

数字孪生提升建筑设计研究物化品质综述

何 晶

深圳市建筑设计研究总院有限公司 广东 深圳 518000

摘 要：数字孪生技术通过构建物理建筑与虚拟模型的动态映射，为建筑设计研究提供了全生命周期的物化品质提升路径。其核心机制涵盖数据闭环、动态修正与多尺度协同，依托BIM/CIM建模、物联网感知及AI算法，实现设计参数优化、施工误差控制与运维性能监测。该技术突破传统设计范式，推动建筑设计向数据驱动、智能决策转型，显著提升建筑结构安全、能耗效率与空间使用体验，成为智能建造领域的关键技术支撑。

关键词：数字孪生；建筑设计；物化品质

引言：在建筑行业向智能化、绿色化转型的浪潮中，传统设计方法因数据割裂、决策滞后等问题难以满足复杂建筑系统的品质提升需求。数字孪生技术凭借其物理实体与虚拟模型实时映射、数据全周期闭环流动的特性，为建筑设计研究提供了突破性解决方案。通过整合BIM/CIM建模、物联网感知与AI分析，数字孪生不仅实现了设计参数的精准优化、施工误差的动态控制，更推动了运维阶段的性能迭代，成为提升建筑物化品质、构建可持续建筑生态的核心引擎。

1 数字孪生技术赋能建筑设计的核心机制

1.1 数字孪生技术体系

(1) 定义与构成：数字孪生是物理实体的动态虚拟映射，核心由四部分构成。物理实体即建筑本体及相关设施，是数据采集源头；虚拟模型通过三维建模还原建筑几何形态与物理属性，实现1:1数字化复刻；数据交互依托传感网络与通信协议，实现物理与虚拟空间的实时数据传输；服务接口则为设计、施工、运维等环节提供标准化数据调用通道，支撑多场景应用。(2) 关键技术支撑：以BIM/CIM为模型构建基础，精准呈现建筑构件关系与城市空间逻辑；物联网技术通过部署温感、位移、能耗等传感器，采集建筑全生命周期数据；AI算法对海量数据进行分析，实现故障预警、能耗优化等智能决策；实时渲染技术则保障虚拟模型的高保真可视化，便于设计方案直观评审。

1.2 与建筑设计的耦合关系

(1) 设计阶段：借助虚拟仿真技术对设计参数进行优化。在结构设计中，模拟地震、风压等荷载作用下的建筑受力状态，调整构件尺寸与材料选型；在能耗设计中，仿真不同气候条件下的建筑能耗指标，优化门窗隔热性能与暖通系统配置；在光环境设计中，模拟日照时长与光线分布，改善室内采光均匀度。(2) 施工阶段：通过

虚拟模型与施工现场的动态映射，减少误差累积。对于装配式构件，利用数字孪生技术预演安装流程，精准匹配构件连接节点，降低现场拼装误差；实时采集施工设备运行数据与人员位置信息，优化施工工序排布，避免交叉作业冲突；对比实际施工进度与虚拟计划，及时调整资源配置，保障项目按期交付^[1]。(3) 运维阶段：依托数字孪生系统反馈建筑性能数据，驱动设计迭代。通过能耗监测传感器实时采集建筑用电、用水数据，分析能耗异常点，为后续建筑节能设计提供改进方向；监测建筑结构变形、设备运行参数，预判维护需求，其数据可用于优化同类建筑的结构设计与设备选型；收集用户使用反馈，结合空间功能使用数据，为建筑功能布局设计的迭代提供依据。

1.3 物化品质提升的底层逻辑

(1) 数据闭环：构建从设计、施工到运维的全生命周期数据流动闭环。设计阶段生成的参数数据为施工提供指导，施工过程中的实际数据反哺设计优化，运维阶段的性能数据为下一轮设计提供参考，实现数据在各阶段的无缝传递与循环利用，保障建筑品质持续提升。(2) 动态修正：基于实时数据实现模型更新与决策支持。通过传感器实时采集物理实体数据，更新虚拟模型状态，精准反映建筑实际情况；利用AI算法分析实时数据，生成优化决策建议，如根据能耗数据调整空调运行参数，根据人流数据优化电梯调度方案，动态提升建筑运行品质。(3) 多尺度协同：实现宏观城市尺度与微观构件尺度的品质联动。在宏观层面，数字孪生城市模型可分析建筑与城市交通、能源系统的协同性，优化建筑选址与外部管网设计；在微观层面，通过构件级数字孪生监测材料性能与连接状态，保障建筑结构安全，两者协同作用，全面提升建筑物化品质。

