

Research on Optimization of Key Technologies for Water Conservancy Automation Control in the East Route Water Diversion Project

Nan Xiao¹ Yuanying Cui²

1. Shandong Main Line Co., Ltd. of the East Route of the South to North Water Diversion Project, Zaozhuang, Shandong, 277000, China

2. School of Business Administration, Shandong University of Finance and Economics, Jinan, Shandong, 250014, China

Abstract

With the increasingly prominent problem of uneven spatial and temporal distribution of water resources in China, the East Route Water Transfer Project has become an important measure for cross basin water transfer. The level of water conservancy automation control directly affects the operational efficiency and water supply safety of the project. Currently, there are problems with data transmission delay, insufficient system coordination, and delayed emergency response in the automation control of the East Line Water Transfer Project. This article conducts in-depth research on the optimization scheme of key technologies for water conservancy automation control in the East Route Water Diversion Project. By analyzing core technologies such as intelligent perception, data processing, and system integration, and combining them with practical engineering cases, optimization control strategies and technical improvement measures are proposed. Research has shown that optimized automation control technology significantly improves the accuracy and stability of engineering scheduling, providing theoretical and practical basis for ensuring the efficient operation of the East Route Water Transfer Project.

Keywords

East Route Water Diversion Project; Water conservancy automation control; Technical optimization; intelligent dispatching

东线调水工程水利自动化控制关键技术优化研究

肖楠¹ 崔员萦²

1. 南水北调东线山东干线有限责任公司, 中国·山东 枣庄 277000

2. 山东财经大学工商管理学院, 中国·山东 济南 250014

摘要

随着我国水资源时空分布不均问题愈发突出, 东线调水工程作为跨流域调水重要举措。其水利自动化控制水平直接影响工程运行效率与供水安全, 当前东线调水工程在自动化控制方面存在数据传输延迟、系统协同性不足、应急响应滞后等问题。本文针对这些问题深入研究东线调水工程水利自动化控制关键技术优化方案, 通过分析智能感知、数据处理、系统集成等核心技术并结合实际工程案例, 提出优化控制策略与技术改进措施。研究表明优化后的自动化控制技术显著提升工程调度精准性和运行稳定性, 为保障东线调水工程高效运行提供理论与实践依据。

关键词

东线调水工程; 水利自动化控制; 技术优化; 智能调度

1 引言

水资源是维持社会经济发展和生态平衡的重要关键因素, 我国水资源空间分布有着“南多北少”的明显显著特征, 这一特征严重限制了北方地区的整体发展进程。东线调水工程是缓解北方水资源短缺的战略举措, 该工程通过构建规模庞大的输水网络实现水资源跨区域调配, 然而东线调水工程

线路长且节点众多运行环境复杂, 传统人工调度和简单自动化控制模式难以满足工程高效安全运行需求。随着物联网大数据人工智能等新兴技术快速发展, 水利自动化控制迎来了全新的发展机遇。为实现东线调水工程水资源科学调度与精准管理, 迫切需要对其水利自动化控制关键技术开展优化研究, 提升自动化控制水平既能提高工程运行效率又能降低运行成本, 还能增强工程应对突发情况的能力和保障调水工程稳定供水, 这对促进区域协调发展和生态文明建设有着重要意义^[1]。

【作者简介】肖楠(1987-), 男, 中国山东枣庄人, 本科, 工程师, 从事水利信息化与自动化研究。

2 东线调水工程水利自动化控制现状分析

2.1 工程概况

东线调水工程作为我国水资源跨流域调水的一号工程,以江苏扬州江都水利枢纽为枢纽,依托京杭大运河,新开渠道南北连接,经13级泵站群提水,跨越4条主要流域,扬程65米以上,“逐级抽水、湖库调节”串调4湖,调蓄库容1亿立方米,年调水方案148亿立方米,功能多样。4个省21市,线路总长1156公里,利用运河700公里,新建渠道450多公里,沿线众多水利工程,险峻穿行天险屏障,建设、管理难度大。

2.2 现有自动化控制技术应用

目前东线调水工程已经建设了输水干线自动化感知控制系统,感知层布置水位、流量、水质传感器约2000支,实现了输水干线全程感知,水位传感器布置有压力传感器、雷达传感器,流量传感器布置有超声波传感器、电磁传感器,水质传感器布置有pH值参数、浊度参数、氨氮参数等,输水过程感知已经形成了完善的感知网络;输水过程传输实现了“光纤干线网+无线传输”的传输构架,对于江苏、山东等平原地区,建设了光纤传输网络,输水线路里程1500多公里,在地形地貌条件不好的地方,采用了4G/5G无线网络实现了数据传输实时回传。

控制层依托SCADA系统控制线路沿线泵站机组启停和水闸开度,通过SCADA控制泵站变频、水闸自动抬降,通过程序控制实现部分工况下自动控制。管理层决策层通过GIS系统实现工程设备位置信息和实时监测信息三维展示,对沿线输水线、工程位置、线路状态实现可视化决策,辅助调度人员做出最直观决策,部分应用场景试点数字孪生虚拟仿真系统,构建虚拟调度系统辅助决策。

