

金沙水电站水轮机的水力设计与结构设计

唐容文, 黄刚, 黄小川, 谢纓

(四川省能投攀枝花水电开发有限公司, 四川 攀枝花 617068)

摘要:金沙水电站安装4台单机容量为140 MW的轴流转桨式水轮发电机组, 转速57.7 rpm, 水轮机转轮直径为10.65 m, 该转轮直径为仅次于葛洲坝的全球第二大水轮机组。介绍了该电站的水轮机水力设计、模型试验及水轮机结构设计情况。

关键词:金沙水电站; 水轮机水力设计; 结构设计

中图分类号:TV7;TV734;TV73

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2018)02-0007-04

1 概述

金沙水电站位于金沙江干流中游末端的攀枝花河段, 上距观音岩水电站坝址28.9 km, 下距攀枝花中心城区10.3 km, 控制流域面积25.89万 km^2 , 多年平均流量1870 m^3/s , 具有日调节能力。电站装机容量为 $4 \times 140 \text{ MW}$, 多年平均发电量25.07亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。电站以两回220 kV电压等级接入电力系统。电站按无人值班(少人值守)设计, 计划首台机组投产时间为2020年6月30日。

天津阿尔斯通公司于2016年1月通过竞标获得了金沙水电站4台140 MW水轮机制造合同。水轮机参数: 最大水头26 m, 额定水头16.8 m, 最小水头8 m; 额定转速57.7 rpm, 飞逸转速178 rpm; 转轮直径为10.65 m; 额定出力142.9 MW; 额定流量937 m^3/s ; 允许吸出高度 H_s 为-8.82 m; 最高效率为96.09%。

2 水力设计情况

该水轮机水力设计由美国通用公司(GE)可再生能源水电技术中心完成, 水轮机模型试验于2017年4月在GE实验室完成。

GE对该水轮机主要过流部件进行了全面的流体动力分析, 全面研究了其能量特性、空化特性及水力稳定性等。

2.1 蜗壳设计

蜗壳设计主要是以蜗壳进口、机组中心线与蜗壳轴线的距离为基础, 其目的是获得一个合适于所用蜗壳出口的水力角度常数和每个双列叶栅流道近似的流量。

计算结果表明: 蜗壳的水力设计与其高水平

的效率保证相适应。

2.2 双列叶栅

固定导叶的设计是由水力约束和机构约束折中的。从水力设计角度考虑, 希望得到合适于进口流态的设计, 从而在其出口边获得一个与流量对应的、正确的水力角度和最小的水头损失。从机械设计角度考虑, 设计取决于项目特点(主要是水头范围、过压等)。

从流速场分布图(图1)可以看出, 双列叶栅中的流动特性是优良的, 且无明显脱流。

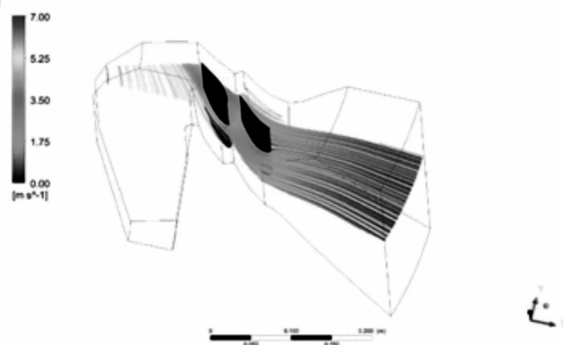


图1 流速场分布图

2.3 转轮

转轮设计的目的是得到与整个水轮机运行范围相匹配的几何尺寸(效率、空蚀、飞逸、稳定性和机械特性), 依靠数字模拟来实现这一目标。计算域简化为周期条件下的一个活动导叶流道和一个转轮叶片流道。

转轮的最小水头损失对应于适当的 n_{11} 值(120~130 r/min, 对应于真机水头22~26 m)。此外, 该水头损失值与金沙项目的水头损失值相当, 其效率水平很高。就尾水管而言, 水头损失很

