

水利工程闸门自动化控制系统设计与应用研究

张德欣 路梦杰 王浩龙

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司 河南 郑州 450000

摘要：在跨区域水资源调配工作中，闸门自动化控制系统借助“云边端”架构，整合传感网络与智能算法，实现输水干线全景感知与精准调控。该系统基于动态水文数据，经边缘计算与中央控制协同，用数字孪生和机器学习生成闸门操作方案，能将响应时间缩短至秒级，从而提升输水效率、降低损耗。其自适应调节能力、分布式架构及虚实结合模式，为长距离水资源调配提供坚实保障，在应对洪涝灾害威胁、水资源分配及生态保护等方面作用显著。

关键词：水利工程；闸门自动化；控制系统；设计；应用

引言

长距离水资源调配工程面临着复杂的水文条件和精准调控的挑战，传统的人工模式已难以满足效率与安全方面的需求。本文聚焦闸门自动化控制系统，阐述其“云边端”架构设计，包括感知层、边缘层与云端层的协同运作，硬件选型的环境适应性与精度保障，软件系统的数字孪生与算法融合。通过分析系统在应对洪涝灾害威胁、水资源调配等场景的应用，展现其对跨区域水资源高效、安全调配的支撑作用，为同类工程提供参考。

1 水利工程闸门自动化控制系统概述

水利工程闸门自动化控制系统是跨区域水资源调配体系中的核心技术支撑，它通过集成传感器网络、智能控制算法与远程监控平台，实现对输水干线中各类闸门的精准调控与动态管理。该系统以实时水文数据为基础，依托布设在建筑物关键部位的压力传感器、流量计量装置及视频监控设备，持续采集输水过程中的水位变化、水流速度、闸门运行状态等参数，经边缘计算节点初步处理后传输至中央控制系统，形成对整个输水网络运行状态的全景式感知。基于动态感知数据，系统的智能决策模块通过预设的水力数学模型与机器学习算法，自动生成闸门操作方案。该方案既能够根据输水目标调整闸门开启度以控制流量分配，又能在遭遇突发水情时快速响应，通过联动调节上下游闸门实现水压平衡，避免因局部过载引发工程结构安全风险。相较于传统人工操作模式，这种自动化控制模式不仅将闸门调节响应时间缩短至秒级，还能通过多闸门协同控制消除输水过程中的水力干扰，使干线输水效率得到显著提升，同时降低因人为操作误差导致的水资源损耗。系统的创新设计体现在其具备的自适应调节能力，通过构建数字孪生平台，将物理输水系统的实时状态映射至虚拟空间，工程师可在仿真环境中模拟不同工况下的闸门操作效果，提

前预判潜在风险并优化控制策略。这种虚实结合的调控模式大幅提高了系统应对复杂水文条件的能力，而分布式控制架构的采用，使系统能够根据输水干线的地理分布特点，将控制单元分散部署于各节制闸、分水口等关键节点，通过工业以太网实现数据交互与协同工作，既保证了局部调控的灵活性，又确保了整体输水目标的一致性，为长距离、大规模水资源精准调配提供了稳定可靠的技术保障。

2 水利工程闸门自动化控制系统设计

2.1 系统总体架构设计

系统采用“云边端”三层分布式架构，将感知层、决策层与执行层通过异构网络深度融合，形成覆盖整个输水干线的智能控制体系。感知层由部署在输水沿线关键节点的智能传感单元构成，这些单元嵌入闸门启闭机、闸室侧墙及输水管道等结构内部，通过微机电系统集成多种感知功能，能够同步捕获水流脉动、结构振动及环境温湿度等多维度参数。数据经本地加密芯片处理后，通过低功耗广域网传输至边缘层。边缘层部署于各区域控制中心，搭载具备并行计算能力的工业级服务器，通过预装的轻量化水力模型对感知数据进行实时解析，生成局部闸门调节指令，同时将关键特征参数压缩后上传至云端平台。这种分层处理模式既减少了核心网络的数据传输负荷，又保证了局部控制的快速响应。云端层作为系统的中枢节点，构建基于混合云架构的算力集群，通过分布式数据库存储全干线历史运行数据与实时状态信息，借助虚拟化技术实现计算资源的动态分配，为全局优化算法提供强大算力支撑^[1]。各层级间通过自适应通信协议实现数据无缝流转，使局部调控与全局目标保持动态协同。

