

# 水利工程中自动化与网络通信协同调度研究

曲金强 严金超

南水北调中线信息科技有限公司 北京 丰台 100071

**摘要:** 水利工程自动化与网络通信的协同调度是提升工程效能的关键。本文构建了包含感知层、通信层、调度层与执行层的协同调度体系,阐述了自动化控制与网络通信的耦合关系。研究聚焦多源感知数据融合、异构网络传输优化及协同决策算法等关键技术,建立了涵盖时效性、准确性与稳定性的性能评价指标体系,旨在实现水资源精准调控与工程系统稳定运行,为水利工程智能化发展提供理论支撑。

**关键词:** 水利工程; 自动化调度; 网络通信; 协同优化

引言: 水利工程作为重要基础设施,在防洪、供水、生态保护等方面发挥关键作用。传统调度模式存在控制与通信割裂、响应速度慢等问题,难以满足现代水利发展需求。随着自动化与网络通信技术进步,二者协同调度成为提升水利工程效能的重要途径。研究水利工程自动化与网络通信协同调度,整合资源、优化决策,对保障水利工程安全高效运行、实现水资源可持续利用具有重要现实意义。

## 1 水利工程自动化与网络通信协同调度基础理论

### 1.1 核心概念

水利工程自动化以现代控制技术为核心,通过部署智能传感器、执行机构与分布式控制系统,实现水流参数实时监测与设备自主调控<sup>[1]</sup>。该范畴涵盖闸门启闭自动化、泵站智能控制、水质在线监测等典型场景,其本质是通过技术手段替代人工操作,提升系统运行精度与响应速度。水利专用网络通信则针对水利工程特殊环境设计,具备抗干扰能力强、传输距离远、数据精度高等特征,采用分层组网架构实现多节点可靠连接,重点解决偏远地区信号覆盖与恶劣环境通信稳定性问题。协同调度作为跨领域融合概念,指在统一时空框架下整合自动化控制指令与通信资源分配,通过多系统动态耦合实现水资源优化配置,其核心在于突破传统调度模式中控制与通信的割裂状态,构建双向信息交互机制。

### 1.2 协同调度的理论支撑

系统工程理论为协同调度提供方法论基础,强调从整体视角分析系统要素间相互作用关系。通过建立多目标优化模型,统筹考虑防洪安全、供水保障、生态流量等约束条件,实现调度方案的全局最优。例如,在某流域防洪调度中,通过多目标优化模型计算,可使洪峰流量削减200立方米/秒,同时保障下游生态流量不低于10立方米/秒。信息融合理论聚焦多源异构数据处理,运用加

权平均、卡尔曼滤波等算法对水位、流量、水质等观测数据进行集成分析,提升状态感知准确性。例如,采用卡尔曼滤波算法处理水位数据后,测量误差可从 $\pm 0.05$ 米降低至 $\pm 0.02$ 米。调度优化理论需针对水利工程特点进行适配性改造,在传统线性规划基础上引入动态规划、随机规划等方法,解决水流传播时滞、设备启停约束等非线性问题,同时考虑通信链路带宽限制对控制指令传输的影响,构建包含通信质量参数的扩展优化模型。

### 1.3 自动化与网络通信的协同关系

网络通信为自动化系统提供数据传输通道与控制指令载体,其带宽容量决定监测数据刷新频率,传输时延影响控制指令执行精度,可靠性水平直接关联系统安全运行。自动化系统则对网络通信提出差异化需求,如闸门控制需毫秒级时延保障,视频监控要求大带宽支持,移动监测终端依赖低功耗广域网技术。二者协同需遵循时空一致性原则,确保控制周期与通信周期匹配;坚持可靠性优先原则,在通信中断时启动本地控制预案;贯彻经济性原则,根据调度任务重要性动态分配网络资源,形成控制精度与通信成本间的平衡机制。

## 2 水利工程自动化与网络通信协同调度体系构建

### 2.1 协同调度体系的目标与原则

体系构建以提升水利工程综合效益为核心目标,通过整合自动化控制能力与网络通信资源,实现防洪减灾精准化、水资源配置高效化、工程运行智能化<sup>[2]</sup>。实用性原则要求系统设计贴合实际工程需求,避免功能冗余与技术过度超前;可靠性原则强调在复杂环境与突发故障下维持关键功能正常运转,通过冗余配置与自愈机制保障系统韧性;扩展性原则支持新技术迭代与新业务接入,采用模块化架构设计预留功能扩展接口。技术与业务融合原则贯穿体系构建全过程,将通信协议标准、控制算法模型等底层技术与防洪调度、水量分配等业务场景深度

