

# 水工建筑物安全监测布置优化方法研究

贾春亮

湖北省水利水电规划勘测设计院有限公司 湖北 武汉 430000

**摘要:** 水工建筑物安全监测对保障工程安全意义重大。本文聚焦监测布置优化, 阐述监测系统设计需遵循整体性、数据可靠性保障、自动化集成原则; 构建包含基于主成分分析的点集划分、多因素关联性分析、动态调整机制的监测点布置优化方法体系; 提出变形与渗流、环境量与结构响应协同及多源数据融合等优化策略; 给出分层设计流程、关键技术实现与质量保障体系等实施路径, 为监测布置优化提供参考。

**关键词:** 水工建筑物; 安全监测; 布置优化; 多源数据融合; 动态调整机制

引言: 水工建筑物作为水利工程的关键构成, 其安全运行关乎人民生命财产与经济社会稳定。随着工程规模扩大与结构复杂度提升, 传统监测布置方法面临挑战, 难以精准捕捉建筑物安全状态。现有监测系统存在监测项目孤立、数据可靠性不足、自动化程度低等问题, 影响安全评估准确性。在此背景下, 研究水工建筑物安全监测布置优化方法, 提升监测效能与精准度, 成为保障工程安全运行的迫切需求。

## 1 监测系统设计优化原则

### 1.1 整体性监测原则

水工建筑物安全监测需以全局视角构建监测体系, 覆盖力学、物理、化学等多维度状态参数的动态演化过程<sup>[1]</sup>。变形监测需反映结构空间位移特征, 渗流监测需捕捉孔隙水压力分布规律, 应力应变监测需解析内部力学响应机制, 环境量监测需记录水位、气温等外部驱动因素。各监测项目并非孤立存在, 需通过关键参数组合分析揭示内在关联性。例如, 将水位变化作为原因量, 与坝体浸润线、扬压力等效应力进行耦合分析, 可识别渗流场与应力场的相互作用机制; 将温度梯度与混凝土应变数据关联, 当温度梯度超过 $5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 且混凝土应变增量超过30微应变时, 可区分热胀冷缩效应与结构损伤导致的变形差异。这种多参数协同分析模式, 能够突破单一监测项目的局限性, 形成对建筑物安全状态的立体化认知。

### 1.2 数据可靠性保障原则

数据质量是监测系统有效性的核心基础, 需通过多重技术手段构建容错机制。针对关键监测断面, 可部署双类型传感器形成数据互补, 如采用振弦式渗压计与光纤光栅渗压计并行采集, 利用不同原理的仪器特性提升数据可信度。数据传输环节需设计冗余路径, 当有线通信中断时自动切换至无线传输模式, 确保数据连续性。存储系统应采用分布式架构, 将原始数据与处理结果分

别存储于本地服务器与云端平台, 防止因单点故障导致数据丢失。数据检验流程需贯穿全生命周期, 采集阶段通过阈值判断剔除异常值, 传输阶段通过校验码验证数据完整性, 存储阶段通过时间序列分析识别数据漂移, 分析阶段通过多模型交叉验证确保结论可靠性。这种全流程质量控制体系, 能够最大限度降低人为误差与设备故障对监测结果的影响。

### 1.3 自动化集成原则

自动化是提升监测效率的关键路径, 需在系统设计阶段预留技术升级空间。传感器选型应兼顾当前需求与未来扩展, 例如选择支持数字接口的仪器, 便于后续接入物联网平台, 数字接口传输速率需达到1Mbps以上。数据传输网络需采用开放式协议标准, 确保有线通信(如RS485、以太网)与无线通信(如LoRa、5G)的无缝衔接, 避免因技术迭代导致系统重构, 有线通信传输距离需覆盖1000米, 无线通信覆盖半径需达到500米。中央控制平台应具备模块化架构, 支持新增监测项目时仅需扩展软件功能模块, 而无需改动硬件系统, 软件功能模块扩展时间需控制在24小时内。这种前置性设计思维, 能够显著降低后期改造成本, 延长监测系统技术生命周期。

## 2 监测点布置优化方法体系

### 2.1 基于主成分分析的点集划分方法

水工建筑物监测数据常呈现高维特征, 直接处理易导致计算复杂度激增与信息冗余<sup>[2]</sup>。主成分分析通过线性变换将原始数据投影至低维空间, 提取方差贡献率最大的主成分作为关键特征向量。具体实施时, 需构建包含位移、渗压、应力等多参数的样本集, 经标准化处理后计算协方差矩阵, 通过特征值分解确定主成分数量。降维后的数据可揭示监测点间的潜在关联性, 例如将三维位移数据转化为包含水平位移主导方向与垂直位移幅度的二维特征, 进而识别空间分布规律。曲面区域划分阶

