

水利工程自动化监测技术应用

王金鹏

河南省水利第一工程局集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 在水利工程建设与管理需求日益精细化和智能化的当下,保障工程安全稳定运行成为关键任务。本文系统阐述水利工程自动化监测核心技术体系,涵盖感知层、传输层及数据处理与应用层关键技术及精度参数。分析该技术在水库、水闸与泵站、堤防与河道、灌区等工程的应用维度,探讨系统构建运行支撑要点。研究技术融合创新、应用效能提升及适配性优化方向,为水利工程安全监测、调度决策及风险防控提供技术参考,助力工程运维智能化与高效化发展。

关键词: 水利工程;自动化监测技术;核心应用;系统构建;发展趋势

引言:水利工程关乎国计民生,传统监测方式难以满足现代需求。自动化监测技术凭借精准、实时、全面等优势,已然成为保障工程安全运行的关键手段。通过构建多层次技术体系与开展多维度应用,为水利工程提供全生命周期健康管理,对防洪减灾、水资源合理利用等具有重要意义。

1 水利工程自动化监测核心技术体系

1.1 感知层技术

感知层作为水利工程自动化监测的基础环节,承担着数据采集与初步转换的关键任务。水文参数监测技术通过部署精度达0.1毫米的高精度水位计、测量误差小于0.01米/秒的流速仪等设备,实时捕捉水位高度、水流速度等动态信息,为水量调度与防洪减灾提供基础数据支撑^[1]。结构变形监测技术依托全球导航卫星系统定位精度达1毫米、激光测距仪测量精度达0.1毫米及静力水准仪精度达0.01毫米等工具,对大坝坝体位移、沉降量及接缝开合度进行毫米级精度跟踪,确保结构安全状态可量化评估。渗流渗压监测技术采用振弦式渗压计量程精度达0.1%FS与光纤光栅传感器分辨率达1皮米,通过监测坝基扬压力分布及坝体渗漏路径,揭示隐蔽工程隐患。环境与气象参数监测技术整合测量精度达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 的温湿度传感器、测量误差小于0.2毫米的雨量计及测量精度达0.1米/秒的风速风向仪,构建覆盖工程全域的微气候监测网络,为极端天气预警与施工安全管控提供环境基准。

1.2 传输层技术

传输层构建起感知设备与数据处理中心的信息通道。有线传输技术以光纤通信传输速率达10Gbps与工业以太网传输速率达1000Mbps为核心,通过物理链路保障数据传输的稳定性与抗干扰性,适用于数据量大的固定监测站点。无线传输技术采用LoRa传输距离达15千米、

NB-IoT覆盖半径达10千米等低功耗广域网协议,突破地理限制实现偏远区域设备接入,配合5G网络支持高清视频流传输速率达1Gbps与实时控制指令传输延迟小于1毫秒。混合传输网络构建技术通过有线无线协同组网,形成主备链路冗余机制,当单一传输通道故障时自动切换至备用路径,确保数据传输连续性。这种分层架构设计既兼顾了传输效率,又提升了系统容错能力。

1.3 数据处理与应用层技术

数据处理与应用层实现从原始数据到决策支持的转化。实时数据采集与预处理技术通过边缘计算节点对多源数据进行清洗、校准与异常值剔除,减轻中心服务器处理压力。数据存储与管理技术采用分布式数据库与云存储架构,支持海量历史数据的高效检索与长期保存。数据建模与分析技术运用机器学习算法构建工程状态预测模型,通过特征提取与模式识别提前发现潜在风险。可视化展示技术将复杂数据转化为三维模型、趋势曲线及热力图等直观形式,辅助管理人员快速掌握工程运行态势,为调度决策提供可视化依据。

2 水利工程自动化监测技术的核心应用维度

2.1 水库工程自动化监测应用

水库工程自动化监测聚焦于坝体安全、库区水文及溢洪道运行三大核心领域。坝体安全监测通过分布式传感器网络布设100-500个传感器节点,对混凝土坝的应力应变测量精度达0.1微应变、土石坝的孔隙水压力测量精度达0.1千帕及坝基沉降测量精度达0.1毫米进行动态跟踪,结合数字孪生技术构建虚拟坝体模型,实现结构安全状态的实时推演^[2]。库区水文情势监测依托浮子式水位计测量精度达0.5厘米与声学多普勒流速仪测量精度达0.01米/秒,同步采集水位、流速及水温数据,为水库调度提供精准的水量平衡依据。溢洪道运行状态监测采用

