

智慧水利背景下数字孪生流域构建关键技术与实践路径

张继恒 王志永

开封黄河河务局兰考黄河河务局 河南 开封 475300

摘要: 智慧水利背景下,数字孪生流域构建意义重大。本文阐述核心架构设计,包括三维数字底板、多尺度建模、虚实交互引擎;介绍智能感知网络等关键支撑技术集群;分析防洪减灾、水资源调配、工程安全管控等典型应用场景实现路径;提出标准规范、平台架构、能力建设等技术实施保障体系,为数字孪生流域建设提供全面参考。

关键词: 智慧水利;数字孪生流域;关键技术;应用场景;保障体系

引言:在智慧水利发展浪潮中,数字孪生流域成为关键方向。传统水利管理模式面临诸多挑战,难以满足精细化管理需求。数字孪生流域借助先进信息技术,可实现全要素数字化映射与智能化模拟,提升决策科学性。构建数字孪生流域需攻克多项技术难题,明确应用场景与实施路径,对推动水利行业转型升级、保障水安全意义深远。

1 数字孪生流域核心架构设计

1.1 三维数字底板构建技术

三维数字底板作为数字孪生流域的基础支撑,需通过5种以上多源异构数据融合实现全要素空间表达^[1]。整合地理信息系统(GIS)的空间分析优势、建筑信息模型(BIM)的工程细节刻画能力、物联网(IoT)的实时感知数据流、倾斜摄影的快速三维建模特性以及激光点云的高精度几何描述,形成覆盖地形地貌、水利工程、环境要素等10类以上多维信息的综合空间模型。该模型需突破传统数据孤岛限制,通过统一坐标系转换与语义关联技术,将分散的点、线、面数据转化为具有拓扑关系的三维场景。时空数据库设计需兼顾数据存储效率与查询性能,采用分布式集群架构管理TB级以上空间数据,通过空间索引优化与分层存储策略,实现从全流域30000平方千米尺度到局部工程10米级尺度的快速调用。数据治理体系需建立标准化处理流程,针对不同来源数据的格式差异、精度偏差等问题,开发自动化清洗工具与质量评估算法,形成可复用的1000项以上数据资产库,为上层应用提供一致可靠的数据支撑。

1.2 多尺度建模技术体系

多尺度建模需兼顾宏观流域态势感知与微观工程细节模拟。为实现不同尺度间的无缝衔接与协同联动,需构建层级化、一体化的建模技术框架,整合流域、区域、工程等多维度空间信息与监测数据,形成覆盖全流域、全要素的数字孪生基底。物理空间映射通过分级建

模策略,在流域层面采用100米级网格化表达水系网络,在区域层面结合数字高程模型(DEM)还原10米级地形起伏,在工程层面利用BIM模型精确刻画建筑物0.1米级结构,最终实现地上地下、水里水外的一体化呈现。动态更新机制需建立模型颗粒度与感知数据精度的匹配规则,通过数据驱动的方式自动修正模型参数,支持从千米级流域水情到厘米级工程变形的5层级呈现。语义建模方法引入深度学习技术,对激光点云数据进行特征提取与分类识别,自动分割建筑物、植被、道路等8类要素,并通过知识图谱构建技术赋予模型逻辑推理能力,使虚拟场景中的对象具备属性关联与行为模拟能力。

1.3 虚实交互引擎开发

虚实交互引擎需实现高保真可视化与双向控制能力。作为数字孪生系统的核心交互载体,其开发需聚焦实时性、精准性与易用性,融合多源数据融合、实时渲染、智能交互等关键技术,打造集可视化展示、交互控制、仿真推演于一体的综合平台。实时渲染技术融合游戏引擎的图形处理优势与3D GIS的空间分析能力,通过动态LOD(细节层次)技术优化渲染效率,支持从32千米范围的全局概览到1米精度的局部细节观察的无级缩放。交互控制接口开发需建立数字孪生体与物理实体的数据传输通道,通过标准化协议实现设备状态实时映射与控制指令精准下发,形成闭环反馈系统,数据传输延迟控制在10毫秒以内。仿真推演算法集成水动力学、泥沙运动等机理模型与机器学习预测模型,构建混合驱动的模拟环境,既能通过物理规律精确复现水流演变过程,又能利用数据挖掘技术预测潜在风险,单次模拟计算时间控制在5分钟以内,为决策提供科学依据。

