数字孪生淠史杭灌区建设实践与成效分析

黄 娟

（安徽省淠史杭灌区管理总局，237005，六安）

摘 要：数字孪生灌区建设是智慧水利发展的重要内容之一，也是推动农村水利行业数字化转型、培育新质生产力的重要举措。以数字孪生淠史杭灌区建设为例，系统探讨其实践路径与成效。淠史杭灌区按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”智慧水利建设总体要求，以“管用、实用、好用”为目标，推进数字孪生灌区先行先试建设。在已有信息化基础上进一步完善灌区雨情、水情、工情、农情、气象等全要素数据采集设施，夯实数据基础。通过整合灌区水情与调度历史数据，配套开发供需水预测、水资源配置、渠道防汛调度、供水调度等模型，构建数字孪生淠史杭灌区管理平台，深化水资源配置与供用水调度、水旱灾害防御等关键业务智能化应用。通过“前端感知＋数据底板＋专题模型”方式融合相关业务，提升灌区水资源优化配置、供水科学调度和渠道防洪“四预”能力。分析该平台在来水预报、需水预测、配水预演、水量调度、供水节水、渠道防汛6个方面的应用成效，可为同类灌区数字孪生建设提供一定的借鉴参考。

关键词：淠史杭灌区；信息化；数字孪生；建设实践；成效分析

Construction practice and effect analysis of digital twin Pishihang irrigation district//HUANG Juan

Abstract: The construction of digital twin irrigation districts is an essential component of smart water conservancy development and a key measure to promote the digital transformation of rural water conservancy and cultivate new quality productive forces. Taking the construction of the digital twin Pishihang irrigation district as an example, this paper systematically explores its implementation pathway and outcomes. Following “demand-driven, application-oriented, digitally empowered, and capacity-enhancing” overall principles of smart water conservancy and aiming for solutions that are “effective, practical, and user-friendly”, the Pishihang irrigation district has advanced as a pilot in digital twin irrigation development. Building on its existing informatization foundation, the district has improved its comprehensive data acquisition infrastructure for rainfall, hydrology, engineering status, agricultural activities, and meteorological conditions, thereby reinforcing its data base. By integrating hydrological data and historical scheduling records, and developing supporting models for water demand forecasting, water resource allocation, channel flood dispatching, and water supply scheduling, a digital twin management platform has been established. This platform enhances intelligent applications in key areas such as water resource allocation, water supply scheduling, and flood and drought disaster response. Through the integration of “front-end perception + data infrastructure + specialized models”, relevant business processes are linked to improve “four pre” capabilities in water resource optimization, scientific water scheduling, and channel flood control. The platform’s effectiveness has been analyzed across six functions: inflow forecasting, water demand prediction, pre-distribution planning, water regulation, water supply and conservation, and channel flood control, providing useful insights for the development of digital twin irrigation districts in similar contexts.

收稿日期：2025-05-04 修回日期：2025-06-26

作者简介：黄娟，高级工程师，主要从事水利信息化建设与管理。

Keywords: Pishihang irrigation district; informatization; digital twins; construction practice; effect analysis
中图分类号：TV+S274+TP27　　**文献标识码**：B　　**文章编号**：1000-1123(2025)13-0042-08
DOI：10.3969/j.issn.1000-1123.2025.13.006

泛史杭灌区位于安徽省中西部和河南省东南部，横跨江淮两大流域，是泛河、史河、杭埠河3个毗邻灌区的总称，是新中国成立后建设的全国最大灌区，总面积1.47万km^2，实灌面积1060万亩（1亩=1/15 hm^2，下同），惠及皖、豫2省4市17个县（区）。灌区灌溉系统为“长藤结瓜”式，包括3个渠首、2.5万km渠道、21座中型水库、1200余座小型水库、20万座塘堰和6万座渠系建筑物。水资源总量约100亿m^3，主水源来自佛子岭等六大水库，总库容70.74亿m^3，辅助水源包括中小型水库和塘堰调节径流以及38座泵站抽取外部河湖水。引江济淮工程全部建设完成后，调度江水作为补充水源，将形成引、蓄、提、调“四水联调”格局。作为国家水网重要组成部分，灌区兼具防洪、生态等综合效益，近5年年均供水43.1亿m^3，2024年产粮74亿kg，占全国总产量的1%，保障安徽全省25%人口及33% GDP用水需求，兼具防洪、生态等综合效益。

2021年中央一号文件提出，要强化现代农业科技和物质装备支撑，实施大中型灌区续建配套及现代化改造。《智慧水利建设顶层设计》《“十四五”重大农业节水供水工程实施方案》等文件相继出台，制定了“十四五”期间实现灌区管理数字化、调度智能化的具体路径。2022年全国水利工作会议提出打造现代化数字灌区，打通国家水网“最后一公里”。泛史杭灌区作为安徽省乃至全国的重要农业基础设施，应用数字孪生、大数据、云计算等前沿技术进行现代化升级改造，既是落实国家政策的具体行动，更是保障粮食安全、推动农业智慧化的重要举措。

