文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4651 /（中图刊号）：860GL005

基于 BIM 与数字孪生的智慧住宅全生命周期管理路径探索

张贝贝
林州市水利服务中心
DOI:10.32629/btr.v8i6.4804

[摘 要] 随着城市化进程加速与“双碳”目标的深入推进,传统住宅建设与管理模式已难以满足高质量、可持续、智能化的发展需求。建筑信息模型(BIM)与数字孪生(Digital Twin)技术作为新一代信息技术与建筑业深度融合的关键载体,为实现智慧住宅全生命周期精细化、协同化、智能化管理提供了全新路径。本文系统梳理了BIM与数字孪生的融合逻辑及其在建筑领域的应用现状,深入剖析智慧住宅全生命周期各阶段(规划、设计、施工、运维、改造与拆除)的管理痛点,提出融合BIM与数字孪生的智慧住宅全生命周期管理框架,并详细阐述其在各阶段的具体应用模式与实施路径。研究表明,通过构建以BIM为基础、数字孪生为驱动的集成化信息平台,可有效打通数据壁垒,实现物理空间与虚拟空间的实时映射与动态交互,显著提升住宅项目的决策效率、资源利用效率、运维响应能力与可持续发展水平。最后,本文探讨了当前面临的挑战并提出相应对策,为推动智慧住宅高质量发展提供理论支撑与实践参考。
[关键词] BIM；数字孪生；智慧住宅；全生命周期管理；智能建造；可持续发展
中图分类号：TU17 文献标识码：A

Exploration of Full Lifecycle Management Pathways for Smart Homes Based on BIM and Digital Twin

Beibei Zhang
Linzhou Water Conservancy Service Center

[Abstract] With the acceleration of urbanization and the deepening implementation of the "dual carbon" goals, traditional residential construction and management models are no longer adequate to meet the demands for high-quality, sustainable, and intelligent development. Building Information Modeling (BIM) and Digital Twin technology, as key carriers of the deep integration between new-generation information technology and the construction industry, offer innovative pathways for achieving refined, collaborative, and intelligent full lifecycle management of smart homes. This paper systematically reviews the integration logic of BIM and Digital Twin and their current application status in the construction field, thoroughly analyzes the management challenges at each stage of the smart home lifecycle (planning, design, construction, operation, maintenance, renovation, and demolition), and proposes a full lifecycle management framework for smart homes that integrates BIM and Digital Twin. It further elaborates on the specific application modes and implementation pathways at each stage. Research indicates that by constructing an integrated information platform based on BIM and driven by Digital Twin, data barriers can be effectively overcome, enabling real-time mapping and dynamic interaction between physical and virtual spaces. This approach significantly enhances decision-making efficiency, resource utilization, operational response capabilities, and sustainability levels of residential projects. Finally, this paper discusses current challenges and proposes corresponding countermeasures, providing theoretical support and practical references for promoting the high-quality development of smart homes.
[Key words] BIM; Digital Twin; Smart Homes; Full Lifecycle Management; Intelligent Construction; Sustainable Development

引言

长期以来,我国住宅产业仍存在“高投入、高消耗、高排放、低效率”的粗放式发展模式,项目各阶段信息割裂、协同不足、运维滞后等问题突出,难以适应新时代对绿色、健康、智能、韧

性住宅的需求。在此背景下，“智慧住宅”概念应运而生，其核心在于通过物联网(IoT)、大数据、人工智能(AI)、云计算等新一代信息技术，实现住宅从“建造物”向“智能生命体”的转变。而BIM作为贯穿建筑全生命周期的信息集成与协同平台，为智慧住宅提供了坚实的数据基础；数字孪生技术则通过构建物理实体的高保真虚拟映射，实现状态感知、仿真预测与智能决策，为智慧住宅注入了“大脑”与“神经”。将BIM与数字孪生深度融合，构建覆盖住宅“规划—设计—施工—运维—改造—拆除”全生命周期的智能管理体系，不仅是技术发展的必然趋势，更是实现住宅产业转型升级、落实国家“双碳”战略、提升人居环境质量的关键路径。

1 BIM与数字孪生的融合逻辑

BIM可视为数字孪生在建筑领域的“静态骨架”与“初始基因”，提供了建筑从无到有的完整几何与语义信息；而数字孪生则是在BIM基础上，通过接入实时传感数据、环境数据、用户行为数据等，赋予建筑“动态生命”与“智能感知”能力[1]。二者关系可概括为：BIM是数字孪生的基础，数字孪生是BIM的深化与延伸。融合后的系统既能保留BIM的结构化信息优势，又能实现数字孪生的实时感知与智能决策能力，形成“静态+动态”、“历史+实时”、“设计+运营”的闭环管理体系。

