

基于深度强化学习的高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计方法研究

柴晨微¹ 郑晓英² 杜彦清^{1*}

1.河北加壹建筑设计有限公司 河北 石家庄 050000

2.石家庄市保障性安居工程开发建设有限责任公司 河北 石家庄 050000

【摘要】：随着城市化进程的加速，高层建筑在现代城市中扮演着愈发重要的角色。然而，传统高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计方法在处理复杂结构时存在计算效率低、设计精度不足以及多目标优化困难等问题。为解决这些问题，本文提出了一种基于深度强化学习的新方法，旨在通过智能体与环境交互、奖励机制引导以及神经网络学习，实现高层建筑抗侧力结构的高效拓扑优化设计。实验结果表明，该方法不仅能够显著提升结构性能，还在材料成本降低方面展现出明显优势，为高层建筑结构设计提供了新的技术途径。

【关键词】：深度强化学习；高层建筑；抗侧力结构；拓扑优化设计

DOI:10.12417/2811-0536.26.06.061

引言

在现代城市发展中，高层建筑占据着举足轻重的地位。随着城市化进程的加速，土地资源日益紧张，高层建筑以其高容积率的优势成为解决城市人口密集问题的关键手段。然而，高层建筑的结构设计面临着诸多挑战，尤其是在抗侧力结构的优化设计方面。抗侧力结构在承受风荷载、地震作用等侧向力时发挥着至关重要的作用，其合理性直接影响到高层建筑的安全性与经济性。因此，开展基于深度强化学习的研究不仅具有重要的理论价值，更对实际工程应用具有深远意义。

1 高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计背景

(1) 高层建筑发展现状：近年来，高层建筑的数量显著增多，且其高度不断增加，逐渐成为城市天际线的重要组成部分。这种发展趋势不仅反映了土地资源的高效利用需求，也体现了现代建筑技术的快速进步。然而，高层建筑的结构设计面临着诸多挑战，尤其是在超高层建筑中，结构安全性和平衡性问题成为设计的关键难点。例如，随着建筑层数的增加，荷载传递路径的复杂性显著提升，可能导致应力集中现象，从而影响建筑的整体稳定性。高层建筑的受力结构、侧向力体系、抗震能力及抗风能力等方面的设计优化需求也愈加突出，这对结构设计提出了更高的要求。

(2) 抗侧力结构的重要性：抗侧力结构在高层建筑设计中具有不可替代的作用，其核心功能在于承受

风荷载、地震作用等侧向力，从而保障建筑的安全性。对于超高层建筑而言，风荷载和地震作用是主要水平控制荷载，其高柔特性使得建筑对这些侧向力尤为敏感。合理设计抗侧力结构不仅是提高建筑稳定性的关键措施，也是实现经济性和安全性平衡的重要手段。研究表明，在复杂高层与超高层建筑结构设计中，通过优化抗侧力结构设计，可以有效增强建筑的整体性能。

2 传统拓扑优化设计方法分析

2.1 常见传统方法概述

传统拓扑优化设计方法在结构工程中已得到广泛应用，其中变密度法和均匀化方法是两种经典且具有代表性的技术。变密度法通过建立两点分布数学模型，将设计域内材料的存在与否进行分类，数学表达式中1表示有材料，0表示无材料，并以此为基础构建优化模型。例如，在塔架刚度优化问题中，基于体积和位移约束的最大刚度拓扑优化问题可通过SIMP方法表述为柔顺度最小化的目标函数，同时考虑体积和位移的限制条件。均匀化方法则通过对微结构单胞的弹性张量进行均匀化处理，推导结构的宏观等效弹性模量，从而实现拓扑优化设计。这些方法在简单结构设计中表现出较高的效率与可靠性，但在复杂高层建筑抗侧力结构设计中仍面临诸多挑战。

2.2 传统方法的局限性

尽管传统拓扑优化设计方法在结构工程领域取得

作者简介：

第一作者：柴晨微，女（1990.11-29），汉，河北省任丘市人，硕士，职称：中级，职务：结构工程师，研究方向：建筑工程。

第二作者：郑晓英，女（1986.10），汉族，河北人，研究生，职称：工程师研究方向：工程管理。

通讯作者：杜彦清，女（1986.11.10），汉族，石家庄市鹿泉区人，大学本科，职称：高级工程师，职务：市政综合所主任工程师，研究方向：市政给排水。

了显著进展，但在处理复杂高层建筑抗侧力结构拓扑优化问题时，其局限性逐渐显现。一是，计算效率问题尤为突出，特别是在设计域划分精细的情况下，传统方法需要耗费大量计算资源，导致优化过程难以接受的时间成本。二是，设计精度不足也是一个关键问题，传统方法往往只能提供简略的结构形态，难以满足高层建筑对抗侧力结构精细几何外形的要求。另外，多目标优化能力有限，传统方法通常仅能考虑单一目标（如材料用量或结构刚度），而高层建筑抗侧力结构设计需综合考虑安全性、经济性与施工便捷性等多个目标，这使得传统方法在实际工程应用中存在一定的局限性。

