



中华人民共和国行业标准

P

SL 142—97

水轮机模型浑水验收试验规程

**Code for model hydraulic turbine
acceptance tests with sediment water**

1997-05-16 发布

1997-06-01 实施

中华人民共和国水利部 发布

中华人民共和国行业标准

水轮机模型浑水验收试验规程

SL 142—97

主编单位：中国水利水电科学研究院

批准部门：中华人民共和国水利部

中华人民共和国水利部

关于批准发布《水泵模型浑水验收 试验规程》和《水轮机模型浑水验收 试验规程》行业标准的通知

水科技 [1997] 195 号

根据部 1994 年水利水电技术标准制定、修订计划，由部科学技术司主持，以中国水利水电科学研究院为主编单位制定的《水泵模型浑水验收试验规程》、《水轮机模型浑水验收试验规程》经审查批准为水利行业标准，并予以发布。标准的名称和编号分别为：《水泵模型浑水验收试验规程》SL 141—97；《水轮机模型浑水验收试验规程》SL142—97。

以上标准自 1997 年 6 月 1 日起实施。在实施过程中各单位应注意总结经验，如发现问题请函告部科学技术司，并由其负责解释。

标准文本由中国水利水电出版社出版发行。

1997 年 5 月 16 日

目 次

1	总则	5
2	术语的定义、符号及计量单位	7
3	模型验收试验台	11
4	模型水轮机组	15
5	模型验收试验各种参数测量及误差	22
6	模型验收试验	28
7	保证值的验证	32
8	模型验收试验的组织等事项	35
	附加说明	36

1 总 则

1.1 制定的目的

本规程规定了用模型水轮机验证原型水轮机浑水性能的模型浑水试验方法，作为水轮机模型浑水验收试验的准则。

1.2 适用范围

1.2.1 本规程适用于反击式（包括混流式、斜流式、轴流式及贯流式）水轮机的模型浑水验收试验。

1.2.2 本规程仅限于验证水轮机标书及合同中所规定的水轮机浑水水力性能的各项指标，不涉及水轮机的结构、强度、材料及其他方面的问题。

1.2.3 本规程只适用于含沙量不超过 $50\text{kg}/\text{m}^3$ ，中值粒径小于 0.1mm 的悬移质浑水验收试验。

1.3 引用标准

下列标准包含的条文，通过在本规程中引用而构成本规程的条文。在本规程出版时，所示版本均为有效。所有标准都会被修订，使用本规程的各方应探讨使用下列标准最新版本的可能性。

GB/T15613—95 水轮机模型验收试验规程

IEC193 (1965) 水轮机模型验收试验国际规程

IEC193A (1972) 水轮机模型空化验收试验国际规程

IEC193No.1 (1977) 水轮机模型验收试验国际规程的修正

IEC995 (1991) 用考虑比尺效应的水力机械模型验收试验确定原型性能。

1.4 试验内容

1.4.1 水轮机浑水验收试验主要包括以下项目：

- a) 能量特性试验；
- b) 空化特性试验；
- c) 飞逸转速特性试验；
- d) 通流部件磨损特性试验；
- e) 水压脉动特性试验。

1.4.2 委托方提出的其他需要水轮机浑水验收试验的项目（如力特性），由双方协商确定。

2 术语的定义、符号及计量单位

本规程采用我国实行的法定计量单位。本规程使用的术语的定义、符号及计量单位见表 2。

表 2 术语的定义、符号及计量单位

序号	术 语	定 义	符号	计量 单位
1	清水	悬移质泥沙含量小于或等于 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ ，且能够目测转轮进口或出口处空化空泡的水		
2	浑水	悬移质泥沙含量大于 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ 的水		
3	泥沙含量（含沙量）	单位体积浑水中的泥沙质量	S	kg/m^3
4	水柱高度	用于表示压强的清水水柱高度	h	mH_2O
5	清水的密度	单位体积清水的质量	ρ	kg/m^3
6	浑水的密度	单位体积浑水的质量	ρ_s	kg/m^3
7	清水的重度	单位体积清水在空气中的重力 $\gamma = \rho \cdot g$	γ	N/m^3
8	浑水的重度	单位体积浑水在空气中的重力 $\gamma_s = \rho_s \cdot g$	γ_s	N/m^3
9	位置水头	测点到基准面的高度 Z 按该点浑水重度折算的水柱高度 $Z' = (\gamma_s / \gamma) Z$	Z'	mH_2O
10	压力水头	用水柱高度表示的系统中任意点的压强 $h_p = (p_g / \gamma) + a'$	h_p	m
11	表计高度	测量表计在测点以上的高度 a 按该点浑水重度折算的水柱高度 $a' = (\gamma_s / \gamma) a$	a'	mH_2O
12	表计压力	系统中任意点大于或小于大气压力的表计读数	p_g	Pa
13	速度水头	平均流速的平方除以 2 倍重力加速度，再按该点浑水重度折算的水柱高度 $h_v = (\gamma_s / \gamma) (V^2 / 2g)$	h_v	m

续表

序号	术 语	定 义	符号	计量 单位
14	总水头	某给定过水断面位置水头，压力水头和速度水头的总和 $H_t = Z' + h_p + h_v$	H_t	m
15	净水头	水轮机作功用的有效水头（图 2-1）	H_n	m
16	大气压	折合成试验水温下的气压水柱高度	h_a	mH ₂ O
17	汽化压力	试验水温下与汽化压力相应的水柱高度	h_{va}	mH ₂ O
18	吸出高度	水轮机基准面至尾水位的高度 H_s （图 2-2）按该点浑水重度折算的水柱高度 $H'_s = (\gamma_s / \gamma) H_s$	H'_s	mH ₂ O
19	水轮机流量	单位时间内流过水轮机进口测量断面的清水或浑水的体积	Q	m ³ /s
20	平均流速	流量被过流面积除的商	V	m/s
21	水轮机输入功率	水轮机进口水流所具有的水力功率	P_{in} (N_d)	W, kW
22	水轮机输出功率	水轮机主轴传递的机械功率	P_{out} (N_t)	W, kW
23	水轮机效率	水轮机输出功率与输入功率的比值	η	
24	转速	水轮机主轴每分钟的旋转次数	n	r/min
25	飞逸转速	各种导叶开度和叶片转角下，水轮机输出力矩为零时的转速	n_{run}	r/min
26	转轮直径	水轮机模型转轮规定部位的直径	D	m, mm
27	粒径级配	以小于某一粒径的泥沙重量的百分比为纵坐标，泥沙粒径为横坐标的累积粒径级配曲线给出的粒径组成		
28	中值粒径	在粒径级配曲线上对应于 50% 含量的颗粒粒径	d_{50}	mm
29	泥沙矿物组成	泥沙中不同矿物成分的含量情况		