小,其流态正常(对于给定的水头,其水头损失随流量增加而增大)。

通过模拟计算,证实了水轮机效率满足保证值,转轮设计满足空化要求。同时,转轮出口的流速分布也得以确定。

3 模型试验

根据 CFD 模拟后定义的水力设计进行了模型水轮机的制造,在 GE 位于格勒诺布尔的试验室进行了初步试验和验收试验,并在瑞士洛桑试验室进行了二次验收试验。

根据合同,模型试验内容包括:水轮机效率试验、出力试验、飞逸试验、空化试验、压力脉动、水推力试验、蜗壳差压测流以及导叶和桨叶水力矩试验。

3.1 效率和出力试验

效率试验在电站空化系数下进行,试验水头为 8 m。试验工况点覆盖整个运行范围,试验结果如下:

各个水头下的出力均超过保证出力,且 8 ~ 13 m 水头下的出力裕度均不小于 8%。

模型最高效率为 93.77%,满足保证值。

真机加权平均效率为 94.27%,超过保证值 94.16%。

3.2 空化试验

空化试验包括确定空化裕度及进口空化的观测。

(1)进口空化观测。进口空化观测在电站空化系数下进行。在 4 个桨叶开度下,不断减小单位转速 n_{11} 直至观测到两个叶片同时出现可见附着气泡。

(2)空化裕度。出口空化系数参照点为转轮中心线高程,对相应真机的七个水头进行了试验,所选择的七个水头覆盖了机组整个运行范围。为了确定出口空化限制,在恒定转速、水头和导叶开度下通过改变下游水箱压力进行试验。在 σ 递减条件下,测量其效率、流量和出力。

试验结果表明:在所有水头下的最大出力工况下,电站装置空化系数与初生空化系数之比有很大余量,因此,在保证运行水头范围内,对应其最低尾水位真机转轮将不会发生任何出口空化。

3.3 飞逸转速试验

飞逸转速试验水头为 2 m。试验在高空化系

数下进行,同时测定空化系数对飞逸转速的影响,试验结果如下:

真机最大飞逸转速为 134.59 r/min,低于保证值 178 r/min。

3.4 压力脉动试验

压力脉动通过尾水管内、蜗壳内、导叶后转轮前内顶盖上的传感器进行测量。所记录的信号使用频谱分析仪进行分析(漩涡流的低频率)后进行处理。

试验在电站装置空化系数下、不同导叶开度及桨叶开度、3 个水头下进行。

在整个运行范围内,压力脉动满足合同保证值(除了最小水头压力脉动的测量受进口空化干扰)。

另外,在模型试验中,还对导叶及桨叶水力矩、蜗壳差压测流等进行了试验。

3.5 水推力试验

在模型试验中,对轴向水推力特性进行了测定,测量在装置空化系数下、不同导叶和桨叶开度最不利流量条件下(包括飞逸)进行。试验结果如下:

对于协联工况,最大的真机水推力 15 187.46 kN 出现在最大水头下。

在飞逸工况下,最大真机水推力 19 170.5 kN 出现在最大水头下。

其数值均满足合同保证值。

综上所述,金沙水电站水轮机的水力设计是成功的,其代表了当今世界先进水平。

4 机械设计特点

水轮机为立轴轴流式,弯肘型长尾水管。从发电机顶部俯视,旋转方向为顺时针。机组主要由座环、蜗壳、机坑里衬、导水机构、主轴、转轮、水导轴承、主轴密封、接力器、尾水管等构成。

4.1 座环

座环结构型式为支柱式,每个固定导叶均为单独的零件,上环板分为 6 瓣,固定导叶数量为 15 个(含舌板)。上环板为(Q345B + S355J2G3)钢板,固定导叶为 Q345B 钢板。

座环作为水轮机的主支撑,具有足够的强度和刚度,能够承受所有通过其传递的荷载,包括传递到座环上的发电机的重量和水轮机重量在内的机械荷载、水力荷载、蜗壳最大内水压力和土建结构荷载。

固定导叶的设计考虑了弯矩的影响和轴向负荷与固定导叶横断面重心之间偏心的影响。固定导叶为流线形,与模型相似。

座环设计成采用地脚螺栓固定在混凝土内。座环与顶盖、底环连接的法兰在现场进行了全接触面加工。

4.2 蜗壳

蜗壳为“T”型(不对称梯形断面)混凝土蜗壳,护衬至X-X轴线16 m处,蜗壳的进水口设2个中墩,蜗壳包角为215°左右。蜗壳流道尺寸与模型流道尺寸相似。蜗壳采用Q235钢板制作。

