

ICS 27.140

P 59

备案号: J2662—2019



中华人民共和国电力行业标准

P

DL/T 5772 — 2018

---

# 水电水利工程水力学安全监测规程

Specification for hydraulics safety monitoring for  
hydropower & water resources project

2018-12-25 发布

2019-05-01 实施

---

国家能源局 发布

中华人民共和国电力行业标准

# 水电水利工程水力学安全监测规程

Specification for hydraulics safety monitoring for  
hydropower & water resources project

**DL/T 5772 — 2018**

主编机构：中国电力企业联合会

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2019 年 5 月 1 日

中国电力出版社

2019 北 京

中华人民共和国电力行业标准  
水电水利工程水力学安全监测规程  
Specification for hydraulics safety monitoring for  
hydropower & water resources project  
**DL/T 5772 — 2018**

\*

中国电力出版社出版、发行  
(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)  
北京天泽润科贸有限公司印刷

\*

2019 年 10 月第一版 2019 年 10 月北京第一次印刷  
850 毫米×1168 毫米 32 开本 2.375 印张 58 千字  
印数 001—500 册

\*

统一书号 155198 · 1603 定价 **36.00** 元

**版 权 专 有 侵 权 必 究**

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

## 国家能源局

## 公 告

2018 年 第 16 号

依据《国家能源局关于印发〈能源领域行业标准化管理办法（试行）〉及实施细则的通知》（国能局科技〔2009〕52号）有关规定，经审查，国家能源局批准《光伏发电工程地质勘察规范》等204项行业标准，其中能源标准（NB）32项、电力标准（DL）172项，现予以发布。

附件：行业标准目录

国家能源局

2018 年 12 月 25 日

附件：

## 行 业 标 准 目 录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	出版机构	批准日期	实施日期
...							
194	DL/T 5772—2018	水电水利工程水力学安全监测规程			中国电力出版社	2018-12-25	2019-05-01
...							

## 前 言

本标准根据《国家能源局关于下达 2010 年第一批能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2010〕320 号）的要求制定。

本标准制定过程中，编写人员进行了资料收集、分析研究和综合整理工作，总结了我国水电水利工程水力学安全监测的经验及国内最新研究成果，参考相关标准，并广泛征求了国内有关业主、设计、咨询、施工、科研单位和有关专家的意见，经审查定稿。

本标准主要技术内容包括监测项目与方法、监测仪器及其埋设安装、监测、监测资料整理与分析等。

本标准由中国电力企业联合会提出。

本标准由电力行业大坝安全监测标准化技术委员会（DL/TC 32）归口。

本标准主编单位：长江水利委员会长江科学院

本标准参编单位：中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

本标准主要起草人员：金 峰 黄国兵 段文刚 王才欢  
曾 祥 张 晖 陈 端 戴晓兵  
李 利 李延农 江耀祖 耿 峻  
唐祥甫 侯冬梅 杨 伟 李 静  
汪世鹏

本标准主要审查人员：吴时强 汪 毅 王玉洁 赵花城  
曾玉红 吴龙华 刘继广 李端有  
潘 琳 郑晓红 赵志勇 陈树莲  
耿贵彪 刘剑鸣 段国学 王 跃  
刘大文 谭恺炎 郭 晨 於三大

胡晓云 冯永祥 邱小弟

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管理中心（北京市白广路二条一号，100761）。

库七七 [www.kqgw.com](http://www.kqgw.com) 提供下载

## 目 次

1	总则	1
2	术语	2
3	监测项目与方法	3
3.1	一般规定	3
3.2	水流流态	5
3.3	水位与波动	6
3.4	动水压强	6
3.5	水流流速	7
3.6	流量	8
3.7	消能效果	8
3.8	下游冲淤地形	9
3.9	流激振动	9
3.10	通气风速与通气量	10
3.11	水流掺气浓度	10
3.12	水流空化	11
3.13	空蚀与磨损	12
3.14	泄洪雾化	12
3.15	船舶系缆力	13
4	监测仪器及其埋设安装	14
4.1	一般规定	14
4.2	仪器底座	14
4.3	电缆	15
4.4	监测仪器	16
4.5	观测站	18
5	监测	19

5.1 监测条件 .....	19
5.2 过水建筑物检查 .....	19
6 监测资料整理与分析 .....	21
6.1 一般规定 .....	21
6.2 资料整理 .....	22
6.3 分析评价 .....	23
6.4 成果报告 .....	24
附录 A 底流速仪流速计算公式 .....	25
附录 B 通气风速和通气量计算公式 .....	26
附录 C 仪器底座埋设安装示意图 .....	28
本标准用词说明 .....	29
引用标准名录 .....	30
附：条文说明 .....	31



## Contents

1	General provisions .....	1
2	Terms .....	2
3	Monitoring contents and methods .....	3
3.1	General provisions .....	3
3.2	Flow pattern .....	5
3.3	Water level and wave .....	6
3.4	Hydrodynamic pressure .....	6
3.5	Flow velocity .....	7
3.6	Flow discharge .....	8
3.7	Energy dissipation .....	8
3.8	Riverbed erosion .....	9
3.9	Flow induced vibration .....	9
3.10	Wind speed and discharge of vent pipe .....	10
3.11	Flow aeration .....	10
3.12	Flow cavitation .....	11
3.13	Cavitation erosion and abrasion .....	12
3.14	Atomization caused by flood release .....	12
3.15	Mooring force of ships .....	13
4	Monitoring instruments and embedment .....	14
4.1	General provisions .....	14
4.2	Basement of monitoring instrumens .....	14
4.3	Observation cable .....	15
4.4	Monitoring instruments .....	16
4.5	Observation stations .....	18
5	Monitoring .....	19

5.1	Monitoring conditions .....	19
5.2	Inspection on hydraulic structures .....	19
6	Sorting and analysis on monitoring data .....	21
6.1	General provisions .....	21
6.2	Sorting on monitoring contents .....	22
6.3	Analyze and evaluate .....	23
6.4	Report writing .....	24
Appendix A	The calculation formula of the bottom velocity .....	25
Appendix B	The calculation formula of wind speed and discharge of vent pipe .....	26
Appendix C	Sketch map of embedment on basement of monitoring instrumens .....	28
	Explanation of wording in this specification .....	29
	List of normative standards .....	30
	Addition: Explanation of provisions .....	31

## 1 总 则

**1.0.1** 为规范水电水利工程水力学安全监测,保证监测成果质量,掌握过水建筑物运行时的水力特性和工作性态,满足工程安全运行的需要,制定本标准。

**1.0.2** 本标准适用于水电水利工程过水建筑物水力学安全监测。

**1.0.3** 水力学安全监测包括仪器监测和巡视检查。具体监测项目的确定宜综合考虑大坝级别、过水建筑物型式及其水力指标等因素。

**1.0.4** 水力学安全监测应遵循下列原则:

1 监测项目应统筹安排、突出重点,并考虑与模型试验对比验证。关键部位测点宜冗余设置。

2 对于枢纽工程多个过水建筑物的监测,应注意相关监测项目的同步性、相关性和系统性。

**1.0.5** 水力学安全监测除应符合本标准规定外,还应符合国家现行有关标准的规定。

## **2 术 语**

### **2.0.1 水力学安全监测 hydraulic safety monitoring**

对过水建筑物过水运行时的水力要素及其影响进行观察、监测与分析评价的活动。

### **2.0.2 过水建筑物 hydraulic spilling structure**

水电水利工程中，水流出库所流经的建筑物总称，包括泄洪表孔、泄洪中（深）孔、溢洪道、泄洪洞、排沙洞、消力池、水垫塘、发电引水系统、船闸、升船机、引航道等。

### 3 监测项目与方法

#### 3.1 一般规定

**3.1.1** 水力学安全监测项目（参数）包括水流流态、水位与波动、动水压强、水流流速、流量、消能效果、下游冲淤地形、流激振动（包括加速度、速度、位移和应变）、通气风速与通气量、水流掺气浓度、水下噪声、空蚀与磨损、泄洪雾化（包括降雨强度、风速风向）、船舶系缆力等。根据大坝级别、过水建筑物型式及其水力指标等因素综合考虑，按照表 3.1.1 选择开展相应监测。

**3.1.2** 水流流态、水位与波动、空蚀与磨损、下游冲淤地形等根据具体情况，既可纳入日常运行安全监测项目，也可纳入短期试验性安全监测项目；动水压强、水流流速、流量、消能效果、流激振动、通气风速与通气量、水流掺气浓度、水下噪声、泄洪雾化、船舶系缆力等属于短期试验性安全监测项目。

**3.1.3** 监测项目由 1 个或多个参数组成，一般需要通过多参数同步监测和综合分析进行水力特性安全评价：

1 水流空化特性评价在监测水下噪声的同时，还应辅助观测附近的动水压强和水流流速等。

2 水流掺气效果评价在监测通气风速和掺气浓度的同时，还应辅助观测通气空腔负压特性。

3 泄洪雾化监测包括降雨强度、泄洪水舌风风速风向等参数。同时，还应辅助观测泄洪水力学条件（泄洪流量、上下游水位、闸门开启组合与开度等）与天然气象条件（降雨、风速风向、空气湿度和气压等）。

表 3.1.1 各类过水建筑物水力学安全监测项目（参数）

过水建筑物	监测项目（参数）																	
	水流 流态	水位 与 波动	动水 压强	水流 流速	流量	消能 效果	下游 冲淤 地形	流激振动				通气 风速 与通 气量	水流 掺气 浓度	水下 噪声	空蚀 与磨 损	泄洪雾化		船舶 系统 力
								加速 度	速 度	位 移	应 变					降雨 强度	风速 风向	
泄洪表孔	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
泄洪中（深）孔	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
溢洪道	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
泄洪洞	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
排沙洞	○	○	○	○	○	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—
消力池	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○	—
水垫塘	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	—	—	○	○	○	○	—
发电引水系统	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	○	—	○	○	—	—	—
船闸	○	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	○	○	○	○	—	—	○
升船机	○	○	○	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○
引航道	○	○	—	○	—	—	○	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	○

注：“○”表示选测项目，“—”表示不测项目。

4 流激振动监测包括加速度、速度、位移和应变等参数。同时，还应辅助观测动水压强和闸门开度等。

**3.1.4** 泄洪过程中，在闸门操作室、坝区交通要道、居住区和办公区可进行生态环境量的观测。观测参数包括泄洪噪声、泄洪风速、泄洪振动、温湿度等，并进行泄洪前后的对比分析。

## 3.2 水流流态

**3.2.1** 水流流态观测应记录从上游进口区域至下游出口区域沿程水流三维运动和变化状态，泄洪洞、排沙洞和发电引水系统等洞身不易观测，可观测其进口和出口流态。流态观测应与水位观测同步进行。

**3.2.2** 流态观测应符合下列要求：

1 泄水建筑物进口流态观测包括前缘表面水域和闸（堰）孔处流态。观测重点为来流对称性、水流侧向收缩、回流范围、漏斗漩涡大小和位置、波动特性和漂浮物堆积运移情况等。

2 泄水建筑物泄槽段流态观测重点为折冲水流、分离水流、掺气和扩散特性、跌水和壅水、水冠和水翅、波动特性、冲击波、弯道水流及其产生的横比降等水流形态。

3 泄水建筑物出口流态观测重点为底流、挑流和面流等衔接形式的特征流态，以及下游河道主流区和回流区分布、下泄水流及波浪对岸坡的影响等。

4 船闸闸室与引航道流态观测重点为回流、斜流、往复流、波动特性等。

5 电站进水口流态观测见本条第1款规定。采用叠梁门分层取水的进水口，应关注机组甩负荷时通仓内流态和涌浪。当设有调压井（室）时，宜结合机组甩负荷进行涌浪观测。

**3.2.3** 水流流态观测方法可采用文字描述、摄影和录像等方式进行定性或定量记录。必要时，可采用无人机航摄系统或安装固定点遥控摄像设备记录水流流态。

### 3.3 水位与波动

**3.3.1** 水位观测宜包括时均水位和瞬时水位的量测。

**3.3.2** 水位观测宜包括上游水位、下游水位、明流水面线、挑射水舌轨迹线及水跃波动水面等。

**3.3.3** 水位与波动量测仪器可采用水尺、波高仪、压力式水位计和超声波式水位计等。应按照现行国家标准《水位测量仪器》GB/T 11828 和《水位观测标准》GB/T 50138 的有关规定执行。

**3.3.4** 测点布置和监测方法：

1 水位与波动测点布置宜参照水力学模型试验成果确定。

2 溢洪道和表孔，可在闸墩、边墙和导墙上刻划水尺，也可用水尺法、直角坐标网格法或摄影法进行监测。明流泄洪洞内的水面线可通过压力式水位计监测，也可采用预涂粉浆法测量最高水面线。

