

引水式水电站水力机械选型设计

魏 勃 阳

(大唐雅安电力开发有限公司, 四川 雅安 625500)

摘要:水力机械选型关系到水电站工程投资、安全运行、动能指标及经济效益等重大问题,正确进行水力机械选择是水电站设计中的主要任务之一。影响水电站水力机械选型设计的因素众多,本文以锅浪跷水电站工程为例,探索高坝水库引水式水电站装机方案和水力机械选型的方法,可为类似工程提供借鉴。

关键词:水电站;设计;机械选型;设备布置

中图分类号:[TM622];P335+.2;S219.02

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2023)04-0122-06

Selection Design of Hydraulic Machinery for Diversion Hydropower Station

WEI Boyang

(Datang Ya'an Electric Power Development Co., Ltd., Ya'an Sichuan 625500)

Abstract: The selection of hydraulic machinery is related to the investment, safe operation, kinetic energy index and economic benefit of hydropower station. Correct selection of hydraulic machinery is one of the main tasks in the design of hydropower station. There are many factors affecting the selection design of hydraulic machinery in hydropower station. Taking Guangqiao Hydropower Station as an example, this paper explores the installation scheme of high-dam reservoir diversion hydropower station, which can provide a reference for similar projects.

Keywords: Hydropower station; Design; Mechanical selection; Equipment layout

1 工程概况

天全锅浪跷水电站为混合式开发,坝址位于两河口下游约 700 m 处,厂址位于下游约 11 km 处的傍海腔,与在建的脚基坪电站衔接。电站装机 3×70 MW,年发电量 7.7855 亿 kW·h,年利用小时数 3 707 h,水库正常蓄水位 1 280.00 m,总库容 1.84 亿 m³,具有年调节能力^[1]。

2 主要机械设备选择

2.1 额定水头的确定

锅浪跷电站为高坝大库引水式电站,电站最大水头 289.81 m,最小水头 215.20 m,年加权平均水头 263.45 m,汛期加权平均水头 263.43 m。在考虑到减少受阻出力,同时兼顾水轮机最大水头机组的稳定运行,额定水头与年加权平均水头比值宜控制在 0.95~1 倍之间,经配合动能专业后综合比较确定额定水头为 250 m。

2.2 机组台数的确定

本电站装机 210 MW,在电网中所占比重不

大,单机容量对系统影响不大,对装设两台和三台机组两方案按 HLD358B 水轮机计算进行比较,机组台数比较见表 1。

表 1 机组台数比较表

参 数	2 台	3 台
装机容量 /MW	210	210
单机容量 /MW	105	70
额定水头 /m	250	250
转轮直径 /m	2.90	2.35
额定转速 /r·min ⁻¹	333.3	428.6
单机流量 /m ³ ·s ⁻¹	46.92	31.5
吸出高度 /m	-7.5	-7.1
进水阀直径 /m	2.35	1.85
发电机总重量 /t	2×460=920	3×300=900
进水阀总重量 /t	2×115=230	3×80=240
桥机重量 /t	207	155
主厂房尺寸(长×宽) /m	58.0×22	56.0×17.5
尾水管底板高程 /m	973.3	975.30
多年平均发电量 /万 kW·h	77 386	77 855
投资差值 /万元	1 167	
年电量差值 /万 kW·h	469	
补充单位电能投资 /元/kW·h	2.49	

收稿日期:2023-07-06

比较结果表明,3台机组方案比2台机组方案多年平均电量增加469万kW·h,投资亦相应增加1167万元,补充单位电能投资为2.49元/kW·h,低于2台机方案(3.81元/kW·h),说明3台机方案比较合理。在参与系统调度和梯级电站联合运行方面,2台机组也显得不够灵活。本电站为龙头水库电站,下游几个梯级电站均为3台机组。经技术经济综合比较,确定装机3台,

单机容量70MW。

2.3 水轮机及附属设备

2.3.1 机型选择

本电站运行水头215.2~289.81m,属中高水头电站,适于装设混流式水轮机。近年来,随着高水头电站的大力开发,国内制造厂已经拥有一批较优秀的混流式水轮机转轮。模型水轮机参数比较见表2。

