

ICS 27.140

P 59

备案号: J1053—2010

DL

中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5244 — 2010

**水电水利工程常规水工模型
试 验 规 程**

**Code for normal hydraulics model investigation for
hydropower & water resources**



2010-05-24 发布

2010-10-01 实施

国家能源局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	2
3 总则	3
4 试验大纲	4
5 相似准则	5
6 试验设备	6
6.1 供水系统	6
6.2 基本固定设备	6
7 试验量测仪器	8
7.1 水位量测仪器	8
7.2 压强量测仪器	8
7.3 流量量测仪器	9
7.4 流速量测仪器	9
7.5 量测仪器检定	10
8 基本资料	11
9 模型设计	12
10 模型制作与安装	13
11 试验内容	14
11.1 水位与水面线	14
11.2 泄流能力	14
11.3 流速和流态	14
11.4 时均动水压强	15
11.5 脉动压强	15

DL/T 5244—2010

11.6 局部冲刷	15
11.7 波浪	16
12 试验资料整理与分析	17
12.1 原始资料整理	17
12.2 成果整理与分析	17
13 试验研究成果	18
附录 A (规范性附录) 常规水工模型试验测量精度	19
附录 B (资料性附录) 重力相似常用比尺换算关系	21
附录 C (资料性附录) 原始资料记录及计算表格形式	22
条文说明	25

前 言

本标准根据《国家发展改革委办公厅文件关于印发 2006 年行业标准项目计划的通知》（发改办工业〔2006〕1093 号）的要求制定。

本标准制定过程中，总结了我国水电水利工程常规水工模型试验的实践经验及国内外最新研究成果，并征求了国内有关单位和专家的意见。

本标准的主要技术内容包括相似准则、试验设备、试验量测仪器、基本资料、模型设计、模型制作与安装、试验内容、试验资料整理与分析、试验研究成果等。

本标准的附录 A 是规范性附录。

本标准的附录 B、附录 C 是资料性附录。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业水电施工标准化技术委员会归口。

本标准负责起草单位：水资源与水电工程科学国家重点实验室（武汉大学）、长江水利委员会长江科学院。

本标准主要起草人：贺昌海、周赤、王才欢、张新年、段文刚、曾祥、雷川华。

本标准在执行过程中的意见或建议反馈至中国电力企业联合会标准化中心（北京市白广路二条 1 号，100761）。

1 范 围

本标准规定了水电水利工程常规水工模型试验的基本要求。

本标准适用于水电水利工程枢纽布置和各种水工建筑物以重力为主要作用力的工程水力学问题的试验研究。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是注日期的引用文件，其随后所有的修改单（不包括勘误的内容）或修订版均不适用于本标准，然而，鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注日期的引用文件，其最新版本适用于本标准。

DL/T 5173 水电水利工程施工测量规范

3 总 则

3.0.1 为规范常规水工模型试验研究工作，特制定本标准。

3.0.2 本标准未明确规定的，应执行国家和行业现行有关标准的规定。

4 试 验 大 纲

4.0.1 模型试验前，应根据试验任务和要求，编制试验大纲。

4.0.2 试验大纲宜包括下列内容：

- 1 工程概况；
- 2 试验研究目的和内容；
- 3 工程设计方案和基本资料；
- 4 模型设计和试验研究方法；
- 5 主要试验设备和量测仪器；
- 6 预期成果目标；
- 7 试验研究进度计划；
- 8 试验研究负责人和参加人员；
- 9 其他。

5 相 似 准 则

5.0.1 模型与原型应满足几何相似、水流运动相似和动力相似。

5.0.2 模型试验应遵循重力相似准则，还应满足以下要求：

- 1 模型应采用正态模型；
- 2 模型水流应在紊流区；
- 3 模型糙率达不到相似要求时，必要时可采用合理方法校正；
- 4 模型水深宜大于 30mm。

6 试 验 设 备

6.1 供 水 系 统

6.1.1 常规水工模型试验宜采用循环式供水系统，主要包括蓄水池、水泵、平水箱、配水管和回水渠等设施。具备天然条件时可采用重力式供水系统。

6.1.2 蓄水池蓄水量、供水流量、回水渠等应满足模型试验要求。

6.1.3 平水箱高度宜不低于 5m，容积可按实验室最大供水流量乘以 75s~100s 估算。溢水槽长度可取水面变差 10mm 计算而定，或按每 100L/s 供水流量需 20m 长的溢水槽进行估算。

6.1.4 配水管可采用 1~2 级网络状或环状布置，常用直径 150mm~500mm 钢管，并应在适当位置安装控制阀门。

6.1.5 回水渠宜采用网格状布置，底坡宜大于 1:200，深度宜大于宽度，断面面积应根据通过最大流量确定，并应在适当位置加设拦污栅、沉砂池等设施。

6.2 基 本 固 定 设 备

6.2.1 基本固定设备包括玻璃水槽、水箱。

6.2.2 玻璃水槽的技术要求如下：

- 1 尺寸和供水量应根据规划开展的试验项目规模确定；
- 2 玻璃厚度应满足强度、变形等要求；
- 3 玻璃间接缝应平整光滑，止水性好；
- 4 槽宽的安装精度应控制在 $\pm 0.3\%$ 以内。

