

西霞院水电站水轮发电机组的主要特点

李 涛¹, 李 杰¹, 陈洪伟¹, 王文先²

(1. 水利部小浪底水利枢纽建设管理局, 河南 郑州 450000; 2. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要: 西霞院水电站安装4台单机容量为35 MW的竖轴轴流转桨式水轮发电机组。根据黄河多泥沙的特点, 对西霞院水电站水轮发电机组的结构及技术性能进行了优化。水轮机主要部件采用不锈钢制造, 过流部件表面采用抗磨涂层, 发电机为伞式结构, 电气部分采用较好的绝缘技术。

关 键 词: 水轮机; 发电机; 西霞院水电站

中图分类号: TV734.2

文献标识码: B

文章编号: 1000-1379(2006)09-0032-03

西霞院水电站安装4台单机容量为35 MW的竖轴轴流转桨式水轮发电机组。电站总装机容量140 MW, 年利用小时数4 164 h; 最大水头14.35 m, 最低水头5.83 m, 额定水头11.5 m, 电站保证出力45.6 MW, 多年平均发电量5.83亿kW·h。

1 基本情况

1.1 上、下游水位

(1) 上游水位。电站校核洪水位134.75 m, 设计洪水位132.56 m, 正常蓄水位134.00 m, 汛期限制水位131.00 m, 死水位131.00 m。

(2) 下游尾水位。设计洪水位($Q=9\ 857\ \text{m}^3/\text{s}$)125.3 m, 校核洪水位($Q=13\ 763\ \text{m}^3/\text{s}$)126.23 m, 电站过4台机组额定流量水位($Q=1\ 385.6\ \text{m}^3/\text{s}$)121.1 m, 最低水位(基流 $Q=200\ \text{m}^3/\text{s}$)120.03 m。

1.2 泥沙特性

多年平均输沙量10.71亿t, 实测最大含沙量为941 kg/m³, 多年平均含沙量37.32 kg/m³, 汛期多年平均含沙量72.76 kg/m³。泥沙中值粒径 $d_{50}=0.024\ \text{mm}$, 主要成分为石英($\geq 90\%$)、长石及云母。西霞院水电站平均过机含沙量及过机泥沙级配见表1、表2。

表1 西霞院水电站平均过机含沙量 kg/m³

时 段	7 月	8 月	9 月	10 月	11~6 月
1~3 年	5.4	7.3	3.5	1.1	0.02
4~14 年	28.9	45.5	22.5	1.0	0.08
15~50 年	86.0	93.3	37.2	2.0	0.07

表2 西霞院水电站过机泥沙级配

时 段	小于某粒径(mm)的沙重/%						d_{50}/mm
	<0.005	<0.01	<0.025	<0.05	<0.1	<0.25	
1~3 年	34.9	53.3	79.4	94.8	99.2	100	0.008 4
4~14 年	26.8	43.7	69.6	92.3	97.6	100	0.012 0
15~50 年	20.9	31.4	54.0	81.0	93.0	100	0.021 0

2 机型的确定

从电站水头范围来看, 有卧轴贯流式和立轴转桨式水轮机可供选择, 一般认为用卧轴贯流式机组比较合适。但考虑到黄河为多泥沙河流, 机组防沙问题是非常严重的问题, 业主针对机型选择问题组织了多次专家咨询会和专题会议, 许多专家认为:

(1) 在多泥沙河流上运行, 贯流式机组相对于轴流式机组而言, 其过流部件磨损后较难维修处理。停机时整个流道会有泥沙淤积, 有可能造成导叶、转轮启动困难。

(2) 贯流式机组的发电机、轴承等均布置在水下的灯泡体内。受灯泡体尺寸限制, 运行维护空间较小, 运行维护人员的工作条件较差; 并且导叶形状较为复杂, 从检修难度上讲贯流式机组比轴流式机组难度要大一些。

(3) 在清水条件下贯流式机组比轴流式机组具有效率高、水轮机过流能力大、设备尺寸小、质量较轻等优点。但在多泥沙条件下, 由于其流道内流速较高而加快磨损, 使得效率较快下降, 因此其固有优点难以体现。

