

人工智能赋能建筑行业可持续发展的逻辑、挑战与进路

连 烁¹, 张偲宸², 舒景奇³

¹云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

²桂林旅游学院商学院, 广西 桂林

³广西师范大学经济管理学院, 广西 桂林

收稿日期: 2025年7月15日; 录用日期: 2025年7月25日; 发布日期: 2025年8月19日

摘 要

在全球气候变暖与能源短缺日益严峻的背景下, 如何在建筑行业乃至人们的日常起居中做到绿色低碳不仅是国家层面的战略问题, 更是与全人类未来发展息息相关的现实挑战。人工智能是赋能建筑行业中的新兴技术, 可作为一种运用数字模型运用于建筑中碳排放量的动态预测分析与节能路径优化, 让建筑中各要素碳排放权重更加合理, 施工工艺更加节能。研究表明, 我国建筑行业碳排放的实时管控面临着排放因素复杂多变, 碳排放监测额外支出, 以及排放量不直观、难以实时观测等诸多挑战。而人工智能在构建排放观测的实时传感系统的基础上, 能通过智能能源管理系统、区块链等技术, 利用现有数据拟合碳排放数据情景, 提供可靠、精确的排放数据, 将排放逻辑与机器学习深度融合, 创立更加公开透明的碳排放额度公示制度, 助力我国“双碳”政策在建筑行业落实, 而这也推动碳管理技术朝着数字化、智能化、低碳化和全生命周期管理的方向快速发展。

关键词

人工智能, 建筑行业, 碳排放, 可持续发展

The Logic, Challenges and Approaches of Empowering the Sustainable Development of the Construction Industry with Artificial Intelligence

Shuo Lian¹, Sichen Zhang², Jingqi Shu³

¹School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

²School of Business, Guilin Tourism University, Guilin Guangxi

³School of Economic and Management, Guangxi Normal University, Guilin Guangxi

Abstract

Against the increasingly severe backdrop of global climate warming and energy shortages, achieving green and low-carbon practices in the construction industry and in people's daily lives is not only a strategic priority at the national level but also a critical challenge for the future development of all humanity. As an emerging technology empowering the construction sector, artificial intelligence (AI) can serve as a digital model to perform dynamic prediction analysis of carbon emissions and optimize energy-saving pathways in buildings, achieve more reasonable carbon weighting for building components and more energy-efficient construction processes. Research indicates that real-time carbon management in China's construction industry faces multiple challenges, including complex and variable emission factors, additional costs for carbon monitoring, and difficulties in intuitive, real-time observation of emission levels. Building upon real-time sensing systems for emission observation, AI leverages technologies such as smart energy management systems and blockchain to simulate carbon emission scenarios using existing data. This provides reliable and precise emission metrics while enabling deep integration of emission logic with machine learning. Such integration facilitates the establishment of a more transparent carbon emission quota disclosure system, accelerating the implementation of China's "dual carbon" goals (carbon peak and carbon neutrality) in construction. Consequently, this advancement will drive rapid progress in carbon management technologies toward digitalization, intelligence, low-carbonization, and full lifecycle management.

Keywords

AI, Construction Industry, Carbon Emission, Sustainable Development

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在碳排放的来源中, 建筑行业的占比约 30%, 在能源排放的占比高, 2021 年我国的建筑行业的二氧化碳排放总量高达 38.2% [1], 优化建筑行业中碳排放问题刻不容缓。我国党和政府也将碳排放问题放在生态文明建设的战略制高点[2], 在《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中, 也明确提出了要大幅提高能源的利用效率, 减少建筑行业中各项过程所带来的非必要排放。在保障建筑施工安全的前提下, 通过建筑施工过程管理对碳排放进行动态分析, 进而通过碳数据核算优化碳排放模型, 集约利用排放额度, 是解决当下建筑行业可持续发展的现实路径。

大基建模式下建筑施工粗放管理问题是排放过度的直接成因之一, 传统施工模式下的碳排放管理中依赖人工和精确度低的问题, 为碳管理技术在建筑行业的运用设下阻碍。施工过程中普遍缺乏早期工程管理, 施工过程中碳排放控制管理失范、精度缺失、监管力度缺位都会导致高额碳排放问题。粗放式施工的无预见性直接导致项目成果的质量参差, 甚至为后续的施工流程埋下安全隐患[3]。施工工艺的选择、施工人员的活动度差异等包括了隐含碳排放, 使碳排放量呈现不同结果, 这就让碳排放的数据准确度更加难以保证。