一、泛史杭灌区的信息化建设探索

1.信息化建设历程

①试点探索与基础建设期（20世纪90年代末—2010年）：2002年入选全国首批大型灌区信息化试点，在泛河总干渠试点布设水情遥测、视频监控、水闸自动化控制等硬件设施，配套开发灌区计量与水管理系统，奠定了信息化建设初步基础。

②规划引领与系统推进期（2011—2020年）：2011年编制《安徽省泛史杭灌区信息化建设规划》，明确目标、架构和“先干渠、后支渠”“先急后缓”的推进路径。依托灌区续建配套与节水改造项目，建成泛河、史河、舒庐3个信息化分中心并实施灌区量测水项目，扩大了信息化覆盖范围，提升了基础数据采集能力。

③数字化转型与智慧化升级期（2021年至今）：2021年启动数字灌区一期项目建设，2022年实施数字孪生灌区建设，构建数据中心、物联网平台、“一张图”和综合业务平台，深度融合物联网、大数据、云计算技术，扩展并整合监测站点数据，开发水利专题模型与多项业务应用，推动灌区管理向智能化、精细化全面迈进。

2.早期主要建设内容

①感知体系。建设覆盖渠首、支渠以上引水口/分水口、市县区界断面量测水站点628处；建设雨水情监测站13处、视频监控169处；建设水质自动监测站1处，可监测9类水质数据。

②自动控制系统。灌区实行总局与县区分级管理，总局直管51座水闸，其中15座闸站完成自动化改造，具备中控与现地控制功能。

③支撑保障体系。建设小型通信机房2处、数据中心机房1处，主要用于支撑灌区业务系统的数据处理和存储。设置3个灌区分中心，主要功能为信息管理、网络汇聚等。通信采用“公网为主+自建为辅”模式，自建光缆总长129.4 km，公网租赁总长160 km，总局互联网带宽150 M，用于日常办公、雨水情监测、视频监控信息回传等服务。

④业务系统。开发泛河总干渠监控中心系统、灌区涵闸群数据管理分析系统及泛史杭灌区综合视频监管系统，具备水位雨量实时监测功能。

⑤网络安全体系。按照等保二级要求在机房部署了防火墙、堡垒机、审计日志等安全设备，并对3个业务系统进行定级备案。

3.存在的主要问题

①监测感知体系薄弱。一是监测密度低，已有设施以点状分散监测为主，灌区覆盖范围小；二是感知维度低，仅采集水位、雨量等基础供水数据，尚未接入气象预报、遥感监测等现代技术，供水调度、旱情评估仍依赖人工经验判断；三是设备老化严重，部分监测站点使用的传感器和数据采集设备已运行多年，存在精度

下降、故障频发等问题，影响了数据的准确性和时效性，同时，总局150 M带宽网络难以支撑近200路视频并发；四是网络覆盖面低，自建光缆仅覆盖总干渠主干网，总局与下属单位间未建立专用通信网络；五是监测体系建设零散化、碎片化，未能开展系统性顶层设计，分级、分类、分步推进监测设施配套。

②数据底板不完善。一是数据存储碎片化，灌区经过多年运行和管理，积累了大量水情、水资源配置、供水调度、工程基础信息等资料，但因信息采集规范化和数字化程度低，许多人工记录、原始资料、历史文档等未妥善保存，造成数据丢失或不完整；二是数据价值闲置化，大量资料未数字化，搁置在档案室，查阅困难，造成资源利用率低，深度挖掘不足；三是数据应用表层化，数据共享机制不健全，信息共享率不足30%，部门间数据壁垒严重，数据分析仅停留在简单统计层面，缺乏深度挖掘数据价值的能力，致使数据应用效果有限。

③缺少水利专业模型应用。一是未开发供需水预测模型，无法对灌区蓄水工程汇水区进行降雨预报、产汇流预报以及对塘库蓄水动态变化进行有效预测，且难以准确预测作物需耗水、城乡供水、工业需水和生态需水；二是未开发灌区水资源配置模型，无法全面分析水源可供水量，难以对灌溉、城乡供水、工业及生态用水科学地进行多目标配置；三是未开发供水调度模型，供水调度预案仍需人工编制，闸群调度依赖经验操作；四是未开发渠道防汛调度模型，难以对突发性洪水险情进行预报、预警、预演并给出有效的调度和抢险处置预案。

④业务应用零散。一是业务覆盖面不全，现有的3套业务系统对灌区水资源管理、防汛抗旱等核心业务支撑不足；二是缺少工程管理、水资源管理等信息化系统，业务管理仍依赖纸质台账和人工经验，难以满足现代化灌区管理的需求；三是系统间协同性差，不同业务系统间缺乏有效集成和联动，导致信息孤岛现象严重，难以实现数据的共享与协同处理。

综上，浭史杭灌区早期在信息化建设方面虽然取得了一定进展，但仍面临诸多挑战。这些问题不仅制约了灌区信息化水平的提升，也影响了灌区水资源管理和调度决策的科学性和高效性。为解决上述问题，推动灌区信息化建设向更高层次发展，浭史杭灌区自2022年起启动了数字孪生灌区建设先行先试，通过构建完善的监测感知体系、强化数据底板建设、引入水利专业模型及整合优化业务应用，全面提升灌区信息化水平，支撑灌区水资源管理和调度决策。

