

ICS 27.140

P 55

**SL**

中华人民共和国水利行业标准

**SL/T 158—2020**

替代 SL 158—2010

---

**水工建筑物水流脉动压力  
和流激振动模型试验规程**

**Code for model test on flow pressure fluctuation and  
flow induced vibration of hydraulic structures**

2020 - 12 - 15 发布

2021 - 03 - 15 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《水工建筑物水流脉动压力和流激振动模型试验规程》等2项水利行业标准的公告

2020年第25号

中华人民共和国水利部批准《水工建筑物水流脉动压力和流激振动模型试验规程》（SL/T 158—2020）等2项为水利行业标准，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	水工建筑物水流脉动压力和流激振动模型试验规程	SL/T 158—2020	SL 158—2010	2020.12.15	2021.3.15
2	水利血防技术规范	SL/T 318—2020	SL 318—2011	2020.12.15	2021.3.15

水利部

2020年12月15日

## 前 言

根据水利行业标准制修订计划安排，按照 SL 1—2014《水利技术标准编写规定》的要求，对 SL 158—2010《水工建筑物水流压力脉动和流激振动模型试验规程》进行修订。

本标准共 10 章，主要技术内容包括：

- 相似准则；
- 试验设备和量测仪器；
- 模型设计；
- 模型制造与安装；
- 试验方法与观测内容；
- 流激振动数值模拟原则；
- 资料整理与成果分析。

本次修订的主要内容有：

——增加了术语、试验水箱要求、脉动压力和振动传感器选择要求等内容；

——对试验设备及试验数据合理性和可靠性分析等进行了修正和补充。

本标准所替代标准的历次版本为：

- SL 158—95
- SL 158—2010

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：吴一红 张文远 张蕊 王志刚

杨帆 谭水位 陶林

本标准审查会议技术负责人：黄国兵

本标准体例格式审查人：牟广丞

本标准在执行过程中，请各单位注意总结经验，积累资料，随时将有关意见和建议反馈给水利部国际合作与科技司（通信地址：北京市西城区白广路二条2号；邮政编码：100053；电话：010-63204533；电子邮箱：bzh@mwr.gov.cn），以供今后修订时参考。

<http://www.slzjxx.cn>  
水利造价信息网

## 目 次

1 总则 .....	1
2 术语 .....	2
3 一般规定 .....	3
4 相似准则 .....	4
5 试验设备和量测仪器 .....	5
6 模型设计 .....	6
7 模型制造与安装 .....	7
8 试验方法与观测内容 .....	8
9 流激振动数值模拟原则 .....	9
10 资料整理与成果分析 .....	10
标准用词说明 .....	11
标准历次版本编写者信息 .....	12
条文说明 .....	13

# 1 总 则

**1.0.1** 为规范水工建筑物水流脉动压力和结构流激振动模型试验研究的方法和技术要求，提高试验研究成果的科学性、准确性和可靠性，制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于水工建筑物水流脉动压力模型试验、流激振动模型试验。

