

基于数字孪生的水利工程标准化管理平台研究与应用

陆发兵 苏 阳 张向辉

南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 枣庄 277300

摘 要: 本文针对水利工程传统管理模式的痛点,研究基于数字孪生的水利工程标准化管理平台。界定相关核心概念,梳理数字孪生核心技术与水利工程标准化管理体系,完成平台总体架构、功能模块设计并攻克关键技术难题。以某中型水库为应用对象开展实践,结果表明平台实现了运维标准化、管控智能化与管理高效化,有效解决传统管理短板,为水利工程精细化、标准化管理提供技术支撑与实践参考。

关键词: 基于数字孪生;水利工程标准化管理平台;应用

引言:水利工程是民生保障与生态安全的重要基础设施,其管理水平直接关乎工程效能与运行安全。当前传统管理模式存在数据孤立、隐患发现滞后、标准执行不一等问题,难以适配现代化管理需求。数字孪生技术的兴起为水利工程管理升级提供了新路径,结合行业标准化要求构建智能管理平台,可实现工程全流程精准管控,因此开展本平台的研究与应用具有重要的现实意义与应用价值。

1 相关理论与关键技术基础

1.1 核心概念界定

(1) 数字孪生概念:数字孪生通过集成多维度数据构建物理实体的高保真数字镜像,实现物理空间与信息空间的实时双向映射。其核心特征包括精准映射、实时同步与模型自迭代。虚实映射驱动"实到虚"的状态同步,闭环驱动实现"虚到实"的优化调控,形成持续演进的自优化循环。(2) 水利工程标准化管理:水利工程标准化管理是为保障工程安全与效能,对管理全流程制定统一执行准则与考核要求的工作体系。管控标准规范具体操作与安全监测行为,管理维度涵盖安全、调度、维护与行政职能,考核体系以量化指标和定性评估相结合,实施周期化检查与持续改进^[1]。(3) 水利数字孪生平台:水利数字孪生平台是融合数字孪生理念与水利业务需求的智能管理系统。其建设逻辑以数据融合、模型仿真和业务协同为核心,应用边界覆盖工程设计、施工与运维全阶段,重点关注水情监测、安全评估和调度优化,管控价值集中表现为管理效率提升、风险防控前移和决策科学化。

1.2 数字孪生核心技术体系

(1) 多维感知技术:综合运用空天地一体化数据采集手段(卫星遥感、无人机航拍、地面站点观测)、传感器实时监测网络(水位、流量、渗流等参数)以及多

源异构数据归集技术,实现对水利工程全要素状态的全面、实时、高精度感知。(2) BIM+GIS融合建模技术:通过建筑信息模型(BIM)实现水利工程构筑物(坝体、闸门、渠道等)三维精细化建模,融合地理信息系统(GIS)构建工程周边大范围地理场景,实现工程结构与其地理环境的无缝集成与虚实精准映射。(3) 数据融合与仿真模拟技术:对多源感知数据进行清洗、配准与融合分析,消除数据噪声与不一致性;在此基础上,构建水文工况动态仿真推演模型,实现对水位变化、水流演进等工况的未来趋势预测与多情景模拟。

1.3 水利工程标准化管理体系框架

(1) 工程运维标准化:制定巡检路线、养护周期、调度操作、值守职责的标准化流程规范,确保日常运维行为有章可循、记录完整、责任可溯,保障工程处于良好运行状态。(2) 安全管控标准化:建立包含工程隐患排查(内容、频次、方法)、风险预警(分级标准、发布流程)及应急处置(预案启动、响应措施)在内的标准化体系,形成事前预防、事中控制和事后处置的全链条安全管理闭环。(3) 数据管理标准化:统一规范水利数据在采集(采集频次、精度要求)、存储(数据格式、编码规则)、共享(接口标准、访问权限)及应用(分析方法、成果输出)各环节的技术与操作标准,确保数据资源的可用性、一致性与安全性。

2 基于数字孪生的水利工程标准化管理平台总体设计与关键技术实现

2.1 平台建设需求分析

(1) 功能性需求:平台须具备标准化流程管控能力,实现巡检、养护、调度等业务的闭环管理;提供全天候实时监测功能,对水情、工情、雨情及设备状态进行动态跟踪;构建水文仿真模拟模块,支持多情景工况推演;建立智能预警与决策辅助机制,实现风险识别、分级预警与处

