

KCS 99.100

P 60

备案号 J889—2008

**SL**

中华人民共和国水利行业标准

**SL 142—2008**

替代 **SL 142—97**

## 水轮机模型浑水验收试验规程

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

**2008-11-10** 发布

**2009-02-10** 实施

中华人民共和国水利部 发布

https://www.sizjxx.com  
水利造价信息网

中华人民共和国水利部  
关于批准发布水利行业标准的公告

2008 年第 30 号

中华人民共和国水利部批准《水轮机模型浑水验收试验规程》(SL 142—2008) 等 2 项标准为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	水轮机模型浑水验收试验规程	SL 142—2008	SL 142—97	2008.11.10	2009.02.10
2	水工混凝土结构设计规范	SL 191—2008	SL/T 191—96 和 SDJ 20—78	2008.11.10	2009.02.10

二〇〇八年十一月十日

http://www.sizjxx.com  
水利造价信息网

## 前 言

根据水利部水利水电规划设计总院的水利水电勘测设计技术标准修订工作安排，按照《水利技术标准编写规定》（SL 1—2002）的要求，对《水轮机模型浑水验收试验规程》（SL 142—97）进行修订。

本标准共 7 章 15 节 108 条和 2 个附录，主要技术内容包括：

- 总则；
- 术语、符号及计量单位；
- 试验台；
- 模型水轮机；
- 参数测量及不确定度；
- 验收试验；
- 保证值的验证。

对 SL 142—97 修订的内容，主要包括以下几个方面：

——在前引部分增加了前言及基本信息，取消了原规程中的附加说明；

——在“术语、符号及计量单位”中，增加了术语的英文注释，并对部分术语进行了重新修改和整理；

——在“试验台”中，提高了试验最小雷诺数的要求，提高了对试验台浑水试验效率测试不确定度的要求；

——在“模型水轮机”中，提高了水轮机模型加工精度的要求；

——在“参数测量及不确定度”中，增加了对试验用泥沙中值粒径的要求；

——在“保证值的验证”中，增加了磨损评估的内容。

——取消了原规程中的第 8 章“模型验收试验的组织等事项”；增加了附录 B“验收试验大纲和报告”。

另外，本标准还对原规程局部结构和文字描述进行了修改。  
本标准所替代规程的历次版本为：

——**SL 142—97**

本标准批准部门：中华人民共和国水利部

本标准主持机构：水利部水利水电规划设计总院

本标准解释单位：水利部水利水电规划设计总院

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准参编单位：中水北方勘测设计研究有限责任公司

本标准出版、发行单位：中国水利水电出版社

本标准主要起草人：陆 力 李铁友 何成连

王海安 马素萍

本标准审查会议技术负责人：刘志明 王福军

本标准体例格式审查人：窦以松

<https://www.slzjxx.com>  
水利造价信息网

## 目 次

<b>1</b>	<b>总则</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>术语、符号及计量单位</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>术语</b>	<b>7</b>
<b>2.2</b>	<b>主要符号及计量单位</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>试验台</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>模型水轮机</b>	<b>15</b>
<b>5</b>	<b>参数测量及不确定度</b>	<b>22</b>
<b>5.1</b>	<b>一般规定</b>	<b>22</b>
<b>5.2</b>	<b>流量测量方法及不确定度</b>	<b>22</b>
<b>5.3</b>	<b>水头测量方法及不确定度</b>	<b>22</b>
<b>5.4</b>	<b>功率测量方法及不确定度</b>	<b>22</b>
<b>5.5</b>	<b>转速测量方法及不确定度</b>	<b>23</b>
<b>5.6</b>	<b>含沙量测量方法及偏差</b>	<b>23</b>
<b>5.7</b>	<b>其他测量参数及不确定度</b>	<b>24</b>
<b>5.8</b>	<b>水轮机空化系数和模型效率</b>	<b>24</b>
<b>5.9</b>	<b>总不确定度</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>验收试验</b>	<b>26</b>
<b>6.1</b>	<b>能量特性试验</b>	<b>26</b>
<b>6.2</b>	<b>空化特性试验</b>	<b>26</b>
<b>6.3</b>	<b>泥沙磨损特性试验</b>	<b>27</b>
<b>6.4</b>	<b>其他试验</b>	<b>28</b>
<b>7</b>	<b>保证值的验证</b>	<b>29</b>
	<b>附录 A 水银的密度、水的物理性质和重力加速度</b>	<b>31</b>
	<b>附录 B 验收试验大纲和报告</b>	<b>33</b>
	<b>标准用词说明</b>	<b>34</b>

## 1 总 则

**1.0.1** 为了规范水轮机模型浑水验收试验，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于含沙量不超过  $50\text{kg/m}^3$ ，中值粒径小于  $0.1\text{mm}$  的悬移质反击式（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。

