

基于改进 GRO-GWO 算法的装配式建筑施工多目标优化

Multi-objective Optimization of Prefabricated Building Construction based on Improved GRO-GWO Algorithm

樊德兵, 王育德, 孔 芳

(河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056038)

摘 要: 针对装配式建筑施工管理中的多目标优化问题, 在传统工期-成本-质量目标基础上, 增加碳排放目标, 构建了四目标优化模型。将 GRO 算法与 GWO 算法的优点相结合, 提出 GRO-GWO 算法并对其进行改进, 利用改进 GRO-GWO 算法对装配式建筑施工多目标优化模型进行求解。以济宁某公租房项目为例进行验证, 优化后方案为: 工期 138.84 小时、成本 14.89 万元、碳排放 75996.89 千克、质量得分 6.36 分。与正常模式相比, 该方案工期缩短 10.92%, 成本降低 3.76%, 碳排放减少 0.19%, 质量符合要求。结果表明, 所建模型与算法能为装配式建筑施工的多目标优化决策提供有效支持, 有助于提升工程管理的综合效益与绿色水平。

关键词: 装配式建筑; 项目管理; GRO-GWO 算法; 多目标优化

中图分类号: TU711

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0136-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.024

FAN Debing, WANG Yude, KONG Fang

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: In order to reduce carbon emissions in the construction process of prefabricated buildings and optimize comprehensive performance, a multi-objective optimization model of construction period, cost, carbon emissions and quality is constructed. Firstly, based on the ordered weighted average operator and the Delphi method to quantify the quality objectives, the single-objective optimization functions of the four major objectives are established by reasonable assumptions, and then the multi-objective integration is carried out by using the multi-attribute utility function. According to the characteristics of the model solution, the advantages of the gold rush optimization algorithm (GRO) and the gray wolf optimization algorithm (GWO) are combined, and an improved GRO-GWO algorithm is proposed. The example verification shows that the algorithm can shorten the construction period by 10.92%, save the cost by 3.76%, reduce the construction carbon emission by 0.19%, and optimize the quality level by 6.36. The research results provide a quantitative decision-making tool for low-carbon management of prefabricated building construction.

Key words: prefabricated building; project management; GRO-GWO algorithm; multi-objective optimization

0 引言

装配式建筑作为建筑产业现代化转型的核心方向, 其精细化管理对实现“双碳”目标至关重要。当前施工过程中仍普遍存在工期延误与成本超支问题, 亟需通过多目标优化提升项目管理水平。有效的工期-成本-质量-碳排放协同管控, 不仅可提

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52278171); 河北省自然科学基金资助项目 (E2020402079)

作者简介: 樊德兵 (1999—), 男, 硕士, 研究方向: 结构项目管理。

收稿日期: 2024-04-22

高工程建设效率，更是推动建筑业绿色低碳发展的关键途径。

如李锋等^[1]经过研究发现，当前建筑施工过程的工期管理与成本管理亟待优化，绝大部分建筑工程面临着延期完工的风险与现状，也曾发生过成本超支现象。装配式建筑具有提高生产效率、提高建筑质量、减少环境污染、节约人力成本等优势^[2]。装配式建筑也像传统建筑一样需要满足工期、成本、质量等目标，Ji 等^[3]开发灰色模型对装配式建筑发展趋势进行预测，通过分析装配式建筑的工期、成本等，得出装配式建筑施工是建筑行业提升施工生产力、促进可持续发展的重要方法；齐宝库等^[4]针对我国推进装配式建筑产业化发展在工期、成本、质量方面提出应对策略；Zhang 等^[5]分析了装配式建筑的特点，利用 NSGA-II 算法对其进行工期成本、质量的多目标优化管理；Bonamente 等^[6]通过全生命周期的角度对装配式建筑的碳足迹进行分析，更是印证了其节能减碳的优点；Heravi 等^[7]对装配式建筑集成生产与安装阶段的碳排放进行评估，研究该阶段的减碳性能；Aghasizadeh 等^[8]对装配式建筑的环境效益和经济效益进行综述；赵彦革等^[9]还提出从成本和环境两方面确定装配式建筑的经济效益与环境效益。Luong^[10]等人对传统蚁群算法进行改进，得到一种新的基于多种群的蚁群算法，通过此算法对工程的质量水平进行优化；杨汉宁^[11]分析了装配式建筑的成本与现浇建筑成本的变动情况，用定量与定性化方法评价装配式建筑成本较高的原因，并为此提出改进建议；郭庆军等^[12]认识到构建装配式建筑施工目标规划模型对于提升建筑企业的绿色施工竞争力、指导施工实践具有重要意义，这一模型不仅有助于优化项目的工期、成本、质量等传统目标，还能充分考虑环境因素，实现真正意义上的可持续发展；游又能等^[13]提出了被动式超低能耗建筑与装配式建筑的耦合集成技术，这也是当代建筑业发展的两大重要趋势，它们各自的关键应用技术不仅提升了建筑的质量和性能；刘义川等^[14]采用全生命周期的方法进行实证分析，深入了解预制件在生产、运输、安装等各个环节中的碳排放情况，从而为优化生产工艺、降低能耗和减少碳排放提供科学依据；高宇等^[15]以深圳某项目为例，计算预制构

