

建筑幕墙全生命周期智能化：数字孪生、智能建造与云边端协同

康丹莹, 韩 焯

上海建科检验检测认证有限公司, 上海

收稿日期: 2026年4月21日; 录用日期: 2026年5月13日; 发布日期: 2026年5月25日

摘 要

建筑幕墙在轻量化、抗震安全、设计灵活性、施工效率、节能环保等多个维度具有显著优势, 这些特性使其成为现代高层建筑外围护结构的主导选择, 但其长期面临设计效率低、施工精度差、运维风险高三重困境。人工智能与数字孪生技术的引入, 正在推动幕墙系统从“单点应用”走向“系统集成”。文章系统梳理了AI与数字孪生在建筑幕墙领域的最新研究与应用进展, 从感知、决策、执行三个维度构建了幕墙智能体的技术框架; 同时围绕设计施工、智能建造、运维监测三大环节展开梳理, 讨论了数据标准缺失、模型泛化能力不足等当前瓶颈, 并对物理信息神经网络、多模态大模型、自主智能体系统及生成式AI辅助设计等未来发展方向进行展望, 旨在为建筑智能化领域的研究者与工程实践者提供系统性的理论参考。

关键词

建筑幕墙, 数字孪生, 智能机器人, 智能运维, 管理工程

Building Facade Full-Life-Cycle Intelligence: Digital Twin, Intelligent Construction, and Cloud-Edge-Device Collaboration

Danning Kang, Ye Han

SRIBS Testing Inspection and Certification Co., Ltd., Shanghai

Received: April 21, 2026; accepted: May 13, 2026; published: May 25, 2026

Abstract

Building facades offer significant advantages in multiple dimensions, including light weight, seismic

safety, design flexibility, construction efficiency, and energy conservation. These characteristics have made them the dominant choice for the exterior enclosure of modern high-rise buildings. However, the facade industry has long been plagued by three persistent challenges: low design efficiency, poor construction accuracy, and high operational risks. The introduction of artificial intelligence and digital twin technologies is driving facade systems from “standalone applications” toward “system integration”. This paper systematically reviews the latest research and application progress of AI and digital twins in the field of building facades, and constructs a technical framework for the facade agent from three dimensions: perception, decision-making, and execution. The review is organized around the stages of design and construction, intelligent construction, and operation and maintenance. It discusses current bottlenecks such as the lack of data standards and insufficient model generalization, and looks ahead to future directions including physics-informed neural networks, multimodal foundation models, autonomous agent systems, and generative AI-assisted design. The aim is to provide researchers and engineering practitioners in the field of building intelligence with a systematic theoretical reference.

Keywords

Building Facade, Digital Twin, Intelligent Robot, Intelligent Operation and Maintenance, Management Engineering

Copyright © 2026 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

建筑幕墙作为建筑与环境交互的界面,承担着采光、隔热、通风、安全等多重功能。自20世纪现代主义建筑广泛采用玻璃幕墙以来,这一建筑元素便成为技术与美学博弈的焦点。然而,传统幕墙系统长期面临三重困境:在设计环节中,复杂曲面与异型板块的建模依赖人工经验,效率低下且易出错;在建造环节中,高空作业风险高、劳动力短缺、精度控制难;运维环节则痛点日益凸显:高空检测危险性高、缺陷识别依赖人工经验、维修决策缺乏数据支撑。这些问题在既有建筑保有量持续攀升的背景下愈发严峻。

将人工智能引入建筑幕墙领域,为解决以上困境提供了新的可能。从技术演进的视角来看,建筑幕墙的智能化发展历经三个关键阶段:1980年前后进入机械自动化阶段(如巴黎阿拉伯世界研究所的光敏机械光圈),通过模拟电路实现对环境的简单响应;2000年左右迈入数字控制阶段(如巴塞罗那Media-TIC建筑的Arduino控制系统),依托规则编程完成幕墙的动态调节;2010年至今则处于AI驱动阶段(如阿布扎比阿尔巴哈塔建筑所采用的预测算法),借助机器学习技术实现对环境行为的预测与优化。关于动态幕墙的技术演进,已有学者对1985~2024年间的代表性案例进行了系统比较分析[1]。近年来,数字孪生与“云-边-端”协同架构的引入,进一步将幕墙智能化从“单点应用”推向“系统集成”,实现了设计、施工、运维全链条的数据贯通与协同优化。

