

数智涌现：建筑学解构与智构的双重思辨

Emergence of Digital Intelligence: Dual Contemplation on Architectural Deconstruction and Intelligent Construction

叶家宏 | YE Jiahong 黄辰宇 | HUANG Chenyu 沈彦廷 | SHEN Yanting
姚佳伟 | YAO Jiawei

中图分类号: TU-201 文献标志码: A 文章编号: 1001-6740 (2024) 06-0005-09 DOI: 10.12285/jzs.20240529001

摘要: 数智技术涌现的当下, 传统工程建设体系逐步解体, 未来建筑学又将如何被再建构, 是本文探讨的关键。本文纵观建筑史剖面, 以建筑学多次转型所伴随的技术革新为背景, 展开建筑学未来智构的双重思辨: 从全尺度到全周期; 从技术现状到未来趋势与挑战。最后, 总结了建筑学数智转型的新方向, 用以拓展建筑学科边界, 启发未来建筑数智重构。

关键词: 数智技术、建筑设计、学科转型、全尺度空间智能、全周期建筑智能

Abstract: In the wake of the emerging era of digital intelligence technology, the gradual deconstruction of traditional architecture systems prompts the critical inquiry into how the future of architecture will be reconstructed. This study delves into the topic by examining the historical landscape of architecture, contextualizing it within the backdrop of technological innovations accompanying multiple transformations in architectural history. It unfolds a dual contemplation on the future intelligent construction of architecture: transitioning from full-scale to full-cycle perspectives, and from current technological states to trends and challenges. Ultimately, it summarizes the new possibilities of architectural transformation in the age of digital intelligence, expanding the boundaries of architectural disciplines and inspiring the future reconstruction of architecture through digital intelligence.

Keywords: Digital intelligent technology, Architectural design, Disciplinary transformation, Full-scale space intelligence, Full-life-cycle building intelligence

作者:

叶家宏, 同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生;
黄辰宇, 同济大学建筑与城市规划学院博士研究生;
沈彦廷, 同济大学建筑与城市规划学院硕士研究生;
姚佳伟 (通讯作者), 同济大学建筑与城市规划学院副教授、博士生导师。

国家自然科学基金重点项目资助 (项目批准号: 52338004);
江苏省建筑碳中和技术工程研究中心资助课题 (课题号: JZTZH2023-0101); 国家自然科学基金面上项目资助 (项目批准号: 52278041)。

录用时间: 2024-09

引言

人工智能 (Artificial Intelligence, AI) 技术的崛起, 拓展了后人类时代的认知边界^[1]。AI 赋能的设计思维也正进一步推动建筑学知识体系的更新迭代^[2]。在大模型、几何深度学习、量子人工智能、零样本学习等新一代数字技术带来的数字浪潮下, 建筑的传统定义与内涵已然发生变革, 建筑空间设计与科学技术的互融在如今达到多元、多面、多维的高峰^[3]。传统工程建设项目在数智时代的今天, 是可以被解构的一切可量化基本单元, 如形态变量、设备变量、运维变量, 甚至隐变量等。在未来建学的探索中, 我们所追逐的不

仅是 AI 技术在学科领域的应用, 更是一种智慧的融合, 一场传统与未来的对话。未来建筑学的主要研究方向正迈向建筑智能科学。建筑智能科学涵盖了“全尺度空间智能”与“全周期建筑智能”两大维度 (图 1)。其中, “全尺度空间智能”致力于深入挖掘城市街区、建筑单体、室内空间等不同尺度空间的设计需求与挑战, 依托数字技术优化城市形态, 提升环境品质, 创造更宜居的城市环境^[4, 5]。“全周期建筑智能”则着眼于建筑全生命周期的各阶段, 从设计、建造到运营维护, 乃至后期的更新与改造。在建筑全生命周期中应用人工智能技术, 提升设计、建造甚至能源利用的效率, 促进建筑可持续发展。



图 1：建筑智能科学架构

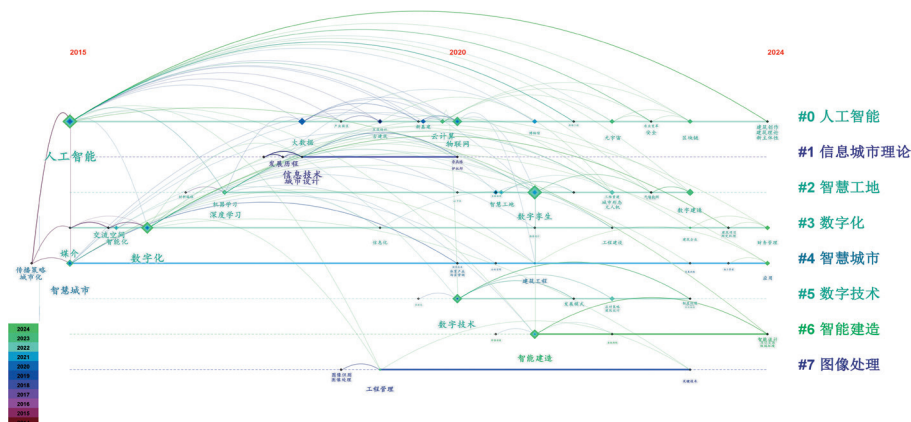


图 2：数智智能在建筑研究中关键词演变与聚类

一、建筑学发展沿革

1. 前数字化时代

前数字化时代，建筑设计依赖于既有经验、手绘图纸以及人工建造，一个项目从设计到落地需要投入大量的人力资源。尽管每一流程都有大量劳动力与时间成本，但前数字化时期的项目进程推动却缓慢而烦琐^[6]。首先是旧经验与新问题之间的矛盾，由于技术进步、社会变迁或环境改变，工程项目中遇到的问题可能在过往不曾涉及。传统的经验和方法无法直接用于指导新问题的解决；其次是高投入与低产出的矛盾，前数字时代的设计项目推进，需要设计师借助纸笔、CAD、SketchUp 等一系列工具逐步将设计构想转化为可视化的图纸与模型，这些工具的使用需要大量的时间和精力；最后是人工建造与精准施工的矛盾，人为因素存在诸多不定性的影响，如人工测量与布置误差，项目工程质量控制相对困难。

2. 数字化时代

随着计算机技术的不断发展，数字技术在各行各业的推广应用已愈发普及。建筑数字化作为其中一部分，通常以信息化、数据化为基础，通过计算机软件的编辑与运算将建筑设计的构想、意图、标准以及用户需求等各种信息转译为可编程

的二维数字数据^[7]。这一数字化过程帮助建筑设计更加灵活、高效。建筑数字化技术包括参数化设计、智能建造、性能模拟等。数字化工具的介入可以很好地解决前数字化时代的三大矛盾，通过参数生形、机器人施工以及计算机模拟，实现高效、准确、科学的设计^[8]。