2.3 存在的主要问题

虽说已经搭建起初步的自动化体系了,可现有的系统依旧很难满足工程精细化管理的需求。在感知层面上,传感器布局存在着结构性的缺陷,偏远河道以及支流水系监测覆盖率不足30%,部分设备老化致使数据误差率超过15%,特别是在极端天气情况下传感器故障率提升40%以上。在数据传输方面,混合通信网络存在着带宽瓶颈,在强降雨、沙尘等恶劣天气时无线传输中断率高达25%,部分老旧光纤线路数据延迟超过30秒会影响到实时调度。在系统协同性方面,泵站与水闸分属于不同的管理单位,通信协议和控制标准并不统一,导致联动控制响应时间超过5分钟无法满足水资源动态调配的需求。就像在2022年汛期应急调度过程中,因为系统协同延迟某段河道水位超警戒值后泵站与水闸联动调节耗时达1.5小时。在应急管理层面,现有的预案大多是人工编制的静态方案,缺乏与实时监测数据的动态关联,面对2023年山东段泵站突发断电事故系统没能自动触发备用电源切换导致下游区域出现短暂停水。总体来看,当前自动化系统智能化水平不够难以适应复杂工况下精准调

度的需求^[2]。

3 东线调水工程水利自动化控制关键技术优化方案

3.1 智能感知技术优化

3.1.1 传感器网络升级

在东线调水工程复杂的输水网络当中,传统传感器存在覆盖盲区和精度衰减问题,难以满足精细化管理方面的需求。优化方案采用新一代低功耗广域网即LPWAN技术,部署NB-IoT与LoRaWAN双模智能传感器,可实现偏远支渠与地下输水段的全域覆盖。在关键水工设施的地方配置多参数一体化监测设备,比如在泵站前池安装集成压力流量水温浊度检测功能的复合型传感器,单台设备能够替代传统3~5个独立传感器,可显著降低部署成本与维护方面的难度。同时引入自组织网络协议像RPL协议,让传感器节点具备自动拓扑优化的能力,当局部节点出现故障或者受到信号干扰的时候,网络能在30秒内完成路径重构以保障数据采集的连续性。此外采用边缘计算技术,在传感器节点内置AI预处理模块,对原始数据进行降噪与特征提取操作,减少无效数据传输并将数据有效率从78%提升至95%。

3.1.2 水质监测技术改进

针对传统水质监测延时性、指标单一化等瓶颈,创新设计方案,建立“光谱+生物+电化学”多态化综合监测指标体系。在干道输水线上,安装高光谱水样分析仪,通过可见近红外光谱(400-1000nm)反演模型,实时在线反演高锰酸盐指数、叶绿素a等12项监测指标,准确率在±5%之间。通过微生物燃料电池的生物传感器,快速应对水质监测突发污染事件,检测酚、氰化物等有毒物质监测限低至 $\mu\text{g}/\text{L}$ 量级。使用机器学习算法,构建水质动态预警模型,通过历史数据、气象预测模型、水文模型输出预测值未来24h水质动态预测,正确率达92%以上。对于监测结果异常值后,系统自动触发行、周、月三级报警,同时进行加密监测和追溯^[3]。

3.2 数据处理与传输技术优化

3.2.1 大数据处理平台构建

基于ApacheFlink流处理框架和Hadoop分布式存储系统搭建东线调水工程专用大数据平台,平台采用“云边端”协同架构模式在省级调度中心部署私有云集群实现PB级数据分布式存储与并行计算工作。在区域分控中心设置边缘计算节点对实时监测数据进行初步清洗与聚合处理,通过建立数据治理体系制定统一数据标准与元数据管理规范解决原有系统数据格式不兼容问题。利用SparkMLlib机器学习库开发多场景分析模型,基于时间序列算法的流量预测模型能提前7天预测输水需求且将误差率控制在8%以内,通过关联规则挖掘分析设备运行数据可预测泵站轴承故障等潜在风险并将故障预警提前期延长至72小时。

3.2.2 通信网络优化

构建以“光纤为主、5G/卫星为辅”的异构冗余通信网络。平原地区建设千兆光纤网络，SDH同步数字组网，保障数据传输低时延；山区、水乡等特殊区域建设5G宏基站和5G网络通信终端，5G网络通信速率大于200Mbps，卫星通信系统采用Ka频卫星，确保极端情况下5G网络通信数据正常传输。SD-WAN软件定义广域网，实现智能广域网自动负载均衡和智能自动切换，主链路故障时，备用链路50ms之内完成通信链路切换。此外，采用压缩传输，通过Zstandard算法，实时压缩监测数据，在带宽传输上节省60%，减少网络拥堵。

