

二滩水电站水轮机模型试验简介

金德才

(二滩工程公司,四川攀枝花,617000)

摘要 简要介绍了二滩水电站水轮机模型试验的主要项目、测试结果、使用标准、模型向真机转换的方法、换算结果以及模型试验的一些特点。试验表明,水轮机模型试验的各项记录、成果是真实、有效的,试验的各项指标基本满足合同和 IEC 标准规定。

关键词 二滩水电站 混流式水轮机 模型试验 技术指标

二滩水电站是我国本世纪内投产的最大水电工程,是金沙江的最大支流——雅砻江下游的第二个梯级电站,距四川省的攀枝花市约 45 km。电站装有 6 台 550 MW 立轴混流式大型水轮发电机组,电站保证出力为 1 000 MW。电站建成后,装机容量约占四川电网容量的 1/4,在电网中的作用非常重要。本文简要介绍水轮机模型试验情况。

1 水轮机主要参数

最大水头: 189 m
 最小水头: 135 m
 加权平均水头: 170 m
 额定水头: 165 m
 额定转速: 142.9 r/min
 额定流量: 371 m³/s
 最大飞逸转速: 280 r/min
 加权平均效率: 93.437 %
 最高效率: 95.95 %
 原型转轮喉径: 5 850 mm
 原型转轮标称直径: 6 257.394 mm

2 水轮机模型概述

2.1 模型比例

模型转轮标称直径 D_{1m} : 374.437 mm
 模型转轮喉径 D_m : 350 mm
 模型比例: $D_p/D_m = 5\ 850/350 = 16.714\ 28$;
 $D_{1p}/D_{1m} = 6\ 257.394/374.374 = 16.714\ 28$

2.2 试验前仪表率定结果

水头仪表 误差为 $\pm 0.100\ 5\ %$
 压力传感器 误差为 $\pm 0.1\ %$

文杜里管 误差为 $\pm 0.126\ 4\ %$
 流量仪表 误差为 $\pm 0.161\ 5\ %$
 力矩测量装置 误差为 $\pm 0.116\ %$
 2.3 试验后仪表率定结果
 文杜里管 误差为 $\pm 0.100\ 5\ %$
 力矩测量装置 误差为 $\pm 0.1\ %$

2.4 试验台精度

流量 Q 误差 $\pm 0.161\ 5\ %$
 净水头 H_n 误差 $\pm 0.100\ 5\ %$
 力矩 T 误差 $\pm 0.141\ 6\ %$
 转速 n 误差 $\pm 0.020\ 0\ %$
 水比重 WT 误差 $\pm 0.004\ 0\ %$
 效率误差 $[(\text{误差})]^{1/2} \pm 0.238\ 0\ %$

计算效率综合误差时应加上随机误差。经验表明,20 s 测量时间内的效率随机误差小于 $\pm 0.100\ %$ 。故由均方根公式计算得出的效率综合误差为 $\pm 0.258\ 2\ %$ 。此误差与设计联络会上买、卖双方事前商定的试验台综合允许测量误差 0.258 2 % 相同。

2.5 水质及重力加速度的修正

2.5.1 水的密度和粘性

由模型试验数据向原型参数转换时,考虑了流过模型和真机的水温的差异。试验室水温约 25 ,雅砻江的平均水温约 6 。有关计算中采用的流过真机水的密度、粘度分别为:在 6 时,水的密度 $= 999.90\ \text{kg/m}^3$ 、粘度 $= 0.948\ 6 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$ 。

2.5.2 重力加速度整定

根据 IEC 标准 995 出版物,由下式得出本电站大坝位置处的重力加速度
 $g = 9.780\ 3(1 + 0.005\ 3 \sin^2 Y) - (3 \times 10^{-6} \times Z)$
 $= 9.79\ \text{m/s}^2$ 。

式中 Y 为电站所处位置的纬度 (26°);
 Z 为装机高程 1002.5 m。

3 模型试验条件及试验结果

3.1 效率试验结果及换算至原型水轮机

真机效率等于实测模型最大效率加上由莫迪公式换算出的效率增值,即 $\eta_p = \eta_m +$

$$= 0.6667 \times (1 - \eta_{peak}) \times [1 - (D_m/D_p)^{0.2}]$$

$$= 0.6667 \times (1 - 0.9446) \times [1 - (350/5850)^{0.2}]$$

$$= 1.59\%$$

故在 165 m 额定水头和转轮无减压孔情况下,原型水轮机各加权点的效率值见表 1。

表 1 原型水轮机各加权点的效率值表

水轮机出力/MW	加权因子 C_i	加权平均效率/ %
561.00	0.40	94.91
477.00	0.30	95.96
393.00	0.20	93.48
280.00	0.10	88.61

