

数字孪生技术在智慧水利中的应用

康展豪

郑州水经云图信息技术有限公司 河南 郑州 450000

摘要：数字孪生技术通过构建物理与虚拟空间的动态映射，在智慧水利中实现数据整合、模型优化与业务协同。本文阐述了数字孪生在水利数据采集融合、防洪减灾、水资源管理、生态保护及工程运维等场景的应用，提出分阶段推进策略、技术标准体系构建及能力建设路径。该技术通过多源数据整合、模型动态更新与多目标优化机制，有效解决水利系统复杂场景模拟与决策难题，为水利行业数字化转型提供关键技术支撑。

关键词：数字孪生；智慧水利；多源数据融合；动态模拟；智能决策

引言：随着水利行业数字化转型加速，传统监测与决策模式面临复杂水系统动态模拟、多目标协同优化等挑战。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟空间的实时映射，为水利系统提供全要素数字化表达、动态模拟与智能决策支持。其数据驱动特性与多学科融合能力，可有效整合多源异构数据、优化模型参数，支撑防洪减灾、水资源管理、生态保护等场景的精细化管控。

1 数字孪生技术基础与智慧水利关联性

1.1 数字孪生技术本质解析

数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟空间的动态映射关系，实现真实世界与数字世界的虚实交融。其核心机制在于建立高精度三维模型与实时感知数据的深度融合，使虚拟模型能够精准复现物理实体的几何特征、运行状态及环境交互过程^[1]。这种映射并非单向数据复制，而是通过物联网传感器网络持续采集物理实体的多维度数据，驱动虚拟模型实时更新与状态演化，形成数据流动与模型更新的闭环链路。数据驱动特性赋予数字孪生动态学习能力，系统可基于历史数据与实时反馈不断优化模型参数，提升对复杂场景的模拟精度与预测能力。多学科融合建模能力体现在技术架构对多领域知识的集成应用，水力学模型刻画流体运动规律，地理信息系统（GIS）提供空间分析与可视化支撑，气象学模型输入降水、蒸发等边界条件，各学科模型通过数据接口实现参数传递与协同计算，共同构建覆盖“天空地水工”全要素的复合仿真体系。

1.2 智慧水利建设需求匹配

智慧水利建设要求实现水利系统从单一要素监测向全要素数字化的跨越，数字孪生技术通过统一时空基准与数据模型，将河流、水库、堤防等工程实体与水位、流量、水质等监测要素进行数字化编码，形成可被计算机识别的数字资产库。针对水循环过程跨时空、多介

质、非线性的特征，数字孪生平台集成降水预报、产汇流计算、河道演进等模块，构建覆盖大气-地表-地下的全流程模拟链条，实现从降雨到径流的动态追踪与演变预测。在多目标优化层面，数字孪生突破传统决策支持系统静态分析的局限，通过在虚拟空间中预演不同调度方案对防洪安全、供水保障、生态流量等目标的综合影响，量化评估各方案效益损失比，为决策者提供动态权衡与实时调整的技术支撑。这种基于数字孪生的协同优化机制，有效解决了水利系统中防洪与供水、工程安全与生态保护等目标间的矛盾冲突，推动水利管理向精细化、动态化、智能化方向演进。

2 数字孪生技术在水利数据采集与融合中的应用

2.1 多源异构数据整合

水利系统数据来源具有显著的异构性特征，既包含地面传感器网络采集的实时监测数据，也涵盖遥感平台获取的大范围空间信息，还需整合历史档案中的长期观测记录^[2]。传感器网络通过部署水位计、流量计、水质监测仪等设备，形成覆盖河流、水库、渠道的立体化监测体系，持续采集水文要素的动态变化数据。遥感技术则利用卫星光学影像、无人机多光谱扫描、雷达测雨产品等手段，获取流域地表特征、植被覆盖、土壤湿度等空间分布信息，弥补地面监测的空间盲区。历史数据作为时间维度的延伸，通过数字化归档与时空基准统一，与实时监测数据形成互补。时空对齐技术通过坐标转换、时间插值等方法，消除不同数据源在空间参考系与时间分辨率上的差异，构建具有一致时空基准的融合数据集，为数字孪生模型提供完整的数据基础。

2.2 数据清洗与标准化处理

原始水利数据常因设备故障、环境干扰或传输错误存在异常值，需通过统计分析与机器学习算法进行检测与修正。基于滑动窗口的阈值判断、基于聚类分析的

离群点识别等方法,可有效识别传感器跳变、数据缺失等异常情况,并通过邻近值插补、模型预测填补等手段完成数据修复。标准化处理聚焦于消除数据格式与语义差异,通过制定统一的数据结构模板,将不同来源的文本、数值、图像等数据转换为标准编码格式。接口规范定义则明确数据交换的协议规则,确保各类监测设备与信息系统间的无缝对接。数据质量评估体系从完整性、准确性、一致性、及时性四个维度构建指标框架,采用加权评分或模糊综合评价等方法,量化评估数据融合质量,为模型训练提供可靠的数据保障。

