

瀑布沟水电站水轮发电机组安装综述

何西平 吕玉忠 李传法

(中国水利水电第七工程局有限公司机电安装分局 四川 彭山 620860)

摘要 介绍瀑布沟水电站水轮发电机组的特点、安装流程和运行调试情况。重点探讨瀑布沟水电站座环加工、定子组装、转子组装、筒阀安装、机组轴线调整、机组调试等关键技术。
关键词 瀑布沟水电站 机组安装 座环 定子 转子 筒阀 轴线调整 运行调试
中图分类号 :TV734.1 文献标识码 :B 文章编号 :1006-764X(2011)S2-0001-06

瀑布沟水电站是建在大渡河上的一个具有防洪、发电等功能的特大型水电工程。工程建设单位为中国国电集团公司,设计单位为中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,监理单位为四川二滩国际工程咨询有限责任公司。该水电站共安装 6 台 600 MW 水轮发电机组,其中 6 台发电机和 2 号、4 号、6 号水轮机由东方电机股份有限公司制造,1 号、3 号、5 号水轮机由通用电气亚洲水电设备有限公司制造。

瀑布沟电站是四川电力系统中的骨干电站,在电力系统中担负调峰、调频及事故备用,在枯水期担负峰腰荷,在丰水期主要担负基荷和部分腰荷。整个水电站按“无人值班”要求设计,全部通过计算机监控系统,由集控中心统一调度运行。机组采用立轴混流式水轮机和立轴半伞式发电机,旋转方式为俯视顺时针,金属蜗壳,励磁方式采用可控硅自并励,推力轴承采用外循环水冷却,制动方式为机械制动,主要技术参数见表 1 和表 2。

1 水轮机主要结构特点

- 1.1 2 号、4 号和 6 号水轮机
- a. 水轮机为立轴混流式,带有金属蜗壳和弯肘形尾水管,在固定导叶与活动导叶之间装设圆筒阀。水轮机主轴与发电机主轴刚性直联,旋转方向为俯视顺时针。
 - b. 转轮采用分瓣结构,设计上采用上冠为埋入式螺栓连接、下环为焊接结构。转轮叶片采用 VOD 或 AOD 精炼铸造。上冠和下环为铸造。上冠设有与水轮机轴联接的法兰。
 - c. 水轮机轴为中空结构,内径满足补气的要求,采用外法兰形式。水轮机轴采用 ASTM A668 Gr. D 锻制,水轮机轴与转轮的扭矩传递采用销套结构。
 - d. 水导轴承为稀油润滑、巴氏合金的分块瓦,水导瓦采用楔子板支撑方式,便于安装和调整导轴瓦与滑转子之间的间隙。水导瓦共 20 块,水导油冷

表 1 水轮机主要技术参数

额定容量/ MW	安装高程/ m	转轮直径/ mm	额定流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	水头/m		转速/(r·min ⁻¹)			单机总 质量/t
				最大	最小	额定	额定	飞逸	
611	661.00	6964.126 ^①	435 ^①	181.7	114.3	156.7 ^①	125	260	2038 ^①
		7115 ^②	431.7 ^②			154.3 ^②			1760 ^②

注 ①东方电机股份有限公司参数;②通用电气亚洲水电设备有限公司参数。

表 2 发电机主要技术参数

额定容量/ MAV	额定功率/ MW	额定电压/ kV	额定电流/ kA	额定转速/ (r·min ⁻¹)	额定功率 因数	额定频率/ Hz	飞轮力矩/ (t·m ²)
666	600	20	19.244	125	0.9	50	140000
定子质量/ t	转子质量/ t	发电机总 质量/t	推力轴 承负载/t	定子铁芯 内径/mm	转子直径/ mm	发电机空气 间隙/mm	转、定子绕组 绝缘等级
518.7	1160	2400	2900	13180	13111	33	F

却循环方式采用外循环方式。

e. 主轴工作密封采用衡压动态高分子抗磨端面轴封结构, 主轴工作密封副采用进口的 HWW2082 高分子合成材料, 主轴密封采用圆周均布的预压小弹簧动态衡压轴封结构。工作密封采用水润滑和水冷却, 水压为 $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$, 在工作密封的下方设置检修密封, 采用压缩空气充气膨胀式橡胶密封, 密封气压为 $0.5 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 。

f. 座环按蜗壳现场进行水压试验和投运后安全承受上部机墩混凝土结构和机组重量的要求设计和制造。座环由上、下环板与固定导叶组成。上、下环板采用不小于 210 mm 厚的优质的 ASTM A516M Gr.485-Z25 抗层状撕裂型钢板焊接制成。固定导叶采用 HITTEN610mod 材料制成, 部分固定导叶出水边设置经机械加工用于对圆筒阀运动进行导向的导轨, 上环板以上的相应位置至少设有 $1/3$ 圆筒阀高度的导轨。

