

# 基于强化学习和经验规则的剪力墙智能布置方法

王柳茜, 杨彬

同济大学土木工程学院, 上海 200092

DOI:10.61369/ME.2024080031

**摘要** : 传统的高层剪力墙结构设计过程中, 存在设计效率低, 设计周期长, 较为依赖工程师主观经验等问题。提出一种融合强化学习与结构设计经验规则的剪力墙智能布置方法。该方法通过读取建筑布置方案构建强化学习模型, 将结构设计经验规则嵌入奖励机制, 实现剪力墙拓扑形态生成与墙体长度优化。通过实际工程算例验证表明, 所提出的高层剪力墙智能布置方法可行, 生成方案与工程师设计相似度较高, 且设计效率较传统方法显著提升, 为高层剪力墙结构智能设计提供了有效技术路径。

**关键词** : 高层剪力墙结构; 智能布置; 强化学习; 经验规则

## An Intelligent Layout Method of Shear Wall Based on Reinforcement Learning and Empirical Rules

Wang Liuxi, Yang Bin

School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092

**Abstract** : In the traditional design process of high-rise shear wall structures, issues such as low design efficiency, long design cycles, and a heavy reliance on engineers' subjective experience have been identified. This paper introduces an intelligent layout method for shear walls that integrates reinforcement learning with structural design experience rules. By constructing a reinforcement learning model based on the building layout plan and embedding structural design experience rules into the reward mechanism, this method generates the topological form of shear walls and optimizes wall lengths. Practical engineering examples demonstrate that the proposed intelligent layout method for high-rise shear walls is feasible, generating schemes that closely resemble those designed by engineers, and significantly improving design efficiency compared to traditional methods. This method provides an effective technical approach for the intelligent design of high-rise shear wall structures.

**Keywords** : high-rise shear wall structure; intelligent layout; reinforcement learning; empirical rules

### 引言

剪力墙结构作为我国高层建筑的核心结构形式, 凭借其优异的侧向刚度、成熟的设计理论及完善的规范体系, 广泛应用于高层住宅建筑中。然而, 传统设计流程高度依赖结构工程师的概念设计能力与经验: 需基于建筑功能约束构建初步方案, 通过结构计算软件反复迭代验证, 并协调多专业需求进行调整。这一过程往往因多轮迭代而耗时耗力, 且受限于各专业协同壁垒, 设计成果常难以兼顾结构经济性与合理性, 暴露出效率低下、周期冗长、主观经验依赖性强等问题。

随着智能建造技术的发展, 结构智能设计已成为突破行业高门槛瓶颈、提升设计效率的有效途径。近年来, 国内外学者针对剪力墙智能设计与优化开展了系列研究, 方法涵盖启发式算法 (如遗传算法、粒子群算法、禁忌搜索算法)、神经网络深度学习算法及强化学习算法等。例如, Zhou 等<sup>[1]</sup>采用改进的遗传算法进行剪力墙的优化设计, 并考虑了结构设计中的先验知识; Lou 等<sup>[2]</sup>提出了一种结合支持向量机的禁忌搜索算法, 以剪力墙自重为优化目标优化高层建筑剪力墙布置。Pablo N.Pizarro<sup>[3]</sup>等使用卷积神经网络 (CNN) 根据已有的建筑工程实例, 对结构墙体的几何和拓扑特征进行了预测。Lu 等<sup>[4]</sup>采用生成对抗网络 (GAN), 结合物理数据驱动剪力墙自动设计。程国忠等<sup>[5]</sup>基于深度强化学习, 以剪力墙材料用量为优化目标, 构建了高层剪力墙结构智能优化方法。

现有研究中, 强化学习在剪力墙布置领域仍处于探索阶段, 且多聚焦于墙体数量或自重等单一经济性目标, 对结构设计经验规则 (如墙体长度合理性、拓扑形态约束、刚度均匀性等) 的综合融入与优化探索不足。本研究以高层剪力墙结构为对象, 提出基于深度强化学习的智能布置方法, 通过将结构设计经验规则转化为约束条件构建强化学习奖励机制, 实现剪力墙拓扑形态生成与墙体长度的协同优化。最后结合实际工程案例进行应用与评价, 验证了该方法的可行性。

作者简介:

王柳茜 (1996.02-), 男, 汉族, 云南红河人, 本科学历, 学士学位, 研究方向: 智能建造;

