

溪洛渡水电站 800 MW 级水轮机技术 研究与实践

孙文彬¹, 牛文彬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. 水电水利规划设计总院, 北京 100120)

摘 要: 本文介绍了溪洛渡水电站 800 MW 级水轮机主要参数(水头、出力、稳定性指标、效率和流量、空化性能等)和主要部件结构(转轮、蜗壳和座环、导水机构、圆筒阀、主轴和主轴密封、水导轴承、补气系统和尾水管等)的设计成果。研究成果可供水电站设计和施工参考。

关键词: 水轮机; 技术参数; 溪洛渡水电站

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2016.10.011

中图分类号: TV734.1

文献标识码: B

文章编号: 1000-0860(2016)10-0050-04

Study and practice on technology of 800 MW hydro-turbine for Xiluodu Hydropower Station

SUN Wenbin¹, NIU Wenbin²

(1. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, Sichuan, China;

2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: The design results of the main parameters (water head, output, stability index, efficiency, flow rate, cavitation performance, etc.) and the main component structures (runner, spiral case, stay ring, water distributor, cylindrical valve, main shaft and its seal, water pilot bearing, air admission system, draft tube, etc.) of the 800 MW hydro-turbine for Xiluodu Hydropower Station are introduced herein, so as to provide some references both the design and the construction of the hydropower station.

Key words: hydro-turbine; technical parameter; Xiluodu Hydropower Station

1 工程概况

溪洛渡水电站为金沙江下游河段(雅砻江河口至宜宾)首个开发项目,位于四川省雷波县和云南省永善县境内。电站以发电为主,兼有防洪、拦沙和改善上下游航道等巨大的综合效益。电力主送华东、华南地区,兼顾云南省枯水期用电需要,是实现“西电东送”的骨干电站,在系统中担负基荷、腰荷及部分峰荷。水电站枢纽工程包括拦河大坝、引水发电建筑物、导流洞、泄洪洞等,大坝采用混凝土双曲拱坝,最大坝高 285.5 m,具有坝高、库大、坝身泄洪量大的特点;水电站总装机容量 12 600 MW,最大稳定发电容量 13 860 MW,机组容量 770 MW。

20 世纪 50 年代初,成都勘测设计研究院开始溪洛渡工程选址,2001 年 10 月完成可行性研究,2003 年 8 月通过可研报告审查,历时 50 多年。随后电站筹建工程开始施工,2005 年 12 月 26 日工程正式开工,2007 年 11 月截流,2008 年 8 月签订机组设备采购合同,2009 年初地下厂房首台机尾水管开始安装,2012 年 6 月底首台机组安装完成,2013 年 5 月 4 日水库开始蓄水,7 月首批 4 台机组发电,创造了“月投产 4 台”和“半年投产 12 台”770 MW 机组世界纪录,2014 年 6 月底全站 18 台机组全部投产发电。

收稿日期: 2016-06-03

作者简介: 孙文彬(1969—),男,教授级高级工程师。

2 水轮机主要参数

鉴于电站装机容量巨大,机组台数多,在重点考虑机组及辅助设备安全性的同时,还要兼顾经济性和技术创新,溪洛渡水轮机参数经过多次论证,推荐额定水头 186.0 m,水轮机额定出力 713 MW,设计出力 784 MW,额定转速 125 r/min。

机组采购采用国内公开招标,历经模型水轮机开发、机组采购招投标、同台对比模型试验以及评标授标过程,18 台机组以台(套)为单位,分别授予哈电(以下简称 HE)左岸厂房 1[#]~6[#]机组,共 6 台(套);福伊特(上海)(以下简称 VHS)左岸厂房 7[#]~9[#]机组,共 3 台(套);东电(以下简称 DEC)右岸厂房 10[#]~18[#]机组,共 9 台(套),全厂共三种型号水轮机,合同生效后,进行了水轮机模型性能完善和验收试验。

2.1 水 头

水轮机水头范围 149.5~229.4 m,水头变幅近 80 m, $H_{\max}/H_{\min}=1.53$;额定水头 186 m, $H_{\max}/H_r=1.23$,水头变化幅度和 $H_{\max}/H_r$ 比值均突破了大多数水电站的经验控制值,水库汛期为确保防洪库容须按防洪限制水位运行,平枯期为了充分利用水能资源高水位运行时间尽可能长,使得高低水头段运行时间均长,中间水头段运行时间短,加上机组容量和尺寸大,确保水轮机在全水头段均具有良好的稳定性和能量指标是研究的重点和难点。三种型号水轮机的设计水头在 198.7~209.5 m,大水头与之相比为 1.09~1.15。

