

文章编号:1673-9469(2025)06-0074-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.009

“双碳”背景下装配式建筑施工多目标优化研究

崔邯龙¹,张圆^{1*},于博²,柳松峰²,肖永刚³

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 邯郸市鹏泰建筑安装有限公司,河北 邯郸 056001;
3. 重庆建工第三建设有限责任公司,重庆 400060)

摘要:为解决装配式建筑施工工期-碳排放-成本多目标优化问题,系统梳理了装配式建筑标准层主体结构的施工活动流程及其资源配置情况。识别了施工过程的碳排放源与类别,结合过程评价法与排放因子法构建了碳排放核算模型,并建立了碳排放核算清单,分析了碳排放的经济影响,为施工碳排放核算提供了基础。综合考虑施工活动的多种资源组合模式,活动持续时间的不确定性以及碳成本等因素,以不同模式下各项活动的施工时间、碳排放、成本为依据,构建了离散的多目标多模式组合优化模型。针对该优化模型的特点,对非支配排序鲸鱼优化算法进行离散化处理,通过算法求解获得施工模式组合方案的帕累托解集,并采用层次分析法-改进熵权法组合加权的逼近理想解排序法对非支配方案进行综合排序,为管理者优选出最佳方案。工程实例应用结果显示,工期、碳排放、成本均得到了有效控制,满足管理者的预期目标,验证了优化模型的科学性和求解方法的实用性。

关键词: 装配式建筑施工;碳排放;多目标优化;非支配排序鲸鱼优化算法;决策

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

Research on Multi-objective Optimization of Prefabricated Building Construction Under the Background of “Dual Carbon”

CUI Hanlong¹, ZHANG Yuan^{1*}, YU Bo², LIU Songfeng², XIAO Yonggang³

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Handan Pengtai Construction Installation Co., Ltd., Handan, Hebei 056001, China; 3. Chongqing Construction Engineering Third Construction Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: To address the multi-objective optimization problem of construction time, carbon emission and cost in prefabricated building construction, the construction activity process and resource allocation of the standard floor main structure of prefabricated buildings were systematically reviewed. The carbon emission sources and categories in the construction process were identified, and a carbon emission accounting model was constructed by combining the process evaluation method and emission factor method. A carbon emission accounting list was established, and the economic impact of carbon emission was analyzed, providing a basis for construction carbon emission accounting. Considering various resource combination modes of construction activities, the uncertainty of activity time and carbon cost, a discrete multi-objective multi-mode combination optimization model was constructed based on the construction time, carbon emission and cost of each activity under different modes. In response to the characteristics of this optimization model, the non-dominated sorting whale optimization algorithm was discretized. The Pareto solution set of the construction mode combination scheme was obtained through

收稿日期:2024-05-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC1910605);固废资源化利用与节能国家重点实验室开放基金资助项目(SWR-2023-007);国家环境保护矿冶资源利用与污染控制重点实验室开放基金资助项目(HB202306)

第一作者:崔邯龙(1977—),男,河北邢台人,硕士,副教授,从事土木工程建造与项目管理方面的研究。

*通信作者:张圆(1999—),女,河北保定人,硕士研究生,从事土木工程建造与项目管理方面的研究。

algorithm solution, and the non-dominated schemes were comprehensively ranked using the Analytic Hierarchy Process-improved entropy weight method combined weighted Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution. This provided a comprehensive ranking for non-dominated schemes, enabling managers to select the best solution. The application results of engineering examples show that the construction time, carbon emission and cost have been effectively controlled, meeting the expected goals of managers, and verifying the scientific nature of the optimization model and the practicality of the solution method.

Key words: prefabricated building construction; carbon emission; multi-objective optimization; non-dominated sorting whale optimization algorithm; decision

当前,为实现“碳达峰”与“碳中和”目标,我国全面推动经济社会各行各业的绿色转型^[1]。建筑业作为高排放、高收益产业,既是我国经济发展的重要支柱,也是我国实现“碳中和”目标的关键领域。在建筑工业化和能碳双控的背景下,装配式建筑已成为我国大力推广的建筑形式。

为探究装配式建筑的碳减排价值,王广明等^[2]通过对比装配式和现浇式施工的综合效益,测算了建材、能源消耗以及建筑垃圾处理的碳排放量,表明装配式建筑具有更高的性价比。从建筑全生命周期来看,施工阶段耗时短,污染物排放集中,对环境的影响强度较高^[3]。在可行性研究阶段加强施工碳排放的管控,能够从源头上减轻建筑施工的不良环境影响^[4]。曹西等^[5]以预制混凝土构件为测算对象,应用碳排放因子法计算了装配式建筑物化过程的碳排放。纪颖波等^[6]基于过程评价法,分析了装配式和现浇住宅物化阶段碳排放路径的差异性,计算并对比了二者的碳排放量。孟昊杰^[7]采用“排放因子法+生命周期法”,按照人、料、机要素计算了装配式建筑施工过程的直接和间接碳排放量。我国装配式建筑起步较晚,现场施工管理技术尚不成熟,面临工期延误、成本超标、碳排放强度高和资源配置不合理等问题。建筑施工管理优化研究多集中于工期、成本等传统目标的管控,如伊长生等^[8]考虑资源投入量的不同,研究了模糊施工环境下的多模式工期-成本优化问题。部分学者把碳排放纳为优化目标,王静静等^[9-10]以装配式建筑施工现场的吊装机械为研究对象,构建“进度-成本-碳排放”均衡优化模型,寻求施工机械的配置方案的最优解。刘香香等^[11-12]以单种预制构件安装工序在正常、加急和经济模式下的时间、成本和碳排放量为建模基础,引入权重算子,利用蚁群算法、遗传算法求解多目标综合模型,有效促进了装配式建筑绿色施工的顺利开展。

