

智能化监测在水电站水工建筑物运维中的应用

李龙翠¹ 潘美文²

1. 浙江华东工程咨询有限公司 浙江 杭州 311122

2. 云南雄骋项目管理咨询有限公司 云南 昆明 650106

摘要: 水工建筑物是水电站安全运行的核心载体,传统人工巡检运维模式存在监测滞后、精度不足、隐患预判能力薄弱等缺陷。本文系统阐述物联网、大数据、人工智能等智能化监测核心技术,探究其在大坝、泄洪设施、厂房边坡等水工建筑物运维中的实际应用。针对当前设备稳定性差、数据融合度低、运维体系不完善等问题,提出针对性优化对策,以期提升水电站运维精细化水平,保障水工结构长期安全稳定运行。

关键词: 智能化监测; 水电站; 水工建筑物运维; 应用

引言: 水电作为清洁可再生能源,在电力能源体系中占据重要地位,水工建筑物的运行状态直接决定水电站整体运营安全。现阶段传统运维模式难以适配现代化水电站全天候、高精度、智能化的运维需求,极易诱发各类结构安全隐患。为此,智能化监测技术逐步替代传统运维方式。本文围绕智能化监测技术体系与实际应用场景展开分析,总结现存短板并制定优化策略,为水电工程智能运维升级提供实践参考。

1 水电站水工建筑物运维与智能化监测核心技术概述

1.1 水电站水工建筑物运维核心内容

(1) 核心运维对象:水电站水工建筑物核心运维对象包含大坝、溢洪道、泄洪洞、发电厂房、边坡支护结构等关键设施,是水电站完成蓄水、泄洪、发电等核心功能的基础载体,其运行状态直接决定水电站整体安全与稳定运行水平。(2) 主要运维需求:运维工作核心涵盖结构变形、渗流渗压、裂缝病害、沉降位移、冲刷破损等多维度监测,核心目标是全方位排查建筑物潜在安全隐患,实时把控结构运行状态,持续保障水工建筑物的整体结构稳定性与运行可靠性。(3) 传统运维模式弊端:传统运维以人工巡检为主,存在明显短板。人工巡检效率偏低、主观判断性强,定期监测模式导致数据连续性不足,无法实现24小时全天候实时监控,安全隐患发现存在严重滞后性,难以精准预判建筑物结构长期劣化规律,无法满足现代化水电站安全运维需求^[1]。

1.2 智能化监测核心技术体系

(1) 物联网感知技术:依托高精度传感器、GNSS定位设备、红外监测设备、高清摄像设备等智能终端,全方位布设监测点位,实现水工建筑物各类运行

参数的自动化、实时化、全域化采集,为后续数据分析提供精准原始数据。(2) 大数据与云计算技术:针对海量监测数据开展存储、清洗、分类、融合等系统化处理,搭建云端一体化数据管理平台,实现数据集中管控、实时调取与动态分析,为水工结构安全智能研判提供坚实的数据支撑。(3) 人工智能分析技术:基于机器学习、图像识别及专业算法模型,对监测数据、现场影像数据进行智能解析,自动识别裂缝、变形、渗漏、冲刷等各类病害,完成风险分级评估与智能预警,提升隐患处置精准度。

1.3 智能化监测相较于传统监测的应用优势

(1) 监测效率优势:打破人工巡检的时间与空间限制,实现全天候无人值守自动监测,大幅提升监测频次与全域覆盖范围,有效弥补传统监测的盲区与短板。(2) 数据精度优势:智能监测设备采集的数据精度高、连续性强、稳定性好,可彻底规避人工操作失误、主观判断偏差等问题,保障监测数据的真实性与有效性。(3) 运维预判优势:通过算法模型深度挖掘数据变化规律,精准预判水工建筑物结构劣化趋势,推动运维模式从传统“事后处置”,向“事前预警、事中管控”的智能化、主动化模式转型。

2 智能化监测在水电站水工建筑物运维中的具体应用

2.1 在大坝运维中的应用

(1) 大坝变形智能监测:大坝作为水电站核心挡水结构,变形状态是判定结构安全的核心指标。系统依托GNSS监测系统、高精度倾角传感器,在坝体关键点位布设监测终端,全天候实时采集大坝水平位移、垂直沉降、倾斜变形等核心数据。通过云端数据分析模型,实