**1.0.3** 流激振动研究可采用模型试验和数值模拟两种方法。

**1.0.4** 本标准主要引用下列标准：

SL 155 水工（常规）模型试验规程

**1.0.5** 水工建筑物水流脉动压力和流激振动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 脉动压力 pulsating pressure

由于水流紊动产生的流速脉动场作用于固壁的附加动水压力。

### 2.0.2 流激振动 flow-induced vibration

水流流动诱发的结构振动。

### 2.0.3 水弹性模型 hydro-elastic model

水与弹性体耦合振动的模型。由于试验流体为水，结构模型除满足结构几何相似以外，同时还满足质量和刚度分布相似。

### 2.0.4 质量变态模型 mass distorted model

结构总体质量相似但质量分布不相似的水弹性模型。

### 2.0.5 刚度变态模型 stiffness distorted model

结构总体刚度相似但局部结构刚度不相似的水弹性模型。

### 2.0.6 流激振动数值模拟 numerical simulation of flow-induced vibration

通过数值方法研究流激振动问题。

## 3 一般规定

### 3.1 研究大纲

**3.1.1** 应根据研究任务和要求，编制研究大纲，在研究过程中可做必要的修正。

**3.1.2** 研究大纲内容宜包括：项目概况、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。

### 3.2 基本资料

**3.2.1** 应收集工程概况、总体布置、水工建筑物泄流能力及特征水位等资料。

**3.2.2** 应收集研究范围内的地形资料和相关建筑物布置及体型图等资料。

**3.2.3** 流激振动研究，除收集 3.2.1 条和 3.2.2 条要求的资料外，还应收集所研究水工建筑物的材料特性及相关地质资料。

### 3.3 报告编写

**3.3.1** 模型试验报告宜包括：前言、工程概况、试验目的与内容、基本资料、模型设计与制造、量测方法、模型验证或率定试验、试验结果与分析、结论与建议等内容。如有数值模拟内容，报告宜增加计算目的、计算方法和模型及其验证、计算结果与分析等。

**3.3.2** 成果提交形式宜包括研究报告、电子文档、录像和照片等。



## 4 相似准则

**4.0.1** 水流脉动压力模型试验，应满足几何相似、水流运动相似和动力相似，遵循弗劳德相似准则。

**4.0.2** 水工建筑物流激振动模型试验，除应满足 4.0.1 条相似准则外，同时还应满足结构动力相似，包括：结构物的几何条件、物理力学特性、运动条件和边界条件的相似。当结构动力相似条件难以完全满足时，应满足水流和弹性体两者主要参数的相似。根据结构物的特点和试验目的及要求，经充分论证，也可采用质量变态模型模拟或刚度变态模型模拟。

## 5 试验设备和量测仪器

**5.0.1** 水流脉动压力和流激振动模型试验宜采用专用水箱或水槽。专用水箱或水槽应符合下列规定：

- 1 水箱容积和水面积能保证来流稳定和顺畅；
- 2 有可调节的稳水装置或溢流设施，有效水头容许偏差为 $\pm 1\%$ 。

**5.0.2** 试验量测仪器、仪表应符合国家计量认证的有关要求。

**5.0.3** 试验量测前应对量测仪器进行率定，且应满足量测仪器技术指标和安装要求。

**5.0.4** 振动测试系统一般由信号采集分析系统、信号放大器和传感器组成。信号放大器测量频率范围应覆盖被测信号频率范围，动态范围应适应信号变化范围。各振动量（位移、速度、加速度等）宜分别采用相应的传感器测量，否则应消除可能引起的误差。

**5.0.5** 脉动压力传感器选择应符合下列规定：

- 1 感应膜直径宜小于6mm；
- 2 传感器量程、精度和频响范围应满足试验要求，且宜适应温度、磁场、湿度及防水等试验环境要求。

**5.0.6** 振动传感器选择应符合下列规定：

- 1 传感器质量应小于测试对象有效质量的1/10；
- 2 测试前应对测试对象的频率、可能产生的最大振动位移进行预估，选择合适频响范围及灵敏度的传感器；
- 3 传感器应适应温度、磁场、湿度、防水等工作环境要求。

## 6 模型设计

- 6.0.1 水流脉动压力模型设计应遵循 4.0.1 条规定的相似准则。
- 6.0.2 水流脉动压力试验模型设计应根据试验研究要求，并综合考虑建筑物特点、尺寸、水头、流量、试验量测精度和试验室条件等因素，选定适宜的模型类型和比尺。
- 6.0.3 水流脉动压力测点应根据水流流态和研究需要布置。
- 6.0.4 流激振动模型的设计应遵循 4.0.1 条、4.0.2 条规定的相似准则。
- 6.0.5 流激振动试验模型比尺的确定除应满足 6.0.2 条的规定外，还应考虑水工建筑物材料水弹性模拟的可行性。
- 6.0.6 流激振动模型应进行结构物模型材料的物理力学参数验算，主要的物理力学参数应符合相似比尺要求。
- 6.0.7 流激振动模型除应满足水流边界条件相似外，还应分析结构物边界约束条件对振动影响。周边环境噪声可能对振动测试结果产生较大影响时，模型应采取必要的隔离降噪措施。
- 6.0.8 在进行动力特性测试之前，应对测试对象结构的振型和频率进行初步分析，为传感器选型及测点布置提供依据。
- 6.0.9 振动测点的布置应根据试验目的、结构及其振动特点等确定。传感器应安装在能够反映结构整体和主要部位动态响应的位置上。

