基于生成式设计的建筑结构形态优化与性能模拟

潘祖祺

新余起军建筑工程有限公司 江西新余 338000

摘要：随着计算机技术的飞速发展，生成式设计作为一种新兴的设计方法，在建筑领域中逐渐受到重视。生成式设计通过算法模拟自然界的生长过程，能够自动生成满足特定条件和性能要求的建筑结构形态。本文首先介绍了生成式设计的基本原理，然后探讨了其在建筑结构形态优化中的应用，并通过性能模拟验证了优化效果。研究表明，生成式设计能够有效提升建筑结构的性能，降低材料消耗，提高空间利用率，为建筑设计提供了新的思路和方法。

关键词：生成式设计；结构形态优化；性能模拟；建筑设计

引言

在现代建筑设计中，如何实现结构形态的优化以提高建筑性能一直是设计师关注的焦点。传统的设计方法往往依赖于设计师的经验和直觉，而生成式设计则通过计算机算法来辅助设计，使得设计过程更加科学和高效。生成式设计的核心在于利用计算机程序模拟自然界的生长机制，通过迭代计算生成多种设计方案，并从中选择最优解。

一、生成式设计原理及其在结构形态优化中的应用

（一）生成式设计基本原理

生成式设计是一种以计算机算法为核心的设计方法，其核心概念包括参数化建模、算法驱动和迭代优化。参数化建模是指将设计对象表达为一系列相互关联的参数和规则，这些参数可以量化描述设计的几何形状、材料属性、功能需求等。算法驱动意味着设计过程不是由设计师直接绘制，而是由预设的算法根据参数和规则自动执行，探索并生成设计方案。迭代优化则是指算法通过不断重复计算和评估，根据设定的目标逐步改进设计，直至达到最优或满足特定标准。生成式设计通过定义明确的规则和约束来探索设计空间。规则可以是对几何形状的限制（如最大高度、最小曲率半径）、材料性能的要求（如强度、延展性）、功能区域的划分（如承重区、非承重区）等。约束则是在设计过程中必须满足的条件，例如结构必须能够承受特定的荷载、空间必须满足使用功能等。通过这种方式，设计系统能够在满足所有约束的前提下，自动探索所有可能的形态组合，从而生成大量多样化的结构形态方案，这些方案往往是人类设计师

难以凭直觉想到的。

（二）结构形态优化的生成式策略

适用于建筑结构的生成式优化策略有多种，其中包括基于进化算法的方法。进化算法模拟自然界中的生物进化过程，通过选择、交叉和变异等操作，从初始的随机种群中逐步筛选出适应度更高的个体，即更优的结构形态。元胞自动机则是一种基于网格的计算模型，通过定义局部单元的简单状态转换规则，能够涌现出复杂的全局形态，适用于模拟生长、扩散等过程，可用于生成具有分形特征或自适应性的结构。代理模型（或称响应面模型）是用一个简化的数学模型来近似表示复杂结构分析（如有限元分析）的结果，它可以在优化过程中快速评估大量设计方案的性能，从而显著提高优化效率。在生成过程中融入结构受力逻辑、材料效率、建造可行性等考量因素是关键。结构受力逻辑要求生成的形态能够有效地传递荷载，避免应力集中，通常表现为结构构件沿主应力线分布。材料效率则追求在满足强度和刚度要求的前提下，使用最少的材料，这通常意味着结构形态会呈现出轻质、高强的特点，如薄壁、变截面等。建造可行性则需要考虑实际施工条件，如构件的尺寸限制、连接方式、安装顺序等，确保生成的形态能够被经济、高效地建造出来^[1]。

（三）设计约束与目标设定

在生成式结构形态优化中，设定关键的设计约束条件是确保生成方案符合实际需求的基础。几何限制包括建筑物的总体尺寸、层高、开间、门窗洞口位置、与周边环境的协调性等。功能要求涉及空间的使用性质（如住宅、办公、公共活动）、内部布局（如房间面积、交通

流线)、设备管线布置空间等。荷载条件则必须明确结构需要承受的各种荷载,包括恒载(结构自重)、活载(使用荷载、人群荷载)、风荷载、雪荷载、地震作用等,并考虑这些荷载的组合效应。这些约束条件需要被转化为具体的数学表达式或逻辑规则,输入到生成式设计系统中。定义优化的目标函数是指导优化过程朝着期望方向发展的关键。目标函数是衡量设计方案优劣的量化指标。常见的目标函数包括结构重量最小化,这在大型钢结构或桥梁设计中尤为重要,直接关系到材料成本和运输安装难度;刚度最大化,确保结构在荷载作用下变形控制在允许范围内,保证使用舒适度和安全性;应力均匀化,使结构构件内部应力分布更均匀,避免局部应力过高导致破坏,提高结构整体性和耐久性。有时也会设定多目标优化,例如同时追求重量最轻和刚度最大,这时需要采用特定的多目标优化算法来找到帕累托最优解集^[2]。

