

ICS 27. 140

P 55

**SL**

中华人民共和国水利行业标准

**SL 155—2012**

替代 SL 155—95

---

# 水工(常规)模型试验规程

**Specification for normal hydraulic model test**

**2012-07-13 发布**

**2012-10-13 实施**

---

中华人民共和国水利部 发布

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

2012 年第 20 号

中华人民共和国水利部批准《水工（常规）模型试验规程》  
(SL 155—2012) 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	水工（常规）模型试验规程	SL 155—2012	SL 155—95	2012. 7. 13	2012. 10. 13

二〇一二年七月十三日

## 前 言

根据水利部水利行业标准制修订计划，按照《水利技术标准编写规定》(SL 1—2002)的要求，编制本标准。

本标准共 11 章 25 节 148 条和 2 个附录，主要技术内容包括总则、术语、基本资料、相似准则、模型设计、模型制作与安装、试验基本设备、试验量测仪器、试验程序、试验内容与方法、试验资料整理分析与报告编写等。

本次补充或修订的主要内容有：

- 在总则中对规程的研究范围进行修改，增加试验研究大纲编制、泄洪雾化研究内容。
- 在相似准则中增加掺气、泄洪雾化等特殊水力现象的相似要求。
- 在试验设备与量测仪器中，增加一些先进的流速、掺气浓度、风速、地形等测量仪器以及相应的量测仪器检定，如 PIV、ADV 等。
- 在模型设计中，增加试验所需的基本资料一节；增加泄洪雾化模型试验的比尺及范围选取要求。
- 在模型制作与安装中，增加泄洪雾化模型制作和安装要求。
- 完善试验程序一节内容，规范试验过程的控制性文件。
- 在试验方法中，增加泄洪雾化、掺气浓度、风速等模型试验的内容和方法。完善局部冲淤地形测量的相关内容。
- 在试验资料整理与分析中，增加泄洪雾化、掺气浓度、风速等模型试验相关内容。
- 在报告编写中，规范报告编写格式，完善审批程序。
- 根据测量仪器的增加情况，补充附录 A 水工模型试验

测试仪器及其精度要求。

本标准全文推荐。

本标准所替代标准的历次版本为：

——SL 155—95

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：南京水利科学研究院

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：吴时强 韩昌海 骆少泽 周 辉  
沙海飞 赵建钧 吴修锋 周 杰  
杨 宇 张宗孝

本标准审查会议技术负责人：刘志明 汪庆元

本标准体例格式审查人：陈登毅

## 目 次

1	总则 .....	1
2	术语 .....	2
3	基本资料 .....	4
4	相似准则 .....	5
5	模型设计 .....	6
6	模型制作与安装 .....	7
7	试验基本设备 .....	8
7.1	供水系统设施 .....	8
7.2	通用性固定设备 .....	8
8	试验量测仪器 .....	10
8.1	一般规定 .....	10
8.2	水位（水面线）及波高量测仪器 .....	10
8.3	压力量测仪器 .....	10
8.4	流量量测仪器 .....	11
8.5	流速量测仪器 .....	12
8.6	量测仪器、仪表检定 .....	13
9	试验程序 .....	14
10	试验内容与方法 .....	15
10.1	流态观测 .....	15
10.2	水位与水面线测量 .....	15
10.3	泄流能力测试 .....	15
10.4	流速、流向观测 .....	16
10.5	时均压力测量 .....	16
10.6	脉动压力试验 .....	16
10.7	局部冲淤试验 .....	16
10.8	水面波动测量 .....	17

10.9	风速测量	17
10.10	掺气浓度测量	18
10.11	泄洪雾化参数测量	18
11	试验资料整理分析与报告编写	19
11.1	试验资料的记录与整理	19
11.2	试验成果的表达方式	19
11.3	试验成果的整理分析	19
11.4	试验成果报告格式	20
11.5	试验报告编写	20
11.6	试验报告审批和评审	21
附录 A	水工模型试验测试仪器及其精度要求	22
附录 B	各项试验原始记录及计算表(样式)	25
	标准用词说明	29
	条文说明	31

# 1 总 则

**1.0.1** 为了规范水工（常规）模型试验的标准和方法，控制水工模型试验质量，保证试验研究成果的准确性和可靠性，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于以重力为主要作用力的水工（常规）模型试验，包括明流和有压流。

