

中华人民共和国水利行业标准

SL 162—2010

替代 SL 162—95

水电站有压输水系统模型试验规程

**Specification for hydraulic model test of pressurized
conveyance system in hydropower station**

2010-10-11 发布

2011-01-11 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

2010 年第 40 号

中华人民共和国水利部批准《水流空化模型试验规程》
(SL 156—2010) 等 4 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	水流空化模型 试验规程	SL 156—2010	SL 156—95	2010.10.11	2011.01.11
2	掺气减蚀模型 试验规程	SL 157—2010	SL 157—95	2010.10.11	2011.01.11
3	水工建筑物水 流压力脉动和流 激振动模型试验 规程	SL 158—2010	SL 158—95	2010.10.11	2011.01.11
4	水电站有压输 水系统模型试验 规程	SL 162—2010	SL 162—95	2010.10.11	2011.01.11

二〇一〇年十月十一日

前 言

根据水利部水利水电规划设计总院《关于开展〈防洪标准〉等 14 项水利水电勘测设计标准制定与修订工作的通知》（水总科〔2007〕246 号）和《水利枢纽水力学原型观测规范》等六项规范编修工作的技术服务合同（水 0203902007）的要求，对《水电站有压引水系统模型试验规程》（SL 162—95）进行了修订。

本标准共 8 章 3 节 43 条，主要技术内容有：

- 一般规定；
- 相似准则；
- 试验设备与量测仪器；
- 模型设计；
- 模型制造与安装；
- 试验方法与观测内容；
- 试验资料整理与成果分析；
- 附录 A：有压输水系统的数值模拟。

本次修订的主要内容有：

- 增加了有压输水系统的数值模拟内容；
- 对模型设计进行了修订和补充。

本标准所替代规程的历次版本为：

- SL 162—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：中国水利水电科学研究院

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：陈文学 白音包力皋 杨开林

董兴林 谢省宗

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：曹 阳

目 次

1	总则	1
2	一般规定	2
2.1	研究大纲	2
2.2	基本资料	2
2.3	报告编写	2
3	相似准则	3
4	试验设备与量测仪器	4
5	模型设计	5
6	模型制造与安装	6
7	试验方法与观测内容	7
8	试验资料整理与成果分析	8
附录 A	有压输水系统的数值模拟	9
	标准用词说明	11
	条文说明	13

1 总 则

1.0.1 为规范水电站有压输水系统模型试验的研究方法与技术要求，提高试验研究成果的科学性、准确性和可靠性，特编制本标准。

1.0.2 本标准适用于水电站和水泵站的有压引水隧洞（管道）、调压井和尾水隧洞（尾水管）等在内的非恒定与恒定流水力模型试验。

1.0.3 有压输水系统模型试验应根据试验任务要求编制试验研究大纲。

1.0.4 本标准引用标准为：

《水工（常规）模型试验规程》（SL 155）。

1.0.5 有压输水系统模型试验除应符合本标准外，尚应符合国家现行有关标准的规定。

2 一般规定

2.1 研究大纲

2.1.1 应根据研究任务和要求，编制研究大纲，该大纲在研究过程中可作必要的修正。

2.1.2 研究大纲内容宜包括项目概况、工程基本资料、研究目的和内容、技术路线及模拟方法、进度计划、预期成果、研究负责人和参加人员等。

2.2 基本资料

2.2.1 模型试验前应收集与工程相关的地形资料。地形图比例应满足研究需要。

2.2.2 模型试验前应收集工程规模、总体布置和细部结构等资料。

2.2.3 模型试验前应了解工程的各种运行方式、相应的流量及特征水位。

2.2.4 模型试验前应了解水轮机及水泵的工作特性曲线。

2.3 报告编写

2.3.1 模型试验报告宜包括前言、工程概况、试验目的与内容、模型设计与制作、量测方法、模型验证或率定试验、试验结果与分析和结论与建议等内容。

2.3.2 数学模型计算报告宜包括前言、工程概况、计算目的与内容、模型及计算方法、模型验证或率定计算、计算结果与分析、结论与建议等内容。

2.3.3 成果提交形式宜包括研究报告、电子文档、录像和照片等。

3 相似准则

3.0.1 模型应满足几何相似、水流运动相似和动力相似，遵循欧拉相似准则。

3.0.2 模型与原型的水锤波速应相似，且水锤波速比尺应等于水流流速比尺。当研究过渡过程中调压井的涌波特性时，模型可不满足波速相似。

对于压力钢管，水锤波速比尺可按公式 (3.0.2) 确定。

$$u_r = v_r = \left[\frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{dK}{\delta E}}} \right]_r \quad (3.0.2)$$