段,采用最小二乘法拟合监测点分布曲面,通过折面逼近技术将复杂曲面分解为多个平面组合,确保每个子区域内监测点具有相似响应特征。这种划分方式既能保持原始数据的主要信息,又能通过简化几何形态降低后续分析难度,为监测点聚类提供数学基础。

## 2.2 多因素关联性分析方法

监测点布置需综合考虑结构特性与地质条件的耦合效应。结构应力集中区通常位于坝体断面突变处或孔洞周边,这些区域混凝土应变梯度显著,需加密布设应变计;软弱地基区域因承载力不足易产生不均匀沉降,需通过沉降标与测斜仪联合监测。地质雷达与钻孔取样数据可辅助识别地层分界线,指导监测点沿软弱带走向布置。风险等级分区阶段,需建立多因素评分模型,将结构重要性、地质复杂度、环境作用强度等指标量化赋值,通过加权求和划分高、中、低风险区域。高风险区监测点间距应小于规范最小值,例如在断层影响带内将渗压计间距从50米缩减至30米,同时增加数据采集频率以捕捉突变信号。

## 2.3 动态调整机制

施工期与运行期的监测重点存在显著差异。施工期需重点关注基础处理效果与结构成型质量,例如混凝土浇筑阶段需密集监测温度场以防止裂缝产生,温度监测点布设间距需控制在2-3米,运行期则转向长期变形与渗流稳定性监测,长期变形监测频率需设置为每日1次。环境变量对监测需求的影响具有条件触发特征,水位骤升阶段需在上游坝坡增设位移监测点,当水位日涨幅超过1米时,增设位移监测点数量需达到5-10个;温度骤降时需表层混凝土增加应变测点,当温度日降幅超过5℃时,增设应变测点数量需达到3-5个;地震发生后需对坝顶与坝基开展加密监测,地震后24小时内完成首轮加密监测,监测点数量需达到常规监测点的2倍<sup>[3]</sup>。动态调整可通过预设阈值实现自动化响应,例如当连续3日水位涨幅超过1米时,系统自动启动备用监测点数据采集程序,并将监测频率从每日1次提升至每小时1次,确保风险演化过程被完整记录。

## 3 监测项目协同优化策略

### 3.1 变形监测与渗流监测协同

变形与渗流是水工建筑物安全状态的核心表征参数,二者相互作用机制直接影响结构稳定性。位移传感器与渗压计的空间耦合布置需遵循"共域监测"原则,在潜在滑动面、渗流出口等关键区域形成双重监测覆盖。例如,在土石坝坝坡稳定分析中,将测斜仪与渗压计沿同一剖面布置,测斜仪布设深度需达到潜在滑动面以下2

米,渗压计布设深度需与测斜仪一致,通过位移矢量与渗压梯度的联合分析,可识别渗流作用引发的土体软化效应,当渗压梯度超过0.5kPa/m且位移矢量方向与渗流方向夹角小于30°时,判定存在渗流软化风险。裂缝监测与应力应变监测的联动分析需建立物理量关联模型,当混凝土表面裂缝宽度超过0.2毫米时,同步提取周边应变计数据,通过应变能释放率计算判断裂缝扩展趋势,当应变能释放率超过50J/m<sup>2</sup>时,判定裂缝处于扩展状态。这种协同模式突破了单一监测项目的局限性,能够揭示变形-渗流耦合作用下的结构失稳前兆。

### 3.2 环境量监测与结构响应关联

环境变量是驱动水工建筑物力学状态变化的外源因素,需构建"环境-结构"动态响应数据链。水位变化与坝体扬压力存在直接水力联系,通过在上游水位测站、坝基渗压计群与坝顶位移监测点之间建立时间序列关联,当水位涨幅超过2米时,需在24小时内完成扬压力与位移数据的关联分析,可量化水位骤升对坝体抗滑稳定性的影响程度,当扬压力系数超过0.8且位移增量超过5毫米时,判定坝体抗滑稳定性降低。温度场监测需覆盖结构表层与内部,混凝土开裂风险预警模型应整合温度梯度与应变数据,当表层温度骤降速率超过5℃/h且内部应变增量超过50微应变时,触发开裂风险预警,预警信号需在10分钟内推送至运维终端<sup>[4]</sup>。这种关联分析能够将环境扰动转化为可量化的结构安全指标,为运行调度提供科学依据。