表2 模型水轮机参数比较表

转轮型号	HLA520	HLA550	HLD358B	HLA351
推荐使用水头 H_{\max}/m	310	310	310	400
叶片数	15/15	17	17	15/15
$n'_{10}/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	63.3	65.3	61.5	66.0
最优工况 $Q'_{10}/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	0.26	0.373	0.315	0.209
$\eta_0/\%$	92.7	92.7	93.55	92.9
σ_0	0.04	0.05	0.03	0.03
限制工况 $Q'_1/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	0.415	0.45	0.435	0.323
$\eta/\%$	84.8	89.3	90	87.7
σ	0.06	0.07	0.095	0.055

由于混流式水轮机在适应水头变幅、运行稳定性等方面的特殊性,在250m以上水头段的转轮参数水平往往有较大差异,因此,有必要根据各

型水轮机模型特性曲线计算出原型水轮机主要参数(表3),并结合本电站具体情况进行深入的机型比较。

表3 原型水轮机主要参数比较表

转轮型号	HLA520	HLA550	HLD358B	HLA351
单机容量 N_f/MW	70	70	70	70
额定水头 H_r/m	250	250	250	250
转轮公称直径 D_1/cm	240	220	235	280
额定转速 $n_e/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	428.6	500	428.6	375
额定流量 $Q_e/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	31.9	31.5	31.5	31.6
额定点效率 $\eta/\%$	92.0	93.4	93.5	93.3
额定点单位转速 $n'_1/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	65.06	69.57	63.7	66.41
额定点单位流量 $Q'_1/\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	0.35	0.412	0.361	0.255
额定点空化系数 σ	0.05	0.06	0.04	0.033
转轮出口圆周速度 $u_2/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	38.5	45.5	40.0	37.0
额定点比转速 $n_s/\text{m}\cdot\text{kW}$	115.5	134.8	115.5	101.1
吸出高度($K=1.6\text{m}$)	-11.1	-15.1	-7.1	-4.3

通过原型水轮机参数比较,A550转轮由于单位参数较高,转轮直径小,转速高,转轮出口圆周速度大(正常参数水平值35~42m/s之间),水轮机效率不算低,但空化系数大,导致厂房开挖深,不合适。A351转轮应用水头较高,真机转速为

375r/min,转轮直径相比最大,主机设备投资相对最大。A520与D358B两个转轮对应的原型水轮机转速相同,A520为长短叶片转轮,经过近年来其他电站的运行,转轮运行稳定性和抗空蚀能力均表现优秀,用于本电站A520转轮开挖深度

较大,转轮 D358B 转轮其额定点效率高,运行范围较优。

电机厂也针对本电站作了初步的选型(装机为 3 台 80 MW 方案,额定水头 255 m),由于资料不够详尽,这些方案仅作参考,制造厂建议方案见表 4。

东芝水电设备公司和安德里茨水电以及东风

表 4 制造厂建议方案

制造厂名称	东芝水电	安德里茨水电	东风电机厂
单机容量 N_f /MW	80	80	80
额定水头 H_r /m	255	255	255
水轮机型号	HL(105)-LJ-200	HL(105)-LJ-190	HLD358B-LJ-245
叶片数	17	15/15	17
转轮进口直径 D_1 /cm	270.5	284.5	245
转轮出口直径 D_2 /cm	200	190	186
转轮出口圆周速度 u_2 /m · s ⁻¹	39.27	37.3	41.74
额定转速 n_e /r · min ⁻¹	375	375	428.6
额定点效率 η /%	93.61	94.0	93.6
额定点比转速 n_s /m · kW	105	105	120.5
吸出高度 /m	-5.0	-5.4	-7.4

D358B 转轮是东方电机公司为瓦屋山电站(2 × 130 MW、水头 227 ~ 301 m、额定水头 253 m)开发的转轮,经水轮机模型试验验证及该电站实际运行的情况,该转轮在诸多方面均体现出先进性。因此,经综合技术和经济比较结果,决定以 D358B 转轮为模板开展设计工作。