g. 蜗壳采用钢板焊接结构, 材料选用 HITTEN610U2 钢板制作。蜗壳在不考虑与混凝土联合受力条件下能单独承受最大内水压力(含水击压力) 2.45 MPa 和静水试验压力 3.675 MPa 。

h. 顶盖主要材料为 ASTM A516 Gr.70, 顶盖预留有强迫补气系统管道接口。

i. 底环和基础环材料为 Q235-B, 底环预留有补压缩空气的管口。

j. 导水机构设置 24 只导叶用于控制和引导水流到水轮机转轮, 导叶采用焊接性能良好的 ZG06Cr16Ni5Mo 不锈钢整体铸造。

k. 水轮机设置 2 个油压操作的直缸接力器, 额定操作油压为 6.3 MPa 。

l. 尾水管为高窄型的弯肘形尾水管, 为便于进入尾水管检查和维修转轮而不必拆卸水轮机, 设有 1 套检修平台。

m. 圆筒阀为可紧急关机的隔断阀, 安装在固定导叶和活动导叶之间, 圆筒阀关闭时在水轮机的固定导叶和活动导叶间作为止水阀; 开启时位于水轮机座环和顶盖间空腔室内, 不干扰水流流态。阀体采用优质 ASTM A516 Gr.70 mod 钢板制造, 其上、下密封处接触面 200 mm 范围内和密封底面, 分别堆焊含镍量不小于 4% , 含铬量不小于 13% 的不锈钢, 加工后上、下密封处接触面厚度不小于 10 mm , 密封底面厚度不小于 20 mm 。圆筒阀设置 6 只油压操作直缸接力器, 额定工作压力为 6.3 MPa , 同步装置采用机械同步结构。

1.2 1 号、3 号和 5 号水轮机

a. 水轮机为立轴混流式, 带有金属蜗壳和弯肘

形尾水管, 在固定导叶与活动导叶之间装设圆筒阀。水轮机主轴与发电机主轴刚性直联, 旋转方向为俯视顺时针。

b. 转轮采用斜分瓣结构, 转轮设计成上冠和下环为焊接的结构。转轮上冠、下环和叶片采用 VOD 精炼铸造。上冠设有与水轮机轴联接的法兰。

c. 水轮机轴为中空结构, 内径满足补气的要求, 采用外法兰形式。水轮机轴采用 ASTM A668 Gr.D 锻制, 主轴与转轮采用摩擦 + 联轴螺栓传递扭矩结构。

d. 水轮机导轴承是稀油润滑、巴氏合金的分块瓦, 水导轴瓦采用螺钉支撑方式, 便于安装和调整导轴瓦与滑转子之间的间隙。水导瓦共 20 块。油冷却循环采用自循环方式。

e. 主轴工作密封是从加拿大进口的碳精密封, 采用静压自调节结构, 用水润滑, 水压为 $0.2 \sim 0.5 \text{ MPa}$ 。在工作密封的下方设置检修密封, 采用压缩空气充气膨胀式橡胶密封, 密封气压为 $0.5 \sim 0.8 \text{ MPa}$ 。

f. 座环按蜗壳现场进行水压试验和投运后安全承受上部机墩混凝土结构和机组重量的要求设计和制造。座环由上、下环板与固定导叶组成。上、下环板采用优质的 ASTM A516M Gr.485 焊接制成, 环板厚度不低于 210 mm 。固定导叶采用 16Mn 实心钢板制成, 过渡板采用 HITEN610U2 钢板制成, 部分固定导叶出水边应设置经机械加工用于对圆筒阀运动进行导向的导轨, 上环板以上的相应位置至少设有 $1/3$ 圆筒阀高度的导轨。

g. 蜗壳采用钢板焊接结构, 材料选用 HITTEN610U2 钢板制作。蜗壳应在不考虑与混凝土联合受力条件下能单独承受最大内水压力(含水击压力) 2.45 MPa 和静水试验压力 3.675 MPa 。