3 挑（跌）流水舌轨迹线和消力池内水跃可采用全站仪、摄像仪和照相机等仪器测量。

4 消力池和消能区下游河道的水位变化过程和波动特性可用波高仪或水位计测量。

5 引航道及船闸闸室内的水位变化过程可用水位计或波高仪测量。

6 调压井（室）内涌浪宜用压力式水位计测量。

### 3.4 动水压强

**3.4.1** 动水压强包括时均压强和脉动压强。

**3.4.2** 动水压强测点布置应遵循下列原则：

1 测点布置应能反映过水建筑物的压强分布特征，可参考模型试验成果选取，过水建筑物急变段、水流冲击区和掺气水流等部位应进行动水压强监测。

2 多孔过水建筑物体型相同时，可选择单孔进行压强监测；



同一过水建筑物的挑坎或掺气设施有多种布置体型时，可分别增加测点。

3 测点宜沿过流面底板或顶板中心线布置，在建筑物体型变化剧烈处宜加密布置，在顺直流道段可适当加大测点间距。

4 掺气坎、扭曲鼻坎、差动坎等特殊部位应布置测点，并与水流掺气浓度和水下噪声测点布置相协调。

5 水垫塘底板压强测点宜沿水流中心线纵向布置，水流冲击区应适当加密测点。根据水舌落水位置，可横向布置若干监测断面及测点。

6 消力池底板压强测点宜沿水流中心线纵向布置，强水跃区底板测点布置宜适当加密，对应侧墙靠近底板处也可适当布置测点。

7 船闸输水系统测点宜布置在阀门上下游侧、阀门段、T形管、分流口以及管道转弯处等部位。

**3.4.3** 时均压强可采用压力传感器、测压管和精密压力表测量；脉动压强应采用压力传感器测量。

### 3.5 水 流 流 速

**3.5.1** 水流流速包括断面平均流速、断面流速分布、表面流速和底部流速。

**3.5.2** 水流流速测点布置应遵循下列规定：

1 流速测点布置宜参照水力学模型试验成果确定。

2 压力管道内的平均流速可通过流量换算获得。

3 引航道口门区流速观测应沿过水断面在航宽范围内布置 5 个～7 个测点，测量表面流速，并能表征该断面的通航水流条件。

**3.5.3** 水流流速可采用浮标、旋桨式流速仪、超声波流速仪、底流速仪和毕托管、粒子跟踪测速系统等进行监测。

**3.5.4** 底流速仪流速计算公式可采用附录 A 所列公式。

### 3.6 流 量

**3.6.1** 流量宜通过对其他水力要素（如水位、流速）的测量间接获得。根据流速分布的特点，布置测流断面，通过断面水位、流速的监测推算流量。

**3.6.2** 明渠及河道流量监测断面宜布置在顺直段，可采用断面流速仪间接测量，也可采用《河流流量测验规范》GB 50179 中的流量测验法。

**3.6.3** 管道流量可用超声波流量计、电磁流量计等测量。

**3.6.4** 船闸输水系统的流量可通过观测闸室水位随时间变化的过程，结合闸室面积计算，也可采用管道流量测量方法。

### 3.7 消 能 效 果

**3.7.1** 消能效果监测包括流态观测和消能率推算等。

**3.7.2** 底流消能效果监测应包括水跃长度、跃首位置、跃前水深、跃后水深、水跃的形式和底流速等。

**3.7.3** 挑流消能效果监测应符合以下规定：

1 挑流消能效果监测的重点为水舌挑距、水舌入水角、水流扩散形态、水垫塘及下游河道流态等。

2 测量水舌剖面轨迹、平面扩散覆盖范围，对于碰撞挑流消能，加测撞击位置。

3 射流跌入下游尾水后，应监测水舌入水位置、平面水流流态、击溅水体影响范围、水面波动影响范围等。

**3.7.4** 面流消能效果监测应符合以下规定：

1 面流消能效果监测的重点是涌浪及水流流态。

2 应记录回流等不利流态的位置、范围和回流流速。

**3.7.5** 消能效果流态监测可采用目测法和摄影法。必要时，可采用无人机航摄系统记录流态。

### 3.8 下游冲淤地形

**3.8.1** 泄水建筑物在宣泄较大洪水后宜进行下游冲淤地形测量。

**3.8.2** 下游冲淤地形的监测内容主要包括冲刷坑位置与范围、最大冲坑深度、冲刷坑及堆丘形态。

**3.8.3** 下游冲淤地形的测量多采用水下测量方法，有条件时也可采用抽水测量。水下测量可采用测深杆、探测仪、水下多波束三维地形测量系统等。水下地形测量可按照《水电工程测量规范》NB/T 35029 和《水文测量规范》SL 58 中的有关规定执行。

### 3.9 流激振动

**3.9.1** 流激振动主要包括泄水建筑物的导墙、边墙、底板、水工闸门（阀门）、闸墩和拦污栅等各类泄流结构因水流压力脉动、漩涡激励及其他水动力荷载所激发的结构振动。

**3.9.2** 流激振动监测指标包括加速度、速度、位移和应变等参数。

**3.9.3** 流激振动监测内容包括结构的动力特性和振动响应，必要时应对水流压力脉动等水动力荷载进行同步观测。

**3.9.4** 水工结构动力特性观测内容及布置应满足下列要求：

1 应对有水和无水条件下水工结构动力特性参数分别进行观测。

2 测试前，应根据测试对象结构的振型和频率初步分析结果，或结合模型试验成果，选择测点布置位置和传感器型号。

3 动力特性测试应划分网格布置测点，测点布置宜选在振型的拐点、敏感点等处；测点的个数根据测试的振型阶数确定。

**3.9.5** 水工结构振动响应测点布置应根据观测目的、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。

**3.9.6** 结构振动响应测试前的准备工作：

1 应根据诱发结构振动的荷载及结构本身的动力特性，判别

振动类型和振动量级，确定测试方法和手段。

- 2 标定传感器。
- 3 选定合适的采样频率和采样时间。
- 4 对测试系统的背景噪声进行测量、记录。

### 3.10 通气风速与通气量

**3.10.1** 设有通气管道的过流建筑物宜进行通气效果观测，通气管道可通过观测管道内的风速分布计算其通气量。

**3.10.2** 通气风速监测部位应包括掺气设施通气管，泄水管道的工字闸门、事故闸门、检修闸门、泄洪洞的补气洞（管），以及电站进水口快速闸门下游侧等处通气管道。

**3.10.3** 通气风速测点布置应符合下列规定：

- 1 通气风速观测断面应选择在通气管道的均匀直线段，距进口的距离宜大于 10 倍管径。
- 2 断面风速测点应根据管道形状、长度、进口条件布置相应的测点。

**3.10.4** 通气风速可采用毕托管和风速仪等进行测量，应满足下列要求：

- 1 毕托管或风速仪应安装牢固，并对准气流方向。
- 2 毕托管动、静压差可采用差压计或微差压传感器测量。应合理选择差压计或差压传感器量程，保证毕托管与差压计或差压传感器的连接通畅。

**3.10.5** 通气风速测量时应同步监测掺气空腔压力。

**3.10.6** 通气风速和通气量计算公式可采用附录 B 所列公式。

### 3.11 水流掺气浓度

**3.11.1** 设有掺气减蚀设施的泄水建筑物应进行水流掺气效果观测，观测内容包括沿程底部和侧壁水流掺气浓度。

**3.11.2** 掺气浓度测点数量和位置宜综合考虑水流条件、掺气设施

的型式和尺寸等因素确定，每级掺气设施的最后测点应布置在其要保护区域的末端。同时，应在第一级掺气设施上游未掺气部位设置背景测点进行掺气浓度零值修正。掺气浓度观测时，应同时进行水位、流速、压强等观测。

**3.11.3** 采用电阻式掺气浓度仪测量水流掺气浓度时，安装前应标定掺气浓度传感器的清水电阻（初始值）。

**3.11.4** 电阻式掺气浓度仪的导线长度大于 50m 时，应进行现场长线修正标定。

### 3.12 水 流 空 化

**3.12.1** 对可能发生空化水流的泄水建筑物、船闸输水系统等宜进行水流空化观测。当满足下列条件之一时，应开展水流空化监测：

- 1 水流流速大于 30m/s、水流最小空化数小于 0.3 的泄流设施。
- 2 新型掺气减蚀设施或新型消能工。
- 3 过流边界和水流特性急变处。

**3.12.2** 水流空化主要监测水下噪声。宜同时观测上下游水位、水流流速和流态、动水压强等，并记录闸门运行状态。

**3.12.3** 水下噪声测点布置应满足下列规定：

1 应重点布置在流道边界变化剧烈、有水流分离与剪切现象的部位：

- 1) 泄水建筑物的闸门槽、反弧段、扩散段、分岔口、挑坎、辅助消能工；
- 2) 竖井式泄洪洞的溢流堰与竖井连接段、垂直转弯处；
- 3) 船闸平板阀门门槽、反向弧门底缘、门楣以及廊道体型突变处等。

2 在水流分离点下游邻近区宜布置压强测点，并在非空化区设置“背景”水流噪声测点。

**3.12.4** 水下噪声监测仪器宜采用带前置信号放大的水听器和高

频率大容量数据采集仪。

### **3.13 空 蚀 与 磨 损**

**3.13.1** 在可能发生空化水流的空化源及其下游附近宜进行空蚀监测。泄放含沙水流的过水建筑物应进行磨损监测。过水建筑物的反弧段、弯道凹曲面及收缩段出口为磨损观测的重点部位。

**3.13.2** 过流面空蚀与磨损监测宜分为过流时实时监测和过流后实地测量两个阶段。过流时实时监测宜采用蚀损传感器量测，过流后实地测量宜采用涂层法。

**3.13.3** 空蚀与磨损观测的主要内容应包括蚀损部位、蚀损坑形状、蚀损深度等。

### **3.14 泄 洪 雾 化**

**3.14.1** 对于采用挑流消能的泄水建筑物，特别是采用挑流水舌空中碰撞或水舌空中充分扩散消能形式的，应进行泄洪雾化监测。

**3.14.2** 泄洪雾化监测包括降雨强度、风速风向等参数。应同步观测泄洪水力学条件（泄洪流量、上下游水位、闸门开启组合与开度等）与自然气象条件（降雨、风速风向、空气湿度和气压等）。

**3.14.3** 泄洪雾化监测范围包括整个雾化降雨和雨雾区域，对雾化影响区域内的开关站、发电厂房、厂区道路、下游岸坡，以及周边重要建筑物等部位宜重点观测。

**3.14.4** 泄洪雾化测点布置应综合考虑泄水建筑物的特点与地形条件等因素，根据雾化降雨强度的大小进行分区布置，重点部位宜加密测点。

**3.14.5** 泄洪雾化雾流影响范围的观测宜采用人工方法，并结合照相、摄像等进行记录。必要时，可采用无人机航摄系统记录。

**3.14.6** 泄洪雾化降雨强度宜采用常规人工雨量器、翻斗式雨量传感器、自记雨量计等进行测量。对于核心强降雨区域，可采用特制超强雨量传感器测量；对于雨量微小的区域，可采用滴谱法

测量。

**3.14.7** 风速风向观测宜采用旋杯式风速计，气压观测宜采用常规的气压表，湿度观测宜采用气象专用的湿度计。

### **3.15 船舶系缆力**

**3.15.1** 船闸闸室、升船机承船厢、上下游引航道靠船墩部位应进行船舶系缆力监测。

**3.15.2** 船舶系缆力宜采用系船钢缆串接拉力传感器进行测量。测量工况宜包括设计最不利水位组合，测点布置应与船舶或船队的系缆方式相一致，分为船首和船尾系缆力。

**3.15.3** 船闸闸室系缆力测量时，应测量闸室前部、中部和后部等泊位的系缆力。

**3.15.4** 对于采用集中输水系统的船闸，在测量闸室前部系缆力时，还应同步观测记录水流流态和壅水高度等；在测量闸室后部系缆力时，还应同步观测泄水过程中进口是否出现漩涡及漩涡大小、形态、历时等参数。

**3.15.5** 在测量船舶系缆力时，应同时测量或收集船闸充泄水时闸、阀门开度变化过程及闸室水位、充泄水流量变化过程等资料。

**3.15.6** 升船机承船厢船舶系缆力监测应与升船机的运行状态及水力特性监测同步。

## 4 监测仪器及其埋设安装

### 4.1 一般规定

- 4.1.1 监测仪器设备应可靠、耐久、实用，技术性能指标满足监测设计及工程要求。
- 4.1.2 信号放大器、数据采集系统应与传感器的输出相匹配。
- 4.1.3 传感器安装前应进行全面的检查和检验，确认其工作状态正常。
- 4.1.4 监测仪器的基准值（或初始值）应在过水观测前设定（或测定）。
- 4.1.5 仪器的观测电缆应集中引至观测站或专门的观测集线箱内，电缆端头应做编号标识和防水防潮处理。

### 4.2 仪器底座

- 4.2.1 仪器底座应与施工期混凝土浇筑同步埋设，其内预留电缆供后期引接传感器。
- 4.2.2 仪器底座设计加工应符合下列规定：
  - 1 应具备足够的刚度和连接强度。
  - 2 底座材质应选择不锈钢。当过流面设置有钢衬保护时，底座和钢衬材质应一致。
  - 3 底座几何尺寸选取应合适，外壁管径宜为 120mm～200mm，长度宜为 180mm～220mm，套筒壁厚不宜小于 6mm，顶盖板厚度不宜小于 12mm，出线管（孔）内径不宜小于 20mm。
- 4.2.3 仪器底座埋设安装应符合下列规定：
  - 1 应按照设定的测点位置，在现场放样、固定焊接底座，并



