

# 基于自适应优化的装配式木结构住宅墙体碳排放机理研究

——以内蒙古满洲里为例

丁琛琪<sup>1,2</sup>, 邹德志<sup>1,2\*</sup>

1. 内蒙古工业大学建筑学院, 呼和浩特 010051

E-mail: zdz@imut.edu.cn

2. 绿色建筑自治区高等学校重点实验室, 呼和浩特 010051

## 摘要:

伴随装配式建筑的发展, 结合不同地域特征构建新的节能方式, 对满足建筑性能及降低建筑碳排放具有一定的意义。本研究基于类型学原理, 选取内蒙古满洲里地区的装配式木结构建筑为研究对象, 提取典型构造类型及组合规律; 对比墙体材料热工性能和构造形式, 进行自适应重构优化, 测算对比优化前后墙体碳排放, 明确构造组合和材料选择对碳排放的影响。研究表明, 150mm 轻型木结构墙体在保温性能和碳排放间实现最佳平衡; EPS 和聚氨酯板保温性能优越但生产高能耗致碳排放显著增加。研究揭示了通过自适应优化, 合理平衡墙体保温性能与碳排放之间的关系, 为严寒地区的低碳建筑设计提供了理论依据。

**关键词:** 自适应优化; 装配式木结构; 住宅; 墙体; 碳排放机理;

**Keywords:** Adaptive Optimization; Assembled Wooden Structure; Residential Building; Walls; Carbon Emission Mechanisms

**资助项目情况:** 本项目受国家自然科学基金项目(项目编号: 52168007); 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(项目编号: JY20230053)资助

## 引言

在我国, 严寒地区很大部分农村住宅受限于建筑自身性能因素, 在冬季取暖需求下能耗问题突出建筑碳排放较高, 通过改变建筑材料和墙体构造对住宅的热工性能和碳排放有直接影响。木材因其优异的保温性能、可再生性以及相对较低的碳排放, 对发展低碳建筑具有一定促进作用。将装配式建造方式与木材相结合使建造便捷且有效降低能源消耗, 适合农村住宅需求。

本文以满洲里地区的装配式木结构住宅为研究对象, 结合当地气候特点和既有建筑运用遗传算法构建基于碳排放和热工性能的墙体优化模型, 在保证住宅性能的前提下优化墙体的构造和材料组合, 实现碳排放的最小化, 探讨其墙体设计对全生命周期碳排放的影响。

## 1 研究现状

内蒙古因其独特地理和气候环境使得建筑围护结构保温性能至关重要。冷红和肖雨桐分析了寒地城市居住区形态对住宅能耗的影响, 并提出了减小体形系数、取日照间距最小值和合理规划住宅朝向等节能规划建议<sup>[1]</sup>。马远力等人通过城市研究, 对不同建筑参数分析, 提出以敏

<sup>1</sup>丁琛琪, 内蒙古工业大学, 研究生

<sup>2</sup>邹德志(✉), 内蒙古工业大学, 副教授, zdz@imut.edu.cn

感度为基础的综合能耗分析框架<sup>[2]</sup>。黄海静等人用类型学方法定义原型住宅，确定能耗特征，为既有住宅节能改造提供依据和建议<sup>[3]</sup>。马一腾研究了杭州地区居住建筑的能耗、室内热环境以及建筑类型，并提出了相应的优化建议<sup>[4]</sup>。以上研究多聚焦于现代住宅平面发展总结，使用类型学在建筑围护结构方面的研究较少。