按公式 $\eta_{p加权} = (C_i \times \eta_i / C_i)$ 计算得 165 m 水头下真机加权平均效率为 94.309%,比合同规定的 93.437%高出 0.872%。

在 170 m 净水头下,合同要求的真机最高效率须大于或等于 95.95%。由试验结果计算得出的真机最高效率为 95.94%,比合同保证值低 0.01%。

根据模型试验数据绘制出的真机效率特性曲线,水轮机最高效率为 96.14%,并出现在 165~170 m 水头段内。

3.1.1 效率重复性试验

试验期间,在业主选定的 28° 导叶开度下验证了效率与单位转速关系的重复性。测得的最大效率差为 0.07%,在规定的允许误差范围内。

3.1.2 转轮减压孔对效率的影响

为测得因 10 个减压孔和补气装置造成的效率下降,在下列四种情况下测量了模型水轮机效率,具体比较如下见表 2。

- (1) 有补气装置和减压孔;
- (2) 无补气装置,有减压孔;
- (3) 无补气装置,减压孔被封堵;
- (4) 在电站空化系数下,无补气装置和减压孔。

表 2 单位出力范围和结果表

单位出力范围	结果
< 0.08	无明显差别。
0.08~0.16	第(3)种情况的效率较高,最大为 0.3%
> 0.16	第(2)种情况的效率较高。

由此可看出,转轮减压孔对水轮机效率的影响

是有限的,因而在转轮顶部无减压孔情况下测得的模型水轮机效率视为有效效率,用其计算真机效率。

3.2 能量及出力试验

试验期间,根据测得模型数据计算得出的真机平均平枯电能为 8 024 797 162 kW·h,比合同要求的 8 006 872 437 kW·h 高出 0.244%。

试验表明,满足所有真机出力保证的最大导叶开度为 34°;真机空蚀出力限制见表 3。

表 3 真机空蚀出力限制值表

净水头 /m	尾水位 /m	空蚀限制出力 /MW
135.0	1 010.5	440.0
155.0	1 010.8	540.0
165.0	1 010.9	582.0
170.0	1 010.9	600.0
176.0	1 010.9	621.0

满足合同规定的水轮机以额定转速在 1 010.90 m 尾水位条件下运行时,176 m 最小净水头下,真机保证出力不小于 621 MW 的要求。

3.3 飞逸转速试验

飞逸转速试验是在模拟电站 189 m 最大净水头和不同导叶开度(12° 开始测量)下,直至达到导叶本身的最大开度 42° 工况下进行的。在电站空化系数条件下,始终未出现最大飞逸转速。在不考虑发电机损耗情况下,由试验数据换算得出的原型飞逸转速为 288 r/min。

根据 IEC 标准 193 出版物,模型飞逸转速向真机飞逸转速转换时,应考虑发电机损耗。故电站原型水轮机的飞逸转速,在减去发电机的风损和摩擦损耗共计 17 390 kW 对转速的影响后,在 189 m 最大净水头和最大导叶开度 34° 工况下为 279 r/min,低于合同规定的保证值 280 r/min。

3.4 水推力试验

转轮的轴向水推力试验是在模拟 189 m 最大净水头和导叶从 14° 至 34° 的不同开度变化下进行的。转轮在上冠上开有 10 个减压孔和装有一挡流板。在模拟机组甩负荷时,水轮机过渡过程工况下可能出现的最大净水头 222.0 m 和 34° 导叶开度下,转轮上冠和迷宫环之间的间隙为标准设计和两倍设计间隙时,试验得出的真机轴向水推力特性如下:

(1) 在标准设计间隙条件下,相当于原型转轮的水推力为 635.08 t,低于合同要求的 867 t。

(2) 在两倍设计间隙条件下,相当于原型转轮的水推力为 922.003 t,低于合同保证值 1 040 t。

(3) 在飞逸工况下,出现了不利的向上水推力。试验完成后,GE 公司通过调整减压孔面积和挡流板

位置等一系列试验,解决了此问题。同时采取减小减压孔总面积的方法来获得适当的水推力和保证效率下降不大。

由于受铸造和加工工艺的限制,模型转轮上冠开了 12 个减压孔,即与开 10 个减压孔的原型转轮不完全相似。GE 公司最后通过保证减压孔数量不相同的这两种原型转轮的减压孔的总面积和上冠密封环间隙的总面积之总和相等来解决这一问题。