2.3.2 额定转速的确定

效率、空化性能和运行稳定性是水轮机的三大重要指标,在确定原型水轮机参数时必须充分考虑。锅浪跷电站 H_{\max}/H_r 为 1.158,水头变幅不算大,而 D358B 转轮也采用了具有负倾角的“X”叶片,能适应水头变幅大的条件,但水轮机参数也不宜选得过高,以尽量避免由于稳定性所导致的振动和裂纹等问题;另一方面,泥沙磨蚀和水流速度关系密切,对混流式水轮机主要以转轮出口圆周速度 U_2 反映过机流速,而 U_2 与转速成正比,因此,合理选择水轮机转速以减轻泥沙磨蚀的影响。由于锅浪跷水库修建后的 50 年内出库泥沙几乎为零,水流可视为清水出库。机组在清水中运行,根据上面比较结果,D358B 转轮推荐采用 428.6 r/min 方案。

2.3.3 原型水轮机参数的确定

根据 D358B 转轮模型综合特性曲线^[2],初步确定原型水轮机参数如下:

水轮机型号 HLD358B-LJ-235

额定出力 N 71.8 MW

转轮直径 D_1 2.35 m

额定转速 n_e 428.6 r/min

额定流量 Q_e 31.5 m³/s

额定效率 η 93.5%

额定点单位转速 n'_1 63.7 r/min

额定点单位流量 Q'_1 0.361 m³/s

额定点比转速 n_s 115.5 m · kW

额定点比速系数 K 1 826

额定点临界空化系数 σ_s 0.04

水轮机吸出高度 H_s -7.1 m

2.3.4 水轮机主要附属设备

2.3.4.1 进水阀型式及参数

本电站为一管三机的引水系统,每台水轮机前均应装设进水阀。《水力发电厂机电设计规范》DL/T 5186-2004 中规定:最大水头在 250 m 及以上的水电厂宜选用球阀。

蜗壳进口断面直径为 1 847 mm,选择球阀直径为 1 850 mm。

球阀型号 QF299-WY-185

公称直径 1.85 m

承受的最大静水头 299 m

设计压力 4.0 MPa

额定工作油压 6.3 MPa

配套油压装置 HYZ-2.5-6.3

2.3.4.2 调速器及油压装置的型式和参数

调速系统压力等级为 6.3 MPa,经估算,接力

器总容积约 0.035 m^3 , 主配直径 d 计算值约为 0.04 m 。为稳妥起见, 参照主配规格, 将主配压阀直径确定为 80 mm 。油压装置压油罐总容积按经验公式估算约 0.7 m^3 左右, 考虑到系统油渗漏以及在事故低油压下操作接力器三个全行程的要求, 将压力油罐总容积偏大确定为 1.6 m^3 。水轮发电机组采购以后将根据机组有关参数较精确地计算出调速器及油压装置的容量。

2.4 安装高程的确定

利用公式 $H_s = 10.0 - \Delta/900 - K\sigma H$, K 取 1.6 , 电站利用 HLD358B 模型转轮空蚀结果查得各工况的空化系数。各特征水头下的吸出高度计算值见表 5。

表 5 吸出高度计算值

特征水头 /m	流量 / $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	对应尾水位 /m	空化系数	H_s /m
288.8	27.0	988.25	0.03	-4.96
263.25	29.7	988.36	0.038	-7.10
250.0	31.5	988.43	0.04	-7.10
215.2	28.0	988.29	0.04	-4.87

表 6 不同关机时间调保计算表(水库正常蓄水位 1 280.00 m)

序号	关闭时间 /s	[GD2] $\text{t} - \text{m}^2$	最大转速 n_{\max}	最大转速升高 $\beta_{\max}/\%$	蜗壳水锤压力 /m	压力升高 $\zeta_{\max}/\%$	尾水管 最低压力	实际关闭 时间
1	7	1 400	561.276	49.67	392.517	32.07	-1.609	6.19
2	8	1 400	571.063	52.28	374.295	25.94	-1.604	7.01
3	9	1 400	579.614	54.56	362.377	21.93	-1.610	7.95
4	10	1 400	586.777	56.47	354.815	19.39	-1.589	8.82

表 7 不同关机时间调保计算表(水库校核洪水位 1 282.30 m)