件组装阶段碳排放量，并对该阶段的施工提出相应的措施。

在这些学者的分析中，都提到了装配式建筑在节能减碳方面的优势。但对装配式建筑施工管理控制不能局限于以往的三大目标，引入碳排放这一目标进行工期-成本-碳排放-质量的多目标优化研究，以期对相关工程提供参考。

1 施工流程梳理

装配式建筑通过主体结构材料分类大致可分为装配式混凝土建筑结构、装配式钢结构、装配式木结构和复合结构等四类。装配式混凝土建筑对于传统混凝土建筑来说有直接的改进和替代作用，是近年来建筑领域学者们的研究重点，考虑到目前为止装配式混凝土建筑的应用范围最广泛，将选择装配式混凝土建筑的施工过程为研究对象。

经过查阅相关文献和进行施工现场调研，装配式建筑的施工过程大致划分为五个环节，分别为：构件进场验收及堆放环节、支护体系拆建环节、构件吊装环节、构件安装环节和构件节点连接环节。五个主要施工环节的具体施工内容如图 1 所示。

2 优化模型建立

在装配式整个施工过程中，由于人力、材料、机械的投入不同会影响工期、成本、碳排放与质量。施工工序可分为正常模式、赶工模式与节约模式，不同的模式下耗费不同的生产资源、成本及工期。在此基础上考虑碳排放因素，以找到最优的组合。

2.1 施工现场数据

通过现场调研以及施工工程清单等数据，对不同执行模式下的装配式建筑施工进行分析，以标准层施工为例，整理出不同执行模式下的相关信息见表 1。

结合上表数据，对施工工序在三种执行模式下的工期、成本、碳排放及质量进行计算。其中，各施工环节的总持续时间为该装配式建筑施工的总工期；通过市场调研，人工费按照平均每小时 45 元计算，材料费按照各施工环节实际消耗材料量与材料的市场价格计算，机械设备使用费按照各施工环节

