目　录

一、流域环境管理与生态监测

1. 流域水生态安全与绿色水电的思考——机遇与挑战 1
2. 水电开发河流生境修复问题与思考 2
3. 问诊江河脉动，构建生态河流 3
4. 金沙江下游水电开发水生态保护关键技术与应用 4
5. 新时代下我国西北地区水资源短缺问题再思考 5
6. 可持续水电评价方法初步研究 12
7. 金沙江上游梯级联合泄洪对下游河段 总溶解性气体过饱和累积影响研究 16
8. 黄河上游龙羊峡以上河段水电梯级开发 对湿地关键生态因子的影响 24
9. 基于生态经济价值的流域横向生态补偿标准研究 30
10. 四川省实现高比例可再生能源接入的发展研究 34
11. 湖北省输变电工程水土流失特征研究 42
12. 大型水电工程施工期环境监理模式探讨 48
13. GIS 技术在水电站项目水土流失调查中的应用 54
14. 测水何家水库河道疏浚及污水回灌对取水口的影响分析 59
15. 西南山区水库甲藻生消环境影响因子分析 64
16. 大型水电工程水生生态影响后评价研究 65
17. 洱海流域水资源量变化趋势分析 69
18. 构建新时代流域水电开发生态环境保护管理体系的 探索与实践 74
19. 国际工程环境保护工作开展方式 79
20. 黄河龙羊峡以上干流河道形态特征及空间分异规律 83
21. 浏阳河流域鱼类资源现状调查及河流健康状态评价 90
22. 生态空间管控与衔接分析 95
23. 沙坪二级水电站坝下游鱼类集群观测实验研究 98
24. 水文情势变化对岩溶区流域河流生态影响研究 104
25. 梯级水电站生态流量监测系统的设计与施工 110
26. 桐子林水电站工程环保水保管理工作实践 117
27. 光照水电站叠梁门分层取水效果观测与评估方法研究 125
28. 以事前控制为抓手，探索水电工程环境监理能力 建设之路 126
29. 绿色小水电评价指标体系与退出机制研究 131
30. 建生态环保电站　创一流发电企业 132

二、水电工程环境保护与流域水生态修复技术

31. 黄河上游刘家峡以上河段水电开发 对土著鱼类资源影响及保护措施体系分析.....135
32. 澜沧江乌弄龙水电站升鱼机诱捕鱼系统 关键工艺设计研究.....140
33. 黄河上游高寒区水电开发鱼类保护工程实践研究.....145
34. LNG 环保自卸汽车在长河坝工程中的推广应用研究.....150
35. 十全湖退渔还湖生态修复方案研究.....155
36. 大渡河流域水电开发水生生态及鱼类保护浅析.....160
37. 大通河流域金沙峡水电站生态基流下泄方案浅析.....164
38. 黄登水电站分散组团安置搬迁移民实践与思考.....171
39. 基于景观水保学理论的河流湿地生态修复方案研究.....174
40. 减水河段滨河景观廊道宽度的确定方法研究.....178
41. 高坝过鱼设施集诱鱼流态与鱼类生态行为响应研究.....182
42. 绿色发展理念下 300m 级特高堆石坝 工程建设期生态保护浅析.....183
43. 绿色小水电生态环境保护措施研究.....189
44. 岷江下游航电梯级生态流量协同造峰调度研究.....192
45. 某水电站绿色施工技术.....197
46. 农村岩溶地下水硬度一体化去除技术与装备研究.....202
47. 水电工程临河型弃渣场水土保持措施体系研究.....207
48. 基于“海绵城市”的透水人行道路面面层材料 应用对比分析.....215
49. 我国喷混植生护坡绿化技术浅析.....222
50. 西藏尼洋河多布水电站鱼类增殖放流站设计.....227
51. 雅砻江两河口水电站过鱼工程集鱼地点选择研究.....233
52. 鱼类游泳能力量化模型在过鱼设施设计中的应用.....242
53. 低流量状态下的中小型山区河流 鱼类栖息地质量维持研究.....251
54. 丹巴水电站干支流鱼类栖息地保护可行性分析.....252

三、水电工程设计与施工

55. 可视化附着式振捣器控制系统研发与应用.....260
56. 某高速公路桥梁棱形挂蓝设计的计算和分析.....264
57. 浅析高海拔高寒地区混凝土冬季施工技术.....273
58. 浅析西藏高寒地区水工混凝土裂缝成因及控制技术.....277
59. 长河坝水电站坝料混装炸药开采技术研究.....281
60. 马来西亚南车大型钢构厂房屋面板制作及屋面系统安装.....287
61. 高速铁路湿陷性黄土隧道下穿高速公路施工技术.....292

62. 冲击碾压技术在高填方路基中的碾压实验研究 298
63. 塔贝拉库区深水下闸多功能平台简介 302
64. 浅析仁宗海引水隧洞绕渗检查放空及充水操作技术要求 307
65. 典型重力坝加固方案坝基稳定模型试验与有限元分析 311
66. 多种水下混凝土在铜街子电站消力塘水下修补中的应用 319
67. 双江口溢洪道不良地质段开挖支护分析 325
68. 浅议大体积模袋混凝土在紫坪铺工程护岸基础 泄流冲坑处理中的运用 330
69. 乌东德水电站 3#、4#导流洞进口渐变段围岩稳定性分析 334
70. 长河坝砾石土心墙堆石坝三维地震反应分析 345
71. 云南省内滑坡安全与监控 349
72. 仁宗海水库电站大坝渗漏原因综合分析 354

四、水电站运行与检修

73. 水光风储应用及互补研究 361
74. 沉积物对泵磨损的影响 362
75. 大岗山电站 650MW 水轮发电机组圆筒阀简介 366
76. 大型水轮发电机转子一点接地保护配置及优化改造实践 369
77. 电化学方式储能产业在四川省电力系统中 的应用前景和投资机会 372
78. 基于 GSM 通信的水电站水轮发电机组运行监测装置分析 376
79. 基于柔性光学电流互感器的选择性定子 接地保护研制及应用 379
80. 金窝电站 J1F 机组 3#、6#折向器关闭超时故障详解 384
81. 浅谈高水头大容量冲击式机组的不合格电量控制 388
82. 浅谈工频调感式串联谐振交流耐压实际应用 392
83. 浅谈漫水湾电厂发电机磁极引线接头改造 396
84. 区域集控中心通信系统的解决方案 399
85. 水电站智能巡检系统的开发及应用 403
86. 亭子口水利枢纽正常蓄水位洪水调度研究 408
87. 亭子口公司营销管理策略研究 412

流域水生态安全与绿色水电的思考——机遇与挑战

夏 军[1, 2]

（1.武汉大学水安全研究院　湖北　武汉 430072；2.中国科学院水资源研究中心 北京　100864）

摘　要：该报告以长江流域举例，重点论述了流域水生态安全与绿色水电的若干思考。主要内容有：流域水安全、绿色发展与水生态安全，其中水生态安全是指人类生存发展所需的由流域以及全球水循环联系的生态系统，如林草植被、江河湖库、湿地、海岸带以及人居环境等，不受到破坏以及环境污染等影响的保障程度。在此基础上，报告重点论述了绿色水电工程建设与发展的机遇与挑战，以及相关应用基础的生态水文学的实践与应用。生态水文学是研究水文学与生物系作用机理并应用自然过程作为管理工具加强广义景观生态服务（如海岸、城市、农村等）的一门综合交叉学科。国际上已经有相关的探索和研究，例如针对已开发河流的欧洲河流生态修复计划(AMBER)等，通过国际同行研究的经验与教训总结以及我国水电开发的成就和存在来自生态方面的挑战，报告重点研讨了我国绿色水电建设转型的需求、绿色水电建设的机遇以及未来发展的展望。

报告小结的核心观点：生态文明建设是国家人民福祉的共同事业，推进生态文明建设对破解我国可持续发展的种种难题有决定性的意义；水安全是生态文明建设的保障，应对全球变化和生态水文学是生态文明建设的重要科学基础；绿色水电工程建设与实践的是新时期水利水电工程建设与转型的重要机遇；探索绿色 水电工程建设与管理需要创新思维，例如，都江堰的启发、对鱼道的困境解决的思考、非完全截流水电工程探索、协调防洪、供水和发电，特别维系河流生态的综合措施。目的是通过水、生物多样性、生态服务、气候变化弹性和文化等多维管理，增加河湖生态系统恢复力，达到维系生态和人类社会经济发展的可持续性。

关键词：流域水生态安全；生态水文学；绿色水电工程；转型；思考

水电开发河流生境修复问题与思考

喻卫奇

（水电水利规划设计总院，北京 100120）

摘　要：水电是我国主要的能源资源，开发水电是我国长期能源战略的重要举措。河流水资源具有多功能性，水能资源的开发与河流其他功能的发挥既有矛盾性，也有协调统一性。长期以来，由于水电运行管理涉及多个部门，协调难度大，水电开发的环境保护责任难以落实，资源开发与生态保护需求的矛盾难以协调统一。社会舆论导向对水电开发不利，这在很大程度上影响了我国水电开发进程。在国家全面推行生态文明建设以及长江大保护的新时期，研究探索流域综合治理途径和河流生境修复对策措施，已经成为水电开发的重要任务。作者结合近年来国家水电生态环境保护政策、技术标准体系研究和工程项目实践，从流域系统角度和项目管理层面，探讨了我国水电环保政策法规制度、技术标准和开发建设管理方面的主要问题，以及解决问题的途径，以促进水电可持续发展。

问诊江河脉动，构建生态河流

何月萍，彭金涛

（中电建成都勘测设计研究院有限公司 四川 成都 610072）

摘　要：践行习近平生态文明思想，尊重自然，顺应自然，在更为长期的水利水电工程运行管理工作中，要转变思维，主动融于绿色，拥抱生态，把握河湖生态系统的健康脉搏，从系统治水的长远发展观念上，强化生态调度，增强科学管理能力，不断促进河流生态修复恢复，实现可持续发展、人与自然和谐共生。从古至今，古圣先贤在治水事业中倾尽智慧，谱写了一曲曲顺应自然、利用自然的人水乐章。千年都江堰，无坝分水，维系了河流生态的流量过程，2018 年 5 月，习近平总书记在环保大会上称之为生态水利工程的典范。京杭大运河，南旺分水工程，“三分朝天子，七分下江南”的分水奇观，因地制宜，顺应江湖规律，顺势而为，生机不息。今天我们依循古老智慧，唤醒天人合一观念，在工程调度和管理中也不断推进着生态的实践。如黄河水量调度、调水调沙及河口生态调度实践；淮河闸坝防污调度；长江三峡水利工程多年来持续开展生态调度；而我们在金沙江下游也提出了生态调度方案，目前正在向长江上游支流、更广阔地区河流延伸。西部地区多为大江大河的源头区域，绿色生态的调度和管理方式转变迫在眉睫，一场更为广泛的发展方式转变，从而扭转河流生态恶化的趋势。

本报告针对西部地区水电开发水库调蓄改变水文节律、河流引水造成下游河道减水、闸坝形成河道生境破碎化等问题，遵从尊重自然、顺应自然的理念，研究了单个电站以及多个电站群生态调度关键技术研究和实践，提出了多目标、多约束的生态调度方案以及智慧管理、绿色管控的构想。

关键词：水电；生态调度；绿色管控

金沙江下游水电开发水生态保护关键技术与应用

杨少荣，於三大，王小明

（中国三峡建设管理有限公司，四川　成都　610041）

摘　要：金沙江下游水电开发过程中坚持“绿色水电”理念，通过理论研究、技术研发与工程应用相结合，构建了绿色水电开发水生态保护技术体系。建立了维持生境空间尺度需求的栖息地保护规划技术，逐步形成以长江上游珍稀特有鱼类自然保护区为主，库区支流及库尾流水江段为辅的鱼类栖息地保护格局，并通过鱼类增殖放流、集运鱼系统、生态调度及系统科学监测研究，缓解了水电工程开发过程中带来的水生态影响，有利于开发河段水生生物多样性的提升，促进了生态友好型绿色水电工程的建设，为梯级水电开发水生态保护的全过程控制提供了依据。

关键词：金沙江；梯级水电；水生态保护

新时代下我国西北地区水资源短缺问题再思考

程 龙，张子沛，任 怡

（中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘 要：水是生命之源，生产之要，生态之基。水资源短缺一直是制约我国西北地区可持续发展的关键因素。新时代下，我国方方面面都在发生深刻而长远的变化，西北地区水资源短缺问题更是需要重新审视与思考。本文从西北地区水资源现状、开发利用过程演变分析和新时代下的地区水资源需求对该问题进行分析与思考，提出地区可持续开发建议，以期对未来地区水资源开发利用决策有所帮助。

关键词：新时代；西北地区；水资源；短缺

1 前言

党的十九大报告指出，经过长期努力，我国特色社会主义进入了新时代，我国社会主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾。当前，我国正处于百年不遇的大变局下，具有重要战略地缘地位的西北地区，对于我国未来发展意义重大，而制约该地区可持续发展的水资源问题，一直以来都是我国重点的研究领域。本文拟结合近些年国内经济发展形势，重新梳理区域发展用水需求，试图重新思考地区缺水问题，以期对未来地区水资源开发利用决策有所帮助。

2 西北地区水资源现状

西北地区包括新疆、青海、甘肃、宁夏全境和陕西秦岭以北的关中、陕北地区，以及内蒙古西部的阿拉善盟、伊克昭盟、乌海和河套平原等地区，面积 348.6 万 km^2，占全国土地面积的 35%左右，据 2018 年统计，全区人口约 10242.81 万人，占全国总人口的 7.34%。

西北地区水系主要分为内陆河流域和外流河流域，内陆河流域面积约 271 万 km^2，占比最大，约 78%，外流河黄河流域约 62 万 km^2，其余外流河流域面积 15.6km^2，内陆河流域由于冰雪资源调节能力，水资源量比较稳定，而外流去区的水资源量主要受降水影响，随降水量的变化而变化。根据相关统计西北地区水资源总量约 2100 亿 m^3，占全国水资源总量约 7.6%，其中地表水约 1800 亿 m^3，占全国地表水水资源总量约 6.7%，地下水约 1100 亿 m^3，重复计算量约 800 亿 m^3，占全国地下水水资源总量约 1.36%。

3 西北地区水资源开发利用过程演变分析

自建国以来，我国水资源开发利用强度持续增强，西北地区水资源开发利用历史悠久。统计分析我国自建国以来供水量等相关资料，结果见表 1 及图 1，可以看出我国供水总量的变化具有以下特点：

（1）从 1980 年到 2018 年，全国供水量从 4432.4 亿 m^3 增长 6015.5 亿 m^3，近 40 年间供水量增长 36%，年平均增长率约 0.93%，1997 年前增速较快，1997 年后供水量增速减缓，趋于稳定；

（2）从 1980 年到 2018 年，西北诸河片区供水量从 560 亿 m^3 增长到 654.8 亿 m^3，近 40 年间供水量增长 16.9%，年平均增长率约 0.45%，与全国年平均增长率相比，增长较为缓慢。

（3）从供水水源组成来看，全国地表水供水量呈现持续增长趋势，增长率约 30%，而地下水供水量呈现先增长，后自 2007 年后开始递减趋势，说明我国地下水资源保护政策政策逐步实施，地下水压减效果初显。西北诸河片区，受制于地表水水资源较为匮乏特点，地表供水量增长基本不大，而地下水供水量处于持续增长状态，区域地下水资源保护压力较大。

表 1　　1980 年以来我国分区供水量及增长情况（部分）

片　区	年份	地表水供水量（亿 m³）	地下水供水量（亿 m³）	其他（亿 m³）	总供水量（亿 m³）	年增长率（%）
全　国	1980	3813.3	619.1	0	4432.4	/
	1993	4360	864	0	5224	1.37
	1997	4591.7	1031.5	0	5623.2	1.91
	2007	4723.5	1069.5	25.7	5818.7	0.35
	2018	4952.7	976.4	86.4	6015.5	0.31
西北诸河片区	1980	520.5	39.5	0	560	/
	1993	524.9	57.9	0	582.8	0.31
	1997	487.9	59.2	0	547.1	-1.53
	2007	520.3	105	1.6	626.9	1.46
	2018	516.9	134.3	3.6	654.8	0.40
黄　河	1980	274	84.4	0	358.4	/
	1993	279.4	128.5	0	407.9	1.06
	1997	270.4	134.2	0	404.6	-0.20
	2007	249.1	129.5	2.5	381.1	-0.58
	2018	260.5	117.2	14	391.7	0.25
长江片	1980	1286.3	67	0	1353.3	/
	1993	1597.7	73.7	0	1671.4	1.81
	1997	1665.2	73.5	0	1738.7	1.01
	2007	1853.4	80.5	5.7	1939.6	1.16
	2018	1994.9	62	14.8	2071.6	0.62

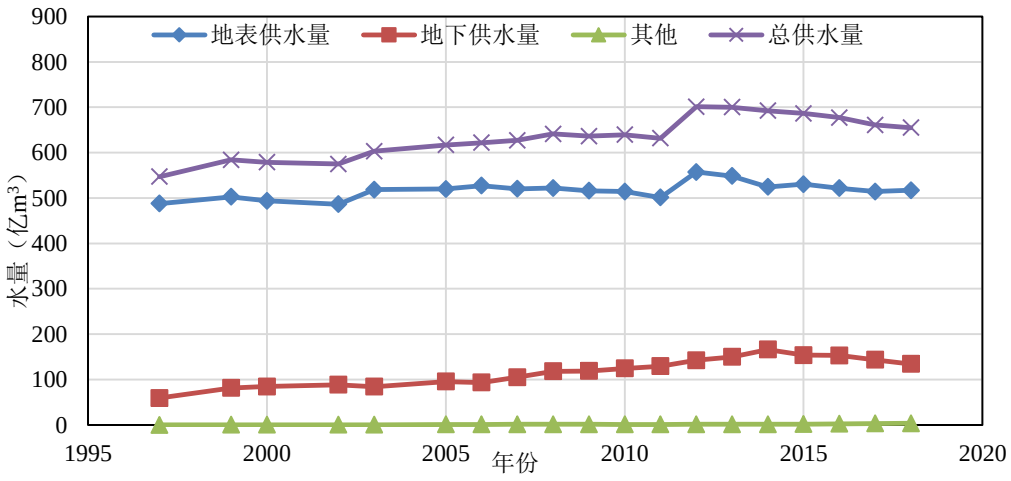


图 1　　1980 年以来我国西北诸河片区供水量及增长情况

统计分析我国建国以来用水量情况，见表 2 及图 2，可以分析得出以下结论：

（1）自建国以来随着人们生活水平的提高，用水量持续增长，特别是 1980 年以后，我国人均综合用水量维持在 450m³ 左右。

（2）从全国来看，农业用水占总用水量比重最大，但用水比重逐年减小，2018 年，比重已经降至 61.4%，说明我今年来农业高效节水工作效果显著，同时伴随国家经济发展、城镇化进程不断加快，工业、城市生活比重持续增加，此外，随着我国生态文明建设的不断增强，生态用水量比重也呈现不断增长趋势。

（3）西北诸河地区，1997 年到 2018 年，总用水量增长约 30%，其中生活用水量变化最大，增加近 1 倍，工业增长 20%，农业增长 18.6%。

（4）从全国用水结构平均水平来看，西北诸河区域，农业用水比重虽然在降低，但在区域总用水量比重仍然较大，基本在 90%左右，占全国农业用水量比重也达到了 15%。2018 年，工业用水、生活用水量占区域总用水量不到 3%，占全国工业用水量仅 1.4%，占全国生活用水量仅 2.2%，生态用水量占区域用水量不到 7%，占全国生态用水量 23%。

表 2　建国以来用水量增长情况

年份	农业和农村生活		工业		城市生活		生态		总计（亿 m^3）	人均用水量（m^3）
	用水量（亿 m^3）	用水比例（%）	用水量（亿 m^3）	用水比例（%）	用水量（亿 m^3）	用水比例（%）	用水量（亿 m^3）	用水比例（%）		
1949	1001	97.1	24	2.33	6	0.58	0	0	1031	187
1959	1938	94.6	96	4.69	14	0.68	0	0	2048	316
1965	2545	92.7	181	6.60	18	0.66	0	0	2744	378
1980	3912	88.2	457	10.30	68	1.53	0	0	4437	450
1993	4055	78	906	17.43	237	4.56	0	0	5198	445
1997	4198	75.3	1121	20.14	247	4.44	0	0	5566	458
2007	3598.5	61.8	1404.1	24.13	710.4	12.21	105.7	1.82	5819	440
2018	3693.1	61.4	1261.6	20.97	859.9	14.29	200.9	3.34	6016	431

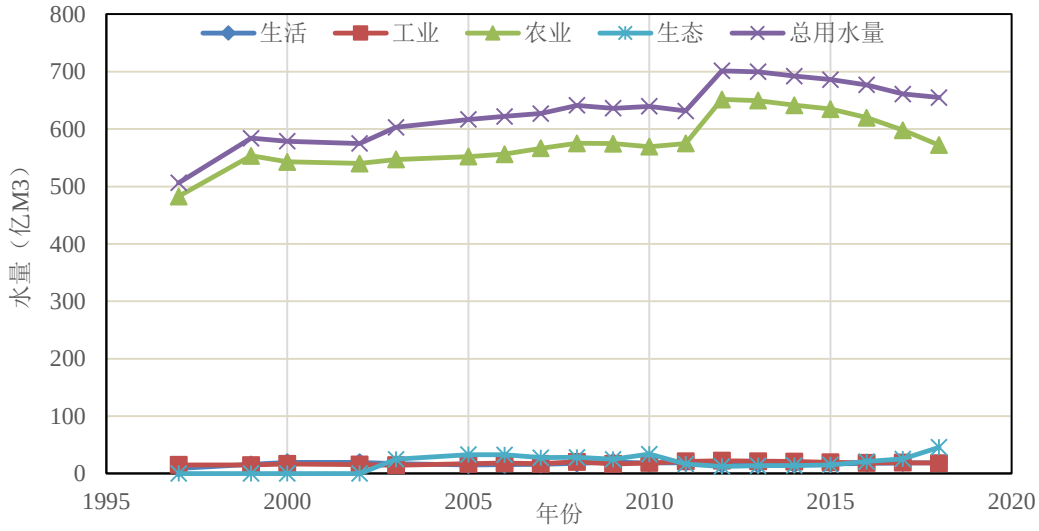


图 2　我国用水量情况变化表

4 新时代下西北地区水资源需求

建国以来的 70 年间，我国西北地区水资源开发利用率不断提高，供水量、用水量也均有显著变化，但由于受制于地区自身水资源量不足的，地区的经济发展、城镇集聚度均处于我国平均水平以下，地区东西部发展差距较为明显，反映到水资源利用情况即地区西部地区人均水资源量少，供用水量少，农业比重大、生产、生活比重小。

习近平总书记在十九大报告中指出，经过长期努力，中国特色社会主义进入了新时代。新时代下，国家新的区域发展政策、新的经济结构、新的区域城镇体系建设等诸多社会发展因素均会对水资源供给提出新的要求。

4.1 区域节水能力评价

节水优先，建设节水型社会是解决干旱缺水问题十分有效的战略措施，通过建设节水型社会，可以使资源利用效率得到提高，生态环境得到改善，可持续发展能力不断增强，促进人与自然的和谐相处，推动文明社会发展。在水量不变的情况下，要保证工农业生产用水、居民生活用水和良好的水环境，必须建立节水型社会，合理开发利用水资源，大力提高水资源利用率，培养人们节水、

惜水的良好习惯。2019 年 4 月，国家发展改革委、水利部联合印发《国家节水行动方案》，明确指出到 2020 年，节水政策法规、市场机制、标准体系趋于完善，万元国内生产总值用水量、万元工业增加值用水量较 2015 年分别降低 23%和 20%，规模以上工业用水重复利用率达到 91%以上，节水效果初步显现；到 2022 年，全国用水总量控制在 6700 亿 m^3 以内，节水型生产和生活方式初步建立；到 2035 年，全国用水总量控制在 7000 亿 m^3 以内，水资源节约和循环利用达到世界先进水平，整体朝向节水新型社会发展。

西北地区降水量稀少，蒸发强烈，水资源极度匮乏，因此，国家也非常重视西北地区节水工作的开展，甘肃省张掖市是我国第一个节水型社会建设试点城市，并通过了试点的后期验收工作，但实施节水工程，打造节水型社会是一项复杂而又艰巨的任务。在农业上，当前我国诸多地区，尤其是西北地区农业灌溉仍处于大水漫灌的传统灌溉方式，灌溉水有效利用系数处在较低水平。根据中国水利水电科学研究院冯保清《我国不同分区灌溉水有效利用系数变化特征及其影响因素分析》分析，西北地区灌溉水有效利用系数测算结果为 0.479，仍有大幅度提升改造的空间，而作为西北地区重要粮食产区的宁夏、内蒙两个自治区的大部分灌区大量引用黄河干流水进行灌溉，灌溉管理粗放。整体来看，西北地区农业灌溉系数较低，有很大的提升与改造空间；在工业上，在运用高新科技节约用水的基础上，更应加大对中水回收利用的投资建设，加强水资源重复利用率；在生活中，要积极宣传节水型社会建设，加强宣传教育，加强立法与监督，使居民养成爱水、惜水的良好意识。据测算，在不影响经济和生活质量的水平下，在地区运用现有的先进技术和方法，农业可以减少 10%~50%的用水量，工业可以减少 40%~90%的用水量，城市减少 30%的用水量。因此，在地区开展有效的节水工程，能够将有限的水资源合理运用，改善地区生态状况，并为地区创造更大的经济效益。

4.2 区域农业发展需求

根据国家统计局关于 2018 年粮食产量的公告，2018 年我国粮食产量约 6.6 亿 t，约占全球总产量 25.87 亿 t 的 24%，进口约 1.16 亿 t（其中大豆进口量约为 8500 万 t），人均粮食产量约为 470kg，高于世界平均水平 345kg，我国粮食的基本状况是自给自足，并有一定的粮食储备，但粮食安全问题仍存在一些隐患。

在粮食立足自给的基本国策下，根据我国主要农产品需求、主要农作物单产和种植业结构预测，我国 2030 年粮食需求量为 6.8 亿 t～7.3 亿 t，约需粮食作物播种面积 19.4 亿亩～20.9 亿亩，根据作物结构，粗估农作物总播种面积应不少于 30 亿亩，为保证 30 亿亩的播种面积，耕地面积应保持在 18 亿亩～19 亿亩。

截止到 2017 年末，全国耕地面积为 20.24 亿亩，根据《全国土地利用总体规划纲要（2006—2020 年）调整方案》（2016 年），到 2020 年，全国耕地保有量为 18.65 亿亩以上，基本农田保护面积为 15.46 亿亩以上，建设用地总规模控制在 4071.93 万公顷（61079 万亩）之内。我国耕地质量优等地主要分布在湖北、湖南、广东三省，占 90.28%；高等地主要分布在河南、江苏、山东等 9 个省，占 79.89%；中等地主要分布在黑龙江、吉林、云南等 10 个省，占 73.73%；低等地主要分布在内蒙古、甘肃、黑龙江等 6 个省份，占 85.55%，东部区域聚集了我国 2/3 的人口与经济，土地资源的开发强度极大，我国目前从粮食主产区区域分布来看，主要集中于东北、华北长江中下游等地区。为全面推动新时代形成全面开放新格局，近些年党中央、国务院提出“粤港澳大湾区”、“长三角区域一体化”、“长江经济带战略”等一系列国家区域发展战略，均对涉及区域提出了新的发展思路和新的发展要求，可以预见，未来我国东部区域对于建设用地的需求也会越来越高，耕地后备资源日益短缺。

西北地区具有广阔的土地资源，光照、气温条件适宜，而西北地区粮食产量为 4377 万，仅占

全国的 6.63%，土地资源潜力不能有效释放，最大的制约因素是水资源的短缺，考虑国家的土地资源资源政策，跨地区补充耕地的探索，未来区域的发展完全可以作为我国耕地资源的重要战略补充，而这对区域水资源的开发将提出更好的要求。

4.3 区域能源发展需求

能源是人类社会赖以生存和发展的物质基础，在国民经济中具有特别重要的战略地位。西北地区是国家重要的能源基地，如图显示的是我国主要的能源基地，新疆基地、鄂尔多斯盆地基地、山西基地等几大基地组成了全国重要的能源生产区。当前陕西省的天然气产量就占全国的近 1/3，黄河上中游地区的原煤产量、原油产量以及发电量占全国的比例分别高达 70%，25%和 20%，该区域已经成为了我国重要的新能源基地、稀土生产基地、能源化工基地。

随着国内经济的不断发展和人民生活水平的不断提高，能源消耗量也越来越高，2018 年中国能源消费总量高达 46.4 亿 t 标准煤，参照欧美发达国家的人均能源消耗量，中国的能源消耗总量还会伴随着经济增长不断增加。同样，中国还是全球最大的石油、天然气进口国。据统计，2018 年中国的石油表观消费量达 6.48 亿 t，较上年增长 6.95%。其中，进口的石油高达 4.619 亿 t，自产的石油约为 1.89 亿 t（比 2017 年下降 1.3%），对外依存度高达 72%。2018 年中国的进口天然气约 9038.5 万 t，同比大幅增长 31.9%，对外依存度上升至 45.3%。预计 2019 年中国仍需要进口 1430 亿 m^3 天然气，对外依存度将增至 46.4%。

作为三大能源原料的石油、天然气对外国的高度让我国能源安全存在隐患，放在当下中美经济贸易摩擦的大背景下，该问题的重要性更是尤为突出，而我国有丰富的煤炭资源，煤是当今我国最重要的能源资源，我国煤炭资源储量丰富，预测储量超过 4.5 万亿 t，是世界煤炭第一生产大国，2016 年探明储量为 1.6 亿 t，占全球总量达到 21.4%，如何开发煤炭资源的多元化发展是一项重要的能源研究方向。近年来煤炭深加工产业不断创新，煤制甲醇、煤制乙烯已成为重要的能源供给源，以煤制甲醇为例，当前国内甲醇主要生产方式为煤制甲醇，约占甲醇总产量的 77.3%，而西北地区为煤制甲醇主产区，总产能约为 4114 万 t，占全国甲醇总产量的 52%。当前国家先后出台了一批政策支持煤化工产业发展，工业与信息化部专项发文鼓励开展甲醇汽车应用的试点工作，随着多方政策的支持及科技水平的提高，煤化工行业具有良好的发展前景及上升空间，将来在能源领域会有更广阔的应用平台。同时由于西北地区具有丰富的煤炭资源，未来将会有更多大型煤化工及甲醇项目在西北地区建成投产，而煤化工行业具有高耗水的特性，需要大量水资源支撑。

4.4 区域生态文明建设需求

良好的生态环境是人类生存与健康的基础，人与自然是生命共同体，人类对大自然的伤害最终会伤及人类自身。生态环境是人类生存最为基础的条件，是我国持续发展最为重要的基础。同时，生态环境还是人类文明存在和发展的基础。

生态环境保护是功在当代、利在千秋的事业，建设生态文明是中华民族永续发展的千年大计。坚持人与自然和谐共生，坚定走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路，建设生态中国，既能为人民创造良好生产生活环境，也能为全球生态安全作出贡献。

西北地区拥有“北方防沙带”及“黄土高原生态屏障带”，是我国“两屏三带”生态安全战略格局中的重要组成部分，同时，西北地区是我国水土流失和土地荒漠化的重灾区。据统计，在自然因素和人为因素的合力作用下，一到多雨季节，地区泥沙俱下，黄土高原地区水土流失面积高达 45 万 km^2。水土流失的不断加剧还往往会引发一系列的次生灾害，形成灾害性链条。地表水的增加及江河、湖泊大量泥沙淤积，致使河道堵塞、河床抬高、洪水泛滥，极易诱发滑坡、崩塌、泥石流等自然灾害，严重危及西北地区和下游人民的生命财产安全。

水土流失是由多种原因所引发，如植被破坏、风蚀、水蚀等，但是造成水土流失的首要原因还是植被覆盖率和覆盖质量的急剧下滑。据兰州理工大学刘海霞《西北地区生态环境问题及其治理路径》统计，西北大部分地区森林和草原植被覆盖率呈逐年下降的趋势，青海和新疆的森林覆盖率下降到仅剩 2.59%和 1.68%，甘肃下降到 4.33%；宁夏草地退化率为 97.3%，陕西为 58.5%，甘肃为 45.1%；同时位于西北地区的青、宁、甘三省份水土流失面积分别为 4.65 万 km^2、1 万 km^2 和 13.44 万 km^2，分别占到各自全省总土地面积的 46%、71%和 85.73%。

据调查，位于西北地区的甘肃省“荒漠化土地总面积 19.34 万 km^2，占全省总面积的 45.4%”，新疆沙化面积高达“79.59 万 km^2，占全区总面积的 47.7%。青海沙化面积达 12.52 万 km^2，占全省面积的 17.4%以上”，同时沙化面积还在逐年扩大。与此同时，在我国西北地区还分布着广泛的沙漠和戈壁，占我国沙漠总面积的份额比重甚大，如位于新疆境内世界第二大的塔克拉玛干沙漠，准噶尔盆地中部的古尔班通古特沙漠、库姆塔格沙漠，位于青海西北部的柴达木盆地沙漠，位于甘肃和宁夏西北部的腾格里沙漠等等。春秋季节风沙走石，沙尘肆虐，这是致使近年沙尘暴天气频繁登陆我国的重要原因之一，沙尘暴天气的频现不仅给西北地区造成严重的经济损失，还会严重危及中东部以及长江中下游地区生态安全和人民的经济财产安全。土地荒漠化不断加剧不仅会直接影响西北地区工农业的生产，还会制约其经济社会可持续发展的进程。

历史上的文明古国都发源于生态环境良好的地区，但因为生态环境遭到破坏导致文明衰落的历史故事比比皆是。在古丝绸之路上曾拥有诸多文明古国，但随着生态环境的不断恶化，曾经肥沃的土地不断被侵蚀，文明古国也已经难觅踪影。

西域古国以绿洲为立国根本，历经数百年，曾经繁盛一时。然而在今天，由于生态环境持续恶化，古代的大片良田已沦为流沙，古城废墟历历在目，曾经浩瀚的罗布泊已经干涸。罗布泊西南的楼兰古城，现已为一片荒凉的风蚀土丘、风蚀低地和沙丘环绕，古楼兰绿洲也全变成不毛之地。尼雅河下游三角洲上的精绝古国，如今在干涸的河流沿岸残存着枯死的胡杨林，而古城已被 5m 高的沙丘包围，丝绸之路上的碉堡和烽火台，现在已是深入沙漠之内 3km～10km 依稀可见的遗迹。丝绸之路沿线的古文明已消失在荒漠之中。水资源的不合理利用、天然植被的破坏是导致现状最根本的原因。现如今，西北一些临近沙漠的县城，村镇同样面临着生活栖息地受沙化的影响，诸如“甘肃民勤县绿洲渐遭沙漠吞噬，村民房屋屡被吹塌”的新闻屡见不鲜，生态环境濒临可危。

4.5 区域城镇体系建设需求

西北地区地广人稀，人口密度仅为 29.38 人/km^2，约为全国平均水平的 20%，大部分区域土地开发强度较低，城镇体系建设不完全。当前西北地区经济较为薄弱，2018 年陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 GDP 总量分别约为 24438 亿元、8246 亿元、2865 亿元、3705 亿元、12199 亿元，总量约为 51453 亿元，仅占当年全国 GDP 的 5.7%，经济基础十分薄弱，如果再除去西北经济强省陕西省，剩下的甘、宁、青、新四省的 GDP 总量仅为 27015 亿元，四省以占全国 30%的面积及 4.25%的人口，却仅创造了 3%的产值。同时，西北五省人均 GDP 均低于全国平均人均 GDP，经济较差的甘肃省人均 GDP 仅为全国平均水平的一半左右，如何能够改善西北地区经济现状，响应“一带一路”国家级战略部署，着力打造丝绸之路经济带，吸纳人口，打造城市群协同发展，缩小西北地区与其他先进地区的差距是未来我国一项重要的经济建设任务。

西北许多地区常年过量开采地下水导致地质灾害频发，地面不断沉降，部分城市出现塌陷状况。地下水下降造成植被衰退。引发地质环境问题，如地面沉降、岩溶塌陷、地裂缝等，引发水质恶化，如含水层串层污染、常规离子组分升高、苦咸水入侵等都使地下水的水质发生改变。国内诸多山地地区泥石流、地震、洪水等自然灾害频发，并不适宜人类生活，每年都会有数起较大规模的地质灾

害严重影响到人民财产安全，应当将原有不适宜人类居住的山地进行移民搬迁，恢复当地植被，将西北荒漠平原通过引调水工程打造为宜居乐土，减少地质灾害对人民生活的影响。

西北地区是维吾尔、哈萨克、回、蒙、土等少数民族主要聚集区，这些地区经济社会发展滞后，人民生活水平较为贫困，区域开发难度较大，这里是打赢脱贫攻坚战和全面奔小康的关键地带。同时，诸多少数民族群众存在吃水难、用水紧的现状，无法有效的进行农业、工业开发，地区生态环境较差，水资源是制约当地发展的重要因素。在祖国协同发展，共同创进的大背景下，优先考虑发展经济基础较差的少数民族地区，通过引调水工程为当地提供最为重要的水资源，能从根本上改变当地的社会经济现状及生态环境。

5 西北地区水资源可持续开发建议

综合分析西北地区水资源现状、开发利用过程演变分析以及新时代下的地区水资源需求，可以看出西北地区自身水资源有限，随着地区经济的发展、人口的增长，水资源开发利用强度逐渐增大，平均来看，开发利用率已达 30%以上，水资源短缺已经逐渐成为制约区域发展的限制性因素。

随着我国进入新时代，国民社会经济发展国内外形势、水资源用途、不同地区的发展战略均发生了深刻而长远的变化，西北地区的水资源短缺问题更加成为一个需要通盘考虑，深入研究，科学谋划的重大问题，建议西北地区水资源可持续开发采用以下策略：

（1）深入研究挖掘地区节水潜力，特别是地区占比较重的农业灌溉体系节水潜力，以求水资源价值得到最大发挥。

（2）结合区域发展，考虑新兴水资源需求，特别是地区生态需求，重新进行水资源供需耦合分析，预测西北地区水资源缺口。

（3）继续深入推进跨流域调水研究工程，结合地区用水需求，建议引水方式采用一次规划、分期实施。

（4）考虑国家目前能源发展发展趋势和安全需求，建议选择黄河流域上中游能源基地作为第一批受水点群，自西南诸河逐步连通，逐步实施连通调水工程。

参考文献：

[1] 刘海霞,马立志.西北地区生态环境问题及其治理路径[J].实事求是,2016(04):50-54.

[2] 潘彬,韩美,倪娟.黄河下游近 50 年径流量变化特征及影响因素[J].水土保持研究,2017,24(01):122-127

[3] 蒋光昱,王忠静,索滢.西北典型节水灌溉技术综合性能的层次分析与模糊综合评价[J/OL].清华大学学报(自然科学版):1-9[2019-09-06].https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.26.015.

[4] 何芳,徐友宁,陈华清,张江华.西北地区矿山地质灾害的现状及其时空分布特征[J].地质通报,2008(08):1245-1255

[5] 屈晓娟.我国西北地区煤矿开采的经济收益及能源战略分析[J].煤炭技术,2014,33(02):77-79.

[6] 赵玉田. 脆弱生态系统下西北干旱区农业水资源利用策略研究[D].兰州大学,2016.

[7] 孙韵植.城镇体系规划的可持续发展战略[J].住宅与房地产,2018(27):243

[8] 杜宝义,孔艳,韩翠婷,程淑建.水资源优化配置策略研究[J].中国水运(下半月),2019,19(07):197-198.

[9] 苏冰倩,王茵茵,上官周平.西北地区食物结构及其安全现状评估[J].水土保持研究,2017,24(06):354-359.

[10] 冯保清.我国不同分区灌溉水有效利用系数变化特征及其影响因素分析[J].节水灌溉,2013(06):29-32+35.

可持续水电评价方法初步研究

孙丹丹，刘　园，蒋　红

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川　成都　611130）

摘　要：水电开发在推动经济社会发展，节能减排方面做出重要贡献，同时水电工程本身也存在可持续发展的问题。本文依据水电工程可持续评价的内容及评价指标体系，选择金沙江上游某大型水电站为案例，从经济社会、环境、管理等方面对设计阶段各项指标进行计算，综合评价电站可持续性。由于可持续评价内容、指标体系目前还属初步尝试，还需通过大量实践和深入研究建立更符合实际的标准体系，以便更好地为行业主管部门和水电开发业主提供科学指导。

关键词：水电工程；可持续性；评价

1　水电可持续评价的发展现状

可持续发展概念始于1972年在斯德哥尔摩举行的联合国人类环境研讨会上首次提出，1987年，世界环境与发展委员会出版《我们共同的未来》，其中，将可持续发展定义为：既能满足当代人的需要，又不对后代人满足其需要的能力构成危害的发展。此概念的提出，得到了国际社会的广泛认可。可持续发展的核心思想是经济发展、保护资源和保护生态环境协调一致，让子孙后代能够享受充分的资源和良好的资源环境。1992 年 6 月，联合国环境与发展大会在巴西里约召开，会议提出并通过了全球的可持续发展战略《21 世纪议程》，并且要求各国根据本国的情况，制定各自的可持续发展战略、计划和对策。

在全球气候变化要求减少温室气体排放的背景下，水电作为可规模利用的清洁能源相较于化石能源具有相当的优势，因此水电开发受到广泛关注。而随着可持续发展战略的提出，国际社会也不断探索对水电工程开发规划和具体工程项目开展综合评价。20 世纪 80 年代开始，欧美一些发达国家针对水坝建设对生态环境的影响、河流生态系统恢复等方面开展了大量研究工作。为减缓水电开发造成的负面生态影响，产生了瑞士的绿色水电评价和美国的低影响水电认证。

瑞士的绿色水电标准从水文特征、河流系统连通性、泥沙与河流形态、景观与生境、生物群落5个方面反映健康河流生态系统的特征，并通过5个方面的管理措施来实现，即最小流量管理、调峰、水库管理、泥沙管理、电站设计。环境范畴与管理范畴的内容结合，形成一个环境管理矩阵，整个矩阵为其 25 个域中的每一个域定义了环境目标、基本要求和详细的方法。绿色水电认证的目的是努力将水电站对生态环境的负面影响降至最低，评价方法采用的是定性评价。

美国低影响水电从8个方面提出了“低影响水电”应满足的条件，即：流量、水质、鱼类保护措施、流域保护、濒危物种保护、文化资源保护、公共娱乐功能、未被建议拆除。认证审查人员对照标准进行判断，只有满足所有标准的水电站才能通过认证。低影响水电旨在帮助识别和奖励那些通过采取措施将水电对环境的负面影响降至最低程度的水电站，使其发电企业在市场营销中更具竞争力。美国低影响水电认证和瑞士的绿色水电认证的共同点都是以环境保护为主要目标，关注水电工程对生态环境的影响，且该两种认证制度并未提及可持续水电的概念。

在绿色水电站评价和低影响水电认证的启发和影响下，一些国际机构开发了水电可持续性评估工具，最具代表性的为国际水电协会（International Hydropower Association，IHA）与湄公河委员会（Mekong River Commission，MRC）分别推出的《水电可持续性评估规范》（Hydropower Sustainability Assessment Protocol）与“可持续水电快速评估工具(Rapid basin-wide Sustainability Assessment Tool)”。

水电可持续性评估规范针对水电工程所处的前期、准备、实施和运行四个阶段，提供独立的可持续性评估工具。评估主题涵盖环境、社会、技术和经济四个方面，根据工程各阶段的不同特点，

设置不同的评估主题，每个评估主题的得分从 1 分到 5 分不等，评估主题页内给出 3 分的完整说明，描述的是基本良好实践，5 分说明给出的则是 3 分说明之外的附加要求，表达的是已被证实的最佳实践。其他评分等级的说明，则是以 3 分和 5 分为参照点给出标准。

可持续水电快速评估工具是湄公河委员会基于湄公河流域的开发现状以及作为跨境河流的特殊属性所开发的可持续评估工具，其特点是着眼于整个流域评估任何阶段水电发展的可持续性。评估设置 11 个主题共 53 项指标，每项指标给出 1 分~5 分的评分标准。评估时可根据评估目的选择相应指标。

水电可持续性评估规范与可持续水电快速评估工具总体来讲仍是定性评估，评估方法相对复杂，评估者对工具的熟练程度、评估专家对工程的认识等都将直接影响评估结果。

我国水能资源丰富，随着近年水电开发速度的加快，主要河流梯级开发布局已基本形成，水电开发过程中，生态环境、征地和移民安置、发电企业管理等方面也不断涌现出各种各样的问题和不足，为适应生态文明建设和能源绿色发展的要求，有必要探索研究适应我国水电发展国情的可持续性评价标准。

2　可持续水电评价内容及方法

参考《水电可持续性评价规范》、《可持续水电快速评估工具》、绿色水电等国际性技术规范，考虑水电站在设计、建设和运行中各利益相关方的需求，结合生态环境、安全管理等方面要求，分别针对水电站设计、建设和运行三个阶段建立评价指标体系。评价指标体系设置目标层、要素层和指标层，根据水电工程所处开发时段设置各时段评估主题，并拟定评价指标。单个指标的评估主要采用定量或定性方式，并尽量采用定量方法计算出单项指标的具体数值，并对照评分标准进行赋分，根据单项指标的得分和各项指标权重，得出最终评价总分。单项指标评分采用 5 分制，总分采用百分制，高于 60 分即可认为水电工程可持续。以设计阶段评价指标体系为例，目标层为社会经济、环境、管理三个方面，对应的要素层和指标层各设置 11 个评估主题及 12 个单项评价指标。

表 1 水电站设计阶段可持续评价指标体系

目标层	设计阶段		评价方法	指标计算及赋分方法
	要素层	指标层		
经济社会	工程效益	综合利用效益	定量评价	除发电外的综合利用功能，与水电行业中位值占比，100%为 3 分标准，大于 110%为 5 分标准
	区域经济贡献	区域经济贡献率	定量评价	区域经济贡献年均值与电站资产总额占比，230%为 3 分标准，大于 300%为 5 分标准
	财务生存能力	财务内部收益率	定量评价	与财务基准收益率占比，大于或等于 1 为 5 分标准
	减排效益	能源替代效应	定量评价	单位装机替代火电煤耗，0.5 为 3 分标准，大于 0.7 为 5 分标准
	社会稳定	社会稳定风险	定性评价	社会稳定风险评估结论，低风险为 5 分标准，采取风险防范措施后低风险为 3 分标准
	移民安置	单位装机移民人数	定量评价	小于 10 为 5 分标准，50~100 为 3 分标准
		移民环境容量比	定量评价	环境容量与移民人数比值大于 3 为 5 分标准，1.5~2 为 3 分标准
环境	环境总体影响	环境影响经济损益	定量评价	效益与损失比大于 5%为 5 分标准，效益与损失相当为 3 分标准
	环境敏感程度	生态敏感性	定性评价	水电工程涉及特殊生态敏感区或重要生态敏感区情况，不涉及为 5 分标准
	环境保护对策措施	环境保护和水土保持设计执行情况	定性评价	环保、水保专项设计开展情况
管理	政策与规划合法性	项目前期工作和项目设计的合法性	定性评价	审批程序的合法合规性
	工程管理	工程管理能力	定性评价	工程管理组织机构设置、管理制度等的完善程度

3 案例分析

根据设计阶段可持续水电评价指标体系，选取金沙江上游某大型水电站作为案例进行分析。该水电站位于西藏自治区和四川省交界的金沙江干流上，电站采用堤坝式开发，坝型为混凝土双曲拱坝，最大坝高 217m，库容 10.8 亿 m^3，调节库容 5.37 亿 m^3，电站总装机容量 224 万 kW。电站于 2016 年 11 月通过国家发展和改革委员会核准，目前正处在建设阶段，但由于尚未达到建设高峰年，因此本文采用设计阶段评价指标对该水电站可持续性进行评价。

3.1 经济社会评价

该水电站固定资产投资约 294 亿元，建设期将对地方经济增长产生拉动作用，并对地方财政税收做出较大贡献。经测算，电站投资建设期间（2014~2024 年），可拉动西藏 GDP 增长 1.13 个百分点，可拉动四川省经济增长 0.05 个百分点。

电站投运后，通过项目自身发挥效益，促进西藏和四川两省经济增长。经测算，2025 年对西藏经济增长的贡献率为 5.20%，可拉动自治区经济增长 0.52 个百分点；对四川省的经济贡献率为 0.32%，可拉动全省经济增长 0.03 个百分点。

3.2 环境评价

电站的建设对当地社会经济发展具有重要作用，可有效改善区域交通等基础设施条件，解决当地群众就业，社会效益显著。电站不涉及环境敏感区，工程按照现行环保法律法规要求编制环境影响评价报告，并针对工程建设和运行可能对环境产生的影响制定了完善的环境保护措施体系。电站运行期可实现 737.7 万 t/年的减排效益，在一定程度上防止了非再生能源的消耗及其带来的环境问题，具有较好的环境效益。

3.3 管理评价

为合理开发金沙江丰富的水能资源，加强藏区电力基础设施建设，实现“藏电外送”，构建国家“西电东送”接续能源基地，国家发展和改革委员会于 2011 年 8 月批准同意该电站开展前期工作。2011 年 7 月国家环保部对金沙江上游水电规划环评进行批复，2016 年 4 月对电站环评进行了批复。电站开发建设单位为华电金沙江上游水电开发有限公司，中国华电集团有限公司直属的水电流域公司，受集团总部直接管理，主要负责金上川藏段梯级电站和沿江风光电资源的开发建设和管理。公司管理水平先进，运营能力处于行业领先水平，抗风险能力较强。

3.4 结果分析

通过定量计算和定性分析，得出该电站各单项指标的评价得分（表 2），综合权重，确定该电站的最终得分（图 1）。

表 2 设计阶段可持续评价结果

目标层	要素层	指标层	得分	权重	最终得分
经济社会	工程效益	综合利用效益	1	2	2
	区域经济贡献	区域经济贡献率	4	1	4
	财务生存能力	财务内部收益率	1	2	2
	减排效益	能源替代效应	5	1	5
	社会稳定	社会稳定风险	5	1	5
	移民安置	单位装机移民人数	5	1	5
		移民环境容量比	4	1	4
环境	环境总体影响	环境影响经济损益	5	3	15
	环境敏感程度	生态敏感性	5	2	10
	环境保护对策措施	环境保护和水土保持设计执行情况	4	2	8
管理	政策与规划合法性	项目前期工作和项目设计的合法性	5	2	10
	工程管理	工程管理能力	4	2	8
综合得分					78

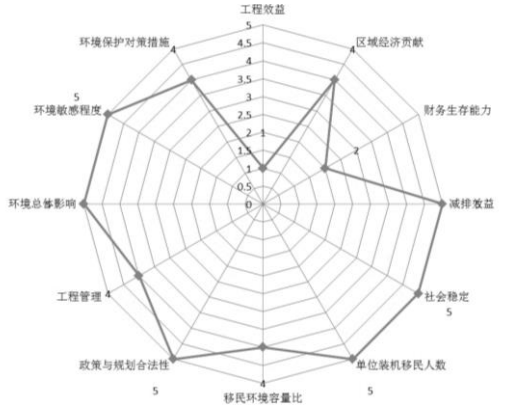


图 1 可持续性评价得分结果

由评价结果可见，该电站在经济社会方面的得分最多为 5 分，由于该电站的开发任务以发电为主，无其他综合利用功能，因此工程综合利用效益得分最低，为 1 分；电站地处川藏地区，交通等基础设施条件较差，财务生存能力得分较低，其余经济社会得分均在 4 分以上，总体属于中等可持续水平；电站在规划、设计过程中，严格执行国家相关法律法要求，依法履行相关审批程序，在开发水电的同时，对电站建设和运行过程中可能产生的生态环境问题、移民问题都予以充分考虑，深入贯彻“绿色金上”的水电开发精神。综上，电站综合评价得分为 78 分，为中等可持续，表明该水电站具有较好的可持续性。但由于电站地处金沙江上游川藏段，生态环境敏感，高海拔地区植被恢复存在一定难度；电站坝高超过 200m，水库为季调节水库，运行期库区水温分层明显，低温水下泄对下游河段水生生态有一定影响；高坝泄洪产生的气体过饱和影响也是需重点关注的环保问题。因此，在电站后续的开发建设和运行管理过程中，需坚持生态优先，在保护中开发的原则，走可持续发展之路。

4 结语

可持续水电评价是以大中型水电工程为对象，从经济社会、环境和管理 3 个方面评价其在设计、建设、运行等各个阶段的可持续性。根据评价结果分析制约水电站可持续性的关键问题，提出改进措施，从而为水电开发企业提供科学的管理和决策支持。

以金沙江上游某大型水电站为例，进行了设计期可持续性的分析和评价，该电站综合得分为 78 分，处于中等可持续水平。在评价所包含的 11 个评估主题中，综合利用效益和财务指标相对较差，水电开发企业可考虑争取政府部门给予政策的倾斜或扶持。

本文属于初步研究，为了建立具有广泛适用性的可持续水电评价指标体系和评价标准，还需开展更加深入的研究和案例分析工作，从而提高指标体系的科学性和适用性。

参考文献：

[1] 杨桐鹤, 禹雪中, 冯时. 水电可持续发展的概念、内容及评价[J]. 中国水能及电气化, 2010, (8):9-14.
[2] 缪益平, 陈飞翔, 战永胜, 等. 雅砻江梯级水电可持续发展评价指标体系研究[J]. 四川水力发电, 2014, (2):118-123.
[3] 安雪晖, 柳春娜, 黄真理. 长江流域水电开发可持续性评价体系[J]. 中国发展, 2015, (4): 7-13.
[4] 贾宝真, 禹雪中. 国内外水电环境及可持续性评价标准的比较[J]. 水力发电, 2013, (4):13-16.
[5] 水电可持续性评估规范[R]. 国际水电协会. 2010. 11.
[6] 水电站可行性研究报告[R]. 成都:中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 2016. 7.
[7] 陆波, 喻卫奇, 蒋波. 水电可持续性评估工具简析[J]. 水力发电, 2013, (9):5-8.

金沙江上游梯级联合泄洪对下游河段总溶解性气体过饱和累积影响研究

刘　睿

（中国电建集团西北勘测设计研究院，陕西 西安 710065）

摘　要：水电工程建成运行后，泄水建筑物在泄水过程中，由于水头高、流速大，会形成强掺气水流。进入到水垫塘内时，由于压强的升高导致大量的气体溶解成为溶解气体，从而造成总溶解气体过饱和（Total dissolved gas，简称 TDG）现象。本文通过对金沙江上游叶巴滩、拉哇及巴塘三个梯级进行预测分析，研究梯级联合泄洪工况下对总溶解性气体过饱和的累积影响，同时根据研究结果提出减缓影响的建议。

关键词：梯级联合泄洪；总溶解性气体过饱和；累积影响

1 研究背景

根据《金沙江上游水电规划报告》，金沙江上游共规划了 13 级电站，自上而下依次为：西绒、晒拉、果通、岗托、岩比、波罗、叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、昌波、旭龙、奔子栏。方案共利用落差 1372m，总装机容量 13920MW，多年平均年发电量 642.29 亿 kW·h。推荐岗托、波罗、叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、昌波和旭龙 8 个电站为规划实施方案，目前叶巴滩、拉哇、巴塘以及苏洼龙四个梯级已经核准开工建设。金沙江上游河段梯级开发方案见图 1。

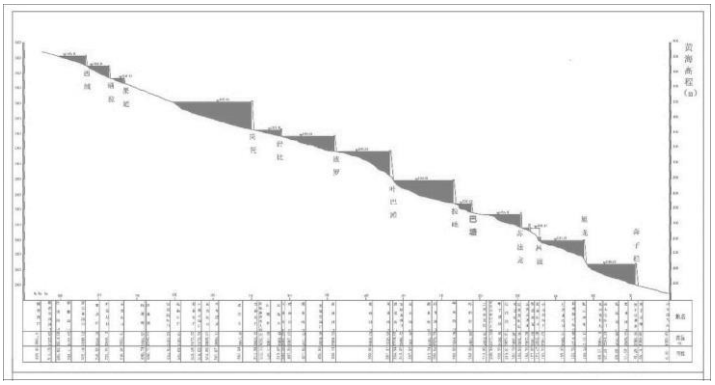


图 1　金沙江上游河段梯级开发方案

根据已经核准的四个梯级的布置方案，上游的叶巴滩电站、拉哇电站以及巴

塘电站首尾相连，主要保护的天然河段为巴塘坝下至苏洼龙库尾的 12km 天然河段。因此本次研究重点对叶巴滩、拉哇以及巴塘三个梯级的联合泄洪工况进行分析，预测对巴塘坝下 12km 天然河段总溶解性气体过饱和的影响。

2 研究方法

2.1 过饱和 TDG 生成预测模型

坝身泄洪孔出口距离大坝较近，处于大坝安全考虑，通常在泄洪水流落水区域修建护坦、二道坝等，形成水垫塘进行消能，消力池内过饱和 TDG 生成过程见图 2。

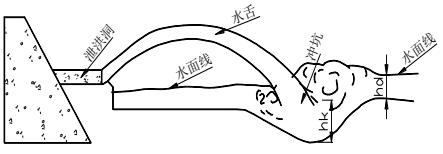


图 2　过饱和 TDG 生成示意图

基于过饱和 TDG 生成过程的分析，得到过饱和 TDG 生成预测模型如下：

$$G_d = G_{eq} + \frac{1}{2}\frac{\bar{P}_m}{P_0}\phi_1 G_{eq} \exp\left[-k_d\left(\frac{h_d}{h_k}\right)^{3/4}\right]$$

式中，

G_d 为消力池下游 TDG 饱和度(%)；

G_{eq} 为对应当地大气压的 TDG 平衡饱和度，取值为 100%；

P_0 为当地大气压(kPa)；

P_m 为消力池底部最大绝对压强(kPa)；

ϕ_1 为消力池内压力修正系数；

k_d 为消力池出口区域的 TDG 释放系数；

h_d 为消力池出口水深(m)；

h_k 为消力池水垫厚度(m)。

2.2 天然河道纵向一维过饱和 TDG 释放预测模型

（1）水动力学方程

$$i\mathrm{d}s = \mathrm{d}h + (\alpha + \xi)\mathrm{d}\left(\frac{V^2}{2g}\right) + \frac{Q^2}{K^2}\mathrm{d}s$$

$$K = \frac{1}{n}R^{\frac{2}{3}}A$$

式中，

i：河道底坡；

s：河道长(m)；

Q：断面流量(m^3/s)；

V：断面平均流速(m/s)；

A：过水断面面积(m^2)；

h：断面水深(m)；

K：断面平均流量模数；

n：糙率；

R：为水力半径(m)。

（2）过饱和 TDG 输移扩散方程

过饱和 TDG 在下游水体的输移释放模型采用一维输移扩散方程，其中过饱和 TDG 释放采用美国陆军工程兵团提出的一阶动力学过程。方程表述为：

$$\frac{\partial(G-G_{eq})}{\partial t} + u\frac{\partial(G-G_{eq})}{\partial x} = -k_{\mathrm{TDG}}(G-G_{eq})$$

式中，

G：计算时刻的 TDG 饱和度(%)；

G_{eq}：TDG 平衡饱和度(%)；

u：断面平均流速(m/s)；

t：滞留时间(s)；

k_{TDG}：释放系数(s^{-1})。

2.3 库区立面二维过饱和 TDG 释放预测模型

（1）连续性方程

$$\frac{\partial uB}{\partial x}+\frac{\partial wB}{\partial z}=qB$$

其中，u、w 分别为纵向和垂向流速(m/s)；B 为宽度(m)；q 为单宽流量(m^2/s)。

（2）动量方程

$$\frac{\partial uB}{\partial t}+\frac{\partial uuB}{\partial x}+\frac{\partial wuB}{\partial z}=gB\sin\alpha-\frac{B}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}=g\cos\alpha$$

其中 g 为重力加速度(m/s^2)；ρ 为密度(kg/m^3)；p 为压强(N/m^2)；τ_{xx} 和 τ_{xz} 为紊动切应力(N/m^2)；α 为河床与 x 方向的夹角。

纵向紊动切应力 τ_{xx} 计算表达式为：

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho}=A_x\frac{\partial u}{\partial x}$$

由于纵向上对流输运占主导地位，紊动切应力的影响作用相对较小，因此计算紊动切应力时纵向紊动粘性系数取为常数，即 $A_x=const$。与纵向切应力相似，垂向紊动切应力 τ_{xz} 的计算公式如下：

$$\frac{\tau_{xz}}{\rho}=A_z\frac{\partial u}{\partial z}$$

其中 A_z 为垂向紊动粘性系数(m^2/s)。由于垂向速度较小，水体的对流输运较弱，模型采用的垂向涡流粘滞系数计算公式如下：

$$\nu_t=\kappa\left(\frac{l_m^{\,2}}{2}\right)\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\tau_{wy}e^{-2k_1z}+\tau_{ytributary}}{\rho\nu_t}\right)^2}\,e^{-cR_i}$$

$$l_m=\Delta z_{\max}$$

其中，ν_t 即为涡粘系数 A_z (m^2/s)，κ 为范卡门常数；τ_{wy} 为因风而产生的横向剪应力[N/m^2]；k_1 为波数；$\tau_{ytributary}$为因支流入流而产生的横向剪应力[N/m^2]；$\Delta z_{\max}$ 为垂向网格间距的最大值(m)。c 为常数，取 0.15；R_i 为理查森数，$R_i=g\frac{\partial\rho}{\partial z}/\rho\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2$。

（3）自由水面计算方程

$$B_\xi\frac{\partial\xi}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\int_\xi^h uBdz-\int_\xi^h qBdz$$

其中ξ表示水面高程(m)；h表示水深(m)；B_ξ为对应高程的水面宽度(m)；B为水面宽度(m)。

（4）TDG 输运方程

$$\frac{\partial GB}{\partial t}+\frac{\partial uBG}{\partial x}+\frac{\partial wBG}{\partial z}=\frac{\partial(BD_xG)}{\partial x^2}+\frac{\partial(BD_zG)}{\partial z^2}+S_GB$$

式中S_G为TDG源项，考虑了因为压强、温度等条件的改变引起的水体内过饱和TDG的释放，以及表层水体与大气间的传质作用。源项表达式如下：

$$S_G=k_{\mathrm{TDG}}(G_{eq}-G)+(K_La)_s(G_s-G)$$

其中G为计算单元的 TDG 饱和度(%)；G_s为当地大气压下的 TDG 饱和度(%)；G_{eq}为当地平衡饱和度(%)；k_{TDG}代表计算水体内过饱和 TDG 释放系数(h^{-1})；$(K_La)_s$是自由水面的水气传质系数，其中a为比表面积(m^{-1})。

2.4 坝下近坝河段平面二维过饱和 TDG 预测模型

（1）连续性方程

$$\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{\partial hu}{\partial x}+\frac{\partial hv}{\partial y}=0$$

（2）动量方程

x 方向：

$$\frac{\partial hu}{\partial \mathrm{t}}+\frac{\partial huu}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial huv}{\partial \mathrm{y}}=fvh-\mathrm{g}h\frac{\partial \xi}{\partial \mathrm{x}}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{\mathrm{g}h^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy})$$

y 方向：

$$\frac{\partial hv}{\partial t}+\frac{\partial hvv}{\partial y}+\frac{\partial hvu}{\partial x}=-fuh-\mathrm{g}h\frac{\partial \xi}{\partial \mathrm{y}}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y}-\frac{\mathrm{g}h^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial \mathrm{y}}+\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy})+\frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy})$$

（3）输运方程

$$\frac{\partial G}{\partial t}+u\frac{\partial G}{\partial x}+v\frac{\partial G}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(E_x\frac{\partial G}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(E_y\frac{\partial G}{\partial y}\right)+k_{\mathrm{TDG}}S_{\Phi G}$$

式中：t为时间；

x、y 为右手笛卡尔二维空间坐标系；

ξ为水位(m)；

h 为水深(m)；

u、v 分别表示在 x、y 方向的流速分量(m/s)；

p为压(kN/m^2)；

ρ_0为参考水密度(kg/m^3)；

ρ为密度(kg/m^3)；

E_{x}、E_{y}为 TDG 在 x、y 方向上的扩散系数；

$S_{\Phi G}$为源汇项；

k_{TDG}为过饱和 TDG 释放系数；

G为过饱和 TDG 浓度；

2.5 混合模型

泄水产生的过饱和 TDG 在下游河道的输移释放过程中伴随发电尾水或支流的汇入，采用混合模型考虑发电尾水或支流汇入影响，即：

$$G=\frac{G_mQ_m+\alpha G_bQ_b}{Q_m+\alpha Q_b}$$

其中

G 为汇流与主流混合后的 TDG 饱和度(%)；

G_m 为汇流混合前主流的 TDG 饱和度(%)；

G_b 为汇流 TDG 饱和度(%)；

Q_m 、Q_b 分别为主流流量和汇流流量(m^3/s)；

α 为掺混系数，$0\le\alpha\le1$。

3 结果与分析

3.1 巴塘水电站单独运行

巴塘单独泄洪条件下，预测范围为巴塘坝址至苏洼龙库尾间金沙江干流河段。采用 TDG 释放模型，分别对巴塘水电站在工况 1（两年一遇洪水）和工况 2（五年一遇洪水）情况下过饱和 TDG 在巴塘至苏洼龙库尾河段的输移释放过程进行预测，计算河段内典型断面预测结果见表 1。

表 1　巴塘单独泄洪下过饱和 TDG 输移释放预测结果表

序号	距巴塘坝址距离(km)	过饱和 TDG 值(%)		备注
		工况 1（两年一遇）	工况 2（五年一遇）	
1	0.3	119.7	125.3	巴塘溢洪道出口断面
2	0.5	111.1	116.7	泄水与尾水掺混断面
3	0.7	110.5	115.7	巴楚河汇入断面
4	2.7	110.2	115.3	
7	4.8	109.9	114.9	水磨沟汇入断面
8	7.0	109.6	114.6	
9	8.7	109.4	114.3	郎达河汇入断面
10	12	109.1	113.8	苏洼龙库尾断面

巴塘尾水出口至苏洼龙库尾段的 TDG 的输移释放过程见图 3。

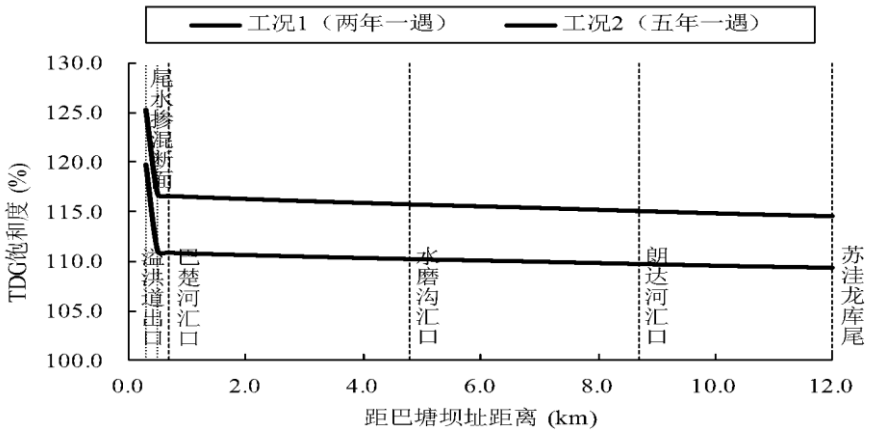


图 3　巴塘坝址下游河段内 TDG 饱和度沿程变化图

工况 1（两年一遇）洪水条件下泄水（泄洪流量 2016.8m³/s）生成的 TDG 饱和度为 119.7%。接纳左侧的发电尾水（发电流量 1553.2m³/s）与之掺混，在不考虑上游梯级泄洪影响下，发电尾水 TDG 饱和度值为 100%，加之流量与泄水流量比为 3：4，尾水掺混对降低泄水生成的 TDG 饱和度的作用显著，认为两股水流在坝下 0.5km 均匀混合，混合后的 TDG 饱和度为 111.1%，比泄洪生成的 TDG 饱和度降低了 8.6%。坝下 0.7km 处左岸巴楚河汇入，未考虑支流梯级泄洪的影响，TDG 饱和度值为 100%，汇入后使金沙江干流内 TDG 饱和度降低 0.6%，至 110.5%，随着向下游输移释放，TDG 饱和度逐渐降低，至距离巴塘坝址 12km 的苏洼龙库尾断面，TDG 饱和度降低为 109.1%。

工况 2（五年一遇）洪水条件下泄水生成的 TDG 饱和度为 125.3%，接纳尾水后在坝下 0.5km 处与尾水混合后的 TDG 饱和度值为 116.7%，降低值为 8.6%。坝下 0.7km 处巴楚河汇入后使河道内 TDG 饱和度再降低 1.0 %，为 115.7%，再经过 12km 河道释放至苏洼龙库尾时，TDG 饱和度降低低至 113.8%。

3.2 巴塘水电站与叶巴滩水电站联合运行

采用 TDG 释放模型，分别对巴塘、叶巴滩联合泄洪下工况 3（两年一遇）和工况 4（五年一遇）过饱和 TDG 在巴塘至苏洼龙库尾河段的输移释放过程进行预测，计算河段内典型断面预测结果见表 2。

表 2　巴塘与叶巴滩联合泄洪下巴塘下游段过饱和 TDG 输移释放预测结果表

序号	距巴塘坝址距离(km)	过饱和 TDG 值(%)		备注
		工况 1（两年一遇）	工况 2（五年一遇）	
1	0.3	119.7	125.3	巴塘溢洪道出口断面
2	0.5	114.2	120.4	泄水与尾水掺混断面
3	0.7	113.5	119.1	巴楚河汇入断面
4	2.7	113.1	118.6	
5	4.8	112.8	118.2	水磨沟汇入断面
6	7.0	112.4	117.7	
7	8.7	112.1	117.4	郎达河汇入断面
8	12	111.7	116.8	苏洼龙库尾断面

巴塘尾水出口至苏洼龙库尾段的 TDG 的输移释放过程见图 4。

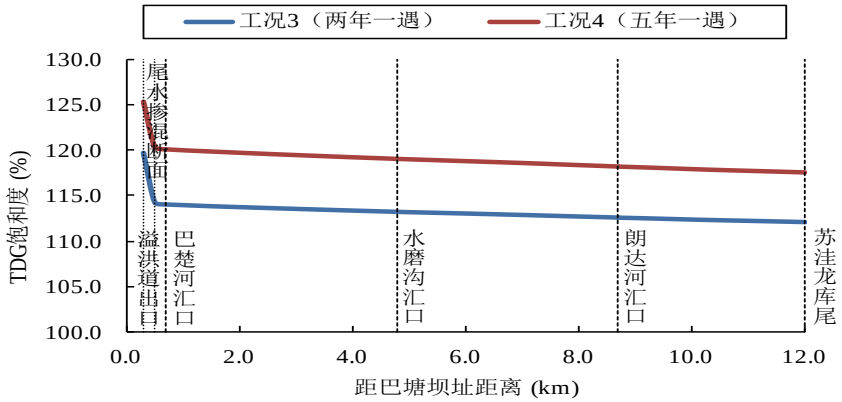


图 4　巴塘坝址下游河段内 TDG 饱和度沿程变化图

工况 3（两年一遇）洪水泄水生成的 TDG 饱和度为 119.7%，至坝下 0.5km 与发电尾水掺混后，降低 5.5%，降低为 114.2%，坝下 0.7km 处巴楚河支流 TDG 饱和度为 100%，汇入后使河道内 TDG 饱和度降低 0.7%，降为 113.5%，至苏洼龙库尾，TDG 饱和度降为 111.7%。

工况 4（五年一遇）洪水泄水生成的 TDG 饱和度为 125.3%，至坝下 0.5km 与发电尾水掺混后，降低 4.9%，降低为 120.4%，坝下 0.7km 处巴楚河支流 TDG 饱和度为 100%，汇入后使河道内 TDG 饱和度降低 1.3%，降为 119.1%，至苏洼龙库尾，TDG 饱和度降为 116.8%。

3.3 巴塘水电站与拉哇、叶巴滩水电站联合运行

采用 TDG 释放模型，分别对巴塘水电站与拉哇、叶巴滩水电站联合运行工况 5（两年一遇）和工况 6（五年一遇）过饱和 TDG 在巴塘至苏洼龙库尾河段的输移释放过程进行预测，计算河段内典型断面预测结果见表 3。

表 3　巴塘与叶巴滩、拉哇联合泄洪下巴塘下游段过饱和 TDG 输移释放预测结果表

序号	距巴塘坝址距离(km)	过饱和 TDG 值(%)		备注
		工况 1（两年一遇）	工况 2（五年一遇）	
1	0.3	119.7	125.3	巴塘溢洪道出口断面
2	0.5	122.6	128.7	泄水与尾水掺混断面
3	0.7	121.5	127.1	巴楚河汇入断面
4	2.7	120.8	126.3	
5	4.8	120.2	125.7	水磨沟汇入断面
6	7.0	119.7	125.1	
7	8.7	119.3	124.6	郎达河汇入断面
8	12.0	118.5	123.7	苏洼龙库尾断面

巴塘尾水出口至苏洼龙库尾段的 TDG 的输移释放过程见图 5。

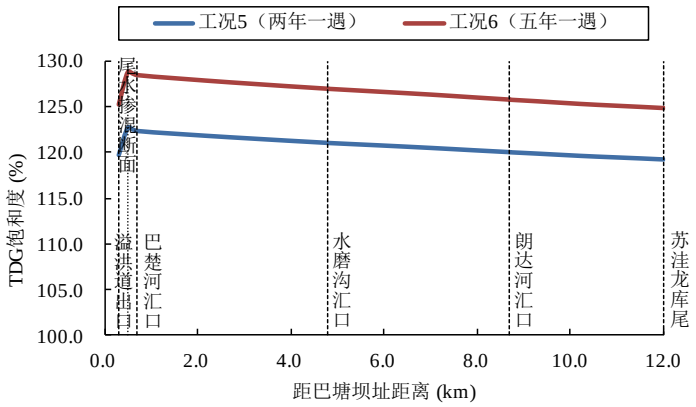


图 5　巴塘坝址下游河段内 TDG 饱和度沿程变化图

工况 5（两年一遇）洪水泄水生成的 TDG 饱和度为 119.7%，至坝下 0.5km 与发电尾水掺混后，由于上游拉哇泄洪引起的 TDG 饱和度较高，至巴塘坝前溶解气体仍释放较少，巴塘泄洪水流与发电尾水混合后，饱和度升高 2.9%，升至 122.6%，坝下 0.7km 处巴楚河支流 TDG 饱和度为 100%，汇入后使河道内 TDG 饱和度降低 1.1%，降为 121.5%，至苏洼龙库尾，TDG 饱和度降为 118.5%。

工况 6（五年一遇）洪水泄水生成的 TDG 饱和度为 125.3%，至坝下 0.5km 与发电尾水掺混后，升高 3.5%，升高为 128.7%，坝下 0.7km 处巴楚河支流 TDG 饱和度为 100%，汇入后使河道内 TDG 饱和度降低 1.6%，降为 127.1%，至苏洼龙库尾，TDG 饱和度降为 123.7%。

3.4 分析结论

根据 3.1~3.3 小节的预测分析，得出以下结论：

（1）通过对两年一遇洪水和五年一遇洪水工况下的气体过饱和影响预测可知，随着泄洪流量的增大，对下游气体过饱和的影响也随之增大。

（2）上游梯级联合泄洪时，会对下游河段的气体过饱和造成累积影响。

（3）根据分析预测可知，无论是巴塘单独运行、还是巴塘与上游梯级联合运行，溢洪道出口断面的气体过饱和基本保持不变（两年一遇：119.7%，五年一遇：125.3%），因此，经过溢洪道挑流后气体过饱和基本维持一个稳定值，不受上游梯级影响。

（4）根据分析预测可知，梯级累积影响主要集中在发电尾水中。巴塘单独运行时，尾水断面掺混后气体过饱和值为 110.2%和 115.3%；巴塘与叶巴滩联合运行时，尾水断面掺混后气体过饱和值为 114.2%和 120.4%；巴塘与拉哇、叶巴滩联合运行时，尾水断面掺混后气体过饱和值为 122.6%和 128.7%，由此可见，梯级累积影响主要集中在发电尾水中。

4 结语

通过对金沙江上游巴塘水电站单独运行，巴塘、叶巴滩联合运行，巴塘、拉哇以及叶巴滩联合运行三个工况进行计算分析发现，在梯级联合泄洪的工况下，对下游河段的气体过饱和存在累积影响，累积影响主要是集中在发电尾水之中。

为避免梯级联合泄洪对下游气体过饱和的影响，考虑到叶巴滩水电站及拉哇水电站均有一定的调节能力，因此得出以下建议：

（1）泄洪发生频率控制

金沙江上游水电站泄洪时段主要在 6～9 月。从流域角度考虑，充分利用叶巴滩和拉哇电站的调节能力，控制各电站的泄洪时间，尽量避免巴塘、叶巴滩和拉哇三个梯级同时泄洪。

（2）优化机组运行与泄洪过程

当上游来流的 TDG 饱和度较低时，由于发电系统不改变 TDG 饱和度，泄洪期间加大机组发电流量或保持机组满发，尾水与泄洪水流掺混有助于降低过饱和 TDG 不利影响。但拉哇泄洪时生成的过饱和 TDG 至巴塘坝前仍保持高饱和度，而巴塘泄洪生成的 TDG 水平相对尾水较低，这种情况下可考虑减小机组过流，增加泄洪流量。

（3）运行期监测

鉴于国内外对高坝泄流下游 TDG 过饱和问题缺乏深入系统的认识和研究，因此为及时了解金沙江上游各梯级电站建成后高坝泄流下游 TDG 过饱和状况及其对水生生物的影响，验证数学模型预测结果，为工程环境保护及提高我国在高坝泄流 TDG 过饱和领域的研究水平提供可靠数据和基础资料，有必要在电站泄洪期间开展泄洪的过饱和 TDG 生成预测，并对泄洪产生的过饱和 TDG 在各梯级库区河段的释放过程开展原型观测研究。

参考文献：

[1] 陈永灿, 付健, 刘昭伟. 三峡大坝下游溶解氧变化特性及影响因素分析[J]. 水科学进展, 2009, 20: 526-530.

[2] 陈永柏, 彭期冬, 廖文根. 三峡工程运行后长江中游溶解气体过饱和演变研究[J]. 水生态学杂志, 2009, 2: 1-5.

[3] 冯镜洁, 李然, 李克锋, 李嘉, 曲璐. 高坝下游过饱和 TDG 释放过程研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29: 7-12.

[4] 孙大东. 金沙江上游叶巴滩水电站环境影响报告书（报批稿）[R]. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，2016 年 1 月.

[5] 孙莹. 金沙江上游巴塘水电站环境影响报告书（报批稿）[R]. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，2017 年 3 月.

黄河上游龙羊峡以上河段水电梯级开发对湿地关键生态因子的影响

杨　涛,牛天祥，寇晓梅，牛　乐，吕　玥

（中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司， 陕西 西安　710065）

摘　要：通过对黄河上游（龙羊峡以上）河段湿地植被、水禽及鱼类的调查研究，探讨了水电开发对湿地关键生态因子的影响，可为水电开发相关设计工作提供理论背景及数据支撑。结果表明：水电开发对湿地植被、水禽及鱼类等生态要素的影响因湿地所处河段位置，是否为区域特有物种以及开发强度而不同。首曲梯级蓄水对黄河首曲湿地某些湿地植物群落的生物量和生产力产生一定的影响或者局部区域优势种群发生变化，但保护区主体功能并未发生显著变化；研究区不涉及鸟类集中分布区，对区域鸟类的影响总体较小；根据鱼类物种的分布特征、敏感性和有无增殖放流，将黄河上游龙羊峡以上流域区 10 种主要鱼类划分成 4 个影响等级，后续开发可根据影响程度采取相应保护及恢复措施。

关键词：水电开发；湿地；植物；水禽；鱼类

1 引言

我国《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》提出：在做好生态保护和移民安置的前提下积极发展水电。“十三五”至未来相当长时间，我国都将处在水电工程建设高峰期，大规模、高强度的梯级水电工程建设可导致流/区域生态系统的加速演替，直接威胁流/区域的生态安全，可能引发的社会问题和争议更加显著[1-3]。黄河上游龙羊峡以上河段干流穿过三江源国家级自然保护区的多个分区以及黄河首曲国家级自然保护区。该区干流梯级水电开发对流域环境和生态的影响，特别是对干流沿线湿地系统格局和湿地水生态的影响受到关注[4]。本研究旨在通过区内植被、水禽及鱼类特征的调查分析，探讨水电开发对湿地关键生态因子的影响，为后续水电开发工作提供科学依据。

2 研究方法

2.1 研究区概况

本研究区是指龙羊峡水电站以上的流域区（95°54′-103°25′E，32°10′-36°34′N）（图 1），地跨青海、四川、甘肃三省，总面积约 13 万平方公里。该区地处青藏高原亚寒带，总体属大陆性高原气候，一年中分干季和雨季，干湿季交替明显[5]，区内分属于两个土壤地区，36 个亚类，分属 17 个土类，7 个土纲[6]，自然植被共记录 7 个植被型、18 个植被亚型、44 个群系组，其中灌丛是流域区类型最多、分布最广的植被型，其次是草甸。

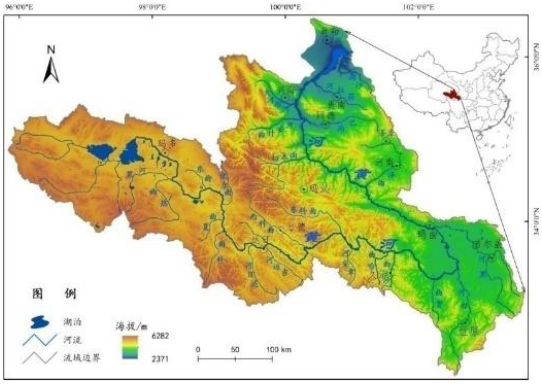


图 1 黄河上游龙羊峡以上流域区示意图

2.2 研究方法

（1）基础资料收集/购置：三江源、黄河上游龙羊峡以上河段湿地及河库鱼类生态等相关研究

成果、河段流域区 MODIS 影像数据、中等分辨率遥感影像数据、研究区主要基础地理信息、社会经济统计资料。

（2）遥感分析：梯级规划河段流域区湿地分类；干流和重要支流下游河段沿线的湿地景观格局；典型（重要）湿地生境的景观生态特征。

（3）植物群落分析：在生长季中期开展湿地植物群落样方调查，分析沿线典型湿地植被生态等特征。在野外物种鉴定的基础上，对不确定的物种，采集标本，通过专家咨询和参照《中国植物志》、《青海植物志》和中国数字标本馆（CVH）等进行核对。

（4）河/库鱼类生态调查和采样：在梯级规划河段干流沿线、重要支流下游河段，通过实地捕捞、市场调查、部门和渔民走访，并结合研究区长期研究资料查阅汇总。

3 结果与分析

3.1 对湿地植被影响

根据中国植被图（1:100 万，中国科学院植物研究所，2000）分类原则、等级、单位和系统，黄河上游龙羊峡以上流域区植被分布如图 2 所示。自然植被共记录 7 个植被型、18 个植被亚型、44 个群系组，其中灌丛是流域区类型最多、分布最广的植被型，共 5 个植被亚型，包括 13 个群系组；其次是草甸共 2 个植被亚型，包括 10 个群系组。栽培植被共 2 个植被亚型，包括 2 个群系组。主要植被类型包括：禾草、薹草高寒草原，蒿草、杂类草高寒草甸，高寒沼泽，高山稀疏植被及温带丛生禾草草原。

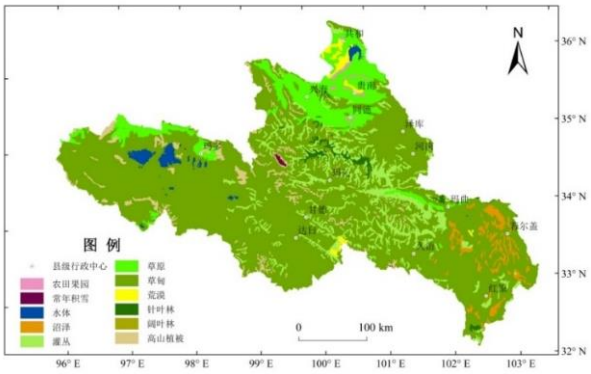


图 2 黄河上游龙羊峡以上流域区植被类型分布

黄河上游（龙羊峡以上）河段主要有两片集中的湿地分布区，河源区的星星海湿地保护分区及其下游宽谷河网湿地和甘肃黄河首曲湿地国家级自然保护区及毗邻沼泽草甸湿地。由于星星海湿地保护分区位于水电规划河段的上游，未布置梯级，因此，黄河上游（龙羊峡以上）河段水电开发对本河段影响很小，不会对湿地重要生境造成淹没影响，因此，本研究主要分析对首曲湿地国家级自然保护区及毗邻沼泽草甸湿地植物群落和种群的影响。

水电开发对湿地最显著的影响就是淹没湿地动植物生境[2,7]。水库淹没涉及湿地类型发生改变，原来的泥炭沼泽、苔草沼泽、湖泊和湿草地等类型将转变成为人工湿地[7-8]。水库淹没湿地保护区面积 8.77km^2，占保护区总面积的 0.43%，对首曲湿地景观格局的改变较小；另外，水库蓄水淹没了部分沼泽性湿地，但形成了水库，且在库周一定范围内又会形成新的沼泽性湿地。因此，首曲湿地生态系统结构并未发生显著变化。

根据首曲湿地齐哈玛、白河汇口、黑河汇口、玛曲黄河大桥水深、流速变化情况，日内平均水深最大小时升幅 0.23m，最大小时降幅 0.39m，日内断面平均流速最大小时升幅 0.14m/s，最大小时降幅 0.22m/s。黄河首曲湿地自然保护区典型断面处平均水深和流速日内变幅较小。且根据对下游河道水温影响预测，齐哈玛、白河汇口、黑河汇口三个断面处 4 月~8 月天然水温与联合运行后水

温变幅很小。而区内浅水草本沼泽湿地植物群落经过长期演化已经适应了高原高寒区气候环境，对平均水深、流速和水温较小的日内变幅不敏感，水电开发不会导致植物生理生殖性状发生改变，但可能会导致某些群落长势或局部优势种发生变化。另外，由于开发后水流减缓，泥沙将在库内淤积，下泄水流中泥沙含量减少，进入玛曲湿地的泥沙含量和营养盐物质进一步下降，将导致首曲湿地某些植物生产力降低。

3.2 对湿地重要水禽的影响

据调查统计，流域内共计有鸟类 32 科 154 种，其中繁殖鸟有 94 种。鸟类中鹱科占 85 种，此外雀科、鹰科种类也较多。鸟类活动范围广，飞行能力强，其活动范围和栖息生境几乎涵盖黄河上游流域各生境类型。

星星海湿地保护分区及下游的宽谷河网湿地，鸟类数量众多，代表鸟类主要有黑颈鹤、玉带海雕、金雕等。星星海湿地保护分区位于水电规划河段的上游，所在河段未布置梯级，因此，水电开发对该区段的鸟类基本无影响。

甘肃黄河首曲国家级自然保护区内湿地鸟类不仅数量多，而且很多为国家重点保护物种，主要包括黑颈鹤、黑鹤、金雕等。总体上看，黄河首曲湿地自然保护区典型断面处平均水深、流速日内变幅较小，玛曲以上河段梯级联合运行对下游河道水温影响较小。同时，黄河首曲湿地保护区与黄河玛曲大拐弯河段相邻，该河段亦未布置任何梯级，因此，水电开发对其中的湿地鸟类影响较小。

玛曲以下高山峡谷段两岸森林资源丰富，淹没会导致库区两岸山坡大面积的林地消失，栖息在其中的鸟类群落也将随之消失。

从鸟类资源分布情况看，水电规划布置的梯级不涉及鸟类集中分布区，对区域鸟类的影响总体较小；玛曲以下的峡谷区段，其中分布的多数鸟类活动能力很强，其生存受影响程度较小。另一方面，梯级水库形成后，随着湖库面积增加，为部分游禽提供了广阔的繁殖场所和良好的食物来源，秋冬季节将引来一定数量的游禽来此停留、越冬。随着流域新的生态系统的形成，鸟类群落优势种将发生一定变化。适合森林和灌丛的鸟类类群将迁往高海拔生境，高海拔森林生态系统中鸟类群落物种多样性可能增加。

3.3 对鱼类多样性的影响

黄河上游龙羊峡以上流域主要有 5 种土著鱼类，为黄河上游的特有鱼类。包括主要分布于兰州以上黄河上游干支流及附属湖泊中的有极边扁咽齿鱼、拟鲶高原鳅、黄河高原鳅，分布于黄河上游海拔 3000-4300m 的静缓淡水水域的有骨唇黄河鱼，而刺鲃的分布仅局限于青海兴海至甘肃兰州等黄河干支流河段。由于水电开发，龙羊峡以上的黄河干支流河段已成为这 5 种鱼类最后的自然生境[9]。花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、黄河裸裂尻鱼、拟硬刺高原鳅、硬刺高原鳅 5 种鱼类的地理分布范围相对较广，除了分布于黄河上游外，在其他水系内亦有分布。

研究发现梯级电站建设影响鱼类种群特征及分布[4,10]。比较区内各鱼类在黄河上游龙羊峡以上流域区的分布与梯级水电开发的淹没范围，发现刺鲃在黄河上游龙羊峡以上流域区的分布生境（军功以下干流河段），大部分将被水电开发形成的淹没区取代，刺鲃的生存将受到一定程度的威胁。花斑裸鲤、极边扁咽齿鱼、厚唇裸重唇鱼、骨唇黄河鱼、黄河裸裂尻鱼、拟鲶高原鳅、黄河高原鳅、硬刺高原鳅、拟硬刺高原鳅 9 种鱼类在水电淹没河段外有分布，威胁程度相对较小（图 3）。

从 2011 年至今，区内已进行多次花斑裸鲤和极边扁咽齿鱼的放流活动，对这两种鱼类种群数量进行了补充。而刺鲃、厚唇裸重唇鱼、骨唇黄河鱼、拟鲶高原鳅、黄河高原鳅、硬刺高原鳅、拟硬刺高原鳅 7 种鱼类尚不能人工繁殖，黄河裸裂尻鱼虽然已能进行人工繁殖，但技术尚不成熟。

根据鱼类物种的分布特征、敏感性和有无增殖放流（表 1），将黄河上游龙羊峡以上流域 10 种主要鱼类划分成 4 个影响等级，来分析梯级水电开发对鱼类多样性的影响。

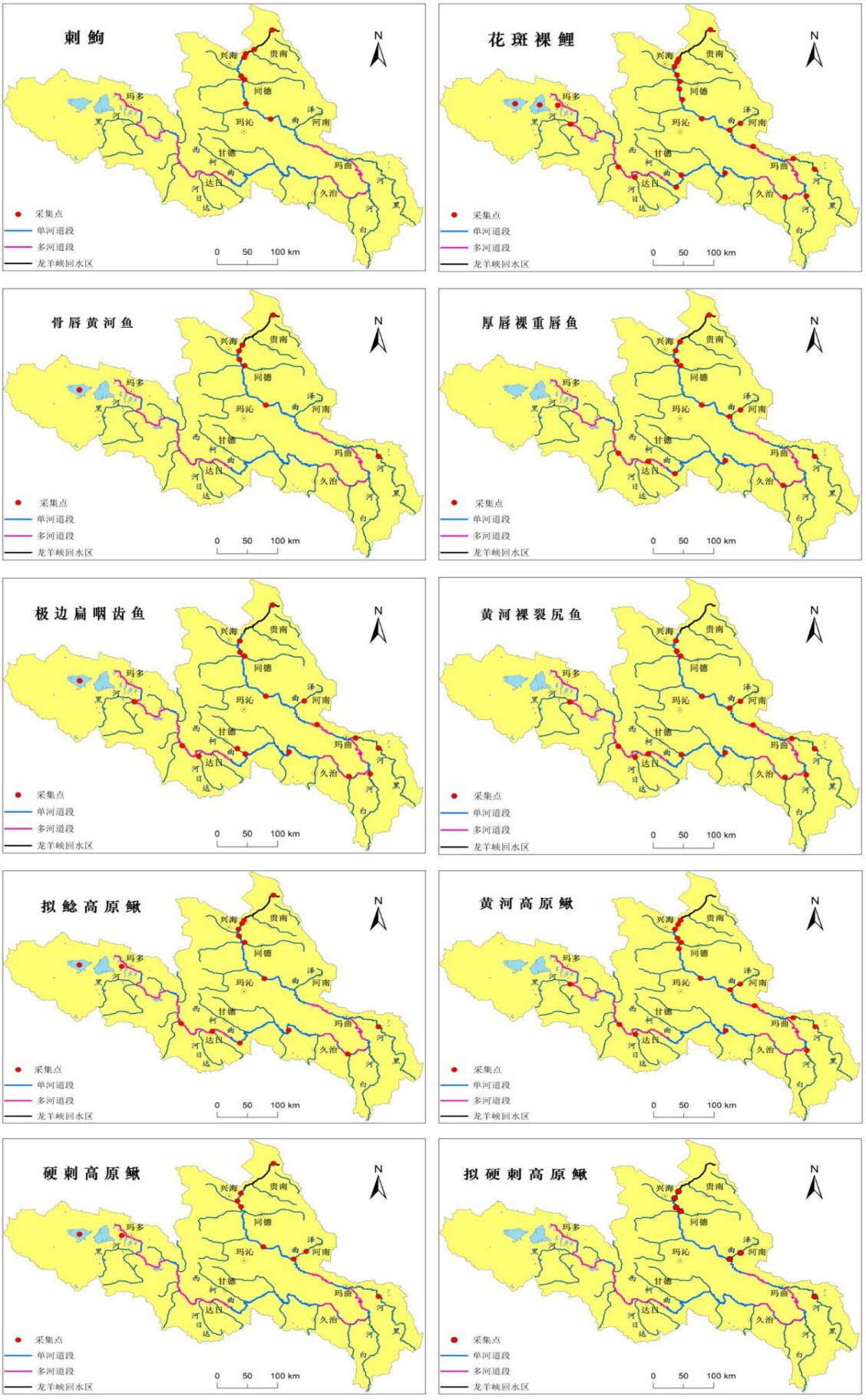


图 3 黄河上游龙羊峡以上主要鱼类空间分布

表 1　黄河上游龙羊峡以上水电开发对鱼类多样性的影响

	刺鲃	花斑裸鲤	骨唇黄河鱼	极边扁咽齿鱼	黄河裸裂尻鱼	厚唇裸重唇鱼	拟鲶高原鳅	黄河高原鳅	硬刺高原鳅	拟硬刺高原鳅
地理分布	+		+	+			+	+		
集中分布于影响河段	+									
敏感性	+		+	+		+	+			
无增殖放流	+		+			+	+	+	+	+

一级，为黄河上游特有鱼类，研究区内物种集中分布在水电开发影响河段，对水电开发敏感，目前无法增殖放流。包括刺鲃 1 个物种，受水电开发影响极大。

二级，为黄河上游特有鱼类，对水电开发敏感，目前无法增殖放流。包括骨唇黄河鱼、拟鲶高原鳅 2 个物种，受水电开发影响大。

三级，为黄河上游特有鱼类，对水电开发敏感，目前已进行增殖放流；或非黄河上游特有鱼类，对水电开发敏感，但目前无法增殖放流；或是黄河上游特有鱼类，但目前无法增殖放流。包括极边扁咽齿鱼、厚唇裸重唇鱼、黄河高原鳅 3 个物种，受水电开发影响较大。

四级，非黄河上游特有鱼类，对水电开发敏感性不大。包括花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼、硬刺高原鳅、拟硬刺高原鳅 4 个物种，受梯级水电开发影响相对较小。

4 结语

综上所述，根据湿地所处河段位置，是否为区域特有物种以及水电开发强度不同，黄河上游龙羊峡以上河段干流梯级水电开发对湿地植被、水禽及鱼类等表现出不同影响。具体表现为：

（1）首曲梯级蓄水对黄河首曲湿地某些湿地植物群落的生物量和生产力产生一定的影响或者局部区域优势种群发生变化，但是总体上并未显著改变甘肃黄河首曲湿地保护区景观生态结构，保护区主体功能并未发生显著变化。

（2）水电规划布置的梯级不涉及鸟类集中分布区，对区域鸟类的影响总体较小；玛曲以下的峡谷区段，其中分布的多数鸟类活动能力很强，其生存受影响程度较小。而梯级水库为部分游禽提供了广阔的繁殖场所和良好的食物来源，鸟类群落优势种将发生一定变化。

（3）根据鱼类物种的分布特征、敏感性和有无增殖放流，将黄河上游龙羊峡以上流域区 10 种主要鱼类划分成 4 个影响等级，其中刺鲃受水电开发影响极大，其次是骨唇黄河鱼、拟鲶高原鳅，极边扁咽齿鱼、厚唇裸重唇鱼、黄河高原鳅 5 个物种受水电开发影响较大，而作为非特有种的花斑裸鲤、黄河裸裂尻鱼、硬刺高原鳅、拟硬刺高原鳅 4 个物种受梯级水电开发的影响相对较小。

参考文献：

[1] Petts G E, Gurnell A M. Dams and geomorphology: Research progress and future directions [J]. Geomorphology, 2005, 71(1-2):27-47.

[2] 麻泽龙, 程根伟. 河流梯级开发对生态环境影响的研究进展 [J]. 水科学进展, 2006, 17(5): 748-753.

[3] 毛战坡, 王雨春, 彭文启, 等. 筑坝对河流生态系统影响研究进展 [J]. 水科学进展, 2005, 16(1): 134-140.

[4] 冯慧. 黄河上游龙羊峡-刘家峡河段水生生物多样性研究及生态系统健康评价 [D]. 西北大学, 2009.

[5] 蓝永超, 鲁承阳, 喇承芳, 等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(4): 920-928.

[6] 史学正, 于东升, 高鹏, 等. 中国土壤信息系统 (SISChina) 及其应用基础研究 [J]. 土壤, 2007, 39(3): 329-333.

[7] 祁继英, 阮晓红. 大坝对河流生态系统的环境影响分析 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, 33(1): 37-40.

[8] Ouyang W, Hao F, Song K, et al. Cascade Dam-Induced Hydrological Disturbance and Environmental Impact in the Upper Stream of the Yellow River [J]. Water Resources Management, 2011, 25(3): 913-927.
[9] 申志新, 王国杰, 李柯懋, 等. 黄河龙羊峡上游鱼类资源现状及保护对策 [J]. 水生态学杂志, 2014, 35(1): 70-76.
[10]张建军, 冯慧, 李科社, 等. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化 [J]. 淡水渔业, 2009, 39(3): 40-45.

基于生态经济价值的流域横向生态补偿标准研究

黄　迪，温　岩，张子平

（湖北清江水电开发有限责任公司，湖北 宜昌 443000）

摘　要：流域生态补偿标准的界定涉及到经济学领域的诸多内容，而横向生态补偿更需要一个相对统一、可量化的标准来约束监督。目前流域横向生态补偿标准多在定性范围内分析，定量方面的研究较少，其主要原因是量化标准难以确定，不利于补偿方与受偿方之间有效协商。本文基于流域生态经济价值模型，结合横向生态补偿的模式，提供了一种量化流域横向生态补偿标准的思路。

关键词：补偿标准；生态补偿；生态经济价值

1 引言

生态补偿即生态保护补偿，是一个基于环境而言的法学新兴概念。生态补偿是当前国际上保护生态环境占主导地位的重要市场经济手段，它将生态系统服务的外部的、非市场的价值转化为提供生态系统服务的财政激励措施[1]。在地理和生态角度，流域是一个完整的地理系统、生态系统。以流域为单元开展生态保护，可体现生态系统的完整性。由于流域内的人口分布较为集中、经济活动更为频繁、生态问题尤为突出、生态保护恢复工作十分急切，故流域生态补偿研究是当前生态补偿研究的热点之一。

国内生态补偿问题已受到学者的广泛关注，其研究主要集中于补偿标准确定[2][3]、补偿机制与政策[4][5]、时空格局分析等[6]，取得了一定研究成果。生态价值和生态补偿的研究也逐渐增多，特别是流域生态补偿越来越受到关注[7][8]。

补偿标准是生态补偿机制中的重要组成部分，也是我国区域生态补偿实践的难点之一[2]。生态补偿涉及到生态效益、经济效益和社会效益的有机统一。为了平衡三者，需要对生态系统的生态效益、社会效益进行量化评估。而与区域生态补偿相关的大尺度影响过程，其补偿标准的评估存在各种制约。因此，生态补偿标准的量化研究对生态补偿机制的运行起着重要作用。

2 流域生态经济价值

2.1 生态价值当量

生态系统价值的量化和货币化已受到国内外学者的广泛关注。目前大多采取替代法计算，暂无比较公认成熟的生态价值定价方法。Costanza 等人于 1997 年从科学意义上明确了生态系统价值估算原理和方法[9]；谢高地等结合我国国情，在其生态系统服务价值评估体系基础上展开两次调查，得出了新的评估体系[10]。按照归一化思路，生态价值当量指具备森林基本相同生态功能当量，其主体包括草地、农田、湿地、河流、湖泊等[11]。或者说，单位生态价值当量就是单位面积森林与其它生境功能强弱的量化值。生态价值当量指标体系结构如表 1 所示，价值当量表[12]如表 2 所示。

表 1　生态价值当量指标体系结构

指标	类型
林地	常绿阔叶林、落叶阔叶林、常绿针叶林、针阔混交林、稀疏林、灌木林地
草地	天然牧草地、人工牧草地、其他草地
农业用地	水田、旱地
湿地	沼泽、内陆滩涂
河流湖泊	河流、湖泊、水库、坑塘
荒地	沙地、裸岩

表 2　不同生态系统的单位生态价值当量

生态价值当量	Costanza（1997 年）	谢高地（2002 年）	谢高地（2007 年）
林地	1.00	1.00	1.00
草地	0.25	0.42	0.42
农业用地	0.09	0.20	0.28
湿地	2.35	2.41	1.95
河流湖泊	0.97	4.99	1.61
荒地	0.00	0.02	0.05

2.2 生态经济价值

生态价值当量由不同生态系统的当量标准和各生态系统的面积构成。在流域有限范围内，只要确定其中某个系统的生态经济价值，其它系统的生态经济价值也可依据不同生态系统之间生态价值当量关系换算。有限流域范围内某系统生态经济价值即可由测算的单位生态价值当量的经济价值与该系统生态价值当量的乘积换算。有限流域范围（如流域下某支流）生态价值当量由 2.1 所述 6 类当量构成，其生态价值当量计算式为

$$N_j = S_j \cdot E_j \cdot \alpha \quad (j = 1, 2, \cdots, 6) \tag{1}$$

$$N = \sum_{j=1}^{6} N_j \tag{2}$$

式中，N 为流域范围的生态价值当量；N_j 为某生态系统的生态价值当量；S_j 为某生态系统面积，hm^2；E_j 为某生态系统对应的单位生态价值当量，hm^{-2}；α 为修正系数，取决于有限流域范围的自然地貌、区位等，一般取 1。

则流域生态经济价值为

$$V_N = N \cdot U \tag{3}$$

式中，V_N 为有限流域范围的生态经济价值，元；U 为单位生态价值当量的经济价值，元。

3 流域横向生态补偿标准研究

3.1 流域横向生态补偿

流域即分水线所包围的集水区，是以河流和水资源的定向运动识别的地域系统，属自然地理概念[13]。流域生态补偿以保护流域生态环境、减小人类社会活动对环境的破坏、促进上下游协调发展为目的，依据生态系统服务价值、生态保护成本、发展机会成本，运用政府和市场手段，调节流域内生态保护利益相关者之间的利益关系[4]。

根据补偿者与受偿者之间的行政隶属关系，可将生态补偿分为纵向生态补偿和横向生态补偿两种形式。若补偿者与受偿者之间存在行政隶属关系，则为纵向生态补偿，比如中央政府对不同层级地方政府开展的生态补偿，省政府对本行政辖区内市、县、乡镇等开展的生态补偿等；若补偿者与受偿者之间不存在行政隶属关系，则为横向生态补偿，比如省际之间和市际之间的生态补偿[14]。横向生态补偿作为生态补偿的一种重要途径，其目的是保护及持续性利用生态系统，借助公共政策或市场手段，理清和调节不具行政隶属关系但生态关系紧密的地区之间的利益关系。其相关地区可以是同级行政区，也可以是不同级行政区。

由于行政区划与流域的特殊关系，流域内生态补偿跨行政区划且不存在行政隶属关系的情况较为普遍。长江上游省份如四川、陕西、重庆生态相关性较为密切，即补偿方和受偿方之间的生态利益关系十分明确，且互相之间不存在行政隶属关系，利于建立横向生态补偿制度，通过公共政策手段或市场化手段开展横向生态补偿。

3.2 横向生态补偿标准的主要模式

补偿标准是生态补偿制度中的重要组成部分，它解决的是补偿多少的问题。补偿资金额度测算是补偿标准量化的基础，是生态补偿机制运行的前提和关键。生态补偿标准的计算就是确定流域生态保护受益主体应当具体分担的投入量，确定受益主体对投入主体的补偿支付金额标准[15]。结合国内外研究，生态补偿额度应介于补偿者经济发展机会成本损失与受偿者生态服务价值产出之间。

王军锋基于流域功能需求，从环境治理角度提出流域生态补偿可划分为环境质量改善和水源地功能保护两种类型，据此设计了生态补偿标准设计的两种模式——一般流域水污染控制生态补偿和水源地保护生态补偿[16]。两种模式下的上下游均不存在行政隶属关系，前一种模式上下游经济基础一般处于对等地位，后一种模式因上游牵涉水源地生态保护，本地经济开发受到一定限制。

3.2.1 一般流域生态补偿

若上游选择向水体环境排污或破坏上游生态，则应就其环境污染或生态破坏行为对下游造成的损失进行补偿；若上游行政区域所属主管部门维持自然生态环境，则其因放弃开发而损失的经济发展应得到补偿。对于水体生态保护而言，其直接受益方是下游行政区域，故下游应对上游进行生态补偿。若上游行政区域所属主管部门对生态环境加以改善，则其投入应得到补偿；对于流域河流，其下游受益方应对上游补偿。

3.2.2 水源地保护生态补偿

水源地因其地理区位、功能区划等原因，其经济基础一般较为薄弱，却担负着提供其它城市饮用水的重要任务。水源地作为受偿方，为了提高其提供生态产品的能力，应对辖区的生态资源实施更为严格的管制措施，对企业排污标准的制定更为严格。为了平衡利益关系，取水行政单位应对水源地提供补偿。

3.3 基于生态经济价值的流域横向生态补偿标准

在流域横向生态补偿中，补偿方和受偿方往往对彼此的责权利有明确规定。一般来说，若双方事先做好书面协定，补偿方需要受偿方提供更多更好的生态服务，并由受偿方为其额外增加的成本进行补偿；因流域上游受偿方生态环境破坏或保护不到位导致下游补偿方所辖范围内出现生态经济损失的，受偿方就应对补偿方赔偿。协定中补偿标准的确定以前文提及的生态经济价值为依据。

补偿方与受偿方的补偿关系并不限于书面协定，应以实际发生的生境改变情况为依据。以非隶属关系的三个行政区域 A、B 和 C 为例，其在流域的区位关系示意如图 1 所示，其中 A 相对位于最上游。A 因生产、生活对流经 A、B、C 三个行政区域的水体造成了污染，需要为其污染水体的行为受到惩罚，相应地 A 与 B 构成补偿方与受偿方。而 B 并未对水体造成污染，若对流经 B 的水体进行改善，C 因 B 改善水体而享受到满足生态要求的环境，则 B 与 C 构成受偿方与补偿方；另一方面，若 B 未改善水体，C 因水生态环境遭到破坏可向 B 提出赔偿，此时 B 与 C 构成补偿方与受偿方。补偿方与受偿方明确后，三个行政区域之间的补偿额度则依据影响水体的生态经济价值计算。

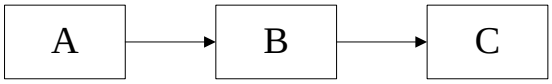


图 1　流域中行政区域示意图

3.4 粤闽汀江-韩江横向生态补偿实例

韩江流域位于广东东部、福建西南部，是广东省除珠江流域以外的第二大流域。流域范围包括广东、福建、江西三省部分区域，流域面积 30112km^2，其中广东省 17851km^2（占 59.3%），福建省 12080km^2（占 40.1%），江西省 181km^2（占 0.6%）。支流汀江总长 323km，流域面积为 11802km^2，是福建流入广东最大河流，与石窟河、梅潭河、象洞溪等其他福建主要河流总水量大约占韩江流域水量的 50%。由于上游养殖等影响，进入广东省域的水质下降为 IV 类和劣 V 类。

广东、福建两省于 2016 年签订了《关于汀江-韩江流域上下游横向生态补偿的协议》，将汀江、梅潭河、石窟河、象洞溪四条由福建来水纳入考核目标，确立了“双向补偿”的原则，相关考核要求如表 3 所示[17]。当上游来水水质达标时，由下游拨付资金补偿上游；当上游来水水质低于标准值时，上游需对下游补偿。补偿总额由双方财政于 2016-2017 每年各出资 1 亿元人民币建立专项基金，根据考核标准进行奖惩。在监测方面，为确保数据客观，水质监测在国家环境监测总站组织下进行。

表 3　汀江-韩江流域横向生态补偿标准

考核跨省（区）断面	考核内容	标准
汀江	年均值水质标准 III 类	达标率 100%，幅度不超过 10%
梅潭河	年均值水质标准 III 类	达标率 100%，幅度不超过 10%
石窟河	年均值水质标准 III 类	2016 年达标率 50%，2017 年 70%
象洞溪	年均值水质标准 V 类	2017 年达标率 70%

4 结语

生态经济价值和生态补偿是近些年的研究热点，本文从流域生态补偿的经济学基础出发，给出了流域生态经济价值的一般表述，以此展开流域横向生态补偿标准研究，探讨了横向生态补偿标准的两种模式。通过生态补偿标准的量化分析，一方面可以使补偿方直观认识到自身因对流域生态环境的破坏行为所应承担的惩罚成本，以避免生态环境进一步恶化；另一方面让受偿方因可见的补偿收益而积极开展生态保护工作。这种量化的补偿标准将 6 种主要生态资源有机联系，有助于生态补偿的有效实践。

参考文献：

[1] 张志强. 流域生态系统补偿机制研究进展[J]. 生态学报，2012，32(20)：6543-6552.

[2] 王昱，丁四保，卢艳丽. 中国区域生态补偿中的补偿标准问题研究[J]. 中国发展，2011，11(6)：1-5.

[3] 吴明红，严耕. 中国省域生态补偿标准确定方法探析[J]. 理论探讨，2013，(2)：105-107.

[4] 中国生态补偿机制与政策研究课题组. 中国生态补偿机制与政策研究[M]. 北京：科学出版社，2007.

[5] 丁四保，王晓云. 我国区域生态补偿的基础理论与体制机制问题探讨[J]. 东北师大学报（哲学社会科学版），2008，(4)：5-10.

[6] 金艳. 多时空尺度的生态补偿量化研究[D]. 杭州：浙江大学，2009.

[7] 李云生，周广金，梁涛，等. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益［J］. 地理研究，2009，28(6)：1656-1664.

[8] 张志强，程莉，尚海洋，等. 流域生态系统补偿机制研究进展［J］. 生态学报，2012，32(20)：6543-6552.

[9] Costanza R，d’Arge R，De Groot R，et al. The value of the world’s ecosystem services and nature[J]. Nature，1997，387(6630)：253-260.

[10] 谢高地. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报，2008，23(5)：911-919.

[11] 肖池伟. 赣江流域生态经济价值与生态补偿研究[J]. 地域研究与开发，2016，35(3)：133-138.

[12] 刘春腊. 基于生态价值当量的中国省域生他补偿额度研究[J]. 资源科学，2014，36(1)：148-155.

[13] 丁四保，王昱著. 区域生态补偿的基础理论与实践问题研究[M]. 北京：科学出版社，2010.

[14] 国家发展改革委国土开发与地区经济研究所课题组. 地区间建立横向生态补偿制度研究[J]. 宏观经济研究，2015(3)：13-23.

[15] 任勇，冯东方，俞海. 中国生态补偿理论与政策框架设计. 北京：中国环境科学出版社，2008.

[16] 王军锋. 基于补偿标准设计的流域生态补偿制度运行机制和补偿模式研究[J]. 环境保护，2017(7)：38-43.

[17] 张捷，傅京燕. 我国流域省际横向生态补偿机制初探——以九州江和汀江-韩江流域为例[J]. 中国环境管理，2016(6)：19-24.

四川省实现高比例可再生能源接入的发展研究

程平凡，曾成碧，苗　虹

（四川大学电气信息学院，四川 成都 610065）

摘　要：四川能源资源禀赋，为解决可再生能源开发产生的弃水弃风弃光的问题，打造四川清洁能源生产基地与优质电能输送枢纽，实现高比例的可再生能源接入，整合水电、风电、光伏发电将是省内以后能源发展战略的重点。本文首先梳理四川省能源发展现状及趋势；针对高比例可再生能源的接入，提出新的电网规划方法，并给出规划模型以及系统经济特性分析模型，为工程实践提供参考；结合四川现有的能源结构，总结省内高比例可再生能源接入的发展战略，探讨发展战略的技术支撑，同时给出相关的政策建议。

关键词：四川省；高比例；可再生能源；发展战略

1 引言

能源是现代工业的基础，没有能源与能源技术支撑，所有的现代物质文明都无法存在。伴随着经济的发展，传统化石能源的开发利用导致环境恶化、气候变暖、资源紧张等突出问题。以风能、太阳能为代表的可再生能源在能源消费总量中逐步提高，成为清洁、环保、优质的新选择[1-3]。四川省水电资源丰富，是我国重要的电力外送基地。此外，2018 年四川省能源工作会议披露，风电、光伏的装机容量将稳步提升，年内装机规模达到 5.1×10^6 kW。因而整合省内各类可再生能源，优化水、风、光等可再生能源的开发时序和规模，提高四川省的可再生能源使用占比具有重要意义。

因可再生能源具有间歇性的特点，对电力系统的调峰调频能力提出更高要求[4-5]。常规能源、抽水蓄能、储能系统启动次数更为频繁，影响其经济寿命[6-8]。高比例的可再生能源接入电网，将对电力系统的规划设计、调度运行、保护控制、运行维护等方面产生新的挑战[9-12]。四川是水电资源大省，同时也有着丰富的可再生资源，这样的资源禀赋决定了其作为我国清洁能源生产端的定位。要实现省内高比例的可再生能源生产消费占比，就需充分地利用多能源间的互补特性和发掘设备的潜能，着力解决强不均衡性、不确定性及波动性下多元能源间优化协调运行问题[13-15]，以最大限度消纳可再生能源，提高电能质量，同时保证电网安全运行，打造高品质的能源输送枢纽。

全球能源技术的发展，对我国来说既是严峻挑战也是重大机遇。四川省的可再生能源分布特点与我国相似，通过研究提高省内可再生能源接入的比例，也可以为全国可再生能源发电与并网提供一定参考。本文将根据四川省现有能源结构组成，分析四川省发展可再生能源的重要性和必要性。通过建立交直流混联智能电网的电力规划和生产模型，进行四川省高比例可再生能源发展的途径研究，最后提出促进相关产业发展的政策建议，为四川打造为全国能源转型升级的示范基地提供技术保障。

2 四川省能源发展现状及趋势

2.1 四川省能源消费构成

根据已公布的相关资料[16]，四川省在 2016 年的能源消费总量为 16688.7 万 t 标准煤。其中煤品燃料消费量 6946.5 万 t 标准煤，与 2015 年相比，占能源消费比重下降 3.6%，减少消费 592.8 万 t，可以减少排放二氧化碳 1576.9 万 t 和二氧化硫 4.1 万 t。油品燃料消费量 4515.8 万 t 标准煤，占比为 27.1%，与上年相比增幅减小。天然气消费量 2414.9 万 t 标准煤，比 2015 年增长 6.2%，占比提高 0.9 个百分点，净增 140.9 万 t 标准煤。2016 年以水电为主的一次电力消费为 5271.7 万 t 标准煤，比 2015 年增长 7.4%，占比提高 2.0 个百分点。总体来说，2016 年四川省非化石能源消费占一次能源消费比重达到 35.4%，高于 13.3%的全国平均水平。

在电力生产方面，目前四川的水电装机容量达到 7564 万 kW，居全国第一。水电、风电、光伏

发电等清洁能源发电量占比高达 88%，2017 年的外送电量达 1389.52 亿 kW • h，相当于节约 5000 多万 t 标准煤。

总体来看，四川省的煤品消费无论是从总量还是所占比重已经三年内持续下降，除水电外的可再生能源利用不断提高，已经成为我国重要的清洁能源基地。

2.2 四川省能源发展趋势

立足于建成全国优质清洁能源基地和国家清洁能源示范省，四川省将构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

水电仍然是主要的开发资源。根据规划，全省 2020 年水电总装机容量预计将达到 8301 万 kW。四川盆地还具有丰富的天然气和页岩气资源，天然气总资源量 7.2 万亿 m^3，累计探明储量 3 万亿 m^3；页岩气资源量 27.5 万亿 m^3，可开采量 4.42 万亿 m^3。可以通过发展天然气分布式能源、扩大 CNG 汽车等方式来促进产业发展。为优化省内的能源结构，四川省将有序布局风电、太阳能发电、生物质能的开发。预计 2020 年，全省将建成 600 万 kW 的并网风电。在光照资源丰富的川西地区，将建成太阳能发电 453 万 kW。生物质能发电也将投产超过 50 万 kW。充分利用各种资源互补优势，提高可再生能源的利用占比。

作为电力外送大省，加快输送网络的建设，可以有效地减少弃水、弃风等现象。四川电网与外区电网已形成“四直四交”的联网格局，但仍不满足现有需要。在未来的发展中，完善优化电力新通道将是重点。

3 高比例可再生能源接入电网设想

3.1 电力规划方法

针对高比例可再生能源接入、交直流混联的新型电网模式，需转变传统的根据电力需求预测来优化电源配置的规划方法。新的电力规划将从广区域、多资源、变时序出发，考虑电源的波动性和随机性特征，统一布局多区域的电源，优化跨区域的电力输送通道。

新的规划方法中，需优化的变量是调峰调频电厂的配置以及未来电网扩展的预留空间；各区域的电力需求、可再生能源利用规模、电网供电的经济特性等可作为限制条件；最终的输出结果为各分区域电力生产布局、能源利用结构占比、电网运行成本、长远规划方案等。具体的电力规划方法可以用图 1 表示。

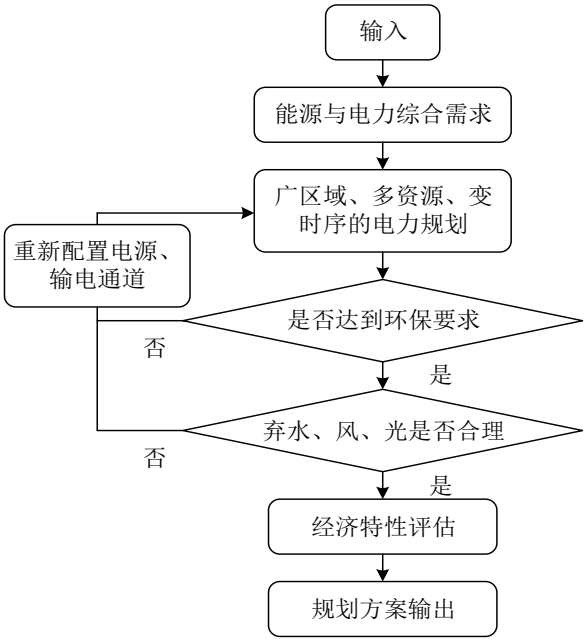


图 1 高比例可再生能源接入的电力规划方法

3.2 规划模型分析

以“清洁低碳、安全高效”为目标，电力规划应具有最优的经济特性。供电成本可以分为机组能耗成本、外送电力成本以及电网损耗三部分，以供电成本最低的目标函数可以写为：

$$P=\min\sum\Big[C_{r,t}T_{r,t}P_c\left(1+\gamma\right)^{-y_i}+C_{k,t}T_{k,t}P_k\left(1+\gamma\right)^{-y_i}+P_L\left(1+\gamma\right)^{-y_i}\Big] \tag{1}$$

式（1）中，r 为电源所属区域；t 为电源类型；$C_{r,t}$ 表示各区域电源的发电容量；$T_{r,t}$ 则表示电源的利用时间；P_c 为单位发电成本；γ 为折现率；y_i 表示与规划初期的时间距离；$C_{k,t}$ 表示各区域外送电力通道的容量；$T_{k,t}$ 则表示外送通道的利用时间；P_k 为单位电力外送成本；P_L 为单位电网损耗成本。

约束条件主要有：

（1）发电资源约束

$$R_{L,r}+R_{I,r}+R_{E,r}\geq R_{C,r}+R_{W,r}+R_{R,r} \tag{2}$$

式（2）中，$R_{L,r}$ 为本地发电资源；$R_{I,r}$ 为外地调入本地的发电资源；$R_{E,r}$ 为本地调出的发电资源；$R_{C,r}$、$R_{W,r}$、$R_{R,r}$ 分别是发电所需使用的燃料资源、水力资源和可再生资源。

（2）可再生能源约束

四川省着力打造清洁能源外送基地，高效利用可再生能源，将不断提高可再生能源发电占比。由 30%上升到 60%以上。

（3）环境保护约束

$$\sum V_{r,t}\leq E_{\text{total}} \tag{3}$$

上式中，$\Sigma V_{r,t}$ 表示不同区域、不同类型的电源所排放污染物的总量，主要包括 CO_2、SO_2 和 NO_x 等气体；E_{total} 则是所允许的排放总量。

3.3 经济特性分析

经济特性分析以上以小节所规划方案为研究对象，要求系统运行成本在规划期内最小。目标函数为：

$$P=\sum\left(P_{F,r,t}+P_{B,r,t}+P_{M,r,t}+P_{D,r,t}\right) \tag{4}$$

式（4）中，r 为电源所属区域；t 为电源类型；$P_{F,r,t}$、$P_{B,r,t}$、$P_{M,r,t}$、$P_{D,r,t}$ 分别是燃料费用、电网停电损失、电网维护费用、设备折旧费。

约束条件有：

（1）电力平衡约束

$$P_L+P_S=\sum P_{r,t}+P_{I,r}+P_{E,r} \tag{5}$$

在电力平衡约束公式中，P_L 为负荷功率；P_S 为备用功率；$\Sigma P_{r,t}$ 为各个区域不用类型电源所发功率；$P_{I,r}$、$P_{E,r}$ 则是区域所受功率和外送功率。

（2）电能传输通道约束

$$P_{T\min}\leq P_{I,r}+P_{E,r}\leq P_{T\max} \tag{6}$$

式（6）中，$P_{T\min}$ 和 $P_{T\max}$ 分别为电能传输通道的上下限值。

（3）旋转备用约束

$$\sum R_{r,t,T}^{\text{up}}\geq P_{R,T}^{\text{up}} \tag{7}$$

$$\sum R_{r,t,T}^{\text{down}} \geq P_{R,T}^{\text{down}} \tag{8}$$

以上两式中，r 为电源所属区域；t 为电源类型；上标 up 表示上调旋转备用；down 表示下调旋转备用；$R_{r,t,T}$ 为 T 时刻电源的旋转备用；$P_{R,T}$ 表示 T 时刻系统所需的备用。

（4）机组运行约束

$$P_{r,t,i} + P_{R,T,i}^{\text{up}} \leq P_{i\max} \tag{9}$$

$$P_{r,t,i} - P_{R,T,i}^{\text{down}} \geq P_{i\min} \tag{10}$$

$$\left| P_{i,T} - P_{i,T-1} \right| \leq \Delta P_i \tag{11}$$

以上各式中，r 为电源所属区域；t 为电源类型；up 表示上调旋转备用；down 表示下调旋转备用；$P_{r,t,i}$ 则是第 i 台机组的发电量；$P_{R,T,i}$ 为第 i 台机组的旋转备用；$P_{i\max}$ 和 $P_{i\min}$ 分别是第 i 台机组发电量上限和下限；$P_{i,T}$ 表示第 i 台机组在 T 时刻的发电量；ΔP_i 即是机组 i 在单位时间内负荷变化允许的最大值。

（5）电网安全约束

$$-P_{l,\max} \leq \sum S_{k,l} p_{k,l} \leq P_{l,\max} \tag{12}$$

式（12）中，$P_{l,\max}$ 表示支路 l 的最大潮流功率；$S_{k,l}$ 为节点 k 注入功率对支路 k 潮流的灵敏系数；$p_{k,l}$ 为节点 k 注入支路 l 的净功率。

4 高比例可再生能源接入的发展战略

4.1 总体发展战略规划

要想实现高比例可再生能源的发展，需规模化利用水电、风电、光电等新能源，综合考虑分布式电源、储能装置、抽水蓄能水电站的地理布局，协调电网与负荷的发展，逐步利用电能替代煤炭、石油的使用，完善绿色、低碳、高效的电能结构。

根据国家、四川省的相关发展战略，四川省的能源发展可分为三个阶段。2020 年前是实现能源体系转型攻坚的关键期；2030 年前是实现能源体系转型的攻坚期；2050 年前则是能源体系的转型期。结合现有发电、储能、新能源汽车等技术，不同时期的发展重点可以用下图表示。

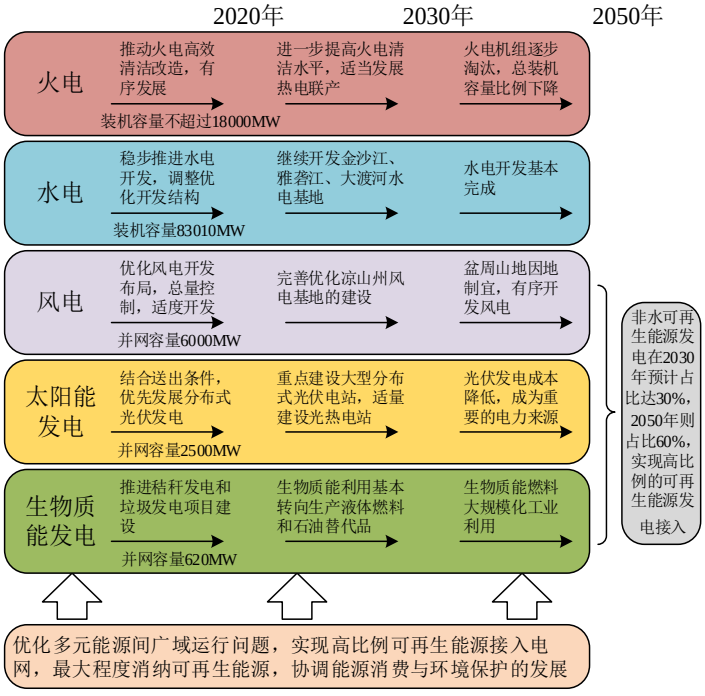


图 2 四川省高比例再生能源接入的发展战略

图 2 所示的发展战略侧重于电源方面，而扩展电力通道、建设能源互联网、设立储能系统、推广新能源汽车也是发展战略的重要部分。

要想保障电力资源的合理调用，必须建立安全可靠、智能经济的输配电网。加强建设能源输送通道和互联网，可以让四川省的可再生能源参与全国能源消费的一次平衡，从广域空间中消纳清洁电力。

目前四川省内仅有寸塘口一座投产的抽水蓄能电站，装机容量为 0.2 万 kW，远远达不到配置电力总装机容量 4%~7%的要求。随着风电、光伏发电机组容量的不断提高，储能电站的容量还应增加。加快建设抽水蓄能电站，是未来实现高比例可再生能源接入电网必不可少的一环。

推广新能源汽车，一方面要完善充电桩等基础配套设施，另一方面可以采取政府补贴等手段，激发居民的购买欲。利用新能源汽车不仅实现电能替代，清洁环保，还能对电网产生“削峰填谷”的积极作用，减小电网的调度调峰压力，最大程度利用可再生新能源。

4.2 具体发展措施

为实现高比例可再生能源接入电网，相关部门可以从以下几方面进行积极引导：

（1）突出以可再生能源为中心的发展目标。可预见的是，目前占四川发电量绝大部分的水电资源，将在 2030 年前后基本开发完毕。政府需制定可再生能源不同阶段的发展计划和目标，来满足不断增长的电能需求。还可以通过行政和市场等手段，鼓励对可再生能源的投资、研发、生产等，提高可再生能源的利用水平。

（2）完善优化电力网络和外送通道的建设。高比例可再生能源的接入，不确定性必然对电网运行特性影响更加突出。电网规划时，需将风电场、光伏电站等纳入考虑，优化配置接入点和汇集点。同时加强四川电网与省外电网的通道建设，利用从广区域的可再生能源消纳。

（3）创新突破新型能源技术。未来四川省不仅要实现高比例的可再生能源接入，还要能够供应价格低廉的电力。加强可再生能源发电关键技术的研发，继续降低风电、光伏的发电成本。微型化生物质能发电技术，使其能广泛应用于偏远地区的分布式发电。改进优化关键设备，如并网逆变器、大容量储能电池等，进一步降低电网运行成本。

（4）积极探索建立电力市场。四川作为重要的电力外送基地，在满足省内需求后，富余的电力可以进行现货交易。先期可以进行跨区域间可再生能源增量现货交易的试点工作，初步探索可再生能源上网电价调整机制，最终完善电力市场的建设，激发市场活力，提升可再生能源接入比例。

（5）加快能源领域的立法进程。四川省可再生能源的发展成果有目共睹，但仍有弃水弃风弃光、补贴不到位等现象。进一步深化电力市场的改革、优化可再生能源调度方法、促进可再生能源的发展就需要配套文件法规，应用法律手段，切实解决不同能源之间的优先之争，科学引导四川省内能源结构的积极转变。

5 关键技术支撑

在未来的发展中，电能在居民能源消费的比例将进一步显著增加。除现有已经规模化应用的风电、光伏发电等技术，以智能电网、储能技术为代表的新型电力技术[17]将成为未来高比例可再生能源接入利用的技术支撑。

5.1 智能电网技术

智能电网技术包括智能电网标准体系、智能输变电技术、智能配用电技术、智能调度技术。智能电网可以灵活接纳分布式电源，实现自愈控制和互动化，为用户提供高效的电力增值服务。传统的电网运行一般对负荷不加以控制，出现紧急情况则采用切负荷的方法，来保证电网发电与负荷的功率平衡。而高效的智能电网通过通信系统、计算机网络、传感器等基础设施，为高比例可再生能源提供平台，为负荷中心提供合适的应急电力，能够防止因自然环境或者人为原因造成大电网停电事故。

目前我国电网各个环节的信息共享程度较低，综合利用效能未能充分发挥。未来智能电网的发展，以信息化、自动化技术为基础，集成新工艺、新材料、新设备，可靠地满足发电、输电、供电提出的各种变化要求。

5.2 交直流混联电网技术

在交直流混联电网中，交流和直流互为支撑。目前我国的电网已经形成特高压交直流混联的格局，具有“强直弱交”的特点，即是大区域之间的电网联络采用高压直流方式，区域内部则使用交流方式。相较于交流输电技术，长距离输电采用高压直流具有传输容量大、损耗小等优点。我国已建成投入运行的高压直流线路达到 20 余条。

随着可再生能源利用率不断提高，越来越多的分布式发电系统接入系统，小区域内采用交直流混联微电网则具有广阔的应用前景。混联微电网相较于单一形式的微电网，可以减少各类功率变换器的数量，抑制谐波产生，具有更好的延展性，是未来微电网的发展趋势。

交直流混联电网目前已经有规模应用的案例，今后的研究工作将侧重于安全稳定标准的制定、电网大扰动的分析等方面。混联微电网方面，其拓扑结构、容量配置、性能评估、运行控制、保护和能量管理等方面也仍需积极探索。

5.3 电能大规模储能技术

引入大规模储能环节到电力系统中，可以提高电能供需管理的效率、利用系统的安全稳定运行、有效利用设备资源、扩大可再生能源接入的规模。电能大规模储能技术的发展和应用必将给未来电网带来革命性的变革[18-19]。

目前大规模储能技术相对成熟、已投入实际应用的只有抽水蓄能技术，并且其受到地理位置的制约。为实现高比例可再生能源接入，需进一步突破电池储能的规模化集成技术。大容量、快速、高效、低成本、绿色环保将是未来的储能装置的发展趋势。随着成本的下降，电池储能将成为未来储能主流，压缩空气和飞轮等其他储能可作为辅助。大规模储能技术可应用于调峰填谷、平抑可再生能源的间歇性和波动性等。

6 未来可用技术展望

6.1 超导电力技术

超到电力技术是基于超导体零电阻和完全抗磁体的基本属性，与现代电力技术紧密结合而形成的新兴技术。超导电力技术构建超导输电线、变压器、储能装置等电力设备，实践于电网发、输、配等各个环节[20-21]。采用超导技术，可以增加发电机的单机容量，满足日益增长的能源需求。应用于以特高压电网为骨干的能源互联网，则可以提高输送容量，降低网损，提高系统运行的灵活性、可靠性、安全性，增加能源利用效率，为超大规模的智能电网建设提供技术支撑。

目前超导技术整体处于研究、试验的阶段。未来超导技术的发展主要集中于新型超导材料的研究、运行温度的提高，以减少设备投入和运行成本。此外，实现超导体高载流复合化、装置集约化也是重点研究方向。

6.2 二氧化碳捕集与封存技术

二氧化碳捕集与封存技术（Carbon Capture and Storage, CCS），是一项新兴的、具有较强减少碳排放能力的技术。CCS 技术被认为是控制温室气体的重要技术，是应对全球变暖的有效措施[22]。在电力系统中应用 CCS 技术，需与大型高效电站结合，才能产生显著的经济效益。

当前常用的二氧化碳捕集技术可分成三类[23]：燃后捕集技术、燃前捕集技术和富氧燃烧技术。我国已经建成多个燃煤电厂燃后捕集示范项目，燃前捕集技术的代表项目则为整体煤气化联合循环系统（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC），以后的研究重点将集中于富氧燃烧技术，主要是降低制氧设备的成本。二氧化碳封存技术则多利用地下深层盐水层、废弃的油田以及不可开采

的煤层等。部分小型示范项目[24]表明，封存二氧化碳可以提高煤层甲烷的开采量。

5.3 新一代人工智能技术

未来不仅有高比例可再生能源接入电网，可预见也将存在大规模的新能源汽车接入，电网将具有更复杂的结构，其不确定性、非线性、强耦合性等特征更为突出。因此新一代人工智能技术凭借先进的传感技术和计算机技术[25]，转变传统的计算分析方法，成为解决复杂电力系统问题的有效手段。

基于大数据特征分析，人工智能技术可以解决传统分析方法无法精确建模、计算时间长等困难。人机辅助决策也可以更好地对电网实现自动实时控制。新一代人工智能技术可以应用到电网规划、电力调度、电力市场交易等领域。未来人工智能将会更多地渗入电力系统。

7 结语

能源是现代工业的基础，能源的发展关系到国家的战略安全。目前我国能源对外依存度上升快速，只有优化国内国能能源结构，才能保证自身的能源安全，实现可持续发展。四川省内自然资源禀赋，是我国重要的电力外送基地。提高省内可再生能源发电的比例，一方面需要科学技术支撑，另一方面还需完善相关政策制度。通过技术创新，降低可再生能源发电、储能等环节的成本；出台能源法律体系，构建基于市场的可再生能源电能供求机制和交易体系。两个方面并举，双管齐下，四川省实现60%~80%高比例可再生能源接入是完全可行的。

参考文献：

[1] 王耀华, 焦冰琦, 张富强, 等. 计及高比例可再生能源运行特性的中长期电力发展分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21):9-16.

[2] 王蓓蓓, 赵盛楠, 刘小聪, 等. 面向可再生能源消纳的智能用电关键技术分析与思考[J]. 电网技术, 2016, 40(12):3894-3903.

[3] Z. Ma, A. Pesaran, V. Gevorgian, et al. Energy storage, renewable power generation, and the grid: NREL capabilities help to develop and test energy-storage technologies[J]. in IEEE Electrification Magazine, vol. 3, no. 3, pp. 30-40, Sept. 2015.

[4] 徐熙林, 宋依群, 姚良忠, 等. 高比例可再生能源受端区域电网调峰的出力网际分配[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(08):43-51.

[5] G. Wen, G. Hu, J. Hu, et al. Frequency regulation of source-grid-load systems: a compound control strategy[J]. in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 12, no. 1, pp. 69-78, Feb. 2016.

[6] 金晶岚. 燃煤机组参与深度调峰消纳可再生能源的可行性分析[D]. 华北电力大学(北京), 2017.

[7] T. Meng, M. Qian, D. Zhao, et al. Peak regulation strategy of regional power systems for large-scale renewable generation accommodation[C]. 2018 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), Beijing, 2018, pp. 99-104.

[8] Q. Chen, T. Littler, J. Wenling, et al. Offshore wind power impact on peak load regulation of power systems[C]. 2014 IEEE PES General Meeting Conference & Exposition, National Harbor, MD, 2014, pp. 1-5.

[9] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 147-158.

[10] J. Yi, P. F. Lyons, P. J. Davison, et al. Robust scheduling scheme for energy storage to facilitate high penetration of renewables[J]. in IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 7, no. 2, pp. 797-807, April 2016.

[11] S. Wei, Y. Zhou, Y. Huang. Synchronous motor-generator pair to enhance small signal and transient stability of power system with high penetration of renewable energy[J]. in IEEE Access, vol. 5, pp. 11505-11512, 2017.

[12] B. Kroposki, B. Johnson, Y Zhang, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy[J]. in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 61-73, March-April 2017.
[13] 崔德民, 赵海兵, 方燕琼, 等. 考虑就地消纳与外送相协调的可再生能源生产模拟[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16):112-118.
[14] Y. Li, L. Wei, Y. Chi, et al. Study on the key factors of regional power grid renewable energy accommodating capability[C]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, 2016, pp. 790-794.
[15] B. O. Ngoko, H. Sugihara, T. Funaki. A short-term dynamic thermal rating for accommodating increased fluctuations in conductor current due to intermittent renewable energy[C]. 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Xi'an, 2016, pp. 141-145.
[16] 四川省统计局. 2017 年四川统计年鉴[J]. 北京:中国统计出版社.
[17] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(07): 1893-1904+2205.
[18] 林海雪. 现代储能技术应用概况及展望[J]. 电源学报, 2015, 13(05): 34-40+47.
[19] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications[J]. Proceedings of the IEEE, vol. 102, no. 6, pp. 1014-1030, June 2014.
[20] H. Maeda, Y. Yanagisawa. Recent developments in high-temperature superconducting magnet technology (Review)[J]. Applied Superconductivity, vol. 24, no. 3, pp. 1-12, June 2014, Art no. 4602412.
[21] G. Angeli, M. Bocchi, M. Ascade, et al. Development of superconducting devices for power grids in Italy: update about the SFCL project and launching of the research activity on HTS cables[J]. Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, pp. 1-6, June 2017, Art no. 5600406.
[22] L. Ruieneanu. The potential of carbon capture and storage as a tool for the integration of RES[C]. 2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, Craiova, 2014, pp. 1-4.
[23] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(07): 61-67.
[24] 叶云云, 廖海燕, 王鹏, 等. 我国燃煤发电 CCS/CCUS 技术发展方向及发展路线图研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(03): 80-89.
[25] 戴彦, 王刘旺, 李媛, 等.新一代人工智能在智能电网中的应用研究综述[J]. 电力建设, 2018, 39(10): 1-11.

湖北省输变电工程水土流失特征研究

蔡萱[1]，石剑波，张莹[1]，王秋霞[2]，张歆[2]，赵俊华[2]，李依潺[2]

（1.国网湖北省电力有限公司电力科学研究院，湖北 武汉 430071；
2. 长江水利委员会长江流域水土保持监测中心站，湖北 武汉 430071）

摘 要：为摸清输变电工程水土流失特点和环境影响因素，便于开展输变电工程水土保持工作，有效防治水土流失。本文以湖北省近年输变电工程为研究对象，通过查阅相关期刊论文、规划报告、监测报告和水土保持方案等资料建立基础数据库，系统分析输变电工程水土流失防治责任范围变化情况和水土流失特点。结果表明：输变电工程实际水土流失防治责任范围相比方案报告书阶段均减少；各输变电类项目水土流失防治责任范围变化率在 18.50%～36.59%之间，平均变化率为 26.06%；输变电类项目扰动后土壤侵蚀模数均较高，侵蚀级别均在中度及以上；各项目分区中，站区和塔基区占总水土流失量的比例较高，每年平均土壤流失厚度达 3.86 mm；类比四川省和江苏省同类输变电工程，在地形地貌较复杂的条件下湖北省输变电类工程各项目分区侵蚀模数相对较小。该研究对于输变电主体工程施工组织设计具有一定的参考价值。为今后的水土流失防治和水土保持监测提供理论依据。

关键词：水土保持；输变电工程；水土流失防治责任范围；项目分区；土壤侵蚀模数

近年来诸多高电压等级电网的建设呈现急速发展的态势。而输变电站工程建设的同时，也在一定程度上扰动地表，破坏植被，加快水土流失速率[1-2]。与公路、铁路、管道等线型建设项目不同，输变电项目工程具有投资时间长、建设周期长、技术要求高、不可控因素多、总体水土流失强度较小、局部点状水土流失强烈的特点[3-5]。其产生的大量散点状塔基站场和放线状施工便道对项目区周边生态环境造成了极大破坏[6]。

输变电类项目水土流失特点的研究较多，张贞等以康定 500kV 输变站工程为例，阐述了输变电站工程水土流失成因和特点[7]；杨文姬等从华北地区实际情况出发提出输变电工程建设中水土流失特点及配套防治措施[8]；彭瑶等对江苏省典型输变电类开发建设项目进行系统分析，得出影响输变电类项目水土流失的主要环境因素，明确了该类项目水土流失防治分区与水土流失分布情况[9]；史小栋等以四川省 500kV 输变电工程为例，比较得出建设施工期和运行期水土流失防治责任范围面积分别占方案报告书的 50%~70%和 30%~50%[10-11]；孙中峰、蔡建勤等以山西省为例探讨了黄土区输变电线路工程水土流失特点，认为黄土区施工道路水土流失量占总体流失量的 40%-70%[12]。目前，大多数研究均侧重于水土流失量的差异比较，未能全面考虑水土流失强度的不均衡性和环境影响因素，更没能反映出区域水土流失特点[13-16]。因此，分析不同项目分区水土流失强度，对于揭示输变电类工程水土流失特点具有重要的理论和实践意义。本文以湖北省近年典型输变电类工程为研究对象，查阅相关期刊论文、规划调查报告、水土保持监测报告，收集水土保持项目分区、水土流失量、时间等数据。通过统计分析明确湖北省输变电类工程各项目分区水土流失特点。

1 研究区概况

按全国土壤侵蚀类型区的划分，湖北位于西南紫色土区和南方红壤区，各地区地质、地形、土壤、植被类型等自然条件差异极大，土壤侵蚀类型极为复杂。湖北省土壤侵蚀的类型以水力侵蚀为主，主要有面蚀和沟蚀。根据湖北省 2015 年水土流失遥感调查成果，湖北省共有土壤侵蚀面积 35517.50km²，占全省总面积的 19.10%。其中轻度 18542.00km²，占总侵蚀面积的 52.21%；中度 12327.27km²，占总侵蚀面积的 34.71%，强烈 3185.95km²，占总侵蚀面积的 8.97%；极强烈 1149.64km²，占总侵蚀面积的 3.24%，剧烈 312.64km²，占总侵蚀面积的 0.88%。

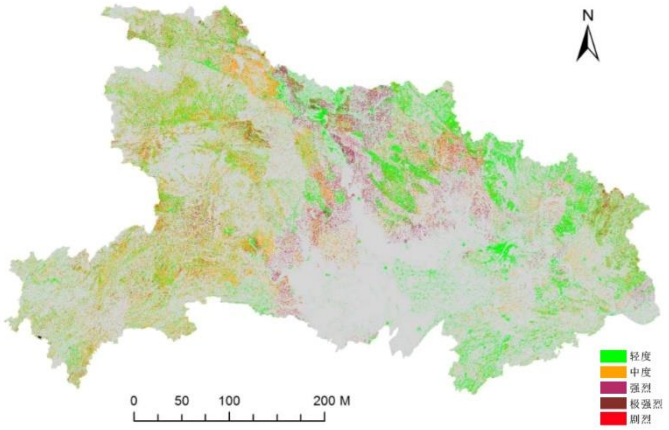


图 1　湖北省土壤侵蚀强度图

2 结果和讨论

2.1 输变电工程各项目分区水土流失防治责任范围变化率

水土流失防治责任范围是指生产建设单位和个人对其开发建设行为可能造成水土流失且必须采取有效措施进行预防和治理的范围。其大小直接关系到建设单位责任区的范围和投资大小[17-19]。工程施工过程中，随着项目进展的不断深入，因实际占压、扰动范围发生变化，水土流失防治责任范围也会发生一定的变化。本文对湖北省近年典型输变电项目相关数据进行统计分析，结果表明：输变电类工程水土流失防治责任范围与批复的方案报告书相比，面积均减小。可能由于方案报告书均在主体可研阶段编制，随着主体工程设计的不断深入，输变电工程线路逐步优化后长度变短，工程主要在建设区范围内进行，基本对方案报告书中划定的直接影响区未造成扰动的原因。也可能由于在工程建设过程中，建设单位的日常检查管理和措施落实较为规范，施工单位做到了文明施工，施工期间各项施工活动严格控制在征地范围内，基本没有对施工区域以外造成水土流失危害的原因，故直接影响区减少，防治责任范围减小。

由实际防治责任范围和方案设计中相关数据得出各输变电类项目水土流失防治责任范围变化率，如表 1。各输变电类项目水土流失防治责任范围变化率在 18.50%~36.59%之间，平均变化率为 26.06%。各工程项目分区中，站外供排水系统的防治责任范围变化率最高，为 46.32%，其次为进站道路和塔基区，而站区变化率最小为 12.58%。这可能由于随着主体工程设计深度深入，在施工过程中站外供排水管线的征地严格控制在红线范围内，对周边的影响较小，而输变电线路长度较可研阶段优化变短，塔基数量减少，塔基永久占地面积减少，防治责任范围面积变化率较大。因此，在今后编制同类水土保持方案报告书时，应综合考虑水土流失防治责任范围的变化率，对各项目分区水土流失防治责任范围进行更合理的估列。

表 1 各项目水土流失防治责任范围变化率

项目名称	站区	进站道路	站外供排水系统	站外施工场地	塔基区	牵张场区	施工便道	总计
广水旭升（陈巷）110kV 输变电工程	2.50%	20.00%	58.54%	3.58%	43.44%	27.00%	5.15%	18.65%
武汉高车 110kV 输变电工程	4.92%	50.72%	58.33%	25.00%	42.86%	28.99%	47.37%	25.55%
恩施白杨坪 110 千伏输变电工程	20.00%	30.56%	35.74%	4.76%	72.76%	41.78%	25.00%	35.16%
宜昌远安旧县 220kV 输变电工程	12.40%	33.33%	57.14%	11.11%	14.24%	6.67%	54.79%	20.77%

项目名称	站区	进站道路	站外供排水系统	站外施工场地	塔基区	牵张场区	施工便道	总计
应城长江埠 220kV 输变电工程	15.50%	74.23%	25.00%	22.58%	39.66%	/	53.13%	27.22%
武汉东西湖径河 220kV 输变电工程	16.00%	40.48%	54.17%	22.22%	29.63%	/	10.00%	36.59%
监北 220kV 输变电工程	16.72%	/	35.29%	/	10.95%	/	/	18.50%
平均	12.58%	41.55%	46.32%	14.88%	36.22%	26.11%	32.57%	26.06%

2.2 输变电工程各项目分区水土流失特征

为更好的反映输变电工程各项目分区水土流失特征，本文对所选样本工程各项目分区水土流失量进行统计分析，如图 2。同一项目分区，各工程水土流失量所占比例差异明显，各项目分区中，站区和塔基区占总水土流失量的比例较高，站区占总水土流失量的 40%以上，水土流失量最多，其次为塔基区。这可能由于在基础开挖、临时堆土和土方回填阶段，施工扰动和破坏面积比较大，站区和塔基区立地条件改变，土体结构被破坏，土壤抗侵蚀能力降低，土壤流失量较大。因此，站区和塔基区在施工前应剥离表土，集中堆放于临时施工区内，并采取临时拦挡和排水等防护措施，施工过程中，应在边坡处布设护坡，坡脚处修建挡墙，坡顶设截水沟，在斜坡上修建排水工程；施工结束后，对施工迹地进行土地整治、覆土后，铺草皮绿化或复垦。

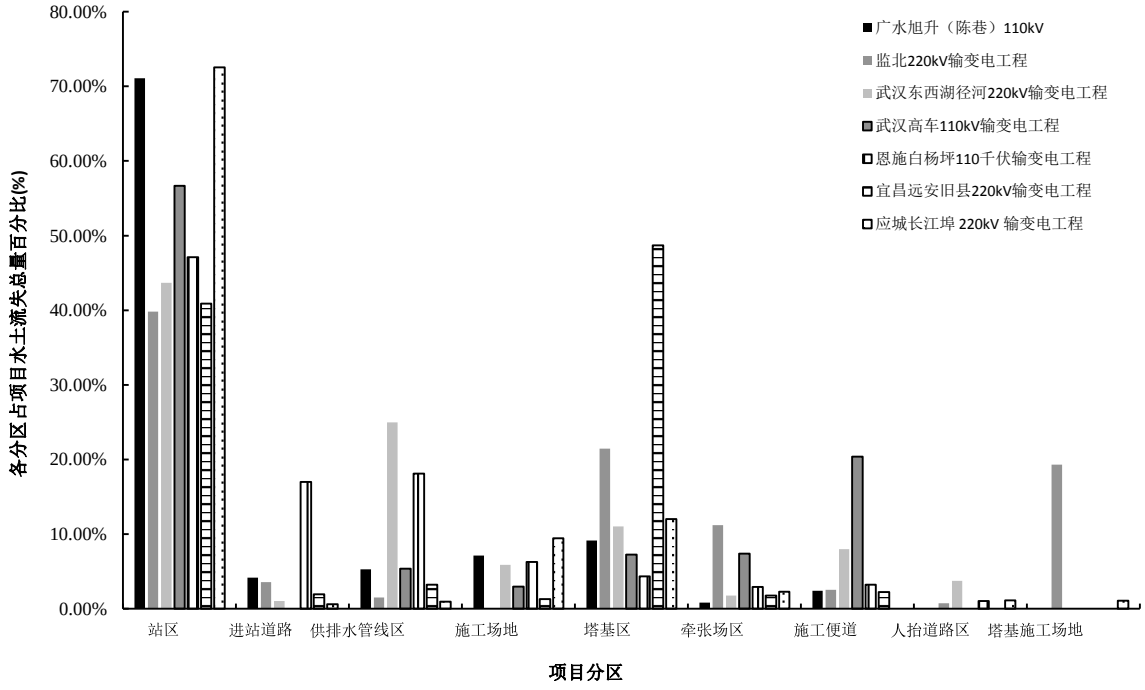


图 2 各项目分区占总流失量的百分比

为更好地反映所选样本项目水土流失强度的不均衡性，本文对样本工程不同项目分区进行土壤侵蚀模数统计，进而反映整个工程不同项目分区的水土流失强度差异，统计结果及强度分级见表 2。输变电类项目扰动后土壤侵蚀模数均较高，侵蚀级别均在中度及以上。侵蚀模数最大的分区为站区和塔基区且显著高于其他分区，每年平均土壤流失厚度达 3.86 mm，侵蚀级别为强烈；扰动后土壤侵蚀模数最小的为施工便道，每年平均土壤流失厚度达 2.14 mm，侵蚀级别为中度。因此，应加强对输变电类工程站区和塔基区水土流失重点监测和防治。

表 2 不同项目分区土壤侵蚀模数及强度分级

项目分区	土壤侵蚀模数/(t/km²·年)			土壤侵蚀强度分级		
	最小值	最大值	平均值	侵蚀模数分级标准/（t/km²年）	平均流失厚度/(mm/年)	侵蚀级别
站区	4543	6243	5292.00a	5000~8000	3.86	强烈侵蚀
塔基区	4615	5984	5186.33a	5000~8000	3.79	强烈侵蚀
站外供排水系统	3485	5267	4196.67b	2500~5000	3.06	中度侵蚀
施工场地	2596	4156	3467.33c	2500~5000	2.53	中度侵蚀
牵张场区	2750	3549	3095.33c	2500~5000	2.26	中度侵蚀
进站道路	1258	4213	3035.33c	2500~5000	2.22	中度侵蚀
施工便道	2680	3598	2927.00c	2500~5000	2.14	中度侵蚀

注：数据采用 Duncan 检验，不同字母代表差异显著(P<0.05)。

2.3 类比同类输变电站项目水土流失特点

输变电线路呈离散型分布，跨越不同土壤侵蚀类型区，其环境影响因素较多，包括降雨、植被覆盖率、地形地貌和地质条件等。综合考虑各环境因素，选取江苏省和四川省同类输变电类工程建立相关数据库，类比分析湖北省、江苏省和四川省同类输变电站工程不同项目分区的水土流失特征和土壤侵蚀强度。三省的影响因素参数值见表 3。四川省、江苏省和湖北省年均降雨量和植被覆盖率差异不显著，在 1000 ~ 1500 mm 之间，江苏省植被覆盖率较低为 26%，四川省最高为 35%，而地形地貌差异较大，四川省以山地丘陵为主，江苏省平原占总面积的 85.7%，湖北省以山地为主，地势起伏较大。

表 3 三省输变电工程水土流失影响因素参数值

省份	地形地貌				年均降雨量/mm	植被覆盖率/%
	山地	丘陵	平原	高原		
江苏省	0.0%	14.3%	85.7%	0.0%	1112a	26.0a
湖北省	56.0%	24.0%	20.0%	0.0%	1200a	32.0a
四川省	74.2%	10.3%	8.2%	7.3%	1200a	35.0a

注：地形地貌数据来源百度百科；年均降雨量数据来源各省气象局网站；植被覆盖率来源林业志。数据采用 Duncan 检验，不同字母代表差异显著(P<0.05)。

三省输变电类工程不同项目分区土壤侵蚀模数见图 3。四川省输变电类工程项目分区中塔基区土壤侵蚀模数最大，其次为施工便道，江苏省输变电类工程项目分区中塔基区和进站道路侵蚀模数最大，而湖北省输变电类工程项目分区中站区和塔基区侵蚀模数最大，三省输变电类工程项目分区中塔基区侵蚀模数均是最高的。因此，要加强塔基区水土流失监测和防护。三省输变电类工程侵蚀模数差异明显，四川省输变电类工程土壤侵蚀模数最大，其次为江苏省，湖北省输变电类土壤侵蚀模数最小。地形地貌较复杂的条件下湖北省输变电类工程各项目分区侵蚀模数相对较小的原因可能是湖北省对输变电类工程水土流失监测和防治的标准和要求较高，水土保持防治措施严格按照了水土保持方案实施。

通过 SPSS18.0 对三省近年输变电工程土壤侵蚀模数与各因素参数进行相关性分析。如表 4。年均降雨量对三省各项目分区的土壤侵蚀模数无显著影响，植被覆盖率与四川省塔基区、江苏和湖北省施工场地土壤侵蚀模数呈显著负相关。山地对输变电工程各项目分区土壤侵蚀模数呈显著正相关，与输变电工程塔基区呈极显著正相关，丘陵对三省各项目分区均呈显著相关。由此可知，地形地貌对输变电各项目分区水土流失的影响较大。

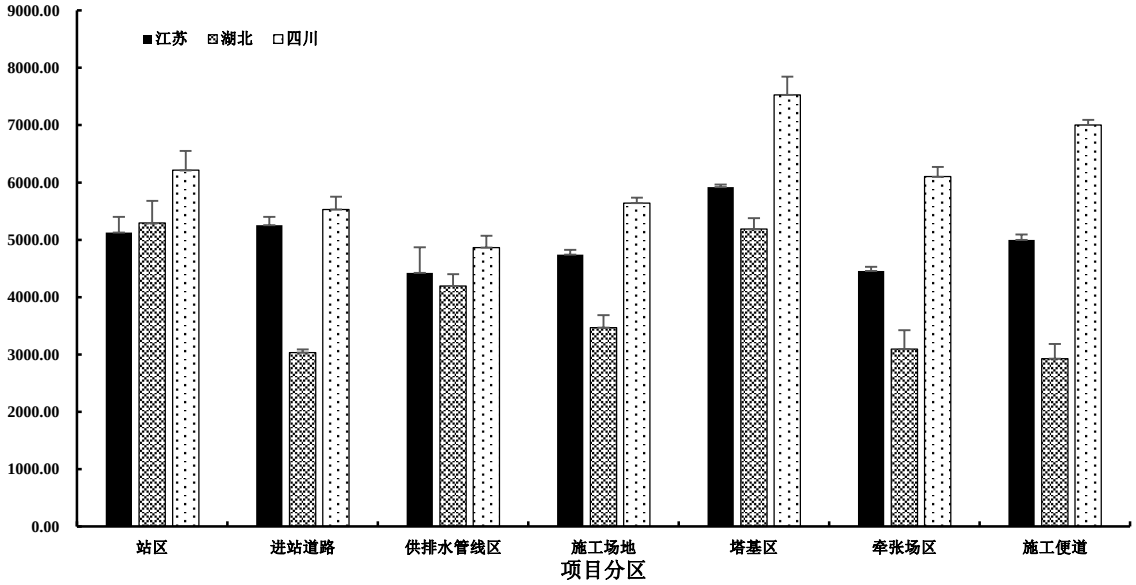


图 3 三省输变电类工程不同项目分区土壤侵蚀模数对比

表 4 输变电工程土壤侵蚀模数与地形地貌的相关性

省份	项目分区	地形地貌/%				年均降雨量/mm	植被覆盖率/%
		山地	丘陵	平原	高原		
四川省	站区	0.905*	0.860*	-0.619	0.620	0.620	-0.880
	进站道路	0.903*	0.871*	-0.655	0.684	0.584	-0.809
	站外供排水系统	0.875*	0.896*	-0.755	0.756	0.446	-0.880
	施工场地	0.825*	0.893*	-0.763	0.641	0.441	-0.884
	塔基区	0.931**	0.893*	-0.757	0.750	0.450	-0.886*
	牵张场区	0.905*	0.820*	-0.531	0.702	0.702	-0.827
	施工便道	0.925*	0.894*	-0.758	0.776	0.446	-0.883
江苏省	站区	/	0.884*	-0.757	/	0.468	-0.805
	进站道路	/	0.883*	-0.781	/	0.436	-0.805
	站外供排水系统	/	0.894*	-0.777	/	0.417	-0.880
	施工场地	/	0.891*	-0.725	/	0.492	-0.889*
	塔基区	/	0.895*	-0.770	/	0.427	-0.881
	牵张场区	/	0.882*	-0.804	/	0.400	-0.801
	施工便道	/	0.881*	-0.811	/	0.387	-0.899*
湖北省	站区	0.921**	0.897*	-0.789	/	0.391	-0.869
	进站道路	0.896*	0.897*	-0.769	/	0.425	-0.876
	站外供排水系统	0.827*	0.895*	-0.787	/	0.398	-0.873
	施工场地	0.843*	0.884*	-0.797	/	0.406	-0.898*
	塔基区	0.928**	0.889*	-0.804	/	0.381	-0.882
	牵张场区	0.913*	0.899*	-0.793	/	0.376	-0.861
	施工便道	0.845*	0.897*	-0.771	/	0.503	-0.874

注：* 在 0.05 水平（双侧）上显著相关；**在 0.01 水平（双侧）上极显著相关。

3 结语

各输变电类项目水土流失防治责任范围平均变化率为 26.06%。站外供排水系统的防治责任范围变化率最高，为 46.32%，其次为进站道路和塔基区，而站区变化率最小为 12.58%。因此，在今后编制同类水土保持方案报告书时，应综合考虑水土流失防治责任范围的变化率，对各项目分区水土流失防治责任范围进行更合理的估列。

湖北省输变电类项目扰动后土壤侵蚀模数均较高，侵蚀级别均在中度及以上。侵蚀模数最大的防治分区为站区和塔基区且显著高于其他分区。今后应加强对输变电类工程站区和塔基区水土流失重点监测和防治。

影响输变电类项目水土流失的环境因素较多。其中，山地丘陵地貌对湖北输变电工程水土流失影响较显著。针对输变电类工程，各省应提高对水土流失监测和防治的标准和要求，水土保持防治措施应严格按照水土保持方案实施。

参考文献：

[1] Jaiswal R K, Mukherjee S, Raju K D, et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2003, 4(1): 1-10.

[2] 贺康宁, 王治国, 赵永军. 开发建设项目水土保持[M]. 中国林业出版社, 2009.

[3] Svenonius E. Discussion on Public Participation in Environmental Impact Assessment of Power Transmission and Transformation Project[J]. North China Electric Power, 2016, 7(9): 232.

[4] Li B J, Niu D X, Lu Y, et al. Analysis of the surplus rate of power transmission and transformation project cost based on grey correlation analysis[C]. International Conference on Electronics. 2016.

[5] 高宝林, 周全. 输变电工程水土保持设施技术评估程序及应注意的问题[J]. 中国水土保持, 2009(10): 13-15.

[6] 田甜. 探讨输变电工程水土保持措施方案设计与实际实施的脱节问题[J]. 广东水利水电, 2011(11): 30-31.

[7] 张贞, 刘国东, 贺亮. 康定500kV输变电工程水土流失防治措施及生态恢复对策[J]. 亚热带水土保持, 2008, 20(2): 60-63.

[8] 陈根土. 山区500kV输电线工程水土保持[J]. 华东水电技术, 1999(4): 39-42.

[9] 杨文姬, 孙中峰, 乔锋, 等. 对华北地区500kV输变电工程水土保持的认识与建议[J]. 中国水土保持科学, 2011, 09(6): 79-82.

[10] 彭瑶, 付丽, 汤建熙, 等. 江苏省输变电类开发建设项目水土流失特点及防治管理措施[J]. 中国水土保持, 2013(2): 5-8.

[11] 史小栋, 尹嫚, 王巧红, 等. 输变电工程在不同阶段的水土流失防治责任范围变化分析——以四川省500kV输变电工程为例[J]. 四川环境, 2013, 32(6): 62-65.

[12] 史小栋, 尹嫚, 朱永刚. 四川省500kV输变电工程水土保持措施研究[J]. 水土保持应用技术, 2013(5): 33-35.

[13] 孙中峰, 蔡建勤, 王愿昌, 等. 山西省输电线路工程水土保持方案相关问题探讨[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 21-24.

[14] 刘登峰, 林靓靓. 南方红壤丘陵区输变电工程水土保持措施[J]. 山西水土保持科技, 2011(1): 40-41.

[15] 吴晓. 湖北省输变电工程水土保持动态监测研究[D]. 华中师范大学, 2011.

[16] 邓泽文, 吴宜进, 张燕. 湖北省山地丘陵区输变电工程水土保持监测实践与分析——以十堰500kv输变电工程为例[J]. 亚热带水土保持, 2010, 22(1): 56-59.

[17] 余超, 王慧觉, 谢明亮. 晋东南-南阳-荆门1000KV特高压输变电工程(湖北段)水土流失监测[J]. 亚热带水土保持, 2009, 21(4): 57-59.

[18] 吴晓, 吴宜进. 湖北省城区输变电工程水土保持监测实践与分析——以武汉戴家湖110kV输变电工程为例[J]. 人民长江, 2011, 42(4): 98-101.

[19] 王晖, 张家其, 吴宜进, 等. 天门220kV侨乡输变电工程水土保持监测实践[J]. 中国水土保持, 2014(9): 62-64.

[20] 隗锋. 孝感庙头220kV输变电工程水土保持监测实践[D]. 华中农业大学, 2016.

[21] 刘卉芳, 徐永年, 陈超, 等. 山区丘陵区输变电工程水土流失特点及防治措施分析[J]. 北京水务, 2009(s2): 21-24.

[22] 许佩瑶, 楚秀杰, 张凡, 等. 华北南部山丘区和平原区某500kV输变电工程水土流失防治措施[J]. 亚热带水土保持, 2012(1): 56-58.