**1.0.3** 水工（常规）模型试验研究范围为水利枢纽布置和各种泄水建筑物的工程水力学问题，主要包括枢纽布置优化、泄水建筑物泄流能力、泄洪消能型式、体型优化、上下游水流衔接、动水荷载以及下游河道冲淤、泄洪雾化及防护措施等。

**1.0.4** 开展水工（常规）模型试验研究，应根据试验任务书要求编写试验研究大纲。

**1.0.5** 本标准的引用标准主要有以下标准：

《掺气减蚀模型试验规程》（SL 157）

**1.0.6** 水工（常规）模型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

### 2.0.1 水工模型 hydraulic model

以重力为主要动力因素，研究水工建筑物、河道与水流等相互作用的实体模型。

### 2.0.2 模型比尺 model scale

模型与原型各对应物理量间的比值。

### 2.0.3 正态模型 normal model

水平长度比尺与垂直长度比尺相等的模型。

### 2.0.4 变态模型 distorted model

水平长度比尺与垂直长度比尺不相等的模型。

### 2.0.5 整体模型 integrated model

研究枢纽工程布置及各建筑物之间相互关系的水工模型。

### 2.0.6 单体模型 monomer model

研究单一泄水建筑物水力特性的水工模型。

### 2.0.7 局部模型 partial model

研究特定部位水力特性的水工模型。

### 2.0.8 断面模型 sectional model

研究具有二元水力特征的泄水建筑物水力特性的水工模型。

### 2.0.9 局部动床模型 local mobile bed model

研究水工建筑物局部冲淤的水工模型。

### 2.0.10 时均压力 time-averaged pressure

由于水流紊动所产生的流速场作用于固壁的附加动力压力时均值。

### 2.0.11 脉动压力 pulsating pressure

由于水流紊动所产生的脉动流速场作用于固壁的附加动力压力，在空间和时间上具有随机性的脉动值。

### 2.0.12 泄洪雾化参数 atomization parameter caused by

flood release

表征由于泄水建筑物在泄洪过程中伴随产生的一种降水和雾化物理现象影响的参数，例如降雨强度、影响范围等。

**2.0.13 掺气浓度** air concentration in flow

在一定的流速下，水流就会发生掺气过程，即空气潜入水中，使水中含气达一定程度，形成水气混合体，混合体中空气体积与混合体体积的比值就是掺气浓度。

## 3 基本资料

**3.0.1** 工程概况包括工程建设任务、工程规模、工程等别、建筑物级别及设计标准等。

**3.0.2** 水文、气象方面应收集以下资料：

1 应收集以下水文资料：

- 1) 工程区域水位—流量关系；
- 2) 特征频率的洪水位及相应下泄流量；
- 3) 其他相关水文资料。

2 必要时应收集水流含沙量、泥沙颗粒级配及河床糙率等资料。

3 必要时应收集工程区域气象资料。

**3.0.3** 地形、地质方面应收集以下资料：

1 应收集模拟范围内的地形、地貌资料，地形图比例不宜小于1：2000。

2 必要时应收集泄水建筑物下游河床及岸坡的地质资料。

**3.0.4** 应根据试验任务和要求，收集以下工程设计资料：

1 枢纽布置。

2 泄水建筑物布置及体型。

3 消能防冲布置。

4 下游河道防护措施。

5 枢纽及泄水建筑物运行工况和要求。

6 其他。

**3.0.5** 对收集的资料应认真整理、分析和核对，发现问题及时与资料提供部门沟通、核实和纠正，对资料的更改和更新应做好相关记录，以备查用。

## 4 相似准则

**4.0.1** 水工模型应满足几何相似、水流运动相似和动力相似，并应遵循弗劳德相似准则。

**4.0.2** 在满足重力相似的基础上，水工模型试验应满足以下限制条件：

1 模型水流应进入阻力平方区；若有困难，至少应保证在紊流区。

2 模型糙率达不到相似要求并对试验成果影响较大时，应进行糙率校正。

3 模型水深不宜小于 3cm。

4 水工建筑物模型应采用正态模型。

**4.0.3** 在特殊情况下，应对阻力、表面张力和黏滞力等因素的缩尺影响加以分析和修正。

## 5 模型设计

**5.0.1** 应遵循重力相似准则，并按几何相似进行模型设计。

**5.0.2** 应根据试验任务和要求，在满足 4.0.2 条规定的限制条件下，结合试验场地、设备、供水能力和量测仪器精度等选定模型类型、比尺及模拟范围。

**5.0.3** 模型类型与比尺的选择宜满足以下要求：

1 研究枢纽布置与各建筑物的相互关系，宜采用整体模型，几何比尺不宜小于 1：120。

2 研究枢纽中单一建筑物的水力特性，宜采用单体模型，几何比尺不宜小于 1：80。

3 研究枢纽中特定部位的水力特性，可采用局部模型，几何比尺不宜小于 1：50。

4 研究具有二元水力特征的泄水建筑物水力特性时，可采用断面模型，几何比尺不宜小于 1：50。

5 研究枢纽建筑物上下游的局部冲淤，宜采用局部动床模型，几何比尺不宜小于 1：120。

**5.0.4** 模型模拟范围应保证试验工作段的流态相似，模型高度应综合考虑模型最高水位和超高、流量量测设施、冲刷深度等因素。

**5.0.5** 特殊水力模型设计应遵循以下要求：

1 模拟泄洪雾化的模型设计，其比尺选定应考虑表面张力相似要求，模型流速宜达到 6m/s 以上，水流韦伯数应大于 500；下游模拟范围应包含下游河道一定高程的两岸边坡，其高程确定应考虑泄洪雾化影响高度。

2 模拟掺气等内容的模型设计参见 SL 157。

3 模拟旋涡相似的模型设计，应考虑表面张力和黏滞力缩尺效应。

**5.0.6** 模型设计应考虑量水装置、稳水装置、尾水闸门控制装置、测点布置等，并选用合适的量测仪器设备。

## 6 模型制作与安装

**6.0.1** 应绘制模型总体布置图、建筑物模型详图、测点布置图，并提出模型加工与安装要求。

**6.0.2** 模型材料可选用木材、水泥、有机玻璃、塑料和金属材料等。

**6.0.3** 模型制作与安装时，应进行必要的结构稳定和强度校核。

**6.0.4** 模型安装应用经纬仪、水准仪或全站仪等控制，并应满足以下精度控制要求：

1 平面导线布置应根据模型形状和范围确定，导线方位允许偏差为 $\pm 0.1^\circ$ 。

2 水准基点和测针零点允许误差为 $\pm 0.3\text{mm}$ 。

3 建筑物模型高程允许误差为 $\pm 0.3\text{mm}$ ，地形高程允许误差为 $\pm 2\text{mm}$ ，平面距离允许误差为 $\pm 10\text{mm}$ 。

**6.0.5** 模型地形制作可采用断面板法、桩点法和等高线法。采用前两法时，模型中两控制断面间距可取 $50\sim 100\text{cm}$ ，对于地形变化较复杂的河段，控制断面应适当加密。

**6.0.6** 模型制作校核与验收应符合以下要求：

1 模型安装完毕后，应进行全面质量校核，并应有完整记录。

2 校核完毕后，应进行试水，发现问题及时采取补救措施。

3 对于大型或重要工程模型，宜组织技术验收。

## 7 试验基本设备

### 7.1 供水系统设施

7.1.1 试验供水系统应包括蓄水池、动力泵、平水装置、配水管和回水槽等设施。

7.1.2 蓄水池应考虑供水、回水便利，蓄水量应满足试验要求。

7.1.3 动力泵类型及型号应根据试验厅（室）用水量和运行情况选用。

7.1.4 试验厅的平水装置可采用平水塔。塔高应高于模型最大高度，但不宜低于5m，其容积可按最大供水量乘以75~100s估算。溢流槽长度可按水面变差1cm而定。在特定条件下，也可采用适当的平水及稳压设施直接供水。

7.1.5 配水管路可采用1~2级网络布局，常用管径为150~500mm，并在适当位置安装控制闸门。对于供水量要求较大的试验厅，可适当增大管径。

7.1.6 回水槽宜采用环状或网状平面布置，槽底坡度宜大于1:200，并在适当部位架设拦污栅和集水井。

### 7.2 通用性固定设备

7.2.1 常规模型试验厅可配备玻璃水槽、水箱和压力箱等通用性固定设备。

7.2.2 玻璃水槽技术规格可按下列要求采用：

1 常规玻璃水槽槽宽0.4~0.8m，高1~2m，长20~30m，流量50~200L/s。特殊情况下，水槽可根据需要确定尺寸及供水能力。

2 玻璃厚度应满足强度和变形的要求。

3 玻璃之间接缝应平整光滑，止水性好。

4 槽宽最大误差不宜超过 $\pm 2\text{mm}$ 。

5 若有需要，可附加变坡装置，调节宜轻便灵活。

### 7.2.3 水箱技术规格可按下列要求采用：

1 常规水箱箱体宜呈矩形，边长 3~4m，高 3~5m，容积 30~80m<sup>3</sup>，开孔宽与水箱宽度之比宜为 1:7~1:8，供水量不宜小于 100L/s。

