

带泵板结构顶盖取水技术在巴拉水电站的应用

李前, 三郎兵

(四川足木足河流域水电开发有限公司, 四川成都 610041)

摘要: 顶盖取水技术是将顶盖止漏环与转轮止漏环间不作功的泄漏水引出作为技术供水的水源, 将泄漏水变废为宝。通过顶盖取水技术得到的机组技术供水, 水质较好, 可靠性高, 结合巴拉水电站在确定水推力不大于 660 t 的前提下, 通过流体动力学 CFD 数值模拟技术和解析算法等, 研究确定电站顶盖取水结构方案, 以提高水轮发电机组技术供水的稳定性及经济性。

关键词: 顶盖取水; 结构选择; 水轮机设计

中图分类号: [TM622]; TH3; TK733+.1

文献标志码: B

文章编号: 1001-2184(2023)05-0112-04

Application of Water Intake Technology Using Top Cover with Pump Plate Structure in Bala Hydropower Station

LI Qian, SAN Langpang

(Sichuan Zumuzu River Basin Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610041)

Abstract: The top cover water intake technology is to extract the non-working leakage water between the top cover leakage ring and the runner leakage ring as a source of technical water supply, turning the leakage water into treasure. The technical water supply of the unit obtained through the top cover water intake technology is in good quality and high reliability. Based on the premise that the hydraulic thrust of Bala Hydropower Station is determined not to be greater than 660t, the top cover water intake structure scheme is studied and determined through the fluid dynamics CFD numerical simulation and analytical algorithms, and the stability and economy of technical water supply of the turbine are improved.

Key words: Top cover water intake; Structure selection; Turbine design

0 引言

混流式水轮机顶盖取水作为水电站技术供水的方式正被逐步推广应用。顶盖取水是将顶盖止漏环与转轮止漏环间不做功的泄露水作为技术供水的水源, 具有节能、清洁环保、安全可靠的特点。目前技术条件下的水轮机顶盖取水结构有带泵板和不带泵板两类, 其结构设计会直接影响顶盖取水效果和机组安全运行^[1]。带泵板和不带泵板两种结构均有其优缺点^[2], 通过设计过程中的计算对比, 将决定是否满足水电站顶盖取水应用要求的结果。

1 工程概况

巴拉水电站位于四川省阿坝藏族羌族自治州马尔康县日部乡境内, 系大渡河干流水电规划“3

库 22 级”中的主源一脚木足河河段自上而下的第 2 梯级水电站, 主电站地下主厂房装有 3 台单机额定功率 240 MW 的混流式水轮发电机组, 总装机容量 746 MW (含生态机组装机 26 MW), 多年平均发电量 25.528 亿 kW·h (单独), 额定水头 217.0 m, 具有日调节能力。电站于 2020 年 12 月 29 日正式开工建设。

2 顶盖取水结构选择

电站通过招标已确定制造厂为东方电气集团东方电机厂有限公司, 基于巴拉水电站水轮机设计参数水头、转速、布置等综合情况, 已明确机组临界转速为 600.92 r/min, 水轮机轴向水推力^[3]不大于 660 t (不含转动部分重量)。为使将来机组性能优良、运行安全稳定更有保障, 通过流体动力学 CFD 数值模拟技术^[4]探究带泵板的顶盖

收稿日期: 2023-08-20

取水和不带泵板顶盖取水两种结构方式,最后确定顶盖取水为合理结构,能增加技术供水稳定性及经济性。

3 水轮机设计

巴拉水电站水轮机为立轴混流式,带有金属蜗壳和弯肘形尾水管,在水轮机固定导叶与活动导叶之间装设筒形阀,筒形阀采用全数字集成式电液控制系统。水轮机主轴与发电机主轴刚性直联,水轮机旋转方向为俯视顺时针,其基本参数见表1:

