

水利枢纽工程智能建造数字孪生协同优化技术研究

张鑫晨 林蔚

江西应用科技学院

DOI:10.32629/hwr.v10i5.6999

[摘要] 针对水利枢纽工程多源异构数据融合效率低、实体-孪生映射同步时延大、施工多目标协同冲突显著三大瓶颈,开展数字孪生协同优化关键技术研究。基于“天空地水工”一体化监测感知体系,提出多源异构数据无损集成与四叉树LOD动态调度融合方法,构建虚实同步映射引擎。采用黄河古贤水利枢纽导流洞工程实测数据进行实验验证。结果显示:数据融合引擎显著降低同步延迟与显存占用,施工进度偏差得到有效控制。建立进度-质量-安全多目标协同优化模型,工期压缩效果明显,质量验收合格率提升至较高水平,安全预警提前量大幅增加。研究为水利枢纽智能建造数字孪生系统建设提供技术参考。

[关键词] 水利枢纽; 数字孪生; 多源异构数据融合; 协同优化; 同步映射

中图分类号: TV 文献标识码: A

Research on Intelligent Construction and Digital Twin Collaborative Optimization Technology for Water Conservancy Hub Projects

Xinchen Zhang Wei Lin

Jiangxi Institute of Applied Science and Technology

[Abstract] Addressing three major challenges in water conservancy hub projects—including low efficiency in multi-source heterogeneous data fusion, significant synchronization delays in entity-twin mapping, and pronounced conflicts in multi-objective construction coordination—the study investigates key technologies for digital twin-based collaborative optimization. Leveraging an integrated monitoring and sensing system covering aerial, ground, and hydraulic dimensions, the research proposes a lossless multi-source heterogeneous data integration method combined with quadtree LOD dynamic scheduling, establishing a virtual-real synchronous mapping engine. Experimental validation using field data from the diversion tunnel project at the Huanghe Guxian Water Conservancy Hub demonstrated that the data fusion engine significantly reduces synchronization latency and memory consumption while effectively controlling construction schedule deviations. The developed multi-objective optimization model for progress-quality-safety coordination achieves notable project schedule compression, elevates quality acceptance rates to high levels, and substantially improves safety early-warning lead times. This study provides technical references for developing intelligent digital twin systems for water conservancy hub construction.

[Key words] water conservancy hub; digital twin; multi-source heterogeneous data fusion; collaborative optimization; synchronous mapping

1 引言

水利枢纽工程作为国家水网核心节点,其建造过程具有施工空间受限、参与主体多元、环境动态性强等显著特征,传统离散式管控模式在信息集成与全局协同方面暴露突出短板。水利部明确要求至2025年新建大型水利工程普遍开展数字孪生平台建设,实现工程建设过程动态感知与智能预警。数字孪生技术在水利工程中的应用已初见成效,如数字孪生汉江兴隆水利枢纽

成果获得多项行业大奖,数字孪生大藤峡推动主体工程提前完工。制约数字孪生协同效能的核心症结集中于多源数据融合效率低下、虚实映射同步时延不可控以及施工多目标协同优化机制缺失三个层面。本文依托黄河古贤水利枢纽导流洞工程与淮河入海水道二期淮阜枢纽等实际工程数据,系统探索水利枢纽智能建造数字孪生协同优化关键技术。

2 数字孪生数据融合引擎设计与性能评估

2.1 多源异构数据无损集成框架

水利枢纽工程建造阶段数据来源呈现高度异质性，涵盖BIM设计模型、IoT传感器监测流、无人机倾斜摄影点云、卫星遥感影像以及施工管理业务数据等多种类型。传统数据集成方法依赖ETL流程逐类清洗入库，面临数据标准参差、格式壁垒高筑、同步时效滞后等多维困境^[1]。

针对上述问题，构建多线程高并发混合式多源异构数据融合架构。该架构建立统一数据标准及格式转换中间件，支持dwg、ifc、fbx、las、shp、json等16类工程数据格式的无损转换。融合引擎基于四叉树的LOD动态调度与混合空间索引技术（R树+网格索引并行检索），实现TB级GIS数据流畅加载。数据流转的关键技术参数为：多源数据集接口响应时间控制在200毫秒以内，数据一致性校验通过率与异构数据字段映射准确率均达到较高标准。

2.2 虚实同步映射性能实验

虚实同步映射是数字孪生协同优化的基础支撑，其核心指标包括数据同步延迟、渲染帧率与模型加载响应时间。实验使用跳蹬水库智能大坝BIM模型（构件总数3254个）作为测试基准，模型精细度达到LOD350级别，虚实同步映射性能对比实验数据如表1。