(4) 在黄河这样的多泥沙河流上, 特别是在黄河中下游这样的水沙条件下, 贯流式机组还缺乏实际运行经验。

业主经慎重研究, 最后确定西霞院水电站采用立轴转桨式机组, 并于2005年4月通过模型验收试验, 得到了水力性能优良的机型。

3 机组结构与特点

西霞院水电站水轮发电机组是由通用电气亚洲水电设备有限公司设计制造的, 励磁设备分包商为南瑞公司, 调速器由武汉事达电气股份有限公司制造。

收稿日期: 2006-07-31

作者简介: 李涛(1971-), 男, 河南鹿邑人, 工程师。

3.1 水轮机

水轮机基本参数见表3。水轮机包括埋入部分、导水机构、转动部分及辅助设备。

表3 水轮机基本参数

项 目	参 数
型 号	ZZ(K400) - LH - 730
额定出力	36.1 MW
转轮直径	7.3 m
额定转速	75 r/min
飞逸转速(协联/协联破坏)	190/220 r/min
最大水头	13.82 m
最小水头	5.83 m
额定水头	11.5 m
额定流量	345 m ³ /s
额定效率	92.24%
最高效率	94.33%
比转速	672 m · kW
装置空化系数	1.435 1
吸出高度	-2.63 m
安装高程	116.5 m

3.1.1 埋入部分

埋入部分由座环、转轮室、尾水管锥管及凑合节、机坑里衬及混凝土的蜗壳、尾水管肘管等主要零部件组成。

(1)蜗壳。蜗壳为混凝土型式,不对称梯形断面,包角为215°。蜗壳和座环连接区段以及蜗壳顶部应敷有6 mm厚钢板里衬,以防渗漏和冲刷。为便于检修,在蜗壳下游设置一个700 mm×800 mm的进人门,并在蜗壳的最低处设一个DN600 mm液压盘形操作阀,以便顺利地将蜗壳中的存水排出。

(2)尾水管。尾水管型式为弯肘型,由进口锥管、弯形肘管和出口扩散段组成。尾水管的型线与验收后的模型水轮机尾水管相似,进口锥管段采用钢板焊接里衬,并在外壁焊有环筋和竖筋以增加刚度。为便于检修,在尾水管水平扩散段设有两个DN600 mm液压盘形排水阀。

(3)转轮室。转轮室为分瓣结构,由上、下两环组成,过流面采用不锈钢钢板,在转轮室外壁上焊有很多环筋和竖筋,并配有调整转轮室圆度和安装位置的拉杆和压杆。转轮室与转轮在中心线以下对应部位为球面,在转轮室下环上装有用于测量转轮室真空压力的4个压力测嘴。

(4)座环。座环是水轮机的基础部件,支承传递着其上部的机组重力、机墩混凝土重力以及水轮机最大水推力等荷载。座环采用由上环、下环和立柱组成的整体式结构,为便于运输,座环分四瓣焊接结构,其结合面进行精加工,并配有定位销。为便于浇筑和填实座环下面的混凝土,在座环上设置了1个灌浆孔,灌浆后用封板和螺旋塞封焊。通过尾部固定导叶,设置1个顶盖应急排水孔。

(5)机坑里衬。为防止渗水和便于浇注混凝土,设置了机坑里衬,采用钢板焊接钢结构。机坑里衬壁上开了2个进人门,机坑上部在发电机下挡风板处设有环形轨道和一台进行导水机构传动件安装检修的3 t电动葫芦。

3.1.2 导水机构

(1)导叶装配。导叶应采用三支点轴承结构,水轮机设置

油压操作的4只导水叶摇摆接力器,其操作油压为6.3 MPa,采用中心对称方式布置,固定在支持盖上。接力器设计成在开启方向满足导叶最大开度,在关闭方向有少量的压紧行程。调速环为钢板焊接轻型结构。

