

三屯河灌区数字孪生应用价值

贾 君

昌吉市水利管理站(昌吉市三屯河流域管理处) 新疆 昌吉 831100

摘要: 随着国家“数字中国”战略的深入推进,水利行业正加快向数字化、智能化、现代化转型。数字孪生技术作为新一代信息技术与传统基础设施深度融合的关键载体,在灌区管理中展现出巨大的应用潜力和现实价值。本文以新疆昌吉三屯河灌区为研究对象,系统梳理其数字孪生平台的建设背景及典型应用场景,并深入分析其在配水调度、水费结算、防汛预警、工程巡检等方面的赋能成效。研究表明,三屯河灌区通过构建以智慧业务系统为核心的数字孪生体系,初步实现了信息采集自动化、存储数字化、控制网络化与决策智能化,显著提升了水资源配置效率、工程运行安全性和管理服务效能,为灌区迈向规范化、现代化、智慧化提供了可复制、可推广的实践范式。文章最后对未来发展方向提出建议。

关键词: 数字孪生;智慧灌区;三屯河灌区;水资源管理;智能调度;防汛预警

引言

我国作为农业大国,灌溉面积占耕地总面积超50%,灌区作为农业生产重要基础设施,肩负保障国家粮食、生态和水安全使命。但传统灌区管理存在信息化水平低、调度响应慢等诸多问题,难以适应新时代高质量发展要求。在此背景下,《“十四五”水安全保障规划》提出推进智慧水利建设,将数字孪生灌区列为重点任务。数字孪生是在物理与虚拟空间建立高保真、实时交互映射,通过集成仿真实现智能决策与优化,在水利领域,数字孪生灌区融合多种前沿技术,构建一体化感知网络和智能管控平台,是推动灌区治理现代化的核心引擎。三屯河灌区地处新疆昌吉州,是干旱区引水灌区,面临多重挑战,近年率先开展数字孪生平台建设成效显著,总结其经验,对提炼技术路径、管理模式,为全国同类灌区提供参考,具有重要理论与现实意义。

1 三屯河灌区概况与数字化转型动因

1.1 自然地理与工程体系

三屯河流域地处天山北麓,地势南高北低,坡度较大,总的趋势是由西南向东北倾斜。由于长年受山洪对山区风化物质的搬运,以及头、三屯河老河道深切沟梁之间,地形复杂,整个流域分为南部山区、中部平原和北部沙漠三部分。流域呈狭长形,主要支流包括大三屯河、小三屯河、孔萨拉沟、西庙尔沟等。三屯河属季节性河流,年内月际变化很大,区域内降水集中于6-8月,汛期降水量占全年60%以上,短时强降雨与山区融雪、冰川融水叠加,易形成突发性洪水^[1]。历史上最大入库洪峰流量达816m³/s,防洪压力巨大。灌区内建有两座骨干水库:三屯河水库(上游)与努尔加水库(下游)。其

中,努尔加水库库容为前者两倍,调节能力强,是区域水资源调配的关键节点。灌区渠系总长数百公里,设有多个配水站与闸门,服务3000余户用水单位,年灌溉面积约数十万亩。

1.2 传统管理模式的瓶颈

在实施数字化改造前,三屯河灌区的管理主要依赖人工经验与纸质流程:(1)配水调度:每日清晨8点,各配水站通过电话上报水情与需水计划,调度人员手工记录、计算并下达指令,整个流程耗时3-4小时,效率低下且易出错;(2)水费计收:采用人工记录、手工核算方式,每轮灌水后需2-3天完成全村水账计算,误差率高,透明度不足;(3)防汛预警:主要依赖碾盘庄水文站共享数据,缺乏本地化实时监测与预测模型,洪水预见期短,应急响应滞后;(4)工程巡检:依靠人工徒步巡查,周期长、覆盖不全,难以及时发现隐患。上述问题严重制约了灌区水资源的高效利用与工程安全运行,亟需通过信息化手段实现系统性变革。

1.3 建设目标与理念

三屯河灌区数字孪生平台以“提升综合服务效能、推动管理智能化”为核心目标,秉持“统一规划、分步实施、业务驱动、技术赋能”的建设理念,聚焦六大核心业务:信息采集、量水测水、配水调度、水费计收、防汛预警、工程管理,构建“一个平台、多维应用、全域协同”的智慧灌区框架体系。