3. 智能化时代

第四次工业革命带来的思维转变和技术革新，正深刻地影响着城市规划与建筑设计领域，并引领着一场数字智能的转型与升级。根植于计算机科学，依托人工智能时代算力、算法与算据的长足进步，当代建筑设计与建造模式也在发生改变^[9]。从近年“数智智能”为主题的相关研究关键词演变情况与聚类可以发现（图2），建筑智能目前仍处发展阶段。建筑智能从早期信息技术与图像识别衍生的智能监测系统，到数字孪生、云计算、元宇宙进一步实现资源数字化管理，再到多元智能涌现的今天，AI也逐步在设计、建造与运维各阶段展开可结合性的前沿探索，为建筑学科数智转型奠基。

二、全尺度空间智能

随着城市人口的增长与城市化进程的推进，绿色低碳环境营造与能源系统规划在新一轮的城市更新中面临诸多挑战，

如：城市尺度下如何完善传统城市国土空间规划，纳入绿色低碳的城市形态设计方法与布局策略，并充分考虑分布式能源系统、城市交通系统优化；街区尺度下，如何进行环境性能导向的街区与住区规划以及城市设计以缓解热岛效应，降低区域能源负荷；建筑尺度下，建筑暖通空调等设备系统如何升级，外围护结构如何设计与改造，以实现节能降碳等。我们提出了“全尺度空间智能”的概念，力求在城市、街区、建筑单体各个尺度将新质生产力纳入建筑学科体系，通过AI赋能拓展学科边界，实现城市可持续发展。

1. 定义

全尺度空间智能是一种综合运用数字技术的城市发展策略，旨在通过全面优化城市形态，提升环境韧性，打造更加宜居的城市环境。这一理念不仅关注建筑的外观和功能，更调整整个城市空间的智能化应用。具体而言，全尺度空间智能可分为以下三个层面：

（1）城市空间智能：这一层面关注城市整体的规划和设计，包括城市布局、交通系统、绿化空间等方面。通过数字技术的支持，可以进行城市模拟和规划，优化城市空间的利用，提升城市的可持续性。

（2）街区空间智能：街区是城市的基本单元，街区空间智能着重考虑如何提升街区的环境性能和感知舒适性，这包括街

区的风环境、光环境与热环境等方面。

(3) 建筑空间智能：建筑是城市的最小组成部分，建筑空间智能强调利用数字技术实现建筑的智能化设计和运营。具体流程包括建筑单体的体量生成、空间划分以及室内家具布置等一系列设计工作流以及后续的建筑运营与维护。

全尺度空间智能的目标是通过综合运用数字技术，营造出更加智能、宜居、宜业、宜游的城市环境，提升城市的竞争力和吸引力，推动城市规划与设计深度转型。

2. 算法

不同空间尺度下的空间智能研究存在侧重点上的差异，但各种算法并不存在空间尺度上的异质性（表 1）。常见的机器学

习算法可分为强化学习、深度学习以及集成学习等，常用的具体算法有 ResNet^[10]、元胞自动机（Cellular Automaton，CA）^[12]、XGBoost^[13] 以及自研发 Python 算法^[18] 等。各类算法在空间智能设计与规划中均有应用，但实际案例中可能需要耦合算法搭建研究 workflow，以解决具体场景中的问题。例如，元胞自动机（CA）应用的地理空间范围十分灵活，可覆盖从街区到全球的不同尺度^[25]。但 Zhou, Z. 等人的研究^[10] 作为单个案例只展示该方法在城市尺度上的应用。此外，卷积神经网络（Convolutional Neural Network，CNN）在 Wang, Z 等人的研究^[10] 中用于城市时间的视觉感知质量评估，但 An, W 等人的研究^[15] 则将 CNN 与优化算法以及支持向量机（Support Vector Machine，SVM）耦合用于住区供暖负荷的分时预测。因此，

在全尺度空间智能中需要理解的是算法特性，以进一步探索不同算法可用于的领域，而不局限于单一尺度应用。算法之间还可以通过耦合的方式提升其性能，以解决更复杂的科学问题。

3. 应用

1) 城市空间智能

在 20 届中国城市规划学科发展论坛上，吴志强院士提出“城乡规划学科发展年度十大关键词”。其中，“智慧规划：AI 赋能”获得 2023—2024 年度近百位学科专家的高度认可，成为投票率最高的关键研究方向^[26]。为推动这一研究方向发展进程，各界学者从城市规划决策系统、城市空间环境视觉感知评估、城市时空热岛研究与改进等方面进行了探索。Wang, Z. 等

