

基于AI的建筑结构优化设计与性能化分析方法研究

崔万里

山东建筑大学 山东济南 250000

摘要: 在现代建筑工程向绿色化、轻量化与智能化发展的背景下,传统建筑设计过度依赖工程师经验与规范条文,在多目标优化、复杂工况性能评估等方面逐渐显现局限性。人工智能技术凭借强大的数据处理能力、非线性拟合能力与全局寻优能力,为结构优化设计与性能化分析提供了新的技术路径。本文围绕基于AI的建筑结构优化设计与性能化分析体系展开研究,梳理想能优化算法、代理模型、深度学习等技术在结构设计中的应用方式,探讨性能化分析在多灾害工况下的实现路径,结合工程应用场景分析实际效果,并对当前技术瓶颈与未来发展方向进行总结。研究表明,AI技术能够有效提升结构设计效率、降低材料消耗、提高结构安全冗余度,推动建筑设计从经验驱动向数据驱动与智能驱动转型。

关键词: 人工智能; 建筑结构; 优化设计; 性能化分析; 结构安全

引言

建筑结构设计是保障建筑安全、经济、适用的核心环节,其合理性直接影响工程成本、施工难度与长期服役性能。传统结构设计多采用试算迭代方式,以规范限值为约束条件,通过人工调整构件尺寸、结构布置与材料强度完成方案设计。这种模式在面对高层建筑、大跨度空间结构、复杂异形结构时,往往难以实现全局最优,容易造成材料浪费或安全储备不足。

同时,在地震、强风、火灾等灾害作用下,结构呈现高度非线性响应,传统有限元分析计算量大、耗时长,难以在设计阶段完成多方案快速比选与性能精细化评估。随着建筑行业数字化转型不断深入,性能化设计理念逐步普及,结构设计不再仅满足规范最低要求,而是以预设性能目标为导向,实现更精细、更可靠、更经济的设计成果。

人工智能技术的快速发展,为解决上述问题提供了可行方案。机器学习、智能优化算法、代理模型与数值模拟相结合,能够在海量设计变量中快速寻找最优解,精准预测结构在复杂工况下的力学行为,实现优化设计与性能评估的一体化。基于此,本文对AI技术在建筑结构优化设计与性能化分析中的应用方法进行系统研究,以期智能化结构设计理论完善与工程实践推广提供参考。

一、基于AI的建筑结构优化设计方法

(一) 智能优化算法在结构参数优化中的应用

结构优化设计通常涉及截面尺寸、材料参数、构件

布置、拓扑形式等多个变量,属于多约束、多目标、非线性复杂优化问题。传统优化方法如线性规划、梯度下降法在处理高维问题时易陷入局部最优,而人工智能优化算法具有全局搜索能力强、不依赖梯度信息、适应性强等优势。

遗传算法通过模拟生物进化过程中的选择、交叉与变异操作,能够在离散设计空间中迭代寻优,适用于框架柱截面、梁高、剪力墙厚度等参数优化。粒子群优化算法模拟群体觅食行为,收敛速度快、参数设置简单,在连续变量优化问题中表现稳定,常用于结构刚度、重量与位移的协同优化。模拟退火算法、蚁群算法等也在结构布置优化、节点形式优化中得到应用。

在多目标优化中,AI算法能够构建帕累托最优解集,使结构在满足强度、刚度、稳定性的前提下,实现自重最轻、造价最低、延性最好等多个目标的平衡。

(二) 基于代理模型的高效优化策略

结构优化过程中需要反复调用有限元模型进行力学计算,计算成本高、周期长,难以支撑大规模迭代。AI代理模型通过学习已有计算数据,构建设计参数与结构响应之间的映射关系,可替代部分有限元仿真,大幅提升优化效率。

常用代理模型包括响应面法、克里金模型、支持向量机以及各类神经网络模型。深度神经网络具有强大的非线性拟合能力,能够在大量样本训练后实现高精度预测,将原本数小时的有限元计算缩短至秒级完成。在优

化流程中，代理模型先对大量候选方案进行快速筛选，再对少数优质方案进行精细化有限元验证，既保证优化效率，又不降低设计精度。该策略在超高层核心筒优化、大跨度桁架优化、装配式构件优化中应用效果显著。

（三）结构拓扑优化与轻量化智能设计

拓扑优化旨在给定荷载与约束条件下，寻找材料最优分布形式，实现结构轻量化与性能提升。传统拓扑优化依赖变密度法均匀演化，计算量大且结果易出现离散破碎区域。AI技术通过生成式模型与深度学习方法，可直接生成连续、光滑、可施工的拓扑形态，同时兼顾力学效率与建筑造型需求。

利用卷积神经网络对结构应力场、位移场进行学习，能够快速给出最优材料分布方案。在空间结构、异形钢结构、装配式住宅构件设计中，AI拓扑优化可在保证安全性能不变的前提下降低结构自重15%~30%，显著提升材料利用率，契合绿色建筑发展要求。

（四）基于BIM与AI的协同优化

建筑信息模型（BIM）为结构优化提供了完整的数据基础。AI算法可通过接口读取BIM模型中的几何信息、材料属性、荷载信息与边界条件，自动构建参数化优化模型。优化完成后，结果可实时反馈至BIM平台，自动更新构件尺寸与布置形式，实现设计、分析、优化一体化闭环。

在实际工程中，BIM+AI模式可快速完成碰撞检查、冗余识别、配筋优化与造价估算，减少人工修改次数，缩短设计周期，提升图纸质量与方案可靠性。

二、基于AI的建筑结构性能化分析方法

（一）性能化分析的基本框架

性能化分析以结构预设性能目标为核心，通过定量评估结构在多工况下的响应状态，判断是否满足正常使用、人身安全、防倒塌等不同水准要求。其流程包括性能目标确定、荷载工况选取、力学响应计算、性能指标判定与方案调整。

