

数字孪生平台在水利工程全周期监管管控中的构建与实践

石洪胜

天津市金帆工程建设监理有限公司 天津 300000

摘要：本文旨在系统阐述数字孪生平台在水利工程全生命周期（规划、设计、施工、运维）监管管控中的构建逻辑、核心架构与关键技术，并通过一个综合性的实践案例，深入剖析其应用成效。研究表明，基于数字孪生的监管模式能够实现物理工程与虚拟模型的实时交互、动态映射与智能推演，显著提升监管工作的前瞻性、精准性和协同效率，为保障工程质量、安全、进度与投资目标提供了强有力的技术支撑，是推动水利行业数字化转型与高质量发展的关键路径。

关键词：数字孪生；水利工程；全生命周期；工程监理；智能管控

引言：水利工程质量与安全关乎国计民生、生态安全与社会稳定。工程监理是连接多方核心纽带，对保障工程目标实现至关重要。但传统监管模式以人工巡检、纸质记录、事后纠偏为主，面对超大型、高难度、智能化水利工程面临诸多挑战：信息割裂严重，各阶段海量数据分散，形成信息孤岛，监管决策依据不足；过程监管滞后，对隐蔽工程等监管有盲区延迟，只能被动处理问题；协同效率低下，多方协作沟通成本高、链条长，影响问题解决时效；知识沉淀困难，经验数据难有效存储复用。在此背景下，数字孪生技术应运而生，它构建与物理实体高度一致的虚拟映射体，打通物理与数字世界壁垒。将其用于水利工程监管，有望解决痛点，实现深刻转变，探索构建全生命周期数字孪生监管平台意义重大。

1 数字孪生与水利工程监管的融合机理

1.1 数字孪生的核心内涵

数字孪生是动态演化、集成多源异构数据且具备仿真与决策能力的复杂系统，核心为“虚实映射、实时交互、共生共智”。虚实映射借助高精度建模（如 BIM + GIS），在数字空间精准复刻物理水利工程的各类属性。实时交互依靠物联网传感器网络，持续采集物理实体状态数据，驱动虚拟模型更新，虚拟模型仿真结果也可指导物理实体运行。共生共智则利用大数据分析、机器学习等算法，深度挖掘历史与实时数据，实现智能诊断、超前预警与科学推演，形成“感知 - 分析 - 决策 - 执行”的闭环智能。

1.2 全生命周期监管的需求映射

将数字孪生融入水利工程监管，要精准对接各阶段核心需求。规划与设计阶段，监管需审查设计方案合规

性等。数字孪生平台集成多源数据构建区域级数字底座，支持方案比选、洪水演进模拟等，辅助前瞻性审查。施工阶段是监管重点，涉及质量、安全、进度、投资控制。数字孪生平台可实现全过程精细化管控，如关联 BIM 模型与施工进度、成本预算，动态监控资源投入偏差；通过智能视频分析识别违章作业与隐患；利用传感器网络对关键结构健康监测。运维阶段，工程移交后监管仍关注长期性能与安全^[1]。数字孪生平台承接建设期数据，构建完整工程档案，结合长期监测数据进行结构健康评估、寿命预测、维修策略优化，实现从“建造”到“运营”的平滑过渡与价值延续。

2 水利工程数字孪生监管平台的构建

2.1 总体架构设计

一个成熟的水利工程数字孪生监管平台应采用分层解耦、模块化、可扩展的架构设计，通常可分为以下五层：



图1：水利工程数字孪生监管平台架构

2.1.1 感知层

负责全面感知物理世界。包括部署在施工现场及工程本体上的各类传感器（如GNSS位移监测站、渗压计、应力计、倾角仪、视频摄像头、无人机、智能安全帽、环境监测仪等），以及来自BIM模型、GIS地图、设计图纸、施工日志等静态数据源。该层确保了数据采集的全面性、实时性与准确性。

2.1.2 网络与数据层

承担数据传输与存储任务。通过5G、工业物联网（IIoT）、光纤等高速网络，将感知层采集的海量异构数据（结构化、半结构化、非结构化）汇聚至数据中心。采用分布式数据库（如Hadoop, Spark）和时空数据库（如PostGIS）进行高效存储与管理，并建立统一的数据标准与治理规范，打破信息孤岛。

2.1.3 模型与仿真层

核心是构建高保真的水利工程数字孪生体，通常采用“BIM+GIS+IoT”的融合模式。BIM模型提供工程构件的精细几何与语义信息，GIS提供宏观地理环境与空间关系，IoT数据则赋予模型生命力，使其能够实时反映物理状态^[2]。在此基础上，集成水动力学、结构力学、岩土力学等专业仿真引擎，支持对洪水、溃坝、结构变形等复杂场景进行动态模拟与推演。

