

青铜峡灌区监测感知网建设实践与优化

施海莹

宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i7.18220

[摘要] 青铜峡灌区是黄河上游代表性古老灌区和国家重要商品粮基地,其水资源高效利用与现代化管理是保障区域粮食安全和生态安全的核心。监测感知网络作为灌区现代化转型的“神经末梢”,对水资源调度等精细化水平起着决定性作用。本文基于灌区现代化改造实践,分析监测感知网络建设背景与问题,构建“空天地水工”一体化感知体系框架,阐述感知终端布设等关键技术方案。结合典型片区应用实例,验证该网络在灌溉效率提升等方面成效。智慧灌区通过安装传感器和设备构建信息感知网络,能够实时监测采集水情等关键信息,经数据处理后为管理者提供决策依据,并结合智能控制系统实现灌溉设施的自动化控制和精准管理,从而降低水资源浪费、提高利用效率。最后针对田间监测密度不足等问题,提出终端智能化升级等优化路径,为西北干旱区大型灌区数字化转型提供可复制技术范式。

[关键词] 青铜峡灌区; 监测感知网络; 数字孪生; 水资源管理; 智慧水利

中图分类号: S278 文献标识码: A

Construction Practice and Optimization of Monitoring and Sensing Network in Qingtongxia Irrigation District

Haiying Shi

Ningxia Hydraulic and Hydroelectric Survey, Design, and Research Institute Co., Ltd

[Abstract] The Qingtongxia Irrigation Area is a representative ancient irrigation area in the upper reaches of the Yellow River and an important national commodity grain base. Its efficient utilization and modern management of water resources are the core of ensuring regional food and ecological security. The monitoring and perception network, as the "nerve endings" of the modernization transformation of irrigation areas, plays a decisive role in the refinement level of water resource scheduling. This article is based on the practice of modernizing irrigation areas, analyzing the background and problems of monitoring and perception network construction, constructing an integrated perception system framework of "air, space, water and engineering", and elaborating on key technical solutions such as the deployment of perception terminals. By combining typical application examples in certain areas, verify the effectiveness of the network in improving irrigation efficiency and other aspects. Smart irrigation areas build an information perception network through the installation of sensors and equipment, which can monitor and collect key information such as water conditions in real time. After data processing, it provides decision-making basis for managers and combines intelligent control systems to achieve automated control and precise management of irrigation facilities, thereby reducing water resource waste and improving utilization efficiency. Finally, in response to issues such as insufficient field monitoring density, optimization paths such as upgrading terminal intelligence are proposed to provide a replicable technological paradigm for the digital transformation of large-scale irrigation areas in the arid northwest region.

[Key words] Qingtongxia Irrigation District; Monitoring perception network; Digital twin; Water resource management; Smart Water Conservancy

引言

宁夏引黄灌区是中国四大古老灌区之一,核心青铜峡灌区覆盖银川、石嘴山、吴忠三市9个县区,灌溉面积506万亩,随着

黄河流域战略推进,传统调度模式不适应精细化管理需求。2025年青铜峡灌区现代化改造工程将新建和改造监测站点284个,构建全要素感知体系,实现水情、工情、农情、墒情实时感知。这

一工程总投资约70亿元,旨在打造“节水高效、生态良好、设施完善、管理科学”的现代化生态灌区。

国内外研究显示,国外如美国加州中央河谷灌区和澳大利亚墨累达令盆地已部署物联网监测网络,国内桃花江灌区和位山灌区也建立了感知体系,这些系统通过实时采集灌区流量、水位、土壤湿度、温度等关键参数,实现对农业环境的动态监测和智能灌溉。针对青铜峡灌区,现有研究多集中于工程改造与水资源调度,但缺乏监测感知网络系统梳理和多源数据融合。

本次研究内容包括分析监测网络现状与瓶颈、构建“空天地水工”一体化感知框架、提出感知终端、传输网络及数据中心技术方案、验证应用成效并提出优化路径。技术路线按照现状调研、框架构建、技术研发、实践验证、优化提升的逻辑展开,通过调研和政策解读、数字孪生技术构建框架、研发适应干旱地形的技术方案。

1 青铜峡灌区监测感知网络建设现状与瓶颈

1.1 灌区基本特征与监测需求

青铜峡灌区地理坐标介于东经 $105^{\circ} 37' \sim 106^{\circ} 39'$,北纬 $37^{\circ} 49' \sim 39^{\circ} 23'$ 之间,地形呈“J”形带状,划分为河东、河西两大区域,灌区年均气温 $9.0^{\circ}\text{C} \sim 9.8^{\circ}\text{C}$,日照时间 $2800 \sim 3100\text{h}$,主要种植小麦、水稻、玉米等作物,其中汉延渠单一渠道即承担40万亩农田灌溉任务。

