

巨型水电站建设简评(一)

邓念元

(电力工业部成都勘测设计研究院,成都,610072)

摘要 水能是迄今为止唯一可供大规模经济开发的再生性能源。在经济的发展对电力需求日益增长的过程中,世界各国都把水能资源的开发放在重要的位置。截止到1990年,世界水电装机容量达600 000 MW,发达国家可供开发的常规水能资源基本上开发殆尽。随着水电建设的发展,水电站的规模也日益扩大,从大型发展到巨型。巨型水电站的建设是一项庞大而复杂的系统工程,从规划设计到施工建设都有各自的特点,它的建设还会影响到社会经济的各个领域,对水电站所在地区乃至整个国家的社会发展、经济政策和产业布局起着巨大的甚至决定性的作用。

目前,我国正在进行大规模的经济建设,国民经济的飞速发展对电力的需求日益增长,拥有居世界第一位的水能资源的开发被提到了重要的位置。长江三峡水利枢纽的开工建设结束了中国作为一个水电大国没有巨型水电站的历史,并且,在不远的将来,中国的水电开发将向西部的金沙江进军,建设溪落渡、向家坝、白鹤滩和虎跳峡等一批巨型水电站。世界上已经建成的巨型水电站的规划设计、施工建设和工程管理等方面的成功经验值得我们在长江三峡、溪落渡以及其它巨型水电站建设中借鉴。

关键词 巨型水电站 建设 发展历史

水能是一种清洁、廉价的再生性能源,即使在科学技术高度发展的今天,人类社会进入了核能或直接利用太阳能的时代,但蕴藏在江河中的水能仍然是并且在相当一段时间内必将是唯一可供大规模经济开发的再生能源。因此,自从人类社会进入工业化以来,世界各国在电力建设上都自始至终坚持把水能资源的开发放在首要的位置。尤其是第二次世界大战结束后,人类社会进入了一个前所未有的高速发展阶段,社会经济的发展对能源尤其是电力的需求日益增长,水能资源的开发和水电建设得到了空前的发展。1950年,全世界水电装机容量仅71 200 MW,到1990年增加到近600 000 MW,40年来增长近8倍,平均每10年左右就翻一番。随着水电建设的发展,水电站的规模也不断扩大。1950年,全世界投入运行的1 000 MW以上的水电站仅2座,最大装机容量1 974 MW(美国大古力水电站),1960年增加到10座,最大容量达2 563 MW,1970年为28座,最大容量达6 000 MW,1980年达72座,最大容量6 480 MW,而到1990年,则增加到108座,单站最大容量突破10 000 MW,达12 600 MW(巴西和乌拉圭合建的伊泰普水电站),水电站的规模也从大型发展到巨型。自从1969年前苏联第一座超过5 000 MW的克拉斯诺雅尔斯克(6 000 MW)巨型水电站投入运行以来,到目前为止,全世界投入运行的装机容量5 000 MW以上的巨型水电站7座,最大装机容量12 600 MW,单机容量达700 MW(见表1)。巨型水电站建设是一项庞大而复杂的系统工程。它除了涉及到水电站本身的规划设计、施工建设等方面之外,还会影响到社会经济的各个领域,对水电站所在地区乃至整个国家的社会发展、经济政策和产业布局起着巨大的、甚至决定性的作用。

1 发展历史

1.1 美国

现代大型水电站建设的起源可以追溯到本世纪30年代初期。当时美国正处于严重的经济危机之后,为了促进经济尽早复苏,1933年罗斯福总统宣誓就职后,宣布推行新政,

表1 世界上已投入运行的巨型水电站主要工程特性

电站名称	所在河流	所属国家	年均流量 /m ³ ·s ⁻¹	利用水头 /m	装机容量 /MW	年发电量 /亿kW·h
伊泰普	巴拉那河	巴西 巴拉圭	9 200	124	12 600	630
古里	卡罗尼河	委内瑞拉	4 870	143	9 100	510
拉格朗德二级	拉格朗德河	加拿大	2 730	140	7 326	330
大古力	哥伦比亚河	美国	3 080	108	6 480	210
萨彦-舒申斯克	叶尼塞河	俄罗斯	1 480	226	6 400	235
克拉斯诺雅尔斯克	叶尼塞河	俄罗斯	2 800	106	6 000	215
邱吉尔瀑布	邱吉尔河	加拿大	1 260	330	5 225	330
图库鲁依斯科河	弗朗西斯科河	巴西	11 000	64	7 960	387

注:(1)古里水电站二期10台机组的额定容量为610 MW,最大连续出力可达730 MW,电站最大出力为10 300 MW;(2)拉格朗德二级一期5 328 MW(16×333 MW)已全部完成,目前正在建设二期6×333 MW;(3)大古力水电站还计划扩建2 400 MW,在第四厂房内安装700 MW的常规机组和500 MW抽水蓄能机组2台;(4)图库鲁依水电站一期4 000 MW(12×330 MW+2×20 MW)已经建成,将来规划扩建二期12×330 MW。