现有研究存在一定的不足:装配式建筑施工碳排放研究多集中于定量计算和定性分析,将碳排放融入施工流程优化管理的研究相对较少;装配式建筑施工多目标优化研究,大多对归一化处理后的综合模型寻优,优化结果和优化对象比较单一,且未考虑现场干扰因素的影响,无法满足整个项目施工流程优化的要求。

目前,我国装配式建筑市场以半预制混凝土结构建筑为主,其标准层施工流程较为规范、统一,不仅降低了搜集数据的难度,还提高了多模式优化的可行性。因此,本文系统梳理装配式建筑标准层的施工流程,深入研究施工过程的碳排放,综合考虑多种施工模式、模糊持续时间等因素,以不同模式下各项活动的时间、碳排放和成本为依据,建立工期-碳排放-成本多模式组合优化模型,并运用非支配排序鲸鱼优化算法结合主客观加权的逼近理想解排序法(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)求解最佳方案。

1 施工碳排放核算基础

1.1 碳源分析

装配式建筑施工过程中的碳排放来源于施工人员、建材、机械能源消耗等多种途径,为尽可能全面、精确地评估装配式建筑施工对温室效应的贡献,本研究将施工过程产生的多种温室气体统一量化,并转换为二氧化碳当量(CO₂e)进行表示。按照碳源的属性,施工碳排放可进一步划分为直接碳排放、间接碳排放和隐含碳排放^[13]。直接碳排放主要包括耗油型机械消耗化石燃料和施工人员呼吸产生的碳排放,间接碳排放包括耗电型机械用电及施工用水产生的碳排放,除预制构件外的其他建材在上游生产与运输过程的碳排放计入隐含碳排放。

1.2 核算模型

排放因子法是联合国政府间气候变化专门委员会提出的一种碳排放估算方法^[14],该方法将碳源消耗量与单位碳源排放量的乘积作为排放值,计算逻辑简单,适用性高。过程评价法基于微观量化思想,依据既定作业流程计算活动实施过程中资源消耗产生的碳排放,提高了核算结果的可信度。为便于开展多模式组合优化研究,本文结合过程评价法的核算思路与排放因子法,汇总计算单项施工活动产生的碳排放量,进而简明、准确地核算整个施工流程的碳排放总量 E , 见式(1)。

$$E = Q \times f = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n E_{idc} + E_{inc} + E_{imc} \quad (1)$$

式中: Q 为碳源消耗量; f 为排放因子; i 为活动代号, $i = 1, 2, \dots, n$; E_i 为第 i 项活动的碳排放, kgCO_2e ; E_{idc} 为直接碳排放, kgCO_2e ; E_{inc} 为间接碳排放, kgCO_2e ; E_{imc} 为隐含碳排放, kgCO_2e 。

1.3 核算清单

基于装配式建筑标准层主体结构的施工流程和资源消耗分析,识别碳源并选取排放因子,建立基于施工活动的碳排放核算清单(表1)。该排放清单可为施工碳排放计算提供数据支持。

1.4 碳成本

随着低碳经济的稳步推进,我国在控制碳排放、推动绿色发展方面取得了初步成效,但年碳排放总量仍呈上升趋势,大气环境容纳碳排放的空间正逐年缩减。碳排放空间的减少势必会引起环境成本的上升,即产生碳排放损失成本。从本质上看,碳排放损失成本就是将企业排放温室气体所引起的直接经济支出或代价以货币形式加以量化。核算碳排放损失成本有助于企业内部进行环境成本计量和核算,并实现对大气环境的补偿。

在建筑全生命周期中,各阶段碳排放的主体不同,碳成本的承担主体也随之变化。在施工建造阶段,施工单位应积极承担因碳排放引起的、需列入项目成本的经济支出,并将碳成本纳入到施工