置建议的自动输出；同时配备多维数据可视化工具，以图表、三维场景等形式直观呈现管理全貌。（2）非功能性需求：系统需具备高稳定性，确保7×24小时不间断运行；健全网络安全防护与数据加密机制，保障水利关键信息的安全性；兼容主流浏览器、操作系统及终端设备（大屏、PC、移动端）；支持模块化、微服务化架构，便于功能扩展与工程规模适配；同时实现轻量化部署，降低硬件投入与日常运维成本^[2]。（3）标准化适配需求：平台建设须全面对标水利行业现行管理标准、工程考核规范及数字化建设指导文件，确保业务流程设计、数据格式定义、考核指标设置等均与行业要求无缝衔接，避免形成“信息孤岛”与“标准盲区”。

2.2 平台总体架构设计

（1）数据层：搭建统一数据底座，整合多源感知数据（传感器、遥感、视频）、业务数据（巡检、养护记录）及空间数据（BIM、GIS），实施数据标准化治理与统一存储，建立共享交换机制，为上层模型与服务提供高质量数据支撑。（2）模型层：构建三类核心模型——数字孪生模型（实现工程几何结构与实时状态的精准映射）、水文仿真模型（对水位、流量等水文要素进行动态推演）、风险评估模型（对隐患概率与影响程度进行量化计算），形成智能分析引擎集群。（3）服务层：采用微服务架构封装标准化管理业务服务（流程引擎、任务调度）、智能分析服务（数据挖掘、趋势预测）及预警调度服务（阈值判断、预案匹配），以API形式灵活供应用层调用。（4）应用层：面向管理部门与运维人员设计多端可视化终端，包括指挥大屏（全局态势监控）、PC管理端（业务操作与配置）及移动端（现场巡检与信息上报），满足不同使用场景需求。

2.3 平台核心功能模块设计

（1）全域实时监测模块：集成水情（水位、流量、流速）、工情（变形、渗流、应力）、雨情（降雨量、蒸发量）及设备运行状态（闸门开度、机组参数）等监测要素，提供实时数据展示、异常自动告警与历史趋势查询功能。（2）标准化流程管控模块：将工程巡检（路线、频次、检查项）、养护（周期、内容、验收）、调度（指令下达、执行反馈）及台账管理（记录填报、归档查询）等业务流程固化于系统，实现任务自动派发、执行过程留痕、超期自动催办的闭环管控。（3）智能预警与应急模块：基于风险评估模型实时分析监测数据，智能识别潜在隐患并判定风险等级（蓝/黄/橙/红），自动匹配标准化应急方案库，向责任人员精准推送预警信息与处置流程^[3]。（4）数据统计与考核模块：自动归集各

类管理活动数据，生成多维度统计报表（巡检完成率、隐患整改率、设备完好率等），结合考核指标体系实现智能评分、排名分析与改进建议输出。

2.4 平台关键技术难点与解决方案

（1）多源异构数据融合难题：水利数据来源广泛、格式各异、采集频率不统一，融合难度大。解决方案是制定统一数据接入与交换标准，搭建数据治理引擎（ETL流程），对多源数据进行清洗、对齐、转换与标准化存储，实现跨类型数据的互通共享与一致性表达。（2）虚实实时同步难题：物理工程状态持续变化，数字孪生场景需与之保持动态一致，对数据传输与渲染效率要求极高。解决方案是采用轻量化建模与LOD（细节层次）技术降低模型渲染负载，结合增量数据传输与消息队列机制，实现状态数据的高效同步与场景实时刷新。（3）标准化与智能化适配难题：智能化分析结果须符合行业管理规范方可有效落地，技术实现与标准要求之间存在衔接缺口。解决方案是将行业管理标准（预警分级阈值、考核评分细则、应急响应流程等）以规则引擎形式嵌入算法模型，使智能分析输出的预警级别、处置建议和评分结果自动贴合规范要求，确保技术应用与管理标准的内在统一。

3 基于数字孪生的水利工程标准化管理平台应用实践与效果分析

3.1 应用项目概况

（1）项目区位、工程规模、管理现状与现存痛点：以某中型水库枢纽工程为应用对象，该工程集防洪、灌溉、供水等功能于一体，现有管理模式仍以人工巡检、纸质记录和分散系统操作为主。各业务系统数据相互孤立，实时监测数据与业务流程之间缺乏有效关联，导致管理层无法及时掌握工程动态，隐患发现滞后、调度决策周期长等问题较为突出，已难以适应当前水利工程精细化、标准化管理要求。（2）项目数字化、标准化管理建设目标与实施范围：以构建覆盖工程全区域的数字孪生底座为核心，建设标准化管理平台，实现工程运行状态的实时映射、运维流程的标准化管控和风险隐患的智能预警。实施范围涵盖大坝主体、泄洪设施、灌溉渠首及配套监测感知体系，具体包括水情测报、安全监测、调度运行和日常巡检维修等主要业务场景，为工程标准化管理全面赋能。