宁夏青铜峡灌区的特殊自然地理条件要求其监测系统必须能够精准地处理复杂的水资源调度需求,例如监测11条骨干渠道和29座主要水闸的流量水位数据,以确保506万亩农田的均衡供水。此外,为了应对黄河青铜峡段汛期防洪和灌区末端干旱风险,实时监测雨情水情变得至关重要。灌区的老旧渠道和建筑物需要通过实时隐患排查来维护,同时,为了保障黄河流域的生态安全,监测退水水质和地下水动态也是不可或缺的。

1.2 现有监测网络建设基础

在“十四五”期间,青铜峡灌区通过现代化改造工程,不仅构建了监测感知基础框架,还显著提高了渠道输水效率,有效减少了渠道渗漏损失,为147.3万亩农田的春季正常灌溉提供了坚实保障。在工情监测方面,已实现139座设施的远程自动化控制,干渠直开口已安装1016套测控闸门;在数据处理方面,已整合农情、水情、工情等287类数据要素,构建了标准统一的数据框架;在应用系统方面,各渠道管理处开发了综合业务应用平台与闸门控制平台,实现了闸控指令的动态发布及需水计划的智能执行。

1.3 现存主要瓶颈

尽管青铜峡灌区监测感知网络建设取得进展,但与数字孪生灌区要求相比仍有显著差距,主要瓶颈在两方面:

(1)感知覆盖存在盲区。现有监测站点多集中于骨干渠道和重点建筑物,田间监测密度不足,土壤墒情、作物长势等数据缺失,导致灌溉调度“最后一公里”数据支撑不足。部分扬水灌区因地形复杂,传统监测覆盖率仅60%,难以满足精准灌溉需求。

(2)数据融合能力薄弱。虽已构建基础数据框架,但水情、工情、农情、墒情等多源数据融合面临挑战,数据标准不统一导致信息孤岛。信息采集点分布不均、采集频率低、网络稳定性不足、共享机制不完善,制约了数据深度融合。现代化改造工程旨在通过设施改建、调蓄工程和数字赋能解决这些问题,建设节水高效的生态灌区。

2 青铜峡灌区“空天地水工”一体化监测感知网络构建

2.1 总体设计理念与框架

基于青铜峡灌区特点和管理需求,遵循“需求牵引、数字赋能、分步实施”原则,构建“空天地水工”一体化监测网络,实现监测全覆盖、传输稳、数据融合、服务精准的目标。框架分为感知层、传输层、数据层和应用层,协同形成技术链条:感知层借助多种设备采集数据;传输层通过“公网+专网”确保数据实时安全传输;数据层统一处理多源数据;应用层基于数字孪生提供智能服务。借鉴位山灌区和桃花江灌区经验,并结合本地特点优化。

2.2 感知层:全要素监测终端布设

针对感知覆盖盲区的问题,采取“骨干加密、田间拓展、重点强化”的策略,科学地布设各类监测终端,实现从骨干渠道到田间地头的全链条监测。

水情监测方面,于骨干渠道重点水闸前后各设置一个水位计,并在闸门上安装位移监测器,以实现水位与闸门开度的同步采集;在干渠交接水、分水处设置自动化测流装置,实现渠道流量实时监测;干渠直开口的测控一体化闸门覆盖率达95%,实现了灌溉用水的精准计量。

工情监测方面,结合管理处管理需要,在主要渠道建筑物、主要交通路口、主要险工段增设视频监控点,实现重点区域监控全覆盖,同时西干渠、惠农渠、唐徕渠三个渠道,试点实施无人机自动巡航,渠道每10公里配置一套无人机自动巡检系统,可对渠道裂缝、淤积、渗漏等隐患进行智能识别与预警,巡检效率提升3倍以上。

农情监测通过整合卫星遥感与墒情监测站,全面监测灌区种植结构、灌溉面积、作物需耗水及长势。遥感监测每年4次,分辨率10米。利用私有化部署算法(如种植结构提取、墒情识别)结合遥感技术,实现高效监测。同时补充55套土壤墒情监测站,采集土壤含水量、温度、电导率等参数。

2.3 传输层:多网融合通信架构

构建“云-边-端”三级传输架构,结合无线与有线传输方式,保障数据传输的稳定性和实时性。重点建筑物监测数据通过光纤有线传输,边缘节点部署在基层管理所,承担数据预处理、存储备份和本地决策功能,当监测到闸门异常时可直触发本地预警,响应时间控制在20秒以内。渠道和田间监测感知数据通过4G网络传输,将数据统一传输至宁夏水利物联网平台,实现跨层级、跨系统、跨地域的数据共享与业务协同。

2.4 数据层:统一数据底板建设

以青铜峡灌区287个数据要素为基础,结合引黄用水统计预测模型研究中后期报告的数据收集和分析方法,参照国家水利数据标准,扩充完善数据字典,构建统一数据底板,涵盖基础地理(含1:5000比例尺地形图、灌区边界、土壤类型等)、工程设施(含渠道、水闸、泵站等建筑物设计参数和运维记录)、监测感知(整合水情、工情、农情、墒情等实时采集数据)、业务管理(含用水计划、灌溉记录、维修保养等数据)四大类数据。建立数据融合处理机制,用ETL工具对多源数据清洗、转换与集成,通过时空校准技术解决数据时间差和位置偏差问题。构建数据质量评价体系,从完整性、准确性、及时性三个维度实时监控,异常数据自动触发校核机制。开发数据共享服务平台,通过API接口、数据订阅等模式,为灌溉调度、工程运维、生态监测等业务系统提供标准化数据服务。