大型水电工程施工期环境监理模式探讨

罗龙海，樊义林，王　玮，刘　欢，陈　洋

（中国三峡建设管理有限公司白鹤滩建设部，四川 成都 610041）

摘　要：水电工程施工周期长、作业面大，工程施工会对生态环境带来重大影响。水电工程施工期引入环境监理对于落实环评及相关批复要求，保护施工区生态环境具有重要作用。本文系统分析了小浪底工程、三峡工程、向家坝工程、白鹤滩工程施工期环境监理模式，详细介绍了各模式的特点，最后指出了大型水电工程环境监理发展趋势及服务方向。

关键词：水电工程；施工期；环境监理模式

环境保护是我国一项重要的基本国策，自上世纪 80 年代以来，我国工程建设项目逐步形成了环境影响评价制度、“三同时”制度和排污许可制度等为主的三项环境管理制度[1]。这种模式注重“事前监督”和“事后验收”，即注重项目环保审批和竣工验收环节。项目施工阶段是薄弱环节，环境保护工作具有明显的“哑铃”特点[2]。为解决水电建设项目带来的一系列环境影响，黄河小浪底工程第一次引入环境监理制度[3-4]；我国水利工程逐步引入项目施工期环境监理，2002 年 12 月，国家环境保护总局会同水利部、交通部、铁道部等部门联合发文明确将青藏铁路格尔木至拉萨段、西气东输等 13 个国家重点项目实行施工期工程环境监理[5]，环境监理制度逐步在全国各大水电建设项目中开展试点，取得了较好的成绩，但各项目环境监理模式存在着差异，环境监理效果也存在不同程度的差异。

1 水电环境监理工作内容

目前，环境监理的工作内容与程序在全国范围内尚未形成一致观点[6]。尹卫萍把环境监理分为环境保护达标监理和环境保护工程监理，环境保护工程监理是对施工期建设和运营期的环境保护工程进行监理[7]；环境保护达标监理则是对主体工程的施工是否符合环保要求进行监理，如废水、废气、噪声的达标排放进行监理。劳佳则认为，环境监理的主要工作内容分为运营期环境监理和施工期环境监理。施工期环境监理主要包括现场污染防治工程设计监理、污染防治工程建设监理、污染防治实施调试监理等方面[8]。

水电项目建设周期长、涉及面广、环保设施多，因此，笔者认为水电项目建设期环境监理分为环境管理监理、环境保护工程设施监理、生态保护工程措施监理、环境保护设施达标监理。环境管理监理即项目开工前、施工中、竣工后环境保护与水体保持行政审批手续报批情况、环境保护管理制度与管理机构的建设、环境风险应急及环境监测管理等方面进行监理。环境保护工程设施监理即对项目施工期间各类环保、水保设施是否按照环评文件及批复要求开展规划、设计、建设、竣工验收等进行监理。生态保护工程措施监理是对项目建设过程中是否严格按照项目环境影响评价文件及批复提出的生态保护及水土保持措施工程等的实施过程进行监理。环境保护设施达标监理即对环境质量达标情况监理，对各类污染防治措施和水土保持措施效果进行监理，通过对照环评执行标准就项目施工过程中排放的大气污染物、水污染物、固体废物、噪声以及水体流水等进行监测、分析，确保各污染物排放达标。根据上述分析，可将水电项目施工区环境监理的工作流程归纳为图 1。

2 大型水电站环境监理模式

2.1 小浪底工程模式

2.1.1 小浪底环境监理工作概况

小浪底工程施工期环境保护工作最早开始 1991 年，与工程建设同步进行。为确保环境保护工作纳入到小浪底工程枢纽建设管理体系中，在施工期枢纽区有效地开展环境保护工作，小浪底工程

建设管理局在 1993 年成立了环境保护管理办公室；1994 年，枢纽工程开工后，小浪底建设管理局立即引入环境监理[9]。

2.1.2 小浪底环境监理工作流程

枢纽施工期环境监理是工程监理的重要工作之一，是项目工程监理的延伸。环境监理的主要工作方式是日常巡查。按照枢纽施工区污染源分布特点，环境监理定期对施工区开展巡查，巡查过程中发现问题，立即以口头的形式通知施工单位环境管理员限期整改，随后以函件等书面的形式予以确认。对需要限期整改的问题，环境监理将按期检查验收，并将检查情况以书面的形式通知施工单位[3]。

小浪底枢纽施工期环境监理采取的方式主要分三种：①日常巡查，必要时自行进行仪器检测，或委托小浪底工程建设检测中心进行监测；②查询访问；③定期召开环境保护例会与环境保护考核等对施工区开展环境监理工作。

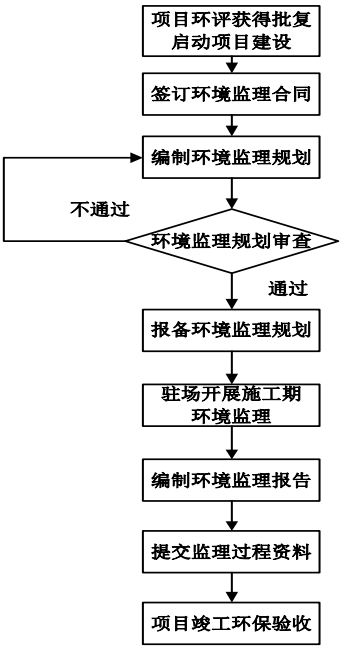


图 1　水电工程施工期环境监理工作流程

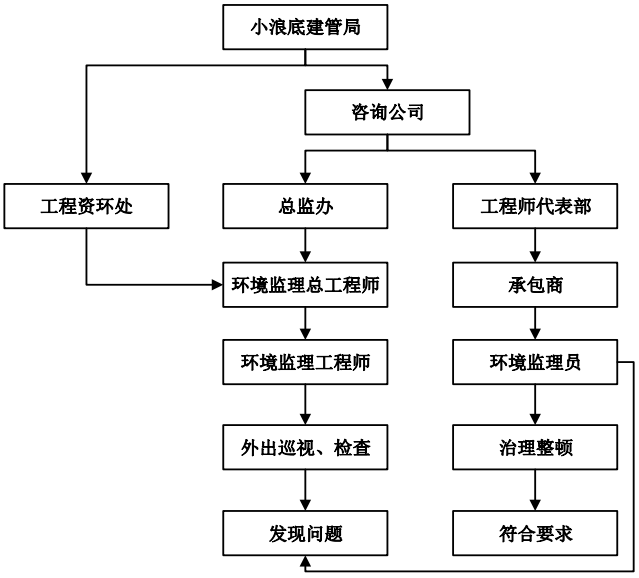


图 2　小浪底工程环境监理工作流程

2.1.3 小浪底环境监理模式

小浪底环境监理模式属于包容式环境监理模式[10]，环境监理是项目工程监理的一部分，但同时又具有一定的独立性。环境监理相对独立的负责监督检查项目参建各方是否按照环境保护等相关规定组织实施施工，在出现违反环境保护等相关规定或出现重大环境问题时报告项目工程监理，由项目总监理工程师签署意见后实施整改。环境监理与施工单位是工作关系，监督其环境保护工作，是联系业主和承包商的纽带，确保施工区环境保护工作顺利进行[11]。

2.2 三峡工程模式

2.2.1 三峡工程环境监理概况

三峡工程施工区的环境保护工作始于 1993 年，同年中国长江三峡集团公司在枢纽区成立了现场环境保护管理部门，负责枢纽区施工期环境保护管理。按照我国水利建设项目环境保护的要求，三峡水利枢纽三期工程于 2005 年开始引入环境监理，三峡集团将众多的环境管理工作交由环境监理实施，实行“一站式”环境监理[12]。

2.2.2 三峡工程环境监理模式

“一站式”环境监理模式属于环境保护管理的范畴，即枢纽施工区的环境保护管理工作、监测工作、监理工作等全部交专业的、有资质的环境监理单位，依托自身在环境监测、环境保护设计、环境影响评价、环境保护规划、竣工环境保护验收等方面的技术优势，安排环境保护管理、环境影响评价、工程监理等多名专业人员进驻施工区现场开展环境监理工作，完成环境监理、监测和管理任务。“一站式”的环境监理模式，环境监理单位拥有完全的建设单位管理职责。三峡工程三期施工区环境保护体系如图 3。

在建设工程量大、施工周期长、环境保护管理工作复杂的水电工程中，“一站式”的环境保护管理不仅能让环境监理单位获得较大的工作空间，充分发挥在环境咨询服务领域积累的专业技术能力；而且能让建设单位减少人力资源和物力投入的同时完成了枢纽施工区复杂的环境保护管理任务。

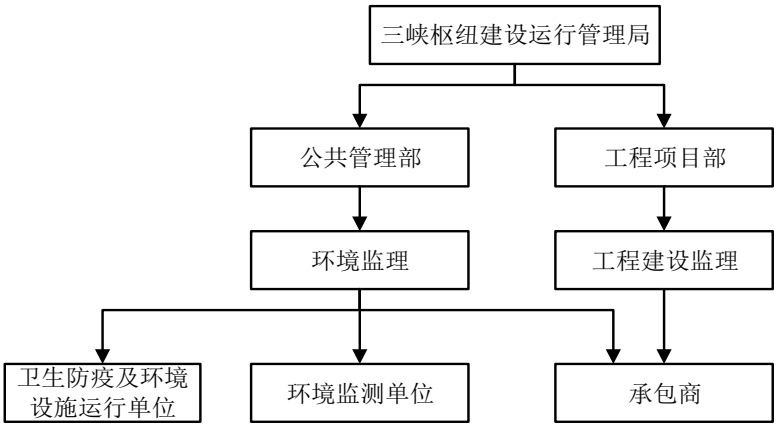


图 3　三峡三期工程施工区环境保护体系

2.3 向家坝工程模式

向家坝水电站实行的是环境保护管理和环境监理相结合的管理模式，属于结合式环境监理模式，设立环境保护管理中心，统一协调施工期环境保护与监理管理工作。环境保护中心不但承担工程建设过程中的环境保护管理和一部分监理内容，而且担负着管理环境监理单位的职责。按照项目所处阶段的特点，采取不同的环境保护管理模式。项目建设期以“环境监理为主，环境管理为辅”；项目建设运行期以“环境管理为主，环境监理为辅”模式。

该模式有弥补了有关环境监理工程师在环境保护问题整改上面执行力不足的问题。在水电行业中，环境问题的处理流程通常为环境监理工程师发现环境保护有关问题后上报建设单位，建设单位认可后，赋予其相应权利后下发书面文件，环境监理提出的整改建议才能得到有效落实，否则，环

境监理工程师只能发现问题而不能解决现场问题。这使环境保护管理工作常常处于非常困难的境地。而向家坝水电站工程由环保保护管理中心代建设单位直接行使环境管理的职责，发现问题即提出相应整改要求。这样做，不仅缩短了发现问题到提出整改方案的时间，还提高了整改执行度[13]。

2.4 白鹤滩工程模式

2.4.1 白鹤滩工程环境监理概况

白鹤滩水电站始终坚持“建好一座电站，改善一片环境”的绿色发展理念，逐步建立了 “五位一体”（即建设——设计——工程监理——环境监理——施工单位）的环保水保管理体系，实现从规划到施工，再到项目竣工环保验收全生命周期环境保护管理，统筹运营期、施工期环境保护全方位管理[14]。白鹤滩水电站现场环境管理体系如图 4。

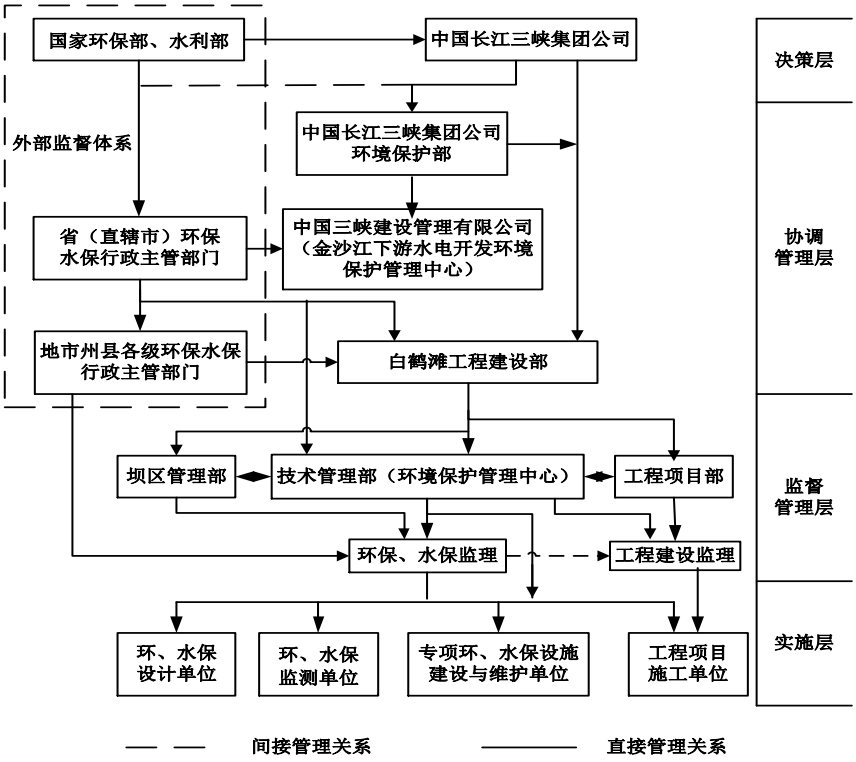


图 4　白鹤滩工程环保水保管理体系图

2012 年 8 月，中国三峡集团引入第三方监理咨询公司中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司开展白鹤滩水电站枢纽区建设期环境监理。

2.4.2 白鹤滩工程环境监理流程

环境监理在设计招标阶段、施工阶段、竣工验收阶段等依据环评报告、水保方案文件及其批复要求分别对设计单位、施工单位、运行管理单位、环境监测单位等进行初步设计和施工图设计、施工组织设计、污染防治、生态保护、社会影响、环境监测等过程进行监理，确保各阶段各参建方行为符合相关标准及法律法规要求，各项环保措施落实到位，生态环境得到有效保护。环境监理流程如图 5。

2.4.3 白鹤滩工程环境监理模式

白鹤滩水电站环境监理属独立式环境监理模式，中南院直接与白鹤滩建设部签订服务合同，环境保护管理与环境监理分开，环境监理工程师独立性得到保证。环境监理独立于设计单位、施工单位、工程建设监理单位开展工作，与建设单位属合同关系，但又相对独立，能对建设单位的行为起到监督作用。

该模式环境监理员环保专业知识、政策法规知识水平较高，对工程环境保护要求和环境问题把握准确，环境监理通过现场巡查将发现的问题通过技术联系单、巡查通报等形式反馈给建设单位，依靠建设单位对施工单位管理实现环境管理目标。由于该模式环境监理更加独立，将现场监理情况以季报、年报的形式上报环境主管部门，可以更加专业地指导工程监理环境保护工作，监督设计单位按照法律法规、环评报告书及批复的要求开展环境保护设计，监督建设单位开展环境保护工作，确保各项环保措施落实到实处。但该模式由于环境监理没直接对施工单位进行管理，没有工程审签权，因此同小浪底对比一定程度上削弱了环境监理对施工单位和工程监理单位的约束力。该模式在建设单位的合理授权范围内行使项目结算审签权，环境监理效果将会是最好。

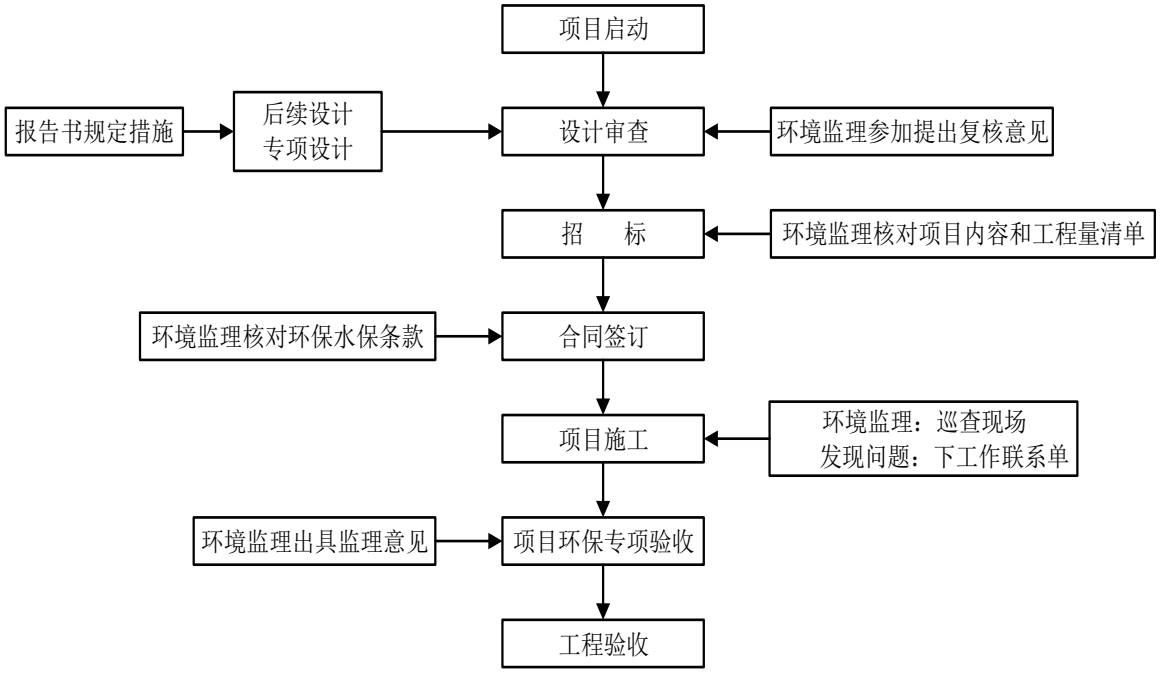


图 5　白鹤滩工程环境监理流程图

3 各环境监理模式特点

对比四种环境监理模式，包容式属于环境监理发展的初级阶段，独立式是环境监理发展的后期阶段，各监理模式具有不同特点，适用不同的项目管理需求。四种环境监理模式特点见表 1。

表 1　四种环境监理模式特点

项目名称	环境监理模式	管理范畴	特点
小浪底工程	包容式	工程监理	直接对施工单位进行监理，对建设单位负责，管理程序和链条少，具有工程结算审签权，对施工单位约束力较强，但环境监理工程师工作接受总监理工程师管理，独立性较难得到保证，不利于环保水保措施的落实。
三峡工程	“一站式”	环境管理	环境管理、环境监测、环境监理均由一家单位承担，管理效率高；监理属于建设单位内设机构，独立难以得到保证，不利于环保水保措施的落实。
向家坝工程	结合式	环境管理	环境管理与环境监理结合，可以减少管理程序，提高效率，但监理与环境管理人员、机构均一致，监理独立性难以保证，不利于环保水保措施的落实，同时监理无工程结算审签权，一定程度削弱对施工单位的约束力。
白鹤滩工程	独立式	环境监理	作为第三方对建设、设计、施工、工程监理、环境监测等单位项目全生命周期监督、监理，独立性得到保证。人员专业，能更好的发挥咨询服务单位的技术力量，项目环境保护与水体保持效果更好；但监理无工程结算审签权，一定程度削弱对施工单位的约束力。

4 环境监理发展趋势

水电工程环境监理模式经历了包容式环境监理模式、“一站式”环境监理模式、结合式环境监理模式、独立式环境监理模式，由不成熟逐渐走向成熟。但由于国内尚无相关法律和技术规范指导环境监理发展，建设项目环境监理呈现出行业和区域差别，在工作深度和工作范围也存在不同程度的差异。2016 年 4 月 7 日，环境保护部印发《关于废止<关于进一步推进建设项目环境监理试点工作的通知>的通知》正式废止试点 5 年的建设项目环境监理工作，标志着全国推广的建设项目环境监理工作国家层面不在要求。新环境保护法及新修订的建设项目环境管理条例也未对建设项目环境监理做出明确要求，未来环境监理将不在作为建设项目强制管理要求，将逐步发展为为建设单位提供技术咨询服务，由各省市、建设单位自主决定。

5 结语

环境监理是我国环境保护管理的重要内容之一，1994 年黄河小浪底工程第一次引进环境监理，至今历时发展 20 多年，对我国水电工程开发建设生态环境保护起到了重要作用。但随着建设项目环境监理试点工作的取消，建设项目环境监理工作将由行政主管部门强制要求逐步变为建设单位的自主行为。环境监理将作为技术咨询服务性质建设单位、各省市灵活选择，现有环境监理单位只有打造一支技术力量过硬、服务水平高的队伍，转变思路，树立市场的理念，全方位、高效、专业的为建设单位提供技术支持与服务，才能在未来的市场竞争中得到社会认可、获得发展与进步。

参考文献：

[1] 刘永珍. 公路工程建设项目施工期环境影响研究[D]. 南京. 南京林业大学, 2003.

[2] 李国庆, 田世民, 韩雄. 论水利工程中的环境监理工作[J]. 华北水利水电学院学报, 2005, 4:60-62.

[3] 张宏安, 尚宇鸣, 解新芳, 姚同山. 黄河小浪底工程建设中的环境监理[J]. 水电站设计, 1999, 15(3):95-99.

[4] 尚宇鸣, 张宏安, 燕子林等. 小浪底工程环境保护与环境监理[J]. 人民黄河, 2000, 2:40-41.

[5] 贺广军, 胡江锡, 谭申生等. 工程环境监理实务与工程建设环保技术标准及项目竣工环保验收实用技术手册[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2010.

[6] 田丰, 宋磊, 席天功等. 中国建设项目环境监理现状与发展趋势研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 10:56-62.

[7] 尹卫萍, 唐松林. 建设项目环境监理的思考[J]. 环境监控与预警, 2011, 3(5) :51- 53.

[8] 劳佳. 关于推行项目环境监理工作的探讨[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2011, 21(2) : 8-10.

[9] 燕子林, 肖金凤. 小浪底水利枢纽工程的环境管理模式[J]. 水电站设计, 1999, 15(3):100-103.

[10] 陈凤先, 孔令辉, 蔡梅, 卓俊玲. 我国环境监理问题分析与发展策略探讨[J]. 环境监测管理与技术, 2013, 25(3):9-12.

[11] 王沛芳, 王超, 李勇, 肖金凤. 水利水电工程施工中环境监理及其应用[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(6):51-53.

[12] 黄凡, 周建兰, 王新平. 三峡工程环境监理模式浅析[J]. 建设管理, 2015, 8:53-55.

[13] 赵荧, 于江, 丁衡英. 向家坝水电站环境监理探讨[J]. 科技与创新, 2015, 4:01-02.

[14] 罗龙海, 王玮, 陈洋. 大型水电站施工期环境保护与管理—以白鹤滩水电站为例[J]. 水电与新能源, 2018, 02:70-74.

GIS 技术在水电站项目水土流失调查中的应用

曹永翔[1]，张振师[1]，杨建军[2]

（1 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；2 新疆大学，乌鲁木齐 830046）

摘 要：本文以新疆某水电站为研究对象，利用 GIS 技术，通过 RUSLE 数学模型实现水土流失量计算，并提取了土壤侵蚀强度图，提高了水土流失调查工作效率和精度，为水土保持措施设计提供了技术支撑。

关键词：GIS 技术；水土流失；水电

1 引言

当前国家将生态文明提到前所未有的高度，在工程建设过程中如何防治水土流失、保护好生态环境，是应该思考和重视的问题。防治水土流失需要因地制宜布设水土保持措施，而前提是对工程建设引起的水土流失进行准确预测，目前一般采用的方法为利用类比工程或当地实测资料，对于缺少类比工程或实测资料的项目，土壤侵蚀模数的选取和水土流失量计算主要依靠经验，往往精确度较低。文章以新疆某水电站为研究项目，通过遥感影像解译，结合 GIS 技术和 RUSLE 数学模型计算水土流失量，将 GIS 技术与水土保持技术结合起来，提高了工作效率高和预测精度。

2 项目区概况

研究项目选取新疆某水电站，工程位于温宿县境内，工程区为天山南坡中高山区，属典型的温带大陆性气候，干旱少雨，蒸发强烈，四季分明，冬冷夏热，春季多风，多年平均降水量为 196.4mm，多年平均风速为 1.2m/s。土壤类型主要为栗钙土和草原土。植被区划属于温带荒漠区，植被类型以荒漠草原为主。

3 研究方法

水土流失调查测算模型采用修正的通用土壤流失方程 RUSLE：

$$A = RKLSCP \tag{1}$$

式中：A——土壤流失量；

R——降雨侵蚀力；

K——土壤可蚀性；

L——坡长因子；

S——坡度因子；

C——植被、作物覆盖因子；

P——水土保持措施因子。

遥感影像选用 IKONOS 影像（1 米分辨率）和 TM 卫星影像（30 米分辨率），DEM 数据利用 1：5 万数字地形图，空间分辨率为 25 米。软件利用卫星影像处理软件 ERDAS9.1 和 ArcGIS9.3，通过软件对遥感影像进行处理，分别获取通用土壤流失方程的各因子数据，最终得到土壤流失量。

4 数据处理

4.1 降雨侵蚀力因子(R)

降雨侵蚀力是降雨引起土壤侵蚀的潜在能力，与降雨量、降雨强度、雨滴的大小及雨滴下降速度有关[1]。降雨侵蚀力反映降雨和它所产生的径流对土壤侵蚀的影响，难以直接测定，多用降雨参数，如雨强、雨量等来估算。[2]本工程项目区比较集中，降雨采用同一个 R 值。R 值根据温宿县 2010 年月降水数据，利用 Wischmeier 提出的经验公式[3]计算：

$$R = \sum_{i=1}^{12} \left[1.735\times10\left(1.5\times lg\frac{P_i^2}{P}\text{-}0.818\right)\right] \tag{2}$$

式中：Pi——各月平均降雨量，mm；

P——年降雨量，mm。

R 值计算结果见表 1。

表 1 降雨侵蚀力因子

地点	降雨侵蚀力因子 R[MJ・mm/（hm^2・h・a）]
温宿县（2010 年）	515.02

4.2 土壤可蚀性因子（K）

土壤可蚀性是指土壤对侵蚀营力分离和搬运作用的敏感程度，反映了土壤对侵蚀的敏感性及降水所产生的径流量与径流速率的大小[4]。针对项目区的实际情况，采用数学模型法进行计算 K 值，数学模型利用 Williams 等人在 1990 年侵蚀-生产力影响评价模型(EPIC)提出的计算公式：

$$K=\left\{0.2+0.3\exp\left[-0.0256SAN\left(1-\frac{SIL}{100}\right)\right]\right\}\left(\frac{SIL}{CLA+SIL}\right)^{0.3}\left(1.0-\frac{0.25C}{C+\exp(3.72-2.95C)}\right) \quad (3)$$

$$\left(1.0-\frac{0.75SN1}{SN1+\exp(-5.51+22.9SN1)}\right) \quad (4)$$

$$SN1=1-SAN/100 \quad (5)$$

式中：SAN——砂粒含量，%；

SIL——粉粒含量，%；

CLA——粘粒含量，%；

C——有机碳含量，%；

K——土壤可蚀性，t・h/(MJ・mm)。

计算结果见表 2。

表 2 土壤可蚀性因子表

序号	类别	土壤厚度（cm）	SAN 砂粒（2-0.02mm）	SIL 粉粒（0.02-0.002mm）	CLA 粘粒（<0.002mm）	C（%）	SN1	K（公制）
1	栗钙土	0~5	70.10	16.10	13.80	4.63	0.30	0.02
2	棕钙土	0~19	41.20	43.40	15.40	1.62	0.59	0.03
3	亚高山草原土	0~14	23.25	43.72	33.03	6.88	0.77	0.03

4.3 地形因子(LS)

地形因子是坡度因子和坡长因子的总称，项目区坡长因子利用 Van Remortel 的计算公式[5,6]计算：

$$L=(\lambda/22.13)^m \quad (6)$$

$$m=\beta/(1+\beta) \quad (7)$$

$$\beta=(\sin\theta/0.0896)/[3.0\times(\sin\theta)^{0.8}+0.56] \quad (8)$$

式中：*L*——坡长因子；

λ——通过 DEM 提取的坡长，m；

22.13——标准小区坡长，m；

m——坡长指数；

θ——坡度角。

根据 McCool 的研究，通用土壤流失方程允许计算的最大坡度为 15°[75]，刘宝元对坡度在 9°~55°的陡坡土壤侵蚀进行了研究[8]，项目区地面坡度为 5°~40°，因此 LS 因子计算分为缓坡与陡坡，其中缓坡采用 McCool 的公式，陡坡采用刘宝元的公式，坡度因子计算公式：

$$S=10.8\sin\theta+0.03，\theta<5° \quad (9)$$

$$S=16.8\sin\theta-0.5,\quad 5°<\theta<10° \tag{10}$$

$$S=21.91\sin\theta-0.96,\quad \theta>10° \tag{11}$$

式中：S——坡度因子；

θ ——由 DEM 提取的坡度值。

在 ARCGIS 软件中获取坡度和坡长图，利用上述坡长和坡度公式计算坡长和坡度因子，将两个因子叠加可得到 LS 值分布图。

4.4 植被、作物覆盖因子(C)

植被、作物覆盖因子表示在一定条件下，有植被覆盖或作物种植情况下土壤流失量与同条件下连续休闲的情况下土壤流失量的比值[9]，反映的是地表植被或作物对地表的保护作用，项目区 C 因子利用下列公式计算：

$$C=0.992e^{-0.0344V} \tag{12}$$

式中：C——植被、作物覆盖因子，取值介于 0.001~1 之间，裸露地面 C 取最大值 1，地面得到良好保护时取 0.001[10]；

V——植被覆盖度，%。

利用遥感方法计算植被覆盖度，常用归一化植被指数（NDVI）来估算植被覆盖度[11~13]，计算公式为：

$$V=108.49NDVI+0.717 \tag{13}$$

$$NDVI=(NIR-RED)/(NIR+RED) \tag{14}$$

式中：V——植被覆盖度，%；

NDVI——归一化植被指数值；

RED——红波段的反射率；

NIR——近红波段的反射率。

项目区 NDVI 利用 IKONS 影像进行提取获得。

4.5 水土保持措施因子(P)

水土保持措施因子是采取一定水土保持措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值[14]，取值范围介于 0~1，未采取水土保持措施的土壤取值为 1[15]。Wischmeier 和 Smith 1978 年的研究根据坡度对 P 因子确定了取值，具体见表 3，根据项目区坡度因子范围，确定项目区的 P 因子取值。

表 3 项目区 P 因子的划分

坡度（°）	P 因子
1～8	0.60
9～16	0.70
17～25	0.80
26～30	0.90

5 结果与分析

根据计算公式，确定通用土壤流失方程各因子的取值，栅格大小为 5m×5m，生成各因子栅格图层。在 ARCGIS 软件空间分析模块下，将各因子图相乘，计算每个栅格的土壤流失量，提取工程区的土壤流失量，得到 2011 年土壤流失量表，见表 4。根据《土壤侵蚀分类分级标准》确定土壤侵蚀强度分级指标，对像元土壤流失量进行分类，将流失量在同一侵蚀等级的像元进行合并，生成土壤侵蚀量图。

表 4 工程土壤侵蚀量表

序号	地点	土壤侵蚀模数平均值[t/（km²·a）]	面积(km²)	年土壤侵蚀量（t）
1	首部枢纽	2720	0.11	299.20
2	首都枢纽施工区	1820	0.04	72.80
3	厂房施工区	1000	0.05	50.00
4	1#施工支洞施工区	1750	0.02	35.00
5	业主营地	2765	0.02	55.30
6	砂石料筛分系统	1359	0.03	40.76
7	1#弃渣场	960	0.03	28.80
8	2#弃渣场	1953	0.02	39.06
9	3#弃渣场	1245	0.04	49.80
10	1#砂砾石料场	870	0.07	60.90
11	2#砂砾石料场	763	0.01	7.63
工程区平均		1680	0.44	739.25

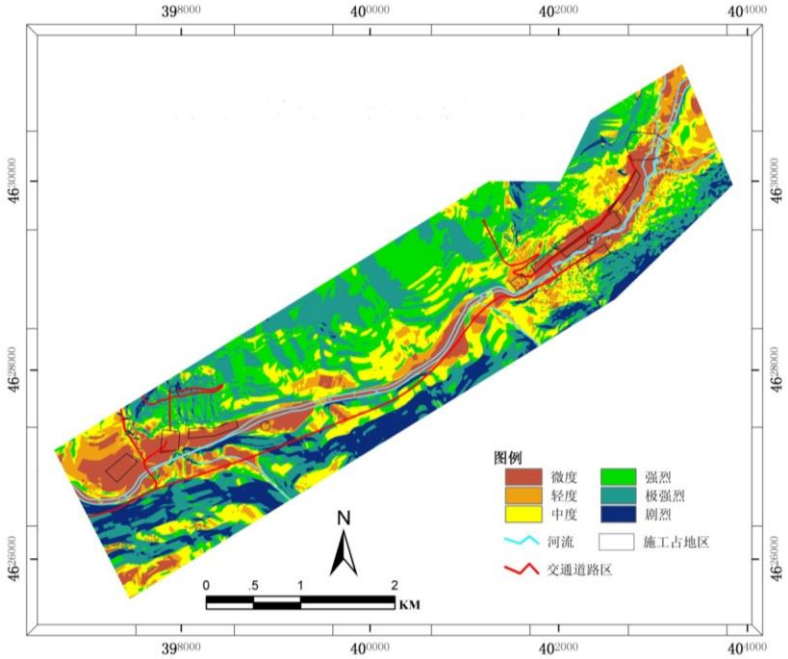


图 1 工程土壤侵蚀强度图

结合表 4 和图 1 结果可看出，工程区平均土壤侵蚀模数为 1680 t/（km² • a），属于轻度侵蚀。

通过对现场侵蚀沟进行测量调查，结合同流域同类型的工程水土保持实地监测数据分析，工程区平均土壤侵蚀模数为 1700t/（km² • a），属于轻度侵蚀范围，与遥感技术获得的结果基本一致，说明遥感技术获取的土壤侵蚀模数基本合理。

6 结语

基于 GIS 技术，利用 RUSLE 模型，计算工程的水土流失量，提高了计算效率和预测精度，尤其是对于缺少实测资料的地区提供了水土流失调查解决方案，为有效的开展水土保持工作提供了技术支持。

对遥感技术结果进行验证，遥感技术与实地调查监测数据存在一定差异，这主要由 RUSLE 模型中各因子的精度决定。尤其是地形因子（LS）、作物覆盖与管理因子（C）是通过数字地形图和遥感影像提取，选择的数据源精度越高，提取的因子值将越精确，最终得到的土壤侵蚀模数和水土流失量也会更加接近实地调查结果。因此在实际工作中，尽可能选择高精度的数据源将会提高结果精度。

参考文献：

[1] 杨磊，丁树文.基于 GIS 和 USLE / RUSLE 的小流域土壤侵蚀量研究[J].干旱环境监测，2011，25(1)：25-28.

[2] 吕建树.济宁市土地利用生态安全研究[D].山东师范大学，2011 年.

[3] 王万中，焦菊英，郝小品，等.中国降雨侵蚀力 R 值的计算与分布[J].水土保持学报，1995,9（4）：5-18.

[4] 洪华生，杨远，黄金良.基于 GIS 和 USLE 的下庄小流域土壤侵蚀量预测研究[J].厦门大学学报（自然科学版），2005,44（5）：675-679.

[5] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses—a guide for conservation planning[M]U. S .Department of Agriculture.1978:537.

[6] 李炜民，谢军飞，李晓兵，等.东灵山-百花山景区土壤侵蚀的安全评价[J].西北林学院学报，2007,22（4）：63-77.

[7] McCool D K, Foster G R , Mutchler C K , et al. Revised slope length factor for the universal soil loss equation[J]. Transactions of ASAE, 1989,32:1571-1576.

[8] Liu B Y, Nearing M A, Risse L M. Slope gradient effects on soil loss for sleep slopes[J]. Transactions of ASAE, 1994, 37: 1835-1840.

[9] 傅世锋，查轩.基于 GIS 和 USLE 的东圳库区土壤侵蚀量预测研究[J].地球信息科学:2008，10（3）：392-393.

[10] 陆建忠，陈晓玲，等.基于 GIS-RS 和 USLE 鄱阳湖流域土壤侵蚀变化[J].农业工程学报，2011，27（2）：338-339。

[11] 许红梅，高清竹，江源，赵云龙.黄河中游砒砂岩地区长川流域植被盖度及其动态分析[J].中国沙漠，2005，25（6）：881-882.

[12] 孙红雨,王长耀,牛铮,等.中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系—基于 NOAA 时间序列数据分析[J].遥感学报,1988，2(3)：204-210.

[13] 卢玲,李新,程国栋.利用 NOAA AVHR 植被指数数据集分析黑河流域季候特征[J].中国沙漠,2002，22(2)：187-191.

[14] 李小华，曹月娥，等.基于 RS 和 RUSLE 的新疆铁米尔苏河梯级水电站水土流失预测研究[J].中国农村水利水电，2015，2015（10）：186-187。

[15] 杨琴.基于 USLE 的喀斯特地区水土流失定量监测研究[D].贵州师范大学，2008 年。

测水何家水库河道疏浚及污水回灌对取水口的影响分析

刘　启，卜跃先，安贞煜

（湖南省水利水电勘测设计研究总院，湖南 长沙 410007）

摘　要：文章通过对湖南省何家水库河道疏浚及污水回灌对取水口水质影响的计算与分析，为何家水库制定水环境保护措施，提高突发事件应对能力提供参考。

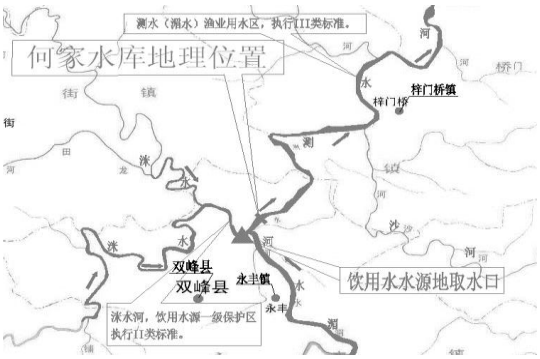
关键词：何家水库；疏浚；回灌；取水口

1 项目概况

何家水库大坝座落在湖南省娄底市双峰县永丰镇，涟水支流测水上，犁头咀（测水与涞水交汇处）下游 0.66km，坝址处多年平均流量 28.2m³/s，控制集雨面积 1461.0km²，正常蓄水位 76.5m，相应库容 136.44 万 m³。工程规模为小（1）型水库，主要建筑物为翻板闸坝、非溢流坝，为双峰县县城应急抗旱水源工程。同时对部分河段进行疏浚治理。通过建坝拦截水流，增加正常库容，在干旱季节，能满足双峰县城 30 天应急供水和 3700 亩农田应急灌溉的需要；在正常情况下，新增供水规模达 4 万 m³/d，提高了供水保证率和调节性能。

何家水库由测水及涞水汇合而成，其中测水为渔业用水区，执行III类水质标准；涞水为饮用水源一级保护区，执行 II 类水质标准。县城取水点位于涞水河江东潭（交汇口上游约 140m）。入库另一支流测水流经双峰县城主城区，目前尚有约 30%居民生活污水未经处理直接排入测水。

项目所在水系情况见附图 1。



附图 1

2 疏浚影响分析

2.1 对水厂取水口 SS 的影响分析

疏浚河段位于取水口上游约 2km，湿法施工，采用环保挖泥船开挖，施工期疏挖作业时，由于挖泥船疏浚搅动使得底泥再悬浮，在疏浚点周围形成圆形或椭圆形的浑浊带，引起局部水域的 SS 污染，对水体水质和透明度产生影响。根据 1991 年交通部水运工程科学研究所对绞吸式挖泥船作业源强进行现场模拟实验（代表船型为 1600m³/h 绞吸式挖泥船）[1]，将本项目挖泥船（疏浚效率为 1450m³/h）与其实测资料进行类比，本工程挖泥时悬浮物泥砂的源强为 7.56t/h，浓度为 250~350mg/l。

挖泥船施工时基本上是定点作业，悬浮疏浚物的扩散机理类似于连续点源扩散。施工时由于铲头的扰动造成底泥悬浮并随流扩散，在施工区水域形成条状浑浊水体。作业船开挖的河床底质主要为卵石，泥砂粒径大，悬砂量小，且易于沉降，加之施工作业开挖量不大，因此产生的悬浮物总量较小。根据湘江航道维护疏浚现场实际监测资料，在作业点附近，底层水体中悬浮物含量在 300~400 mg/l 之间，表层水体中悬浮物含量在 100~180 mg/l 之间。在施工期的水文条件下，悬浮物沉降速度较快，一般悬浮疏浚物随流扩散 100~200m 即接近水域悬浮物背景浓度，影响范围较小。

取水口位于疏浚河段下游约 2km，挖泥船疏浚搅动造成的悬浮物浓度增加范围在 200m 以内，取水口的 SS 浓度不会受到疏浚施工的影响。

2.2 河流底泥再悬浮物重金属对水质的影响

根据水质与底泥现状监测结果，测水中重金属元素含量满足III类水质要求，底泥监测值满足《土壤环境质量标准》（GB15618-1995）中二级标准。根据八十年代《湘江污染综合防治》研究中对底泥重金属形态及迁移转化研究成果：水体中重金属污染物经絮凝沉降作用，随泥沙一起沉积在河床中，底泥重金属形态一般以硫化物结合态为主，含量最高，约占 75%，腐殖质结合态和硝酸盐结合态的含量约为 8～10%，盐酸盐物质结合态约占 10%，水溶性物质为可给态，含量约为 5%。可给态要转化为毒性最大的离子态需要一定的条件，这些条件就是水体的 pH、温度、Eh、重金属的原始浓度等。根据水质常规监测结果，测水河多年平均水温为 9.5～14.5℃，夏天 18.95～29.0℃，冬天 4.9～8.7℃，水温较高，水体中的重金属具有较高的吸附速率系数，促进低价金属离子变成高价金属离子，生成氧化物沉淀，有利于悬浮物絮凝、聚合、络合等物理化学过程的进行，使重金属进入底泥。根据污染源调查，何家水库库区河段无排酸性废水排入，疏浚作业也无酸性废水产生。

由于施工不产生酸性废水，同时水体中 pH 值正常，再悬浮于水体中的重金属形态不会发生新的改变，因此，疏浚工程除增加作业区下游局部水域水体中悬浮物浓度外，不会造成重金属污染。

2.3 疏浚作业区底泥中重金属释放定量分析

本文采用模型计算疏浚作业区范围内底泥扰动重金属释放量对下游取水口水质的影响。

①预测因子

根据现状监测数据，涞水河底泥中重金属含量满足《土壤环境质量标准》（GB15618-95）二级标准。但 Cd 监测值与标准值较接近，且水环境质量指标要求较高。预测因子定为 Cd。

②预测模式

涞水河为小型河流，污染物的扩散能力较强，从污染物排入到完全混合的过程较短，采用一维模型进行预测：

$$c = c_0 \exp\left(-K_1 \frac{x}{86400u}\right)$$

$$c_0 = c_p Q_p / \left(Q_p + Q_h\right)$$

c_0——计算初始点污染物浓度贡献值，mg/L；

K_1——综合衰减系数，1/d；

x——预测点与排放点的距离，m；

u——河流平均流速，m/s；

cp——排放废水中污染物的浓度，mg/L；

Q_p——废水排放量，m^3/s；

Q_h——河流流量。

③预测参数

水质模型需识别的参数有：综合衰减系数 K_1、流速、流量等，取值见下表：

涞水河水文参数

河段	K_1	流量/m^3/s	流速/m/s	平均水深/m	河宽/m
涞水河	1.0（不考虑衰减）	10.63	0.12	2.4	36.9

④污染源强

参考河海大学论文《里运河底泥重金属释放试验研究》，文中以 Cd 为例，表层土中的镉在前 8 天平均每天 1L 土向水体释放的污染物质的量为 14-20 ug/(L·d)。在后 8 天释放的速度加快，平均每天 1 L 土向水体释放的污染物质的量为 15-35 ug/(L·d)。

深层土当中，镉在前 8 天平均每天 1 L 土向水体释放的污染物质的量为 20-25 ug/(L·d)。在后 8 天释放的速度加快，平均每天 1 L 土向水体释放的污染物质的量为 25-33ug/(L·d)。

该文中指出，底泥污染越严重，其污染物释放量越大，里运河底泥中 Cd 的浓度超出《土壤环境质量标准》（GB15618-1995）二级标准 8.78 倍，涟水河底泥中 Cd 的浓度接近标准值，本次预测按最不利情况考虑，释放污染物按其倍数的 1/8.78 计算。

涟水河疏浚底泥体积为 0.69 万 m^3，按最不利情况下计算，该河段疏浚扰动情况下释放污染物质 Cd 的量为 0.00032g/s。

⑤取水口水质影响预测

根据模型预测，在不考虑衰减的情况下，疏浚扰动段河床底泥 Cd 对取水口处的浓度贡献值为 0.00003mg/L，满足《地表水环境质量标准》Ⅱ类（0.005mg/L）水质标准。疏浚作业扰动底泥，对水体中 Cd 浓度的贡献值较小，基本不会对取水口处水质造成不利影响。

3 回灌影响分析

工程实施后，当枯水期涟水流量小于取水口取水流量 0.93m^3/s 时，湄水（III类水体）将回灌涟水（Ⅱ类水体），对取水口水质产生不利影响。评价对此风险情况进行预测。

预测采用 O’connor 河口上溯模式，公式如下：

$$C=\frac{C_pQ_p}{(Q_h+Q_P)M}\exp[\frac{ux}{2M_l}(1+M)]+C_h$$

式中：x—距离排入口距离，m，x<0，自 x=0 处排入；

C—预测浓度，mg/L;

Cp—污染物排放浓度，mg/L；

Qp—污水排放量，m^3/s；

Ch—上游污染物浓度，mg/L；

Qh—上游河流流量，m^3/s；

u—河流流速，m/s；

M_l—断面纵向混合系数，m^2/s；$M=\sqrt{1+4k_1M_l/u^2}$，为保证取水口水质安全，衰减系数 k_1 设为 0。

（1）现状条件下

以 COD 和 NH_3-N 为预测因子，预测湄水倒灌对涟水水质的影响，水文参数采用典型年最小日均流量，结果如下：

水环境预测参数

参数名称	Cp（mg/L）		Qp（m^3/s）	Ch(mg/L)		Qh(m^3/s)	u（m/s）	Ml(m^2/s)
	COD	NH_3-N		COD	NH_3-N			
取值	18.07	0.415	0.14	12.32	0.238	0.14	0.01	1.5

湄水倒灌对洙水河段污染物浓度预测值　(mg/L)

x(m)		-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70
c(mg/L)	COD	20.77	20.23	19.72	19.24	18.79	18.38	17.99
	NH_3-N	0.43	0.42	0.41	0.40	0.39	0.38	0.37
x(m)		-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140
c(mg/L)	COD	17.62	17.28	16.96	16.66	16.38	16.12	15.87
	NH_3-N	0.36	0.35	0.34	0.34	0.33	0.33	0.32
x(m)		-150	-160	-170	-180	-190	-200	-210
c(mg/L)	COD	15.64	15.43	15.23	15.04	14.87	14.70	14.55
	NH_3-N	0.31	0.31	0.30	0.30	0.30	0.29	0.29
x(m)		-220	-230	-240	-250	-26	-270	-280
c(mg/L)	COD	14.40	14.27	14.14	14.03	13.92	13.81	13.72
	NH_3-N	0.29	0.28	0.28	0.28	0.27	0.27	0.27
x(m)		-290	-300	-310	-320	-330	-340	-350
c(mg/L)	COD	13.63	13.54	13.46	13.39	13.32	13.26	13.20
	NH_3-N	0.27	0.27	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
x(m)		-360	-370	-380	-390	-400	-410	-420
c(mg/L)	COD	13.14	13.09	13.04	12.99	12.95	12.91	12.87
	NH_3-N	0.26	0.26	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

由表可见，当枯水期洙水流量小于取水流量时，受湄水倒灌影响，洙水 COD 和 NH_3-N 浓度均有一定增加，影响距离 180m。取水口距离湄水排入口约 140m，当发生湄水回灌时，取水口的水质将无法满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅱ类标准。

（2）库区河道截污情况下

何家水库属双峰县应急水源工程，为确保取水口水质安全，应对库区湄水河段的水域功能区划分进行适当调整（拟划为饮用水源保护区）；加快湄水沿岸截污管网建设，将湄水河双峰县城段排污口全部截污，纳入污水厂进行处理后排入坝下河道，做到“污水不下河”。

以 COD 和 NH_3-N 为预测因子，预测湄水河段调整水源保护区范围，河道截污情况下，倒灌对洙水水质的影响，结果如下：

截污后水环境预测参数

参数名称	Cp (mg/L)		Qp (m^3/s)	Ch(mg/L)		Qh(m^3/s)	u (m/s)	Ml(m^2/s)
	COD	NH_3-N		COD	NH_3-N			
取值	9.40	0.318	0.14	12.32	0.238	0.14	0.01	1.5

截污后湄水倒灌对洙水河段污染物浓度预测值　(mg/L)

x(m)		-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70
c(mg/L)	COD	16.72	16.43.	16.17	15.92	15.69	15.47	15.27
	NH_3-N	0.39	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.34
x(m)		-80	-90	-100	-110	-120	-130	-140
c(mg/L)	COD	15.08	14.90	14.73	14.58	14.43	14.30	14.17
	NH_3-N	0.33	0.33	0.32	0.31	0.31	0.30	0.30
		-150	-160	-170	-180	-190	-200	-210
c(mg/L)	COD	14.05	13.94	13.83	13.74	13.64	13.56	13.48
	NH_3-N	0.30	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28	0.28

x(m)		-220	-230	-240	-250	-260	-270	-280
c(mg/L)	COD	13.40	13.33	13.27	13.21	13.15	13.10	13.05
	NH_3-N	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.26	0.26
x(m)		-290	-300	-310	-320	-330	-340	-350
c(mg/L)	COD	13.00	12.96	12.92	12.88	12.84	12.81	12.78
	NH_3-N	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.25	0.25
x(m)		-360	-370	-380	-390	-400	-410	-420
c(mg/L)	COD	12.75	12.72	12.70	12.67	12.65	12.63	12.61
	NH_3-N	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

由表可见，湄水河段调整水源保护区范围，河道截污情况下，当枯水期洣水流量小于取水流量时，受湄水倒灌影响，洣水 COD 和 NH_3-N 浓度均有一定增加，影响距离 80m。取水口位置 COD_{Cr} 及 NH_3-N 的预测值分别为 14.17 mg/L，0.30 mg/L，水质满足《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅱ类标准。

4 结语

水利工程建设对取水口的影响是重点问题之一，本文以何家水库为例，分析了疏浚及回灌对取水口水质的影响。

疏浚过程中污染物释放量与底泥扰动量、底泥污染程度有关，若不规范作业，如对河床底泥扰动的深度加大，扰动面积增加等，使底泥中释放的重金属量增加，将对下游取水口水质造成威胁。

枯水期，当取水口所在支流流量小于取水口取水流量时，如另一支流污染超标，受其倒灌影响，取水口的水质将无法满足相关要求。需对受污染河段的水域功能区划分进行适当调整，同时加快沿岸截污管网建设，将排污口全部截污，纳入污水厂进行处理后排入坝下河道，做到“污水不下河”。在落实以上措施条件下，回灌风险对取水口的影响控制在一定范围之内。

西南山区水库甲藻生消环境影响因子分析

陈　旻，张陵蕾，廖　宁

（四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘　要：山区河道型水库内近年来频发甲藻水华现象，且多发于水体营养水平较低的西南地区。以有甲藻水华现象的紫坪埔水库作为例，进行了两年的持续观测，对藻类生物量的时空分布规律展开了调查研究。研究发现，紫坪铺水库内藻类喜聚集在水深较大的区域，每年春末夏初均有甲藻水华发生，优势藻种为倪氏拟多甲藻。而通过同步对水库的水质因子进行调查分析，认为紫坪铺水库整体营养水平为中营养水平，氮素较为充足，磷和有机物含量较低。对于藻类的生长，氮磷的影响并不显著，而有机物含量的增加表现出一定促进作用，BOD5 超过 2.5mg/L 时藻类生物量明显增多。其他生境因子中，水温、溶解氧浓度和水库调度对藻类生长均有显著的响应关系，且甲藻水华时期表现有明显的水温特征区间，可初步确认紫坪铺水库优势藻种的生长适宜水温为 16-20℃这一范围左右。此外，而水库运行水位较低且处于水位缓慢抬升期时，更适应水库内甲藻的生长。

大型水电工程水生生态影响后评价研究

孙丹丹，刘　园

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都　611130）

摘　要：为研究评价水电工程建设对水生生态环境的影响，根据环境影响评价法及后评价管理办法的要求，开展瀑布沟水电站环境影响后评价工作，通过对比工程建设前后水生生态环境状况，分析评价工程建设及运行对水生生物及鱼类的影响。后评价研究结果表明：瀑布沟水电站建成后，库区饵料生物的种类组成及分布发生了变化，但优势种群未发生变化。库区鱼类种群数量发生了变化，适宜静缓流水环境的鱼类得到不同程度发展，但整个河段的鱼类种类组成基本未发生变化。后评价研究结果与环境影响评价报告预测结论基本一致。

关键词：水电工程；水生生态；后评价

1 概述

根据《中华人民共和国环境影响评价法》第二十七条：在项目建设、运行过程中产生不符合经审批的环境影响评价文件的情形的，建设单位应当组织环境影响的后评价，采取改进措施，并报原环境影响评价文件审批部门和建设项目审批部门备案；原环境影响评价文件审批部门也可以责成建设单位进行环境影响的后评价，采取改进措施。在原国家环境保护部令第 37 号《建设项目环境影响后评价管理办法（试行）》中指出，环境影响后评价是指编制环境影响报告书的建设项目在通过环境保护设施竣工验收且稳定运行一定时期后，对其实际产生的环境影响以及污染防治、生态保护和风险防范措施的有效性进行跟踪监测和验证评价，并提出补救方案或者改进措施，提高环境影响评价有效性的方法与制度。环境影响后评价对于提高环境影响评价的有效性，提高项目决策和管理水平具有非常重要的作用。

水电工程在建设过程中，由于闸坝的修建，导致河流形态、流量、流速、底质等发生一定改变，进而影响水生生物及鱼类的生存及繁衍。针对已建工程开展水生生态影响后评价，总结水电工程在规划设计、施工管理以及运行过程中的经验教训，分析水电工程对水生生态环境的影响，以此为工程运行期的科学调度与管理提出建议，力争将水电工程对水生生态的影响降至最低，并为新建项目决策提供技术支撑，具有重要的价值和意义。

本文以大渡河中游瀑布沟水电站为例，结合工程竣工环保验收资料和环境影响后评价相关调查成果，通过对工程建成前后水生生态环境状况的调查，评价工程建设对

水生生态环境的影响趋势，并与环境影响评价文件中预测结论进行对比分析，验证环境影响评价结论的准确性，评价环境保护措施的实施情况和效果，为优化水生生态环境保护对策措施提供科学依据。

2 工程概况

瀑布沟水电站为大渡河干流规划 22 座梯级电站中的第 17 级、属于规模最大的梯级，是大渡河干流水电开发的控制性工程。瀑布沟水电站位于大渡河的中游，地处四川省雅安市汉源县、石棉县和凉山彝族自治州甘洛县境内，水库正常蓄水位 850 m，总库容 53.9 亿 m³，装机容量 3600MW，保证出力 926MW，年发电量 147.9 亿 kW•h，建设任务以发电为主，兼有防洪、拦沙等综合效益。项目主要由大坝、引水发电系统和尼日河引水工程等组成。大坝为砾石粘土心墙堆石坝，最大坝高 186m；水库正常蓄水位 850m，相应库容 50.11 亿 m³，死水位 790m，调节库容 38.94 亿 m³，具有季调节功能。电站于 1988 年 2 月核准，2004 年 3 月正式开工建设，2009 年 12 月首台机组投产发电，2010 年 12 月，机组全部发电，2012 年 12 月，枢纽工程通过竣工验收。2014 年 4 月，通过环保部组织的竣工环保验收。

3 工程建设前水生生态状况

瀑布沟水电站环评阶段，专业调查单位于 1984、1985 年对库区水生生物本底情况进行了调查，2002 年再次对库区及大渡河中游水生生物进行了现场调查。调查范围包括大渡河干流泸定至龚嘴段，重点是瀑布沟大坝至新棉镇段以及主要支流流沙河、大冲沟（石棉的丰乐乡）等支流。

3.1 饵料生物

根据调查结果，瀑布沟水库建成前库区共有浮游植物 4 门 28 属，其中硅藻门 14 属、绿藻门 9 属、蓝藻门 4 属和甲藻门 1 属。浮游植物种类组成特点是以硅藻为主，其次是绿藻和蓝藻。常见的种类有舟形藻、席藻、针杆藻、脆杆藻、卵形藻、等片藻、桥穹藻和羽纹藻等。

浮游动物 4 类 18 种，其中原生动物 4 种，轮虫 5 种，枝角类 5 种，桡足类 4 种，种类稀少，无优势种和常见种。各调查断面中流沙河的浮游动物种类最多，有 14 种。

底栖动物 3 类 8 属，其中扁形动物 1 属，软体动物 1 属，水生昆虫 6 属，优势种为环足摇蚊，常见种为蜉游目的幼虫。

3.2 鱼类

瀑布沟工程河段共有鱼类 65 种，分属于 7 目 15 科 51 属，以鲤形目最多，占总种数的 70.8%，其次是鲇形目、鲈形目，分别占 15.4%和 7.7%；其余 4 目共占 6.1%。鲤形目中以鲤科鱼类最多，有 30 种，占鲤形目总种数的 65.2%，占库区鱼类总数的 46.2%；其次是鳅科，有 9 种，占鲤形目的 19.6%，占总种数的 13.8%。

工程河段干流广泛分布的鱼类有红尾副鳅、短体副鳅、山鳅、斯氏高原鳅、细尾高原鳅、长薄鳅、红唇薄鳅、宽鳍鱲、长鳍吻鮈、蛇鮈、异鳔鳅鮀、白甲鱼、齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、鲤鱼、侧沟爬岩鳅、四川爬岩鳅、犁头鳅、短身间吸鳅、中华间吸鳅、粗唇鮠、凹尾拟鲿、黑尾鱼央、福建纹胸鮡、黄石爬鮡等。主要支流流沙河及坑凼中分布有红尾副鳅、短体副鳅、山鳅、泥鳅、宽鳍鱲、稀有鮈鲃、棒花鱼、峨眉鱊、中华鳑鲏、麦穗鱼、墨头鱼、鲤鱼、鲃鱼、侧沟爬岩鳅、犁头鳅、西昌华吸鳅、黄石爬鮡、青鳉、黄鳝、黄石爬鮡、子陵栉鰕虎鱼、成都栉鰕虎鱼、叉尾斗鱼、齐口裂腹鱼等。

鱼类产卵场主要分布在万工以上至迎政以下江段，越冬场从关帝沱至瀑布沟大坝，坪阳村至石棉、小堡、大树等都有分布，索饵场集中分布在汉源至丰乐江段。

渔获物以齐口和重口裂腹鱼为主，占渔获量的 85%；鳅科鱼类渔获量超过 10%；齐口裂腹鱼常捕个体 0.1~0.4kg；重口裂腹鱼在 0.1~0.35kg 左右；黄石爬鮡在 0.025~0.05 kg，并且小个体占渔获物 30%以上。

4 工程建设后水生生态现状

瀑布沟水电站后评价阶段，为掌握工程河段水生生物及鱼类资源现状，专业单位分别于 2017 年 9 月、2018 年 4 月和 5 月对瀑布沟水电站工程河段的水生生态及生物多样性进行了调查与评价。调查范围为龙头石坝址至枕头坝一级库尾河段，并兼顾区间 3 条较大支流流沙河、南桠河、尼日河。

4.1 饵料生物

调查共检出浮游植物 6 门 31 属 67 种。按物种丰富度由大到小依次为硅藻门、绿藻门、蓝藻门、甲藻门、裸藻门和黄藻门，所占比例分别为 41.79%、40.30%、11.94%、2.99%、1.49%、1.49%。评价区浮游植物以硅藻群和蓝藻丛占优势。

调查共检出浮游动物 28 属 37 种，按物种丰富度由大到小依次为原生动物、轮虫、枝角类、桡足类，所占比例分别为 43.24%、37.84%、13.51%、5.41%。

调查共检出底栖动物 12 目 27 种，按物种丰富度由大到小依次为节肢动物、软体动物、环节动物，所占比例分别为 77.8%、14.8%、7.4%。

4.2 鱼类

根据现场调查并查阅文献，统计瀑布沟水电站工程影响区有鱼类 62 种，分属 7 目 13 科 50 属。其中，鲤形目鱼类最多，有 46 种；其次是鲇形目鱼类，有 8 种。

干流河段分布的鱼类有红尾副鳅、短体副鳅、山鳅、贝氏高原鳅、细尾高原鳅、斯氏高原鳅、长薄鳅、红唇薄鳅、泥鳅、宽鳍鱲、草鱼、宜宾鲴、中华鳑鲏、峨眉鲬、白鲦、花鲭、麦穗鱼、长鳍吻鮈、棒花鱼、银鮈、鲈鲤、白甲鱼、墨头鱼、重口裂腹鱼、侧沟爬岩鳅、犁头鳅等。支流河段分布的鱼类有山鳅、泥鳅、宽鳍鱲、白鲦、花鲭、棒花鱼、墨头鱼、稀有鮈鲃、侧沟爬岩鳅、犁头鳅、短身间吸鳅、西昌华吸鳅、青鳉、黄鳝、叉尾斗鱼、成都栉鰕虎鱼、子陵栉鰕虎鱼等。现场调查访问到的鱼类有重口裂腹鱼、齐口裂腹鱼、鲈鲤、青石爬鮡、宽鳍鱲、长吻鮠等。

水库形成后，鱼类产卵场主要分布在瀑布沟电站库尾、汉源和金口河段。索饵场集中分布在瀑布沟库尾、汉源等处。越冬场分布在瀑布沟库区、汉源和深溪沟坝前。

5 水生生物及鱼类变化分析

瀑布沟水库形成后，改变了原天然河流的流量、年变化规律、河道的连通性，产生了大坝阻隔、库区等不同的河流单元。

水库建成运行阶段，浮游植物种类和数量明显增多，但研究河段仍以硅藻门、绿藻门为主；电站运行后研究河段浮游动物种类和数量明显增多，但仍以原生动物为主；底栖动物也有类似的变化趋势，节肢动物、软体动物和环节动物种类均有所增加，但工程建成前后底栖动物均以蜉蝣目为主。

对于鱼类来讲，工程河段鱼类种类有所减少（3 种鱼类在本次调查中未见，分别为黑尾鮈、福建纹胸鮡、黄黝鱼）。建库前，适应急流水底吸着类群墨头鱼、平鳍鳅科、鮡科等的 10 余种鱼类，其种群数量有一定的减小，而适宜静（缓）水产卵的平原型鱼类如鲤、鲃、宽鳍鱲、马口鱼、麦穗鱼和中华鳑鲏等鱼类，因库区环境对它们更为有利，则得到不同程度的发展。通过对比工程建设前后工程河段渔获物的捕捞结果，可知一些缓静水生态型鱼类的数量并未发生大幅度变化。

通过现场调查，瀑布沟水电站建设前和建设后相比，鱼类种类和数量有所减少，总体来看，瀑布沟水电站大坝的兴建改变了原河流生态环境，并使一些分布广泛的经济鱼类只能生活于被隔离的水体中，但对绝大多数鱼类来说，它们都能在改变后的水域中找到适宜于自身的生活环境，并保持一定的种群数量。

6 水生生态影响预测验证

通过后评价调查研究，瀑布沟水库形成后，工程河段浮游植物种类组成仍以硅藻门占绝对优势，其次为绿藻，蓝藻。工程河段原有的浮游植物种类基本得以保留，随周围环境逐步稳定，原有的浮游植物种类得以恢复。

工程建设前的浮游动物种类在工程运行阶段都得以保留，且运行阶段新增了部分物种，但优势种类仍以原生动物为主。

电站运行期库区蜉蝣目减少，红裸须摇蚊、羽摇蚊、多足摇蚊数量较工程建设前有所增加，主要是由于水库形成后，水位抬升，水库底层溶解氧减少，适应需氧量少的种类有一定程度发展。在库尾河段，出现河流--湖泊型底栖动物种群的过渡带，这些区域仍以蜉蝣目和毛翅目等需氧量较大的流水生境类群为主。

瀑布沟电站运行期库区鱼类种类稍有减少，工程河段适应急流水底吸着类群墨头鱼、平鳍鳅科、鮡科等的 10 余种鱼类，其种群数量在一定程度上有所减少，而适宜静（缓）水产卵的平原型鱼类如鲤、鲃、宽鳍鱲、马口鱼、麦穗鱼和中华鳑鲏等鱼类，因库区环境对它们更为有利，则得到不同程度的发展。研究河段鱼类种类组成基本没有发生变化，库区鱼类资源量有下降趋势，鱼类生境分布发生变化，重点保护鱼类的种类没有减少，但其分布及资源量均发生变化。

通过对于环评阶段水生生态现状及预测结论，上述研究结果与环评阶段预测结论基本一致。

7 水生生态保护措施的有效性

根据瀑布沟水电站环境影响评价报告及批文要求，工程开展了划定栖息地保护河段实施就地保护、建设了鱼类增殖放流站开展人工增殖放流、开展了鱼类保护研究以及下泄低温水影响研究等水生生态保护措施。

瀑布沟水电站黑马鱼类增殖放流站已投入运行，其中一期工程于 2008 年 9 月建成投入运行，承担瀑布沟、深溪沟水电站珍稀鱼类增殖放流任务；二期工程于 2016 年底投入运行，承担大岗山、枕头坝、沙坪等水电站珍稀鱼类增殖放流任务。2010 年~2018 年期间黑马鱼类增殖放流站共累积放流鱼苗约 562.43 万尾，其中 2010 年~2018 年深溪沟水电站与瀑布沟水电站联合共开展了 11 次放流活动，共放流稀有鮈鲴、长薄鳅、重口裂腹鱼、齐口裂腹鱼、白甲鱼、中华倒刺鲃和长吻鮠等 8 种鱼类，累积放流鱼苗约 472.03 万尾。2016 年-2018 年在大岗山、枕头坝一级、沙坪二级 3 座水电站开展了 3 次放流活动，共放流齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、长薄鳅、白甲鱼、华鳈等共计约 90.4 万尾。

黑马鱼类增殖放流站在 2017 年进行了放流苗种的标记，后期将持续开展标记放流并组织回捕。此外，开展了川陕哲罗鲑、稀有鮈鲴、长薄鳅和青石爬鮡等鱼类繁殖基础生物学研究；齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、青石爬鮡、白甲鱼等鱼类人工繁殖技术研究；放流及主要经济鱼类苗种培育技术研究；鱼类放流技术的影响研究；齐口裂腹鱼、重口裂腹鱼、青石爬鮡、白甲鱼等养殖生物学及技术研究；氮气过饱和对鱼类的研究；下泄低温水对鱼类影响研究。上述科研工作已通过验收结题。

8 结语

（1）瀑布沟水电站建设后，水生生物资源在种类和数量上发生了一定变化。但较工程建设前，优势种类未发生变化。工程建设前后鱼类的种类未发生明显变化，但因水域环境发生变化，种群数量有降低趋势。

（2）瀑布沟水库在建设及运行期间履行了全阶段环境保护审批程序和环境保护管理制度，在环评、初步设计、验收过程中，开展了一系列水生生态保护措施设计，落实了环评文件及批复文件要求，较好地执行了环境保护“三同时”制度。

（3）瀑布沟水电站水生生态影响后评价研究表明，工程建设对水生生态环境产生一定影响，随着各项保护措施的实施，影响得到缓解。本次后评价研究结果与环评阶段预测结论保持较好的一致性。

参考文献：

[1] 四川大渡河瀑布沟水电站环境影响报告书[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 1985. 5.

[2] 四川大渡河瀑布沟水电站环境影响复核报告书[R]. 成都：中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2003. 5.

[3] 大渡河瀑布沟水电站枢纽工程竣工环境保护验收调查报告[R]. 贵阳：中国水电顾问集团贵阳勘测设计研究院, 2012. 12.

[4] 四川省大渡河瀑布沟水电站环境影响后评价报告[R]. 北京：环境保护部环境工程评估中心, 2018. 12.

洱海流域水资源量变化趋势分析

林　芸，唐亚松，刘　刚，刘　胜

（中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南　昆明　650051）

摘　要：洱海流域地处大理州政治、经济、文化中心的大理市，是大理市的主要水源地，具有调节气候、供水等多种功能，对大理地区的经济社会发展具有举足轻重的作用。根据收集到的洱海流域水文气象资料，对洱海流域的水资源量进行分析计算，分析总结洱海水资源量的变化趋势。根据分析结果，洱海流域一方面受大尺度的气候因素影响，天然水资源量总体呈下降趋势，另一方面，随着经济社会的不断发展，人类活动影响日趋严重，水资源开发利用率呈逐年上升趋势。应当采取切实可行的手段加强洱海流域的水资源保护，合理开发利用洱海水资源，加强水资源管理，形成有序而高效的水资源利用模式。

关键词：洱海流域；水资源量；趋势；利用模式

1 流域自然地理概况

洱海流域属澜沧江-湄公河水系，是全国第 7 大淡水湖泊、云南省第 9 大高原湖泊，位于澜沧江、金沙江和元江-红河 3 大水系分水岭地带，属澜沧江-湄公河水系。发源于洱源县，上源称弥茨河，大体自南向北流，沿途纳入海西海（总库容 6185×$10^4$$m^3$）、茈碧湖（总库容 9360×$10^4$$m^3$）、西湖，经洱源和邓川两坝子分别由弥苴河、罗时江、永安江等进入洱海，西纳苍山十八溪水，南有波罗江，东有凤尾箐等小溪流汇入，其天然出湖河流仅有西洱河，湖水从西洱河流出与漾濞江汇合后注入澜沧江。在西洱河闸门出口以上的流域面积 2565km^2。洱海因湖形南北狭长、形如人耳、风浪大如海而得名。湖面高程 1966m（1985 国家高程基准）时，湖面面积 252km^2，蓄水量达 29.59×$10^8$$m^3$。1995 年 10 月“引洱入宾”工程建成后，通过隧道将洱海水引入宾川，形成了新的出湖通道[1]。

洱海地处云南省大理白族自治州境内，被大理人民称为“母亲湖”，流域由南向北流经洱源县、大理市。大理市位于下游，囊括了整个洱海的湖面面积，全市用水水源基本都来自于洱海，是大理市的主要饮用水源地，又是苍山洱海国家级自然保护区和风景名胜区的核心，并具有调节气候、供水、发电、农灌、航运、水产养殖、旅游、水生生物多样性等多种功能，对于整个流域乃至大理地区的经济社会发展、水生态文明建设及基础生活环境提升起着举足轻重的作用，是大理的核心竞争力。而洱海周边的田园风光、农耕文化，更是洱海的魅力所在[1]。

2 流域气候、水文特性

流域地处滇中区域西部，处于低纬度高原地带，四周高山环绕，大部分属北亚热带高原山地季风气候，其特点是气候温和、寒止于凉、暑止于温、四季如春、日照充足、雨热同季、干湿分明、风能丰富。全年有干湿季之别而无四季之分。降水充沛，但时空分布不均。

据区域内的大理气象站观测资料统计，多年平均气温 15.4℃，最高月平均气温 25℃，最低月平均气温 2.3℃；极端最高气温 31.6℃，极端最低气温-4.2℃，多年平均降水量 1049.3mm，多年平均相对湿度 69%；多年平均蒸发量（小型蒸发皿）1864.2mm[2]。

流域旱季主要受干暖偏西气流控制，干旱少雨，日照充足，空气干燥；湿季为来自孟加拉湾和北部湾的暖湿气流控制，湿度大，降水充沛。由于地形的作用，流域内气候的垂直变化十分明显。根据区域内的气象、雨量站资料分析，降水量在面上分布差异较大，大体上自南向北、自西向东递减。因受大的地形和局部地形的作用，面上分布和垂直分布都有所不同。自洱海东面的挖色一带，多年平均降水量不足 750mm，高程每上升 100m，降水量约增大 48mm，是本区域内的降水低值区；洱海西岸多年平均降水量超过 1000mm，高程每上升 100m，降水量约增大近 70mm，属本区域内

的降水高值区。区内雨季一般在 5 月下旬～10 月下旬，降水年内分配不均。5～10 月降水量约占全年降水量的 85.7%，1～4 月和 11 月、12 月降水量约占全年降水量的 14.3%。

区域径流主要来源于降水，融雪甚少，径流特性主要取决于降水特性。与降水相应，流域径流时空分布不均，山区大于盆坝区和河谷区，大部分径流集中在雨季，汛期 6～10 月径流量约占全年径流量的 75%，枯期 11～5 月径流量约占全年径流量的 25%。径流模数除与集水面积有一定关系外，更主要与降水时空分布有关。由于降水在面上分布差异较大，径流模数的地区分布差异也很大，洱海流域陆面多年平均径流模数约为 $38.8\times10^4 m^3/km^2$；高值区在降水量较大的点苍山一带，径流模数约 $69\times10^4 m^3/km^2$；而降水较少的洱海东岸挖色一带，其径流模数仅在 $27\times10^4 m^3/km^2$ 左右[3]。由于流域下垫面复杂多变，径流的年际变化大于降水的年际变化，并随流域面积的增大而减小。径流在年内的分配也较悬殊，且由于流域下垫面的调节作用，比降水滞后约 1 个月。洱海流域近 63%的径流集中在 7～10 月 4 个月内，12～5 月半年径流量只占全年径流量的 22.6%。

3 基本资料

为了分析洱海的径流，本次重点收集洱海流域炼城（二）水文站、下关水文站、天生桥水文站、下关（引洱入宾）水文站、海西海水库、茈碧湖水库的流量、水位、雨量等相关资料，吊草沟、喜洲、苍山、沙坪、挖色、凤羽、洱源牛街、福和、银桥等水文、雨量站点的雨量资料，以及大理气象站降水、蒸发资料。资料年限采用至 2015 年。主要依据的水文气象站点分布见图 1。

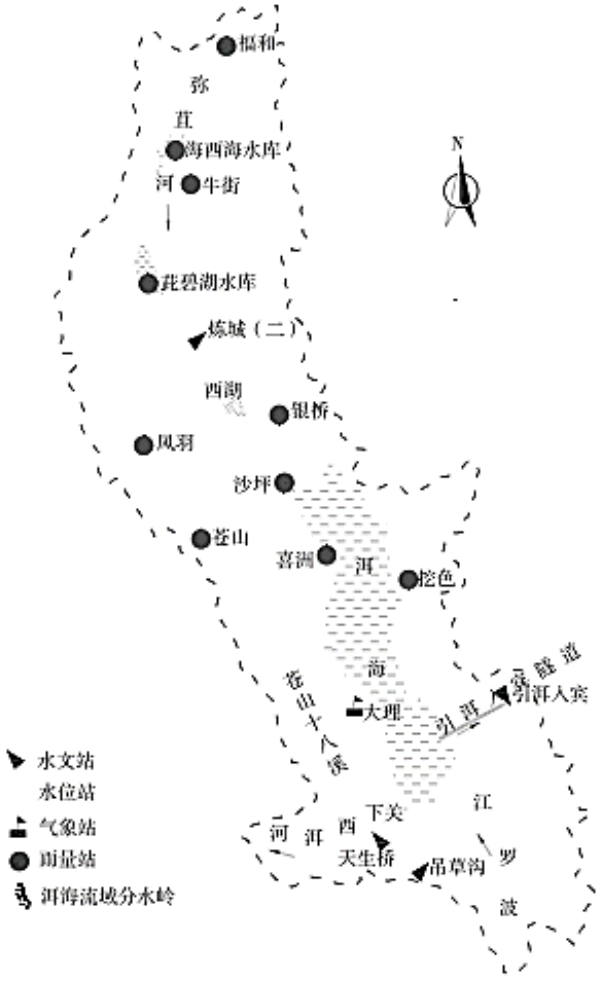


图 1 洱海流域水文、气象站点分布图

经基本资料综合评价及三性分析，上述站点资料均具有较好的可靠性和代表性，除炼城（二）站之外，各站点资料也都具有一致性，而炼城（二）站已作了一致性处理，处理后的资料具有一致性。

4 洱海天然水资源量计算

4.1 计算方法

洱海天然水资源量采用以下平衡式计算：

$W_{天}=W_{陆}+W_{湖}=W_{出}+W_{耗}\pm\Delta W\pm\Delta W_{水库}$（式 1）

式中：$W_{天}$-洱海天然水资源量；$W_{陆}$-陆地入湖量；$W_{湖}$-湖面产水量；$W_{出}$-出湖水量；$W_{耗}$-流域内工农业及生活用水耗水量；ΔW-洱海计算时段始末蓄水变量；$\Delta W_{水库}$-上游水库蓄水还原量。

即洱海流域天然水资源量为流域陆域产水与湖面产水之和，还原因子考虑了出湖流量、流域耗水量、洱海蓄水变量和上游水库蓄水变量[4~5]。由于洱海渗漏损失量计算参数无资料考证，因此不作考虑。

4.2 还原量计算

4.2.1 出湖水量 $W_{出}$

出湖水量采用天生桥一级电站发电量与新桥断面水量关系推求，1994 年起加入引洱入宾，并加入天生桥断面生活污水部分出流。出湖水量主要为实测数据。洱海多年平均出湖水量为 $7.478\times10^8m^3$。

4.2.2 耗水量 $W_{耗}$

由于资料原因，仅对 1980～2015 年工、农业、生活用水进行还原计算（q）。1980 年以前耗水量采用云南省第 1 次水资源调查评价的还原量。

1）农业耗水量：通过《大理州水利统计年鉴》进行洱源县、大理市的实灌耕地面积统计，又根据“云南省水利工程成就图”查算洱源县、大理市洱海流域在全市范围内所占耕地面积的比重，计算洱海流域内的实灌耕地面积。灌溉定额用《云南省水利年鉴》的灌溉用水量除以实灌面积求得。按照灌溉定额和灌溉面积得到农业用水量，再考虑渠系利用系数 0.55～0.65、耗水系数 0.70～0.75，得到农业耗水量。

2）工业耗水量：工业主要为乳制品、烟草、啤酒、中成药、软饮料以及低速载货汽车等轻型工业为主，无火、核电厂等重工业，根据各年万元增加值的单位用水量和 10^4 元增加值推求得到工业用水量，再考虑 0.215 的耗水系数，求得工业耗水量。

3）生活耗水量：参考 DB53/T 168-2006《云南省地方标准用水定额》和 DB53/T 168-2013《云南省地方标准用水定额》，按不同年代取不同的用水定额，根据历年人口统计数字，通过农村人口与城镇人口比重，采用不同的用水定额，生活用水定额采用为 65～110L/人·d。估算得到生活用水量。生活耗水系数采用 0.09～0.11，据此得到生活耗水量。

经分析，2015 年洱海流域农业灌溉用水量为 $1.720\times10^8m^3$，工业用水量为 $0.9253\times10^8m^3$，生活用水量为 $0.2493\times10^8m^3$；2015 年洱海流域农业耗水量 $0.7467\times10^8m^3$，工业耗水量 $0.1989\times10^8m^3$，生活耗水量 $0.0272\times10^8m^3$，总耗水量为 $0.9728\times10^8m^3$。

4.2.3 洱海蓄水变量△W

采用年初水位与下年初水位变幅查算水位库容曲线得年内蓄水变量。计算长度为 1956～2015 年。

4.2.4 上游水库蓄水变量△$W_{水库}$

还原计算考虑洱海上游海西海、茈碧湖两个中型水库水量还原，采用年初水位与下年初水位变幅查算水位库容曲线得年内蓄水变量，统计两个水库蓄水变量。

4.3 计算成果

经还原计算后，得到 1956～2015 年洱海多年天然水资源量 $8.198\times10^8m^3$。洱海流域历年天然水资源量变化趋势见图 2，10 年滑动平均水资源量变化趋势见图 3。

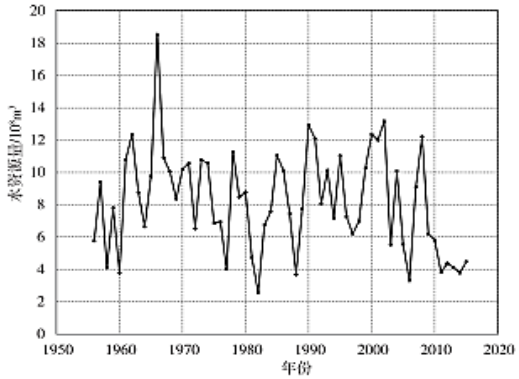


图 2　洱海流域天然水资源量变化趋势图

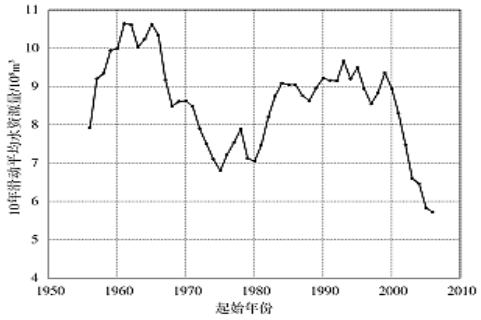


图 3　洱海流域 10 年滑动平均水资源量变化趋势图

5 洱海流域水资源量变化趋势分析

从上述分析结果看，洱海流域天然水资源量年际变化较大，年最大水资源量出现在 1966 年，达 $18.54\times10^8m^3$，年最小水资源量出现在 1982 年，仅 $2.589\times10^8m^3$，最大最小水资源量之比达 7.16。

从 10a 滑动平均水资源量变化趋势来看，自上世纪九十年代至今，洱海水资源量大体呈逐渐下降趋势，洱海流域水资源短缺问题日益凸显，特别是近年来，由于洱海流域连年干旱，枯水时间较长，加剧了洱海水资源的短缺。表 1 列出了洱海流域历年天然水资源量的变化趋势情况。从该表可以看出，五十年代平均水资源量较常年偏少 17.4%，属枯水年份；六十年代处于丰水期，较常年偏多 21.9%；七十年代处于平水期，与常年相差不大；八十年代开始进入第 2 个周期变化，又进入枯水期，九十年代属于丰水期，到 2000 年～2009 年，水量开始下降，但平均值也与多年平均属于同一个量级，2009 年之后，进入连续 7 个枯水年，平均水资源量与常年比，下降了 43.2%，尤其是 2011 年之后，洱海的水资源量仅有 $4.118\times10^8m^3$，下降了将近 50%。这样的连续 7a 枯水，属历史上首次。

表 1　洱海流域历年天然水资源量变化趋势表

年份	平均水资源量/10^8m^3	与多年平均水资源量比/%
1956～1959	6.775	-17.4
1960～1969	9.995	21.9
1970～1979	8.624	5.2
1980～1989	7.052	-14.0
1990～1999	9.216	12.4
2000～2009	8.949	9.2
2009～2015	4.658	-43.2
2011～2015	4.118	-49.8
多年平均	8.198	

6 结语

洱海作为云南省第 2 大高原湖泊、大理市主要水源地，一方面受大尺度的气候因素影响，天然水资源量总体呈下降趋势，另一方面，由于地处大理州政治、经济、文化中心的大理市，随着经济社会的不断发展，人类活动影响日趋严重，水资源开发利用率呈逐年上升趋势。根据收集到的洱海流域水文气象资料，对洱海流域的水资源量进行分析计算，分析总结洱海水资源量的变化趋势。按照本次分析结果，可为相关的水文分析计算奠定基础，为宏观决策层面提供依据。

1）应当采取切实可行的手段加强洱海流域的水资源保护，合理开发利用洱海水资源，加强水资源管理。

2）在洱海流域农业用水大户中，积极发展高效节水农业，合理取用水。

3）加强水资源管理，完善洱海流域用水机制和水价系统，避免水资源大量浪费，形成有序而高效的水资源利用模式。

参考文献：

[1] 林芸,钱斌天,刘刚,等.云南省大理州大理市海西高效节水减排项目可行性研究报告[R].中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司,2017，8.

[2] 李东梅,马根连,蔡文静,等. 大理市地表水资源调查评价[R].云南省水文水资源局大理分局,2007，9.

[3] 李婕,陈岗,简世勋. 洱海流域水资源供需平衡预测分析[C].//云南省水利学会 2015 年度学术年会论文集,昆明:云南省水利学会，2015(12)：724-728.

[4] 罗佳翠,傅骅. 洱海流域及周边地区水资源的可持续利用[J].中国农村水利水电, 2003（10）:73-75.

[5] 李文娟,严昌荣,刘恩科,等.洱海流域近 59 年水资源的多时间尺度分析[J]. 中国农业气象, 2010,31(增 1):10-15+19.

构建新时代流域水电开发生态环境保护管理体系的探索与实践

邢　伟，毛　进

（华电金沙江上游水电开发有限公司，四川 成都 610041）

摘　要：我国生态文明建设形势已发生历史性变化，建立与之适应的生态环保管理体系，对企业自证守法、安全运营至关重要。本文从环境管理、环境监督、环保措施、环保科研、环境保障等五个方面，提出了构建新时代流域水电开发生态环保管理体系的总体思路，并在金沙江上游水电开发中推广应用。

关键词：生态；环保；管理体系

1 引言

近年来，我国生态文明建设形势发生了历史性变化，思想认识程度之深、污染治理力度之大、制度出台频度之密、执法监督尺度之严、环境改善速度之快前所未有。建设单位作为项目生态环保工作的第一责任人，贯彻国家生态文明建设要求，建立与之适应的生态环保管理体系，对企业自证守法、安全运营至关重要。本文结合华电金沙江上游水电开发公司（简称“金上公司”）有关情况，对构建新时代流域水电开发生态环保管理体系进行一些思考与分析，并在金沙江上游水电开发中得到推广应用。

2 金沙江上游（川藏段）水电开发概况

金沙江上游是金沙江水电基地的重要组成部分。2004 年 3 月，国家正式启动金沙江上游干流河段水电规划工作，梯级布局及资源规划方案为“一库十三级”，规划总装机容量 13920MW。2012 年 7 月，国家发展改革委批复了《金沙江上游水电规划报告》，同意八级规划实施方案。规划实施方案中，川藏段岗托、波罗、叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、昌波七级由华电金沙江上游水电开发公司负责开发，总装机 9436MW。

表 1：金沙江上游（川藏段）水电开发概况表

项目	岗托	波罗	叶巴滩	拉哇	巴塘	苏洼龙	昌波
装机	1200MW	920MW	2240MW	2000MW	750MW	1200MW	826MW
所处阶段	可研	可研	在建	在建	在建	在建	可研
核准时间	–	–	2016 年 11 月	2019 年 1 月	2017 年 10 月	2015 年 11 月	–
截流时间	–	–	2019 年 3 月	计划 2021 年	计划 2020 年	2017 年 11 月	–
计划首台机组投产日期	–	–	2025 年	2028 年	2023 年	2021 年	–

金上水电开发认真贯彻“生态优先、绿色发展”的生态环保理念，确立了建设“绿色金上”环保精品工程的目标。在开发过程中，统筹兼顾生态环保要求与工程建设的有效衔接，确保工程进度与环保“三同时”相协调，不断探索构建新时代流域水电开发生态环保管理体系。

3 环境管理体系

3.1 分级管控机构建设

公司本部层面：成立以党委书记、总经理为组长的生态环保领导小组，定期召开会议通报管理现状，研究布置下一步工作。机构设置上，组建流域环境保护管理中心，承担流域环保工作的全局统筹、纵向管理职能，负责环保水保的前期、设计、招标、过程监督、验收等业务归口管理，及与各单位、政府主管部门之间信息传递的中心纽带作用。

基层单位层面：成立相应的电站生态环保领导小组，组建安全环保部，配置专职环保管理人员。创新环保管理机制，将业主与环水保监理的职能融合，成立电站环水保管理中心，环水保监理代行

业主管理职能；既充实和加强基层环水保管理力量，同时又赋予环水保监理更高的职权，更利于实现环水保监理对工程监理的专业技术指导、对施工单位的业务考核。

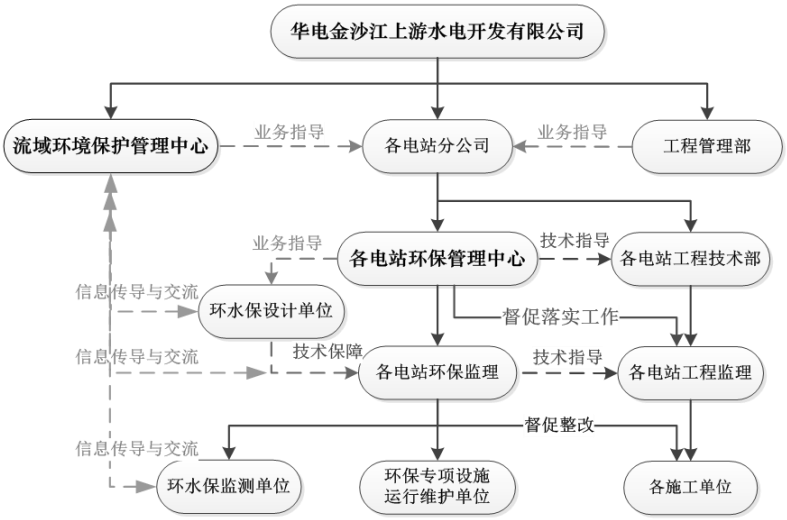


图 1：分级管控生态环保管理体系框架图

3.2 生态环保管理制度建设

以国家生态环境保护最新法律、法规和政策为指引，以创建“绿色金上”为目标，编制完善《生态环境保护管理办法》、《环境保护与水土保持“三同时”管理办法》等管理制度，形成上下位关系清晰、配置合理，全过程、全方位、全要素的生态环保管理制度体系。

表 2：生态环保管理制度体系框架表

制度类型	制度名称
基本制度	生态环境保护管理办法
一般制度	环境保护与水土保持“三同时”管理办法
	环境保护与水土保持监理管理办法
	环境保护与水土保持监测管理办法
	环境事件责任追究办法
实施细则	环境保护与水土保持监督检查、考核办法
	突发环境事件应急预案
	水电工程招标文件环水保标准条款

4 环境监督体系

4.1 定期监督

建立环保水保监督检查制，实行分级监督。监督重点包括：环保水保措施落实情况，环保水保设施建设进度与主体工程进展匹配情况，环保水保监理、监测开展情况，环保信息公开情况，各级行政主管部门的检查意见整改落实情况等。

表 3：分级监督检查情况表

监督检查分级	组织方	监督检查对象	频次	成果运用
一	公司	各电站	季度/次，阶段性监督	实施月度绩效考核、纳入分公司企业领导班子绩效考核管理。
二	各电站	环水保监理	月度/次	纳入公司年度设计、监理考核评价。
三	环水保监理	各施工承包商	日巡检、月检查同步	纳入公司施工单位信用评价管理。

采取“亮美丑、树典型”和“持续通报”的闭环管理措施。季度监督检查当月，在月度基建视频会上通报检查情况，公布各电站环保形象典型照片，形成警示、震慑作用，将突出环境问题列入月度重点工作计划。次月会议持续通报整改情况，整改不及时、不彻底的，实施月度考核，视情况

在年度绩效考核中扣分。对突出问题仍不重视、不整改的，印发风险预警书、或按公司《环境事件责任追究办法》问责。

4.2 阶段性监督

强化事中监管，参照国家竣工环保、水保自主验收的程序及规定，在工程关键节点开展阶段性自主验收，委托第三方开展阶段验收调查并编制调查报告，成立专项工作组开展验收。叶巴滩水电站完成截流阶段环保、水保专项验收。

5 环保措施体系

5.1 健全环保措施体系

建立完善的水环境保护、大气环境保护、声环境保护、水土保持、生态环境保护措施体系，认真做好各环保措施的设计、建设和运行管理，确保各项工作满足环评、水保要求。

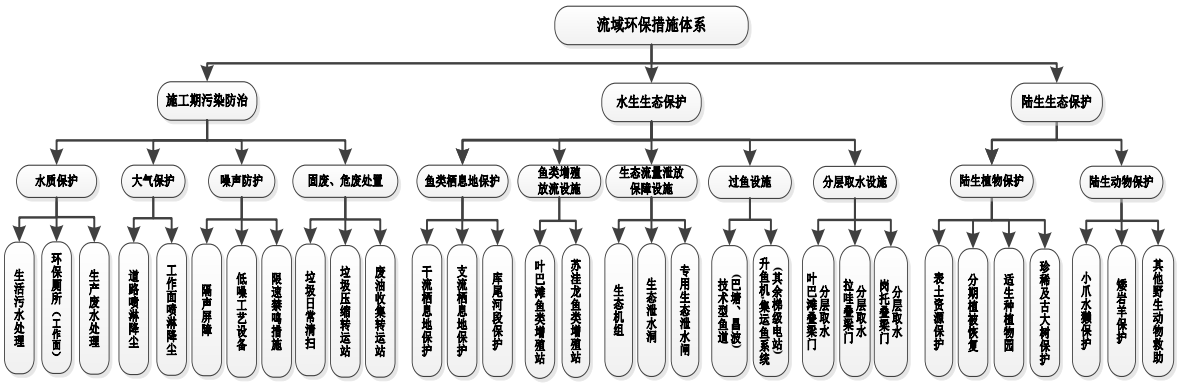


图 2 流域环保措施体系图

在水环境保护方面，配套建设生活污水、生产废水处理设施。生活污水采用 MBR（膜生物反应器）工艺处理；在工作面规范配置环保厕所；生产废水采用辐流沉淀等工艺处理。污废水经处理后，循环回用于场内降尘和厂区绿化，实行“零”排放管理。

在大气保护、噪声防护方面，强化道路、工作面喷淋降尘；优先选用低噪工艺的设备；在声环境敏感点设置隔声屏障、限速禁鸣标志，定期实施监测。

在固废、危废防治方面，各电站生活垃圾均统一外运至地方垃圾填埋场处理，叶巴滩电站已建成投运垃圾压缩转运站，生活垃圾经压缩后统一外运处置。同时，在各工区设置废油临时收集贮存点，苏洼龙、叶巴滩电站建设废油收集转运站，委托有资质的单位定期外运处置。

在栖息地保护方面，取得两省区各级政府同意，将多个支流河段作为鱼类栖息地予以保护。先期开发的 4 级电站，金上流域的干流、支流保留自然河段长度已达 423km。

在鱼类增殖放流方面，严格按环评批复要求在截流前建成投运鱼类增殖站。2018 年 3 月，苏洼龙鱼类增殖站在截流次年实现首批鱼类亲本站内人工繁殖成功；同年 9 月完成首次放流任务。2019 年 3 月，叶巴滩电站截流，其配套的鱼类增殖站同期建成投运。至 2019 年 6 月，金上流域已累计完成两次放流共 35 万尾。

在生态流量泄放方面，为保证河流生态，各级电站分别设计了生态机组、专用生态泄水闸、生态泄放洞等生态流量保障设施。其中，叶巴滩电站在环评批复后，追加环保投资上亿元，进一步完善相应保障措施，以提高生态泄水的安全度和保证率，并取得原环境保护部复函同意。

在过鱼措施方面，苏洼龙正同步开展升鱼机工程设计关键技术科学研究，过鱼隧道按计划掘进。巴塘鱼道工程专题设计报告通过审查。叶巴滩水电站正开展过鱼设施相关鱼类生态行为学等研究。

在分层取水措施方面，对预测水库水温分层效应明显的高水头电站设计了多层叠梁门用于分层取水，通过下泄表层水，可预防和减免水温分层后下泄低温水对下游敏感目标的影响。

在陆生生态保护方面，规范表土收集，积极推进高寒高海拔干旱河谷植被恢复研究，完成苏洼龙、叶巴滩水电站适生植物试验园设计方案；按环评要求完成苏洼龙电站库区大核桃移栽；完成原环境保护部“绿色水电”系列研究课题中的“陆生关键物种保护及恢复技术科研项目”并通过验收。编制适应区域气候条件的推荐植物名录，逐年制定计划，同步开展分期植被恢复，持续稳步提升现场形象。

5.2 建立生态环境监测与调查体系

加强施工期监测管理。及时委托技术单位开展环境监测、水保监测工作，加强与监测单位的沟通对接，掌握监测现状，适时组织专题会，指导现场及时调整施工组织，尽量减少环境风险及对工程后期验收和评优的影响。

统筹推进流域生态调查。集中委托技术单位对在建电站同期开展陆生、水生生态调查，以统筹各电站调查时间、空间的重叠，确保调查方法、深度及关键问题从技术上统一。调查内容涵盖施工期、蓄水前后、运行初期的工作任务，有利于为竣工环保验收及环境影响后评价积累宝贵的过程资料。

表 4：金沙江上游叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙水电站生态调查计划表（第一阶段）

<table>
<tr><th>电站</th><th>2019</th><th>2020</th><th>2021</th><th>2022</th><th>2023</th><th>2024</th><th>2025</th></tr>
<tr><td>苏洼龙</td><td rowspan="4">第 1 次水生、陆生调查</td><td>下闸蓄水</td><td rowspan="4">第 2 次水生、陆生调查</td><td></td><td></td><td></td><td rowspan="4">第 4 次水生、陆生调查</td></tr>
<tr><td>叶巴滩</td><td></td><td></td><td></td><td>第 3 次水生、陆生调查</td><td>下闸蓄水</td></tr>
<tr><td>巴塘</td><td></td><td>下闸蓄水</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>拉哇</td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

为加强对在建项目的过程跟踪，委托开展“金沙江上游（川藏段）流域水电开发生态环境跟踪评价”工作，每年梳理规划实施过程中存在的问题，对流域水电环境管理提出环境合理化建议，以实现金沙江上游流域水电开发与环境保护协调发展。

6 环保科研体系

委托开展了《金沙江上游（川藏段）水电开发生态环境保护与综合管理体系总体规划研究》，从流域层面对科研体系进行规划，提出了涵盖基础性研究、应用性研究、管理性研究的环保科研体系，为流域生态环保科研的有序推进奠定基础。此后，结合开发进程，各类科研有序开展。

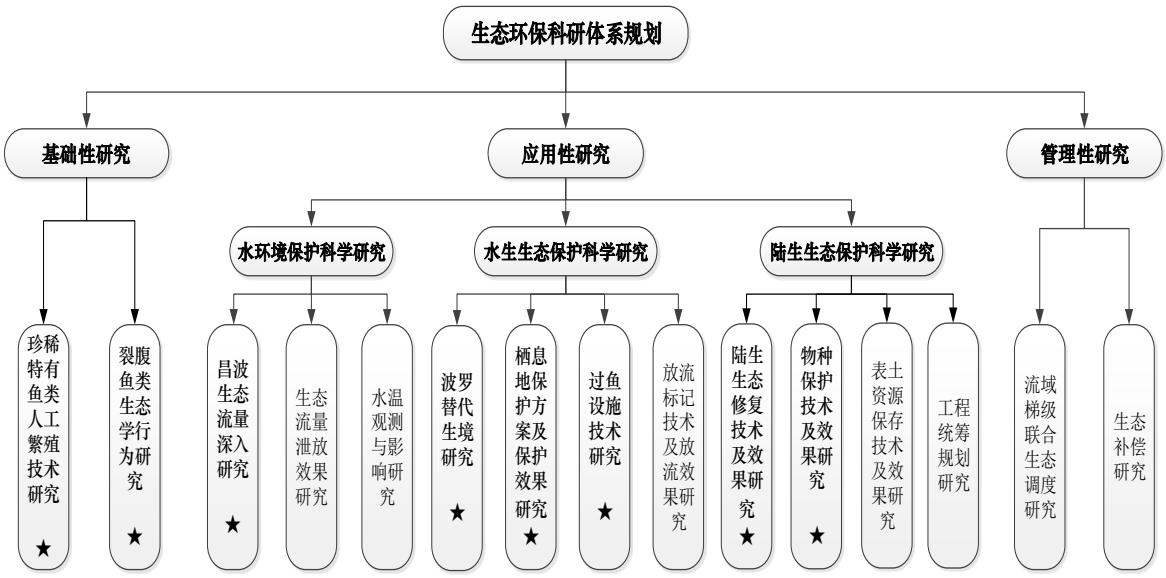


图 3：生态环保科研体系规划图（★表示已开展或正开展的研究）

7 环境保障体系

7.1 高度重视责任意识提升

抓好生态环保意识形态教育，不断提高政治站位，增强贯彻习近平生态文明思想的政治自觉、思想自觉、行动自觉。与流域机构联合开展习近平生态文明思想联学交流活动，建立交流共建长效机制，以党建促业务，不断强化环保责任意识提升；组织生态环保管理制度宣贯及环保工作座谈会，进一步统一和提升各单位抓好生态文明建设的意识。

7.2 落实绩效考核与责任追究，实现体制保障

在企业年度绩效考核评价实施细则中，将环境保护作为关系企业安全运营的重要指标纳入考核范围。同时，编印《环境事件责任追究办法》，对屡纠屡犯的突出环境问题采取“零容忍”，勇于开展内部问责，严格确保制度执行的刚性，使各单位对环境保护心存敬畏。

7.3 加强人才队伍建设，提供人才保障

加大对环保、工程管理人员的培训力度。邀请地方行政主管部门、国内大型流域开发公司相关专家授课，宣贯讲解国家环保水保法律法规、工作经验及管理要点，提高员工业务技能，夯实生态环保管理人才基础。

7.4 确保资金足额投入，增强资金保障

合理、足额编制环保、水保概算投资，为各项生态环保措施的落实提供资金基础；合理安排资金计划，保障环保重点工程资金投入，确保环保投资与主体投资相匹配；加强环保资金使用监管，确保专款专用。

8 结语

金沙江上游是长江重要的生态安全屏障，生态环境脆弱，恢复技术难度大，其独特的地理位置和自然环境对环保工作提出了更高的要求，迫切需要建立完善的流域生态环保管理体系以确保工作高效推进。近年来，金上公司流域生态环保管理体系运转有效，获得了相关好评。在各级生态环境保护部门的指导下，生态环境保护管理水平逐步提升，努力树立人与自然和谐发展的“绿色金上”新形象。

国际工程环境保护工作开展方式

屈福旺，穆万鹏，徐文卓

（桑河二级水电有限公司，云南 昆明 650214）

摘　要：随着国家“一带一路”倡议构想的逐步落实，越来越多的中国企业，特别是施工企业走出国门，参与到更加广阔的世界市场竞争中去。由于国内与国外大环境以及国人与其他民族思维方式存在较大差异，各企业在机遇增加的同时也面临着更多的挑战。

关键词：国际工程；环境保护；机遇与挑战；方式方法

1 引言

我国政府自 2015 年 3 月 28 日起开始构建“一带一路”（“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”）区域合作平台，该平台覆盖区域范围内的国家多为新兴经济体，其经济发展迅速，对装备和基础设施需求强劲，市场潜力巨大，为我国企业提供了难得的发展机遇和广阔的市场空间。作为“一带一路”倡议的主要参与者，越来越多的具备较强实力的中国企业在国内市场日趋饱和的情况下，将目光瞄向这些国际市场，以此作为企业发展的新机遇和新契机。当然机遇总是与挑战并存，中国企业在向国际市场进军的路上会遇到很多意料之中或意料之外的困难，比如对项目所在国的政治、经济、投资环境、法律条文的不熟悉，项目建设过程中专业人才的匮乏、汇率波动的风险、物资组织和运输、“走出去”的配套政策和机制滞后等。其中，有一项对工程项目能否顺利实施甚至启动影响重大的不确定因素,是在很多公司意料之外或被严重低估的，即环境保护工作。

随着世界经济的快速发展，世界各国逐渐意识到可持续发展的重要性，环保意识普遍加强[1]，在发展本国经济的同时，同样甚至更加重视环境保护等问题。在中国企业参与较多的各发展中及不发达国家，均参照西方模式对工程建设的环境保护工作提出了很高的标准；其次以美国国际河流组织为代表的欧美发达国家 NGO 环保组织非常活跃，对有中国企业参与的水电站等工程建设更是给于特别关注，经常发出片面甚至是不公正客观的报导，抹黑中国企业的形象，引导当地政府及民众反对项目建设，对工程项目的实施造成了严重影响。

2 失败案例

这里将以两个典型的受环境保护问题严重影响的项目来说明环境保护工作在国际工程项目中的重要性。

案例 1：“小小青蛙”使中铁折戟波兰。

2011 年 6 月 13 日，波兰公路管理局正式取消了与中国海外工程有限责任公司联合体签订的 A2 高速公路项目合同，导致这一结果的一个非常重要的因素就是中海外公司对该项目的环保工作严重低估，重视不足。A2 高速公路连接波兰华沙和德国柏林，是打通波兰和中西欧之间的重要交通要道，并将用于 2012 年 6 月由波兰和乌克兰联合举办欧洲足球杯，因此备受波兰政府、民众甚至欧盟国家的瞩目。但中海外首先在投标报价阶段就考虑不全面，相较 A2 高速公路西段标段达到项目总投资 25%的环保成本预算，中海外的环保成本预算只占项目总投资的 10%；其次在项目环保工作上与相关的政府部门和咨询公司沟通、协调不到位。A2 高速公路路段沿途栖息着 7 种珍稀两栖动物，包括一种雨蛙、两种蟾蜍、三种青蛙和一种“普通欧螈”。波兰多罗咨询公司多次对中海外进行邮件交涉，要求中海外在施工过程中必须妥善处理“蛙”的问题，包括为动物修建穿越公路的专用通道及通道建成之前蛙类的迁移工作等。但中海外直接不予理睬，直到蛙类冬眠期临近仍未开展相关工作，因此被采取强制措施，全面停工以便全力以赴“搬运”蛙类，将其迁移到安全地带。造

成以上结果的原因主要是中海外对项目环保工作没有给予足够的重视，未对波兰的环保工作和环境氛围进行充分的了解：波兰很多基础设施项目建设资金都有欧盟机构的补贴，如果违反欧盟环境保护法律，波兰就可能拿不到补贴，所以波兰对环保问题非常重视，在很多基建项目中，都会要求承包方聘请生物专家进行指导，将工地及周边的珍稀动物迁移到安全的地方。在这种情况下，在 A2 高速项目的实施过程中由于成本上升，资金周转不开无法按期发放工程款导致发生了当地分包商及员工游行示威、烧砸办公场所的暴力事件、多次停工致使工程进度严重延误等问题，遭到波兰政府、媒体及社会对中国企业的广泛批评，中海外被解除了合同，多个有中国企业参与投资的项目搁浅。

案例 2：喉舌失声，中企背黑锅。

缅甸密松水电站位于伊洛瓦底江干流上游，迈立开江与恩梅开江汇合处下游 7km 处，密支那以北 37km 处，总装机容量 600×10^4kW，是世界上第 15 大水电站，由缅甸电力部、中国电力投资集团、缅甸亚洲世界公司组成的合资公司投资建设，于 2009 年 12 月正式开工建设。令人意外的是，2011 年 9 月 30 日，缅甸总统吴登盛突然单方面宣布在他的任期内搁置密松水电站，并表示“这是对民意的尊重”。讽刺的是在大坝叫停前，吴登盛曾两次前往密松考察，并敦促加快项目建设。这里所谓的“民意”其实质是克钦族谋求独立的“民意”，是被日本、美国等国家所操纵的新闻媒体、教会及 NGO 组织所渲染的“民意”。诚然，中电投在项目开发过程中确实存在对项目的环境保护工作重视程度不足，在项目开工之前未进行环境影响评估，与教会、NGO 等组织等沟通协调不到位等问题。但克钦独立军（KIA）与缅甸政府的利益冲突才是根本原因，密松水电站坝址在克钦邦政府军辖区，而淹没区却在克钦独立军辖区，建成后将在上游地区淹掉克钦独立军的一部分辖区，压缩与缅甸政府对抗的战略空间。如此关系克钦族生死存亡的事情，反对修建电站也就在情理之中了。同时，缅甸几家影响力较大的媒体都被日本控制，不管中国企业做什么都不会得到正面的报道，大多数基督教会、NGO 环保组织则长期受到美国的资助与影响，长期散布密松水库会造成环境灾难的言论。密松水电站被搁置的决定得到了极端环保分子、政治活动家、日本及美国等国家的欢迎和支持，而当地移民却始终没有反对。项目的搁置使大量当地居民失业，生计困难，一些反对组织在当地呼吁移民返回家园，然而绝大多数移民都认为新的居住条件更好，几乎没有居民愿意搬回原来的居住地。中电投在撤出了大部分人员和设备后，现场的留守人员仍在为当地移民提供大米、医疗、教育、扶贫等帮助，而这些消息却从未出现在缅甸国内的新闻媒体上。长期以来，多数中国海外企业在解决这类问题时，仍拘泥于传统方式，闷头做事，不注重宣传沟通，缺乏与时俱进的改变，没有自己的媒体代言人，没有自己的教会组织，也没有自己的 NGO。企业社会责任并非密松项目停建的本质，中国海外企业缺乏公平的舆论环境，话语权的缺失却使中国海外企业的形象遭到抹黑。

3 成功经验

相对于以上两个受环保问题影响而遭受惨重损失的项目，位于柬埔寨的桑河电站项目在环境保护工作上的开展方式及经验做法，值得急于走出国门并在国际市场中抢占一席之地的中资企业学习和借鉴。

桑河二级水电站位于柬埔寨东北部上丁省内，总装机容量 400MW，于 2014 年 1 月 10 日开工建设，是目前柬埔寨最大的水电站。说起该电站环保工作的开展方式，有必要先了解柬埔寨国内的环境保护氛围：作为一个传统的农业国家和新兴的旅游国家，柬埔寨政府对环境保护的重视程度是毋庸置疑的，很早就颁发了环保法、环评法等法律法规，且法律条文较为严苛，执行度要求高；柬埔寨对外开放程度很高，境内汇集了众多以国际河流组织为代表的知名国际 NGO 环保组织。国际河流组织总部位于美国加利福尼亚州伯克利，分支机构遍布亚洲、非洲及拉丁美洲众多国家，其目标是保护河流以及依靠河流生存的社会群体，反对水库建设，代表性活动成果之一是参与组织全球

性的国际反水库运动，宣称正是他们的努力使世界范围内的水库建设减少了一半，可见其影响力。在这些国际 NGO 组织的带动下，其分支机构和各种自发成立的 NGO 民间组织遍布柬埔寨全国各地，部分地区甚至达到了每个村镇都有其成员甚至分部的程度。

在这样的不利环境下，澜沧江公司通过以下几方面工作的开展，顺利完成了工程的开发建设[3]。

1）认真做好项目前期的咨询工作。桑河电站在立项之初就遭到以国际河流组织为代表的 NGO 组织的反对，这些 NGO 组织完全无视电力短缺对柬埔寨经济的快速发展所造成的巨大制约，无视柬埔寨人民的切身利益，通过新闻媒体大肆宣扬电站建设对区域生态环境的破坏，阻扰电站的建设。在这种情况下，澜沧江公司遵照柬埔寨环境保护方面的相关法律法规及柬埔寨政府的要求，委托柬埔寨国内最具权威性质的咨询公司开展了环境影响评价工作[2]，之后将环境影响评价报告提交柬埔寨政府进行审批，最终通过了国会的审核，并得到洪森首相的亲自批准，项目各项前期工作得以顺利进行。

2）根据环评报告及柬埔寨政府对其的批复文件，并结合工程所在地实际情况，在工程设计[6]过程中重点考虑当地生态环境、物种保护等方面所需的工程措施的设计工作，如控制大坝高程以减小淹没区面积，布设合适的鱼类通过大坝的通道，以保护途径大坝的洄游鱼类等。

3）引用一句习近平主席对党的要求的一句话——“打铁还需自身硬”，澜沧江公司根据环境影响评估报告的要求、柬埔寨相关法律法规的规定以及在国内工程建设中积累的丰富经验，结合桑河电站现场的实际情况，对电站所在区域的环境保护工作进行了全面规划[3]，制定了各项环境保护工作技术措施[4]，并在工程建设过程中严格落实，确保将电站建设对周边的环境影响降低到最小程度。

4）着重做好对外协调沟通工作。通过以下两个发生在桑河电站建设过程中的事件，可以使我们了解到做好对外协调沟通工作的重要作用。事件一：2015 年 7 月，桑河下游一临河村庄中的数名村民出现呕吐、腹泻等症状，在某 NGO 组织的引导下，当地一媒体报道宣称该症状是由桑河电站在施工过程中对桑河河水造成的污染所致，对澜沧江公司的公众形象进行抹黑。为了还原事实真相，维护澜沧江公司的良好形象，澜沧江公司邀请由柬埔寨政府能矿部、环保部、当地政府官员、当地媒体、NGO 组织代表、事件所涉及的村庄的民众代表等组成的考察见证团，到电站施工现场进行参观考察，同时邀请柬埔寨国内具有权威性质的检测机构对桑河河水进行水质检测分析[5]。事实证明桑河河水水质良好，并未遭到电站施工活动的污染，由此澄清了误会，获得了各方的好评。事件二：2015 年上半年国际河流组织开展“环境与社会政策综合评估报告”课题研究，其主要内容是对包括桑河电站在内的一批中国企业开发建设的国际水电工程在环境保护工作开展情况等方面进行评估打分。国际河流组织在没有和澜沧江公司进行正面接触，客观调查取证的情况下，根据网络上搜集到的信息以及其他 NGO 组织针对桑河电站所做的报告，做出主观的、片面的、不负责任的评估。在获知这一情况后，澜沧江公司快速反应，与国际河流组织代表进行了会务交流沟通，并根据评估的相关内容整理资料，同时提交给柬埔寨能矿部、环保部和国际河流组织，要求国际河流组织在多方的共同见证下客观公正地开展评估工作，最终得到了较高的分数，进一步在当地政府、民众、新闻媒体及各 NGO 组织中牢固树立了澜沧江公司“绿色、生态、负责”的品牌形象[6]。

4 结语

在国际工程的开发建设过程中，环境保护是一项非常重要和敏感的工作，这对急于走出国门，想要真正进入国际市场并在其中站稳脚跟的中国企业~~，这~~是不可回避的。因此企业不仅要勇于面对，不回避，不拒绝，更要在对外协调工作中展现出积极主动的姿态，做好国际工程开发建设环境保护工作，挺起腰杆，与当地政府环保部门、NGO 组织等平等对话，竖立中国企业负责任、讲信用的良好形象，为将“一带一路”建设成为绿色、繁荣与友谊之路夯实基础。

参考文献：

[1] 秦虎，王菲　国外的环境保护 [M]　北京：中国社会文献出版社，2008.
[2] HJ/T88-2003 环境影响评价技术导则：水利水电工程 [S] .
[3] 常旭，闫平　试论大型水利水电工程建设环境管理 [J]　中国科技博览，2014（19）：175-175.
[4] 王林涛　水利水电工程施工现场环境保护措施探讨 [J]　建筑工程技术与设计，2015（29）.
[5] 吴金川，王梦帆，杨慧莉　水利水电工程环境监测与施工环境保护对策 [J]　河南水利与南水北调，2016（5）：106-107.
[6] 董鹏翔　水利水电工程设计中关于环境保护措施探讨 [J]　建筑工程技术与设计，2016（12）.

黄河龙羊峡以上干流河道形态特征及空间分异规律

寇晓梅[1]，牛　乐[1]，杨　涛[1]，胡金明[2]，洪　欢[2]

（1.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；
2.云南大学，云南 昆明 650206）

摘　要：黄河上游龙羊峡以上地区位于国家重要的生态安全屏障—三江源地区，独特的地形地貌造就了独特多样的河流形态环境。本文利用遥感影像、地形数据，采用地理信息系统技术，分析了黄河龙羊峡以上干流各河段的形态特征和分布规律，旨在通过对河流自然特征的了解，为后续合理利用资源、充分保护河流生态提供基础依据。

关键词：河道形态；黄河龙羊峡以上；河道形态；空间分异

1 引言

黄河龙羊峡以上干流河长 1600 多 km，源头至鄂陵湖出口长约 200 多 km，鄂陵湖出口至龙羊峡水电站库尾河长约 1417km，落差 1677m，多年平均流量 643m^3/s。本文研究对象是从鄂陵湖出口至龙羊峡水电站库尾河段。

研究河段自上而下地貌特征主要表现为：从鄂陵湖出口~达日县，黄河干流穿行于起伏不大的高原丘陵盆地地带，支流纵横、沼泽湖泊星罗棋布，河谷开阔，河床平坦；从达日县~久治县，河道穿行于巴颜喀拉山东南段与阿尼玛卿山中段~南段之间，两岸山势渐高，坡度较缓，河谷略有收缩，宽谷和峡谷间有分布；从久治县~玛曲县，河流经过开阔的沼泽区，支流黑河、白河等汇入，水量大增，成为黄河第一大产流区；从玛曲以下，河道从高原下切成为深谷，河谷狭窄，水流湍急，落差较大。

2 河型分类及特征指标

2.1 河型分类

河型是指一条河流的平面形态，它在宏观尺度上直观地反映了河流的地貌多样性，不同河流形态存在不同的流速、流量、河宽、水深、比降、河床质粒径梯度等，这些构成了河流多样的生境条件，为鱼类等水生生物生存繁衍提供了场所，自然条件的变化和人类活动会导致河流系统因素的改变，从而引发水生生态的改变，因此研究河型具有重要的生态意义。

目前，河型的分类并未完全统一，按照河流平面形态进行分类，可分为弯曲、顺直、辫状、单股、分汊、江心洲等类型；按河流变动特性分类，可分为周期增宽、蜿蜒、游荡、摆动等类型。本文结合研究河段内河型空间分布特征，将河型分为单河道与多河道两大类型，其中，单河道型包括蜿蜒、顺直 2 种河型，多河道型包括辫状、网状、分汊 3 种河型。

2.2 河流形态特征指标

为系统地反映研究河段形态特征，从河段的空间、内部、外部形态特征三个维度构建研究河段的河流形态特征指标体系。河流的空间特征用纵向与横向的特征表示；河流的内部形态特征用河间地特征表示；河流的外部形态特征用边界特征表示。每个特征下均设有进一步描述相应特征的指标，基于数据的可获得性，针对河段特点并借鉴相关研究指标，选取 4 个特征 7 项指标进行表征，见图 1.1-1。

河流形态特征指标体系中，各指标的定义、内涵及计算方法如下：

（1）蜿蜒度：表征河流弯曲程度，反映河段纵向特征。蜿蜒度（a_1）定义为河段内河流中心线长度（L_C）与河段起止点间距离（L）比值，即 $a_1=L_C/L$，为无量纲量。一般认为蜿蜒度大于 1.5 的河流为蜿蜒型河流。

（2）纵剖面：河流中心线高程沿程变化，反映河段纵向特征。纵剖面（a_2）本文定义为研究河段每隔 5 km 提取中心线高程进行绘制。

（3）比降：沿水流方向上河段起止点高程差，反映河段纵向特征。河道比降（a_3）定义为河段两端高程差（Δh）与河段起止点间距离（L）之比，$a_3=\Delta h/L$。

（4）河宽：河流总宽度，包括河道水面宽度与河间地宽度，反映河段横向特征。本文河宽由遥感目视解译得到河流边界线，每隔 100 m 左右取河流宽度。

（5）横断面：反映河段横向特征，如河岸坡度、河漫滩多寡、河谷大小等，同时又表征河流横向连通性。本研究取河段典型断面 14 处。

（6）面积比（a_6）：特定河段单位面积内发育的河间地面积，用河段内河间地面积（A_I）与河段总面积（A）之比来表示：$a_6=A_I/A$。河段总面积为河间地面积与水面面积之和。面积比用来反映不同河段分布的河间地相对差异及各个河段内河间地的发育状况，面积比大表明河段内分布的河间地密度大，河间地发育良好，反之，说明河间地发育少，密度小。

（7）坡度比（a_7）：斜坡坡面与水平面夹角的度数。河岸的坡度在一定程度上反映了河段的边界条件。本文沿河道左右两岸各向外扩 3km 作为缓冲区，将缓冲区内的坡度划分成 6 个等级，分别是 0~8°、8°~15°、15°~25°、25°~35°、35°~45°、>45°，每个河段缓冲区内各个坡度等级所占百分比即为河段的坡度比。

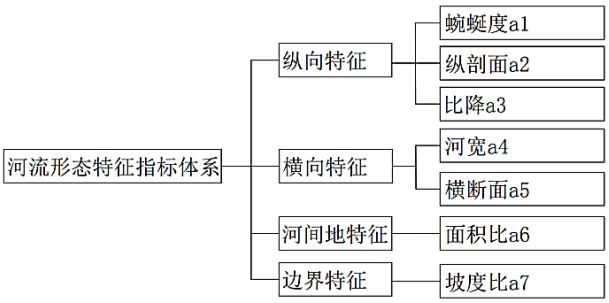


图 1 黄河上游河流形态特征指标体系图

2 研究河段河道形态特征及空间分异

2.1 研究河段河型

本研究将黄河龙羊峡以上河段划分成 14 个部分，其中单河道型 7 段，编号为 SCi（i=1~7），多河道型 7 段，编号为 MCi（i=1~7），各河段位置见表 2.1-1 及图 2.1-1。

表 2.1-1 黄河龙羊峡以上河段河型分段表

河段	位 置	河长（km）	经纬度	
			起 点	终 点
SC1	吾托-卡尔格（柯生乡附近）	306	E100° 15′58″N 35°42′41″	E101° 24′47″N 34°13′47″
MC1	卡尔格-俄日盖秀玛（欧拉乡附近）	59	E101° 24′47″ N34°13′47″	E101° 48′11″ N34°03′44″
SC2	俄日盖秀玛-玛曲渔场（黑河入河口附近）	47	E101° 48′11″ N34°03′44″	E102° 07′34″ N33°58′09″
MC2	玛曲渔场-卡加（辖曼乡附近）	78	E102° 07′34″ N33°58′09″	E102° 25′12″ N33°34′37″
SC3	卡加-同惹（唐克乡附近）	32	E102° 25′12″ N33°34′37″	E102° 24′50″ N33°25′55″
MC3	同惹-畅隆（齐哈玛黄河大桥附近）	65	E102° 24′50″ N33°25′55″	E101° 56′10″ N33°26′44″
SC4	畅隆-乔南贡尕卜	14	E101° 56′10″ N33°26′44″	E101° 54′18″ N33°32′26″
MC4	乔南贡尕卜-阿万仓黄河大桥（沙曲入河口）	51	E101° 54′18″ N33°32′26″	E101° 33′14″ N33°40′34″
SC5	阿万仓黄河大桥-隆卡（德昂乡附近）	319	E101° 33′14″ N33°40′34″	E100° 00′43″ N33°40′11″

河段	位　置	河长（km）	经纬度	
			起　点	终　点
MC5	隆卡-狼雅贡玛（优云乡附近）	200	E100° 00′43″ N33°40′11″	E99° 03′54″ N34° 20′59″
SC6	狼雅贡玛-歇柔桑（东曲入河口附近）	35	E99° 03′54″ N34°20′59″	E98° 52′44″ N34°29′07″
MC6	歇柔桑-格波隆格恰（热曲入河口附近）	96	E98° 52′44″ N34°29′07″	E98° 23′02″ N34°38′09″
SC7	格波隆格恰-热曲村	27	E98° 23′02″ N34°38′09″	E98° 23′03″ N34°48′35″
MC7	热曲村-鄂陵湖口	88	E98° 23′03″ N34°48′35″	E97° 54′32″ N35°05′52″
	合计	1417		



图 2 黄河上游龙羊峡以上干流河型分布图

2.2 河段纵向特征——蜿蜒度

研究河段蜿蜒度见图 2.2-1。整体而言，蜿蜒度大于 1.5 的河段有 5 段，总长约 953km，占总河长的 67%。其中单河道中，蜿蜒度最大的是 SC5 段，其次是 SC3 段，再次是 SC1 段；多河道中，蜿蜒度最大的河段是 MC6 段，其次是 MC5 段；其余河段的蜿蜒度均在 1.2~1.4 之间，较为顺直。

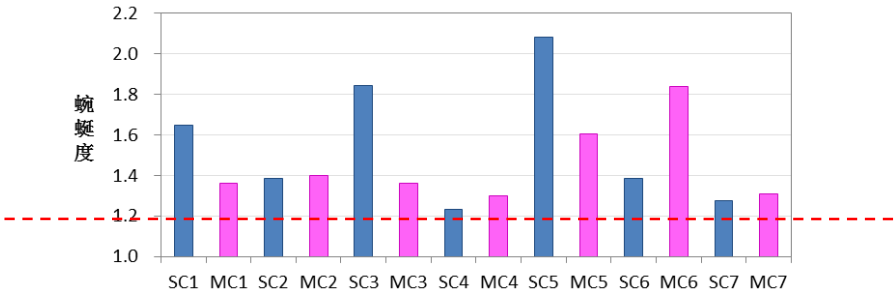


图 2.2-1 黄河上游龙羊峡以上干流各河段蜿蜒度值

2.3 河段纵向特征——纵剖面

研究河段干支流纵剖面见图 2.3-1，河段从下游至上游干流海拔高程沿程升高明显，比降达 1.17‰；但分段上升幅度有差异，总体上可分为 4 段：

第一段：从龙羊峡库尾至泽曲汇入口段，河段纵剖面上升幅度明显，为整个河段中最大，比降为 4.34‰，其中巴沟汇入口至泽曲汇入口纵剖面发生显著转折，是黄河龙羊峡以上干流河床下切幅度最大的河段。根据河流裂点（nick point）理论，该河段应是黄河龙羊峡以上干流的“裂点”。

第二段：从泽曲汇入口至沙曲入口段，河段上升幅度变缓，比降为 0.46‰。

第三段：从沙曲入口到吉迈段，河段上升幅度又有增加，比降为 1.2‰；

第四段：从吉迈口到鄂陵湖口，上升幅度变缓，比降仅为 0.80‰。

较大支流中，除了玛曲黄河第一弯处的几条河流的中下游河段上升幅度较小外，其余支流海拔高程上升幅度均大于相应干流河段，特别是泽曲入河口下游的支流（沙沟、茫拉河、大河坝河、曲什安河、巴沟、切木曲），支流比降在 3.8~13.0‰。

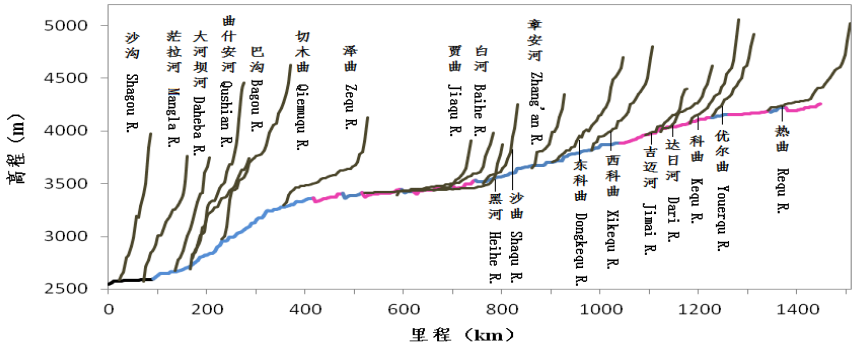


图 2.3-1 黄河上游龙羊峡以上干支流纵剖面图

2.4 河段纵向特征——比降

各河段比降见表 2.3-1。单河道段中，除了 SC2 和 SC6 段的河道比降较小外，其余河段的河道比降均大于 1‰，其中 SC1 段河道比降为所有河段中最大，达到 3.46‰。多河道段中，MC5 段河道比降最大，达到 2.27‰，位于柯生乡、欧拉乡段的 MC1 和位于玛多附近的 MC7 段的河道比降大于 1‰，其余河段的河道比降均小于 0.5‰，其中 MC3 与 MC2 段河道比降最小，均小于 0.3‰。总体而言，位于上游的多河道段的河道比降均要小于紧连的单河道段的河道比降。

表 2.3-1 黄河上游龙羊峡以上干流各河段的河道比降

单河道	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7
河道比降（‰）	3.46	0.63	1.86	1.46	2.66	0.79	1.92
多河道	MC1	MC2	MC3	MC4	MC5	MC6	MC7
河道比降（‰）	1.19	0.27	0.23	0.36	2.27	0.31	1.02

2.5 河段横向特征——河宽

各河段河宽的特征值见表 2.4-1。研究河段平均河宽为 428m，多河道段的平均河宽远大于单河道段。单河道 SC3 段达到最大，SC7 段达到最小；多河道段平均河宽最大的河段在黄河第一弯处的两个网状河段 MC3 和 MC4，平均河宽最小的河段在最上游的 MC7 段。研究区内最大河宽出现在位于玛曲采日玛乡附近的 MC4 段，该段有发育规模较大河间地，河宽达到 5988m；最小河宽出现在靠近玛多的单河道 SC7 段，约为 10m。

变差系数（C_V）反映了各河段中河宽的相对离散程度，C_V 值越小表明河段内河宽相对越一致。总体来看，多河道段的河宽变差系数要大于单河道段，其中 SC4 段和 MC2 段的变差系数小，河宽相对一致；河宽变差系数较大的河段是 MC6 段与 MC7 段，这两个河段内河宽变化差异较大，河型变化丰富。

表 2.4-1 黄河上游龙羊峡以上干流河段河宽特征值

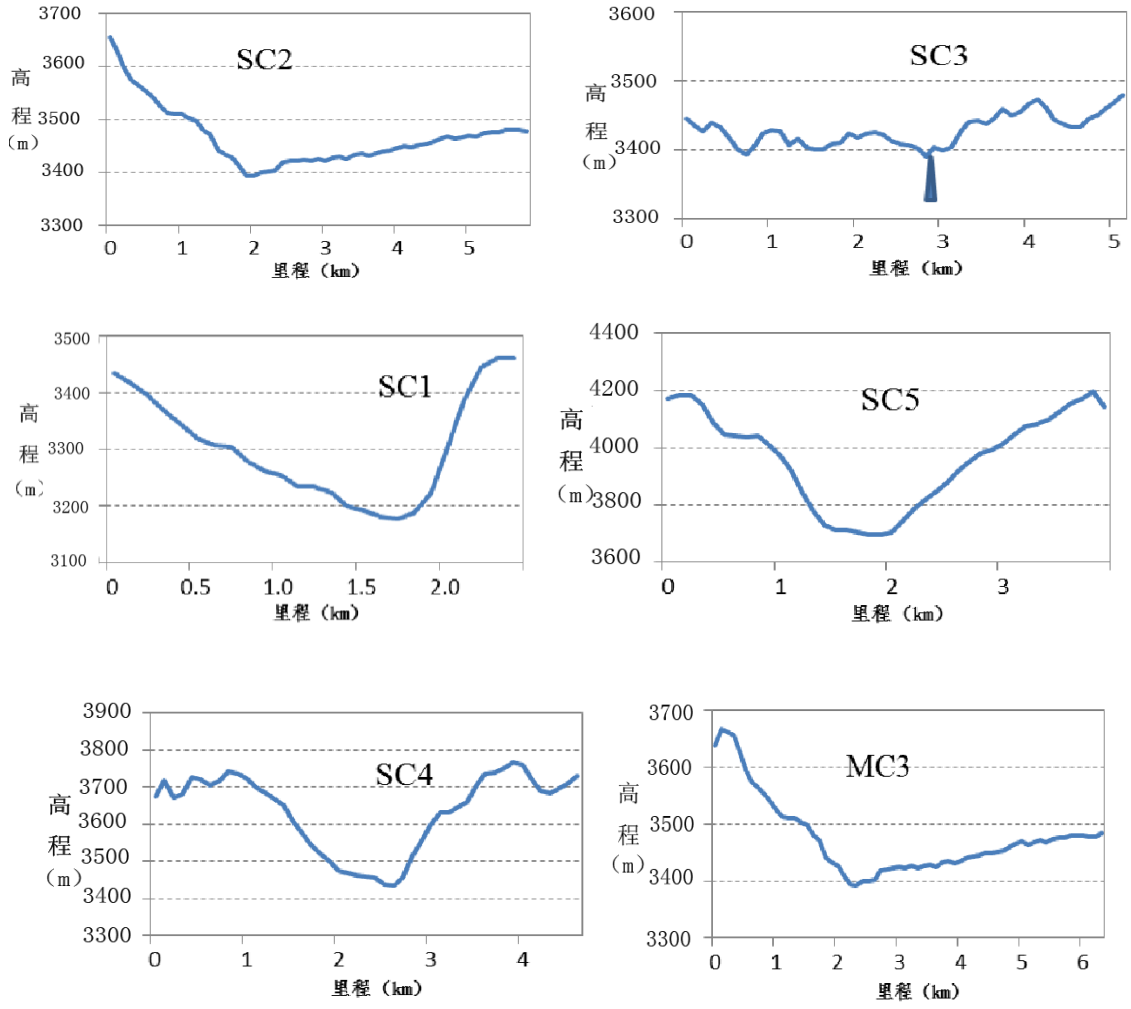
河段	河段长（km）	平均河宽（m）	最大河宽（m）	最小河宽（m）	变差系数 Cv
SC1	306	90	725	17	0.61
MC1	59	403	1549	60	0.72
SC2	47	233	1211	63	0.60
MC2	78	731	1416	181	0.38
SC3	32	321	706	92	0.51
MC3	65	1106	3034	151	0.50
SC4	14	134	199	88	0.17

河段	河段长（km）	平均河宽（m）	最大河宽（m）	最小河宽（m）	变差系数 Cv
MC4	51	1158	5988	120	0.89
SC5	319	147	1044	31	0.76
MC5	200	569	1679	31	0.61
SC6	35	90	241	30	0.43
MC6	96	603	5460	30	1.24
SC7	27	53	237	10	0.55
MC7	88	358	2369	16	1.07
总河段	1417	428	5988	10	-

2.6 河段横向特征——横断面

各河段的典型横断面见图 2.5-1，可以看出，黄河龙羊峡以上干流各河段典型横断面形态多样，不仅有位于峡谷、河谷区 V 型、U 型断面，还有位于平原区的开阔断面。

从下游至上游看，SC1 段位于下切河谷区，河流深切，两岸间或有冲积扇分布；MC1、SC2 段河谷开始变得较为开阔，出现大面积阶地，阶地以下有少量河滨湿地；MC2、SC3、MC3 段两岸极为开阔，有大面积河漫滩，地势平缓，发育有河漫滩湿地，周围分布有沙丘和牛轭湖遗留痕迹；SC4 段河漫滩较少，断面呈 U 型；MC4 段附近有低于河道高程的湖泊湿地，河岸极为开阔；SC5 河谷较为开阔，两岸分布有河漫滩湿地，断面呈 U 型；MC5 段河谷更为开阔，发育有很多河漫滩湿地；SC6、MC6 段两岸地势较平缓，两岸发育有大量与河相连的湖泊湿地；SC7 断面呈 V 型，属 V 型峡谷段；MC7 段两岸极其平缓，两岸分布有与河道相连的大型湖泊。



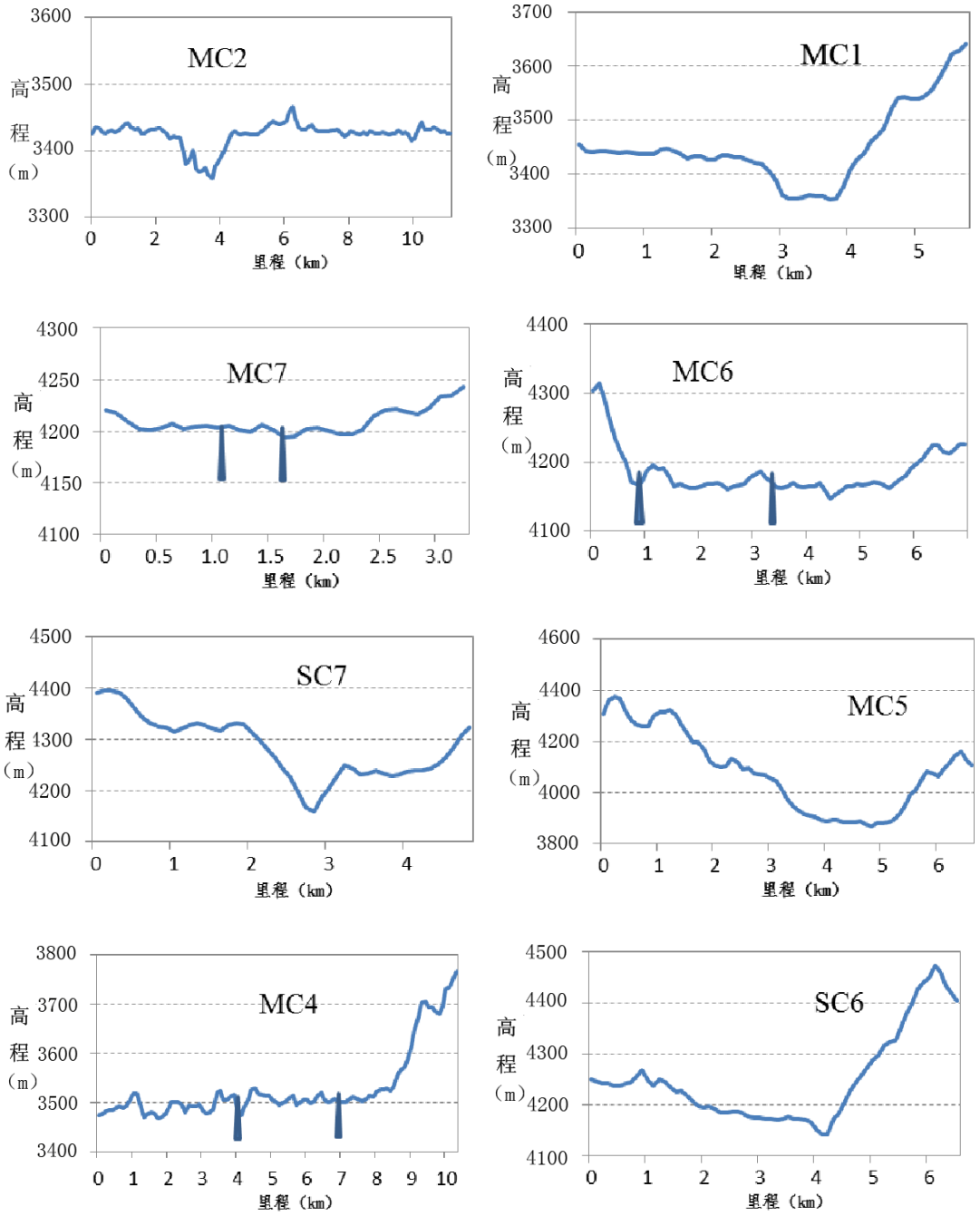


图 2.5-1 黄河上游龙羊峡以上各河段典型横断面图

注：横断面从河流左岸至右岸绘制；河道不明显的河段，河道部分用三角形或两个三角形之间的部分突出表示。

2.7 河间地

河间地是指包括河心洲、沙洲、边滩等在内的河道间未被水淹没的部分，河间地作为湿地最重要的组成部分，具有独特的生态功能及价值。通常认为鱼类倾向于在河间地较多的河段产卵，所以河间地的存在与多寡对鱼类等水生生物有重要影响。总体来看，研究河段的河间地大多分布在多河道段。用面积比来分析河间地的发育情况，计算结果见表 2.6-1。

单河道段中，SC4 与 SC1 河段的面积比最小，接近 0；而 SC2、SC3 与 SC5 面积比较大，占总河段总面积的 20%左右，表明这些河段相比其他单河道河段，河道中分布了较多的河心洲。多河道河段中，MC7 段面积比最大，达到 83%，其次是 MC6 段和 MC4、MC3，面积比在 73%左右，面

积比最小的是 MC2 段。除 MC2 段外，多河道河段河间地的面积比均大于 50%，表明黄河龙羊峡以上干流多河道段内河间地发育普遍良好。

表 2.6-1 各河段河间地特征

河段	河段长（km）	河间地面积（km^2）	面积比（%）
SC1	306	0.94	2.93
MC1	59	15.62	54.16
SC2	47	2.20	18.95
MC2	78	22.14	39.07
SC3	32	2.63	25.25
MC3	65	56.96	72.72
SC4	14	0	0
MC4	51	58.55	72.69
SC5	319	10.19	20.84
MC5	200	75.59	63.53
SC6	35	0.30	9.97
MC6	96	60.26	73.06
SC7	27	0.15	10.11
MC7	88	27.67	83.13

2.8 边界特征——坡度比

各河段边界的坡度比见图 2.7-1，总体来看，多河道段边界分布在 0~8°和 8°~15°这两个范围的坡度所占比例较单河道段多。单河道段中，SC1 段和 SC5 段的边界坡度在 25°~35°、35°~45°、>45°范围所占比例较大，这与 SC1 段高原面抬升，河流深切作用有关。SC2 段、SC3 段和 MC2 段 90%以上的边界坡度都位于 0~8°和 8°~15°这两个范围区间，这 3 段所处区域沼泽湿地发育。MC6 与 MC7 段 95%以上的边界坡度小于 15°，这两个河段两岸地势平坦，湖泊密布。

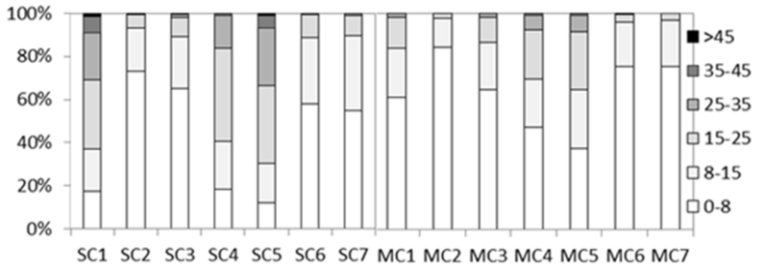


图 2.7-1 黄河龙羊峡以上干流各河段边界不同等级坡度比例图

3 结语

黄河龙羊峡以上干流河型总体上呈单河道型与多河道型相间分布形态，其中在研究河段下游段泽曲入口以下的 SC1 段及沙曲至达日的 SC5 段，单河道型河段距离较长，河道比降较陡，是研究河段中水力资源蕴藏较为丰富的河段；多河道型河段主要分布在黄河第一湾玛曲河段及研究河段的上游段鄂陵湖口至达日河段，该区域河谷较为开阔，河网较发育，河道比降小，生物多样性相对较丰富，是高原鱼类生境条件较为适宜的区域。

本文构建了研究河道形态的纵向特征指标（蜿蜒度、纵坡面、比降）、横向特征指标（河宽、横断面）、河间地特征指标（面积比）、边界特征指标（坡度）等 7 项指标，较为全面、系统地定量分析了黄河龙羊峡以上河道的自然形态特征，表征了研究河段形态的空间分异规律，这些研究能够为今后对黄河上游干流合理利用资源和生态环境保护提供较为充分的技术依据和参考。

浏阳河流域鱼类资源现状调查及河流健康状态评价

殷芙蓉[1]，阴双雨[2]，李　翔[1]，谭秀益[1]

（1.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司，湖南 长沙 410014；

2.武汉市伊美净科技发展有限公司，湖北 武汉　430000）

摘　要：通过对浏阳河流域鱼类资源的调查可知，与 1980 年浏阳河流域的鱼类资源相比较，浏阳河流域的鱼类种类大幅度减少，由原有的 86 种鱼类下降到 44 种。从浏阳河鱼类生物完整性角度来评价浏阳河河流健康状态。根据计算结果可知，浏阳河上游河流健康状态为“一般”，中下游河流健康状态为“一般”向“差”的过度状态。鱼类生物损失指数为 51.16%，浏阳河属于不健康状况。

关键词：浏阳河流域；鱼类资源；鱼类生物完整性；河流健康

浏阳河位于湖南省东部，是湘江的一级支流，水系发源于罗霄山脉的大围山北麓，有大溪河和小溪河两个源流。流域全长共 222 公里，流域面积 4665 平方公里，流经浏阳市、长沙县市共 40 个乡镇。

本文旨在通过调查浏阳河流域的鱼类资源现状来了解浏阳河河流健康状态，对浏阳河流域鱼类资源的保护及可持续利用和浏阳河水环境的改善具有重要意义 。

1 调查方法

2017 年 4 月至 5 月，在浏阳河下游的柏加镇、镇头镇，位于中游的普迹镇，位于上游的古港镇、达浒镇、大围山镇、小溪河高坪、支流椒花河这 8 个区域进行了鱼类资源现场调查。调查的主要方式是雇佣渔民网捕，辅以收集渔民网捕、电捕渔获物的方式进行，依照《内陆水域渔业自然资源调查手册》[1]采样方法。采集的鱼类标本进行现场拍照、分类、记数、体长、体重测量，不易确定的种类 ，用 10%的福尔马林溶液保存带回实验室鉴定。标本鉴定及分类主要依据《中国动物志.硬骨鱼纲.鲤形目》[2]、《中国动物志.硬骨鱼纲.鲤形目（下卷）》[3]、《中国动物志.硬骨鱼纲.鲇形目》[4]、《中国淡水鱼类检索》[5]、《湖南鱼类志》[6]。

2 结果与分析

a）种类

根据《浏阳县农业区划成果报告》(1981)记载，20 世纪 80 年代浏阳河鱼类有 86 种，主要经济鱼类有草鱼、鲢、鳙、青鱼、鲤、鲫、长春鳊、三角鲂、团头鲂、黄尾鲴、细鳞鲴、鳜、银鲴、乌鳢、翘嘴鲌、蒙古鲌、青梢鲌、鳜、赤眼鳟、中华倒刺鲃、黄颡鱼等。

与 1980 年浏阳河流域的鱼类资源相比较，浏阳河流域的鱼类种类大幅度减少，由原有的 86 种鱼类下降到 44 种。

从整个流域来看，浏阳河原有的经济鱼类中草鱼、鲢、鳙、青鱼、黄尾鲴、银鲴、翘嘴鲌已经逐渐退出优势物种，其中鳜、蒙古鲌、青梢鲌、赤眼鳟、中华倒刺鲃在本河段已经很少见。宽鳍鱲、高体鳑鲏、中华鳑鲏、鲴和李氏吻鮈鲩、侧条光唇鱼、洞庭小鳔鮈等小型鱼类已经成为了浏阳河流域的优势物种。

从不同区域来看，浏阳河中下游鱼类以鲴、中华鳑鲏、高体鳑鲏、银鮈等喜静水缓流的鱼类为主。

表 1　各区域鱼类资源现场调查情况表

种	调查区域							
	下游		中游	上游			小溪河	支流
	柏加镇	镇头镇	普迹镇	古港镇	达浒镇	大围山镇	高坪	椒花河
鲢	3	0	0	0	0	0	0	0
鳙	4	0	0	0	0	0	0	0

种	调查区域							
	下游		中游	上游			小溪河	支流
	柏加镇	镇头镇	普迹镇	古港镇	达浒镇	大围山镇	高坪	椒花河
鲃	3	5	0	6	4	8	3	2
鲤	2	6	4	5	3	0	6	4
细鳞鲴	0	0	5	0	0	0	0	0
马口鱼	2	2	0	0	4	6	3	3
宽鳍鱲	9	6	5	4	3	16	4	9
草鱼	3	0	0	0	0	0	0	0
鯊	15	23	0	34	11	32	28	13
鳊	14	6	0	0	3	0	0	0
飘鱼	3	1	0	0	0	0	0	0
南方拟鯊	2	2	0	0	0	0	0	0
华鳊	5	6	6	0	2	0	0	0
团头鲂	2	3	0	0	0	0	0	0
达氏鲌	3	5	3	0	3	0	0	0
中华鳑鲏	24	22	0	0	56	45	0	19
高体鳑鲏	13	19	0	0	35	32	0	17
侧条光唇鱼	0	3	0	0	43	21	0	19
唇鱼骨	0	0	2	0	3	0	0	0
花鱼骨	0	3	4	6	9	0	0	7
麦穗鱼	6	2	0	0	0	0	11	0
黑鳍鳈	3	12	0	0	0	0	0	0
银鮈	11	6	9	0	11	0	8	9
吻鮈	0	0	0	0	23	0	0	0
洞庭小鳔鮈	0	0	0	0	78	34	0	38
蛇鮈	0	6	0	0	11	0	0	5
花斑副沙鳅	0	2	0	0	0	0	0	0
中华花鳅	0	2	0	0	4	3	0	0
泥鳅	9	4	0	5	9	2	0	11
南方鲇	1	0	0	0	2	0	0	0
鲇	0	0	0	0	1	0	0	0
黄颡鱼	0	3	3	0	1	0	1	0
瓦氏黄颡鱼	1	2	5	0	3	0	3	0
细体拟鲿	0	2	5	0	0	0	0	0
黄鳝	2	0	0	0	0	0	0	0
大眼鳜	0	0	0	2	0	0	1	0
斑鳜	0	0	4	0	0	0	3	0
沙塘鳢	0	8	0	0	0	0	0	6
黄鱼幼鱼	0	4	0	0	0	0	0	4
李氏吻鰕虎	8	14	0	14	11	21	0	18
子陵吻鰕虎	14	12	0	23	23	9	0	32
叉尾斗鱼	0	0	0	6	0	0	0	0
乌鳢	1	0	0	0	0	0	0	0
刺鳅	2	0	0	0	5	0	0	0
尾数	165	191	55	105	361	229	71	216
种类数量	27	29	12	10	26	12	10	17

b) 珍稀、濒危保护鱼类和重要经济鱼类状况

根据湖南省水产研究所、浏阳市畜牧水产局的历史资料及现场调查结果，浏阳河没有国家重点保护鱼类、也没有被列入中国濒危动物红皮书的鱼类，被列入湖南省地方重点保护野生动物名录的有 4 种，分别为太湖新银鱼、洞庭小鳔鮈、胡子鲇、叉尾斗鱼。根据现场调查结果，洞庭小鳔鮈在浏阳河上游有较高的资源量，胡子鲇、叉尾斗鱼在浏阳河中游、上游有一定的资源量，太湖新银鱼在浏阳河现存量很低。



现场调查到的叉尾斗鱼



现场调查到的洞庭小鳔鮈

2 基于浏阳河鱼类生物完整性评价浏阳河河流健康状态

结合国内外研究方法和评价体系，鱼类调查方法与河流特征的 IBI 指标体系如下表所示。

表 2　适合我国长江水系河流水体的鱼类完整性指标评价体系

评估项目	评分标准		
	5	3	1
种类丰富度与组成			
1 鱼的物种数	>20	10～20	<10
2 鲤科鱼类的物种数百分比(%)	<45	45～60	>60
3 外来鱼类种数	0	0～1	>1
鱼类营养阶层			
4 溪流底栖食虫鱼类的相对密度(IS)(%)	>25	10～25	<10
5 软体动物食性相对密度(IV)(%)	>15	10～15	<10
6 小鱼虾食性鱼类相对密度(TP)(%)	>10	5～10	<5
7 杂食性的相对密度(O)(%)	<15	15～30	>30
8 浮游植物食性相对密度(P)(%)	<25	25～35	>35
鱼类耐污性			
9 敏感种的相对密度(%)	>15	5～15	<5
10 耐污种的相对密度(%)	<40	40～85	>85
11 先锋种的相对密度(%)	<35	35～65	>65
鱼类健康情形			
12 畸形鱼的相对密度(%)	<1	1～3	>3
合计			

生物完整性指数(IBI)的计算方法如下：研究者取样一个鱼类群聚，然后根据数种属性打分(S)，其中 5=最佳，3=中等，1=最差。研究者可给予各类型分数：

A. 物种的数量与种类(Ss)：(1)较多本土物种一般表示较高环境质量，(2)对环境敏感的物种存在表示环境质量高；

B. 某种鱼类的食性(Sf)：高比例的虫食与肉食生物表示高环境质量，而较高比例的杂食生物表示低环境质量；

C. 鱼类耐污性(Sa)：鱼类耐污性越高表示环境质量越低；

D. 鱼类健康情形(Sh)：较高比例的罹病与长瘤的鱼类及有解剖结构异常的鱼类均表示低的环境质量。

将所有群聚的属性分数加起来，得到生物整合指标(IBI)：IBI=Ss+Sf+Sa+Sh。总的来看，较高 IBI 分数表示较高环境质量。

表 3　鱼类生物完整性等级划分及特征

IBI 数值	特征完整性	等级
58～60	相对而言没有人类的干扰，依地理区系、湖泊(河流)大小和生境特点，所有期望出现的种类，包括耐受性极差的种类都存在，并有完整的年龄级；平衡的营养结构，极少数天然杂交和感染疾病的个体；极少或没有引进种。	极好
48～52	由于耐受性极差的种类的消失，种类丰度略低于期望值；某些种类的数量，年龄结构和大小分布低于期望值标准，营养结构显示出某种压力低，但仍有极少天然杂交和感染疾病的个体；引进种个体的数量比例通常很低。	好
40～44	环境恶化的讯号增加，包括耐受性差的种类消失，较少的种类和通常的种类数量下降，杂食性鱼类和耐受强种类的频度增加使营养结构偏斜；高年龄级个体和顶级肉食者可能罕见，天然杂交和感染疾病的个体的出现高于一般水平；引进种个体的数量比例上升。	一般
28～34	少数种类，主要是杂食性种类，耐受性强的种类，适应多种栖息地的种类或引进种类等，占据优势，极少顶级肉食者；年龄级缺失，数量、生长和体质指标下降，天然杂交和感染疾病个体出现较多。	差
12～22	除引进种和耐受性强的杂食性种类外，鱼类较少；天然杂交个体很普遍，感染疾病和寄生虫，鳍损坏和其它外形异常的个体的比例很高。	极差
＜12	重复采样，没有发现鱼。	没有鱼

浏阳河上游为杨潭乡(现高坪乡)至双江口河段；中游为双江口至镇头市河段；下游从镇头市起始。现把浏阳河分为上、中、下游 3 个区域使用鱼类生物完整性指数(IBI)分析浏阳河河流健康状态。根据计算结果，浏阳河上游河流健康状态为“一般”，中下游河流健康状态为“一般”向“差”的过度状态。

表 4　浏阳河分区域河流健康状态表

区域	生物完整性指数(IBI)	河流健康状态
上游	41	一般
中游	36	“一般”向“差”的过度状态
下游	36	“一般”向“差”的过度状态

3 基于鱼类生物损失指数评价浏阳河河流健康状态

鱼类生物损失指标计算公式如下：

$$FOE = FO/ FE$$

式中，FOE 为鱼类生物损失指数，FO 为评估河段调查获得的鱼类种类数量， FE 为 1980s 以前评估河段的鱼类种类数量。

浏阳河 1980s 以前鱼类按照 86 种计算，本次调查现场捕获鱼类 44 种。经计算，鱼类生物损失指数为 51.16%，属于不健康状况。

表 5　鱼类生物损失指数赋分标准

鱼类生物损失指数	1	0.85	0.75	0.6	0.5	0.25	0
指标赋分	100	80	60	40	30	10	1

4 结语

与 1980 年浏阳河流域的鱼类资源相比较，浏阳河流域的鱼类种类有大幅度减少，由原有的 86 种鱼类下降到 44 种；原有的经济鱼类中草鱼、鲢、鳙、青鱼、黄尾鲴、银鲴、翘嘴鲌、已经逐渐退出优势物种，其中鱤、蒙古鲌、青梢鲌、赤眼鳟、中华倒刺鲃已经很少见。宽鳍鱲、高体鳑鲏、中华鳑鲏、鱎和李氏吻鮈鳈、侧条光唇鱼、洞庭小鳔鮈等小型鱼类已经成为了浏阳河流域的优势物种。从不同区域来看，浏阳河中下游鱼类以鱎、中华鳑鲏、高体鳑鲏、银鮈等喜静水缓流的鱼类为主。上游的鱼类与浏阳河中下游有一定区别，洞庭小鳔鮈、侧条光唇鱼在渔获物的比例明显升高，这可能与上游多为砾石底质且保留有部分流水浅滩有关。

浏阳河分为上、中、下游 3 个区域使用鱼类生物完整性指数(IBI)分析浏阳河河流健康状态。根据计算结果，浏阳河上游河流健康状态为“一般”，中下游河流健康状态为“一般”向“差”的过度状态，

鱼类生物损失指数为 51.16%，属于不健康状况。

浏阳河上游河流健康状态高于中下游的主要原因是上游仍保留有部分流水生境、溪流底栖食虫鱼类的相对密度较高、上游鱼类养殖活动较少，外来物种在鱼类中的比例很低。河流筑坝对水生生态系统功能的影响是浏阳河河流健康状态下降的重要原因，大坝和水库改变了水流流态、水利调度导致河道水量减少、大坝阻碍了鱼类洄游都会对水生生物产生明显影响。此外，水域污染、滥捕也是影响浏阳河鱼类生物完整性的重要因素。

参考文献：

[1] 张觉民，何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册[M]. 北京 ：中国农业出版社 ，1991 ：242—298.
[2] 陈宜瑜. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形 目(中卷) [M]. 北京 ：科学 出版社 ，1998.
[3] 乐佩琦. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲤形 目(下卷) [M]. 北京 ：科学 出版社 ～2000.
[4] 褚新洛，郑葆珊 ，戴定远. 中国动物志·硬骨鱼纲·鲇形目 [M]. 北京 ：科学出版社，1999.
[5] 朱松泉. 中国淡水鱼类检索[M]. 南京 ：江苏科学技术 出版社 ，1995.
[6] 湖南省水产科学研究所. 湖南鱼类志[M]. 长沙 ：湖南科技出版社 ，1980 ：1229 .

生态空间管控与衔接分析

刘　瑜

（长沙环境保护职业技术学院，湖南 长沙 410004）

摘　要：基于对生态文明建设视角下国土空间管控的衔接研究，对国土空间下各类管控区基本概念进行相应阐述，说明各类管控区之间的关系。对在生态文明建设视角下，将各类管控空间统一到生态红线概念，说明了生态红线控制区与各类功能分区的空间衔接，对生态红线的管控提出了原则与方法、措施。

关键词：生态文明建设；国土空间；生态红线；空间衔接

随着国民经济的快速发展，人类各项活动不断加强，各种用地矛盾日益突出，生态环境问题也日益加重。主体功能区、环境功能区、生态环境脆弱区、禁止开发区等概念、管控政策纷纷出台，如此优化国土空间，在一张蓝图指导下确保国家生态安全格局，实现生态环境的可持续发展，本文将针对生态文明建设视角下，对各种空间管控的空间衔接等问题进行相应阐述。

1 各类空间管控区基本概述

1.1 国土空间

指国家主权与主权权利管辖下的地域空间，是国民生存的场所和环境，包括陆地、陆上水域、内水、领海、领空等。

1.2 主体生态功能区

主体功能区即各地区所具有的、代表该地区的核心功能。指基于不同区域的资源环境承载能力、现有开发密度和发展潜力等，将特定区域确定为特定主体功能定位类型的一种空间单元。各个地区因为核心（主体）功能的不同，相互分工协作，共同富裕、共同发展。核心（主体）功能是自身资源环境条件、社会经济基础所决定的，也是更高层级的区域所赋予的。

主体功能不同，区域类型就会有差异。大致可分为以提供工业品和服务产品为主体功能的城市化地区，以提供农产品为主体功能的农业地区，以提供生态产品为主体功能的生态地区等。

1.3 环境功能区

环境功能区按照环境要素，可分为环境空气质量功能区、声环境质量控制功能分区和水环境功能区。

环境空气功能分区，按照 GB3095-2012，环境空气功能区分为二类：一类区为自然保护区、风景名胜区和其他需要特殊保护的区域；二类区为居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区。

声环境质量控制功能分区，按照 GB3096-2008，声环境功能区分为以下五种类型：

0 类声环境功能区：指康复疗养区等特别需要安静的区域。1 类声环境功能区：指以居民住宅、医疗卫生、文化教育、科研设计、行政办公为主要功能，需要保持安静的区域。2 类声环境功能区：指以商业金融、集市贸易为主要功能，或者居住、商业、工业混杂，需要维护住宅安静的区域。3 类声环境功能区：指以工业生产、仓储物流为主要功能，需要防止工业噪声对周围环境产生严重影响的区域。4 类声环境功能区：指交通干线两侧一定距离之内，需要防止交通噪声对周围环境产生严重影响的区域，包括 4a 类和 4b 类两种类型。4a 类为高速公路、一级公路、二级公路、城市快速路、城市主干路、城市次干路、城市轨道交通（地面段）、内河航道两侧区域；4b 类为铁路干线两侧区域。

水环境功能分区，根据 GB3838-2002，依据地表水水域环境功能和保护目标，按功能高低依次划分为五类：I 类　主要适用于源头水、国家自然保护区；Ⅱ类　主要适用于集中式生活饮用水地表水源地一级保护区、珍稀水生生物栖息地、鱼虾类产卵场、仔稚幼鱼的索饵场等；Ⅲ类　主要适用于集中式生活饮用水地表水源地二级保护区、鱼虾类越冬场、洄游通道、水产养殖区等渔业水域及游泳区；IV 类　主要适用于一般工业用水区及人体非直接接触的娱乐用水区；V 类　主要适用于农业用水区及一般景观要求水域。

1.4 生态空间

指具有自然属性、以提供生态服务或生态产品为主体功能的国土空间，包括森林、草原、湿地、河流、湖泊、滩涂、岸线、海洋、荒地、荒漠、戈壁、冰川、高山冻原、无居民海岛等。

1.5 重点生态功能区

指生态系统十分重要，关系全国或区域生态安全，需要在国土空间开发中限制进行大规模高强度工业化城镇化开发，以保持并提高生态产品供给能力的区域，主要类型包括水源涵养区、水土保持区、防风固沙区和生物多样性维护区。

1.6 生态环境敏感脆弱区

指生态系统稳定性差，容易受到外界活动影响而产生生态退化且难以自我修复的区域。

1.7 禁止开发区域

指依法设立的各级各类自然文化资源保护区域，以及其他禁止进行工业化城镇化开发、需要特殊保护的重点生态功能区。

2 生态红线及与各类空间管控区的关系

生态保护红线，指在生态空间范围内具有特殊重要生态功能、必须强制性严格保护的区域，是保障和维护国家生态安全的底线和生命线，通常包括具有重要水源涵养、生物多样性维护、水土保持、防风固沙、海岸生态稳定等功能的生态功能重要区域，以及水土流失、土地沙化、石漠化、盐渍化等生态环境敏感脆弱区域。

生态红线主要是维护各个地区以及国家生态环境平衡以及生态的可持续发展，根据生态环境系统中连通性以及完整性的要求，划分出需要特别保护的地区。生态红线可以在生态空间范围内，拥有特殊的生态功能，采取强制性措施保护的地区，是保护国家生态安全的底线。例如，生物多样性维护以及水土保持生态功能区等，这些地区被人们称作生态红线，生态红线一直都在环境保护中发挥自身积极作用[1]。如果我国生态文明建设工作想要有序展开，就必须认识到生态红线重要性，并做好生态红线与土地利用规划的衔接工作，由此也可以看出生态红线重要性。

生态红线在与其他功能分区划分时，需要及时了解生物多样性维护、水源涵养以及水土保持等重要功能分区。有效识别生态环境敏感区域以及重要区域的空间分布。在确定各功能分区边时，要与河湖海岸边界、土地调查以及自然边界等有机结合。在划定勘界时遵从以下原则。

2.1 科学性原则

以构建国家生态安全格局为目标，采取定量评估与定性判定相结合的方法划定生态保护红线。在资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价的基础上，按生态系统服务功能（以下简称生态功能）重要性、生态环境敏感性识别生态保护红线范围，并落实到国土空间，确保生态保护红线布局合理、落地准确、边界清晰。

2.2 整体性原则

统筹考虑自然生态整体性和系统性，结合山脉、河流、地貌单元、植被等自然边界以及生态廊道的连通性，合理划定生态保护红线，应划尽划，避免生境破碎化，加强跨区域间生态保护红线的有序衔接。

2.3 协调性原则

建立协调有序的生态保护红线划定工作机制，强化部门联动，上下结合，充分与主体功能区规划、生态功能区划、水功能区划及土地利用现状、城乡发展布局、国家应对气候变化规划等相衔接，与永久基本农田保护红线和城镇开发边界相协调，与经济社会发展需求和当前监管能力相适应，统筹划定生态保护红线。

2.4 动态性原则

根据构建国家和区域生态安全格局，提升生态保护能力和生态系统完整性的需要，生态保护红线布局应不断优化和完善，面积只增不减。

3 生态文明建设视角下各类空间管控要求

生态保护红线原则上按禁止开发区域的要求进行管理。严禁不符合主体功能定位的各类开发活动，严禁任意改变用途，确保生态功能不降低、面积不减少、性质不改变。因国家重大基础设施、重大民生保障项目建设等需要调整的，由省级政府组织论证，提出调整方案，经环境保护部、国家发展改革委会同有关部门提出审核意见后，报国务院批准。

功能不降低。生态保护红线内的自然生态系统结构保持相对稳定，退化生态系统功能不断改善，质量不断提升。

面积不减少。生态保护红线边界保持相对固定，生态保护红线面积只能增加，不能减少。

性质不改变。严格实施生态保护红线国土空间用途管制，严禁随意改变用地性质。

通常情况下，生态红线主要应用在环境质量安全、自然资源的使用以及自然生态服务等方面。生态红线在管理过程中要严格按照严禁开发区域的要求展开管理工作。禁止一切不符合主体功能定位展开各种开发活动，不可以随便改变其用途。从而保证生态功能稳步提高、面积不减少，性质等不发生改变。遵循严格管理原则、生态优先原则以及奖惩并重原则等。根据不同主导功能定位，采取差别化管理。在生态红线的具体应用与管理过程中具体可以采用一下几点方式：

建立监测网络和监管平台，国家环境保护部、土地资源部以及发改委之间需要积极进行交流沟通，建立健全生态红线网络和监管平台。同时要利用好环境监测站点、水土保持等监测站点的检测功能，对生态红线进行实时监控，及时获取有效信息。

建立考核机制，国家环境保护部以及相关部门，需要根据实际情况对各省各市的生态红线保护情况进行严格考核，并建立相应考核机制。与此同时，将考核结果归纳到生态文明建设目标评价体系中。

加强生态保护与修复，要积极做好生态红线保护与修复工作，以县为单位建设生态红线保护台账系统，制定相应的保护与修复条例。尤其要注意重点物种地栖息地以及良好生态系统的保护与修复工作。针对生态系统不同损害情况展开不同的修复与保护工作，从而有效提高生态系统功能，同时做好生态红线周边地区的污染防治工作。

4 结语

综上所述，随着国民经济的快速发展，社会经济水平的不断提高，我国生态环境产生的问题日益突出。近年来，我国又提出生态文明建设战略。所以，生态文明建设视角下国土空间的衔接需要进一步完善。做好空间衔接工作，使我国土地资源得到合理利用，做到既要金山银山，又要绿水青山。

参考文献：

[1] 张程.基于生态文明建设的土地利用规划与环境保护规划空间衔接[J].中外交流,2017(38).

[2] 汪翼.生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究[J].环境与生活,2014(22):65-65.

[3] 夏国刚.生态文明视角下的土地利用总体规划[J].石河子科技,2016(6):7-11.