数字化技术推动下计算思维与计算机科学为建筑学提供了新方法，更多学者用算法模拟围护结构适应性，模拟建筑碳排放，可以很好地支撑绿色低碳建筑发展。沈景春和张星星提出了适应不同气候的自适应装配式建筑设计，为单户住宅提供低碳生活方案<sup>[5]</sup>。Kormaniková等人讨论自适应结构设计，以响应环境变化，解决适应性问题，提高能效和功能性<sup>[6]</sup>。Francesco Sommesse 等人利用智能材料优化仿生建筑外立面，增强环境适应性和提升能效及舒适度<sup>[7]</sup>。孙澄、韩昉松等人应用自适应建筑表皮设计方法，提升能效、热舒适，减少能耗，并优化日照和眩光适应性<sup>[8]</sup>。刘露旭改进遗传算法，优化钢筋混凝土框架结构设计，以降低成本，并通过实例验证了算法的有效性<sup>[9]</sup>。王加彪研究传统建筑表皮设计，通过哈尔滨建筑实践推动其智能化和生态化<sup>[10]</sup>。尽管已有研究关注建筑围护结构的自适应构建，但针对不同气候区特别是严寒地区墙体的研究较少，本研究在前人研究的基础上，采用类型学和自适应优化的方法，对满洲里地区装配式木结构墙体开展系统性研究。

## 2 类型学分析体系构建

研究选取满洲里 106 个住宅为对象进行统计分析，并按建筑套型进行分类，分析与热工性能相关的墙体参数（构造形式、材料形式、厚度），选出当地典型住宅墙体形式，见下表。

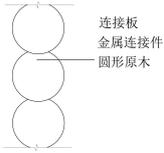
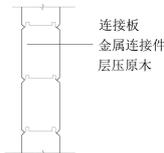
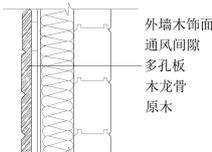
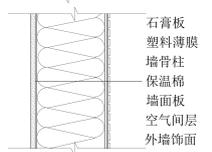
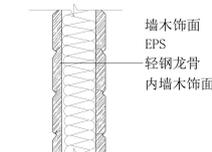
表 1 满洲里地区装配式木结构住宅建筑（图片来源：作者自摄）

建筑套型	建筑外形	
单层小平米套型		
单层中等平米套型		
双层小平米套型		
双层大平米套型		
三层大平米套型		

### 2.1 墙体构造类型提取

通过调研，目前满洲里地区装配式木结构住宅主要为井干式木结构和轻型木结构。井干式木结构住宅墙体由厚原木或胶合木垒叠而成，横木间密封，为木承重结构墙；轻型木结构住宅外墙由轻钢骨架、覆面板、连接件、保温材料及饰面层组成，当地采用内外木板夹岩棉层的构造形式，具体构造形式见下表。

表 2 不同墙体构造类型的样本建筑（图片来源：作者自摄）

结构类型	具体分类	实际构造外形	构造简图
井干式木结构	圆形原木井干式		
	层压原木井干式		
	层压原木井干式 (加外保温)		
轻型木结构	轻型木结构 (石膏板内饰面)		
	轻型木结构 (框架外墙)		

根据调研发现样本建筑类型中圆形原木井干式、层压原木井干式（加外保温）、轻型木结构（石膏板内饰面）类型数量在研究范围内使用较少，而层压原木井干式和轻型木结构（框架外墙）应用数量较多，故提取这两种构造形式作为典型构造类型。

## 2.2 墙体材料类型提取

墙体材料的选择是决定碳排放和热工性能的重要因素，木材相对于钢材、混凝土等高能耗材料具有明显的碳减排优势，本研究结合满洲里地区的建筑材料供应情况，选取保温材料、饰面材料、其他材料作为优化对象，见下表。

表3 不同墙体材料类型

结构类型	具体分类	主体材料	保温材料	饰面材料
井干式木结构	圆形原木井干式墙体	落叶松原木	无	无
	层压原木井干式墙体	层压胶合松木	无	无
	层压原木井干式墙体 (加外保温)	桦木	EPS	桑拿板 层压原木
轻型木结构	轻型木结构外墙 (石膏板内饰面)	松木	岩棉	石膏板
	轻型木结构外墙 (框架外墙)	松木 钢材	EPS	桑拿板