3.2 平台落地部署与实施流程

（1）前期准备：组建专项工作组，全面摸排工程现有数据资源，梳理水情、工情、视频监控等各类数据来源与通信链路状况；对照现行水利行业管理标准与考核规范，逐项分析平台标准化适配需求；基于工程已有

BIM模型与高精度地形数据,开展孪生场景轻量化适配与精度校验;同步完成感知层设备安装调试和网络基础设施改造,确保数据采集与传输通道畅通可靠。(2)平台搭建:遵循总体架构设计依次完成数据层、模型层、服务层、应用层的系统部署,逐项调试数据接入、模型计算、业务服务与可视化展示功能;将巡检、养护、调度、台账等标准化管理流程全部嵌入系统工作流引擎,完成权限配置与表单定制;面向管理人员、运维人员和技术支持人员开展分层分级操作培训,确保各角色熟练掌握对应功能模块的使用方法^[4]。(3)试运行优化:选取汛期与非汛期典型工况,组织为期三个月的平台试运行。全面排查系统稳定性、数据准确性及流程适配性等方面的问题;根据一线用户反馈对界面交互逻辑、预警阈值参数、流程节点设置等进行多轮迭代优化;结合试运行积累的实际业务数据,对标准化管控流程进行校准完善,确保平台功能与现场管理需求紧密契合。

3.3 平台核心应用成效

(1)管理标准化成效:通过平台将巡检路线与频次、养护周期与验收标准、调度操作规范、台账记录格式等全部固化执行,实现了运维行为的统一规范管理,所有操作均可追溯、可审计,从根本上解决了传统人工管理模式下标准执行不一、记录缺漏、责任难落实等随意性问题。

(2)管控智能化成效:依托数字孪生三维场景实现了工程运行态势的可视化呈现与动态跟踪,智能分析模型可对监测数据进行自动研判,实现了工程隐患的早期识别与分级预警推送,管理人员在风险发生前即可获知预警信息并提前部署,管理决策由被动响应全面转向主动预判^[5]。

(3)管理高效化成效:平台投用后,巡检任务派发与结果上报时间缩短约60%,隐患从发现到处置的平均周期明显缩短,各类统计报表与考核评分实现一键自动生成,大幅降低了人工填报与纸质台账管理负担,工程运维效率与全生命周期管理水平得到显著提升。

3.4 现存问题与优化方向

(1)平台当前应用短板:部分隐蔽工程(如坝体内

部廊道、输水隧洞深处)的孪生模型几何精度与材质表达尚不够细腻,局部细节与物理工程存在可见偏差;基层操作人员对智能化工具接受度参差不齐,移动端在野外弱网环境下的响应速度与操作流畅度仍有提升空间;部分老旧监测设备接口协议不开放,数据接入受限于兼容性问题,影响监测覆盖面的完整统一。(2)后续优化方向:持续迭代模型精细化程度,引入更高分辨率倾斜摄影与激光点云数据对孪生场景进行精度补全;拓展功能应用场景,向水质监测预警、生态流量调度、工程健康寿命预测等方向延伸覆盖;进一步完善标准化管控体系,将试运行阶段暴露的管理盲区及时纳入标准修订计划,使平台功能与管理需求同步演进、持续适配。

结束语

本文完成了基于数字孪生的水利工程标准化管理平台的研究、设计与实践,平台在中型水库应用中取得显著成效,有效提升了工程管理的标准化与智能化水平。虽存在孪生模型精度不足、弱网环境适配性待提升等问题,但后续可通过模型迭代、功能拓展逐步完善。未来,可进一步推动平台在不同类型水利工程中的推广应用,助力水利行业治理体系与治理能力现代化建设。

参考文献

- [1]代进雄,冯雁,杨晓蕾,等.EPC模式下长距离供水工程数字孪生智能建造系统开发[J].人民黄河,2026,48(6):130-135.
- [2]董秀兰.基于数字孪生的水利工程施工安全生产标准化建设路径[J].科技创新与生产力,2025,46(8):112-114.
- [3]崔培,张涛,曾斌,等.数字孪生水利动态时空数据底板构建研究[J].中国水利,2025,11(2):52-64.
- [4]张旺,朱士建,王高旭.烟台大中型水库数字孪生流域防洪调度“四预”应用研究[J].水利技术监督,2025,24(2):72-76.
- [5]陈云鹏.数字孪生技术在长距离调水工程运行管理中的应用研究[J].互联网周刊,2025,8(19):22-24.