

数字孪生在水利工程施工动态管控中的应用研究

吴启龙

阜宁县水务局 江苏 盐城 224400

摘要:水利工程施工建设具备长周期、多变量、强动态的特征,传统管控模式难以适配复杂多变的现场需求。本文围绕数字孪生技术在施工动态管控中的应用展开系统论述,剖析数字孪生驱动施工管控的技术逻辑与耦合关系,梳理多源数据采集融合、孪生模型构建、管控指标映射等关键技术架构,提出施工准备、执行、变更及多工序交叉作业等环节的动态管控实施路径,并探讨模型精度提升、边缘计算融合、多方协同平台拓展等持续优化方向,为数字孪生技术与水利工程施工管控的深度融合提供参考。

关键词:数字孪生;水利工程施工;动态管控;虚实交互;技术架构

引言:水利工程施工涉及多类型构筑物搭建与多类别资源调配,现场环境复杂、建设周期较长,施工状态处于持续变动之中。传统固定式管控模式在信息获取的及时性与决策调整的精准性方面存在明显不足。数字孪生技术依托数字化建模与虚实交互能力,能够承接施工场景的动态变化信息,为管控工作提供可视化、可交互的操作载体。将数字孪生引入水利工程施工动态管控,有助于打通信息感知、分析研判与管控调整的完整链路,提升施工管控的精细化水平。

1 数字孪生驱动水利工程施工管控的技术逻辑

1.1 数字孪生体的建模机理与数据映射方式

数字孪生体建模依托多维空间架构搭建数字化载体,依托海量现场信息完成虚拟场景的精准构建。建模过程遵循空间拓扑对应原则,结合水利工程构筑物的形体特征与结构参数,完成层级化模型搭建。各类传感采集信息、设备运行信息与场地环境信息可接入数字化模型内部,完成物理场景信息向数字空间的转化传导^[1]。数据映射贯穿模型搭建与运行的全周期流程,实现物理施工场景各类状态信息的数字化复刻,让虚拟模型可以精准对应物理场景的各类状态变化,为后续施工管控工作开展提供稳定的数据支撑与模型载体。

1.2 水利工程施工场景的动态管控需求分析

水利工程施工场地环境复杂多变,施工建设涉及多类型构筑物搭建与多类别施工资源调配,整体建设流程具备极强的动态变化特征。施工推进过程中,场地环境、施工设备、建设物料与作业状态会持续产生状态变动,传统固定模式的管控模式难以适配工程建设的动态变化节奏。施工管控工作需要实现对场地状态、作业流

程、资源状态的实时把控,完成建设全过程的精细化统筹。动态管控可以适配水利工程长周期、多变量的建设特征,保障施工建设流程有序推进,提升施工管控的精细化与科学化水平。

1.3 数字孪生与施工动态管控的耦合关系

数字孪生技术具备的数字化建模、信息传导与状态复刻能力,能够匹配水利施工动态管控的运行逻辑。数字化模型可以承接施工场景各类动态变化信息,为管控工作提供可视化的操作载体。施工动态管控的各类工作需求,能够引导数字孪生模型完成数据更新、模型迭代与状态优化。技术体系与管控体系可以形成深度联动的运行模式,数字孪生为动态管控提供技术支撑,动态管控为数字孪生技术应用提供落地场景,双向适配的运行模式可以持续完善水利工程施工管控的技术体系。

1.4 虚实交互在施工管控中的运行机制

虚实交互依托数字空间与物理施工场景的信息互通渠道开展运行工作,数字化模型接收物理场景产生的各类动态数据,完成场景状态的实时更新。数字空间可依托模型运算与信息分析,输出适配施工场景的管控指引,反向作用于物理施工流程。双向信息互通的运行模式,打通传统施工管控的信息壁垒,实现施工状态感知、信息分析、管控调整的完整闭环。稳定的虚实交互机制,支撑水利工程施工管控工作持续适配现场动态变化,维持施工建设流程的有序运转。

2 数字孪生支撑施工动态管控的关键技术架构

2.1 多源异构施工数据的实时采集与融合技术

水利工程施工运行过程中会生成类型多样、结构形

式存在差异的海量数据,数据内容涵盖场地环境数据、设备运行数据、资源调配数据以及作业流程数据。各类数据采集渠道互不相同,数据存储格式与传输标准存在明显区别,单一数据处理模式无法完成整体数据的整合利用。多源异构数据采集技术可以针对施工现场不同维度信息开展常态化捕捉,保障各类施工信息获取的连续性^[2]。数据融合技术能够对零散的原始数据开展清洗、转化与整合处理,统一各类信息的输出标准,消除不同类别数据之间的孤立状态,为后续模型构建与管控分析提供充足且规整的数据资源。