2 智慧住宅全生命周期管理痛点分析

传统住宅项目管理呈现明显的阶段性割裂，各阶段目标不一致、数据不共享、责任不连贯，导致资源浪费与效率低下。(1)规划阶段：缺乏对区域人口、交通、能源、环境等多源数据的综合分析，规划方案科学性不足。(2)设计阶段：专业协同困难，设计变更频繁，绿色性能与用户体验难以量化评估。(3)施工阶段：进度、质量、安全依赖人工管理，信息滞后，返工率高；建材溯源困难，碳排放难以精准核算。(4)运维阶段：设施设备管理依赖纸质台账或孤立系统，故障响应慢；能耗高，用户舒适度与个性化服务缺失。(5)改造与拆除阶段：缺乏建筑构件材料信息，难以实现精准拆解与资源回收，造成大量建筑垃圾。上述痛点的核心在于数据孤岛与缺乏全生命周期视角。BIM与数字孪生的融合正是破解这一难题的关键。

3 融合BIM与数字孪生的智慧住宅全生命周期管理框架

本文提出“1平台+3层架构+6阶段协同”的智慧住宅全生命周期管理框架。

1平台：基于云原生的BIM+数字孪生集成平台，作为数据汇聚、处理与服务的核心中枢。

3层架构：(1)数据感知层：部署IoT传感器(温湿度、能耗、安防、结构健康等)、BIM模型、GIS数据、用户行为数据等；(2)模型与计算层：构建轻量化BIM模型，融合实时数据形成动态数字孪生体，支持仿真、AI分析与可视化；(3)应用服务层：面向不同阶段、不同角色提供定制化应用，如智能设计审查、施工进度模拟、预测性维护、碳足迹追踪等。

6阶段协同：确保数据在规划、设计、施工、运维、改造、拆除各阶段无缝流转与价值延续。

该框架强调“一次建模、多次复用、持续更新”，实现从“建造交付”向“服务交付”的转变。

4 基于BIM与数字孪生的智慧住宅各阶段应用路径详解

4.1规划阶段：数据驱动的科学决策

在规划阶段，传统住宅选址与布局多依赖经验判断，难以兼顾生态、交通、能源与社会公平等多重目标。而依托城市信息模型(CIM)平台，可将区域级BIM、人口热力图、公共交通流量、历史气象数据及碳排放清单等多源异构信息进行融合，构建覆盖城市尺度的宏观数字孪生场景。在此基础上，借助人工智能与空间分析算法，对不同住宅开发方案进行多维度仿真推演：例如模拟建筑群布局对区域风环境、日照时长及热岛效应的影响，动态优化容积率、建筑密度与绿地率等关键指标；同时耦合建筑碳排放模型，预评估不同选址与体量组合下的全生命周期隐含碳与运行碳强度，从而支撑绿色低碳导向的科学决策[2]。这种以数据驱动的规划方法，不仅提升了方案的环境适应性与资源效率，也为后续设计阶段设定了清晰的性能边界。

4.2设计阶段：多专业协同与性能优化

各专业方在同一BIM环境中开展正向设计，模型中的墙体、梁柱、管线等构件均携带几何、材料、性能等语义信息，系统可自动完成碰撞检测与净高分析，显著减少因专业割裂导致的设计冲突与施工返工。更重要的是，绿色建筑评价标准(如LEED、中国《绿色建筑评价标准》)可被嵌入设计流程，实现能耗模拟、自然采光系数计算、室内声学环境预测等性能指标的实时反馈与迭代优化。同时，通过整合用户调研数据、社区行为画像或智能家居配置需求，设计团队可在虚拟空间中模拟不同户型对家庭生活动线、社交互动及设备集成度的影响，推动“以人为本”的个性化住宅设计。最终输出的设计成果不仅是一套施工图纸，更是一个包含完整几何、物理与功能信息的“数字基因库”，为后续建造与运维奠定坚实基础。

4.3施工阶段：精益建造与透明管理

施工阶段是连接虚拟模型与物理实体的桥梁，也是资源密集与风险高发的关键期。通过将BIM模型与施工进度计划(4D)、成本预算(5D)深度关联，项目管理者可在数字孪生平台上实现可视化进度推演与资源调度优化。同时，利用无人机航拍、地面激光扫描等技术定期采集施工现场点云数据，并与BIM模型进行自动比对，系统可精准识别实际施工偏差，及时预警质量隐患。此外，在工地广泛部署物联网(IoT)设备——如集成定位与生命体征监测的智能安全帽、扬尘噪声传感器、塔吊应力监测仪等——这些实时数据流汇聚至数字孪生中枢，形成对“人、机、料、法、环”的全方位感知与闭环管理[3]。尤为关键的是，每一块建材在出厂时即被赋予唯一身份标识(如二维码或RFID标签)，并与BIM中的对应构件绑定，实现从工厂生产、物流运输到现场安装的全链条溯源，为后期碳足迹核算、质量追溯及绿色认证提供可靠依据，真正践行精益建造与透明管理理念。