蜗壳设有1个直径为800 mm的内开式进人门以便于检修。蜗壳在工地预装并焊接。

为便于排出流道和蜗壳内的积水,在蜗壳最低高程处设置了1套直径为800 mm的盘形阀,积水经排水阀、管道排至尾水管。

排水阀采用油压操作,配2套操作盘形阀的移动式电动油泵系统供蜗壳和尾水管排水阀操作,并能够适应厂房内的各台机组。

4.3 机坑里衬

机坑里衬为钢板焊接结构,材料为Q235,里衬钢板的厚度为20 mm,靠近座环的部位厚度为30 mm。机坑里衬上部内径为15 200 mm,下部内径为15 500 mm。机坑照明灯采用直接布置在机坑壁上的布置方式(机坑壁不开孔)。

4.4 导水机构

导水机构的功能是形成和改变进入转轮水流的环量,使转轮具有良好的水力特性;导水机构同时具有调节流量进而调节机组出力的作用;导水机构可以在各种工况下关闭导叶,封闭水流,停止机组。

导水机构由顶盖、支持盖、底环、转轮室、导叶和导叶操作机构、真空破坏阀组成。第一台导水机构在工厂预装。

(1) 顶盖和支持盖。

顶盖和支持盖采用钢板焊接结构,顶盖分4瓣,支持盖分2瓣,整体具有足够的强度和刚度,能够安全、可靠地承受包括推力支架传递的推力负荷、最大水压力、真空压力、最大水压脉动、各种轴向和径向力、转轮上抬力和所有其他作用在其上面的力;还能够支承导水机构、导轴承、主轴密封和其他部件,并且在整个运行范围内不产生过

大的振动和有害的变形。

顶盖设有法兰,外法兰用螺栓和定位销连接到座环的法兰上,内法兰用螺栓和定位销与支持盖连接,并设有用于拆卸顶盖时顶起顶盖的螺栓螺孔。

(2) 底环。

底环采用钢板焊接或铸焊结构,具有足够的强度和刚度。在满足运输要求的条件下,底环分为4瓣。

底环能安全、可靠地支承最大水压力和所有作用在其上的其他负荷而不产生有害的变形。

(3) 导叶和导叶操作机构。

导叶为锻焊中空结构,三支点,24个。导叶体采用不锈钢板00Cr13Ni5Mo卷焊制造,并焊接到锻钢的导叶轴上。导叶体高3 895.6 mm。在顶盖和底环的抗磨板上设置可拆卸、可更换的导叶密封。

每个导叶采用3个自润滑导轴承支承,一个在底环,另外2个在顶盖中。导叶轴上部设置1个可调整的自润滑推力轴承以承受导叶的重量并阻止任何作用在导叶上向上或向下的水推力。

导叶保护装置采用剪断销结构。

控制环为钢板焊接结构,分2瓣。控制环把接力器的操作力和力矩同时均匀地分配给所有导叶,并与接力器推拉杆以及所有的导叶连杆和销相连接。

(4) 转轮室。

转轮室主要采用不锈钢板06Cr19Ni10材料制造,分4瓣。转轮室具有足够的强度和刚度,加工完成后的最小壁厚不小于35 mm。转轮室外壁配有足够的加强筋、安装调整用的拉紧器、支撑等,为保证转轮室能与混凝土结合牢固,还需配置足够数量的锚筋。

(5) 真空破坏阀。

支持盖上设有8个真空破坏阀,真空破坏阀的设计需保证动作灵活、可靠、不漏水、进气量大。

4.5 主轴

水轮机主轴为中空结构,供桨叶接力器操作油管通过。水导轴承处采用带轴颈结构,与电机轴和转轮采用外法兰连接,材料为锻钢20SiMn。主轴外径为1 800 mm。

水轮机和发电机组的主轴临界转速的计算

考虑了水轮机的刚度、水轮机和发电机的轴承支座及其位置、发电机的尺寸和发电机转动惯量等,所计算的临界转速比最大飞逸转速高 25% 以上。

4.6 转轮

转轮由轮毂及 5 只转角可调的桨叶(叶片)、桨叶操作接力器、操作机构、泄水锥等组成。接力器及操作机构设在轮毂内。转轮和主轴采用法兰螺栓联接。

轮毂采用 ZG20SiMn 整体铸造,表面(桨叶转动范围)堆焊不锈钢。

桨叶操作机构采用缸动结构。连杆、拐臂操作需保证正常、不会产生卡阻现象。桨叶接力器按额定操作油压 6.3 MPa 设计。接力器及操作机构在轮毂内的布置方式以便于装配和检修为准。