沙坪二级水电站坝下游鱼类集群观测实验研究

刘　钊，汪　烊

（1. 国电大渡河流域水电开发有限公司枕沙水电建设管理分公司，四川 金口河 614700）

摘　要：由于部分目标鱼类的趋流特性，电站机组尾水下游及鱼道进口一定区域范围内会出现鱼类集群现象。研究工作旨在探究电站不同运行工况下研究区域范围内鱼类集群情况，掌握不同过鱼季节不同目标鱼类集群效应较强时所对应的电站运行工况，为鱼道运行调度方式的最终确立提供基础支撑。

关键词：沙坪二级；鱼类集群；实验研究

1 研究概况

1.1 电站设计概况

沙坪二级水电站枢纽主要由泄洪闸、鱼道、左右岸挡水坝段、河床式厂房等建筑物组成。混凝土闸坝坝顶高程 557m，最大坝高 63m，枢纽布置格局为左岸台地布置河床式厂房，右岸主河道布置 5 孔泄洪闸。

鱼道出口段布置在泄洪闸与厂房间纵向导墙上，在厂房尾水闸门下游采用渡槽横跨尾水渠，其余沿大渡河左岸岸坡布置，进口段布置在尾水渠出口下游约 140m 处。鱼道由下至上由进口鱼道池室、休息池、观测室、出口等组成。

1.2 观测地点与时间

观测地点：水声学走航工作地点主要位于沙坪二级水电站坝下水域以及坝址下游约 1km 的水域。水声学定点观测地点位于沙坪二级水电站坝址下游左岸，距离坝址约 500m 处玉林桥下（E103°12.820 N29°14.277）。

观测时间：水声学走航观测时间为 3 月 25 日-3 月 30 日，4 月 12 日-4 月 18 日，5 月 5 日-5 月 11 日；水声学定点观测时间为 3 月 20 日-3 月 24 日，4 月 19 日-4 月 22 日，5 月 12 日-5 月 16 日。



图 1 水声学走航示意图

1.3 主要观测设备

坝下鱼类观测使用台湾佳明公司制造的鱼探仪（美国设计，台湾生产）。它主要运用回波计数法获取个体信号、水平距离和深度。

WHRZ1200-I 型 ADCP 是走航式宽带 ADCP，采用了 TRDI 公司的宽带信号处理专利技术，在保证精度的前提下，提高了流速测量的空间和时间分辨率。

1.4 观测方案

坝下鱼类集群监测工作主要包括坝下鱼类上溯监测，水声学观测，坝下分区域渔获物采样和坝下流场分析四部分工作内容。

鱼类上溯观测主要是在沙坪二级水电站下游水域鱼类洄游通道上利用网具捕捞上溯鱼类，统计

分析不同时期上溯鱼类种类和资源量。

2 坝下流场分析

本报告对鱼类洄游行为进行研究，需要坝下较为精细的流场条件，结合原型观察，采用数值模拟方法进行反演。模型中将水流视为不可压缩流体，水动力学控制方程包括连续方程和动量方程，紊流方程采用 RNG k-ε 模型，并采用 VOF 模型来追踪流体的自由液面变化；方程离散采用有限差分法，离散格式采用考虑了流动方向的一阶迎风格式。

2.1 水动力学控制方程

本文将流体视为不可压缩流体，采用的水动力学控制方程包括连续方程和动量方程。

流体的质量守恒定律由连续方程来描述，其含义是指在单位时间内流体微元中的质量变化量等于对应时间间隔内流入该微元体的净质量，用方程表述为：

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x}+\frac{\partial(vA_y)}{\partial y}+\frac{\partial(wA_z)}{\partial z}=0 \tag{2-1}$$

式中，x、y、z 分别为三个方向上的坐标分量，单位为 m；u、v、w 分别为三个方向上的速度分量，单位为 m/s；Ax、Ay、Az 分别为流体通过三个方向对应的面积分数；VF 为网格内可供流体流动区域的体积分数；ρ 为流体密度，单位为 kg/m3；p 为压强，单位为 Pa；Gx、Gy、Gz 分别为三个方向上的体积力加速度，单位为 m/s2；fx、fy、fz 分别为三个方向上的粘滞力加速度，单位为 m/s2，满足式（2-5）~（2-13）；μ 为动力粘度，单位为 Pa s。

2.2 VOF 模型

本文将采用 VOF 模型，通过求解水体体积分数 F 的输运方程来追踪自由液面的变化情况。在自由液面处，F 的梯度最大方向即自由液面的法线方向，求解出 F 的值和自由面的法线方向后，就能得到自由液面的形状。水体体积分数 F 的输运方程如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(FA_x u\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(FA_y v\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(FA_z w\right)\right]=F_{DIF} \tag{2-2}$$

$$F_{DIF}=\frac{1}{V_F}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu}{S_c\rho}A_x\frac{\partial F}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu}{S_c\rho}A_y\frac{\partial F}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu}{S_c\rho}A_z\frac{\partial F}{\partial z}\right)\right] \tag{2-3}$$

式中， F=1 表示计算网格单元充满水体，F=0 表示计算网格单元充满气体，0＜F＜1 表示计算网格单元同时包含水体和气体；FDIF 为有效的体积分数扩散项；Sc 为紊流施密特常数。

2.3 研究区域及模型建立

如图 2 所示的枕沙坪二级水电站枢纽三维模型，为了使三维计算模型能够与实际原型保持一致，本文根据真实的工程水下地形（最小等高线间距为 1.0 m）和枢纽建筑布置图，制作成数字地形与水工建筑物契合的三维模型。三维模型的原点位于右岸坝肩处，所建模型在 X 方向的范围为 10~900 m，在 Y 方向的范围为-100~715 m，在 Z 方向的高程范围为 510~580 m。

2.4 网格划分

在整个计算区域内，均采用六面体的结构化网格进行划分。对于水流流态复杂、出现急变流的区域，如发电尾水出口采用局部加密的方法进行处理。整个计算区域网格区块在 X 方向采用局部加密和渐变网格，网格最小尺寸为 1 m，最大尺寸为 2 m；在 Y 方向采用局部加密和渐变网格，网格最小尺寸 1m，最大尺寸 3m；Z 方向采用均匀网格，网格尺寸为 1m。整个计算区域网格总数量约为 326 万。

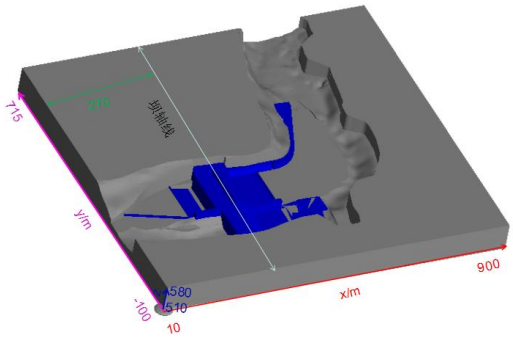


图 2 沙坪二级枢纽三维模型

2.5 边界条件设定

本次模拟的计算入口为电站发电机组尾水出口，计算出口为坝轴线下游 900 m 处。

天然河道中的水体液面为水体与大气的交界面，因此，将水面的边界条件设定为压力边界条件，p=1.013×105 Pa（大气压力）。

计算入口采用流量入口边界条件，给定发电尾水流量 Q 和液面压力 p=1.013×105 Pa（大气压）。

计算出口采用压力边界条件，设定口断面的水位 Houtlet 和水面压力 p=1.013×105 Pa（大气压）。

壁面采用无滑移边界条件，给定相应的河道壁面糙率为 0.03，将挡水大坝、鱼道等水工建筑物视为混凝土材质，给定相应的壁面糙率为 0.014。

为了精确控制发电机组尾水出口的流量，采用质量源项的处理方式，对发电机机组出口出流面积和流量进行设置。

为了精确控制发电机尾水泄流流量和出流面积，采用质量源项的方法进行处理。在尾水出口闸门处，添加质量源项，其几何尺寸与尾水出口闸门尺寸保持一致，并根据具体的计算工况给定相对应下泄流量 Q。

2.6 方程离散及求解

本文的方程离散采用有限差分法（Finite Difference Method，简称 FDM）。它是将求解区域划分为矩形或正交曲线差分网格，在网格线节点上对压力、速度、体积分数 F 及其他未知标量进行存储，并将这些未知量的偏微分方程的导数用差商来代替，从而将连续函数的微分方程离散为网格节点上有限个未知数的差分方程。每个方程中包含了本节点及其附近一些节点上的待求函数因变量值，通过求解这些代数方程就可以得到所求微分方程的数值解。

3 研究结果

3.1 坝下鱼类资源调查结果

3.1.1 渔获物种类

2019 年 3 月-2019 年 5 月，坝下渔获物调查期间总共收到渔获物 165 尾，隶属于 2 目，4 科，10 属，12 种。其中优势种是齐口裂腹鱼（68.50%）、重口裂腹鱼（21.21%）泉水鱼（2.42%），其他种类总计占（7.87%）。具体种类明细见下表。

3.1.2 坝下主要渔获物规格

（1）齐口裂腹鱼

渔获物调查期间总共捕获到齐口裂腹鱼 113 尾，体重范围：119.21~1348.9g，体长范围：16.5~44.0cm，4 月份和 5 月份解剖观察，齐口裂腹鱼的性腺发育为Ⅱ期至Ⅲ期。

表 1 齐口裂腹鱼体长/体重

月份	数量(N)	平均体长（cm）Mean ± SD	体重(g) Mean ± SD	性腺发育
3	0	0	0	
4	53	25.7±4.6	366.0±172.6	Ⅱ期
5	60	26.7±4.1	368.6±204.7	Ⅲ期

由表 1 可得，3 月份齐口裂腹鱼 0 尾，4 月份齐口裂腹鱼 53 尾，平均体长：25.7cm，标准差 SD:4.6,平均体重：366g，标准差 SD：172.6，性腺发育：Ⅱ期；5 月份齐口裂腹鱼 60 尾，平均体长：26.7cm，标准差 SD:4.1,平均体重：368.6g，标准差 SD:204.7,性腺发育：Ⅲ期。

（2）重口裂腹鱼

渔获物调查期间总共捕获到重口裂腹鱼 35 尾，体重范围：106.4-1284.0g，体长 16.0—50.0cm，4 月份和 5 月份解剖来看，重口裂腹鱼的性腺发育为Ⅱ期至Ⅲ期。

表 2 重口裂腹鱼体长/体重

月份	数量(N)	平均体长（cm）Mean ± SD	体重(g) Mean ± SD	性腺发育
3	0	0	0	
4	14	28.5±8.2	450.6±354.9	Ⅱ期
5	21	26.7±3.4	320.3±111.3	Ⅲ期

由表 2 可得，3 月份重口裂腹鱼 0 尾，4 月份齐口裂腹鱼 14 尾，平均体长：28.5cm，标准差 SD:8.2,平均体重：450.6g，标准差 SD：354.9，性腺发育：Ⅱ期；5 月份齐口裂腹鱼 21 尾，平均体长：26.7cm，标准差 SD:3.4,平均体重：320.3g，标准差 SD:111.3,性腺发育：Ⅲ期。

（2）泉水鱼

渔获物调查期间总共捕获到泉水鱼 4 尾，体重范围： 5.6~23.7g，体长范围：14.5—18.6cm，4 月份和 5 月份解剖来看，泉水鱼的性腺发育为Ⅳ期。

表 3 泉水鱼体长/体重

月份	数量(N)	平均体长（cm）Mean ± SD	体重(g) Mean ± SD	性腺发育
3	0	0	0	
4	4	16.5±1.9	118.7±24.0	Ⅳ期
5	0	0	0.0	

由表 3 可得， 4 月份泉水鱼 4 尾，平均体长：16.5cm，标准差 SD：1.9，平均体重：118.7g，标准差 SD：24，性腺发育：Ⅳ期。

（4）青石爬鮡

渔获物调查期间总共捕获到泉水鱼 2 尾，体重范围： 17.6—31.0g，体长范围：8.0—9.6cm，4 月份捕捉到 2 条。

表 4 青石爬鮡体长/体重

月份	数量(N)	平均体长（cm）Mean ± SD	体重(g) Mean ± SD	性腺发育
3	0	0	0	
4	2	8.8±8.0	24.3±6.7	
5	0	0	0.0	

由表 4 可得， 4 月份青石爬鮡 2 尾，平均体长：8.8cm，标准差 SD：8，平均体重：24.3g，标准差 SD：6.7。

（5）白甲鱼

2019 年 3 月-2019 年 5 月渔获物调查期间总共捕获到泉水鱼 1 尾，体重 95.3g，体长 16.0cm，4 月份捕捉到 1 条，通过解剖了解性腺发育，其性腺发育为Ⅳ期。

3.2 坝下流场分析

工况一：

坝下水位为 533.58m，运行 4#~6#发电机组，单机引用流量为 458.5m3/s，总引用流量为 1375m3/s，不考虑泄洪。

图 3 给出了沙坪二级水电站工况 3 坝下数值模拟流速量图。

在工况一下，水流由 4#~6#发电机组下泄，水流从尾水渠流出后，遇到尾水坎，水位抬升，流速加快，坝下主流流速范围为 0.8m/s~2.5m/s，主流边缘流速范围为 0.25m/s~0.8m/s。

由于是右岸 3 台机组发电，靠河道左岸尾水渠内出现回流，流速范围为 0m/s~0.8m/s。由于溢流坝段未泄流，在消力池出口下游存在圆形回流区，回流流速范围为 0m/s~0.80m/s，河道左岸转弯进口 2 下游存在一定范围的狭长型回流区，流速范围为 0m/s~0.8m/s。

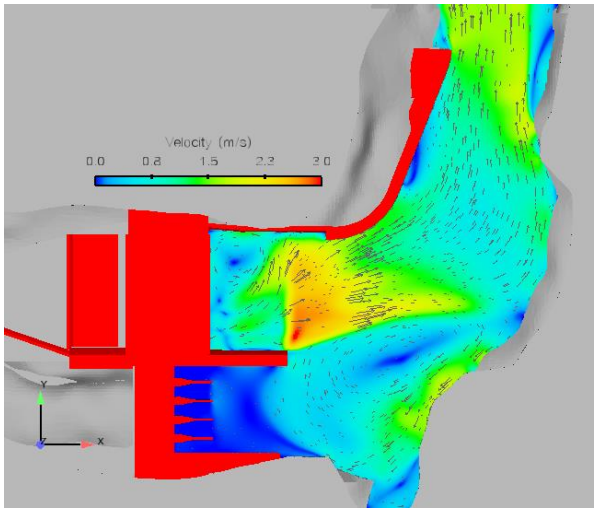


图 3 沙坪二级水电站工况 1 坝下数值模拟流速矢量图

工况二：

坝下水位为 536.76m，运行 1#~6#发电机组，单机引用流量为 458.5m³/s，总引用流量为 2751m³/s，不考虑泄洪。

图 4 给出了沙坪二级水电站工况 4 坝下数值模拟流速量图。

在工况二下，水流由 1#~6#发电机组下泄，水流从尾水渠流出后，遇到尾水坎，水位抬升，流速加快，坝下主流流速范围为 0.8m/s~3.2m/s，主流边缘流速范围为 0.4m/s~0.8m/s。

本工况是机组满发，尾水渠内无回流，消力池出口下游靠近发电主流趋于存在狭长形状的回流区，流速范围为 0m/s~0.8m/s；左岸转弯过后靠近鱼道侧出现狭长形状回流区，流速范围为 0m/s~1.6m/s。

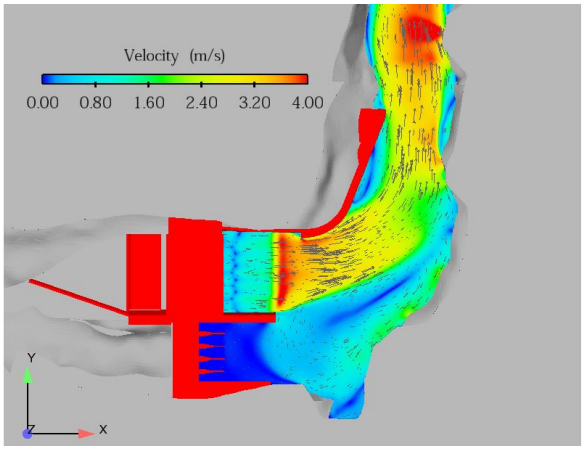


图 4 沙坪二级水电站工况 2 坝下数值模拟流速矢量图

3.3 鱼类上溯随下泄流量的关系

表 5 为 2019 年 3-5 月份鱼类上溯观测期间对应的流量和水温范围，以及各次观测工作持续时间，上溯信号总数和时均上溯信号数量。2019 年 3 月水声学上溯观测中，共监测到上溯信号 1512 个，时均上溯信号 21 个；2019 年 4 月水声学上溯观测中，共监测到上溯信号 2494 个，时均上溯信号 29 个；2019 年 5 月水声学上溯观测中，共监测到上溯信号 2646 个，时均上溯信号 42 个。

结合观测工作期间水温和下泄流量的数据分析，推断鱼类上溯与季节，水温和下泄流量均有关联。3-5 月中，上溯鱼类数量呈增长趋势，尤其进入五月之后，上溯鱼类数量增长较大。从统计的水文信息来看，3-5 月水文逐渐升高，由于鱼类是变温动物，水温对鱼类繁殖行为有较大的影响，推断五月上溯鱼类数量增长较大的原因是水温逐渐升高，达到了鱼类适宜的繁殖水温范围，鱼类在外部因素作用下上溯寻找适宜产卵场。从下泄流量统计数据上看，下泄流量对鱼类上溯行为有着直接的影响，下泄流量范围在 200-600m^3/s，最适宜鱼类上溯。

表 5 鱼类上溯观测统计表

观测时间	水温	流量	工作时长(持续)	上溯信号数量	时均上溯信号数量
3.20-3.23	8—10	187—1450	72	1512	21
4.21-4.25	9—11	207—1910	86	2494	29
5.15-5.18	9—11	352—2850	63	2646	42

3.4 坝下鱼类分布

坝下鱼类分布统计成果见表 6

表 6（a）坝下鱼类水平分布统计表

时间	坝下 0-500m	坝下 500-800m	坝下 800-1000m	备注
3 月	296	52	37	主要统计有明显集群的信号数
4 月	398	92	36	主要统计有明显集群的信号数
5 月	377	66	54	主要统计有明显集群的信号数

表 6（b） 坝下鱼类垂直分布统计表

时间	0-0.5m	0.5-2m	2m 以下
3 月	58	250	77
4 月	79	342	105
5 月	75	323	99

4 结语

根据水声学走航观测数据进行统计分析：鱼类个体主要分布聚集在坝下至下游 400m 以内的范围，并且距离坝址较近的水域鱼类集群数量较多，大坝左岸流速相对较缓的水域，鱼类集群数量明显较多。推断其原因可能是鱼类在自身生理条件影响下上溯，由于大坝物理屏障阻碍，无法继续上溯，因此在坝下水域集群试图寻找上溯路径。而大坝右岸水域布置鱼道，并且有礁石，流速相对平缓，有利于鱼类制动游泳，因此鱼类在此区域集群较为明显。监测发现鱼类分布主要分布水层为 0.5~2m（礁石区域），推断这可能是上溯鱼类大部分是底栖类群，稀罕光线较弱的环境，而 0.5m-2m 水域主要为礁石环境，适宜鱼类主动游泳和栖息。

参考文献：

[1] 鱼类集群行为的研究进展[J]. 周应祺,王军,钱卫国,曹道梅,张仲秋,柳玲飞.上海海洋大学学报. 2013(05)

[2] Density induced transition in a school of fish[J] . Dorílson Silva Cambuí,Alexandre Rosas. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications . 2012 (15)

[3] Convergence and divergence between two multibeam sonars (SIMRAD SM20 and RESON SeaBat 6012) used to extract the spatial, morphologic and energy parameters of fish schools[J] . Y. Perrot,J. Guillard,E. Josse. Fisheries Research . 2010 (3)

[4] 应用鱼类行为学[M]. 科学出版社 , 周应祺, 2011

[5] An experimental aquarium for observing the schooling behaviour of Antarctic krill (Euphausia superba)[J] . So Kawaguchi,Rob King,Rob Meijers,Jon E. Osborn,Kerrie M. Swadling,David A. Ritz,Stephen Nicol. Deep-Sea Research Part II . 2009 (7)

水文情势变化对岩溶区流域河流生态影响研究

莫崇勋[1,2,3]，黄怡婷[1,2,3]，何嘉奇[1,2,3]，阮俞理[1,2,3]，孙桂凯[1,2,3]，杨云川[1,2,3]

（1. 广西大学 土木建筑工程学院，广西 南宁 530004；
2. 工程防灾与结构安全教育部重点实验室，广西 南宁 530004；
3. 广西防灾减灾与工程安全重点实验室，广西 南宁 530004）

摘　要：采用 IHA/RVA 法和 EFC 指标分别分析澄碧河坝首站和平塘站的水文情势改变程度，并利用滑动平均法分析特殊水文指标的趋势。研究显示，澄碧河水文情势的改变已经影响了河流生态，其中，澄碧河坝首站和平塘站的水文综合改变度分别为 46.04%和 66.91%，均属于中度改变；EFC 的组成较变异前更为丰富；变异后，澄碧河坝首站和平塘站的 1 日最小流量分别以平均每年 0.07m^3/s 的速率缓慢上升和平均每年 0.01m^3/s 的速率缓慢下降。受到水文情势和岩溶区的影响，上游平塘站对河流生态产生不利影响，下游坝首站更利于澄碧河枯水期河流生态的发展。研究拟为后期澄碧河实施生态监管提供依据，建议加强对岩溶区流域水文气象要素的监测和分析，保证河流生态健康安全。

关键词：IHA/RVA 法；EFC；滑动平均；岩溶区流域

1 引言

在全球变化环境的背景下，水文情势的变化可能加剧了河流生态的恶化，该方面的研究已受到了全球的关注。Suen J P[1]采用 IHA 法研究台湾 23 个测站，发现水文情势改变会从水资源量和水生态安全方面影响淡水生态；Mwedzi 等[2]采用 IHA 法分析津巴布韦建坝前、后水文情势的改变情况，发现当超过大坝 20km 时，这种影响将会消失，类似的研究成果也出现在中国的三峡工程[3]；周毅等[4]通过 EFC 分析黄河源区流量组成的改变情况，发现枯水流量事件增多和小洪水事件的变动将降低河道中营养物质的溶解能力，进而影响河流枯水期的生态健康；田伊池等[5]利用 IHA/RVA 法对牛路岭水库河流生态健康进行研究，发现河流生态遭受胁迫是由于水库调蓄作用引起水文情势改变而产生的。上述研究主要针对非岩溶区流域，对岩溶区流域研究不足。岩溶区流域水文、气象的特殊性会导致生态水涵养功能的降低。澄碧河流域属于半岩溶区流域，多年来一直保持良好的水质。然而，受到变化环境的影响，澄碧河的水文情势已经发生了改变[6]，而澄碧河目前缺乏水文情势改变对河流生态方面的定性和定量的影响分析。鉴于此，本文以澄碧河流域为例，分析水文情势变化对岩溶区流域河流生态的影响，以期为岩溶区流域河流生态系统的保护提供科学依据。

2 流域概况

澄碧河流域位于广西西北部，东经 106°21′~106°48′，北纬 23°50′~24°45′，流域面积为 2087km^2，森林覆盖率达到 70%，岩溶面积约为 400km^2（占流域面积约 20%），是我国较为典型的岩溶区流域之一。澄碧河发源于广西百色市凌云县，流经弄福、浩坤和平塘等地，最后在百色市右江区大码头处汇入右江河，河流全长 127km，年平均流量约 8.6 亿 m^3。澄碧河流域见图 1。澄碧河资料较为完整的水文站有坝首站和平塘站（由澄碧河水库管理局提供），其中，坝首站位于下游澄碧河水库处（东经 106°38′，北纬 23°57′），拥有 1963 年~2014 年的逐日水文资料；平塘站位于澄碧河上游（东经 106°28′，北纬 24°09′），拥有 1963 年~2011 年的逐日水文资料。流量是反映河流生态综合情况的重要指标，也是河流生态需水研究的基础，因此，文章采用将采用这两个站的逐日流量进行计算。



图 1　澄碧河流域

3 研究方法

3.1 IHA/RVA 法

IHA（Indicators of Hydrologic Alteration，水文变化指标）[7]是研究河流水文情势和河流流量完整过程对河流生态影响的重要方法，共包含 33 个指标（见表 1），主要采用逐日流量资料进行分析。由于平塘站和坝首站变异前、后水文序列均大于 20 年，避免了气候变化的干扰，满足该方法的适用条件[8]。

表 1　IHA 指标及其生态意义

IHA 指标	生态意义
1-12 月各月流量的中值或均值。	水生生物对生境的需求；植被土壤对湿度的需求；陆生生物对水量的需求；影响水文、溶解氧和水体光合作用等。
1、3、7、30、90 日最小流量； 1、3、7、30、90 日最大流量； 零流量日；基流指数。	生物竞争和耐性平衡的需求；保证生物和非生物因素构建的生态系统；保证河道形状及其物理条件；保证植物土壤水分压力；消解污染物等。
最小 1 日出现日期（儒略日）； 最大 1 日出现日期（儒略日）。	流量与生物生命周期的相容性；洄游鱼类产卵的指标；保证生物繁殖、进化等。
低流量脉冲数，低流量脉冲历时；高流量脉冲数，高流量脉冲历时。	与土壤水分压力的频率和大小有关；与植被缺氧压力的频率和持续时间有关；保证水禽觅食和繁殖场所的畅通性等。
增长率，减少率，逆转次数。	影响植物干旱压力（下降条件时）等。

RVA（Range of Variability Approach，变化范围）[9]通过分析 IHA 各指标上、下限来评估水文改变程度。采用下式计算[10]

$$D_j = \frac{N_j - N_{je}}{N_{je}} \times 100\% \quad (1)$$

$$D_0 = \left(\frac{1}{33} \sum_{j=1}^{33} D_j^2 \right)^{1/2} \times 100\% \quad (2)$$

式中，D_j 为 IHA 第 j 个指标的改变程度，j=1,2,...,33；N_j 为变异后 RVA 范围内的实际观测年数；N_{je} 为变异后第 j 个指标在其 RVA 范围内的期望年数。$|D_j|$<33%为低度改变，33%≤$|D_j|$<67%为中度改变，$|D_j|$≥67%为高度改变。D_0 为水文综合改变度，评价等级标准与 D_j 一致。

由于澄碧河尚未开展河流生态指标监控，且澄碧河流量资料较为完整，因此，拟采用 IHA/RVA 法分析澄碧河水文变异对河流生态的影响。

3.2 EFC

EFC（Environmental Flow Components，环境流组）[7]能较为全面地分析流量改变的原因，并判断河流生态的完整性。EFC 主要包含枯水流量、特枯流量、高流量脉冲、小洪水和大洪水流量事件，不同流量事件反映不同的河流生态情况（见表 2），主要通过这 5 种流量事件的水位图反映[3]，EFC 通常由 IHA 软件分析得到。拟对澄碧河进行 EFC 分析评价澄碧河水文变异对河流生态的影响。

表 2　EFC 及其生态意义

EFC 类型	生态意义
月枯水流量	维持生物所需栖息地环境的水温、水质和溶解氧；为水生生物提供基本的生存条件；为陆生生物提供饮用水。
特枯流量	维持洪泛区植物种类；减少外来生物入侵。
高流量脉冲	保护河岸植被不被河道侵入；对长时间枯水期水质进行修复，冲走污染废弃物；保持河口盐分平衡等。
小洪水	为鱼类的迁徙和产卵提供场所；维持生物生命周期；为幼鱼提供食物；补给洪泛区水位；控制洪泛区植物分布和种类等。
大洪水	维持水生和陆生生物平衡；改变洪泛区的物理形态，为生物繁殖创造新的地点，形成新的河流生态环境；增加土壤水分；促进河流和河漫滩的物质交换等。

3.3 滑动平均法

滑动平均法能减小数据的随机性和独立性，降低数据的自由度，且随着阶数 m 增大，可以显现数据的变化趋势。采用下式进行滑动平均计算[11]

$$y_t = \frac{1}{2m+1}\sum_{i=-m}^{m} x_{t+i} \qquad (3)$$

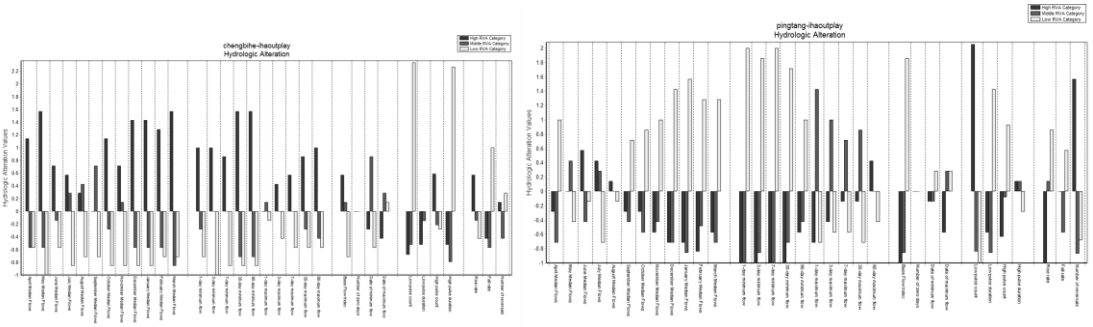
式中，t 为经滑动平均后的序列项；x 为序列值；m 为整体样本中的一部分；i 为 m 的相反数。m=2 为 5 点滑动平均，m=3 为 7 点滑动平均，以此类推。

拟采用滑动平均法对变异程度较高的 IHA 指标进行趋势分析，了解澄碧河河流生态情况。

4 结果分析

4.1 水文改变度

根据文献[12]的分析结果，坝首站水文变异发生于 1992 年，平塘站水文变异发生于 1989 年。采用 IHA Version7.1 软件分别对坝首站和平塘站进行分析，结果见图 2。



a 坝首站　　b 平塘站

图 2　水文变化分析

由图 2a 知，除了零流量天数，坝首站其余 32 个指标均发生了不同程度的改变。多数指标的高流量范围为正值，说明这些指标出现高流量的频次增多，超出 RVA 上限的频次增多；中流量范围和低流量范围基本为负值，说明多数指标出现低、中流量的频次减少，超出 RVA 下限的频次减少；低流量次数、高流量平均延时、流量平均减少率和流量逆转次数这四个指标低于各自 RVA 下限的频次增多；非汛期出现高流量的频次明显多于汛期；低流量出现的频次在年内分配较为均匀。经计算，坝首站水文综合改变度为 46.04%，属于中度改变。水文情势改变后，坝首站汛期高流量一定程度上有利于水生生物的繁殖，枯水期高流量出现频次增多，不仅一定程度上保证了水生生物对水资

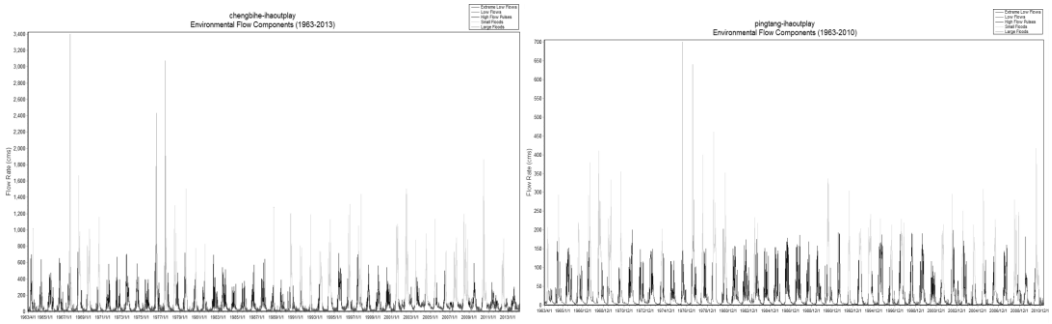
源的需求，还提高了河流水质等级。

由图 2b 知，除了零流量天数，平塘站其余 32 个指标均发生了不同程度的改变。多数指标的低流量范围为正值，说明这些指标出现低流量的频次增多；多数指标的中、高流量范围为负值，说明中、高流量的频次减少；非汛期低流量频次增量明显多于汛期，汛期高流量频次增加不明显，且 4 月明显出现较多的低流量；最小流量的低流量出现频次明显增多，最大流量出现“中流量为主、高流量出现较少、基本不出现低流量”的情况。经计算，平塘站水文综合改变度为 66.91%，属于中度改变。水文情势改变后，平塘站年内出现低流量的情况较多，不仅不利于水生生物的生长，还会降低枯水期河流的降解能力。

综上分析，平塘站和坝首站的水文情势均对河流生态产生了影响。莫崇勋等[6][12]发现由于澄碧河地处岩溶区（主要是上游），所以存在降雨减少、径流增加的现象。澄碧河下游来水量丰富（主要靠降雨和上游岩溶区补给）且储水能力强，使下游水文情势的改变对河流生态产生积极的影响，而上游水量主要靠降雨补给而储水能力较弱，故使上游出现较多的低流量，进而可能对生态产生不利的影响，尤其是河流的枯水期。IHA/RVA 法已排除了气候变化的干扰，出现此类现象说明澄碧河澄碧河河流生态可能受岩溶发育的影响，同时，水文情势的改变将会加剧河流生态的恶化，因此，建议加强对岩溶区流域水文气象要素的监测和分析，确保河流生态健康安全。

4.2 环境流组成

采用 IHA Version7.1 软件分别对坝首站和平塘站的 EFC 进行分析，结果见图 3。



a 坝首站　　b 平塘站

图 3 EFC

由图 3a 知，坝首站 5 种流量事件均发生了变化。变异前流量由高流量脉冲和枯水流量事件组成，且集中化程度高（尤其是 1983~1989 年），即变异前大部分时段流量模式单一。变异后高流量脉冲事件的量值和极大值均有所减小，小洪水事件和枯水流量事件的量值和极值均有所增大；澄碧河水库 2003 年的运行方式（即汛末（8 月 11 日后）抬高汛限水位至 185.0m）使得 2003 年后小洪水事件更为集中；变异后流量主要由小洪水、枯水流量和高流量脉冲事件组成，说明 EFC 组成更多样化；变异后大洪水事件完全消失，主要是由于澄碧河水库采用新安江模型与预报经验相结合的方式进行洪水预报，预报精度比以前大有提升。此外，变异前后特枯水流量事件基本不发生。

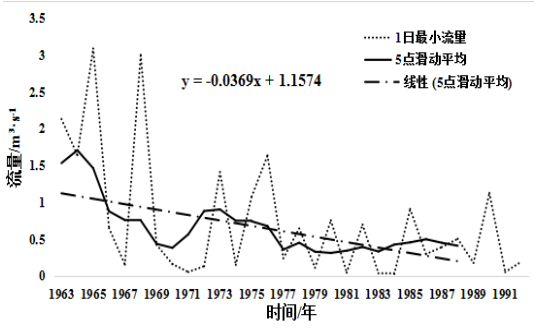
由图 3b 知，平塘站 5 种流量事件均发生了变化。变异前流量事件基本由高流量脉冲和枯水流量事件组成，且集中化程度高（尤其是 1981~1989 年），即大部分时段流量模式较单一。变异后流量由小洪水、枯水流量、高流量脉冲和特枯水流量事件组成，说明 EFC 组成更多样化；变异后大洪水事件完全消失，小洪水事件量值有所增大，特枯水流量事件明显增多。

综合上述分析，变异后坝首站和平塘站的 EFC 组成较为丰富，对生态流量过程的完整性产生了积极的影响。受澄碧河水库汛末调蓄作用和汛前洪水预报精度提高的影响，两站变异后均出现大洪水事件完全消失、小洪水事件有所增加的现象；变异前两站高流量脉冲事件高度集中有利于维持河流的物理形态、保护河岸植被不被河道侵入、修复枯水期水质和冲走污染废弃物，虽然变异后两

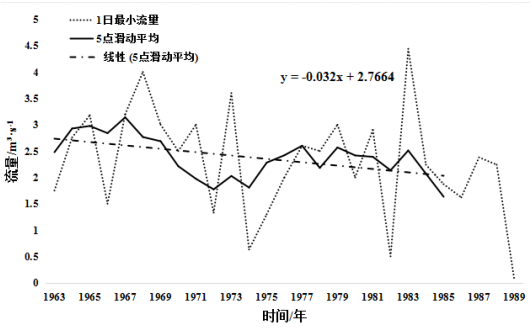
站高流量脉冲事件有所减少，但变化不大，对生态的影响不大。出现变异后坝首站特枯水流量事件基本不出现、平塘站特枯水流量事件明显增多的现象，说明上游枯水期生态可能受到了胁迫。

4.3 趋势

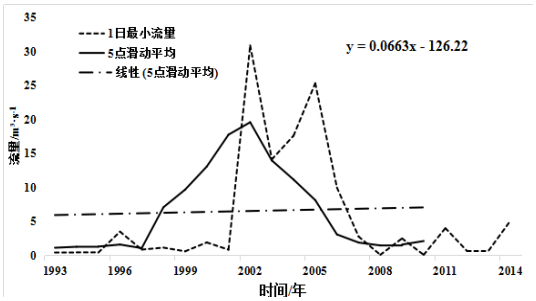
1 日最小流量是反映河流枯水期情况的指标之一，变异后，坝首站 1 日最小流量出现高流量的频次增多，而平塘站 1 日最小流量出现低流量的频次明显增多。为了进一步分析 1 日最小流量的变化趋势，运用 5 点滑动平均法降低数据的自由度后，分别分析变异前、后两站 1 日最小流量的趋势，见图 4。



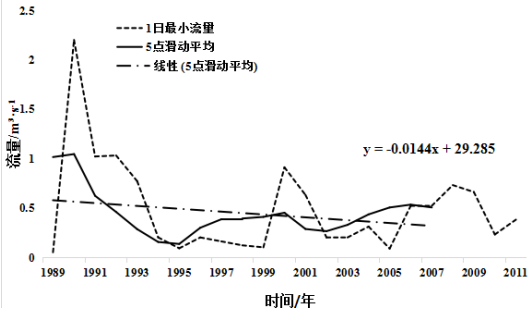
a 变异前坝首站



b 变异前平塘站



c 变异后坝首站



d 变异后平塘站

图 4　变异后 1 日最小流量趋势

由图 4a 和 4b 知，变异前坝首站 1 日最小流量以平均每年 0.04m^3/s 的速率缓慢下降，变异前平塘站 1 日最小流量以平均每年 0.03m^3/s 的速率缓慢下降，说明变异前坝首站和平塘站的 1 日最小流量均呈现缓慢下降的趋势。由图 4c 和 4d 知，变异后坝首站 1 日最小流量以平均每年 0.07m^3/s 的速率缓慢上升，变异后平塘站 1 日最小流量以平均每年 0.01m^3/s 的速率缓慢下降，说明变异后坝首站和平塘站的 1 日最小流量变化趋势不一致，但变化趋势均较缓慢。此外，坝首站变异后 1 日最小流量增加趋势明显；平塘站变异后流量趋势有所增加，但增加不明显，流量总体仍然呈现下降趋势。综上趋势分析结果可知，澄碧河枯水期流量变化较为稳定，且坝首站更利于河流生态的稳定发展。

5 结语

变异后，由于受到岩溶区和水文情势改变的影响，澄碧河坝首站对河流生态有利，平塘站可能对河流生态不利。

变异后澄碧河坝首站和平塘站的流量事件组成比变异前丰富，总体上对河流生态健康有利，但平塘站特枯流量事件出现的频次增加，存在生态影响风险。

变异前坝首站和平塘站 1 日最小流量的变化趋势相近，均有增长的趋势；变异后坝首站 1 日最小流量呈现缓慢增长的趋势，而平塘站呈现缓慢下降的趋势。澄碧河枯水期流量变化较为稳定，且坝首站更利于河流生态的稳定发展。

本文主要从流量方面对河流生态进行分析。目前，澄碧河尚未建立生态指标监测，缺乏河流生态方面的资料，论文的研究拟为后期澄碧河实施生态监管提供依据。此外，建议澄碧河进一步加强对岩溶区流域水文气象要素的监测和分析，避免水文情势改变对河流生态产生不利影响。

参考文献：

[1] Suen J P. Potential impacts to freshwater ecosystems caused by flow regime alteration under changing climate conditions in Taiwan[J]. Hydrobiologia, 2008, 5(6):115-128.

[2] Mwedzi T, Katiyo L, Mugabe F T, et al. A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe[J]. Water S A, 2016, Vol. 42(2):194-202.

[3] 王学雷,姜刘志.三峡工程蓄水前后长江中下游环境流特征变化研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2015,49(05):797-804.

[4] 周毅, 崔同, 郑鑫,等. 基于 IHA 的黄河源区水文情势及环境流变化[J]. 人民黄河, 2017, 39(7):61-64.

[5] 田伊池, 王冬. 基于 RVA 的水库工程对下游水文情势的影响分析[J]. 黑龙江水利科技, 2015, 43(8):4-8.

[6] 莫崇勋,莫桂燕,阮俞理,朱新荣.岩溶区流域降雨径流趋势变异分析[J].水电能源科学,2018,36(02):20-23.

[7] Richter B D, Baumgartner J V, Powll J, et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystem[J]. Conservation Biology,1996,10:1163-1174.

[8] N. Poff. A hydrogeography of unregulated streams in the United States and an examination of scale-dependence in some hydrological descriptors[J]. Fresh Water Biology,1996,36(1):71-79.

[9] Richter B D, Baumgartner J V, Braun D P. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network[J]. Regulated River,1998,14:329-340.

[10] SHIAU J T, WU F C. Feasible diversion and in stream flow release using range of variability approach[J]. Journal of Water Resources Planning and Management,2004,130(5):395-404

[11] 莫崇勋,黄怡婷,何嘉奇,孙桂凯,阮俞理.基于汛期分期的洪峰流量特征研究[J].水力发电,2018,44(03):5-9+46.

[12] 莫崇勋,阮俞理,莫桂燕,林怡彤,孙桂凯,杨云川.考虑水文变异的河道生态径流研究[J].水力发电,2017,43(10):27-30.

梯级水电站生态流量监测系统的设计与施工

李　培，卢宝胜，丁德忠，吴　波

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610213）

摘　要：水电站拦河坝下游河段缺水，特别是引水式水电站下游河段脱水甚至干涸，一定程度上影响了河流的正常生态功能和群众的生产、生活。为保障河道生态环境对水量的需求，水电站增设河道生态流量监测设施很有必要。大渡河一级支流的田湾河流域水电站生态流量监测系统的设计与施工，可用于哪些还未修建河道生态流量监测设施的水电站借鉴。

关键词：河段缺水；生态流量；监测系统

1 引言

我国水电建设发展迅速，从《第一次全国水利普查公报》中看，已建水电站 46758 座。这些水电站为促进地方经济和社会发展发挥了重要作用，但随之带来的生态问题也不容忽视。一些水电站因下泄生态流量不足造成部分河段减水、脱水甚至干涸，一定程度上影响了河流的正常生态功能和群众的生产、生活。

为保护河流生态环境，推动水资源科学、合理、有序开发和可持续利用，我国政府十分重视生态环境保护，十八大提出要加强生态文明建设，十八届三中全会将水资源管理、水环境保护、水生态修复等纳入生态文明制度建设重要内容，并作出重要部署，提出明确要求。各地水利和环保部门相继出台措施对不满足生态流量下泄要求的水电站责令整改或挂牌督办。“水电站下泄生态流量监测系统”是重要的长效监督、管理手段，为主管部门随时掌握各水电站的流量下泄情况、保障下游河流的生态用水需求发挥了重要作用。

2 流域水文气象及工程概况

2.1 田湾河流域概况

田湾河位于四川省甘孜州康定县、雅安市石棉县境内，为大渡河中游右岸的一级支流。它发源于康定县境内贡嘎山西侧，干流河道全长 84.5km。全流域面积 1400km²。按流域和河道性划分，腾增沟口以上为上游，腾增沟口～界碑石为中游，界碑石以下为下游。

2.2 暴雨、洪水、径流特性

田湾河流域的洪水由暴雨形成。据田湾雨量站 1963～1987 年降水资料统计，年最大 6h 和年最大 24h 降水量的均值分别为 52.9mm 和 82.8mm。从大泥口水文站历年实测资料看，一次单峰洪水的历时一般为 1～2d 左右，复峰洪水的历时为 3～5d 左右，峰顶历时一般约 15min。

田湾河流域径流来源主要是降水，其次为地下水及冰川融雪水补给，流域内由于降水量丰沛、植被良好以及上游众多的天然海子，使流域具有调蓄能力大、径流丰沛稳定和年际变化小的特点。

2.3 流域梯级水电站工程简介

梯级从上至下依次由仁宗海、金窝和大发三级水电站组成。仁宗海电站大坝为堆石坝，坝高 69m，水库总库容 1.12 亿 m³，调节库容 0.91 亿 m³，水库具有年调节能力。

金窝电站位于田湾河中段（界碑石～喇嘛沟口），是田湾河规划梯级中的第二级，坝址控制集水面积 1060km²。金窝电站坝型为底格栏栅坝，坝高 5.5m，库容较小，仅具有区间日调节能力。

大发水电站位于田湾河下段，是田湾河规划的最末一级，坝址控制集水面积为 1162 km²。大发电站坝型为底格栏栅坝，坝高 6.82m，库容较小，仅具有区间日调节能力。

2.4 梯级电站生态流量监测系统工程简介

田湾河流域梯级水电站从上至下依次由仁宗海、金窝和大发三级水电站组成，三级电站主要取

水均为引水隧洞取水。各电站的取水，一定程度上影响了河流的正常生态功能和群众的生产、生活。分别在各水电站下游河段修建测流断面和河道生态流量监测系统，以保障河道生态环境对水量的需求。

仁宗海、金窝、大发三级水电站建设的测流断面和河道生态流量监测系统很相似，为缩减篇幅，以居中位的金窝水电站为代表，对“梯级水电站生态流量监测系统的设计与施工”进行论述。

3 金窝电站生态流量监测系统的设计

3.1 设计任务

3.1.1 生态流量监测系统流量数据和视频图像在主管部门的管理软件平台显示，并且数据和视频有叠加功能。

3.1.2 生态流量监测系统预留可接入雅安水利局、四川省水文系统主管部门监测系统平台的接口。

3.1.3 监测系统整套设备取得（水利部）相关部门认证、检测报告等。

3.1.4 系统准许接入主管部门的监测平台，并通过石棉县主管部门的联合验收。

3.1.5 系统具备现场参数设置功能。

3.1.6 系统设备具备可以通过 WEB 查询功能。

3.1.7 实现两个电站首部引水明渠和生态流量标准监测断面采集的流量数据接入公司水情测报系统。

3.2 设计依据

3.2.1 《水利水电工程水情自动测预报系统设计规定》（DL/T5051）

3.2.2 《水文自动测报系统技术规范》（SL61-2003）

3.2.3 GB50011-2001 建筑抗震设计规范

3.2.4 SZY201-2012 水资源监测要素

3.2.5 SZY203-2012 水资源监测设备技术要求

3.2.6 SZY204-2012 水资源监测设备现场安装调试

3.2.7 SZY205-2012 水资源监测设备质量检验

3.2.8 SL651-2014 水文监测数据通信规约

3.2.9 SCSW008-2011 水文测报系统技术规约和协议（2015 年修订版）

3.2.10 GB5 0343-20 04 《建筑物电子信息系统防雷技术规范》

3.3 设计技术标准

3.3.1 视频监控器技术标准：

（1）技术指标：不低于 200 万像素，全自动夜视功能。带云台控制，可变倍与自动变焦。为快速定点监控，可实现平台对预置位调用。

（2）监测频率：实时在线，单次故障周期不得超过 24h。

（3）安装指标：重点监控下泄水量（建议安装在取水口下游 20m 处），并且可监控来水量，可通过变倍将完整下泄水区域满屏显示，夜视可看清下泄水流状态。

（4）权限指标：市级查看全市监控点，并县可控制市管监控点。县级只可看并控制本县区域内的监控点。电站负责人只可对本电站视频监控点进行查看。

（5）入网方式：通过水务局内部设计的网络架构接入平台，网络 IP 配置以市级统一规划 IP 为标准进行配置。

（6）共享方式：通过水务局内部网络或公网共享数据。

（7）存储要求：存储周期不小于 30d，可对特定时段监控录像进行锁定（锁定后视频不可被删除或覆盖）。

（8）通讯协议：支持 ONVIF 与国标 GB/T28181 协议。

（9）通讯带宽：确保 2 路客户端同时访问不卡顿（建议不低于 10Mb 带宽）。

3.3.2 流量监测技术标准：

（1）技术指标：监测下泄流量，误差率不得超过正负 8%（为提高精确度，建议将下泄渠道改造成上下游长度不低于 3m 长的矩形堰，改造后的矩形堰最大过水量不得小于需监控流量的最低标准），可实现平台对前端设备实时数据的召测。

（2）监测频率：一天不少于 8 条流量记录，单次故障周期不得超过 36h。

（3）安装指标：监测下泄水水量（建议监测闸门下泄堰渠流量），安装位置下泄水流速相对水量成曲线变化（不会因水量变化而出现较大波动）。

（4）权限指标：市级查看全市监测点数据。县级只可看并控制本县区域内的监测点数据。电站负责人只可对本电站监测点数据。

（5）入网方式：通过 GRPS 或内部网络架构接入平台，测站编码以市级统一规划编码为标准进行配置。

（6）共享方式：通过水务局内部网络或公网共享数据。

（7）存储要求：存储周期不小于 5 年。

（8）通讯协议：与县、市平台数据结构一致或可数据可转换。

（9）入库方式：通过二次开发接口，将数据存储到县、市平台数据库，通过公网方式将数据存储入库。

3.3.3 雷达水位计技术标准：

（1) 测量范围：30m 或 70m。

（2）精度：±3mm。

（3）频率范围：26GHz。

（4）供电电压：6～24V。

（5）信号输出：RS485 Modbus。

3.3.4 遥测终端机技术标准：

(1）硬件配置：2 路 RS485 接口，1 路 TTL 串口（可用作 IO 接口，外接单总线温湿度传感器，控制继电器等），SDI 接口，1 路 IO 接口，1 路脉冲输入接口，1 路脉冲雨量计接口，2 路模拟量 4～20mA 接口，1 路以太网接口（可外接多种转换模块），2 路 12V 可控电源输出，1 路 5V 可控电源输出。

（2）存储容量：16M，支持最大 256G TF 卡。

（3）供电电压：6～24V。

（4）功耗 ：待机电流<1Ma(12V);工作电流<6Ma(12V)。

（5）工作环境：温度-30～60℃。

（6）湿度：<95%(无凝露)。

3.4 生态流量监测系统整体系统架构

整体系统架构详见图 1.。

3.5 生态流量视频监控原理

带夜视功能的高清摄像头，经过内部自建的光纤网络传输到厂区，再经过租用的通讯运营商 MSTP 数据专线光缆将实时视频数据上传到区水利局机房视频服务器，通过视频流服务器平台将数据进行存储，并转发到 PC 网络终端与手机 APP 终端，实现对电站取水口远程实时数据的监控。

数据通过租用光纤方式将数据传回中心机房，其通讯网络需与现有网络兼容（现有网络为内部

专网），同时可以兼容现有电站自建的视频监控设备，为整合现有电站监控点数据到新平台提供技术支撑。同时，视频数据可通过内部专网将数据上传致上级主管单位或兄弟单位。

生态流量视频监控原理详见图 2。

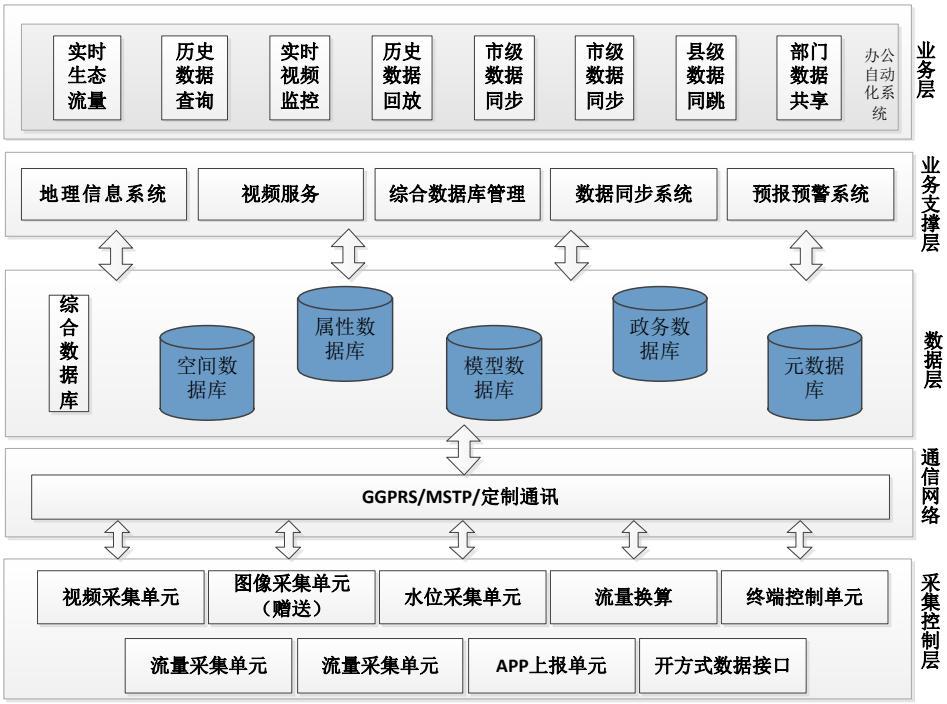


图 1　整体系统架构

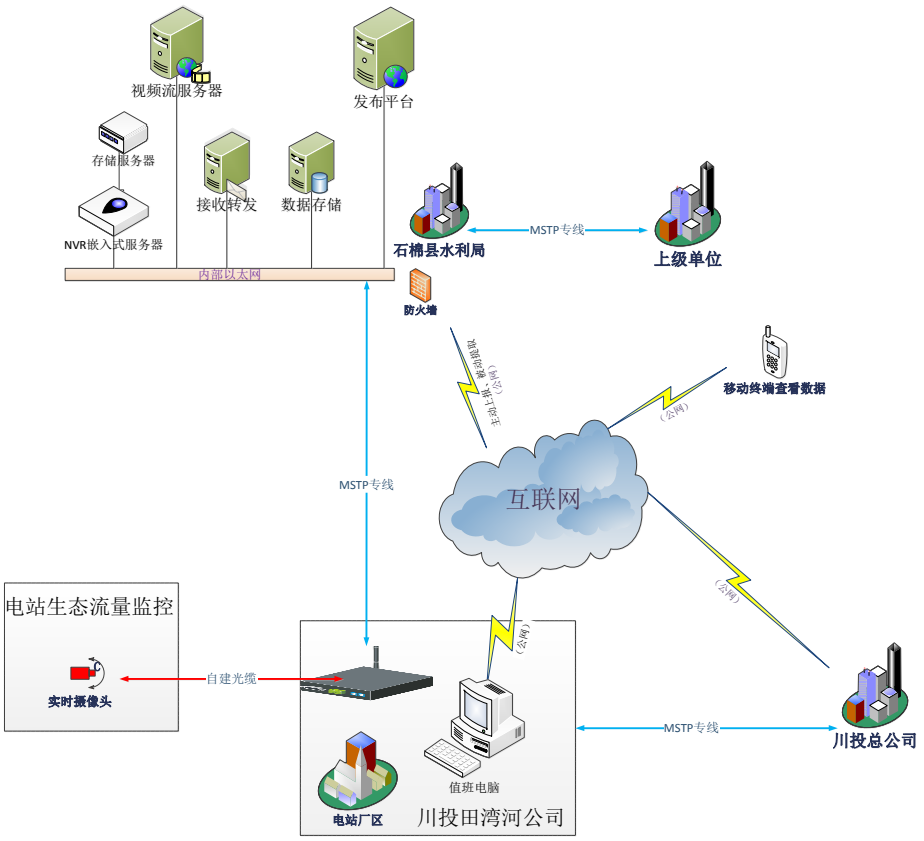


图 2　生态流量视频监控原理示意图

4 金窝电站生态流量监测系统的施工

4.1 金窝生态流量监测平面施工图

生态流量监测平面施工图详见图 3

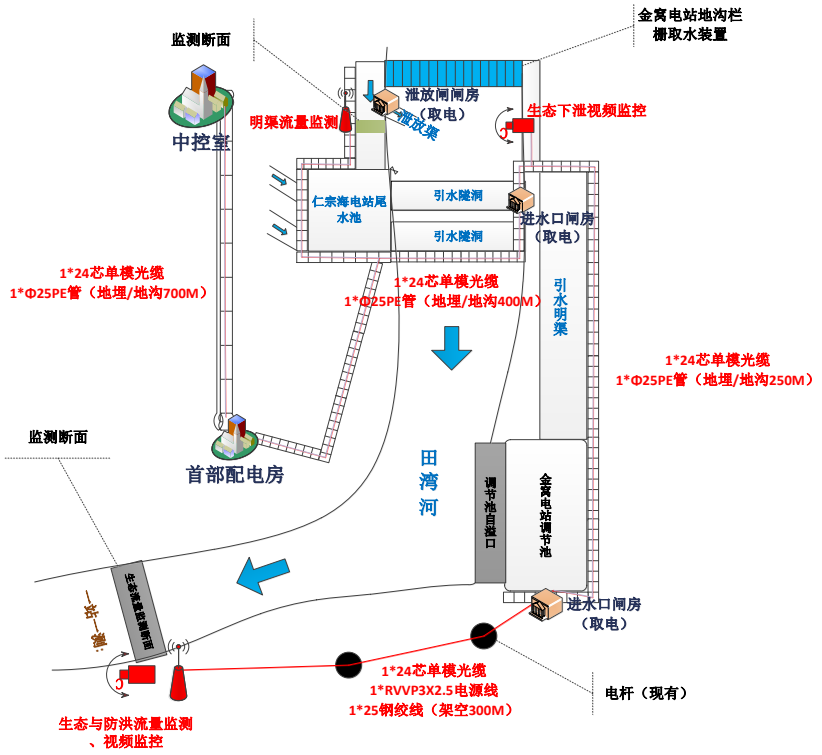


图 3　金窝生态流量监测平面布置图

4.2 摄像头及雷达水位计安装

摄像头及雷达水位计安装详见图 4。

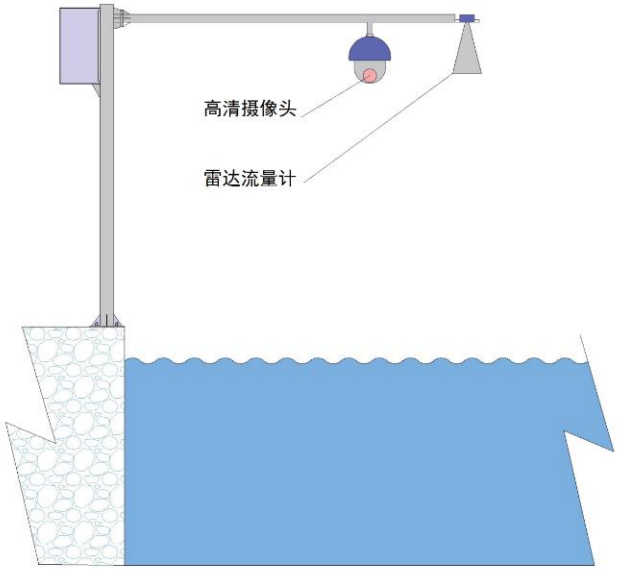


图 4　摄像头及雷达水位计安装示意图

4.3 光缆与通讯网络敷设

该项目需通过光纤网络进行通讯，长度约 4000m，分为架空、地沟与地埋方式敷设，其中架空约 3000m，其中架空光缆采用 25m² 钢绞线加间距不小于 50cm 的持钩安装方式，其余部分采用穿 PE 管地沟与地埋方式进行敷设。

4.4 吊线

4.4.1 吊线抱箍距杆稍 40 至 60cm 处，背档杆吊线抱箍可以适当降低，吊档杆抱箍可升高，距杆稍不得少于 25cm。第一层吊线与第二层吊线间距 40cm。

4.4.2 第一吊线应在杆路前进方向左侧，吊线位置不能任意改变方向。

4.4.3 吊线的背档杆和吊档杆 5m 以上的应做辅助装置。100m 以上的长杆档吊线要做辅助拉线，跨越杆应做三方拉线，终端杆做 7/2.6 的顶头拉线，超 200m 以上飞线，跨越杆和终端杆的顶径在 19cm 以上。飞线跨越不能超过 400m，如越过在中间需立过渡中间杆。

4.4.4　8m 以上角深内角应做辅助线，角杆辅助线采用 7*2.2 钢铰线，从吊线抱箍穿钉至封口 60cm，用二只 U 型钢卡（10cm）间距 10cm，5 至 7 圈封头，5 至 8m 角深内角吊线可有 4.0 铁线绑扎辅助；超 8m 以上角深、府角、仰角辅助线应与杆上主吊线相同钢绞线做做辅助线，吊线接续应采用 3.0 铁线另缠方法。

4.5 拉线

4.5.1 拉线方位角深一定要用皮尺测定，丈量角深以 50m 标准杆距为测定依据。

4.5.2 拉线抱箍在电杆的位置，终端拉，顶头拉，角杆拉，顺线拉线一律装设在吊线抱箍的上方，侧面拉线装设在吊线抱箍的下方，拉线抱箍与吊线抱箍间距 10cm±2cm.第一道拉线与第二道拉线抱箍间距为 40cm。

4.5.3 7×2.2 钢绞线主吊线，角深在 7.5m 以下，拉线应采用 7/2.6 钢绞线；角深在 7.5m 以上，拉线应采用 7/2.6 钢绞线；角深在 7.5 米以上，拉线应采用 7/2.6 钢绞线，顶头拉线都用 7/2.6 钢绞线。

4.5.4 15m 以上角深的角杆，应做人字拉线.拉线距离比 1:1，但不得少于 0.75，防风拉为 8 根杆一处，四方拉一般 32 杆左右设一处(最长不得大于 48 根杆距)；四方拉必须做辅助线装置。

4.6 高拉桩撑杆吊板拉

4.6.1 高拉桩杆稍应向拉线合力方向反侧倾斜 60—80cm，付拉包箍距杆菌稍不少于 25cm，正拉线与地面保持合理的高度。

4.6.2 不得在角深 7m 以上角杆装设撑杆，撑杆方应该在角杆内角平分线上，撑杆杆根要埋深 40—60cm。

4.6.3 吊板拉横担应装在杆子 1/5 处。

4.7 光缆接续与安装

4.7.1 局站内光缆的安装，根据设计安装时留有足够的长度。

4.7.2 光缆在局站终端形式:

（1）ODF 架。

（2）光纤终端盒等严格按照设备说明书操作，尾纤与光缆接续严格按设计顺序连接，同时在尾纤上贴有标记，并作好记录。

4.7.3 炮纤在机架内盘绕应大于规定的曲率半径，利用光缆中光纤连接时其连接损耗应符合设计要求.在熔接测试时，必须严格用 OTOR 仪测试。

4.7.4 光缆接续:

（1）光缆接续内容:光纤接续，加强芯，护套的固定，接头损耗测量接头盒的封装以及接头保护的安装。

（2）光纤接头前应该对光缆程式选用接头盒，根据接头预留长度进行开剥.光缆开剥后在接头盒支架上的固定要牢固，不得损坏束管及纤芯.环境要整洁，纤芯接续必须按出厂色谱顺序或设计要

求对应相接，不能得有误，尤其是分歧接头光缆时按规定接续并作好记录.架空光缆接头盒加强芯不接地，不联通。

（3）用熔接机进行纤芯接续时，光纤熔接的全部过程应采用 OTOR 监测，测出接头损耗，同时记录接头点到测试点纤芯距离.确保光纤接续平均损耗达到设计文件的规定，保证光缆传输质量。

（4）接好纤芯后用热缩管保护，光纤在余线盘固定及盘绕的曲率半径应大于 37.5mm，避免对 1.55um 波长产生附加衰减.盘绕后的纤芯用胶带稳妥固定在盘纤板内。

（5）光缆接头盒封装时，密封胶带应填实，光缆接头盒紧固螺丝要上紧，保证密封性能，在确认不渗漏的情况下方可装到吊线上(或埋入地下)。

4.8 光缆架设

4.8.1 光缆布放时不允许过度弯曲，其弯曲半径不得小于光缆处径 20 倍，不允许有小扣及纽绞现象，不得损坏光缆保护层。

4.8.2 布放光缆时应在角深大的角杆上，背档或吊档杆上挂有滑轮.光缆在角杆，四方拉上有预留线，预留线用塑料波纹管护套，预留弓子中间用软扎线固定在电杆上。

4.8.3 光缆钩间距为 50cm±3cm，挂钩与光缆搭扣一致，挂钩托板齐全，平正布放无蛇形。

4.8.4 光缆接头盒两侧余线 10～20m 为宜，将余线用预留架固定接头杆相邻两杆的反侧，把反线盘在余线架上，绑扎牢固整齐。

4.9 地线避雷线

4.9.1 终端杆，引入杆，接近局，站的 5 根电杆必须置避雷线。

4.9.2 角杆，跨越杆，分支杆，12m 以上的特殊杆，高坡杆利用拉线入地，地气线，避雷线应用 4.0mm，铁线沿杆子直接入地，其上部高出杆顶 10cm，4.0mm 铁线用 2.5mm 铁线间距 40～60cm 固定在电杆上。

4.9.3 利用拉线入地的避雷线，不得碰触吊线包箍。

5 水位流量转换

田湾河流域河道平均比降达到 44.2‰，水流速度大，河流推移质粒径大，甚至于大石块与洪水一起奔跑，在河道水流中根本无法安装流速仪或超声波流量计。雷达水位计测得的水位，通过水位流量关系获得流量值。

水位流量关系通过水工模型建立。求流量的方法为面积流速法，求流速的方法为距离时间法。

6 结语

为保障河道生态环境对水量的需求，推动水资源科学、合理、有序开发和可持续利用，水电站增设河道生态流量监测设施很有必要。“水电站下泄生态流量监测系统”是重要的长效监督、管理手段。大渡河的一级支流田湾河流域梯级水电站生态流量监测系统的设计与施工项目实例为主管部门随时掌握各水电站的流量下泄情况、保障下游河流的生态用水需求发挥了重要作用。

桐子林水电站工程环保水保管理工作实践

段溪洛，徐劲松，黄　彬

（雅砻江流域水电开发有限公司，四川 成都 610021）

摘　要：桐子林水电站在工程建设初期，桐子林建设管理局秉承公司“流域统筹、和谐发展”的工程建设环境保护管理理念，高度重视桐子林水电站工程环保水保管理，确定了“树环保形象”的管理目标。为认真贯彻落实 “三同时”制度，着力提升环保水保管理水平，在公司相关部门的大力支持下，建立健全环保水保管理体系，拟定环保水保工作“中长期规划”，制定以 “花园式工区”建设为抓手的具体工作思路。参建各方积极响应，结合桐子林水电站工程各施工区域的施工情况，提出实施方案并认真落实，工程建设环保水保工作稳步推进，实现了环保水保全过程管理。工程建设过程中得到了地方政府和社会各界的一致好评。

关键词：桐子林水电站；环境保护；措施

1 主要环保水保工作

1.1 环境保护措施落实情况

桐子林水电站工程各项环境保护措施主要依据环境影响报告书及批复文件和 “三同时”制度要求，与工程施工进度同步实施。

1.1.1 水环境保护措施

桐子林水电站工程工区污(废)水处理设施主要为生活污水处理设施和生产废水处理设施。生活污水处理设施包括业主营地和施工承包商营地生活污水处理设施；生产废水处理设施则主要包括金龙沟人工骨料生产系统废水处理设施和混凝土拌和系统废水处理设施等。桐子林水电站坝址位于盐边县饮用水二级水源保护区内，为避免施工废水对水源保护区水质造成不利影响，管理局在执行复核环评报告书要求水污染《污水综合排放标准》(GB8978-1996)一级排放标准的基础上，提出了施工区所有生产废水及生活污水处理达到一级标准后全部进行回用的管理目标，实现废(污)水“零排放”。

1.1.1.1 生活污水处理

根据报告书及批复文件要求，新建生活营地需采用XHS-15型生活污水成套处理设备进行处理。

业主营地设在二滩电站建设管理及运营生活营地雅攀水电园内，沿用原有化粪池处理系统，纳入园区统一管理，由二滩实业公司负责清掏；金龙沟人工骨料生产系统工程承包商利用原二滩水电站生活营地作为生活营地，沿用原有化粪池处理，由承包商负责清掏；其他施工承包商营地均为租用当地社区房屋，生活污水采用化粪池处理，并与金河村村委会签订施工区化粪池（含施工现场固定式和移动式厕所）清掏协议，委托其进行化粪池清掏并后作为农家肥进行利用。新建于桐子林渣场的中水七局项目部施工营地生活污水采用澳博一体化污水处理设备处理，处理能力为96m^3/d，设施于2012年4月份进行安装、调试、试运行，处理后的水全部于营地绿化养护及道路洒水降尘；厂坝区永久生活污水采用地埋式成套污水处理设备进行处理，生活污水处理能力为1m^3/h，于2015年3月安装、调试完成并移交电厂。监测结果表明，水质均符合《污水综合排放标准》(GB8978-1996)一级标准要求。

1.1.1.2 生产废水处理

桐子林水电站工程砂石骨料加工系统废水报告书及批复文件要求处理采用混凝沉淀、细砂回收处理、机械脱水工艺。

系统设计、建设、运行维护由广西局项目部负责，采用半干法生产，生产能力约540 t/h，废水

采用“细砂回收+混凝沉淀+干化”的处理工艺，处理能力为 400m^3/h，即通过管道收集各个车间的生产废水，利用刮砂机进行细砂回收，废水溢流至调节池后泵抽到细砂回收器（水力旋流器+高频振动筛）进行预处理，废水进入辐流沉淀池絮凝沉淀，上清液排入清水池回用；底泥由刮泥机排入废渣沉淀池，沉淀后上清液回抽至辐流式沉淀池循环处理，泥渣清挖干化后运至渣场堆放。

为实现管理局提出的生产废水处理达到一级标准后全部进行回用的“零排放”要求，管理局组织监理和施工单位相关人员开展考察学习，经多种方案比选，广西局项目部完成了《金龙沟人工骨料生产系统工程废水处理系统改造方案(修)》编制，并经监理审批后实施。改造方案主要包括：人工骨料生产工艺优化、废水产量减少，新增加药间 1 座，幅流式沉淀池改造，完善废水回用设施及管道等。废水处理系统改造完成并顺利投运，实现了“零排放”要求。环境监测结果表明：人工骨料生产系统悬浮物部分超《污水综合排放标准》（(GB 8978-1996)）一级排放标准。

环境影响报告书及批复文件要求，混凝土拌和系统需采取间歇式沉淀、投加中和剂的处理措施进行废水处理。

桐子林水电站工程共设置左岸混凝土拌和系统和 120 混凝土拌和系统两座。左岸混凝土拌和系统废水处理设施与混凝土拌和系统同步建成并投入运行，其设计、建设和运行维护管理由中水七局桐子林项目部负责，该系统废水采用两级沉淀处理，废水处理能力为 30m^3/d。处理后的废水回用于洒水降尘或场地冲洗，废渣运往指定渣场堆放。为进一步满足高峰期废水处理和管理局提出的生产废水处理后全部回用的“零排放”要求，中水七局桐子林项目部完成《混凝土拌和系统废水处理改造方案》的编制并经监理批复后进行改造。改造方案主要包括：将废水处理量由 30m^3/d 提升至 36m^3/d，新建清水池和废渣沉淀池各 1 座，扩建二级沉淀池，完善废水回用设施及管路。改造完成后废水处理能力满足施工要求，实现废水全部回用“零排放”管理目标。120 混凝土拌和系统废水处理设施与 120 混凝土拌和系统同步建成并投入运行，其设计、建设和维护管理由安蓉公司桐子林项目部负责。利用两级沉淀池方式进行废水处理，处理能力为 10m^3/d，处理后的废水回用于洒水降尘和场地冲洗，废渣运往指定渣场堆放。

根据环境监测结果表明：处理后的废水 pH 值和悬浮物部分超过《污水综合排放标准》（GB 8978-1996）一级排放标准并实现“零排放”。

1.1.1.3 含油废水处理

环评报告书及批复文件要求采取沉淀池+小型隔油池的处理措施。

本工程发电厂房电站变压器底部修建了混凝土隔油池并铺满鹅卵石，采用排油管道将隔油池与透平油罐室的事故油池连通形成含油废水收集系统。一旦发生变压器意外事故，由含油废水收集系统将含油废水收集至事故油池集中处理。

1.1.1.4 黄磷厂废水处理

报告书及批复文件对位于库区的黄磷厂明确要求进行搬迁，并按照有关规定另行报批环境影响报告书。

由于黄磷厂已于关停，不实施搬迁，因此未开展专项环评工作。但鉴于黄磷厂部分设施位于桐子林水电站运行期安全水位 1020m 以下，需对其废水及磷渣等实施清理工作，避免水库蓄水后对库区及下游水质产生污染。雅砻江公司委托成都兰德曼科技有限公司承担该项处理工作，成都兰德曼科技有限公司完成《四川川投电冶有限公司黄磷冲渣废水治理工程方案设计》的编制并通过专家评审。管理局将审定方案报送攀枝花市环保局备案。处理总水量约 4787.05m^3、沉底泥渣约 336.4m^3，残留泥渣和滤渣已按规范用水泥砂浆封存于池中。攀枝花市环境监测站取样监测结果表明，残留废水经处理后已达到《污水综合排放标准》（GB8978-1996）一级排放标准。雨后废水收集池积水质量监测， pH、悬浮物、氟化物、元素磷和磷酸盐等 5 项指标均达到《污水综合排放标准》（GB8978-

1996）的一级标准。治理方案完成后通过了专家验收，米易县环境保护局出具了“关于桐子林水电站库区黄磷废水治理工程现场检查情况的说明”。管理局以“关于申请桐子林水电站库区黄磷废水治理工程验收的报告”向攀枝花市环境保护局进行报备。

1.1.1.5 库区水质保护措施

盐边县集中式饮用水水源保护区以盐边县城自来水厂取水口为界进行范围区划，该取水口位于坝址下游左岸 2.1km 处，年取水量 140～150 万 m^3。本工程施工涉及其二级保护区及准保护区。根据《攀枝花市集中式饮用水水源保护区划定方案》，二级保护区和准保护区执行《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）III类标准。环评报告书及批复文件要求落实盐边县取水口水质保护措施并制定应急处理预案。

通过对桐子林水电站工程施工活动可能造成的风险分析，管理局于 2014 年 3 月完成《桐子林水电站工程突发环境事件应急专项预案》和《桐子林水电站工程施工期盐边县自来水厂取水口水质污染应急预案》编制，并向盐边县环保局进行了备案（备案编号：5104222014C030018）。

工程建设过程中，在严格落实环评报告及其批复意见的同时，通过采取对生产生活废水处理、库区黄磷厂泥磷池和磷渣及废水清理、含油废水处理等措施并严格执行“零排放”。

施工阶段丰、平、枯期的水质监测结果表明， 除 2014 年 6 月、2014 年 8 月、2015 年 7 月、2016 年 7 月四个时段铁含量超出《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）III类标准限值外，其它指标均达到地表水III类标准；特别是坝址下游 1000m 盐边县自来水厂取水口处的水质未因工程施工活动造成污染，水环境保护措施效果显著。

1.1.2 空气环境防治措施

工程施工期大气环境保护措施主要包括砂石加工系统及混凝土系统的扬尘、交通粉尘、燃油废气、开挖爆破粉尘等施工活动空气污染消减与控制措施。主要措施包括：低尘工艺、除尘装置、洒水降尘、定期维修保养等。

1.1.2.1 砂石加工系统与混凝土生产系统粉尘消减及控制

环评报告书及批复文件要求采取喷雾除尘、洒水降尘、封闭集尘实施情况：

（1）金龙沟人工骨料加工系统

金龙沟人工骨料生产系统采取的降尘措施主要包括：在料场设置高位水池用于料场开采作业面洒水降尘；钻孔采取湿法作业；人工骨料生产系统入料口、中碎、细碎车间安装的喷淋设施；装料过程中进行洒水降尘；为了加强场地洒水工作整个骨料加工系统施工道路安装喷淋管路进行洒水，最大程度上减少扬尘污染。

（2）混凝土拌和系统

混凝土拌和系统安装粉尘收集装置；粉煤灰、水泥等粉状物资采取封闭式储存；卸料平台安装喷淋设施；场地不定期清扫和冲洗，同时混凝土施工人员配备口罩并督促使用。

1.1.2.2 爆破开挖粉尘的消减及控制

报告书及批复文件要求：湿法作业，并尽量选用带收尘设备的施工机械以降低施工产生的粉尘量。

实施情况：工程爆破选取先进的爆破方式，为降低爆破粉尘，枢纽工程区有条件的爆破工作面在施爆前采用洒水车进行洒水。左右公路边坡、进水渠和尾水渠边坡等开挖作业面采用人工洒水和洒水车洒水降尘，钻孔采用湿法作业或选用带吸尘装置的钻机。施工过程中受大气污染影响的施工人员，发放防尘口罩，并督促佩戴使用。

1.1.2.3 交通道路粉尘消减及控制

报告书及批复文件要求：道路硬化、密闭运输、洒水降尘，做好公路绿化及路面清扫

实施情况：为有效降低道路扬尘，场内永久公路路面全部采用混凝土硬化；结合水保措施，对公路两旁进行绿化，栽种行道树并进行养护，起到良好的吸附扬尘和净化尾气的作用；各承包商运输粉煤灰、水泥等粉状物时采取罐车运输，运输土石方及骨料的车辆采取篷布覆盖；金龙沟人工骨料生产系统进场道路及部分枢纽区道路安装的洒水喷淋设施，专人维护管理；枢纽工程区道路由专门的文明施工队伍负责清扫，采用洒水车洒水降尘；在道路设置限速标志和减速带，通过控制车速减少运输过程中的扬尘。

1.1.2.4 燃油废气的消减及控制

报告书及批复文件要求：施工期间，往来车辆需安装尾气净化器，保证尾气达标排放

实施情况：严格要求各承包商需用符合国家有关要求的车辆和设备，加强车辆及设备的日常维修、保养，维持良好的工况，确保尾气排放符合标准。

工程建设过程中，严格按照环评报告及其批复意见认真落实环境空气保护措施，对开挖、爆破粉尘、砂石骨料及混凝土系统粉尘、燃油废气及交通粉尘等均从工艺及设备选择、设备维护、施工管理、人员防护、敏感目标保护、施工区隔离等方面采取削减和防治措施，施工期各项环境空气保护措施落实到位。监测数据表明： 2012 年 4 季度～2015 年 1 季度桐子林车站居民点总悬浮颗粒物、二氧化氮符合《环境空气质量标准》（GB3095-1996）二级标准，坝址工区二氧化氮达到《环境空气质量标准》（GB3095-1996）二级标准，坝址工区、金龙山人工骨料加工系统颗粒物符合《大气污染物综合排放标准》（GB16297-1996）无组织排放标准。2015 年 2 季度～2016 年 2 季度因施工期接近尾声，坝址工区、金龙山人工骨料加工系统和桐子林车站居民点三个监测位点的二氧化氮和总悬浮颗粒物监测值均达到《环境空气质量标准》二级标准。

1.1.3 环境噪声污染防治措施

桐子林水电站工程根据施工期噪声污染源数量多且分散的特点，声环境保护措施从噪声源控制、传播介质降噪和敏感对象保护等多方面着手，较好地减小了施工噪声的影响。

1.1.3.1 交通噪声控制

报告书及批复文件要求：在敏感路段，采取交通管制措施；在声环境敏感点处设置标志牌；加强道路的养护和车辆的维护保养，降低噪声源；并尽量选用低噪声车辆；砂石系统工程区设立隔声墙。

实施情况：

在车流量较大的桐子林火车站、施工生活区、业主营地等声环境敏感区附近设置交通警示牌及减速带，限制工区内车辆时速，禁止施工车辆白天大声鸣笛，夜间禁止鸣笛。在具备条件的路段和工区外围栽植乔木形成隔音屏障，减少对周边环境影响；

1.1.3.2 爆破噪声控制

报告书及批复文件要求：控制爆破时间，严禁夜间爆破

实施情况：控制爆破规模与起爆时段，减少单孔炸药量，爆破作业按照相关规定执行。

1.1.3.3 生产噪声控制

环评报告书及批复文件要求采用低噪音设备降低噪声源并加强维护保养，采取隔音、吸声、减振等措施，加强人员防护。

工程施工过程中，采取了选用低噪音施工设备，砂石系统、混凝土生产系统的机械设备增加减振垫，定期对设备进行维护保养，空压机、拌和站、成品料装卸平台等部位设置了封闭隔音屏障或声障墙，对在高噪音环境下的人员发放了耳塞等措施。监测结果表明，桐子林火车站居民点、桐子林渣场新建施工生活区、二滩电站厂房办公区和坝区等环境敏感点监测值符合《声环境质量标准》（GB3096-2008）2 类标准。

1.1.4 人群健康保护措施

1.1.4.1 参建人员健康保护

环评报告书及批复文件要求，需对施工人员进行卫生检疫，施工期间定期对施工人群进行观察和体检并采取疟疾预防性服药、甲型、乙型肝炎疫苗和流行性出血热疫苗接种的预防免疫措施，并实施工区疫情监控。

因桐子林水电站工程紧邻盐边县城，管理局将施工期防疫工作纳入了盐边县卫生防疫体系，并督促施工单位制定了食堂卫生管理制度，要求餐饮服务人员持健康证上岗，组织开展培训教育，提高员工自我健康保护意识。保持生活营地和食堂环境卫生。对受粉尘及噪声影响较大的作业人员发放防尘口罩、耳塞等劳动保护用品，建立人群健康档案。施工区内未发生群发性传染病及重大职业病事件。

1.1.4.2 环境卫生及食品卫生管理与监督

环评报告书及批复文件要求，对饮用水水质进行监控，定期对公共场所进行卫生清理和检查，加强环境卫生清理及食品卫生管理。

桐子林水电站大坝枢纽区各参建单位饮用水均由盐边县自来水公司供水。由于砂石项目部营地远离县城，为保证饮用水安全，要求广西局桐子林项目部加强员工管理，饮用水采用桶装水，食堂安装净水器等措施，确保饮水安全。督促落实生活区专人负责环境卫生清理；制定食堂卫生管理制度上墙并严格执行；餐饮服务人员持健康证上岗、定期体检，统一佩戴工作服、工作帽、口罩；对食材进行保鲜，生、熟分存；定期对食堂进行消毒等措施。

1.1.5 固体废弃物处置与处理措施

1.1.5.1 固废处置

环评报告书及批复文件要求，对生活垃圾进行收集并采用垃圾车运至垃圾处理场统一处理。

管理局按照生活垃圾“日产日清”，严格落实生活垃圾统一清运至盐边县垃圾处理场进行处理。业主营地生活垃圾由二滩实业公司负责清运。要求承包人在生活营地、施工区域及辅企等区域设置垃圾桶，并与盐边县城建局签订垃圾清运协议，落实清运责任。建筑垃圾按要求运至头道河渣场堆放。

1.1.5.2 危废处置

管理局印发了《桐子林水电站工程危险废物管理细则》，监理单位制定了《危险废物监督管理制度》，施工单位制定了《危险废弃物规范化管理制度及职责》，设置了含油废水暂存点，废油桶堆放点，含油废弃物暂时存放点场地均实施硬化、悬挂警示标识和管理制度、设置灭火器和拦挡措施、采取封闭管理。并委托攀枝花市恒德废物集中处理有限公司开展含油废弃物的清运和处置工作。规范了危险废弃物的收集、临时储存、处理等全过程管理工作。

1.1.6 生态保护措施

1.1.6.1 水生及陆生生态保护

环评报告书及批复文件要求，对施工区的陆生植物进行全面调查，合理优化施工场地的布设，对工区附近的保护植物进行挂牌保护，并修建防护拦。加强宣传教育、禁伐禁猎，以强化对生物资源的保护。采取人工增殖放流等补偿措施，重点增殖放流珍稀保护和特有等鱼类。建立水生生态环境监测系统，长期观测鱼类增殖放流效果。

为消减施工队伍对植被和土壤的影响，在施工区设置警示牌，标明施工活动区，严令禁止到非施工区活动；非施工区严禁烟火、狩猎和捕鱼等活动。施工期间对施工人员和附近居民加强施工区生态保护的宣传教育，发现珍稀动、植物立即上报当地环保部门及林业部门。严禁施工人员非法猎捕珍稀保护动物及野生动物，禁止施工人员捕食蛙类、蛇类、鸟类和兽类，以减轻施工对当地陆生

动植物的影响。配合当地渔政部门加强对鱼类种质资源库的渔业管理，禁止电鱼、炸鱼、毒鱼等违法捕鱼行为。做好宣传与引导工作，控制对雅砻江鱼类的捕食。2016 年 4 月，鱼类增殖放流站通过功能性验收， 6 月通过完工验收。2016 年具备亲鱼繁殖能力，2017 年实现增殖放流目标。

1.1.6.2 二滩森林公园、风景名胜区保护

环评报告书及批复文件要求，保护森林公园及风景名胜区森林植被；加强宣传教育、禁止乱砍乱伐。

本工程主要采取了预防保护措施、景观及生态恢复措施、森林公园和风景名胜区保护措施。通过开展环保宣传教育，发放《环保水保工作手册》、设置宣传栏等形式，对施工人员加强施工区生态保护的宣传教育，教育施工人员，禁止施工人员捕食蛙类、蛇类、鸟类、兽类，乱砍乱伐，以减轻施工对当地陆生动植物的影响，确保了施工期间未发生乱砍乱伐、捕猎鱼类和野生动物等破坏生态环境的行为。委托昆明院对施工区的陆生植物进行了全面调查，针对工程蓄水可能对库区部分红椿植株产生淹没影响，与米易县文华园艺公司签订了《桐子林水电站红椿苗木绿化及养护合同》，在业主营地内建成立红椿园，蓄水前完成红椿苗木的栽植及管护并进行隔离及挂牌，目前，苗木长势良好。各项生态保护措施落实到位。

1.1.7 环境监测与管理

1.1.7.1 环境监测

环评报告书及批复文件要求，由业主委托具备相应资质的环境监测单位按照相关要求进行监测。

招标引进了四川省地质工程勘察院，依据监测合同及监测实施方案开展现场监测工作，按期提交监测成果。环境监测范围包括桐子林水电站工程施工区、水库淹没区及施工活动影响区域。监测内容包括施工期生产废水、生活污水、地表水、环境空气及噪声监测，监测数据整理、分析、报告编制等。共计实施监测 98 次，提交环境监测季报 17 期，环境监测年报 4 期。

1.1.7.2 环境管理及监理

环评报告书及批复文件要求，健全环境监理及管理体系，督促落实各项环保措施。

招标引进了昆明勘测设计院成立桐子林建设管理局环保水保管理中心，代表管理局履行环保水保管理职责和合同范围内专项环保工程的监理工作，对工程环保措施进行效果管理，负责进行专业检查指导，对发现的问题提出处理和改进意见。工程监理合同规定，对土建和机电安装合同项目工程中相关环保措施实施监理，监督施工单位严格执行合同中的环保条款，督促施工单位落实相关环保措施或整改要求。

1.2 水土保持措施落实情况

根据批复的水土保持方案及变更设计报告，水土流失防治区分为枢纽工程区、渣场区、料场区、施工生产生活区、交通设施区、水库淹没及影响区等 6 个防治区。

1.2.1 枢纽工程区水土保持措施

方案报告及批复意见要求，围堰迎水面护坡、高挖方段锚杆、锚索和喷锚加固，围堰彻底拆除，石渣清运，临时防护措施、场地平整、植被建设。

枢纽工程区实施的水土保持工程措施主要包括左、右岸公路边坡防护，导流明渠、进水渠和尾水渠边坡混凝土护坡、鱼类增殖站放流站平台外侧混凝土、钢筋笼及生态土石龙护坡，下游河道左右岸防护工程等。 2010 年、2011 年实施了左右岸边坡及公路临江侧绿化，在边坡马道上修筑了种植槽，并安装喷灌系统，种植槽内栽植的灌木有三角梅、夹竹桃、小叶女贞、连翘、七彩扶桑、花叶垂榕、花叶假连翘等灌木，并种植花生藤、满天星、狗牙根、结缕草等地被植物及爬山虎、油麻藤、山毛豆和炮仗花等藤本植物。在公路临江侧修建种植槽，采取黄花槐、三角梅及花生藤的立体种植绿化措施。在左岸进厂道路及厂前回车平台设置移动花坛、绿化带、坡脚种植槽，移动式花坛

布置于厂前平台，绿化带种植黄花槐、三角梅并种植草坪，坡脚种植槽内种植爬山虎、油麻藤等爬藤植物。根据鱼类增殖站建筑物布置特点，分为鱼文化生态景观广场区、亲鱼景观区、苗种景观区三个区域进行景观绿化，实现各区域的主体建筑物与植物景观有机结合，达到植物景观点缀建筑物的目的，种植的植物主要有金叶女贞球、银杏、桂花、白玉兰、黄葛、三角梅、混播草坪，并在作业通道及停车区域敷设透水砖及植草格。目前枢纽区各项水土保持措施以全面落实，水土保持设施设施完善，植物措施长势良好，景观效果初步形成。

1.2.2 渣场水土保持措施

方案报告及批复意见要求，采取挡渣墙挡护措施，先拦后弃、分层堆放和碾压；桐子林渣场渣脚挡渣墙及其冲淘防护措施、挡渣墙至 1016 高程坡面浆砌石护坡、渣顶及坡面截排水等措施；头道河渣场取消沟口两侧干砌石挡墙，并对沟口渣体增设护坡措施；阿布郎当沟渣场采取土地整治、截排水、撒播湿生草种、绿化覆土、栽植乔灌木及撒播草籽绿化等措施。

头道河渣场在使用过程中较好的落实了“三同时”要求，结合工程进度相继完成沟水处理工程、进场道路硬化及边坡整治、挡渣墙及沟口渣体坡面高程 1008m 以下的浆砌石、高程 1008m 以上的网格梁护坡、马道排水系统和植物措施，全面落实先拦后弃、分层堆放和碾压的要求。实际弃渣量约 350 万 m^3，堆渣高程为 1027.5m~1029.5m。目前，渣场整治工作已完成，完成了弃渣影响范围内的边坡削坡、浆砌石网格梁、截排水设施及复耕范围以外的生态恢复工作，已具备复耕条件。成都院提供渣场稳定性分析报告表明，渣场稳定安全系数满足规范要求，渣场整体稳定。

桐子林渣场使用过程中，严格落实先拦后弃、分层堆放和碾压的要求，实际弃渣量 53 万 m^3，弃渣堆放至高程 1020m。永久防护工程及绿化工作跟进完成，坡面播撒草种，渣顶平台采取种植三角梅和播撒草种的绿化措施，新建的施工生活临时营地已拆除并完成场地平整，目前已具备复耕条件。成都院提供渣场稳定性分析报告，报告表明：稳定安全系数满足规范要求，桐子林渣场整体稳定。

阿布郎当沟渣场共计完成弃渣量 49.41 万 m^3，已按设计要求完成渣场整治及生态恢复。生态恢复措施包括坡面撒播湿生草籽、渣顶平台栽植乔木结合混播草籽等。成都院提供渣场稳定性分析报告表明，拦渣坝稳定安全系数满足规范要求。

1.2.3 料场水土保持措施

方案报告及批复意见要求，剥离表土集中堆放，分区、分级开挖，开采结束后，完善排水沟，覆土栽植乔灌木、撒播草籽的水保措施。

骨料开采过程中，采取梯段开挖、分层支护，对开采边坡和进场道路边坡实施跟进支护、同步形成截排水系统。目前，已完成上料场道路及分层进场道路的截排水措施和生态恢复措施。

1.2.4 施工生产生活区水土保持措施

方案报告及批复意见要求，场地平整、硬化和临时防护，完善排水沟，植被恢复。

人工骨料加工系统承包人生活营地沿用原二滩电站施工营地；人工骨料生产系统按照设计要求同步落实截排水措施，该系统已拆除并完成生态恢复；混凝土拌和系统已拆除，根据设计规划，用于检修承包商营地及鱼类增殖站建设，目前，所有设施建设完成；其余生产生活区域均采取了栽植灌木和撒播灌草相结合的植被恢复措施。

1.2.5 施工公路水土保持措施

方案报告书及批复意见要求，永久公路与水土保持相关的截排水沟、涵管、挡墙均由主体工程设计并完成；临时道路在使用过程中应采取截排水、拦挡等措施。

本工程新建场内永久公路长度为 3.1km，场内扩建临时公路 1.5km，新建临时施工道路 5.6km。场内永久公路截排水沟、涵管、挡墙等设施完善，并对道路沿线采取乔灌与地被植物相结合的绿化

措施；临时道路均设施截排水及拦挡措施。

1.2.6 水库淹没及影响区水土保持措施

方案报告及批复意见要求，对不稳定库岸提出监测和封育管理要求。

水库蓄水前，已完成库岸公路及铁路路基加固处理。水库蓄水后，对可能发生失稳、塌岸及浸没问题的区域，加强了巡视、检查，发现问题及时处理。监测结果表明，桐子林水电站库区水土流失防治责任范围内的各类水土保持完善，淹没及影响区得到了及时有效的防治，植物措施效果良好。

2 环保水保竣工验收

按照公司环境保护管理中心的统筹安排，桐子林水电站工程环境保护和水土保持竣工验收工作全面完成。分别于 2016 年 12 月、2017 年 2 月完成了调查评估工作， 桐子林水电站工程于 2017 年 9 月完成水土保持竣工验收，于 2018 年 1 月完成环境保护竣工验收自主验收及公示。

3 管理成效

在雅砻江公司的正确领导和地方政府的大力支持下，桐子林水电站工程严格落实环境影响报告书、水土保持方案报告及批复文件要求，按照国家有关法律法规和规程规范的要求，全面落实环境保护和水土保持各项措施。通过参建各方共同努力，较好地完成了桐子林水电站工程建设期的环境保护和水土保持工作。在水电站建设过程中，从未受到相关行政部门及地方政府的处罚。并荣获了“2017 年度四川省生产建设项目水土保持生态文明工程”和“国家水土保持生态文明工程”称号。

光照水电站叠梁门分层取水效果观测与评估方法研究

脱友才

（四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘　要：叠梁门是目前大中型水电站采取的较为普遍的分层取水工程方案，具有能适应较大的水位变化、可连续取得表层温水的特点。我国滩坑、光照、糯扎渡、溪洛渡以及锦屏一级等水电站均采取了叠梁门分层取水措施，并相继建成并投入运行。根据已实施的叠梁门操作运行与调度管理反馈的信息看，存在操作时间长、动水提放难度大、水调和电调存在冲突等现实问题，同时对于叠梁门的分层取水效果和生态响应缺乏必要的跟踪调查和评估手段，如何做到叠梁门的有效运行一直是电厂的棘手难题。为探讨叠梁门的分层取水效果，四川大学于 2019 年 3 月～6 月对光照水电站开展了分层取水试验，针对光照水电站引水发电系统的布置情况进行了分层取水水温观测方案专项设计，并组织了现场实施，基于同步的水库调度、机组运行和叠梁门操作等资料，探讨了叠梁门分层取水的效果评估方法。研究表明：(1)光照叠梁门的分层取水具有较好的水温改善效果，有 5 层~3 层叠梁门运行的机组下泄水温较无叠梁门运行提升范围为 0.0℃～1.4℃，平均提升 0.6℃；(2)无叠梁门机组下泄水温对应取水口底板高程 20m 的位置，叠梁门的运行进一步抬升了取水高程，提高高度约 2m，使得分层取水高程能进入到温跃层区；(3)“一洞两机”条件下机组运行方式对分层取水效果产生一定的影响，同一引水道机组台数的增加，有助于抬高取水高程。

以事前控制为抓手，探索水电工程环境监理能力建设之路

冯　博

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072）

摘　要：建设项目环境监理制度作为我国环境管理领域的制度创新之一，对强化建设项目全过程管理、提升环评有效性和完善性起到了积极作用。其试点范围逐步扩大，几乎覆盖了所有基础建设领域，参与试点的各环境监理单位在创新监理模式和丰富监理手段等方面进行了大胆的尝试，做了大量的基础理论研究工作，但对提升监理能力方面的研究相对较少。本文从环境监理流程中最为重要的事前控制作为突破口，试图找到提升事前控制能力的途径，从而达到提升水电工程环境监理质量的目的。

关键词：环境监理；事前控制；服务水平

水电工程作为典型的生态影响型建设项目，开发建设过程具有影响区域范围广，影响环境要素多、影响作用时间长及影响人口数量大的特点。随着生态文明体制改革不断推进，绿水青山就是金山银山的理念深入人心，水电工程施工期的环境保护工作越来越受到社会各界的关注，而水电工程环境监理以第三方身份，凭借自身在环保技术及环境管理方面的业务优势，对水电工程施工期环境保护事务实施全过程监督管理，其在督促环保措施落实、减免施工对环境不利影响、保证工程建设与环境保护相协调、预防和初期干预避免环境污染事故等方面发挥着重要作用。就其工作内容的实质而言，其更接近于针对水电工程施工期各类环境事务的一项综合管理，其综合管理的职能包括了计划、协调和控制。其中控制是根据既定计划及衡量标准，检查工作的实际情况及进展，总结经验，发现问题，采取措施，改进工作。[1]。控制不仅是管理工作的重要职能，而且在管理过程中能否实施有效的控制也是决定管理成败的关键。因此，环境监理能力建设和提升也就是控制能力的建设和提升，而在整个控制流程中又以事前控制最为关键，因其实施于施工行为之前，具有前瞻性、预见性和主动性，因此，如果事前控制工作到位，可减少事中和事后阶段因整改或返工所造成的工期和经济损失，大大降低后期控制工作的难度，提高环境监理的工作效率，从而使环境监理整体服务水平得以提升。

1 事前控制的重要性

管理学中的事前控制是指“通过观察情况、收集整理信息、掌握规律、预测趋势，正确预计未来可能出现的问题，提前采取措施，将可能发生的偏差消除在萌芽状态中，为避免在未来不同发展阶段可能出现的问题而事先采取的措施”[2]。在水电工程环境监理实践过程中，事前控制所做的工作能有效避免因对施工行为可能造成的环境影响识别不全面不深入，减免措施设计不合理不充分，所造成的环境污染和水土流失的发生，也可为后续的事中控制和事后控制提出控制目标、控制依据和纠偏措施，相对事中控制和事后控制而言，事前控制更具前瞻性和预见性，可防患于未然；而且事前控制对事不对人，不涉及经济利益，不会造成被管理单位的抵触情绪，易于被接受并付诸实施。同时，事前控制阶段工作是建立在以往控制过程中所积累的纠偏纠错经验基础上，对人员综合素质水平要求更高，工作难度更大，事前控制工作能否顺利开展，其前瞻性和预防性能否得以充分体现，也是衡量环境监理单位业务能力、人员素质、积极性和主动性的重要指标。

现阶段，水电工程环境监理项目普遍存在事前控制能力较弱，事前介入程度不深的问题，这种情况一方面源于建设单位授权不到位，一方面也源于环境监理单位的主动性不强。事前控制不力，造成施工单位在施工过程中对环境影响源把握不准，措施投入没有预见性，往往是“头疼医头，脚

疼医脚”，环境污染隐患转化成环境污染事件的概率大大提高，同时事后整改也加大了环保措施的实施难度和资金投入。环境监理在监理过程中控制重点也被动后移至事中控制和事后控制上，主要精力消耗在环境污染隐患排查和督促整改上，监理人员看似很忙碌，但监理部却始终在一种较低水平的监管层面上运行。因为没有统筹考虑，所以施工现场往往是整改了旧问题，又接着产生新问题，而且新问题产生的部位和时间也难以预知，从某种意义上说施工现场的环境监管工作是处于失控状态的。

2 事前控制的工作内容

水电工程环境监理事前控制的主要工作内容包括划分控制单元、确定控制目标、制定考核标准、明确控制程序和审核专项环境保护措施方案。责任主体明确的控制单元，清晰客观的目标、科学严谨的标准、简洁流畅的程序和可操作性强的专项环境保护措施方案是环境监理全过程控制顺利开展的基础，这五方面的工作需要环境监理与各参建单位充分沟通协商后，形成制度文件，由建设单位颁布执行。其次是根据环境影响评价文件的要求、具体施工标段和施工工作面的施工特点、施工区域环境敏感目标的种类和分布特点等，审核承包商上报的环境保护专项措施方案。

2.1 划分控制单元

水电工程往往项目组成和施工工序都较为复杂，工程管理过程中需要根据工程性质、规模和是否引入竞争等因素进行施工标段划分。环境监理在工作过程中，为了便于与工程监理单位和承包商进行工作对接，往往也以施工标段作为环境监理单元，重点施工作业面作为环境监理节点，从而形成监管网状，并采用“以点带面，全面控制”的方式，通过对各施工工作面和施工标段环境保护工作实行全过程控制，以实现对整个水电工程环境保护工作的全过程监理的目的。因此，环境监理事前控制工作的对象主要是由施工工作面及由工作面组成的施工标段。

2.2 确定控制目标

水电工程环境监理的控制目标由两个层面组成，第一层面是由建设单位和环境监理单位共同制定的环境管理目标，这类目标的制定一般兼顾建设单位的企业发展战略、企业荣誉和社会责任，其表述以定性描述为主，指向性较强，便于各参建单位和人员理解。第二层面是环境影响报告书中明确的各类环境保护目标，包括预防保护目标、污染控制目标及恢复治理目标，这类目标不仅适用于针对整个水电工程的宏观层面的环境管理，也适用于施工标段和施工工作面等微观层面的环境管理，其表述以定量描述为主，突出底线，专业性较强，可作为环境监理开展全过程控制的依据。

2.3 制定考核标准

制定考核标准时，紧密围绕各项控制目标从招投标及合同管理、环境保护管理体系建设、工作制度、措施落实情况、宣传教育及协调配合等方面对现场环境保护工作进行分解，全面反映环境保护工作开展情况。考核对象为工程承包商，如有必要经建设单位同意后，也可对工程监理单位和建设单位相关部门进行考核。考核内容为承包商的环境保护措施落实情况和“三同时”制度执行情况，以及工程监理和建设单位相关部门监督职责的履行情况。考核标准的制定以“内容全面，重点突出，分值合理，操作性强”为原则，尽量做到贴近工程实际，力求考核结果能最大程度上反映各单位环保工作开展情况。同时制定环境保护违规违约行为处罚办法，亮明环境监理控制的红线。

2.4 制定控制程序

水电工程环境监理控制程序一般是在编制环境监理实施方案和协助建设单位制定规章制度时制定。因各建设单位单位环境管理模式和环境监理单位采用的监理模式不同，环境监理与工程建设监理在处理与环境保护相关事务时，其职责范围有所不同。在需要工程监理参与并承担督促落实责任的监理模式中，如单纯在环境监理细则中制定控制程序，很难对工程建设监理起到约束作用，故在涉及与环境监理单位无合同关系的其他单位协同配合的控制程序制定都应在建设单位颁布的规

章制度中进行明确。

2.5 审核专项环境保护措施方案

环境影响评价阶段，环评单位虽已进行了环境影响识别、环境影响预测和污染防治措施设计等工作，但因尚处于建设项目可行性研究阶段，且着眼于整个建设项目宏观层面的整体评价，难以细化到施工标段和施工工作面，无法指导环境监理开展控制工作。故环境监理要求承包商在新的施工标段或施工工作面开工前，编制专项环境保护措施方案报环境监理审核，该措施方案应在环境影响评价文件相关内容的基础上，结合具体施工标段和施工工作面的施工特点，并重点关注施工区域环境敏感目标的种类和分布特点，进行更加细致和深入的环境影响识别，提出针对性、操作性强的预防或减免措施，同时明确落实预防或减免措施的工程量、人员机具投入、投资及保障措施。

3 提高事前控制能力的途径

3.1 协助建设单位建立健全环境保护管理制度

协助建设单位建立健全环境保护管理制度是环境监理的重要职责之一，而且环境监理工作的控制目标、控制标准和控制程序都是需要在环境保护管理制度中加以明确的。因此，健全完善的环境保护制度是水电工程环境监理工作的重要保障，也是检验事前控制工作是否得力的衡量标准。现阶段，环境保护管理制度经多个水电工程的施行，已较为成熟，存在的问题主要集中在编制完成后，大部分建设单位未组织各参建单位对环境保护制度进行充分讨论，直接颁布施行，这给在制度施行过程中各参建单位有标不依,有章不遵埋下了隐患。

涉及环境监理控制目标、控制标准和控制程序的环境保护制度应在制定前进行深入调研，根据以往经验及建设单位管理体系的特点，在公开、民主的基础上进行制定，并经各参建单位在充分了解和讨论后达成最广泛的共识，随后可先试行，并在试行过程中多方听取意见，再做进一步的修改完善。

3.2 提高环境监理实施细则的针对性和可操作性

环境监理实施细则的编制直接反映了环境监理单位对水电工程环境保护全过程控制的理解能力和控制技术水平。详实且针对性强的监理实施细则一方面可以更好的指导环境监理人员开展环境监理工作，一方面也对承包商起到正面警示作用，时刻提醒承包人在施工过程中应避免哪些环保违规违约行为的产生，同时也能消除建设单位对环境监理工作能力的疑虑，增强信任感，有利于促进建设单位和环境监理单位工作中的良性互动。以往环境监理实施细则的内容过于宽泛，仅从宏观层面阐述如何开展环境监理工作，针对性和可操作性都不强，环境监理实施细则达不到使监理人员按图索骥的效果。

为了提高环境监理实施细则的针对性和可操作性，环境监理应在对具体施工标段或施工工作面开展环境监理工作之前，仔细研究环保水保相关法律法规、环境影响评价文件及相关设计文件，并结合施工标段或施工工作面的施工特点和以往环境监理经验，除在环境监理实施细则中明确监理控制程序与监理方法外，还应梳理出施工过程中经常出现的环保违规违约行为、环境监理的重点、难点，并分别提出预防与应对处理措施。

3.3 强化对承包商上报专项环境保护措施方案的审核

在以往环境监理过程中，事前控制较为重视对招投标文件、合同文件、施工组织设计中环保水保条款的核查，但实际控制效果并不理想。各类型工程的招投标文件、合同文件、施工组织设计中环保水保条款千篇一律，针对性不强，而且水电工程主体工程标包含施工内容众多，如大坝工程标内含大坝填筑，料场开挖，场内交通及人工骨料加工系统等，施工对环境影响的方式和程度各不相同，但招投标文件、合同文件、施工组织设计中环保水保条款均较为笼统，并未做相应的细化，很难用于指导承包商落实环保措施，也很难作为环境监理开展监理工作的依据。

因此，水电工程环境监理事前控制的重点还是需要立足于施工标段和施工工作面，在这个层面开展事前控制工作更易于抓住控制重点，提出的控制要求、防治或减免措施更加有针对性，也更有助于控制目标的实现。环境监理需要对环境影响评价文件做细致的分析，领会环境影响评价文件中的各项要求，结合施工标段和施工工作面的具体情况，对承包商上报的专项环境保护措施方案进行审查，着重审查承包商对施工行为可能造成环境影响识别的合理性和准确性，以及所提出的预防或减免措施的有效性和可靠性。因该措施方案针对性强，可作为后续环境监理控制工作的依据，并督促承包商加以落实。

在承包商编制上述方案的过程中，因专业知识所限，难免出现各种疑问和困难，一方面环境监理可在编制过程中加以指导，协助其完善该方案，另一方面可通过集中培训的方式提高编制人员的环保专业知识。完善的专项环境保护措施方案，经环境监理批复后承包商遵照执行。

3.4 加强水电工程建设信息的收集整理

水电工程建设信息的收集和整理是环境监理各项事前控制工作的基础，只有掌握了详实、准确的工程建设信息，才能为预判可能产生的环境影响，并制定切实可行的防范措施提供依据。因水电工程复杂程度较高，施工标段众多，且各施工标段开工时间根据工序要求各不相同，所以针对施工标段和施工工作面的事前控制贯穿于环境监理工作的始终，信息收集整理也是一项需要常抓不懈的工作。

但现阶段，因环境监理工作尚处于摸索阶段，在信息收集方面仍存在制度不健全，渠道不畅通的问题，致使收集过度依赖承包商，而其上报的信息不及时、不全面、不客观的问题普遍存在，所以在信息收集阶段环境监理必须克服惰性，主动出击，进一步拓宽信息收集渠道，全面掌握工程建设信息，及时了解工程动态。

3.4.1 参加工程建设监理例会

工程建设监理例会是建设单位、工程建设监理单位和承包商集中协商讨论各施工标段进度、质量和资金等相关问题的例行会议，会议涉及的工程建设信息较多，尤其有关进度计划的会议内容对环境监理事前控制工作意义重大。如进度计划涉及某施工标段或施工工作面即将开工，而该施工标段或施工工作面存在对环境影响程度较大的施工行为，环境监理则可及时介入，要求承包商报送针对该项施工行为的专项环境保护措施方案，经环境监理批复后遵照执行。

3.4.2 收集施工方案

在以往的环境监理过程中，因管理流程限制，除环境监理特殊要求外，承包商报送工程建设监理的文函，一般不会抄送环境监理，环境监理也就错失了从上报文函中系统收集工程建设情况的机会。环境监理无法获取具体施工标段和施工工作面的施工方案及施工进度计划，也就不能及时介入开展事前控制工作。因此，应与建设单位协商，改进管理流程，要求各承包商将所有上报工程建设监理的施工方案、工程施工进度计划等抄送环境监理，并由环境监理对方案进行甄别，如施工活动将产生环保水保问题，环境监理将启动事前控制程序，要求承包商报专项环境保护措施方案，经环境监理批复后遵照执行，同时建议工程监理单位在监理过程中加大防范力度，避免造成环保水保问题，达到提前介入和预判的目的。

3.5 加强事前控制效果分析，持续改进控制措施

水电工程环境监理事前控制工作既要重视控制过程，也应重视对控制效果的检查和总结，可采用 PDCA 循环法将事前控制措施的制定、实施、效果检查和改进处理等质量管理活动有机结合起来，使其成为完整的闭环系统。通过对控制效果的评估，检视控制措施的有效性，以便总结经验教训，提出更有利于问题解决的措施。这个过程应周而复始，持之以恒，只有这样才能使事前控制过程中出现的问题及时得以解决，环境监理单位事前控制能力才能阶梯式上升，从而保证环境监理服

务水平的的持续提升。

4 结语

随着生态文明体制改革不断推进，我国环境保护政策也随之发生了重大调整，尤其是“环境保护督查制度”施行以来，一直保持高压态势，对环境违法行为“零容忍”的态度，并形成制度化的严格治理体系，环境保护“严监管”已成为新常态。在新形势下，环保行政主管部门和建设单位都对环境监理在水电工程建设期环境管理中的作用提出了更高的要求，因此环境监理在全过程控制方面的能力建设和提高成为当务之急，而因事前控制可防患于未然，控制得当可使整个控制过程达到事半功倍的功效，有利于提升环境监理服务水平，故应从以下方面着力提升水电工程环境监理的事前控制能力：

1)涉及环境监理控制目标、控制标准和控制程序的环境保护制度应在取得参建各方的广泛共识后颁布施行，建立在公开、民主、共识基础上的管理制度，才更有说服力和执行力。

2)环境监理实施细则是环境监理工作指导性文件，为提高其针对性和可操作性，应针对施工标段或施工工作面梳理出施工过程中经常出现的环保违规违约行为、环境监理的重点、难点，并分别提出预防与应急处理措施。

3)通过参加工程监理例会和收集施工方案等措施，及时捕捉工程建设信息，并对信息加以甄别，同时针对有用信息及时启动事前控制程序，协助承包商完成环境影响识别和污染防治措施设计。

4)以施工标段和施工工作面作为监理对象，强化对专项环境保护措施方案的审核，力争使措施方案中的环境影响识别准确、合理，防治措施有效、可靠，并确保其在后续施工过程中得到有效落实。

5）采用 PDCA 循环法对事前控制的整个过程进行质量管理，不断强化对控制效果的分析，对事前控制措施有效性进行评估，效果好的措施可规范化并加以推广，不好的措施可进行持续改进，使我院环境监理事前控制能力实现阶梯式上升，从而保证我院环境监理服务水平的的持续提升。

参考文献：

[1] 秦志华. 管理学[M].大连:东北财经大学出版社,2011.1:245.

[2] 孙德胜. 工程质量事前控制分析[J]. 工程建设与设计, 2006（8）: 116-118.

绿色小水电评价指标体系与退出机制研究

张耀丹，李　永，李克锋

（四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘　要：小水电是重要的民生水利基础设施和可再生的清洁能源。近年来，小水电的快速发展带来了诸多问题，对河流生态系统造成不同程度的影响。为解决“什么样的小水电应该退出、什么样的小水电应该保留”这个科学难题，拟构建绿色小水电评价指标体系并在其基础上建立小水电退出机制。主要研究内容及成果如下：

（1）首先通过对国内外相关文献、资料的梳理，识别出了水电开发对生态环境影响的 16 项指标。然后以已有研究为基础，结合引水式小水电开发特点及山区河流的特征筛选出了生态环境需水量保障程度、减水河段长度占比率、水环境质量达标情况、栖息地质量满足度、纵向连通措施有效性、灰线带变化达标率、减排效率等 7 项评价绿色小水电的指标，并确定了各指标的评价标准。最后运用二元对比模糊分析法结合专家会议法（Delphi Method）确定了各指标的权重，采用线性加权求和的方法建立了绿色小水电评价模型，进而构建了绿色小水电评价指标体系。

（2）在考虑生态环境保护要求的前提下，以绿色小水电评价指标体系为基础，借鉴已有河流水能资源量计算方法，扣除禁止开发河段对应的水能资源量以及生态流量对应的水能资源量，建立了河流水能资源生态环境可开发量的计算方法，为建立小水电退出标准提供理论基础。

（3）为建立小水电退出机制，首先构建了退出机制总体思路，建立了退出机制运行程序；然后在总体思路基础上探索并建立了基于法律法规、“三线一单”、绿色小水电评价指标体系三个小水电退出标准；最后在小水电建设项目环境影响技术评估基础上，结合小水电拆除对生态环境造成的影响，分析了退出电站的退出条件，针对绿色小水电评价指标弱项因子分析了保留电站的生态化改造方案，进而建立了小水电退出机制。

研究成果可为国家清理小水电、政府管理小水电、制定小水电退出政策提供技术支撑；对科学可持续地发展小水电、维护河流生态系统健康及保护生态空间具有现实意义；为山区河流资源合理利用、生态环境保护与修复提供科学依据。

建生态环保电站　创一流发电企业

--田湾河梯级电站环境保护经验总结

卢宝胜，彭　鑫，田　碧

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610041）

摘　要：田湾河梯级电站是“十五”期间，积极响应中央关于加快中西部经济发展的战略，着手建设的投资省、见效快、工期短的中型水电站之一。本文重点介绍了田湾河梯级电站在工程设计、施工和经营全过程中如何开展“生态环保电站”建设和经营。为我国开展生态环保水电站建设提供了经验。

关键词：清洁能源；科学建设；生态环保电站；田湾河公司

1 概述

田湾河是大渡河中游右岸的一级支流，发源于贡嘎山西侧，田湾河从巴王海至河口河道长 48km，流经甘孜州康定市和雅安市石棉县，全流域面积 1400km^2，河口多年平均流量为 42.3m^3/s，天然落差 2120m，河道平均比降 44.2‰，水力资源理论蕴藏量 870MW。

田湾河梯级水电站按“一库三级”开发，从上至下依次为仁宗海水库电站、金窝水电站和大发水电站，总装机容量 74MW。自工程设计、建设初期开始，就将环保、水保措施纳入工程项目同步实施，以“建生态环保电站”为目标，严格按批复的环境影响报告书落实环境保护“三同时”，树生态可持续发展理念。2009 年从工程建设转入电力生产经营后，持续开展环保及生态文明建设，严格执行流域三站首部生态下泄流量，加强生产过程中废油、废弃物、生活污水等管理，未发生环境污染事故，环境保护总体可控。

2 清洁能源，优越的环境效益

田湾河梯级水电站年发电能力与一座装机 400MW 的燃煤火电站相当，可减少因发电燃煤所产生的大量大气污染物(SO_2、NOx、TSP)以及火电站产生的废碴、废水的排放，每年节约火电煤炭约 101.1 万 t。在环境经济方面，由于梯级水电站较小的环境损失换来较大的环境效益，故本工程具有优越的环境经济指标。

3 依法依规，严格建设工程环境保护评估、审批

田湾河流域梯级水电站自工程设计、建设初期开始，就将环境保护纳入工程项目同步实施，严格落实环境保护“三同时”，树生态可持续发展理念。严格履行建设工程环境保护评估、审批程序，按批复的环境影响报告书标准施工。

4　科学建设，减小环境影响

4.1 从环境保护出发，合理的选址和选线。

选址选线避绕敏感的环境保护目标，不对敏感保护目标造成直接危害，这是“预防为主”的主要措施。

选址选线符合地方环境保护规划和环境功能（含生态功能）区划的要求，或者说能够与规划相协调，即不使规划区的主要功能受到影响。

选址选线地区的环境特征和环境问题清楚，不存在“说不清”的科学问题和环境问题，即选址选线不存在潜在的环境风险。

从区域角度或大空间长时间范围看，建设项目的选址选线不影响区域具有重要科学价值、美学价值、社会文化价值和潜在价值的地区或目标，即保障区域可持续发展的能力不受到损害或威胁。

4.2 创新开发模式，缩短环境影响时间

田湾河梯级采取“流域、整体”的开发模式，虽然极大地增加了管理难度，但却大大缩短了水电工程建设对区域环境影响的时间，节约了水电工程建设所需的社会资源，实现了水能资源开发价值最优化，具有显著的社会和生态环境效益。首先，整体开发对田湾河流域区域环境相对减少三年以上时间的扰动和影响。其次，整体开发包括土地在内的社会资源占用。“流域、整体”开发模式也开创了我国中型河流开发建设的先河。

4.3 优化设计方案，减少环境破坏

公司结合当地已有林区道路实际，采取一系列工程和管理措施，反复论证优化设计方案，力求最大限度减少对环境的影响。

在项目建设实施过程中，公司全程组织开展了优化设计和优化方案布置，尽量减少林木采伐、土地占用、覆盖层开挖等，最大限度地节约社会资源。据不完全统计，田湾河工程建设共减少林地、耕地占用 53hm²以上，减少开挖 200 万 m³以上。

仁宗海水库电站于 2003 年 6 月完成可研设计并通过主管部门审查。可研设计推荐的坝型及坝体结构是可行的、安全可靠的。之后为了最大限度的减少对贡嘎山自然保护区的缓冲区的影响，对环境保护和水土保持设计提出了更高的要求。因此，为满足该区域的环保、水保要求，尽量减轻电站开发对环境的不利影响。立即对枢纽建筑物结构进行调整。主要有以下几项：（1）取消碎石土心墙，坝面复合土工膜直接与防渗墙和岸坡趾板相接。可研设计阶段堆石坝采用复合土工膜与碎石土心墙结合的综合防渗堆石坝坝型。碎石土料取至距坝址 31km 处的三国坪料场，开采条件较差，而且要占用耕地；同时，料场的开采对植被和环境都有一定影响，不符合该区域的环保要求，此项调整直接减少开挖耕地近 50 万 m³。（2）坝体堆石料由人工开采的块石料改为天然砂砾石料。可研设计阶段坝体堆石料取至距坝址约 2km 处的 2 号沟石料场，由于 2#沟料场为森林区，植被茂密；石料开采对植被和环境都有一定影响，不符合该区域的环保要求。此项调整直接减少森林破坏约 30 万㎡（3）可研设计阶段对坝基第⑦层淤泥质壤土采用全部挖除方案。由于淤泥质壤土开挖后的堆放可能造成水土流失，污染河道，对环保、水保不利。为此公司开展了大量科研，通过试验及研究，提出了坝基表面第⑦层淤泥质壤土采用振冲碎石桩处理。此项调整直接减少开挖量 60 万 m³以上。（4）仁宗海调压室、蝶阀室、压力钢管施工道路调整为索道或者卷扬道，减少林木采伐面积 15hm²；减少建渣 100 万 m³以上，生态保护效果十分明显。（5）根据当时已有林区道路，为减少道路对深林的影响，将原设计道路的高线方案改为利用林区已有道路和沿河滩修建道路。

4.4 建设与保护并重，减小生态影响

工程建设期，公司严格按批复的环境影响报告书标准施工，控制粉尘、噪声、生活污水、垃圾、建渣管控，尽力减少森林、植被、河道生态破坏。生活污水采取化粪池、生化处理后用于浇地绿化处理，减少水质污染；生活垃圾采取定点存放，外委属地政府清运至指定垃圾场回收处理；落实施工迹地渣场整治、植物恢复，防止水土流失，植被与周边环境已基本融为一体。

5 落实环保措施，实施生态可持续发展

5.1 开展增殖放流，改善水域环境

实施电站建设完工后的增殖放流活动，在水库、田湾河增殖放流鱼苗 34 万尾。在仁宗海水库库区及其他重要河段设立“禁止捕鱼、炸鱼、钓鱼”的警示牌。

5.2 泄放生态流量，满足供水需求

严格执行生态流量泄放措施，在流域梯级水电站安装了生态流量在线监测设备，并与属地管理部门生态流量在线监测系统联网，实时接受监督。梯级电站在设计中也就考虑了保证田湾河生态流量的补水措施，梯级电站未取走各支沟水量，作为整个流域河道生态流量补水，以保证河道生态水源充足。

6 加强生产管理，严防环保、水保事故

加强生产过程中的废油、生活垃圾管理。采取固定容器、固定部位集中收集存放，并做好防止渗漏措施，待有一定存量后，交由有回收资质的单位进行处理，杜绝油类泄漏外流或混入水中，引发环境污染事故。

开展公益活动，增强民众环保意识。积极开展森林防火、禁止猎杀野生动物等保护环境安全宣传教育，组织开展“爱我家园、保护环境”公益活动，清理沿途垃圾，设置环保宣传标语等，为维护田湾河美好的生态环境履行国有企业的担当。

7 利用水电开发，支持生态保护工作

田湾河流域山高、坡陡、枯汛期流量差异特别大，汛期多发暴雨山洪、泥石流、山体塌方、滚石等自然灾害。公司始终践行“三个回报”理念，科学调度水库消纳洪峰、利用引水系统排水降低河道泄洪压力。汛期严格 24 小时值班，水情、雨情测报、工业摄像监视河道来水情况，建立地方区域联防机制，共享预测信息，提升区域防洪度汛能力。在连续三年的特大山洪泥石流自然灾害面前，公司勇于担当，组织专业队伍加强道路抢修、坡沟治理，得到当地人民、政府的一致好评。

8 结语

自然环境是人类生存的基本条件，是发展生产、繁荣经济的物质源泉。田湾河公司始终坚持“预防为主，防治结合”的指导思想，严格落实环保措施，加强环保宣传，生产经营与环境保护并重，践行“生态环保电站”任务，守护好田湾河的绿水青山。

黄河上游刘家峡以上河段水电开发对土著鱼类资源影响及保护措施体系分析

牛　乐[1]，寇晓梅[1]，张乃畅[1]，吕彬彬[2]

（1.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；
2.陕西格林维泽环保技术服务有限公司，陕西 西安 710086）

摘　要：黄河上游刘家峡以上河段经过多年的水电开发，对黄河土著鱼类资源造成了一定影响，从流域层面提出鱼类保护措施体系，有助于把握鱼类保护的方向和重点。本文总结了河段水电开发情况，分析了河段主要土著鱼类资源变化情况和水电开发对鱼类资源的影响因素。提出在开发程度较低的龙羊峡以上河段，应以生态保护优先、适度开发为前提，充分论证对土著鱼类的影响，做好预防、减缓措施，重点是鱼类栖息地保护措施；在开发程度较高的龙羊峡以下河段，应以修复和补救措施为主。以此综合提出了栖息地保护、过鱼措施、增殖放流措施、生态调度、水温影响减缓措施、流域水生生态保护措施管理和监测措施等为框架的鱼类保护措施体系。

关键词：黄河上游；水电开发；土著鱼类；保护措施体系

黄河上游刘家峡以上河段是我国重要的水电基地之一，分析已建水电站对土著鱼类资源造成的影响，提出河段水电开发鱼类保护措施体系，有助于从全流域角度系统筹划鱼类保护措施，把握保护方向和重点，从而更好的保护黄河上游土著鱼类资源。

1 黄河上游刘家峡以上河段水电开发概况

黄河上游刘家峡以上至鄂陵湖湖口河段全长约 1837km，按照不同水电规划河段及开发情况，划分为湖口至尔多河段(1256km)、茨哈至羊曲河段(161km)、龙羊峡至刘家峡河段(420km)。

湖口至尔多河段规划实施 4 座水电梯级，其中玛尔挡水电站为近期开发梯级，正在建设。首曲、宁木特、尔多水电站作为后续研究梯级，处于研究论证阶段。另外鄂陵湖湖口于 90 年代建设黄河源电站一座，目前地方政府正在组织拆除。茨哈至羊曲河段布置茨哈峡、班多、羊曲 3 座水电梯级，班多水电站已经建成发电，羊曲水电站目前处于停工状态，茨哈峡水电站尚未建设。龙羊峡至刘家峡河段共规划了 14 座水电站，从上到下依次为龙羊峡、拉西瓦、尼那、山坪、李家峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、黄丰、积石峡、大河家、炳灵、刘家峡。自上世纪 50 年代刘家峡开工建设以来，基本均已建成，只有山坪电站未建。

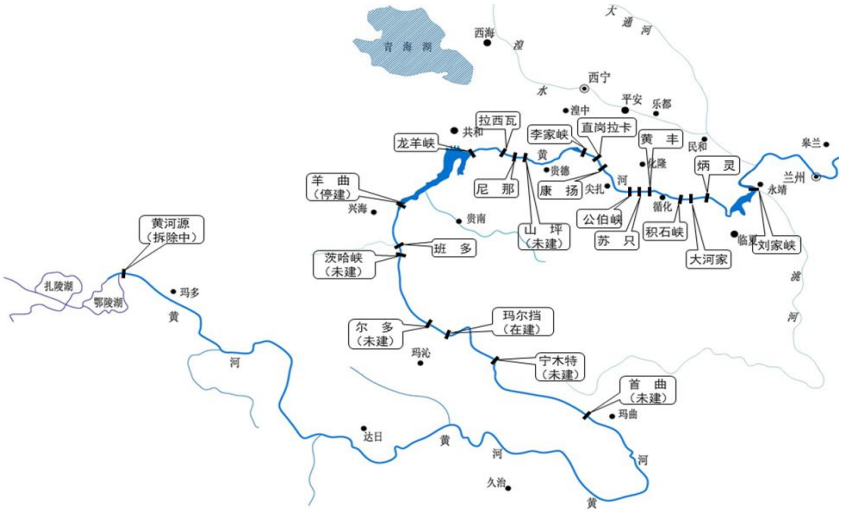


图 1　黄河上游刘家峡以上河段干流水电梯级布置图

2 黄河上游刘家峡以上河段鱼类区系及种类

从分布范围分析，龙羊峡以上河段仅有以裂腹鱼和条鳅亚科鱼类为代表的中亚高山复合体，而龙羊峡至刘家峡河段，除中亚高山复合体外，还有以黄河雅罗鱼为代表的北方平原复合体，以鲇、刺鲃和黄河鲃为代表的中国江河平原复合体和第三纪早期复合体鱼类。根据中国淡水鱼类区划[1]的意见，龙羊峡以上属于青藏亚区；龙羊峡以下至天水以西属于陇西亚区。根据近几年鱼类资源调查，河段鱼类以鲤科和鳅科鱼类为主，按照不同河段划分，湖口至尔多河段存在鱼类 22 种，茨哈至羊曲河段存在鱼类 23 种，龙羊峡至刘家峡河段存在鱼类 46 种。

刘家峡以上河段保护性土著鱼类主要有花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、黄河裸裂尻、极边扁咽齿鱼、骨唇黄河鱼、拟鲶高原鳅、黄河雅罗鱼、赤眼鳟、大鼻吻鮈、圆筒吻鮈、黄河高原鳅、兰州鲇、北方铜鱼等[2]，另外，刺鲃作为同时生活在青藏高原水域和江河平原水域的有鳞鱼类，在适应高原水体环境的进化机制方面和生态习性方面有较高的研究价值[3]，已经列入了《中国物种红色名录》易危种。

3 黄河上游刘家峡以上河段水电开发对土著鱼类资源影响分析

3.1 刘家峡以上河段土著鱼类资源变化情况

龙羊峡以上河段目前水电开发程度不高，黄河上游土著鱼类仍有广泛生存空间，土著鱼类资源未发生较大变化。龙羊峡至刘家峡河段是水电开发程度较高的河段，土著鱼类组成较历史对比发生变化。根据历史调查资料[2-5]和近几年的调查工作，主要土著鱼类资源变化情况如下。

骨唇黄河鱼、极边扁咽齿鱼一般分布在海拔较高的水域，历史上主要分布于贵德以上河段，目前主要分布于龙羊峡以上河段。

花斑裸鲤属于适应性较强的物种，历史上在黄河源头至刘家峡河段广泛分布，目前分布范围未发生变化，在龙羊峡以上河段广泛分布，在龙羊峡以下河段已建高坝水库库尾、低坝水库库区、未开发河段可维持较大规模种群，估计地方政府和已建电站对该物种大量的增殖放流也起到了较大的作用。但在高坝库区深水区资源量较小。

黄河裸裂尻、厚唇裸重唇鱼、拟鲶高原鳅、黄河高原鳅历史上在黄河源头至刘家峡河段广泛分布，目前主要分布于龙羊峡以上河段。在龙羊峡以下河段，这些鱼类多成岛屿化分布，常见于已建水库库尾或者未开发河段。但黄河裸裂尻、厚唇裸重唇鱼在贵德川未开发河段较难发现，拟鲶高原鳅、黄河高原鳅在该河段资源量也较小。

刺鲃历史上在龙羊峡至兰州河段均有分布，目前主要集中分布于龙羊峡库尾至班多电站坝下河段、大河家电站以下至兰州以上河段。

北方铜鱼、黄河雅罗鱼、赤眼鳟、大鼻吻鮈、圆筒吻鮈，历史上在贵德以下河段有分布，目前黄河雅罗鱼在刘家峡干支流河段少量分布，已属于少见种；北方铜鱼在黄河干流已多年未采集到；赤眼鳟在贵德至刘家峡段基本退出，在黄河中下游河段资源量基本稳定；大鼻吻鮈目前主要在银川和中下游河段可见，属少见种，贵德至刘家峡段基本退出；圆筒吻鮈目前主要分布于甘肃、宁夏的黄河黑山峡河段，开展工作少，资源及分布尚不明确。

兰州鲇主要分布区在刘家峡以下河段，刘家峡以上河段较少见。

3.2 水电开发对土著鱼类资源影响因素分析

3.2.1 河流形态及连通性变化

龙羊峡以上河段目前只建成班多水电站（黄河源水电站正在拆除），玛尔挡水电站、羊曲水电站还未建成，大部分河段没有开发，仍维持天然河流状态。

龙羊峡至刘家峡河段已建成 13 级电站，只剩贵德川和部分丹阳川两段天然河段。该河段受淹没影响，宽谷河段和峡谷河段、河床底质、浅滩、深潭、急流、缓流相间的多样性的河流形态已不存在，从流水生境转变为湖库生境，而黄河上游土著鱼类多为适应流水生境鱼类。大部分水电梯级

首尾相接，对河段鱼类形成多级阻隔效应。

3.2.2 水文情势变化

水电站运行需要进行调蓄。据调查，贵德、循化等地的河流水位每天涨落范围在 0.5m～1m 左右，人工洪水有利于刺激产卵期的鱼类洄游、产卵。但是每天发生的人工洪水，对于在岸边浅水处产卵的鱼类，由于水位的涨落，易使在低水位线之上的鱼卵失水、缺氧死亡。

3.2.3 水温变化

受龙羊峡水库、拉西瓦水库对水温影响，贵德、循化两水文站年内水温变幅范围较天然状态缩小。贵德水文站 2006 年至 2012 年统计 4 月-7 月平均最高水温仅为 8.9℃。而龙羊峡建设前贵德水文站 4 月-7 月平均最高水温可达到 18.2℃（1978 年-1986 年统计）。龙羊峡至刘家峡河段春夏季节的低温水，可能不但会造成该河段鱼类的产卵期推迟，还会影响受精卵的孵化率。

3.2.4 人工引进外来物种影响（间接影响）

水电站建成水库蓄水后，由于库区鱼类养殖，造成了外来物种入侵影响。例如龙羊峡、李家峡、刘家峡投放的池沼公鱼，该鱼类自然分布在我国黑龙江，繁殖能力强，具有吞食沉积性鱼卵的习性，并且已经成为龙羊峡、刘家峡水库中的优势鱼种，对黄河土著鱼类构成了极大威胁。

4 黄河上游刘家峡以上河段水电开发鱼类保护措施体系

4.1 总体保护思路

黄河上游刘家峡以上河段就开发程度来说，龙羊峡以上河段长达 1417km，且开发程度较低，几个大型水电站正处于建设前期或论证期，因此该河段水电开发应充分论证对土著鱼类的影响，做好预防、减缓措施，重点是在河段生态保护优先、适度开发的前提下，做好鱼类栖息地保护工作，预留足够土著鱼类保护空间。

龙羊峡以下河段长 420km（含龙羊峡库区），开发时间较早，开发程度较高，已经对黄河上游土著鱼类造成了一定不利影响，重点是采取修复及补救措施，在一定程度上恢复鱼类生物多样性。

因此，在实施栖息地保护、过鱼措施、增殖放流措施、生态调度、水温影响减缓等措施的基础上，在龙羊峡以上河段和龙羊峡以下河段需要有不同的保护重点和方向，初步拟定河段水电开发鱼类保护措施体系图见图 2。

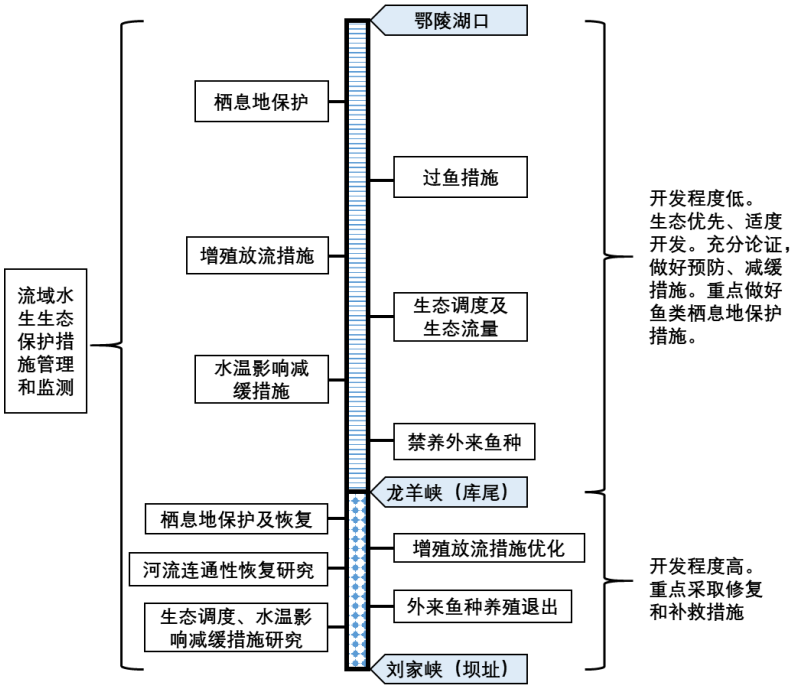


图 2 黄河上游刘家峡以上河段水电开发鱼类保护措施体系图

4.2 鱼类栖息地保护

保存尚未开发的河段作为土著鱼类栖息地进行保护，是鱼类资源最根本有效的保护措施。

对于龙羊峡以上河段，目前尚未大规模开发，在水电规划前期论证过程中，环境保护部门已经提出了鱼类栖息地保护要求，保留了大量天然河段。根据相关保护要求，湖口至尔多河段鱼类栖息地保护干流主要为两湖湖泊湿地区、沙曲至玛曲河网湿地区以及特合土至塔格尔宽谷河段，还包括支流黑河、白河、泽曲河和西科河部分河段。茨哈至羊曲河段干流主要保护河段为羊曲水电站库尾至班多水电站坝址河段，支流保护河段主要为切木曲及格曲河特有鱼类国家级水产种质资源保护区、大河坝河、巴沟河下游 11km 河段。干流栖息地保护河段和不开发河段总长约 976km，占龙羊峡以上干流总长的 68.9%。

对于龙羊峡至刘家峡河段，开发程度已经较高，干流只存在贵德川和部分丹阳川两段天然河段，总长约 48km。区间主要支流隆务河、大夏河、洮河已进行了多级水利水电开发，保护条件较差。建议重点对干流剩余天然河段实施鱼类栖息地保护。丹阳川河段位于大河家水电站至炳灵水电站之间，尚保持有多种黄河上游土著鱼类，建议在该河段实施栖息地保护的同时，加强鱼类增殖放流工作，保持河段土著鱼类资源量的稳定。贵德川河段上游存在龙羊峡、拉西瓦两座大型水电站，目前主要分布花斑裸鲤和一些小型鳅类，建议在实施栖息地保护前应开展土著鱼类种群恢复研究，通过减缓水温影响、水文情势影响措施，增加鱼类增殖放流措施，逐步恢复贵德川河段原有土著鱼类生物多样性。

4.3 过鱼措施

水电工程对鱼类的最大影响是阻隔效应，采取过鱼措施可以缓解水电工程对鱼类的阻隔影响。

龙羊峡以上河段的未建、在建水电梯级均应考虑建设过鱼设施。目前玛尔挡水电站、羊曲水电站均考虑采用升鱼机的过鱼方案。已建班多水电站正在补充建设鱼道。

龙羊峡至刘家峡河段水电梯级开发时间较早，大部分电站在环评阶段未提出过鱼要求，仅黄丰水电站环评批复提出采用人工捕捞过坝的过鱼方式。由于已建电站在早期设计未考虑预留枢纽过鱼的空间，建议可以在局部重要河段试点研究不影响枢纽布置的河流连通性恢复措施，例如补建上下游集运鱼码头的集运鱼措施研究。

4.4 鱼类增殖放流措施

龙羊峡以上河段的玛尔挡水电站拟建设一座鱼类增殖站，建议尔多水电站今后的鱼类增殖放流任务考虑依托玛尔挡水电站鱼类增殖站进行。茨哈峡、班多、羊曲三座电站拟合建一座鱼类增殖站。远期建设的宁木特、首曲电站可根据建设时序，共同建设鱼类增殖站一座。

龙羊峡至刘家峡河段目前已建鱼类增殖站 3 座，即苏只水电站、积石峡水电站和炳灵水电站鱼类增殖放流站。由于河段开发较早，已建鱼类增殖放流站多针对所在电站自身的库区、库尾河段。目前鱼类增殖站繁殖成功的鱼类主要为花斑裸鲤、黄河裸裂尻、极边扁咽齿鱼。建议应根据龙刘河段现有鱼类增殖能力，从放流对象、放流规模、放流河段，系统规划和开展龙羊峡至刘家峡河段鱼类增殖放流工作，必要时可根据需要，补建流域层面的鱼类增殖放流站一座。

4.5 生态调度及生态流量下泄

为了减缓对下游河道的影响，各水电梯级需制定联合调度运行方案，在鱼类繁殖季节，控制下游日内的水位变幅，保证鱼类的产卵繁殖。

龙羊峡以上河段以未建梯级为主，可在设计阶段开展梯级联合生态调度研究。龙羊峡水库调蓄能力较强，其下游水文情势受上游水电梯级影响小，下游已建水电梯级较多，可以针对重要河段开展水电梯级联合生态调度研究，重要河段包括贵德川和丹阳川未开发河段。

刘家峡以上河段各水电梯级均采用坝后式电站布置形式，已建电站通过机组运行能够保证下游

生态流量；未建电站在设计中还考虑了生态流量专用下泄措施，可以保证在极端工况下的生态流量下泄。

4.6 水温影响减缓措施

龙羊峡以上河段水电梯级全部建成后，将产生水温影响叠加效应，主要影响范围下游至龙羊峡库尾。玛尔挡水电站已考虑建设叠梁门分层取水措施，羊曲水电站设计已经考虑了进水口前置挡墙措施。建议其他未建的高坝大库水电站在设计中进一步优化取水口位置，设计合理的分层取水设施，降低水温变化对下游的影响。

龙羊峡以下河段的贵德川河段受低温水影响比较明显，可以结合对贵德川河段的保护，研究其上游龙羊峡水电站、拉西瓦水电站低温水影响减缓措施，降低低温水的影响。

4.7 防止外来物种入侵

鉴于已建水电站库区渔业养殖已经对黄河上游土著鱼类造成了影响。建议龙羊峡以上河段水电开发过程中重视外来种入侵问题，禁止库区养殖外来物种。龙羊峡以下河段水电梯级库区，对外来物种养殖实行逐步退出。

4.8 做好流域水生生态保护措施管理和监测工作

各水电开发企业应联合做好流域水生生态保护措施管理工作和监测工作，重点对鱼类保护措施的实施和运行进行全过程管理，加强鱼类保护措施运行效果监测，根据效果监测提出保护措施运行的持续改进方案，不断提升保护措施效果。此项工作可以结合流域环境保护综合管理和监测工作开展。

5 相关建议

从流域层面开展鱼类保护工作是一项较大的系统工程，需要协调统一好各水电建设单位，因此建立流域层面水电梯级环境保护管理机构，有助于该项工作的顺利开展。对于水电开发造成的间接影响，如外来物种入侵问题，其解决措施需要地方渔业管理部门的大力支持。对鱼类栖息地保护河段实施系统保护，也需要地方政府参与协助。另外，对于水电梯级开发程度较高的河段，开展河流连通性恢复、珍稀鱼种增殖放流、生态调度、水温影响减缓措施等，还需要开展大量的科学研究工作。

参考文献：

[1] 李思忠. 中国淡水鱼类分布区划[M]. 北京:科学出版社，1981.

[2] 张建军、冯慧、李科社、杨兴中、李芳、张燕军. 黄河上游龙羊峡至刘家峡河段梯级水电站建设后鱼类资源变化[J].淡水渔业，2009，39（3）:40-45.

[3] 李柯懋、申志新、赵娟. 刺鲃生物学特性和保护价值及建议[J].河北渔业，2013，（9）:64-65.

[4] 沈红保、李科社、张敏. 黄河上游鱼类资源现状调查与分析[J].河北渔业，2007，（6）:37-41.

[5] 唐家文、何德奎. 黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查（2005 年-2010 年）[J].湖泊科学，2013，25（4）:600-608.

澜沧江乌弄龙水电站升鱼机诱捕鱼系统关键工艺设计研究

周　琳，陈学强，牛　乐

（中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘　要：水电站升鱼机的诱捕鱼系统的设计是关系到整个过鱼设施设计成败的关键因素。本文对澜沧江乌弄龙水电站过鱼对象的生物学特性进行研究，结合不同种类过鱼对象的洄游需求，对升鱼机过坝个体规格和游泳能力进行分析，对升鱼机诱捕鱼系统的诱鱼口、集鱼通道、集鱼斗等关键工艺进行设计研究，为类似工程提供了借鉴和参考。

关键词：乌弄龙水电站；升鱼机；诱捕鱼系统；工艺设计

1 引言

水利水电工程建设和运行对鱼类的主要影响包括洄游阻隔、生境片段化、栖息生境变化等。为了减少上述影响，近年来许多工程规划了过鱼设施、栖息地保护、人工增殖放流等多种水生生态的保护措施以减少和降低工程带来的不利影响。其中过鱼设施又包括升鱼机、鱼道、集运鱼等。升鱼机作为过鱼设施中的一种，可在一定程度上帮助大坝上下游之间鱼类的基因交流，减少种群数量减少带来的遗传问题，为鱼类的长久生存创造条件。国内外实例也证明在大坝上修建过鱼设施来改善河流连通性，使鱼类能顺利上行或下行过坝，对维持河流生态系统的连通性、保护珍稀鱼类、维持鱼类的遗传及生物多样性具有重要意义[1-2]。

国内升鱼机的设计尚不成熟，处于起步阶段，已经实施的项目数量有限，对升鱼机的设计、运行等方面的研究还缺乏经验。乔娟等对升鱼机的发展及相关技术问题进行了探讨[3]，王政平等人提出了 VOF 方法在升鱼机集诱鱼系统中的应用[4]，刘志国等人对丰满水电站重建工程升鱼机进鱼口水流条件优化措施进行了研究[5]，臧海燕等人对丰满水电站的过鱼设施金属结构布置与设计进行了研究[6]；李海涛对山口电站鱼类保护措施与过鱼方案研究进行了探讨[7]，常毅等人进行了苏洼龙水电站过鱼设施方案比选初步研究[8]；卢冰华等人对严寒地区高坝过鱼设施布置方案进行了设计研究[9]。

实践证明，过鱼效果的好坏关键取决于诱捕鱼系统设计的好坏，诱捕鱼系统是否设计合理直接决定了整个过鱼设施设计的成败，因此本文以澜沧江乌弄龙水电站为例，通过对过鱼对象的生物学特性进行研究，结合不同种类过鱼对象的洄游需求，对升鱼机的诱捕鱼系统关键工艺进行了探讨。

2 工程概况

乌弄龙水电站坝址位于云南省迪庆藏族自治州维西县巴迪乡的澜沧江干流上，是澜沧江上游干流推荐梯级电站的第二级，堤坝式开发方式，二等大（2）型工程，装机容量 990MW，水库正常蓄水位 1906.0m，总容 2.85 亿 m^3。最大坝高 137.5m。水电站开发任务以发电为主，兼顾促进地区经济、社会和环境协调发展，促进移民群众脱贫致富，并为发展旅游等创造条件。

3 过鱼对象特性

3.1 过鱼对象选择

本工程选择过鱼对象是遵循的原则是：1）具有洄游及江湖洄游特性的鱼类；2）受到保护的鱼类；3）珍稀、特有及土著、易危鱼类；4）具有经济价值的鱼类；5）其它具有迁徙特征的鱼类；6）具有代表性的鱼类。根据以上原则及鱼类调查成果，采用赋值法对河段鱼类进行筛选，选取总分大于 2 的鱼类和总分为 2 的鱼类中的特有种作为本工程主要过鱼对象，包括光唇裂腹鱼、澜沧裂

腹鱼、裸腹裂腹鱼、德钦纹胸鮡、细尾鮡、兰坪鮡和似黄斑褶鮡；其它鱼类则作为兼顾过鱼对象。

3.2 过鱼季节

鱼类主要繁殖期和过鱼季节的选择见表 1。由表 1 可知本工程主要过鱼季节选择 3 月至 7 月。

表 1 主要过鱼季节选择表

过鱼对象	月份											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
光唇裂腹鱼												
澜沧裂腹鱼												
裸腹裂腹鱼												
兰坪鮡												
似黄斑褶鮡												
德钦纹胸鮡												
细尾鮡												
主要过鱼季节	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

注: 主要过鱼季节　　鱼类繁殖期

3.3 过坝个体规格分析

主要过鱼对象体长是设计过鱼设施的重要依据，鱼类通过诱鱼口的游泳能力（感应流速）与个体大小关系密切。乌弄龙过鱼设施是为保障坝上坝下群体的繁殖，促进遗传交流，减少后期死亡率从而对基因库形成有效补充，因此应该以繁殖阶段的个体为主要过鱼对象进行设计。同时繁殖阶段的个体也具有更明显的趋流上溯习性。

在具体设计参数过程中，主要过鱼对象的最小性成熟体长可以作为升鱼机诱鱼系统结构设计和流速设计的依据，最大个体的体长可以作为集鱼槽结构设计的依据。该江段小型鱼类主要为鲅类和鮡类，其最小性成熟体长体长多在 60mm 左右，体型较大的鱼类主要为裂腹鱼类，一般性成熟个体在 200mm 以上，最大个体可达 600mm，普遍大小在 200mm～400mm 之间，因此，在进行升鱼机设计时，以 60mm～400mm 作为主要的过坝个体规格。

3.4 鱼类游泳能力分析

为全面研究过鱼对象的游泳能力，工程对主要过鱼对象的趋流特性及克流能力开展了试验研究。主要测试指标为：感应流速、临界游泳速度、突进游泳速度、持续游速、耐久游速、爆发游速。

4 升鱼机工艺设计

4.1 诱捕鱼系统工艺设计

4.1.1 诱鱼口工艺设计

4.1.1.1 诱鱼口流速设计

过鱼设施的流速采用鱼类游泳速度设计，水流速度不能简单的用流量和水位来计算，应该分析河流的流速断面，考虑近壁面和底部对水流的影响。因为边壁及底部的摩阻，一般在过鱼孔口处流速分布均存在一定的梯度，孔边壁及底部流速显著低于过鱼孔口中心流速，游泳能较弱的鱼类可以利用此区域通过。

鱼类上溯时一般会寻找高流速梯度的区域。河流流速较低时，鱼类沿整个河宽均有分布，而当流速增加，例如遇到人工障碍时，鱼类倾向于沿着主流的边缘上溯，如岸边或靠近底部等有流速梯度分布的区域。

过鱼设施进口一般采用一股高速水流进行诱鱼，诱鱼流速主要与鱼类的游泳能力有关，一般过鱼设施诱鱼流速取鱼类临界游速和突进游速之间，这样在保证足够的吸引力与影响范围的同时，也不会形成对鱼类的流速屏障及对鱼类产生疲劳效应。

综上，根据过鱼对象的游泳能力测试结果，诱鱼口的流速最大取值范围可以为 0.701m/s～1.481m/s，为了后期设计时更有针对性，且尽量满足大部分种类的诱鱼水流条件，建议将取值范围进行优化，最小值增加 25%，最大值缩小 25%，据此可计算出，诱鱼口的流速值建议在 0.87m/s～1.11m/s 的范围内，并使得该流速较周围水流有 0.2m/s～0.3m/s 的流速差，形成较合理的流速梯度，吸引鱼类进入。

4.1.1.2 诱鱼口工艺设计

诱鱼口的水深以满足乌弄龙和里底联合运行的不同工况下的水深为前提，保证每年 3 月至 7 月主要过鱼季节内，诱鱼口内的水深不低于 1.0m，基本上是本河段内最大鱼类体高的 2 倍。

为不影响底层鱼类及表层鱼类的通过，进鱼口应为矩形结构，底板与河道平缓衔接，这种结构还可以适应下游水位变化。

诱鱼口开口越大，流量越大，越容易被上溯的鱼类发现，但是同时也会增加工程量、增加施工难度和投资，因此根据目前鱼道等过鱼设施设计的经验分析，诱鱼口的开口宽度建议大于 2m，对于大江大河来说，开口宽度应至少在 3m 左右。

4.1.2 集鱼通道工艺设计

4.1.2.1 集鱼通道流速设计

升鱼机集鱼通道内需保证水流平顺，有一定的水流流速，流速应大于测试鱼的感应流速以保鱼类不易掉转方向或游出通道，另外，集鱼通道内流速也不应大于鱼类持续游泳速度，这样鱼类不会在通道内产生疲劳，根据以上原则，结合主要过鱼对象的游泳能力，集鱼通道内水流速度的建议取值范围为：0.167m/s～1.05m/s。升鱼机实际运行时可根据对运行效果的监测通过调节补水流量对通道内流速进行调节以适应现场鱼类。

4.1.2.2 集鱼通道尺寸设计

集鱼通道的主要功能为将进入进鱼口的鱼类暂时保存在通道内，因此通道不可过小，以免引起鱼类的胁迫而使得其逃逸。集鱼通道建议采用敞开式通道，通道中不设置挡板。

建议通道宽度一般为 2m～5m，同时要求大于最大过鱼体长 2 倍，综合考虑取 3.0m。深度为 1.2m～4m。通道长 15m～20m，这个长度既能够容纳一定数量的鱼类长时间停留，进入的鱼类也不易逃逸。同时，集鱼通道中应具有一定的流速，能够使鱼类在较长时间内在通道内停留而不外逃。

3.1.3 集鱼斗工艺设计

3.1.3.1 集鱼斗类型

目前国际上普遍使用的集鱼斗结构主要有两种类型：

a）自带防逃笼型

此种类型提升箱前段自带一个鱼类防逃装置，使得溯游进入的鱼类不易逃出提升箱。主要采用水流将鱼类诱进提升箱，通常不设赶鱼设施。其结构见图 3.1。

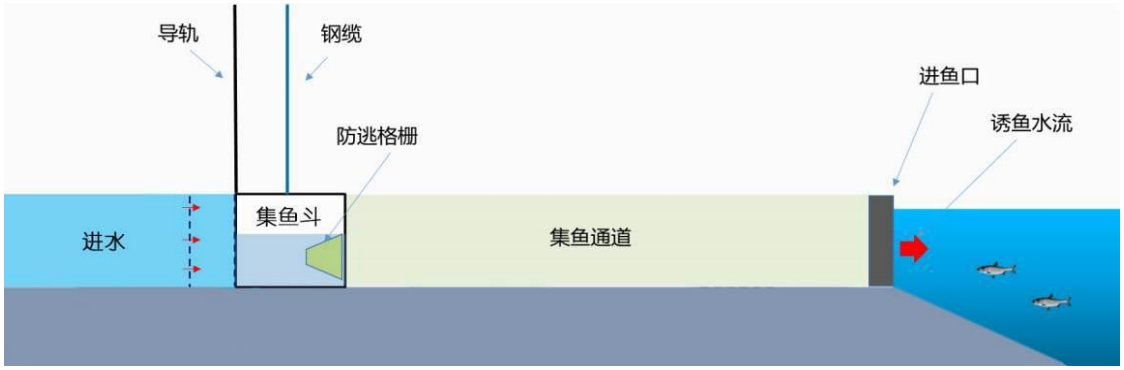


图 1 自带防逃笼型提升箱工作原理

b）沉底式



图 2　沉底式提升箱工作原理

两种类型提升箱各有优缺点并有一定的适用条件，见表 2。

表 2　两种类型提升箱比较表

类型	优点	缺点	适用范围
自带防逃笼型	不需要赶鱼设施； 进入的鱼类不易逃出；	集鱼数量较少	过鱼数量较少； 过鱼周期短、鱼类不易受伤。
沉底式提升型	不易对鱼类造成伤害	需要赶鱼设施配合	过鱼数量多； 过鱼种类多、过鱼规格大； 过鱼周期长。

根据乌弄龙过鱼对象特点，本河段过鱼种类多，过鱼周期较长。因此，本阶段建议采用沉底式提升箱。

3.1.4 拖曳格栅工艺设计

拖曳格栅（也称赶鱼栅）是将集鱼通道内的鱼类驱赶进入集鱼斗的设施。拖曳格栅悬挂于集鱼通道上方，待集鱼通道内的鱼类达到一定数量后，拖曳格栅关闭，并向集鱼斗方向平移，直至集鱼斗外侧缘。此时，将集鱼斗提升，鱼类全部进入集鱼斗。

为了防止鱼类逃出，建议栅格规格为 2cm（高）×20cm（宽）。由于拖曳格栅与集鱼通道之间会有较大的空隙，建议将拖曳格栅四周空隙较大的地方设置毛刷样结构，以防止鱼类逃逸。

3.1.5 接底设施设计

由于诱鱼口进口底板高程和河床仍可能存在高程差，不利于底层鱼类寻找进口。因此，建议结合实际情况考虑在进口处修建接底设施，接底设施可采用混凝土浇筑或抛石处理。接底设施坡度控制在 1:1.5 之内，底部铺设粒径 20cm～50cm 的石块以增加糙率并模拟自然底质。

3.1.6 其他诱鱼条件

除诱鱼水流条件外，诱鱼口可能还需要进行其他环境条件的模拟，如底质、光线、声音、溶氧等条件。

虽然光线、声音、溶氧对鱼类的行为有一定的影响，但是不同的鱼类对不同的环境反应不同，而且同一种鱼类的不同的发育阶段对环境的反应也不相同，另外，鱼类对环境还有一定的适应能力，这些因素都在一定程度上影响了光线、声音、溶氧诱鱼和导鱼的效果，只可作为辅助方法用来集鱼口的拦导鱼设施。

4 结语

鱼类成功发现并进入诱鱼口是升鱼机设计成败的关键。影响鱼类进入诱鱼口的因素较多，其中关键性的因素主要包括流速、水深、底质等。

本文根据过鱼对象的游泳能力测试结果，给出了诱鱼口流速范围，由于鱼类的种类不同，不同季节其游泳能力也会有所差异，因此，在进行诱鱼口设计时，应尽量实现多种流速分布的情况，以满足不同鱼类、不同季节均能够成功被发现并进入，另外，还需保证乌弄龙电站在不同工况下诱鱼口流场的稳定，可通过控制进入集鱼通道内的流量来实现，也可以通过诱鱼口开口大小来实现。

建议集运鱼系统建成后根据过鱼效果跟踪监测并及时进行总结，根据运行试验和监测效果，调整相关参数，针对不同的过鱼对象、过鱼季节等选择较优的进口流速。在运行过程中进一步优化设计，并针对运行效果对运行管理制度进行完善，充分发挥集运鱼系统过鱼的效果。

参考文献：

[1] 陈大庆，吴强，徐淑英.大坝与过鱼[C].水电水利建设项目环境与水生生态保护技术政策研讨会，2005，254-278.

[2] 郑金秀，韩德举.国外高坝过鱼设施概况及启示［J］.水生态学杂志，2013，34（4）：46-49.

[3] 乔　娟，石小涛，刘德富等.升鱼机的发展及相关技术问题探讨[J].水生态学杂志，2013，34（4）：50-55.

[4] 王政平，洪伟辉，贾东远.VOF 方法在升鱼机集诱鱼系统中的应用［J］.水利规划与设计，2018，12：83-87.

[5] 刘志国，郑东飞，王晓刚.丰满水电站重建工程升鱼机进鱼口水流条件优化措施研究［J］.水利水电技术，2017，2（48）：106-112.

[6] 臧海燕，刘　浩，韩四保等.过鱼设施金属结构布置与设计［J］.东北水利水电，2016，7：16-17.

[7] 李海涛.山口电站鱼类保护措施与过鱼方案研究初探［J］.水利建设与管理，2011，10：70-73.

[8] 常　毅，谭奇林，张轶超.苏洼龙水电站过鱼设施方案比选初步研究［J］.水力发电，2016，42（7）:8-11.

[9] 卢冰华.严寒地区高坝过鱼设施布置方案设计研究［C］.三峡工程与长江水资源开发利用及保护国际研讨会，2008，158-164.

黄河上游高寒区水电开发鱼类保护工程实践研究

王 倩[1]，张东亚[2]，吕玥[1]，牛乐[1]

（1.中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065；
2.中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司，北京 710065）

摘　要：本文对黄河上游各电站采取的鱼类增殖放流、过鱼等鱼类保护措施的落实及运行情况进行了统计和梳理，分析总结了黄河上游鱼类保护措施建设的现状及存在的问题。提出了今后黄河上游已建水电站新建鱼类保护措施应开展的关键技术研究，为今后高寒地区水电开发鱼类保护措施提供理论依据和支撑。

关键词：黄河上游；高寒区；鱼类保护；鱼类增殖放流；过鱼设施

近年来，已（在）建水电工程对水生生态和鱼类的影响备受国内外广泛关注。当前，我国水能开发已经由最初的经济和技术瓶颈阶段进入到了生态、环境瓶颈阶段，减小水电工程建设对鱼类生境和资源的影响，研究鱼类保护措施已成为当前我国水电工程环境保护工作的重中之重。随着生态保护力度的加强，水电工程建设从最初的过鱼措施到后来的鱼类增殖放流站、栖息地保护，鱼类保护措施正在不断被落实。在国内，过鱼设施多出现在沿海一带，主要是为了保证江海之间鱼类的洄游，这些鱼道多建于六七十年代[1]。鱼类增殖放流站的建设近几年才刚兴起，在保护鱼类上有着不可替代的作用，其主要分布在四川、云南、贵州等河流上[2]。对于过鱼设施和鱼类增殖放流站在高寒地区的研究和应用仍较少，因此，没有系统的、成熟的经验和技术可借鉴。

黄河上游是我国梯级水电开发较为成熟的河段，现已形成以龙羊峡、李家峡、刘家峡等水电站为骨干的大型水电站建设群，在区域社会经济生活中发挥着巨大的效益，龙羊峡以上电站建成后也必将发挥巨大效益。黄河上游电站工程规模巨大，所处区域具有高寒半干旱的气候特征，生态环境脆弱，随着水库蓄水运行，对环境的影响效应正逐步显现出来[3]。由于高原鱼类与环境的高度适应性和特有性，高寒区鱼类的保护已成为高原水电开发环境影响需要深入研究的一个重要内容。为了做好高原地区水电开发鱼类的保护，本文采用资料收集、现场调研的方法，通过对高寒区已建鱼类保护措施的调研，总结高寒区鱼类保护措施开展现状及其存在问题，为今后高寒地区水电开发鱼类保护措施提供技术支撑。

1 高原鱼类分布特征研究

1.1 鱼类种类组成特征

从历史调查资料和现状调查综合分析，黄河上游鱼类有 47 种，土著种有 24 种，外来物种有 23 种，外来物种占上游鱼类种类的 48.9%[4]。裂腹鱼具有短距离洄游的习性，电站的建设使生境破碎化，切断了鱼类的洄游通道，导致龙刘河段高原鱼类资源减少，逐渐向上游退缩，主要分布在各水库的库尾 [5]；江河平原鱼类刺　、黄河鮈、黄河雅罗、大鼻吻鮈等逐渐向下游退缩，外来物种鲤鱼、鲫鱼、麦穗鱼、虹鳟等种类增多 [6]；龙羊峡以上河段主要为土著种类，资源量较以往稍微有所下降。

1.2 鱼类分布特征

黄河上游龙羊峡以上河段属青藏高原鱼类区系，极边扁咽齿鱼、花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼和拟鲶高原鳅、拟硬刺高原鳅在上游干支流均有分布。龙刘河段为高原鱼类向平原鱼类区，平原鱼类主要有刺　、黄河鮈、大鼻吻鮈、兰州鲇等，高原鱼类主要有花斑裸鲤、黄河裸裂尻、拟鲶高原鳅等种类，在干支流均有分布[7]。

近些年龙刘河段分布的江河平原鱼类逐渐向下游退缩，高原鱼类向上游退缩，该河段土著鱼类分布减少，高原鱼类花斑裸鲤、拟鲶高原鳅在此河段仍有分布，主要分布在各水库的库尾，龙羊峡

以上河段鱼类的分布整体变化较小，资源量较以往有所下降[8]。

1.3 重要栖息地及变化趋势

黄河上游鱼类重要生境主要集中分布在黄河源电站坝下至玛多县城下游岗那格玛措湖河段、特合土至岗龙河段以及玛曲河段、班多至唐乃亥河段 4 个区域，区域内河谷宽阔，滩地较多，部分河段河网发达，是典型的河网湿地。

龙刘河段开发率达 88.6%，流水生境基本丧失，河流片段化、湖库化严重，浅滩、深潭、急流、缓流相间的多样性的河流形态消失，已完全从流水生境转变为湖库生境。

从整个刘家峡以上河段看，随着梯级电站的不断实施，多样的栖息生境条件有所改变，干流适宜栖息生境存在的比例仅占整个河段的 30%左右。



图 1 黄河上游高寒区鱼类分布河段

2 高寒区鱼类保护措施现状

2.1 高寒区鱼类增殖放流站建设现状

鱼类增殖放流是指将人工培育繁殖的育苗投放到天然河道，使其自然生长，以增加放流对象鱼类资源量和繁殖群体的一项措施[10]，该措施适用鱼种广泛、运行管理便捷，目前已是水电工程鱼类保护措施最广泛使用的措施之一。

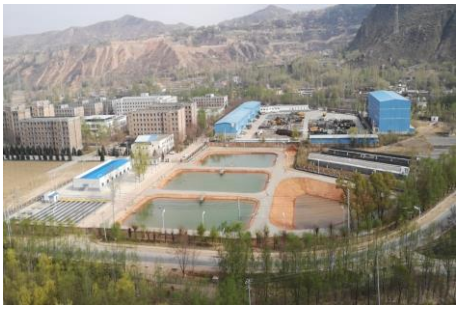
龙羊峡以下河段内大部分梯级已经建成运行多年，自上而下依次布置有龙羊峡、拉西瓦、尼那、李家峡、直岗拉卡、康扬、公伯峡、苏只、黄丰、积石峡、大河家、炳灵、刘家峡 13 座梯级电站。全部为已建电站。目前龙刘河段已建苏只鱼类增殖放流站、积石峡鱼类增殖放流站、炳灵鱼类增殖放流站，增殖对象是花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、黄河裸裂尻鱼和兰州鲶 4 种高原裂腹鱼，对于保护高原土著鱼类和探索保护技术奠定了基础。

苏只、积石峡鱼类增殖站分别建成于 2007 年、2005 年，主要增殖放流对象为花斑裸鲤和黄河裸裂尻，2009 年～2015 年分别在苏只～积石峡段放流 141 万尾和 135 万尾；目前苏只鱼类增殖放流站正常运行，积石峡鱼类增殖放流站于 2018 年重新建设于积石峡业主营地内。

炳灵鱼类增殖放流站位于炳灵水电站左岸库尾，于 2006 年建成，增殖放流对象为花斑裸鲤、厚唇裸重唇鱼、黄河裸裂尻、黄河高原鳅、刺鮈、拟鲇高原鳅。年放流规模为 10.9 万尾；目前正常运行。

截止 2011 年，苏只、积石峡鱼类增殖放流站累积放流黄河土著鱼类 205 万尾。暂未收集到炳灵鱼类增殖放流站放流记录。


苏只鱼类增殖放流站


新建积石峡鱼类增殖放流站


炳灵鱼类增殖放流站

图 2 黄河上游龙羊峡～刘家峡河段已建鱼类增殖放流站

2.2 高寒区鱼类过鱼设施建设现状

过鱼设施是连通河流上下游的一种方式，是恢复河流连通性的重要措施，可以帮助上下游鱼类种群完成基因交流。目前，主要的过鱼设施有集运鱼措施、网捕过坝、鱼道、鱼梯、仿自然旁通道、鱼闸、升鱼机等。过鱼设施能恢复河流的连通性，减缓大坝的阻隔影响。鱼道、鱼梯、仿自然旁通道多应用于水头较低的拦河工程。集运鱼措施、升鱼机、网捕过坝多应用于高坝。

近年来，国内高寒高海拔地区已建成的鱼道有西藏藏木鱼道、西藏多布鱼道、青海湖柳沙河鱼道等。

目前，黄河上游班多水电站鱼道正在建设中，该鱼道是龙羊峡上游唯一的鱼道工程，对龙羊峡上游鱼类连通和高原鱼类、平原鱼类种质交流具有重要意义。

（1）青海湖沙柳河鱼道

2006 年，青海省水利厅在沙柳河拦河坝上修建了一座宽 5m，长 150m 的导壁式过鱼通道，但当时过鱼效果并不明显。2008 年，青海湖裸鲤救护中心邀请台湾清华大学生物学专家曾晴贤教授进行鱼道设计，在经过实地考察后,参考台湾鱼道设计使用的经验，结合青海湖裸鲤生物学特性、沙柳河水坝和河道的情况，在沙柳河安装了简易过鱼通道，简易鱼道为钢制分体式结构， 由长、宽、高为 100cm×100cm×60cm 的 18 个单独箱体连接而成。简易鱼道一经使用就显现出良好的上溯效果，根据监测，裸鲤上溯高峰时节的高峰时段，同方向铺设挡水板每分钟通过鱼道上溯裸鲤亲鱼 37 尾，相对交替铺设挡水板每分钟通过鱼道上溯裸鲤亲鱼 39 尾，起到了很好过鱼效果。

目前，青海湖沙柳河鱼道是国内生态保护的典范，每年 5 月下旬至 7 月上旬，成千上万的青海湖裸鲤通过鱼道，上溯产卵。

（2）多布水电站鱼道工程

多布水电站鱼道工程根据尼洋河两岸的地形和电站枢纽布置条件，鱼道进鱼口设置在厂房尾水出口，以适应鱼类习性。根据鱼类对光色、声音的反应，设置拦鱼电栅、声光系统等诱鱼设施。鱼道线路由厂房尾水向下游延伸至尾水渠末端后，向左岸折回上游，沿左岸上游边坡向上游库区延伸，并设置出鱼口闸门及出口，全长 1100.46m。鱼梯采用矩形断面，过鱼宽度为 2m，鱼梯内设竖缝式隔板以控制流速，每 2.5m 设置横隔板一道，过鱼竖缝左右侧间隔布置，尺寸为 30cm，每 7 个～15 个池室设一个休息室，休息室长 4.0m～6.0m。鱼道建筑物主要由鱼道进口、明渠段、鱼道出口、观察室等组成，鱼道附属设施包括诱鱼设施、观测设施、拦污设施、防护设施等。主要过鱼对象巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼、拉萨裂腹鱼和尖裸鲤。

多布鱼道从 2015 年开始投入运行，运行过程中有监测到裂腹鱼类通过，过鱼效果良好。

（3）班多水电站鱼道工程

班多水电站是茨哈至羊曲河段的第 2 个梯级电站，是该河段唯一已建电站。坝址位于班多峡谷出口处，距上游茨哈峡水电站约 7km，距下游羊曲水电站约 75km。班多水电站 2010 年蓄水至今，

大坝对鱼类的阻隔影响已经逐步显现，主要土著鱼类平均体重发生下降，需要采取有效的过鱼措施，缓解种群间遗传交流受阻的不利影响，以保护鱼类种群的遗传多样性。



青海湖沙柳河鱼道



多布水电站鱼道

图 3 高寒高海拔地区已建鱼道

班多水电站采取右岸鱼道方案进行过鱼。鱼道穿过右岸副坝进行布置，主要由 2 个进鱼口、鱼道池室、休息室、观察室、出鱼口等组成，鱼道全长 2032.70m，综合坡比为 1.971%。鱼道两个进鱼口分别布置在厂房尾水下游约 310m、380m 处岸坡外侧，出口布置在库区右岸。本工程采用矩形断面的垂直竖缝式鱼道，隔板形式为同侧竖缝式。鱼道池室净宽 2m，池室长度为 2.5m，池室坡度 1:45，池室水深取 0.5m～2.2m。

2.1 黄河上游高寒区鱼类保护措施现存问题

（1）黄河上游龙羊峡至刘家峡河段已建梯级较多，河段碎片程度较高，但目前鱼类保护措施实施较少，已建电站鱼类保护措施需继续加强，以减缓黄河上游梯级电站对鱼类带来的影响。

（2）黄河上游已建成 3 座鱼类增殖放流站，基本集中在公伯峡以下河段，目前尚未能从整个河段统筹考虑建设鱼类增殖放流站，已建增殖放流站尚未做放流效果监测，无法衡量放流后对河段鱼类资源的补充程度。目前，花斑裸鲤人工增殖技术已相对成熟，但黄河裸裂尻、厚唇裸重唇鱼、极边扁咽齿鱼、等土著鱼类繁殖技术尚未完全突破，主要由于亲本鱼类较难捕捞，并且较难获得这些土著鱼类的饵料。

正在规划设计的羊曲鱼类增殖放流站将承担茨哈至羊曲河段的鱼类增殖放流任务，建成后将成为龙羊峡以上河段的鱼类保护研究中心，将填补公伯峡以上河段无鱼类增殖放流站的空白。

（3）黄河上游多高坝大库，已对鱼类形成了阻隔作用，正在建设的班多鱼道只能缓解班多至唐乃亥鱼类重要生境的阻隔问题，今后玛尔挡、羊曲水电站要深入开展过鱼措施设计，最大程度恢复河流连通性。

3 黄河上游高寒区鱼类保护工作展望

黄河上游龙羊峡至青铜峡河段已基本开发完成，其中龙羊峡至刘家峡河段布置有 14 个梯级，已开发完成 13 座；刘家峡至青铜峡河段已建成 9 座电站。龙羊峡以上河段共规划有 13 座梯级电站，在水电规划上分两段进行，茨哈至羊曲河段和湖口至尔多河段。茨哈至羊曲河段布置有茨哈峡、班多和羊曲 3 座水电站，其中只有班多电站已建成。尔多至湖口河段规划布置有十级方案，玛尔挡水电站正在建设当中，其它均处于规划阶段。

黄河上游龙刘河段水电开发较早，刘家峡水电站未开展环评，龙羊峡水电站开展环评未进行审查，后续建设的拉西瓦水电站、尼那水电站、李家峡水电站、直岗拉卡水电站、康扬水电站、公伯峡水电站电站未提出鱼类保护措施，也未提出生态流量和生态调度的要求，苏只水电站和炳灵水电站提出了鱼类增殖放流站，黄丰水电站提出了生态流量泄放、增殖放流站、人工捕捞过坝，积石峡

水电站提出了增殖放流站、鱼类生境保护，大河家水电站提出了下放生态流量、增殖放流站等鱼类保护措施。总体来说，黄河上游鱼类保护措施不系统，应统筹考虑建立黄河上游鱼类保护措施体系。

今后需进一步研究高寒区鱼类保护关键技术，根据黄河上游鱼类的自然鱼产力、自然生境特点和工程建设对鱼类资源的影响，提出合理确定高寒区鱼类资源补偿规模的方法；提出适宜高寒区鱼类生长繁殖的人工维生系统设备参数；研究高寒区保温防寒及防晒技术；开展高寒区鱼类游泳能力试验和水工模型实验；对不同型式的同侧及异侧竖缝式鱼道水流条件进行深入研究。

参考文献

[1] 陈凯麒,常仲农,曹晓红,等.我国鱼道的建设现状与展望[J].水利学报,2012,43（02）:182-188.

[2] 杨君兴,潘晓赋,陈小勇等.中国淡水鱼类人工增殖放流现状[J].动物学研究,2013,34(4):267-280.

[3] 唐文家,何德奎.黄河上游茨哈峡至积石峡段鱼类资源调查(2005-2010 年)[J].湖泊科学,2013,25(04):600-608.

[4] 李柯懋,唐文家,关弘韬.青海省土著鱼类种类及保护对策[J].水生态学杂志,2009,30(03):32-36.

[5] 何春林,宋昭彬,张鹗.中国高原鳅属鱼类及其分类研究现状.四川动物,2011,30,150-155.

[6] 唐文家,何德奎.青海省外来鱼类调查(2001-2014 年)[J].湖泊科学,2015,27(03):502-510.

[7] 张建军.黄河上游鱼类资源现状调查与分析[A].黄河水产研究所.可持续水产养殖—资源、环境、质量—2003 水产科技论坛论文集[C].中国水产科学研究院,2003:10.

[8] 杜军.黄河上游鱼类资源及变化初探[N].中国渔业报,2009-12-21(002).

[9] 曲修杰.黄河玛曲段水产种质资源保护区的调查研究[D].中国农业科学院,2009.

[10] 单婕,薛联芳.水电工程鱼类增殖放流站设计浅析[J].水力发电,2015(12):10-13.

LNG 环保自卸汽车在长河坝工程中的推广应用研究

陈　曦，黄　哲

（中国水利水电第五工程局有限公司，四川 成都 610066）

摘　要：应国家“立足国内、开拓国际、油气并举、厉行节约、建立储备”的油气发展的战略方针，结合长河坝水电站大坝工程坝料运输总量大、强度高，场内交通隧道运输份额大的特点，本工程在经多方论证后尝试引进 LNG 环保自卸汽车，开创了水电行业 LNG 环保自卸汽车应用的先河，并伴随其投产运行进行了动力性、燃油经济性、制动性、操控稳定性、平顺性以及通过性等多方面试验研究，为 LNG 汽车在水电施工行业的推广应用提供参考。

关键词：LNG；环保自卸汽车；长河坝水电站；推广应用研究

1 概 述

面对全球性的能源危机、环境污染及气候改变，世界各国都将节能环保与新能源汽车发展作为战略选择。我国也提出了“立足国内、开拓国际、油气并举、厉行节约、建立储备” 的油气发展战略。据统计，目前世界能源结构中天然气比例为 24.1%，而我国仅为 3.4%。因此我国在十二五规划中，要求天然气比重在能源结构中达到 8.3%。所以，要油气并举、逐渐加大天然气在能源结构中的比重、加快天然气的开发利用势在必行。另外，控制环境污染、降低废气排放也是开发利用天然气的重要原因。近年来，城市的汽车不断增多，汽车尾气排放量也越来越大，城市空气中 PM2.5 有 60%来自于汽车尾气。所以减少尾气排放，开发清洁能源也迫在眉睫。

长河坝水电站砾石土心墙坝为国内在建的第二高坝，坝料运输总量大、强度高，场内交通隧道多，其工程建设中的环保问题受到行业和地方相关部门高度关注。长河坝大坝施工需要投入数百辆施工设备，废气排量大，而且整个运输线路有 80%以上是隧洞运输。隧道内运输因车辆尾气排放，会导致洞内烟尘浓、能见度低、安全隐患增加，极易导致交通事故。如果采用 LNG 燃料，其燃烧后产物大部分为水和二氧化碳，这样就可以大大降低隧道内烟雾浓度。因此，我们拟在长河坝项目采用 LNG 自卸汽车完成坝料运输任务，从而有效改善隧道的交通条件、降低汽车尾气对环境的污染。

2 车辆的选型与配套设施的建设

2.1 车辆的选型

LNG 汽车选用福田戴姆勒公司的 BJ3253DFMKB-S6 型欧曼重卡，该车是福田戴姆勒汽车、中集圣达因、富瑞特装等企业强强联合、联合创新、专为天然气运输用户量身打造的重卡产品。

作为对比试验的燃油汽车选用重庆红岩公司的 CQ3254TMG384 型红岩金刚重卡，该车由上汽依维柯商用车投资有限公司与重庆机电控股(集团)公司共同投资成立的重型汽车生产企业。车辆基本配置见表 1，车辆基本参数见表 2。

表 1　车辆基本配置表

车型	基本配置	车辆自重
欧曼 LNG 重卡	6*4 自卸车、潍柴 350 马力天然气发动机、陕齿 12 档变速箱、奔驰 16T 后桥主减速比 5.26、450L 气瓶。	19.05t
红岩金刚燃油重卡	6*4 自卸车、潍柴 340 马力高压共轨发动机、陕齿 12 档变速箱、奔驰 16T 后桥主减速比 5.26、350L 铝合金油箱。	19.01t

表 2　车辆基本参数表

车型	欧曼 LNG 重卡	红岩金刚燃油重卡
车辆型号	BJ3253DFMKB-S6	CQ3254TMG384
长宽高（mm）	8450×2500×3150	8450×2500×3169
燃料种类	液化天然气	柴油
轴距	3825+1350	3600+1350
最高车速(km/h)	90	90
扭矩(N·m)	1500	1300
最大功率转速(rpm)	2200	2200
最大扭矩转速(rpm)	1400-1600	1600

2.2 配套设施建设

作为 LNG 汽车配套的加气站由攀枝花华油天然气有限公司负责投资建设，总建设费用约 550 万元。为确保安全，本加气站严格依照《汽车加油加气站设计与施工规范》(GB50156-2002)(2006 年版)进行建设，加气站的工程规划已经上级部门审批通过，工作人员持证上岗，并依相关要求配备防火防爆器械，定期进行安全检查。

加气站选型为撬装式 LNG 加气站，其成套设备由 LNG 储存加气撬和站控系统两大部分组成。该选型便于在简易混凝土基础上进行设备的现场管道连接和固定。加气站结构示意见图 1，加气站设备配置见表 3。

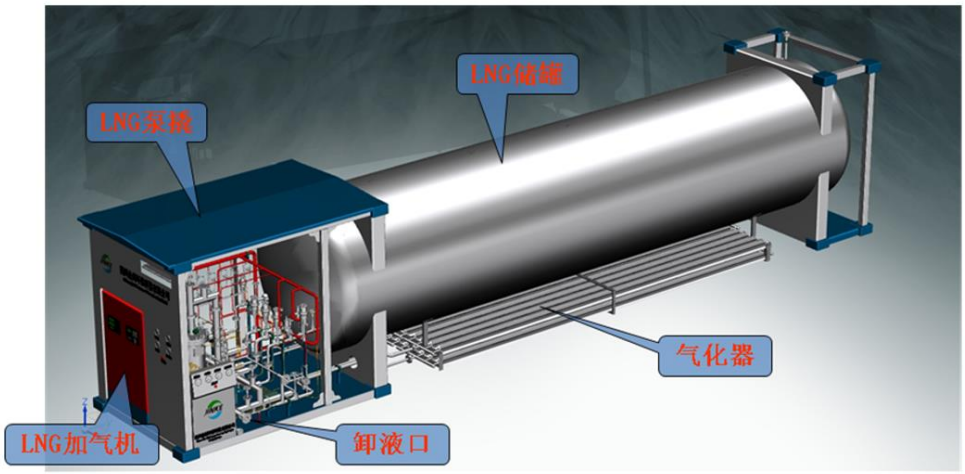


图 1 加气站结构示意

表 3　LNG 撬装加气站设备配置表（60 方单泵管路式）

序号	设备名称	规格型号及参数
1	LNG 储存泵阀撬	
1.1	LNG 储罐	储罐形式：卧式 几何容积：60m³ 设计压力：1.3MPa 绝热形式：高真空绝热 充满率：90% 日蒸发率（LN2）≤0.2% 内/外罐的设计温度：-196℃/环境温度 内/外罐的材质：S30408/Q345R
1.2	储罐/卸车增压器	设计压力：2.5MPa 气化能力：300Nm³/h
1.3	调饱和加热器	设计压力：2.5MPa 气化能力：300Nm³/h
1.4	低压 EAG 加热器	设计压力：2.5MPa

序号	设备名称	规格型号及参数
		气化能力：100Nm³/h
1.5	低温潜液泵	最大流量 340L/min（液态），功率 11kW
1.6	低温泵池	0.08m³，设计压力：1.6MPa
1.7	低温管路	设计压力：1.6MPa 绝热形式：高真空多层绝热
1.8	低温阀门与安全放散	DN10～DN50
1.9	仪表及传感器	包含压力变送器、温度变送器、电磁阀、可燃气体探测器等
2	卸车软管	DN50，PN2.5MPa；L=4000
3	LNG 加气机	工作压力 1.6MPa，单注单回（国产）
4	站控系统	
4.1	电气设备	包括：MCC 控制柜（750×600×1800），PLC 控制柜（750×600×1800）（含声光报警灯）及 UPS 电源（2KVA，山特）
4.2	上位机部分	包括：2 台工控机（研华等），2 台显示器（19″液晶宽屏）、2 套 WINXP 专业版操作系统、1 套组态软件（力控/组态王）、1 套计费管理系统软件及 1 台打印机（A4）
5	仪表风系统	空气压缩机（出口压力：0.6-0.8MPa）
		干燥机（含过滤器）
		压力传感器

3 运行阶段跟踪研究

3.1 研究主要内容

在设备引进前期，通过对一系列进场试验成果分析， LNG 汽车在动力性能、驾驶性能方面与普通燃油汽车处于同一水平，完全能够满足工程建设施工要求；且其在平缓路段运输单价消耗优于普通燃油汽车；通过对 LNG 自卸汽车与普通燃油汽车尾气中有害气体排放含量分析可知，其 NOx 及 CO 的排放少，环保优势明显，若能在长隧道运输中，通过减少有害气体排放，将大幅度提高隧道空气质量，减少相关辅助设备和人力投入消耗。

在运行阶段，主要对进场试验研究内容进行进一步校核，以确保研究成果的可靠性。主要对 LNG 环保自卸汽车进场研究试验中环保性结果是否与长期生产运行一致进行评估，同时，通过长时间运行统计，对其经济性进行核算。

3.2 环保性调研

后续跟踪阶段，又进行多次尾气检测，随车辆使用时间延长，尾气排放各项数据均值有小幅度增长，且车辆维护前后尾气排放有明显差异，在依照要求进行车辆保养的条件下，LNG 汽车尾气排放情况优于普通燃油重卡，与进场试验结果基本一致。

此外，按照《四川省长河坝水电站施工期环境现状监测方案》要求，甘孜州环境监测站对该地区的地表水、大气、噪声现场采样并及时送回实验室进行分析。从中获取其大气质量检测结果进行 LNG 环保自卸汽车引进前后对比分析。受条件所限，大气质量监测主要监测因子为 TSP。试验依照《环境空气总悬浮颗粒物的测定重量法 GB / T15432—1995》规范进行，每次连续监测五天，同滤膜采样，单次采样 12 小时。TSP 试验监测结果见表 4。

表 4　TSP 试验监测结果记录表

监测点	长河坝水电站坝区 5#隧洞出口							
报表时间	LNG 汽车引进前				LNG 汽车引进后			
	2012 年 2 季度	2012 年 3 季度	2012 年 4 季度	2013 年 1 季度	2013 年 2 季度	2013 年 3 季度	2013 年 4 季度	2014 年 1 季度
TSP 均值	0.3244	0.3324	0.3564	0.3246	0.3262	0.3278	0.3414	0.3213

（mg/m³）								

考虑季度施工强度影响，对 LNG 环保自卸汽车引进前后各四个季度进行对比分析，可以得出，对于 TSP 值，LNG 车辆引进后有小幅度改善。

3.3 经济性核算

运行阶段经济性核算重要通过统计一个较长时段内多辆 LNG 汽车与燃油汽车的坝料运输量、运输里程、油（气）消耗情况，对 LNG 环保自卸汽车的实际运行单耗进行计算，从而获得其直接经济效益情况。

选定试验时段为 2014 年 7 月份。LNG 汽车在本工程中主要用于石料场石料运输，该月份为堆石填筑高峰时段。试验路段为江咀料场运输上坝道路，路线长 12.5km，主体运输道路为混凝土浇筑路面，路况良好。试验选取 LNG 汽车与燃油汽车分别统计并对比分析。具体情况见表 5。

表 5　LNG 汽车与燃油汽车经济系数对比表

LNG 汽车	每吨每公里耗气量 kg/（t×km）	液化气单价 元/kg	经济系数 元/（t×km）
	0.0308	7.0000	0.2156
燃油汽车	每吨每公里耗油量 L/（t×km）	柴油单价(2014 年 9 月 30 日) 元/L	经济系数 元/（t×km）
	0.0327	6.9316	0.22267

通过抽选特征月份，对 LNG 汽车及燃油汽车经济性能对比分析，可以得出，LNG 汽车直接经济效益比燃油汽车节约直接成本 0.0111 元/（t×km）。经济性各方面情况与进场试验基本一致。

3.4 运行阶段研究成果总结

通过生产阶段试验分析可知，LNG 环保运输车辆在爬坡能力、最高时速、其制动性、操控稳定性和平顺性等多方面与燃油汽车并无明显差别，与进场试验情况相符，LNG 运输车辆在本工程较为平缓的下游江咀堆石料运输线路运输经济效益明显，每吨每公里比燃油汽车节约直接成本 0.0111 元。

4 其他优势分析

4.1 安全性能

在安全性方面，LNG 环保自卸汽车在工程施工过程中的推广应用也有着以下明显优势。

（1）LNG 为-162℃深冷液体，工作压力 0.8MPA，携带安全。在控制技术上和设备要求上与 CNG 相比要求低。

（2） LNG 比重小，在挥发时与空气对比轻，一旦泄露不易聚集，能很快在高空飘散。

（3）LNG 爆炸极限窄，一般难以在高空中达到爆炸条件，与现在推广应用的 CNG 相比工作压力等级低。

总体来说，LNG 作为车用燃料，较普通燃油汽车更加安全。

4.2 运储性能

LNG 密度为 0.47×103kg/m³，体积比同质量的天然气小 625 倍，所以可用汽车轮船很方便地将 LNG 运到没有天然气的地方使用。LNG 储存效率高，占地少，投资省。

5 结语

LNG 环保自卸汽车在长河坝工程中的推广应用研究，在公司科技进步奖评比中获公司科技进步二等奖，本次系列研究实验成果表明了 LNG 环保运输车辆在动力性、驾驶性方面与燃油汽车并无明显差别，完全能够满足本工程土石坝高强度、连续运输施工要求。同时，LNG 环保自卸汽车在

环保性能和经济性能方面的表现更为优越，平缓路段运输较普通燃油车成本优势明显，可降低成本约 0.053 元/（t×km），在长隧道运输中，通过减少有害气体排放，将大幅度提高隧道空气质量，减少相关辅助设备和人力投入消耗。此外，LNG 自卸汽车具有安全性能高及运储效率高、投资省的特点。综合考虑，LNG 环保自卸汽车具有驾驶性能可靠、经济及环保效益明显，安全性能高特点，值得在大型水利工程土石方运输中推广应用。

参考文献：

[1] 陈莹丽. 探究 LNG 储运技术特点及发展前景[J] 中国化工贸易，2015，(4):62-62.
[2] 刘建辉. 天然气储运关键技术研究及技术经济分析[D] 华南理工大学，2012.
[3] 许孝轩，陈维平. 液化天然气的运输方式及其特点[J] 油气储运，2006(3).

