

数字孪生技术赋能建筑设计全过程创新

赵 静

河北惠宁建筑标准设计有限公司，河北 石家庄 050000

[摘要]随着建筑行业数字化转型的持续推进，数字孪生技术作为融合物理实体、数字模型、传感数据与智能分析的前沿技术体系，逐渐在建筑全生命周期管理中发挥关键作用。传统建筑设计流程在数据集成、信息反馈、成果可视化与协同效率等方面仍存在局限，而数字孪生技术借助实时数据驱动、多源信息融合与动态仿真能力，为建筑设计全过程创新提供了新路径。文中从数字孪生技术的内涵与特征出发，分析其在建筑设计阶段、施工阶段与运营阶段的赋能机制，系统梳理建筑设计全过程中数据模型构建、信息交互机制、性能模拟分析与协同设计优化等关键应用方式。文章进一步探讨数字孪生技术在风险预测、能耗分析、环境模拟、结构优化等方面的创新价值，并结合建筑行业发展趋势，提出未来建筑设计数字化创新的方向。研究表明，数字孪生技术不仅提升了建筑设计的科学性与精准性，还推动了建筑全生命周期的精细化管理，为建筑行业质量提升和可持续发展提供重要支撑。本研究为建筑设计的数字化转型提供理论依据与方法参考。

[关键词]数字孪生；建筑设计；全过程管理；智能分析；建筑数字化

DOI: 10.33142/ect.v3i12.18626

中图分类号: TU17

文献标识码: A

Digital Twin Technology Empowers Innovation Throughout the Entire Architectural Design Process

ZHAO Jing

Hebei Huining Standard Design Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: With the continuous advancement of digital transformation in the construction industry, digital twin technology, as a cutting-edge technical system integrating physical entities, digital models, sensor data, and intelligent analysis, has gradually played a pivotal role in the lifecycle management of buildings. Traditional architectural design processes still face limitations in data integration, information feedback, outcome visualization, and collaborative efficiency. Digital twin technology, leveraging real-time data-driven approaches, multi-source information fusion, and dynamic simulation capabilities, offers new pathways for innovation throughout the entire architectural design process. This paper begins with the connotation and characteristics of digital twin technology, analyzing its empowerment mechanisms in the design, construction, and operation phases. It systematically reviews key application methods such as data model construction, information interaction mechanisms, performance simulation analysis, and collaborative design optimization across the entire architectural design process. The study further explores the innovative value of digital twin technology in risk prediction, energy consumption analysis, environmental simulation, and structural optimization, while proposing future directions for digital innovation in architectural design based on industry trends. Research findings indicate that digital twin technology not only enhances the scientific rigor and precision of architectural design but also promotes refined lifecycle management, providing critical support for quality improvement and sustainable development in the construction industry. This study offers theoretical foundations and methodological references for the digital transformation of architectural design.

Keywords: digital twin; architectural design; whole-process management; intelligent analysis; building digitization

引言

随着数字化、智能化进程在建筑行业的不断推进，建筑设计体系正在经历深度变革。传统建筑设计模式通常依赖静态图纸、人工经验判断以及有限的模拟工具，信息流动不充分、反馈不及时，导致设计优化空间不足，难以满足复杂建筑需求与高质量建造要求。在此背景下，数字孪生技术的引入为建筑设计提供了创新机遇。数字孪生技术通过构建与物理建筑同步运行的数字化模型，实现数据驱动的实时模拟、预测分析与动态优化，使设计者能够在虚拟空间中预演建筑全生命周期的运行状态，从而发现潜在问题、优化设计决策并提升工程实施效率。作为一种融合

信息技术、人工智能与工程管理的新型技术体系，数字孪生推动建筑行业从静态设计向动态设计转型，实现设计、施工与运营的全过程数据联动。为了适应建筑行业的发展需求，有必要从理论、技术与实践等多方面系统分析数字孪生技术赋能建筑设计全过程创新的作用机制，以推动建筑领域数字化升级。