表1 基于施工活动的碳排放核算清单

Tab.1 Carbon emission accounting list based on construction activities

序号	活动名称	工人呼吸 排放因子	建材		机械设备	
			种类	排放因子	种类	排放因子
1	建材入场及准备	0.392	—	—	塔式起重机	120.43
2	放线及标高测量	0.392	—	—	—	—
3	柱、墙钢筋绑扎	0.392	钢筋(综合) 扎丝	3 000.000	钢筋调直机	12.28
				1.529	钢筋切断机	22.85
				—	钢筋弯曲机	9.11
4	柱、墙水电部件预埋	0.392	PVC 预埋件 扎丝	7.930	—	—
				1.529		
5	柱、墙模板安装	0.392	铝模板 钢支撑及配件	14.780	塔式起重机	120.43
				35.000	载重汽车	103.04
6	梁、板模板安装	0.392	铝模板 钢支撑及配件	14.780	塔式起重机	120.43
				35.000	载重汽车	103.04
7	预制叠合板吊装	0.392	—	—	塔式起重机	120.43
8	预制楼梯吊装	0.392	灌浆料	512.660	塔式起重机	120.43
					电动灌浆机	11.53
9	梁、板钢筋绑扎	0.392	钢筋(综合) 扎丝	3 000.000 1.529	钢筋调直机	12.28
					钢筋切断机	22.85
					钢筋弯曲机	9.11
10	梁、板水电部件预埋	0.392	PVC 预埋件 扎丝	7.930	—	—
				1.529		
11	隐蔽验收及整改	0.392	—	—	—	—
12	混凝土浇筑	0.392	C30 混凝土	295.000	混凝土泵 振捣器	173.32 2.85
			C50 混凝土	385.000		
			自来水	0.168		

总成本中。本文采用从量计税的方式,碳单价取50元/tCO₂e^[15],按“碳排放量×碳单价”计算施工碳成本。

2 模型构建

2.1 基本假定

为确保优化模型的合理性和有效性,建模前假定以下条件:(1)标准层主体结构建设为重复性工作,施工流程是具有明确逻辑关系的活动集合;(2)施工活动按非抢占式执行,不存在导致停工的不可抗因素;(3)每项施工活动存在切实可行的几种实施模式;(4)施工资源按时入场,合理考虑施工建材损耗量。

2.2 核算边界

核算边界的定义最早出现在碳排放研究领域,在多目标优化问题中引入该概念,有助于统一工期、成本与碳排放的计量范围,避免漏算或重复计算,从而确保优化数据的可靠性和一致性。施工现场主要分为施工区、生活区和办公区,施工区是活动作业的实际执行区域,也是发生碳排放、时间和成本的主要场所,故本研究的核算边界为施工区的各项施工活动。

2.3 多目标优化模型

2.3.1 子目标模型

(1)总工期

受现场劳动力效率、设备性能等不确定因素的影响,活动持续时间具有一定的模糊性。本文引入了三角模糊数理论,采用期望值操作方法对模糊时间数据进行去模糊化处理^[16]。假设活动*i*的持续时间 $\tilde{d}_i = (t_{i1}, t_{i2}, t_{i3})$,根据时间的非负性和管理者的中立态度确定计算系数^[17], \tilde{d}_i 被重新定义为确定性参数 $E(\tilde{d}_i)$,处理后 $E(\tilde{d}_i) = \frac{t_{i1} + 2t_{i2} + t_{i3}}{4}$ 。施工网络计划往往不止一条执行线路,工期管控的重点在于优化关键线路,该线路中活动持续时间的总和即为总工期*T*,见式(2)。

$$\min T = \sum_{i \in L_p} D_i^k = \max_{L_i \in L} \left(\sum_{i \in L_i} \sum_{k=1}^{K_i} E(\tilde{d}_{ik}) X_{ik} \right) \quad (2)$$

式中: L_p 为网络计划中的关键线路; L 为网络计划中的所有线路; L_i 为网络计划中的第*i*条线路; D_i^k

为活动*i*执行*k*模式的时间, h ; K_i 为施工模式种类数量; $E(\tilde{d}_{ik})$ 为活动*i*执行*k*模式的期望时间, h ; X_{ik} 为二元变量。

(2)碳排放总量

按照过程分析法的思路,统计施工活动的碳源消耗情况,利用排放因子法计量单项施工活动在不同实施模式下的碳排放量。碳排放总量*E*为所有活动作业碳排放量的总和,包括工人呼吸、机械耗能等方面,见式(3)(4)。

$$\min E = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} E_{ik} X_{ik} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} (E_{idck} + E_{inck} + E_{imck}) X_{ik} \quad (3)$$

$$E_{ik} = E_{pik} + E_{sik} + E_{wik} + E_{eik} + E_{mik} \quad (4)$$

式中: E_{ik} 为活动*i*执行*k*模式的碳排放, $kgCO_2e$;直接碳排放 E_{idck} 包括工人呼吸碳排放 E_{pik} 和耗油碳排放 E_{sik} , $kgCO_2e$;间接碳排放 E_{inck} 包括耗电碳排放 E_{eik} 和用水碳排放 E_{wik} , $kgCO_2e$;隐含碳排放 E_{imck} 为建材生产运输的碳排放 E_{mik} , $kgCO_2e$ 。