二、数字孪生浭史杭灌区建设实践

1.建设思路

数字孪生浭史杭灌区建设以“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”为原则，通过物联网、云计算和人工智能等新技术，以实时采集的水情、雨情、工情、墒情等数据为基础，构建虚拟灌区与实体灌区的同步仿真，实现天气预测、作物需水预测、旱情监测、水源调度、水旱灾害防御等功能。浭史杭数字孪生灌区分“数字化筑基（2022年）、智能化升级（2025年）、智慧化融合（2035年）”三阶段推进（见图1），通过整合已有设备、规范新建系统、优先急用模块的策略，逐步完成“三化目标、四大功能、五大体系、三个平台、三个阶段”的“34533”战略架构，建设管用、实用、好用的数字孪生灌区。

2.总体架构

数字孪生浭史杭灌区建设的总体架构包括信息化基础设施、数字孪生平台、业务应用平台、网络安全体系、运行维护体系等（见图2），充分利用灌区已有的信息化感知设备、基础设施及支撑平台等成果，统筹兼顾长远目标与近期需求，分阶段推进系统部署和项目实施。同时，注重系统的可扩展性，在灌区业务深化和外部环境变化的情况下，能够实现业务覆盖范围的拓展、功能的逐步增强及性能的持续提升，从而充分发挥系

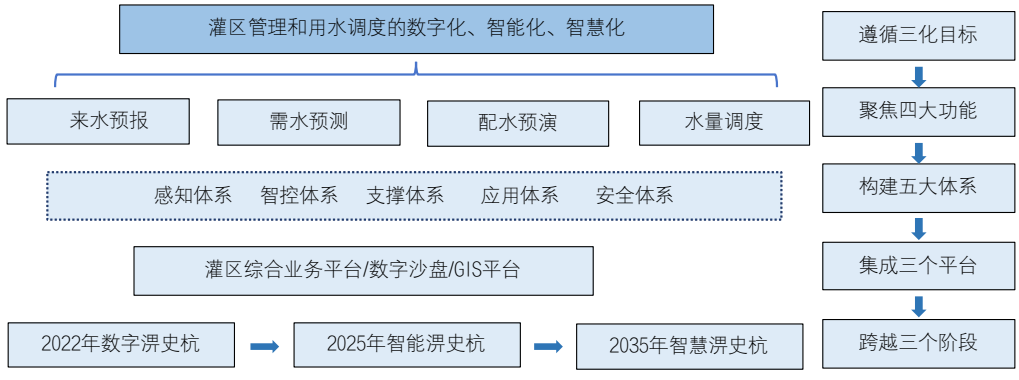

图1 数字孪生浭史杭灌区建设思路

统的整体功能和效益。

3.建设内容

(1)监测感知体系建设

水情监测方面，新建296处站点，并整合水文部门1300余处观测点共享数据，形成总干渠、干渠及分干渠重要节点用水监测全覆盖网络；雨情监测方面，新建13处雨情站点，与气象部门1400余个观测点互联，实现灌区全域降水动态掌控；视频监控方面，建成380余处高低点位视频监控系统，对枢纽工程、险工险段及管理区域实施24小时可视化监管；自动化控制方面，建成58处水闸，覆盖渠首枢纽、干渠进水口、节制闸、泄水闸等关键节点，实现闸门启闭远程控制；墒情监测方面，在农业灌溉核心区域，建设25处墒情监测站，共享农业部门站点15处，实现土壤墒情实时监测；支撑保障体系方面，租赁78条专线补充主干通信网络，将互联网带宽提升至1 G，完善数据中心、调度中心建设，承担灌区各类监测数据计算存储及分析展示功能。

(2)数据底板建设

在已有灌区“一张图”基础上，时间基准采用北京时间，空间基准采用2000国家大地坐标系，高程基准采用1985国家高程基准，基于GIS平台构建空间数据库，开展灌区工程数据测量复核与更新，完善基础地理、水利工程、管理范围、土地确权划界等基础数据，建成灌区1098万亩灌域范围L1级数据底板，滨河总干渠、史河总干渠、汲东干渠77.5 km^2管护范围和31 km^2水下地形L2级数据底板，以及渠首重点工程建筑物L3级数据底板。整编1960年以来的水情数据和水量调度数据，利用卫星遥感技术分析灌溉进度、灌溉面积、作物分类及作物种类。

(3)数字孪生平台主要功能模型

为解决灌区来水预报、需水预测、水量配置、水资源调度等灌区业务管理工作主要依靠传统手段和经验判断等问题，基于灌区实时监测信息、作物种植结构信息、第七次人口普查数据、社会经济发展数据、工程特征信息等，开发供需水预测模型、水资源配置模型、供水调度模型及渠道防汛调度模型，制定标准化模型开发、调用、共享接口，实现模型通用化封装与接口标准化，实现辅助编制年度供水计划、阶段供水方案、防汛调度方案等，提升灌区水资源优化配置、供水科学调度的预报、预警、预演、预案“四预”功能(见图3)。