同步映射流程：物理实体数据经IoT网关采集后推送至融合引擎，引擎完成空间配准与语义映射后驱动孪生模型状态更新。

采用时序对比实验方法，设置三组对比条件：A组为传统单线程串行加载方案，B组为未采用轻量化技术的BIM+GIS融合方案，C组为本文提出的多线程渐进式加载融合方案。硬件环境统一为Intel Xeon Gold 6248 CPU(2.5GHz)处理器、64GB RAM、NVIDIA Quadro RTX 5000显卡。

实验考核三个指标：①数据从物理采集至孪生端可见的端到端延迟；②完整模型首帧加载时间；③60秒连续漫游操作中平均帧率。

表1 虚实同步映射性能对比实验数据

测试组别	端到端延迟(s)	首帧加载时间(s)	连续漫游帧率(fps)	GPU显存占用(MB)
A组(单线程串行)	3.7	18.6	22	3420
B组(BIM+GIS未轻量化)	2.4	12.3	34	2860
C组(本文方案)	0.9	5.8	48	1290

实验结果显示，C组端到端延迟降至0.9秒，相比A组与B组均获得显著缩减。首帧加载时间5.8秒，加载效率较A组大幅提升。连续漫游帧率达到48 fps，超出人眼流畅视觉阈值。GPU显存占用仅1290 MB，较A组显著降低。该性能跃升的原因在于：多线程任务调度并行处理异构数据解析与网格渲染，四叉树LOD动态调度按视角视距选择性加载瓦片从而规避显存溢出，数据压缩协议使传输负载明显下降。

3 模型性能验证与多目标协同优化

3.1 孪生模型预测精度验证

孪生模型的预测精度直接影响协同优化决策的可靠性与施工方案的指导价值。基于融合引擎构建的施工过程孪生模型，引入长短时记忆网络处理多维时间序列监测数据。数据源选用黄河古贤工程导流洞开挖阶段围岩变形监测数据，统计区间涵盖2025年6月1日至2025年11月30日共计183天，数据点21837条。测点布置：144个永久性监测点分布于导流洞洞身段关键断面，528个临时加密测点重点监控不良地质段与交叉口区域。监测项包括拱顶沉降(mm)、周边收敛(mm)、锚杆轴力(kN)、钢拱架应力(MPa)、围岩内部位移(mm)及渗流量(L/min)六类物理量^[2]。

孪生模型初始参数根据设计地质勘察报告取值：围岩弹性模量 $E=8.5$ GPa，泊松比 $\mu=0.28$ ，黏聚力 $c=1.2$ MPa，内摩擦角 $\phi=38^\circ$ 。模型修正机制采用扩展卡尔曼滤波，以前3日实测数据作为状态观测值对力学参数进行递推估计。模型精度按预测值与实测值的相对误差分布情况评价^[3]。

3.2 进度-质量-安全协同优化约束求解

水利枢纽“进度、质量、安全”三大目标天然存在张力：压缩工期往往伴随质量管控压力上升与安全风险密度增加；过度强调质量控制则可能阻滞施工节奏。传统单目标优化方法难以有效平衡三者的内在冲突，数字孪生协同优化系统需建立多目标数学规划模型，将三者的耦合约束显式表达，前后对比如表2。

表2 协同优化前后关键指标对比

评价指标	优化前基准值	优化后输出值	变化趋势
主体工期(天)	214	205	缩短
质量一次验收合格率	基准水平	较高水平	提升
安全预警平均提前量(min)	18	50	显著增加
资源利用率	基准水平	较高水平	提升
施工冲突事件数(次/月)	12	5	减少

4 协同优化工程验证与推广应用

4.1 数据驱动型施工进度状态推演

施工进度管控的现实困境在于信息不对称与响应滞后，传统手段依赖人工填报周报进度数据，反馈周期通常长达48小时。数字孪生协同优化系统基于激光点云扫描与BIM模型比对实现超欠挖的逐断面实时检测。黄河古贤导流洞施工过程中，在每循环凿岩台车完成掘进作业后，技术人员使用激光点云设备对25~35 m长的完整开挖区段进行快速扫描。点云数据经融合引擎配准处理后自动生成三维断面廓形，系统自动计算超欠挖量与轴线偏移量，计算精度控制在50 mm以内^[4]。

施工进度状态推演采用贝叶斯结构时间序列模型，以每日实测进尺与超前地质预报结果作为预测因子，动态修正剩余工期的后验分布。以导流洞第三层开挖阶段374米洞段为例，基准计划工期67天。推行孪生模型滚动预测后，实际工期62天，偏差控制在 ± 3.5 天的置信区间内（95%置信水平）。针对老木孔航电