(3)总成本

高昂的建设成本一直是制约装配式建筑发展的重要因素^[18],传统施工成本包括资源消耗发生的直接成本和保障施工顺利实施的间接成本。然而,在低碳施工视角下,传统成本较低并不意味着装配式项目整体效益最优,计入碳成本更能客观地反映装配式建筑施工的综合价值。本研究所有施工活动的成本总和即为总成本*C*,见式(5)(6)。

$$\min C = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} C_{ik} X_{ik} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{K_i} (C_{idk} + C_{ink} + C_{iek}) X_{ik} \quad (5)$$

$$C_{ik} = \sum_{m=1}^{m_i} q_{ik}^m (1 + \rho_{ik}^m) c_m + \sum_{p=1}^{p_i} q_{ik}^p c_p + \sum_{c=1}^{c_i} q_{ik}^c c_c + E(\tilde{d}_{ik}) c_k + E_{ik} c_e \quad (6)$$

式中: C_{ik} 为活动*i*执行*k*模式的成本,包括直接成本 C_{idk} 、间接成本 C_{ink} 和碳成本 C_{iek} ,元; m_i 、 q_{ik}^m 分别为建材种类和消耗量; p_i 、 q_{ik}^p 分别为人工种类和消耗量; c_i 、 q_{ik}^c 分别为机械种类和消耗量; ρ_{ik}^m 为建材损耗率,%; c_m 、 c_p 、 c_c 分别为建材、人工和机械单价; c_k 为执行*k*模式的间接成本系数,元/h; c_e 为碳单价,元/tCO₂e。

2.3.2 约束条件

(1)排他约束

每项施工活动仅能从施工模式集合中随机选

择一种模式实施,为防止求解过程中出现个别施工活动一次执行多种模式的问题,加入排他约束,见式(7)。

$$\sum_{k=1}^{K_i} X_{ik} = 1 \quad (7)$$

式中: X_{ik} 为二元变量,当 $X_{ik} = 1$ 时,执行;当 $X_{ik} = 0$ 时,不执行。

(2) 理想值约束

根据施工管理者的优化预期,将同时满足工期、碳排放与成本理想目标值作为约束条件,在算法寻优过程中对方案进行初步筛选,以减少后续决策工作量,见式(8)。

$$(T \leq T^*) \cap (E \leq E^*) \cap (C \leq C^*) \quad (8)$$

式中: T^* 为总工期理想值, h; E^* 为碳排放总量理想值, kgCO₂e; C^* 为总成本理想值, 元。

3 算法框架设计

第二代非支配排序遗传算法的成功应用,证明了非支配排序策略在解决多目标优化问题中的实用价值。鲸鱼优化算法以参数少、结构简单等优势,展现出巨大的应用潜力。因此, Jangir 等^[19]提出了非支配排序鲸鱼优化算法,并验证了其在处理多约束、非线性复杂模型方面的优越性能。基于此,本文对非支配排序鲸鱼优化算法框架进行设计与处理,用于解决装配式建筑施工多目标、多模式组合优化问题。

3.1 编码与种群初始化

采用实数编码对施工活动序号及其相应的施工模式进行编码,假设工程实例包含 n 项活动, $X_{i,j(k)} = (X_{i,1k}, X_{i,2k}, \dots, X_{i,nk})$ 为一个 n 维的位置向量, i 代表鲸鱼个体的序号, $j(k)$ 表示各项施工活动的实施模式。对于具有离散整数性质的施工模式组合优化问题,活动实施模式在可行解的搜索空间内随机产生,需对种群初始化公式进行取整处理:

$$X_{i,jk} = X_{j(L)} + \text{round}((X_{j(U)} - X_{j(L)}) \times \text{rand}_{i,j}) \quad (9)$$

式中: $X_{i,jk}$ 为第 i 个施工模式组合方案的第 j 项施工活动实施模式; round 表示四舍五入取整; $X_{j(U)}$ 、 $X_{j(L)}$ 为第 j 项活动施工模式取值界限; $\text{rand}_{i,j}$ 为 $[0,1]$ 内随机数。

3.2 适应度计算

根据总工期 T 、碳排放总量 E 、总成本 C 的适

度函数,计算种群个体的适应度,见式(10)一式(12)。

$$T = \sum_{i \in L_p} \sum_k E(\tilde{d}_{ik}) \quad (10)$$

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_k E_{ik} \quad (11)$$

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_k C_{ik} \quad (12)$$

3.3 非支配排序和拥挤度计算

通过比较各方案解之间的适应度值,依次推导出每个解被支配的次数,并划分等级。同一等级内的个体互不支配,且低等级个体支配高等级个体。从低等级开始选择子代个体,采取拥挤距离机制对同一等级的个体排序,保留拥挤距离较大的解,从而获得期望的帕累托最优方案解集。