①水资源配置模型。主要任务：根据灌区水资源管理需求，将灌区根据控制节点划分为27个配水单元。绘制配水单元间的空间拓扑关系图，根据灌区水资源配置原则，开发基于人工智能的优化算法，读入灌区

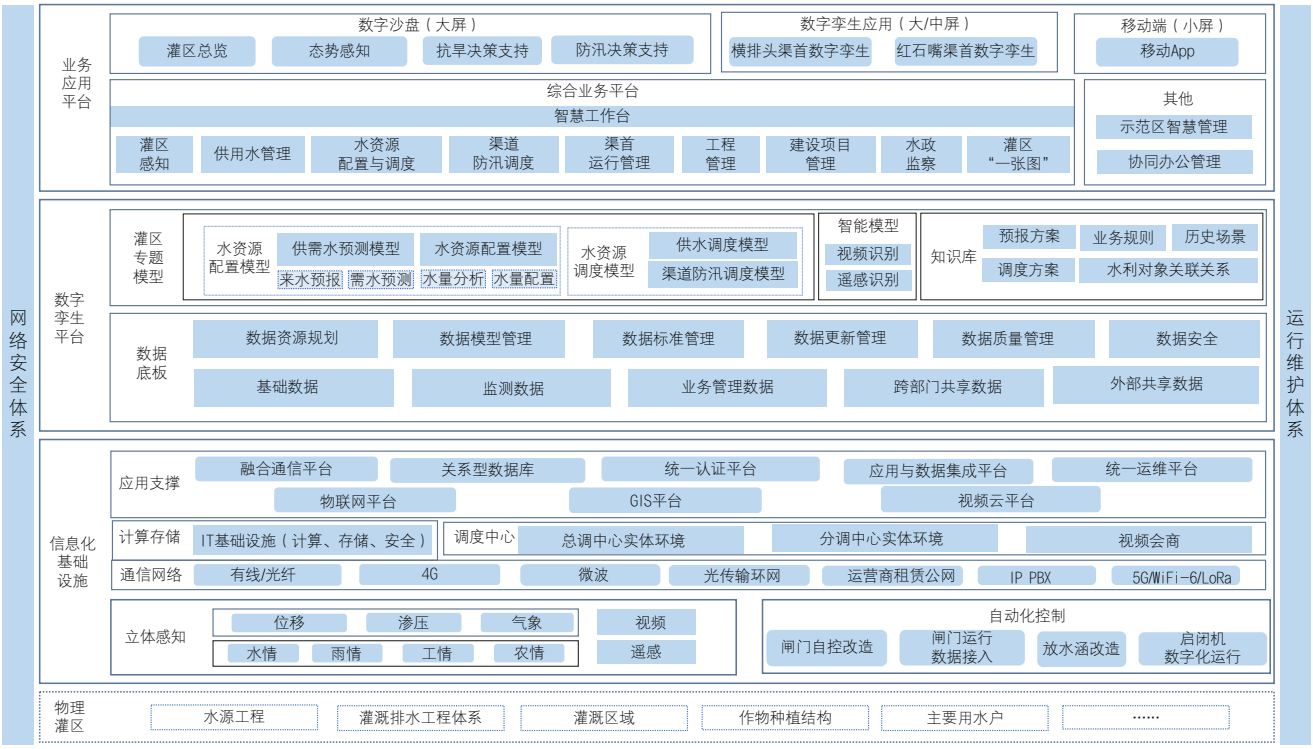

图2 数字孪生淠史杭灌区总体架构

工程基本数据、单元历史用水和上游水库历史来水数据，输入可供水量、需水量数据，分析灌区总体水资源平衡、单元水资源平衡和各水源对各单元各行业的水资源配置量，设计流程见图4。实现农业灌溉用水、城乡用水、生态用水的供需平衡，优化水资源在灌区内的时空分配。如，对合肥、淮南等有城市生活供水的城市，利用优先保证供水、缺水率最小目标，保障灌区主要城市生活供水安全；对六安等以农业灌溉为主的城市，采用综合因素分析方法，确保水资源配置达到最优。

②水资源调度模型。主要任务：以水资源高效利用和确保渠道汛期运行安全为总体目标，综合考虑调度单元用水需求、区间暴雨及由此导致的小流域入渠洪水对渠道水流的影响，包含供水调度模型和渠道防汛调度模型两部分。供水调度模型包括引水量反演模块、配水调度模块、输配水模拟模块和评价模块；渠道防汛调度模型包括产流模块、汇流模块、渠道行洪和调度推演模块及调度方案评估模块，实现泾史杭灌区常规调度与防洪调度由经验决策提升为智慧决策。技术流程：通过对渠首引水量和供水时间的反演，利用渠系空间拓扑结构、渠系水力参数、闸门空间位置和闸门参数，对灌区输配水模拟仿真，实现分干渠及以上骨干渠系输配水动态模拟，以配水效率最高、渠