保温材料有聚氨酯保温棉（PU）和膨胀聚苯乙烯（EPS）保温板，饰面材料主要为落叶松木板和再生木材，墙体内层结构材料是轻型钢材和木质复合材料组合。研究发现层压胶合松木、松木、钢材、EPS 和桑拿板在调研范围内的住宅墙体材料中使用普遍且具典型性。

### 2.3 墙体厚度类型提取

通过调研，在满洲里地区的装配式木结构住宅建筑中，基于井干式木结构和轻型木结构两个类型建筑中，通用的墙体建造过程中因具体分类不同，构造厚度也有一定的差别，具体如下表：

表 4 不同墙体构造类型各构造层厚度统计

结构类型	具体分类	主体材料厚度 (单位 mm)	保温材料厚度 (单位 mm)	饰面材料厚度 (单位 mm)	整体厚度 (单位 mm)
井干式 木结构	圆形原木井干式	200	0	0	200
	层压原木井干式	140	0	0	140
	层压原木井干式 (加外保温)	140	140	25	305
轻型 木结构	轻型木结构外墙 (石膏板内饰面)	140	0	20	160
	轻型木结构外墙 (框架外墙)	0	100	50	150

满洲里地区装配式木结构住宅墙体厚度分为 140—160mm（适用于轻型木结构住宅，保温效果好）、180—200mm（适用于井干式木结构住宅，保温性能显著提高，适合严寒地区）、220mm 及以上（极端气候下保温效果最优但材料用量大）。调研发现本地区装配式木结构住宅墙体厚度在 140mm 至 305mm 之间，其中保温材料厚度为 100mm 的墙体形式占比较大，整体厚度为 150mm 的墙体数量最多且具典型性。

## 3 自适应优化组合墙体选型及碳排放计算

### 3.1 典型墙体组合类型的选型

通过对样本建筑进行分析总结，考虑到调研范围内不同墙体构造形式由指定材料组合而成，因此将该地区装配式木结构住宅使用的墙体构造类型以及墙体厚度作为分类指标，对其进行统计和分类，见下表。

表 5 不同分类指标组合所具有的样本建筑数量占比统计

墙体厚度	圆形原木井干式	层压原木井干式	层压原木井干式 (加外保温)	轻型木结构外墙 (石膏板内饰面)	轻型木结构外 墙(框架外墙)
140mm	0	34%	0	0	0
150mm	0	0	0	0	47%
160mm	0	3%	0	6%	0
200mm	7%	0	0	0	0
305mm	0	0	3%	0	0

统计发现，本地区装配式木结构住宅墙体主要为层压原木井干式及轻型木结构框架形式，占比 84%，其中轻型木结构框架墙体使用率最高。通过对层压原木井干式及轻型木结构框架式墙体构造做法进行分析，不同材料的热物理参数见下表。

表 6 装配式木结构住宅墙体材料的热物理参数

材料名称	导热系数/[W/(m·K)]	热阻值/[(m <sup>2</sup> ·K)/W]— (以 100mm 厚度为例)
层压胶合松木	0.107	0.934
EPS	0.033	3.034
桑拿板	0.045	2.222
钢材	58.2	0.002

依据《民用建筑热工设计规范》GB 50176-2016 中的热工计算方法和《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》的规定，来分析两种装配式木结构住宅墙体构造的热工性能。

(1) 热阻计算

单一匀质材料的热阻：

$$R = \frac{\delta}{\lambda}$$

式中：R 表示材料层的热阻(m<sup>2</sup>·K)/W；δ 表示材料层厚度 m；λ 表示材料导热系数 W/(m<sup>2</sup>·K)。

对于多层材料墙体，墙体总热阻 R 总为各层热阻之和。并且，围护结构的总热阻还需要考虑内表面和外表面的换热阻，最终传热系数 K 的计算公式为：

$$K = \frac{1}{R_{总}}$$

根据《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》的规定，位于满洲里地区的建筑外墙传热系数最大值为 0.25 W/m<sup>2</sup>·K。计算两种典型装配式木结构住宅墙体构造组合形式的传热系数，140mm 厚层压原木井干式墙体为 0.765W/m<sup>2</sup>·K，150mm 厚轻型木结构框架墙体为 0.242W/m<sup>2</sup>·K，后者保温性能远好于前者，筛选出适合满洲里地区的为轻型木结构框架外墙。

