

基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统

闫 亮

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要:在国家粮食安全与农业现代化背景下,传统管理难以满足灌区高效用水与精准决策需求。数字孪生技术为灌区治理带来革命性路径。本文旨在系统阐述基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统的构建逻辑、核心架构与关键技术。首先论述了系统构建所依赖的“数据底板-模型平台-知识引擎”三位一体的核心架构,重点解析了多源异构数据融合、水文水动力耦合模型、人工智能算法以及水利业务知识图谱等关键支撑技术;其次,深入探讨了该系统在水资源优化配置、灌溉精准调度、工程智能运维及灾害风险预警等核心业务场景中的功能实现路径,为推动灌区从“经验驱动”向“数据-机理-知识”驱动的智慧化转型提供理论指导和技术参考。

关键词:数字孪生;灌区;智能调度;决策支持系统

引言

水利是农业的命脉,农业是水利的增效,灌区是国家粮食安全的基石。我国灌区灌溉面积占全国耕地一半以上,产粮超七成,但长期面临水资源分布不均、用水效率低、工程老化、调度依赖经验等挑战。在气候变化与水资源趋紧背景下,推动灌区智能化管理成为重大课题。数字孪生技术凭借物理实体与虚拟模型的实时双向交互能力,成为构建智慧水利的新引擎。2022年,水利部将数字孪生灌区列为先行重点,标志灌区建设迈入数字化、网络化、智能化新阶段。数字孪生灌区并非简单可视化,而是融合全要素感知、全过程模拟、全场景预演与全周期管理的复杂系统,通过高保真映射构建“虚拟灌区”,依托智能算法提供前瞻性决策支持,实现从被动响应到主动预见、粗放管理到精准调控的根本转变。

1 基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统的核心架构

一个完整的基于数字孪生的智能调度与决策支持系统,其技术架构可以概括为“数据底板-模型平台-知识引擎”三位一体的有机整体。这三者相互依存、相互赋能,共同构成了系统的核心支柱。

1.1 数据底板:全要素感知与融合

数据是数字孪生的生命线,是构建虚拟世界的基础。数据底板的目标是建立覆盖灌区全域、全要素、全周期的立体化感知网络和统一的数据资源池。这需要整合来自“天空地水工”多个维度的多源异构数据。“天”基数据主要指卫星遥感影像,可提供大范围的土地利用、作物长势、地表温度等信息;“空”基数据指无人机航拍,用于获取高分辨率的工程设施现状和局部灾情;“地”基数据则依赖于广泛部署的地面传感器网络,包括水位、流

量、水质、雨量、墒情、气象等各类物联网设备,实现对关键节点的分钟级甚至秒级监测^[1]。此外,还包括来自水利工程BIM模型、历史运行台账、社会经济统计数据等静态和半结构化数据。所有这些数据通过高速可靠的通信网络汇集到数据中心,并经过清洗、校准、融合、标准化等一系列处理,最终形成时空一致、语义统一、质量可信的“一张图”数据底板,为上层应用提供坚实的数据支撑。

1.2 模型平台:多过程耦合与仿真

如果说数据底板是系统的“感官”,那么模型平台就是其“大脑”。模型平台的核心任务是将物理世界的规律和机理,通过数学语言进行抽象和封装,构建一系列能够描述灌区水循环全过程的耦合模型。其中,水文模型用于模拟降雨-径流过程,预测来水情况;水动力模型则精确刻画水流在各级渠道中的运动规律,包括水位、流速、流量的时空变化。这两类模型的深度耦合,是实现灌区水量精准预报和调度仿真的基础。在此之上,还需集成作物需水模型,根据作物类型、生育期和气象条件,动态计算田间实时需水量。更进一步,通过引入系统优化模型,如线性规划、动态规划或多目标优化算法,可以在满足各种约束条件(如工程能力、生态流量、用户合同)的前提下,自动生成全局最优或帕累托最优的水资源配置与调度方案。这个模型平台不仅能够对当前工况进行“数字镜像”,更能对未来不同情景(如不同来水、不同种植计划)进行“前瞻预演”,为决策者提供量化依据。