传统性能化分析高度依赖非线性有限元动力时程分析，计算成本高，在方案迭代阶段实用性有限。AI技术通过数据驱动预测与智能评估，构建高效性能化分析体系，使性能评估能够贯穿设计全过程。

（二）基于机器学习的结构非线性响应预测

地震、强风等作用下结构表现出明显的非线性特征，包括材料弹塑性、几何大变形、节点半刚性等。传统有限元模型计算复杂，而机器学习模型可通过大量样本学

习参数与响应之间的关系，实现快速预测。

长短期记忆网络（LSTM）适合处理时程数据，可对地震作用下的层间位移角、加速度响应、残余变形进行高精度预测。卷积神经网络（CNN）可从应力场、应变场图像中识别结构薄弱部位。通过训练好的AI模型，工程师可在几秒内获得结构弹塑性分析结果，大幅提升性能化分析效率。

（三）多灾害耦合作用下的性能评估

实际结构往往同时承受多种灾害作用，如地震与风荷载、温度与地震耦合等。AI多任务学习模型可同时学习不同灾害下的结构响应规律，实现多灾害耦合效应的综合评估。通过构建多灾害样本库，AI模型能够输出结构在组合工况下的应力、变形、损伤指数与安全系数，为性能化设计提供更全面的依据。

在超高层、大跨结构与重要公共建筑中，多灾害性能化分析可有效提升结构韧性，降低灾害风险。

（四）结构损伤识别与性能韧性评估

性能化分析不仅面向设计阶段，也覆盖结构全生命周期。AI技术可结合传感器监测数据、图像识别数据，对结构裂缝、变形、锈蚀等损伤进行智能识别，判断构件损伤程度与位置。通过深度学习模型预测结构剩余承载力、延性与恢复能力，实现结构性能韧性评估，为后期加固、维修与改造提供决策支持。

三、工程应用价值与实践效果

在实际工程中，AI优化与性能化分析已展现出显著优势。在超高层框架-核心筒结构设计中，采用多目标智能优化后，结构自重降低10%~20%，造价降低8%~15%，层间位移与刚度分布更合理。在大跨度空间桁架项目中，AI拓扑优化使杆件布置更均匀，风振响应降低，结构整体稳定性提升。

装配式钢结构住宅中，AI可自动完成构件选型、节点优化与抗震性能验算，设计效率提升50%以上，构件标准化程度显著提高。综合来看，AI技术不仅提升结构经济性，更增强了结构在灾害工况下的安全性能，使性能化设计真正落地可行。

四、当前存在的问题与挑战

第一，数据质量与样本规模不足。AI模型高度依赖数据，但结构工程领域实测数据少、仿真数据分散、标注成本高，影响模型泛化能力。

第二，模型可解释性较弱。深度学习多为黑箱模型，其决策逻辑难以用传统力学原理解释，在严格规范审核

场景下推广受限。

第三，与现行规范体系衔接不足。现有设计规范基于传统方法制定，AI优化成果缺乏统一的评价标准与审核依据。

第四，跨学科人才短缺。既懂结构工程又掌握人工智能算法的复合型人才较少，制约技术深度应用。

五、未来发展趋势

未来，AI与建筑结构设计的融合将向更深度、更系统的方向发展。一是物理信息与数据驱动相结合，将力学方程、规范规则嵌入神经网络，提升模型可解释性与可靠性。二是多模态大模型在结构设计中应用，实现自然语言交互设计、智能出图与自动验算。三是全生命周期智能化，从设计、施工到运维均由AI提供决策支持，实现性能最优与成本最优。四是行业标准逐步完善，形成针对AI结构设计的技术指南、审核流程与合规要求。

结论

人工智能技术为建筑结构优化设计与性能化分析提供了高效、精准、智能的技术手段，能够有效改善传统设计效率低、优化不充分、性能评估粗糙等问题。通过智能优化算法、代理模型、深度学习与BIM技术的集成应用，可实现结构参数优化、拓扑优化、多灾害性能评估与全生命周期性能监控。

尽管目前在数据、可解释性、规范衔接等方面仍存在挑战，但随着技术不断成熟与行业体系逐步完善，AI将深刻改变建筑结构设计模式，推动行业向绿色、智能、高效方向发展。未来应进一步加强跨学科研究，推动AI算法与结构工程理论深度融合，提升智能化设计工具的实用性与普及度，为我国建筑工程高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 田景然, 刘梓萌, 韩秀军. AI赋能“筑”力未来 [N]. 重庆科技报, 2025-07-08 (015). DOI: 10.44517/n.cnki.ncqkj.2025.000316.
- [2] 张燕, 张雨辰, 李锦曦. AI赋能建筑工程现场安全管理新模式构建与实践路径 [J]. 建筑, 2026, (03): 96-99.
- [3] 王纲, 沈洪平. 生成式AI在城镇更新改造建筑设计中的应用 [J]. 新型城镇化, 2026, (03): 98-99.
- [5] 吉国华, 闫树睿. 面向建筑AI的专业数据挖掘与应用 [J]. 当代建筑, 2026, (01): 51-55. DOI: 10.20268/j.cnki.ISSN2096-8051.20261205.
- [6] 杜明芳. AI+智慧建筑研究 [J]. 土木建筑工程信息技术, 2018, 10 (03): 1-6. DOI: 10.16670/j.cnki.cn11-5823/tu.2018.03.01.