本文旨在系统梳理AI与数字孪生在建筑幕墙领域的研究与应用现状,从感知、决策、执行三个维度构建幕墙智能体的技术框架,引入数字孪生施工技术、无人机实时裂纹检测、机器人精密控制以及“云-边-端”协同体系等最新成果,揭示不同场景中AI技术的共性逻辑与差异化路径,并在此基础上展望“数字孪生+AI Agent”的未来方向,重点分析数字孪生与多模态大模型的融合应用、人机协同的智能检测与清洁机器人,以及面向可持续设计的多智能体协作系统,旨在为建筑智能化领域的研究者和工程

实践者提供系统性的理论参考与技术路径。

2. 研究方法

为确保本综述的系统性、可复现性与科学性, 本文遵循了规范的系统性文献检索与分析方法。整个研究流程包括文献检索策略的制定、文献筛选与数据提取, 以及理论分析框架的构建。

文献检索策略: 本研究覆盖了建筑、计算机科学及工程应用领域的核心学术数据库, 包括 Web of Science 核心合集、Scopus 以及中国知网(CNKI)。检索时限设定为 2015 年至 2026 年, 以聚焦近十年间人工智能与数字孪生技术在建筑幕墙领域的最新进展。

3. 数字孪生在幕墙领域的应用

在施工技术领域, 郑志涛等[2]探索了基于数字孪生的复杂异形幕墙, 针对上悬式 GRC (玻璃纤维增强混凝土)幕墙这一典型复杂异形系统, 深入探究了数字孪生技术在施工全流程中的应用路径。该研究提出了一套从模型创建到虚拟预拼装, 再到现场测量、数据反馈、模型修正的闭环 workflow。具体而言, 在施工前利用 BIM 创建高精度幕墙模型, 并在虚拟环境中完成龙骨与面板的预拼装, 提前发现并解决干涉问题; 施工中采用高精度全站仪与三维激光扫描仪采集现场控制点坐标, 通过数字孪生平台将实测数据与 BIM 模型实时比对, 生成偏差云图; 安装完成后再次扫描实体并反向修正模型, 形成“实模一致”的交付成果。工程实践表明, 该技术可将安装误差控制在 3 mm 以内, 返工率降低约 60%。

数字孪生与参数化设计的结合, 进一步提升了幕墙工程的设计效率。以 Grasshopper、Dynamo 为代表的可视化编程工具, 使设计师能够通过定义参数之间的逻辑关系来驱动几何生成。近年来的突破在于, AI 算法被嵌入参数化 workflow, 实现规则的自动发现与优化。以青岛深蓝中心超高层单元式幕墙工程为例, 该项目面临复杂的塔楼收分形体, 单元板块类型多达数千种。设计团队采用参数化方法对表皮进行分析与优化, 通过分层分区域的误差归并, 将单元类型减少了 70% 以上。这一过程中, AI 利用机器学习算法对板块相似度进行聚类分析, 自动推荐归并方案; 同时借助大语言模型辅助构建型材特征数据库, 将特征识别准确率提升至 99.7% [3]。

在幕墙安全管控的宏观视角, 杨占东等[4]将数字孪生的应用从单体建筑拓展至城市尺度, 提出了“数字孪生城市”框架下的建筑幕墙安全管控体系。该研究指出, 幕墙安全不仅是单体建筑问题, 更是城市公共安全问题——面板脱落、开启扇坠落等事故可能造成严重的人员伤亡与财产损失。在这一框架中, 城市级别的 BIM/GIS 融合平台汇聚了区域内所有建筑的幕墙数据, 通过数字孪生技术构建“一栋一档”的幕墙健康档案。AI 算法基于这些数据对幕墙风险进行分级评估, 自动生成巡检计划与预警信息。