十全湖退渔还湖生态修复方案研究

陈运梅，喻　婷，陈晓群，吴雪洁，张秀莲

（湖北省水利水电科学研究院，湖北 武汉 430070）

摘　要：十全湖退渔还湖生态修复项目是仙桃市重点工程，结合十全湖湖泊现状和规划的功能定位，因地制宜地提出了退渔还湖的工程设计方案和水生态修复方案。

关键字：十全湖；退渔还湖；生态修复

1 研究背景

十全湖位于东经 113.42°~113.45°，北纬 30.30°~30.32°之间，毗邻仙桃市主城区西南区。十全湖流域总面积 15.37 km^2。受农业种植和淡水养殖业发展的影响，目前十全湖湖区已被围垦殆尽。由于围垦被土埂阻隔，破坏了湖泊生态环境和调蓄功能，排涝压力增大，减弱了天然的调蓄作用和纳污自净的能力，生物多样性急剧下降。加之城市工业废水的排放，造成湖区内水土污染，部分鱼塘、农田污染严重，生态系统遭到破坏，对现状当地居民健康安全形成较大威胁。

根据《仙桃市城乡总体规划（2008-2030）》，十全湖及其周边河渠被纳入新城区建设范围。十全湖湖区在十全湖休闲公园中心地带，湖区周围规划为适合人居的生态社区，故仙桃市新城市建设的需要对十全湖的生态修复提出了新的要求。因此，十全湖退渔还湖生态修复工程的尽快实施对区域降低区域排涝压力，改善湖泊水生态环境是十分迫切的。

2 十全湖现状

2.1 湖泊形态现状

受农业种植和淡水养殖业发展的影响，目前十全湖湖区已被围垦殆尽，取而代之的是约 3000 m^2 的浅水池塘和 17000 m^2 的水田，降低了湖泊调蓄能力，影响了湖泊纳污自净能力；同时湖泊水深过浅，限制了生物多样性的发展，打破了湖泊原有生态体系。十全湖被鱼塘和水田分割，影响了水体交换，阻碍了水生生物洄游，破坏了湖泊生态环境[1]。

2.2 湖泊水质现状

受农业种植业和淡水养殖业的影响，十全湖湖区的面源污染比较严重，水质情况恶劣。受浅水环境的影响，十全湖自净能力较差；水系不连通，水质得不到改善。根据环保部门的监测数据，十全湖目前水质为 IV~V 类，主要超标污染物为总氮、高锰酸盐指数。

2.3 湖泊水生态现状

十全湖拟恢复湖区现状多为围湖养鱼的鱼塘和种植莲藕的藕塘，彼此由田埂隔离，生物交换通道中断或受阻，导致湖泊调蓄能力减小，生态功能退化严重；同时多年渔业养殖产生的鱼类排泄物和投肥污染积累在底泥中，以及莲藕死亡后的腐败物也聚集在底质中，导致湖底淤积和污染严重；鱼类养殖以四大家鱼为主，主要有青鱼、白鲢、团头鲂、鲫鱼、草鱼、鲤鱼、鳙鱼等；湖周边的田埂周围存在挺水植物群落，主要有芦苇、香蒲等。总体评价湖泊生态功能单一，基本受人为活动支配。

总的来说，十全湖目前已丧失防洪调蓄、水量供给和休闲旅行等功能。根据《湖北省湖泊保护条例》，亟需开展十全湖修复和保护工作[2]。

3 退渔还湖工程方案研究

3.1 湖泊规模确定

十全湖退渔还湖生态修复工程通过清淤扩大湖泊调蓄容积可将工程区的排涝标准提高到20 年

一遇。十全湖湖容的确定方法：先确定湖泊最低生态水位和湖泊调蓄水深，并通过位于湖泊出口渠尾段东风泵站的水位推算十全湖的特征水位，从而推算十全湖退渔还湖后的湖容曲线。

由于缺乏历史长期的水文和湖泊特性数据，不能使用天然水位资料统计法和湖泊形态分析法确定湖泊的最低生态水深。因此，本次主要使用功能法、经验法和湖泊纳污能力推算三种方法推算湖泊最低设计水深，并参照相关研究确定十全湖的最低生态水深为 1.3m。



十全湖水系图

3.2.1 湖泊最低设计水深

3.2.1.1 采用功能法推算湖泊最低生态水深

根据生态系统功能，确定湖泊最低生态水深主要考虑渔业、旅游业、芦苇以及其他水生植物所需要的水深。由植物学原理可知，芦苇等挺水植物的生长水深最小应满足 0.8 m。基于动物学原理，平原湖区当水深在 1.3 m 左右时，是鱼、虾、河蟹和元鱼等生存所需要的最佳水深。对旅游休闲来说，主要包括划船、垂钓以及其它水上娱乐等。一般来说，当水深达到 0.7 m 时即可满足旅游休闲功能的需求。因此，初步确定十全湖的最低生态水深水深为 1.3 m。

3.2.1.2 采用经验法推算湖泊最低设计水深

无论初始水位如何，水位的永久性抬升或降低，会导致湖泊物种多样性的减少和植被覆盖度降低，随着时间的推移，部分地区的物种会慢慢恢复以适应新的水位，但也有地区物种长时间后仍无法自行恢复；水位波动幅度的增加或减少对植被的影响不尽相同。从无波动到高波动，物种多样性经历先增加后减少的过程。对于多数调控而言，约 1-2 m 的年内变幅对生态系统生物多样性的增加和稳定最为有利。根据相关研究，洪泽湖生态系统的最低生态水深为 1.24 m，洪湖生态系统的最低生态水深为 1.14 m，南四湖生态系统的最低生态水深为 1 m。综上所述，初步确定十全湖的设计最低生态水深为 1.3 m。

3.2.1.3 采用湖泊纳污能力推算湖泊最低设计水深

根据《地表水环境质量标准》（GB3838-2002），按《仙桃市十全湖生态修复项目》规划，十全湖的水质以 IV 类水质标准计。

在规划区内，城镇生活和生产污水均由污水管网统一排入污水厂进行处理，不进入十全湖；同时十全湖以休闲旅游为主，湖区不存在水产养殖情况。十全湖周边无点源污染和内源污染，其主要污染源为大气沉降污染、屋面径流污染、街道径流污染、建筑工地地表径流和排水灌渠沉积物污染等面源污染。借鉴武汉市雨水污染物监测结果，单位面积径流污染物负荷中 COD、BOD、SS、TN 和 TP 分别为 52.5、25.3、117.8、20.1 和 2.66 kg/(ha*a)。十全湖的承雨面积为 15.37 km^2，计算得到 COD、BOD、SS、TN 和 TP 年入湖总量分别为 80.69 t、38.87 t、181.06 t、30.89 t 和 4.09 t。十全湖

设计水质中 COD、TN 和 TP 的浓度分别为 30 mg/L、1.5 mg/L 和 0.1 mg/L，为达到设计水质，则分别需要 268.98 万 m^3、2059.58 万 m^3 和 4088.42 万 m^3 的水量对污染物进行稀释。若以湖区面积为承水面积，则湖区设计深度分别为 0.13 m、1.03 m 和 2.04 m，根据取大值原则初步确定十全湖的最低水深为 2.04 m。

3.2.1.4 最低生态水深比选

根据上述的计算结果，十全湖的最低生态水深有 1.30 m 和 2.04 m 两种设计方案。在第一种方案下，工程量和经济预算较小，但需要借助水生态修复工程对入湖污染物进行净化以维持十全湖的水环境健康发展；在第二种方案下，工程量和经济预算较第一种方案显著增大，但方案实施后主要依靠水体自净能力净化水质，而对水生态修复过程考虑较少。根据功能定位，十全湖以休闲旅游为主，水生态修复和滨水绿化工程是本次规划的主要内容之一。因此，在水生态修复和滨水绿化工程建设过程可以兼具对入湖污染的净化。综上所述，选择 1.30 m 的最小水深设计方案比较合理。

3.2.1.5 湖泊调蓄水深

规划区属于湿润平原河网区域，其洪水过程受集中降水过程的影响较大，而在湿润地区，一次大暴雨事件的降水量主要集中分布在一日之内。由 1957-2016 年规划区年最大一日降水量统计结果可知，1961、1969、1991 和 2011 年的最大一日降水量均接近 190 mm，与 P = 5%的设计一日最大暴雨量接近，因此本项目采用 20 年一遇的设计暴雨对规划区的水文过程进行研究。由《灌溉与排水工程设计规范》（GB 50288-2018）可知，旱作区一般可采用 1-3 天暴雨从作物受淹起 1-3 天排至田面无积水。规划区属城镇区域，其排水模数则与旱作区类似，且排水效率应进一步提高，因此确定规划区的排涝标准为 20 年一遇最大一日暴雨一日排完。

由规划区的排涝体系可知，排区多余的水量通过升级改造后的东风泵站，以 18 m^3/s 的流量排入到通顺河，从而可以确定排区的设计排涝流量为 18 m^3/s。计算得到规划区的调蓄水量为 83.08 万 m^3。在规划区内，调蓄起始水深为设计最小生态水位，即 1.3 m，在此基础上增加调蓄湖容 83.08 万 m^3。计算得到十全湖需增加的调蓄水深为 0.42 m。

3.2.1.6 湖泊湖容曲线的确定

东风泵站进水池设计运行水位为 21.63 m，最低运行水位为 21.33 m，最高运行水位为 22.13 m。考虑十全湖至东风泵站径流过程中存在的沿程水头损失，根据沿程比降、流量、建筑物等情况，通过试算法进行水面线推算。

水面线推求采用实测地形图进行计算。本次工程范围内的河道宽为 5-10 m，属小型河道，河道顺直，河岸阻力较小，考虑生态护岸工程的实施，本次计算选取主槽糙率为 0.035。根据东风泵站的最高运行水位按水面线推求至十全湖处，得到十全湖的控制水位为 22.26 m。因此，两者比较得到十全湖的设计水位为 22.26 m，对应湖容为 445.9 万 m^3。东风泵站的最低运行水位为 21.33 m，十全湖的最低水位为 21.37 m，对应湖容为 268.31 万 m^3。由于十全湖的最低生态水深为 1.30 m，因此十全湖的设计湖底高程为 20.07 m，取为 20.00 m。东风泵站进水池设计运行水位为 21.63 m，得到湖泊常水位为 21.67 m，对应湖容为 327.79 万 m^3。计算得到调蓄水深为 0.42 m，小于十全湖控制水位与常水位之差（0.59 m），表明十全湖特征水位设计值具有安全合理性。从而得到水位~面积~湖容曲线。

3.2 退渔还湖工程

3.2.1 清淤工程

根据《仙桃市江汉水城•十全湖生态休闲公园规划》，十全湖公园的用地类型可划分为绿地及水面两部分，面积分别为 1.85 km^2 和 2.0km^2。由于湖区现状多数为鱼塘，鱼塘底部高程为 22.22-22.80m，湖岸线所在位置现状地面高程约为 22.22-22.80m，本次设计的湖底开挖高程为 20.00m，常水位为

21.67m，故十全湖的水面形成需进行清淤疏挖而成，开挖的土体回填到湖周围的公园绿地和规划的建设用地，回填后周边地面高程约为 23.7m。

3.2.2 护岸工程

该工程的湖岸断面均为在原地面上开挖和堆土碾压相结合而成，湖区内清淤疏挖的土体回填至十全湖周边规划的建设用地和绿地用地内，据估算回填后　　湖岸岸顶高程约为 23.70m，根据《公园设计规范》（GB51192-2016）要求，游憩绿地适宜坡度宜为 5．0%～20．0%，本次土体回填的绿地岸坡坡度分两个形式：在设置有亲水平台处的绿地岸坡采用 20%，其余岸坡采用 10%[3]。

由于湖岸岸线布局为不规则线条组成，湖岸结构需进行相应变化。本次设计从结构稳定、景观效果和便于施工等多方面综合考虑， 结合十全湖岸线的不同功能分区采用三种生态护岸型式，分别为自然缓坡入水护岸、人工摆石护岸及硬质护岸（设置亲水平台）三种[4] [5]。

自然缓坡入水护岸：适用于现状岸坡平缓，沿湖岸绿地面积宽阔，沿线有居民小区，离规划道路有一定距离的岸线。自绿道处以 1:10 缓坡接至湖区绿地高程 22.26m。自内湖岸线处以 1:4.0 缓坡从高程 22.26m 接至设计湖底高程 20.00m。自外湖岸线至内湖岸线间湖区绿地范围可种植各类景观植物，自内湖岸线至湖区水面依次种植各类挺水、浮叶、沉水植物，改善湖区生态环境。

人工摆石护岸：适用于湖岸规划为滨水公园的岸线。自绿道处以 1:10 缓坡接至湖区绿地高程 22.26m。自内湖岸线处以 1:4.0 缓坡从高程 22.26m 接至设计湖底高程 20.00m。沿内湖岸线处新建人工摆石护岸，护岸高 0.5m。自外湖岸线至内湖岸线间湖区绿地范围可种植各类景观植物，自内湖岸线至湖区水面依次种植各类挺水、浮叶、沉水植物，改善湖区生态环境。

硬质护岸：适用于设置亲水平台的湖岸段。自绿道处以 1:20 缓坡接至湖区绿地高程 22.26m，每隔 50m 设一条人行慢道至亲水平台。自内湖岸线处以 1:4.0 缓坡从高程 22.26m 接至设计湖底高程 20.00m。挡墙采用 C20 混凝土重力式挡墙，墙高 1.5m，顶宽 0.5m，临水面直立，背水面坡比 1:0.4，挡墙底部设 100 厚砂砾石垫层。

4 湖泊水生态修复工程方案

本工程任务是通过实施退渔还湖、水系连通、水生态保护及修复等措施恢复十全湖水生态，并与仙桃市新城区的城市规划相结合，使十全湖成为水清、岸绿、景美的生态湖泊。十全湖退渔还湖生态修复工程通过清淤扩大湖泊调蓄容积可将工程区的排涝标准提高到 20 年一遇；通过实施水系连通和水生态保护与修复将十全湖水质保持在Ⅳ类。

4.1 水系连通工程

4.1.1 水系连通现状分析

十全湖四面被三条河流围绕，北边为洛江河、西边和南边为通顺河、东边为全东渠（前通河），十全湖现状为鱼塘和藕塘。湖区内无主要河道支流来水，湖区内灌溉用水通过沙嘴闸抬高汪洲河水位进行引水，经过洛江河流入全东灌渠。湖区内灌溉水系相当发达，由联船灌渠、船东灌渠和 11 条斗渠斗沟组成的田间工程。 湖区内的排水一部分通过底沟流入全东渠（前通河），一部分直接流入全东渠（前通河）再经东风闸和东风泵站排入通顺河。

4.1.2 水系连通工程

根据《仙桃市江汉水城•十全湖生态休闲公园规划》，十全湖退渔还湖面积 3000 亩，定位为十全湖生态休闲公园，湖周围规划为仙桃市政府、生态社区、文体广场等城市用地，无农业用地。为了实现十全湖与周边水系的连通，规划十全湖水系连通线路为：汪洲河⟶洛江河⟶全东渠（前通河）⟶十全湖⟶底沟⟶全东渠（前通河）⟶通顺河。

4.2 湖泊生态修复工程

通过湖盆物理形状改造、底质改善、高等水生植被构建、食物网构建、清水态生态系统优化与

稳定等工程措施重建十全湖水生态系统，恢复岸带挺水植被 37500 m^2，沉水植被 2 km^2，并构建与之相协调的食物网。

生态重建完成后，黑藻、金鱼藻、狐尾藻和马来眼子菜等“植冠型”大型沉水植物等覆盖面积 1 km^2，苦草、微齿眼子菜等不影响景观的“地毯型”沉水植被覆盖面积 1km^2。

根据十全湖承雨面积 15.37 km^2 计算，流域内面源污染中总氮和总磷的年入湖总量分别为 30.89 t 和 4.09 t；根据十全湖的引水水源情况，将十全湖的背景水质现状视为 III 类，十全湖以 IV 类水质标准计，计算得到十全湖能够容纳的 TN 为 1.64 t，TP 为 0，因此需要治理的 TN 和 TP 年总量分别为 29.25 t 和 4.09 t。由此计算，通过十全湖的生态措施可分别削减下游总氮负荷的 56.5%、总磷负荷的 84.4%，在很大程度上减小下游的水体富营养化风险。

5 结语

十全湖退渔还湖生态修复工程可以恢复十全湖的湖容，使其充分发挥海绵城市建设中海绵体接纳和调蓄城市洪水的作用，同时水系连通工程中的生态修复模块也可以净化水质，减小城市面源污染对水功能区的不利影响，发挥海绵体的净化水质作用。

十全湖水退渔还湖生态修复工程，可加快十全湖与外部水体的交换，促进十全湖水体自净，提高十全湖的水资源承载能力；疏通生物交换通道，改善生境，对于保持生物多样性、塑造良性生态平衡关系具有积极作用。提高湖泊抗干扰和自然修复能力，合理平衡自然功能与社会功能间关系，是保障水生态安全，改善十全湖水生态环境的需要[6]。

十全湖退渔还湖生态修复工程，改善周边生态环境，使其充分发挥工程的经济、社会和环境效益。退渔还湖生态修复后的十全湖仙桃城郊地，将会成为仙桃又一个风景优美的城市核心区。对促进项目区经济发展具有十分重要的意义，工程实施对促进地区经济持续稳定发展具有巨大作用，社会、经济效益显著[7]。

参考文献：

[1] 秦　灏、施巍巍、王桂凤. 长荡湖围垦区退田还湖方案研究及效益分析[J] .江苏水利， 2014(1) :14-16；

[2] 湖北省湖泊保护条例[S]　湖北省人大常委会 2012.5.30；

[3] 《公园设计规范》（GB51192-2016）[S]；

[4] 潘琤琤　基于鱼类栖息地修复的浙江省城市湖泊公园设计研究[D] 浙江农林大学 2013.6；

[5] 蔡　斌 西安沣河生态景观设计及生物栖息地营造研究[D] 西安建筑科技大学　2016.12；

[6] 杨　柳、江　丰、谢正磊、王正军、廖富强、齐述华，鄱阳湖退田还湖圩区土地返耕利用的研究[J] . 中国土地科学， 2017(03) :44-50；

[7] 王　毅、于秀波、摆万奇，长江中游地区退田还湖、生态建设与堤垸经济发展[J].国情报告 第三卷.2000 年（上）[J]：68-80。

大渡河流域水电开发水生生态及鱼类保护浅析

陈帮富，彭旭初

（国家能源集团大渡河流域水电开发有限公司，四川 成都 610041）

摘　要：如何在水电开发中更好地保护好水生生态，将其负面影响降低到尽可能小，是近年来水电开发者及相关参与者努力的方向，鱼类作为水生生态最为重要的物种，理应获得更多的关注和保护。文章主要介绍大渡河公司在水电开发的同时，对水生生态及鱼类开展的保护工作。重点阐述了大渡河公司水生生物及鱼类保护理念，特别是过鱼设施、鱼类增殖放流、鱼类栖息地保护和生态调度等鱼类保护措施，以及围绕鱼类保护开展的相关科研工作。

关键词：大渡河公司；水电开发；水生生态保护；鱼类保护；措施

水电工程设施是合理开发利用水资源的重要手段，有效实现了流域内水资源的均衡配置，促进了当地的社会和经济发展（Bhagabati et al., 2014）。但另一方面，水电工程建成后，阻断了河流的连通性，造成水电站上下游间的物理和生物隔断，同时，水电工程蓄水后，改变了河流的原始流态，造成河流水动力特征和水温条件的改变（Gelda and Effler，2007；Yang et al., 2012；Kasper et al., 2014）。这些水文情势的改变，引发了一系列生态环境变化，进而影响水生生物的生存、发展、演化。鱼类作为重要的水生生物组成，是目前水利工程水生生态影响的关注焦点（Tuo et al., 2011；Azami et al., 2012）。

大渡河流域作为中国规划的十三大水电基地之一，水能资源丰富。国家能源集团大渡河公司作为大渡河流域主要开发业主，自 2000 年成立以来，始终秉承“与青山绿水为伴，让青山绿水更美”和“绿色发展”的环保理念，始终坚持“在保护中开发、在开发中保护”原则，在开发水电的同时，积极开展了水生生态及鱼类的保护工作，本文主要介绍大渡河公司近年来采取的水生生态及鱼类保护措施，以期为水电开发中的鱼类保护工作提供借鉴指导。

1 流域水电开发概况

大渡河发源于青海省果洛山东南麓，干流全长 1062km，天然落差 4175m，大渡河干流水电规划推荐三库 28 级开发方案，总装机容量 2670 万 kW，年发电量约 1123 亿度。

大渡河公司负责承担大渡河干流 17 个梯级电站的开发，合计总装机约 1757 万 kW。其中已建成投产的龚嘴、铜街子、瀑布沟、深溪沟、大岗山、猴子岩、枕头坝一级、沙坪二级等 8 个梯级电站，共计装机 1011.24 万 kW；代建的双江口电站装机 200 万 kW；筹建项目有金川、巴底、丹巴等 8 个项目，总装机约 470 万 kW。

2 鱼类资源状况

大渡河流域鱼类资源丰富，共有鱼类 116 种，隶属 8 目 19 科 77 属。其中，鲤形目 4 科 57 属 83 种，占 71.5%；鲇形目 5 科 11 属 20 种，占 17.3%；鲈形目 5 科 5 属 8 种，占 6.9%，鲑形目、鳗鲡目、鳉形目、合鳃目、鲟形目均为 1 科 1 属 1 种。

大渡河上、中、下游鱼类区系组成差异较大，上游和河源的鱼类区系组成基本上是适应于高原宽谷和高山峡谷的鱼类，如，川陕哲罗鲑、大渡裸裂尻、长须裂腹鱼等，上游鱼类的目、科、属和种类均比中、下游少。中游的鱼类区系组成中具有上、下游鱼类的一些特点，由于中游地处东部盆地和西部高山高原之间，得天独厚的自然环境造就了中游鱼类区系中常混杂有上、下游适应能力强的物种，同时也出现了独特的种类，如稀有鮈鲫仅在中游的鱼类区系中存在。下游河段由于与岷江干流接近，有许多岷江干流鱼类进入下游河段，如长薄鳅、鲈鲤等。因此下游鱼类种类上与岷江干流多数相同，形成了大渡河下游鱼类资源分布最多的特点。

大渡河流域有国家Ⅱ级保护鱼类两种，川陕哲罗鲑和胭脂鱼。目前，由于人类活动、水质污染、水电工程设施建设等的影响，大渡河流域上述鱼类野生群落受到了显著的影响，迫切需要对上述鱼类进行科学保护。

3 水生生态及鱼类保护措施

基于“生态优先”和“统筹考虑”的原则，在系统的研究梯级水库生态特点的基础上，大渡河流域以长期动态的生态监测为依托，从河流生态环境整体考虑，形成了干流上下游、支流、干支流统筹保护的格局，建立以栖息地保护为主，增殖放流、过鱼设施、增殖放流、渔政管理、生态调度、生境修复等多种保护措施为辅的综合保护体系。具体为河源区河段以栖息地保护与人工繁殖研究相结合，上游及中游河段以鱼类增殖放流和栖息地保护为主，下游深溪沟梯级以下以鱼道等过鱼通道建设为主的流域鱼类保护措施总体格局。根据这一总体保护规划，行业行政主管部门在项目环评批复中，都对各项目都提出了详细的要求。

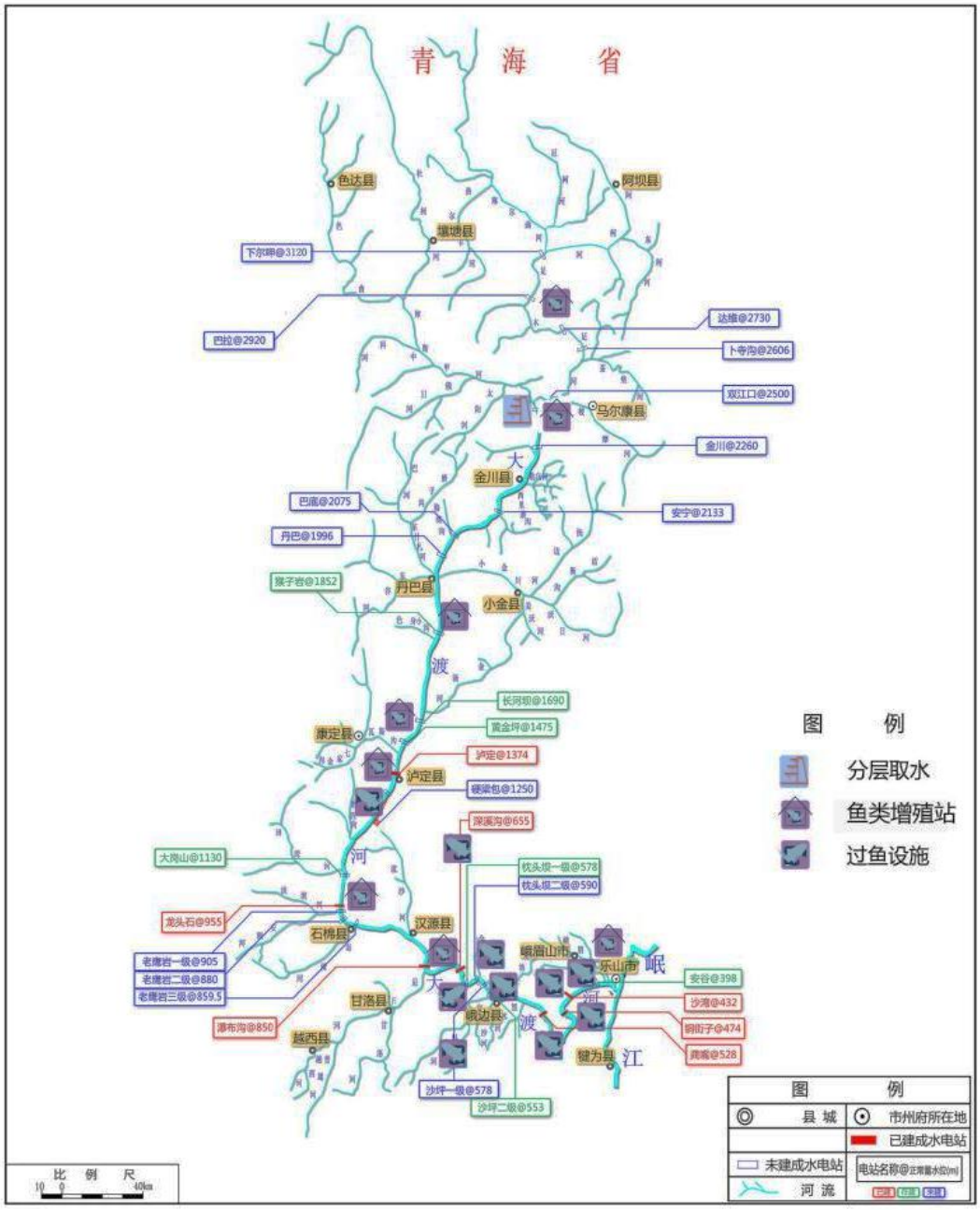


图 1　大渡河干流水电规划鱼类保护措施分布示意图

大渡河公司在水电开发中采取的主要水生生态及鱼类保护措施如下：

3.1 栖息地保护

河流鱼类栖息地不仅提供鱼类的生存空间，同时还提供满足鱼类生存、生长、繁殖的全部环境因子，如水温、地形、流速、流量、河流地貌、河床质、水质条件、饵料生物等环境要素，因此栖息地保护是鱼类资源保护最有效的措施，从流域的角度而言，栖息地保护的原则是以能够尽可能保护所有的鱼类而进行规划布局。

根据大渡河流域“二区三段”的栖息地保护规划。双江口电站以上河段鱼类种类较少，主要以川陕哲罗鲑保护为主，将其库区支流梭磨河全河段和茶堡河河口段作为鱼类栖息地保护区，拆除梭磨河松岗、热足水电站进行鱼类生境修复，在梭磨河和茶堡河河口修建 4 处总面积为 1.07 公顷的人工产卵场；金川电站将坝址至安宁库尾 13km 大渡河干流段和金川坝下支流新扎沟入大渡河汇合口以上 4km 支流河段作为鱼类栖息地进行保护并进行生境营造；瀑布沟主库区、流沙河支库及流沙河支流河段作为大渡河中游产粘沉性卵流水性鱼类栖息地保护河段；沙坪电站坝址下游至龚嘴库尾约 7km 流水河段、深溪沟至龚嘴坝址河段 6 条支流汇口、龚嘴库区主要支流龙池河和黑水河口以上各 2km 河段作为鱼类栖息地。

3.2 过鱼设施

大渡河公司涉及项目主要包括鱼道和升鱼机两种过鱼设施，目前已建成枕头坝一级和沙坪二级电站 2 座鱼道。其中枕头坝一级水电站鱼道工程是大渡河流域第一座建成投运的竖缝式鱼道工程，鱼道总长 1228.25m，净宽 2m，最大运行水头超过 30m；沙坪二级电站鱼道总长 597m，净宽 2m。待核准的金川电站鱼道为洞式+仿自然旁通道模式，总长 5.05km，其中新扎沟天然河道段鱼道长约 4.0km，人工隧洞鱼道段全长 1.05km。正在开展前期工作的老鹰岩一、二级电站、枕头坝二级和沙坪一级电站均设置了鱼道；代建的双江口电站主要由有轨道式升鱼机，由集鱼槽、地面桥梁轨道、地下隧洞滑道和库内地面滑道四部分建筑物组成。

3.3 增殖放流及鱼类科研

大渡河流域干流共计规划 9 座鱼类增殖放流站，大渡河公司共涉及 3 座，分别是瀑布沟黑马、猴子岩和双江口鱼类增殖站，主要负责承担大渡河公司 17 个开发建设项目的珍稀鱼类保护研究和增殖放流任务，放流规模达 200 万尾/年。其中，瀑布沟黑马鱼类增殖放流站主要服务瀑布沟、深溪沟、大岗山、枕头坝一二级、沙坪一二级共计 7 级电站，设计放流规模 97.3 万尾/年，截至 2019 年 7 月为止瀑布沟黑马鱼类增殖放流站共计放流 707.25 万尾；猴子岩鱼类增殖放流站主要服务于猴子岩、安宁、巴底、丹巴 4 级电站，设计放流规模 48 万尾/年，截至 2019 年 7 月为止猴子岩鱼类增殖放流站共计放流 70 万尾；双江口鱼类增殖站主要服务于双江口、金川 2 级电站，设计放流规模 42.7 万尾。

为更好的开展后续增殖放流工作，大渡河公司依托瀑布沟黑马鱼类增殖放流站开展了红唇薄鳅、大渡白甲鱼、长鳍吻鮈、侧沟爬岩鳅、青石爬鮡、川陕哲罗鲑等中长期放流要求的珍稀特有鱼类科学研究工作，其中侧沟爬岩鳅、长鳍吻鮈、红唇薄鳅、青石爬鮡等实现了野生亲鱼收集、驯养和人工繁殖技术突破；侧沟爬岩鳅驯养野生亲鱼 1000 尾，繁育幼鱼 800 余尾；青石爬鮡驯养野生亲鱼 200 余尾，繁育鱼苗 120 余尾；长鳍吻鮈驯养野生亲本 28 尾，繁育鱼苗 150 余尾；红唇薄鳅驯养野生亲鱼 15 尾，繁育鱼苗 120 余尾。侧沟爬岩鳅、长鳍吻鮈、红唇薄鳅、青石爬鮡等科研鱼类，在某些关键节点已取得技术突破，但尚未形成较为稳定的规模化生产力，还需在催产药物配置优化、水花鱼苗开口饵料选择及转食、顽固性寄生虫疾病防治等方面并进一步深化研究。

3.4 生态调度研究及生态流量

按照大渡河水电梯级生态调度是维持大渡河流生态系统的基本稳定与健康发展，保障河流各项

功能得到正常发挥，促进实现大渡河流域水资源综合利用的最大效益的总体目标要求，大渡河公司委托科研单位开展了大岗山至铜街子共 7 级电站的大渡河中下游河段生态调度研究工作。

大渡河公司已运行各梯级电站均设置生态流量泄放保障设施，并按要求将生态流量监测系统接入相关地方行政主管部门官方系统，接受监督管理。

4 结语

大渡河是长江流域岷江水系最大支流，在我国能源资源建设中具有重要的战略地位。因此，大渡河水电开发与环境保护的协调发展对于我国能源的可持续发展意义重大。本文着重介绍了大渡河公司在水电开发过程中采取的水生生态及鱼类保护措施，主要结论及建议如下：

大渡河流域共有鱼类 116 种，隶属 8 目 19 科 77 属。其中国家Ⅱ级保护鱼类两种；四川省级保护鱼类 11 种；长江上游特有鱼类 39 种。尽管大渡河流域鱼类资源丰富，但目前在大渡河流域上述鱼类野生群落均极为少见或濒临灭绝，对鱼类进行科学保护刻不容缓。

（1）大渡河流域采取的栖息地保护为主，增殖放流、过鱼设施、生态调度、生境修复等多种保护措施为辅的综合保护体系是积极有效的，最大限度地降低了由于人类过度捕捞、水质污染、水电开发等对鱼类的影响。

（2） 建议结合“河长制”的建立，加强流域综合监管，充分调动所有参与者的积极性，为大渡河流域水生生态及鱼类保护做出更大贡献。

参考文献：

[1] Bhagabati S, Kawasaki A, Babel M, et al. A Cooperative Game Analysis of Transboundary Hydropower Development in the Lower Mekong: Case of the 3S Sub-basins[J]. Water Resources Management, 2014, 28(11):3417-3437.

[2] Gelda R K, Effler S W. Simulation of Operations and Water Quality Performance of Reservoir Multilevel Intake Configurations[J]. Journal of Water Resources Planning & Management, 2007, 133(1):78-86.

[3] Yang M, Li L, Li J. Prediction of water temperature in stratified reservoir and effects on downstream irrigation area: A case study of Xiahushan reservoir[J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2012, 53-54(6):38-42.

[4] 白音包力皋, 郭军, 吴一红. 国外典型过鱼设施建设及其运行情况[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2011, 09(2):116-120.

[5] 朱江译, 贾志云校. 淡水生物多样性危机[J] . 世界自然保护联 盟通讯(IUCU)， 1999， (4) : 3-4.

大通河流域金沙峡水电站生态基流下泄方案浅析

李　勇，范仲文

（青海黄河中型水电开发有限责任公司，青海 互助 810000）

摘　要：金沙峡水电站位于大通河下游，电站位于高寒地带，为低坝引水式水电站，拦河坝从左到右依次为左岸重力坝、1 孔开敞式溢流堰、3 孔溢流表孔、1 孔泄洪冲沙闸、发电引水进水闸、右岸砂砾石坝，电站设计阶段未考虑专用生态基流下泄设施，后期电站运行过程中通过固定溢流表孔中孔弧门开度的方式向下游下泄生态基流，弧门长期局部开启运行对弧门结构产生不利影响，同时冬季弧门存在结冰现象，长期运行对弧门及附属建筑物安全运行存在影响，因此需在枢纽设置专用生态基流下泄设施。生态基流下泄方案应充分结合现有枢纽建筑物的布置及运行方式，不影响原枢纽挡水及泄水建筑物的功能和使用安全。按照“无控制，不间断、可监测”的原则进行设计，确保生态基流能够满足要求。经过对表孔溢流坝工作弧门底坎加装垫块、溢流堰开槽、溢流堰面设置虹吸管三种方案进行对比，最终决定采用溢流堰面设置虹吸管的方式实现生态基流下泄工作。

关键词：大通河流域；金沙峡水电站；生态基流；下泄方案

生态基流是维持河流生态系统运转的基本流量，是下游生态所依赖的上游河流水文基本流量，对于维持河流生态系统运转具有重要的意义。大通河流域小水电分布较多，其在弥补电力需求、促进社会经济发展等方面发挥了一定作用。同时，由于流域内大部分水电站为引水式电站，早期建设的部分电站在设计时未考虑生态基流下泄设施，只能通过局部开启泄洪弧门和溢流堰自溢等方式下泄生态基流，考虑到弧门长期局部开启运行对弧门结构产生不利影响，弧门在冬季结冰无法开启等客观因素，需设置专用的生态基流下泄设施。同时，随着经济社会的不断发展，政府对河流生态环境保护工作提出了更高的要求，生态基流泄放设施必须遵循“无控制，不间断、可监测”的要求，因此，引水式电站需结合现有的水工建筑物，采取合理的工程措施确保电站按照生态基流指标向下游下泄生态基流。

1 概述

大通河属黄河流域，地处青藏高原东北边缘，是湟水河的最大一级支流，黄河的二级支流，发源于青海省海西州木里祁连山脉东段托来南山和大通山之间的沙果林那穆吉木岭。自西北向东南流经青海省天峻、刚察、祁连、门源、互助、民和 6 县，以及甘肃省天祝、永登两县（连城、红古地区），于青海省民和县享堂镇附近汇入湟水河。干流全长 574.12km，其中青海境内河道长 464.52km，甘肃境内河道长 60.33km，总落差 2295m，大通河开发河段占干流全长比例约 43.9％。

大通河开发程度较大河段主要集中在仙米以下约 194.9km 河段，有 31 座工程集中在该河段。大通河水电工程以小型工程居多，23 座水电工程有 17 座采用引水式开发，电站运行过程中产生了减脱水问题，受建设期经济社会发展水平及有关行业标准较低等多方面因素影响，大部分水电站未设置无控制生态基流设施，仅靠闸门启闭来完成生态流量下泄，部分电站在运行过程中未严格按照环评报告要求足量下泄生态流量，造成引水河段生态流量不足。随着经济社会的不断发展，政府确立了“绿水青山就是金山银山”的执政理念，进一步加强生态文明建设工作，并对大通河流域河道生态基流保障工作提出了严格的要求，根据《关于开展中小水电生态基流保障综合整治工作的通知》（青发改能源[2017]346 号）和《关于印发“青海省主要河流生态基流流量指标分析计算报告”的通知》要求，“流域内引水式电站需新建生态基流下泄措施、固定闸门等永久性工程措施保证下泄流量，确保河道不出现减脱水段”。

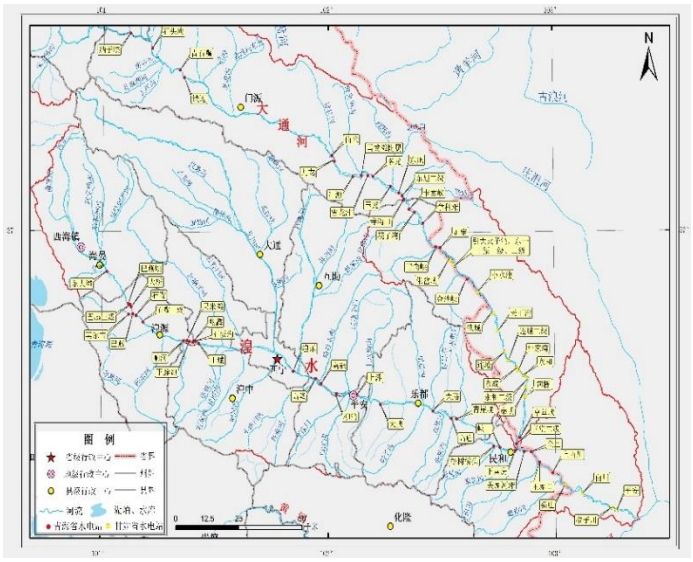


图 1 大通河干流已建、在建水电站分布示意图

2 金沙峡水电站

金沙峡水电站位于大通河下游(上游：河源～尕大滩，中游：尕大滩～连城，下游：连城～大通河口)的青海省互助土族自治县境内，地处甘青交界段（左岸为甘肃的天祝县，右岸为青海的互助县）。工程以发电为主，总装机容量 70MW。坝址以上流域面积 13328km^2，水库总库容 260 万 m^3，正常蓄水位和设计洪水位均为 2166.90m，校核洪水位 2167.90m。

枢纽工程由拦河坝、发电引水系统和发电厂房及升压站等组成，属三等中型工程，混凝土闸坝和右岸砂砾石坝为 3 级建筑物，设计洪水重现期 50 年，校核洪水重现期混凝土闸坝为 500 年、砂砾石坝为 1000 年。拦河坝从左到右依次为左岸重力坝、2 孔开敞式溢流堰、3 孔溢流表孔、1 孔泄洪冲沙闸、发电引水进水闸、右岸砂砾石坝，坝轴线呈折线型，坝顶高程 2169.20m，坝顶总长 254.92m，溢流表孔和泄洪冲砂闸均为弧形钢闸门。电站由甘肃省水利水电勘测设计研究院设计，工程于 2004 年 2 月开工，2006 年 12 月下闸蓄水，2007 年 10 月机组并网发电。

金沙峡水电站未设计、施工专用永久性生态基流设施，电站运行过程中通过固定溢流表孔中孔弧门开度的方式向下游下泄生态基流，弧门长期局部开启运行对弧门结构产生不利影响，同时电站位于高寒地区，弧门在冬季存在结冰现象，因此需在枢纽设置永久性生态基流设施。

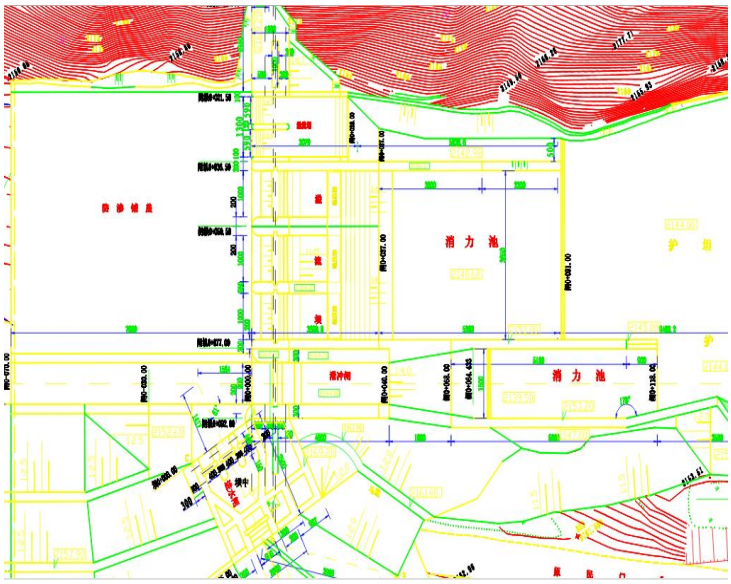


图 2　大通河金沙峡水电站枢纽布置简图

3 生态基流下泄设施布置原则

3.1 生态基流下泄设施的设计按照“无控制，不间断、可监测”的原则进行，并安装必需的监测计量设备。

3.2 生态基流下泄设施的设计应充分结合现状枢纽建筑物的布置及运行方式。

3.3 生态基流下泄设施的设计不得影响原枢纽挡水及泄水建筑物的功能和使用安全。

3.4 生态基流下泄设施的设计应充分考虑出水断面水流对下游建筑物、岸坡等的冲刷作用，设置必要的消能防冲措施。

3.5 非汛期（10 月至次年 5 月）最小生态基流下泄流量为 7.59m^3/s，汛期（6 月至 9 月）最小生态基流下泄流量为 15.18m^3/s，因此生态基流下泄设施流量需满足生态基流指标。

4 生态基流下泄设施方案对比

4.1 表孔溢流坝工作弧门底坎加装垫块

设置 7 个垫块布置在泄洪表孔中孔工作弧门底坎上，采用 δ=120mm 钢板加工而成。钢板尺寸规格 7 个 200mm×200mm×120mm。弧门底部坐落在钢垫块上，使弧门小开度放水，满足生态基流下泄过程不受人为控制的要求。

在正常蓄水位 2166.9m 工况下，下泄生态流量 9.35m^3/s，当水位下降至最低运行水位 2164.6m 时，下泄生态流量 8.06m^3/s，满足下泄生态流量≥7.59m^3/s 的要求。汛期可结合 1 孔开敞式溢流堰自流和泄洪表孔左、右孔开启方式，确保下泄生态流量≥15.18m^3/s。

该方案闸门开度小，下泄水流流速大，其缺点是对闸门底坎的磨损较为严重，为后期泄洪设施检修带来一定的困难，冬季运行期间会在弧形闸门出口及闸室内结冰；优点为在闸门底坎设置钢垫块，不影响枢纽坝体的结构安全，生态流量的下泄不受人为控制，对闸门的正常运行稳定、闸门的刚度和强度影响较小，施工简单方便、工期短，可在短时间内对闸孔底坎进行改造后即刻运行，能够在短期内实施完成后投入使用。

4.2 溢流堰开槽

溢流堰中间开一个 2m 宽，2.1m 深的泄水槽，在正常蓄水位 2166.90m 工况下，下泄生态流量 9.09m^3/s，满足下泄生态流量≥7.59m^3/s 要求。当库水位下降位时，可以通过右侧泄洪表孔液压式启闭机操作系统调整闸门开度，汛期可结合 1 孔开敞式溢流堰自流和泄洪表孔左、右孔开启方式，，确保下泄生态流量≥15.18m^3/s。

该方案改造直观，其优点是施工简单方便、工期短，可在短时间内对溢流堰混凝土进行凿除和修复处理；泄流不受人为控制。缺点是库水位变幅对生态流量影响很大，尤其是冬季库水位降低较频繁，需要时时开启泄洪表孔工作弧门来保证生态基流流量要求。

4.3 溢流堰面设置虹吸管

靠近两侧边墙处放置两根 DN1100 的虹吸管，两根虹吸管分别靠紧溢流坝的左右岸边墙布置，在虹吸管的顶部和下游弯管部位设有镇墩，两镇墩间架设管道，下部凿除坝面 30cm 厚混凝土，上部外包布置 30cm 厚混凝土，进口伸入正常蓄水位下 3m，进口下部设喇叭口，喇叭口下设拦污栅，虹吸管顶部设有真空泵，虹吸管出口镇墩处设有阀门。

单根虹吸管下泄，在正常蓄水位 2166.90m 工况下，下泄生态流量 9.61m^3/s；水位下降至死水位 2164.60m，下泄生态流量 8.07m^3/s，流量均能满足下泄生态流量≥7.59m^3/s 要求。

该方案改造直观，其优点是施工简单可靠，工期短；库水位变幅对生态流量下泄影响小。缺点：由于抽真空需要出水口阀门关闭才能实现，所以下游出水口前必须设阀门。

经方案比较讨论，溢流堰靠近泄冲闸段，堰前淤积较少，沿堰面布设倒虹吸泄流管，管道出口接消力池，具有布设简单、泄流顺畅、不需新设消能设施等优点，故本次设计采用在溢流堰面敷设

虹吸管方案。

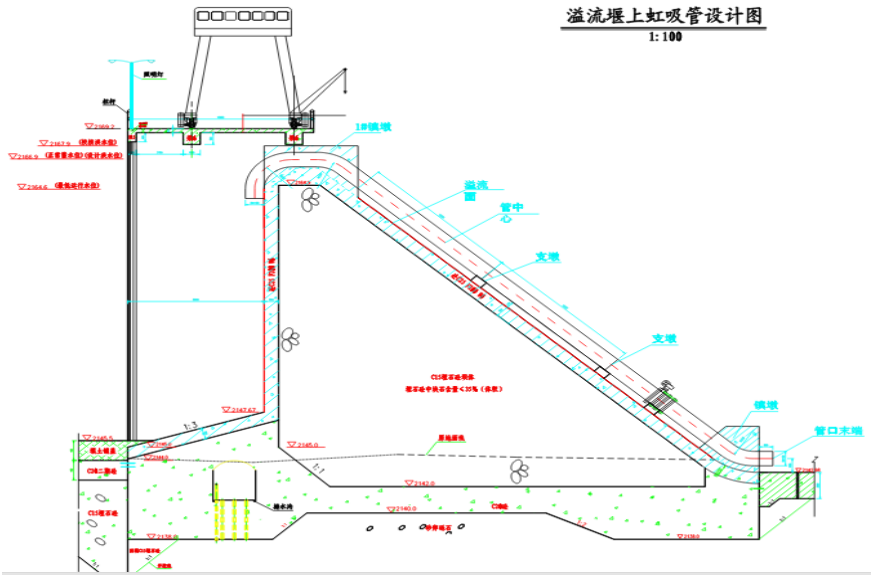
5 虹吸管下泄生态基流设计方案

5.1 工程概况

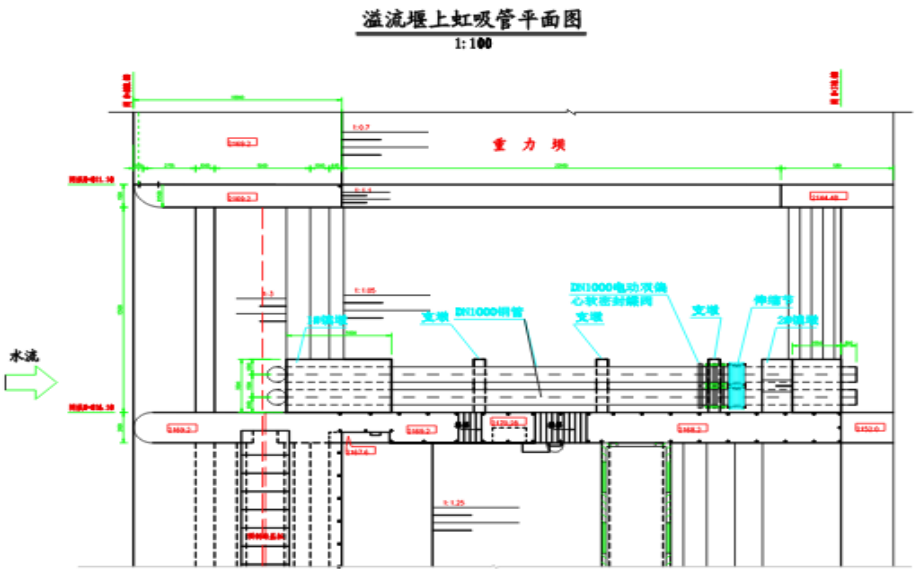
金沙峡水电站生态基流非汛期下泄流量不小于 7.59m³/s。放流设施布置于临近泄洪冲砂闸的溢流坝坝顶，对溢流坝坝顶堰面钢筋混凝土进行拆除形成临时管槽，管槽内敷设 2 根 DN1100 的虹吸钢管，单根长 32.9m。溢流堰顶及堰底各设一现浇 C25 钢筋混凝土镇墩，钢管中部设伸缩节及支墩，下部设控制蝶阀，并以真空泵辅助，利用虹吸原理将上游水流不间断的输送至下游河道，通过下游河道流量计进行实时监控，达到生态基流下泄的足额下泄和实时监控的要求。

虹吸管工作方式：通水前关闭末端 DN1100mm 电动双偏心软密封蝶阀，打开真空管道上的 DN1100mm 电动双偏心软密封蝶阀和水环真空泵，将倒虹吸管道内的空气抽空，使管道内充满水，此时完成抽真空过程。后关闭真空管道上的 DN1100mm 电动双偏心软密封蝶阀和水环真空泵，打开 DN1100mm 电动双偏心软密封蝶阀，虹吸管中形成不间断的自由出流。

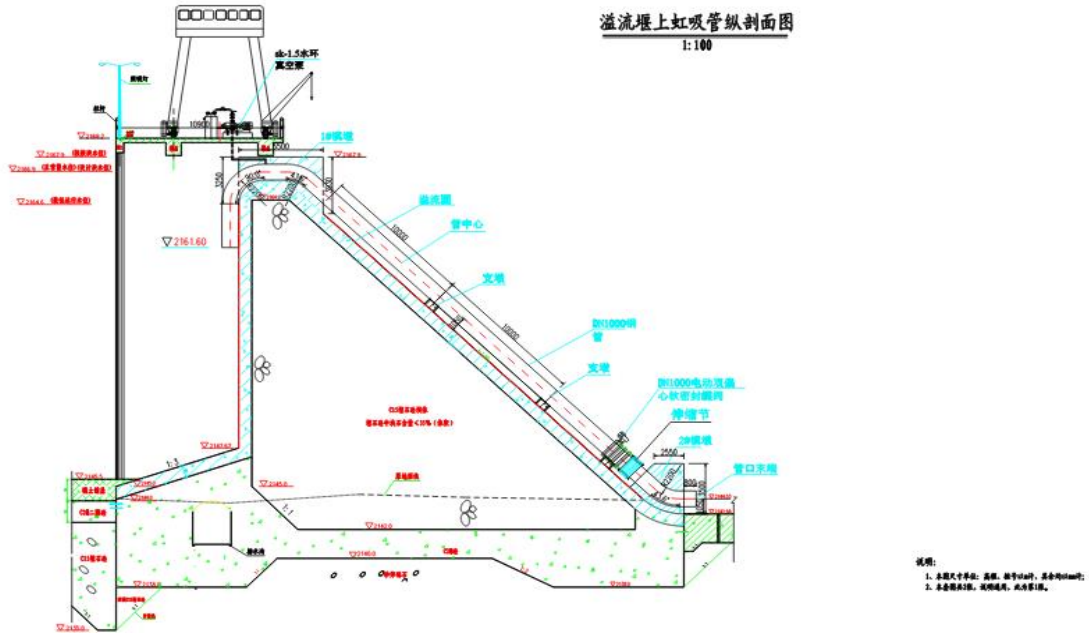
5.2 溢流堰上虹吸管设计图



5.3 溢流堰上虹吸管平面图



5.4 溢流堰上虹吸管纵剖面图



5.5 生态基流流量指标

金沙峡水电站 10 月至 5 月（次年）最小下泄生态流量为 7.59m³/s，6 月至 9 月最小下泄生态流量为 15.18m³/s。

5.6 水力计算

虹吸管水力计算依据《水力计算手册》（武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研室主编，第二版），下泄流量按恒定管流计算，公式如下：

$$Q = \mu_c A\sqrt{2gH_0}$$

$$\mu_c = \frac{1}{\sqrt{1+\lambda\frac{l}{d}+\sum\zeta}}$$

式中：μc——管道系统流量系数；

A——管道断面面积；

d——管道内径；

l——管道计算长度；

H0——包括行近流速水头的作用水头；

λ——沿程水头损失系数；

Σζ——管道计算段中各局部水头损失系数之和；

为满足生态泄流要求，计算采用最低运行水位时的最小水头。经计算，在最低运行水位 2164.60m，且下游消力池水位为 2144.18m 时，采用 2 根 DN1100 的虹吸管泄流，单根最小下泄流量可达 8.07m³/s，流速为 8.49m³/s，能够满足枯水期生态下泄不小于 7.59m³/s 的泄水流量要求，丰水期 2 根同时运行可满足生态下泄不小于 15.18m³/s 的泄水流量要求。具体计算如表 6-1 所示。

大通河金沙峡水电站虹吸管泄流计算表　　表 6-1

最低运行水位（m）	下游水位（m）	管道出口中心线高程（m）	管道直径(m)	管长（m）	沿程水头损失系数	局部水头损失系数	流量系数	流量(m³/s)	流速(m/s)
2164.60	2144.18	2144.03	1.0	41.3	0.017	3.9	0.424	8.07	8.49

5.7 主要建筑物

（1）堰顶改造：在右孔溢流堰靠近边墙处堰顶呈阶梯形拆除混凝土，阶梯最高点控制高程为2165.90m，水平拆除宽度约为3.5m，拆除后形成纵向呈阶梯形，横向呈矩形的临时管槽。

（2）镇墩设计：虹吸管道布设完毕后，分别在堰顶及堰底反弧段设现浇C25钢筋混凝土1#、2#镇墩。1#镇墩尺寸为5.0m×3.5m×2.1m（长×宽×高）；2#镇墩尺寸为5.0m×3.5m×3.5m（长×宽×高）。镇墩与堰面结合处将堰面混凝土凿毛处理并埋设直径25mm的锚筋（间距0.6m×0.6m）。

（3）支墩设计：钢管中部设3座现浇C25混凝土支墩，支墩尺寸为0.8m×3.5m×0.5m（长×宽×高）。支墩与堰面结合处将堰面混凝土凿毛处理并埋设直径25mm的锚筋（间距0.5m×0.5m）。

5.8 机电及金属结构

（1）水力机械

金沙峡水电站下游需要的生态流量为 15.18㎥/s，拟在水库溢流堰上设置两条倒虹吸泄水管，泄水管流量为7.59㎥/s，单条泄水管公称直径1.1m，倒虹吸泄水管上游进口高程2161.60米，最低运行水位2164.60米，倒虹吸泄水管下游出口高程2144.03米，泄水管流速8.49m/s。

倒虹吸管道顶部连接一条DN200mm的抽真空管道，真空管道上安装控制管道启闭的电动双偏心软密封蝶阀一台，公称直径DN200 ，公称压力PN1.0Mpa；真空管道末端接sk-1.5水环真空泵，泵最大吸气量 1.6m³/min，功率 3kw；倒虹吸管道末端设置电动双偏心软密封蝶阀一台，公称直径DN1100mm ，公称压力PN1.0Mpa，倒虹吸管道出水端安装流量计，同时将出水流量信息发送至中控室，对出水流量进行实时监测。

倒虹吸管道通水前需关闭末端 DN1100mm 电动双偏心软密封蝶阀，打开真空管道上的DN200mm 电动双偏心软密封蝶阀和水环真空泵，将倒虹吸管道内的空气抽空，使管道内充满水，此时完成抽真空过程。

关闭真空管道上的DN200mm电动双偏心软密封蝶阀和水环真空泵，打开DN1100mm电动双偏心软密封蝶阀，倒虹吸管道正常出流。

表6-2 水力机械设备的主要工程量

序号	设备名称	规格参数（mm）	单位	数量
1	电动双偏心软密封蝶阀	DN1100 PN1.0Mpa	台	2
2	电动双偏心软密封蝶阀	DN200 PN1.0Mpa	台	2
3	sk-1.5水环真空泵（含控制柜）	最大气量1.6m³/min，3kw	台	2
4	气水分离水箱	容积0.2m³	个	1
5	钢管	DN200mm	米	30
6	流量计		台	1

（2）电气设备

在枢纽电动阀附近设置枢纽电动阀PLC控制动力箱 1面，动力电源从枢纽动力配电柜备用回路引至电动阀PLC控制动力箱，电动阀的电源从电动阀PLC控制动力箱分别引接。

5.7 金属结构

根据生态用水流量的要求，共布设2根DN1100×14mm虹吸钢管，利用虹吸的原理下泄生态用水，管道沿溢流面布设，溢流堰顶和消力池设两个镇墩，中间段架空，架空段设2个支墩和一处伸缩节；为防止较大污物堵塞管道，在管道进水口设置简易钢筋网片拦污；钢管除锈等级Sa2.5级，内、外防腐均采用涂刷60μm环氧富锌底漆，80μm环氧云铁中间漆，120μm环氧面漆，与混凝土接触部分涂刷改性水泥浆临时防腐。金属结构工程量详见下表：

表 6-3 金沙峡水电站生态用水金属结构工程量表

序号	名称	型号	外径	长度	壁厚	重量	附件	备注
		DN (m)	DN (m)	（m）	（mm）	(t)	(t)	
1	虹吸管	1.10	1.2	100	14	38.12	3	材质 Q235B，含弯管总量
2	伸缩节	1.2						BY 型
说明：	压力钢管除锈等级 Sa2.5 级，防腐措施如下：1）涂刷 60μm 环氧富锌底漆，80μm 环氧云铁中间漆，120μm 环氧面漆。2）附件主要是钢管支承环。							

6 结语

金沙峡水电站为低坝引水式电站，溢流堰靠近泄冲闸段，堰前淤积较少，通过在堰面布设倒虹吸泄流管，可以有效解决电站生态基流下泄问题，倒虹吸泄流管具有布设简单、泄流顺畅、不需新设消能设施等优点，为低坝引水式电站解决生态基流下泄问题提供一定的参考。

参考文献：

[1] 青海省发展和改革委员会《关于开展中小水电生态基流保障综合整治工作的通知》（青发改能源[2017]346 号）

[2] 青海省水利厅《关于印发“青海省主要河流生态基流流量指标分析计算报告”的通知》（青水资函[2017]385 号）

[3] 青海省大通河干支流水电规划报告（青海省水利水电勘测设计研究院）

[4] 青海省大通河卡索峡、金沙峡、青岗峡水电站生态基流下泄实施方案（甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司）

[5] 水力计算手册（武汉大学水利水电学院水力学流体力学教研室主编，第二版）

[6] 金沙峡水电站工程初步设计报告（甘肃省水利水电勘测设计研究院有限责任公司）

黄登水电站分散组团安置搬迁移民实践与思考

赵　桥，杨吉宣，龚李元

（中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南　昆明　650051）

摘　要：黄登水电站在移民搬迁安置实施过程中，通过研究库区地形地貌，分析土地资源状况，结合移民生产生活习惯，提出了“大分散、小集中”移民自行组团的方式进行安置，很好的解决了人地矛盾，移民组团安置点更加完善，生活更加美好。

关键词：征地移民；安置方式；组团安置

1　前言

随着国内水电站工程建设的不断推进，建设征地移民安置工作变得越来越重要，水库移民的安置方式多种多样，不同的安置方式产生不同的社会、经济和生态效应[1]。中国水库移民安置的重点是农村移民，在当前农村劳动力职业分化加快，家庭财富和劳动力能力差距逐渐拉大，村民需求和生活方式开始出现多样化的背景下，探索科学合理的农村移民安置方式和有效途径，是库区社会、经济和生态可持续发展、移民安置后生活稳步提高的重要前提[2,3]。

黄登水电站位于澜沧江上游怒江州兰坪县和迪庆州维西县境内，地处“三江并流”腹地，两岸山高坡陡，土地资源匮乏，环境容量有限，给建设征地移民安置工作带来了很大的困难；黄登水电站涉及搬迁安置移民 2687 人，搬迁安置人口较多，加之环境容量有限，如何妥善安置移民是电站建设面临的困难之一。

黄登水电站库区山高坡陡，水库蓄水后，压缩了库周居民的生存空间，移民居住和耕种空间小，采取何种安置方式是决定移民安置成败的关键[4,5,6]。为了能最大限度的减少建设征地对移民生产生活的影响，经过多次实践总结，采用“大分散，小集中”的移民自行组团安置的方式安置搬迁移民能较好的解决人地矛盾。

2　建设征地区基本情况

黄登水电站坝址位于怒江州兰坪县营盘镇境内的澜沧江上，距离兰坪县政府驻地约 70km，距离昆明市（经云龙县）631km。电站装机容量 1900MW，正常蓄水位 1619m，正常蓄水位相应库容 $15.49\times10^{8}m^{3}$，水库回水长度约 86km，电站建设征地区规划水平年涉及搬迁安置人口 685 户 2687 人（其中兰坪县 632 户 2478 人，维西县 53 户 209 人）。

电站征地涉及区属高山峡谷地区，河谷至山顶相对高差达 3000m，河谷狭窄，呈“V”字型，两岸地形基本对称，山坡陡峻，自然坡度一般大于 45°，多陡壁。建设征地区地处云南省西北部的边远山区，涉及两县均属于少数民族聚居区，兰坪县为白族普米族自治县，维西县为傈僳族自治县。建设征地区居民以白族、傈僳族为主，占总人口比例 85%以上，其余有普米族、纳西族、藏族等 10 多个民族，各民族都有自己的民族语言和风俗习惯。

3　审定的移民安置方案

黄登水电站移民搬迁安置结合安置区移民安置环境容量分析及移民意愿调查、征求地方政府意见情况，在进行地质查勘、建设用地地质灾害危险性评估，居民点饮用水水源水质化验，现场规划调查等基础上，确定了黄登水电站两县搬迁移民安置方案。需搬迁安置的移民规划设计水平年为 685 户 2687 人，搬迁的移民规划均在本乡（镇）范围内沿江两岸安置，共设 11 个近迁集中安置点安置移民 611 户 2358 人，库周自行分散安置 74 户 329 人。11 个集中安置点均为近迁安置点，安置点规模在 42 人～627 人之间，其中兰坪县 9 个，维西县 2 个。

4 移民安置过程中遇到的困难

黄登水电站水库区移民搬迁工作从 2011 年启动，至 2013 年完成了兰坪县坝尾安置点的建设，并有 14 户 72 人搬迁入住，在实施过程中发现坝尾安置点开挖量较大，边坡高、挡墙高，虽然项目总体投资不大，但是人均投资较大，移民搬迁入住后，生产生活较未搬迁之前有诸多不便，安置效果没有达到理想状况，移民和安置区居民都有一些意见。

4.1 地形地质条件

黄登水电站建设征地区两岸高程 1950m 以上局部分布有相对缓坡，坡度一般为 15°～35°。两岸岸坡地形不完整，冲沟发育，呈沟梁相间。特殊地理地形条件造成了大规模集中安置移民需要大开大挖，需要修建高边坡、高挡墙才能安置下电站移民，造成安置点投资高，水保环保压力大，安置点形象面貌差等不利影响。

4.2 环境条件变化大

澜沧江黄登水电站河段呈现明显的“V”型，两岸高程 1950m 以上才局部分布有相对缓坡，河谷海拔较低，山顶为海拔 4000m 以上的雪山，呈现明显的立体气候。电站库区原有居民原居住地在河谷底部，光热条件较好，气温较高。规划的集中安置点大多在山顶坡度较缓的地方，海拔比原居民点高了很多，气温差距较大，习惯了在干热河谷地区生活的移民不习惯高山峡谷气候，农作物和居民点附近的果蔬也有很大的品种差异，这些都给移民的生活带来了困难。

4.3 耕种困难

采取大规模集中安置的方式安置黄登水电站移民，由于地形地质条件限制，本村组内很难有适宜的安置地点，安置点往往距离移民原有居住地较远，移民安置后，距离库周剩余耕地、园地、林地等生产资料较远，虽然上一阶段规划时尽量规避跨村组安置移民，但由于条件限制，安置后的移民发现继续耕种原有剩余土地困难较多，给移民生产生活带来诸多不便。

4.4 生活习惯有差别

居住在库区的移民和居住在高处的居民由于光热条件、耕地种类、农作物种类等不同导致他们的生产生活有着明显的差异，移民和安置区居民民族、生活习惯差异明显，将库区居民搬离他们长期居住的地方，必须适应另外一种生活方式，给他们的生活带来了一些困难。

4.5 移民接受程度低

规划的大规模集中安置移民安置点虽然在规划阶段得到了移民的认可，但在实施过程中，随着移民意愿的变化，随着已经搬迁移民示范效应的增强，越到后期，移民越不愿意大规模集中安置，对原规划的安置点抵制情绪越来越大，导致后期实施的安置点很难推动。

5 移民自行组团安置

黄登水电站水库区移民兰坪县坝尾安置点移民入住后发现诸多不便。作为水库区启动并完成的第 1 个移民安置点，示范作用明显，之后推动的很多安置点遇到了库区移民的反对，认为集中安置点距离原有居住点较远、较高，与原来的生产生活习惯等有较大差别，移民较难适应，同时距离剩余的生产资源距离较远，不方便生产。为了解决库区移民对搬迁后生产生活各类问题的担心，研究适宜黄登水电站库区情况的安置方式十分必要。

5.1 自行组团安置方式的提出

针对黄登水电站库区山高坡陡，不宜大开大挖的特点，经过与地方实施机构多次现场踏勘、会议讨论，提出一种“大分散、小集中”的安置方式，即移民自行分散组团安置方式。移民根据自身条件，自行结合村组内关系较亲近的移民，3 户、5 户或者 8 户、10 户自行在库周适宜地方自行择址建房，降低大规模移民安置对场地的要求，结合地形地势，在交通方便的区域，在自家或距离剩余土地资源较近的区域，选择工程量较小的地点自行组团建房安置。自行分散组团安置方式首先得到了移民的认同，库区移民非常乐意选择，使黄登水电站移民安置工作得到了较快的推动。

5.2 自行组团安置方式的实施

在提出“大分散、小集中”的移民自行组团安置方式之后，得到了县、州、省各级移民管理机构和电站业主的认同和肯定，认为是一种适宜黄登水电站库区特点的安置方式，能解决电站面临的移民搬迁难的问题。

2015 年开始，地方实施部门开始推广移民自行组团安置方式安置移民，在水库淹没区沿江公路沿线选取了多个大小不等的自行组团安置点，移民选择距离剩余土地资源较近，交通条件较好，“三通一平”投入不大的建房地点，根据自身财力购买面积大小不同的宅基地，自行选择建房类型和建房面积。自行组团分散安置方式受到了黄登水电站移民的欢迎，累计有约 2000 移民选择了这种安置方式，大大推动了黄登水电站移民安置进程，让一度陷入僵局的电站移民在 2016 年和 2017 年进入了搬迁建房高峰期，为电站 2017 年能按时下闸蓄水打下了基础。

5.3 自行组团安置方式的适宜性

黄登水电站实行的移民“大分散、小集中”自行组团安置方式，适宜于高山峡谷地区环境容量有限，没有条件大规模建设集中安置点的区域；也适宜于库周剩余资源较多，移民不愿远迁的地区；对于少数民族聚居区可以推广使用。

6 结论及建议

6.1 结论

黄登水电站建设征地移民安置在实施过程中，结合库区地形地貌特点，根据库区移民需求，创新性的提出“大分散、小集中”移民自行组团安置的方式安置移民，受到了移民的欢迎，很好的解决了黄登水电站移民安置难度大的问题。与黄登水电站库区情况相似的大中型水电水利工程建设征地移民安置可参考借鉴使用移民自行组团安置方式，减少移民搬迁难度，降低大规模建设移民安置点带来的环保、水保和投资压力[7,8]。

6.2 建议

提出大中型水电水利工程在集中安置移民有较大难度的情况下，可以参考黄登水电站采用移民自行组团安置的方式安置移民，可以有效的增加库周环境容量，减少集中安置大开大挖带来的各种问题，移民乐于接受。在实际推行中，应加大移民选址控制，确保移民建房地点地质稳定[9,10]。现阶段，黄登水电站移民组团安置取得了较大进展，移民搬迁和建房积极性高，但由于总体上还是移民自行“三通一平”，自行建房的模式，“三通一平”质量有进一步提高的空间，建议实施主体加大对移民水、电、路建设的监督和指导，同时加大户与户之间公共区域的公共基础设施完善工作的支持，使移民组团安置点更加完善，生活更加美好[11]。

参考文献：

[1] 苏爱华，付保红. 中国水库农村移民安置方式分析研究[J]. 云南地理环境研究，2008,20(5)：73-78.

[2] 邱正光，伍黎芝，杜金平. 三峡库区农村移民安置模式探讨[J]. 人民长江，2000,31(3)：21.

[3] 米雪燕，董鲁疆. 新疆雅玛渡水电站工程移民安置工作探索[J]. 中国水能及电气化，2010(8),26-29.

[4] 杜　波，陈永勤. 水利工程征迁移民安置影响因素分析及对策探讨［J］. 江苏水利，2010(4)42-44.

[5] 李杰富，张维平. 云南水电移民实行“长效补偿”下的移民安置规划工作探讨[J]. 云南水电技术，2009(1)：14-17.

[6] 高建国，于国兴，李书开. 库区移民安置模式比较研究[J]. 财经理论与实践，1998(3):43-461.

[7] 张朝峰，曾建生，陈永森，等. 水库移民安置与补偿分析[J]. 广西水利水电，2001(1)36-38.

[8] 张绍山，施国庆. 中国水库移民[J]. 水利水电科技进展，1998,18(1):8-12.

[9] 伍黎芝. 三峡工程农村移民安置的途径与政策建议［J］. 人口与经济，2001(2):48-51.

[10] 曾建生，陈水森，张朝峰，等. 可持续发展的水库移民安置模式研究[J]. 广西水利水电，2001(4):6-9.

[11] 朱兆才，冯俊林，谢强富，等. 大型水电工程移民安置实施规划探索与实践，云南水利发电，2006,32（11）35-36.

基于景观水保学理论的河流湿地生态修复方案研究

彭翠华，王宣入，吴文佑

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072）

摘　要：随着城市化进程和生态文明建设的加快，生态优先、绿色发展理念的贯彻，河流湿地生态系统的修复问题受到重视，以研究水土和人、社会、文化内在联系的景观水保学应运而生，并成为新形势下水土保持业务创新发展的重要理论指导。本文以某城市航电工程河流湿地为例，在景观水保学理论的指导下，运用生态修复的各项技术，使河流湿地生态系统能够重新恢复到良性循环状态，融入当地文化理念，建立起河流湿地系统的安全格局，形成安全、美丽、有文化内涵、健康的城市水土生态系统。

关键词：景观水保学；河流湿地；生态修复

1 引言

河流是生命的源泉，河流湿地生态系统是地球上水陆相互作用形成的独特生态系统，是自然界最富生物多样性的生态景观和人类最重要的生存环境之一[1]，她为人类提供淡水、食品等资源；她涵养水分、调节气候、调蓄洪水、保持水体自净；她维系水文循环，提供休憩、旅游空间以及教育和美学价值[2]。然而，由于城市不合理的开发建设导致河流湿地生态系统受到严重干扰。特别是水利水电工程建设，一方面在保障供水，发展农业灌溉和水力发电，保障防洪安全等方面发挥了巨大作用；另一方面也使江河湖泊的面貌发生了巨变。在河流上建设的水坝和各类建筑物大幅度改变了河流地貌景观和水文情势；过度的水资源开发利用，造成河流干涸、断流，对河流生态系统产生了重大影响，人类这些大规模经济生产活动对于河流湿地生态系统的干扰所造成的影响是巨大而深远的[2]。

党的十八大提出“经济建设、政治建设、文化建设、社会建设、生态文明建设五位一体的中国特色社会主义事业总布局”，充分体现了生态文明建设的重要地位。2016 年 1 月 5 日，习近平总书记在重庆召开推动长江经济带发展座谈会上提出：“推动长江经济带发展必须从中华民族长远利益考虑，走生态优先、绿色发展之路，使绿水青山产生巨大生态效益、经济效益、社会效益，使母亲河永葆生机活力。”

在此背景下，合理的规划布局水土等自然资源，依据城市自然条件，理顺城市自然肌理，维持和保护自然水土格局的连续性，保护现有河流湿地并恢复退化湿地，成为在新形势下城市水土保持的一项重要任务，景观水保学的理念也就应运而生。

2 景观水保学的内涵与运用

景观水保学研究水土和人、社会、文化内在联系的学科，以市域和乡域地表为研究对象，通过人工干预，合理梳理水、土元素的空间秩序和布局的方式，创造合理城市自然和人文基底，并协调人、社会、文化与水土之间的关系[3]。景观水保学主要目的是建立安全的城市水土生态格局，促进城市、人与自然和谐，其主要研究方向是解决水土保护、水土恢复、水土安全、水土美丽以及水土文化 5 大核心问题。在此理论的指导下，针对工程建设中受影响的城市河流湿地系统，首先需保护原生土壤资源和原生态植被，继而采用 GIS 平台分析河流湿地生态系统的生态安全格局，在此基础上，运用生态修复的各项技术，新创造、引导或加速自然演化过程，经过一定时间的恢复，使受影响河流湿地生态系统能够重新恢复到良性循环状态，并融入当地文化理念，从而建立起河流湿地系统的安全格局，形成安全、美丽、有文化内涵、健康的城市水土生态系统。

本文以某城市航电工程受影响河流湿地为例，探讨在新形势下，以景观水保学理念为指导，对该受影响河流湿地进行生态修复方案研究。

3 景观水保学理论指导下的某航电工程河流湿地生态修复方案研究

3.1 某航电工程项目概况

该航电工程以航运为主、航电结合，兼顾防洪等综合利用的工程，电站坝址控制流域面积约124686km^2，水库正常蓄水位 358m，航道及船闸等级为Ⅲ级，装机容量 360MW，为河床式航电工程，采用右船闸右厂房的布置形式。枢纽主要建筑物自左至右依次布置泄洪冲沙闸、电站厂房、船闸等组成，为减少淹没损失，在库区坝前段两岸修建防洪堤。

3.2 GIS 平台下的工程区生态安全格局分析

3.2.1 洪水生态格局分析

根据工程区洪水风频计算结果，对拟建工程河流洪水风险频率和拟建电站正常蓄水位模拟叠加，确立高、中、低不同洪水生态格局下的湿地规模和格局。

通过对天然水位及航电工程运行后水位的模拟叠加，运行后水位上涨 4～1m 不等，一些原本具有调洪功能的湿地将常年位于水下，而之前的水陆过渡带区域将成为新的重要湿地生境。根据洪水生态格局分析结果，在洪水高风频区域（五年一遇），应保护、保留自然湿地面貌，对已经被人工改造的湿地，应尽量退耕还湿，恢复为自然湿地，以此满足滞水、生物栖息等过程的需要；在洪水中风频区域（十年一遇），可保留农田，但应调整生产结构，种植耐淹、高杆作物；在洪水低风频区域（二十年一遇），应限制开发和建设规模，避免布置大中型项目。此外，在满足行洪安全的框架下，可考虑社会、文化审美需求，如建设湿地公园，开发利用湿地科普教育功能，开辟水上游览线路，结合水产养殖，开展自助捕鱼游憩活动。

3.2.2 鸟类生境适应性生态格局分析

根据工程区生态调查结果，区域湿地的变化将对涉禽类的觅食环境及栖息地产生较为明显的影响。本文对以黑颈鹤为代表的涉禽类进行栖息地适宜性分析。通过文献查阅，确定影响其栖息地适宜性的因素、分值及权重。在 GIS 中对土地利用类型图、坡度图及居民点分布图三个图层进行叠加分析，可将区域以黑颈鹤为代表的涉禽类适宜生境划分为高、中、低水平。

对于高适宜水平区（得分分值 6-10 分），建议尽量保护湿地自然状态，以地带性乡土植被为目标，从植物类型和丰富度等方面改善湿地景观功能，选择乡土湿生植物进行湿地生态修复。从生物核心栖息地构建与外围的连接廊道，为动物迁徙提供连通性良好的栖息地和廊道；中等适宜水平区（得分分值 3-6 分），改善植被群落组分结构，在关键部位种植或恢复乡土湿地植被斑块，加宽景观元素间的连接廊道，人工建设避开生态敏感区。低适宜水平区（得分分值 0-3 分），调整土地利用格局，在关键部位引入或恢复乡土湿地植被斑块，建设防护林体系，构建生物廊道系统，人工建设避开生态敏感区。

3.2.3 视觉景观格局分析

通过对场地现状踏勘分析，重点对四条廊道进行可视度分析：乌尤山环型廊道、涌斯江游憩廊道、主航道廊道、凤洲岛环岛廊道。借助 GIS 视觉分析工具，将研究范围的敏感区分为三个等级：高敏感区、中敏感区、低敏感区。经过分析发现重点视觉敏感区域包括：

乌尤山环型廊道：视觉敏感区域包括凌云山、乌尤山；

斯江游憩廊道：由于地形较为平坦，主要的视觉敏感区域为沿岸居民社区；

主航道廊道：主要的视觉敏感区域为航道两侧人口聚居片区；

凤洲岛环岛廊道：主要的视觉敏感区域为古城区、三桥及其江心岛以及该地的某世界遗产景点；

对于视觉高敏感区域应建立视觉通廊和视觉控制区，为湿地景观恢复视觉效果营造提供依据。

3.3 河流湿地生态系统生态修复方案

基于区域生态格局分析，遵循各水平区域湿地恢复建设原则及内容，提出湿地生态修复建设总

体布局为：“一环一廊两岛两区九片”。针对各区的生态格局和生态重要性，以景观水保学理论为指导，采取以下生态修复措施：

3.3.1 河道整理

工程区库尾部分河段及涌斯江部分河道，由于淤积、采砂等原因，形成堵塞和破坏，限制了河道生态功能的发挥，加之电站建设过程中弃渣、工程开挖等施工因素影响，湿地区河网系统受到影响。因此，结合航电工程建设，需对部分河道进行整理，保留河道逶迤蜿蜒的自然形态，对采砂迹地进行平整填埋，覆土并补种植物以恢复湿地植被。稳定现有岛屿形状，对较窄河道或淤积严重的区域进行清淤、疏浚，构建湿地良好的基底条件。

3.3.2 滨水植物缓冲带建设

沿河网边坡建设由乔灌草结构构成的立体植物缓冲带，确保陆地生态系统和水域生态系统的连续性。滨水植物缓冲带由近水植物——濒水植物——挺水植物——浮水植物——沉水植物过渡，植物配置采用当地耐水淹的乡土树种，配置上结合区域生物格局水平，注重动物生境的营造，考虑增加一些浆果类、可食用植物的组成，以吸引动物的定居。同时，结合芦苇、香蒲等挺水植物，以及睡莲、狐尾藻等浮水和沉水植物，强化湿地的水体净化功能、鱼类及涉禽类栖息地功能，以及游憩观赏功能等。

3.3.3 生态化护岸

护岸生态化是指要在确保护岸功能和一定防洪能力的前提下，以环境和生态保护为基础，设计上因地制宜地采用具有自然河岸特性的人工护岸，强调河道的生态、景观和亲水功能。包括通过可渗性界面，保证河岸与水体之间的水分交换和调节；使用多孔隙材料或自然材料灵活组合，增大表面糙度，形成水流的多流速变化，并形成许多鱼巢，为水生生物提供栖息、繁衍和避难的场所等，以促进人与自然的和谐发展。

工程涉及的江段河道周边分布有居住区、商业区等，部分河段物资财产和人口密集，因此护岸必须有防洪、保护人民生命财产安全的工程要求。而河流的堤岸部分是水陆交界的过渡地带，生态的边缘效应明显，因此，护岸在生态上是一个非常重要的部位，护岸的生态性对于河道生态系统非常重要。

依据工程防洪设计要求，防洪堤的设计为 20 年一遇的防洪标准，最大堤高约 18.0m。电站建成后，库区正常蓄水位 358.0m，死水位为 357.5m。江岸高耸的防洪堤将阻隔居民与河流的交流，阻碍了人们的亲水活动。通过对沿江社会形态分析，对人口密集及工业区分布河段，如老江坝段、某集团厂区段等，在不影响河道行洪安全的原则下，建议对堤顶进行滨江水景观廊道建设，设置景观木栈道，观景平台、垂钓休闲台等，利用堤后原有地形，构建滨江绿地景观廊道，有利于提升周边土地开发利用价值，为当地旅游开发创造机遇。对于其余人居稀少或无人居住区河段，可对硬质护堤进行立面装饰，可采用植物进行垂直绿化，或采用天然石材贴面、构成图案等，增加其艺术性和观赏性。为减缓河道渠化对鱼类生境产生的影响，可对河岸水位以下部分护岸，采用大块石等结构，在一定程度上构建鱼类可栖息避难的场所，丰富河道形态，有助于保护河道生物多样性。

3.3.4 沙洲及原生滩涂湿地保护

涌斯江江岸防洪堤外现存部分滩地有许多湿生植物和成年柳树，具有较高的生态价值，因电站库区形成后对涌斯江常水位无太大影响，因此，对江岸沙洲和植被以及原生滩涂湿地均应加以保护、利用，有条件的地段可补种水生植物。部分地段扩大浅水滩地，形成滞流区或人工湿地、浅滩，为鱼类和其他水生生物提供栖息地、繁育场所。

4 结语

（1）城市水土保持研究的核心问题是城市、人、水土的关系，在当前“生态文明建设”、“生态优先、绿色发展”，城市水土保持新兴业务逐渐增多的新形势下，传统的水土保持业务受到巨大的挑战，而运用景观水保学理论，将水保与景观、文化多元融合，是推动水土保持新业务，水土保持学科新发展的重要推手，也是水土保持学科发展的新方向。

（2）城市河流湿地生态系统是城市生态系统的重要组成，且担负着涵养水源、调节气候、提供休憩等重要作用。当前，人类因为工程建设等开发活动对河流湿地生态系统的干扰，已经造成了一系列的生态问题，对河流湿地生态系统的生态修复需求也日益紧迫。一时间，“河流生态修复”、“城市水环境修复”成为各大城市热点议题，在拉动内需，绿色 GDP 考核等口号下，盲目投资、规划、建设城市水生态修复工程将可能造成一系列不利后果。因此，科学认识、系统梳理城市水土关系，正确认识理解河流湿地生态修复是至关重要的问题。而景观水保学恰是研究水土和人、社会、文化内在联系的学科，如何理顺城市水土关系，让水土各安其位，合理运用植被全方位进行河流湿地生态修复正是景观水保学研究的内容之一。将景观水保学运用于城市河流湿地系统的恢复，在解决水土问题的同时，让植物和动物种群回归城市环境，为市民提供更多亲近水体和大自然的机会，从而让城市不再作为大自然的对立面，增强绿色基础设施及雨水集蓄利用系统的布局，削弱因为极端气候导致的洪灾和干旱对城市发展的负面影响。

（3）目前，由于景观水保学理论还处于尝试、发展阶段，相应的理论体系尚不十分健全，需要水保工作者在城市水土保持建设中总结、完善、补充、延伸这一理论，为水土保持事业的新发展提供强有力的支持。本工程是对新形势下，这一理论在水保新业务中的一个尝试，以期为景观水保学理论体系提供实践支撑，在今后的城市水土保持业务发展中起到抛砖引玉的作用。

参考文献：

[1] Wheeler B D. Introduction：Resto ration and wetlands[A]. In:W heeler B D, Shaw S C, Fo jt W J ,et al eds. Resto ration of TemperateW etlands[C]. Ch ichester: JohnW iley & Sons L td,1995,11-18.

[2] 董哲仁等.河流生态修复[M].中国水利水电出版社，2013.

[3] 何　昉，夏　兵，梁仕然.景观水保学——城市水土保持的理论探索[J].风景园林，2013（5）

[4] 崔保山，刘兴土. 湿地恢复研究综述[J].地球科学进展，1999.

[5] Henry C P, Amo ro s C. Resto raton eco logy of riverine wet-lands (I) :A scientific base〔J〕. EnvironmentalM anagement,1995, 19 (6) : 891～ 902.

[6] Henry C P, Amo ro s C, Giuliani Y. Resto ration eco logy ofriverine wetlands (II) : A n examp le in a fo rmer channel of the Rhone R iver〔J 〕.EnvironmentalM anagement, 1995, 19(6) : 903～ 913.

[7] 边延辉等. 洪河湿地生态修复研究.吉林大学硕士学位论文，2006

减水河段滨河景观廊道宽度的确定方法研究

吴文佑，邹兵华，蒋　红，白　霞

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司生态环保工程分公司，四川 成都 610072）

摘　要：传统的水利水电工程为我国国民经济和社会发展发挥了举足轻重的作用，但也对河流生态系统造成了一定的胁迫效应和负面影响，其中之一为引水式电站导致拦河坝下游一定长度的河段减水，导致河流景观严重退化。在修复减水河段生态景观时，滨河景观廊道的修复十分重要。然而，对于滨河景观廊道宽度的确定，目前没有形成一个完善的研究方法。本文以某河流减水河段为例，提出了以植物类型调查、植物在河滨首次出现位置的量测、多样性指数计算相结合的“植物首现宽度法”，用于确定该河段滨河景观廊道宽度。研究结果显示，该方法确定的廊道宽度较为合理，为减水河段滨河景观修复提供了依据及技术支撑。同时，该方法亦可在城市河流景观规划、生态修复、河流管理等实践中提供一定的参考。

关键词：减水河段；景观廊道宽度；无因次植物首现宽度

1 前言

河流系统是自然界最重要的生态系统之一，是人类文明的重要孕育地，也是人类生存和发展的物质基础。传统的水利工程为我国国民经济的发展发挥了举足轻重的作用，但也对河流生态系统造成了胁迫。水利水电工程的负面影响之一为引水式电站导致下游河段减水，从而不同程度地改变了生境条件，导致河流系统结构和功能的变化。

为满足景观要求，在进行减水河段景观生态修复时，需确定滨河景观廊道的范围，这个范围是指沿河流分布的不同于周遭基质的植物生长带，是衔接集水区水域陆域的界面及过渡带。它是保护河流某些重要的自然过程或人文过程所需要的基本空间，其对河流生态、河流水质、集水区保育及景观都具有相当重要的意义[1]。目前，国内对于滨河景观廊道范围的划分还没有一个成熟有效的定量的确定方法，大多以定性描述为主，鉴于此，笔者探讨并提出了“植物首现宽度法”，用于确定滨河景观廊道宽度，并据此分析提出了减水河段景观恢复方案，以期为今后减水河段滨河景观恢复工作提供一定的借鉴和参考。

2 研究方法

2.1 无因次植物首现宽度

选取 4 个减水河段断面进行现场调查，调查内容记录植物由河心向河岸第一次出现的宽度及植物种类，同时收集断面基流资料。测量方法借助镭射测距仪、卷尺等工具，以量取各植物第一次出现的宽度，同时记录该植物的种类。断面基流资料为实测收集，内容包含枯期 11 月水面宽、流量、水位、流速及断面面积等项目。无因次植物出现宽度 W=某植物出现宽度 X_i/该断面的基流宽度 B_{11}（公式 1）。其中，若 W=1 時，则表示该植物首现位置恰于基流量为 B_{11} 时的水陆交界处。

2.2 物种多样性指数

物种多样性指数是用以判断群落或生态系统的稳定性指标。在滨河生态系统中，植物群落的多样性维持了整个滨河生态系统的稳定性[2]。本文采用 Simpson 多样性指数进行滨河植物生物多样性计算，其公式如下：$D=1-\sum(Ni(Ni-1))/(N(N-1))$ （公式 2），其中 Ni 为群落中第 i 种的个体数，N 为群落中所有种的个体数。

3 运用与分析

3.1 无因次植物首现宽度

本文选择研究减水河段 JSB、FT 下段 A、B、C、D 4 个断面连续 3 年 11 月的基流宽度，见表

1；4 个断面 16 个样方植被调查所获得的植物以灌木为优势种群，有白刺花（*Sophora davidii*）、小马鞍羊蹄甲（*Bauhinia brachycarpa*）、川甘亚菊（*Ajania potaninii*）、小蓝雪花（*Ceratostigma minus*）、兰花蒿（*Caryopteris incana*）、小檗（*Beriberis spp.*）等；河漫滩草丛主要有白茅（*Imperata cylindrica (Linn.) Beauv.* ）、青蒿（*Sweet Wormwood Herb*）、金色狗尾草（*Setaria glauca (L．)Beauv*）、五节芒（*Miscanthus floridulu (Labnll.)Warb*）、细柄草（*Capillipedium parviflorum（R. Br）Stapf*）、有须芒草(*Miscanthus sinensis Anderss*) 、黄背草(*Themeda triandra*) 、羊齿天门冬(*Asparagus filicinusHam*) 、垫状卷柏(*Selaginella pulvinata*) 、异颖芨芨草(*Achnather um inaequiglume Keng*) 等作为优势种或亚优势种一起控制滨河滩地群落结构，无绝对优势的纯群落。由于岷江干旱河谷的典型气候控制，乔木较少，零星分布白杨（*Populus tomentosa Carr*）、旱柳（*Salixmatsudana*）、刺槐（*Black Locust*）等。



图 1 A 断面



图 2 B 断面



图 3 C 断面



图 4 D 断面

表 1　研究区基流宽度表

断面	年份			平均宽度
	2009 年	2010 年	2011 年	
断面 1	15.7	14.1	16.4	15.40
断面 2	13.1	11.6	14.3	13.00
断面 3	4.3	5.6	5.9	5.27
断面 4	16.1	15.2	16.8	16.03

研究将 16 个断面滨河植物依据其生活型分为一年生草本、多年生草本、灌木及乔木等类型，分别累积其种类数目，见表 2。

表 2 选取河段滨河植物调查结果

断面名称及编码		一年生草本植物	多年生草本植物	灌木	乔木
断面 1	样方 1	2	5	6	2
	样方 2	2	4	3	1
	样方 3	0	4	5	0
	样方 4	1	3	6	0
断面 2	样方 1	2	5	3	1
	样方 2	1	4	4	0
	样方 3	1	3	3	1
	样方 4	2	5	4	0

断面名称及编码		一年生草本植物	多年生草本植物	灌木	乔木
断面 3	样方 1	1	2	2	1
	样方 2	2	1	3	0
	样方 3	0	3	2	0
	样方 4	2	2	3	1
断面 4	样方 1	2	4	3	1
	样方 2	1	3	3	0
	样方 3	1	4	3	0
	样方 4	2	3	3	1

本研究将现场调查的河滨植生进行乔灌草分类，可为后期景观廊道的生态绿化复层结构设计配置提供参考。

由现场调查中已经记录的每一种植物首现位置 *Xi*，以及表 1 基流宽度 B_{11}，将其带入公式 1，即可得无因次植物首现宽度 *W*，将 *W* 与 4 个断面河滨植物的生活型关系绘制如图 5 所示。

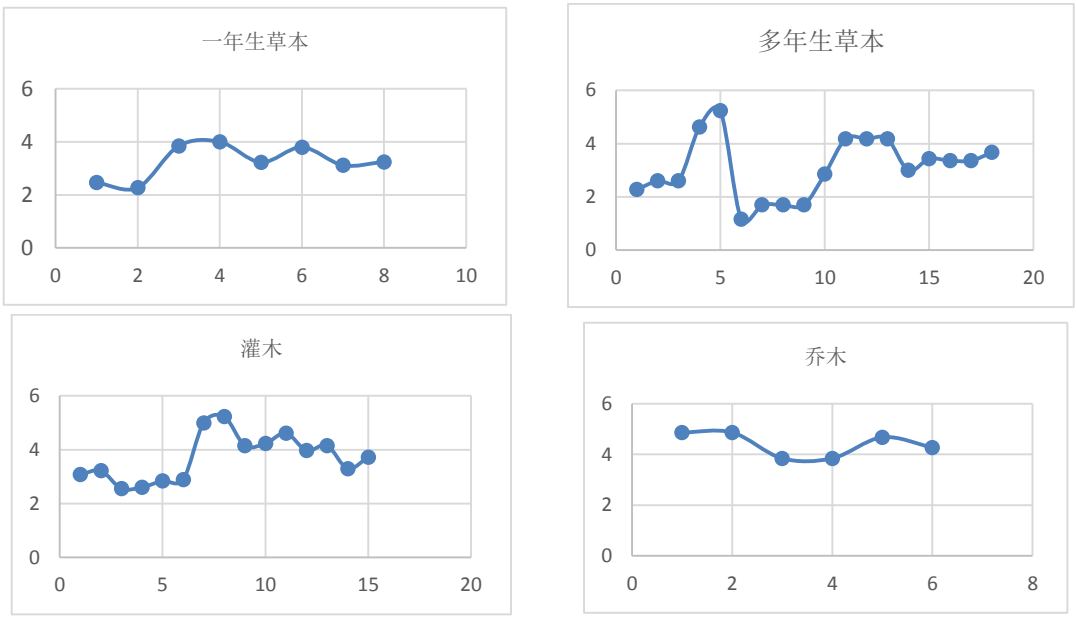


图 5 W 与河滨植生生活型关系图

根据分析结果，由河心向河岸生长的植物生活型依序为一年生草本、多年生草本、灌木及乔木，即 *W* 乔木>*W* 灌木>*W* 多年生草本>*W* 一年生草本，但各植物生活型彼此间并非完全清晰的界限，而是存有互相交叠重复的地带。以断面 1 为例，一年生草本植物生长范围在 2 至 4 倍 B_{11} 之间，多年生草本则在 2 至 5.5 之间，灌木在 2.8 至 3.9 之间，乔木则在 3.5 范围间，说明滨河廊道在 B_{11} 宽度为 3 至 4 倍时，植物的生活型最丰富，在垂直结构上更符合复层植被配置型式。此外，乔、灌普遍出现在 *W* 为 3 以上的范围，说明受洪水等干扰较少的部分更适合乔、灌这些需要较长时间成长的植物。

3.2 物种多样性指数计算

4 个断面物种多样性指数如表 3，河流 11 月基流宽度越大，物种多样性指数越高，植物种类较为丰富，而宽度越小，植物原生群落出现不同程度的退化，植物种类相对单一，物种多样性指数低。

表 3 选取河段多样性指数计算成果

河段	多样性指数
断面 1	0. 781
断面 2	0. 452
断面 3	0. 313
断面 4	0. 770

4 结语

本研究根据水文资料分析得减水河段 11 月流量宽度，并配合量测河滨植物首现位置之宽度，利用无因次的概念，将河川水文特性与河滨植物资料结合，以期提供工程与景观廊道定量确定的途径。

1）研究减水河段河滨植物经调查统计显示共 18 种植物，且均具有耐旱、耐湿、生长力强等特性。因河滨同时具有不同的湿度环境，故植被会同时出现喜干旱和喜潮湿的种类；由于滨河地带是水分梯度改变较大的环境，许多一年生草本生命周期短，只要一有合适的环境出现，即会在此地进行繁殖生长，如白茅、青蒿、金色狗尾草，故减水河段白茅、青蒿等喜湿草本迅速生长，而后一些能同时耐湿耐干的种类，如五节芒、有须芒草、白刺花等相继在滩地中生长，成为优势种群。

2）由于各减水河段生态系统中水文特性不同，本研究期望利用各生活型河滨植物首现宽度与流量宽度 B_{11} 进行无因次河滨植物首现宽度 W 值的计算，以缩小各减水河段的差异，并以 W 值作为滨河景观廊道宽度的判定依据，结果表明，为达到滨河景观廊道的复层稳定结构，滨河廊道宽度至少应大于 3 倍 B_{11} 值，即研究减水河段滨河景观廊道宽度至少应大于 48m。

3）本方法是在减水河段景观生态修复工程中的一个尝试，可为减水河段滨河景观修复提供依据及技术支撑，该方法仍需在工程实践中进行不断的充实和完善，以期在今后的城市河流景观规划、生态修复、河流管理等实践中提供一定的参考。

参考文献：

[1] 车生泉.城市绿色廊道研究.城市生态研究，2001.25（11）：44～48

[2] 夏继红，严忠民.生态河岸带综合评价理论与修复技术[M].北京：中国水利水电出版社，2009

[3] 张俊斌,梁大庆，叶旭容，杨敬戎，黄朝庆. 台湾河川水利生态工程之植生特性与分析.水土保持研究，2005.12（4）:153-158

高坝过鱼设施集诱鱼流态与鱼类生态行为响应研究

刘小帆，安瑞冬

（四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘 要：高坝集中位于高山峡谷区不适合修建鱼道，因此作为过鱼设施的集运鱼系统将发挥巨大作用，集鱼进口位置的选择和顺利引导鱼类进入集运鱼系统是其成功的关键。本文以世界在建第一大白鹤滩水电站为研究工程，选取圆口铜鱼与长鳍吻鮈作为研究的目标鱼类；通过 RNG k-ε 紊流模型和 VOF 自由液面处理的三维紊流数值模拟来研究不同工况下的坝下流场，并且通过物理模型试验验证数值模拟结果的合理性；运用集诱鱼流态水力学特性（流速、紊动能、水深和流速梯度）多指标分析预测目标鱼类上溯轨迹和集群分布，并根据预测结果指导集运鱼进口位置的布置。本文研究结果表明各个工况坝下均有 2~3 条预测上溯轨迹，均能顺利洄游到坝前一定位置，并且在坝下左右岸均存在大量鱼类喜好区；并且给出了三个集鱼进口位置的建议，分别为 X＝1200m 处下游河道左岸、X＝1600m 处下游河道右岸及 X＝1800m 左岸，进口附近水域均为鱼类集群适宜区域，并建议将集鱼平台布置在其附近流速喜好区内。本文研究对鱼类上溯轨迹预测及集鱼进口设计有重要的参考意义，有助于解决我国中高水头过鱼问题。

绿色发展理念下 300m 级特高堆石坝工程建设期生态保护浅析

彭旭初，谢祥兵，段　斌，张蜀豫

（国家能源集团大渡河流域水电开发有限公司，四川 成都　610041）

摘　要：随着党和国家生态文明建设实践不断深化，绿色发展已成为社会各界共识。本文基于绿色发展理念核心要义，结合双江口水电站 300m 级特高堆石坝建设特点和实际情况，探索大型水电工程环境保护管理实践经验，提出水电工程施工期环境保护管理工作建议，为同期及后续水电工程环境保护管理提供参考和借鉴。

关键词：绿色发展；双江口；水电工程；施工期；生态保护

1　前言

2015 年，党的十八届五中全会提出绿色发展理念，指出绿色发展就是要解决好人与自然和谐共生问题，并把绿色发展作为指导未来我国经济与社会发展的五大理念之一。水电工程做为国家重要基础设施建设项目，建设周期长、占地面积大，造成的生态环境影响不容忽视[1]。目前我国水电开发已逐步向生态脆弱区域和环境敏感区发展，如何在水电工程开发建设过程中，以绿色发展理念为指导，协调解决好水电开发与河流生态保护之间的关系，实现经济效益和生态效益的有机统一，日益成为我国水电工程建设管理研究的新方向。

在水电工程施工期是水电工程建设活动对环境影响的直接影响期，也是落实各项环境保护措施的关键时期。良效的环境保护管理是实现水电工程绿色发展目标的关键因素和重要基础。本文介绍了双江口水电站施工期环境保护管理重点内容和主要环境保护措施，探讨了绿色发展理念下水电工程施工期环境保护管理实践经验和问题思考。

2　工程简介

双江口水电站是大渡河水电规划“3 库 22 级”开发方案的第 5 级，是大渡河干流上游控制性水库，位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康市、金川县境内，开发任务以发电为主，兼顾防洪（见图 1）。电站装机容量 200 万 kW，多年平均年发电量 77 亿 kW·h。水库正常蓄水位高程 2500m，总库容为 28.97 亿 m^3，调节库容 19.17 亿米，具有年调节能力。电站枢纽工程由拦河大坝、引水发电系统、泄洪建筑物等组成。拦河大坝采用土质心墙堆石坝，最大坝高 312m，是目前世界已建和在建水电工程中的第一高坝。



图 1　双江口水电站效果图

双江口水电站枢纽工程建设环境保护工作具有以下特点：

2.1 环境敏感对象众多

双江口水电站工程位于川西高原的高山峡谷森林生态保育区范围内，所属河段地表水水域功能为Ⅱ类。工程建设涉及国家Ⅰ级重点保护野生植物红豆杉、国家Ⅱ级重点保护野生植物岷江柏、濒危植物四川牡丹及国家Ⅱ级重点保护鱼类川陕哲罗鲑等众多环境敏感对象。

2.2 环保措施系统全面

双江口水电站工程建设除采取常规的环境污染防治措施外，还涉及陆生生态、水生生态及水环境保护等生态环境保护内容，包括鱼类增殖放流、过鱼设施、栖息地保护、珍稀植物园、种质资源库、人工产卵场、低温水缓解、生态流量下泄等多项环境保护专项措施。在我国以及世界水电工程项目中，双江口水电站工程建设采取的环境保护措施系统全面，具有显著的典型性和代表性。

2.3 环保科研项目众多

双江口水电站工程涉及陆生生态和水生生态保护、生态修复等众多科学技术研究，包括分层取水技术、诱鱼与集鱼技术、鱼类栖息地保护、珍稀特有鱼类人工繁殖驯养、生态调度、高寒地区植被恢复与水土保持等关键技术攻关及其运行效果的跟踪调查研究。我国水电发展“十三五”规划明确[2]，“要依托双江口水电站等典型工程，系统开展生态环境保护科学研究，不断提高水电环境保护技术可行性、有效性和经济性，为建设环境友好型水电工程提供技术支持”。

3 双江口水电站枢纽工程环境保护管理实践

3.1 双江口水电站枢纽工程绿色发展基本规划

双江口水电站枢纽工程在建设初期便提出了“安全、绿色、创新、和谐、高效”的总体工作目标，提出以绿色发展理念为指引，以“工程建设必须与生态环境保护相协调”为基本准则，在降低工程建设过程中资源耗损的同时，将水电工程对生态环境负面影响降低到最低程度，实现水电工程更加良好的环境保护效果，实现水电开发与环境保护的和谐统一。在环评阶段，双江口水电站便提出了详细的环境保护和水土保持控制指标体系，明确了施工期环境保护管控目标。在工程施工阶段，双江口水电站在环境保护和水土保持“三同时”实施方案的基础上，率先在行业内编制了环境保护典范工程规划，明确了环境保护管控重点及标准要求，将绿色发展理念细化到工程建设管理的各项关键环节。双江口水电站工程绿色发展目标：

1.坚持绿色水电开发理念，使得水电开发与环境保护协调友好。在注重生态优先，协调发展的基础上更有效地进行水电开发，更加注重工程建设与当地环境的和谐，更加注重资源投入和科技攻关，更加注重建设绿色水电工程，为开发好双江口水电站水能资源，促进地方经济社会发展、保护川西北环境做出积极贡献。

2.积极创建环保典范工程，引领绿色水电建设新方向。双江口水电站从“理念新、体系新、手段新、成果新”四个方面着手编制双江口水电站环保典范工程创建规划，将重点从“环水保理念、管理机制、工程措施、智能监控、科研创新、企地合作”6 大方面，开展精细化、智能化管理，进一步提升环保水保形象面貌和环水保措施效果，重点打造双江口水电站环保水保工程亮点和示范工程，树立我国绿色水电建设新标杆。

3.2 双江口水电站枢纽工程环境保护管理机制

双江口水电站枢纽工程施工期建立健全了环保水保管理体系，以有效规范并推动现场环保保护管理工作实施。国电大渡河公司流域水电开发有限公司在双江口水电站枢纽工程建设管理过程中，落实了“管业务必须管环保水保”、“管工程必须管环保水保”的“一岗双责、党政同责”工作要

求；创新了双江口水电站枢纽工程环保水保管理机制，形成以分管领导统管、业务保障部归口管理、各建管中心负责具体实施的环保水保总体管理体系，印发了环保水保管理办法、违约考核实施细则、约谈实施细则、信息资料管理实施细则、固体废弃物管理实施细则及废油暂存管理标准等 6 项环保水保相关管理制度和技术标准，实施了“环保水保监理+工程建设监理”的双监理制管理模式，形成了“八位一体”环保水保管理体系，建立了环保水保监测（调查）专业技术服务机构，与工程监理合力形成“双监理制”，系统强化现场管控及整改落实力度。

1.双监理制管理模式实现环保水保分级管控和精细化管理。环保水保监理负责进行专业化、集中管控，重点管控涉及法律法规、管理程序、地方督查、专项工程、阶段验收等关键环节，确保工程建设不触碰法律红线、依法合规推进；工程建设监理负责按照合同文件，监督各承包人落实环保水保主体责任，切实落实“三同时”制度要求，确保各项环保水保措施按规定实施到位，提升分公司环保水保管理制度及标准要求的执行力。

2.开创“八位一体”全方位环保水保管理体系。“八位一体”环保水保管理体系包括建设单位、设计单位、监理单位、施工单位、监测服务单位、运行管理单位、科研咨询单位、地方行政主管部门在内的环保水保管理体系。工程各参建单位成立专门机构、安排专人负责环保水保工作，实现环保水保工作从统筹安排、方案设计、措施落实到过程监管及效果验证等全过程、全方位管理，确保环保水保工作有人抓、有人管、有人做，并通过科研咨询单位的技术咨询指导及与地方行政主管部门形成的“企地共创”机制。双江口水电站“八位一体”环保水保管理体系示意图见图 2。

3.建立了环保水保监测（调查）专业技术服务机构。双江口水电站枢纽工程已招标引入水土保持监测、环境监测、水生生态调查、陆生生态调查单位，为双江口水电站枢纽工程环保水保专业化管理和环境保护措施效果评价提供了技术支撑。

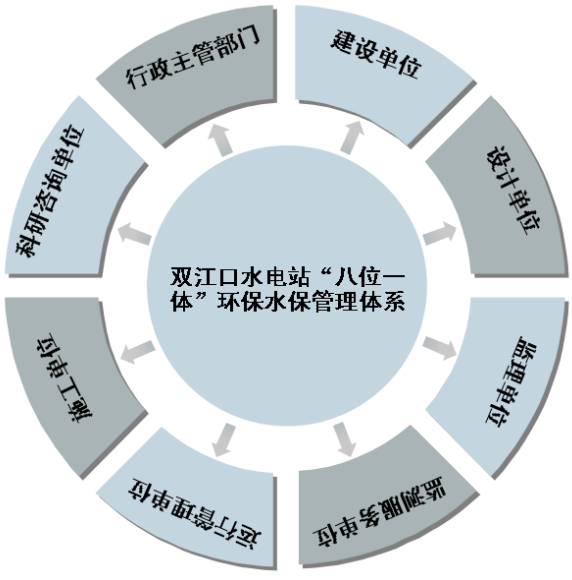


图 2　双江口水电站枢纽工程环保水保管理体系示意图

3.3　双江口水电站枢纽工程环境保护主要创新措施

基于绿色发展理念，双江口水电站枢纽工程环境保护工作除了常规的施工期环境保护措施外，重点从创新环境保护措施和推进绿色低碳工程建设两个方面，在进一步降低工程建设资源消耗同时，尽量减少工程建设对生态环境的影响。

1.“智慧工程”创新应用。双江口水电站智慧工程建设及应用，基于涂扬举等人从企业管理的角度提出的智慧企业理论及其结合水电企业的特点提出的智慧工程“业务单元”智慧企业建设方法

[3-6]。双江口水电站智慧工程是以全生命周期管理、全方位风险预判、全要素智能调控为目标，将信息技术与工程管理深度融合，通过打造工程数据中心、工程管控平台和决策指挥平台，实现以数据驱动的自动感知、自动预判、自主决策的柔性组织形态和新型工程管理模式。智慧工程的创新应用，能够实现工程建设智能化管理，提升土料及石料开采、运输精细化管理水平，大幅降低工程建设所需的人力资源投入和资源消耗，减少工程对生态环境的影响。

2.珍稀植物园建设及珍稀植物保护。为进一步落实红豆杉、岷江柏等珍稀植物保护措施，双江口水电站正设计建设大渡河流域首个珍稀植物园，也是国内首个高原高寒地区珍稀植物园。在珍稀植物园内将开展珍稀植物移栽、人工繁育和种质保存等相关科研工作。同时，双江口水电站工程建设单位将联合地方政府，将珍稀植物园打造为川西北地区生态环境保护教育基地，系统宣传生态保护和珍稀植物保护知识。

3.鱼类增殖站与鱼类栖息地保护。双江口水电站除建设鱼类增殖站开展大渡河流域珍稀鱼类繁育技术研究和鱼类增殖放流以保持流域鱼类多样性外，还开展了集鱼与过鱼设施相关科研设计工作，以保证大坝上下游鱼类基因资源有效交流。双江口水电站将开展鱼类栖息地保护及生境修复工作，将拆除大渡河支流梭磨河上 2 座水电站进河道生境修复，划定大渡河支流茶堡河进行鱼类栖息地保护，增强保护河段的自然属性，在生境修复技术研究成果基础上设计建设人工产卵场，以提升野生鱼类自我修复能力。

4.积极推进节能减排技术应用。双江口水电站工程在大坝填筑和地下洞室开挖工程中，约 1/3 的运输车辆将采用 LNG(液化天然气)汽车，在减少燃料消耗成本的同时大幅减少汽车尾气排放。在双江口水电站枢纽工程建设过程中，严格落实污水处理“零排放”要求，推广新型节水设备，要求中水回用，所有生活、生产废水经处理后回用，不直接向自然水体排放。

4 实践经验及工作思考

4.1 双江口电站枢纽工程环境保护管理主要措施

1.提升法律意识，慎重审批合同外新增渣场及施工场地。严格遵守环境保护与水土保持相关法律法规，严控环境保护范围，对照《双江口水电站水土保持方案》用地规划，慎重审批超出水保方案及招标文件约定的用地申请，禁止新增渣场、渣料转存场及其它超出水保方案或施工规划的施工场地。涉及水保方案变更的新增渣场或施工场地，须提前履行水保变更程序，按批准的水土保持变更方案落实相应的防治措施。

2.提升合同意识，严格执行合同文件环保水保相关条款。注意督促工程监理单位组织本单位开展招标文件专用技术条款“环境保护和水土保持”相关内容的培训学习并做好培训记录，确保招标文件或合同条款环保水保相关要求在日常监理工作中予以有效执行。要求各监理单位督促承包人开展招标文件专用技术条款“环境保护和水土保持”相关内容专项学习培训，监督、指导承包人严格按照合同约定开展环保水保工作，并重点落实好招标文件专用技术条款要求的环保水保实施方案和环境事件应急预案的报批。

3.落实环保费用，做好环保水保工程量统计及费用结算。督促各监理单位切实做好环保水保总价项目费用分解细化的审查工作，严格现场环保水保措施、设施的计量签证、现场验收与合同结算程序，据实结算环保水保费用并建立独立的环保水保计量签证与费用结算台账。

4.注重闭环管理，严格落实环保水保问题整改闭合。督促各监理单位按照双江口水电站枢纽工程环境保护与水土保持工作管理办法要求，落实监理单位环保水保工作职责，强化现场巡查，对于

现场巡查发现或者环保水保监理转达的环保水保相关问题，及时下发监理整改通知并督促承包人落实问题整改闭合，不断提升现场环保水保工程形象。

5.建立健全环保水保专项措施运行管理制度及维护运行台账。为体现环境管理“全生命周期”的特点并为后续环境保护和水土保持“自验收”做好准备，将环保水保专项措施的运行维护管理与工程建设放在同等重要的位置，做到“专业维护、有章可循、按章操作、问题可溯”。

4.2 水电工程施工期环境保护工作思考

随着国家各项环保水保法律法规的施行，水电工程项目前期环境影响评价不全面、招标阶段环保水保设计深度不够、施工期环境保护控制标准模糊等问题，对水电工程施工期环境保护工作的有效落实和环保水保措施效果的有效发挥造成一定影响。在后续水电工程建设过程中，建议对以下环节进行重点管控化。

1.加强项目环境保护评价工作深度，特别是保护措施设计深度。水电工程项目环境影响评价及其批复文件是工程施工期环境保护管理的重要依据，环评文件中规划、设计的各项环境保护具体措施是工程实施阶段环境保护管理直接依据。在国家简政放权的要求下，后续水电工程项目可以在工程开工前完成才环评报批手续，而工程开工后一般直接进入了施工阶段。在施工图阶段环境保护设计工作未能有效、及时衔接的情况下，工期前期编制的环评文件对施工期环保措施的有效落实有着更加重要的指导意义。因此，建议在新的水电工程建设管理要求下，充分利用工程前期论证时间，加强项目环境影响评价报告和环境保护措施设计深度，确保水电工程施工期环保“三同时”制度的有效执行。

2.招标阶段注重环境保护总体设计，保证环境保护费用投入。为提升工程施工期环境保护措施落实力度，水电工程在招标阶段宜在环评报告的基础上，进一步开展施工期环境保护总体设计方案，并从水生陆生动植物保护、水污染防治、环境空气保护、声环境保护、固体废弃物等方面，进一步细化保护措施、处理工艺和控制标准要求。同时，总体设计宜进一步细化环境保护和水土保持费用概算项目，细化各项环保措施费用测算。土建及机电工程项目招标文件编制过程中，宜完善环保水保工程计量、支付条款说明，具备单独出项条件的环保项目尽量单独列支，减少环保水保总价项目数量。

3.积极推进“四新”技术应用，积极探索“智慧环保”管理。水电工程施工期环境保护的主要工作目标是减少工程建设对生态环境的影响。除了常规的环保水保管控措施外，后续水电工程应积极推进“四新”技术应用，降低工程建设资源消耗和对生态环境的影响。在工程措施方面，如采用砂石系统“湿法”生产工艺降低粉尘污染，采用纳米喷射混凝土降低地下洞室支护过程中环境空气污染，采用生产生活废水处理及回收利用的节能减排技术降低水资源消耗等新技术应用，可从根本上降低水电工程建设对环境的影响。在环境保护管理措施方面，可借鉴智慧工程管理实践成果，探索“智慧环保”管理，使环境保护智慧管控系统成为精简人员配置、提高工作效率、多元化成果展示的科技创新手段，提升水电工程施工期环境保护管理力度和精细化、智能化水平，助力实现绿色水电工程创建的愿景目标。

5 结语

在国家生态环保监督管理体系逐步完善、环境保护要求标准不断提高的形势下，水电开发须更加重视践行绿色发展理念，做好绿色发展与水电工程建设深度融合，不断探索完善水电工程施工期环境保护管理的有效实践，减少水电工程施工对生态环境的影响，体现水电做为可再生清洁能源的典型特点。双江口水电站工程环境保护工作在我国水电工程建设中具有一定典型性，其枢纽工程施

工期环境保护管理的探索及实践对新形势下的大型水电工程施工期环境保护管理工作有一定示范引领效用。

参考文献：

[1] 杜国松.水电工程建设中环境问题的解决措施[J].2011（8）:206-209.
[2] 水电发展“十三五”规划.国家能源局.2016.
[3] 涂扬举， 郑小华， 何仲辉等. 智慧企业框架与实践[M]. 北京:经济日报出版社， 2016.
[4] 涂扬举.建设智慧企业，实现自动管理[J].清华管理评论，2016(10) :29-37.
[5] 涂扬举.水电企业如何建设智慧企业[J].能源，2016 (8) :96-97.
[6] 涂扬举.智慧企业建设引领水电企业创新发展[J].企业文明，2017(1) :9-11.
[7] 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司.四川省大渡河双江口水电站环境影响报告书[R].成都：中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，2013.
[8] 四川省大渡河双江口水电站环保典范工程创建规划[R].成都：中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，2017.

绿色小水电生态环境保护措施研究

宋超山， 王 倩， 牛 乐

（中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘 要：近年来，小水电无序过度开发，生态影响突出，已成为生态环境保护主要问题之一。2018 年 6 月，中共中央和国务院颁布《关于全面加强生态环境保护，坚决打好污染防治攻坚战的意见》， 提出要“打好长江保护修复攻坚战”。为此，要找准带小水电问题的病因，推动小水电的绿色发展。

关键词：绿色小水电；河道连通；生态流量

小水电一般分布在支流，普遍缺乏河流规划依据，各地小水电在发展过程中出现了无序竞争、遍地开花的问题，导致天然河流所剩无几，河流生境高度破碎化，河道在枯水期减脱水严重。2015 年环保部联合 9 部委印发的《关于进一步加强涉及自然保护区开发建设活动监督管理的通知》中明确要求对自然保护区设立之前已存在的合法取水权要逐步退出，但部分地区仍为自然保护区内小水电增效扩容创造条件，不退反扩。无规划、无审批核准、无环评的小水电较普遍。有关部门数据显示，约占 60%水电没有依法履行手续。近年来，部分小水电项目实施了增效扩容改造，多数也未依法开展环境影响评价。

由于建设年代不同，小水电企业落实生态环境保护责任不到位，85%的项目未采取鱼类保护措施，约 40%以上的项目未建设生态流量下泄措施。相关部门在日常监管中，由于监管力量不足等原因，监管流于形式，难以形成有效监管。开发与保护的部分政策相互冲突，未形成推进生态环境保护的小水电管理政策体系。导致坝下河段水量显著减小，甚至出现干涸；部分地区开发程度高，首尾相接，整条河流已难觅流水生境，河流生态功能完全丧失；二是挤占鱼类生境，鱼类种类和资源减少。小电站建设改变河流水文情势，闸坝阻隔鱼类洄游，鱼类生存空间大幅压缩，鱼类生物多样性急剧下降。

1 小水电环境整治的由来和依据

2016 年，水利部发布《水利部关于推进绿色小水电发展的指导意见》（水电 [2016]441 号）其后水利部水电局主持、国际小水电中心主编《绿色小水电评价标准》（SL752-2017）2017 年 8 月正式实施，对实现绿色小水电提出明确标准，推进绿色小水电建设。

2017 年 10 月，国务院总理李克强签署第 687 号中华人民共和国国务院令，对《中华人民共和国自然保护区条例》进行了修改， 第三十二条：在自然保护区的核心区和缓冲区内，不得建设任何生产设施。

2018 年 12 月，水利部等四部委《关于开展长江经济带小水电清理整改工作的意见》提出共抓大保护、不搞大开发，正确把握生态环境保护、经济社会发展、社会稳定之间的关系，切实纠正小水电开发中存在的生态环境突出问题，保护和修复河流生态系统，促进小水电走出绿色发展的路子。

2 小水电环境整治切入点及相应措施

综合绿色小水电评价标准和电站对生态环境造成的影响因素，建议应从保障生态流量、栖息地保护、河道连通、生境修复、增殖放流等方面着手分析，对造成的影响采取相对应的改造方案或补偿措施。

2.1 保障生态流量

小水电工程多为引水式开发，在设计过程中未考虑生态用水在运行和管理中没有考虑维护河流健康所需的生态基流，从而往往在坝址和发电厂房区间产生减脱水河段，河流水流连续性及纵向连通性遭到破坏，进而对河流生态系统及其相邻河岸带的生态系统产生了严重胁迫效应，河流水文、

地貌形态、生物栖息地等发生较大改变，河流廊道生态功能严重退化， 生物多样性面临严重威胁。

根据水利部水利水电规划设计总院下发的《水利工程规划设计生态指标体系与应用指导意见》（水总环移[2010]248 号）中提出：对北方地区，生态基流应该分非汛期和汛期两个水期分别确定，汛期一般在 5～10 月，非汛期在 11～4 月。一般情况下，非汛期生态基流应不低于多年平均天然径流量的 10%；汛期生态基流可按多年平均天然径流量的 20-30%。

已建小水电泄放生态流量可通过在排水闸设置限位垫板、焊封启闭机螺杆等方式泄放生态流量，并且在生态流量泄放设施的泄放口或坝下断面设置流量在线监测系统，及时掌握泄放流量，为进一步优化下泄生态流量提供依据。

2.2 栖息地保护

对流域内鱼类重要生境设置为鱼类栖息地进行保护。在栖息地保护区域内实施全年禁渔、禁止采砂。禁渔区沿线设立禁渔禁采标志牌、宣传栏，同时加强栖息地保护区域内的渔政监管和巡查。定期开展栖息地保护及鱼类资源保护宣传。宣传方式为每年集中春、秋两个时段以会议、广播、宣传栏、宣传单、宣传车等方式集中宣传。宣传内容包括：栖息地保护的目的和意义；禁渔区域范围；违反禁渔要求后需承担的责任等。结合流域水生生态监测，对栖息地保护区域内鱼类种群资源实施常规监测，为鱼类资源保护措施的制定和保护效果的评估提供科学依据。

2.3 河道连通

流域梯级电站建成后，原有连续的河流生态系统被分割成不连续的环境单元，不仅阻隔了洄游鱼类的通道，对半洄游性鱼类和非洄游性鱼类也有很强的阻隔效应。有研究表明，由于大坝的阻隔，完整的河流环境被分割成不同的片段，鱼类生境的片段化和破碎化导致形成大小不同的异质种群，种群间基因不能交流，使各个种群将受到不同程度的影响。种群数量较大的鱼类，群体间将出现遗传分化；种群数量较少的物种将逐步丧失遗传多样性，危及物种长期生存，导致种群灭绝的概率增加。

目前，在国内针对小水电站采取了鱼堰的方式实现河道连通，并且取得了较好的河道连通效果。



图 1 国内已建成的溢流坝过鱼堰

2.4 生境修复

减水河段由于流量减小，导致河道水深较浅，鱼类在枯水季节、灌溉季节通过该河段存在一定的困难。减水河段生境修复的措施有河滩修复、河道疏槽等措施促进生境修复。

（1）采用生态堤岸进行河滩的保护与修复。生态堤岸采用植物护岸以及天然石材、木材护底，以增强堤岸抗洪能力，如在坡脚采用石笼、木桩或浆砌石块（设有鱼巢）等护底，或者在护岸植被成型以前，利用自然可降解材料护岸，保证植物在长成前不受水流侵蚀。自然型堤岸工程设计一般都较为隐蔽，或在水下，或埋于种植土中，表面和自然原型堤岸无很大差别，其上筑有一定坡度的土堤，斜坡种植植被，实行乔灌草相结合，固堤护岸，达到恢复鱼类栖息地的目的。

（2）减水河段疏槽

减水河段由于河道水面率较宽，而水深较浅，鱼类在枯水季节、灌溉季节通过该河段存在一定的困难，根据《水电水利建设项目河道生态用水、低温水和过鱼设施环境影响评价技术指南（试行）》上推荐的水力生境参数标准，鱼类适宜生境下河道最小水深应超过鱼类体长的 2~3 倍。在减水河段疏槽时，需要结合减水河段天然河床特点，考虑常枯水流量条件下的断面水深要求，在尽可能保留河床横断面原始形态的前提下进行主槽塑造。在河流横断面上进行深挖形成深槽，构建复式断面，深槽内将具有足够的水深，使鱼类可以在减水河段的栖息地内生存，有洄游需求的鱼类可以顺利通过减水河段。

2.5 鱼类增殖放流

水电开发水文情势变化，将引起库区鱼类种类组成发生演变。库区江段原来适应于底栖急流、砾石、洞穴、岩石等底质环境产粘沉性卵的鱼类，将逐渐移向干流库尾及水库各支流的流水河段，在库区种群数量将有所下降。

引水式电站开发后，坝下必然有一段长度不等的减水河段，将对栖息在减水河段内的水生生物带来一定不利影响，尤其是鱼类活动影响较大。原分布在这些减水河段鱼类的种类和数量均将受到较大限制。

因此，需要统筹考虑在流域实施增殖放流措施。鱼类增殖放流站布局可选在交通、电力等较方便，水质较好的河段；放流河段选择在鱼类栖息地保护河段或生境较好的水电开发河段。

3 小水电管理的绿色推进

对已有小水电进行环境整治，在后期应该加强电站安全生产和绿色水水电建设管理，其加强内容建议如下：

(一) 探索建立发展的人才培养管理制度。在人才管理上下功夫，注重员工整体素质的培养。提高新进水电站人员的文化和专业素质门槛，加强培训工作力度，尽量在短时间内提高员工的整体技术水平。 (二) 水电站要建立完善的设备日常巡检维护管理制度。对设备的日常维护，要有专人进行巡查与记录。水电站的运行管理人员一旦发现设备出现缺陷与损坏，就要及时对其进行分析、判断并上报，及时消除设备的安全隐患。(三) 水电站加强安全生产管理。不断地对水电厂进行安全巡视，对设备的重大隐患和缺陷，要进行全方位的跟踪和记录，保障水电厂设备健康稳定运行。 电站需要积极进行安全生产标准化建设，提交自评报告经上级单位审核，审核通过获得农村水电或电力安全生产标准化称号。(四) 加强绿色小水电建设管理。制定绿色小水电建设方案和监管机制，配备专兼职管理人员，落实绿色小水电建设专项投入，组织人员参加绿色小水电建设业余培训，保证下流量泄放监控设施正常投入运行。

4 结语

本文旨在以探讨小水电生态环境保护措施，积累绿色小水电建设经验，验证绿色小水电和自然生态环境和谐共存，小水电是重要的民生水利基础设施和清洁可再生能源，已建成的小水电在解决无电缺电地区人口用电，促进江河治理、生态改善、环境保护、地方社会经济发展等方面做出了重要贡献，让小水电和环境保护建立和谐统一的关系，使其溶入大自然，成为青山绿水的一部分。

岷江下游航电梯级生态流量协同造峰调度研究

陈栋为，夏豪，陈国柱，陈凡，徐海洋，赵再兴

（中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司，贵州 贵阳 550081）

摘　要：岷江下游 4 个水电梯级的开发将对最下游梯级水电站(龙溪口)坝址下长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区内的重点保护鱼类产卵、繁殖关键生命周期的洪峰流量过程产生影响。因此，有必要开展梯级电站生态流量联合调度研究。研究认为，在鱼类产卵高峰期的 7～8 月，梯级电站可分预泄－敞泄－回蓄 3 个阶段实施造峰调度，老木孔，东岗岩，犍为和龙溪 4 个梯级同步敞泄，保证洪峰顺利通过各梯级，维持下游天然水文过程；洪水过后，采取专门的调度措施回蓄，延长回蓄时间，保证退水过程与天然洪峰保持基本一致，避免造成下游减脱水过程。研究方案的实施可为下游长江珍稀特有鱼类提供类似天然的水文过程，减轻水电梯级开发对鱼类产卵的影响。

关键词：珍稀鱼类保护；生态流量；航电梯级；协同造峰；联合调度；岷江

洪水是河流生态系统的固有特征，如果洪水长期受到控制，河流、湿地、洪泛区之间将成为孤立的、脆弱的生态斑块，易受到干扰和破坏。因此，汛期生态流量调控对维持河流系统(包括湿地、湖泊) 的整体性功能和动态平衡，满足河流需要的周期性大流量需求具有重要意义[1-4]。

随着流域水电、航电及水利规划的实施，河流梯级开发强度的增大，流域的上、中、下的控制性梯级运行，使得河流流量的时空分布发生巨大的变化，特别是蓄峰补枯的运行调度是对汛期流量、洪水等天然的水文情势影响显著，进而对水生生态系统的水文节律，对重要水生生物，尤其对鱼类的生命周期产生显著影响[5-9]。河流生态流量调控是按照生态流量过程目标需求，通过改变河流梯级调度方式，调节下游生态流量过程，达到下游生境恢复的目的[10-15]。本研究以岷江下游航电梯级为例，聚焦岷江下游汛期生态流量的需求，以最下游梯级龙溪口航电枢纽工程的生态调度为核心，考虑梯级协同，在汛期实现岷江下游航电梯级协同造峰，满足汛期水生态系统的流量需求。

1 岷江下游航电梯级概况

1.1 航电梯级概况

岷江是长江上游的一级支流，位于四川盆地腹部区西部边缘，地理位置界于东经 99°42′～104°40′和北纬 28°20′～33°38′。发源于四川与甘肃接壤的岷山南麓，干流自北向南流经茂县、汶川至都江堰市，由都江堰分水为内、外二江，穿成都平原后在彭山汇合，继续南流，经青神至乐山乌尤寺右岸纳入大渡河、青衣江，转向东南流，经犍为、过宜宾，在宜宾城下汇入长江。干流全长 735km，流域面积 135811km²，天然落差 3560m，平均比降 4.84‰。岷江乐山至宜宾段为下游，长 162km，河道平均比降 0.6‰。枯水河面宽 150～350m，最小水深 1.0m，最小槽宽 15m，最小曲率半径 150m，共有滩险 62 个。

岷江下游航电梯级规划建设老木孔、东风岩、犍为和龙溪口四个梯级，龙溪口为下游最后一个梯级，目前犍为梯级已开工建设，龙溪口梯级即将开工建设，其余 2 个梯级尚处于规划阶段，下游各梯级基本情况见表 1，流域地理位置见图 1。

表 1　岷江干流（乐山～宜宾段）航电规划报告主要经济技术指标

序号	枢纽名称	建设地点	正常蓄水位（m）	流域面积（km²）	装机容量（万 kw）	调节性能
1	老木孔	乐山	358	124686	32	日调节
2	东风岩	五通桥	344	126470	26	日调节
3	犍为	犍为县	335	126862	36	日调节
4	龙溪口	犍为县	317	131980	48	日调节

1.2 梯级调度原则

按照《岷江高等级航道建设方案（2011～2015）》和《岷江（乐山～宜宾段）航电规划报告》的要求，优化梯级的运行调度方式，建立规划梯级的统一运行调度机制，满足岷江下游（乐山~宜宾段）航运、防洪、生态保护等多方面的需求，在规划及方案实施阶段制定了对岷江航电 4 个梯级联合调度原则为：

（1）根据上游来水量，老木孔、东风岩梯级均按自身拟定的调度方式运行，基本是来多少水泻多少水，以满足通航要求和保证自身安全运行为首要前提；

（2）在满足通航下泄基流的前提下，犍为梯级可进行 1h~3h 调峰运行，增加发电效益；

（3）由于上游梯级调峰发电，造成一日内来水量差别较大，通过龙溪口梯级 2450 万 m^3 调节库容进行反调节，以保证下游河道水位变幅相邻时段不超过 1 m 的通航要求。

（5）各梯级在产漂流性卵鱼类产卵高峰期不调峰运行，早晚时段加大下泄流量，人工营造鱼类产卵所需的水文条件。各梯级在产粘沉性卵急流产卵类群鱼类产卵高峰期应稳定下泄流量，且不低于天然状况的多年平均流量。

2 汛期生态流量需求

2.1 用水对象

岷江下游航电梯级最后一级龙溪口枢纽闸坝下距长江上游珍稀、特有鱼类国家级自然保护区实验区边界月波约 8km，距缓冲区边界越溪河口约 47.2km，距核心区边界约 81.3km。岷江下游江段汛期主要生态用水为保护区内的重点保护鱼类产卵、繁殖关键生命周期的洪峰流量过程需求。江段产漂流型卵鱼类产卵季节在 3~8 月，产卵高峰期多为 7～8 月。

岷江下游产漂流性卵鱼类主要有鲢、鳙、草鱼、青鱼、鲿、鱤、鲚、蛇鮈、铜鱼、圆口铜鱼、吻鮈、圆筒吻鮈、长鳍吻鮈、犁头鳅、银鲴、赤眼鳟、花斑副沙鳅、中华沙鳅、贝氏等。

产卵需湍急的水流条件，通常在汛期洪峰发生后产卵。这一类鱼卵比重略大于水，但产出后卵膜吸水膨胀，在水流的外力作用下，鱼卵悬浮在水层中顺水漂流。孵化出的早期仔鱼，仍然要顺水漂流，待身体发育到具备较强的溯游能力后，才能游到浅水或缓流处停歇。从卵产出到仔鱼具备溯游能力，一般需要 30h 或 40h 以上，有的需要时间更长。产卵水温在 16~32℃之间。主要经济鱼类多在 18℃左右的水温时开始产卵。产卵高峰多在 20~24℃。

该江段鱼类物种与常见产漂流性卵鱼类用水需求差异不大，在产漂流性鱼类繁殖季节，需要江河涨水过程，包含着水位升高、流量增大、流速加快、流态紊乱和透明度减小等多种水文因素的变化对鱼类繁殖综合刺激作用，但根据这些鱼类的繁殖活动是在水的上层，甚至表层进行的特点，其中流速的增大在促进鱼类繁殖的诸水文因素中，起主要作用。

2.2 梯级建设后对下游流量的改变

在考虑研究河段以上各调节水库的联合作用下，计算最下游梯级龙溪口枢纽坝址丰（P=5%）、平（P=50%）、枯水年（P=95%）逐日流量过程，并与天然情况逐日流量过程进行对比，以枯水年为例，变化情况见图 2。

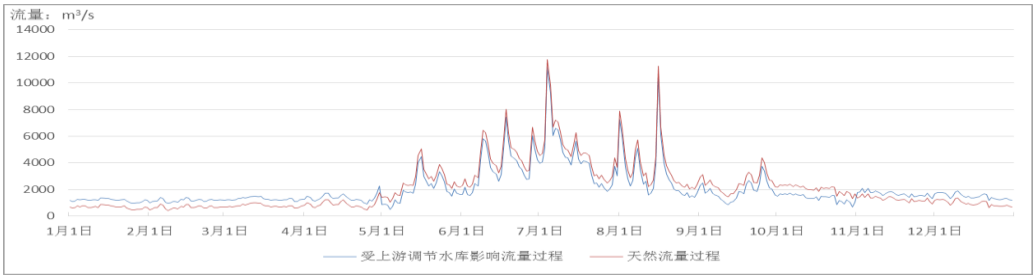


图 1 龙溪口枢纽枯水年逐日流量过程与流量

从图中可以看出，在上游调节水库的作用下，龙溪口闸址断面处枯水期（11 月~4 月）的月平均流量较天然状态明显增加，约 500m³/s；丰水期（5 月~10 月）的月平均流量较天然状态明显下降，约 600m³/s。但除了流量上有所差异外，径流过程和规律基本是一致的。

2.3 流量过程目标

天然河流水文情势的年内变化规律，形成了流量、水位、涨落水率等水文要素的时序规律，为河流水生生态系统中各种生物的生命周期传递信号。如河流水文情势的节律性变化为鱼类产卵繁殖提供信号，鱼类的产卵繁殖活动与河流生态水文指标存在一定的响应关系。因此，下泄流量过程需求以天然状态下的水流变化规律为目标，满足修复鱼类栖息地、保护水生生态系统流量过程。

根据五通桥水文站 1939 年 5 月~2005 年 4 月径流系列统计，选择丰、平、枯水年各典型年的鱼类繁殖期（3 月~9 月）流量过程见图 3，考虑岷江下游梯级为径流式日调节梯级，变化基本不改变来水逐日流量过程，因此，岷江下游梯级需要在汛期针对洪水实施敞泄以满足鱼类繁殖期的洪峰需求。

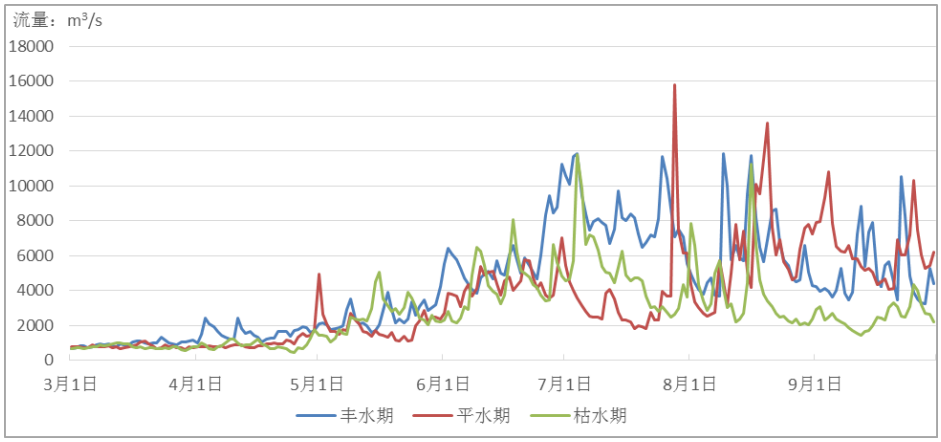


图 2 龙溪口坝址典型年产卵期逐日流量过程

3 敞泄造峰调度措施

3.1 敞泄措施

为了给产漂流性卵鱼类产卵、孵化提供适宜水生生境，在 7~8 月份结合洪水预报，与上游梯级同步实施 1 次应急性敞泄调度，根据水情测报，提前 24h 开闸，闸门全开，保持敞泄，敞泄时间与上游各枢纽同步，每次敞泄调度过程持续 5～7d。产卵后，鱼卵要顺水漂流而下，为保证孵化流程不被阻断，洪峰过后推迟 48h 关闸回蓄，各梯级根据洪峰传播过程，自上游枢纽至龙溪口枢纽依次关闸回蓄，回蓄流量约为上游来水流量的 10%～20%，按 80%～90%来水流量下泄，根据来水情况适当延长回蓄时间，保证回蓄期间下泄流量相对稳定，具体调度过程如下：

（1）基本维持死水位 316m 运行。

（2）当入库流量小于等于最大通航流量 15000m³/s（2 年一遇洪水）时，维持在 316m 运行，枢纽正常通航、发电。

（3）当入库流量大于 15000m³/s 时，闸门逐步加大泄量降低水库水位直到敞泄状态，枢纽停止通航、发电；可根据水情测报，提前 24h 开闸，闸门全开，保持敞泄；产卵后，鱼卵要顺水漂流而下，为保证孵化流程不被阻断，洪峰过后推迟 48h 关闸。

（4）当入库流量小于 15000 m³/s 处于退水段时，水库回蓄水位逐步达到 316m。

3.2 回蓄措施及可靠性分析

（1）泄放措施

龙溪口枢纽运行后，在汛期执行泄洪冲沙、敞泄生态调度后将进行回蓄至运行死水位（316m），

回蓄开始时间在洪峰过后 48h 回蓄，按照天然退水过程，洪峰过后 48～72h，按照来水流量的 20%回蓄，洪峰过后 72h 以后按照按照来水流量的 10%回蓄，根据来水情况，适当增长蓄水时段，进一步减缓蓄水时段对下游河段水文情势的不利影响。

以两年一遇的典型洪水为例，选取 1986 年闸址洪水过程，洪峰流量为 17450 m³/s，发生时间 1986 年 8 月 19 日 10:00，洪峰过后推迟 48h 回蓄，回蓄措施方案见表 2。

表 2　两年一遇的典型洪水敞泄回蓄措施

回蓄时段	回蓄流量（m³/s）	下泄流量（m³/s）	回蓄时间（h）	下泄措施
1986/8/21 10:00～ 1986/8/22 9:00	632～792	2500～4000	24	泄洪闸+发电机组控泄
1986/8/22 9:00～ 1986/8/22 9:00	242～315	2200～2100	94	泄洪闸+发电机组控泄

（2）实施可靠性分析

敞泄回蓄期间枢纽左岸布置的 24 孔泄洪闸和发电机组已经正常运行，其中泄洪闸单闸设计泄洪能力为 2062m³/s，控制 2 闸即可满足下泄 2100～4000m³/s 流量要求。泄洪闸既能单独局部开启运行、又能组合运行，通过将部分闸门开启可以满足下泄各级流量的要求。在蓄水至发电死水位后可启用发电机组+泄洪闸下泄生态流量，龙溪口航电枢纽设 9 台发电机组，单机发电引用流量为 532.93m³/s，9 台发电机组满发电即可满足下泄 4000m³/s 流量要求。根据来水过程和下泄流量目标，进行泄洪闸+发电机组控泄是可以满足回蓄期间的生态流量下泄。

4 造峰调度效果

龙溪口枢纽运行后，在汛期执行泄洪冲沙、敞泄生态调度后将进行回蓄至运行死水位（316m），以两年一遇的天然典型洪水 7d 流量过程为例，分析敞泄造峰调度对天然典型洪水 7d 流量过程的影响，根据敞泄造峰调度措施，回蓄开始时间在洪峰过后 48h 回蓄。按照天然退水过程，洪峰过后 48～72h，按照来水流量的 20%回蓄，洪峰过后 72h 以后按照按照来水流量的 10%回蓄，并根据来水情况，适当增长蓄水时段，进一步减缓蓄水时段对下游河段水文情势的不利影响。

根据两年一遇的坝址典型洪水频率，选取 1986 年闸址天然洪水过程为代表洪水，洪峰流量为 17450 m³/s，洪峰发生时间 1986 年 8 月 19 日 10:00，洪峰过后推迟 48h 回蓄，敞泄调度过程与天然洪峰过程对比见图 4。

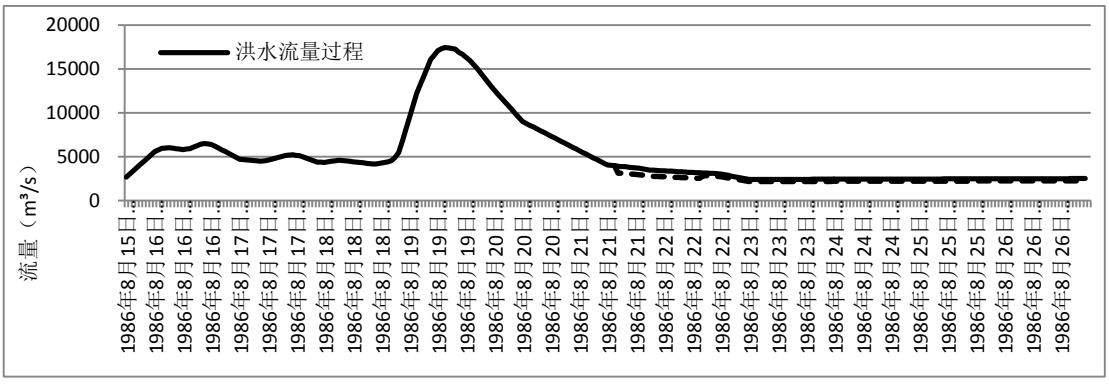


图 4　两年一遇的典型洪水敞泄回蓄流量过程图

根据对两年一遇的典型洪水与敞泄调度的洪水过程，并重点分析回蓄期间过程，通过预泄、敞泄措施后，洪峰过程与天然洪水基本保持一致，在回蓄期，持续时间 118h，保持了 2000～4000m³/s 的流量下泄，且下泄过程与天然退水过程同比减少，退水过程基本一致，回蓄期间不会造成下游减脱水过程，维持了下游流量在洪水退水过程的相对稳定。

龙溪口梯级采取敞泄调度，恢复汛期天然洪水过程，保证下游长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区河段的洪峰刺激和漂流流速。由于采取岷江下游 4 个梯级同步敞泄造峰调度方式，调度时

段为全流域洪水发生时段，在下游 81.3km 处的长江汇口处也将同步发生洪峰，河道的坦化和槽蓄作用对洪峰效果影响不大。龙溪口枢纽以下江段分布有 5 处漂流性卵产卵场，产卵规模占总规模的 85%，主要分布在龙溪口坝址至下游 40km 处，因此采取的敞泄调度可满足产漂流性卵的鱼类洪峰需求，有效的保护下游水生生态系统。

5 结语

岷江下游江段汛期生态流量需求主要为生态用水为长江上游珍稀特有鱼类国家级自然保护区内的重点保护鱼类产卵、繁殖关键生命周期的洪峰流量过程需求。在航电梯级规划设计阶段重点针对汛期洪水实施敞泄造峰调度以满足鱼类繁殖期的洪峰需求。

（1）敞泄造峰调度针对汛期洪水来水过程，分为预泄-敞泄-回蓄三个阶段实施造峰调度，四个梯级实现同步敞泄，保证洪峰顺利通过航电梯级，发挥洪水的生态功能。

（2）针对梯级回蓄过程采取专门的调度措施，延长回蓄时间，保证下泄流量过程与天然退水过程基本一致，人造洪峰与天然洪峰保持一致，避免造成下游减脱水过程，维持了下游流量在洪水退水过程的相对稳定，有效的保护下游水生生态系统。

（3）由于岷江下游 4 个航电梯级水库调节性能较弱，其敞泄造峰调度依赖于中、上游控制性梯级的下泄洪峰过程，为进一步提高敞泄造峰调度的生态保护效果，需要与中、上游梯级开展联合调度，确保洪峰的发生时间、流量过程满足鱼类繁殖关键生命周期的洪峰流量过程需求。

参考文献：

[1] 王浩，王建华，秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J].水科学进展，2004,15(1):124-130

[2] 董哲仁，孙东亚，赵进勇.水库多目标生态调度[J].水利水电技术， 2007, 38(1): 28-32

[3] 蔡其华.充分考虑河流生态系统保护因素完善水库调度方式[J].中国水利, 2006(2):14-17
翟丽妮，梅亚东，李娜.水库生态与环境调度研究综述[J].人民长江，20038(8):56-57

[4] 梅亚东，杨娜，翟丽妮.雅砻江下游梯级水库生态友好型优化调度[J].水科学进展，2009,20(5):721-725

[5] 胡和平，刘登峰，田富强，等.基于生态流量过程线的水库生态调度方法研究[J].水科学进展，2008，19(3):325-328

[6] Schmidt J C, Roderic A P, PaulE G, et al•The 1996 controlledflood in Grand Canyon: flow, sediment transport and geomorphic change[J]•EcologicalApplications, 2001, 11(3): 657-671•

[7] Muth R T, CristLW, LaGoryK E•Flow and TemperatureRecom mendations forEndangered Fishes in theGreen RiverDownstream of FlamingGorge Dam[R]•Colorado RiverRecovery Implementation Program Project, 2002

[8] Dauble D D, Hanrahan T P, GeistD R•Impacts of the ColumbiaRiver hydroelectric system on Main-stem Habitats of Fall ChinookSalmon[J]•North American Journal of Fisheries Management,2003, 23(3): 641-659•

[9] Higgins JM, ASCE, BrockW G•Over review of reservoir releaseimprovements at20 TVA dams[J]•Journal ofEnergy Engineering,1999(4): 1-17•

[10] 石晓丹，焦涛.大坝运行过程中泄水对坝下游生态系统的影响分析及控制[J]，水利科技与经济，2007,13(5):320-323

[11] 徐天宝，彭静，李翀.葛洲坝水利工程对长江中游生态水文特征的影响[J].江流域资源与环境，2007,16(1):72-75

[12] 王远坤，夏自强，王桂华.水库调度的新阶段_生态调度[J].水文,2008,28(7):6-9

[13] 郭文献，夏自强，王远坤，韩帅.三峡水库生态调度目标研究[J]. 水科学进，2009,20(4):556-562

[14] Lovich J, MelisT S, et al•The state of the Colorado River ecosystem in Grand Canyon: lessons from 10 year of adaptive ecosystemmanagement[J]•Intl•J•River BasinManagement, 2007, 5(3):207-221•

某水电站绿色施工技术

顿　江

（中国葛洲坝集团二公司，四川 成都 610091）

摘 要：为了实现水电开发与生态环境协调发展的目标,在一些具备技术和资金条件的水电站,可以根据水电工程对生态环境的影响特征,在水电工程的规划设计阶段提出相对于环境可行性更高的生态环境保护目标,并且明确相应的保护措施,这是绿色水电工程建设规划的基本特征和目标。分析了绿色水电工程建设规划的概念和基本内容,提出了包括施工期和运行期的规划指标体系,并且探讨了规划的时期和基本方法。该研究成果可以为满足我国水电开发保护生态环境的宏观需求以及实现水电工程生态友好的建设目标提供参考和技术支持。

关键词：绿色水电；建设规划；指标体系；施工技术

1 工程概况

两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上，电站采用坝式开发，两河口水电站枢纽建筑物由砾石土心墙堆石坝、洞式溢洪道、深孔泄洪洞、放空洞、漩流竖井泄洪洞、地下发电厂房、引水及尾水建筑物等组成，采用“拦河砾石土心墙堆石坝+右岸引水发电系统+左岸泄洪、放空系统+左、右岸导流洞”的工程枢纽总体布置格局。砾石土心墙堆石坝最大坝高 295m，引水发电系统为大型地下洞室群结构，安装 6 台 500MW 的水轮发电机组。

2 绿色施工目标

落实中华人民共和国建设部《关于印发<绿色施工导则>的通知》（建质[2007]223 号）文件精神，推进集团绿色施工工作，在保证质量、安全等基本要求的前提下，通过科学管理和技术进步，最大限度地节约资源与减少对环境负面影响，实现四节一环保（节能、节地、节水、节材和环境保护），全面提升项目部科学管理水平。

3 绿色施工技术

3.1 环境保护

3.1.1 扬尘控制

①运送土方、垃圾、设备及施工材料等，不污损场外道路。运输容易散落、飞扬、流漏的物料的车辆，必须采取措施封闭严密，保证车辆清洁。施工现场设置洗车槽。

②土石方作业阶段，采取洒水、覆盖等措施，达到作业区目测扬尘高度小于 1.5m，不扩散到场区外。

③结构施工、金结安装、装饰装修阶段，作业区目测扬尘高度小于 0.5m。对易产生扬尘的堆放材料采取覆盖措施，对粉末状材料封闭存放，场区内可能引起扬尘的材料及垃圾搬运时具有降尘措施，如覆盖、洒水等，浇筑混凝土前清理仓位时尽量避免使用吹风器等易产生扬尘的设备，机械剔凿作业时可用局部遮挡、掩盖、水淋等防护措施，清理垃圾时采用容器吊运。

④施工现场非作业区达到目测无扬尘的要求。对现场易飞扬物质采取有效措施，如洒水、地面硬化、围档、密网覆盖、封闭等，防止扬尘产生。

3.1.2 噪音与振动

①现场噪音排放不得超过国家标准《建筑施工场界噪声限值》（GB12523-2011）的规定。具体数值详见表 3.1-1。

表 3.1-1　施工场界噪声限值

施工所处阶段	主 要 使 用 机 械	噪声源噪声限值(≤分贝)	
		昼 间	夜 间
土石方	推土机、挖掘机、装载机等	75	55
打　桩	各种打桩机等	85	禁止施工
结　构	混凝土搅拌机、振捣棒、电锯等	70	55
装　修	吊车、升降机等	65	55

②使用低噪音、低振动的机具，采取隔音与隔振措施，避免或减少施工噪音和振动。施工人员远距离通话使用对讲机，严禁大声喊叫喧哗。

3.1.3 光污染控制

①尽量避免或减少施工过程中的光污染。夜间室外照明灯加设灯罩，透光方向集中在施工范围。

②电焊作业采取遮挡措施，避免电焊弧光外泄。

3.1.4 水污染控制

①施工现场污水排放达到国家标准《污水综合排放标准》（GB8978-1996）的要求。

②施工现场针对不同的污水，设置相应的处理设施，如沉淀池、隔油池、化粪池等。

③污水排放委托有资质的单位进行废水水质检测，提供相应的污水检测报告。

④保护地下水环境。采用设计中隔水性能好的边坡支护技术。现场采用明沟排水措施，做到不污染地下水，并尽量减少对地下水的抽取。

⑤对于化学品等有毒材料、油料的储存地，有严格的隔水层设计，做好渗漏液收集和处理。

3.1.5 土壤保护

①保护地表环境，防止土壤侵蚀、流失。因施工造成的裸土，及时覆盖砂石或种植速生草种，以减少土壤侵蚀；因施工造成容易发生地表径流土壤流失的情况，采取设置地表排水系统、稳定斜坡、植被覆盖等措施，减少土壤流失。

②沉淀池、隔油池、化粪池等不发生堵塞、渗漏、溢出等现象。及时清掏各类池内沉淀物，并委托有资质的单位清运。

③对于有毒有害废弃物如电池、墨盒、油漆、涂料等回收后交有资质的单位处理，不能作为建筑垃圾外运，避免污染土壤和地下水。

④施工后恢复临时占地内施工活动破坏的植被。与当地园林、环保部门或当地植物研究机构进行合作，在先前开发地区种植当地或其他合适的植物，以恢复剩余空地地貌或科学绿化，补救施工活动中人为破坏植被和地貌造成的土壤侵蚀。

3.1.6 施工垃圾

①施工中要求“活完、料净、脚下清”，施工材料随用随取，减少施工垃圾产生。

②加强施工垃圾的回收再利用，力争施工垃圾的再利用和回收率达到 30%，建筑物拆除产生的废弃物的再利用和回收率大于 40%。对于碎石类、土石方类施工垃圾，可采用地基填埋、铺路等方式提高再利用率，力争再利用率大于 50%。

③施工现场生活区设置封闭式垃圾容器，施工场地生活垃圾实行袋装化，及时清运。对施工垃圾进行分类，并收集到现场封闭式垃圾站，集中运出。

3.1.7 地下设施、文物和资源保护

①施工前调查清楚地下各种设施，保证施工场地周边的各类管道、管线、建筑物、构筑物的安全运行。

②施工过程中一旦发现文物，立即停止施工，保护现场并通报文物部门并协助做好工作。

③避让、保护施工场区及周边的古树名木。

④逐步开展统计分析施工项目的 CO_2 排放量，以及各种不同植被和树种的 CO_2 固定量的工作。

3.2 节材与材料资源利用

3.2.1 节材措施

①图纸会审时，审核节材与材料资源利用的相关内容，达到材料损耗率比定额损耗率降低 30%。

②根据施工进度、库存情况等合理安排材料的采购、进场时间和批次，减少库存。

③现场材料堆放有序。储存环境适宜，措施得当。保管制度健全，责任落实。

④材料运输工具适宜，装卸方法得当，防止损坏和遗洒。根据现场平面布置情况就近卸载，避免和减少二次搬运。

⑤采取技术和管理措施提高模板、脚手架等的周转次数。

⑥优化安装工程的预留、预埋、管线路径等方案。

⑦就地取材，施工现场 500 公里以内生产的施工材料用量占总重量的 70％以上。

3.2.2 结构材料

①使用预制混凝土和商品砂浆。准确计算采购数量、供应频率、施工速度等，在施工过程中动态控制。结构工程使用散装水泥。

②使用高强钢筋和高性能混凝土，减少资源消耗。

③钢筋专业化加工和配送。

④优化钢筋配料和钢构件下料方案。钢筋及钢结构制作前对下料单及样品进行复核，无误后方可批量下料。

⑤优化钢结构制作和安装方法。大型钢结构采用加工厂制作，现场拼装，采用分段吊装、整体提升、滑移、顶升等安装方法，减少措施用材量。

⑥采取数字化技术，对大体积混凝土、大跨度结构等专项施工方案进行优化。

3.2.3 周转材料

①选用耐用、维护与拆卸方便的周转材料和机具。

②优选制作、安装、拆除一体化的专业队伍进行模板工程施工。

③模板以节约自然资源为原则，推广使用定型钢模、钢框竹模、竹胶板。

④施工前对模板方案进行优化。多层、高层建筑使用可重复利用的模板体系，模板支撑采用工具式支撑。

⑤优化高排架方案，采用整体提升、分段悬挑等方案。

⑥采用外墙保温板替代混凝土施工模板的技术。

3.3 节水与水资源利用

3.3.1 提高用水效率

①施工中采用先进的节水施工工艺。

②施工现场喷洒路面、绿化浇灌不使用生活自来水。现场搅拌用水、养护用水采取有效的节水措施，严禁无措施浇水养护混凝土。

③施工现场供水管网根据用水量设计布置，管径合理、管路简捷，采取有效措施减少管网和用水器具的漏损。

④现场机具、设备、车辆冲洗用水设立循环用水装置。施工现场办公区、生活区的生活用水采用节水系统和节水器具，提高节水器具配置比率。项目临时用水使用节水型产品，安装计量装置，采取针对性的节水措施。

⑤施工现场建立可再利用水的收集处理系统，使水资源得到梯级循环利用。

⑥施工现场分别对生活用水与工程用水确定用水定额指标，并分别计量管理。

⑦对拌合楼等用水集中的区域和工艺点进行专项计量考核。施工现场建立雨水、中水或可再利用水的搜集利用系统。

3.3.2 非传统水源利用

①现场机具、设备、车辆冲洗、喷洒路面、绿化浇灌等用水，优先采用非传统水源，尽量不使用市政自来水。

②力争施工中非传统水源和循环水的再利用量大于 30%。

③充分收集自然降水用于施工和生活中适宜的部位。

3.3.3 用水安全

在非传统水源和现场循环再利用水的使用过程中，制定有效的水质检测与卫生保障措施，确保避免对人体健康、工程质量以及周围环境产生不良影响。

3.4 节能与能源利用

3.4.1 节能措施

①制订合理施工能耗指标，提高施工能源利用率。

②优先使用国家、行业推荐的节能、高效、环保的施工设备和机具，如选用变频技术的节能施工设备等。

③施工现场分别设定生产、生活、办公和施工设备的用电控制指标，定期进行计量、核算、对比分析，并进行预防与纠正。

④合理安排施工顺序、工作面，以减少作业区域的机具数量，相邻作业区充分利用共有的机具资源。安排施工工艺时，优先考虑耗用电能的或其它能耗较少的施工工艺。避免设备额定功率远大于使用功率或超负荷使用设备的现象。

⑤根据当地气候和自然资源条件，充分利用太阳能、地热等可再生资源。

3.4.2 机械设备与机具

①建立施工机械设备管理制度，开展用电、用油计量，完善设备档案，及时做好维修保养工作，使机械设备保持低耗、高效的状态。

②选择功率与负载相匹配的施工机械设备，避免大功率施工机械设备低负载长时间运行。机电安装可采用节电型机械设备，如逆变式电焊机和能耗低、效率高的手持电动工具等，以利节电。机械设备使用节能型油料添加剂，在可能的情况下，考虑回收利用，节约油量。

③合理安排工序，提高各种机械的使用率和满载率，降低各种设备的单位耗能。

3.4.3 生产、生活及办公临时设施

①利用场地自然条件，合理设计生产、生活及办公临时设施的体形、朝向、间距和窗墙面积比，使其获得良好的日照、通风和采光。

②临时设施采用节能材料，墙体、屋面使用隔热性能好的的材料，减少夏天空调、冬天取暖设备的使用时间及耗能量。

③合理配置采暖、风扇数量，规定使用时间，实行分段分时使用，节约用电。

3.4.4 施工用电及照明

临时用电优先选用节能电线和节能灯具，临电线路合理设计、布置，临电设备采用自动控制装置。采用声控、光控等节能照明灯具。

4 结语

水电站在建设过程中存在着移民安置、泥沙、影响人类和生物多样性以及改变下游水温等一系列问题,这些问题需要工程决策者和施工工程技术人员在建设水电站的同时认真加以考虑和慎重处理,并且通过相应的设施和工程予以补偿。索风营电站建设公司改变观念,从被动环保走向主动环保,

从要我环保走向我要环保,为水电站的建设创新了工程建设项目与绿色生态环保并举的环保工程建设管理新理念。

参考文献：

[1] 邹建国.乌江水电开发中的环境保护工作[C].中国水力发电工程学会, 湖北省水力发电工程学会,2006:1-3。
[2] 禹雪中，廖文根，骆辉煌. 我国建立绿色水电认证制度的探讨[J]. 水力发电,2007,(7):1-4.
[3] 罗时朋，钟灿兵，燕乔. 水电工程建设项目环境影响后评价理论与方法[J]. 水利水电技术,2008,(9):4-7。
[4] 郭乔羽，杨志峰. 三门峡水利枢纽工程生态影响后评价[J]. 环境科学学报,2005,(5):580-585。
[5] 中国水利水电科学研究院. 绿色水电指标体系及评估方法初步研究[R]. 2009。

农村岩溶地下水硬度一体化去除技术与装备研究

凌　尚

（湖南省水利水电勘测设计研究总院，湖南 长沙 410007）

摘　要：饮用水钙硬度的化学软化去除过程中生成的 $CaCO_3$ 结晶产物颗粒细碎，沉降性能差，后续需增设混凝、沉淀和过滤等单元以保障出水浊度，这在农村饮用水处理中难以实现。本文针对该问题，以自有专利技术为核心，开展农村地下岩溶水硬度一体化去除技术与装备研究，旨在为农村硬度超标地下水提供一套高效、简单和低成本的软化装置。研发结果表明，接触絮凝/水力旋流一体化设备，可同时保障出水硬度和浊度完全满足《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006），硬度去除率在 60%以上，出水浊度低于 1 NTU。接触絮凝/水力旋流一体化设备软化药剂的和混凝剂的最佳投加量分别为 150 mg/L 和 30 mg/L；最佳分流比 0.08，最佳处理负荷 120 L/h，在此负荷下物料在一体化设备中的水力停留时间约为 60 s。

关键词：硬度去除；岩溶地下水；接触絮凝；水力旋流

水中硬度超标将对日常生活、工业生产造成一定影响，甚至威胁人类健康[1]。硬度超标引起的结垢还会降低换热设备的效率，导致机械故障[2]。化学沉淀法除硬度具有操作简单、去除率高的优势，已有上百年应用历史；且易与混凝、沉淀等净水工艺结合，适应性强，至今仍是最常用硬度去除技术[3]。但在针对硬度超标的农村饮水安全保障中，即便是化学沉淀法的应用也存在较大难度。这是因为化学结晶产物 $CaCO_3$ 和 $Mg(OH)_2$ 颗粒细碎，沉降性能差[4]，为保证出水浊度达标，化学软化处理单元之后还必须设有混凝、沉淀和过滤等单元，这对于农村自来水厂（自来水站）而言，难以实现。

湖南省湘中某镇农村供水以地下岩溶水为水源，原水中总硬度为 200~350 mg/L（以 $CaCO_3$ 计），以暂时性 Ca 硬度为主。虽然总硬度满足《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006），但根据世界卫生组织的划分标准，仍属于超硬水，长期饮用将对群众健康造成严重威胁。当地结石病发病率明显高于周边地区，也证实了水质对健康造成了影响。受场地、资金和技术水平等客观条件制约，目前该镇自来水站的处理工艺仅为“静沉+漂白粉消毒”，对硬度无去除效果。若要化学沉淀去除硬度，则需要增设混凝、沉淀和过滤等单元，这相对于一座常规的城市自来水处理工艺，难以实现。

受当地政府和省水利部门委托，项目组于现场开展了为期半年的湖南省岩溶地下水硬度去除适宜性技术与装备研发工作，旨在为农村硬度超标地下水提供一套高效、简单和低成本的软化装置，确保供水水质安全。为此，项目组以自有专利技术水力旋流分离固液技术为核心，开展了了农村地下岩溶水硬度一体化去除技术与装备的研究。

1 接触絮凝/水力旋流一体化硬度去除装置

1.1 装置设计思路

接触絮凝技术起源于直接过滤，指的是在介质表面上发生的絮凝过程。与传统絮凝相比，其絮凝过程是在介质表面上完成，因此絮凝过程得到强化，特别适合于颗粒细碎、沉降性能较差的胶体物质和悬浮物。水力旋流分离器是一种通用分离设备，具有占地面积小、处理能力大、分离效率高和无运动部件等优点[5]，已被广泛应用于矿冶、石化、食品和环境等领域的固液分离单元操作。

由于接触絮凝和水力旋流分离器的突出优势，本研究考虑将二者进行有机结合，高硬度地下水投加软化剂后，迅速生成 $CaCO_3$ 晶体，直接泵入接触絮凝/水力旋流分离装置，一方面通过调控水力旋流过程实现接触絮凝，一方面通过接触絮凝，改善水力旋流器的固液分离效率，最终形成为岩溶区地下水的一体化高效软化设备。

1.2 一体化装置结构及工作过程

接触絮凝/水力旋流一体化设备的结构示意图如图 1 所示，其中左图为主体设备的装配示意图，右图为入口法兰盘结构示意图。直管段旋流腔直径 D_1 取 70 mm；高度 H_1 取 70 mm；圆锥段旋流腔上顶直径 D_2 取 70 mm，下底直径 D_3 取 20 mm；圆锥段的锥角取 5 °、8 °和 10 °三个规格；溢流/底流管管径有 20/15 mm、30/15 mm、20/20 mm、30/20 mm 共 4 个组合模式；溢流管插入旋流腔的长度 H_2 取 35 mm。

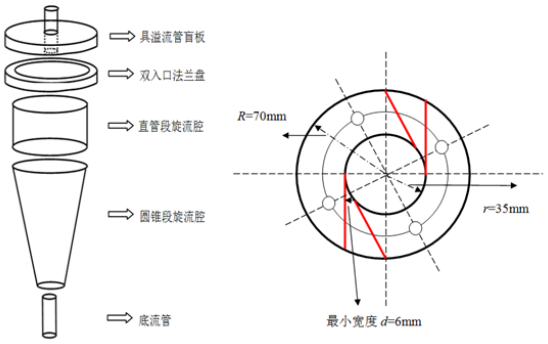


图 1 接触絮凝/水力旋流一体化软化装置结构示意图

含结晶产物的地下水进入装置后，悬浮于液体中的固体颗粒及液体由于旋流作用都受到了离心力的作用。由于两相介质的密度差，使两相介质所受的离心力不同，轻质分散相（水及少部分颗粒）向轴线附近的低压区移动，聚集在轴线附近，边旋转边向上做螺旋运动，形成内旋流，最终从溢流口排出。由于固体颗粒也受到离心力的作用，当该力大于颗粒运动所承受的液体阻力时，固体颗粒将克服阻力作用而向水力旋流器边壁移动，与液体分离开，并在后续液流的推动下，分离出的颗粒（及一部分水）则由底流口排出。

一旦在旋流过程中发生了接触絮凝过程，固体颗粒的粒径明显增大，此时固体颗粒，即絮凝体，将在重力作用下直接发生沉降，而不是在旋流作用下一直运动到旋流器的边壁，之后再从边壁滑落到底流口。可以看出，接触絮凝过程的发生，将改变水力旋流器内的固液分离过程，缩短固体颗粒的运动历程，这对固液分离效果无疑有促进作用。

2 材料与方法

2.1 岩溶地下水和药剂

该镇岩溶地下水水质见表 1。

表 1 岩溶地下水水质

序号	指标	结果
1	色度	＜5
2	嗅和味	无
3	肉眼可见物	无
4	pH	7.8
5	COD_{Mn}/（mg/L）	0.3
6	氨氮(以 N 计)/（mg/L）	0.099
7	总硬度(以 $CaCO_3$ 计)/（mg/L）	220
8	总碱度(以 $CaCO_3$ 计)/（mg/L）	208

表 1 表明，该镇岩溶地下水水质优良，上述指标均满足《地下水环境质量标准》（GB/T 14848-93）Ⅲ类限值，完全可以满足集中供水水源的水质要求。从总硬度来看，甚至达到了Ⅱ类标准（＜300 mg/L），但作为饮用水，硬度总体仍然偏高，属于超硬水。同时，硬度以暂时性硬度为主。

药剂主要为软化剂 NaOH、混凝剂聚合氯化铝（PAC），均为分析纯。

2.2 实验系统及实验条件

接触絮凝/水力旋流一体化设备由潜水泵、吨桶、进出水管线、玻璃转子流量计、加药泵、静态混合器和水力旋流器等几个部分组成，见图 2。软化药剂、混凝剂和助凝剂在进水管线上投加，采

用管式静态混合方式与原水混合。经混合反应之后，进入水力旋流器，同步完成接触絮凝和水力旋流固液分离。

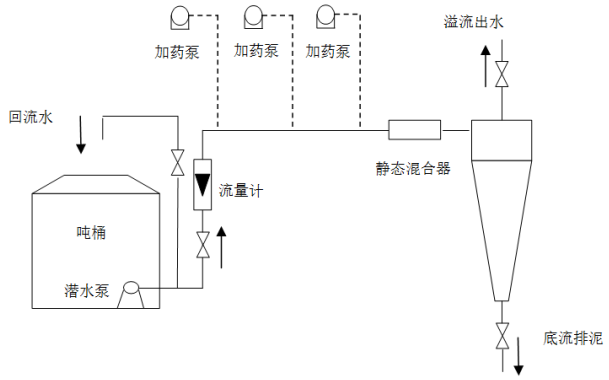


图 2 接触絮凝/水力旋流一体化设备系统流程图

潜水泵用来提供动力将吨桶中的原水泵入压入旋流器中，也可以实现吨桶内原水的混合搅拌。玻璃转子流量计显示进入旋流器的流量。实验中进出水流量和分流比通过调节相应阀门实现控制。

实验主要考察软化药剂和混凝剂投加量对硬度和浊度去除效果和出水 pH 的影响，以及装置进水负荷和分流比（底流流量/进流流量）对出水浊度的影响。NaOH 的投加量为分别取 90~210 mg/L，PAC 投加量为 5~40 mg/L；处理负荷取 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5 m^3/h 共 5 种情况。

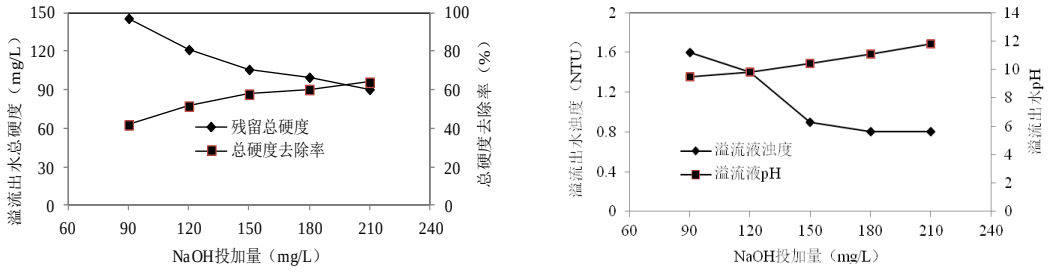
2.3 水环境容量计算结果

硬度测定采用钙离子选择电极法；pH 值和浊度分别采用上海雷磁 PHS-3C 型酸度计和上海昕瑞 WGZ-500B 型浊度计进行。

3 结果与讨论

3.1 软化剂投加量对处理效果的影响

当 PAC 的投加量为 10 mg/L，进水负荷为 120 L/h，分流比 0.1 时，NaOH 投加量对处理效果的影响如图 3 所示。



a b

图 3 NaOH 投加量对处理效果的影响

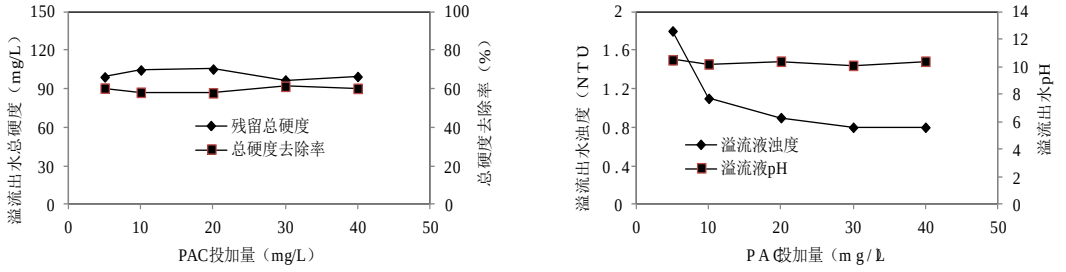
图 3a 表明，NaOH 投加量的增加有助于硬度去除效果的提升，溢流出水中残留总硬度水平随着 NaOH 投加量的增加大致呈直线下降趋势。当 NaOH 投加量为 150 mg/L 时，出水总硬度为 105.8 mg/L，对应的去除率为 58%。从残留总硬度水平来看，达到了 WHO 规定的低硬水的标准。

由图 3b 可知，溢流出水的 pH 值将随着 NaOH 投加量的增加而持续上升，基本上呈直线关系。溢流出水 pH 过大将增加后续 pH 回调的难度，因此 NaOH 的投加量不宜过大。溢流出水浊度随 NaOH 投加量的增加有下降的趋势，当投加量超过 150 mg/L 后，浊度可以降到 1.0 NTU 以下，满足《生活饮用水卫生标准》关于浊度的要求。

综合溢流出水的硬度、浊度和 pH，以及软化剂投加的成本等，确定 NaOH 的优选投加量为 150 mg/L。

3.2 混凝剂投加量对处理效果的影响

由 3.1 实验结果，固定 NaOH 的投加量为 150 mg/L。当进水负荷为 120 L/h，分流比 0.1 时，混凝剂 PAC 投加量对处理效果的影响如图 4 所示。



a　　b

图 4 PAC 投加量对处理效果的影响

图 4a 表明，对于一体化设备，PAC 的投加量不会用溢流出水的硬度去除有明显影响。这主要是 PAC 混凝的去除对象是水中的胶体和悬浮物质，而对溶解性的 Ca^{2+}基本不具有去除作用。由图 4b 可知，PAC 投加量对溢流出水的 pH 值影响甚微，但可以明显降低溢流出水的浊度。由于 PAC 是聚合物形式，其水解过程导致的液相中 H^+浓度变化较小，因此 pH 值不会发生明显变化。而 PAC 通过网捕卷扫、吸附架桥等作用，能够有效去除水中的 $CaCO_3$ 颗粒，因此溢流出水的浊度可以得到明显降低。为确保出水浊度达标，PAC 投加量可以适当加大，优选确定 PAC 投加量为 30 mg/L。

3.3 分流比对处理效果的影响

分流比是一体化设备的一个重要操作参数。在接触絮凝/水力旋流一体化设备处理地下水时，底流液是作为生产废水进行排放的。在相同分离效率（溢流出水浊度）下，分流比越小，则底流液体积越小、含固率越大，这一方面降低的生产废水量，另一方面也有利于生产废水的回收利用。因此分流比的优选是接触絮凝/水力旋流一体化设备研发的核心之一。

分流比取 0.05、0.08、0.10、0.12 和 0.15 共 5 种情况，不同分流比条件下溢流出水的浊度如图 5-9 所示。

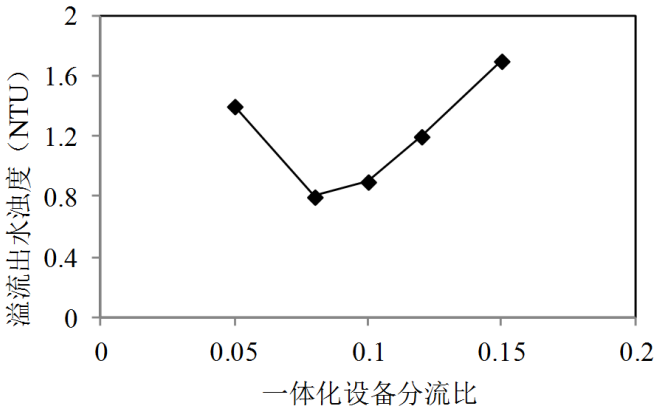


图 5 一体化设备分流比对处理效果的影响

研究表明，当分流比较小时，颗粒物质将会在底流口出现明显的堵塞现象，这会严重削弱水力旋流器的固液分离效果，适当提高分流比，堵塞现象将明显抑制甚至消失。图 5 结果也表明，当分流比为 0.05 时，溢流出水浊度较高，为 1.4 NTU，分流比增加到 0.08 时，溢流浊度明显降低，为 0.8 NTU。

但分流比的增加会引起压降比（$\Delta p_{溢流}/\Delta p_{底流}$）的减小，进而导致底流颗粒物浓度的降低，这对固液分离将产生严重的不利影响。本研究中，当分流比超过 0.08 之后，溢流出水浊度随着分流比的增加有升高的趋势，分流比为 0.15 时，溢流出水浊度高达 1.7 NTU，不能满足《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006）关于浊度的要求。综上，优选确定一体化设备的分流比为 0.08。

3.4 处理负荷对处理效果的影响

接触絮凝/水力旋流一体化设备处理地下水的一个突出技术优势在于其高处理负荷，一体化设备只有具备高处理负荷能力，才能实现结构紧凑、占地面积小和易于实施的技术特性。不同处理负荷条件下，溢流出水的浊度如图 6 所示。

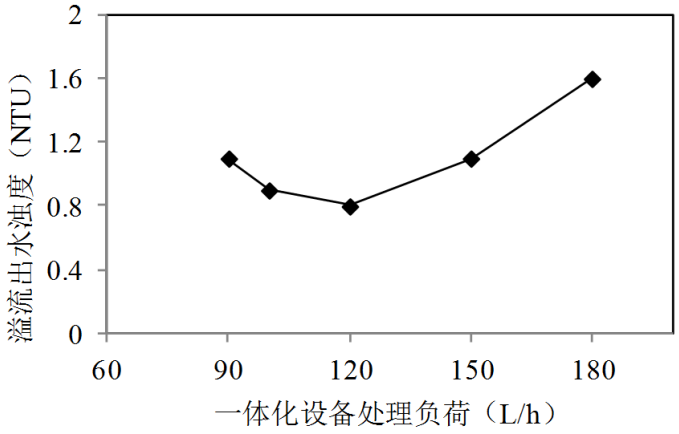


图 6 一体化设备处理负荷对处理效果的影响

当处理负荷小于 120 L/h 时，溢流出水的浊度随处理负荷的增加而降低，此后进一步增加处理负荷将导致分离效率的降低，溢流出水浊度随着增加。分析认为，一定范围内处理负荷的增加，可以提高一体化设备内部的旋流强度，从而增强接触絮凝效果，但当处理负荷超过一定限值（本研究中为 120 L/h）后，物料在一体化设备中的停留时间过短，不利于接触絮凝和固液分离，将导致浊度的增加。

经计算，当处理负荷为 120L/h 时，地下水在一体化设备内的停留时间仅为 60 s 左右，与常规沉淀、浓缩工艺相比，优势非常明显。

4 结语

研发的接触絮凝/水力旋流一体化设备，将接触絮凝工艺与水力旋流固液分离工艺有机结合，通过调控水力旋流过程在一体化设备内实现悬浮物的接触絮凝，经接触絮凝后水力旋流的固液分离效率得以强化。一体化设备对地下水的硬度去除中试结果表明，装置出水硬度和浊度完全满足《生活饮用水卫生标准》（GB 5749-2006）。

接触絮凝/水力旋流一体化设备软化药剂的和混凝剂的最佳投加量分别为 150 mg/L 和 30 mg/L；最佳分流比 0.08，最佳处理负荷 120 L/h，在此负荷下物料在一体化设备中的水力停留时间约为 60 s。

参考文献：

[1] Mahasti N N N, Shih Y J, Vu X T., et al. Removal of calcium hardness from solution by fluidized-bed homogeneous crystallization (FBHC) process[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2017, 78: 378–385.

