

基于LCU与AI辅助分析的灌区水闸自动化控制系统建设与应用实践

孙寿春

菏泽市智慧水务有限公司, 中国·山东 菏泽 274000

摘要: 水闸是灌区输配水、防洪排涝和生态补水的重要控制节点, 传统人工值守和分散控制方式难以满足现代化灌区安全、精准、连续运行需求。以山东省闫潭灌区 2023 年度续建配套与现代化改造工程为依托, 构建以 LCU 控制柜为核心的水闸自动化控制系统, 集成荷重开度仪、上下限位保护、视频监控、通信网络和 SCADA 监控软件, 实现闸门开度、荷载、启停状态、报警信息和现场视频的集中采集与远程监管。在此基础上, 引入 AI 辅助分析模块, 对启闭时间、荷载波动、报警频次和视频画面进行综合研判, 形成异常识别、风险分级和巡检建议。实践表明, 该方案在不改变 PLC 安全控制主链路的前提下, 提升了闸站运行可视化、故障发现及时性和运维管理精细化水平, 可为中小型灌区水闸自动化改造和智能运维升级提供参考。

关键词: 灌区水闸; LCU 控制柜; AI 辅助分析; 自动化控制; SCADA; 智能运维

Construction and Application Practice of Automated Control System for Irrigation District Water Gates Based on LCU and AI-Assisted Analysis

Sun Shouchun

Heze Smart Water Co., Ltd., China Shandong Heze 274000

Abstract: Water gates are important control points for water distribution in irrigation districts, flood prevention and drainage, and ecological water replenishment. Traditional manual monitoring and decentralized control methods struggle to meet the needs of safe, precise, and continuous operation in modern irrigation districts. Relying on the 2023 continuation and modernization project of Yantan Irrigation District in Shandong Province, an automated water gate control system centered on LCU control cabinets has been built. The system integrates load position meters, upper and lower limit protection, video monitoring, communication networks, and SCADA monitoring software to achieve centralized collection and remote supervision of gate opening, load, start-stop status, alarm information, and on-site video. On this basis, an AI-assisted analysis module has been introduced to comprehensively assess opening/closing times, load fluctuations, alarm frequency, and video footage, forming abnormality identification, risk classification, and inspection suggestions. Practice shows that this solution, without altering the PLC main safety control link, improves gate station operation visibility, fault detection timeliness, and refinement of operation and maintenance management, providing a reference for automated upgrades and intelligent operation of small to medium irrigation district water gates.

Keywords: Irrigation district water gates; LCU control cabinet; AI-assisted analysis; Automated control; SCADA; Intelligent operation and maintenance

0 引言

智慧水利背景下灌区水闸智能管控发展诉求。

随着智慧水利和现代化灌区建设持续推进, 水闸运行管理正由人工巡查、人工启闭和经验调度, 逐步转向自动采集、远程控制和智能分析。水闸数量多、分布散、运行环境复杂, 部分闸站仍存在现场值守强度大、运行数据不

连续、调度响应滞后、设备隐患发现不及时等问题。特别是在灌溉高峰、防汛排涝和生态补水等工况下, 闸门开度、启闭荷载、电机状态和现场水情变化频繁, 仅依靠人工经验难以实现稳定、精细和可追溯管理。

LCU 控制柜、荷重开度仪、视频监控和 SCADA 平台已能较好解决水闸“可监测、可控制、可报警”的基础

问题,但传统自动化系统通常以阈值报警和人工判断为主,对历史运行数据、报警日志和视频画面的综合利用不足,难以提前识别设备性能衰减、启闭阻力增大、传感器异常和通信不稳定等潜在风险。现有水利自动化规范对现地控制、硬件连锁提出明确要求,但设备健康预判的落地指引相对不足^[1]。将 AI 分析嵌入水闸自动化系统,不是替代 PLC 安全连锁和人工调度,而是在数据层面增加趋势研判、异常识别和运维辅助能力,使水闸管理由“事后处置”向“提前预警”转变。

当前中小型灌区智能化改造案例偏少, AI 智能运维的落地实践较为有限,部分项目对智能算法与工程安全控制边界划分不够清晰^[4-5]。本文结合闫潭灌区水闸自动化改造实践,围绕 LCU 现场控制、SCADA 远程监管和 AI 辅助分析三部分,提出适配中小型灌区的一体化方案,为同类工程改造提供实践参考。

1 工程建设需求

闫潭灌区承担农业灌溉、生态供水和区域排涝等任务,骨干水闸是灌区水量调配和安全运行的重要节点。本次改造主要面向节制闸、分水闸等关键闸站,建设内容包括 LCU 控制柜、机旁操作箱、荷重开度仪、上下限位保护装置、视频监控系统、通信链路和 SCADA 监控软件等。