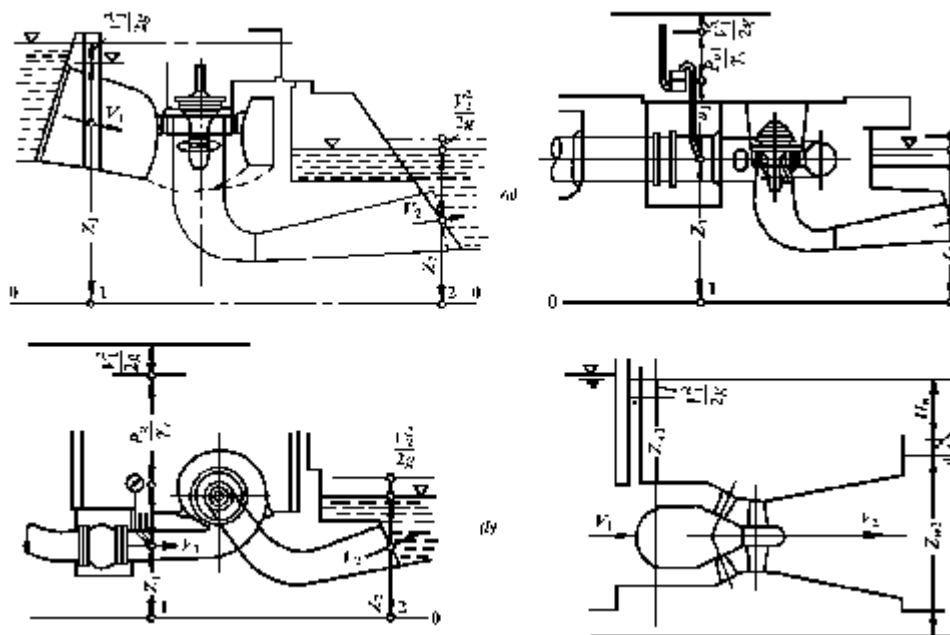


图 2-1 水轮机净水头的确定

(a) 反击式水轮机立轴梯形蜗壳弯尾水管 $H_s = \left[(Z_1 - Z_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} \right] \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma} \right\}$; (b) 反击式水轮机立轴圆断面蜗

$H_s = \left[(Z_1 + a_1 - Z_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} \right] \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma} \right\} + \frac{p_{a1}}{\gamma}$; (c) 反击式水轮机卧轴 $H_s = \left[(Z_1 + a_1 - Z_2) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} \right] \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma} \right\}$

(d) 贯流式水轮机 $H_s = \left[(Z_{w1} - Z_{w2}) + \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g} \right] \left\{ \frac{\gamma_s}{\gamma} \right\}$

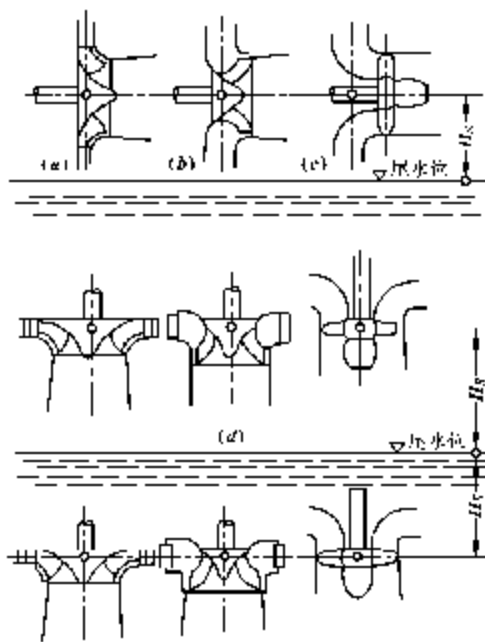


图 2-2 确定吸出高度 H_s' 的基准面 $[H_s' = H_s (\gamma_s / \gamma)]$

(a) 低比速混流式；(b) 高比速混流式；(c) 转浆式、定浆式；
(d) 正吸出高度；(e) 负吸出高度

3 模型验收试验台

3.1 模型浑水验收试验台分闭式和开式两种。一般开式试验台只用于水轮机模型的浑水能量试验。

3.2 开式试验台上、下游均应设置浑水搅拌装置，闭式试验台上、下游水箱的形状设计应避免泥沙淤积，否则，应设置浑水搅拌装置。

3.3 闭式试验台的泥沙加入装置宜设在下游水箱的顶部。加沙装置应能控制加沙速度，加沙完毕后应能良好密封。

3.4 试验台连接管路直径应符合泥沙起动流速的要求。

3.5 试验系统应在其最底部设置快速排空阀。

3.6 对模型验收试验台的要求及选择应由委托方在合同中提出。试验台应能满足验收试验项目、试验参数测量精度和运行稳定的要求。

3.7 清、浑水能量特性、空化特性和其他特性的验收试验应在同一试验台进行。特殊情况经双方协商同意也可用同一试验装置分别在不同的试验台进行。

3.8 反击式水轮机的能量特性、空化特性及其他特性的试验可使用不同的试验水头。

3.8.1 能量试验水头：轴流式、贯流式应不小于 **4m**；混流式、斜流式应不小于 **20m**。

3.8.2 空化试验水头：轴流式应不小于 **8m**（在偏离最优工况的大流量区可适当降低水头）；贯流式应不小于 **4m**；混流式、斜流式应不小于 **20m**。轴流式若原型水头小于 **8m** 时，可适当降低水头进行试验，但最低应不小于 **4m**。

3.8.3 水压脉动试验水头：应不小于空化试验水头。

3.8.4 磨损特性试验水头：应不小于能量试验水头。

3.9 雷诺数 Re 的最小值及其计算公式见表 3.9。

表 3.9 试验雷诺数 Re 的最小值

类 型	轴流式、贯流式	混流式、斜流式
Re 大于	2×10^6	2.5×10^6
Re	$Re = D_t \frac{\sqrt{2gH}}{\nu}$	
D_t (尾水管最小进口直径)	对中高比速混流式、轴流式、斜流式及贯流式，大于或等于 350mm； 对低比速混流式，大于或等于 250mm	

