

模块化建筑布局的自动生成方法综述

林佳瑞^{1,2}, 蔡云宏^{1,2}, 蒋武³, 潘鹏^{1,2,*}

(1, 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2, 住建部数字建造与孪生重点实验室, 北京 100084; 3, 中建三局第一建设工程有限责任公司, 武汉 430040)

【摘要】模块化建筑因其标准化与节能环保等优势, 在建筑工业化发展中日益受到重视, 但其设计过程的复杂性对传统设计方法提出了挑战。近年来, 生成式设计方法被广泛引入模块化建筑领域, 成为提升设计智能化水平的关键路径。本文围绕模块化建筑布局的自动生成方法, 首先梳理了模块化建筑布局的数字化表达方式, 为算法生成奠定数据基础; 随后详细讨论基于优化算法和基于深度学习的两类自动生成方法, 分析各自的原理、流程及适用情形; 最后归纳现阶段存在的挑战, 并展望未来研究的发展方向。

【关键词】模块化建筑; 生成式设计; 建筑布局; 优化算法

1 引言

模块化建筑是通过预制的标准三维单元在现场装配而成的一种新型工业化建造方式, 具有施工周期短、节能环保等优点。然而, 与传统现浇施工不同, 模块化建筑要求在设计早期充分考虑组装的限制, 设计容错度低, 这对建筑师提出了新的挑战。传统人工设计难以全局性地考虑所有因素, 往往需要反复试错, 导致设计周期长、效率低^[1]。因此, 将数字化手段和智能技术引入模块化建筑布局设计过程, 成为提升设计效率和质量的必然途径。

近年来, 建筑信息模型 (Building Information Modeling, BIM) 技术的发展以及生成式设计的兴起为模块化建筑的布局自动生成提供了新的思路。BIM 能够集成建筑的几何和语义等全生命周期信息, 为数字化设计奠定基础。而生成式设计利用计算机算法自动产生设计方案, 在建筑布局、结构优化等领域已展现出巨大潜力。特别是生成式人工智能的快速发展, 使计算机具备了一定的“创造力”, 能够从大量历史设计中学习模式并生成新方案。在建筑领域, 学者们已探索利用进化算法、机器学习、深度学习等方法来自动生成平面布局或三维空间配置, 并测试其对输入要求的符合程度。模块化建筑设计也对此开展了研究, 其中既包括基于优化算法的“知识驱动”方法, 也包括基于深度学习的数据驱动方法^[2]。

为系统梳理该领域的研究脉络与关键挑战, 本文采用系统性文献回顾方法, 分别在中英文文献数据库中检索相关研究文献, 时间范围限定为 2016 年至 2025 年。中文文献主要

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(52378306); 清华大学-中建三局土木工程新技术联合研究中心资助项目。

【作者简介】潘鹏(1976-), 男, 教授。主要研究方向为建筑与基础设施抗震韧性评价与提升、土木工程数字建造与孪生。
E-mail: panpeng@tsinghua.edu.cn

来源于中国知网,通过“模块化建筑”、“自动生成设计”、“建筑布局”等关键词进行组合检索,最终筛选出3篇具有代表性的文献,主要聚焦于模块化建筑的数字化发展趋势、BIM在布局设计中的应用等内容。英文文献主要来源于Web of Science数据库,通过关键词组合如“modular building”、“generative design”、“graph-based layout”等进行检索,并筛选出具有代表性的13篇文献,涵盖优化算法、图结构建模、深度学习与BIM自动设计等多个维度的研究成果,为综述撰写提供了系统的文献基础。

本综述首先介绍模块化建筑布局的数字化表达方式,包括图结构建模和BIM数据模型表示等,为生成设计提供数据基础。随后详细讨论基于优化算法的生成方法和基于深度学习的生成方法两大类生成式设计方法,分析各自的原理、流程及适用情形。最后提出对未来研究方向的展望,希望为后续研究提供借鉴和启示。