3 深度强化学习在结构拓扑优化中的优势

3.1 深度强化学习原理

深度强化学习作为机器学习的一个重要分支，结合了深度学习的感知能力与强化学习的决策能力，其基本原理围绕智能体（Agent）与环境（Environment）之间的交互展开。在每一次交互过程中，智能体根据当前环境状态（State）选择一个动作（Action），执行该动作后环境会反馈一个新的状态以及相应的奖励（Reward）。这一过程通过奖励机制引导智能体不断优化其行为策略，以最大化累积奖励为目标。深度强化学习通常利用神经网络（Neural Network）对复杂的状态空间和动作空间进行建模，从而提升对高维数据的处理能力。神经网络通过学习历史交互数据，逐步改进策略网络（Policy Network）和价值网络（Value Network），使智能体能够在未知环境中实现高效的自主学习与决策。

3.2 应用于结构拓扑优化的优势

相较于传统方法，深度强化学习在高层建筑抗侧力结构拓扑优化中展现出显著优势。一是，深度强化学习能够高效处理高维复杂问题，这在传统方法中往往因计算复杂度过高而难以实现。例如，在面对大规模高层建筑结构设计时，深度强化学习可以通过神经网络的强大表示能力，快速捕捉结构性能与拓扑形式之间的复杂映射关系。二是，深度强化学习具备自主学习与决策的能力，能够在无需人工干预的情况下探索最优拓扑方案。这种能力使得设计师可以从繁琐的迭代计算中解放出来，专注于更高层次的设计目标。三是，深度强化学习具有较强的适应性，能够在动态环境中灵活调整策略。在高层建筑设计中，当外部荷载条件或设计需求发生变化时，基于深度强化学习的方法可以迅速重新优化拓扑结构，以满足新的约束条

件，从而显著提升设计效率与结构性能。

4 基于深度强化学习的高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计方法

4.1 模型构建

为应对高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计的复杂性，本研究构建了一种深度强化学习模型，该模型的核心在于神经网络结构、状态空间和动作空间的设计。在神经网络结构方面，采用深度卷积神经网络（DCNN）与长短期记忆网络（LSTM）相结合的方式，以提取结构拓扑优化中的空间特征并捕捉时间序列信息。DCNN负责处理结构布局的二维或三维图像数据，而LSTM则用于建模优化过程中不同迭代步骤之间的依赖关系。状态空间被定义为包含建筑结构的几何参数、材料属性以及当前优化目标的向量集合，确保模型能够全面感知设计环境的状态变化。动作空间则涵盖了所有可能的结构修改操作，例如增加或删除某些构件、调整材料分布等，从而为模型提供灵活的决策能力。通过上述设计，模型能够在复杂的拓扑优化问题中实现高效的自主学习与决策。

4.2 奖励函数设计

奖励函数的设计是基于深度强化学习方法成功应用于高层建筑抗侧力结构拓扑优化的关键环节。影响高层建筑抗侧力结构性能的主要因素包括结构刚度、材料用量和稳定性等，这些因素共同决定了结构的整体性能与经济性。为此，本研究设计了一种多目标奖励函数，将结构刚度最大化、材料用量最小化以及稳定性约束纳入其中。具体而言，奖励函数由三部分组成：第一部分基于结构刚度矩阵的特征值计算，以鼓励模型生成具有较高刚度的设计方案；第二部分通过对材料体积进行归一化处理，惩罚材料过度使用的方案；第三部分则通过引入稳定性指标，确保设计方案满足抗震设计规范中的相关要求。通过合理权衡上述因素，奖励函数能够有效引导模型在优化过程中逐步收敛至满足多目标需求的拓扑结构。

4.3 算法流程

基于深度强化学习的高层建筑抗侧力结构拓扑优化算法流程主要包括模型训练、优化迭代和收敛判断三个关键步骤。在模型训练阶段，首先初始化神经网络参数，并通过与虚拟环境交互生成初始状态数据。随后，模型根据当前状态选择动作，并执行相应的结构修改操作。环境根据奖励函数计算并反馈奖励值，模型基于此更新神经网络参数以提升决策能力。在优化迭代阶段，模型不断重复状态-动作-奖励的循环过