3.2 遗传算法自适应优化

基于满洲里严寒地区建筑节能需求，本文提出结合遗传算法的自适应优化方法优化装配式木结构住宅墙体设计，在遗传算法框架下考虑传热性能，探索适应当地气候的最优墙体组合形式。结合轻型木结构构造特点，初始种群涵盖多种墙体材料和厚度组合，避免局部最优，针对严寒气候区，优化初始个体时着重考虑保温材料选择和墙体厚度合理分配。

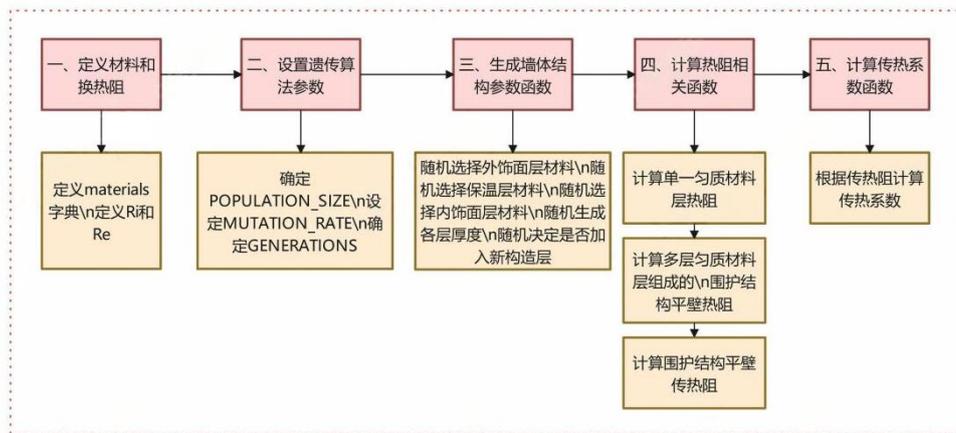


图 1 自适应墙体优化组合基础流程图（图片来源：作者自绘）

首先，依据上文基于类型学提取的典型墙体材料及构造类型，定义当地气候条件下木材、保温、饰面材料及其导热系数的遗传算法，确定内表面和外表面换热阻 R<sub>i</sub> 和 R<sub>e</sub>，设置遗传算法参数为种群大小 500、变异率 0.05、迭代次数 500 次。生成墙体结构参数的函数随机选择外

饰、保温和内饰面层材料，定义各材料层最小及最大厚度且不超典型墙体构造层厚度，还随机决定是否加入新构造层（“空气”或“反射隔热层”）并确定其厚度和位置。热阻相关函数包括计算单一匀质材料层热阻、多层匀质材料层组成的围护结构平壁热阻以及围护结构平壁传热阻的函数，传热系数函数根据传热阻计算传热系数（见图 1）。

