

TB 水电工程水轮机宽负荷范围运行稳定关键技术研究

陈源¹, 兰东宏², 李立¹, 杨征勇¹, 马增军³

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南长沙 410014; 2. 华能澜沧江水电股份有限公司托巴水电工程建设管理局, 云南迪庆 674608; 3. 哈尔滨电机厂有限责任公司, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 针对中低水头段混流式水轮机的运行稳定性问题, 提出了中低水头段混流式水轮机水力稳定性优化方向及措施, 以及降低部分负荷压力脉动的工程方法, 旨在为相近水头的电站设计提供参考, 以提高水轮机的运行效率和安全性。

关键词: 混流式水轮机; 水力稳定性; 转轮; 压力脉动; TB 水电工程

中图分类号: TK72

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2024)S1-0127-04

Research on key technologies for wide land operation range stability of hydraulic turbine in TB Hydropower Project//CHEN Yuan¹, LAN Donghong², LI Li¹, YANG Zhengyong¹, MA Zengjun³ (1. POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 2. Tuoba Hydroelectric Engineering Construction Management Bureau of Huaneng Lancang River Hydropower Inc., Diqing 674608, China; 3. Harbin Motor Factory Co., Ltd., Harbin 150040, China)

Abstract: Aiming at the operation stability of Francis turbines at low and medium head, the paper presents the optimization directions and measures for the hydraulic stability of turbines at low and medium head, as well as engineering methods to reduce the pressure pulsation at partial load, in order to provide references for the design of power with similar head, so as to improve the operation efficiency and safety of turbines.

Key words: Francis turbine; hydraulic stability; wheel; pressure pulsation; TB Hydropower Project

TB 水电工程是澜沧江干流上游河段规划的第四个梯级, 其上游为里底水电站, 下游与黄登水电站相衔接, 电站共安装 4 台单机容量 350 MW 的混流式水轮发电机组, 电站总装机容量 1 400 MW。电站枢纽工程主要包括 3 个部分: 混凝土重力坝、泄洪建筑物、右岸地下输水发电系统。引水系统建筑物包括进水口、引水隧洞和压力钢管等。尾水系统建筑物包括尾水洞及尾水出口建筑物等。4 条尾水隧洞平行布置。电站水头运行范围为 96.8~121.3 m, 为保证 TB 水电工程应对电网波动过程中具有出色的稳定性和可靠性, 同时满足电站运行调节的灵活性适应需求, 保障水轮发电机组宽负荷稳定安全运行, 要求水轮机在运行中不仅具备宽变幅水头的适应能力和高效率的运行区域, 而且在各水头、负荷组合工况下都具有良好的稳定性。

1 水力稳定性的关键参数论证

1.1 额定水头选择

额定水头表示水轮机发额定出力所需的最小水

头, 额定水头的选取将直接影响水轮机转轮直径、加权平均效率、低水头下的最大出力和机组运行的稳定性^[1]。额定水头选取的焦点主要体现在水轮机高水头运行稳定性和发电量以及低水头发电受阻容量两方面因素, 尤其对于宽水头范围变幅的水电站, 低水头发电受阻容量和高水头水轮机的运行稳定性是无法避免的问题^[2]。根据部分国内外的经验公式和电站参数分析, 同时结合国内外大型水轮机运行情况统计分析结果^[1], 考虑到在尽量减少机组出力受阻的同时满足机组稳定运行的要求, 根据中国水利水电科学研究院对国内外已投运的转轮直径超过 5 m 的大型水轮机运行稳定性的统计成果, 最大水头与额定水头之比不大于 1.15 的水电站运行稳定较好, TB 水电工程水头变幅不大, 经过额定水头优化比选, $H_r = 108.0$ m, 最大水头与额定水头比为 1.123, 处于常规混流式水轮机的正常工作范围, 满足机组运行稳定性要求。

1.2 比转速选择

随着科学技术的创新与进步, 新材料和新工艺

的应用,设计和制造水平的不断提高,水轮机比转速也呈现逐步提高的发展趋势。提高水轮机比转速,可以减小机组尺寸,降低机组造价,提高经济效益,但是会影响机组效率水平、空化性能和运行稳定性^[2-3]。因此,水轮机比转速是水轮机参数的重要指标之一。TB 水电工程基本参数为:最大水头 $H_{\max}=121.3\text{ m}$ 、额定水头 $H_r=108\text{ m}$ 、最小水头 $H_{\min}=96.8\text{ m}$ 、单机额定容量 $P_r=350\text{ MW}$ 、额定转速 $n_r=125\text{ r/min}$ 。根据大型混流式水轮机比转速-额定水头的关系曲线,TB 水电工程额定水头对应的比转速约为 $214\text{ m}\cdot\text{kW}$,在统计曲线中处于适中参数水平位置。

