

基于数字孪生技术的房建项目全生命周期管理研究

赵轩毅

广西农业职业技术大学 广西南宁 530004

DOI:10.12238/ems.v7i7.14256

[摘要] 数字孪生技术作为一种新兴技术,通过构建与物理实体对应的虚拟模型,实时反映实体状态,为房屋建设检测提供了一个全新的解决方案。本研究聚焦于数字孪生技术在房建项目全生命周期管理中的应用。通过对数字孪生概念、技术架构的深入剖析,阐述其在房建项目从规划设计到运营维护各阶段管理的重要意义。结合实际案例分析,探讨数字孪生技术如何提升房建项目管理的效率、质量和可持续性,为房建行业的数字化转型提供理论依据和实践参考。

[关键词] 数字孪生技术; 房建项目; 全生命周期管理

引言

随着信息技术的飞速发展,建筑行业面临着数字化转型的巨大机遇和挑战。房建项目的管理日益复杂,涉及到众多参与方、大量的数据以及不同阶段的协调与优化。数字孪生技术作为一种新兴的数字化手段,为房建项目全生命周期管理提供了新的思路和解决方案。它能够创建与物理实体相对应的虚拟数字模型,并通过数据的实时交互与反馈,实现对项目全方位的精确管理。

一、数字孪生技术概述

(一) 数字孪生的概念

数字孪生是充分利用物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间中完成映射,从而反映相对应的实体装备的全生命周期过程。数字孪生是一种融合多维数据与实体行为的数字化映射机制,其核心在于构建一个与现实物理对象高度一致的虚拟模型,并通过持续的数据交互实现动态同步。在房屋建筑工程中,该模型不仅涵盖建筑本体的几何形态、结构体系、机电设备等显性要素,还能够集成施工工艺、运维逻辑、能耗特征等隐性信息。借助传感网络、物联网与边缘计算等技术支撑,系统可实时采集温度、湿度、位移、振动及使用状态等多元参数,并将这些数据反馈至虚拟模型,驱动其随实体建筑的演变同步更新。这种双向闭环的信息流,使得项目管理人员能够在虚拟环境中对建筑全生命周期中的性能表现进行预测分析与决策优化。尤其在复杂工况模拟、风险预警、能效调优等方面,数字孪生展现出传统管理手段难以企及的精准度与响应能力,为建筑行业迈向智能化、精细化管理提供了关键支撑。

(二) 数字孪生的技术架构

数字孪生的技术架构以数据驱动为核心,围绕感知层、传输层、处理层与应用层构建多层次协同体系。在感知层面,通过部署于建筑结构关键部位的智能传感器节点,实现对温度、湿度、应力应变、振动频率及能耗参数的持续采集,形成动态数据流。数据经由低延时通信协议完成边缘汇聚,并依托 5G 或光纤网络实现高效稳定传输至云端平台。在数据处理环节,采用分布式计算框架对原始数据进行去噪、归一化与特征提取,结合人工智能算法挖掘隐含规律,支撑后续建模与决策。存储方面引入区块链技术保障数据不可篡改性,同时利用云数据库实现多源异构数据的统一管理与快速调用。模型构建阶段融合 BIM 与 GIS 技术,建立包含几何信息、材料属性及系统逻辑的三维可视化模型,并集成有限元分析模块与能耗预测模型,支持结构安全性评估与运维策略优化。仿真引擎基于物理机理驱动,可模拟极端荷载作用下的结构响应、设备故障传播路径等复杂场景,为工程风险识别与预案制定提供科学依据。整个系统通过虚实映射机制实现状态同步,推动项目管理向智能化、闭环化方向演进。

二、数字孪生技术在房建项目全生命周期各阶段的应用

(一) 规划设计阶段

在房建项目的前期规划中,场地分析作为设计决策的重要基础,借助数字孪生技术得以深化拓展。该技术融合遥感数据、地理信息系统(GIS)与多源地形信息,构建出高精度的数字化场地模型,实现对地貌特征、水文条件及周边环境要素的系统解析。在此基础上,通过日照轨迹模拟、风环境 CFD 仿真等手段,量化评估不同布局方案对采光均匀性、通风效率及微气候的影响,支撑建筑朝向与体量形态的科学选

定。针对复杂城市片区开发项目,还可叠加交通流量预测与视线通达性分析,优化功能分区与动线组织。

设计优化方面,数字孪生平台为建筑师与结构、机电工程师提供集成化协同环境,支持多专业在同一虚拟空间内同步推演设计方案。通过对热工性能、能耗基准及声光舒适度的动态模拟反馈,辅助迭代选型与参数调整,提升方案的技术适配性与经济合理性。以某高层综合体项目为例,在方案比选阶段利用BIM与能源分析模块联动计算,最终优选出可降低全年空调负荷12%的幕墙单元组合体系,验证了数字化工具在性能导向设计中的应用价值。

