

数字孪生技术在建筑工程全生命周期中的应用研究

郭德鲁

(山东港通工程管理咨询有限公司, 山东 烟台 264000)

摘要 随着建筑业数字化转型不断深入, 数字孪生技术成为推动行业高质量发展的核心引擎。本文以2026年建筑业智能化新阶段为立足点, 阐述数字孪生概念、特征及建筑行业技术架构, 分析其在全生命周期各个阶段的适配性, 探讨从规划决策到智慧运维的应用路径。通过建立相关机制, 数字孪生可以解决传统建筑全生命周期的难点。结果表明, 融合物联网、人工智能和BIM技术的数字孪生体系可以提高工程项目管理水平和全要素生产率, 为现代建筑产业体系提供技术支撑。

关键词 数字孪生; 建筑工程; 全生命周期; 智能建造; 智慧运维

中图分类号: TU17

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.16.012

0 引言

当前, 全球建筑业正从粗放式增长向精细化、智能化转变, 中国也在加快数字中国的建设。2025年以来, 住房和城乡建设部相继出台相关政策, 推广数字孪生技术在工程建设领域的应用, 要求新建工程项目逐步普及数字孪生相关技术, 明确提出要构建城市基础设施全生命周期监管体系, 引导特级资质建筑施工企业率先完成数字孪生平台建设, 发挥行业标杆引领作用。这些政策确定了数字孪生的战略地位, 也给出了效能的量化指标。在这种情况下, 传统的BIM技术已经不能满足要求了, 虚拟和真实的交互、演化预测能力的数字孪生技术应运而生。它是将物理实体的所有维度数据整合起来的一种动态的镜像, 贯穿于整个项目的过程之中。面对复杂项目, 如何借助数字孪生技术冲破数据壁垒, 达成物理与数字世界的精准映射并实施双向赋能, 成为学界与业界共同重视的研究重点。

1 数字孪生技术概述

1.1 数字孪生的基本概念与核心特征

数字孪生不是单一技术堆砌, 而是物理与数字空间的高保真、实时化、双向互动映射关系。其本质是用多维感知技术获取物理实体全部数据, 在虚拟空间创建有同等属性的数字化模型。数字孪生体在建筑工程中不是建筑构件的三维几何表达, 而是集成多种动态数据的集合。其主要特征就是高保真, 虚拟模型可

以毫秒级同步反映物理实体的细微变化, 实时交互, 不同于传统的BIM技术, 支持从虚拟端下发指令到物理端, 演化预测性, 依靠算法和历史数据训练, 在虚拟环境中模拟未来场景, 预判风险隐患, 实现从事后补救到事前预防。能力跃迁使得数字孪生成为物理世界比特和原子之间的桥梁, 为建筑工程精益化管理提供了新的认识视角^[1-2]。

1.2 数字孪生在建筑行业的技术架构

创建建筑行业数字孪生技术架构要遵照“端一边一云一用”分层逻辑, 形成数据采集、传输、处理和应用闭环。感知层是基础, 部署激光雷达等设备全方位地对施工现场多源异构数据进行采集, 保证物理实体状态数字化映射无死角。网络层利用5G专网等传输通道, 把感知数据实时上传到边缘或者云端, 解决数据传输拥堵和延迟问题。平台层是核心“大脑”, 集成BIM引擎等, 负责多源数据融合清洗等, 构建数字底座。应用层面向不同的用户提供进度监控等模块, 用可视化大屏等呈现方式实现决策支持的直观化、智能化。该架构实现数据纵向贯通, 促进设计、施工、运维各方横向协同, 形成数据驱动业务闭环。

数字孪生和传统的BIM技术在数据时效性以及交互机制上存在着本质的区别(见表1)。传统BIM主要针对设计阶段的几何信息管理以及施工前的碰撞检测, 数据更新依靠人工建模或者阶段性导入, 不能体现施工现场的动态特征。数字孪生依靠物联网传感网络把

作者简介: 郭德鲁(1978-), 男, 专科, 助理工程师, 研究方向: 建筑工程技术。

物理实体的状态实时映射出来，双向交互能力使得管理者可以“看”现场，也可以通过虚拟模型干预物理设备的运行。从静态档案到动态镜像的转变，使技术在复杂场景中应用的范围变大。在深基坑监测、高支模安全预警等对实时性要求高的环节，数字孪生的优势是不可替代的。