2.2 出 力

水轮机额定出力 713 MW。由于额定水头较低,高水头段额定出力下导叶开度仍小,稳定可调的出力范围窄,造成稳定性风险,经研究论证水轮机设计出力选择为 784 MW,对应水轮发电机组设计容量为 770 MW/855.6 MVA。从水电站实际运行来看,三种型号水轮机在(50%~100%)相应水头最大保证出力范围均可安全稳定运行。

金沙江汛期来流量大,为了满足防洪库容,溪洛渡水库限制在低水位运行,水头低,水量来多少放多少,水轮机导叶运行在全开状态,在保证稳定性能的条件下,具备尽量大的过流能力和出力是考核的重要指标。三种型号水轮机在汛期加权平均水头 176 m 时的最大出力为 648~653 MW,高低相差约 10 MW。

2.3 稳定性指标

国内外巨型水电机组普遍存在如压力脉动大、振动和裂纹等诸多类型的稳定性问题,使得水轮机运行范围窄,限制了水电机组性能的发挥。在溪洛渡机组招标文件中对稳定性指标和长期连续安全稳定运行工况进行了严格规定。项目业主、设计单位和机组厂家对此高度重视,通过多轮次技术交流、多转轮的研发比选和过程控制,最后中标的三种型号水轮机稳定性能均达到或基本达到招标文件要求。

2.3.1 压力脉动试验

水轮机模型试验装置设置了蜗壳进口、无叶区、尾水锥管(距转轮出口 $0.3D_2$ 和 $1.0D_2$ 处二个断面)、尾水肘管 45° 凹凸侧共 13 个压力脉动测点。压力脉动幅值定义为时域峰—峰值(97% 置信度),三种型号水轮机模型验收试验所测得的结果如下:(1)蜗壳进口压力脉动幅值在整个运行区均小于 3.4%;(2)无叶区压力脉动幅值在整个运行区均不大于 4.0%;(3)尾水锥管压力脉动幅值在整个运行区均小于 5.5%,在合同要求稳定运行区的低水头段不大于 4%,高水头段不大于 3%; $1.0D_2$ 与 $0.3D_2$ 的尾水管压力脉动幅值相比,基本一致,没有明显差异。

尾水肘管压力脉动幅值在整个运行区均不大于 4.2%。在整个运行范围内,未发现高部分负荷高频压力脉动带(其定义为负荷在要求的稳定运行区内,频率大于或接近机组转频,压力脉动时域峰—峰值 $\Delta H/H$ 大于等于 4%)。

水轮机模型试验阶段进行了变空化系数对压力脉动的影响试验,试验结果表明,在低空化系数下,压力脉动幅值较大,在略低于电站空化系数开始至大空化系数段,压力脉动特性无明显趋势变化。

补气对压力脉动影响的模型试验中,DEC 和 VHS 采用大轴中心孔补气,HE 采用尾水管边壁补气,试验结果表明:HE 和 DEC 水轮机在自然补气量为 0~0.5% Q 范围内,补气对各测点压力脉动幅值基本没有影响。VHS 水轮机在自然补气量 0~1.5% Q 范围内,压力脉动有较大幅度降低,通过 FFT 分析,主频的压力脉动幅值变化不大。各单位的补气试验均表明水轮机效率对补气比较敏感。

2.3.2 流态观测

水轮机模型设有通过光纤内窥镜直接观察转轮叶片进口边空化、气泡、脱流和叶道涡情况的装置,在尾水锥管设有观察叶道涡和转轮叶片卡门涡的透明段。模型试验结果如下:(1)三种型号水轮机叶片进

口边负压面初生空化线和正压面初生空化线均控制在最大水头和最小水头的运行范围之外。(2)三种型号水轮机的叶道涡发展线均基本未进入稳定运行区,有两个厂水轮机的叶道涡初生线部分进入了稳定运行区下限356.5 MW。(3)在水电站空化系数下,给定的运行范围内,三种型号水轮机均没有观察到可见的卡门涡现象。

2.4 效率和流量

三种型号水轮机模型最优点效率为94.96%~95.52%,原型加权平均效率为95.34%~95.88%,额定工况点(186 m、713 MW)原型效率92.97%~94.07%,对应额定流量为421~416 m³/s。各型号水轮机能量指标优良,且高效区宽广,但各型号水轮机之间仍有一定的效率差,对水电站平枯水期发电量有一定的影响。