其中的一个方面就是由联邦政府投资修建大型水利水电工程,以增加就业和推进社会经济复兴,这一举措迅速得到了国会的批准。随即联邦政府成立了田纳西河流域管理局(TVA)负责中部贫穷落后的田纳西河流域的全面规划、治理和开发,开工兴建西部干旱地区科罗拉多河上的胡佛水电站;同时还批准了水能资源丰富的西北部地区哥伦比亚河最上游的大古力和最下游的邦纳维尔水电站开工建设,胡佛和大古力水电站分别于1931年和1933年开工。胡佛水电站建

设计进展顺利,216 m 高的拱形重力坝,装机容量 1 345 MW 的水电站和 346 亿 m^3 库容的水库于 1936 年投入运行,成为美国也是世界上第一座超过 1 000 MW 的大型水电站,同时也是当时世界上最高的大坝和最大的水库。但大古力水电站由于坝体工程量巨大,直到 1941 年才投入运行,1951 年安装完全部 21 台水轮发电机组,总装机容量 1 974 MW,成为当时世界上最大的水电站。胡佛水电站的建成,对早期美国干旱缺水的中西部地区七州的经济的发展起了决定性的作用;而大古力水电站的投产,则为第二次世界大战后期美国的铝、镁等轻金属和军工武器的生产,飞机的制造和核武器的研制以及赢得第二次世界大战的胜利提供了充足的能源,建立了不可磨灭的功勋。

第二次世界大战后,美国的水电建设达到了高潮。50 年代投产了契夫约瑟夫(1 070 MW)、尼亚拉加一级(2 070 MW)。60 年代建成哥伦比亚河上的约翰代(2 160 MW)和科罗拉多河上的格兰峡(1 280 MW)。70 年代,美国经济进入飞速发展时期。从 70 年代初到 80 年代中期,先后开工并建成了布莱里姆-右尔博阿(1 000 MW)、卡泰塔克(1 275 MW)、拉丁顿(1 980 MW)、诺斯菲尔德(1 000 MW)、腊孔山(1 530 MW)、巴斯康蒂(2 100 MW)、上戴维斯(1 800 MW)、赫姆斯(1 050 MW)等一批大型常规和抽水蓄能水电站。为了充分利用哥伦比亚河的水能资源,1964 年和加拿大签订了哥伦比亚河条约,加拿大按照规定在上游地区兴建了总有效库容达 252 亿 m^3 的 3 座大型水库和水电站,使得哥伦比亚河中下游的径流特性得到极大改善。与此同时,以水电为主的西北电网和以火电为主的西南电网通过超高压输电线路连接起来。系统对调峰要求增加了,哥伦比亚河上早期兴建的按基腰荷运行的水电站也开始逐步扩建。邦纳维尔水电站从原设计的 1 070 MW 扩大到 1 824 MW。而大古力水电站通过机组改造结合扩建第三厂房,总装机容量达 6 480 MW,成为美国第一座进入巨型行列的水电站。到 1990 年为止,美国本土上可开发的水能资源几乎开发殆尽,水电总装机容量达 9 000 0 MW,拥有 1 000 MW 以上的水电站(包括抽水蓄能电站)15 座,成为世界上水电装机容量最多的国家。

1.2 前苏联

前苏联地跨欧亚两洲,地大物博,河流纵横,拥有欧洲第一大河-伏尔加河和亚洲的鄂毕河、勒拿河、叶尼塞河、黑龙江(阿穆尔河)等世界著名大河,经济上可开发的水能资源 269 000 MW,仅次于中国居世界第二位。自 1917 年十月革命胜利苏联建国以来,在电力建设上始终把水电开发放在首要位置。自 30 年代开始就着手开始了位于经济中心区域的第聂伯河和伏尔加河的规划和开发,先后建成了伊万科夫(30 MW)、乌格里其(110 MW)、雷宾斯克(330 MW)、第烈伯(3 450 MW)等一批大中型水电站。40 年代末全部恢复了欧洲地区遭第二次世界大战战火破坏的水电站。50 年代中后期建成了古比雪夫(2300 MW)和伏尔加格勒(2563 MW)两座当时世界上最大的水电站,并在大力开发欧洲部分剩余的水能资源的同时,向偏僻的西伯利亚和东部亚洲的鄂毕河、叶尼塞河及其支流安加拉河挺进。60、70 年代建成了勃腊

茨克(4 500 MW)、克拉斯诺雅尔斯克(6 000 MW)、萨拉托夫(1360 MW)、沃特金(1 000 MW)、契尔凯(1 000 MW)、努列克(2 700 MW)、托克托古尔(1 200 MW)、乌斯基伊利姆(4 320 MW)和结雅(1 290 MW)水电站。80 年代后,苏联将水电建设的重点转移到了水能资源丰富的亚洲东北部地区和干旱缺水的中西亚地区,建成了鲍古昌(4 000 MW)、切博克萨尔(1 400 MW)、英古里(1 300 MW)、萨彦-舒申斯克(6 400 MW)和舒勒宾斯克(1 200 MW),正在建设下卡马(1250 MW)、布烈亚(2 000 MW)、凯西亚利多(1 600 MW)、卡布拉津(1 600 MW)、卡通河(1 570 MW)、罗贡(3 600 MW)、塔什尔克(1 800 MW)、扎戈尔斯克(1 200 MW);开始着手规划设计位于叶尼塞河中下游的中叶尼塞(6 700 MW)、奥西诺夫(6 500 MW)、伊加尔卡(6 600 MW)及其支流卡通河上的图鲁汉斯克(12 000~20 000 MW)等一批巨型水电站,使叶尼塞河成为前苏联亚洲地区的一个巨型水电能源基地。截止到 1990 年,苏联水电装机容量近 80 000 MW,建成 1 000 MW 以上的水电站 16 座,正在建设 7 座,其中有 2 座超过 5 000 MW 的巨型水电站投入运行。