**1.0.3** 水轮机模型浑水验收试验主要包括能量特性、空化特性、磨损特性和其他试验。

**1.0.4** 下列标准包含的条文，通过在本标准中引用而构成本标准的条文。

**GB/T 2900.45** 电工术语 水电站水力机械设备

**GB/T 10969** 水轮机通流部件技术条件

**GB/T 15613** 水轮机模型验收试验规程

**IEC 60193** 水轮机、蓄能泵和水泵水轮机模型验收试验

**1.0.5** 水轮机模型浑水验收试验除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

## 2 术语、符号及计量单位

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 清水 clean water

悬移质泥沙含量不大于  $0.05 \text{ kg/m}^3$ ，且能够清晰目测转轮进口或出口处空化空泡的水。

#### 2.1.2 浑水 sediment water

悬移质泥沙含量大于  $0.05 \text{ kg/m}^3$ ，且不能够清晰目测转轮进口或出口处空化空泡的水。

#### 2.1.3 泥沙含量 (含沙量) sediment concentration

单位水体中所含泥沙的质量。

#### 2.1.4 水柱高度 water column

用于表示压强的清水水柱高度。

#### 2.1.5 清水密度 density of clean water

单位体积清水的质量。

#### 2.1.6 浑水密度 density of sediment water

单位体积浑水的质量。

#### 2.1.7 表计压力 gauge pressure

系统中任意测点大于或小于大气压力的表计读数。

#### 2.1.8 表计高度 gauge height

测量表计在测点以上的高度  $a$  按该点浑水密度折算的水柱高度，按式 (2.1.8) 计算：

$$a' = \frac{\rho_s a}{\rho} \quad (2.1.8)$$

#### 2.1.9 位置水头 potential head

测点到基准面的高度  $Z$ ，按该点的浑水密度折算的水柱高度，按式 (2.1.9) 计算：

$$Z' = \frac{\rho_s Z}{\rho} \quad (2.1.9)$$



### 2.1.10 压力水头 pressure head

以水柱高度表示的系统中任意点的压强，按式 (2.1.10) 计算：

$$h_p = a' + \frac{p_a}{\rho g} \quad (2.1.10)$$

### 2.1.11 速度水头 velocity head

平均流速的平方除以 2 倍重力加速度，再按该点的浑水密度折算的水柱高度，按式 (2.1.11) 计算：

$$h_v = \frac{\rho_s V^2}{2\rho g} \quad (2.1.11)$$

### 2.1.12 总水头 head

某给定过水断面的压力水头、速度水头和位置水头的总和，按式 (2.1.12) 计算：

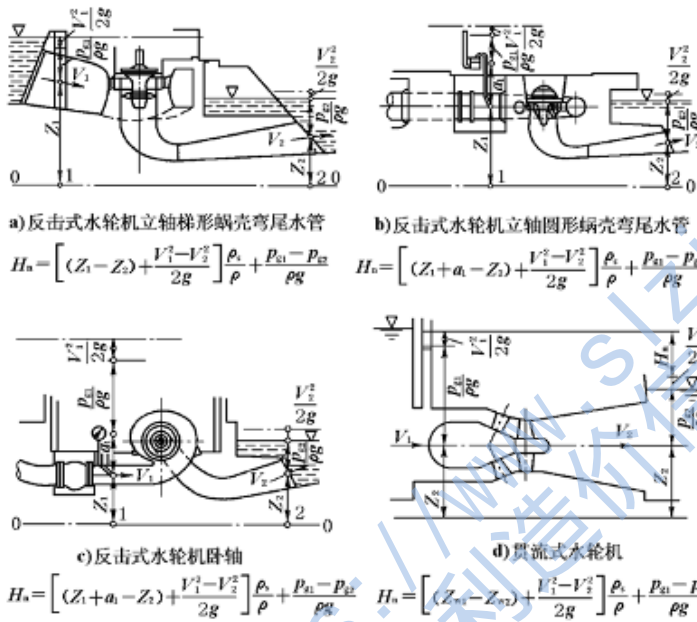


图2.1.13 水轮机净水头的确定

$$H_t = h_p + h_v + Z' \quad (2.1.12)$$

**2.1.13 净水头 net head**

水轮机做功用的有效水头，见图 2.1.13。

**2.1.14 吸出高度 static suction head**

水轮机基准面至尾水位的高度  $H_s$  (见图 2.1.14)，按该点的浑水密度折算的水柱高度，按式 (2.1.14) 计算：

$$H_s' = \frac{\rho_s H_s}{\rho} \quad (2.1.14)$$

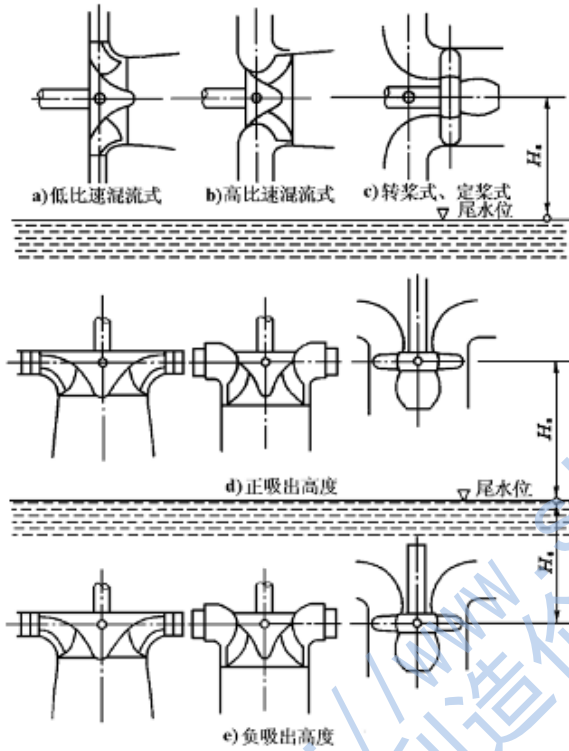


图 2.1.14 确定吸出高度  $H_s$  的基准面

### 2.1.15 转轮公称直径 *reference runner diameter*

水轮机转轮规定部位的直径，见图 2.1.15。

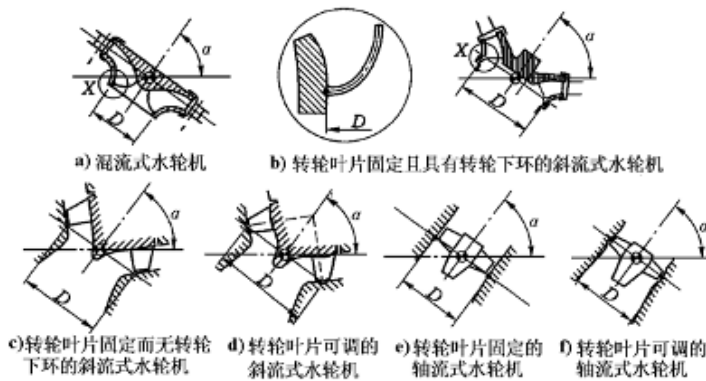


图2.1.15 转轮公称直径

### 2.1.16 粒径级配 *grain size distribution*

按粒径大小分级，某一级粒径所占总重量的百分数。

### 2.1.17 中值粒径 *median grain size*

在粒径级配曲线上对应 50% 含量的颗粒粒径。

### 2.1.18 泥沙矿物组成 *sediment mineral composition*

泥沙中不同矿物成分的含量情况。

### 2.1.19 泥沙磨损 *sand erosion*

含沙水流对水轮机通流部件表面所造成的材料损坏。

## 2.2 主要符号及计量单位

$S$ ——泥沙含量(含沙量)( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$h$ ——水柱高度( $\text{m}$ )