2.3 数据驱动模型更新机制

数字孪生模型的适应性依赖于持续的数据反馈与参数优化。在线学习机制通过实时数据流不断更新模型状态,采用增量学习或迁移学习策略,在保留历史知识的同时快速吸收新信息,使模型能够跟踪水利系统的动态演变。离线训练则利用长期积累的高质量数据,通过批量学习方式优化模型结构与参数,提升对复杂水现象的模拟能力。模型参数动态校准结合贝叶斯框架或卡尔曼滤波算法,将新观测数据与模型预测结果进行融合,逐步修正参数估计偏差。不确定性量化分析通过蒙特卡洛模拟或概率分布拟合方法,评估数据噪声、模型简化等因素对预测结果的影响范围,为决策提供风险边界信息。传播分析则追踪不确定性在模型各模块间的传递路径,识别关键敏感参数,指导数据采集与模型优化的重点方向。

3 数字孪生技术在水利业务场景中的应用

3.1 防洪减灾领域

洪水预报与风险预警系统通过集成气象降水预报、产汇流模型与河道演进算法,构建覆盖全流域的动态模拟框架。数字孪生平台实时融合雷达测雨、地面雨量站等多源降水数据,驱动分布式水文模型计算径流过程,结合一维/二维水动力模型模拟洪水演进路径,实现未来72小时洪水过程精准预测^[3]。风险预警模块基于地理信息系统(GIS)平台,将洪水淹没范围与人口分布、基础设施等空间要素叠加分析,生成分级预警图谱,为人员转移与抢险资源调配提供空间决策支持。堤防安全监测采用分布式光纤传感与无人机倾斜摄影技术,实时捕捉堤防变形、渗流等特征参数,通过机器学习算法识别管涌、裂缝等隐患类型,结合数字孪生模型模拟险情发展趋势,辅助制定抢护方案。应急调度方案动态生成机制以实时水情、工情数据为输入,通过多目标优化算法平衡防洪、供水、生态等约束条件,在虚拟空间中预演不同调度策略的连锁反应,自动生成兼顾安全与效益的动

态调控路径。

3.2 水资源管理领域

多水源联合调配系统构建涵盖地表水、地下水、再生水等多类水源的供需网络模型,数字孪生平台通过实时监测水库蓄水、河道径流、用水需求等动态要素,结合中长期气候预测与用水计划,运用线性规划算法优化水源分配比例,确保区域供需平衡。节水型社会建设指标监测体系整合用水计量、水价杠杆、节水器具普及等数据流,通过大数据分析技术评估节水措施实施效果,识别高耗水行业与区域,为差异化节水政策制定提供量化依据。水权交易支撑平台基于数字孪生模型模拟水量分配方案对生态基流、农业灌溉的影响,通过区块链技术实现交易信息不可篡改记录,结合智能合约自动执行水量扣减与生态补偿计算,保障交易公平性与生态安全性。

3.3 水生态保护领域

河湖健康评估系统集成水质监测、生物调查、水文情势等数据,构建包含物理、化学、生物多维度指标的评估模型,数字孪生平台通过对比历史基准与现状数据,量化评估水体富营养化、生态流量达标率等关键指标,识别退化河段与主导压力因素。修复方案模拟模块基于生态水力学原理,在虚拟环境中测试底泥疏浚、人工湿地构建等工程措施对水动力条件与生物群落的影响,优化修复工程布局与参数。水生生物栖息地适宜性分析融合流速、水深、水温等水文要素与底质类型、植被覆盖等生境特征,通过物种分布模型预测关键物种适宜栖息范围,为生态流量调度与生境修复提供科学依据。生态流量保障措施优化机制以维持河流生态功能为目标,通过数字孪生模型模拟不同流量情景下的河道形态演变与生物响应,动态调整水库下泄流量过程,实现防洪、发电与生态保护的协同。

3.4 工程运维领域

水库大坝结构安全监测采用智能传感器网络与数字图像相关技术,实时采集变形、渗流、应力等结构响应数据,数字孪生模型通过有限元分析反演结构安全状态,结合机器学习算法预测剩余使用寿命,提前识别潜在风险。泵站机组能效评估系统集成振动、温度、流量等监测参数,通过数据包络分析(DEA)方法量化机组运行效率,结合数字孪生模型模拟不同工况下的能量转换过程,提出叶片角度调整、转速优化等改造建议。渠道输水效率动态诊断平台融合水位、流量、含沙量等监测数据,通过水力计算模型识别渗漏、淤积等损失环节,结合无人机热成像技术定位破损位置,为精准维修提供空间指引。

