

大渡河长河坝水电站水轮机模型验收试验

施彬, 孙文彬

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 为了验证长河坝水电站水轮机的水力性能指标是否达到合同文件要求, 从而为将来水轮发电机组的运行拟定合理的运行方式, 提高水电厂运行的经济性和可靠性, 进行了长河坝水电站水轮机模型验收试验。

关键词: 水轮机; 模型验收试验; 长河坝水电站

中图分类号: TV7; TV222

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2016)01-0054-04

1 概述

长河坝水电站地下厂房中安装了4台单机额定功率为650 MW的混流式水轮发电机组, 该水轮发电机组由哈尔滨电机厂有限责任公司(以下简称哈电)设计制造。为了验证水轮机的水力性能指标, 在哈电水轮机室高水头试验1台进行了水轮机模型验收试验。

长河坝水电站机组主要参数如下:

单机额定功率 650 MW

水轮机额定出力 663 MW

水头范围 217.7 ~ 166 m

额定水头 200 m

水轮机安装高程 1 463.45 m

转轮进口直径 D_1 6.7 m

额定转速 142.9 r/min

转轮叶片数 16片

活动导叶数 24

固定导叶数 23

长河坝水电站水轮机模型验收试验项目包括: 效率试验、空化试验、水推力试验、飞逸转速试验、导叶水力矩试验、蜗壳测流压力差试验、压力脉动试验、流态观测试验(叶道涡、卡门涡、叶片进口空化)、补气试验和圆筒阀水力特性试验及其它试验。

2 模型试验台的基本情况

2.1 试验台的总体布置及特点

试验台为一个封闭式循环系统, 由2台功率为400 kW的双吸离心泵及配套管路、阀门和模型水轮机等组成。通过管路连接、阀门切换, 水泵

可以单独运行, 也可做串、并联运行。整个系统可双向运行。

2.2 模型水轮机

哈电针对长河坝水电站水轮机开发了HLA998模型, 该模型装置含整个流道, 除部分尾水管直锥段为了便于观测转轮涡带情况采用非金属材料外, 其它部位均采用金属材料, 水轮机原型与模型几何相似。

转轮名义直径 D_1 420 mm

转轮叶片数 Z_0 16片

固定导叶数 23

活动导叶数 24

导叶分布圆直径 D_0 487.2 mm

活动导叶高度 B_0 76.68 mm

转轮进口高度 76.4 mm

尾水管高度(导叶中心到底板) 1 504.48 mm

尾水管长度(出口到机组中心) 2 789.55 mm

尾水管出口高度 971.64 mm

尾水管出口宽度 752.24 mm

高压侧测压断面面积 A_1 0.181 m²

低压侧测压断面面积 A_2 0.653 m²

3 水轮机模型验收试验台率定及误差分析

3.1 仪器仪表率定

模型验收试验前, 哈电的技术人员介绍了模型试验台设备及数据采集系统, 并出示了原级测试仪器的有效检定合格证书。

验收试验前, 对水头传感器、力矩传感器、尾水压力传感器和电磁流量计等主要测量仪器仪表

收稿日期: 2015-11-05

进行了原位率定。验收试验后,对电磁流量计进行了复核标定,率定结果满足有关规程要求。

3.2 误差分析

根据合同要求,模型试验台效率综合最大误差不大于0.25%。

经对典型验收试验工况点进行的测试误差计算得知,本次验收试验的效率测试综合误差为±0.233%,满足合同规定的 f_{η} 不大于±0.25%的要求。

4 试验内容及结论

4.1 能量试验

效率和出力试验在合同规定的25 m试验水

表1 额定工况点试验结果表

项目	额定流量 Q_r /m ³ ·s ⁻¹	模型效率 η_m /%	原型机额定点效率 η_{pr} /%	对应原型机水头 H_p /m	对应原型机出力 P /MW
保证值	358	93.133	94.616	200	663
初步试验值	359.68	92.89	94.431	200	663
验收试验	359.57	92.88	94.429	200	663
试验结果修正值	359.57	93.1	94.64	200	663