表 1 数字孪生和传统 BIM 技术在建筑应用中关键维度对比表

对比维度	传统 BIM 技术	数字孪生技术
数据时效性	静态或阶段性更新，存在滞后	实时动态同步，毫秒级响应
交互方向	单向信息传递（设计到施工）	双向闭环交互（虚实互控）
核心能力	几何表达、碰撞检查、工程量统计	状态监测、仿真预测、自主决策
数据粒度	构件级属性信息	粒子级物理状态与环境参数
应用场景	设计优化、施工交底	全过程智能管控、预测性维护

2 数字孪生技术在建筑工程全生命周期中应用的适配性

2.1 规划决策阶段的宏观仿真与方案优选适配性

项目规划决策阶段，数字孪生技术的适配性表现在宏观仿真能力和多方案比选上。传统规划依靠二维图纸和静态效果图，不能全面评价建筑与周边环境耦合关系以及长期运营效益。数字孪生集成地理信息系统（GIS）、城市信息模型（CIM）和气象水文数据，可以在虚拟空间中重建项目所在地全域环境，进行日照、风环境、交通流量和碳排放分析。仿真分析可以使得决策者在动工前对不同的方案进行量化评估，规避环境风险和社会矛盾。基于历史数据训练的 AI 算法可以对项目投资回报率、建设周期、运营成本等进行概率预测，给投资决策提供科学依据，降低由于信息不对称造成的决策失误风险，实现从经验驱动到数据驱动的范式转变^[3]。

2.2 设计与施工阶段的虚实协同与动态管控适配性

进入设计和施工阶段，数字孪生技术的适配性体现在创建虚实协同机制和动态精准管控施工过程。设计环节数字孪生支持多专业并行协同设计，用实时碰撞检测、性能模拟反馈结构安全等指标来减少设计变更和返工。施工环节，面对复杂的现场环境以及频繁的作业变动，数字孪生把施工进度计划、成本数据、

安全质量信息同现场实时数据融合起来。利用无人机巡检等设备获取现场数据，数字孪生平台自动对比计划和实际进度，找出偏差原因并生成纠偏策略。动态管控冲破设计和施工的壁垒，实现信息流的无缝对接，保证工程依照数字化蓝图高质量交付，改善施工组织的精细化水平和资源的利用效率。

3 数字孪生技术在建筑工程全生命周期中的应用路径

3.1 基于多源数据融合的规划选址与环境模拟路径

规划选址和环境模拟的应用路径中，首先要建立多源异构数据的高精度融合机制。通过卫星遥感影像、激光点云数据、地下管线探测数据和社会经济统计数据整合，数字孪生平台可以得到厘米级精度的场地三维底图，真实地还原出地形地貌、植被覆盖、既有建筑形态。在此基础上，引入计算流体力学（CFD）和辐射传热模型，对候选地块进行微气候环境的精细化模拟，分析不同季节、不同时段的风速风向、温度分布和太阳辐射强度，为建筑朝向、体型系数和开窗比例的科学确定提供量化支撑^[4]。同时，结合交通仿真算法，模拟项目建成后对周边路网交通压力的影响，评价出入口设置的合理性，优化交通组织方案。该路径不但可以实现规划方案的可视化展示，而且可以借助数据驱动的定量分析来保证规划决策的科学性、前瞻性，从源头上提高建筑与城市环境的和谐度。

3.2 驱动设计迭代优化的性能仿真与协同路径

设计阶段的数字孪生应用路径是性能仿真驱动的快速迭代和多方协同。利用参数化设计工具和数字孪生平台的深度接口，设计师可以建立参数化模型，将结构受力、能耗指标、采光效果、声学环境等性能参数关联起来，当设计师对某一设计变量进行调整时，结构受力、能耗指标、采光效果、声学环境等性能参数就会立即更新并反馈。利用嵌入的遗传算法等优化引擎，在大量的设计组合中自动寻优，得到美学、功能、经济性都好的最佳方案。从协同角度来讲，数字孪生平台创建了云端协同工作空间，建筑、结构、机电、景观等各个专业团队在同一模型上并行工作，实时共享设计变更和冲突信息。系统自动执行多维度的碰撞检测和规范合规性审查，把错漏碰缺消灭在萌芽状态。另外，用虚拟现实（VR）技术，业主和使用者可以沉浸式体验设计方案，提出直观的反馈，从而缩短设计确认周期。这一路径彻底改变了传统的串行设计模式，实现了设计质量和效率的双重飞跃。

表 2 数据清楚地显示了数字孪生在施工关键场景

中的明显效果。在传统的管理模式下，进度偏差一般要等到周例会或者月度汇报的时候才被发现，造成纠偏滞后；数字孪生依靠实时数据比对，把识别时间缩短到小时级，极大地提高了调度的灵活性。在安全管理上，全覆盖的智能监测把人工巡检的视觉盲区全部