1.3 吸出高度选择

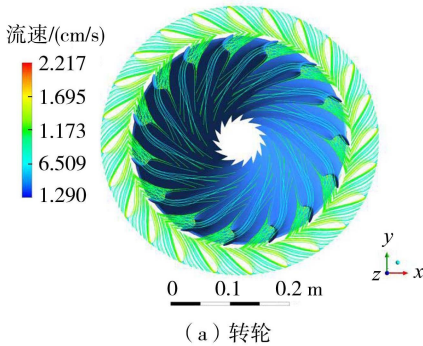
空化系数 σ 是衡量水轮机空蚀性能的重要指标,其取值的大小会对水轮机的安装高程、运行稳定性和使用寿命产生直接的影响。当水轮机比转速为 $214\text{ m}\cdot\text{kW}$ 时,电站空化系数在 $0.135\sim0.197$ 之间,选取电站空化系数为 0.17 ,对应水轮机吸出高度为 -10.3 m 。

1.4 原型水轮机技术参数

哈尔滨电机有限公司负责 TB 水电工程的 1~4 号水轮机设计、制造及供货,原型水轮机主要技术参数如下:转轮直径 $6\,200\text{ mm}$,额定水头 108 m ,额定流量 $364.8\text{ m}^3/\text{s}$,加权效率 93.58% ,最优效率 95.03% ,额定转速 125 r/min ,飞逸转速 250 r/min ,吸出高度 -10.3 m ,比转速 $214\text{ m}\cdot\text{kW}$,比速系数 $2\,227$ 。

2 转轮的水力稳定性研究

为适应风-光-水互补清洁能源基地的快速发展,水电站建设越来越重视水轮机的运行稳定性问题。为满足 TB 水电工程水轮机组运行范围比常规电站宽广、低水头压力脉动低的要求,根据 TB 水电工程运行特点,基于 CFD 数值模拟分析以及模型试验等方法^[1,4],开展了保证低水头段机组运行稳定性的水力设计关键技术研究(图 1)。除了水力流道的优化设计外,研究重点是模型转轮的优化设计。



一般认为,影响水轮机稳定性的主要因素有:①导叶与转轮叶片的动静干涉问题;②尾水管涡带;③叶片进出水边附近的脱流(或许也可称作叶道涡);④卡门涡;⑤转轮空化性能。

2.1 转轮叶片数选择

根据 TB 水电工程水轮机的运行特点及其运行稳定性要求高、加权平均效率高、超宽运行范围等特点,寻求最佳解决方案,如最优的叶片数配比,合适的导叶高度以及导叶分度圆直径等关键参数。在获得高效率、高稳定性的同时,避免因动静干涉而引起的水力激振等问题,转轮叶片数选用成熟的 15 叶片与导叶数 24 相匹配,增加叶栅稠密度改善流态的同时,提高了转轮刚强度,通过先进的技术研发手段,降低水轮机整体的压力脉动,消除运行范围内部分负荷的压力脉动。

2.2 转轮叶片型式选择

针对 TB 水电工程宽负荷范围运行特点,采用双反 C 型全负荷运行叶型,优化叶片表面压力分布,进一步降低叶片的应力集中,使叶道涡初生线和发展线更进一步向小负荷区移动,在水力设计时对转轮上冠和叶片头部型线进行优化,使叶道涡初生线和发展线更进一步向小负荷区移动,同时确保叶片进水边正、背面的脱流区远离保证的运行范围。额定水头额定出力工况时,允许的最大应力为 67.07 MPa ;最大水头额定出力工况,允许的最大应力为 74.26 MPa ;叶片应力水平平均远低于合同标准 110 MPa ,其水力性能和刚强度性能均得到改善和提高,对电站稳定运行非常有利^[2]。

模型转轮验收试验结果显示,TB 水电工程转轮的叶道涡初生线进入了运行范围,但已远离 $40\%P_r$ 运行区,叶道涡初发展线和叶片背面脱流线均在水轮机稳定运行范围之外,证明针对转轮叶片头部形状和上冠翼型的优化效果十分显著。