式中 a_0 ——水流中的水锤波波速；

u_r ——水锤波速比尺；

v_r ——水流速度比尺；

d ——压力管内径，m；

δ ——压力管壁厚，m；

K ——水的体积弹性模量，Pa；

E ——管壁材料弹性模量，Pa。

3.0.3 模型宜为正态模型，当引水管（隧洞）长度远大于管径（或洞径）时，可采用局部变态模型或时间变态模型。局部变态模型可根据调压井控制方程和水锤控制方程确定各参量的比尺。

3.0.4 对于气垫式调压室，模型除满足 3.0.1 条和 3.0.2 条外，还应满足大气压力相似。

4 试验设备与量测仪器

4.0.1 供水系统、试验设备与量测仪器应遵循 SL 155 的有关规定。

4.0.2 模型试验中，原型水库可采用水箱模拟。水箱应符合下述要求：

1 水箱容量应满足稳水要求。

2 箱内应设溢水和补水设施，可按试验要求调节水位，且能在模拟电站增、甩负荷试验过程中保持水位基本不变。

4.0.3 当模拟水电站或水泵站增、甩负荷时，快速阀门控制系统的时间允许偏差应为 $\pm 0.35\text{s}$ 。

4.0.4 试验使用的量测仪器、仪表应符合国家计量认证的有关要求。

4.0.5 试验可选择以下量测仪器：

1 水位（涌波）量测可选择波高仪和自动跟踪水位仪等。

2 流量量测可选择超声波流量计、电磁流量计、三角堰及矩形堰等。

3 压力量测可选择压力传感器等。

5 模型设计

5.0.1 模型设计应遵循第3章规定的相似准则。

5.0.2 应根据试验研究要求，综合考虑工程规模、试验场地、仪器设备和进度要求，合理选定模型的类型和范围。

5.0.3 模型比尺的选择应满足试验研究和测量精度要求，具体应遵循以下原则：

1 引水隧洞（管道）长度比尺，应视管长和试验场地条件选定。

2 引水隧洞（管道）管径比尺应按阻力相似要求，结合现成管材规格选定，可与长度比尺不一致。

3 调压井应按正态模型设计，几何比尺应与管径比尺一致。

5.0.4 下游尾水渠的模拟宜考虑尾水洞出流至边界反射特性的相似性。

6 模型制造与安装

- 6.0.1 应绘制模型总体布置图、结构物详图和测点布置图，并提出模型加工及安装的精度要求。
- 6.0.2 引水隧洞（管道）模型应具有调节输水管道水头损失的措施，以满足水头损失相似的要求。
- 6.0.3 长管道应有防止模型变形的措施。
- 6.0.4 根据试验要求，引水隧洞（管道）应设有满足快速启闭的控制设备。
- 6.0.5 根据试验场地的情况，引水隧洞（管道）可转弯布设，但应保持总水头损失相似。
- 6.0.6 调压井和引水管模型应按图纸要求组装，所有高程均应用精密水准仪控制，允许偏差应为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。
- 6.0.7 模型加工制作精度要求，管道长度误差应小于 $\pm 1.0\%$ ，径向误差应小于 $\pm 0.5\%$ 。
- 6.0.8 其他有关模型制作、安装及测量设备安装等要求，应遵循 SL 155 的相关规定。

7 试验方法与观测内容

7.0.1 试验应符合以下要求：

1 应测量和校正模型引水管恒定流的水头损失，使其达到与原型相似。应记录各工况下的相关参数，作为正式试验的依据。

2 应率定模型压力管水锤波速。若与原型值不相似，应调整模型压力管刚度，直到两者相似。

3 试验过程中应同步测量并记录各水力参数的变化过程线，每种工况重复 3 次。

7.0.2 根据试验任务要求，可选择观测以下内容：

- 变负荷时瞬时流量过程；
- 变负荷时调压井涌波变化过程；
- 变负荷时管道水锤压力过程。

7.0.3 其他方法和内容应遵循 SL 155 的相关规定。

8 试验资料整理与成果分析

8.0.1 对试验观测数据，应结合数学模型的计算结果进行可靠性分析，有压输水系统的数值模拟见附录 A。

8.0.2 应整理出以下参数过程变负荷工况下的有关图表：

——瞬时流量过程线；

——调压井涌波过程线，给出涌波最高、最低值；

——管道水锤压力过程线，给出水锤压力最大值。

8.0.3 应分析论证调压井各设计方案和细部尺寸对调压井涌波的影响、各种试验方案压力管中的水锤压力及其危害程度、快速闸门开、闭时间对整个水力系统的影响。

8.0.4 应论述水工模型需满足的相似准则、模型材料选择和模型设计制造的合理性。当采用变态模型时，应论证其相似性。

8.0.5 应阐明模型中的测点布置及主要量测仪器、量测方法及量测精度。

8.0.6 其他有关恒定流资料的整理与分析，应遵循 SL 155 的规定。

附录 A 有压输水系统的数值模拟

A.0.1 压力管道中的水力瞬变由下一对偏微分方程描述：

$$L_1 = \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{f |v| v}{2gd} = 0 \quad (\text{A.0.1-1})$$