2 当水箱水深大于 3m 时，宜采用钢结构，最大箱体变形不应超过 5mm。

3 水箱箱内宜布置升降式平水槽，平水槽长视允许水面变差而定。

4 水箱箱内应设稳流装置，保证水面平稳和出流均匀。

5 有特殊要求的水箱，可根据需要确定尺寸，但应校核水箱结构强度和刚度。对于高水箱，应对地基做必要的处理。

### 7.2.4 压力箱技术规格可按下列要求采用：

1 压力箱箱体宜采用平卧圆筒形，直径 1.5~2m，长 3~4m，供水量不小于 100L/s，压力不超过 196kPa (20m 水头)。

2 压力箱应自成供水系统，采用电机稳流器，保持恒定流量。

3 压力箱箱内应设稳流装置，保证出流均匀。

4 压力箱结构强度可按压力容器核算。

## 8 试验量测仪器

### 8.1 一般规定

**8.1.1** 试验量测仪器主要包括：水位（水面线）及波高量测仪器、压力量测仪器、流量量测仪器、流速量测仪器等。各类量测仪器的选用均应满足量程和精度等要求。

**8.1.2** 试验使用的各类量测仪器、仪表均应经过严格的检定。未经检定的仪器、仪表，不应在试验中使用。

### 8.2 水位（水面线）及波高量测仪器

**8.2.1** 水位测针可用于测量恒定流水位及水面线。

**8.2.2** 自动跟踪水位计可用于测量恒定流和非恒定流水位，选型应满足跟踪速度要求。

**8.2.3** 压力传感器可用于测量恒定流和非恒定流水位。

**8.2.4** 波高仪可用于测量水面波动，选型应满足频响范围要求。

### 8.3 压力量测仪器

**8.3.1** 测压管可用于测量恒定流时均压力，但应满足以下要求：

1 测压孔内径应小于 2mm。

2 测压孔应垂直边壁，且孔口与过流面齐平。

3 测压管宜采用玻璃管或透明塑料管，管径应均匀，内径宜大于 6mm；采用塑料管时应避免折弯。应做好排气工作，保持管内水体连通性。

4 测压管控制高程应用水准仪等仪器确定。

**8.3.2** 当压力水头超过 3m 时，宜用压力传感器或压力表测量。

**8.3.3** 测量两点间的压力差可选用差压传感器或液柱比压计。

**8.3.4** 测量脉动压力应采用压力传感器，传感器安装应垂直边壁，且孔口与过流面应齐平；若上述安装要求有困难，可在传感

器与测压孔之间串接刚性短管，管长应短于 0.3m。传感器选型应满足以下要求：

- 1 感应膜直径宜小于 6mm。
- 2 自振频率应大于被测量频率的 5 倍。
- 3 综合精度应满足试验要求。

## 8.4 流量量测仪器

8.4.1 量水堰可用于测量恒定流量，其堰型可按下列要求选用：

1 当流量量程  $Q < 30\text{L/s}$  时，宜选用直角三角堰，流量可根据率定曲线或经验公式确定。

2 当流量量程  $Q \geq 30\text{L/s}$  时，宜选用矩形堰，流量可采用雷伯克经验公式确定。

3 当流量量程  $2\text{L/s} < Q < 90\text{L/s}$  时，可选用复式堰，流量计算应采用率定结果。

8.4.2 量水堰安装应满足以下要求：

1 三角堰堰槽宽度应为 3~4 倍最大堰上水头。

2 矩形堰堰板高度应大于最大堰上水头的 2 倍。

3 堰板应与堰槽垂直正交，堰板顶部应水平。

4 堰槽应等宽，槽壁长度可稍超过堰板位置。

5 矩形堰板与堰下水舌之间应设置通气孔，堰板下水位与堰顶高差不宜小于 7cm。

6 消浪栅应设置在堰板上游 10 倍以上最大堰顶水头处。

7 水位测针孔应设置在 6 倍最大堰顶水头处。

8.4.3 文丘里管宜用于测量恒定流流量，其体型及尺寸应符合标准设计，管径可视流量而定。流量系数应采用率定曲线。

8.4.4 文丘里管的安装应满足以下要求：

1 在文丘里管安装位置的上游 10 倍管径和下游 6 倍管径距离内，应无闸门、弯头等水管配件。

2 文丘里管的上测压孔应设在上游 0.5~1.0 倍管径处，喉部测压孔应设在喉部中央。

3 测压断面应设 4 个孔径为 1mm 的测压孔，并用均压环串联。

4 管道中心线应保持水平。

8.4.5 电磁流量计和超声波流量计可用于测量恒定流流量和非恒定流流量。

8.4.6 电磁流量计和超声波流量计的安装应满足以下要求：

1 流量计应安装在水泵下游侧的直管段，在流量计上游 15 倍管径和下游 5 倍管径范围内应无扰动部件，量测时应保证管道内充满水体。

2 流量计上下游直管段的管道内径与流量计测量管径的偏差应小于 3%，其内壁应清洁光滑。

## 8.5 流速量测仪器

8.5.1 毕托管可用于恒定流时均流速的测定，但应按以下要求选型：

1 当流速量程  $0.15\text{m/s} < v < 2.5\text{m/s}$  时，可选用管径为 8mm 标准毕托管。

2 当流速量程  $0.15\text{m/s} < v < 10\text{m/s}$  时，宜选用管径为 2.5mm 微型毕托管。

8.5.2 旋桨流速仪及旋桨流速流向仪宜用于测量 2m/s 以下的流速流向，其性能要求如下：

1 叶轮直径小于 15mm。

2 起动流速 3~5cm/s。

3 流速  $v$  与转速  $n$  应保证线性关系，即  $v = Kn + C$ ，其中， $K$  为流速变化斜率， $C$  为旋桨流速仪起动流速。

4  $K$  值、 $C$  值可由率定试验确定。

8.5.3 激光流速仪和热线（膜）流速仪可用于测量高流速、脉动流速以及窄缝、旋涡等的流速。

8.5.4 粒子图像测速仪（PIV）可用于测量水流流速分布。

8.5.5 三维多普勒流速仪（ADV）可用于测量复杂流态下的点

流速流向。

## **8.6 量测仪器、仪表检定**

**8.6.1** 试验使用的量测仪器、仪表，凡属市场购置的，均应满足试验测试要求，并应符合国家或行业技术监督部门的计量认证规定。

**8.6.2** 自行研制的仪器、仪表，应采用经技术监督部门认可的检测方法进行自检合格后，方可使用。

**8.6.3** 试验测试仪器及其精度的控制要求见附录 A。

## 9 试验程序

**9.0.1** 应根据试验任务和要求，制定模型试验研究大纲。模型试验研究大纲宜包括以下内容：

- 1 工程概况。
- 2 模型试验研究目的和内容。
- 3 基本资料。
- 4 模型设计、制作和安装。
- 5 主要试验设备和量测仪器。
- 6 模型试验方法与试验条件。
- 7 预期提交的试验成果。
- 8 模型试验研究进度安排。
- 9 模型试验研究人员安排。

**9.0.2** 模型试验前应进行量测仪器率定及模型校验等项预备工作。

**9.0.3** 模型试验宜包括原设计方案试验、修改优化方案试验和推荐方案试验等。

**9.0.4** 模型试验取得阶段性成果后，应及时与委托方沟通，对模型试验阶段性成果进行技术讨论。对专题研究应及时组织专家讨论。

**9.0.5** 模型试验中应及时整理分析试验资料，发现疑问，应随时进行补充试验，加以校验和修正。

**9.0.6** 应提出正式试验研究报告及辅助成果（照片、录像等）。

## 10 试验内容与方法

### 10.1 流态观测

10.1.1 应定性描述模型试验水流流态，说明回流区、旋涡、折冲水流、分离水流、水翅、跌水、壅水等现象及其范围、强弱等特征。

10.1.2 观测方法可采用目测法、示踪法、照相或录像等。

### 10.2 水位与水面线测量

10.2.1 水位测点和水面线测点应根据原型水文资料或模型试验需要设置。

10.2.2 量测仪器可按 8.2 节规定选用。

10.2.3 每测次应重复测量 2~3 次。

10.2.4 记录观测数据应注明试验条件、组次和日期、量测仪器名称和编号等。试验记录表格见附录 B。

### 10.3 泄流能力测试

10.3.1 堰流试验方法应满足以下要求：

1 在形成自由堰流条件下，待水位流量稳定后，测读流量和上下游水位。

2 在固定流量条件下，逐步抬高下游水位形成淹没堰流，测读上下游水位或流量，确定不同淹没度下的泄流能力。

3 改变流量，重复进行上述操作步骤，得到新的试验组次。

10.3.2 孔流试验方法应满足以下要求：

1 在固定闸门开度形成孔流条件下，测量泄流能力。

2 改变闸门开度，得到不同开度条件下的孔流泄流能力。

10.3.3 应根据观测数据计算堰流或孔流的流量系数，淹没流应给出相应的淹没系数。试验记录计算表格见附录 B。

**10.3.4** 泄流能力测试应不少于 5 个流量级，并应包括特征水位和流量，由此得到水位—流量关系曲线。

## **10.4 流速、流向观测**

**10.4.1** 应根据试验任务和要求，布置测速范围和断面。

**10.4.2** 应根据流速变化范围和测量条件选用相应的测速仪器。

**10.4.3** 施测断面应至少布置 3 条垂直测线，每条垂线视水深情况应至少有 3 个测点。对于复杂流态区域，应适当加密测速垂线及测点。

**10.4.4** 在测量流速的同时，应进行流向观测。

**10.4.5** 记录观测数据应注明试验工况、量测仪器名称和编号等。试验记录计算表格见附录 B。

## **10.5 时均压力测量**

**10.5.1** 应根据试验任务和要求，布置时均压力测点。

**10.5.2** 时均压力量测方法可按 8.3 节规定选用。

**10.5.3** 记录观测数据，应注明试验工况、量测仪器名称和编号等。试验记录计算表格见附录 B。

## **10.6 脉动压力试验**

**10.6.1** 脉动压力测点宜与时均压力测点接近或重合。

**10.6.2** 脉动压力量测仪器可按 8.3 节规定选用。每测次应重复测量 3 次。采集时间、采样频率等均应符合采样定理的要求。

**10.6.3** 记录观测数据应注明试验工况、量测仪器名称和编号等。

## **10.7 局部冲淤试验**

**10.7.1** 模型沙选择应满足以下要求：

1 对于沙砾石或岩石节理极为发育的原型河床可用散粒体模拟，其粒径可根据级配曲线按几何相似或抗冲流速相似选择。

2 对于细颗粒泥沙组成的原型河床可用轻质模型沙模拟，其粒径可通过泥沙起动公式计算或预备试验确定。

3 对于岩体构成的原型河床可用节理块或胶结材料模拟，也可近似地用散粒体模拟，模拟材料要求达到与抗冲流速相似。

10.7.2 模型铺沙高程应根据基岩面高程确定，必要时可按覆盖层和基岩分层铺设。

10.7.3 铺沙范围应大于冲刷范围，铺设厚度应大于可能最大冲刷深度。

10.7.4 峡谷河床宜适当考虑岸坡冲刷的影响因素。

10.7.5 冲刷试验时间应满足冲坑稳定要求，特殊情况下应由预备试验确定。

10.7.6 试验前应避免扰动原状沙面，试验后应避免扰动冲淤地形。

10.7.7 应及时测绘冲淤地形，并注明试验工况等。

## 10.8 水面波动测量

10.8.1 应根据试验任务和要求布置测点，宜布置在水面波动剧烈区、重点岸坡、电厂尾水或通航区等部位。

10.8.2 水面波动量测仪器可按 8.2.4 条规定选用，采样时间和频率应符合采样定理的要求，并应重复测量 3 次。

10.8.3 记录的水面波动数据应注明试验工况、量测仪器名称和编号等。

10.8.4 试验前波高仪应及时率定。

## 10.9 风速测量

10.9.1 风速测量应在通气管道的直段进行。直段起点应至少在测量点前 10 倍管径以外，终点应至少在测量点后 4 倍管径以外。

10.9.2 风速测量可采用风速仪或风压计，仪器量程应根据测量风速大小选定。

## 10.10 掺气浓度测量

10.10.1 掺气浓度测量可按 SL 157 规定执行。

## 10.11 泄洪雾化参数测量

10.11.1 泄洪雾化参数主要是泄洪引起的降雨强度及其影响范围。

10.11.2 泄洪雾化参数测量范围包括测量平面范围及高程，可根据预备试验或经验确定。

10.11.3 测量器具可选用量筒、雨量计、滴谱试纸或光学量测仪器等。一个测点宜重复测量 3 次。模型降雨量测量方法宜根据以下条件选用：

- 1 雨量大于 50mm/h 时，宜采用量筒或雨量计。
- 2 雨量 5~50mm/h 时，宜采用称重法或滴谱法。
- 3 雨量小于 5mm/h 时，宜采用滴谱法或光学测量方法。

