基于数字孪生技术的水利水电工程管理应用研究

张志睿　刘　勇

湖南澧水流域水利水电开发有限责任公司江垭水电站 湖南 张家界 427221

【摘　要】：水利水电工程存在全生命周期数据分散独立，工程管控模式粗糙，调度运维智能水平薄弱的行业问题，文章搭建数据底板、平台中枢、应用终端一体的水利水电工程数字孪生三层架构体系。梳理 BIM 与 GIS 融合、多源数据整合、虚实双向交互的核心技术，覆盖工程施工、运行、资产应急全周期管理场景，分析数字孪生技术在水利工程领域的落地实施路径，依托引调水、流域防洪、输水干线工程实例检验技术应用效果。数字孪生技术能够打通工程独立数据资源，提升工程施工管控、水库调度、设备运维及应急处置的智能效果，为水利水电工程智慧化转型发展提供技术依托与实践借鉴。

【关键词】：数字孪生；水利水电工程；全周期管理；BIM+GIS；智能调度

DOI:10.12417/2811-0536.26.10.075

引言

水利水电工程工况繁杂、周期漫长，安全管控难度较高，传统人工粗放管理存在数据零散、仿真偏差、虚实联动缺失、应急研判迟缓等问题，难以适配现代智慧水利建设发展需求。数字孪生技术拥有虚实映射、智能仿真、动态迭代、闭环管控的核心特质，是水利工程数字化智能化升级的核心技术手段。本文面向水利水电工程全场景应用，搭建标准化三层架构，梳理核心技术路径，结合工程全周期场景与典型案例探究技术应用价值与落地成效，为水利水电工程智慧化管控体系建设提供理论与实践支撑。

1 水利水电工程数字孪生三层整体架构体系

（1）数据底板：多源全周期数据资源构建体系：数据底板构成数字孪生体系的感知根基，依据全生命周期数据归集规范搭建一体化数据资源池，收纳三类不同维度数据实现全域要素统一映射。流域地形三维建模依托无人机倾斜摄影、高精度 GIS 测绘整合基础地理与工程静态信息，收录大坝、隧洞、发电机组各类 BIM 构件参数以及流域水文地质、气象存档资料，构建标准化静态数据库承载场景搭建基础[1]。全域布设的光纤光栅应变传感器、渗压计、流量监测设备持续采集工程运行状态信息，5G 专网搭配 MQTT 通信协议保障日均 10GB 监测数据稳定传输，边缘计算节点依托小波变换降噪、3σ 异常值剔除、NTP 时间同步处理原始数据，统一各类数据的精度标准与时序基准。工程全流程业务系统 API 接口实现互通联动，归集施工进度台账、水库调度曲线、设备检修工单、故障处置日志等业务资料，三类数据依托统一时空基准完成整合归集，为上层仿真计算与各类业务应用提供完整实时的数据供给，破除工程各阶段存在的数据孤岛问题。

（2）平台中枢：融合计算智能分析引擎架构：平台中枢承载虚实交互与智能演算核心职能，分层解耦架构搭建数据存储、仿真建模、功能应用一体化智能引擎。数据存储层部署时序、关系、分布式文件混合存储架构，时序数据库承载每秒十万条高频时序监测数据，PostgreSQL 关系库存储结构化业务台账，依托空间模块实现地理检索，HDFS 系统收纳大容量 BIM 模型、遥感影像等非结构化数据，配套元数据治理体系实现全量数据统一管控。多尺度混合仿真模型层结合物理机理与数据驱动算法，水文模型模拟流域降雨径流演变，有限元网格模型分析坝体温度、应力场分布，LSTM 神经网络预测机组轴承运行温度，模型接入实时监测数据动态修正参数，仿真结果贴合工程实际工况。应用功能层整合三维可视化、并行运算、智能诊断、多终端协同核心模块，三维渲染引擎实现多尺度场景无缝切换，容器化 GPU 集群提升仿真计算效率，机器学习算法识别工程故障与洪水演变情况，适配多类终端设备运行模式，满足多人在线标注、远程协同会商的作业需求。

（3）应用终端：分阶段场景智慧管理体系：应用终端贴合工程全周期管理诉求，划分施工、运行、全周期综合三类业务系统构建场景化管控体系。施工阶段智能管理系统联动 BIM 进度模型搭建 4D 模拟预警机制，RFID 构件溯源、UWB 厘米级人员定位及电子围栏技术管控施工进度、实体质量与现场安全，作业人员未佩戴防护装备进入高危区域时设备自动触发声光告警。运行期安全调度系统建立变形、渗流、应力多维度安全评价指标体系，层次分析法核算工程综合安全系数并设定分级预警标准，多目标优化算法迭代生成多项水库调度方案，深度学习算法预判水轮机组设备剩余使用年限，落实设备预防性运维模式。全周

期资产应急管理系统关联 BIM 构件与资产台账，自动完成设备折旧核算与退役评估工作，溃坝、流域洪水等突发险情可通过系统推演灾害演进过程，路网空间分析结果匹配最优人员疏散路线，输出可视化应急处置方案，覆盖工程开工至退役的全部管理场景。