2.2 水利工程施工场景的孪生模型构建方法

水利工程施工场景涵盖空间结构、施工设备、物料资源与环境条件等多重内容,场景整体具备多层级、复杂化的特征。孪生模型构建需要结合水利工程施工的行业特性,对接施工现场真实空间结构与建设布局。技术实施过程中依照工程结构排布规律与施工场地分布特征,搭建贴合现场建设状态的数字化场景。模型构建全程结合实时更新的施工数据完成动态迭代,让数字化场景可以跟随施工推进进程完成状态更新,实现物理施工场景空间形态与建设状态的数字化复刻,适配水利工程阶段性施工建设的实际需求。

2.3 施工动态管控指标的孪生映射与关联分析

水利工程施工动态管控体系包含多维度评价与管控内容,各类管控要素存在紧密的内在联系。孪生映射技术可以将现场各类管控要素转化为数字空间可识别的量化参数,完成物理管控内容向数字系统的精准转化。关联分析技术能够挖掘不同管控指标之间的内在联动关系,梳理施工进度、施工质量、施工安全与资源调配之间的相互影响关系。依托数字化分析方式拆解施工过程中各类变量的变化规律,为施工管控工作的精细化开展提供科学的分析依据。

2.4 管控指令的孪生反馈与闭环执行技术

数字孪生体系可依托数字空间完成施工状态的智能研判,结合施工现场实际状态生成针对性的管控调整内容。管控指令可以通过信息传输通道传导至现场作业环节,指导施工流程与资源配置的优化调整。闭环执行技术能够跟踪管控内容的落地进度,捕捉现场作业调整后的全新状态并回传至数字模型。整套运行模式打通数字研判与现场执行的衔接链路,形成完整的管控运行链路,提升施工动态管控的落地性与有效性。

2.5 多维施工要素的孪生协同表达方式

水利工程施工体系由人员、设备、物料、场地、工

序等多重施工要素共同组成,各类要素相互交织影响整体施工推进节奏。孪生协同表达技术可以对分散的施工要素开展统一化整合排布,在数字空间搭建多维度要素协同展示体系。技术模式能够清晰呈现各类施工要素的运行状态与匹配关系,梳理不同要素在施工推进中的配合逻辑,实现多维度施工资源与作业流程的统筹协调,助力施工管控工作实现全方位、精细化的统筹管理。

3 数字孪生赋能施工全过程动态管控的实施路径

3.1 施工准备阶段的孪生预演与方案优化

水利工程正式开工前需要完成施工方案的细化打磨与筹备工作的统筹规划,传统筹备模式多依靠固有经验完成方案编制,容易出现施工布局与现场条件不匹配的问题。数字孪生技术可搭建与施工现场高度匹配的数字化场景,对预设施工方案开展全过程预演处理^[3]。技术体系能够还原施工筹备的全部流程,排查方案布局、工序安排与场地规划中存在的合理内容。通过多维度场景推演完成施工方案的迭代调整,完善施工筹备阶段的各项规划内容,为现场施工开展铺垫稳定基础条件。

3.2 施工执行阶段的孪生监控与偏差识别

施工执行阶段的现场状态会随建设推进产生持续变动,各类施工参数与作业状态需要得到持续监测。数字孪生体系可对接现场各类感知设备,实时捕捉施工流程中的各项运行参数,完成施工全过程的动态监测管控。数字化模型能够对比标准施工参数与现场实际运行参数,精准筛查施工过程中产生的各类偏差问题。及时捕捉工序推进、结构施工与设备运行中的异常状态,为施工管控工作提供精准的问题指向,保障施工建设贴合预设建设标准。

3.3 施工变更阶段的孪生推演与方案调整

水利工程施工周期较长,现场环境与建设条件会产生各类变动,施工变更成为施工建设中的常见环节。传统变更处理方式缺乏精细化的前期研判,容易对整体施工进度与建设质量产生影响。数字孪生可针对各类施工变更内容开展前置推演,模拟变更实施后的施工运行状态。结合推演反馈的各项信息调整施工规划与作业方案,优化变更后的工序排布与资源配置模式,降低施工变更对整体工程建设带来的不利影响。

3.4 多工序交叉作业的孪生协调管控

水利工程施工包含多项平行开展、穿插推进的作业工序,不同工序的作业范围与资源需求存在重叠,容易出现作业冲突与流程混乱的问题。数字孪生可在数字空间整合全部施工工序的推进节奏与作业范围,梳理各