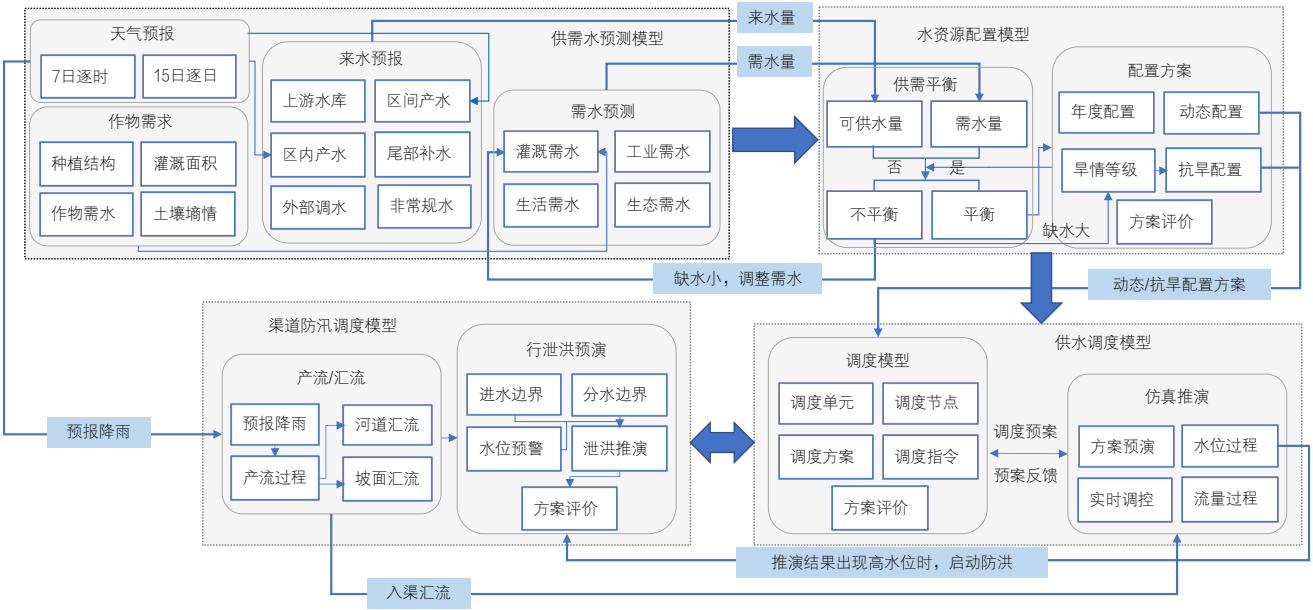

图3 平台主要功能模型总体框架

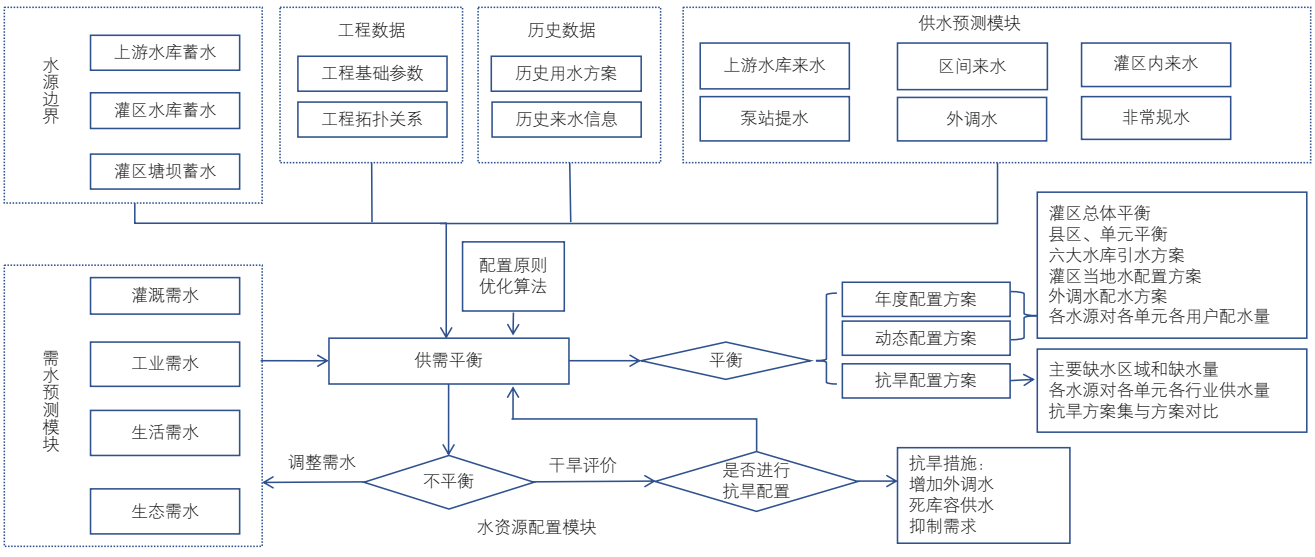

图4 水资源配置模型设计流程

首引水量最少为目标，生成调度预案，梳理评价指标体系，对调度预案进行评价，最终筛选出最优调度方案（见图5）。

（4）业务应用平台

基于“业务场景化、工作流程化、办公精简化”的核心思路，利用现代计算机、互联网、云计算、大数据、GIS、模型算法等新兴技术，围绕灌区灌溉调度、工程管理等核心业务开发灌区感知、水资源配置与调度、渠道防汛调度、供用水管理、工程管理、项目建设管理、水政监察、渠首枢纽智慧运行管理及移动App等多项业务应用。根据日常管理需求，通过梳理业务流程、融合基础功能，构建了统一的数字孪生灌区综合业务平台，作为各项业务应用的统一入口，方便灌区各级管理部门的日常业务应用。