3.10 试验水头必须稳定，测量流量、转速及力矩的过程中，允许水头波动的最大值与最小值之差，为试验水头的 $\pm 0.5\%$ 。

3.11 试验水头上游测点应布置在蜗壳进口断面，下游测点应布置在尾水管出口断面〔图 2-1 (a)、(b)、(c)〕。速度水头可按断面的平均流速值计算。

3.12 如选用静压测量方法，每一测量断面最少应布置 4 个静压孔。若为圆形断面，4 个静压孔应置于两个互相垂直的直径上；若为矩形断面，应置于各边的中点。各静压孔应用一均压环管或具有相同水流阻力的管路与压力表连接。如果测量断面设置在水平管路上，为避免空气聚集或泥沙淤塞，静压孔不应置于断面的最高及最低点（图 3.12），并在最高点设排气阀，在最低点设排沙阀。如果测量断面设置在垂直管路上，应在均压环管上等距设置 4 个以上排沙排气阀。每个孔分别测出的压力与其算术平均值的差值的允许偏差为 H_n 的 $\pm 0.2\%$ ，否则测量无效。

3.13 如选用静压测量方法，静压孔应是圆形，并且垂直于管内壁。测孔直径 d 为 3~6mm，长度 l 至少是孔径的 2 倍。测孔圆角 r 不得大于 $d/4$ （图 3.13），离测孔至少 100mm 范围内的管路内壁应光滑。

3.14 模型水轮机进口处淹没水深应保持水面高出进口断面最高点 1m 以上，出口处淹没水深应保持水面高出尾水管出口断面最高点 0.5m 以上。

3.15 模型水轮机组进口水流应无旋，流速应均匀分布。

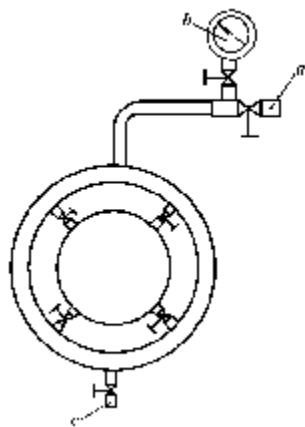


图 3.12 测量点及测量断面
布置方法

a—排气；b—压力计；c—排水

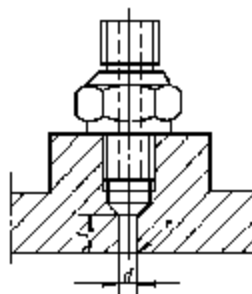


图 3.13 测压孔形式及尺寸

$d=3\sim6\text{mm}$; $l\geq 2d\geq 6\sim 12\text{mm}$;

$r\leq d/4$

3.16 模型水轮机组和流量测定装置之间不应有进水或漏水。

3.17 试验用泥沙宜选用原型水轮机过机泥沙，也可以经双方约定采用其他与原型过机泥沙级配、密度等相近的代用沙。

3.18 空化试验过程中产生气泡和析出气体时，应保证水头、流量测量仪表的正常工作不受影响。全封闭试验系统在每次更换新水后，应在真空度 $7\sim 8\text{mH}_2\text{O}$ 下运行 1h 以上，方可进行正式试验。在每次加入新泥沙时，应在同样真空度下再运行 20min 以上方可进行正式试验。

3.19 空化试验过程中最大真空度一般不超过 $8\text{mH}_2\text{O}$ 。

3.20 用于模型验收的浑水试验台，必须经过省、部级正式鉴定，并持有计量行政主管部门的鉴定合格证明。试验台的精度，清水模型效率的允许总误差为 $\pm 0.3\%$ ，允许重复误差为 $\pm 0.15\%$ ；委托方根据需要也可选择模型效率的允许总误差为 $\pm 0.3\%\sim \pm 0.5\%$ ，允许重复误差为 $\pm 0.15\%\sim \pm 0.25\%$ 的试验台。浑水模型效率的允许总误差为 $\pm 0.5\%\sim \pm 0.8\%$ ，允许重复误差为

$\pm 0.25\% \sim \pm 0.4\%$ 。凡清水效率总误差超过 $\pm 0.5\%$ ，浑水效率总误差超过 $\pm 0.8\%$ 的试验台，不能作为验收试验之用。

3.21 试验台的实际精度，依模型验收试验时的校验结果为准。

4 模型水轮机组

4.1 模型水轮机组，应由委托方提供包括自蜗壳进口至尾水管出口的全部通流部件。

4.2 模型转轮直径，轴流式、斜流式、贯流式及中高比速混流式 D 大于或等于 350mm，低比速混流式 D 大于或等于 250mm。

不同型号的水轮机转轮直径 D 取以下部位作为基准值：

a) 轴流式、斜流式及贯流式： $D = D_1$ ， D_1 为转轮叶片轴线与转轮室内表面交点处直径（见图 4.2-1）。

b) 混流式： $D = D_2$ ， D_2 为转轮叶片工作面出水边和下环相交处的直径（图 4.2-2）。

4.3 模型机组通流部件的制造应考虑过流表面在浑水试验期间的抗磨要求，浑水试验后因通流部件几何形状变化而引起的能量性能变化值，应在试验台的精度范围之内。

4.4 模型机组的通流部件（包括蜗壳、座环、导叶、底环、转轮室及尾水管等），均应严格按制造厂的设计图纸制造，各部件几何形状按设计图纸的允许偏差值，应符合表 4.4-1 的要求。各部件表面粗糙度，应符合表 4.4-2 的要求。

4.5 模型机组各部件的装配尺寸及间隙应符合表 4.5 的要求。轴封应适合在浑水条件下使用，无浑水外漏。在正式试验中摩擦力应保持稳定。如轴封使用外部水源润滑，则应在过机流量中扣除进入模型机组流道中的润滑水流量。

4.6 模型部件局部可用透明的非金属材料制作，但必须保证部件表面的粗糙度及加工精度，并有足够的刚度。

4.7 叶片可转动的模型水轮机，在改变叶片旋转角度时，必须保持叶片轴线位置不变动，不得另行调整叶片和转轮室的间隙。单个叶片转角的允许偏差为 $\pm 0.25^\circ$ 。