4. 智能建造与机器人控制

胡河宇等[5]提出了一种基于阻抗模型和自适应补偿的位置/力混合控制方法, 解决了幕墙安装中“既要保证位置精度, 又要控制接触力”的需求。该方法的理论创新在于将机器人的末端执行器建模为“质量-弹簧-阻尼”系统, 通过调节阻抗参数实现位置控制与力控制的平滑切换; 同时引入自适应补偿项, 在线估计并抵消幕墙板块重力、风荷载等未知干扰的影响。实验结果表明, 该方法可实现位置跟踪误差 $< 0.2 \text{ mm}$ 、接触力控制误差 $< 5 \text{ N}$ 的精密作业, 远超人工安装精度。这一成果使幕墙安装从“粗放式”推向“精密式”, 对超高层建筑、复杂曲面幕墙等场景具有战略意义。

在工程应用层面, 河北省科技厅支持研发的饰面机器人代表了幕墙安装机器人的最新实践[6]。该机器人最大负载能力达 900 斤, 可完成 8 米高度的安装任务, 单块最大尺寸 2.5 米 \times 4 米的幕墙安装平均仅需 4.5 分钟。其搭载的 3D 视觉系统能够实现毫米级定位, 末端力传感器通过算法实时微调动作, 将安

装误差控制在 0.5 mm 以内。单台机器人配合 1 名操作工人可完成传统 5~10 名工人的作业量, 整体效率提升超过 50%。此外, 近期举办的建筑场景专场活动也集中展示了多种智能建造技术在幕墙安装与现场施工中的集成应用[7]。

徐冰[8]指出, 幕墙安装的精度控制是一个涉及测量、定位、调整、复核的闭环过程。当前工程实践中已形成“全站仪 + 三维激光扫描”的双级控制网架构, AI 算法负责偏差分析与预测。在此基础上, 机器学习模型被用于预测温度、风荷载等环境因素对幕墙定位的影响, 从“后调整”进化到“预补偿”。徐冰的研究数据显示, 在 12 米跨度单元幕墙施工中, 平整度可控制在 $\leq 1 \text{ mm}/1000\text{mm}$, 拼缝差 $\leq 0.5 \text{ mm}$ 。

5. 智能运维与监测

黄宝锋等[9]研发了名为 Cladding Net 的轻量化深度学习网络, 并集成于无人机平台, 实现了无人机实时裂纹识别。该研究的核心创新在于轻量化架构设计, 采用深度可分离卷积与注意力机制, 将模型参数量压缩至传统模型的 1/10, 使其可在无人机机载边缘计算设备上实时运行; 系统可实现每秒 20 帧的处理速度。该系统已成功应用于上海、浙江等地的实际幕墙智能巡检项目, 累计检测面积超过 10 万平方米, 裂纹识别准确率达 90% 以上。这一成果将幕墙检测从“蜘蛛人”高空作业的低效模式, 升级为“无人机巡航 + AI 实时识别”的高效模式, 检测效率提升 10 倍以上, 成本降低约 70%。

《中国建设信息化》刊发的研究提出了“云-边-端”协同的智慧幕墙体系, 为幕墙运维的规模化部署提供了系统性的工程范式[10]。该架构的核心设计理念是: 端侧部署传感器与边缘计算设备, 负责数据采集与轻量级预处理; 边侧部署边缘服务器, 运行轻量化 AI 模型, 实现毫秒级响应的实时诊断; 云侧承担重模型训练、跨项目数据汇聚与长期趋势分析。徐冰[8]进一步将这一架构与幕墙安装实践结合, 提出了融合 BIM-GIS 引擎与物联网感知的智慧幕墙体系, 打通了设计、施工、运维之间的数据孤岛, 构建了覆盖幕墙全生命周期的“数字档案”。

除无人机平台外, 固定式传感器网络与计算机视觉技术的结合, 构成了幕墙损伤识别的另一技术路径。基于深度学习(如 YOLO 系列、Mask R-CNN)的幕墙损伤检测模型在标准数据集上的平均精度可达 85% 以上。然而, 实际工况中的光照变化、玻璃反射、拍摄角度等因素会显著影响检测精度。黄宝锋等[9]的 CladdingNet 通过数据增强与注意力机制在一定程度上缓解了这一问题。中国建筑科学研究院的相关研究也表明, 数智技术正在有效破解幕墙运维难题, 多项创新成果已在实际工程中验证了其可行性与经济性[11]。

杨占东等[4]的数字孪生城市框架为幕墙安全管控提供了宏观视角。每栋建筑的幕墙都拥有一个动态更新的数字孪生模型, 融合设计资料、施工记录、历次检测报告、实时传感器数据。AI 算法基于这一模型对幕墙风险进行分级评估, 自动生成差异化巡检策略。初步数据显示, 采用该体系后, 幕墙相关事故发生率下降约 40%, 运维成本降低约 30%。