研究与应用

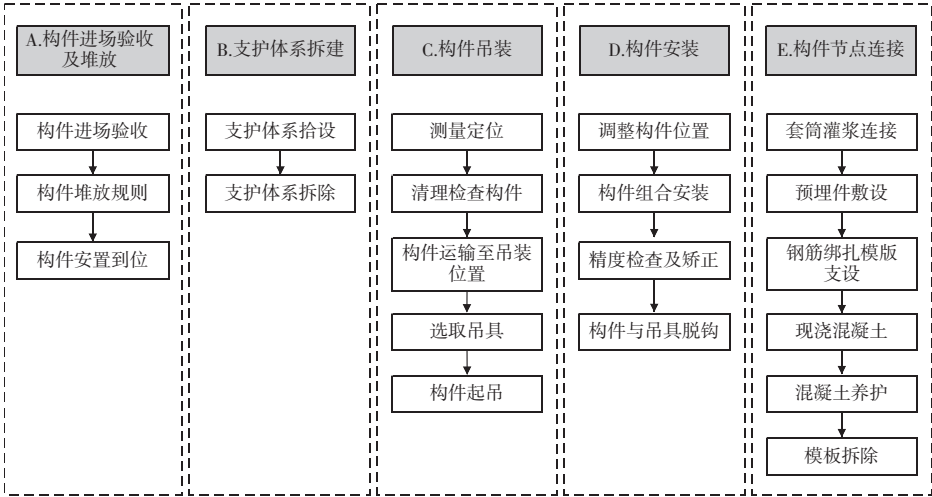


图 1 装配式建筑的主要施工环节

Fig. 1 The main construction links of prefabricated buildings

表 1 不同执行模式下的参数

Table 1 Parameters under different execution modes

序号	施工环节	节约模式		正常模式		赶工模式	
		工人 /人	时间 /h	工人 /人	时间 /h	工人 /人	时间 /h
A	构件进场验收及堆放	8.0	6.5	8.0	6.5	8.0	6.5
B	支护体系搭建	18.0	73.0	19.0	64.0	23.0	51.0
C	预制构件起吊	9.0	7.5	9.0	7.5	9.0	7.5
D	预制构件安装	11.0	13.0	13.0	10.5	16.0	8.5
E	构件节点处理	26.0	41.0	31.0	35.0	35.0	30.5

使用的机械设备台班的市场价格；碳排放主要来自于工人、材料以及机械设备产生，工人产生的碳排放主要来自于其呼吸，通过工人呼吸碳排放系数和工作时间计算呼吸的碳排放量；材料产生的碳排放量通过各种材料的消耗量及其碳排放系数计算；机械设备的碳排放主要通过其运行中消耗的电能、汽油等能源及相应的碳排放系数计算；根据专家打分矩阵与求得的各施工环节的相对权重值，可以得到不同执行模式下的质量得分情况。计算得出施工工序在三种执行模式下的工期、成本、碳排放及质量数据汇总见表 2~6。

表 2 施工过程中涉及的碳排放因子

Table 2 Carbon emission factors involved in the construction process

来源	单位	碳排放因子/kg
工人呼吸	CO ₂ /（人·天）	1.720
钢筋	CO ₂ /kg	2.300
混凝土	CO ₂ /m ³	321.300
汽油	CO ₂ /kg	2.930
柴油	CO ₂ /kg	3.100
电	CO ₂ /kg	1.246
水	CO ₂ /t	0.860

表 3 不同执行模式下的工期

Table 3 Duration under different execution modes

序号	施工环节	节约模式 /h	正常模式 /h	赶工模式 /h
A	构件进场验收及堆放	6.5	6.5	6.5
B	支护体系搭建	73.0	64.0	51.0
C	预制构件起吊	11.0	11.0	11.0
D	预制构件安装	21.0	17.5	12.5
E	构件节点处理	61.0	55.0	50.5
合计		172.5	154.0	131.5

表 4 不同执行模式下的成本

Table 4 Costs under different execution modes

序号	施工环节	节约模式 /万元	正常模式 /万元	赶工模式 /万元
A	构件进场验收及堆放	0.214	0.214	0.214
B	支护体系搭建	2.376	2.219	2.091
C	预制构件起吊	0.599	0.599	0.599
D	预制构件安装	2.774	2.698	2.589
E	构件节点处理	9.486	9.378	9.269
合计		15.449	15.106	14.761

表 5 不同执行模式下的碳排放

Table 5 Carbon emissions under different execution modes

序号	施工环节	节约模式 /kg	正常模式 /kg	赶工模式 /kg
A	构件进场验收及堆放	121.3	121.3	121.3
B	支护体系搭建	563.2	532.7	509.1
C	预制构件起吊	733.4	733.4	733.4
D	预制构件安装	67.8	56.3	48.4
E	构件节点处理	74 634.6	74 597.4	74 465.3
合计		76 120.3	76 041.1	75 877.5

表 6 不同执行模式下的质量得分

Table 6 Quality under different execution modes

序号	施工环节	节约模式	正常模式	赶工模式
A	构件进场验收及堆放	1.51	1.49	1.35
B	支护体系拆建	1.54	1.23	1.11
C	预制构件起吊	1.74	1.71	1.38
D	预制构件安装	1.69	1.43	1.24
E	构件节点处理	1.47	1.28	1.09
	合计	7.95	7.14	6.17