(2)支持盖装配。导轴承采用稀油润滑的金属分块瓦轴承,导轴承瓦衬采用巴氏合金材料,自润滑循环方式,设计不需要用水冷却。导叶臂与连板之间采用导叶摩擦装置,代替传统的剪断销。在导叶关闭过程中,如相邻导叶之间有异物阻碍卡住时,因导叶阻力大于摩擦力,故导叶臂、压板与连板将产生位移,以保护导水机构传动零件中的其他零件不被损坏,同时导叶位移信号装置发出信号,通知运行人员调整复位。

(3)底环。底环为可拆式结构,与顶盖下环和转轮室用螺栓固定。在底环下部设有环形检查廊道,以便在外部对导叶下轴套进行检修。底环和顶盖采用高分子聚合物抗磨板。

3.1.3 转动部分

(1)转轮。转轮由桨叶和转轮体及泄水锥组成:转轮体为整铸结构,过流表面敷焊不锈钢;泄水锥为整铸或钢板结构。不锈钢桨叶采用真空精炼铸造、数控加工,叶片外缘带有抗磨蚀裙边。桨叶操纵采用活塞带操作架和连臂的结构,桨叶转轴采用双向“X”形密封。转轮体和叶片的过流表面加工后作金属碳化物热喷涂抗磨处理。

(2)主轴。主轴采用锻钢,中空结构,内有操作油管。水轮机主轴上端法兰与发电机转子中心体直接连接;主轴下部设有水润滑运行密封和充气式检修密封。

3.2 发电机

发电机基本参数见表4。

表4 发电机基本参数

项 目	参 数
型 号	SF - J35 - 80/10470
额定容量	41.176 MVA
额定电压	10 500 V
额定电流	2 264 A
额定功率因数	0.85(滞后)
额定频率	50 Hz
相 数	3
额定转速	75 r/min
飞逸转速	220 r/min
定子接法	4Y
绝缘等级(定子/转子)	F/F
励磁方式	静止晶闸管励磁
转动惯量 GD2	≥13 000 t · m ²
额定励磁电压	264 V
额定励磁电流	992 A

水轮发电机立式伞式结构,装有推力轴承和下导轴承,无上导轴承。水轮发电机采用双路自循环径向密闭通风,在机座外壁均匀装有8只空气冷却器。冬季采用开启式与密闭自循环相结合的冷却方式,可通过每个空气冷却器支架上的取暖孔放出的部分热风取暖。

3.2.1 定 子

定子分4瓣,机座为钢板焊接结构。定子机座在厂内组装,工地组合整圆后焊成整体。定子机座组焊、鸽尾筋装焊、铁

心压装和下线及绕组连接均在工地进行。

发电机定子采用 4 支路,星形连接,有 3 根主引出线,方位为 -Y 轴方向,相间间隔 300;有 6 根中性引出线,方位为 +Y 轴偏 -X 轴 45°,相间间隔 300。

定子采用的圈式线圈是按通用电气加拿大定子绝缘系统生产的,F 级绝缘,环氧粉云母带包扎的全固化圈式线圈。每匝线圈由多股涤纶烧结铜线绕制,用环氧粉云母带作为主绝缘包扎。线圈通过端部换位来减少绕组环流,在线圈热压前,线圈外面包有半导体防晕带,在线圈的直线部分包有低阻带,端部包有高阻带。

定子上、下端附近装有灭火水管,在确认火灾发生时,可打开灭火水管,使水喷雾系统工作。

3.2.2 转 子

转子由主轴、转子支架、磁轭和磁极组成,采用磁轭压板带离心式径向风扇的结构形式。发电机转子主轴采用三段轴结构,分下轴(主轴)、中心体、上轴(集电环轴)。转子支架为空心圆盘式结构,厂内组焊加工后,运至工地进行组装并焊成整体。磁轭叠装完成并打入斜键后,挂磁极,再整体吊入机坑并与主轴、集电环轴相连接。转子设有纵、横阻尼绕组。转子绝缘按 F 级设计。