2 数字孪生提升建筑设计研究物化品质的关键技术路径

2.1 高精度几何建模与虚拟仿真

(1) 基于BIM/CIM的几何参数化设计：以LOD500（运维级）精度为标准，依托BIM/CIM技术构建建筑全要素参数化模型。建模时不仅还原建筑构件几何形态，更嵌入材料性能、构件连接方式、设备技术参数等核心信息，实现从宏观形态到微观细节的精准复刻。如深圳金融文化中心，以“金石叠山”为设计概念，存在菱形交错的复杂结构。项目团队用BIM技术解决幕墙与结构定位难题：先从下斜面生成入手，明确下斜面幕墙完成面距结构外控制面70厘米，再将结构外控制面内退结构梁高一半得到结构轴心控制面，升起柱子交汇到控制面确定结构空间坐标点，形成闭合结构体系，完成结构与幕墙交互，精准解决异型空间定位问题，同时将钢构件截面尺寸、焊接节点形式等参数嵌入模型，直接关联加工图纸与安装规范，为施工精度控制奠定基础。(2) 多物理场耦合仿真：突破单一物理场局限，构建结构、热工、流体多物理场耦合仿真体系。结构仿真结合地域地震烈度、风压等级，模拟不同荷载下的应力分布与变形；热工仿真耦合围护结构热传导特性与室外气候参数，分析能耗；流体仿真模拟室内通风与室外风环境。深圳金融文化中心的“钻石之眼”单拉索幕墙，尺度为卢浮宫跨度两倍，项目运用BIM工具统筹各专业，结合CFD模拟优化通风以满足绿建标准；还基于BIM与CFD融合建模，分析建筑气流评估达标情况，辅助空调决策，同时用Sap2000分析设防烈度抗震性能，通过多物理场协同，确保复杂结构与建筑功能、节能要求的平衡。

2.2 实时数据驱动的动态映射

(1) 物联网传感器网络部署：结合建筑结构特性与全生命周期监测需求，进行分层分类的物联网传感器网络设计。在结构关键受力点（如梁柱节点、基础承台）精准部署高精度应力传感器与位移传感器，实时捕捉结构受力波动；在建筑外墙、屋顶等围护结构分层安装温湿度传感器，监测热湿环境传递规律；在空调机组、水泵等机电设备关键部件加装振动传感器与电流传感器，追踪设备运行工况。深圳金融文化中心为保障“大钻石”自平衡钢结构体系稳定，在钢索连接节点、核心承重构件等部位加密部署传感器，实时采集应力应变数据，施工阶段还同步监测模板沉降速率、混凝土养护温湿度变化，为虚拟模型动态更新提供连续、精准的数据源，确保自平衡体系施工安全^[2]。(2) 数据融合算法：针对传感器采集的结构应力、环境温湿度、设备电流等多源异构数据，采用多步骤数据融合算法处理。先通过卡尔曼滤波算法清洗数据，剔除传感器漂移、外界干扰产生的异常值；再通

过时空对齐技术，将不同时间、不同位置传感器数据统一到建筑三维坐标系与时间轴下；最后通过特征融合模型提取关联信息。深圳金融文化中心处理钢结构数据时，通过该流程分析温度变化与结构位移的关联性，精准识别温度应力对钢结构变形的影响，确保虚拟模型与建筑实际状态高度一致，为结构安全评估提供可靠数据支撑。

2.3 AI辅助的决策优化

(1) 机器学习预测施工误差：基于历史施工数据与实时监测数据，构建机器学习预测模型预判施工误差风险。深圳金融文化中心钢结构施工中，收集类似项目钢构件安装偏差、焊接质量等历史数据，结合本项目实时监测的构件运输、安装精度数据，用机器学习模型预测构件拼装误差，指导施工人员调整安装方案；同时针对复杂节点深化设计，结合安装过程虚拟仿真、吊装路径规划及应力位移有限元仿真分析，减少现场返工，保障施工质量。(2) 生成式设计优化方案：以建筑性能目标（如能耗、空间利用率、结构安全系数）为约束，用生成式设计算法自动生成多套方案，经多目标决策模型筛选最优。深圳金融文化中心方案阶段，通过Rhino模型结合GH构建电池组，归整数据表格参数并优化，输出各层功能空间净高分析，解决斜面空间面积控制问题；还基于BIM参数化软件调整平面布局，优化杆件尺寸，用相关软件模拟结构性能，生成多套结构设计方案，结合建造成本、施工难度筛选，实现方案优化。

