

智能监测技术在水利水电设施健康诊断中的应用

徐向娟, 柴文政

河南海马建设工程有限公司, 河南 安阳 455000

DOI:10.61369/ME.2024100008

摘 要 : 随着水利水电工程规模扩大与运行年限增长, 设施健康诊断需求日益迫切。智能监测技术通过多源数据采集、实时分析与预警功能, 为水利水电设施安全运行提供了新的技术路径。本文梳理了智能监测技术在大坝安全、水工建筑结构及机电设备等场景中的具体应用, 探讨了技术选型、设备维护及人才储备等现实挑战, 并提出针对性的应对策略, 旨在为提升水利水电设施健康管理水平提供理论参考。

关 键 词 : 智能监测; 水利水电设施; 健康诊断; 设备维护; 复合型人才

Application of Intelligent Monitoring Technology in Health Diagnosis of Water Conservancy and Hydropower Facilities

Xu Xiangjuan, Chai Wenzheng

Henan Haima Construction Engineering Co., Ltd., Anyang, Henan 455000

Abstract : With the expansion of water conservancy and hydropower projects and the increase of operation years, the demand for facility health diagnosis is increasingly urgent. Intelligent monitoring technology provides a new technical path for the safe operation of water conservancy and hydropower facilities through multi-source data acquisition, real-time analysis and early warning functions. In this paper, the specific application of intelligent monitoring technology in dam safety, hydraulic structure and electromechanical equipment is sorted out, and the practical challenges such as technology selection, equipment maintenance and talent reserve are discussed, and the corresponding countermeasures are put forward, aiming at providing theoretical reference for improving the health management level of water conservancy and hydropower facilities.

Keywords : intelligent monitoring; water conservancy and hydropower facilities; health diagnosis; equipment maintenance; inter-disciplinary talent

引言

作为现代基础设施体系的核心组成, 水利水电工程在保障水资源调配、清洁能源供应等方面发挥不可替代的作用。混凝土老化、金属结构疲劳等潜在风险随运行年限增加呈指数级增长, 传统定期检测方式难以捕捉突发性损伤演变过程, 离散化监测数据亦无法支撑系统性安全评估, 而智能监测技术能提高设施监测实效性和准确性。本文从智能监测技术的工程适配性切入, 探讨其在设施健康管理中的实践挑战与优化方向。

一、智能监测技术在水利水电设施健康诊断中的应用场景

(一) 大坝安全监测

智能监测技术在大坝安全领域的应用核心在于构建多维动态感知体系。基于分布式光纤传感网络的渗流监测系统通过埋设于坝体的光纤光栅阵列, 实时捕捉渗流水压梯度变化, 其测量精度可覆盖从坝基到坝顶的全断面渗透路径。当坝体内部出现渗漏异常时, 光纤传感节点通过波长偏移量解析渗流方向与速率, 为判断防渗体失效风险提供直接依据^[1]。北斗卫星导航系统的高精度

定位功能与惯性测量单元结合, 形成大坝形变监测的时空基准框架, 通过解算卫星观测数据与惯性参数融合模型, 实现毫米级位移的连续追踪。坝体应力场重构依赖于嵌入式的振弦式传感器网络, 其通过测量钢弦振动频率变化反演混凝土内部应力分布, 结合温度补偿算法消除环境热胀冷缩干扰。多源监测数据经边缘计算节点进行时空对齐与噪声过滤后, 输入风险预警模型生成坝体稳定性动态图谱, 辅助管理人员识别潜在滑动面或结构开裂趋势。

(二) 水工建筑物结构健康监测

水工建筑物结构损伤的智能诊断依赖于声学信号与三维形态

的协同分析。声发射监测装置通过布置在闸门支撑梁、隧洞衬砌等关键部位的压电传感器，捕获材料内部微裂纹扩展释放的弹性波信号^[2]。波形特征提取算法可区分混凝土碳化剥落、钢筋锈蚀膨胀等不同损伤模式对应的声发射事件聚类特征，据此评估结构剩余承载能力。对于外观形态复杂的输水渡槽或溢洪道，三维激光扫描系统通过发射脉冲激光并接收反射信号，构建毫米级精度的表面点云模型。对比历次扫描数据生成形变差异热力图，可量化混凝土表面裂缝的宽度扩展与走向演变趋势。当检测到闸门轨道螺栓松动导致的异常振动时，无线加速度传感器组网将振动频谱传输至诊断平台，通过匹配历史故障数据库识别螺栓预紧力不足或金属疲劳等失效模式，为制定靶向维修方案提供依据。