振动传感器测量精度达0.001g与图像识别技术识别准确率达95%，对闸门启闭过程中的结构振动、水流形态进行双重监测，确保泄洪时水流平稳且设备运行可靠。

2.2 水闸与泵站工程自动化监测应用

水闸与泵站工程自动化监测围绕闸室结构、启闭设备及进出水口参数展开。闸室结构监测通过埋设应变计量程达5000微应变与测斜仪测量精度达0.1毫米，捕捉混凝土裂缝发展及基础不均匀沉降，在监测过程中，还能对裂缝的发展趋势进行预测分析，为结构加固提供数据支撑。启闭设备运行状态监测集成编码器分辨率达1弧分与扭矩传感器测量精度达0.1牛米，实时记录闸门开度、启闭速度及驱动力矩，通过阈值设定实现设备异常预警。这些监测数据会存储在云端数据库中，方便后续的查询与分析。进出水口水文参数监测利用压力式水位计测量精度达0.1厘米与电磁流量计测量精度达0.5级，精准测量水位变化及过闸流量，流量数据还能与水库的调度计划进行关联分析，为水量调配与水质保护提供基础数据。

2.3 堤防与河道工程自动化监测应用

堤防与河道工程自动化监测涵盖沉降位移、冲淤变化及渗流安全三方面。堤防沉降与位移监测采用GNSS定位精度达2毫米与静力水准仪精度达0.01毫米组合方案，对堤顶高程变化及水平位移进行毫米级精度监测，并且能根据监测数据生成位移变化曲线图，及时发现潜在滑坡风险。河道断面冲淤变化监测通过多波束测深仪测深精度达0.1米与无人机航测技术地面分辨率达0.05米，定期扫描河道地形，量化冲刷深度与淤积厚度，为河道整治提供三维地形模型。三维地形模型还能与历史数据进行对比，直观展示河道的变化情况。堤防渗流安全监测部署振弦式渗压计量程精度达0.1%FS与分布式光纤传感距离达50千米，沿堤防轴线布设50-200个监测断面，实时感知渗流路径与压力分布，阻断管涌等隐蔽工程隐患。

2.4 灌区工程自动化监测应用

灌区工程自动化监测聚焦于渠道水位流量及灌溉系统运行状态。渠道水位与流量监测采用雷达水位计测量精度达1毫米与明渠流量计测量精度达1级，实现非接触式数据采集，避免传统设备受泥沙淤积影响。灌溉系统运行状态监测整合土壤水分传感器测量精度达±3%与电动阀控制模块响应时间小于1秒，根据作物需水规律自动调节灌溉时长与强度，提升水资源利用效率。通过物联网平台整合多维度监测数据，形成灌区用水效率评估体系，为节水改造与精准灌溉提供决策依据。

3 水利工程自动化监测系统的构建与运行支撑

3.1 自动化监测系统的架构设计

系统总体架构规划需兼顾功能完备性与扩展灵活性，通常采用“感知-传输-处理-应用”四层架构^[3]。顶层应用层面向用户需求，提供数据可视化、决策支持及远程控制接口；中间处理层整合数据清洗、智能分析及模型训练功能，构建工程安全评估核心算法库；传输层依托有线无线混合网络，实现数据从现场设备到云平台的可靠传输；底层感知层通过多类型传感器网络，完成水文、结构、环境等参数的实时采集。分层功能模块设计遵循模块化原则，各层内部进一步细化为独立子模块，例如感知层可拆分为变形监测、渗流监测等专项单元，便于后期功能升级与维护。技术选型适配原则强调场景匹配性，针对野外恶劣环境选用工业级传感器，在数据密集区域部署边缘计算节点降低传输压力，软件平台优先选择开放架构以支持第三方算法接入。

3.2 系统部署与调试关键技术

监测设备布设技术要点涵盖传感器选型、安装定位及防护设计。变形监测设备需根据工程结构特征确定测点分布，例如混凝土坝宜在坝体断面转折点及地质缺陷区着重加密布设；渗流监测则需沿渗流路径科学合理分层设置测压管。传输网络搭建需综合考量传输距离、数据量及可靠性要求，短距离采用RS485总线，长距离选用光纤环网，无线区域部署LoRa自组网作为补充，同时要确保不同传输方式之间的兼容性与协同性。软件系统部署包含操作系统选型、数据库配置及服务组件安装，参数配置需根据工程特性调整数据采集频率、存储周期及预警阈值，调试阶段通过模拟信号注入验证系统响应准确性，还需对系统进行全面的功能测试与性能评估。