2.5 空化性能

通过模型试验验证,各型号水轮机均有较好的空化性能,在各种特征工况,水电站空化系数有较大的安全裕度。在额定工况点,三种型号水轮机的初生空化系数 σ_i 为0.07~0.1,临界空化系数 σ_1 为0.04~0.06,与电站空化系数相比均有足够的安全裕量,成都勘测设计研究院考虑到溪洛渡水电站为地下式厂房,适当降低安装高程几乎不增加土建工程量,且有利于机组的稳定运行,因此选择了相对较大的电站空化系数,从运行结果来看,达到了预期目的。

3 水轮机主要结构

3.1 总体结构

溪洛渡水轮机为立轴混流式,俯视顺时针方向旋转,带窄高弯肘型尾水管和圆筒阀,水轮机安装高程359.00 m,尾水管底板高程约332.00 m,机坑进人门高程约363.3 m。水轮机主要部件要求通过模型试验验证其良好的水力性能,以及通过规定工况下的应力计算、振动变形计算确保其足够的刚强度和部件之间的合理匹配,以控制变形和消除共振。

3.2 转轮

三种型号水轮机转轮进口直径分别为7.69 m、7.66 m和7.40 m,负倾角叶片,叶片数为17片、15片和15片,上止漏环型式为梳齿、梳齿和阶梯,下止漏环型式均为迷宫式,设置在下环的下部,转动止漏环在转轮本体上直接加工而成,DEC转轮设有长泄水锥,HE转轮上冠设有泄压孔。叶片、上冠和下环采用相同材质,转轮材料分别为ZG06Cr13Ni4Mo、

ASTM A743 GradeCA-6NM、ZG06Cr13Ni4Mo,为了保证转轮有足够的强度和抗磨蚀性能,对转轮材料的化学成分和力学性能提出了具体的控制标准,叶片采用VOD或AOD精炼,铸件全部采用国产,18台转轮采用散件运输,在各厂自行修建的工地现场加工场内组焊加工,残余应力测量和静平衡后,整体交货。转轮结构设计均采取了减少局部应力集中和增加叶片刚强度的措施。

3.3 蜗壳和座环

蜗壳按全水压设计,压力2.87 MPa,HE和DEC蜗壳断面形状为全圆断面,VHS为三心圆弧,进口延伸段断面内径分别为7.27 m、7.2 m和7.74 m,蜗壳材料分别为600 MPa级的B-610CF、S500M和ADB610D,最大厚度为90 mm、74 mm和80 mm,蜗壳在现场金结加工厂下料制作。按合同规定蜗壳所有纵缝(含工厂和现场焊缝)、凑合节环缝、丁字焊缝(纵环缝相交处)、蜗壳与压力钢管合拢焊缝,均进行100% UT+100% TOFD(智能超声检测)检查,其他焊缝采用常规超声波为主检查,未采用射线检查,未进行水压试验,蜗壳浇筑方式以弹性垫层代替常规的保压浇筑,垫层敷设范围为45°和135°二种方案。

座环由支持环、座环本体、基础环三段式组焊结构,座环上下环板采用抗层状撕裂钢板,材料分别采用S355J2G3-Z35和S500Q-Z35,上下环板厚度分别为270 mm/270 mm、260 mm/220 mm和215 mm/215 mm,固定导叶材料分别采用A668ClassE、S550Q和S500Q,数量为23个,根据水力特性分成不同形状的多组,部分固定导叶末端设有圆筒阀导轨,座环内设有导流板。为减少运输难度,HE和VHS的蜗壳大舌板在国内首次采用现场焊接。座环各接触面在现场全机加工,以校正由于座环和基础环在现场组装、焊接和浇筑混凝土后产生的变形。

3.4 导水机构

顶盖、底环为钢板焊接结构,HE顶盖上环板材料为S355J2G3-Z35,下环板材料为S355J0;VHS顶盖上环板材料Q345C Z35,下环板材料S355J0+N;DEC顶盖上、下环板材料ASTM A516 Gr70。底环材料为Q235B。在顶盖和底环对应导叶两端的整个过流表面和易发生磨蚀部位设有不锈钢抗磨板,以及导叶端面密封、固定止漏环和圆筒阀密封,顶盖上还设有泄压管等。

活动导叶数24个,3支点负曲率结构,整体采

用 06Cr13Ni4Mo 电渣熔铸,导叶相对高度分别为 0.181、0.176 和 0.172,导叶分布圆相对直径分别为 1.121、1.122 和 1.143。导叶接力器活塞直径分别为 850 mm、710 mm 和 900 mm,行程分别为 575 mm、603 mm 和 560 mm,设有慢关闭装置、液压锁定、手动锁定以及将导叶锁定到任意位置的手动限位装置,接力器额定操作压力 6.3 MPa。