h. 顶盖主要材料为 ASTM A36M, 顶盖预留有强迫补气系统管道接口。

i. 底环和基础环材料为 Q235-B, 底环和基础环预留有补压缩空气的管口。

j. 导水机构设置 24 只导叶用于控制和引导水流到水轮机转轮, 导叶采用焊接性能良好的 ZG06Cr16Ni5Mo 不锈钢整体铸造。

k. 水轮机设置 2 个油压操作的直缸接力器, 额定操作油压为 6.3 MPa 。

l. 尾水管采用高窄型的弯肘形尾水管, 为便于进入尾水管检查和维修转轮而不必拆卸水轮机, 设有 1 套检修平台。

m. 圆筒阀为可紧急关机的隔断阀, 安装在固定导叶和活动导叶之间, 圆筒阀关闭时在固定导叶

和活动导叶间作为止水阀,开启时位于座环和顶盖间空腔室内,不干扰水流流态。阀体采用优质 ASTM A516M Gr. 60 钢板制造,筒体厚度不小于 160 mm,其上部与密封条接触面为不锈钢,在阀体下部 30 mm 范围内为不锈钢。圆筒阀设置 6 只油压操作直缸接力器,额定工作压力为 6.3 MPa;同步装置采用电气同步结构。

2 发电机主要结构特点

- a. 发电机为立轴半伞式、由水轮机同轴驱动的三相交流同步发电机。采用密闭自循环空气冷却方式、水喷雾灭火方式。
- b. 转子上方设有上导轴承,上导瓦共 16 块;转子下方设有下导轴承和推力轴承,下导轴承油槽和推力轴承油槽分开设置。推力轴承和下导轴承布置在下机架上。下导瓦共 24 块,推力瓦共 20 块。
- c. 定子机座分 4 瓣到货,在工地进行组圆焊接,定子机座考虑足够的强度和必要的刚度,能承受定子绕组短路时产生的切向力和半数转子绕组短路时产生的单向磁拉力。定子铁芯用 90 根双鸽尾形定位筋固定于定子机座上;定子铁芯由进口优质冷轧薄硅钢片 50M270 叠成,定子上、下两段铁芯冲片采用刷胶粘接方式,全圆由 45 片组成,铁芯外径为 14 200 mm,内径 13 180 mm,总高 3 050 mm,铁芯轴向均匀设有高度为 5 mm 的通风沟 75 个,通风槽钢采用非磁性钢制成。铁芯采用穿心螺杆进行压紧,穿心螺杆采用高强度非磁性钢 40MnCr18 制成,在穿心螺杆上端采用蝶形弹簧结构,整体压紧后进行铁损试验。铁损试验结束后,进行热态压紧。其结构见图 1。

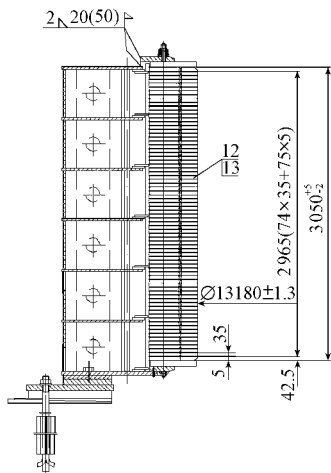


图 1 定子铁芯装配简图

- d. 转子支架为圆盘式焊接结构,中心体和分瓣扇形支臂在现场焊接为整体;转子支架中心体上端与上端轴相连,下端与发电机主轴相连,并通过凸形键传递扭矩。磁轭采用优质高强度钢板(2.5 mm

M5937-A80)冲片迭压而成,分两大段,高度为 3 310 mm。转子共有磁轭主键、加强键、中段扭矩键、上下部切向主键各 16 根。磁轭与转子支架采用热打键的连接方式,磁极由铁芯、线圈和阻尼绕组等组成,磁极铁芯采用 1.5 mm 厚的 DJL350 薄钢板冲片迭压而成,并采用鸽尾结构与磁轭相连。其结构见图 2。

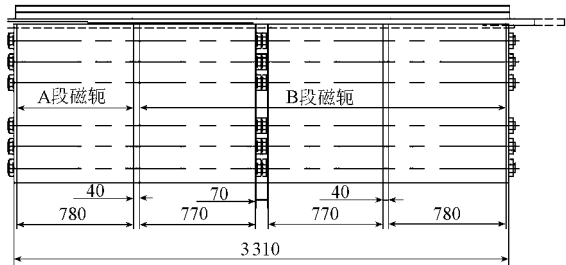


图 2 转子装配简图

- e. 推力轴承推力负荷为 2 900 t,推力轴承共 20 块弹性金属塑料瓦,采用多波纹弹性油箱支撑方式;轴承润滑油冷却采用外循环冷却方式。
- f. 主轴材料采用锻钢 A668CL. D,上端轴材料采用锻钢 20MnSi。
- g. 上架采用能将径向力转化为切向力的八卦形结构,可有效改善发电机基础的受力。
- h. 在发电机上、下导轴承和推力轴承油槽分别设置了防油雾装置,将轴承运行时产生的油雾抽出并经过油气分离。

