

基于数字孪生的工程全生命周期协同管理模式与效能提升研究

王朝辉 寻 阳

陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司, 陕西 西安 713700

[摘要]伴随工程项目的规模扩大与复杂程度持续增加,传统管理模式在信息共享、协同效率以及风险控制方面暴露出明显局限。凭借数字孪生技术的工程全生命周期协同管理模式,借助搭建与实体工程实时同步的虚拟模型,达成设计、施工、运营及维护全流程数据的互联与实时模拟。此模式可推动多方协同合作、开展动态优化处理并实施风险预警措施,进而增强项目管理效率、资源利用程度和工程质量。

[关键词]数字孪生;全生命周期管理;协同管理;工程效能;风险预警

DOI: 10.33142/ec.v8i7.17583

中图分类号: TU201

文献标识码: A

Research on Collaborative Management Mode and Efficiency Improvement of Engineering Whole Life Cycle Based on Digital Twins

WANG Zhaohui, XUN Yang

Shaanxi Xixian New Area Jinghe New City Urban Construction Investment Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 713700, China

Abstract: With the expansion and increasing complexity of engineering projects, traditional management models have exposed significant limitations in information sharing, collaborative efficiency, and risk control. With the collaborative management mode of the whole life cycle of engineering based on digital twin technology, and by building virtual models that are synchronized with physical engineering in real time, the interconnection and real-time simulation of data throughout the entire process of design, construction, operation, and maintenance can be achieved. This model can promote multi-party collaboration, carry out dynamic optimization processing, and implement risk warning measures, thereby enhancing project management efficiency, resource utilization, and engineering quality.

Keywords: digital twins; whole life cycle management; collaborative management; engineering efficiency; risk warning

引言

工程项目一般涵盖设计、施工、采购以及运营维护等诸多阶段,信息分散、参与方数量多、管理环节繁复。传统管理模式易,数据孤岛问题突出,引发进度滞后、成本超出预算以及质量隐患。伴随数字技术的进步,“数字孪生(Digital Twin)”给工程管理提供了崭新解决方案。数字孪生借助虚拟模型与物理实体的实时映射,可达成全流程数据的监控、分析以及模拟,助力决策优化与多方协作。本文着重研究基于数字孪生的工程全生命周期协同管理模式的构建、效能提升办法以及应用效果,为大型复杂工程管理给出理论与实践借鉴。

1 数字孪生在工程全生命周期管理中的作用

数字孪生借助构建与实体工程精准同步的虚拟模型,达成物理对象跟虚拟空间的双向数据流通。在设计环节中,数字孪生能开展三维建模、施工模拟及结构优化,提早找出设计冲突和潜在风险,提升设计质量与可行性;在工程施工阶段,借助实时收集施工现场传感器数据、无人机影像以及设备运行信息,数字孪生利用实时采集的相关信息,对施工进度、资源配置和质量控制开展动态分析与优化,让施工过程实现可视化与精细化管理;在运营维护期间,

数字孪生可对设施性能、环境参数和结构健康状况进行持续监控,给出科学的数据依据,达成预防性维护与风险预警。数字孪生不仅弥补了传统管理模式信息滞后和孤岛问题,还增强了工程全过程的可控性和可视化程度,为全生命周期协同管理奠定技术基础^[1]。

2 协同管理模式构建

2.1 信息化平台建设

数字孪生协同管理模式里,信息化平台起到核心支撑作用。凭借构建统一的数据集成平台,可对设计、施工、监理单位及业主端的数据实施集中管理,构建多维度数据中心。此平台不仅包括工程设计图纸、施工进度、材料采购、设备运行以及质量检测等方面的信息,还能达成实时数据更新与可视化呈现,消除传统管理模式里信息孤岛和数据滞后状况。各参与主体可在统一平台同步获取项目数据,达成管理透明化,提升信息传递效能与决策精准度。同时,平台具备数据权限管理与安全控制功能,让不同角色在对数据进行访问和操作时具备恰当权限,进而保障数据安全、明确责任归属。

2.2 跨阶段协作机制

数字孪生模式突出项目全生命周期的合作畅通。各参

与方借助统一平台,实时更新任务进度、资源使用情况以及质量数据,达成设计、施工、监理及运营环节的联合管理。跨阶段协作机制既能预先察觉工序间的矛盾与阻碍,又能对施工顺序和资源调度进行优化,降低延误与浪费。例如,当施工单位在平台更新进度数据之际,监理单位能马上评估施工质量与安全风险,并给出调整方案;设计单位可依据现场反馈开展设计优化工作,保障施工与设计同步开展。此外,跨阶段协作机制能助力构建责任追溯体系,通过记载各环节操作及决策步骤,为项目管理提供科学支撑,增强管理透明度与协作效率^[2]。