二、性能模拟在生成式结构优化中的作用与集成

(一) 性能模拟的重要性

结构性能模拟,涵盖力学性能、热工性能、抗震性能等多个方面,在评估生成式设计方案的可行性与优劣中扮演着关键角色。生成式设计能够快速产生大量形态各异的方案,但这些方案是否满足工程实际要求,必须通过精确的性能模拟来检验。力学性能模拟可以计算出结构在预期荷载作用下的内力分布、变形情况、应力水平,判断结构是否安全可靠,构件尺寸是否合理。热工性能模拟则能评估建筑围护结构的保温隔热效果,判断是否满足节能设计标准。抗震性能模拟通过输入地震动记录,分析结构在地震作用下的响应,验证其是否具备足够的延性和耗能能力,保障生命财产安全。这些模拟结果为生成式优化提供了直接的反馈。当模拟显示某个设计方案在某个性能指标上不达标时,这个信息会被传递回生成式设计系统,系统据此调整参数、修改规则或约束,引导后续生成的形态向更优解发展,从而逐步淘汰性能不佳的方案,保留和优化性能优越的方案。

(二) 模拟方法的选择与简化

在生成式设计的快速迭代过程中,选择合适的性能模拟方法至关重要。有限元分析(FEA)是应用最广泛、功能最强大的结构性能模拟工具,能够精确模拟复杂几何形状和边界条件下的结构行为。然而,标准的FEA计算量较大,耗时较长,难以满足生成式设计每一步迭代都需要进行性能评估的快速反馈需求。因此,需要探讨如何在保证一定精度的前提下,提高模拟效率。一种方

法是采用简化模型,例如在初步评估阶段使用梁单元模型代替实体单元模型,或者在特定区域采用子模型技术。另一种方法是利用代理模型(Surrogate Models),如响应面法、神经网络等,先用少量精确的FEA结果训练代理模型,后续迭代中用训练好的代理模型快速预测性能,大幅缩短计算时间。此外,还可以根据优化目标,针对性地简化非关键部分的模拟计算,或者采用并行计算技术,同时处理多个方案的模拟任务^[3]。

(三) 生成式设计与性能模拟的集成流程

将性能模拟有效嵌入生成式优化流程,是发挥两者协同优势的关键。具体方法是将性能模拟工具作为生成式设计系统中的一个环节,形成“设计-模拟-评估-反馈-再设计”的闭环 workflow。首先,生成式设计系统根据当前参数和规则,自动生成一个或多个新的结构形态方案。然后,这些方案的数据(通常是几何模型或参数化描述)被传递给性能模拟模块。模拟模块执行预设的模拟任务(如静力分析、动力时程分析等),输出性能评估结果。接着,评估模块根据设定的性能标准和目标函数,对这些结果进行量化评分或分类。评分或分类结果作为反馈信息,传递回生成式设计系统。设计系统根据反馈调整其内部的控制参数、进化策略或优化算法,指导下一轮的设计生成。在这个过程中,数据传递和信息交互的技术要点在于接口的标准化和自动化。需要建立生成式设计软件、性能模拟软件(如FEA软件)以及可能的代理模型工具之间稳定、高效的数据接口,确保几何模型、材料属性、荷载条件等数据能够准确无误地传递。同时,信息交互流程需要自动化,减少人工干预,保证整个闭环流程能够快速、连续地运行,从而实现高效的协同优化。

三、生成式优化与性能模拟的协同效应分析

(一) 形态与性能的关联性探讨

生成式设计能够产生传统方法难以构思的复杂结构形态,这些形态与结构的性能,如承载能力、变形控制、材料利用率等,存在着深刻的内在联系。例如,生成式设计可能产生具有分形特征或有机流线型的梁柱截面,这种形态通过增加材料在受力关键区域的集中,或者在非关键区域减少材料,从而在不降低甚至提高承载能力的前提下,显著改善结构的受力均匀性,有效控制结构在荷载作用下的变形。同时,这种优化形态往往能最大限度地减少材料用量,实现更高的材料利用率。性能模拟反馈是连接形态与性能、并促进二者协同优化的关键