## 7 模型制造与安装

- 7.0.1** 模型制造与安装应绘制模型总体布置图、结构物模型详图、测点布置图，提出模型加工及安装要求，验算模型结构强度。
- 7.0.2** 模型制造与安装精度应符合 SL 155 的相关要求。
- 7.0.3** 脉动压力传感器应与测压表面齐平且垂直。测点需用导管引出再接压力传感器时，导管宜采用长度小于 30cm 的刚性管。压力传感器布置应能够反映主要流动及结构物受力动力特征。
- 7.0.4** 流激振动结构物模型应依据 6.0.4~6.0.7 条模型设计的要求进行制造。
- 7.0.5** 振动测试传感器安装及测试系统部件连接应牢固，并采取防水措施。试验过程中，应检查仪器的完好性及可靠性。
- 7.0.6** 模型制造安装完成后，应进行检查、率定与校核，并有完整记录。

## 8 试验方法与观测内容

### 8.0.1 试验方法应符合下列规定：

- 1 水流脉动压力和流激振动试验，应根据试验任务的要求确定试验组次。
- 2 试验数据的采集应符合采样定理的要求，并根据水流特点选择合适的采样时间间隔和样本容量。
- 3 脉动压力和结构物振动，宜进行3次以上量测。
- 4 结构动力特性测试时可采用锤击法。测点的数量根据测试的振型阶数确定，布置宜选在振型的拐点、敏感点等处。

### 8.0.2 根据试验要求，可选择以下观测内容：

- 1 脉动压力。
- 2 结构物模态试验相应参数。
- 3 水工建筑物流激振动动力响应参数。

## 9 流激振动数值模拟原则

**9.0.1** 水工建筑物流激振动问题可采用数值模拟结合水流脉动压力测试结果进行研究。必要时应采用流激振动物理模型试验与数值模拟相结合的方式进行研究。

**9.0.2** 水工建筑物的模态特性宜采用数值模拟进行研究。

**9.0.3** 水工建筑物流激振动数值模拟成果与水弹性模型试验成果可相互验证，互为补充。

<https://www.slzjxx.com>  
水利造价信息网

## 10 资料整理与成果分析

- 10.0.1** 应在试验报告中阐述试验数据采集和分析处理的方法。
- 10.0.2** 应在试验报告中阐述流激振动试验制模材料的选定及其相似性。
- 10.0.3** 应对水流脉动压力和流激振动的试验数据进行合理性和可靠性分析。
- 10.0.4** 试验数据应采用以随机过程理论为基础的随机数据处理方法进行分析处理。
- 10.0.5** 水流脉动压力试验数据经分析处理后，对于平稳随机过程，可用脉动压力均方根值、最大值、最小值、功率谱等特征来描述脉动特性，必要时还应以概率密度和相关函数等特征来描述脉动特性，并绘制相应图表。对非平稳随机过程，则应根据问题的特点采用非平稳随机过程的特征函数进行描述。
- 10.0.6** 结构物流激振动试验数据分析处理可遵循 10.0.5 条的规定。
- 10.0.7** 应以各阶振型和频率来描述结构物的自振特性，并绘成相应图表。
- 10.0.8** 应在试验报告中论述各部位脉动压力特性及对工程的影响。
- 10.0.9** 应在试验报告中论述水工建筑物模态特性。
- 10.0.10** 应在试验报告中论述水工建筑物流激振动特性及其对工程安全的影响，并提出改善措施。

## 标准用词说明

标准用词	严格程度
必须	很严格，非这样做不可
严禁	
应	严格，在正常情况下均应这样做
不应、不得	
宜	允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做
不宜	
可	有选择，在一定条件下可以这样做



## 标准历次版本编写者信息

### SL 158—95

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准主要起草人：庞昌俊 黄种为 许玉林 周名德  
何益源 张声鸣 陈永奎

### SL 158—2010

本标准主编单位：中国水利水电科学研究院

本标准主要起草人：吴一红 章晋雄 张文远 穆祥鹏  
袁珏 杨帆 谭水位 何耘

中华人民共和国水利行业标准

水工建筑物水流脉动压力  
和流激振动模型试验规程

SL/T 158—2020

条文说明

<https://www.slzjxx.com>  
水利造价信息网

## 目 次

1	总则	15
3	一般规定	16
4	相似准则	17
5	试验设备和量测仪器	22
6	模型设计	23
7	模型制造与安装	24
8	试验方法与观测内容	25
9	流激振动数值模拟原则	26
10	资料整理与成果分析	27