2.3 虚拟仿真与决策支持

数字孪生凭借虚拟仿真功能,为施工方案优化与风险管理提供技术支撑。利用虚拟环境对施工工序、设备运行和工人操作进行模拟,管理者能预先找出潜在问题并加以优化改进,降低施工阶段返工与安全事故发生概率。同时,虚拟仿真能开展进度推演与资源负荷分析,助力施工方案的优化和施工计划的动态调整。融合实时数据,仿真模型可评估不同方案成效,为各方给出科学的决策参考,提升协作效能与项目执行精准度。

2.4 模式构建的管理保障

构建协同管理模式时,应涵盖角色权限管理、任务分配、流程标准化以及异常事件响应机制。界定各方责任与操作权限,保障数据与任务的合理分派;设立标准化流程及操作规范,保障协作高效有序开展;构建异常事件应对机制,一旦项目遭遇突发状况或出现偏差,可迅速调配相关资源处理。这些管理保障举措可让信息共享与操作执行紧密衔接,增强数字孪生协同管理模式的可操作性与可靠性。

3 效能提升策略

3.1 进度优化

在工程建设项目管理里,科学把控施工进度是保障项目按时完工的核心要素。传统项目管理模式往往依靠人工经验与静态规划,难以招架大型复杂工程里多专业多工序交叉作业及现场不确定因素带来的挑战。数字孪生驱动的进度优化机制,借助构建工程全周期的虚拟模型,把施工图纸、资源调配、工序顺序以及施工现场实时数据融合起来,实现对施工过程的精细管理。数字孪生平台可在虚拟场景中模拟不同施工方案,预判各方案在时间把控、资源利用及工序配合上的效果,提早察觉工序冲突、资源瓶颈或潜在延误点。例如,大型桥梁工程里,吊装、混凝土浇筑和设备安装常出现时间节点重合的状况,传统方法或许难以及时察觉,数字孪生仿真却能提前识别并给出调整举措。平台拥有动态监控能力,实时跟进关键节点的施工完成进度,且生成进度偏差分析报告,为项目管理人士提供科学决策参考。此外,数字孪生可和施工设备、人员调度系统进行联动,达成资源优化配置,比如科学规划施工机

械的使用时长,降低设备闲置与等待时长,提高工序衔接的流畅度。借助历史项目数据,平台可预估潜在延误风险,制定预防性办法,如提前安排劳动力或调整施工流程,进而保证施工计划的可控性和节点执行的可靠性。借助上述多维度、多层次的进度管理办法,数字孪生让施工计划由静态管理转变为动态优化,极大减少了工期延误的风险,增强了工程按时交付的能力^[3]。

3.2 成本控制

大型工程项目的成本管控复杂又敏感,涵盖材料消耗、机械设备运用、人工投入以及外部供应等方面。传统成本管理多依赖事后核算,难以迅速察觉浪费或异常支出,数字孪生技术借助实时收集施工现场的各种资源数据,达成成本管理的数据化、可视化与动态化。平台可实时监测材料消耗量、施工机械运转时长、人工工时以及运输成本,同时将实际数据与预算标准加以对比,及时找出成本偏差与浪费环节。例如,在装配式建筑施工期间,构件的运输与装配要精准配合,不然易导致材料闲置或作业重复。数字孪生可模拟不同调度方案给成本带来的影响,预先优化运输路线与装配次序,削减材料与人力浪费。借助动态成本剖析与预算预警,管理者可提前对资源计划和施工方案作出调整,防止成本超出预算,平台可开展施工方案的虚拟成本模拟,评判不同方案对整体投资造成的影响,进而选定最优方案削减总成本。此外,数字孪生可与供应链管理系统相互配合,实现对采购进程、材料储备及供应风险的实时把控,削减因供应滞后或材料短缺造成的追加成本。凭借全流程成本监控和预测管理手段,数字孪生把传统事后核算模式转变为全过程精细管控,实现资金高效使用与经济效益最大化。

3.3 质量提升

工程质量是衡量施工安全与结构耐久性的核心要素,然而传统的质量管理大多依靠人工巡检和阶段性检测,存在覆盖范围有限和响应滞后的问题。数字孪生融合 BIM 模型、传感器数据以及实时分析技术,可达成施工质量全流程在线监控。平台可收集关键结构部位的应力、位移、温度、湿度等参数,再与设计模型做对比,察觉潜在质量缺陷。例如,针对高层建筑的混凝土施工,数字孪生可实时监测混凝土浇筑过程中的温度及应力分布,识别出温度出现异常或者应力与设计值不符的现象,迅速发出警报并给出调整方案。此外,虚拟模型能对施工误差影响结构整体性能的情况进行模拟,协助施工单位对工艺和工序顺序加以优化,减少隐患风险。数字孪生还能对每一环节的施工进度和质量检测结果加以记录,为质量追溯提供数据依据。在装配式建筑里,可利用数字孪生对构件精度和接口质量开展在线监控,迅速察觉偏差并加以纠正,保障现场装配精度与结构整体性能。同时,借助对历史质量数据的分析,平台可归纳质量问题的规律,为后续施工给出改进办法,达