杨彬 (1979.10-), 男, 汉族, 山东济南人, 博士研究生, 教授, 研究方向: 智能建造。

## 一、剪力墙智能布置方法

本研究技术路线如下图所示，包括：（1）建筑墙体数据提取；（2）剪力墙位置初步确定；（3）强化学习算法设计与训练；（4）剪力墙形态生成。

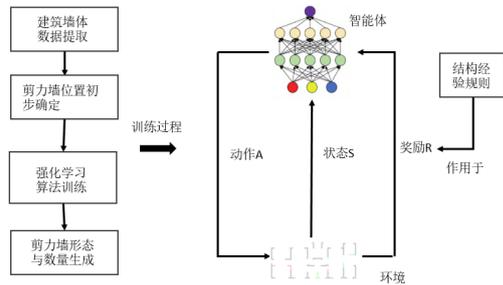


图1：剪力墙智能布置方法流程

### （一）建筑数据提取

剪力墙布置应满足建筑的功能需求，因此，需要基于建筑墙体进行剪力墙的布置。采用基于图层的自动化解析方法处理 CAD 矢量图形文件，通过开发脚本识别构件图层信息，将建筑平面资料转换为二维点线集合。针对剪力墙布置的关键需求，仅提取建筑墙体位置坐标信息，并按 300mm 模数对墙体进行离散化处理，为后续设计提供标准化输入。

### （二）剪力墙位置初步筛选算法

为缩减强化学习状态空间维度，提出基于遗传算法的剪力墙位置智能筛选方法。该方法以建筑交叉墙体为基础生成候选点集，主要流程如下：（1）初始化种群：基于建筑交叉墙体生成候选点集，随机生成初始种群；（2）适应度评估：构建包含空间分布均匀性、候选点数量、离散程度等指标的适应度函数；（3）精英保留：每代保留前 10% 精英个体；（4）选择性变异操作：对种群中适应度较差的个体，改变其中候选点的位置；（5）迭代循环：重复上述适应度评估和变异操作，直到满足设定的迭代次数。

通过该方法，能够从所有建筑墙体的位置初步筛选出一组剪力墙可能生成的位置组合，便于后续的研究。

### （三）强化学习环境设计

#### 1. 状态空间建模

将剪力墙生成环境抽象为离散状态空间，定义为  $S = \{s_1 + s_2 + \dots + s_i\}$ 。

其中  $s_i$  表示第  $i$  个剪力墙的状态。将单个墙体的状态，进一步抽象为点和线段的集合： $s_i = \{points_i, lines_i\}$ 。 $points_i$  代表该墙体所包含的点集， $lines_i$  表示该墙体所包含的线段的坐标信息。

#### 2. 动作空间设计

动作空间表示为  $a = \{a_i | a_i \in [0, 4N]\}$ 。

其中  $N$  表示环境中的单个剪力墙体数量。每个墙体对应 4 种基本动作：水平方向  $\pm 1$  单位步长、垂直方向  $\pm 1$  单位步长（步长取 300mm 模数）。通过剪力墙体在建筑墙空间中的增加和减少，从而改变剪力墙的拓扑形态和墙体长度，以表征所有可能的墙体组合情况。

### （四）融合经验规则的强化学习奖励函数设计

#### 1. 结构设计经验规则

结构设计经验规则是工程师与学者们长期以来对结构设计规

律的高度总结，对保证结构设计的安全合理与经济有着较强的指导作用。提炼出以下几种经验规则：（1）单片墙体长度约束：单片剪力墙墙肢过长其延性会下降，墙肢过短则容易形成短肢剪力墙。《高层建筑混凝土结构技术规程》<sup>[6]</sup>里规定墙段长度不宜大于 8m，同时需要控制短肢剪力墙占比；（2）墙体拓扑形态约束：优先采用 L 型、T 型等空间抗侧力体系，提高整体性；减少一字型墙体与复杂弯折墙肢；（3）整体刚度分布均匀：剪力墙结构平面布置宜简单、规则，宜沿两个主轴方向或其他方向双向布置，两个方向的侧向刚度不宜相差过大；（4）结构墙体面积合理：参考头部房企统计数据<sup>[7]</sup>，剪力墙投影面积与建筑面积比值控制在经济区间；（5）墙体连通对齐：相邻墙体之间相互对齐连通，有助于形成受力性能较好的联肢墙；同时有助于梁的设置，减少不必要的梁之间的搭接和转换，使传力路径简洁明晰，结构受力合理。