2.2 施工优化模型

优化目标“工期 - T ”、“成本 - C ”、“碳排放 - E ”、“质量 - Q ”的多目标优化，根据不同施工工序所包含的执行模式，构建优化模型为式 (2)~(5)：

$$T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} T_{ij} \quad (2)$$

$$s. t. T_{is} \leq T_{ij} \leq T_{il}$$

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} C_{ij} \quad (3)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} E_{ij} \quad (4)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \omega_i Q_{ij} \quad (5)$$

式中： n 为施工环节数量； T_{ij} 为第 i 个施工环节在第 j 种执行模式下的持续时间； T_{is} 为第 i 个施工环节最短持续时间； T_{il} 为第 i 个施工环节最长持续时间； q_i 为第 i 个施工环节的执行模式数量； ω_i 为第 i 个施工环节在整体中的权重； Q_{ij} 为第 i 个施工环节在第 j 种执行模式下的得分。

3 改进 GRO-GWO 算法及流程

3.1 改进 GRO-GWO 算法

传统的灰狼优化算法在寻优迭代过程中未考虑个体经验、历史经验和其他个体经验对灰狼种群的影响，从而使得算法在迭代后期容易陷入局部最优解。而在淘金优化算法中每个淘金者代表搜索空间中的一个解决方案，他们不断地在搜索空间中移动，根据当前位置、历史信息以及其他淘金者的信息更新其位置，使得算法能够较好地调节全局搜索与局部搜索过程。因此，将 GRO 算法与 GWO 算法进行融合设计出改进 GRO-GWO 算法，弥补了 GWO 算法在迭代过程中缺乏记忆功能和信息交流功能的缺点，从而提升算法的寻优性能。

3.1.1 改进初始灰狼种群

由于没有先验信息，个体通常是由随机初始化产生的。这种策略在某种意义上是有用的，但有时

个体在搜索域中的分布并不均匀，导致收敛速度过慢。引入 Tent 混沌映射对 GWO 算法进行改进，改进后表达为：

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2x_i + \text{rand}(0,1) \times \frac{1}{N} & 0 \leq x \leq \frac{1}{2} \\ 2(1 - x_i) + \text{rand}(0,1) \times \frac{1}{N} & \frac{1}{2} < x \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中： N 是粒子的个数； $\text{rand}(0, 1)$ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数。

3.1.2 改进灰狼位置更新方式

α 狼在狼群中等级最高，理应不受其他狼的引导，因此参考 GRO 算法中淘金者迁移阶段，使 α 狼在迭代过程中逐步缩小最优解的搜索区域，使算法渐渐靠近最优解，改进后的 α 狼位置更新方式为：

$$\begin{cases} C_1 = 2r_2 \\ D_1 = C_1 \cdot X^*(t) - X_a(t) \\ l_1 = \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - 1} \right) \left(2 - \frac{1}{t_{\max}} \right) + \frac{1}{t_{\max}} \\ A_1 = 1 + l_1 \left(r_1 - \frac{1}{2} \right) \\ x_\alpha(t+1) = X_\alpha(t) + A_1 \cdot D_1 \end{cases} \quad (7)$$

在等级制度中， β 狼只接受 α 狼的领导，因此参考 GRO 算法中淘金者开采阶段，使 β 狼在 α 狼搜索到的最优解区域内进行搜索，改进后的 β 狼位置更新方式为：

$$\begin{cases} l_2 = \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max} - 1} \right) \left(2 - \frac{1}{t_{\max}} \right) + \frac{1}{t_{\max}} \\ A_2 = 2l_2r_1 - l_2 \\ D_2 = X_\beta(t) - X_\alpha(t) \\ X_\beta(t+1) + X_\alpha(t) = A_2 \cdot D_2 \end{cases} \quad (8)$$

δ 狼只接受 α 和 β 狼的领导，因此参考 GRO 算法中淘金者的团队合作过程，使 δ 狼更新位置时参考 α 狼和 β 狼的位置信息，改进后更新方式为：

$$\begin{cases} D_3 = X_\alpha(t) - X_\beta(t) \\ X_\delta(t+1) = X_\delta(t) + r_1 \cdot D_3 \end{cases} \quad (9)$$