3.4 位置更新

鲸鱼通过包围猎物、气泡网攻击以及随机搜寻的方式更新位置,逐步趋向最优解。首先,随机生成参数 p ($0 \leq p \leq 1$),若 $p \geq 0.5$,鲸鱼将沿着螺旋路径持续向上游动靠近猎物;反之,则进一步判断 $|\vec{A}|$ 的大小,若 $|\vec{A}| < 1$,鲸鱼会不断收缩环绕游动来缩小对猎物的包围圈,逐渐向最优解的方向更新位置;否则,将随机搜寻其他鲸鱼个体,根据随机个体和当前鲸鱼的位置关系进行全局搜索。同样,需将鲸鱼位置更新的向量四舍五入取整。

(1) 鲸鱼将当前最优候选解假定为猎物,即包围目标,并不断调整自身位置以逼近猎物,取整处理的包围运动模型见式(13)。

$$\vec{X}(t+1) = \text{round}(\vec{X}^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}) \quad (13)$$

式中: $\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$,表示当前个体位置 $\vec{X}(t)$ 与猎物位置 $\vec{X}^*(t)$ 之间的包围步长,其中, $\vec{C} = 2\vec{r}$, \vec{r} 为 $[0,1]$ 内随机向量; $\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a}$,其中, $\vec{a} = 2 - \frac{2 \cdot t}{\text{iter}_{\max}}$, t 表示当前的迭代次数, iter_{\max} 为设定的最大迭代次数。

(2) 鲸鱼沿着螺旋轨迹游动接近猎物的同时收缩包围圈的行为即为气泡网攻击,通常设定有50%的概率选择收缩环绕包围和对数螺旋运动更新鲸鱼的位置。在包围运动中,通过减小 \vec{a} 的值来模拟鲸鱼的收缩环绕包围行为,此时, \vec{A} 是 $[-a, a]$

内的随机值。当鲸鱼采取对数螺旋策略时,仍以当前最优候选解作为猎物,沿着螺旋形或“9”形路径朝着猎物向上游动来更新位置,取整处理的对数螺旋运动模型见式(14)。

$$\vec{X}(t+1) = \text{round}(\vec{D} \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\pi l) + \vec{X}^*(t)) \quad (14)$$

式中: $\vec{D} = |\vec{X}^*(t) - \vec{X}(t)|$ 表示当前个体与猎物位置的距离; e 为自然常数; 常数 b 定义对数螺旋路径; l 为 $[-1, 1]$ 内随机数。

(3) 鲸鱼随机选择个体代替当前最优候选解来更新位置,取整处理的随机搜寻运动模型见式(15)。

$$\vec{X}(t+1) = \text{round}(\vec{X}_r - \vec{A} \cdot \vec{D}) \quad (15)$$

式中: \vec{X}_r 为随机搜寻的鲸鱼个体位置, $\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_r - \vec{X}(t)|$ 表示随机个体与当前个体的距离。

4 实例分析

本文以装配式建筑标准层主体结构施工过程为研究对象,该项目地上部分 29 层,地下 2 层。其中,1~28 层为标准层,采用部分预制混凝土构件装配式施工的方式,以整层为施工段进行流水作业。预制混凝土构件包括叠合板和预制楼梯,其余部分采用现浇方式施工。经分析,标准层施工的单代号网络图如图 1 所示,每个活动序号代表的具体工作内容见表 1。

4.1 施工数据

结合现场调研结果和施工活动的资源消耗情况,对施工活动在不同模式下的模糊持续时间、碳排放量和成本进行整理,见表 2。

4.2 优化效果分析

对模糊持续时间进行期望值处理,确定施工的关键线路,设置优化目标理想值,并采用非支配排序鲸鱼优化算法对优化模型进行求解。由各目标均值优化迭代图(图 2)可以看出,各目标均值随迭代次数的增加趋于稳定,收敛性良好。考虑

表 2 优化参数汇总表

Tab. 2 Summary of optimization parameters

活动序号	施工模式	模糊持续时间/h	碳排放量/kgCO ₂ e	成本/元
1	1	(4,5,6)	80.98	1 443.85
	2	(3,4,5)	69.62	1 455.98
	3	(2,3,4)	57.58	1 322.08
2	1	(4,5,6)	3.92	1 240.20
	2	(3,4,5)	4.70	1 220.24
	3	(2,3,4)	4.70	1 082.24
3	1	(16,17,18)	25 011.93	39 250.06
	2	(15,16,17)	26 345.43	42 149.47
	3	(13,14,15)	27 137.14	43 464.56
4	1	(7,8,9)	149.57	2 829.48
	2	(6,7,8)	155.50	2 826.78
	3	(5,6,7)	162.21	2 951.11
5	1	(10,11,12)	629.13	30 357.31
	2	(9,10,11)	625.03	31 442.15
	3	(8,9,10)	602.91	31 563.14
6	1	(8,9,10)	520.34	25 337.98
	2	(7,8,9)	515.20	26 035.76
	3	(6,7,8)	489.97	25 876.59
7	1	(8,9,10)	141.86	59 972.90
	2	(7,8,9)	137.38	60 146.88
	3	(6,7,8)	123.59	60 164.38
8	1	(3,4,5)	49.01	9 442.41
	2	(2,3,4)	41.41	9 277.91
	3	(1.5,2,2.5)	36.45	9 067.42
9	1	(13,14,15)	18 237.58	30 657.89
	2	(11,12,13)	19 213.94	31 993.31
	3	(9,10,11)	19 782.77	32 422.99
10	1	(8,9,10)	155.32	3 611.77
	2	(7,8,9)	160.48	3 590.02
	3	(6,7,8)	167.19	3 734.36
11	1	(3,4,5)	3.14	736.16
	2	(2,3,4)	3.53	693.18
	3	(1.5,2,2.5)	3.14	556.16
12	1	(9,10,11)	49 787.33	52 779.34
	2	(7,8,9)	51 605.45	53 857.42
	3	(6,7,8)	52 644.09	55 564.44

