

数字孪生驱动下水利工程全生命周期动态管控体系

常鹏晖

安阳市水利工程运行保障中心 河南 安阳 455000

摘要: 针对水利工程全生命周期管控存在数据割裂、预判滞后、协同不足、决策单一等行业痛点,本文依托数字孪生虚实映射、智能模拟、迭代优化的核心特性,结合多维感知、BIM+GIS、智能仿真等关键技术,构建分层级、多机制、全流程的水利工程动态管控体系。覆盖工程规划、施工、运行、退役全场景,剖析体系应用短板,提出标准化、轻量化、迭代优化策略,为水利工程智慧化、精细化全周期管控提供技术支撑。

关键词: 数字孪生驱动;水利工程;全生命周期;动态管控体系

引言: 传统水利工程管控多采用静态、碎片化管理模式,存在跨阶段数据不通、风险预判被动、多主体协同低效等诸多问题,难以适配现代化水利高质量发展需求。数字孪生技术可实现物理工程与数字模型虚实交互、态势推演与动态调控,为水利工程全生命周期智能管控提供全新路径。本文基于相关理论与关键技术,搭建全流程动态管控体系,探究全场景应用模式与优化方案,助力水利管控数字化转型升级。

1 相关理论与技术基础

1.1 水利工程全生命周期动态管控理论

(1) 水利工程全生命周期内涵。界定水利工程规划设计、施工建设、运行管理、退役处置四大阶段的核心管控内容与管控目标。规划设计阶段聚焦方案论证与勘测设计,施工建设阶段侧重进度质量与安全管控,运行管理阶段突出安全监测与调度维护,退役处置阶段强调生态恢复与风险评估。(2) 动态管控核心特征。分析动态管控实时性、协同性、预判性、迭代优化的核心特征,区别于传统静态管控模式。实时性保障数据即时采集响应,协同性促进多主体跨阶段信息互通,预判性推动事后处置向事前预警转变,迭代优化支撑基于实测数据的模型参数持续修正^[1]。(3) 全生命周期管控现存痛点。梳理各阶段数据割裂、风险预判滞后、管控协同不足、决策依据单一等行业共性问题。设计施工运维数据格式各异难以贯通,风险识别依赖人工经验且周期较长,跨阶段责任主体权责交织导致联动响应缓慢,决策多基于有限监测断面而非全局性数据支撑。

1.2 数字孪生核心理论与体系架构

(1) 数字孪生核心概念。阐述数字孪生虚实映射、实时交互、智能模拟、迭代优化的核心内涵与运行机理。通过传感器与模型构建虚拟镜像,实现物理实体与数字模型的双向数据流动,基于历史与实时数据驱动模

型推演未来态势,并依托实际反馈实现模型自我更新优化。(2) 数字孪生水利体系架构。基于行业规范,解析数据底板、模型核心、知识驱动、应用服务四大核心层级的功能逻辑。数据底板汇集多维多尺度水利数据,模型核心承载水利专业数学模型,知识驱动沉淀规则与专家经验,应用服务面向防洪调度等业务场景输出决策辅助信息。(3) 数字孪生适配水利管控的优势。对比传统管控技术,分析数字孪生在全要素感知、全流程模拟、风险预演、动态调控方面的独特优势。实现从单点监测向全域感知跨越,从离线分析向在线推演升级,从经验预判向量化预演转变,从被动响应向主动调控跃升。

1.3 关键支撑技术

(1) 多维感知与数据融合技术。涵盖北斗监测、无人机巡检、物联网感知、多源水利数据清洗与融合技术。构建天-空-地-水一体化感知网络,实现水位、流速、形变等多要素协同监测,基于时空基准统一与质量标注形成高可用数据集。(2) BIM+GIS三维建模技术。阐述水利工程三维数字模型构建、空间场景模拟、工程信息可视化技术原理。集成BIM构件级精细建模与GIS大场景空间表达,融合地质地形和结构属性,实现工程内外观全貌可视化与空间分析。(3) 智能仿真与预警决策技术。包括水利工程生态仿真、洪水预演、风险智能研判、分级预警决策技术。构建水文学与水动力学耦合模型,叠加未来降雨情景推演洪水演进,基于阈值与智能识别实现分级预警,形成风险态势图与调度预案联动输出的快速决策支持机制。

2 数字孪生驱动的水利工程全生命周期动态管控体系构建

2.1 体系构建原则与总体目标

(1) 构建原则。遵循统筹集约、先进实用、安全可靠、迭代升级的建设原则,兼顾通用性与工程针对性。

统筹集约强调统一规划与资源共享,避免重复建设;先进实用要求技术适度超前且贴合水利业务实际;安全可靠突出数据与系统运行的安全底线;迭代升级支持功能模块持续优化演进,适应水利工程管控需求动态变化。