碳管理技术在狭义上包括碳捕集利用(CCUS)和碳移除(CDR)技术[4], 数字化技术在建筑行业碳管理技术的运用中前景广阔。一方面, 我国的碳管理技术仍未达到国际前沿水平, 在“双碳”的目标要求下, 碳捕集利用和碳移除的建筑产业部署亟待推广, 我国仍需要加大碳管理技术研发投入从而与国际前沿接轨。另一方面, 国家《“十四五”节能减排综合工作方案》中也明确了要推动建设低碳城市, 发展“超低能耗建筑”, 将数字化技术与碳管理技术深度融合, 能够推进节能减排工程朝着数字化、精确化、智能化的方向发展。

目前, 我们面临着数字化建造相关研究不足, 新质产业部署数量远少于传统产业部署等问题, 而人工智能与建筑行业的结合是新型科技驱动力与传统产业的结合, 人工智能赋能让建筑行业在科技革命中焕发新的生机, 形成以科技创新为核心动力的新质生产力, 并利用技术革命突破传统生产力的技术壁垒, 通过要素的创新性配置, 从量变引发质变。以人工智能赋能传统建筑行业建立碳排放预测模型, 及建设碳排放交易及碳数据要素的相关标准的研究仍旧任重而道远。

低碳城市建设在建筑行业所面临的挑战是摆脱传统的高耗能施工模式, 解决施工管理失范、施工无预见性、隐含碳排放监测缺失的问题, 引入数字化技术集约管理, 从而实现“少碳-低碳-零碳”的新型可持续建筑发展, 利用人工智能的高效数据预演效果构建碳数据核算模型, 对碳排放量进行动态分析。本文将以人工智能赋能作为核心手段, 探究建筑行业的可持续发展以及可量化的碳管理路径。

2. 文献综述与评述

2.1. 国内外研究综述

自 1956 年的达特茅斯会议上人工智能的概念被提出以后, 人工智能便以一种新型学术概念的姿态成为学术舞台的聚焦点[5]。深度学习与数据智能赋予其无可比拟的创新驱动力, 更是有无数的交叉学科领域以 AI 为基础, 催生出数以万计的前沿成果[6]。据统计, 图灵奖自设立以来, 截至 2025 年 1 月 1 日共颁布了 58 次, 其中与人工智能领域相关的图灵奖颁发了共计 8 次。不计其数的科学工作者投身人工智能领域, 在该领域留下了丰硕的技术成果。以人工智能为关键词在中国知网(CNKI)中检索, 与其相关的文献有 33 万篇, 涵盖了包括自动化技术、金融、电力行业等多个学科。人工智能通过在大模型深度开发与交叉学科领域中学习[7], 持续优化自己的语言、算法与逻辑, 其应用的广泛性和适应性依然在不断提升。

AI 在建筑行业的运用在近几年呈上升趋势, 目前的研究方向主要分为以下几类。一是 AI 在协同管理与智能决策方面, 以相关的研究报告为例: 数字孪生是一种能够通过数字模型映射物理实体的技术手段[7], 通过数字孪生在交通设施智能建造中的应用[8], 交通管理部门能构建多源数据融合的实时交互平台, 显著提升交通基础设施建造的协同管理能力与智能决策能力。二是生成式 AI 在辅助建筑信息模型构建方面的应用, 如: 机器学习是能通过数据驱动实现知识获取和自我优化的科学技术[9], 预测混凝土性能时引入机器学习可以弥补经验模型在预测性能方面的不足[10], 如由 AI 驱动的生成式“设计大模型”与计算机辅助设计(CAD)与建筑信息模型(BIM)相结合以实现技术迭代[11]。三是 AI 参与碳核算的相关研究, 基于 BIM 的碳核算、基于 GIS 的碳核算与基于 IoT 的碳核算, 三者分别从建筑、地理与传感的角度出发进行社区尺度的数字化碳核算[12]。四是 AI 在建筑行业中的标准化建设应用的相关研究, 如对于个体建筑全生命周期的碳排放, 其主要在规划设计、施工建造和运营维护的阶段产生, 其中规划设计中的碳排放量可以忽略不计, 据《建筑碳排放计算标准(GB/T 51366-2019)》规定[13], 计算建筑物碳排放的范围应涵盖建设工程规划许可证范围内的所有能源所产生的碳排放量, 以及可再生能源及碳汇系统的减碳量。建筑作为城乡规划中的基本单元, 个体建筑的碳排放水平直接影响着整体低碳城市空间的节能减排