时计算变形速率、累计变形量,精准研判大坝整体及局部变形发展趋势,可快速捕捉微小异常形变,及时预警结构隐患,保障大坝整体受力稳定。(2)大坝渗流智能监测:渗流问题是诱发大坝渗漏、塌陷的主要隐患。通过在坝体、坝基及两岸山体布设渗压计、渗流量传感器,构建全域渗流监测网络,不间断监测渗流压力、渗流量的动态变化。系统可智能甄别正常渗流与异常渗漏状态,精准识别隐蔽性渗漏隐患,预判渗流冲刷、渗透破坏风险,为大坝防渗加固、隐患治理提供数据支撑,有效保障大坝防渗体系的完整性与稳定性^[2]。(3)大坝表面病害智能识别:传统人工排查坝体表面病害存在盲区大、效率低等问题。依托高清视频监控、AI图像识别技术,对大坝表面进行常态化扫描监测,可自动精准识别坝体裂缝、表层剥落、冲刷破损、风化脱落等各类病害。同时自动定位病害位置、测算病害尺寸,持续跟踪病害发展变化趋势,形成完整病害数据台账,为大坝精细化维修养护、病害综合治理提供精准、客观的依据。

2.2 在泄洪建筑物运维中的应用

(1)溢洪道结构监测:溢洪道是水电站汛期泄洪的核心设施,泄洪时水流冲击易引发结构受力异常。通过在溢洪道闸室、底板、边墙等关键部位布设振动传感器、应变传感器,实时采集结构应力、振动频率、振幅等数据,动态分析泄洪全过程中结构的受力状态与稳定性能。可有效预判结构疲劳损伤、共振隐患,规避结构开裂、破损等安全风险,保障溢洪道高效、安全泄洪。(2)泄洪洞冲刷磨损监测:泄洪洞长期承受高速水流冲刷、空蚀冲击,内壁易出现磨损、破损问题。利用三维激光扫描、红外监测设备,对泄洪洞内壁进行全方位动态监测,精准捕捉内壁冲刷、空蚀、剥落、磨损等病害,智能研判破损范围与严重程度。基于长期监测数据总结损耗规律,科学制定泄洪洞养护、修复周期,提升泄洪洞运维的科学性与针对性。(3)泄洪设备联动监测:结合智能控制系统,构建泄洪设备一体化监测体系,对泄洪闸门启闭状态、运行速度、开合精度、设备损耗等参数进行实时采集与分析。实现泄洪设备运行状态、建筑物结构状态的联动监测,及时发现设备卡滞、老化及结构受力异常问题,全面保障汛期泄洪建筑物及配套设备稳定运行,筑牢水电站防汛安全防线^[3]。

2.3 在厂房及边坡建筑物运维中的应用

(1)发电厂房结构监测:发电厂房承载各类发电设备,结构稳定性直接影响发电效率与设备安全。系统针对厂房墙体、梁柱、楼板等核心结构,实时监测沉降、变形、裂缝发展情况,同时联动采集发电设备运行振

动数据。通过数据融合分析,研判厂房结构形变与设备运行的适配性,规避结构变形、墙体开裂影响设备正常运行的问题,保障厂房结构与发电设备协同稳定工作。(2)厂区内边坡智能监测:厂区内边坡易受降雨、水流冲刷影响,存在滑坡、坍塌隐患。通过布设位移传感器、雨量监测设备、土体含水率监测终端,构建边坡立体化监测体系,联动监测边坡位移形变、降雨量、土体含水率等关键指标。依托智能算法预判边坡失稳风险,实现隐患提前预警、动态管控,有效防范边坡地质灾害,保障厂区内整体运行安全。(3)附属设施运维监测:针对水电站排水沟、防护栏、检修通道、导流设施等附属建筑物,开展常态化智能监测。实时排查设施破损、堵塞、老化等问题,及时处置微小隐患,保障附属设施功能完好,完善水电站整体运维保障体系,提升水工建筑物整体运行的完整性与安全性。

2.4 智能化监测运维平台的整体应用

(1)数据一体化管控:平台整合大坝、泄洪设施、厂房、边坡等所有水工建筑物的监测数据,打破传统运维数据分散、碎片化、不互通的壁垒。实现多维度监测数据的融合汇总、统一展示、分类存储与溯源查询,构建完整的水电站运维数据库,为整体安全研判、运维决策提供全面的数据支撑。(2)智能预警与分级处置:平台预设多级安全风险阈值,对实时监测数据进行动态比对分析。针对轻微、一般、重大等不同等级的结构隐患,自动触发分级预警,同步推送对应的隐患处置方案与整改建议,改变传统隐患处置滞后的问题,大幅提升隐患排查、整改处置的效率与规范性^[4]。(3)运维台账智能化生成:系统可自动汇总统计日常监测数据、结构病害信息、隐患处置记录、设备运维情况等内容,智能生成标准化运维报告与电子台账。实现水电站水工建筑物运维工作的数字化、规范化、可追溯管理,替代传统人工台账记录模式,降低人工工作量,提升运维管理精细化水平。

