

数字孪生灌区水资源调度管理平台设计与实现

员 强

冠县水利局 山东 聊城 252500

摘要: 本文聚焦数字孪生灌区水资源调度管理平台的设计与实现。阐述了数字孪生与水资源调度核心理论, 分析平台业务、非功能及数据需求。详细介绍平台“五层两体系”架构, 包括各层设计、数据库与接口设计。说明开发环境、技术选型及核心功能模块实现过程, 涵盖数字孪生体构建、智能调度决策、可视化与交互功能等, 为灌区水资源科学调度提供技术支持。

关键词: 数字孪生; 灌区管理; 水资源调度

引言: 在水利现代化发展的浪潮中, 科学高效的水资源调度管理成为灌区可持续发展的关键。传统灌区管理方式面临数据分散、决策粗放等挑战, 难以满足精准化管理需求。数字孪生技术凭借其虚实映射、动态推演等特性, 为灌区水资源调度提供了全新解决方案。本文聚焦数字孪生灌区水资源调度管理平台, 深入剖析其理论支撑、需求架构及实现路径, 助力灌区管理向智能化、精细化方向迈进。

1 数字孪生灌区水资源调度核心理论与技术基础

1.1 数字孪生核心理论

数字孪生核心理论以多物理域建模、实时数据映射、全生命周期演进为核心, 为灌区水资源调度提供精准数字化支撑。它强调物理实体与虚拟模型动态耦合, 构建含几何、物理、行为等多维度特征的虚拟孪生体, 精准复刻灌区实体。多尺度建模技术解决不同层级灌区单元精细表达难题, 建立从灌溉单元到整个灌区系统的层级关联模型体系。实时数据融合理论高效处理异构数据, 整合多源数据, 经清洗、融合算法实现虚拟模型与物理实体同步更新^[1]。全生命周期管理理论覆盖模型全流程, 结合机器学习算法自我优化, 让虚拟孪生体实时反映物理灌区状态, 为调度决策提供可靠依据。

1.2 水资源调度核心理论

水资源调度核心理论以高效利用、供需平衡、生态优先为导向, 融合多学科知识。系统工程理论将灌区水资源调度视为复杂系统, 明确各子系统边界与关联, 梳理要素相互作用机制。优化理论是决策核心支撑, 采用线性、动态规划等方法, 以灌溉保证率等为目标函数, 结合相关约束条件构建优化模型。水文循环模拟理论精准刻画灌区降水等水文过程, 用分布式水文模型计算水资源供需状况。生态水文理论融入调度体系, 兼顾灌溉与生态基流保障, 防止生态问题。这些理论融合, 形成

兼顾多方利益的调度理论体系, 指导科学调度实践。

2 数字孪生灌区水资源调度管理平台需求分析

2.1 业务需求

业务聚焦灌区水资源调度全流程, 涵盖数据采集、模型运算、决策制定、执行监控等核心环节。数据采集要自动获取水源水位、流量、墒情等关键数据并实时传输, 支持多源数据统一管理。调度决策需智能生成方案, 依实时供需、气象预报及优化模型快速产出多个方案, 并对比分析辅助决策。执行监控要实时追踪灌溉工程运行状态, 远程下发指令并获取反馈。日常管理要提供基础信息管理、用水计量统计等功能, 支撑用水审计与效益评估。应急调度在突发情况下, 能快速调整方案, 启动应急预案, 保障供水与防洪安全, 全面满足各场景需求。

2.2 非功能需求

非功能需求保障平台稳定高效运行, 涉及性能、可靠性、安全性、可扩展性。性能上, 平台要高效处理数据, 支持万级以上监测点实时接入与并发处理, 模型运算响应不超30秒, 界面刷新延迟低于1秒。可靠性方面, 年均故障率低于0.5%, 单节点故障可快速切换, 数据传输成功率不低于99.9%。安全性涵盖数据安全与访问控制, 采用加密技术防数据泄露篡改, 建立分级权限体系保障操作安全。可扩展性要求平台模块化架构, 支持新增灌区单元、扩展监测指标、集成新算法模型, 兼容不同品牌设备与第三方系统^[2]。

2.3 数据需求与流程分析

数据需求包含基础地理、监测、业务及外部数据。基础地理数据有地形图等空间数据, 精度达1:2000, 含工程设施属性数据。监测数据涵盖水源、墒情、作物、气象监测, 采样频率5-30分钟一次。业务数据记录调度全流程信息。外部数据对接气象、水文部门系统。数据流程

分采集、传输、处理、存储、应用五环节：监测设备采集数据经5G/4G传至平台，经清洗等处理后存入数据库，为模型运算、调度决策、可视化展示提供支撑，形成完整数据闭环。