值,在根据IEC60193-1999规程规定的试验误差修正后,模型效率基本达到保证值要求,换算后的原型效率满足合同要求。

表2 不同水头下输出功率保证值表

项 目	净水头 /m								
	217.7	216.2	210	205.5	204.3	200	198	196	166
保证功率 P /MW	737	737	712	696	692.0	672	663	651	483
初步试验值 P /MW	740.2	740.1	712.3	696	692.1	673.0	664.3	653.3	488.6
验收试验值 P /MW	740.7	738.6	712	695.5	690.3	672.3	663.1	651.6	486.8
导叶开度保证值 a_m /%	93	94	95	97	98	99	100	100	100
试验值 a_m /%	93	97	98	98	98	99	100	99.6	99.2
流量 Q /m ³ ·s ⁻¹	367.3	370.2	367.8	367.7	368.4	367.3	366.5	363.5	325.1
初步试验值 Q /m ³ ·s ⁻¹	367.3	370.2	367.8	369.1	368.4	367.3	366.5	363.5	325.1
验收试验值 Q /m ³ ·s ⁻¹	368.3	370.4	368.4	369.8	368.6	368	366.1	363.8	325

出力试验结果与初步试验结果相符,满足合同保证值。

4.1.4 水轮机加权平均效率试验

对合同文件要求的各水头下效率保证值进行了见证试验,加权平均效率试验结果见表3。

表3 水轮机加权平均效率表

项 目	模型加权平均效率 η_{mave} /%	原型机加权平均效率 η_{pave} /%
保证值	93.159	94.64
初步试验值	93.185	94.7
验收试验值	93.161	94.78

验收试验结果表明其与初步试验相符,满足合同规定要求。

头和电站空化系数下进行。

验收组分别对HLA998模型水轮机的最高效率点、额定效率、合同文件要求的加权点效率和各水头下出力保证值进行了见证。

4.1.1 模型最优效率试验

对最优工况点进行了10点采集,经算术平均得到模型最优效率 $\bar{\eta}_{max} = 95.29\%$,与初步试验结果相符,满足合同保证值95.2%。

4.1.2 额定效率试验

HLA998水轮机在额定水头下的额定功率和额定效率试验结果见表1。

额定效率与初步试验结果相符,低于保证

4.1.3 出力试验

对合同文件要求的各水头下出力保证值进行了见证试验,试验结果见表2。

4.2 空化试验

试验时,保持试验水头25 m不变,调节尾水压力使其逐渐降低以确定临界空化系数值和初生空化系数值,原型水轮机在对应的水头、尾水位和负荷条件下的空化特性由模型试验确定。

临界空化系数 σ_1 值定义为与无空化工况的效率相比下降1%的 σ 值。初生空化系数定义为在3个转轮叶片表面开始出现可见气泡时所对应的空化系数。

验收试验对不同水头下的空化保证值进行了见证试验,试验工况点及结果见表4。

表4 不同水头下的空化保证值表

序号	净水头 /m	功率 /MW	σ_1 保证值	σ_p	σ_i 保证值	验收值		空化裕度	
						σ_1	σ_i	σ_p/σ_1	σ_p/σ_i
1	166	483	0.067	0.117	0.097	0.065	0.095	1.23	1.8
2	196	651	0.060 5	0.099	0.088	0.06	0.089	1.11	1.65
3	198	663	0.060 5	0.098	0.088	0.06	0.086	1.14	1.63
4	200	672	0.06	0.097	0.087	0.06	0.081	1.2	1.62
5	205.5	696	0.058	0.094	0.084	0.058	0.082	1.15	1.63
6	216.2	696	0.046 7	0.09	0.068	0.042	0.068	1.32	2.13
7	217.7	696	0.046 7	0.089	0.068	0.04	0.066	1.35	2.23
8	204.7	696	--	0.095	--	0.056	0.072	1.32	1.7
9	215	737	--	0.09	--	0.048	0.075	1.2	1.88