注:施工模式 1 代表经济模式,2 代表正常模式,3 代表赶工模式。

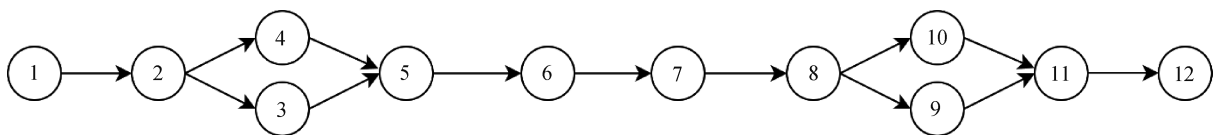


图 1 单代号网络图

Fig. 1 Diagram of single codename network

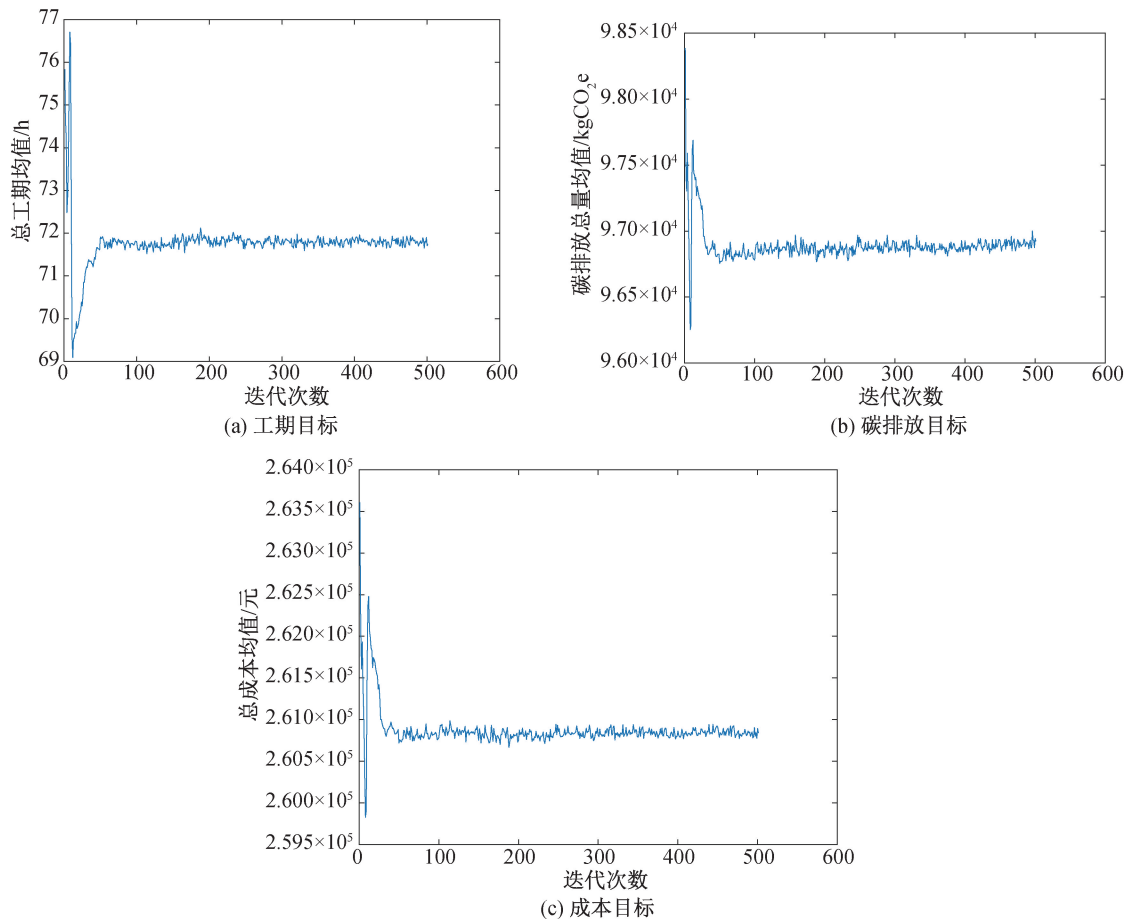


图2 单目标均值优化迭代图

Fig. 2 Single objective mean optimization iterative diagram

本文模型的特征,采用反转世代距离(Inverted Generational Distance, IGD)和超体积(Hypervolume, HV)指标进行评估,结果显示IGD值为 1.5213×10^{-11} ,HV值为 3.2704×10^9 ,表明算法寻优性能较好,解集的可信度较高。在正常施工模式下,一个标准层的施工工期为76 h,碳排放量为98 877.67 kgCO₂e,成本为264 689.10元。优化后工期均值约为72 h,碳排放均值为95 894.82 kgCO₂e,成本均值为259 663.66元。表3列出了具有代表性的单目标较优的帕累托方案。