2.2 硬件选型与配置

硬件系统的选型围绕极端环境适应性与控制精度展

开。感知终端选用具有宽温域特性的光纤光栅传感器，其通过光信号调制实现对微小应变的高精度捕捉，能够在强电磁干扰与湿度饱和的环境中稳定工作，直接嵌入闸门金属结构内部监测应力变化，避免传统电学传感器因线缆老化导致的信号衰减。闸门驱动单元采用永磁同步伺服系统，通过矢量控制技术实现扭矩的平滑输出，配合高精度绝对值编码器实时反馈闸门位移量，使开启度调节精度控制在微米级。驱动模块的模块化设计允许单个组件独立更换，降低现场维护的复杂度。边缘计算节点选用具备防腐蚀外壳的工业控制计算机，内置专用协处理器加速水力模型的并行运算，通过冗余设计的双以太网接口实现与云端及执行机构的双向通信，确保数据传输链路的连续性。中央控制平台采用刀片式服务器集群，通过热插拔技术实现硬件资源的在线扩展，存储系统采用分布式文件架构，将数据按地理区域分片存储，配合固态存储阵列提升高频访问数据的读取速度。硬件配置的冗余度设计确保单点故障不会导致系统整体瘫痪。

2.3 软件系统设计

软件系统以数字孪生为核心构建虚实交互框架，物理层与虚拟层通过实时数据接口紧密相连，形成动态映射关系，确保虚拟模型能实时反映物理系统的运行状态。虚拟层借助先进的三维建模引擎，精确复现输水干线的地形地貌、水工建筑物及水流运动状态，将传感器采集的物理参数如水位、流速等转化为虚拟模型的动态属性，实现闸门运行状态的可视化仿真，为操作人员提供直观的决策依据。控制算法模块采用深度强化学习与水力解析模型的融合架构，通过历史运行数据训练的神经网络能够快速逼近水流运动的非线性特征，同时引入有限元分析结果修正模型偏差，确保闸门调节方案既满足实时性要求又符合水力学基本规律。算法的可解释性设计允许工程师通过可视化工具追溯决策过程中的参数权重变化，提升系统的可信度。人机交互界面采用沉浸式三维可视化技术，操作人员可通过手势控制在虚拟场景中漫游，直观查看各闸门的实时运行参数与水力梯度分布。软件系统的模块化设计使功能扩展无需重构底层架构，各模块独立运作，新增控制策略可通过插件形式集成至现有系统，大幅提升软件的适应性与生命周期。

2.4 抗干扰与可靠性设计

抗干扰设计从电磁兼容与数据完整性两方面着手。系统硬件采用全金属屏蔽结构形成法拉第笼效应，内部电路通过光电隔离技术实现强弱电回路的物理隔离，信号传输线路采用双绞线差分传输模式，配合频谱扩展技

术降低电磁辐射对敏感元件的影响。在高压输电线路穿越区域，闸门控制箱额外加装磁环滤波器，通过抑制特定频段的电磁耦合消除干扰信号。数据传输层面采用动态加密协议，每个感知节点拥有独立的加密密钥，数据在传输过程中实时生成校验码，接收端通过哈希算法验证数据完整性，当检测到数据包损坏时自动触发重传机制。边缘层与云端之间建立双通道通信链路，主链路中断时毫秒级切换至备用链路，确保控制指令的实时送达^[2]。可靠性设计引入健康度评估模型，通过分析传感器漂移趋势、电机运行温度及通信延迟等参数，提前预判设备潜在故障并生成维护建议。关键部件采用N+1冗余配置，闸门驱动系统的双电机设计允许单电机故障时自动切换至备用电机，系统定期执行热备切换演练，确保冗余机制在实际故障发生时能够可靠生效。这些设计使系统在复杂自然环境与长期运行条件下保持稳定的控制性能。

3 水利工程闸门自动化控制系统的应用

3.1 应对洪涝灾害威胁强降雨调控中的应用

系统借助先进传感器网络，实现对全域水文参数的实时精准感知，以此为基础构建动态水位变化模型。当监测到洪涝灾害威胁中的强降雨来袭，渠内水位迅速上涨、流速明显加快时，智能决策模块会迅速启动。它基于水流惯性以及渠道承载能力进行深度匹配分析，综合考量多种因素后，自动生成科学合理的梯级闸门联动方案。通过精准调控不同闸位的开启时序与幅度，比如先开启哪些闸门、开启多大角度以及何时开启后续闸门等，实现渠内水位的有效调控，避免因水位过高冲垮堤岸、漫溢淹没周边区域等安全风险的发生。

依托数字孪生平台强大的计算与模拟能力，系统能够对流域内降雨及渠内水位变化过程展开高精度、实时仿真。通过模拟不同降雨强度下渠道的水流情况，系统能够敏锐且提前捕捉局部区域的水位异常上涨趋势。在渠道结构压力临界值即将到达前，系统迅速且精准地主动调节沿线退水闸，将超额水量有序引出。借助闸门微调维持退水时的稳定水位差，有效防止出现紊流冲刷渠道基础的现象，保障渠道结构安全^[3]。