在奖励函数设计过程中，考虑以上经验规则对剪力墙结构状态的合理性进行评判并进行奖励。

#### 2. 奖励函数分层设计

本模型采用稀疏奖励与密集奖励结合的策略。

其中过程奖励  $R_{process}$  组成如下： $R_{process} = R_a + R_b + R_c$

其中， $R_a$  为动作合法性奖励（越界动作赋予较大负奖励）； $R_b$  为形态合理性奖励（不合理形态向合理转换时赋予正奖励）。 $R_c$  为长度合理性奖励（短肢墙或过长墙调整至合理长度时赋予正奖励）。

最终奖励的组成如下： $R_{final} = \alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_2 + \alpha_3 R_3 + \alpha_4 R_4 + \alpha_5 R_5$

上式中， $\alpha_1 \sim \alpha_5$  表示经验规则的权重（根据训练效果动态调整）。 $R_1$  表示单片墙体长度合理性的奖励：对墙长不超过限定长度，且并未出现短肢墙的墙体进行奖励； $R_2$  表示单片墙体形态合理性的奖励：根据总状态中 L 型、T 型、Z 型墙体数量给予奖励，根据一字型墙体数量给予惩罚； $R_3$  表示均匀性的奖励：当各个墙体形心之间的距离较为接近，偏差不超过平均距离的 30%，则给予奖励； $R_4$  表示墙体面积合理性的奖励：若剪力墙墙率与经验上最优的剪力墙率偏差不超过 2%，则给予奖励； $R_5$  表示剪力墙连通性的奖励：若相邻墙体之间有对齐的墙肢，则给予奖励。

### （五）强化学习模型训练及剪力墙布置生成

采用强化学习算法中的 Dueling-DQN 算法进行训练。该方法是对传统 DQN 算法的改进，核心在于将网络结构分为价值流（Value Stream）和优势流（Advantage Stream）两部分。通过 Dueling-DQN 的双网络机制稳定训练过程，能够有效处理稀疏奖励的问题，显著提升了算法在剪力墙生成这类动作空间大、奖励稀疏场景下的性能。

训练过程中，每一个训练步包含：（1）环境随机初始化，每片剪力墙置为一种随机状态；（2）智能体按  $\epsilon$ -greedy 原则选择动作；（3）环境接收动作，剪力墙布置的状态发生改变；（4）环境根据状态给出对动作的奖励；（5）重复（2~4）过程直到达到 200 步的最大迭代步数；（6）智能体根据收集到的数据更新神经网络参数。

利用训练好的强化学习模型，执行一个完整的训练过程，即能得到剪力墙智能布置方案。

## 二、工程案例验证与分析

### (一) 案例概况与布置成果

以某实际高层住宅案例为例，对所提出的高层剪力墙结构智能设计方法进行验证。本案例为一栋10层楼高的剪力墙结构，层高3.05m，建筑高度30.5m，建筑平面尺寸为18m×30m。项目的抗震设防烈度为8度(0.2g)，场地类别Ⅱ类，设计地震分组为第三组。该高层住宅的标准层建筑平面如下图。

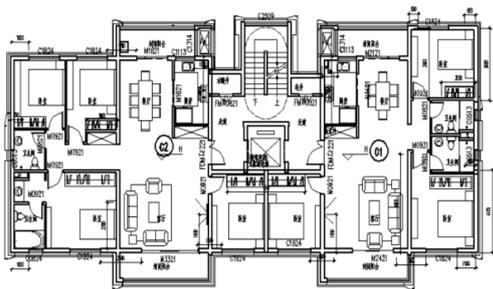


图2: 案例的建筑平面图

采用上文提出的剪力墙智能布置方法对该建筑案例进行设计。在上述搭建的环境下，进行了50轮的训练，最终得到剪力墙智能布置方案，算法的训练曲线如下图所示。从图中可以看出，随着训练的进行，奖励逐步提升，并在30轮以后趋于平稳，说明该算法收敛性较好。智能设计过程约1h，相较实际项目往往需要几天才能初步确定剪力墙布置方案的情况，大大提升效率。