2.1.4 应用服务层

面向监理业务的具体功能实现。该层将底层能力封装成一系列微服务，供上层应用调用。典型服务包括：4D/5D进度-成本可视化、质量验评管理、安全风险智能识别与预警、隐蔽工程验收追溯、环境影响动态评估、应急指挥调度等。所有服务均围绕监理的核心KPI（关键绩效指标）展开。

2.1.5 交互展示层

作为人机交互的界面，通过Web端、移动端、大屏甚至VR/AR设备，提供沉浸式的三维可视化体验。监理工程师可以“走进”虚拟工程，实时查看任意部位的状态，调取相关数据，接收预警信息，并下达指令，实现高效的人机协同。

2.2 关键技术支撑

平台的成功构建依赖于多项关键技术的深度融合：

（1）多源异构数据融合技术：解决BIM、GIS、IoT、文档等不同格式、不同坐标系、不同精度数据的集成难题，是构建统一数字孪生体的基础。（2）高精度时空建模技术：利用倾斜摄影、激光点云扫描等技术快速构建厘米级精度的实景三维模型，并与BIM模型进行精准配准，形成“地上地下、室内室外”一体化的数字底板。

（3）边缘计算与云计算协同：对于需要毫秒级响应的安全预警（如边坡失稳），采用边缘计算在本地进行初步分析；对于大规模仿真与长期趋势预测，则利用云端的强大算力，实现计算资源的最优配置。（4）人工智能与机器学习：应用计算机视觉（CV）技术分析监控视频，自动识别未戴安全帽、违规闯入等行为；利用深度学习模型分析传感器时序数据，预测结构未来的健康状态；通过自然语言处理（NLP）技术，从海量工程日志和报告中提取关键信息^[3]。（5）区块链技术（可选但重要）：用于确保关键工程数据（如原材料检测报告、隐蔽工程验收记录）的不可篡改与可追溯，增强监理工作的公信力。

3 实践案例：某大型平原水库工程数字孪生监理平台应用

3.1 工程概况与挑战

以我国华北地区某在建的大型平原水库枢纽工程为例。该工程位于环渤海经济带，承担城市供水、生态补水与防洪调蓄等多重功能，总投资约80亿元，建设周期6年。工程以土石坝为主，基础处理广泛采用高压喷射灌浆（高喷）防渗墙技术，同时涉及大规模土方填筑作业。由于地处冲积平原，地基软弱、地下水位高，且冬季寒冷漫长，施工窗口期短，对土方压实质量与防渗结构可靠性提出极高要求。传统监理模式在此类工程中面临突出挑战：土方碾压过程难以量化控制，人工抽检覆盖率低，易出现漏压、欠压区域；高喷防渗墙属隐蔽工程，施工参数（如提升速度、旋转速率、浆液配比）若偏离设计值，将直接影响墙体连续性与防渗效果，但传统手段难以实时监控；多工区平行作业、交叉频繁，进度与资源协调复杂；冬季低温环境下混凝土与灌浆施工质量风险加剧，需精细化温控与过程追溯。

3.2 平台构建与部署

针对上述北方平原水利工程特点，项目监理单位联合技术团队，构建了一套聚焦土方智慧碾压与智慧高喷施工的数字孪生监理平台。

3.2.1 构建区域级数字底座

通过无人机倾斜摄影与机载LiDAR扫描，建立了覆盖库区及周边30平方公里的高精度实景三维模型（精度达5cm）。整合地质勘察BIM模型、地下水监测数据、气象预报信息及既有河道GIS图层，形成支撑全周期决策的数字底板。

3.2.2 部署智能感知网络

在所有土方碾压设备上加装高精度GNSS定位终端、惯性测量单元（IMU）与振动传感器，实时采集行驶轨迹、碾压遍数、行进速度及激振力；在高喷钻机集成

物联网数据采集模块,自动记录钻杆深度、旋转速度、提升速率、浆液流量与压力等关键参数;在重点填筑区与高喷轴线布设土壤含水率传感器与温度监测点,辅助判断最佳碾压时机与冬季施工保温效果;现场人员佩戴智能安全帽,实现定位、SOS报警与音视频回传。