6.2.3 水箱的技术要求如下：

- 1 箱体宜为矩形，其平面尺寸、供水量和高度宜根据规划开

展的试验项目规模确定；

2 箱内宜设置升降式平水槽，槽长应视允许水面变差而定；

3 箱内应设置稳流装置，保持水面平稳。

7 试验量测仪器

7.1 水位量测仪器

7.1.1 水位测量可采用水位测针、自动跟踪水位计、压力传感器、波高仪等仪器，仪器应按要求安装，其量程和精度应满足测试要求。

7.1.2 测量恒定流水位宜采用水位测针。

7.1.3 测量非恒定流水位可采用自动跟踪水位计或压力传感器。

7.1.4 测量水面波动宜采用波高仪。

7.1.5 水位测量仪器零点高程应采用水准仪校正。

7.2 压强量测仪器

7.2.1 压强测量宜采用测压管、晶体压力传感器等仪器。

7.2.2 测压管宜用于测量恒定流时均压强，技术要求如下：

1 测压管测点的孔口内径应小于 2mm，孔口应与过流面齐平、垂直；

2 测压管的量测段可采用玻璃管或有机玻璃管，内径宜大于 10mm，零点高程应用水准仪校正；

3 测压管应排出气泡。

7.2.3 测量动水压强和脉动压强宜采用晶体压力传感器。选型与技术要求如下：

1 感应膜直径应小于 5mm；

2 自振频率应大于被测量频率 5 倍；

3 输出信号应与二次仪表匹配；

4 综合精度应满足试验要求；

5 测点孔口应与过流面齐平。

7.3 流量测量仪器

7.3.1 流量测量宜采用量水堰和电磁流量计。

7.3.2 量水堰宜用于测量恒定流流量，选型要求如下：

- 1 模型流量 $Q < 30\text{L/s}$ 时，宜采用直角三角堰；
- 2 模型流量 $Q > 30\text{L/s}$ 时，宜采用矩形薄壁堰，堰顶水头不应小于 30mm。

7.3.3 量水堰的安装要求如下：

- 1 直角三角堰堰槽宽度应为最大堰顶水头的 3 倍~4 倍，堰口中心线应为铅垂方向；
- 2 矩形薄壁堰堰板高度应大于最大堰顶水头的 2 倍；
- 3 堰板应与堰槽垂直正交，堰板顶部应保证水平；
- 4 堰槽应等宽；堰槽长度应满足试验测量精度要求；
- 5 矩形堰板与堰下水舌之间应设置通气孔，并保证水舌下无负压，尾水与堰顶高差应不小于 70mm；
- 6 水位测针孔应设在 6 倍最大堰顶水头处，孔口位置应低于堰顶 30mm。

7.3.4 电磁流量计可用于测量恒定流流量和非恒定流流量，其选型应满足量程和精度要求。

7.3.5 电磁流量计应符合产品安装使用要求。

7.4 流速测量仪器

7.4.1 流速测量宜采用小旋浆流速仪和毕托管，也可采用水流表面粒子图像速度场仪 (PIV)、三维多普勒流速仪 (ADV)、激光流速仪等仪器。

7.4.2 毕托管宜用于测量恒定流时均点流速，应考虑其对流场的干扰。选型标准如下：

- 1 $0.15\text{m/s} < v < 2.5\text{m/s}$ 时，可用管径为 8mm 的毕托管；
- 2 $0.15\text{m/s} < v < 10\text{m/s}$ 时，宜用管径为 2.5mm 的毕托管。

7.4.3 旋浆流速仪和旋浆流速流向仪宜用于流速为 3m/s 以下的测量, 流速仪选型应满足试验精度要求。

7.4.4 水流表面粒子图像速度场仪 (PIV) 宜用于测量大范围的水流表面流速。

7.4.5 三维多普勒流速仪 (ADV) 宜用于测量复杂流态下的流速。

7.4.6 激光流速仪宜用于测量水质较好的玻璃水槽和水洞条件下的流速。

7.5 量测仪器检定

7.5.1 通用量测仪器应送国家或行业技术监督部门授权的计量检定机构检定, 专用量测仪器可自检, 但应满足试验精度要求。

7.5.2 自行研制的量测仪器, 应经相应的技术监督部门鉴定合格。

7.5.3 送检量测仪器的检定周期应按国家或行业检定规程的有关规定执行; 自检量测仪器的检定周期不宜超过两年。

7.5.4 常用量测仪器及其精度控制要求详见附录 A。

8 基 本 资 料

8.0.1 常规水工模型试验应收集拟模拟范围内的地形资料，地形图比例宜不小于 1:2000。

8.0.2 应收集泄水建筑物下游河床及岸坡的相关地质资料。

8.0.3 应收集相关水文和设计资料，主要包括：

1 枢纽布置、泄水建筑物体型详图，消能防冲及下游河道整治设计图；

2 坝址水位流量关系、下游控制断面水位流量关系；

3 河床及泄水建筑物糙率；

4 大坝各种不同频率的设计洪水位及相应下泄流量；

5 运行工况。

9 模型设计

9.0.1 应按重力相似准则进行模型设计，常用比尺换算参见附录B。

9.0.2 应根据试验内容、试验场地、设备、供水量和量测仪器精度等要求，参照4.0.3的限制条件，选定模型类型、比尺及截取范围。

9.0.3 模型类型和模型比尺的选择原则如下：

1 研究枢纽布置与泄水建筑物泄洪消能，宜采用整体模型，比尺不宜小于1:150；

2 研究枢纽中部分泄水建筑物水力特性，可采用局部模型，比尺不宜小于1:80；

3 研究枢纽中某一泄水建筑物的水力特性，可采用单体模型，比尺不宜小于1:80；

4 研究枢纽中某一或某一部分泄水建筑物的水力特性，研究对象接近于二元水流时，可采用断面模型，比尺不宜小于1:50。

9.0.4 模型截取范围要求如下：

1 纵向截取长度，应满足试验工作段内的水流流态不受影响；

2 横向截取范围，应超过最高试验水位相对应的高程，并超高100mm以上。

10 模型制作与安装

10.0.1 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。

10.0.2 泄水建筑物宜用有机玻璃等透明材料制作，模型需要长久保留的宜选用不易变形的材料制作。

10.0.3 模型边墙应满足稳定和强度要求。

10.0.4 模型地形制作可采用断面板法、桩点法和等高线法。采用前两种方法时，模型中两控制断面间距应根据地形变化情况选取，宜为 0.5m~0.8m；对于地形变化较复杂的河段，控制断面应适当加密。

