

信息机电系统在水利工程闸门自动化控制中的应用与优化

赵松波 唐 帅

南水北调中线信息科技有限公司 河南 南阳 473000

摘要: 信息机电系统通过传感器、PLC、通信网络及智能算法等技术架构,实现水利工程闸门自动化控制。系统可实时监测水位、流量、闸门状态等参数,支持远程控制与故障预警,提升防洪调度、水资源调配、应急抢险等场景的响应速度与精准度。当前面临传感器精度受限、算法适应性不足等挑战,需通过引入激光雷达融合技术、开发数字孪生系统等技术升级,以及建立三维运维体系、强化数据安全防护等管理创新优化系统性能。

关键词: 信息机电系统; 水利工程闸门; 自动化控制; 应用; 优化

引言: 水利工程作为国家基础设施建设的关键部分,其闸门控制对防洪、灌溉、供水等起着至关重要的作用。传统闸门控制依赖人工操作,存在响应慢、精度低等问题,难以应对复杂多变的水情。随着信息技术发展,信息机电系统凭借其强大的数据采集、处理与智能决策能力,为闸门自动化控制带来新契机。深入研究其在水利工程闸门自动化控制中的应用与优化,对提升水利工程运行效率与安全性意义重大。

1 信息机电系统核心技术架构

1.1 硬件系统组成

(1) PLC控制单元: 采用分布式控制架构,通过分级部署实现精准管控,例如在某水利工程中,配置7面PLC柜构建三级控制模式,一级柜负责全局指令下发,二级柜分管区域设备协调,三级柜直接对接终端执行组件,大幅提升控制响应速度与系统容错能力,满足复杂场景下的多设备协同需求。(2) 传感器网络: 构建多参数实时监测体系,涵盖水位传感器、流量传感器、闸门位移传感器及结构应力传感器等,可对设备运行状态与环境数据进行高频采集,采样间隔低至1秒,数据误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内,为系统决策提供精准数据支撑^[1]。(3) 执行机构: 集成电动启闭机、液压驱动系统与机电一体化装置,其中电动启闭机采用变频调速技术,实现闸门0.1m/s-0.5m/s无级变速;液压系统配备压力反馈装置,实时调节输出压力,确保执行动作平稳可靠,适配不同负载工况。(4) 通信网络: 采用工业以太网、5G专网与VPN远程接入的冗余设计,工业以太网保障本地设备毫秒级通信,5G专网实现偏远区域高速数据传输,VPN确保远程运维安全接入,多链路备份有效避免单点故障,提升通信稳定性。

1.2 软件系统设计

(1) 上位机监控平台: 基于iFIX组态软件开发,具备实时数据可视化、故障报警与报表生成功能,通过动态流程图直观展示设备运行状态,故障发生时可触发声光报警并记录故障信息,支持按日、周、月自动生成运行报表,便于运维人员分析决策。(2) 数据中台: 依托Hadoop架构搭建时序数据库,可高效存储与挖掘海量监测数据,以某水务工程为例,系统每日通过标准化数据接口向水务管理平台报送10万条以上数据,涵盖水位、流量、设备能耗等关键指标,同时支持数据回溯查询与趋势分析,为优化运行策略提供数据依据。(3) 智能算法模块: 集成BP神经网络流量预测与模糊控制策略,BP神经网络通过学习历史数据可实现未来24小时流量精准预测,预测误差低于5%;模糊控制策略能根据实时流量、水位变化动态优化闸门启闭速度,避免闸门频繁启停,减少机械损耗,提升系统运行效率与稳定性。

1.3 系统集成与冗余设计

(1) 双机热备机制: 在上位机与PLC控制单元中部署双机热备系统,正常运行时主设备负责数据处理与控制指令下发,备用设备实时同步主设备数据,当主设备发生故障时,备用设备可在100ms内自动切换接管工作,确保系统无间断运行,降低故障对生产的影响。(2) 混合控制模式: 采用现地控制与远程控制的权限分级管理,现地控制优先级高于远程控制,运维人员在现场可通过本地操作面板直接控制设备,远程控制则需通过身份认证与权限审核,既保障紧急情况下的快速响应,又避免误操作风险,实现分级管控^[2]。(3) 防雷击与电磁兼容设计: 在系统硬件选型与布线中融入防雷击与电磁兼容措施,室外传感器与通信线路配备防雷器,设备外