成效。上述研究均能表明，在可持续发展的视角下，当代碳管理技术参与的建筑行业也有着向数字化、智能化、低碳化与全生命周期管理的趋势[14]，人工智能正在成为建筑行业想要高质量发展的助力。

2.2. 文献评述

包括人工智能技术在内的数字化技术的发展为建筑行业带来了前所未有的机遇[15]，尽管人工智能与建筑行业的相关研究数量在近些年显著提高[16]，其中文献检索的主要关键词中碳排放占比最高，以人工智能为关键词在建筑行业相关研究报告的数量也不少，但人工智能在建筑可持续发展方面的研究却鲜有提及，尤其是人工智能在建筑行业中的碳核算模型构建方面的研究甚少，目前建筑行业相关标准中尚缺少关于人工智能的应用的标准。而在贯彻落实新发展理念的过程中，建筑碳核算模型构建无疑是建筑行业减碳攻坚克难过程中的关键因素。因此，本文以建筑行业可持续发展为目标，以人工智能为落脚点解决建筑施工过程中碳排放中实时管控难、优化预测难、舒适平衡难等问题，旨在构建集“实时传感-精准预测-智能调节”一体的标准化建筑碳管理全生命周期系统。

3. 人工智能赋能建筑行业可持续发展的现实困境

3.1. 建筑行业人工智能技术应用滞后，建筑碳管理依赖传统路径

首先，传统碳排放管理方式本身就存在诸多问题：一是施工方、监理、用户各方之间的信息不对称，碳排放数据难以共享；二是传统管理模式缺乏系统性和科学性，项目的施工运营会通过降本增效使自己的利益最大化；三是数据精度缺失，碳排放计量依赖传统人工记录与估算，数据的可信度不足。其次，在《建筑行业数字化转型与智慧城市建设研究报告》中，明确表示建筑行业数字化标准程度低，这也给建筑行业数字化转型带来了阻碍。且不同企业间的信息孤立现象严重，产业接口与标准的缺乏让数据对接与协同工作雪上加霜。第三，同时高校建筑类相关专业教育中的人工智能技术应用教育占比较低[17]，在传统基建观念下存在着劳动力转型冲突的问题[18]，让 AI 替代部分劳动强度大、重复性高的岗位容易诱发工会抵制，如美国建筑工人联合会(NABTU)曾大力抵制 AI[19]，防止其威胁工人岗位，传统建筑人员人工智能素养与专业知识的缺失也让 AI 的普及性大打折扣。与此同时，AI 领域的专业技术人员往往又缺乏相应的建筑工程专业素养，复合型人才缺失让 AI 与建筑行业这一交叉学科领域发展落后于其他领域，也让数字化技术在建筑行业中难以被普及；传统建筑行业的管理模式根深蒂固，人工智能等数字化技术在传统大基建观中难以渗透观念壁垒；一些施工现场常常位于边远山区，网络信号覆盖率不足和网络延迟高导致的边缘计算能力不足，是建筑行业数字化的现实桎梏，上述这些问题让人工智能技术在建筑行业相较于众多其他行业更容易受到传播阻碍。

