

基于数字孪生的灌区智能运维管理系统设计与应用 ——以漳南灌区为例

孟振军

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要:在国家“藏粮于地、藏粮于技”战略与智慧水利建设推进下,传统灌区管理模式难满足新时代水资源精细、智能管理需求。本文以河南省漳南灌区现代化改造工程为背景,探讨基于数字孪生技术的灌区智能运维管理系统。该系统遵循“需求牵引、应用至上”等原则,构建五层两翼总体架构,实现灌区全要素等数字化映射与智能化管控。重点阐述数据底板、模型平台、知识平台三大核心支撑体系建设方法,解析以“灌区一张图”为核心的运行监测等业务应用系统功能设计。实践显示,此系统能提升灌区水资源集约利用水平、多级协同管理效率及工程安全运行保障能力,为全国大型灌区现代化、智慧化改造提供可复制推广的“漳南样板”。

关键词:数字孪生;灌区;智能运维;水资源调度;水利工程;信息化

引言

灌区关乎国家水、粮食和生态安全,作用不可替代。但我国不少大型灌区存在工程老化、用水效率低、管理粗放、信息化滞后等问题,制约综合效益发挥。在此情形下,水利部推进智慧水利建设,将数字孪生流域和灌区作为水利高质量发展的核心路径。数字孪生技术集成多学科数据,能实现物理与虚拟世界实时交互映射,应用于灌区管理可解决传统模式痛点,推动管理深刻变革^[1]。河南省漳南灌区是国家大型灌区,也是“十四五”改造重点项目,范围广、工程多样、管理复杂,具典型代表性。本文依托其现代化改造工程初步设计报告,阐述如何以数字孪生为内核构建智能运维管理系统,为同类工程提供理论与实践参考。

1 漳南灌区现状与建设需求分析

1.1 工程概况与信息化现状

漳南灌区由幸福、万金、洹东、洹南、汤河等多个子灌区构成,工程浩大,涵盖渠道整治、建筑物新建改造、巡渠路硬化及全面数字孪生建设。各子灌区信息化基础差异明显:幸福灌区2024年启动数字孪生建设,完成L2级全域及部分L3级重要节点数据底板,部署需水预测等业务应用系统,信息化基础较好;万金灌区2020-2021年信息化升级,有闸门远程控制等基本功能,但缺高级智能功能且部分设备老化;洹东、洹南、汤河灌区近年侧重土建改造,信息化监测极少。鉴于这种“有、弱、无”并存现状,此次信息化建设需采取“整合已有、统筹在建、规范新建”策略,充分利用幸福成果,升级维护万金,为零基础子灌区构建现代化信息体系。

1.2 核心建设需求

基于灌区现代化发展的总目标,漳南灌区智能运维管理系统的核心需求可归纳为以下几点:(1)精准感知需求:实现对灌区水情(水位、流量)、工情(闸门、泵站状态)、气象、墒情、水质、安全监测等全要素的立体化、全覆盖、高精度感知。(2)智能决策需求:构建科学的需水预测模型、水动力仿真模型和水资源配置调度模型,实现从“凭经验配水”到“按模型算水”的转变,支撑供水可靠、调度灵活、用水精准。(3)高效协同需求:打通干渠、分干渠、支渠等多级管理单元间的信息壁垒,实现95%以上的骨干渠系量测水监测覆盖率和闸控自动化率,全面提升多级联动协同管理效率。(4)安全可靠需求:建立完善的水旱灾害防御体系和工程安全监测预警机制,提升对洪涝、干旱及工程险情的快速响应与应急处置能力。(5)精细管理需求:实现水量的精准计量与水费的智能计收,为农业水价综合改革提供数据支撑,促进水资源节约集约利用。

2 系统总体设计

2.1 设计原则与思路

系统严格遵循“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”的总要求,并坚持四大原则:一是顶层设计、示范引领,确保系统整体性和前瞻性;二是整合共享、集约建设,避免重复投资,实现资源高效利用;三是融合创新、实用至上,确保系统“管用、实用、好用”;四是整体防护、安全可靠,保障系统长期稳定运行。总体设计思路为:“整合已有,统筹建设,充分共享,示范引领”^[2]。即在整合现有信息化成果的基础上,通过完善

立体感知体系、自动控制系统和支撑保障体系，构筑完备的信息化基础设施；以数据底板、模型库、知识库为核心，打造强大的数字孪生平台；最终，围绕核心业务需求，构建智慧化的业务应用系统。