10.0.5 制作模型时，测量放样应按 DL/T 5173 的有关规定执行。

10.0.6 模型安装要求如下：

1 平面导线布置，应视模型形状和范围而定，导线方位允许偏差 $\pm 0.1^\circ$ ；

2 水工建筑物模型高程允许误差 $\pm 0.3\text{mm}$ ；

3 地形高程允许误差 $\pm 3\text{mm}$ ，平面距离允许误差 $\pm 10\text{mm}$ ；

4 水准基点和测针零点允许误差 $\pm 0.3\text{mm}$ ；

5 模型安装完毕后应进行全面校核，并有完整记录；

6 校核完毕后应进行试水，发现问题应及时纠正。

11. 试 验 内 容

11.1 水 位 与 水 面 线

11.1.1 根据试验要求设置水位测量点, 可用固定测针、活动测针、自动水位仪和钢尺等测量水位和水面线。

11.1.2 非恒定流的水位变化过程可用自动跟踪水位计量测, 每测次应重复测量 2 次~3 次。

11.1.3 观测数据记录格式参见附录 C。

11.2 泄 流 能 力

11.2.1 试验时保持流量和闸门开度不变, 调节尾水位, 待水位流量稳定后, 观测流量和水位。

11.2.2 变换闸门开度或流量, 重复上述操作步骤。

11.2.3 试验流量范围应包括设计最大和最小流量, 或试验水位范围应包括设计最高和最低水位。

11.2.4 水位、流量测点不宜少于 10 组, 并应满足试验精度要求。

11.2.5 对于淹没出流, 宜补充自由出流条件的试验, 计算淹没系数。

11.2.6 观测数据记录格式参见附录 C, 并计算流量系数。

11.3 流 速 和 流 态

11.3.1 应根据流速量程与试验要求选用相应的流速量测仪器。

11.3.2 重点测量水工建筑物下游、消能工后的过水断面流速分布和影响两岸稳定的岸边流速分布, 根据试验需要设置主测断面, 不宜少于 8 个, 其他流速测量断面位置视需要而定。

11.3.3 在流态复杂处及出现回流处应补充测点进行流速观测。

11.3.4 可采用摄影法或目测法观测流态。

11.3.5 观测数据记录格式参见附录 C。

11.4 时均动水压强

11.4.1 时均动水压强可用测压排测量。

11.4.2 水流稳定后,可按编号顺序量测各测压管内的水柱高度。

11.4.3 当模型测得的负压值换算至原型接近绝对真空时,应进行分析论证。

11.5 脉动压强

11.5.1 脉动压强应采用晶体压力传感器测量。

11.5.2 每测次应重复测量 3 次。

11.5.3 试验结束后,传感器应再次率定。

11.6 局部冲刷

11.6.1 选择模型冲刷材料的要求如下:

1 模拟砂砾石河床覆盖层,宜用碎石散粒体,其粒径宜按长度相似换算选择;

2 模拟由细颗粒泥沙组成的原型河床,可用轻质模型冲刷料,其粒径宜按启动流速相似计算,并通过预备试验确定;

3 模拟由岩体构成的原型河床,宜用人工碎石、天然砂卵石等散粒体,粒径应按抗冲流速换算。

11.6.2 动床模拟要求如下:

1 动床铺沙顶高程应根据动床冲刷模拟对象确定;模拟基岩冲刷时,应根据河床基岩弱风化层顶部高程确定;模拟覆盖层冲刷时,应根据覆盖层表面高程确定;必要时可按覆盖层和基岩分层铺设;

2 动床范围应大于可能冲刷范围;

3 动床厚度应大于最大可能冲刷深度。

11.6.3 试验冲刷时间的确定应以形成稳定冲刷坑为原则，宜为 2h~3h，特殊情况应由预备试验确定。

11.6.4 动床试验时，应遵循以下要求：

1 泄水建筑物泄水前和流量调整过程中，应使下游形成水垫，其水垫深度应大于拟下泄流量所对应的下游水深，以避免流量调试过程中的泄洪冲刷力大于实际流量泄洪冲刷力；

2 冲刷试验完成后关闭上游进水阀门前，应调节尾门使下游形成水垫，避免水流在流量减小过程中扰动冲淤地形；

3 试验完成后应及时测绘冲淤地形。

11.7 波 浪

11.7.1 测点应布置在建筑物下游水面波动区。

11.7.2 可选用波高仪为主测仪器。

11.7.3 每测次记录时间应大于 30s，采样频率宜不小于 10Hz，并重复测量 3 次。

11.7.4 试验结束后，波高仪应再次率定。

12 试验资料整理与分析

12.1 原始资料整理

- 12.1.1 原始资料应及时整理，试验、计算和校对人员应在原始资料记录及计算表格中签名。
- 12.1.2 同类数据的有效数字位数应统一，且与其精度保持一致。
- 12.1.3 试验结束后，原始资料应按有关规定整理、归档。

12.2 成果整理与分析

- 12.2.1 应按试验工况，绘制相应的水位、水面线图表。
- 12.2.2 应计算流量系数，绘制水位流量关系图表。
- 12.2.3 应按试验工况，绘制相应的流速分布图表。
- 12.2.4 应绘制流态、流向平面图，标明水边线、静水区、回流范围和主流方向，对试验中出现的特殊水流现象进行描述。
- 12.2.5 按试验工况，绘制各部位相应的压强分布图表。
- 12.2.6 脉动压强应以压力脉动均方根值、功率谱、概率密度和相关函数等特征描述，并绘制相应图表。
- 12.2.7 局部冲刷应根据试验结果，绘制冲淤平面图以及冲坑的纵、横剖面图。
- 12.2.8 波浪应以波高、周期和频谱特性等参数描述，并绘制相应图表。

13 试验研究成果

13.0.1 应提交常规水工模型试验研究报告、典型工况照片、必要的录像资料等试验研究成果。

13.0.2 试验研究报告主要包括摘要、目录、报告正文、附录等。

13.0.3 试验研究报告正文应包括工程概况、试验目的与任务，模型设计与制作、量测仪器、试验过程、试验成果与分析，结论与建议等内容。

13.0.4 照片应有说明，录像应配有相应的字幕或解说。

附录 A

(规范性附录)