3.2. AI 算法黑箱特性导致碳管理数据难以溯源

AI 算法“黑箱”特性是指 AI 高度复杂的内部机制让决策过程难以用传统逻辑解释[20]，导致 AI 的算法逻辑与计算过程通常情况下难以被人理解[21]，即便是 AI 设计者也很难预料 AI 的生成结果，这就产生了 AI 在被理解程度下降后相关技术人员对于 AI 的安全感与信任度问题[22]，既有对未能理解算法却对 AI 保持着无条件信任的过度依赖问题，也有无法理解从而就拒绝相信 AI 的信任危机。因 AI 的算法透明度缺失，建筑行业的碳管理数据往往难以溯源。机器学习与深度学习在赋予生成式 AI 解决多样化问题能力的同时，其生成结果往往过分注重普适性而忽略了用户需求的特殊性。其结果推演过程的不可视化容易诱发复杂情景中结果适应性缺失。一方面便捷性所诱发的“工具沉迷”会让 AI 生成的普遍性结果被使用者滥用[23]，另一方面“结果依赖”让 AI “黑箱”特性中可视化过程的缺失问题被大众忽视。AI 大数据模型中错误观点的参杂会导致建筑施工中 AI 使用失范问题的产生。而逻辑架构不可视同样也

让 AI 引入行业的标准化变得举步维艰。

鉴于传统建筑企业的数据管理依赖中心化的数据库，且相关从业人员的数据安全意识淡薄，包括碳管理数据在内的建筑数据管理安全性明显不足，据 BIM 模型储存方式统计，将近 51% 的建筑行业从业人员选择将 BIM 数据储存在使用者个人电脑和本地服务器当中，其存在显著的安全隐患[24]。而许多的云端 BIM 模型甚至没有设置查看权限，其他人可以轻易地拿到整套的建筑模型，其中便包括碳排放数据等建筑相关数据。相关数据的政策性保护缺失和从业人员的安全意识淡薄，让建筑行业碳数据的信息安全岌岌可危。

4. 人工智能赋能建筑行业可持续发展的优化路径

4.1. 完善人工智能标准化建设，助力全生命周期数据交互

建筑行业相关企业间的信息孤立现象主要是因为标准差异，这种标准差异由于企业间的信息不对称难以自发弥补。这要求必须用数据标准强制贯通的方法来解决信息孤立的问题[13]，一是可以通过构建建筑数据湖如城市模型信息平台的方式，在平台上统一数据录入标准，强制企业全周期数据留痕，要求数据涵盖“立项-施工-运营”全过程，并利用 AI 完成数据核对与矫正工作；二是可以通过数据共享与协同管理解决数据孤岛与碎片化问题，利用大数据构建数据管理平台，引导企业共享数据资源，助力工程各方更加紧密地合作与协同[25]。

虽然在我国建筑行业领域的传统模块的行业标准化工作已经比较完整，但是人工智能在该领域相应的标准化工作还仍未完善[13]，一方面是因为 AI 在建筑行业中的标准化框架缺失，AI 助力建筑行业可持续发展的范式难以复制推广。另一方面是因为行业统一的数据标准以及传感器数据接口协议的缺失[23]，导致 AI 模型训练和跨平台协作的数据兼容性无法保证。建筑数字技术使用规范的落地，能够助力 AI 在建筑行业中的被规范使用。同时 AI 的使用范式落地也有助于标准化建设，建筑设计师可以利用 AI 的机器学习与长短记忆神经网络(LSMT)技术，为建筑风格提供多样化的建设方案。防止建筑风格在标准化的限制之下千篇一律，让建筑更加符合大众化的审美标准。而标准化建设的完善也有助于全生命周期系统在建筑行业的运用，在建筑构件中利用标准化范式统一加入碳足迹的追溯系统，让建筑材料的效益最大化。运用 IoT 传感技术为人工智能实时传输数据，而人工智能在施工过程中可以实时监测，一是能第一时间保证施工过程中的技术规范，二是有利于碳排放实时核算标准在施工过程中具体落实。而确保 BIM 模型设计到 IoT 运营数据符合碳核算标准之后，也能助推 AI 模型在跨阶段时能合理调用[26]。传统建筑企业在利用数字化技术转型升级的同时，也要做好市场化信息配置标准化工作。为了保证建筑市场交易信息透明公开，市场监管方可以利用区块链技术，让相关产业配套的数据市场与地块信息能无差别交接。通过 IoT 传感技术的建筑行业普及，实时监测设备能耗、材料使用情况以及废弃物产生量，利用好数据市场，将碳排放数据和建筑的全生命周期管理相结合，为建筑的运行和拆除、建筑材料的二次使用提供安全可靠的碳数据支撑服务。

