

智能传感技术在水利工程安全监测及数据管理中的应用

王 炜

新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000

[摘要] 本文对智能传感器的基本概念、分类和其在水利领域的应用实践开展系统梳理, 着重研究了大坝、堤防、水电站与河道的检测体系, 也对数据的搜集、储存、处理与可视化手段进行研究, 为工程安全维护以及决策智能化升级予以理论参照依据。

[关键词] 智能传感技术; 水利工程; 安全监测; 数据管理

DOI: 10.33142/hst.v9i2.19160

中图分类号: TV632.63

文献标识码: A

Application of Intelligent Sensing Technology in Safety Monitoring and Data Management of Water Conservancy Engineering

WANG Wei

Xinjiang Water Resources and Hydropower Research Institute, Urumqi, Xinjiang, 830000, China

Abstract: This article systematically reviews the basic concepts, classifications, and application practices of intelligent sensors in the field of water conservancy. It focuses on the detection system of dams, embankments, hydropower stations, and rivers, and also studies the collection, storage, processing, and visualization methods of data, providing theoretical reference for engineering safety maintenance and intelligent decision-making upgrading.

Keywords: intelligent sensing technology; water conservancy engineering; safety monitoring; data management

水利工程的正常运行与洪水防御、水资源供给、电力生产以及生态保护等多个领域密切相关, 受极端天气增多连同工程耐久性降低影响造成的风险叠加, 人工巡检和定期监测等手段存在反馈不及时、数据间断和精准度欠佳等问题, 智能传感技术的进步给水利工程安全监测带来了新的路径, 采用高精度监测仪器, 可以及时获取结构形变的水文及环境的相关数据, 还可实现智能管理以及信息分析, 构建动态监测和风险预警, 大幅提高工程安全管控的可靠性及响应速率。

1 智能传感技术概述

1.1 智能传感器的基本原理

智能传感器在传统传感器的基础上联合了信号采集处理及通信能力, 可把所采集的物理量或环境参数输出为电信号形式, 施行在线分析之后进行数据传递, 在水利工程中, 应合理设置传感器投放点, 并进行参数校准及联网调试, 随后对工程构件位移、应力变化、水文参数及环境变量开展持续性监测, 若监测到异常数据, 则会生成预警, 为工程安全监管提供数据基础^[1]。

1.2 主要类型及功能

位移/变形传感器系统能够对坝体和堤防及土体结构

微小位移和裂缝等予以监测, 在安装时应均匀分布, 使用精密数据采集装置, 持续性收集动态数据, 运用时序分析技术对结构可靠性进行测定; 应力/应变传感器可及时反映混凝土、土体的应力分布现象, 传感器需覆盖结构的核心受力截面, 应保证黏接稳固, 动态数据采集, 可以对安全阈值判定和疲劳累积预测起到支撑作用; 利用水位/流量传感器达成对水库河道及泵站水文特征的监测, 操作流程涵盖选点定位、布设超声波/压力传感器、系统功能测试和数据调整等, 利用预警系统达成水量的调配与风险的应对; 气象及环境传感器可以对气温、降雨量、风速、土壤水分含量等参数开展监测, 在安装期间, 应远离局部干扰源, 实时将感知数据上传并交叉验证趋势的演变趋势, 可对工程指挥与防灾措施决策实施起到支持作用^[2]。

2 智能传感技术促进水利工程安全监测开展

2.1 大坝安全监测

2.1.1 位移、裂缝、渗流监测

大坝安全运行的关键所在是对坝体结构的细微位移、裂隙发展和渗流状况开展长期监测, 坝顶、坝肩和坝基属于重点监测的地方, 要沿坝体纵向和横向均匀地配置光纤

位移传感器,一般是50m间隔设置一组,做到坝体监测全域覆盖布局,采用激光位移计可以开展 $\pm 0.1\text{mm}$ 精度的微小形变观测,自动收集坝体下沉、水平移动与倾斜的相关数据。开展裂缝监测工作时一般在裂隙双侧布置光纤光栅应变传感器,针对每条裂缝要设置3~5个监测点,以捕捉裂缝宽度变化是否达到0.05mm,坝体渗流利用渗压计和孔隙水压力计进行监测,同时利用渗流量计对下游渗透水流量开展计量剖析,将数据借助无线网络实时同步到数据中心,每周都可以实施变形速率与渗流增量的相关性分析,若周位移量大于2mm或渗流增幅大于10%界限时,监测模块会触发风险标识,助力工程项目做出科学的决策^[3]。

2.1.2 异常预警系统

监测数据整合完成之后,以多源参数交叉分析达成早期风险辨识,在安全评估模型中,输入坝体位移、应变、渗流与水位测量等相关数据,运用趋势预测方法开展动态推演,预警模块共划分为三个级别:结构位移达到历史最大值80%时,启动黄色警报,若测量数值突破历史极值,则会呈现红色标识,蓝色警示提示主体结构存在震荡现象,预警内容可借助可视化界面、移动终端传达给值班人员,使管理部门迅速开展应急方案,定期针对阈值以及预测模型进行校准,使预警可靠性得到提高,及时识别潜在的结构隐患点。

