

试析数字孪生技术在智慧水利工程中的应用

顾霞

浙江大禹信息有限公司,浙江杭州,310002;

摘要:为了促进智慧水利工程的可持续发展,本研究引入数字孪生技术,通过构建物理水利系统的虚拟映射,实现了实时监测、动态模拟、智能分析和精准决策,大幅提升了水资源管理、防洪调度、工程运维等领域的效率与安全性。

关键词:数字孪生技术;智慧水利工程;防洪减灾

DOI: 10.69979/3060-8767.25.10.041

引言

随着全球气候变化加剧和城市化进程加快,水资源管理与水利工程运维面临日益复杂的挑战,过去的水利系统依赖静态数据和经验决策,难以应对突发性洪涝、干旱及设施老化等问题。数字孪生技术通过集成物联网、大数据、人工智能和仿真建模,构建水利工程的动态虚拟副本,实现了从“被动响应”到“主动预测”的转变。

1 智慧水利工程中数字孪生技术概述

1.1 数字孪生技术的运行机制

历经多年的建设和发展历程,我国水利工程已然构建起兼具防洪排涝、水资源调配以及生态保护等多种功能的完备运行体系,随着“智慧水利”建设不断向前推进,传统管理模式已难以契合现代化水利工程精细化、智能化的管理要求,数字化转型的紧迫性变得越发明显。数字孪生技术作为一种融合物理世界和数字世界的创新模式,借助集成物联网感知、云计算、大数据分析以及人工智能等前沿技术,于虚拟空间构建出与实体水利工程同步映射、虚实交互的数字化镜像。该技术体系依靠布设在坝体、闸门、渠道等关键部位的智能传感器网络,实时采集水位、流量、应力变形等多元数据,经由云端数字孪生平台达成多源异构数据的融合建模与动态仿真,基于机器学习算法的智能分析模块可对工程运行状态开展健康诊断与风险预警,当监测数据偏离预设阈值时,系统会自动生成覆盖处置建议、应急预案等要素的决策方案,并依靠控制指令闭环反馈至物理实体,达成“状态感知—实时分析—科学决策—精准执行”的智能化闭环管理机制。

1.2 数字孪生技术的实施步骤

1.2.1 方案设计

此阶段重点在于搭建与水利工程实体相对应的数

字孪生技术体系,其中覆盖软件系统开发、控制机制设计以及多维度模型构建等关键模块,首先,要依据水利工程全生命周期管理的需求,开发具有多源数据融合能力的数字孪生平台系统,整合BIM建模、物联网感知、大数据分析等技术模块,构建包含几何拓扑结构、材料物理属性以及水力行为特征的全要素虚拟模型。其次,针对不同业务场景分别创建具有差异化工况模拟能力的孪生子系统,就如大坝形变监测模型需要集成地力学参数与实时传感数据,灌区输水模型则要融合水力学方程与闸门控制逻辑。在数据层要求达成SCADA系统、遥感影像、传感器网络等多模态数据的标准化接入以及时空对齐,借助数字线程技术建立实体工程与虚拟模型之间的双向映射关系,保证孪生体可动态呈现闸门开度、库容变化等物理实体的实时状态,最终形成拥有预测预警、方案推演、决策优化功能的智能孪生系统。

1.2.2 数据采集

此阶段的核心任务聚焦于围绕数字孪生模型的数据需求系统性构建水利工程全生命周期数据治理体系,首先要明确数据采集对象,借助物联网设备、遥感技术以及人工巡检等多种途径来开展采集工作,在数据传输环节,要设计分层级网络架构,运用5G、LoRa等混合通信技术以保障实时性与可靠性,而在存储环节,则需构建分布式云存储与边缘计算相结合的体系,达成海量数据的高效存取。针对数据标准化问题,应参照《水利对象分类与编码标准》等规范,建立涉及元数据标准、数据字典、交换接口的完整标准体系,并保证时空基准、数据精度、格式要求的统一,基于此构建起包含工程安全、防洪调度、生态监测等典型应用场景的水利专题数据集。此外,还应借助建立多源信息融合机制,运用知识图谱技术消除数据冗余,由此实现跨系统数据的语义级关联。

1.2.3 模型设计

此阶段是基于已有的数据构建具有多尺度以及多物理场耦合特性的水利工程数字孪生模型体系,从而达成虚拟空间和实体工程之间的动态交互以及精准映射,首先要创建虚拟工程建模框架,搭建起从流域宏观尺度直至闸门构件微观尺度的多层次几何模型,保证模型的空间精度以及拓扑关系契合工程实际情况。在信息协同建模环节,要整合水文水力模型、结构力学模型、泥沙输移模型等多个学科的模型,借助数据同化技术达成模型之间的动态耦合以及参数传递。可视化建模需要运用三维渲染引擎以及VR/AR技术,构建可支持多视角观察、分层显示的可视化系统,直观地呈现水位变化、应力分布等关键指标。运行过程行为建模则是借助机器学习算法对历史运行数据进行分析,建立设备状态退化模型以及故障预警模型,实现对工程运行趋势的智能预判。管理决策建模需融合多目标优化算法以及专家知识库,构建防洪调度、水资源配置等决策支持模型,并且设置多种预案仿真推演功能,最终凭借建立高保真度的仿真实验建模环境,采用实时数据驱动以及模型在线校正技术,保证模拟结果与实际监测数据的误差被控制在允许的范围之内。