全尺度空间智能算法概述表 1

研究主题	尺度	方法	算法特征	来源
城市空间视觉感知质量评估	城市	深度卷积神经网络（DCNN） ResNet	ResNet 是基于 DCNN 的架构模型，可用于处理具有空间结构的数据，例如图像	文献 [10]
城市规划智能决策支持系统	城市	多智能体系统（MAS）、新型的多目标蚁群优化算法（BKPACS）	MAS 中每个智能体都可以被视为一个强化学习代理，它通过与环境以及其他智能体的交互来学习最优的决策策略，以最大化其个体的奖励信号；BKPACS 的核心是模拟蚁群在解决多目标优化问题时的搜索行为	文献 [11]
模拟城市扩张	城市	CA、长短期记忆网络耦合（LSTM-CA）	CA 是由离散的单元格组成的格点空间中的动态系统，常用于模拟复杂系统中的自组织行为；长短期记忆网络（LSTM）专门设计用于处理和预测时间序列数据	文献 [12]
住区能源改造策略探索	街区	XG Boost，Igene 优化算法	XGBoost 是梯度提升树的扩展和优化，数据挖掘和预测建模领域被广泛应用；Igene 是基于遗传算法的加速优化工具	文献 [13]
城市时空热岛研究与改进	城市	自编程 Python 程序	自行开发 Python 程序进行研究可以提供定制化、灵活性、可拓展性等优势，以满足研究的特定需求	文献 [14]
住区每小时供暖负荷预测	街区	麻雀搜索算法（SSA）、CNN、SVM	SSA 主要用于参数优化；CNN 可通过卷积层和池化层有效地提取时间序列数据特征；SVM 可以有效处理小样本、非线性、高维度等复杂情况	文献 [15]
识别通风潜力高和通风不良且亟须改善的城市风廊	街区	启发式搜索算法（A* 搜索算法）	A* 搜索算法利用启发式函数来估计从起始节点到目标节点的代价，根据代价指导搜索方向，尽快找到最优解，广泛应用于解决路径规划、图搜索、游戏问题等各种领域的问题	文献 [16]
居住区快速日照评估	街区	多层感知器（MLP）	MLP 是 ANN 的一种，称为前馈神经网络训练过程通常采用反向传播算法，通过将输出与实际目标比较，根据误差来调整连接权重，逐步优化网络的性能。可用于分类、回归、聚类、图像识别、预测等领域	文献 [17]
绿地空间优化	街区	K-means	K-means 算法常被用于数据聚类，通过聚类分析，可以帮助发现数据中的潜在模式和结构	文献 [18]
街区更新与热环境评估	街区	生成对抗网络（GAN）	GAN 的训练过程是生成器和判别器之间的对抗过程，常用于生成各种类型的数据，包括图像、文本、音频等	文献 [19]
住宅建筑进行数据驱动的性能分析	建筑	人工神经网络（ANN）与遗传算法	ANN 由多个神经元连接形成网络，每个连接都有一个权重，表示神经元之间信息传递的强度。可用于分类、回归、聚类、模式识别、预测、自然语言处理等方面	文献 [20]
农村居住建筑节能优化被动式设计生成	建筑	自编程 Python 程序	自行开发 Python 程序进行研究可以提供定制化、灵活性、可拓展性等优势，以满足研究的特定需求	文献 [21]
优化建筑物的能源管理	建筑	多智能体对决赛深度 Q 网络（MADD-DQN）	MADD-DQN 是传统的深度 Q 学习拓展，引入两个 Q 网络，一个用于选择当前状态下的最佳动作，另一个 Q 网络来评估选择的动作的价值，通常用于决策问题	文献 [22]
建筑能耗预测	建筑	深度强化学习（DRL）A3C、DDPG、RDPG	A3C、DDPG 和 RDPG 是三种常用的深度强化学习，该方法将强化学习与深度学习结合，处理高维度的状态和动作空间以及复杂的非线性决策问题	文献 [23]
室内日光性能预测	建筑	CNN、GAN	CNN 对图像敏感度高，可以从几何形状中提取特征并构建非线性预测模型	文献 [24]

人的研究^[10]是将智能算法与城市空间环境评价相结合,为政府城市更新决策与更新策略提供指导。具体是通过将带有“无聊”“令人愉快”等不同感知标签的训练集作为输入并确定感知打分机制,以训练 ResNet 深度卷积神经网络。训练好的模型对后期输入的未标签街景图像输出人类感知分数,进行空间环境视觉评价。该方法能够帮助检索城市亟待更新的“低分空间”,为后续的城市更新奠定基础。Khelifa, B. 等人的研究^[11]则是基于 AI 和决策支持系统 (DSS),提出了城市智能决策支持系统 (IDSS)。该系统涵盖了 ANN、多智能体系统 (Multi-Agent System, MAS)、多目标蚁群优化算法 (BKPACS) 等,并且可以通过模仿人类的决策,将城市项目及时合理地分配到适当的区域,实现最佳的规划决策。Yin, S. 等人的研究^[14]着眼于当前的城市气候问题,提出了一种将城市天气生成器 (UWG)、局地气候区 (LCZ)、深度学习方法和 Python 自动周期计算的框架实现大规模长时间的城市热岛强度 (Urban Heat Island Intensity, UHII) 预测,进一步优化城市热岛强度与下垫面特征之间的关系,为城市热岛缓解策略实施提供指导。

2) 街区空间智能

相较于城市空间智能,智能算法在街区尺度的应用则更聚焦于环境性能提升,具体可分为风、光、热环境等多要素驱动的街区智能设计。在设计流程中加入性能模拟与预测,再通过建筑形态与布局的调整实现环境性能,形成精准响应,为使用者营造可持续的低碳人居环境。风环境驱动的街区设计,通常与城市风廊相关。Lau, T. K. 等人^[16]对于通风走廊识别与改造建议的研究中,通过启发式搜索算法对地图上建筑布局进行搜索,确定城市风廊的通风效果,并且通过 CFD 模拟加以验证。需要说明的是,尽管该方法略显简单且结果不如 CFD 模拟准确,但其优势在于快速且有效地提供研究区域风环境的概览,确定通风条件较差且需要紧急改善的区域。基于此,机器学习的快速预测方法在精度要求不高的场景中应用仍值得推广。光环

境通常是在室内考虑,街区尺度下的光环境通常与住区日照相关。基于此,Jiang, C. 等人的研究^[17]提出了一种基于多层感知器的方法,实时预测输出居住建筑的日照情况,并且将结果与常用的 ladybug tools 等建筑日照模拟软件的结果进行对比,验证了该方法的高效与准确。此外,基于该技术,Jiang, C. 等人还开发了适用于 Rhino 与 Grasshopper 的住宅区布局规划插件,它能够在符合日照规范的基础上进行快速的规划设计。随着城市发展逐渐从增量转向存量,城市更新成为建筑领域的热点问题。学者们也一样将研究转向了旧城空间改造上。刘宇波等人的研究以深圳南头古城为例^[19],首先通过图像聚类算法对城市形态类型进行自动识别与分析,然后借助掩模的方式对 GAN 进行训练,使得 GAN 学会特定城市形态类型的空间模式。基于此,实现输入待改造区域的城市图像后,由 GAN 快速生成城市肌理织补图像,并且直接对生成结果形态图像特征输出网格化的性能指标,实现热环境性能的快速评估,以辅助设计进行筛选与修改深化。此外,该研究还将结合 grasshopper (GH) 平台,构建一套自动化的城市形态生成系统——DeepCity。依托该平台,设计者只需调整 GH 中的部分初始参数,便能构建自己的人工智能辅助设计工具,降低智能算法工具使用难度并节省时间成本。

3) 建筑空间智能

建筑空间智能的研究相较于城市与街区尺度更为丰富与深入。这是由于建筑尺度范围小,与智能算法结合时所需的算力资源较少。此外,建筑作为城市的最小单元,诸多大尺度的智能空间技术前置化研究均以建筑单体为研究对象。同样地,由于我国近期出台的《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》等政策均强调绿色低碳建筑设计的迫切性和重要性,国内外诸多建筑空间智能成果也导向这一主题。Etemad, A 等人的研究^[20]围绕海湾地区炎热干旱气候下住宅建筑最佳设计参数的探索展开。该研究以 EnergyPlus 的模拟结果