(2) 总体目标。实现水利工程全要素数字化映射、全流程动态监测、全周期智能管控、全方位风险预警,构建虚实融合的智慧管控模式。以数字孪生为核心驱动,建设覆盖工程规划、施工、运行、退役各阶段的统一管控体系,全面提升水利工程感知能力、分析能力、决策能力与执行能力。

2.2 体系整体框架设计

(1) 数据感知层。搭建空天地一体化监测体系,整合工程监测、环境水文、业务管理等多源数据,构建标准化数据底板。融合北斗位移监测、无人机影像采集、物联网传感网络与业务系统数据,经统一编码、清洗融合后形成数据资产,为上层模型与平台提供高质量数据支撑。(2) 模型支撑层。构建水利工程结构模型、水文水力模型、风险评估模型、调度仿真模型组成的模型库与知识库。结构模型表征工程实体几何与物理属性,水文水力模型模拟径流与洪水演进过程,风险评估模型量化结构安全与溃坝概率,调度仿真模型优化水库调度与应急方案,沉淀专家规则与历史案例形成知识驱动引擎^[2]。(3) 平台服务层。搭建三维可视化管控平台,实现数据管理、模拟仿真、预警研判、协同管控、迭代优化等核心功能。平台集成数据治理工具、模型调度引擎与可视化渲染模块,以统一门户向用户提供二三维一体化展示、实时态势感知、方案预演推演及多端协同会商能力。(4) 业务应用层。覆盖工程规划、施工、运行、退役全生命周期的动态管控业务场景。规划设计阶段支撑方案比选与模拟验证,施工阶段保障进度安全与质量追溯,运行阶段实现安全监测与智能调度,退役阶段服务生态评估与拆除决策。

2.3 体系核心运行机制

(1) 虚实同步映射机制。实现物理水利工程与数字孪生模型实时数据同步、状态同步、场景同步。通过标准化数据接口与消息队列,建立监测数据自动触发模型更新的通道,保证虚拟模型实时反映物理工程真实状态。(2) 动态感知研判机制。依托实时监测数据与仿真模型,动态识别工程运行风险、建设隐患。构建多维多尺度预警指标体系,自动捕捉位移突变、渗流异常、洪水超限等风险征兆,结合模型推演实现态势快速研判^[3]。

(3) 智能迭代优化机制。基于历史数据与实时工况,持续优化管控策略、模型参数与调度方案。引入数据同化

与参数反演技术,利用实测反馈校正模型参数,并通过强化学习等算法动态生成优化策略,实现管控方案随工况演进而自适应调整。(4) 多级协同管控机制。打通水利部门、施工单位、运维单位的信息壁垒,实现多层级协同管控。建立统一信息共享与任务协同平台,规范跨部门数据交互流程与权限体系,确保应急会商、调度指令、处置反馈在各主体间高效流转。

2.4 体系安全保障设计

(1) 数据安全保障。建立数据加密、权限管控、备份恢复机制,保障水利核心数据安全。对涉密监测数据与工程图纸实施分级加密存储,基于角色与业务需求设置细粒度访问权限,部署异地容灾备份与数据恢复预案,防范数据泄露与丢失风险。(2) 系统运行安全。搭建工控网络防护、平台稳定运维体系,保障管控系统持续可靠运行。部署工业防火墙与安全隔离网关,防范网络攻击向工控层渗透,建立系统运行状态实时监控与故障快速恢复机制,确保管控平台在极端工况下仍保持核心功能稳定可用。

3 数字孪生驱动下水利工程全生命周期动态管控体系应用与优化策略

3.1 工程规划设计阶段:数字化仿真优化管控

(1) 规划方案数字仿真。基于数字孪生模型模拟工程选址、布局、水文适配性,优化规划设计方案。构建规划区域高精度数字地形模型与水系拓扑关系,融合历史水文气象数据与地质勘察资料,建立多尺度水文水动力耦合模型。在虚拟空间中开展多方案选址比选与枢纽布置优化,模拟不同设计方案在水位调节、泄洪能力及生态流量保障方面的综合表现,结合多目标评价方法优选出适应区域水文特征的最优总体布局方案。(2) 设计风险前置预判。提前研判工程设计中的结构风险、水文风险,规避后期建设运行隐患。在设计阶段将水工建筑物结构参数输入数字孪生模型,施加设计洪水、地震动峰值加速度、极端温差等荷载组合,开展有限元应力应变分析与渗流耦合计算,提前识别结构薄弱部位与超标工况下的失稳模式,在设计方案审定前完成安全隐患的规避与治理措施嵌入。

