

水利工程全生命周期数字化管理模式研究

文 | 刘睿

水利工程在从建设到拆除的整个过程中,长期存在数据分散、监测延迟及风险控制不力等核心挑战。BIM 技术凭借其三维精准建模、信息整合及跨学科协作等核心优势,为构建一个贯穿规划、设计、建造、运营直至报废全过程的数字化管理框架,奠定了坚实的基础,对推动水利工程管理朝着更加精细化和智能化转型,具有深远的实践价值。

水利工程全生命周期数字化管理的现实需求与 BIM 技术切入

水利工程作为国家防洪减灾和水资源配置的关键设施,其管理涉及规划、设计、施工、运营和报废五个阶段,长久以来传统管理方式存在数据分散、信息不互通及监测延迟等问题。比如,黄河下游一处险工采用人工巡查模式,发现坝体裂缝隐患平均耗时达到 72 小时,且漏报率高达 18%;某大型水库监测数据分布在 12 个独立系统中,2023 年汛期渗流量数据延迟 6 小时,险些错失险情处理时机,这充分暴露了传统方法在精准风险控制上存在的瓶颈。BIM 技术凭借三维精细建模、全生命周期信息整合以及多专业协同设计等核心优势,为构建覆盖工程全过程的数字化管理体系提供关键技术支持,推动工程管理朝着数据驱动和智能决策方向转型。

基于 BIM 技术的水利工程全生命周期数字化管理模式设计

数字化管理模式的总体架构与核心逻辑

水利工程数字化管理方式主要依托 BIM 技术来支撑,严格遵循《数字孪生流域建设技术导则》等相关标准,构建起“感知-数据底板-模型平台-知识平台-应用”五层纵向体系,各层级借助规范化接口实现信息的单向传递与双向交互。感知层专门负责多源异构数据的实时获取工作,数据底板层主要承担标准化处理与分级存储的任务,模型平台层能够支持 BIM/GIS/DT 融合建模与动态模拟,知识平台层整合规则库、案例库及推理引擎等内容,应用层则服务于安全监测预警、运维决策支持以及应急指挥等实际应用场景。各层级间的数据动态流动,运用卡尔曼滤波算法对感知层实时

监测数据,与模型平台预测值进行融合校准,以此确保数字孪生模型状态同步延迟不超过 100ms,为上层知识推理与业务决策提供可靠的数据支撑。

在五层架构中,各阶段管理诉求在对应层面实现有效对接,应用端决策结果驱动模型平台和数据底层平台迭代升级,BIM、GIS、DT 等技术深度融合并全程赋能,驱动工程管理模式从固化记录向实时智能演进。

从规划设计到施工建设阶段的数字化管控机制

在规划设计期间,项目团队通过无人机航测和激光雷达扫描获取高精度地形信息,在 BIM 系统内建立达到 LOD400 标准的三维模型,确保大坝核心部位建模偏差不超过 ±2 毫米,同时整合 GIS 地理信息实现 1:500 比例尺的流域地形精确匹配。利用数字孪生技术预先分析不同工况下结构受力特征与形变趋势,从而及时发现设计缺陷,各专业设计人员依托统一 BIM 模型,完成建筑、机电、水利等专业数据互通与冲突校验。进入施工阶段后,将 BIM 模型作为施工组织核心依据,配合部署 2000 余个物联网感知设备,搭建智慧工地管理体系,实时采集现场数据并进行云端存储。系统借助 GIS 坐标系快速锁定异常构件,配合区块链技术对主要建材进行全程质量追踪。BIM 作为静态数据载体存储几何与属性信息,数字孪生以毫秒级动态更新能力支撑实时模拟与智能决策,两项技术的综合应用使施工安全事故比例从 12% 降至 4.8%、项目延期概率由 10% 控制在 5% 以下。