研究与应用

3.1.3 改进灰狼权重系数

在传统 GWO 算法中， α 、 β 和 δ 狼的权重系数是相同的，这显然与真实狼群的等级制度矛盾，真实狼群中各等级的狼所占的权重是不同的。受到 Díaz - álvarez 等的启发，引入式 (10) 来衡量 α 、 β 和 δ 狼的重要程度：

$$\begin{cases} \omega_i = \frac{3f_\delta - f_i}{3f_\delta - f_\alpha} \\ \theta_i = \frac{\omega_i}{\sum_{j=\alpha,\beta,\delta} \omega_j} \end{cases} \quad i \in \{\alpha,\beta,\delta\} \quad (10)$$

式中： θ_i 即为 α 、 β 和 δ 狼分别对应的权重； f 为适应度函数。当头狼离猎物越近时，其权重也就越高， α 狼为灰狼种群提供了主要的运动方向，而 β 狼和 δ 狼则为灰狼种群提供了辅助方向， α 、 β 和 δ 狼各司其职、共同协作，加快对猎物的包围和攻击。

改进灰狼权重系数后， ω 狼的位置更新公式则变为：

$$X_\omega(t+1) = \frac{\theta_\alpha \cdot X_\beta + \theta_\beta \cdot X_\beta + \theta_\delta \cdot X_\delta}{3} \quad (11)$$

3.2 改进 GRO - GWO 算法流程

改进后的 GRO - GWO 算法流程图如图 2 所示，当达到最大迭代次数时，则输出 $X_\alpha(t)$ ，若未达到则循环步骤 (3) 到 (6) 直到达到最大迭代次数。

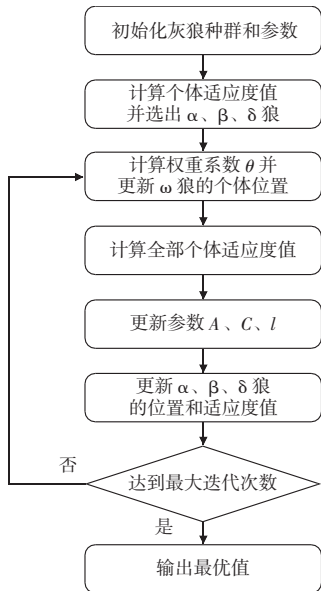


图 2 GRO - GWO 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of GRO - GWO algorithm

4 优化结果

根据对济宁某公共租赁住房工程相关数据的分析以及基于工期 - 成本 - 碳排放 - 质量的多目标优化模型的构建，在 MATLAB 中编写改进 GRO - GWO 算法、GRO 算法和 GWO 算法程序，并进行分析运算。算法运行结果对比如图 3 所示：

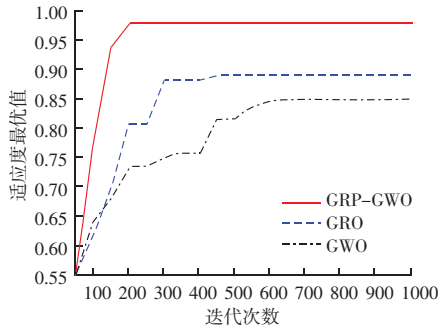


图 3 算法运行结果对比图

Fig. 3 The comparison diagram of the running results of the algorithm

可知利用改进 GRO - GWO 算法对构建的多目标优化模型的进行求解，输出了最大适应度值 0.98， $(T, C, E, Q) = (138.84, 148\ 896.43, 75\ 896.89, 6.36)$ ，即此时函数为最优。通过分析可以得出：

(1) 该装配式建筑施工项目的工期优化值为 138.84 小时，满足工期目标约束 $[131.5, 172.5]$ ，与正常模式相比工期提前了 15.16 个小时，为该施工项目节约了约 10.92% 的时间。

(2) 该装配式建筑施工项目的成本优化值为 14.89 万元，满足成本目标约束 $[14.76, 15.45]$ ，比正常模式下的成本降低了 0.56 万元，为项目节约了约 3.76% 的成本。