4.2. 人工智能技术参与创建碳核算模型，构筑低碳智能建筑空间

传统碳核算面临着数据采集难、排放追踪难、动态预测缺失等难点，而 AI 有着管理数据庞大，可自我迭代的优点。但是人工智能因其黑箱特性而诟病于算法透明度缺失而导致 AI 生成式方案的信任度欠缺，同时防火墙、加密通信等传统措施对于建筑物来说又有很强的局限性，不仅是建筑智能数据的安全在中心化的数据库中难以被保证，且智能建筑数据溯源(被篡改数据与丢失数据)在中心化数据库查询过程复杂，往往需要耗费高昂人力与物力。因此，将传统碳核算与人工智能、区块链、技术孪生等技术的深度融合，可以大幅度缓解传统碳核算机制的痛点。

针对传统碳核算数据采集难的问题,可基于 IoT 传感器实时采集能耗与材料数据经由 AI 录入平台,解决数据收集难的痛点,再由区块链溯源原材料供应链解决中心化数据库难溯源的特点,最后基于数字孪生构建碳流路径模型,预测未来碳排放情景,解决动态预测缺失的问题。

针对传统碳核算数据排放追踪难的问题,智能建筑中的数据兼具来源广泛、数量庞大的特点,数据泄密会给用户与企业带来巨大的损失[27],区块链技术以去中心化、不可篡改、透明可追溯、安全可靠的特点高度契合人工智能进军智能建筑行业的需求。人工智能在区块链的技术融合运用的同时也补足智能建造中建筑能耗较高、设备故障的问题(设备在机器学习中自我优化及利用人工智能预测碳排放路径及生成相关的优化方案)。而区块链技术不仅能增加人工智能在建筑中数据使用的安全性,还可灵活地管理、溯源智能建筑数据应对不同的用户需求。

针对传统碳核算数据动态数据缺失的问题,建筑内能源管理系统是指通过智能软件对楼宇内部各个信息要素进行人工或自动化操控[28],通过集成能源管理系统(EMS),能够实现建筑能源的实时监控与优化调度,提高能源的利用效率。通过人工智能机器学习与深度学习的特点,开发 LSTM-Transformer 混合模型预测未来 24 小时能耗,实时优化碳排放路径,平衡建筑内各个配置之间的碳额度规划,实现建筑空间节能减排。

针对 AI 黑箱特性所衍生的算法信任度缺失与信息安全问题,可以引入区块链技术来提高信息的可信度与安全性。同时也要在建筑行业领域中制定相关的 AI 操作规范,如要求主流建筑设计软件(BIM)开放 API 接口,支持 AI 插件的部署,最后建立 AI 生成模型的测试认证中心,对施工安全检测、能耗预测等指标进行第三方检测,以及通过高级加密标准(AES)等加密算法对建筑内数据进行加密处理,确保数据在存储和传输过程中的安全性。

5. 结论

人工智能作为数字化领域中的前沿技术,正在深刻改变着建筑行业在新时代中的可持续发展格局。通过建筑行业中人工智能等数字化标准的制定,传统建筑与人工智能的深度融合应用为碳核算路径提供了更加便捷、智能、精确的数字化方案,区块链技术、IoT 传感器技术和 LSTM 技术的运用让产业数字化程度在建筑行业中不断攀升,让低碳城市空间的建设享受信息化的时代红利。人工智能在与区块链、碳管理技术等技术的深度融合中,使建筑施工过程管理更加规范,建筑碳排放更具可预测性,隐含碳排放能够更好地被监测。

