基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统构建

何　洁　寇战锋　孟振军

安阳市水利工程运行保障中心　河南　安阳　455000

摘　要：在现代化灌区建设中，数字孪生技术为智能调度与决策支持提供了新途径。本文围绕基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统构建展开，阐述了灌区数字孪生体构建，包括几何结构映射、数据融合、模型库搭建及动态更新机制；介绍了智能调度模型体系，涵盖水资源供需平衡、多目标优化等模型；说明了决策支持系统功能架构；探讨了系统运行与维护机制。该系统有助于提升灌区水资源利用效率与调度决策科学性。

关键词：数字孪生；现代化灌区；智能调度；决策支持系统；运行维护

引言：农业发展对水资源高效利用提出更高要求，传统灌区调度与决策方式难以满足需求。数字孪生技术凭借可实现物理实体与虚拟模型精准映射、动态交互的优势，为灌区智能化发展带来新契机。构建基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统，能够整合灌区多源数据，精准模拟水文过程与工程运行，为科学调度与决策提供有力支撑，推动灌区向高效、智能、可持续方向转型。

1 灌区数字孪生体构建

1.1 灌区几何结构与物理设施数字化映射

灌区几何结构与物理设施数字化映射以物理灌区实际空间形态和工程布局为基准，整合灌区地形地貌、边界范围、水系分布等几何信息，结合灌排渠道、闸泵工程、分水建筑物、量水设施等核心物理设施的结构参数、空间位置及运行特性，通过三维激光扫描、无人机航测、BIM 技术等手段完成数字化建模[1]。建模过程严格遵循水利工程数字化建模规范，确保数字模型与物理实体在几何尺寸、空间关系上高度一致，精准还原各类设施的结构特征与空间布局，为数字孪生体的动态运行提供几何与物理基础支撑。

1.2 多源异构数据融合与数字底板搭建

多源异构数据融合与数字底板搭建围绕灌区全要素数据展开，整合水文水资源、气象、工程运行、土壤墒情、灌溉需求等多类型数据，涵盖传感器实时监测数据、历史统计数据、遥感影像数据及工程设计数据等异构数据源。基于数据融合技术与水利数据标准，对各类数据进行清洗、规整、关联与融合，消除数据冗余与格式差异，构建统一的数据关联规则与数据交互规范。在此基础上搭建灌区数字底板，实现各类数据的集中管理、统一调度与高效调用，形成覆盖灌区全场景、全要素的高可用数据支撑体系，为数字孪生体的机理分析与动态推演提供数据保障。

1.3 水文过程与工程控制机理模型库

水文过程与工程控制机理模型库构建基于水文学、水力学及水利工程控制理论，结合灌区水文循环规律、水量转化过程及工程运行特性，构建涵盖降水径流模拟、地下水补给与排泄、渠道水流演进、闸泵运行控制等核心机理模型。模型库涵盖不同时空尺度的模拟模型，兼顾模型的科学性与实用性，通过理论推导与工程实践经验结合，优化模型参数设置，实现对灌区水文过程、工程运行状态的精准刻画与动态模拟，为数字孪生体的动态响应与行为预测提供核心机理支撑。

1.4 数字孪生体动态更新与同步机制

数字孪生体动态更新与同步机制依托实时数据采集与处理系统，建立数据驱动的更新模式，实现数字孪生体与物理灌区的动态响应与精准匹配。通过实时采集物理灌区的工程运行数据、环境监测数据及水文过程数据，结合数据处理与分析技术，及时捕捉物理灌区的状态变化，将变化信息同步反馈至数字孪生体，完成模型参数调整、状态更新与行为修正。更新机制遵循实时性与准确性原则，结合灌区运行规律设置合理的更新周期，确保数字孪生体能够精准复刻物理灌区的动态变化，维持数字孪生体与物理灌区的一致性，为智能调度与决策支持提供可靠的数字映射支撑。

2 灌区智能调度模型体系

2.1 水资源供需平衡分析模型

水资源供需平衡分析模型以灌区水资源全量管控为核心，基于水资源评价理论与水量平衡原理，整合灌区降水、地表水、地下水等各类水资源量，系统分析不同时段、不同区域的水资源供给能力[2]。结合灌区农业灌溉、工业用水、生态用水等各类用水需求，量化用水定额与用水时序，通过水量收支核算实现供需关系的动态分析。模型充分考虑气候波动、用水结构变化等影响因素，精准研判供需缺口或盈余状况，为后续调度方案制定提供科学的供需分析依据，契合水利工程水资源调控的核心技术要求。