2 数字孪生技术在指挥水利工程中的应用

2.1 水资源优化配置

数字孪生技术应用于水资源优化配置领域,给现代水利管理给予了有变革性的解决办法,该技术借助构建高精度的水资源数字孪生体,可整合多种来源且结构各异的数据,像气象预报数据、实时水文监测数据、土壤墒情信息、农业灌溉需求、工业用水计划以及城市生活用水量等,此系统运用分布式计算架构,结合机器学习算法,可动态模拟不同气候情景下水资源的演变趋势,预先推演干旱、洪涝等极端水文事件所产生的影响,还可以评估跨流域调水、水库联合调度等方案实施后的效果。

在水资源动态监控领域,数字孪生体借助物联网感知层,实时采集如河流流量、水库水位以及地下水埋深等关键指标,并结合遥感影像反演技术,达成水资源数量与质量的双重监测,该系统着重关注水质参数的时空变化模拟,可追踪污染物迁移扩散路径,为水环境保护给予决策支持,于需求侧管理方面,系统整合社会经济数据,运用深度学习模型预测不同产业部门的用水需求变化,经供需平衡分析生成最优配水方案。比如在农业灌溉季,系统会结合作物生长模型与土壤墒情数据,制定精准灌溉计划,在枯水期,能启动应急调度预案,平

衡生态用水与生产用水之间的矛盾。

2.2 强化洪水风险预测

为了更有效地应对洪水灾害提升预测的精准程度,现代防洪体系有必要整合多种来源的实时数据,搭建起高度集成化的洪水监测与预警平台,这个平台依靠气象数据、水文数据、地理信息数据以及历史灾情数据,运用多源数据融合技术,联合卫星遥感、气象雷达、无人机监测以及地面传感器网络,达成降水、土壤湿度、河道水位等关键指标的动态监测。比如说,气象卫星可给出大范围的降水趋势,地面水文站以及物联网传感器则可以精准地捕捉局部水位变化,以此保证预警数据的全面性与时效性。

在洪水模拟领域,传统的物理水文模型尽管可对水流演进过程给予模拟,然而其计算量较大,且实时性欠佳,数据驱动模型则可依据历史洪水数据展开训练,快速对洪水演进趋势作出预测,数字孪生技术把物理模型与数据驱动模型进行结合,打造出高精度的流域数字孪生体,可实时模拟河流、湖泊以及水库的水动力学过程。比如当上游监测站监测到强降雨情况时,系统会结合水库调蓄能力、河道行洪能力以及下游地形数据,动态预测洪水抵达时间、淹没范围以及风险等级,并且优化应急调度方案,数字孪生系统支持动态洪水推演,可依据实时数据持续对预测结果作出调整,举例来说,要是某支流水位超出警戒,系统会自动调整下游洪水演进模型,同时结合历史灾情数据,评估可能受到影响的居民区、农田以及基础设施,为应急决策提供科学依据。系统还可模拟不同防洪措施的效果,帮助决策者优化调度策略,降低灾害损失。

2.3 防洪减灾与洪水预警

数字孪生技术运用于防洪减灾领域,给应对洪水灾害给予了全新的技术支持,基于数字孪生构建的流域模型借助集成多源数据,打造出一个有高度仿真特性的虚拟流域系统,此系统有高精度地形地貌数据、水系分布这类静态信息,还可实时接入气象雷达的降雨监测数据、水文站的水位流量数据以及卫星遥感影像等动态信息。依靠数据同化技术,模型可动态修正模拟参数,提升洪水预报的准确性。

暴雨来临之前,数字孪生系统可结合气象预报数据,提前72小时开展洪水演进模拟工作,该系统利用分布式水文模型来计算产流过程,借助水动力学模型模拟汇流以及淹没过程,最终生成囊括水深、流速、淹没时长等参数的风险等级图谱,这些成果借助可视化平台得以

直观呈现,帮助决策者迅速识别重点防护区域。比如在2022年珠江流域防洪期间,数字孪生模型提前48小时精准预测了北江洪峰水位,误差被控制在0.15米以内。

这项技术可对应急预案给予动态优化支持,借助模拟不同调度方案下洪水的演进状况,可评估水库泄洪以及分洪区启用等措施所产生的预期效果,在2023年海河流域暴雨发生期间,数字孪生系统凭借实时模拟,为蓄滞洪区启用决策提供了关键依据,使得直接经济损失减少了大约12亿元。未来随着物联网传感器布设密度的提高以及机器学习算法的运用,数字孪生技术在洪水预警响应时间以及预报精度等方面将会实现更大的突破。