2 模块化建筑布局的数字化表达

在实现布局自动生成之前,首先需要解决如何以数字化方式准确表示模块化建筑的布局设计。良好的数据表达能够将建筑布局的关键信息转化为计算机可处理的形式,从而为后续的算法生成与优化提供支撑。模块化建筑由于其特有的单元模块拼接特性和空间组合逻辑,其数字化表达既要体现几何信息,也需描述拓扑关系与语义属性。

从数据源角度来看,原始设计数据通常采用BIM模型或CAD平面图纸的形式表达。BIM具有构件级的空间几何、物理属性和装配信息,能够完整表达模块构造与布局信息;而CAD图纸则更侧重于二维几何表达,是设计初期最常见的图形数据来源。

从算法输入的角度来看,当前布局自动生成方法中常用的表达方式主要可分为图结构数据和图像数据两类。图结构建模方式强调模块之间的空间邻接、连通、组合关系,常用于图神经网络、图优化、基于规则的推理等方法;而图像表达方式则将平面图转化为像素级图像输入,适用于如GAN等基于图像学习的生成模型。这两类表达形式分别适用于不同的算法框架,反映了模块化建筑布局设计在图结构与图像语义之间的建模差异。

当前主流研究多采用图结构建模和BIM数据模型作为数字化表达方式,后续将分别介绍这两种典型方法及其在模块化建筑中的应用。

由于模块化建筑布局涉及各功能空间或模块单元之间的拓扑关系,用图结构表示布局是一种直观且富有表达力的方法。如图1所示,在模块化建筑布局的图结构表示中,节点代表空间或模块,边代表它们之间的邻接、连接等关系。Lin等^[3]提出了一种模块化建筑布局图(ModularGraph)的概念,图中的节点代表建筑的功能空间,边代表功能空间之间邻接、连通和组合的空间关系,边的权重代表邻接边界的共享长度占比或连通边界中开口尺寸占比。该模型能够全面、准确地表示功能空间之间的邻接、连通和组合关系,从而以简洁统一的图结构承载丰富的拓扑信息。此外,该模型还能用于机器学习训练,将历史布局方案转换为计算机可理解的数据,以训练生成式设计AI。Su等人^[4]进一步提出了平面图学习结合扩散模型的方法,利用离散扩散模型(D3M)从8万张住宅户型平面中学习拓扑图

模式，再生成新布局拓扑图。该研究将户型平面转化为空间关系图并训练扩散模型，结果显示该模型能生成多样的楼层拓扑。另外，一些研究借鉴空间句法等图论分析方法，将建筑布局表示为可达图来评估空间的连通性与可变更性。例如，Herthogs 等人^[5]提出了一种普遍性和适应性空间评估（SAGA）方法，该方法将建筑平面图抽象为加权渗透图，以图的可达性定量评估布局的通用性和可变性，从而提高模块化建筑的长寿命设计提供指导。