1.3 加拿大和巴西

加拿大地处北美,不仅拥有丰富的核能资源,煤炭和石油等化石燃料储量相当丰富。但是,加拿大一直把水能资源的开发当作电力建设和能源建设的根本,水电装机容量和年发电量均超过年电力总消耗量的 60% 以上。加拿大的人口和工业用电 90% 都分布在仅占国土面积 20% 的南半部;而丰富的水能资源则大部份分布在气候寒冷、人烟稀少的北部地区和西南部山区。从 40 年代以来,通过最大限度地利用当地材料来降低筑坝成本、大规模采用地下工程来改善严寒地区水电站的运行条件、采用先进的施工设备和完善的施工管理减少建设过程中的劳动力需求、利用远距离超高压输电将电力输送到负荷中心等各种现代化技术,开发偏远地区的水力资源,不但满足了国内工业生产和居民生活的用电需要,而且有富余的电力出口到美国。先后建成了伊洛魁(1 880 MW)、尼亚拉加梯级(一级 1 824 MW,二级 1 328 MW)、博阿鲁瓦(2 416 MW)、丹尼尔约翰逊(1 292 MW)、马尼夸根二级(1 183 MW)、邱吉尔瀑布(5 225 MW)、隆斯普鲁斯(1 020 MW)、马尼夸根三级(1 183 MW)、麦加(2 610 MW)、雷维尔斯托克(2 700 MW)等大型水电站。并在 1973~1985 年 12 年时间里,完成了由拉格朗德河、卡涅皮斯考河和伊斯特门河上 11 座大坝组成的蓄水、引水和调水发电的詹姆斯湾能源综合开发一期工程。共建成 5 座大坝和水库,总库容 2 034 亿 m^3 ,有效库容 953 亿 m^3 ,水电站 3 座 10 270 MW(拉格朗德四级 2 637 MW,三级 2 304 MW,二级一期 5 328 MW)。目前,詹姆斯湾能源开发二期工程正在进行中,除完成上述三条河的另外 6 座大坝和 5 座水电站外,还将集中开发位于詹姆斯湾地区的大贝莱茵河和布鲁内河,并扩建拉格朗德二级水电站,使其总装机容量达到 7 326 MW。詹姆斯湾能源开发二期工程总装机容量 9 530 MW,预计 1998 年全部完成。到 1990 年为止,加拿大水电装机容量超过 70 000 MW,拥有 1 000 MW 以上的水电站 15 座,其中邱吉尔瀑布

水电站和拉格朗德二级水电站进入巨型电站的行列,而且是世界上2座最大的地下水电站。

巴西是南美洲最大的国家,动力资源匮乏,缺煤少油,化石燃料全部依靠进口。但巴西拥有世界第一大河-亚马逊河和第九大河-巴拉那河,水能资源蕴藏量达213 000 MW。自脱离殖民统治独立以来,巴西历届政府都将水能资源的开发作为电力建设的唯一支柱和基本国策,并不惜大规模举债进行水电建设以满足工业发展和居民生活对电力的需求,电力总消耗中水电的比重长期保持在90%以上。1960年仅有装机容量3 640 MW,1990年发展到近50 000 MW,年增长率达10%。为满足东南沿海地区工业发展的需要,集中财力和物力进行了位于负荷中心外缘地区的巴拉那河及其上游支流的连续滚动开发。建成了保罗阿方索一级(1 524 MW)、埃斯特雷托(1 040 MW)、福尔纳斯(1 216 MW)、阿瓜韦梅利亚(1 380 MW)、福兹多尼亚(1 674 MW)、伊尔哈索尔台拉(3 200 MW)、伊吐比亚腊(2 080 MW)、马里姆邦多(1 440 MW)、保罗阿方索四级(2 460 MW)、圣地亚哥(2 000 MW)、圣西毛(1 613 MW)、索布拉迪诺(1 050 MW)、恩博可可(1 000 MW)、伊泰普(12 600 MW)、伊塔帕里卡(1 500 MW)、图库鲁依一期(4 000 MW)等1000 MW以上的水电站16座。迄今为止,巴西东部和南部发达地区巴拉那河及其支流上的水能资源基本上得到全部开发,水电资源的开发逐渐向人烟稀少、热带雨林密布的偏远的亚马逊河及其支流转移。巴西积极开发水能资源促进经济发展的一贯政策成为广大发展中国家的典范。