2 水利水电数字孪生落地核心关键技术路径

（1）BIM 与 GIS 无缝融合集成技术：BIM 与 GIS 融合技术弥合精细水工构件模型与宏观流域地理场景的脱节问题，统一空间基准为技术融合奠定基础。布尔莎七参数模型完成地方独立坐标系至 2000 国家大地坐标系的转换，现场水准控制点校准转换参数，平面坐标转换误差可控制在 0.5 米以内，输水隧洞、坝体 BIM 模型可贴合山体地形实景场景，排查构筑物与地下管线的空间碰撞隐患[2]。专业转换工具提取 BIM 构件几何形态与属性数据，批量输出适配 GIS 平台的要素格式，Draco 压缩算法缩减百兆级大坝模型体量至十兆范围，适配网页端的实时加载运行条件。BIM 构件与地理要素形成绑定关联的时空更新机制，工程设计出现变更时三维场景模型同步迭代，留存操作人员、调整时间、修改缘由的完整记录，维持数字模型与实体工程空间、属性信息的一致性（见图 1）。

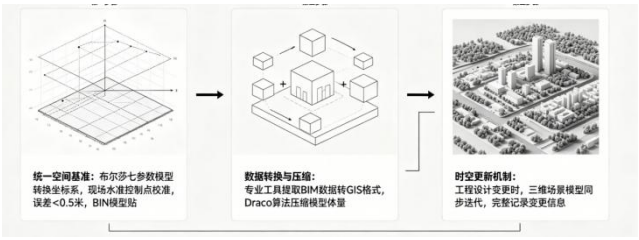


图 1 BIM 与 GIS 无缝融合集成技术

（2）多源数据融合与混合仿真建模技术：多源数据融合与混合仿真建模技术建立监测数据、机理模型数据的双向互补通道，卡尔曼滤波算法整合各类传感器监测数值弥补数据差异，设备故障造成的数据缺失可通过时空插值算法结合周边水文、地形特征重构时序内容，补齐监测链路断点。混合仿真模型依托机理计算搭建基础框架，机器学习修正模型运算误差，分布式水文模型推演流域产汇流基础变化规律，长短期记忆神经网络结合历史降雨、水位信息微调预报结果，洪水预报场景整体准确率可达九成以上。有限元温度应力计算结果支撑坝体变形分析基底，机器学习模型拟合施工扰动、时效变形带来的变量影响，精准预判工程长期形变发展趋势。两类技术协同弥补传统机理模型的算力短板与纯数据模型的物理逻辑缺陷。

（3）三维可视化与虚实双向交互控制技术：三维可视化与虚实双向交互控制技术搭建具备感知与操控能力的虚实联动闭环体系，大规模流域场景依靠分层细节加载方式区分远近景模型精度标准，中景工程区域适配中等面数模型并结合视锥体剔除算法稳定画面帧率，上万平方公里的全域流域场景可实现流畅加载，界面视图可在宏观流域全景与单扇闸门微观操作视角间灵活切换。数字线程串联完整的虚实交互控制链路，虚拟三维界面调整的闸门开度参数可转化为标准化控制指令，下发至现场 PLC 执行机构完成物理设备调节动作，设备编码器采集的闸门运行数据实时回传并更新数字模型状态，形成虚拟指令下发、实体设备执行、运行状态回传的完整操控闭环。整套虚拟操控体系响应延迟控制在 500 毫秒以内，现场操控体验与就地作业保持一致，达成数字空间对实体水利设施的远程精准管控。

3 数字孪生技术水利水电工程全周期管理应用

（1）施工期智能建造数字化管控应用：数字孪生实现施工阶段智能建造全流程数字化管控，BIM+GIS 融合模型检测全线构筑物碰撞问题，长距离调水隧洞施工可提前辨识隧洞与既有地下管线空间冲突，优化隧洞轴线即可减少管线改造成本。施工计划关联三维模型开展 4D 动态模拟，同步 TBM 掘进、混凝土浇筑现场进度数据，系统比对进度偏差，识别刀具损耗、地质突变等滞后因素并推送预警，动态调整施工排布以缩短建设工期。预制水工构件搭载 RFID 芯片绑定质量信息，扫码可调取原料批次、施工记录、强度检测数据，实现工程质量全流程溯源。施工现场依托高精度定位与电子围栏划定边坡、隧洞高危区域，系统捕捉人员违规作业行为并向设备与管理终端推送预警，规避施工坍塌、坠物等安全隐患。

（2）运行期安全监测与水库优化调度应用：工程运行阶段的数字孪生技术服务于结构安全监测与水资源优化调度工作，坝体安全监测整合变形、渗流、应力等监测指标搭建综合安全评估模型，量化得出工程安全系数并设定橙色预警标准，系数低于限定数值时平台自动发出告警信息，调取对应位置传感器时序数据与三维结构热力图，帮助工作人员定位工程隐患[3]。流域水库群联合调度依托数字孪生仿真平台推演多项调度方案，测算防洪优先、发电优先、错峰泄洪不同工况下的河道水位与下泄流量变化，多目标优化算法筛选最优调度模式，保障流域防洪标准的同时提升水电产能。振动、温度传感器持续采集泵站与水轮机运行参数，卷积神经网络算法捕捉轴承磨损、转子异常振动等早期故障特征，提前规划设备检修时段，规避

