

水利工程运行安全监测技术研究

谢 利

徐州市南水北调工程管理中心 江苏 徐州 221000

摘 要: 本文以水利工程运行安全监测全流程技术体系为研究对象, 首先明确了运行安全监测的核心定义、技术特征与覆盖监测对象, 系统梳理了形变监测、渗流监测、应力应变监测三类核心技术的应用逻辑与管控要点。在此基础上, 深入剖析当前行业内普遍存在的监测设备环境适配性不足、数据采集传输精度受限、多源数据精细化分析能力薄弱三类典型问题, 针对性提出设备防护优化、采集传输体系升级、多源数据融合分析的全链条技术优化路径, 构建形成覆盖“设备-链路-分析”全环节的安全监测技术升级框架, 可为在役水利工程的安全监测体系提质增效提供可落地的技术支撑。

关键词: 水利工程; 运行阶段; 安全监测; 监测技术; 数据采集

引言: 水利工程作为水资源调配、防洪减灾、能源供给的核心基础设施, 其长期运行的结构安全直接关系到下游区域的生命财产安全与社会经济稳定。随着国内大量已建水利工程逐步进入长期服役阶段, 受材料老化、荷载长期作用、环境侵蚀等多重因素叠加影响, 工程结构的渐进式劣化风险持续攀升, 传统的周期性人工巡检模式已无法适配全时段、全维度的安全管控需求。运行安全监测作为实时掌握工程结构状态的核心技术手段, 其技术体系的完善程度直接决定了隐患识别的前瞻性与运维决策的科学性。本文围绕水利工程运行安全监测的技术体系、现存短板与优化方向展开系统性梳理, 为水利工程长效安全管控提供专业层面的技术参考。

1 水利工程运行安全监测概述

水利工程运行安全监测是指在工程正式投入使用后, 依托专业监测设备、技术手段与分析方法, 对工程主体结构、附属设施及周边运行环境的各项参数进行连续性采集、整理、分析的技术工作, 核心目标是实时掌握工程结构的真实运行状态, 判定结构稳定性与安全性, 规避结构性失效风险。(1) 水利工程运行安全监测具备鲜明的技术特征。首先是监测的连续性, 工程结构损伤与状态变化是长期累积的过程, 需要全天候、全周期不间断监测, 杜绝监测盲区; 其次是参数的多元性, 工程安全状态受形变、渗流、应力、温度、水位等多重参数影响, 需实现多维度同步监测; 最后是数据的精准性, 运行阶段工程状态变化多为细微形变与参数波动, 对监测设备精度、数据采集频率、数据处理精度均有极高要求。(2) 运行安全监测的核心监测对象具备明确针对性, 主要涵盖坝体、闸室、渠道、堤防、边坡等主体

结构, 以及工程基础、防渗体系、排水系统等关键附属结构, 重点监测各类结构在长期运行中的形态变化、受力状态与渗透特性, 全面覆盖影响工程安全运行的核心要素^[1]。

2 水利工程运行核心安全监测技术

2.1 形变监测技术

形变监测是水利工程运行安全监测的基础核心技术, 主要用于监测工程主体结构的竖向沉降、水平位移、倾斜形变、裂缝开合度等形态变化, 直观反映工程结构的整体与局部稳定性。工程长期运行中, 基础沉降、土体滑移、结构受力不均等问题都会直接体现为结构形变, 是判断工程安全状态的首要指标。(1) 形变监测包含静态形变监测与动态形变监测两类技术模式。静态形变监测主要针对工程缓慢、持续性的细微形变, 通过定点布设监测点位, 定期采集结构位移与沉降数据, 适配坝体、堤防等大型结构的长期稳态形变监测。该技术依托高精度监测传感器与水准测量设备, 可精准捕捉毫米级细微形变, 数据稳定性强、误差可控。动态形变监测主要应对工程受水体冲击、水位骤变等工况产生的瞬时形变、往复形变, 具备高频采集、实时响应的特点, 能够捕捉短时形变波动, 适配闸门、溢流坝段等动态受力结构的监测需求。(2) 在技术应用中, 形变监测需遵循点位均匀布设、基准点稳定、数据同步采集的核心原则, 保障监测数据能够真实反映结构整体形变规律, 避免局部点位偏差导致的状态误判^[2]。