常规水工模型试验测量精度

常规水工模型试验测量精度要求见表 A.1。

表 A.1 常规水工模型试验测量精度表

施测对象	测试仪器	精度控制	备注
模型	水准仪 经纬仪 全站仪 钢尺	1. 建筑物模型高程和宽度误差应控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内,长度误差应控制在 $\pm 5\text{mm}$ 以内,模型地形高程误差应控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内,平面距离误差应控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内; 2. 试验中模型变形应不超过 1%,漏水量应不超过试验最小过流量的 1%	试验模型应满足 5.0.2 相关规定的限制条件,注意减小缩尺影响
水位	水位测针	测针零点高程的误差应控制在 $\pm 0.2\text{mm}$ 以内,每一水位测次,应重复测读 2 次~3 次,取其稳定值或最低最高的平均值,测读误差应控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内	测杆应沿铅垂方向安装牢固。试验前应检查测针及连接管,连接管不应有堵塞、含气泡及漏水现象
	自动跟踪水位仪	率定曲线的偏差系数 $C_v = \sigma/\mu$ 应控制在 $\pm 5\%$ 以内	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
流量	量水堰板	应遵照量水测针精度控制要求,流量误差控制在 $\pm 1\%$ 以内	应按 7.3.2 和 7.3.3 的技术要求进行堰板的安装;待流量稳定后,方可测读测针读数;模型流量可按不同堰型的率定曲线或有关计算公式推算
	电磁流量计	在管内平均流速大于 0.2m/s 的条件下,流量误差应控制在 $\pm 1\%$ 以内	应进行电磁流量计的传感器、转换器以及管道的安装,并进行定期维护和检定

表 A.1 (续)

施测对象	测试仪器	精度控制	备 注
流速	毕托管	1. 自检率定, 当雷诺数 $Re=3300\sim 360\,000$ 范围内, 流速系数 $\phi=1$, 误差控制在 $1\%\sim 2\%$; 2. 每一测次, 应重复测读 2 次~3 次, 取其稳定值或最大高差与最小高差的平均值; 比压计水头差测读误差应控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内	测量前应检查毕托管和连接管, 是否堵塞或漏气; 在静水中进行充水排气, 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, 以比压计的压头差值最大读数记录
	旋浆流速仪	1. 自检率定, 率定测点应不少于 15 个, 应满足 75% 以上测点, 偏差不得超过 $2\%\sim 3\%$; 2. 每一测点记录值应不少于 3 次, 每次采集时间应不少于 $5\text{s}\sim 10\text{s}$; 3. 断面流速叠加计算, 与实测流量比较, 两者误差应控制在 $\pm 5\%$ 以内	每个测流断面测读垂线数应不少于 3 条; 每条垂线测点数应不少于 3 点。量测流速时应注意不超过流速仪的量测范围
压力	测压管	用水准仪测定各测点及测压板零点高程, 测读误差应控制在 $\pm 0.3\text{mm}$ 以内; 在静水中校验测压管液面与测点高程一致, 误差应控制在 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内; 流态稳定后, 方能测读, 每一测次, 应重复测读 3 次~4 次, 取其最高与最低读数的均值或稳定值, 测读误差应控制在 $\pm 3\text{mm}$ 以内	应按 7.2.2 的技术要求安装测压管, 每次试验前应检查测压孔和测压管是否符合要求; 用消水排除测压管与连通管中的气泡
	脉动压力传感器	以电压为输出信号的压力传感器, 导线长度宜小于 15m ; 量程选择使工作压力值在标准量程值 $60\%\sim 80\%$ 为宜	每次测试前、后, 应按有关规定, 进行系统自检率定; 率定量测区间应大于试验量测区间, 率定曲线的偏差系数 $C_p=\sigma/\mu$ 应不大于 5% ; 每次测量的记录时间应不少于 5s ; 测量动水压强时, 要注意压力传感器所显示的压力值系作用在感应膜上的压力值, 测点压力应据此换算; 传感器的安装应符合有关规定

附录 B

(资料性附录)

重力相似常用比尺换算关系

重力相似常用比尺换算关系见表 B.1。

表 B.1 重力相似常用比尺换算关系表

序 号	物 理 量		量 纲	国际单位	相似比尺
1	几 何 学 量	长 度	L	m	L_r
2		面 积	L^2	m^2	L_r^2
3		面积矩	L^4	m^4	L_r^4
4		体 积	L^3	m^3	L_r^3
5	运 动 学 量	时 间	T	s	$L_r^{1/2}$
6		速 度	LT^{-1}	m/s	$L_r^{1/2}$
7		加速度	LT^{-2}	m/s^2	L_r^0
8		流 量	L^3T^{-1}	m^3/s	$L_r^{5/2}$
9		单宽流量	L^2T^{-1}	m^2/s	$L_r^{3/2}$
10	动 力 学 量	质 量	M	kg	L_r^3
11		力	MLT^{-2}	N	L_r^3
12		压 强	$ML^{-1}T^{-2}$	N/m^2	L_r
13		动 量	MLT^{-1}	$kg \cdot m/s$	$L_r^{7/2}$
14		功 能	ML^2T^{-2}	$N \cdot m$	L_r^4
15		功 率	ML^2T^{-3}	$N \cdot m/s$	$L_r^{7/2}$

附录 C

(资料性附录)