结合,确保技术手段有效支撑业务目标实现。

## 2.2 协同调度体系的层次结构

感知层作为数据源头,通过部署水位计、流量计、雨量传感器等设备构建全要素监测网络,采用分布式采集与边缘计算技术实现数据就地预处理,减少无效数据传输,并支持设备自诊断与故障预警功能。通信层构建多网络融合传输架构,整合光纤专网、无线公网、卫星通信等异构链路,基于软件定义网络技术实现链路动态切换与带宽智能分配,确保关键数据优先传输,同时具备抗干扰与自愈能力。调度层集成协同决策核心功能模块,包含数据融合分析、调度方案生成、风险预警评估等子系统,运用多目标优化算法与数字孪生技术生成动态调度策略,支持多场景模拟推演与策略优化。执行层建立自动化指令精准落地机制,通过可编程逻辑控制器驱动闸门、泵站等执行机构,配置本地控制模式应对通信中断场景,增加执行状态实时反馈功能,形成闭环控制回路以提升系统可靠性。

## 2.3 体系各层次的接口设计

感知与通信层接口规范定义数据封装格式与传输协议,采用轻量级物联网协议实现传感器与网关设备间的低功耗通信,支持数据加密与完整性校验功能,且具备动态协议适配能力以兼容多类型设备接入,还支持设备状态远程诊断。通信与调度层数据交互标准明确不同优先级数据的传输规则,建立基于时间敏感网络的实时数据通道与基于消息队列的非实时数据通道,确保调度指令与监测数据的时序一致性,并引入流量整形机制优化网络资源分配,增强网络稳定性。调度与执行层指令传输协议规范控制指令编码格式与执行反馈机制,通过心跳检测与重传策略保障指令可靠送达,配置执行结果校验环节防止误动作发生,增加异常状态上报功能以提升系统容错能力,实现全流程监控。

# 3 水利工程协同调度的关键技术支撑

## 3.1 自动化感知技术优化

多源传感器协同感知机制通过时空对齐与数据融合算法,整合水位、流量、水质等异构观测数据,消除单一传感器误差累积效应。采用分布式协同观测策略,依据监测区域特征动态调整传感器采样频率与空间布局,实现重点区域高密度监测与全流域覆盖的平衡。例如,在重点防洪区域,水位传感器采样频率设置为每秒5次;在一般区域,采样频率设置为每秒1次<sup>[1]</sup>。自动化数据实时预处理技术运用边缘计算节点对原始数据进行清洗、校准与压缩,通过滑动窗口滤波算法抑制随机噪声,利用数据压缩算法减少无效传输,确保关键信息及时上送。感知

设备远程监控与自诊断系统集成故障特征提取与模式识别算法,通过分析设备运行参数变化趋势预测潜在故障,支持远程固件升级与配置参数调整,降低现场维护频次。

## 3.2 网络通信技术适配与优化

水利场景通信技术选型需综合考量传输距离、环境适应性、建设成本等因素,在库区等开阔区域采用无线自组网技术实现灵活部署,在隧洞等封闭空间部署漏泄电缆通信系统保障信号覆盖。例如,无线自组网覆盖半径可达1千米,漏泄电缆通信系统传输距离可达500米。数据传输优先级调度机制依据业务类型划分数据流等级,对闸门控制指令等实时性要求高的数据启用专用时隙保障传输,对视频监控等大流量数据采用按需调度策略。例如,闸门控制指令专用时隙宽度设置为1毫秒,视频监控数据按需调度时,可根据网络带宽动态调整传输速率。网络抗干扰技术通过跳频扩频、信道编码等手段提升信号抗衰落能力,部署双链路热备与多路由迂回机制,当主用链路中断时自动切换至备用通道,确保通信连续性。例如,采用跳频扩频技术后,信号抗干扰能力可提升20分贝;双链路热备切换时间可控制在0.1秒以内。

## 3.3 协同调度核心算法设计

基于实时数据的调度决策算法构建多目标优化模型,将水量分配、设备能耗、生态流量等约束条件转化为数学表达式,通过强化学习框架训练智能决策模型。算法在训练阶段模拟不同水文情景下的调度过程,学习最优决策策略;在实际运行中根据实时感知数据动态调整输出,实现调度方案的实时优化。自动化设备与通信资源的协同分配算法采用图论建模方法,将调度任务抽象为带权图结构,节点代表设备或通信节点,边权重反映资源消耗或传输延迟。通过最小生成树算法求解最优资源分配路径,确保在满足业务需求的前提下最小化系统开销。动态环境下的调度方案自适应调整算法引入环境感知模块,实时监测降雨、水质变化等扰动因素,通过滚动优化机制更新调度参数。当检测到突发水文事件时,算法快速生成应急调度方案,通过仿真验证后立即执行,确保系统快速响应环境变化。

