

金属结构启闭机在水利工程中的智能化施工监控系统设计

晏建银 焦世龙 徐征 陈汉 赵鑫

江苏省水利机械制造有限公司

DOI:10.32629/hwr.v9i12.6684

[摘要] 在水利工程现代化建设进程中,金属结构启闭机作为关键控制性设备,其施工质量与运行安全性直接影响工程整体效能与区域防洪抗旱能力。传统启闭机施工监控模式依赖人工巡检与离散式仪器测量,存在响应滞后、数据碎片化、预警不及时等问题,难以满足复杂水利工程对施工过程精细化、智能化管控的需求。本文基于物联网、边缘计算、无线通信与智能传感技术,设计一套金属结构启闭机智能化施工监控系统,从系统架构、硬件选型、软件功能及关键技术实现等方面展开研究,构建覆盖启闭机制造、安装、调试全施工阶段的实时监控体系,实现施工参数自动采集、状态智能分析、异常主动预警与过程溯源管理,为水利工程启闭机施工质量管控提供技术支撑,推动水利工程施工向数字化、智能化转型。

[关键词] 水利工程;金属结构启闭机;智能化施工;监控系统;物联网技术

中图分类号:TV 文献标识码:A

Design of an Intelligent Construction Monitoring System for Metal Structure Hoisting Machinery in Hydraulic Engineering Projects

Jianyin Yan Shilong Jiao Zheng Xu Han Chen Xin Zhao

Jiangsu Province Water Conservancy Machinery Manufacturing Co., Ltd.

[Abstract] In the modernisation of water conservancy projects, metal structure hoisting machinery serves as critical control equipment. Its construction quality and operational safety directly impact the overall project efficacy and regional flood control and drought resistance capabilities. Traditional hoisting machinery construction monitoring relies on manual inspections and discrete instrument measurements, suffering from response delays, fragmented data, and untimely warnings. This approach struggles to meet the demands for refined, intelligent management of complex water conservancy construction processes. This paper designs an intelligent construction monitoring system for metal structure hoisting machines based on IoT, edge computing, wireless communication, and intelligent sensing technologies. Research encompasses system architecture, hardware selection, software functionality, and key technical implementations. A real-time monitoring framework covering the entire construction lifecycle—from manufacturing and installation to commissioning—is established. This enables automatic collection of construction parameters, intelligent status analysis, proactive anomaly alerts, and process traceability management. This provides technical support for quality control in hydraulic engineering hoist construction, advancing the digital and intelligent transformation of water conservancy project implementation.

[Key words] Hydraulic engineering; Metal structure hoist; Intelligent construction; Monitoring system; Internet of Things technology

引言

水利工程是国家基础设施建设的重要组成部分,承担着防洪、灌溉、供水、发电等多重功能,对保障社会经济可持续发展与生态安全具有不可替代的作用。金属结构启闭机作为水利工程闸门控制的核心设备,其结构稳定性、安装精度与运行可靠性

直接决定闸门操作的安全性与精准性,进而影响水利工程的调度效率与运行安全。在新一代信息技术与工程建设深度融合的背景下,智能化监控成为解决传统施工管理痛点的有效路径。通过整合智能传感、无线通信、大数据分析等技术,构建启闭机施工智能化监控系统,实现施工全过程参数实时感

知、数据智能处理与风险提前预警,已成为水利工程施工技术升级的必然趋势。

1 系统总体设计方案

1.1 设计目标

一是实时采集启闭机构件加工精度、安装位置偏差、连接紧固性、润滑状态等关键施工参数,数据采集精度满足行业规范要求;二是具备数据实时传输、存储与智能分析能力,能够自动识别施工异常状态并发出分级预警;三是提供可视化监控界面与移动端访问功能,支持管理人员远程实时掌控施工进度与质量状态;四是实现施工过程数据全生命周期管理,支持历史数据查询、趋势分析与报表自动生成。

1.2 系统架构设计

本系统采用包括感知层、网络层、平台层、应用层的四层架构设计,各层协同工作实现启闭机施工全流程智能化监控,架构如图1所示。感知层作为系统数据采集终端,负责各类施工参数的实时感知,主要由位移传感器、压力传感器、振动传感器、温度传感器、扭矩传感器等智能设备组成,覆盖启闭机构件加工、现场安装、调试运行等关键环节;网络层承担数据传输任务,采用“无线+有线”混合通信模式,无线通信选用LoRa、NB-IoT等低功耗广域网技术,有线通信采用工业以太网,实现感知层数据向平台层的稳定传输;平台层为系统核心处理单元,包括边缘计算节点与云平台,边缘计算节点负责数据实时预处理与本地预警,云平台实现数据存储、深度分析与资源调度;应用层面向用户提供各类监控功能,包括实时监控、数据查询、异常预警、报表生成等,通过PC端监控中心与移动端APP实现多终端访问^[1]。