3 机组主要安装技术

水轮发电机组安装主要流程见图 3。

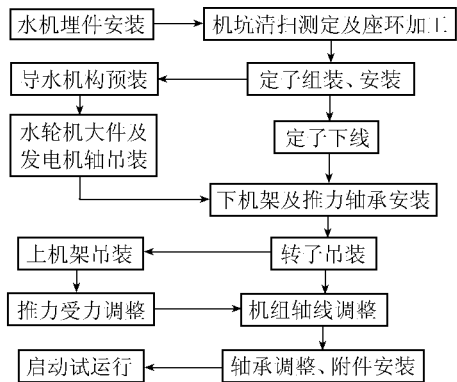


图 3 水轮发电机组主要安装流程

3.1 座环加工

- a. 座环加工设备(图 4)的安装调整精度决定着座环加工的平面度、圆度偏差,同时也对座环加工效率造成影响。因此必须精确调整机床的中心、水平度和垂直度,以保证座环加工面的精度要求。
- b. 座环加工立铣床由底部支撑(包括支座、主副梁、栏杆脚踏板等)回转机构(包括回转座、球面座等)升降机构(包括中心立柱、升降传动机等)集

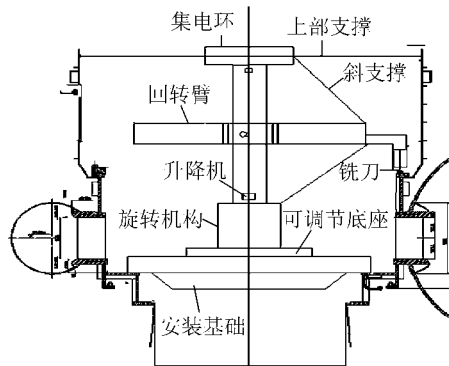


图4 座环加工设备

电环、前臂(包括滑梁、铣头等)、后臂(包括电气柜、配重块等)、顶部支撑(包括支撑座、调整座、拉杆装配)等部件组成。

c. 在座环上下法兰之间开档尺寸控制上,综合考虑了导水机构各设备实际加工尺寸、设计端面总间隙、温度变化对部件尺寸的影响、水轮机设备安装后顶盖可能产生的下沉等综合因素,计算出出现场所需加工尺寸。

d. 铣床采用逆向铣削方式,铣削平面时采用125 mm 标准8刀刃端面铣刀,切削速度120~170 mm/min,每齿进给量0.13 mm/z,最大切削深度2 mm,最大切削宽度115 mm。

e. 粗加工阶段进刀量控制在0.5~1.0 mm/次,在粗加工过程中定期复查铣床的水平及中心。当加工量剩余1 mm左右时进入精加工阶段。在精加工过程中进刀量控制在0.10 mm/次。加工余量剩余0.1~0.15 mm时,进刀量控制在0.05 mm/次。精加工过程中法兰面每加工一圈后用精密水准仪测量加工面的水平和高程,用光学合像水平复查铣床的水平。无论粗加工还是精加工,铣刀的转速控制在300~350 r/min,铣刀的行走速度(支臂旋转速度),粗加工时为150~170 mm/min,精加工时为120~150 mm/min。在操作中主轴与横臂转速调整,采用逐步加大并保证机床运行稳定的原则进行。

3.2 筒形阀安装

针对筒形阀阀体薄壁(180 mm)、尺寸大(外径为9348 mm,高度为1630 mm)、刚性较差、吊装过程中容易变形的特点,筒形阀在预装和组装过程中采用与顶盖整体吊装的方法,有效地避免了筒形阀变形;优化了筒形阀接力器提升杆垂直度调整工艺、碟簧压缩量调整工艺、同步机构调整方法,保证了筒形阀动作同步性;铝青铜导向条采用分段焊接的方法,可以释放部分焊接热应力,有利于减少焊接裂纹(图5)。

