

Application of Automatic Monitoring Technology in Safety Operation and Maintenance of Hydraulic Engineering

Nan Zhu

Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, 224100, China

Abstract

With the continuous expansion of China's water conservancy projects, operational safety management and long-term stability have become increasingly critical. Traditional manual inspection methods, characterized by lengthy cycles, low accuracy, and slow response, struggle to meet modern management requirements. Automated monitoring technology, leveraging sensor networks, data acquisition, and intelligent analysis platforms, enables real-time perception and dynamic evaluation of project operations, significantly enhancing early warning and decision-making efficiency. This paper explores the application of such technology in dam, embankment, and hydrological monitoring through its system architecture and principles. It analyzes the integration mechanism between monitoring data processing and intelligent early warning models, while proposing optimization directions for information integration and unmanned operation and maintenance. The study demonstrates that this technology holds significant value in ensuring water conservancy project safety and advancing smart water management initiatives.

Keywords

automated monitoring; hydraulic engineering; safety operation and maintenance; intelligent early warning; data fusion

自动化监测技术在水利工程安全运维中的应用研究

朱楠

香港城市大学工学院, 中国·香港 224100

摘要

随着中国水利工程规模的不断扩大,运行期的安全管理与长期稳定性问题愈加突出。传统人工巡检方式存在周期长、精度低、响应慢等弊端,难以适应现代化管理需求。自动化监测技术依托传感器网络、数据采集与智能分析平台,实现了工程运行状态的实时感知与动态评估,显著提升了预警与决策效率。本文从系统构成与原理入手,探讨其在大坝、堤防及水文水情监测中的应用,分析监测数据处理与智能预警模型的融合机制,并提出信息集成与无人化运维的优化方向。研究表明,该技术在保障水利工程安全与推动智慧水利建设方面具有重要价值。

关键词

自动化监测; 水利工程; 安全运维; 智能预警; 数据融合

1 引言

水利工程是国家防洪减灾、供水灌溉与生态保护的关键基础设施,其运行安全直接关系到国计民生。随着工程规模增大、结构复杂度提高,传统以人工巡检和定期检测为主的监测手段已难以支撑精细化管理的需求。近年来,自动化监测技术的迅速发展为水利工程运维提供了全新的技术支撑。通过传感器、遥测终端和通信网络构建的信息化监测体系,可实现对结构变形、渗流压力、水位流量等多要素的连续观测与分析,使安全隐患得以及时发现与响应。本文围绕自动化监测技术的系统构成与运行机制,结合工程实例分析其在大坝、堤防及水文监测中的应用效果,并进一步探讨智

能化发展趋势与实践路径,以期为中国水利工程的智慧化运维提供参考。

2 自动化监测技术体系构成与运行原理

2.1 监测系统总体架构

自动化监测体系由感知层、传输层与分析决策层三部分组成。感知层负责对水工结构与环境参数的实时获取,采用高精度传感器测量应力、位移、渗压、温度、振动及水位等信息,部分系统还集成视频监控与遥感影像数据。传输层通过有线或无线通信网络(如4G、LoRa、光纤或卫星通信)实现数据的高速传输与集中管理。分析决策层基于大数据分析建模算法,对采集信息进行融合处理、特征提取和风险评估,并以可视化界面形式呈现运行状态,实现远程监控与自动报警。该体系具备实时性强、数据连续、响应快速的特点,使传统的周期性检测转变为连续动态监测,为安全管理

【作者简介】朱楠(2002-),男,中国江苏大丰人,在读硕士,从事水利水电自动化与智能化研究。

提供了更坚实的数据支撑。

2.2 传感器与数据采集技术

传感器技术是自动化监测的核心，其性能直接决定了监测数据的准确性与稳定性。常用传感器包括应变计、渗压计、倾斜仪、加速度计、光纤光栅传感器及 GNSS 位移监测设备。光纤传感技术因抗电磁干扰、耐腐蚀性强、适应性强等优势，被广泛应用于大坝和堤防结构变形监测。数据采集系统（DAS）通过多通道采集模块实现信号的同步采样与数字化处理，配合远程数据管理单元（RTU）可自动完成数据筛选、存储与上传。在复杂环境下，为确保监测数据的稳定性，系统通常设置冗余通道与断点续传机制，并配合太阳能供电与低功耗设计，以保证长期连续运行。

2.3 数据传输与信息安全保障

自动化监测系统对数据传输的可靠性要求极高。工程现场环境复杂，通信链路容易受地形遮挡或极端气候影响，因此多通道融合传输技术成为保障信息安全的关键手段。系统通过多路径选择和自动重发机制提升通信成功率，并采用加密算法和身份认证机制防止数据被篡改或泄露。近年来，基于 5G 和北斗卫星通信的融合技术逐步应用于大型水利枢纽监测，显著提高了数据传输速率与覆盖范围，为跨区域、远程化运维提供了条件。同时，监测中心通过部署云平台与分布式数据库，实现数据的高效存储与调用，为后续分析建模奠定基础。