[2] Chaussemier M, Pourmohtasham E, Gelus D., et al. State of art of natural inhibitors of calcium carbonate scaling[J]. Desalination, 2015, 356: 47–55.

[3] 张程，刘成，胡伟. 复配药剂软化法对地下水中硬度的去除效能研究[J]. 中国给水排水, 2014, 30(7): 43-46.

[4] Rodriguez-Blanco J D, Bots P, Roncal-Herrero T, et al. The Role of pH and Mg on the Stability and Crystallization of Amorphous Calcium Carbonate[J]. Journal of Alloys and Compounds. 2012, 536: S477−S479.聂小保，徐超，易青明，等. 水力旋流器原位处理疏浚泥水研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11): 66-72.

水电工程临河型弃渣场水土保持措施体系研究

邹兵华，袁　洁，操昌碧

（中国水电顾问集团成都勘测设计研究院，四川 成都 610072 ）

摘 要：本文通过对西南地区多个大中型已建和在建水电站临河型渣场典型防护措施的调查，对临河型渣场的防护措施体系进行了分析总结，并结合水土保持法律、法规、技术规范的要求和新技术、新工艺、新材料的应用及工程措施与植物措施有机结合等，从水保措施的安全稳定性、施工适应性、经济性、生态功能和绿化效果统筹的角度，对临河型渣场防护措施的体系布局及适用条件进行了研究分析，可为水电工程临河型渣场及其他类型渣场的防护措施设计提供参考。

关键词：水电工程；临河型渣场；防护措施体系；适用条件

1 引言

近年来，我国水电工程建设及发展迅速，随着“西部大开发”和“西电东送”战略的深入推进，西南地区的金沙江、雅砻江、大渡河等流域已经成为我国水电开发的重要基地。

水电工程项目在开发建设过程中，枢纽工程建筑物（拦河大坝、引水隧道、发电厂房）、施工道路、土石料场、施工生产生活场地等基础、边坡开挖等均可能产生大量弃渣。由于弃渣体为人工堆置形成的松散堆积体，在降雨、洪水及重力等作用下，可能造成较严重的水土流失危害。实践证明，弃渣是水电工程建设过程中水土流失的主要来源，弃渣场通常为水电工程建设中水土流失防治的重点区域，而渣场防护是保证渣场边坡稳定，防治水土流失，恢复生态环境的重要举措，对水电工程弃渣场防护措施体系及其适用条件进行研究，特别是工程措施与植物措施的有机结合，对做好渣场水土保持，乃至水电工程水土保持工作有着重要的现实意义。

根据《生产建设项目水土保持设计指南》[1]，水电工程的弃渣场可分为临河型渣场、沟道型渣场、库区型渣场、坡地型渣场以及平地型渣场。由于水电工程多处于高山峡谷地区，项目区场地有限，弃渣场布置较为困难。水电工程施工布置通常在综合考虑弃渣来源、场地布置、渣场容量、交通运输条件及弃渣运距等因素后，选择交通运输条件好、运距短的河（沟）道两岸较为平缓的滩地布置弃渣场，其特点是渣脚高程低于河（沟）道中相应渣体防护标准的设防洪水位，这种渣脚受洪水影响的渣场称为临河型渣场，其挡渣建筑物称为拦渣堤。目前，关于水电工程渣场防护措施体系及适用条件的研究相对较少，为了提高渣场设计成果的合理性、实用性和工作效率，需对渣场的防护措施体系和各措施的适用条件进行研究，以供设计人员在设计工作中，根据现场施工条件、建筑材料来源、洪水特性（流速、水位）、迹地恢复要求等实际情况，分别选择相应的防护措施，以系统、全面、快速、合理的完成渣场的防护措施设计。经过调查统计，临河型渣场作为水电工程中最常见、防护措施最全面、防护措施对其他类型渣场借鉴作用最大的一种渣场类型，通过对其防护措施及其适用条件进行研究，进而建立从渣脚到渣顶全方位、立体式的防护措施体系，可以有效地指导临河型渣场的水土保持防护措施设计，同时也可为其他类型渣场的防护措施设计提供有益的参考。

2 典型临河型渣场特点及防护措施设计要求

临河型渣场的弃渣堆积在河床或沟道的两岸，渣脚高程低于河（沟）道中渣体防护标准的设防洪水位，为防止弃渣进入河道和渣体坡面的水土流失，同时抵抗一定标准的设计洪水，渣脚需要设置拦挡、防淘措施、坡面需设置防洪水冲刷的护坡措施；为了满足水土保持的要求，临时用地需要迹地恢复，因而坡面防冲刷措施以上的坡面及渣顶需要采取林草植物措施；同时为了排除坡面汇水对渣体的冲刷，需在渣顶内侧周边及马道上设置截排水沟将雨水排走。

3 典型防护措施调查

3.1 防护措施现场调查

经过现场调查，金沙江、雅砻江、大渡河等流域已建、在建的溪洛渡、锦屏一级、官地、猴子岩、泸定、大岗山、硗碛、双河等水电站典型临河型渣场防护措施见图 1。



(a) 溪洛渡水电站豆沙溪沟渣场临江侧钢筋石笼拦挡护坡



(b) 溪洛渡水电站溪洛渡沟渣场混凝土拦渣堤、框格护坡及其内撒播草籽



(c) 锦屏一级水电站棉纱沟渣场土工格栅植灌草护坡



(d) 官地水电站 1#渣场渣脚混凝土拦挡



(e)大岗山水电站桃坝渣场混凝土拦渣堤



(f)硗碛水电站 4# B 渣场浆砌块石拦渣堤



(e) 官地水电站 1#渣场坡面浆砌石护坡



(f) 官地水电站 2#渣场Ⅰ区混凝土拦渣堤及浆砌石护坡



(g) 猴子岩水电站 1#渣场格宾石笼拦挡、防淘及雷诺护垫护坡



(h) 猴子岩水电站 2#渣场浆砌石拦渣堤及护坡



(i) 泸定水电站 2#渣场浆砌石拦渣堤及干砌石护坡



(j) 泸定水电站 3#渣场雷诺护垫护坡



(k) 溪洛渡水电站杨家沟渣场渣顶乔草绿化



(l) 官地水电站 1#渣场坡面植草绿化



(m) 硗碛水电站泄洪洞渣场渣顶及坡面撒播草籽



(n)双河水电站 3#渣场坡面撒播草籽及截（排）水沟



(o) 双河水电站 3#渣场渣顶栽植乔木、撒播草籽及周边截水沟



(p) 硗碛水电站 3#支洞渣场渣脚栽植乔木及坡面撒播草籽



(q) 溪洛渡水电站豆沙溪渣场顶面内侧排水沟



(r)硗碛水电站 1#支洞渣场挡墙外侧排水沟

图 1　临河型渣场典型防护措施现场调查

2.2 立体防护措施体系

根据临河型渣场典型防护措施的现状调查，结合水土保持法律、法规、技术规范[3-7]的要求，经过分析总结，对渣场从渣脚到渣顶在垂直方向上层层设防，形成了临河型渣场完整的防护措施体系，主要包括：渣脚防护、坡面防护、渣顶迹地恢复及截排水措施等，渣场防护中已经采用的防护措施和可用于渣场上述四个部位防护的措施具体如下：

1）渣脚防护措施：主要为浆砌石挡墙、混凝土挡墙、石笼（铅丝、格宾）挡墙

2）坡面防护措施：主要为工程护坡、植物护坡和综合护坡，具体如下：

①工程护坡：主要有砌石护坡、混凝土护坡、石笼护坡等；

②植物护坡：主要有三维植被网护坡、生态袋护坡、撒播（灌）草籽等；

③综合护坡：主要有框格骨架植草护坡、雷诺（格宾）护垫护坡、联锁式护坡、铰接式护坡、土工格栅植灌草护坡等；

3）渣顶迹地恢复措施：主要为栽植乔灌木造林、撒播（灌）草籽；

4）截排水措施：渣顶截（排）水沟、坡面截水沟。

3 防护措施及适用条件分析研究

3.1 防护措施体系

由于临河型渣场的弃渣堆积在河床或沟道的两岸，渣脚高程低于河（沟）道中渣体防护标准的设防洪水位，为防止弃渣进入河道和渣体坡面的水土流失，按照“先拦后弃”的原则，需沿河道堆渣侧渣体坡脚线修筑拦渣堤，并满足相应设计洪水条件下的防掏和防冲刷要求。为此，堤基临水侧计算冲刷深度以下 0.5～1.0m 的范围需要设置齿墙等可靠的防淘措施，拦渣堤的结构和断面需满足相应稳定安全要求。同时，对设计洪水位加安全超高至拦渣堤内侧（顶）的渣体坡面采取工程护坡措施。为了保证渣体边坡的稳定，堆渣坡比要求缓于 1：1.6～1：1.8，并对高差较大的渣体边坡，每隔 15～20m 设置一道 1.5～2.0m 宽的马道。对工程护坡以上的渣体坡面及渣顶，为了使单调、易被降雨冲刷的松散渣体坡面与周围环境相协调，需要采取植物、生态恢复措施或是景观绿化、美化措施，同时为了排除坡面汇水对渣体的冲刷，需在渣顶内侧及马道上设置截排水沟将雨水排走。

3.2 防护措施适用条件分析

通过对临河型渣场特点及防护要求的分析，从安全稳定性、施工适应性、经济性、生态功能及绿化效果四个方面，对渣场从渣脚到渣顶全方位的水土保持防护措施（主要为：渣脚防护措施、坡面防护措施、渣顶绿化措施、截排水措施）进行研究，结合新技术、新材料和新工艺的应用及工程措施与植物措施相结合的水土保持设计理念，对各防护措施的特点和适用条件进行总结，具体如下：

3.2.1 渣脚防护措施

渣脚防护措施主要为拦渣堤，常采用重力式结构形式，按建筑材料分类，主要为浆砌石、混凝土、石笼（铅丝、格宾）等。

浆砌石拦渣堤：是采用水泥砂浆作为胶凝材料的砌石拦渣堤，浆砌石拦渣堤具有就地取材、施工简单、抗冲、抗磨、耐用、投资较省等优点，适用于渣脚受洪水影响、淹没深度小于 3～5m，水流流速小于 3～5m/s 渣场的渣脚防护[1]。

混凝土拦渣堤：是以混凝土作为建筑材料的拦渣堤，具有抗冲、抗磨、耐用等优点，适用于渣脚受洪水影响、淹没深度大于 3～5m，水流流速 5～8m/s 的渣脚防护[1]。

格宾石笼拦渣堤：格宾指由镀锌或 5% AL-ZN 稀土合金（高尔凡）的冷拔低碳钢丝经机器编制而成的六边形双绞合金属网面构成的箱型构件，使用时把箱内填充满尺寸适当的毛石，并封口形成的防护结构称为格宾石笼。格宾石笼所需的格宾网可在工厂进行规模化生产，箱内填充石料可就地取材，来源丰富，具有耐久性好，透水、排水性好，能有效减少静水压力和渗透压力，同时适应地基及坡面不均匀沉降的能力强，能灵活适应干地、水下施工，施工工艺简单，操作容易，适用于渣脚受洪水影响，流速为 6.0～8.0m/s 的渣脚防护，并可单独作为拦渣堤临河侧基础的防洪水冲刷措施。

钢筋石笼拦渣堤：钢筋石笼是以较粗钢筋（Φ12）作为基本骨架，以稍细钢筋（Φ8）护面，经焊接、填石、封口而形成的一种规则箱型防护构筑物。因钢筋石笼暴露大气环境中，钢筋易锈蚀、断裂，失去对填石的约束作用进而遭受冲毁破坏，因此在水电工程的渣场防护中，钢筋石笼钢筋石笼适用于渣脚受洪水影响，流速小于 6m/s，后期被淹没或作为临时渣场的渣脚防护。

3.2.2 坡面防护措施

渣场坡面防护措施主要为工程护坡、植物护坡和综合护坡。具体为：1）工程护坡主要有：砌石护坡、混凝土护坡、石笼护坡等；2）植物护坡主要有：三维植被网护坡、生态袋护坡、撒播（灌）草籽等；3）综合护坡主要有：框格骨架植草护坡、格宾护垫护坡、联锁式护坡、铰接式护坡等。

3.2.2.1 工程护坡

干砌石护坡：是采用块石直接垒筑而不需要胶凝材料的护坡措施，适用于渣体边坡因雨水冲刷，可能出现沟蚀、溜坍、剥落以及可能受洪水影响、坡面较缓（坡度为 1:2.5～1:3.0）、流速小于 3.0m/s 的渣体坡面防护[1]。

浆砌石护坡：是采用浆砌石对渣场坡面进行防护、防止洪水冲刷的工程护坡措施，适用于位于沟岸、河岸、沟道坡面较陡（坡度为 1:1.0～1:2.0）、可能遭受洪水冲刷的临河型渣场的渣体边坡防护[1]。根据《灌溉与排水工程设计规范》[2]（GB50288-99），单层浆砌块石护坡的抗冲刷流速为 2.5～4.0m/s，双层浆砌块石护坡的抗冲刷流速为 3.5～5.0m/s，浆砌石护坡的抗冲刷流速为 4.0～6.0m/s，设计中根据河流的流速来选取。

混凝土护坡：是以混凝土作为建筑材料的工程护坡措施，适用于边坡可能遭受强烈洪水冲刷的临河型渣场的渣体边坡防护。根据河道水流的流速情况，可采取混凝土或钢筋混凝土护坡，必要时需加锚固定。根据坡面可能遭受洪水冲刷的强烈程度选用不同的混凝土强度等级，一般是冲刷的强烈程度越严重，护坡的混凝土强度等级越高，常用的混凝土有 C15、C20、C25。一般来说，现浇混凝土的抗冲流速小于 8.0m/s[1]。

3.2.2.2 植物护坡

三维植被网护坡：三维植被网是一种适用于水土保持的新型土工合成材料，是用于植草固土用的一种三维结构的似丝瓜网络样的网垫，可在坡面构建一个具有自身生长能力的防护系统，具有质地疏松、柔韧等特点，留有 90%的空间可充填土壤、沙砾和细石，植物根系可以穿过其间，由于植物根系可深入地表以下 30～40cm，从而形成一层坚固的绿色复合保护层，可有效地防止水土流失，增加绿化面积，改善生态环境。当边坡的植被覆盖率达到 30%以上时，能承受小雨的冲刷，覆盖率达 80%以上时能承受暴雨的冲刷，待植物生长茂盛时，能抵抗冲刷的水流流速达 6m/s，三维植被网护坡作为一种植物护坡，适用水流流速小于 6m/s[1]、生态绿化效果要求较高的临河型渣场渣体边坡绿化。

生态袋护坡：生态袋系由聚丙烯（PP）及一系列辅料复合加工而成的双面熨烫针刺无纺布加工而成的具有抗紫外、抗老化、无毒、不助燃，裂口不延伸的袋子，作为一种植物护坡形式，适用于景观要求较高、小于流速 5m/s[1]的临河型渣场的渣体边坡防护。

撒播（灌）草籽护坡：作为迹地恢复的植物护坡形式，是渣场边坡绿化常用的一种方式，通过覆土，能够迅速覆盖渣体，恢复生态环境，具有施工简便，价格低廉，养护容易等特点，适用于需要迹地恢复、不受洪水影响的临河型渣体边坡。在选择（灌）草种籽之前，要按照当地的气候条件、立地条件及生态绿化效果，结合（灌）草籽的生理、生态特性进行考虑，并以选择乡土、易于成活和养护容易的(灌)草种为主。

3.2.2.3 综合护坡

框格骨架内植灌草护坡：是指采用浆砌石、混凝土等在坡面形成框架，结合铺草皮、喷播植灌草、栽植灌木等方法形成的一种护坡技术。框格骨架根据形状的不同，可分为方格形、菱形、人字形等[1]，作为一种综合护坡形式，框格植灌草护坡特别适用于坡度较陡、坡体岩土均匀且较稳定的边坡。但对于不同稳定性的边坡应采用不同的框格形式和锚固形式组合进行加固或坡面防护。当边坡稳定性好，可采用浆砌块石框格护坡。如果边坡稳定差，可采用现浇钢筋混凝土框格，加锚杆进行加固。框格固定好之后，在框格内植草或栽植藤本植物，进行综合防护。适用于各类型、各土石比例的渣场边坡，常用坡率 1：1.0～1：1.5，每级边坡高度不超过 10m，但在干旱、半干旱地区应保证养护用水的持续供给，施工季节一般应在春季和秋季进行，应尽量避免在暴雨季节施工[1]。

雷诺护垫护坡：是指由机编双绞合六边形金属网面构成的厚度远小于长度和宽度的垫形工程构件（厚度在 0.15～0.3m(含 0.3m)的网箱结构），由隔板分成若干单元格，其中装入块石等填充料后盖板，各箱面板边端均采用直径更大的钢丝连接成一体。作为一种综合护坡形式，雷诺护垫护坡具有柔性、对地基适应性强等优点，适用于生态绿化效果要求较高、可能受洪水冲刷影响的临河型渣场边坡防护，其厚度、允许洪水流速见表 1。

表 1 雷诺护垫抗冲刷流速表

厚度（m）	填充石料粒径		临界流速	极限流速
	石料粒径	d_{50}	m/s	m/s
0.17	70～100	0.1	3.5	4.2
	70～150	0.1	4.2	4.5
0.23	70～100	0.1	3.6	5.5
	70～150	0.1	4.5	6.1
0.30	70～100	0.1	4.2	5.5
	70～150	0.1	5.0	6.4

联锁式护坡：是一种新型连锁式混凝土预制块相互联锁组成的铺面系统，由一组尺寸、形状和重量一致的新型混凝土预制块相互连接而形成的连锁结构，它独特的连锁性设计使每一个联锁块被相邻的 6 个联锁块锁住；联锁块铺面提供一个稳定、柔性、透水、可植草的坡面生态保护层[1]。联锁式护坡是新型连锁式混凝土预制块相互联锁组成的铺面系统，能为受中低型波浪作用的渣场边坡提供有效、耐久的边坡防护，具有施工便捷、经济耐用、稳定、柔性、透水和可植草特点，适用于处于中小水流（不大于 6.0m/s），需要截流降水、恢复生态、降低坡体孔隙压力的边坡防护及绿化，同时可满足多色彩的景观要求。作为一种综合护坡形式，联锁式护坡适用于景观要求较高、不受洪水影响的各类型渣场的渣体边坡以及可能受洪水影响、流速 6m/s 以下、坡度缓于 1:1.0[1]、景观要求较高的临河型渣场的渣体边坡防护。

铰接式护坡：是一种预制高强度混凝土块铺面系统，由一组尺寸、形状、重量一致的预制混凝土块用一系列绳索（如镀锌钢绞线）相互连接而形成的联锁型矩阵，用于渣体边坡的防护，具有抵抗水力侵蚀的性能，并对防治水土流失具有极高的实用功能，同时在块体内部可采取植物措施，以达到生态绿化效果[1]。作为一种综合护坡形式，铰接式护坡适用于景观要求较高、不受洪水影响的各类型渣场的渣体边坡以及可能受洪水影响、流速 6m/s 以下、坡度缓于 1:1.0、景观要求较高的临河型、沟道型、库区型及平地型渣场的渣体边坡防护。

土工格栅植灌草护坡是指利用土工格栅作为固土材料，并以灌木及草本类植物为主要植物，种植在坡体上构建植物群落，以利坡面防护和植被恢复的护坡措施[1]。该项措施比一般草皮护坡具有更高的抗冲能力，具有成本低、施工方便、易于绿化、恢复植被、美化环境等优点。作为一种综合护坡形式，土工格栅植灌草护坡适用于景观要求较高、可能受洪水影响但流速 1m/s～2m/s、坡率缓于 1：1.5、每级坡面高度不超过 10m[1]的临河型渣场的渣体边坡防护。

3.2.3 渣顶植被恢复措施

对于渣顶的防护，通常分为以下两种情况：1）有复耕造地要求的渣顶：由移民安置专业按照相关设计规范进行设计；2）无复耕造地要求的渣顶：防护措施主要为栽植乔灌木造林、撒播（灌）草籽绿化。因撒播（灌）草籽已在坡面防护措施中介绍，所不同的是撒播场地的坡度不一样而已，其适用条件类似，这里不再赘述，下面着重阐述渣顶栽植乔灌木的造林措施。

对于不需要复耕造地的渣顶，由于其场地较平整，常常“因地制宜、适地适树”进行乔灌木搭配造林，以增强生态绿化效果，作为一种渣顶绿化措施，栽植乔灌木造林适用于生态绿化要求较高的临河型渣场的渣顶绿化。

渣顶造林之前，先应该按照当地的气候条件、立地条件及要达到的生态绿化效果，结合造林树种的生理、生态特性进行考虑，使造林树种的生物学、生态学特性与造林地的立地条件相适应，并以选择乡土、易于成活和养护容易的树种为主。

3.2.4 截排水措施

渣场的截水沟是指在坡面或渣顶面靠山坡侧修筑的拦截、疏导上坡面汇流，具有一定比降的沟槽工程；排水沟是指用于排除坡面或渣顶面雨水的沟槽工程。在水电工程中，通常截排水沟结合应用，其材料多采用浆砌石砌筑或混凝土浇筑，断面形式常采用矩形、梯形等，具有就地取材、施工简便、造价低廉等特点。渣顶截（排）水沟适用于渣顶内侧需排除上坡面降雨汇流的临河型渣场；坡面（马道）截（排）水沟适用于坡面汇流面积较大，且设置有马道的渣体坡面。

在水电工程的临河型渣场水土保持设计工作中，可根据渣场堆置方案、防护建筑物材料来源、受洪水影响的程度、坡面及渣脚遭受冲刷的流速、迹地恢复及景观绿化的要求等现场实际情况，分别选择各种渣脚防护、坡面防护、渣顶迹地恢复及截排水措施进行组合，形成经济合理、可行的渣场防护措施方案，以减少防护措施方案比选工作量，提高设计成果质量、针对性和工作效率。

4 结语

当前水电工程作为清洁能源，受到社会各界的广泛关注，但由于其开发方式的特殊性，建设过程中必然产生大量的弃渣，须设置渣场集中堆放。实践证明，弃渣场为水电工程建设过程中水土流失防治的重点区域，做好渣场的水土流失防治工作，是水电建设项目防治水土流失的重要举措和关键环节。临河型渣场作为水电工程中最常见、防护要求较高的一种渣场类型，通过对其防护措施及其适用条件进行分类研究，从而建立起从渣脚到渣顶全方位、立体式的防护措施体系，对临河型渣场的水土保持防护措施设计，具有较大的实践意义，同时也可为水电工程其他类型渣场的防护措施设计提供借鉴和参考。

但对于工程弃渣，由于其来源、组成、大小、形状等复杂，其物理力学性质和参数对确定坡比以及稳定性计算至关重要，直接影响到防护措施的设计，进而影响渣场的安全稳定，今后可对渣场的渣料组成、物理力学性质、参数以及安全稳定计算方法等方面进行研究，以得到可靠的设计参数，进而保证渣场的安全稳定；同时立地条件对植物树草种选择、建植方式、时间及养护影响较大，后续研究可对水电工程所在大江、大河的立地条件（光、热、水、土壤、气温）进行研究和分类，并推荐提出各立地条件下适宜的乔、灌木及草种。

参考文献：

[1]《生产建设项目水土保持设计指南》，中国水利水电出版社，2011.11.
[2]《灌溉与排水工程设计规范》（GB50288-99）
[3]《开发建设项目水土保持技术标准》(GB 50433－2018)
[4]《开发建设项目水土流失防治标准》(GB 50434－2018)
[5]《水电建设项目水土保持方案技术规范》（DL/T5419-2009）
[6]《造林技术规程》(GB/T15776-2006)
《水土保持工程质量评定规程》(SL336-2006)

基于“海绵城市”的透水人行道路面面层材料应用对比分析

汤　峰，姚帮松

（湖南农业大学工学院，湖南 长沙 410128 ）

摘　要：近年来，强降雨引发了城市内涝等一些列问题，不透水路面已不能满足海绵城市建设要求，透水路面作为海绵城市建设的重要一环，对于雨水进行合理利用和生态保护也将提供十分显著的帮助和影响作用。本文简要介绍了城市透水性人行道路面的作用、分类和意义，及三种主要的透水面层材料(透水混凝土、透水沥青混合料和透水路面砖)对比分析，并对透水路面的发展提出了一些自己的建议。

关键词：人行道；面层材料；透水路面；分析

随着我国经济的发展，城镇化进程的加速，城镇地表逐步被钢筋混凝土房屋、大型基础设施、各种不透水的公共场地和透水性极差的混凝土路面覆盖。其中混凝土路面所占比例越来越大，对社会和生态环境产生了许多负面影响，尤其是当降雨强度较大或历时较长时，会因排水速率不够而迅速形成地表径流，导致路面积水、交通不畅而引发城市内涝；雨水无法下渗，被不断抽取的城市地下水得不到补充，地下水位下降，引发地面沉降；密不透气的面层使得其上、下难以进行热量和水分的交换，不能有效地调节地表温湿度，加剧了城市的热岛效应；由于冲刷和溶解作用，城市地表的污染物（各种营养盐、颗粒物质甚至是有毒有害的重金属进入地表径流，其直接排放会对受纳水体造成污染。不透水路面在地表径流产生后，雨水才通过城市排水管网排出，是典型的末端治理方式，近年来，已不能满足城市的发展要求。



图 1 长沙市人行道积水



图 2　长沙“看海”

海绵城市的主要建设原因就是确保城市在发展中具备更为显著的弹性和可持续性，综合其定义和功能，就是城市要对自然灾害等外部环境变化进行有效适应，所以这项工作具备良好的弹性，能实现对雨水的吸取、渗透和净化，并且对这些积蓄的水实现有效利用，可持续发展，最终借助自然或人工结合的手段，切实满足生态优先的工作原则，这对于雨水进行合理利用和生态保护也将提供十分显著的帮助和影响作用，其中的重要环节之一就是透水路面（见图 3）。

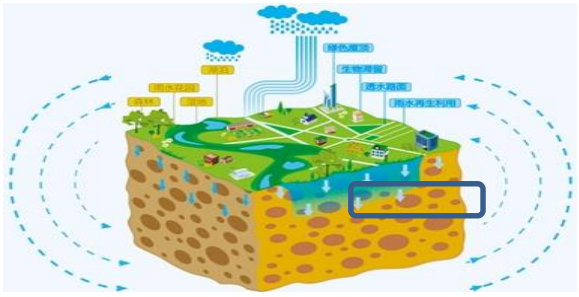


图 3　海绵城市示意图

1 城市透水路面的作用

相对于传统路面，透水性面层则是针对地表径流产生的根源，利用自身良好的透水性能对雨水进行分散式的吸收，推迟了地表径流产生的时间，缓和了径流高峰，提高了对降雨控制的效率，大大减轻了城市管网的排水压力。其改善性的作用如下：1）分散性地收集和处理雨水，在径流还未产生时就将其全部或部分地消除，降低城市地表径流系数，缓和径流高峰；2）雨水顺着面层材料的孔隙下渗到基层和土壤，再经土壤继续向下渗透，维持土壤的生态环境，补充地下水源；3）面层以下的基层和土壤有天然的过滤作用，可以截留下渗雨水带来的地面污染物，还可以通过其自身所具有的生态功能净化污染物，降低排入水体中的污染物浓度；4）透水面层的孔隙增大了路面的透水性和透气性，使得路面具有呼吸功能，从而加强地表与空气之间能量与物质的交换，调节城市气候，缓解热岛效应，尤其是在阳光曝晒的夏季，对降低路面表层温度具有很大的作用；5）即使路基不透水，大量的雨水也可以暂时地储存在基层和面层的孔隙中，通过排水管道或者蒸发作用消除；6）面层的凹凸构造和上下连通的孔隙可降低噪音，为人们创造安静的城市环境。

2 城市透水路面的分类

根据水流路径的不同，透水路面可以分为全透型透水路面、半透型透水路面和排水型透水路面（详见图 4-6）。此分类的工程意义在于：各透水路面的功能要求不同，半透水型路面主要用于避免路面积水，雨水不能透过路基深入地下，而全透型除此之外还有补给地下水的功能。此分类还考虑了土基承载力和降雨状况的不同。根据透水路面的面层材料划分，主要分为透水混凝土、透水沥青混合料、透水路面砖三种。

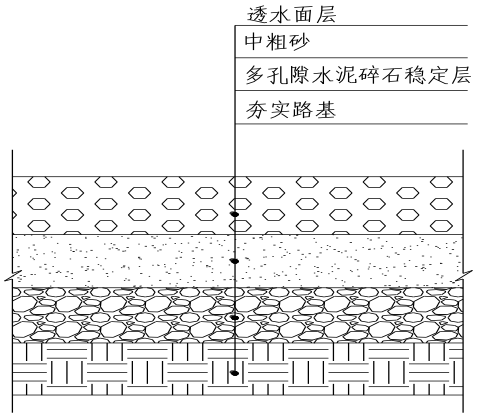


图 4 全透型透水路面

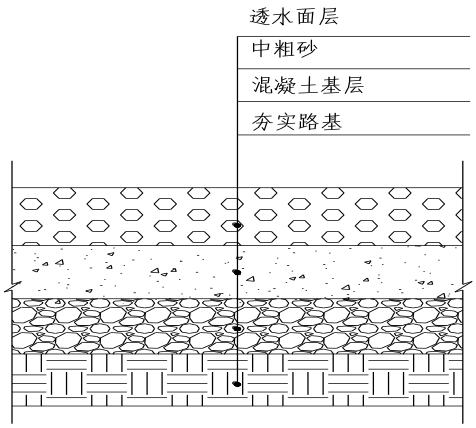


图 5 半透型透水路面

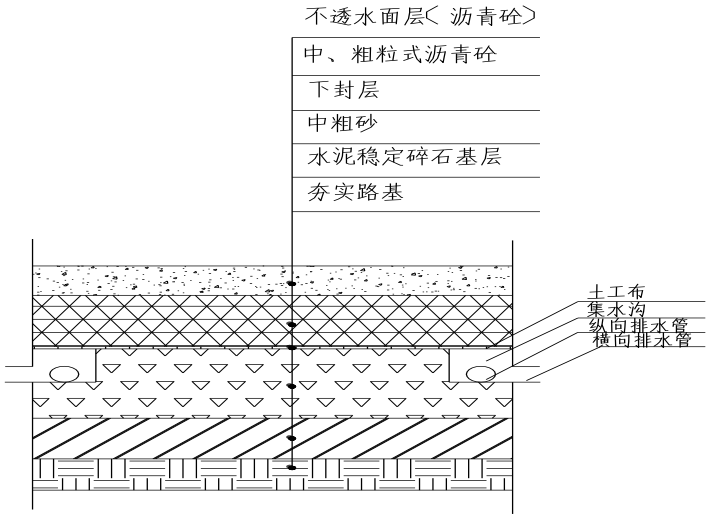


图 6 排水型透水路面

3 透水人行道路面面层材料分析

3.1 透水混凝土面层

透水混凝土是由骨料（不含或少含细骨料）、水泥、水、外加剂和掺合料等按一定比例制成的具有连续孔隙构造的多孔混凝土。普通的水泥混凝土路面缺乏渗透雨水和吸收热量的能力，极大地破坏了城市生态系统，透水混凝土则可以有效地解决这一问题，是生态混凝土的重要品种之一。它的制备方法是通过控制水泥用量，使其恰好包裹粗骨料的表面，而不致流淌到骨料间的空隙，通过骨料表面水泥浆的胶结作用，形成具有上下连通的连续孔隙的骨架－孔隙结构。由于细骨料比表面积比较大，包裹其表面所需的水泥也要增加，从而会导致孔隙率的下降。因此，透水混凝土通常不加细骨料，但也可以加少量细骨料增加强度。

根据凌天清[1]、罗旭辉[2]、程娟[3]等人的研究，笔者在湖南农业大学结构试验室进行了透水混凝土面层配合比设计试验，采用“印山台”牌 P·O42.5R 普通硅酸盐水泥作为胶结材，其各项技术性能如表 1：

表 1 水泥技术性能

密度/	凝结时间	/min	抗压强度	/MPa	抗折强度	/MPa
($g \cdot cm^{-3}$)	初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
3.0	155	230	29.6	51.8	5.3	8.7

骨料配置时，选用粒径在 10-20mm 的单一粒径碎石，表观密度为 2616kg/m^3，堆积密度为 1403kg/m^3，含泥量在 0.5%以下。掺入粉煤灰，具体性能如表 2 所示。

表 2 粉煤灰性能及组分 /%

细度	需水量比	含水量	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
18.9	100	0.1	51.6	26.3	9.2	3.8	1.8	7.3

水采用自来水，采用水泥裹石法拌制混凝土，既不影响透水混凝土空隙形成，满足透水特性要求，又能保证试件具有足够抗压、抗折强度，满足其应用于路面的力学性能条件。插捣法成型，拌合物分 3 次装入试模，每一层装入的厚度略高于试模高度的 1/3，分层插捣，每一层插捣 25～30 次，成型、拆模后置于水中养护（如图 7 所示），并每天记录水槽温度。参照 JTGE30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》[4]要求，确定试件的 28d 立方体抗压强度 f_{cu}（试件尺寸 150×150×150mm）（如图 8 所示）和 28d 抗折强度 f_f(试件尺寸 400×100×100mm)（如图 9）。笔者采用 15℃透水系数评价混凝土透水性能，其测试方法参见文献[5]，测试装置如图 10。国家建筑标准设计图集 10MR204《城市道路透水人行道铺设》[6]规定:土基渗透系数大于等于 10^{-4}cm/s，且渗透面距离地下水位>1.0m 时，路面用于有人群无停车荷载透水人行道时，面层透水水泥混凝土厚度一般为 30-50mm，抗压强度≥C30，抗折强度≥3.5MPa，透水水泥混凝土 15℃透水系数不小于 0.5mm/s。



图 7 透水混凝土养护



图 8 抗压试验装置



图 9 抗折试验装置



图 10 透水性能试验

表 3 透水混凝土性能试验结果

编号	水灰比	水泥用量/	碎石用量/	性 能			
		(kg/m3)	(kg/m3)	有效孔隙率	k(15℃)	28d 抗压强度	28d 抗折强度
/	/	/	/	/%	mm/s	MPa	MPa
T_1	0.35	398	1714	18.6	2.8	22.3	3.51
T_2	0.35	318	1714	20.8	3.2	20.8	3.55
T_3	0.35	398	1714	21.3	3.6	19.6	4.10

注：目标孔隙率均为 20%,T1 未掺入外加剂；T2 掺入粉煤灰（掺量为 20%）；T3 掺入减水剂（聚梭酸类高效减水剂掺量为 3%）

从试验结果不难看出，粉煤灰和减水剂的掺入，能提高透水混凝土的透水性，原因是粉煤灰的水化产物依然不多,填充空隙的能力差,宏观上则表现为透水性好。掺入聚合物减水剂后,改善了透水混凝土拌和物的工作性,从而使透水系数变大，另外，外掺粉煤灰和减水剂均使得 28d 的抗压强度降低，但抗折强度均有提高，但本研究仅针对某一定量的值，对于不同掺量的外加剂的影响并未进行。

综上所述，透水混凝土面层施工简单，养护费用低，设计与施工人员对混凝土的性能也比较了解，理论和技术比较成熟,其铺装作为低影响开发（Low Impact Development，简称 LID）措施之一，可以达到用雨水补充地下水资源；减少路面径流，预防城市内涝的发生；减少路面径流携带的污染物，减轻河道水体污染等目的。透水混凝土铺装对改善城市的自然环境和维护生态平衡等具有重要的现实意义，是一种与自然环境相协调的绿色基础设施。但其也有以下缺点：1）质量不宜控制，表面往往比较粗糙，表面颗粒容易脱落。由于透水混凝土的多孔结构，使得骨料之间的接触面积减少，内部的粘结力和机械咬合力降低，所以相同配合比下，其强度低于普通的混凝土。2）耐久性差。透水混凝土的蜂窝状结构，使其抗压、抗折性能较差；透水混凝土表面孔隙率大，容易受到空气、阳光和水的侵蚀，所以其耐久性也有待提高。3）易堵塞。由于透水混凝土结构松散，孔隙率大因此易被颗粒物堵塞。 然而其各种优良性状都是依靠孔隙渗水来实现的，一旦孔隙被堵塞，其优点将得不到有效的发挥。4）不易维护。透水混凝土铺装作为新型设施，从技术层面来看还没有有效的维护方法。如当遭遇风沙天气后，细小的沙尘将透水混凝土孔隙占据，铺装渗透效果大大降低。透水混凝土相对普通混凝土来说,在相同的抗压强度的情况下,透水混凝土有较高的抗折强度，但其水泥用量有所提高，不利于国家环保要求，其发展前景是各类纤维改性再生骨料透水混凝土，利用工业固体废料以及农业废料来减少水泥的用量，保护环境。

3.2 透水沥青混合料面层

到目前为止，透水性沥青混合料人行道路面无论配合比设计还是结构设计,都没有成熟的方法，特别是强度运用于结构中的透水混凝土路面设计方法，更不系统，所以没有相应的设计标准或规范可供参考。笔者总结出应主要从以下几个方面来分析：

3.2.1 原材料选择

透水沥青混合料面层混合料的选择主要考虑针入度、软化点、延度、TFOT 与 RTFOT 后残留物等指标，应采用高粘度改性沥青，该沥青具有较小的针入度、较高的软化点和较好的抗裂性能。骨料采取间断级配，粗骨料含量较多且粒径均匀，细骨料和填料含量少，故形成与透水混凝土相同的骨架－孔隙结构，骨料与填料均宜采用与沥青粘附性好的材料，表面应清洁、粗糙而富有棱角、质地坚硬、颗粒近似立方体的轧制碎石,其颜色应尽可能与路面颜色相近,另外应考虑骨料压碎值、洛杉矶磨耗损失、黏附性均符合技术要求，磨光值（BPN）可作为参考。

填料一般采用石灰石等碱性岩石磨细而成的白色矿粉。使用时必须保持洁净、干燥、结团。另外，人行道路面面层一般会选择彩色沥青，颜料是彩色沥青路面色彩的主要来源,对彩色沥青路面的成本有较大的影响。彩色沥青的颜料应能承受日光的照射、不褪色、不溶于水,并有良好的耐热性。颜料在混合料级配设计中可代替部分矿粉的用量,其用量以所拌和的混合料肉眼观察具有足够的光亮度和鲜明的色彩为准。

3.2.2 配合比设计

设计透水沥青混合料面层的配合比时,应根据材料性能满足空隙率方面的设计要求，其设计有效空隙率应为 18%-25%，并考虑集料级配、最佳油石比、沥青饱和度、稳定度、流值等确定最佳配合比。

透水沥青混合料面层优点：1）具有调节路面温度功能。在烈日曝晒情况下，排水性沥青路面温度比普通沥青路面平均温度低约 2℃。若在城市中得以广泛应用，可一定程度上缓解热岛效应；2）透水沥青混合料面层平整性好，养护方便，具有良好的降噪功能，较好的柔性使得行走更加舒适；缺点：1）成本远高于传统的沥青混合料，施工要求高，养护费用也高；2）高温稳定性较差，容易老化，缩短了路面的使用寿命。

目前，沥青路面与混凝土路面一样，朝着再生技术迅猛发展，而沥青再生技术正朝着多元化、精细化、高效化的方向发展，不仅能节约资源、保护环境，还能拓展其应用范围，丰富道路材料产品种类，降低产品造价，是对现有再生技术的升级。然而，废旧沥青路面材料多元化、精细化、高效化再生利用的前提和基础是对旧料的分级分类，目前大多数生产场站按照旧料破碎后粒径大小分类形式简单，没有形成多元化再生的目标。若能建立完整的旧料检测、铣刨、回收体系，即首先通过检测及资料调查掌握旧料性质，其次制定有针对性的铣刨方案，最后对铣刨的旧料进行回收处理，如按照粒径、沥青种类、老化程度、矿料种类等逐步分级利用，才能最大化的实现废旧沥青路面材料的剩余价值。

3.3 透水路面砖

透水路面砖结构种类很多。按透水原理可分为通过砖体本身孔隙透水和通过砖与砖之间的缝隙透水两种。按材质和生产工艺可分为陶瓷透水砖和非陶瓷透水砖，陶瓷透水路面砖是将废陶瓷或其他材料粉碎、压制成形后，高温烧结而成的带有通道孔隙的透水砖；非陶瓷透水砖是将砂、石用凝结材料胶结、成形、固化而制成的透水砖，如混凝土透水路面砖。根据透水孔隙的形成方式，混凝土透水路面砖可分为两类，一类同透水混凝土类似，在制作中少用或不用细集料，预留通道孔隙以实现透水功能；另一类是在原料中加入发气剂，在制砖过程中放出气体并形成细小而均匀的气泡，使混凝土具有多孔结构[7]。透水路面砖铺砌与更换都较为方便，抗折强度和抗压强度相对较强，图案组合容易实现，具有良好的装饰效果。无论是陶瓷透水砖还是非陶瓷透水砖（这里主要指混凝土透水砖），在制作的过程中都会产生有害气体，前者是烧制过程中燃料本身放出的气体，后者的污染来源主要是水泥在生产过程中排放的颗粒物、二氧化硫和氮氧化物等。陶瓷透水砖虽然原料来源

广泛，但由于需要高温烧制，能耗远远大于非陶瓷透水砖，所以成本也比较高。边角处抗磨能力较弱，面层容易松动、沉陷和隆起。

根据我国透水砖行业标准 JCT945-2005，对透水砖的强度、保水性、透水性、耐磨性、抗冻性等指标做了规定。抗压强度等级 Cc30 平均值不小于 30MPa，单块最小值不小于 25MPa，耐磨性磨坑长度不大于 35mm，保水性不小于 0.6g/cm^2，透水系数(15℃)≥1mm/s，抗冻性 25 次冻融循环后外抗压强度损失率不得大于 20％。

近年来，围绕混凝土透水砖的研究主要趋向于如何利用工业、农业废料，取代砖内的骨料及水泥，减少水泥用量的同时，实现对各类矿渣和建筑垃圾的二次利用，节约能源，废物利用，保护环境。例如与笔者有着深度校企合作的张家界海绵城市生态建材有限公司研发的生态海绵砖，荣获多个国家专利，具有较高的生态效应。与传统的荷兰砖相比，生态海绵砖具有超强透水性与吸水性（如图 11）且重量减轻 30%，成本下降 20%。另外，生态海绵砖路面具有环境友好性或生物相容性，碱性低，适合植物的生长，减少水泥用量，除尘降噪、净水储热等功能。

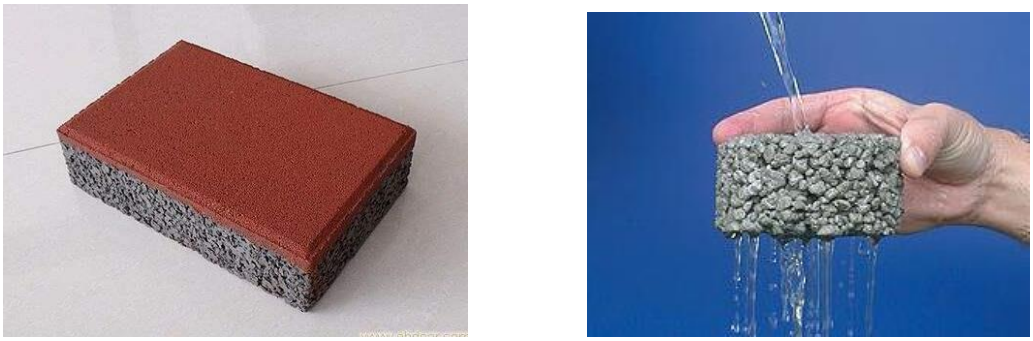


图 11 生态海绵砖

4 结语

有效推进新型城镇化，环保绿色的海绵城市建设成已为我国城市发展的主流方向，透水路面在其中发挥着重要的作用，其优点是具有排水、降噪、调节生态环境等功能，在一些发达国家发展迅速。我国对此的研究虽然较晚，理论研究与应用实践有待完善，但毋庸置疑的是透水路面前景良好。透水路面的面层材料应

具有适当的孔隙率和适中的强度，既要保证路面良好的透水效果，又要确保满足

一定的承载力。可以根据降水的强度等级和路面的承载情况，选择合适的孔隙率。对于透水水泥混凝土人行道面层厚度一般可设为 30-50mm，抗压强度≥C30,抗折强度≥3.5MPa，透水系数应不小于 1mm/s；对于透水砖人行道路面面层厚度视砖厚情况一般为 60-80mm，耐磨性磨坑长度不大于 35mm，保水性不小于 0.6g/cm^2。对于沥青混合料透水人行道路面面层材料，设计透水沥青混合料面层的配合比，其设计有效空隙率应为 18%-25%，并考虑集料级配、最佳油石比、沥青饱和度、稳定度、流值等确定最佳配合比。对于透水人行道路面今后研究发展，笔者认为应朝着生态、环保、利废、高强、透水的方向持续进行。另外，应对已修建的透水路面长期进行观测，不断寻求路面使用过程中出现的堵塞、脱落、破损、沉降等问题的解决方案，逐步形成一套比较完整的、成熟的透水路面人行道设计、施工与维护的规范。

参考文献：

[1] 凌天清,陈巧巧,秦新等.透水混凝土路面配合比设计及其性能影响因素研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019(38)3:38-59.

[2] 罗旭辉.基于透水混凝土在海绵城市建设应用研究[J].建筑技术开发,2019(08)

[3] 程娟.透水混凝土配合比设计及其性能的实验研究[D].浙江工业大学研究生论文，2006.

[4] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程水泥及水泥混凝土试验 规程: JTG E30—2005 [S] . 北京: 人民交通出版社, 2005. Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test Methods of Cement and Concrete for Highway Engineering: JTG E30—2005 [S] . Beijing: China Communications Press, 2005.
[5] 江苏省建工集团有限公司, 河南省第一建筑工程集团有限责任公司. 透水水泥混凝土路面技术规程: CJJ/T 135—2009 [S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. JSCE, Group LLC of Henan Province the First Construction Work. Technical Specification for Pervious Cement Concrete Pavement: CJJ /T135—2009 [S] .Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
[6] 10MR204《城市道路透水人行道铺设》[S].中国建筑标准设计研究院国家建筑标准设计图集, 北京：中国计划出版社, 2010.
[7] 董祥 , 何培玲 , 李磊 . 道路透水路面不同面层材料的特性探讨 [J]. 西部交通科技 ,2008(5):35-38.
[8] BONICELLI A, ARGUELLES G M, PUMAREJO L G F. Improving pervious concrete pavements for achieving more sustainable urban roads [J] .Procedia Engineering, 2016, 161: 1568-1573. TAN Xiaohua, JIANG Li, LI Xiaoping, et al. A complex model for the permeability and porosity of porous media [J] . Chemical Engineering Science, 2017, 172: 230-238.

我国喷混植生护坡绿化技术浅析

申　剑[1]，周明涛[2]，田德智[3]，杜　颖[2]

（1.华电西藏能源有限公司，西藏 拉萨 850000；
2.教育部三峡库区生态环境工程研究中心（三峡大学），湖北 宜昌 443002；
3.华电西藏能源有限公司大古水电分公司，西藏 山南 856200）

摘　要：喷混植生作为一种护坡绿化工程技术，具备边坡植被修复与浅层防护的双重效益，是传统硬化圬工护坡所无法媲美的，近些年来在众多裸露干扰边坡的综合治理中得到了广泛应用。然而，国内大多数工程技术人员对其概念尚比较模糊，认识亦比较浅显。论文从 4 个方面对喷混植生护坡绿化技术进行了阐述：（1）综合相关研究成果，对喷混植生护坡绿化技术进行了统一定义；（2）分类简介了国内典型喷混植生护坡绿化技术的内涵及其异同点；（3）分析了当前喷混植生护坡绿化技术所存在的关键性问题；（4）对喷混植生护坡绿化技术今后的发展研究提出了若干建议。

关键词：喷混植生；护坡绿化；液压喷播；客土喷播

随着我国国民经济的蓬勃发展，资源开发与基础设施建设扰动形成的裸露边坡逐年增加，引起水土流失和生态破坏现象日趋严重，其对环境的影响已不再是某地区的局域性问题，而是关系到国家生态文明建设的全局性问题[1-3]。《全国水土保持科技发展规划纲要（2012-2020）》中，将“开发建设严重扰动区植被快速营造模式与技术、不同类型区生态自我恢复的生物学基础与促进恢复技术”列为关键技术。十八大以来，党中央高度重视生态文明建设，将其放在突出地位，且融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程，旨在努力建设美丽中国。鉴于此，国内工程界和学术界积极响应贯彻政府号召，从发达国家（日本、美国、英国等）引进或自主创新研发出一系列喷混植生护坡绿化技术，如液压喷播护坡绿化技术[4]、TBS 植被护坡绿化技术[5]等，并将其广泛应用于各类裸露边坡的综合治理，有效促进了国家生态文明建设。但长久以来，人们仅简单的把喷混植生护坡绿化看作是一项具体的应用技术，对所包含的不同技术的内涵及异同点混淆不清，还仅仅局限于经验的定性阶段，缺乏系统性理论归纳与总结。本文在综合相关研究成果的基础上，对我国喷混植生护坡绿化技术的分类，各类型的优缺点以及改进要点进行了探讨。

1 定义

当前，国内有用喷混植生护坡绿化技术来特指某一种具体的边坡喷播绿化技术的，如液压喷播护坡绿化技术、TBS 植被护坡绿化技术、CBS 植被混凝土护坡绿化技术等中的一种，也有用其来统称某一类边坡喷播绿化技术的，即将上述多种具体边坡喷播绿化技术统称为喷混植生护坡绿化技术[6-13]，众多说法杂乱无章，定义纷杂不一。通过查阅大量资料，结合当前国内边坡喷混植生市场应用实况，笔者认为喷混植生护坡绿化技术作为多种具体边坡喷播绿化技术的统称更为合理，更符合行业发展现状。

“喷”即为采用机械设备开展护坡绿化施工工作，而非人工撒播实施的护坡绿化，代表工艺行为。“混”代表多种物料的组合，既包括液相水，亦包括固相土、肥料、植绿物种等等，物料数量大于或等于数字“2”。“护坡绿化”是行为目的所指，亦或喷混的结果。

综合前述，可将喷混植生护坡绿化技术统一定义为：采用喷播设备将植绿物种同其他若干材料的均匀混合物喷射到边坡，进而实现坡面植被恢复与浅层防护的机械绿化技术。

2 典型技术简介

按照喷播混合料中是否包含种植土，现将喷混植生护坡绿化技术分为两大类系，即：液压喷播护坡绿化技术（不包含种植土）和客土喷播护坡绿化技术（包含种植土）。

2.1 液压喷播护坡绿化技术

液压喷播护坡绿化是把植绿物种、肥料、有机胶、保水剂、草纤维、着色剂等固相材料与液相水按一定比例均匀混合成悬浊液，而后通过液压喷播机直接喷敷于坡面的绿化方法，国际上称之为水力播种（Hydro-seeding），属于典型的湿喷法，由美国、欧洲、日本等发达国家研究开发，我国深圳市鑫淼森园林草坪有限公司于 1996 年率先引进此技术[4,6,9-11]。

由于所喷播的混合料中不包含种植土，因此液压喷播护坡绿化仅适用土质或风化极为剧烈的岩质边坡，同时又由于喷播前未采取挂网、锚固等辅助加固措施，因此其又局限于缓坡。但是，液压喷播护坡绿化亦有其独特的技术优点[14-16]：

1）工程实施成本低。其一，喷层薄，需用原材料相对较少，从而具备较高的喷播效率，每工作班组可完成万余平方米的喷播面积；其二，不涉及铺挂网片、布设锚钉等工艺，施工简洁。

2）有机胶和草纤维的联合作用，在一定程度上可避免植绿物种发芽前因雨水或地表径流的冲刷而流失。

2.2 客土喷播护坡绿化技术

客土喷播护坡绿化是把植绿物种、种植土、保水材料（高吸水树脂）、黏结材料(普通硅酸盐水泥、有机胶、高分子化合物、植物油脂、纤维等)[5,11,17]、疏松材料(蘑菇肥、木屑、泥炭、腐叶土、谷壳、家畜肥料等) [18]、肥料(缓释长效肥、速效肥等)、pH 缓冲材料（植被混凝土绿化添加剂[19]、红粘土、过磷酸钙[7]）、水等的若干种按一定比例搅拌混合成流塑稀泥态或松散颗粒状，而后通过泵送或空压形式喷射到坡面上形成植生基材，进而实现边坡防护及绿化的方法。这种技术首先由日本研发，1991 年北京林业大学与日本 JICA 合作在黄土高原开展了喷涂绿化试验，旨在通过增大植被覆盖率的方式防治水土流失，从而揭开了国内专业化客土喷播生态护坡的帷幕。同液压喷播护坡绿化相比，客土喷播护坡绿化具备以下显著特点：

1）适用范围广。喷播混合料含有种植土、疏松材料、肥料等，可为植物生长营造适宜的“土壤载体”，不仅适用于土质边坡，亦适用于岩石、混凝土、浆砌石等无土边坡。

2）有利于边坡防护。一方面，混合料通过泵送或空压喷敷于坡面，形成较高强度且较厚的喷层结构，加之茂密的植株丛，能在短期内形成植被覆盖层，可有效抑制坡面风化侵蚀；另一方面，易与网片、锚钉、框格梁、植生槽等措施协同，增强边坡稳定性。

根据混合料组成的不同，可将客土喷播护坡绿化技术分为素客土喷播（喷播混合料仅由种植土和植绿物种两种材料组成）和混客土喷播（喷播混合料中除了种植土和植绿物种外，还包含有保水材料、黏结材料、疏松材料、肥料、pH 缓冲材料等）。素客土喷播技术由于其保水、保肥、抗冲刷性能较差，在国内已基本被淘汰。当前国内使用较多的是混客土喷播技术，其具有代表性的典型技术有岩石边坡植生基质生态防护技术、厚层基材喷射护坡技术、植被混凝土护坡绿化技术和高次团粒生态护坡技术 4 种。这 4 种技术均是针对岩石和混凝土边坡植被恢复的专业技术，施工工艺与施工机械基本雷同，所不同点主要体现在混合料组成与配比，以及适用范围和应用效果等方面，具体如表 1 所示：

表 1　　典型混客土喷播护坡绿化技术的主要区别

项　目	岩石边坡植生基质生态防护技术[23]	厚层基材喷射护坡技术[5,24]	植被混凝土护坡绿化技术[22,26-28]	高次团粒生态护坡技术[29-30]
别　称	PMS 技术	TBS 技术	CBS 技术	SF 技术
产权所属	北京林业科学院、北京林业大学、清华大学、北京承诺环境生态工程科技有限公司	西南交通大学、四川省励自生态技术有限公司	三峡大学、宜昌绿野环保工程有限公司	日本研发，青岛冠中生态股份有限公司与湖南双胜生态环保有限公司引进创新
研发年限	1997 年	2000 年	2001 年	2002 年

项　目		岩石边坡植生基质生态防护技术[23]	厚层基材喷射护坡技术[5,24]	植被混凝土护坡绿化技术[22,26-28]	高次团粒生态护坡技术[29-30]
混合料	共有材料	种植土、植绿物种、保水材料、疏松材料、肥料、水			
	黏结材料	高分子化合物	有机胶结材料、纤维	普通硅酸盐水泥	植物油脂、纤维
	pH 缓冲材料	–	红粘土、过磷酸钙等	植被混凝土绿化添加剂	–
适用范围	年降水量	≥500㎜	≥600㎜	≥600㎜	≥600㎜
	坡度	≤65°	≤45°	坡度≤85°	坡度≤65°
备　注		喷层抗寒耐旱性好；工程实施成本偏高	喷层结构疏松多孔，植被成坪快；有机胶易老化、喷层耐久性较差	喷层抗冲刷强、耐久性好；喷层结构较致密，早期植物生长缓慢	喷层结构疏松多孔，有机质含量高；工程实施成本高

3 存在的问题

3.1 植被群落生态适应性差

目前，喷混植生护坡绿化所使用的植绿物种多以外引物种为主，因乡土物种或当地野生资源难以收集，在具体实践时尚很少使用[6,8,22]；物种混配时片面地追求速生绿化效果，忽略了恢复生态学和生态工程学的科学内涵[11,31] ，结果导致坡面人工植被群落生态适应性差，不仅需要长期的养护管理，且易斑秃退化。

3.2 工程实施成本高

液压喷播虽然每工作班组可完成上万平方米的绿化任务，但它仅适用于含“土”边坡，对面积广大的缺“土”边坡（岩石、混凝土、浆砌石等）无能为力。客土喷播主要从工程上的喷射混凝土演变而来，工艺要求高、施工速度慢，若以 10cm 的喷敷厚度计量，每工作班组仅能完成约 200m^2 的施工任务，直接影响工期，间接威胁工程成本。一项工程技术能否顺利推广应用，其建设成本是一个重要影响因素。就现有喷混植生护坡绿化技术来看，除液压喷播工程成本较低外，其他任何技术的实施成本均比较高，从而极大地限制了技术的推广应用。

3.3 养护管理措施欠缺

边坡喷混植生应用活的植物来实现其主要功能，生物活体的长期稳定生存需要一定的生态环境条件，水分、养分供给尤为重要[28]。水分上，我国自然降雨南多北少、夏丰冬乏，时空分布极不均匀；养分上，由于喷层厚度的限制，持久供给能力有限。边坡植被自然演替时，对其投入大量的人力、财力长期补充水分和养分是不现实的，目前尚缺乏有效的养护管理措施，此方面的问题已成为喷混植生护坡绿化技术应用的限制性因素。

4 今后发展方向

4.1 优势植物品种选育及时空配置模式研究

边坡喷混植生应在恢复生态学和生态工程学的指导下，优选乡土植物或当地野生资源，尤其是对地域地带生境条件具有极强自我适应性的优势品种。相比外引物种，乡土植物或当地野生资源不仅在养护管理方面的投入少，且还可与周边环境融合协调，增强坡面人工植被系统的持久稳定。植被群落组成越复杂，其多样性指数越高、结构越稳定、抗逆性愈强[32-34]。结合不同的生态区划与筛选的优势植物品种，开展物种驯化与商品化育种，同时探讨坡面植物群落时空配置模式与调控技术[2,11,18,35]，使护坡植被群落自我适应、持续演替。

4.2 施工工艺及养护管理技术研究

总结现有喷混植生护坡绿化技术的优缺点，研发高效率喷播设备，改良喷混工艺，力求提高施工速度，降低工程成本。同时，应用管理学理论、健康学理论、系统工程学等基本理论和原理积极

探讨边坡植被养护管理技术，制订出适应于不同地域地带环境的养护管理措施，提高喷混植生的护坡绿化效应[7,22,36]，为喷混植生护坡绿化在全国范围内的大规模推广应用作铺垫。

4.3 护坡绿化效应研究

喷混植生的终极目标应是构建自我组织、自我调节、自我补偿、自我维持的健康植被。边坡立地条件差，水分与养分保蓄能力低[37]、热容量小[38]、温度日变幅大[39]，不利于植物生长发育。因此，应深入探讨水分、养分及热通量等主要生态因子的时空动态变化过程及其与植物生长进程间的耦合关系，并完善相应的调控技术体系。此外，还应不断地充实植被护坡的力学理论，使其更好地服务于喷混植生护坡绿化技术的应用。

参考文献：

[1] 欧哲,罗国庆,杨家富,等.基于人工台阶加固引流系统的矿山边坡生态修复技术[J].现代矿业,2017,(7):294-299.
[2] 李灿,周海清,赵尚毅,等.岩质边坡生态防护研究现状及发展趋势[J].重庆建筑,2019,18(186):43-45.
[3] 吴赛.水土保持方案中矿山边坡生态防护-坡面喷播绿化[J].四川地质学报,2014,34(增):192-194.
[4] 杨承祥,李广泽,周生.液压喷播植被绿化在大型露天米拉多铜矿的应用研究与实践[J].矿业研究与开发,2018,38(12):108-111.
[5] 周德培,张俊云,等.植被护坡工程技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
[6] 曾维渊,薛帅征,张朋飞,等.边坡生态防护技术综述研究[J].绿色科技,2013, (9):17-19.
[7] 罗阳明. 喷混植生护坡体系的长期稳定性研究[D].西南交通大学博士论文,2011.
[8] 肖芬芬,侍倩.岩质边坡喷混植生护坡技术浅析[J].土工基础,2006,20(3):79-81.
[9] 纪圣性.喷混植生防护技术在高边坡防护中的应用[J].林业建设,2006,(6):5-5.
[10] 舒翔,曹映泓,廖晓瑾,等.岩石边坡喷混植生设计与施工[J].中外公路,2001,21(4):45-48.
[11] 胡明亮.华南岩质边坡工程生态恢复技术体系的探讨[J].南昌工程学院学报,2016,35(6):76-80.
[12] 周颖,曹映泓,廖晓瑾,等.喷混植生技术在高速公路岩石边坡防护和绿化中的应用[J].岩土力学,2001,22(3):353-356.
[13] 张根生.喷混植生技术在石质路堑边坡防护中的应用[J].铁道标准设计,2004, (2):54-55.
[14] 尹淑霞,李宪友,陈峻崎,等. 液压喷播植草新技术[J].草原与草坪,2001, (4):48-49.
[15] 陈学平,江玉磷,宋志强.液压喷播在黄土地区边坡植被建植中的应用研究[J].水土保持研究,2007,14(1):266-269.
[16] 陈雪.液压喷播植草技术在高海拔风电场水土保持植被恢复中的应用[J].黑龙江水利科技,2017,45(6):144-146.
[17] 包海丽.浅谈高次团粒客土喷播边坡裸岩植被恢复[J].农业与技术,2019,39(11):54-55.
[18] 李永强,王新然.边坡复绿与客土喷播施工技术[J].西部探矿工程,2017,(10):1-4;10.
[19] 孙超,陈艳华,郭萍.边坡生物防护技术探析[J].三峡大学学报（自然科学版）,2009,31(1):60-63.
[20] 赵廷宁,辜再元,丁国栋,等.国内边坡绿化现状与发展.北京林业大学学报[J],2005, 12(1):40-45.
[21] 吴长文,章梦涛.裸露山体缺口生态治理[M].北京:科学出版社,2007.
[22] 叶建军,许文年,周明涛.边坡生物治理回顾与展望[J].水土保持研究,2005,12(1):173-176.
[23] 申新山.岩石边坡植生基质生态防护工程技术的研究与应用[J].中国水土保持,2003,(10): 26-28.
[24] 田青怀,廖绫,张洋宁,等.厚层基材（TBS）工艺在功果桥电站边坡生物防护中的应用[J].草业科学,2016,33(10): 2144-2152.
[25] 黄敬军.废弃采石场岩质边坡绿化技术及废弃地开发利用探讨[J].中国地质灾害与防治学报,2006,17(3):69-72.
[26] 王华俊,卿翠贵,邓检良,等.高速公路边坡既有硬质坡面的绿化技术研究[J].公路,2019,21 (6):256-259.
[27] 周明涛,胡旭东,许文年.不同基材边坡土壤肥力变化趋势预测-以向家坝水电站工程为例[J].水土保持通报,2016,36 (4):107-111.
[28] 许文年,王铁桥.混凝土绿化添加剂的制备方法[P].中国:ZL01138343.7,2004.
[29] 郭小平. 日本的高次团粒 SF 绿化技术[J].国体绿化,2002, (5):39.
[30] 郑楚英,钟勋,陈宗湖,张健.生态护坡喷播技术的应用探讨[J].水利水电快报,2019,40 (6):76-79.
[31] 任海,彭少麟.恢复生态学导论[M].北京:科学出版社,2001.

[32] 范志平,曾德慧,余新晓.生态工程理论基础与构建技术[M].北京:化学工业出版社,2006.
[33] 黄景春,宁立波, 魏桦.岩质边坡覆绿技术研究进展[J].湖南工业职业技术学院学报,2018,18 (2):5-11.
[34] 李少丽,许文年,周明涛,等.边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究[J].中国水土保持,2007, (12):53-55.
[35] 姜之未.高速公路边坡生态恢复的问题及解决策略分析[J].四川水泥,2018, (6):124.
[36] 沈彦,杜林峰,丁亚东.边坡生态修复常见质量通病探讨[J].亚热带水土保持,2018, 30(1):62-63.
[37] 董文杰,洪文俊,赵桃桃,等.高速公路边坡生态修复与评价[J].山东交通科技,2017, (4):69-71.
[38] 徐国钢,朱兆华,赖庆旺,等.我国工程边坡生态修复几个重大技术问题的认知与实践[J].江西农业学报,2016,28(5):88-94.
[39] 朱兆华,赖涛,陈晓蓉,等.受损边坡生态修复工艺选择、目标群落设计与效果评价[J].西北林学院学报,2017,32(3):78-83.

西藏尼洋河多布水电站鱼类增殖放流站设计

王　琪

（中国电建西北勘测设计研究院有限公司，陕西 西安 710065）

摘　要：西藏尼洋河多布水电站是以保护生态环境、发电、兼顾灌溉等综合利用的西藏重点水电工程，其截留及蓄水后使尼洋河水域生态环境发生变化，对鱼类资源造成一定影响，建设鱼类增殖放流站是减缓和补偿因工程建设对鱼类造成影响的重要保护措施。该文从概述、鱼类资源概况、鱼类增殖放流站方案规划、运行管理、监测与评估等方面介绍配套建设的鱼类增殖站方案，以期为藏区水电工程鱼类增殖放流站设计提供参考和借鉴。

关键词：鱼类增殖放流站；水电工程；尼洋河

1 概述

多布水电站工程位于西藏自治区林芝县境内，是尼洋河流域综合治理与保护规划开发建设的第一个梯级电站。坝址位于林芝县八一镇多布村，工程为三等中型工程，总库容 0.85 亿 m^3，正常蓄水位为 3076m 时，相应水库库容 0.65 亿 m^3，总装机容量 120MW，为日调节水库。多布水电站工程开发的主要任务是在保护生态环境的基础上，以发电为主，兼顾灌溉等功能，并促进地方经济社会发展。

根据《西藏尼洋河多布水电站环境影响报告书》及国家环境保护部批复意见，要求水库蓄水前在业主营地旁建成鱼类增殖站，同步形成运行管理和技术能力，进行野生亲本捕捞、运输、驯养。

2 鱼类资源概况

根据资料记载及调查结果，尼洋河目前共分布鱼类 2 目 3 科 10 属 15 种，包括土著鱼类 6 属 11 种、外来鱼类 4 属 4 种，主要由鲤科的裂腹鱼亚科和鳅科的条鳅亚科两大类群组成，其中裂腹鱼类为优势类群，属典型的高原鱼类区系。

经查阅《西藏自治区实施<中华人民共和国渔业法>办法》，在尼洋河鱼类组成中，仅发现有自治区Ⅰ级重点保护鱼类尖裸鲤。同时该河段的鱼类有地方特有鱼类和地方主要经济鱼类，如黑斑原鮡、异齿裂腹鱼、双须叶须鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裸裂尻鱼。雅鲁藏布江特有鱼类 7 种：拉萨裂腹鱼、巨须裂腹鱼、异齿裂腹鱼、双须叶须鱼、尖裸鲤、拉萨裸裂尻鱼、黑斑原鮡。

对于鱼类资源状况来说，裂腹鱼类依然是尼洋河主要的渔业资源，从这两年的渔获物的数据统计对比来看，拉萨裸裂尻鱼、双须叶须鱼、异齿裂腹鱼占、巨须裂腹鱼不论在数量还是重量上都占据绝对优势，除异齿裂腹鱼平均体重明显降低外，其余裂腹鱼渔获物规格没有发生下降，因此，裂腹鱼渔业资源情况没有显著变化，而尖裸鲤、黑斑原鮡渔业资源量已明显降低。

3 鱼类增殖放流站设计

3.1 鱼类增殖放流站总体布局

综合考虑运行管理方便，便于布设建筑物，有利于鱼类繁殖、苗种培育及放流工作的开展和实施，以及避让重要公共基础设施等因素，站址选择在业主营地南侧左岸渣场顶部，距业主营地 300m。鱼类增殖站建筑面积 0.38 万 m^2，占地面积 3.52 万 m^2，根据现状地形、地质条件、场地大小，办公楼 1 栋、宿舍楼一栋、养殖车间 6 栋。养殖车间包括亲鱼、后备亲鱼培育车间 1 个、催产孵化车间 1 个、鱼苗培育车间一个、鱼种培育车间 2 个，生态鱼塘一座，污水处理后站位于鱼类增殖站西南方位。各建（构）筑物之间布置次要道路。各建（构）筑物周围及道路两侧辅以绿化。

3.2 鱼类增殖放流站目标

根据《尼洋河流域综合治理与保护规划环境影响报告书》及其审查意见中对尼洋河土著鱼类保护要求，遵循水电开发“生态优先、统筹考虑、适度开发、确保底线”的原则，结合多布水电站评价河段鱼类生物学及生态学特性，提出了多布水电站鱼类保护措施体系。鱼类增殖放流站作为鱼类保护措施体系中的重要措施之一，不仅可以对那些种群数量已经减少或面临重大影响将大量减少的鱼类进行人工增殖，补充其资源量，在某种程度上，还可以达到过鱼措施的效果。

该河段拉萨尖裸鲤为西藏自治区Ⅰ级重点保护鱼类，其余如黑斑原鮡、异齿裂腹鱼、双须叶须鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裸裂尻鱼均为地方主要经济鱼类。根据《西藏尼洋河多布水电站环境影响报告》及其批复意见，近期开展异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂鳅鱼、双须叶须鱼、拉萨裸裂尻等五种高原鱼类的人工繁殖技术研究，中远期结合相关研究成果实现黑斑原鮡的放流及对尖裸鲤开展保护性研究，并考虑远期增殖放流。同时，需要对西藏尼洋河多布水电站河段鱼类资源的动态变化进行跟踪监测，对增殖放流进行适时调整。最终实现尼洋河保护鱼类和经济鱼类的人工补偿放流，补充受水电开发造成破坏的尼洋河流域鱼类资源，使其维持较稳定的种群规模，减少种群消失概率，为长期保存物种保留更多的机会。

3.3 增殖放流对象

多布鱼类增殖放流对象选择主要从以下几个方面考虑：①列入国家级或省级保护动物名录的鱼类；②列入濒危动物红皮书的鱼类；③地域性特有鱼类，种群数量少、繁殖力低、抗逆能力差的鱼类，与产区生境高度适应的鱼类；④生活史复杂，具有长距离洄游习性的鱼类；⑤重要经济鱼类。

根据目前资源的状况及影响预测结果，近期可开展增殖的鱼类双须叶须鱼、拉萨裸裂尻、拉萨裂腹鱼、异齿裂腹鱼和巨须裂腹鱼，这几种鱼类已经有相关的研究，对其人工繁殖和育苗均有一定的把握和经验，技术比较成熟可以作为近期增殖放流的品种。黑斑原鮡在人工繁殖方面的研究目前比较落后，对其在人工条件下繁殖还有待于进一步研究，中远期结合相关研究成果实现黑斑原鮡的放流。尖裸鲤作为自治区级保护性鱼类，其本身数量已很少，最近调查一直没有捕到样本，因此，对尖裸鲤开展保护性研究，考虑远期增殖放流。

3.4 增殖放流苗种的标准、数量和规格

（1）增殖放流苗种标准

放流的苗种必须是由尼洋河野生亲本人工繁殖的子一代，放流鱼苗标准参照《水产苗种管理办法》（2004 年，农业部第 46 号令）执行，采用无伤病和疾病、体格健壮的个体。

（2）增殖放流苗种规格

放流苗种的个体大小对放流效果影响很大。放流苗种太小，抵抗风浪等自然环境影响的能力差，活动力弱，易被凶猛性鱼类捕食，因而存活率低，直接影响到放流效果。因此放流鱼种的规格越大，其成活率越高，因为在自然条件下，外界环境复杂多变，自然水体中敌害生物较多，鱼种规格越大，其对环境的适应能力和躲避敌害生物的能力越强，成活率也相对较高，更容易形成种群。就鱼种本身而言，放流规格是宜大不宜小。但是，鱼种越大，所需要的生产设施越多，培育时间越长，其培育成本也就越高。

（3）增殖放流苗种数量

增殖放流数量的多少一般与增殖放流的目标，放流水体自然环境、水文气候、理化性质、饵料生物资源、鱼类资源现状和种群结构特点以及放流对象生物学特性、规格大小与质量、放流频次和时间等相关联，水利水电工程建设后实施的增殖放流保护措施，属补偿性放流，因此，增殖放流数量的确定还与工程建设和运行对鱼类资源的影响范围和程度紧密联系。由于增殖放流数量的确定需要考虑的因素较为复杂，不确定的因素较多，针对开放性的天然水体合理放流数量的确定很困难，至今没有统一的规范计算方法。根据建库后鱼类资源种群的监测情况，对苗种放流数量进行调整。

根据尼洋河工程河段水生生物调查结果，《多布水电站环境影响报告书》和其批复文件提出的增殖放流任务，结合设计原则确定增殖放流的种类、数量、规格如表 1：

表 1　尼洋河多布水电站增殖放流各种鱼类数量规格表

种 类	数量（万尾）	规格（cm）	备注
异齿裂腹鱼	4.00	5～8	近期
巨须裂腹鱼	4.00	5～8	近期
拉萨裂鳅鱼	4.00	5～8	近期
双须叶须鱼	2.00	5～8	近期
拉萨裸裂尻	2.00	5～8	近期
合计	16.00	/	/

3.5 增殖放流站主要建筑物

3.5.1 亲鱼（后备亲鱼）培育车间

亲鱼培育车间一栋，为单层厂房，建筑面积：787.15m^2，采用框架结构，建筑物长 45.50m，宽 17.30m，柱顶高 6.5m，排架连系梁布置为两层梁顶标高分别为 3.30m 和 6.50m 高处。

3.5.2 催产孵化车间

催产孵化车间一栋，为单层厂房，建筑面积 472.75 m^2，采用排架结构，建筑物长 30.50m，宽 15.50m，柱顶高 6.5m，排架连系梁布置为两层梁顶标高分别为 3.30m 和 6.50m 高处。

3.5.3 鱼苗培育车间

鱼苗培育车间一栋，为单层厂房，建筑面积：472.75m^2，采用框架结构，建筑物长 30.50m，宽 15.50m，柱顶高 6.5m，排架连系梁布置为两层梁顶标高分别为 3.30m 和 6.50m 高处。

3.5.4 鱼种培育车间一、二车间

鱼种培育车间一、二为单层厂房，两个建筑单体相同。建筑面 841.75m^2，采用排架结构，建筑物长 45.50m，宽 18.50m，柱顶高 6.5m，排架连系梁布置为两层梁顶标高分别为 3.30m 和 6.50m 高处。

3.5.5 综合楼

办公楼一栋，为一层框架结构，层高 3.3m，建筑面积 504.70m^2；框架抗震等级为二级，屋面恒载 7.5kN/m^2、活载 0.5kN/m^2。

3.5.6 消防水池

消防水池为全地下矩形钢筋 C25 砼水池，无覆土，池体长 9.45m，宽 5.00m，深 3.50m，容积 150m^3。

泵房尺寸 6.8m×4.5m，半地下结构，采用钢筋混凝土薄壁结构，上部砖混结构。

3.5.7 室外亲鱼池及生态塘

场地布置不规则室外亲鱼池，长约 400m，宽 1m，深 1m，室外亲鱼池呈阶梯状布置，满足水体自流条件。出水与生态塘连接，生态塘地面高程 3060.00m，地下露天形式，结构为池槽开完后采用土工膜结构。

3.5.8 车间内养鱼池

车间内的养鱼池大小不一，地面高程 3060.00m，为地上钢筋砼水池，池壁与底板为整体式薄壁钢筋混凝土结构，池壁厚 250mm，底板厚为 400mm，水池底板下铺设 100mm 厚 C15 砼垫层。

3.5.9 办公楼

设计共一层，层高 3.3m，建筑高度 3.75m，总建筑面积 504.70m^2。主要布置有鱼苗培育实验室、工具室以及值班人员的住宿办公用房。

4 增殖站运行管理

4.1 机构设置及人员编制

增殖放流站主要进行鱼类增殖、放流。生产操作由增殖放流站内固定员工完成。全站人员设置以精简、实用、高效为原则，所有职员应一专多能，形成分工合作，各有侧重的人员构成结构。

本增殖放流站需 7 名人员编制，主要人员有：站长 1 人，负责全面管理并对增殖放流全过程负责；专业技术人员 4 人，主要从事鱼类人工繁殖、苗种培育、养殖等工作；生产技术工人 2 人，具体从事养殖及杂务工作。综合楼设有办公室和晚间值班室，工作人员生活区域位于业主营地。

4.2 增殖放流站运行费用

鱼类增殖放流站运行费用包括亲鱼捕捞、饲料、人员工资、电费、放流费、交通、管理费以及放流效果监测等产生的费用。另外，多布鱼类增殖放流站需承担中远期增殖放流黑斑原鮡、尖裸鲤的繁殖技术研究工作，因此需要将科研经费列入。

4.3 运行内容

4.3.1 增殖繁育

增殖放流鱼类亲本的采捕、驯养、检测标记、亲本培育、人工催产、繁殖、鱼苗孵化、天然饵料培养、仔鱼培育、人工饵料研制、鱼种养殖。

4.3.2 放流

人工标记、放流鱼类检疫、放流地点选择、人工放流、放流后的效果监测、放流效果评估、调整增殖放流计划。

4.4 生产管理规程

4.4.1 亲鱼与后备亲鱼繁育

亲鱼应是直接采集自其自然分布水域的野生个体，尽量避免采用来源不明的亲鱼（后备亲鱼）或子一代作人工繁育的亲本。亲鱼（后备亲鱼）均应建立详细的来源、养殖情况、繁殖情况记录档案，并妥善存档保存。当某一品种野生群体数量极为稀少，难以收集到足够亲鱼（后备亲鱼）群体时，可从其它机构收购少量子一代成熟亲鱼（后备亲鱼）作为补充亲鱼群体，但在进行亲鱼（后备亲鱼）蓄养培育时，应严格将野生个体与子一代个体分池培育，禁止混养，逐尾标记并跟踪记录。

4.4.2 苗种培育

人工繁育的同一种类、但不同批次的子一代苗种，条件许可时应尽量分池培育；以子一代作为亲鱼繁育的苗种，必须与野生亲本繁育苗种分池培育；苗种培育期间应做好养殖生产过程记录，建立可追溯档案。日常生产尤其苗种培育生产中应规范操作程序，采取防重于治的鱼病控制对策，时刻保持养殖系统水质良好，预防和减少病害的发生。苗种放流前，应严格按照放流苗种质量、种质标准与规定，进行苗种种质检测鉴定、病害检疫、适应性驯化，种质、质量、检疫不符合标准的苗种均应从放流苗种中剔除。

4.5 科研工作

根据多布增殖站规划的放流任务，多布鱼类增殖站的科技攻关研究应分别针对近期增殖放流鱼类和远期增殖放流鱼类展开。

近期增殖放流鱼类，人工繁殖和养殖技术尚未完全成功，要进行繁殖技术的引进和熟化，内容主要包括亲鱼驯养和人工诱导其性腺发育成熟、人工催产技术（催产针剂、剂型、处理方法等）、人工孵化技术和大规模苗种培育技术等，投入足够的资金专门研究，在 3～5 年内实现规模化人工养殖，并实施人工繁殖放流。

中远期和远期需实施放流的 2 种鱼类研究内容主要为亲鱼采集与驯养技术、人工繁殖技术、苗种培育技术放流技术等方面内容。根据国内目前研究深度和水平，黑斑原鮡和尖裸鲤的人工繁育技

术尚未掌握，远期放流这两种鱼类相关技术可能较难突破，可由本鱼类增殖站与科研机构或高校合作完成。

5 放流效果监测与评估

根据西藏尼洋河多布水电站环境影响报告书的批复要求，鱼类增殖放流站建成后应开展增殖放流标志跟踪监测和评估，并定期向地方环保部门报告鱼类放流及放流效果监测情况。

5.1 监测评价区域

多布水电站影响涉及区域：西藏尼洋河扎地至真巴河段及该河段重要支流。

5.2 监测评价内容

环境要素监测：水温、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、BOD_5、氨氮、挥发酚、悬浮物、石油类等指标。部分要素的监测可结合水环境监测计划进行。

水生生物监测：叶绿素 a 含量、浮游生物、底栖动物、水生维管束植物的种类、分布密度、生物量 6 项指标。

鱼类种群动态及群落组成变化：鱼类的种类组成与比例、种群结构、时空分布、资源现状及累积变化效应，主要监测区域在尼洋河巴河口～尼洋河出口段干流和具有重要生境分布的支流，重点监测对象为近期放流鱼类：异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂鮈鱼、双须叶须鱼、拉萨裸裂尻以及中远期放流鱼类：黑斑原鮡、尖裸鲤。根据监测结果，分析种群动态及群落构成的变化趋势，研究具有重要生境支流与干流鱼类种类的重现度变化趋势，以此分析评价增殖放流效果。

鱼类种质与遗传多样性：主要保护对象异齿裂腹鱼、巨须裂腹鱼、拉萨裂鮈鱼、双须叶须鱼、拉萨裸裂尻、黑斑原鮡、尖裸鲤等天然种群的形态学、生物学、生物化学、生理生物化学、分子生物学等种质指标及遗传结构。

鱼类生态习性：鱼类早期资源种类、组成与比例、时空分布、繁殖量、水文要素（温度、流速、水位）；产卵场的分布与规模、繁殖时间和频次以及鱼类越冬场和索饵场的情况，重点了解水电站建成运行前后“三场”的变化；监测鱼类产卵规模。

5.3 监测评价时间和频率

鱼类增殖放流前一年、鱼类放流后第 1 年、3 年、5 年、8 年、12 年、16 年、20 年进行监测，共计监测 8 年。环境要素、水生生物在春、夏、秋各监测 1 次；鱼类资源春、秋监测两次；鱼类产卵场调查 3～8 月进行，以 4～6 月为重点。

5.4 监测断面

尼洋河流域共设 7 个断面，其中支流栖息地保护区一个断面（娘曲）、坝上上游两个断面（尼洋河百巴镇上游和连别河湾附近）、库中一个断面（更张门巴名族乡附近）、坝址处一个断面、坝下干流一个断面（加定附近）、常年流水型支流一个断面（更张弄巴）。各断面可根据具体情况适当调整。

5.5 监测评价报告内容

1) 鱼类增殖放流站运行情况；
2) 定期放流情况；
3) 水电开发涉及水域鱼类资源现状及变化；
4) 放流鱼类增殖效果。

对放流鱼类进行标记后，建立人工种群要建立遗传档案库。通过整理统计放流监测数据以及咨询当地渔民和有关专家，生态效益方面考虑水域生态环境变化、鱼类群落结构变化、鱼类捕捞量变化、物种多样性变化、等多方面因素综合评估放流效果。

6 结语

多布水电站鱼类增殖放流站站址交通方便，选址合理。设计采用循环水处理系统培养模式为主、室外流水仿生培养为辅的模式实现亲鱼驯养和培育、人工催产孵化、鱼苗、鱼种培育等工艺内容，该方案适合放流鱼种的繁殖与培养，同样适合黑斑原鮡等鱼类的繁殖技术研究工作，能够满足《多布水电站环境影响报告书》批复中的增殖放流要求。此方案工艺先进、设计合理，能够补充尼洋河因多布水电站建设而减少的鱼类资源。该鱼类增殖站位于高寒高海拔区，昼夜温差大，运行管理要求高，在做好相关鱼类增殖放流科研工作的前提下，可有效缓解尼洋河流域水电开发对水生生态的影响，对促进工程建设及流域水电开发与生态环境保护的协调、持续发展具有积极意义。

参考文献：

[1] 西藏尼洋河多布水电站环境影响评价报告书[R]. 2012.

[2] 西藏尼洋河多布水电站鱼类增殖放流站初步设计报告 [R]. 2014.

[3] 高峰，张湘隆. 雅砻江锦屏梯级电站鱼类增殖放流站设计[J]. 水利水电技术，2011.

[4] 袁强，汤伟雄，陈小东，严成斌. 大渡河黑马鱼类增殖放流站二期工程设计[J]. 四川水利，2015.

雅砻江两河口水电站过鱼工程集鱼地点选择研究

陈明曦，许莉萍，吴　迪，郎　建，吕海艳

（中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司 四川 成都 610072）

摘　要：两河口水电站工程建设改变了河道的自然生态环境，对鱼类造成阻隔影响，为了减缓上述影响，工程采取修建过鱼设施的方式帮助鱼类上溯，满足基因交流的需求。过鱼工程设计中集鱼地点的选择对过鱼效果起着关键作用。两河口过鱼工程开展了鱼类游泳能力测试、坝下流场水工模型试验、鱼类集群效应观测等系列研究工作，并综合以及其它工程条件，最终确定了集鱼地点。其工作思路与研究成果对于其它水电工程过鱼设施设计具有一定的借鉴和参考作用。

关键词：水电开发；过鱼工程；集鱼地点

1 前言

随着国家西部大开发的不断推进，大量水电工程的兴建对西部地区的经济与社会发展起到了巨大的推动作用，但引起的生态问题也日异突出[1]。水电工程拦河筑坝，对鱼类最直接的影响为阻隔效应。工程建成后由于大坝的阻隔，连通的河流生境被分割成不同的片段，鱼类生境的片段化和破碎化导致形成大小不同的异质种群，种群间基因不能交流。种群数量较大的鱼类，群体间将出现遗传分化；种群数量较少的物种将逐步丧失遗传多样性，危及物种长期生存，导致种群灭绝的概率增加[2]。

为了恢复江河水生群体之间的天然联系和减缓对鱼类阻隔的影响，修建过鱼工程是水电工程开发建设鱼类保护的重要措施之一，也是恢复工程影响河段鱼类资源的重要途径之一[3]。

2 工程概述

2.1 两河口工程概况

两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内。工程开发任务以发电为主，兼顾防洪。电站总装机容量 3000MW。工程采用堤坝式开发，挡水建筑物为砾石土心墙堆石坝，最大坝高 295m。水库正常蓄水位 2865.00m，相应库容 101.54 亿 m^3，死水位 2785.00m，调节库容 65.60 亿 m^3，具有多年调节能力。工程枢纽平面见图 1。

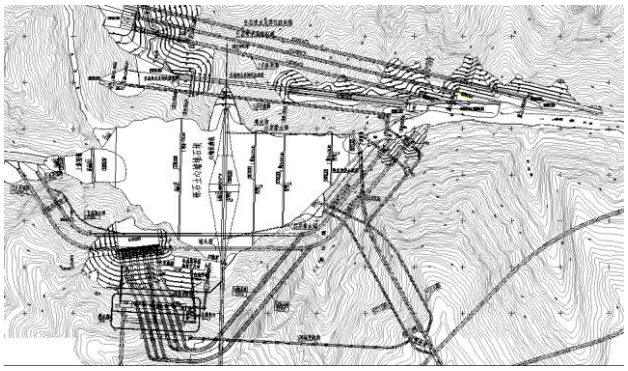


图 1　两河口水电站枢纽布置图

两河口过鱼工程采用“集鱼槽式集鱼+升鱼机提升+AGV 小车(Automated Guided Vehicle)运输过坝+运鱼船放流”；主要过鱼对象为齐口裂腹鱼、长丝裂腹鱼、四川裂腹鱼、短须裂腹鱼 4 种鱼类，兼顾过鱼对象包括厚唇裸重唇鱼、黄石爬鮡、短尾高原鳅、软刺裸裂尻、山鳅、青石爬鮡等；过鱼季节为每年的 3～9 月，其中 5～8 月为主要过鱼时段。

2.2 集鱼位置选择的重要性

集鱼位置的选择在过鱼工程设计中具有重要的作用，国内外有关研究表明，鱼类能否快速地发

现和准确进入鱼道进口，是鱼道能否成功运行的关键因素之一[4]。进鱼口位置的选择成为影响过鱼设施运行成败的关键[5,6]。

合理的进鱼口位置可以有效提高过鱼效率，但在实际工程中由于对鱼类生态习性等方面的认识不完善，同时关于过鱼工程集鱼地点以及进鱼口结构的相关研究还较薄弱，因此在不少工程中鱼类进入鱼道较为困难，导致诱鱼效果较差[3]。两河口过鱼工程采用集鱼槽集鱼，其集鱼地点选择的合理性对于其运行效果同样起着关键作用。

3 两河口过鱼工程集鱼地点

3.1 技术路线

国内过鱼工程设计中为了确定集鱼地点，一般需开展鱼类游泳能力测试与流场分布水工模型试验研究工作，国内科研单位也开展过相关的鱼类集群效应观测[7-9]。

根据已有的研究成果，拟定两河口过鱼工程集鱼地点确定的技术路线。开展主要过鱼对象的游泳能力测试，获得主要过鱼对象的暴发游泳速度。开展坝下河段流场模型试验及三维数值模拟，结合主要过鱼对象游泳能力测试成果，分析电站建成后，各典型发电工况条件下发电尾水是否对鱼类上溯形成流速屏障。在主要过鱼季节，在坝下河段开展鱼类集群效应观测，分析研究鱼类聚集的区域，对水工模型试验研究成果进行验证。最后分析工程布置条件、地形地质条件、泄洪雾化影响等多方面因素，最终确定最佳的集鱼地点。技术路线见图 2。

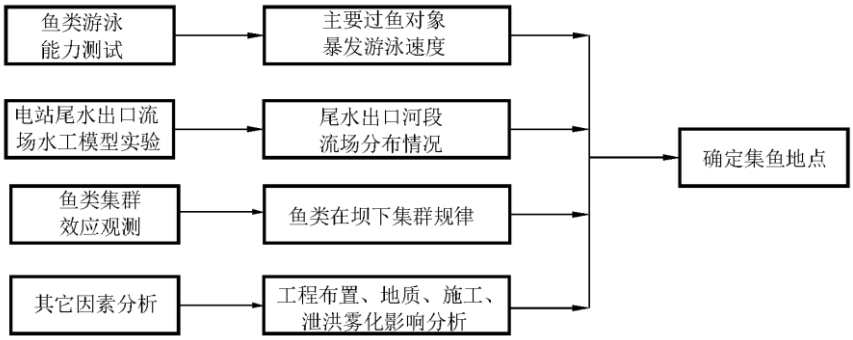
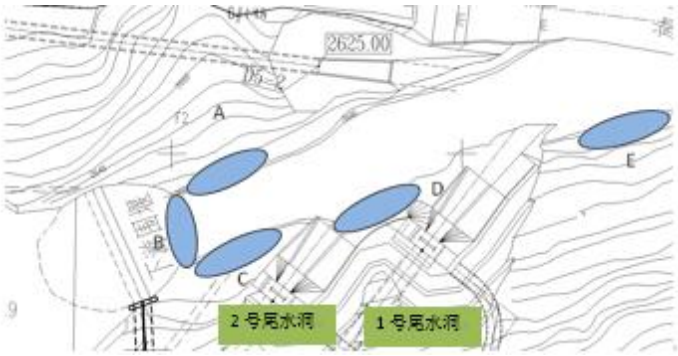


图 2　技术线路图

3.2 初拟集鱼地点

根据国内外工程设计经验以及相关的导则与规范，集鱼地点通常选择在泄水闸、电站尾水、生态放水口等经常有水流下泄处，或鱼类洄游路线及经常集群地附近；同时进鱼口位置的选择还应当考虑尽可能放置在鱼类可能上溯到的最上沿；但河段中若存在鱼类的流速屏障，进口不应布置在屏障的上游。根据以上布置原则，结合两河口电站枢纽布置的特点，初步拟定的集鱼地见图 3。



注：A-5 号导流洞上游(左岸)；B-大坝坝趾(下游围堰下方)；C-2 号尾水洞上游(右岸)；D-1 号、2 号尾水洞之间上沿；E-1 号尾水洞下游。

图 3 潜在集鱼地点位置示意图

3.3 鱼类游泳能力测试

3.3.1 材料与方法

测试装置采用丹麦 LoligoSystem 公司生产的游泳水槽 SW10150、SW10050，见图 4。测试前的对水槽内的流速进行标定，测试期间同步记录溶氧(DO)、水温(T)等参数。

测试对象为工程河段捕获的伤残的对象，包括长丝裂腹鱼 12 尾(体长：8.6~20.4cm，体重：9~180g)、齐口裂腹鱼 23 尾(体长：5.3~23.8cm，体重：3~175g)。测试前先暂养 24h 以适应实验环境。暂养池和实验装置中用水均取自雅砻江江水，暂养池日换水量约 20%，每天换水 10min，保证在测试过程中水体的理化性质与天然水体相近。

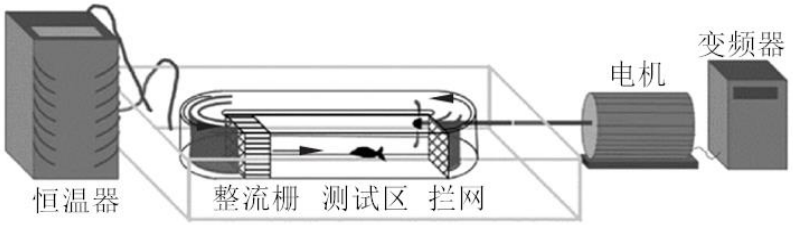


图 4　鱼类游泳能力测试水槽构造示意图

3.3.2 测试成果

测试成果见图 5、图 6，长丝裂腹鱼其绝对爆发游泳速度为 1.49±0.26m/s，相对爆发游泳速度与体长的关系为 y=-0.3441x+15.244 (R^2=0.6224)；相对爆发游泳速度为 9.77±1.72BL/s。齐口裂腹鱼相对爆发游泳速度为 11.75±2.77BL/s，绝对爆发游泳速度与体长的关系为相对爆发游泳速度与体长的关系为 y=-0.3521x+15.63 (R^2=0.5761)。本工程推荐过鱼规格 20-40cm，将体长 20cm 代入拟合的公式，可得长丝裂腹鱼最小爆发游泳速度为 1.7m/s，齐口裂腹鱼最小爆发游泳速度为 1.68m/s。

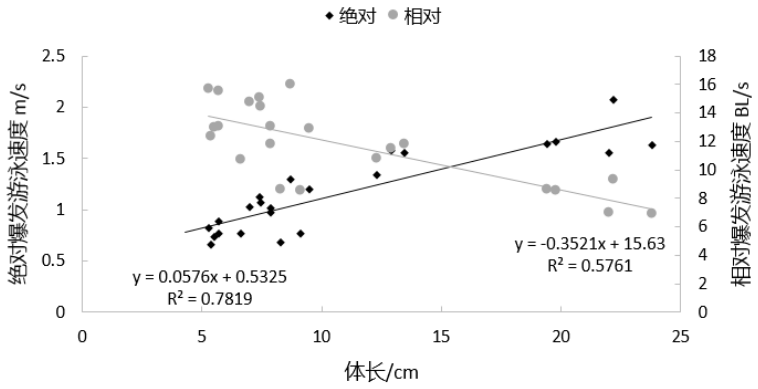


图 5　长丝裂腹鱼暴发游泳速度与体长关系图

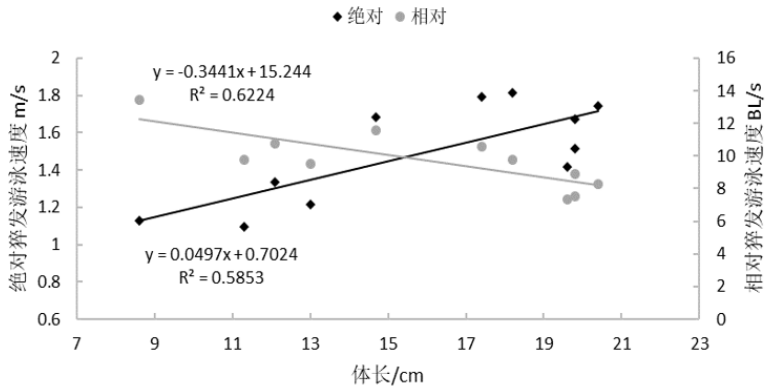


图 6　齐口裂腹鱼暴发游泳速度与体长关系图

3.4 坝下河段流场模型试验及三维数值模拟

3.4.1 试验工况

两河口工程下游梯级为牙根一级电站。试验工况分为下游牙根一级未建成以及建成两大工况。其中牙根一级建成条件下选取牙根一级库水位为正常蓄水位 2605.00m 进行流场分析（死水位2599.00m 时，两河口坝下河段的流场情况与牙根一级未建成工况一致）。具体工况选择电站建成后典型发电工况。试验工况具体见表 1。

表 1　模型试验工况

工况		机组台数	流量(m_3/s)	出流
牙根一级建成前	1	电站承担基荷发电方式	112	1#尾水洞出流
	2	1	248.6	1#尾水洞出流
	3	4	994.4	1#尾水洞 3 台机出流，2#尾水洞 1 台机出流
	4	6	1491.6	1#尾水洞 3 台机出流，2#尾水洞 3 台机出流
牙根一级建成后(库水位为正式蓄水位2605.00m)	1	1	248.6	1#尾水洞出流
	2	3	745.8	1#尾水洞 2 台机出流，2#尾水洞 1 台机出流
	3	4	994.4	1#尾水洞 3 台机出流，2#尾水洞 1 台机出流
	4	6	1491.6	1#尾水洞 3 台机出流，2#尾水洞 3 台机出流

3.4.2 物理模型制作

整体模型设计、制作、试验以及数据处理均按《水电水利工程常规水工模型试验规程(DL/T 5244-2010)》规定执行。整体模型为正态模型，比尺 1：30，其相关比尺如下：流速比尺：$\lambda_v=\lambda_L^{1/2}=5.477$；流量比尺：$\lambda_Q=\lambda_L^{5/2}=4929.50$；糙率比尺 $\lambda_n=\lambda_L^{1/6}=1.76$。水工模型试验上游库区河道模拟高程至2610.00m，下游河道模拟至 2591.00m。河道地形模拟范围为下游围堰至 1＃尾水洞下游 540.0m。河道地形采用断面法，用水泥砂浆成型。模型过水建筑物(1＃尾水洞出口、2＃尾水洞出口)用有机玻璃制作。

3.4.3 数值模拟计算方法与网格划分

模拟范围：包括 1*尾水洞上游 70m 至 2#尾水洞下游 450.0m，总长近 750.0m 河段。建模时，以坝轴线下游 530.14m，在坝轴线 A 点右侧 191.64m 处点(X=3742208.4794，Y=268998.6353)为坐标原点；X 轴与两个尾水洞出口河段轴线大致平行，指向下游为正；Y 轴与河道垂直，指向左岸为正；Z 坐标与高程一致。

模型选择及计算方法：建模采用原型数据，模拟工具选用 FLUENT 软件，计算模型选用 Standard $k-\varepsilon$ 紊流模型，固壁边界处理采用壁面函数法，偏微分方程离散采用有限体积法，动量、紊动能和紊动耗散率插值采用二阶迎风格式。

边界条件：(1)1#和 2#尾水洞出口断面采用速度进口边界，以保证入流量为一恒定值；(2)河道下游出口为出流断面，采用自由出流边界；(3)1#和 2#尾水洞壁面及河道地形采用固壁边界。

网格划分：沿水深方向网格较密，节点间距为 0.4～0.8m，与水深垂直的方向网格较稀，节点间距为 2.0～3.0m。天然情况，机组半发(工况 3)的网格单元总数约 27.31 万个，机组满发(工况 4)的网格单元总数约 28.70 万个。牙根一级水电站正常蓄水位，机组半发(工况 3)的网格单元总数约 29.70 万个，机组满发(工况 4)的网格单元总数约 30.04 万个。数值模拟范围及网格划分见图 7。

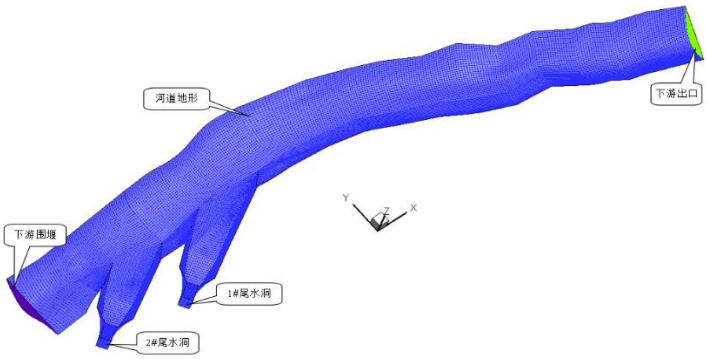


图 7 计算区域及网格划分

3.4.4 试验成果

1)牙根一级建成前

牙根一级建成前，典型发电工况条件下两河口电站尾水出口河段流态见图 8 中的(a)-(d)。相应的数值模拟成果见图 9 中的(a)-(d)。



(a)工况 1，Q=112m^3/s



(b)工况 2，Q=248.6m^3/s

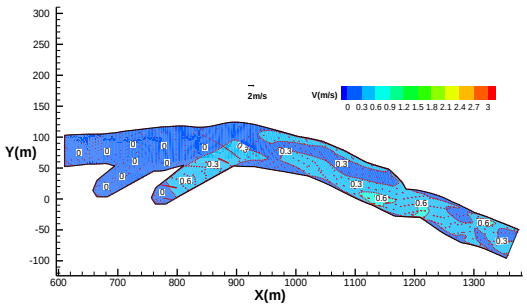


(c)工况 3，Q=994.4m^3/s

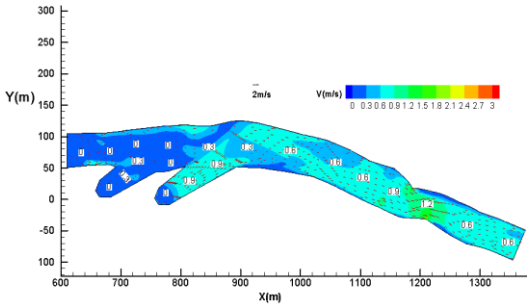


(d)工况 4，Q=1491.6m^3/s

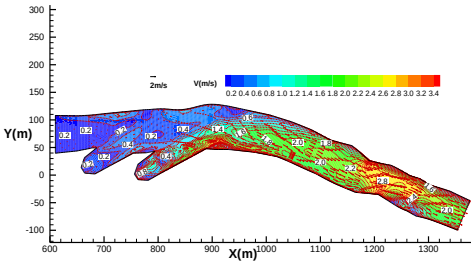
图 8 牙根一级建成前，典型发电工况条件下尾水出口河段流态



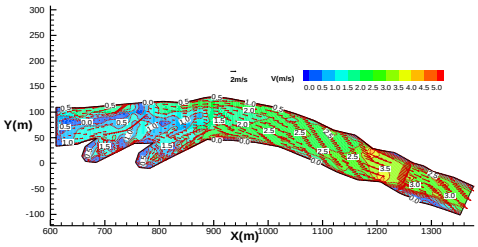
(a)工况 1，Q=112m^3/s



(b)工况 2，Q=248.6m^3/s



(c)工况 3，Q=994.4m^3/s

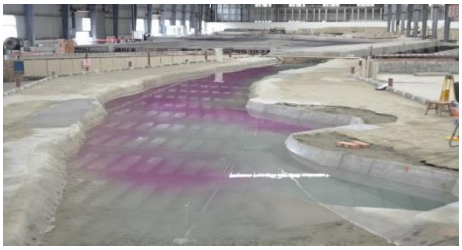


(d)工况 4，Q=1491.6m^3/s

图 9 牙根一级建成前，典型发电工况条件下尾水出口河段流场数值模拟成果

2)牙根一级水电站建成后

牙根一级建成后，牙根库水位为 2605.00m 典型发电工况条件下尾水出口河段流态见图 10 中的(a)-(d)。相应的数值模拟成果见图 11 中的(a)-(d)。



(a)工况 1，Q=248.6m^3/s



(b)工况 2，Q=745.8m^3/s

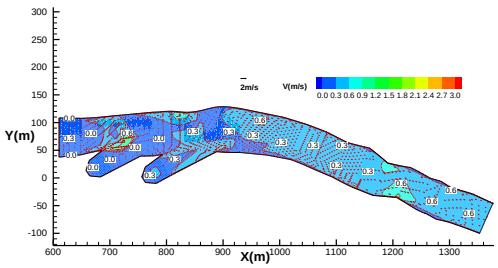


(c)工况 3，Q=994.4m^3/s

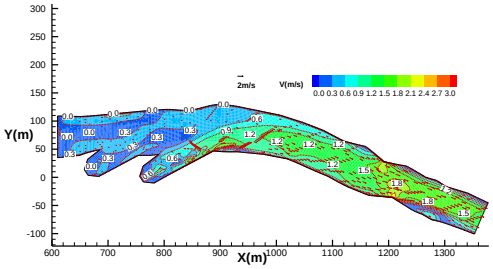


(d)工况 4，Q=1491.6m^3/s

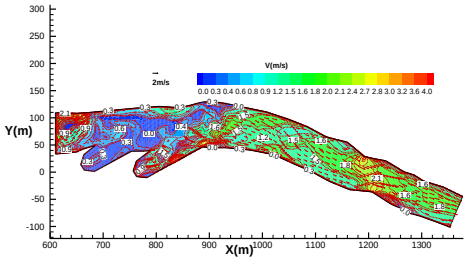
图 10 牙根一级建成后，典型发电工况条件下尾水出口河段流态



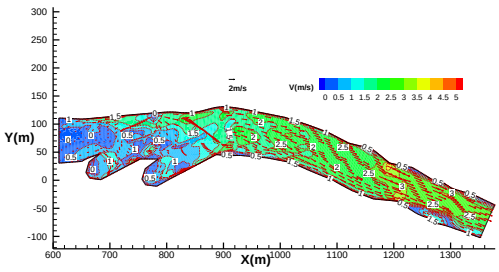
(a)工况 1，Q=248.6m^3/s



(b)工况 2，Q=248.6m^3/s



(c)工况 3，Q=994.4m^3/s



(d)工况 4，Q=1491.6m^3/s

图 11 牙根一级建成后，典型发电工况条件下电站尾水出口河段流场数值模拟成果

结果表明：数学模型和物理模型模拟结果吻合良好。各发电工况尾水洞对岸沿程存在低流速区，可作为鱼类回游上溯的通道。机组满发时，尾水洞出口河段河心及右岸区域流速较大，但均小于1.67m/s，未形成流速屏障，不影响了鱼类从该区域回溯上游，其余发电流量时亦未见明显的流速屏障。2#尾水洞对岸上游区域呈相对缓流回流状态，同时由于坝体阻挡，该区域是鱼类上溯的最上游端，鱼类较易于在此集群。推荐 2#尾水洞出口上游左岸(A 点)以及大坝坝趾(B 点)做为集鱼地点。

3.5 鱼类集鱼效应观测

3.5.1 观测方法

采用鱼探仪(Sound Metrics 公司制造的双频识别声呐 DIDSON)。在尾水出口河段进行定点观测，观测点位如图所示定点连续观测(图 12)，四个观测点均位于左岸岸边，包括 2 号尾水洞上游静水区(观测点 1)、2 号导流洞洞口(观测点 2)、1 号和 2 号导流洞口之间(观测点 3)和 1 号导流洞洞口附近(观测点 4)。每个观测点设置左、中、右 3 个观测断面。观测期间电站通过导流洞下泄流量730~770m³/s。每个观测点为 1d，每天上午、下午及夜间各观测 3h，即 9:00-12:00、14:00-17:00、19:00-22:00。

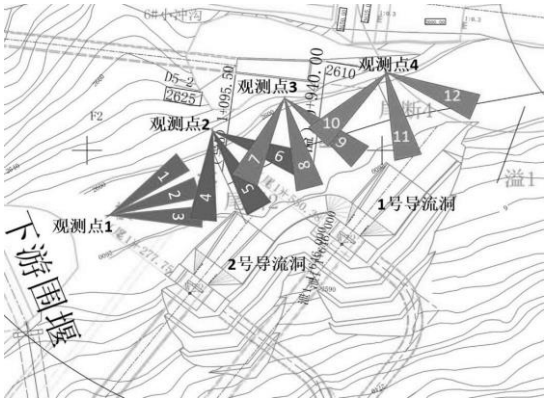


图 12 两河口坝下尾水附近鱼类集群效应观测点位图

3.5.2 观测结果

观测结果表明从空间上，尾水洞正下方的 5 号和 11 号断面鱼类数量明显较其它断面少，其它断面白天观测鱼类数量差异不大，而夜间 2#尾水洞上游的 1、2、3、4 号断面鱼类数量明显增加，特别是临近 2#导流洞口附近的 4 号断面，夜间观测鱼类数量急剧增加。

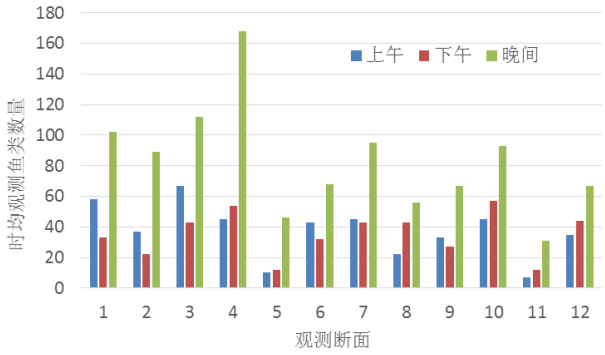


图 13 定点观测每个断面时均鱼类数量比较

观测结果观测结果见图 13。观测结果表明，在电站下泄流量 730-760m³/s 工况条件下(两河口工程共设置 6 台机电，单机引用流量 248m³/s，最大引用流量 1491.6m³/s)。在尾水洞上游侧区域，即图中的 A 区、B 区及 C 区分布有较多的鱼类，说明尽管在电站尾水大流量下泄的情况下可能会对上溯鱼类形成流速屏障，但鱼类仍可通过河岸边的低流速区到达尾水洞上游，而后聚集在下游围堰下方，即鱼类将上溯至河道内物理屏障的下方。因此建议集鱼地点选择尾水洞的上游区域。

3.6 其它因素分析

（1）地质条件

A 点位于大坝下游 6#冲沟底部，6#冲沟上部边坡开挖抛渣，冲沟中下部堆渣较厚。经前期地质调查，6#冲沟存在发生泥石流的可能，6#沟沟心设置泥石流排导槽，因此沟口不宜布置过鱼建筑物。其余各点岩体位于弱风化、弱～强卸荷带内，岩体质量分类为Ⅳ2～Ⅴ1 类，地质条件上相差不大，不存在建设升鱼机系统的不利地质条件。

（2）布置条件

A 点处存在 6#冲沟，沟心设置泥石流排导槽，受此影响不宜再布置集鱼设施；B 点位于坝址下游围堰下方，下游围堰中部处布置有用于导排大坝渗流的量水堰，量水堰左侧至岸边区域具备布置集鱼系统的条件；C 点位右岸 2#尾水隧洞出口上游，C 点与坝脚之间的区域较为狭窄，布置集鱼设施、补水设施以及升鱼机系统存在一定的难度；D 点位右岸 1#、2#尾水隧洞出口之间，布置条件更为有限，同时尾水洞出口断面布置构筑物，人为束窄了尾水口出水断面面积，可能对尾水洞正常运行产生影响；E 点场地条件较为开阔，不存在布置集鱼系统的制约因素。

（3）泄洪雾化影响分析

两河口水电站为雅砻江中下游的“龙头水库”，工程泄洪具有“水头高、泄量大、河谷窄、岸坡陡、泄洪功率高、下游河道及岸坡抗冲能力较低”的特点。本工程泄洪功率大，泄洪雾化影响区范围广，影响程度深。本工程潜在的集鱼地点中 E 点位于泄洪雾化区范围，雨强在 50mm/h~200mm/h 范围，工程泄洪雾化将对对升鱼机的建筑物与金属结设备产生不利影响。

（4）施工条件

拟选的五个集鱼地点施工条件相当，无本质差别。

4 结语

参考国内外已有过鱼工程选择诱鱼口位置的经验与原则，本报告拟定了左岸 5#导流洞上游(A 点)，大坝坝趾(下游围堰下方，B 点)、右岸 2#尾水隧洞出口上游(C 点)，右岸 1#、2#尾水隧洞出口之间(D 点)，右岸 1#尾水隧洞出口下游(E 点)5 个集鱼点。通过坝下集群效应观测，在尾水洞上游侧区域，即图中的 A、B、C 点分布有较多的鱼类。坝下流场数值模拟分析表明各发电工况条件下河道断面均存在低流速区，鱼类可通过这些低流速区上溯至尾水洞上游区域，直至坝脚物理屏障处。受 6#冲沟影响，A 点不具备布置集鱼系统的条件，BCDE 四点均可布置集鱼系统，但 CD 两点场地较为狭小，布置上存在一定的难度，其中 D 点位于两尾水洞出口之间，可能将对尾水洞正常运行产生影响；E 点位于电站泄洪雾化区范围内，电站泄洪雾化对集鱼系统的建筑物和鱼斗、启闭设备等金属构件将产生不利影响。ABCDE 五点工程地质条件以及施工条件相当。

经综合比选，最终推荐 B 点，即大坝下游左岸，下游围堰下方作为过鱼工程的集鱼地点。

参考文献：

[1] Lytle DA,Poff NL.Adaptation to natural flow regimes.Trends in Ecology & Evolution.2004,19:94-100

[2] Michel Larinier.环境问题、大坝与鱼类洄游[R]. 罗马:联合国粮食及农业组织,2007

[3] 陈凯麒,葛怀凤,郭 军,等.我国过鱼设施现状分析 及鱼道适宜性管理的关键问题[J]. 生态学杂志,2013,34(4): 1-6.

[4] Fao and CVWK.Fish Passes:Design,Dimensions,and Monitoring.Food and Agriculture Organization of the United Nations and DVWK.Rome 2002

[5] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等.基于鱼类行为学与水力学的水电站鱼道进口位置选择[J].农业工程学报,2016,32(24):164-170

[6] 王兴勇,郭军.国内外鱼道研究与建设[J].中国水利水电科学研究院学报，2005,3(3):222-228
[7] 金志军,马卫忠,张袁宁,等.异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为[J].水利学报,2018,37(6):1897-1902
[8] 蔡露,王伟营,王海龙,等.鱼感应流速对体长的响应及在过鱼设施流速设计中的应用[J].农业工程学报,2018,34(2):176-181
[9] 张沙龙,侯轶群,王龙涛，等.长丝裂腹鱼的游泳能力和游泳行为研究[J].淡水渔业,2014,44(5):32-37
[10] 潘露,王川.叶巴滩水电站进鱼口河段数值模拟研究[J].水利科技与经济,2018.3(4):70-74
[11] 史斌,王斌,徐岗,等.浙江楠溪河拦河闸鱼道进口布置优化研究[J].人民长江,2011,42(1):69-71
[12] 黎贤访,朱世洪,邓润兴，等.鱼道进口水力特性数值模拟研究[J].人民长江,2015,46(8):7-9
[13] 王茜,李冬冬,付媛媛,齐书豪,王刚.声学方法应用于鱼类集群行为的研究进展[J].黑龙江科技信息.2017,12:152-153
[14] 李芳,安瑞冬,马卫忠,赵再兴,林宁亚.鱼类坝下集群效应对水力学条件的响应规律研究[J] .中国农村水利水电.2018,10:87-91
[15] 周应祺,王军,钱卫国,曹道梅,张仲秋,柳玲飞.鱼类集群行为的研究进展[J].上海海洋大学学报.2013,5(22):734-741

鱼类游泳能力量化模型在过鱼设施设计中的应用

金志军[1,2]，单承康[1]，王猛[1]，唐忠波[1]，马卫忠[1]，魏浪[1]，石小涛[2]

（1.中国电力建设集团贵阳勘测设计研究院有限公司，贵州 贵阳 550081；
2.三峡大学水利与环境学院，湖北 宜昌 443000）

摘　要：鱼类游泳能力是过鱼设施设计中具有指导意义的主要生态指标，基于目前封闭游泳能力测试水槽被迫条件下鱼类游泳能力量化遭到质疑的事实，本文以拉萨裸裂尻鱼为研究对象，通过获取临界游泳能力模型、疲劳曲线模型、最佳游泳速度模型和最大上溯距离模型对比被迫游泳能力测试法和鱼类自主上溯游泳能力测试法优缺点以及推荐个（各）测试方法下对应的测试参数，回答了鱼类游泳能力如何在过鱼设施设计中应用这一关键问题。

关键词：过鱼设施；游泳能力模型；被迫游泳能力测试；自主上溯游泳能力测试

1 概述

过鱼设施建设目的是确保目标鱼种能够安全、及时、有效通过障碍物（如大坝）。过鱼设施内部流速设计关系到过鱼设施效果，流速设计值取决于：1）目标鱼种游速能力；2）目标鱼种的游泳耐力（能够维持游速的持续时间 E）。鱼类游泳能力定量关乎到鱼道长度、坡度、休息室、挡板、过鱼口等设计，因此，鱼类游泳能力是鱼道设计中具有指导意义的主要生态指标[1]。

目前主要采用封闭水槽进行鱼类被迫游泳能力定量，包括：流速递增法测量感应流速、临界游泳速度、突进游泳速度，固定流速法测量持续游泳速度、耐久游泳速度和爆发游泳速度。各指标用于鱼道池室最低流速、鱼道池室平均流速以及过鱼设施过鱼口最大流速设计。目前，我国几乎所有鱼道设计流速都基于封闭水槽测量法下得到的鱼类游泳能力指标值而确定。如鱼类临界游泳速度和爆发游泳速度在鱼道、过鱼旁路、物理导鱼栅等工程设计上都有重要应用[2]。

尽管临界游泳速度等游泳能力指标得到了广泛的应用[3-5]，学者们仍然指出其测定方法存在众多的弊端，导致应用受到限制，主要原因有：（1）测定流场与自然界相去甚远，测得的结果不能很好的反映自然状况下的鱼类游泳能力[6]；（2）测定时鱼类在密闭狭小空间内进行强迫游泳，其游泳行为遭到限制（如爆发-滑行行为）[7]。但因其测试方法具备操作简单和技术成熟的优势，仍然得到了广泛的应用。所以，封闭水槽下鱼类游泳能力定量法在何种程度上能够真实反映鱼类通过复杂流场下流速障碍的能力，以及该方法适用范围是鱼类游泳能力定量的关键问题。

基于对鱼类行为学和水力学的认识不断深入，国内外学者围绕过鱼设施为主题开展了卓有成效的研究。研究者们认为：鱼类通过自然界水流速度障碍能力的测试首先需要基于鱼类自主游泳，允许鱼类使用各种游泳行为上溯或休息。因此，一系列明渠水槽也曾被用来研究鱼类自主游泳能力。其中 Castro-santo 等（2012）在鱼类自主游泳能力方面进行了开拓性的工作[8]。Castro-santo 将多种新英格兰地区的洄游性鱼类暴露于流速为 1.5~4.5m/s，长为 25m 的水槽中，通过观测鱼类自主上溯情况，发现鱼类游泳速度远超封闭水槽中测得的鱼类游泳能力[9]。

因此本文针对具有短距离洄游习性高原裂腹鱼属—拉萨裸裂尻鱼—为研究对象，开展鱼类游泳能力测试实验，包括被迫游泳能力测试条件下临界游泳能力、游泳耐力和长水槽测试条件下自主爆发游泳能力，以及根据所得数据来建立鱼类游泳能力模型（如疲劳曲线、最大上溯游泳距离与流速关系曲线、最优游泳速度策略等）。本文游泳能力测试方法、数据分析方法以及建立的游泳能力模型不仅延伸了以往的研究，更是进一步明确的将鱼类游泳能力与鱼道设计相联系。

2 试验设计及试验方法

2.1 试验水槽

2.1.1 封闭水槽游泳能力测试

拉萨裸裂尻鱼临界游泳速度和游泳耐力均在封闭游泳能力测试水槽(游泳水槽 SW10100，Loligo System；丹麦)中完成（图 1）。

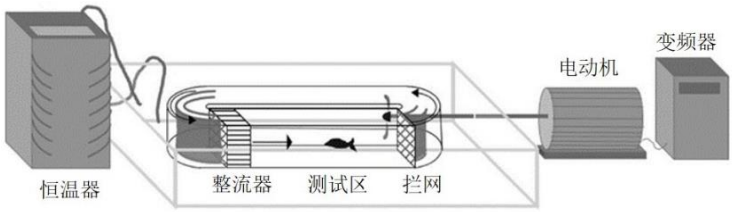


图 1　游泳能力封闭水槽测试

2.1.2 鱼类自主游泳行为测试水槽

鱼类自主游泳能力及行为测试在长 900cm、宽 40cm、深 30cm 的上端开敞式可变坡水槽(图 2a)中进行，该水槽主体由上下回水池、中间实验水槽、水循环动力系统组成。试验用水由 1 台流量为 100m^3/h 潜水泵供给，水流经消能整流后进入槽体实验段，最后经由尾门排入下游水池循环。选取水槽水流流态平顺的中间段作为试验测试段，水槽末端放有百叶栅式尾门和拦鱼网。试验区正上方架设 1 台摄像头(红外网络摄像头，焦距 8mm、帧率 25Hz；海康威视)，摄像头与试验水槽平行架设，记录鱼类整个上溯过程。通过在水槽放置规则障碍物束窄水槽过水断面制造急流区和缓流区，以便研究复杂流态下试验鱼通过流速障碍能力和行为。鱼类通过单级流速障碍试验障碍物剖面为上底长 160cm、下底长 245cm、高 27cm 的梯形，形成了长 160cm、宽 22cm 的单级竖缝(图 2b)。

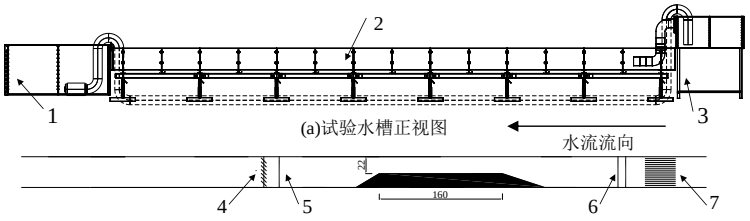


图 2　自主上溯游泳能力测试水槽(单位：cm)

1 下游回水池 2 实验水槽 3 上游回水池 4 尾门 5 拦网 6 平流蜂窝 7 整流消能管

2.2 试验用鱼

拉萨裸裂尻鱼取于藏木水电站增殖放流站，为 2 龄幼鱼。实验前，拉萨裸裂尻鱼分批在直径为 2.9m 的钢化玻璃缸中暂养，试验前进行饥饿暂养 48h。暂养水取自雅鲁藏布江，水温为 14.6±1.1℃，全天不间断充氧，溶解氧大于 6.0mg/L。从暂养玻璃缸中随机选择样本用于试验，其中 20 尾(mean±S.E.；BL=11.44±0.25cm、mass=18.17±1.11g)用于固定流速下鱼类游泳耐力测试(持续游泳能力)，16 尾(BL=11.75±0.20cm、mass=18.90±1.26g)用于通过长 160cm 竖缝长距离爆发游泳能力试验。

2.3 试验方法

2.3.1 拉屎裸裂尻鱼临界游泳能力测试

通过流速递增法测试拉萨裸裂尻鱼临界游泳速度。临界游泳速度测试：试验前估计试验鱼体长，试验鱼在流速为 1BL/s 条件下适应 60min，适应结束后流速增加 1BL/s，此后，流速每隔 20min 增加 1BL/s，直到试验鱼疲劳贴网超过 10s 后结束试验。临界游泳速度由以下公式得到：

$$U_{crit}^{i} = U_i + \nabla v \times \frac{t_i}{t} \qquad (1)$$

式中，U_i为第 i 尾实验鱼疲劳时的前一流速(cm/s)，∇v 速度增幅(约 10cm/s)，t为时间增量(t等于 20min)，t_i为实验鱼在最高流速下游泳时间(min)。

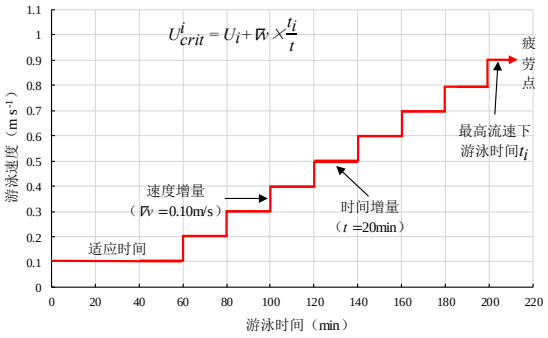


图 3　鱼类临界游泳速度测试流程图

为了消除个体差异性以及体长的影响一般用平均临界游泳能力$\overline{U_{crit}}$和相对游泳能力U'_{crit}来进行鱼类游泳能力对比。

$$\overline{U_{crit}}=\frac{1}{n}\sum_{i}^{n}U_{crit}^{i} \quad (2)$$

$$U'_{crit}=U_{crit}^{i}/BL_i \quad (3)$$

式中，n 为实验鱼的数量，U_{crit}^{i}、BL_i分别表示第 i 尾实验鱼临界游泳速度和体长。

游泳能力测试结果需考虑固体阻塞效应。由于水槽测试段长 55cm，宽 14cm，高 14cm，远大于鱼身最大截面积，经计算，本实验鱼类阻塞效应对流速速度影响程度可忽略不计。

2.3.3 拉萨裸裂尻鱼游泳耐力

拉萨裸裂尻鱼游泳耐力测试在固定流速下进行。实验鱼在 5cm/s(~0.5 BL/s)低流速下适应 30min，然后将流速调至设定流速，记录游泳开始至疲劳的时间。若游泳时间超过 200min，则停止记录。固定流速在 7.46BL/s~15.38BL/s 之间。每种游泳速度下游泳时间与速度关系用对数线性关系描述为：

$$\ln E=a+bU_S \quad (4)$$

式（6）中$\ln E$是持续游泳时间的自然对数（E表示截止到疲劳时，鱼类持续游泳时间）；U_S是游泳速度(与鱼长相关；BL/s)；a 和 b 是回归系数(b<0)，b 值取决于鱼是以爆发速度游泳还是耐久速度游泳，当给出鱼类疲劳曲线(游泳速度-持续游泳时间关系)，可通过上式预测鱼类上溯距离 D。鱼类上溯距离(D)可用($U_S\times E$)来表示：

$$D=U_S\times e^{a+bU_S} \quad (5)$$

式(7)是假定鱼类在流速为 0 的情况下理论上溯距离。鱼在鱼道流速为U_f下顶流上溯距离D_g可表示为：

$$D_g=(U_S-U_f)\times e^{a+bU_S} \quad (6)$$

同样根据鱼类疲劳曲线，假定实验鱼需要通过长度为 d 的渠道，则可由(2.6)式计算出目标鱼能通过鱼道时所允许鱼道内平均流速U_f：

$$U_f=U_s-\frac{d}{E} \quad (7)$$

式（9）中：U_f为通过鱼道所允许的平均流速(cm/s)；U_s为目标鱼类的游泳速度(cm/s)；d为需要克服流速长度(cm)；E为鱼在U_s下的可持续游泳时间(s)[3]。

式(8)表明鱼类上溯距离(D_g)最大时，对应某一最佳游泳速度(optimum swimming speed，U_{opt})。对式（8）中的U_S进行求导，求得导数为 0 时对应的游泳速度为最佳游泳速度(U_{opt})：

$$U_{opt}=U_f-1/b \quad (8)$$

2.3.4 拉萨裸裂尻鱼长距离爆发游泳能力

每次试验将一尾拉萨裸裂尻鱼放入水槽下游拦网后(图 2.2)适应 10min ，适应结束后去掉拦网开始正式试验。试验鱼竖缝则试验结束，且每次试验时间不超过 60min。试验后截取试验鱼通过竖

缝的游泳视频，并通过软件提取试验鱼上溯轨迹坐标和通过竖缝所需时间(精确到 0.04s)。为对比研究不同竖缝流速、不同竖缝长度下鱼类游泳速度，将长度为 160cm 单级竖缝划分为 4 个等级，即竖缝长度为 40、80、120、160cm 这 4 个等级流速障碍，同样记录试验鱼成功通过竖缝和尝试通过的时间。

2.3.5 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 OriginPro 2015 软件对数据进行处理和绘图；采用 SPSS 18.0 统计分析软件进行线性回归分析(α=0.05)；采用 Logger Pro 3.12 对鱼类上溯轨迹进行提取；采用 suffer 软件进行鱼类上溯轨迹与流场耦合。统计数值均以平均值±标准差(mean±S.E.)表示。

3 游泳能力与模型

3.1 拉萨裸裂尻鱼临界游泳能力

鱼类有氧运动能力评价指标主要由U_{crit}来表示，是鱼道设计中重要的鱼类游泳能力指标。试验结果表明：在水温为 14.79±1.72℃下试验鱼临界游泳速度为 110.94±2.16cm/s(90.06~130.53cm/s)；相对临界游泳速度为 10.51±0.19*BL*/s。

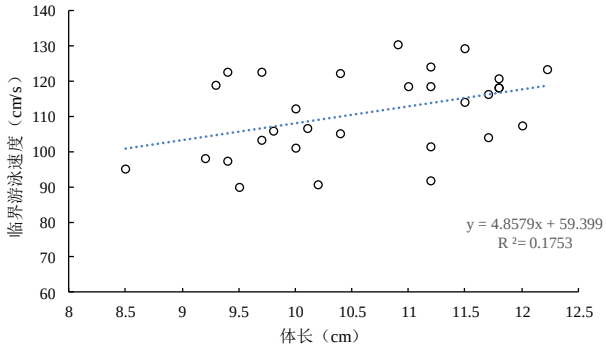


图 4　拉萨裸裂尻鱼临界游泳速度

3.2 固定流速法下拉萨裸裂尻鱼游泳能力与模型

3.2.1 拉屎（拉萨）裸裂尻鱼游泳耐力模型

20 尾试验鱼(*BL*：10.61±0.19cm)用于游泳耐力测试。在 7.46*BL*/s~15.38*BL*/s 的流速下测试试验鱼游泳耐力。最大持续游泳速度为 7.46*BL*/s~10.34*BL*/s；游泳耐力(*E*)与耐久游泳速度(*BL*/s)呈负相关(R^2=0.476，$F_{1,12}$=10，*P*=0.009):

$$\ln E = 12.695 - 0.5001U_P \quad (9)$$

根据拟合公式，当 E=20s 时，*Up*=19.39BL/s；当 E 等于 200min 时，*Up*=6.60BL/s。

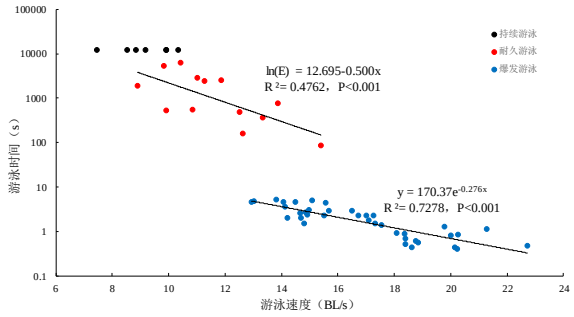


图 5　拉萨裸裂尻鱼游泳耐力曲线(方点为封闭水槽游泳能力测试法下鱼类持续游泳速度，圆点为封闭水槽游泳能力测试法下鱼类耐久游泳速度，菱形点为鱼类自主上溯爆发游泳能力)

3.1.2 拉萨裸裂尻鱼最佳游泳速度模型

由图 6 可知，即不同流速(4~10BL/s)下拉萨裸裂尻鱼游泳速度与上溯距离的关系图，可得鱼类上溯距离最大时，其游泳速度比水流速度大 2BL/s(等于$-1/b$)，即为最优游泳速度。

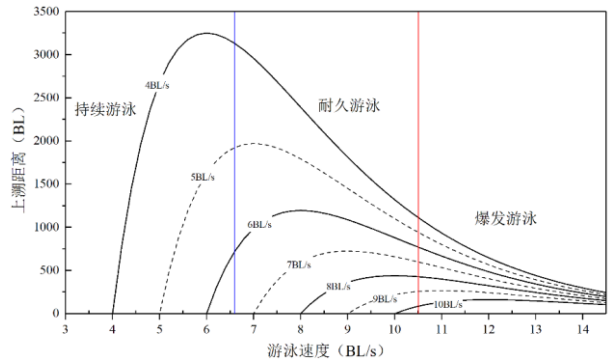


图 6　不同固定流速(4~10BL/s)下拉萨裸裂尻游泳速度与上溯距离的关系(鱼类最优游泳速度策略：上溯游泳速度最优值对应上溯距离最大值)

3.2 拉萨裸裂尻鱼长距离自主爆发游泳能力与模型

在明渠均匀流拉萨裸裂尻鱼爆发游泳能力测试中(T=14.60±1.10℃)，共 16 尾试验鱼(BL:11.75±1.96cm)用于通过长 160cm、平均流速为 137.45±1.86cm/s 的竖缝。其中 38%的拉萨裸裂尻鱼用时 3.65±0.55s 通过长为 160cm、平均流速为 137.45cm/s 的竖缝。通过不同流速、不同长度竖缝所对应的游泳速度和持续游泳时间见表 1。

表 1　通过不同长度竖缝实验鱼尾数、通过时间、游泳速度

通过竖缝长度(cm)	40	80	120	160
通过尾数	15	11	6	6
流速(cm/s)	153.13±1.02^{a}	149.15±1.31^{a}	142.4±1.76^{b}	134.2±2.91^{c}
通过所需时间(s)	1.31±0.30^{a}	2.29±0.46^{ab}	2.53±0.47^{ab}	3.65±0.55^{b}
游泳速度(BL/s)	17.44±0.67^{a}	17.13±0.69^{a}	16.17±0.82^{a}	15.03±0.71^{a}

其中一尾拉萨裸裂尻鱼用时 2.28s 通过长 160cm 的竖缝，其上溯轨迹见图 7；上溯轨迹点对应的平均水流速度为 135.39±1.89cm/s，平均相对游泳速度为 70.18cm/s，最大瞬时相对游泳速度为 204cm/s（图 8）。

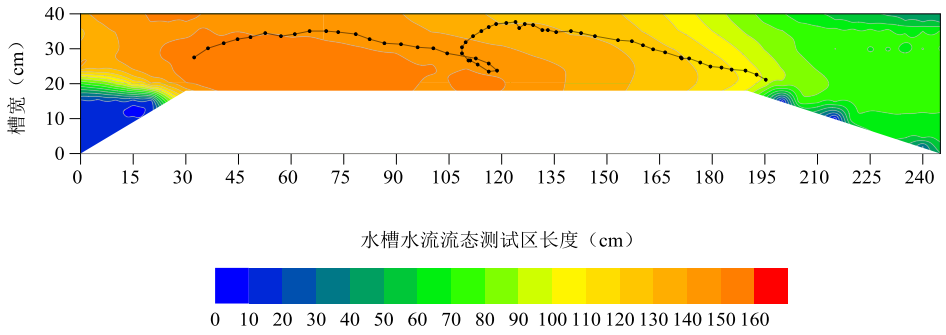


图 7　其中一尾试验鱼爆发冲刺通过 160cm 长的竖缝的上溯轨迹对应的不同流速（相邻轨迹点时间间隔为 0.04s）

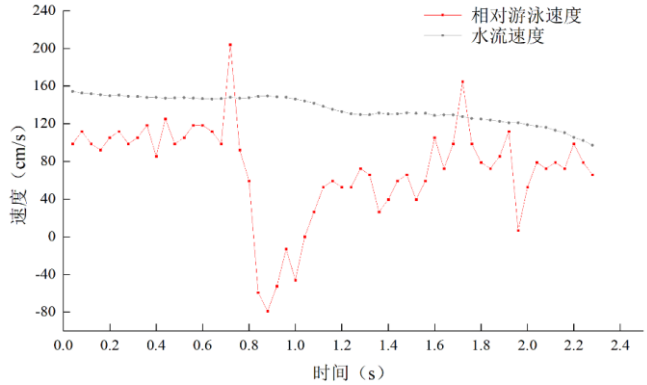


图 8　1 尾试验鱼通过竖缝相对游泳速度和对应的水流速度随时间变化

3.3 拉萨裸裂尻鱼最大上溯距离模型

根据封闭水槽游泳能力测试中的拉萨裸裂尻鱼游泳耐力曲线（图 5），当拉萨裸裂尻鱼以大于流速 2BL/s 的游泳速度持续上溯时(图 6)，其游泳距离最大(D_{max}，BL)；最大上溯距离模型为：$D_{max} = 24008e^{-0.5U1}$($R^2$=1，$P$<0.001)(图 9)。

在明渠均匀流拉萨裸裂尻鱼爆发游泳能力测试中，通过竖缝爆发游泳速度(U_{burst})与持续游泳时间 E(s)关系为：$E = 170.37e^{-0.276U_{burst}}$(图 5，$U_{burst}$在 13BL/s 至 23BL/s 之间)，对应的可通过高流速区长度模型为：$D = 227.08e^{-0.276U2}$(R^2=1，P<0.001)(图 9)。

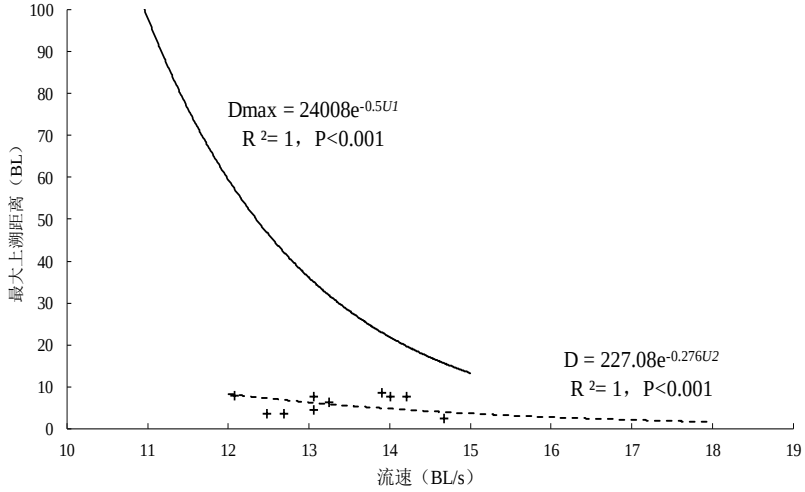


图 9　拉萨裸裂尻鱼在不同流速下最大游泳距离模型（实线为封闭水槽测试法下拉萨裸裂尻鱼在不同流速下最大上溯距离模型；虚线为拉萨裸裂尻鱼在不同高流速下可上溯距离 D，其中+点表示未通过 160cm 竖缝的 10 尾鱼最大上溯距离）

4 讨论与展望

4.1 讨论

4.1.1 游泳能力模型

鱼类游泳指标（图 4）以及鱼类上溯能力模型(图 5 和图 9)是对鱼类上溯能力的定量描述。在自然界(或鱼道)中，水流速度持续变化，鱼类游泳行为也会发生变化；这导致鱼类往往以一种较不稳定的运动状态游泳：阶段性的持续式游泳运动、静止及偶发的爆发游泳运动常常相互穿插发生；而鱼类游泳能力指标以及游泳能力模型是假定鱼类持续以某固定游泳速度通过不同长度的断面平均流速的基础上得到的。但在鱼道设计或者在评价天然河道是否存在鱼类上溯障碍时，往往将流速均匀化处理，因此上述模型具有重要的应用价值。

4.1.2 不同测试方法优缺点及适用性

通过上述两种游泳能力测试法对比，同时在总结国内外文献的基础上，表 2 总结了两种测试方法优缺点以及不同测试方法下推荐测试参数。

表 2　封闭水槽游泳能力测试方法和鱼类自主游泳能力测试优缺点对比及推荐测试参数

测试方法	优点	缺点	推荐测试参数
封闭水槽（Loligo 水槽）条件下鱼类被迫游泳能力测试	1. 便携，易于携带 2. 流速可实时调控 3. 温度可控制 4. 可测量鱼类呼吸耗氧	1. 试验水槽鱼类可用空间狭窄 2. 流态单一，水力指标只有流速值 3. 游泳速度等价于水流速度	1. 感应流速 2. 持续游泳速度 3. 耐久游泳速度 4. 临界游泳速度 5. 流速递增法下突进游泳速度 6. 游泳速度与耗氧率的关系

测试方法	优点	缺点	推荐测试参数
长明渠或者鱼道模型条件下鱼类自主游泳能力测试	1. 流态多样性高，接近鱼道真实情况 2. 试验鱼可自主选择性游泳上溯 3. 水槽相对较长，不会限制鱼类行为	1. 水槽体积大，不易于操作和携带，往往要求现场建造试验水槽 2. 鱼道模型流态测量工作繁琐	1. 爆发速度 2. 爆发距离 3. 爆发次数 4. 进口吸引率、趋流性 5. 通过每级鱼道的成功率 6. 流速偏好区间 7. 湍动能偏好区间 8. 上溯路径选择等上溯行为 9. 鱼道最优流态确定 10. 鱼道设计流速校核

4.1.3 游泳能力指标在过鱼设施设计中的应用总则

过鱼设施结构复杂，导致其内部产生空间和时间上可变的水流速度（例如，休息池中的低流速和竖缝处的高流速）。过鱼设施不同部位的流速限制原则不同，下面推荐了游泳能力在过鱼设施设计中的应用。

（1）感应游泳速度（U_r）

关于鱼类趋流性可以概括为：所有鱼类都能够感受到流速并作出相应的游泳行为，鱼类利用流速进行定向（如逆流游泳被称为正趋流性，positive rheotaxis）。如果流速低于鱼种趋流阈值，则鱼无法定位游泳方向。因此，在鱼道中的流速必须大于趋流性发生流速阈值，一般认为鱼类感应流速为趋流性发生的最低流速。

（2）持续游泳速度（U_s）

鱼在该游泳速度下可以维持游泳数小时而不会引起鱼类主要生理变化。主要由有氧呼吸提供游泳能量。该游泳速度受温度和水体溶氧量的影响。在鱼道设计种（中），U_s应用于鱼类运输水槽（或管道）、休息池、升鱼机集鱼通道等部位。

（3）耐久游泳速度（U_p）

在此游泳速度下，鱼持续游泳几分钟后便疲劳。有氧和厌氧呼吸以不同的比例来提供能量。Bain and Stevenson（1999）建议耐久游泳速度是能够维持 5～8min 的游泳速度速度[10]；Beamish（1978）建议能持续游泳 20s 到 200min 的游泳速度为耐久游泳速度[11]。

在鱼道设计中，V_p可以与持续游泳时间 E 结合使用，以估计疲劳前能游泳的距离 D，根据不同流速下上溯距离来设计鱼道进口诱鱼流速。

（4）爆发游泳速度（U_b）

在该游泳速度下，主要是无氧呼吸来提供能量，鱼可以短时间持续游泳。Bell（1991）建议爆发游泳速度是指可以持续游泳 5-10 秒的速度[12]；Bain and Stevenson（1999）认为只能持续游泳 2～3s 的速度为爆发游泳速度[10]；Beamish（1978）认为持续游泳时间小于 20s 的速度为爆发游泳速度[11]。该速度随着鱼种的体长增加而增加；在自然界中，鱼类一般用该速度捕食或者躲避被捕食；在鱼道中鱼类一般用该速度通过堰口、竖缝处等急流区。

鱼类穿越较高流速区域，特别是通过速度屏障区（鱼道进口、堰口、孔口和竖缝等处）的能力取决于物种游泳能力和目标物种个体大小，以及鱼类必须通过高流速区的区域长度。在鱼道设计中，具体以持续游泳多少时间来定义爆发游泳速度，要根据鱼类上溯需要通过高流速区长度和流速来定。考虑到鱼道中连续性的高流速区并不会很长，故鱼类爆发游泳速度推荐用鱼类自主上溯游泳能力测试方法测得。

对于具有多种过鱼对象的鱼道设计项目，鱼道各部位的速度取决于目标鱼种中游泳能力最弱、体长最小的鱼类而言。

4.2 展望

（1）鱼道成功率更多取决于鱼类短距离爆发能力(例如通过竖缝、槽口、天然河道急流段)而不是长距离持续游泳能力[13]。通过挡板、木块、石块等束窄明渠水槽形成单一急流区，或者形成由多级高流速区和低流速区组成的类鱼道流态来研究鱼类上溯能力，是未来研究鱼类自主爆发游泳能力和鱼类上溯行为的趋势。

（2）改变实验鱼道模型流速除了可以用于评估鱼类游泳能力，还能用于测试不同流态下鱼类游泳行为。尽管实验室水槽试验中的水力条件尽可能接近真实鱼道，但大多数水槽只是模型。水槽比例缩放影响水力条件，因此实验室鱼道模型里的流态或许不能完全合理的应用于实际鱼道中[14-15]。此外，模型只包含实际鱼道部分区域，实验结果与实际中鱼类通过整个鱼道的结果的符合程度也尚不清楚。

（3）考虑到目前被普遍用来量化游泳能力的封闭水槽测试方法论、基于低于鱼类游泳能力的平均流速鱼道流速设计标准以及鱼道设计缺乏考虑鱼类对水力条件作出的行为反应等不足。在未来研究中，应在基于平均流速鱼道设计的基础上通过试验得出流速设计值修正参数；应着重于分析可视化复杂流场下鱼类游泳行为和游泳耗能，以及通过定量鱼类游泳姿态失稳处或能量消耗突增处的紊流阈值来确定鱼道水力设计阈值。

参考文献：

[1] 金志军,马卫忠,张袁宁,等. 异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为[J]. 水利学报, 2018, 49(04): 512-522.

[2] Katopodis, C. and Gervais, R. Fish swimming performance database and analyses[M]. Canadian Science Advisory Secretariat (CSAS) Research Document, 2016.

[3] 郑金秀, 韩德举, 胡望斌, 等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究. 水生态学杂志, 2010, 3: 104－110.

[4] 石小涛, 陈求稳, 黄应平, 等. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法分析. 生态学报, 2011, 31: 6967- 6972.

[5] Laborde A, González A, Sanhueza C, et al. Hydropower Development, Riverine Connectivity, and Non‐sport Fish Species: criteria for Hydraulic Design of Fishways[J]. River Research and Applications, 2016, 32(9): 1949-1957.

[6] Tudorache C., Viaenen P., Blust R et al. Longer flumes increase critical swimming speeds by increasing burst－glide swimming duration in carp Cyprinus carpio[J], L. J. Fish Biol,2007,71: 1630－1638.

[7] Reidy S.P., Kerr S.R. & Nelson J.A. Aerobic and anaerobic swimming performance of individual Atlantic cod[J]. J. Exp. Biol, 2000, 203: 347－357.

[8] Castro-Santos T, Sanz-Ronda F J, Ruiz-Legazpi J. Breaking the speed limit—comparative sprinting performance of brook trout (Salvelinus fontinalis) and brown trout (Salmo trutta)[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences[J]. 2012, 70(2): 280-293.

[9] Castro-Santos T. & Haro A. Fish Guidance and Passage at Barriers. In: Fish Locomotion: An Eco-ethological Perspective[M]. Domenici P. & Kapoor B.G. (Eds.). Science Publishers, 2010.

[10] Bell, M. Fisheries Handbook of Engineering Requirements and Biological Guidelines. U.S.Army Corps of Engineers, North Pacific Division, Fish Development and Evaluation Program,1991. Portland, OR. 35 chapters.

[11] Bain, M.B. & Stevenson, N.J., eds. Aquatic habitat assessment: common methods. Bethesda, MD: American Fisheries Society, 1999.

[12] Beach, M.A. Fish Pass Design. Fisheries Research Technical Report No. 78. Guidelines for the Design and Approval of Fish Passes and Other Structures to Facilitate the Passage of Migratory Fish in Rivers. Lowestoft, United Kingdom. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1984, 44 pp.

[13] Alexandre C M,Quintella B R, Silva A T, et al. Use of electromyogram telemetry to assess the behavior of the Iberian barbel (Luciobarbus bocagei, Steindachner, 1864) in a pool-type fishway[J]. Ecological Engineering, 2013, 51(51):191-202.

[14] Guiny E,Ervine D A,Armstrong J D. Hydraulic and Biological Aspects of Fish Passes for Atlantic Salmon[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 131(7):542-553.

[15] Silva, A T,Santos, J M,Franco A C, et al. Selection of iberian barbel barbus bocagei (Steindachner,1864) for orifices and notches upon different hydraulic configurations in an experimental pool type fishway[J]. Journal of applied ichthyology, 2009,25, 173－177.

低流量状态下的中小型山区河流鱼类栖息地质量维持研究

朱载祥，李　永

（四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室，四川 成都 610065）

摘　要：在金沙江下游干流生境由于大规模水电开发难以满足鱼类完成生活史需求的背景下，支流生境替代成为了河流生态保护的有效措施。黑水河是白鹤滩库区的优先保护支流，下泄适宜生态流量是修复鱼类栖息地，发挥其对于长江上游特有鱼类保护作用的重要工作，但这造成了与水电业主经济利益的冲突，给修复工作执行带来了困难，缓和两者之间矛盾势在必行。本研究在实地调查监测的基础上，针对河流横向以及纵向分别设计修复措施，即在河道横断面局部开挖疏槽，纵向设置拦水堰与潜水堰。运用二维水动力学模型对研究河段生态流量下泄与采取不同修复措施前后的水动力学条件进行数值模拟，并计算了相应的加权可用栖息地面积（WUA），以此评价不同工况对于栖息地的修复效果。结果显示，研究河段适宜生态流量为 16.80m^3/s（35%多年平均流量），WUA 较之初态 2.39m^3/s（5%多年平均流量）时增加 9304.42m^2（317.37%）；4.80m^3/s（10%多年平均流量）时，局部开挖疏槽、修筑潜水堰与拦水堰分别使得 WUA 较之初态增加 3809.96 m^2（129.96%）、5194.60 m^2（177.19%）与 6640.54 m^2（226.51%），局部开挖疏槽与拦水堰组合造成的 WUA 增幅达到 9651.44 m^2（329.21%），超过了下泄适宜生态流量的修复效果。综上，采取针对性的修复措施能够达到在较低流量水平下维持较高水平栖息地质量的目的。

关键词：低流量；工程措施；鱼类栖息地质量；二维水动力学模型；WUA

丹巴水电站干支流鱼类栖息地保护可行性分析

黄滨，董浩平，施家月

（中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司，浙江 杭州 311122）

摘 要：开展鱼类栖息地保护可行性分析是鱼类栖息地保护关键技术顺利实施的重要前提，本文以丹巴水电站为例，在河流（替代）生境保护内涵的基础上，结合其鱼类栖息地保护需求及电站开发后干、支流河段的环境特征，制定鱼类栖息地保护可行性分析指标体系，从生境满意度、物种丰富度、河道连通性三个方面，对丹巴减水河段、革什扎河、东谷河和小金川进行评价，确定保护优先级。结果表明：丹巴水电站鱼类栖息地保护的优先级，由高到低依次为：丹巴减水河段>小金川大跌水以下河段>革什扎河杨柳坪水电站闸坝以下河段>东谷河科里水电站坝址以下河段。拟选择丹巴减水河段、小金川大跌水以下河段进行鱼类栖息地的保护，同时开展革什扎河和东谷河河口区的鱼类栖息地保护。

关键词：丹巴水电站；鱼类栖息地保护；可行性分析

水利水电工程在获得防洪、灌溉、供水、发电、航运等综合效益的同时，对水环境、陆生生态、水生生态、社会环境等造成了诸多影响，有些甚至是长期的、累积的和不可恢复的（黄钰铃等，2007；董哲仁，2003；麻泽龙等，2006）。其中，对鱼类的影响是水利水电工程最为不利的影响之一。首先，大坝的阻隔效应会直接影响到鱼类种群间基因的交流；其次，大坝修筑、引水发电等工程将改变流量、流速、水深等河流水文情势，直接减少鱼类的生存空间，改变产卵场、越冬场、索饵场等鱼类重要生境。据文献统计，大坝是近百年来造成全球 20%淡水鱼类濒危的主要原因，近 75%的德国淡水鱼和 40%的美国淡水鱼遭受其威胁（CHEN D, et al, 2009）。经美国独立科学顾问委员会 ISAB 和美国国家科学委员会 NRC 的统计，水电设施的建设使得哥伦比亚河奇努克鲑(大鳞大马哈鱼，fall Chinook salmon)的数量每年减少约 5-11 百万条（HATTEN J R, et al, 2009）。在我国，葛洲坝和三峡的相继建成，预计将造成长江 600km 受影响河道中的 40 种珍稀动物的 1/4 丧失生存能力。中华鲟数量骤减，种群结构发生变化，产卵场由原 800km 河段减小到仅葛洲坝坝下 30km，雄性幼鱼数量减小近 90％（BAN X, et al, 2011）。洞庭湖的四大家鱼由于水库低温水下泄，产卵期推迟约 20 天（董哲仁等，2007）。雅砻江二滩水电站阻断了圆口铜鱼和长薄鳅这两种产漂浮性卵的上溯通道（王玉蓉等，2007）[8]。为此，《水电发展“十三五”规划》提出逐步形成生态保护与修复技术体系。要求系统开展水电工程分层取水、过鱼、栖息地建设、珍稀特有鱼类人工繁殖驯养、生态调度等关键技术攻关及其运行效果跟踪调查研究，不断提高水电环境保护技术可行性、有效性和经济性。

根据大渡河流域水电开发规划和水生生态保护措施的总体布局，大渡河干流在划定的川陕哲罗鲑栖息地保护的基础上，将足木足河干流阿柯河汇口至规划的下尔呷梯级坝址河段、双江口库区支流梭磨河及其他适宜生境纳入到保护范围；金川~丹巴河段、黄金坪~硬梁包河段未开发的 60km 河段以及沙湾城区~青衣江汇合口等河段作为大渡河干流鱼类栖息地的主要保护范围，进行切实保护。丹巴水电站作为“十三五”常规水电重点项目中加快推进的项目，其开发河段是大渡河流域水生生态保护措施体系中鱼类栖息地重要生境之一，分布有干流减水河段、支流或支流河口、天然河段等多种栖息地类型，具有较好的代表性。因此，本研究选择丹巴水电站的鱼类栖息地保护为案例，开展鱼类栖息地保护可行性分析研究。

1 研究区域概况

丹巴水电站位于大渡河干流上游，丹巴坝址至猴子岩库尾之间 22km 保留河段保持流水状态，有必要作为大渡河流域上游河段鱼类栖息地重要生境之一加以保护。丹巴水电站采用混合式开发，闸坝至厂址间存在 19km 减水河段，厂址下游至猴子岩库尾有 3km 天然河段；闸坝至厂址 19km 减

水河段分布有革什扎河、东谷河、小金川等一定规模支流，仍有部分河流生境较为完整或河口段暂未开发，可为鱼类提供一定适宜的栖息地。丹巴水电站过鱼设施建成后，该河段将成为连通丹巴水电站上游河段和猴子岩库区的纽带，也将成为大渡河干流上游鱼类重要的栖息生境。因此，确定本次丹巴水电站鱼类栖息地保护的应用研究范围为：干流河段，丹巴水电站坝址至小金川河口约 19km 干流河段，即丹巴水电站的减水河段。支流河段，吉牛水电站坝址至河口约 25.7km 的革什扎河河段；科里水电站坝址至河口约 9.1km 的东谷河河段；关州水电站坝址至河口约 18.6km 的小金川河段。

2 鱼类栖息地保护可行性分析指标体系

鱼类栖息地保护的可行性分析，是从理论上和技术上（不考虑经济合理性问题）对备选支流进行初步筛选的过程，结合河流（替代）生境保护需要具有“可替代、可保护、可持续”的内涵（杨青瑞等，2015），即：支流生境存在受干流开发影响的保护物种，并具有一定的种群丰富度和栖息繁殖的基本条件，在物种结构和生境条件上与干流存在相似性，可较大程度上替代干流生境；干、支流相互连通，保护支流具有较好的连通性、生境健康、安全，具有较高的保护价值，可以原位生境保护形式，缓解干流开发对生态的不利影响；支流生态价值丰富、保护成本合理、生态补偿有效，在经济上具有可持续保护的条件。

鱼类栖息地保护的可行性分析（不考虑经济可持续性），可用替代可行性和保护可行性来综合表征。首先，支流能否实现替代作用，应调查生境是否具有满足保护物种的基本栖息条件，以及是否存在干流的保护物种，并具有一定的种群丰富度，因此替代可行性可用生境满足度和保护物种丰富度两个子目标来评价；其次，支流是否具有替代生境的保护条件，要视其是否与替代的干流相互连通，同时支流生境本身要具有一定的稳定性，因此保护可行性可用干支流连通性和生境稳定性两个子目标来评价。可行性评价指标体系一般包括水文情势、河流水质、生物群落和物理结构 4 个一级指标，及生态基流、关键涨水过程、水污染状况、干支流水温差异、重要鱼类保护程度、鱼类物种多样性、饵料生物水平、物理生境多样性、鱼类“索饵场”、“产卵场”和“越冬场”分布、河流连通性 10 个二级指标，构建河流（替代）生境保护的可行性分析指标体系（杨青瑞等，2015）。丹巴水电站开发河段干支流的鱼类栖息地保护，主要以保护各自河段分布的土著鱼类为目标，不替代其他河段的鱼类栖息地。因此，根据丹巴水电站鱼类栖息地保护的需求，结合丹巴干支流河段的环境特征，本研究对鱼类栖息地保护可行性指标进行了选择和优化，选取水文条件、水动力条件、地形地貌条件、保护物种数量、纵向连通性等 5 个指标，如表 1。

表 1　丹巴水电站鱼类栖息地保护可行性分析指标体系

目标层	子目标层	指标
可行性指数(A1)	生境满足度(C1)	水文条件满足度(D1)
		水动力条件满足度(D2)
		地形地貌条件满足度(D3)
	保护物种丰富度(C2)	保护物种数量(D4)
	河道连通性(C3)	纵向连通性(D5)

注：指标体系中具体指标的赋值参照参考文献（刘四华等，2017）

考虑到丹巴水电站减水河段干支流的水质状况良好，均能满足《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)Ⅱ类标准；减水河段干支流的鱼类栖息地保护，主要以保护各自河段分布的土著鱼类为目标；生境稳定性仍与各河流原天然河道情况基本一致。因此，本次研究不再进行水环境条件、河床、河岸稳定、水土流失等因素的分析。

（1）生境满足度（C1）

根据丹巴河段干支流生境特点，本研究拟定生境满意度（C1）计算公式如下：

$$C1=30\%D1+40\%D2+30\%D3 \quad (1)$$

水文条件满足度（D1），是指为了维持支流最基本生态功能，在一定时间内，支流持续流动的最小生态流量满足程度。

水动力条件满足度（D2），是指支流与干流相比，在流速、水深、水面宽度、Fr 数等方面的满足程度。根据丹巴河段干支流生境特点，拟定水动力条件满足度计算公式为：D2=(E1+E2+E3+E4)/4，其中，E1 为流速、E2 为水深、E3 为水面宽度、E4 为 Fr。

地形地貌条件满足度（D3），是指蜿蜒度、河床比降、生境多样性（流态多样性、浅滩深潭单元）等地貌条件的满足程度。

（2）物种丰富度（C2）

根据丹巴水电站鱼类资源的分布情况，本研究拟定物种丰富度（C2）计算公式如下：：

$$C2=D4_{评价河段}/D4_{研究范围} \quad (2)$$

物种丰富度（C2）是指评价江段鱼类物种的丰富程度，其计算得分越大，表明评价河段物种的丰富度越高；$D4_{评价河段}$为评价河段中存在的物种数量；$D4_{研究范围}$为研究范围分布的物种数量。

（3）河道连通性（C3）

河道连通性是指拟开展鱼类栖息地保护的河流必须保持连通性，才能保证完整性和鱼类资源保护的有效性，河流系统在物质、能量和信息等方面流动的畅通性。河道连通性（C3）用 0 和 1 表示，0 表示不连通，1 表示连通。若不连通，则该河段不具备鱼类栖息地保护的可行性。

综上，结合丹巴河段干支流生境特点和鱼类栖息等要求，确定了鱼类栖息地保护可行性指数的计算方法：

$$A1=（0.6\times生境满足度C1+0.4\times物种丰富度C2）\times河道连通性C3 \quad (3)$$

3 丹巴水电站干支流鱼类栖息地保护可行性分析

3.1 丹巴减水河段鱼类栖息地保护可行性分析

3.1.1 生境满意度分析

（1）水文条件满足度（D1）

由于丹巴水电站目前处于可研阶段，坝址处最小生态流量暂未最终确定，本次研究按照预可阶段 56.1m^3/s（坝址处多年平均流量 10%）考虑。丹巴水电站减水河段干流的水文条件满足度为 0.6。

（2）水动力条件满足度（D2）

本研究的流速满足度（E1），以天然条件下枯水期多年平均流量为基准，分析生态流量情况下减水河段流速的满足度；以生态流量情况下流速与枯水期多年平均流量情况下流速的相似度为评价的计算依据。评价结果显示，生态流量情况下，丹巴水电站减水河段的流速满意度（E1）为 73.3%，满足度总体为良好水平。

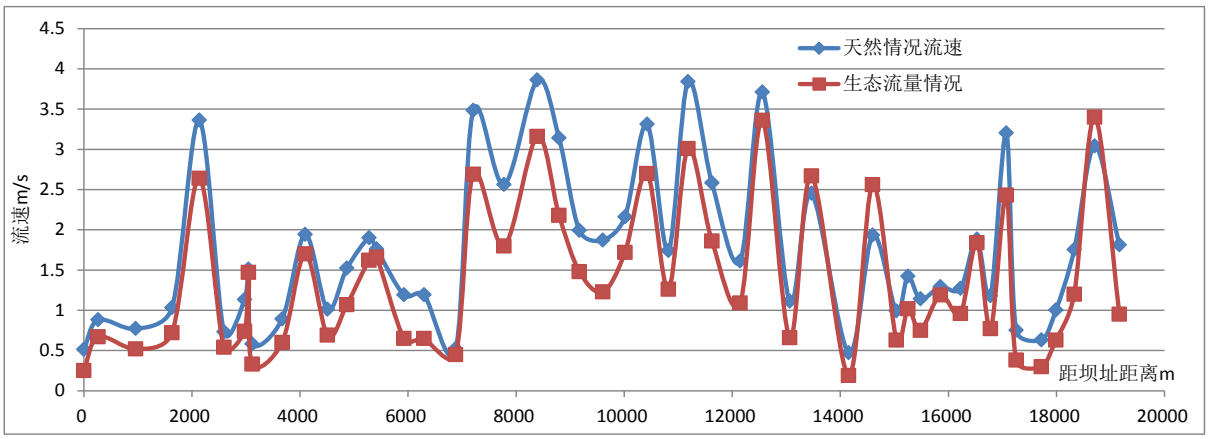


图 1　研究河段各断面流速分布图

本研究的水深满足度（E2），以生态流量情况下断面最大水深与枯水期多年平均流量情况下断面最大水深的相似度为评价的计算依据。评价结果显示，生态流量情况下，丹巴水电站减水河段的水深满意度（E2）为 68.5%，满足度总体为良好水平。

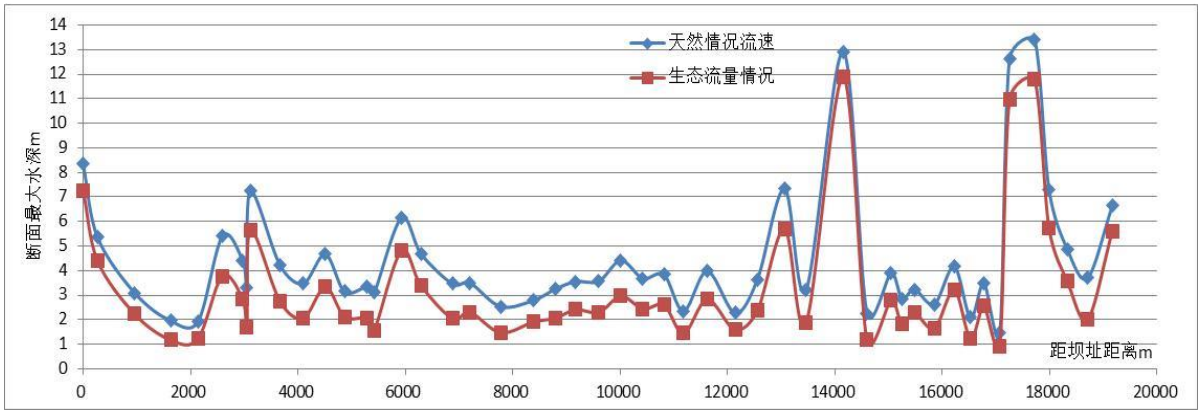


图 2　研究河段各断面最大水深分布图

本研究的水面宽度满足度（E3），以生态流量情况下断面最大水深与枯水期多年平均流量情况下断面水面宽度的相似度为评价的计算依据。评价结果显示，生态流量情况下，丹巴水电站减水河段的水面宽度满意度（E3）为 77.7%，满足度总体为良好水平。

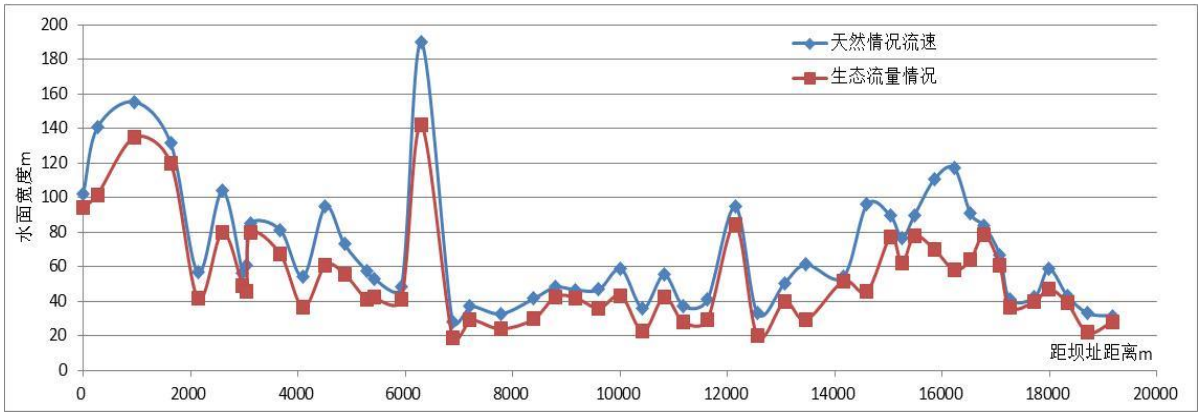


图 3　研究河段各断面水面宽度分布图

本研究的 Fr 数满足度（E4），以生态流量情况下断面最大水深与枯水期多年平均流量情况下断面 Fr 数的相似度为评价的计算依据。评价结果显示，生态流量情况下，丹巴水电站减水河段 Fr 数满意度（E4）为 83.2%，满足度总体为好。

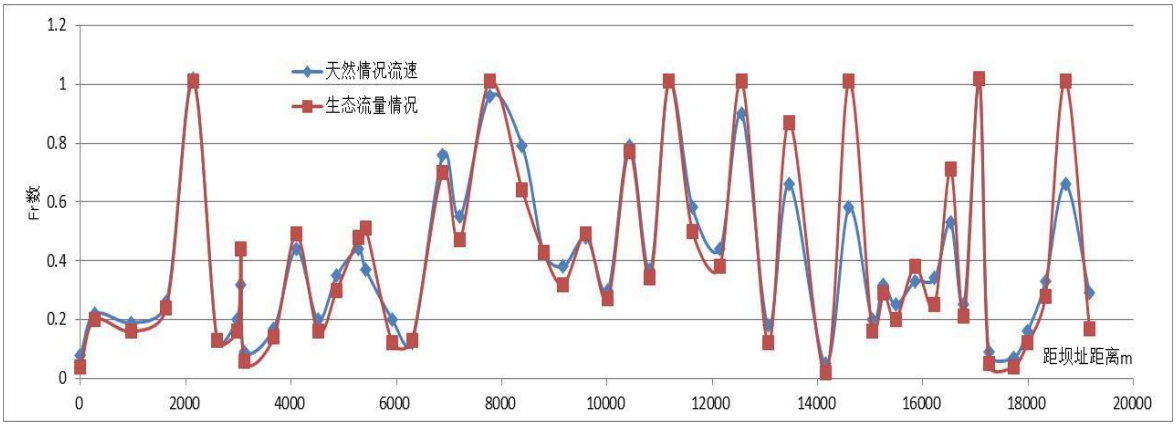


图 4　研究河段各断面 Fr 数分布图

根据上述流速、水深、水面面积、Fr 数的满足度分析结果，水动力条件满足度（D2）为(E1+E2+E3+E4)/4=0.76，总体评价为良好水平。

（3）地形地貌满足度（D3）

本次采用广泛应用的 Rosgen 分类（ROSGEN D L, 1994）标准对蜿蜒度进行分类：S=1 为顺直河段，S<1.2 为低度蜿蜒，1.2~1.4 为中度蜿蜒，>1.4 为高度蜿蜒。丹巴水电站减水河段干流的蜿蜒度约 1.11，河道蜿蜒度一般。

参照鱼道和仿自然旁通道设计采用的底坡范围，对河床比降满足度进行分类：I<0.5%满足度好，0.5%~1.5%满足度良好，1.5%~5%满足度一般，>5%满足度差。丹巴坝址至下游 6.9km 处，平均坡降仅约 0.17%，河床比降满足度好；6.9km 至 12.6km 河段为陡坡段，平均坡降为 1.5%，最大坡降达 4.2%，河床比降满足度一般；坝址下游 12.6km 至小金川汇口约 6.4km 河段，平均坡降约为 0.3%，河床比降满足度好。

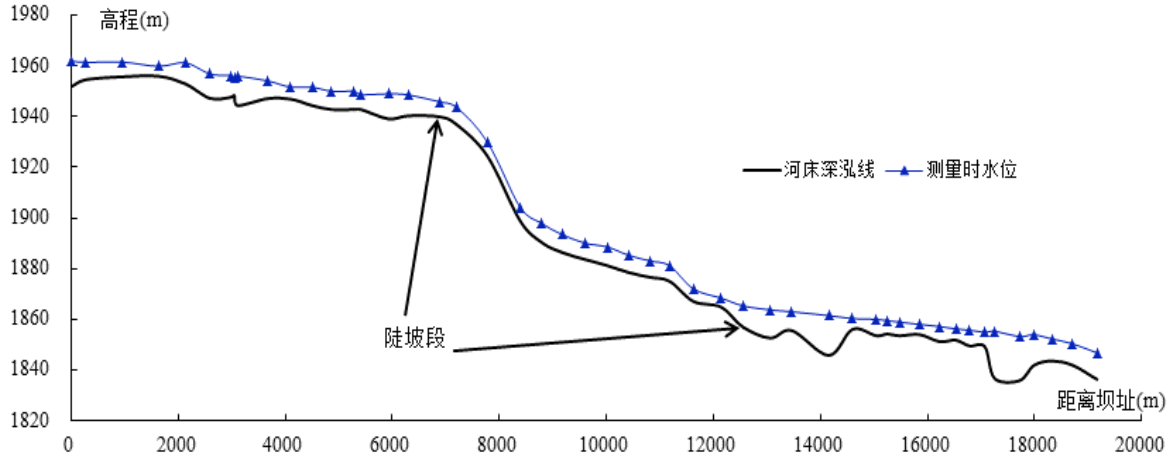


图 5　丹巴坝址至小金川汇口干流纵向坡降情况

丹巴水电站减水河段干流为天然河道形态，断面形态各不相同，断面多样性好。干流生境形态分布情况见表 2，生态流量情况下河道内的生境形态较天然情况更为多样，浅滩和深潭分布无减少，生境多样性满足度好。

表 2　研究河段干流生境形态分布情况

流量(m3/s)	急流(个)	较急流(个)	较缓流(个)	缓流(个)	深潭(个)	浅滩(个)		
						左滩地	河心滩	右滩地
下泄生态基流量情况下	28	15	4	2	3	10	3	7
枯水期多年平均流量情况下	39	10	0	0	3	4	2	5

因此，丹巴水电站减水河段干流蜿蜒一般，河床比降能够满足鱼类洄游，断面形态多样、深潭浅滩交替出现，干流地形地貌满足度（D3）为一般，取 0.6。

（4）生境满意度分析

丹巴水电站减水河段干流的水文条件满足度（D1）为 0.6，水动力条件满足度（D2）为 0.76，地形地貌满足度（D3）为 0.6；由式（1）可知，C1=30%D1+40%D2+30%D3=0.66，生境满足度总体为良好水平。

3.1.2 物种丰富度分析

物种丰富度（C2）是指评价河段鱼类物种的丰富程度。根据丹巴水电站鱼类资源的调查结果，开发河段干支流调查到的鱼类在丹巴水电站减水河段均有分布，故物种丰富度（C2）为 1，物种丰富度高。

3.1.3 河道连通性分析

根据相关资料和现场调查，丹巴水电站减水河段无拦河闸坝工程，也无天然大跌水分布，减水河段目前无工程或天然阻隔，处于连通状态。因此，河道连通性（C3）为 1。

3.1.4 小结

综上，丹巴水电站减水河段鱼类栖息地保护可行性指数，A1=(0.6×C1+0.4×C2)×C3=0.80，可行性评价等级为“可行”，详见表 3。

表 3　研究河段鱼类栖息地保护可行性分析结果

河段	目标层	指标	评价结果	准则层	指标	评价结果	子目标层	指标	评价结果
丹巴水电站减水河段	可行性指数(A1)	0.8	可行	生境满足度(C1)	0.66	良好	水文条件满足度(D1)	0.6	一般
							水动力条件满足度(D2)	0.76	良好
							地形地貌条件满足度(D3)	0.6	一般
				保护物种丰富度(C2)	1	好	物种数量(D4)	1 种/1 种	好
				河道连通性(C3)	1	连通	纵向连通性(D5)	1	连通

3.2 革什扎河鱼类栖息地保护可行性分析

革什扎河杨柳坪水电站进水口以上河段，考虑到地形地貌满足度（D3）为 0，生境满足度总体为极差，取 0。革什扎河杨柳坪水电站进水口以下河段，水文条件满足度 0.4，水动力条件满足度（D2）为 0.65，地形地貌满足度（D3）为 0.4；因此，生境满足度，C1=30%D1+40%D2+30%D3=0.50，生境满足度总体为一般水平。

根据丹巴水电站的鱼类资源的调查结果，丹巴水电站开发河段干支流调查到的鱼类共 8 种，革什扎河共调查到鱼类 5 种，因此，物种丰富度（C2）为 0.63，物种丰富度为良好。

根据相关资料和现场调查，革什扎河吉牛坝址以下河段目前分布有大雪水电站、杨柳坪水电站，河道连通性受到工程阻隔。因此，革什扎杨柳坪水电站闸坝以上河段的连通性（C3）为 0，杨柳坪水电站闸坝以下河段的连通性（C3）为 1。

综上，杨柳坪水电站进水口以上河段鱼类栖息地保护可行性指数 A1=0，评价等级为“不可行”；杨柳坪水电站进水口以 A1=0.55，评价等级为“勉强可行”。详见表 4。

表 4　革什扎河鱼类栖息地保护可行性分析结果

河段	目标层	指标	评价结果	准则层	指标	评价结果	子目标层	指标	评价结果
杨柳坪水电站进水口以上河段	可行性指数(A1)	0	不可行	生境满足度(C1)	0	极差	水文条件满足度(D1)		
							水动力条件满足度(D2)		
							地形地貌条件满足度(D3)	0	极差
				保护物种丰富度(C2)	0.63	良好	物种数量(D4)	5 种/8 种	良好
				河道连通性(C3)	0	不连通	纵向连通性(D5)	0	不连通
杨柳坪水电站进水口以下河段	可行性指数(A1)	0.55	勉强可行	生境满足度(C1)	0.5	一般	水文条件满足度(D1)	0.4	较差
							水动力条件满足度(D2)	0.65	良好
							地形地貌条件满足度(D3)	0.4	较差
				保护物种丰富度(C2)	0.63	良好	物种数量(D4)	5 种/8 种	
				河道连通性(C3)	1	连通	纵向连通性(D5)	1	连通

3.3 东谷河鱼类栖息地保护可行性分析

东谷河科里电站发电厂房以下河段，水文条件满足度为 0.6，水动力条件满足度（D2）为 0.76，地形地貌满足度（D3）为 0.5。因此，生境满足度，C1=30%×D1+40%×D2+30%×D3=0.63，生境满足度总体为良好。

根据丹巴水电站的鱼类资源的调查结果，丹巴水电站开发河段干支流调查到的鱼类共 8 种，东谷河共调查到鱼类 3 种，物种丰富度（C2）为 0.38，物种丰富度较差。

根据相关资料和现场调查，东谷河科里水电站坝址以下河段无拦河闸坝工程，也无天然大跌水分布，减水河段目前无工程或天然阻隔，处于连通状态。因此，东谷河科里水电站坝址以下河段的河道连通性（C3）为 1。

综上，东谷河科里水电站坝址以下河段鱼类栖息地保护可行性指数，A1=(0.6×C1+0.4×C2)×C3=0.53，评价等级为“勉强可行”，详见表 5。

表 5　东谷河鱼类栖息地保护可行性分析结果

河段	目标层	指标	评价结果	准则层	指标	评价结果	子目标层	指标	评价结果
东谷河科里水电站坝址以下河段	可行性指数(A1)	0.53	勉强可行	生境满足度(C1)	0.63	良好	水文条件满足度(D1)	0.6	一般
							水动力条件满足度(D2)	0.76	良好
							地形地貌条件满足度(D3)	0.5	一般
				保护物种丰富度(C2)	0.38	较差	物种数量(D4)	3 种/8 种	较差
				河道连通性(C3)	1	连通	纵向连通性(D5)	1	连通

3.4 小金川鱼类栖息地保护可行性分析

小金川大跌水以下河段，水文条件满足度（D1）为 0.4，水动力条件满足度（D2）为 0.71，地形地貌满足度（D3）为 0.5。因此，生境满足度，C1=30%×D1+40%×D2+30%×D3=0.55，生境满足度总体为一般。

根据丹巴水电站的鱼类资源的调查结果，丹巴水电站开发河段干支流调查到的鱼类共 8 种，小金川共调查到鱼类 7 种，物种丰富度(C2)为 0.88，物种丰富度为好。

根据相关资料和现场调查，小金川关州水电站闸坝以下河段无拦河闸坝工程，但在河口上游约 16.8km 处存在天然大跌水分布(跌水高度约 3m)，该河段无工程阻隔，但存在天然阻隔影响。因此，小金川大跌水以上河段的河道连通性(C3)为 0，大跌水以下河段的河道连通性(C3)为 1。

综上，小金川大跌水以上河段鱼类栖息地保护可行性指数，A1=0，评价等级为“不可行”； 小金川大跌水以下河段鱼类栖息地保护可行性指数，A1=0.68，评价等级为“基本可行”。详见表 6。

表 6　小金川鱼类栖息地保护可行性分析结果

河段	目标层	指标	评价结果	准则层	指标	评价结果	子目标层	指标	评价结果
小金川大跌水以上河段	可行性指数(A1)	0	不可行	生境满足度(C1)			水文条件满足度(D1)		
							水动力条件满足度(D2)		
							地形地貌条件满足度(D3)		
				保护物种丰富度(C2)			物种数量(D4)		
				河道连通性(C3)	0	不连通	纵向连通性(D5)	0	不连通
小金川大跌水以下河段	可行性指数(A1)	0.68	基本可行	生境满足度(C1)	0.55	一般	水文条件满足度(D1)	0.4	较差
							水动力条件满足度(D2)	0.71	良好
							地形地貌条件满足度(D3)	0.5	一般
				保护物种丰富度(C2)	0.88	好	物种数量(D4)	7 种/8 种	好
				河道连通性(C3)	1	连通	纵向连通性(D5)	1	连通

4 结论与研究展望

本研究，根据丹巴水电站鱼类栖息地保护的需求、干支流河段的环境特征，制定鱼类栖息地保护可行性分析指标体系，从生境满意度、物种丰富度、河道连通性三个方面，对丹巴减水河段、革什扎河、东谷和和小金川进行评价。结果显示，干流鱼类栖息地保护可行性等级为“可行”，小金川大跌水以下河段为“基本可行”，革什扎河杨柳坪水电站闸坝以下河段和东谷河科里水电站坝址以下河段等级为“勉强可行”；鱼类栖息地保护的优先次序为：丹巴减水河段>小金川大跌水以下河段>革什扎河杨柳坪水电站闸坝以下河段>东谷河科里水电站坝址以下河段。干流河段生境条件、物种丰富度、河道连通性等满足度均较好，鱼类栖息地保护最为可行，拟将其作为大渡河上游鱼类栖息地重要生境进行保护。

丹巴水电站为引水式开发，建成后受上游具有年调节能力的双江口水电站调度影响，丹巴坝址处泄洪概率较天然情况大大降低；坝址至厂房河段河道内流量主要为下泄的生态流量和区间汇流，涨水概率和涨水幅度均将有较大降低。各支流已建或规划梯级电站的调节性能均较差，遇一定规模洪水时基本为敞泄状态，其闸坝下游河道及河口区仍将存在天然涨水过程。因此，在开展干流鱼类

栖息地保护的同时，选择合适的支流或支流河口区开展系统保护。根据各支流鱼类栖息地保护可行性分析结果，拟选择小金川大跌水以下河段进行支流鱼类栖息地的保护，同时开展革什扎河和东谷河河口区的鱼类栖息地保护。

综上，本研究初步拟定大渡河丹巴河段鱼类栖息地保护方案为：以丹巴水电站坝址至小金川河口下游约 3km 处的 22km 干流河段为主体，包括小金川大跌水以下 16.8km 的支流河段、革什扎河河口区和东谷河河口区，进行鱼类栖息地的系统保护；同时，发挥丹巴库尾和猴子岩库尾存在的流水河段，为库区喜缓流和静水生境但需流水刺激产卵的鱼类提供适宜的水生生境。通过对丹巴河段干支流及支流河口的保护，与下游猴子岩库区和上游丹巴库区(丹巴过鱼设施相连通)形成“水库-河流-水库”的生态系统，不仅能提供一个流态多样、河流形态多样的生态系统，为鱼类提供良好的栖息和繁殖生境，也将为上、下游河段鱼类栖息和种质交流提供适宜生境。

本文选取和优化确定的栖息地可行性指标体系，综合考虑了丹巴水电站干支流生境、物种和河道连通性等因素，评价结果能反映丹巴水电站干支流鱼类栖息地保护可行性的总体情况，可以指导鱼类栖息地保护方案的制定。但该指标体系在应用过程中，也存在一些不足：① 鱼类栖息地保护可行性分析的指标体系中未考虑鱼类最小栖息空间的指标；② 部分指标未量化或没有推荐权重。这些不足需要在后期应用和研究中进一步完善。

参考文献：

[1] 黄钰铃,王从锋,刘德富.水库建设与生态系统和谐[J].节水灌溉,2007(8):63-66.