进行复测与记录。

2 底座顶盖上表面应与过流面齐平，不平整度不宜大于 1mm；轴线应与过流面垂直，最大偏角不大于 2°；外壁与周围钢筋牢固焊接。

3 出线管（孔）出引电缆后的缝隙填充密实，不得漏浆。

4.2.4 仪器底座埋设安装可参照附录 C。

### 4.3 电 缆

4.3.1 电缆选型应满足下列要求：

1 应选用橡胶护套水工观测专用屏蔽电缆，亦可选用 PVC 护套屏蔽电缆。电缆应密封防水并有足够的承拉强度，耐老化和耐酸碱侵蚀。

2 电缆芯线间电阻的偏差宜小于 5%，在 1.0MPa 压力水中绝缘电阻应大于 50MΩ。

4.3.2 施工期预埋电缆敷设应满足下列要求：

1 敷设前应对电缆导通、绝缘等特性进行检查记录，线端及中部应标识相应的监测仪器编号。

2 预埋电缆宜用外套钢管或 PVC 塑管保护。

3 电缆走向宜避开干扰区域，以水平或垂直布置为主，并与邻近的结构钢筋绑扎牢固。

4 仪器底座内和观测站集线箱内的电缆应有一定的冗余度。

5 电缆安装过程中，所有电缆的端部应采取相应的密封防水措施。

6 电缆敷设完毕后应及时绘制准确的走线图，并存档备查。

4.3.3 临时架设电缆宜分为表面与浅埋两种安装方式，重要部位应采用外套钢管、高强度 PVC/PUC 塑管或包绕土工布等措施予以保护，并应做好电缆走线记录。

4.3.4 观测电缆的巡视检查内容包括安全设防、编号辨识、导通状态检测等，应结合施工部位的重要性和特殊性定期查验。

**4.3.5** 电缆连接与接头密封宜按照《混凝土坝安全监测技术规范》DL/T 5178 的有关规定执行。

## **4.4 监 测 仪 器**

**4.4.1** 压力传感器选型和技术性能指标应符合下列要求：

- 1 传感器选型应根据测点部位压力特性分别选取表压、绝压、差压传感器。
- 2 传感器测头宜选用不锈钢双隔离膜型式，传感器的外壳应有足够的强度。
- 3 传感器的量程应根据测点部位的最大动水压强合理选取。
- 4 传感器的精度应不低于满量程的 $\pm 0.5\%$ ，时漂应低于 $\pm 0.5\%/年$ 。
- 5 其他技术要求应按照《硅压阻式动态压力传感器》GB/T 26807 的有关规定。

**4.4.2** 压力传感器安装应满足下列要求：

- 1 压力传感器头部表面应与底座表面保持齐平。
- 2 安装在含沙水流或可能发生淤积部位的传感器，应采用相应的防护措施，防止传压通道堵塞。

**4.4.3** 压力传感器采集系统应满足以下要求：

- 1 采样频率不低于 200Hz。
- 2 稳态采样时长为 60s~120s，采样次数不低于 3 次。
- 3 非恒定过程宜记录全过程。

**4.4.4** 测压管选型与安装应符合下列规定：

- 1 测压管全程流道宜采用不锈钢或其他耐腐蚀材料，测压孔的直径宜为 2cm~5cm。
- 2 测压管测头表面应与过流壁面齐平。

**4.4.5** 压力表的量程应根据安装部位最大压力合理选取，宜使测值变化在量程上限的 1/3~2/3 范围内，精确度等级不低于 0.4 级。其他技术要求应满足《精密压力表》GB/T 1227 的有关规定。

**4.4.6** 压力表安装位置应低于测压孔进口高程，安装高程应精确测定，安装完毕后应进行编号。压力表与导管的衔接部分应有排气装置，并在测量前排除连通管内的气体。

**4.4.7** 底流速仪由流线型翼型探头和差压传感器组成。翼型探头动压孔轴线安装应与水流流向平行，偏差不大于  $2^\circ$ ，且动压孔口指向迎水方向。差压传感器选型精度应不低于满量程的  $\pm 0.5\%$ ，时漂应低于  $\pm 0.5\%/年$ 。

**4.4.8** 流激振动传感器选型应根据测试对象的响应频率和可能产生的最大振动位移，选择合适规格的传感器。

**4.4.9** 流激振动传感器宜直接安装在被测结构面上。如需采用中间连接件，连接件最低频率应为被测上限频率的 5 倍~10 倍。

**4.4.10** 通气风速微差压传感器精度应不低于满量程的  $\pm 0.5\%$ ，时漂应低于  $\pm 0.5\%/年$ 。毕托管应牢固安装在支架上。

**4.4.11** 电阻式掺气浓度传感器应满足下列要求：

- 1 电极感应面应与底座盖板齐平，绝缘电阻应大于  $50M\Omega$ 。
- 2 电极材料的导电性能稳定，在电场作用下不产生极化，长期在水中不氧化、不锈蚀。

**4.4.12** 水流掺气浓度采样时长宜为 5s~10s，采样次数不低于 5 次。

**4.4.13** 水听器性能指标应满足以下要求：

- 1 宜带前置信号放大器。
- 2 最高响应频率不小于 200kHz。
- 3 频响波动值不大于  $\pm 5dB$ 。
- 4 指向性：开角大于  $80^\circ$ 。
- 5 耐压性能：大于监测部位的最大水压力。
- 6 其他技术指标应参照《声学 水下噪声测量》GB/T 5265 的有关规定。

**4.4.14** 水听器高频采集系统应满足以下要求：

- 1 采样频率宜大于 400kHz，分析频率宜大于 100kHz。
- 2 稳态采样时长为 30s~60s，采样次数不低于 3 次。

3 非恒定过程宜记录全过程。

**4.4.15** 磨蚀传感器选型与安装应满足下列要求：

1 传感器抗磨蚀性能应与被测过流面混凝土的耐磨性能相匹配。

2 传感器垂直埋设在混凝土内，上端面与混凝土表面齐平。

**4.4.16** 磨蚀传感器泄洪期间观测频次为 1 次/10 天；泄洪前后各观测 1 次。

**4.4.17** 人工雨量器、翻斗式雨量传感器和自记雨量计等选型与安装应参照《降水量观测仪器》GB/T 21978 和《降水量观测规范》SL 21 的有关规定执行。

**4.4.18** 特制超强雨量传感器选型与技术性能指标应满足下列要求：

1 结构强度应满足能抗击测点安装部位雾化超强降雨和泄洪水舌风的破坏力，避免仪器结构破坏。

2 仪器量程应能满足测点部位最大降雨强度测量要求。可通过减小承雨器口径或下部加设分流装置的手段扩展仪器量程，并进行率定。

3 优先选用可在线遥测的仪器。

**4.4.19** 系缆力拉力传感器的量程应有足够的裕度，时漂应低于  $\pm 0.5\%/年$ 。

## **4.5 观 测 站**

**4.5.1** 观测站应以安全和相对集中作为选址原则，宜布置在交通便利的位置。

**4.5.2** 观测站应设集线箱，配备足够的电力、照明、通信及必要的安全设施。

**4.5.3** 观测仪器系统宜采用专用电源，接用现场施工或照明电源时应采取稳压和断电保护措施。

**4.5.4** 电源和信号传输应满足绝缘、接地和避雷等要求。

## 5 监 测

### 5.1 监 测 条 件

**5.1.1** 监测条件主要包括过流建筑物运行时的水位、流量及运行方式等，应满足过水建筑物安全运行和安全评价要求，宜综合考虑过水建筑物的布置方式、水力特性、运行要求和运行组合方式等。特殊要求的监测条件宜专门论证。

**5.1.2** 宜按设计洪水位、正常蓄水位或者工程运行要求的其他水位进行水力学监测。

**5.1.3** 过水建筑物监测条件宜按其类别分别确定：

1 泄水建筑物（表孔、深孔、溢洪道和泄洪洞等）宜考虑正常蓄水位、其他特征水位下闸门全开敞泄或局部开启工况。

2 机组过流系统宜考虑启动试运行水位和正常蓄水位条件下 25%、50%、75%和 100%甩负荷工况。

3 通航建筑物宜结合试运行组织监测，监测过程中船闸的工作水头应由小到大逐级增加，直至达到最大设计水头。

### 5.2 过水建筑物检查

**5.2.1** 观测前后应对过水建筑物进行外观检查。检查应符合下列要求：

1 检查前应制定可行的检查项目和程序。

2 检查应主要针对建筑物过流关键部位，记录表面缺陷、破损等现象，并及时编写和提交检查报告。

3 当出现破坏时，应进行详细描述、测量、照相或摄像等。

**5.2.2** 过水建筑物检查前应协调水库的调度和运行计划，做好检

查前的准备工作，确定检查时间和内容。

**5.2.3** 检查可采用目测、望远镜等直观方法，并辅助照相机和摄像机等设备进行。特殊部位也可采用无人机航摄系统或水下机器人记录。

**5.2.4** 检查应包括下列主要内容：

1 过水建筑物表面的冲蚀和磨损，以及磨损区位置、范围和深度等。

2 检查、记录发生空蚀破坏的位置、形态、范围、深度等。

3 检查消能工下游冲刷及淤积情况，记录可能由于冲刷引起的岸坡塌陷及其他破坏现象。

4 检查闸门的完好性和止水情况。

**5.2.5** 观测后应对检查资料进行整理、分析和归档。

## 6 监测资料整理与分析

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 监测资料整理与分析的内容包括仪器监测、人工观测以及过水建筑物检查等所获得的数据资料，包括原始记录数据（含图表）、电测数据文件和照片影像资料等。应及时对原始数据资料进行检查和整理，提出监测成果简报。

**6.1.2** 各监测项目应使用标准记录表格，认真记录、填写，不应涂改、损坏和遗失。整理整编成果应做到项目齐全、考证清楚、数据可靠、方法合理、图表完整、规格统一、说明完备。

**6.1.3** 监测资料应记录完整，内容包括试验记录人、时间、部位、观测工况和观测的物理量等信息。对于电测物理量，应记录文件名及存储的介质，观测的一次、二次仪表型号和相关参数。

**6.1.4** 应及时分析各观测物理量的变化或绘制观测物理量过程线图，对异常结果应查明原因，并采取相应措施，在可能条件下组织复测工作。

**6.1.5** 电测数据应整理汇总，并进行备份。将全部原始数据资料及收集的参考资料进行分册装订，并存档备查。

**6.1.6** 监测资料整理应包括下列主要内容：

1 收集工程资料、观测资料、模型试验资料和其他与观测工作有关的技术文件。

2 整理一次、二次仪表的型号和相关参数，并详细记录观测过程中一次、二次仪表的工作状态。

3 整理录像和照片资料及相应的文字说明。

4 审查校核原始资料、平面坐标系统、各高程系统间的换

算、观测读数换算、所有考证资料、过程线、关系曲线、文字说明等的合理性。

**6.1.7** 监测资料分析方法宜采用比较法、作图法和特征值统计法。

**6.1.8** 根据观测数据资料、录像和照片，描述水流的运动状态，分析相关物理量的时域和频域特征值。

**6.1.9** 分析观测物理量特征值的变化规律及观测物理量之间的相关关系。

**6.1.10** 观测成果和有关物理量宜采用图、表、曲线或经验公式表示。

**6.1.11** 观测成果与设计成果、水工模型试验成果、有关规范对比分析，判断建筑物状态及运行情况是否正常，评价过水建筑物的安全性态，提出工程运行管理建议。

## **6.2 资 料 整 理**

**6.2.1** 水流流态、流向应绘制平面图，并标明水边线、静水区、回流范围和主流方向，对监测中发现的特殊水流现象应进行描述。

**6.2.2** 水位与水面线应按运行条件绘制相应的图表。水面波浪应采用波高、周期和频率特性等参数描述，并绘制相应的图表。

**6.2.3** 时均压强应按运行条件绘制各部位相应的压力分布图表。脉动压强监测数据经分析处理后，应通过均方根值、主频值、时间波形等进行幅域、频域、时域特性分析，并绘制相应的图表。

**6.2.4** 流速分布应按运行条件绘制相应的图表（随流程）。

**6.2.5** 泄流量应按上下游水位绘制相应的图表。

**6.2.6** 局部冲刷应绘制冲淤地形平面图，以及冲坑的纵剖面图和横剖面图。

**6.2.7** 流激振动应以各阶振型和频率来描述结构物的自振特性，并绘制相应图表。结构动力响应观测数据处理分为时域和频域两种处理方法。

**6.2.8** 通气孔风速应采用图表表示，计算通气量和气水比，并分



析气水比与相应水力要素之间的关系。

**6.2.9** 水流掺气应按运行条件编制掺气设施下游过流面掺气浓度的沿程分布图表。

**6.2.10** 水下噪声应按运行条件绘制噪声谱级图，并绘制水下噪声谱级参数（总声级或典型频率谱级）与水流空化数或其他有关水力参数的关系曲线。

**6.2.11** 泄洪雾化降雨量分布应采用雨量等值线图描述。

**6.2.12** 船舶系缆力分析时应分别绘制不同工况、不同泊位的系缆力过程线，结合水流流态资料、闸室充泄水阀门开度及闸室水位、流量变化过程进行描述，整理船舶系缆力最大值，并与设计允许值进行比较。

### 6.3 分 析 评 价

**6.3.1** 上游水流流态应重点关注有压式进水口前的漩涡类型与尺度，一旦出现危害压力水道安全运用或机组稳定运行的贯通式漏斗漩涡，应提出消除措施或安全调度建议；对于明流泄槽，应关注槽内水流表面掺气、水翅和折冲水流等；下游水流流态应关注水流的衔接形态、平面回流、消能区下游河道及岸坡的波浪特性等。