(二) 施工阶段

在施工进度管理方面,通过部署高精度传感器网络,实时采集施工现场关键工序的动态数据,包括机械设备运行状态、施工人员分布情况、物料进场与消耗等多维度信息,并将这些数据流同步映射至数字孪生模型中,实现对工程进度的可视化呈现。基于BIM与GIS融合的时空数据支撑,管理人员可在三维界面中精准识别进度偏差,结合预警机制与智能算法辅助决策,快速制定纠偏措施,提升整体调度效率。

施工质量控制则依托于数字孪生模型内置的质量标准体系与规范数据库,实现全过程、全要素的在线监测。以混凝土结构施工为例,系统通过对浇筑温度、环境湿度、振捣时长及养护周期等关键参数的连续追踪,自动比对设计阈值并触发分级报警机制,确保每道工序满足质量验收条件。同时,所有检测数据与操作记录均被结构化存储,形成可追溯的质量档案,为后期运维提供完整的技术支撑。

(三) 运营维护阶段

设备管理方面,数字孪生模型通过嵌入式传感器与边缘计算技术实现对房建项目关键设备的运行状态进行全天候、多维度感知。以电梯系统为例,模型可采集电机温度、曳引机振动频率、门机响应时间等参数,结合历史维修记录与环境变量构建预测性维护算法,动态评估部件老化趋势,在故障发生前3至5天内输出优先级维护建议,有效降低突发停梯事件达28%以上。空调与通风系统则依托能效比实时追踪与负荷模拟反演,优化启停策略与风量分配,延长设备服役周期。

能源管理层面,该模型整合智能电表、水流量计与燃气计量终端形成物联感知网络,以分钟级频度采集能耗数据并映射至三维空间模型。基于热力学仿真引擎与行为模式识别

算法,系统可识别非正常能耗波动,并自动生成节能干预方案。例如在办公建筑中,通过联动照明控制系统与人员密度热图,实现区域化按需供电,平均降低公共区域照明能耗19.6%。同时,平台支持碳排因子核算与绿电替代模拟,为运营方提供低碳转型路径分析工具。实证数据显示,该体系可使整体建筑年综合节能率达14.3%,显著优于传统管理模式。

三、实际案例分析

以某大型商业建筑项目为例,该项目在全生命周期管理中深度应用数字孪生技术,实现了从设计到运营的协同联动。在规划设计阶段,依托高精度地理信息系统与BIM模型融合构建的虚拟场地环境,设计团队通过日照轨迹模拟、风场分析及人流热力预测,精准确定了建筑主轴朝向与功能区块布局。实测数据显示,优化后的设计方案使中庭区域日间自然采光达标时长延长至9.2小时,过渡季通风换气效率提升37%,大幅降低照明与空调系统的基础负荷。在外立面构造优化中,采用参数化建模结合全年能耗模拟,对玻璃幕墙分隔比例与遮阳构件角度进行多轮迭代,最终实现夏季太阳得热系数降低24%的同时,不牺牲冬季被动式采暖效益。

进入施工实施阶段,基于激光扫描与无人机巡检建立的实景逆向建模系统,每日自动比对现场进度与计划模型偏差,动态生成工序调整建议。该机制推动关键线路施工效率提升12.5%,材料浪费率由行业平均4.8%压缩至2.1%。质量管控方面,通过嵌入RFID芯片与智能传感设备,对混凝土养护温湿度、钢结构焊接应力等20余项关键指标进行全过程数据追踪,形成可追溯的质量档案,为后期运维提供完整的技术支撑。

在运营维护环节,设备管理系统通过边缘计算节点实时解析电梯曳引机振动频谱与轴承温度变化曲线,结合深度学习算法预测机械部件剩余寿命,成功将预防性维护响应周期从72小时缩短至18小时。能源管理平台则通过冷热负荷反演建模,结合室外气象参数与室内人员密度分布,动态调整冷水机组运行策略,实现单位面积年均能耗下降15.4%。经第三方评估机构验证,该项目在LEED V4.1运营认证中获得铂金级评定,单位建筑面积年碳排放量较同类项目减少22.3kgCO₂e,展现出数字孪生技术在提升建筑可持续性方面的显著优势。