表1 巴拉水电站水轮机基本参数

名称	参数
旋转方向	俯视顺时针
最大净水头 /m	235.5
最小净水头 /m	214.3
额定水头 /m	217.0
水轮机额定出力 /MW	246.2
额定转速 /r·min ⁻¹	250.00
最大飞逸转速 /r·min ⁻¹	≤465.00
机组临界转速 /r·min ⁻¹	600.92
轴向水推力 /t	≤660
水轮机安装高程 (导水机构中心线)	WL2 674.5 m
吸出高度 /m	-11
水轮机型号	HLD1046B-LJ-395
活动导叶个数	24
导叶接力器个数	2
筒形阀接力器个数	6
筒形阀同步方式	全数字集成式电液控制系统
额定操作油压 /MPa	6.3

3.1 转轮

转轮过流部分的型线和尺寸与经过验收的模型转轮相似,过流表面光滑,呈流线型,无裂纹、凹凸不平等缺陷,型线偏差不大于 IEC60193 的规定。转轮叶片 17 个,全部采用抗空蚀、抗磨蚀和具有良好焊接性能的低碳优质不锈钢材料 ZG04Cr13Ni5Mo 制造,转轮泄水锥采用与上冠相同的材料制造,和上冠做成一体,在结构设计上有足够的刚度,并有利于大轴中心孔补气和减少尾水压力脉动。转轮上冠设有泄压孔或平压管路等泄水装置,以减少顶盖的水压力和转轮向下的

水推力。

3.2 主轴

机组采用二根轴结构,即水轮机轴和发电机轴。水轮机主轴上端法兰与发电机轴下端法兰直接连接,分界法兰面高程暂定为 2 679.6 m。水轮机主轴采用 20SiMn 低合金整锻,带轴领两端均为外法兰结构。主轴采用中空结构、水轮机轴与发电机轴采用销钉螺栓联接并传递扭矩。主轴与转轮采用螺栓连接,摩擦传递扭矩结构。两端法兰采用模板加工,保证机组的互换性。

3.3 顶盖

顶盖支撑水轮机导轴承、水轮机密封、筒形阀和筒形阀操作机构。顶盖设计成能方便地装入和拆卸水轮机部件,并且可利用主厂房起重机整体吊入或吊出水轮机坑。顶盖采用钢板焊接结构,采用 Q345B 钢板焊接而成。顶盖除了设有自流排水管外,另外还提供了两台潜水泵,一台主用,一台备用。顶盖过流面设有抗磨板。抗磨板材料为 04Cr13Ni5Mo 不锈钢板,采用塞焊固定在顶盖本体上。在对应导叶全关位置密合处设有端面密封装置,密封条的材料为铸铝青铜 ZCuAl10Fe3 加橡胶的结构。顶盖上设有梳齿式固定止漏环,材料为 06Cr19Ni10,其硬度比转轮硬度低 HB50 以上。顶盖上还设有顶盖泄压管。顶盖的设计充分考虑设置对筒形阀后的影响,并保证整体顶盖具有足够的强度和纵、径向刚度,能安全可靠地承受最大水压力(包括水锤压力)、径向推力、最大水压脉动和所有其它作用力,包括导水机构、导轴承、主轴密封、筒形阀及操作机构等部件的支撑力,并不产生过大的振动力和变形。顶盖上装有用于导叶轴的自润滑轴承、密封和导叶轴承孔。筒形阀上部密封设置在顶盖上。

4 顶盖结构方案

4.1 研究理论

足木足公司联合制造厂家东方电机厂,结合流体动力学 CFD 数值模拟技术和解析法计算方法,并结合电站实际运行验证等方法进行研究,取得了一系列顶盖取水技术的理论研究成果:

