

数字孪生技术在大型灌区节水改造中的应用路径探析

寇战锋 何 洁 孟振军
安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘 要：针对大型灌区用水粗放、渗漏严重、管控滞后等节水痛点，本文探析数字孪生技术在灌区节水改造中的应用路径。阐述数字孪生与灌区改造的核心理论，搭建分层应用框架，从水资源调配、设施运维、田间灌溉、效果评估四大维度，梳理落地实施路径。研究表明，该技术能实现灌区全域可视化、管控智能化、调配精准化，有效破解传统改造短板，助力灌区节水增效、可持续发展，为大型灌区现代化改造提供技术参考。

关键词：数字孪生技术；大型灌区；节水改造；应用路径

引言：水资源集约利用是农业现代化发展的核心要务，大型灌区作为农业灌溉主力军，节水改造刻不容缓。传统灌区改造重硬件、轻智能，管控粗放、决策滞后，难以满足高效节水需求。数字孪生技术具备全域映射、实时交互、智能仿真优势，适配水利工程精细化管控需求。本文结合灌区节水痛点与技术特性，构建完整应用体系，深挖落地路径，补齐管控短板，助力灌区转型升级，保障粮食安全与水资源高效利用。

1 相关理论与技术基础

1.1 数字孪生技术核心理论

(1) 数字孪生技术内涵与特征。数字孪生是依托物理实体、虚拟模型、数据交互、智能分析构建的全要素映射体系，通过实时数据传输实现物理世界与数字空间的同步复刻、动态交互。该技术具备多维度映射、全生命周期追踪、实时数据交互、智能仿真推演四大核心特征，能精准还原实体运行状态，预判运行风险，为精细化管控提供支撑。(2) 数字孪生系统架构与运行逻辑。数字孪生系统分为感知层、数据层、模型层、应用层四层架构。感知层采集实体基础数据，数据层整合存储多源信息，模型层构建三维虚拟复刻模型，应用层实现管控、预警、决策功能。运行时，系统实时采集物理实体数据，同步更新虚拟模型，通过仿真分析反馈调控指令，形成闭环管控。(3) 数字孪生在水利领域的适配性分析。水利工程工况复杂、管控范围广、对精准调度要求高，数字孪生的全域映射、动态仿真特性，能适配灌区水域分布广、用水流程复杂的特点，可破解传统水利管控不直观、不精准、滞后性强的难题，契合水利工程智能化、精细化改造需求。

1.2 大型灌区节水改造核心需求

(1) 大型灌区用水现状与节水痛点。当前大型灌区普遍存在用水计量粗糙、输水渗漏严重、配水不均衡、用水效率偏低等问题。痛点集中在管控手段粗放，缺乏实时监控，水资源浪费严重，难以适配农业节水、水资源集约利用的发展要求。(2) 灌区节水改造核心目标与关键任务。核心目标是提升水资源利用率，减少损耗，实现节水增效、稳产增收。关键任务包括完善输水设施、搭建智能监控体系、优化配水方案、健全节水管控机制，推动灌区从粗放式管理转向精细化管控。(3) 传统灌区改造模式的局限性。传统改造以硬件修缮为主，重建设、轻管控，缺乏数据支撑和智能调度手段，无法实时掌握用水动态，改造效果难以长效维持，应对旱涝、用水高峰等突发情况应变能力差，智能化水平不足^[1]。

1.3 支撑技术体系

(1) 多源数据感知与采集技术。依托传感器、无人机、遥感监测、物联网设备，全方位采集灌区水位、流量、土壤墒情、气象等数据，实现全域、实时、精准的数据采集，为数字孪生模型搭建和运行提供基础数据保障。(2) 三维建模与仿真模拟技术。利用测绘数据、工程参数搭建灌区三维实景模型，还原渠道、农田、水利设施全貌，结合工况数据开展水流运行、用水分配仿真模拟，直观展示灌区运行状态，预判输水损耗和用水缺口。(3) 智能算法与大数据分析技术。运用大数据整合多维度数据，通过机器学习、优化算法分析用水规律，挖掘节水潜力，智能生成配水方案，实现异常情况预警、用水效率评估，提升灌区管控的智能化水平。