3.2.3 开发核心应用模块

(1) 土方智慧碾压监控系统

平台将每台压路机的实时作业数据与BIM土方分层模型动态关联,自动生成“碾压热力图”,直观显示各区城压实遍数与合格率。系统设定阈值规则(如设计要求 ≥ 6 遍),一旦发现漏压或遍数不足区域,立即向监理APP推送告警,并联动现场广播提醒操作员返工。冬季施工期间,系统还结合地表温度数据,智能建议是否暂停碾压以避免冻土压实失效。

(2) 智慧高喷施工全过程管控

高喷施工参数通过4G/5G实时上传至平台,与设计参数自动比对。平台内置高喷成墙质量评估算法,基于提升速度与浆液流量的匹配度,实时判断墙体均匀性风险等级。若出现异常(如提钻过快导致断桩),系统不仅发出预警,还可调取该时段视频回放,辅助监理进行责任追溯。施工完成后,平台自动生成高喷墙体三维数字档案,包含每米深度的施工参数曲线,为后期渗流分析提供依据。

(3) 4D进度-资源协同看板

将施工计划与BIM模型、设备定位数据融合,实现土方填筑、高喷施工等关键线路的动态推演与偏差预警。监理可直观查看各标段每日完成方量、设备利用率及人力投入,及时协调资源冲突。

(4) 冬季施工智能温控模块

针对北方严寒特点,平台接入环境温度、土体温度及保温措施状态数据,结合AI模型预测冻深发展,自动提醒覆盖保温棉或调整施工时序,保障冬季工程质量。

3.3 应用成效分析

土方碾压合格率由传统抽检下的89%提升至98.7%,杜绝大面积返工;高喷防渗墙施工参数合规率达99.2%,经后续钻孔取芯验证,墙体连续性良好,无断桩、缩颈现象;冬季施工期间成功规避3次因低温导致的压实质量风险,保障工期节点;监理巡检效率提升50%,问题闭环处理时间缩短65%;所有施工过程数据自动归档,形成可追溯、可复用的数字资产,为工程移交与智慧运维奠定坚实基础。

4 讨论与展望

4.1 面临的挑战

尽管数字孪生在水利工程监理中展现出巨大潜力,但在推广普及过程中仍面临一些挑战:一是初期投入成本高:硬件传感器、软件平台开发及专业人才培养需要较大的前期投资。二是数据标准与互操作性:行业内缺乏统一的数据标准,不同厂商的软硬件系统之间存在兼容性问题^[4]。三是复合型人才短缺:既懂水利工程技术又精通信息技术的复合型人才十分稀缺。四是安全与隐私:海量工程数据的集中存储对网络安全提出了更高要求,如何保护敏感数据不被泄露是必须解决的问题。

4.2 未来发展趋势

(1)从“可视化”走向“自主化”:随着AI技术的进步,平台将不仅限于展示和预警,更能自主生成优化建议,甚至在特定场景下实现部分控制指令的自动下发,形成更高阶的“自治孪生”。(2)从“项目级”走向“流域级”:单个工程的数字孪生将逐步融入更大的流域或水网数字孪生体系中,实现跨工程、跨区域的水资源联合调度与风险联防联控。(3)与元宇宙(Metaverse)深度融合:通过更沉浸式的VR/AR/MR交互,打造身临其境的远程监理、培训和应急演练环境。(4)强化“双碳”目标导向:平台将集成碳排放监测与核算模块,助力水利工程在建设和运营全过程实现绿色低碳发展。

5 结语

数字孪生技术为传统水利工程监理带来新思路与工具。构建全生命周期数字孪生监理平台,集“感知-建模-仿真-决策-执行”于一体,可打通数据壁垒,实现对工程多方面的智能化管控。本文结合理论与实践,论证了该模式的可行与优越。数字孪生不仅是技术升级,更是监理理念与模式革新,推动监理工作从“旁站监督者”向“价值创造者”“风险预见者”转变。虽推广面临成本、标准、人才等障碍,但数字化、智能化、精细化发展方向明确。未来,随着技术成熟与生态完善,数字孪生将成为水利工程监理及行业高质量发展的核心引擎,为国家水安全与生态文明建设发挥关键作用。

参考文献

- [1]李晓光.基于数字孪生的施工安全智能预警模型[J].智能物联技术,2026,58(1):87-90.
- [2]胡玉平.数字孪生技术在水利工程运行管理中的应用[J].中国科技纵横,2025(15):53-55.
- [3]张以晓.论数字孪生技术与智慧水利建设[J].黑龙江水利科技,2022,50(7):180-183.
- [4]周阳宗,陶少雄,吴仕红.数字孪生引江补汉工程建设与应用实践[J].中国水利,2025(23):58-65.