[2] 董哲仁.水利工程对生态系统的胁迫[J].水利水电技术,2003,34(7):1-5.

[3] 麻泽龙,谭小琴,周伟,等.河流水电开发对生态环境的影响及其对策研究[J].广西水利水电,2006(1):24-28.

[4] CHEN D, XIONG F, WANG K, et al.Status of research on Yangtze fish biology and fisheries[J]. Environmental Biology of Fishes, 2009, 85(4):337.

[5] HATTEN J R, TIFFAN K F, ANGLIN D R, et al. A spatial model to assess the effects of hydropower operations on Columbia river fall Chinook salmon spawning habitat[J]. North American Journal of Fisheries Management, 2009, 29(5):1379-1405.

[6] BAN X, DU Y, LIU H Z, et al. Applying instream flow incremental method for the spawning habitat protection of Chinese sturgeon [J]. River Research and Applications, 2011, 27(1):87-98.

[7] 董哲仁,孙东亚.生态水利工程原理与技术[M].中国水利水电出版社,2007.

[8] 王玉蓉,李嘉,李克锋等.雅砻江锦屏二级水电站减水河段生态需水量研究[J].长江流域资源与环境,2007,16(1):81-85.

[9] 杨青瑞,陈声威,何建宽等.支流生境替代保护效果评价指标体系与评价方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(6):408-413.

[10] 刘四华.大渡河丹巴河段鱼类栖息地可行性与适宜性研究[J].低碳世界,2017,(30):253-255.

[11] ROSGEN D L. Classification of natural rivers[J]. Catena, 1994,22:169-199.

可视化附着式振捣器控制系统研发与应用

王　鹏

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：针对传统盾构管片混凝土浇捣工艺施工粗放、振捣参数和过程不可控等缺点，研发了一种可视化附着式振捣器控制系统，实现了振捣参数的远程监测和程序化控制，并在实际应用中取得显著成效。

关键词：振捣参数；可视化；控制系统；研发

1 概述

近年来，国内地铁建设项目高速发展，而盾构法施工中地铁隧道的主要部件地铁盾构管片的质量直接关乎地铁隧道实体质量。在盾构管片生产施工中，混凝土振捣工序是盾构管片生产施工中最为关键的环节，直接关系到盾构管片的密实度、平整度、气泡现象等实体和外观质量。因而控制盾构管片混凝土振捣质量至关重要。

在管片施工领域，大多数盾构管片混凝土浇捣工艺采用附着式振捣器进行振捣。传统的附着式振捣方式多采用气动回路直接驱动附着式振捣器实现混凝土振捣，该方式施工粗放，劳动强度高，振捣频率、振捣时间、气动压力、振幅等参数无法监测，混凝土振捣过程不可控，易产生过振、欠振现象并引起管片表面气泡、空洞、蜂窝、麻面等质量问题，工人的熟练程度和责任心直接影响混凝土振捣质量，难以保证盾构管片混凝土施工质量。

在中电建成都混凝土制品有限公司新津管片厂建设时，笔者所在的科研团队为摒弃传统附着式振捣器施工粗放，劳动强度高，振捣频率、振捣时间、气动压力、振幅等参数无法监测，混凝土振捣过程不可控等缺点，自主研发了一种可视化附着式振捣器控制系统，实现了振捣频率、振捣时间、振幅和气动压力等参数的远程监测和程序化控制，有效避免了过振、欠振现象，消除了盾构管片气泡、空洞、蜂窝、麻面等混凝土质量问题，确保了盾构管片混凝土施工质量。

2 控制系统原理

可视化附着式振捣器控制系统通过调节气压调节阀精确控制气动压力，通过调节电磁阀开度大小精确控制振捣频率，通过 PLC 中央处理单元精确控制振捣时间。控制系统上位机采用工业组态软件进行画面组态，通过 PROFINET 通讯协议与 PLC 中央处理单元连接，从而在上位机上实现振捣频率、振捣时间、振幅和气动压力等参数的远程监测和程序化控制。可视化附着式振捣控制系统系统模块示意图见图 1，原理框图见图 2。

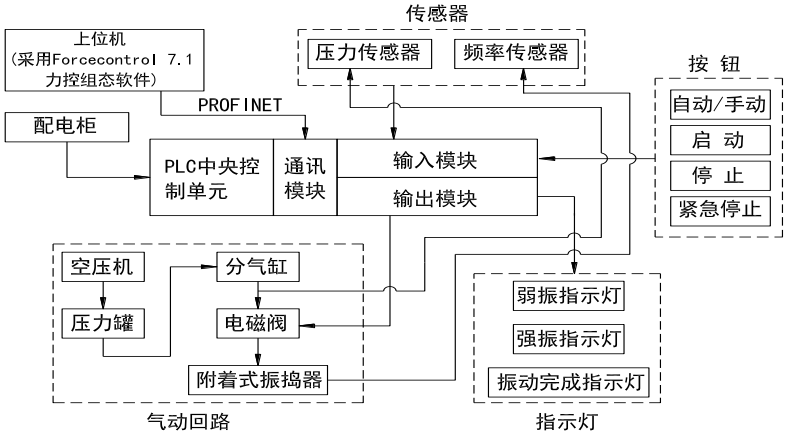


图 1　可视化附着式振捣控制系统系统模块示意图

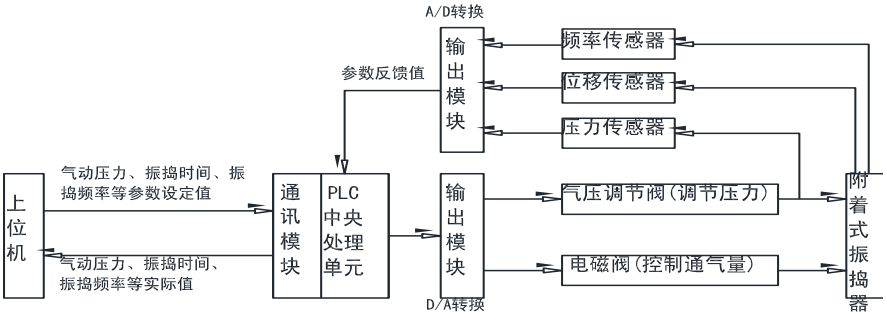


图 2　可视化附着式振捣器控制系统原理框图

3 控制系统动作流程

附着式振捣器控制系统启动后，上位机将预设的气动压力、振捣时间、振捣频率等参数值，通过通讯模块传输至 PLC 中央处理单元，PLC 中央控制单元通过输出模块 D/A 转换驱动气压调节和电磁阀动作，附着式振捣器开始工作，并按照振捣程序预设优先进入弱振阶段，弱振结束后进入强振阶段。振捣过程中，压力传感器、频率传感器和位移传感器将检测到的气动压力、振捣频率、振幅等数据通过输入模块 A/D 转换传输至 PLC 中央处理单元，PLC 中央处理单元将各实时监测参数通过通讯模块传输至上位机显示，并对各参数的预设值和实际值进行比较运算，若气动压力的实际检测值与预设值有偏差，则调整气压调节阀大小来调整气动压力；若振捣频率的实际检测值与预设值有偏差，则调节电磁阀开度大小来调整通气量，以达到控制振捣频率的目的。当弱振时间计时达到预设值，则进去强振阶段，当强振时间计时达到预设值，强振结束，整个控制系统工作完成。可视化附着式振捣器控制系统动作流程见图 3。

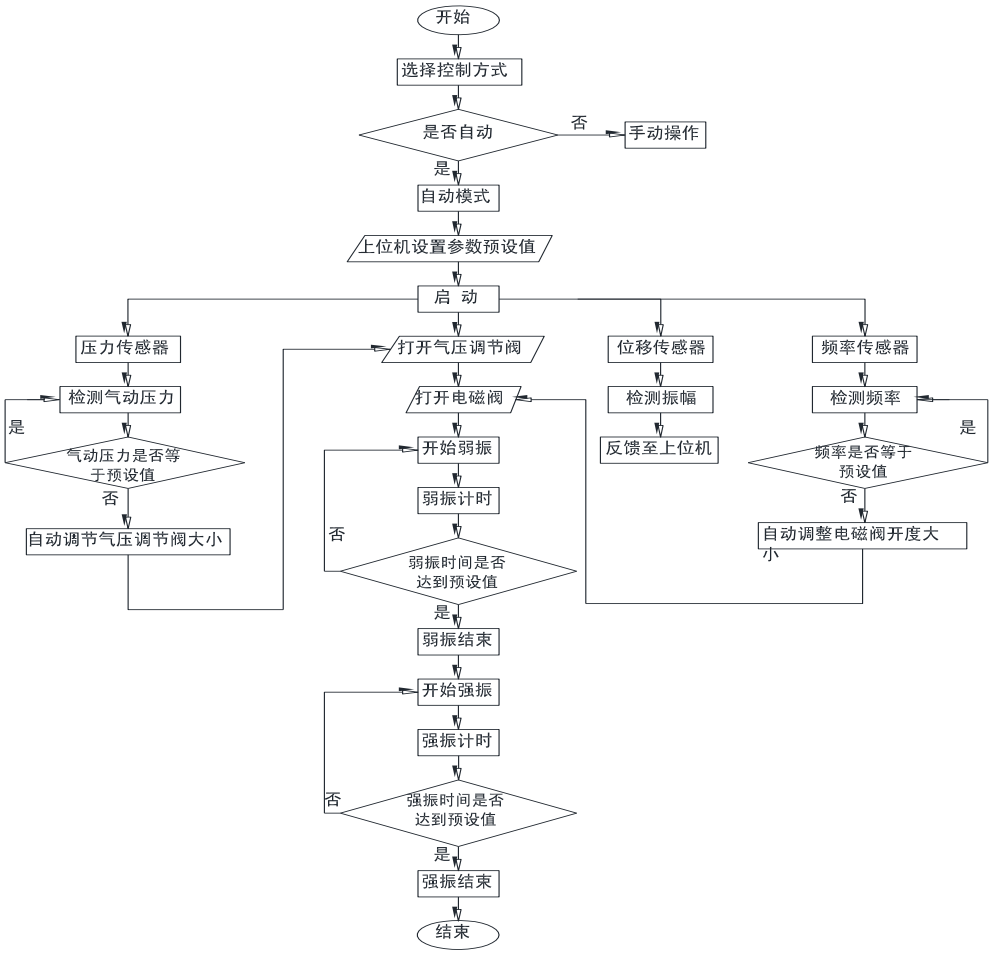


图 3　　可视化附着式振捣器控制系统动作流程图

步骤 1：系统通电后，配电柜开始为 PLC 中央处理单元、输入模块、输出模块、上位机、传感器、控制按钮、信号指示灯等进行供电。切换按钮“自动/手动”，若为“自动”状态，则系统进入自动模式，反之，进去手动操作模式。

步骤 2：系统进入自动模式后，上位机设置气动压力、振捣频率、振捣时间等参数预设值，并将参数传输至 PLC 中央处理单元。

步骤 3：点击“启动”按钮，系统进入运行模式。

步骤 4：空压机首先启动运行，空压机产生气体，气体经压力罐中间压缩后通过管路进入气压调节阀，然后进入分气缸，气体经分气缸分成各支路后，经管路传输至电磁阀，并进入附着式振捣器，并驱动振捣器振捣。

步骤 5：系统开始进入弱振阶段，“弱振指示灯”亮，同时弱振开始计时，当弱振时间达到预设值，弱振结束，“弱振指示灯”熄灭；系统依次进入强振阶段，“强振指示灯”亮，强振开始计时，当强振时间达到预设值，强振结束，“强振指示灯”熄灭，“振捣完成指示灯”亮。

步骤 6：振捣过程中，位移传感器、频率传感器、压力传感器将实时检测的数据传输经输入模块传输至 PLC 中央处理单元。上位机通过 PROFINET 通讯协议与 PLC 中央处理单元连接，实时监控振捣频率、振幅、气动压力、振捣时间等参数，以实现人机间的数据交互。

步骤 7：振捣过程中，频率传感器将实时检测的振捣频率经输入模块传输至 PLC 中央处理单元，PLC 中央处理单元对检测频率进行处理，若频率检测值等于其预设值，则保持电磁阀开度大小稳定不变；若频率检测值大于其预设值，则调小电磁阀开度，以降低振捣频率；若频率检测值小于其预设值，则调大电磁阀开度，以提高振捣频率。

步骤 8：振捣过程中，压力传感器将实时检测的气动压力经输入模块传输至 PLC 中央处理单元，PLC 中央处理单元对检测的气动压力进行处理，若气动压力检测值等于其预设值，则保持气压调节阀开度大小稳定不变；若实际压力检测值大于其预设值，则调小气压调节阀开度，以降低气动压力；若实际压力检测值小于其预设值，则调大气压调节阀开度，以提高气动压力。

步骤 9：振捣过程中若点击“停止”按钮，则系统停止振捣。振捣时若遇到紧急情况，点击“紧急停止”按钮，控制系统立即停止运转，振捣瞬间停止，以确保人员设备安全。

步骤 10：振捣过程自动结束。

4 工程应用实例

中电建成都混凝土制品有限公司新津管片厂主要有两条生产线，2+5 管片生产线及其控制系统全部由厂家设计完成，另一条 2+4 管片生产线机械部分由厂家提供，生产线电气及控制系统由我们自主研发，并将可视化附着式振捣器控制系统嵌入其中。通过运行实际证明，由厂家设计的 2+5 管片生产线 2 条作业线同时施工生产节拍为 6min。而我们自主设计的 2+4 管片生产线，由于采用了弹性可调节的可视化智能控制系统，优化了生产流程、振捣与养护参数，在 2 条作业线同时投入使用、交替作业时，生产节拍可控制在 5 min（即单片管片施工等效节拍时间为 5 min），较厂家设计生产线节拍少 1 min，月产能较厂家生产线多生产管片约 134 环管片，在理论每月满负荷生产情况下，理论上年度可多生产管片 1608 环，生产效率提高 16.6%。按 3 万元/单环计算，每年可产生经济效益约 4824 万元。

5 结语

通过新津管片厂生产实践证明，可视化附着式振捣器控制系统摒弃了传统附着式振捣器施工粗放，劳动强度高，振捣频率、振捣时间、气动压力、振幅等参数无法监测，混凝土振捣过程不可控等缺点，实现了振捣频率、振捣时间、振幅和气动压力等参数的远程监测和程序化控制，有效避免了过振、欠振现象，消除了盾构管片气泡、空洞、蜂窝、麻面等混凝土质量问题，确保了盾构管片

混凝土施工质量。通过在新津管片厂的应用，有力的提高了盾构管片生产质量和效率，确保了成都轨道交通 18 号线盾构管片的生产供应任务，满足了盾构隧道的施工进度和成型质量要求，为成都轨道交通 18 号线盾构施工提供了强有力的后盾。

某高速公路桥梁棱形挂蓝设计的计算和分析

顿　江

（葛洲坝集团第二工程有限公司，四川 成都 610091）

摘　要：高速公路桥梁挂蓝施工可用桁架式挂蓝、三角式挂蓝、棱形挂蓝和斜拉式挂蓝等工艺。本文对通过某大桥南引桥的棱形挂蓝预压、施工和挂篮行走三种荷载组合的验算和分析，来验算强度和稳定性均满足规范要求。

关键词：高速公路；桥梁施工；棱形挂蓝；技术性能

1　工程概况

大桥工程点里程桩号为 K0+757.500-K2+565.0m，全长 1807.5m，其中南湖桥（70+105+90+80+55）m 为不等跨变高度预应力混凝土连续箱梁桥。主梁采用单箱单室直腹板箱型截面，箱梁顶宽 15.9m，底宽 8m，顶板厚度 30cm，腹板厚 50-80cm，跨中、边跨直线段底板厚 0.32m，S7-S10 处底板依次厚 0.7m、0.6m、0.5m、0.5m；侧翼缘板悬臂长 3.95m，悬臂端部 0.2m 厚，根部 0.6m 厚。

主梁 0#段长 12m，现场考虑支架施工，其他各段采用菱形挂篮施工，悬浇段施工节段长分别为 3m、3.5m、4m 三种类型，合拢段长 2.0m。根据比较发现，最重梁段为 A1#段，混凝土体积为 71.5m^3，重量为 187.7t（混凝土容重按 2.6t/m^3 计算）。

2　棱形挂蓝主要参数

混凝土自重 GC＝26kN/m3；钢弹性模量 Es＝2.1×105MPa；允许最大变形：20mm；施工时、行走时抗倾覆安全系数为 2；自锚固系统的安全系数为 2；受压杆件的长细比允许值为 150，受拉杆件的长细比允许值为 200；挂篮系统设计计算采用计算机电算和手算相结合的方式，电算程序采用美国 CSI 公司的 sap2000V15.2.1 专业结构设计软件。材料容许应力（根据中国行业标准）：

$$\text{Q235钢}[\sigma_w]=145\text{MPa},\quad [\sigma]=140\text{MPa}\quad [\tau]=85\text{MPa}$$
$$\text{Q345钢}[\sigma_w]=210\text{Mpa},\quad [\sigma]=200\text{MPa}\quad [\tau]=120\text{Mpa}$$
$$\text{45\#钢}[\sigma_w]=220\text{MPa},\quad [\sigma]=210\text{MPa}\quad [\tau]=125\text{Mpa}$$

临时结构容许应承载力可提高 30%。

3 棱形挂篮主要的技术性能

挂篮底模直线拟合曲线误差 7mm。

能适应最大梁重：187.7t（A1#块）。

适应梁长：3m，3.5m，4m 三种。

梁高变化范围：8.512-3.5m。

最大梁宽：顶板 15.9；底板：8m。

挂篮总重：约 80t（含内模）。

4 棱形挂篮各部分构造简介

4.1 棱形挂篮承重桁架系统

主桁架主要由二片菱形架和横联连接而成，组成该挂篮主要受力结构。桁架由普通热轧[36b 槽

钢组焊接成方形截面，用螺栓连接成菱形架，横联主要由 2x100x10 角钢组成。主构架上前端布置有横梁，由 2*I56b 普通热轧槽钢组成，作为前吊杆的支撑点。本挂篮设计了后锚点、前支点，施工时通过后锚提供的拉力来平衡混凝土自重和施工荷载。

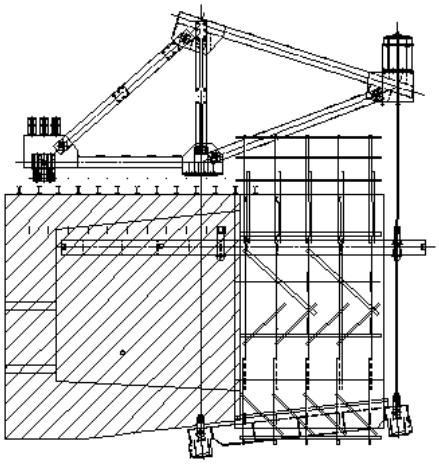


图 1 挂篮立面图

4.2 棱形挂篮后锚系统

承重桁架的锚固系统，在浇注混凝土时，用后锚杆穿过预留孔，上端与挂篮后锚点连接，下端与混凝土箱梁顶板连接。后锚共采用 6 根反压梁（每侧 3 根）抵抗挂篮使用时的倾覆力，通过计算两根反压梁即可以满足受力要求，为安全考虑，在受力不均，预埋有误差等不利情况下满足使用要求，增加一根反压梁，增大安全系数。后锚杆采用材质为Φ32 精轧螺纹钢。

4.3 棱形挂篮底篮系统

在前、后底横梁上布设底纵梁，作为浇注混凝土时的承重结构，底纵梁支撑底部模板。前、后底横梁采用 2I56*b 普通热轧工字钢组成，底纵梁由 2*[14b 普通热轧槽钢和 I10 普通热轧工字钢组成。前、后底横梁上设置连接点，前横梁通过吊杆与顶部横梁联接，后横梁中，有两根吊杆与桥梁顶板联接，其余的均连接在梁段的底板上。底模的立模和拆模，是通过千斤顶完成的。其中吊杆均采用Φ32 精轧螺纹钢。

4.4 棱形挂篮行走系统

行走轨道是用 2*28b 工字钢拼焊而成，挂篮行走时，在后锚点上，用特制小轮反挂于行走轨道的上翼缘板，用两个 20t 葫芦驱动挂篮前移。行走轨道的固定，是通过预留孔安装反压梁进行固定。

4.5 棱形挂篮模板系统

模板系统由内、外模板、人行道板、滑梁及模板固定装置组成，均采用大块钢模。（内模除滑梁外其余部分均现场自备），模板由内外滑梁支撑，而内外滑梁的锚固，则通过吊带一端锚固于混凝土箱梁的顶板，一端锚固于挂篮前上横梁。内外模板侧模间由对拉螺杆承受浇注混凝土时的侧向压力。挂篮移动时，外模由外模滑梁支托随同挂篮前移，内模滑梁同时被拉出。然后在适当的时候将内模顺着内模滑梁拉出。

5 菱形挂篮构造和荷载的组合计算分析

菱形桁架由 2[36b 普通热轧槽钢组成的方形截面杆件构成；前横梁由 2*I56b 普通热轧工字钢组成，底模前后横梁由 2I56*b 普通热轧工字钢组成；底纵梁是由 I10 和[14b 普通热轧槽钢组成的桁架；吊杆采用Φ32 精轧螺纹钢。

5.1 棱形挂篮荷载系数

考虑箱梁混凝土浇筑时胀模等系数的超载系数：1.05；预压时动力系数：1.2 挂篮空载行走时的

冲击系数 1.3；浇筑混凝土和挂篮行走时的抗倾覆稳定系数：2.0；预压荷载荷载系数 1.2；

5.2 棱形挂篮荷载组合

荷载组合 I：混凝土重量+超载+挂篮自重+施工荷载；用于混凝土浇筑过程验算；

荷载组合Ⅱ：挂篮自重+冲击附加荷载；用于挂篮系统行走时验算；

荷载组合 III：挂篮自重+预压荷载+冲击附加荷载；用于挂篮预压时计算；

5.3 棱形挂篮荷载计算

箱梁恒载是通过比较五跨中每段的自重、长度等因素考虑，取三种浇筑长度下，自重最大的浇筑段作为验算对象，即 A1 段与 A1，段，浇筑长度 3m，自重 187.7t；即 A8 段与 A8，段，浇筑长度 3.5m，自重 163.8t；即 A12 段与 A12，段，浇筑长度 4m，自重 153.4t；

施工机具及人群荷载：10t；挂篮系统自重：包括模板系统挂篮重量约 80t；风荷载：风压计算，参考以往的计算，风荷载按 q=1.0kN/m2；

5.4 棱形挂篮浇筑过程验算

5.4.1 棱形挂篮浇筑过程荷载组合形式

采用荷载组合Ⅰ：混凝土重量+超载+挂篮自重+施工荷载，组合形式如下：

1.2（挂蓝自重+施工荷载+1.05×混凝土重量），其中 1.2 表示浇筑混凝土的动力系数，1.05 表示超灌系数。即：

A1 段与 A1，段：　　1.2x（76.2+10+1.05x187.7）=339.9t；

A8 段与 A8，段：　　1.2x（73.35+10+1.05x163.8）=309.8t；

A12 段与 A12，段：　1.2x（73.35+10+1.05x153.4）=296.7t；

5.4.2 棱形挂篮荷载传递路线分析

（1）箱梁底板及腹板混凝土压力的传递路线是：混凝土自重、施工荷载→面板→槽钢横肋→底模纵梁　①前底模横梁→前吊杆→顶横梁②后底模横梁→后吊杆→已浇底板混凝土。

（2）箱梁腹板混凝土侧压力的传递路线是：混凝土侧压力→内外模板面板→槽钢纵肋→桁架→对拉螺杆。

（3）箱梁翼板混凝土压力的传递路线是： 混凝土压力→外模面板→槽钢纵肋→外模滑梁　①前吊杆→顶横梁②后吊杆→已浇翼板混凝土。

（4）箱梁顶板混凝土压力的传递路线是：混凝土压力→内模板面板→槽钢纵肋→内模吊架→内模滑梁　①前吊杆→顶横梁。②后吊杆→已浇顶板混凝土。

（5）利用 sap2000 软件整体建立计算模型

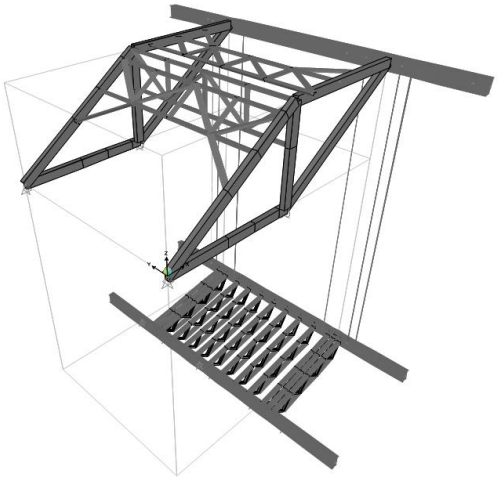


图 2 计算模型图

5.4.2　棱形挂篮计算分析

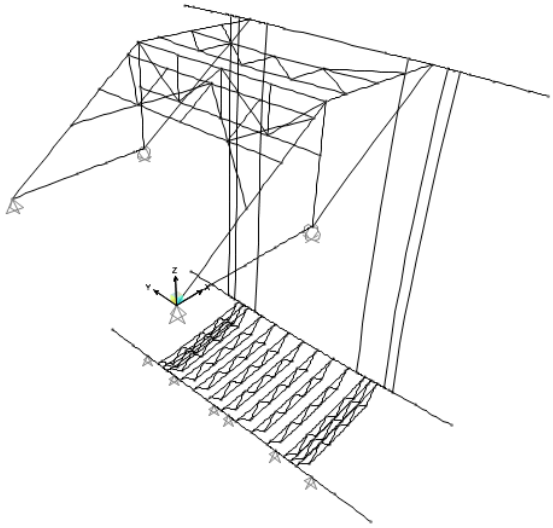


图 3 变形图

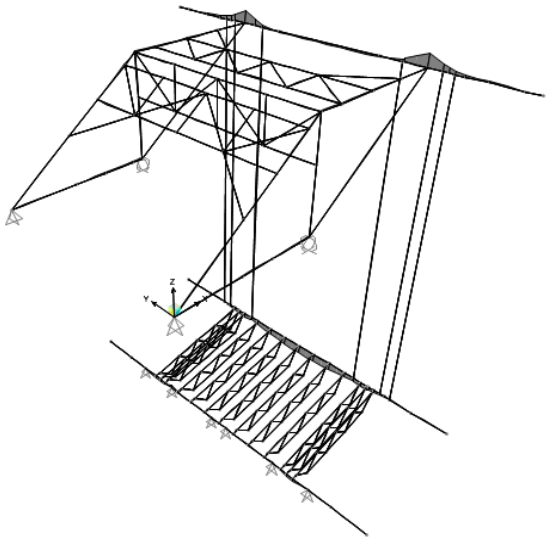


图 4　弯矩图

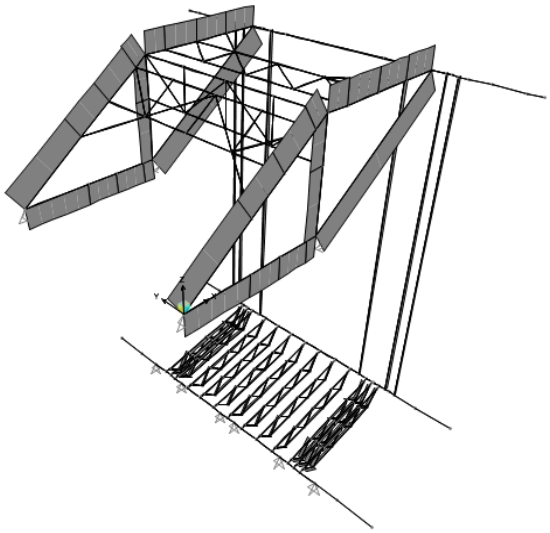


图 5 轴力图

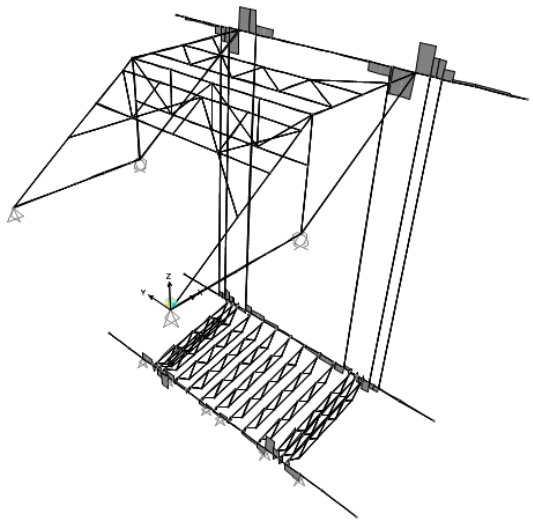


图 6　剪力图

5.4.3　棱形挂篮不同荷载工况下的计算

（1）浇筑长度 3m，混凝土最大重量 187.7t；计算结果：后锚点最大拉力，82.7t，中立柱最大支反力 169.7t，主桁架最大应力比 0.81，杆件最大内力 143.5t，最大相对位移 18.8mm；

（2）浇筑长度 3.5m，混凝土最大重量 163.8t；计算结果：后锚点最大拉力，78.35t，中立柱最大支反力 160.9t，主桁架最大应力比 0.75，杆件最大内力 135.9t，最大相对位移 17.7mm；

（3）浇筑长度 4m，混凝土最大重量 153.4t；计算结果：后锚点最大拉力，81t，中立柱最大支反力 166.2，主桁架最大应力比 0.79，杆件最大内力 140.5t，最大相对位移 18.3mm；

5.4.4　棱形挂篮具体细部验算

（1）前后横梁及底纵梁验算：（荷载布置如下图所示）

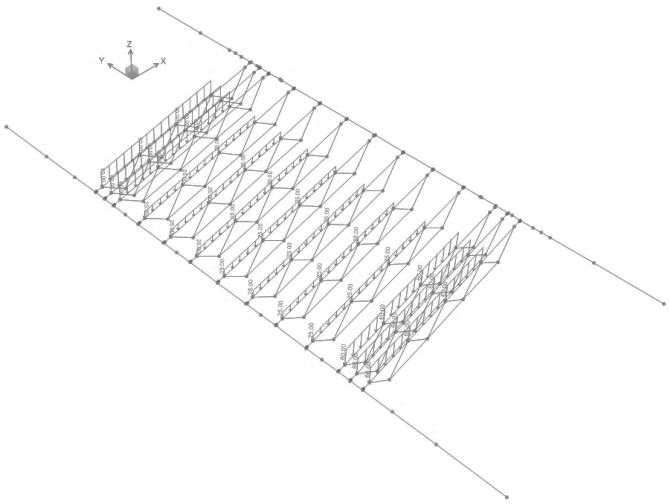


图 7 荷载布置图，

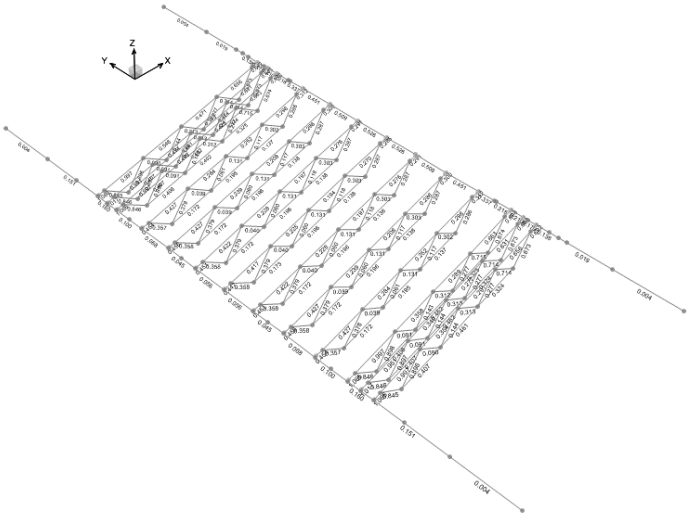


图 8 应力比云图

从以上计算结果可以看出，底纵梁材料最大应力比，1.06>1，不满足要求，通过局部增加加强板来改善受力情况，即在槽钢腹板位置增加一块钢板；底纵梁最大变形 1.3mm，最大剪力 177094N，最大弯矩 33769625N.mm。前后横梁最大应力比 0.526，最大变形 8mm，最大弯矩 419332507。由于底纵梁应力比大于 1，截面局部加强验算：

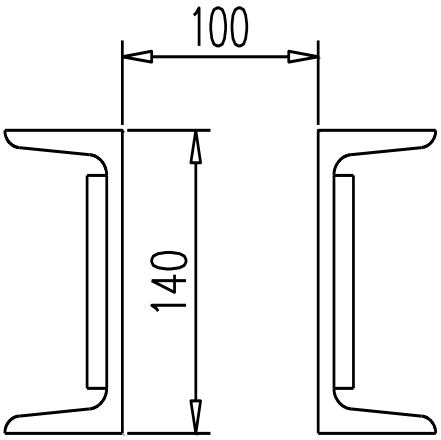


图 9 槽钢加强视图

其中

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{36174754}{214844} = 168.\frac{4N}{mm^2}$$

（2）单侧后锚固点计算

$$R_{II} = 82.7t$$

后锚及抗倾覆稳定系数取 2，则单侧所需的Φ32 精轧螺纹钢根数：

$$F = \frac{4 \cdot 60 \cdot 5}{82.7 \cdot 5} = 2.9$$

取 N=4 根，则倾覆安全系数满足施工要求，为安全起见，考虑受力不均等情况，共布置 6 根，则满足施工要求。

（3）吊杆计算

通过软件计算，前吊杆承受最大拉力 23.8t，后吊杆承受最大拉力 41.3t，吊杆均采用Φ32 精轧螺纹钢，其容许承载力为 60t，满足施工要求。

（4）导梁计算

导梁在浇筑混凝土的时候荷载最不利，计算简图见下图：



图 10 导梁荷载分布图

导梁所受荷载主要包括侧模自重和翼缘板混凝土重量，考虑 1.4 的放大系数，导梁材料为 2*36b 槽钢，利用软件计算得:最大应力比 0.6，最大变形 7.1mm。

6　棱形挂篮系统行走验算

6.1 行走荷载组合

采用荷载组合Ⅱ：挂篮自重+冲击附加荷载；组合形式为 1.3（挂篮自重+施工机具及人员），其中 1.3 表示挂篮空载行走时的冲击系数。按最不利荷载考虑，即：

1.3x（76.2+10）=112t；

6.2 利用 sap2000 软件整体建立计算模型

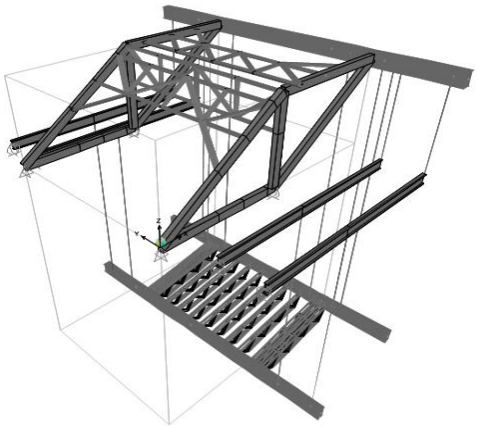


图 11 计算模型

6.3 计算分析

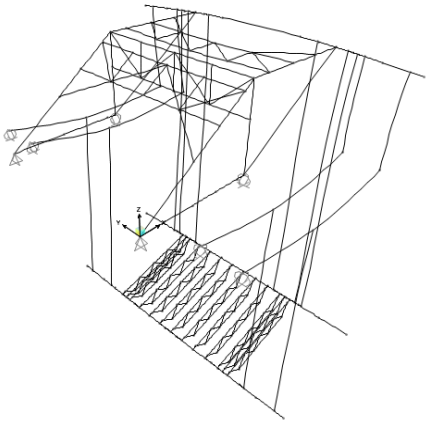


图 12 变形图

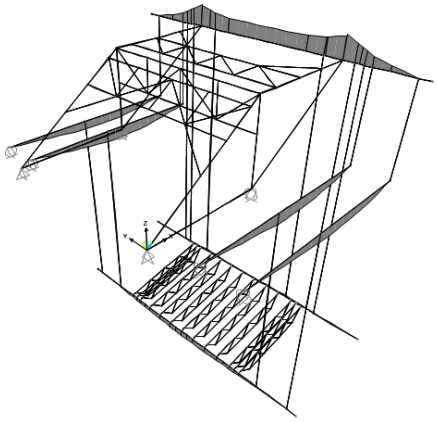


图 13 弯矩图

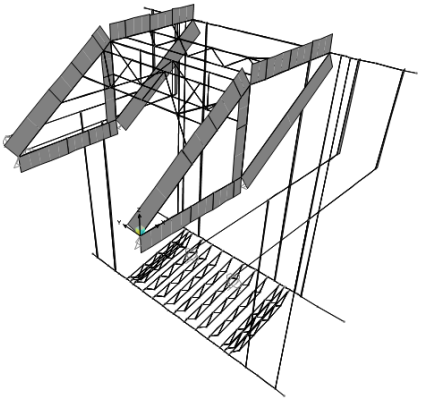


图 14 轴力图

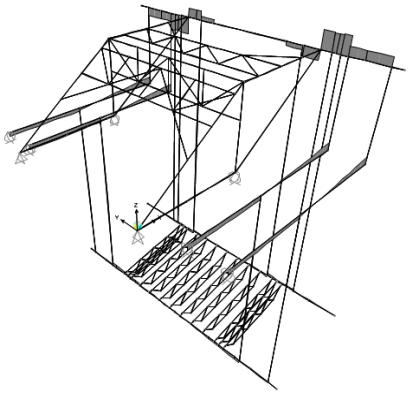


图 15 剪力图

6.4 计算结果

后锚点最大拉力为 20.3t，中立柱最大支反力 44.9t，主桁架最大应力比 0.322，最大相对位移 5.5mm；

6.5 具体细部验算

(1) 挂篮前移时，其倾覆力矩由反扣在刚轨道上的行走小车来平衡，每个钢轨上有四个行走小轮，每个小轮承担的力为：

(2)、轨道由 20mm 厚钢板焊接而成，经计算面积 A=20*350*2=14000mm2，最大剪力 44.9t，则：

$$\tau = \frac{V}{A} = \frac{44.9 \times 10^4}{14000} = 32.\frac{1N}{mm^2}$$

7 棱形挂篮预压验算

7.1 预压荷载组合

采用荷载组合：挂篮自重+预压荷载重+冲击附加荷载为 1.2（挂篮自重+箱梁自重），其中 1.2 表示挂篮空载行走时的冲击系数。按最不利荷载考虑，即：

1.2x（76.2+187.7）=316.68t

7.2 计算结果

后锚点最大拉力为 79.4t，中立柱最大支反力 163.1t，主桁架最大应力比 0.78，桁架最大变形 18mm；

8 棱形挂篮试验目的

挂篮拼装完成后，必须按图纸认真检查，特别是各个结点、螺栓、锚杆的连接情况，保证稳妥可靠。拼装完成后，应按挂篮的设计荷载进行试压，并观测各控制点挠度。在挂篮整个使用过程中，每移动一次，都要进行全面检查，确保万无一失。挂篮所使用的预留孔，必须按图准确埋设，并保持孔道垂直，避免锚杆出现斜置现象。挂篮行走时，轨道一定要牢牢固定在箱梁顶面。固定的方法是利用箱梁腹板的预埋竖向精轧螺纹钢筋固定，双 36b＃槽钢组合成短横梁，将轨道压稳。行走时，一个挂篮需设两道压梁。行走以手动葫芦驱动，在行走滑块与轨道表面之间涂抹黄油，减少摩擦。

某大桥主棱形挂篮吊杆主要采用Φ32 精轧螺纹钢，施工时通过对所有的精轧螺纹钢筋要特别加以保护，不得碰撞、搭铁；凡用连接套的地方，必须用红油漆作好标记，以保证锚固长度相等。使用千斤顶的地方都设计了双螺帽，上螺帽作顶升用，下螺帽作承重用。顶升后一定要将下螺帽拧紧。

挂篮加载试验拟采取“砂袋加载法”，砂袋放置在底模板上，以砂袋自重作为试验荷载，采取逐级递增加载逐级测量的试验方法。加载总重量为最不利块段荷载的 1.2 倍。砂袋加载布置示意见图所示。挂篮加载试验主要是通过测量挂篮在各级静力试验荷载作用下的变形，了解挂篮在工作状态时与设计期望值是否相符。

除去挂篮主桁、吊杆的非弹性变形。测出或推算出挂篮前端在各个块段荷载作用下的竖向位移，为施工控制提供参考。

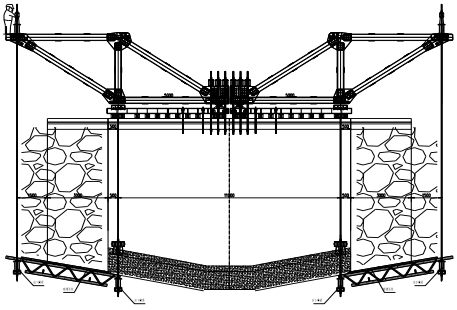


图 16　砂袋布置示意图

为了能绘制出挂篮总挠度曲线，了解箱梁各个段施工时挂篮前端最大挠度，按等代荷载的方法对试验荷载进行分级加载。

8.1 变形观测项目

后锚上挠值;前支点沉降值;主桁前端结处变形;主桁上前横梁吊带处和主桁上前横梁跨中变形;底篮前横梁吊带处变形以及跨中变形。

8.2 观测方法

(1)变形观测采用国家二等水准测量或工程测量变形三等水准测量的精度等级要求和观测方法进行施测，精度可达到±1mm。

(2)由于挂篮变形受日照温差的影响，根据公式 L1=L0（1+α△t0）计算，挂篮构件中吊带变形受温差影响最大。在温差达 10℃时，变形之差为 1.1mm。为了准确测得挂篮变形值，加载试验时间应选择在温差较小的时间段进行。

8.3 试验加载程序

在箱梁 0 号块段上安装挂篮，在底篮上放置砂袋，做好试验前其他各项准备工作。在进行正式加载试验前，用第一级荷载进行预加载，预加载试验持荷时间为 30min。预加载的目的在于，一方面是使结构进入正常工作状态，另一方面是检查测试系统和试验组织是否工作正常。在确认测试系统和试验组织工作正常后，预加载试验反复进行两次，预加载 1 小时后进行正式加载。按照第 1 级

荷载加载砂袋。在第 1 级荷载的基础上，按照第 2 级与第 1 级荷载差值进行加载。按照上述方法，依次进行第 3 级至第 7 级荷载的加载试验。每次加载完毕后，均进行变形观测并记录。试验荷载采用分级单循环加载的方法施加，按等代荷载的分级逐级递增加载，试验荷载持续时间一般为 30 分钟，且取决于结构变形达到相对稳定所需要的荷载。

8.4 加载试验风险控制

如果加载值没有达到设计加载荷载，且变形大于设计允许值，应停止加载试验，分析原因后采取相应的措施。为便于逐级加载和卸载，应在水箱内画出每级荷载刻度线。加载试验应选择在风力小于 6 级的天气进行。

8.5 试验成果整理

按照试验方案加载后，可等代测量出相对应块段的主桁、吊带、后锚、前支点等变形值以及挂篮总变形值。其余块段可采用“内插法”求出。根据在各个块段荷载作用下的挂篮竖向位移，绘制荷载与变形的相关曲线图。

9 结语

通过对挂篮结构位移的计算和验算比较分析，得出结论是经过对预压、施工和挂篮行走三种荷载组合的验算，表明强度和稳定性均满足规范要求。

箱梁浇筑过程荷载组合Ⅰ时，挂篮结构产生的最大位移，出现在菱形挂篮顶部，其值-18.8mm；预压时，挂篮结构最大位移是-18mm，挂篮行走时，最大位移是-5.5mm。均满足规范要求的不超过 20mm 的要求。比较三种荷载组合下支反力结果，混凝土浇筑时的支反力最大，挂篮单个前支点反力为：169.7t，两个前支点反力合计：339.4t。挂篮单个后锚点拉力为：82.7t。考虑到结构的安全性，每个锚点设置 4 根Φ32 精轧螺纹钢筋。单根Φ32 精轧螺纹钢筋可承受的最大拉力允许值为：60t，4 根Φ32 精轧螺纹钢筋可承受的最大拉力为：240t。

挂蓝施工在桥梁施工中应用最为广泛，为了确保挂篮在使用过程中的安全，应严格遵守施工规范，控制浇注速度，尽量减少施工荷载带来的倾覆力矩，并且在极端恶劣天气条件下禁止使用挂篮施工。

参考资料

[1]《公路桥涵施工技术规范》 JTG/T F50-2011
[2]《钢结构设计规范》 GB 50017-2003
[3]《路桥施工计算手册》 人民交通出版社
[4]《组合钢模板技术规范》 GB/T 50214-2013
[5]《机械设计手册》 机械工业出版社
[6]《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》 JTJ 025-1986

浅析高海拔高寒地区混凝土冬季施工技术

顿　江

（中国葛洲坝集团第二工程有限公司，四川 成都　610091）

摘　要：两河口水电站位于四川省甘孜州雅江县境内的雅砻江干流上，该项目属于雅砻江流域，河段地处青藏高原东缘梯级地貌的过渡地带，气候属青藏高原亚润气候区，主要受高空西风环流和西南季风影响，干、湿季分明。本文以两河口水电站恶劣气候及特殊地理环境，简述高寒高海拔地区混凝土冬季施工措施及质量控制。

关键词：高海拔高寒；混凝土；冬季施工技术

1 引　言

目前，国内多数施工单位对混凝土的冬季施工防护措施比较重视，混凝土浇筑存在一些不足，主要体现在准备工作不充分、保温措施没有严格落实、养护工作不到位等方面。应该采取应对措施，做好准备工作，在混凝土拌和、浇筑时采取有效的保温措施，尽量降低低温给施工带来的影响,确保工程质量。本文根据参考文献结合现场实际工作经验，提出了建设性的思路，仅供参考。

2 工程自然条件

2.1 水文气象

该项目属于雅砻江流域，河段地处青藏高原东缘梯级地貌的过渡地带，气候属青藏高原亚润气候区，主要受高空西风环流和西南季风影响，干、湿季分明。冬季为干季，期间日照多，湿度小根据雅江、道孚、新龙三县的资料，年平均气温 9℃，1 月平均气温 1℃，7 月平均气温 16.5℃，极端最低气温为－15.9℃，昼夜温差大，垂直气候变化显著。

2.2 水文地质条件

地下水类型主要为第四系松散层孔隙水和下伏基岩裂隙水，地基土为强透水层，受大气降水和沟水补给，向雅砻江排泄，钻孔揭示地下水埋深 10～15m。

3 道路管理

对于由本标段负责维护的施工路段，每天派专人进行清扫，确保路面无结冰现象。在设计、修建施工便道时，充分考虑冬季施工的要求，并合理布置截、排水沟。一旦进入冬季，每天安排专人对施工便道进行清洁值班。在下雪时，及时对积雪进行清扫，及时清理融雪在路面产生的积水，避免气温骤降时积水结冰。

4 风水电管理

做好施工供风、供水、供电设施的布置及管线的布设工作。供水管道及排水管道不使用或停用超过 1 小时，均要排空管内积水，以防结冰堵塞管道。进入冬季施工，全面对供风、供水、供电设施及管线进行检查；供水管道不得有漏水现象，以免冬季施工过程中供水管道漏水导致路面、仓面结冰；照明灯、供热设施不得紧贴保温板，避免对保温板造成损害；供风管路和储气罐进场检查，及时排除管路和罐内积水。

5 施工准备工作

为保证冬季施工措施顺利、高效实施，本标段将做好如下施工准备工作：

设置气象联络员专门采集气象信息，在进入冬季前，预先收集本地气象台(站)历年气象资料，建立观测制度，设置工地气象观测点，及时掌握气象变化趋势及动态，以利于安排施工，做好预防工作。提前对项目现场管理人员进行冬季施工培训，学习冬季施工相关专业知识，明确各自职责，保证责任到人；对各作业班组进行技术、质量、安全等方面的交底和分工种进行专门培训，确保冬

季施工措施落实到位。施工管理部提前做好冬季施工所需的器具、保温材料如保温被、测量大气及非接触式红外线快速测温器(枪式)、围挡用的彩条布或篷布等材料计划，机物部根据材料计划及时采购物资，确保冬季施工顺利进行；对机械设备、管线等进行全面检修，更换老化元件，备用一定量的易损零配件；结合机械设备的换季保养，及时更换润滑油，提前储备符合本地防冻要求的防冻液，并提前搭建好暖棚车间。

冬季期间，所有设备均采用抗冻柴油，并按要求定期进行维护和保养，不得超负荷工作，对不满足现场要求的施工机械不得使用。提前对易受冻输水管路采用保温材料包裹，对水池采取覆盖保温被的措施进行保暖。提前选择并储存好满足冬季施工要求的原材料。

提前检查住房及仓库是否满足过冬要求，及时按照冬季施工要求设置保温棚，准备好加温器具，同时，作好防火措施，棚内安设通风口，保证通风良好，并准备好各种抢救设备。提前做好施工现场防寒保暖工作，对道路和作业区采取防滑措施，储备足够的融雪剂(出于环保考虑，非紧急情况尽量不用)，道路湿滑时车辆安装防滑链，以保证施工道路上的机械设备正常通行。

6 混凝土施工

6.1 冬季施工对原材料的要求

6.1.1 原材料的温度控制

（1）水温的控制

冬季施工用水应以热水为主，对水采用电热水器直接加热，控制水温在 60°C 左右。水加热时要严格控制其温度，并设专人进行温度测量。

（2）骨料的温度控制

冬季施工时，必须搭设暖棚对骨料进行保温，保证砂石骨料温度在 5°C 以上，以满足混凝土的冬季施工要求。

（3）水泥的温度控制

水泥不允许直接加热，因此在搅拌前，先将水泥放入暖棚内，保证水泥搅拌前温度不低于 5°C。

6.1.2 水泥和外加剂

水泥优先选用硅酸盐水泥、普通硅酸水泥，混凝土的水泥最小用量不少于 300kg/m³，水灰比不大于 0.6。掺用防冻剂的混凝土，严禁使用高铝水泥。在冬季浇筑的混凝土工程，根据施工方法，合理选用各种外加剂。

6.2 混凝土的搅拌

根据招标文件要求，本工程主体项目施工用混凝土由低线拌和系统提供，搅拌时水温控制在 60°C 左右,混凝土出机口温度不低于 10°C，生产出来的混凝土具备冬季施工的条件。

其它临建工程用混凝土由左下沟自建拌和站拌制，安排在 10：00 以后气温高于 5°C 后施工，采用 60°C 热水拌制，满足出机口温度不低于 10°C 要求。

6.3 混凝土运输

混凝土采用搅拌车运输，运输路线多为隧道，运输时多装快运，少倒运，少在明线段停留。减少混凝土在运输过程中的热量损失。混凝土罐车采用外包混凝土罐车保温被的方式保证冬季混凝土运输质量。混凝土罐车保温措施见图 1。

运输设备要有可靠的防风措施，并尽可能加以保温。各种运输设备在工作结束时，必须立即用蒸汽或热水冲洗干净；恢复工作时要首先加热。冬季施工使用的各种机械应全面检查，更换冬季用润滑系统用油及燃料，对有问题的机械设备及时修理，不得带故障运转。

机械在使用前应首先检查传动系统，无冻结情况后方可启动。每日工作前对所用机械进行预热，并做详细检查，确认无问题后正式作业。运输车辆每日施工完毕后排空水箱余水，防止冻结。



图 1 混凝土罐车冬季保温措施

6.4 钢模板保温

钢模肋间填塞导热系数≤0.03W/m·℃、5cm 厚的聚苯乙烯泡沫板，为防止聚苯乙烯泡沫板脱落，采用胶水将聚苯乙烯泡沫板牢牢粘贴在模板上。

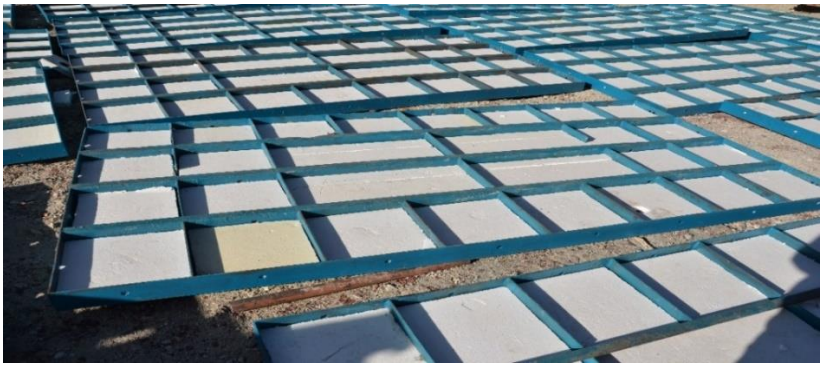


图 2 聚苯乙烯泡沫板

6.5 混凝土的施工

混凝土浇筑前，必须切实做好备仓工作，各相应技术人员和设备必须提前配备到位，泵送系统须提前做好检修，并备好相应配件，提前将备用发电机调试好并配置到位。混凝土浇筑时要保证混凝土的均匀性和密实性，要保证结构的整体性，尺寸准确，钢筋、预埋件位置准确，以保证拆模后混凝土表面平整、光洁。

施工缝的位置宜留在结构剪力较小，且便于施工的部位，在施工缝处浇筑混凝土时，应先清除掉水泥薄膜和松动石子，并冲洗干净，使接缝处原混凝土的温度高于 5℃，然后涂抹水泥浆或与混凝土砂浆成分相同的砂浆一层。

混凝土浇筑时，易与容器冻结，故在浇筑前应采取防风、冻结保护措施，一旦发现混凝土冻结必须做出退场处理。混凝土拌和物入模浇筑，必须经过振捣，使其内部密实，并充分填满模板各个角落，达到设计的要求。浇筑模板使用保温模板，振捣混凝土采用机械振捣，振捣要快速。在进行混凝土浇筑时必须四周对称浇筑，防止由一端向另一端推移浇筑时造成模板受力不均匀产生倾斜给施工带来难度，浇筑必须连续、高效地进行，争取在较短的时间内完成。

尽量减少因施工操作引起的混凝土温度损失，如减少混凝土暴露时间，及时对混凝土进行保温。冬季前浇筑但强度没有达到设计要求的混凝土，用保温被覆盖进行保温。

施工期间，认真测量室外温度、浇筑混凝土原材料的温度、浇筑混凝土出机口温度、入模温度和养护温度等，并要 24h 实施气温监测，并做好记录，及时反映到技术部门，技术部门再根据实际测温记录对施工措施进行及时的调整。冬季施工时，可按以下要求进行温度检查：外界气温每 4h

至少测量一次；水温及骨料温度每 2h 至少测量一次；混凝土的机口温度和浇筑温度，每 2h 至少测量一次；已浇混凝土内部温度，浇后 3d 以内需特别加强观测，以后可视气温及构件情况定期观测。测温时重点关注边角最易降温的部位；进行温度检查时，测温点布置应全面，准确反应混凝土的温度情况，应在混凝土结构迎风面、背风面、两侧及顶部均设有测温孔。测温时，仪器应与外界隔离并留在测温孔内不小于 3min，测温孔应编号，同时做好记录。

6.6 混凝土的养护

确保混凝土环境温度不低于 5℃。混凝土外用保温被进行覆盖，在负温情况下不得洒水养护。

6.7 混凝土的拆模与表面保温

混凝土模板拆除的时间，应按结构特点、自然气温和混凝土所达到的强度来确定，混凝土强度必须满足抗冻要求，同时要求达到设计强度 40%以上。一般以缓拆为宜。冬季拆除模板时，应满足温控防裂要求，并遵守内外温差不大于 20℃或 2d～3d 内混凝土表面温降不超过 6℃。

在拆除模板过程中，如发现混凝土有冻害现象，应暂停拆除，经处理后方可继续拆除。拆除模板后采用塑料布进行覆盖进行养护，塑料布外用保温被进行覆盖。保温模板如不影响下一道工序施工，可不拆除，直至寒冷气温结束。

7 结语

由于两河口工程处于高寒高海拔崎岖,使得冬季气温异常寒冷,在这样的季节下施工,非常容易出现质量事故,是混凝土施工质量问题的多发季节。本文重点分析了混凝土冬季施工中的施工措施，结合实际工作经验，对混凝土冬季施工条件下引发的凝结时间限制、浇筑温度、保温措施、拆模时间等问题进行了分析,并对具体的解决措施作了研究,提出了相应的养护方法,以确保工程的质量。

随着季节的变化,冬季施工往往受到温度的影响而阻碍了施工的进展,而混凝土在施工中是运用最多的材料,其浇筑质量的高低直接影响了工程的使用性能。因此,在本工程施工中,尤其是冬季阶段更需要保证浇筑质量。

参考文献：

[1] 施惠生,孙振平,邓恺编著..混凝土外加剂实用技术大全[M],2008:618.

[2] 金连才.西藏高寒地区冬季混凝土施工新技术与方案选择[D].四川大学,2003:

[3] 周　翀.谈混凝土工程在冬季施工过程中需要注意的问题[J].建材与装饰：上旬,2013(1):106-107.

[4] 卢传亮.水工混凝土冬季施工方法探讨[J]. 山西水利.2005(02)

[5] 郝臣君.寒冷地区冬季混凝土施工质量控制研究[D].西安科技大学,2012:1-77.

[6] 达娃.高寒地区混凝土施工技术及要点分析[J].产业与科技论坛, 2013,(13):131-132.doi:10.3969/j.issn.1673-5641.2013.13.070.

浅析西藏高寒地区水工混凝土裂缝成因及控制技术

万明栋，黄艳梅

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：西藏高寒高海拔地区昼夜温差大，气候寒冷干燥、多风，混凝土浇筑后容易产生裂缝，影响结构的整体性及防水性，危及建筑物运行安全。本文结合工程实例阐述了混凝土裂缝产生的原因和危害，总结出了裂缝的控制措施和处理方案，确保了工程质量和运行安全，供类似工程借鉴和参考。

关键词：温差大；高寒；裂缝；控制；处理

1 引言

由于西藏高原奇特多样的地形地貌和高空空气环境以及天气系统的影响,形成了复杂多样的独特气候。除呈现西北严寒干燥、东南温暖湿润的总趋向外,还有多种多样的区域气候以及明显的垂直气候带。西藏地区主要气候特点是：干湿分明，四季难分、冬长夏短；夏季辐射强烈，日照多，夜间多冰雹，冬季寒冷、风大、时间长，年温差变化小、日温差变化大；降水量藏南和藏东南多，其余大部分地区少，且日降水量小，多夜雨。水工混凝土的裂缝问题是颇受关注的质量通病，面对气候条件特殊的西藏地区更是如此。分析裂缝的种类和原因，研究裂缝的控制措施对于提高工程质量减少工程事故具有重要的意义。

2 工程概况

果多水电站位于西藏自治区昌都县境内，为扎曲水电规划“两库五级”中第二个梯级电站，水库正常蓄水位为 3418m，死水位 3413m。正常蓄水位以下库容 7959 万 m^3，调节库容 1746 万 m^3，电站装机容量 160MW（4×40MW），工程等别为三等工程，工程规模为中型。工程枢纽布置格局为：碾压砼重力坝+坝身泄洪冲沙系统+左岸坝身引水系统+坝后地面厂房。

工程施工区平均海拔在 3400m 左右，极端最低气温-20.7℃（1982 年 12 月 26 日），极端最高气温 33.4℃（1972 年 7 月 8 日），多年平均气温 5.6℃，昼夜温差较大，最大月平均日温差高达 18.8℃，年平均日温差为 16℃。空气较为干燥，相对湿度在 39%～59%，最大风速 15m/s，风向 NW 或 W。该区域冻土主要为季节性冻土，冻土时间一般为 12 月中旬至次年 1 月中旬，最大冻土深度 90cm，最大积雪厚度 15cm。

扎曲河段地处澜沧江上游，属高原寒温带半湿润气候，平均气温较同纬度其它地区低，日照时间长，降水量很少，多年平均降水量 499.5mm。降雨多集中在 5 月～9 月，占全年降雨量的 83%，且多为阵雨、暴雨。冬季寒冷，降雨稀少，水边有结冰现象，河面有时封冻，春季 3 月气候转暖。

3 混凝土裂缝产生的主要原因

（1）材料原因。原材料对于工程质量的影响是显而易见的，原材料的质量和混凝土裂缝的形成有着直观的联系。如水泥品种选择不当、水泥受潮变质，粗细骨料级配不合理、含泥量超标，以及材料的存放管理不重视等等，都会导致混凝土开裂。

（2）配合比原因。西藏水工混凝土工程本身的工作环境相对特殊，混凝土容易受到地质地形以及气象水文条件的影响，耐久性无法保障，配制经济、合理的配合比尤为关键。

（3）混凝土浇筑原因。混凝土下料高度过高，分层厚度偏大，骨料分离无法到达预期效果，混凝土密实度不足，出现漏振或过振等等都易因为混凝土裂缝。

（4）养护原因。养护不当会直接影响混凝土的质量，提前脱模或者养护时间不足等等，使得混凝土在温度或者收缩应力的影响下出现开裂问题。

（5）西藏地区昼夜温差大、风大，相比白天强日照、高温情况，夜间环境温度骤降，而混凝土正处于水化温升阶段，内部温度较高，内外温差较大，这是西藏地区混凝土更易产生或加剧裂缝发展的主要原因。

4 混凝土裂缝的危害

（1）水工混凝土一般要与水流经常接触，在水压力的作用下裂缝会逐渐加深和扩大，长时间的冲蚀将使水工建筑物产生渗漏。水流经混凝土渗出后，不断破坏与混凝土接触的基础层，引起水解破坏，严重时导致混凝土结构物破坏。西藏条件严寒，河面结冰，有此引起的冻胀现象，更加大了混凝土被被破坏的程度。

（2）当水流与混凝土内部接触后会发生化学反应，空气中的二氧化碳极易渗透到混凝土内部与水泥的某些水化产物相互作用形成碳酸钙，加快混凝土碳化速度，降低甚至完全破坏混凝土强度。混凝土的裂缝还会削弱混凝土对钢筋的保护作用，剥落的混凝土会使钢筋长期暴漏在潮湿的环境下，破坏掉钢筋的外层保护膜，使钢筋产生锈蚀。

（3）混凝土裂缝对混凝土结构物的结构强度和稳定性具有直接的影响，会降低混凝土结构物的结构强度和整体稳定性，轻则影响建筑物的外观和正常使用，重则导致混凝土结构物的完全破坏。

5 混凝土裂缝控制措施

5.1 原材料

（1）水泥：选用发热量低的中热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥，不得将不同品种或标号的水泥混合使用。

（2）粗细骨料：采用非碱活性骨料，严控粗细骨料的粒径和细度模数、含泥量，连续级配并级配良好。

（3）粉煤灰：为了改善混凝土的和易性和降低水泥用量，掺加适量的粉煤灰。

（4）外加剂：采用具有见谁、缓凝、早强特性的高效减水剂，减水剂可以降低水化热峰值，对混凝土的收缩有补偿功能，可提高混凝土的抗裂性。

（5）水：根据浇筑气温选择用水温度，严禁使用碱性水，水质满足混凝土施工要求。

5.2 混凝土拌合控制

（1）混凝土配合：比尽量采用常态混凝土浇筑，改善级配设计，采用低流态混凝土，从而减少水泥用量，降低混凝土水化热。

（2）粗骨料高温季节采取遮阳、低温季节采取保温措施，骨料料堆高度大于 6m，地笼取料，使粗骨料温度高温季节不高于月平均气温，低温季节骨料不冻结、料堆中下部骨料温度不低于 3℃。细骨料常年采取遮雨措施，防止雨水进入成品砂堆，低温季节采取保温措施。

（3）高温季节对混凝土骨料采用风冷措施进行预冷，并采取加片冰、加制冷水拌合等措施降低混凝土出机口温度；低温季节，浇筑混凝土采取加热水拌合等措施提高混凝土出机口温度，热水温度不高于 60℃。

5.3 混凝土施工及养护

5.3.1 一般要求

（1）混凝土浇筑前关注天气预报，混凝土浇筑尽可能避开高温、曝晒、多风、骤然降温的天气，并采取遮挡、保温措施。

（2）控制浇筑层最大高度和浇筑间歇时间，做好混凝土温控措施。

（3）混凝土浇筑分层按设计要求进行，大坝基础约束区和老混凝土约束部位浇筑层高一般为不大于 1.5m，脱离基础约束区浇筑厚度一般不大于 3m，局部位置（如廊道处）根据结构适当调整。

若需变动，应经监理人书面批准。当上、下浇筑层间歇时间超过 28 天时，下层混凝土按照老混凝土处理。

5.3.2 高温季节

（1）混凝土运输、入仓设备外侧均包裹保温材料，以减少混凝土运输过程中温度回升。

（2）在施工现场布置冷水站，施工的大体积混凝土均预埋冷却水管并通冷水，以降低混凝土内部温度。冷却通水用干管和支管均包裹保温材料，以满足仓内冷却水管进口水温要求。

（3）采用喷雾机喷雾在仓面上空形成一层雾状隔热层，减少直射混凝土面阳光，降低仓面环境温度。

（4）混凝土振捣完成后，表面用保温被进行全面覆盖，以防环境温度倒灌；混凝土施工完成后，仓面采用花管流水养护，养护均匀不间断。

5.3.3 低温季节

（1）冬前（10 月底）对所有混凝土运输设备及混凝土外露面均固定保温材料，防止内外温差过大。大坝混凝土越冬时：首先在坝顶顶铺设一层塑料薄膜（厚 0.6mm），然后在其上部铺设三层 2cm 厚的聚乙烯保温被，最后在顶部铺设一层三防帆布；大坝侧面铺设一层塑料薄膜（厚 0.6mm），然后在其侧面部铺设 4cm 厚 XPS 板，最后在铺设一层三防帆布。

（2）模板外保温，在浇筑过程中及时覆盖保温被，并配备电热毯、暖风机等设备提高浇筑仓面温度。

（3）每层混凝土浇筑结束后，在其上表面采用一层土工膜和 5cm 厚聚苯乙烯保温卷材压紧覆盖，侧面粘贴保温材料进行封闭保温：永久外露面粘贴 5cm 厚保温板，临时外露面粘贴 5cm 厚保温卷材。

（4）对已浇好的底板、护坦、闸墩、孔洞部位等，在进入低温、气温骤降频繁的季节前，应将空腔封闭，并进行表面保护。

（5）在气温变幅较大的季节，长期暴露的基础混凝土及其他重要部位的混凝土必须加以遮盖保护。

（6）应根据混凝土强度、混凝土内外温差确定拆除模板的时间，应避免在夜间或气温骤降时拆除模板。

（7）为降低坝体内外温差，防止或减少表面裂缝，应在低温季节前将坝体温度降至设计要求的温度。

6 裂缝处理技术

根据混凝土裂缝的宽度、深度可以将裂缝分为表层裂缝（宽度＜0.2mm，深度＜300mm）、浅表层裂缝（0.2mm≤宽度＜0.3mm，300mm≤深度＜1000mm）、深层裂缝（宽度≥0.3mm，深度≥1000mm）。

同时国内外学者把裂缝分为死缝、活缝和增长缝等三种。对于死缝可以采用刚性材料填充修补；对活缝则采用弹性材料修补；对于增长缝，必须消除引发裂缝的因素后再进行修补。裂缝修补除了要恢复水工建筑物的防水性和耐久性之外，还要从结构安全及美观角度出发进行修补，西藏果多水电站的裂缝修补方法主要有表面封闭法、压力灌浆法及填堵法。

6.1 表面封闭法

针对宽度小于 0.3mm 的裂缝，可将聚合物水泥膏、弹性密封胶或渗透性防水剂涂刷于裂缝表面，以恢复其防水性和耐久性。该法施工简单，但仅适用于浅裂缝。

（1）工艺流程：表面刷毛并冲洗→嵌补表面缺损（可用环氧胶泥或乳胶水泥）→选材涂复。

（2）施工要点：① 由于涂层较薄，应选用粘结力强且不宜老化的材料；② 对活动裂缝，应采用延伸率较大的弹性材料；③ 涂复均匀，不得有气泡。

6.2 压力灌浆法

针对宽度大于 0.3mm 且深度较大的裂缝，可将化学灌浆材料（如聚氨酯、环氧树脂或水泥浆液）通过压力灌浆设备注入到裂缝深处，以恢复结构整体性、防水性及耐久性。

（1）工艺流程：凿槽→埋设浆嘴→封缝→密封检查→配制浆液→灌浆→封孔→灌浆质量检查。

（2）施工要点：① 灌浆材料宜选用粘结力强、可灌性好的树脂类材料，通常选用环氧树脂；② 对于宽度大于 2mm 的特大裂缝可采用水泥类材料，对于活动性裂缝宜采用经稀释的环氧树脂或聚氨酯；③ 化学灌浆压力控制在 0.2～0.4Mpa，水泥浆灌浆压力控制在 0.4～0.8Mpa，增大压力并不提高灌浆速度，也不利于灌浆效果；④ 灌浆后，待浆液初凝而不外渗时，方可拆下灌浆嘴(盒、管)。

6.3 填堵法

针对宽度大于 0.5mm 的宽大裂缝或钢筋锈蚀裂缝，可沿裂缝将混凝土凿成“U”型或“V”型槽，然后嵌填修补材料，以恢复防水性、耐久性或部分恢复结构整体性。

（1）工艺流程：凿槽→基层处理(混凝土去污、钢筋除锈)→涂刷结合剂(环氧树脂浆液)→嵌填修补材料→面层处理。

（2）施工要点：① 嵌填材料可视具体情况选用环氧树脂、环氧砂浆、聚合物水泥砂浆、聚氯乙烯胶泥或沥青油膏；② 对于锈蚀裂缝，先对钢筋彻底除锈，再涂防锈涂料。

7 结语

裂缝的防止和处理，一直是水工混凝土质量控制的重点，特别是西藏高海拔高寒地区，其特殊的气候环境导致大体积混凝土极易产生温度裂缝。因此，必须从混凝土原材料、拌合、运输、浇筑、养护等环节进行控制，减少和控制混凝土裂缝的产生和扩展，提高混凝土结构的质量，进而确保水工建筑物的安全运行。

长河坝水电站坝料混装炸药开采技术研究

陈　曦，王　宁

（中国水利水电第五工程局有限公司，四川 成都 610066）

摘　要：目前，混装炸药逐渐应用于水利工程大规模爆破中，相比于传统的成品炸药，混装炸药具有高安全性、可靠性、环保性，并且容易满足施工进度要求。本文针对长河坝水电站大坝中后期堆石填筑料需求量大，采用成品炸药无法满足施工进度要求，开展混装炸药开采技术的研究。通过 2 批次的现场爆破试验，确定了合理的爆破参数，并采用混装炸药车进行机械装药。研究成果表明，所确定的爆破参数和机械装药方式满足堆石料的级配要求，相应的爆破振动速度等有害爆破效应满足规程要求。通过与成品炸药的对比表明，混装炸药爆破作业方式具有显著的经济效益和社会效益。

关键词：混装炸药；成品炸药；爆破试验；颗粒级配

1　概述

长河坝水电站位于四川省甘孜藏族自治州康定市境内，是大渡河干流水电规划“三库 22 级”的第 10 个梯级电站。大坝为砾石土心墙堆石坝，最大坝高 240m，为目前强震区、深厚覆盖层上世界第一高坝[1]。大坝填筑量约 3300 万 m^3，坝体填筑量大，石料开采量大。填筑石料主供料场为响水沟石料场和江咀石料场，其中，江咀料场位于大坝下游磨子沟内，总体沿磨子沟左侧坡面布置，单面临空，在特殊的少数民族地区，开采区对面山坡有居民，受料场开采影响较大。为满足坝体填筑料供应需求及减少爆破开采对周围居民的影响，需采取合适的爆破开采技术。

经分析及前期应用，传统的成品炸药在长河坝水电站应用中主要存在如下问题：

（1）安全风险大。成品炸药感度高[2]，在储存、运输和使用过程中，稍有不慎就容易导致爆炸事故，造成人员伤亡或财产损失。若流失到犯罪分子手中，将会给人民的生命财产造成极大的威胁，在甘孜藏区还会造成极坏的政治影响[3]。

（2）延误爆破施工进度。大坝填筑进入高峰期后，日均炸药用量很大，由于交通不便经常堵车和工地炸药库核定储存空间有限，会导致因炸药到不了位而延误爆破施工进度。

（3）影响爆破质量。当爆破料场内部的岩石时，由于岩石越来越致密坚硬，岩石的波阻抗会增大，为了保证爆破效果，所用炸药的波阻抗要相应加大，即炸药的爆速和装药密度要增大，但成品炸药受生产线流水作业的限制，其爆速和装药密度基本无法改变，相对于致密坚硬岩石波阻抗偏小，导致爆破后石料中细颗粒含量少[4]。另外，成品炸药在装药过程中经常会卡药，造成炸药装不到位，实际装药量小于设计装药量，导致爆破后产生较多的大块和根底。成品炸药一般为不耦合装药，炸药的爆炸能量散失的较多，深孔爆破容易产生根底。成品炸药生产出来之后，经过长期存放与长途颠簸后，炸药性能会有所下降，从而影响爆破质量。从 2012 年 12 月份起，随着响水沟料场爆破的深入，成品炸药存在的上述问题就开始出现。

（4）大坝填筑进入高峰期后，日均炸药用量很大，若仍然用人工装成品炸药，不仅爆破作业人员体力消耗大、易疲劳，而且搬运炸药和装药花费的时间也会很长，导致爆破作业时间延长。人员疲劳就容易产生安全隐患甚至安全事故。

根据文献[5-6]，相比于传统的成品炸药，现场混装炸药具有安全、高效、可靠、环保的优点。因此，为减少火工用品带来的负面影响，并基于上述优点，针对长河坝工程研究采用混装炸药开采技术。本文主要研究如何确定合理的混装炸药参数及如何高效完成装药。

2　爆破试验

根据规划，混装炸药若能够成功引进，将主要用于江咀石料场的堆石爆破作业。因此，现场混

装炸药爆破试验在江咀料场进行。混装炸药所用的乳胶基质由康定地面站生产后，采用专用运胶车保温运输至在长河坝工地的贮胶站，再泵送至贮胶罐内贮存。在使用时，由贮胶罐放至混装车内，再运至爆破现场进行炸药混制和装药爆破。为获得合适的混装炸药参数，现场进行了 2 批次爆破试验，第 1 批次包含 2 场试验，第 2 批次包含 3 场试验。由于混装炸药适合用机械装药，因此试验中采用混装炸药车代替人工进行装药。



图 1　混装炸药试验现场

2.1 第 1 批次爆破试验

第 1 批次的试验规模及爆破参数如表 1 和表 2 所示。

表 1　试验规模

序号	爆破时间	预计爆破量/m³	混装炸药使用量/kg
1-1	2015.6.7	5000	2880
1-2	2015.6.11	12500	7220

表 2　爆破参数

序号	1-1	1-2
台阶高度/m	15	15
钻孔超深/m	2	2
钻孔深度/m	17	17
钻孔角度/。	90	90
钻孔直径/mm	115	115
孔距/m	5	5
排距/m	4	4
堵塞长度/m	4.5	4
线装药密度/(kg/m)	15	14
单孔药量/kg	180	180
装药结构	连续、耦合	连续、耦合
起爆网路	单孔单响	单孔单响
总装药量/kg	2952	7316
实际单耗/(kg/m³)	0.59	0.60

采用上述爆破参数进行爆破试验，并对现场爆破过程进行跟踪得出如下结论：

（1）两场爆破试验中，爆破时间较晚且爆破时伴有小雨，故未能布置振动测试仪器。

（2）两场爆破试验过程中，石料场多岩隙裂缝，地质条件不佳，个别孔混装炸药装药渗漏现象明显。爆破后孔口堵塞段大块明显较多，颗分试验显示爆破料整体偏粗，不能满足正常堆石料上坝填筑技术要求，且两场爆破的级配大致相同，图 2 为颗粒级配曲线图。

（3）爆堆堆积高度降低不多，抛掷较少，爆破后冲明显，拉裂破坏范围较大。

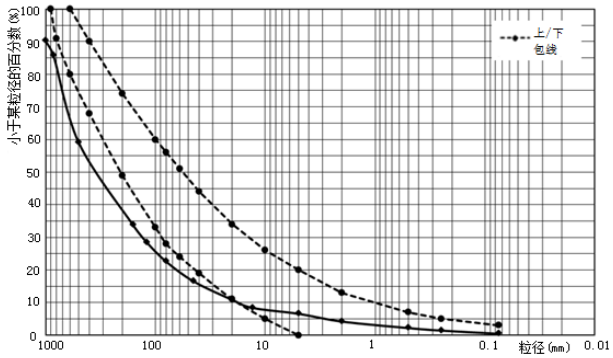


图 2　第 1 批次爆破级配曲线

通过分析发现，第 1 批次的爆破主要存在以下问题：

（1）部分区域爆破效果不理想，经分析主要原因可能为前排底盘抵抗线过大，爆破排数较少（两排），没有明显的挤压效果。

（2）试爆区装药过程存在漏药现象，成孔位置存在较大裂隙、料场部分临边区域下侧存在原用于金矿勘探的探洞。

（3）试爆区爆破后表层大块石较多，经分析主要原因可能为原设计顶部堵塞长度过大，此外，炸药发泡较慢及岩石裂隙造成炸药渗漏也导致实际孔顶堵塞长度小于设计堵塞长度。

针对前 2 场爆破试验中混装炸药表现出来的主要问题，经分析，初步拟定以下解决方案：

（1）调整混装炸药配方，增加混装炸药稠度，在控制范围内削弱其流动性，从而减少狭小裂缝药体渗漏现象。

（2）减少装药孔顶部堵塞长度，初步拟定为由 4.5m 调整为 3m。

（3）全程跟踪钻孔，对出现金矿小巷道的孔进行记录，对炸药渗漏孔采用分段装药方式，防止炸药渗漏，岩石条件严重破碎及受矿洞影响的孔采取塑膜装药。

（4）减少最后一排孔的单孔装药量，即对最后一排孔分两段进行空气间隔装药，间隔距离 1m。

2.2 第 2 批次爆破试验

在第 2 批次爆破试验进行前，针对第 1 批次爆破试验出现的药体渗漏现象，在混装炸药地面站处，进行配合比调整及配方优化试验。整个优化主要从两个方面增加炸药稠度：（1）将乳胶基质的水油相比例从初期选定的 93.5:6.5 调整为 94:6，如表 3 所示；（2）更换油相配方中乳化剂厂家，选用更高标准的乳化剂产品，从而提高乳化效果。

表 3　水相、油相配方表

水相	水	硝酸铵	添加剂 A	添加剂 B
	15%	85%	0.2%(外加)	0.15%(外加)
油相	柴油	机械油	乳化剂 A	乳化剂 B
	45%	26%	23%	6%

第 2 批次的试验规模如表 4 所示。本批次中各场次的装药结构根据钻孔情况进行，经现场跟踪，爆破场次 2-1 仍采用连续耦合装药方式，爆破场次 2-2、2-3 末排采用空气间隔装药，共分两段，空气间隔 1m，岩石破碎段视情况采用间隔装药或套袋装药方式进行，以减少混装炸药渗漏现象。除装药结构外其他试验主要参数如表 5 所示。

表 4　试验规模

序号	爆破时间	预计爆破量/m^3	混装炸药使用量/kg
2-1	2015.6.26	12600	6360
2-2	2015.7.25	14000	8000
2-3	2015.7.30	12000	7200

表 5　爆破参数

序号	2-1	2-2 日	2-3
台阶高度(m)	15	15	15
钻孔超深(m)	2	2	2
钻孔深度(m)	17	17	17
钻孔角度(。)	90	90	90
钻孔直径(mm)	115	115	115
孔距(m)	5	5	5
排距(m)	4	4	4
堵塞深度(m)	3	3	2.5
线装药密度(kg/m)	13~15	11~12	12~14
单耗(kg/m^3)	0.6	0.55	0.58
单孔药量(kg)	180	165	175

本批次爆破根据前期试验出现的情况进行调整采取防渗漏措施，各场次爆破颗粒级配曲线如图 3~图 5 所示。

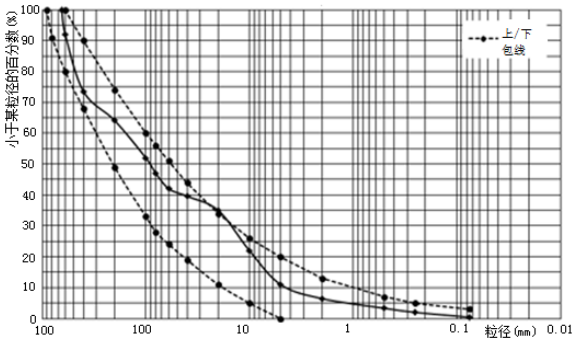


图 3　第一场爆破试验颗粒级配曲线

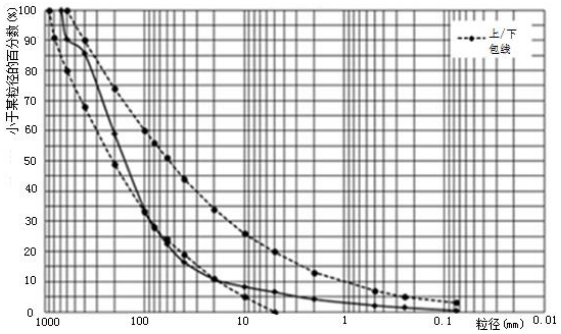


图 4　第二场爆破试验颗粒级配曲线

从图 3~图 5 可以看出，3 场次的颗粒级配曲线在上下包线之间，基本满足堆石料级配及开挖要求。但是 20mm~80mm 粒径的岩块略偏少，由于爆破对岩石的破坏，20mm~80mm 粒径的岩石产生在爆破作用的压缩圈、破裂圈内，而压缩圈、破裂圈的范围与药包半径有关。之前成品炸药爆破能够满足堆石料级配，且与混装炸药爆破孔径一致，所以导致 20mm~80mm 粒径的岩石含量波动主要是由于受到岩层裂隙影响。

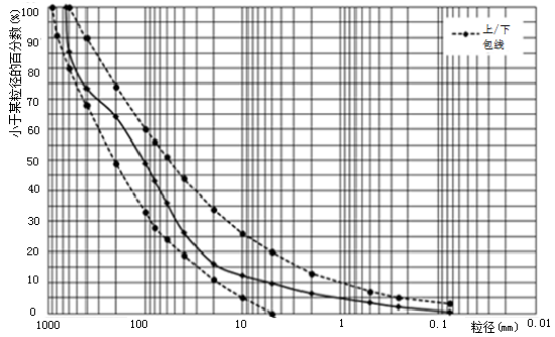


图 5　第三场爆破试验颗粒级配曲线

为验证所确定的混装炸药参数及爆破参数的合理性，避免因振动过大，对周围居民产生影响，第 2 批各场次爆破试验均采用振动测试仪器进行了爆破振动监测。在距离爆破边缘 120m 处，放置振动测试仪，具体振动测试数据如表 6 所示。

根据规程[7]，一般民房爆破振动的允许振速 V 为 2cm/s，采用公式计算允许安全距离 R 为 78.02m，施工爆破现场 78.02m 范围内无民房。所以混装参数及爆破参数满足规程要求。第 2 批次的爆破效果整体分析结果如表 7 所示。

表 6　振动数据表

数据源名称	总装药量/kg	最大单响药量/kg	距离/m	主振频率/Hz	最大振速/(m/s)	触发时间
设备_通道 1_段 1(横向)	6504	190	120	12.207031	0.837965	2015-6-26 18：23：37
设备_通道 2_段 1(纵向)	6504	190	120	12.207031	0.948694	2015-6-26 18：23：37
设备_通道 3_段 1(垂直)	6504	190	120	17.089844	0.678168	2015-6-26 18：23：37

表 7　爆破效果分析

爆破块度	经过对渗漏孔进行塑膜装药处理后，大块较少。通过多场次试验后，发现造成大块原因主要为：1、堵塞过长；2、岩石裂隙、金矿洞子造成炸药渗漏。
爆堆形态	爆堆堆积高度下降明显（约 2m），抛掷距离满足挖装要求，利于挖装的安全施工。
爆破安全	无盲炮，人身、财产、建（构）物安全
爆破后冲	后冲减少，拉裂破坏范围变小。
是否满足堆石料级配要求	基本满足堆石料级配要求。

3　混装炸药的应用

经现场爆破试验，堆石料的开采采用第 2 批次的爆破参数，爆破结果表明，效果良好，极大地降低了爆破成本，经济效益显著，同时，对于安全文明施工及环、水保方面有着良好的表现，具有较大的社会效益。

3.1　经济效益

（1)采用混装炸药车装药，1 个混装车操作工配合 2 个爆破工，每分钟装药效率可高达 450kg，相当于 10~15 人的装药能力，节约 50%的人工投入，减少 40%的装药时间，从而节省了爆破作业时间，大大降低了作业人员的劳动强度。混装炸药减少了包装、储存、长距离运输、流通等工序，可大幅降低炸药供应成本，大大提高了民用爆炸物品生产、储存、运输和使用等各环节的安全性，保障工程安全与环保。

（2）混装乳化炸药具有体积威力大、爆速高、完全耦合装药等特点，其孔网参数比传统的孔网参数大，钻孔延 1m 爆破方量比传统爆破大 1.2 倍以上，1m³钻孔量节省 16%，钻孔工作效率提升 39%，有效降低钻孔成本。混装炸药爆破单价比成品炸药节约约 3 元/m³。

3.2　社会效益

（1）更安全。在储存、运输过程中都是半成品，只有到现场混装炸药车将车上半成品混拌装入炮孔内敏化之后才成为真正意义上的炸药，炮孔内敏化后的混装炸药不具有雷管感度与摩擦冲击感度。而且，由于采用生产与装药爆破一体化的施工模式，现场用多少就生产多少，剩余的半成品可返回地面站内储存，真正实现了柔性化生产，不存在炸药流失等安全隐患，且所需涉爆人员的数量少，所以混装炸药的安全性非常高。

（2）更可靠。混装炸药的爆速和装药密度可以根据现场岩性进行调整，能够很好的与被爆岩石的波阻抗进行匹配，确保爆破效果。混装炸药的流动性与流散性较高，在装药过程中不会卡药，

能保证实际装药量满足设计要求。混装炸药为耦合装药，能减少炸药爆炸能量的散失，降低岩石爆破后的根底率和大块率。混装炸药在现场生产后可直接爆破，炸药的质量可靠性高。

（3）更环保。成品炸药在装药过程中人工直接接触炸药，不利于职业健康，同时装药后现场会残留大量炸药包装物，不利于环保与文明施工。而混装炸药则不存在以上问题，所以也更有利于职业健康与环保。

4 结语

（1）通过 2 批次的混装爆破试验，确定了合理的混装炸药爆破参数，试验结果表明，采用该爆破参数爆破出来的堆石料基本满足级配要求。通过对爆破振动速度进行及飞石的监测，结果表明不会对周围居民造成影响，满足规程要求。

（2）采用混装炸药车装药，迎合了混装炸药适用于机械化作业的特点，提高了装药速度和爆破作业效率，节省了人工投入。

（3）后期应用表明，混装炸药具有明显的经济效益，比成品炸药节约约 3 元/m³；同时也具有明显的社会效益，在安全性、可靠性、环保性方面成效显著。

（4）研究所确定的现场混装炸药爆破作业方式满足了大坝填筑对料场石料爆破质量和进度的要求。因此，所研究的现场混装炸药技术在水利工程石料场开采爆破施工中具有极大地借鉴意义。

参考文献：

[1] 熊雄. 长河坝水电站工程建设管理综述[J]. 水力发电,2016,42(10):1-4.
[2] 胡庆贤. 炸药感度评价方法的探讨[J]. 含能材料,2000,(03):127-129.
[3] 吴高见. 高土石坝施工关键技术研究[J]. 水利水电施工,2013,(04):1-7.
[4] 李夕兵,古德生,赖海辉,朱成忠. 岩石与炸药波阻抗匹配的能量研究[J]. 中南矿冶学院学报,1992,(01):18-23.
[5] 周伟光,孙伦奎. 现场混装乳化炸药技术的应用新进展[J]. 广东化工,2017,44(01):60+90.
[6] 叶图强,郑旭炳,汪旭光,吴春平. 装药车制乳化炸药的试验研究[J]. 含能材料,2008,(03):262-266.
[7] GB6722-2003. 《爆破安全规程》[S]

马来西亚南车大型钢构厂房屋面板制作及屋面系统安装

刘海友

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：本文以马来西亚南车厂房为例，介绍了国外大型钢构厂房屋面板加工及屋面系统安装的施工的技术特点，难点及施工措施，对类似工程施工具有一定借鉴意义。

关键词：大型钢构厂房；屋面板制作；安装

1 概述

南车厂房位于马来西亚西部霹雳州怡保BATU GAJAH（华都牙野）镇南2km处，距离怡保35km，距离吉隆坡200km，工程区域为热带雨林气候，常年雨水较多，气候炎热。

厂房主要由组装车间及转运架车间及辅房组成，总长418.6m，最大宽度88m，最大高度23.5m，总投影面积35825.52m^2。其中钢桁架最大跨度40m，钢网架最大跨度45m，宽度88m，高度19.6m，钢网架投影面积为3960m^2。钢架结构是正方四角锥平板式，节点采用螺栓球节点，网格规格为4.5m×4.5m，支撑形式为多点柱上弦球支撑。

屋面构造由上至下依次为轻质屋面压型钢板，屋面板支座，岩棉，Z型檩条等，屋面结构如图1。

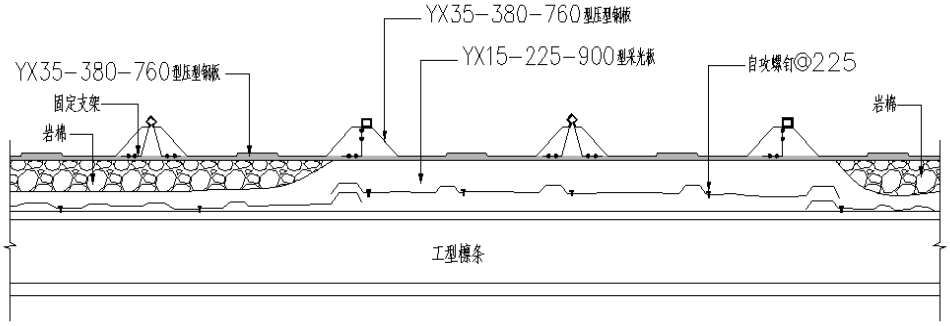


图1 屋面结构

2 屋面板制作

2.1 制作场地布置

根据现场实际情况，压板前需要综合考虑加工场地，吊运方便以及与土建作业干扰影响，分部位分时段进行。场地分别位于1轴线辅房A-E右侧及32轴线左侧，现场为沙土地基，基本满足场地硬化要求。

2.2 吊架制作

成型后的屋面板最长达44.3m，为保证吊运中压板不弯折损坏，必须采用长吊架配合吊装，需在现场制作一个长42m，断面为800×800×800mm的三角钢吊架，吊架采用DN100，δ=6mm的无缝钢管、φ25圆钢和L63×6角钢焊接组成。吊运时10～20块屋面板堆叠在一起，将吊架置于上方，用60t汽车吊吊运至屋顶。

2.3 屋面板现场制作

本屋面板工程长度方向为整体施工，安装作业处于大面积临空状态，根据设计要求，屋面板一个坡向不允许有搭接，彩钢板长度较长，为便于施工和保证质量，需要加工设备尽可能靠近安装建筑物外两端侧，就近制作，就近安装，尽量减少二次倒运，以免因二次转运而造成板弯折损坏，彩钢板压板的加工和安装应尽可能同步进行。

屋面板机就位后，根据屋面板工艺的要求调整到位、稳固，在开工前进行试生产，先试压长 1.5m 的一小段，检查其尺寸规格，调试面板机的参数，直至生产符合要求的屋面板。

生产屋面板的材料为彩钢板卷材，每卷重 2-3t，卷板前卷材放在板机的后面支架上，保持通风和干燥，避免因浸水而影响彩钢板表明质量。

屋面板出板方向设有辊轴支架，长约 12m，当生产出的屋面板超过 12m 时需要屋面板抬板人抬着向前走，直至生产出足够长的板材，当成型的板材达到设计要求的板长时，停止压板并切割。面板长度宜比设计略长 100mm，便于将来板端切割调整。

根据现场实际情况和现场施工要求按编号、尺寸堆放，压板的堆放场地应平整，成型板与地面隔离空隙高度在 100-200mm，并铺设好垫木，板下垫木间距不应大于 6m，每一层板叠数不应超过 20 张。

板成型后不得被其它物体碰撞，表面应干净，不应由明显的凸凹褶皱，严禁在板上行走或堆放其它物品，以免板受外力产生变形或破坏。

3 屋面结构系统安装

3.1 安装流程

屋面结构安装流程图见图 2

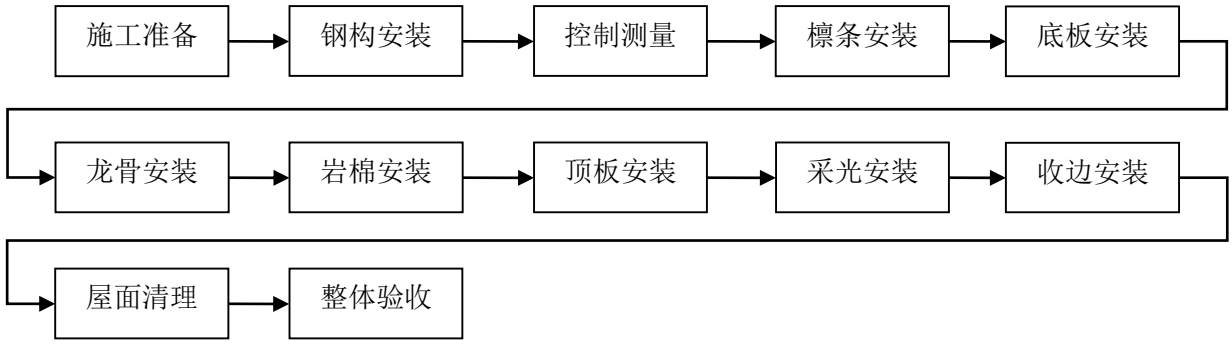


图 2. 屋面结构安装流程图

3.2 檩条安装

屋面檩条为薄壁 C 型檩条，用螺栓与檩托进行连接。安装前，应检查檩托安装是否正确。

安装主檩条时，先对好控制轴线，再将檩条螺栓拧紧，检查主檩条是否高低不平，必要时进行调整。次檩条用螺栓与主檩进行连接，螺栓穿好后略微紧固，然后进行位置、标高调节，最后再完全拧紧。檩条安装示意图见图 3.

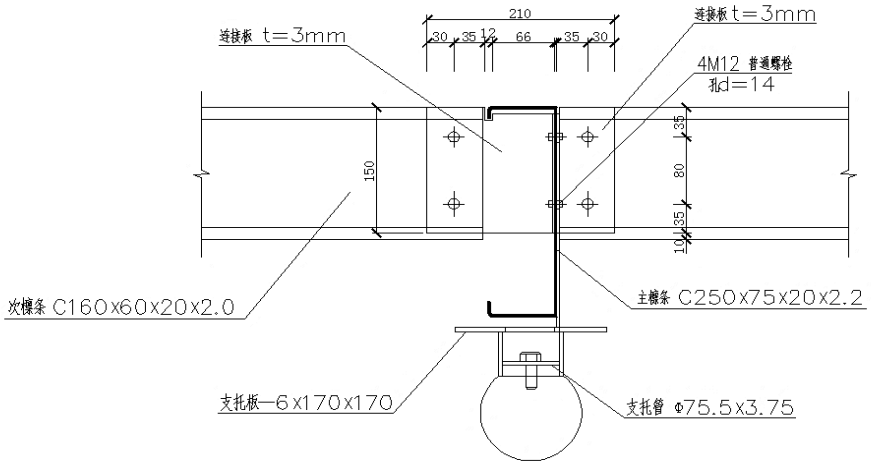


图 3　檩条安装示意图

质量验收标准：

（1）檩条间距允许偏差±5mm。

(2) 檩条弯曲矢高偏差不大于 L/750，且不应大于 12mm。（L 为檩条长度）

3.3 天沟安装

屋面天沟采用钢板折弯成型，钢板材质为 Q235B。天沟在工厂内制作，根据设计详图，确定屋面天沟的展开尺寸，在折弯机上压制成型，在现场安装焊接。

天沟安装工艺流程：测量放线→天沟支撑架安装→天沟外胆安装→铺设下部保温层→地面天沟对接→天沟就位→天沟焊接→天沟伸缩缝及端头板安装→天沟安装尺寸复核调整→安装天沟泛水板→天沟蓄水试验→天沟开孔处理→天沟清理→缺陷修补→完工。

天沟的垂直运输采用汽车吊加人工辅助吊装，安装天沟支架前应进行天沟测量，天沟放线应与屋面板材在天沟位置标高、檐口的标高及位置同步进行。

两段天沟之间的连接方式为对接焊接，对接时注意对接缝间隙不能超过 1mm，先每隔 100mm 点焊，确认满足焊接要求后方可焊接。焊条型号根据母材确定,焊接完成后应对焊接部位的焊渣进行清除及刷防锈漆。

最终完工后，要对天沟进行清理，清除屋面施工时的废弃物，特别是雨水口位置，要保证不积淤，确保流水的顺畅。

每条天沟安装好后，除应对焊缝外观进行认真检查外，还应在雨天检查焊缝是否有肉眼无法发现的气孔，如发现气孔渗水，则应用磨光机打磨该处，并重新焊接。

安装好一段天沟后，先要在设计的落水孔位置中部钻排水孔，安装排水口，避免天沟存水，对施工造成影响。

3.4 屋面底板、Z 型檩条安装

屋面底板采用 0.4mm 厚镀铝锌压型钢板，在檩条上部铺设。底板板型采用 YX15-225-900 型，固定螺钉两波一个，板端部每波一个；底板上部铺设 Z 型檩条，可与底板同时施工，也可分步施工。安装前将板材安装控制线（屋面底板安装平行线）在檩条上，检查檩条的直线度、挠度、及隐敝工程。

屋面底板安装采用自攻螺钉扣挂，在安装好的檩条上先测放出第一列板的安装基准线，以此线为基础，每二十块板宽为一组距，在屋面整个安装位置测放出底板的整个安装测控网。

当第一块压型板固定就位后，在板端与板顶各拉一根连续的准线，这两根线和第一块板将成为引导线，便于后续压型板的快速固定。

安装一段区域后要定段检查，方法是测量已固定好的压型板宽度，在其顶部与底部各测一次，以保证不出现移动和扇形。

压型底板通过自攻螺钉与次檩条连接，自攻螺钉的间距：横向为两波的距离，在波谷处与檩条连接。

钢底板的安装顺序为由低处至高处，由两边缘至中间部位安装，搭接为高处搭低处。按板起始线放置后，用自攻钉紧固两端后，再安装第二块板。

安装到下一放线标志点处，复查板材安装偏差，当满足设计要求后进行板材的全面紧固。不能满足要求时，应在下一标志段内调正，当在本标志段内可调正时，可在调正本标志段后再全面紧固。

Z 型檩条安装于屋面底层板之上，位于次檩条上方，与屋面底板同时安装有利于底板的固定。固定螺钉两波一个，与底板螺钉错开布置，在底板波峰处与次檩条相连接。

3.5 岩棉安装

岩棉到货后应检查规格、数量、厚度、包装、受潮情况，对不合格的，特别是已受雨淋的保温材料必须进行清退或处理。存放仓库应保持干燥，有防风、防雨、防火设施，现场临时堆放时表面用防火布覆盖，并设灭火器材。

通过吊车或在屋面安装定滑轮将岩棉提升至屋面，当时运至屋面的岩棉当时用完，避免大量堆放或因防水不当造成岩棉雨淋而浪费。

岩棉安装应与屋面顶板安装同步进行，当采取先安装岩棉后铺设屋面板时，岩棉与屋面板前后距离不宜太长，确保当时铺设的岩棉能够及时覆盖。

质量要求：铺设到位、密实，平整、无污染、无受潮、雨淋现象。

3.6 屋面上层板安装

（1）屋面板支座安装

安装前应检验屋面檩条的安装坡度，不符合要求的及时校正。屋面板安装后，因热胀冷缩可导致屋面板自由滑移，为防止出现因支座安装不正确造成屋面板被拉破，安装屋面板支座时，应先打入一颗自攻螺钉，然后对支座进行校正一次，调整偏差，并注意支座端头安装方向应与屋面板铺板方向一致，校正完毕后，再打入其它螺钉，将其固定，并控制好螺钉的紧固程度，避免出现沉钉或浮钉。

安装中及时调整固定座安装坡度，确保与屋面板平行，安装完成后应复测，检查平整度及屋面波纹线对屋脊的垂直度，且固定座的安装坡度应与屋面板平行。

固定座的安装精度：目测每一列屋面板支座应在一条直线上；

屋面板支座如出现较大偏差时，屋面板安装咬边后，会影响屋面板的自由伸缩，严重时板肋将在温度作用下被磨穿。如发现有较大的偏差时，应对有偏差的支座进行纠正。

（2）屋面上层板安装

屋面板采用型号角驰 760 型，固定方式为无孔锁扣式连接。其安装流程为：放线→就位→咬边。

屋面板的平面控制，一般以屋面板下固定支座来定位，在屋面板固定支座安装合格后，只需设板端定位线，以板伸出天沟边沿的距离为控制线，板块伸出排水沟边沿的长度以略大于设计为宜。

就位时先对准板端控制线，然后将搭接边用力压入前一块板的搭接边，最后检查搭接边是否紧密接合。

屋面板位置调整好后，用电动锁边机或手动锁边钳进行锁边咬合，本咬合方式为 360^0。要求全程咬紧，咬过的边连续、平整，不能出现扭曲和裂口。当天就位的屋面板必须完成咬合，以免来风时板块被吹坏或刮走。

（3）采光板安装

采光板安装可与屋面板同时进行，视采光板到货情况而定，可先可后安装，但最好同时进行，以免窝工，由于采光板为透明的有机玻璃材质，安装时严谨避免踩踏，否则很容易造成采光板破坏及安全事故发上。

（4 ）屋脊堵头板、挡水板安装

屋面板在屋脊处应正确设置屋脊堵头板、屋脊挡水板，并用防水密封胶嵌缝。屋面板安装好似可同步进行屋脊堵头板、挡水板、檐口堵头板及防水密封胶的敷设。

（5） 金属屋面的保护与清洁

金属屋面的构件等应有保护措施，不得发生碰撞变形、变色、污染等现象；

金属屋面工程安装完毕后，将屋面表面清扫干净；并清理干净天沟内的杂物。

3.7 收边件安装

收边件安装在屋面上层板安装完成后进行，按照图纸要求安装，搭接处加密封胶；凡收边件与混凝土结构插接的地方，要先切除细槽，吹净浮灰，加密封胶后进行安装。

4 结语

本工程为铁路机车系统行业大型钢构厂房工业建筑，跨度大，安装高度高，压型屋面工作量大，尺寸超长，吊运安装难度大，场地紧张，土建结构并行施工，压型板施工占地面积大，需合理安排施工用地，工序配合，密切衔接，机动灵活布置施工机械和劳动力资源安排。

高速铁路湿陷性黄土隧道下穿高速公路施工技术

王吉成

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：以京张高速铁路草帽山隧道下穿张承高速公路为例，详细的介绍了高速铁路湿陷性黄土隧道下穿高速公路的开挖方案、隧道支护、监测的施工技术，从而减小施工沉降、降低施工风险，为粉砂、粉土地层、湿陷性黄土隧道穿越高速公路制定施工方案提供借鉴。

关键词：京张高铁；草帽山隧道；湿陷性黄土；下穿；高速公路；工艺；监测

1.工程概述

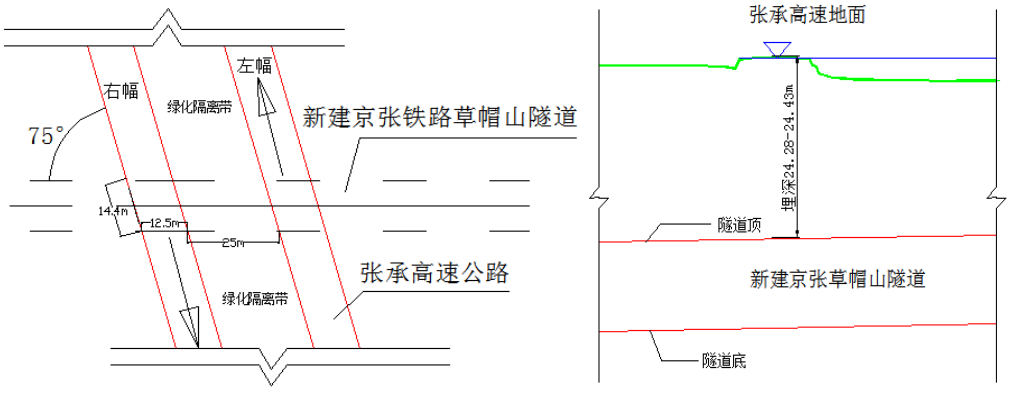
1.1 概述

近年来，随着国家基础设施投入力度的不断加强，高速铁路建设及高速铁路的飞速发展和工程设计技术的发展，高速铁路在铁路工程中的比例越来越大，同时隧道建设的地质条件也越来越复杂。当隧道穿过第四系上更新统洪坡积层、硬塑且局部具自重湿陷性的新黄土、拱顶粉砂地层、隧道埋深浅或岩体自稳能力差时，造成初期支护沉降量大，施工安全风险大，施工速度缓慢。为了解决这一难题，笔者以京张高铁草帽山隧道下穿张承高速公路为例，详细的介绍了草帽山隧道下穿施工方案、施工操作方法及监测控制要点等方面的情况，从而达到了在确保安全质量的前提下隧道的快速施工。

1.2 工程简介

草帽山隧道全长 7340m，隧道位于低山丘陵区，线路走向大体与草帽山山体走向平行。隧道下穿张承高速公路 DK175+660～DK175+770 段地质为：硬塑，局部具自重湿陷性新黄土；稍湿～潮湿的细沙；粉质粘土、细角砾土，呈透镜体或夹层分布（见图 1 所示），隧道围岩类别为Ⅴ级加强。

草帽山隧道下穿张承高速公路左右幅及中间隔离带。左右幅宽各为 12.5m，中间隔离带宽为 25 米，公路与隧道交叉角度约为 75°，路面至隧道顶距离为 24.28m～24.43m（见图 1 所示）。



新建京张铁路下穿张承高速公路平面示意图　　新建京张铁路下穿张承高速公路纵断面示意图

图 1　　草帽山隧道与张承高速公路方位图

2．下穿段隧道施工技术

2.1 施工总体方案

结合现场实际情况、前期施工经验及地质情况，洞内拱墙外部 140°范围内设置外径为 108mm 的超前大管棚结合超前小导管联合支护，掌子面采用局部加固，且掌子面开挖顶拱初支时预埋灌浆管，中台阶开挖前进行顶拱初支注浆；洞身采用上、中、下三台阶分部开挖法，上台阶

预留核心土；中台阶采用左右不对称跳挖且施做临时仰拱法施工。遵循“人工配合机械开挖、少扰动、短进尺、快循环、强支护、紧封闭、勤量测”的施工原则，在监控量测数据的指导下实施隧道的开挖与支护工作，做到仰拱及时封闭成环，二次衬砌施作紧跟。

2.2 超前地质预报结果

根据地质雷达此段有明显异常反射波，雷达波频率变低，局部存在错断。推断该段仍以新黄土、粉土、粉质粘土为主，夹砂类土薄层或透镜体，围岩整体性差，易塌方。建议及时支护，加强监控量测。

2.3 超前支护施工

2.3.1 拱部超前长管棚支护

超前支护分为顶拱 140°范围内，采用外径为 108mm，壁厚 6mm 的热轧无缝钢管，管壁打孔，布孔采用梅花型，孔径为 6mm，孔间距为 7cm，钢花管尾留 150cm 不钻孔的止浆段。每环长为 24m，每环搭接长度 3m，环向间距为 30cm，钢管轴线与衬砌外缘夹角不大于 12 °，径向误差不大于 20cm，环向误差不大于 10cm，洞内管棚安装在采用扩挖后的 I22a 钢架上，在钢架腹部钻孔作为导向，相邻钢管的接头前后错开。

一般按编号，偶数第一节用 3m，奇数第一节用 6 m，以后各节均用 6m。同一横断面内的接头数不大于 50%，相邻钢管接头至少错开 1m，管棚采用丝口连接，外车丝扣长 500mm,连接钢管采用长 1000mm 的内车丝扣。

管棚注浆采用水泥注浆，水泥浆水灰比为 1:1（重量比），注浆压力为 0.5～2.0Mpa。

2.3.2 拱部超前小导管

隧道顶拱 110°范围采用外径 42mm 壁厚 4mm 的热轧无缝钢管与钢架联合使用，并将小导管环向间距加密至 20cm，外插角为 10°～15°；纵向间距调整为每 2 榀钢架搭设 1 环小导管，每根导管长度为 3.0m。

2.3.3 掌子面局部加固

掌子面局部采用Φ25 玻璃纤维锚杆和厚 10cm 的 C25 喷射混凝土全断面封闭加固（见图 2 所示）。Φ25 玻璃纤维锚杆沿洞身方向水平交错布置，每根长 L=2.0m，间距 1.5m；上台阶掌子面每循环开挖进尺为 1 榀钢拱架，每榀钢拱架间距 0.8m，开完后立即进行掌子面加固。掌子面封闭范围为延隧道初期支护外轮廓线再向外扩 50cm。

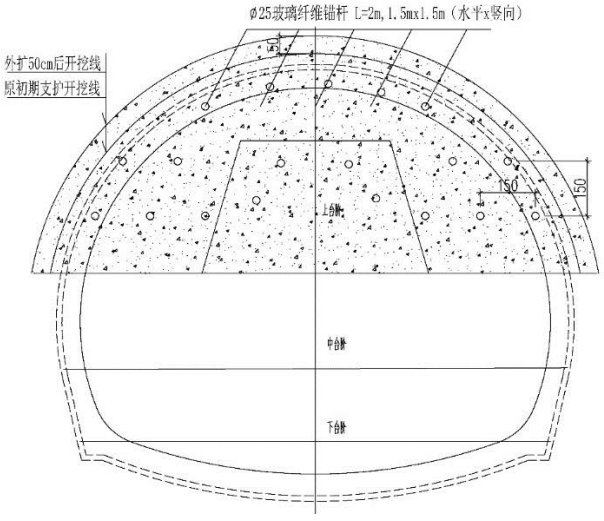


图 2　　掌子面局部加固断面图

2.4 隧道洞身开挖施工

洞身采用三台阶且中台阶施做临时仰拱法，及上台阶预留核心土、中台阶临时仰拱、掌子面局部加固施工（见图 3 所示）。由于隧道为湿陷性黄土隧洞，此采用人工配合挖掘机开挖施工，挖掘机配合装载机装渣，自卸车运输至弃渣场。为控制隧道初期支护沉降变形过大，针对性的采取以下措施：上台阶每次开挖不超过 1 榀（每榀钢架 90cm）钢架间距，中台阶和下台阶每次开挖不超过 2 榀钢架间距，仰拱每次开挖不超过 3 榀钢架间距，每个台阶同时只能开挖一个部位，中台阶和下台阶两侧开挖错开 5 榀以上钢架间距，严禁中台阶和下台阶同时开挖。

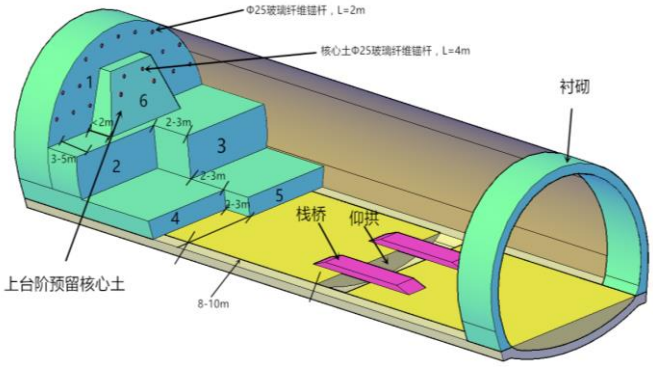


图 3　洞身开挖断面图

第一步上台阶预留核心土开挖及支护，在拱部超前支护后及掌子面局部加固后进行，环向开挖上部弧形导坑，预留核心土，核心土长度为 3～5m。在预留核心土后部架立钢架和 I18 临时钢架，喷临时仰拱（见图 4 所示）。

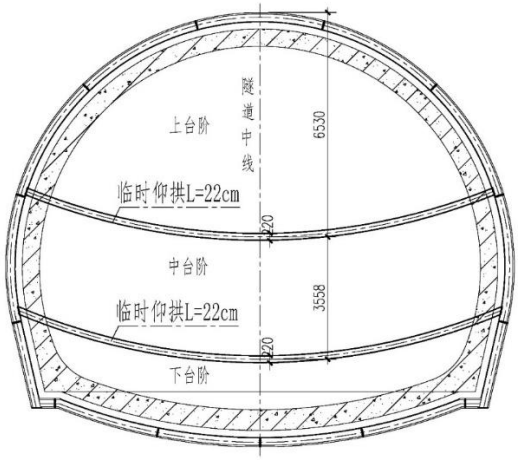


图 4　三台阶法临时仰拱施工工序横断面图

第二步中台阶、下台阶单侧不对称跳挖，严禁同时开挖同一台阶左右两侧，最大不得超过 1.8m，左、右台阶错开 3m 以上。

第三步仰拱开挖支护，仰拱开挖之前必须完成钢架锁脚施工，仰拱开挖每循环进尺不大于 3 米。

第四步核心土开挖，开挖上台阶所预留的核心土，开挖进尺与上台阶循环进尺相一致。

第五步仰拱及仰拱填充分层浇筑，浇筑仰拱衬砌 C35 混凝土，当混凝土达到终凝后，再进行仰拱填充 C20 混凝土浇筑。仰拱及填充分开整体浇筑，一次成型。

2.5 隧道初期支护施工

初期支护采用型钢钢架、系统锚杆、钢筋网及喷射混凝土组成。型钢钢架在加工厂按照设计尺寸进行冷弯加工，汽车运输至工作面，机械配合人工立架。气腿钻打设超前小导管、锁脚锚管。喷

射混凝土采用大型机械湿喷作业。钢架加工时在锁脚锚管位置焊接长 X 宽 X 厚为 30cm×20cm×1.6cm 钢板，钢板对称钻直径为Φ60mm 的孔，方便锁脚锚管穿入。

2.5.1 初期支护施工工序

开挖后及时进行初喷混凝土封闭掌子面→施作钢架→超前支护→搭设锚杆→铺设钢筋网→复喷混凝土。

2.5.2 初期支护施工参数

在顶拱 110°范围采用Φ42mm 超前小导管进行超前支护，小导管每环设置 71 根，环向间距为 20cm，纵向每榀钢架设置一环超前小导管。超前小导管内采用 1:1(重量比)水泥浆注浆。临时仰拱支护钢架采用 I18 型钢钢架，每 2 榀初支钢架设置 1 处。初期支护采用 C30 喷射混凝土，厚度为 28cm，喷混凝土采用湿喷工艺。边墙采用Φ22 砂浆锚杆，每根长度 4m，间距（环×纵）1.2×1.0m。掌子面局部加固采用 C25 喷射混凝土封闭+Φ25 玻璃纤维锚杆，喷砼厚 10cm，Φ25 玻璃纤维锚杆沿洞身方向水平设置，每根长度 L=2.0m，间距 1.5m，交错布置。掌子面局部加固每 2 榀钢架间距进行一次掌子面加固。钢筋网采用Φ8 的圆钢制作，网格间距 20×20cm。采用 I22a 钢架支护，钢架间距 0.9m。钢架之间采用Φ20 纵向连接筋连接，连接筋内外侧环向间距均为 1m，交错布置；钢架拱脚 80cm 处，纵向采用宽 20cm、厚 16mm 的钢板与钢架通长焊接；每处钢架拱脚通长下垫[32b 槽钢；锁脚锚管与钢架连接采用钢板钻孔（钢板 30cm×20cm×1.6cm）替锁脚锚管与钢架“U”形连接钢筋，锁脚连接钢板在加工厂焊接完成，确保焊接质量；各台阶两侧拱脚锁脚锚管采用 6 根Φ42 无缝钢管， L=4.5m。

2.6 初支背后顶拱注浆

初支喷护时，在顶拱正顶处每隔 2m 预埋一根Φ42mm 的钢管，埋设深度大于初支厚度 2～3cm，中台阶开挖前，对初支进行 1:1.5～1:2 的水泥浆注浆，预防初期支护与开挖断面之间下沉造成高速公路路面以下出现脱空。

3.监控量测

隧道开挖后，土体向洞身方向的变形位移量是围岩是否稳定的表现，最能反映出围岩或支护的稳定性，浅埋砂层隧道开挖后，会有明显的下沉，因此地表的观察和地表的沉降显得尤为重要。浅埋砂层隧道监控量测项目包括洞内外观察，地表沉降和洞内监控量测。

3.1 地表变形监测

结合现场实际地形情况，在地表沿隧道线路方向与公路相交处布置观测点，横向每 2.5 米布置一个断面（与洞内测点相对应，便于对监测数据进行分析）每个断面布设 21 个观测点，以线路中心为对称点（见图 5 所示）。沉降速率≥5mm/d 时量测频率不少于 4 次、沉降速率≤5mm/d 时量测频率不少于 2 次。地表沉降观测点在开挖之前开始观测，可以获得开挖全过程的沉降值。

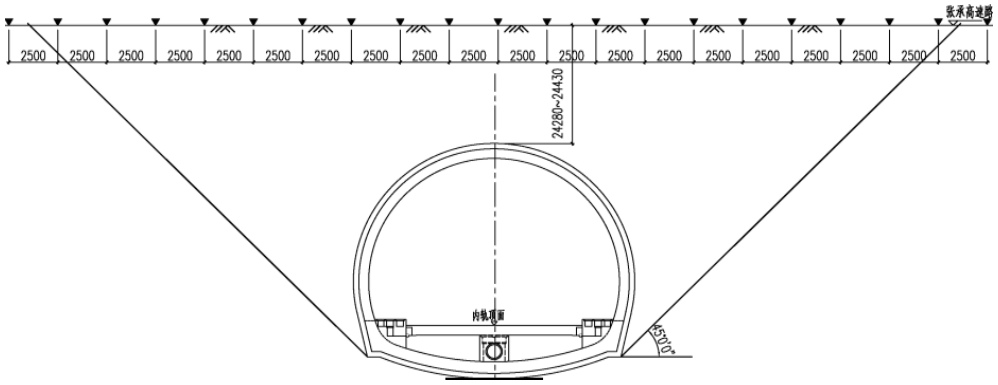


图 5　隧道地表沉降监测点埋设示意图

3.2 洞内净空位移监测

采用全站仪无尺量测方法，对拱顶下沉和水平收敛进行量测，洞内按照 5m 的间距设置量测断面，量测频率沉降速率≥5mm/d 时量测频率不少于 2 次、沉降速率≤5mm/d 时量测频率不少于 1 次。主要检测隧道拱顶下沉、拱腰、边墙处的收敛变形（见图 6 所示）。在拱顶处布置下沉测点，在拱腰设置水平收敛的上部测点，监控上台阶开挖后变形规律；下台阶拱脚处（不低于仰拱纵向施工缝）布置下部测点，监控下台阶开挖变形。测点均钻孔埋入初期支护背后砂土内，外露 5cm 左右，焊接小块钢板，钢板上粘贴带十字丝测量反光片，每组收敛点均位于同一里程同一水平线上。沉降观测初始读数应在开挖后 3-6h 内完成。

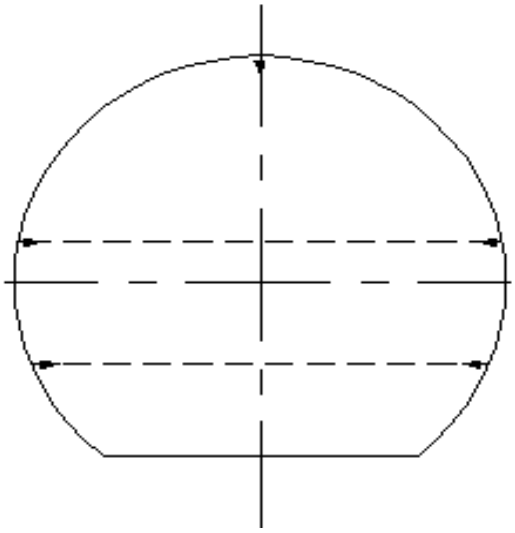


图 6　拱顶下沉量测和净空变化量测的测线布置示意图

3.3 量测结果分析

现场量测数据及时整理核对，并应进行数据处理回归分析。该湿陷性黄土、粉砂、粉土地层隧道开挖后只有沉降变形，没有收敛变形。增加施工措施后，洞内典型断面统计（见下表），累计拱顶沉降最大值由原来的 120mm，减小到 51.5mm，无水平收敛。沉降变形得到了有效的控制，证明该措施方案是可行的。

草帽山隧道斜井小里程方向DK175+744断面监测数据记录表

断面桩号	量测日期	拱顶数据	拱顶沉降速率	拱顶累计沉降	备注
		m	mm/d	mm	
DK175+744	2017/9/21	689.9927	1.7	88.0	
DK175+744	2017/9/22	689.9900	2.7	90.7	
DK175+744	2017/9/23	689.9889	1.1	91.8	
DK175+744	2017/9/24	689.9878	1.1	92.9	
DK175+744	2017/9/25	689.9854	2.4	95.3	
DK175+744	2017/9/26	689.9833	2.1	97.4	
DK175+744	2017/9/27	689.9829	0.4	97.8	
DK175+744	2017/9/28	689.9804	2.5	100.3	
DK175+744	2017/9/29	689.9791	1.3	101.6	
DK175+744	2017/9/30	689.9777	1.4	103.0	
DK175+744	2017/10/1	689.9777	0.0	103.0	
DK175+744	2017/10/2	689.9755	2.2	105.2	
DK175+744	2017/10/3	689.9726	2.9	108.1	
DK175+744	2017/10/4	689.9719	0.7	108.8	
DK175+744	2017/10/5	689.9717	0.2	109.0	
DK175+744	2017/10/6	689.9701	1.6	110.6	
DK175+744	2017/10/7	689.9699	0.2	110.8	
DK175+744	2017/10/8	689.9701	-0.2	110.6	
DK175+744	2017/10/9	689.9687	1.4	112.0	
DK175+744	2017/10/10	689.9673	1.4	113.4	
DK175+744	2017/10/11	689.9668	0.5	113.9	

未采取上述技术时洞内典型沉降观测统计表 1

草帽山隧道斜井里程方向DK175+692断面监测数据记录表

断面桩号	里测日期	拱顶数据	拱顶沉降速率	拱顶累计沉降	备注
		m	mm/d	mm	
DK175+692	2017/11/8	689.9816	5.3	5.3	
DK175+692	2017/11/9	689.9783	3.3	8.6	
DK175+692	2017/11/10	689.9726	5.7	14.3	
DK175+692	2017/11/11	689.9678	4.8	19.1	
DK175+692	2017/11/12	689.9653	2.5	21.6	
DK175+692	2017/11/13	689.9619	3.4	25.0	
DK175+692	2017/11/14	689.9577	4.2	29.2	
DK175+692	2017/11/15	689.9540	3.7	32.9	
DK175+692	2017/11/16	689.9496	4.4	37.3	
DK175+692	2017/11/17	689.9477	1.9	39.2	
DK175+692	2017/11/18	689.9452	2.5	41.7	
DK175+692	2017/11/19	689.9414	3.8	45.5	
DK175+692	2017/11/20	689.9402	1.2	46.7	
DK175+692	2017/11/21	689.9390	1.2	47.9	
DK175+692	2017/11/22	689.9354	3.6	51.5	
DK175+692	2017/11/23	689.9354	0.0	51.5	

采取上述技术后洞内典型沉降观测统计表 2

4 结语

由于隧道开挖扰动的影响，围岩中的原始应力平衡状态被破坏，应力产生重新分布，岩体的受力状态改变，致使岩体的强度降低，承载能力下降。当二次应力值大于岩体强度时，岩体发生塑性变形，形成围岩松动圈，隧道发生内空收敛变形。浅埋砂层隧道，由于上覆地层较薄，开挖引起的变形极容易诱发地表下沉和围岩大变形。又由于砂层的物理力学性质较差，开挖后围岩自身难以形成支撑环来维持洞室稳定，若施工方法和支护加固措施选取不合理，易造成隧道围岩变形过大，引起围岩坍塌破坏，甚至冒顶。

通过此创新工法、密排超前支护、掌子面局部加固、预留核心土、仰拱及时跟进封闭成环，形成拱力的施工方法，解决了高速铁路湿陷性黄土隧道穿越高速公路沉降量大、浅埋隧道开挖支护困难、变形大且难以控制的问题，达到了在确保安全质量的前提下隧道快速施工。

参考文献：

[1] 冯晓东. 浅埋砂层隧道施工关键技术[J]. 硅谷, 2011, 37(6):160-160.

[2] 黄德华. 粉砂地层小间距浅埋暗挖隧道穿越铁路施工技术[J] ,隧道建设, 2004, 24 (1) : 40 - 43.

冲击碾压技术在高填方路基中的碾压实验研究

郭　瑞，祁　涛，沈　渝

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：路基作为道路工程重要组成部分，尤其是高填方路基受填土自重及交通荷载的影响，易产生工后沉降质量问题，导致路基下沉和路面开裂。冲击碾压技术是将低振幅、高频率的振动碾压方式改为高振幅、低频率的冲击碾压方式，介绍了该技术的基本原理、特点，并结合工程实例进行了增强补压试验，试验结果表明：冲击碾压技术可提高路基施工质量，有效减少工后沉降，保证路基的整体强度和均匀性。

关键词：冲击碾压技术；工后沉降；高填方路基

1 引言

随着经济社会的不断发展，我国城镇规模等级也不断扩大，市政路网等基础设施向郊区化延伸，出现了越来越多的填方路基。与普通的低填浅挖路基相比，高填方路基高度较大、相应填筑面积及填土自重均较大，工后沉降问题尤为突出，因此对于填筑路基来说，控制好路基的密实程度对路基长期稳定有着非常重要的意义。冲击碾压技术作为发展起来的岩土工程压实新技术，能有效消除或者部分消除高路堤、填挖结合部的工后压缩变形、差异变形，在提高工程质量、克服路基隐患方面表现出明显的优势，具有广阔的应用前景。

2 冲击碾压技术原理

冲击碾压就是冲击式压路机的多边形凸轮在牵引车带动下向前滚动，重心高度交替变化，将高位势能转化为动能对路基进行冲击，快速连续周期作用，从而对路基深层产生较强的冲击能量，对填料产生夯击作用，压实路基的过程并具有地震波的传播特性，使压实深度可随冲击碾压遍数的增加而递增，由上至下形成一定厚度的冲碾均匀加固层，对填料深层达到密实作用；同时辅以滚压、揉压的综合作用，使土石颗粒之间产生位移、变形和剪切，从而全面提高路基的综合强度和稳定性。

3 试验段概况

成都天府新区汉州路北段项目群共包含 7 条道路工程，路基挖方 299 万 m^3 、填方 247 万 m^3，软土换填 + 路堤填筑总高度大于 5m 的段落总长约 1.0km。施工前选取具有代表性的厦门路西段（大安南路延线至益州大道）K0+800～K0+900 段作为冲击碾压试验段，以取得最优的施工控制参数。

该段为高填方路段，最大填土高度 9.5m，平均填土高度 6.8m，原地貌为积水鱼塘，试验段开展前首先抽排水并将不良软土全部清除。

4 试验方案

4.1 试验目的

（1）验证路基正常碾压 1.5m 层厚时，采用选定的冲击碾压设备补强效果：冲击碾压后压实度比正常压实提高 2～3 个百分点，碾压前与碾压后每层控制沉降量 3～5%，计 4.5～7.5cm。

（2）确定碾压试验参数：碾压遍数、最优含水率及最佳施工工艺等。

4.2 碾压设备选用

试验段选定的冲击压路机型号为 YCT25 型（三叶凸轮），采用装载机牵引，其主要机械性能详见下表 1。

冲击压路机双轮各宽 0.9m，两轮内边距 1.17m，行驶两次为一遍，并冲击碾压宽度 4m。每次冲击力按冲碾轮触地面积边缘与地表以 45° 夹角向土体内分布碾压。每遍第二次的单轮由第一次两轮内边距中央通过，形成的理论冲碾间隙双边各 0.13m，当第二遍的第一次向内移动 0.2m 冲击

碾压后，即将第一遍的间隙全部碾压。第三遍再加复到第一遍的位置冲击碾压，依次进行至最终遍数。

冲击压路机向前行驶在纵向冲击碾压地面所形成的峰谷状态，以单双遍为一冲压单元，当双数遍冲压时，调整转弯半径，达到对形成的波峰与波谷进行交替冲击碾压，使地面峰谷减小，表面接近平整。

表 1 YCT25 型冲击压路机主要性能指标

型号	形状	冲击能量（kJ）	牵引车功率（马力）	静载（t）	行驶速度（km/h）	冲击轮宽（cm）	压实影响深度（cm）
YCT25	三叶凸轮	≥25	≥400	15	8～15	90	60～150

4.3 试验程序

该工程路基填料主要为开挖出的中风化泥质砂岩，首先对填筑土料进行室内试验，以确定最优含水率、最大干密度等物理性能指标；然后根据室内试验成果，拟定不同施工参数在现场分别进行碾压试验并取样检测，汇总分析试验成果。

4.4 试验主要步骤

采用常规碾压方法进行路基碾压，碾压层后达到 1.5m 高度后，用平地机对路基表面进行清理整平，即可进行冲击碾压试验。

（1）冲压前检测

检测冲压前路基面压实度，检测位置在路基表面以下至少 20cm 处，并做好记录。

埋设高程观测点标识，测量冲压前的标高，并做好记录。

检测冲压前路基填料含水率，要求在最优含水率的±2%范围。

（2）冲击碾压施工

采用冲击压路机分别碾压 10、15、20、25 遍，行驶速度控制在 10～15km/h 之间，从路基的一侧向另一侧转圈冲碾，冲碾顺序按“先两侧、后中间”错轮进行，轮迹覆盖整个路基表面为冲碾一遍。

（3）检测

每按规定碾压遍数碾压完成后，分别检测路基压实度、含水率，测量观测桩的高程数据，并做好记录。

（4）整平

冲击碾压结束并经检测记录后，用平地机整平冲碾路段，并采用重型钢轮压路机将路基表面碾压平整密实。

5 试验成果分析

5.1 室内试验成果

通过室内试验检测，中风化泥质砂岩填料主要物理性能详见下表 2。

表 2 泥质砂岩主要物理性能指标

试验项目	最优含水率（%）	最大干密度（g/cm³）	CBR 值（%）
实测值	12.2	1.91	8.5

5.2 现场试验结果分析

（1）工后沉降分析

K0+800～K0+900 段路基分别经过 10、15、20、25 遍冲碾后的沉降数据详见下表 3 和图 1。

表 3 试验段冲碾遍数与沉降量的关系

测点桩号	测点编号	规定遍数冲碾后沉降量（cm）			
		10 遍	15 遍	20 遍	25 遍
K0+820	中	2.5	4.5	6.2	6.4
	左 10	2.6	5.0	5.8	6.5
K0+840	右 8	2.8	4.6	6.0	5.9
	左 10	3.4	4.4	6.0	6.3
K0+860	右 10	2.2	4.0	5.5	6.1
	左 8	2.7	4.3	5.2	6.0
K0+880	中	2.9	4.5	5.7	6.3
	右 10	3.0	3.8	6.1	5.8

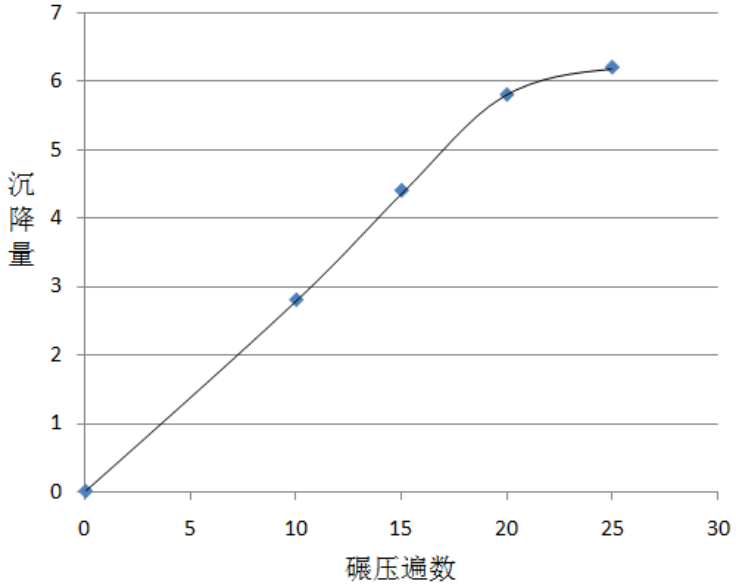


图 1 压实遍数与沉降量关系

试验数据表明：

当冲击碾压 20 遍时，最大沉降值 6.2cm，最小沉降值 5.2cm，平均沉降值 5.8cm，碾压前与碾压后沉降控制值 3.8%，满足设计要求。

路基填土的沉降量随冲击碾压遍数的增加而增加。

当冲碾 10 遍时，平均沉降值 2.8cm；

当冲碾 15 遍时，平均沉降值 4.4cm，与冲碾 10 遍相比增加 1.6cm；

当冲碾 20 遍时，平均沉降值 5.8cm，与冲碾 15 遍相比增加 1.4cm；

当冲碾 25 遍时，平均沉降值 6.2cm，与冲碾 20 遍相比增加 0.4cm。

从而可以看出：冲碾遍数超过 20 遍时，沉降量增加的速率较慢，冲碾效果幅度明显降低，因此从经济角度出发，选择 20 遍的冲碾遍数，即可有效减少路基的工后沉降。

（2）路基压实分析

K0+800～K0+900 段路基填土分别经过 10 遍、15 遍、20 遍、25 遍冲碾后的压实度试验结果，详见下表 4。

表 4 试验段冲碾遍数与压实度的关系

测点桩号	测点编号	冲碾前压实度（%）	冲碾 10 遍（%）		冲碾 15 遍（%）		冲碾 20 遍（%）		冲碾 25 遍（%）	
			压实度	压实度变化	压实度	压实度变化	压实度	压实度变化	压实度	压实度变化
		1	2	（2-1）	3	（3-2）	4	（4-3）	5	（5-4）
K0+820	右 8	92.5	94.7	2.2	95.5	0.8	95.6	0.1	95.9	0.3
	中	92.2	95.0	2.8	95.2	0.2	95.5	0.3	95.4	-0.1
K0+850	中	92.0	93.8	1.8	94.4	0.6	94.6	0.2	95.0	0.4

	左 10	92.6	93.1	0.5	93.6	0.5	94.0	0.4	94.2	0.2
K0+880	左 8	92.2	94.2	2.0	94.8	0.6	94.8	0.0	95.1	0.3
	右 10	92.4	94.8	2.4	95.2	0.4	95.7	0.5	95.7	0.0
平均值		92.3	94.3	2.0	94.8	0.5	95.1	0.3	95.3	0.2

试验数据表明：

随着冲碾遍数的增加，路基压实度逐步增加；

当冲碾 10 遍时，压实度平均值为 94.3%，与冲碾前压实度相比提高了 2 个百分点；

当冲碾 15 遍时，压实度平均值为 94.8%，与冲碾前压实度相比提高了 0.5 个百分点；

当冲碾 20 遍时，压实度平均值为 95.1%，与冲碾前压实度相比提高了 0.3 个百分点；

当冲碾 25 遍时，压实度平均值为 95.3%，与冲碾前压实度相比提高了 0.2 个百分点；

压实度变化值从 2.0 到 0.2，减小变化率由 75%到 33.3%，路基经冲碾 20 遍后压实度变化不大。因此从经济角度出发，选择 20 遍的冲碾遍数，可有效提高路基压实度，相比冲碾前提高 2.8 个百分点，满足设计要求。

（3）路基弯沉分析

K0+800～K0+900 段路基填土分别经过 10 遍、15 遍、20 遍、25 遍冲碾后的弯沉值检测结果，详见下表 5。

表 5 试验段冲碾遍数与弯沉值的关系

碾压遍数	弯沉值（0.01mm）
冲击碾压前	221.5
冲碾 10 遍	208.3
冲碾 15 遍	196.9
冲碾 20 遍	193.5
冲碾 25 遍	192.2

试验结果表明：随着冲碾遍数的增加，路基弯沉值逐步减小；路基经冲碾后，整体强度和承载力显著提高。

5.3 试验结果

根据试验成果分析，综合考虑工程质量及施工作业经济性，该项目高填方路基冲击碾压施工工艺参数如下表 6。

表 6 冲击碾压施工参数组合

填料类别	含水量（%）	冲碾设备	行走速度（km/h）	冲碾遍数
泥质砂岩	10.2±2	YCT25 冲击式压路机	10～15	20

6 结语

冲击碾压技术作为高填方路基快速填筑施工中的一项重要技术，应用越来越普遍。通过工程实际应用表明：冲击碾压技术可有效消除高填方路基工后沉降问题，提高路基整体强度、承载力和稳定性。施工中应根据不同路基填料、冲击碾压设备、设计指标要求等进行试验段，以确定最佳的施工技术参数。

塔贝拉库区深水下闸多功能平台简介

张光辉，谢贞金

（中国水利水电第七工程局有限公司，四川 成都 610081）

摘　要：巴基斯坦塔贝拉水电站四期扩建工程，需在离岸边 200m 处将单套重达 100 多吨的叠梁门下放至库底门槽，实现下闸封堵任务。本文介绍下闸多功能平台的设计，通过巧妙构思，经济适用，满足下闸各种功能的要求，圆满实现预定的下闸目标，为类似工程提供借鉴经验。

关键词：叠梁门；深水下闸；多功能平台

1 工程概况

塔贝拉水电站位于巴基斯坦印度河干流上，在拉瓦尔品第西北约 64km，工程始建于 1968 年，控制流域面积 17 万 km^2，总库容 137 亿 m^3，总装机 3478MW，工程具有灌溉、发电、防洪等效益。主坝系斜心墙土石坝，最大坝高 143m，坝顶长 2743m，坝体体积 1.21 亿 m^3，是世界上填筑量最大的土石坝。塔贝拉水电站四期扩建工程，将右岸 4 号灌溉洞改造为发电引水洞，并新建一座装机 1410MW（3×470MW）的电站，扩建后电站总装机容量达到 4888MW。

四期扩建工程是利用 4 号灌溉洞原有 2 套检修闸门（单套重 108t）分别改造为 4 节封堵叠梁门，设法将其放入库区内原有进水口闸槽中临时封堵 4 号洞，然后新建高位取水口，同时进行隧洞出口新增发电厂房修建。4 号引水洞封堵是塔贝拉水电站四期引水洞改造的紧前工作，直接影响整个项目进度，封堵工期紧，是整个扩建工程的关键任务。

2 面临的主要问题

（1）下闸吊装设备选择困难。原检修闸门单套重量达 108t，经分节改造成 4 节叠梁门后，最大单重 32t。库区门槽位于库区水下 80m 深处，下闸位置离岸边最近距离 200m，陆基起重设备无法覆盖。

（2）水上平台控制困难。库区常年风速 3 级，浪高平均 0.5m，水面作业平台测站测量精度、平台稳定难以控制。

（3）下闸过程监测控制困难。库区深水下闸，水下 80m 采用无导轨吊装，门槽与闸门间容差仅±30cm，下闸过程中，对闸门状态进行动态高精度测量难以控制。

3　水上平台功能要求

（1）运输能力。要求一套叠梁门（共 4 节）应能在一个运输循环完成吊装，叠梁门节存储 108t、吊装设备重量按 80t、辅助设备和人员按 20t，则平台总荷载为 208t。在承受荷载的情况下浮箱纵向坡度控制在 1%以内。叠梁门总面积约 100m^2，吊装作业区面积约 100m^2，测量定位等设备占用面积约 100m^2，取平台面积有效利用系数为 0.6，预期平台面积为 500m^2。

（2）起吊能力。平台上的起吊设备有效吊重必须大于 32t（最重的叠梁门节重量，尺寸为 5855×4450×1200mm）。平台上的起吊设备有效吊深必须大于最大可能吊深 120m。

（3）起吊状态控制能力。平台上的起吊设备在叠梁门下闸过程中应具备准确测定吊深、测量吊重、测量控制抓梁角度、测量抓梁和叠梁门的间距的功能。

（4）技术供应能力。平台还应具备电力供应、平台精确定位和平台锚定的能力。

4　多功能平台设计

4.1 平台设计

首先确定浮箱尺寸、结构形式、工程施工需求、运输标准等。综合应用钢结构设计规范（GB

50017-2003）、内河小型船舶建造规范、船舶建造质量检验规范等的相关内容，确定浮箱的结构形式和尺寸，再进行浮箱的整体强度与薄弱构件强度、整体结构稳定性的校核。

在进行浮箱整体强度分析时，一般可将箱体视为空心梁结构，重点分析沿箱体长度方向所承受的不均匀分布的荷载和浮力，其共同作用使浮箱产生总的纵向弯曲。浮箱的整体纵向弯矩和剪力包含浮箱处于静力状态下的弯矩与剪力、浮箱受到波浪冲击力而产生的附加弯矩与剪力两部分。在进行箱体结构设计计算时，可以假设浮箱静置于波浪上，在重力与浮力的共同作用下，依据梁的弯曲理论计算得到箱体的弯矩和剪力。

假设浮箱沿长度方向每单位长度的重力为 ω，所受浮力 ρgF（其中 ρ 为水的密度，F 为箱体水下横剖面面积），则距浮箱端面沿长度方向 x 位置处箱体截面的剪力和弯矩可以用以下公式求得。

$$Q_x = \int_0^x \omega dx - \int_0^x \rho g F dx \tag{1}$$

$$M_x = \int_0^x Q_x dx \tag{2}$$

上式计算的边界条件为：当 $x=0$ 与 $x=1$ 时，$Q_0 = Q_1 = 0$；$M_0 = M_1 = 0$。

对于浮箱结构体系而言，不论采用何种结构形式及尺寸，整个箱体的构造依旧是板梁的组合结构。构件的整体系统中一些特定的独立构件发生破坏并不一定会对整个结构系统灾难性的影响，但是如果破坏的构件是系统的一个静定构件，则可能导致整体系统的崩溃，因此可采用概率论的方法对结构的可靠性进行分析。

4.2 平台浮箱的选取

根据工程现场条件和海外其他项目闲置浮箱多套，叠梁门多功能吊装平台选择浮箱作为浮具，浮箱模块尺寸为 12m×3.0m×1.5m（长×宽×高），自重约 11.5t。浮箱最大允许吃水深度为 1.2m，单个浮箱排水量约为 43.2t。浮箱模块为船用钢板焊接而成的密闭箱体，侧面设有丁钩和销轴以便相配连接，浮箱模块结构如图 1 所示。

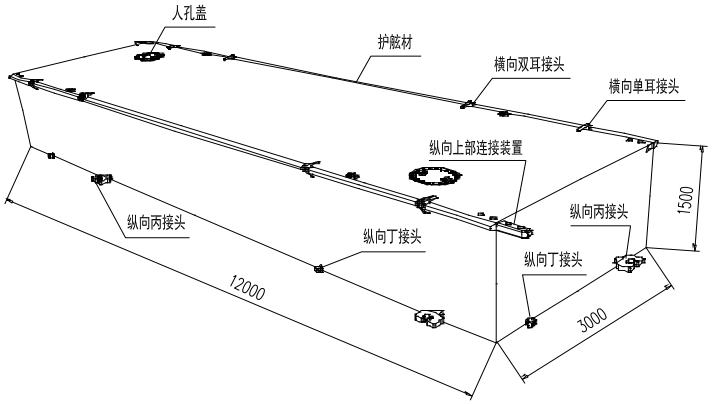


图 1　浮箱模块结构图

4.3 平台多种功能实现

（1）运输能力实现

考虑平台中间预留叠梁门安装吊物孔，平台中部无浮箱，叠梁门多功能吊装平台由 14 个浮箱模块按 3 列 5 行排列拼装而成，在平台中部预留吊物孔（第 2 列第 3 行少安装 1 个浮箱），平台轮廓尺寸为 36m×15m×1.5m（长×宽×高）。根据浮箱模块的参数，平台最大允许吃水深度为 1.2m，因此理想满载排水量为 604.8t，浮箱平台自重为 161t。平台上配置运输叠梁门的电动台车和轨道系统，满足同时存放 4 节叠梁门的要求。叠梁门多功能吊装平台平面布置如图 2。

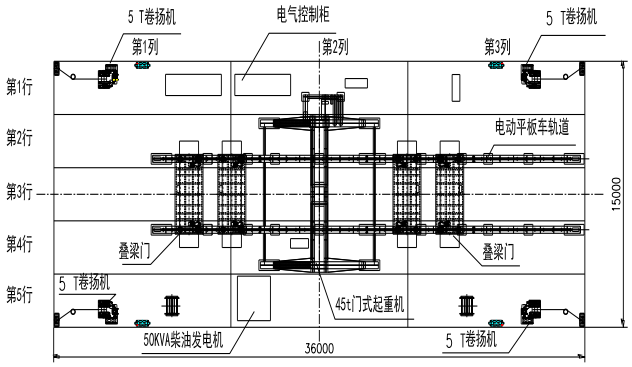


图 2 叠梁门多功能吊装平台平面布置图

叠梁门多功能吊装平台的技术参数如表 所示。

表 1 叠梁门多功能吊装平台的技术参数

序号	参数	数值
1	平台总体尺寸	36m×15m×1.5m（长×宽×高）
2	吊装设备	45t 门式起重机
3	设计起吊工件	叠梁门最大单节重量 32t，共 4 件
4	装载门节数量	4 件(总重约 108t)
5	作业环境	水上
6	风力	< 6 级
7	水域条件	内陆水库
8	流速	0.5m/s
9	适用水深	45m～120m
10	设计载重	160t
11	实际载重	112t （包括叠梁门和潜水装备）
12	浮箱自重	257t （包括台车、45t 固定门机及发电机等）
13	抓梁及液压系统	1 套
14	安装最大工件外形尺寸	5855mm×4450mm×1200mm

（2）起吊能力实现

在平台中部布置 1 台固定式的 45t 门式起重机，起重机的高度为 12.5m，最大吊深可达 140m。门式起重机吊钩中心，与平台中部预留吊物孔（第 2 列第 3 行）的中心重合，以便叠梁门吊装作业。

（3）起吊状态控制能力实现

① 抓梁自由行程和抓钩测量与指示装置。液压自动抓梁由梁体、液压穿轴装置、液压驱动装置、支承导向装置、定位装置、穿（退）轴和就位检测装置、水下快速电缆插头等部件组成。为了用抓梁的自由行程判断叠梁门吊装的状态，在抓梁上安装具有厘米级精度的红外测距系统，可测量抓梁与叠梁门顶板的距离，从而根据抓梁是否进入了自由行程段来判断叠梁门是否就位。

② 吊深和吊重指示系统。在门机的起升机构上安装扬程指示及位置控制装置、荷载指示及限制装置。扬程指示及位置控制装置是根据钢绳的行程折算吊深行程，从而校核叠梁门节所处高程。荷载检测及限制装置具有过载和欠载保护功能。运行时，当启闭荷载达到额定荷载的 90%时，发出声光报警信号；当钢丝绳拉力超过额定荷载的 10%时，自动切断电源，起升机构停止工作。吊装过程中根据门机荷重与门叶自重的关系，来判断门节是否已放至安装位。

③ 实施吊装过程控制。根据整套运输逐节吊装的方案，首先在岸边将一套 4 节装载上叠梁门多功能吊装平台，置于装载小车上；利用吊装平台的测量和锚定系统、抓梁四角系统控制，测控平台位置、叠梁门位置和姿态，保证叠梁门起吊轴线与闸槽轴线重合；缓慢下放门叶，监控吊深行程值将叠梁门放至距闸槽入口上方 500mm 高处时暂停；再次校核、调整多功能吊装平台和叠梁门姿态，复核叠梁门轴线与闸槽轴线重合；继续下放门节，直至门机荷重减小值与门节自重相当，判断

门节已放至安装位，并利用吊深行程以校核；进一步放下抓梁，同时观察液压抓梁的自由行程监控值，确认后，操作液压抓梁张开抓钩，脱开门节并提起液压抓梁。

（4）技术供应能力实现

① 平台锚定。本工程的多功能吊装平台锚定系统采用海军锚作为主锚，由海军锚、浮筒、锚链等部分组成。浮箱平台定位时，将浮箱平台四角上的 5t 卷缆机放缆，与锚链连接，完成水面多功能吊装平台与锚定系统的连接，根据测量反馈结果，通过卷缆机牵引海军锚实现对平台水面位置的快速精确调整。

② 平台精确定位。利用 GPS-RTK 粗略定位，再利用全站仪对吊装平台上的控制点进行高效高精度测量定位，可实现多功能吊装平台的厘米级高精度定位。通过电动锚定系缆动态操控吊装平台姿态，牵动吊装平台并稳定于叠梁门闸槽的正上方，使浮箱上的吊点中心与叠梁门闸槽中心线重合。工程实践说明，在收到测量结果后 5～10 min 后平台即可调整到位，其定位精度可达厘米级。

③ 电力供应。平台上布置 1 台备用 50KVa 柴油发电机，做为 4 台电动卷扬机、1 台 45t 门式起重机的电力供应。

5 多功能平台拼装

浮箱采用 15t 平板汽车单件运输，车速不超过 25km/h。浮箱和其它组件采用 120t 汽车起重机吊装。平台的浮箱模块按 3 列 5 行排列，将平台 3 列顺次编号为三组，每组 5 个浮箱（第二组 4 个浮箱），平台按照分组编号顺次拼装。

第一组浮箱组装拼装方法：利用 120t 汽车起重机将第一个浮箱吊入水中，与岸边设置的系缆柱固定后起重机松钩；再将第二个浮箱吊入水中，靠近已固定浮箱，用专用钩篙进行人工方位调整；两个浮箱完全接触后，用专用撬杠对浮箱进行人工微调；两浮箱体穿销孔完全对齐后插入连接钢销。根据受力多工况分析，对受力较集中的部位增焊钢板加强。第一组浮箱组装完成后，随即将该组上的设备（包括绞缆机、发电机、台车轨道）组装到浮箱上。

将已组装完成的第一组 5 个浮箱外推，留出第二组 4 个浮箱组装的空间后固定。按第一组浮箱组装的方式顺次组装第二组 4 个浮箱和第三组 5 个浮箱。

平台拼装完成后，再安装配置运输叠梁门的台车和轨道系统、吊装叠梁门的门机系统、平台锚定的海军锚、锚链、绞缆机系统、发电系统以及栏杆等。多功能平台及机电设备组装流程详见图 3。

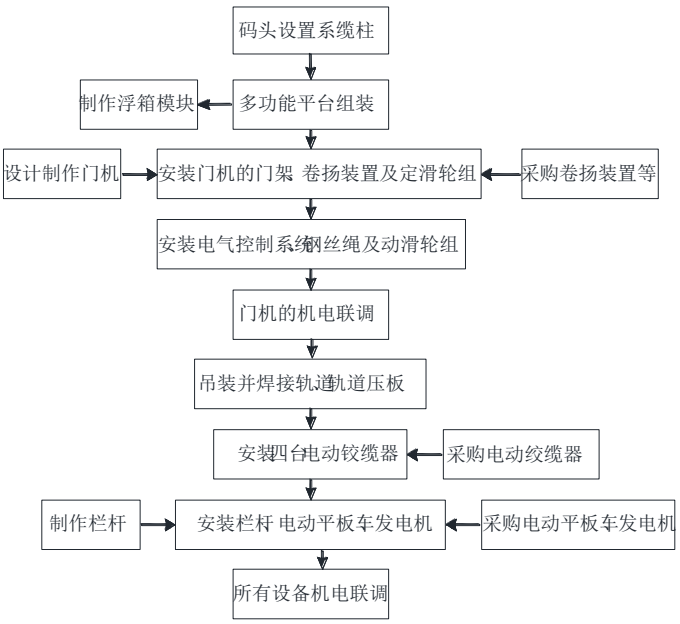


图 3 多功能平台及机电设备组装流程图

6 结语

塔贝拉库区深水下闸作业，因地制宜，巧妙采用浮箱模块拼装成多功能水上作业平台，其运输能力、起吊能力、起吊状态控制能力、锚固能力、快速定位能力、技术供应能力等多种功能均满足设计要求，很好解决了塔贝拉库区吊装施工平台难题。该平台设备轻便，可重复利用，设备造价低，经济性和实用性较强的优点，为类似工程施工提供借鉴经验。

浅析仁宗海引水隧洞绕渗检查放空及充水操作技术要求

林伊邦，熊长青

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610213）

摘　要：水库大坝的渗流渗压参数是关键技术参数，影响着大坝的安全和周围环境的安全，大坝是关乎人民利益和社会影响的重要建设项目。由于仁宗海水库大坝一直存在渗漏量偏大问题，本文就以仁宗海水库较高水位情况下对仁宗海电站引水隧洞泄放水操作，同时进行仁宗海水库大坝坝后渗水量实时监测，为确保整个放水及充水过程的安全，本文通过对仁宗海引水隧洞绕渗检查放空及充水操作技术要求的分析，以供国内同类水库大坝渗流渗压监测比较、借鉴。

关键词：绕渗检查；放空；充水；技术要求

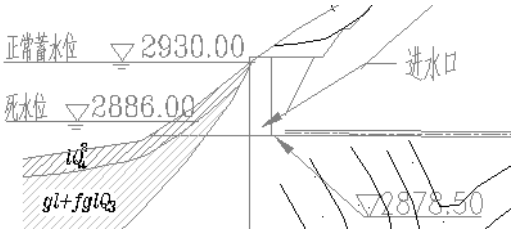
1 工程概况

田湾河发源于贡嘎山西侧，是大渡河右岸的一级支流，流经四川省甘孜州康定县和雅安市石棉县。据考证田湾河干流全长 84.5km，在干流和支流环河上各有一个天然海子，干流上为巴王海，环河上为仁宗海。田湾河最大的一级支流就是环河，占全流域面积的 28%。其上天然海子－仁宗海已建成龙头水库。

仁宗海水库电站作为田湾河一库三级梯级开发的龙头水库电站，主要由“引田入环”输水枢纽、坝区枢纽、引水系统、厂区枢纽和送出工程等组成。仁宗海水库总库容 1.12 亿 m^3，具有年调节能力；电站装设 2 台 120MW 的 6 喷嘴水斗式水轮机，最高水头 615m。通过送出工程在石棉美罗变电站并入四川电网。

2 仁宗海引水隧洞绕渗检查原因

自 2008 年仁宗海水库蓄水以来，仁宗海大坝一直存在渗漏问题，先后经历了多次专家咨询和四次灌浆处理，虽取得了一定的成果，但是大坝渗漏问题依然突出，影响着仁宗海大坝的长期安全稳定运行。为提升仁宗海大坝安全性，2018 年 9 月按照计划，实施仁宗海引水隧洞内水位降至 2876m 过程中，验证引水隧洞与坝后渗水量的相关性，期间对仁宗海大坝坝后渗水量实时监测，也为了准确找到了防渗墙与土工膜连接部位的缺陷位置，为下一步的处理提供了可靠的依据。

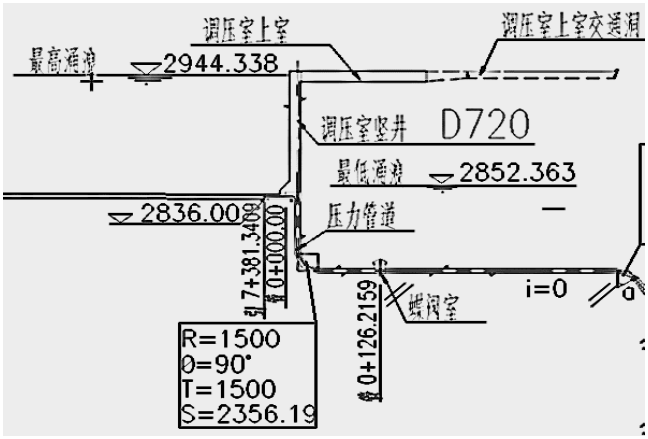


仁宗海引水隧洞进水口水位高程

3 仁宗海引水隧洞放空技术要求

由于本次引水隧洞放空工作是在仁宗海水库水位接近最高水位且不超过省防汛办要求下进行，根据中国水电顾问集团公司成都勘测设计院编制的《仁宗海水库电站工程设计运行说明书》及充、放水方案讨论会议要求，本次引水隧洞的放空主要包括：一是塔式进水口闸门井蓄水量约 590 m^3 及调压室竖井上段（高程 2928m 至 2883m）蓄水量约 1910 m^3；二是引水隧洞放水至 2876m，蓄水量约 1.7 万 m^3。因引水隧洞较长，沿程未设置放水孔，又需要维持 2876m 高程，故放水分三阶段进行，一是闸门井和调压室竖井上段采用机组停机，通过喷针排水的方式进行排水，排水前需全关引水隧洞进水口工作闸门，控制水位下降速度约 1.5m/h。二是引水隧洞部分段利用机组带负荷 5MW 至 10MW 左右，控制水位下降速度约 1.5m/h。三是放水至引水隧洞 2876m 高程时，将机组停机，

开喷针进行排水（根据洞内渗水量及现场实际情况），维持在此水位，以便实施对仁宗海大坝坝后渗水量的监测。



调压井竖井位置、尺寸、高程

3.1 闸门井及调压室竖井上段放空

仁宗海电站两台机组停机解列，全关引水隧洞进水口工作闸门，保持引水隧洞进水口检修闸门全开。机组利用喷针排水模式，手动调整喷针开度，泄放调压室竖井上段水体（高程 2928.00m 至 2883.00m，监控系统球阀前端压力约在 5.91MPa 至 5.48MPa），根据渗漏水量适当控制泄放速度，保持水位下降速度 1.5m/h，泄放流量约 1.03m³ /s 左右（含洞内渗水），此过程大约 30h 左右。

根据《仁宗海水库电站工程设计运行说明书》，为确保水工建筑物安全，放空时闸门井及竖井水位控制按每小时下降 5m，保持 3h 的原则，放空时间不少于 30h。因该段主要考虑隧洞内外压平衡，不可骤降，以免对隧洞造成破坏。本次闸门井及竖井水位下降速度控制在 1.5m/h 左右。闸门井及竖井储水体积通过计算得出，此过程对应泄放流量为 Q 渗（洞内渗水量）+0.03m³ /s。

实际放水过程中，因该阶段流量的变化对水位下降速度的影响非常大，适时调整喷针开度的难度较大，本次从初期到后期喷针开度不断加大过程，由单喷针开度约 6%逐步加大至双喷针 7.5%。实际放水时，可以采取略快放水一段时间，再减慢直至保障水位不变的方式，保障总体水位下降速度。

3.2 引水隧洞部分分段放空

当进水口闸门井水体泄放完成后，开始泄放引水隧洞（高程 2883.00M 至 2876.00M）部分水体，利用机组带负荷 5MW 至 10MW 左右，泄放流量约 3 .0m³ /s（控制水位下降速度约 1.5m/h），放水至引水隧洞至 2876m 高程时（监控系统球阀前端压力约在 5.42MPa 左右），调整机组喷针开度（根据洞内渗水量），维持在此水位，此过程约需 4.7h 左右。

原则上，泄放流量=Q 渗+1.5 m³ /s（由于洞内渗水量随水位下降而增大，可以逐渐加大开度），同时应控制洞内放水速度在 1.5m/h。

由于放空引水隧洞时，要求水位下降约 1.5m/h，加上该段储水量相对较大，采用机组带负荷的方式进行放空。通过近似计算，每小时放水 1.5m 约 5700m³ 水，折算为流量约 1.58m³ /s 左右，可带负荷 P= （Q 渗+ 1.58m³ /s）/1.97（因水头下降，计算时，耗水率可取值大于 1.97），因初段及末端水量略小，且渗漏量逐渐加大，故机组带小负荷负荷采取逐渐增加的方式。

对应高程数据计算：

对应高程=（球阀前端压力+压力修正值）*103.36+2320.5

其中压力修正值=（初始高程实测-2320.5）/103.36-初始压力实测，103.36m 为 1MPa 压力对应水头。

3.3 保持水位在 2876m 的高程

当水位下降到达 2876m 的高程后，将机组解列，采用喷针排水模式，手动调整喷针开度维持该水位，此过程约需 10h 左右。

2018 年 9 月仁宗海绕渗检查引水系统放空记录表						
放水阶段	高程 m	蓄水量 m^3	水压 MPa	流量 m^3/s	时间 h	喷针开度%
第一阶段	2928-2883	2500	5.9-5.48	0.5-0.92	30.4	单喷针 6.1-双喷针 7.5
第二阶段	2883-2876	1.7 万	5.48-5.42	0.62-2.45	3.5	双喷针 14.1-15.4
第三阶段	维持 2876	17.4 万	5.42	1.5-1.9	10	双喷针 7.5-22.5

3.4 放空期间注意事项

严格按照规定控制放水速度：以机组超声波流量计为主监视泄放流量，根据泄放流量，调整机组负荷，控制水位下降速度。引水隧洞的水量与隧洞高程差大致成线性关系，放水初期，应估计好洞内渗水情况，控制水位下降速度。

应实时监视球阀前端水压及配水环管水压。排水开始前，记录当前球阀前端水压及配水环管水压，参照理论计算值，进行数据修正。每 30min 记录球阀前端水压及配水环管水压、机组超声波流量及负荷，且水压每下降 0.1MPa（即水位每下降 10m），记录一次时间点。

应考虑到表计误差、读数误差、沿程水头损失。放水初期，安排人员在塔式进水口平台利用卷尺或绳子直接测量水位下降高度，测算水位下降速度和渗水量，以便后期调整控制放水速度。

4 仁宗海引水隧洞充水技术要求

隧洞充水时的水位上升速度应分两阶段控制：一是 2876.00m 至 2883.00m 高程段约 3.5m/h，对应充水流量约为 5.0 m^3/s（无压充水）；二是 2883.00m 高程以上（调压室段）约 5m/min，对应充水流量约为 3.4 m^3/s。

4.1 引水隧洞充水

仁宗海电站机组停机，所有喷针保持关闭状态，将仁宗海水库隧洞进水口工作闸门提至 5～10cm 对引水隧洞（2876.00m 至 2883.00m 段）充水，充水速度控制在约 3.5m/h，应注意闸门振动情况，监视球阀前端压力约在 5.42 至 5.48MPa 之间，此过程约 2h。

4.2 闸门井及调压室竖井上段充水

当引水水洞充水至 2883m 时，控制仁宗海水库隧洞进水口工作闸门开度 5cm 内对调压室竖井上段充水，充水速度控制在约 5m/min，监视球阀前端压力约在 5.48 至 5.91MPa 之间，此过程约 10min 左右。

竖井段充水因水位上升较快，进水口工作闸门处压差会急剧降低，宜不断加大开度，控制充水速度。在竖井充水的末端，水位上升不明显时，建议仍点动闸门提升 1 至 2 次，确认水位不再继续上升后，再进行闸门全开的操作。

2018 年 9 月仁宗海绕渗检查引水系统充水记录表						
充水阶段	高程 m	蓄水量 m^3	水压 MPa	流量 m^3/s	时间 h	闸门开度 cm
第一阶段	2876-2883	1.7 万	5.42-5.48	4.1-5.5	2.2	5-10
第二阶段	2883-2928	2500	5.48-5.9	3.2-3.4	0.68	5

4.3 充水期间注意事项

应根据充水时的实际库水位及隧洞内渗水流量，调节进口闸门开度，防止隧洞水位上升过快。

充水过程中操作闸门的时候，监视钢丝绳、闸门的提升情况，万一异常，停止操作，如果在水库高水位情况下，工作闸门在小开度充水流量仍大于充水要求时，把工作门和检修门全关，提前检修门充水阀，再利用工作门小开度充水。

充水期间现场安排人员监视球阀控制柜上压力钢管水压，每 30 分钟记录球阀控制柜上压力钢管水压，判断隧洞水位上升是否过快。

5 结语

在水库水位较高的情况下，引水隧洞进行放空和充水操作，控制难度高，且一旦失控，对水工建筑的影响大，是一项风险较高的操作。整个放空和充水过程应该按照技术要求进行，严格控制放空流量、充水流量以及隧洞水位控制要求，做到严格按方案实施，不能操之过急。在充水结束后，应安排人员对放空段引水隧洞的巡查，以确认未对水工建筑造成破坏。

参考文献：

[1] 王军，李俊，黄金坪水电站右岸厂区蓄水后渗流渗压监测成果分析 [J].四川水力发电,2017,36（05）：92-95.