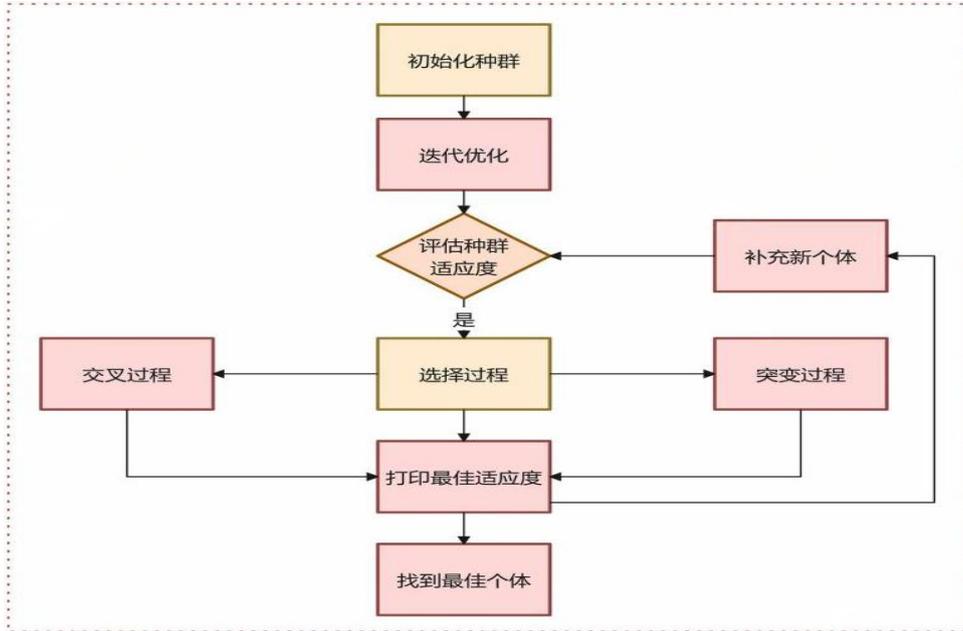


图 2 遗传算法主流程图（图片来源：作者自绘）

通过使用墙体结构参数的函数随机生成一定数量的墙体结构个体组成初始种群，其中外饰、内饰和保温层材料从特定列表随机选择，厚度在规定范围内随机生成，还可能随机加入新构造层，初始化种群的多样性为后续进化提供丰富搜索空间（见图 2）。

接着，对种群中的每个个体计算传热系数，并根据其是否小于 0.25 确定适应度值，适应度评估决定哪些个体更可能被选择进行遗传操作，引导算法向更优解进化。然后，根据适应度分数进行选择操作，利用适应度分数比例概率从种群中选择一半墙体组合形式索引构建新种群，模拟自然选择过程，将优化后的传热系数较低的墙体组合形式传递给下一代。

对选择出来的墙体进行交叉操作，创建两个空的墙体组合形式作为子代，以 0.5 的概率决定子代会继承哪个父代的特定属性值，比如对于外饰面层材料、保温层材料、内饰面层材料以及各层的厚度等属性，通过交叉，可以促进不同墙体组合之间的特征交流，避免算法陷入局部最优的墙体组合方案，提高算法找到全局最优墙体组合的可能性。之后，对交叉产生的子代个体进行变异操作，当随机数小于变异率时，若属性是特定材料属性则从特定材料列表随机选择新材料，若为厚度属性则在相应厚度范围内随机生成新厚度值，变异操作防止算法过早收敛到局部最优解，增加种群多样性。

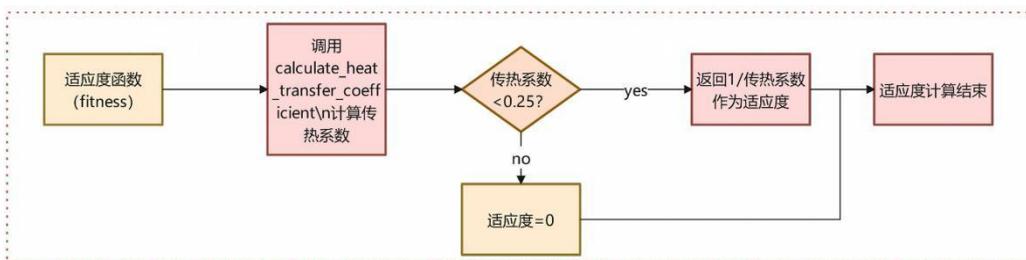


图 3 适应度函数流程图（图片来源：作者自绘）

适应度函数在遗传算法中评估墙体结构个体优劣，以传热系数小于 0.25 为判断标准确定适应度值，若传热系数小于 0.25，返回 1 除以传热系数，传热系数越小适应度越高，目标是找到传热系数小的墙体结构实现更好保温性能；若不小于 0.25，则适应度为 0，表明不符合要求（见图 3）。