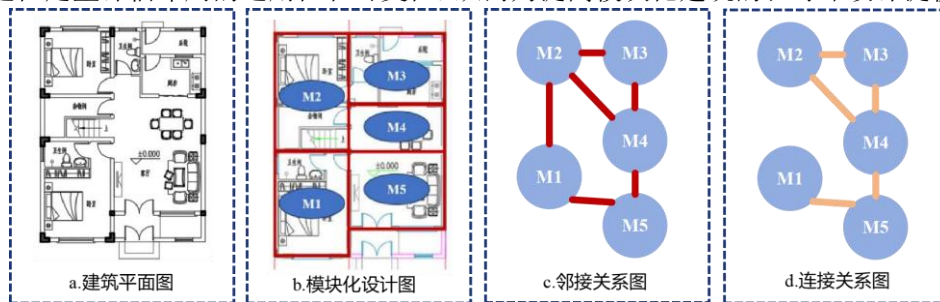


图1 模块化建筑布局的图结构建模过程示意图

BIM 作为建筑数字化的载体，被广泛用于模块化建筑设计中。BIM 模型包含构件的空间位置、几何尺寸、材料和成本等丰富信息，可用于表示模块单元的组合方式和建筑整体布局。例如，张博^[6]指出应在设计阶段结合 BIM 对模块进行模数化设计，建立模块构件库，通过不同功能模块的多样化组合来满足多变的使用需求。BIM 的三维信息集成特点使其适合表示模块化建筑中各模块单元及其装配关系，有研究提出将 BIM 与图数据结构结合以支持生成式设计，其核心思路是设计了基于 BIM 的图数据模型，通过定义模块化建筑设计所需的 IFC 视图，提取出模块单元的空间属性、拓扑关系、几何和语义信息，并映射为图模型^[7]。这种方法通过数据转换算法实现 BIM 模型到图模型的转换，为自动布局生成提供了统一的数据支撑。同时，BIM 支持与规则检查和仿真分析的集成，Sydora 等^[8]开发了一种领域专用规则语言，可将建筑规范转化为计算机可读的规则，对 BIM 模型进行合规性检查，并用于自动生成满足规则的室内布局方案。由此可见，BIM 既是模块化布局的三维数字化载体，又可作为信息交换与约束检查的平台，为生成式设计奠定基础。

3 生成式设计方法

模块化建筑布局的生成式设计方法可大致分为两大类：一类是基于优化算法的布局生成方法，即通过人工设定的算法或规则，在给定约束下搜索布局方案；另一类是基于深度学习的布局生成方法，即利用数据驱动模型从已有设计中学习经验来生成新方案。本节分别对这两类方法进行综述，比较其原理特点和典型应用。

3.1 基于优化算法的布局生成方法

基于优化算法的布局生成方法利用明确的算法逻辑在解空间中搜索满足要求的布局方案。其特点是可直接编码设计规则和目标函数，对约束条件的把控较强，适合求解有确定评价标准的问题，其采用的优化算法包括启发式算法、进化算法、数学规划方法等。

由于模块化建筑布局问题往往具有高度的组合复杂性，传统设计方法在处理大规模模块单元排布时难以有效应对。因此，许多研究引入了启发式算法和进化计算技术以提升解的质量与计算效率，遗传算法（Genetic Algorithm, GA）是其中一种常见的典型算法，该算法模拟自然选择和遗传中的复制、交叉、变异等现象，通过多次迭代改进方案，搜索最优解。针对模块化高层住宅布局，Fan 等^[9]利用遗传算法实现了平面单元组合和交通核心布置的两阶段自动布局生成。他们提出了一种模块单元参数化编码，将模块户型表示为基因序列，并对平面单元布局和楼梯电梯核心布局两个子问题分别优化。进化算法的另一典型应用是 Dino 提出的 EASE（Evolutionary Architectural Space layout Explorer）系统^[10]，该研究利用遗传算法，在满足硬约束的前提下使 3D 空间布局不断进化，并提供一组性能各异的最优解供设计师权衡选择。EASE 通过一种基于优先级的启发式布局配置方法产生初始方案，并定义多种约束指标评估方案优劣，再用遗传算子改进方案，从而实现发散探索与收敛优化的平衡。除遗传算法外，其他进化算法如粒子群、模拟退火等也有应用^[11]，但总体思路都是设定编码方式来表示布局，将约束和目标转化为适应度函数，反复迭代寻优得到满足要求的方案集合。这类方法擅长处理多目标和非线性问题，例如 Sharafi 等^[12]构造了三维分配优化模型，同时考虑最小造价、平面规则度最大、体形能效最大三项目标，对多层模块化建筑进行空间优化配置。可见，进化算法能够较好地探索解空间并找到兼顾多种性能的方案，对于模块化布局这种复杂设计问题是一种有效手段。

除了启发式方法，精确的数学规划方法也被用于布局自动生成。Cubukcuoglu 等人^[13]针对医院建筑的复杂布局要求，提出了一个分阶段优化 workflow。首先使用谱聚类方法进行功能分区与楼层分配，随后将分区布局与路线布置统一表述为混合整数规划（Mixed Integer Programming, MIP）问题求解。该研究将平面离散为规则网格，将科室房间布置和交通流线的生成用 MIP 在网格上同步优化，保证满足科室邻近性、流程通达性等多种要求。总的来说，数学规划方法能精确满足显式提出的设计要求，并确保输出方案的严格合规性，因此在需要保证设计正确性的模块化建筑布局生成中具有重要作用。但其不足在于如果要求过多可能导致无解或计算复杂度过高，面对模糊或主观的设计目标时适用性受限。