3 数字孪生灌区水资源调度管理平台架构设计

3.1 总体架构设计

平台采用“五层两体系”的总体架构，实现从数据采集到决策应用的全流程支撑。感知层作为数据入口，部署水位计、流量计、墒情传感器、无人机等感知设备，构建空天地一体化数据采集网络，实现对灌区关键要素的全面监测。数据层负责数据的存储与管理，采用分布式数据库架构，分为空间数据库、实时数据库、业务数据库，分别存储地理空间数据、实时监测数据、业务管理数据，通过数据中台实现数据统一治理与共享。模型层是核心支撑层，集成数字孪生建模引擎、水文模拟模型、优化调度模型等，实现虚拟孪生体构建、水文过程模拟及调度方案优化。应用层面向业务需求，开发孪生可视化、智能调度、工程监控等功能模块，满足管理人员操作需求。表现层采用Web端与移动端结合的方式，提供直观的操作界面与便捷的访问渠道。

3.2 核心模块设计

核心模块设计围绕平台核心功能，构建相互协同的模块体系。数字孪生体构建模块负责虚拟灌区的构建与更新，通过数据驱动实现几何模型、物理模型与行为模型的融合，支持灌区场景的三维可视化展示与动态推演。智能调度决策模块是核心功能模块，集成多种优化算法，输入实时监测数据、气象预报数据及用水需求数据后，自动生成调度方案，提供方案对比、模拟推演及指令下发功能，支持人工干预调整。工程监控模块实现对泵站、闸门、输水渠道等工程设施的远程监控，实时显示设备运行参数，支持远程控制与故障报警，确保工程设施按调度方案运行。可视化与交互模块采用三维渲染技术，直观展示灌区地形地貌、工程分布、水流状态等信息，支持场景缩放、漫游、查询等交互操作，同时提供数据图表、态势看板等多种展示形式。数据管理模块负责数据的全生命周期管理，包括数据接入、清洗、存储、查询、统计分析等功能，为其他模块提供数据支撑，各模块协同运行保障调度业务高效开展。

3.3 数据库设计

数据库设计采用多库协同架构，结合数据类型特点选择适配的数据库产品。空间数据库采用PostGIS，存储灌区地形图、工程布置图、行政区划等空间数据，支持空间查询、叠加分析等操作，确保空间数据的高效管理

与应用。实时数据库选用InfluxDB，针对监测数据高频采集的特点，优化数据写入与查询性能，采用时间序列数据存储方式，支持毫秒级数据写入与历史数据快速回溯，满足实时监测与模型运算的数据需求^[1]。业务数据库采用MySQL，存储用水计划、调度指令、灌溉记录、用户信息等业务数据，采用关系型数据模型，确保数据一致性与事务完整性，支持复杂的业务查询与统计分析。另外，设计数据同步中间件，实现各数据库间的数据实时同步与交互，避免数据孤岛。同时，制定统一的数据编码规范与存储标准，对各类数据进行分类编码，明确数据字段定义与格式要求，建立数据备份与恢复机制，采用增量备份与全量备份结合的方式，确保数据安全可靠。

3.4 接口设计

接口设计遵循标准化、高兼容、高安全原则，构建完善的接口体系支撑数据交互与功能调用。数据采集接口采用MQTT与HTTP协议结合的方式，MQTT协议用于监测设备与平台的数据传输，适配低带宽、高延迟场景，保障数据实时性；HTTP协议用于对接气象、水文等外部系统，实现外部数据的批量接入。内部服务接口采用RESTful风格设计，基于JSON格式进行数据交互，实现各模块间的功能调用与数据共享，如模型层向应用层提供调度方案运算接口，数据层向各模块提供数据查询接口等。外部系统接口采用标准化API设计，提供数据共享与功能对接能力，支持与灌区现有灌溉控制系统、用水计量系统等对接，实现数据互通与业务协同。接口安全设计采用Token认证、数据加密、访问权限控制等措施，确保接口调用的合法性与数据传输的安全性。

4 数字孪生灌区核心功能模块开发与实现

4.1 开发环境与技术选型

开发环境采用Windows与Linux混合架构，服务器端选用CentOS7.9操作系统，具备稳定可靠、安全性高的特点，支持分布式部署；客户端开发环境选用Windows10操作系统，搭配VisualStudio2022、PyCharm2023等开发工具，满足不同开发语言的开发需求。技术选型围绕架构各层需求展开，感知层采用LoRaWAN与5G通信技术，LoRaWAN用于近距离低功耗传感器数据传输，5G实现高清视频与大数据量的高速传输。后端开发采用SpringBoot框架，基于Java语言实现，具备快速开发、易扩展的优势，搭配MyBatis框架实现数据库交互；模型层采用Python语言开发，结合TensorFlow、PyTorch框架构建机器学习模型，利用NumPy、Pandas库进行数据处理。前端开发采用Vue3框架，结合ElementPlus组件库构建界面，