### 3.3 多源数据融合分析

人工巡检与仪器监测数据互补验证是提升监测系统鲁棒性的关键环节。人工巡检可识别仪器盲区的表面缺陷,如混凝土剥落、排水管堵塞等,而仪器监测能捕捉人工难以发现的内部状态变化,如深层渗流、钢筋锈蚀等。二者数据融合需建立标准化对接协议,将巡检记录中的定性描述转化为可量化的损伤指数,与仪器监测数据在时空维度上匹配分析。统计模型与有限元模型的交叉验证可提升安全评估可靠性,统计模型通过历史数据拟合建立经验预警阈值,有限元模型通过结构仿真计算理论响应值,当两类模型预测结果偏差超过15%时,启动模型修正程序重新校核参数。这种双模型驱动的分析框架能够有效降低单一方法的不确定性,提高安全预警的准确率。

## 4 优化方法实施路径

### 4.1 分层设计流程

监测系统设计需遵循递进式优化逻辑,各阶段任务明确且衔接紧密。初步设计阶段以风险等级评估为核

心,通过结构重要性系数、地质条件复杂度、环境作用强度等指标量化评分,筛选出必须配置的监测项目。例如,对于高拱坝工程,需将应力应变、渗流、位移等列为必测项目,而低风险重力坝可适当简化监测内容。详细设计阶段引入主成分分析法,对初步选定的监测点进行空间聚类分析,通过计算各点数据方差贡献率确定最优测点数量。具体实施时,将位移、渗压、应力等参数构成多维数据集,经标准化处理后提取主成分,保留累计贡献率超过85%的特征向量,据此优化测点空间分布。施工阶段需开展动态校准工作,根据混凝土浇筑进度、地基处理效果等实际情况调整传感器布置方案。例如,当发现某区域渗压计读数异常时,需在周边增设辅助测点以验证数据可靠性,同时对传感器网络进行拓扑优化,确保数据传输稳定性。

#### 4.2 关键技术实现

传感器选型需建立多维度评价标准体系。精度指标应满足工程安全监测规范要求,如渗压计量程误差需控制在 $\pm 0.5\%$ FS以内;耐久性需适应工程全生命周期需求,采用不锈钢封装与抗腐蚀涂层技术延长使用寿命;环境适应性需覆盖极端工况,例如在北方寒冷地区选用具备低温补偿功能的振弦式传感器。数据采集频率设计需平衡信息密度与存储成本,常规监测项目可设置为每日一次,关键部位在施工期或汛期提升至每小时一次。传输协议标准化需统一数据格式与通信接口,采用ModbusTCP/IP协议实现有线传输,LoRa无线技术覆盖偏远区域,确保各类传感器数据无缝接入中央控制平台。边缘计算节点部署可显著提升系统响应速度,在坝体关键断面设置智能终端,对原始数据进行实时滤波、特征提取与异常初判,当监测值超过预设阈值时立即触发预警信号,同时将压缩后的核心数据上传至云端平台进行深度分析。

#### 4.3 质量保障体系

监测系统可靠性验证需构建双重防护机制。硬件层面采用冗余设计,对关键监测断面部署双类型传感器,

如同时安装振弦式与光纤光栅渗压计,当某一类型仪器出现故障时自动切换至备用设备;软件层面开发故障自诊断程序,通过分析数据波动特征识别传感器漂移、线路中断等异常状态,并生成维修工单推送至运维终端<sup>[5]</sup>。数据质量评估需建立三维指标体系,完整性指标要求单次采集成功率超过98%,缺失数据需在24小时内补传;一致性指标通过多传感器数据交叉验证,例如将测斜仪计算的坝体深层位移与表面位移计读数进行相关性分析,偏差率需控制在15%以内;时效性指标规定数据从采集到展示的延迟时间不得超过5分钟,确保安全预警的及时性。质量保障体系运行需形成闭环管理流程,定期生成评估报告并反馈至设计阶段,持续优化监测方案。

#### 结束语

水工建筑物安全监测布置优化研究,通过构建系统设计原则、优化方法体系、协同策略及实施路径,有效提升了监测系统的科学性与实用性。该成果在实际工程应用中,可精准捕捉建筑物安全状态变化,为工程安全评估与决策提供可靠依据,降低安全风险,保障水工建筑物长期稳定运行,对推动水利工程安全监测技术发展具有积极意义。

#### 参考文献

- [1]张科峰.水工建筑物安全监测布置优化方法研究[J].现代装饰,2022,507(10):166-168.
- [2]汪雷丹.水工建筑物安全监测布置优化方法研究[J].现代物业,2021(13):42.
- [3]毛永茂.基于深基坑施工的水工建筑物安全监测技术分析[J].建筑工程技术与设计,2024,12(36):160-162.
- [4]宋凯,李庆,袁佳杰,等.智能传感技术在城市河湖水工建筑物安全监测中的应用与优化[J].智能城市,2025,11(8):131-134.
- [5]周柯宇,李明,张俊丽.水工建筑物结构安全监测数据智能分析与报告自动化系统的设计与应用[J].四川水力发电,2024,43(6):27-30.