突发停机引发的输水、供电停滞问题，设备运维模式由此转变为预判式维护。

（3）全周期资产管理与突发事件应急推演应用：数字孪生贯穿工程全生命周期，落实资产精细管控与突发险情应急处置。数字化资产管理将闸门、泵站、监测设备的 BIM 模型与资产台账逐一对应，平台可调取设备采购时间、历次检修记录、配件更换详情，通过年限平均法完成资产折旧核算，工程抵达服役年限后结合模型参数、运行损耗数据评定退役拆除方案。洪水漫堤、隧洞涌水、溃坝等极端工况可依托系统完成动态仿真推演，复现洪水演进路径、淹没范围与水深变化特征，全域路网及居民点空间数据可支撑多条疏散路线测算比对，筛选最优撤离方案，同步匹配物资调配、抢险布防等处置内容，形成规范可视的应急处置预案。汛期可依托既有洪水仿真案例适配当下雨情工况，缩减防汛决策的研判耗时。

4 数字孪生水利工程典型工程实践应用成效

（1）引调水工程数字孪生应用成效：大型跨流域引调水工程数字孪生系统覆盖工程全流程管理，BIM 与 GIS 融合模型用于施工前期排查，规避隧洞与地下管线空间冲突，降低管线改造成本。隧道掘进同步接入进度监测数据，甄别刀具损耗隐患并调整施工方案，压缩工程建设周期[4]。全线输水管道布设百余组水质监测设备，数字孪生模型推演污染物扩散轨迹，管道破损引发水质超标时，系统结合水流参数判定污染抵达取水口时长，启动跨区段应急调水模式，阻断污染水体向下游扩散，维系区域供水安全稳定。

（2）流域防洪数字孪生调度实践应用成效：大江大河流域数字孪生防洪调度系统汇总气象雷达、水文站点全域监测数据，支持 72 小时滚动递进式洪水预报，特大洪水场景下可提前 48 小时预判干流控制站洪峰流量，洪峰数值与出现时刻的偏差处于较低区间，为防汛物资调配、人员转移留出充足处置时间。流域串联水库可依托系统完成多类调度方案仿真测算，常规调度运行状态易造成下游河道水位超限，错峰泄洪模式需要启用蓄滞洪区分摊洪水压力，联合优化调度模式精细管控各水库下泄流量，无需启用蓄滞洪区便可将干流水位稳定在合理区间，减少洪水淹没引发的各类经济损耗。

（3）输水干线工程智能运维应用成效：长距离深埋输水干线数字孪生系统聚焦隧洞地质隐患防控与泵站设备运维精细化管控，隧洞超前地质探测实测数据精准对接三维地质模型，生成掌子面前方完整精细地质剖面，施工阶段提前甄别富水断层、破碎带等各类不良地质区域，提前落实注浆加固处理措施，有效规避隧洞大规模涌水等重大地质灾害问题[5]。沿线渡槽与泵站布设的振动、温度感知设备统一接入数字孪生平台，智能分析算法精准捕捉机组早期磨损异常状态，提前统筹规划检修作业，规避设备非计划停机隐患，保障跨区域调水工程持续稳定输水运行。系统内置的全周期资产管控模块统筹全线水工设施台账管理，有效缩减工程常态化运维所需的人力与资金成本。

5 结语

本文构建水利水电工程数字孪生三层架构体系，明确 BIM 与 GIS 融合、多源数据混合仿真、虚实双向交互等核心技术路径，实现数字孪生技术在工程施工、运行调度、资产应急全周期的全覆盖应用。多项典型工程实践表明，该体系可有效破解水利工程数据孤岛、管控低效、预报精度不足等行业痛点，显著提升工程建设运维质量与防汛调度智能化水平。未来可进一步优化智能算法模型精度，拓展多场景融合应用维度，持续完善数字孪生智慧管控体系，助力水利水电工程行业数字化、智慧化高质量转型升级。

参考文献：

[1] 于克海,范卫超.水利工程项目质量管理信息化发展应用[J].南国博览,2025,(2):91-95.

[2] 王洪迪,周明强,杨国俊.数字孪生在猛进水库工程建设中的应用[J].水利技术监督,2025,(5):63-66+80.

[3] 仇志峰,赵爱国,任萌萌,等.原则、规范与路径:数字孪生水利工程项目档案管理体系的构建[J].档案管理,2025,(2):80-83+87.

[4] 陈见长,田永生.数字孪生东庄水利枢纽智能建造管控系统研究与应用[J].现代信息科技,2025,9(4):33-38.

[5] 王展帆.数字孪生技术在水利工程项目中的应用[J].中国新技术新产品,2025,(2):107-109.