

# 基于数字孪生的建筑性能模拟与优化设计

刘琳曼 王金凤 郭京琦

中国五洲工程设计集团有限公司 北京 100053

**摘要：**在建筑产业数字化转型与“双碳”目标驱动下，数字孪生技术通过构建物理建筑的全要素虚拟映射体，实现建筑性能的动态模拟与全生命周期优化。本文融合建筑信息模型（BIM）、物联网感知数据与多物理场仿真算法，构建具备实时交互能力的建筑数字孪生模型。通过该模型可对建筑能耗、室内热环境、结构荷载等性能指标进行多场景动态仿真，支持设计团队在方案阶段即开展性能迭代优化。研究显示，数字孪生技术可将建筑能耗模拟误差控制在10%-15%，并通过数据闭环决策模式缩短设计周期25%-30%。此外，针对多源异构数据融合、跨专业协同仿真等技术难点，结合边缘计算与深度学习预测算法，提出面向智慧建筑的数字孪生应用架构，为建筑性能优化提供技术范式。

**关键词：**数字孪生；建筑性能模拟；优化设计；BIM

**引言：**全球建筑业正经历低碳化与智能化转型，传统性能模拟方法因数据割裂、场景静态化等局限，难以满足复杂建筑系统的动态优化需求。数字孪生技术通过构建物理实体与虚拟模型的双向映射机制，实现建筑全生命周期的数据集成与实时仿真。据Gartner报告显示，采用数字孪生技术的建筑项目，其性能优化效率提升可达35%，已成为建筑产业数字化升级的核心技术支撑。

## 1 数字孪生技术在建筑领域的兴起

随着建筑行业向智能化、绿色化转型，数字孪生技术凭借虚实映射与动态优化能力迅速成为行业焦点。在“双碳”目标与建筑全生命周期管理需求驱动下，传统静态设计与粗放式运维模式已难以满足需求，数字孪生通过构建建筑物理实体的虚拟镜像，实现对建筑性能、能耗、结构健康等多维度的实时监测与仿真优化。国际上，智慧城市建设与超高层建筑项目率先应用数字孪生技术，如新加坡“虚拟新加坡”平台实现城市级建筑数字孪生管理；国内雄安新区在规划阶段即引入数字孪生技术，为建筑全生命周期数字化转型提供范本。这种技术不仅革新了建筑设计与运维流程，更推动行业向数据驱动、智能决策的方向发展，成为建筑产业升级的核心驱动力。

## 2 数字孪生技术基础与建筑领域应用

### 2.1 数字孪生的定义与核心特征

**第一作者简介：**刘琳曼（1992年—），女，汉族，河北省石家庄市人，硕士研究生，工程师。

**第二作者简介：**王金凤（1987年—），女，汉族，陕西省榆林市人，大学本科，工程师。

**第三作者简介：**郭京琦（1994年—），女，汉族，山东省宁阳县人，大学本科，工程师。

### (1) 物理实体与虚拟模型的实时映射

数字孪生的核心在于建立物理实体与虚拟模型之间的精确映射关系。在建筑领域，通过三维建模技术将建筑的几何结构、材料属性等信息数字化，结合物联网传感器实时采集的温度、湿度、能耗等物理数据，使虚拟模型能够动态反映建筑实体的运行状态。这种映射并非静态复制，而是基于数据实时更新的双向交互过程。例如，当建筑外部环境温度变化时，虚拟模型可同步模拟建筑内部热环境响应，帮助设计师预判性能变化；运维阶段，设备故障信号能即时反馈至虚拟模型，实现故障定位与维修方案预演，显著提升建筑管理效率。

### (2) 数据驱动与动态交互能力

数据是数字孪生的“血液”，其动态交互能力依赖于多源数据的深度融合与分析。建筑运行过程中，传感器网络持续采集环境参数、设备状态等实时数据，结合历史运维记录、设计图纸等结构化数据，通过大数据分析机器学习算法，挖掘数据背后的规律。例如，利用深度学习算法分析建筑能耗数据，可预测不同时段的用电峰值，并通过虚拟模型模拟优化策略，如调整空调系统运行参数或启用储能设备。这种数据驱动的动态交互模式，使数字孪生模型具备自适应优化能力，为建筑性能提升提供科学决策依据。

## 2.2 建筑领域数字孪生的关键技术

### (1) 多源数据融合

建筑数字孪生的实现依赖于BIM、IoT、传感器等多源数据的高效融合。BIM模型提供建筑的几何与语义信息，构成数字孪生的基础框架；IoT设备与传感器网络则负责采集建筑运行过程中的实时数据，如温湿度、光

照强度、设备运行参数等。然而，这些数据存在格式异构、时间异步等问题，需通过数据清洗、格式转换与时空对齐技术，将其整合至统一的数据平台。例如，将BIM模型中的设备位置信息与传感器采集的故障数据关联，实现设备状态的精准定位与可视化管理。同时，结合区块链技术保障数据的安全性与可追溯性，为建筑全生命周期管理提供可靠的数据支撑。