消除，隐患无处藏身。材料损耗的精准控制依靠对进场、库存、使用环节的实时追踪，有效地防止了浪费。最根本的是设计变更引起的返工大幅减少，这是由于前期设计的深度优化和施工过程的精准执行所导致的，充分证明了数字孪生技术在降本增效方面所起的作用。

表 2 数字孪生在施工阶段关键场景应用效能提升数据

应用场景	传统管理模式指标	数字孪生赋能后指标	效能提升幅度
进度偏差识别	平均滞后发现时间：7 天	实时发现（< 1 小时）	响应速度提升 168 倍
安全隐患排查	人工巡检覆盖率：65%	智能监测覆盖率：100%	盲区消除率 100%
材料损耗控制	平均损耗率：4.5%	精准管控损耗率：1.2%	成本节约 3.3%
设计变更返工	平均每项目变更次数：25 次	平均每项目变更次数：6 次	返工率降低 76%

3.3 实现施工过程透明化的智能监控与调度路径

施工过程透明化智能监控与调度属于数字孪生落地的重要环节，其实施路径要依靠“感—传—知—控”一体化闭环。在施工现场广泛部署高清摄像头、环境监测仪、塔吊黑匣子、智能地磅、人员定位基站，系统实时采集人、机、料、法、环多维数据，映射到数字孪生体中，形成施工现场的透明工厂。另外，利用计算机视觉技术，系统自动识别未佩戴安全帽、违规闯入危险区域等行为，即时触发声光报警和推送通知。在进度控制上，数字孪生平台会把实际进度同 BIM 4D 计划模型自动对比，用热力图直观表现滞后区域，再依照资源投入情况智能剖析滞后原因，自动生成赶工建议方案。大型机械设备系统实时监测运行状态和负载情况，优化调度指令，防止闲置和冲突。该路径把施工全过程可视化、可追溯、可预测，把粗放式的现场管理升级为精细化的智能制造模式，保证工程按期优质交付。

3.4 构建资产长效价值的智慧运维与应急路径

运维阶段创建资产长效价值的智慧运维和应急路径，关键之处在于创建以数字孪生为基础的全生命周期资产管理及应急响应体系。数字孪生体会不断累积建筑运行时的能耗、设备状态、环境舒适度、结构健康等各类数据，用深度学习算法挖掘数据背后隐藏的规律，创建设备健康度评价模型和能耗基准线。系统根据预测结果自动生成预防性维护工单，优化备件库存管理，在保证舒适度的基础上动态调整暖通空调运行策略，达到极致节能的目的。数字孪生平台内置多种灾害情景库，一旦接收到火警、漏水或者结构异常信号，立即启动应急预案，在虚拟空间中推演灾害扩散趋势，规划最佳疏散路径，联动门禁、广播、排烟、消防系统进行自动化处置^[5]。同时所有的运维数据都

存入资产数字档案，为以后的改造扩建或者拆除回收提供准确的数据支持。该路径不但大大降低了运营成本，而且提高了建筑应对突发事件的韧性，使建筑全生命周期的社会效益最大化。

4 结束语

数字孪生技术作为建筑业数字化转型的核心驱动力，正在对建筑工程全生命周期的管理模式和价值创造逻辑进行全方位的重塑。从规划决策的宏观仿真到设计阶段的性能优化，从施工过程的透明管控到运维阶段的智慧预测，数字孪生依靠创建虚实映射、实时交互、数据闭环，很好地解决了传统建筑行业信息割裂、协同低效、管理粗放的难题。随着 5G、人工智能、边缘计算等先进技术不断发展融合，数字孪生将会在更深的层次、更广的范围内给建筑业高质量发展赋能。随着行业标准体系的完善和生态圈的形成，数字孪生不会只在单体项目上使用，而是会向城市群、基础设施网的宏观尺度发展，成为建设数字中国、实现碳达峰碳中和目标的重要技术基础。建筑行业要积极拥抱变革，加强技术创新和应用实践，共同开启智能建造的新篇章。

参考文献：

[1] 聂青.数字孪生驱动建筑工程协同管理[J].住宅与房地产,2026(05):4-6.
[2] 崔媛慧子,徐琳,肖青山.基于数字孪生技术的建筑工程造价管理研究[J].建筑与预算,2025(10):28-30.
[3] 东丹.建筑工程中智能化技术发展与应用研究[J].新城建科技,2025,34(10):25-27.
[4] 梁雅静.建筑工程管理中数字信息化技术应用研究[J].信息系统工程,2025(10):110-113.
[5] 罗程.数字孪生技术在建筑工程交付模型建设中的应用[J].中国房地产业,2025(27):10-13.