为保持种群大小稳定，若交叉和变异后的新种群小于初始种群大小，则生成新个体添加到新种群，确保每一代有足够个体进化，维持种群多样性。在一定迭代次数内重复选择、交叉、变异等操作，不断优化墙体组合形式，使个体向更优解进化。遗传算法结束后，从最终种群中找出适应度最高的个体作为最佳个体，代表最优墙体结构设计。

### 3.3 生命周期碳排放测算

生命周期碳排放（LCA）方法评估建筑全流程碳排放，涵盖从生产到拆除，且关注能耗密集型材料。LCA 计算步骤有定义目标与范围、优化墙体设计以最小化全生命周期碳排放，进行清单分析和影响评估，并用 ISO 14040 标准评估各阶段碳排放贡献。

碳排放因子计算依据《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）相关方法，确保数据的准确性和规范性，见下表。

表 7 碳排放因子

材料	碳排放因子 (kg CO <sub>2</sub> e/吨)
聚氨酯保温棉 (PU)	45.2
落叶松木板	13.1
层压原木	12.5
再生木材	5.3

此外，对于不同阶段的碳排放计算，还需考虑运输工具的能源消耗，运输任务主要通过卡车完成，并参考每吨公里的碳排放因子计算。

针对不同墙体设计方案，依据以下公式计算碳排放：

$$E = \sum_{i=1}^n (m_i \cdot e_i) + \sum_{j=1}^n (d_j \cdot t_j \cdot f_j)$$

上式中，E 为总碳排放量； $m_i$  为第 i 种材料使用质量，单位吨； $e_i$  为第 i 种材料碳排放因子，单位 kg CO<sub>2</sub>e/吨； $d_j$  为第 j 种材料的运输距离，单位公里； $t_j$  为运输工具的单位碳排放量单位 kg CO<sub>2</sub>e/吨公里； $f_j$  为第 j 种材料的运输工具类型。

通过上述步骤，本文对不同墙体设计的全生命周期碳排放进行系统性评估，为后续优化方案提供定量依据。

## 4 结果

### 4.1 墙体构造对传热系数的影响

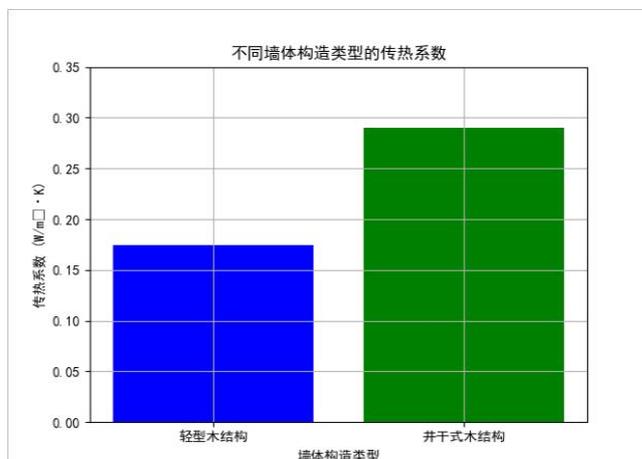


图 4 墙体构造对碳排放的影响（图片来源：作者自绘）

优化重点比较两种常见墙体构造类型的传热系数表现（见图 4）。结果显示，轻型木结构传热系数表现优异，保温性能好，150mm 厚度轻型木结构墙体传热系数最低为  $0.1748 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，远低于井干式木结构的  $0.290 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ ，主要因轻型木结构使用多层保温材料且构造轻便，能更有效减少热量流失，适合严寒地区建筑应用。