$\rho$ ——清水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\rho_s$ ——浑水密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$Z$ ——位置水头( $\text{m}$ )

$h_p$ ——压力水头( $\text{m}$ )

$\sigma'$ ——表计高度(m)  
 $p_s$ ——表计压力(Pa)  
 $h_v$ ——速度水头(m)  
 $H_t$ ——总水头(m)  
 $H_n$ ——净水头(m)  
 $h_a$ ——大气压(m)  
 $H_s'$ ——吸出高度(m)  
 $\sigma$ ——空化系数  
 $\sigma_c$ ——临界空化系数  
 $\sigma_1$ ——初生空化系数  
 $\sigma_p$ ——电站空化系数  
 $Q$ ——水轮机流量(m<sup>3</sup>/s)  
 $V$ ——平均流速(m/s)  
 $P_{\text{in}}$ ——水轮机输入功率(kW)  
 $P_{\text{out}}$ ——水轮机输出功率(kW)  
 $\eta$ ——水轮机效率  
 $n$ ——转速(r/min)  
 $n_m$ ——飞逸转速(r/min)  
 $d_{50}$ ——中值粒径(mm)

### 3 试 验 台

**3.0.1** 试验台分闭式和开式两种，开式试验台一般不用于水轮机模型浑水空化特性试验。

**3.0.2** 开式试验台的上、下游应设置浑水搅拌装置。闭式试验台的上下游水箱的形状设计应防止泥沙沉积，必要时应设置浑水搅拌装置。

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

**3.0.4** 试验台连接管路直径的选择应符合泥沙起动流速的要求。

**3.0.5** 试验系统应在其最底部设置快速排空阀。

**3.0.6** 在进行浑水能量特性、空化特性和其他特性的验收试验之前，宜在同一试验台进行清水试验。

**3.0.7** 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，试验水头的选定应符合下列规定：

1 能量试验水头：轴流式、贯流式不应小于 **4m**，混流式、斜流式不应小于 **20m**。

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

3 磨损特性试验水头不应小于能量试验水头。

4 水压脉动试验水头不应小于空化试验水头。

**3.0.8** 模型尺寸的最小值和应满足的试验条件应符合表 **3.0.8** 的规定。

雷诺数  $Re$  应按式 (3.0.8) 计算：

$$Re = \frac{Dv}{\nu} \quad (3.0.8)$$

式中  $D$ ——转轮公称直径, m;  
 $u$ ——转轮公称直径  $D$  处的圆周速度, m/s;  
 $\nu$ ——运动黏滞系数,  $m^2/s$ 。

表 3.0.8 模型尺寸的最小值和应满足的试验条件

类 型	轴流式、贯流式、斜流式	混流式
$Re$	$>4 \times 10^6$	
$D$ (mm)	$\geq 300$	$\geq 250$

**3.0.9** 试验水头应稳定, 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, 应为试验水头的  $\pm 0.5\%$ 。

**3.0.10** 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 [见图 2.1.13 a)、b)、c)]。速度水头可按断面的平均流速值计算。

**3.0.11** 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 个静压孔应置于相互垂直的直径上; 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, 静压孔不应置于断面的最高及最低点, 并在最高点设排气阀, 在最低点设排沙阀 (见图 3.0.11)。如果测量断面设置在垂直管路上, 应在均压环管上设置 4 个以上排沙排气阀。

**3.0.12** 如选用静压测量方法, 静压孔应是圆形, 并且应垂直于管内壁。测孔直径  $d$  为 3mm~6mm, 长度  $l$  应至少是孔径的 2 倍。测孔圆角  $r$  不应大于  $d/4$ , 离测孔应至少 100mm 范围内的管路内壁应光滑 (见图 3.0.12)。

**3.0.13** 水轮机模型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。

**3.0.14** 水轮机模型进口水流应无旋, 流速应均匀分布。

**3.0.15** 水轮机模型和流量测定装置之间不应有进水或漏水。

**3.0.16** 试验用泥沙宜选用原型水轮机过机泥沙。

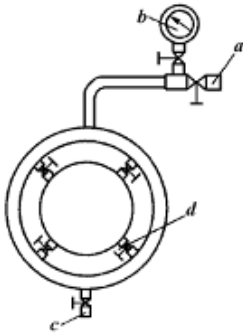


图3.0.11 测量点及测量  
断面布置方法

$a$ —排气;  $b$ —压力计;  $c$ —排水排沙;  $d$ —静压孔  $d=3\text{mm}\sim 6\text{mm}$ ;  $l\geq 2d$ ;  $r\leq d/4$