10.11.4 应记录测量的时长及雨量，确定降雨强度，并根据各测点雨量分布，分析确定雾化影响范围。

## 11 试验资料整理分析与报告编写

### 11.1 试验资料的记录与整理

- 11.1.1 原始记录数据出现错误时，应划掉重写，不应涂改。
- 11.1.2 试验资料应及时整理，试验者、整理者和校对者均应在原始记录及计算表格中签名，对直接采用电脑记录的原始数据，应注明试验者、整理者和校对者姓名。
- 11.1.3 试验数据的有效位数应与试验精度相符。
- 11.1.4 应及时将试验资料整理归档。

### 11.2 试验成果的表达方式

- 11.2.1 当同一试验内容有多组试验资料或一组试验资料有几个参数时，应列表表示。
- 11.2.2 当一组试验资料中的两个变量互为函数关系时，宜绘图表示。
- 11.2.3 当试验组次较多时，可用经验公式表达变量之间的函数关系。
- 11.2.4 重要工程或重要研究项目应有照片、录像，试验录像应配有相应的字幕和解说词。

### 11.3 试验成果的整理分析

- 11.3.1 流态、流向应绘制平面图，并标明水边线、回流范围和主流方向。
- 11.3.2 水位与水面线应按试验组次绘制相应的图表。
- 11.3.3 泄流能力可绘制成相应的水位—流量关系曲线或建立相关的经验公式。
- 11.3.4 流速分布应按试验组次绘制相应的图表。
- 11.3.5 时均压力应按试验组次绘制各部位相应的压力分布

图表。

**11.3.6** 脉动压力试验数据经分析处理后，应用压力脉动随机分布、时域数字特征、频域能量分布特征等描述，并绘制相应的图表。

**11.3.7** 局部冲刷应绘制冲淤平面图，以及冲坑的纵剖面图和横剖面图。

**11.3.8** 水面波动应用波高、周期和频谱特性等参数描述，并绘制相应的图表。

**11.3.9** 风速、风量应用图表表示。

**11.3.10** 泄洪雾化量应用雨量等值线图描述。

## **11.4 试验成果报告格式**

**11.4.1** 试验报告宜由封面、扉页、内容提要、正文、参考文献和附录等组成。

**11.4.2** 试验报告封面应包含试验报告全称、编号、密级、完成单位名称和日期。

**11.4.3** 试验报告扉页应包含项目编号、项目委托单位、项目负责人、主要参加人、报告编写人、审查人、审批人等。

**11.4.4** 试验报告的内容提要应用简短文字叙述试验内容和结论等，并给出相应的关键词。

**11.4.5** 试验报告正文应为试验报告的主体。

**11.4.6** 试验报告的参考文献应列出必要的文献。

**11.4.7** 必要时，试验报告可设置附录。

## **11.5 试验报告编写**

**11.5.1** 试验报告内容应主要包括工程概况、试验目的和内容、技术路线和方法、模型设计、测试手段、必要的试验数据、试验成果分析、结论与建议等。

**11.5.2** 试验报告表述内容应全面，表达应准确，图表应规范，结论观点应明确，建议应切合实际。

**11.5.3** 试验报告应使用中华人民共和国法定计量单位。技术术语应遵循国家标准或行业标准规定，尚无统一规定的应予以定义。

## **11.6 试验报告审批和评审**

**11.6.1** 试验报告应履行必要的审批程序。

**11.6.2** 重大项目的试验报告应组织专家评审。

## 附录 A 水工模型试验测试仪器及其精度要求

表 A 水工模型试验测试仪器及其精度要求

施测对象	测试仪器	精度要求	注意事项
模型	水准仪、经纬仪、全站仪、钢尺	控制局部模型高程和宽度误差小于 0.3mm，长度误差小于 5mm，整体模型地形高程误差小于 2mm，平面距离误差小于 10mm	试验模型应满足 4.0.2 条规定的限制条件，注意减小缩尺影响
水位及水面线	水位测针	测针零点高程的精度应控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ ，每一测次应重复测读 2~3 次，取其稳定值或平均值，测读精度为 $\pm 0.3\text{mm}$	测杆应安装牢固并呈铅垂方向，试验前应检查测针及连接管，不得有堵塞、气泡及漏水现象
	自动跟踪水位计	率定曲线的偏差系数 $C_v = \sigma/\mu$ ， $C_v$ 不应大于 5%，其中， $\sigma$ 为均方差； $\mu$ 为平均值	水位计测杆应安装牢固并呈铅垂方向，每次测试前应进行自检率定，试验量测区间应在率定曲线的直线部分
	波高仪	精度为 $\pm 0.2\text{mm}$	测杆应垂直安装
流量	量水堰板	流量量测应选择合理的堰型，量水堰板板面安装应呈铅垂方向；堰顶安装应呈水平方向；应保证流量测量精度	应按技术要求进行量水堰板安装；待流量稳定后，方可测读上游测针读数；应按不同堰型的率定曲线或有关计算公式推算模型流量
	文丘里流量计	应保证安装要求，减少测量误差	应按技术要求进行文丘里流量计的安装；应定期进行自检率定，绘制流量率定曲线
	电磁流量计、超声波流量计	管内平均流速应大于 0.2m/s	安装应满足 8.4.6 条的要求，并定期维护和检定

表 A (续)

施测对象	测试仪器	精度要求	注意事项
流速	毕托管	<p>(1) 自检率定, 当雷诺数 <math>Re=3300\sim 360000</math> 时, 流速系数 <math>\phi=1</math>, 误差控制在 <math>1\%\sim 2\%</math>;</p> <p>(2) 每一测次应重复测读 <math>2\sim 3</math> 次, 取其稳定值或平均值; 比压计水头差测读精度应控制在 <math>3\text{mm}</math> 以内</p>	<p>试验前, 应检查毕托管和连接管是否堵塞或漏气; 在静水中进行冲水排气, 使比压计两端水柱同高; 在不进气条件下, 将毕托管放入施测位置的水体中, 对准流向</p>
	旋桨流速仪	<p>(1) 自检率定, 率定测点不应少于 15 个, 精度应满足 75% 以上测点, 偏差不应超过 <math>2\%\sim 3\%</math>;</p> <p>(2) 每一测点记录值不应少于 <math>4\sim 5</math> 次, 每次采集时间不应少于 <math>5\sim 10\text{s}</math>;</p> <p>(3) 断面流速迭加计算, 与实测流量比较, 两者误差不应超过 <math>5\%</math></p>	<p>每个测流断面测读不应少于 3 条垂线; 每条垂线测点不应少于 3 点</p>
	激光流速仪、热线流速仪	精度为 $\pm 0.5\%$	<p>在实际环境中测量误差会增大, 因此在使用时应注意仪器正常维护以及试验用水水质要求等, 以减少测量误差</p>
	粒子图像测速仪 (PIV)	精度为 $\pm 0.1\%$	
	三维多普勒流速仪 (ADV)	精度为 $\pm 0.5\%$	<p>探头以下 <math>5\text{cm}</math> 范围内为仪器测量盲区, ADV 无法测量该区水流速度, 同时测速时应注意避免周边磁场等对量测结果的影响</p>

表 A (续)