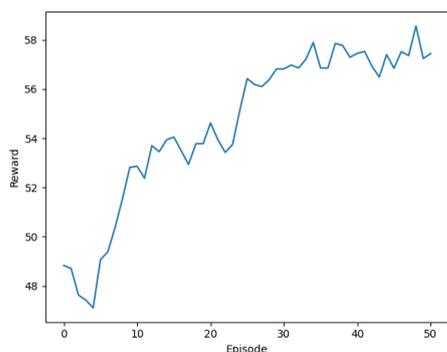


图3 训练曲线

### (二) 基于交并比的评价

实际结构工程师的剪力墙布置方案综合考虑了多方因素，是较为合理且能够落地的布置方案。为验证本方法所生成的剪力墙布置方案的合理性，将其与实际工程师设计结果进行对比。

引入了交并比指标  $S_{IOU}$ <sup>[8]</sup> 来评价本方法与工程师设计案例的重合程度。 $S_{IOU} = \frac{A_{inter}}{A_{union}}$ 。其中  $A_{inter}$  表示本方法生成剪力墙与工程师设计剪力墙计算交集并求和得到的交集面积， $A_{union}$  表示本方法与工程师设计的所有剪力墙求并集得到的并集面积。 $S_{IOU}$  得分越高，本方法与工程师设计越接近。下图为采用本研究的智能布置方法与实际工程师设计结果的剪力墙对比结果。本方法设计结果  $S_{IOU}$  交并比指标为0.76，表明两个设计结果相似程度较高，本方法布置结果较为合理，能为实际工程应用提供参考。

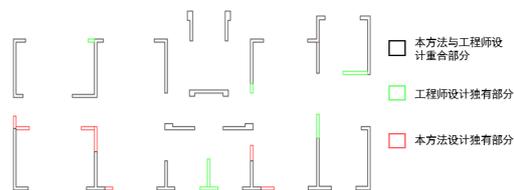


图4: 本方法布置结果及与工程师设计结果对比

### (三) 基于结构物理性能的评价

以本研究所得剪力墙布置为基础，使用国内泛用的结构计算软件PKPM，建立结构计算模型。其中墙体荷载按照实际建筑图中墙体布置如实输入，考虑普通楼面恒载  $2\text{kN}/\text{m}^2$ ，楼面活载  $2\text{kN}/\text{m}^2$ ，楼梯间采用0厚度板导荷，恒载  $8\text{kN}/\text{m}^2$ ，活载  $3.5\text{kN}/\text{m}^2$ 。全楼剪力墙混凝土等级采用C40，全楼上下剪力墙厚度统一不收进。其余结构计算参数与结构工程概况中的信息保持一致。

采用PKPM软件计算，主要计算结果如下：结构的最大位移角为1/1393，满足规范限值要求1/1000。结构位移比、周期比、剪重比、刚重比等指标均满足规范限值要求，证明该结构布置方案具有较好的侧向刚度，无特别不规则的情况，结构安全可靠。

## 三、结论

提出了一种基于强化学习算法的剪力墙智能生成方法，并采用实验验证了该方法生成结果的合理性，具体结论如下：(1) 提出的以满足设计经验规则作为强化学习的奖励的强化学习智能布置方法，能够合理有效地完成剪力墙布置任务；(2) 实验工程算例表明，本方法算法收敛性较好，且计算时间较之传统设计过程可大为缩短，有助于提高结构设计效率；(3) 实验工程算例表明，本方法布置成果与工程师布置成果具有一定的相似性，且结构位移角、周期比等指标满足规范要求，能够对实际工程设计提供一定参考价值；(4) 本方法对结构经验规则的考虑难以一应俱全，后续研究可开展考虑更多结构经验规则的方法的研究。

### 参考文献

- [1]Zhou X, Wang L, Liu J, et al. Automated structural design of shear wall structures based on modified genetic algorithm and prior knowledge[J]. Automation in Construction, 2022, 139:104318.
- [2]Lou H, Gao B, Jin F, et al. Shear wall layout optimization strategy for high-rise buildings based on conceptual design and data-driven tabu search[J]. Computers & Structures, 2021, 250: 106546.
- [3]PIZARRO P N, MASSONE L M, ROJAS F R, et al. Use of convolutional networks in the conceptual structural design of shear wall buildings layout[J]. Engineering Structures, 2021, 239: 112311
- [4]Lu X, Liao W, Zhang Y, et al. Intelligent structural design of shear wall residence using physics-enhanced generative adversarial networks[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2022, 51(7): 1657-1676.
- [5]程国忠,周绪红,刘界鹏,等.基于深度强化学习的高层剪力墙结构智能设计方法[J].建筑结构学报,2022,43(9):84-91.
- [6]高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3-2010[S].北京:中国建筑工业出版社.
- [7]2010龙湖地产集团总部.龙湖地产结构设计限额控制指标[R].2014.
- [8]刘元鑫,廖文杰,林元庆,解琳琳,陆新征.数据特征对剪力墙结构生成式智能设计的影响[J].清华大学学报(自然科学版),2023,(12):2005-2018.