# 1 总 则

**1.0.1** 本条主要说明编制本标准的必要性和目的。必要性是作为规范本行业的水流脉动压力和结构物流激振动模型试验研究方法和技术要求。目的在于保证试验研究成果的质量和水平。

**1.0.2** 本标准适用于水工建筑物水流脉动压力模型试验和流激振动模型试验。主要研究对象如下：

- (1) 水电站溢流式厂房顶板水流脉动压力；
- (2) 陡槽泄槽底板、堆石坝溢流面板和过水围堰面板水流脉动压力；
- (3) 水跃消力池底板水流脉动压力；
- (4) 挑、跌流水垫塘底板、冲刷坑河床水流脉动压力；
- (5) 特殊消能工边壁水流脉动压力；
- (6) 拱坝泄洪消能与坝体流激振动；
- (7) 溢流坝泄洪消能与闸墩流激振动；
- (8) 消力塘中隔墙及其他建筑物流激振动；
- (9) 闸门流激振动；
- (10) 水电站溢流式厂房流激振动；
- (11) 引水管道振动；
- (12) 其他水工建筑物振动。

结构物流激振动的模拟试验，由于制模材料的模拟相似性存在问题，还不能对所有结构物都进行模拟，这方面尚待进一步研究。另外，有些以强迫振动为主的项目，可以仅进行脉动压力试验提供动力荷载，配合数学模型进行结构物振动特性分析。

## 3 一般规定

### 3.1 研究大纲

**3.1.2** 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。

### 3.2 基本资料

**3.2.1~3.2.3** 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榷并加以纠正。

### 3.3 报告编写

**3.3.1、3.3.2** 模型试验报告正文可参考下列格式编写：

(1) 前言说明研究项目的来源、目的、主要内容、技术路线、基础资料、研究依据、参考资料等及其他需要说明的问题。

(2) 工程概况介绍工程所在位置、流域，水库（围堰）特征指标，枢纽布置，泄水（导流）建筑物尺寸及其应用条件等。

(3) 模型设计方法包括模型相似条件、模型限制条件、模型中各比尺的选择和计算、模型平面布置及仪器设备等。

(4) 模型制造及量测仪器设备包括模型制造的方法和精度控制、主要量测仪器设备的性能及精度。

(5) 模型率定和验证试验。

(6) 如有数值模拟内容，说明计算目的、计算方法和模型及其验证、计算结果与分析等。

(7) 试验方案拟定。

(8) 各试验方案成果分析。

(9) 结论与建议。

## 4 相似准则

4.0.1 脉动压力要素统计特征量的相似比尺与模型比尺  $L_r$  关系为

流速脉动比尺	$V'_r = L_r^{1/2}$		(1)
紊动强度比尺	$(\sqrt{V'^2})_r = L_r^{1/2}$		
脉动压力幅值比尺	$p'_r = L_r$		
脉动频率比尺	$f_r = L_r^{-1/2}$		
相关函数比尺	$R_r = L_r^2$		
谱密度比尺	$S_r = L_r^{2.5}$		

对于水流脉动压力频率的模型相似律，目前仍存在两种见解。

其一：由流体力学的基本方程出发得相似模型律，并和重力相似准则相一致的结论，即脉动压力的欧拉数和斯特劳哈尔 (Strouhal) 数，分别为

$$(Eu)_r = \left( \sqrt{P'^2} \left/ \frac{\rho u_0^2}{2} \right. \right)_r = 1 \quad (2)$$

$$(St)_r = (fL/u_0)_r = 1 \quad (3)$$

式中  $u_0$ ——平均流速，m/s。

由式 (2) 和式 (3) 得

$$\text{脉动压力振幅比尺} \quad (\sqrt{p'^2})_r = L_r \quad (4)$$

$$\text{脉动压力频率比尺} \quad f_r = L_r \quad (5)$$

其二：由原型观测和不同比尺的模型试验得出的经验模型律。

$$\text{脉动压力振幅比尺} \quad (\sqrt{p'^2})_r = L_r^m \quad (6)$$

$$\text{脉动压力频率比尺} \quad f_r = L_r^n \quad (7)$$

由于量测方法、使用仪表和资料整理方法等不尽相同，因此得出的  $m$ 、 $n$  值也不尽相同，大致  $m \approx 1$ ， $n \approx 0 \sim -1/2$ 。