3.3 定子组装

a. 根据瀑布沟地下厂房安装间组装工位紧张

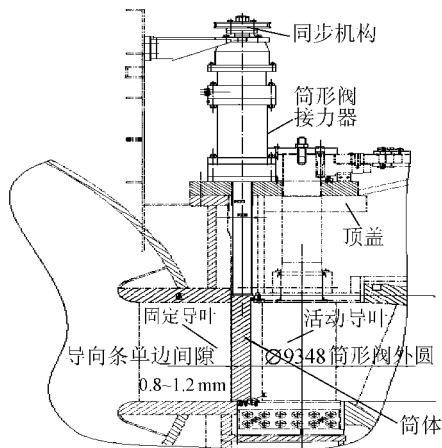


图5 筒形阀装配简图

的特点,6号、5号机定子组装在安装间进行,4号机定子组装在本机坑内进行,3号机定子安装在1号机坑内组装后吊至3号机坑内安装及下线,从而保证了发电计划如期进行。

b. 针对定子铁芯高的特点,研究制定了高定子铁芯叠装工艺,保证通风沟的有效截面积并有效地控制了定子铁芯的总高度。

c. 为减少定位筋装焊的累积误差,定位筋装焊采用9等分弦距法,提高了定位筋的安装质量。

d. 在定子叠片过程中,主要控制几点:①定子冲片按错开1/2张进行叠片。②铁芯叠片时,定子冲片应紧靠定位筋。③铁芯叠片过程中,根据实际情况,利用0.5环氧酚醛层压布板3240的无齿片,调整定子铁芯波浪度。其一般是在定子铁芯首次预压后,根据定子铁芯首次预压后铁芯波浪度以及铁芯齿部张度,在叠装后继铁芯段时,用0.5环氧酚醛层压布板3240的无齿片进行相应位置处的定子铁芯波浪度以及铁芯齿部张度调整。④每叠完一小段后,测量段高,其偏差不超过设计值的0.50 mm。堆积过程中,注意每段高度偏差的相互补偿。⑤堆积过程中要随时用整形棒整形,不允许用铁锤敲打铁芯和整形棒,每叠完一段,还要统一整形一次。⑥随着堆积高度的增加,槽样棒和槽楔槽样棒应逐渐上移,以保证定子槽形的几何尺寸。⑦各段定子铁芯的通风槽片的小工字钢,在高度方向应上下对齐,并防止通风槽片边缘突出定子铁芯槽内。

e. 定子铁芯分6次压紧,分段压紧时应注意:①每次预压前将铁芯全部整形一次。②定子铁芯首次预压时,使用上齿压板进行压紧。③每次预压过程中,应以定子铁芯圆周方向上波浪度较大的位置为起点,采用顺时针、逆时针相结合的把紧方式进行多次对称压紧。④槽样棒与槽楔槽样棒不得露出铁芯。⑤每次预压时,应用专用液压扳手,按50%,

75% ,100% 逐渐加大穿心螺杆的压紧力矩 ,使其最终的压紧力矩分别达到 $1\,600\text{ N}\cdot\text{m}$ 。每次使用穿心螺杆端部螺纹均应涂上二硫化钼 ,同时 ,严禁铁芯压紧过程中使用风动扳手。⑥在叠装过程中 ,每大段定子铁芯叠装完成后 ,在压紧状态下 ,应测量定子铁芯轭部背部高度及槽底、槽口铁芯高度尺寸和定子铁芯的半径和圆周波浪度。

3.4 转子组装

转子是发电机组结构最为复杂、连贯性强的主要部件 ,转子组装要求精度高 ,将直接影响发电机安全稳定运行。

3.4.1 转子中心体焊接

转子中心体与圆盘支架间有轴向焊缝和环向对接焊缝 ,且焊缝离中心体的距离较近 ,焊接时对中心体的形位公差影响比较大 ,焊接对推力头把合面水平、挂钩的水平、立筋的垂直度、圆度控制都是一个难点。应从几方面对焊接进行监测和控制 :①采取合理的转子支架焊接顺序。②采取减小焊接变形的措施 ,如根据母材选用合适的焊接方法和焊接材料以及焊接工艺参数 ,在各焊缝处焊接骑马板 ,以防焊接过程中焊缝收缩过大 ,对组装间隙大的焊缝 ,采用镶边堆焊 ,并采用多层多道分段退步焊接等工艺。

3.4.2 磁轭结构特点

磁轭与转子支架固定采用径向键(磁轭弹性键)、切向键、加强键布置不在同一立筋上的多种联接键固定方式。转子支架与转子磁轭固定最初选用的是三峡左岸电站的结构 ,这种结构紧量完全通过加热磁轭后在磁轭键槽与转子支架的立筋间加垫产生。由于瀑布沟水电站转子立筋较高 ,在工地组焊成整圆时 ,焊接量大 ,容易引起焊接变形。工地虽然可以通过调节键弥补焊接变形 ,但调节键本身在与立筋焊接时也会变形 ,导致磁轭弹性键与调节键的面接触变成线接触 ,接触部分屈服变形形成假紧量。另外磁轭的残余变形属于不可恢复 ,从而使实际紧量小于设计值。为解决这一问题 ,改成整体打磁轭键结构(图6) ,调节键结构与磁轭键结构 ,转子支架在现场组焊后再进行立筋加工。这一结构的优点如下 :①转子支架在工地组圆后再加工 ,可以精确保