4.4运维阶段：智能服务与预测性维护

此时，原始BIM模型被升级为具备实时交互能力的运维级数字孪生体，持续接入楼宇自控系统(BAS)、智能家居终端、安防监控网络及住户行为反馈等多维数据流。在此基础上，系统可实现多项智能化服务：在能源管理方面，基于历史与实时用电、用水数据，结合天气预报与电价策略，AI算法可动态调节空调、新风与照明运行参数，在保障舒适度的前提下降低能耗10%~20%；在设施维护方面，通过振动、温度传感器对电梯、水泵、风机等关键设备进行状态监测，提前预警潜在故障，实现从“被动维修”向“预测性维护”的转变；在应急响应方面，一旦发生火灾，系统可自动定位火源位置，结合实时人流分布规划最优疏散路径，并联动启动排烟、喷淋与广播系统；在用户服务层面，系统还能根据住户作息习惯自动调节室内环境，并推送快递到达、访客预约等个性化社区服务，显著提升居住体验与安全感。

4.5改造阶段：精准评估与方案生成

传统改造常因缺乏原始资料而陷入“盲拆盲改”困境。而依托数字孪生平台，系统可快速调取该住宅的原始BIM模型、材料清单、隐蔽管线布局及历次维修记录，并结合当前结构健康监测数据(如沉降、裂缝)，对改造可行性进行精准评估。AI辅助设计模块可基于用户需求(如适老化、空间扩容)自动生成多种改造方案，并在虚拟环境中模拟其对能耗、采光、结构安全及邻里关系的影响，辅助业主科学决策[4]。改造施工过程同样纳入数字孪生体系，确保新增系统与既有设施无缝衔接，避免信息断层，为下一次生命周期迭代积累完整数据链。

4.6拆除阶段：绿色回收与资源循环

由于孪生体中完整记录了每一构件的材质类型、规格尺寸、有害物质含量及连接方式，系统可自动生成精细化的拆解顺序图与材料分类回收方案。例如，预制混凝土板可整体吊装再利用，铝合金窗框可熔炼再生，电线铜芯可高效提取。这种“精准拆除”模式极大减少了建筑垃圾产生，提高了资源回收率。所有拆除与回收数据亦被回传至平台，反哺新材料研发、构件标准化设计及绿色建造规范的优化，真正形成“设计—建造—使用—回收—再设计”的闭环生态，推动住宅产业迈向可持续未来。

5 实施挑战与对策建议

尽管前景广阔，BIM与数字孪生在智慧住宅中的深度融合仍面临多重挑战：(1)标准体系缺失：BIM建模标准、数据接口协议、数字孪生成熟度等级等缺乏统一规范，导致系统互操作性差。对策：加快制定国家/行业级标准，推广IFC、CityGML等开放格式，建立数据治理机制。(2)成本与收益失衡：前期软硬件投入大，短期经济回报不明显，开发商动力不足。对策：政府可通过补贴、容积率奖励等政策激励；探索“建设+运营”一体化商业模式，将运维收益前置于建设阶段。(3)数据安全与隐私保护：住宅涉及大量住户隐私数据，如何在利用数据价值与保护隐私间取得平衡至关重要。对策：采用联邦学习、边缘计算等技术实现“数据可用不可见”；建立严格的数据访问权限与审计机制。(4)人才结构断层：既懂建筑又精通IT的复合型人才稀缺。对策：推动高校跨学科教育改革，设立“智能建造”专业；加强在职人员数字化技能培训。(5)技术集成复杂度高：BIM、IoT、AI、云平台等多技术栈集成难度大，系统稳定性与扩展性面临考验。对策：采用微服务架构与低代码平台，降低开发门槛；优先在标杆项目中试点验证，逐步推广。

6 结语

BIM与数字孪生的深度融合，为智慧住宅全生命周期管理提供了前所未有的技术可能性与实施路径。通过构建“静态BIM+动态孪生”的集成化信息平台，不仅能够有效解决传统住宅项目中存在的信息割裂、协同低效、运维滞后等核心痛点，更能实现从“建造产品”向“提供服务”的范式转变，推动住宅产业向绿色化、工业化、智能化、服务化方向转型升级。未来，随着5G、AI大模型、区块链等技术的进一步成熟，BIM与数字孪生将在智慧住宅中发挥更深层次的作用——例如，利用大模型实现自然语言驱动的智能运维指令，或通过区块链确保建材碳足迹数据的不可篡改。可以预见，以数据为纽带、以孪生为引擎的智慧住宅，将成为实现“人民美好生活向往”与“城乡建设绿色低碳发展”双重目标的重要载体。

[参考文献]

[1]郭兴海,李建宏,丁孝朋.BIM+数字孪生鹰眼(全景图技术)在住宅建筑施工项目中的应用[C]//中国图学学会土木工程图学分会,《土木建筑工程信息技术》编辑部.《第12届BIM技术国际交流会——数智建造助力城市高质量发展》论文集.中外建设信息有限责任公司;北京市建筑设计研究院股份有限公司;中建八局(北京)建设有限公司,2025:235-242.

[2]刘俊睿.智慧建造理念在住宅建筑工程中的应用研究[J].居舍,2025,(29):148-151.

[3]赵星瑞.基于数字孪生技术的装配式住宅质量安全研究[J].居舍,2024,(20):177-180.

[4]刘书敬.探究智慧建造在住宅建筑工程安全施工管理中的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(04):165-167.