上述情况表明，脉动压力幅值符合重力相似准则，而频率相似存在不同见解，但目前大多数仍按式 (1) 的相似比尺换算。

**4.0.2 水工建筑物流激振动模型试验**，应同时满足水力条件相似和结构动力相似，即水弹性相似。

(1) 水力条件相似：模型应满足本标准 4.0.1 条的相似准则，条文说明和 SL 155《水工（常规）模型试验规程》的有关规定；

(2) 结构动力相似：应满足建筑物几何条件、物理力学特性、运动条件和边界条件的相似。

几何条件相似：应满足建筑物原型和模型的几何尺寸和相应的位置相似，结构物受力产生的应变和变位的比尺为

$$\left. \begin{aligned} \delta_r &= \epsilon_r l_r = \theta_r l_r \\ \epsilon_r &= \theta_r = 1 \\ \delta_r &= l_r \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $\delta_r$ ——线变位比尺；

$\epsilon_r$ ——线应变比尺；

$\theta_r$ ——角变位比尺；

$l_r$ ——结构线长度比尺。

物理力学条件相似：应满足原型与模型结构材料的力学参数和受力后引起的变化相似。在线弹性范围内，各参数的比尺为

$$\left. \begin{aligned} \mu_r &= 1 \\ \sigma_r &= E_r \epsilon_r \\ \tau_r &= G_r \theta_r \\ \sigma_r &= E_r = G_r = \tau_r \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中  $\mu_r$ ——泊松比比尺；  
 $\sigma_r$ ——正应力比尺；  
 $\tau_r$ ——切应力比尺；  
 $E_r$ ——弹性模量比尺；  
 $G_r$ ——剪切模量比尺。

运动条件相似：应满足原型与模型结构的运动状态和产生运动的条件相似，在随机动水荷载作用下，结构运动的微分方程可表示为

$$\text{原型} \quad ([M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\})_p = (\{F(t)\})_p \quad (10)$$

$$\text{模型} \quad ([M]\{\ddot{\delta}\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\})_m = (\{F(t)\})_m \quad (11)$$

式中  $[M]$ ——含流体附加质量的矩阵；  
 $\{\ddot{\delta}\}$ ——结构的加速度列阵；  
 $[C]$ ——含流体影响的阻尼矩阵；  
 $\{\dot{\delta}\}$ ——结构的速度列阵；  
 $[K]$ ——含流体影响的刚度矩阵；  
 $\{\delta\}$ ——结构的位移列阵；  
 $\{F\}$ ——作用在结构上的动水脉动荷载列阵；  
 $t$ ——时间。

在一般的三维弹性体条件下，单元刚度矩阵可写成

$$[K]^e = [B]^T [D] [B] V^e \quad (12)$$

式中  $[K]^e$ ——单元刚度；  
 $[B]$ ——与坐标无关的量纲为  $L^{-1}$  的常数矩阵；  
 $[D]$ ——弹性系数矩阵；  
 $V^e$ ——单元体积。

其中弹性系数矩阵  $[D]$  为



$$[D] = \frac{E(1-\mu)}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

在原型与模型相似条件下，则

$$\left. \begin{aligned} M_r \frac{\delta_r}{t_r^2} &= C_r \delta_r / t_r = K_r \delta_r = p_r' l_r^2 \\ K_r &= M_r t_r^{-2} = \rho_{sr} l_r^3 t_r^{-2} = E_r l_r \\ E_r &= \rho_{sr} l_r^2 t_r^{-2} \\ \mu_r &= 1 \\ C_r &= M_r t_r^{-1} = \rho_{sr} l_r^3 t_r^{-1} \\ p_r' &= K_r \delta_r l_r^{-2} = E_r \delta_r l_r^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中  $t_r$ ——时间比尺；

$E_r$ ——弹性模量比尺；

$\mu_r$ ——泊松比比尺；

$\rho_{sr}$ ——结构材料密度比尺；

$\delta_r$ ——结构位移比尺；

$l_r$ ——线长度比尺；

$C_r$ ——阻尼系数比尺；

$p_r'$ ——脉动压力比尺。

边界条件相似：应满足原型与模型边界约束条件和受力条件

相似。模型中结构物边界约束条件参见本标准 6.0.7 条说明。受力条件主要是动水荷载的相似，按本标准 4.0.1 条相似准则设计和制造模型，可以达到动水荷载相似。

