

考虑碳排放的不规则工业厂区车间布局优化

李 锐¹, 雷 云¹, 左精力¹, 宋金昭²

(1.西安建筑科技大学城市发展与现代交通学院, 陕西 西安 710055; 2.西安建筑科技大学管理学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为解决工业厂区边界不规则情况下的车间布局问题, 助力工业企业完成碳中和目标, 基于栅格数据结构, 构建了包括碳排放成本在内的运输总成本最小和非物流关系最大的多目标优化模型。并提出一种改进的多目标布谷鸟搜索算法对模型进行求解, 通过引入多种群进化策略, 采用基于参考点的环境选择算子, 有效地提高了算法的收敛速度, 保证了解的多样性和均匀性。最后, 以某水泥厂生产车间为研究对象进行仿真验证, 研究结果表明, 相较于优化前, 运输总成本降低了27.11%, 非物流关系提高了7.86%, 从而验证了模型和算法的有效性和可行性。

关键词: 车间布局; 多目标优化; 不规则场地; 碳排放; 改进多目标布谷鸟搜索算法

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

1 引言

在工业化和城市化快速推进过程中, 土地资源的日益紧缩与不断开发, 导致工业厂区的规划形态逐渐偏离传统的规则几何形状, 呈现出多样化且不规则化的空间格局, 而在传统的模型中通常假设待规划区域为矩形形状。由于场地形状的不规则性, 车间布局的合理性、经济性等方面都较规则场地复杂。因此, 采用科学的理论和方法对不规则场地的车间布局进行深入研究具有重要意义。

针对不规则场地的布局问题, 国内外研究者多采用栅格数据结构进行场地建模。Ning X^[1]等利用栅格化方法构建了以最小化总噪声污染水平、最小化运输总成本及设施间最小化潜在风险的多目标优化模型, 有效地降低了施工现场的噪声污染; Zavari M^[2]等基于栅格化方法, 提出了一种施工场地设施布置方法; 孙刘诚^[3]等基于栅格数据结构, 构建以运输成本最小为目标的不规则物流园区功能区块布局的集合划分模型, 提出了基于割树技术的变邻域搜索算法进行求解; 孔月萍^[4]等引入二维图形排样理论, 设计了一种不规则场地中跟踪式光伏阵列

基金项目: 国家社会科学基金项目“城市基础设施数字化转型的碳减排效应与优化路径研究”(23BTJ034)

的优化排布方法，提高土地资源的利用率；彭广益^[5]等构建了以所有栅格间综合关联度最大为目标的不规则临港产业区布局。

20 世纪以来，温室气体排放量持续增加，气候环境问题日益突出，应对全球气候变化已成为当前国际社会面对的共同挑战。中国政府在《巴黎协定》中承诺 CO₂ 排放量在 2030 年达到峰值，在 2060 年前实现碳中和^[6]，明确了绿色低碳发展是复杂环境治理问题的重要途径。工业生产是中国产生碳排放的主要领域之一，约占全国碳排放量的 40%^[7]。在此背景下，探索低碳车间布局问题，对于推动工业碳减排、促进“双碳”目标的实现具有重要意义。

针对低碳车间布局问题，Zhang Z^[8]等面向节能的制造车间设施布局，构建以总负荷运输距离最小、能源消耗最小的多目标优化模型；Li R^[9]等构建以物料运输成本最小、非物流关系最大及碳排放量最小的多目标优化模型，实现了规则场地下工业厂区的低碳布局；肖燕^[10]等提出基于低碳物流的 SLP 改进方法，有效地降低了工厂的物流量及能源消耗；刘琼^[11]等提出了以制造过程总碳排放和总完工时间最小为优化目标的车间布局和调度集成优化模型；耿庆桥^[12]等提出一种结合拓展环境负荷模型与系统布局规划理论的物流园区布局优化方法，实现了物流园区的低碳化布局；李锐^[13]等针对危化品仓库，建立

危险指数最小、物料搬运量最小和碳排放成本最小的多目标优化模型，有效地降低物料搬运量及碳排放成本。

综上所述，在不规则场地布局优化领域，研究者普遍关注物流园区、光伏排布及施工场地等布局优化问题，针对不规则形状的工业厂区车间布局优化的研究较少。在低碳车间布局领域，不少学者已经开始逐步研究以降低碳排放量为优化目标的车间布局问题，但是以工业厂区车间布局为应用场景的低碳化研究较少。因此，将不规则场地下车间布局问题作为研究对象，通过分析工业厂区内各种运输方式所产生的碳排放量，建立以最小化运输总成本（包括碳排放成本）和最大化非物流关系为目标的优化模型，并采用改进的多目标布谷鸟搜索算法进行求解，打破了传统车间布局模型中待规划区域是矩形的限制，实现工业厂区的节能增效，推动绿色生产的实践与发展。