2.3 尾水管流道优化

水轮机的尾水管参数与转轮特性匹配的优化设计也是重中之重,主要工作包括:在转轮水力性能优

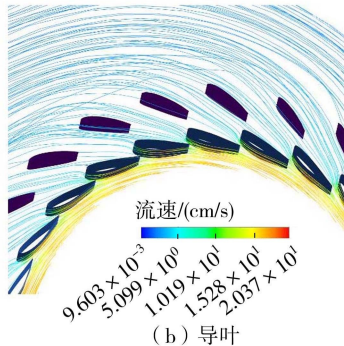


图 1 转轮、导叶流态 CFD 计算云图

化的同时结合尾水管参数的优化来提高稳定性。混流式水轮机转轮一般按进水边无撞击来流或略带正冲角,出口法向或略带正环量的原则设计的,但当水轮机偏离最优工况运行时,尾水管内部的水流状态会相应发生变化,出口漩流会在尾水管中形成涡带^[5]。大量的试验研究表明,尾水管涡带所导致的低频压力脉动幅值偏大,是机组产生振动的最主要根源。尾水管涡带作为转轮偏离最优工况运行时都会产生的一种不稳定流现象^[4],特别是在部分负荷工况时会更严重,这是混流式水轮机一种普遍的固有特性,一般无法消除,只能通过优化尾水管水力特性及转轮水力特性使其减小到最低程度。TB 水电工程转轮具有尾水管涡带能量强度较低,无涡区偏大流量的特点,最大限度地保证了转轮较高的稳定性。

2.4 水轮机水力激振计算

计算分析尾水管压力脉动频率和从进水口至尾水管出口的水力流道的自然频率,过流部件卡门涡频率和顶盖、固定导叶、活动导叶、转轮、叶片的自振频率水力激振频率计算结果见表 1。

根据计算结果(图 2)可知,转轮在水中的固有频率有效避开了激振频率,叶片在水中的固有频率避开了出水边卡门涡频率,不会发生共振,有利于水轮机稳定运行。

3 水轮机转轮模型试验

3.1 空化试验

对 TB 水电工程全部正常运行范围的临界空化

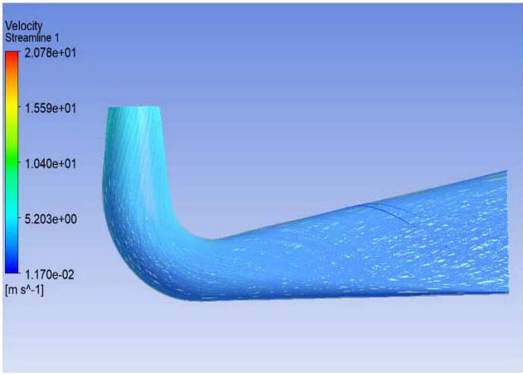


图 2 尾水管流场计算结果云图

系数以及初生空化系数进行了复核试验,试验结果见表 2。通过试验结果可知,在电站全部正常运行范围内,电站空化系数(σ_p)与临界空化系数($\sigma_{0.5}$)比值大于 1.6;电站空化系数(σ_p)与初生空化系数(σ_i)比值大于 1.15,空化系数及空化安全裕量满足合同要求,根据电站选取吸出高度 H_s 为-10.3 m,机组在全水头范围内可以实现无空化运行。

3.2 流态观测试验

对 TB 水电工程特征水头下的叶道涡初生线、发展线进行了试验,根据观测结果和表 3 可知,叶片进水边正、负压面脱流现象未进入电站运行范围。转轮叶道涡发展线未进入电站保证出力范围。在电站运行范围内,未见卡门涡现象发生。

3.3 压力脉动试验

对电站水头 121.3、117、112、108、102、96.8 m 下的电站空化系数下进行复核试验,导叶开度从空载至短时过负荷,覆盖电站运行范围。在电站运行

表 1 水力激振频率计算结果

转轮整体固有频率		转轮叶片固有频率		卡门涡频率	
节径数	固有频率/Hz	阶次	叶片频率/Hz	工况	卡门涡频率/Hz
$R=0$ (扭转)	29.28	1	72.54	额定水头额定出力	135.28~1232.81
$R=1$ (摆动)	21.35	2	88.55	最大水头最大出力	170.92~1711.19
$R=2$ (四瓣)	29.90	3	113.17	$H_{max_2}=112\text{ m}$ 超出力 374 MW	168.10~1766.50

表 2 空化验收试验结果

水头/m	功率/MW	σ_p	σ_i	$\sigma_{0.5}$	σ_p/σ_i	$\sigma_p/\sigma_{0.5}$
96.87	300.6	0.206	0.126	0.048	1.635	4.29
102.11	326.8	0.195	0.115	0.052	1.696	3.75
108.09	357.43	0.184	0.115	0.058	1.600	3.17
111.94	374.41	0.178	0.113	0.060	1.575	2.97
116.97	395.28	0.170	0.109	0.065	1.560	2.62
121.09	395.0	0.164	0.078	0.043	2.102	3.81