3.5 导叶水力矩试验

模型水轮机共设有 20 个对称的活动导叶和 19 个不同型号的固定导叶。导叶水力矩试验期间,分别进行了导叶同步试验和非同步试验。同步试验结果如下:在打开 1,2,6,11,16 及 20 号 6 个导叶和对应原型 135 m、189 m 水头的单位转速 $n_1 = 76.99 \text{ r/min}$ 和 65.07 r/min 及飞逸单位转速工况下,测得的导叶最大水力矩系数 $CT_2 = -0.0181$ 。此系数是在 189 m 最大净水头和 20°导叶开度工况下测得的。导叶水力矩此时作用呈关闭趋势。试验结果表明,在对应于电站的整个水头段内运行,导叶水力矩作用于导叶始终呈关闭趋势。

根据模型试验结果,得出的真机导叶水力矩和特性如下:

(1) 在 189 m 最大净水头下,所有导叶水力矩总的最大值为 $1.182 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

(2) 在 135 ~ 189 m 的水头段内运行时,水轮机的导叶水力矩呈关闭趋势。

(3) 在飞逸工况下,导叶水力矩也呈关闭趋势。

3.6 性能试验

性能试验在 10 个减压孔被封堵的转轮上进行。通过改变模型水轮机的转速,保持试验水头为常数来改变单位转速 n_1' 。135 m 最小水头下的单位转速 n_1' 最大,为 76.99 r/min ,165 m 额定水头下为 69.65 r/min ,189 m 最大水头下为 65.07 r/min 。

从水轮机特性可知,当水轮机比转速 n_s 选定之后(二滩水轮机的 $n_s = 184.3 \text{ r/min}$),重要的是要选择好模型水轮机的单位转速 n_1' 和单位流量 Q_1' ,如选取的 n_1' 太低,就要使用较大的 Q_1' ,这将影响到水轮机的效率和空蚀性能,所以,一般希望能选用单位转速较高的模型。二滩电站模型水轮机的最优单位转速约为 $n_{10}' = 69 \text{ r/min}$,基本上达到预想要求。

根据 1958 年至 1986 年共 20 年水文资料统计,雅砻江天然流量大于 $6 \times 371 \text{ m}^3/\text{s}$ (台数 \times 单机额定流量)的时间,平均每年为 3 个月,其余 75 % 的时

间,电站由水库调节运行,但二滩电站水库的调节性能为不完全季调节,这就要求水轮机选型时应尽可能使单位转速高一些,单位流量小一些,使机组获得较高的效率和较好的空蚀性能。试验表明,GE 公司为二滩电站设计的转轮基本上满足了电站的这一特点和要求。

3.7 空蚀试验

IEC 标准 193A 出版物对水轮机临界空化系数的定义主要有:(a) 与无空蚀工况相比,水轮机效率无变化的零空化系数 σ_0 ;(b) 水轮机效率相对下降 1% 的临界空化系数 σ_1 和 (c) 标准空化系数 σ_s 三种。合同规定使用的临界空化系数为零空化系数 σ_0 。

对本电站的水轮机临界空化系数,GE 公司建议并经业主同意改用介于 σ_0 和 σ_1 之间的 $\sigma_{0.5}$ 作为标准。此处与无空蚀的水轮机效率相比,效率下降 0.5%。最大、最小水头相对应的电站空化系数 σ_p 分别为 0.091 和 0.125。

试验前、中和后均对水中空气含量进行了测量,分别为 0.628%、0.603% 和 0.565%,均满足 IEC 标准不小于 0.2% 的规定。

试验中还对转轮出口处的空蚀和涡带进行了全过程观察。在有些工况下,涡带较大,以至初生气泡的观察受到影响。在电站空化系数 $\sigma_p = 0.105$ 下,未观察到可见涡带,这在一定程度上说明水轮机的空蚀性能是良好的。

3.8 稳定性试验

试验在整个单位转速范围、电站空化系数及水轮机未补气工况下进行。试验中,在下列 8 个位置上测量了压力脉动值。

- 在距转轮出口 $0.3D$ 和 $1D$ 转轮直径处的尾水管顶部圆周的上下游处。
- 蜗壳进口处。
- 顶盖轮转入水和导叶尾缘处。
- 尾水管肘管顶部和底部。

在未补气工况及 135 ~ 189 m 水头范围内,测得的水轮机尾水管内压力脉动的最大分频振幅值为 3.9%;在 135 m 净水头及出力小于 50% 工况下,压力脉动的最大混频振幅值为 8.1%;其它水头下,压力脉动的混频振幅值均低于 5.5%,但有些工况超过合同规定的保证值 5%。

合同规定,考核水轮机稳定性能的主要标准是脉动压力的混频振幅值。由于试验中测得的少数点的最大压力脉动的混频振幅值超出保证值 5%。为此,GE 公司在后来的实际设计中,采取了增强机组结构件如顶盖、下机架等部件强度和刚度的措施,以改善水轮机的运行稳定性。