近年来，一些研究尝试跳出传统优化范式，将建筑布局生成视为多智能体自组织或仿真过程。Su 等人^[14]将复杂高层住宅平面布局问题建模为自适应问题而非纯优化问题，采用多智能体系统（Multi-Agent System, MAS）结合蒙特卡洛树搜索（Monte Carlo Tree Search, MCTS）的策略进行求解。其思想是将空间单元视为智能体，每个智能体根据局部规则感知环境并行动，而不是由全局优化直接决定布局。通过引入 MCTS 算法作为智能体之间的通信机制，模拟智能体轮流占据空间、调整位置的过程，最终整个系统涌现出满足全局约束的稳定布局。总体而言，基于优化算法的生成方法具有可解释、约束直观的优点，能确保生成方案在结构、规范等方面的可靠性。然而，其自动生成的方案往往需要进一步由设计师审阅优化，以注入美学和人文考虑。

3.2 基于深度学习的布局生成方法

深度学习通过从大规模数据中学习隐含规律，能够在设计生成中发挥创造性作用。在模块化建筑布局自动生成领域，引入深度学习可以让系统自主学习人类设计的模式和风格，从而生成更加多样、智能的方案。

对抗生成网络（Generative Adversarial Networks, GAN）是一种典型的深度学习模型，由生成器和判别器组成，通过对抗训练学习并拟合数据的分布规律。Ghannad^[15]提出了一个针对模块化住宅设计的框架，将 GAN 与传统算法结合，用以自动生成满足模块化施工要求的住宅方案。该框架包括两个部分，一是耦合 GAN，用于从项目高层需求出发生成住宅的平面布局草案；二是模块配置算法，将 GAN 生成的布局进一步划分和调整为具体的模块单元配置。该方法旨在缩短繁琐的模块化设计前期过程，通过 GAN 从历史住宅设计中学习布置模式，再用启发式算法保证输出方案可以拆解为标准模块且满足构造要求。Liao 等人^[16]针对剪力墙结构设计提出“文本-图像融合”GAN 模型，将文字描述和草图同时作为输入，引导模型生成满足结构受力和设计要求的结构布置方案。经过仅数百份数据的训练，该模型在案例中成功生成了符合要求的结构方案，而普通 GAN 等深度模型通常需要大量训练样本，这对于模块化建筑这类缺乏海量公开数据的领域具有借鉴意义。总的来说，GAN 类模型擅长生成逼真的布局图像或方案，但需注意确保生成结果的合规。

扩散模型是近年兴起的深度学习模型，通过模拟数据逐步添加噪声再去噪的过程来生成新样本。Su 等^[4]利用离散扩散模型来学习住宅平面布局的拓扑图分布，并用于新布局生成。这一方法的意义在于，它充分发掘了已有设计中蕴含的大量拓扑模式知识，而这些知识过去往往未被利用。相比 GAN 需要直接学习和输出具体平面图，扩散模型学习的是抽象关系，因此对训练数据的要求相对降低，提供了更大的灵活性。这些深度学习模型的方法充分说明，布局生成可以看作一种数据序列或分布的采样问题，深度学习模型能够捕获其中隐含的设计逻辑，从而泛化出人类设计者未必想到的方案。总体而言，深度学习模型大大拓宽了可探索的设计空间，提供了前所未有的自动化创意能力，但如何使其与工程规则相融合是模块化建筑应用中必须解决的问题。

