闸门远程控制系统在配水调度中的实践

王 敏 许博善 许多智

内蒙古河套灌区水利发展中心永济分中心 内蒙古 巴彦淖尔 015000

【摘 要】：针对内蒙古河套灌区干支斗渠分级配水需求，设计闸门远程控制系统，解决传统配水调度精度低、通信不稳定、现场管控不便等问题。系统采用调度中心—区域分控—现场控制—感知执行四层架构，CPU315-2DP/PN 型 PLC 作为核心控制单元，构建光纤专网+4G/5G 无线+LoRa 三层冗余通信网络，搭配专用控制软件与各类传感、驱动设备，实现闸门开度、流量、液位实时监测与闭环控制。实践验证显示，配水流量相对误差控制在 0.09%~0.35%，通信延迟≤20ms，可满足内蒙古河套灌区分时按量配水调度需求，提升配水效率与运行稳定性，为灌区精细化配水提供技术支撑。

【关键词】：配水调度；闸门远程控制；PLC；冗余通信；闭环控制

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.052

引言

灌区配水调度保障农业灌溉与水资源合理利用，闸门是配水调控关键设备，控制精度与响应速度直接影响配水效率及水资源利用率。内蒙古河套灌区作为特大型自流灌区，传统闸门控制依赖人工操作，配水精度低、远程管控不足、通信链路不稳定、故障响应滞后，难以适配干支斗渠分级配水、灌组调度、春灌秋浇集中供水、大流量节水配水的精细化需求。结合河套灌区及北方大中型自流灌区实际应用场景，设计配水调度场景下的闸门远程控制系统，通过合理架构设计、硬件选型与软件优化，实现闸门远程精准控制、数据实时交互与安全稳定运行，为灌区水资源高效调配提供可靠技术解决方案。

1 配水调度场景下闸门远程控制系统总体架构设计

（1）系统整体结构组成：配水调度场景下闸门远程控制系统采用调度中心—区域分控—现场控制—感知执行四层架构，以内蒙古河套灌区干支斗渠分级配水、轮灌组调度、大流量水位流量协同调控为实际应用场景，由配水调度指挥中心、片区分控站、现场控制单元、传感与执行终端构成[1]。系统中枢为调度中心，负责全渠系配水计划生成、闸门群协同调度、历史运行数据查询统计及远程控制指令下发，实现整个配水系统宏观管控。片区内各闸站运行状态汇聚汇总、本地应急控制处置及调度中心指令转发传递由片区分控站承担，可缓解调度中心压力。边缘控制核心是现场控制单元，能独立完成闸门开度闭环调节、运行数据采集及设备安全保护，提升系统响应效率。感知执行终端采集闸门开度、渠系液位、配水流量，驱动闸门执行动作，形成集中监管、分区自治、现地闭环的配水调度运行结构，适配北方大型自流灌区多节点、长距离、轮灌组分时按量配水业务流程，保障配水调度有序高效开展。

（2）核心控制单元配置：核心控制单元以 CPU315-2DP/PN 型 PLC 为主控制器，配套高速计数模块、模拟量 I/O 模块、继电器输出模块，拥有 PROFIBUS 与工业以太网双通信接口，可灵活适配不同通信需求，确保数据传输高效。各现场控制柜采用星型拓扑组网，支持多宽频数据传输，可同时承载开度、流量、液位等多种参数实时传输，满足配水调度多数据交互需求。核心控制单元配置双机热备机制保障配水调度连续性，主备控制器实时同步运行数据，故障切换时间小于一个 PLC 扫描周期，避免控制器故障导致配水中断。控制器集成开度运算、流量换算、同步纠偏、保护逻辑等功能模块，无需依赖调度中心指令，可独立执行配水流量闭环控制，通信中断时也能维持目标配水流量稳定，提升系统可靠性与实用性。