选择最令管理者满意的施工方案和搜索帕累

托方案解集是同等重要的任务,层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)通过1~9标度法将管理者的主观意向具体化^[20],而熵权法通过分析优化指标的数理特征进行赋权,使结果更为客观^[21]。卢有麟等^[22]改进了传统熵权公式,使其更适用于各指标的熵值接近且趋近于1的情况。因此,本文采用AHP-改进熵权法组合加权的TOPSIS法进行综合评估,该方法能够在兼顾数据分布特征的同时,满足管理者的实际需要。按照AHP法计算工期、碳排放、成本的主观权重 $A_j = (0.26, 0.63, 0.11)$,采用改进熵权法分析决策数据确定客观权重

表3 部分帕累托施工模式组合方案

Tab. 3 Part of pareto construction mode combination scheme

序号	施工模式组合	工期/h	碳排放量/ kgCO ₂ e	成本/元	
1	工期支配	(3,3,1,1,3,3,3,3,2,3,1)	70	96 210.42	260 503.90
2		(3,3,1,1,3,3,3,3,1,3,1)	70	96 205.26	260 525.65
3	碳排放支配	(3,3,1,1,3,3,3,1,1,3,1)	74	94 660.07	258 760.55
4		(3,3,1,1,3,3,3,1,2,3,1)	74	94 665.23	258 738.80
5	成本支配	(3,3,1,1,1,3,3,3,1,2,3,2)	74	96 509.57	258 611.05
6		(3,3,1,1,1,3,3,3,1,1,3,2)	74	96 504.41	258 632.80

$B_j = (0.3378, 0.3326, 0.3296)$ 。经计算,组合权重 $\omega_j = (0.3138, 0.4846, 0.2016)$, 代入到 TOPSIS 法进行排序,最终选定排名第一的方案3作为施工方案。该方案使整个项目工期减少了56 h,碳排放降低了118 092.80 kgCO₂e,成本节约了165 999.40元。

5 结论

本文提出的装配式建筑施工优化模型和求解方法,充分考虑了施工现场的复杂性、管理者意向和数据分布规律,使得标准层施工工期提前2.63%,碳排放减少4.27%,成本降低2.24%,为装配式建筑低碳施工提供了实际指导。

1)建立了施工碳排放核算基础,分析碳源并构建碳排放核算模型,制定基于施工活动的碳排放核算清单,将碳成本计入总成本以量化其经济影响。

2)构建了工期-碳排放-成本多模式组合优化模型,考虑多种施工模式与模糊活动持续时间等因素,依据不同模式下各项活动的施工时间、碳排放和成本建模。

3)针对多目标多模式组合优化模型的特点,设计了非支配排序鲸鱼优化算法,拓宽了智能算法的应用范围。采用主客观组合加权的TOPSIS法对非支配方案排序优选,提升了决策结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 王金南,蔡博峰. 打好碳达峰碳中和这场硬仗[J]. 中国信息化, 2022(6): 5-8.
WANG J N, CAI B F. Winning the hard battle of carbon peaking and carbon neutrality [J]. Zhongguo Xinxihua, 2022(6): 5-8.
- [2] 王广明,刘美霞. 装配式混凝土建筑综合效益实证分析研究[J]. 建筑结构, 2017, 47(10): 32-38.
WANG G M, LIU M X. Empirical analysis and research of comprehensive benefits of prefabricated concrete buildings [J]. Building Structure, 2017, 47(10): 32-38.
- [3] 李彩惠,岳丽飞. 基于AHP-MF绿色施工评价研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(3): 110-112.
LI C H, YUE L F. Study on green construction evaluation based on AHP-MF [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2015, 32(3): 110-112.
- [4] 肖天明. 建设项目环境效益可研新观念: 精益可研观 [J]. 河北工程大学学报(社会科学版), 2012, 29(4): 14-16.
- XIAO T M. New idea on construction project environmental efficiency feasibility study: feasibility study concept of lean [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Social Science Edition), 2012, 29(4): 14-16.
- [5] 曹西, 缪昌铅, 潘海涛. 基于碳排放模型的装配式混凝土与现浇建筑碳排放比较分析与研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(S2): 1233-1237.
CAO X, MIAO C Q, PAN H T. Comparative analysis and research on carbon emission of prefabricated concrete and cast-in-place building based on carbon emission model [J]. Building Structure, 2021, 51(S2): 1233-1237.
- [6] 纪颖波, 张祺, 朱发东. 基于Process-Based LCA方法的我国装配式住宅物化阶段碳排放计算模型研究[J]. 工程管理学报, 2017, 31(4): 23-28.
JI Y B, ZHANG Q, ZHU F D. A embodied carbon emission calculation model for China's prefabricated residential buildings: a Process-Based LCA method [J]. Journal of Engineering Management, 2017, 31(4): 23-28.
- [7] 孟昊杰. 装配式建筑施工碳排放计算及影响因素研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
MENG H J. The calculation of carbon emissions and research of influencing factors about prefabricated construction [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [8] 伊长生, 孙妍妍, 沈佳乐, 等. 多模式工期-成本均衡优化的模糊规划模型[J]. 项目管理技术, 2016, 14(12): 18-22.
YI C S, SUN Y Y, SHEN J L, et al. Fuzzy programming model for multi-mode project-cost equilibrium optimization [J]. Project Management Technology, 2016, 14(12): 18-22.
- [9] 王静静, 王宗喜, 刘慧敏. 基于NSGA-II的装配式建筑施工机械排班方案优选[J]. 土木工程与管理学报, 2023, 40(3): 25-30.
WANG J J, WANG Z X, LIU H M. Optimization of construction machinery scheduling scheme for prefabricated building based on NSGA-II [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 40(3): 25-30.
- [10] 侯幸福. 基于离散仿真的吊装工程低碳施工多目标优化研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
HOU X F. Multi-objective optimization for low-carbon construction of hoisting project based on discrete simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [11] 刘香香, 孙凤. 基于蚁群算法的装配式建筑施工工序多目标优化模型[J]. 土木工程与管理学报, 2021, 38(3): 113-118.
LIU X X, SUN F. Multi objective optimization model of installation process of prefabricated buildings based on