施测对象	测试仪器	精度要求	注意事项
压力	测压管	<p>(1) 用水准仪测定各测点及测压板基准高程，测读精度应达 0.3mm；</p> <p>(2) 在静水中校验测压管液面与测点高程一致，误差不应超过 0.5mm；</p> <p>(3) 水位稳定后，方能测读，每一测次应重复测读 3~4 次，取其平均值或稳定值，测读精度应控制在 3mm 以内</p>	按技术要求进行测压管安装，每次试验前应检查测压孔和测压管是否符合要求，并做好排气工作，保证管内水体连通性
	压力传感器	每次测试前应进行自检率定，率定曲线的偏差系数 $C_e = \sigma/\mu$ ， $C_e$ 不应大于 5%，每次测量的记录时间不应少于 5s	压力传感器的安装应垂直壁面，且孔口与过流面齐平

## 附录 B 各项试验原始记录及计算表 (样式)

表 B-1 水面线观测记录表

\_\_\_\_\_ 试验

试验组次 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

上游水位 (m) \_\_\_\_\_ 上游测针读数 (cm) \_\_\_\_\_ 始 \_\_\_\_\_ 上游测针零点高程 (m) \_\_\_\_\_  
 终 \_\_\_\_\_

下游水位 (m) \_\_\_\_\_ 下游测针读数 (cm) \_\_\_\_\_ 始 \_\_\_\_\_ 下游测针零点高程 (m) \_\_\_\_\_  
 终 \_\_\_\_\_

原型流量 (m<sup>3</sup>/s) \_\_\_\_\_ 堰上测针读数 (cm) \_\_\_\_\_ 始 \_\_\_\_\_ 堰口测针读数 (cm) \_\_\_\_\_  
 终 \_\_\_\_\_

测尺基点高程 (m) \_\_\_\_\_

测点编号	测点距离 (m)	零点距离 (m)	测点模型高程 (m)	测点水面高程 (m)	备注

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-2 水位流量观测记录表

\_\_\_\_\_ 试验

试验组次 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

开启 门号	闸门开度 (m)	量水堰测 针读数 (cm)	原型流量 (m <sup>3</sup> /s)	上游水位 测针读数 (cm)	上游 水位 (m)	下游水位 测针读数 (cm)	下游 水位 (m)	备注

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-3 堰流流量系数计算表

\_\_\_\_\_ 试验

试验组次 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

堰流公式  $Q = mb \sqrt{2g} H_0^{3/2}$  宽度  $b =$  \_\_\_\_\_ (m)  $b \sqrt{2g} =$  \_\_\_\_\_

流量 $Q$ ( $m^3/s$ )	上游水头 $H$ (m)	下游水头 $h_s$ (m)	行近流速水头 $v^2/2g$ (m)	上游能头 $H_0$ (m)	$H_0^{3/2}$	淹没度 $h_s/H_0$	流量系数 $\mu$	流态

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-4 孔流流量系数计算表

\_\_\_\_\_ 试验

试验组次 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

孔流公式  $Q = \mu ab \sqrt{2gH}$  宽度  $b =$  \_\_\_\_\_ (m)  $b \sqrt{2g} =$  \_\_\_\_\_

开启 门号	闸门 开度 $a$ (m)	流量 $Q$ ( $m^3/s$ )	上游 水头 $H$ (m)	下游水头 $h_s$ (m)	行近流速 水头 $v^2/2g$ (m)	相对开度 $a/H$	淹没度 $h_s/H$	流量系数 $\mu$	流态

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-5 毕托管流速记录表

\_\_\_\_\_ 试验

测杆编号 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

原型流量 (m<sup>3</sup>/s) \_\_\_\_\_

量水堰测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

流速比尺 \_\_\_\_\_

断面编号 \_\_\_\_\_

测线号	水深 (m)	测点位置	毕托管水柱高差 (cm)		$\sqrt{h}$	原型流速 (m/s)	流向	备注
			倾斜	垂直 $h$				

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-6 旋浆流速仪流速记录表

\_\_\_\_\_ 试验

测杆编号 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

原型流量 (m<sup>3</sup>/s) \_\_\_\_\_

量水堰测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

流速比尺 \_\_\_\_\_

仪器编号 \_\_\_\_\_

K = \_\_\_\_\_

C = \_\_\_\_\_

测线号	水深 (m)	测点位置	采样时间 $t$	仪器读数 $n$				$\left(\frac{n}{t}\right)_{cp}$ (cm/s)	$V_m$ (cm/s)	$V_p$ (m/s)	流向	备注
				1	2	3	4					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

表 B-7 时均压力记录计算表

\_\_\_\_\_ 试验

试验组次 \_\_\_\_\_

模型比尺 \_\_\_\_\_

闸门开启情形：

模型 (cm) \_\_\_\_\_

原型 (m) \_\_\_\_\_

闸孔号码 \_\_\_\_\_

上游水位 (m) \_\_\_\_\_

上游测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

测针零点高程 (m) \_\_\_\_\_

下游水位 (m) \_\_\_\_\_

下游测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

测针零点高程 (m) \_\_\_\_\_

原型流量 (m<sup>3</sup>/s) \_\_\_\_\_

量水堰测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

堰口测针读数 (cm) \_\_\_\_\_

编号	测压孔高程 (m)	测压管读数 (cm)	测压管水头 (m)	压力水头 (9.8kPa)		备注
				+ (压)	- (压)	
						测压板 零点高程 (m) =

试验者 \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日

计算者 \_\_\_\_\_

校核者 \_\_\_\_\_

## 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	

中华人民共和国水利行业标准

水工（常规）模型试验规程

SL 155—2012

条 文 说 明

## 目 次

1	总则	33
3	基本资料	34
4	相似准则	35
5	模型设计	38
6	模型制作与安装	39
7	试验基本设备	41
8	试验量测仪器	43
9	试验程序	48
10	试验内容与方法	49
11	试验资料整理分析与报告编写	53

# 1 总 则

**1.0.1** 《水工（常规）模型试验规程》（SL 155—95）自 1995 年 7 月 21 日发布生效以来，对规范水工（常规）模型试验研究方法，提高试验研究成果的可靠性与准确度起到了重要作用。

近年来，随着我国水利水电工程建设快速发展，对水工模型试验研究内容、方法及模拟技术提出了新的要求。与此同时，量测技术的发展促进了测试手段的提高，但这些先进的测试技术和方法应用条件尚未在 SL 155—95 中得到反映。故有必要对现行试验规程进行必要的修订工作，以进一步促进水工常规模型试验技术的不断发展。

本条说明本标准的编制目的及必要性。

**1.0.2** 本条明确规定本标准的适用范围是以重力为主要作用力的水工（常规）模型试验并规定了相应的研究范围，以别于其他试验专题研究。

**1.0.3** 考虑到泄洪雾化已成为当前高坝建设必须解决的问题，而目前尚缺乏泄洪雾化模型试验专题标准，因此本标准暂将泄洪雾化列入常规模型试验内容。

**1.0.4** 本条规定应根据试验任务书的要求，编写试验研究大纲，作为模型试验研究的基本依据。

### 3 基本资料

**3.0.1~3.0.4** 基本资料是开展水工（常规）模型试验研究的基础。使用基本资料时，应认真进行分析，准确使用资料中与本项试验研究有关的信息，发现问题应仔细考证，并及时与资料提供部门进行沟通、核实，对资料的更改和更新应做好相关记录，以备查用。如涉及河床冲刷及其防护措施的研究时，地形、地质资料方面应收集河床覆盖层厚度、岸坡岩石分布、节理发育、破碎情况、河床抗冲流速等资料。

## 4 相似准则

4.0.1 本条明确了模型应满足的几项基本相似准则。

从严格的数理观点出发，模型与原型达到完全相似是不可能的。但只要模型比尺选择适当，模型与原型两个水流系统仍能保证足够的相似性。对本条规定的三项相似准则说明如下：

(1) 几何相似准则。要求模型与原体之间的有关比尺符合以下关系：

$$\text{长度比尺} \quad L_r = L_p / L_m \quad (1)$$

$$\text{面积比尺} \quad A_r = A_p / A_m = L_r^2 \quad (2)$$

$$\text{体积比尺} \quad V_r = V_p / V_m = L_r^3 \quad (3)$$

式中  $L, A, V$ ——长度、面积、体积。

下标  $r, p, m$ ——比尺、原体、模型。

(2) 水流运动相似准则。要求模型与原体之间的有关比尺符合以下关系：

$$\text{时间比尺} \quad T_r = T_p / T_m \quad (4)$$

$$\text{速度比尺} \quad v_r = v_p / v_m = L_r T_r^{-1} \quad (5)$$

$$\text{加速度比尺} \quad a_r = a_p / a_m = v_r / T_r = L_r T_r^{-2} \quad (6)$$

$$\text{流量比尺} \quad Q_r = Q_p / Q_m = \frac{L_p^3 T_p^{-1}}{L_m^3 T_m^{-1}} = L_r^3 T_r^{-1} \quad (7)$$