3.9 补气试验

试验的主要目的是确定补气对机组稳定性和效率的影响程度。

试验在对应于 135 m 和 189 m 水头、带部分负荷及电站空化系数工况下进行。空气由转轮下环底部的水轮机轴中心孔补入。通过补气,电站整个水头段内的压力脉动振幅值均小于合同规定的保证值 5%。补气量与机组的运行工况有关,经试验得出的补气量与水轮机流量的最佳比值($Q_{\text{air}}/Q_{\text{water}}$)为 0.15%。若水轮机按此比值补气运行,对效率影响不大,仅下降约 0.25%。补气后,尾水管内压力脉动的混频幅值均减小到 2% 以下。

试验还表明,补气系统仅在导叶 $12^\circ \sim 18^\circ$ 开度范围内并出现最大压力脉动的工况下才需要投入。

3.10 蜗壳测流压差试验

按合同要求及蜗壳压差测量法的规定,在蜗壳上选定两个不同的测流断面,并在每个断面上测量水轮机的流量。此项试验的目的是为现场指数试验的相对流量公式取得数据。通过试验,获得的用于验证现场指数的最终相对流量公式为:

$$\log Q = 0.51176 \log H + 1.08073.$$

3.11 水力流道的尺寸检查

(上接第 30 页)

允许误差范围内, $2290 \times (1.0 + 0.05) = 2405$ kN,基本与设计锁定吨位吻合。因此,可以认为,以 2400 kN 为锁定吨位的主要目的,是保证在边坡稳定的前提下,使锚索处于完全弹性范围内,将锚索的应力松弛损失和徐变量降到最低限度。

在进行无粘结岩锚施工中,进行锚固灌浆使岩石和锚索成为整体,故在张拉时产生的徐变值可视作此整体的徐变值。而在设计荷载 3300 kN 和 3750 kN 时,经过 180 min 的徐变观测,徐变呈非线性变化。当 $F = 3300$ kN 时,徐变值为 1.32 mm,徐变度为 34.3×10^{-6} MPa;当 $F = 3750$ kN 时,徐变值为 0.68 mm,徐变度为 15.5×10^{-6} MPa。徐变度满足混凝土徐变度变化范围 $(3 \sim 36) \times 10^{-6}$ MPa,也就是说,在超张拉状态下,所发生的徐变是正常的。

7 结 语

(上接第 20 页)

overland flow. Trans. ASAE, 1985, 28(3), 755 ~ 762

14 钱宁,万兆惠著.泥沙运动力学.北京科学出版社,1983,24,284,356

15 G. M. Smart. Sediment Transport Formula for Steep Channel. J. Hydraulic Engineering, 1984, 110(3), 267 ~ 277

所有模型过流部件均按业主选定的项目进行了实物尺寸检查,同时还验证了导叶和转轮的型线。

4 结 语

二滩电站水轮机模型试验在业主代表目击下,于 1994 年 11 月 6 日至 12 月 2 日在 GE 公司位于加拿大蒙特利尔市拉辛的水力试验室进行。试验期间,各测试项目均严格按合同规定的程序和条件进行,试验中记录和获得的数据是真实和有效的。

各项试验均严格按合同技术规范、IEC 出版物 193(1965)、193A 及其第一次补充(1972)和 1 号修正(1977):“水轮机模型验收试验的国际规范”进行。试验期间,主要对模型水轮机的效率、空蚀、飞逸转速,补气和水推力等项目进行了测试。试验结果表明,模型水轮机的效率、能量、空蚀、轴向水推力、导叶水力矩等主要指标达到合同要求,尾水管压力脉动指标基本达到要求,但个别工况下超过了合同规定的指标。

作者简介

金德才 男 二滩工程公司 工程师

(收稿日期:1998-09-03)

(1) 本试验分析了锚索自由端、锚墩和基础变形与荷载的关系,为验证锚索的理论设计提供依据。

(2) 按钢绞线计算伸长值理论,将直线与实测变形线的交点,作为锁定吨位是合理的。

(3) 将预应力混凝土的徐变度变化范围 $(3 \sim 36) \times 10^{-6}$ MPa 引入作为分析岩体锚索徐变度变化的范围,有一定的可行性。

(4) 此锚索正处于断层破碎带上,经试验张拉,效果理想,为下一步进行 3000 kN 锚索施工的安全性提供了依据。

作者简介

李向东 男 中国水利水电第七工程局勘测设计院 工程师

马邦凯 男 中国水利水电第七工程局基础处理公司经理 高级工程师

(收稿日期:1997-10-24)

作者简介

王协康 男 四川大学高速水力学国家重点实验室 博士

敖汝庄 女 四川大学调整水力学国家委员实验室 工程师

喻国良 男 四川大学文选水力学国家重点实验室 教授 博导

方 铎 男 四川大学水利系 教授 博导

(收稿日期:1997-11-10)