

冶勒水电站水斗式水轮机组的主要参数

赵显忠¹ 程云山²

(1. 中国水利水电第七工程局机电安装分局, 四川 彭山 620860; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 介绍冶勒水电站水斗式水轮机组的主要参数: 电站最大水头 644.8 m, 额定水头 580 m。经综合比较后确定选用单机容量为 120 MW 的竖轴水斗式水轮发电机组。在单喷嘴比转速和喷嘴数的选择中, 参考国内外先进机组的参数, 最终选取单喷嘴比转速 $n_{s1} = 18.8 \text{ m} \cdot \text{kW}$, 喷嘴数为 6 个, 水斗数为 21 个。

关键词 冶勒水电站; 水斗式水轮机; 水轮机选型; 喷嘴; 比转速

中图分类号 : TK735⁺. 1

文献标识码 : B

文章编号 : 1006-764X(2006)05-0059-03

Main parameters of scoop-type water-turbine generator set at Yele Hydropower Plant // ZHAO Xian-zhong¹, CHENG Yunshan² (1. The Mechanical & Electrical Erection Company of the Seventh Water Conservancy and Hydropower Engineering Bureau of China, Pengshan 620860, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : An introduction is given to the main parameters of the scoop-type water-turbine generator set at the Yele Hydropower Plant: the maximum water head is 644.8 m, and the rated head is 580 m. Through a comprehensive analysis, the vertical shaft Pelton impulse water-turbine generator set with a single unit capacity of 120 MW is chosen. In reference to the parameters of advanced water-turbine generator sets at home and abroad, the optimal specific speed of single nozzle is determined as $n_{s1} = 18.8 \text{ m} \cdot \text{kW}$, and the numbers of nozzles and scoops are 6 and 21, respectively.

Key words : Yele Hydropower Plant; scoop-type water-turbine generator; type selection of water-turbine generator; nozzle; specific speed

冶勒水电站位于四川省南部南桷河上游, 是南桷河梯级开发的龙头水电站。其水库坝址位于冕宁县冶勒乡, 水电站厂址位于石棉县栗子坪乡南桷村, 坝址与厂址相距 11 km, 水电站距成都约 400 km。电站在汛期担负峰荷, 在枯水期担负腰荷及基荷。电站动能指标为: 装机容量 240 MW, 多年平均年发电量 6.47 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 年利用小时数 2 700 h, 保证出力 108 MW; 水库正常蓄水位 2 650.00 m, 死水位 2 600.00 m, 总库容 2.98 亿 m^3 , 调节库容 2.76 亿 m^3 , 为多年调节水库。

为保证冶勒水电站长期安全运行在高效率区, 该水电站全套引进法国 ALSTOM 公司的水斗式水轮机组, 单机容量 120 MW。这是目前亚洲单机容量最大、喷嘴数最多的水斗式水轮机组之一^[1]。

1 机组选型

通过对冶勒水电站各装机容量方案进行动能指标、替代容量、替代电量、经济指标和电力系统发展等方面的分析比较, 以及随后进行的冶勒水电站装

机容量复核和财务评价专题研究, 初步设计阶段确定并通过审查的电站装机规模为 240 MW。

冶勒水电站最大水头为 644.8 m, 额定水头为 580 m。在 400 ~ 700 m 水头范围内, 通常有混流式和水斗式两种水轮机机型可供选择。从水轮机模型综合特性曲线可知, 水斗式机组的模型综合特性曲线其等效率线比混流式水轮机模型综合特性曲线平缓, 也就是其高效率区范围更广, 虽然其最高效率不及混流式水轮机, 但因为混流式水轮机偏离最优工况区后效率下降较大, 所以水斗式水轮机的平均效率有可能略高于混流式水轮机的平均效率。经过与 KVAERNER, VOITH 和 ALSTOM 等国外制造厂商就冶勒水电站水轮发电机组的选型问题进行技术交流, 对这两种机型进行了比较分析。

a. 由于冶勒水电站在系统中承担调峰任务, 负荷变动频繁。采用多喷嘴水斗式水轮机能够自动切换喷嘴数(喷嘴数可在 1 到 6 之间切换)来适应负荷的变化, 其运行区域宽广, 运行范围从 25% N_r 到 100% N_r (N_r 为水轮出力), 且在此范围内效率变化平缓, 平均效率较高。而混流式水轮机的运行范围

