

基于传感数据融合的水利工程闸门智能化管理方法研究

钱栋¹ 陈研研² 何东²

1. 淮安市洪金灌区管理所, 中国·江苏 淮安 223126

2. 淮安市古黄河枢纽控制工程管理站, 中国·江苏 淮安 223400

摘要: 随着水利信息化进程的不断推进, 传统依赖人工操作与定时调度的闸门管理方式已难以满足现代水资源调配的高效、安全与智能化需求。近年来, 传感技术的飞速发展为水利工程管理提供了精准、实时的数据支持, 而多源传感数据的融合处理则为闸门的自动化与智能控制奠定了基础。本文围绕水利工程闸门的智能化管理需求, 探讨了传感器类型与部署策略、数据融合方法以及基于融合数据的控制决策机制, 构建了一个多维感知、智能决策、自主控制的一体化管理系统。通过典型应用案例分析, 验证了该方法在提升闸门响应速度、优化调度决策、降低人工干预频率等方面的可行性与优势。研究成果对推动水利工程向数字化、智能化方向发展具有积极意义。

关键词: 传感数据融合; 水利工程; 智能闸门; 控制策略; 物联网

Research on intelligent management method of water conservancy project gate based on sensor data fusion

Qian Dong¹, Chen Yanyan², He Dong³

1. Huai'an Hongjin Irrigation District Management Office, China Jiangsu Huai'an 223126

2. Huai'an Ancient Yellow River Hub Control Project Management Station, China Jiangsu Huai'an 223400

Abstract: With the continuous progress of water conservancy informatization, the traditional gate management mode relying on manual operation and scheduled scheduling has been difficult to meet the requirements of high efficiency, safety and intelligence of modern water resources allocation. In recent years, the rapid development of sensing technology provides accurate and real-time data support for water conservancy project management, and the fusion processing of multi-source sensing data lays the foundation for the automation and intelligent control of gates. Focusing on the intelligent management requirements of water conservancy project gates, this paper discusses sensor types and deployment strategies, data fusion methods and control decision-making mechanism based on fused data, and constructs an integrated management system with multi-dimensional perception, intelligent decision-making and autonomous control. Through the analysis of typical application cases, the feasibility and advantages of this method in improving gate response speed, optimizing dispatching decision and reducing manual intervention frequency are verified. The research results are of positive significance to promote the development of hydraulic engineering in the direction of digitalization and intelligence.

Keywords: Sensor data fusion; Water conservancy project; Intelligent gate; Control strategy; Internet of things

1 基于传感器的数据获取与融合机制

1.1 传感器类型与部署策略

在水利工程闸门智能化管理系统中, 传感器的选择与布局决定了系统感知的广度与精度。针对水情监测, 常用的设备包括超声波水位传感器(测量误差 $\pm 3\text{mm}$)、电磁流量计(量程 $0 - 20\text{m}^3/\text{s}$, 误差 $\pm 0.5\%$)、水温传感器等; 工情方面主要使用闸门开度编码器($\geq 1024\text{PPR}$ 光电编码器)、液压压力传感器(量程 $0 - 40\text{MPa}$, 标准 420mA 输出)及结构振动传感器(基于 MEMS 惯性单元,

频响范围 $20\text{Hz} - 1\text{kHz}$); 为实现环境监测, 部署视频监控摄像头与一体化气象传感模块(具备风速、风向、降雨与蒸发参数)。布设策略方面, 应覆盖闸前、闸后水位、液压系统压力点、结构梁柱节点、渠道断面流速等关键区域, 并在核心位置进行双传感器冗余布设, 通讯方式采用 RS485 或 CAN 总线接入边缘计算节点, 确保数据采集的实时性与完整性。

1.2 数据融合方法与模型选择

传感数据融合是构建多源感知体系的核心, 按层级划

分主要包括数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据级融合通过加权平均、互相关分析等方法对原始数据直接整合,适用于流量-水位联合估测场景;特征级融合采用 PCA、LDA 或小波分析等方法对传感器输出的特征进行降维与组合,广泛应用于闸门结构状态监测与异常识别;决策级融合则通过 Dempster-Shafer 证据理论、贝叶斯推理等手段,综合各传感器的判断结果形成统一控制指令。考虑到水工数据非线性强、误差不均衡等问题,推荐使用扩展卡尔曼滤波(EKF)模型,并结合动态权重分配机制与时间同步协议(如 PTP)以实现实时数据融合。该算法嵌入在 STM32 平台上运行时,融合延迟可控制在 20ms 以内,满足现场自动控制的响应需求。