作为训练集来训练 ANN 预测模型,再结合遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 对建筑的玻璃太阳透射率、室外气流速度等各类参数进行寻优,寻找最小冷却能耗、最少室内不舒适时间以及最少碳排放量的帕累托 (Pareto) 前沿最优解。绿色低碳建筑的实现与相关参数有关,同时由于各个房间受到的太阳辐射差异以及制暖、冷需求差异,房间组合方式也会对建筑性能造成影响。因此,Gao, K. 等人的研究^[21]通过自编程 python 工具推演建筑房间组合与性能预测,再通过遗传算法优化建筑的视觉、热舒适度、能耗,得到高节能率且舒适的建筑最佳平面。由此可见,建筑空间智能与建筑性能的结合点多集中于预测模型与参数寻优这一流程。此外,建筑空间智能还体现在空间布局与配置的灵活性,这可以使得建筑空间根据不同的使用需求和场景进行调整和变化。例如,住宅平面自动生成工具 House-GAN^[27],在给定建筑边界约束的情况下,依托于功能气泡图快速生成多样化的房屋布局组合。其具体算法除了 GAN 以外,还涉及了卷积消息传递网络 (Convolutional Message Passing Network, Conv-MPN) 与 CNN,用于特征输出与转换。House-GAN 的优势不仅在于平面的生成,还在于该研究架构通过引入节点约束,使得生成平面更符合设计的实际需求,让我们可以看到智能算法可迭代性,给智能设计与实际工程的深度融合提供了可能。

4. 小结

全尺度空间智能的跨尺度融合,在一定程度上能实现空间和资源利用的综合优化、环境性能的稳步提升、城市战略布局的完善与策略高效响应 (图 3)。空间、资源利用的综合优化得益于跨尺度空间智能的融合。这意味着不同尺度的数据可以共享和整合,从而使得资源利用率更加综合和精准。此外,通过不同尺度的协同控制系统,城市、街区和建筑可以综合考虑城市风、光、热环境,稳步城市整体环境性

能，促进城市可持续发展。最后，跨尺度智能技术的融合能够自下而上地汇总多尺度数据，构建城市交通、建筑、能源的综合大数据系统，这有利于城市整体战略布局与实时策略响应，提升城市韧性。

三、全周期建筑智能

随着技术的发展，我们逐步迈入数智时代。在这个变革的浪潮中，建筑智能作为一个重要的发展方向逐渐受到关注。人工智能的应用创新不仅为行业智能化转型提供了支撑，同时也促使着建筑学科的内涵与外延发生深刻变化。全周期建筑智能与传统的建筑设计相比，建筑智能更加注重全生命周期的考量，不仅局限于设计阶段，还关注建造、使用以及后期的运维等各个环节。通过着力发展各阶段的智能技术与工具，为后续打造建筑全周期智能化、一体化的产业链作铺垫。

1. 定义

全周期建筑智能的核心关注点在于通过智能化技术和系统，实现建筑产业链各个环节的高效协作与衔接，从根本上解决传统建筑设计方案推演时间长、团队协作效率低的问题，为建筑行业的可持续发展和智能化转型提供重要支撑。全周期建筑智能目前可细分为三方面：

(1) 智创设计：一种人工智能技术赋能的创新设计方法，旨在基于 AI 技术实现设计前期的大数据分析、方案生成、自动化建模与渲染等功能，解放生产力，推动设计流程的全面自动化。

(2) 智能建造：强调以机械设备代替人类劳动力，在施工时能实现智能化监控、自动化执行和实时调整，以应对不断变化的施工环境和任务，从而提高施工效率、降低成本，并确保工程质量和安全。

(3) 智慧运维：通过实时监测、数据分析和智能化决策等技术提升建筑运维系统的监测效果、运转效率以及安全性，延长建筑使用寿命，降低建筑运营碳排放量。

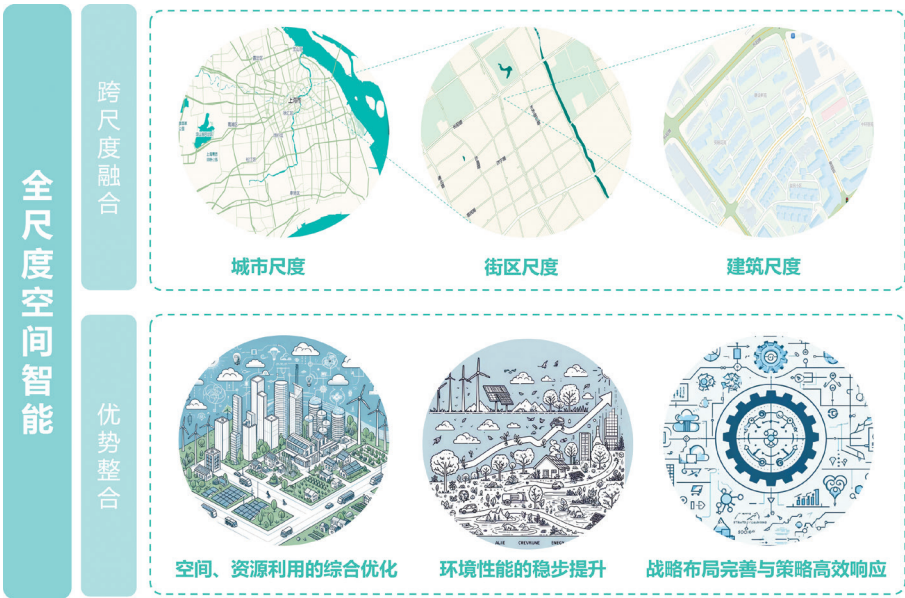


图 3：空间智能的尺度融合与优势

综上，全周期建筑智能是将设计、建造与运维各阶段的智能技术深度链接，实现各环节信息传递与智能决策，为建筑智能化转型提供关键支持。

2. 工具

与全尺度周期智能中所关注算法与工具研发不同，设计、建造与运维中的 AI 技术应用更有针对性，当前行业内暂无平台能够将全流程的智能技术进行汇总。因此，本节介绍围绕三个领域的常见工具——展开。

1) 智创设计工具

近年来，设计流程中的 AI 产品研发形势正盛（表 2）。常用的数据分析工具有十方 DEEPUD 与 BlackShark，能帮助设计师快速抓取前期分析中所需的地理信息资料并进行量化分析，省去了大量人为检索的时间。方案智能生成的工具较多，主要是围绕住宅强排与户型生成展开，如诺亚建筑科技公司的住宅模块工具、Maket 网站的建筑与室内设计工具。此外，基于 Stable-Diffusion (SD) 和 Midjourney (Mid) 效果图生成已经可以实现文字生图、草图生图等功能，跳过建模步骤实现快速出图^[28]。

