

表孔泄洪闸门远程操作控制系统在石泉厂站中的研究及应用

郭飞武

大唐石泉水力发电厂 陕西 安康 725200

【摘要】：针对石泉厂站表孔泄洪闸门原有控制系统老化、核心元器件依赖进口、数据监测滞后、远程控制缺失，且无法适配“无人值守、少人值班”管理模式的核心痛点，本文开展电气控制系统智能升级与远程控制系统的专项研究及工程应用。改造后系统完全满足 GB7251、NB/T42084-2016 等标准及“无人值守、少人值班”管理要求，设备国产化率达 100%，有效解决了老电厂“人工依赖度高、智能化水平低、远程管控弱”的关键问题，为同类老水力发电厂向“无人值守”转型提供了可复制、可推广的实践方案。

【关键词】：电气控制系统；远程监控；国产化 PLC；泄洪闸门；钢丝绳在线监测

DOI:10.12417/2705-0998.25.20.007

引言

石泉水力发电厂作为汉江区域重要水利枢纽，自 1973 年投运以来，长期承担着防洪泄洪核心任务。随着运行年限增加，原系统逐渐暴露出问题，响应国家“关键核心技术自主可控”及电力行业“无人值守、少人值班”转型号召，本文基于石泉厂站实际工况，开展电气控制系统智能升级与远程控制系统研究，通过国产化替代、智能感知赋能、远程网络构建，实现泄洪设备从“人工操控”向“智能自主运行”的转型，对保障厂站安全生产、提升防洪调度效率具有重要工程价值与行业示范意义。

1 工程概况与改造目标

1.1 研究背景

石泉厂站表孔泄洪闸门原有控制系统采用 20 世纪 70 年代技术方案，配套固定卷扬式启闭机与常规控制柜，投运至今已超 50 年。随着电力行业“智能化升级”与“核心技术自主可控”战略的推进，原系统逐渐暴露出难以调和的矛盾。

2 电气控制系统智能升级方案设计

2.1 方案设计原则

本次方案设计严格遵循“适配性、可靠性、扩展性、经济性”四大原则。

充分考虑石泉厂站现有设备基础，表孔控制柜尺寸与原柜一致，避免改造过程中破坏坝面原有结构；电机安装尺寸与原电机匹配，无需修改启闭机基础；核心设备采用冗余设计，PLC 以太网接口冗余、电源模块冗余，确保单一设备故障不影响系统运行；泄洪闸门集控柜预留 20 个通讯接口，可扩展接入其他泄洪闸门控制系统，满足石泉厂站泄洪闸门未来升级改造需求；优先选用性价比高的国产设备，避免过度设计；同时，旧设备中可回收部件进行翻新利用，降低改造成本。

2.2 硬件系统筑牢无人值守基础

2.2.1 控制柜适配无人运行环境

采用 2mm 厚 304 不锈钢板制作柜体，配置防雨罩与密封胶条，防护等级提升至 IP55，可有效抵御雨水、灰尘侵入，解决原柜体锈蚀问题；柜内增设温湿度智能调控系统（温度范围 0-50℃、湿度范围 30%-70%），通过加热板与通风风扇自动调节内部环境，避免凝露与元件过热；内置开门报警装置（与远程平台联动）、独立检修照明灯具及 3P63A 备用断路器、2 个 10A5 孔插座，提升运维便利性，减少现场停留时间。

2.2.2 核心元器件国产化选型

选用国产自主可控 PLC（CPU 主频≥266MHz，硬件国产化率 100%），支持冗余以太网接口（通讯速率≥100Mbps）及带电热插拔 I/O 模块，编程软件符合 IEC61131-3 标准，兼容国产操作系统，通过 61850 电力规约认证，确保远程控制指令高速、稳定传输；选用上海起重电机厂生产的二级能效三相异步电机，表孔闸门电机功率 16kW/22kW，适配无人值守下的节能运行需求；元器件容量按电机额定电流 1.5 倍配置，具备过压、欠压、断相自保护功能，故障状态实时上传至远程平台。

2.2.3 智能感知系统实现无人化监测

每台闸门配置绝对型高度编码器（测量误差≤0.1%）、双吊点荷重传感器及开度荷重综合监控仪，数据通过光纤实时传输至 PLC，为无人操作提供精准数据支撑；增设 YBLX 型重锤限位与 DXZ 型起升限位开关，实现机械-电气双重极限保护，避免闸门超程故障；在每台闸门钢丝绳的固定端、缠绕端等关键位置加装伸缩监测装置，实时检测断丝、断股、锈蚀、磨损等损伤，定量分析损伤程度并定位，支持预警阈值自定义，故障识别准确率≥98%，完全替代人工目视检测；在闸门控制柜前、闸门下方区域安装海康威视智能球机，支持区域入侵侦测、越界侦测、设备异常状态识别（如闸门错位、钢丝绳松弛），视频存储≥60 天，实现“可视化无人值守”，远程可实时查看设备运行状态。