4 数字孪生技术实施路径与保障措施

4.1 分阶段推进策略

试点示范项目选择需综合考量业务需求紧迫性、数据基础完备性及技术承载能力,优先在防洪重点区域、水资源矛盾突出流域或工程安全风险高的场景开展实践^[4]。单点应用阶段聚焦核心功能验证,通过部署智能传感器网络与轻量化模型,实现局部场景的实时映射与决策支持;区域拓展阶段强化多源数据融合与业务协同,构建覆盖水文-水动力-工程结构的复合模型,支撑跨部门联动调度;全流域推广阶段则需突破行政边界与数据壁垒,建立统一时空基准的数字孪生平台,实现全要素动态模拟与全局优化。存量系统改造采用“微服务化”架构重构思路,通过标准化接口封装原有功能模块,逐步替换为支持数字孪生的新组件;新建系统从规划设计阶段即嵌入数字孪生基因,采用云原生技术架构与模块化开发模式,确保与存量系统的无缝对接与功能迭代。过渡机制设计需平衡技术先进性与实施可行性,通过建立中间件层实现新旧系统数据互通与业务流转,避免因全面替换导致的服务中断风险。

4.2 技术标准体系构建

数据采集与传输标准明确传感器精度等级、采样频率、通信协议等参数规范,针对水位、流量、水质等不同要素制定差异化采集方案,确保原始数据可追溯性与一致性。模型开发与验证规范定义模型结构选择、参数率定、验证评估等环节的技术要求,引入不确定性分析方法量化模型预测误差范围,建立覆盖物理过程、统计规律、机器学习等多类型模型的验证基准库。系统集成与接口标准聚焦异构系统互联互通,制定数据交换格式、服务调用规则、安全认证机制等核心条款,采用RESTful API或消息队列等技术实现跨平台数据实时共享,通过标准化接口管理工具降低集成复杂度。标准体系建设需兼顾国际对标与本土创新,在采纳ISO、IEC等国际标准核心框架基础上,结合水利行业特性补充流域模拟精度、工程结构安全阈值等专项条款,形成具有行业适用性的技术标准簇。

4.3 能力建设与生态培育

复合型人才培养通过“理论教学+项目实践+轮岗

交流”模式构建,在高校设置数字孪生水利交叉学科方向,强化水文水资源、计算机科学、系统工程等多领域知识融合;在行业机构开展在职人员技能提升计划,重点培训数据治理、模型开发、系统运维等关键能力。产学研用协同创新机制以重大科技专项为牵引,组建由科研院所、技术企业、管理部门构成的联合攻关团队,建立需求对接、技术共研、成果共享的合作范式,通过设立开放课题、共建实验室等方式激发创新活力^[5]。开放共享的数据资源池建设采用“分域管理+统一服务”架构,对基础地理、监测实时、业务管理等数据进行分类存储与权限控制,通过数据脱敏、隐私计算等技术保障安全合规,依托水利信息网构建覆盖全国的数据服务节点,为模型训练、应用开发提供高质量数据供给。生态培育需构建正向反馈循环,通过举办技术竞赛、发布白皮书、培育示范基地等方式扩大行业影响力,吸引更多主体参与数字孪生技术迭代与应用推广。

结束语

数字孪生技术的深度应用正在重塑水利行业的管理范式。从数据融合到模型优化,从单点试点到全域推广,其技术价值已从理论验证转向实际业务赋能。通过构建统一时空基准的数字孪生平台,水利系统实现了从静态监测到动态模拟、从经验决策到数据驱动的跨越。随着技术标准体系的完善与产学研生态的成熟,数字孪生将成为水利高质量发展的核心引擎,持续推动工程安全、资源效率与生态保护的协同提升,为行业可持续发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]吴普伟.数字孪生技术在智慧水利中的应用[J].中国科技纵横,2026(1):59-61.
- [2]苟文萱.数字孪生技术在智慧水利中的应用探讨[J].智能建筑与智慧城市,2024(10):23-25.
- [3]高旭,王坤.数字孪生技术在智慧水利建设中的应用[J].工程建设与设计,2026(5):159-162.
- [4]韩月朦.数字孪生技术在智慧水利工程中的应用研究[J].河南水利与南水北调,2024,53(11):88-90.
- [5]黄立锴.浅谈数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J].珠江水运,2022(16):46-48.