原始资料记录及计算表格形式

原始资料记录及计算表格形式见表 C.1~表 C.7。

表 C.1 水面线观测记录及计算表

试验名称 _____ 试验工况 _____ 年 ____ 月 ____ 日

试验人 _____ 计算人 _____ 校对人 _____

上游水位(m) _____ 上游测针读数(mm) _____ 上游测针零点高程(m) _____

下游水位(m) _____ 下游测针读数(mm) _____ 下游测针零点高程(m) _____

原型流量(m^3/s) _____ 堰上测针读数(mm) _____ 堰口测针读数(mm) _____

长度比尺 _____ 测尺基点高程(m) _____

测点 编号	测点位置	零点高程 m	测点模型高程 m	测点水面 高程 m	备 注

表 C.2 水位与流量观测记录及计算表

试验名称 _____ 试验工况 _____ 年 ____ 月 ____ 日

试验人 _____ 计算人 _____ 校核人 _____

开启 门号	闸门 开度 m	量水堰测 针读数 mm	原型 流量 m^3/s	上游水 位测针 读数 mm	上游 水位 m	下游水 位测针 读数 mm	下游 水位 m	备注

表 C.3 堰流流量系数计算表

试验名称 _____ 试验工况 _____ 年 ____ 月 ____ 日

试验人 _____ 计算人 _____ 校核人 _____

堰流公式 $Q = mb\sqrt{2g}H_0^{1.5}$ 宽度 $b =$ _____ (m) $b\sqrt{2g} =$ _____

流量 Q m^3/s	上游 水头 H m	下游 水头 h m	行近流速 水头 $v^2/2g$ m	上游 能头 H_0 m	$H_0^{1.5}$	潜流比 h/H_0	流量 系数 m	流态

表 C.4 孔流流量系数计算表

试验名称 _____ 试验工况 _____ 年 ____ 月 ____ 日

试验人 _____ 计算人 _____ 校核人 _____

孔流公式 $Q = \mu eb\sqrt{2g}H$ 宽度 $b =$ _____ (m) $b\sqrt{2g} =$ _____

开启 门号	闸门 开度 e m	流量 Q m^3/s	上游 水头 H m	下游 水头 h m	行近流 速水头 $v^2/2g$ m	相对 开度 e/H	淹没度 h/H	流量 系数 μ	流态

表 C.5 毕托管流速观测记录及计算表

试验名称 _____ 测杆编号 _____ 年 ____ 月 ____ 日

原型流量(m^3/s) _____ 试验人 _____

量水堰测针读数(mm) _____ 流速比尺 _____ 计算人 _____

断面编号 _____ 长度比尺 _____ 校核人 _____

测线 编号	水深 m	测点 位置	毕托管水柱高差 mm		$\sqrt{h}$	原型流速 m/s	流向	备注
			倾斜	垂直 h				

表 C.6 直读式旋浆流速仪流速观测记录及计算表

试验名称 _____ 测杆编号 _____ 年 ____ 月 ____ 日

原型流量(m^3/s) _____ 仪器编号 _____ 试验人 _____

量水堰测针读数(mm) _____ 流速比尺 _____ 计算人 _____

 $K=$ _____ $C=$ _____ 校核人 _____

测线 编号	水深 m	测点 位置	采样 时间 t	仪器读数 v_m mm/s				$\left(\frac{n}{t}\right)_{cp}$ c/s	v_{mcp} mm/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)

表 C.7 时均压强观测记录及计算表

试验名称 _____ 试验工况 _____ 年 ____ 月 ____ 日

试验人 _____ 计算人 _____ 校核人 _____

闸门开启情形: 模型(mm) _____ 原型(m) _____ 闸孔号码 _____

上游水位(m) _____ 上游测针读数(mm) _____ 测针零点高程(m) _____

下游水位(m) _____ 下游测针读数(mm) _____ 测针零点高程(m) _____

原型流量(m^3/s) _____ 量水堰测针读数(mm) _____ 堰口测针读数(mm) _____

编 号	测压孔高程 m	测压管读数 mm	测压管水头 m	压强水头 m 水柱		备 注
				+	-	

水电水利工程常规水工模型 试 验 规 程

条 文 说 明

目 录

3	总则	28
4	试验大纲	29
5	相似准则	30
6	试验设备	33
6.1	供水系统	33
6.2	基本固定设备	34
7	试验量测仪器	35
7.1	水位量测仪器	35
7.2	压强量测仪器	35
7.3	流量量测仪器	35
7.4	流速量测仪器	37
7.5	量测仪器检定	38
8	基本资料	39
9	模型设计	40
10	模型制作与安装	41
11	试验内容	42
11.1	水位与水面线	42
11.2	泄流能力	42
11.3	流速和流态	42
11.4	时均动水压强	42
11.5	脉动压强	43
11.6	局部冲刷	43
11.7	波浪	44
12	试验资料整理与分析	45

12.1	原始资料整理	45
12.2	成果整理与分析	45
13	试验研究成果	46

3 总 则

3.0.1 主要说明了编制本试验规程的必要性和目的。必要性是作为统一常规水工模型试验的技术标准、方法和依据。目的在于保证试验研究成果的质量。

4 试 验 大 纲

4.0.1、4.0.2 对于委托课题，试验单位应根据委托单位提出的试验任务书及其他要求，编写试验大纲，作为研究开始以前的一个基本文件，也是开展试验研究的基本依据，应予以重视。自选课题或内部任务则不需要相关研究经历。

5 相似准则

5.0.1 由于天然河道及水工建筑物中的水流运动非常复杂，因此，依据水力学基本原理，纯粹从数理观点出发，模型与原型要达成完全相似是不可能的。但是，只要模型比尺选择恰当、模拟技术合理，模型与原型两个水流系统仍能保证足够的相似性。本条规定的相似条件是应该遵守的流体相似基本原理，它包括以下三方面。

1 几何相似

要求原型与模型之间的有关几何比尺符合以下关系：

$$L_r = L_p / L_m \quad (1)$$

$$A_r = A_p / A_m = L_r^2 \quad (2)$$

$$V_r = V_p / V_m = L_r^3 \quad (3)$$

式中：

L ——长度，m；

A ——面积， m^2 ；

V ——体积， m^3 ；

下标 p ， m ， r ——原型，模型，比尺。

2 水流运动相似

要求模型与原型之间的有关比尺符合以下关系：

$$v_r = v_p / v_m = L_r T_r^{-1} \quad (4)$$

$$a_r = a_p / a_m = v_r / T_r = L_r T_r^{-2} \quad (5)$$

$$Q_r = Q_p / Q_m = \frac{L_p^3 T_p^{-1}}{L_m^3 T_m^{-1}} = L_r^3 T_r^{-1} \quad (6)$$