参考文献

- [1] 周凯,王景全,王震,等. 基于低碳目标的混凝土建筑结构设计方法研究进展[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(7): 113-130+141.
- [2] 中共中央国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm, 2021-09-22.
- [3] 邹泓荣. 现浇楼板粗放式施工的不良后果[J]. 建筑工人, 2007(5): 14-15.
- [4] 张贤,彭雪婷,贾子奕. 美国碳管理技术发展态势研究[J]. 石油石化绿色低碳, 2024, 9(6): 1-9.
- [5] 杨善林,李霄剑,张强,等. 人工智能与管理变革[J]. 中国管理科学, 2023, 31(6): 1-11.
- [6] 荆东星,陈杨晖. 以学科交叉为基础的跨应用领域人工智能教学模式探索[J]. 湖南工业职业技术学院学报, 2025, 25(2): 113-120.
- [7] 鲍劲松,张荣,李婕,等. 面向人-机-环境共融的数字孪生协同技术[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 103-115.
- [8] 孙宝娣,陈柯颖,陈赵慧,等. 数字孪生技术赋能社区尺度碳核算现实需求、发展趋势与未来展望[J]. 地球信息科学学报, 2025, 27(7): 1671-1686.
- [9] 何清,李宁,罗文娟,等. 大数据下的机器学习算法综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(4): 327-336.

- [10] 刘军华, 刘宾, 曹海峰, 等. 基于机器学习的高温下混凝土力学性能研究[J/OL]. 中外公路: 1-17. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.u.20250627.1412.010.html>, 2025-07-28.
- [11] 王章琼, 赵歧林, 徐晓雅, 等. 人工智能在建筑结构中的应用研究进展[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(16): 6598-6607.
- [12] Agarwal, R., Chandrasekaran, S. and Sridhar, M. (2018) Imagining Construction's Digital Future. McKinsey & Company.
- [13] 中国住房与城乡建设部. 建筑碳排放计算标准[EB/OL]. <http://www.mohurd.gov.cn/>, 2019-04-09.
- [14] 彭颖, 陈宇鑫, 刘丽燕, 等. 数字孪生技术在建筑节能减碳领域的发展与应用综述[J/OL]. 浙江理工大学学报(自然科学版): 1-14. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1338.TS.20250704.1326.002.html>, 2025-07-28.
- [15] 邵军校, 左春阳, 陈佳锋, 等. 基于低碳 AIoT 管理体系的建筑结构碳排放精细化管理路径及数字化平台研究[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会. 中国土木工程学会总工程师工作委员会第四届总工论坛论文集. 2024: 86-89.
- [16] 王瑶, 张逸君, 聂影, 等. 基于数字化技术的建筑业碳排放研究: 文献计量学和可视化分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(S2): 32-37.
- [17] 胡兴福, 邓林. 对接新时代建筑行业发展新需求引领土木建筑类专业改造升级——《职业教育专业目录(2021)》土木建筑大类解析[J]. 中国职业技术教育, 2021(14): 11-15.
- [18] Bussone, A., Stumpf, S. and O'Sullivan, D. (2015). The Role of Explanations on Trust and Reliance in Clinical Decision Support Systems. 2015 *International Conference on Healthcare Informatics*, Dallas, 21-23 October 2015, 160-169. <https://doi.org/10.1109/ichi.2015.26>
- [19] Glikson, E. and Woolley, A.W. (2020) Human Trust in Artificial Intelligence: Review of Empirical Research. *Academy of Management Annals*, **14**, 627-660. <https://doi.org/10.5465/annals.2018.0057>
- [20] 谭九生, 范晓韵. 算法“黑箱”的成因、风险及其治理[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版), 2020, 23(6): 92-99.
- [21] 门慧芳. 中企赴美并购 AI 企业国家安全审查问题研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [22] 谢潇, 罗世杰. 论生成式人工智能的动态风险及适应性治理[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2025, 25(1): 112-125.
- [23] 樊金龙, 韩伟涛, 王琛, 等. 自主 BIM 平台工程项目全生命周期数据贯通挑战与标准化发展路径研究[J/OL]. 建筑节能(中英文): 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1612.TU.20250708.1347.002.html>, 2025-07-28.
- [24] 林良帆. BIM 数据存储与集成管理研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [25] 李洪杰. 建筑行业项目数据治理的挑战与创新策略[J]. 商业文化, 2024(6): 108-110.
- [26] 李蒙, 鲁曼, 余宏亮. 区块链技术下的建筑材料信息技术架构研究[J]. 建筑经济, 2019, 40(10): 103-107.
- [27] 牛春. 大数据在建筑工程安全管理中的应用[J]. 建设机械技术与管理, 2025, 38(2): 76-77+83.
- [28] 张亚婕. 智能楼宇的集成式数学模型及能源管理系统研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2022.