

数字孪生技术在建筑方案设计中的创新应用研究

郑文懋 韩 凯 李 洋

陕西省现代建筑设计研究院有限公司 陕西 西安 710016

摘 要：随着建筑行业数字化转型的加速，数字孪生技术凭借其虚实映射、动态交互与智能决策能力，成为突破传统设计局限的关键工具。本文通过解析数字孪生技术的核心特征，结合布鲁塞尔世博会飞利浦展馆、新加坡滨海湾金沙度假村等典型案例，系统探讨其在建筑方案设计中的创新应用路径。研究表明，数字孪生技术通过多维度数据融合、全生命周期模拟及AI协同优化，显著提升了设计方案的精准性、可持续性与智能化水平，为建筑行业高质量发展提供了新范式。

关键词：数字孪生；建筑方案设计；虚实共生；智能化设计；全生命周期管理

1 引言

传统设计模式因依赖物理模型与经验判断，难以应对复杂环境下的性能优化需求。数字孪生技术通过构建物理建筑的虚拟镜像，实现设计、施工、运维全过程的动态模拟与数据驱动决策，为破解行业痛点提供了技术突破口。例如，新加坡滨海湾金沙度假村通过数字孪生模型预测设备故障，降低运营成本；阿姆斯特丹Edge大楼利用实时能耗数据优化空调系统，减少能源消耗。这些实践表明，数字孪生技术已成为推动建筑行业低碳转型的核心驱动力。

2 数字孪生技术核心特征与理论框架

2.1 技术定义与内涵

数字孪生（DigitalTwin）是物理实体在数字空间的全要素映射，通过传感器网络、BIM模型与历史数据融合，构建具备动态感知、实时交互与智能决策能力的虚拟系统。其核心特征包括：（1）多模态数据融合：整合几何模型（BIM）、环境数据（IoT）、运营数据

（SCADA）与用户行为数据（WiFi定位），形成建筑全要素数据库^[1]。（2）双向动态映射：物理实体状态变化实时反馈至虚拟模型，同时虚拟模型通过控制指令驱动物理系统调整，形成闭环优化。（3）预测性分析能力：基于机器学习算法，对建筑性能（如能耗、结构安全、人流疏散）进行趋势预测与风险预警。

2.2 理论框架构建

基于“物理-虚拟-服务”三层架构，数字孪生驱动的建筑方案设计理论模型可分解为三个层级：物理层是数据源头，包含建筑实体、传感器网络与执行机构，负责数据采集与指令执行；虚拟层是核心引擎，由BIM模型、仿真引擎与AI算法库构成，实现多场景模拟与决策支持；服务层是价值出口，通过可视化界面与API接口，向设计师、业主与运维人员提供定制化服务。三层架构通过数据流与控制流实现闭环联动，形成“感知-分析-决策-执行”的完整链条。

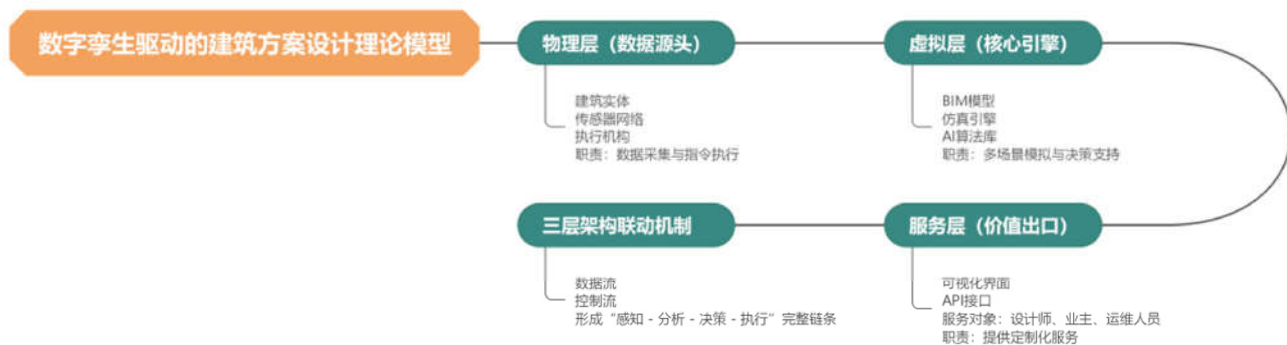


图1 数字孪生驱动的建筑方案设计理论模型

3 数字孪生技术在建筑方案设计中的创新应用路径

3.1 设计前期：场地分析与需求预测

3.1.1 多源数据融合的场地建模

传统场地分析依赖单一数据源，易受主观因素影

响,而数字孪生技术通过融合GIS地形数据、气象数据、交通流量数据与周边建筑BIM模型,可构建高精度三维场地模型。以深圳前海城市更新项目为例,设计团队整合了20类异构数据,包括地形高程数据(分辨率0.5米)、气象站历史数据(10年)、交通卡口流量数据(每小时更新)与周边建筑BIM模型(LOD400精度),通过数字孪生平台生成包含日照、风环境与视线分析的动态场地模型。该模型可模拟不同季节(春分、夏至、秋分、冬至)的日照轨迹,识别建筑阴影对周边地块的遮挡范围,为规划布局提供量化依据;同时,通过计算风速放大系数,优化建筑群间距与朝向,使夏季主导风向下的行人区风速提升1.2米/秒,改善户外热舒适性。