结合运行管理需求,系统建设目标主要包括四个方面:一是实现闸门开度、荷载、电机状态、限位状态和报警信息的实时采集;二是形成现地手动、现地自动和远程控制相结合的多模式控制体系;三是通过机械限位、电子限位、急停保护、过载保护和权限控制提升运行安全性^[2];四是在远程平台侧建设 AI 辅助分析模块,对运行过程和设备状态进行趋势研判,为调度和检修提供辅助依据。

2 系统总体架构设计

2.1 LCU 自动化控制架构

系统采用“现场感知执行—LCU 现地控制—网络传输—远程监控—AI 辅助分析”的总体架构,如图 1 所示。现场侧由荷重开度仪、限位装置、启闭机、摄像机和机旁操作箱组成,负责闸门状态感知和启闭动作执行; LCU 控制柜作为现场控制核心,完成信号采集、逻辑判断、连锁保护和控制输出;网络传输层通过光纤、工业以太网及无线备用链路实现数据上行和指令下发;远程监控层通过 SCADA 软件完成运行监视、报警管理、历史查询和视频调阅; AI 辅助分析模块位于平台侧,接收自动化系统产生的运行数据和视频数据,输出风险等级、异常类型和巡检建议^[5]。

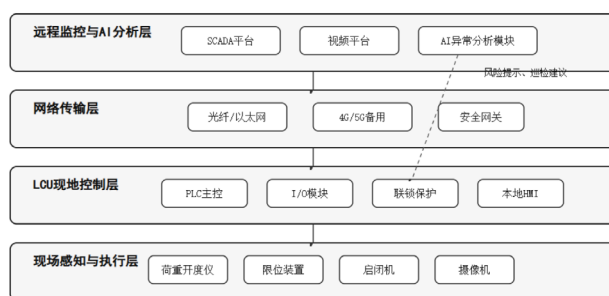


图 1 AI 辅助的灌区水闸自动化控制系统总体架构

2.2 控制模式与安全逻辑

系统设置现地手动、现地自动和远程控制三种模式。现地手动模式用于检修、调试和应急处置;现地自动模式由 LCU 按照目标开度和设定逻辑完成启闭控制;远程控制模式由调度中心通过 SCADA 平台下发指令,并结合视频画面进行复核。三种模式之间采用权限闭锁和状态确认机制,避免多点同时操作。

安全逻辑采用“硬件优先、软件辅助、人工确认”的原则。机械限位、急停回路和过载保护直接作用于控制回路,属于最高优先级;电子限位、开度阈值和荷载阈值由 PLC 程序判断并联动报警^[1]; AI 分析结果仅作为风险提示和运维建议,不直接参与闸门启停控制,从而避免智能算法不确定性影响水闸安全运行。

2.3 AI 辅助分析模块

为提升系统对潜在故障的提前识别能力,系统在远程监控平台侧设置 AI 辅助分析模块。该模块不直接参与闸门启停控制,而是作为运行状态研判和运维决策支持工具,重点解决三类问题:一是启闭过程是否异常,二是设备状态是否存在劣化趋势,三是是否需要安排重点巡检。

AI 辅助分析模块的数据来源包括闸门开度曲线、荷载曲线、启闭时间、报警频次、通信状态、视频画面和水情记录。平台首先对多源数据进行时间对齐、缺失修补和异常值清洗,然后提取启闭时长、荷载峰值、荷载波动幅度、开度变化速率、报警间隔等特征,形成水闸运行状态向量^[4]。

在分析方法上,系统采用“规则阈值+时序异常检测+案例库比对”的组合方式。规则阈值用于识别超限、急停、通信中断等确定性事件;时序异常检测用于发现启闭时间延长、荷载波动增大、开度响应迟滞等渐变型问题;案例库比对用于将当前异常与既有检修记录、报警记录和设备缺陷记录关联,给出可能原因和处置建议。该方式具有实现简单、结果可解释、便于维护等特点,适合中小型灌区水闸智能运维场景,完整的异常识别与运维闭环流程如图

2 所示^[6]。



图 2 基于 AI 辅助分析的水闸运行异常识别与运维闭环流程

3 核心功能设计

本系统打通水闸监测－控制－预警－运维全业务链条，改变传统自动化重控制、轻运维的短板。为清晰展示各单元功能与应用价值，整理系统核心功能配置如表 1 所示。

表1 系统核心功能配置

功能模块	主要内容	作用
现地控制	LCU控制柜、PLC主控、I/O模块、本地HMI、机旁操作箱	实现闸门现地启闭、状态采集、逻辑判断和联锁保护，保证现场控制可靠性。
安全保护	荷重开度仪、上下限位、急停回路、过载保护、权限闭锁	防止闸门冲顶、坠底、过载运行和误操作，形成多级安全防护。
远程监管	SCADA监控软件、数据库、报警管理、历史曲线、视频调阅	实现闸站运行状态集中展示、远程控制和运行过程可追溯。
AI分析	开度曲线、荷载曲线、报警日志、视频画面、检修记录综合分析	识别启闭迟滞、荷载异常、频繁报警、通信异常等问题，形成风险提示。
运维闭环	风险分级、人工确认、工单派发、巡检反馈、案例沉淀	将AI识别结果转化为实际运维动作，提升设备管理精细化水平。