较窄,虽然最高效率较高,但偏离最优工况区后效率下降较大,平均效率接近于水斗式水轮机。

b. 水斗式水轮机喷针头、喷嘴口环等部件磨损后易于拆卸和更换,检修维护时间短。而混流式水轮机的导叶、转轮和迷宫环等被磨蚀破坏后,检修维护复杂且工期较长。

c. 冶勒水电站具有较长的压力引水管道,为了有效防止水击压力的破坏,调速器关闭时间较长。水斗式水轮发电机组在甩负荷时,利用折向器迅速偏开水流,可有效控制水压力和机组转速的上升,从而可节省压力引水系统的投资费用^[2]。

d. 目前国外水头大于 600 m、单机出力大于 100 MW 的混流式水轮发电机组较少,且主要由 KVAERNER 和苏尔寿两大公司生产制造,而国内目前还没有单机容量超过 100 MW、水头超过 600 m 的混流式机组。在国内,水头 600 m 以上的大容量(≥100 MW)水轮机大多选用水斗式水轮机,这种水轮机的设计制造厂商多,具有成熟的制造经验。

经过上述综合比较,确定选用水斗式水轮机组。

2 单机容量的确定

根据冶勒水电站最大水头 644.8 m、额定水头 580 m,并在汛期担负峰荷的特点,初步设计阶段确定的装机方案为 4 台 60 MW 或 2 台 120 MW 水斗式水轮发电机组。我国广西天湖、福建黄南溪、湖北锁金山、四川草坡等水电站安装的是国产水斗式水轮发电机组,最大单机容量仅为 15 MW。近年来建造的云南高桥水电站单机容量为 30~40 MW,其中有部分转轮和相关技术是从国外引进的。目前国内生产大容量水斗式水轮发电机组的设计制造经验不足,也缺乏先进的模型转轮,设计制造单机容量为 60 MW 或 120 MW 水斗式水轮发电机组具有一定的难度。因此设计方提出,如有条件利用外资引进机组,可考虑增大单机容量,减少机组台数,以节省水电站的造价。

由于国外厂商如 KVAERNER、VOITH、ALSTOM 和苏尔寿等公司在生产大容量水斗式水轮发电机组方面均有成熟的设计制造经验,而增大单机容量、减少机组台数一方面可大大减少厂房尺寸,节省土建投资,另一方面可降低机电设备投资,两种备选方案的厂房工程量比较见表 1^[3]。

由表 1 可知,方案 1 的土建工程量较大,比方案 2 的工程量多 17 670 m³。同时由于方案 1 的机组台数多,其机电设备的总投资也将大于方案 2。

通过以上比较分析,同时考虑冶勒水电站的机组及其相关设备主要利用外国政府贷款并进行国际

表 1 不同方案厂房土建工程量比较 m³

比较项目	方案 1 (4×60 MW)	方案 2 (2×120 MW)	方案间 差值
主厂房工程量	53 223	42 300	10 923
副厂房工程量	10 738	8 331	2 407
母线道工程量	761×4	802×2	1 440
电缆道工程量	1 966	1 164	802
中压电气设备道工程量	5 338	3 240	2 098
土建总工程量	74 309	56 639	17 670

招标采购,以利于拓宽融资渠道和选择优惠的贷款条件及经验丰富的制造厂商,最终确定选择 2 台 120 MW 水斗式水轮发电机组。

3 水轮机基本参数

3.1 单喷嘴比转速选择

在冶勒水电站单喷嘴比转速的选择过程中,不同厂家推荐了不同的比转速:哈尔滨水轮机厂统计公式为 $n_{s1} = 284.2H^{-0.4388} = 17.4 \text{ m} \cdot \text{kW}$;苏尔寿水电公司推荐 $n_{s1} = 20.8 \text{ m} \cdot \text{kW}$;挪威国家水电公司推荐 $n_{s1} = 20 \text{ m} \cdot \text{kW}$;ALSTOM、VOITH、ELIN 和 KVAERNER 公司均推荐 $n_{s1} = 18.8 \text{ m} \cdot \text{kW}$ 。