试验结果满足合同性能值 $\sigma_p/\sigma_1 > 1.6$ 、 $\sigma_p/\sigma_i > 1.1$ 的要求。

4.3 飞逸转速试验

飞逸转速试验是在水轮机可能的全部运行水头范围和从导叶关闭位置到模型导叶可能的最大开度范围内进行的、且试验水头不小于 10 m。

按额定开度的 110% 计算,原型水轮机最大飞逸转速为 240.6 r/min ($A_0 = 27$ mm, $n_{11} = 109.65$ r/min), 小于合同规定的最大飞逸转速 255 r/min, 满足合同要求。

4.4 水推力试验

验收试验进行了单倍迷宫间隙下的轴向水推力(飞逸工况)试验。HLA998 水轮机在单倍间隙

能量状态下最大轴向水推力为 9 586.68 kN, 满足不大于合同保证值 11 200 kN 的要求。在单倍间隙飞逸工况下最大轴向水推力为 726 kN。

4.5 压力脉动和叶道涡观察试验

验收试验时,在蜗壳进口、导叶后转轮前、顶盖与转轮上冠间各布置了一个测点;锥管 $0.3D_2 + Y$ 、 $0.3D_2 - Y$ 方向各布置了一个测点;肘管进口上下游、肘管 45° 上下游凹凸处各布置了一个测点,选取了在导叶开度 $A_0 = 12, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 26$ mm、在表 5 中的特征水头和空化系数条件下进行了验收试验。试验结果见表 5。

试验证明,在长河坝水电站水轮机整个运行

表5 压力脉动验收试验工况点表

n_{11} r/min	σ_p /m	H_p /m	H_s /m	额定 n /r · min ⁻¹	D_p /m	$n_{测}$ /r · min ⁻¹
74.3	0.117	166	-11	142.9	6.7	885
68.4	0.099	196	-11	142.9	6.7	814
68	0.098	198	-11	142.9	6.7	810
67.7	0.097	200	-11	142.9	6.7	806
67	0.095	204.3	-11	142.9	6.7	797
66.8	0.094	205.5	-11	142.9	6.7	795
65.1	0.09	216.2	-11	142.9	6.7	775

范围内的电站空化系数下,各测点压力脉动幅值满足合同文件保证值的要求。HLA998 转轮具有良好的稳定性能,可以在整个运行范围内安全稳定地运行。

通过对 HLA998 模型水轮机的气泡进行观测,发现叶道涡和叶片背面脱流发生在长河坝水电站水轮机运行范围外,在最小水头 100% P 出力附近有叶片头部出现正面空化涡。鉴于该工况点实际运行可能性很小,故可以接受。

4.6 导叶转动力矩试验

在进行水轮机工况导叶同步试验时,将试验

水头定为 $H_m = 15$ m,活动导叶开度定为 $A_0 = 10、14、18、26$ mm,对每一开口进行了原型机水头 $H_r = 200$ m、对应的模型转轮单位转速 $n_{11} = 67.7$ r/min 的导叶水力矩的测试。此时,对应的非同步导叶的开度位于 $A_0 = 18$ mm。在进行水轮机工况导叶非同步试验时,同步导叶开度为 $A_0 = 14$ mm,此时对应的非同步导叶的开度位于 $A_0 = 18$ mm。

通过试验结果可以得到以下结论:在水轮机全部运行范围内,导叶均具有自关闭的趋势。

4.7 补气试验

通过模型试验确定自然补气的必要性并(或)寻求降低尾水管压力脉动或使水轮机在部

分负荷区平稳运行的其它方法与措施。

验收试验是在电站空化系数下选择最大压力脉动点及最大水头45%额定功率工况点进行中心孔补气和边壁补气(距转轮出口下方 $0.3D_2$ 处)试验。

补气试验结果表明:中心孔补气与边壁补气对水轮机尾水管压力脉动的影响基本相同。虽然补气对尾水管压力脉动幅值有轻微减弱的趋势,但对减弱水轮机尾水管压力脉动没有起到决定性作用。