2.2 水库及堤防监测

2.2.1 水位及渗漏监测

水库和堤防的安全、稳定运行离不开水位渗流数据支持,坝顶以及核心溢洪区域每隔一百米安装一个雷达水位检测仪,测量的最小误差是 $\pm 5\text{mm}$,堤防渗漏利用渗压计、土壤水分传感器进行监测,可以长时间监测堤身关键层水压及土体含水量,监测深度一般控制在0.5~5m,保证重要土层的覆盖^[4]。

2.2.2 土体稳定性评估

结合土体稳定性对堤防安全进行综合管理,采用倾斜计应变传感器联合孔隙水压力计来测量土体变形及应力的改变,针对核心滑坡以及高危险性区域,应加大地下光纤光栅分布数量的规模,做完整体剖面应力应变监测,数据传输到云空间后,依据有限元分析模型取得堤防安全系数,安全系数低于0.75临界标准值,则会自动跳转高风险预警的页面,分析模型把0.75~0.85的范围认定为中等风险段,经由数据监测与模型分析,可以于3~5d前预先作出滑动沉降风险的判断,指导堤防开展结构优化和排水处理相关工作^[5]。

2.3 水电站及泵站运行监测

2.3.1 机械设备状态监测

水电站机组及泵站设备安全运行是以机械状态监测为依据的,振动、温度、转速、轴承应力形成核心因素,振动监测装置安装在轴承座以及关键的联轴器处,单机组要安装6个及以上数量的传感器点位,采样的周期为1ms,能区分0.02mm/s的微弱振动所产生的变化。温度探头安设到润滑油管路和高热的位置,温度检测所产生的误差是 $\pm 0.5^\circ\text{C}$,实时采集的数据利用无线网络输送到监控平台,做FFT解析以追踪趋势,可检测设备磨损失衡或者过载运行情况。

2.3.2 运行效率优化

利用动态采集的流量曲线、水位变化的情况及机械性能参数,采用水轮机效率的计算模型,能够对机组开度、转速及流量分配等环节进行优化,做到能源消耗为最小而发电产出为最大。

2.4 河道及防洪工程监测

2.4.1 洪水监测与预警

洪水预警系统凭借水位变化、流速趋势以及降雨量开展交叉验证,沿关键的断面每隔200m安装一套水位流速探头,且在上游地方安排雨量采集装置,达成跨断面水文数据的协同,水文参数每隔十分钟重新采集,依靠水文模型确定洪峰到达的时点以及最大流量。

2.4.2 河道冲刷与沉积监测

水流对河道的冲淤作用对输水效率和防汛的稳定具有重要的影响,借助声呐测深仪、光纤应变传感器和水位流速传感器可以追踪河床沉积冲刷现象,传感器之间的间隔一般控制在100~300m,以30min为周期开展采样工作,资料上传至管理平台之后借助泥沙模型开展评估,预测沉积物累积的速度和冲刷动态的发展,给河床治理、边坡稳定以及洪水调度提供实证方面的支撑,在工程着手实施的阶段,这项技术可以在1~2周前对河道淤积异常现象做出预判,给管理部门创造充分条件使其采取行动。

3 数据管理与分析技术

3.1 数据采集与实时传输

基于水利工程智能监测,核心任务是做到多种传感器数据的完整采集和稳定传送,传感器设备安装成功以后,要与数据采集装置进行连接,采用硬接线或者无线传输进行统一集中管理,位移及应变类传感器一般每隔5min采集数据,对水位流速等水文核心参数要每分钟采集一次,以便实时知晓洪水等突发事件。采集终端一般带有边缘计算功能,对采集数据开展初滤波、消除异常及压缩,保证

数据一致性^[6]。

3.2 数据存储与数据库管理

采集器件生成的数据要满足安全归档以及快速检索等要求,而且要与历史数值的核对以及长期变化规律的解析兼容,用关系型数据库存储结构化数据,例如 PostgreSQL 等,可以记载传感器参数实测数值的时间、精度等指标;实时更新的实验记录可以采用时序数据库(如 InfluxDB)来进行归档以及快速查询。在数据管理的过程中,构建分层级数据表组织架构,保证数据的可追踪和有关联性,为降低数据丢失的几率,应每天开展增量式的备份操作,全量备份工作按周进行,除此之外,采用 RAID 存储或是云冗余存储,数据库还需开发权限模块以及对操作日志进行归档,方便运维人员对数据交互活动做跟踪和核对。