2.4 用户交互与体验反馈

(1) VR/AR技术实现设计可视化预验收：依托VR/AR技术构建高还原度的沉浸式设计可视化场景，打破传统图纸局限，让业主、施工方等相关方提前直观体验建筑空间与功能，实现设计方案的可视化预验收。深圳金融文化中心在设计阶段，通过VR技术打造1:1虚拟建筑空间，相关方可佩戴设备进行全场景漫游，细致感受不同楼层的空间尺度、墙面装修质感与灯光效果，精准检查门窗开启角度、家具摆放间距是否合理；同时借助AR技术将虚拟模型实时叠加到施工现场场地，清晰对比“钻石之眼”外立面造型与周边建筑风格、道路布局的匹配度，提前发现设计与实际环境的冲突问题并及时调整，避免后期返工^[3]。(2) 用户行为数据驱动空间功能优化：通过在建筑关键区域部署高清视频监控、红外感应传感器等设备，持续采集用户在空间内的行走动线、停留时长、区域使用频次等行为数据，经后台系统分析生成人流热力图、空间使用频率统计表及功能需求热力分布等可视化结果。深圳金融文化中心因异形结构存在多处锐角空间，设计团队结合同类文化场馆的用户行为数据，发现

锐角区域因空间形态特殊,用户使用意愿低,遂将设备机房、储藏室等对净高和空间完整性要求不高的功能空间布置于此,既充分利用闲置空间,又保障中腹核心区域的开阔性与完整性,显著提升整体空间利用效率与用户使用体验。

3 数字孪生在建筑设计中提升物化品质的挑战与未来发展方向

3.1 当前挑战

(1) 数据标准不统一:数字孪生涉及BIM模型、IoT传感器、AI分析等多类数据,但各数据格式缺乏统一标准,兼容性差,交互时需反复转换,易丢失信息或延迟,制约效率。深圳金融文化中心使用Revit、Rhino、Sap2000等软件,数据格式转换需反复处理,增加工作难度,还存在信息损耗风险。(2) 计算资源需求高:建筑全生命周期数字孪生需处理海量数据,大规模实时仿真(如多物理场耦合、城市尺度建筑集群模拟)对算力要求极高,普通服务器难以支撑,常出现模型更新延迟、仿真结果偏差,成为大规模应用瓶颈。深圳金融文化中心搭建数字孪生结构监测平台,实时采集处理大量钢结构数据,进行多物理场耦合仿真时,算力需求大,给项目推进带来压力。(3) 跨学科人才缺口:数字孪生融合建筑设计、物联网、AI等多学科,需兼具建筑专业素养与IT技术能力的复合型人才。但现有人才培养体系中,建筑学科侧重设计与结构,IT学科侧重技术开发,缺乏深度融合,导致行业内懂建筑设计逻辑且能熟练操作数字孪生系统、优化算法的人才稀缺,影响技术落地。

3.2 未来趋势

(1) 技术融合:与区块链结合构建可信数据共享体系,记录数据全流程,保障信息真实安全,促进多方协

同;与元宇宙融合打造沉浸式设计协作空间,让设计师、施工方、业主在虚拟环境实时交互评审方案,提升效率。未来深圳金融文化中心这类复杂项目,可借区块链保障BIM模型、监测数据安全共享,通过元宇宙实现多方实时协同。(2) 智能化升级:未来数字孪生系统依托AI实现自主优化,通过深度学习分析历史与实时数据,自动识别模型偏差(如结构变形预测误差、能耗仿真偏差),驱动虚拟模型自我修正,减少人工干预,实现全流程智能决策与动态优化。深圳金融文化中心后续运维阶段,系统可通过AI自动分析结构老化、设备能耗数据,识别模型偏差并修正,实现智能运维。(3) 可持续导向:随“双碳”目标推进,数字孪生将成建筑低碳设计核心工具,构建全生命周期碳足迹追踪模型,实时监测建材生产、施工、运维各阶段碳排放,精准识别高碳环节,为低碳设计提供支撑。深圳金融文化中心未来可利用该技术优化低碳方案,推动建筑绿色转型。

结束语

数字孪生技术正以数据为纽带,重塑建筑设计的全周期品质管控范式。其通过虚实交互、智能决策与多尺度协同,不仅攻克了传统设计中的信息孤岛与动态修正难题,更推动了建筑行业向低碳化、智能化方向演进。

参考文献:

- [1]李翠环,程训建.数字孪生系统在建筑智能运维中的运用[J].建筑节能,2024,52(11):98-100.
- [2]杨磊.数字孪生技术在建筑装饰设计应用现状分析[J].鞋类工艺与设计,2024,4(11):159-161.
- [3]杨璇,李新颖.数字孪生技术在装配式建筑设计与施工过程中的应用研究[J].住宅与房地产,2024,(02):27-29.