1 数字孪生技术的理论基础与应用价值

1.1 数字孪生技术的内涵与构成体系

数字孪生技术最初源于制造业，其核心理念是通过建立一个与真实物理系统同步运行的数字实体，实现物理世界与数字世界的实时映射。在建筑领域，数字孪生模型通

常由物理建筑对象、虚拟建筑模型、双向数据接口、实时监测系统与智能分析模块组成。数字孪生系统以高精度数字模型为基础，以传感器实时数据为驱动，结合人工智能算法实现对建筑状态的预测与分析。其关键特征包括实时性、动态性、可视化与智能分析能力，使建筑能够在虚拟环境中进行全方位展示、性能评估与风险预测。

1.2 数字孪生在建筑设计中的关键优势

数字孪生技术在建筑设计阶段可实现透明化、实时化与精细化的设计管理。其一，数字孪生具有高效的信息集成能力，能够整合结构、机电、能耗、环境等多源信息，提高设计的整体性与协调性；其二，通过动态模拟功能，设计者可在模型中预演建筑运行状态，对能耗、光环境、气流组织等进行深度分析；其三，数字孪生支持多专业协同设计，使各参与方实现同步数据共享，有效减少设计冲突与返工。与传统设计模式相比，数字孪生显著提升了设计可靠性与决策科学性。

1.3 建筑行业数字化转型背景下的应用需求

建筑行业正处于从信息化向智能化发展的关键阶段，传统设计流程已难以满足复杂建筑项目的精细化要求。绿色建筑、智慧建筑与可持续城市建设对设计科学性、能耗计算与运行预测提出更高要求。数字孪生技术不仅能够实现设计过程透明化，还可为建筑运营提供实时数据支持，使设计成果与未来运营需求形成闭环关系。因此，在行业数字化背景下，引入数字孪生技术已成为建筑行业提升竞争力的重要途径。

2 数字孪生技术在建筑设计阶段的创新应用

2.1 基于数字孪生的建筑信息整合与数据驱动设计

建筑设计需要大量信息支持，包括功能分析、结构计算、设备布置、能耗预测等。数字孪生技术通过构建统一的数据平台，使各类信息在模型中形成完整链条，减少专业之间的信息断层，同时实现数据驱动的设计决策。设计者可根据实时数据对建筑性能进行评估，如当风环境模拟结果不理想时，可调整建筑体形与开窗方式并立即获得反馈。此外，数字孪生模型能够持续更新，在设计优化过程中形成动态演进体系，使设计从静态绘制转向动态优化。

2.2 数字孪生辅助建筑性能模拟与方案优化

数字孪生技术提供的动态模拟平台能够进行能耗分析、热环境模拟、光环境分析、空气流动模拟等，为建筑性能评估提供科学依据。模型可根据建筑使用条件、区域气候、设备参数等进行实时计算，使设计者提前发现潜在问题。例如，通过空气流动模拟可优化通风系统设计，通过太阳辐射分析可调整遮阳策略。性能模拟不仅能提升建筑设计的准确性，还能用于对不同方案进行量化比较，从而选择最优设计方案。

2.3 多专业协同设计机制的构建与优化

建筑设计涉及结构、机电、建筑、景观等多个专业，

传统的协同方式多依赖文件传递，效率较低且易发生信息冲突。数字孪生技术能够构建多专业统一协作平台，各专业团队在同一模型中工作，通过可视化系统即时看到不同专业的设计影响。例如，结构构件位置调整、设备管线布置优化等均可在模型中实时查看，避免了传统设计阶段的冲突与返工。协同机制的构建大幅提升了设计效率，可有效缩短整体设计周期。