（3）远程通信网络架构：远程通信网络采用光纤专网+4G/5G 无线+LoRa 三层冗余架构，结合灌区不同闸站地理位置分散、部分偏远无线路、风沙大环境复杂的通信需求，实现全方位无死角通信覆盖。骨干渠系闸站地理位置固定、数据传输量大，光纤作为主干通信方式，提供高带宽、低时延稳定传输，保障调度指令和大量运行数据快速传递[2]。斗渠及分散闸口分布零散，部分无固定通信线路，4G/5G 双模无线通信适配移动组网需求，可灵活应对闸站动态调整。偏远地区或信号薄弱区域，LoRa 扩频通信补充覆盖，解决信号盲区问题。系统可根据信号强度自动选择最优通信链路，实现通信方式自适应切换。调度中心与现场单元采用 Modbus-RTU 标准通信协议，统一数据帧格式与设备地址，完成配水指令、运行参数、故障信息标准化交互，通信延迟控制在 20ms 以内，满足配水调度实时控制核心要求。

2 闸门远程控制系统硬件配置与安装

（1）现场控制单元硬件选型：现场控制单元按灌区户外风沙大、温差大、潮湿的恶劣工作环境选型，兼顾防潮、防尘、抗电磁干扰性能，以 CPU315-2DP/PN PLC 为核心，搭配 7 英

寸工业触摸屏、SD 数据存储卡、JTAG 调试接口与物理操作按键，可本地设置参数、实时显示运行状态、切换手动/远程模式，方便现场运维人员操作调试。通信模块集成 RS232、以太网、GPRS 多接口，兼容光纤、无线等多种传输链路，提升通信灵活性与兼容性。电源模块采用双路冗余供电，支持市电与太阳能互补供电，既能满足有市电闸站正常运行，也适配无市电偏远闸站，避免供电中断引发配水故障。电机驱动器选用大扭矩低速步进伺服驱动器，匹配河套灌区大流量闸门平稳启闭需求，防止闸门启闭过快导致配水流量剧烈波动，保障配水精度，适配灌区精细配水工作要求（见图 1）。

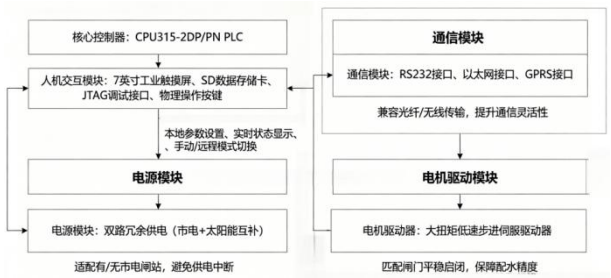


图 1 现场控制单元硬件选型

（2）开度与液位传感器布设：开度监测采用绝对式旋转编码器+增量式旋转编码器双传感器冗余布设，分别安装于闸门两侧油缸，形成双重保障，确保开度测量精准可靠。绝对式编码器可保障断电后闸门位置信息不丢失，避免断电造成开度数据错乱。增量式编码器提供 0.1mm 分辨率实时位移反馈，由卷筒转轴带动转动，以拉线伸缩位移为依据，计算闸门实际开度，满足精细配水对开度测量的高精度要求。上下游液位监测选用静压式液位计，安装于渠内稳流段，避开涡流、漂浮物等干扰因素，测量精度达±0.5cm，可实时捕捉渠系液位变化[3]。关键配水断面、轮灌组分界断面加装超声波流量仪，实时采集实际配水流量数据，为配水流量闭环控制提供准确实测依据，保障配水流量与目标值匹配。

（3）驱动与安全保护装置设计：驱动装置采用步进电机搭配行星轮减速机构组合设计，可实现大扭矩、低噪声平稳驱动，控制机械传动误差，将其控制在±1mm 以内，保障闸门启闭精准度，避免传动误差影响配水精度。安全保护采用机械限位+光电限位+电气保护三重设计，全方位保障设备和渠系安全。闸门运行最高点和最低点均安装限位开关，运行至超行程位置时，立即切断驱动电源并发出报警信号，防止闸门冲顶或过度关闭。电机回路配置过流、过载、缺相、超温保护模块，实时监测电机运行状态，出现异常立即自动停机并上传故障信息，防止闸门卡阻、电机损坏等事故，为配水调度设备与渠系运行安全提供坚实保障。