设计流程中的智能工具汇总 表 2

序号	工具名称	来源	功能
1	十方 DEEPUD	https://www.shifang.city/	前期资料、方案生成、智能分析、智能出图、智能运维
2	诺亚	https://noah-i.cn/	方案强排
3	Stable-Diffusion	本地部署	效果图生成
4	Midjourney	https://www.midjourney.com/home	效果图生成
5	SIMForms	文献 [29]	方案生成、效果图渲染
6	BlackShark	https://blackshark.ai/	地理信息数据获取
7	Maket 建筑与室内设计工具	https://www.maket.ai/	户型生成、3D 渲染
8	ARCHITECTURES 生成式住宅设计	https://architectures.com/en	方案生成、实时建模、工程量估算
9	AI-Structure CAD	本地部署	建筑结构智能设计
10	PKPM	https://www.pkpm.cn/guide/guide.html	施工图审查
11	小库设计云	https://www.xkool.ai/zh/XkoolDesignCloud	前期资料、方案生成、智能绘图

2) 智能建造工具

建造中的智能主要体现在机器人工具研发与推广应用上（表 3），根据具体执行任务的不同，可分为建筑装配机器人与混凝土施工机器人。其中，建筑装配机器人用于建筑构件的组装和装配，包括自动化砌砖机器人^[30]、预制构件装配机器人^[31]等；混凝土施工机器人用于混凝土的施工任务，如混凝土喷涂机器人^[33]、混凝土打印机器人^[34]等。由于各类型机器人的分工不同，建造流程中通常会出现多机器人的协同工作，部分流程还需要人工参与衔接调控，因此在未来建筑机器人的研发中还需要考虑人机交互便捷性。

3) 智慧运维技术

随着建筑全生命周期概念的提出，建筑运维也逐步成为核心关注点。为匹配不同的使用需求，运维系统也在不断更新升级（表 4）。智慧化运维当前仍然是以建筑信息模型（BIM）技术为核心，该技术能

将建筑设计之初的三维数据、设备管线布置等情况上传至云端运维，但无法提供实时的建筑运行动态数据情况^[40]。因此，智慧运维中需要引入物联网技术，实现数据实时获取。再通过射频识别（RFID）技术与 BIM、物联网（IoT）^[41]设备进行融合，使得运维系统能够将虚拟模型信息、实时数据采集和监测集成，为数字化管理提供更全面、更精准的技术支持。此外，由于数据更新与采集频次之多，数据之广，还需要在系统中引入云计算^[42]与大数据分析^[43]等技术。一方面为海量数据的存储分析提供计算空间与资源，另一方面通过数据分析识别建筑内部异常情况、发现潜在问题，并依托数据支持进行优化决策。最后还需要在系统中加入边缘计算^[44]、虚拟现实（VR）和增强现实（AR）^[45]以及机器学习^[39]等技术，在实现运维系统高效率运转的同时，实现设备智能可视化的管理与维护以及自主智能调整。

3. 应用

1) 智创设计

建筑设计流程是一个综合性的过程，从最初的前期分析到最终的建筑完成，涵盖了多个关键步骤，具体可分为需求收集与分析、概念设计、方案生成、效果图生成以及施工图绘制、图纸审查等方面。由于设计行业市场需求的转变，诸多科技公司研发 AI 产品逐步推广至各个细分领域。例如，十方 DEEPUD（<https://www.shifang.city/>）智能辅助设计平台在当前已经可以提供智能调研，其具体功能包括下载全球任意地区的城市三维模型、计算现状开发量和指标、一键 POI 数据分析、空间量化分析和评价、实景三维在线查看等，后续的方案设计提供了大量有效信息，节省了人为检索相关资料的时间。此外，该平台还提供了概念设计生成工具，其底层算法支持与前述的研究一致，都采用了 GAN 算法。以周边环境为基础，进行相应的布局生成，在一定程度上可以很好地将设计融入周边肌理，但这一工具的使用也同样可能带来所谓“千城一面”的同质化问题。当前市场认可度较高具体方案生成工具主要针对住宅区强排、办公建筑等功能模块。诺亚（<https://noah-i.cn/>）当前功能模块已经可以依据规范实现住宅自动强排并计算经济指标与日照快速预测。该模块还可以实现通过人机交互来进行布局调整，尽可能地贴合设计师需求并提升效率。效果图生成与智能技术是建筑设计领域最成熟的应用之一，常见的工具有 Stable-Diffusion（SD）、Midjourney（Mid）以及 SIMForms 平台等。其中，SD 和 Mid 一般是通过建筑造型关键词或草图进行生成，而 SIMForms 平台^[29]则是基于前期的设计参数，如场地模型、容积率、建筑高度等约束条件，生成相应的形体后，再进行风格化渲染，相较于 SD、Mid 而言，其成图效果更为稳定，它不仅能进行效果图制作，还能帮助推演给定条件下的建筑形态。此外，还有诸多类似插件，如 BlackShark、Maket 建筑与室内设计工具、小库设计云等。

工程建造中的机器人类型 表 3

序号	工具	来源	功能
1	自动化砌砖机器人	文献 [30]	CDPR 机器人系统，带有通过电缆连接到框架的夹具，用于砌砖
2	建筑机械臂	文献 [31]	建筑构件组装与安装、混凝土施工、高空作业、建筑垃圾清理
3	自动化钢筋焊接机器人	文献 [32]	基于先进的控制系统与传感技术实现自动化钢筋焊接
4	混凝土喷涂机器人	文献 [33]	通过高压喷射的方式将混凝土喷涂到建筑结构表面，用于防水、防火、保温等处理
5	混凝土打印机器人	文献 [34]	携带有混凝土喷射系统，可根据预设程序将混凝土材料打印成所需的结构形态

运维系统中的智能算法 表 4

序号	技术	来源	作用
1	BIM	文献 [35]	提供几何信息、构件属性、空间关系以及设备的型号、规格、安装位置
2	IoT	文献 [36]	通过传感器实时监测和获取建筑设备的运行状态与参数、环境性能监控以及安全监测与预警
3	云计算	文献 [37]	通过云端提供大规模的数据存储和管理服务强大的计算和处理能力，减少设备的运行负荷，提高专项数据计算分析的效率
4	大数据分析	文献 [38]	用于处理和分析海量的建筑运行数据，识别异常情况、发现潜在问题，并提供数据支持以进行优化决策和预测维护
5	边缘计算	文献 [39]	将计算资源放置在距离数据产生源更近的位置，以减少数据传输的延迟和带宽消耗，提高数据处理的效率和实时性
6	VR、AR	文献 [40]	虚拟现实和增强现实技术可以用于建筑设施和设备的可视化管理和维护，实现对建筑运行状态的实时仿真和优化
7	机器学习	文献 [41]	对建筑设施和设备的运行状态进行预测、优化和自主调整，提高维护效率和准确性