2 不规则工业厂区布局优化模型

2.1 问题描述

将不规则场地栅格化，如图 1 所示。在栅格化过程中，采用“四舍五入”的近似方法，即对于那些面积超过单个栅格面积一半的区域，视为有效建模区域，而对于面积不足的区域，则不纳入考虑范畴。此外，在布局中充分考虑外部环境、既有设施等物流量的影响，引入

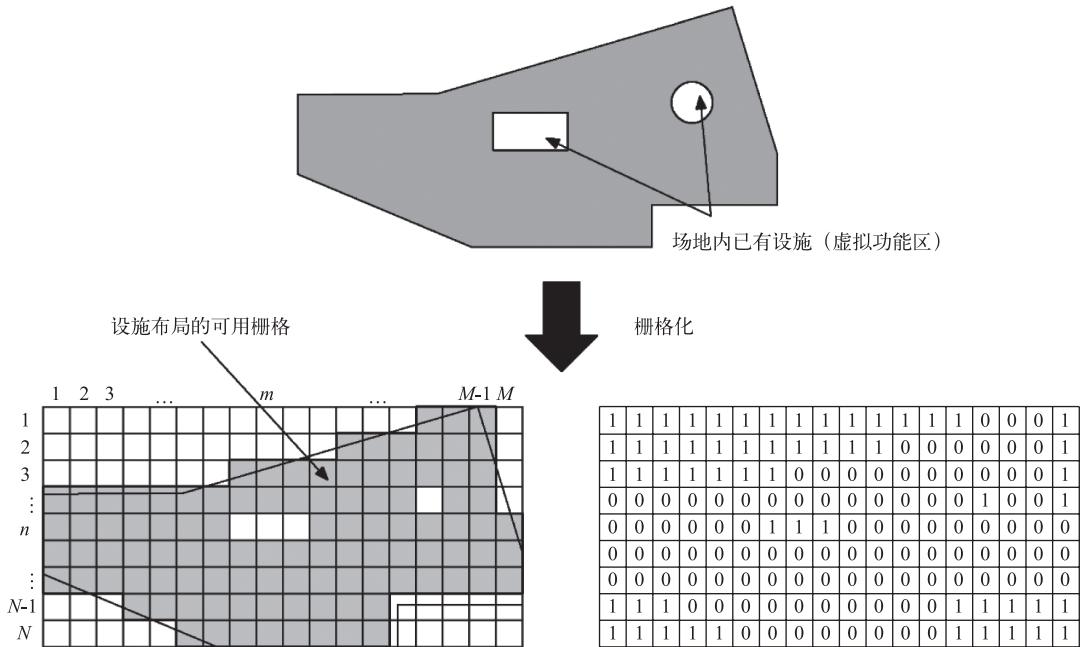


图 1 不规则场地的栅格化表达

虚拟功能区，如厂外矿山、货流出入口、厂内主干道等，虚拟功能区所在栅格为不可用栅格。具体到本文的应用场景，将不可规划区域所在栅格置为 1，可规划区域所在栅格置为 0。

不规则场地中的车间布局问题可以理解为，在给定场地边界范围内，综合考虑各种目标的优化和特定的约束条件，将各作业单元合理地布置在场地可规划栅格中，从而实现多目标协调。在此问题中，作业单元之间的非物流关系、物流量及物流成本等相关参数已知，而各作业单元所占栅格的位置视为变量，提前规划厂区内主干道、货流出入口后，将其作为虚拟功能区加入模型约束中，求解最优布局。

2.2 模型假设

考虑到模型的真实性和可操作性，作以下假设：

1) 厂区边界范围及占地面积大小已知，并按照一定大小的栅格划分待规划区域；

2) 厂区内各作业单元为矩形，作业单元之间的货运交换量、非物流关系大小及面积大小已知；每个作业单元按照其长宽大小，采用“四舍五入”的方法将各作业单元划分为整数个栅格；

3) 车间可以有不同的布置方向，即车间可以水平布置，也可以垂直布置；

4) 各作业单元的坐标基准点为中心点，各作业单元之间的运输距离为各单元所在位置形心之间的正交距离；

5) 厂区内位置固定的作业单元及虚拟功能区内的栅格不属于规划区域内可使用的栅格，且其栅格位置及形心位置已知。

2.3 符号说明

符号说明见表 1。

表 1 模型符号及说明

符号	说明
σ	栅格的边长
M 、 N	厂区内可规划区域的栅格横向、纵向数量
(m_i, n_i)	第 i 个作业单元形心所在栅格的坐标
A	表示规划区域内所有栅格集合
A_i	第 i 个作业单元栅格集合
a_{mn}	在栅格坐标系中，第 m 行、 n 列的栅格
l_i 、 w_i	作业单元实际长、宽

(续)