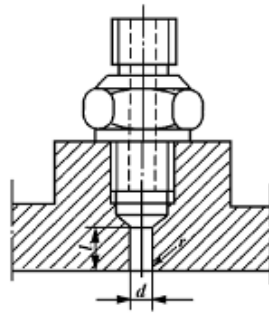


图3.0.12 测压孔形式  
及尺寸

**3.0.17** 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或补充新水后, 应在真空度  $7\text{m}\sim 8\text{m}$  水柱下运行  $1\text{h}$  以上, 方可进行正式试验。在每次加入或更换新泥沙时, 应在同样真空度下再运行  $20\text{min}$  以上方可进行正式试验。

**3.0.18** 空化试验过程中尾水箱的最大真空度不宜超过  $8\text{m}$  水柱。

**3.0.19** 用于模型验收的试验台, 应通过技术鉴定, 其原级测量设备应持有法定计量部门的检定证书。试验台的精度, 清水模型效率的允许总不确定度应为  $\pm 0.3\%$ ; 浑水模型效率的允许总不确定度应为  $\pm 0.5\%$ 。

**3.0.20** 试验台的实际不确定度, 应以模型验收时的校验结果为准。

## 4 模型水轮机

**4.0.1** 水轮机模型通流部件的制造应符合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引起的能量性能变化值，应在试验台的精度范围之内。

**4.0.2** 水轮机模型的通流部件（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 4.0.2-1 的要求。各部件表面粗糙度，应符合表 4.0.2-2 的要求。

表 4.0.2-1 水轮机模型通流部件几何形状允许偏差值  
(见图 4.0.2-1, 图 4.0.2-2)

部 件	项 目	尺寸公差 (%)	备 注
蜗壳	进口直径 $D_0$	$\pm 1.0$	
	尺寸 $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $F$	$\pm 1.5$	
	中心距 $B$	$\pm 1.0$	
座环	内、外圆直径 $D_1$ 、 $D_2$	$\pm 0.4$	
	圆弧半径 $R$	$\pm 2.0$	
	固定导叶高度 $B_0$	$\pm 0.3$	
	固定导叶翼型	$\pm 3.0$	对导叶最大厚度的比值
导叶	导叶高度 $b_0$	$\pm 0.2$	
	分布圆直径 $D_0$	$\pm 0.1$	
	$L_1$ 、 $L$	$\pm 1.0$	
	导叶翼型	$\pm 2.0$	对导叶最大厚度的比值
	波浪度	$\pm 0.02$	
叶片	型线	$\pm 0.1 \sim 2$	
	波浪度	$\pm 0.02$	



表 4.0.2-1 (续)

部 件	项 目	尺寸公差 (%)	备 注
底环	内圆直径 $D_4$	$\pm 0.1$	
	圆弧半径 $R$	$\pm 2.0$	
转轮室	喉部直径 $D_6$	$\pm 0.2$	
	转轮室直径 $D_7$	$\pm 0.1$	
尾水管	进口直径 $D_1$	$\pm 1.0$	
	$L_1$ 、 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W$	$\pm 2.0$	

表 4.0.2-2 水轮机模型通流部件表面最大允许粗糙度

项 目	粗糙度 $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
转轮、活动导叶	0.8 ~ 3.2
座环、固定导叶、底环、转轮室、泄水锥、顶盖等过流表面	3.2 ~ 12.5

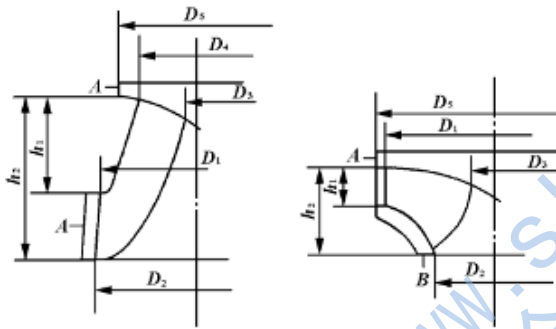


图4.0.2-1 混流式水轮机主要尺寸图

**4.0.3** 水轮机模型各部件的装配尺寸及间隙应符合表 4.0.3 的要求。轴封应适合在浑水条件下使用，无浑水外漏。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水轮机模型流道中的润滑油流量。

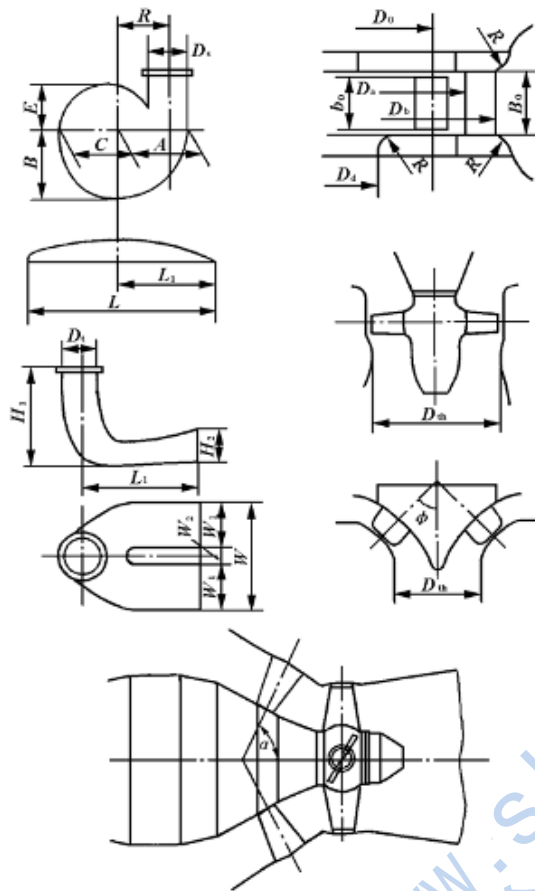


图4.0.2-2 轴流式、斜流式及贯流式水轮机主要尺寸图

**4.0.4** 水轮机模型部件局部可用透明的非金属材料制作，但应保证部件表面的粗糙度及加工精度，并应有足够的刚度。

**4.0.5** 转桨式水轮机模型，在改变叶片旋转角度时，应保持叶片轴线位置不变，并不应另行调整叶片与转轮室的间隙。单个叶片转角的允许偏差应为 $\pm 0.25^\circ$ 。

表 4.0.3 水轮机模型装配尺寸要求 (见图4.0.3)