从30年代开始的半个多世纪以来,由于工业的迅速发展和人类社会进入工业化和电气化时代,对电力需求日益增长;产业结构的调整和居民生活的现代化使得电力系统对调峰容量的要求也日益增加;石油、煤炭等化石燃料价格的不断上涨和人类对生活环境质量要求的提高和环保意识的加强,世界水电建设处于突飞猛进的鼎盛时期。与此同时,由于电站规模的日益扩大,水电站的规划设计和施工建设日趋复杂,引起了与之相关的河流规划、水工技术、施工组织、机电技术等方面的重大发展。尤其是70年代以来,随着大型电子计算机、遥感技术、断裂力学、可靠度分析以及碾压混凝土、新型建筑材料和掺和材料等新技术、新工艺和新材料的出现和发展,推动了水电建设不断向新的高峰攀登。巨型水电站无论是枢纽规划、水工技术还是机电设备和施工组织都具有和普通规模的水电站完全不同的特点,它是一项具有科学性和完备性的庞大而复杂的系统工程。

2 枢纽规划

水电站的枢纽规划是工程成败的关键,它不仅决定了工程的规模、效益及费用,而且还对电站所在区域以及邻近地区甚至整个国家的产业布局以及能源结构产生深远的影响。

流域的水能资源开发规划是巨型水电站枢纽规划的基础,它涉及到整个流域或地区的资源综合开发、经济发展以及近期和远景的产业布局、经济结构等各个方面。对于工程

本身而言,它必须对工程区域的地形地质条件、施工条件、水气象条件和对外交通条件;对所关系到的发电、防洪、灌溉、水产养殖、旅游、生态环境和淹没损失等各方面的效益和损失进行综合分析评价,权衡得失并考虑与所在流域和地区其它相关枢纽的关系来确定工程的规模和兴建时机,以最经济的方式最大限度地合理利用资源。

首先,巨型水电站的枢纽规划是一个动态规划,它应该随着流域资源的开发程序、经济发展水平和负荷增长要求进行不断地调整和完善。如美国的大古力巨型水电站所在的哥伦比亚河,国会于1932年批准了首次流域规划,推荐大古力水电站为第一期工程,建议分两期实施。但施工准备过程中的1935年又提出了一次建成高坝的方案,当年8月国会批准。由于当时的技术条件和负荷要求的限制,装机容量为1 974 MW的大古力水电站于1951年全部投入运行。在此后的20余年时间里,根据历次流域规划的哥伦比亚河干支流美国境内的水能资源基本上开发完毕。在60年代,加拿大根据与美国签订的哥伦比亚河条约在上游兴建了总调节库容为252亿 m^3 的3座水库。使大古力水电站原来大量的季节性电能全部变成了有效电能,电力系统的扩大又增加了对调峰容量的要求。因此,1965年第五次修订了哥伦比亚河流域规划,1967年开始彻底改造和扩建运行了20余年的大古力水电站,修建了装机容量为3 900 MW的第三厂房,将左岸的提灌站改为抽水蓄能电站,使总装机容量达到6 480 MW;从长远考虑,在第三厂房前池的右侧还预留了第四厂房的位置,拟采用下游的契夫约瑟夫水电站的水库作为下池,兴建装机容量为2 400 MW的抽水蓄能电站,使总装机容量达到8 880 MW。

第二,巨型水电站必须从长远的利益和发展的观点来进行规划,力求近期和远景结合。如委内瑞拉的古里水电站,1962年所提交的规划报告中提出了枢纽的发电装机容量与该地区的经济增长和电力负荷相适应、节省投资的分三步兴建总装机容量为9 160 MW的方案。即第一期将大坝修至220 m高程(最大坝高110 m),装机10台2 660 MW;第二期将大坝加高20 m并兴建装机容量2 200 MW的第二厂房;第三期再将大坝加高30 m并扩建第二厂房增加装机4 300 MW。根据规划,古里水电站于1963年开工,1968年第一台机组投产,1977年2 660 MW的一期工程全部投入运行。70年代后期,由于世界石油价格的迅速上涨和国内用电负荷剧烈增加,1978年2月开工合并后的两期扩建工程,加高大坝52 m,增设第二厂房,安装10台最大出力为730 MW(铭牌出力610 MW)的大型机组,第一厂房内的机组出力也增至3 000 MW,总容量达10 300 MW。1983年11月1日第一台机组投产发电,1986年全部建成。所生产的电力通过3条750 km长的765 kV超高压输电线路送往加拉加斯、马拉开波等负荷中心。全国以石油为主的能源消费结构彻底改变,马拉开波湖的石油源源不断地出口到世界各地,换取了外汇,扭转了该国外贸出口赤字的被动局面,彻底摆脱了强大的外债压力。