如表 1 所示，现地控制与安全保护是系统运行基础；远程监管实现多闸站集中管控；AI 模块仅做状态研判；运维闭环把分析结果落地到现场工作，各模块协同保障水闸安全运行。

4 建设实施与应用效果

系统实施过程中，现场设备安装重点控制控制柜固定、接地保护、电缆敷设、荷重开度仪校准和限位装置校验。动力电缆与信号电缆分开敷设，通信设备采取防雷、防潮和防水措施；荷重开度仪安装后通过多次启闭过程校验开度值与实际行程的一致性；上下限位装置按照闸门极限位置和运行安全距离进行设置，确保软硬件保护边界清晰。

系统调试按单机调试、回路调试、联动调试和试运行四个阶段开展。单机调试重点检查启闭机、限位装置、荷重开度仪、摄像机和通信模块状态；回路调试重点验证采集信号、控制输出和急停保护；联动调试重点验证现地控制、远程控制、模式切换、报警联动和视频调阅；试运行

阶段重点观察数据上传稳定性、远程控制响应、报警准确性和 AI 风险提示的可用性。

投入试运行后，闸门开度、荷载、启停状态、报警信息和现场视频能够在远程平台集中显示，调度人员可根据水情和运行需求下达控制指令，并通过视频画面进行复核。AI 模块对启闭时间延长、荷载波动增大、报警频次升高等情况进行持续跟踪，当同一闸门在多个运行周期中出现相似异常时，系统给出重点巡检提示，辅助运维人员提前排查启闭机阻力增大、传感器漂移或限位装置松动等问题。

总体来看，该系统并未改变水闸控制的安全主链路，而是在现有自动化系统之上增加数据分析和运维提示能力，既保证了工程控制的稳定性，又提高了运行管理的智能化水平。对于中小型灌区而言，该方案设备组成相对成熟，改造成本可控，后续可根据数据积累情况逐步优化 AI 分析模型。

5 存在问题与改进方向

从试运行情况看，系统仍有进一步完善空间。首先，部分闸站通信条件受地形、天气和供电环境影响较大，远程视频调阅和数据上传偶有延迟，后续应加强光纤主链路和无线备用链路的冗余配置。其次，AI 分析效果依赖历史数据质量，目前部分设备编码、报警分类和检修记录仍需进一步规范，后续应建立统一的数据治理规则。再次，AI 模块当前以异常提示和运维辅助为主，尚不宜直接参与闸门自动调度控制，后续应在充分试运行和人工复核基础上，逐步探索调度规则库、水情预测和闸群协同控制的融合应用^[9]。

6 结语

本文结合闫潭灌区水闸自动化改造实践，提出了基于 LCU 控制柜与 AI 辅助分析的水闸自动化控制系统建设方案。系统以 LCU 为现场控制核心，以 SCADA 平台为远程监管载体，以 AI 辅助分析模块为运维辅助工具，实现了闸门运行状态实时采集、现地与远程双重控制、多重安全保障、视频联动监管和异常风险提示。

该方案的特点在于不追求复杂模型堆叠，而是围绕水闸工程运行中的真实问题，构建可解释、可维护、可逐步扩展的智能分析流程。实践表明，系统可有效提升闸站运行可视化水平和故障发现及时性，为中小型灌区水闸自动化改造、智慧灌区建设和智能运维升级提供参考。

参考文献：

[1] 中华人民共和国水利部. SL 612-2013 水利水电工程自动化设计规范[S]. 北京：中国水利水电出版社，2013.

[2] 中华人民共和国水利部. SL 41-2018 水利水电工程启闭机设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.

[3] 中华人民共和国水利部. 数字孪生水利工程建设技术导则 (试行)[S]. 2022.

[4] 曹海峰. 水利信息化数据资源整合设计与实现[J]. 陕西水利, 2024(11):124-127.

[5] 罗展舒, 张秀峰, 王跃舟. 基于云-网-端架构的

全链路水利工程信息化监控系统设计[J]. 网络安全和信息化, 2024(7):109-110.

[6] 张峰, 张伟. 基于 BIM 的水闸工程信息化运维管理系统设计与应用研究[J]. 水上安全, 2025(19):70-72.

作者简介: 孙寿春 (1997-), 男, 黑龙江牡丹江人, 本科, 工程师, 研究方向: 水利工程自动化、智慧水务、灌区信息化建设。