(3) 该装配式建筑施工项目的碳排放优化值为 7.596 万千克，满足碳排放目标约束 $[7.59, 7.60]$ ，比正常模式下的碳排放降低了 144.21 kg，优化后该项目减少了约 0.19% 的 CO_2 。

(4) 该装配式建筑施工项目的质量水平优化值为 6.36，在质量目标约束 $[6.17, 10]$ 内，表明该项目优化后的质量是符合施工管理要求的。

5 结论

在传统建筑工期 - 成本 - 质量的多目标优化的基础上，增加了对碳排放这一目标的研究，分别构建各目标的优化模型，利用多属性效用函数构建多

目标优化的综合模型，通过改进 GRO - GWO 算法对模型进行求解，最终用实际工程对模型的可行性和实用性进行验证。通过分析国内外对装配式建筑施工多目标管理的现状，提出符合时代发展要求的工期 - 成本 - 碳排放 - 质量的多目标优化研究。将 GRO 算法与 GWO 算法的优点相结合，提出 GRO - GWO 算法并对其进行改进，利用改进 GRO - GWO 算法对装配式建筑施工多目标优化模型进行求解，为装配式建筑多目标优化提供了科学合理的求解方案。所构建的多目标优化模型是切实可行的，为装配式建筑施工管理者的决策以及具体施工活动提供了参考。

参 考 文 献

- [1] 李锋, 杨萍. 施工企业成本控制方法研究和存在的问题 [J]. 四川建筑, 2006, 26 (1): 151 - 152.
- [2] 王晓刚, 韩雪莹, 刘昭等. 装配式建筑设计 - 生产 - 施工协同度评估研究 [J]. 铁道标准设计, 2023, 67 (10): 208 - 213.
- [3] Ji F R, Luo Z, Hu X, et al. A DPSIR Framework to Evaluate and Predict the Development of Prefabricated Buildings: A Case Study [J]. Sustainability, 2023, 15 (19): 14264.
- [4] 齐宝库, 张阳. 装配式建筑发展瓶颈与对策研究 [J]. 沈阳建筑大学学报: 社会科学版, 2015 (2): 156 - 159.
- [5] ZHANG F. Constructing a Multi - Objective Optimization Model for Engineering Projects Based on NSGA - II Algorithm under the Background of Green Construction [J]. Decision Making: Applications in Management and Engineering, 2024, 7 (1): 37 - 53.
- [6] BONAMANTE E, COTANA F. Carbon and energy footprints of prefabricated industrial buildings: Asystematic life cycle assessment analysis [J]. Energies, 2015, 8 (11): 12685 - 12701.
- [7] HERAVI G, ROSTAMI M, KEBRIA M F. Energy consumption and carbon emissions assessment of integrated production and erection of buildings' pre - fabricated steel frames using lean techniques [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 253: 120045.
- [8] AGHASIZADEH S, TABADKANI A, HAJIRASOULI A, et al. Environmental and economic performance of prefabricated construction: A review [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 97: 106897.
- [9] 赵彦革, 孙倩, 魏婷婷等. 装配式建筑绿色建造评价体系研究 [J]. 建筑科学, 2022, 38 (7): 134 - 140.
- [10] LUONG D L, TRAN D H, NGUYEN P T. Optimizing multi - mode time - cost - quality trade - off of construction project using opposition multiple objective difference evolution [J]. International Journal of Construction Management, 2021, 21 (3): 271 - 283.
- [11] 杨汉宁. 基于 BIM 技术的装配式建筑工程与现浇式建筑工程成本对比研究 [J]. 价值工程, 2023, 42 (17): 4 - 6.
- [12] 郭庆军, 赛云秀. 建设项目绿色施工目标规划模型的构建 [J]. 统计与决策, 2011 (2): 64 - 66.
- [13] 游又能, 康一亭, 马健等. 我国被动式超低能耗装配式建筑关键技术的研究与发展 [J]. 建筑科学, 2019, 35 (8): 137 - 142.
- [14] 刘义川, 刘贵文, 傅晏等. 装配式建筑预制构件生产调度文献综述 [J]. 项目管理技术, 2019, 17 (4): 20 - 25.
- [15] 高宇, 李政道, 张慧等. 基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析 [J]. 工程管理学报, 2018, 32 (2): 30 - 34.