第三,巨型水电站的枢纽规划也是一项系统工程,必须

综合考虑邻近流域地区的地理条件和经济发展水平,将附近地区多条河流的水能资源的开发看成是一个不可分割的有机整体加以研究,集中开发。如地处加拿大东北部魁北克省边远地的拉格朗德河,在进行詹姆斯湾水电开发规划时,以该河为中心,将邻近的卡涅皮斯考河上游和伊斯特门河作为一个不可分割的整体,通过建库蓄水和开渠引水,从两河引入 $780 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $807 \text{ m}^3/\text{s}$ 的水量,使拉格朗德河下游段的径流成倍增加,拉格朗德二级水电站的装机容量也从 $3\,500 \text{ MW}$ 增加到 $7\,326 \text{ MW}$,取得了巨型水电站的规模效益。分散性资源的集中开发,极大减少了施工临时设施和简化施工布置,避免了多处枢纽建设所必须修建的施工道路、场地工程、辅助企业及输变电工程的分散重复建设,节省了大量的投资,起到了事半功倍的作用。同时,集中的枢纽也便于管理和维护,降低运行成本,它为偏远地区水能资源的开发规划提供了宝贵的经验。

第四,巨型水电站在电网中的作用举足轻重,它的运行方式对电网的调度和其它电源的建设起着决定性的作用。因此,巨型水电站的规划几乎都要求将不均衡的江河径流进行有效的调控,最大限度地改善径流的季节性分配,使之满足电力系统的负荷要求,充分发挥巨型水电站的容量效益,做到蓄能充足,调控自如,有求必应。在已经投入运行的 7 座巨型水电站中,每座水电站自身具备或依靠与之相关的上游梯级水库的有效库容,均达到了能对坝址处的径流进行多年调节的水平(见表 2)。只有位于巴西托坎廷斯河最下游的图库鲁依水电站,近期由于负荷和水库调节能力的限制,仅完成了装机 $4\,000 \text{ MW}$ 的一期工程,在枢纽规划时预留了第二厂房的位置,待上游水库群形成且负荷增长时才待机扩建。

表 2 主要巨型水电站的径流调节特性

电站名称	年径流量 / 亿 m^3	本级水库有效库容 / 亿 m^3	库容系数	上游水库总有效库容 / 亿 m^3	总有效库容 / 亿 m^3	总库容系数
伊泰普	2 900	190	0.065	1 130	1 320	0.455
大古力	970	64	0.065	388	452	0.466
古里	1 535	854	0.556		854	0.556
萨彦-舒申斯克	466	153	0.328		153	0.328
克拉斯诺雅尔斯克	880	304	0.345	153	457	0.519
邱吉尔瀑布	397	251	0.632		251	0.632
拉格朗德二级	860	194	0.186	742	936	1.088

总之,巨型水电站的建设涉及到社会经济的各个方面,枢纽规划都注重除发电以外其它诸方面的综合利用。从长远入手,尽量协调和充分挖掘电站所能达到的防洪、灌溉、航运、水产养殖、旅游、环保、工业和城市供水等方面效益。争取用有限投资和最小的损失最大限度地开发和利用所蕴藏的一切资源,最大程度地发挥巨型水电站的综合效益。如前述的大古力水电站,规划了重复利用 64 亿 m^3 的调节库容和下游约翰代 24.7 亿 m^3 的防洪库容并配合下游堤防,满足下游河道和城市的防洪要求;还在大坝左侧修建提水站,灌溉流域中部高地干旱缺水的 45 万 hm^2 的农田,在扩建时又利用该灌溉调节水库作为 300 MW 的抽水蓄能电站的上池(下池

为大古力水库);水库形成后还在周围规划了面积达 $1\,576 \text{ km}^2$ 的渔业、野生动物和旅游度假的公共保护区。

巨型水电站的规划必须对环境的综合影响进行全面的评价,在改善自然环境的同时尽量不损害生态环境。如加拿大詹姆斯湾能源开发工程的规划过程中,将三条河流的自然环境作为一个整体,研究跨流域调水后对该区域的自然环境和生态环境可能造成的影响。结论是将卡涅皮斯考河和伊斯特门河 90% 的水量调入拉格朗德河,不会影响该区域的自然环境和生态环境。图库鲁依、伊泰普和萨彦-舒申斯克水电站的建成改善了天然河道的航运条件,虽然这些地方地处偏远,自然资源未得到开发,货源有限,但考虑到远景发展需要,枢纽中都预留了航运过坝建筑物的位置,一旦将来经济发展需要水运时,过坝航运建筑物即可兴建并投入运行,既节省了初期建设的投资,避免了不必要的资金积压,又满足了经济发展的近期需要和远景要求。

3 水工建筑物

巨型水电站枢纽建筑物工程浩大,其费用往往占水电站投资相当大的比例(达 60%~70%)。因此,巨型水电站枢纽建筑物的规划设计都充分利用既有地形地质等自然条件,因地制宜。为了节省投资,减小工程量,方便施工和运行管理,从建筑物的工程量、施工条件以及枢纽建筑物的运行条件等方面综合考虑来优化枢纽建筑物设计,最大限度地协调地形的狭窄和建筑物的庞大、厂房与泄洪建筑物、不利的地质条件与可靠的基础处理及合理的建筑物型式选择等多方面的关系。