式中  $T, v, a, Q$ ——时间、速度、加速度、流量。

(3) 动力相似准则。要求模型与原体之间的有关比尺符合以下关系：

$$\text{质量比尺} \quad m_r = m_p / m_m = \rho_r L_r^3 \quad (8)$$

$$\text{力的比尺} \quad F_r = F_p / F_m = \rho_r L_r^4 T_r^2 \quad (9)$$

式中  $m, \rho, F$ ——质量、水流密度、重力。

根据牛顿相似准则，当以重力为主要作用力时，重力比尺与惯性力比尺应相等，即

$$(F_H)_r = (ma)_r \quad (10)$$

如果用尺度表示，则

$$\gamma_r L_r^3 = \rho_r L_r^2 v_r^2 \quad (11)$$

将  $\gamma = \rho g$  带入式 (11)，整理转化后，得

$$\left( \frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_r = (Fr)_r = 1 \quad (12)$$

式中  $F_H$ ——惯性力；

$v$ ——水流速度；

$g$ ——重力加速度；

$L$ ——特征长度；

$Fr$ ——弗劳德数，又称重力相似准数。

按照重力相似准则，有关物理量的比尺换算关系见表 1。

表 1 重力相似比尺换算表

物理量	量纲	正态模型	变态模型	物理量	量纲	正态模型	变态模型
长度	$L$	$L_r$	$L_r, y_r$	流量	$L^3 T^{-1}$	$L_r^{5/2}$	$L_r y_r^{3/2}$
面积	$L^2$	$L_r^2$	$L_r y_r$	质量	$M$	$L_r^3$	$L_r^2 y_r$
体积	$L^3$	$L_r^3$	$L_r^2 y_r$	力(重力)	$MLT^{-2}$	$L_r^3$	$L_r^2 y_r$
时间	$T$	$L_r^{-1/2}$	$L_r / y_r^{1/2}$	压强	$MLT^{-1}T^{-2}$	$L_r$	$y_r$
速度	$LT^{-1}$	$L_r^{1/2}$	$y_r^{1/2}$	动量	$ML^{-1}$	$L_r^{7/2}$	$L_r^2 y_r^{3/2}$
加速度	$LT^{-2}$	$L_r^0$	$y_r / L_r$	能量	$ML^2 T^{-2}$	$L_r^4$	$L_r^2 y_r^2$

4.0.2 为了消除或减少由其他次要作用力影响所产生的偏差，本条规定的限制条件说明如下：

(1) 原体水流雷诺数 ( $Re$ ) 较大，通常处于紊流阻力平方区。模型雷诺数比原体缩小  $L_r^{3/2}$  倍，有时难以达到该区。但根据阻力相似准则的要求，模型至少应该保证在紊流区。根据莫迪 (Moody) 图解，层流和紊流的界限雷诺数大致在 2500 ~ 5000 之间。

(2) 根据重力相似准则，模型糙率应为原体糙率的  $L_r^{1/6}$  倍。如果模型材料糙率达不到这个要求，而且由于流程较长，对试验

成果有较大影响时，应进行糙率校正。

(3) 根据英国科学家 L. Kevin 的理论计算，为保证模型中对原型水流重力作用不受表面张力显著影响，一般要求模型水深不小于 3cm。

(4) 对具有明显三维性流态的水工建筑物模型应采用正态模型。

**4.0.3 水工（常规）模型原则上应满足重力相似准则，在特殊情况下，应对简化因素带来的误差加以修正。**

(1) 糙率相似修正。主要是由于按照糙率相似准则，模型糙率为原型的  $L_r^{1/6}$ ，对于泄水建筑物表面糙率较低情况，模型材料的糙率偏大，因此在泄水流道较长的情况下会对水力参数带来一定的误差，应加以修正。

(2) 表面张力相似修正。在掺气、雾化、旋涡模拟的有关试验中应考虑表面张力相似修正，对于无法完全满足旋涡相似要求的，应通过适当加大泄流量等方式符合流态相似要求，确定旋涡发生的可能性及其性质。

(3) 黏滞力相似修正。由于模型流态达不到紊流阻力平方区的要求，存在水流  $Re$  数相似问题，模型水流黏滞力作用增加，为此对泄流能力等试验结果应做适当修正。

## 5 模型设计

**5.0.1** 常规模型试验采用重力相似准则，并按正态模型设计，能重演或预演原体水流运动现象，这是模型设计的基础。

**5.0.2** 模型类型应根据任务要求选定，模型比尺和模拟范围选择，应根据保证研究对象水流相似的要求，并结合试验室及测量仪器的具体条件综合确定。

**5.0.3** 各类模型比尺，应尽可能大于条文规定的下限比尺，以减小缩尺效应。

**5.0.5** 特殊水工模型试验往往是在水工常规模型上开展一些针对性强的试验研究工作，包括泄洪雾化、掺气、旋涡等，这些现象的模拟常常是次要作用力不能忽略的，因此需要提出在保证主要作用力相似的前提下，尽可能满足这些次要作用力的相似，同时应对这些次要作用力引起的缩尺效应加以修正。泄洪雾化模型试验水流韦伯数应选用泄水建筑物出口断面水流水力参数确定。

## 6 模型制作与安装

**6.0.1** 绘制模型布置图和加工详图，应具备下列资料：

(1) 水工建筑物设计详图，包括平面图、剖面图及各个部件的放大图。

(2) 地形测量图，比例一般为 1 : 500~1 : 2000。

(3) 水文地质资料，包括水位—流量关系曲线、河床糙率、悬沙和底沙颗分曲线，1m 水深时的底沙起动流速及岩基分布和节理发育破碎情况等。

**6.0.2** 本条所列举的模型材料，考虑到材料性能、采购方便、价格低廉和加工可行性等综合因素，具体应结合模型的特点及便于观测等要求选用。

**6.0.4** 导线布置通常沿模型边墙，形成封闭导线网。若模型过大，可在重要地段增设支导线。同时，水准基点应选在视野较好、不易人为破坏之处，基座应保证不变形，高程应定得适当，并尽可能取整数。

精度控制要求是根据现有测量仪器的精度制定的，一般可以做到。

**6.0.5** 本条所列举的是模型地形制作常用的方法及要求，其中最常用的是断面板法，其技术要求如下：

(1) 先在地形图上勾画模型导线，并与模型现场保持一致。

(2) 依据导线读出并记录每条地形断面等高线的水平距离及相应高程。

(3) 断面板经锯剪加工后，按编号次序对准模型相应导线位置，用水准仪测定高程，加以固定。

(4) 模板间填料可用三合土、细沙或江河泥沙等材料，分层排铺夯实。最后用水泥砂浆抹面粉光。

**6.0.6** 模型校验收是避免模型制作放样错误、保证试验精度和提高试验质量的重要环节。对于大型或重要工程模型试验，还应对模型关键部位的强度加以检验验收。

## 7 试验基本设备

### 7.1 供水系统设施

循环式供水系统主要设备的技术规格要求，大都根据国内主要水工试验室的资料统计而得，并经实践经验是行之有效的，具有实用参考价值。

蓄水池容积可按照式 (13) 计算：

$$V = Ah \quad (13)$$

式中  $V$ ——蓄水池容积， $m^3$ ；

$A$ ——试验室平面面积， $m^2$ ；

$h$ ——有效水深， $h=80\sim 200cm$ 。

也可根据试验厅（室）水流回流长度、最大供水流量估算蓄水池容积。一般可按照最大供水流量要求并考虑水泵运行一定时间的需求确定蓄水池容积。

$$V = Q_{\max} T \quad (14)$$

式中  $Q_{\max}$ ——试验厅（室）最大供水流量， $m^3/s$ ；

$T$ ——水泵运行时间，可按  $5\sim 15min$  计算。

试验厅（室）最大供水流量可根据试验厅室功能要求确定，并由此可选用供电能力，即

$$P = 9.81Q_{\max} H/e \quad (15)$$

式中  $P$ ——所需电机总功率， $kW$ ；

$H$ ——计及局部水头损失和沿程水头损失的总水头， $m$ ；

$e$ ——电动机水泵综合效率，可取  $e=0.7$ 。

根据上式确定的水泵总功率，结合水泵型号和试验室不同供水流量需求情况，选用不同容量的水泵组合。水泵类型可采用离心式水泵、潜水泵、轴流泵，具体型号和配套组合可根据试验厅用水量和运行情况确定。