（5）网络安全体系

淠史杭灌区的网络采用分层架构，数据中心承担灌区业务系统的运行，并设有多个外联出口，向上连接安徽省水利厅和政务外网及互联网，向下接入管理局、管理分局等分支网络，按照《信息安全技术 网络安全等级保护定级指南》《水利网络安全保护技术规范》等标准规范和网络安全等级保护三级的要求进行网络安全建设，构建网络安全组织管理体系、安全技术体系、安全运营体系和监督检查体系，强化数据安全保护。

（6）运行维护体系

围绕信息化基础设施、数字孪生平台、业务应用平台、网络安全管理等，制定信息系统运行维护管理办法，明确岗位责任主体及管理人员工作职责。构建统一的运维平台作为工具，实现对淠史杭数字孪生灌区的多层次、全维度运维管理。

4. 主要做法

在“十四五”规划引领下，淠史杭灌区通过灌区续建配套与现代化改造工程实施数字孪生灌区建设，是全国首批数字孪生灌区先行先试灌区之一。淠史杭灌区在项目实施过程中坚持创新驱动，强化科技引领，积极探索数字孪生技术在灌区管理中的应用。

（1）顶层设计与分步实施

淠史杭灌区按照“顶层设计+目标分解”实施路径推进数字孪生灌区项目建设，依托“十四五”现代化改造工程，构建起中央、省级及地方多级联动的资金保障体系，2020年完成总体规划编制，2022年基本建成数字孪生灌区框架，实现实时数据采集与传输、险段视频监控与关键闸门远程控制等，为水资源智能调度、渠道仿真推演等奠定坚实基础，2025年基本形成灌区数字孪生体系，实现灌区的全面数字化管理和智能化决策。

（2）机制创新与协同管控

组建项目建管处，纵向联动县区水利局落实数据接入，横向整合技术单位提供专业支撑。采用设计—采购—施工一体化总承包模式，使技术方案与施工部署形成有机整体。通过周调度、月通报的动态管理机制，定期召开项目进展会议，重点破解开发进度滞后、设备安装与调试不畅等难题，有效确保项目按计划顺利推进。

（3）数据共享与标准互通

通过构建统一的数据平台，实现灌区工程、水资源、环境等多要素信息的实时监测与动态管理。与水文局共享实时水位、流量数据，与气象局对接降水预报，统一灌区监测数据接入格式，避免多源数据融合障碍。

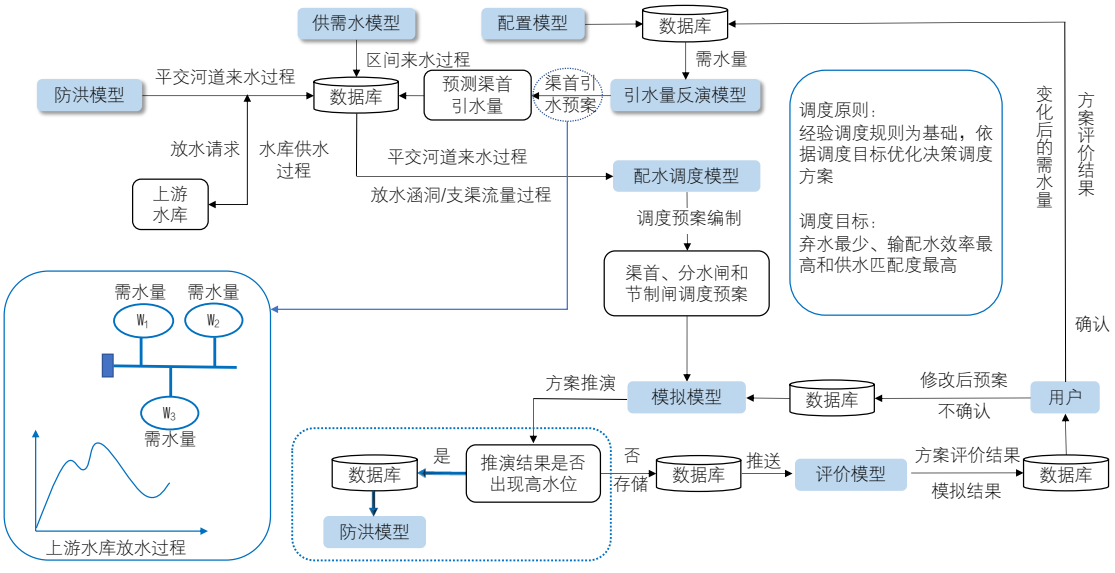

图5 水资源调度模型技术流程

（4）管理、应用、运维一体化推进

设备安装后向管理单位提供系统操作手册，并开展

“理论+实操”培训(如闸门远程控制等)。同时,注重信息化运维人才培养,构建运行管理单位自行维护和专业维护相结合的运维模式,进行系统的日常维护及故障处理,确保系统长效运行。