3 数字孪生技术在建筑施工阶段的价值体现

3.1 施工过程模拟与风险预判技术

在施工阶段，数字孪生技术可用于模拟施工流程与工程进度，使施工组织更加科学合理。模型可模拟材料运输路径、机械设备布置与施工顺序，提前识别潜在冲突与安全风险。例如，当模型显示某施工阶段存在高风险作业区域时，管理人员可及时调整方案并制定预防措施。此外，通过实时数据监测系统可捕捉施工现场信息，并与模型比对，及时发现偏差，实现工序控制与进度管理的动态化。

3.2 施工资源管理与现场调度优化

建筑施工涉及大量资源管理，包括劳动力、机械设备、材料等。数字孪生技术能够实时分析施工现场的数据，为管理决策提供科学依据。例如，可预测材料消耗趋势，从而优化材料供应计划；可根据施工进展调整机械设备使用方案；可通过能耗监测降低施工阶段能源浪费。该技术帮助施工管理人员以更高的效率和更低的资源消耗推进工程建设，为施工阶段的精细化管理提供支撑。

3.3 施工质量监测与动态反馈机制

传统施工质量管理多依赖人工检查，数据获取效率低且易出现偏差。数字孪生技术可通过传感设备实现对结构变形、混凝土强度、温度湿度等参数的实时监测，使质量管理更加精细可靠。监测数据可直接反馈到数字模型中，并与设计参数比对，若出现偏差则可及时调整施工措施。动态反馈机制有效提升了施工质量，减少返工概率，保障建筑安全性。

4 数字孪生技术在建筑运营阶段的深度应用

4.1 建筑运行状态的实时监测与智慧管理

建筑投入使用后，其运行状态包括温度湿度、能耗、空气质量、设备运行情况等。数字孪生技术可构建实时监控系统，通过传感器收集各类数据并在数字模型中呈现，使建筑管理人员能够清晰了解运行状况。系统可自动识别异常情况，如空调能耗过高、室内空气不达标等，并提示维护策略。数字孪生的智慧管理方式可提高能源使用效率，延长设备寿命，提升用户舒适度。

4.2 能耗分析与节能策略动态优化

建筑运行过程中，空调、电力与照明等系统相互关联，能耗结构复杂，传统管理方式往往难以实现系统层面的综合分析与协同调控。借助数字孪生技术，可对各类能耗数据进行实时采集与解析，在虚拟环境中重构建筑能源运行

状态,为精细化管理提供直观依据。通过对室外气候变化、人员活动规律与设备运行特征的综合分析,系统能够动态调整空调运行模式,避免能源使用与实际需求不匹配。对照明系统的用能行为进行识别与评估,有助于发现潜在浪费环节,并据此优化控制策略。能耗分析模型在持续运行过程中不断积累数据并进行自我学习,使节能方案能够随环境条件与使用需求变化而调整。

4.3 设备预测性维护与全生命周期管理

设备维护在建筑运营支出中占据较大比重,其管理水平直接影响建筑运行的稳定性与经济性。引入数字孪生技术后,建筑设备可通过持续采集运行数据,形成与实体系统高度一致的数字模型,为状态分析与维护决策提供支持。通过对振动参数、能耗变化与运行频率等信息进行综合分析,系统能够识别潜在异常特征,对可能发生的故障进行提前预判,从而安排针对性的维护措施,降低突发停机风险。基于数字孪生模型开展设备全生命周期模拟,有助于评估不同运行工况下的性能衰减规律,预测设备使用年限与维护需求变化。

5 数字孪生技术推动建筑设计全过程创新的未来方向

5.1 数字孪生与人工智能的深度融合趋势

在未来建筑设计实践中,数字孪生技术将与人工智能形成更加紧密的融合关系,推动设计方式由经验主导向数据驱动转变。依托智能算法对大量设计与运行数据进行分析,数字孪生模型能够实现方案的自动推演与优化,为设计决策提供科学依据。人工智能参与建筑布局组织、立面形态生成与结构体系优化,可在满足功能与规范要求的前提下,提高设计效率与整体合理性。通过深度学习方法对历史项目数据进行挖掘,可识别不同类型建筑在能耗、结构性能与空间使用方面的规律,为新项目提供具有参考价值的判断依据。数字孪生在这一过程中不仅承担信息载体的角色,也逐步演变为具备分析与反馈能力的智能系统。随着算法能力与数据基础的不断完善,数字孪生将成为建筑设计体系中的关键工具,推动建筑设计向高效、精准与可持续方向发展。