**6.3.2** 泄水建筑物水面线应结合边墙高度分析。对于明流无压隧洞，水流冲击波波峰应限制在直墙范围内；当电站尾水波动较大时，应分析其对机组安全稳定运行的影响。

**6.3.3** 动水压强应分析沿程压力梯度分布情况，评价体型设计的合理性；关注重点部位的压强特性，如实用堰堰顶负压、掺气空腔负压、窄缝消能工侧壁正压、有压隧洞出口洞顶压强、水垫塘底板冲击压强和消力池脉动压强等，并与有关标准规范要求对比分析。

**6.3.4** 水流流速分析应重点关注泄水建筑物泄槽流速，当流速超过 30m/s 时，应结合掺气设施运行效果分析其可能产生的空蚀危害。对于底流消力池和跌坎消力池，临底流速超过 15m/s 时，应

结合辅助消能工布设情况分析其可能产生的空蚀危害。

**6.3.5** 泄水建筑物流量监测应与相同工况模型试验成果对比，分析评价其泄流能力。

**6.3.6** 消能效果评价：挑流消能应结合坝下河床冲坑最低点与坝址、相关建筑物、岸坡的距离进行分析评价，其上游坡应缓于 1:3；底流消能应结合临底流速、脉动压强、水流流态和河床冲刷等指标评价；面流消能应结合涌浪和水流流态特性评价。

**6.3.7** 掺气设施通气风速应小于 60m/s，底部通气设施的单宽通气量应保持在  $9\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m}) \sim 10\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

**6.3.8** 掺气设施下游近壁掺气浓度大于 3%~4%时，可达到掺气减蚀的效果。

**6.3.9** 水流空化特性可采用水下噪声谱级差或其他方法进行分析判断。

**6.3.10** 流激振动应结合结构物高度、振幅和频率等，分析相关结构的稳定性。

## **6.4 成 果 报 告**

**6.4.1** 监测报告内容应包括工程概况、观测依据和基本资料、监测工况条件、监测项目与方法、测点布置、监测成果与分析、结论与建议，以及必要的附图、附表和照片等资料。

**6.4.2** 监测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。

**6.4.3** 监测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。

**6.4.4** 分阶段开展的监测工作应按合同或任务书要求编写阶段成果报告，全部工作完成后，编写监测成果总报告。

**6.4.5** 水力学安全监测所用的技术资料、观测成果及分析计算资料、监测成果报告、项目合同、工作大纲和评审意见书等，应按国家科技档案规定要求整理归档。

## 附录 A 底流速仪流速计算公式

**A.0.1** 底流速仪法是通过翼型探头和与之相连的差压传感器测量的动水压强和静水压强之差来计算流速。测点水流流速  $v$  可按下列公式计算：

$$v = C\sqrt{2g\Delta H} \quad (\text{A.0.1})$$

式中： $v$  ——测点水流流速（m/s）；

$C$  ——修正系数，应由实验率定求得，对于标准毕托管，修正系数可取 1.0；

$g$  ——重力加速度（m/s<sup>2</sup>）；

$\Delta H$  ——毕托管动、静压强水柱高差（m）。

## 附录 B 通风风速和通气量计算公式

## B.1 毕托管风速计算公式

B.1.1 毕托管法的气流速度可按下式计算：

$$v_a = \varphi \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho_a}} \text{ 或 } v_a = \varphi \sqrt{2 \frac{\rho_w}{\rho_a} g \Delta H} \quad (\text{B.1.1})$$

式中：  $v_a$  ——气流速度 (m/s)；

$\varphi$  ——毕托管流速系数，应在风洞内进行标定，一般取  $\varphi = 1.0$ ；

$\Delta p$  ——毕托管动静压差 (Pa)；

$\Delta H$  ——毕托管所测水柱高差 (m)；

$\rho_a$  ——观测断面空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ )；

$\rho_w$  ——水的密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

## B.2 通气量计算公式

B.2.1 通风管的通气量可按下式计算：

$$Q_a = A \bar{v}_a \quad (\text{B.2.1})$$

式中：  $Q_a$  ——通风管的通气量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )；

$A$  ——通风管观测断面面积 ( $\text{m}^2$ )；

$\bar{v}_a$  ——观测断面平均气流速度 (m/s)。

B.2.2 对于仅布设在通风管道中心的单一风速测点，其断面平均气流速度可按下式估算：

$$\bar{v}_a = k v_{a\max} \quad (\text{B.2.2})$$

式中： $\overline{v_a}$  ——观测断面平均气流速度 (m/s)；  
 $k$  ——经验系数，取值范围为 0.80~0.85；  
 $v_{amax}$  ——观测断面中心测点平均气流速度 (m/s)。

## 附录 C 仪器底座埋设安装示意图

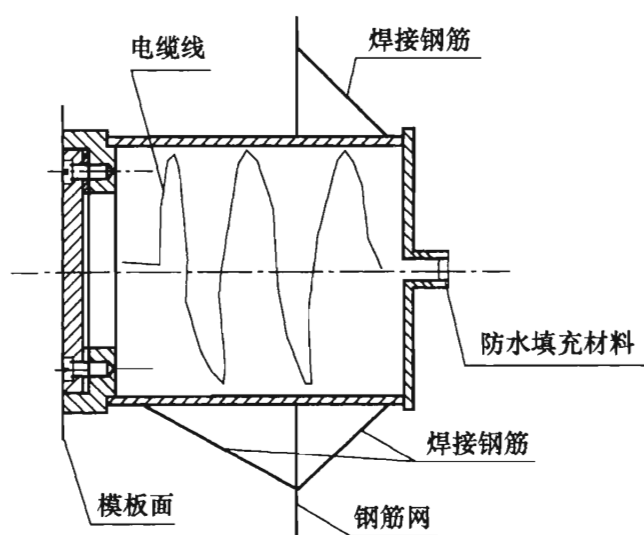


图 C 仪器底座埋设安装示意图

## 本标准用词说明

**1** 为便于在执行本标准条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

- 1) 表示很严格,非这样做不可的:  
正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。
- 2) 表示严格,在正常情况下均应这样做的:  
正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。
- 3) 表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的:  
正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”。
- 4) 表示有选择,在一定条件下可以这样做的,采用“可”。

**2** 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为:“应符合……的规定”或“应按……执行”。

## 引用标准名录

- 《水位观测标准》 GB/T 50138
- 《河流流量测验规范》 GB 50179
- 《精密压力表》 GB/T 1227
- 《声学 水下噪声测量》 GB/T 5265
- 《水位测量仪器》 GB/T 11828
- 《降水量观测仪器》 GB/T 21978
- 《硅压阻式动态压力传感器》 GB/T 26807
- 《混凝土坝安全监测技术规范》 DL/T 5178
- 《水电工程测量规范》 NB/T 35029
- 《降水量观测规范》 SL 21
- 《水文测量规范》 SL 58



中华人民共和国电力行业标准

水电水利工程水力学安全监测规程

**DL / T 5772 — 2018**

条 文 说 明

## 目 次

1	总则 .....	34
3	监测项目与方法 .....	36
3.1	一般规定 .....	36
3.2	水流流态 .....	37
3.3	水位与波动 .....	38
3.4	动水压强 .....	38
3.5	水流流速 .....	39
3.6	流量 .....	41
3.7	消能效果 .....	41
3.8	下游冲淤地形 .....	43
3.9	流激振动 .....	44
3.10	通气风速与通气量 .....	45
3.11	水流掺气浓度 .....	45
3.12	水流空化 .....	46
3.13	空蚀与磨损 .....	47
3.14	泄洪雾化 .....	48
3.15	船舶系缆力 .....	55
4	监测仪器及其埋设安装 .....	56
4.1	一般规定 .....	56
4.2	仪器底座 .....	57
4.3	电缆 .....	57
4.4	监测仪器 .....	58
4.5	观测站 .....	59
5	监测 .....	60
5.1	监测条件 .....	60

5.2 过水建筑物检查.....	60
6 监测资料整理与分析.....	61
6.1 一般规定 .....	61
6.3 分析评价 .....	62
6.4 成果报告 .....	62

## 1 总 则

**1.0.1** 本条指出了本标准编制的目的。根据对近百年来多起水电水利工程事故的原因分析，泄水时的水力条件是使水工建筑物遭受破坏的重要原因之一。其中，最为普遍的是高速水流引起的工程破坏。随着我国水电建设的迅速发展，高坝大库越来越多，新型消能工广泛应用，包括空化空蚀、水流掺气、过流面磨蚀、流激振动、泄洪雾化及坝下冲刷等高速水流问题十分突出，水力学安全监测重要性愈发凸显。

下泄水流的水力特性，直接关系到水电水利工程的安全运行。开展水力学监测，可以及时发现问题，防止事故的发生和发展，避免造成更大的危害。绝大多数建筑物的破坏过程都非突然发生，一般会有一个缓慢的从量变到质变的过程，即使建筑物或运行方式存在缺陷，或客观条件存在未定因素，只要加强现场监测，就能及时发现问题，防患于未然。因此，水力学安全监测是保证工程安全的一项重要措施。

近年来，随着仪器仪表自动化工业和计算机软件开发技术水平的提高，水力学安全监测学科也相应蓬勃发展，无论是监测手段还是采集分析技术均显著提高。如大容量高频率数据采集系统的应用，明显提高了过流壁面空化现象分析的水平 and 效率。大量水力学安全监测工程的成功实施和相关标准的颁布，也为本标准的制定提供了技术支撑和实践经验。可以预见，随着本标准的颁布实施，势必进一步加强和规范水力学安全监测的实施及其技术水平的提升。

**1.0.2** 本条指出了标准的适用范围。关于大坝安全监测方面的行政法规主要有以下几个：

(1) 国务院 1991 年 3 月发布《水库大坝安全管理条例》(国务院令第 77 号), 规定大坝主管部门应建立大坝定期安全检查、鉴定制度。大坝管理单位必须按照有关技术标准, 对大坝进行安全监测和检查; 对监测资料应及时整理分析, 随时掌握大坝运行状况。发现异常现象和不安全因素时, 大坝管理单位应立即报告大坝主管部门, 及时采取措施。

(2) 国家发展和改革委员会 2015 年 4 月发布《水电站大坝运行安全监督管理规定》(国家发展和改革委员会令第 23 号), 规定电力企业应保证大坝安全监测系统、泄洪消能和防护设施、应急电源等安全设施与大坝主体工程同时设计、同时施工、同时投入运行。大坝蓄水验收和枢纽工程专项验收前, 应分别经过蓄水安全鉴定和竣工安全鉴定。电力企业应加强大坝安全监测与信息化建设工作, 及时整理分析监测成果, 监控大坝运行安全状态, 并且按照要求向大坝中心报送大坝运行安全信息。

(3) 国家能源局 2015 年 5 月发布《水电站大坝安全定期检查监督管理办法》(国能安全〔2015〕145 号), 规定定期检查项目包括地质复查、大坝的防洪能力复核、结构复核或者试验研究、水力学问题复核或试验研究、渗流复核、施工质量复查、泄洪闸门和启闭设备检测和复核、大坝安全监测系统鉴定和评价、大坝安全监测资料分析等。

此外, 国家能源局 2011 年 8 月发布《水电工程验收管理办法》(国能新能〔2011〕263 号), 2013 年 3 月发布《水电工程安全鉴定管理办法》(国能新能〔2013〕104 号), 国家电力监管委员会 2009 年 2 月发布《水电站大坝安全监测工作管理办法》(电监安全〔2009〕4 号), 以上规范性文件均对大坝安全监测工作作出了具体规定。