3 自动化监测在大坝安全管理中的应用

3.1 大坝结构变形监测

大坝的结构变形监测是安全管理体系的基础环节，其目的是实时掌握坝体及坝基的应力应变演化规律，评估结构的稳定性与耐久性。自动化变形监测系统通过布设高精度位移计、倾斜仪和光纤光栅传感器，实现对坝体三维变形的连续观测。光纤光栅技术以其高灵敏度和抗干扰性能，可精确捕捉微小位移变化，并结合温度补偿模型修正外界环境影响，使数据更加稳定可靠。监测系统通过物联网通信与数据采集终端（RTU）实现实时传输，管理平台可依据模型分析结果自动生成风险评估报告。当数据偏离正常区间时，系统立即触发报警并推送信息至监控中心。实践表明，自动化监测可显著提升坝体变形识别效率，提前发现结构异常，有效避免因人工检测滞后导致的安全风险，为大坝运行提供持续性的技术保障。

3.2 渗流与压力监测

渗流与压力变化直接影响大坝的整体稳定性，是评估防渗系统可靠性的重要依据。自动化渗压监测系统通过在坝体及坝基关键部位布设孔隙水压力传感器、渗流流量计和温度计，实现对内部渗透压力场的高频采样。系统通过数据融合算法建立渗流压力与库水位、降雨量等多变量的关联模型，对坝体渗流通道的发展趋势进行动态跟踪。基于时间序

列分析的趋势识别模块，可自动判断异常渗流区段并生成空间分布图，为维修加固提供定量依据。工程实践中，某大型水库在监测系统运行后，成功识别下游渗流量异常增长的区域，及时采取帷幕灌浆加固措施，避免了结构破坏风险。该系统的应用表明，自动化渗流监测能显著提高风险预警的准确度与响应速度，对大坝长期安全运行具有重要意义。

3.3 动力响应与地震监测

地震与动力荷载对大坝安全构成重大威胁，其瞬态响应特征是结构安全评估的关键参数。为此，自动化监测系统在坝体关键部位布设高频加速度计、动态应变计与地震波记录仪，实时捕捉振动加速度、频谱分布及应变时程信号。系统结合有限元分析模型，可在地震发生后快速计算坝体受力分布与动态响应系数，判定结构安全等级。数据经无线传输至监控中心后，通过自动比对历史地震响应曲线，识别潜在损伤位置及程度。该系统在地震活跃区的大坝工程中表现突出，能够在震后数分钟内生成安全评估报告，为抢险决策提供科学依据。动力响应监测的引入，使大坝安全管理由被动检测转向主动防御，实现了从“事后评估”到“实时诊断”的重大转变，极大增强了抗震防灾能力与运行韧性。

4 自动化监测在堤防与水文水情管理中的应用

4.1 堤防变形与渗漏监测

堤防作为防洪体系中的关键结构，其安全状况直接关系到区域防灾体系的稳定性。受地形地质、水位波动及气候变化等多重因素影响，堤体变形和渗漏问题具有隐蔽性与突发性。自动化监测系统通过布设地下水水位计、渗压计、倾斜仪及光纤光栅传感器，实现对堤体内部应力场、孔隙水压力及变形特征的长期观测。数据经无线传输汇聚至监控平台后，系统通过三维可视化与时序分析技术动态展示堤防健康状况，并对异常数据进行智能识别。若监测结果出现渗流量增大或位移突变，系统将自动触发预警机制并推送信息至管理中心，实现隐患早发现与精准定位。实践表明，该技术使堤防监测由“事后补救”转向“事前防控”，显著提升了防汛指挥部门的应急响应效率与防灾决策能力。

4.2 水文水情自动化监测

水文要素的连续监测是防洪调度与水资源管理的基础。自动化水文监测系统在河道、水库及闸站布设雷达水位计、超声波流量计与自动雨量站，结合北斗定位与 4G/5G 通信，实现实时采集与远程传输。数据进入水文信息平台后，通过多维建模分析可形成流域水文动态图谱，为调度部门提供即时的流量、水位及降雨分布信息。系统利用人工智能算法对历史与实时数据进行趋势预测，能够提前识别洪峰形成与传播过程，为闸门调度及泄洪预案提供决策依据。在应急管理过程中，该监测体系具备无人值守、自动巡检与断点续传等功能，可在极端气候条件下保持连续运行，大幅提高了防汛监测的可靠性与预报的时效性。