项 目	允许值(%)	备 注
a	$0.05 < a < 0.1$	对所在点直径的比值
b	$> 0.1$	对导叶高度的比值
c	$0.05 < c < 0.08$	对转轮室直径的比值
d	$\approx 0.5$	对转轮体直径的比值
e	$0.035 < e < 0.08$	对转轮直径的比值
e <sub>0</sub>	$\pm 2.0$	对最优平均开度的比值

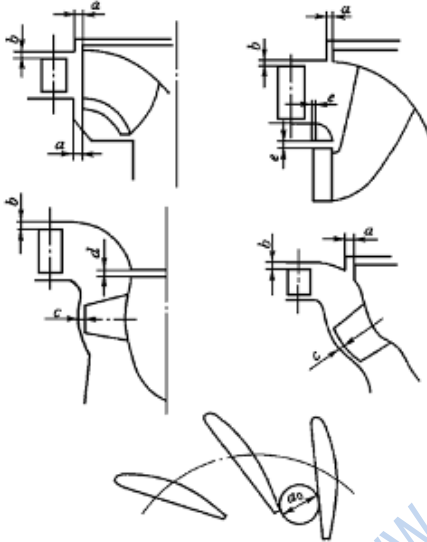


图4.0.3 水轮机模型装配尺寸检查部位

**4.0.6** 水轮机模型各通流部件的连接处，应保持表面平整、光滑。

**4.0.7** 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。

4.0.8 转轮的型线及尺寸检查应符合下列规定：

1 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 4.0.8-1、图 4.0.8-2），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 4.0.8-1）及转轮径向和端面跳动值（见表 4.0.8-2）。

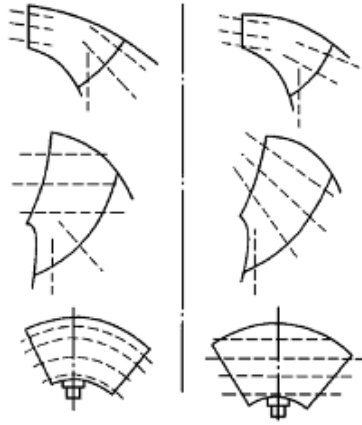


图4.0.8-1 叶片检查断面

表 4.0.8-1 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	
$D_1$ 、 $D_3$	$\pm 0.20\%$	$\pm 0.40\%$	对所在圆直径的比值按加工图检查 符号意义见图 4.0.2-1、图 4.0.2-2、图 4.0.8-2
$D_2$ 、 $D_4$	$\pm 0.25\%$	$\pm 0.35\%$	
$D_5$	$\pm 0.50\%$	$\pm 0.75\%$	
$h_1$ 、 $h_2$	$\pm 0.50\%$	$\pm 0.75\%$	
$A_1$	$\pm 1.5^\circ$	$\pm 3^\circ$	
$A_2$	$\pm 1^\circ$	$\pm 2^\circ$	

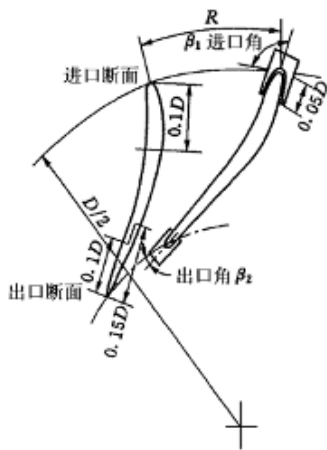


图4.0.8-2 叶片进、出口  
检查部位

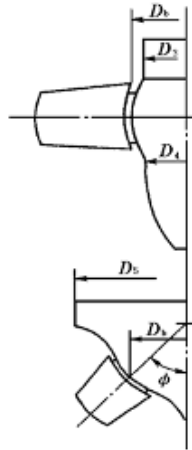


图4.0.8-3 轴流式、斜流式  
及贯流式水轮机模型转轮  
主要检查部位

表 4.0.8-2 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
<b>A</b>	<b>0.01</b>	对所在圆直径的比值 符号意义见图 4.0.2-2
<b>B</b>	<b>0.01</b>	

2 对轴流式、斜流式和贯流式水轮机，应用测绘仪或样板检查叶片至少 4 个截面处的型线。检查选定的截面应至少有 5 个测点。检查转轮各主要尺寸的偏差（见表 4.0.8-3）。

4.0.9 样板或其他特殊量器具应由水轮机模型制造单位提供。样板应根据允许的偏差（不大于叶片型线允许偏差）进行检查。

表 4.0.8-3 轴流式、贯流式及斜流式水轮机模型  
转轮径向和端面跳动检查部位及允许跳动值

项 目	允许偏差	备 注
$D_1$	按转轮室尺寸根据表 4.0.8-1 确定	符号意义见图 4.0.8-3
$D_2$ 、 $D_3$ 、 $D_4$	$\pm 0.1\%$	
$D_5$	按加工图检查	
$\phi$	$\pm 0.25^\circ$	