1.3 数据处理与异常识别机制

为了确保数据融合的有效性,必须在融合前进行统一的数据清洗与处理。首先,针对采样频率不一致的问题,通过插值算法对数据进行频率重建(如统一至 5Hz);其次,借助数据抽象接口(DAI)将不同设备的输出格式标准化处理,统一字段及单位;对于异常值识别,则采用滑动窗口统计与动态阈值机制进行初步剔除,进一步引入 LSTM 神经网络进行趋势预测,提前识别漂移数据与突变点,预测精度可达 $\pm 5\%$ 以内。最终结果将赋予可信度评分,反馈至融合算法中进行动态权重调整,确保整体控制逻辑建立在可信、准确的数据基础之上。

2 水利工程闸门智能化管理系统设计

2.1 系统架构总体设计

整个智能闸门控制系统在借鉴工业自动化架构与水利工程调度流程的基础上,构建了“感知—传输—控制—执行—反馈”五位一体的协同控制体系,旨在实现水工调度的高精度、高可靠性与高度智能化管理^[1]。感知层通过系统化布设智能传感器,实现对水位、水压、闸门开度、结构应力及环境气象(风速、降雨、温湿度等)的全面感知与实时上传。传感器设备支持 RS485、Zigbee、CAN 等多种通信协议,灵活适配集中布设与分布式部署需求,适应不同施工现场环境。传输层以 NB-IoT 为主通信手段,结合以太网、4G/5G 无线网络形成冗余链路,有效保障在复杂环境下的数据连续性与安全性。控制层由边缘计算节点完成本地数据融合、故障诊断与应急逻辑响应,并与部署在云端的 SCADA 平台协同工作,实现跨区域多闸门的统一监控、数据归档、调度策略制定与远程控制指令

下发^[2]。执行与反馈层采用工业级 PLC 控制液压执行系统(如 Bosch Rexroth 伺服液压泵、比例阀等),根据上层控制逻辑驱动闸门精确启闭,并同步采集反馈信号(如液压状态、门位变化、启闭速度、结构振动等),构建稳定、可靠的闭环控制机制。整套系统支持最短 500ms 级的控制响应周期,可广泛适用于山洪暴雨、应急泄洪等对响应速度与运行稳定性要求极高的场景,全面提升水利工程调度的自动化水平与灾害应对能力。

2.2 智能决策与控制策略

智能控制体系融合机器学习算法与现代控制理论,采用“预测—决策—执行”三级闭环调度逻辑,实现以数据驱动为核心的智能化运行机制^[3]。在预测层,系统引入基于历史水文数据和实时监测数据构建的 LSTM 与 CNN 混合模型,对上游来水量、区域降雨、下游用水需求等关键变量进行 6-12 小时滚动预测,预测误差控制在 $\pm 6\%$ 以内,为调度策略预先提供依据。在决策层,构建多目标最优化模型,结合防洪调蓄、水资源利用效率与生态流量等目标,通过改进型遗传算法或粒子群算法求解闸门最优开度组合。模型输入包括当前与预测水位、库容变化、流量平衡系数、用水计划与结构安全限值等,提升策略的科学性与全局协调性。执行层采用模糊逻辑与自适应 PID 联合控制策略,依据水动力响应特性动态调整控制参数,有效应对流量非线性变化与突发波动。整个控制逻辑支持三种操作模式:全自动模式下系统独立决策与控制;半自动模式由系统推荐开度策略,人工确认执行;人工模式下由人工全权操作控制台,具备极端条件下的人控备份能力,提升系统安全冗余水平与灵活运维保障能力。

2.3 人机交互与可视化界面

为提升系统的操作效率与使用体验,设计开发了跨平台、可配置、高交互性的可视化控制平台,实现了从参数监测、报警联动到策略干预的完整人机交互闭环。该平台采用 B/S (Browser/Server) 架构,支持部署在政务云、水务专网、本地数据中心等多种环境,可通过标准浏览器在 PC、平板及移动端终端访问,无需安装额外软件。系统主界面以模块化设计为核心,可根据运行场景与用户习惯灵活配置监控图层与数据图表,核心展示内容包括实时水位曲线图、流量监控图、闸门开度状态动画、液压系统压力曲线、设备在线状态与历史运行日志等。数据更新频率可自定义配置,最高支持 5 秒一次刷新频率,保障信息的实

时性。报警系统支持基于规则引擎与 AI 模型的双重异常检测机制,系统管理员可通过 Web 端设定自定义报警规则(如位移偏移 >2cm、液压压力突降、通信中断持续超 3min 等),并分级推送至不同角色的管理端,包括微信、小程序、短信、App 等推送方式。平台内置远程控制权限管理系统,支持分级授权、日志审计与双因子认证,确保每一次操作都有章可循,符合水利行业的安全监管要求。同时,移动端 App 进一步集成远程高清视频监控、语音控制指令接口与现场数据报表同步上传功能,保障一线巡检人员在复杂水文环境下的快速响应与操作便捷,真正实现“看得清、调得动、管得住”的智能管理目标^[4]。