序号	关闭时间 /s	[GD2] $\text{t} - \text{m}^2$	最大转速 n_{\max}	最大转速升高 $\beta_{\max}/\%$	蜗壳水锤压力 /m	压力升高 $\zeta_{\max}/\%$	尾水管 最低压力	实际关闭 时间
1	7	1 400	565.065	50.68	392.928	31.19	2.515	6.34
2	8	1 400	574.829	53.29	373.948	24.86	2.520	7.24
3	9	1 400	583.182	55.52	363.840	21.48	2.534	8.14
4	10	1 400	590.109	57.36	356.419	19.00	2.533	9.04

时, 最大速率上升值 $\beta_{\max} = 55.52\%$; 最大压力升高值 $\zeta_{\max} = 25.942\%$; 尾水管进口最大真空度 -1.61 m 。以上计算值均满足规范要求。

考虑让调节保证计算留有一定富裕, 目前设计阶段建议: 机组关机时间采用 8 秒直线关闭, 要求厂家满足 [GD²] 大于 $1 400 \text{ t} - \text{m}^2$ 。水库正常蓄水位 $1 280.00 \text{ m}$ 、水库校核洪水位 $1 282.30 \text{ m}$, 3 台机组全部丢弃负荷, 相对额定转速升高 52.28% 、 53.29% , 小于允许最大转速上升率

安装高程计算公式: $\nabla_{\text{安}} = \nabla_{\text{W}} + H_s$, 考虑最不利工况并留适当余量, 本电站安装高程确定为 981.20 m 。

2.5 调节保证初步计算

根据《水力发电厂机电设计技术规范》DL/T 5186-2004, 蜗壳最大压力升高率宜小于 30% ; 机组最大转速升高率宜小于 60% 。

本电站采用一管三机有压引水方式, 引水系统由引水隧洞、调压室、压力钢管等组成。调压室后压力钢管主管全长约 690.0 m , 内径 5.0 m ; 距离最长的 1 号机支管长约 90.8 m , 内径 1.85 m 。水轮机过水系统的水流惯性时间常数 $T_w = 1.543 \text{ s} < 4 \text{ s}$, 机组惯性时间常数 $T_a = 9.8 \text{ s} > 4 \text{ s}$, 比值 $T_w/T_a = 0.16 < 0.4$ 。

机组转动惯量 GD^2 按 $1 400 \text{ t} - \text{m}^2$, 按不同的关机时间, 计算蜗壳压力升高值和机组速率上升值, 不同关机时间调保计算见表 6、7。

计算表明: 机组转动惯量取 $GD^2 = 1 400 \text{ t} - \text{m}^2$, 调速器采用一段关闭, 导叶关闭时间取 $8 \sim 9 \text{ s}$, 正常蓄水位及校核洪水位下三台机组甩全负荷

60% ; 压力升高 25.94% 、 24.86% , 小于允许最大压力上限值 381 m , 尾水管进口压力大于 -8.0 m , 满足水电站机电设计技术规范要求。

3 水力机械辅助设备

3.1 主厂房起重设备

主厂房吊运最重件为发电机转子带轴, 约重 165 t 。选用 $200\text{t}/50\text{t}/10\text{t}$ 单小车桥式起重机一台。额定起重量为 200 t , 跨度为 17.5 m ; 起升高度为主钩 22.0 m 、副钩 24 m ; 起升速度为主

钩 0.5~1.5 m/min(变频)、副钩 2.0~5.0 m/min,运行速度为大车 8.0~20.0 m/min、小车 1.0~10.0 m/min(变频),电动葫芦运行速度为 20 m/min。

3.2 技术供、排水系统

3.2.1 技术供水系统

电站技术供水对象主要是发电机空冷器、各轴承油冷却器、深井泵润滑水等。顶盖水虽然是极清洁的水源,且不消耗厂用电,但由于顶盖取水的水压和水量存在不稳定性,顶盖水作为备用水源,待机组采购后再和制造厂商探讨顶盖取水的可行性。为提高供水系统的可靠性,每台机组均为单元供水。根据经验公式估算并参考相近容量机组的用水量,本电站一台机组总的用水量约为 500 m³/h。结合厂家资料,每台机组初选两台 DFG250-315/4/75 型离心泵,额定流量 550 m³/h,扬程 32 m,电机功率为 75 kW;每台水泵出口对应设置一台全自动滤水器。