[2] 刘建坤，由广昊，马林艳.长河坝大坝施工期安全监测成果分析[J].水力发电，2016，42（10）：57-61.

典型重力坝加固方案坝基稳定模型试验与有限元分析

段　斌[1]，张　林[2]，何江达[2]，陈　媛[2]，陈建叶[2]

（1.国电大渡河流域水电开发有限公司　四川 成都　610041；2.四川大学　四川 成都　610065）

摘　要：某重力坝坝基中次级断层破碎带和层间错动带等软弱结构面发育，断层与错动带相互交错。针对某重力坝地质条件极其复杂的特点，试验研制出适合工程地质条件的模型材料，建立了典型坝段坝基的地质力学试验模型和三维非线形有限元计算模型。采用地质力学模型综合法试验和三维有限元计算方法研究某重力坝加固方案的坝基稳定问题，两种方法得出 16#～19#坝段的综合安全系数 Kc 分别为 3.6～4.8 和 3.8～5.4，两种研究方法的结果基本一致。同时，试验和计算研究成果表明，坝基加固处理后，坝基整体刚度和承载能力得到提高，坝与地基的变形明显减小，稳定安全系数显著提高，为坝基抗滑稳定安全性评价和加固设计提供了科学依据。

关键词：重力坝；坝基稳定；加固方案；地质力学模型试验；变温相似材料；有限元法

1 引言

重力坝主要依靠其自身的重力来维持稳定，其坝体体积大，稳定性总体较好。但据统计，在有记载的重力坝失事案例中，40%是由于坝基失稳所致[1]，因此坝基稳定问题是影响重力坝安全的关键问题之一。由于坝基中存在断层、节理、裂隙和软弱夹层等地质缺陷，这些软弱结构面一方面可能形成坝基中的滑移通道，形成失稳破坏；另一方面，由于水流的长期作用可能导致这些软弱结构面的强度弱化，对坝基稳定产生不利影响。因此，如何科学、准确地对坝基稳定性作出评价，并提出合理的处理措施对工程具有十分重要的技术经济意义。

重力坝坝基稳定问题的研究方法主要有刚体极限平衡法、数值分析法、模型试验法等。地质力学模型试验法是目前研究坝与地基稳定性问题的有效方法，它主要研究岩体的断层、破碎带、软弱夹层、裂隙节理等不连续构造对结构的应力分布和变形状态的影响，分析坝基稳定性。近年来，这种试验方法有了很大进展，特别是在模型材料方面研制出能够模拟岩体及软弱结构面力学参数变化的变温相似材料，促进了模型试验的突破性发展。同时，随着空间有限元理论和计算机技术的日益进步，使得对地质条件复杂的重力坝进行整体稳定的三维有限元仿真分析成为可能。以三维有限元仿真为基础的数值分析法能够模拟多种工况和方案，较方便地施加荷载，迅速计算出应力和变形，便于坝基稳定安全系数的计算。因此，对大中型水利水电工程，数值分析和模型试验相结合的研究方法可以从不同角度全面分析坝基的稳定，从而相互验证，互为补充。

作为本文研究对象的某重力坝工程，其坝基地质条件相当复杂，次级断层破碎带和层间错动带等软弱结构面发育，断层与错动带相互交错，形成多条滑移组合，坝基岩体变模较低，加之断层与错动带切割，使得坝基的整体性进一步削弱。针对设计拟定的坝基加固处理方案，采用超载与强降相结合的综合法进行破坏试验，同时采用三维非线性有限元法进行数值计算，研究坝与坝基的变形特性、破坏机理和安全系数，综合评价工程的安全性和加固效果，为坝基抗滑稳定安全性评价和加固设计提供科学依据。

2 工程概况及地质情况

2.1 工程概况

该工程水库总库容 5.72 亿 m^3，电站装机容量 150 MW。水库枢纽大坝采用最大坝高 119.14m 的碾压混凝土重力坝，共分为 30 个坝段。

2.2 坝区地质构造

坝区地质构造结构面按规模可分为五个等级：第一级构造为 F5、F7、F11 断裂；第二级构造为

F31 断层；第三级构造为 F58、F63、10f2、f20、f26、f27、f101、f113、f114、f115 断层；第四级构造为层间错动带右 JC6-B、右 JC7-B、JC21-C、左 JC2-C 等；第五级构造为陡、缓倾角的节理裂隙。以 16#坝段为例，天然地基中的地质构造概化情况见图 1。

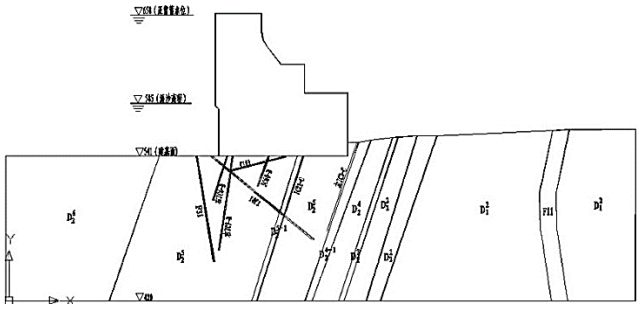


图 1　16＃坝段横剖面地质结构概化图

2.3 岩体及软弱夹层物理力学参数

坝基岩体及软弱夹层及其物理力学参数见表 1。

表 1　岩体及软弱夹层物理力学参数表

岩体	容重（g/cm³）	变形模量（GPa）	泊桑比	抗剪断强度	
				f′	C′（MPa）
D_2^5、D_2^7	2.81	6.5～10	0.25	1.0～1.2	1.0～1.1
D_2^4、D_2^6、D_2^8、D_2^{5-5}	2.70	7.0	0.23	1.0～1.2	1.0～1.1
D_2^2 、D_2^{5-6}	2.65	2.65	0.3	0.65	0.45
D_2^1、D_2^3、D_2^{4-1}、D_2^{4-1}	2.72	5.5	0.22	0.9	0.9～1.0
D_1	2.72	7.0	0.23	1.0～1.2	1.0～1.1
D_2^{5-1}	2.78	6.0	0.24	1.0	1.0
f114、10f2	1.65	0.05～0.1	0.40	0.55	0.1
其它断层破碎带	1.76	0.1～0.3	0.40	0.45	0.06
JC-B	1.8	0.1～0.2	0.40	0.40	0.15
JC-C	1.65	0.05～0.1	0.42	0.37	0.02
混凝土	2.40	20	0.16	1.2	1.1

2.4 坝基加固方案

由于坝基岩体中存在的断层、层间错动带等多种地质构造缺陷是影响坝基抗滑稳定、坝基岩体不均匀变形的主要工程地质问题，应重点对这些不利地质构造采取加固处理措施，通过多方案论证，设计采用了以置换混凝土塞为主的加固处理方案，对影响坝基稳定的主要断层进行开挖置换。以 16#坝段为例，其坝基加固方案见图 2。

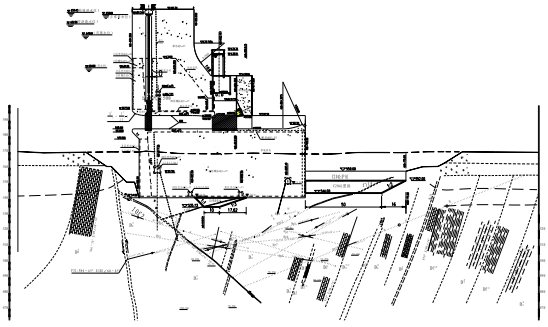


图 2　16＃坝段坝基加固方案图

3　地质力学模型与有限元模型

3.1 地质力学模型简介

根据工程特点、地基特性及设计要求，经综合分析，某碾压混凝土重力坝三维地质力学模型试验几何比 C_L＝150，模型模拟的范围为：横河向范围为 16#、17#、18#、19#坝段，共 95m；上游范围取 1.5 倍坝高，下游范围取 2 倍坝高；坝基模拟深度取 1.0 倍坝高。由此确定出模型尺寸为 3.55m×0.63m×0.8m（纵向×横向×高度）。地质力学模型见图 3。



图 3　地质力学模型图

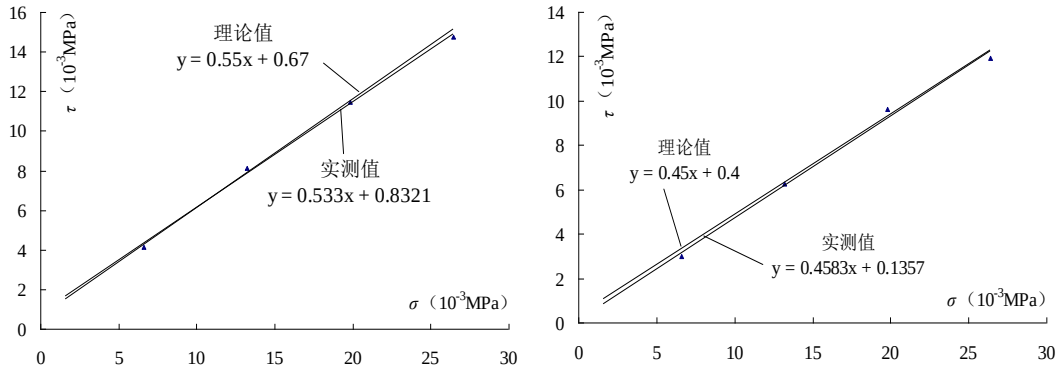
试验荷载组合：水压力+淤沙压力+扬压力+自重。试验采用油压千斤顶加载，所用千斤顶数量由荷载分布及其分块计算确定。由于坝基中存在断层 10f2、f114、f115、f101、F31 等控制坝基稳定的地质构造，在各坝段典型剖面上的断层及其出露处布置了内外变位测点，重点监测这些部位的变位情况。此外，在重力坝坝体的下游测和两外侧布置了变位和应变测点，测试在破坏试验过程中坝体变位和应变的变化情况。

试验过程和方法：采用综合法进行模型试验，首先对模型进行预压，然后将荷载加至一倍正常荷载，在此基础上进行强度储备阶段试验，即降低断层抗剪断强度 15%～20%，之后再进行超载阶段的试验，将水荷载以 0.2P0～0.3P0 的步长进行增大，直至坝基破坏失稳为止。

3.2 地质力学模型材料

3.2.1 断层变温相似材料

为了能在物理模型中模拟岩体及软弱结构面强度弱化的力学行为，本文采用四川大学水利水电学院水工结构研究室研制出的一种新型地质力学模型材料—变温相似材料。用这种材料来制作模型可以在一个模型上进行强储法和综合法试验。变温相似材料首先在常温状态下与原型材料的力学参数满足相似关系，在升温过程中，模型材料的抗剪断强度会随着温度的升高而逐步降低，并与原型的力学特性仍然保持相似关系。

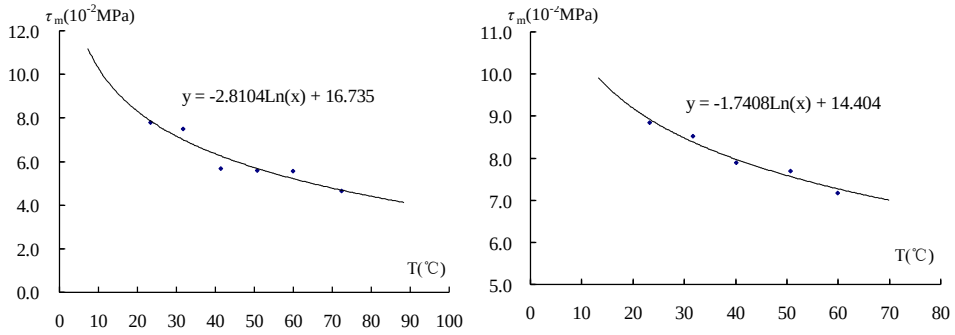


A 材料　　B 材料

图 4　某重力坝断层模型材料抗剪断强度曲线

断层 10f2、f114 的抗剪断强度参数 f 'p = 0.55，　c'p= 0.1 MPa；断层 F31、f101、f115 的抗剪断

强度参数 f 'p= 0.45，c'p= 0.06 MPa 。依据模型的相似关系：Cf=1，Cγ=1, CL=150，Cc＝C σ ＝Cγ·CL＝150 则模型中断层 10f2 、f114 的抗剪断强度参数 f 'm= 0.55，c'm= 0.00067 MPa；断层 F31、f101、f115 的抗剪断强度参数 f 'm = 0.45，c'm = 0.0004 MPa。将模拟断层 10f2、f114 的模型材料称为 A 变温相似材料，模拟断层 F31、f101、f115 的模型材料称为 B 变温相似材料。通过材料性能试验研究，首先按力学指标配制相应的混合料备用，并选定不同夹层薄膜以满足常温下的抗剪断强度相似条件，抗剪断强度按 c－φ 综合效应模拟，进行抗剪试验测得断层材料在常温温下的抗剪断强度曲线，见图 4。然后在选定材料和夹膜的基础上做变温材料试验，得出不同温度条件下的抗剪断强度 τ m～T 关系曲线，见图 5。



A 材料　　B 材料

图 5 某重力坝断层变温相似材料的 τ m～T 关系曲线

3.2.2 其它部位的模型材料

根据坝体材料、坝址区各类岩体和主要结构面的物理力学参数，按相似关系换算得到各类模型材料的物理力学参数，并研制出相应的各种材料配比，分别研制了坝体、岩体、置换混凝土、回填渣等材料的模型材料，进行模型材料选配和模型制作。

3.3 三维非线性有限元计算模型

参照模型试验，对 16#、17#、18#、19#坝段建立三维有限元计算模型。坝体及坝基岩体采用空间 8 节点等参实体单元模拟，坝体建基面及坝基各类结构面采用接触面单元或夹层单元模拟，三维有限元计算的模拟范围、荷载情况与模型试验一致。计算时采用弹塑性本构模型和 Drucker-Prager 准则，计算程序采用四川大学水利水电学院岩土工程试验室三维静动力非线性有限元分析程序。16#坝段的三维有限元网格图见图 6。

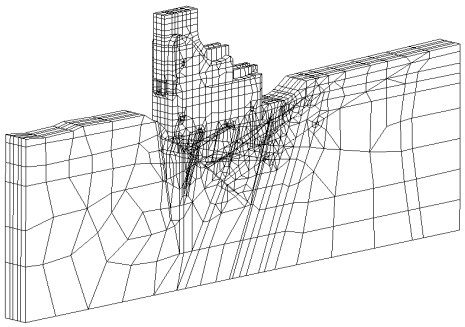


图 6　16#坝段三维有限元网格图

4　模型试验与有限元计算分析

4.1 模型试验破坏过程及形态

根据试验现场观测记录、坝体与基岩的外部变位、断层的内部相对变位等试验结果综合分析，其破坏过程可归纳为如下特征：

（1）在正常运行工况及主要断层强降 15％～20％时，坝与地基处于正常工作状态，坝与地基的表面变位值及断层结构面上的相对变位值均较小，未出现开裂现象。

（2）强降后超载至 1.4 P0～1.6 P0 时，断层 F31、10f2 最先在 16＃坝段的坝踵处发生初裂，出现微裂纹。随着超载倍数的增加，裂纹扩展，并向 17＃、18＃坝段延伸。

（3）当超载至 2.3 P0～2.6 P0 时，变位曲线出现拐点，测点变位值开始明显增大，岩体开始出现较大的变位。坝踵处的基岩出现拉裂破坏，坝趾处的基岩出现压裂破坏。

（4）当超载至 3.0 P0～3.3 P0 时，变位曲线的增幅显著加大，断层 f101、f114 开裂，加固处理部位的 F31、10f2 也开始出现裂纹。

（5）当超载至 4.0 P0～4.6 P0 时，坝踵基岩破坏严重，坝趾附近、护坦下部和尾部岩体出现破坏，建基面下部岩体沿节理裂隙开裂贯通，从而出现坝踵、坝趾及建基面下部岩体破坏，裂缝相互连通，形成整体破坏失稳趋势。

通过破坏试验，模型的破坏主要发生在坝踵、坝趾、软弱结构面及建基面下部岩体等区域。坝踵、坝趾处的基岩破坏较严重。在 16#坝段，断层 10f2 与 f101 的裂纹虽已贯通，但受坝基中部混凝土加固塞的作用，裂纹未扩展至坝基面，其破坏形态见图 7。

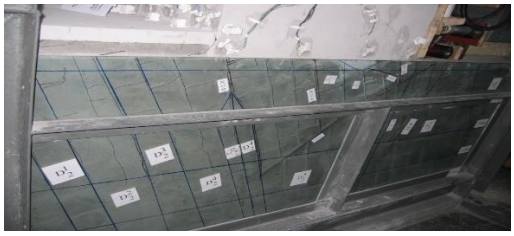


图 7　模型 16＃坝段外侧的破坏形态图

4.2 模型试验综合安全系数分析

重力坝坝基深层抗滑稳定安全度 Kp 的评价主要根据试验得到的坝体变位、坝体建基面应变、下游护坦及基岩表面变位、软弱结构面的相对变位等试验数据综合评定。

4.2.1 坝基内断层各测点的相对位移

模型试验反映出，在正常运行工况下，坝体总体发生向下游的顺河向变位，最大顺河向变位发生在坝顶处。16＃～19＃坝段坝顶处的顺河向变位分别为 1.95cm，2.4cm，2.1cm，2.85cm（原型值），而未加固坝基的最大顺河向变位相应值分别为 3.0cm，3.2cm，3.3cm，4.2cm，可知坝体变形得到明显降低，坝与地基的整体刚度得到提高。在超载过程中，变位逐步增大，同时发生坝踵向上、坝趾向下的不均匀竖直向变位。

4.2.2 坝体建基面应变分布特征

由于坝与地基的联合作用，当坝与地基的变位发生波动时，坝体应变会产生相应的变化，应变关系曲线可作为判定坝基稳定安全度的一个依据。通过模型试验测出，各坝段测点应变值总体在 Kp＝1.4～1.6、Kp＝2.3～2.6 出现明显转折或波动，特别是在 Kp＝3.0～3.3.处应变曲线出现较大的波动。其中 16#坝段坝体外侧建基面应变 με-KP 关系曲线见图 8，图中应变值为原型值，单位为 μm。

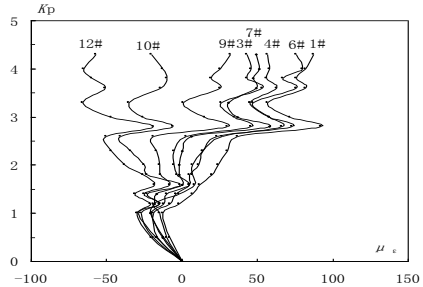
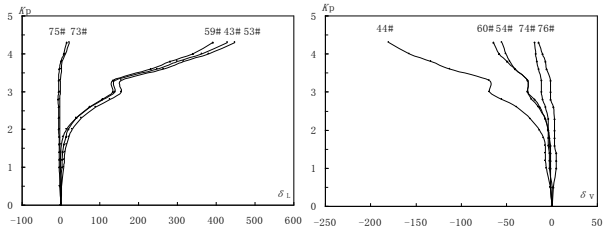


图 8　16＃坝段坝体外侧建基面应变 με-KP 关系曲线图

4.2.3 下游护坦及基岩表面变位分布特征

从试验数据中分析，在正常运行工况下，下游坝基面变位值较小，变位值随着超载倍数的增加而逐渐增大，坝趾处的变位较大，测点变位值向下游逐步递减。基岩总体发生了向下游的顺河向变位和竖直向的沉降变位，顺河向变位相对于竖直向变位较大。本文给出了 16#坝段基岩表面变位曲线，见图 9，图中变位值为原型变位值，单位为 mm，其中顺河向变位向下游为正，竖直向变位向上为正。从变位曲线图中还可以看出，由于下游布置有置换混凝土，下游坝基得到加固。



（a）顺河向变位　　（b）竖直向变位

图 9　16＃坝段基岩表面变位曲线图

4.2.4 软弱结构面的相对变位特征

本文给出了断层 F31 中测点相对变位，见图 10，图中相对变位值为原型值，单位为 mm，方向以断层上盘岩体向下滑为正。分析试验数据可知，在正常运行工况下，断层的相对变位较小；随着超载倍数的增加相对变位值逐步增大。倾向下游的断层 F31、10f2 在未加固处理部位（5、7、9 测点）产生的变位较大，在加固处理部位产生的变位（10 测点）较小。当超载至 2.3 P0～2.6 P0 时，F31、10f2 的变位曲线出现明显的拐点和转折；超载至 3.0 P0～3.3 P0 时，变位曲线增幅显著增大；超载至 4.0 P0～4.3 P0 时，坝与地基发生大变形，呈现出破坏失稳趋势。

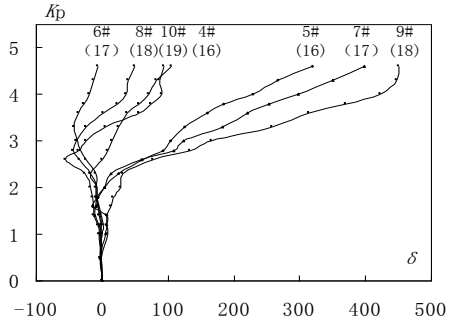


图 10　断层 F31 测点相对变位曲线图

4.2.5 综合安全系数评价

试验中，当加载至正常运行工况后，通过变温相似材料，将主要断层的抗剪断强度降低 15％～20％（即强降系数 K_1＝1.2），再超载至 3.0P_0～4.0P_0（即超载系数 K_2＝3.0～4.0）时，变位幅度明显增大，经过本文 4.2.1～4.2.4 的分析，坝与地基相继发生大变形，出现破坏失稳趋势。由试验成果综合分析可知，某重力坝 16＃～19＃坝段加固处理方案的综合稳定安全度 K_C 为：

$$K_C = K_1 \times K_2 = 1.2 \times （3.0 \sim 4.0） = 3.6 \sim 4.8$$

根据对天然地基的破坏试验研究结果，未加固坝基的超载安全度为 Kp＝2.0～3.0。显然加固处理后的坝基安全度得到了较大提高，加固措施作用明显。

4.3 坝基抗滑稳定有限元分析

通过三维有限元计算，得到加固前后正常运行工况坝基可能组合滑移面的抗滑安全系数，见表 2。可以看出，加固方案对坝基中断层、溶蚀带、层间挤压带等控制性结构面的处理，增加了坝基的整体刚度和承载能力，也使得坝基中可能组合滑移面的抗滑安全系数大幅提高，均达到了规范要求的 3.00 标准，这表明坝基加固措施是十分有效的。

表 2 坝基加固前后组合滑移面稳定性对比表

坝段	未加固坝基				加固坝基			
	组合滑移面数	未达标滑移面数	所占比例(%)	最低安全系数	组合滑移面数	未达标滑移面数	所占比例(%)	最低安全系数
16#	17	2	11.76	2.78	17	0	0	3.08
17#	15	5	33.33	2.35	15	0	0	3.14
18#	12	2	16.67	1.93	12	0	0	3.36
19#	16	5	31.25	1.97	16	0	0	3.15

4.4 综合安全系数有限元对比分析

三维非线性有限元计算模拟了模型试验降强、超载过程，计算工况与模型试验相同，即正常蓄水位+淤沙+扬压力+自重，其中扬压力按等效荷载考虑。当加载至正常运行工况后，降低断层的抗剪断强度至 83%（即强降系数 K_1=1.2），研究坝与地基在正常运行状态下的工作性态及强降后的超载特性。以 16＃坝段为例，按超载 Kp＝2.0，3.0，3.5，4.0 倍正常上游水载时，坝基破坏演变过程见图 11，分析可知：

（1）超载系数 K_2=2.0 时，坝踵处塑性区沿断层 10f2 进一步向坝基深部发展，坝趾处破坏区有所扩大，下游混凝土抗力体下部岩体 D_2^3 出现塑性破坏。

（2）超载系数 K_2=3.0 时，坝踵处塑性区沿断层 F31 向深部贯穿，坝趾处塑性区沿坝基面向上游扩展，下游塑性区进一步扩大，错动带 JC21-B 上有塑性区生成。

（3）超载系数 K_2=3.5 时，各塑性区进一步向坝基深部扩展，下游塑性区与坝趾处塑性区相互连通。

（4）超载系数 K_2=4.0 时，坝踵处塑性进一步向下游和深部发展，破坏区沿坝基面从上游至下游贯通整个坝基，并且坝趾下游混凝土抗力体下部岩体出现大面积塑性破坏，坝基失去稳定性。此时，由于在坝基中部布置有一个混凝土塞，断层 f101 上的塑性区未沿结构面贯穿，混凝土塞起到一定加固作用。

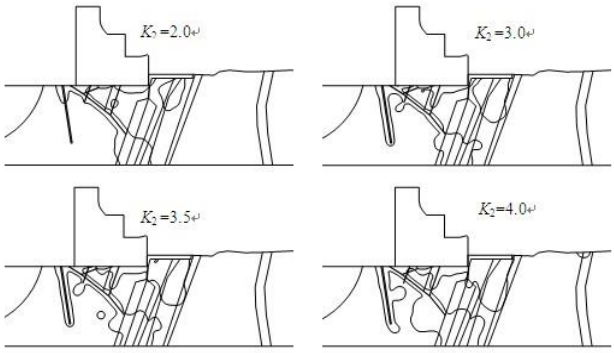


图 11　16#坝段塑性破坏过程图

综合分析超载过程坝基破坏区随 Kp 的发展演化规律，可以认为 16#坝段的坝基稳定超载安全系数 K_2＝4.0，综合稳定安全度 K_C＝K_1×K_2＝1.2×4.0=4.8。同理可得出，17＃～19＃坝段的坝基稳定超载安全系数分别为 4.2、4.5、3.3，综合安全系数分别为 5.04、5.40、3.96。由此可知，三维非线形有限元计算出的综合安全系数与模型试验成果基本吻合。

5　结论及建议

5.1 针对某重力坝坝基加固方案，采用地质力学模型综合法试验获得了坝与地基的破坏过程、破坏形态和破坏机理，得出 16#～19#坝段的综合安全系数 Kc 为 3.6～4.8；采用三维非线性有限元法研究坝基加固方案某重力坝的坝基稳定性，得出 16#～19#坝段的综合安全系数 K_c 分别为 4.80、5.04、5.40、3.96。

5.2 地质力学模型综合法试验与三维非线形有限元计算研究表明，坝基加固处理效果明显。坝基加固处理后，某重力坝 16#～19#坝段的坝基整体刚度和承载能力得到提高，与天然坝基条件相比较，坝与地基变形明显减小，稳定安全系数显著提高，置换混凝土塞能有效减小断层的起裂、扩展和滑移通道的形成，说明以置换混凝土塞为主的加固处理措施能有效改善坝与地基的工作性态和提高坝与地基的稳定性。

5.3 在进行某重力坝坝基稳定分析时，地质力学模型试验与三维非线性有限元方法分别从模型试验和数值计算两个角度进行研究，得出的规律基本一致，两种方法各有特点，可以相互验证。特别对于地质条件复杂的重力坝坝基稳定问题，为了全面分析论证重大工程技术问题，将试验与计算紧密结合起来进行综合分析是十分必要的。

参考文献：

[1] 高大钊.岩土工程的回顾与前瞻[M].北京：人民交通出版社，2001.

[2] 吴媚玲.水工建筑物.北京：清华大学出版社，1991.

[3] 张伯艳，陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝基抗震稳定[J]. 岩石力学与工程学报. 2001，20（5），665－670.

[4] Zienkiewicz O C.: The Finite Element Method.3rd.ed. London: McGraw-Hill, 1997.

[5] Bathe K J and Wilson E.L.: Numerical methods in Finite Element Analysis. Prentice～Hall, Inc., 1976.

[6] Kumsar H.,Aydan O.,Ulusay.R.: Dynamic and Stability Assessment of Rock Slope against wedge failures. Rock Mechanics and Rock Engineering.2000.33(1),31－35.

[7] 李朝国，张林. 右江百色 RCC 重力坝坝基稳定三维地质力学模型试验研究. 红水河. 1997，16（2）.1－6.

[8] 张　林，费文平，李桂林等.高拱坝坝肩坝基整体稳定地质力学模型试验研究. 岩石力学与工程学报. 2005，24（19）：3465－3469.

[9] 董建华，谢和平，张　林，等. 大岗山双曲拱坝整体稳定三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2007，26(10)：2027－2033.

[10] 张　林，刘小强，陈建叶，等. 复杂地质条件下拱坝坝肩稳定地质力学模型试验研究[J].四川大学学报（工程科学版），2004，36（6）：1－5.

[11] CHEN Y， ZHANG L， HE X S，et al. Evaluation of model similarity of induced joints in a high RCC arch dam[C]// Physical Modelling in Geotechnics—6th ICPMG. [S. l.]：[s. n.]，2006：413－417.

[12] HE X S，ZHANG L，CHEN Y，et al.Stability study of abutment of Jinping-I arch dam by geomechanical model test[C]// Physical Modelling in Geotechnics—6th ICPMG. [S. l.]：[s. n.]，2006：421－423.

[13] 陈建叶，张 林，陈 媛等.某碾压混凝土重力坝深层抗滑稳定破坏试验研究[J].岩石力学与工程学报，2007，26(10)：2097－2103.

[14] 沈 泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报，2001，18(5)：32－36.

[15] 马芳平，李仲奎，罗光福. NIOS 相似材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报，2004，23（1）：48-51

[16] Nasim Uddin. A dynamic analysis procedure for concrete-faced rockfill dams subjected to strong seismic excitation [J]. Computer and Structure，1999，72：409- 421

[17] W. von Grabe，H.Tworuschka. An interface algorithm for nonlinear reliability analysis of reinforced concrete structures using ADINA [J]. Computers and Structures，1997，64：949-958

[18] M. Mao，C. A. Taylort. Nonlinear seismic cracking analysis of medium-height concrete gravity dam [J]. Computers and Structures，1997，64：1197-1204

多种水下混凝土在铜街子电站消力塘水下修补中的应用

石清文

（国电大渡河公司龚嘴水力发电总厂，四川 乐山 614900）

摘　要：鉴于铜街子水电站在运行过程中受高速水流的冲刷影响，消能塘前池和消力坎顶部及坎后均出现不同程度的破坏，需要对上述缺陷进行处理。经现场检测，消能塘底板最大冲坑深度 0.70m，最小冲坑深度 0.12m。原消能塘底板厚度在 7m 以上。现已实施的一期施工主要采用水下不扩散混凝土进行修补，同时选取 3 处实验块分别使用水下不扩散混凝土、水下聚合物混凝土、水下自护混凝土进行实验，为二期施工方案材料选定提供依据。

关键词：水下不扩散混凝土；水下聚合物混凝土；水下自护混凝土；消力塘

1 前言

铜街子水电站（以下简称铜站）位于大渡河下游四川省乐山市沙湾区境内，距龚嘴水电站（以下简称龚站）33.0km，是龚嘴电站的反调节电站，是一座以发电为主，兼有漂木和改善下游通航效益的二等大（2）型水利枢纽工程。电站原装机容量 600MW（2016 年机组增容改造完成后为 700 MW），保证出力 137.7MW，多年平均年发电量 32.36 亿 kW•h。大坝主坝为混凝土重力坝，最大坝高 82.0m。主要水工建筑物为 2 级，次要水工建筑物为 3 级。水电站泄水建筑物包括 1#、2#、3#、4#、5#溢洪道及左右两个冲砂底孔。1～5#溢洪道下游侧与消能塘相连，溢洪道消能方式为底流消能。消能塘由前池、消力坎、后池及齿墙等组成。电站在运行过程中受高速水流的冲刷影响，消能塘前池和消力坎顶部及坎后均出现不同程度的破坏，根据铜街子大坝第三次定期安全检查专家组意见：需要对上述缺陷进行处理。

2 缺陷检查及分析

2.1 缺陷检查

消能塘范围内，主要发现 3 处混凝土缺陷，其中 2 处位于消能塘底板、1 处位于消力坎。

缺陷 1：消能塘前池底板存在具有一定规模的局部混凝土损伤，顺水流向近似呈椭圆形，长轴长度约为 70m，短轴长度约为 35m，淘蚀范围：介于（坝横）0+080.0 至（坝横）0+150.0 之间，（坝纵）0+270.0 至（坝纵）0+305.0 之间，周缘淘蚀平均深度约为 0.3m，最大深度约为 0.7m，结合水下无人潜航器摄像成果及潜水员水下复核情况，查明该淘蚀区底部普遍存在薄层泥沙附着，厚度约 2cm，并伴随有骨料出露、钢筋裸露的现象，裸露长度约 2m~4m；淘蚀区中部实测高程与设计高程 EL.420.0m 基本一致，未见明显淘蚀现象。

缺陷 2：消力坎存在局部混凝土损伤，损伤部位包含消力坎迎水面与消力坎顶面结合部位、消力坎顶面、消力坎背水面以及消力坎背水面与底板结合部位，坝横方向里程介于（坝横）0+157.5 至（坝横）0+169.0 之间，坝纵方向里程介于（坝纵）0+296.5 至（坝纵）0+338.5 之间。

消力坎迎水面与消力坎顶面结合部位存在钢筋裸露现象，转角部位近似呈圆弧状，钢筋裸露高度由消力坎顶面 EL426.0m 沿消力坎迎水面向下延伸约 0.7m。消力坎顶面存在钢筋裸露现象，混凝土损伤顺水流向宽度约 3m，深度约 0.25m。消力坎背水面存在钢筋裸露现象，钢筋裸露高度由消力坎顶面 EL.426.0m 沿消力坎背水面向下延伸约 6m。消力坎背水面与底板交接部位存在局部混凝土淘蚀现象，并伴随有钢筋出露现象，局部混凝土淘蚀垂向高度约 0.2m，平均深度约 0.15m。

缺陷 3：消能塘底板存在局部混凝土淘蚀现象，坝横方向里程介于（坝横）0+170.0 至（坝横）0+180.0 之间，坝纵方向里程介于（坝纵）0+322.0 至（坝纵）0+338.5 之间。该范围平面展布垂直于水流向近似呈梯形，平面展布规模约为 8m（坝横方向）×14m（坝纵方向）；以消能塘底板设计

高程 EL.420.0m 为基准，局部淘蚀的最大深度约为 0.12m。

2.2 修复难点分析

（1）对消力塘混凝土修复设计，配制高性能混凝土：应具备较高的强度、较好的抗冲磨性能、较强的抗裂性能，鉴于新老混凝土在弹性模量、自身收缩变形和温度应力方面均有较大差别，容易导致新混凝土与老混凝土脱开，因此需研究确定水下混凝土（砂浆）的配合比。

（2）新老混凝土良好的结合：新浇筑的抗冲层混凝土与下面基层混凝土联合整体受力的结构问题，是工程的一大难点，亦是决定修复处理工程成败的关键之一，新老混凝土弹性模量差异较大，基础老混凝土有较大的约束力，处理不当施工后脱开的可能性较大，因此需要重点研究解决新老混凝土结合面处理的有效措施，以利于新老混凝土整体结合。

（3）增强上下层连接的锚筋桩、植筋或预应力锚杆的布置及加强问题。

（4）新浇筑混凝土的配筋方案问题，考虑是否采用双层配筋及竖向配筋。

（5）修补施工方案的研究，包括施工工艺、工期安排、水下作业安全保障等。

3 修复方案比选

3.1 水下修复方案

（1）消力塘底板混凝土缺陷具有缺陷量大且修复材料用量多的特点，针对底板修复采用水下不分散混凝土、边缘与老混凝土结合部位采用水下聚合物混凝土进行修复，消力坎缺陷采用水下环氧砂浆修复。

（2）本次破坏仅限于表面抗冲磨层，因此应拆除潜在的已分离但未冲毁的面层混凝土。

（3）加强板块与下层混凝土之间的锚固。

（4）优化分缝位置，缝面避开孔口直接冲击水流；改善结构缝面处理，防止脉动水流沿缝面进入。

3.2 干地施工修复方案

（1）干地施工方案，首先需要在消力塘下游消力齿上游侧的消力塘内砌筑挡水围堰，挡水围堰需要满足消力池水抽干后的挡水压力和防渗要求。

（2）围堰按 4 级建筑物，20 年的洪水标准设计，围堰两端与消力塘边墙相接。围堰底高程 420.00m，顶高程 433.50m，顶宽 5.0m，轴线长度 110m。采用土石填筑，迎水面设防渗土工布防渗，上游坡比 1:2.0，下游坡比 1:2.5，顶宽 5.0m。

（3）由于下游已建有沙湾水电站，涉及环保问题，而且施工完毕后围堰拆除难度较大（围堰方量约 6 万 m3）。

（4）工期方面不能满足修复的需要，且由于挡水围堰的施工，造价方面不存在优势。

（5）优点是干地施工修复方案可以进行优化，不需要进行修前复查，而且质量方面能够得到有效控制。

3.3 水下修复和旱地修复比较

项目	水下施工方案	干地施工方案
工程设计	施工工艺：水下清理－切边凿除－凿毛——钻孔植筋—恢复钢筋网—仓面清洗—模板吊装—涂刷界面剂—浇筑施工—水下检查摄像。 消力塘底板：采用水下不扩散混凝土修复为主，局部小范围采用聚合物混凝土。消力坎采用水下环氧砂浆修复。	设施工围堰，增设抽水设施，施工工艺与水下施工方法相同，浇筑材料不同。 消力塘底板采用水下不分散混凝土，连接部位和厚度小于 10cm 部位采用水下聚合物混凝土修复；消力坎迎背水面和顶部均采用环氧砂浆修复。

项目	水下施工方案	干地施工方案
施工	不受时间制约，枯水期均可施工，工期可灵活安排。施工准备工作简单。	可以多个作业面同时施工，但必须在一个枯期施工完成，需设施工围堰，增加抽水设施。围堰填筑、道路开挖、池内抽干、检修耗时长，整体工期无法灵活控制。施工无法度汛，无法满足整个枢纽的泄洪要求，不利于整枢纽运行和流域协调控制。施工程序复杂，成本高，耗时长。
环保及安全生产	对整个枢纽生态环境影不影响，对电厂安全运行不产生本质上的影响。	施工围堰拆除困难，存在潜在的环保问题。
前期工作	修前需要复查定位，且不容易发现新增缺陷部位。	修前不需要复查，容易发现消力塘存在的其他问题。
工期	约 6 个月	约 9 个月
工程投资估算(万元)	2558.91	4816.65

铜街子消力塘损毁部位修复设计方案比选论证专题会,从修复效果、施工方案、施工工期、工程投资等方面进行综合比较，确定采用水下修复施工方案。

为了确保水下施工的质量的可靠性、降低投资风险，结合铜街子水电站消能塘底板和消力坎坎顶破坏的实际情况，经过综合考虑分两期施工。通过对一期的水下修复成果的检测和验证，优选质量可靠、性价比高的方案进行第二期施工。

3.4 一期实施方案

分期范围选定的原则：选择缺陷 1（缺陷一：消能塘前池底板存在具有一定规模的局部混凝土损伤，顺水流向近似呈椭圆形，长轴长度约为 70m，短轴长度约为 35m，淘蚀范围：介于（坝横）0+080.0 至（坝横）0+150.0 之间，（坝纵）0+270.0 至（坝纵）0+305.0 之间，周缘淘蚀平均深度约为 0.3m，最大深度约为 0.7m。），顺水流方向沿着靠近（坝纵）0+296.50 水平距离左侧 4m 的溢流坝段结构缝右侧的缺陷范围内有限施工，详见图 1。

一期施工区域混凝土除三处实验块外的其它区域均采用水下不扩散混凝土进行浇筑。

选取三块实验块，主要检验水下不扩散混凝土和水下聚合物混凝土的工程质量。

其中 1#~3#实验块平面位置详见图 2。1#和 2#实验块采用水下聚合物混凝土浇筑，3#实验块采用水下不扩散混凝土浇筑。其中 1#实验块位于环状淘蚀区上游边缘弧长 5m 范围（宽度 1.5m）。

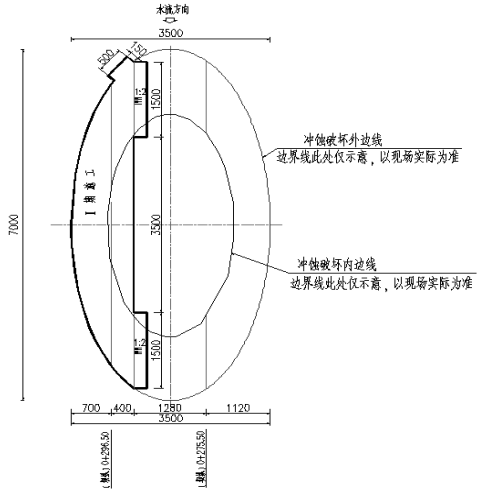


图 1 铜街子消能塘一期施工范围平面布置图

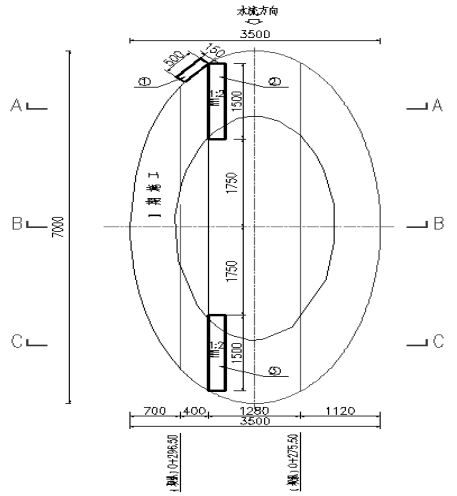


图 2 铜街子消能塘一期施工实验块平面布置图

4 三种水下混凝土材料

4.1 水下不扩散混凝土

水下不扩散混凝土应根据现场实际水温、运距、现场施工要求等，通过实验确定混凝土配合比，混凝土拌合站严格按此配合比配制混凝土。为了保证混凝土浇筑时不发生离析现象，在浇筑导管底部出口处安装软管，开始浇筑时，软管紧贴浇筑区底部，后续的浇筑过程中，软管须始终埋在新浇筑的混凝土内部。水下不扩散混凝土需连续浇筑，当施工过程中必须间隔时，续浇的时间间隔不宜超过水下不扩散混凝土初凝时间。絮凝剂的选择应充分考虑工程的实际要求、施工条件和所使用的原材料的特性，通过试验来确定。絮凝剂的性能试验方法应按《水下不分散混凝土试验规程》（DL/5117-2000）。

表 1 掺抗分散剂 C40 水下不分散混凝土的性能要求

试验项目		性能要求
泌水率%		＜0.5
含气量%		＜4.5
坍落度 mm	30s	230±20
	2min	230±20
坍扩度 mm	30s	450±20
	2min	450±20
抗分散性	水泥流失量%	＜1.5
	悬浊物含量 mg/L	＜150
	pH	＜12
凝结时间 h	初凝	≥5
	终凝	≤30
水下成型试件与空气中成型试件抗压强度比%	7d	＞60
	28d	＞70
水下成型试件与空气中成型试件抗折强度比%	7d	＞50
	28d	＞60
粘结劈裂抗拉强度 Mpa	14d	＞1.6

4.2 水下聚合物混凝土

水下聚合物混凝土系互穿网络高分子材料，拥有不同高分子材料的互补和协同效应。由它制备的聚合物砂浆或混凝土具有优越的性能，可用于混凝土结构的快速修复和制备特种性能混凝土预制构件，也用于水下混凝土的补强加固。水下聚合物混凝土材料指标不得低于下表。

表 2 水下聚合物混凝土主要性能指表

项目			指标
树脂性能	凝胶时间（25℃，h）		≤20（可调节）
	密度（g / cm³）		1.10±0.10
	粘度（mpa·s）	A 组分	≤750
		B 组分	≤6
力学性能	粘接强度（MPa）	3d	≥3.5
		28d	≥4.0
	抗折强度（MPa）	3d	≥40
		28d	≥45
	抗压强度（MPa）	3d	≥60
		28d	≥80

表 3 水下聚合物混凝土的参考配合比（重量比）

	石子	沙子	水泥	PBM 树脂	促进剂（紫色）
混凝土	32%~36%	39%~43%	9%~10%	16%~19%	树脂的 1.0~2.5%
砂浆	-	60%~68%	15%~17%	20%~25%	树脂的 1.0~2.5%

4.3 水下自护混凝土

水下自护混凝土是一种全新水下混凝土施工技术，是利用水下保护剂对施工部位的水体进行改性，使改性水体与混凝土间产生一定的相斥作用，降低水流对混凝土的冲刷，从而提高混凝土水下的抗分散和抗冲散能力，减少其在水流环境中的流失，确保工程质量的可控性。主要通过预先往水体中投放高分子水下保护剂使水体改性，在水体中形成稳定的空间柔性网络，抑制浇筑入水的混凝土胶凝材料损失。因此，可直接在水体中浇筑自密实混凝土，依靠自重充分填充模板内空间，也能够穿越钢筋和堆石体空隙，形成满足性能要求的混凝土。水下自护混凝土具有水中不分散、无压自流和范围可控等特点。

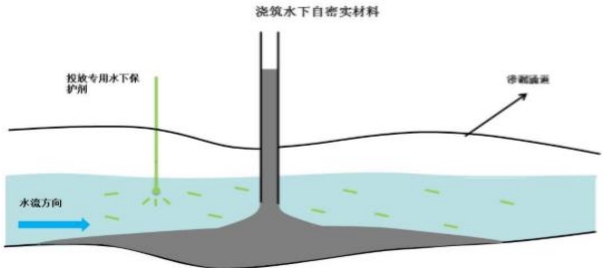


图 3 水下自护混凝土特种施工技术示意图

4.4 施工流程及质量控制

消能塘底板混凝土缺陷部位水下修复施工主要包括以下施工程序：施工前期准备－安全技术交底－水上平台制安－整治缺陷水下检查－水下清理－切边凿除－凿毛——钻孔植筋（或焊接）—铺设钢筋网—仓面清洗—模板制作及水下安装固定—涂刷界面剂—浇筑施工及过程监控—完工水下检查摄像。具体流程及质量控制如下：

（1）水下清理

水下整治前，依检查结果对整治部位进行水下清理，清理杂物等吊出水面。确保水下修复面无杂物及任何附着物。

（2）切边凿除

水下切割按整治面积区域可分别采用手持式水下液压切割工具，或大面积区域采用水下液压链锯整体切割。水下凿除潜水员采用液压破碎镐进行凿除。水下切割及凿除不破坏底板钢筋网。

依据消能塘底板检查的缺陷范围，采用潜水员对破损部位的四周进行规整切边处理。切边范围要求，切除边线应大于破损部位 30cm，形状为内角不小于 70 度的多边形。

（3）凿毛清理

凿除原混凝土表面松动、低强的混凝土，直至露出新鲜、坚实的混凝土基面，以消除新老混凝土结合面的隔离层，确保新老混凝土的有效粘结面积和粘结强度。混凝土凿毛之后，将凿掉的混凝土渣屑等杂物集中到一起运出水面。凿毛过程中不破坏原有钢筋结构。

（4）钻孔植筋

采用水下风钻或潜孔钻机在修复区域底部钻竖直方向锚筋孔，锚筋孔直径 40mm，深度 1.0m，间、排距均为 1.5m，梅花形布孔。

钻孔之后，采用高压水枪对锚筋孔进行冲洗，冲除钻孔内的混凝土渣屑等杂物，保证孔内清洁无异物，未植入钢筋前，需将钻孔端头保护，防止杂物进入钻孔内。

锚筋采用直径 25mm 的 HRB400 钢筋，锚筋顶部折成 90 度弯钩，弯钩长度 25cm，弯钩与消能塘顶层钢筋焊接。由于缺陷深度不同，锚筋的实际长度每个钻孔部位可能不尽相同，须经过测量确定。

采用灌注法注入锚固剂，保证锚筋插入后，锚固剂能够充满锚筋与锚孔之间的环形空间。注入锚固剂后，潜水员在水下向锚孔内植入锚筋，锚筋应到达锚孔底部，植入锚筋之后，潜水员将锚筋

转动几圈，使锚筋能够与锚固剂充分、有效粘结。水下锚固剂性能不得低于以下指标。

（5）钢筋布置

消能塘顶层水下钢筋网恢复原则：按原设计标准布置顶层钢筋，新铺设钢筋需与原钢筋进行焊接，原钢筋残留长度不满足规范要求时，需重新植筋。对于破损部位边缘露出的钢筋，在超出破损边缘长度小于 500mm 的钢筋附近重新植入水平锚筋，锚筋深度 0.5m，锚筋外露长度 0.5m；将超出破损边缘长度大于等于 0.5m 的钢筋采用套管进行调直，采用水下风动钢丝刷进行除锈。

水下钢筋焊接应满足《水工混凝土结构设计规范》（DL/T 5057-2009）的要求，水下焊接前应完成陆上模拟实验。

（6）模板安装、结构缝设置

考虑模板材料应选择不易损坏、变形及腐蚀性小的材料，材料还需要必要的强度和刚度等因素，应选择钢模板。

植筋完成后，对原结缝缝面进行处理，设置分缝材料，安装模板。模板应可靠安装，杜绝浇筑过程中跑模、漏浆等。

（7） 仓面清洗

为保证修复新老砼结合，钢筋安装完成后，须对修复面进行扩大彻底清理，确保基面无杂物及其它附着物等。

（8）仓面涂刷界面剂

仓面清洗完成后，为确保新老砼的粘结，需在砼浇筑前对基面整体涂刷界面剂。

（9）浇筑施工

混凝土浇筑宜采用导管法、泵送法等方法，需能确保混凝土质量，避免对环境的污染。

混凝土浇筑前，应由潜水员水下对模板的缝隙和孔洞封堵，确保不漏浆；将模板内区域清理干净；

为保证混凝土的整体性，浇筑应连续进行，浇筑过程潜水员全程配合；

浇筑过程中水中自由落差不大于 30 cm，防止骨料离析，潜水员全程跟踪及时调整。

浇筑过程中应由潜水员水下检查砼流动面的形状及扩展状态、填充状态。

浇筑完成后，应由潜水员水下对混凝土进行检查，保证达到设计高程，表面平坦，并确保各个角落都应浇筑到位。

（10）检查摄像

整治结束后针对整治区域采用 ROV 水下检查并录像，大面积区域 ROV 水下检查网格间距宜 1m*1m 左右，局部区域至少保证 1 条检查路线和视频录像。

5 结语

目前已施工的一期施工范围主要采用水下不扩散混凝土进行施工，并通过使用三种水下修补材料在铜街子水电站消力塘毁损部位修复项目一期工程中分区块试验的方式，检测经过一个汛期后三种材料的冲损情况，确定三种水下修补材料对消力塘的适应性，为铜街子水电站消力塘二期施工提供依据。

参考文献：

[1] 丁新龙；水下不分散混凝土施工技术规范;中国石油集团;2003 年.

[2] 覃林涛；聚合物混凝土在水下修补工程中的应用，2012.

双江口溢洪道不良地质段开挖支护分析

周正军，王观琪，何　兰

（成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072）

摘　要：建设中的双江口水电站洞式溢洪道埋深较深且开挖断面巨大，在 0+107m～0+180m 段花岗岩侵入岩因受断层带切割影响，岩体较破碎，完整性变差且围岩强度较低，洞室围岩自稳性差。通过选取溢洪道不良地质段构建三维计算模型，基于洞室围岩应力特点生成初始应力场，分别针对 2 种不同支护方式：①系统锚杆支护；②系统锚杆+局部预应力锚杆，开展不良地质洞段开挖稳定分析，为设计决策提供了有益的理论参考。

关键词：溢洪道；不良地质；围岩稳定；开挖支护

1 引言

双江口水电站为一等大（1）型工程，洞式溢洪道开挖断面大、结构受力及运行环境复杂，且已开挖区域揭示洞室围岩实际地质条件明显比前期预测差。其中，溢 0+107m~溢 0+180m 洞段新发现断层破碎带 F3 通过，断层产状总体产状为：N50°～60°W/NE∠80°～90°，与洞向夹角 30°~40°，主错带宽约 13m，岩体以强风化～全风化为主，区段岩体呈碎裂结构～散体结构，节理短小且发育，开挖后顶拱及两侧均见有裂隙切割组合产生的掉块，洞室自稳性差的地。此外，该洞段开挖过程中随岩体的应力调整和松弛卸荷、汛期雨水下渗等因素的影响，围岩强度将进一步降低，存在施工期开挖安全风险。因此，根据开挖揭露及地质判别情况，针对该区段开展开挖支护分析对于设计决策具有益的理论参考意义。

2 主要计算理论

基于围岩本构模型理论，计算中洞室围岩采用摩尔-库伦理想弹塑性本构[1-2]，其应力-应变关系如式（1）所示。

$$\{d\sigma\}=C_e(\{d\varepsilon\}-\{d\varepsilon^p\}) \tag{1}$$

式（1）中：$\{d\sigma\}$—应力增量，单位：Pa；$\{d\varepsilon\}$—应变增量，无量纲；$\{d\varepsilon^p\}$—塑性应变增量，无量纲；C_e—弹性刚度矩阵，单位：Pa。

岩体的塑性屈服破坏准则可表示如式（2）所示。

$$F=\sqrt{J_2}\sin(\theta+\frac{\pi}{3})-\sqrt{\frac{J_2}{3}}\cos(\theta+\frac{\pi}{3})\sin\varphi-\frac{I_1}{3}\sin\varphi-c\cos\varphi \tag{2}$$

式（2）中：I_1—第一应力不变量，单位：Pa；J_2—第二偏应力不变量，单位：Pa2；θ—应力罗德角，单位：°；φ—内摩擦角，单位：°；　c—粘聚力，Pa。

设锚杆单元是一种一维理想弹塑性单元，仅能承受拉应力和压应力，计算中采用 FLAC3d 有限差分法软件中自带的锚杆单元。

3 计算模型及参数

结合溢洪道的结构布置形式，考虑不良地质段距边坡表面较近（进洞口方向最近约 80m），且断层影响范围较大，选取溢洪道进口一带的边坡区域构建整体分析模型，具体如图 1 所示，其中不良地质体与洞式溢洪道空间关系如图 2 所示。结合溢洪道已开挖区域揭露的地质特点，经过地质判别在本文计算中围岩计算物理力学参数取值见表 1。

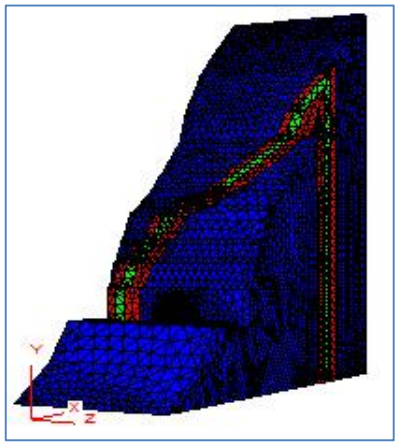


图 1 计算洞段三维网格模型

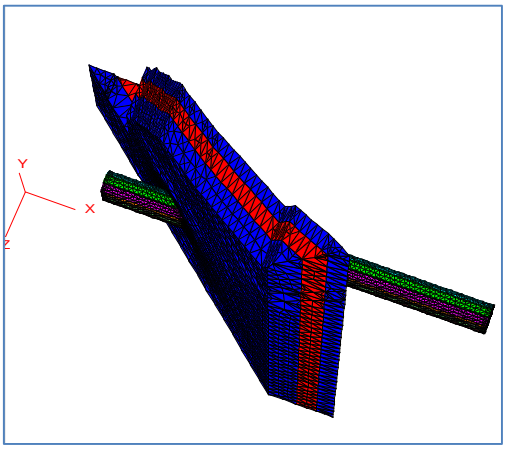


图 2 不良地质与溢洪道的空间关系示意

表 1 计算围岩物理力学参数取值

围岩类别	容重/（KN·m^{-3}）	弹量/GPa	泊松比	摩擦角/°	粘聚力/ MPa
Ⅴ类	23	0.5	0.35	24.2	0.1
Ⅳ类	23.5	3	0.35	34.99	0.4
Ⅲ类	25.5	7	0.3	43.53	0.95

4 计算方案

为对双江口洞式溢洪道不良地质洞段采取针对性支护措施，主要对比两种支护方案，具体描述如下。

方案 1：对于不良地质段 0+107m～0+150m 段，沿边墙和顶拱设系统锚杆 Φ28（L=6m）、Φ32（L=9m），间排距 2m，长短间隔交错布置，拱脚范围加强 2 排锚杆 Φ32（L=9m），纵向间距 2m；0+150m~0+180m 段沿边墙设系统锚杆 Φ28（L=4.5m）、Φ32（L=6m），沿顶拱设系统锚杆 Φ25（L=4.5m）、Φ28（L=6m），间排距 2m，长短间隔交错布置，拱脚范围加强 2 排锚杆 Φ32（L=9m），纵向间距 2m。计算洞段系统锚杆单元如图 3 所示。

方案 2：考虑不良地质洞段岩性自稳能力较差，在方案 1 系统锚杆支护的基础上根据断层的走向在 0+82.5m~0+160m 段左边墙和 0+110m~0+187.5m 段右边墙增设 450KN 预应力锚杆。增设预应力锚杆在边墙自上而下分布 4 根，间距为 3m，排距为 2.5m。此时，计算洞段段锚杆单元如图 4 所示。

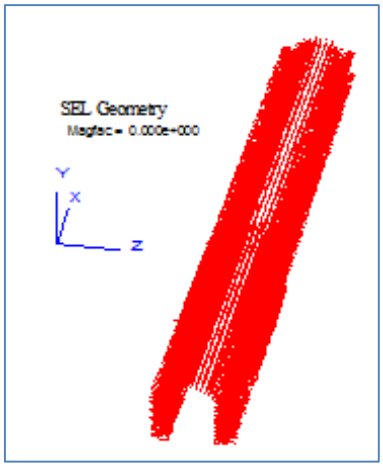


图 3 方案 1 锚杆单元

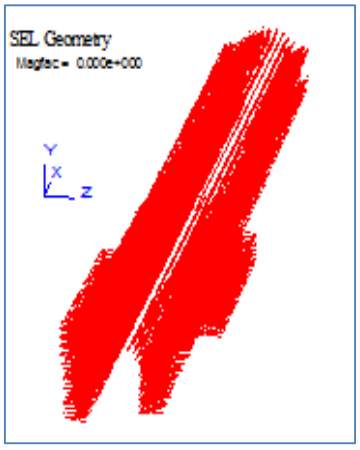


图 4 方案 2 锚杆单元

5 结果分析

5.1 初始地应力场计算结果

洞式溢洪道溢 0+90~溢 0+180m 段水平埋深约 200m，垂直埋深约 150m，围岩为二云二长花岗岩，根据右岸平洞实测地应力成果推测洞式溢洪道围岩地应力分布如下：0+042m~0+07m 段

σ_1=2~4MPa，σ_3=0~1MPa；0+070m~+210m 段 σ_1=8~12a，σ_3=1~2MPa；0+210m~270m 段 σ_1=14~18MPa，σ_3=2~4MPa；0+270m~430m 段 σ_1=20~25MPa，σ_3=4~5MPa。采用边界法[3]通过反复试算生成初始应力场，以减小初始应力场对于围岩塑性区发展的影响[4]，最终计算生成溢洪道围岩 σ_1 和 σ_3 分布等值线如图 5 所示，计算生成的初始地应力场与地质推测分布量值范围基本一致。

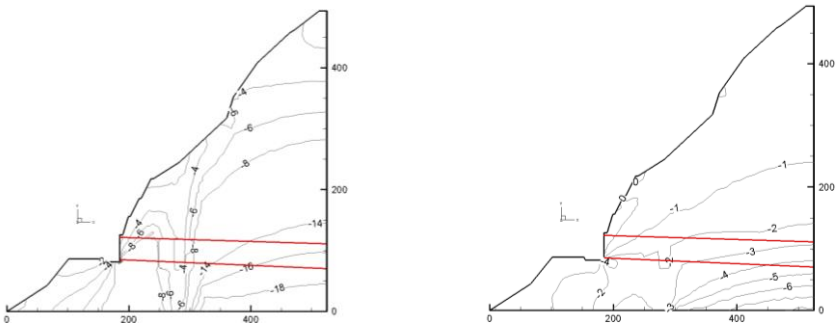


图 5 溢洪道围岩初始地应力场分布等值线（单位：MPa；左图为 σ1，右图为 σ3）

5.2 支护方案 1 计算结果

断面开挖完成后围岩整体向开挖临空面变形。其中，不良地质段典型断面沉降和水平位移最大值统计如表 2 所示。

表 2 典型断面水平和沉降变形最大值统计（支护方案 1）

断面位置	0+90m	0+110m	0+130m	0+140m	0+150m
沉降变形最大值（cm）	1.21	1.65	3.23	4.96	6.21
水平变形最大值（cm）	2.22	4.32	5.49	3.57	7.34

断面开挖完成后不良地质洞段洞室围岩塑性发展明显，局部洞段（0+90m~0+140m）边墙的塑性区超过锚杆的锚固深度，具体如图 6-图 9 所示。虽然大多数系统锚杆受力在设计抗拉范围内，但局部锚杆受力最大达 327KN，超锚杆设计抗拉力。结合变形和塑性区计算成果，从限值变形和约束塑性发展的角度有必要对不良地质洞段进一步加强支护。

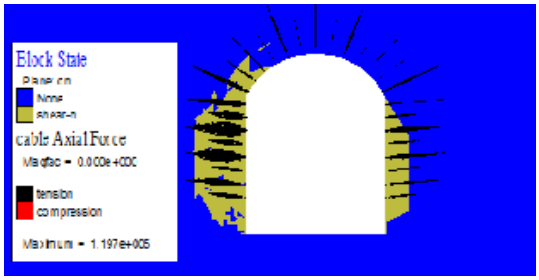


图 6 0+90m 断面围岩塑性区和锚杆受力示意

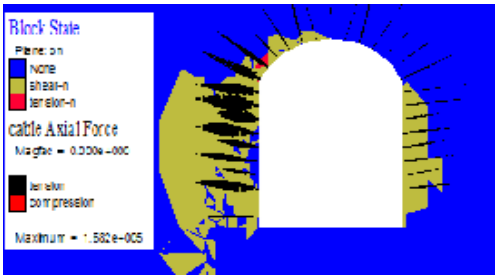


图 7 0+110m 断面围岩塑性区和锚杆受力示意



图 8 0+130m 断面围岩塑性区和锚杆受力示意



图 9 0+140m 断面围岩塑性区和锚杆受力示意

由以上计算结果分析可知，全断面开挖完成后围岩未发生整体塑性流动，但局部洞段存在锚杆的拉力超过锚杆的极限抗拉力。

4.3 支护方案 2 计算结果

在系统锚杆的基础上为进一步限制下挖过程中边墙的塑性区和变形发展，按方案 2 增设预应力

锚杆，结合方案 1 洞室围岩开挖后塑性区发展情况，增设预应力锚杆拟定长度为 18m。此时断面开挖完成后不良地质段典型断面沉降和水平位移最大值统计如表 3 所示，对比方案 1，洞室围岩向临空面变形减小。

表 3 典型断面水平和沉降变形最大值统计（支护方案 2）

断面位置	0+90m	0+110m	0+130m	0+140m	0+150m
沉降变形最大值（cm）	1.20	1.61	3.20	4.91	6.08
水平变形最大值（cm）	2.03	3.84	4.71	3.45	7.14

结合围岩塑性区分布图 10~图 13 可知，在系统锚杆支护+局部预应力锚杆支护下断面开挖完成后洞室围岩虽仍存在塑性区，但塑形区基本在支护系统范围内。

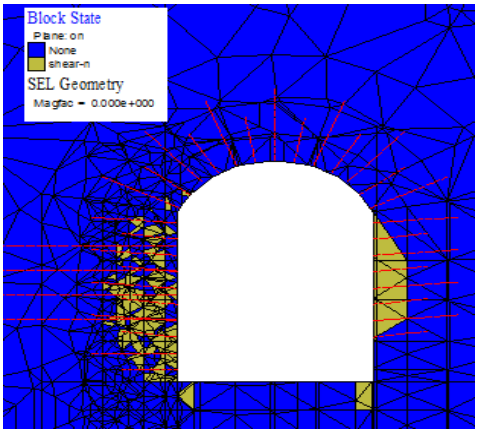


图 10 0+90m 断面围岩塑性区分布范围

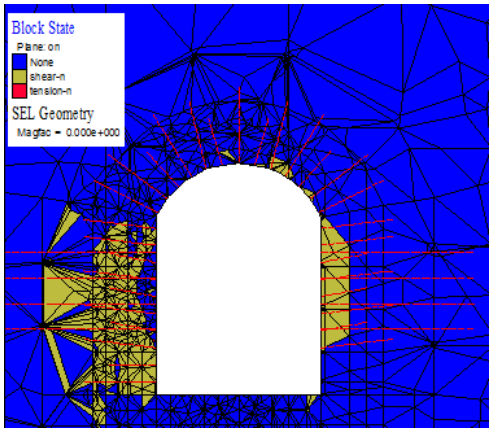


图 11 0+110m 断面围岩塑性区分布范围

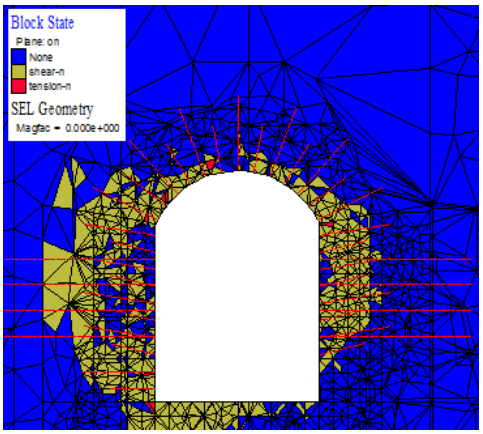


图 12 0+130m 断面围岩塑性区分布范围

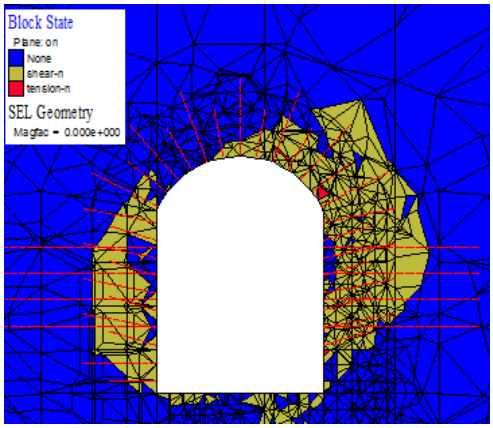


图 13 0+140m 断面围岩塑性区分布范围

此时，0+90m 断面系统锚杆的最大拉力为 88.5KN、0+110m 断面系统锚杆的最大拉力为 136.3KN、溢 0+130m 系统锚杆的最大拉力为 146.7KN、溢 0+140m 断面系统锚杆的最大拉力为 167.7KN、溢 0+150m 断面系统锚杆的最大拉力为 274.5KN。结合溢 0+90m~0+150m 断面系统锚杆的受力分布可知，沿断层及其影响带锚杆受力较大，锚杆的最大受拉力为 284.4KN，小于对应锚杆的设计极限抗拉能力。

4 结语

采用三维有限差分法对双江口溢洪道不良地质洞段开展开挖支护分析，初步结论如下。

（1）常规系统锚杆支护下，溢 0+150m 断面顶拱拱脚处局部锚杆受力稍超锚杆极限抗拉强度；溢 0+110m~溢 140m 洞段围岩塑性区超过系统锚杆的锚固深度。应从约束塑性区发展和限值变形的角度对溢 0+110m~溢 150m 洞段加强支护。

（2）在常规系统锚杆支护的基础上在溢 0+82.5m~溢 0+187.5m 洞段边墙上增加 450KN 预应力锚杆，此时预应力锚杆穿过围岩塑性区且系统锚杆的承受的最大拉力小于锚杆的极限抗拉力，措施可行。

（3）计算中假定锚杆与锚杆周围围岩接触完好不存在拉断或拉脱现象，计算成果仍需要结合现场拉拔试验验证，实际实施中需保证预应力锚杆的作用效果。

参考文献：

[1] 赵　翔，魏玉峰，郝腾飞，等，　圆形地下洞室开挖围岩扰动区及塑性区范围的确定及讨论[J].公路，2018(4):264-268.

[2] 李细咏，冯　凌，刘尚各. 地下洞室围岩力学参数分区反演方法[J]. 土工基础,2015,29(4):98-102.

[3] 侯明勋，葛修润. 岩体初始地应力场分析方法研究[J]. 岩土力学,2007,(8):1626-1630.

[4] 朱以文，黄克戬，李 伟.地应力对地下洞室开挖的塑性区影响研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(8):1344-1348.

浅议大体积模袋混凝土在紫坪铺工程护岸基础泄流冲坑处理中的运用

钟　静[1]，秦小茹[1]，谭　炜[1]，徐小磊[2]

（1.四川省紫坪铺开发有限责任公司，四川 成都 610091；
2.中国水利水电第十一工程局有限公司，河南 郑州 450001）

摘　要：模袋混凝土以土工织物模袋为载体，主要应用于河道护岸、航道整治大面积护坡、土坝护坡等工程，其单层厚度普遍为10～40cm。在紫坪铺工程护岸基础泄流冲坑处理中，将150cm及其以上厚度的大体积模袋混凝土创新性地应用在护岸基础冲坑填筑中，经长时间泄流冲刷检验，有效提高了基础部位抗冲能力，拓宽了水下基础深坑抗冲处理思路。

关键词：大体积；模袋混凝土；基础；抗冲能力；紫坪铺工程

1 引言

模袋法指在上、下两层高强度土工织物（布）制作的大面积连续袋体内灌注流动性混凝土或水泥砂浆，凝固后形成一种整体的、透水不透浆的防护结构的施工方法，又称土工模袋法。一般情况下，其单层厚度10～40cm，常多层重叠用于堤防沿岸加固。为抵抗强烈的泄洪冲击，采用厚度150cm及其以上的模袋混凝土用于深度和宽度均较大的岸坡泄流冲坑部位的填筑，以作为基础，目前在国内仍属少见。

2 工程概况

紫坪铺水利枢纽工程是一座以灌溉和供水为主，兼有发电、防洪、旅游等的I等大1型水利枢纽工程，工程位于成都西北岷江上游，距都江堰市约9km。水库库容11.12亿m^3，正常蓄水位877.00m，汛限水位850.00m，防洪高水位861.60m，设计洪水位871.20m，校核洪水位883.10m，电站总装机4×190MW。

2018年7月上旬，紫坪铺工程遭遇近百年一遇洪水，库水位一度超过防洪高水位861.60m达到862.83m。为确保大坝安全，根据省防指要求，全开泄洪洞和冲沙洞同时泄洪，下泄流量连续三天超2450m^3/s，泄洪洞下泄流量1415m^3/s，出口挑流段平均流速超过32m/s。受大流量高流速泄洪冲击，电站下游左岸300m处的尾水护坡基础淘刷严重，致约146m长护坡严重滑塌。经水下检测，滑塌区域基础普遍存在8～12m深的冲坑，坑内为已塌落的护坡混凝土。为避免坍塌范围继续扩大而加深对工程安全的不利影响，应予及时修复。

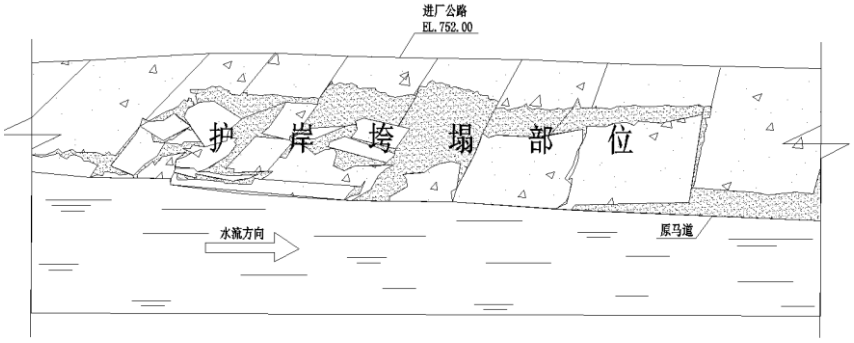


图1 尾水护岸塌陷情况

3 基础破坏原因

紫坪铺电站左岸尾水护岸建于河床砂卵石覆盖层之上。护岸塌陷段距1#、2#泄洪洞挑流水舌在河道的主冲坑中心点约40～70m左右，基础部位直接遭受强烈的泄洪水流冲击波及回水淘刷破坏。

护岸基础形成大量深浅不一的冲坑，其范围和深度随泄洪时长增加而扩展，目前未达稳定状态，护岸基础被掏空致使上部岸坡失稳。

4 基础处理方案比选

4.1 原护坡基础处理方式

2013 年“7.9”洪水期间，该段同样遭受大流量高流速泄洪冲击，基础淘刷严重致护坡局部坍塌。考虑到主汛期尾水施工条件受电站负荷变化及可能的泄洪影响，经水下地形勘测，应急修复以从岸坡吊装四面体回填基础淘刷部位出水，在此之上重新浇筑护坡混凝土。

受塔吊吊重限制，四面体棱长 1.7m，重约 1.5t。水下四面体间无连接，露出水面部分以钢丝绳相连。因重量较小，2013～2017 年汛期间，大量四面体被水流卷走至河心滩地，护岸基础抗冲刷能力削弱严重。分析认为，四面体作为护坡水下基础未置于基岩之上，自重较低且未相互连接，抗冲能力明显不足；冲坑未达基岩，受冲刷后范围会继续扩大，无连接的四面体将陆续随坑面扩大而向深处滑落，最终也会致护坡失稳。

4.2 水下混凝土浇筑、四面体抛投、抗滑桩、沉井方案

对护岸基础冲坑的处理有水下混凝土浇筑、抗滑桩、沉井等方案。

水下混凝土浇筑方案（图 2）存在以下主要问题：

（1）冲坑较深，存在大量垮塌的护坡混凝土，相互交错，致使基础面凹凸不平显著，水下模板搭设难度大，混凝土浇筑因模板搭设不严，易出现严重跑浆等问题；

（2）水下施工需潜水员配合，施工效率不高，安全隐患大，不利于应急修复；

（3）水面施工辅助平台及水下模板距离泄洪挑流区很近，遭遇泄洪，将毁于一旦。

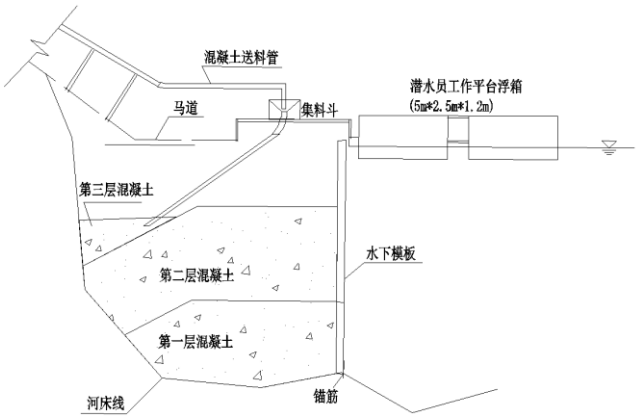


图 2 水下混凝土浇筑

沉井、抗滑桩等将护坡基础至于基岩的永久性治理措施，需搭设围堰，存在工程量大、造价高，在主汛期也将面对电站泄洪风险，施工难度大。

增大四面体自重，抛投回填冲坑的方式，受吊装能力限制，四面体自重增加幅度有限且水下部分难以相互连接，整体性差，抗冲性能提高不大，经不起强烈的大流量高流速泄洪冲击。因而，实际中并不推荐上述方案。

4.3 大体积模袋混凝土方案

大幅增加单个填筑体自重，提高基础材料的整体抗冲性能，就能显著提高抵御大流量高流速泄洪冲刷破坏的能力。

采取水面浇筑大体积模袋混凝土后依次放入泄洪冲坑，逐级往上部堆填出水的基础填筑方案，也利用了模袋混凝土流态时对水下基础凹凸面良好的适应性，增强了填筑的相对密实性，模袋与模袋之间的咬合能力也能得到提高，最终形成的大体积不规则混凝土，可较好抵御大流量高流速泄洪水体的强烈冲击。

这种方案在电站泄洪期间，具有较大的抗风险能力。一旦泄洪，水面浇筑和吊装平台可随时撤离泄洪区；泄洪停止后，可快速恢复施工。施工难度较其它方案小，效率较高，适合护岸基础工程的应急修复，是为推荐方案。

5 模袋混凝土水下施工

5.1 模袋指标

单个模袋尺寸 1.5m×2.3m×1.5m（长×宽×高），混凝土理论灌注量 5m³；实际平均灌注量 4.2m³；灌注后整体重量约 10.1t，为原四面体重量的 7 倍。单袋混凝土的自重成倍增加，要求模袋能承受更高的应力应变。采用特种高强机织聚丙烯模袋布，每平方米重量 450g，规格参数为纵向 80KN，横向 60KN，延伸率 30%。具有良好的抗拉、防渗、抗撕裂、抗顶破、抗穿刺性能，能有效防止不规则石块对布面的冲击；延伸性能好，应力分散快，使负载均布化；摩擦系数大，施工时不易滑移；水下铺放时保护水泥颗粒不流失,水泥和骨料不离析,增加了混凝土的密实性,保证了混凝土的强度。

5.2 混凝土充灌与填筑

采用 C25 细石混凝土。细骨料为机砂，粗骨料为碎石，最大粒径 25.0，掺合料粉煤灰，型号为Ⅱ级，掺量 19%。采用商品混凝土泵送充入模袋的施工方法。

模袋混凝土水下填筑有先铺后灌与先灌后铺两种方法。先铺后灌所需水上设施量相对较少，占用河道范围小，但投入水下作业人员多，安全系数低；先灌后铺不需或少需水下作业人员，水上充灌混凝土易操作，质量有保证，施工不易受水流变化影响，填筑效率高，但所需水上设施相对较多，占用河道较宽。

根据现场情况，采用先灌后铺法回填护岸基础。混凝土泵出口软管伸至水上作业船头，将模袋在可开合的预制铁箱内布置好后，泵送混凝土入袋。每袋灌注结束后，铁丝封口，再水下码放（图 3），先从坡脚处码放。

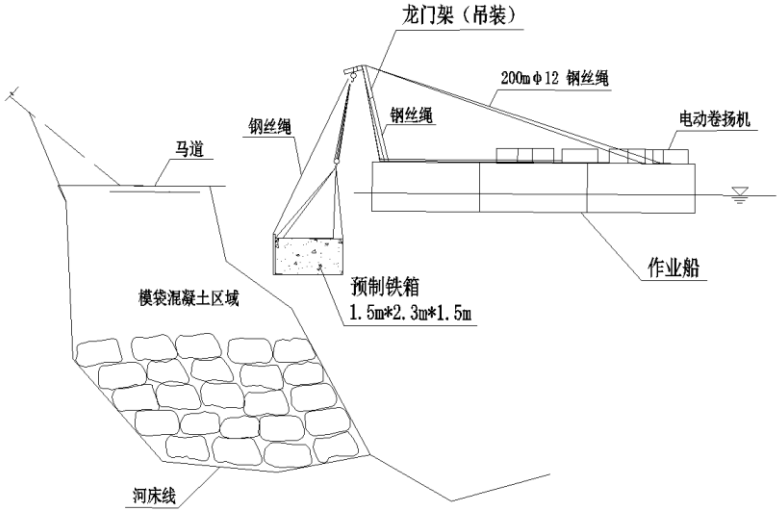


图 3 大体积模袋混凝土水下填筑示意图

混凝土灌注过程中，应随时检查模袋固定是否牢固，以防充灌不饱满。灌完一袋后，按操作步骤进行下一袋的充灌施工,特别注意相邻两袋模袋混凝土应安放稳固。单袋混凝土充灌到位后，及时停止泵送，防止模袋产生鼓包或破裂。

6 运用效果

基础处理后已历经 9 次泄水，累计泄水时长 1137h，最大下泄流量 1850m³/s。经检查，大体积模袋混凝土填筑部位未见沉陷，保持稳定，充分说明该技术用于泄洪冲坑部位基础填筑，起到大幅提高基础抗冲能力的良好效果。

7 结语

利用大体积模袋混凝土透水不透浆、流态时具有可塑性大、自重大，抗冲能力较四面体等预制混凝土块强、施工受电站泄洪影响小，较为方便等特点，将其作为岸坡基础及其冲坑填筑新技术，能显著提高基础部位的抗冲能力。而模袋大小、性能，水下码放形式，仍需紧密结合水流流速、冲坑形态等实际情况予以设计。

该方法同模袋混凝土的常见应用有所不同，拓宽了水下基础深坑抗冲处理的思路，是实际运用中的一个创新，具有良好的推广价值。

乌东德水电站 3#、4#导流洞进口渐变段围岩稳定性分析

李　华[1]，姚品品[1]，宛良朋[1]，王若愚[2]

（1. 中国三峡建设管理有限公司乌东德工程建设部，云南 昆明 650041；
2. 中国长江电力股份有限公司乌东德电厂筹建处，云南 昆明 650041）

摘　要：乌东德水电站是综合效益显著的大型水电工程，左右岸 5 条导流洞呈“左 2 右 3、4 大 1 小、4 低 1 高”的布置格局，其中 3#、4#导流洞进口渐变段围岩洞段围岩条件较差且进口边坡存在局部不稳定，为对比不同开挖方案下的围岩稳定并选取最优的开挖方案，本文基于开挖支护设计方案对右岸 3#导流洞渐变段处中隔墙及 4#导流洞渐变段的围岩稳定性进行数值模拟分析，提出该洞段Ⅱ、Ⅲ层左、右半幅开挖的最优顺序,同时也给其它同类型地质条件下的相邻大型洞室施工提供借鉴和参考。

关键词：乌东德水电站；导流洞；渐变段；稳定性；数值分析

1 引言

乌东德水电站[1]是金沙江下游河段 4 个梯级(乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝)最上一级，其装机容量 10200 MW，多年平均发电量 401.1 亿 kW·h，为一等大Ⅰ型工程。水电站枢纽工程主要由大坝、消能泄洪洞、引水发电系统等建筑物组成。其引水发电系统采用地下厂房形式布置，左右岸各 6 台机组。水电站采用河床一次断流、围堰全年挡水、两岸导流隧洞导流的施工导流方式；后期导流采用陆续投入运行的永久泄水建筑物泄水。水电站两岸共布置 5 条导流洞(左岸 1 和 2#导流洞、右岸 3-5#导流洞，见图 1)。1 和 2#导流洞进口底板高程 814 m，出口高程 800 m，洞身呈城门洞型，净断面尺寸约 18 m×26 m(宽×高)。3 和 4#导流洞为低高程导流洞，进口底板高程为 812 m，出口底板高程为 800 m，净断面尺寸约 20 m×27.5 m(宽×高)；5#导流洞为高高程导流洞，进口底板高程为 833 m，出口高程为 824 m，净断面尺寸约 15 m×19 m(宽×高)。导流洞洞线呈平行布置，轴线间距为 50 m，洞间岩柱宽度约 32～35 m。

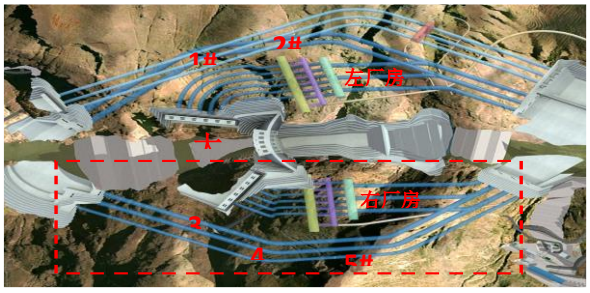


图 1 乌东德水电站导流洞布置示意图[1]

乌东德水电站右岸 3#、4#导流隧洞进口位于红沟崩坡堆积体内，导流隧洞进口底板高程 812.0m，洞身段平行布置，轴线间距 38m～50m，洞顶最大上覆岩体厚度 560m（如图 2 所示）。据文献[2]显示，3#、4#导流洞进口 K0+000～K0+050 段为渐变段，其中 K0+000～K0+020 为渐变段最大开挖断面（27.90m×30.30m），K0+050 段为渐变段最小开挖断面（22.90m×30.30m）。3#导流洞进口渐变段为Ⅴ类围岩，4#导流洞进口渐变段为Ⅳ类围岩，导流隧洞围岩体由褶皱基底构成，进口的地层为 P_{t2y}^{1}，其中 P_{t2y}^{1} 为肉红色互层夹薄层和中厚层石英质大理岩化白云岩。并且大断层 F3 在 3#导流隧洞桩号 K0+012m、4#导流隧洞桩号 K0+120m 处切过洞身，与洞轴线夹角 60°，严重弱化了该区域的稳定性。根据导流隧洞进口渐变段的特点、设计及施工单位拟对该部位的 3#、4#导流隧洞自上而下分三大层进行开挖支护（如图 3 所示）：Ⅰ层采用钻架台车中导洞开挖后两侧拱扩挖方法，确定开挖高度为 10m。Ⅱ层开挖高度为 12m，分 2 小层开挖，Ⅲ层也分 2 小层及左、右半幅（自进口段

往下游方向左手侧为左侧，另一侧为右侧）开挖，开挖高度为 8.3m，Ⅱ、Ⅲ主要采用水平开挖方法进行。鉴于该洞段围岩条件较差,进口边坡也存在局部不稳定情况,因此非常有必要对比不同开挖方案下的围岩稳定,为选取最优的开挖方案提供技术支持。本文基于开挖支护设计方案对右岸 3#导流洞渐变段处中隔墙及 4#导流洞渐变段（如图 4 所示）的围岩稳定性进行模拟分析，以便给出该洞段Ⅱ、Ⅲ层左、右半幅开挖的最优顺序,同时也给其它同类型地质条件下的相邻大型洞室施工提供借鉴和参考。



图 2 右岸 3#、4#导流洞进口渐变段现场空间位置关系

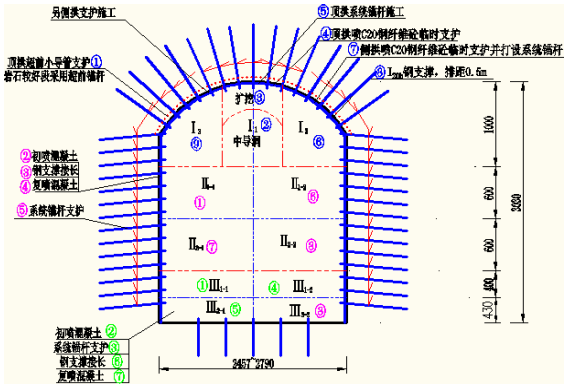


图 3 右岸 3#、4#导流洞进口渐变开挖支护方案

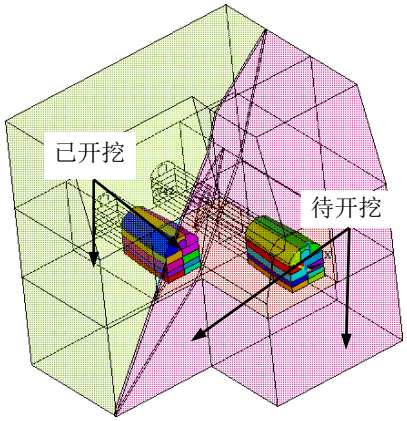


图 4 右岸 3#、4#导流洞进口渐变段计算初始开挖状态

2 计算模型与初始条件

数值仿真开挖支护步序依据实际开挖支护过程进行，3、4#导流洞进口渐变段Ⅰ层先采用中导开挖，然后依据设计进行扩挖，Ⅱ、Ⅲ层采用左、右半幅开挖。各分层开挖后进行及时的锚杆支护及钢拱架支护。其中 U 型钢拱架采用 Beam 单元模拟，锚杆采用 Cable 单元模拟，最终的支护结构形式如图 5。计算过程中采用的围岩力学模型为含结构面的层状岩体模型应变软化/硬化模型，相关力学参数依据地质推荐参数取值。围岩状态评价指标采用破坏接近度（FAI），该指标可以反映层

状岩体基质和层面在开挖扰动下的破坏程度。当其值小于 1.0 时认为围岩相对稳定；当其值大于 1 时，认为围岩发生屈服即大于该值的区域均为塑性区；当其值超过一定设定的大于 1.0 的某一临界值（如 1.2）可以认定围岩可能产生了松动；当其值超过设定的大于 1.0 的某一临界值（如 1.5），可以认定围岩可能产生了破坏。

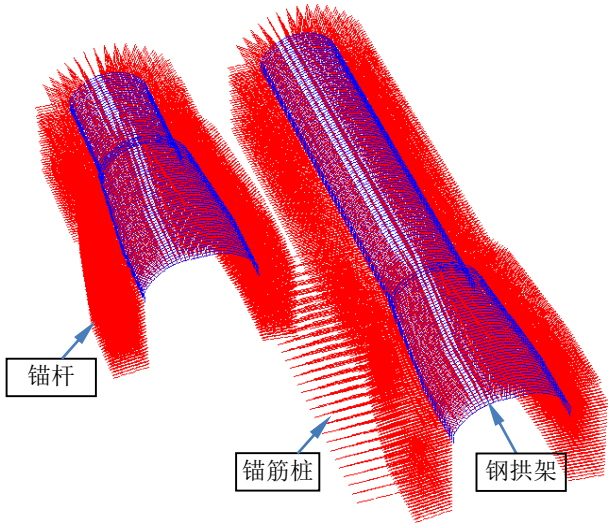


图 5 支护结构形式图

计算过程中钢筋拱都采用相同的材料参数(弹模 30GMPa，泊松比 0.3)，采用 Shell 单元[3]模拟 U 型钢筋拱(见图 4b)。根据文献[1]，工程区地应力以自重应力为主，因此地应力条件采用自重应力，该洞段埋深 360 m。考虑薄层岩体的结构以及带来的力学特性，岩体力学模型采用遍布节理模型，该模型可以考虑层状岩体基质和层面力学性质的差异，模型详情参见文献[3]。其力学参数根据数值计算反演选定，列于表 1。同时为考虑回填混凝土与垮塌部位围岩接触面的影响，设置了基于 Mohr-Coulomb 准则的接触面模型，其力学参数列于表 2。

表 1 岩体力学参数

E /GPa	ν	ψ /°	σ^t /MPa	c /MPa	φ / °	c_j /MPa	φ_j /°	dip /°	dd /°	ψ_j /°	σ_j^t /MPa
1.8	0.33	8.0	1.0	2.0	45	0.1	25	75	90	6.0	0.2

注：E为变形模量，ν为泊松比；c和φ、c_j和φ_j分别为基质和层面的粘聚力和内摩擦角；σ^t和σ_j^t分别为基质和层面的抗拉强度；ψ和ψ_j为基质和层面的剪胀角；dip为层面倾角，dd为倾向。

表 2 混凝土/岩体接触面力学参数

k_n ／MPa	k_s ／MPa	c ／ kPa	φ / °
300	70	12.0	22

注：k_n和k_s分别为接触面的法向刚度和剪切刚度。

3 计算结果分析

3.1 Ⅱ、Ⅲ层不同开挖步序的围岩稳定性对比

根据进口段导流洞开挖进度，3#及 4#导流洞进口渐变段Ⅰ层已经开挖结束，目前正进行Ⅱ层的开挖。此次分析将通过对比分析Ⅱ、Ⅲ层先左侧后右侧及先右侧后左侧开挖等两种工况下四个断面（即 0+010，0+035,0+080 及 0+105 断面，见图 6）开挖结束后的围岩破坏接近度、位移、最大主应力及最小主应力分布的差异来选择较优的开挖方式。表 3~表 6 给出的是这四个断面处的破坏接近度、位移、最大及最小主应力分布图。

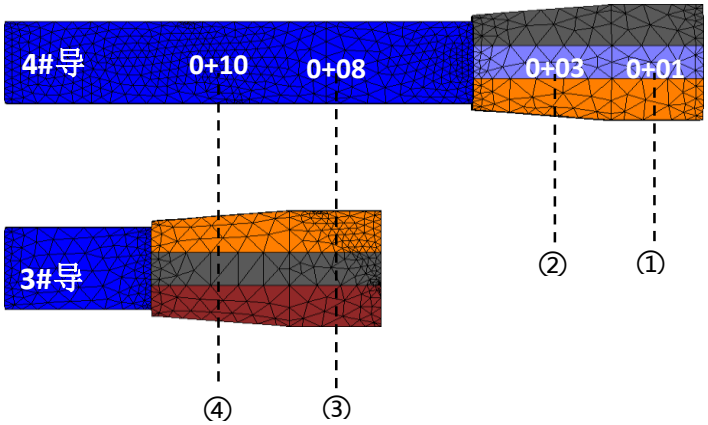


图 6 对比的断面位置

表 3 4#导 0+010 断面处两种开挖方式计算结果对比

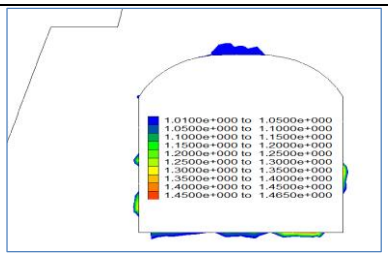
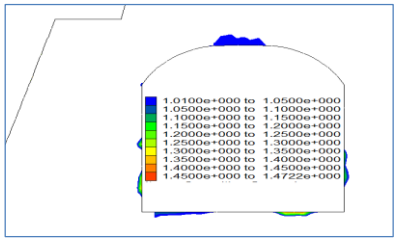
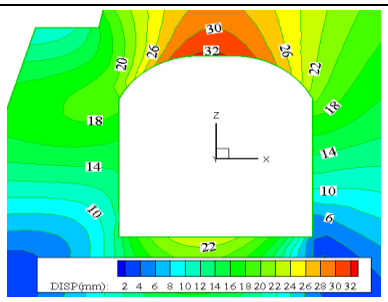
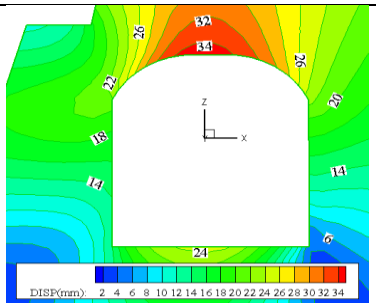
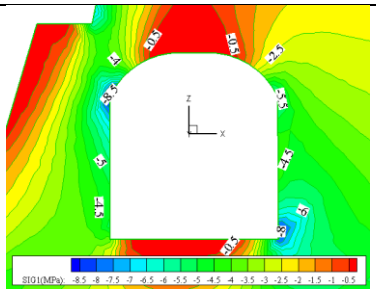
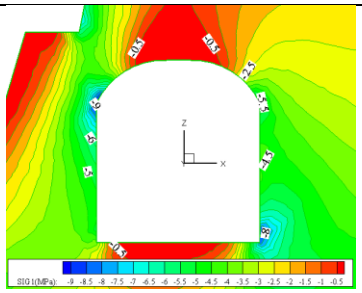
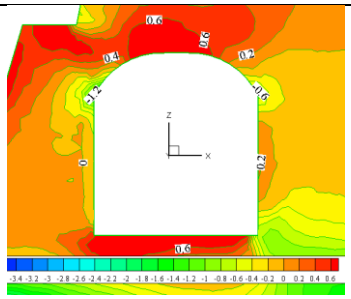
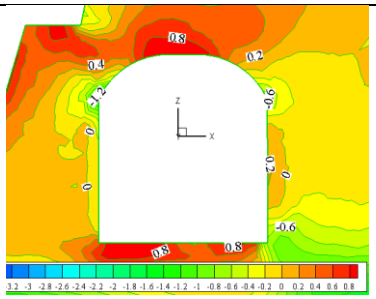
	先左后右开挖	先右后左开挖
破坏接近度	 塑性区最大深度 1.75m（FAI_{Max}=1.41）	 塑性区最大深度 1.93m（FAI_{Max} =1.47）
位　移	 最大值 32mm	 最大值 34mm
最大主应力	 最大值 8.5MPa	 最大值 9MPa
最小主应力	 拉应力最大值 0.6MPa	 拉应力最大值 0.8MPa

表 4 4#导 0+035 断面处两种开挖方式计算结果对比

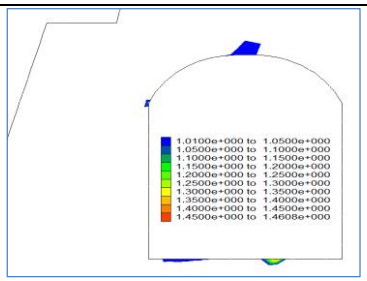
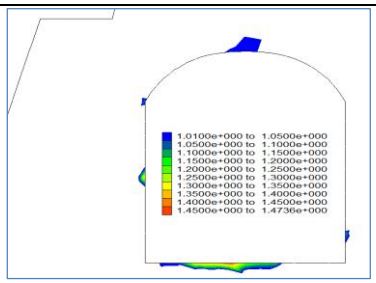
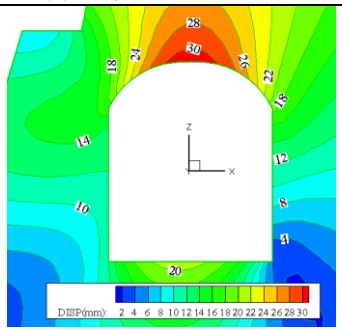
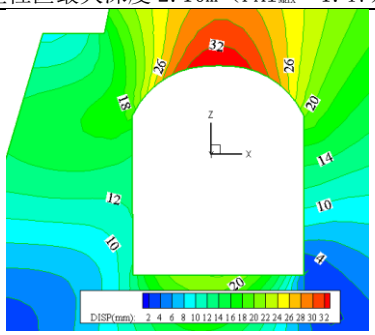
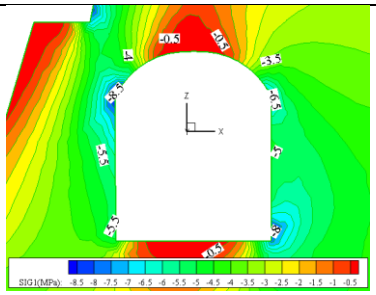
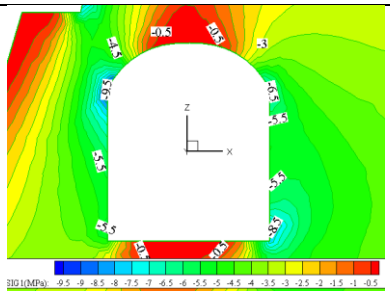
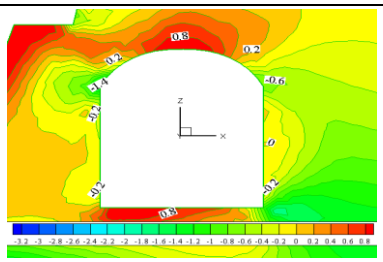
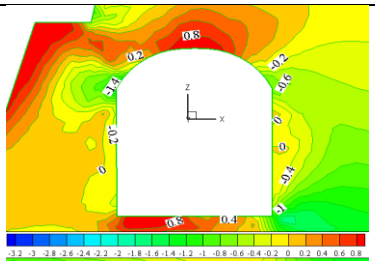
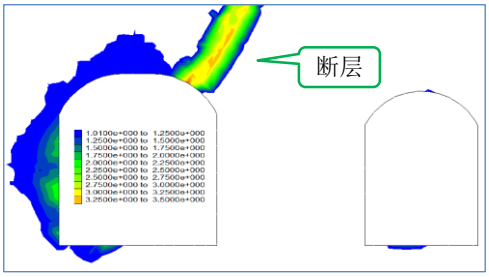
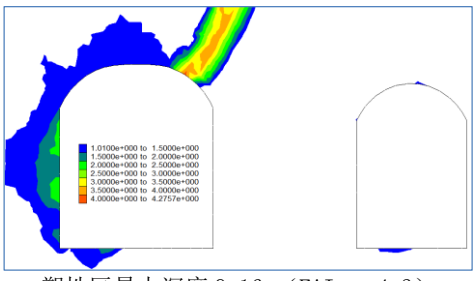
	先左后右开挖	先右后左开挖
破坏接近度	 塑性区最大深度 2.05m（FAI_{Max} =1.46）	 塑性区最大深度 2.10m（FAI_{Max} =1.47）
位移	 最大值 30mm	 最大值 32mm
最大主应力	 最大值 8.5MPa	 最大值 9.5MPa
最小主应力	 拉应力最大值 0.8MPa	 拉应力最大值 0.8MPa

表 5 4#导 0+080 断面处两种开挖方式计算结果对比

	先左后右开挖	先右后左开挖
破坏接近度	 塑性区最大深度 9.03m（FAI_{Max} =3.5）	 塑性区最大深度 9.16m（FAI_{Max} =4.3）

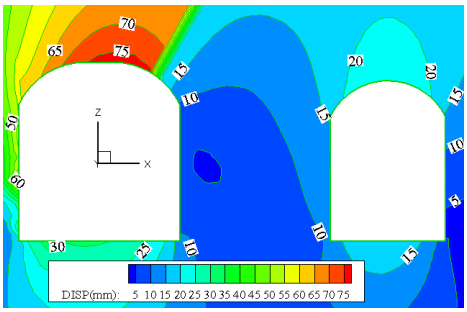
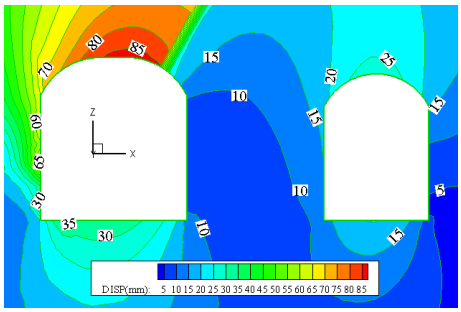
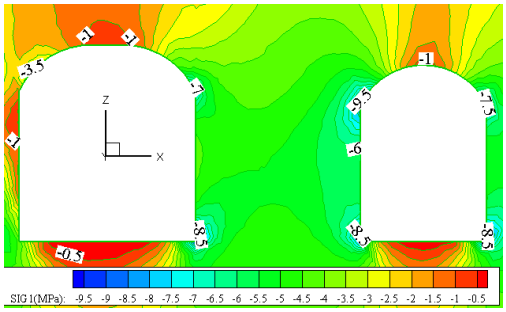
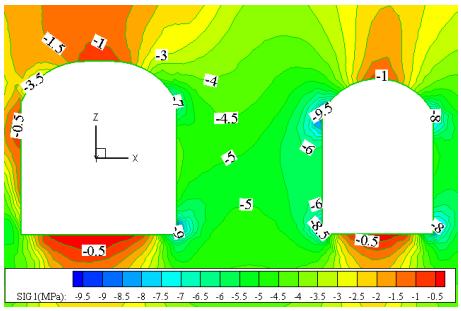
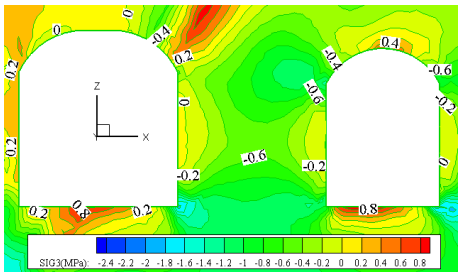
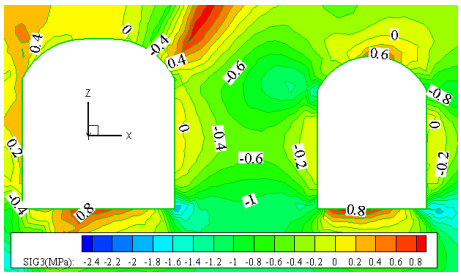
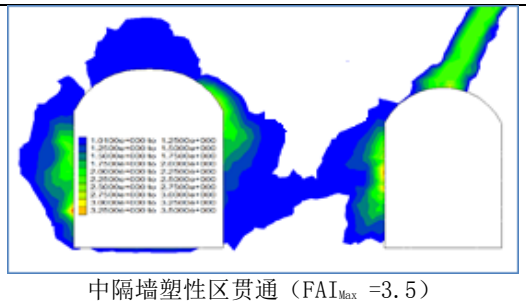
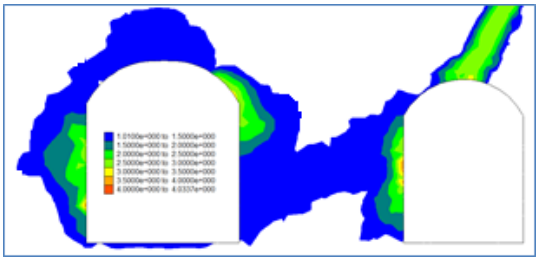
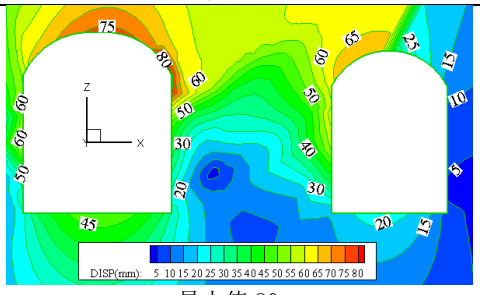
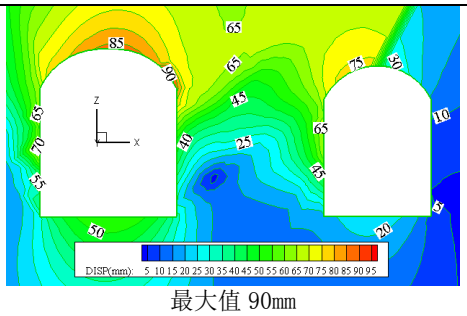
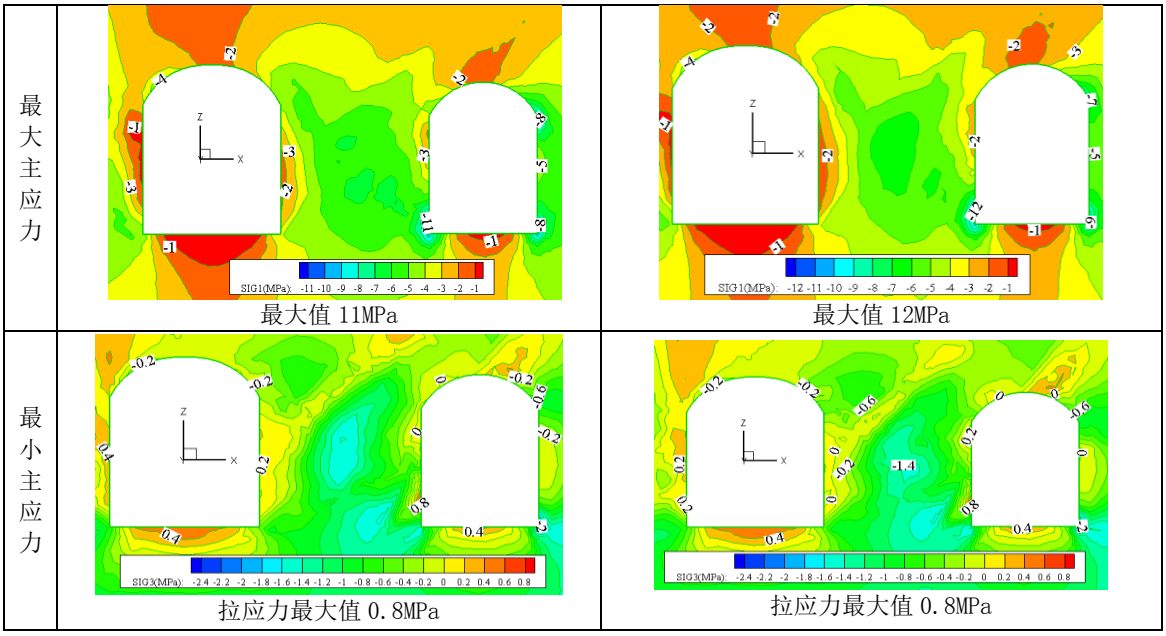
位移	 最大值 75mm	 最大值 85mm
最大主应力	 最大值 9.5MPa	 最大值 9.5MPa
最小主应力	 拉应力最大值 0.8MPa	 拉应力最大值 0.8MPa

表 6 4#导 0+105 断面处两种开挖方式计算结果对比

	先左后右开挖	先右后左开挖
破坏接近度	 中隔墙塑性区贯通（FAI_{Max} =3.5）	 中隔墙塑性区贯通（FAI_{Max} =4.5）
位移	 最大值 80mm	 最大值 90mm



将表 3～6 并中各断面不同开挖方式下围岩塑性区的深度、最大位移值，最大主应力值及拉应力最大值列于表 7。由该表可知，先左后右开挖方案要优于先右后左开挖方案。值得注意的是，4#导 0+080 及 0+105 断面对应的塑性区深度、最大位移、最大主应力及拉应力最大值均较大，围岩接近不稳定状态；特别是 0+105 断面的中隔墙区域塑性区已贯通，应重点加强支护。

表 7 各典型断面处不同开挖方式下围岩力学性质对比

对比内容	塑性区深度/m		最大位移/mm		最大主应力/MPa		拉应力最大值/MPa	
开挖顺序	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左
0+010 断面	1.75	1.93	32	34	8.5	9	0.6	0.8
0+035 断面	2.05	2.10	30	32	8.5	9.5	0.8	0.8
0+080 断面	9.03	9.16	75	85	9.5	9.5	0.8	0.8
0+105 断面	中隔墙塑性区贯通	中隔墙塑性区贯通	80	90	11	12	0.8	0.8

3.2 Ⅱ、Ⅲ层不同开挖步序的围岩稳定性对比

为对比各工况下中隔墙的岩体力学行为，本文拟定了 3#、4#导流洞的顶拱（点 1、1’），拱座（点 2、2’、3、3’），及边墙中部（点 4、4’、5、5’）的Ⅱ、Ⅲ层的开挖位移增量（如图 7 所示）。需要说明的是，对于 3#进口渐变段而言，所关注的断面监测点是 1~5，而对于 4#导流洞进口渐变段，关注的断面监测点是 1’~5’。

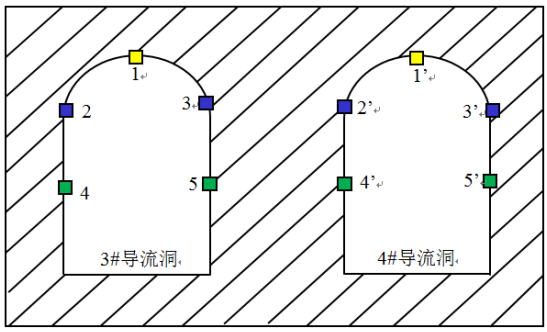
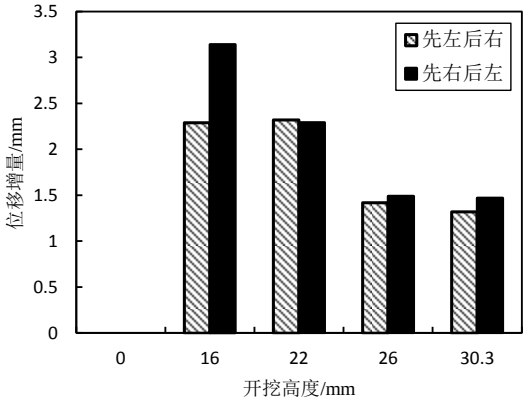


图 7 对比监测点编号

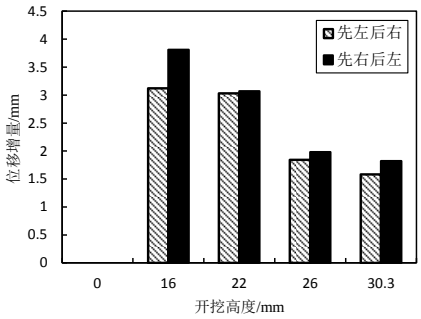
表 8 及图 7～10 为Ⅱ、Ⅲ层两种开挖方式下典型断面监测点处位移增量的结果对比，从中可以看出，在各断面监测点位移增量上，先左后右开挖方案结果要整体上要小于先右后左开挖方案结果（尽管个别点处的位移增量不服从该规律）。因此，从位移增量的结果对比上，Ⅱ、Ⅲ层开挖方式应采用先左后右的开挖方案。

表 8 各典型断面处Ⅱ、Ⅲ层先右后左开挖监测点位移增量变化

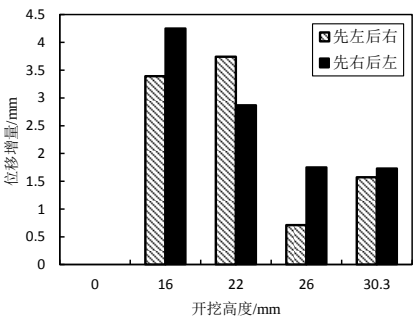
典型断面	开挖高度/m	顶拱/mm		左侧拱座/mm		右侧拱座/mm		左侧边墙/mm		右侧边墙/mm	
		先左后右	先右后左	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左	先左后右	先右后左
0+010	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	26.78	26.78	10.95	10.95	12.08	12.08	5.20	5.20	3.02	3.02
	16	2.29	3.14	3.12	3.81	3.39	4.25	3.03	3.02	1.67	2.05
	22	2.32	2.29	3.03	3.07	3.74	2.87	3.13	3.38	4.09	4.41
	26	1.42	1.49	1.84	1.98	0.71	1.75	1.79	2.06	2.68	2.99
	30.3	1.32	1.47	1.58	1.82	1.57	1.73	1.77	1.99	2.31	2.54
0+035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	27.06	27.06	10.95	10.95	10.14	10.14	6.98	6.98	4.10	4.10
	16	1.94	2.66	3.12	3.81	3.41	4.18	1.99	2.08	-0.19	-0.17
	22	1.66	1.87	3.03	3.07	2.76	2.78	1.42	1.60	1.88	2.29
	26	1.31	1.21	1.84	1.98	1.47	1.66	0.89	1.01	2.79	3.09
	30.3	1.06	1.19	1.59	1.82	1.46	1.61	0.85	1.01	2.22	2.58
0+080	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	58.76	58.76	15.99	15.99	4.90	4.90	7.13	7.13	6.76	6.76
	16	6.96	8.43	17.70	20.80	1.82	2.10	2.08	2.56	0.92	0.67
	22	7.27	7.42	10.63	12.34	1.39	1.44	11.67	13.80	-2.53	-2.98
	26	5.59	5.82	8.33	8.72	0.89	1.01	22.62	23.22	0.04	0.30
	30.3	3.90	5.08	4.96	6.64	0.93	1.08	12.13	14.87	0.86	0.97
0+105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	62.70	62.70	17.71	17.71	31.03	31.03	10.61	10.61	12.31	12.31
	16	6.45	7.94	16.82	19.11	18.28	22.08	3.97	4.53	4.27	4.48
	22	6.76	6.70	9.85	11.81	19.70	17.72	12.51	17.80	5.53	3.25
	26	5.27	5.26	9.84	9.64	10.79	8.59	32.09	31.40	8.63	11.80
	30.3	3.43	4.53	3.66	5.66	7.33	8.55	8.10	11.64	12.66	14.89



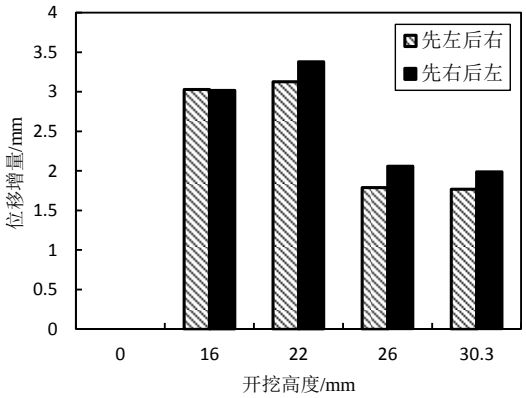
（a）顶拱变形增量



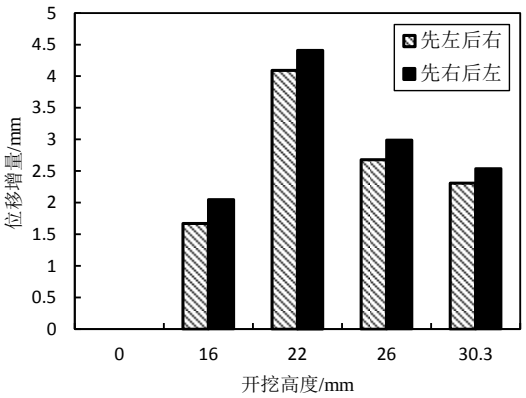
（b）左侧拱座变形增量



（c）右侧拱座变形增量

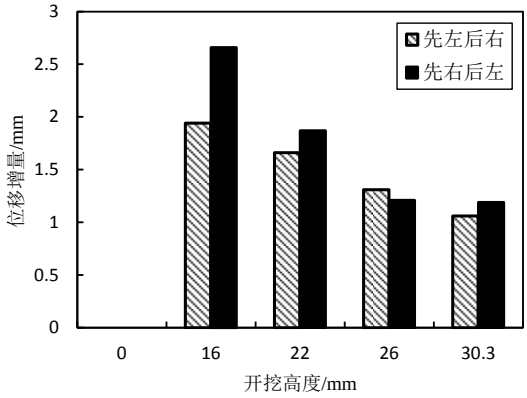


（d）左侧边墙变形增量

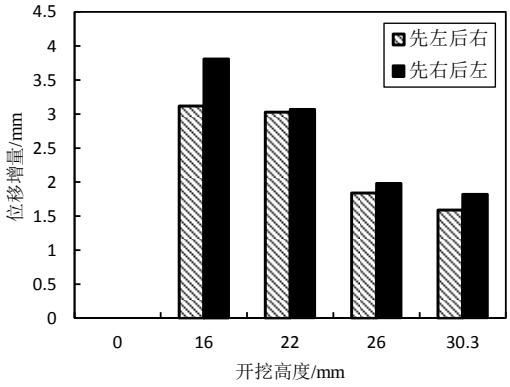


（e）右侧边墙变形增量

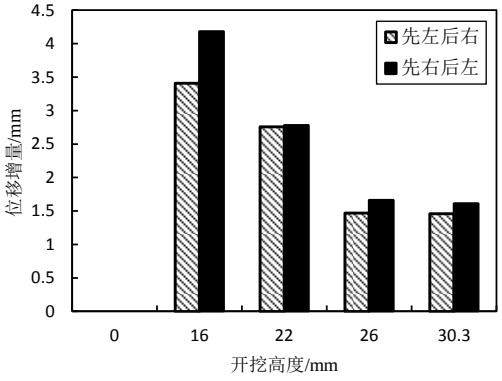
图 7 0+010 断面监测点位移增量



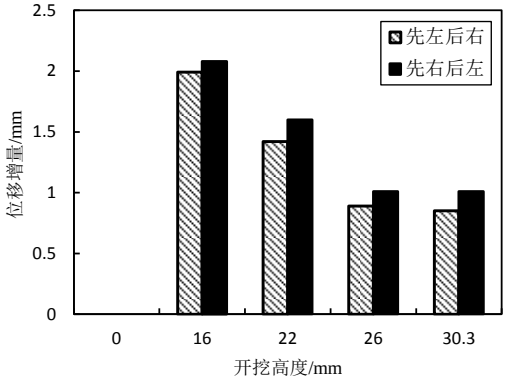
（a）顶拱变形增量



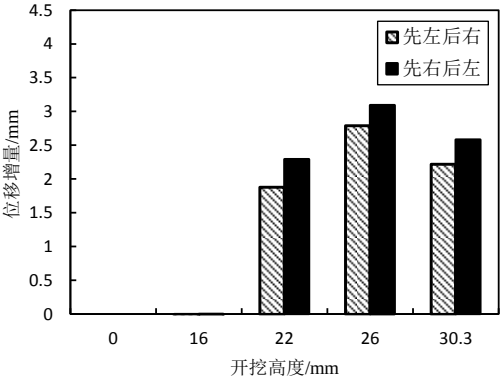
（b）左侧拱座变形增量



（c）右侧拱座变形增量

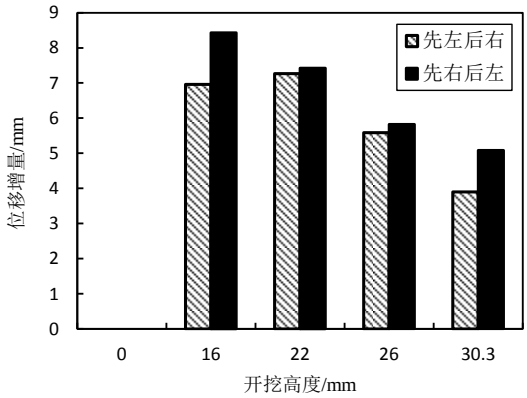


（d）左侧边墙变形增量

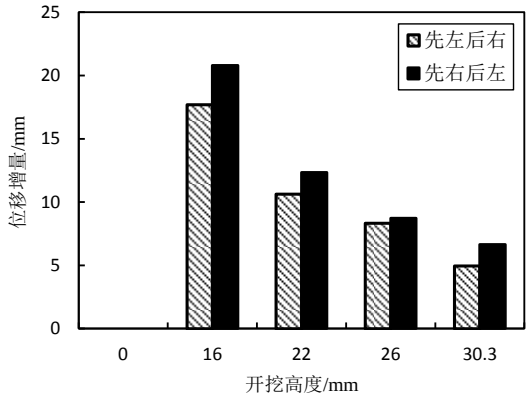


（e）右侧边墙变形增量

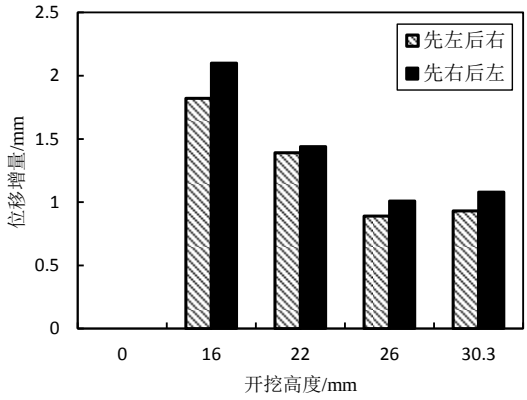
图 8　0+035 断面监测点位移增量



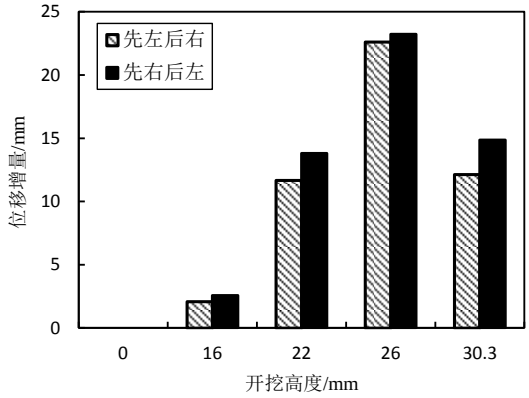
（a）顶拱变形增量



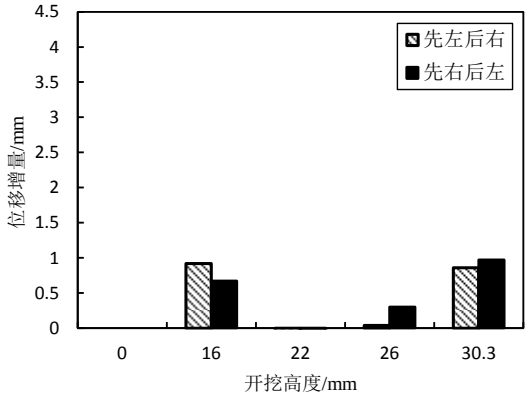
（b）左侧拱座变形增量



（c）右侧拱座变形增量

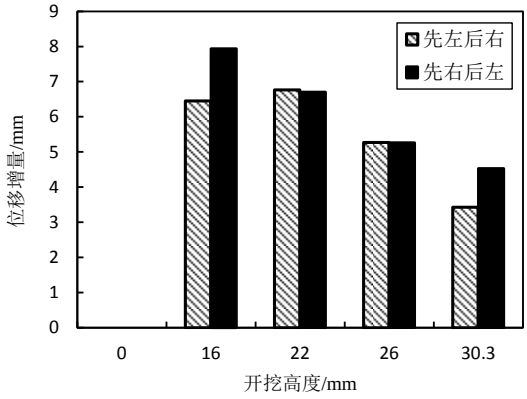


（d）左侧边墙变形增量

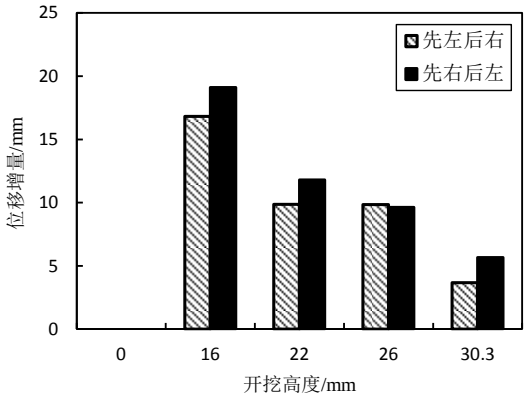


（e）右侧边墙变形增量

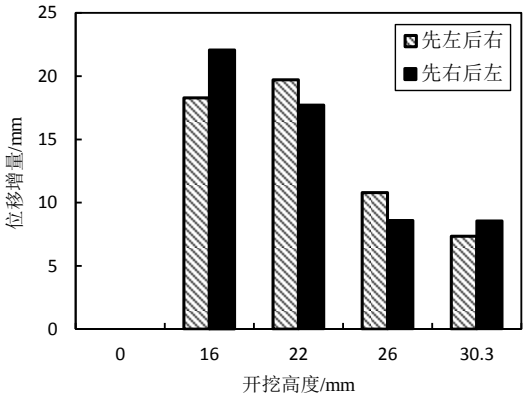
图 9 0+080 断面监测点位移增量



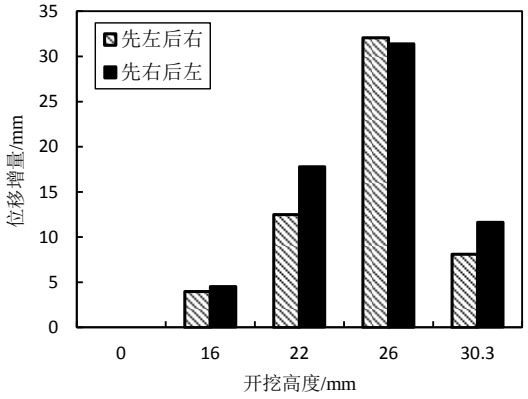
（a）顶拱变形增量



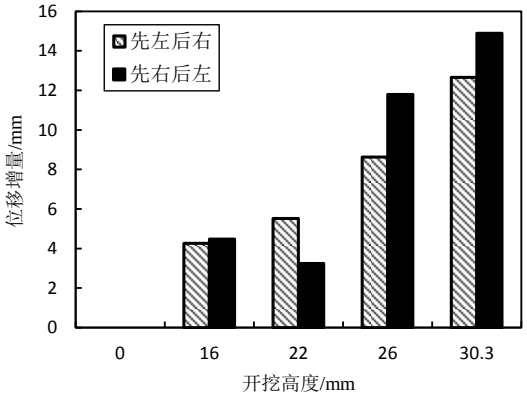
（b）左侧拱座变形增量



（c）右侧拱座变形增量



（d）左侧边墙变形增量



（e）右侧边墙变形增量

图 10 0+105 断面监测点位移增量

3 结语

（一）通过上述的计算分析，对比各断面在Ⅱ、Ⅲ层先左后右开挖及先右后左开挖的不同开挖方式下围岩的塑性区深度、最大破坏接近度值、最大位移值、最大主应力值及拉应力最大值可知，先左后右开挖方案要明显优于先右后左开挖方案。

（二）受断层及Ⅴ类围岩的影响，断层下游 3、4#导流洞中隔墙区域处于极不稳定的状态，因此，无论采用何种开挖方案，均应加强该区域的超前探测工作，并及时进行超前支护，必要时应对该洞段的 3#导流洞顶拱及左侧边墙施加锚筋桩（长度 18m）支护，并及时架设钢拱架；同时，对 3、4#导流洞中隔墙增加预应力对穿锚索，以确保该洞段中隔墙的稳定性。

参考文献：

[1] 钮新强，石伯勋，翁永红,等. 金沙江乌东德水电站可行性研究报告[R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司，2011.

[2] 长江设计公司乌东德水电站设计代表处.金沙江乌东德水电站施工地质简报(总第 5-60 期) [R].武汉:长江勘测规划设计研究有限责任公司，2012.

[3] Itasca Consulting Group.FLAC3D.Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, user's manual[S].Minneapolis,Minnesota, USA, 2005.

[4] 刘鸿文. 材料力学(第 5 版)[M]. 北京: 高等教育出版社，2011.

长河坝砾石土心墙堆石坝三维地震反应分析

杨　星[1]，张　丹[1]，李红军[2]

（1.中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072；
2.中国水利水电科学研究院，北京 100038）

摘　要：通过三维非线性动力响应分析方法，对比分析了长河坝砾石土心墙堆石坝在旧规范和新规范场地谱设计地震和最大可信地震作用下的地震响应。分析结果表明，由于旧规范具有包络特性的一致概率反应谱和新规范按最大发生概率原则确定的设定地震场地相关反应谱存在较大差异，得到的两种场地谱地震动作用下的坝体抗震安全评价指标也有较大差异，但长河坝砾石土心墙堆石坝的抗震安全性均可得到有效保证。

关键词：长河坝水电站；心墙堆石坝；场地相关反应谱；地震响应；抗震安全

1 引言

水工建筑物抗震设计规范是一种以现有的科学水平和经济条件为前提，根据积累的抗震经验和资料不断修订完善的专门性技术规范。汶川大地震后，许多学者通过对震害实例考察和分析，深入研究了水工建筑物地震破坏形式、震害机理、抗震加固措施等方面的经验和教训[1-2]。在此基础上，对《水工建筑物抗震设计规范》（DL5073-2000）[3]（下称旧规范）进行了修编，并于 2015 年发布了《水电工程水工建筑物抗震设计规范》（NB35047-2015）[4]（下称新规范），以更好地指导强震区水工建筑物的抗震设计[5]，其中新规范明确提出了对进行专门的场地地震安全性评价的抗震设防类别为甲类的工程，其设计反应谱应采用场地相关设计反应谱。

2016 年建成的长河坝水电站砾石土心墙堆石坝，最大坝高 240m，是位于深厚覆盖层上的世界最高土石坝，地震设防烈度Ⅸ度，是一座集超高心墙堆石坝、深厚覆盖层、高地震设防烈度和狭窄河谷四大难题于一体的工程。本文通过建立的可考虑坝体-防渗体动力相互作用的三维非线性地震反应分析方法，对比分析新、旧水工建筑物抗震设计规范场地谱地震波作用下大坝的地震响应，在此基础上对长河坝大坝进行抗震安全评价。

2 计算方法与输入地震动

2.1 动力本构模型

筑坝料的动力本构模型采用三维非线性动力本构模型，该模型将土体视为黏弹塑性变形材料，模型由初始加荷曲线、移动的骨干曲线和开放的滞回圈组成。动力计算参数根据中国水科院完成的长河坝坝料动力特性试验成果选取，由于篇幅所限，具体见文献[6]。图 1 为长河坝坝体坝基三维有限元网格，共包含 16216 结点和 21194 个单元，其中顺河向为 X 方向，指向下游为正，竖向为 Y 向，垂直向上为正，坝轴向为 Z 向，指向右岸为正。

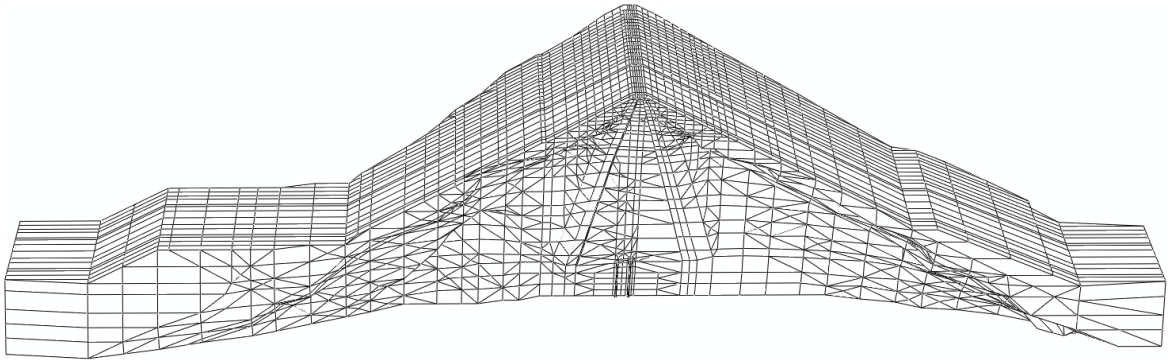


图 1 三维有限元网格

2.2 输入地震波

根据场地地震安全性评价成果，坝址区地震基本烈度为Ⅷ度，100 年超越概率 2%的基岩峰值加速度为 359gal，100 年超越概率 1%的基岩峰值加速度为 430gal。计算同时输入顺河向、横河向和竖向地震，竖向地震输入加速度峰值取为水平向的 2/3。设计地震根据旧规范一致概率谱拟合的顺河向加速度时程曲见图 2，以新规范设定地震场地相关反应谱为目标谱拟合了 3 组（9 条）人工地震动加速度时程，其中第 3 组计算的地震响应最大，以下新规范以第 3 组地震动计算结果为代表，第 3 组顺河向加速度时程曲线见图 3，新旧规范加速度反应谱见图 4。

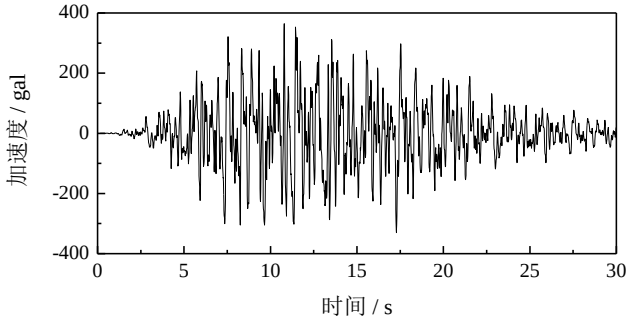


图 2 旧规范场地谱拟合人工地震波

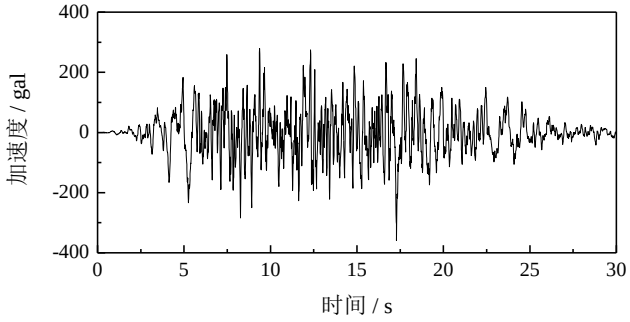


图 3 新规范场地相关谱拟合人工地震波

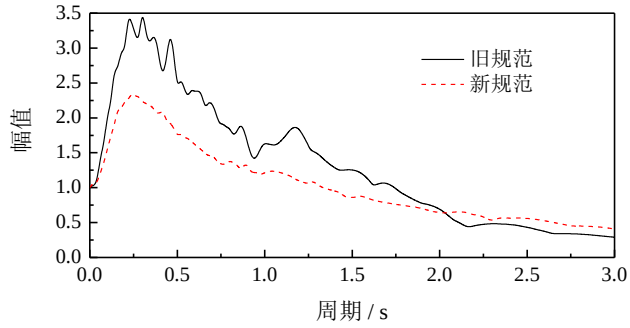


图 4 新旧规范加速度反应谱（阻尼比 5%）

3 计算结果与分析

3.1 设计地震动

旧规范和新规范场地谱设计地震动作用下大坝最大剖面顺河向加速度响应分别见图 5 和图 6。由图 5 和图 6 可以看出，坝体内顺河向加速度反应总体不大，甚至由于坝基覆盖层和心墙材料阻尼的作用，坝体内部加速度响应随着高程增加略有减小，但在坝顶部加速度等值线较密集，且位置越高，加速度响应越大，增加的速率也越快，表现出坝顶部存在明显的“鞭梢效应”，但新规范的顺河向加速度响应最大值小于旧规范的顺河向加速度响应最大值。设计中采取的在坝顶部铺设经编土工格栅、坝面铺设大块石压重护坡等抗震加固措施，可有效降低地震过程中坝顶部发生动力破坏的可能性。

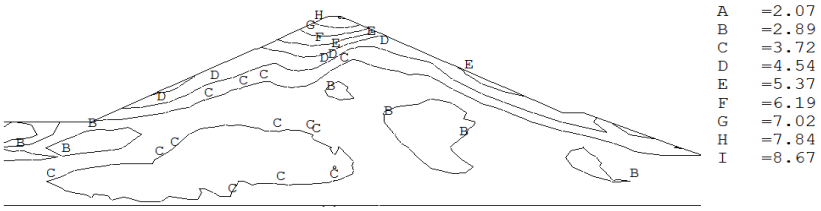


图 5 旧规范最大剖面顺河向加速度分布（m/s2）

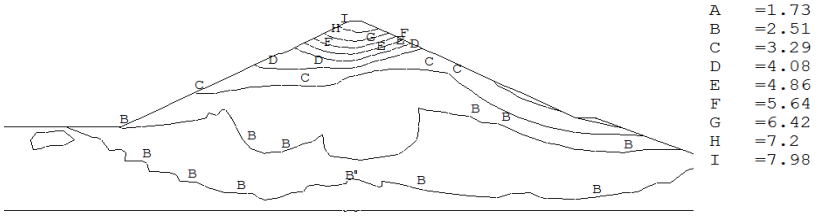


图 6 新规范最大剖面顺河向加速度分布（m/s2）

旧规范和新规范场地谱设计地震动作用下大坝竖向地震永久变形分别见图 7 和图 8。由计算结果可知，设计地震动作用下，坝体竖向地震永久变形在河谷中央坝顶达到最大，最大沉降量分别为 1.18m 和 0.95m，最大震陷率分别约为坝高的 0.5%和 0.4%（不含覆盖层）。为体现坝顶及心墙沿坝轴线震陷的不均匀性，采用震陷倾度作为衡量指标，震陷倾度定义为坝顶最大震陷与最大震陷部位距岸坡距离的比值。设计地震动作用下，旧规范和新规范震陷倾度分别约为 0.47%和 0.38%，符合一般分布规律，坝体具备良好地抵抗地震变形的能力。

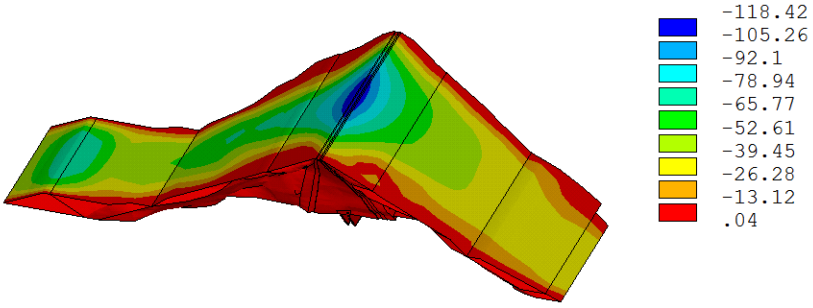


图 7 旧规范坝体竖向地震永久变形（cm）

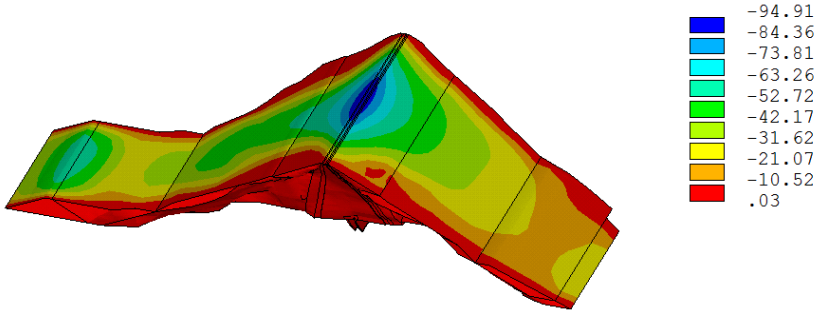


图 8 新规范坝体竖向地震永久变形（cm）

旧规范和新规范场地谱设计地震动作用下的计算结果汇总见表 1。

表 1 设计地震动作用下新旧规范计算结果汇总

输入地震动	最大加速度（m/s^2）/放大倍数			地震永久变形（cm）		
	顺河向	坝轴向	竖向	顺河向	坝轴向	竖向
旧规范	9.1/2.5	7.3/2.0	6.2/2.6	21.3/-19.6	-34.8/34.5	118.4
新规范	8.3/2.3	5.7/1.6	4.9/2.0	17.5/-14.5	-27.3/27.9	94.9

注：地震永久变形顺河向以向下游为正，坝轴向以向右岸为正。

3.2 最大可信地震动

旧规范和新规范场地谱最大可信地震动作用下的计算结果汇总见表 2。

表 2 最大可信地震动作用下新旧规范计算结果汇总

输入地震动	最大加速度（m/s^2）/放大倍数			地震永久变形（cm）		
	顺河向	坝轴向	竖向	顺河向	坝轴向	竖向
旧规范	10.1/2.35	8.3/1.93	7.2/2.51	26.8/-23.1	-42.2/41.2	143.5
新规范	9.2/2.1	6.5/1.5	5.7/2.0	19.6/-16.3	-29.5/29.4	101.1

注：地震永久变形顺河向以向下游为正，坝轴向以向右岸为正。

旧规范和新规范场地谱最大可信地震动作用下，大坝竖向地震永久变形同样在河谷中央的坝顶达到最大，最大沉降量分别约为 1.44m 和 1.01m，最大震陷率约为 0.60%和 0.42%（不含覆盖层），震陷倾度约为 0.57%和 0.4%，最大震陷率在不含覆盖层和不考虑坝顶土工格栅抗震加固措施等的情况下仍小于新规范 0.6～0.8%的建议允许值，因此，从地震永久变形的角度，最大可信地震作用下大坝的抗震安全性仍可得到有效保证。

由以上旧规范和新规范场地谱设计地震和最大可信地震作用下的计算结果可以得到，旧规范计算的坝体三个方向的最大加速度响应和地震永久变形幅值高于新规范的计算结果。由图 4 可以看出，旧规范具有包络特性的一致概率反应谱的谱值在坝体主要参与振型的周期范围内大于新规范按最大发生概率原则确定的设定地震场地相关反应谱的谱值，且新规范场地相关反应谱峰值区域宽度较窄，坝体自振周期与峰值区域相差较远，因而，根据新规范计算的坝体地震响应小于根据旧规范的计算结果，但两种场地谱设计地震和最大可信地震作用下长河坝坝体的抗震安全性均可得到有效保证，满足现行水工建筑物抗震设计规范的大坝抗震安全性要求。

4 结语

由于旧规范具有包络特性的一致概率反应谱和新规范按最大发生概率原则确定的设定地震场地相关反应谱存在较大差异，导致两种场地谱地震动作用下的坝体抗震安全评价指标也有较大差异，但长河坝大坝的抗震安全性均可得到有效保证，满足现行水工建筑物抗震设计规范的抗震安全性要求。长河坝砾石土心墙堆石坝作为深厚覆盖层上世界已建最高土石坝，鉴于地震的不确定性和本工程的复杂性，其抗震安全问题仍是后续关注的重点之一。

参考文献：

[1] 杨星, 刘汉龙, 余挺, 等. 高土石坝震害与抗震措施评述[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(5): 583-590.
[2] 刘小生, 赵剑明, 杨玉生, 等. 基于汶川地震震害经验的土石坝抗震设计规范修编[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(11): 2111-2118.
[3] 水工建筑物抗震设计规范: DL 5073-2000[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
[4] 水电工程水工建筑物抗震设计规范: NB 35047-2015[S]. 北京: 国家能源局, 2015.
[5] 陈厚群. 水工建筑物抗震设计规范修编的若干问题研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 4-10+15.
[6] 中国水利水电科学研究院. 长河坝砾石土心墙堆石坝抗震安全性复核分析[R]. 2016

云南省内滑坡安全与监控

张礼兵，魏天清，冯燕明，肖长安

（中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，云南　昆明　650051）

摘　要：云南省通过综合物探手段开展滑坡体地质性状识别，为滑坡体监测布置及分析评价提供数据和依据，运用在线及移动式监测技术（必要时采用综合物探方法进行快速探测）实时掌握滑坡体工作性状。综合应用物探及监测成果，对滑坡体进行快速准确、高效低成本的安全评价和分级预警。

关键词：滑坡；综合物探；分级预警；综合研判；可视化

1 引言

据不完全统计，云南省内规模较大的滑坡、泥石流灾害点有近 4000 个，全省每年因滑坡、泥石流造成的经济损失较大。全省有上百个城镇及乡村、矿山、大中小型水电站及水库、超过 1000km 铁路和公路受到滑坡、泥石流的威胁和损坏，每年均有上 10^4 户农户生命财产受到滑坡、泥石流的威胁，农田被毁等，严重影响云南省经济社会发展和社会稳定。由此可见，云南省由自然环境及人工建坝形成的滑坡体数量多、规模大，已经严重威胁到人员及公共设施的安全，对滑坡体进行安全识别、监测及预警尤显必要。

2 基于综合物探的勘查技术

综合物探方法是为了克服单一物探方法受自身特点的限制，进一步提高资料解释精度，以各种单一物探方法为基础，把 2 种或 2 种以上的物探方法有效地组合起来进行探测和解释，从而大大提高物探成果解释精度，达到共同完成或解决某一地质或工程问题的目的。就其分类来说，综合地球物理技术又可以分为两种：①地球物理联合反演方法；②地球物理成果综合解释方法[1]。

通过对基于三维 3S 的综合物探的勘查技术的研究，解决滑坡体探测中综合物探方法组合的选择、物探成果的综合解译，以及基于结构和物性的滑坡体三维建模等问题，在对滑坡体无扰动的情况下，完成对滑坡体地质结构等基本情况的探查，为滑坡体成因及性态分析、监测及工程措施提供基础资料，见图 1。

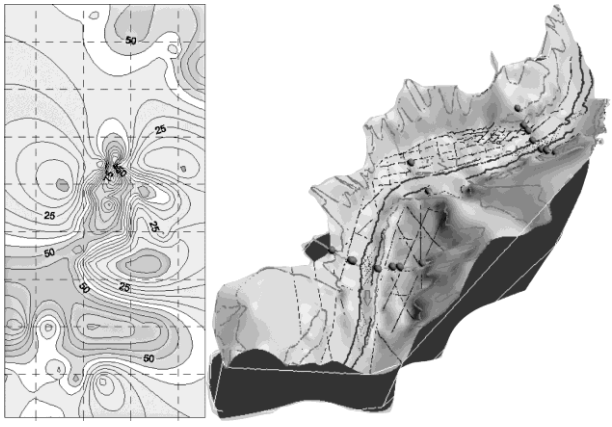


图 1　综合物探成果图

3 滑坡体监测及仪器设备

研究内容包括滑坡体监测方案、移动式变形监测和实时在线监测技术等，其中移动式变形监测系统可用于滑坡体现状（变形规律与量级）的大范围、大规模调查，可在车辆或船等载体移动情况下完成对滑坡体的扫描、数据解译、变形监测等，实时在线监测系统需在滑坡体上布置较为完善的监测系统，实现滑坡体精密、快速的自动化监测，该技术用于需要实时监测和预警的重大滑坡体[2]。

移动式变形监测如地基合成孔径雷达（Ground-based Synthetic Aperture Radar，GB-SAR），它主要应用宽带雷达探测技术对雷达信号辐射区域进行高分辨距离域成像，利用合成孔径雷达技术提高方位向分辨能力，并利用微波干涉测量技术对目标形变量进行提取计算[3]。对于小区域变形监测，地基 SAR 比星载 SAR 更加稳定，它可以专门为监测目标区域建立特定的几何场景，并根据目标特点选择较为方便的短时间基线，是星载 SAR 测量技术的有效补充，在星载 SAR 难以满足监测时空分辨率和精度要求的情况下能够得到较好的应用[4-8]。

地基合成孔径雷达由雷达主机、电脑控制单元、供电相和线性滑轨等组成，主要应用于滑坡、大坝、高边坡等面状区域的二维变形监测，标称形变探测精度能够达到亚 ymm 级，见表 1。监测成果见图 2。

表 1　地基合成孔径雷达系统基本配置参数表

雷达控制单元	信号频段	Ku
	信号类型	SFCW
	孔径类型	合成孔径
天线	增益	18dBi
	极化方式	VV
	主瓣-3dB 角宽	75° H/90° V
分辨率	空间分辨率	0.3
	方位向分辨率/ mrad	4.0
最大监测距离/ m		4000
变形监测灵敏度/mm		0.1

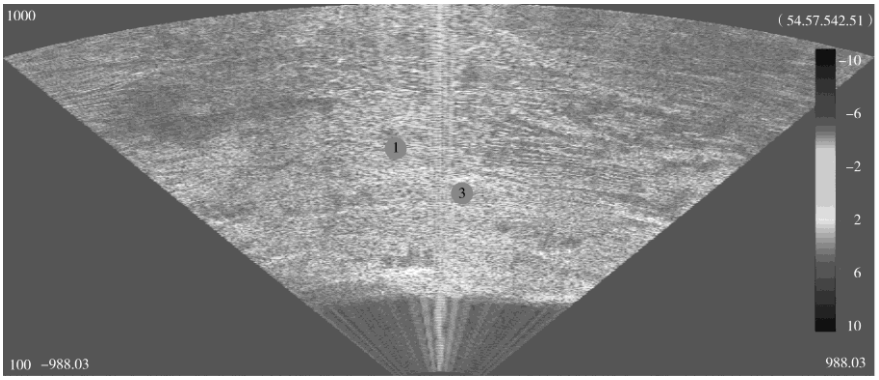


图 2　Insar 监测成果图

4 滑坡体安全评价及分级预警体系研究

目前边坡稳定性评价方法多种多样，但由于边坡稳定受多方面因素影响，而各因素具有不确定性(模糊性、随机性、信息不完全性和未确定性)和复杂性，故传统的确定性分析方法如极限平衡理论用于边坡分析，结果不十分理想[9]。采用定量理论法（层次分析法、因子分析法、相关系数法、均数法等）和定性经验半经验法（德尔菲法等）对不同的分级项目进行权重分配和建模计算，确定综合评判指标，实现滑坡体安全评价、健康诊断及分级动态预警等。

滑坡变形演化的 3 阶段规律，典型边坡位移-时间曲线形态及演化阶段是一个由量变到质变的渐进过程。大量的边坡监测数据分析表明，在边坡变形失稳的发展演化过程中，从开始出现变形到最终的失稳破坏，其累积位移-时间曲线可以明显分为初始变形、等速变形和加速变形 3 个阶段[10-11]，见图 3 所示。

第 1 阶段（AB 段）：初始变形阶段。该阶段变形从无到有，边坡体开始产生裂缝，位移-时间过程曲线出现相对较大的斜率，但随着时间的延续，曲线斜率有所减小，表现出减速变形的特征。

第 2 阶段（BC 段）：等速变形阶段。该阶段边坡体在初始变形阶段的基础上，在重力的作用下，边坡岩土体基本上以相同（近）速率在继续滑移。因不时受到外界因素的影响，其位移-时间过程曲线可能会有所波动，但此阶段变形曲线总体趋势为一倾斜直线。

第 3 阶段（CF 段）：加速变形阶段。对应边坡体的加速滑动阶段。当边坡体变形发展到一定的阶段后，变形速率会呈现出不断加速增长的趋势，直至边坡体整体失稳（滑坡）之前，其位移-时间过程曲线近于陡立。

从加速变形阶段（CF 段）可以看出，尽管该阶段内整体为加速滑动，但滑坡的运动状态前后差别很大。因此根据边坡位移-时间过程曲线的特点，又可将其细分为初加速、中加速和临滑阶段 3 个亚阶段，即图 3 中的 CD，DE 和 EF。滑坡速率和曲线斜率在这 3 个亚阶段中呈现出本质的变化，尤其是在临滑阶段由于变形急剧发展，曲线斜率呈现近于 90°的翘尾[12-15]。

边坡变形演化的 3 阶段规律是边坡岩土体在质量力作用下变形演化所遵循的一个普遍规律。在滑坡预警预报时应牢牢把握此时间演化规律，根据监测点的位移时间过程曲线准确地判断边坡所处的变形阶段，并据此采取针对性的应对策略和措施。

滑坡失稳破坏灾害预警级别划分，将地质灾害监测预警按变形破坏的发展阶段、变形速度、发生概率和可能发生的时间排序分为 4 级：注意级、警示级、警戒级、预报级。将上述 4 级分别以蓝色、黄色、橙色、红色予以标示。

注意级(蓝色)：地质灾害隐患点进入匀速变形阶段，有变形迹象，1a 内发生地质灾害的可能性不大，定为蓝色预警。

警示级(黄色)：地质灾害隐患点变形进入加速阶段初期，有明显的变形特征，在数月内或 1a 内发生大规模边坡失稳破坏的概率较大，定为黄色预警。

警戒级(橙色)：地质灾害隐患点变形进入加速阶段中后期，有一定的宏观前兆特征，在几 d 内或数周内发生大规模边坡失稳破坏的概率大，定为橙色预警。

预报级(红色)：地质灾害隐患点变形进入临滑阶段，各种短临前兆特征显著，在数 h 或数周内发生大规模边坡失稳破坏的概率很大，定为红色预警。

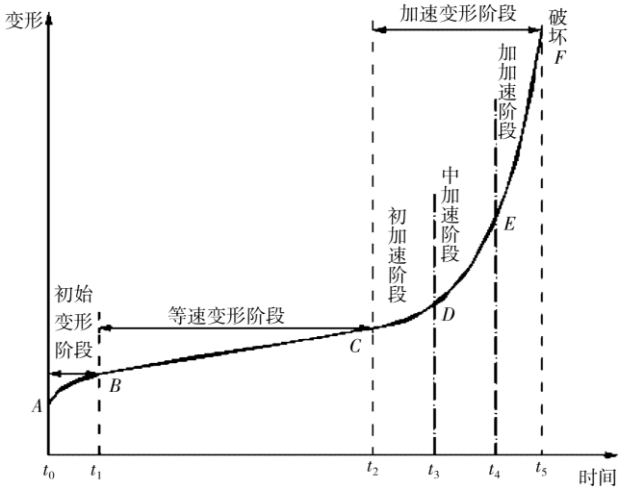


图 3　边坡变形失稳破坏的演化过程图

4　综合物探与监测技术的综合应用

通过综合物探手段开展滑坡体地质性状识别，为滑坡体监测（如监测布置等）及分析评价提供数据和依据，运用实时在线（重点滑坡体监测）和移动式监测技术（滑坡体性态普查）全面掌握滑坡体工作现状，并根据监测成果，必要时采用综合物探方法，对滑坡体的现状进行快速探测，综合应用物探及监测成果，对滑坡体进行快速准确、高效低成本的安全评价和分级预警，见图 4。

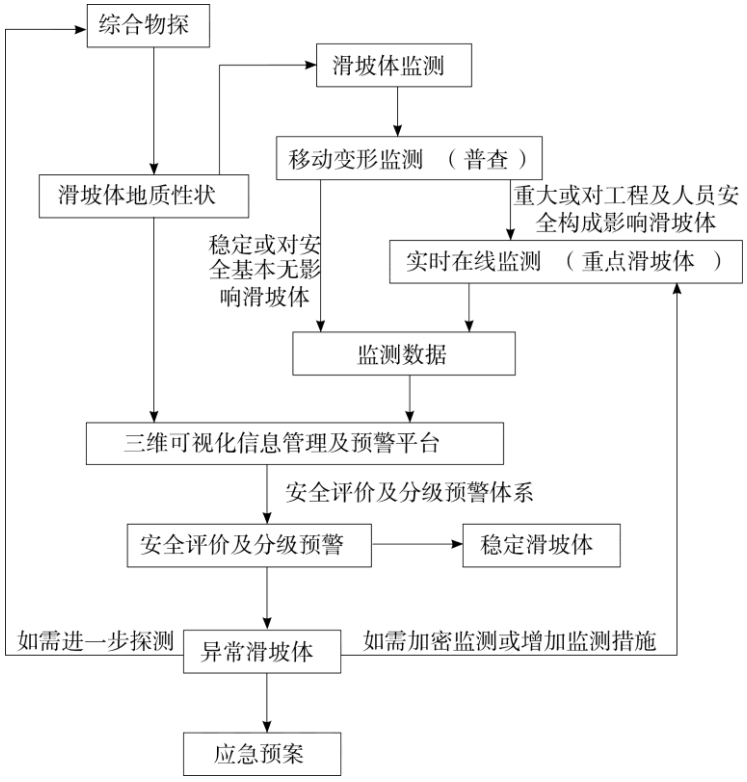


图 4　滑坡体综合研判与分析预警流程图

5　三维可视化的信息管理及预警系统

开发三维可视化的信息管理及预警系统，用户通过与三维模型的可视化交互操作，可查看滑坡体的基本情况（如范围、方量、厚度等）、监测及检测信息等，建立一套适用于滑坡体的综合预测方法和安全预警体系，并通过滑坡体变形监测信息和物探资料进行安全评价，对发展趋势进行预测并做出分析评价，最终实现滑坡体安全防控。

鉴于滑坡体信息的浏览、分析评价、预测预警等全在三维可视化平台上进行，实现了真正意义上的“所见即所得”，技术上具有先进性和创新性，同时更好的适应了用户的需求。

系统主要功能实现：适应安全监测、物探检测、地质等资料的规范化管理要求；快速处理大量数据；适应各种格式文件的数据导入；支持三维模型导航；各种报告制作方便；能够储存和输出各种工程信息；数据分析功能；数据预警机制；定期实时数据备份，见图 5。

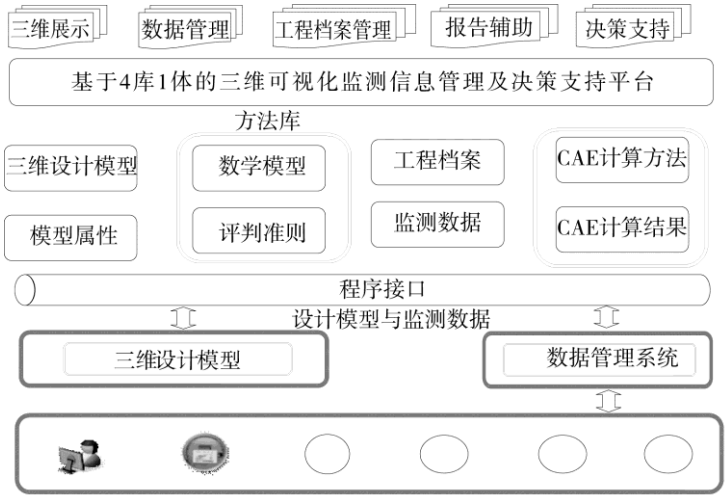


图 5　三维可视化信息管理及预警平台总体结构设计图

6 结语

通过综合物探手段开展滑坡体地质性状识别，为滑坡体监测布置及分析评价提供数据和依据，运用在线及移动式监测技术（必要时采用综合物探方法进行快速探测）实时掌握滑坡体工作性状。综合应用物探及监测成果，对滑坡体进行快速准确、高效低成本的安全评价和分级预警。

参考文献：

[1] 丁　玥.地质勘测中的综合物探技术应用[J].科技论坛,2017(16):107.

[2] 梁全辉. 边坡监测技术浅谈[J].科学之友,2010(9):27.

[3] 王振攀. 边坡雷达在矿区边坡监测区域的应用分析[J]. 信息与电脑(理论版), 2017(10):218-219.

[4] 赵东寅,申其鸿,马海涛，等.国产地基合成孔径雷达监测预警系统在紫金山金铜矿露天采场边坡位移监测的应用[J].中国安全生产科学技术，2015，11(4)：54-58.

[5] 王维勤,韦忠跟.MSR300 边坡雷达监测预警系统在凹山采场的应用[J].现代矿业，2017(1)：174-176.

[6] 韦忠跟.边坡雷达监测预警机制及应用实例分析[J].煤矿安全，2017，48(5)：221-223.

[7] 韦忠跟，王立文，徐玉龙.国内某露天矿边坡雷达监测数据分析[J].煤矿安全，2017，48(4)：223-225.

[8] 傅能武.紫金山金铜矿北口排土场边坡雷达监测预警系统的应用实践[J].现代矿业，2017(9)：176-177.

[9] 夏元友，李梅. 边坡稳定性评价方法研究及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2002，21(7)：1087-1091.

[10] 介玉新,柏永亮,张彬.边坡稳定分析中加速度临界滑动面研究[J]. 工程地质学报, 2017，25(5)：1238-1243.

[11] 冯燕明，李剑萍，等. 滑坡体综合研判与安全预警关键技术研究及示范研究报告[R]. 昆明：中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司，2017.

[12] 黄　春,柯善军,刘利勇.瀑布沟电站库区鹞子岩 2 号边坡塌岸预测与治理设计[J]. 水电站设计, 2017，33(4)：48-51.

[13] 孙东亚，陈祖煜，杜伯辉，等.边坡稳定评价方法 RM R-SM R 体系及其修正[J]. 岩石力学与工程学报,1997，16(4)：297-304.

[14] 杨　刚.基于层次—集对理论的边坡稳定评价模型[J]. 华北科技学院学报, 2015，12(6)：61-65.

[15] 洪　勇,邵珠山,马力.支持向量机在边坡稳定分析预测的应用[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2017，33(6)：1004-1010.