$$L_2 = \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.0.2-2})$$

式中 H ——从基准线算起的测压管水头；

v ——断面平均流速；

f ——沿程阻力系数；

d ——管道直径；

a ——水击波速；

g ——重力加速度；

x 、 t ——距离和时间。

A.0.2 边界条件：

1 上游边界条件：通常水位为常数，即库水位。

2 调压井边界条件：调压井段的连续方程和动量方程。

3 水轮机（水泵）边界条件：水轮机（水泵）的特性方程，通常用特性曲线表示。

4 下游边界条件：一般水位为常数，即下游水位。

A.0.3 由于压力管道内的水锤波速远大于管道内的平均流速，控制方程的特征线几乎为直线，因此，管道内的非恒定流通常采用特征线法求解。

当仅研究调压井涌波特性时，可利用连续方程和能量方程列出调压井涌浪数学模型。由于是常微分方程组，可用龙格-库塔方法求解。

A.0.4 计算方案的确定应包括以下内容：

1 典型计算工况，如增负荷、甩负荷及变负荷等。

2 关键因素的影响，如蝶阀的开关规律、调压井阻抗孔几何尺寸等。

3 通气阀的布置方式等。

A.2.4 应整理出各种变负荷工况下输水系统瞬时流量过程线、压力管道典型部位水锤过程线、水轮机（水泵）运转特性曲线和调压井涌波过程线等。

分析关键因素对输水系统的影响，并提出系统安全运行的工程措施。

标准用词说明

执行本标准时，标准用词应遵循下表规定。

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
不可	不需要、不要求	

中华人民共和国水利行业标准

水电站有压输水系统模型试验规程

SL 162—2010

条 文 说 明

目 次

1	总则	15
2	一般规定	16
3	相似准则	17
4	试验设备与量测仪器	19
5	模型设计	20
6	模型制造与安装	22
7	试验方法与观测内容	23
8	试验资料整理与成果分析	24

1 总 则

1.0.1 本条主要说明编制本试验规程的必要性和目的。

随着我国水利水电事业的发展，高水头、长引水管道电站数量迅速增加，高水头、长引水管道系统的过渡过程问题也倍受工程界的关注，出现了许多新的研究方法和新的工程措施。修编后的试验规程反映了十多年来该领域的研究成果和水平，特别是空间比尺变态模拟和时间比尺变态模拟的提出使得水电站有压输水系统模型试验更加灵活。此外，在水电站有压输水系统研究方面，数值模拟已经成为一种重要的研究手段，因此，在本标准的附录部分增加了数值模拟内容。

2 一般规定

2.1 研究大纲

2.1.2 承担试验任务的研究人员应广泛听取设计、管理、施工等部门的意见，及时进行信息反馈，确保按时、准确完成任务，为工程设计、施工提供切实可行的科学依据。

2.2 基本资料

基本资料是开展试验工作的前提条件，使用资料时要对资料进行认真分析和校核，发现问题要仔细考证，及时与提供资料的部门进行商酌并加以纠正。

2.3 报告编写

2.3.1、2.3.2 同时开展模型试验和数学模型计算时，研究报告应对模型试验成果和数值模拟结果进行比较分析。

3 相似准则

3.0.1 此条为水电站有压输水系统模型试验应满足的基本相似准则。

3.0.2 引水隧洞（管道）的水锤波速与液体的弹性模量 K 、管道特性（包括管道尺寸、管壁厚度及材料）和外部约束有关。两端自由支承均质材料的管道输送清水时，管道水锤波速的计算公式为