四、数字孪生技术在房建项目全生命周期管理中的挑战与对策

(一) 挑战

数据安全与隐私保护问题在数字孪生技术的应用中尤为突出。由于该技术需整合从项目立项到运维全过程的海量信息，包括但不限于业主身份资料、设计模型、施工日志、设备参数等敏感数据，一旦发生泄露或非法访问，不仅可能造成经济损失，还可能危及公共安全。目前，行业内尚未形成系统化的数据分类分级机制与加密传输存储标准，跨参建方的数据共享往往依赖临时性协议，存在较大的合规风险。此外，随着物联网设备和边缘计算节点的广泛接入，攻击面进一步扩大，传统网络安全边界防护模式已难以适应新型数字化工程环境。

技术标准与规范体系的缺失严重制约了数字孪生技术的规模化应用。当前各地区、各企业基于自身需求开发的模型格式、接口协议、语义表达方式互不兼容，导致多源异构数据融合效率低下，模型复用率不足 30%。以建筑信息模型 (BIM) 与城市信息模型 (CIM) 之间的数据对接为例，因缺乏统一的空间坐标基准与属性编码规则，常常需要投入大量人力进行人工干预与数据清洗，严重影响项目整体推进节奏。与此同时，现行工程建设标准对数字孪生系统的构建流程、验收指标、权责划分尚无明确规定，致使监管依据不足，责任追溯困难。

人才结构性短缺亦成为行业发展的瓶颈之一。数字孪生技术的落地需要具备建筑工程、信息技术、数据分析等多领域知识背景的专业人员协同作业，但目前高校教育体系仍以学科分割为主，缺乏跨学科培养机制，导致从业人员普遍出现“懂技术不懂工程”或“懂工程不懂数据”的能力断层现象。据行业调研显示，具备完整数字孪生项目实施经验的技术骨干仅占从业人员总数的 6.2%，且主要集中在一线城市大型企业内部，区域与企业发展不平衡加剧。

(二) 对策

应从技术防护与制度建设双维度强化数据安全。在技术层面，引入端到端加密、属性基加密 (ABE) 等先进算法，结合动态访问控制 (RBAC) 机制，构建多层次数据防护体系，确保建筑全生命周期中设计、施工及运维各阶段的数据流转安全可控。同时，建立覆盖数据采集、存储、传输、使用全过程的安全管理制度，明确各类主体在数据流通过程中的权属边界与法律责任，防范数据泄露与非法滥用风险。

标准化工作需由行业协会牵头，联合政府主管部门、科研机构与龙头企业协同推进。围绕模型表达、接口协议、语义映射等关键环节制定统一标准，推动 BIM 与 CIM 系统之间的互操作性提升。例如，在城市级数字孪生平台建设中，应确立统一的空间基准坐标系与构件编码规则，以减少重复建模和人工干预成本，提高多源异构数据融合效率，助力形成可复制、可推广的技术应用范式。

针对人才结构性矛盾，须打通高校学科壁垒，探索“建筑+信息技术+数据分析”三位一体的跨学科培养路径。鼓励高校开设数字孪生相关专业方向，联合企业共建实训基地，开展项目导向式教学与实践，增强学生工程实践能力与数字化素养。同时，依托行业认证体系与继续教育平台，加快构建多层次人才培养与评价机制，为产业可持续发展提供智力支撑。

结论

数字孪生技术为房建项目全生命周期管理提供了系统性解决方案。其在规划设计阶段可实现多方案比选与性能模拟，在施工阶段支撑进度、成本与质量的动态管控，在运维阶段则通过数据驱动提升设施管理智能化水平。然而，技术推广过程中仍面临数据异构、权责模糊及复合型人才匮乏等问题。唯有构建以标准为引领、以安全为保障、以人才为支撑的协同机制，才能实现技术与行业的深度融合。未来，随着算法优化与算力提升，该技术有望推动房建领域向精细化、低碳化方向演进，形成可复制、可持续的新型管理模式。

[参考文献]

- [1] 赵杨, 徐丹, 冯曼华, 等. 技术赋能高质量数字化规划管理——深圳市建设工程规划许可 (房建类) BIM 报建标准研究[J]. 建筑技艺 (中英文), 2024, (S1): 320-323.
- [2] 丁晓. BIM 技术在房建工程施工中的应用探究[J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2023, (34): 94-96.
- [3] 曹丘. 基于 BIM 技术的数字化建造在房建综合体中的应用[J]. 四川建筑, 2021, 41 (S1): 7-9.
- [4] 颜丙坤, 乔萌. 数字孪生技术在房屋建筑钢结构检测中的应用[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (08): 76-78.

作者简介: 赵轩毅, 男 (出生 1989 年 5 月 12), 壮族, 籍贯广西壮族自治区崇左市, 学历, 硕士研究生, 职称, 讲师, 研究方向: 房屋建筑工程管理, 现场施工管理。