3.3 大数据分析 with 智能决策

3.3.1 异常监测数据与风险评估

面对庞大的监测数据集,实时对异常变化进行监测是工程安全管理的核心要素,针对采集数据集开展缺失值补全、干扰去除和归一化工作,之后运用统计手段或机器学习技术对数据进行分析,在坝体位移当中,可采用滑动窗口和 Z-score 法,再结合检测异常数据点;针对渗流的变化趋势,采用阈值预警模型,若渗流速率较历史均值的增幅突破 30% 则自动判定存在异常。把异常数据和历史事件及工程结构模型进行关联,可对安全系数开展分析,对风险类别加以归类:绿色提示处于安全范畴,黄色提示处于警戒范畴,红色提示处于高风险范畴,系统会按预设的等级自动构建出风险警报,为管理人员提供应对办法,以便及时解决潜在的安全问题^[7]。

3.3.2 模型预测与仿真

异常监测不是数据分析唯一能起到的作用,还可推断未来的发展趋势,在水利工程当中,能够搭建水文模型、土体力学模型还有坝体结构变形模型,开展结果预判和模型再呈现,结合历史降雨量观测的相关资料、流量的变化规律和土体的含水状况,使用多变量回归或长短期记忆网络(LSTM)工具对洪峰水位以及河道流量开展预测;采用有限元仿真技术再现坝体应力分布以及渗流路径,能够预估未来一个月坝体位移是如何变化的,预测统计的结果可以被用于防洪调度、堤防加固、水电站运行优化,可于 1~2 周前预判可能存在的风险。

3.4 可视化平台与信息化管理

3.4.1 报警系统

监测数据利用可视化平台以图表和曲线方式进行展

示,利于管理人员全面知晓工程运行的现况,报警系统按照既定阈值自动将异常数据标注好,系统采用短信、电邮和移动应用三种方式同时给值班人员发送通知。系统会对报警相关事件及处理结果存档,给后续分析以及改进作为参考,为实现预期所要求的可靠程度,每季度要开展传感器示值误差检测、数据系统完整性的校验以及对报警触发条件进行修订。

3.4.2 决策支持系统

决策支持系统把监测数据、历史档案、模型预测信息综合起来,给管理机构输出优化的调度、运维提供参考依据,堤防渗流观测提高 20%,系统可以动态制定巩固举措、推荐加大巡检次数或调整水位管理等举措,用户借助平台对各方案进行对比,评估实施可行性和最终结果,把最终决策上传至现场并进行实施,管理者可使用可视化终端监视数据的变动、风险等级,并提出管理建议,使管理环节形成封闭回路,系统会定期备份各项决策相关资料及执行进度,作为工艺改良和未来部署的论证参考^[8]。

4 结束语

水利工程安全监测智能传感技术呈现出重大的应用潜力,可对结构状态进行监测,迅速找出异常情形并增强决策的科学性,凭借数据管理、模型预测、可视化平台的集成策略,不但提高了监测精度和处理的时效,从而为水利项目的持续发展、精细管理提供数据支撑,伴随传感设备、人工智能以及信息化水平的渐渐提高,智慧监测网络会在灾害抵御、运行改良与风险防范上起到更加重要作用,为水利工程达成安全稳定、高效节能和长期可持续的运行提供可靠保障。

[参考文献]

- [1]赵红兵,李心愉,刘栋梁,等.基于无人机技术的水利工程巡检系统——评《水利工程安全监测与养护修理》[J].人民长江,2025,56(12):284-285.
- [2]易兰.数据防伪在水利工程质量安全监测中的应用研究——增强数据防伪技术的抗攻击能力[J].中国品牌与防伪,2025(14):145-147.
- [3]杨艳.用智慧水利守护调水安全——《长距离调水工程安全监测、检测技术与信息融合》[J].水利科技与经济,2025,31(10):173.
- [4]蔡强,郭衍伟.水利工程质量检测中智能传感器实时监测系统的应用研究——提升质量检测的实时性与精准度[J].中国品牌与防伪,2025(12):123-125.
- [5]张文强.西藏自治区数字孪生水利“天空地水工”监测感

知体系建设思考[J].水利信息化,2025(4):87-91.

[6]孙昊阳,舒强.三维激光扫描与 BIM 的集成技术在水利工程变形监测中的应用[J].治淮,2025(3):28-30.

[7]王玺圳,程红刚,曹雪峰.倾斜摄影三维模型在生产建设项目水土保持监测中的应用——以黄藏寺水利枢纽工程为例[J].中国水土保持,2025(2):47-49.

[8]胡自勍.水利工程中的水闸智能化监测控制技术研究——以大藤峡水利枢纽工程为例[J].农业开发与装备,2024(8):153-155.

作者简介:王炜(1987.11—),性别:男,新疆乌鲁木齐人,学历:本科,职称级别:中级工程师,主要从事方向:水利水电安全监测。