4.8 指数试验

在模型上测取蜗壳测流断面上两测压孔之间的压差,所选择的测流断面应最适合于确定相对流量。

根据长河坝水电站确定的测点布置位置处的压差和流量的关系式为:

$$Q = 0.1983 (\Delta P)^{0.5097}$$

式中 Q 为流量(m^3/s); ΔP 为两测压孔之间的差压值(kPa)。

4.9 圆筒阀试验

为了全面确定模型水轮机的各项性能,在水轮机模型试验中,必须包括圆筒阀模型水力特性试验,并且根据试验结果优化圆筒阀的结构和设计,为原型水轮机圆筒阀设计提供可靠的依据。

圆筒阀试验进行了以下4个试验项目:圆筒阀静态力试验、圆筒阀开度对水轮机性能的影响试验、圆筒阀开度对水轮机流量的影响试验、圆筒阀开度对导叶水力矩的影响试验。

通过试验结果可以得到以下结论:圆筒阀除极小开度外,在绝大多数开度下都具有自关闭的趋势。

5 结论及分析

长河坝水电站水轮机模型试验按合同文件要求完成了初步试验和验收试验,其中模型验收试验是在模型验收组专家的现场见证下完成的,根据试验结果得到了以下结论:

(1)根据试验台原级测试设备原件的证明和率定结果得知,试验台误差满足合同及 IEC60193 规程的要求。

(2)HLA998 模型水轮机最高效率为 95.23%,相应的原型机最高效率为 96.7%,满足合同文件保证值要求。

(3)HLA998 模型水轮机加权平均效率为 93.161%,对应的原型机加权平均效率为 94.78%,满足合同文件保证值要求。

(4)额定工况点模型效率实测值为 92.88%,相应原型效率 94.429%,基本满足合同保证要求。

(5)HLA998 转轮具有良好的空化性能,满足合同 $\sigma_p/\sigma_1 \geq 1.6$ 、 $\sigma_p/\sigma_i \geq 1.1$ 的要求。

(6)HLA998 转轮在最大水头 $H_{\max} = 216.2 \text{ m}$ 下最大飞逸转速为 240.6 r/min,小于合同文件保证值 255 r/min,满足合同文件要求。

(7)HLA998 指数试验建立了蜗壳压差和流量的关系。

(8)HLA998 水轮机的最大轴向水推力为 9 586.68 kN,小于合同保证值 11 200 kN。

(9)HLA998 原型水轮机运行各水头压力脉动值满足合同要求。

(10)HLA998 模型水轮机的观测结果:叶道涡初生线和背面脱流线在电站运行范围外,在最小水头 100% P 附近有叶片头部正面空化涡,鉴于该工况点实际运行可能性很小,故可以接受。

(11)HLA998 圆筒阀试验结果表明:圆筒阀除极小开度外,在绝大多数开度下都具有自关闭的趋势。

(12)HLA998 导叶水力矩试验结果表明:在水轮机全部运行范围内导叶均具有自关闭的趋势。

(13)补气试验结果表明:中心孔补气与边壁补气对水轮机尾水管压力脉动的影响基本相同,虽然补气对尾水管压力脉动幅值有轻微减弱的趋势,但对减弱水轮机尾水管压力脉动没有起到决定性作用。

从模型验收试验的成果可以看出:HLA998 水轮机是一个综合性能优良的转轮,完全满足技术协议的要求。我们有信心期待此转轮在长河坝水电站长期安全、可靠、稳定、高效地运行,取得良好的经济效益和影响!

作者简介:

施 彬(1968-),女,福建古田人,教授级高级工程师,学士,从事水电站水力机械设计工作;

孙文彬(1969-),男,江西泰和人,副处长,教授级高级工程师,学士,从事水电站水力机械设计工作。

(责任编辑:李燕辉)