壳采用接地处理,同时对PLC控制柜进行电磁屏蔽设计,有效抵御雷击冲击与电磁干扰,确保系统在雷雨、工业强电磁等恶劣环境下稳定运行。

2 信息机电系统在水利工程闸门自动化控制中的应用

2.1 防洪调度场景

(1) 案例:某大型水库地处多雨流域,在2024年汛期暴雨期间,依托信息机电系统实现闸门群协同控制。该水库共部署12扇泄洪闸门,系统通过传感器网络实时采集库区水位、入库流量及下游河道水位数据,结合气象部门的降雨预报信息,自动生成闸门启闭方案。在连续72小时强降雨过程中,系统动态调节各闸门开度,将库区水位精准控制在防洪限制水位 $\pm 0.1\text{m}$ 范围内,有效避免了水位超限风险,保障了下游沿岸城镇与农田的安全。(2) 技术亮点:核心在于应用基于BP神经网络的流量预测预调度算法。系统通过历史降雨、水位、流量数据训练模型,提前12小时预测入库流量变化趋势,据此制定预调度策略,在洪水来临前提前开启闸门预泄,避免传统人工监测、决策导致的响应延迟问题。同时,闸门群协同控制逻辑可根据各闸门运行状态动态分配泄流量,确保设备负载均衡,提升整体防洪效率。

2.2 水资源调配场景

(1) 案例:某跨流域调水工程连接两大水系,承担着沿线5个城市的供水任务。工程中应用的信息机电系统,实现了闸门与沿线20座泵站的联动控制。系统根据沿线城市每日上报的用水需求,结合水源地水位、输水干线流量等实时数据,自动调节输水闸门开度与泵站运行功率。在2024年夏季用水高峰期,系统稳定运行,日均调水量达500万立方米,精准满足了沿线城市居民生活、工业生产及农业灌溉的用水需求,未出现一次供水短缺或输水管道过载问题。(2) 技术亮点:采用多源数据融合的决策支持系统。该系统整合了水源地水文数据、沿线用水需求数据、闸门与泵站运行状态数据等多类信息,通过数据中台进行实时分析与建模,优化闸门开度与水流速度的匹配关系。例如,在输水干线流量过大时,自动调小上游闸门开度并降低下游泵站功率,避免管道压力过高;在流量不足时,同步增大闸门开度与泵站出力,确保输水效率,实现水资源的高效、精准调配^[3]。

2.3 应急抢险场景

(1) 案例:某堤防工程临近河道,2023年汛期因河道水位骤升,堤防局部出现结构隐患。部署在堤防上的信息机电系统,通过埋设在堤防内部的结构应力传感器,实时监测堤防应力变化。当某段堤防应力值超出安全阈值15%时,系统立即发出预警信号,同时自动触发

闸门控制指令,关闭堤防附近的2扇节制闸门,阻断河道水流向隐患区域的渗透。后续抢险人员及时赶到加固堤防,成功避免了溃口事故的发生。(2) 技术亮点:关键在于部署边缘计算节点。在闸门控制终端与传感器附近设置边缘计算模块,可直接对采集到的应力、水位等数据进行本地分析与决策,无需依赖远程云服务器,实现毫秒级应急响应。即使在极端天气导致通信网络中断的情况下,边缘节点仍能独立完成监测、预警与闸门控制操作,有效规避了通信中断带来的抢险延误风险,为应急处置争取宝贵时间。

3 信息机电系统在水利工程闸门自动化控制中现存问题与优化策略

3.1 技术瓶颈

(1) 传感器精度受限:在多泥沙流域的水利工程中,传统水位计易受水中高泥沙含量影响,泥沙附着在传感器探头表面或堵塞测量通道,导致水位测量误差高达5%以上。例如某黄河流域水库,汛期水流含沙量骤增时,水位计多次出现数据漂移,偏差最大达0.3m,无法为闸门控制提供精准数据,增加了防洪调度的决策风险。(2) 算法适应性不足:现有流量预测模型多基于常规气象水文数据训练,在极端天气下适应性明显不足。当遭遇台风、特大暴雨等非正规天气时,模型难以准确捕捉水文参数的突变规律,预测偏差常超15%。如2024年某沿海城市水库遭遇强台风,流量预测模型提前6小时预测的入库流量与实际值偏差达22%,导致闸门预调度方案不合理,需人工紧急调整,增加了操作压力。

3.2 管理挑战

(1) 运维人员技能缺口:信息机电系统融合了机械、电子、软件、通信等多领域技术,对运维人员的复合型技能要求较高,但目前行业内此类人才短缺。多数基层运维人员仅掌握基础设备操作,面对系统软件故障、算法参数异常等问题时,无法独立排查,需依赖设备厂家技术支持,导致故障处理周期延长,平均修复时间超8小时,影响系统稳定运行。(2) 数据安全风险:远程控制功能需通过网络接口实现,但部分工程的网络安全防护措施不完善,缺乏防火墙、入侵检测系统等防护设备,远程控制接口易受黑客攻击。2023年某灌区曾出现因接口漏洞导致的闸门控制指令异常,虽未造成严重事故,但暴露出数据安全管理的漏洞,对系统操控安全性构成威胁。