供水系统采用  $1\sim 2$  级配水管，其中第一级为主管道，与平

水塔相连，并应在管道前段安装控制闸门，以利于管道安装、检修，主管道应根据试验厅室功能布局需要布置，一般采用环状布置。二级管道与相近的主管道连接，可直接接入模型前池或量水系统。

回水槽一般采用环形或网状布置，以提高试验厅室场地利用率，便于模型布置。

蓄水池及回水系统应定期清除泥沙淤积及漂浮物等杂物，保证供水效率。

特定情况（如供水流量较小或所需流量超过试验厅供水能力等）下，可取消平水塔，采用直接供水方式，但应在进入模型前设置消浪消能及平水（或稳压）设施，确保模型进流平稳。

## 7.2 通用性固定设备

各种玻璃水槽、水箱和压力箱等，都是根据不同用途建设的通用性固定设备。其技术规格尺寸也是参照国内主要试验室资料统计而得，具有实用参考价值。

## 8 试验量测仪器

### 8.2 水位（水面线）及波高量测仪器

8.2.1 水位测针是测量恒定流水位最佳常规仪器，目前广泛地用于水工模型试验，市场上有现成产品可供选购。

8.2.2~8.2.4 自动跟踪水位计、压力传感器和各种类型的波高仪，都是根据电学原理研制而成，可用于恒定流和非恒定流水位和波高测量。但对水温和水质均较敏感，露天试验场宜慎用。使用时，应勤于率定，以保证测量精度。

### 8.3 压力量测仪器

8.3.1 测压管是根据连通管原理设计而成，是目前试验室最常用的测压仪器，其精度主要取决于测压孔和测压管的加工安装质量。

8.3.2 对于压力水头超过 3m 的情况，压力传感器或压力表有足够的敏感度，更易于测量。

8.3.3 选用液柱比压计时，工作液体应满足以下要求：

- (1) 不粘管壁，液面清晰易读。
- (2) 与水接触不致混合。
- (3) 不污染水和不腐蚀管壁。
- (4) 温度变化对密度影响不大。
- (5) 化学性能稳定，不宜蒸发。

比压计可供选用的工作液体密度见表 2。

表 2 可供选用的工作液体密度表

液体名称	化学式	15.5℃时密度(g/cm <sup>3</sup> )
汞（水银）	Hg	13.6
四溴乙烷	CHBr <sub>2</sub>	2.98

表 2 (续)

液体名称	化学式	15.5℃时密度(g/cm <sup>3</sup> )
三溴甲烷	CHBr <sub>3</sub>	2.90
四氯化碳	CCl <sub>4</sub>	1.60
a-氯苯	C <sub>10</sub> H <sub>7</sub> Cl	1.20
氯乙酸乙酯	CH <sub>2</sub> ClCOOC <sub>2</sub> H <sub>5</sub>	1.16
水	H <sub>2</sub> O	1.00
甲苯	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	0.87
乙醇	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0.79

8.3.4 压力传感器及其二次仪表，是测量瞬时动态压力和脉动压力必不可少的量测仪器，目前市场上有现成产品可供选用。

## 8.4 流量量测仪器

8.4.1、8.4.2 量水堰属堰槽类量水仪器，也是目前试验室测定流量最精密的常规仪器。根据标准设计制作和安装的各式堰型，其流量计算可引用以下经验公式：

(1) 直角三角堰可用南京水利科学研究院标准地秤校正后的拟合经验式：

$$Q = 1.33H^{2.465} \quad (16)$$

式(16)适用范围为  $H=0.03\sim 0.25\text{m}$ 。

(2) 矩形堰可用雷伯克 (T. Rehbock) 经验公式：

$$Q = \left(1.782 + 0.24 \frac{H}{P}\right) BH_0^{1.5} \quad (17)$$

式(17)适用范围为  $H=0.03\sim 0.75\text{m}$ 。

式中  $Q$ ——流量， $\text{m}^3/\text{s}$ ；

$H$ ——堰上水头， $\text{m}$ ；

$H_0$ ——修正后水头 ( $H_0 = H + 0.0011\text{m}$ )， $\text{m}$ ；

$P$ ——堰高， $\text{m}$ ；

$B$ ——堰宽， $\text{m}$ 。

(3) 复式堰由直角堰和矩形堰两部分组成，如图 1 所示。经南京水利科学研究院标准地秤率定结果见表 3。

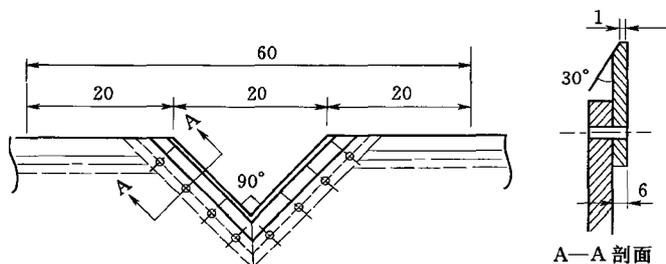


图 1 复式堰构造和尺寸 (单位: mm)

表 3 复式堰 (堰宽 60cm) 堰上水头与率定关系率定结果

H (cm)	Q (L/s)	H (cm)	Q (L/s)	H (cm)	Q (L/s)
3.57	0.35	9.99	4.59	14.95	20.30
4.56	0.71	10.54	5.42	17.63	33.60
5.70	1.22	11.46	7.91	18.93	40.40
6.95	1.87	11.83	9.17	19.96	47.50
8.57	3.06	12.44	11.04	23.09	71.00
9.41	3.99	13.00	12.99	24.93	88.00

8.4.3、8.4.4 文丘里管属差压类量水仪器，其精度虽不及量水堰，但由于装卸方便，又不占场地，目前仍应用于水工试验室。

常用的文丘里管主要由收缩管、喉管和扩大管三部分组成，如图 2 所示，其流量计算公式为

$$Q = C_d a \sqrt{\frac{2gh}{1 - (a/A)^2}} = C_d a \sqrt{\frac{2gh}{1 - (d/D)^4}} \quad (18)$$

式中  $C_d$ ——流量系数，根据率定曲线确定，一般可取 0.985；

$a$ ——喉管段面积；

$h$ ——喉管与上游管路控制断面之间的水头差；

$A$ ——上游管路断面积；

$d$ ——喉管直径；  
 $D$ ——上游管路直径。

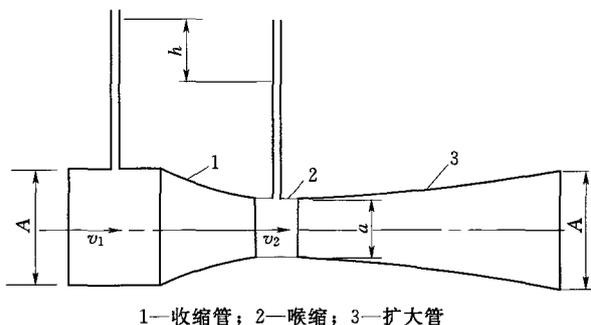


图 2 文丘理管结构图

8.4.5、8.4.6 电磁流量计是利用法拉第电磁感应定律制成的一种测量导电液体流量的仪表。由于其测量精度已达到了 $\pm 1\%$ 以内，可直接安装在进水管道上，利用计算机直接记录流量变化，因此已逐渐推广应用于水工模型试验，目前可根据需求直接在市场上选购。

超声波流量计是以“速度差法”为原理，测量圆管内液体流量的仪表。它采用了先进的多脉冲技术、信号数字化处理技术及纠错技术，使流量仪表更能适应复杂环境，计量更方便、经济、准确。

## 8.5 流速量测仪器

8.5.1 毕托管是测量恒定流时均“点”流速最佳常规仪器。流速计算公式为

$$v = \varphi \sqrt{2gh} \quad (19)$$

式中  $\varphi$ ——流速系数，根据率定试验，当雷诺数  $Re = 3300 \sim 360000$  时， $\varphi = 1$ ，误差控制在  $1\% \sim 2\%$ ；

$h$ ——全压强和静压强之差，由比压计测得，m。

8.5.2 旋桨流速仪是量测小流速的常用仪器，精度低于毕托管，

但应定期率定，确保量测精度满足试验要求。

**8.5.3 激光流速仪和热线（膜）流速仪**，都是先进的测速仪器，但由于价格昂贵，且操作复杂，对水质要求高，除专题研究外，一般常规模型试验极少应用。

**8.5.4、8.5.5 粒子图像速度场仪（PIV）和三维多普勒流速仪（ADV）**已逐渐应用于水工（常规）模型试验。PIV适用于同步、瞬时量测大面积表面流速分布，需要有相应跟踪粒子；ADV适用于量测点流速流向，可量测点的时均流速和脉动流速。这些仪器的使用，应进行定期比对试验，以保证测量精度。

