

基于数字孪生的住宅建筑项目管理全周期低碳化技术

贾盛¹ 方娟²

1 上海融嘉房地产开发有限公司 2 上海檬弗建筑工程科技有限公司

DOI:10.12238/btr.v8i3.4706

[摘要] 随着全球建筑行业向低碳化转型,本文提出了基于数字孪生模型的全周期低碳化技术方案,旨在通过数字化管理优化住宅建筑项目的碳排放和能效。研究通过仿真模型模拟建筑项目全生命周期的能效和碳排放情况,结合现场监测数据进行效果评估。通过实施低碳化措施,设计阶段能效系数为0.90,运营阶段提升至1.20,碳排放量从1500kgCO₂降至1000kgCO₂,施工周期从12个月缩短至9个月,投资回报率(ROI)从1.6增长至2.3。研究结果表明,数字孪生技术在推动建筑项目低碳化管理方面具有显著优势,并能提高经济效益和环境效益,具有广泛应用前景。

[关键词] 数字孪生; 低碳化; 建筑管理; 能效

中图分类号: G258.9 文献标识码: A

Digital twin-based low-carbon technology for the whole cycle of residential building project management

Sheng Jia¹ Juan Fang²

1. Shanghai Rongjia Real Estate Development Co., Ltd.

2. Shanghai Mengfu Construction Engineering Technology Co., Ltd

[Abstract] With the transition of the global construction industry to low-carbonization, this paper proposes a full-cycle low-carbon technology scheme based on digital twin model, aiming to optimize the carbon emissions and energy efficiency of residential construction projects through digital management. The study simulates the energy efficiency and carbon emissions of the whole life cycle of the building project through the simulation model, and evaluates the effect based on the on-site monitoring data. Through the implementation of low-carbon measures, the energy efficiency coefficient was increased to 0.90 in the design phase, 1.20 in the operation phase, the carbon emission was reduced from 1500 kg CO₂ to 1000 kg CO₂, the construction period was shortened from 12 months to 9 months, and the return on investment (ROI) increased from 1.6 to 2.3. The results show that digital twin technology has significant advantages in promoting low-carbon management of construction projects, and can improve economic and environmental benefits, and has a wide application prospect.

[Key words] digital twin; decarbonization; construction management; energy efficiency

引言

在全球气候变化日益加剧的背景下,建筑行业低碳化发展已经成为可持续发展中的一个重要问题。住宅建筑项目无论是能效还是碳排放都占很大比重,所以如何实现项目管理全周期低碳化已成为一个迫切需要解决的难题。本文研究目的是以数字孪生模型为基础,探索如何利用数字化技术及低碳化措施对住宅建筑项目进行全方位的管理。研究通过结合建筑数字化管理技术及低碳技术,运用全周期模拟及优化分析方法对数字孪生技术的工程实施效果进行了评价。主要研究内容涉及数字孪生技术的各个阶段应用,低碳化实施方案及其效果评价等方面,

以期为促进住宅建筑行业低碳转型发展提供理论支持与实践依据。

1 住宅建筑项目背景概况

1.1 项目条件

住宅建筑项目的规模和结构通常决定了其能效与碳排放的潜力。随着建筑行业逐步迈向数字化转型,建筑项目的设计、施工和管理也在积极采用先进的数字技术,如建筑信息模型(BIM)和数字孪生技术^[1]。这些技术不仅提高了项目的协同效率,还增强了对建筑生命周期内各个阶段的管理能力。随着全球对环境可持续性要求的提升,建筑项目必须满足日益严格的碳排放控

制标准和绿色建筑法规,以降低能源消耗和环境影响,推动绿色建筑技术的广泛应用。

1.2 低碳化需求

住宅建筑行业碳排放在世界总排放量中占有很大比重,特别是建筑材料生产、运输以及建设等环节。为迎接这一挑战,低碳化改造与优化的推行就显得尤为紧迫。提升建筑能效,采用绿色建筑材料、降低碳排放是现阶段建筑行业发展的重大要求。引入数字孪生技术可以准确地管理与预测建筑全生命周期,以有效优化控制碳排放,减少建筑项目环境足迹,促进建筑向更高标准发展。

2 主要影响因素及关键技术措施

2.1 主要影响因素

住宅建筑项目低碳化实施过程中,受到诸多因素的制约。从外部环境看,政策法规越来越严把碳排放关,绿色建筑标准是重要动力。市场需求也促进了绿色建筑飞速发展,特别是用户对于节能环保建筑要求越来越高。从经济的角度看,低碳改造需要在成本和效益上达到合理的平衡,而如何在确保低碳效益的前提下减少投资成本已经成为一个巨大的问题^[2]。在技术因素中,BIM、数字孪生技术等数字化工具与平台为项目管理提供更加准确的决策支持,促进低碳化措施高效落实。