3.5 圆筒阀

溪洛渡圆筒阀为世界难度最大的圆筒阀之一,主要表现在尺寸大、压力高,HE 圆筒阀在国内首次采用现场转轮组装厂拼焊加工,DEC 和 VHS 圆筒阀采用分半运输,现场装配。圆筒阀内径/外径分别为 9 510 mm/9 910 mm、9 535 mm/9 935 mm、9 420 mm/9 820 mm,高度分别为 1.605 m、1.48 m 和 1.39 m,材料分别为 Q345C、S355J2 + N 和 ASTM 516Gr70,上下端部采用不锈钢,壁厚 200 mm,采用 6 个接力器同步操作,接力器活塞杆与圆筒阀之间采用超级螺母连接,操作方式 DEC 采用全数字集成式(数字缸)电液同步专利技术,HE 和 VHS 采用同轴油马达式电液同步,圆筒阀静水启闭时间为 70 ~ 80 s,设计推荐圆筒阀接入正常开停机流程,以及在过速装置动作情况下动水关闭停机。三个厂家的水轮机圆筒阀均完成了现场性能试验,由于试验时间不同,试验水头在 210 ~ 215 m,右岸圆筒阀在机组出力 770 MW 下动水关闭时,接力器下腔最大压力为 12.7 MPa,左岸圆筒阀在机组出力 700 MW 下动水关闭时,接力器下腔最大压力为 16 MPa 和 19.4 MPa,均满足各厂提供的设计压力。

3.6 主轴和主轴密封

1[#]~6[#]水轮机机主轴内/外径为 1 990 mm/2 500 mm,长度 4 965 mm,与转轮连接采用中法兰,销套传递扭矩,与发电机轴连接为外法兰,销钉传递扭矩;7[#]~9[#]水轮机机主轴内/外径为 2 870 mm/3 120 mm,长度 5 220 mm,与转轮连接采用外法兰,销套传递扭矩,与发电机轴连接为中法兰,销套传递扭矩;右岸水轮机机主轴内/外径为 1 750 mm/2 350 mm,长度 4 743 mm,与转轮连接采用中法兰,销套传递扭矩,与发电机轴连接为外法兰,销钉传递扭矩。

主轴工作密封采用可动式向下端面密封,VHS

的密封材料为进口钼酚醛树脂材料,DEC 和 HE 采用 CESTIDUR 高分子合成材料。主轴检修密封采用压缩空气充气膨胀式橡胶密封结构。

3.7 水导轴承

水轮机导轴承为稀油润滑、巴氏合金表面的分块瓦轴承,楔块调整。轴承冷却系统均为外循环,哈电采用自泵式+备用泵,其他采用外加泵外循环。

3.8 补气系统

溪洛渡水电站水轮机设有主轴中心孔自然补气系统和压缩空气强迫补气系统,由于下游水位较高且变幅大,自然补气系统在大轴顶部设置一只浮球补气阀和一只压板式(浮筒式)补气阀,并且在发电机转子中心体内的补气管路上设置常开的手动对夹式检修蝶阀,补气总管直径为 DN400 ~ DN500。压缩空气强迫补气系统主要在顶盖、底环的活动导叶之间设置强迫补气孔,除此之外,VHS 水轮机还设有尾水锥管的强迫补气系统。

3.9 尾水管

尾水管采用弯肘窄高型,为了厂房提前开挖的需要,水轮机安装高程、尾水管底板高程、尾水管体型和长度等主要尺寸在机组招标前已基本确定。合同确定的三种型号尾水管高度分别为 24.71 m、24.443 m 和 24.284 m,尾水管长度 53.5 m,金属里衬采用现场制作。由于尾水管淹没深度大,下游水位变幅大,在最高尾水位下,尾水管最大承压近 80 m,为此要求尾水管里衬按疲劳强度设计。

4 结 语

溪洛渡水电站从选址到发电历经 60 多年时间,经过多轮次的技术经济比较,充分协调了机电设备设计制造可行性和电站综合效益最大化,在建设阶段还创造了多项世界纪录和国内先例,巩固和加强了多项前沿技术。目前水电站已经全面建成,经过首批机组及全部 18 台机组成功投运以来的 2 年多时间无故障运行表明,水轮机参数和结构科学合理,综合效益达到设计水平,标志着中国水电在 10 000 MW 级电站和 800 MW 机组的建设管理、设计、制造和安装技术水平平均达到成熟阶段。

(责任编辑 郭利娜)

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告