- ant colony algorithm[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2021, 38(3): 113-118.
- [12] 王茹, 毛洁, 黄炜, 等. 外挂墙板施工阶段碳排放的智能监测与优化[J]. *安全与环境学报*, 2024, 24(4): 1596-1604.
- WANG R, MAO J, HUANG W, et al. Intelligent monitoring and optimization of carbon emissions in the construction stage of external wall panels[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(4): 1596-1604.
- [13] 杨浩. 基于CPS的装配式建筑施工现场碳排放实时监测与多目标优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- YANG H. Real-time monitoring of carbon emission and multi-objective optimization in prefabricated building construction cite based on CPS [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [14] 谢婉君, 李晓娟, 杨婷, 等. 装配式建筑施工阶段碳排放测算研究[J]. *工程管理学报*, 2022, 36(3): 52-57.
- XIE W J, LI X J, YANG T, et al. Research on carbon emission calculation in the construction stage of prefabricated buildings [J]. *Journal of Engineering Management*, 2022, 36(3): 52-57.
- [15] 肖旭东. 绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- XIAO X D. Study on life cycle carbon emission and life cycle cost of green buildings[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [16] XU J P, ZHOU X Y. Fuzzy-like multiple objective decision making[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011: 57-133.
- [17] 刘佳, 刘伊生, 施颖. 基于模糊集理论的施工项目工期-成本-质量权衡优化方法研究[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2017, 16(3): 30-38.
- LIU J, LIU Y S, SHI Y. Method of time-cost-quality tradeoff optimization of construction project: a study based on fuzzy set theory[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2017, 16(3): 30-38.
- [18] 姚卫涛, 吕海涛. 基于ISM的装配式建筑成本影响因素分析[J]. *河北工程大学学报(社会科学版)*, 2019, 36(2): 7-9.
- YAO W T, LYU H T. Research on influencing factors of ISM-based assembly building cost[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Social Science Edition)*, 2019, 36(2): 7-9.
- [19] JANGIR P, JANGIR N. Non-dominated sorting whale optimization algorithm (NSWOA): a multi-objective optimization algorithm for solving engineering design problems[J]. *Global Journal of Researches in Engineering*, 2017, 17(4): 15-42.
- [20] 王飞, 胡静娴, 黄晶. AHP和模糊综合评判在绿色建筑中的评价研究[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2014, 31(2): 106-109.
- WANG F, HU J X, HUANG J. AHP and fuzzy comprehensive evaluation in green building evaluation research [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2014, 31(2): 106-109.
- [21] 郭延华, 李乐昱. 基于改进熵权-突变级数法的岩爆等级评判[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2019, 36(3): 67-71.
- GUO Y H, LI L Y. Evaluation of rock burst level based on the improved entropy weight-catastrophe progression method[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2019, 36(3): 67-71.
- [22] 卢有麟, 陈金松, 祁进, 等. 基于改进熵权和集对分析的水库多目标防洪调度决策方法研究[J]. *水电能源科学*, 2015, 33(1): 43-46.
- LU Y L, CHEN J S, QI J, et al. Multi-objective decision making method for reservoir flood operation based on improved entropy weight and set pair analysis [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 43-46.

(责任编辑 张爱丽)