### 3 监测项目与方法

#### 3.1 一般规定

表 3-1 列出了近年来国内若干典型水电工程的水力学安全监测概况，相关监测项目和监测方法可供类似工程参考。

表 3-1 近年来实施的部分水力学安全监测工程

序号	工程名称	监测建筑物	监测项目	监测方法
1	三峡	泄洪表孔、深孔、排沙孔、排漂孔、机组过流系统和永久船闸	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、流激振动、船舶系统力、空气噪声、水流含沙率、闸门开度行程	水面线：刻划水尺辅助望远镜目测； 流态：数码摄影、录像和文字描述；
2	水布垭	溢洪道、闸门、两岸雾化区域	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、通气风速、掺气浓度、流激振动、泄洪雾化	时均压强：测压管和精密压强表记录； 脉动压强：压力传感器、动态应变仪和 DASP 数据采集分析系统；
3	溪洛渡	泄洪表孔、水垫塘、泄洪洞、闸门、两岸雾化区域	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、流激振动、泄洪雾化	流速：动压管流速仪、动态应变仪和 DASP 数据采集分析系统；
4	向家坝	泄洪表孔、中孔、消力池、导墙	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、空蚀与磨损、流激振动	水下噪声：平板型水听器和 Odyssey 采集系统；
5	梨园	溢洪道、跌坎消力池、冲沙洞、两岸雾化区域	水流流态、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、流激振动、空蚀与磨损、泄洪雾化	掺气浓度：掺气浓度传感器和长江掺气浓度仪；
6	大岗山	泄洪深孔、水垫塘、泄洪洞	水流流态、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、流激振动	风速：毕托管和比压计记录；
7	龙滩	泄洪表孔、底孔	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、通气风速与通气量、掺气浓度、空蚀与磨损、导墙振动、泄洪雾化	空气噪声：声级计记录；

续表 3-1

序号	工程名称	监测建筑物	监测项目	监测方法
8	糯扎渡	溢洪道、左岸泄洪洞、右岸泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、通气风速、掺气浓度	泄洪雾化：人工雨量器、翻斗式雨量传感器、自记雨量计和特制超强雨量传感器； 水下地形：超声波探测仪测量； 岸坡涌浪：电容式波高仪； 开度行程：滑线式电位器或光电编码器
9	小湾	泄洪表孔、中孔、水垫塘、泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、闸门和坝身振动、雾化观测、过流后检查	
10	小浪底	孔板泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、近底流速、水流空化噪声、通气风速、掺气浓度、闸门及孔板环振动	
11	二滩	泄洪表孔、中孔、水垫塘、泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、近底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、闸门及副厂房振动、消能区岸坡涌浪、泄洪雾化	
12	公伯峡	旋流泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度	
13	隔河岩	泄洪表孔、深孔、消力池	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、泄洪雾化	
14	构皮滩	泄洪表孔、中孔、水垫塘、泄洪洞	水流流态、水面线、动水压强、临底流速、水下噪声、通气风速、掺气浓度、泄洪雾化	
15	乐昌峡	溢流坝	水流流态、水位、动水压强、流速、流量、水温、下游冲淤地形、泄洪雾化	
16	锦屏一级	水垫塘、泄洪洞	水流流态、动水压强、水下噪声、透压力、通气风速、磨损、流激振动	

### 3.2 水流流态

**3.2.1** 水流流态是水流总体流势和局部流动形态的总称，局部流态可直观地反映出过水建筑物的某些水力特性。流态是水力学安全监测的一项重要内容，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详实地描述流态，尤

其是不利流态，如回流、漩涡、水翅等现象。流态观测应定性或定量描述流态的位置、范围、形态和相关参数，流态平面位置和范围监测应测定流线、迹线及其边界范围。

### 3.3 水位与波动

**3.3.1** 水位是工程设计、施工及运行管理的重要依据，可分为时均水位和瞬时水位。

### 3.4 动水压强

**3.4.1** 动水压强是一项重要的水力学监测项目，也是过水建筑物动水荷载监测的基本参数，可作为空化空蚀及消能防冲等问题分析的重要依据，几乎所有过水建筑物水力学安全监测均设此项。在高速水流条件下，动水脉动压强不仅增加了结构物的瞬时荷载，还可能引起结构的流激振动和固壁的空化空蚀等问题。当过水建筑物进出口水位差超过 80m~100m 时，应进行动水压强观测。

**3.4.2** 对于泄洪表孔、深孔、溢洪道和泄洪洞，这类过水建筑物的动水压强观测具有共性，每种过水建筑物可选择 1 个孔口进行压强观测。若同一过水建筑物的掺气坎或挑流坎有多种布置形式，可适当增加测点。测点布置可以参照模型试验或同类工程的水力学监测成果布设，并根据工程特点、现场条件做适当调整。动水压强测点一般应沿过流面底板中心线自进水口至出口全程布置，在建筑物体型发生较大变化之处宜加密布置，如渥奇段、掺气挑坎和掺气空腔、消能工段、反弧段、挑坎末端等部位，在顺直流道段测点间距可适当加大。侧墙、闸墩及闸门槽处可根据需要适当布置压强测点，在掺气坎空腔及下游一定范围内靠近底板的侧墙处、扭曲鼻坎内外侧墙、差动坎侧墙等部位应布置压强测点，并与掺气和空化观测布置相协调。

水垫塘底板动水压强观测点应沿水流中心线纵向布置，在射流冲击部位可适当加密测点。根据水舌落水位置，可横向布置一



定数量的监测断面，每个断面布置若干测点。

消力池（戽）底板压强监测应沿水流中心线纵向布置，直至尾坎顶部。在强水跃区，底板测点布置可适当加密，对应侧墙靠近底板处也可适当布置压强测点。如要求闸门非对称开启运行进行消力池水力特性分析，可参考模型试验适当增加压强测点。

机组输水系统压强测点一般沿流道全程布设，在蜗壳末端和尾水管进口部位应加密测点，以便甩负荷时准确捕捉蜗壳最大压力升高值和尾水管最大压力降低值（负压）。

采用测压管和压力表测量时均压强时，应配备专门的排气设施，并在正式测量前排除连通管内的气体。

**3.4.3** 压力传感器既可进行时均压强测量，又可进行脉动压强测量，尤其是可作非稳定水力过程的动水压强过程线测量——这一点是测压管所不可替代的。时均压强和脉动压强可用压力传感器同时观测，对脉动压强观测精度有特殊要求的部位，其时均压强和脉动压强应分开观测。

### 3.5 水 流 流 速

**3.5.1** 流速是水力要素指标的一个重要参数，是过水建筑物设计的重要依据之一，也是进一步研究消能与冲刷、空化空蚀、脉动与振动等问题的基础。根据实际需要，可将监测的流速分为断面平均流速、断面流速分布、区段平均流速、表面流速和底部流速。流速应尽量在流量稳定期间监测。

**3.5.3** 水流表面流速监测可采用粒子跟踪测速系统、浮标测速法、旋桨式流速仪和超声波流速仪；当明渠流速不超过 5m/s 时，可采用旋桨流速仪、超声波流速仪量测；当底流速超过 15m/s 时，可采用底流速仪测量。

浮标测速法宜用于监测水流表面流速。在河道、泄槽流速较高，用流速仪测速困难的情况下，常采用浮标法监测区段平均流

速。浮标的修正系数应事先率定。观测浮标的方法主要有目测法、普通摄影法、连续摄影法、高速摄影法，以及经纬仪立体摄影法和经纬仪交会测量法等。浮标观测应注意适当选取观测段，根据测速实际需要，确定观测区段长度并设置参考断面标记。

毕托管测速法由流速仪翼型探头和差压传感器（或两支压力传感器）两部分组成。翼型探头通过连接预埋的通用底座布设在过流面底板、侧壁或顶板，由动压孔和静压孔将水流压差引至差压传感器。动压孔安装方向应与水流流向一致，动压孔指向迎水面。静压孔布设在翼型探头旁侧，引测测点部位静水压强。差压传感器量程应根据测量部位可能的最大流速合理选择。

旋桨（旋杯）式流速仪宜用于流速较低部位的测量。其特点是体积较小、便于安装，多用于泄水闸测流。

超声波流速仪（或流速剖面仪）宜用于大型渠道或天然河道测速，主要有两类：采用传播时间法的时差式超声波流量计和采用多普勒效应法的多普勒式超声波流量计。多普勒式超声波流量计是利用相位差法测量流速，某一已知频率的声波在流体中运动，由于液体本身有一运动速度，超声波在接收器与发射器之间的频率或相位发生相对变化，通过测量这一相对变化就可获得水流速度。时差式超声波流量计是利用声波在流体中顺流传播和逆流传播的时间差与水流流速成正比这一原理来测量的。一套流速仪由两个超声波换能器组成，换能器相对分装在河道两岸，流速仪的轴向与流向成一定夹角，利用超声波在顺流和逆流中传播的时间差计算水流流速。一套流速仪所测量计算的流速为河道相应高程平均流速，一组流速仪（多套）则可测量和计算河道断面垂向流速分布。

浮标的修正系数应事先率定。观测浮标的方法有目测法、普通摄影法、连续摄影法、高速摄影法，以及经纬仪交会测量法等。在河道、导流明渠等流速仪测速困难的情况下，可采用浮标法监测区段平均流速。

底流速仪探头应设计加工成流线型，确保其不成为空化源，并标定其流速系数。底流速仪的高度不宜超过 20cm。

### 3.6 流 量

**3.6.1** 在需要对过水建筑物的流量进行复核时，应进行流量监测。流量的测量方法应根据建筑物的特点及尺寸、水头、流量、量测精度和现场条件等因素确定。对于电站引水压力管道、输水明渠和导流洞等过水建筑物，常进行流量监测，进而通过流量推算过流表面的糙率。

泄水建筑物流量监测，应在工程建成后，积累过流水位与流量关系的资料，直至可绘出水位与流量关系曲线。在有控制闸（阀）门时，应绘制闸（阀）门不同开度下的水位-流量关系曲线。

流量测量断面应布置在水流平顺的位置。根据水流流速分布的特点，按测试需要布置固定测流断面和临时测流断面，再根据水文测流断面水尺、流速及水流断面面积推算流量。对于固定测流断面，应将断面布置在稳定地段，而临时测流断面，可视过水建筑物具体情况而定。对具有多个泄水建筑物联合运行时的流量观测，可利用下游水文站条件和设备进行监测。

### 3.7 消 能 效 果

消能形式主要包括挑流、底流、面流和戽流等消能工，一般根据地形与地质条件、泄流条件、运行方式、下游水深及河床抗冲能力、下流水流衔接、泄洪雾化及其对其他建筑物的影响等综合因素，通过技术经济比较选定。目前，国内大、中型工程多采用挑流消能或底流消能，采用面流、戽流消能工较少。消能设施的良好运行，是枢纽安全运行的关键性因素之一。

选定的消能形式，应在宣泄消能防冲设计洪水及以下各级洪水，尤其是常遇洪水，消能效果良好，结构可靠，防空蚀、抗磨损和抗冰害。

(1) 挑流消能:

挑流消能适用于岩石地基的高中水头枢纽。挑流消能是一种既安全又经济的消能措施,它借助挑坎使高速水流形成挑流水舌,水舌沿着近似抛物线的轨迹在空中扩散后进入下游水垫而消能。在射流过程中,通过吸附和掺混空气来耗散部分能量,然后将水流抛射到远离挑坎的下游水垫,通过水垫内的水流紊动剪切和对河床的冲刷而完成消能的过程。因为坚硬岩石具有较强的抗冲性能,所以对高水头枢纽采用挑流消能较为适宜。

挑流消能设施的平面形式可采用等宽式、扩散式和收缩式。挑坎多采用等宽连续挑坎、差动挑坎、高低坎、窄缝挑坎和异型挑坎等。工程设计通常根据地形地质条件、枢纽布置及消能防冲的要求选定。对高中水头、大泄量、狭窄河谷和地质条件差的工程,多采用窄缝挑坎。

连续挑坎是指挑坎为连续实体。其特点是挑流水舌横向展开,进入水垫的水舌呈“一”字形。因其结构简单、运用安全可靠,为国内外广泛采用。在相同水力学条件下,连续挑坎的挑距比差动挑坎远,且挑坎形状平滑简单,不易空蚀。它的不足之处是水舌比较集中,消能率较低,对河床和岸坡的冲刷较剧烈。

差动挑坎即挑坎的齿台(高坎)与沟槽(低坎)具有不同的反弧半径与挑射角,可把水流“撒开”,在垂直方向能有较大的扩散,水舌厚度大大增加,有利于减弱水流对河床的冲刷。

高低坎是相对多个孔口而言,不同孔口挑坎采用不同高程,其目的是将各孔水舌纵向拉开,可根据需要分散入水落点,避免各股水舌集中入水,从而起到减轻冲刷和充分消能的目的。

窄缝挑坎的特点是挑坎出口的宽度大大小于泄槽的宽度,它可以将挑流水舌纵向拉开,进入水垫的水舌呈“1”字形。由于水舌在空中的掺气扩散增强,进入水垫后前后左右扩散,呈三维紊动扩散流态,因此其消能率较连续挑坎高,可大大减小河床冲刷的深度和宽度,且冲刷坑沿河道纵向均匀分布,适用于河谷狭窄、

岸坡稳定性较差的高坝、大流量枢纽。

为了使下泄水流符合下游河势，纵向拉开，使水舌落入指定范围，实际工程中还广泛采用了斜切挑坎、扭曲挑坎等异型挑坎，控制挑射水流的方向和落点，取得了较好效果，采用异型挑坎的工程有石头河、碧口、鲁布革、安康和李家峡等。

### (2) 底流消能：

底流消能即水跃消能，它是泄水建筑物一种常用的消能方式。当急流进入消力池后，受尾水顶托，使流态突然改变而形成水跃，通过水跃内部的强烈紊动、剪切和掺混作用，使部分动能转换为热能和位能，从而达到消能的目的。跃后水流为缓流，其冲刷能力一般较小，故底流消能方式适应各类地质条件，特别是在软弱基岩上，采用底流消能更为合适。底流消能设施包括常规消力池以及各种辅助消能工。消力池的剖面形式包括平底式、斜坡式及多级消力池；其平面形式多为矩形，此外还有扩散型或复式消力池。