2 关键支撑技术集群

2.1 智能感知网络构建

智能感知网络是数字孪生流域的数据采集基础,需通过新型传感技术实现全要素动态监测^[2]。低功耗水文测

报设备可长期部署于偏远区域,持续采集水位、流量等基础数据,单设备续航时间达3年以上;水质监测传感器阵列集成多参数检测模块,同步获取酸碱度、溶解氧等6项指标,检测精度达到0.01单位;水环境传感器结合光谱分析与生物监测技术,捕捉水体富营养化、重金属污染等隐性风险,可识别20种以上污染物。边缘计算节点构建需结合流域地理特征,在关键断面与工程节点部署智能终端,通过本地化算法实现数据清洗、异常检测与初步分析,单节点处理能力达1000条/秒,减少无效数据传输。通信协议优化需针对流域场景特点,研发抗干扰能力强、传输距离远的无线专网技术,采用自适应调制编码与多跳中继策略,确保在山区、库区等复杂地形下的数据传输稳定性,单跳传输距离达5千米,为上层应用提供实时可靠的数据支撑。

2.2 数据驱动建模技术

数据驱动建模需突破传统机理模型的局限性,通过机器学习挖掘数据潜在价值。该技术以全生命周期水文监测数据为核心支撑,构建“数据采集-特征提取-模型构建-动态校正”的全流程技术链路,有效提升水文模拟与预报的精准度和时效性。特征要素提取环节运用深度神经网络,从海量时空数据中自动识别影响水文过程的关键参数,如降雨时空分布、下垫面特征等,筛选出20个以内精简有效的输入变量。动态校正机制建立需构建模型参数在线更新框架,结合实时监测数据与历史规律,通过贝叶斯推断或强化学习算法动态调整模型参数,单次参数更新时间控制在1分钟以内,使预报结果更贴近实际演变趋势。知识图谱构建需将水利领域专家经验与专业规范结构化存储,通过本体建模技术定义实体关系,形成包含1000条以上规则推理、案例匹配的智能决策库,为模型优化与方案生成提供知识支撑。

2.3 仿真验证技术体系

仿真验证是保障数字孪生模型可靠性的关键环节。为全面检验模型在复杂工况下的适配性与稳定性,需构建多维度、多层次的仿真验证技术体系,整合虚拟试验、性能评估、迭代优化三大核心模块,实现从模型构建到应用落地的全流程质量管控。数字孪生体验证需开发虚拟试验平台,模拟暴雨洪水、工程溃决等极端场景,测试模型在非线性的条件下的响应能力,单次模拟可设置10种以上不同参数组合,识别边界条件与参数阈值。性能评估指标体系需兼顾科学性与实用性,从精度维度考量模拟值与实测值的偏差,控制在0.1单位以内;从时效性维度评估计算效率与响应速度,单次计算时间控制在10分钟以内;从鲁棒性维度检验模型抗干扰能力

与泛化性能,在5种以上不同数据扰动下保持稳定。迭代优化方法构建需形成闭环流程,将评估结果反馈至建模环节,通过参数调整、结构优化或算法升级持续提升模型性能,经过3轮以上验证形成高可信度数字孪生体,为流域防洪、水资源调度等业务提供决策依据。

3 典型应用场景实现路径

3.1 防洪减灾四预系统

防洪减灾四预系统需通过多技术融合实现全流程智能化。预报模块需集成气象降水预报与水文模型,采用分布式水文模拟技术提升计算效率,结合实时降雨监测数据动态修正模型参数,使洪水预报精度达到0.5米以内,延长预见期至72小时^[3]。预警模块构建需建立分级响应机制,根据洪水量级、影响范围等要素划分4级预警等级,通过5G通信网络与智能终端实现预警信息秒级触达,同步推送3条以上避险路线与安置点信息。预演模块开发需融合三维可视化引擎与水动力学模型,构建交互式洪水演进模拟平台,支持用户自定义5种以上降雨场景与工程调度方案,通过多方案对比分析评估防洪效果,单次预演计算时间控制在15分钟以内,为决策提供科学依据。预案模块建设需建立动态预案库,结合历史洪水数据与工程现状生成初始方案,再通过多目标优化算法调整闸门启闭顺序、分洪区运用时机等10个以上关键参数,最终形成兼顾防洪安全与经济损失的最优调度方案,单次优化计算时间控制在30分钟以内。

3.2 水资源智能调配系统

水资源智能调配需实现供需双侧精准匹配。供需平衡分析需构建多水源联合调度模型,整合地表水、地下水、再生水等水源数据,结合用水需求预测与工程供水能力,通过线性规划算法生成区域水资源配置方案,优化取水口布局与输水线路。实时监控网络建设需整合用水计量设备、水质传感器与流量监测站数据,采用物联网技术实现数据自动采集与边缘处理,通过数字孪生平台构建全流程可视化监管界面,动态显示水源地水位、输水管线压力、用户用水量等关键指标。智能决策支持需开发基于强化学习的调度算法,将历史调度数据与实时监测信息输入神经网络,通过不断试错学习优化调度规则,在干旱等极端条件下自动调整供水优先级,提升决策科学性与响应速度。