式中:

v ——流速, m/s;

a ——加速度, m/s²;

Q ——流量, m³/s;

T ——时间, s。

3 动力相似

要求模型与原形之间的有关比尺符合以下关系:

$$m_r = m_p / m_m = \rho_r L_r^3 \quad (7)$$

$$F_r = F_p / F_m = \rho_r L_r^4 T_r^{-2} \quad (8)$$

式中:

m ——质量, kg;

F ——力, N;

ρ ——水流密度, kg/m³。

5.0.2 根据牛顿液流相似准则, 当重力为液流的主要作用力时, 其重力比尺与惯性力比尺应相等, 即应满足式 (9)。

$$(F_g)_r = (ma)_r \quad (9)$$

如果用尺度表示, 则有:

$$\gamma_r L_r^3 = \rho_r L_r^2 v_r^2 \quad (10)$$

将 $\gamma = \rho g$ 代入式 (10), 整理后得:

$$\left(\frac{v}{\sqrt{gL}} \right)_r = (Fr)_r = 1 \quad (11)$$

式中:

v ——流速, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

L ——特征长度, m;

Fr ——佛劳德 (Froude) 数。

按照重力相似准则，得到如下时间比尺：

$$T = L_r^{1/2} \quad (12)$$

重力相似常用比尺换算关系参见附录 B。

为了消除或减少由其他次要作用力影响所产生的偏差，本条文四个限制条件说明如下：

1 变态模型一般难以反映三维性较强的水流条件，而水工建筑物上、下游区域水流的三维特性明显，因此，常规水工模型不能采用变态模型，而应采用正态模型；

2 原型水流雷诺数较大，通常在紊流阻力平方区。而模型水流雷诺数比原型小 $L_r^{3/2}$ 倍，因此，一般难以达到该区。但是，根据阻力相似准则的要求，模型水流至少应该达到紊流。根据莫迪 (Moody) 图解，层流和紊流的界限雷诺数在 2500~5000 之间；

3 根据重力相似准则，模型糙率比原型小 $L_r^{1/6}$ 倍。如果模型材料达不到这个要求，应进行糙率校正；

4 为减小黏滞力影响，保证模型重力相似，根据经验，应尽量保证模型水深大于 30mm；

在模型上测的脉动压力优势频率，由于模型缩尺影响，不能按重力相似准则换算成原型。

6 试 验 设 备

6.1 供 水 系 统

6.1.1~6.1.5 循环式供水系统主要设备的技术规格要求,大多数是根据国内大型水工实验室的资料统计而得,并经实践检验证明是行之有效的,因此,具有实用参考价值。重力式供水系统使用不多,因为它需具备一定的天然条件。如果有条件,应当尽量利用,以节省维护费用。

蓄水池容积可按式(13)或式(14)计算:

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

式中:

A ——实验室面积, m^2 ;

h ——水深, $100\text{mm} \sim 300\text{mm}$ 。

$$V = QT \quad (14)$$

式中:

Q ——供水流量, m^3/s ;

T ——抽水时间,一般为 $5\text{min} \sim 15\text{min}$ 。

离心式水泵所需电动机总功率可按下式计算:

$$P = 9.81QH/e \quad (15)$$

式中:

P ——电动机总功率, kW ;

Q ——供水流量, m^3/s ;

H ——包括局部损失和沿程损失的总水头, m ;

e ——电动机水泵综合效率,常取 0.7。

根据以上公式计算得到的总功率,结合水泵型号和实验室用

水情况，可确定水泵容量和台数。

采用 1~2 级配水管，其中第一级为主管道，与平水箱相连接，并应在管道前段安装控制闸门，以利于管道安装、检修、拆卸。第二级管道在主管上开设，直接进入量水系统（量水堰或电磁流量计等），并应在适当位置安装控制闸门。对于形状不规则的水工实验室，可根据实际情况采用网络布置；对于形状规则的水工实验室，主管道可在实验室内沿四周采用环状布置。

回水渠采用网格状布置，可以满足场内多个模型试验时回水的要求，有利于节约试验场地，提高使用效率。

一般应在进入蓄水池之前的回水渠内的适当位置加设拦污栅、沉砂池等辅助设施，以防止蓄水池淤积，保证水泵的正常运行，特别是对于清淤、检修困难的地下蓄水池，更应注意。

6.2 基本固定设备

6.2.1~6.2.3 各种玻璃水槽、水箱，是根据不同用途建设的基本固定设备。其技术规格尺寸是参照国内大型实验室资料统计而得，具有实用参考价值。

玻璃水槽可在槽宽 0.4m~1.0m、高 1.0m~2.0m、长 20m~30m、流量 50L/s~200L/s 范围内选择。

水箱可在边长 3m~4m，高 3m~5m，容积 30m³~80m³，孔宽比 1/7~1/8，供水量大于 100L/s 范围内选择。

7 试验量测仪器

7.1 水位量测仪器

7.1.2 测针是测量恒定流水位最佳常规仪器，目前广泛用于国内各水工实验室，市场上有现成产品可供选购。

7.1.3~7.1.5 自动跟踪水位计和各种类型的波高仪，是根据电学原理研制而成，可用于测量非恒定流水位和波高。但对水温和水质较敏感，在露天实验场宜慎用。使用时，应经常率定，以保证其测量精度。

7.2 压强量测仪器

7.2.2 测压管是根据连通管原理设计的，是目前国内各实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，因此，必须严格满足本条提出的各项技术要求。