4 结论

模块化建筑作为建筑工业化的重要形式，正随着数字化与智能化技术的发展而迎来新的机遇。本文综述了模块化建筑布局自动生成的方法体系和关键技术，包括基于 BIM 和图结构的数字化表达，利用优化算法自动求解布局，以及采用深度学习模型从数据中学习生成设计。研究表明，这些方法各有优势，优化算法能够严格满足约束并提供可解释的方案依据，深度学习方法则擅长发掘隐含模式，产生富有创造力的布局方案。尽管如此，我们也应认识到，真正实现成熟的自动化布局生成仍需解决许多难题。数据不足限制了深度学习模型性能，复杂约束集成尚不完善，多专业协同和方案灵活性亦需要更多关注。但这些挑战有望被逐步克服。尤其在建筑全生命周期数字化的大背景下，自动布局生成技术将与 BIM、CAD 等深度集成，实现从概念设计到施工制造的数智一体化。

参 考 文 献

- [1]刘倩,杨淑娟,郁有升,等. 模块化装配式建筑发展现状与未来展望 [J]. 青岛理工大学学报, 2021, 42 (05): 35-40+48..
- [2]王鼎明,何宛余,王彦文. 装配式模块化建筑的“数智化”发展 [J]. 当代建筑, 2022, (08): 57-61.
- [3] X. Lin, J. Chen, W. Lu, H. Guo, An edge-weighted graph triumvirate to represent modular building layouts, *Automation in Construction* 157 (2024).
- [4] P. Su, W. Lu, J. Chen, S. Hong, Floor plan graph learning for generative design of residential buildings: a discrete denoising diffusion model, *Building Research & Information* 52(6) (2023) .
- [5] P. Herthogs, W. Debacker, B. Tunçer, Y. De Weerd, N. De Temmerman, Quantifying the Generality and Adaptability of Building Layouts Using Weighted Graphs: The SAGA Method, *Buildings* 9(4) (2019).
- [6]张博. 数字化背景下 BIM 在模块化集成建筑中的应用研究[D]. 吉林建筑大学, 2023.
- [7] V.J.L. Gan, BIM-based graph data model for automatic generative design of modular buildings, *Automation in Construction* 134 (2022).
- [8] C. Sydora, E. Stroulia, Rule-based compliance checking and generative design for building interiors using BIM, *Automation in Construction* 120 (2020).
- [9] Z. Fan, J. Liu, L. Wang, G. Cheng, M. Liao, P. Liu, Y.F. Chen, Automated layout of modular high-rise residential buildings based on genetic algorithm, *Automation in Construction* 152 (2023).
- [10] I.G. Dino, An evolutionary approach for 3D architectural space layout design exploration, *Automation in Construction* 69 (2016) 131-150.
- [11] V.J.L. Gan, C.L. Wong, K.T. Tse, J.C.P. Cheng, I.M.C. Lo, C.M. Chan, Parametric modelling and evolutionary optimization for cost-optimal and low-carbon design of high-rise reinforced concrete buildings, *Advanced Engineering Informatics* 42 (2019).
- [12] P. Sharafi, B. Samali, H. Ronagh, M. Ghodrat, Automated spatial design of multi-story modular buildings using a unified matrix method, *Automation in Construction* 82 (2017) 31-42.
- [13] C. Cubukcuoglu, P. Nourian, I.S. Sariyildiz, M.F. Tasgetiren, Optimal Design of new Hospitals: A Computational Workflow for Stacking, Zoning, and Routing, *Automation in Construction* 134 (2022).
- [14] P. Su, X. Lin, W. Lu, F. Xiong, Z. Peng, Y. Lu, Generative design for complex floorplans in high-rise residential buildings: A Monte Carlo tree search-based self-organizing multi-agent system (MCTS-MAS) solution, *Expert Systems with Applications* 258 (2024).
- [15] P. Ghannad, Y.-C. Lee, Automated modular housing design using a module configuration algorithm and a coupled generative adversarial network (CoGAN), *Automation in Construction* 139 (2022).
- [16] W. Liao, Y. Huang, Z. Zheng, X. Lu, Intelligent generative structural design method for shear wall building based on “fused-text-image-to-image” generative adversarial networks, *Expert Systems with Applications* 210 (2022).