三、主要成效

数字孪生淠史杭灌区建设以来,在2022—2023年抗旱、2024年防汛等工作中发挥了重要支撑保障作用。主要体现在:来水预报更科学、需水预测更精准、配水预演更高效、水量调度更可靠、供水节水更有力、渠道防汛更智慧等6个方面。

1.来水预报更科学

利用水情在线监测和卫星遥感影像解译的灌区水库、塘坝、渠道蓄水数据,通过供需水预测模型,集成气象部门短临降雨预报,构建降雨预报模块、水源蓄水监测模块、来水预报模块和需水预测模块等,逐个分析灌区上游6座大型水库及21座中型水库未来10天来水量,利用遥感影像分片区定量分析灌区内1000多座小型水库和20万口塘堰来水量,全面掌握灌区水源供水条件,并为水资源配置提供标准化数据接口。

2.需水预测更精准

将灌区按渠系分政区划为27个配水单元,绘制配水单元间的空间拓扑关系图,根据一定的配置原则,开发基于人工智能的优化算法,构建需水预测模块,读入灌区工程基本数据、单元历史用水和上游水库历史来水,输入可供水量、需水量数据,分析灌区总体水资源平衡、单元水资源平衡和各水源对各单元的灌溉需水、城乡需水、生态需水3种需水类型的水资源配置量。农业需水量利用遥感影像数据动态分析各单元种植结构和灌溉进度,确定当前已灌面积、未灌面积,采用灌区水稻各生育期灌溉用水定额,预测各单元需水量;同时,利用灌区内土壤墒情站点,复核遥感解译数据,提高遥感数据准确率。

3.配水预演更高效

以灌区算据为支撑,利用灌区水资源配置模型,实现不同年型供需水平衡分析和优化配置。根据灌区各单元需水量,通过引水量反演模型拟合灌区各级渠系水利用系数,生成最优配水预案,以旬为尺度明确各单元引蓄提各类水源供水周期及供水量,确定各控制建筑物调度水量和流量。在应对旱情时,人工编制配水方案依赖经验,时间长、效率低,易造成配水不及时,通过数字孪生灌区建设,配水方案编制时间由原来1~2周缩短为几分钟,可以根据降雨来水形势变化及时作出动态优化配水方案。以2023年为例,淠史杭灌区春季上游水库蓄水仅为近10年同期的一半,直接影响栽插期水稻的种植。4月份,人工编制栽插期种植方案,仅能保障562万亩水稻栽插;5月底,灌区经历2轮强降雨,水库来水增多,墒情改善,亩均需水量减少;6月初借助数字孪生灌区系统,根据降雨形势变化快速编制了动态配水方案,及时调整种植面积,水稻栽插面积恢复至常年833万亩水平。

4.水量调度更可靠

利用灌区渠道调度模型和水动力仿真模型,动态模拟渠道输配水过程,实现可视化预演,优化了复杂渠系下多目标控制的联合调度,提高水闸调度的科学性和时效性。以2025年1月12日向安徽合肥城市供水的场景为例,系统对供水调度预案进行推演,横排头进水闸从12日上午8时开始将流量加大到40 m^3/s,罗管节制闸从12日下午3时开始放水,流量为35 m^3/s,随着时间的推移,各控制点的水位开始上涨,水头大约经过18 h到达合肥市的将军岭节制闸,与实际观测结果基本一致,证明模型可指导实际调度。

5.供水节水更有力

在潜南干渠、清凉寺分干渠、汤东支渠、汤西支渠推进现代化改造试点,探索骨干工程与田间工程的协调推进。采用地方政府主导、水利和农业农村部门配合、灌区管理单位协助、用水户参与的改造模式。示范区地方政府整合资金,完善田间灌排工程,淠史杭灌区通过实施骨干工程续建配套项目,增设量测水设施和信息化管理手段,实现骨干工程与田间工程的集中连片建设。示范区水资源配置是在全灌区水资源配置基础上,根据示范区用水特点,针对性地对多样水源、多级渠系管理、多层供用关系进行分析,进一步细化供水配置单元、计算节点、计算关系,实现水资源精细配置,与调度精准对接,配置调度一体联动,解决供需平衡分析、调配不均的问题。以灌区高效农业示范片之一的林水寨为例,其耕地面积5000亩、鱼稻区1100亩,数字化改造后,安装了水位传感器和自动闸门,实现了远程精准控制给排水,2022年当地遭遇严重的旱情,但鱼稻田产量仍提高了20%。

