

岩滩水电站机组主要参数的选择及水轮机模型验收试验

Main Parameter Selection of Unit & Model Acceptance Test on Turbine of Yantan hydropower Station

刘益祥

Liu Yixiang

(广西电力工业勘察设计院 南宁市建政路 10 号 530023)

(Guangxi Electric Power Industry Investigation & Design

Institute, 10 Jianzheng Road, Nanning, Guangxi, 530023)

摘要 岩滩水电站装机 4 台, 装机容量 1210 MW, 水轮机为混流式, 额定水头 59.4 m, 转轮直径 D_1 为 8 m, 是我国目前尺寸最大的混流式水轮机。岩滩水电站水轮机性能采用模型验收试验方式验收。其全模拟模型最高效率达到 92%。

关键词 岩滩水电站 混流式水轮机 参数选择 模型验收试验

Abstract Four turbine-generator units are be installed at Yantan hydropower station. Total power of the station is 1 210 MW. The turbine is Francis type, rated head 59.4 meters and runner nominal diameter 8 meters, it is maximal dimension Francis turbine in China at present. Model acceptance test is applied to accept Yantan turbine performances. The model efficiency maximum is 92 percent in the completion of similar prototype.

Key words Yantan hydropower station, Francis turbine, parameter selection, model acceptance test

1 机组主要参数的选择

1.1 水轮机机型选择

红水河岩滩水电站是红水河梯级开发和华南电网中的骨干工程, 电站最大毛水头 69.2 m, 最小水头 37 m, 加权平均水头 60.5 m (上游有天生桥电站时)。水轮机机型选择, 在对斜流式、轴流式和混流式等不同方案比较论证的基础上, 推荐采用混流式机型方案, 并以 A112 转轮作为设计基础。

A112 转轮曾先后用在安地 ($D_1 = 0.71$ m)、里石门 ($D_1 = 0.96$ m)、牛路岭 ($D_1 = 2.0$ m) 和涠源 ($D_1 = 5.0$ m) 等水电站, 并在牛路岭电站进行了比较全面的中间试验。虽然 A112 转轮的能量参数比 P0702 (即 HL220) 转轮提高了许多, 但效率曲线较陡, 用于岩滩水电站平均效率偏低。通过牛路岭电站实测发现, A112 转轮有两个比一般混流式机组都大的振动区: 一个在导叶开度 $a = 31.5\% \sim 34\%$, 振幅 $\bar{A} = 21\%$; 另一个在 $a = 56\% \sim 57\%$, $\bar{A} = 18.8\%$ 。同时, 由于 A112 转轮高上冠、大锥角下环的流道尺寸,

叶片受力状况不好。牛路岭电站 3 号机组在运行了 9 000 多小时后进行检查时, 发现有 5 个叶片根部出水边处出现裂纹。为了改善 A112 转轮存在的问题, 根据岩滩电站设计的要求, 哈尔滨大电机研究所 (以下简称哈所) 进行了大量的试验研究, 先后推荐了性能较优的 A208、A244、A286 等转轮。上述转轮的主要试验结果见表 1。

虽然 A208 转轮的最优效率和单位转速都略高于 A112, 且效率曲线平缓, 平均效率较高, 但在高水头试验台上试验时发现其稳定性较差, A244 和 A286 两转轮均适用于岩滩水电站, 但两者相比, A286 转轮方案的电能和保证出力均较高, 见表 2。

此外, 在压力脉动、飞逸转速和强度等方面, A286 转轮也优于 A244 转轮。但是 A286 转轮的单位流量偏低, 为此, 岩滩电站采用 A286 改型转轮 (A286a), 改型转轮的主要参数为: 水轮机额定水头 59.4 m, $D_1 = 8$ m, 额定出力 308.7 MW, 模型转轮最优单位转速 $n'_{10} = 77 \sim 80$ r/min, 在 $n'_{11} = 77.85$ r/min 时, 限制单位流量 $Q'_{11} \geq 1200$ L/s, 最优效率 $\eta_{10} = 92\%$ (全模拟时), 平均效率及转轮其他性能与 A286 相当。

1.2 机组单机容量的选择

岩滩水电站是红水河上的第五级电站，随着上游梯级电站的开发，它的保证出力和年利用小时数将大幅度的增加，电站出力大于1100 MW 的时间也随之增多。

由于水轮机基本参数水平较初设时有了较大的提高，考虑到电站后期要增大装机容量要求，在选型设计中，广西电力工业勘察设计院对发电机的最大容量问题进行了研究，推荐最大容量系数1.1，即发电机最大容量302.5 MW。以A286转轮为基础进行方案比较的结果如表3。