由上述推荐值,若比转速取 20.8 m·kW 左右,则机组转速为 428.6 r/min,转轮直径为 $D_1 = 2\,250 \text{ mm}$,水轮机在额定工况下的射流直径为 $d_0 = 220 \text{ mm}$, $D_1/d_0 = 10.2$ 。实践中 D_1/d_0 的取值范围一般为 10~18,转轮斗叶的应力与水头成正比,而与 D_1/d_0 的平方成反比,为使斗叶应力保持在容许的范围内,高水头水轮机应选择相对较大的 D_1/d_0 值。采用 20.8 m·kW 左右的比转速已经使 D_1/d_0 值处于下限范围。对此多数国外厂商认为,对于水头范围为 546.7~644.5 m 的冶勒水电站水轮机来说,比转速取 20.8 m·kW 过高了,因为此时的斗叶工作应力太大,已经达到要保证斗叶寿命而必须采取特殊措施的程度。根据他们的经验,为保证冶勒水电站长期稳定运行,不推荐单喷嘴比转速 n_{s1} 为 20.8 m·kW。经反复比较,最终将冶勒电站水轮机单喷嘴比转速定为 18.8 m·kW。

3.2 喷嘴数选择

对于冶勒水电站,水轮机的喷嘴数可以选择 5 个或 6 个,按单台水轮机 122.5 MW 出力进行比较,计算结果见表 2。

表 2 5 喷嘴和 6 喷嘴方案的水轮机参数比较

喷嘴数/个	额定转速 $n_r/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	额定流量 $Q_r/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	喷嘴标称直径 d_0/mm	转轮标称直径 D_1/mm	D_1/d_0	多喷嘴比转速 $n_s/(\text{m} \cdot \text{kW})$	单喷嘴比转速 $n_{s1}/(\text{m} \cdot \text{kW})$
5	333.3	23.5	241	2900	11.92	41.00	18.3
6	375.0	23.5	218	2600	12.00	46.11	18.8

由表 2 可见 5 喷嘴水轮机的转轮直径大 ,转速低 ,同时由于转速降低将导致发电机尺寸增加 ,这一方面加大了机组成本 ,另一方面还将增加厂房土建工程量。由于冶勒水电站为地下式厂房 ,且地质条件较差 ,应尽可能地减小厂房尺寸和节省开挖量。另外 ,根据国外制造厂商提供的资料 6 喷嘴水斗式水轮机的效率要高于 5 喷嘴水轮机 ,并且 6 喷嘴水轮机在调节负荷时可对称关闭喷嘴 ,而不会给轴承造成附加载荷。经过综合比较 ,冶勒水电站最终选择 6 喷嘴水轮机。国外主要水轮发电机组制造厂商为冶勒水电站水轮发电机组推荐了主要参数(见表 3)。

冶勒水电站的水轮发电机组及其附属设备、电站计算机监控系统、梯级调度系统及通信设备等全都进行国际招标采购。最后由法国 ALSTOM 公司和奈尔皮克公司联营体中标。经合同谈判 ,最终确定冶勒水电站水轮机型号为 CJT5317-L-260/6×21.8 ,其主要参数如表 4 所示。

4 水轮机附属设备

4.1 调速器及其油压装置

冶勒水电站每台机组配 1 台数字式调速器和 1 台油压装置 ,调速器能根据水电站水头及对出力的要求按程序控制各个喷针的动作 ,并确保折向器配合喷针协联动作。调速器控制压力油操作内藏式接力器完成喷嘴的开启和关闭 ,操作压力油来自调速器油压装置系统。折向器通过压力油进行开启 ,弹簧复归关闭。

4.2 压力钢管、蝶阀、水轮机进口球阀及其油压装置

水轮机发电用水由坝前经有压隧洞引至调压井 ,调压井后为直径 3.4 m 的压力钢管 ,其入口装 1 只双平板蝶阀 ,该蝶阀室装设蝶阀起重设备。压力钢管在厂房前分叉至两台机组 ,每台机组配水环管前装有一个球阀 ,操作机构为双缸摇摆式接力器 ,操作油压为 6.0 MPa。两台球阀共用 1 套压力油供