在水流与水弹性体流激振动模拟试验中，应满足水流与弹性体两者各参数的相似比尺是一致的。各参数比尺与模型比尺  $L_r$  的关系为

$$\left. \begin{aligned} l_r &= L_r = \delta_r \\ t_r &= T_r = L_r^{1/2} \\ \theta_r &= \rho_{sr} = \rho_{wr} = \mu_r = \varepsilon_r = 1 \\ \tau_r &= \sigma_r = E_r = p'_r = L_r \\ C_r &= L_r^{2.5} \\ V_{sr} &= V_{wr} = t_r = L_r^{1/2} \\ f_r &= L_r^{-1/2} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中  $\rho_{wr}$ ——水密度比尺；

$V_{sr}$ ——质点的速度比尺；

$V_{wr}$ ——水流流速比尺。

结构动力相似条件中阻尼、泊松比等一般难以满足相似条件，但应该满足水流和弹性体密度相似、弹性模量相似、几何相似以及边界条件相似等主要参数相似。

质量变态模型是指仅满足刚度（弹性模量）相似，总体质量相似但质量分布不相似的水弹性模型；刚度变态模型是指仅满足质量分布相似，结构整体刚度相似但局部结构刚度不相似的水弹性模型。流激振动试验可以根据研究问题的特点和要求，在充分论证的情况下，可采用质量变态模型模拟或刚度变态模型模拟。如在平面闸门流激振动试验中，闸门刚度较大，闸门振动主要是以钢丝绳或启闭杆控制的整体竖向振动，模拟这种振动时可以采用质量变态模型，将闸门制成整体几何和质量相似的刚性闸门模型，钢丝绳或启闭杆按弹性相似模拟。

## 5 试验设备和量测仪器

**5.0.1** 水流脉动压力和流激振动模型试验也可结合水工模型试验进行，模型中的压力、流速、泄量等与水位直接相关，应保证库水位的稳定。在流激振动试验中，经常会遇到建筑物泄量随时间变化的情况，因此水箱应具有调节流量的能力。

**5.0.2~5.0.4** 这3条都是对试验用的量测仪器仪表的要求，即应符合国家仪器设备计量认证的有关要求，方可使用。试验量测仪表规范化、科学化才能保证试验成果的准确性和可靠性。对于量测一次仪器仪表的率定（校验）、二次仪器仪表及采集系统的检定（校验），其周期一般为1~2年。流激振动试验中振动加速度、速度和位移的测量一般应选用相应类型的加速度传感器、速度传感器和位移传感器，也可以将加速度传感器的信号经一次积分或二次积分得到相应的速度或位移信号，对积分信号可能引起的测量误差应进行必要的分析。

**5.0.5** 脉动压力是点脉动压力，脉动压力传感器的直径应越小越好。根据目前市场上可选用的脉动压力传感器实际情况，建议选用直径小于6mm的传感器。振动测量传感器会对模型产生附加质量，传感器质量过大会改变结构的自振频率和振型。传感器质量小于测试对象有效质量的1/10，结构的自振频率测量误差能够控制在5%以内（详见华东水利学院编写的《模型试验量测技术》）。流激振动试验中振动信号一般较微弱，场地环境比较复杂，振动传感器应选择能够包含结构主要频响范围，灵敏度能捕捉微小振动信号，具有防潮防水性能的传感器。

## 6 模型设计

**6.0.6** 选定模型类型和比尺后，模型材料在加工制造过程中如果存在一定的误差，要求对结构物制模材料的弹模、密度等进行测试与验算。如不满足相似比尺的要求，则应重新选择比尺或制模材料。在水工建筑物流激振动模型试验中，结构物制模材料要完全符合相似要求，是很困难的。根据目前的经验，对于原型为混凝土的水工建筑物，流激振动结构物的制模材料，在一些试验研究中采用了加重橡胶和乳胶水泥作为制模材料，其主要力学参数，如容重、弹性模量可以满足相似，但制模材料的泊松比和阻尼比不能达到相似（乳胶水泥的泊松比和阻尼比更接近混凝土），其影响有待研究。