2.2 总体架构

系统采用“五层两翼”总体架构（如图1所示）。物理灌区层是现实中的水源、灌溉排水工程及灌溉区域等实体，为数字孪生提供映射源；信息化基础设施层涵盖立体感知体系（传感器、视频监控）、工程自动化控制系统（闸门、泵站远控）、通信网络（自建光纤等）和信息基础环境（机房等），为上层提供硬件支撑；数字孪生平台层是核心引擎，由数据、模型、知识平台构成，提供“算据”“算法”“知识”支撑；业务应用层是面向具体管理业务的功能集合，含灌区一张图等系统；系统用户层包括灌区管理单位等。两翼即贯穿始终的网络安全和运行维护体系，为系统安全、稳定、可持续运行提供保障。



图1：漳南灌区智能运维管理系统总体架构图

2.3 数据架构与网络架构

数据架构方面，系统汇聚基础数据、监测数据、业务数据、空间数据和非结构化数据等多源异构信息。前端监测数据通过有线/无线网络逐级汇聚至总中心，调度指令则反向下达。同时，通过水利信息网和政务外网，与省水利厅、气象局等外部单位实现数据共享交换。网络架构方面，采用“自建与租用并行、有线与无线结合”的混合组网模式。干渠沿线铺设24芯光纤，保障关键节点通信的高带宽、低延迟与高可靠性；对于分散的地下水监测点等，则采用4G/5G无线传输，兼顾经济性与灵活性。

3 数字孪生平台核心支撑体系建设

3.1 多尺度数据底板构建

数据底板是数字孪生的“算据”基础。漳南灌区采用分级建设策略：L1级数据底板：通过共享河南省水利“一张图”，获取覆盖全域的优于2米分辨率遥感影像和优

于30米DEM数据，服务于宏观态势研判。L2级数据底板：通过航测等方式，自主建设覆盖干渠、分干渠及支渠的高精度数据，包括优于0.5米的DOM（数字正射影像）和优于2.5米格网精度的DEM（数字高程模型），总面积达180.27平方公里，为中观尺度的运行管理提供支撑。L3级数据底板：针对渠首、重要水工建筑物（如节制闸、泵站、渡槽）等关键局部场景，利用BIM（建筑信息模型）技术和无人机倾斜摄影，构建厘米级精度的三维实景模型和工程信息模型，实现对工程细节的精细化表达。通过把这三级数据底板与实时监测数据、业务管理数据深度融合，构建了一个基础统一、二三维一体化、跨层级、跨业务的灌区数字化场景。

3.2 多维度模型平台开发

模型平台作为数字孪生的“算法”核心，为智能决策提供科学支撑。水利专业模型方面，需水预测模型采用“机理模型-深度学习-数据同化”耦合框架，动态预测作物需水量；水动力仿真模型构建一维与二维耦合的水动力学模型，模拟洪水演进和日常输配水状态，辅助防洪调度与水量分配；水量调度模型综合考虑复杂水源条件，构建三维供需映射网络，实现水资源精准配置。智能模型基于AI视频分析技术，开发水面漂浮物识别等一系列智能算法模型，提升视频监控自动化与智能化水平。可视化模型借助BIM+GIS融合技术，关联工程属性与实时数据，构建多要素动态组合渲染和时序驱动仿真模型，实现工程运行状态三维可视化、动态化展示。

3.3 知识化知识平台沉淀

知识平台致力于把专家经验、业务规则等隐性知识显性化与结构化。它包含多个知识库：调度方案库对历史上典型需水预测、水量调度及应急预案等进行知识化处理，便于快速调用与参数调整；知识图谱库构建含水利对象及其关系的知识图谱，展现灌区内外在逻辑；业务规则库将工程调度等规章制度结构化，形成可自动执行的规则集；专家经验库通过特定模式挖掘、修正专家决策过程，形成可复用经验资产。

4 业务应用系统功能设计

4.1 灌区一张图

作为系统的总入口和总览视图，“灌区一张图”基于WebGIS技术，将所有工程、监测、业务信息集成于一个统一的二三维电子沙盘之上。管理人员可通过地图点选、空间查询等方式，一屏“看灌区、懂灌区、管灌区”，并能一键跳转至相关业务详情页面，实现业务联动。