(1)水工建筑物的设计是一门艺术。枢纽中各建筑物的合理布局是工程设计的首要问题,它直接决定了建筑物的结构型式、规模和相互关系、枢纽建筑物的工程量、施工方案和工程费用。已建成的巨型水电站,无论是伊泰普,还是萨彦-舒申斯克、古里、拉格朗德二级、图库鲁依都无一例外,巧妙地对枢纽的地形地质条件、水流条件、建筑物的功用及型式、施工组织 and 运行管理等各方面进行综合分析研究,使枢纽中的建筑物配合相得益彰,成为建筑艺术的精品。如位于巴西和巴拉圭交界处巴拉那河上的伊泰普水电站,虽然坝址的地形地质条件有利于泄洪建筑物及电站厂房同轴线平行布置,利用天然的伊泰普小岛作为分期导流的纵向围堰。但是,通过对枢纽的地形条件、水流条件、施工条件及施工工期进行综合比较,选择了在河床中布置主坝及长 960 m 的坝后式厂房,右岸两个矮小山头之间的洼地修建岸边溢洪道,并利用圆弧形的 770 m 长的混凝土翼坝和主坝连接,左岸低台地设置宽 200 m 的导流明渠,岸坡高台地设置长 $4\,280 \text{ m}$ 的土石坝的枢纽布置方案。这样虽然枢纽的挡水前缘长达 $7\,760 \text{ m}$,但施工条件及运行期水流条件大为改善。(a)利用导流明渠开挖的 $2\,200 \text{ 万 m}^3$ 的石碴填筑左岸土石坝及上、下游主围堰,溢洪道开挖的弃料填筑右岸连接坝,大大减少了开挖料弃置和填筑的取料费用;(b)电站厂房居于河床深槽,基础开挖量小,主体工程基坑施工期及围堰挡水时间缩短,施工洪

水风险减小;(c)混凝土浇筑使用互不干扰的两个独立系统进行施工,加快了混凝土浇筑进度;(d)溢洪道的落水区远离电站尾水,减少了溢洪水流对厂房尾水的干扰,极大有利于电站的稳定和安全运行。同样,图库鲁依水电站由于在河槽的右侧有一顺河断层通过,设计采用变形适应性强的粘土斜心墙堆石坝跨越右侧的河槽,而在左侧的河槽及低台地上修建溢流坝、进水口及电站厂房、船闸及通航渠道等建筑物,并巧妙利用左岸台地上坝轴线处的小山包布置一个Y形土坝,将一期的土石挡水坝与扩建时的上游围堰结合,既充分利用了地形,又解决了顺河断层对大坝的不利影响这一难题。而古里水电站在进行二期扩建的水工建筑物设计时,将扩建的厂房置于河床右岸的一片长1 000 m,宽400 m的花岗岩礁石滩上,在滩上开挖厂房基础及尾水渠,所开挖的石料全部用于混凝土骨料的生成。

(2)混凝土坝虽然具有挡水、过水、引水等一物多用的优点,但它对基础的要求高,需大量开挖坝基,开挖料的运输和弃置及基础处理需占用很长的工期和花费大量的费用,外来材料如水泥等费用也是不可忽视的。因而,对于巨型水电工程的设计,尤其是在人工建筑材料供应困难和运输不便的偏远地区,以及在宽阔平坦的河床修建水电站时,设计人员往往大量使用土石等当地材料筑坝。如伊泰普、图库鲁依和古里水电站,除溢洪及电站取水建筑物采用混凝土外,两岸都采用堆石坝或土坝,以减少外来材料的运输量和充分利用可利用的开挖弃置料。加拿大拉格朗德二级水电站虽然具有修建混凝土重力坝,河床并列布置溢洪建筑物及电站厂房的优越条件,但经过充分论证,采用了河床堆石坝、岸边溢洪道和地下厂房的总体布置方案。高160 m、体积2 300万 m^3 的冰碛土斜墙堆石拦河坝。主堆石区采用溢洪道开挖的花岗岩块石,心墙及两侧的反滤层、过渡层采用当地广泛存在的冰碛土和沙砾石冰积物经过筛分、烘干处理的分选料。水库周边堰口处的27座总方量达2 500万 m^3 的副坝,都采用冰碛土防渗的堆石坝和沙砾石土石坝。基础除深度大于35 m的采用混凝土防渗墙外,多采用粘土浆防渗墙。导流洞和地下厂房系统共开挖岩石约320万 m^3 ,则用来加工混凝土骨料,或筛选后作为主坝的过渡区填筑料。该电站充分利用当地丰富的冰碛土和冰积沙砾石,以及溢洪道、地下厂房的开挖料筑坝,共节约水泥150万t,节省运输费用近3亿美元。同时,大大简化了大规模混凝土施工庞大的骨料加工、混凝土生产和浇筑系统以及维持寒冷地区混凝土生产和浇筑的加热系统等。减少了模板架立、钢筋安装、仓面准备及系统运行的劳动力约1万人年约2亿美元,极大地节省了工程费用。