3.2.2 排水系统

排水系统包括检修排水和渗漏排水,两系统分开设置^[4]。

3.2.2.1 检修排水

电站为高水头混流式机组电站,尾水流道体积不大,且因机组安装高程较低,若用集水井间接排水方式,其检修集水井时承受的水压较大,因此,检修排水考虑采用直接排水方式。检修排水量主要包括流道积水和尾水闸门漏水。据估算,一台机组流道积水量约为 320 m³,进水口闸门及尾水闸门漏水量 210 m³/h。初选两台 200WFB-AD1 型自吸泵,一主一备。水泵额定流量 280 m³/h,额定扬程 30 m,配套电机功率为 55 kW。可确保在较短时间内排出流道水以及在单泵工作时足以排干闸门漏水。排流道积水时,手动开启两台水泵同时工作,积水排空后切换到自动运行方式排除闸门漏水,根据尾水管液位控制水泵启停。

3.2.2.2 渗漏排水

渗漏排水主要包括厂房水工建筑物渗漏水、设备排污水以及管路、阀门漏水等,通过排水管或地漏等引入渗漏集水井。参考同类型电站经验,渗漏集水井有效容积约为 85 m³。初选三台 250QJ200-26 型深井潜水泵,两主一备。水泵额

定流量 200 m³/h,额定扬程 26 m 配套电机功率为 20 kW。水泵工作采用自动运行方式,根据集水井液位控制水泵启停。

3.2.2.3 集水井清淤

选用一台 65WQ25-28-4 型移动式潜水排污泵,临时从渗漏集水井进入人孔中投入。

3.3 压缩空气系统

3.3.1 中压气系统

中压压缩空气供调速器油压装置和球阀油压装置的压力油罐充气 and 补气用,供气压力为 6.3 MPa,设置两台中压空压机,一主一备。经估算,每台空压机所需的生产率约 0.683 m³/min。选用两台 15T2XB15/70 型空压机,额定排气量 0.85 m³/min,最大排气压力 7.0 MPa;并配置两只 1.5 m³ 的贮气罐。当地气候湿度大,在空压机与气罐间配置一台冷干机,型号为 1RAD-60/1000。

3.3.2 低压气系统

低压压缩空气主要供机组制动、主轴密封围带充气以及风动工具和吹扫用气等。根据电气主接线方案,制动用气按一台机制动考虑,按估算的用气量,选用两台 UP5-22-8 型低压空压机,一主一备,额定排气量 3.34 m³/min,排气压力 0.85 MPa。设置两只 6 m³ 的贮气罐,额定压力 1.0 MPa。当地气候湿度大,在空压机与气罐间配置一台冷干机,型号为 1R65RC。

3.4 油系统

3.4.1 透平油系统

透平油系统供进水阀、调速系统用油及机组各轴承润滑油。经估算一台机组设备总的用油量约 13 m³,加上管网充油量,则所需的净油罐容积约 14.3 m³。参考油罐规格并考虑适当的裕量分别设置一个 15 m³ 的净油罐和一个 15 m³ 的运行油罐。油处理设备选用两台 2CY-5/3.3-1 型齿轮油泵,一台 LY-100 型压力滤油机,一台 ZJCQ-6 型透平油过滤器。

3.4.2 绝缘油系统

绝缘油系统主要供变压器用油。考虑到本河段梯级电站开发建设,因此,锅浪跷电站不单独设置绝缘油系统,仅在第一次注油时,在变压器旁设置一真空滤油机自循环滤油。

3.5 水力监测系统

电站全厂性监测设有上下游水位、电站毛水头、拦污栅压差及进口检修门压差测量。机组段监测设有顶盖压力、蜗壳进口压力、尾水管进口压力真空、水轮机工作水头的测量;机组振动、摆度监测等项目^[5]。

3.6 压力钢管检修蝶阀

为满足压力钢管检修的需要,根据水工布置的要求,在调压井后设置一检修蝶阀。压力钢管直径为5 m,选用1台直径5 m的双密封液控蝶阀,蝶阀工作压力为0.94 MPa,设计压力为1.2 MPa。配套蝶阀液压站采用高压皮囊式结构,不需要补充压缩空气。