给系统 ,每台球阀各配 1 个压力油罐。

4.3 调节保证计算

冶勒水电站为水斗式机组 ,设有喷针和折向器双重调节机构。由于机组甩负荷时折向器可使射流偏离转轮从而控制机组转速上升 ,所以可通过延长喷针关闭时间来控制水锤压力的上升。经初步计算并与制造厂商商定 ,机组甩负荷时喷嘴处最大压力值(含水锤)不大于 7 259 kPa ,最大转速上升率不大于 30%。

冶勒水电站设有上游调压井 ,输水系统的水体惯性时间常数 $T_w = 2.383\text{ s} < 4\text{ s}$,转动惯量 $GD^2 = 1\,900\text{ t}\cdot\text{m}^2$,机组惯性时间常数 $T_a = 6.1\text{ s}$, $T_w/T_a = 0.391 < 0.4$ 。

折向器关闭时间 1.5 s(制造厂商提供值) 。由计算可知 ,当 2 台机组同时甩负荷时喷针的关闭时间为 37 s ,此时喷嘴处的最大水压值(含水锤)以及机组转速上升幅度能满足调节保证计算要求 ,见表 5。小波动调节计算也表明 ,在现有的输水系统和机组及调速器参数下 ,调节系统可满足小波动稳定要求。

表 4 冶勒水电站水轮机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
最大水头	644.8 m	额定流量	23.62 m ³ /s
加权平均水头	597.0 m	额定转速	375 r/min
额定水头	580.0 m	飞逸转速	725 r/min
最小水头	546.7 m	额定功率	122.5 MW
转轮直径	2 600 mm	额定工况点效率	91.62%
射流直径	218 mm	最大功率	136 MW
喷嘴数	6 个	最高效率	91.84%
水斗数	21 个	排出高度	3.8 m

表 5 调节保证计算结果(H = 612.8 m)

计算工况	喷针关闭 时间/s	最大水锤 上升率/%	最大水锤 压力/kPa	折向器关 闭时间/s	转速上升 率/%
P = 122.5 MW	37	13.6	6 875	1.5	8.7
P = 136 MW	37	15.0	6 923	1.5	8.7

表 3 国外制造厂商为冶勒水电站推荐的水轮机型式及参数

制造 厂商	水轮机 型式	喷 嘴 数	单喷 嘴比 转速/ ($\text{m}\cdot\text{kW}$)	水轮机设计点参数					水轮机转轮参数							
				N_r/MW	H_r/m	$Q_r/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	$n_r/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$\eta_r/\%$	转轮节 圆直径 D_1/mm	水斗 宽度 B/mm	D_1/B	水斗 数/ 个	喷嘴 口直 径 d/mm	额定点 射流直 径 d_0/mm	D_1/d_0	飞逸 转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
ALSTOM NEY	竖轴 水斗式	6	18.8	122.5	580	23.62	375	91.62	2 600	741	3.51	21	283	218	11.92	725
VOITH SIMENS	竖轴 水斗式	6	18.8	122.5	580	23.50	375	91.67	2 626	754	3.48	20	294	220	11.94	685
ELIN VAMCE	竖轴 水斗式	6	18.8	122.5	580	23.50	375	91.60	2 605	710	3.67	21	294	216	12.04	675
ABB KVAERNER	竖轴 水斗式	6	18.8	122.5	580	23.92	375	90.80	2 624	731	3.59	21	296	218	12.03	675

(下转第 72 页)

于不同的工程,各因素的影响程度存在一定差异,出现随着工程规模的变化而变化,工程规模越大影响程度也就越大的状况,这也符合工程投资的实际状况。因为随着工程规模的不断增大,势必在设计、工期等方面出现波动。另外,由于投资规模较大,价差的影响也在不断增大。

3 结 语

通过对南水北调东线江苏某段工程的工程投资变化分析,笔者认为在工程投资管理过程中应该着重做好以下工作。

a. 优化价差管理方法。实证分析表明,价差是影响工程投资变化的重要因素,而且对于大型工程项目,价差的影响程度也大。因此,应承认价差,合理计算、结算价差,把价差作为工程总投资的组成部分,规范价差的计算和管理。总的来说,价格调整是工程投资管理的一项主要内容。我国的工费、材料费、机械使用费价格比较平稳,建筑工程造价也相对稳定。但是,在某些时期建筑材料也出现过较大幅度的涨跌,如2003年下半年,钢材、水泥价格的大幅度上涨对建设工程造价影响较大。如何根据工程的进展情况,结合国家的政策及市场价格因素的变化,合理确定工程投资的价差,更加准确地反映建设项目成本和费用的变化情况,减少业主和承包商的风险,形成良好的价差调整机制,是项目管理层和实施层对投资进行动态管理和对工程投资风险进行预测并实施监控的一项重要工作^[2]。