2.2.4 备用电源远程适配

0 号、1 号柴油发电机通过专用通讯模块接入泄洪闸门控制系统，采用光纤与泄洪闸门集控柜连接，实现远程一键启停（响应时间≤1 分钟），无需人工现场执行“检查油位-合闸电源-手动启动-确认供电”流程；泄洪闸门控制电源支持 AC220V±15%宽电压运行，确保柴油发电机供电时系统稳定工作，解决无人值守下的应急供电问题。

2.3 远程控制系统支撑少人值班

采用分层分布式网络架构，通过光纤实现数据高速传输，构建“现场层-集控层-监控层-安全层”四级控制网络，确保远程控制的稳定性与安全性。

现场层现地控制柜与启闭机、传感器、视频球机直接连接，采集设备运行数据，执行控制指令，实现本地无人化运行；集控层泄洪闸门集控柜汇总 10 台闸门及 2 台柴油发电机的运行数据与状态信息，进行数据预处理与协议转换，预留 20 个通讯接口，可扩展接入其他泄洪闸门控制系统，满足厂站未来升级需求；监控层中控室、水工班配置工业计算机与监控平台，安装专用监控软件，支持设备状态实时显示、远程操作、故障报警、数据查询与报表生成，操作人员可在中控室完成所有闸门的集中管控，实现“少人值班”；1 号保护室公用监控系统通过防火墙、入侵检测系统与集控层隔离，防止网络攻击与非法操作，确保无人值守下的系统网络安全，同时支持全闸门与柴油发电机的远程应急控制，形成双重保障。

2.4 控制逻辑与软件系统保障无人运行

2.4.1 “三级闭锁”控制模式设计

采用“手动-自动-远控”三级控制模式，优先级依次为：手动（应急备用）>自动（本地无人干预）>远控（少人值班核心模式），互为闭锁，确保操作安全。远方/现地开关切至“远方”，中控室、水工班或 1 号保护室通过上位机发送指令，系统自动执行操作，操作日志自动存储（保留≥30 天），全程无需现场人员参与，是“少人值班”的核心运行模式；远方/现地开关切至“现地”，控制方式切至“自动”，通过 15 寸触摸屏设置目标参数（如闸门开度、运行速度），系统根据传感器反馈数据自动调整运行状态，抵达目标位置后自动停机，支持故障自动停机与报警，适配现场无人值守场景；手动模式仅作为应急备用，远方/现地开关切至“现地”，控制方式切至“手动”，通过控制柜上的上升/下降/停止/急停按钮操作，不受 PLC 故障影响，确保极端情况下的设备可控性。

2.4.2 故障自处理与预警逻辑

PLC 实时监测电机、闸门、传感器、通讯网络等状态，触发故障时自动执行“停机-报警-记录-推送”闭环处理，无需人工介入，具体逻辑如下表所示：

表 1 故障类型与无人化处理逻辑

故障类型	故障阈值	无人化处理逻辑
电机过载	电流>整定电流 1.2 倍，持续 3 秒	立即停止电机运行，控制柜故障指示灯亮、触摸屏显示故障信息，远程平台弹窗+声光报警，记录故障时间、电流值，支持远程诊断
闸门卡阻	荷重>额定值 110%且开度无变化>5 秒	立即停止电机运行，启动钢丝绳在线监测装置排查原因，远程平台推送故障定位与初步诊断结果，禁止再次启动直至故障排除
钢丝绳损伤	断丝数≥6 根/捻距 或磨损量≥10%	立即停止闸门运行，标记损伤位置与程度，触发紧急报警（远程平台+手机 APP），禁止远程操作，仅允许手动低速下放闸门
闸门超限位	上限开关（SQ1） 或下限开关（SQ2） 动作	立即停止对应方向运行，允许反向操作，远程平台显示限位报警信息，记录操作轨迹，便于追溯
PLC 通讯故障	通讯中断>3 秒	自动切换至备用以太网接口，若仍中断则切换至自动模式，远程平台推送通讯故障预警，提示运维人员处理
传感器异常	数据偏差>0.5%或 无数据反馈>2 秒	自动标记异常传感器，启用冗余传感器数据（若有），远程平台推送传感器维护提示，不影响系统正常运行