2.2 关键技术与措施

要想使住宅建筑项目低碳化发展,就需要采用一系列关键技术和措施。数字孪生技术是一种集成管理平台,可实现建筑项目从设计、建设到运营全生命周期数字化管理,促进能效预测与碳排放优化。绿色建筑设计和材料选择,智能监控系统、节能设备和可再生能源使用等低碳技术,是促进建筑行业向高质量发展的核心途径。

3 数字孪生模型与低碳化技术的模拟分析

3.1 仿真模型

本研究采用数字孪生模型作为建筑项目管理的核心工具,通过模拟建筑项目全生命周期内的能效、碳排放、施工周期和成本等指标。该模型能够集成多种技术与数据来源,对建筑项目从设计、施工到运营各阶段的能效和碳排放进行动态优化分析,进而为实现低碳化目标提供科学依据^[3]。

3.2 数值模拟参数

3.2.1 能效系数

能效系数是评价建筑能效的重要指标,用于描述建筑在能量消耗上的效率。其公式为:

$$E = \frac{Q}{A \cdot \Delta T}$$

其中, E 为能效系数, Q 为建筑总能量消耗, A 为建筑面积, ΔT 为建筑内部外部温差。根据不同的建筑类型和使用功能,能效系数的设置将直接影响建筑能效优化方案的选择。

3.2.2 碳排放量

碳排放量是建筑项目低碳化评估的关键指标,能够反映建

筑过程中各环节的碳排放情况。其计算公式为:

$$C = \sum(C_i \cdot d_i)$$

其中, C 为总碳排放量, C_i 为第 i 阶段的碳排放因子, d_i 为第 i 阶段的能耗量。此公式帮助评估建筑生命周期内各阶段的碳排放,并制定相应的减排措施。

3.2.3 施工周期

施工周期对建筑项目的资源调度和能效控制有着至关重要的作用。施工周期的计算公式为:

$$T = \frac{D}{R}$$

其中, T 为施工周期, D 为项目总工作量, R 为工作效率系数。合理调整施工周期有助于降低能源消耗,并提高项目的资源使用效率。

3.2.4 成本效益分析

为了评估低碳技术的经济性,成本效益分析至关重要。该分析公式为:

$$ROI = \frac{NVP}{C}$$

其中, ROI 为投资回报率, NVP 为净现值, C 为总成本。该公式帮助评估低碳改造项目在实施后的经济性和长期效益。

3.3 技术阶段划分

全周期低碳化技术的实施可以分为三个主要阶段:设计阶段、施工阶段和运营阶段。在设计阶段,主要目标是通过优化建筑结构材料与材料,最大限度地提高建筑能效并减少碳排放。在施工阶段,关键任务包括选择低碳材料,优化施工方法,以及减少施工过程中产生的碳排放。运营阶段则着重于通过智能化管理系统,如能源管理系统(EMS),持续监控建筑的能源消耗,进一步降低能效损失,并实施定期的能源优化。

3.4 数值模拟分析

通过对不同低碳化方案的模拟分析,能够比较各方案在能效、碳排放、施工周期和成本方面的表现。表1是四个指标在不同方案下的模拟数据。

表1 不同低碳化方案模拟结果

方案	能效系数 (E)	碳排放量 (C)	施工周期 (T)	成本效益分析 (ROI)
方案A(传统)	0.85	1800 kg CO ₂	12 个月	1.5
方案B(绿色材料)	1.05	1400 kg CO ₂	11 个月	1.8
方案C(智能建筑)	1.2	1200 kg CO ₂	10 个月	2
方案D(综合优化)	1.35	1000 kg CO ₂	9 个月	2.5

通过这些数据可以清楚地看到,随着低碳化技术的应用,建筑项目的能效逐步提高,碳排放量逐渐降低,施工周期也相应缩短。而成本效益分析则显示,采用综合优化方案的回报率最高,表明在经济性和环保效益方面,综合低碳化措施最具优势。

4 关键施工技术与低碳化实施

4.1 数字化施工管理技术

数字化施工管理技术通过运用建筑信息模型(BIM)和数字

孪生平台,在施工过程中实现了精准地控制和高效地协作。BIM技术以虚拟建模、三维可视化等方式使建设过程中各种任务、各种资源得到实时优化,降低了设计、建设等环节的矛盾及返工^[4]。同时数字孪生技术实现了数据的共享与分析,实现了对项目进度的监测,对可能出现的问题进行了超前的预见,保证了项目如期按质量地完成。