3.2 工程施工建设阶段:动态质量进度管控

(1) 施工全过程动态监测。实时采集施工工艺、工程质量、施工进度数据,实现施工状态可视化管控。在施工现场部署各类传感终端,自动采集碾压参数、混凝土温度、灌浆压力等工艺数据,结合无人机倾斜摄影与北斗定位技术,逐日更新施工面貌模型,在数字孪生平台中实现施工进度与实际面貌的同步映射与动态比对,

精准管控施工质量^[4]。(2)施工风险智能预警。针对施工形变、渗流、安全隐患等问题实现实时预警,动态调整施工方案。基于监测数据驱动边坡稳定与渗流模型在线计算,实时判定基坑及围堰安全状态,一旦形变速率或渗流量超过预设阈值立即分级推送预警信息,并利用孪生模型快速推演不同处置措施的效果,辅助现场动态优化施工方案。

3.3 工程运行管理阶段:智能安全运维管控

(1)工程性态实时监控。动态监测大坝、水闸、堤防等主体工程结构状态、水文工况变化。依托渗流压力、位移变形、应力应变等多类感知设备,构建设施健康状态在线监控网络,将实时监测数据映射至三维数字模型,实现坝体沉降、坝基渗流、闸门启闭力等关键指标的综合评判与异常自动识别。(2)工况仿真与调度优化。开展洪水预演、水资源调度仿真,实现工程运行动态调控。耦合气象预报与洪水预报模型,滚动预演不同降雨情景下的入库洪水过程,基于多目标优化算法生成水库调度方案集,综合防洪安全、供水保障与生态需求自动推荐最优调度策略,实现调度方案随水雨情实时滚动修正。(3)故障智能诊断与处置。依托模型自诊断技术,精准识别运行故障,匹配最优处置预案。建立设备故障模式知识库与因果推理模型,对闸门启闭异常、机电设备故障等进行实时诊断与原因追溯,自动匹配处置预案库并在孪生平台中预演处置效果,为运维人员提供可视化决策支持^[5]。

3.4 工程退役处置阶段:数字化闭环管控

(1)退役工程状态评估。基于全周期数据积累,仿真评估工程老化、破损状态,判定退役条件。汇集工程设计、施工记录、历次安全鉴定与加固改造资料,利用材料老化模型与结构劣化分析方法,定量评估工程当前安全余量与剩余服役寿命,为是否达到退役条件提供技术判定依据。(2)退役方案仿真优化。模拟工程拆除、生态修复方案,实现退役阶段安全、环保、高效管控。在数字孪生平台中建立拆除施工全过程仿真模型,模拟不同拆除时序对坝体稳定及下游河道水沙过程的影响,优化拆除工艺参数与生态修复方案,确保退役过程安全

可控且环境影响最小。

3.5 体系应用现存问题与优化策略

(1)现存核心问题。总结当前技术融合不足、数据标准不统一、模型适配性弱、落地成本较高等问题。感知设备与业务系统接口异构导致集成度偏低,规划、建设、运行各阶段数据格式不统一而难以贯通,通用模型参数本地化校准难度大,高昂的硬件与平台建设投入制约中小水利工程推广。(2)针对性优化策略。提出统一数据标准、优化轻量化模型、分阶段迭代建设、强化技术融合等优化路径。加快制定覆盖全生命周期的水利数字孪生数据标准与接口规范;研发适用于中小型工程的轻量化仿真模型及云端平台,降低部署门槛;采取试点先行、分阶段投入策略,逐步扩展至全局应用;深化北斗高精度定位、AI图像识别与BIM+GIS的技术集成,形成耦合优势,全面提升管控体系的实用化与智能化水平。

结束语

本文构建的数字孪生水利工程全生命周期动态管控体系,打通了工程各阶段管控壁垒,实现了从被动处置到主动预判、从经验决策到量化智控的转变,有效提升水利工程管控的精准性与协同性。针对当前技术融合不足、模型适配性弱等落地难题,提出针对性优化路径。未来可持续深化多技术融合创新,完善轻量化模型与数据标准,推动体系规模化落地,赋能智慧水利长效发展。

参考文献

- [1]高玉生.水利工程勘测全过程数字孪生技术体系构建研究[J].中国水利,2026,7(2):56-59.
- [2]马传浩.数字孪生技术在水利工程全生命周期运行管理中的应用[J].水电建设,2026,2(1):97-101.
- [3]董秀兰.基于数字孪生的水利工程施工全流程动态管控路径[J].科技创新与生产力,2025,46(8):112-114.
- [4]张旺,朱士建,王高旭.数字孪生流域下水利工程全生命周期“四预”管控应用研究[J].水利技术监督,2025,23(2):72-76.
- [5]朱思宇,杨红卫,尹桂平.数字孪生驱动智慧水利工程全生命周期管控框架研究[J].水利水运工程学报,2024,17(3):88-95.