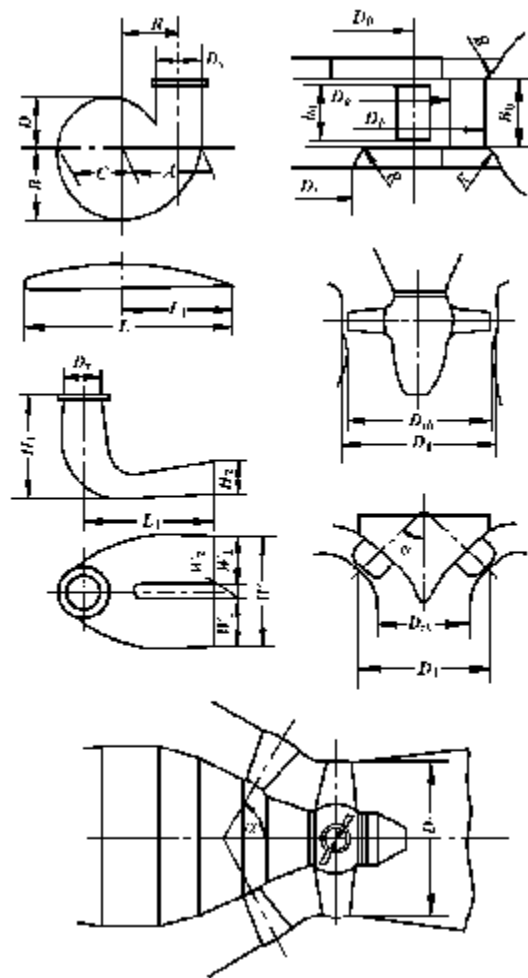


图 4.2-1 轴流式、斜流式及贯流式水轮机主要尺寸示意图

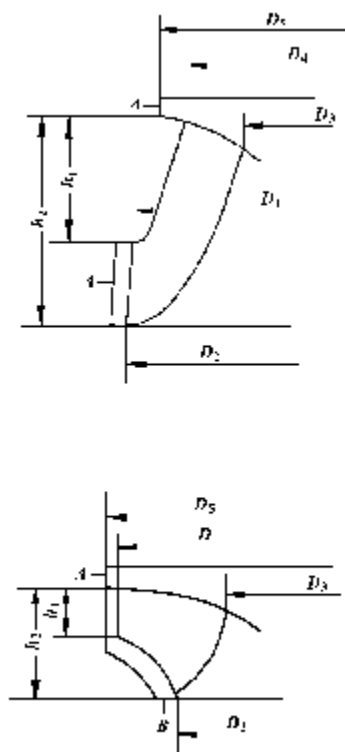


图 4.2-2 混流式水轮机主要尺寸示意图

表 4.4-1 水轮机模型通流部件几何形状允许偏差值

部 件	项 目	偏差 (%)	备 注
蜗 壳	进口直径 D_5	± 1.0	
	尺寸 A 、 B 、 C 、 D	± 2.0	
	中心距 R	± 2.0	
座 环	内、外圆直径 D_a 、 D_b	± 0.4	对导叶最大厚度的比值
	圆弧半径 R	± 2.0	
	固定导叶高度 B_0	± 0.4	
	固定导叶翼型	± 3.0	

续表

部 件	项 目	偏差 (%)	备 注
导 叶	导叶高度 b_0	± 0.2	对导叶最大厚度的比值
	分布圆直径 D_0	± 0.1	
	L_1 、 L	± 1.0	
	导叶翼型	± 2.0	
	波浪度	2.0	
叶 片	型线	$\pm 0.1 D_1$	
	波浪度	1.0	
底 环	内圆直径 D_d	± 0.1	
	圆弧半径 R	± 2.0	
转轮室	喉部直径 D_{th}	± 0.2	
	转轮室直径 D_1	± 0.1	
尾水管	进口直径 D_i	± 1.0	
	L_1 、 H_1 、 H_2 、 W_1 、 W_2 、 W	± 2.0	

表 4.2-2 水轮机模型通流部件表面最大允许粗糙度

项 目	粗糙度 R_a (μm)
转轮、活动导叶	0.8~3.2
座环、固定导叶、底环、转轮室、导流锥、 顶盖等过流表面	3.2~12.5

表 4.5 水轮机模型装配尺寸要求 (见图 4.5)

项 目	允 许 值 (%)	备 注
a	$0.1 > a > 0.05$	对所在点直径的比值
b	> 0.1	对导叶高度的比值
c	$0.08 > c > 0.05$	对转轮室直径的比值
d	≈ 0.5	对转轮体直径的比值
e	$0.08 > e > 0.035$	对转轮直径的比值
a_0	± 2	对最优平均开度的比值

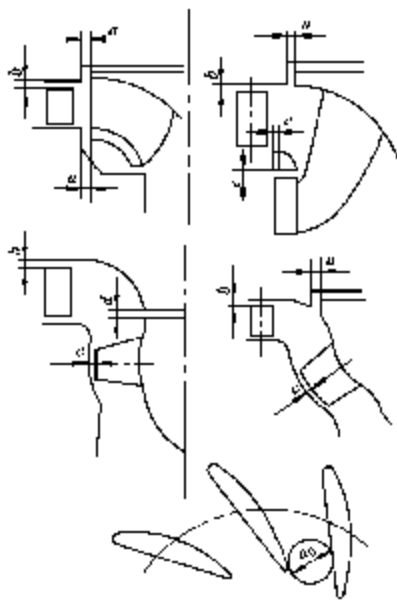


图 4.5 水轮机模型装配尺寸检查部位

4.8 模型水轮机组各通流部件的连接处，应保持表面平整、光滑。

4.9 模型水轮机必须按照设计图纸检查其通流部件的几何形状及尺寸，并记录在案，作为检查是否与原型水轮机几何相似的依据。

4.9.1 应检查蜗壳、固定导叶、活动导叶、转轮、转轮室和尾水管的主要尺寸；固定导叶、活动导叶和转轮叶片的数量；转轮间隙和导叶间隙。

4.9.2 转轮的型线及尺寸检查：

a) 对混流式水轮机，应用测绘仪或样板至少检查叶片上、中、下三个断面的进、出口形状及开口尺寸（见图 4.9.2-1、图 4.9.2-2），还应检查转轮各主要尺寸的偏差，进、出口中间截面处的叶片安放角度（见表 4.9.2-1）及转轮径向和端面跳动值（见表 4.9.2-2）。