3 配水调度专用控制软件设计

（1）闸门开度测量与误差校正：软件基于闸门有效行程分段线性化原理建立开度计算模型，结合河套灌区大型闸门运行实际特性，将开度曲线划分为多段直线区间，以液压缸实测位移数据为输入，通过模型实时解算闸门实际开度，提升开度测量精准度。闸门两侧油缸运行不同步易导致卡阻、损坏，采用位置闭环同步纠偏算法，双传感器实时监测两侧油缸行程差，自动输出修正电压调节两侧电机转速，快速消除行程偏差，确保闸门平稳运行。开度零点校准与行程补偿机制已建立，定期自动校正开度测量数据，抵消传感器磨损、环境干扰等因素带来的测量误差，将开度测量相对误差控制在 0.2%以内，为配水流量精准控制提供可靠开度数据支撑（见图 2）。

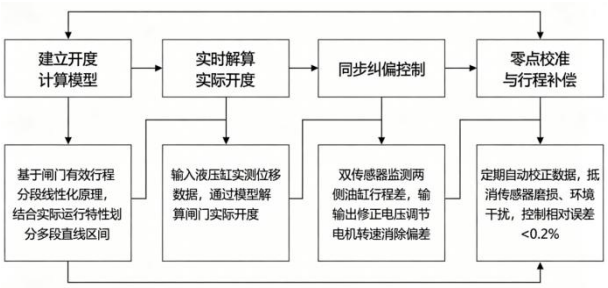


图 2 闸门开度测量与误差校正

（2）配水流量闭环控制算法：配水流量闭环控制以灌区配水计划、轮灌组配水指令设定的目标配水流量为设定值，以现场流量仪采集的实际配水流量为反馈值，采用 PID+前馈补偿复合控制算法，结合闸门开度-流量映射关系，实时计算最优闸门开度控制量，保障实际配水流量与目标值匹配。控制算法引入防频繁启闭逻辑以延长设备使用寿命、避免流量振荡，设置合理开度死区与调节速率限制，防止闸门频繁动作造成设备损耗和配水流量波动[4]。微分先行与积分分离优化提升系统响应速度与稳态精度，使实际配水流量快速、稳定跟踪目标值，恒流量配水、轮灌组分时配水、春灌秋浇集中配水均可满足灌区配水调度实际需求，实现精细配水。

（3）远程通信协议与数据交互：系统采用 Modbus-RTU 作为核心通信协议，该协议通用性强、传输高效、稳定性好，通过定义统一设备地址、功能码与数据寄存器，实现调度中心、分控站、现场控制单元间标准化数据交互，避免协议不统一引发的数据传输混乱。通信层设计数据校验、超时重传、链路检测机制，数据传输中实时校验完整性，超时或链路中断时自动重传，定期检测通信链路状态，及时发现并处理通信故障，保障数据传输可靠。数据交互覆盖配水调度关键参数，包括目标开度、实际开度、上下游液位、实时流量、设备运行状态、故障信息等，数据上传周期可按配水需求灵活配置，指令下发与状态回传延迟低，实现调度端与现场端实时数据同步，为配水

调度决策提供及时准确的数据支撑。

4 系统在配水调度中的实践应用与效果验证

（1）现场部署与调试方案：以内蒙古河套灌区配水闸站为实际应用案例，按硬件安装—接线调试—通信组网—软件标定标准化流程开展现场部署，保障系统部署规范、运行稳定。部署前期，完成控制柜、传感器、驱动装置固定安装与线路连接，按电气安装规范接线，避免线路接触不良、短路等问题。后续下载 PLC 程序、配置触摸屏组态，将配水控制逻辑、参数设定导入控制器，完成触摸屏操作界面调试。通信层面逐点调试光纤、4G/5G、LoRa 三种通信链路，检测链路连通性与传输稳定性，保障调度中心与各现场单元通信顺畅。调试阶段重点开展开度校准、液位标定、流量系数测定、同步纠偏测试、保护功能验证，逐步完成单闸控制调试与群闸联调，排查解决调试中的问题，确保系统各项性能指标符合配水调度运行要求，为后续实际运行奠定坚实基础。