2 数字孪生技术在大型灌区节水改造中的应用框架构建

2.1 应用总体设计思路

(1) 设计原则。应用框架遵循实用性、先进性、兼容性、安全性四大原则。立足灌区节水改造实际需求,杜绝盲目建设,选用成熟可靠的技术手段,兼顾长期使用与后期扩容升级;兼容现有水利设备与系统,减少资源浪费;严守数据安全底线,保障灌区运行稳定,贴合节水增效、智能管控的核心宗旨。(2) 整体架构搭建。采用分层递进式架构,自上而下分为应用层、平台层、数据层、模型层、感知层五层。感知层负责现场数据采集与设备操控,模型层复刻灌区全要素场景,数据层提供数据支撑,平台层整合各项智能功能,应用层落地节水管控业务,层层联动形成闭环管控体系。(3) 建设目标与核心功能定位。建设目标为实现灌区水资源精准调配、损耗实时监控、灌溉智能决策,大幅提升用水效率。核心功能定位在全域实景可视化、水资源动态监测、灌溉方案智能生成、设备远程操控、异常预警告警,补齐传统灌区管控短板,助力节水改造落地见效。

2.2 灌区全要素数字孪生模型构建

(1) 基础地理与工程设施建模。整合测绘、航拍、工程图纸数据,精准构建灌区地形地貌、渠道、水库、泵站、闸阀等基础设施三维模型,还原设施位置、规格、走向,还原灌区真实地理布局,为可视化管控打下硬件基础。(2) 水文水资源动态建模。结合水文监测数据、气象资料,构建水流运动、水量分配动态模型,实时模拟水源补给、输水损耗、水量结余情况,动态反映水资源流转全过程,实现水量变化的实时追踪与预判。(3) 作物需水与灌溉过程建模。根据灌区作物种类、生长周期、土壤墒情,建立作物需水模型,模拟灌溉水流扩散、下渗过程,匹配作物各阶段需水量,优化灌溉时长与频次,杜绝过量灌溉,实现精准按需供水^[2]。

2.3 数据支撑体系建设

(1) 多源数据整合与标准化处理。汇集感知设备、遥感、人工上报、历史档案等多源数据,统一数据格式、口径,剔除冗余错误数据,完成数据清洗、归类,打破数据孤岛,让各类数据适配模型运算与平台调用。(2) 数据实时传输与存储管理。搭建专用传输网络,实现监测数据秒级上传,选用云端与本地结合的存储方式,分区存储实时数据、历史数据、模型数据,建立数据索引,方便快速调取使用,保障数据流转顺畅。(3) 数据安全性与共享机制。设立权限分级管理制度,加装防火墙、加密软件,防范数据泄露、篡改。建

立内部共享机制,在保障安全的前提下,实现各管控岗位数据互通,提升协同管控效率。

2.4 智能管控平台搭建

(1) 平台功能模块设计。平台划分监测监控、智能调度、节水分析、设备管理、预警告警五大模块,各司其职又相互联动,覆盖灌区水管控全流程,满足日常监管、应急处置、效率核算等各项需求。(2) 可视化展示与交互操作。依托三维模型,直观展示灌区全貌、设施状态、水量数据,用图表、实景画面结合的形式呈现信息。支持鼠标点选、缩放、查询操作,一键查看详情、下达指令,降低管控门槛。(3) 平台与硬件设备联动机制。建立平台与闸阀、水泵、传感器等终端设备的联动指令体系,平台下达调控指令后,设备自动响应执行,实现远程启停、流量调节,减少人工干预,提升管控响应速度与精准度。

3 数字孪生技术在大型灌区节水改造中的具体应用路径

3.1 水资源精准调配与节水管控

(1) 灌区用水需求精准预测。融合历史灌溉数据、实时气象预报、作物种植结构与生育阶段参数,构建多维度用水需求预测模型。通过机器学习算法深度分析不同时段、不同区域的用水规律,精准测算全灌区及各干支渠系的短期与中长期用水需求,消除供需信息差,为配水决策提供前瞻性数据支撑,解决传统配水凭经验、滞后性强的问题。(2) 动态配水与流量智能调控。基于需求预测结果,在数字孪生平台中自动生成多套配水方案并进行仿真比选,选取最优策略下发至现场。平台实时采集渠道流量、水位数据,动态调整闸阀开度与水泵运行参数,实现水源到田间的全流程精准配水。具备自动纠偏能力,当实际流量与计划偏差超出阈值时,即时触发二次调节,确保水量分配公平、高效且无冗余^[3]。(3) 渗漏损耗监测与管控。利用高精度传感器与数字模型,实时追踪渠道输水过程,精准定位渗漏、跑水等异常点位。通过水流模拟仿真,量化分析不同渠段的损耗率,识别高损耗区域并生成针对性堵漏、修缮建议。同时建立渗漏损耗动态台账,持续监测改造效果,从源头减少水资源无效损耗,显著提升输水效率。