b) 对轴流式、斜流式和贯流式水轮机，应用测绘仪或样板检

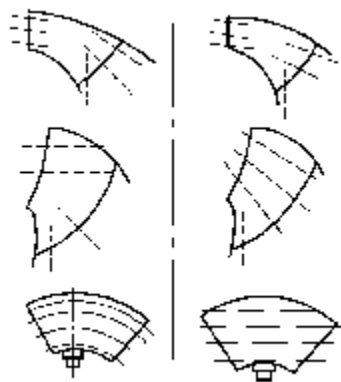


图 4.9.2-1 叶片检查断面

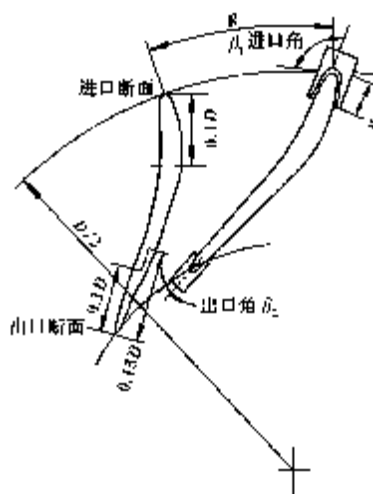


图 4.9.2-2 叶片进、出口
检查部位

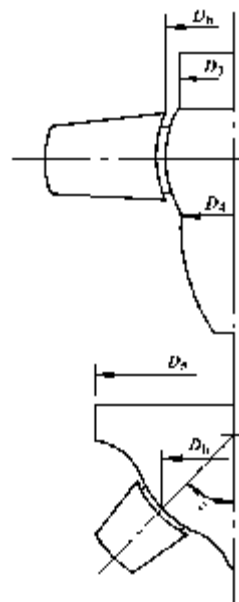


图 4.9.2-3 轴流式、斜流式及贯
流式水轮机模型转轮主要检查部位

查叶片至少 4 个截面处的型线。检查选定的截面至少应有 5 个测点。检查转轮各主要尺寸的偏差（见表 4.9.2-3）。

表 4.9.2-1 混流式水轮机模型转轮检查部位及允许偏差

项 目	允 许 偏 差 (%)		备 注
	平均值	单个值	
D_1 、 D_3	± 0.20	± 0.40	对所在圆直径的比值 按加工图检查
D_2 、 D_4	± 0.25	± 0.35	
D_5	± 0.50	± 0.75	
h_1 、 h_2	± 0.50	± 0.75	
β_1	$\pm 1.5^\circ$	$\pm 3^\circ$	符号意义见图 4.2-2、 图 4.9.2-2
β_2	$\pm 1^\circ$	$\pm 2^\circ$	

表 4.9.2-2 混流式水轮机模型转轮径向和端面跳动
检查部位及允许跳动值

项 目	允 许 跳 动 值 (%)	备 注
A	0.01	对所在圆直径的比值
B	0.01	符号意义见图 4.2-2

表 4.9.2-3 轴流式、贯流式及斜流式水轮机模型
转轮主要检查尺寸及允许偏差

项 目	允 许 偏 差 (%)	备 注
D_1	按转轮室尺寸根据表 4.9.2-1 确定	符号意义见图 4.9.2-3
D_6 、 D_3 、 D_4	± 0.1	
D_5	按加工图检查	
φ	$\pm 0.25^\circ$	

4.10 样板或其他特殊量器具由模型水轮机制造单位提供。样板要根据允许的误差（不大于叶片型线允许误差）进行检查。

5 模型验收试验各种参数测量及误差

5.1 流量测量方法及误差

5.1.1 流量测量可采用原级法（包括称重法、容积法）或次级法（电磁流量计）。采用容积法测量时，测量前、后应清理泥沙。

5.1.2 采用称重法或容积法测量时，向称重容器内或容积池内充水的时间不得少于 50s。分流装置的切换和充水计时应准确。

5.1.3 采用电磁流量计测量流量时，流量计应经原级法进行清水校验，有条件时还应进行浑水校验。应检验泥沙对流量测量的影响，并进行修正。

5.1.4 流量测量的允许误差应符合表 5.1.4 的规定。

表 5.1.4 流量测量的允许误差

测 量 方 法	清 水	浑 水
称重法	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.30\%$
容积法	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.40\%$
电磁流量计法	$\pm 0.30\%$	$\pm 0.50\%$

5.2 水头测量方法及误差

5.2.1 水头测量可用压力传感器、差压传感器及其他高精度的压力计。

5.2.2 水头测量的允许误差为 $\pm 0.15\%$ 。

5.3 功率测量方法及误差

模型水轮机的输出功率一般通过测功装置测量水轮机轴的力矩和转速，按下式计算确定

$$P_{out} = M\omega \quad (5.3)$$

式中 P_{out} ——模型水轮机主轴的输出功率，W；

M ——模型水轮机主轴的力矩，N·m；

ω ——模型水轮机主轴旋转的角速度，rad/s。

5.3.1 测功装置（测功电机、扭矩仪等），应有良好的稳定性和较高的灵敏度。

5.3.2 测功臂应采用受外界温度影响较小的金属材料制作。臂长测量的允许误差为 $\pm 0.02\%$ 。

5.3.3 测量力矩的平衡力，应采用国家级标准砝码或经过标定的电气负荷传感器。平衡力测量的允许误差为 $\pm 0.12\%$ 。

5.4 转速测量方法及误差

5.4.1 转速测量的一次信号装置必须与模型水轮机主轴刚性连接，并确保无相对运动。

5.4.2 转速测量，可用电磁感应或光电脉冲发生器，以及其他转速测量仪器。

5.4.3 在转速测量过程中，允许转速波动值为 $\pm 0.25\%$ 。

5.4.4 测量飞逸转速时，应使主轴与测功装置脱开，或者在不脱开情况下调整轴端负荷力矩为零。

5.4.5 转速测量的允许误差为 $\pm 0.1\%$ 。

5.5 含沙量测量

5.5.1 含沙量测量位置应设在蜗壳进口前的压力管道上，测点与模型水轮机之间不得有水流进入或流出，管道直径应基本一致。含沙量测量不应影响机组进口压力测量结果。

5.5.2 测量方法可以采用取样过滤称重法或其他方法，采用取样过滤称重法时，取样点应在管中心。采用其他次级方法时，应使用取样过滤称重法进行校核，允许两者间测量值之差为 $\pm 10\%$ 。