成施工质量的持续优化,保证工程长期稳定可靠^[4]。

3.4 风险管理

大型工程施工往往具有结构复杂、工序丰富、参与单位数量多以及施工环境不确定性大的特性,故而潜在风险种类丰富,主要有安全事故、施工冲突、材料供应滞后、机械设备故障以及环境因素干扰等。传统的风险管理模式常依靠人工巡查、定期检查以及事后分析,这种做法存在信息滞后、覆盖范围有限和响应不及时弊端,无法契合大型复杂工程对高效、安全与精细化管理的要求,引入数字孪生技术,为工程风险管理提供了崭新的应对方案。通过数字孪生手段,工程施工可在虚拟与物理空间实现同步映射,实时整合施工现场环境、设备运行、人员行为及施工进度等多维数据,为风险动态识别与预警提供科学依据。

数字孪生平台可收集传感器、无人机、视频监控、物联网设备及其他现场监测装置的数据,对施工现场的环境情况、机械负荷状态、人员活动情况和工序推进进度展开全面分析。以桥梁施工为例,传感器可实时采集塔吊作业负荷、桥墩施工边坡变形、高空作业人员位置信息以及风速、温度等环境数据,再同步进数字孪生模型里。系统借助仿真算法,把采集的数据和施工计划、设计参数以及安全规范加以对比,可提前察觉潜在的安全问题,如塔吊超负荷运行、边坡土体稳定性欠佳、作业人员高空作业违规或恶劣天气作业存在风险等。平台借助评估风险发生概率与可能影响程度,平台可生成可视化预警信息,为项目管理者提供清晰、可行的应对办法。

数字孪生不仅是聚焦于风险识别,还可模拟多种应对方案成效。例如,一旦检测到塔吊负荷临近极限,系统能够模拟采取调整施工顺序、分批吊装或延迟作业等举措对施工进度与安全造成的影响,从而选出最佳方案以降低风险。在进行边坡施工时,借助虚拟仿真可预测不同支护方案对边坡稳定性的优化效果,且为施工方案的调整提供科学凭据。在人员管理上,数字孪生可联合定位系统与作业记录,对作业人员分布实施监控,一旦出现人员扎堆或作业重合现象,平台会预先提示项目经理实施作业调度和疏散^[5]。

数字孪生还能针对施工过程里出现的风险事件进行历史记载与数据解析。平台对不同项目及阶段的风险事件开展统计与分类,平台可总结出风险发生规律,打造风险库,为后续项目给出参考和防范举措。例如,特定施工阶

段中某类型材料供应延误情况频发,可借数据分析提前谋划备用供应商与材料调度方案,进而减少供应风险对工期和成本的不利作用。此外,数字孪生可针对施工环境的改变、气象条件以及设备使用数据做趋势分析,实现对潜在风险的预估,为项目管理者提供提前介入的凭据。通过虚拟仿真与实时监控相融合的方式,数字孪生达成风险管理全过程动态化和闭环化目标。在施工风险出现前,系统可凭借预测和模拟制定预防性办法;一旦风险出现,平台借助实时监测和剖析马上生成应对办法,让管理者可迅速实施纠正举措,由此减少风险对施工进度、质量和安全造成的不利影响。数字孪生技术既提升了施工现场的安全系数,又强化了工程项目整体管理的精细度与可控性,达成了大型工程施工的高效、安全、可靠运转。

4 结语

基于数字孪生构建的工程全生命周期协同管理模式,凭借虚拟模型与物理实体的同步映射,达成由数据驱动的多方合作、动态优化及风险预警。该模式借助信息化平台对设计、施工和运营数据进行整合,构建起任务驱动、绩效评估与反馈的闭环体系,有力提高了项目在进度、成本和质量方面的管控水平。数字孪生既增强了工程管理的透明度与响应效率,还削减了施工风险和资源损耗,为大型复杂工程开辟了可持续发展的道路。未来,伴随人工智能、物联网和大数据技术的持续进步,数字孪生在工程全周期协同管理中的效能将愈发凸显,助力行业管理模式革新与工程项目高效运作。

[参考文献]

- [1]刘丽,聂慧梓,魏雷涛,等.基于数字孪生的工程项目管理研究[J].中国军转民,2023(11):8-10.
- [2]鲁金铭,武斌.数字孪生技术在建筑工程领域的应用[J].绿色建筑与智能建筑,2024(12):79-82.
- [3]王坤,黄元库,梁策,等.数字孪生驱动的隧道工程全生命周期管理研究[J].中国铁路,2024(7):59-68.
- [4]李宗亚.以数字化工程管理为出发点探究工程管理数字化关键技术[J].居舍,2023(25):34-37.
- [5]官志群,王永志,廖少明.基于数字孪生的建设工程项目管理数字化[J].土木工程学报,2024,57(7):106-128.

作者简介:王朝辉(1988.3—),毕业院校:延边大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:陕西西咸新区泾河新城城市建设投资有限公司,职称级别:工程师。