2 典型应用场景与赋能成效分析

2.1 配水调度全流程管理

平台通过建设需水计划、流量调配计划、智能调度管理和水土平衡测算等功能模块,实现了从年度配水规

划到日级调度执行的全流程信息化管理。具体而言,各用水单位在前一天通过系统或移动端App上报次日需水计划。次日清晨,中心调度人员在平台上可直观查看系统自动采集的各渠道实时水情、用户需水量以及水库蓄水和上游来水量等关键数据。在充分掌握供需状况后,系统会基于内置的灌区配水调度模型,自动计算各渠口的增减流量,并生成一套科学合理的配水计划供调度人员参考。调度人员结合经验与系统建议,最终确定当日的执行方案^[2]。尤为值得一提的是,平台还配备了配水预演功能。在正式下达指令前,调度人员可启动水动力仿真模型,在三维可视化场景中对整个调度过程进行虚拟推演。预演过程中,水头经过每个支渠口的时间、水位及流量信息均能清晰呈现,若发现任何不合理之处,可即时进行优化调整。待配水计划经预演确认无误后,调度指令便可通过系统一键下达。各配水站接收到指令后,工作人员无需亲赴现场,只需通过远程控制系统结合实时视频监控,即可精准完成闸门调节,并将执行结果实时反馈回平台。整个配水流程由此前的3个多小时大幅缩短至20分钟,不仅极大提升了输配水工作的效率,也为用水户提供了更为优质、及时的供水服务。

2.2 水量水费自动结算

水量水费的自动结算机制是三屯河灌区实现精细化管理的重要体现。平台首先建立了覆盖全灌区3000多个用水户的电子化基础台账,每年开灌前,管理人员会将每个用户的水源信息、土地性质、灌溉方式、面积、定额及年度许可水量等关键数据录入系统,为后续的精准确量奠定基础。在灌溉期间,灌区采用轮灌模式,每10天为一轮。乡镇配水人员配备专用的电子计时证设备,在田间直接记录每位用户的实际用水时长。供水周期结束后数据回传至中心平台,平台接收到用水时长数据后,会结合实时水量信息,自动计算出本轮供水中每位用户的实际用水量,真正实现了“配水到户、计量到户”^[3]。在此基础上,系统根据核定的水价标准,计算出相应的水费金额。比对用户的实际用水量与其年度许可水量和灌溉定额,计算超定额部分的水量及对应的阶梯水费。这一整套自动化流程,将原来每轮灌水后需要两到三天才能完成的人工水账计算工作,压缩至30分钟内即可完成,并且杜绝了人为计算可能产生的各类误差。并长期保存电子水帐记录,便于日后查询核实。更重要的是,每轮灌水结束后,平台会向灌区所有受益单位和用水户公布详细的用水计量和计费依据,全面落实“总量控制、定额管理”的政策要求,有力促进了“水价、水量、水费”三公开,目前灌区水费计算准确率已达到

100%。这种透明、公平的计费模式,有效发挥了水价杠杆的调节作用,显著提升了用户的节水意识,灌区平均灌溉定额从过去的425方/亩下降至现在的365方/亩。

2.3 水库防汛预警预报

数字孪生平台构建了一套针对三屯河水库及下游努尔加水库的两库联合调度防汛预警系统。该系统以雨情、气象、融雪等历史及实时监测数据为基础,通过短期来水预报模型,精准分析并预测三屯河水库上游的产汇流过程、两库之间的区域汇流过程以及努尔加水库下游大小洪沟的产汇流过程,最终输出各区域集水区的来水过程线、洪峰流量及其出现时间,为水库防汛调度提供了坚实的数据依据。在此基础上,平台以满足区域需水、充分利用雨洪资源为目标,严格遵循两库梯级调度规则,并以水库可供水量及“三条红线”为约束条件,利用配水调度模型制定两库联调的调度预案,并进行调洪演算。通过一系列的模拟计算,能够确定努尔加水库的最优出库流量,并指导后续的灌溉调度。整个过程实现了从传统的经验驱动向模型驱动的根本转变,大大提高了洪水预报的准确性与可靠性。在实际应用中,汛期各级管理人员可通过手机App或软件平台,实时掌握山区降雨、洪沟汇流、上游来水等关键信息,使得洪水预警时间得以提前2至4小时。这宝贵的预警窗口期,使得灌区能够在第一时间启动应急预案,在确保人员及工程安全的前提下,实现了防汛管理的及时、高效与科学。