采用Three.js实现三维可视化效果。数据库选用MySQL、PostGIS、InfluxDB,配合Redis实现数据缓存,提升系统响应速度。

4.2 数字孪生体构建实现

数字孪生体构建实现分为数据预处理、模型构建、动态更新三个阶段。数据预处理阶段对采集的多源数据进行处理,空间数据通过ArcGIS进行格式转换与坐标校准,确保空间位置精准;监测数据采用异常值检测算法去除无效数据,通过数据插值补全缺失数据。模型构建阶段采用多维度建模方法,几何模型通过Blender软件构建灌区地形、工程设施的三维几何模型,导入PostGIS数据库关联空间属性;物理模型基于圣维南方程构建水流运动模型,结合作物水分胁迫模型实现灌溉过程的物理模拟;行为模型通过机器学习算法训练,基于历史数据学习灌区运行规律,实现运行状态的预测。动态更新阶段建立数据驱动的更新机制,实时监测数据通过数据中台推送至孪生体模型,几何模型根据工程改造数据定期更新,物理模型与行为模型通过实时数据校准参数,实现虚拟孪生体与物理灌区的实时同步,支持通过可视化界面直观查看孪生体的运行状态与演化趋势。

4.3 智能调度决策模块实现

智能调度决策模块涵盖数据处理、模型运算、方案生成与执行全流程。数据处理模块接入实时监测、气象预报及用水需求数据,经标准化处理转化为模型输入,并建立质量评估机制保障数据可靠。模型运算模块集成多种算法,基础调度用线性规划算法构建以水资源利用效率最大为目标的模型,复杂场景用遗传算法优化,结合水文模拟模型算不同方案下的供需平衡。方案生成模块依运算结果生成多个调度方案,含水源分配、工程运行参数、灌溉时间安排等,按综合评估指标打分排序。方案执行模块生成并下发调度指令,通过接口对接工程控制系统远程控制泵站、闸门等,实时采集反馈数据监测执行效果,出现偏差则自动触发模型重算,生成调整方案,实现闭环管理。

4.4 可视化与交互功能实现

可视化与交互功能实现采用三维渲染与数据可视化结合的方式,打造直观高效的操作界面。三维可视化实

现基于Three.js引擎,加载构建完成的数字孪生体模型,通过光照、材质渲染技术提升场景真实感,实现灌区地形、工程设施、水流状态的三维展示,支持场景缩放、平移、旋转等基础操作,提供多角度查看功能。数据可视化采用ECharts图表库,设计折线图、柱状图、饼图等展示监测数据趋势、用水统计、方案对比等信息,同时构建态势看板,集中展示灌区关键指标如水源水位、灌溉保证率、工程运行状态等^[4]。交互功能设计包括数据查询、场景交互、方案推演等,数据查询支持通过点击三维模型或输入条件查询工程属性、监测数据等信息;场景交互支持选中工程设备查看详细运行参数,支持模拟闸门开启、泵站运行等操作;方案推演功能通过时间轴控制,模拟不同调度方案下的水流运动、作物长势变化过程,辅助管理人员直观评估方案效果,同时支持用户手动调整参数,实时查看调整后的推演结果,提升决策参与度。

结束语

数字孪生灌区水资源调度管理平台的设计与实现,融合多学科理论与先进技术,构建了完整的架构体系。通过各核心功能模块的开发,实现了对灌区水资源调度的全方位、智能化管理。该平台有助于提升水资源利用效率,保障供水与防洪安全,推动灌区管理的现代化转型。未来可进一步优化平台性能,拓展应用场景,为水利行业高质量发展贡献力量。

参考文献

- [1]李卓蔓,周伍光,赵琴,等.基于数字孪生的灌区水资源调配支撑系统设计与实现[J].人民黄河,2024,46(S2): 195-196.
- [2]孙晓磊,李龙飞,邓海,等.数字孪生技术在大型灌区水网中的应用——以广西玉林龙云灌区水网为例[J].中国水利,2024,(13):57-62.
- [3]张绿原,胡露骞,沈启航,谈震,牛霄飞.水利工程数字孪生技术研究与探索[J].中国农村水利水电,2021(11): 58-61.
- [4]张以晓.论数字孪生技术与智慧水利建设[J].黑龙江水利科技,2022,50(7): 180-183.