## 3.4 数据安全性与隐私保护技术

调度数据传输加密技术采用国密SM4算法对控制指令与状态数据实施端到端加密,密钥通过SM2算法动态生成并定期更换,确保数据传输过程不可窃取。访问控制机制基于属性基加密技术实现细粒度权限管理,根据用户角色、部门与业务范围分配数据访问权限,权限变更记录实时同步至区块链审计日志,确保操作可追溯。身份认证机制结合数字证书与动态令牌技术,用户登录时

需提供证书私钥签名与动态验证码,防止身份冒用。系统安全漏洞实时监测技术部署分布式探针网络,对网络流量、设备日志与系统调用进行持续分析,结合威胁情报库识别异常行为模式。当检测到潜在攻击时,系统自动隔离受影响节点并启动防护策略,同时生成安全报告供运维人员分析。安全策略动态更新机制通过机器学习模型预测新型攻击手段,提前调整防火墙规则与入侵检测阈值,确保系统防护能力始终领先于威胁演进。

#### 4 协同调度体系的绩效评价与优化方向

##### 4.1 性能评价指标体系构建

数据传输时效性指标涵盖端到端传输延迟、数据刷新频率等维度,通过对比指令下发时间与设备响应时间差值衡量通信实时性,采用连续采样统计方法计算数据有效更新周期。例如,端到端传输延迟平均值控制在50毫秒以内,数据刷新频率不低于每秒5次。调度决策准确性指标聚焦调度方案与实际工程需求的匹配程度,建立包含水位控制误差、流量分配偏差、设备启停次数等子指标的量化评估模型,通过历史数据回溯验证决策合理性<sup>[4]</sup>。例如,水位控制误差平均值控制在 $\pm 0.05$ 米以内,流量分配偏差平均值控制在 $\pm 2$ 立方米/秒以内。系统运行稳定性指标从故障发生频率、恢复时间、可用率等角度刻画系统抗干扰能力,定义不同严重等级故障的判定标准,统计特定时段内系统正常运转时长占比。资源利用合理性指标分析自动化设备执行效率与通信带宽占用率的动态关系,建立设备空转率、通信链路负载率等评估参数,评估资源分配是否达到最优平衡状态。

##### 4.2 体系性能的测试与分析方法

模拟环境下的性能测试方案搭建包含典型水利场景的数字仿真平台,通过参数化配置模拟不同流量工况、设备故障类型及通信干扰强度,设计阶梯式测试用例验证系统极限性能。关键指标量化分析方法运用统计过程控制技术对采集的原始数据进行预处理,采用控制图分析指标波动规律,运用相关性分析揭示不同指标间内在关联。性能瓶颈定位技术集成链路追踪与性能剖析工具,通过

分析数据包传输路径时延分布定位通信拥塞节点,利用设备运行日志挖掘频繁故障设备的共性特征,结合数字孪生模型模拟不同优化策略的实施效果。

##### 4.3 协同调度体系的优化方向

技术融合深度提升路径聚焦自动化控制算法与通信协议的协同优化,开发支持动态带宽分配的通信中间件,实现控制指令优先级与通信资源占用的自动匹配,构建融合边缘计算与云计算的混合调度架构。体系响应速度优化策略从缩短数据采集周期、优化决策算法复杂度、提升指令执行效率三方面入手,采用时间敏感网络技术降低通信延迟,运用并行计算框架加速调度方案生成,配置预置控制策略应对紧急工况。适应复杂场景扩展性优化通过模块化设计解耦系统功能组件,建立开放式接口标准支持新传感器接入与新业务扩展,运用机器学习技术训练适应多变量耦合的调度模型,提升体系在极端天气、设备老化等非标准场景下的适应能力。

#### 结束语

水利工程自动化与网络通信协同调度研究,从基础理论、体系构建、关键技术到绩效评价与优化,形成完整研究框架。通过整合自动化控制与网络通信资源,实现防洪减灾精准化、水资源配置高效化、工程运行智能化。未来需持续深化技术融合,提升体系性能,适应复杂场景需求,推动水利工程协同调度向更高水平发展,为水利事业现代化提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1]王闻通,孙猛.水利工程自动化监控系统中网络安全管理的思考[J].治淮,2022(12):69-71.
- [2]曾庆祥.水利工程电气自动化系统的信息安全防护技术[J].水上安全,2024(18):5-7.
- [3]李景奇,孟俊,黄晋,等.江都水利枢纽工控系统网络安全关键技术设计[J].江苏水利,2023(11):50-54,63.
- [4]陈照宇.信息化手段在水利工程安全检测中的应用与发展趋势[J].水上安全,2025(8):46-48.