1.3 知识引擎:智能化分析与决策

模型平台提供了强大的计算能力,但要使其真正服务于复杂的水利业务,还需要一个强大的知识引擎来进行引导和赋能。知识引擎的核心是将长期积累的水利专

家经验、行业规范、调度规程、应急预案等非结构化或半结构化的领域知识，通过知识图谱等技术进行结构化、形式化和数字化。知识图谱以“实体-关系-属性”的方式，构建起一个涵盖水源、工程、用户、作物、政策等海量实体及其复杂关联的语义网络。当系统面对一个具体的调度任务时，知识引擎可以自动检索相关规则和案例，结合模型平台的仿真结果，利用人工智能算法（如机器学习、强化学习）进行综合研判，最终生成符合业务逻辑、兼顾多方利益、具有可操作性的智能决策建议^[2]。例如，在制定年度配水计划时，系统不仅能计算出最优的水量分配，还能根据历史经验和政策导向，自动调整方案以优先保障口粮田或高附加值经济作物的用水需求。

2 关键技术支撑

数字孪生灌区智能调度与决策支持系统的构建与高效运行，离不开一系列前沿信息技术的深度融合与创新应用。这些技术构成了系统得以实现其强大功能的底层支撑，主要包括多源异构数据融合技术、水文水动力耦合建模与仿真技术、人工智能与机器学习算法，以及水利知识图谱构建技术。

2.1 多源异构数据融合技术

灌区作为一个开放的复杂巨系统，其运行状态由来自不同源头、不同类型、不同格式、不同精度和不同更新频率的数据共同刻画。这些数据既包括结构化的传感器实时流数据（如水位、流量），也包括半结构化的遥感影像、工程图纸，以及非结构化的文本报告、专家经验。多源异构数据融合技术旨在解决这些数据在时空基准、语义定义、质量标准上的不一致性问题，将其整合为一个逻辑统一、内容完整、质量可靠的数据资产。该技术通常包含三个层次：在数据层，通过时空配准、坐标转换等手段，将不同来源的数据对齐到统一的时空框架下；在特征层，利用数据挖掘和模式识别技术，提取不同数据源中的共性特征并进行关联；在决策层，则通过贝叶斯网络、D-S证据理论等高级融合算法，对来自多个信源的信息进行综合判断，以得到比单一信源更准确、更科学的结论。高质量的数据融合是确保数字孪生体能够真实、全面反映物理灌区状态的前提。

2.2 水文水动力耦合建模与仿真技术

水文水动力耦合模型是数字孪生灌区进行水量预报、调度仿真和灾害推演的核心引擎。传统的水文模型（如新安江模型、HEC-HMS）擅长于模拟流域尺度的产汇流过程，而水动力模型（如MIKE 11、HEC-RAS）则精于刻画河道或渠系内水流的运动细节。然而，灌区的水资源调度问题横跨了这两个尺度，需要将上游流域的来水

过程与下游渠系的输配水过程无缝衔接。耦合建模技术通过在两个模型之间建立动态的数据交换接口，实现了信息的双向反馈。例如，水文模型计算出的出口断面流量过程线，作为边界条件输入给水动力模型；而水动力模型模拟的渠系水位变化，又反过来影响上游水库的泄流决策，进而影响水文模型的初始条件。这种耦合机制使得整个模拟过程更加符合物理实际，能够更精准地预测在特定调度指令下，水流从水源到田间的全过程响应，为制定科学的调度方案提供了坚实的量化基础。

2.3 人工智能与机器学习算法

人工智能（AI）与机器学习（ML）算法为数字孪生灌区注入了自主学习和智能决策的能力。在数据处理方面，深度学习模型（如卷积神经网络CNN）被广泛应用于遥感影像的自动解译，能够高效、准确地识别土地利用类型、作物种植面积和长势等级。在预测预报方面，循环神经网络（RNN）及其变体（如LSTM、GRU）因其对时间序列数据的卓越处理能力，被用于构建高精度的短期径流预报、需水预测和墒情预测模型^[3]。在优化调度方面，强化学习（RL）算法展现出巨大潜力，它通过让智能体在虚拟灌区环境中不断试错和学习，能够自主探索出在复杂约束条件下实现多目标（如节水、增产、保生态）平衡的最优或近优调度策略。此外，AI算法还被用于异常检测，通过对历史正常数据的学习，能够自动识别出传感器故障、工程渗漏或非法取水等异常事件，极大提升了系统的主动预警能力。