在遭遇突发性强降雨时，系统的边缘计算节点能快速解析分布式传感器采集的水流冲击力数据。这些节点凭借强大的计算能力，在极短时间内对海量数据进行精准分析，结合渠道结构的承载阈值，迅速且智能地自动执行闸门应急调控程序。通过合理调节闸门状态形成局部合理水流区域缓冲洪水动能，为抢险队伍争取处置时间，同时将闸门操作过程中的结构应力变化实时反馈至健康监测系统，确保水利设施在极端工况下的运行安全。

3.2 水资源配置中的应用

系统通过构建多目标优化模型，将输水干线沿线的城市供水、生态补水等需求参数进行细致梳理与精准分析，转化为量化指标，为后续的智能调控提供坚实的数据支撑。智能决策模块借助先进的传感器与数据分析技术，在分析各分水口实时流量需求的基础上，动态调整节制闸的开启度，使水资源分配既满足各用户的时段性需求，实现全干线水资源的高效利用。

利用虚拟仿真平台模拟不同季节来水波动对调配方案的影响，系统可提前生成适应性调度策略。在枯水期或生态调度任务中，系统可根据沿线生态补水需求，主动开启退水闸，将部分输水量引导至沿线生态沟渠或地下水回补区，通过控制退水闸开启时间与流量，实现精准生态补水，提升区域地下水水位。在丰水期则通过加大闸门开启度提高输水流量，同时借助水流速控技术减少渠道内的泥沙淤积，维持输水能力的长期稳定。

针对跨区域调水中的水质保障需求，系统会实时收集沿线水质传感器传回的全面监测数据，这些传感器分布于调水线路的关键节点，24小时不间断工作，涵盖重金属含量、微生物指标、酸碱度、溶解氧等多项参数。系统接收到数据后，运用先进的数据分析算法，对海量数据进行深度挖掘与快速处理，从而快速精准识别水质变化趋势。依据这些精准数据，系统巧妙调节闸门开启节奏，打造脉冲式输水模式，以水流强力扰动提升水体自净能力，确保输水末端的水质达标。

3.3 生态保护中的应用

系统通过监测河道内水生生物栖息地的水位、流速等关键参数，实时掌握河道生态状况。将这些数据结合生态流量阈值模型进行精准分析，系统能够自动调节闸门开启度，以维持适宜的河道基流，保障水生生物的基本生存环境。在鱼类繁殖季节，系统更是发挥关键作用，通过模拟自然水文节律的脉冲式放水，营造有利于鱼类产卵的水流扰动环境，同时利用闸门微调形成的深

潭与浅滩交替格局，丰富河道内的生态多样性。

针对输水干线沿线的湿地生态系统，系统依托先进监测设备，实时精准采集湿地土壤含水率与植被蒸腾数据。经专业模型分析后，智能调控退水闸，精准把控补水时段与水量，维持湿地水位动态平衡。如此一来，既充分保证挺水植物的生长需求，又能有效避免长期淹水引发的土壤盐碱化，同时通过闸门操作形成的周期性干湿交替，促进湿地沉积物中营养物质的循环利用。

在应对突发性水污染事件时，系统可通过快速关闭污染河段上下游闸门形成隔离区域，防止污染进一步扩散。系统同步调节周边闸门，改变水流方向，构建新的分流路径，引导清洁水源精准流向污染区域进行稀释置换。借助水流动力学模型，模拟不同换水周期下污染物浓度变化，精准计算最优换水周期。在最短时间内降低污染物浓度，减少对下游生态系统的影响，同时通过闸门操作记录为污染溯源提供水流路径数据支持^[4]。

结语

综上所述，水利工程闸门自动化控制系统通过“云端”架构与数字孪生等技术，实现了水资源调配的智能化与精准化。其在提升输水效率、保障工程安全、兼顾生态保护等方面成效显著。未来可深化多系统协同，融入更多前沿技术，优化动态调控能力，为应对复杂水情、实现水资源可持续利用提供更强大的技术支撑，推动跨区域水资源调配迈向更高水平。

参考文献

- [1]霍祥宇.水利工程闸门自动化控制系统的故障诊断与维护方法[J].建筑与施工,2024,3(15):89-90.
- [2]王利华.闸门自动化监控系统在水利工程中的应用[J].魅力中国,2021(9):443-444.
- [3]韩一峰.水利工程中径流闸门自动化控制系统的应用实践分析[J].中国机械,2020(8):37,39.
- [4]李蒙,姜金凤.水利工程中径流闸门自动化控制系统的应用[J].中国房地产业,2024(12):174-177.