2.2 多目标优化调度模型

多目标优化调度模型基于运筹学中的多目标优化理论，结合灌区调度的实际需求，确立水资源利用效率、灌溉保证率、生态保护、工程运行安全等优化目标，构建兼顾各类目标的优化函数。通过设置合理的约束条件，涵盖水资源总量约束、工程运行能力约束、用水优先级约束等，采用遗传算法、粒子群优化等智能优化算法求解最优调度方案。模型注重各类目标的协调兼顾，避免单一目标优化导致的调度失衡，实现灌区水资源利用效益最大化，符合现代化灌区多目标协同调度的学术研究与工程应用方向。

2.3 输配水过程演进模型

输配水过程演进模型依托水力学中的明渠水流运动理论与数值模拟方法，精准刻画灌区输配水系统的水流运动规律。整合灌排渠道的断面参数、糙率、坡度等核心参数，模拟水流从水源地经主干渠、支渠、斗渠至田间的演进过程，量化水流传播时间、水位变化、流量损耗等关键参数。模型能够精准捕捉输配水过程中的水量损失与水流状态变化，还原输配水全流程的动态特征，为调度方案的可行性验证与优化调整提供精准的水力学支撑，衔接数字孪生体的动态映射功能。

2.4 调度方案自适应生成机制

调度方案自适应生成机制基于模型计算结果与灌区实时运行状态，结合机器学习与自适应控制理论，构建动态响应的方案生成体系。整合水资源供需平衡结果、多目标优化解及输配水过程模拟数据，结合灌区实时监测的水量、水位、墒情等数据，自动适配不同运行场景与工况变化，生成针对性的调度方案。该机制能够根据灌区运行状态的动态变化，自动调整方案参数与调度策略，无需人工干预即可实现调度方案的动态适配，提升灌区智能调度的灵活性与时效性，支撑数字孪生灌区的实时调控需求。

3 决策支持系统功能架构

3.1 系统总体架构设计

系统总体架构设计遵循分层解耦、模块化集成的核心设计理念，依据水利信息化系统设计规范与数字孪生技术应用相关标准，构建自上而下、层层递进的功能层次结构[3]。架构涵盖数据层、模型层、功能层与应用层，各层次职责清晰、协同联动，形成闭环运行的决策支持体系。数据层承担各类灌区数据的集中管理与高效调用，实现多源数据的统一整合与规范管理；模型层整合智能调度与机理分析相关模型，为决策计算提供核心算法支撑；功能层承载各类决策支持核心功能，实现调度推演、可视化展示等核心需求；应用层面向用户提供便捷的操作与交互入口，降低决策人员操作门槛。架构设计充分兼顾扩展性与兼容性，可灵活适配灌区运行过程中的功能升级与需求变化，为后续功能拓展预留充足空间，遵循现代化灌区信息化系统的主流设计原则。

3.2 调度方案推演与比选功能

调度方案推演与比选功能以数字孪生体与智能调度模型为核心支撑，基于运筹学与系统评价理论，实现不同调度方案的动态推演与科学比选。通过调用输配水过程演进模型、多目标优化调度模型，精准推演不同调度方案下灌区水量分配、水流演进、工程运行等各类状态变化，量化不同方案的水资源利用效率、灌溉保证率、工程运行成本等关键评价指标。采用综合评价方法对各类调度方案进行系统性比对与筛选，剔除不合理方案、筛选最优方案，为决策制定提供客观、量化的支撑依据，破解传统调度中方案选择主观性强、缺乏量化依据的痛点，贴合灌区科学决策的实际应用需求。

3.3 可视化交互与动态展示功能

可视化交互与动态展示功能依托地理信息系统与三维可视化技术，结合数字孪生体的高保真映射特性，构建灌区全场景、全要素的可视化展示界面。整合灌区几何模型、实时监测数据、模型计算结果等各类信息，以三维可视化形式直观呈现灌区地形地貌、工程设施分布、水文过程变化及调度运行状态。设计简洁便捷的交互操作方式，支持用户对数字孪生体进行视角调整、细节查看、数据查询等操作，可动态呈现调度方案执行过程与灌区状态变化，帮助决策人员快速、直观掌握灌区运行态势，提升决策的直观性与高效性，顺应水利信息化可视化发展的主流趋势。