### 4.2 墙体材料对碳排放量的影响

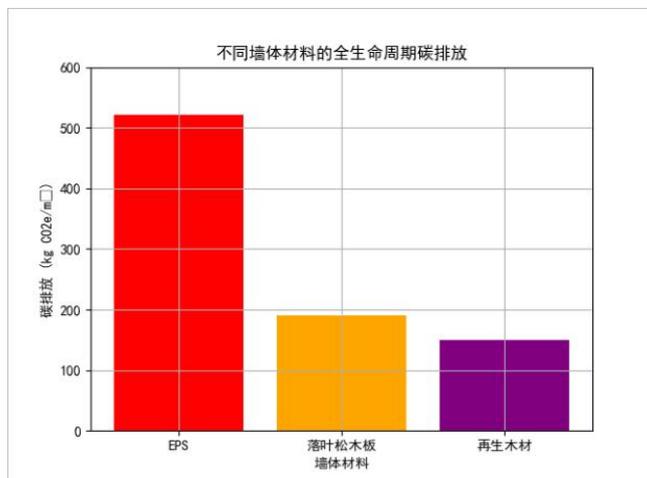


图 5 墙体材料对碳排放量的影响（图片来源：作者自绘）

优化分析 EPS、落叶松木板和再生木材对碳排放的影响，结果表明，EPS 碳排放量  $522 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ ，使用落叶松木板和再生木材作为外饰面材料时，碳排放量则显著降低，分别为  $190 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$  和  $150 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ （见图 5）。

再生木材的低碳表现尤为突出，这是因为它不仅具有良好的碳封存能力，还能够有效地减少原生木材的使用，从而降低建筑的整体碳排放。相较而言，EPS 虽然具备优异的保温性能，但其高碳排放需要在实际应用中权衡材料的综合性能与环境影响。

### 4.3 墙体厚度对传热系数和碳排放的影响

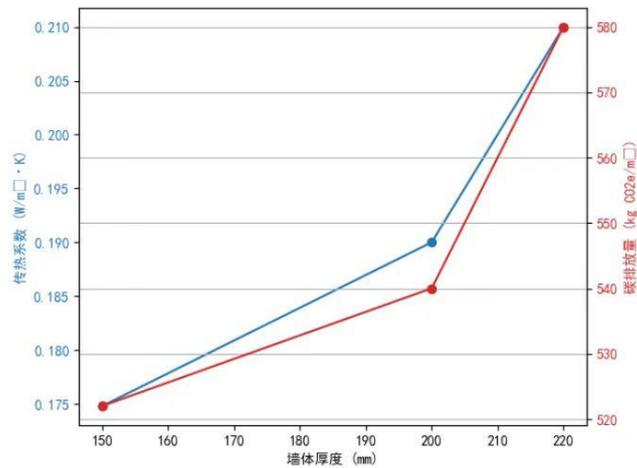


图 6 墙体厚度对传热系数的影响（图片来源：作者自绘）

增加墙体厚度可提升保温性能但会致碳排放上升。优化对比显示，150mm、200mm、220mm 厚度墙体传热系数分别为 0.1748 W/m²·K、0.190 W/m²·K、0.210 W/m²·K，伴随厚度增加保温效果增强，适合极寒环境，但碳排放量也增加，150mm 墙体碳排放为 522kg CO₂e/m²，200mm 和 220mm 墙体分别为 540kg 和 580kg CO₂e/m²，结果表明 150mm 厚度墙体在保温性能和碳排放间实现最佳平衡（见图 6）。

### 4.4 生命周期碳排放分析

通过对墙体传热系数 U 值与碳排放量之间的关系进行分析，揭示二者的相互影响。总体上，传热系数与碳排放量之间呈现出一定的正相关性，这意味着随着传热系数的降低，碳排放量也会相应增加（见图 7）。