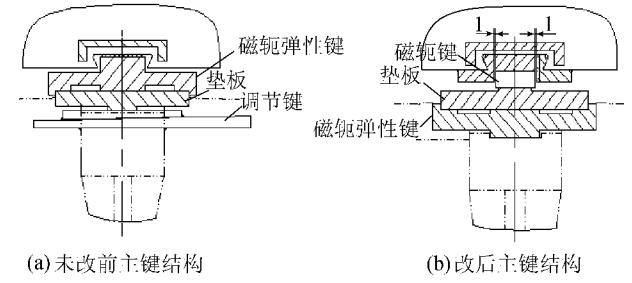


图6 调节键结构及磁轭键结构

证立筋的直线度、垂直度、至中心距离 ;②磁轭弹性键与立筋加工面直接接触 ,接触面积大 ;③可以通过传统冷打键 ,在磁轭热打键前冷打将磁轭调圆 ,消除磁轭部分残余变形。

3.4.3 磁轭定位

根据厂家提供的安装工艺说明书 ,磁轭采用叠片导键和定位销起周向和径向定位作用。而转子支架设有16根立筋 ,由于临时叠片键直径偏大 ,而磁轭冲片“T”形槽尺寸偏小 ,若在每个立筋位置布置一根叠片导键 ,这样磁轭冲片上的键槽就无法直接嵌入叠片导键上 ,必须从叠片导键上部向下穿入才能进行叠片 ,这样所用直线工期比较长。为解决这一定位问题 ,有以下3种解决方案 :①将部分叠片导键后面的垫板取掉 ,让该导键仅起到周向定位 ,径向则靠临时叠片销钉定位 ;②将叠片导键两边各加工10mm ,让叠片导键仅起到径向定位作用 ;③只均匀布置8根叠片导键 ,调整叠片导键起周向和径向定位作用 ,并加工临时定位销钉做辅助定位。

根据现场实际情况 ,决定采取第3种方案 ,但转子磁轭每层整周布置12张冲片 ,而叠片导键只有8根 ,这样每张冲片位置不可能都有叠片导键 ,而厂家到货的销钉根本起不到定位作用。根据现场实际情况和以往安装经验 ,采取了以下工艺 :每张冲片利用4根临时圆柱销(圆柱销尺寸根据磁轭拉紧螺栓孔加工)定位 ,叠片至530mm高时 ,调整所叠冲片的外径、圆度满足要求后 ,用专用圆拉刀逐一拉铣螺孔 ,换装永久螺杆用以定位 ,换装时注意要跳跃进行。实践证明 ,这一定位方式是行之有效的。

3.4.4 下部切向键安装

根据厂家提供的安装说明书 ,下部切向键径向垂直度在 0.05 mm/m ,且切向键和键槽紧靠 ,由于现场空间受限 ,无法直接测量切向键径向垂直度。为防止焊接变形导致磁轭圆度调整困难 ,采取了以下工艺 :在切向键上部预留 0.20 mm 左右的间隙 ,并且焊接方向由外向内焊接 ,有效地保证下部切向键安装质量及叠片顺利进行。

3.5 机组轴线调整

瀑布沟水电站机组轴线由上端轴、转子中心体、发电机轴、水轮机轴4部分组成 ,发电机主轴与转子中心体采用销钉螺栓加径向键联接形式 ,发电机轴与水轮机轴采取销钉螺栓联接形式 ,该联接形式若出现轴系超差则现场处理极为困难 ,针对以上特点 ,采取推上端轴、旋转推力头、加垫等方式纠正轴系超差 ,以保证机组轴线同心。

3.6 机组整体调试

瀑布沟水电站机组在超低水头下(实际运行水头仅 113 m ,低于设计最低水头 114.3 m)完成了机组启动试运行 ,主辅机设备、过流部件均一切正常。

根据调试过程中的运行工况对各部导瓦间隙和冷却系统进行了调整 ,保证了各部轴承瓦温、发电机温升控制在较优的范围内运行。

4 机组运行工况

瀑布沟水电站 6 号机于 2009 年 12 月 13 日投产发电 ,5 号机于 2009 年 12 月 23 日投产发电 ,4 号机于 2010 年 3 月 31 日投产发电 ,3 号机于 2010 年 6 月 29 日投产发电 ,在运行水头仅有 113 m 左右的情况下 ,机组运行稳定 ,振动、摆度值均优于国家标准要求 ,