## 5 参数测量及不确定度

### 5.1 一般规定

- 5.1.1** 在验收试验前后应对主要测量仪表进行校验。  
**5.1.2** 水头、功率等测量仪表在每次试验前后均应进行校验。

### 5.2 流量测量方法及不确定度

- 5.2.1** 流量测量可采用原级法（包括称重法、容积法）、次级法（电磁流量计）等。采用容积法测量时，测量前应清理容器内的泥沙。  
**5.2.2** 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应少于 50s。分流装置的切换和充水计时应准确。  
**5.2.3** 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。  
**5.2.4** 流量测量的允许不确定度应符合表 5.2.4 的规定。

表 5.2.4 流量测量的允许不确定度

测量方法	清水 (%)	浑水 (%)
称重法	±0.1	±0.2
容积法	±0.1	±0.2
电磁流量计法	±0.2	±0.3

### 5.3 水头测量方法及不确定度

- 5.3.1** 水头测量可用压力传感器、差压传感器或其他高精度的压力计。  
**5.3.2** 水头测量的允许不确定度应为±0.15%。

### 5.4 功率测量方法及不确定度

- 5.4.1** 水轮机模型的输出功率通过测功装置测量水轮机轴的力

矩和转速，应按式(5.4.1)计算确定：

$$P_{\text{out}} = M\omega \quad (5.4.1)$$

式中  $P_{\text{out}}$ ——水轮机模型主轴的输出功率，W；

$M$ ——水轮机模型主轴的力矩，N·m；

$\omega$ ——水轮机模型主轴旋转的角速度，rad/s。

**5.4.2** 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。

**5.4.3** 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应为±0.02%。

**5.4.4** 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。平衡力测量的允许不确定度，清水时应为±0.12%。

## 5.5 转速测量方法及不确定度

**5.5.1** 转速测量的一次信号装置应与水轮机模型主轴刚性连接，并确保无相对运动。

**5.5.2** 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。

**5.5.3** 在转速测量过程中，允许转速波动值应为±0.25%。

**5.5.4** 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。

**5.5.5** 转速测量的允许不确定度应为±0.1%。

## 5.6 含沙量测量方法及偏差

**5.6.1** 含沙量测量位置应设在蜗壳进口前的压力管道段上，测点与水轮机模型之间不应有水流进入或流出，管道直径应基本一致。含沙量测量不应影响水轮机进口压力测量结果。

**5.6.2** 试验前应对试验用泥沙的中值粒径进行检测分析。试验中实测的中值粒径与试验前测定的中值粒径允许偏差应为±15%。



**5.6.3** 含沙量测量方法可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应为±10%。

**5.6.4** 试验规定含沙量与设计工况的实测含沙量的允许偏差应为±10%。

**5.6.5** 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。

**5.6.6** 每次试验前后应在相同工况下测量2次含沙量，两者的允许偏差应为±5%。

## 5.7 其他测量参数及不确定度

**5.7.1** 吸出高度测量：测量允许不确定度应为±0.2%。

**5.7.2** 大气压测量：测量允许不确定度应为±0.2%。

**5.7.3** 真空度测量：测量允许不确定度应为±0.2%。

**5.7.4** 水温测量：测量允许不确定度应为±0.5℃。

**5.7.5** 水压脉动测量：水压脉动传感器测量允许不确定度应为±0.5%。

## 5.8 水轮机空化系数和模型效率

**5.8.1** 水轮机空化系数 $\sigma$ 按式(5.8.1)计算：

$$\sigma = \frac{h_a - h_w - h_v - H_s'}{H_n} \quad (5.8.1)$$

式中  $\sigma$ ——水轮机空化系数；

$h_a$ ——大气压，m；

$h_w$ ——水的汽化压力，m；

$h_v$ ——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。

**5.8.2** 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）按式(5.8.2)确定：

$$\eta_M = \frac{P_{\text{测}}}{P_{\text{水}}} = \frac{M\omega}{\rho g Q H_n} = \frac{P' L n}{30 \rho g Q H_n} = K \frac{P' L n}{\rho g Q H_n} \quad (5.8.2)$$

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, m<sup>3</sup>/s;  
 $\rho$ ——清水的密度, kg/m<sup>3</sup>。

## 5.9 总不确定度

**5.9.1** 总不确定度应包括系统不确定度和随机不确定度两部分。系统不确定度应取决于测量方法及测量仪表的校验结果;随机不确定度则应按通常的统计学原理确定,应有足够多的观测次数,使随机不确定度减小到可能的最小值。

模型效率的系统不确定度应按式(5.9.1-1)计算:

$$E_{\eta_s} = \pm \sqrt{E_Q^2 + E_{H_n}^2 + E_P^2 + E_n^2 + E_L^2} \quad (5.9.1-1)$$

式中  $E_Q$ ——流量测量系统不确定度, %;  
 $E_{H_n}$ ——净水头测量系统不确定度, %;  
 $E_P$ ——平衡力测量系统不确定度, %;  
 $E_n$ ——转速测量系统不确定度, %;  
 $E_L$ ——力臂测量系统不确定度, %。