由于底流消能尾水波动小、尾水流速分布比较均匀，因此设有通航建筑物和其他对流态有严格要求的枢纽多采用底流消能。但有过漂浮物和排凌要求的枢纽，易造成消力池的破坏，不宜采用底流消能方式。

在水头较高时，消力池内的辅助消能工可能存在高速水流空蚀问题，当收缩断面平均流速大于  $15\text{m/s} \sim 18\text{m/s}$  时，应加强观测。

## 3.8 下游冲淤地形

下游河床局部冲刷情况是衡量消能工布置是否合理与消能效果是否充分的重要指标，也直接关系到大坝或挑流鼻坎的自身安全。对于下游河道采用“不护底”的挑流消能工程，如重力坝坝身泄洪孔口、岸边溢洪道与泄洪洞等，一般都进行下游冲刷观测。对于重要的底流消能工程，可以对消力池尾坎下游、海漫保护段及其下游河床的冲刷情况进行观测，以便了解其运行状态。为便

于分析比较冲刷效果，一般在泄洪前对下游河床进行地形测量。

下游冲刷的强度主要取决于泄洪参数指标，一般而言，宣泄较大洪水时下游冲刷也会较大，因此宜在宣泄较大洪水后进行冲坑地形测量。

局部冲刷监测要求准确测定冲坑位置、深度、形态及范围。水下部分测点和断面的间距宜为 3m~10m，在地形陡变部位应适当加密。最终成果应能提出冲刷坑地形等高线及有关分析意见。

下游冲刷情况常采用水下测量方法获得。当采用抽干检查法时，还应对冲刷岩石的节理裂隙、断层等情况进行描述记录。

### 3.9 流 激 振 动

振动测点布置应考虑便于与相关的试验和分析结果进行比较。振动测试仪器设备应满足下列要求：

(1) 振动测试系统宜由信号采集分析系统、信号放大器和传感器组成。

(2) 信号放大器包括各种前置放大器、主放大器和滤波器等。信号放大器测量频率范围应覆盖被测信号的有用频率范围，动态范围应能够适应信号的变化范围。信号放大器还要求具有低通、高通和带通滤波功能，以滤除超低频信号以及高频噪声等。

(3) 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。具体分述如下：

1) 加速度计。水工结构振动测量常用低频压电式传感器。对于有超低频信号测试要求（低于 0.5Hz）的管道系统，也可采用电容式加速度计。

2) 速度传感器。速度传感器是用于直接测量速度的传感器。

3) 位移传感器。观测振动位移的传感器有涡流探头（或接近探头）、线性变量微分变送器（LVDT）、拉线式电位计等，都用于检测相对于固定点的绝对位移。

4) 专用传感器。对特定振动量的测量，可采用专用测试仪器

(如激光振动测量仪等)。

5) 应变片。对于需要进行应力评定的水工结构,如闸门、管道等,可以采用应变片进行测量。

6) 力传感器。主要用于结构动力特性测量激振力,一般采用压电式力传感器。

### 3.10 通气风速与通气量

**3.10.1** 通气量直接反映通气效果和掺气设施体型布置的合理性,是水力学安全监测的重要项目之一。过水建筑物通气管道的断面一般较大,观测中通气管道的通气量需要通过测量断面的风速,确定其断面风速分布和断面平均风速进行计算。

**3.10.3** 通气风速的测量断面应选择气流稳定、风速分布比较均匀的直管段。在进口后直管道长度足够的情况下,观测断面应距离进口 10 倍管径以上。某些工程通气管道的直管段长度不足,或者受现场条件限制无法达到上述要求时,可以根据实际情况调整风速测量断面的位置。

### 3.11 水流掺气浓度

**3.11.1** 近壁水流掺气浓度是判断掺气减蚀设施有效性与体型布置合理性的一个直接依据和重要指标。设置掺气设施是为了将空气导入水中,通过改变水的物理性质,防止空化的发展,并削弱空泡崩溃产生的冲击力,从而达到减蚀的目的。减蚀效果与掺气浓度,尤其是近壁掺气浓度密切相关。

**3.11.3** 目前国内外大多数工程监测多采用电阻法量测水流掺气浓度。根据麦克斯韦(Maxwell)理论,水流掺气浓度  $C$  (特指体积浓度)可用置于水流中的传感器电极间的电阻来表示。

电阻式掺气浓度传感器主要由电极和支撑板组成,电极导线与掺气浓度仪相接,水流掺气浓度可由二次仪表直接显示。

掺气浓度传感器一般由承担单位自行研制,设计制作时应当

注意：①电极及其支撑面应当有足够的刚度和平整度，以保持其间的恒定距离并避免水流脱壁；②电极导电性须稳定，极间绝缘性能好，一般采用不锈钢材料做电极，用有机玻璃做支撑面。

掺气浓度传感器的清水电阻是量测水流掺气浓度的参照基准量，清水电阻准确与否直接影响掺气浓度的测量结果。掺气浓度传感器的清水电阻值不仅与感应电极的材料、几何特征有关，而且因水质、水温不同而异。为了避免泄水过程中水质、水温变化产生测量误差，要求在观测前和观测结束时分别标定清水电阻，在条件允许的情况下随时监测泄水过程中的清水电阻。如果清水电阻发生变化，在资料整理过程中根据实际量测的清水电阻对观测结果进行修正。

**3.11.4** 电阻式掺气浓度测量仪与传感器之间的连接导线长度大于 50m 时，由于导线的影响将会改变原有的感应电阻与掺气浓度的线性关系，使得掺气浓度测量值偏离实际值，其偏离程度与导线长度及线间绝缘度有关。这种偏离现象可以通过现场长线标定予以消除。

### **3.12 水 流 空 化**

**3.12.1** 过水建筑物中一旦发生空化水流就可能引起空蚀破坏，空蚀破坏不仅妨碍过水建筑物正常运行，发展严重时可能危及工程安全。掌握过水建筑物在各种运行条件下的水流空化状态对指导工程合理调度运行具有重要指导作用，也是评估过水建筑物安全的重要依据。水流空化特性因流道体型、水力要素及水质的不同而异，空蚀还涉及材料的抗空蚀性能，由于缩尺效应和施工质量的影响，过水建筑物的水流空化状态不能完全通过模型试验准确预测，需要进行原型观测确定。

**3.12.2** 水流空化噪声具有幅值高、频域宽的特性，通过监测水下噪声信号判断水流空化特性已在三峡、葛洲坝、五强溪、小浪底、二滩及紫坪铺等工程的原型观测中多次应用。实践表明，通过监



测水下噪声信号来判断水流空化是比较可靠的方法。由于空泡崩溃的脉冲性和随机性，水流空化噪声具有一般水下噪声不具备的高频宽带特性。通过水下噪声特性分析，可以判断是否出现空化、空化源的位置、空化类型及空化强度。对空泡崩溃区动水压强的测量分析可作为水流空化的辅助判据。

**3.12.3** 水听器是通过水下噪声获取空化信息常用的一次仪表，它是一种利用压电效应制作的声电换能器。原型观测时的信号传输电缆较长，干扰噪声强，应采用带前置放大器的水听器，可增大信噪比，提高观测结果的可靠性。

### 3.13 空蚀与磨损

混凝土过流面蚀损包括空蚀和磨损两层含义。空蚀是由于高速水流中空泡溃灭时产生的微射流的冲击作用导致泄水建筑物混凝土材料的流失。磨损是泄水建筑物表面在含沙水流的摩擦作用下产生的混凝土材料的流失。混凝土蚀损破坏一般是空化水流空蚀和含沙水流磨损共同作用的结果。在泄水建筑物泄洪过程中，通过对过流表面进行实时监测，测量混凝土表面蚀损深度，及时了解混凝土表面性状。

混凝土蚀损监测是在泄水建筑物运行期间，对其混凝土表面性状进行监控和测试，实时评判建筑物的安全状态。对于重要的泄水建筑物，尤其是洞式泄水建筑物、消力池等不易直接观测到的混凝土过流面，宜对蚀损破坏进行实时监测。混凝土过流表面蚀损破坏程度划分标准见表 3-2。

表 3-2 混凝土过流表面蚀损破坏程度划分标准

破坏程度 划分标准	轻度级（Ⅰ级）	中度级（Ⅱ级）	重度级（Ⅲ级）	破坏级
蚀损深度 $d$ (mm)	$0 < d < 20$	$20 \leq d < 50$	$50 \leq d < 100$	$d \geq 100$

续表 3-2

破坏程度 划分标准	轻度级（Ⅰ级）	中度级（Ⅱ级）	重度级（Ⅲ级）	破坏级
混凝土 表面性状	混凝土表面浅 表层粗糙或砂浆 层剥离	粗骨料外露，并 有磨损痕迹。保护 层剥离，偶有钢筋 外露	钢筋大量出露， 并有磨损痕迹，钢 筋偶有剪断或拉 断现象	混凝土大面积 损毁，钢筋剪断或 拉断，结构缝止水 破坏

蚀损传感器垂直安装在混凝土中，传感器顶面与混凝土表面齐平。初始状态时，各引线之间均处于连通状态。当混凝土表面受到蚀损破坏时，相应地，传感器也开始从顶部受到蚀损破坏。随着破坏的深入发展，相应深度的引线基准导线出现断开状态。通过测量引线基准导线是否处于连通状态，就可以分级判断混凝土蚀损深度。

判断过流面是否发生蚀损破坏，也可以采用涂层法。过流前，通过分析在有可能发生蚀损的部位涂有一定黏合度的涂料，可沿水流方向涂抹一定的范围。涂抹前清除表面尘土，必要时可打磨，保持干燥，以保证涂料具有足够的黏结性，同时做好试验部位的桩号和高程位置的记录，便于试验后的对照检查。

### 3.14 泄 洪 雾 化

**3.14.1** 泄洪雾化是由泄水建筑物泄洪引起的水雾弥漫现象与非自然降雨过程，包括雨和雾两部分。在挑流、底流、面流（岸流）三大类消能方式中，以挑流消能工的泄洪雾化问题最为突出。因此，对于挑流消能工程一般都进行泄洪雾化原型观测。

影响泄洪雾化的主要因素包括消能方式、水舌碰撞特性、挑坎型式、泄洪流量、泄洪落差、挑坎高程、地形地貌因素和气象因素等。泄洪雾化源主要来自水舌空中运动自掺气裂散抛洒、孔口水舌碰撞裂散和水舌入水喷溅等，其中以水舌碰撞裂散和入水喷溅最为重要。泄洪雾化形态如图 3-1 所示。