$$a = \frac{a_0}{\sqrt{1 + \frac{dK}{\delta E}}} \quad (1)$$

式中 a ——水锤波速，m/s。

隧洞（管道）水锤波速的通用计算公式为：

$$a = \sqrt{\frac{K}{\rho[1 + (K/E)\psi]}} \quad (2)$$

式中 ρ ——液体的密度，kg/m³；

ψ ——无量纲参数，取决于管道的弹性特性和尺寸。

(1) 对于非衬砌隧洞：

$$\psi = 1, E = G \quad (3)$$

式中 G ——岩石的刚性模量，Pa。

(2) 对于钢衬隧洞：

$$\psi = \frac{DE}{GD + E\delta} \quad (4)$$

(3) 对于钢筋混凝土管，可用一具有等价厚度的钢管代替，等价钢管厚度为

$$\delta_e = E_r \delta_c + \frac{A_s}{t_s} \quad (5)$$

式中 δ_c ——混凝土管厚度，m；

E_r ——混凝土弹性模量与钢弹性模量的比值，一般 E_r 的

变化范围为 0.06~0.1，当考虑混凝土管裂缝时，建议用 0.05；

A_s ——钢筋面积， m^2 ；

l_s ——钢筋间距， m 。

调压井的涌波特性主要与输水系统的长度和流速有关，与引水隧洞（管道）的水锤波速无关，因此，在试验研究调压井的涌波特性时，可不考虑输水管道的波速相似。

3.0.3 由于模型试验中选材的问题，很难严格满足水锤波速比尺与流速比尺相等的条件，此时可采用变态模型进行试验。

4 试验设备与量测仪器

4.0.2 此条对试验用的水箱提出要求，一般可采用架空式钢板水箱。

4.0.3 针（蝶）阀或快速阀门控制系统为重要的试验控制设备，一般可采用可控硅自动控制。

4.0.5 主要量测仪器均必须满足动态测量要求，并采用同步测量记录。

5 模型设计

5.0.1 水电站输水系统模型，按欧拉相似准则设计，并采用正态模型。但由于引水管（如引水隧洞）常常很长，而洞径相对较小，采用正态模型有困难时，可按变态模型设计。局部变态模型按照 3.0.3 条设计时，相似准则中隐含了 Vogt 数相似准则，即：

$$\left[\frac{Z}{v \sqrt{\frac{a_d L}{A g}}} \right]_r = 1 \quad (6)$$

式中 Z ——调压井涌波高度，m；

v ——引水管内流速，m/s；

a_d ——引水管面积， m^2 ；

A ——调压井面积， m^2 ；

L ——引水管长度，m；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

下标 r ——模型比尺。

对于局部变态模型，有关物理参数的比尺可按以下关系式设计：

(1) 调压室段：

$$\frac{d_r^2 v_r}{Q_r} = 1, \frac{D_r^2 Z_r}{Q_r T_r} = 1, \frac{L_r}{V_r T_r} = 1, \frac{v_r^2}{Z_r} = 1, \frac{L_r n_r^2}{d_r^{4/3}} = 1 \quad (7)$$

式中 D_r ——调压室几何比尺；

v_r ——水流流速比尺；

Q_r ——流量比尺；

d_r ——引水管管径比尺；

L_r ——引水管长度比尺；

Z_r ——调压室涌波比尺；

T_r ——时间比尺；

n_r ——糙率比尺。

调压室涌波比尺应等于水头比尺。

(2) 压力管道段：

$$\frac{L_r}{a_r T_r} = 1, \frac{V_r}{a_r} = 1, \frac{V_r^2}{H_r} = 1, \frac{L_r n_r^2}{d_r^{4/3}} = 1 \quad (8)$$

式中 a_r ——水锤波速比尺。

调压室与引水隧洞连接部位一般采用正态模型，以便真实反映局部流态对调压室水力特性的影响，并保证局部阻力相似。

时间变态模型是根据水锤波的传播距离而设计的。水锤波在时间 t 内移动的距离是 L ，即 $L=at$ 。

因此，时间比尺、几何比尺和水锤波速比尺要满足以下关系式：

$$L_r = a'_r T'_r \quad (9)$$

式中 L_r ——几何比尺；

a'_r ——变态水锤波速比尺；

T'_r ——变态时间比尺。

由于水锤压力是一系列水锤波的叠加引起的，根据水锤波的叠加公式可得到时间变态模型水锤压力的比尺：

$$P'_r = a'_r L_r^{1/2} \quad (10)$$

式中 P'_r ——水锤压力比尺。

6 模型制造与安装

6.0.7、6.0.8 条文规定的精度要求，是根据已有经验与保证试验成果质量而定的。

7 试验方法与观测内容

7.0.1

1 此款是为保证引水系统阻力相似而规定的。

2 压力管水锤波速，可通过同步记录下来的首尾水锤压力的峰值相位差计算测定，并通过调整模型压力管的刚度使其达到相似。

3 试验过程中应同步测量并记录各水力参数的变化过程，以便于深入分析水锤波的传播规律。为保证试验资料的质量，规定每组次重复测量 3 次。

7.0.2 具体观测内容根据试验任务的要求确定。

8 试验资料整理与成果分析

8.0.2 所列三项均属瞬变流试验内容，其成果用图表示比较清晰。

8.0.3 这条是报告的重点，要进行充分论证，提出有说服力的结论意见。

8.0.4 当模型的水锤波速不相似时，模型试验得出的水锤压力与原型的水锤压力会存在一定差异，研究成果可用于方案的比较。为使研究成果更具说服力，要开展数值模拟工作，深入分析各工况下输水系统的水锤压力特性。