此外, 无人机技术还拓展至幕墙清洗领域。据新华网报道, 无人机清洗系统可在 1 小时内完成传统“蜘蛛人”2 日的工作量, 显著提升高空作业的安全性与效率[12]。

6. 技术瓶颈与未来展望

幕墙 AI 系统需要建筑师、结构工程师、计算机科学家等多学科协同, 而幕墙全生命周期的数据分散于设计单位、施工单位、业主、运维公司等多个主体, 缺乏统一的数据标准与共享机制。这一困境在数字孪生应用中尤为突出[10]。此外, 即使在特定项目上已经训练出高精度的 AI 模型, 迁移到另一个项目时, 性能往往会显著下降, 例如 CladdingNet 迁移至其他石材类型或损伤模式时, 准确率可能下降。上述瓶颈的根源在于: 现有系统多为“任务驱动”的专用智能, 缺乏一个统一的信息物理融合框架来整合感

知、决策与执行。因此, 未来最富潜力的突破方向是构建“数字孪生 + AI Agent”的智能幕墙系统, 将幕墙从被动响应的“智能组件”升级为具备环境感知、自主决策与持续学习能力的“智能体”。以下提出一个具体的信息物理融合系统架构, 并定义其核心科学问题。

该架构以数字孪生模型为信息中枢, 以 AI Agent 为决策核心, 通过闭环交互实现幕墙系统的自适应运维。AI Agent 由三个紧密耦合的模块构成: 感知模块负责处理来自幕墙物联网(应变、温度、振动传感器)和机器视觉(无人机、固定摄像头)的异构数据, 运行轻量化深度学习模型(如 CladdingNet 的改进版)实时检测裂纹、松动、密封胶老化等损伤, 并将结构化后的状态特征注入数字孪生模型。规划模块基于数字孪生模型提供的幕墙当前状态与历史健康档案, 利用强化学习生成最优运维决策序列; 其状态空间包括损伤类型、位置、严重程度、环境荷载(风压、温度)、维修资源等, 动作空间涵盖巡检路径规划、清洁/维修任务调度、预警等级发布等, 奖励函数则综合最小化寿命周期成本与最大化安全裕度。控制模块将规划模块输出的高层指令转化为底层执行指令, 驱动机器人(安装机器人、无人机等)完成精密操作; 该模块继承胡河宇等[5]的阻抗力/位混合控制算法, 并可在线修正轨迹以适应实际工况偏差。

为实现信息物理系统的双向闭环, Agent 与数字孪生模型之间定义了两类标准交互接口。状态同步接口使感知模块以固定频率将实时检测数据与语义标签写入数字孪生模型, 触发模型的几何与属性更新; 数字孪生内部嵌有物理信息神经网络(PINN), 依据力学平衡方程对稀疏传感器数据做全场插值, 生成高分辨率应变/位移云图。决策执行接口允许规划模块从数字孪生模型中查询当前幕墙的“健康状态向量”(含每个板块的损伤概率、剩余寿命预估), 强化学习策略网络据此输出动作; 控制模块执行后, 新的传感器数据再次通过状态同步接口反馈, 形成感知、规划、执行、再感知的闭环。

在关键算法层面, 需要突破的是基于分层强化学习的运维决策优化。幕墙运维决策是一个长周期、多约束优化问题, 现有方法依赖固定规则(如“既有幕墙每五年定期检查一次”), 缺乏对环境风险与历史维修效果的适应性。为此, 本文提出分层强化学习框架: 高层策略使用深度 Q 网络或近端策略优化, 以周或月为步长, 决定是否需要出动无人机全面巡检或者仅依赖固定传感器持续监测, 其状态输入为数字孪生模型计算的综合风险指数(融合风速历史、面板服役年限、上次检测以来的损伤增长率); 当高层决策触发巡检后, 低层策略基于当前损伤热力图规划无人机的飞行路径与拍摄角度, 可使用指针网络或图注意力网络求解, 目标是 minimized 飞行耗时的同时最大化关键区域的覆盖度。