（三）机电设备运行状态监测

水利枢纽中发电机、闸门启闭机等机电设备的智能监控聚焦于振动与热力学参数的融合诊断。永磁同步发电机的转子偏心故障可通过部署在轴承座的振动传感器检测，其采集的时域信号经快速傅里叶变换后，在频域中呈现特定倍频谐波分量，结合轴向窜动量监测可定位磁极对中偏差。高压断路器触头磨损状态评估采用紫外光谱检测技术，通过分析电弧光中的特征波长强度变化，间接推算触头材料烧蚀程度。液压启闭机活塞杆的密封失效预警依托于压力脉动监测，当油压波动幅值超出设定阈值时，流体动力学仿真模型可逆向推演密封圈磨损导致的泄漏路径^[3]。红外热像仪对变压器绕组进行非接触式温度场扫描，基于热传导方程构建的温升预测模型可识别局部过热区域，结合油色谱分析数据判定绝缘老化或接触电阻异常等潜在缺陷。

二、水利水电设施健康诊断中智能监测技术应用面临的挑战

（一）技术选型挑战

水利水电设施多样化的运行环境与功能需求导致智能监测技术适配性矛盾凸显。高坝水库与低水头闸站对形变监测精度的差异化要求，使单一技术方案难以满足全域覆盖。例如分布式光纤传感技术虽能精准捕捉坝体渗流路径，但在强电磁干扰的水电站厂房中易产生信号失真；北斗定位系统适用于露天坝面的毫米级位移监测，却无法穿透混凝土结构获取内部应力场数据^[4]。多源异构传感器的数据融合难题进一步加剧技术选型困境，振动、温度、湿度等参数的时间分辨率与空间尺度差异，使统一分析平台面临时间戳对齐与空间插值算法双重考验。技术标准的碎片化现状迫使工程团队在选型时需权衡国际电工委员会规范、水利行业标准与企业内部协议间的兼容性，跨系统集成时频繁出现通信协议冲突与数据格式转换损耗。

（二）监测设备维护挑战

极端环境下的设备稳定性缺陷成为制约监测系统可靠性的关键瓶颈。高湿度工况诱发传感器金属部件电化学腐蚀，导致振弦式应力计的钢弦张力衰减与频率漂移；强震动环境使光纤光栅解调仪的精密光学元件发生机械松动，降低波长解算精度。野外部署设备的能源供应矛盾突出，太阳能供电系统在连续阴雨天气下

储能不足，迫使部分节点进入休眠状态并产生数据断点^[5]。设备标定与校准的工程复杂性同样不容忽视，渗压计需定期进行水压舱原位比对标定，而泄洪期的高速水流冲击使传感器拆卸返厂维护的作业窗口期极度压缩。不同厂商设备的量程范围与灵敏度差异导致跨系统数据可比性下降，例如某型号超声波流量计在含沙量超标工况下的测量误差会干扰整个输水系统的流量平衡分析。

（三）复合专业人才匮乏

水利工程与信息技术的学科壁垒导致具备跨界能力的专业人才供给严重不足。传统水利工程师缺乏机器学习算法调优经验，难以构建渗流监测数据的特征提取模型；计算机专业人员虽精通数据分析却对混凝土徐变机理、金属结构疲劳损伤阈值等专业概念认知模糊，导致开发的诊断系统出现误判^[6]。高校学科设置尚未形成深度融合的培养体系，水利类专业课程鲜少涉及边缘计算架构设计，电子信息工程教学亦未涵盖水工建筑物特殊监测需求。企业现有技术团队的知识更新速度滞后于技术迭代周期，部分运维人员仍依赖经验判断设备故障，无法有效解析振动频谱图中的早期故障特征频率。产学研协同机制的缺位进一步加剧人才能力断层，科研院所的算法研究成果常因缺乏工程验证场景而难以转化为实用化诊断工具。