模型效率的允许随机不确定度  $E_{\eta_r}$ , 清水应为  $\pm 0.15\%$ , 浑水应为  $\pm 0.25\%$ 。

水轮机模型效率的总不确定度应以系统不确定度和随机不确定度的方和根求出, 按式(5.9.1-2)计算。

$$E_{\eta} = \pm \sqrt{E_{\eta_s}^2 + E_{\eta_r}^2} \quad (5.9.1-2)$$

**5.9.2** 不同温度下的水银密度、水的汽化压力、清水的密度、清水的运动黏度以及不同纬度与海拔高度的重力加速度值, 见附录 A。不同温度下浑水汽化压力与动力黏度值暂取清水数值。

## 6 验收试验

### 6.1 能量特性试验

**6.1.1** 能量特性试验宜在电站空化系数下进行。如在不空化条件下运行，应通过试验检查在电站空化系数下能量特性是否受空化的影响。如果有影响，则应按照试验结果进行修正。

**6.1.2** 在浑水试验前应先进行清水试验。清水的效率及功率试验，宜选取额定工况导叶开度  $\alpha_0$  的 30%~120% 的范围。导叶开度间隔应为  $\alpha_0$  的 10% 左右。浑水试验的导叶间隔开度可大些。

**6.1.3** 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。

**6.1.4** 转桨式水轮机模型，试验时叶片转角间隔可定为  $5^\circ$ 。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 空化特性试验

**6.2.1** 除应采用能量法（即外特性法）确定清水和浑水的临界空化系数  $\sigma_c$  外，还应观测在清水条件下初生空化系数、电站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。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观测结果进行校核。

**6.2.2** 空化特性试验的曲线应以横坐标为空化系数  $\sigma$ ，纵坐标为水轮机效率  $\eta$ 、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  $\sigma_c$  的选取，宜以  $\eta = f(\sigma)$  线为主，并应

参考  $P_{11} = f(\sigma)$  线及  $Q_{11} = f(\sigma)$  线。

**6.2.4** 临界空化系数  $\sigma_c$  可取  $\sigma_0$  或  $\sigma_1$  (见图 6.2.4), 应在试验大纲中明确规定。

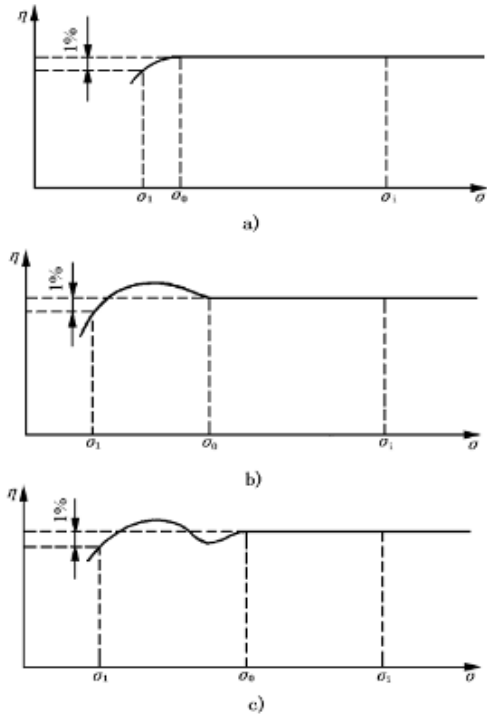


图6.2.4 确定  $\sigma_c$  的常见方法

### 6.3 泥沙磨损特性试验

**6.3.1** 通流部件的磨损部位及相对磨损强度试验宜采用易损涂层法进行。若直接对水轮机模型流道表面进行磨损试验, 该试验应在另各部件上进行 (包括转轮、导叶、止漏环等), 备件的流道尺寸及能量、空化特性应与进行性能试验时一致。

**6.3.2** 若采用易损涂层法进行磨损特性试验时，涂层宜分层涂覆，各层宜用不同颜色相区别。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，并具有良好的耐水性，试验结束后应易于清除。涂层的抗磨能力应满足 **6.3.3** 中抗磨时间的要求。

**6.3.3** 每一工况点的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 **5.6.4** 的要求。

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

**6.3.5** 磨损试验结束后，应按不同部位的磨损面积和磨损深度分析各部位的相对磨损强度，并应据此为原型水轮机的抗磨防护或水轮机模型的抗磨改进提供依据。

#### **6.4 其他试验**

**6.4.1** 飞逸转速特性试验宜在电站空化系数条件下使用清水进行。

**6.4.2** 进行清、浑水水压脉动特性试验应以尾水管上指定部位的水压脉动为主。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空化系数下进行。

**6.4.3** 力特性试验宜在电站空化系数下进行，主要验证轴向水推力、导叶总水压力及水力矩。转桨式水轮机模型还应验证叶片所受的最大扭矩。

## 7 保证值的验证

**7.0.1** 试验前应准备需要的各种资料,包括综合特性曲线和各导叶开度的  $\eta = f(\alpha_{11})$  曲线,  $\eta = f(\sigma)$  曲线, 飞逸转速特性曲线, 水压脉动曲线以及与验证有关的曲线和数据。

**7.0.2** 可用模型试验的结果作为保证值,也可用模型试验结果,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应符合 7.0.4 的规定。

**7.0.3** 效率与功率保证值的验证,应在电站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。

**7.0.4** 将水轮机模型效率换算为原型水轮机的效率时,宜按式 (7.0.4-1)、式 (7.0.4-2)、式 (7.0.4-3) 进行换算。

$$\Delta\eta_{h,p} = \eta_{h,m} + \Delta\eta_h \quad (7.0.4-1)$$

$$\Delta\eta_h = \delta_{re} \left[ \left( \frac{Re_{re}}{Re_m} \right)^{0.15} - \left( \frac{Re_{re}}{Re_p} \right)^{0.15} \right] \quad (7.0.4-2)$$

$$\delta_{re} = \frac{1 - \eta_{h,opt,m}}{\left( \frac{Re_{re}}{Re_{opt,m}} \right)^{0.15} + \frac{1 - V_{re}}{V_{re}}} \quad (7.0.4-3)$$