表 3 6 号机组带负荷各部位振动摆度和压力脉动

有功功率/MW	上导/ μm		下导/ μm		水导/ μm		定子 $X/\mu\text{m}$	上机架/ μm		下机架/ μm			顶盖/ μm		蜗壳脉动/ kPa	尾水脉动/ kPa	尾水真空/ kPa
	X	Y	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y	Z	X	Y			
27	109	126	243	244	229	117	19	38	33	22	24	46	17	54	35	29	12
57	103	114	195	202	213	97	18	33	29	19	20	34	18	73	23	29	12
85	99	115	186	195	207	79	19	29	28	18	20	36	15	58	23	33	16
118	99	116	180	186	189	77	18	26	24	16	18	35	13	52	20	26	18
146	98	113	167	169	170	69	18	23	21	16	16	36	12	38	25	26	23
163	111	126	187	192	173	68	19	29	25	19	18	42	15	35	29	35	24
184	142	164	261	263	170	70	18	37	34	22	21	49	19	31	40	78	27
208	135	153	216	223	132	68	17	33	29	20	18	46	19	18	29	69	26
237	134	152	200	208	109	71	18	32	30	18	17	40	14	11	30	60	26
257	128	144	179	181	122	68	17	28	26	16	18	39	15	17	27	43	25
278	119	137	157	165	121	65	17	26	25	15	15	34	12	13	21	26	18
308	93	110	134	132	125	60	18	18	15	13	13	33	10	12	30	20	14
337	94	110	125	137	139	61	17	15	13	12	11	12	10	13	15	9	4
369	94	112	132	135	122	63	16	15	14	12	11	11	10	16	15	8	9
397	93	111	143	130	123	62	16	15	15	12	11	16	9	13	16	2	5

表 4 6 号机组甩负荷过程参数

甩负荷/MW	上导 X 向摆度/ μm			上导 Y 向摆度/ μm			下导 X 向摆度/ μm		
	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后
200	129	252	88	144	298	106	249	308	239
400	97	281	80	108	339	96	153	368	238
甩负荷/MW	下导 Y 向摆度/ μm			水导 X 向摆度/ μm			水导 Y 向摆度/ μm		
	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后
200	259	286	243	122	182	186	69	135	82
400	148	317	248	124	267	159	59	130	75
甩负荷/MW	上机架水平 X 向振动/ μm			上机架水平 Y 向振动/ μm			下机架水平 X 向振动/ μm		
	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后
200	35	96	33	33	74	31	20	45	24
400	19	95	36	17	61	33	13	49	24
甩负荷/MW	下机架水平 Y 向振动/ μm			下机架垂直 X 向振动/ μm			顶盖垂直振动/ μm		
	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后
200	20	93	25	46	221	43	23	71	55
400	12	113	24	16	205	41	14	66	57
甩负荷/MW	顶盖水平 Y 向振动/ μm			定子水平 X 向振动/ μm			尾水管真空度/kPa		
	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后	甩前	甩中	甩后
200	18	100	19	17	36	20	89	20	87
400	9	80	18	16	75	18	64	- 13	85
甩负荷/MW	蜗壳压力/kPa			转速上升率/%			蜗壳水压上升率/%		
	甩前	甩中	甩后						
200	1 197	1 646	1 204	7.1			37.5		
400	1 173	1 713	1 198	25.7			46.0		

(下转第 8 页)

瀑布沟水电站 6 号机组推力轴承受力调整时 , 由于上机架还未吊入机坑 , 不具备抱 2 部瓦强迫镜板水平调整受力的条件 , 因此采用的是上述第 1 种状态 , 单独抱下导瓦进行调整。单独抱下导瓦 , 对于弹性油箱式推力轴承来说 , 转子每次落到镜板上不一定是水平状态 , 因此决定像刚性受力调整时那样以 4 块主受力瓦为准进行调整 , 在调整过程中检测 4 块主受力瓦压缩值是否差别很大 , 并根据镜板水平做出相应的调整 , 在调整完毕后再次起落转子 , 检查数据是否一致。6 号机组受力调整仅用了 6 次就把各项数据调整到厂家要求的范围内 , 内外侧的百分表至支柱螺栓中心处的距离分别为 255 mm 和 550 mm , 根据式 (1) 计算得的数据如表 1 所示。

表 1 6 号机组支柱螺栓中心处压缩值 mm

瓦编号	$h_{内}$	$h_{外}$	h	瓦编号	$h_{内}$	$h_{外}$	h
1	0.63	0.92	0.379	11	0.66	0.98	0.384
2	0.52	0.67	0.390	12	0.64	0.91	0.407
3	0.62	0.82	0.447	13	0.57	0.77	0.397
4	0.65	0.94	0.399	14	0.61	0.82	0.429
5	0.61	0.85	0.403	15	0.54	0.72	0.384
6	0.64	0.91	0.407	16	0.58	0.82	0.373
7	0.67	1.00	0.385	17	0.61	0.90	0.359
8	0.61	0.90	0.359	18	0.61	0.84	0.411
9	0.65	0.85	0.384	19	0.61	0.82	0.429
10	0.66	0.98	0.384	20	0.60	0.82	0.410