2) 智能建造

在当前信息时代的宏观背景下，智能建造已成为建筑产业链重要环节。该方法涵盖了数字化构配件生产、自动化施工、智能设备和机器人技术等多方面，可以在实现施工效率提升与人力成本压缩的同时，提升施工质量与安全性。当前智能建造领域已实现完全的机器人施工，典型的案例是成都市的天府农博园“瑞雪”展示馆——由同济大学袁烽教授主导的研究型实践。作为国内首个“全机器人预制”建筑，为了构建复杂的双曲互承木构壳体，该场馆的建造中使用了木构机器人、3D 打印机器人，以及 FUSense 全域感知数字模拟系统等智能技术，实现建造过程中精确拟合与模块化预制装配^[42]。此外，建筑业内也有技术企业聚焦于智能建造技术研发，如上海一造科技有限公司（Fab-Union）研发的基于 Grasshopper 平台的 FUROBOT 插件，有效降低机器人操作的门槛，使操作者通过简单操作，让机器人执行不同的工艺流程。智能建造技术除了在实际项目与工具开发中有所进展外，学界也对该技术的升级展开了诸多探索。Park, S. 等人的研究^[43]中已经实现了施工机器人的自然语言的交互，操作者可根据自然语言指令指导建筑机器人完成相应的施工操作，这对于未来机器人建造技术的推广具有促进意义。Meng, Q. 等人的研究^[44]则在探索建筑 3D 打印中的减碳可能，即 3D 打印混凝土中混入含有一定比例的建筑垃圾、尾矿、工业废料作为骨料的再生砂浆，这样既可以提高 3D 打印速度，减少水泥用量，还能节省工程成本并降低建筑 3D 打印碳排放，为建筑产业节能减碳提供支持。

3) 智慧运维

智慧运维系统是数字化信息与物理实体融合的产物，它以数字、信息、网络、传感、人工智能等技术为依托，根据所应对的问题调整技术架构，实现多维度实时监测与管理，为建筑管理提供全面、高效、一体化的服务。目前常用的运维系统包括智慧停车、智慧照明、能耗管控、智

慧安防以及智能设备管理等。智能停车系统利用传感器、摄像头和无线通信技术，实现对停车场内车辆的实时监控和管理^[45]。这种系统能够提供实时的停车位信息，帮助驾驶员快速找到可用停车位，同时减少了寻找停车位的时间，缓解了停车难题。智能照明系统利用传感器和自动控制技术^[46]，根据环境光线、人员活动等条件自动调节照明亮度和开关状态，实现能源的节约和管理。通过智能照明系统，建筑可以根据实际需求调整照明，提高能源利用效率，降低能耗成本。能耗管控系统通过监测建筑内部各种设备的能耗情况，分析能耗数据，提供节能建议，并实时监控和控制建筑的能源使用情况，以达到节能减排的目的^[47]。这种系统通常与智能建筑管理系统集成，通过数据分析和智能算法优化能源使用，提高能源利用效率。智能安防系统利用视频监控、空间识别、入侵检测等技术，实现对建筑内外的安全监控和管理。通过智能安防系统，区域范围可以实时监控安全状况，及时发现异常情况并采取措施，提高安全性和防范能力^[48]。智能设备管理系统利用物联网技术，实现对建筑内各种设备的远程监控、运行状态分析和维护管理^[49]，帮助建筑管理者及时发现设备故障或异常情况，提高设备的可靠性和使用效率，减少维护成本和停工时间。这些智能化技术的应用，不

仅提升了建筑的智能化水平，提高了建筑的舒适性、安全性和能源利用效率，还为建筑管理者提供了更便捷、高效的管理手段，促进了建筑行业的可持续发展。

4. 小结

全周期建筑智能通过对设计、建造、运维的流程链式整合，实现对建筑信息的高效协同利用，缓解对接低效率的问题，提升工程整体效率与质量，提升客户满意度（图 4）。首先，合并三个环节可以实现信息的共享和传递，避免了信息孤岛和重复劳动。其次，由于产业链的整合，设计可以提供建造和运维阶段所需的数据和信息，建造又能根据设计阶段的要求实现精准施工，运维系统再根据建造阶段的信息进行智能维护。这种协同效应有助于提高工程项目整体效率和质量。最后，该产业链能够为客户提供一站式解决方案，全面、一体化的服务有利于客户满意度的提升。

四、未来发展趋势与挑战

随着数字技术的迅速发展，建筑学科正经历一场深刻的转型。这场数字技术带来的深刻转变不仅是建筑学科的演变，更是整个建筑行业的转型。新技术的涌入打



图 4：全周期建筑智能的链式整合与优势

破了传统建筑学的边界，使得建筑学从设计到施工、运维等各个阶段逐步解体。通过 AI 技术融合共生，可以重铸全新的建筑范式。当然，这一过程还伴随着学科体系变革与重构、现有技术整合以及新技术融合与应用等一系列挑战。如何应对这些挑战，以及在未来建筑学中又会产生怎样的作用和影响，这是我们在今后的研究中首先要思考并解决的问题。

1. 建筑学科体系变革与重构

技术的变迁使得传统建筑学科面临着重组的挑战。然而，当前学科教育与社会上的建筑执业领域已有稳态运转体系，面对智能技术的冲击，做好转型预判至关重要。转型的关键在于挖掘智能技术与建筑之间的契合之处，拓展学科边界，开启跨学科的对话。在建筑教学体系内则体现在学生培养计划的革新与科目大纲遴选与制定。新的培养计划需着重培养学生的跨学科能力和创新思维，不仅强调建筑理论与实践的结合，还融入了数字化设计、智能建造等前沿技术的学习内容。科目大纲的遴选与制定则需与时俱进，紧跟行业发展的脉搏，确保学生在毕业后能够适应未来建筑行业的需求。

2. 建筑行业创新探索与转型

随着科技的不断演进，建筑行业正处于前所未有的变革期。传统的建筑模式和流程正逐渐被智能化、数字化技术所颠覆，如何在这一波潮流中实现创新与转型，已成为行业的焦点。建筑行业的未来发展不仅依赖于新技术的引入，更在于如何有效地将这些技术融入设计、施工、管理等各个环节中。立足于建筑热点问题，结合 AI 技术进行全流程优化与资源整合，将先进的 BIM、IoT、数字孪生等新兴技术应用于建筑全生命周期。同时，行业从业者也需不断提升自身技能，突破传统的思维定式，重构设计逻辑，打破形式与功能的固有框架，进而探索建筑与环境、人与