式中  $Re_{re} = 7 \times 10^6$ ;

$\eta_{h,p}$ ——原型水轮机计算水力效率, %;

$\eta_{h,m}$ ——水轮机模型计算水力效率, %;

$Re_m$ ——每一试验点的模型雷诺数;

$Re_p$ ——相似工况点的原型雷诺数;

$\delta_{re}$ ——对应于  $Re_{re}$  的相对可换算损失;

$\eta_{h,opt,m}$ ——每一试验含沙量下水轮机模型最优计算水力效率, %;

$Re_{opt,m}$ ——每一试验含沙量下水轮机模型最优计算水力效率

$\eta_{h,opt,M}$  点处的雷诺数；

$V_{opt}$ ——对应于  $Re_{opt}$  的损失分布系数，对转桨式水轮机，

$V_{opt} = 0.8$ ，对混流式及定桨式水轮机， $V_{opt} = 0.7$ 。

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

**7.0.5 空化保证值的验证：**应对规定的工况点，验证电站空化系数，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和形态。

**7.0.6 在针对两个以上的模型水轮机或转轮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模型水轮机或转轮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，并推荐抗磨性能优良模型水轮机或转轮。

**7.0.7 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  $n_p$ ，可按式 (7.0.7-1)、式 (7.0.7-2) 及式 (7.0.7-3) 进行计算：

$$Q_p = Q_M \left( \frac{H_{n,p}}{H_{n,M}} \right)^{1/2} \left( \frac{D_p}{D_M} \right)^2 \quad (7.0.7-1)$$

$$P_p = P_M \left( \frac{H_{n,p}}{H_{n,M}} \right)^{3/2} \left( \frac{D_p}{D_M} \right)^2 \frac{\eta_{h,p}}{\eta_{h,M}} \quad (7.0.7-2)$$

$$n_p = n_M \left( \frac{H_{n,p}}{H_{n,M}} \right)^{1/2} \left( \frac{D_M}{D_p} \right)^2 \quad (7.0.7-3)$$

式中 下角标  $M$ ——模型；

下角标  $P$ ——原型。

## 附录 A 水银的密度、水的 物理性质和重力加速度

表 A-1 不同温度下的水银密度值

温度 (°C)	0	5	10	15	20
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	13596	13583	13571	13559	13546
温度 (°C)	25	30	35	40	45
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	13534	13522	13509	13497	13485

表 A-2 不同温度下水的汽化压力值

温 度 (°C)	汽化压力 (m)	温 度 (°C)	汽化压力 (m)	温 度 (°C)	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 A-3 不同温度下清水的密度值

温 度 (°C)	密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	温 度 (°C)	密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	温 度 (°C)	密 度 (kg/m <sup>3</sup> )
0	999.80	4	1000.00	8	999.84
1	999.88	5	999.98	9	999.78
2	999.92	6	999.94	10	999.70
3	999.96	7	999.90	11	999.60



表 A-3 (续)

温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	温度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
12	999.48	20	998.20	28	996.90
13	999.34	21	997.96	29	996.00
14	999.20	22	997.74	30	995.70
15	999.00	23	997.54	31	995.96
16	998.88	24	997.32	32	995.00
17	998.72	25	997.10	33	994.64
18	998.54	26	996.84	34	994.26
19	998.36	27	996.66	35	993.90

表 A-4 不同温度下清水的动力黏度值

水温 (°C)	动力黏度 (10 <sup>-3</sup> N·s/m <sup>2</sup> )	水温 (°C)	动力黏度 (10 <sup>-3</sup> N·s/m <sup>2</sup> )	水温 (°C)	动力黏度 (10 <sup>-3</sup> N·s/m <sup>2</sup> )
0	1.781	15	1.139	30	0.798
5	1.518	20	1.002	35	0.719
10	1.307	25	0.890	40	0.653

表 A-5 不同纬度及海拔高程下的重力加速度值

纬度 (°)	海拔高程 (m)				
	0	1000	2000	3000	4000
	重力加速度 (m/s <sup>2</sup> )				
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	9.796	9.793	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

## 附录 B 验收试验大纲和报告

### B.0.1 验收试验大纲应包括以下主要内容：

- 1 项目简介。
- 2 工作程序和计划进度。
- 3 验收试验前，提供验证需要的各种资料及所有可能影响水轮机水力性能的布置型式和尺寸。
- 4 模型验收试验台的具体要求及试验安排。
- 5 模型验收试验项目。
- 6 水轮机模型的检查及测量仪器的校验。
- 7 各项验收试验规定泥沙含量和中值粒径、组次及工况点的选定。
- 8 要求完成的验收内容，包括各种特性曲线、数据、图表和过流部件的几何形状及尺寸。

### B.0.2 验收试验报告应包括以下主要内容：

- 1 有关模型验收试验的各项记事、文件及资料。
- 2 参加验收试验人员名单。
- 3 验收试验项目。
- 4 模型验收试验台及水轮机模型的说明。
- 5 进行验收试验的过程及测量仪器校验方法的介绍。
- 6 至少有一个测程从原始数据至最终结果的详细计算例子。
- 7 测量仪表的校验，验收试验各种参数测量不确定度的分析。
- 8 水轮机模型流道几何尺寸测量结果。
- 9 各种试验曲线及图表。
- 10 试验结果与保证值的比较及技术结论。
- 11 相关负责人签字。

## 标准用词说明

标准用词	在特殊情况下的等效表述	要求严格程度
应	有必要、要求、要、只有……才允许	要 求
不应	不允许、不许可、不要	
宜	推荐、建议	推 荐
不宜	不推荐、不建议	
可	允许、许可、准许	允 许
不必	不需要、不要求	