3.3 系统运维与保障技术

设备常态化运维技术建立“巡检-校准-更换”全周期管理机制，定期开展传感器精度校准、通信模块性能测试及电源系统状态检查。在巡检过程中，要制定详细的巡检计划与标准，明确巡检内容与流程，确保巡检工作不遗漏任何关键环节。数据质量保障技术通过多源数据交叉验证、异常值自动标记及历史数据回溯分析，确保数据完整性与可信度。系统故障预警与应急修复技术构建三级响应体系，一级故障通过设备自检程序自动重启，二级故障触发远程诊断工具定位问题节点，三级故障启动备用设备并派遣技术人员现场处置，同时建立故障知识库支撑快速修复决策。在应急修复过程中，要建立高效的沟通协调机制，确保各部门之间信息畅通，协同工作。运维过程中注重数据备份与恢复策略设计，采用分布式存储与异地容灾方案，保障系统连续运行能力。

4 水利工程自动化监测技术的发展趋势与优化方向

4.1 技术融合创新方向

多源监测技术融合应用正成为重要突破口^[4]。传统单一监测手段难以全面捕捉水利工程复杂运行状态,将变形监测、渗流监测、应力监测等多类技术整合,通过数据互补与交叉验证,可构建更完整的工程健康画像。这种融合不仅体现在传感器层面,更延伸至数据处理环节,不同类型数据经统一时空基准对齐后,能挖掘出更深层次的运行规律。人工智能与大数据技术的深度集成正在重塑监测体系。机器学习算法可自动识别数据中的异常模式,相比传统阈值判断,能更精准捕捉早期隐患。深度学习模型对图像、振动等非结构化数据的分析能力,为设备故障预测提供了新维度。大数据技术则通过海量历史数据训练,优化了监测参数动态调整机制,使系统具备自适应能力。边缘计算在监测系统中的应用拓展显著提升了响应速度。将部分计算任务从云端下沉至边缘节点,实现了数据就近处理与实时决策。这种架构既减轻了核心网络传输压力,又降低了关键数据传输延迟,特别适用于闸门控制、渗漏预警等对时效性要求高的场景。边缘节点与云端的协同计算模式,正在形成分级智能处理新范式。

4.2 应用效能提升路径

监测精度与实时性优化需从硬件软件双维度突破。新型传感器研发持续提高量程精度,量子传感、光纤传感等技术逐步走向实用化。数据传输协议优化与5G技术融合,确保了海量数据稳定传输。软件层面,自适应滤波算法有效抑制环境噪声干扰,时间同步技术将多节点数据时差控制在微秒级。系统智能化与自主决策能力提升依赖知识图谱构建。将工程运行规则、专家经验转化为可机器读取的知识模型,使系统具备初步推理能力。强化学习算法在模拟环境中持续训练,逐步掌握最优监测策略。这种进化式智能体系,正在从被动响应向主动预防转变。跨工程协同监测体系构建打破信息孤岛。通过标准化数据接口与统一平台架构,实现不同工程监测

数据的互联互通。区域性监测网络可共享气象、水文等公共数据,提升整体预警能力。这种协同模式还支持监测资源动态调配,在突发险情时形成跨工程支援机制。

4.3 技术应用的适配性优化

不同类型水利工程的技术适配调整需建立模块化体系。水库、堤防、泵站等工程特点差异显著,监测系统应具备可配置能力。通过软件定义传感器技术,同一硬件平台可加载不同监测算法。标准化接口设计支持快速功能扩展,满足多样化监测需求^[5]。复杂环境下监测技术的适应性改进聚焦抗干扰能力提升。针对高盐雾、强电磁、深水等特殊场景,研发专用防护结构与抗干扰电路。自供电技术通过能量收集装置延长设备续航,无线传输协议优化确保信号穿透障碍物。这些改进使监测系统在极端条件下仍能保持稳定运行。

结束语

水利工程自动化监测技术通过持续创新,已形成覆盖全要素、全流程的监测体系。技术融合与智能算法的应用显著提升了隐患识别能力,系统架构的模块化设计增强了工程适配性。随着技术迭代,监测系统将进一步突破环境限制,为水利工程安全运行构建更可靠的技术屏障,助力行业高质量发展。

参考文献

- [1]陈波.水库大坝安全监测自动化技术的应用分析[J].水上安全,2025(2):67-69.
- [2]张大强.水利工程监测技术的发展与应用[J].工程与建设,2024,38(1):196-198.
- [3]朱位隆.大坝安全监测自动化技术应用现状及发展思考[J].水利技术监督,2023(11):124-127.
- [4]高建辉,张高旗.水利工程大坝安全监测自动化技术应用[J].城镇建设,2025(9):238-240.
- [5]张文豪.智能监测系统在水利工程安全管理中的应用研究[J].河南水利与南水北调,2025,54(4):84-85.