桨叶采用 ZG04Cr13Ni4Mo 不锈钢精铸制造,经五轴数控机床加工而成。叶片外缘设抗空蚀裙边,叶片的内端侧加工成与轮毂良好配合的球形并使轮毂与叶片的间隙减至最小。桨叶与轮毂间有可靠的密封。

泄水锥用螺栓连接在轮毂的下端,拆卸泄水锥和端盖后可检修轮毂内部的桨叶操作机构。

4.7 导轴承

水轮机导轴承为稀油润滑、具有巴氏合金表面的分块瓦、自润滑轴承。

导轴承由分块的轴瓦、轴瓦支承、带油槽的轴承箱、箱盖和附件组成。

冷却器可布置在油槽中。

水轮机在各种连续运行工况下,其由稀油润滑的导轴承的轴瓦最高温度不超过 70 °C;油的最高温度不超过 65 °C。

4.8 主轴密封

水轮机主轴的密封采用静压自调节式密封,置于导轴承下方。主轴工作密封副采用优质产品,其结构型式在已运行的同类型水轮机中被证明是可靠的。工作密封为自补偿型,在整个使用期间对磨损后的密封间隙可进行自动调整。

主轴检修密封位于工作密封下,采用压缩空气充气的围带橡胶密封结构。机组检修长时间停机时,围带内需充入压缩空气。

4.9 尾水管

尾水管型式为弯肘型,水平扩散段设有 2 个中墩。尾水管里衬为钢板焊接结构,金属尾水管里衬自转轮室下部开始延伸至肘管出口与扩散段进口连接断面处,里衬上部有 1 000 mm 长的不锈钢段,厚 35 mm,其余为 Q235 碳钢。

在锥管段设有 1 个净尺寸为宽 800 mm,高 1 000 mm 的密封进入门,在扩散段设有 1 个直径为 800 mm 的密封进入门。

在尾水管最低点设置了 2 套直径为 800 mm 的盘形阀,该阀包括油压操作机构、锁锭、轴、轴套、轴封、轴座、阀门、阀座、排水箱里衬、基础螺栓、拦污栅及其他附件。排水阀采用油压操作,2 套操作盘形阀的移动式电动油泵系统供蜗壳和尾水管排水阀操作,并能够适应厂房内的各台机组。

4.10 机坑环形吊车

水轮机坑设有 1 套电动环形吊车。吊车有效荷载为 5 t,用于更换导轴承零件、接力器零件、导叶操作机构零件等。

5 结 语

GE 公司从水轮机模型设计、模型试验、选型到结构设计、各部件的强度、刚度计算均采用目前世界上最先进的技术,确保了机组获得最好的性能指标。

作者简介:

唐容文(1972-),男,四川蓬安人,工程师,从事水电工程建设技术与管理工作;
黄刚(1973-),男,四川仁寿人,高级工程师,从事水电工程建设技术与管理工作;
黄小川(1982-),男,四川自贡人,工程师,从事水电工程机电技术与管理工作;
谢纛(1966-),男,四川仁寿人,工程师,从事水电工程机电技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

美姑河公司一科研成果获专利证书

四川美姑河水电开发有限公司与中国水利水电科学研究院、北京中水科海利工程有限公司共同协作,针对高水头、多泥沙河流推移质对水工泄水建筑物的破坏修复进行了技术研究、攻关,采用“以柔克刚”的思路,开发出用于水工泄水建筑物受推移质破坏后的修复新材料。该新材料对处于大凉山腹地美姑河上的柳洪水电站泄洪闸底板进行修复并获得成功,其技术成果“泄水建筑物推移质冲刷破坏复合式修复结构”于 2018 年 2 月获得由国家知识产权局颁发的《新型实用专利证书》。

孙祥 供稿