4.2 节能与绿色建筑技术

采用节能和绿色建筑技术,包括选用绿色材料如水泥、环保涂料和可再生建筑材料,大大降低建筑过程的碳排放。建筑外立面设计及保温技术改进有利于降低能耗、优化热性能。如通过设置高效外墙保温材料、低辐射玻璃等措施可以有效降低热损失、提升建筑能效。

4.3 智能建筑技术

通过融合智能能源管理系统(EMS)与物联网(IoT)的先进技术,智能建筑技术有能力对建筑的能源使用进行实时监测,并做出相应的动态调整。通过物联网技术,建筑设备可根据实际使用情况自动调整,减少能源浪费^[5]。智能建筑技术在优化建筑中能源使用的同时也有助于预测性维护、延长设备寿命、进一步减少能源成本与碳排放。

4.4 施工现场低碳管理

施工现场可研管理是降低建筑项目碳排放最关键的环节。建设期间通过对运输路线及机械设备的优化使用能够降低资源运输及设备运行带来的碳排放。选用环保建材与低碳施工设备,有利于降低建筑过程对环境的污染与能源的消耗。合理的施工管理既可以减少项目成本又可以保证建筑项目施工阶段低碳化目标的实现。

5 控制措施实施效果与评估

5.1 现场监测数据

在实施低碳化措施后,项目现场对四个关键指标(能效系数、碳排放量、施工周期和成本效益)进行了监测。以下为一组时间序列数据,涵盖了设计阶段、施工阶段和运营阶段的监测结果:

表2 低碳化技术实施过程中的关键指标变化

时间	能效系数 (E)	碳排放量 (C, kg CO2)	施工周期 (T, 月)	成本效益分析 (ROI)
设计阶段	0.9	1500	12	1.6
施工阶段	1.05	1300	11	1.8
运营阶段	1.15	1100	10	2
运营阶段后1年	1.2	1000	9	2.3

表2显示了建筑项目在不同阶段的关键指标变化,通过对比可以看出,随着低碳化措施的实施,能效系数逐渐提高,碳排放量逐步降低,施工周期缩短,投资回报率逐年提高,显示出低碳

化技术的明显成效。

5.2 实施效果评价

通过对上述现场监测数据的分析,可以看出低碳化措施在项目各阶段的显著效果。在设计阶段,能效系数为0.90,碳排放量为1500kgCO₂,但随着施工阶段的推进,能效系数提升至1.05,碳排放量减少至1300kgCO₂,施工周期缩短到11个月。到了运营阶段,能效系数进一步提高至1.15,碳排放量降低至1100kgCO₂,并且施工周期减少至10个月,ROI为2.0,表明低碳化措施在实际运营中得到了有效地实施。在运营后1年,能效系数达到了1.20,碳排放量降至1000kgCO₂,ROI达到2.3,验证了低碳化技术的长效性和可持续性。

6 结论

本文探讨了基于数字孪生模型的住宅建筑项目管理全周期低碳化技术,重点分析了数字化施工管理、绿色建筑技术、智能建筑系统和低碳施工现场管理的应用。研究表明,通过数字孪生模型的综合应用,能够有效优化建筑项目的能效和碳排放,在各个阶段取得显著成效。根据现场监测数据,低碳化措施在项目设计、施工及运营阶段的实施效果显著:设计阶段能效系数为0.90,运营阶段达到1.20,碳排放量从1500kgCO₂降至1000kgCO₂,施工周期缩短至9个月,ROI从1.6提升至2.3。这些结果表明,低碳化技术不仅对环境有益,也能提升项目的经济效益。通过这一研究,数字孪生模型为建筑行业的低碳化转型提供了有效路径,并为未来类似项目的实施提供了数据支持和理论依据。

[参考文献]

- [1]何沐春,张宏,张蕾,等.新型建筑工业化背景下住宅建筑设计实践[J].城市建筑空间,2025,32(2):89-92.
- [2]赵文涵.农村住宅低碳化改造策略[J].城镇化与集约用地,2023,11(2):65-71.
- [3]严斌,李斌彬.施工企业在安全管理中应用数字化技术意愿的影响因素研究[J].安全与环境学报,2024,24(7):2693-2700.
- [4]张艺文.数字化+物联网技术在桥梁施工管理中的应用研究[D].中北大学,2024.

[5]Yu.Z. RETRACTED ARTICLE: Green building energy efficiency and landscape design based on remote sensing technology: Green building energy efficiency and landscape design based on remote sensing technology.: Z. Yu [J]. Soft Computing - A Fusion of Foundations, Methodologies & Applications, 2024, 28.

作者简介:

贾盛(1984-),男,汉族,山东青岛人,融信中国沪苏区域城市总经理,研究方向:地产项目管理数字化、低碳化创新实践。

方娟(1984-),女,汉族,山东青岛人,运营经理,研究方向:地产项目管理创新实践。