符号	说明
cap_a 、 cap_b	道路运输和铁路运输一次运输的容量限制
Q_{ij}^z	作业单元 i 、 j 间使用运输方式 z 时的物流量
C_{ij}	作业单元 i 和 j 之间单位运量单位运距的运输成本
D_{ij}	作业单元 i 和车间 j 形心的曼哈顿距离，即正交距离， $D_{ij} = (m_i - m_j + n_i - n_j) \sigma$
Z	运输方式集合， a 为公路运输， b 为铁路运输， c 为皮带运输， d 为管道运输， $a, b, c, d \in Z$
E_z	表示不同运输方式的碳排放量
e_a 、 e_b	分别表示柴油碳排放因子和电力碳排放因子
R_a 、 R_b	公路运输、铁路运输单位距离燃油消耗量
P_c 、 P_d	带式运输机和管道运输机的功率
v_c 、 v_d	带式运输机和管道运输物料的运输速度
α	皮带倾角
C_{CO_2}	碳税税率
y_{ij}^z	决策变量， $y_{ij}^z = \begin{cases} 1, & Q_{ij}^z > 0 \\ 0, & Q_{ij}^z = 0 \end{cases}$

2.4 目标函数

在车间布局中，物流因素和非物流因素决定作业单元的布局，其中物流因素为主，非物流因素为辅。在绿色低碳发展的趋势下，考虑包括碳排放成本在内的运输总成本最小和非物流关系为目标函数，构建不规则场地中车间布局的多目标优化模型。

(1) 运输总成本最小 运输总成本由物料搬运成本和运输碳排放成本两部分组成。厂内物流运输在工业企业的车间布局中具有重要作用，直接影响布局的合理性。运输距离越长，消耗的能源就越多，碳排放量也就越多。通过优化物流运输，减少、消除或合并不必要的搬运操作，可有效缩短运输路径、减少运输距离，实现工业厂区的节能增效。

1) 物料搬运成本 W_1 。物料搬运成本是运输成本的重要组成部分，指所有作业单元之间的运输费用总和，该费用取决于每两个作业单元之间的距离、单位搬运成本和物流量，物料搬运成本是总搬运强度与单位搬运成本的乘积。

$$\min W_1 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k C_{ij} Q_{ij}^z D_{ij} \quad (1)$$

2) 运输碳排放成本 W_2 。碳税被视为一项可用于实施低碳策略的措施,即碳排放成本等于碳排放量乘碳税价格^[14],不同的运输方式碳排放量也会有所不同。工业企业厂内运输常用的运输方式主要为道路运输、铁路运输、带式运输和管道运输四种方式,因此厂区内运输产生的碳排放总量为各类运输方式碳排放总量之和。

目前,碳排放测算方法主要有实测法、物料平衡法、排放因子法^[15]。其中,排放因子法是 IPCC 提出的第一种碳排放估算方法,也是目前广泛应用的方法,排放因子法计算碳排放是用活动数据与相应的碳排放因子的乘积进行碳排放估算^[16]。因此,采用排放因子法测算厂内运输的碳排放量。不同运输方式的碳排放模型具体如下:

$$\begin{cases} E = \sum E_z = E_a + E_b + E_c + E_d \\ E_a = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k e_a R_a D_{ij} \frac{Q_{i,j}^z}{cap_a} y_{ij}^z \\ E_b = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k e_b R_b D_{ij} \frac{Q_{ij}^z}{cap_b} y_{ij}^z \\ E_c = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k e_c \frac{P_c}{v_c} \frac{Q_{ij}^z}{\cos \alpha} y_{ij}^z \\ E_d = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k e_d \frac{P_d}{v_d} Q_{ij} y_{ij}^z \end{cases} \quad (2)$$

则厂区内运输产生的总碳排放成本为

$$W_2 = C_{CO_2} \sum E_z \quad (3)$$

运输总成本为

$$\min F_1 = W_1 + W_2 \quad (4)$$

(2) 非物流关系最大 非物流关系反映了作业单元之间联系的紧密程度,该值越大表明作业单元联系越密切。建立厂区内各作业单元之间非物流关系最大函数如下:

$$\max F_2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k T_{ij} b_{ij} \quad (5)$$

式中, F_2 表示作业单元间非物流关系; T_{ij} 表示作业单元之间的非物流密切度值; b_{ij} 表示密切度关联因子。其中, b_{ij} 由车间之间的实际物流距离 D_{ij} 和最大可能距离 D_{max} 决定。两者之间的转换关系见表 2。

表 2 关联因子量化表

D_{ij}	b_{ij}
$0 < D_{ij} \leq D_{max}/6$	1
$D_{max}/6 < D_{ij} \leq D_{max}/3$	0.8
$D_{max}/3 < D_{ij} \leq D_{max}/2$	0.6
$D_{max}/2 < D_{ij} \leq 2D_{max}/3$	0.4
$2D_{max}/3 < D_{ij} \leq 5D_{max}/6$	0.2
$5D_{max}/6 < D_{ij} \leq D_{max}$	0