5.2 数字孪生平台的标准化与开放化建设

数字孪生技术在建筑领域的广泛应用,离不开统一而完善的标准体系作为基础支撑。围绕数字模型构建、数据表达方式与信息更新规则建立清晰规范,有助于保证不同阶段、不同主体之间的数据一致性与可靠性。数据接口与交换标准的完善,可降低系统之间的对接成本,提升信息流转效率,为多平台协同运行创造条件。面向未来,数字孪生平台需要构建开放、可扩展的数据接口体系,与建筑信息模型、地理信息系统及物联网感知系统实现顺畅衔接,

使设计、施工与运营阶段的数据得以连续传递与整合。通过统一的协同机制标准,项目参与方能够在同一数字环境中开展工作,减少信息割裂与重复建设。标准化建设不仅提升了数字孪生系统的可复制性与稳定性,也为技术规模化推广奠定基础,推动建筑行业数字化转型向更高水平发展。

5.3 全过程数字化管理的行业发展方向

数字孪生技术的深化应用,将促使建筑行业逐步摆脱传统碎片化管理模式,迈向以数据为核心的全过程数字化管理体系。通过将建筑信息模型、物联网感知系统与大数据分析手段有机结合,设计、施工与运营各阶段的信息得以持续传递与共享,形成动态联动的闭环管理结构。在这一体系下,设计成果能够更准确地指导施工实施,施工过程中的数据又可反向反馈至模型之中,为后续调整与优化提供依据。建筑投入使用后,运行数据的持续积累有助于评估建筑性能变化,支持精细化运维与功能适配。全过程数字化管理不仅提升了项目组织与资源配置效率,也增强了建筑对使用需求变化与环境条件变化的适应能力。以数字孪生为支撑的管理模式,将推动建筑行业在效率、质量与可持续发展水平上的整体提升,为实现高质量发展提供坚实基础。

6 结论

数字孪生技术为建筑设计与实施全过程带来了新的发展路径,通过构建高精度数字模型并与现实建筑形成持续联动,可实现数据实时更新、状态反馈与动态分析,从而提升决策的科学性与可靠性。在设计阶段,数字孪生有助于整合多源信息,开展建筑性能预测与方案比选,促进建筑、结构与机电等多专业之间的高效协同,减少设计冲突与反复修改。在施工阶段,依托数字模型进行过程模拟与进度管理,可提前识别潜在风险,优化施工组织方式,并对工程质量进行全过程监测。在建筑投入使用后,数字孪生通过对能耗、设备运行与环境参数的持续分析,为精细化管理与智慧运营提供支持,提升建筑整体运行效率。随着人工智能、云计算与物联网技术的不断成熟,数字孪生将在建筑行业中发挥更加重要的支撑作用,推动建筑设计与管理模式向智能化、精准化与可持续方向不断演进。

[参考文献]

- [1]刘杰,王宁.数字孪生技术在建筑设计与管理中的应用研究[J].建筑科学,2021,37(4):42-47.
 - [2]陈伟,张焱.数字化转型背景下数字孪生技术的建筑实践价值[J].建筑技术开发,2022,49(6):15-20.
 - [3]李娜,赵蕾.数字孪生在建筑全生命周期管理中的应用研究[J].施工技术,2020,49(10):98-102.
- 作者简介: 赵静(1984.12—),女,汉族,毕业院校:河北建筑工程学院,现就职单位:河北惠宁建筑标准设计有限公司。