发电机最大容量原意是在额定容量275 MW基础上，充分利用温升余度来提高发电机出力的。由于哈尔滨电机厂的发电机额定容量已按额定温升设计，因此不存在利用温升余度

表1 Table 1

转轮型号 Runner type	最优工况 Optimum operation condition			限制工况 Limit operating condition			n_s (m·kW)	n'_{10} (r/min)	导叶高度 Gate height	叶片数 No. of blades
	n'_{10} (r/min)	Q'_{10} (L/s)	η_{10} (%)	Q'_1 (L/s)	η (%)	σ				
A112	77	1 100	91.0	1 250	88.7	0.14	254	152	0.315D ₁	14
A208	79	1 060	92	1 220	88.3	0.114	256.6	152	0.315D ₁	13
A244	80	1 080	91.7	1 275	86.6	0.15	263.1	158.8	0.315D ₁	13
A286	78	1 000	92.7	1 184	88.8	0.16	255.8	142.6	0.315D ₁	13

表2 Table 2

转轮型号 Runner type	额定水头 (m) Rated head	单独运行 B.		上游天生桥投入 A. T.		上游天生桥、龙滩投入 A. T. L.	
		保证出力 (WM) F. O.	多年平均电能 (10 ⁸ kW·h) A. A. G.	保证出力 (MW) F. O.	多年平均电能 (10 ⁸ kW·h) A. A. G.	保证出力 (MW) F. O.	多年平均电能 (10 ⁸ kW·h) A. A. G.
		A244	58.2	238.4	56.67	382.4	67.60
A286	59.4	245.1	56.57	392.4	67.81	778.1	83.84
		(6.7)	(-0.1)	(10.0)	(0.21)	(14.6)	(0.84)

括号内数字为两方案差值 Values in Brackets are differences of two options; B. = Before the completion of the upstream stations; A. T. = After the completion of the upstream Tianshanqiao station; A. T. L. = After the completion of the upstream Tianshanqiao and Longtan station; F. O. = Firm output; A. A. G. = Average annual generation.

表3 Table3

最大容量系数 Power coefficient max.	机组总容量 Total power of units(MW)	水轮机额定水头 Rated head of the turbine(m)	水轮机额定流量 Rated flow of the turbine (m ³ /s)	年电能(10 ⁸ kW·h) Average annual generation		
				单独运行 B.	上游天生桥投产 A. T.	上游天生桥、龙滩投产 A. T. L.
1.0	4×275	55.6	562	55.41	65.75	81.72
1.1	4×302.5	59.2	580	56.57	67.81	83.84
	(+110)			(+1.16)	(+2.66)	(+2.12)

括号内数字为两方案差值 Values in Brackets are differences of two options; B. = Before the completion of the upstream stations; A. T. = After the completion of the upstream Tianshanqiao station; A. T. L. = After the completion of the upstream Tianshanqiao and Longtan station;

表4 Table 4

水轮机 Turbine					发电机 Generator								
转速 Speed (r/min)	比转速 Specific speed n_s (m·kW)	比速 系数 k S. S. C.	点模型效率 率 (%) M. T. E.	加权平均效率 (%) W. A. E.	磁极对数 No. of both poles (2P)	槽数 No. of coil slot (Z)	绕组支路数 (a) C. N.	每极每相槽数 N. P. P.	磁扼冲片板数 (板) P. N.	单位重量 Unit weight (kg/kVA)	单位容量 量钢耗 (kg/kVA) S. C.	单位容量 量铁耗 (kg/kVA) I. C.	绝缘重量 (t) W. I.
75	267.2	1 978	87.3	91.5	80=8×10	720	5.4	3	4	5.893	0.3387	0.6457	9.25
76.9	275	2 025	87.7	91.3	78=6×13	882	6	3 $\frac{10}{13}$	3	5.785	0.3107	0.6186	10.43

S. S. C. = Specific speed coefficient; M. T. E. = Model turbine efficiency at rated operating condition. W. A. E. = Weighted average efficiency; C. N. = Circuit number of winding; N. P. P. = No. of coil slot for every pole and phase; P. N. = Pole number of rim stamped plate; S. C. = Steel consumption of unit capacity; I. C. = Iron consumption of unit capacity; W. I. = Weight of insulating material.