3.3 工程安全管控系统

工程安全管控需构建全生命周期监测体系。结构健康监测需集成应变计、位移计、渗压计等5类以上传感器数据,通过无线传输技术将数据汇聚至边缘计算节点,采用机器学习算法识别结构变形趋势,结合工程设计参

数构建安全评估模型,实时计算结构安全系数,精度达0.01。风险预警体系建立需梳理工程安全影响因素,制定包含位移阈值、应力限值等10项以上安全指标库,当监测数据超出安全范围时自动触发预警,通过短信、声光报警等方式通知管理人员,同步推送3种以上可能引发的次生灾害信息。维修养护决策需开发基于数字孪生的工程维护计划生成系统,根据结构健康状态、环境侵蚀程度等因素预测设备寿命,结合维修资源约束生成最优维护方案,通过虚拟仿真验证维护效果,减少非计划停机时间,延长工程使用寿命。

4 技术实施保障体系

4.1 标准规范建设

标准规范是数字孪生流域建设的基础性保障。数据接口标准制定需聚焦跨系统数据互通需求,统一数据编码规则与传输协议,定义涵盖空间数据、业务数据、感知数据等类型的标准化交换格式,开发通用API接口工具包,降低系统集成成本^[4]。模型认证体系构建需建立全生命周期管理机制,从模型开发阶段明确输入输出规范,到测试阶段设定精度、效率等量化指标,再到应用阶段实施动态跟踪评估,形成涵盖准入审查、运行监控、退出淘汰的完整认证链条。安全防护标准制定需采用分层防御策略,数据层面实施加密存储与脱敏处理,网络层面部署防火墙与入侵检测系统,应用层面建立权限管理与审计日志机制,构建覆盖物理环境、主机系统、应用程序的立体化安全防护网,确保数字孪生系统稳定运行。

4.2 平台架构设计

平台架构设计需兼顾灵活性与扩展性。微服务架构采用模块化开发理念,将系统拆分为数据治理、模型计算、可视化渲染等独立服务单元,通过服务注册中心实现动态调用,支持根据业务需求灵活组合功能模块,提升系统响应速度与维护效率。云边协同机制构建需打通云端与边缘端的计算资源,云端侧重模型训练与知识库更新,利用高性能计算集群处理海量历史数据,边缘端专注实时推理与本地决策,通过轻量化模型部署实现毫秒级响应,形成“云端训练-边缘优化-终端应用”的闭环

链条。开放生态体系建设需预留标准化服务接口,制定第三方服务接入规范,支持遥感解译、气象预报、工程仿真等外部服务快速集成,通过开放API市场促进技术供需对接,形成政府引导、企业参与、用户反馈的良性发展生态。

4.3 能力建设路径

能力建设需多维度协同推进。技术研发梯队组建需打破学科壁垒,汇聚水利、计算机、地理信息等领域专业人才,建立联合攻关机制,重点突破多源数据融合、高精度建模、虚实交互等关键技术瓶颈,形成具有自主知识产权的核心算法库。试点示范工程选择需兼顾典型性与代表性,在不同地理气候条件、不同规模流域开展技术验证,通过迭代优化形成涵盖建设标准、实施流程、运维规范的可复制推广模式,为大规模应用提供实践依据。人才培养体系构建需深化产教融合,在高校增设水利信息化交叉学科方向,在职业院校开设数字孪生技术技能课程,在企业建立实训基地与联合实验室,通过“理论学习-项目实践-创新研究”三阶段培养,打造既懂水利业务又掌握信息技术的复合型人才队伍。

结束语

数字孪生流域构建是智慧水利发展的关键方向。通过核心架构、支撑技术、应用场景及保障体系等多方面探索,已取得一定成果。后续需持续完善技术,强化标准规范,优化平台架构,加强能力建设,推动数字孪生流域在更多场景应用,提升水利管理智能化、精细化水平,助力水利事业高质量发展。

参考文献

- [1]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.
- [2]黄海兵,三梅英,张翼,等.流域水库-水电站数字孪生数据底座建设关键技术研究[J].陕西水利,2025(1):99-102.
- [3]王瑛,李永芳.数字孪生水利工程关键技术及应用探讨[J].中国高新科技,2025(15):100-101,104.
- [4]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[J].长江科学院院报,2024,41(8):172-179.