4.3 水质与生态监测

生态文明建设对水利工程运维提出了从“工程安全”向“生态安全”并重的新要求。水质自动化监测系统利用多参数传感器对水体溶解氧、pH值、浊度、氨氮、叶绿素等关键指标进行实时检测，并通过无线网络传输至云端数据库。结合遥感影像和无人机巡测，可形成流域水质空间分布模型，动态反映水体生态变化。数据分析平台采用机器学习算法识别污染源扩散规律，对突发性水质异常进行预警与溯源。部分流域已部署无人船巡测系统，集成采样、测流与视频模块，实现河湖环境的全天候智能监管。该监测体系为流域生态修复、污染治理与水功能区管理提供了精确的数据支撑，推动了水利工程从单一防洪体系向综合生态调控体系的转型升级。

5 智能化监测数据分析与运维决策优化

5.1 监测数据的融合与建模

在水利工程的自动化监测体系中，多源异构数据的高效融合是实现智能分析与科学决策的基础。由于监测对象涉及坝体、堤防、闸门、水文及气象等多领域，数据在时间分辨率、空间尺度与采样频率上存在差异，若缺乏系统融合将导致分析偏差。为解决此问题，研究者采用基于时间序列的同步对齐技术与多维特征融合算法，将不同来源的数据映射到统一的时间空间框架中。通过灰色关联分析、主成分分析及深度神经网络模型，可揭示结构响应与环境变化间的非线性耦合关系，建立动态健康评估模型，实现对异常趋势的提前识别与风险量化评估。这种基于模型的融合方式不仅提高了监测数据的利用率，还为后续预警决策提供了数学依据，推动了监测体系向智能化方向演进。

5.2 智能预警与决策支持系统

自动化监测系统的核心价值在于将数据转化为决策依据，智能预警技术正是这一过程的关键环节。当前预警系统通过引入多级阈值设定、自学习算法与模糊逻辑分析，实现对结构变形、渗流压力及水文异常的实时识别。系统可依据数据波动特征自动调整阈值参数，使预警结果更具适应性与灵敏性。在决策支持层面，监测数据与水利调度、气象预报、地理信息系统相融合，形成可视化的决策平台，为管理者提供科学的响应策略与处置建议。例如，在洪水高峰期，系统可通过AI模型预测来水过程，自动计算最优泄洪方案，实现对流域内多闸门的协同控制。智能预警体系的建立显著提

升了防灾减灾效率，为水利工程的安全运维提供了可靠技术支撑。

5.3 无人化与远程运维模式

随着物联网、人工智能与机器人技术的快速融合，水利工程运维正逐步迈向无人化与远程化阶段。基于无人机的航测与红外巡检技术可在恶劣气候和复杂地形条件下执行高精度检测任务，无人船装备多参数传感模块可实现水文要素的动态测流与水质采样。智能巡检机器人具备自主导航与障碍识别功能，能够替代人工完成坝体巡查、设备检测等高风险作业。运维管理端通过云平台实现多站点监控与任务调度，结合边缘计算实现数据本地化处理，提升系统响应速度与稳定性。无人化运维的实施不仅显著降低了人工成本与安全风险，还使监测工作实现全天候、连续化运行，为建设智慧水利和构建自适应安全监管体系提供了可持续发展路径。

6 结语

自动化监测技术的推广应用正推动水利工程运维模式从经验驱动向数据驱动转变。通过传感器网络、通信技术与智能分析的有机结合，监测体系实现了从单点观测到系统性认知的跃升，为工程安全提供了可量化、可预测的科学依据。当前，部分地区仍存在设备标准不统一、数据管理体系分散、智能算法适配性不足等问题，需要在制度、技术与管理层面进一步完善。未来的研究应重点关注多源异构数据的深度融合、监测模型的自适应优化以及无人化运维体系的标准化建设。自动化监测不仅是技术革新，更是水利工程安全治理理念的转型，其持续发展将为中国水利事业的数字化、智能化与可持续发展奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 翟自宏. 水利工程智能运维“云—网—端”全链路监控关键技术研究. 甘肃省, 甘肃省引洮工程水资源利用中心, 2021-12-05.
- [2] 张绍池, 安芳芳. 水利工程大坝的安全监测技术研究[J]. 张江科技评论, 2025, (07): 108-110.
- [3] 杨珊丽. 水利工程安全风险分析及信息化技术应用研究[J]. 水上安全, 2025, (07): 142-144.
- [4] 刘畅, 朱小龙. 基于数字孪生技术的水利工程异常诊断与运维优化策略[J]. 科技视界, 2025, 15(27): 86-88.
- [5] 李焯帆. 提高水利工程机电设备运维管理水平方法的探讨[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(二). 河南水投运营管理有限公司, 2025: 312-313.