问题，岩滩电站发电机最大容量302.5 MW，即应是发电机的额定容量。尽管由于发电机的额定容量的提高，相应费用要增加约500万元，但机组间距和厂房

尺寸不变，在没有影响整个枢纽布置的条件下，每年可多得电能1.16~2.66亿 kW·h，经济效益十分显著。据此，确定机组单机容量为302.5 MW，则电站总

装机容量为1210 MW。

1.3 机组转速的选择

根据电站加权平均水头和转轮的特性参数,拟定了75、76.9、78.9 r/min 三个转速方案进行比较。转速78.9 r/min 方案,由于水轮机平均效率显著下降,发电机的电磁设计也明显不合理,故予以否定。75 r/min 和76.9 r/min 两转速方案的参数对比见表4。

从表4可以看出:虽然转速76.9 r/min 方案水轮机额定工况点的效率和比转速较高,但加权平均效率却降低了0.2%,相当于每年少发电10 GWh。而且就发电机的设计制造而言,尽管转速76.9 r/min 方案的发电机重量较轻,材料费可节省6万元左右,但由于发电机槽数多,线圈多,磁极为奇数,绕组端部联接复杂等原因造成制造工艺上的困难,致使发电机总造价不但不能降低,反而还会增加。综合分析,选定机组的额定转速为75 r/min。

2 水轮机的模型验收试验

随着水轮机单机容量和尺寸的增大,国际上已比较普遍地采用水轮机模型验收试验来确定原型水轮

机的性能。岩滩水电站的混流式水轮机验收试验于1988年7月28日至8月8日在哈所的高水头试验台上进行。1992年5月16日至23日在岩滩水电站工地对1#原型水轮机转轮几何形状及尺寸进行检测验收。

2.1 模型验收试验

2.1.1 模型试验台及验收试验装置

试验台为一封闭式循环系统,主要设备详见图1,其基本参数为:最高水头100 m,最大流量1.2 m³/s,转轮直径300~500 mm,供水泵电机功率2×400 kW,测功机功率400 kW,测功机转速900~1800 r/min,流量校正筒容积120 m³,水库容积750 m³,试验台综合效率误差<±0.3%。

模型试验装置的基本参数为:转轮型号 A296-35 (A296为实验室转轮编号,产品编号为 A286a),转轮直径 D₁=350 mm, D₂=364.4 mm,转轮叶片数13,蜗壳型号 W67,蜗壳包角345°,座环为平行边结构,尾水管为弯肘型,扩散段内设有两个隔墩,全部通流部件均为岩滩水电站所采用的型式,与电站实际情况全模拟。