5.5.3 如果使用旁通管连续分流测量含沙量时，应在过机流量中扣除分流流量。

5.5.4 试验规定含沙量与设计工况的实测含沙量的允许偏差为±10%。

5.5.5 每次正式试验前后应至少在相同工况下测量两次含沙量，两者的允许偏差为±5%。

5.6 其他参数测量及误差

5.6.1 吸出高度测量：测量允许误差为±0.2%。

5.6.2 大气压测量：测量允许误差为±0.2%。

5.6.3 真空度测量：测量允许误差为±0.2%。

5.6.4 水温测量：测量允许误差为±0.5℃。

5.6.5 水压脉动测量：水压脉动传感器测量允许误差为±1.0%。

5.7 水轮机模型效率

应根据所测量的各项参数（如水头、流量、力矩及转速等）按下式确定

$$\eta_M = \frac{P_{out, M}}{P_{in, M}} = \frac{M\omega}{\gamma Q H_n} = \frac{P' L \pi n}{30 \gamma Q H_n} = K \frac{P' L n}{\gamma Q H_n} \quad (5.7)$$
$$M = P' L$$

式中 P' ——测功机力矩平衡力，N；

L ——测功臂长度，m；

n ——水轮机转速，r/min；

H_n ——以水柱高度表示的试验净水头，m；

Q ——水轮机的流量，m³/s；

γ ——清水的重度，N/m³。

5.8 试验参数测量的总误差

总误差应包括系统误差和随机误差两部分。系统误差取决于测量方法及测量仪表的校验结果；而随机误差则按通常的统计学原理确定，应有足够多的观测次数，以使随机误差减小到可能的最小值。

模型效率的系统误差 $E_{\eta, s}$, 以下式计算

$$E_{\eta, s} = \pm \sqrt{E_Q + E_{H_n} + E'_P + E_n + E_L} \quad (5.8-1)$$

式中 E_Q ——流量测量系统误差, $E_Q = \Delta Q / Q$;
 E_{H_n} ——净水头测量系统误差, $E_{H_n} = \Delta H_n / H_n$;
 E'_P ——平衡力测量系统误差, $E'_P = \Delta P' / P'$;
 E_n ——转速测量系统误差, $E_n = \Delta n / n$;
 E_L ——力臂测量系统误差, $E_L = \Delta L / L$ 。

模型效率的允许随机误差 $E_{\eta, R}$ 为 $\pm 0.3\%$ 。

水轮机模型效率的总误差 (相对不确定度) 以系统误差和随机误差的方和根求出

$$E_{\eta} = \Delta \eta_M / \eta_M = \pm \sqrt{E_{\eta, s}^2 + E_{\eta, R}^2} \quad (5.8-2)$$

5.9 水轮机空化系数 σ

水轮机空化系数 σ 按下式计算

$$\sigma = \frac{h_a - h_{va} - h_{vt} - H'_s}{H_n} \quad (5.9)$$

式中 σ ——水轮机空化系数;
 h_a ——大气压, m;
 h_{va} ——水的汽化压力, m;
 h_{vt} ——尾水管出口水面上的真空度, m;
 H'_s ——吸出高度, m;
 H_n ——净水头, m。

5.10 仪表校验

在验收试验前、后对主要测量仪表均应进行校验。在验收试验过程中, 如果委托方对测量精度提出质疑时, 试验方应重新进行检定和校验。

不同温度下的水银密度、水的汽化压力、水的密度、水的运动粘滞系数以及不同纬度及海拔高度的重力加速度值, 见表 5.10-

1～表 5.10-5。不同温度下浑水汽化压力与运动粘滞系数值暂取清水数值。

表 5.10-1 不同温度下的水银密度值

温度 (℃)	0	5	10	15	20
密度 (kg/m³)	13596	13583	13571	13559	13546
温度 (℃)	25	30	35	40	45
密度 (kg/m³)	13534	13522	13509	13497	13485

表 5.10-2 不同温度下水的汽化压力值

温度 (℃)	汽化压力 (m)	温度 (℃)	汽化压力 (m)	温度 (℃)	汽化压力 (m)
0	0.0623	12	0.1430	24	0.3049
1	0.0670	13	0.1527	25	0.3238
2	0.0719	14	0.1630	26	0.3437
3	0.0772	15	0.1739	27	0.3647
4	0.0829	16	0.1855	28	0.3867
5	0.0889	17	0.1977	29	0.4100
6	0.0953	18	0.2106	30	0.4344
7	0.1021	19	0.2243	31	0.4601
8	0.1093	20	0.2387	32	0.4871
9	0.1170	21	0.2540	33	0.5155
10	0.1252	22	0.2700	34	0.5454
11	0.1338	23	0.2870	35	0.5767

表 5.10-3 不同温度下清水的密度值

温度 (℃)	密度 (kg/m³)	温度 (℃)	密度 (kg/m³)	温度 (℃)	密度 (kg/m³)
0	999.80	5	999.98	10	999.70
1	999.88	6	999.94	11	999.60
2	999.92	7	999.90	12	999.48
3	999.96	8	999.84	13	999.34
4	1000.00	9	999.78	14	999.20

续表

温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)	温度 (℃)	密度 (kg/m ³)
15	999.00	22	997.74	29	996.00
16	998.88	23	997.54	30	995.70
17	998.72	24	997.32	31	995.36
18	998.54	25	997.10	32	995.00
19	998.36	26	996.84	33	994.64
20	998.20	27	996.56	34	994.26
21	997.96	28	996.30	35	993.90

表 5.10-4 不同温度下水的运动粘滞系数值

水温 (℃)	运动粘滞系数 (10 ⁻⁶ m ² /s)	水温 (℃)	运动粘滞系数 (10 ⁻⁶ m ² /s)
0	1.787	20	1.002
5	1.514	25	0.891
10	1.304	30	0.798
15	1.137	35	0.654

表 5.10-5 不同纬度及海拔高度的重力加速度值 (m/s²)