2.4 水利知识图谱构建技术

知识图谱是连接数据、模型与具体业务场景的桥梁，它将人类专家的隐性知识显性化、结构化。构建水利知识图谱首先需要大量的水利规范、设计手册、调度日志、事故报告等文本资料整理，通过自然语言处理（NLP）技术抽取出关键的实体（如“水库”、“闸门”、“水稻”、“抗旱预案”）和它们之间的关系（如“水库_控制_闸门”、“水稻_需水_高峰期”）。然后，利用本体论（Ontology）方法对这些抽取的知识进行规范化定义和逻辑推理规则的设定，形成一个层次清晰、逻辑严谨的知识体系。在数字孪生系统中，知识图谱的作用至关重要。当模型平台仿真出多个可行的调度方案后，知识图谱可以依据“优先保障生活用水”、“基本农田用水红线”等业务规则，对方案进行合规性过滤和优先级排序。同时，它还能能为决策者提供方案背后的推理链条，解释“为什么这个方案更优”，从而增强决策的透明度和可接受性，有效弥合了“数据驱动”与“规则驱动”之间的鸿沟。

3 核心业务场景的功能实现

基于上述核心架构,数字孪生灌区智能调度与决策支持系统能够在多个关键业务场景中发挥其独特价值,彻底改变传统的管理模式。

3.1 水资源优化配置与调度

这是系统最核心的功能。传统的水量调度往往依赖于固定的配水比例或经验判断,缺乏对实时供需动态的精准把握。在数字孪生系统中,调度过程被重构为一个“感知-分析-决策-执行-反馈”的闭环。系统首先通过数据底板实时感知上游来水、水库蓄水、渠道输水损失、田间墒情及作物需水等全链条信息;然后,模型平台基于这些信息,滚动进行短期(未来几天)和中期(未来几周)的供需平衡分析与调度方案仿真;接着,知识引擎介入,对仿真方案进行合规性检查和多目标权衡,生成若干备选方案供决策者选择;系统通过远程控制指令,自动调节干支渠上的节制闸、分水闸等关键节点,实现水量的精准、按需配送。整个过程实现了从“以供定需”到“以需定供”的转变,极大地提升了水资源的利用效率和配置公平性。

3.2 工程智能运维与健康监测

灌区工程设施,特别是大量分布的水闸、泵站、量测设施等,其健康状态直接关系到输水效率和安全。数字孪生系统通过为每个重要工程建立数字档案(Asset Digital Profile),并接入其运行状态的实时监测数据(如闸门开度、电机电流、振动噪声等),可以实现对其健康状况的在线评估与预测性维护。系统内置的故障诊断模型能够自动识别异常模式,提前预警潜在的机械磨损、电气故障或结构隐患^[4]。当发生故障时,系统不仅能精确定位故障点,还能基于知识图谱自动推送维修方案、备件清单和操作指南,指导现场人员快速处置。这不仅降低了运维成本,更有效避免了因工程故障导致的供水中断或安全事故。

3.3 灾害风险预警与应急响应

灌区面临的自然灾害主要包括旱灾和涝灾。数字孪生系统通过集成高精度的气象数值预报产品和水文模型,

能够提前数天甚至一周对区域性干旱或暴雨洪水风险进行预警。对于旱情,系统可以模拟不同抗旱预案(如启用备用水源、调整灌溉制度)的效果,辅助管理者做出科学的抗旱决策。对于汛情,系统可以对暴雨情景下的渠系行洪能力进行仿真,识别出易涝区域和薄弱环节,并自动生成人员转移、工程抢险等应急预案。在应急响应阶段,系统可以作为指挥调度的“作战沙盘”,实时显示灾情态势、救援力量分布和物资调配情况,实现应急资源的最优调度和指挥指令的高效下达,最大限度地减少灾害损失。

4 结语

综上所述,基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统,代表了灌区治理模式的一次深刻变革。它通过构建物理灌区与虚拟灌区的实时交互闭环,将数据、模型、知识与业务深度融合,为解决水资源高效利用、工程精细管理、灾害科学应对等核心难题提供了系统性解决方案。该系统不仅是先进技术的集成应用,更是一种全新的治理理念和方法论,其核心在于推动灌区管理从依赖个体经验的“艺术”走向基于数据和模型的“科学”。尽管在建设过程中会遇到数据、模型、机制等多方面的挑战,但随着技术的不断成熟和实践的持续深入,数字孪生必将成为驱动灌区现代化、保障国家水安全和粮食安全的核心引擎,为实现农业强国目标贡献不可替代的水利力量。

参考文献

- [1]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.
- [2]王建龙.现代化数字孪生灌区建设的路径分析[J].中国战略新兴产业,2024,(17):169-171.
- [3]袁楠,李润伟,夏沁园.数字孪生赋能东风渠大型灌区现代化管理的应用与实践[J].河南水利与南水北调,2026,55(01):84-86.
- [4]孟繁博.基于数字孪生的智慧灌区水资源精准调配与节水增效分析[J].当代农机,2026,(01):84-85.