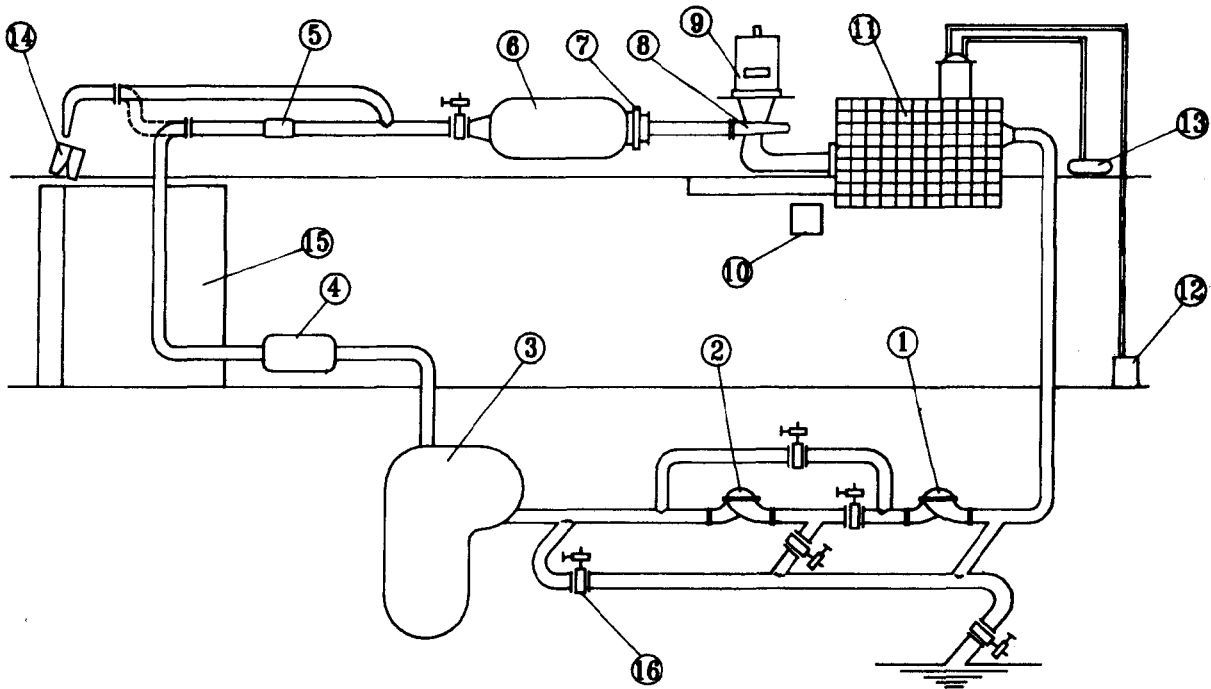


图1 高水头模型试验台 Fig. 1 High-head Model Test stand

1. 2. 供水泵 Feed pump; 3. 空气溶解箱 Dissolved air tank; 4. 冷却器 Cooler; 5. 电磁流量计 Electromagnetic flowmeter; 6. 压力水箱 Upper water tank; 7. 推力平衡器 Thrust balance; 8. 模型水轮机 Model turbine; 9. 测功电机 Dynamometer; 10. 油压装置 Oil pressure unit; 11. 尾水箱 Lower water tank; 12. 真空泵 Vacuum pump; 13. 压缩机 Compressor; 14. 液流切换器 Deflector; 15. 流量校正筒 Flowmeter calibrating case; 16. 电动蝶阀 Electro-butterfly valve

2.1.2 各种测量项目和使用的仪器及现场率定

(1) 流量:采用美国 Fisher-Porter 公司生产的 10D1435型电磁流量计,可测量的最大流量为1.69

m³/h,精度为±0.25%,采用容积法率定。

(2) 水头:采用美国 Bell/Howell 公司生产的 CEC4-336-0001型力平衡压力传感器,厂家保证重复

性精度为±0.02%。采用水银压差计率定。

(3) 力矩：采用美国 Interface 公司制造的 1110-A0-1K 型负荷传感器，厂家保证重复性精度为±0.02%，该传感器采用一套精度为±0.0025%的标准砝码率定，测功臂长 848.25 mm，传感器测量的力和测功臂长之积即为力矩。

(4) 转速：采用 4-0002 磁感应器测量，测速齿盘为 120 齿，精度在任何采样周期内为±1 个脉冲，因采样周期很长，故其误差忽略不计。

(5) 尾水压力：采用 CEC-1000-04 型压力传感器测量，量程 0~300 kPa，精度 0.05%，采用水银压力计率定。

(6) 大气压力：采用水银压力计测量。

(7) 压力脉动：采用 PCB112A21 型压电晶体测振传感器测量，用标准压力表进行动态率定。

各单项参数的总误差用平方和根法合成，即

$$E_T = \pm \sqrt{E_M^2 + E_C^2}$$

式中： E_T —— 单项参数总误差；

E_M —— 总测量误差；

E_C —— 总率定误差。

根据 IEC 规程规定，模型试验效率的综合误差按下式计算：

$$E_\eta = \pm \sqrt{E_{HT}^2 + E_{QT}^2 + E_{TT}^2 + E_{NT}^2}$$

式中： E_η —— 综合误差；

E_{HT} —— 水头 H 的总误差；

E_{QT} —— 流量 Q 的总误差；

E_{TT} —— 力矩 T 的总误差；

E_{NT} —— 转速 N 的总误差；

水头、尾水压力、力矩、压力脉动等项测量在每次试验前均先进行标定，然后才进行试验，标定结果均符合上述误差范围。流量的标定是在整个验收试验前后各进行一次，实测最大误差为 0.160%，均小于 0.25%。

试验台采用以 PDP 11/44 计算机为主体的实时数据采集与处理系统。每组数据采集时间为 30 s，每秒采集 50 个数据，取其平均值。所有能量试验结果以二维样条拟合合成综合特性曲线。

2.1.3 验收试验

验收试验共做了 5 项，即能量特性试验、气蚀特性试验、飞逸特性试验、水压脉动特性试验和蜗壳压差与流量关系试验。

(1) 能量特性试验工况

能量特性计划试验点数共 17 个，即水头 $H = 37$ m 时，导叶开度 $a_{oM} = 24$ ； $H = 53$ m 时， $a_{oM} = 14、18、$