## **8.6 量测仪器、仪表检定**

量测仪器定期送检和自检是为了保证量测仪器的合格和有效，从测试手段上保证实验研究成果的质量。

## 9 试验程序

**9.0.1** 在接受试验任务后，应深入了解工程设计的目的和意图，熟悉基本资料，然后编制模型试验研究大纲。

**9.0.2** 量测仪器率定主要指量水堰、文丘里管、毕托管和旋桨流速仪等常规仪器的率定。

模型校验是指模型糙率校验。当要求模型糙率较大时，可用梅花贴石或梅花桩以及砂浆拉毛等方式加糙，以达到模型与原型之间的水面线相似。当进行长管道模型试验时，要求模型糙率较小，而管壁糙率又难以修正时，可采用调整坡度、改变长度和调整水头等方法进行校正。

**9.0.3** 原设计方案试验、修改优化方案试验和推荐方案试验是试验过程的基本程序，具体要求如下：

(1) 原设计方案试验是针对原设计方案进行试验，并根据试验要求，量测有关水力参数进行分析，评价原设计方案的合理性和可靠性。

(2) 修改优化方案试验是针对原设计方案试验发现的问题，提出修改方案，进行优化，最终提出推荐方案。

(3) 推荐方案试验是针对选定的推荐方案，进行全面系统的观测，提供充分论证。

**9.0.4** 模型试验取得阶段性成果后，应及时与委托方沟通，必要时进行模型现场讨论，即阶段性技术小结，这对提高试验质量及成果为工程设计服务十分重要，应当引起足够重视。

**9.0.5、9.0.6** 模型试验过程中，应及时整理分析试验资料，有问题随时补充试验，对试验结果进行必要的校验和修正，以保证试验成果的完整性和可靠性。试验报告编写完成后，模型应尽可能保留一段时间，以备补充必要成果，以满足工程设计要求。

## 10 试验内容与方法

### 10.1 流态观测

**10.1.1** 流态描述是水工（常规）模型试验的一项重要内容，也是定性判断设计方案合理性的重要依据之一，因此应尽量利用相关手段或方法翔实地定性或定量描述流态，尤其是不利流态，例如回流、旋涡、水翅等现象。

### 10.2 水位与水面线测量

**10.2.1~10.2.3** 水位与水面线是水工模型试验最基本测量项目。主测仪器是测针和自动跟踪水位计，条文规定的试验方法是实践经验总结，可供参考。

### 10.3 泄流能力测试

**10.3.1、10.3.2** 泄流能力是常规模型试验重点研究项目，主测仪器是测针和量水堰或电磁流量计，目的是测量流量系数，可分为自由堰流、淹没堰流、自由孔流、淹没孔流等四种流态。条文规定的试验方法是实践经验的总结，可供参考。

### 10.4 流速、流向观测

**10.4.1~10.4.4** 流速分布包括纵向、横向和垂向三个方面，是衡量消能效率的重要标志。主测仪器是毕托管、微型旋浆流速仪、PIV 和 ADV，具体选型视试验条件和流速量程而定。

### 10.5 时均压力测量

**10.5.1、10.5.2** 时均压力是优化建筑物体型的重要研究项目。主测仪器是测压管，其精度主要取决于测压孔的安装质量。

由于原型中压力出现负压值低于空化现象发生临界值时，会

产生汽化现象，因此模型测得的压力值不能反映原型真实现象，负压值不能直接引申至原型。

## 10.6 脉动压力试验

**10.6.1、10.6.2** 条文规定的试验方法是根据实践经验制定的。测压孔与传感器的间距不大于 0.3m，是根据专项实验研究而得的，否则会影响测量精度。

## 10.7 局部冲淤试验

**10.7.1~10.7.3** 河床冲淤试验模拟的关键是动床模拟材料的选择。条文规定的动床模拟材料选择方法和铺设要求，对床底冲淤来说，问题不大。但岸坡冲刷模拟比较困难，尚需通过进一步实践来检验。常用模型砂材料见表 4。

表 4 常用模型砂材料表

材料	容重 (g/cm <sup>3</sup> )	材料	容重 (g/cm <sup>3</sup> )
聚苯乙烯	1.03~1.05	电木	1.40~1.50
有机玻璃	1.19	无烟煤	1.40~1.70
褐煤	1.10~1.40	煤灰	2.10~2.20
烟煤	1.20~1.50	硅	2.40
聚氯乙烯	1.35~1.38	天然砂	1.45~1.65

当模型采用散粒体模拟时，可采用依兹巴什公式计算散粒体粒径。

$$V = (5 \sim 7) \sqrt{d} \quad (20)$$

式中  $V$ ——抗冲流速，m/s；

$d$ ——散粒体粒径，m。

**10.7.4** 对峡谷高坝来说，岸坡冲刷非常重要，处理试验资料时，应充分考虑这一点。

**10.7.5** 根据经验，在模型水位、流量调好后，一般经过 2~3h 的冲刷试验，下游河床冲淤变化基本趋于平衡。

**10.7.6** 试验操作关键是使模型开始放水 and 停水时，不致扰动原来的砂面，以保证试验成果的可靠性。

**10.7.7** 冲淤地形测量可用等高线法，也可采用地形自动测量系统测量断面地形数据。

## **10.8 水面波动测量**

**10.8.1** 水面波动涉及闸坝（泄水建筑物）下游大尺度紊动，也是衡量消能效果的指标之一。通过观测，可提供下游河道岸坡的保护范围及消浪措施，以及通航条件保障措施。

**10.8.2~10.8.4** 主测仪器是波高仪。试验方法是根据实践经验制定的。为避免偶然误差，规定每测次重复测量 3 次，并强调波高仪应及时率定，以保证测量精度。

## **10.9 风速测量**

**10.9.1、10.9.2** 风速是泄水建筑物通气的判断依据之一，模型试验测量该项目，可有助于评估泄水建筑物通气设施的合理性，测量仪器主要为风速仪和风压计，测量风速时应严格按照仪器测量技术要求进行，以保证测量精度。

## **10.11 泄洪雾化参数测量**

**10.11.1、10.11.2** 泄洪雾化参数主要有雾化强度和雾化范围，是判断泄洪雾化影响程度、提出预防措施的重要依据。测量范围确定是实践经验的总结，可供参考。

**10.11.3** 泄洪雾化参数的测量方法主要与雾化强度有关，可选用量筒、雨量计、滴谱试纸或光学测量仪器，并配置计时器。

**10.11.4** 泄洪雾化强度存在明显的缩尺效应。根据目前的研究成果，可参照下式进行换算：

$$S = S_0 L_r^{-k} \quad (21)$$

式中  $S$ 、 $S_0$ ——模型、原型雾化强度，mm/h；

$L_r$ ——模型比尺；

$k$ ——修正系数，可根据消能方式参考有关文献确定。

根据已有研究成果，雾化范围遵循几何相似准则换算。

## 11 试验资料整理分析与报告编写

### 11.1 试验资料的记录与整理

11.1.1、11.1.2 原始资料是试验的第一手资料，其正确与否，直接关系到成果质量，因此试验人、计算人和校核人均应对原始资料的真实性、完整性负责，严格遵循条文规定，按要求及时整理原始资料，并加以妥善保存。

11.1.3 试验数据的有效位数，除按修约规则外，还应根据精度和谐一致原则，进行取舍。

11.1.4 试验资料归档应根据各单位制定的规章制度执行。

### 11.2 试验成果的表达方式

11.2.1、11.2.2 图表是成果表达的通用方式，但要注意规范化，不得随心所欲，标新立异。

### 11.3 试验成果的整理分析

本节 10 条规定基本上概括了常规模型试验的主要内容，可用以解决 1.0.3 条所规定的工程水力学问题。

### 11.4 试验成果报告格式

应遵循现行标准规定的科技报告的统一格式。

### 11.5 试验报告编写

试验报告正文是报告的主体，在相当程度上反映了报告的质量。因此，在技术内容和文字上都应严格要求，做到文字清晰，语句通顺，表达准确，图表规范，不应使用未正式公布的简化字、自造字等。同时应使用法定计量单位。

## **11.6 试验报告审批和评审**

**11.6.1** 报告正式印刷前，需要通过一定的审批程序，以保证试验成果质量。