空间之间更为复杂且多维的关系。行业内部的转型不仅是技术的革新，更需要文化与思维方式的深度调整，只有这样才能在未来的市场竞争中占据有利地位。

3. 全流程建筑智能技术整合

建筑智能技术在全尺度、全周期均已有所应用，但各步骤间的延续性弱，无法实现全流程、多尺度的设计、建造、运维系统的整合。应对这一挑战，需要执行一系列整合措施。首先，需要加强技术平台的建设和整合，通过开发智能化的设计软件、建造系统和运维平台，实现不同尺度、不同阶段之间的信息共享和系统集成。这将需要跨行业的技术合作，整合各方资源，打造开放、灵活的技术平台，为建筑全流程智能化提供支持。其次，建立统一的标准和规范，确保各个环节的数据和信息能够互相匹配和交流。其中包括建立统一的数据格式、命名规范以及信息传递的标准化流程，以实现设计、建造和运维各阶段的无缝衔接。最后，建立监督和评估机制，确保整合措施的有效实施并及时发现和解决平台系统问题，推动智能化技术在建筑领域的广泛应用和持续改进。

4. 新技术迭代融合的可行性

信息时代下，技术更迭日新月异。尽管，当前数字技术与建筑领域已经有了诸多尝试与应用，但我们仍需意识到技术的快速迭代已成常态。新技术的涌现与未来发展趋势值得我们关注，不断了解新技术的基本原理、应用场景及其影响，有助于在迭代中找到与建筑学融合的切入点，筛选具有与建筑学交叉融合的可行性方法与技术，为建筑学科的永续创新与发展奠定基础。这一过程要求我们不仅要关注技术本身，还需深思其与建筑学科长远发展的契合度，确保在不断变化的技术环境中，建筑学科能够持续进化，并保持其独特的人文价值。

五、结语

立足数智时代的当下，回顾建筑学千百年来的演变历程。我们有理由相信，每一次技术变迁都必然深刻地影响着建筑学的发展轨迹。从最初的栖身之所到后来的空间营建，再到如今的数字建构，建筑学经历了一次又一次的革新。在技术快速更迭的今天，建筑学更是面临着诸多挑战，但同样，蕴含着前所未有的机遇。因此，我们需要保持对技术发展的敏锐感知，从建筑学的角度审视技术，通过跨学科合作与创新，找到最适合建筑行业的交叉创新方法与技术应用路径。

在建筑学解构与智构的双重思辨下，我们提出了“全尺度空间智能”与“全周期建筑智能”两大维度，为建筑学科提供了一种转型的新方向，也同样提出新要求。领悟新技术的本质，掌握其核心原理，是我们迈向建筑智能科学的第一步。为了更好地应对当下的数智转型变革，我们还需要更进一步去探索新技术思维架构，深入挖掘其在建筑领域的应用场景，拓展在设计、施工、运营等各个环节的结合潜力，为建筑学注入新的生机与活力，推动建筑学的新飞跃。

参考文献

- [1] 袁烽, 许心慧, 王月阳. 走向生成式人工智能增强设计时代[J]. 建筑学报, 2023 (10): 14-20. DOI: 10.19819/j.cnki.issn0529-1399.202310003.
- [2] 陈雷, 张伶伶, 陈子墨, 等. 基于图像生成式人工智能的“人—机—人”建筑设计教学模式研究[J/OL]. 建筑师, 1-10 [2024-08-24]. <http://kns.cnki.net/Kcms/detail/11.5142.TU.20240705.0849.002.html>.
- [3] 姚佳伟, 安纳, 丁凡. 后数字建筑学中的具身认知探究: 临近与脱逃[J]. 住宅科技, 2023, 43 (9): 14-19. DOI: 10.13626/j.cnki.hs.2023.09.004.
- [4] 张孝贤, 周元婧, 李大勇, 等. 基于全景图像的社区体检评估技术应用研究[J]. 建筑师, 2024 (2): 5-12.
- [5] 史宜, 张钟虎, 娄莺, 等. 问诊天堑: 基于多源数据的城市跨江城区数字体检与优化策略研究——以南京浦口中心城区为例[J]. 建筑师, 2024 (2): 22-30.
- [6] 项星玮, 林再国, 张烨, 等. 先进制造业的典型生产模式对于建筑设计平台架构的启示[J]. 建筑师, 2021 (4): 96-104.