3.7 机修设备和油化验设备

天全河流域锅浪跷和干溪坡电站以及下游几级电站均由大唐公司开发,因此,机修设备和油务中心应统筹考虑,可设在天全县城或距离县城不远的地方。锅浪跷电站不单独设置机修设备和油化验设备,但仍有必要配置一些常用的修配工具。

4 水力机械设备布置

电站机组为竖轴布置,主厂房为地面式厂房,根据水轮发电机组的流道尺寸,兼顾调速器、油压装置和球阀的布置,机组间距为12 m。

厂房宽度考虑发电机定子、转子、发电机上机架、转轮、球阀的吊运以及上、下游所必须的维护通道,机组X轴线距上游边墙的距离为11.0 m,距下游边墙的距离为6.5 m。

安装场位于主厂房的右侧(面向上游),与进厂公路相连。为能满足一台机组扩大性大修的要求,安装场长15.0 m,宽17.5 m,安装和检修时场内可放置水轮机转轮、发电机上机架、发电机转子、水轮机顶盖等部件。安装场与发电机层间高程(▽991.70)。

发电机层地面至起重机轨道顶部的高度为

(上接第121页)

优化水电站的调度运行方式提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 张明珠,俞烜,宋新山,等.岷江中上游及青衣江流域近50年来降水量变化特征分析[J].南水北调与水利科技,2008,6(3):46-53.
- [2] 杜聪,李洪,由丽华,等.岷江流域近65年降水量时空变化特征分析[J].人民珠江,2022,43(5):145-153.
- [3] 钱琦雯,梁萍,祁莉.西太平洋副热带高压的季节内活动与

12.2 m,满足发电机吊运转子的要求。

主厂房共分3层,发电机层(▽991.70)、水轮机层(▽983.70)、球阀层(▽978.00)。

调速器布置在发电机层机组的2象限;供水泵及过滤设备及渗漏排水泵布置在厂房下游尾水平台上的水泵廊道;空压机室和透平油库及油处理设备布置在水轮机层安装间下面的辅机间;检修排水泵布置在球阀层2号机与3号机组之间。

5 结语

水力机械选型关系到水电站工程投资、安全运行、动能指标及经济效益等重大问题,正确地进行水力机械选择是水电站设计中的主要任务之一。结合锅浪跷水电站的具体情况,对相关的水力机械设备进行了认真的选型和设计。水电站进行试运行后,所有设备工作正常,其各项指标均满足设计要求。水力机械设备作为水电站的核心部分,其选型计算是否合理对整个工程有着巨大影响,也会影响配套设施、厂房设计等几乎所有工作,所以,作为技术人员,应当给予高度重视,为水电站以后的顺利运行打下良好基础。

参考文献:

- [1] 魏勃阳.径流式高水头水电站水轮机选型设计[J].电力设备管理,2022,(01):137-138.
- [2] 魏强.水电站水力机械设计选型及相关计算[J].水利科技与经济,2015,(01):107-108.
- [3] 毛柳丹.大型水电站地下厂房振动特性反馈研究[D].天津:天津大学,2013.
- [4] 陈亮,赵若有,李德政.破碎地质条件下多洞室交汇处超大断面洞室开挖技术[J].四川水利,2022,(04):70-72.
- [5] 谢文丰.浅析水利水电工程应急能力建设[J].建筑工程施工技术与设计,2018,(01):25-25.

作者简介:

魏勃阳(1995-),男,四川雅安人,工程师,学士,主要从事水电站工程建设和安全管理工作。

(责任编辑:卓政昌)

变异研究进展[J].气象与环境科学,2021,44(6):93-101.

作者简介:

李卫起(1975-),男,山东菏泽人,高级工程师,硕士,从事水文水资源规划、水利水电工程规划设计等工作;

张艳(1995-),女,湖南常德人,工程师,硕士,从事水文水资源规划、水利水电工程规划设计等工作;

赵圆元(1996-),女,重庆人,助理工程师,硕士,从事水文水资源规划、水利水电工程规划设计等工作。

(责任编辑:卓政昌)