b. 加强设计管理,减少设计变更。实证分析表明,造成工程投资变化的另外一个重要因素是设计变更,而且其对于工程投资变化造成的影响更缺乏可预测性。目前之所以在设计中时常出现造价控制不力的状况,很大程度上是由于设计深度不足造成的,特别是可行性研究深度不够,是造成投资缺口的主要原因。因此要积极提倡限额设计,有效地控制造价^[3]。建设单位在委托设计任务合同书中,除了

确定工程项目类别规模、等级和功能要求以外,还可加列一项关于工程项目的合理限额投资。在这一约束条件下,设计单位一定会认真对待每一个问题,对工程进行合理布置,精心设计。如果属设计反映的造价超过了限额投资,如果是设计不当造成的,就必须坚决返工,加强设计变更管理。水利工程工期长、影响因素多,设计变更不可避免。对影响工程质量的变更是必须的,能节省造价的变更是必要的。对非发生不可的变更,应尽量提前实现。变更发生越早,损失越少;反之损失越大。这是因为设计阶段变更只需改图纸,采购阶段变更需退货重新采购甚至积压,施工阶段变更需要拆除费。

c. 建立水利工程“静态投资、动态管理”投资管理体系。实证分析表明,“静态控制、动态管理”工程投资管理体系在平稳投资变化、减少投资波动上可发挥重要作用。三峡工程在投资管理方面进行了积极的探索,针对传统工程投资管理体制存在的弊端,改变了过去的管理模式,首先提出并建立了“静态控制、动态管理”管理体系^[4],按照“总量控制、合理调整”的原则编制执行概算。通过动态管理,合理确定动态投资,控制投资的总规模。“静态控制、动态管理”模式,建立投资激励和约束机制,将对今后水利建设项目的投资控制和管理产生深远意义和影响。因此,“静态控制、动态管理”的工程投资管理体系将是我国进行投资控制的改革方向。

参考文献:

[1] 肖文琼. 水电工程投资上涨原因分析及控制措施[J]. 湖南水利水电, 2002, 54(2): 56-58.
[2] 叶辑松. 浅论水利工程设计阶段投资控制[J]. 小水电, 2005, 27(5): 27-31.
[3] 李晓鹏. 水利工程投资中应注意的问题[J]. 四川水力发电, 2004, 23(4): 12-15.
[4] 王胜万. 三峡工程投资管理模式改革的实践[J]. 中国投资与建设, 1999, 33(6): 24-27.
(收稿日期: 2006-07-14 编辑: 马敏峰)

(上接第61页)

5 结 语

随着我国水能资源的不断开发,技术上比较难开发的高水头、大落差的水能资源将越来越受到重视。水斗式水轮机组是利用这种水能资源的较好动力装置,将得到更广泛的应用。冶勒水电站是我国第一次引进6喷嘴水斗式水轮机组,也是目前亚洲地区喷嘴数最多和单机容量最大的水斗式水轮机组之一。这种机组的喷嘴控制机构采用内控喷针机构和带协联关系的折向器,技术上较为领先。冶勒水电站已于2005年

底建成发电,各项指标均达到了设计要求。冶勒水电站6喷嘴大容量水斗式机组的引进,为以后我国同类型机组的引进及参数选择提供了经验。

参考文献:

[1] 邓小华. 冶勒水电站冲击式水轮机安装与调整[J]. 水力发电, 2004, 30(11): 38-39.
[2] 王承勇. 白水河二级电站冲击式水轮机参数的确定[J]. 贵州水力发电, 1998, 13(4): 36-39.
[3] 国家电力公司成都勘测设计研究院. 四川省南桷河冶勒水电站初步设计调整及优化设计报告[R]. 成都: 国家电力公司成都勘测设计研究院, 2002.
(收稿日期: 2006-03-09 编辑: 马敏峰)