20、22、24； $H = 59.4$ m 时， $a_{oM} = 14、18、20、24$ ； $H = 68.5$ m 时， $a_{oM} = 14、18、20、22$ ；以及最优工况点 η_{10} 和限制工况点 η_{1*} 。重复性验证 $a_{oM} = 18、22$ 两条曲线。实际验证能量曲线做了 60 个工况点，并补作了 $a_{oM} = 4、7、25.4$ 三个开度线 25 个工况点。

验收试验模型最高效率实测平均值为 92.04%，满足保证值 92.0% 要求。额定工况点模型效率为 90.5%，满足保证值 88.8% 的要求。真机效率按公式 $\eta_p = \eta_M + \Delta_\eta$ 换算，即

$$\Delta_\eta = \frac{2}{3} (1 - \eta_{\max}) \left(1 - \sqrt[5]{\frac{D_{IM}}{D_{IP}}}\right)$$

式中： η_{\max} —— 全模拟模型的最高效率；

D_{IM} —— 模型转轮名义直径；

D_{IP} —— 真机转轮名义直径；

η_p —— 真机水轮机效率；

η_M —— 模型水轮机效率；

换算后水轮机最高效率 94.44%，满足 94.4% 的要求。在 $H = 59.4$ m 水头，额定转速下的真机效率如表 5。

表 5 Table 5

功率比 Power ratio	功率 Power (MW)	合同保证值 Contract guaranteed efficiency (%)	验收试验值 Acceptance test date
100%	307.1	91	92.9
90%	276.39	94.3	94.1
80%	245.68	92.9	91.8
70%	214.97	90.2	89.4
60%	184.26	87.4	86.7
50%	153.55	83.5	83.0

表 5 表明，在 $H = 59.4$ m 水头下，90% 额定负荷以上的效率高于保证值，90% 额定负荷以下的效率低于保证值。

(2) 汽蚀特性试验

因汽蚀试验比较费时，故仅选择了额定工况点、最优效率点及高水头低负荷区共 12 个工况做汽蚀验证试验。在 $a_{oM} = 10、14、16、20、22、24$ 附近各选 2 点。试验结果：额定工况点 ($n'_1 = 77.8$ r/min, $Q'_1 = 1.155$ m³/s), $\sigma = 0.12$ ，高水头低负荷区 $\sigma = 0.04 \sim 0.08$ ，均满足要求。但最优工况点 ($n'_1 = 78.1$ r/min, $Q'_1 = 1.039$ m³/s), $\sigma = 0.124$ ，大于周围各点，并发现在尾水管中心有一直径约 20 mm 的气柱。

(3) 水压脉动特性试验

水压脉动测点共 3 个，在蜗壳进口和锥管以下下游侧 0.4D₁ 和 0.286D₁ 处。试验测试结果表明，该转轮在 50%~60% 部分额定负荷时，亦有一压力脉动区，其幅值最大达 10.48%。大于规定值，其他工况基本满

足要求。

(4) 飞逸特性试验

飞逸特性试验是采用转速为常数 ($n = 1000$ r/min) 改变试验水头的方法进行的。模型转轮最大飞逸转速在 $a_0 = 25.4$ mm (机组最大开度) 时, $n'_R = 137$ r/min, 相应真机在 $H = 68.5$ m 下的飞逸转速为 141.7 r/min。