2.5 约束条件

1) 厂区边界约束。厂区内所有车间的布置不能超出厂区边界。该约束可以表示为

$$A_k \in A, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

2) 间距约束。厂区内的任意两个车间,在轴方向和轴方向上均不能重叠布置,保障每个作业单元的用地都是独立的。该约束可以表示为

$$\begin{cases} |m_j - m_i| \sigma \geq \frac{1}{2}(l_j + l_i) + \Delta m_{ij} \\ |n_j - n_i| \sigma \geq \frac{1}{2}(w_j + w_i) + \Delta n_{ij} \end{cases} \quad (7)$$

式中, Δm_{ij} 表示车间在 x 方向的最小间距, Δn_{ij} 表示车间在 y 方向的最小间距。

3) 固定位置约束。工业厂区间车间布局涉及到多方面因素,包括厂区内外的运输条件、自然环境因素,以及与厂区内车间有一定联系的现有建设设施。因此,某些车间可能受限于特定区域的安排,或者某些车间不能安排在某个区域,具体如下:

设 S_k 为某一特定的范围的栅格集合, P_i 为某一待布置的作业单元的栅格集合,则某个车间只能布置在特定的位置的表达式为

$$P_i \in S_k \quad (8)$$

而某个车间不能布置在特殊位置的表达式为

$$P_i \notin S_k \quad (9)$$

4) 主干道约束。根据外部交通条件,提前规划厂区内主干道与货流出入口,其余作业单元平行主干道布置。该约束可表示为

$$(m_i - \frac{l_i}{2\sigma}, n_i - \frac{w_i}{2\sigma}) \cap (m_i + \frac{l_i}{2\sigma}, n_i + \frac{w_i}{2\sigma}) \notin D \quad (10)$$

式中, D 为主干道的区域范围。

3 改进多目标布谷鸟搜索算法 (IMOCS)

3.1 算法描述

布谷鸟搜索算法 (Cuckoo Search, CS) [17] 是在 2009 年由 Yang 等提出的一种生物启发式智能优化算法, 该算法将布谷鸟寄生卵行为与莱维飞行模式相结合。随后, Yang 等在 2013 年提出了多目标布谷鸟搜索算法 (Multi-Objective Cuckoo Search, MOCS) [18], 从而将 CS 拓展到多目标领域。该算法结构简单, 易于实现, 具有很好的全局搜索能力, 且方便进行多目标算法改进, 是解决车间布局优化问题的较好选择。虽然 CS 已经在许多领域得到了应用和研究, 但仍存在一些缺陷, 例如收敛速度慢、搜索精度不够、迭代过程中容易陷入局部最优。针对研究的问题, 对多目标布谷鸟搜索算法进行如下改进: ① 采用混合编码方式定义两个种群, 扩大搜索空间的范围, 提高种群多样性; ② 提出多种群进化策略, 加快算法的收敛速度, 避免陷入局部最优; ③ 引入了基于参考点的选择算子, 保证解的多样性和均匀性。改进后的多目标布谷鸟搜索算法 (IMOCS) 流程图如图 2 所示。

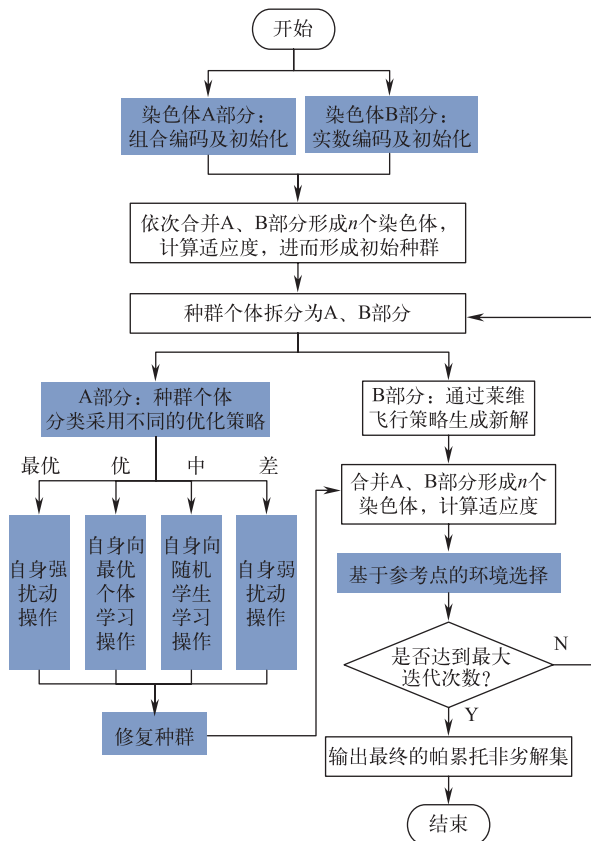


图 2 IMOCS 算法流程图

3.2 编码方式

基因编码由车间的摆放顺序和车间的摆放方向两部分组成, 根据两类变量的各自特点, 采用了组合编码与实数编码结合的混合编码方式。其中, 作业单元的摆放顺序通过组合编码, 记为 A ; 作业单元的布局方向通过实数编码, 记为 B , 0 代表车间横向布置, 1 代表车间纵向布置。染色体编码方式可表示为

$$\begin{cases} A = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\} \\ B = \{\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n\} \end{cases} \quad (11)$$