纬度 (°)	平均海平面以上的的高度 (m)				
	0	1000	2000	3000	4000
0	9.780	9.777	9.774	9.771	9.768
10	9.782	9.779	9.776	9.773	9.770
20	9.786	9.783	9.780	9.777	9.774
30	9.793	9.790	9.787	9.784	9.781
40	9.802	9.799	9.795	9.792	9.789
50	9.811	9.808	9.804	9.801	9.798
60	9.819	9.816	9.813	9.810	9.807
70	9.826	9.823	9.820	9.817	9.814

6 模型验收试验

6.1 能量试验

6.1.1 在浑水试验前应先进行清水试验。清水的效率及功率试验，一般选取额定工况导叶开度 α_0 的 30%~120% 的范围。导叶开度间隔为 α_0 的 10% 左右。根据委托方的要求也可扩大试验范围。浑水试验的导叶开度间隔可以大些。

6.1.2 应至少选定 2 个导叶开度的 $\eta=f(\alpha_{11})$ 曲线进行清水和浑水重复验证，其中 1 个导叶开度应在最优效率区，其他需要进行重复验证的工况除保证点外，由委托方在综合特性曲线上选定。

6.1.3 叶片可转动的模型水轮机，试验时叶片转角间隔可定为 5°。对最优效率点的转角及水轮机的额定工况点、设计工况点应进行重复验证。

6.2 空化试验

6.2.1 除采用能量法（即外特性法）确定清水和浑水临界空化系数 σ_c 外，应同时用闪频仪等观测清水初生空化系数、电站装置空化系数和临界空化系数时，叶片上气泡发生的部位及发展过程，描绘气泡覆盖面积、长度及气穴特征。并进行摄影。初生空化系数 σ_i 根据气泡发生情况可由双方协商确定。用声学法检测浑水初生空化。声学法应在清水条件下用闪频仪等的观测结果进行校核。

6.2.2 空化特性试验的曲线以横坐标为空化系数 σ ，纵坐标为水轮机效率 η 、单位功率 P_{11} 及单位流量 Q_{11} ，绘制出以下三条曲线：效率与空化系数曲线 $\eta=f(\sigma)$ ；单位功率与空化系数曲线 $P_{11}=f(\sigma)$ ；单位流量与空化系数曲线 $Q_{11}=f(\sigma)$ 。

6.2.3 临界空化系数 σ_c 的选取，宜以 $\eta=f(\sigma)$ 线为主，并参考 $P_{11}=f(\sigma)$ 线及 $Q_{11}=f(\sigma)$ 线。

6.2.4 临界空化系数 σ_c 可参考以下方法确定，在合同中应明确规定。

a) 与无空化工况效率相比，效率开始变化时的空化系数〔图 6.2.4 (a)〕。

b) 与无空化工况效率相比，效率降低 1% 时的空化系数〔图 6.2.4 (b)〕。

c) 无空化工况的效率线与效率急剧下跌线交点处的空化系数，该下跌线系由至少三个测点连成的直线〔图 6.2.4 (c)〕。

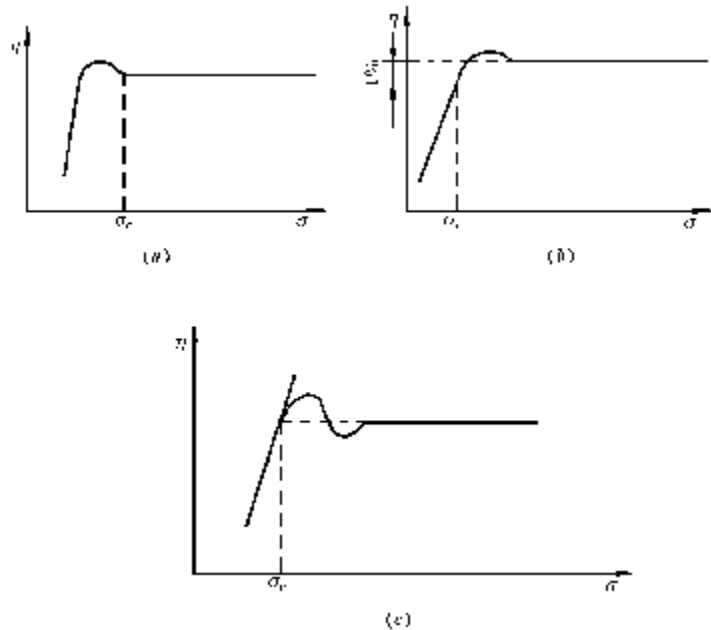


图 6.2.4 临界空化系数 σ_c 的几种常见确定方法

6.3 飞逸转速特性试验

验证飞逸转速特性，一般在电站装置空化条件下使用清水进行。是否在浑水条件下进行该项试验可由合同（协议）双方协商确定。

6.4 水压脉动试验

验证清水和浑水水压脉动特性，应以尾水管上商定部位的水压脉动为主。根据合同要求也可以验证蜗壳、顶盖等部位的水压脉动幅值及频率。水压脉动试验应在电站装置空化系数下进行。试验结果可按混频给出，也可按分频给出，但在合同中应明确规定。

6.5 力特性试验

验证力特性主要验证轴向水推力、导叶总水压力及水力矩。叶片可转动的模型水轮机还应验证叶片所受的最大扭矩。该项试验一般在清水条件下进行，合同（协议）双方也可约定在浑水条件下进行。

6.6 磨损特性试验

6.6.1 通流部件的磨损部位及相对磨损强度试验一般采用易损涂层法进行。若直接对模型水轮机流道表面进行磨损试验，该试验应在另备的一套部件（包括转轮、导叶、止漏环等）上进行，备件的流道尺寸及其能量、空化特性应与进行性能试验时一致。

6.6.2 若采用易损涂层法进行磨损特性试验时，涂层宜分层涂覆，各层宜以不同颜色相区别。涂层表面应光滑，厚度应均匀，总厚度不宜超过 0.5mm。涂层的物理、化学性质应稳定，并有良好的耐水性，试验结束后应易于清除。涂层的抗磨能力应能满足 6.6.3 的要求。

6.6.3 每一工况点磨损试验时间应不少于 30min。如果磨损试验时间超过 3h，则每 3h 应更换一次试验用泥沙。更换后试验泥沙含量应符合 5.5.4 的要求。

6.6.4 应至少选取一个工况点进行磨损特性的重复试验，两者相应部位磨损强度的允许偏差为±25%。

6.6.5 磨损试验结束后，应按不同部位的磨损面积和深度分析各部位的相对磨损强度，并据此为原型机组的抗磨防护或模型机组

的抗磨改进提供依据。在委托方提供了两个以上的不同转轮或模型机组用于抗磨性能的对比筛选时，应在相同含沙量下分别对每个转轮或模型机组进行磨损特性对比试验，试验后应根据各自的试验条件分析相对抗磨能力，并推荐抗磨性能方面的优选转轮或模型机组。