仁宗海水库电站大坝渗漏原因综合分析

周小来

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610213）

摘　要：仁宗海水库堆石坝采用坝面复合土工膜防渗，最大坝高 56m，坝基覆盖层最大深度 148m，坝基防渗采用悬挂式混凝土防渗墙，施工最大墙深 82m。大坝自 2008 年蓄水以来，坝后渗漏量一直较大，虽然经过 4 次检测和处理，渗漏量较蓄水初期有所减少，但是总渗漏量在国内同等规模工程中位居前列，大坝渗压计和坝后绕渗孔水位也较高，大坝渗漏异常情况已引起各方高度关注。根据大坝渗漏现象、帷幕施工及检查情况、渗流通道检测及历次处理和效果、监测资料、渗流计算分析成果，大坝渗漏的主要原因可能是坝面复合土工膜与趾板及防渗墙接头部位拉裂、坝面复合土工膜破损、左右岸坝肩防渗帷幕和防渗墙存在薄弱环节等。

关键词：复合土工膜防渗堆石坝；渗漏原因分析；仁宗海水库电站

1 工程概况

仁宗海水库电站位于四川省康定县境内的大渡河支流田湾河的上游，是田湾河流域梯级开发的龙头水库电站，主要开发任务为发电，无供水、灌溉、防洪等综合利用要求。仁宗海水库电站采用混合式开发，即在支流环河仁宗海海口建坝(堆石坝)壅高水位，并利用坝厂址间的天然落差在界碑石附近田湾河右岸建厂发电；同时，还包括在干流田湾河上建低坝(底格栏栅坝)，将干流的水量引入仁宗海水库集中调节的“引田入环”输水枢纽工程。

仁宗海水库正常蓄水位 2930.00m，死水位 2886.00m，水库总库容为 1.12 亿 m^3，具有不完全年调节性能，电站装机 240MW。

仁宗海水库电站主要由坝区枢纽、引水系统、厂区枢纽、“引田入环”输水枢纽和干沟泥石流防治建筑物等组成。

拦河大坝为坝面复合土工膜防渗堆石坝，坝顶高程 2934.00m，坝顶宽度 8m，坝顶总长度 843.87m，最大坝高 56m。坝基覆盖层最大深度 148m，坝基防渗采用悬挂式混凝土防渗墙，施工最大墙深 82m，墙厚 1m。两岸坝肩岩体防渗采用帷幕灌浆。

2 大坝运行情况

2009 年 4 月 1 日，仁宗海水库开始第二阶段蓄水，2009 年 7 月 6 日，水库水位上升至 2913m 时，右岸灌浆廊道与灌浆平洞交接处下游侧出现明显渗水。随着库水位上升，廊道内渗水量逐渐增大，廊道顶部、底板、上游侧边墙及灌浆平洞进口段均出现较大渗水，有明显渗水点的洞段长度约 200m，大坝下游坡脚排水沟也出现较大渗水。为此进行了右岸趾板、右岸上层灌浆平洞、右岸下层灌浆平洞等补充灌浆处理。2009 年 8 月 24 日，再次下闸蓄水，8 月 28 日水位升至 2913m 时，大坝灌浆廊道及下游坡脚处再次出现渗水，渗水量较 7 月份明显减小。2009 年 9 月 3 日，库水位在 2913m～2915m 时，大坝上游坝体坡面出现几处漏水点。

大坝自 2008 年 12 月开始蓄水以来，先后于 2009 年 7 月～8 月、2010 年 4 月、2011 年 4 月、2013 年 3 月～5 月四次组织对坝肩、坝基、坝体等部位进行了渗漏检测和缺陷处理。2011 年 4 月处理蓄水至正常蓄水位时，观测的渗漏量为 0.875m^3/s；2012 年 9 月 20 日，库水位 2930.03m 时，测得渗漏量 0.855m^3/s，2013 年 3 月～5 月处理后，2013 年 11 月 30 日渗漏量为 0.754m^3/s，渗漏量虽有所减少，但是其改善结果不是特别明显，目前仁宗海水库在正常蓄水位 2930m 时，渗漏量依然较大，约为 754L/s（初期蓄水时渗漏量大于 1000L/s）。

3 宏观分析

根据本工程特点和以往各工程的经验，坝后出现较大渗流水量往往可能基于以下一些主要原因：

（1）挡水结构（土工膜及其接缝、趾板、防渗墙及其接缝）局部施工缺陷或变形较大导致发生破损（破坏）引起的渗漏；

（2）地质条件复杂，帷幕防渗效果不好，导致沿坝基渗漏；

（3）帷幕灌浆深度、两岸延伸范围不足，致使库水经较短渗径绕过两坝肩及坝基的防渗体系产生绕坝渗漏问题；

（4）相邻建筑物内水外渗，进入坝体。

4 左岸渗漏分析

左岸渗漏现象主要为库水位蓄至 2908m~2909m 时，左岸廊道结构缝开始渗水, 主要为结构缝靠底板部位渗水，库水位升至 2919.5m 时，压重平台坡脚出现渗水。

左岸廊道内渗压计实测水位在 2885.40m~2885.05m 之间，从上游到下游，渗压计水位基本逐渐降低。廊道外侧水位与库水位相关性较小，渗流基本稳定，未见明显坝基渗漏情况。左岸灌浆平洞外绕渗孔水位在 2885.56m~2889.02m 之间，左岸坝体下游绕渗孔水位在 2882.07m~2886.13m 之间。从上游到下游，各绕渗孔水位逐渐降低。水位随库水位的变化而同步变化，但变幅相对较小，各绕渗孔水位低于库水位约 40~47m，表明左岸绕坝渗流情况不明显。

根据左岸渗漏现象、帷幕施工及检查情况、渗流通道检测及历次处理和效果、监测资料、渗流计算分析成果，综合分析左岸主要渗漏原因为：

（1）土工膜及其连接缺陷

左岸坝基表层为淤泥质壤土，最大深度约 19m，经振冲碎石桩加固处理后作为大坝基础。由于左岸长期渗漏和坝基沉降造成坝面局部塌陷，起伏不平，左岸预制板与趾板错台明显，最大错台约 30cm，加之左岸边坡上部掉石块砸坏坝面保护盖板，造成复合土工膜破损而引起渗漏。

2018 年 6 月 30 日，库水位升至 2913.26m，对左岸廊道进行检查，桩号左廊 0+163m ~0+200m 渗漏较严重，主要以结构缝靠底板部位渗水，渗漏量以桩号左廊 0+163m 位置最大，向两侧渗漏量减小。根据该日大坝绕坝渗流及坝基防渗墙后渗压计测值分布情况，在 2913.26m 库水位下绕坝渗流孔水位低于左岸廊道底板高程（2884m~2885.7m），故绕坝渗流不是造成廊道渗水的主要原因。

左岸量水堰在库水位低于 2905m 时基本无过流，库水位高于 2905m 开始出现过流，以库水位 2917m 为分界点，库水位低于 2917m 时渗漏量增大速率小于库水位高于 2917m 时渗漏量增大速率，第 3 次物探检测成果表明左 1 异常区渗漏区可能为土工膜与岸坡趾板连接部位损伤所引起。对左岸趾板部位的复合土工膜进行检查，发现主要存在以下问题：复合土工膜焊缝脱落、土工膜破损、锚固角钢变位。大坝左岸周边缝水下检查发现 2906m 高程以上明显渗漏段长 48 米；左岸坝面有 2m^2 明显渗漏。

综上所述，左岸土工膜及土工膜与趾板接头破损是左岸渗漏的主要原因。

（2）趾板帷幕缺陷

在大坝左岸趾板帷幕和防渗墙端头附近检测区完成钻孔 WMZ1~ WMZ5 检测孔，经综合分析全景图像、压水试验、单孔声波及电磁波层析成像等检测资料，各孔段压水试验成果大部份小于 5Lu，基本满足设计渗控要求。但 WMZ1 孔埋深 9.96~15m 吕荣值为 6.21、WMZ2 孔埋深 8.13~13.2m 吕荣值为 6.7、WMZ3 孔埋深 1.05~15m 三段压水吕荣值介于 5.51~7.74Lu、WMZ4 孔埋深 0.95~5m 段压水吕荣值为 8.48Lu、WMZ5 孔埋深 1.05~5m 段压水吕荣值为 6.72Lu，超过设计渗控标准，其它段岩体整体较完整，局部破碎，吕荣值满足设计要求。

左岸趾板表部岩体张开较明显，局部岩芯较破碎，且表部基本均有 1~2 段岩体透水率大于 5Lu，浅表部岩体中可能存在渗漏。

（3）放空洞渗漏分析

左岸放空洞在蓄水初期即出现渗水现象，随即已对放空洞在大坝帷幕前的顶拱锚喷洞段进行了衬砌处理，并对该洞段围岩进行了固结灌浆处理。水库蓄水过程中，放空洞在大坝帷幕前的洞段沿衬砌裂缝渗水仍较大，后对其顶拱及右边墙作加强固结灌浆处理，和裂缝渗水处理。

初步分析，放空洞洞身开挖爆破导致围岩卸荷，裂隙拉张，如果混凝土衬砌与围岩接触较差及固结灌浆效果差，洞室松弛圈会形成较强的透水体，形成顺洞轴线的渗漏通道。如放空洞与通向河床的构造、裂隙相连，可能存在穿过帷幕或绕过帷幕向河谷坝体侧渗漏的通道。

（4）地质原因

左岸基岩为三叠系上统居里寺组第五岩段(T_3j^5)，深灰色中厚层～巨厚层变质砂岩夹薄层板岩，构造部位上贡嘎山复向斜核部，岩体裂隙发育，风化、卸荷强。因岩体较破碎，其透水性较好：强卸荷一般属严重透水，弱卸荷以中等透水为主，弱透水及微透水带埋深较大。岸坡岩体层面裂隙①EW /N∠85 °与③N35 ℃W/SW∠28 ℃组合可能导致库水外渗渗径变短，对防渗不利，可能存在的局部灌浆缺陷及帷幕底界外的破碎岩体会增大库水渗漏量。

库坝区岩体位于复式向斜核部，岩体较破碎，结构面发育，裂隙连通性较好；区域内降水时段长、降水量丰富；前期勘察及施工期开挖中发现，洞壁多线状流水，局部股状涌水。岸坡丰富的地下水会增大渗漏量。

左岸上层灌浆平洞 0+020m 为强卸荷，0+020～0+090m 为弱卸荷，0+000～0+073m 弱风化，0+073～0+090m 微风化。除弱卸荷界线同防渗线一致外，其它强卸荷带、弱风化带均位于水平灌浆帷幕防渗线以内。下层灌浆平洞（坝）0+035～（坝）0-009m 强卸荷，（坝）0-009～（坝）0-027m 弱卸荷；（坝）0+035～（坝）0-027m 弱风化。弱卸荷、弱风化界线同防渗线一致，强卸荷带位于水平灌浆帷幕防渗线以内。左岸灌浆平洞仅上层灌浆平洞发育两条小断层，其破碎带厚度均小于0.3m，由碎裂岩和糜棱岩夹泥组成，小断层性质以压性为主，导水性较差，规模小，不易构成较大规模的专门渗漏通道。小断层、层面裂隙①EW～N70 ℃E /S～SE∠60～80 °（层面）与③N72 ℃W/SW∠83 ℃组合可能导致库水外渗渗径变短，对防渗不利。

5 河床部位坝基及坝体渗漏分析

河床部位渗漏现象主要为坝后局部低洼处出现渗水。

土工膜与防渗墙接头后的渗压计水头 4~33m，水头折减不明显，河床部位坝基防渗墙后局部坝 0+208.00、坝 0+304.37、坝 0+364.37 处 P4、P6、P7 渗压计实测水位较高，且与库水位相关性更好，这几处防渗墙基础部位渗透性比其他部位大。

1-1~3-3 监测断面坝基渗压计水位从上游到下游逐渐降低，与库水位相关性较小。4-4 监测断面坝基水位在 2909.4m~2910.1m 之间，较河床及左岸坝基水位高约 22m，且靠下游侧坝基水位相对略高。2-2、3-3 监测断面防渗墙前后水位水力联系更强，表明该部位防渗墙或防渗墙底部存在相对薄弱部位。

根据河床部位渗漏现象，防渗墙、帷幕施工及检查情况，渗流通道检测及历次处理和效果，监测资料，渗流计算分析情况，综合分析河床部位主要渗漏原因为：

（1）坝体缺陷原因分析

2010 年 4 月对大坝右岸“坝 0+791.46～坝 0+828.33”坝段的复合土工膜进行了检查，检查统计结果显示，该范围的复合土工膜存在约 18 处大小不等的孔洞，孔洞最大尺寸 45cm，最小尺寸 1cm；分布高程从 2916.25～2930.44m，2925m 高程以上孔洞有 14 处，占 77.7%；靠右岸的孔洞尺寸较大。

（2）土工膜与防渗墙接头缺陷

大坝第三次渗水处理时的物探检测发现右岸坡脚防渗墙（坝 0+693m~坝 0+785m）存在渗流异

常区，认为该渗流异常区为土工膜与防渗墙的连接处局部损伤所引起。

2018 年 6 月 27 日，库水位上升至 2910m 时，右廊 0+187.0m~右廊 0+195.0m、右廊 0+275.0m~右廊 0+285.0m 上、下游侧边墙出现渗水，上游侧比下游侧略严重，此水位高程与防渗墙与土工膜交接部位接近，可能为搭接部位土工膜破损引起廊道上游侧边墙渗水。右廊 0+187.0m~右廊 0+195.0m、右廊 0+275.0m~右廊 0+285.0m 对应大坝桩号坝 0+690m~坝 0+705m 以及坝 0+785m~0+795m，与第三次渗水处理时的物探结果相吻合。

根据防渗墙后渗压监测成果，P6（坝 0+304.37m）渗压计在 2913.26m 水位下，比两侧渗压计高出 8~16m，P4（坝 0+208.00m）渗压计比两侧渗压计高出 2~4m，该部位土工膜与防渗墙搭接部位存在破损，靠近左廊 0+163m 廊道的 P77 渗压计 2887m，高于左廊 0+163m 廊道底板高程和 PLD-9 渗压计测值为 2886.4m，故可能为坝 0+208.00m~坝 0+304.37m 土工膜与防渗墙交接部位破损。

2018 年 4 月库水位降至死水位后，现场检查发现防渗墙顶存在大量渗漏漏斗，挖开防渗墙顶垫层料，发现土工膜与防渗墙接头有撕坏现象。2018 年 7~8 月潜水员水下检查时发现坝 0+261.8~坝 0+266.8 和坝 0+599.8 部位防渗墙下游侧墨汁吸入较快，渗漏明显，其余部位防渗墙下游侧总共有 300m 长范围墨汁缓慢吸入，存在轻微渗漏。以上现象表明防渗墙与土工膜接头存在缺陷，导致渗漏。

三维有限元渗流反演分析成果，当土工膜与防渗墙交接部位存在缺陷时，与监测渗流场的拟合较好。

综上所述，土工膜与防渗墙交接部位存在渗漏通道。

（3）防渗墙缺陷

防渗墙顶挖开现场检查发现，防渗墙存在顺河流向的贯穿性裂缝，并存在未封孔的预埋管 126 根。根据历次检测成果，并结合监测资料，在桩号坝 0+186～坝 0+215、坝 0+290～坝 0+318 段布置了物探检测孔，分别进行地震波层析成像（CT）、钻孔声波、钻孔全景图像检测、对穿声波测试和压水试验等，发现两段防渗墙均存在顶部 15m 范围内水平裂缝发育，中下部局部区域混凝土未浇筑密实的现象。库水位下降后，桩号坝 0+395~坝 0+428m 段、渗墙上游约数 30m 处发现大量渗漏漏斗，其水流下渗迹像明显，推测该部位对应的防渗墙中部或底部有渗漏通道。上述现象说明防渗墙不同部位存在不同程度的缺陷，这些缺陷为河床部位可能的渗漏通道。

（4）防渗墙底帷幕缺陷

根据防渗墙竣工图纸，由于左岸岸坡基覆界线抬高较多，防渗墙下桩号坝 0+121.67~坝 0+163.84，高程约 2805~2837.5m（面积约 800m^2）的基岩因上部防渗墙未预埋灌浆管而未实施防渗墙墙下帷幕，推测该部位岩体以强卸荷岩体为主，基岩透水率大于 100Lu，透水性多属强透水，可能存在渗漏通道，库水可能穿过强透水岩体渗入下游。

（5）地质原因

由于大坝基础覆盖层深厚，钻孔揭示最大厚度达 148m。受限于当时施工工艺及工程投资等影响，河床部位防渗墙未伸入基岩，防渗墙为悬挂式，其最大深度为 82m，最低高程至 2805m，防渗墙底部位于覆盖层第②层内。防渗墙下伏为第②层、第①层冰川、冰水堆积物，其透水性中等，渗透系数约 1.78×10^{-3}~1.03×10^{-4}cm/s。下伏基岩有属强透水、中等透水的弱风化、弱卸荷岩体。防渗墙河床下部局部存在透水性中等~强的岩（土）层，库水可能下渗经河床下部覆盖层、破碎基岩流向大坝，2-2、3-3 监测断面防渗墙后深部渗压计水位变化幅度较浅部大；伪随机流场法右 3、4 区和示踪法通道 5 为绕防渗墙底部渗漏。

6 右岸渗漏分析

右岸渗漏现象主要为库水位升至 2910m 时，右岸下层灌浆廊道与灌浆平洞交接处下游侧有明

显渗水，随着库水位上升，廊道内渗水量逐渐增大，廊道顶部、廊道上游侧边墙、灌浆平洞进口段及平洞内绕渗孔孔口均出现较大渗水，有明显渗水点的洞段长度约 200m。库水位升至 2921.2m 时，右岸坝后物探检查孔出现涌水，右岸岸坡坝脚也出现较大渗水。

右岸廊道内渗压计实测水位在 2905.12m~2923.35m 之间，越靠近下层灌浆平洞，渗压水位测值越大。右岸下层灌浆平洞帷幕后渗压计水位在 2923.35m，渗压水头值较周边渗压计水位高，且与库水位相关性明显更好，测值随库水位变化而同步变化。平洞端头外侧渗压计水位 2913.86m，较库水位低 16m 左右，测值与库水位有一定相关性。

右岸灌浆平洞及坝肩后绕渗孔水位在 2914.79m~2923.90m 之间，坡体内侧水位（RK9、RK10）高于外侧水位（RK21、RK22），较库水位低 5~12m，与库水位同步变化，两者相关性较好。

右岸坝体下游绕渗孔水位在 2910.32m~2918.94m 之间，新增的右岸上坝公路绕渗孔水位在 2917.86m~2918.92m。其中局部绕渗孔水位（RK14、RK18）测值高于周边其他绕渗孔水位（高 4~5m），也高于左岸绕渗孔水位（高 30m 左右）。总体来看，右岸绕渗孔水位普遍高于左岸绕渗孔水位，且与库水位相关性较好。

根据右岸渗漏现象、帷幕施工及检查情况、渗流通道检测及历次处理和效果、监测资料、渗流计算分析情况，综合分析右岸主要渗漏原因为：

（1）土工膜与趾板连接缺陷

现场检查发现，右岸预制板与趾板错台较明显，可能造成复合土工膜破损而引起渗漏。

（2）帷幕灌浆缺陷

①防渗帷幕连接缺陷

对照帷幕灌浆设计图纸和施工竣工图纸，右岸底层廊道帷幕和趾板帷幕侧面未完全封闭，右岸在第 1 次渗漏处理时对帷幕未封闭区域进行了补灌，但补灌在高水位下进行。

正常蓄水位工况下，下层灌浆平洞绕坝孔 RK11R、RK12R 比库水位低 15m，而上层灌浆平洞绕坝孔 RK9R、RK10R 孔水位仅比库水位低 6~7m，2018 年四川中水成勘院工程物探检测有限公司对右岸下层灌浆平洞水平帷幕质量进行检测，认为该区域岩体裂隙虽发育，但连通性较差，相对不漏水，但未对上层灌浆平洞帷幕进行检测，该区域可能存在漏水通道。大坝第三次渗水处理时（2010 年 11 月）的物探检测发现右岸坝肩靠防渗帷幕外侧为渗流异常区，认为库水穿过右坝肩防渗帷幕体系渗漏进入坝体，在廊道内及坝后渗出。

右岸下层灌浆平洞内 PLD-2 在库水位高于 2904m 时渗压水位快速上升，比同期库水位低 3m，而位于右侧的 PLD-1 比同期库水位低 6.5m，表明渗漏不是通过绕防渗帷幕端部，该库水位高程与上层防渗帷幕底线高程 2903m 接近。由渗压水位大小来看，PLD-2>PLD-3>PLD-1>PLD-4>PLD-5>PLD-6（PLD-7 在库水位升至 2918m 时仍表现为无压），渗压水位最高的部位在右廊 0+302m，对应大坝桩号坝 0+825.37m，考虑最短渗漏路径，该渗漏通道可能为趾板防渗帷幕与上层防渗帷幕交接部位。

综上所述，右坝肩趾板防渗帷幕与上层防渗帷幕交接部位可能存在渗漏通道。

②右岸趾板及防渗墙下帷幕缺陷

右岸岸坡防渗墙底部坝 0+791.97~坝 0+797.47、高程 2882.0m~2884.0m 间 WMR0 钻孔全景图像显示为砂层，坝 0+791.97~坝 0+814.47、高程 2876.0m~2905.0m 间区域岩体钻孔全景图像显示岩体破碎、裂隙发育；上述两区域钻孔压水试验岩体透水率为 32.75～72.49Lu 之间，严重漏水。

分析右岸趾板区检测孔的钻孔全景图像、压水试验、单孔声波及电磁波层析成像等检测资料：压水试验成果均满足小于 5Lu 的设计要求，但 WMR3 孔 7.2~10m、17.5~27.2m；WMR4 孔 3.4~4.9m、8~12.1m、14.5~20m 、20.5~26 m、27.5~29.5m、31.5~34.3m；WMR5 孔 6~10.5m、15~17.4 m、22~30.8m

等；WMR6 孔 8.5m~18.8m 等段岩体破碎。

右岸趾板段施工开挖时岩体风化、卸荷严重，岩体质量较差，本次检测中检测孔孔内电视未见大量水泥结石、裂隙可见张开状态，岩体压水吕荣值与岩芯完整程度不甚匹配。

③右岸灌浆平洞帷幕缺陷

水平搭接帷幕的检测孔资料揭示：三个钻孔岩芯多呈柱状、短柱状，岩体较完整；压水试验成果其吕荣值均小于 5Lu，满足设计防渗要求。

第四次渗漏处理时右岸灌浆平洞钻孔压水试验成果表明，上层灌浆平洞检查孔个别孔段、下层灌浆平洞检查孔靠山内的 4 个孔和个别孔的中间部分孔段吕荣值较大，不满足设计防渗控制标准要求。下层灌浆平洞在 XQJ-1~XQJ-3 孔孔深 35~45m 段透水率较高，最高吕荣值达 29.18Lu，XQJ-4 钻孔钻进至 11~18.5m 段时，岩体极破碎，芯样呈碎块、碎粉状，钻进过程中，孔口可见细砂伴随返水返出，推测强透水。XQJ-5 孔 0.6~2.5、15.3~18.4m 段、XQJ-7 钻孔 19.7~25.2m 段芯样较为破碎，XQJ-9 钻孔 3.9~11.4m 段，由于钻具变形卡孔，进行事故处理时，急剧扰动导致此段芯样呈碎石、砂状，未取出完整的岩芯。监测成果表明，右岸下层灌浆平洞新增 2#渗压计（离掌子面 45m）水头最高，库水位在 2911m 以上时渗压计水头增长很快，仅比库水位低 2~5m，与库水位存在明显相关性，前期右岸下层灌浆平洞物探检测成果表明，该部位存在极破碎岩体，透水性较大。以上现象表明，右岸下层平洞长约 52m 的洞底段局部岩体破碎，透水性较强，可能存在渗漏通道。

（3）绕坝渗漏

右岸绕坝渗流孔孔水位变幅与库水位变幅比在 0.58~0.87，孔水位高且与库水位相关性很好。渗漏通道检测发现，在右岸码头附近存在一重度入渗区域，分析可能为远端绕坝渗漏的入渗口。检测和监测成果显示，右坝肩存在绕渗问题。

（4）地质原因分析

右岸基岩为三叠系上统居里寺组第五岩段(T3j5)，深灰色中厚层～巨厚层变质砂岩夹薄层板岩，构造部位上贡嘎山复向斜核部，岩体裂隙发育，风化、卸荷强。因岩体较破碎，其透水性较好：强卸荷一般属严重透水，弱卸荷以中等透水为主，弱透水及微透水带埋深较大。岸坡岩体层面裂隙①N78°E/SE∠57°与②N55°E/NW∠78°和河谷呈小角度相交，对防渗不利。可能存在的局部灌浆缺陷及帷幕底界外的破碎岩体会增大库水渗漏量。

库坝区岩体位于复式向斜核部，岩体较破碎，结构面发育，裂隙连通性较好；区域内降水时段长、降水量丰富；前期勘察及施工期开挖中发现，洞壁多线状流水，局部股状涌水。岸坡丰富的地下水会增大渗漏量。

右岸上层灌浆平洞 0+000～0+030m 强卸荷，0+030～0+107.83m 弱卸荷；0+000～0+093m 弱风化，0+093～0+107.83m 微风化。除弱卸荷界线同防渗线一致外，其它强卸荷带、弱风化带均位于水平灌浆帷幕防渗线以内。下层灌浆平洞 0+000～0+036m 强卸荷，0+036～0+117.02m 弱卸荷；0+000～0+102m 弱风化，0+102～0+117.02m 微风化。除弱卸荷界线同防渗线一致外，其它强卸荷带、弱风化带均位于水平灌浆帷幕防渗线以内。上、下两层灌浆平洞发育小断层 6 条，破碎带宽度一般 0.1～0.3m，主要由角砾岩和糜棱岩组成，局部夹泥。其规模较小，均未穿越上、下两层灌浆平洞，小断层多为压性，渗透性不佳，且规模小，不易构成较大规模的渗漏通道。小断层、层面裂隙①EW～N70°W /N～NE∠45～60°、②N65°W/NE∠55～60°，与③N22°E/NW∠85°、④SN/W∠85°、⑤N20°E/SE∠77°组合可能导致库水外渗渗径变短，对防渗不利。

7 结语

仁宗海水库大坝自 2008 年蓄水以来，已运行 10 年，虽然经过 4 次检测和处理，渗漏量较蓄水初期有所减少，但是总渗漏量在国内同等规模工程中位居前列，大坝渗压计和坝后绕渗孔水位也较

高，大坝渗漏异常情况已引起各方高度关注。目前渗漏的主要原因基本查明，大坝渗漏的主要原因可能是坝面复合土工膜与趾板及防渗墙接头部位拉裂、坝面复合土工膜破损、左右岸坝肩防渗帷幕和防渗墙存在薄弱环节等。

虽然目前坝后渗水情况仍较严重，正常蓄水位下量水堰渗漏量达 750L/s 左右，防渗墙顶部有入渗破坏漏斗，但坝基最高水位在反滤层内，坝后渗水无明显的细颗粒带出。大坝应力变形监测成果未见有位移或变形突变等现象。大坝的异常渗流暂未带来整体稳定等安全问题，但长期渗透安全性及长期运行安全难于保证。

为解决大坝长期安全稳定运行问题，增加发电效益，对大坝进行渗漏处理十分必要。考虑到仁宗海大坝渗漏情况十分复杂，结合大坝渗漏的特点和对工程安全的影响程度，渗漏处理考虑分两期进行。一期处理主要针对水下喷墨检测、钻孔取芯及压水试验发现的对大坝安全运行影响较大的缺陷，主要包括土工膜与趾板及防渗墙连接部位渗漏处理、左岸坝面土工膜破损修复、右岸连接帷幕局部渗漏处理、左岸边坡冲沟掉石处理、右岸坝后设置排水井降低坝内水位等项目，如一期处理后未达到预期效果，大坝长期安全运行还存在隐患，再进行二期必要的处理。

水光风储应用及互补研究

杨存龙

（国家电投黄河上游水电开发有限责任公司，青海 西宁 810008）

摘　要：黄河上游水电开发有限责任公司是国家电力投资集团公司控股，大型综合性能源企业，总装机1792万千瓦，清洁能源占比93%。水光风储应用及互补研究是从水电、光伏、风电、储能系统四个方面的发展历程和趋势为背景，以水光风储应用为导向，以实证数据为依据开展清洁能源电源点互补特性的研究。通过水、光、风多能互补研究将随机波动的光伏发电转换为平滑、安全、稳定的优质电源，提高新能源发电电能质量，探讨风光水能互补实践应用过程中出现的问题及解决途径。

关键词：黄河；水光风储；研究

沉积物对泵磨损的影响

王圆云，谢汭之，申泉涌

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610213）

摘　要：水泵广泛用于生产和生活，特别是在水利工程中广泛应用。水中的沉淀物会使水泵的使用寿命受到很大影响。本文简要介绍了一些常见的泵，并从泵的磨损实际情况出发，分析了沉积物磨损的形成机理和影响。

关键词：泥沙；磨损；离心泵；空化

1 简介

黄河是中国沉积物含量最高的河流。由于大多数大中型水电站和泵站早期建在黄河上，其水力机械磨损严重，因此我国的泥沙磨损研究始于黄河。随后，由于葛洲坝水电站投运后不久的严重磨损和三峡工程的建设，长江水利机械泥沙磨损问题也受到了广泛关注。近年来，随着水电机组高水头，高比转速的发展，小泥沙含量引起的磨损问题逐渐引起人们的关注。在可行性研究和初步设计阶段，一定程度的处理可以减少沉积物对实际机器的危害。

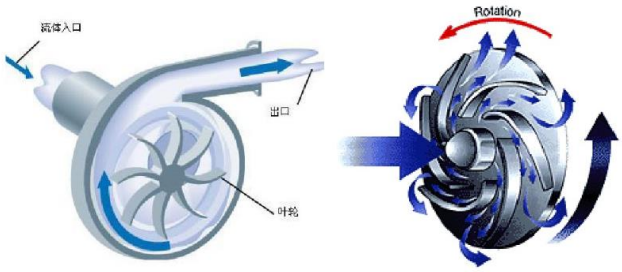
2 离心泵简介

泵是输送流体式使流体增压的机器。它将原动机的机械能转换为液体能。

泵的种类繁多，其中离心泵具有性能广，流量均匀，结构简单，运行可靠，维护方便等诸多优点。因此，离心泵是工业生产中使用最广泛的液体输送设备。除了常用于高压，小流量或计量的往复泵，涡旋泵和容积泵常用于含有气体的液体，而转子泵常用于高粘度介质，离心泵大多用于其他场合。据统计，离心泵的使用占石油和化工生产厂总泵的 70％至 80％。

离心泵通过使用由叶轮旋转引起的水产生的离心力来工作。在启动离心泵之前，必须用水填充泵壳和吸入管，然后启动电机，使泵轴驱动叶轮，水高速旋转。在离心力的作用下，水被抛到叶轮的外缘，并通过蜗壳泵壳的流动通道流入泵的压力管道。

在叶轮的中心，由于水在离心力作用下被抛出以形成真空，抽吸罐中的水在大气压的作用下被压入泵壳中。叶轮连续旋转，使水在叶轮的作用下不断流入和流出，达到输水的目的。



3 液压机械的沉积物磨损

在液压机械的工作流程中，一定量的硬砂颗粒与流动表面碰撞，造成材料的微量剥落。这个过程叫做沉积物磨损。水力机械的沉积物磨损是一个非常复杂的问题。人们普遍认为它是机械和化学作用的结果，其中机械作用是主要原因。

当电流中的沉积物瞬间与电流表面碰撞时，可能产生高温高压。在高温高压的作用下，由于水中有气体，容易氧化金属表面，破坏金属表面的保护膜，导致局部腐蚀。此外，沉积物对金属表面的连续冲击加速了金属保护层的破坏。

另外，由于硬质沉积物的硬度通常高于金属材料的硬度，并且砂粒的形状不同，例如尖锐的金刚石，圆形等，它们高速地位于材料的表面上。当尖锐的沙粒在平行材料表面上移动时，接触点会产生横向塑性流动，切割出一定数量的微量材料，这相当于微切割过程。

在垂直冲击下，当锋利的沙子与材料接触时，锐角会旋转，这也有微切割的效果，但切割能力不如小迎角。原型砂粒在材料表面上的垂直冲击会产生反复的塑性变形并形成凹坑。这些可塑性降低，脆性增加的积累将被抑制和移位。同时，很容易在适当的迎角下直接剪切，这属于变形和磨损。

流动表面沉积物的磨损过程相当于变形磨损和微切削磨损的组合。

4.空化和沉积物磨损的相互作用

一般液压机械的沉积物磨损伴随着空化。由于叶片的粗糙表面和材料中的空隙，当流体通过时，微涡流将引起局部空化。同时，这种干扰也使得含沙水中的沙粒更容易撞击叶片表面。具有空穴作用的砂粒的冲击通道表面将引起凹坑，或者因为铸铁表面更脆并且易于脱落以形成局部深坑，这将导致更大的空化损伤并最终导致叶片穿孔和鱼鳞坑。

空化涉及许多方面，例如流动动力学，机械冲击，材料类型和流动通道部件的组件，以及材料表面和液体之间的电化学相互作用,空化的破坏机制非常复杂。对于不同的材料和实验条件，经常得出不同的结论,有几种空化损伤机制。

4.1 冲击波机制

由于液体中局部压力的变化，空化是由蒸汽泡的形成，生长和破裂引起的。当液体中的静压降至低于相同温度下液体的蒸气压时。在液体中形成大量气泡，并且当气泡到达较高压力位置时，泡沫会崩溃。气泡的破裂将存储在气泡中的势能转换成较小体积的流体动能，并在流体中形成流体冲击波。当冲击波传递到流体中的溢流部分时，溢流部分的表面将产生应力脉冲，脉冲型局部塑性变形，甚至加工硬化。流体冲击波的重复作用在流动通道部分的表面上引起空化坑。

4.2 微喷射机制

由于液体中的压力降低，产生大量气泡。当气泡靠近流动部件的边缘壁或与流动部件的边缘壁接触时，由于气泡的上壁和下壁之间的拐角边界的不对称性，气泡的上壁和下壁的塌陷速度在它们坍塌时是不同的。远离墙壁的气泡壁会更早破裂，最接近材料表面的气泡壁将会爆裂，从而形成壁面导向的微喷射。在很短的时间内，可以完成微射流对材料表面的定向冲击，并且微射流产生的应力等同于“水锤”效应。

4.3 热效应机制

气泡坍塌产生高温，其作用在流动通道部分的表面上，引起材料表面上的相变或其他现象，影响空化过程。在磨蚀过程中大量金属球出现在空化区中的事实支持了当前的热作用理论。气泡坍塌时产生的温度达到流动部件表面材料的熔点，使其在表面张力的作用下熔化，凝固成球体，并在旋流的推动下旋转并研磨成光滑的球体。空化坑。在空化试验中经常会出现发光现象，这是由气泡中的水蒸气或其他气体坍塌达到高温引起的。

4.4 化学腐蚀机理

当气泡在高压区域被压缩时，热量将被释放。同时，水锤压力对材料表面的影响也会产生局部高温。在如此高的速度和高压下，可能发生材料的局部氧化。在气泡坍塌的影响下，氧化膜反复产生和消失，进一步加剧了空化腐蚀。不锈钢的耐腐蚀性能优于碳钢和其他合金钢，这有助于化学腐蚀机理。在转台水空化试验中，彩虹带出现在不锈钢样品表面。彩虹带的温度可达 573K，进一步证明了空化过程中的化学作用。

4.5 电化学机理

在空化腐蚀过程中，由于在局部高温下金属中形成热电偶，形成微电池，导致金属的电化学腐

蚀。通过电化学技术检测金属表面气泡坍塌引起的电极电位变化。结果表明，在空化过程中，金属表面的空化和非空化区域存在电化学效应，形成电化学原电池，并加强了金属零件上气泡坍塌的机械损伤。由于气泡坍塌引起的严重机械作用，合金的局部表面发生塑性变形，甚至表面膜受损，暴露出新的无膜金属表面，在金属表面形成腐蚀电化效应。同时，腐蚀点引起局部应力集中，并加强由气泡坍塌引起的金属局部破坏。





5 泥沙磨损研究进展

20 世纪 80 年代和 90 年代，国内外许多学者研究了离心泵叶轮的磨损情况，但他们通过分析叶轮中固体颗粒的轨迹和数值分析方法，基本研究了叶轮的磨损情况。因此，得出了几个不同的结论：

（1）Shalia，Subolong，Zhu Jinxi 和 Zhao Jingting 已经过测试或计算。据信，颗粒质量越大，轨迹离刀片工作面越偏离。这种观点被许多学者所接受。

（2）Herbich 和 Zhao Zhenhai 认为粒子质量越大，其轨迹越接近叶片工作面。很少有学者支持这种观点，但一些实验证明了这一点。

（3）此外，日本学者坂口认为质量对其轨迹影响不大，但很少有人同意。这些观点有一定的理论或实验依据，但结论却大不相同，这与其实验条件和理论简化有关，尤其是缺乏对实际流场的分析。

进入 21 世纪后，固液两相流甚至多相流 CFD 方法的研究逐渐发生了变化。

两相流系统的理论研究方法大致可分为两类：宏观连续介质理论和周围运动理论。在这两种方法中，宏观方法是主要方法。连续体理论可以细分为以下三种模型：（1）分层流动模型，适用于具有不扩散和固定界面的两相流;（2）双流体模型，假设两相流的各相为连续介质，同时充满整个流场;（3）混合模型，假设两相物质相互作用构成一个新的均匀混合物，类似于两相流。一种新物质不断填充整个流场。通过一组混合流动参数描述混合物，并且通过扩散方程将每个相的参数与混合物连接。在上述三种模型中，双流体模型是使用最广泛的模型。可以认为它代表了连续统理论的主体。　然而，由于颗粒相在连续介质中处理，固体颗粒的非均匀结构的真实性本质上被削弱，并且难以反映颗粒形状，尺寸，碰撞，聚集和分离的特征. .

近年来，随着计算流体动力学的发展，研究人员开始使用双流体模型进行泥沙流动的数值研究，并改进了一些固液两相流动的湍流模型。采用固液两相流模型分析了不同流速下转轮叶片内沉积物浓度的分布。李启飞等分析了水轮机导流部分含沙水的流动特性，预测了蜗壳和导叶区域内沉积物的侵蚀情况，得到了较为准确的结果。高忠信等利用科里奥利力校正的 k-Ap-e 两相湍流模型，考虑压力对沉积物颗粒相的影响，分析了沉积相的速度和浓度分布。在优化设计方面，Thapa 与挪威科技大学合作开发了一套涡轮转子叶片优化设计程序，可以评估设计参数与叶片表面沉积物磨损之间的关系。但是，中国在这一领域取得的成就很少。

离散元素法（DEM）起源于 20 世纪 70 年代，并逐渐应用于粒状系统的计算。该方法考虑形状，尺寸，材料特性，粒度分布和其他因素。根据牛顿第二定律，计算每个粒子的力，位置和速度。

CFD-DEM 耦合方法采用 DEM 方法和 CFD 方法分别求解颗粒和流体的运动，并进行质量，动量和能量转移以实现耦合。该方法结合了 CFD 和 DEM 的优点，可以更准确地描述粒子运动及其与流场的相互作用。到目前为止，CFD-DEM 方法很少用于研究固液泵的两相流动。

欧拉 - 拉格朗日模型用于耦合固相和液相。在欧拉坐标系下求解非定常雷诺平均 NS 方程和标准 ke 湍流模型，得到泵内的液体流场。在拉格朗日坐标系中，求解粒子运动方程。通过迭代计算两相之间的粒子拖曳力和动量交换来实现固相和液相之间的耦合。

参考文献：

[1] 黄思，杨福祥，苏向辉。用 CFD-DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流[J]。科学技术报告，2014（27）

[2] 黄鲜北，杨硕，刘竹青，杨伟，李耀军。基于粒子轨迹模型的离心泵叶轮泥沙磨损预测[J]。农业机械学报，2016（8）

[3] 钱中东，王胜，高元勇。双吸离心泵叶轮泥沙磨损的数值模拟[J]。水电学报，2012（3）

大岗山电站650MW水轮发电机组圆筒阀简介

葛　嘉，宋林隆

（大渡河大岗山水电开发有限公司，雅安 石棉　625400）

摘　要：本文介绍了大岗山电站650MW水轮发电机组设置圆筒阀装置的必要性、结构特点、同步控制系统、运行状况、动水关闭试验等情况，对水轮机圆筒阀装置结构的应用经验积累，具有一定的参考价值。

关键词：大岗山电站；圆筒阀；结构；同步控制、动水关闭

1 概述

大岗山水电站位于大渡河中游石棉县挖角乡境内，为大渡河干流水电规划的第十四级电站，开发任务主要是发电，在系统中担负调峰、调频，枯期担负峰腰荷，汛期主要担负基荷，是四川电力系统的骨干电站之一。该电站安装有4台650MW的混流式水轮发电机组，额定水头为160m，最大水头为178m，最小水头为156.8m，额定流量为451.1m^3/s。机组配置的圆筒阀装置，为导水机构免遭间隙空化与泥沙磨损，防止机组飞逸时免遭损坏具有很大的保护作用。

2 设置圆筒阀的必要性

（1）大岗山机组运行水头较高，汛期河水泥沙含量大。设置圆筒阀，利用其全关时良好的密封性能，可有效消除水轮机停机后导水机构间隙空蚀和磨损的问题，间接延长机组大修周期，避免了大修期间的电能损失，有效提高了经济效益。

（2）大岗山水电站在电力系统中担任调峰、调频并担负事故备用，机组启停比较频繁。设置圆筒阀后，一是圆筒阀开启无需充水平压，启、闭时间较短，提高了机组启动的速动性、运行的灵活性，有利于系统调峰、调频；二是由于停机关圆筒阀漏水量很小，机械制动转速由原设计的35%n降为15%n，延长了制动瓦的寿命，同时缩短机组停机时间，也利于调频和调峰。

（3）大岗山电站压力引水管长约356～399m，管道充水容积约2.8～3.13万m^3。机组飞逸时，快速闸门至少要2min才能关闭，此时压力管道中水柱压力仍然很高，在变水头作用下，机组运行的水力条件十分恶劣，转速持续增高使振动加剧，如果退出飞逸的速度慢，飞逸持续时间延长，对机组零部件变形损坏程度加剧，飞逸危害性加大。设置圆筒阀，其动水开启和关闭时间为60～90s，与机组进水口防飞逸快速闸门相比，圆筒阀紧靠水轮机进水口，因而能更快速有效地使机组安全退出飞逸，减小机组的飞逸持续时间，确保机组安全。

3 圆筒阀结构

大岗山水电站机组圆筒阀结构采用上海福伊特水电设备有限公司的设计和加工方案，主要参数如下：

表1 大岗山电站机组圆筒阀主要参数

项　目	参　数
筒阀筒体外径(mm)	Φ9320
筒阀筒体内径(mm)	Φ8940
接力器直径(mm)	Φ400
筒阀筒体高度(mm)	1825
筒阀操作接力器(个)	6
接力器行程(mm)	1705
筒阀开启、关闭时间(s)	60-120可调
接力器操作油压(MPa)	6.3
筒阀最大工作水头(m)	180

项　目	参　数
筒阀的油压装置型号	YZ-18/2-6.3
系统用油量	约 15m3
操作油牌号	L-TSA 46(GB11120-89)

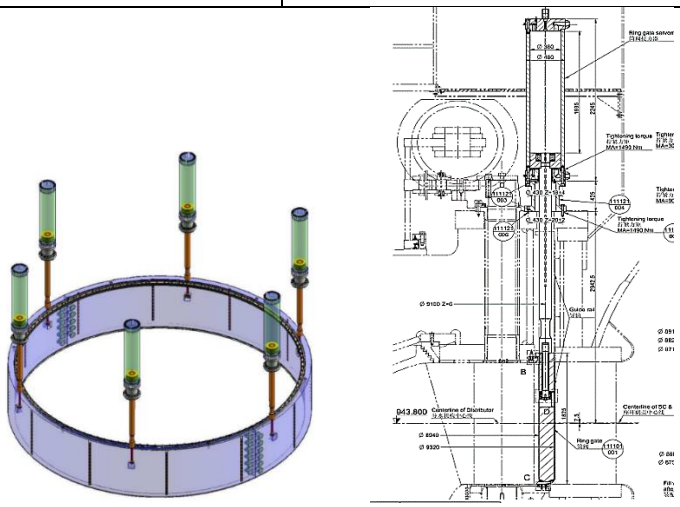


图 1 大岗山电站机组圆筒阀示意图

圆筒阀由筒体和操作接力器两部分组成。筒体为两瓣，在现场完成组装，其外径 9320mm，高 1825mm，厚 380mm，重量约 103.2t。操作机构由均匀分布在顶盖的 6 只内径为 400mm 的直缸接力器组成，其行程 1705mm。筒体圆周均匀布置 12 个导向条，与固定导叶出水边的导向条对应，在开启和关闭时的起导向作用。上密封采用带凸缘的密封板及压环结构装于顶盖上，下密封采用压板密封条结构装于底环上，保证了圆筒阀的良好密封性能。

4 同步控制系统

大岗山圆筒阀同步控制系统主要由机械和电气两部分组成，其中机械部分由筒体、接力器、液压控制阀组、同步分流器、液压比例阀以及相关管路和阀门等组成；电气部分由可编程控制器 PLC 及其配套的模块、位移变送器、压力变送器、位置开关、人机界面等组成。

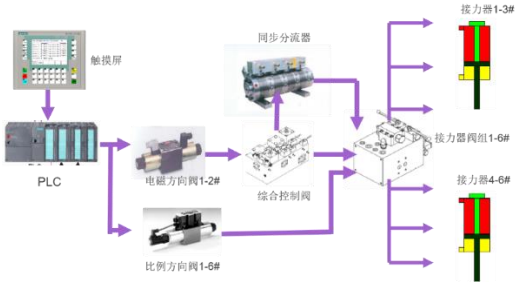


图 2　圆筒阀控制系统基本结构

该系统是以接力器位移量偏差为负反馈的闭环电液随动系统。开启圆筒阀过程中，以 6 个接力器的平均位移为基准，关闭圆筒阀过程中，以 6 个接力器的最大位移为基准。整个系统分两步进行调节：第一步为初调节，由同步分流器向各个接力器分配油源，实现各接力器初步同步控制；第二步为精细调节，由位移变送器采集各接力器运动量，由控制系统进行比较后，通过液压比例阀控制单只接力器供排油量，实现各操作接力器间活塞同步运动的精确调节。

5 大岗山电站 2F 机组圆筒阀试验

2019 年 11 月 19 日～22 日，大岗山电站在 2F 机组上完成了圆筒阀动水关闭试验。试验依次在空转态、25%PN（162.5MW）、50%PN（325MW）、75%PN（487.5MW）及 100%PN（650MW）五个工况下进行。

动水关闭试验中圆筒阀关闭时间在 80s～100s，满足圆筒阀关闭在 60s～120s 的技术要求；接力器杆腔最大压力（峰值）为 18.2MPa, 低于设计值 20MPa；总的下拉力最大为 5944 kN, 在设计范围内；蜗壳最大压力（峰值）为 1.93MPa, 远低于设计值 2.3 MPa；在所有试验工况下，最大筒阀下拉力时单个接力器的最大/最小受力比值最大为 1.46，满足不超过 1.7 的控制条件，此项数据是福伊特公司所承担的项目中试验数据最好的一次，比值低于 1.5。

试验的成功充分论证大岗山机组圆筒阀在动水关闭工况下的安全可靠性，为今后机组长期安全可靠运行提供强有力的技术保障。

6 大岗山电站圆筒阀运行情况

大岗山电站 4 台套圆筒阀装置自 2015 年与机组同步投运以来，整体运行良好，未发生过重大缺陷，开停机过程中未发生一次卡阻现象，均能正常启闭。检修期检查发现，筒阀阀体、导水机构无明显损伤和严重汽蚀，说明圆筒阀减少了机组停机状态下的导叶漏水量，很好的保护了导水机构，但存在圆筒阀密封压板螺栓环氧易脱落的问题。

投运 4 年以来，圆筒阀系统共发生缺陷 22 项，其大部分为渗漏问题，如压力传感器渗油、接力器供油阀法兰接口渗油、接力器控制阀组至综合控制阀组管路法兰密封损坏导致渗油的等。需要在以后运行维护中加强关注，制定密封轮换计划，利用检修期开展螺栓、法兰紧固检查工作，从而消除渗漏问题。

为了更好的应用圆筒阀装置，大岗山电站制定了针对圆筒阀的运行操作规定，具体如下：

（1）机组在正常运行时，圆筒阀应在“自动”控制方式。

（2）在正常开机情况下先提圆筒阀，后开导叶；停机时先关导叶，后落圆筒阀。

（3）正常情况下，圆筒阀不允许动水启闭。

（4）正常情况圆筒阀只有全开和全关位置，动作过程中发卡、不同步时，需判明原因，严禁直接手动操作开、关圆筒阀。

（5）对圆筒阀管路充油时应小开主供油阀充油，以听到油流声为准，当无油流声后方可全开充油阀，充油时水车室应无人作业，充油完成后应对控制油管进行检查有无渗漏。

7 结语

事实证明，圆筒阀在大岗山电站机组上的运用是可行的、有必要的、也是成功的。通过对该圆筒阀结构、控制系统、运行情况、动水试验的研究，将有助于水轮机圆筒阀技术的发展和进步。

大型水轮发电机转子一点接地保护配置及优化改造实践

任江成[1]，邓丛林[2]

（1.雅砻江流域水电开发有限公司，四川 成都 610021；
2.中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司，四川 成都 610072）

摘　要：本文结合某大型水力发电厂运行实际，介绍该电厂大型发电机转子一点接地保护的配置情况、保护装置运行存在的问题，并提出优化改造方法，供同行借鉴、参考。

关键词：转子一点接地保护；乒乓式；注入式

1　引言

发电机励磁回路一点接地故障对机组的危害不大，但若未及时发现，则有可能发展为励磁回路两点接地故障，严重危害机组安全。《继电保护和安全自动装置技术规程》（GB/T 14285-2006）4.2.11 规定：1MW 及以上的发电机应装设专用的转子一点接地保护装置延时动作于信号，宜减负荷平稳停机，有条件时可动作于程序跳闸；《水力发电厂继电保护设计规范》（NB/T 35010-2013）条文 3.9 条说明：对于发电机额定励磁电压大于 200V 的，励磁回路一点接地保护装置布置在励磁系统屏柜中，如因发电机失磁保护需要，转子正、负极回路已引入发电机保护柜内，转子一点接地保护可安装于发电机保护柜，但应采取必要的安全措施。

对于大型发电机，应配置专用的转子一点接地保护装置，可根据实际情况布置在励磁系统屏柜或发电机保护柜内，目前，国内主要使用的是注入式和乒乓式原理的转子一点接地保护。本文将介绍某大型水力发电厂发电机转子一点接地保护的配置情况、保护装置运行存在问题及优化改造实践过程，为其他电厂考虑发电机转子一点接地保护配置及保护盘柜布置、优化改造时提供借鉴、参考。

2　保护配置情况

某大型水力发电厂共安装 4 台 600MW 混流式水轮发电机组，总装机容量 2400MW，发电机型号 SF600-60/15940，发电机机端配置高压断路器，发电机保护双重化配置，分别组屏为发电机保护 A 柜、发电机保护 B 柜，发电机失磁保护未引入转子正、负极回路电压。发电机转子一点接地保护共配置两套保护装置，一套为注入式、一套为乒乓式，采用国内某厂家的 DGT801D 型保护装置，另配置一套转子绝缘监测装置，均布置在励磁系统灭磁开关柜内，三套装置之间通过切换把手实现发电机大轴的接入（即装置功能的投入），当发生发电机转子一点接地故障后，可在三套装置之间进行切换，以验证装置动作的正确性。

双重化配置的继电保护装置应同时投入运行，但根据保护工作原理，发电机转子一点接地保护都是对转子与大轴之间的绝缘进行监测，通过采集的电压、电流计算接地电阻值，且注入式保护需要在转子负极与大轴之间外加电源，大轴只能同时接入一套保护装置，若大轴同时接入两套保护，即两套保护同时投入运行时，两套保护之间会相互影响，导致保护测量不准确，无法正常运行，故实际应用中只能投入一套运行，另一套作为热备用，两套保护之间通过切换把手实现发电机大轴的接入。鉴于注入式转子一点接地保护在机组运行工况下测量精度及可靠性较高，优先投入注入式转子一点接地保护，乒乓式转子一点接地保护装置电压测量回路用空气开关和装置电源开关均处于合闸状态（即处于热备用状态，仅是发电机大轴未接入）。

根据电厂实际需要，发电机转子一点接地保护低定值段动作于机组跳闸、启动停机流程，两套保护动作跳闸信号分别接入发电机保护 A、B 柜，启动发电机保护柜内“励磁内部故障”保护出口跳机端断路器、跳灭磁开关、启动机端断路器失灵及启动停机流程。乒乓式、注入式转子一点接地

保护整定值设定为：高定值“10KΩ、持续5秒报警”，低定值“5KΩ、持续10秒跳闸”。

3 发电机转子一点接地保护运行中存在问题

3.1 存在问题

（1）保护装置投运后的故障率较高，其原因为装置CPU插件或采样插件故障，且此型保护装置较特殊，部分主要元器件已停产，备品采购困难、价格昂贵，影响装置的后期运行维护。

（2）保护装置布置在励磁系统灭磁开关柜内，通常情况下，机组正常运行时不允许打开灭磁开关柜门，电厂人员不便对保护装置进行巡视检查。当某套保护装置异常，需切换至另一套保护装置时，电厂人员在灭磁开关柜内进行切换操作及异常情况处理，不利于电厂人员的人身安全。

（3）通常情况下，保护装置和灭磁开关的检修维护责任班组分属两个班组，检修维护过程中存在交叉作业，不利于开展工作。

3.2 案例分析

3.2.1 事件发生前运行方式

2016年2月13日9时，#3机空载运行，切换把手切至“注入式保护”，即注入式转子一点接地保护功能投入。

3.2.2 事件现象

9时37分31秒，CCS发“#3机乒乓式转子一点接地保护故障报警”信号，3秒后复归。9时39分06秒，CCS发“#3机乒乓式转子一点接地保护接地报警”信号，现场检查#3机乒乓式转子一点接地保护装置IO-1：1灯亮（报警动作指示灯），装置内保护事件为:“0001 发电机转子一点接地高定；0002 发电机转子一点接地高定；0003 发电机转子一点接地高定”。#3机注入式转子一点接地保护装置未有报警现象，装置测得接地电阻为119.99KΩ（测量范围最大值）。

3.2.3 检查处理情况

（1）检查确认乒乓式转子一点接地保护装置整定值设置正确，参数正常，现地进行复归操作，报警动作指示灯信号正常复归。

（2）#3机停机，将切换把手切至“转子绝缘监测装置”，装置测量转子绝缘5.0MΩ（测量范围最大值），无接地现象。

（3）检查乒乓式、注入式转子一点接地保护装置二次回路接线正确且端子紧固，未见异常。

（4）更换乒乓式保护装置，并进行两次转子接地模拟试验，保护装置测量电阻值在误差范围内，动作情况正确，保护装置工作正常。

3.2.4 事件原因

经返厂检测，发现装置在上电运行时发生数次短时死机又自动恢复的现象，结合保护装置动作事件记录分析，判断为保护装置CPU插件的A/D采样芯片故障。

4 优化改造过程

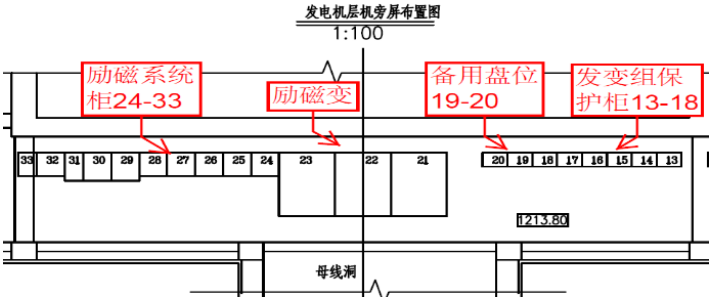
4.1 优化改造目的

（1）保护装置换型，提高设备可靠性，减少机组非计划停运。

（2）保护装置独立组屏，便于设备的日常巡视及检修维护，保障人身安全。

4.2 独立组屏可行性研究

电厂励磁系统盘柜处无备用位置，发变组保护盘柜及故障录波柜左侧有两个备用盘位（屏柜布置如下图所示），同时考虑到发电机额定励磁电压为456.5V，根据《水力发电厂继电保护设计规范》（NB/T 35010-2013）条文3.9条说明之规定，结合现场实际情况，提出两种布置方案：一、安装在灭磁开关柜背面的墙上，采用壁挂式盘柜；二、安装在机组故障录波柜左侧的备用盘位19。



经研究，两种方案均能满足双套保护装置独立组柜、便于运行检修维护的要求，但第一种方案不便于盘柜安装及线缆布置，影响盘柜的整体美观效果。第二种方案中，发电机保护柜与发电机转子一点接地保护柜均为独立盘柜，备用盘位 19（发电机转子一点接地保护柜）距离发电机保护柜（盘位 13、14）的距离较远，转子正、负极回路电压未引入发电机失磁保护，转子正、负极回路电压只需引入发电机转子一点接地保护柜，且转子电压采用专用的耐高压电缆，转子高电压不会对发电机保护产生影响。

综上所述，独立组屏是可行的，采用第二种独立组屏方案。

4.3 优化改造的两个关键问题

4.3.1 切换把手的安装位置

灭磁开关柜内的切换把手用于三套装置之间的切换，两套保护装置单独组屏后切换把手是否仍安装在灭磁开关柜内?根据电厂规定，切换把手的操作由运行人员执行，为便于运行人员操作和保障人身安全，切换把手安装于新盘柜内，直接由设备生产厂家安装固定，取消灭磁开关柜内的切换把手。

4.3.2 保护跳闸出口回路接线

发电机转子一点接地保护低定值段动作于机组跳闸，需要跳机端断路器、跳灭磁开关、启动机端断路器失灵、启动停机流程，考虑到盘柜电缆孔洞大小有限及现场施工难度，将两套保护跳闸出口回路分别用一根足够芯数的电缆并联接至发电机保护 A、B 柜内相应的出口回路处，能够满足继电保护相关规程规范及反事故措施要求。

4.4 优化改造实施

根据优化改造确定的整体技术方案，设备采购到货后，结合电厂年度机组检修工作，4 台机组已全部完成转子一点接地保护的优化改造并投运，保护盘柜整体美观效果较好，盘柜内设备、线缆布置清晰美观，保护装置运行情况保持良好。

5 结语

对于大型发电机，应配置专用的转子一点接地保护装置，国内部分厂家生产的将转子一点接地保护集成在发电机保护内的装置已逐渐减少，同时为便于日常运行维护，保障人身安全，可独立组屏，与励磁系统盘柜并列布置。同时在设计阶段可考虑在发变组保护盘柜及励磁系统盘柜处预留足够的备用位置，增加电厂在后续改造中的选择性。

参考文献：

[1]继电保护和安全自动装置技术规程. GB/T 14285-2006.

[2]水力发电厂继电保护设计规范. NB/T 35010-2013.

电化学方式储能产业在四川省电力系统中的应用前景和投资机会

赖金海，张静

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610041）

摘　要：本文介绍了电化学方式储能产业的发展概况，介绍了储能技术在今后电力系统中的应用和商业模式，提出了储能产业在四川省的发展前景和投资机会。

关键词：储能；电力体制改革；电力现货市场；电力辅助服务；四川

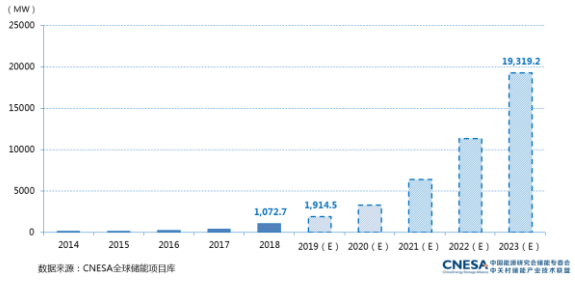
1 进一步深化电力体制改革和新能源的快速发展，推动了“储能”技术的发展和应用

在《关于促进我国储能技术与产业发展的指导意见》的指导下，随着《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》配套文件的出台和落实，我国储能市场实现又一轮高速增长，电化学储能的累计装机规模突破 GW，储能在电网侧和辅助服务市场的投运比例大幅提升，储能在推动大规模可再生能源并网的价值实现有望破冰，储能应用在各个领域全面铺开。在政策和市场的双重促动下，储能市场开启了向规模化应用发展的新阶段。

特别是随着国家风电光伏等新能源产业虽然发展势头迅猛，因为其发电的随机性、波动性将对电网安全造成一定冲击，从而也制约了国内新能源的规模化发展。但储能技术可以实现新能源发电的平滑输出，能有效调节新能源发电引起的电网电压、频率及相位的变化，使大规模风电及光伏发电方便可靠地并入常规电网。

截止 2018 年底，我国已投运储能项目累计装机规模达 31.3GW，占全球储能市场总体规模的 17.3%，其中电化学储能累计装机规模达 1.1GW。另外，2018 年新增投运电化学储能项目的装机规模为 682.9MW，同比增长 464.4%；其中江苏、河南、青海、广东、内蒙古、浙江、贵州、山西、北京和河北是装机规模排名前十位的省市。

预计，截止到 2019 年底，我国电化学储能的累计投运规模将达到 1.92GW，年增速 89%，在“十三五”的收官之年，即 2020 年，将延续超过 70%的年增长速度，到 2021 年，储能的应用将在全领域铺开，规模化生产趋势明显，从而推动储能系统成本的理性下降。随着电力体制改革的进一步推进，推动市场化机制和价格机制的储能政策将为储能应用带来新一轮的高速发展，市场需求也将趋于刚性，在此背景下，电化学储能的规模将实现两连跳，2022 年突破 10GW，2023 年接近 20GW。



中国电化学储能累计装机规模预测（2019-2023）

2 “储能”在今后电力系统中的应用

简单分析储能在电力系统中发电侧、电网侧和用户侧的应用。

2.1 发电侧

由于新能源存在随机性和波动性的特点，不利用大规模并网，配备储能设施可以平抑新能源发电的波动，为系统提供更为稳定的电力，取得很好的效果。

2.2 电网侧

储能系统应用于电网中，可以延缓电网升级、减少输电阻塞、提供辅助服务、提高供电安全可靠性。

2.3 用户侧

储能系统应用于用户侧，主要考虑节省电费、提供不间断供电来实现供电可靠性，从而带来相应的受益。同时在峰谷电价机制下，储能系统可以通过低储高发实现套利。

3 “储能”在今后电力系统中的商业模式

随着“储能产业”的发展，相应设备的成本也将逐步下降，和光伏一样，储能电池的成本也在以每年 20%到 30%的速度降低。2018 年，储能技术成本理论上已经突破了行业拐点，使得“储能产业”在电力系统安全需要的同时也有非常大的商业空间。

3.1 发电侧

当发电侧参与电力市场竞价时（特别是当电力现货市场建设成熟），上网电价存在一定的波动范围，配置的“储能装置”在低电价时段充电在高电价时段放电，有可能给发电商带来一定的收益，同时可以避免常规发电机组频繁启停，以及长时间低功耗运行带来的损失。

3.2 电网侧

“储能装置”在电网侧的作用主要缓解输配电系统升级改造，以及主动参与调频调压等稳定控制等方面。发输配等电力系统在应对负荷高峰时段或尖峰时段运行时需要投入大量的电力资产，但这部分资产的利用率很低，而且新建、扩建还要面临输电走廊、环境等多方面因数制约。配置“储能装置”可以减缓输配电系统的升级改造，其获利模式取决于输配电系统升级改造和储能系统建设于运维之间的成本对比。

（三）用户侧

由于用电一般都存在峰谷电价和基本电费，通过合理配置“储能装置”实现用电负荷的转移存在盈利的可能性，也是当前储能最有可能推广应用的方式之一，而合理的电价结构对储能产业的盈利影响至关重要。

4 “储能”在我省的应用前景和投资机会

在全面深化体制改革的背景下，2015 年 3 月，中共中央、国务院下发《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》(“9 号文”)，标志着本轮电力体制改革轰轰烈烈的拉开了帷幕。几个重要纲领性文件的相继发布为“储能产业”在国内开启快速发展奠定良好政策和市场基础，也为 “储能产业”将来在电力系统中带来极高的商业价值和发展前景。

2017 年 8 月 28 日，为了进一步完善市场化的电力电量平衡机制，国家发展改革委发布了《关于开展电力现货市场建设试点工作的通知》。而“储能装置”在低电价时段充电、在高电价时段放电，可以通过充分实现电力商品的时间价值来获得收益。

2017 年 11 月 15 日，为了进一步完善和深化电力辅助服务补偿机制，推进电力辅助服务市场化，国家能源局发布了《完善电力辅助服务补偿(市场)机制工作方案》。而“储能装置”利用自身快速响应、灵活性高等特点，将来在调频调峰等辅助服务上，同样是实现其商业价值的理想领域。

2018 年 2 月 28 日，为了实现我国 2020 年、2030 年非化石能源消费比重分别达到 15%、20%的目标的同时保障电力系统安全，国家发展改革委发布了《关于提升电力系统调节能力的指导意见》。《意见》专门提出了要推动新型储能技术发展及应用，将在调峰调频需求较大、弃风弃光突出的地区，结合电力系统辅助服务市场建设进度，建设一批装机容量 1 万千瓦以上的集中式新型储能电站。突显了今后“储能装置”在促进清洁能源消纳、电网安全保障中至关重要。

通过当前国家发布的相关文件，根据四川电力系统特性，针对“储能”今后在电力系统中可能存在的商业模式，今后在电力系统发电侧、电网侧和用电侧等多领域参与储能项目的投资收益有以下机会。

4.1 发电侧

目前国家对风、光等新能源发电的财政补贴力度在逐年削弱，而且一些特殊的地区已出现了大规模的弃风、弃光现象。从长远来看，随着电力交易机制的进一步完善、电力市场化交易比重的提高，新能源发电参与竞争上网将是大势所趋。而由于新能源存在随机性和波动性的特点，在电力市场中与传统的发电企业相比并不占优势，但如果加装“储能装置”，将极大的改善电能输出质量，且在同类型的电源中更有市场竞争力。

四川省和其他七个地区，2017 年已经作为首批试点开始启动电力现货市场建设并在今年开始加速实施。加装“储能装置”后，可以在低电价时段充电、在高电价时段放电，理想的情况下利用电力商品的时间价值来获得收益，但电力现货市场的前景感觉短时间内很不乐观。特别是我省虽定位为全国清洁能源输出基地，但受限外送通道和清洁能源消纳保障机制的不完善，导致出现区域内供应过剩、供需严重不平衡的局面。只要这种局面不能得到扭转，电力现货市场就很难获得真正的成功。目前，以最为廉价的“铅蓄电池”储能为列，其电价盈利的平衡点在 0.5—0.7 元/千瓦时，建议密切关注“储能装置”的技术与成本突破，争取今后在电力现货市场完善时通过电量的时间价值在市场竞争中获利。

4.2 电网侧

电力辅助服务是一直是维持电网安全稳定运行的必要手段，“储能”参与辅助服务市场能够有效提升电力系统的运行效率，因而辅助服务市场将是“储能产业”发展的重要载体。国内外已经有成功的商业化储能项目应用于辅助服务领域。国内 2013 年北京睿能公司在京能石景山热电厂实施了国内第一个储能火电联合调频商业化示范项目后，山西也陆续实施了多个同类储能调频项目（在火电厂加装大规模的储能装置，在电网需要的时候，以提供深度调频来获得补偿）。

目前，我省辅助服务总补偿费用占上网电费总额的不足百分之一，在电费总额中仅占较少份额，与国外其他电力市场相比该数值明显偏低。美国 PJM 电力市场(新能源占总装机占比 5%)辅助服务费用占电量费比例为 2.5%，英国(新能源占比 27%)该数值高达 8%。

按照《四川省“十三五” 能源发展规划》，我省还将以“ 三州一市”为主，继续大力发展风、光发电，到 2020 年装机达到 850 万千瓦时，占比 7.72%，将较 2018 年底高出 3 个百分点。

随着我省新能源装机比重的逐步加大，辅助服务在电力系统中的价值愈加体现，系统支付的辅助服务成本将越来越高。《完善电力辅助服务补偿（市场）机制工作方案》提出：部分地区对于自动发电控制、调峰、备用等服务补偿力度较小不能覆盖电力辅助服务提供成本和适当收益的，要完善区域并网发电厂辅助服务管理实施细则相关内容，加大补偿力度。

个人认为在新能源发电集中的“ 三州一市”，今后有参与布局小规模的储能电厂的可行性。一是在今后的辅助服务中有一定的商业空间；二是这些地区电源装机规模较大，外送通道建设滞后，导致在高峰时段电能输出受阻，利用低储高发，平滑输出曲线，将有极大的盈利空间。三是随着储能系统整体技术的提升和市场规模的扩大，储能成本将大幅下滑（有机构预计至 2020 年将较 2018 年下滑 41%）；四是国家目前正在开展单独核定储能电站电价的工作。但布局独立的储能电站和今后的盈利模式受政策影响较大，目前可以重点关注已出台政策的落地效果和行业动向。

4.3 用户侧

按照目前两部制电价用户基本电价的执行方式，电网公司通过用户变压器容量或申报最大需量方式计收基本电费，对使用超过申报最大需求量 105％部分的基本电费加一倍收取，而未足额使用

的也按当初申报量收取。这对生产计划安排不均衡和不容易准确把控的用户来说，将会造成严重不必要的电费支出。如果在大型的工业园区内合理的布局一些“储能装置”，将会极大的减少园区内用户的用电成本。

2018 年 3 月 13 日，国家能源局公布了《增量配电业务配电区域划分实施办法》，其中关键一条就是把新增配电网的审批权限从电网公司变为地方政府。将来公司如果涉足增量配电业务，在自己的供电园区内或在其他公司的园区内合理的布局“储能装置”，不仅能提升工业园区的招商能力，还能通过为用户减少基本电费而获利。同时，布局在工业园区内的“储能装置”，一样可以参与电力辅助服务和电力现货市场。

4.4 借助新能源汽车的快速发展布局充电桩

随着“储能”技术的成熟运用和环境保护的日益重视，新能源汽车近些年得到了高速的发展，市场份额越来越大。而其充电设施的建设却严重滞后，甚至抑制了新能源汽车的发展应用。据悉，目前四川省能源投资集团和青岛特锐德已参与我省充电桩的布局，四川省首个“光储充”示范项目——泸州国家高新区沙湾综合充电站也与 2018 年正式并网发电。长远来看，充电桩业务的市场空间不可估量，前景不容小觑。

5 结语

随着电力交易市场的愈加完善和“储能”技术的快速发展，储能产业将有巨大的发展潜力，甚至极有可能是未来能源革命的核心。但就现阶段而言，在没有形成完善的市场机制和“储能装置”成本没有有效突破时，贸然布局在抢占市场先机的同时，短期内还是有一定的风险。目前，建议可以密切关注国家相关政策和行业动态，待形成良好的商业化应用环境时在大规模的布局。

参考文献：

[1] CNESA 发布—《储能产业研究白皮书 2019》
[2] 郑漳华.《储能技术在电网中的应用发展》[J].《国家电网》,2016，（05）：100-101
[3] 杨军峰.《储能技术在送端电网中促进新能源消纳的容量需求分析》.《储能科学与技术》，2018(04):698-704
[4] 中关村储能产业技术联盟.《辅助服务新政发布 储能显现应用优势——完善电力辅助服务补偿（市场）机制工作方案解读》.《中国电力企业管理》,2018(28):24-25
[5] 李瑞民.《风光互补系统中混合储能容量优化配置研究》.《储能科学与技术》,2019(03):512-522

基于 GSM 通信的水电站水轮发电机组运行监测装置分析

雷相刚，金恩华

（国家能源大渡河猴子岩发电有限公司，四川 康定 626005）

摘　要：水轮发电机组作为水电站的核心装置，其运行状态监测一直是水电站管理控制工作的重点。本文基于 GSM 通信，对水电站水轮发电机组运行监测装置进行分析。试图提出一种以 GSM 通信技术为依托的高灵敏监测系统，对水轮发电机的运行状态做全方位的监督。及时发掘机组运行异常，进行针对性的调整和处理。

关键词：GSM 通信；水轮发电机组；运行监测系统

1 引言

水轮发电机组运行原理及内部结构比较复杂，发生故障时，想要精确定位到故障点相对困难，后期维护工作压力较大。在实际工作中，一般通过有效的事前监测对水轮发电机的故障信号进行采集，做到提前发现、提前预防。为提高并网水轮发电机组运行监测系统的灵敏度，将 GSM 通信技术融合其中。借助通信技术优势，来实现故障或异常信号的传输和处理高效性。

2 水轮发电机组运行监测装置结构设计

水电站水轮发电机组运行状态监控效率的提升需要相关管理人员能够清晰、直观、及时的获取机组当前的运行状态信息，并通过对信息的分析和判断在最短时间内做出正确的调整和处理。当遭遇紧急状况时，管理人员可立即对机组下达安全停机命令，从而确保水轮发电机组的故障影响被控制在一定范围内。整个监测过程中，异常信号的采集、传输是关键。决定将 DSP 处理器作为机组运行状态监测装置电路的核心元件，利用信号采集单元，对机组运行过程中产生的运行负荷、坝前水位、实际输出功率等数据进行收集[1]。安装驱动单元，负责对机组进行远程控制，主要的控制对象为启停机、停水等。监测过程中各类信号的传输和接受由 GSM 通信单元进行控制，通过短信息传送的方式实现水轮发电机组运行状态信息的查询和反馈。利用 UART 接口连接 GSM 通信单元和 DSP 处理器，其中，DSP 处理器完成信息的处理和运行状态的反馈。

3 水轮发电机组运行监测系统硬件设计

水轮发电机组运行监测系统可分为监测传感器、监测中心、数据采集终端以及网络基础四部分，具体的设计方案如下：

3.1 布置监测点

GSM 通信技术以及运行监测系统功能的发挥都要以实时获取的准确机组运行状态信息为依托，为确保传感器采集信息的全面性和普适性，需要对监测点的位置、数量进行合理的选取。监测点应同时满足以下要求：第一，选取的监测点必须能真实、全面的反应整个水轮发电机组的运行状态，获取的信息应为后续的工况分析与故障判断提供可靠的事实依据。第二，监测点位置的选择不能影响机组的正常工作。第三，监测点应有利于传感器的安装和调整，降低后期维护工作难度。第四，监测点的选取应在满足水轮发电机组运行监测要求的基础上，尽量降低设备安装成本。例如在对水轮发电机上机架位置的水平振动进行监测时，监测点的数量应设置为 2 个，要求尽量让监测点位于中心位置，使得 2 个监测点形成直角关系。而在下机架，对垂直振动的监测需要 1 个监测点，将其布置在中心内侧，并与水平振动监测点的设置位置相对应。

3.2 传感器选型

传感器作为信号采集始端，其性能对于运行监测系统的有效性至关重要。传感器的选择要结合水轮发电机组的型号、体量、与性特点等进行，并保证传感器的稳定性、精确性、灵敏度、抗干扰

性能等参数均达到相关要求。依照采集数据的类型，可将传感器分为位移、速度和加速度三类。不同的监测对象应配备不同型号的传感器。例如，大轴位移、法兰摆度的监测应安装位移传感器，上机架、下机架、顶盖等振动信号的监测应安装加速度传感器。本文研究监测系统的振动传感器选用了 MLS/V-9 型号，其灵敏度达到 300Mv/mm，适宜使用温度在-25～60℃。

3.3 数据采集终端

数据采集终端的硬件设施包括液晶显示屏、键盘、鼠标、数据采集箱、传感器电源箱、UPS 电源、直流电源等。其中，由直流电源向传感器供应电能。数据采集箱中设置的模板类型包括振动、摆度、键相、压力脉冲等，模板的设置对应系统监测点的设置，用以水轮发电机运行过程中不同信号的采集[2]。各个信号采集模板之间相互独立，当某一模板本身出现异常时，暂不影响其他运行信号的采集。信号采集模板连接在系统总线中，然后再通过以太网接口，接入水电站的监控系统。

4 水轮发电机运行监测系统软件设计

基于 GSM 通信的水轮发电机运行监测系统软件可划分为四个模块，即运行系统模块、图形界面模块、数据库和 GSM 通信模块。其中，运行系统模块可将水轮发电机的运行状态信息实时发送给管理人员。GSM 通信模块将来自传感器的信息传输到数据库中进行存储，通过筛选、分类和初步处理，将其传送到终端显示窗口。运行系统模块时数据库与图形界面模块之间的联系桥梁，另外，软件的初始化处理也在该模块进行。图形界面模块是人机交互的窗口，将监测装置收集到的运行状态信息以图像、文字的方式显示在 LED 屏中。显示的图形与文字之间具备特定的联系，可确保管理人员在观察信息后及时、准确反应出设备运行状态的变化。图形界面的设计相对灵活，按动对应的按钮即可对系统进行调节和控制。另外，图形界面还可完成数据的查询、调取、自动预警、资料打印等动作。数据库的作用是存储水轮发电机运行状态有效信息以及各类标准化信息，并对数据进行安全维护和分类管理，辅助进行实时数据的采集和传输。基于上述功能，监测设备的数据库中的信息包括实时数据和历史数据两部分。通过对话框即可完成数据的录入、清除和修改。GSM 通信模块用于内部信息传输和外部环境联系，建立水轮发电机组与控制中心的联系。GSM 通信模块需要以硬件驱动为依托，对 I/O 进行定义，实现内部信息的读取及传输。

5 水轮发电机组运行监测系统功能实现

5.1 功能实现原理

在整个运行状态监测系统电路中，DSP 处理器处于核心位置，通过安装在各个监测点的信号采集单元，实时获取水轮发电机组的状态信息。驱动单元负责水轮发电机的远程控制。GSM 通信单元负责各类信号的收发。电源系统供应各功能模块运行的电能需求。LED 显示屏用来显示最新的状态信息。

5.2 系统主要功能

第一，实时数据监测。该功能为水轮发电机组运行监测设备的基础性功能，目的对发电机组的全运行过程进行监督，并对其运行状态的合理性进行判断。在 LED 显示屏，管理者可观察到系统传感器的布置情况、各个通道的介绍、监测到的实时数据等信息，帮助进行水轮发电机组故障预防[3]。第二，数据分析处理。数据分析处理是对来自传感器的各项运行状态信息进行整合和分析，从中挖掘一些异常信号并得出机组的运行规律和运行特点，以掌握发电机组的运行模式，更有效的开展机组运维工作。数据分析处理功能下设曲线分析、轨迹分析、图谱分析等多项子功能，以多种形式呈现获取到的数据，便于针对性调节工作的开展。第三，生成运行报告。在数据库中定位到每一时段的水轮发电机组运行状态信息，可自动生成运行状态报告，有利于研究、测试活动的开展并进行资料存档。第四，自动预警功能。运行监测系统中设置了功能强大的数据库，通过实时信息与历史信息之间的对比分析，系统可自动判断某一信号是否为异常信号。若并网机组运行过程中部分参

数或状态变化明显，系统会自动做出预警，运行人员将会收到短信形式的报警信息。运行人员可根据提示，在第一时间做出正确的反应，以免异常状态进一步恶化，影响并网机组的稳定运行。第五，自动故障诊断。该功能的实现仍然依托系统数据库，在发出报警信号后，系统会根据监测数据判断故障发生点，并根据采集信息的变动判断故障的发展趋势，对检修工作做出指导。第六，机组运行指导。运行监测设备对水轮发电机组进行全方位、不间断的监控。经过一段时间的运行信息积累，系统可建立水轮发电机组的不同工况运行日志，找出各种负荷下，实现机组最佳运行状态的参数配置，以指导机组的运行过程，使得参数配置尽量符合实际运行工况。该功能可确保水轮发电机组始终处于高效运行状态之下，出现故障的概率自然会得到控制。

5.3 功能实现过程

5.3.1 GSM 通信功能

基于 GSM 通信的水电站水轮发电机组运行监测装置的核心优势就在于 GSM 通信功能的实现。本系统使用的 GSM 通信单元为西门子公司生产的 TC35i，该通信单元属于工业级别，同时支持中英文的信息输出。其具体的应用要求及参数介绍如下：工作频段为 EGSM900 和 GSM1800；工作电源为直流 3.5～4.8V；可实现同时实现语音和数字的传输；SIM 卡可通过接口连接器或天线连接器接入[4]。

5.3.2 处理器功能

DSP 处理器的外围电路由 DC-DC 线性转换单元、硬件看门狗单元、电平转换电路等部分组成。通过处理器可对有效信息的状态进行查询，将其转换成参数短信发送到查询端口。当 GSM 通信单元接收到运行状态信息后，先经过处理器的判断，确定其查询权限。对比获取到的信息与数据库中存储的标准信息，自动调取对应的调节参数，然后依照 GSM 通信单元的发送指令将调节参数编辑成短消息，经过 GSM 通信单元进行反馈。处理器中包括外置 FLASH 存储器，用于有效状态信息的临时存储。该存储器中的信息每 5min 进行更新，存储信息的时长为 1 年。通过调节硬件开关可将 FLASH 存储器转换成独立存储设备，并将其中存有的运行状态信息输出到其他电子设备。信息采集单元和驱动单元之间的连接由 DSP 和总线完成。

6 结语

基于 GSM 技术研究水电站水轮发电机组运行状态监测装置，实质上是对监测系统的一种优化设计。作为水电站的核心性生产设备，水轮发电机组的运行状态直接关系到水电站合理经济效益的获取。以一种更加灵敏、高效的通信技术对状态监测装置进行升级，提高水轮发电机组故障控制水平，保证机组运行安全、稳定。

参考文献：

[1] 韦仕朝. 小水电水轮发电机运行维护研究[J]. 科技风, 2019(05):193-203.
[2] 巴　桑. 水轮发电机组运行与维护技术措施分析[J]. 中国新技术新产品, 2018(13):46-47.
[3] 李江红. 水轮发电机组状态监测系统的应用分析[J]. 自动化应用, 2018(06):106-108.
[4] 朱文龙. 水轮发电机组故障诊断及预测与状态评估方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2016.

基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护研制及应用

李华忠[1]，向文平[2]，童 松[2]，刘 灏[2]，王 耀[1]，王 光[1]，陈 俊[1]

（1.南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211100；
2.国家能源大渡河瀑布沟水力发电总厂，四川 汉源 625304）

摘 要：本文提出一种基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护新方法，解决了扩大单元接线方式下发电机定子接地保护无选择性的问题。将柔性光学电流互感器制成一次传感光缆形式，绕置在发电机机端三相导体上，检测发电机机端零序电流，进而采用测得的零序电流与机端零序电压构成零序方向元件，实现选择性定子接地保护。试验结果表明该方法能准确测量零序电流，且不受导体空间位置和电磁干扰等影响，具有明确的选择性，可适用于机端铜排或电缆出线方式。该技术已成功应用于深溪沟两台单机容量 165MW 的“两机一变”发电机组上，保护投运至今运行情况良好。

关键词：扩大单元接线；定子接地保护；选择性；柔性光学；电流互感器(CT)

1 引言

定子绕组单相接地是发电机最常见故障类型。常用发电机定子接地保护原理包括基波零序电压、基波零序电流、三次谐波电压和外加电源注入式原理[1]，这些保护原理已在现场成熟应用，能有效实现 100%定子接地保护，但它们均存在无选择性问题，即不能区分区内还是区外接地故障。尤其对于扩大单元接线方式发电机组，任一台发电机发生定子接地故障时，所有并列运行的发电机定子接地保护均会动作，扩大了事故范围，降低了供电可靠性。而且由于无选择性问题，也给现场故障排查及定位造成不便，存在效率低、耗时长问题。

对于国内外大部分发电机中性点一般采用不接地或经高阻接地方式，发电机发生接地故障后存在零序电流小难以准确测量问题。因此需实现定子接地保护选择性，难点是如何准确测量微小的发电机零序电流。文献[2-3]提出了基于零序方向元件的定子接地保护，并已成功应用于现场。但由于该方法采用传统零序电磁式电流互感器，存在体积大、易受电磁干扰等问题，对现场安装、调试要求高。根据现场应用经验，该方法在机端电缆出线方式时具有较好效果，而对机端采用铜排等硬导体出线方式时存在性能差，甚至无法适用问题。如深溪沟电站 4 台单机容量 165MW 机组，额定电压为 15.75kV，额定电流为 6720A，采用“两机一变”扩大单元接线，机端为三相铜排并列出线，A、C 相间导体水平距离为 600mm，现场因空间受限而无法安装传统零序电磁式电流互感器，所以未实现定子接地保护选择性。

针对上述问题，本文提出一种基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护新方法，将柔性光学电流互感器制成一次传感光缆形式，绕置在发电机机端三相导体上，检测发电机机端零序电流，进而采用测得的零序电流与机端零序电压构成零序方向元件，实现选择性定子接地保护。该方法不受导体空间位置及电磁干扰影响，CT 尺寸可灵活定制，适用于发电机机端铜排或电缆出线方式。

2 柔性光学电流互感器

光学电流互感器（Optical Current Transducer，OCT）基于 Faraday 磁光效应原理，其传感原理如图 1 所示。线偏振光通过处于磁场中的 Faraday 材料（磁光玻璃或光纤）后，偏振光的偏振方向将产生与磁感应强度大小相关的旋转，通过检测旋转角度来测量产生磁场的电流大小[4-7]。

根据安培环路定理，当传感光纤或磁光玻璃围绕一次通流导体闭合成环时。旋光角 φ 可用下式表示：

$$\varphi = V\int_l H\cdot dl = VN_L I \qquad (1)$$

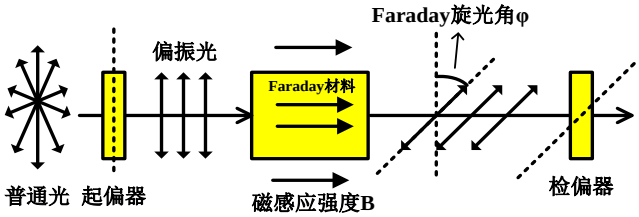


图 1 光学电流互感器原理示意图

式中，V 为光学介质的 Verdet 常数，表示单位磁场产生的旋光角；H 为磁场强度；l 为光在介质中传播的距离；N_L 为围绕通流导体闭合光路的圈数；I 为产生磁场的电流。

柔性光学电流互感器将一次传感器制成光缆，可方便的缠绕在各种形状的一次导体上。同时，柔性光学电流互感器对物理空间要求小，能在狭小空间实现安装，具有很好的灵活性。

3 扩大单元接线发电机定子接地故障电气量特征分析

以图 2 所示的两机一变为例，分析扩大单元接线方式发电机区内、区外单相接地故障时的电气量特征。

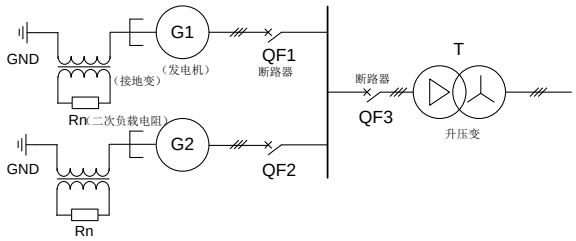


图 2 两机一变扩大单元接线方式

为便于分析，假设每台发电机的容量、定子绕组对地电容、机端电缆对地电容、接地变压器的变比及其二次负载电阻值均相同。设发电机定子绕组每相对地电容为C_g，机端电缆或铜排每相对地电容为C_l，母线每相对地等效电容为C_B，忽略主变低压侧等其他设备对地电容，接地变二次负载电阻为R_n，接地变压器变比为 N，接地变压器二次负载电阻折算到一次侧的阻值为$R_N = N^2\cdot R_n$。

3.1 发电机区内定子接地故障的零序等值回路

假设图 2 中 G1 发电机发生定子接地故障，接地故障点位于定子绕组 A 相距中性点α处，接地过渡电阻为R_f，定子绕组的对地电容分布均可等效地各以$0.5C_g$集中于发电机机端和中性点，其零序等值电路如图 3 所示，分析过程中，忽略了接地变压器的漏阻抗和励磁阻抗，所有电流、电压均为一次值。

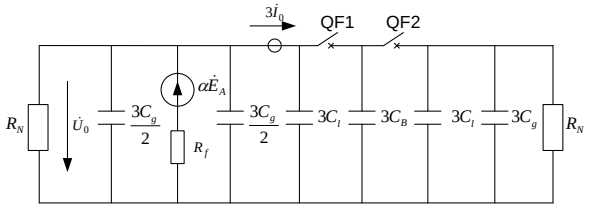


图 3 G1 发电机定子接地故障时的零序等值电路

图中，$3\dot{I}_0$为发电机机端零序电流，$\dot{U}_0$为发电机任一处的零序电压，$\dot{E}_A$为发电机 A 相电动势。

（1）只有一台发电机并网运行（QF1 处于合闸状态，QF2 处于断开状态），发电机区内单相接地故障时，机端零序电流表达式为：

$$3\dot{I}_0 = \dot{U}_0 \cdot j3\omega \cdot (C_l + C_B) \quad (2)$$

由式（2）可知，此时发电机区内单相接地故障时，零序电流超前零序电压 90 度附近。

（2）两台发电机均并网运行（QF1 和 QF2 均处于合闸状态），发电机区内单相接地故障时，机端零序电流表达式为：

$$3\dot{I}_0 = \dot{U}_0 \cdot \left[1/R_N + j \cdot 3\omega \cdot (2C_l + C_g + C_B)\right] \quad (3)$$

由式（3）结合接地变压器二次负载电阻的设计原则[1]可知，此时发电机区内单相接地故障时，零序电流超前零序电压 45 度附近。

3.2 发电机区外接地故障的零序等值回路

当母线上或其他台发电机上发生单相接地故障时，其零序等值电路如图 4 所示，

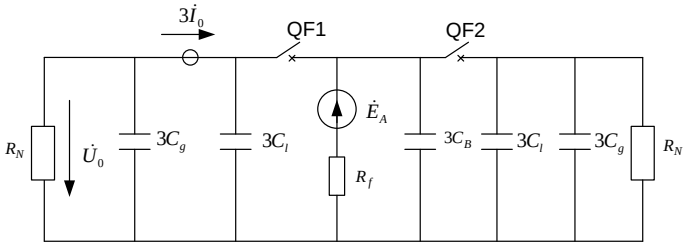


图 4 G1 发电机区外单相接地故障时的零序等值电路

由图 4 可得发电机区外单相接地故障时，流过 G1 发电机机端零序电流的表达式为：

$$3\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 \cdot (1/R_N + j \cdot 3\omega \cdot C_g) \quad (4)$$

由式（4）可知，发电机区外单相接地故障时，零序电流滞后零序电压 135°附近。

3.3 结论

综上分析，当发电机区内发生定子接地故障时，零序电流超前零序电压，考虑电容和电阻影响，角度范围在（0°～135°）。当发电机区外发生接地故障时，零序电流滞后零序电压，角度在 90～180 度范围内，所以可通过判别零序电流和零序电压的相角差以区分区内或区外接地。

4 保护判据及方案

4.1 保护判据

根据公式（2）～（4）构成选择性定子接地保护判据，由机端零序电流与机端零序电压构成零序方向元件，如图 5 所示，

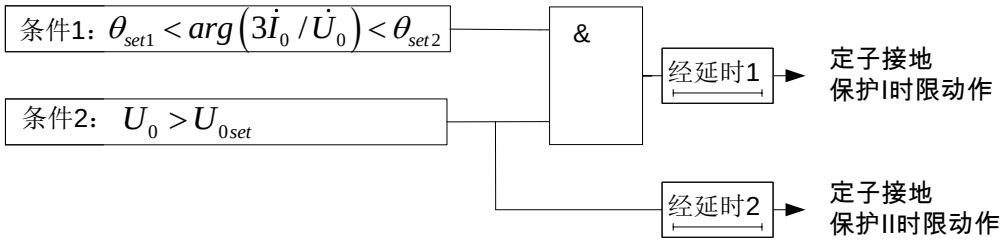


图 5 基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护逻辑图

其中，U_{0set} 为零序电压定值，θ_{set1}，θ_{set2} 为边界角度定值。条件 1：当机端零序电流与机端零序电压的相角差在角度边界定值范围在时，零序方向元件开放；条件 2：当机端基波零序电压大于 U_{0set} 定值时，定子接地保护启动。当上述条件 1 和条件 2 同时满足时，定子接地保护 I 时限经延时 1 动作。此外，考虑当母线上发生接地故障或因接地零序电流太小零序方向元件无法准确判别的情

况，增加定子接地保护 II 时限，经长延时 2 动作，其中延时 2 定值与延时 1 定值配合，时间级差取 0.3s 以上。

根据零序方向元件开放特性画出动作特性图，如图 6 所示，

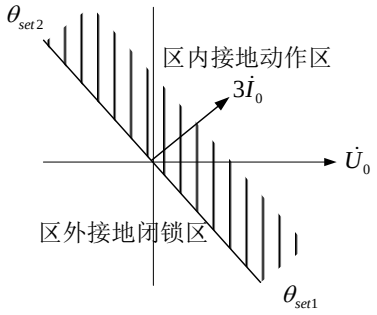


图 6 基于光学电流互感器的选择性定子接地保护动作特性图

4.2 保护方案

在扩大单元接线方式的每台发电机上，均配置基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护，如图 7 所示。将柔性光学电流互感器绕置在发电机机端三相电缆或铜排上，测量机端零序电流，采集单元将零序电流模拟量解析后转换为数字量送至保护装置。采用常规电磁型电压互感器测量发电机机端零序电压。保护装置将采集的零序电流与零序电压进行数据同步，计算零序电压的基波幅值、零序电流和零序电压的相角差值，当满足图 5 所示判据时，保护动作于信号或跳闸。

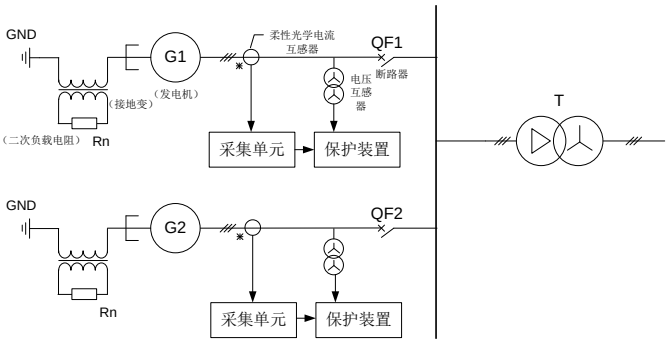


图 7 基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护方案图

5 零序电流精度测试情况

研制基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护装置，搭建 50Hz 三相不接地系统，将柔性光学电流互感器传感环绕置在不接地系统的三相导体外，接线参考图 7 所示。模拟单相接地故障工况，测量和记录零序电流大小。

三相导体任意排布，且通入 1200A 三相对称电流，模拟单相接地故障工况，测量零序电流大小，记录结果如表 1 所示。

表 1 三相导体不对称排布且通 1200A 电流时零序电流测量

序号	零序电流值/A	实测值/A	最大绝对误差	最大相对误差/%
1	0	0-0.03	0.03	—
2	0.30	0.29-0.31	0.01	3.33
3	0.50	0.49-0.51	0.01	2
4	1.00	0.98-1.01	-0.02	-2
5	2.00	1.98-2.02	0.02	1
6	5.00	4.98-5.02	0.02	0.4
7	10.00	9.97-10.02	-0.03	-0.3

由表 1 测试可见，在三相导体任意排布时，柔性光学电流互感器能准确测量零序电流，不受导体空间及电磁干扰影响，满足保护要求。

6 结语

本文提出了基于柔性光学电流互感器的选择性定子接地保护新方法，采用柔性光学电流互感器测量发电机机端零序电流，进而采用零序电流与零序电压构成零序方向元件，实现选择性定子接地保护功能。在此基础上提出了保护方案及判据，研制了保护装置，经试验结果表明，该方法能准确测量微小零序电流信号，不受导体空间位置及外部电磁干扰影响，适用于发电机机端电缆或铜排出线方式，解决了扩大单元接线方式发电机定子接地保护选择性的问题，提高了定子接地故障定位及排查效率。

该技术已成功应用于深溪沟电站两台单机容量 165MW 的“两机一变”发电机组上，在机组额定工况运行下，光学零序电流互感器测得不平衡零序电流一次值小于 0.5A，保护投运至今运行情况良好。

参考文献：

[1] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,1996.

[2] 谈涛，陈俊，王翔，徐金.零序方向元件选择性定子接地保护的分析[J].江苏电机工程，2010，29(5)：40–43.

[3] 陈俊，沈全荣. 扩大单元接线发电机定子接地保护方案[J] .电力系统自动化，2007，31(24)：86–89.

[4] 李传生，张春熹，王夏霄，等. 反射式 Sagnac 型光纤电流互感器的关键技术[J]. 电力系统自动化，2013，37(12):104-108.

[5] 肖智宏.电力系统中光学互感器的研究与评述[J].电力系统保护与控制，2014，42(12)：148-154.

[6] 郭志忠.电子式电流互感器研究评述[J].继电器，2005，33(14)：11-16.

[7] 张健，及洪泉，远振海，等.光学电流互感器及其应用综述[J].高电压技术，2007，33(5)：32-36

金窝电站 J1F 机组 3#、6#折向器关闭超时故障详解

鲜于坤

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610213）

摘　要：折向器关闭超时导致“单组喷针故障”，当两组折向器同时关闭超时时，调速器将报“双喷针故障”，导致机组甩负荷停机，严重影响设备健康和机组出力。本文将从故障现象、原因分析以及故障处理等几个方面，来剖析折向器关闭超时的症结所在。

关键词：调速器；喷针；折向器；液控单向阀

1 引言

田湾河是大渡河右岸一级支流，金窝电站是田湾河梯级水电站中的第二级水电站，装有 2 台立轴冲击式水轮发电机组，单机容量 140MVA，额定水头 595m，额定转速 375rpm。我厂水轮机调速器系统的喷针、折向器部分是采用奥地利 VA TECH HYDRO 公司的进口设备；调速器控制系统是武汉能事达提供的国产设备。调速器的作用是控制喷针开度和折向器的开启或关闭来达到控制水轮机的转速和功率，同时调速器能够根据用户自己设定的喷针转换方式设定值来实现机组并网后的双喷针、三喷针、四喷针、六喷针工作方式，从而达到提高水轮机的效率的目的。

2 故障现象

2019 年 2 月 16 日，对金窝电站一号机组折向器逻辑程序进行修改。主要包括折向器应开启或关闭时，折向器未打开或关闭，此时延时 15S 报折向器开启或关闭超时，同时给监控送故障信号，来关闭该折向器对应的喷针。在机组停机状态下分别对 1#～6#折向器模拟在未打开状态，完成相关静态试验，调速器动作逻辑正常，在机组开机状态下模拟二号折向器未打开故障，调速器动作逻辑正常。

2019 年 2 月 17 日 14:15:08 金窝 J1F 机组（通讯）调速器事故，甩负荷 90MW；14:25:26 现地检查 J1F 机组调速器面板上故障灯和紧急停机故障点亮，B 套 PLC 上双喷针及以上故障、调速器事故光字点亮，1#～6#喷针折向器全关；J1F 机组球阀已全关。15:00:28 查询历史曲线为：J1F 机组减负荷过程中（六切四）3#、6#折向器退出时间分别为 16S、18S；达到调速器程序设定的 15S 报故障逻辑；双喷针及以上事故，出口跳机。

3 原因分析

机组在发电态时，调速器根据负荷情况，选择喷针投入数，在每一组喷针投入时，该组折向器同时保持开启。以金窝电站 J1F 机组为例，负荷 31.4MW，2#、5#喷针投入，2#、5#折向器全开，1#、3#、4#、6#喷针退出，1#、3#、4#、6#折向器全关。如表 1。

表 1　金窝电站 J1F 机组负荷与喷针、折向器投入情况

序号	负荷（MW）	喷针投入情况（开度百分比）						折向器投入情况					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	31.4	0	41.4	0	0	41.4	0	全关	全开	全关	全关	全开	全关
2	71.5	46.9	0	46.9	46.9	0	46.9	全开	全关	全开	全开	全关	全开
3	140	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	72.6	全开	全开	全开	全开	全开	全开

当机组负荷调整时，喷针开度将发生变化，甚至喷针投入情况将重新分配。若一组喷针退出运行，则在该组喷针全关后，该组折向器将全关。然而，当 J1F 机组 3#或 6#折向器在全关过程中，

关闭时间明显较其他折向器长。查询 2019 年 1 月 28 日至 2 月 19 日金窝电站 J1F 机组折向器关闭时间，见表 2。

表 2　金窝 J1F 机组折向器关闭时间统计表（单位：s）

关闭时间 / 日期	1#	2#	3#	4#	5#	6#	备注
2.19			7			6	
2.18	11		18	9	6	26	
2.17		7	8			8	6 切 4
2.16			16			25	6 切 4
2.15			15			22	6 切 4
2.14		7	18	9	9	26	6 切 4，3、6 同时关
2.13		7	6	7	8	23	
2.12	11	7	18	10	8		
2.12		5			7		6 切 4
2.11	13	7	17	9			
2.1	12	7	16	10			
2.2		6			6		6 切 4
1.29			8			7	停机时
1.29			20				
1.28						26	

从上表可以看出，并非 3#、6#折向器关闭时间始终超时。经过查询曲线对比，3#、6#折向器在机组发电态保持开启一段时间后关闭，则关闭超时。

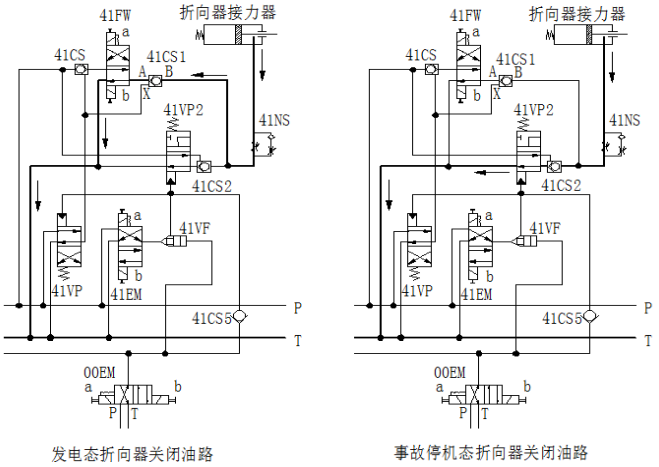


图 1　折向器关闭油路

图 1 所示折向器在机组发电态和事故停机态关闭时回油情况，首先折向器在机组发电态关闭时回油从折向器接力器油缸→单向节流阀 41NS→液控单向阀 41CS1→电磁方向控制阀 41FW→调速器油压装置回油箱，而折向器在事故停机态关闭时回油从折向器接力器油缸→单向节流阀 41NS→液控单向阀 41CS2→液控换向阀 41VP2→调速器油压装置回油箱。然而，3#、6#折向器是在机组发电态并且保持开启一段时间后再关闭，则关闭超时；在事故停机态关闭时，均正常。故折向器关闭超时的故障可能出在 41FW 或 41CS1 上。

4 故障处理

经过多次静态模拟实验，以及清洗阀组和调换阀组，最后将关闭正常的 4#折向器与关闭超时的 6#折向器的液控单向阀 41CS1 调换后，6#折向器关闭正常，4#折向器关闭超时，则我们将症结锁定在液控单向阀 41CS1 上。

分解 4#、6#折向器的液控单向阀 41CS1 后，发现两个阀的内部结构有明显的区别。6#折向器的液控单向阀 41CS1 内部同时安装了丝堵（10）和（11），而 4#折向器的液控单向阀 41CS1 只安装了丝堵（11）没有丝堵（10）。

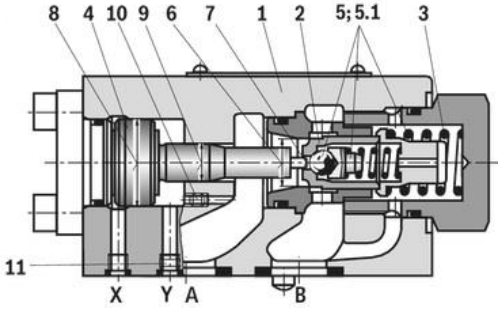


图 2　液控单向阀 41CS1 剖面图

1.阀体　2.阀芯　3.压缩弹簧　4.控制活塞　5.释压球阀　6.面积 A1（锥阀座）
7.面积 A2（滚珠）　8.面积 A3（控制活塞）　9.面积 A4（控制活塞）　10（11）.丝堵

该厂所用液控单向阀 41CS1 是 Rexroth（力士乐）SV 10 PA 1-42 型单向阀，SV 型单向阀是用于底板安装或螺纹连接的先导式单向阀。用于一个执行机构油口的无泄漏阻塞，甚至能够用于长期停机的情况。该阀门主要由阀体 (1)、阀芯 (2)、压缩弹簧 (3)、控制活塞 (4) 以及可选预开口球座阀 (5) 组成。座阀允许流体从 A 流向 B，而无需外部先导压力。在相反方向上，座阀以液压方式紧闭。条件： pA > pB + 开启压力（压缩弹簧）。油口 X 处的高先导压力足以使控制活塞 (4) 向右侧移动，释压球阀 (5)和阀芯 (2) 将先后被推出阀座。这便实现了两个方向上的自由流动（主动保持打开）。注意：替换丝堵(10) 和 (11) 可实现从 SV 型号到 SL 型号的修改。必须始终安装其中一个丝堵。

然而为什么 3#、6#折向器必须保持开启一段时间后再关闭才关闭超时，而保持开启短时间内关闭则又正常呢？下面结合图 2 对液控单向阀 41CS1 内部是否装有丝堵（10）时的动作原理进行分析。

首先，当 41CS1 内部无丝堵（10），油口 Y 被丝堵（11）封堵时。油口 X 通入先导压力油 p，A、B 腔均无压力油，控制活塞 (4)向右侧移动，释压球阀 (5)和阀芯 (2) 将先后被推出阀座，同时弹簧被压缩，此时，A、B 腔互通。

A 腔通入压力油 p 时，压力油 p 从 A 腔→B 腔→折向器油缸，折向器开启；当折向器全开后，pA = pB，同时压力油 p 经过节流孔进入弹簧腔，此时控制活塞（4）两侧压力相等，由于弹簧力作用，控制活塞（4）向左侧移动，阀芯(2)和释压球阀(5)先后回到阀座，A、B 腔被隔断，折向器保持全开。

A 腔通回油 T 时，由于油口 X 已通入先导压力油 p，控制活塞（4）快速向右侧移动，释压球阀(5)和阀芯(2)将先后被推出阀座，A、B 腔互通，压力油 p ´ 从折向器油缸→B 腔→A 腔→调速器油压装置回油箱，由于折向器接力器内的碟簧作用，折向器快速关闭。

其次，当 41CS1 内部有丝堵（10），油口 Y 被丝堵（11）封堵时。油口 X 通入先导压力油 p，A、B 腔均无压力油，控制活塞 (4)向右侧移动，释压球阀 (5)和阀芯 (2) 将先后被推出阀座，同时弹簧被压缩，此时，A、B 腔互通。

A 腔通入压力油 p 时，压力油 p 从 A 腔→B 腔→折向器油缸，折向器开启；当折向器全开后，pA = pB，同时压力油 p 经过节流孔进入弹簧腔，此时由于 41CS1 内部有丝堵（10），压力油 p 从控制活塞（4）的活塞杆（9）处缓慢渗漏至活塞（8）右侧腔内，由于弹簧力作用，控制活塞（4）缓慢向左侧移动，阀芯(2)和释压球阀(5)延时先后回到阀座，A、B 腔被隔断，折向器保持全开。

A 腔通回油 T 时，由于油口 X 已通入先导压力油 p，控制活塞（4）向右侧移动，然而控制活塞（4）的活塞（8）右侧腔内的积油从活塞杆（9）处被挤出，导致控制活塞（4）缓慢向右侧移动，使释压球阀(5)和阀芯(2)延时先后被推出阀座，A、B 腔互通，导致压力油 p´从折向器油缸→B 腔→A 腔→调速器油压装置回油箱的时间更长，由于折向器接力器内的碟簧作用，折向器缓慢关闭。

再次，若折向器开启短时间内，阀芯(2)和释压球阀(5)还未回到阀座，此时关闭折向器，则折向器关闭时间更短。由于 3#、6#折向器液控换向阀 41CS1 活塞杆（9）处的制造、安装工艺的差异，导致此处渗漏量不同，故 3#、6#折向器关闭时间偏长，但不一致。

5 结语

自把 3#、6#折向器液控换向阀 41CS1 内部丝堵（10）拆除后，经过多次静态模拟实验和至今对 J1F 机组发电态时的观察，J1F 机组 3#、6#折向器关闭时间均正常。

参考文献：

[1] https://www.boschrexroth.com.cn/zh/cn/[DB/OL]. Bosch Rexroth 中国官网.

[2] 六喷六折冲击式机组微机调速器及油压装置用户手册（田湾河流域梯级水电站专用）[M].武汉事达电气股份有限公司.2007

浅谈高水头大容量冲击式机组的不合格电量控制

周隆霞，曹雪梅

（四川川投田湾河开发有限责任公司，四川 成都 610013）

摘　要：田湾河流域梯级电站通过对产生不合格电量原因的查找、原因分析，采取了相应的管理办法、技术措施，大幅度的减少了不合格电量，控制不合格电量技术水平已名列省内前茅。

关键词：流域梯级电站；高水头大容量冲击式机组；不合格电量控制

田湾河位于四川省甘孜州康定县、雅安市石棉县境内，为大渡河中游的一级支流，田湾河流域梯级电站按照“一库三级”设计开发，从上从上至下依次由仁宗海、金窝和大发三级水电站组成。流域梯级电站总装机 760MW（仁宗海电站装机容量 2×120MW；金窝电站设装机容量 2×140MW；大发电站装机容量 2×120MW），均为高水头六喷六折冲击式水轮发电机组。

为了提高水能利用效率以及保证转轮的水力平衡， 机组在不同的负荷段，开启的喷针个数不同，这样在调整负荷的过程中存在喷针的切换过程。再切换过程中，存在负荷波动大的不足，极易造成总负荷越限，产生不合格电量。因为这一特性，高水头大容量冲击式机组的不合格电量控制是一个技术难题。田湾河公司下辖三站六台高水头大容量冲击式机组，通过管理手段、技术手段双管齐下，达到了不合格电量控制水平在省内统调电厂名列前茅。本文对高水头大容量不合格电量控制，进行经验介绍。

1 不合格电量的定义

《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》和《华中区域发电厂并网运行管理规定实施细则》（以下简称《两个细则》）对不合格电量进行了具体的规定。总共有 17 类，33 项，分析了大部分发电企业被考核的情况，大部分由于日发电计划偏差部分。

电力调度机构对日发电计划偏差实施如下考核：

1、电网频率正常，实际出力偏离机组额定容量±2%及以上，记偏差部分电量为考核电量；

2、当频率在 49.90 赫兹以下时，低于有功计划曲线而少发电量按 2 倍记为考核电量；当频率在 50.10 赫兹以上时，超过有功计划曲线而多发电量按 2 倍记为考核电量；

3、机组没有按照调度指令时间停运，将其后过程中发生的曲线偏差电量记为考核电量。

2 田湾河公司不合格电量控制水平

通过长时间以来，对不合格电量的重视，采取相应的管理方法和技术措施，在近几年不合格电量均有不同程度的下降，本厂特别在 2018 年全年不合格电量为 11.6038 万度，发电量为 31.43 亿度，不合格电量占比 0.00369%（2017 年该占比为 0.00539%）（见最后表格 1）。特别是田湾河流域电站六台机组均为冲击式水轮发电机组，负荷调整较混流式机组困难，取得这一成绩实属不易。根据国家能源局四川监管办发布的数据，田湾河流域梯级电站不合格电量与总电量比例在 238 个直调电厂排名第四（前三名为国网公司的映秀湾、渔子溪、耿达三家直属电厂）。

3 不合格电量产生的原因

田湾河公司根据《两个实施细则》和本公司设备实际情况，进行了操作人员方面及设备方面分析，发现不合格电量主要原因如下：

3.1 人的失误

1）田湾河流域梯级电站控制中心工作量大，值班人员容易疲劳，尤其夜班时精力不集中，会出现漏看调令、漏执行调令。

2）2017 年 6 月，四川电网实行新的负荷调整方法“点到已到”规则，负荷调整方法由原来单一调整方式更改为多种组合调整方式，负荷调整难度增大，负荷调整特殊情况增多。个别运行人员技术不过硬，在接受到调令时间较为紧急时会出现失误。

3）网上下载负荷曲线后，制作 96 点负荷曲线表格出现失误，导致运行曲线错误。

4）门户管理平台偶尔会有两条调令同时下达的现象发生，运行人员不仔细查看时，就会造成一条调令漏看的情况，而造成负荷不能按照调令及时得到调整，产生不合格电量。

3.2 设备的固有不足

1）田湾河流域梯级电站为高水头冲击式机组，每台机组六个喷针，为了提高水能利用效率以及保证转轮的水力平衡，机组的负荷变化时，存在喷针的切换过程。冲击式机组这一切换过程，有混流式机组所没有的负荷波动大的不足。尤其多台机组参与负荷调节时，会出现几台机组喷针几乎同时都在切换，多喷针切换时负荷波动大，极易造成总负荷越限。

2）调速器接受命令为脉冲控制方式，负荷调整下达过程中，调速器响应较慢，负荷调整时间长，负荷下达值与机组实发值相差在 1~2MW 左右，在总负荷较低的情况下，在一分钟内负荷有可能还未调整到设定值，以至于造成总负荷越下限或者越上限情况。

3）在采用 EDC（后文将进行介绍）方式调整负荷时，区间流量及期末水位设置将影响各站间的负荷分配。当 EDC 闭环瞬间，受区间流量及期末水位与实际值的差距，机组间的实发值可能会与分配值相差过大，造成负荷波动大越限，产生不合格电量。

4）因田湾河流域电站爬坡率为 6.67MW/min，按照负荷调整新规定“点到已到”原则，将出现了一分钟加 3.33 MW/min 现象，因 EDC 分配值为每分钟下达 6.67 MW/min，在依靠 EDC 软件加减负荷时，这半分钟加 3.33 MW/min 将无法实现。

例如：当前运行方式，负荷执行日前发电计划运行,本厂爬坡率为 6.67MW/min；如下 96 点曲线表：

8:15 分负荷按照爬坡率进行增加到 120MW;

8:30 负荷到 120MW，(新调整方法“点到已到”);

8:30~8:40 负荷维持在 120MW;

8:41 负荷为 123.33MW(出现了半分钟加 3.33MW），

8:42~8:45 负荷从 123.33MW 按照爬坡率增加到 150MW，

8:45 负荷到 150MW。

7:30	20	
7:45	20	
8:00	20	
8:15	20	
8:30	150	
8:45	150	
9:00	200	
9:15	200	

4 采取的相应措施

为了使不合格电量得到有效控制，田湾河公司各级管理人员、生产技术人员，群策群力去解决各种困难。

4.1 管理措施

1）使用激励。公司为不合格电量指标制定专项奖，职能部门制定相应的奖惩制度，对全员进行引导激励，对人为因素引起不合格电量进行通报批评及经济考核，切实鞭策后进、鼓励争先。

2）加强培训。认真学习《两个实施细则》的相关内容，全员掌握不合格电量的考核标准。对产生不合格电量的事例开展分析，组织人员深度讨论，形成防范措施。将防范措施以多元样化的方式进行培训，切实提高全员技术水平，避免出现不合格电量。

3）杜绝疏漏。一是要求每天中班值负责下载制作第二天的负荷曲线，打印签字。夜班接班人员进行核对签字；二是要求每人接盘后，需第一时间了解、核对自己当盘负荷调整时间，进行闹钟设置。负荷调整前还需要运行人员对秒钟的把握，使负荷调整精确在秒针上；三是负荷调整前，每人均要到门户管理平台上按调令提示进行二次核对，同时在能量计费系统上查询曲线进行三次核对；四是在值班期间，监盘人员不得从事和监盘无关工作，保障监盘质量，杜绝非负荷调整期产生不合格电量。

4）合理申述。每月不合格电量预考核发布后，进行逐日、逐条分析，与省调核对，减小统计错误的不合格电量产生。

4.2 技术措施

1）田湾河公司和南瑞公司一起，在 AGC 的基础之上，根据流域特点开发出 EDC（流域经济调度控制系统）；所谓经济调度控制（EDC）是用以确定最经济的发电调度以满足给定的负荷水平，水电 EDC 可以狭隘的理解为使一定的水量产生最大的经济效益。省电力公司规定田湾河公司机组的负荷调整爬坡率为 6.67MW/min。按这个速度，当总负荷从 100MW 变化到 740MW 的时候，调整时间长达近 100 分钟，如果全靠手动操作，工作量非常大，人员容易疲劳，而且精度不高，极容量出现偏差电量。EDC 能很好的实现经济调度控制，减少运行人员负荷调整操作强度，提高调整精度。EDC 功能为田湾河公司的不合格电量控制打下坚实基础。

2）将调速器控制方式由脉冲方式修改为现阶段的通讯方式，使调速器更快的响应，负荷调整更快更接近于负荷下达值，经修改控制方式后，一般 EDC 分配到机组负荷后，能在 40S 内调整到下达值。

4.3 人机一体。

发电企业目前的设备自动程度都很高，但仍达不到智能的程度。生产技术人员就要弥补自动化设备不够智能的不足，运行人员深度观察、分析各机组调速器性能，对机组调速器反应慢、延迟反应等情况进行分析总结，实现完美的人机一体。

1）为提高调整精度，观察记录各站机组喷针切换点负荷，制成表格。负荷调整时，人为干涉机组 EDC 的控制，降低负荷调整过程中因死区、喷针切换、区间流量计算、期末水位目标等因素造成的不合格电量。

2）EDC 功能中只能实现每分钟分配 6.67MW/min，针对一分钟内负荷加 3.33MW/min 情况，运行人员采用人工控制与自动化程序相结合的方式，控制每一分钟负荷不越限，将不合格电量落实在每分钟上；即：加减负荷过程中，人为手动调整一分钟加 3.33 MW/min，到下一分钟时将 EDC 闭环运行，设置负荷值目标值自动按爬坡率加/减负荷到位。

3）为防止 EDC 分配过程中，通讯出现“丢包”事件（EDC 已分配，信号未下达至机组），运行人员制作负荷增减调整 excel 表，生成每一分钟电量目标值，可以实时核对目标值与实发值。当设备出现延迟或者拒动时，调整人员可以及时进行人为干预，在负荷调整过程中适当进行超调等微调整，操作指令精准到以“秒”为单位，使机组负荷能在规定时间内能达到合格曲线，减小不合格电量产生。

5 结语

对于发电企业来说，不合格电量控制的经济效益是微乎其微的。但是，通过对不合格电量的分析，找出对策，使不合格电量得到有效控制是可能的。而且，通过这一分析控制的过程，使设备技

术水平得到明显提升、值班人员的业务技能得到提高、企业管理水平得到提升，对发电企业来说，这些提升才是更重要的。

参考文献：

1、 吴建斌，王红英.田湾河流域梯级水电站 EDC 系统分析与调试[J].水电站机电技术 2010.（4）；

2、《华中区域并网发电厂辅助服务管理实施细则》华中电监【2011】200 号；

3、《华中区域发电厂并网运行管理规定实施细则》华中电监【2011】200 号。

表格 1：

1		装机容量单位：MW，电量单位：万kwh						
2								
3	省调直调发电厂上网电量情况表		省调直调发电厂考核电量情况表			2018年考核比例		
4	电厂名称		序号	电厂			%	%
5		总计			总计	一至十二月累加	总电量考核比例	考核与装机容量比
6	田湾河	310345.07	180	田湾河	6.8433			
7	金窝		88	金窝	1.5206	11.6038	0.003738999	1.568081081
8	仁宗海		144	仁宗海	3.2399			
9								
10	安谷	234491.46	1	安谷	22.5869	22.5869	0.009632291	2.925764249
11	巴郎口	28370.79	2	巴郎口	146.9786	146.9786	0.518063122	153.1027083
12	巴青	6698.99	3	巴青	67.8007	67.8007	1.012103668	90.40093333
13	白水河	12354.77	4	白水河	49.4237	49.4237	0.4000373	179.7225455
14	白溪	7897.87	5	白溪	36.1026	36.1026	0.457118184	150.4275
15	百花滩	32044.08	6	百花滩	218.8125	218.8125	0.682848348	182.34375
16	宝兴	79829.63	7	宝兴	2094.9807	2094.9807	2.624314623	1074.349077
17	宝州	52031.02	8	宝州	808.8991	808.8991	1.554647758	586.1587681
18	宝珠寺	212078.93	9	宝珠寺	263.8161	263.8161	0.124395243	37.68801429
19	毕棚沟	6706.53	10	毕棚沟	27.7962	27.7962	0.414464707	124.0901786
20	滨东	50608.83	11	滨东	24.4422	24.4422	0.048296312	24.4422
21	波罗	194615.42	12	波罗	38.6159	38.6159	0.019842159	74.26134615
22	布西	120699.46	13	布西	204.3689	204.3689	0.16932047	1021.8445
240	仔达寨	10449.21	231	仔达寨	250.5728	250.5728	2.398008247	696.0355556
241	足木	13070.25	232	足木	192.5326	192.5326	1.47305976	469.5917073
242	泸定	254564.17	233	泸定	647.6646	647.6646	0.254420962	70.39832609
243	泗耳	13528.28	234	泗耳	75.224	75.224	0.556050033	208.9555556
244	驷马桥	5528.35	235	驷马桥	247.6129	247.6129	4.478967053	1031.720417
245	杵坝	5166.80	236	杵坝	83.7038	83.7038	1.620030298	418.519
246	硗碛	89559.31	237	硗碛	890.4575	890.4575	0.994265718	371.0239583
247	窦团	61730.62	238	窦团	80.0859	80.0859	0.129734485	53.3906
248		15059036.25				全网不	60533.3672	0.000191693
249						不合格	0.401973713	%

（因 238 个电厂统计资料太大，此后省略了 225 各电厂统计数据）

浅谈工频调感式串联谐振交流耐压实际应用

王　飞，周隆霞

（四川川投田湾河水电开发有限责任公司，四川 成都　610213）

摘　要：文章主要通过对工频调感式串联谐振交流耐压试验原理的阐述并结合在田湾河金窝电站发电机定子现场交流耐压的描述分析，从而总结出此方法在现场试验的利弊。

关键词：工频串联谐振发电机定子；耐压试验

1 引言

发电机交流耐压试验是交接预防性试验中检验发电机定子绕组绝缘好坏的最有效和最直接的试验方法之一，它对判断发电机能否继续运行具有决定性的意义 ,也是保证设备绝缘水平，避免发生绝缘事故的重要手段 。随着目前国内发电机组单机容量的不断扩大，定子绕组单相对地电容增大，简单的试验变耐压的方式对试验变得容量要求特别高，已无法满足现场试验的要求，而应用串联谐振原理可以降低试验电源容量，减小试验设备的体积重量从而满足试验要求 。

2 工频调感式串联谐振交流耐压试验原理

该工频串联谐振试验装置就是通过调节调谐电感的电感量使之在工频下的感抗全等于负载电容的容抗从而产生串联谐振，使得试验电源回路呈阻性，试验电源容量全部加在被试品上从而减小试验电源的输入容量。其原理图如图 1 所示:

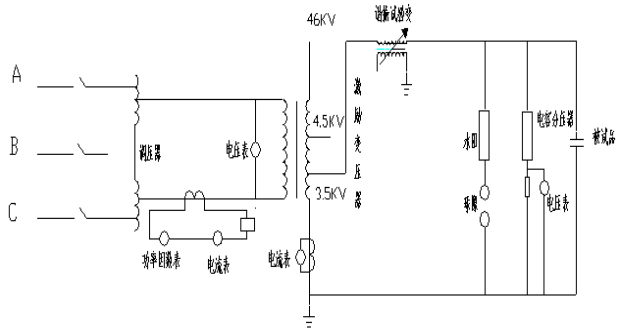


图 1 工频串联谐振耐压试验原理图

将原理图转化成简化等值电路，如图 2 所示：

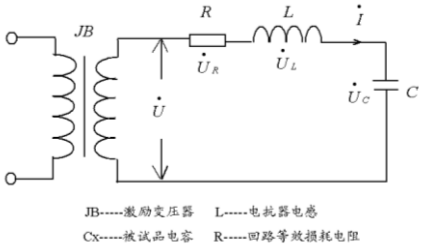


图 2（a）谐振原理图

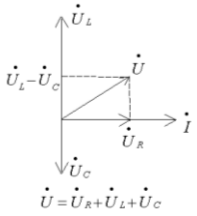


图 2（b）回路向量图

由图 2 (b) 可见，当 $|U_L|=|U_C|$，即 $\frac{1}{\omega C_X}=\omega L$ 时，$\frac{1}{2\pi f C_X}=2\pi f L$，则 $\dot{U}_L=-\dot{U}_C$，$\dot{U}_L+\dot{U}_C=0$，此时回路达到谐振状态。

在谐振状态时，则有 $\dot{U}=\dot{U}_R$，

此时 $|U_L|=|U_C|=I\cdot\frac{1}{\omega C_X}=I\cdot\omega\cdot L$，

被试品 Cx 上获得的容量 $S_C=I^2\cdot\frac{1}{\omega C_X}$，

电抗器 L 上获得的容量 $S_L=I^2\cdot\omega L$，

激励变的输出容量为 $S=U\cdot I=U_R\cdot I=I^2R$，

因此，品质因数 $Q=\frac{S_C}{S}=\frac{I^2\frac{1}{\omega C_X}}{I^2R}=\frac{1}{\omega C_X R}=\frac{\omega L}{R}$，

因为 $\omega L>>R$，故，$Q>>1$，此时被试品所需的电源容量为试验容量的 1/Q 倍，从而大大降低了试验电源容量，减小了试验设备的体积重量。

3 在发电机交流耐压试验中的实际应用

田湾河金窝水电站位于四川省雅安市石棉县境内，2008 年 12 月投产发电，是田湾河梯级电站的第二级电站，设两台单机容量为 14 万 kW 的冲击式机组，机组出口电压 15.75KV，定子绕组单相对地电容为 0.53μF，三相对地电容 1.25μF，2015 年 10 月，金窝电站 2 号机组 B 相发生定子单相接地故障，采用试验变耐压的方式查找出故障点，系定子绕组 93#槽下层线棒绝缘破损所致。对故障点线棒绝缘处理恢复后，因我厂定子绕组对地电容较高，原试验变耐压的方式已无法满足容量的要求，通过采用湖北绍兴特种变压器的工频调感式串联谐振耐压装置完成了定子绕组的现场交流耐压试验。下面将通过现场试验的具体阐述来总结该试验装置的利弊。

3.1 试验电压的选择

由于工频交流耐压试验属于破坏性试验，试验电压越高，对设备绝缘损坏几率就越大，所以必须正确选择试验电压的标准和耐压时间。一般发电机交流耐压试验电压的选择都遵循相关电力预防性试验规程进行，然而在实际应用也略有不同，金窝电站 2#发电机投运至故障发生日已有 7 年有余，定子绕组绝缘也逐步趋于老化，为保障试验过程中不造成绝缘击穿的现象，交流耐压试验电压值在经过东方电机厂相关技术人员的商讨,并结合我厂发电机的实际运行工况,确定先对定子绕组进行绝缘电阻及直流电阻测试，并对三相绕组分别进行 2.5 倍直流耐压及泄漏电流测试无异常后再对三相绕组分相进行 1.5UnKV 工频交流耐压测试，并保持 1min。

3.2 现场试验

现场试验时，首先根据试验原理进行试验接线，实际接线示意图如图 3 所示：

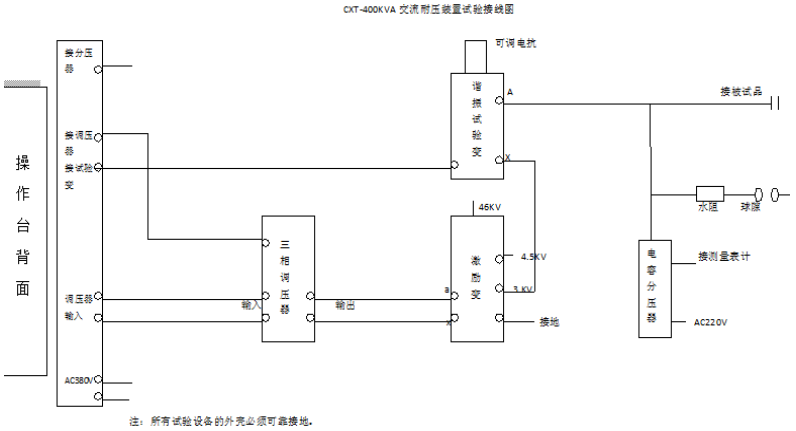


图 3　CXT-400KVA 交流耐压装置实际接线示意图

试验接线完成后认真检查所有试验设备及发电机非试验相是否靠接地，确认无误后进行相关保护的整定。

3.2.1 过流保护整定及校验

该试验装置过流保护的整定一般按被试品设备容量的 1/Q 折算为低压容量，并计算试验电压下低压电流、电压，按低压电流值 1.5 倍整定。我厂发电机容量 S 为 140MW，机端电压为 15.75KV，试验电压值按 1.5UnKV 及 U=1.5×15.75=23.6KV

所以试验电流 $In=\frac{Uc}{Xc}=Uc.\omega C=2\Pi fc.Uc$ =23.6×10^{-3}×314×0.53=3.92A

那么试验所需的容量 S=U In =27.6×3.92=92KVA

由于该试验装置 Q 值约为 20-50 ，所以当取 Q 值为 50 时，低压容量为 1.85KVA，低压输入电压为 380V，那么低压电流则为 4.9A，按低压电流 1.5 倍整定时，过流保护整定值为 8A。

完成过流保护的整定后应对其进行校验，按照空载方式接线，在操作台上的电压表上进行监测，缓慢升压至 40-50V，开始提升可动铁芯气隙，此时电流表指针会缓慢上升，当电流达到整定值 8A 是时，保护应可靠动作切断电源。

3.2.2 过压限制器保护整定及校验

过压保护的整定一般按被试品试验电压值的 1.1 倍整定，试验电压值按 23.6KV ，则过压保护整定为 25.96KV，整定结束后，同样，按空载方式接线，将调整可动铁芯气隙至零位，在所接的分压器高压侧表计进行电压监测，打开过压限幅开关进行空载升压，当电压整定值时应自动闭锁升压，只能降压通过调整球隙，使得升压至整定值时，球隙击穿保护应可靠动作。

3.2.3 过压球隙保护的整定及校验

球隙保护的整定，先要退出过压限制器，一般按被试品试验电压值的 1.1-1.15 倍整定，通过调整球隙，使得升压至整定值时，球隙击穿保护应可靠动作。

3.2.4 调谐耐压

将发电机定子绕组接入试验装置，先将试验电压升至激励变压器额定输入电压的 10%-20%时，通过调节谐振变主磁路气隙寻找谐振点，可重复此过程 2-3 次，直至高压输出电压达到最高值后完成调谐，此时看功率因数表 cosØ 在超前 0.98 至滞后 0.98 之间。

电路全谐时 $\omega L=\cdot\frac{1}{\omega C_X}$

式中:L 为谐振试验变可调电抗；C_X 为发电机单相对地电容；ω 为角频率

假设谐振点的电感为 L_0 则 $L_0=1/(2\Pi f)^2 C_X$ .....(1)

谐振回路中的电流 $I=\frac{U}{R}$ ..... (2)

发电机绕组上所加的电压 $Uc=ICx$ .....(3)

由于发电机的电容 C_X 基本为常量，所以当调节 L 使其达到全谐振 L_0 时，调节回路中的电流，实际是调节（3）式中的 U，即调节激励变压器的输出电压，当达到要求的试压电压值时，即可开始耐压试验，并保持 1min。

值得注意的是，同一台机组分相试验，确定谐振点后，其他相的耐压试验就不能再重新调整气隙，以免产生操作过电压。整体试验结束后必须将谐振变得可动铁芯气隙降至零位。

4 该试验的特点分析

该试验装置通过与以往我厂用普通的升压变压器试验系统相比，具有以下几个方面的特点:

（1）由前面试验原理分析可知，试验所需的电源容量仅为试验容量的$\frac{1}{Q}$,若试验时按电力预防性试验规程规定的耐压值进行试验时，试验所需的容量为 126.7KVA，那么所需的电源容量仅2.54KVA，所以适当地设计回路的品质因数值，在很大程度上降低了供电系统的要求,同时也减小了设备的重量及体积，降低了试验成本。

（2）输出电压波形畸变小。谐振电源是谐振式滤波电路，能改善输出电压的波形畸变，获得很好的正弦波形。

（3）不会出现任何恢复过电压，短路电流小。

谐振状态下当发电机的绝缘弱点被击穿时，相当于电容短路，电路立即脱谐，高电压也立即消失，电弧即刻熄灭，且恢复电压的再建立过程很长，很容易在再次达到闪落电压前断开电源，这种电压的恢复过程是一种能量积累的间歇振荡过程，其过程长，而且，不会出现任何恢复过电压。同时电流经可调电抗器振荡衰减正常试验电流的$\frac{1}{Q}$，如下所示：

谐振试验电流 $$I_X = \frac{U_C}{R} \quad \text{……(1)}$$

$$Q = \frac{S_C}{S} = \frac{I^2 \frac{1}{\omega C_X}}{I^2 R} = \frac{1}{\omega C_X R} = \frac{\omega L}{R} \quad \text{……(2)}$$

而谐振时短路电流 $$I_K = \frac{U_C}{\omega L}$$

所以 $$\frac{I_K}{I_X} = \frac{1}{Q}$$

所以，采用串联谐振对发电机交流耐压在没有任何限流措施的情况下也不会对发电机铁芯有何损伤。

5 结语

该试验装置通过现场试验论证与传统试验变相比，具有体积相对较小、重量相对较轻，能降低供电系统要求，能改善输出电压波形，一定程度上减轻现场试验的工作量，同时谐振装置具有组合方式 灵活, 对试品的破坏小等优点。因此, 串联谐振试验装置能在大中型发电机交流耐压试验中获得广泛的应用。 但从实际应用中不难发现，如遇电容量较大的电气设备，试验电流也很大, 调感式设备的体积仍然较大，试验接线及调谐过程复杂。

参考文献：

[1] 湖北绍兴特种变压器说明书

浅谈漫水湾电厂发电机磁极引线接头改造

蒋军华

（大桥水电开发总公司漫水湾电厂，四川 西昌 615000）

摘　要：漫水湾电厂发电机转子磁极引线采用焊锡连接，受负荷及绝缘老化等影响，经常由于负荷重，转子引线接头接触电阻增大，发热严重、焊锡熔化外流，从而导致转子一点接地保护动作，磁极烧损。为了消除此类问题，并为类似发电机组转子磁极引线烧损提供相应经验，介绍一下漫水湾电厂的处理过程及改进措施。

关键词：磁极引线；发电机；铜银焊；绝缘

1 引言

漫水湾电厂位于凉山州冕宁县漫水湾镇境内，是大桥水库灌区一期工程的重要组成部分，始建于 2002 年 11 月，电厂采用无压引水，引水渠长 7.8km，装机容量为 2×10MW，拥有日调节水库一座，库容 565 万 m^3，并兼有防洪、灌溉、供水等大型水利工程。于 2004 年机组并网发电，为西昌地区提供生活用电及工业用电，承担着调峰作用，因此，保证电站的安全稳定运行至关重要。

2 发电机主要参数及磁极引线连接方式

漫水湾电厂采用东风电机厂制造的 SF10-34/4250 立式水轮发电机。额定功率为 10MW,设计水头 30.1 米，额定电压 10.5kV，额定电流 687.3A,额定频率 50HZ，额定功率因素 0.8（滞后），额定励磁电压 210V，额定励磁电流 525A，定子接线 Y（中性点不接地）。漫水湾电厂磁极引线为锡焊连接，磁极引线用铜排制作而成，一端与磁极线圈相连，另一端与另一个磁极引线相连，两个磁极引线用铜并头套套住，用云母带将接头包好，再用玻璃丝带继续包好，在包好的磁极引线接头上方开一个小孔，便于加灌锡焊，再将包好的磁极引线接头两端剥开两个孔露出金属部分，通过直流焊机（200A 电流）夹碳精棒对准磁极引线接头开孔露出的金属部分加热至锡焊熔化进行灌锡，直到锡焊灌满，不留一点空隙，剥开绝缘层检查，锡焊焊接接头应饱满,外观光洁,而且温度不能太高，加热时间不宜过长，以免烧损绝缘及漏锡；检查无问题再分别用云母带和玻璃丝带包好磁极接头。磁极引线接头如图 1、图 2、图 3。这种连接方式的优点：接触性好，接头没有间隙连接可靠；缺点：锡焊熔点低，温度高了容易脱落，工艺要求高。

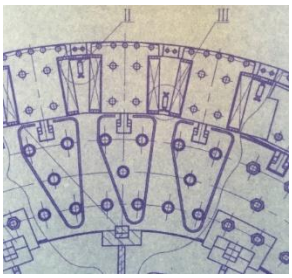


图 1 磁极引线接头示意图

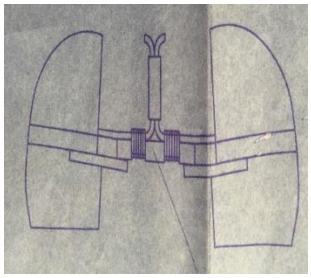


图 2 Ⅱ磁极引线下端接头示意图

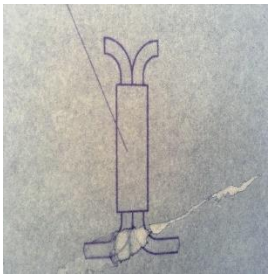


图 3 Ⅲ磁极引线上端接头示意图

3 转子磁极引线烧损情况及原因分析

2014 年至 2015 年漫水湾电厂 1#发电机转子发生磁极引线烧损为 2 次，2#发电机为 3 次。故障现象：1、上位机报“发电机转子一点接地低值”语音报警；2、发电机出口断路器跳闸；3、发电机解列停机。事故处理：1、立即派人到现场将发电机安全停机，通知渠首关水，避免水漫出渠道；2、查看保护动作情况及打印保护动作报告；3、对发电机转子回路进行绝缘测试，查看绝缘情况，有时绝缘电阻无穷大（磁极引线已烧损断开，形成开路），有时为零（转子磁极接头漏锡，已发生接地），进入发电机风洞对磁极引线接头做一一检查，看是否有烧损情况。该厂主要为磁极引线接

头烧损。通过综合分析和判断：认为主要原因有：1、至 2004 年发电以来，随着发电机部分设备老化，导致磁极引线接头处绝缘不合格，绝缘击穿，从而导致接地，引起磁极引线接头烧损；2、发电机转子磁极长期由于离心力的作用而导致磁极松动，引起磁极连接引线接触电阻偏大，引线接头处发热严重，加之发电机负荷常年处于满发状态，负荷重，发电机励磁电流大，磁极引线接头由于温度过高而导致锡焊融化，烧损绝缘，从而引起磁极引线处漏锡和磁极引线烧损。3、磁极引线由于长期运行，且通过的电流大、温度较高，从而导致磁极引线出现裂纹，长期运行导致烧损。

4 发电机转子磁极引线改造

为了彻底解决漫水湾电厂 1#、2#发电机组频繁出现磁极引线接头烧损情况，保证发电机的安全运行、生产效益及减轻检修的工作难度，公司决定利用 2015 年漫水湾电厂 1#、2#发电机组大修，对 1#、2#发电机组转子磁极引线进行改造。

2015 年 5 月先后对 2#、1#发电机的转子吊出，并固定在专门放转子的墩子上。首先对发电机转子进行了绝缘测试、直流电阻测试、交流阻抗测试，并对测试后的数据记录好，作为改造后数据的一个对照及参考。

接着，对 34 个磁极顺时针编号，拆除磁极引线固定绝缘托板，拆除转子阻尼绕组螺丝及风扇，剥开磁极引线连接处的绝缘层，使磁极引线裸露出来，并对编号磁极的引线做出详细检查，5 号和 6 号磁极引线锡焊接头存在发热现象，焊锡有熔化外流情况。用直流焊机（200A 电流）夹碳精棒对磁极引线接头加热至锡焊熔化，取出磁极引线铜并头套，拆开磁极引线接头，出去残留锡焊，用砂纸将磁极引线打磨，使磁极引线接触面平整、无毛刺。检查发现 5、8、20 号磁极松动、10、20 号磁极引线有裂纹。

针对以上检查情况和分析的原因一致，做出了以下处理：

1）10、20 号磁极引线裂纹处理，用专业工具将 10、20 号磁极键拔出，并将磁极取出，并进行磁极线圈与铁芯的分解，制作新的磁极引线，做好绝缘处理，并重新回装。

针对磁极松动处理，将固定转子磁极的磁极键焊点用角磨机磨掉，对于不合格的磁极键进行更换，并用二锤将磁极键打紧，再用电焊加固，使磁极牢固不松动。

对磁极引线改造用铜银焊替代原来的锡焊。把焊接面用砂纸打磨平整，除去磁极引线间氧化层，并用浸有酒精的白布擦洗干净；磁极引线铜并头套打磨清理干净，并套在两磁极引线上，焊接时用大力钳子将磁极引线夹紧固定。将需要焊接的接头周围，用石棉布遮挡好磁极，并塞好防火保温材料复合硅酸盐毡，以免伤及旁边绝缘。用氧气-乙炔焊接，焊接料用铜银焊丝 HIAgCu80-5。焊接时要保护好磁极和引线头的绝缘，防止破坏磁极绝缘。所焊接头必须饱满,连接可靠，用砂纸或锉刀去掉尖角毛刺，使其表面光滑，锉下的铜屑不得掉进铁芯内。对磁极引线接头进行绝缘包扎及固定：将焊好后的磁极引线接头用云母带半迭包 4 层，安装磁极引线固定绝缘托板，再用玻璃丝带半迭包 2 层，刷好绝缘漆，最后用热缩套将磁极接头套好。

根据预防性试验规程发电机转子绝缘试验规范 ATS04-98：

1）转子磁极绝缘电阻测试（用 500V 摇表测量转子对地绝缘电阻值大于 0.5 兆欧）。

2）转子直流电阻测试。与初次结果比较其差别一般不超过 2%。

3）交流阻抗值测试。

4）交流耐压 1000V，耐压时间 60s。

表 1 转子直流电阻对比

发电机	1#	2#
改前值	295.5mΩ	291.3mΩ
改后值	290.6mΩ	285.8mΩ

5 结语

漫水湾电厂通过发电机磁极引线接头改造后，在 4 年多的运行时间里转子磁极再没有发生过故障，采用铜银焊相比锡焊而言，提高了磁极引线连接的强度，铜银焊熔点的温度更高，当磁极引线温度较高时也不像锡焊被融化外流引起故障，提高了发电机运行的可靠性，减少了检修的工作量，同时也减少了处理磁极引线时间，为公司获得了更好的经济效益，也为同型号的水轮发电机磁极接头处理提供了相应的经验。

区域集控中心通信系统的解决方案

何丹心

（大唐四川发电有限公司集控中心筹建处，四川 成都 610000）

摘　要：数据信息传输的安全、稳定、可靠是区域集控中心建设的首要条件，也是各发电企业接入区域集控中心必须解决的主要问题。本文介绍了区域集控中心通信系统通过结合各受控发电企业的实际通信条件，从安全、稳定及经济性考虑，采用了租赁三大运营商光纤传输专用宽带、自建光传输专用通道、自建卫星通信网络应急通道的区域集控通信联合解决方案，并通过实际运行考验，确保区域集控中心的安全稳定运行。

关键词：区域集控中心；通信；三大运营商；卫星通信网络；安全稳定

随着国家进一步深化电力体制改革，电力体制改革的市场化定价、煤电联动、输配分离、配售分开等基本原则已经被贯彻落实，区域发电公司在公开、公正、公平的市场竞争秩序下，各发电企业的电力商品载体进入了商业化运营，传统的运营模式已经无法适应市场经济的发展，通过建设区域集控中心是不同所有制企业的区域发电公司提高在电力行业的影响力、竞争力、提升公司经济效益的首选项目，而高质量、高可靠的通信传输系统是区域集控中心建设的重要一环，通信系统的规划和建设也是影响区域集控中心安全稳定运行的关键因数。

大唐四川集控中心属于大唐集团在川发电企业按照“共商、共建、共享、费用分摊”原则在成都建设的一个区域集控中心（以下简称区域集控中心），是大唐集团在川企业的运行调度中心、生产信息中心、水库调度中心、应急指挥中心、设备诊断中心、安全监控中心。前期规划接入 6 条流域 10 座水电站 30 台机组，总装机容量为 5571WM，后期接入风电、光伏等新能源企业进行监视，采用一席一流域多厂站的区域集控调度模式，分别为大渡河流域的长河坝水电站（4×650MW）、黄金坪水电站（4×200+2×25MW）；嘉陵江流域的亭子口水电站（4×275MW）；岷江流域的天龙湖水电站（3×60MW）、金龙潭水电站（3×60MW）；涪江流域的仙女堡电站（2×38MW）；金汤河流域的金康水电站（2×75MW）、唐元水电站（2×54MW）、铜陵水电站（2×40.5MW）；定曲河流域的去学水电站（2×123MW），各电站分布在四川省的甘孜藏族自治州、阿坝州、绵阳市、广元市境内，距离成都最远的电站约 1200 多公里，距离成都最近的电站约 215 公里。

1 区域集控中心通信系统方案

区域集控中心通信系统规划的目的就是保障集控中心与受控电站之间、集控中心与调度机构之间的生产管理、计算机监控系统、工业电视、消防监控、管理信息、生产调度和行政管理等生产信息的传输和语音通信的稳定可靠。区域集控中心通信系统主要包括有：各流域受控厂站到区域集控中心通信传输网络、区域集控中心到电力调控中心光传输环网、区域集控中心程控调度交换系统、区域集控中心行政交换网络、区域集控中心应急卫星通信网络、通信电源及配线系统等，如图 1 所示。

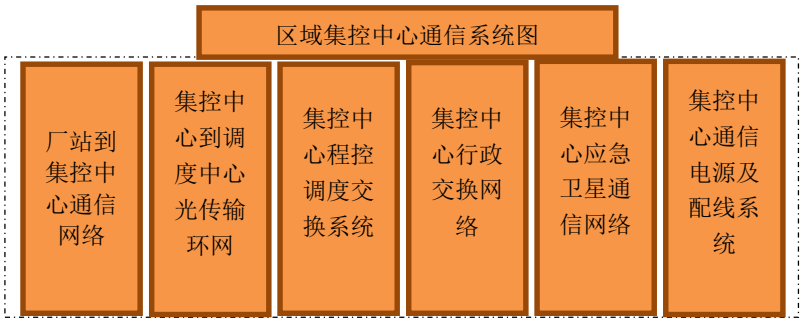


图 1 区域集控中心通信系统图

1.1 通信系统总体解决方案

区域集控中心各流域受控电站地理位置偏远，有部分受控厂站地理位置属于地质灾害高发区域，从安全性和经济性考虑，各发电企业都无法自建集控专用通信线路和网络，根据电力调度控制中心印发的审查会议纪要内容，各流域受控电站接入区域集控中心的主用通道、备用通道均采用租赁中国移动、中国电信、中国联通三大运营商的光纤传输专用宽带；区域集控中心到电力调控中心采用自建光传输专用通道；应急通道采用自建卫星通信网络的整体方案。

1.1.1 通信系统传输通道要求

根据区域集控中心业务划分需求，区域集控中心对通信传输通道主要有调度交换系统、行政交换系统、计算机监控系统、Ⅱ区数据系统、工业电视系统、消防系统、电力生产管理信息系统等，各种业务对传输质量的要求都有一定的差别，如表 1 所示。

表 1 区域集控中心至各流域电站通道承载及宽带配置表

数据网及业务	主用通道		备用通道		应急通道	
	承载网络	宽带 M	承载网络	宽带 M	承载网络	宽带 M
计算机监控系统	三大运营商	4	三大运营商	2	卫星通信	2
Ⅱ区数据网系统	三大运营商	4	三大运营商	2		
Ⅲ区数据网系统	三大运营商	10	三大运营商			
程控调度交换系统	三大运营商	2	三大运营商		卫星通信	2
消防监控系统	三大运营商	2	三大运营商			

注：应急通道计算机监控系统和程控调度交换系统一共为 2M 宽带.

通过对三大运营商同步数字系列（SDH）光纤传输系统专用通道的测试，从区域集控中心到各流域受控厂站测试结果如下：

Ⅰ区数据传输延时≤250ms，误码率不大于 10^{-5}，可用性要求为 99.99%；

Ⅱ区数据传输延时≤400ms，可用性要求为 99.9%；

调度、行政交换机组网为语音业务，数据传输延时≤200ms，可用性要求为 99.9%,。

加上考虑线路接入各流域受控厂站、区域集控中心的延时，三大运营商的专用通道电路延时均≤100ms，无丢包和误码现象，满足区域集控中心建设的要求。

区域集控中心与电力调控中心的通信组网由不同路由的三个变电站接入，组成区域集控中心到电力调控中心的光纤环网，并采用多路由电路保护配置；光缆线路采用租赁电力专网地下管孔自建方式，如图 2 所示。

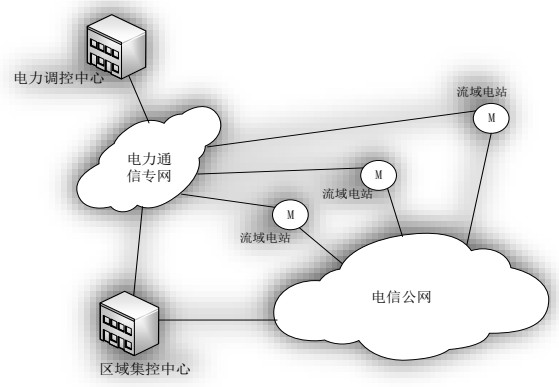


图 2 区域集控中心通信通道示意图

1.1.2 应急通信系统

根据《四川电网梯级水电站集控中心调度管理规定（试行）》要求，集控中心通信系统应具备防御各种故障和抵抗自然灾害能力，卫星通信系统抗自然灾害能力强，传输能量较大，可满足区域集控中心对音频、视频、数据多种业务传输的需求，也符合各流域受控厂站地处偏远山区的建设条件；区域集控中心应急通信系统采用 VSAT 卫星系统，星状、网状相结合的 TDMA 体制传输的混合网络结构组网，在区域集控中心设立卫星中心站，在各流域受控电站设立卫星远端站。

1.1.3 程控调度交换系统

为实现区域集控中心统一调度管理，区域集控中心配置一套 1024 线程控调度交换设备，主控单元采用 1+1 冗余配置，NO.7 或 Q 信令链路多条、具备多方向 2M 数字中继汇接能力，触屏式调度台，维护终端 1 台，数字录音设备 2 套等，并与各流域受控电站程控调度交换系统设备连接，满足区域内受控电站调度通信的需要。

1.1.4 行政交换系统

为充分利用系统内部网络资源、节约通讯成本、提高沟通效率，实现公司内行政电话异地内部互联互通，实现区域集控中心统一行政管理，区域集控中心配置一套 1024 线程控行政交换机设备，主控单元采用 1+1 冗余配置，NO.7 或 Q 信令链路多条、具备多方向 2M 数字中继汇接能力，后台维护管理终端一套。

1.1.5 通信电源及综合配线系统

通信电源系统是通信系统的重要组成部分，为保障通信系统的可靠运行，区域集控中心配置了 2 套容量为-48V/150A 的高频开关电源，2 组容量为 400Ah 的阀控式密封铅酸蓄电池组，采用交流电源经整流后对蓄电池和设备浮充供电，在交流电源中断后由蓄电池对设备供电的方式，既保证了通信电源的稳定、可靠，又同时满足通信设备对电源系统供电的质量要求。

通信设备采用综合配线系统，作为通信系统的配线、测试和设备保安用，所有通信光缆、电缆和电话线必须通过综合配线设备至通信设备，以确保通讯设备及人身安全；综合配线系统中音频线单独成架。

2 结语

大唐四川集控中心通信系统 2018 年 12 月份基本建成，大渡河流域、嘉陵江流域的电站已经接入区域集控中心进行试运行，目前各条流域的受控厂站也陆续接入区域集控中心，计算机监控系统、水情自动化系统、工业电视、消防监控系统等已经投入运行，区域集控中心经过半年多的运行，未发生影响区域集控中心运行的严重故障，各业务系统数据传输流畅，工业电视高清图像传输清晰，未发现误码、丢包等故障现象，实测Ⅰ区、Ⅱ区、Ⅲ区数据信息传输的平均延时、平均丢包率、通道切换时间等参数均满足相关规程规范的要求。

但在目前实际运行中也发现存在一些问题，如一些受控厂站未配有通信专业维护人员，设备的一些基本故障必须等三大运营商的维护人员来处理，在缺陷处理时间上很难满足电力系统的需要；其次是区域集控到流域受控电站通道的维护也存在及时性的问题，因为通道是租赁三大运营商的，加上大部分流域的受控厂站地处偏僻山区，通信通道有小故障时恢复的时间相对较久，如要遇上天气原因或地址灾害，则恢复的时间会相对长些；最后是一些流域的受控厂站因设备型号陈旧或缺少部分应配置的设备，在一定程度上也影响了区域集控中心通信系统的正常运行，同时区域集控中心也要做好通信中断的应急演练。

参考文献：

[1] 曹洋，区域能源集控中心通信系统设计研究[J].通信设计与应用，2017 年 2 月上.
[2] 徐牧，段成红，陶怡等，通信系统设计专题报告[R]成都，中国电建集团成都勘察设计研究院有限公司，2017 年 9 月.
[3] 国网四川电力省公司，四川梯级集控中心调度管理规定[R].成都，国网四川省电力公司，2017 年 12 月.
[4] 曾自怡，五凌电力发电集控中心调度通信实现方式研究[J].电力系统通信，2013 年 01 月.
[5] 董玉杰，中型水电站集控中心通信系统方案探讨[J].科技创新与应用，2017 年 19 期.

水电站智能巡检系统的开发及应用

刘　鹤[1]，伍　林[1]，刘芬香[2]

（1.国电大渡河瀑布沟水力发电总厂，四川 雅安 625304；
2.成都大汇智联科技有限公司，四川 成都 610000）

摘　要：设备巡检是水电站运行管理的一项重要工作，旨在掌握设备运行状态，及时发现设备隐患，目前水电站普遍采用人工定期巡检模式，存在人员投入大、效率低、可靠性差等不足。根据水电站设备巡检的实际业务需求，本文介绍了水电站智能巡检系统的设计开发方案，详细阐述了智能巡检系统的设计原则、系统整体架构、主要功能模块，通过智能巡检机器人和水电站现场现有的工业电视摄像机、红外热成像仪等监测设备，利用视觉识别等技术，结合电站综合数据平台完善的生产数据信息，实现了用系统代替人员开展设备巡检的功能，并介绍了在瀑布沟水电站的实际应用情况。

关键词：水电站；智能巡检系统；巡检机器人；视觉识别；开发；应用

1 引言

设备巡检是水电站运行管理的一项重要工作，各水电站普遍采用人工上位机（含工业电视系统）巡屏和定期现场巡检两站方式开展设备巡检工作，但均存在不足之处。首先是受限于水电站现场传感器布设的种类、数量和位置等因素，无法实时全面的采集设备状态信息，如对水电站现场常见的油水管路及阀门漏水、机械表计示数异常、一次设备超温及放电等缺陷信息无法全面感知，利用上位机巡屏不能完全掌握现场设备真实状况，即使利用工业电视系统辅助检查也存在实时性低、准确性差等问题。而定期现场巡检方式，即每日按计划安排生产人员对现场设备进行若干次的全面巡查，通过人员的“走到、看到、听到、闻到、摸到、分析到”的方式感知设备运行状况，发现设备的隐患和缺陷，这种常用的设备巡检方式存在以下不足：

（1）可靠性低。人工巡检的工作质量受巡检人员经验、责任心、身心状态、技能水平等因素影响大，导致巡检质量不可控，容易发生漏检等情况。

（2）追溯性低。主要依靠手工抄录数据、人工记录现象等方式记录巡检结果，不能形成统一的、标准的设备状态描述，对巡检数据也无法有效的比对分析，不利于缺陷现象的判断和追溯。

（3）存在人身伤害风险。水电站高压、湿滑等不利环境因素多，人员频繁开展现场巡检发生人身伤害的风险较高。

目前，水电站开始采用“无人值班（少人值守）”的生产模式，应用智能化的技术手段逐渐代替人员的现场工作，切实减少现场人员的数量，因此迫切需要研究开发水电站智能巡检系统开展现场设备巡检，完成水电站的日常巡检任务，从而替代人、解脱人和超越人[1]。

本文针对水电站在变革现场巡检方式方面的关键需求，从解决设备巡检中“走到、看到、听到、闻到、摸到、分析到”的感知方式入手，提出了移动监测与固定监测相结合、视觉识别与数据综合分析应用相结合、前端设备采集与后台系统分析相结合的智能巡检系统设计思路，充分利用瀑布沟电站综合数据平台互联互通的基础和全面的设备数据信息[2]，科学构建系统总体架构，合理设计各项系统功能，实现了在不大量增加电站设备改造和高成本投入的前提下，完成了水电站智能巡检系统的开发和现场应用。

2 设计原则

系统旨在代替人员完成设备巡检工作中对设备的“望”、“闻”、“问”、“切”等工作，通过采集图像、红外热成像、声音、温湿度和综合数据平台数据，利用计算机视觉识别、机器自学习等技术，使之具备“智能”能力，代替人员的巡检工作。系统应具备以下特征：

（1）具备更明亮的“眼睛”：研发应用智能巡检机器人，利用电站工业电视系统现有的高清摄像机，根据巡检系统合理增加摄像机和红外热成像仪，完善智能巡检系统的眼睛，使之能够全面看到设备的“跑、冒、滴、漏”现象和各种表计等设备；

（2）具备更敏锐的“耳朵”：在风洞、水车室、水轮机人孔门等部位增加声音采集传感器，记录感知特殊工况下设备产生的异常声音；

（3）具备更灵敏的“鼻子”：合理选用传感器让系统能感知现场的特殊气体成分；

（4）具备更敏感的“触觉”：利用高精度的红外测温手段，让智能巡检系统具有更敏感的温度感知能力，感知异常温度并记录；

（5）具备更聪明的“大脑”：通过开发视觉识别算法模型、设备故障分析诊断模型、智能联动告警模型等，实现对采集数据、图像等信息的自动比对和分析，智能判别设备缺陷并及时发出预警信息通知生产人员处理。

3 系统架构

智能巡检系统的系统架构包括硬件系统拓扑架构、系统软件架构两部分。

3.1 系统拓扑架构

水电站智能巡检系统硬件设备分为前端数据采集设备、网络传输系统和后端管理平台系统三部分，前端数据采集设备包括智能巡检机器人、高清可见光摄像机、红外热成像测温摄像机、声音监测装置等传感设备，网络传输系统包括交换机、无线 WIFI 设备、网线和光缆等，后端管理平台系统主要为服务器设备、存储设备[3]。其主要系统拓扑结构如图 1 所示。

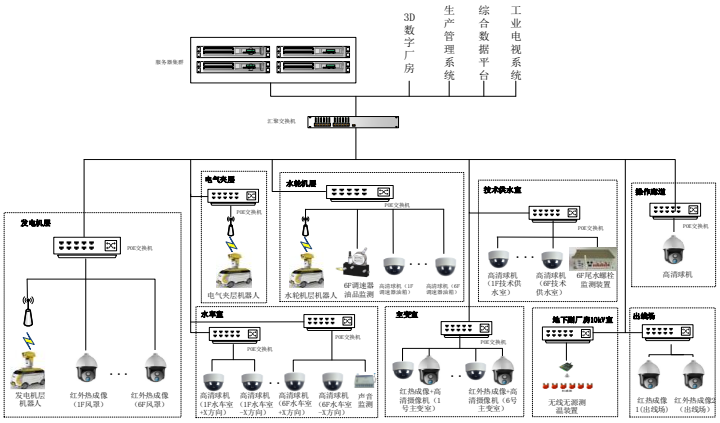


图 1 巡检系统拓扑图

3.2 系统软件架构



图 2 巡检系统软件功能构架图

智能巡检系统结构采用 B/S 架构方案，整个系统包括数据源层、基础资源层、数据存储层、中间件层、功能层和表现层，其中功能层主要部署巡检系统的核心功能，主要包括：系统管理、终端管理、巡检管理、资产管理、可视化管理等功能，软件功能总体架构如图 2 所示。

3.3 系统部署方式

该水电站智能巡检系统采用虚拟化部署方案。智能巡检系统将软件系统整体部署在基于虚拟化技术的超融合平台上，应用云计算、云存储、虚拟化网络技术，满足系统运行对于资源高性能、高可靠、安全性和高可适应性的要求。通过虚拟化技术的应用，将整个系统架构拆分为超融合基础设施、云管理平台、业务应用层三部分。

超融合基础设施由高性能 X86 物理服务器组成，通过虚拟化技术将计算资源、存储资源和网络资源等云端化，便于后期调整优化。通过超融合平台内部的云管理平台，可对物理服务器和虚拟机资源进行灵活调度，并实现实时应用迁移及资源备份等功能，同时向用户提供清晰明了的可视化管理界面，使用户在故障定位上更加便捷可靠。

4 系统功能

4.1 实时监视功能

实时监视功能以“数据形象，多维度，多层展示”为核心，根据需求自动采集各系统的数据，通过常见的图表（柱形图、直线图、饼图、雷达图等）方式展现设备状态，将数据更加直观地提供给生产人员，以提高人员对设备的管控能力和决策能力。

实时监视界面可根据不同展示需求和功能板块来选择相符合的图表，既可以通过一个图表来反映多种指标，也可通过数据的多层钻取在不同的图表中展示。具体模块有：

（1）设备状态指标。展示当前巡检结果，用数据化的方式展示设备巡检点的正常、异常数量，使人员能直观了解设备整体运行状况。

（2）异常情况分布展示。按系统单元维度来展示巡检发现的异常数据，来统计当前年/月/日与上一个年/月/日的报警情况，便于对比分析。

（3）告警列表。可以查看并处理实时告警，当该报警被确认处理后，可填写报警处理方式。

（4）水电站电子地图。构建电站发电机层、电气夹层、水轮机层等空间电子地图，实时展示巡检机器人、高清摄像机、红外热成像、声音采集仪、智能传感器（温度传感）等巡检终端在空间的分布情况。

（5）实时视频、图像、声音等数据查看。按设备和空间两个维度调取机器人或者高清摄像头视频流数据、图像识别结果数据或者生意数据。

4.2 终端设备管理与控制

系统中可通过终端画像方式，分别以终端类型分布、系统终端分布、终端空间分布的维度展示智能巡检系统内终端设备的分布情况，使用户能直观了解终端设备状态。同时，在系统画面中也可以实现对巡检机器人、高清摄像机、红外热成像、声音监测装置等采集等信息进行实时的调取和控制。

4.3 视觉识别

视觉识别融合图像分析处理技术、计算机视觉技术、计算机图形学、人工智能等多项技术，其发展目标在于在监视场景与事件描述之间建立一种映射关系，使计算机从纷繁的视频图像中分辩、识别出关键目标物体。

本系统的视觉识别模型包括机械表识别模型、数字表识别模型、指示灯识别模型、压板识别模型、油位计识别模型、漏油漏液识别模型等。

在指示灯、压板、表计等设备的视觉识别上，系统采用的识别方法包括缩放、模糊等图像预处理，获得多幅预处理图像；再通过目标区域成像信息，提取目标区域的多个特征，如纹理（LBP）

特征、颜色（LUV、HSV）特征、边缘梯度（HOG）特征等，来建立一个设备轮廓的分类器（如 SVM 支持向量机、朴素贝叶斯、决策树、深度学习等），形成识别模型。而对于设备漏油漏液识别上，则采用高斯背景建模，利用背景检测技术，实现目标物体自动检测。

4.4 巡检任务管理

系统能够根据水电站实际管理需要提供多种巡检方案：

（1）日常巡检：可按照用户需求设置定时巡检计划，定时启动机器人、摄像头进行可视区域内设备的巡检；

（2）特例巡检：可设置需重点关注设备的特例巡检，提高特例巡检区域的巡检频次；

（3）事故巡检：事故情况下，可建立临时巡检任务，自动启动机器人或摄像头至故障区域进行巡检，实时采集传输图像供人员查看。

4.5 数据分析与管理

（1）综合智能分析。智能巡检过程中，对设备从系统、空间维度进行图像识别结果数据、温度数据、声音数据等进行综合分析，通过系统智能分析出设备异常状态，并提醒生产人员，提高故障的分析和处理效率。

（2）历史数据分析。根据巡检机器人、智能监测设备采集的数据信息，系统可以按照设备树的设备进行历史数据分析，可以给出设备在过去的故障信息，同时也提供按照同类设备的横向对比功能，为电厂的巡检计划制定、设备风险预警的提供参考依据。

（3）报告自动生成功能。智能巡检系统每执行一次巡检任务都会生成巡检报告，报告格式按用户需求设计，主要内容包括：本次巡检任务的巡检地点、巡检时间、本次任务完成的巡检点、每个巡检点中的设备读数值、判断读数是否在阈值范围内，巡检报告中附有系统巡检时拍摄并经过视觉识别处理的图片，如果视觉识别失败，则会附上原图。

4.6 联动管理功能

联动管理是通过智能巡检系统与综合数据平台的对接，实现与电站 3D 数字厂房系统、ON-CALL 系统、生产管理系统等系统的互联互通，建立电厂中各子系统的联动和快速反应机制，协助运维人员快速处理事故现场。

（1）告警联动。系统接收到综合数据平台的设备报警信息或者内部报警，能联动设备及其相关区域内的巡检机器人、智能监测设备切换到现场识别确认并保存现场画面。系统巡检发现设备异常，能够实时联动电站 ON-CALL 系统，发出设备异常告警信息，通知生产人员进行处理。

（2）事故联动。事故跳闸事件发生后，事故设备及其相关区域内巡检机器人、智能监测设备切换到现场，进行事故确认并启动录像。

4.7 第三方接口支持

建立与瀑布沟综合数据平台的接口。系统巡检结果以图片、视频、数据、报告等形式进行存储，并上传至电站综合数据平台。巡检系统系统所产生的音频、事故录像、报告进行能够上送至综合数据平台。同时能够接受综合数据平台的相关数据，如设备模拟量、机组开停机状态、事故信号等。

5 应用情况

目前，水电站智能巡检系统已在瀑布沟电站全面应用，系统能够按照设定的巡检频次自动启动智能巡检机器人执行设备巡检任务，实时采集分析工业电视摄像头、红外热成像仪、声音传感器等多元信息，智能识别设备指示灯状态、保护压板及把手位置、设备渗漏缺陷、表计及液位读数、设备及环境温度等数据信息，在系统实际应用中多次准确的识别发现在运设备的管路漏水、指示灯指示异常等设备缺陷，并及时的通过 ON-CALL 系统发出报警，充分验证了水电站智能巡检系统可以有效的代替生产人员开展现场设备巡检工作。



图 3 智能巡检系统主界面



图 4 系统识别出管路漏水缺陷（图中红色标记部分）



图 5 智能识别压力表读数

6 结语

水电站智能巡检系统不仅具有传统人工巡检方式的灵活性，也弥补了传统人工巡检存在的时效性差、质量参差不齐的缺陷和不足，能够有效降低人员劳动强度和水电站运维成本。水电站智能巡检系统的成功研发和应用，实现了全天候、全方位、全自主的智能化设备巡检，提升了巡检作业的智能化管控水平，为无人值班（少人值守）电站建设提供了坚实基础和可靠支撑，也为水电站开展智慧化电厂建设进行了有益的探索[4]。

参考文献：

[1] 鲍友革,黄宗碧,姬晓辉.基于强人工智能的水电厂智能巡检机器人研究与应用[J].水电与抽水蓄能，2017（1）：39-43.

[2] 刘鹤，杨朝政.瀑布沟电站综合数据平台设计[J].四川水力发电,2018（1）：115-117.

[3] 韩超，马欣欣等.智慧安全系统在火电厂中的应用研究[J].中国电力,2019（1）：127-132.

[4] 涂扬举.水电企业如何建设智慧企业[J].能源，2016（8）：96-97.

亭子口水利枢纽正常蓄水位洪水调度研究

王剑桢

（嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司，四川 广元 628400）

摘　要：2017 年汛期，亭子口水利枢纽流域遭遇持续干旱天气，直至 8 月末出现一次强降雨过程。10 月上旬，流域发生近 36 年来少见秋汛，在公司正确领导下，通过预报调度，动态控制运行水位，首次在正常蓄水位成功开展洪水调度，实现度汛发电双丰收。

关键词：雨水情；洪水调度；动态控制运行水位；过程最高洪水位

1 嘉陵江流域水文气象特性

嘉陵江流域大暴雨的天气系统主要为西南低涡、低槽冷锋、低空急流和切变。由于天气形势和影响降水的天气系统以及地形条件的不同，使得暴雨分布在地区上和季节上均有差异。亭子口以上流域暴雨多发生在 4～10 月，80%的暴雨发生在 7～9 月。单站暴雨持续时间最长可达 3 天。

嘉陵江流域洪水主要由暴雨形成，属陡涨陡落型洪水，年最大洪水发生时间以 7、8、9 三个月最多，6 月次之，5、10 月亦偶有发生，但量级较小。7～9 三个月洪峰出现次数占全年 84.7%，其中出现在 7 月份的几率最大为 38.5%，其次是 9 月为 25.0%。一次暴雨过程约 5～7d，其中主峰历时 2～3d，一次洪水过程约为 3～7d，峰顶时间一般为 0.5～2h，洪水过程线形状多为单峰，当嘉陵江上游与白龙江及区间降水时间错开时，也时常出现双峰或多峰的洪水过程。

2 亭子口公司防洪任务与调度原则

2.1 防洪任务

根据 2017 年 5 月长江防汛抗旱总指挥部批复的《嘉陵江亭子口水利枢纽 2017 年汛期调度运用计划》，2017 年亭子口水利枢纽大坝度汛标准为 500 年一遇洪水，非常运用度汛标准为 5000 年一遇洪水。亭子口水利枢纽 2017 年的防汛任务是确保枢纽自身安全；承担嘉陵江中下游的防洪任务，将南充市的防洪标准由 20 年一遇提高到 50 年一遇，提高苍溪、南部、仪陇、蓬安、武胜等 5 座县城的防洪标准，减轻重庆市合川城区的防洪压力；配合三峡水库分担长江中下游防洪任务；必要时，与嘉陵江水库群联合运用，减轻重庆市防洪压力。

2.2 调度原则

根据亭子口水利枢纽 2017 年汛期调度运用计划，2017 年水库调度原则为：主汛期（6 月 21 日～8 月 31 日）期间，一般情况下水库按库水位不高于防洪限制水位运行。实时调度过程中视实时水雨情、枢纽状况和防洪形势，经长江防汛抗旱总指挥部同意后，可适时调整枢纽运行水位；当需要水库防洪实施承担嘉陵江中下游防洪任务和长江中下游防洪任务调度时，根据枢纽工况，按防汛主管部门的调度指令实施拦洪错峰；9 月 1 日水库开始蓄水，水库运行水位不超过正常蓄水位 458m 运行；当遭遇枢纽设计标准洪水时，原则上按保枢纽安全运行。

3 亭子口水库调度中心调度过程

3.1 雨情分析

2017 年 1～11 月亭子口水利枢纽上游区域（亭子口水情自动测报系统控制范围，下同）累计降雨 1001.4mm，总体与常年基本持平，比上一年同期偏多 2 成。空间分布较为均匀，供水期比多年同期稍偏多，汛期 880.6mm，比多年同期稍偏少，集中在 7 月、8 月及 10 月上半段，尤以 10 月份最丰，达到多年同期的 2.9 倍。

逐月降雨量对比分析详见图 1。

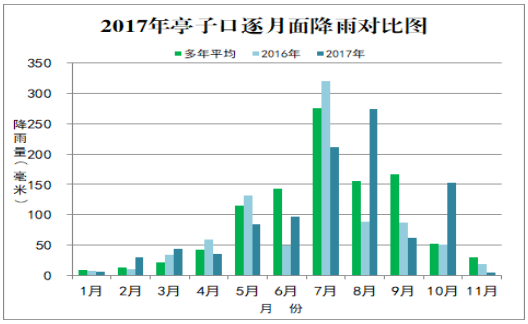


图 1　2017 年亭子口逐月降雨对比图

3.2 水情分析

2017 年流域来水特点：供水期较多年平均略偏多，汛期前中段来水持续偏枯，主汛末陡然转丰，汛期总体来水略偏枯；全年总体来水为正常偏枯年份。

2017 年 1~11 月水库平均入库流量 588m3/s，累计入库水量 169.58 亿 m^3，较多年平均值偏少 6%。1～4 月水库来水受上游水库调节及上游降雨偏多影响，比多年同期略偏多。进入 5 月后，来水持续转枯，5～9 月平均入库流量仅为 648m^3/s，比多年同期平均偏少 3 成。其中 7 月、9 月来水仅为多年同期的一半。而 10 月上旬末受降雨影响，来水由枯转丰，平均入库 1430 m^3/s，是上一年同期的 7.7 倍，是多年平均的 1.9 倍，列 1954 年以来同期丰水第 6 位；11 月平均入库 594m^3/s，是上一年同期的 2.3 倍，是多年平均的 1.5 倍，列 1954 年以来同期丰水第 5 位。

整个汛期有 3 次涨水过程，最大次洪峰流量 6770m^3 /s，峰现时间 10 月 10 日 18 时。逐月入库流量对比分析见图 2。

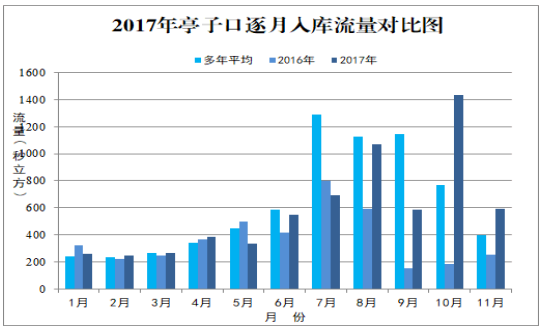


图 2　2017 亭子口逐月入库流量对比图

3.3 降雨、洪水预报

日常降雨预报主要采用中央气象台发布的天气预报成果，重大天气过程预报委托长江上游水文局提供。

亭子口水利枢纽建成了比较完善的水调自动化系统，开发了洪水预报软件，结合经验预报，以保证洪水预报精度。洪水预报方案界定的范围是略阳~亭子口坝址区间，预报模型采用三水源新安江模型，预见期一般为 6～9h，小量级洪水受上游虎头寺电站调节影响，预见期仅为 3～4h。从 2009 年至今的预报成果表明，洪峰预报精度较高，并随洪峰量级增大而提升，但小量级洪水峰现时间预报精度一般。从目前情况看，预报手段及方案基本满足水库调度需要。2017 年洪峰预报精度评价如下：

洪峰编号	洪峰流量（m^3/s）	峰现时间	洪峰预报值（m^3/s）	准确率（%）
20170807	6570	8 月 7 日 21 时	6250	95
20170826	5170	8 月 26 日 13 时	4700	91
20171010	6770	10 月 10 日 18 时	6500	96

3.4 阶段调度目标与实际调度过程

2017 年供水期主要保证下游生态用水；汛期以保证流域度汛安全为主，主汛末水库来水转丰，并开闸泄洪，安全度汛；10 月水库基本蓄满后发生秋汛，由蓄水调度转入防洪调度。

2017 年亭子口水库控制运用计划及实际调度过程详见图 3。

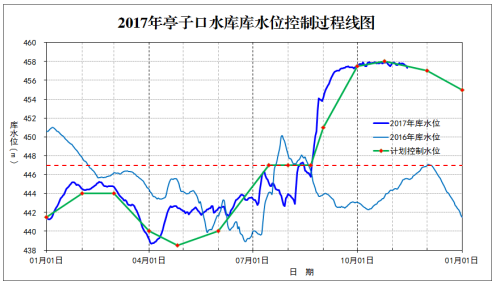


图 3　2017 年亭子口水库库水位控制运用过程线

3.4.1 供水期：受上一年蓄水期来水干旱影响，年初库水位仅 441.52m（比正常蓄水位 458m 低 16.44m，比 2016 年初低 9m），为保证在最枯期 2 月份水库能正常运行，1 月份通过降低出力将水库水位回蓄至 445.24m，再按计划在 4 月初水库水位消落至 438.64m。

3.4.2 汛期：进入汛期后，来水持续偏枯，库水位基本在 442m 运行，直到 7 月上旬一次降雨过程，才使库水位有所上涨，但 7 月中下旬为配合电网迎战持续高温，7 月末再次将库水位拉至 443.93m。

进入 8 月后，流域来水形势开始转好，8 月 4 日亭子口上游开始降雨，7 日降雨加强，洪水陡涨，11 日 4 时，库水位涨至 447m；中旬，预报下旬有明显降雨过程时，加大电站出力腾库迎峰，库水位从 447.41m（14 日 6 时）降至 445.77m（20 日 23 时），腾库 1.3 亿 m^3；下旬，流域降雨如期而至，结合后期降雨预报，亭子口在上级主管部门的指导下积极开展预报调度，一边提前分级蓄水，一边开闸泄洪保安全。降雨历时较长，加之上游电站调节影响，本次洪水出现双峰，峰值分别为 3870m^3/s（8 月 21 日 19 时）和 5170m^3/s（8 月 26 日 13 时），最大三日洪量 6.55 亿 m^3。期间，省防办下发调度令 3 次，亭子口发出闸门操作调度令 24 份，削峰率 37%，在确保安全度汛的前提下，合理拦蓄洪水，做到了防洪发电双赢。

3.4.3 蓄水期：9 月水库正常蓄水，就在 10 月上旬水库基本蓄满时流域突发秋汛，10 月 8~9 日，嘉陵江上游骤降大到暴雨、局地大暴雨，亭子口入库流量暴涨，水库水位迅速上升，9 日 12 时，水位达到了 457.8m，为保证度汛安全开闸泄洪，10 日 18 时洪峰入库，洪峰流量 6770 m^3/s，水库首次开展正常蓄水位防洪调度。今年秋汛，国家防总给予了高度重视，10 月 3 日、9 日两次派工作组到亭子口检查指导防汛工作。在长江防总办、四川省防办统一部署和精心指导下，亭子口加强值班、滚动预报、精细调度，下发闸门操作调度令 74 张，最大出库流量 5980m^3/s，削峰率 12%，不仅确保了流域安全度过秋汛，而且实现精准控制库水位，水库蓄满率达到 100%，为水库供水期正常运用打好基础。

4 水库调度成效

4.1 发挥了枢纽工程综合效益

2017 年 8 月中旬，根据来水预测，通过争取负荷提前将库水位从 447.41m 降至 445.77m，重复利用库容 1.3 亿 m^3，增发电约 2300 万 kW·h；8 月下旬，积极开展常遇预报调度，实施汛期运行水位动态调整，在保证度汛安全前提下，提前分级蓄水，拦蓄洪水 6.59 亿 m^3，增加蓄能 1.22 亿 kW·h，为提早抢发电、经济运行奠定了基础。

4.2 加强水情会商，统筹部署调度取得实效

9 月 29 日，根据天气预报信息，及时召开水情会商会，研判天气、水情，制定水库优化调度方案及市场营销策略，统筹部署优化运行工作，及时调整“国庆”期间负荷安排，在 10 月 3 日上游

强降雨过程预报更加清晰后，全力争取负荷，使库水位缓慢下降迎战洪峰，10 月 9 日暴雨洪水发生后，因未雨绸缪、准确预报，虽在 457.8m 高水位开始开闸泄水调洪，但调度仍然从容不迫，泄洪过程平稳，上下游度汛安全，调洪高水位（457.99m）未突破设计防洪高水位（正常蓄水位）458m，实现了防洪发电双赢。

5 结语

2017 年，亭子口水库来水持续偏枯，电站投产发电后连续三年遭遇枯水年份。在长江防总办、四川防办及电网公司的大力支持和帮助下，积极开展水库优化调度，采用重复利用库容、拦蓄洪尾、分级蓄水、优化电量结构、水库群联合协调调度等措施，提高水能利用率，并取得了显著的社会效益和经济效益。

参考文献：

[1] 许维民. 水库适度承担风险洪水调度[J]. 东北水利水电, 2008(8).

亭子口公司营销管理策略研究

王剑桢

（嘉陵江亭子口水利水电开发有限公司，四川 苍溪 628400）

摘　要：市场营销是个人和集体通过创造，提供出售，并同别人自由交换有价值的产品和服务，以获得其所需所欲之物的一种社会过程。它的主要功能是发掘消费者的需要和欲望，寻求相对于竞争对手来说最适合于本企业发展的目标市场，设计合理的产品和服务项目，通过有效的价格，分销和推广手段来服务于这些目标市场。企业发展过程中的关键环节当属营销策略，电力企业具有相对特殊性，所以更需要在满足群众用电需求的基础上借助电力营销策略提升企业的竞争力，最终达成增加经济效益的目的。本文通过分析亭子口公司所处的营销环境，结合市场需求来优化并提升自身电力营销管理工作的效率和质量，对市场需求进行满足的基础上做到市场竞争力的提升，进而实现企业有序发展的目的。

关键词：营销；管理策略；有序发展

1 引言

2018 年，面对四川电力装机持续增长，外送通道受制和用电低速增长制约、全年装机弃水电量超过 300 亿 kW·h 等不利因素，亭子口公司牢固树立度电必争营销意识。通过人工增雨、推动城东工业园区改造，加强发电计划日调度管理、协调增加攀西断面内省调机组的外送电量等营销管理措施。全年完成电量 29 亿 kW·h，超额完成发电任务。

2 四川省电力现状简述

近年来，受宏观经济结构调整影响，四川省内用电低迷。全社会用电量从 2011 年的 1751 亿 kW·h 缓慢增长到 2016 年的 2101 亿 kW·h，用电增长率从 2011 年的 13.1％下降到 2016 年的 5.5％，其中 2015 年首次出现负增长。

2.1 四川省内电源结构情况

截止 2017 年 5 底，四川省电源总装机容量 9252 万 kW，其中水电装机 7374 万 kW，占总容量的 80%；火电装机 1640 万 kW，占总容量 18%；风电和光伏装机 238 万 kW，占总容量 2%。

2.2 四川电网外送通道情况

“十二五”期间，四川先后建成±800kV 向家坝－上海、锦屏－苏南、溪洛渡－浙西 3 大特高压直流输电线路，±500kV 德阳－宝鸡直流线路、四川－重庆 4 回 500kV 交流线路，共同形成了“四交四直”外送格局，跨省跨区电力交换能力约 2900 万 kW。2017 年 6 月，川渝第三通道的建成投运将新增川电外送能力200万kW，未来 3 条通道组成的川渝断面 输电能力将超过500万kW。

3 四川电力目前的显著特点

2018 年全省市场电量总量约 900 亿 kW·h，占全省统调统分电厂上网电量的 50%以上。供大于求的需求矛盾没有得到根本解决，外送通道输电能力仍不能满足全省水电消纳需求，预计全年装机弃水仍将超过 300 亿 kW·h。面对以上严峻的形势，完成年度发电量和利润任务仍十分艰巨。

4 亭子口公司电力营销管理战略分析研究

4.1 贯彻电力市场政策及相关信息并分析研究，树立计划营销工作思路

亭子口公司积极贯彻落实上级公司有关营销工作的各项指导思想，切实转变观念，认真落实新时代能源工作的新任务和新要求，积极应对严峻的电力体制改革和电力市场挑战，以“价值思维 效益导向”为营销工作指引，全面落实“三大核心竞争力”为目标，坚持科学对标为手段，主动适应市场化销售模式，完善市场化体系建设，充分利用国家连续出台利好政策，全方位推动省内和送出

通道建设，外拓展省外市场，内强电量消纳，降低度电成本，全面实现公司市场竞争力和经营效益双提升。

4.2 全面深入开展电量营销计划争取工作，确保备足粮票

4.2.1 继续强化公共关系，主动与省级职能部门保持良好的沟通渠道，加强与省经信委、电网公司调度、营销及交易中心等部门沟通协调，落实电量计划。以突出自身优势为重点，充分发挥自身电能质量过硬特点，依靠当地政府呼应，全力争取合理的基数电量计划。

4.2.2 根据公司自身实际，分析利益平衡点，积极研究电价策略，利用“行业自律”优势，联合发电企业共同呼吁，引导有利于发电企业的政策出台，创造机会。

4.2.3 实时跟踪了解市场，结合各电站自身情况算好经济账，打好量价组合拳，在充分参与市场交易的同时，结合各电站来水情况及发电能力合理制定竞价方案，多发有效益的电。

4.2.4 加强与现有大用户的沟通联系，建立稳固的合作关系，培育新用户，开拓优质用户市场，应对不断深化的电力体制改革。

4.2.5 重点跟踪外送通道及周边各省电煤价格动态，充分利用通道富余空间，全力推动跨省水火替代工作，在巩固与重庆水火替代关系的同时，认真研究与甘肃、陕西、河南等地区电量替代的可能性。

4.2.6 深化推进政策争取工作落地，切实实现提质增效。亭子口公司立足项目公益性，争取到足额消纳的有利政策。同时利用人工增雨，水库优化调度，利用汛限水位动态控制等手段，增发电 7300 万千瓦时。

4.2.7 挖潜增效，从弃水电量要效益，切实缓解弃水压力。亭子口公司做好水库优化运行工作，充分发挥水库能力，挖掘发电潜力。推进甘南产业园区和城东工业园区发展建设，消纳丰水期弃水电量，减弃增发，拓展盈利空间。度电必争，精细化管理日调度计划，利用联合调度空间及日调节能力错峰增量。

4.2.8 持续加强营销队伍建设及人员配备，通过培训、现场调研等多重手段，进一步打造快速响应市场、专业、高效的营销力量。

5 结语

电力营销是发电企业的关键内容，电力营销工作直接关系到企业的生存与发展。而电力营销管理总体策略直接影响发电企业的竞争能力，是企业发展中的重点内容。在实践中，发电企业要以市场为基础，在国家政策的引导之下，将节能环保、优化消费结构作为关键，为客户提供优质的服务，构建功能齐全、服务能力高以及灵活高效的市场营销系统，为企业的可持续发展奠定良好的基础。