2.4 工程巡检实时监控

三屯河灌区数字孪生平台通过工程巡检实时监控模块,对灌区水利工程的日常巡检、安全生产巡查等工作进行了标准化、规范化的重塑。巡检人员在执行任务时,可通过手机App实时上传巡检记录,包括文字描述、定位信息、轨迹路径,并可同步拍摄照片、录制视频或语音备忘。所有这些多媒体信息均能即时传输至平台后台,并在PC端进行集中展示与管理。管理人员在控制室内,便可实时了解每一位巡查人员的当前位置与行动轨迹,并能随时调阅其在巡检过程中发现的问题详情。一旦发现异常情况,管理人员可以快速定位问题位置,并在第一时间给出专业的处理意见,极大地缩短了问题响应与处置的周期。此外,平台还创新性地引入了无人机巡检作为人工巡检的有力补充,尤其适用于地形复杂、交通不便或存在安全风险的区域。自2017年系统上线以来,平台已累计记录工程巡检信息4937条,其中发现并标记异常记录43条,所有问题均得到了及时有效的处置,有力地保障了灌区工程设施的安全、稳定、高效运行。

3 综合价值评估

3.1 管理效能提升

数字孪生平台将分散、割裂的传统业务整合为统一数字 workflows,打破“信息孤岛”,实现“一屏观全域、一网管全渠”。管理人员从繁琐事务性工作中解放,转向更高价值的分析与决策。

3.2 资源配置优化

通过精准计量与智能调度,水资源利用效率显著提高。灌溉定额下降、超定额用水减少,体现了“以水定地、以水定产”的刚性约束,助力落实最严格水资源管理制度。

3.3 安全韧性增强

防汛预警与工程巡检系统的联动,构建了“监测—预警—响应—处置”全链条风险防控体系,有效提升了灌区应对极端气候事件的韧性。

3.4 服务体验改善

用水户可通过App随时查询水量、水费、配水计划,参与感与满意度提升。透明、公平、高效的供水服务增强了政府公信力。

3.5 示范引领作用

三屯河灌区的实践表明,即使在西部欠发达地区,也能通过适度投入、因地制宜地建设数字孪生平台,实现跨越式发展,为全国智慧水利建设提供“小而美、实而精”的样板。

4 未来展望

面向未来,三屯河灌区数字孪生平台的发展应着力于以下几个方向。第一,深化模型的智能化水平,积极探索引入机器学习等先进算法,使调度策略能够基于历史运行数据进行自我学习与优化,不断提升决策的前瞻性与精准度。第二,进一步拓展感知维度,在现有水文要素的基础上,增加对水质、土壤墒情、作物长势等农

业关键指标的监测,为发展精准农业和智慧农业提供数据支撑^[4]。第三,积极推动“灌区+”的融合发展,主动与气象、农业、电力等相关部门建立数据共享机制,尝试构建一个涵盖水-粮-能协同管理的区域性综合决策平台。第四,系统总结三屯河灌区的建设与运营经验,积极参与国家或行业层面关于数字孪生灌区的技术标准与规范制定,将地方实践升华为可复制、可推广的制度性成果。

5 结语

三屯河灌区数字孪生平台的成功实践,标志着我国灌区管理正经历一场深刻的范式变革,即从传统的“经验驱动”稳步迈向“数据驱动+模型驱动”的新阶段。通过构建一个覆盖全要素、贯穿全业务、管理全周期的高保真数字孪生体,该灌区在提升水资源配置效率、保障水利工程安全等多个维度均取得了突破性的进展。这一系列成果,充分彰显了数字孪生技术在推动水利现代化进程中的核心价值与巨大潜力。展望未来,三屯河灌区应继续秉持创新驱动的发展理念,不断克服现有挑战,深化技术应用,健全制度保障,努力推动数字孪生平台从“可用”走向“好用”,最终迈向“慧用”的更高境界,为全国建设人水和谐、绿色高效的现代化新型灌区贡献更多智慧与力量。

参考文献

- [1]张侨洪,靳晟,刘杰.新疆三屯河灌区水利信息化应用研究[J].农业工程,2024,14(03):16-22.
- [2]宋玉斐.新疆三屯河智慧灌区建设应用分析[J].大坝与安全,2020,(03):24-27.
- [3]李梦瑶.灌区现代化进程中数字孪生技术的应用效能与发展路径[J].大众标准化,2025,(16):139-141.
- [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.