2.5应用层:智能化服务体系开发

基于现有各类灌区业务应用系统,开展整合工作,并对功能模块进行升级与补充,构建青铜峡灌区统一的业务应用系统。厅领导及相关处室、水利调度中心、灌排中心、灌区各渠道管理单位、市县水务局、项目公司或合作社等用户按权限使用。紧密围绕灌区业务管理需求,强化信息技术应用,构建先进、实用的灌区综合管理平台,涵盖灌区一张图、水资源调度管理、闸门控制、水旱灾害防御、工程管理、安全生产管理、水费计收、节水管理、水政管理及灌区移动应用等功能,为灌区各级管理人员提供决策辅助工具,为用水户提供便捷、优质的服务。建设闸控软件1套,分别部署在各个管理处,实现与各类闸门的协议对接及闸门相关各类设备的监测控制,主要功能包括闸门控制、实时数据监控、运行记录管理、设备状态监测及异常记录等功能。

2.6安全保障体系构建

从技术、管理、制度三个层面构建全方位安全保障体系:技术层面,采用防火墙、入侵检测系统等网络安全设备,实现数据传输加密和终端访问控制;对关键闸门控制设备采取物理隔离和专项防护措施,防止恶意攻击。管理层面,建立分级授权机制,明确不同岗位人员的数据访问和操作权限;定期开展等保测评和安全演练,提升应急处置能力。制度层面,制定数据安全管理办法、设备运维操作规程等规章制度,规范监测网络建设、运行和管理的全流程。

3 监测感知网络应用成效

青铜峡灌区“空天地水工”一体化监测感知网络在汉延渠、秦汉渠等试点区域完成部署后,通过2023—2024年灌溉季的实际运行验证,显著提升了灌区管理的精细化水平。成效主要体现在以下四个方面:

(1)水资源调度效率显著提升。基于实时水情数据,实现骨

干渠道流量调度响应时间缩短至15分钟内,较传统模式提升50%;通过干渠直开口测控闸门的精准计量,灌溉用水利用率提高至0.65,亩均节水率达12%,有效支撑“四水四定”原则落实。

(2)灾害防御能力全面增强。整合雨情水情监测数据,建成洪旱灾害预警模型,汛期洪水预警提前期延长至3小时,干旱风险区识别准确率超90%,成功避免2023年夏季3起渠道溃坝事故,减少经济损失约1200万元。

(3)工程运维成本大幅降低。无人机自动巡检系统已全面覆盖西干渠等重点渠道,渠道裂缝、淤积等隐患的识别率提升至95%,维修响应时间严格控制在4小时以内。

(4)生态保护与农业效益协同优化。土壤墒情监测站结合遥感数据,可精准测算作物需水,使玉米、水稻等主粮作物增产8%—10%;通过整合地下水动态数据,为黄河流域生态补水决策提供支撑,有效保障了506万亩农田的生态安全。

4 结论与展望

青铜峡灌区实证研究表明,监测感知网络作为数字孪生灌区的核心支撑,通过构建全要素、高实时性的数据底板,有效解决了模型精准适配与动态更新的关键难题。依托全链条技术体系,水资源调度精度、工程安全预警能力、农情管控效能及运维效率均得到显著提升:需水预测精度达到92%,灌溉效率提升18%,水情预警响应时间缩短至20秒以内,运维人力成本降低80%。

未来研究可从以下三方面深化:一是构建一体化感知网络与孪生模型的实时联动机制,研发数据自动校准算法;二是引入数字孪生体技术,实现监测设备全生命周期管理,降低故障率;三是推动跨灌区数据共享与孪生模型协同,建立统一数字孪生平台。随着技术持续演进,青铜峡灌区有望建成“感知精准、模型高保真、决策智能化”的智慧灌区典范,为黄河流域生态保护与高质量发展提供水利智能化支撑。

[参考文献]

- [1]宁夏水利科学研究院.宁夏引黄灌区水资源利用现状与发展战略研究[M].银川:宁夏人民出版社,2024:45-68.
- [2]湖南省水利厅.桃花江灌区数字孪生建设实践与成效[J].中国水利,2025(20):34-37.
- [3]山东省位山灌区管理局.“天空地水工”一体化感知体系建设在大型灌区的应用[J].水利信息化,2025(3):28-32.
- [4]黄河水利委员会.秦汉渠数字孪生应用平台建设与运行成效[J].人民黄河,2025(4):67-71.

作者简介:

施海莹(1989--),女,汉族,宁夏人,大学本科,中级,研究方向:信息化设计。