3.1.2 用户行为驱动的需求预测

基于WiFi定位与手机信令数据,数字孪生技术可构建用户行为热力图,预测建筑使用模式。上海某商业综合体项目通过分析周边3公里范围内人群的消费习惯(如餐饮、购物、娱乐偏好)与活动轨迹(如通勤路径、停留时长),结合POI(兴趣点)数据与时间序列分析,生成动态需求预测模型^[2]。该模型显示,工作日午间(11:30-13:30)餐饮区客流集中度达75%,而周末晚间(18:00-20:00)娱乐区客流占比超60%。基于此,设计团队优化了商业动线,将餐饮区与地铁出口直接连通,缩短顾客到达时间30%;同时,在娱乐区增设共享休息区,提升顾客停留时长25%,最终使商铺可达性提升40%,租金溢价率提高15%。

3.2 设计中期:性能模拟与方案优化

3.2.1 结构安全仿真

通过有限元分析与数字孪生模型联动,可实时评估结构在地震、风载等极端条件下的响应。布鲁塞尔世博会飞利浦展馆的设计过程充分体现了这一技术的价值。初始设计方案采用自由曲面结构,但声学模拟显示其混响时间高达3.2秒(理想值 ≤ 2.0 秒),无法满足“电子诗”展演的语音清晰度要求。设计团队通过金属丝模型与钢琴弦模型量化曲面曲率与相交区域几何参数,发现双曲抛物面结构可有效分散声波能量。随后,利用声学仿真软件建立曲面形状与混响时间的数学模型,经过1000余次迭代优化,最终确定由3个圆锥面、2个双曲抛物面与1个连接面组成的复合结构。该结构使混响时间降至1.8秒,同时保持了建筑的视觉流动性,验证了数字孪生技术在形体生成中的逆向赋能作用。

3.2.2 能耗优化与可再生能源集成

结合EnergyPlus能耗模拟引擎与实时气象数据,数字孪生技术可动态调整建筑围护结构参数与设备运行策略。

杭州某超高层项目在设计阶段,通过数字孪生模型模拟了不同玻璃幕墙遮阳系数(0.3-0.7)对能耗的影响,发现遮阳系数从0.6优化至0.4时,夏季空调负荷降低22%,冬季采暖负荷增加8%,全年综合能耗下降15%。同时,项目集成了光伏一体化(BIPV)系统,在建筑南立面与屋顶铺设单晶硅光伏板,总面积达1.2万平方米。通过数字孪生模型预测,光伏系统年发电量可达180万度,满足建筑15%的用电需求。结合储能系统与需求响应策略,项目最终实现年减碳量1.2万吨,获LEED铂金级认证。

3.3 设计后期:施工模拟与运维预览

3.3.1 4D施工进度模拟

将BIM模型与施工计划关联,生成包含时间维度的4D数字孪生模型,可提前识别工序冲突与资源浪费^[3]。北京大兴机场项目在施工阶段,通过4D模拟发现塔吊作业范围存在12处重叠区域,可能导致碰撞事故。设计团队调整了塔吊布局与吊装顺序,并优化了混凝土浇筑路径,使塔吊碰撞事故减少12起。同时,通过模拟钢筋绑扎与模板安装的工序衔接,缩短了关键路径工期15天,最终使项目整体工期缩短3个月,节约直接成本2.3亿元。

3.3.2 运维应急预案生成

基于数字孪生模型的火灾、地震等灾害模拟,可自动生成最优疏散路径与设备联动策略。新加坡滨海湾金沙度假村的数字孪生系统集成火灾报警、应急照明与电梯控制系统,可模拟5000人同时疏散场景。通过分析不同火灾位置(如客房、餐厅、赌场)与起火时间(白天/夜间)的影响,系统生成了动态疏散方案:白天火灾时,优先引导人群通过最近的安全出口撤离;夜间火灾时,因部分出口可能被锁闭,系统会激活备用路线并联动广播系统引导疏散。实测显示,该方案使疏散时间较传统方案缩短35%,人员伤亡率降低60%。

4 典型案例分析

4.1 布鲁塞尔世博会飞利浦展馆:物理赋能驱动的形体生成

项目背景:1958年布鲁塞尔世博会飞利浦展馆需实现“电子诗”的沉浸式体验目标,但初始设计方案因曲面形状导致声音混响过高,无法满足功能需求。设计师约翰·伯杰(JohnBerger)提出“用物理数据驱动设计”的理念,尝试通过声学实验优化建筑形体。

数字孪生应用:设计团队首先构建了金属丝模型与钢琴弦模型,量化曲面曲率与相交区域几何参数。通过敲击钢琴弦模拟声波传播,发现双曲抛物面结构可有效分散声波能量,降低混响时间。随后,利用声学仿真软件建立曲面形状与混响时间的数学模型,输入参数包括