**6.0.7** 关于流激振动结构边界约束条件相似中，对坝体等流激振动试验主要是地基模拟范围的选取，应满足耦联系统自振特性相似。因此，有的试验研究以截取不同边界模拟范围，进行自振特性分析计算和比较，以截取适宜的模拟范围。对闸门流激振动试验主要是分析止水和启闭系统模拟对系统自振特性的影响。水流引起的建筑物振动通常是一个微小量，模型试验中由于缩尺原因振动量将比原型更加微弱，环境振动、电磁干扰等可能影响试验的测量结果。为提高模型试验中的信噪比，可采用橡胶垫等隔离措施对试验模型进行隔离，达到提高测量精度的目的。

**6.0.9** 在布置测点时，应按照试验研究任务的特点和要求将测点布置在敏感点、最大振动点及关注点等部位。如平面闸门为主纵梁或主横梁结构，传感器一般布置在能代表主要受力振动的主纵梁或主横梁上，也可布置在吊耳、腹板等关注部位。

## 7 模型制造与安装

**7.0.1** 模型总体布置图和结构物详图，是模型制造和安装的依据，必须规范化。要求图纸线条和尺寸清晰，绘图和校核者均应签名。流激振动试验模型一般要承受一定的水头压力作用，试验前应对整个模型的强度和刚度进行验算，必要时对模型进行加固。

**7.0.3** 对不能直接安装压力传感器的部位，可以采用短管引出再接压力传感器，但应论证导管的影响。中国水利水电科学研究院董兴林等在 20 世纪 80 年代开展了导管长度对传感器量测水流压力脉动的频率响应问题研究，发现采用不同材质及长度的导管对测点的脉动压力均方根值及频谱特性有显著影响。因此建议传感器与测点之间需用导管连接时，宜采用长度小于 30cm 的刚性管。

**7.0.5** 本条是对量测仪器安装、连接提出的要求，传感器直接与水流接触时应注意防水密封，以确保试验观测成果的可靠性。在模型制造与安装完毕后，依照图纸和要求进行检查和校核并做出记录，应成为试验工作的制度。

## 8 试验方法与观测内容

**8.0.1** 在每组次试验中，应保持水位的稳定。在观测过程中和试验结束时，宜进行水位流量的检测和仪器的调零校正，以确保资料的可靠性；同时在试验过程中应注意水流流态的观测。各试验组次条件、资料等记录均应书写清晰。

在流激振动试验中常采用锤击法获取结构的动力特性，该方法具有激振系统简单、移动施力部位容易、试验周期短、可以比较准确获得结构动力特性等优点。

<https://www.slzjxx.com/>  
水利造价信息网

## 9 流激振动数值模拟原则

**9.0.1** 界定了流激振动数值模拟、物理模型的适用范围。对经验比较多的水工建筑物流激振动问题可采用数值模拟结合水流脉动压力测试结果进行分析。对大型工程或经验较少的水工建筑物流激振动问题，应采用流激振动物理模型试验与数值模拟相结合的方式进行研究。

**9.0.2** 数值模拟一般能够比较精确得到水工建筑物的模态分析结果。通过数值模拟计算的模态结果与水弹性模型试验模态分析结果的比较分析，能够检验水弹性模型的精度。结构模态分析可选用 ANSYS、ADINA、SAP 等大型通用商业软件建立水工建筑物的三维有限元模型，进行模态参数的计算分析。在进行数值模拟分析时，应根据研究对象的特点选择合适的边界约束条件、单元类型、网格数量。

## 10 资料整理与成果分析

**10.0.3** 试验数据的合理性和可靠性可结合水流流态、数据的重复性以及类似工程的相关资料进行分析。对于流激振动数据也可将数值模拟结构自振特性计算结果与水弹性模型模态试验结果对比分析，数值模拟流激振动响应计算结果与水弹性模型试验响应的量级比较分析。

**10.0.4** 规定脉动压力和流激振动试验数据处理的方法，即目前广泛采用的应用计算机软件或专用数据处理机进行分析处理。

**10.0.5、10.0.6** 规定脉动压力或流激振动试验必须给出的特征值和特性图，并应分析与相应水力参数之间的关系。

**10.0.7~10.0.10** 脉动压力模型试验和振动模型试验报告应重点阐述的内容，应就其对工程的影响给出明确的结论和相应的建议。