表 3 叶道涡初生线及发展线观测试验结果

水头	出力/MW	
	叶道涡初生线	叶道涡发展线
最大水头	146.78	98.87
额定水头	136.97	89.91
最小水头	102.76	54.47

水头范围,水轮机压力脉动统计结果见表 4。对蜗壳进口、无叶区(导叶后转轮前)、尾水锥管距转轮出口 $0.3D_2$ (D_2 为转轮出口直径)等测点进行了压力脉动测量,并对各测点试验数据进行了分析。

表 4 压力脉动试验结果

测点位置	水头/m	功率范围/%	$(\Delta H/H)/\%$	
			验收试验值	合同保证值
尾水管	96.8~<108	空载~30	5.61	6.4
		30~60	4.58	5.8
		60~80	2.71	4.0
		80~100	1.02	2.5
	108~121.3	空载~30	5.11	6.4
		30~60	3.86	5.0
		60~80	2.80	4.0
		80~100	1.10	2.5
无叶区	96.8~<108	空载~30	3.67	4.0
		30~60	2.39	3.5
		60~80	1.89	3.5
		80~100	2.47	3.0
	108~121.3	空载~30	3.89	4.0
		30~60	2.80	3.5
		60~80	2.08	3.0
		80~100	2.26	3.0
蜗壳	96.8~<108	空载~30	3.10	3.5
		30~60	1.63	3.5
		60~80	1.21	3.0
		80~100	1.32	3.0
	108~121.3	空载~30	3.45	3.5
		30~60	2.12	3.0
		60~80	1.63	2.5
		80~100	1.79	2.5

结果表明,水轮机全水头运行范围,蜗壳、无叶区、尾水管测点压力脉动的幅值均满足合同保证值;在全水头运行区内未产生高部分负荷压力脉动,同时在电站尾水位变化范围内,空化系数对压力脉动幅值影响不大。

4 结 语

本文主要是针对 TB 水电工程运行特点,在水轮机稳定性分析的基础上,通过水轮机参数和性能指标的优化选择、CFD 数值模拟分析以及水轮机模型试验等措施,系统分析总结了中低水头段机组运行稳定性的水力设计关键技术,基于优化的转轮叶片及导叶组合(15+24),避免过流部件在水中的固有频率发生共振;同时采用合理的叶片轴面和翼型,使得转轮叶片上的压力分布更为合理、叶片低压区的压力梯度更为均匀,降低单位面积上的压力负荷,提高转轮抗空化性能,有利于减小机组的振动和噪声,并提高转轮的疲劳寿命和抗裂纹能力。模型验收试验表明,TB 水电工程转轮具有全范围无空化运行条件,同时在全水头运行范围尾水管、无叶区、蜗

壳测点压力脉动均满足合同保证值要求,实现了水轮机全水头全负荷范围稳定运行,解决中低水头段混流式水轮机在部分负荷的水力稳定性问题,为 TB 水电工程水轮机的全水头全负荷范围内安全运行稳定创造有利条件。

参考文献:

[1] 史千. 丰满电站重建工程水力稳定性关键技术研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017.

[2] 姚建国,王秀花. 糯扎渡水电站水轮机稳定运行措施研究[J]. 红水河,2018(5):4-7. (YAO Jianguo, WANG Xiuhua. Study on measures for stable operation of hydroturbine in Nuozhadu Hydropower Station [J] Hongshui River, 2018(5):4-7. (in Chinese))

[3] 姚建国. 黄登水电站水轮机模型验收试验及性能试验分析[J]. 红水河,2021,40(2):35-37. (YAO Jianguo. Analysis on model acceptance test and performance test for hydroturbine in Huangdeng Hydropower Station [J]. Hongshui River, 2021,40(2):35-37. (in Chinese))

[4] 尤建锋,程永光,付亮,等. 原型混流式水轮机压力脉动特性 CFD 模拟分析 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2016(4):509-515. (YOU Jianfeng, CHENG Yongguan, FU Liang, et al. Pressure pulsations of a prototype Francis turbine analyzed by CFD [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016(4):509-515. (in Chinese))

[5] 徐用良,覃大清,赵越,等. 混流式水轮机尾水管压力脉动换算初探[J]. 水力发电学报,2016,35(1):87-94. (XU Yongliang, QIN Daqing, ZHAO Yue, et al. Exploratory analysis on pressure fluctuation conversion in Francis turbine draft tubes [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016,35(1):87-94. (in Chinese))

(收稿日期:2024-09-23 编辑:彭桃英)