- [7] 李飏, 张佳石, 卢德格尔·霍夫施塔特, 等. 算法模型解析设计黑箱[J]. 建筑师, 2019 (1): 94-99.
- [8] 曾忠忠, 张波. 数字建造的线性建筑实践: 以伞亭为例[J]. 建筑师, 2023 (5): 31-37.
- [9] 孙澄, 袁烽, 陈自明, 等. 计算性设计赋能人居环境营造[J]. 当代建筑, 2022 (6): 6-13.
- [10] Wang, Z., Ito, K., & Biljecki, F.. Assessing the equity and evolution of urban visual perceptual quality with time series street view imagery[J]. Cities, 2024, 145: 104704.
- [11] Khelifa, B., & Laouar, M. R.. A holonic intelligent decision support system for urban project planning by ant colony optimization algorithm[J]. Applied Soft Computing, 2020, 96: 106621.
- [12] Zhou, Z., Chen, Y., Wang, Z., & Lu, F.. Integrating cellular automata with long short-term memory neural network to simulate urban expansion using time-series data[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2024, 127: 103676.
- [13] Ye, J., Shen, Y., Huang, C., et al. Explainable AI and multi-Objective optimization for energy retrofits in residential neighborhoods[C]. CAADRIA 2024.
- [14] Yin, S., Xiao, S., Ding, X., et al. Improvement of spatial-temporal urban heat island study based on local climate zone framework: A case study of Hangzhou, China[J]. Building and Environment, 2024, 248: 111102.
- [15] J An, W., Gao, B., Liu, J., Ni, J., & Liu, J.. Predicting Hourly Heating Load in Residential Buildings Using a Hybrid SSA-CNN-SVM Approach[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024: 104516.
- [16] Lau, T. K., Tsai, P. C., Ou, H. Y., & Lin, T. P.. Efficient and cost-effective method for identifying urban ventilation corridors using a heuristic search algorithm[J]. Sustainable Cities and Society, 2023: 105144.
- [17] Jiang, C., Liang, X., Zhou, Y. C., Tian, Y., Xu, S., Lin, J. R., ... & Zhou, H.. A multilayer perceptron-based fast sunlight assessment for the conceptual design of residential neighborhoods under Chinese policy[J]. Building and Environment, 2023, 244: 110739.
- [18] 谢晓欢, 周含芝, 苟中华, 等. 使用者视角下动态绿化暴露量影响因素研究——以深圳市福田区为例[J]. 中国园林, 2023, 39 (10): 90-96. DOI: 10.19775/j.cla.2023.10.0090.
- [19] 刘宇波, 胡凯, 邓巧明. 人工智能辅助的“基于案例设计”——以深圳南头古城周边地区城市肌理织补为例[J]. 南方建筑, 2023 (10): 20-27.
- [20] Etemad, A., Shafaat, A., & Bahman, A. M. . Data-driven performance analysis of a residential building applying artificial neural network (ANN) and multi-objective genetic algorithm (GA) [J]. Building and Environment, 2022, 225: 109633.
- [21] Gao, K., & He, L.. Optimization design generation of the rural residential building towards energy saving by using “Digital intelligence” technology[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 419: 138137.
- [22] Shen, R., Zhong, S., Wen, X., An, Q., Zheng, R., Li, Y., & Zhao, J.. Multi-agent deep reinforcement learning optimization framework for building energy system with renewable energy[J]. Applied Energy, 2022, 312: 118724.
- [23] Liu, T., Tan, Z., Xu, C., Chen, H., & Li, Z.. Study on deep reinforcement learning techniques for building energy consumption forecasting[J]. Energy and Buildings, 2020, 208: 109675.
- [24] He, Q., Li, Z., Gao, W., Chen, H., Wu, X., Cheng, X., & Lin, B.. Predictive models for daylight performance of general floorplans based on CNN and GAN: A proof-of-concept study[J]. Building and Environment, 2021, 206: 108346.
- [25] 杨天人, 吴志强, 潘起胜, 等. 城市发展的模拟与预测——研究进展、发展挑战与未来展望[J]. 国际城市规划, 2022, 37(6): 1-8. DOI: 10.19830/j.upi.2022.418.
- [26] 吴志强. 城乡规划学科发展年度十大关键词 (2023-2024) [J]. 城市规划学刊, 2023 (6): 1-4. DOI: 10.16361/j.upf.202306001.
- [27] Aalaei, M., Saadi, M., Rahbar, M., & Ekhlassi, A.. Architectural layout generation using a graph-constrained conditional Generative Adversarial Network (GAN) [J]. Automation in Construction, 2023, 155: 105053.
- [28] Hanafy, N. O.. Artificial intelligence's effects on design process creativity: “A study on used AI Text-to-Image in architecture” [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 107999.
- [29] Zhang, B., Mo, Y., Li, B., Wang, Y., Zhang, C., & Shi, J. A web-based generative application fusing forms, metrics, and visuals for early-stage design[C]. CAADRIA 2024.
- [30] Wu, Y., Cheng, H. H., Fingrut, A., Crolla, K., Yam, Y., & Lau, D. . CU-brick cable-driven robot for automated construction of complex brick structures: From simulation to hardware realisation[C]. 2018 IEEE International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots (SIMPAR) , 2018: 166-173.
- [31] Hu, H., & Cao, J.. Adaptive variable impedance control of dual-arm robots for slabstone installation[J]. ISA transactions, 2022, 128: 397-408.
- [32] Guo, J., Zhu, Z., Sun, B., & Zhang, T.. A novel field box girder welding robot and realization of all-position welding process based on visual servoing[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 63: 70-79.
- [33] Neudecker, S., Bruns, C., Gerbers, R., Heyn, J., Dietrich, F., Dröder, K., ... & Kloft, H.. A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork[J]. Procedia Cirp, 2016, 43: 333-338.
- [34] Alabbasi, M., Agkathidis, A., & Chen, H.. Robotic 3D printing of concrete building components for residential buildings in Saudi Arabia[J]. Automation in Construction, 2023, 148: 104751.
- [35] Tan, Y., Xu, W., Chen, P., & Zhang, S.. Building defect inspection and data management using computer vision, augmented reality, and BIM technology[J]. Automation in Construction, 2024, 160: 105318.
- [36] Malkawi, A., Ervin, S., Han, X., Chen, E. X., Lim, S., Ampanavos, S., & Howard, P.. Design and applications of an IoT architecture for data-driven smart building operations and experimentation[J]. Energy and Buildings, 2023, 295: 113291.
- [37] Yu, X., & Ren, G.. Application of building BIM technology based on sensor systems and 5G cloud computing. Measurement: Sensors, 2024, 33: 101095.
- [38] Han, K. K., & Golparvar-Fard, M.. Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study[J]. Automation in Construction, 2017, 73: 184-198.
- [39] Nguyen, T., Nguyen, H., & Gia, T. N.. Exploring the integration of edge computing and blockchain IoT: Principles, architectures, security, and applications[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2024: 103884.
- [40] Schiavi, B., Havard, V., Beddiar, K., & Baudry, D.. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction[J]. Automation in Construction, 2022, 134: 104054.
- [41] de Moraes Sarmento, E. M., Ribeiro, I. F., Marciano, P. R. N., Neris, Y. G., de Oliveira Rocha, H. R., Mota, V. F. S., & da Silva Villça, R.. Forecasting energy power consumption using federated learning in edge computing devices[J]. Internet of Things, 2024, 25: 101050.
- [42] 高伟哲, 孙童悦, 袁烽. 天府农博园“瑞雪”: 互承木构壳体的机器人建构实践[J]. 建筑学报, 2023 (10): 62-71. DOI: 10.19819/j.cnki.ISSN0529-1399.20231010.
- [43] Park, S., Wang, X., Menassa, C. C., Kamat, V. R., & Chai, J. Y. Natural language instructions for intuitive human interaction with robotic assistants in field construction work[J]. Automation in Construction, 2024, 161: 105345.
- [44] Meng, Q., Hu, L., Li, M., & Qi, X. Assessing the environmental impact of building life cycle: A carbon reduction strategy through innovative design, intelligent construction, and secondary utilization[J]. Developments in the Built Environment, 2023, 16: 100230.
- [45] Perković, T., Šolić, P., Zargariasl, H., Čoko, D., & Rodrigues, J. J. Smart parking sensors: State of the art and performance evaluation[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121181.
- [46] Tang, S., Kalavally, V., Ng, K. Y., & Parkkinen, J.. Development of a prototype smart home intelligent lighting control architecture using sensors onboard a mobile computing system[J]. Energy and buildings, 2017, 138: 368-376.
- [47] Li, W., & Xu, X.. A hybrid evolutionary and machine learning approach for smart building: Sustainable building energy management design[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2024, 65: 103709.
- [48] Di, C., & Gong, J.. An AI-based approach to create spatial inventory of safety-related architectural features for school buildings[J]. Developments in the Built Environment, 2024: 100376.
- [49] Yu, L., Nazir, B., & Wang, Y.. Intelligent power monitoring of building equipment based on Internet of Things technology[J]. Computer Communications, 2020, 157: 76-84.

图片来源

图 1、图 3、图 4: AI 生成并改绘

图 2: 作者自绘