3.2.3 下机架和上机架

下机架由推力轴承、导轴承、油冷却器等组成的中心体和 6 条合缝腿把合而成;下机架是承重机架,推力轴承由 16 块均匀布置的扇形弹性塑料瓦组成,采用弹簧簇支承。导轴承由 22

块均匀布置的扇形巴氏合金瓦组成,采用支柱螺栓支承结构。推力和导轴承共用油槽有 3 个油冷却器,均匀布置于油槽内。转子下轮环部位装有 16 只制动器,成对均匀布置在下机架的 6 条支腿上。制动器采用气回复油气分离结构,并装有回复信号装置。上机架由中心体及 8 条腿组成,以支承上盖板及刷架座等。

3.2.4 附属设备

推力轴承附近、上端轴和主轴装有轴摆度探头,以监控机组轴摆度。上、下机架及定子机座附近装有振动测量探头,以监控电机振动。下机架下方装有轴电流检测装置和一个接地电刷,以监控轴电流。发电机上端轴装有齿盘测速探头,供调速器及保护装置使用。下机架油槽壁上装有油混水信号器,以监测油冷却器有否漏水。

4 结 语

在各方共同努力下,西霞院水电站的水轮发电机组在开发研究中取得了很好的效果。

水轮机模型在主要性能方面满足并超过了合同的要求,水轮机主要部件采用不锈钢制造,过流部件表面采用抗磨涂层。

发电机电气部分采用了较好的绝缘技术,全伞式结构简化了一些部件,采用了小弹簧簇支撑的塑料瓦推力轴承。

【责任编辑 王 琦】

(上接第 31 页)

(1)模型水轮机的效率超出了保证值。模型的加权效率为 91.08%,超过保证值 91.00%。模型的峰值效率为 92.67%,高于保证值 92.30%。在额定的净水头为 11.50 m,水轮机的最大输出功率为 36.1 MW 时,水轮机模型的效率为 90.27%,高于保证值。

(2)原型水轮机的效率超出了保证值。原型样机的加权效率为 92.88%,高于保证值 92.80%。预期的原型样机峰值效率为 94.33%,高于保证值 93.90%。在额定的净水头为 11.50 m,水轮机的最大输出功率为 36.1 MW 时,预期的水轮机原型样机的效率为 92.24%,高于保证值 92.10%。

(3)在最高运行水头工况和小桨叶角度(5°、10°、15°)下,叶片进水边外缘头部背面极小范围可见到空化气泡;在低水头下从 8.00~5.83 m 范围内的压力面初生空化未能完全满足合同的要求。供货商解释:因这种空化发生在低水头运行时的叶片正压面,故它不会对叶片造成任何显著的危害。卖方保证真机叶片失重将会低于合同保证值。验收组经仔细考虑表示可以接受。

(4)模型的飞逸转速试验结果表明,在最大水头为 14.35 m 的条件下,当非协联的活动导叶开度为 60°、水轮机转轮叶片

角设定为 10°时,最大转速为 212.6 r/min(见证转速为 218.9 r/min)。超过合同规定的 180 r/min,机组将按最大飞逸转速 220 r/min 进行结构设计。

(5)各水头下 35%~100% 出力范围内的尾水管压力脉动幅值满足合同要求,但空载工况($\varphi = 5^\circ$)的压力脉动幅值较大(对应最低水头 5.83 m,尾水管压力脉动幅值达 19.87%),买方要求卖方充分重视,采取有效措施,保证真机空载运行稳定性,使机组并网顺利。

(6)模型的轴向水压推力试验表明,在净水头为 13.82 m 的条件下,当水轮机转轮叶片角设定为 10°以及非协联的活动导叶开度为 60°,在飞逸速度时,最大的轴向推力为 5 391 kN(试验台允许的水压推力为 5 380 kN)。

从试验成果可以看出,除部分工况的空化外,模型转轮性能较好地满足了合同的要求。基于验收试验的结果,模型验收试验予以通过,同意按此模型(但真机叶片将带有裙边)进行真机生产制造。

【责任编辑 王 琦】