### （2）高保真建模与实时仿真引擎

高保真建模与实时仿真引擎是数字孪生的技术核心。在建筑设计阶段，通过高精度三维建模技术，结合建筑物理性能分析软件（如EnergyPlus、ANSYS），构建包含结构力学、热工性能、流体动力学等多物理场的虚拟模型。在运维阶段，实时仿真引擎基于物联网数据驱动模型动态更新，实现建筑运行状态的实时模拟。例如，利用计算流体动力学（CFD）仿真引擎模拟建筑内部气流组织，优化自然通风设计；或通过实时结构仿真，评估建筑在极端荷载下的安全性。这些仿真技术需具备强大的计算能力与高效的算法优化，以满足建筑复杂系统的实时交互需求。

### （3）模型更新与校准机制

建筑数字孪生模型需具备动态更新与校准能力，以确保虚拟模型与物理实体的一致性。随着建筑使用过程中结构老化、设备更换或功能改造，模型需同步调整。通过将传感器实时监测数据与模型预测结果进行对比分析，利用卡尔曼滤波、粒子滤波等算法对模型参数进行修正，实现模型的自适应校准。例如，当建筑实际能耗与模型预测值出现偏差时，可通过校准围护结构传热系数、设备能效参数等，使模型更准确反映建筑真实性能。此外，结合机器学习算法自动识别数据异常模式，触发模型更新流程，保障数字孪生模型的长期有效性与可靠性。

## 3 基于数字孪生的建筑性能模拟方法

### 3.1 性能模拟指标体系构建

#### （1）能源效率指标

能源效率是衡量建筑绿色化水平的关键，其指标体系围绕能源消耗与产出构建。建筑总能耗指标涵盖建筑全生命周期内供暖、制冷、照明、设备运行等各项能源消耗，通过与同类型建筑能耗基准对比，评估节能潜力；可再生能源利用率则聚焦太阳能、地热能等清洁能源在建筑能源供给中的占比，体现建筑对可持续能源的利用程度；设备能效比指标通过分析空调、照明、电梯等设备的能源转换效率，精准定位高耗能设备，为节能改造提供方向。各指标结合建筑功能与地域气候特点设定阈值，助力设计阶段优化能源系统配置，降低运行成

本与碳排放。

#### （2）热舒适性指标

热舒适性直接影响建筑使用者的健康与工作效率，其评估需综合多维度物理参数与人体热反应模型。室内温湿度作为基础指标，需控制在ASHRAE标准推荐的舒适区间内，以保障人体体感舒适；空气流速指标则关注室内气流组织，避免因风速过高导致人体冷感不适；PMV-PPD指标通过综合分析空气温度、相对湿度、平均辐射温度、风速、活动量及衣着情况，预测人群对热环境的满意程度。这些指标通过动态监测与模拟分析，为建筑围护结构设计、空调系统选型及自然通风策略制定提供科学依据，打造宜人的室内热环境。

#### （3）光照环境指标

光照环境指标体系旨在平衡自然光利用与人工照明需求，提升建筑空间品质与视觉舒适度。天然光照度指标通过测量室内不同区域的光照强度，评估自然光的分布与利用效率，指导采光口尺寸、形状及位置设计；眩光指数用于量化光照过强或分布不均导致的视觉干扰程度，避免因眩光引发的视觉疲劳与安全隐患；采光均匀度则反映室内光照分布的均衡性，保障各区域光照质量一致。通过整合这些指标，结合建筑朝向、遮阳设计及照明控制系统优化，实现自然光与人工照明的协同互补，降低照明能耗，营造健康舒适的光环境。

### 3.2 动态模拟流程设计

#### （1）数据采集与预处理

动态模拟依赖多源数据的高效采集与处理。通过部署温湿度、能耗、光照等传感器，结合BIM模型，实时获取建筑环境参数、设备运行数据及几何信息。采集数据经清洗降噪、格式统一与时空对齐处理，利用滑动平均算法平滑波动数据，通过插值法填补缺失值，并整合气象数据与历史运维记录，构建结构化数据集。该过程确保输入虚拟模型的数据准确、完整，为模拟结果的可靠性奠定基础。

#### （2）虚拟模型实时更新与验证

虚拟模型依托物联网实时数据实现动态更新，同步反映建筑实体运行状态。更新过程中，采用均方误差（MSE）、平均绝对误差（MAE）等指标，将模拟结果与实测数据对比，量化偏差程度。当误差超阈值时，触发模型校准机制，运用优化算法调整围护结构传热系数、设备能效等参数，确保虚拟模型与物理实体的动态一致性。例如在能耗模拟中，实时校准空调系统参数，提升预测精度，支撑优化决策。