4.2 运行监测监控系统

该系统是灌区的“千里眼”和“顺风耳”。（1）监测

信息管理：集中管理水雨情、墒情、水质、工情、安全监测等各类实时数据，提供多维度的查询、统计、分析与预警服务。(2) 泵闸站监控：实现对179处闸门和15座提灌站的远程集中控制。系统不仅能下发控制指令，还能实时驱动三维场景中的虚拟闸门同步动作，并结合水动力模型，在虚拟模式下预演不同开度下的水流、水位变化^[3]。(3) 智能视频监控：利用前述AI模型，对视频画面进行自动分析，一旦发现异常（如水位超限、漂浮物聚集、非法入侵），立即触发告警并推送至相关人员。(4) 水质监测管理：对关键断面的水质进行在线监测与动态评估，及时发现并预警水质安全问题。

4.3 供需水预报与智能调度系统

一是供需水感知与预报：基于需水预测模型和来水预报信息，精准感知灌区未来的供需水态势。二是水资源智能调度：调度人员可在数字孪生平台上，制定多种调度预案。系统利用水动力仿真模型，对每种预案进行“预演”，直观展示未来水位、流量的变化过程及可能的风险。通过多方案比选和迭代优化，最终确定最优调度方案，并通过远程控制系统自动执行，真正实现了“四预”（预报、预警、预演、预案）功能。

4.4 水旱灾害防御智能调度系统

系统整合气象、雨量、土壤墒情、河道水位等多源信息，构建了完整的水旱灾害防御体系。(1) 旱情防御：当监测到土壤墒情持续偏低时，系统可结合多水源供水能力，自动生成抗旱联合调度方案。(2) 防汛调度：在汛期，系统可接入卫星云图和气象预报，对强降雨过程进行模拟，预演洪水在渠道及周边农田的演进路径和淹没范围，提前发布预警，并生成科学的防洪调度和人员转移预案。

4.5 工程运维管理系统

该系统将传统的被动式、周期性巡检转变为智能化、精准化的主动运维。一是智能巡检：巡检人员通过移动APP接收任务，在现场可扫码查看工程档案、记录巡检情况、上传问题照片^[4]。二是安全应急响应：当安全监测数据或智能视频发现工程隐患时，系统会自动创建工单，并根据风险等级和专业类别，派发给相应的维修人员，形成“监测-预警-派单-处理-反馈”的闭环管理流程。

4.6 水量计量与水费计收系统

系统实现了从“按亩收费”到“按方收费”的精细化管理。通过遍布各级渠系的在线计量设施，精确核算每个用水户的用水量。系统可根据不同的水价政策（如超定额累进加价），自动计算水费，并支持预缴、结算、统计分析等功能，为水费征收和节水激励提供坚实的数据支撑。

5 系统集成、安全与运维

为确保系统高效、安全、稳定运行，设计中充分考虑了集成、安全与运维体系。(1) 系统集成：内部集成方面，通过标准化接口，将感知、控制、模型、应用等模块无缝衔接；外部集成方面，通过数据交换服务，与省水利“一张图”、气象、水文等外部系统实现数据互通共享。(2) 网络安全：严格遵循国家网络安全等级保护要求，从物理安全、网络安全、主机安全、应用安全到数据安全，构建了纵深防御体系，确保系统免受攻击和数据泄露。(3) 运行维护：建立了科学的IT运维管理体系，包括制度、流程和技术工具，保障系统长期、可靠、高效地服务于灌区管理。

6 结语

本文以河南漳南灌区为例，阐述基于数字孪生技术的灌区智能运维管理系统设计与应用方案。该系统构建“数据底板-模型平台-知识平台”三位一体的数字孪生内核，驱动全业务链条智能化应用场景，解决了传统灌区管理感知不全、调度不精等难题。项目实施助力漳南灌区达成现代化建设目标，提升水资源利用水平与工程安全保障能力，为农业水价改革和农业农村现代化提供信息化支撑。展望未来，随着物联网等技术发展，漳南灌区数字孪生系统有广阔深化空间，如探索全自动调度决策、工程全生命周期健康管理等，推动灌区管理向更高水平智能化、自主化迈进，为国家粮食和水安全贡献力量。

参考文献

- [1] 顾涛, 王一之, 沈莹莹, 等. 数字孪生灌区先行先试建设成效与发展思考[J]. 中国水利, 2025, (13): 34-41.
- [2] 艾菲, 邓萌, 吴吉, 等. 数字孪生灌区单体化建模的方法研究[J]. 四川水利, 2025, 46(05): 85-87+100.
- [3] 张京. 基于BIM+GIS技术的灌区数字孪生系统研究与探索见解[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (29): 56-58.
- [4] 蒋云钟, 冶运涛. 数字孪生灌区内涵解析及建设思路与关键技术[J]. 中国水利, 2025, (13): 24-33.