3 典型应用案例分析与系统优化建议

3.1 案例介绍:某水库枢纽闸门智能控制系统

该系统建设应用于我国华南地区某重点水资源调度枢纽工程,工程控制流域面积超过 1200 平方公里,肩负着防洪减灾、农业灌溉、城市供水与生态调度等多重任务。水库主闸设有 6 扇大跨度弧形钢闸门,每扇单独控制能力达 1000m³/s,总排泄能力强,调度精度要求高。自 2022 年全面实施基于多源传感数据融合的智能控制系统以来,系统围绕“全要素感知—智能分析—闭环控制”的核心理念,对原有自动化系统进行升级优化。共部署水情类传感器 48 个(雷达水位计、电磁流量计等)、工情类 36 个(门体位移、结构应变、液压压力)、环境类 12 个(视频监控、温湿度、风速雨量一体站),形成覆盖主坝、溢洪道、泄洪渠及下游渠道的感知网络。系统采用 LoRa 与 NB-IoT 双通道无线通信架构,通过 2 套工业级冗余边缘计算主机实现数据本地融合处理与应急调度联控,具备在通信中断时独立完成基本控制功能。截至目前,系统已累计完成自主开闭操作 260 余次,自动化控制成功率达 91.3%,极大缓解了调度中心的人力负担。在 2023 年主汛期,通过智能预测调度功能,将强降雨后的水位调节响应时间从平均 30 分钟缩短至 4 分钟以内,实现了全程远程感知、精准控制、智能推演的闭环管理目标,为地方水务管理部门在防洪抗灾与水资源优化配置方面提供了坚实技术支撑。

3.2 系统优化与技术挑战

尽管该智能化系统整体运行表现良好,但在长周期和复杂工况下仍暴露出若干技术短板与改进空间。首先,在强对流天气或雷暴条件下,部分关键传感器出现信号中断

或短时漂移,建议在高风险位置加装避雷装置与全封闭式防护护套,提高设备在恶劣环境下的运行稳定性;其次,NB-IoT 信号在山地隧洞、水坝背坡等复杂地形区存在信号衰减或盲区问题,亟须增设通信中继基站,并引入网状拓扑的信号自愈机制提升链路可靠性;第三,当前决策模型主要基于固定规则优化策略,对季节性来水显著偏移(如枯水期提前、汛期延后)反应能力不足,建议引入融合气象预报、雷达降雨数据的自学习型神经网络预测模型,提高调度策略的前瞻性与适应性;最后,系统平台在运行过程中累积了大量高频数据,导致数据冗余率高、后端存储与计算负担加重,建议开展数据分级压缩管理与边缘本地缓存策略,提升平台整体资源调度效率。

3.3 未来发展展望

展望未来,水利工程智能化将从单点控制向多闸门联动、多工程协同的区域级智能调度体系演进。应以流域或行政区为单位,构建统一的水利物联网架构,实现数据、模型与策略的协同共享与远程联控。遥感卫星与无人机巡检可与地面感知系统融合,形成“空—地—端”一体化感知网络,提升动态监测覆盖能力^[5]。随着 BIM 与实时传感数据的深度融合,数字孪生水工模型将助力结构预测、运行仿真与维护决策。面对极端天气日益频发的趋势,系统还需强化容灾机制与本地自主控制能力,确保在断网、失电等突发情况下依然具备独立运行与应急响应能力,全面提升水利工程运行的智能化与安全韧性。

4 结语

本研究围绕水利工程中闸门智能化管理的核心需求,提出了一种基于多源传感数据融合的系统性解决方案。通过合理配置传感器网络、构建高效的数据融合模型以及实现智能化的控制决策与可视化交互平台,系统在实测应用中展现出良好的响应速度、控制精度与运行稳定性。典型案例验证了该方法在提升调度效率、降低人力干预、增强系统安全性等方面的显著优势。未来,随着数字孪生、遥感集成与自学习调度算法的发展,基于融合感知的智能管理系统将在更大范围内推动水利工程向数字化、智能化和协同化方向迈进。

参考文献:

- [1] 高嵩. 水利工程施工造价及智能化水闸门的应用[J]. 科技与创新, 2020,(22):158-159.
- [2] 程明, 程功. 水利工程信息化管理与智能化的发展

路径研究[J]. 中国战略新兴产业, 2024,(33):66-68.

[3] 郭凯歌. 智能化技术在水利工程中的应用现状分析[C]// 中国水利学会, 西安理工大学. 2024 中国水利学术大会论文集(第五分册). 河南建筑职业技术学院, 2024:394-397.

[4] 李坚. 水利工程数字化与智能化发展趋势研究[J]. 东北水利水电, 2024,42(11):64-67.

[5] 杨岩. 数字孪生在水利泵站智能化管理中实践应用[J]. 水上安全, 2024,(19):74-76.