3.2 灌溉设施智能化运维

(1) 设施运行状态实时监测。在数字孪生空间中构建闸阀、泵站、渠道等设施的高精度数字模型,与现场传感器实时联动。全面监测设备运行电流、电压、振动、开关状态及渠道工况,形成设施健康档案。实现设

施状态从“被动巡检”向“主动感知”转变,随时掌握设备健康状况,消除运维盲区。(2)故障预警与智能检修。结合设备历史数据与实时运行参数,建立设备寿命预测与故障预警模型。系统智能识别异常运行趋势,提前发出设备磨损、卡阻、漏水等故障预警,并自动推送检修工单至移动端。基于故障等级与影响范围,智能规划最优检修路径与人员配置,变“事后维修”为“事前预防”,降低非计划停机风险。(3)设施老化评估与改造优化。通过数字孪生模型对设施进行全生命周期健康评估,量化分析结构老化、性能衰减程度。结合灌区发展规划,模拟不同改造方案的成本效益与节水效果,科学制定设施更新改造计划。优先投资高风险、高损耗区域,实现改造资源的最优配置,延长设施使用寿命,保障工程安全稳定运行^[4]。

3.3 田间精准灌溉与节水增效

(1)土壤墒情与作物长势监测。部署田间物联网设备,实时监测不同地块的土壤含水率、温度、盐分及作物生长指标。结合无人机遥感与卫星影像,定期获取作物长势、植被覆盖度等多维数据。在数字平台上精准描绘田间“水-土-作物”关系图谱,为按需灌溉提供最直接的决策依据。(2)按需灌溉与水肥一体化控制。根据土壤墒情与作物需水需肥模型,自动触发或推荐灌溉时机与用水量,实现“缺多少补多少”。集成水肥一体化设备,在灌溉的同时精准匹配施肥方案,避免大水漫灌与肥料浪费。支持远程与自动控制,实现灌溉过程的无人化、精准化,最大限度提升水肥利用效率。(3)灌溉效率评估与优化调整。建立田间灌溉效率评价指标体系,实时计算灌溉水利用系数、作物水分生产率等核心指标。系统复盘每次灌溉过程,分析灌溉均匀度、深层渗漏量等数据,诊断灌溉制度中的不合理环节。基于分析结果,动态优化灌溉制度、轮灌周期与配水策略,形成灌溉优化的闭环迭代^[5]。

3.4 灌区节水效果评估与决策优化

(1)节水指标量化评价。构建涵盖工程、管理、用水、效益等维度的综合评价体系,自动采集并计算节

水率、水效提升幅度、成本降低等关键指标。生成多维度、可视化的节水成效报告,客观量化数字孪生技术在灌区改造中的实际贡献,为项目验收与绩效评估提供数据支撑。(2)改造方案模拟推演与比选。在数字孪生平台中构建灌区改造的虚拟沙盘,对新建工程、技术升级、管理模式改革等方案进行全流程模拟推演。系统仿真模拟方案实施后的水资源流动、节水效果、运维成本,直观对比不同方案的优劣与风险。在方案落地前实现“试错”,降低决策风险,确保改造方案科学、可行、高效。(3)长效管理决策支持。基于长期运行积累的海量数据,深度挖掘灌区运行规律与节水潜力。为灌区中长期规划、水资源配置、体制机制创新提供数据驱动的决策支持。辅助制定水价优化、精细化管理考核等制度,推动灌区管理从经验型向数据驱动型、从粗放型向精细化转型,保障节水效益的长效性与可持续性。

结束语

数字孪生技术为大型灌区节水改造提供了全新的智能化路径,实现了从粗放管控到精细治理的蜕变。该项技术打通了数据壁垒,实现全流程闭环管控,大幅提升用水效率,减少水资源损耗。后续需持续优化技术适配性,完善数据共享与运维机制,推动技术规模化落地。未来,要深化智能算法应用,贴合灌区实际需求,让数字赋能长效发力,助力农业节水增效与水利事业高质量发展。

参考文献

- [1] 苏小贤.灌区水资源高效利用与节水灌溉技术研究[J].水上安全,2024,7(16):74-76.
- [2] 周宾.大型灌区节水改造工程建设的常见问题与对策[J].河南水利与南水北调,2020,49(10):23-24.
- [3] 李立兵.灌区管道输水灌溉工程节水改造技术的应用[J].中国高新科技,2024,31(6):135-137.
- [4] 田雨丰,何武全.大型灌区节水改造项目实施效果综合评价[J].排灌机械工程学报,2023,41(5):519-526.
- [5] 周志宇.大型灌区节水改造绩效综合评估模型的构建与应用[J].水利技术监督,2022,10(7):96-100.