(5) 蜗壳压差试验

该项试验的目的是确定蜗壳流量计的系数 K 。测点位置见图 2。共测了 16 个工况点, 试验结果 $K = 0.68284$, 则水轮机流量

$$Q = 0.68284 \sqrt{\Delta h_{1-2}}$$

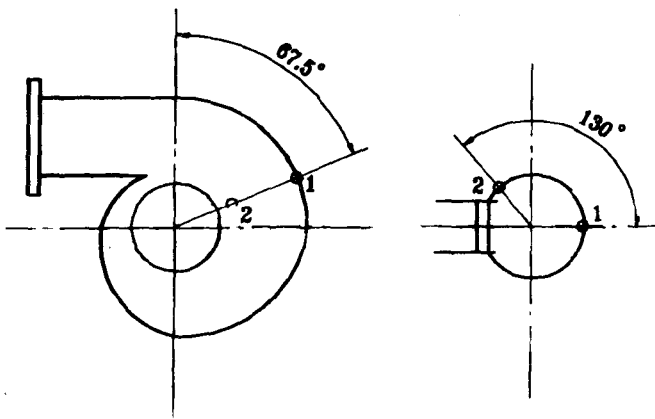


图2 Fig. 2

2.1.4 模型转轮及流道的几何尺寸检查

以上各项试验结束之后, 对模型转轮、蜗壳、导水机构、尾水管等通流部件的几何尺寸进行测量检查, 其尺寸偏差均基本符合 IEC193No1 规程的有关规定。

整个验收试验结果表明, A296 模型水轮机可以满足基本技术要求。

2.2 1# 水轮机转轮现场检测验收

原型转轮为分瓣转轮, 在工地组焊、铲磨, 机加工至全部完成后在现场进行了检测验收。哈尔滨电机厂提供测量叶片型线样板。

这次检测的主要项目有 (见图 3): (1) 转轮进口直径 D_1 、出口直径 D_2 、叶片在导叶中心 2-2 断面进口直径 D_3 、叶片上冠出口处直径 D_4 ; (2) 叶片进口 1-1 断面和 4-4 断面节距; (3) 叶片进口高度 B_1 ; (4) 叶片进口 1-1 断面和 4-4 断面及叶片出口 B-B 断面、4-4 断面、7-7 断面型线; (5) 叶片出口开度 (检测 7 个 R 值)。

原型转轮检测验收部分结果表明, 转轮的 D_1 、 D_2

符合要求, D_3 、 D_4 、 B_1 的偏差均超过了允许值。1-1 及 4-4 断面叶片进口节距平均偏差值超过规定值, 小于部颁标准, 但在 26 个测点中, 有 3 个超差 > 32 mm。转轮叶片出口开度共测了 91 个点, 其中 10% 的点超过了允许偏差值。叶片进口型线在 1-1、4-4 断面共测 208 个点, 有 6 点超差; 叶片出口型线在 4-4 断面共测 91 个点, 有 19 点超差, 7-7 断面测 78 点, 无超差点。由于模型转轮出口 B-B 断面型线与样板不符, 样板不能插到位, 无法测量其型线, 故无从比较。

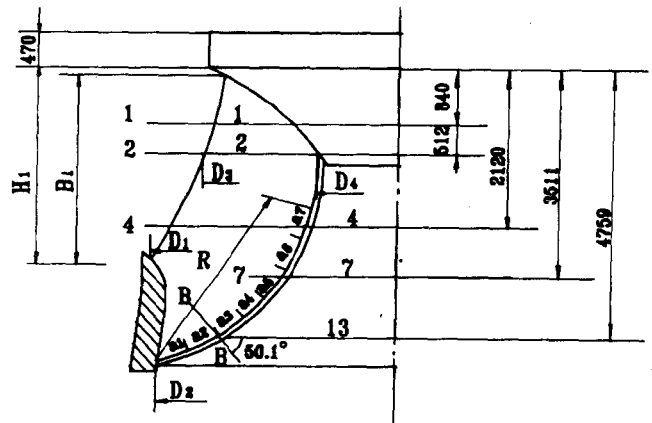


图3 Fig. 3

3 结束语

岩滩水电站 1#、2# 机组已分别于 1992 年 9 月 16 日和 1993 年 8 月 21 日正式并网发电。3#、4# 机组正在紧张安装之中。机组运行情况良好, 机组性能基本达到设计预想参数。由于机组效率的提高和装机容量增加 10%, 电站近期发电量将可增加 3.64%。

以模型验收试验作为水轮机性能的验收工作, 在我国仅是刚刚开始, 有许多工作尚需进一步规范化, 随着市场经济的发展, 有关相应的商务条款, 尚需完善。

岩滩水电站 1# 水轮机转轮几何尺寸的检测方式和测量精度是可以满足要求的。但是, 这次验收对叶片进口角、出口角、叶片正面及背面的波浪度等均未做测量检查, 所以检查验收工作尚不够完整, 模型验收试验只能证明该型转轮的模型参数性能, 只有在原型尺寸验收也合格后, 才能说明原型机组亦达到模型验收的参数性能水平。因此, 电站建设单位不仅要重视模型验收试验工作, 同时也应重视原型水轮机的现场检测, 进行与模型水轮机相似的检测验收工作。

(责任编辑: 蒋汉明、梁积全)