式中, m_i 为编号是 i 的作业单元; n 为作业单元个数; Δ_i 为作业单元的摆放顺序。

3.3 种群进化策略

在多目标布谷鸟搜索算法的优化过程中引入多种群进化策略, 针对染色体 A 部分和染色体 B 部分采取不同的进化策略, 增加种群的随机性和多样性, 提升算法的收敛精度和速度。

(1) 染色体 A 部分 为了保证种群多样性, 避免陷入局部最优, 引入种群进化策略, 将种群个体分为最优种群个体、优等种群个体、普通种群个体及较差种群个体, 并根据不同的种群个体采取不同的学习进化策略 [19]。

最优种群个体采取强扰动进化操作, 随机选取两个基因位 J1 和 J2, 调换位置, 得到新的种群个体, 如图 3 所示。优等种群个体和普通种群个体采取学习进化操作, 随机选取一个基因位 J1, 再从其他个体找到 J1 的左边或右边作为学习对象, 图中以左边为例, 在待进化个体中将学习对象移至 J1 右侧, J1 与 J2 之间的基因位按照逆序进行编码, 由此得到新的种群个体, 如图 4 所示。对较差种群个体采取弱扰动进化操作, 随机选取两个基因位 J1、J2, 将其之间的基因位逆序排列, 如图 5 所示。

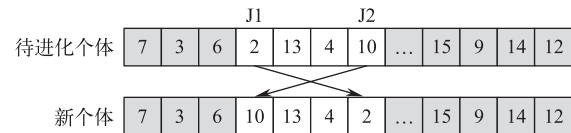


图 3 最优种群个体进化操作

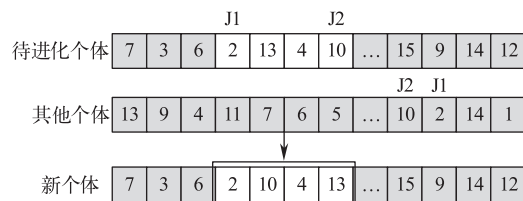


图 4 优等种群个体和普通种群个体进化操作

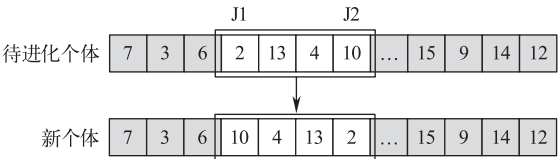


图5 较差种群个体进化操作

(2) 染色体 B 部分 通过莱维飞行策略生成新解，莱维飞行表示如下：

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \alpha \oplus \text{levy}(\beta)$$
 (12)

$$\alpha = \alpha_0 (x_j^{(t)} - x_i^{(t)})$$
 (13)

式中，levy (β) 为服从分布的随机步长，α 为步长，α₀ 为步长控制量，0 < β ≤ 2 为指数，x_i^(t) 为在第 t 次迭代得到的结果中随机选择的一个不同于 x_i^(t) 的个体。

3.4 基于参考点的小生境选择策略

为维持种群多样性，避免种群快速收敛，在解的选择过程中采用参考点选择机制，根据参考点的小生境数评估该参考点的密度，保留小生境数较少的参考点对应的个体，使得种群不断寻优，最终生成一组在 Pareto 前沿上均匀分布的解集。基于参考点的小生境选择策略步骤如下。

1) 设置参考点。通过采用 Das 和 Dennis 提出的单层参考点生成方法在目标空间中构造参考点。每一个参考点集合 Q = {λ₁, λ₂, ..., λ_M} 满足式 (14)。

$$\lambda_j \in \left\{ \frac{0}{p}, \frac{1}{p}, \dots, \frac{p}{p} \right\}, \sum_{i=1}^m \lambda_j = 1$$
 (14)

式中，m 为目标向量维度；p 为坐标轴分段数，参考点规模为 N = C^{m-1}_{p+m-1}，λ_j 为参考点。

2) 关联操作与个体保留。将已经在种群中的每个解都关联到一个参考点，关联个体之后进行保留操作，计 ρ_k 表示临界非支配层集合 {F₁, F₂, ..., F_{L-1}} 中与参考点联系的个体数目，① 若 ρ_k = 0，选取离参考线最近的个体加入下一代种群中，若 ρ_k = φ，则重新选取参考点；② 若 ρ_k > 1，随机选择个体加入下一代种群中。重复以上操作直至子代种群个数达到 N。

4 实例分析

4.1 案例介绍

某水泥厂项目现建设一条 4 000t/d 熟料新型干法水泥生产线，年产熟料 120 万吨，年产水泥 150 万吨，属于大型厂。该项目建设场地呈不规则形状，场地面积约