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

7.3 流量量测仪器

7.3.2、7.3.3 量水堰属于堰槽类量水仪器，是目前国内各实验室测定流量最精密的常规仪器。堰板上游 10 倍以上最大堰顶水头处应设置消浪栅。根据标准设计制作和安装的各种堰型，其流量计算可引用以下相应的经验公式。

1 直角三角堰，如图 1 所示。流量计算可以采用以下拟合经验公式：

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

上式适用范围 $H = 0.03\text{m} \sim 0.25\text{m}$ 。

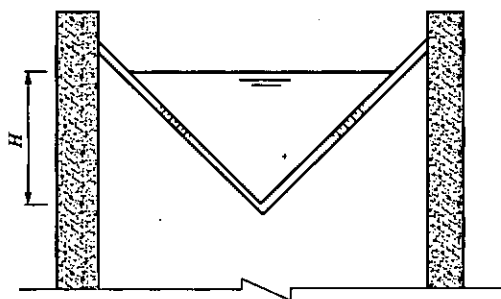


图1 直角三角堰断面图

2 矩形薄壁堰, 如图2所示。流量计算可以采用雷伯克 (T. Rehbock) 经验公式:

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

上式适用范围 $H = 0.03\text{m} \sim 0.75\text{m}$ 。

以上两式中:

H ——堰上水头, m;

H_0 ——修正后水头 ($= H + 0.001 \text{ m}$), m;

P ——堰高, m;

B ——堰宽, m;

Q ——流量, m^3/s 。

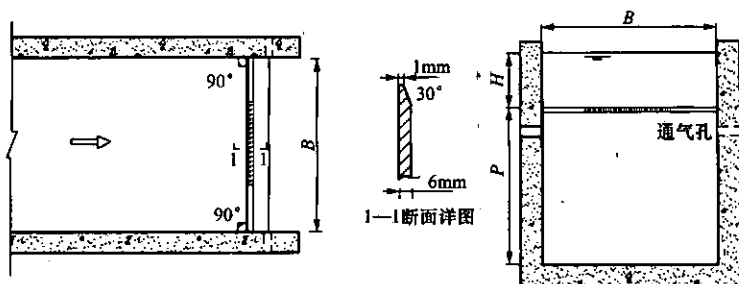


图2 矩形薄壁堰平面布置图及断面图

7.3.4、7.3.5 电磁流量计是利用法拉第电磁感应定律，测量导电液体的体积流量；由于其测量误差已达到±1%以内，且装卸方便，占用场地较小，目前已被广泛应用于国内各水工实验室；市面上的高品质电磁流量计一般均配置有操作控制器，流量直接在显示器中给出。

7.4 流速量测仪器

7.4.2 毕托管流速计算公式为：

$$v = \phi \sqrt{2gh} \quad (18)$$

式中：

h ——全压强和静压强之差，由比压计测得；

ϕ ——流速系数，根据率定试验，当水流雷诺数 Re 在 3300～360 000 范围内时， $\phi=1$ ，误差 1%～2%。

7.4.3 小旋浆流速仪是各水工实验室量测流速的常用仪器，使用时需要定期率定，以保证量测精度。通常利用率定水槽作为率定工具，其精度应控制在 0.5% 以内。

流速与旋浆转速应保证为线性关系，即：

$$v = Kn \pm C \quad (19)$$

式中： K 、 C 值应根据率定结果确定。

流速仪性能要求如下：

- 1 叶轮直径应小于 10mm；
- 2 启动流速应不大于 0.02m/s～0.05m/s；
- 3 流速与旋浆转速应保证为线性关系。

7.4.4、7.4.5 水流表面粒子图像速度场仪 (PIV) 和三维多普勒流速仪 (ADV) 应用于水工模型试验已越来越广泛。

7.4.6 激光流速仪由于对水质要求较高，常规水工模型试验极少应用。

7.5 量测仪器检定

7.5.1~7.5.3 量测仪器按期送检和自检,是为了保证量测仪器的合格和有效,从测试手段上保证试验研究成果的质量。

8 基 本 资 料

8.0.1~8.0.3 模拟范围包括坝址上游和下游,要收集的地质资料有岩基或覆盖层分布、基岩节理发育、破碎情况等。基本资料是开展常规水工模型试验研究工作的前提条件。使用资料时需要进行认真分析和复核,发现问题要仔细考证,并及时和资料提供部门进行沟通和纠正。另外,随着勘测设计工作的深入,基本资料也会更新,也可能会有所调整 and 变化,需要及时收集并在模型试验研究工作中尽量反映。

9 模 型 设 计

9.0.1 常规水工模型试验采用重力相似准则，并按正态模型设计，以重演或预演原型水流运动，是模型设计的基础。

9.0.2 模型比尺的选择，应该重点考虑研究对象的水流相似条件，结合实验室的具体条件综合确定。

9.0.3 各类实际模型比尺，应尽可能大于本条规定的下限比尺，以减小缩尺影响。

10 模型制作与安装

10.0.1 绘制模型布置图和模型加工图，必须具备下列资料：

- 1 水工建筑物设计图：包括平面图、剖面图及细部大样图；
- 2 地形图：比例尺一般为 1:500~1:2000；
- 3 水文、地质资料：包括水位流量关系，河床糙率，悬沙和底沙颗分曲线，1m 水深时的启动流速及岩基分布和节理发育、破碎情况等。

10.0.2 为了便于观察泄水建筑物内的水流流态，本条规定泄水建筑物宜用有机玻璃等透明材料制作。

10.0.3、10.0.4 模型地形制作最常用的方法是断面板法，其主要步骤和要求如下：

- 1 先在地形图上确定模型导线，并在模型现场放样；
- 2 确定每个地形断面与各条等高线的交点，读出并记录交点与导线之间的水平距离及相应高程；
- 3 根据以上数据，加工断面板，并应进行编号；
- 4 按编号次序对准模型相应导线平面位置，用水准仪测定高程并固定；
- 5 断面板间填料可用三合土、黄沙等材料，分层摊铺、夯实，并用水泥砂浆抹面。