3 智能化监测在水电站水工建筑物运维中应用现存问题与优化策略

3.1 智能化监测技术应用现存问题

(1)设备适配与稳定性不足:水电站内部高湿、高压、水流冲击、电磁干扰等复杂工况环境,对监测设备性能要求极高。目前部分通用型监测传感器环境适应性较差,长期运行易出现数据漂移、失真、设备故障等问题。同时,多数老旧水电站建成时间久、结构布局固定,智能化监测设备改造适配难度大,设备兼容性不足,难以实现全面智能化监测覆盖。(2)数据融合与

分析能力有限：现阶段水电站各类监测系统多独立运行，数据分散存储，存在严重的数据壁垒，跨系统数据共享、联动融合程度低。此外，通用智能算法模型贴合水工建筑物运维场景的针对性不足，对隐蔽性渗漏、复合型结构变形等复杂病害的识别精度较低，难以精准预判结构长期劣化趋势。（3）运维管理体系不完善：多数水电站存在“重建设、轻运维”的普遍问题，智能化监测设备安装完成后缺乏常态化管护机制。同时行业专业人才缺口较大，现有运维人员传统运维经验充足，但智能化设备操作、系统调试、故障处置能力薄弱，设备校准、系统维护不及时，大幅降低监测数据准确性与系统稳定性。（4）建设与运维成本较高：智能化监测体系建设需投入大量高精度传感设备、云端数据平台及配套设施，初期建设成本高昂。同时后期系统迭代升级、设备定期更换、日常运维养护需持续投入资金，整体运维成本居高不下，导致多数中小型水电站难以全面落地智能化监测改造。

3.2 技术层面优化策略

（1）优化监测设备选型与布设：针对水电站复杂特殊的运行工况，优先选用防水、防震、抗电磁干扰、耐腐蚀的工业级高精度监测设备，从源头提升设备环境适应性和运行稳定性。结合大坝、泄洪洞、厂房、边坡等不同水工建筑物的结构特征、受力特点及病害高发区域，科学规划设备布设点位，规避监测盲区，优化监测布局，保障全域、精准数据采集。（2）升级智能分析算法模型：立足水工建筑物运行规律、水力特性及病害发展特征，针对性优化 AI 图像识别、变形分析、风险预判等核心算法。结合海量历史监测数据训练专属模型，强化多源监测数据融合分析能力，重点提升对早期微小隐患、隐蔽性渗漏、复合型结构病害的识别精度，实现隐患早发现、早研判、早预警^[5]。（3）搭建一体化数据共享平台：整合变形监测、渗流监测、病害识别、设备运行监测等各类独立系统数据，打破数据孤岛与信息壁垒。构建统一标准化的云端数据共享平台，实现多源数据集中存储、智能融合、实时共享、快速调取与联动分析，规范数据标准，提升监测数据利用率，为运维决策、风险研判提供全面、精准的数据支撑。

3.3 管理与运维层面优化策略

（1）完善智能化运维管理制度：建立标准化、常态化的智能化运维管理体系，制定设备定期校准、系统定期升级、数据定期核查、隐患定期排查的闭环管理制度。规范设备管护、系统运维、数据审核、预警处置等全流程工作标准，杜绝重建设、轻运维问题，保障智能化监测系统长期稳定、高效运行。（2）强化专业人才培养：针对性开展智能化监测设备操作、算法原理、平台运维、故障排查与应急处置等专项培训，提升在岗人员智能化运维能力。同时积极引进水利智能化运维专业技术人才，组建专业化运维团队，搭建人才培养与考核机制，全面夯实智能化运维技术保障基础。（3）推行分级化运维模式：结合水电站装机规模、建筑物重要等级、运行工况差异，推行差异化、分级化的智能化建设与运维方案。针对中小型水电站简化非核心监测模块，优化设备配置，降低初期建设与后期运维成本，贴合不同层级水电站的运维需求，推动智能化监测技术普及落地。

结束语

智能化监测技术彻底革新了水电站水工建筑物传统运维模式，实现运维工作从事后处置向事前预警的主动式转型，有效提升了监测精度与隐患处置效率。但目前该技术应用仍存在设备适配差、数据利用率低、运维体系不完善等现实问题。未来需持续优化智能设备与算法模型，完善运维管理制度与人才体系，降低运维成本，推动智能化监测技术全面普及，助力水电站水工运维高质量、数字化发展。

参考文献

- [1] 杜德进. 水电站大坝运行安全智能监控技术综述[J]. 大坝与安全, 2025, 13(6): 114-118.
- [2] 李扬涛. 深水大坝缺陷鲁棒实时检测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(4): 684-698.
- [3] 李文杰, 王利飞. 基于在线监控系统的泸定水电站水工管理探析和应用[J]. 四川水力发电, 2025, 44(1): 112-115.
- [4] 钟雯, 李炎隆. 考虑多点监测数据的混凝土坝智能预警分析方法[J]. 人民黄河, 2025, 47(7): 150-155.
- [5] 黄铭. 多源数据融合在水利工程安全监测中的应用研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 135-140.