6.渠道防汛更智慧

淠史杭灌区骨干渠道多沿江淮丘陵等高线布设,强降雨期间有大量侧向来水汇入,给工程安全带来严峻挑战。淠史杭灌区利用渠道防汛调度模型,将灌区

防洪压力较大的淠河总干渠、史河总干渠上段、汲东干渠划分为5处防洪调度单元27个集水区，利用产汇流模型分区域计算降雨来水，绘制洪水过程线，初步实现5处重点防洪单元入渠洪水预报、超高水位预警、调度过程预演和防汛调度预案编制。2023年以来在多次强降雨防范过程中，模型计算结果与实际情况基本吻合。

四、结 语

淠史杭灌区以水利部关于智慧水利建设相关文件为指引，围绕灌区水资源配置、供水调度、工程管理等工作中的痛点和难点问题，利用数字孪生、大数据、云计算等先进技术，通过数据采集等硬件设施的完善和来水预报、需水预测、水资源配置、渠道防汛调度等智能模型的开发，对灌区原有信息化基础设施进行数字化、智能化升级改造，建立数字孪生淠史杭灌区平台。平台显著提升了水资源调度精准度和水旱灾害防御能力，同时推进了灌区的粮食生产和城乡居民饮水保障工作，安全性、可靠性、公平性和灵活性得到进一步提高。后续实践中，灌区将继续按照“需求牵引、应用至上、数字赋能、提升能力”总要求，结合安徽智慧水利体系建设，强化各平台之间的资源共享和业务协同，提高平台的数字化、智能化水平，切实实现灌区水资源配置与调度的智慧化管理，为灌区经济社会高质量发展提供坚强供水安全保障，不断巩固数字孪生淠史杭灌区建设先行先试经验，以期为其他数字孪生灌区建设提供参考。

参考文献：

[1] 陈晨.全面提升国家水安全保障能力[N].光明日报，2023-09-14(4).
[2] 李国英.为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J].水利发展研究，2024，24(3)：1-3.
[3] 周红卫，程开宇，王淑英，等.数字孪生钱塘江流域建设及应用[J].人民长江，2024，55(5)：241-247.
[4] 马强，李郑淼，董芳睿，等.流域数字孪生防洪模型的构建：以子牙河“23·7”大洪水复盘为例[J].水利学报，2025，56(1)：73-84.
[5] 崔培，张涛，曾斌，等.数字孪生水利动态时空数据底板构建研究[J].中国水利，2025(2)：52-64.
[6] 张旺，朱士建，王高旭.烟台大中型水库数字孪生流域防洪调度“四预”应用研究[J].水利技术监督，2025(2)：72-76.
[7] 吴娟，林荷娟，薛涛.基于事件驱动的太湖流域抗咸保供“四预”应用[J].人民长江，2025，56(2)：1-8.
[8] 瞿大界.安徽省淠史杭灌区推进现代化改造和高质量发展的探索与实践[J].中国水利，2021(17)：41-43.
[9] 钱峰，夏润亮.数字孪生水利赋能水利新质生产力发展框架研究[J].中国水利，2024(8)：6-10+5.
[10] 王忠静，沈文欣，石羽佳，等.数字孪生催动水利新质生产力与数字水利经济发展研究[J].中国水利，2024(15)：7-12.
[11] 高升.茨淮新河数字孪生灌区建设探索[J].治淮，2023(9)：35-37.
[12] 张煜，刘亮，徐曙光，等.数字孪生峡江水利枢纽工程多尺度建模及可视化渲染关键技术应用[J].水利信息化，2023(6)：18-24.
[13] 刘驰，夏磊，刘猛猛.泗河数字孪生流域建设的实践与思考[J].治淮，2023(11)：33-34.
[14] 牛广利，李天旸，杨恒玲，等.数字孪生水利工程安全智能分析预警技术研究及应用[J].长江科学院院报，2023，40(3)：181-185.
[15] 唐娟，马飞，周小生，等.宁夏秦汉渠数字孪生灌区建设探索与实践[J].水利信息化，2024(5)：33-39+71.
[16] 靖争，曹慧群，林莉，等.数字孪生丹江口水质模型关键技术与应用[J].人民长江，2024，55(8)：222-230.
[17] 贾新胜，马存兵，董庆杰.数字孪生调水泵站工程可视化模型构建和数据交互技术研究与应用[J].中国水利，2024(1)：64-69.
[18] 唐文坚，申邵洪，杨恒玲，等.数字孪生水利工程关键技术及其应用实践——以江垭皂市工程为例[J].长江科学院院报，2024，41(8)：172-179.
[19] 贺挺，李凤生，成建国，等.水利部数字孪生流域模型管理云平台设计及应用研究[J].水利水电技术(中英文)，2024，55(2)：1-15.
[20] 张潮.数字孪生水利建设中筑牢数字安全屏障的思考[J].中国水利，2024(7)：62-66.
[21] 曾燕.水利枢纽数字孪生平台建设及泄洪影响数值模拟[D].武汉：华中科技大学，2024.
[22] 罗斌，周超，张振东.数字孪生水利专业模型平台构建关键技术及应用[J].人民长江，2024，55(6)：227-233.
[23] 陈智洋，李春晋，任明磊，等.数字孪生飞云江流域防洪“四预”应用建设研究[J].水利信息化，2024(6)：35-40.

责任编辑 董林玥