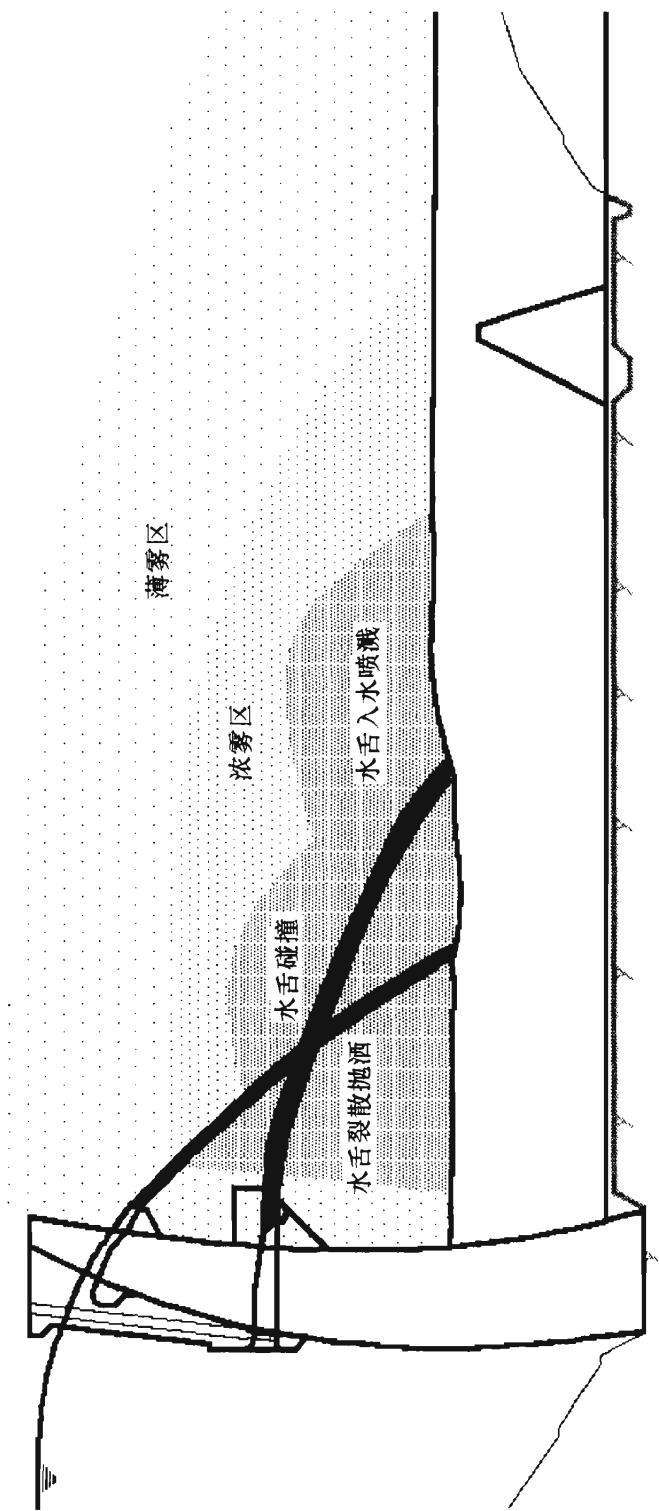


图 3-1 泄洪雾化示意图

泄洪雾化范围可用以下公式估算：

(1) 浓雾区：

1) 纵向范围： $L_1 = (2.3 \sim 3.4) H$ , m。

2) 横向范围： $B_1 = (1.5 \sim 2.0) H$ , m。

3) 高度： $H_1 = (0.8 \sim 1.4) H$ , m。

(2) 薄雾及淡雾区：

1) 纵向范围： $L_2 = (5.0 \sim 7.5) H$ , m。

2) 横向范围： $B_2 = (2.5 \sim 4.0) H$ , m。

3) 高度： $H_2 = (1.5 \sim 2.5) H$ , m。

以上式中  $H$  为最大坝高。

根据有关工程调研和资料收集，泄洪雾化的危害主要集中在以下方面：

(1) 岸坡山体滑坡或塌方：如二滩、龙羊峡。

(2) 开关站和变压器跳闸、机组停机：如黄龙滩、新安江、刘家峡、白山。

(3) 进厂公路交通中断：如东风、新安江、刘家峡、黄龙滩、凤滩。

(4) 雾化结冰影响发电和交通：如刘家峡。

(5) 影响工作和生活，造成办公大楼搬迁：如柘溪、黄龙滩。

部分工程挑流消能泄洪雾化的影响见表 3-3。

表 3-3 部分工程挑流消能泄洪雾化的影响

工程名称	工程概况	雾化状况	影响
新安江	宽缝重力坝，最大坝高 105m，坝后式溢洪式厂房。 泄水建筑物为 9 孔溢流坝、矩形差动挑坎	1968 年 7 月溢流时，水舌扩散区最大风速为 13.2m/s（约六级大风）。 1983 年两次泄流，水舌离开挑坎后充分掺气，阵发性地向下游喷射，形成宽阔的雾化区，坝下 1km 处最大风速达 15.5m/s	在坝下游 150m、高程 70m 处的 20kVA 变压器站 7 跨中有 2 跨跳闸，致使 1、2、5、6 号机组被迫停机。 两岸进出电厂公路交通中断

续表 3-3

工程名称	工程概况	雾化状况	影响
刘家峡	<p>重力坝, 最大坝高 147m, 河床坝后式厂房。</p> <p>泄水建筑物: 左岸泄水道, 贴角扭曲连续挑坎; 右岸泄洪洞, 斜切挑坎; 右岸溢洪道三孔, 斜切挑坎</p>	<p>三个主要泄水建筑物均有泄洪雾化问题。左泄水道泄洪时, 右岸倾盆大雨, 影响范围达 200m~300m, 右岸出线洞洞口降水量为 600mm/h。</p> <p>右洞放水, 左岸 100 余米的山头被暴雨浇淋, 山谷汇流如同小瀑布, 降雨强度最大达 6599mm/h (1978 年)。</p> <p>溢洪道泄流时, 落水处激发水雾成蘑菇云, 升腾高度 100m 以上</p>	<p>妨碍进厂交通, 专建 200m 防雾廊道。</p> <p>泄洪雾化影响右岸 220kV 出线安全运行, 造成线路跳闸事故 13 次。</p> <p>泄洪雾化结冰, 迫使停电, 并将出线塔上移</p>
龙羊峡	<p>重力拱坝, 最大坝高 178m, 地下厂房。</p> <p>泄水建筑物: 右岸两孔岸边溢洪道, 曲面贴角窄缝挑坎; 右岸中孔出口转 21.6° 角, 曲面贴角窄缝挑坎; 深孔急流陡拐, 斜切挑坎; 底孔陡拐, 曲面贴角窄缝挑坎</p>	<p>水库蓄水期, 为向下游补水, 1987 年 2 月 15 日底孔第一次放水, 当泄量为 600m<sup>3</sup>/s~800m<sup>3</sup>/s 时, 在高于水面约 100m 以下的雾化雨强度为 30mm/d。</p> <p>1989 年 7 月 12 日底孔第二次泄水, 当泄量达到 850m<sup>3</sup>/s~1600m<sup>3</sup>/s 时, 雾化雨强度达到 30mm/d~100mm/d</p>	<p>右岸虎山坡古塌滑体在底孔第一次放水的雾化雨作用下产生位移; 在底孔第二次放水后, 7 月 26 日 1 号塌滑体坍塌, 位移达十余米, 坍塌量 87 万 m<sup>3</sup>; 尔后底孔继续泄水, 直至 9 月 15 日才关闭, 在此期间, 1 号坍塌体的张开裂缝迅速向下游扩展, 在其上方形成了 2 号不稳定体, 体积 190 万 m<sup>3</sup></p>
白山	<p>三圆心重力拱坝, 最大坝高 149.5m, 地下厂房。</p> <p>泄水建筑物: 4 个溢流表孔; 3 个深孔且相间布置, 采用高低挑坎碰撞消能</p>	<p>1983 年泄洪, 坝下 350m 处于泄洪雾化降雨之中, 水雾向两岸山体爬升, 高度约 100m。左岸坝下 50m 处的最大降雨强度为 502mm/h。</p> <p>1986 年 9 月泄洪, 水舌溅起巨大水流和水雾, 笼罩整个河床和开关站, 右岸中雨以上范围距坝脚 60m~360m, 左岸为 60m~510m, 最远波及坝下 900m 处</p>	<p>地下厂房进水。</p> <p>开关站支持磁套有放电现象。</p> <p>下游河床堆渣被水冲击四溅, 右岸露天开关站发现 70 余块飞石, 块径为 1cm~3cm, 最大 10cm, 将设备砸坏 10 余处。</p> <p>临时建筑物被冲毁</p>
黄龙滩	<p>重力坝, 最大坝高 107m, 左岸引水式厂房。</p> <p>泄水建筑物: 河中溢流坝 6 孔, 梯形差动挑坎; 深孔, 连续挑坎; 非常溢洪道 1 孔, 扭曲挑坎</p>	<p>1980 年泄洪, 水舌入水点位于厂房附近, 整个厂区上空被强大水雾笼罩, 形成倾盆大雨。水雾暴雨使 2 号机组变压器出口套管与避雷器水流如注, 放电严重。</p> <p>1982 年原型观测证明, 不管采用哪种放水方案均对厂房不利, 导致开关站部分电器放电</p>	<p>由于水泵排泄能力 (1370m<sup>3</sup>/h) 不足, 厂房被淹, 发电机层水深 3.9m, 高压出线短路、停电。事后曾采取将电器设备升高等 21 项防护措施。</p> <p>交通、通信中断, 沿岸居民与职工部分住房倒塌</p>

续表 3-3

工程名称	工程概况	雾化状况	影响
乌江渡	拱形重力坝, 最大坝高 165m, 坝后挑越式厂房。 泄洪建筑物: 溢流坝 6 孔, 两边孔厂房顶滑雪道溢流、中间 4 孔为挑越式; 两岸各设泄洪洞 1 条; 坝身中孔 2 个	1982 年 8 月, 泄洪雾化观测成果表明: 各泄水建筑物单独泄洪时, 下游最大雾化强度为 263.3mm/h, 出现在距右岸泄洪洞出口 80m; 各泄水建筑物联合泄洪时, 下游雾化严重, 雾化源主要来自溅水, 影响范围为厂房后 80m~450m, 上升高度可达 700m 高程	强降水区对岸坡有冲刷作用, 影响其稳定。 地形影响明显, 雾流和降水可顺山坡爬升
柘溪	单支墩大头坝, 最大坝高 104m, 右岸引水电站。 泄水建筑物: 9 孔溢流坝, 堰顶高程 153.0m, 末端采用差动挑坎	泄洪时掺气水舌跌入河床后溅出大量水滴, 形成较强浓雾。在水舌入水处下游形成长 200m~300m、升腾高度约 150m 的雾区, 坝下 800m 的山头处仍有薄雾	左岸山顶办公大楼和生活区处于雾化区, 泄洪时如暴风骤雨, 迫使办公楼迁往右岸下游
凤滩	空腹重力拱坝, 最大坝高 112.5m, 坝内式厂房。 泄水建筑物: 13 孔溢流坝, 高低坎挑流, 对撞消能; 坝身设底孔	1980 年泄洪, 雾化升腾高程达 200.0m 以上, 两岸公路降大雨。下游 500m 处的大桥上仍有水雾。 1981 年原型观测, 雾化区域: 纵向长 370m, 横向宽 190m, 最大高程 230m, 高出坝顶 18.5m	雾化对公路有影响, 无法通行。

泄洪雾化的影响包括工程影响与环境影响两个方面: 一方面, 泄洪雾化直接威胁到开关站、电站厂房、厂区交通道路等枢纽建筑物的正常运行与下游岸坡稳定; 另一方面, 大范围的水雾弥漫与非自然降雨过程对于自然景观、周边居民的日常生活与工农业生产, 以及局部气候条件都会产生一定的影响。

泄洪雾化原型观测设计时, 要兼顾一般性与特殊性两个方面: 一方面, 要结合地形条件合理布置测点, 以便绘制泄洪雾化降雨等值线分布图; 另一方面, 要根据不同枢纽工程附属建筑物的布置特点与泄洪雾化的主要影响对象进行测点的加密布置, 以便实施更具针对性的原型观测。

对于具有多个孔口的泄水建筑物而言，合理的闸门开启调度能够在一定程度上减缓泄洪雾化的不利影响。因此，在进行泄洪雾化原型观测设计时，可以根据需要进行不同泄洪组合的对比观测，以便为闸门的优化调度运行提供依据。

天然气象条件下，降雨量等级划分见表 3-4，风力等级划分见表 3-5。雾化浓度及降雨强度分区见表 3-6。

表 3-4 天然降雨不同时段降雨量等级划分

等级	时段降雨量 (mm)	
	12h 降雨量	24h 降雨量
微雨	<0.1	<0.1
小雨	0.1~4.9	0.1~9.9
中雨	5.0~14.9	10.0~24.9
大雨	15.0~29.9	25.0~49.9
暴雨	30.0~69.9	50.0~99.9
大暴雨	70.0~139.9	100.0~249.9
特大暴雨	≥140.0	≥250.0

表 3-5 天然风力等级划分

风力等级	风速 (m/s)	海面浪高 (m)	海岸船只征象	陆地地面物征象
0	0~0.2	—	静	静，烟直上
1	0.3~1.5	0.1	平常渔船略觉摇动	烟能表示风向，但风向标不能动
2	1.6~3.3	0.2	渔船张帆时，每小时可随风移行 2km~3km	人面感觉有风，树叶微响，风向标能转动
3	3.4~5.4	0.6	渔船渐觉颠簸，每小时可随风移行 5km~6km	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开
4	5.5~7.9	1.0	渔船满帆时，可使船身倾向一侧	能吹起地面灰尘和纸张，树枝摇动

续表 3-5

风力等级	风速 (m/s)	海面浪高 (m)	海岸船只征象	陆地地面物征象
5	8.0~10.7	2.0	渔船缩帆(即收去帆之一部分)	有叶的小树摇摆, 内陆的水面有小波
6	10.8~13.8	3.0	渔船加倍缩帆, 捕鱼须注意风险	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 举伞困难
7	13.9~17.1	4.0	渔船停泊港中, 在海者下锚	全树摇动, 迎风步行感觉不便
8	17.2~20.7	5.5	进港的渔船皆停留不出	微枝拆毁, 人行向前, 感觉阻力甚大
9	20.8~24.4	7.0	汽船航行困难	建筑物有小损(烟囱顶部及平屋摇动)
10	24.5~28.4	9.0	汽船航行颇危险	陆上少见, 可使树木拔起或使建筑物损坏严重
11	28.5~32.6	11.5	汽船遇之极危险	陆上极少见, 有则必有广泛破坏
12	32.7~36.9	14.0	海浪滔天	陆上绝少见, 摧毁力极大
13	37.0~41.4	—	—	—
14	41.5~46.1	—	—	—
15	46.2~50.9	—	—	—
16	51.0~56.0	—	—	—
17	56.1~61.2	—	—	—

表 3-6 雾化浓度及降雨强度分区

序号	分区	降雨强度 $q$ (mm/h)	防护措施
I	水舌裂散及激溅区(特大暴雨)	$q > 40$	混凝土护坡, 设马道、排水沟
II	浓雾暴雨区(大暴雨~暴雨)	$40 > q > 10$	混凝土护坡或喷混凝土护坡, 设马道、排水沟
III	薄雾降雨区(大雨~中雨)	$10 > q > 2.1$	边坡不需防护, 但电气设备需防护
IV	淡雾水汽飘散区(小雨以下)	$q < 2.0$	不需防护