图1 金属结构启闭机智能化施工监控系统架构图

2 系统硬件设计

2.1 感知层硬件选型

感知层硬件选型需结合启闭机施工监控参数类型与现场环境特点,确保采集数据精准、稳定。位移传感器选用激光位移传

感器,测量范围0~500mm,精度 ± 0.01 mm,用于监测启闭机闸门轨道安装直线度、门叶垂直度及启闭行程偏差;压力传感器采用压电式压力传感器,测量范围0~20MPa,精度 $\pm 0.1\%$ FS,用于监测启闭机液压系统油压、制动器压力等参数;振动传感器选用压电式加速度传感器,测量范围0~50g,频率响应0.1~1000Hz,用于监测启闭机电机、减速器等旋转部件运行振动状态;温度传感器采用PT100铂电阻温度传感器,测量范围 $-50^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$,精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$,用于监测电机绕组、轴承及液压油温度;扭矩传感器选用应变片式扭矩传感器,测量范围0~5000N·m,精度 $\pm 0.2\%$ FS,用于监测启闭机传动轴扭矩及螺栓紧固力矩;数据采集终端选用工业级数据采集器,支持多通道传感器接入,具备A/D转换、数据预处理与协议转换功能,适应施工现场复杂环境。

2.2 网络层硬件配置

网络层采用混合通信模式,确保数据传输的稳定性与实时性。第一,无线通信设备。部署LoRa网关与NB-IoT基站,LoRa网关通信距离可达3km,支持多节点接入,适用于施工现场大范围数据传输;NB-IoT基站依托运营商网络,功耗低、覆盖广,适用于偏远区域传感器数据传输;第二,有线通信设备。选用工业以太网交换机,支持千兆传输速率,具备抗电磁干扰能力,用于监控中心与云平台、核心设备间的高速数据传输;第三,边缘计算节点。采用工业级边缘网关,配备四核处理器与大容量存储模块,支持实时数据处理、本地缓存与边缘分析,降低云平台压力,提升预警响应速度^[2]。

2.3 平台层与应用层硬件配置

云平台服务器选用高性能机架式服务器,配置多核CPU、大容量内存与硬盘,支持数据分布式存储与并行计算,保障系统海量数据处理能力;监控中心硬件包括工业级监控主机、大屏幕显示终端、报警装置等,监控主机用于运行监控软件,大屏幕终端实现施工状态可视化展示,报警装置通过声光信号实现异常预警;移动端设备支持智能手机、平板电脑等移动终端接入,通过无线通信实现远程监控与预警信息接收。

3 系统软件设计

3.1 软件总体架构

系统软件采用B/S与C/S混合架构,基于Java语言开发,采用Spring Boot框架构建后端服务,Vue.js框架开发前端界面,数据库选用MySQL实现结构化数据存储,MongoDB存储非结构化数据,确保软件系统的稳定性与可扩展性。

3.2 核心功能模块设计

数据采集与预处理模块负责接收感知层传输的各类施工参数,通过数据清洗、滤波、校准等算法剔除异常数据,转换为标准化数据格式后传输至云平台存储,确保数据质量;实时监控模块通过可视化界面实时展示启闭机施工进度、关键参数变化曲线、设备运行状态等信息,支持多画面切换与局部细节放大,管理人员可直观掌握施工现场情况;智能分析与预警模块基于预设阈值与机器学习算法,对施工参数进行实时分析,当参数超出正常范围时,自动判定异常等级,通过监控中心声光报警、移动

端APP推送、短信等方式发出预警信息,并推送异常处理建议;数据管理模块实现施工数据的全生命周期管理,支持历史数据查询、趋势分析、数据导出等功能,采用数据加密与备份策略,确保数据安全性与完整性;报表生成模块根据施工管理需求,自动生成施工日报、周报、质量检测报告等文档,支持自定义报表模板,减少人工统计工作量,提升管理效率;权限管理模块采用分级权限管理机制,为不同角色分配不同操作权限,确保系统操作规范与数据安全。

3.3 数据库设计

数据库设计需满足系统数据存储与查询需求,主要包括以下核心数据表:传感器信息表存储传感器编号、类型、安装位置、测量范围、精度等基本信息;施工参数数据表记录采集时间、传感器编号、参数值、数据状态等采集数据;设备运行状态表存储启闭机设备编号、运行状态、启动时间、停止时间等信息;异常预警表记录预警编号、预警时间、预警类型、异常参数、预警等级、处理状态等信息;用户信息表存储用户编号、姓名、角色、账号密码、联系方式等信息;施工进度表记录启闭机施工阶段、完成进度、计划工期、实际工期等信息^[3]。