24.97 hm²，西侧和北侧均为乡道，厂区所在地区盛行东北风，厂区边界如图 6 所示。需考虑场地外部交通条件，假设厂区货流出入口位于厂区西侧。

根据《水泥厂设计规范》(GB 50295—2016)，本实例中水泥厂主干道宽度设置为 9m，通道宽度为 21m，主干道连接一个货流出入口。在此试验中，栅格尺寸设置为 9m × 9m，按照“四舍五入”的方法将待规划场地栅格化处理。

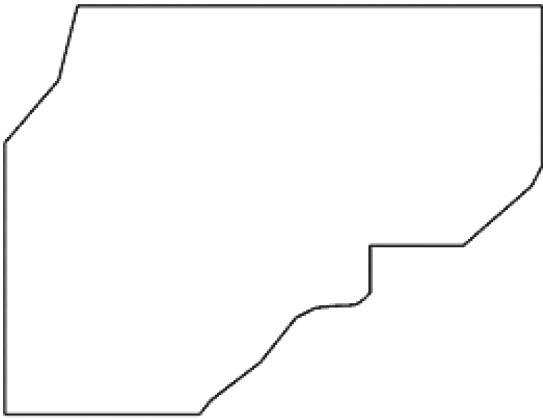


图6 水泥厂厂区边界

水泥厂车间按照水泥生产工艺和功能分区划分为 12 个作业单元，其中，将工艺联系紧密或产生高温的车间联合布置，具体见表 3。作业单元之间的物料搬运量和非物流关系，见表 4 和表 5，表中编号 1~12 依次对应表 3 中作业单元的编号，编号 13、14 为虚拟功能区，编号 13 为水泥厂外部矿山，编号 14 为水泥厂的主要货流出入口，编号 15 为提前规划好的厂区内部主干道。同时，考虑到厂址所在地区盛行风向为东北风，厂区西侧和北侧邻路，将厂前区作为固定车间布置。

表3 作业单元划分表

功能分区	序号	作业单元名称	作业单元面积 /m ²	l _i × w _i	栅格数
原料区	1	辅助原料堆棚	3 362	82 × 41	9 × 5
	2	辅助原料预均化堆场	6 837	159 × 43	18 × 5
	3	原煤堆棚	3 600	120 × 30	13 × 3
	4	煤预均化堆场	8 064	192 × 42	21 × 5
	5	石膏混合材堆棚	3 840	128 × 30	14 × 3

(续)					
功能分区	序号	作业单元名称	作业单元面积 /m ²	$l_i \times w_i$	栅格数
烧成区	6	原料配料	1 508	58 × 26	6 × 3
	7	主生产区(窑系统)	19 890	221 × 90	25 × 10
	8	熟料库	4 096	64 × 64	7 × 7
制成区	9	水泥配料及粉磨系统	8 056	152 × 53	17 × 6
	10	水泥包装	5 605	95 × 59	11 × 7
辅助服务区	11	辅助生产设施区	2 116	46 × 46	5 × 5
	12	厂前办公区	6 160	80 × 77	9 × 9

表 4 作业单元之间物料搬运量

皮带运输物流量汇总			道路运输物流量汇总		
序号	从 - 至	货物流量(万 t/a)	序号	从 - 至	货物流量(万 t/a)
1	1-2	33.824 1	1	9-10	150.000 0
2	2-6	33.824 1	2	14-1	55.880 3
3	3-4	16.863 4	3	14-3	17.939 7
4	4-7	16.863 4	4	14-5	7.299 7
5	5-9	31.356 7	5	10-14	150.000 0
6	6-7	183.030 5			
7	7-8	113.037 2			
8	8-9	6.962 8			
9	13-6	150.770 7			

表 5 作业单元之间的非物流关系

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	—	E/3	I/2	U/0	I/2	U/0	O/1	O/1	U/0	O/1	O/1	X/-1	U/0	E/3
2	E/3	—	U/0	I/2	U/0	E/3	O/1	U/0	U/0	U/0	O/1	X/-1	U/0	I/2
3	I/2	U/0	—	E/3	I/2	U/0	U/0	O/1	U/0	O/1	O/1	X/-1	U/0	E/3
4	U/0	I/2	E/3	—	U/0	U/0	I/2	U/0	U/0	U/0	O/1	X/-1	U/0	O/1
5	I/2	U/0	I/2	U/0	—	U/0	O/1	O/1	E/3	O/1	O/1	X/-1	U/0	E/3
6	U/0	E/3	U/0	U/0	U/0	—	A/4	U/0	U/0	U/0	O/1	X/-1	E/3	U/0
7	O/1	O/1	U/0	I/2	O/1	A/4	—	A/4	I/2	O/1	I/2	X/-1	U/0	U/0
8	O/1	U/0	O/1	U/0	O/1	U/0	A/4	—	E/3	O/1	O/1	X/-1	U/0	U/0
9	U/0	U/0	U/0	U/0	E/3	U/0	I/2	E/3	—	A/4	I/2	X/-1	U/0	U/0
10	O/1	U/0	O/1	U/0	O/1	U/0	O/1	O/1	A/4	—	O/1	X/-1	U/0	A/4
11	O/1	O/1	O/1	O/1	O/1	O/1	I/2	O/1	I/2	O/1	—	I/2	U/0	U/0
12	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	X/-1	I/2	—	X/-1	X/-1
13	U/0	U/0	U/0	U/0	U/0	E/3	U/0	U/0	U/0	U/0	U/0	X/-1	—	U/0
14	E/3	I/2	E/3	O/1	E/3	U/0	U/0	U/0	U/0	A/4	U/0	X/-1	U/0	—