#### （3）多物理场耦合仿真

多物理场耦合仿真通过集成CFD与热工模型,实现建筑环境的综合模拟。CFD模型解析室内空气组织与温度分布,热工模型计算围护结构传热及热负荷,二者数据交互形成闭环。以自然通风模拟为例,CFD输出的气流参数驱动热工模型更新温度场,辅助优化开窗设计。此外,融合光照、结构力学等模拟模块,构建涵盖流体、传热、光学、力学的耦合系统,全方位评估建筑在复杂工况下的性能表现,助力多目标协同优化。

#### 4 数字孪生驱动的建筑优化设计策略

##### 4.1 多目标优化框架设计

###### (1) 性能指标与约束条件的数学建模

将能源效率、热舒适性、光照环境等性能指标转化为数学模型,构建多目标优化函数。例如,以建筑年能耗最小化、PMV-PPD达标率最大化、天然光照度达标面积占比最大化为目标函数,同时纳入建筑成本、规范标准、场地条件等约束条件。采用线性加权法、帕累托前沿理论整合多目标冲突,将建筑围护结构参数、设备选型配置等设计变量作为决策参数,建立基于非线性规划的数学模型。通过量化各指标权重,平衡建筑性能与经济可行性,为优化算法提供明确的求解框架。

###### (2) 基于机器学习的优化算法

引入遗传算法、强化学习等智能算法求解多目标优化问题。遗传算法通过模拟生物进化过程,以交叉、变异、选择操作迭代搜索最优解集,适用于复杂参数空间的全局寻优;强化学习则通过智能体与建筑环境的交互试错,依据奖励机制动态调整决策策略,实现建筑运行策略的自适应优化。例如,利用强化学习算法优化空调系统启停时间与运行功率,在保障热舒适性的同时降低能耗。这些算法可自动处理高维、非线性的优化问题,相比传统算法大幅提升优化效率与精度,助力设计团队快速获取帕累托最优解集。

##### 4.2 实时反馈与迭代优化机制

###### (1) 模拟结果与实际性能的闭环校准

建立虚拟模型模拟结果与建筑实际运行数据的闭环校准机制。通过物联网传感器实时采集建筑能耗、温湿度、光照强度等数据,与数字孪生模型预测值对比分析。利用误差反向传播算法,将偏差信息反馈至模型参数层,动态调整围护结构传热系数、设备能效比等模型参数。例如,当实际能耗高于模拟值时,校准外墙保温性能参数,使模型更贴合建筑真实运行状态。这种闭环校准确保数字孪生模型始终与物理实体同步,为持续优化提供可靠数据支撑。

###### (2) 自适应调整设计参数

依据实时校准后的模拟结果,系统自动触发设计参数自适应调整。针对围护结构,可优化外墙保温材料厚度、外窗玻璃类型及遮阳构造;对于设备运行策略,动态调整空调系统运行模式、照明系统控制逻辑。采用灵敏度分析方法,评估各参数对性能指标的影响程度,优先调整敏感度高的参数。例如,当热舒适性不达标时,优先调整外窗遮阳系数或空调送风温度,快速迭代设计方案。该机制实现建筑性能优化从“被动响应”到“主动调控”的转变,提升设计方案的动态适应性。

##### 4.3 人机协同决策支持系统

构建集成可视化交互界面与专家知识库的人机协同决策支持系统。可视化界面以三维虚拟模型为载体,直观展示建筑性能指标分布、优化前后对比及参数敏感性分析结果,支持设计师通过拖拽、参数输入等方式实时修改设计方案并查看模拟效果。专家知识库整合建筑领域规范标准、工程案例经验及性能优化策略,当系统生成多组优化方案时,自动匹配相似案例提供决策参考。设计师可结合专业经验与系统推荐,在人机交互中完成方案筛选与深化,实现数据驱动与专家智慧的深度融合,提升决策效率与科学性。

#### 结语

综上所述,数字孪生技术凭借物理实体与虚拟模型的实时映射、多源数据融合及智能算法驱动的优化能力,为建筑性能模拟与优化设计提供了创新解决方案。通过构建系统性的性能模拟指标体系,结合多目标优化框架与实时反馈机制,实现了建筑能源效率、热舒适性、光照环境等性能的协同提升,并在设计与运维阶段形成数据闭环管理。人机协同决策支持系统的引入,进一步推动了建筑设计从经验驱动向数据智能驱动的转型。然而,当前技术仍面临多源数据标准化、复杂系统仿真效率及跨专业协同壁垒等挑战。未来,随着人工智能、边缘计算等技术的深度融合,数字孪生有望在建筑全生命周期管理中发挥更大价值,助力行业实现低碳化、智能化发展目标,成为支撑智慧城市建设的核心技术力量。

#### 参考文献

- [1]王伟强,李明轩.数字孪生驱动的建筑能源系统动态建模与优化控制[J].建筑科学,2023,39(8):1-8.
- [2]陈静,周志华.基于BIM与数字孪生的建筑光环境动态模拟方法研究[J].土木工程与管理学报,2023,40(4):155-162.
- [3]赵磊,孙晓峰.数字孪生与物联网融合的建筑设备运维性能优化框架[J].自动化与仪表,2023,38(7):1-7.