2.4 水利工程全生命周期管理

2.4.1 设计阶段

在水利工程开展设计工作的阶段,BIM技术与GIS技术深度融合,为工程全生命周期管理给予了创新的解决办法,利用BIM技术搭建参数化三维模型,可精准整合大坝、隧洞、闸门等水工建筑物的几何数据、材料特性以及设备参数,达成结构应力分析、碰撞检测以及工程量自动统计。结合GIS平台所拥有的空间分析能力,可叠加工程区域的高精度DEM数据、地质钻孔资料以及水文监测信息,构建三维地质模型,模拟库区渗流场分布、边坡稳定性等关键指标,这种技术融合支持设计方案进行多方案比选,还可以借助时空维度扩展实现施工进度4D模拟以及征地移民范围精准划定。比如在抽水蓄能电站设计过程中,BIM模型可关联机组振动数据,GIS平台则能分析上下库之间的高程差以及输水线路的地质风险,二者协同合作,极大提升了复杂地形条件下水利工程设计的科学性与经济性。

2.4.2 运维阶段

在水利工程的运维阶段,BIM+GIS技术同数字孪生技术相互结合,构建起了一种智能化且精细化的工程管理全新模式,在坝体、闸门以及输水隧洞等这些关键部位,它们部署了传感器网络,可实时采集大坝位移、渗流量、应力应变、闸门开度以及库水位等一系列运行数据,随后将这些数据传输至数字孪生平台。该平台依据BIM模型来集成结构参数,同时融合GIS所有的空间分析能力,以此达成工程运行状态的三维可视化监测以及动态仿真。

例如百色水利枢纽借助数字孪生系统,可实时监测大坝浸润线、渗流场分布以及坝基扬压力情况,该系统会结合历史数据与机器学习算法,以此预测可能出现的渗漏或者变形趋势,一旦监测数据超出安全阈值,系统

便会自动触发预警,同时联动BIM模型高亮显示风险区域,辅助管理人员迅速制定处置方案。另外GIS的空间分析功能可以结合气象、水文数据,模拟在极端降雨或地震条件下的坝体稳定性,为应急决策提供科学依据。

2.5 水环境治理与生态保护

流域水环境数字孪生模型是智慧水利建设的关键工具,把物联网感知、多源数据同化以及数值模拟等前沿技术深度融合起来,构建出了虚实交互的流域治理新方式,这个系统把高精度水文水动力模型当作计算引擎,整合了气象卫星的降水预报、水文站的实时流量监测、水质自动站的COD/氨氮等指标数据,以及无人机航拍的河道形态数据,形成了多维动态数据库。依靠GPU并行计算技术,模型可达成小时级更新的污染物扩散三维动态仿真,能追溯工业排污口的历史扩散轨迹,又能依据气象预报预测未来72小时在风力、降雨等不同情景下的污染羽流演变趋势,比如在突发水污染事件中,系统能结合河道拓扑结构和水文参数,智能生成包含吸附坝布设坐标、活性炭投加量等要素的应急方案,让污染拦截效率提高40%以上。在生态补水优化方面,模型依靠耦合植被需水曲线、沉积物再悬浮阈值等生态参数,可精确计算出补水流量阈值和最佳调度时段,使水体自净周期缩短15%~30%。

参考文献

- [1] 陈朝河. 试析数字孪生技术在智慧水利工程中的应用[J]. 智慧中国, 2025, (06): 108—109.
- [2] 贺鹏, 宋学雨. 数字孪生技术和智慧水利系统的整合运用研究[J]. 水上安全, 2025, (11): 107—109.
- [3] 王世正. 数字孪生技术在智慧水利工程中的应用研究[C]//河海大学, 浙江省水利学会, 上海市水利学会, 江苏省水利学会, 安徽省水利学会. 2025 (第十三届) 中国水利信息化技术交流会论文集. 黄河水利委员会山东水文水资源局, 2025: 473—479.
- [4] 耿睿智. 数字孪生与智慧水利: 基层视角下的技术创新与实践路径[C]//河海大学, 浙江省水利学会, 上海市水利学会, 江苏省水利学会, 安徽省水利学会. 2025 (第十三届) 中国水利信息化技术交流会论文集. 黄河水利委员会河南水文水资源局 2025: 1407—1413.
- [5] 张晓艳. 基于数字孪生技术的智慧水利应用研究[J]. 中国战略新兴产业, 2025, (03): 56—58.

作者简介: 顾霞,女,(1982-),浙江长兴人,汉族,本科,工程师,从事水利信息化技术研究。