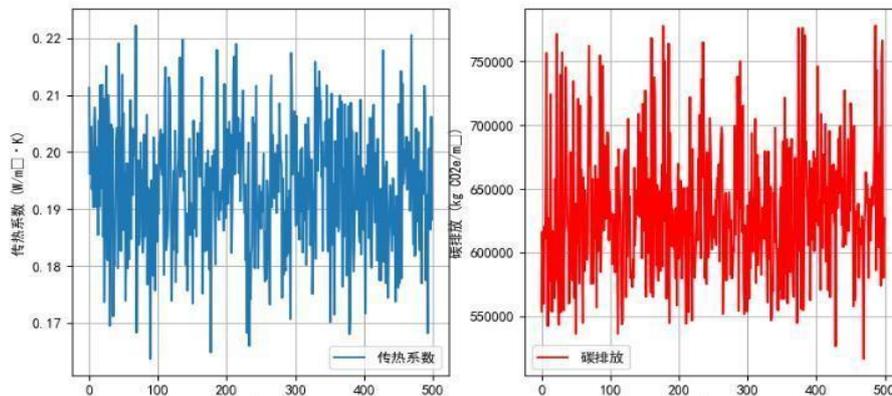


图 7 传热系数与碳排放演化过程（图片来源：作者自绘）

上图中，左侧图显示传热系数在 0.17 至 0.22 间波动并趋于收敛，反映不同墙体结构传热性能差异；碳排放量在 550000 至 750000 kg CO₂e/m² 间波动且逐步收敛，体现优化过程中材料和厚度组合对碳排放的影响。遗传算法迭代中，系统不断优化墙体组合以降低传热系数并控制碳排放，但聚氨酯板、EPS 板等保温性能好的材料因生产能耗高致碳排放不降反升，这在数据波动中体现。

## 结语

本文通过遗传算法优化满洲里地区装配式木结构住宅墙体设计,探讨墙体构造、材料类型和厚度组合对全生命周期碳排放和热工性能的影响。优化结果表明,轻型木结构具有更优的保温性能,而井干式木结构的碳排放较高。优化过程中,尽管保温性能改善,但部分高效保温材料的生产碳排放较大,导致碳排放与热工性能存在一定的权衡。因此,在墙体设计中,应平衡传热系数与材料碳排放,选择适合的构造和材料组合,以实现低碳、节能的建筑目标。

## 参考文献

- [1] 冷红,肖雨桐. 寒地城市居住区形态对住宅能耗影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020.
- [2] 马远力,叶东杰,陈易,等. 居住建筑原型建立及被动式技术节能影响探究[J]. 建筑节能(中英文), 2023.
- [3] 黄海静,林犀. 既有建筑节能改造中的类型学方法——欧洲经验及对我国的启示[J]. 建筑学报, 2020.
- [4] 马一腾. 基于建筑类型学的杭州居住建筑空调能耗研究与设计优化[D]. 浙江大学, 2018.
- [5] Shen, J.; Copertaro, B.; Zhang, X.; Koke, J.; Kaufmann, P.; Krause, S. Exploring the Potential of Climate-Adaptive Container Building Design under Future Climates Scenarios in Three Different Climate Zones. Sustainability 2020.
- [6] Lenka Kormaníková, Eva Kormaníková, Dušan Katunský, Shape Design and Analysis of Adaptive Structures, Procedia Engineering, Volume 190, 2017.
- [7] Francesco Sommese, Lidia Badarnah, Gigliola Ausiello, Smart materials for biomimetic building envelopes: current trends and potential applications, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 188, 2023.
- [8] 孙澄,韩昀松,王加彪. 建筑自适应表皮形态计算性设计研究与实践[J]. 建筑学报, 2022.
- [9] 刘露旭. 遗传算法在建筑结构优化设计中的应用[D]. 辽宁工业大学, 2015.
- [10] 王加彪. 建筑自适应表皮形态性能驱动设计研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2021.