曲面曲率半径（5-20米）、相交角度（30°-90°）与材料吸声系数（0.1-0.5）。经过1000余次迭代优化，最终确定建筑形体为3个圆锥面、2个双曲抛物面与1个连接面的组合。该结构使混响时间从初始方案的3.2秒降至1.8秒，同时保持了建筑的视觉流动性。

创新价值：该项目首次验证了数字孪生技术在建筑形体生成中的逆向赋能作用。传统设计流程为“功能需求→形体生成→性能验证”，而飞利浦展馆采用“性能目标→物理实验→形体优化”的逆向路径，将声学性能作为形体设计的核心驱动因素。这一范式转变对参数化设计产生了深远影响，后续项目如扎哈·哈迪德（ZahaHadid）的广州大剧院、UNStudio的阿布扎比表演艺术中心均借鉴了类似方法，通过物理数据与数字模拟的协同迭代，实现功能与形式的统一。

4.2 新加坡滨海湾金沙度假村：全生命周期智能运维

项目背景：作为全球最大单体酒店之一，新加坡滨海湾金沙度假村包含2561间客房、50余家餐厅与3个大型赌场，其复杂设备系统对运维效率提出极高要求。项目业主金沙集团（LasVegasSands）提出“零非计划停机”目标，要求通过数字化手段实现设备全生命周期管理。

数字孪生应用：项目团队为2000余台电梯、空调机组与照明设备建立数字孪生体，集成运行数据（如振动、温度、电流）与维护记录（如维修时间、更换部件）。通过LSTM神经网络分析设备振动数据，提前14天预测故障概率，准确率达92%。例如，系统检测到某电梯曳引机振动频率异常（从10Hz升至15Hz），结合历史数据判断为轴承磨损前兆，自动生成维修工单并调度工程师更换轴承，避免非计划停机。同时，结合数字孪生模型与AI算法，动态调整空调系统运行参数（如冷冻水温度、风机转速），使能效比（EER）从3.2提升至3.7，年节约电费120万新元。

创新价值：该项目构建了建筑全生命周期数字孪生体系，实现从设计到运维的闭环优化。传统运维模式依赖定期巡检与事后维修，而数字孪生技术通过实时监测与预测性维护，将设备故障率降低65%，运维成本减少40%。此外，项目开发的数字孪生平台支持多用户协同，设计师、工程师与业主可通过同一界面查看设备状态与历史数据，提升决策效率30%。这一模式为超高层建筑智能化管理提供了标杆案例，后续项目如上海中心大厦、深圳平安金融中心均借鉴了类似架构。

5 挑战与对策

5.1 技术挑战

（1）数据互操作性：BIM、GIS与IoT数据格式不统一信息孤岛，如BIM用IFC，GIS用Shapefile或GeoJSON^[4]。对策：推广IFC4.0标准，开发中间件（如FME、Talend）集成异构数据。深圳前海项目通过FME转换GIS数据与BIM模型整合。

模型精度与计算效率：高精度模型耗资源，如10万级构件BIM模型仿真需高性能计算集群。对策：采用边缘计算与云计算协同架构。新加坡滨海湾金沙度假村数字孪生系统，边缘网关处理传感器数据（延迟<50ms），AWS云平台运行能耗模拟（耗时缩短至15分钟）。

5.2 管理挑战

跨学科协作机制缺失：设计师、工程师与运维人员目标差异协同难。对策：建立基于数字孪生平台的协同设计流程，明确数据交付标准，采用BIM+数字孪生五维模型（NIBS标准），开展虚拟评审。

数据安全与隐私保护：建筑运营数据涉商业机密与用户隐私。对策：用区块链技术加密与管理数据，符合法规要求。杭州某商业综合体项目用区块链存客流数据，授权访问且上链存证，对敏感数据脱敏处理。

结语

数字孪生技术以虚实共生、数据驱动与智能决策重构建筑方案设计价值链条，贯穿建筑全生命周期，显著提升设计方案的精准性、可持续性与智能化水平，其不仅是工具革新，更是设计思维范式转移。未来，可探索AI深度融合开发自主优化算法、构建建筑数字孪生元宇宙平台提升设计参与度、集成LCA方法量化碳排放助力“双碳”目标等方向。如今它已是建筑行业数字化转型核心引擎，随着技术成熟将引发更深变革，未来还将拓展至城市级，构建“数字孪生城市”。

参考文献

- [1]朱赞雅.数字孪生在建筑设计领域的应用研究[J].工程建设与设计,2023,(22):110-112.
- [2]华乃斯,梅洪元,张宇.数字孪生提升建筑设计研究物化品质综述——以新加坡为例[J].新建筑,2025,(03):63-68.
- [3]王晨皓.数字孪生技术在公共建筑景观设计中的应用[J].建设科技,2024,(23):95-97+101.
- [4]李桔红.基于数字孪生技术的建筑可视化应用研究[J].智能城市,2025,11(06):95-97.