6.7 浑水模型验收试验内容

各项浑水模型验收试验规定含沙量、组次，应根据实际情况由合同（协议）双方协商确定。

6.8 其他试验项目

本规程中未说明的项目试验方法、精度要求，可由合同（协议）双方协商确定。

7 保证值的验证

7.1 验证试验前制造厂应提供验证需要的各种资料，包括综合特性曲线，各导叶开度的 $\eta=f(n_{11})$ 曲线， $\eta=f(\sigma)$ 曲线，飞逸转速特性曲线，水压脉动曲线以及其他与验证有关的曲线和数据。

7.2 经双方协商可以用模型试验的结果作为保证值，也可以用模型试验结果，考虑比尺效应经过修正后的结果作为原型水轮机的保证值。考虑比尺效应的效率修正方法，见 7.4。

7.3 效率与功率保证值的验证：应在电站装置空化系数条件下验证各含沙量下水轮机的最高效率，最高水头、设计水头、额定水头及最低水头各工况下的效率，输出功率以及加权平均效率。

7.4 将模型水轮机效率换算为原型水轮机的效率时，应按合同中规定的换算公式进行。如合同中未规定换算公式及办法，可用下列公式进行换算

$$\eta_{h,p} = \eta_{h,M} + \Delta\eta_h \quad (7.4-1)$$

$$\Delta\eta_h = \delta_{ref} \left[\left(\frac{Re_{u,ref}}{Re_{u,M}} \right)^{0.16} - \left(\frac{Re_{u,ref}}{Re_{u,p}} \right)^{0.16} \right] \quad (7.4-2)$$

$$\delta_{ref} = \frac{1 - \eta_{h,opt,M}}{\left(\frac{Re_{u,ref}}{Re_{u,opt,M}} \right)^{0.16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \quad (7.4-3)$$

$$Re_u = \frac{D \cdot U}{\nu} \quad (7.4-4)$$

式中 $Re_{u,ref} = 7 \times 10^6$;

$\eta_{h,p}$ ——原型水轮机水力效率，%；

- $\eta_{h,M}$ ——模型水轮机水力效率, %;
- $Re_{u,M}$ ——每一试验点的模型雷诺数;
- $Re_{u,P}$ ——相似工况点的原型雷诺数;
- $\eta_{h,opt,M}$ ——每一试验含沙量下模型水轮机最优效率, %;
- $Re_{u,opt,M}$ ——每一试验含沙量下模型最优效率 $\eta_{h,opt,M}$ 点处的雷诺数;
- V_{ref} ——对应于 $Re_{u,ref}$ 的损失分布系数, 对转桨式水轮机, V_{ref} 取 0.8, 混流式及定桨式水轮机, V_{ref} 取 0.7;
- D ——参考直径, m, 对轴流、斜流及贯流式水轮机, $D=D_1$ (见图 4.2-1), 对混流式水轮机, $D=D_2$ (见图 4.2-2);
- U ——参考直径 D 处的圆周速度, m/s;
- ν ——运动粘滞系数, m^2/s 。

对于不同的试验含沙量, 应分别以各自的 $\eta_{h,opt,M}$ 及 $Re_{h,opt,M}$ 进行模型到原型的效率换算。

7.5 空化保证值的验证: 应根据合同中规定和委托方要求的工况点, 验证电站装置空化系数, 临界空化系数及初生空化系数, 给出相应清水状态下的空化照片, 或用简图描述其部位及形态。

7.6 水压脉动保证值的验证: 应根据合同规定, 验证水压脉动特性及其振幅和频率。试验结果的给出方法见 6.4。

7.7 其他参数换算: 由模型验收试验得出的每个试验工况点的数据, 换算到原型水轮机的流量 Q_P 、功率 P_P 、及转速 n_P , 可按下列公式进行

$$Q_P = Q_M \left(\frac{H_{n,P}}{H_{n,M}} \right)^{1/2} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \quad (7.7-1)$$

$$P_P = P_M \left(\frac{H_{n,P}}{H_{n,M}} \right)^{3/2} \left(\frac{D_P}{D_M} \right)^2 \frac{\eta_{h,P}}{\eta_{h,M}} \quad (7.7-2)$$

$$n_P = n_M \left(\frac{H_{n,P}}{H_{n,M}} \right)^{1/2} \left(\frac{D_M}{D_P} \right) \quad (7.7-3)$$

式中 下角标 M ——模型；
下角标 P ——原型。

8 模型验收试验的组织等事项

8.1 模型验收试验时应按合同规定，由委托方组成验收小组进行验收，承担模型验收试验的一方负责试验事宜。制造厂应派出技术人员负责解答有关的技术问题。必要时可以聘请各方同意的监督和仲裁人。

8.2 验收试验大纲应由承担模型试验单位根据合同制定，并提交委托方审定。试验工作日程由双方协商确定。

8.3 验收试验大纲应包括以下主要内容：

- a) 模型验收试验台的具体要求；
- b) 模型验收试验项目；
- c) 模型水轮机的检查及测量仪器的校验；
- d) 各项验收试验的规定泥沙含量、组次及工况点的选定；
- e) 要求完成的验收成果，包括各种特性曲线、数据、图表和通流部件的几何形状及尺寸。

8.4 验收试验报告应包括以下主要内容：

- a) 有关模型验收试验的各项记事、文件及资料；
- b) 参加验收试验人员名单；
- c) 验收试验项目；
- d) 模型验收试验台及模型水轮机的说明；
- e) 进行验收试验的过程及测量仪器校验方法的介绍；
- f) 至少有一个测程从原始数据至最终结果的详细计算例子；
- g) 测量仪表的检验，验收试验各种参数测量误差的分析；
- h) 模型水轮机流道几何尺寸测量结果；
- i) 各种试验曲线及图表；
- j) 试验结果与保证值的比较及技术结论；
- k) 双方负责人签字。

附加说明

主 编 单 位：中国水利水电科学研究院

参 编 单 位：水利部天津勘测设计研究院

主要起草人：陆 力 周先进 赵 琨 王海安
由彩堂 何成连