(3)位于大江大河上的巨型水电站坝高、洪水流量大,高水头、大流量的泄洪消能是巨型水电站设计和建设的又一重大课题。对于在河道狭窄的峡谷地区修建的巨型水电站这个问题就更加突出。迄今为止,已经投入运行的巨型水电站都采取了各种新技术和专门措施来解决下泄水流的能量消杀及泄洪水流和下游的衔接问题,使下泄水流对下游河道和建筑物的不利影响减少到最低限度。已建成的巨型水电站,除图库鲁依外,泄洪水头均超过100 m,流量大于10 000 m^3/s ,

总泄洪功率达30 000~70 000 MW,下泄水流入水流速达30~60 m/s。如表3所列,它们的泄洪消能方式为:

a. 采用斜切或扭曲挑坎使挑射水流改变方向顺利进入河道并与河道主流方向一致,避免产生回流和切变流淘刷岸坡和建筑物的基础,干扰尾水出流(伊泰普);

b. 采用宽尾墩及窄缝式挑鼻坎来使水流纵向拉开,从而加大流入水的总面积,以分散狭窄地区大单宽流量泄洪产生的能量集中(古里);

c. 在岸边溢洪道泄槽中采用台阶而不是长陡槽来沿程逐级消能,减小挑射水流的初始能量,以简化鼻坎结构和对落水区处的保护(拉格朗德二级);

d. 为了避免因下游水深不足而导致挑射水流对下游河道过度冲刷,引起堆积物过高而影响下游河道的尾水出流和抬高尾水位。在水头高达200 m的重力拱坝的泄洪建筑物上仍成功地采用了收缩式底流消力池(萨彦-舒申斯克);

e. 为消除高速水流对溢流表面产生空蚀破坏,溢流表面设置掺气槽掺气减蚀(萨彦-舒申斯克、伊泰普、古里等)。掺气槽的位置、尺寸及体型根据常压或减压模型试验确定。

在已经建成的巨型水电站中,萨彦-舒申斯克水电站的泄洪消能设计最具有特色。是所有建成的巨型水电站中采用唯一的轻型坝(混凝土重力拱坝)、坝高度最大(242 m)、泄洪水头最高(220 m)的水电站。在长达1 083 m的圆弧形重力拱坝上,装有10台640 MW,长度288 m的坝后式厂房与设计泄流量13 900 m^3/s ,水头107 m的11个中孔平行布置。根据在10个泄水建筑物的整体模型上对各种方案各种施工条件的水力学模型试验成果,选择了消力池消能的方案。该方案消能后下游河道的最大流速不超过8 m/s,水面波动在消力池末端为4 m左右。消力池在平面上为收缩的梯形断面,长130 m,池末端设置高19 m的实用断面堰的消力槛,消力槛的坎顶高程能保证正常泄洪时,池内槛前有44 m的水深,并高出电站出流时的尾水位,保证必要时对消力池进行检修。消力槛上、下游水位差20 m,单宽流量130 m^3/s ,堰上流速15~20 m/s。消力坎和消力池平面收缩有稳定水流作用,淹没水跃沿程动能消杀较大,在消力池的前1/3长度内流速从50~52 m/s降至30 m/s,到消力坎处仅15 m/s,消杀能量70%。对于高达100余 m的溢流面,通过1:50、1:25、1:13的单孔试验,选定在泄水道的压力段的末端、弧形门坎坎后和反弧段起点高程以上设通气槽,以使底层水流达到最佳的掺气效果,保证溢流面不被高速水流空蚀。

表3 巨型水电站设计泄洪能量指标

名称	下泄流量/ $m^3 \cdot s^{-1}$	泄洪落差/m	消能方式	泄洪功率/MW	入水流速/ $m \cdot s^{-1}$	主要泄洪设施
伊泰普	62 200	120	挑流	73 150	46	14孔岸边溢洪道
古里	30 000	140	挑流	42 000	50	9孔溢流坝
萨彦-舒申斯克	13 900	220	消力池	30 580	60	11个中孔
拉格朗德二级	15 300	140	台阶+挑流	21 400	50	8孔岸边溢洪道
图库鲁依	110 000	55	面流	60 500	31	20孔溢流坝

(4)混凝土结构是水工建筑物中最常用的结构。进入70

年代以来,随着计算机技术日益广泛地应用到工程设计中,过去用结构力学或弹性力学等经典力学方法很难或需花费大量人力和时间来解决的各种结构复杂、规模庞大的混凝土建筑物,可借助于大型高速计算机采用有限元法,对不同的材料采用符合材料特性的力学模型,能在很短的时间得到更合理的准确答案,并能对结构进行优化设计,使之受力合理并节省大量的材料。对于巨型水电站所涉及到的各种混凝土结构,无论是体型复杂的双曲拱坝或其它类型的轻型坝坝身的泄洪建筑物。如坝内的孔口、坝上的闸墩,电站进水口的拦污栅排架、结构复杂的厂房水下结构以及承受巨大荷载的大跨度上部结构,采用计算机进行各种工况的应力分析和结构计算,都不成为设计的难题了。对于承受巨大水推力闸门支铰传力的牛脚和闸墩,跨越坝上表孔承受上千吨门机荷载的梁以及电站厂房内的吊车梁柱、层面梁板等,由于预应力结构的广泛应用,断面尺寸大大缩小,计算分析也大大简化。对于受力复杂的坝内孔口和水电站厂房的水下结构的配筋计算,采用计算机结合有限元的分析方法,大大节约了设计时间,结构更加安全经济。对于大体积混凝土的温度场分布、温度应力计算、冷却的散热计算以及分期施工的温度应力,采用电子计算机进行详细的分析计算,设计人员能根据大体积混凝土内的温度场及温度应力的分布情况,采取必要的结构措施来消除温度应力的不利影响或采用优化的浇筑和冷却程序来消除温度应力。已经建成的巨型水电站,几乎都采用了计算机结合有限元等分析方法对混凝土结构进行了优化设计,极大地节约了工程投资。