程，直至满足预设的收敛条件或达到最大迭代次数。收敛判断的标准包括结构性能指标的波动范围、奖励值的变化趋势以及材料用量的稳定性等。当模型输出的结构方案在连续多次迭代中均保持较高性能且无明显波动时，可认为算法已收敛。最终，模型输出的高层建筑抗侧力结构拓扑优化结果不仅满足设计要求，还在材料成本与结构性能之间实现了良好的平衡。

5 实验验证与分析

5.1 实验设计

为验证基于深度强化学习的高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计方法的有效性，本研究选取了一栋具有代表性的超高层建筑作为实验对象。该建筑总高度为280米，共包含60层，标准层平面形状为正方形，边长为30米。建筑主体结构采用钢筋混凝土框架-核心筒体系，塔冠部分位于主体结构大屋面之上，高度为47米。实验参数设置主要包括地震作用放大系数的确定、风荷载取值以及温度荷载的影响。根据规范要求，结构抗震设计参数按7度设防烈度进行设定，风荷载取值参考风洞试验结果，并结合规范进行计算。考虑塔冠升温及降温工况均取为25°C的极端温度条件。这些参数设置旨在全面反映高层建筑在实际使用中的复杂环境作用。

5.2 实验结果

通过基于深度强化学习的方法，对所选高层建筑模型进行了抗侧力结构拓扑优化设计。优化后的结构布局图显示，核心筒位置得到了进一步优化，墙体厚度分布更加合理，同时在关键节点处增加了斜撑布置以提高整体刚度。材料用量方面，优化后结构的总用钢量相比初始设计减少了约15%，而混凝土用量减少了10%左右。这表明深度强化学习方法能够在保证结构性能的前提下有效降低材料成本。通过对优化结果的力学性能分析发现，结构的自振周期和层间位移角均满足规范要求，且在地震作用下的响应显著降低，

进一步验证了该方法在提升结构安全性方面的优势。

5.3 对比分析

为评估基于深度强化学习方法相较于传统拓扑优化方法的优越性，本研究将实验结果与采用变密度法和均匀化方法得到的结果进行了对比分析。结果表明，在结构性能提升方面，基于深度强化学习的方法使结构的抗侧刚度提高了约20%，而传统方法仅能提高10%左右。在材料成本方面，深度强化学习方法通过智能调整结构布局 and 材料分布，实现了更显著的成本节约效果，其材料用量较传统方法减少了12%-18%。深度强化学习方法在处理高维复杂问题时展现出更高的计算效率和更强的自主学习能力，能够快速收敛到最优解，而传统方法由于计算规模限制往往难以达到类似的优化效果。这些对比结果充分证明了基于深度强化学习的方法在高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计中的显著优势。

6 结语

本研究提出了一种基于深度强化学习的高层建筑抗侧力结构拓扑优化设计方法，旨在解决传统优化方法在处理复杂结构设计问题时的局限性。通过构建适用于高层建筑抗侧力结构优化的深度强化学习模型，并设计合理的奖励函数以引导模型学习，该方法在提升结构性能与降低成本方面取得了显著成果。实验结果表明，相较于传统方法，基于深度强化学习的方法能够更高效地生成满足多目标约束的优化方案，同时在材料用量和结构刚度之间实现了更好的平衡。未来，本研究仍有进一步探索的空间。一方面，可以结合更多实际工程案例，验证方法在不同地质条件、建筑功能需求下的适用性与鲁棒性；另一方面，可以考虑将多物理场耦合分析纳入优化框架，以更全面地评估结构性能。随着人工智能技术的不断发展，如何进一步提升模型的训练效率与收敛速度，以及如何实现与其他设计软件的无缝集成，将是未来研究的重要方向。

参考文献:

- [1] 郭茂祖,曹印庚,王鹏跃,等.一种高层建筑群排布生成与推荐算法[J].南方建筑,2022,(9):96-106.
- [2] 杜文凤,王英奇,王辉,等.基于拓扑优化和深度学习的新型结构生成方法[J].计算力学学报,2022,39(4):435-442.
- [3] 周绪红,胡佳豪,王禄锋,等.高层剪力墙结构多目标智能设计方法[J].土木工程学报,2024,57(6):92-100.
- [4] 刘红波,张帆,陈志华,等.人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(1):14-32.
- [5] 殷磊,张达明.某超高层办公楼塔冠结构设计与研究[J].建筑结构,2023,53(S2):136-142.