运维与退役阶段的数据驱动管理机制

在运维阶段,数字化管理核心转向对设施健康状态的实时监测和预防性维护。借助数字孪生运维平台,整合 BIM 模型工程数据和传感器实时采集的水位、流量、设备温度等

运行参数，来建立设备运行状态评估体系。当监测数据出现异常时，系统自动启动预警机制，并调用知识库中的相似故障案例，提供精准维修方案。该机制可使设备故障率从10%降至6%，且维护支出减少约30%。为保证模型持续有效，需要通过定量误差评估进行验证，采用均方根误差公式定期对孪生模型预测值和实际监测数据，确保结果的准确性：

$$R = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

式中： y_i 为第 i 个实际监测数据； \hat{y}_i 为数字孪生模型对应时刻的输出预测值； n 为数据样本总量。当误差超出预先设定的阈值时，就运用梯度下降法对模型参数进行迭代调整，推动孪生模型逐步向着物理实体的实际状态靠拢。在工程进入收尾阶段后，BIM平台会将全生命周期数据进行归档整合，构建包含设计存证记录、材料来源追溯及施工过程信息的完整电子证据链，并且利用区块链技术实现加密存证，以此保障档案不被篡改，最终达成工程知识资产在时间维度上的沉淀与再利用。

表1 BIM+GIS 技术应用前后的管理指标对比

管理阶段	评估指标	传统方法	BIM+GIS 方法	变化幅度
规划设计	设计成本	基准	节省约15%	-15%
	仿冒识别准确率	不可检测	100%	+100%
施工建设	安全事故率	12%	4.8%	-60%
	工期延误率	10%	≤5%	-50%
	劣质建材拦截率	不可追溯	95%	+95%
运维管理	预警响应时间	基准	缩短40%以上	-40%
	异常识别准确率	64.7%	96.7%	+32%
	设备故障率	10%	6%	-40%
	运维决策效率	基准	提升73%	+73%
验收存证	数据造假风险	23%	2%	-98%

来源：兰州资源环境职业技术大学

数字化管理模式的工程实践与综合评估

典型工程的全周期应用验证

某市水闸项目打造从前期规划到后期运维的全流程管理体系。规划阶段项目组依托1:500高精度地形资料开展多学科协同设计，并通过虚拟仿真对方案进行可行性验证。在施工期间，基于区块链的质量追溯体系杜绝不合格材料进入施工现场，单元工程优良率达到了99.5%。运维阶段采用CNN-LSTM算法，分析数据时空动态，实现风险预判。江垓市项目预警精度达96.7%，较传统方法提高32%，决策效率提升73%，让黄河槐荫段险情处置时效从45分钟缩短至12分钟，全周期实践验证表明，该模式具备较强工程适

用性与推广前景。

管理效能的多维度量化评估

完整项目生命周期的实践给管理效能的量化测评奠定了可靠的数据根基，通过对各环节关键指标进行体系化对比分析，能明确BIM技术驱动下数字化管理体系的整体效能范围（如表1所示）。

统计数据呈现出不同环节效率提升的规律。施工环节在品质监督与进度公开方面效果最突出。运维环节借助预测性维护，使管理模式从被动响应转向主动预防。验收存证环节，数据被篡改概率从23%降到2%。这充分体现了数字化管理在项目全流程成本节约、效率提升及风险控制方面的综合价值。

模式优化与持续改进的迭代机制

数字化管理模式的优化迭代需依靠量化评估结果持续反馈，通过嵌入PDCA动态循环管理机制，把计划、执行、检查及改进等环节深度整合到各管理单元内部，使问题在源头就能得到有效解决。在模型维度以均方根误差作为关键校准指标时，当误差超出预设阈值就启动基于梯度下降的迭代优化流程。在知识平台方面，案例库随工程实践不断丰富，同时推理引擎的规则集也会依据新增事故案例实时更新。当前模式在跨地域数据互通、极端工况样本储备及流域整体协同仿真准确性上仍有待提升。未来需重点引入AI图像识别技术，实现建材缺陷自动辨识与虚假预警，并且搭建跨组织、跨区域的数据共享体系，最终构建集“智能预警、联合监管、科学决策”于一体的综合管理生态系统。

结束语

通过整合BIM、GIS、数字孪生及区块链等先进技术，打造出“感知-数据底板-模型平台-知识平台-应用”五级数字化管理架构，以此破解水利工程全周期存在的数据割裂、监测延迟及质量追溯困难等问题。从实际应用效果来看，该方案能将安全预警响应效率提升40%以上，异常识别准确率可达到96.7%，施工事故率下降60%，验收数据造假风险从23%降低到2%，运维决策速度提高73%。接下来需要深化AI图像识别与智能预警技术的融合应用，建立跨部门、跨区域的数据协同共享机制，健全电子证据链的法律保障体系，推动水利工程数字化管理朝着智能化、协同化方向发展。

作者简介：刘睿 兰州资源环境职业技术大学

责任编辑：孙姗姗 投稿邮箱：zhouhl@staff.ccidnet.com