由于首台机组采用的是在自由状态下调整受力 , 因此 5 号机组推力轴承受力调整开始时也是采用在自由状态下调整受力 , 经过 7 次调整后 , 支柱螺栓中心处压缩值最大与最小值的差值为 0.09 mm , 镜板水平度最大为 0.08 mm/m , 远大于设计要求。在调整过程中 , 发现 4 块主受力瓦支柱螺栓压缩值相差很大 , 后来经过多次调整都未能达到要求 , 前后共经过 3 d。

总结当时调整的情况和以后机组轴线调整的情况 , 认为造成这一现象的原因如下 : 受力调整架表用的测杆个别比较单薄 , 百分表架设不够规范 , 个别百分表不灵活 , 轴系存在折线 , 由于是弹性油箱结构 , 单独抱下导瓦 , 在风闸顶落过程中转子落到镜板上不一定是水平状态 , 发电机大轴位移较大 , 再加上水轮机止漏环间隙比较小 , 单边位移比 6 号机组小 1 mm , 致使在调整过程中转轮和基础环止漏环接触 , 进而使镜板水平度偏大 , 是造成这一现象的主要原因。

后来改成强迫镜板水平状态下调整受力 , 经起落 3 次调整后 , 受力数据见表 2。

当时受“ 受力好 , 镜板水平就好 ” 这种思想误导 , 后来发现即使是在强迫镜板水平的状态下镜板也不水平 , 在抱瓦状态下受力数据符合设计要求 , 但松开瓦后受力压缩数据就不一定在 0.10 mm。后来采取

强迫状态调整受力 , 调整 3 次后压缩值就达到了设计要求 , 松开瓦检查镜板水平度在 0.02 mm/m 以内 , 内、外侧百分表至支柱螺栓中心处的距离分别为 280 mm 和 510 mm , 换算后各推力瓦处的弹性油箱压缩值最大与最小值之差为 0.058 mm , 远小于设计要求的 0.10 mm。调整后的数据见表 2。

表 2 经起落 3 次调整后的结果

瓦编号	$h_{内}$	$h_{外}$	h	瓦编号	$h_{内}$	$h_{外}$	h
1	0.65	0.90	0.345	11	0.59	0.82	0.309
2	0.66	0.90	0.367	12	0.59	0.80	0.334
3	0.59	0.81	0.322	13	0.58	0.77	0.348
4	0.62	0.86	0.327	14	0.57	0.78	0.314
5	0.63	0.88	0.325	15	0.55	0.73	0.330
6	0.60	0.83	0.319	16	0.57	0.78	0.314
7	0.65	0.89	0.357	17	0.64	0.89	0.335
8	0.68	0.97	0.326	18	0.64	0.88	0.347
9	0.58	0.80	0.312	19	0.58	0.79	0.324
10	0.56	0.76	0.316	20	0.64	0.91	0.311

由上述结果可知 , 在自由状态受力调整受外界干扰因素的影响较大 , 且调整时间和精度都不如强迫镜板水平状态 , 但这一切都是在保证镜板水平的前提条件下进行的。

3 结 语

电站的机组不一定都具备抱 2 部瓦的条件 , 当采用自由状态下进行受力调整 , 一定要减少外界因素的干扰 , 对于能抱 2 部瓦调整受力的机组 , 尤其是小止漏环间隙再加上轴系折线比较大 , 最好采用强迫镜板水平的抱瓦方式调整 , 这样不仅能保证调整精度 , 并且所用工期较短、精度高 , 可避免不必要的重复调整。

(收稿日期 2011-07-10 编辑 : 高建群)

(上接第 6 页) 从目前运行状况分析 , 能够满足机组在额定水头下带额定负荷的需要。以 6 号机为例 , 机组带负荷各部位振动摆度和压力脉动实测数据见表 3 , 机组甩负荷过程实测数据见表 4。

5 结 语

瀑布沟水电站 600 MW 水轮发电机组的安装 , 在面临设备到货滞后、工期紧张等不利情况 , 通过与业主、设计单位、制造厂家、监理及其他单位的通力协作 , 通过精细化的施工管理和高质量的施工 , 实现了 2009 年年底“ 双投 ” , 2010 年 4 号机、3 号机如期发电的节点目标。机组运行安全稳定 , 创造了巨大的经济效益和社会效益 , 为后续同类型机组设计、安装取得了宝贵的经验。

(收稿日期 2011-07-10 编辑 : 马敏峰)