10.0.6 导线布置通常沿模型边墙，形成封闭导线网。如果模型较大，可在重要地段增设支导线。同时，水准基点应选在视野较好的平坦之处，且要保证不易变形。高程要定得适当，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。模型的校核是避免模型制作时的放样错误、保证试验精度和提高试验质量的重要环节。

11 试 验 内 容

11.1 水 位 与 水 面 线

11.1.1、11.1.2 水位与水面线是水工模型试验最基本的测量项目。主测仪器是测针和自动跟踪水位计，本条文规定的试验方法是实践经验总结，可供参考。

11.2 泄 流 能 力

11.2.1~11.2.5 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，目的是测量和计算流量系数，可分为自由堰流，淹没堰流，自由孔流和淹没孔流等四种流态。

11.2.6 试验记录和计算表格可参考表 C.2、表 C.3 和表 C.4 的格式。

11.3 流 速 和 流 态

11.3.1~11.3.4 流速分布包括纵向、横向和垂向三个方面，是衡量消能工作用的重要标志。主测仪器是毕托管和微型旋浆流速仪，具体选型可以根据流速量程确定。

11.3.5 试验记录计算表格可参考表 C.5 和表 C.6 的格式。

11.4 时 均 动 水 压 强

11.4.1 时均动水压强是优化建筑物体型的重要指标，主测仪器是测压管，其精度主要取决于测压孔的安装质量，因此，测压管、测压孔应满足 7.2.2 的技术要求。一般可以将测压管集中在一起做成测压排，以便于读数。

11.4.2 由于测压管内的水柱高度是波动的，因此，读数据时应注意观察水柱的波动幅度，一般取水柱的最高值与最低值的平均值作为测量值。试验记录表格可参考表 C.7 的格式。换算至原型时可以采用以下公式：

$$P = (H_0 + H_1) - H_2 \quad (20)$$

式中：

P ——测点压强，m 水柱；

H_0 ——测压排零点高程，m；

H_1 ——测压管内水柱高度读数，m；

H_2 ——测压孔高程，m。

11.4.3 真空现象在水流内部是不存在的。模型中测得的负压强按长度比尺换算至原型导致真空现象，是由于模型缩尺效应产生的。所以，此处不能直接换算。

11.5 脉 动 压 强

11.5.1~11.5.3 压力传感器宜直接安装于测压点，孔口应与边壁垂直，且与过流面齐平。若直接安装有困难，可在传感器与测压孔之间串接刚性短管，但管长应小于 0.3m，且应设置能排除管中空气的装置。条文规定的试验方法是根据实践经验制订的。根据专项实验，测压孔与传感器的间距不大于 1m，否则，会影响测量精度。

11.6 局 部 冲 刷

11.6.1、11.6.2 冲刷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，对河床底部冲刷来说问题不大。但岸坡冲刷模拟比较困难，尚需通过进一步的实践来检验。常用的动床模拟材料参见表 1。

表1 常用的动床模拟材料

材 料	容 重	材 料	容 重
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	2.60~2.70

对于散粒体而言,启动流速可按依兹巴士公式计算: $v = k\sqrt{d}$, k 取值为 5~7。

11.6.3 根据经验,模型中水位、流量等调好以后,一般经过 2h~3h 的冲刷试验,下游消能设施后河床冲淤基本达到平衡,对选定方案的下游冲刷,宜做一次重复试验以分析并确定其成果的可靠性。

11.6.4 试验操作过程中,关键是在模型开始放水和停水时,应按严格遵循本条的规定或采取其他措施,避免水流扰动原状砂面地形和冲淤地形,以保证试验结果的真实性和可靠性。冲淤地形可采用传统的等高线法进行测绘,也可用地形自动测量系统测量各断面数据。

11.7 波 浪

11.7.1 波浪涉及闸坝下游大尺度紊动,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。

11.7.2~11.7.4 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。

12 试验资料整理与分析

12.1 原始资料整理

12.1.1 原始资料是试验得到的第一手资料，其正确与否，直接影响试验研究成果质量，因此，无论是采用纸质表格还是采用电子表格，试验人、计算人和校对人员应本着实事求是的科学态度，严格遵循条文的规定，对原始资料及整理负责。

12.1.2 各类试验数据的有效位数，应与各自的量测精度和谐一致，并按四舍五入的规则进行取舍。同类试验数据的有效位数应相同。

12.1.3 原始资料的归档应根据各试验单位制订的有关规章制度执行。

12.2 成果整理与分析

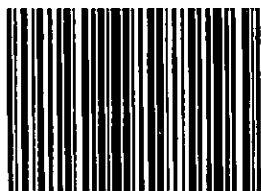
12.2.1~12.2.8 这 8 条基本上概括了常规水工模型试验研究的主要内容，可用以解决枢纽布置和各种水工建筑物的工程水力学问题。

13 试验研究成果

13.0.1 本条提出了常规水工模型试验应提交的主要研究成果。

13.0.2 本条对试验研究报告的格式提出了一些必要的要求。报告封面一般包括项目名称、试验单位、时间；扉页一般包括项目负责人、主要参加人、报告编写人、审查人等；报告正文为试验研究报告的主要部分，应该力求做到文字清晰，语句通畅，标点正确，不能使用未正式公布的简化字、自造字。

13.0.3 本条规定了试验研究报告正文应阐述的主要内容。



155123.80

销售分类建议：规程规范/
水利水电工程/水利水电施工

DL/T 5244—2010

中华人民共和国电力行业标准
水电水利工程常规水工模型
试验规程
DL/T 5244—2010

*

中国电力出版社出版、发行
(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)
北京博图彩色印刷有限公司印刷

*

2010年9月第一版 2010年9月北京第一次印刷
850毫米×1168毫米 32开本 1.625印张 39千字
印数 0001—3000册

*

统一书号 155123·80 定价 8.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究