工序的作业边界与推进时序。技术体系能够统筹各条作业线路的运行状态,化解多工序交叉推进产生的作业矛盾,规范整体施工流程的推进秩序,提升交叉作业模式下的施工规整度。

3.5 施工资源调度的孪生辅助决策

施工资源的合理调配是保障工程有序推进的重要基础,物料、设备与人力的分配状态直接影响施工建设效率。数字孪生可整合施工现场的资源存量、作业需求与工序进度等各类信息,构建全方位的资源调度分析体系。依托数字化空间的数据分析能力研判资源最优分配方式,科学规划各类施工资源的投放位置与投放时段。弱化人工调度带来的主观偏差,提升施工资源的利用效率,让资源调度工作适配各阶段施工建设的实际需求。

4 数字孪生驱动施工动态管控的持续优化方向

4.1 孪生模型精度与施工管控粒度的协同提升

水利工程施工场景具备复杂精细的建设特征,常规尺度的孪生模型难以覆盖细微施工环节的管控需求。模型构建精度的升级可以细化工程结构的数字化复刻程度,捕捉施工细节部位的状态变化^[4]。管控粒度的精细化调整能够缩小施工管控的覆盖单元,让管控行为覆盖更多细分作业环节。两类内容的协同升级可以完善施工管控的底层支撑能力,细化施工过程的数据采集与状态感知维度,推动粗放式管控模式向精细化管控模式转变,适配现代水利工程高标准的施工建设要求。

4.2 边缘计算与孪生实时性的融合增强

传统孪生体系的数据处理模式存在数据传输与运算的延时问题,会影响施工状态更新的灵敏程度。边缘计算技术可以在施工现场终端完成数据筛选、运算与处理工作,缩短数据处理的整体链路。该类技术与孪生体系的深度融合能够加快施工数据的更新频率,提升数字场景与物理施工现场的匹配灵敏性。有效改善数据传输滞后带来的管控滞后问题,强化孪生体系对现场施工状态的动态感知能力,维持施工管控的灵敏运转状态。

4.3 多参与方协同管控的孪生平台拓展

水利工程施工建设涉及多方作业主体的参与配合,各主体的工作内容与管控维度存在差异,传统管控模式容易出现信息互通不畅的问题。孪生平台的功能拓展可以搭建统一的数字化交互载体,整合不同作业主体的工作数据与管控内容。平台架构的优化升级能够打通各作业环节的信息壁垒,实现多方作业信息的互通交互。完善多方协同作业的工作机制,提升整体施工管控体系的

联动能力,适配大型水利工程多方协作的建设模式。

4.4 施工全生命周期孪生管控的纵向延伸

现阶段多数孪生管控体系仅聚焦单一施工阶段,未能实现全流程的连贯管控。孪生管控体系的纵向延伸可以打通施工筹备、现场作业、变更调整、工程收尾的全流程管控链路。持续积累工程各阶段的施工数据与管控数据,搭建完整的工程建设数据体系。拓展数字孪生技术的应用边界,让数字化管控模式覆盖工程建设的全部周期,提升水利工程施工管控的整体性与连贯性。

4.5 水利工程施工孪生管控的技术演进趋势

数字化基建行业的持续发展,推动水利施工管控技术朝着智能化、精细化、一体化方向迭代升级。各类新型数字技术的融入可以持续丰富孪生管控体系的功能模块,完善数据处理、场景构建、智能管控的技术链条^[5]。技术体系的持续迭代能够不断提升施工动态管控的智能化水平,优化水利工程施工的管理模式,为水利工程数字化建设的长效发展提供持续的技术升级方向。

结束语

数字孪生与水利工程施工动态管控的结合,构建了一条从物理场景感知到数字空间研判再到现场执行反馈的完整管控链路。借助虚实交互机制,施工状态可以在数字空间中得到实时复刻与智能分析,管控指令能够精准传导至作业一线。模型精度与管控粒度的协同提升、边缘计算与孪生实时性的深度融合,持续强化管控体系的响应能力。多方协同平台的拓展与全生命周期管控的纵向延伸,进一步拓宽了数字孪生技术在水利施工领域的应用空间,推动施工管控朝着智能化、精细化、一体化方向升级。

参考文献

- [1] 刘晨雨. 数字孪生技术在水利工程建设管理中的应用研究 [J]. 科学技术创新, 2026(11):158-161.
- [2] 祁国毅. 数字孪生技术在水库大坝施工安全管控中的应用研究 [J]. 数码设计, 2025(22):123-125.
- [3] 林向荣. 水利施工过程的数字化管控与智能决策研究 [J]. 数码设计, 2025(24):126-128.
- [4] 张鑫伟, 朱佳辉, 施淞皓. 数字孪生技术在大型水利工程施工进度控制中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2026, 16(7):181-184.
- [5] 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, 119.