（2）配水控制精度测试：为验证系统配水控制精度，在河套灌区干支斗渠典型配水流量区间开展专项测试，该区间覆盖干支斗渠日常配水主要流量范围。测试时通过调度中心下发不同目标流量指令，记录系统计算开度与实际开度、实际流量与目标流量的偏差。测试结果显示，系统计算开度与目标流量匹配度高，流量相对误差稳定在 0.09%～0.35%之间，远低于传统无线智能节点系统、物联网 PLC 系统误差水平，满足灌区精细配水精度要求。闸门开度控制精准，升降过程平稳无超调、无振荡，不同流量设定值切换时，可快速响应并稳定跟踪目标流量，避免流量波动导致渠系水位不稳定，保障配水调度科学合理。

（3）远程通信稳定性验证：远程通信稳定性是配水调度实时控制的关键，专门在不同电机转速、不同通信链路条件下开展稳定性测试，全面模拟灌区配水过程中的各种通信场景。测试结果表明，系统通信延迟稳定在 20ms 以内，无明显波动，满足实时控制需求。光纤、4G/5G、LoRa 三种通信链路切换时，无丢包、无指令滞后，切换过程顺畅，确保调度指令及时下发、现场状态实时回传[5]。开展连续 72 小时不间断运行测试以进一步验证系统长期运行稳定性，测试期间系统通信连通率达 100%，无指令丢失、数据错乱等现象，长距离、多节点、风沙环境下，通信实时性与可靠性完全满足闸门群协同控制要求，为配水调度顺利开展提供可靠通信保障。

（4）配水调度运行效益分析：系统在内蒙古河套灌区投入实际运行后，彻底改变传统配水调度模式，实现配水调度远程化、自动化、精细化，各项运行效益显著提升。闸门操作从以往现场手动操作转为远程一键控制，大幅减少现场运维人员工作量，人力成本降低 60%以上，解决灌区闸站分散、战线长、运维难度大的问题。流量控制精度大幅提升，配水偏差显著减小，避免水资源浪费，使灌区水资源利用率提高 8%～12%，契合河套灌区节水改造、高效节水灌溉发展理念。同步纠偏与多重安全保护机制避免闸门卡阻、冲顶等设备故障和渠系安全事故，减少设备运维成本和事故损失，整体提升灌区配水调度效率与管理水平，为北方大型自流灌区配水调度提供可借鉴的实践经验。

5 结语

本文围绕内蒙古河套灌区配水调度需求，完成闸门远程控制系统总体架构、硬件配置、软件设计及实践应用验证。系统通过四层架构实现集中监管与分区自治有机结合，冗余通信网络保障长距离、多节点、风沙恶劣环境下通信稳定性，专用控制算法提升配水精度与闸门运行平稳性。实践结果显示，系统各项性能指标均满足河套灌区及北方大中型自流灌区配水调度要求，有效解决传统控制模式弊端，提升配水调度自动化、精细化水平。

参考文献：

[1] 刘辉.闸门及其自动化远程控制系统在制盐中的应用[J].盐科学与化工,2025,54(01):34-36.

[2] 彭杰伙.自动泄洪的水库闸门远程控制系统优化设计[J].水电站机电技术,2024,47(10):81-84.

[3] 王丹丹,周颖,李先慎,等.水闸站自动化远程监控与控制改造技术研究[J].水电站机电技术,2024,47(08):33-36.

[4] 聂朋,韩斐,陈柏,等.泄洪闸门液压启闭远程控制方式策略研究[J].水电站机电技术,2024,47(08):43-45.

[5] 王利文,一种远程控制闸门限位保护装置.甘肃省,甘肃省疏勒河流域水资源利用中心,2024-05-24.

[6] 李君香,刘斌.农业灌区闸门远程智能测控系统研究与开发——以甘肃省景电灌区为例[J].南方农机,2024,55(08):77-80.