**3.14.5** 为获得高质量的泄洪雾化全景图片和影像资料,必要且条件具备时,也可采用无人机航拍技术。

**3.14.6** 常规人工雨量器、翻斗式雨量传感器、自记雨量计等监测仪器为气象水利部门定型产品,承雨口标准口径为 200mm,最大量程为 240mm/h,可用于一般雾化降雨区域测量。对于局部核心雾化降雨区域,最大降雨强度为定型仪器量程的几十倍,甚至可达 10000mm/h。目前市面上定型产品远远不能满足量程要求,必须采用特制超强雨量传感器。超强雨量传感器通常将上部承雨口面积缩小,通过调整承雨口面积与储水容器水平面积的比值,达到测量超强降雨的目的;亦可将上部承雨口口径保持不变,下部加设分流装置,通过其分流比例以测量超强降雨;也可采用其他可行的增大量程的手段。使用前均应进行率定。对于雨量微小的区域,可采用滴谱法测量。

### 3.15 船舶系缆力

船舶系缆力是指在水流和风、浪等作用下,停靠的船舶对系船设施上缆绳产生的拉伸力。系缆力是评价船舶停泊条件的一项重要技术指标。

## 4 监测仪器及其埋设安装

### 4.1 一般规定

监测仪器的档案资料应妥善保管，一般包括生产厂家、规格型号、附件名称及数量、合格证书、使用说明书、出厂率定资料、购置日期、分类编号以及使用记录等。

监测仪器的埋设和安装应及时，并按设计要求精心施工。埋设完工后，应做好仪器的保护，记录监测仪器底座埋设部位（如桩号、高程），绘制测点埋设和电缆牵引敷设竣工图，并存档备查。各类监测仪器、电缆的性能和质量应满足监测要求。在仪器埋设前，应进行仪器的标定和连接电缆的电气检查、编号、标识。埋设后及时将连接电缆引入监测站，妥善保管，并同时确认电缆与相应测点编号无误。仪器安装宜在拆模和混凝土面不平整度处理完后进行，以免损坏；传感器与底座应可靠连接，且具可更换性；所装仪器须与底座过流面保持齐平，满足过流面对平整度的要求。

监测仪器的维护管理宜由安装单位负责，建设（管理）单位应予以配合。安装单位应制定监测仪器设备的维护管理制度，指派专人负责监测仪器设备管理。管理人员应按要求进行监测仪器设备的检查维护和信号检测，保证监测仪器过水运行时正常工作与安全。

观测前应对影响仪器测量的堵塞物或表面覆盖物等进行处理：

- （1）测压管发生淤积堵塞时进行掏淤疏通处理。
- （2）压力传感器引水孔发生泥沙、施工浆体等淤积堵塞时，可以采用压力水或高压气体进行冲击清洗。
- （3）风速毕托管及连接管发生积水或其他堵塞时应予以清理。

(4) 压力、流速、掺气、水下噪声等各种观测仪器底座表面固结覆盖物或堆积体均应清理。

(5) 量水堰堰板及上下游引渠内应及时清除水草等杂物。

## 4.2 仪 器 底 座

**4.2.1** 仪器底座是预先埋入结构体内供安装观测仪器（传感器）和储存电缆出线的专用装置，是水力学安全监测仪器的载体，直接埋设在建筑物过流壁面上。底座一般由顶盖板、连接环、套筒、底盖板和出线管（孔）等组成，具有一定的刚性和足够的连接强度，同时满足通用连接部件之间的可互换性。底座内各部件之间的缝隙应采取一定的密封措施，以避免混凝土砂浆或泥浆等杂物浸入。

**4.2.2** 通用底座应具备足够的刚性、强度，并满足底座自身及其与所配装仪器、依附主体结构的通配性。底座的几何尺寸和质量选取应合适，以便于现场搬运、安装和焊接固定。当结构钢筋的设计间距为 200mm 时，底座套筒的外径以不大于 160mm 为宜，以免现场安装切割结构钢筋而带来不便。

**4.2.3** 仪器底座宜与主体施工同期安装，安装前应按照要求进行预处理，包括底座内部清理、螺孔及缝隙涂抹黄油、成套组装等。按照设定的测点位置，在现场放样、焊接固定之后进行桩号复测与记录。

## 4.3 电 缆

**4.3.1** 观测电缆是连接测点仪器（一次仪表）与观测站仪器（二次仪表）的重要通道，直接关系到相关测量信息的正常传输，是保证监测数据的有效性与可靠性的基本环节要素之一。水力学安全监测不仅要经历较长的施工期，还要经历较长的运行期，加之现场施工条件复杂、交叉干扰多，从而对仪器电缆提出了较高要求。应根据仪器类型、使用条件和环境对观测电缆的组配选型、

承压防水、材料强度和质地等技术指标提出具体的要求。根据电缆敷设时间和部位，可分为永久预埋电缆（跟随主体工程混凝土浇筑埋在坝体内）和临时架设电缆（如通气孔风速监测电缆）。

**4.3.2** 预埋电缆走向宜避开干扰区域，以水平或垂直布置为主，并与邻近的结构钢筋绑扎牢固。要避免大型施工机械操作、混凝土仓面浇筑高压清洗和后期钻孔作业对电缆可能产生的破坏。

依接头电缆外套材质推荐不同的电缆连接方法，水力学安全监测观测信号电缆多采用橡胶电缆，电缆连接采用硫化法，该法应用较成熟。PVC 护套电缆连接方法，较流行的是采用热缩套管，称做“热缩套管法”。因其承受水压力有限，近年来有关厂家在热缩套管法的基础上研制出外护套强度更高和两端密封更牢的专用接头，称为“专用接头法”。一般说来，热缩套管法相对操作方便、造价低廉，但耐水压较低，通常小于 1.0MPa；专用接头法相对操作简便、造价较低，耐水压高，最大可达 3.0MPa；硫化法相对操作复杂、造价较高，但可耐水压高，可达 3.0MPa。

**4.3.5** 电缆长度准备应根据监测设计走线图和现场情况确定，其长度按式（4-1）计算：

$$L=KL_0+B \quad (4-1)$$

式中：L —— 电缆总长度（m）；

$L_0$  —— 仪器到观测站牵引路线长度（m）；

K —— 电缆敷设系数，宜取 1.1~1.2；

B —— 观测端加长值（m），宜取 3m~5m。

## 4.4 监 测 仪 器

**4.4.4** 测压管测头表面应与过流壁面齐平，测点周边应光滑平整。测压孔的直径根据实际情况确定，既要防止泥沙颗粒进入，也要防止孔过大时引起水流漩涡而使测值失真。平时不测且条件具备时，可用薄金属板将测头盖紧。

**4.4.18** 特制超强雨量传感器承雨口断面形状宜采用圆形。当储水

容器采用直径为 200mm 的标准圆筒时,承雨口内径与降雨强度的换算关系见表 4-1。

表 4-1 承雨口内径与降雨强度的换算关系

序号	承雨口内径 (mm)	降雨强度 放大倍数	备 注
1	50	16	(1) 降雨强度的放大倍数为储水容器的截面面积与承雨口截面面积之比。 (2) 储水容器水深乘以放大倍数即为观测时段内的总降雨强度
2	63.3	10	
3	89.4	5	
4	100	4	
5	120	2.78	
6	150	1.78	

#### 4.5 观 测 站

观测站选址应考虑临近仪器测点和交通便利等条件。一般选择交通廊道、启闭机房、电站副厂房的角隅,以及岸边、尾水平台、公路或马道旁,安全和相对集中是观测站的选址原则。

观测房可选择砖混结构或以保温材料搭建,自身要有足够的结构强度和一定的抗震性能,以及必要的防雨、通风、地面排水等基本功能。观测站应有足够的空间(高度应不小于 2.2m)、面积和安放监测仪器设备的工作平台,并应设专用集线箱;应有足够的严密性和一定的安全保障条件。

## 5 监 测

### 5.1 监 测 条 件

(1) 观测期间的水库水位要满足过水建筑物安全评价和工程验收的要求，一般达到设计或正常蓄水位。

(2) 对土石坝等需要分期蓄水的工程，水力学安全监测可根据蓄水计划分阶段实施，最终应达到设计或正常蓄水位。

(3) 制定观测工况时，要考虑过水建筑物的种类、数量、布置方式、水力特性、运用要求和来流情况，进行有代表性工况的组合。

(4) 特殊的观测工况是指工程设计时未考虑、现场具有可能实施观测条件的工况，建设单位可会同设计和观测承担单位对需要实施观测的项目进行可行性分析论证，提出观测技术要求和有关配合条件，确保观测工作的安全和顺利实施。

### 5.2 过 水 建 筑 物 检 查

**5.2.2** 检查前准备好必要的动力和照明等检查条件，排干进出通道和检查部位的积水，在竖井、边墙高空等不易接近的检查部位做好检查人员和设备的安全防护；拟定合适的检查程序和内容，包括检查时间、部位、项目和内容、检查路线和顺序、检查记录和报告的要求等。

**5.2.5** 过水建筑物检查资料包括对检查内容及结果的详细描述，必要时绘制草图或素描，同时辅以照片及摄像说明；及时对过流前、后的检查结果进行整理分析，对于发生破坏或异常现象，一般结合水力要素观测结果分析原因；检查完成后注意保留原始记录，及时编写检查报告并归档。

## 6 监测资料整理与分析

### 6.1 一般规定

**6.1.1** 水力学安全监测是监视各类过水建筑物安全运行的耳目。通过监测可获得大量过水建筑物运行水力特性的资料数据。原始监测数据多半是片段的、零散的，甚至是杂乱无章的。为了深入揭示过水建筑物水流运动规律，从繁多的监测资料中找出存在的问题，得出科学结论，必须对监测资料进行整理和分析。

**6.1.2** 水力学安全监测成果是评价水电水利工程运行安全的重要依据。鉴于水力学安全监测工作从仪器埋设、率定调试、现场监测到成果分析历时长、工序多、仪器仪表多样，为了保证水力学安全监测数据的可靠性和结论的合理性，本条对观测资料的整理给予了具体规定。

**6.1.7** 资料分析工作主要是对原始观测数据进行可靠性检验，判断观测仪器的性能是否稳定正常，判定各种观测数据的合理性及观测数据是否符合一致性、相关性、连续性和对称性等原则，对观测资料进行误差分析、处理和修正，根据观测数据计算各物理量测值并绘制有关的过程线图、分布图及相关图。资料分析方法常采用比较法、作图法和特征值统计法。

(1) 比较法包括监测值与监控指标相比较、不同观测工况测值对比、监测各物理量相互对比、监测成果与水工模型试验或数值计算成果相对比，必要时进行工程类比分析等。

(2) 作图法是根据资料分析的要求，通过绘制监测物理量随运行条件的变化过程线图，直观地了解和分析测值的变化大小及

其规律。

(3) 特征值统计法是将历次监测物理量(包括不同运行条件)的最大值和最小值统计汇总分析,考察各监测物理量以及相互之间在数值变化方面是否具有一致性和合理性。

**6.1.11** 针对观测中发现的对工程运行安全有影响的不利因素,可以通过分析或工程类比提出减缓影响的有效措施,用于调整工程运行调度。将观测成果与设计成果、模型试验成果、数模计算成果进行对比分析,可以起到验证设计和科学研究成果的作用;与国内外同类工程的水力学安全监测成果对比分析,可以进一步提高工程设计和科学研究水平。

### **6.3 分 析 评 价**

本节对常规监测项目物理量分析作出了具体规定,可用以解决一般的工程水力学问题。

### **6.4 成 果 报 告**

监测成果报告可参考《科技报告编写规则》GB/T 7713.3—2014规定的统一格式。

成果报告是全面反映监测工作的重要技术文件,其正文是报告的主体,在相当程度上反映了报告的质量,应全面反映各环节开展的监测工作内容、工作方法、监测成果和结论。因此,在技术内容和文字上都应严格要求,做到层次分明、文字清晰、语句通顺、表达准确、图表规范、标点符号正确,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。

对分阶段实施的监测工作,如不同蓄水水位,根据监测任务书的要求,分阶段提交阶段监测报告,并给出阶段监测结论。监测工作完成后,编写监测成果总报告,总结归纳各阶段的工作和成果,给出综合分析评价结论。



成果报告的归档是水力学安全监测工作中的一个组成部分，将所用的各类技术资料、项目合同、工作大纲、审查鉴定意见等，按国家技术档案规定要求整理归档。

---

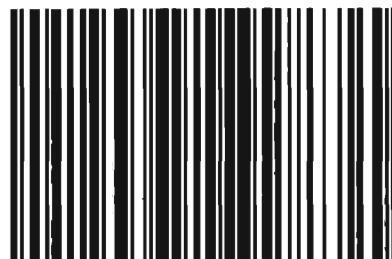


中国电力出版社官方微信



电力标准信息微信

为您提供 **最及时、最准确、最权威** 的电力标准信息



155198.1603

定价：36.00 元