2.2 渗流监测技术

渗流是引发水利工程基础掏空、坝体渗漏、边坡滑

移等重大安全事故的核心诱因,渗流监测技术主要用于持续监测工程坝基、坝体、堤防及周边岩土体的渗透水位、渗透压力、渗流量、渗流流速等关键参数,系统性判定工程防渗体系与排水体系的实际运行有效性。水利工程的防渗结构长期处于水体浸泡、持续水压作用的服役环境中,极易出现防渗层老化、内部裂隙发育等渐进式劣化问题,进而诱发非预期的异常渗流,直接威胁工程整体运行安全。(1)当前主流的渗流监测技术主要分为压力型渗流监测与流量型渗流监测两类。压力型渗流监测通过在工程基础、防渗帷幕、坝体内部指定位置布设渗压计,实时采集不同深度、不同区域的渗透压力动态变化,精准识别局部高压渗流集中区域,辅助判断防渗结构是否存在破损失效隐患。流量型渗流监测主要针对工程排水廊道、排水孔等出流位置开展渗流水量变化监测,通过长期跟踪流量波动规律,判定工程整体渗流状态是否处于设计允许的正常区间。(2)该技术的核心应用要点在于严格执行分层、分区的监测设备布设原则,根据工程结构厚度、岩土分层特性针对性设置监测点位,实现对浅层、深层渗流的全方位覆盖监测,精准区分常规正常渗流与突发异常渗漏,为工程结构防渗状态的精准判定提供核心数据支撑。

2.3 应力应变监测技术

应力应变监测技术聚焦水利工程结构的内部受力状态维度,通过持续监测混凝土、岩土、钢结构等工程主材的实时应力数值与应变变形过程,系统性分析结构内部受力分布的均匀性与合理性,提前预判结构疲劳累积、内部开裂、隐性损伤等常规手段难以识别的深层隐患。工程外部形变监测仅能反映结构表层的位移变化状态,而应力应变参数可直接体现结构内部的受力平衡动态,是识别深层结构性隐患的核心关键技术手段。(1)现阶段工程中常用的应力应变监测设备包含混凝土应变计、岩土应力计、钢筋应力计等不同品类,可针对性适配不同材质、不同埋深、不同受力特征的工程结构监测需求。该技术体系可实现静态应力与动态应力的同步采集监测,既能够长期捕捉工程稳态运行工况下的恒定应力缓慢变化,也可精准响应水位升降、环境温度骤变、外部荷载扰动等场景下的瞬时应力波动,完整覆盖全工况下的受力监测需求。(2)在该技术的实际应用过程中,传感器的埋设定位精度、与周边介质的安装贴合度直接决定最终监测数据的有效性,需在布设环节严格管控安装工艺,保障传感器与工程结构主体完全耦合绑定,可同步跟随结构的形变与受力变化产生响应,确保采集得到的监测数据能够真实反映结构内部的实际受力

状态,避免因安装偏差导致的数据失真^[3]。

3 水利工程运行安全监测技术应用现存问题

3.1 监测设备环境适配性不足

水利工程运行现场环境复杂潮湿,长期存在水体浸泡、水汽腐蚀、温差交变、泥沙附着等工况,对监测设备的防护性能、稳定性能要求极高。现阶段部分常规监测设备的环境适配性较差,在长期潮湿、高腐蚀的工程环境中,易出现传感器灵敏度衰减、数据漂移、设备卡顿失效等问题。同时,部分深埋式、隐蔽式监测设备长期处于封闭、高压的工程内部环境,设备损耗速度快,且故障排查、检修更换难度大,易出现长期数据缺失、数据失真等问题,无法保障全周期连续监测需求。

3.2 数据采集与传输精度受限

数据采集与传输是安全监测的核心环节,直接决定监测结果的准确性。目前部分水利工程的监测系统存在数据采集频率不合理、精度不足的问题,针对细微形变、微小渗流波动等低幅值参数,采集分辨率不足,无法捕捉小幅值的异常参数变化,导致隐性隐患无法被及时识别。在数据传输环节,部分工程监测传输线路老化、无线传输信号受山体、建筑物遮挡干扰,易出现数据延迟、数据丢包、信号中断等问题,破坏监测数据的连续性与完整性,导致后续数据分析无法精准反映工程运行的动态变化规律^[4]。

3.3 数据精细化分析能力薄弱

现阶段多数水利工程安全监测工作侧重数据的采集与存储,缺乏系统化、精细化的数据处理与分析能力。监测系统多实现原始数据的简单汇总、展示,未针对不同工程结构、不同运行工况建立差异化的数据研判标准,无法有效区分环境干扰引发的参数波动与结构性隐患引发的参数异常。同时,多维度监测数据相互独立,形变、渗流、应力应变数据未实现关联融合分析,无法挖掘多参数耦合作用下的工程结构变化规律,难以实现对工程安全状态的精准预判,监测数据的应用价值未能充分发挥。