4.2 相关参数及结果分析

(1) 参数设置 为验证模型在实际应用中的适用性,基于上述案例背景,采用 IMOCS 对该水泥厂车间布局进行优化求解。根据厂区实际生产情况,道路运输采用载重量为 30t 的卡车,单位距离道路运输费用为 1.5 元 / (t·km),单位距离道路运输燃油消耗量为 25.2 kg/100 km,单位距离皮带运输费用为 0.5 元 / (t·km),皮带

运输机速度为 1.5m/s。参考生态环境部发布的《企业温室气体排放核算方法与报告指南 发电设施》,柴油碳排放系数为 3.10tCO₂ · t⁻¹。依据我国生态环境部办公厅发布的《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》,电力碳排放系数为 0.570 3kgCO₂/kWh。碳税税率取 10 元 / t^[20]。

算法参数设置:种群大小为 20,最大迭代次数为

100。

(2) 算法性能评价指标 采用反世代距离 (Inverted Generational Distance, IGD) [21] 对算法性能进行评价。IGD 值越小, 表明算法的收敛性能和分布性能越好, 即算法的综合性能好。IGD 值计算方式:

$$IGD(PF, PF^*) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n dis(PF, PF^*) \tag{15}$$

式中, PF 表示 Pareto 前沿; PF^* 为真实 Pareto 前沿的一组采样点; n 表示分布在 Pareto 前沿中非支配解的个数。

(3) 结果分析 多次运行算法, 将目标函数值过大、过早收敛和不符合工艺流程的布局结果排除, 最终得到一系列需要权衡的 Pareto 解。为验证 IMOCS 的有效性, 从 Pareto 解集中选择一个优解进行比较, 布局图如图 7 所示。

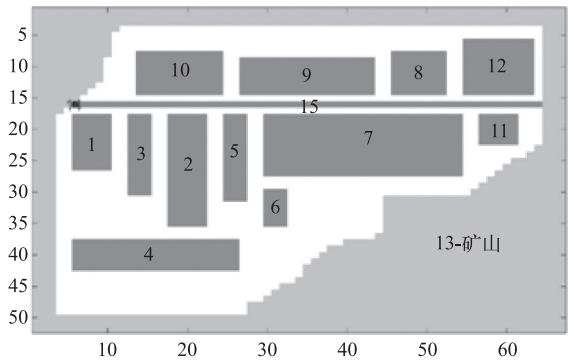


图 7 布局方案图

不同算法的 IGD 值随着迭代次数的增加不断减小, IMOCS 约在 27 代左右收敛、MOCS 约在 57 代左右收敛, IGD 值分别为 2.5×10^6 、 3.3×10^6 , IGD 值的变化情况如图 8 所示。即在整个求解过程中, IMOCS 的 IGD 值相较于 MOCS 小, 并且其收敛速度快于 MOCS, 说明 IMOCS 寻优效果好, 在迭代过程中能较快地找到最优解集, 收敛精度也优于其他算法。因此, 综合考虑种群多样性、收敛性, 所提出的算法获得的 Pareto 前端质量较好。

MOCS 与 IMOCS 求解结果见表 6。由表 6 可知, 采用 IMOCS 求解, 运输总成本相对于初始方案优化了 27.11%, 非物流关系相对于初始方案优化了 7.86%; 与传统的 MOCS 相比, 运输总成本相对于 MOCS 优化了 14.67%, 非物流关系相对于 MOCS 优化了 5.88%, 验证了不规则场地中车间布局模型的有效性。

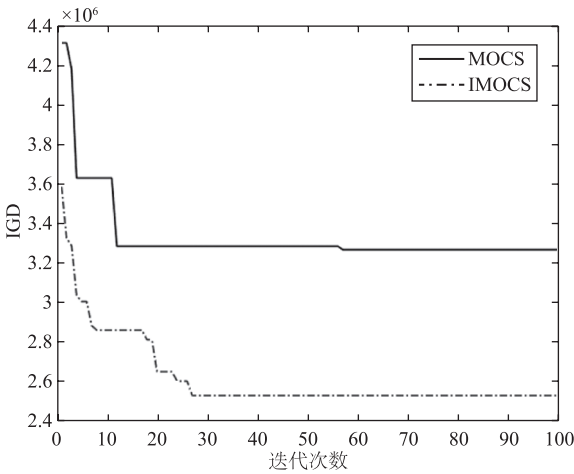


图 8 不同算法 IGD 值对比结果

表 6 不同算法求解结果对比

目标函数		运输总成本 F_1 /元	非物流关系 F_2
初始布局方案		4.39×10^6	106.8
算法	MOCS	3.75×10^6	108.8
	IMOCS	3.20×10^6	115.2
优化效果(%)	MOCS	14.58	1.87
	IMOCS	27.11	7.86