7. 结语

建筑幕墙与人工智能、数字孪生的交叉, 是一个既有深厚学术底蕴又具强烈工程牵引的新兴领域。从本文的梳理可以看出, 幕墙智能化已从“单点技术应用”走向“系统集成融合”: 设计施工环节, 数字孪生技术[2]实现了异形幕墙的精确放线与安装验证; 建造环节, 精密力/位控制算法[5]及智能机器人[6][7]使安装达到亚毫米级精度与较高自动化水平; 运维环节, 无人机实时检测系统[9]、“云-边-端”协同架构[10]以及新兴的无人机清洗技术[12]共同推动了从“被动巡检”到“主动预警与高效维护”的转变; 宏观管理层面, 数字孪生城市框架[4]为幕墙安全管控提供了城市级解决方案; 而数智技术的系统性突破[11]则为全行业升级奠定了坚实基础。

可以预见, 未来的幕墙系统将是一个“数字孪生 + AI Agent”的集成体: 以 BIM 模型为数字底座, 以物联网为感知神经网络, 以“云-边-端”协同为计算架构, 以 AI 算法为决策大脑。当这些技术组件逐步成熟, 幕墙将成为建筑与环境共生、技术与美学共融的真正智能界面。

基金项目

本文受“基于 AI 技术的幕墙建设运维智能体研究与应用”项目 SZ10000149.20250013 资助。

参考文献

- [1] Cocho-Bermejo, A. (2025) Adaptive Architectural Facades: Review 1985-2024. A Comparative Analysis of Media-TIC, the Arab Institute, and Al Bahar Towers Dynamic Facades Approaches. *Nexus Network Journal*, **27**, 925-945. <https://doi.org/10.1007/s00004-025-00831-1>
- [2] 郑志涛, 李闯, 李胜, 等. 基于数字孪生上悬式 GRC 幕墙施工技术研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2024(22): 75-77.
- [3] 中建八局发展设计公司设计研究院. 全流程参数化助力幕墙工程设计和项目管理[EB/OL]. <http://www.myjianzhu.com/club/291.html>, 2025-04-03.
- [4] 杨占东, 杜继予, 幸世杰, 等. 数字孪生城市在建筑幕墙安全管控方面的创新与实践[C]//深圳市建筑门窗幕墙学会, 深圳市土木建筑学会门窗幕墙专业委员会. 现代建筑门窗幕墙技术与应用——2021 科源奖学术论文文集. 2021: 11-21.
- [5] 胡河宇, 曹建福, 曹晔, 等. 建筑幕墙安装机器人的位置/力混合控制方法[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(1): 51-60.
- [6] 河北省科学技术厅. 场景创新 赋能产业③|机器师傅装幕墙[EB/OL]. <https://kjt.hebei.gov.cn/hebkjt/xwzx15/spxw61/2025092511104876230/index.html>, 2025-09-25.
- [7] 上海经信委. 聚焦智能建造, 驱动行业升级——建筑场景专场顺利举办|智能机器人赋能百业[EB/OL]. <https://www.jfdaily.com.cn/sgh/detail?id=1674727>, 2025-11-28.
- [8] 徐冰. 建筑幕墙单元式安装技术与精度控制应用[J]. 中国房地产业, 2026(3): 78-81.
- [9] Huang, B., Shi, J., Guan, X., Liu, X., Yao, X. and Liu, J. (2025) An Unmanned Aerial Vehicle Implemented Network for Real-Time Crack Detection in Stone Cladding. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **40**, 4014-4034. <https://doi.org/10.1111/mice.70021>
- [10] 胥璞, 王金林. 基于“云-边-端”协同架构的智慧建筑幕墙系统体系研究[J]. 中国建设信息化, 2025(17): 74-78.
- [11] 中国建筑科学研究院有限公司深圳分公司. 数智技术破解运维难题 创新成果赋能行业升级[EB/OL]. <http://www.cabr-sz.com/cabrsz/xwdt/fgxw/2025/7/11395807308625215488.html>, 2025-07-28.
- [12] 无人机清洗玻璃幕墙效率有多高? 1 小时完成“蜘蛛人” 2 日工作量[N/OL]. <http://gx.xinhuanet.com/20250714/8b1092d861e949f98ad6a054a4aa727d/c.html>, 2025-07-14.