三、应对水利水电设施健康诊断中智能监测技术应用挑战的策略

（一）依据实际情况科学选型监测技术

水利水电设施的差异性运行场景要求技术选型建立动态适配机制。针对高坝、电站厂房与输水隧洞等不同功能单元，需构建包含环境干扰强度、监测精度阈值与设备耐受性指标的三维评估框架。例如露天坝面优先部署抗电磁干扰的振弦式传感器，地下厂房则选用光纤光栅技术规避强磁场影响^[7]。跨系统兼容性问题可通过建立统一的数据通信协议栈解决，定义基于时间序列的数据封装格式，确保振动、温度、渗流等多源异构数据的时间戳同步与空间坐标映射。技术选型委员会应整合水利工程、传感器技术与数据分析领域专家，针对具体项目编制技术适配矩阵表，明确高寒地区优先采用宽温域设备、多泥沙流域禁用光学测量等约束条件^[8]。边缘计算节点的层级化部署能够缓解数据传输压力，在闸门启闭机等局部关键区域配置具备特征提取功能的智能终端，降低云端平台的算力负载。

（二）完善监测设备维护管理体系

设备全生命周期管理需建立预防性维护与故障预测双轮驱动机制。制定涵盖巡检周期、标定规程与故障代码库的标准化维护手册，例如渗压计每汛期后需进行原位水压标定，光纤解调仪每季度清洁光学接口^[9]。开发设备健康状态评估模型，通过分析历史维护记录与实时运行数据，预测传感器寿命衰减曲线并提前触发备件采购流程。极端环境下的维护难题可通过模块化设计改善，例如将太阳能供电系统与监测节点分离部署，便于阴雨天气快速更换储能模块^[10]。建立厂商技术协同平台，推动不同品牌设备的数据接口标准化，消除量程与灵敏度差异导致的分析误差。

针对野外设备维护困难区域，组建配备移动检测装备的专项运维小组，在非泄洪期集中开展传感器校准与腐蚀防护处理，同步更新设备固件以修复已知系统漏洞。

（三）加强复合型专业人才培养管理

破解人才能力断层需重构高校培养体系与企业培训机制。在水利工程专业增设智能传感器原理、数据挖掘算法等核心课程，电子信息类专业开设水工建筑物结构诊断专题实训，通过跨学科毕业设计促进知识融合。企业联合科研院所建立工程实训基地，设计涵盖坝体渗流监测系统部署、振动频谱故障诊断等场景的仿真训练项目。实施技术岗位双师制，安排水利工程师与数据分析师结对工作，通过联合调试监测系统实现经验转移。建立专业技术资格认证体系，设置智能监测系统规划师、数据分析工程师等新职业认证，明确算法优化能力与工程问题转化能力的考核标

准。企业内部搭建知识共享平台，定期邀请领域专家解读最新技术标准，组织运维团队开展振动信号时频分析、边缘计算架构设计等专题技能轮训，确保人才能力与技术迭代同步进化。

四、结语

综上所述，智能监测技术通过重构水利水电设施健康诊断的数据感知与分析范式，显著提升了风险预警的时效性与决策科学性。面对复杂工况下技术适配性不足、极端环境设备耐受性有限以及人才结构单一等深层矛盾，需从技术标准体系重构、设备环境适应性研发、交叉学科教育模式创新三个维度协同突破。未来随着数字孪生模型迭代优化与自主诊断算法持续升级，设施健康管理将逐步实现从“被动响应”到“主动防御”的范式转移。

参考文献

[1] 江涛. 水利水电工程施工中的信息化技术应用与优化管理研究 [J]. 治淮, 2024, (01): 38-39.
[2] 李珊珊. 水利工程中的智能监测与控制技术研究 [J]. 水上安全, 2024, (15): 37-39.
[3] 忠惠. 智能化在水利水电工程管理中的应用 [J]. 大众标准化, 2024, (16): 170-172.
[4] 肖同霞. 水利水电工程施工中的质量控制方法和技术创新 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (20): 202-204.
[5] 张玮, 薛野, 唐振. 智慧水利阶段的水利水电工程信息化建设研究 [J]. 水利信息化, 2024, (02): 63-68.
[6] 李庆斌, 马睿, 胡昱, 等. 大坝智能建造研究进展与发展趋势 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2022, 62(08): 1252-1269.
[7] 王伟刚. 水利水电工程复杂环境下的安全监测与预警策略分析 [J]. 中国高科技, 2024, (24): 103-105.
[8] 盛金保, 向衍, 杨德玮, 等. 水库大坝安全诊断与智慧管理关键技术与应用 [J]. 岩土工程学报, 2022, 44(07): 1351-1366.
[9] 卢正超, 杨宁, 韦耀国, 等. 水工程安全监测智能化面临的挑战、目标与实现路径 [J]. 水利水电工程学报, 2021, (06): 103-110.
[10] 杨晓波, 黄莹华. 浅析智能技术于水利水电自动化中的应用策略 [J]. 水上安全, 2023, (11): 56-58.