5 结论

采用栅格数据结构描述工业厂区边界的不规则性, 构建了运输总成本最小 (包括碳排放成本) 和非物流关系最大的多目标车间布局优化模型。

针对 MOCS 在求解多目标问题求解时, 存在收敛性和多样性难以平衡的问题, 采用混合编码、多种群进化策略和基于参考点的小生境选择策略等技术改进了 MOCS, 设计了一种 IMOCS。实验结果表明, IMOCS 在求解不规则场地车间布局问题上具有较高的求解效率和求解质量。

本研究仅考虑了物流因素和非物流因素对车间布局的影响, 目标比较单一。针对不规则场地有较多三角地带, 未来研究可探索利用率或建筑系数的影响, 以期更好地为不规则场地中车间布局提供科学依据。

参考文献

[1] NING X, QI J Y, WU C L, et al.Reducing noise pollution by planning construction site layout via a multi-objective optimization model[J]. Journal of

- cleaner production, 2019 (222) : 218-230.
- [2] ZAVARI M, SHAHHOSSEINI V, ARDESHIR A, et al. BIM-based estimation of inputs for site layout planning and locating irregularly shaped facilities[J]. Automation in Construction, 2022 (141) : 104431.
- [3] 孙刘诚, 孙焰, 郑文家. 不规则物流园区功能区块布局模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017, 17 (2) : 168-175.
- [4] 孔月萍, 毛立栋, 赵天悦, 等. 不规则场地中跟踪式光伏阵列的优化排布方法[J]. 电源技术, 2019, 43 (5) : 829-831, 852.
- [5] 彭广益, 季婕, 蒋柳鹏, 等. 基于格栅化方法的不规则临港产业区布局研究[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37 (2) : 135-142.
- [6] 刘燕华, 李宇航, 王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31 (9) : 1-5.
- [7] 史丹. 绿色发展与全球工业化的新阶段: 中国的进展与比较[J]. 中国工业经济, 2018 (10) : 5-18.
- [8] ZHANG Z W, WU L H, WU Z Y, et al. Energy-saving oriented manufacturing workshop facility layout: A solution approach using multi-objective particle swarm optimization[J]. Sustainability, 2022, 14 (5) : 2788.
- [9] LI R, CHEN Y, SONG J Z, et al. Multi-Objective Optimization Method of Industrial Workshop Layout from the Perspective of Low Carbon[J]. Sustainability, 2023, 15 (16) : 12275.
- [10] 肖燕, 程云康, 周康渠. 基于低碳物流的SLP法在工厂布局的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2011, 25 (11) : 24-29.
- [11] 刘琼, 赵海飞. 基于多目标果蝇算法面向低碳的车间布局与调度集成优化[J]. 机械工程学报, 2017, 53 (11) : 122-133.
- [12] 耿庆桥, 贾元华, 吴江, 等. 考虑碳排放影响的物流园区布局优化研究[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47 (1) : 115-125.
- [13] 李锐, 严振宇, 宋金昭, 等. 基于低碳物流的危化品仓库堆垛布局优化研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20 (2) : 61-68.
- [14] 宋丽英, 赵世超, 卞骞, 等. 低碳视角下城乡区域混合车队生鲜配送路径问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23 (6) : 250-261.
- [15] 谢守红, 王利霞, 邵珠龙. 国内外碳排放研究综述[J]. 干旱区地理, 2014, 37 (4) : 720-730.
- [16] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34 (2) : 248-258.
- [17] YANG X S, DEB S. Cuckoo search via Lévy flights[C]//2009 World congress on nature & biologically inspired computing (NaBIC). IEEE, 2009: 210-214.
- [18] YANG X S, DEB S. Multiobjective cuckoo search for design optimization[J]. Computers & Operations Research, 2013, 40 (6) : 1616-1624.
- [19] 葛能鹏, 单武斌, 陈金兰. 人因视角下船舶管加工车间设备布局优化研究[J]. 机械设计, 2023, 40 (7) : 70-76.
- [20] 李珺, 杨斌, 朱小林. 绿色多式联运随机优化策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2018, 18 (4) : 11-18.
- [21] 王亚良, 高康洪, 范欣宇, 等. 面向不确定性的车间布局调度集成建模与优化[J]. 机械工程学报, 2023, 59 (5) : 235-246.

收稿日期: 2024-07-25