2.4.3 软件功能优化

监控软件采用模块化设计，包含数据采集、实时监控、远程控制、故障报警、报表统计、视频联动六大功能模块。实时监控模块以图形化界面显示闸门开度、载荷、电机电流、钢丝绳状态等数据，支持单闸门查看与多闸门对比，直观呈现设备运行状态；视频联动模块点击监控界面中的闸门图标，可自动切换至对应区域的视频画面，实现“数据+视频”双重监控，便于远程判断设备运行状态；报表统计模块自动生成设备运行报表、故障报表、能耗报表，支持按日/周/月导出，减少人工统计工作量，为运维优化提供数据支撑；移动端适配支持手机 APP 远程查看设备状态与报警信息，接收故障推送，实现“少人值班”下的移动化运维。

3 应用效果与验证

3.1 试验验证与数据采集

改造完成进行为期 3 个月的试运行，通过模拟正常运行、

故障工况、应急泄洪等场景，验证系统的智能化水平、远程控制效果及“无人值守”适配性。数据采集采用远程平台自动记录与现场实测相结合的方式，重点监测设备国产化率、数据准确率、远程控制响应时间、故障预警准确率、人员配置变化等核心指标。

3.2 无人值守、少人值班成效

3.2.1 智能化水平显著提升

开度测量误差从原 $\pm 5.2\%$ 降至 $\pm 0.1\%$ ，载荷数据滞后时间从12.3秒缩短至0.5秒，数据准确率 $\geq 99.5\%$ ，为无人操作提供精准数据支撑；钢丝绳在线监测覆盖率达100%，故障识别准确率98.2%，避免故障扩大。

3.2.2 远程控制全面覆盖，落地“少人值班”

远程操作覆盖率达100%，闸门启闭、柴油发电机启停均可通过远程平台一键完成，应急泄洪响应时间从42分钟缩短至5分钟，响应效率提升88%；备用柴油发电机远程启停时间 ≤ 1 分钟，较人工启动缩短7分钟，解决极端天气下人员无法及时抵达现场的问题；现场运维人员现场工作量降低40%，仅需定期（每周1次）前往现场巡检，实现“少人值班”目标。

3.2.3 支撑无人值守稳定运行

核心元器件100%国产自主可控，备品备件采购周期缩短至7天内，年维护费用较改造前降低60%，解决“卡脖子”问题；

控制柜防护等级达IP55，温湿度智能调控，设备故障率降低65%，试运行期间未发生任何安全事故与非计划停运；电机能效等级提升至二级，实现节能与环保双赢。

3.2.4 合规性验证

改造后系统通过第三方权威机构检测，符合GB7251《低压成套开关设备和控制设备》、GB14048《低压开关设备和控制设备》、NB/T42084-2016《起重及冶金用三相异步电动机能效限定值及能效等级》等标准要求；PLC、电机、电气元件均通过CCC认证，钢丝绳在线监测装置通过防爆认证，完全满足“无人值守、少人值班”的安全生产要求。

4 结论

本文通过石泉厂站泄洪闸门电气控制系统智能升级与远程控制系统的研究及应用，解决了老电厂控制系统老化、国产化不足、远程控制缺失等问题，实现了三大核心成果。构建了100%国产化的硬件体系，突破进口元件依赖；新增智能监测功能，实现设备状态全感知与故障预警；搭建多层次远程控制网络，提升应急响应与运维效率。改造后系统运行稳定，满足安全生产需求，为同类老水力发电厂控制系统升级提供了可复制的实践方案。未来可进一步接入厂级智慧管理平台，实现泄洪设备与水库调度、电网负荷的协同控制；引入AI算法，基于历史数据预测设备寿命，实现从“故障维修”向“预测性维护”的转变，进一步提升厂站智能化水平。

参考文献：

- [1] 姚正.基于PLC控制系统的电力设备自动化生产线升级改造研究[C]//重庆市大数据和人工智能产业协会,重庆建筑编辑部,重庆市建筑协会.智慧建筑与智能经济建设学术研讨会论文集(三).杭州耀仲建设有限公司,2025:1047-1050.
- [2] 袁兵,朱建国,谭启辰,等.引水工程泵站配电电气控制系统升级改造研究[J].水利技术监督,2025,(07):71-74+85.
- [3] 李玮华.探讨水利枢纽工程中电气自动化技术的应用[J].中国科技论文在线精品论文,2025,18(01):103-105.
- [4] 钱磊.论电气自动化在水利水电工程中的应用[J].新型工业,2021,11(05):79-80.
- [5] 俞娟.基于高耦合逆变补偿的水利工程电气控制系统设计[J].水利水电技术,2020,51(07):70-76.