4 水利工程运行安全监测技术优化路径

4.1 优化监测设备选型与防护配置

水利工程长期处于高湿度、多腐蚀介质、高外部荷载的特殊运行环境中,常规监测设备极易出现性能衰减与非预期失效,需针对性优化监测设备选型与配套防护方案,全面提升设备长期运行的环境适配性与工作稳定性。设备选型阶段需优先筛选防水、防腐、抗压性能

达标的工业级监测传感器,使其可适配坝体内部、水下区域、潮湿廊道等不同特殊工况的长期监测需求。针对隐蔽式、深埋式部署的监测设备,需进一步优化设备整体封装工艺,强化防尘、防水、抗腐蚀的多层级防护处理,有效降低设备在恶劣环境下的自然损耗速率。同时优化整体设备布设方案,在工程核心监测区域按冗余原则布设设备用监测点位,避免单一设备突发故障导致的关键监测数据断档缺失,配套建立设备常态化自检运维机制,定期排查设备灵敏度衰减、性能漂移、故障失效等隐性问题,保障全量监测设备可长期稳定输出有效监测数据。

4.2 完善高精度数据采集传输体系

依托成熟的高精度监测技术迭代优化全链路数据采集模式,针对不同类型监测参数的固有变化特性,差异化匹配对应的采集频率与采集精度配置规则,避免通用采集模式下的资源浪费与关键信息遗漏。针对坝体形变、结构应力应变等长期缓慢变化的监测参数,设置适配的高频次、高精度采集模式,可完整捕捉常规采集逻辑下容易遗漏的细微参数波动,为结构状态的早期异常识别提供完整数据支撑。针对水位、渗流量等易受外部工况扰动的动态波动参数,优化全时段实时采集机制,保障监测数据可跟随工况变化完成动态同步更新,不会出现关键节点的数据滞后。同时系统性优化整体数据传输链路,完成老旧传输线路的迭代改造,针对山区、封闭工程区域普遍存在的信号遮挡问题,搭配有线传输与无线传输互为冗余的双通道传输模式,从链路层面规避外部信号干扰、单点传输中断等常见故障,保障全量监测数据可实时、完整、精准地传输至后端平台,最终构建形成连续、稳定、高精度的完整数据采集传输体系^[5]。

4.3 构建多源数据融合分析体系

打破传统单一参数独立分析的技术局限,构建覆盖全监测维度的多源监测数据融合分析体系,从底层逻辑上提升工程安全状态研判的精准度。系统整合坝体形变、渗流状态、结构应力应变、环境温度、上下游水位等全品类监测数据,建立适配水利工程运行规律的多参

数关联分析模型,深度挖掘不同监测参数之间的耦合变化规律,可精准区分环境因素自然波动与结构内部损伤引发的参数异常,避免单一参数误判导致的无效预警。同时针对性优化全流程数据降噪、校准处理技术,系统性剔除监测数据中由外部干扰、设备漂移带来的非相关误差,从数据预处理环节提升原始监测数据的可信度与精准度。通过对全量数据的系统化、精细化分析,实现从单点数据异常监测向工程整体运行状态系统性研判的技术转变,充分挖掘多源监测数据的深层应用价值,精准识别常规分析模式下难以发现的工程运行隐性安全隐患,为水利工程的安全运维决策提供可靠的数据支撑。

结束语

水利工程运行安全监测是一项贯穿工程全服役周期的系统性技术工作,其核心价值在于通过连续、精准的状态感知,将传统的“事后故障处置”模式转变为“事前隐患预判”的主动管控模式。当前国内多数在役水利工程的安全监测体系仍存在不同程度的技术短板,无法充分适配长期复杂工况下的深层隐患识别需求。未来行业需持续推动监测技术与工程运维场景的深度融合,在设备环境适配性、数据传输可靠性、多源数据耦合分析能力三个方向持续迭代升级,逐步构建全维度、全周期、高可靠的智能安全监测体系,为水利工程的长期稳定运行筑牢技术防线,充分保障水利基础设施的服役安全与综合效益发挥。

参考文献

- [1] 龙耿文,袁树才,罗家良,等. 水利工程大坝安全监测技术与发展研究[J]. 水上安全,2025,(20):148-150.
- [2] 王桐. 水利工程中堤防结构安全监测技术研究[J]. 农业灾害研究,2026,16(1):112-114.
- [3] 耿燕. 基于大数据分析的水利工程运行安全监测研究[J]. 消费电子,2026,(6):101-103.
- [4] 王延军. 防洪排涝工程中闸门设备安全运行监测技术研究[J]. 水上安全,2026,(9):137-139.
- [5] 姜家宁. 基于现代化技术的水利工程闸门安全运行管理研究[J]. 中国科技纵横,2026,(8):147-149.