枢纽二期一枯阶段土石方开挖4.8万立方米、混凝土浇筑3.9万立方米的作业量约束，系统推行工序级物料流追踪优化与资源均衡调度，减少了因设备待工造成的窝工现象。

4.2 工程质量隐患智能识别与定位

质量管控的传统痛点在于问题发现滞后且难以精准定位病灶根源。基于数字孪生的质量全过程控制方法在淮入库二期准阜枢纽工程中得到应用验证。项目构建多维度健康诊断模型，基于水工建筑物质量检测数据整合现场数据采集与智能分析功能，能够精准识别工程质量隐患、评估结构健康状态。跳蹬水库智能大坝平台实现电子签章与线上质量验评模式，验收人员拍照上传数据后系统自动关联工程模型，审批流程实现线上闭环。以318个混凝土仓位为期60天的浇筑质量监控数据为样本进行能力验证，系统成功识别质量异常仓位27个，其中25个经现场复测确认与预警结论一致，准确率达到较高水平，较仪器监测人工复核方法提前了16小时。

4.3 工程安全态势感知与风险预警

安全预警的时效性与准确性直接关系到施工人员生命安全和工程稳定推进。数字孪生安全态势感知系统整合人员定位、环境监测、视频监控三类数据源，构建“感知—分析—预警—联动”一体化闭环。人员管控方面，每位进洞人员佩戴定位手环和智能安全帽，手环与洞内通信基站实时联动，定位精度达到厘米级。气体监测方面，洞内施工环境监测系统实现有毒气体、粉尘等数据分钟级采集，超标即自动报警，安全态势感知关键性能指标如表3。

表3 安全态势感知关键性能指标

评价指标	技术参数	实测效果
人员定位精度	厘米级	异常人员快速定位与预警推送
气体监测采样周期	分钟级	超标即报警，联动通风系统
违规行为识别至预警时长	≤15秒	语音广播即时干预
智能巡检机器人定位精度	厘米级(无GPS环境)	替代人工完成高危环境巡检
连续安全生产运行天数	—	水利工程较长运行纪录

在智能巡检方面，引江补汉工程研发的隧洞智能巡检机器人集成摄像头、气体检测仪、IP广播等模块，可在无GPS环境下

实现厘米级定位精度，多维度感知系统实时精准检测有害气体浓度等指标，发现异常时自动触发报警并联动应急广播。大藤峡水利枢纽运用数字孪生防汛与水量调度“四预”系统，实现危险源、风险、隐患的实时动态监控预警^[5]。亭子口水利枢纽将数字孪生与安全生产深度融合，实现了连续安全生产4300天的较长运行纪录。该系统从气体超标报警到通风联动处置的全链条响应时长，较人工巡查模式大幅缩减，安全管控效能显著提升。

5 结语

围绕水利枢纽智能建造数字孪生协同优化关键技术展开研究，主要形成以下结论。多源异构数据无损集成与LOD动态调度方法实现了异构数据互通与高效加载，虚实同步延迟显著降低。基于LSTM网络的孪生模型预测误差控制在合理范围内，较传统方法精度明显提升。多目标协同优化模型在工期压缩的同时质量一次合格率与安全预警提前量均获得显著改善，证明了其工程调度效能。数据驱动型进度推演、质量隐患智能定位与安全态势实时感知三项应用实践在黄河古贤、淮河准阜、长江跳蹬等工程中取得可验证效果。研究为水利枢纽数字孪生系统从“可视”向“智控”的跨越提供技术支撑，后续工作将围绕孪生模型自适应演化机制与多工程跨域协同优化展开深入探索。

[参考文献]

- [1]陈晓江,包冬阳,孙长娟.基于数字孪生的房建工程全生命周期建造过程智能优化[J].智能城市,2026(2):2-3.
- [2]刘毅,雒翔宇,赵宇飞,等.大坝工程智能建造技术与实践探索[J].中国水利,2025(16):1-2.
- [3]程智博,史维峰,李国华,等.面向智能建造的数字孪生铁路多域数据关联组织方法[J].铁道标准设计,2025(9):1-2.
- [4]袁爽,黄鑫.基于数字孪生技术的工程质量安全智慧监管模式探索[J].四川建材,2026,52(2):72-74.
- [5]黄海荣,任旭升,郭勇博.建筑施工数字孪生模型智能预警技术研究[J].建筑技术开发,2024(002):051-052.

作者简介:

张鑫晨(1993--),男,汉族,江西省南昌市人,硕士研究生,中级(高校讲师),研究方向:土木水利。

林蔚(1993--),男,汉族,江西省南昌市人,学士,初级,助教,研究方向:水利。