环节。当模拟结果显示某个新生成的形态在特定性能上存在不足，如局部应力过高或变形过大时，这个精确的量化信息会直接反馈给生成式优化算法。算法据此调整其内部规则和参数，例如修改材料的分布策略、调整单元的合并或删除规则、改变约束条件等，引导后续生成的形态在保持原有优势的同时，针对性地改善不足之处。这种基于性能反馈的迭代过程，使得形态的生成不再是盲目探索，而是朝着性能最优化的方向精准演进，促进了形态与性能的深度融合与协同提升^[4]。

（二）优化效率与效果评估

引入性能模拟反馈后，生成式优化的效率与效果会发生显著变化。在收敛速度方面，虽然每次模拟都需要计算时间，但性能反馈能够帮助算法更快地识别和淘汰性能不佳的解，集中资源探索更有潜力的区域，避免了在无效设计空间上的无效迭代，从而可能加快整体收敛进程。在解的质量上，基于真实性能评估的优化能够确保最终得到的方案不仅满足几何约束和功能要求，更在力学性能、经济性等方面达到较高水平，避免了仅凭几何规则生成但性能欠佳的方案。在设计空间探索广度方面，性能模拟反馈能够引导算法探索那些在传统经验下可能被忽略、但性能优异的非传统形态区域，从而拓展了有价值的解空间。综合评估协同优化过程的效果，其在提升结构性能（如提高承载力、改善刚度、增强抗震能力）、减少材料消耗（实现更轻质、更经济的结构）、满足复杂功能需求（如集成设备管线、适应特殊建筑造型）等方面均能产生显著的积极效果。这种综合效果的实现，使得设计结果更加科学、合理，更贴近工程实际需求。

（三）实践中的挑战与应对

在协同应用生成式设计 with 性能模拟的过程中，可能会遇到若干技术挑战。计算资源消耗是一个主要问题，因为每次形态生成后都需要进行性能模拟，尤其是在处理复杂结构或采用高精度模拟时，计算量和时间消耗会非常大，可能成为优化过程的瓶颈。参数敏感性也是一个挑战，生成式设计中的某些参数可能对性能结果极为敏感，微小的参数变动就可能导致性能的剧烈变化，这使得优化过程可能陷入局部最优，或者对初始参数的选择要求很高。此外，多目标冲突在工程实践中普遍存在，

例如追求结构重量最轻可能与追求最大刚度或最小应力集中相矛盾，如何在多个相互冲突的目标之间找到平衡点，是协同优化需要解决的关键问题。应对这些挑战的一般性策略包括：在算法选择上，采用计算效率更高的优化算法，或者针对特定问题定制优化策略；利用并行计算技术，同时进行多个方案的性能模拟，大幅缩短总计算时间；在模型精度与计算效率之间进行权衡，采用经过验证的简化模型或代理模型（Surrogate Model）来替代部分高精度模拟，尤其是在优化迭代的中后期；对于多目标冲突，采用专门的多目标优化算法，寻找帕累托最优解集，为设计决策提供更丰富的选择。这些策略的应用，旨在平衡优化过程的效率与效果，使其更适用于实际的工程应用^[5]。

结语

生成式设计与性能模拟结合为建筑结构设计带来变革与机遇。生成式设计可生成多样结构形态方案，性能模拟为评估方案提供依据，二者集成形成闭环工作流，实现形态与性能协同优化，提升结构性能、降低材料消耗、满足功能需求。但实践中面临计算资源消耗高、参数敏感、多目标冲突等挑战，需探索应对策略。未来，随计算机技术发展和算法优化，二者协同应用有望突破。计算能力提升可实现更复杂模拟优化，融入人工智能和机器学习或使系统更智能。应深入研究推广该设计方法，培养专业人才，推动建筑设计行业朝科学、高效、绿色方向发展，为改善生活环境做贡献。

参考文献

- [1] 张枢健. 基于力学性能的极小曲面壳体生形优化设计研究 [D]. 华南理工大学, 2022.
- [2] 张奇帆. 基于新型梁柱节点的装配式框架结构优化设计 [D]. 上海大学, 2022.
- [3] 邱兆阳. 基于城市形态的办公建筑被动式设计多目标优化研究 [D]. 深圳大学, 2022.
- [4] 姚佳伟, 黄辰宇, 袁烽. 多环境物质驱动的建筑智能生成设计方法研究 [J]. 时代建筑, 2021 (6): 6.
- [5] 沈宇驰. 基于向量图解静力学的自然启发建筑结构找形与设计研究 [D]. 东南大学, 2021.