(1) 顶盖取水技术具有一定的适用性,特定机组是否适合采用顶盖取水与其水头、转速和设

备布置位置有密切关系；

(2) 顶盖取水的流量和压力可以采用解析法进行计算,精度基本满足巴拉工程应用要求；

(3) 顶盖取水技术与增压泵板结构和主轴密封结构等均有关系；

(4) 通过增压泵板增压能力的解析法计算方法,得到满足工程应用要求的结果。

4.2 计算方案

通过对巴拉水轮机顶盖取水方式进行深入的分析计算,对转轮上腔设置泵板与不设置泵板进行了详细对比计算。结果如下：

在转轮上冠设置合适的带泵板结构(见图 1),在顶盖内设置 8 根 DN100 取水管,机坑内顶盖取水管即原顶盖平压管。机坑外部设置技术供水总管与顶盖平压总管,通过在机墩外设置三通及阀门等可实现技术供水功能或顶盖平压排水功能转换。

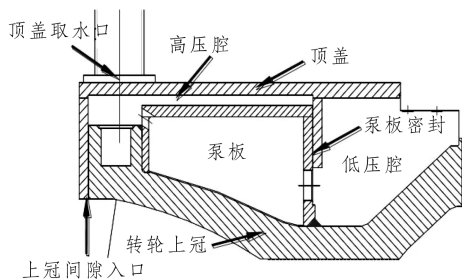


图 1 带泵板结构

4.3 水推力分析

4.3.1 顶盖取水采用泵板结构与不采用泵板结构取水比较—CFD 算法^[4-5]

上冠上腔的任意点 r 处的压力 P 计算公式如下：

$$P = P_0 + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{k_0 \pi n}{30} \right)^2 (r^2 - r_0^2) \quad (1)$$

式中 P_0 和 r_0 为已知点的压力和半径； n 为机组额定转速； ρ 为水的密度；式中的 k_0 值,圆周光滑的面取 0.5,泵板结构取 1。

根据压力的计算式,可以得到上冠上腔(圆环面)受到的水推力 F 计算公式：

$$F = \pi \left\{ \left[P_0 - \frac{\rho}{2} \left(\frac{k_0 \pi n r_0}{30} \right)^2 \right] (r_2^2 - r_1^2) + \rho \left(\frac{k_0 \pi n}{30} \right)^2 \frac{r_2^4 - r_1^4}{4} \right\} \quad (2)$$

式中 r_1 和 r_2 分别为计算圆环面的内外径；其中 r_1 为泵板出水口半径,巴拉值为 1.54 m； r_2 为泵板吸水口半径,巴拉值为 1.19 m。 P_0 、 r_0 、 π 、 n 、 ρ 、 k_0 的取值仍按前述。

在相同的压力梯度标尺上标示的带泵板顶盖取水和不带泵板顶盖取水的差异分别见图 2、3。泵板外侧(同时为顶盖取水管口)处的压力和半径分别为 P_0 和 r_0 。顶盖取水无论是否带泵板,其 P_0 值基本相同。正是 k_0 值在泵板内和外取值的差异,泵板结构使上冠上腔产生了更大的压力梯度,从而达到降低上冠上腔平均压力最终达到尽量减小轴向水推力增加的目的。

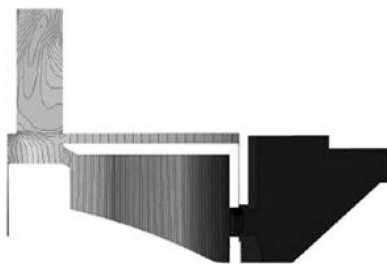


图 2 带泵板的顶盖取水



图 3 不带泵板顶盖取水

经 CFD 算法初步计算,顶盖取水带泵板结构比不带泵板可增加轴向水推力约 48 t(水轮机总水推力不大于 660 t),在满足巴拉水电站实际需求前提下,技术供水稳定性和经济性却大幅度提高。