3.3 系统集成与智能控制技术优化

3.3.1 系统集成设计

根据OPCUA统一架构标准，建设工程级数据交互总线，集成SCADA、GIS、水资源调度系统等12类异构系统。建设数字孪生系统，实现输水工程1:1三维模型，集成实时、台账、空间信息，建设可视化管理平台。按微服务架构解耦各业务系统，建立统一权限、调度、消息等模块，实现管理人员在一个平台下进行设备、调度、命令下发等操作。实现手机端无限拓展，通过WebGL技术实现手机端三维场景仿真，满足移动办公需求。

3.3.2 智能控制算法应用

将传统控制模型与基于强化学习算法相结合的自适应调度系统，以DQN算法对泵站群启停、水闸开度的实时优化，输水效率、能耗成本、生态要求作为优化目标，经过模拟验证比传统的规则优化节能降耗成本18%，提升输水效率12%。基于多源数据融合建立应急处置决策模型，若出现水位超警戒、发现设备故障等情况，系统自动抽取以往相似事件库，结合当前情况做出最优的应对决策，采用数字孪生模拟推演，确保了决策优化。山东一段试点应急处置应用在2023年因暴雨发生“水位超警戒”险情，将应急处置时间从45分钟缩短至8分钟，避免3处险工险段险情扩大^[4]。

4 优化技术应用案例与效果分析

4.1 案例选择与实施

选择东线调水工程山东段济宁到泰安输水区域作为试点，该区域全长大约有180公里，其中包含8座大型泵站和12座节制闸以及跨流域输水隧洞群，沿线地形涵盖丘陵山区、河道交汇区和煤矿采空沉降区，存在水位波动剧烈、输水路径复杂等管理方面难题。在项目实施过程中，首先对传感器网络进行全面升级，在泵站核心设备、关键输水断面以及水质敏感区域新增320个智能传感器节点，构建起覆盖整个区域的监测网络，同时部署基于5G与卫星通信的混合传输系统，搭建边缘计算节点以实现数据预处理。依靠云计算平台搭建大数据中心，整合历史运行数据和实时监测信息，开发基于机器学习的调度决策模型。最后，通过统一数据接口将SCADA系统、GIS平台和智能调度系统深度集成，形

成“监测—分析—决策—执行”的闭环控制体系。整个实施周期历经12个月，通过分阶段压力测试和系统联调确保新技术与原有设施具备兼容性。

4.2 效果分析

4.2.1 监测精度与数据传输效率提升

通过传感器网络升级，试点点位水位测量精度从升级前的 $\pm 8\%$ 提升到 $\pm 3.2\%$ ，流量测量精度提升了25%，采集频率从10min/次提高到10s/次。通过通信网络升级，网络时隙时长从平均12s缩短到6s，恶劣天气丢包率从18%降至0.3%，数据传输无时隙掉包。

4.2.2 调度决策科学性增强

基于大数据平台下的大智慧调度模型运行以来，根据近5年的历史数据和气象水文实时数据，用水量预测提前72h，误差率小于7%，调度新方案能使泵站效率提升18%，水资源利用率由78%提升至89.7%，每年可减少约156万度电量的使用，节省资金约93万元。

4.2.3 应急响应能力提升

2023年7月，突发性强降雨，由系统自动识别警戒水位超过区域，启动三级响应，算法自动以3分钟的计算时间确定最优调度方案，调度5座泵站和7座水闸，控制水位由警戒水位38.5m降至警戒水位36.2m，应急调度时间由45min缩短为13min，有效预防了下游3个乡区的洪涝灾害。

5 结语

东线调水工程是保障区域水资源均衡配置的核心工程，水利自动化控制技术迭代升级对提升水资源利用效率、强化供水安全保障意义深远。通过智能感知、数据处理与智能控制技术协同优化，不仅能显著提升工程调度精准性和系统运行稳定性，更可有效推动水资源管理朝着科学化、智能化方向迈进。面对气候变化和用水需求动态变化双重挑战，未来要持续深化物联网、人工智能、数字孪生等前沿技术与水利工程深度融合，构建更具适应性和韧性的自动化控制系统，同时加强跨学科技术创新和多部门协同合作，进一步完善水利自动化控制技术体系，为国家水资源战略调配和可持续发展筑牢技术根基。

参考文献

- [1] 方晓瑞,胡小峰.智能水闸自动化控制系统在水利工程中的应用[C]//河海大学,浙江省水利学会,上海市水利学会,江苏省水利学会,安徽省水利学会.2025(第十三届)中国水利信息化技术交流会论文集.黄河建工集团有限公司,2025:78-82.
- [2] 谭宇翔,钱利华,袁志波,等.基于国产密码的水利自动化控制系统现场总线信道加密方法研究[J].长江信息通信,2024,37(09):27-29.
- [3] 邵德刚.农田机械水利工程中的自动化控制与智慧化管理[J].农业工程技术,2024,44(05):53-54.
- [4] 张世新.基于PLC技术的大型水利泵站自动化控制系统设计与应用研究[J].工程技术研究,2023,8(14):179-181.