3.3 优化方向

3.3.1 技术升级

(1) 引入激光雷达与超声波传感器融合技术:激

光雷达可穿透高泥沙水体,精准测量水位,超声波传感器则能辅助校正数据,二者融合可有效抵消泥沙对测量的干扰,将水位测量误差控制在1%以内,提升复杂水文环境下的监测精度,为闸门控制提供可靠数据支撑。

(2) 开发数字孪生系统:构建与实际闸门系统1:1的虚拟模型,实时映射闸门运行状态、水文环境等数据,通过虚拟仿真模拟不同工况下的系统响应,提前识别潜在故障,实现预测性维护,减少非计划停机时间,预计可将故障发生率降低30%以上^[4]。

3.3.2 管理创新

(1) 建立“设备-数据-人员”三维运维体系:通过AR技术将设备故障信息、维修步骤等叠加到实际设备上,辅助运维人员现场排查;同时搭建线上培训平台,定期开展多领域技术培训,提升人员综合技能,目标将独立故障处理率提升至80%,缩短故障修复时间至2小时以内。(2) 构建区块链平台:将闸门调度指令、操作记录等关键数据上传至区块链,利用其去中心化、不可篡改的特性,确保数据真实性与可追溯性;同时搭配多重身份认证、数据加密传输等措施,抵御网络攻击,保障远程控制接口安全,提升系统数据安全防护能力。

4 信息机电系统在水利工程闸门自动化控制中的发展趋势与展望

4.1 技术融合趋势

(1) 5G+AIoT:5G技术的高带宽、低时延特性,将与人工智能物联网(AIoT)深度融合,实现闸门控制系统的全域感知与自主决策。通过在闸门、河道、水库等区域密集部署智能传感器,实时采集水文、设备状态等数据,经5G网络高速传输至AI平台,AI算法可自动分析数据并生成最优控制策略,实现闸门的无人化自主运行,大幅提升控制效率与精准度。(2) 量子通信技术:随着远程控制在水利工程中的广泛应用,通信安全愈发关键。量子通信技术凭借其不可破译的特性,将有效提升远程控制的安全性及抗干扰能力,避免控制指令被篡改或拦截,为闸门自动化控制的远程操作提供绝对安全的通信保障,解决当前数据传输的安全隐患^[5]。

4.2 应用场景拓展

(1) 生态流量调控:以往闸门控制多侧重防洪、供水,未来将更多关注生态保护。信息机电系统可结合下

游河道生态需水数据,通过闸门自动化控制精准调节下泄流量,保障河道生态用水稳定,维持水生生物栖息地环境,实现水利工程的生态效益与经济效益协同发展。

(2) 城市内涝治理:系统将与城市地下管网监测系统联动,实时获取管网水位、降雨量等数据,当监测到内涝风险时,自动控制城市河道、排洪沟的闸门动态启闭,加快雨水排放,有效缓解城市内涝问题,提升城市防洪排涝能力。

4.3 政策与标准建设

(1) 推动国家标准制定:目前水利闸门自动化系统缺乏统一标准,导致设备兼容性、数据格式不统一。未来将推动《水利闸门自动化系统技术规范》等国家标准的制定,规范系统设计、建设、运维等环节,提升行业整体技术水平。(2) 建立行业级工业互联网平台:整合行业内的技术资源、数据资源,建立行业级工业互联网平台,促进各单位间的技术共享与协同创新,加速新技术在闸门自动化控制中的应用落地,推动整个行业的数字化、智能化转型。

结束语

信息机电系统在水利工程闸门自动化控制领域已展现出巨大优势,显著提升了控制的精准度与响应速度,有力保障了水利工程的安全稳定运行。然而,技术瓶颈与管理挑战仍不容忽视。未来,随着技术不断革新与管理模式持续优化,信息机电系统将深度融合前沿科技,拓展应用场景,推动水利工程向智能化、生态化迈进。我们应积极拥抱变革,为水利事业高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1]赵旭春.水利工程中闸门自动化监控系统研究[J].科技与创新,2022,(13):150-152.
- [2]葛新.水利工程中闸门自动化监控系统研究[J].黑龙江科学,2021,12(10):102-103.
- [3]黄小明.闸门自动化监控系统在水利工程中的应用[J].黑龙江水利科技,2020,48(12):159-161.
- [4]王宁渝,池浩.PLC技术在水利闸门自动化控制中的应用[J].电子元器件与信息技术,2021,5(08):103-105.
- [5]王岩,尚振兰,周威.闸门自动化监控系统在水利工程中的实际应用[J].智能城市,2020,6(03):187-188.