4.3.2 顶盖取水带泵板结构与不带泵板结构取水比较—解析算法

巴拉水电站顶盖取水系统解析计算结果见表 2；根据解析法计算结果,采用有泵板取水方案与无泵板取水方案相比,水推力将增加约 48 t(水轮机总水推力不大于 660 t)。且泵板功耗与额定功率相比,增加 117.6 kW,占比仅 0.044 1%,几乎可忽略不计,但技术供水稳定性和经济性却大

表2 巴拉水电站顶盖取水系统解析算法计算结果

说明	代号	数据	单位	备注	
机组参数	—	—	—	详见表1	
取水初始参数	导叶出口流速	—	27.30	m/s	—
	小开度下导叶后压力折减系数	—	0.90	—	—
	上冠止漏环进口静压	—	174.60	mH ₂ O	按水头减动压计算
	上冠止漏环直径	D	3.46	m	—
泵板及止漏环结构参数	止漏环间隙值	δ	0.0016	m	—
	沿泄露方向的密封长度	L	0.216	m	—
	泵板密封间隙值	δ_1	0.0035	m	—
	沿泄露方向的泵板密封长度	L1	0.288	m	—
	泵板内液体旋转角速度	ω	26.18	rad/s	—
	泵板出水口 R1 处的压力	P1	0.341	MPa	—
	泵板吸水口 R2 处的压力	P2	0.014	MPa	—
	泵板增压能力	ΔP	0.327	MPa	$\Delta P = P1 - P2$
	泵板内径至平压管处对应轴向推力	F1	113.20	t	—
	泵板内径至主轴密封对应轴向推力	F2	-5.10	t	—
泵板增压能力结果	取水管/平压管内流速	V	1.75	m/s	—
	泵板密封两端压差	—	245584	Pa	—
	泵板密封泄漏量/泵水流量	Q'	0.36	m ³ /s	—
	泵板密封泄漏量/泵水流量	Q'	1293.3	m ³ /h	—
	无泵板不取水上冠上腔总轴向推力	F'	60.1	t	主轴密封至平压管处
	泵板取水结构上冠腔总轴向推力	ΣF	108.30	t	带泵板取水情况
	泵板取水相对直接平压轴向推力增加值	ΔF	48.20	t	$\Delta F = \Sigma F - F'$
	泵板功耗	—	117.6	kW	—
泵板功耗占比	—	0.0441%	—	与额定功率相比	

幅度提高。

5 结 语

基于电站水轮机设计参数水头、转速、厂房布置、取水状态等综合情况,在水轮机轴向水推力限定的情况下,通过 CFD 算法和解析算法两种方式均表明:水轮机采用泵板结构取水比不采用泵板结构的取水方案,水推力虽略微有所增加,增加部分占水轮机总水推力比重却较小。但是,考虑到对电站技术供水稳定性及经济性等好处,且对水轮机无不利影响,因此,带泵板结构的顶盖取水方案在水推力确定的条件下,具有广泛的推广价值。

参考文献:

[1] 杨庭豪. 混流式水轮机顶盖取水及转轮上冠泵板工作特性研究[D]. 华中科技大学,2023.

- [2] 邓金杰,文树洁,吴钢. 水电站水轮机顶盖取水泵板结构分析[J]. 东方电气评论,2018,(32):44-49.
- [3] 廖林生. 水轮机轴向水推力的研究[J]. 东方电机,1992,(4):58-63.
- [4] 赵玺,赖喜德,苟秋琴,等. 混流式水轮机轴向水推力公式研究[A]. 中国农村水利水电,2015,(5):172-175.
- [5] 杨庭豪,吴钢,明乐乐,等. 混流式水轮机顶盖取水结构的性能对比与分析[A]. 华中科技大学,2015年中国工程热物理学会流体机械学术年会,2015.

作者简介:

李 前(1989-),男,四川仁寿人,工程师,学士,从事水电站机电安装管理、水电站运行维护等工作;

三郎兵(1993-),男,四川马尔康人,助理工程师,大专,从事水电站机电安装管理、水电站运行维护等工作。

(责任编辑:卓政昌)