(5)加拿大的拉格朗德二级水电站和邱吉尔瀑布两座巨型水电站都采用了庞大的地下厂房。由于这两座水电站均位于寒冷而偏远的加拿大北部地区,采用地下厂房有利于枢纽在漫长而严寒的冬季采暖;另一方面,也有利于减少水泥、钢

材等外来材料的用量,节省工程费用。虽然拉格朗德二级水电站完全有条件采用地面厂房和更大的机组,但出于上述原因也采用了地下厂房。拉格朗德二级水电站的第一主厂房长483.4 m,高47.3 m,最大跨度为26.5 m,装有16台333 MW机组,辅以16条直径8 m的压力管道;4条宽13.7 m,高19.8 m,长1220 m的尾水隧洞;宽22 m,高45 m,长451 m的尾水调压室;16条直径3.4 m,高程180 m的母线竖井以及1 km长的交通洞组成庞大的硐室群。地下工程总开挖量320万 m^3 ,居世界之首。邱吉尔瀑布水电站的地下厂房长296 m,高48 m,最大跨度28 m,连同引水道、尾水隧洞、尾水调压室、交通洞等各种硐室群的总开挖量共280万 m^3 。这两座规模庞大的地下厂房,虽然地质条件优越(处于结构完整的花岗岩地区),但设计上都采用了先进可靠、实用的新技术。顶拱采用预应力锚杆和挂网喷混凝土的联合支护,将永久和临时支护结合起来,采用结构可靠的岩台吊车梁等(吊车梁的岩肩下部采用高强预应力锚杆加固,锚杆长6.1 m,直径35 mm,直径间距1.2 m \times 1.2 m,张拉到90%的屈服强度即271 kN)。在地下厂房设计中还充分考虑各硐室的施工交通条件,优化硐室群的布置,使各硐室在不开挖支洞的条件下即可进入硐室内施工,既方便了施工,又节省了开挖支洞的工期和费用。这两座地下厂房成功建成,为将来狭窄河谷地区修建巨型水电站的地下工程设计和施工提供了宝贵的经验。(未完待续)

作者简介

邓念元 男 电力工业部成都勘测设计研究院工程监理处 室主任
高级工程师

(收稿日期:1996-08-28)

杂谷脑河滚动开发拉开序幕

杂谷脑河是岷江右岸一级支流,全长168 km。干流可开发容量约40多万kW,上游狮子坪梯级具有年调节水库。全河水力资源开发条件较好,距负荷中心近、交通方便,加之阿坝州办电的积极性高,国家电力公司愿意投入资金,因此具有连续滚动开发、形成中型电源密集的商品电基地的条件。

成都院在50年代对杂谷脑河的水力资源进行了普查,随后有了零星的开发。1986年成都院在《汶、理、茂三县水电规划报告》中对杂谷脑河的水电开发作了初步规划,从此以后,杂谷脑河的水电开发纳入了规划范畴,但开发规划偏小、分散。1997年10月国家电力公司、四川省计委、阿坝州草签了“联合开发杂谷脑河的协议”。根据省计委和国家电力公司有关负责人的指示。成都院首先抓紧完成河流规划方案的调整和狮子坪水库电站的前期工作,以加快杂谷脑河水电资源

滚动开发进程。

1997年10月下旬由成都院领导率领院副总和技术委员会专家以及规划、水工、施工、机电、勘测等生产、管理人员对该河流进行查勘。行程约110 km,对各梯级的坝、厂址和引水洞线等方案及可能存在的问题进行了讨论和研究,明确了方案的比选内容及勘测工作范围。这次大规模的查勘,由于事前准备充分,特别是得到理县政府和有关方面的大力支持,因而圆满地完成了查勘任务。根据现场查勘时的安排,成都院勘测系统各单位发扬艰苦奋斗、雷厉风行的作风,于11月初进入现场开展地质、钻探、坑槽探、物探、测绘等外业工作。野外工作正在顺利进行中。

(摘自1997年12月15日《成都院报》)

省学会暨规划、科普专工委举行 “四川省水力资源普查学术报告会”

学会
活动
掠影



报告会主席台

(1998.2.23)

摄影：李燕辉



出席报告会的省学会领导



报告会会场



科普与教育工作委员会举行四届二次
会议 (1998.2.10)



省水电学会与省电机学会联合举行迎春团拜
会 (1998.1.20)