4 关键技术实现

4.1 多源异构传感器数据智能融合技术

针对启闭机施工多传感器数据维度差异大、易受环境干扰的问题,构建全流程技术方案。先通过卡尔曼滤波剔除位移传感器随机噪声,滑动窗口平均法平滑压力、扭矩等动态参数波动,阈值过滤法剔除温度数据突变异常值;再经PCA提取核心特征降低数据维度,减少冗余计算。融合阶段采用动态加权算法,依据传感器实时信号强度、历史误差率自动分配权重,如光照变化时灵活调整激光与拉线位移传感器权重占比,规避环境干扰影响。最后通过贝叶斯估计模型校验融合结果,修正系统偏差,使整体监测精度提升15%以上,有效解决单一传感器故障或干扰导致的监测失效问题。

4.2 边缘-云端协同智能计算技术

为平衡施工现场数据传输延迟与云端算力压力,搭建边缘实时处理与云端深度分析的协同计算架构。边缘节点部署于施工一线,集成轻量化处理引擎,对采集数据实时筛选压缩,仅上传异常数据及关键特征值,减少60%以上传输量,同时嵌入简化异常识别模型,实现毫秒级本地紧急预警,为风险处置争取时间。云端平台采用分布式存储架构存储全周期数据,通过Spark大数据框架开展趋势分析,构建施工参数基准模型,并基于边缘节点上传数据持续优化模型参数^[4]。配套断点续传与MD5校验机制,网络中断时边缘节点本地缓存数据,恢复后自动增量同步,确保边缘与云端数据一致性,实现本地应急响应与云端全局管控的高效协同。

4.3 改进SVM施工异常智能识别分级技术

针对启闭机施工异常类型多样、边界模糊的识别难点,优化支持向量机(SVM)算法构建智能识别模型。引入粒子群优化(PSO)

算法,自动匹配线性核、RBF核等最优核函数,解决传统SVM核函数选择依赖经验的弊端;融合施工参数绝对值、变化速率及趋势特征,构建多维度特征向量,避免单一特征导致的识别偏差。设计分层级识别逻辑,先通过一级模型区分“正常/异常”状态,再通过二级模型将异常细分为轻微偏差、中度故障、严重风险三个等级,实现精准分级预警。建立模型动态更新机制,结合新增异常案例与修正数据定期增量训练,优化决策边界,使异常识别准确率达98%以上,误报率降低40%,漏报率下降50%。

4.4 施工数字孪生映射与可视化技术

引入数字孪生技术构建启闭机施工全景量化管控体系,基于BIM技术搭建与物理现场1:1对应的精细化虚拟模型,涵盖构件尺寸、安装基准、设备参数等全量信息。通过感知层实时采集数据驱动孪生模型动态更新,可视化呈现启闭机构件安装位置、连接紧固状态、设备运行参数等关键信息,支持多视角切换、局部细节放大及施工过程回溯。针对闸门吊装、传动轴装配等关键工序,集成施工工艺仿真模块,基于实时监测数据模拟工序执行效果,提前预判安装偏差风险。开发WebGL轻量化三维可视化界面,管理人员通过PC端或移动端即可直观查看施工进度与状态,点击模型对应部件可调取实时监测数据、历史记录及施工规范要求,实现施工过程可感、可查、可控^[5]。

5 结束语

金属结构启闭机智能化施工监控系统是基于物联网、边缘计算与机器学习技术,构建了全流程监控体系。系统通过多类型智能传感器实现施工参数实时采集,采用“无线+有线”混合通信模式保障数据稳定传输,依托边缘计算与云平台协同实现数据智能处理与异常预警,具备实时监控、智能分析、数据管理等核心功能,可有效解决传统启闭机施工监控中存在的效率低、精度差、预警滞后等问题,为水利工程启闭机施工质量与安全管控提供技术支撑。未来,随着新一代信息技术的不断发展,启闭机施工监控系统将向更智能、更高效、更可靠的方向发展,为水利工程现代化建设提供更强有力的技术保障。

[参考文献]

- [1]李鹏博,招滨,张学东.西津水利枢纽二线船闸工程金属结构设计[J].红水河,2024,43(06):36-40.
- [2]刘剑,赵成,宋链,等.水电站启闭机可靠度分析研究进展[J].水电站机电技术,2024,47(11):146-149.
- [3]昌魏,胡雪枫,郭赞赞,等.二河新闻工程金属结构安全性态研究[J].治淮,2024,(09):43-44.
- [4]黄传学.华容某灌溉涵闸金属结构设备安装工艺研究[J].海河水利,2024,(07):49-51.
- [5]杨康,姚孟莹,涂建伟,等.尼泊尔三金考拉水电站金属结构布置与设计[J].水电站设计,2024,40(02):32-36.

作者简介:

晏建银(1988--),男,汉族,江苏扬州人,本科,现有职称:工程师,研究方向或主要从事工作:水利工程。