3.4 调度指令生成与任务分发功能

调度指令生成与任务分发功能紧密衔接调度方案推

演结果，依据水利工程调度规程与指令生成相关规范，构建标准化、规范化的指令生成与分发体系。根据筛选出的最优调度方案，自动转化为具体可执行的调度指令，明确指令核心内容、执行对象、执行时限与执行标准，确保指令的可操作性与规范性。通过系统标准化接口将调度指令精准分发至对应工程设施的控制终端与相关管理人员，实现指令的快速传递与高效执行。同步反馈指令执行状态，及时捕捉执行过程中的各类问题，形成“方案推演—指令生成—任务分发—状态反馈”的闭环管理，支撑灌区智能调度的高效落地与有序推进。

4 系统运行与维护机制

4.1 实时监控与动态响应机制

实时监控与动态响应机制基于物联网监测技术与实时数据处理理论，构建覆盖系统全要素、全流程的监控体系。整合灌区工程设施运行状态、水资源动态、模型计算过程及系统软硬件运行参数等监测内容，通过传感器、数据采集终端实现各类数据的实时捕捉与传输[4]。对监测数据进行实时解析与异常识别，一旦发现参数偏离正常范围或系统运行异常，立即启动响应流程，自动触发预警提示并推送异常信息，同步联动相关功能模块进行初步调整，为故障处置与状态恢复争取时间，保障系统运行的稳定性与连续性。

4.2 调度计划滚动修正机制

调度计划滚动修正机制依托动态监测数据与系统运行反馈信息，结合灌区水资源动态变化规律与用水需求调整，构建动态优化的计划修正体系。以既定调度计划为基础，整合实时水文气象数据、土壤墒情数据及工程运行状态数据，分析调度计划执行过程中出现的偏差及成因。基于偏差分析结果，对调度计划的参数、时序及分配方案进行动态修正，逐步优化计划内容，使调度计划始终适配灌区实际运行工况，提升调度计划的针对性与可执行性，符合水利调度动态优化的学术研究方向与工程实践要求。

4.3 多级协同调度模式

多级协同调度模式基于系统工程协同理论与水利灌区分级管理体制，构建涵盖灌区总调度中心、分中心、现场管控单元的多级调度体系。明确各级调度单元的职责与权限，建立标准化的信息交互与指令传递流程，实现各级单元之间的高效协同与联动。总调度中心负责全局调度方案制定与统筹协调，分中心负责区域内调度执行与局部优化，现场管控单元负责具体指令落地与实时反馈，形成上下联动、分级负责的调度格局，破解传统调度中层级脱节、协同不足的问题，提升灌区调度的整体效率。

4.4 平台运行维护与安全保障机制

平台运行维护与安全保障机制结合计算机系统维护规范与水利信息安全标准，构建“日常维护 + 安全防护”的双重保障体系。日常维护聚焦系统软硬件、模型参数、数据资源等核心要素，建立定期巡检、故障排查、参数校准的维护流程，及时处理系统运行中的各类隐患，保障系统各模块功能正常发挥。安全保障围绕数据安全、网络安全、运行安全展开，采用数据加密、访问控制、入侵检测等安全技术，防范数据泄露、网络攻击等安全风险，规范系统操作流程，建立安全应急处置流程，确保系统运行安全与数据安全，为系统长期稳定运行提供坚实保障。

结束语

基于数字孪生的现代化灌区智能调度与决策支持系统，通过构建数字孪生体、智能调度模型体系，实现决策支持系统功能集成，并建立完善的运行与维护机制。该系统有效整合灌区各类资源与信息，提升调度决策的科学性与精准性，增强灌区应对复杂情况的能力，保障灌区工程安全运行与水资源高效利用，为现代化灌区建设与管理提供坚实的技术保障与决策依据。

参考文献

[1] 胡文才，张煜煜. 数字孪生技术助力南四湖防洪调度与二级坝工程管理 [J]. 水利信息化,2024,(05):50-54.DOI:10.19364/j.1674-9405.2024.05.009.

[2] 刘宏路. 基于数字孪生技术的水库及灌区信息化建设分析 [J]. 水上安全,2024,(19):47-49.

[3] 谢崇宝，白静，郑世宗，等. 数字孪生灌区建设核心要义与关键技术探讨 [J]. 中国农村水利水电,2024,(11):179-184+195.

[4] 张霞，郭伟华，袁轲，等. 数字孪生欧阳海灌区关键技术研究和应用 [J]. 水利信息化，2023(3):20-25.