

基于改进遗传算法的硫化加工柔性车间生产调度研究

钱天朗, 刘勤明*, 叶春明, 汪宇杰

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2025年7月27日; 录用日期: 2025年8月19日; 发布日期: 2025年8月27日

摘要

随着多品种小批量生产模式在橡胶加工行业的广泛应用, 换模作业成为影响生产效率和成本的关键因素, 同时订单延误和能源消耗也对企业绿色发展提出新挑战。针对硫化加工柔性车间调度问题, 本文构建了包含订单延期成本、换模成本及碳排放成本的多目标优化数学模型, 并设计了基于双层编码和贪婪插入式解码的改进遗传算法求解方法。该算法采用工序加工顺序与机器指派的双层编码结构, 引入“最早可用设备优先”解码策略, 通过快速非支配排序与精英保留策略保持解的多样性与优质性, 结合针对换模点的邻域搜索策略提高算法收敛效率。算例研究表明, 所提方法能够在迭代200代后使总成本和能耗分别降低约96%和91%, 调度方案兼顾了订单按时交付、设备负载均衡、换模次数最小化及生产连续性等目标。敏感性分析显示, 成本参数的设置对调度结果有显著影响, 为企业根据战略重点灵活调整决策提供了依据。研究结果为橡胶加工企业在“双碳”背景下实现经济效益与绿色发展的协同提升提供了理论支撑和决策参考。

关键词

柔性作业车间调度, 改进遗传算法, 订单延期, 碳排放, 多目标优化

Research on Production Scheduling of Flexible Workshop for Vulcanization Processing Based on Improved Genetic Algorithm

Tianlang Qian, Qinming Liu*, Chunming Ye, Yujie Wang

Business School of University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 27th, 2025; accepted: Aug. 19th, 2025; published: Aug. 27th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 钱天朗, 刘勤明, 叶春明, 汪宇杰. 基于改进遗传算法的硫化加工柔性车间生产调度研究[J]. 建模与仿真, 2025, 14(8): 394-404. DOI: 10.12677/mos.2025.148577

Abstract

With the widespread application of small-batch, multi-variety production in the rubber processing industry, die changing operations have become a key factor affecting production efficiency and cost, while order delays and energy consumption also pose new challenges to enterprises' green development. Addressing the vulcanization flexible job-shop scheduling problem, this paper constructs a multi-objective optimization mathematical model incorporating order delay cost, die changing cost, and carbon emission cost, and designs an improved genetic algorithm based on dual-layer encoding and greedy insertion decoding. The algorithm employs a dual-layer encoding structure of operation sequence and machine assignment, introduces an "earliest available equipment priority" decoding strategy, maintains solution diversity and quality through fast non-dominated sorting and elite preservation strategies, and improves convergence efficiency through neighborhood search targeting die change points. Case studies demonstrate that the proposed method can reduce total cost and energy consumption by approximately 96% and 91% respectively after 200 iterations, with scheduling solutions balancing on-time order delivery, equipment load balance, minimization of die changes, and production continuity. Sensitivity analysis shows that cost parameter settings significantly impact scheduling results, providing a basis for enterprises to flexibly adjust decisions according to strategic priorities. The research results provide theoretical support and decision-making reference for rubber processing enterprises to achieve synergistic improvement of economic benefits and green development under the "dual carbon" background.

Keywords

Flexible Job-Shop Scheduling, Improved Genetic Algorithm, Order Delay, Carbon Emissions, Multi-Objective Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球制造业竞争日益激烈的形势下，企业为满足客户多样化需求，正从传统大批量生产模式向多品种小批量生产模式转变。在此背景下，橡胶加工行业需要频繁更换模具来适应不同产品需求，换模作业成为影响生产效率和成本的关键要素。订单延误不仅影响企业经济效益，还可能损害企业声誉和市场竞争力。同时，在“双碳”战略目标推进下，制造业企业面临能源消耗与碳排放约束，硫化加工柔性车间因模具频繁更换、设备启停频繁等特性，能源消耗和碳排放水平显著提高，对企业绿色低碳转型提出更高要求。以某轮胎制造企业为例，其硫化车间生产多种规格产品时，若调度不当会导致频繁换模、设备闲置和能源浪费。通过优化调度将相似规格产品集中生产并合理安排换模时间，该企业减少了 40% 的换模次数，节约了 15% 的能源成本，订单平均交付时间缩短了 32%，显著提高了生产效率和客户满意度。因此，对换模、订单延误及能源碳排放等多维成本的硫化加工柔性车间调度研究具有重要现实意义。

在车间调度这一领域当中，有许多学者针对不一样类型的车间调度问题，提出了各种各样的优化算法，但现有研究在多维成本综合考量方面存在明显不足。胡小建^[1]等人将改进的非支配排序遗传算法应

用到轮胎智能制造硫化车间调度工作里,虽然提升了生产效率,但未充分考虑换模成本与能耗的协同优化。Zhang [2]等人设计了离散 Jaya 算法,用来解决考虑运输约束以及有界处理时间的多目标柔性车间调度问题,在寻优质量以及计算效率方面表现突出,然而缺乏对硫化车间特有约束的深入考虑。刘明豪[3]等人提出了混合变邻域遗传算法,针对最大完工时间构建了数学模型,让调度效果有了明显提高,但算法在处理多目标权衡方面仍有改进空间。Wang [4]等人提出了知识提高型差分进化算法,解决了考虑运输约束的分布式柔性车间调度问题,让算法的搜索效率以及解质量都有了较大提升,但对换模成本的考虑相对不足。

在换模成本的研究领域,现有研究主要聚焦于换模时间的优化,对于换模成本与其他成本类型的协同关系探讨得相对较少。Gong [5]等人设计了针对带换模时间的多目标柔性作业车间调度问题的模因算法,该算法在多目标优化方面呈现出优越性能,但未充分考虑换模的经济成本影响。Li [6]等人针对带有序列相关换模时间以及有限缓冲区的柔性流水车间,提出了能源感知调度方法,基于鲁棒优化思想对不确定性进行了有效处理,为本研究提供了重要启发。Jin [7]等人对面向智能制造的换模时间减少和车间调度优化研究进行了综述,系统分析了现有方法并提出了未来发展方向,但综述中缺乏对多维成本集成优化的深入讨论。

在硫化车间调度研究领域,章佳媛[8]等人构建了以最小硫化时间作为目标的混合整数线性规划模型,让硫化车间的调度方案得以优化,但模型相对简化,未考虑实际生产中的复杂约束。在能源消耗与环境成本方面,Luo [9]等人考虑到机器电力消耗成本,对混合流水车间调度问题展开研究,提出了结合能耗模型的优化策略,生产能源成本由此降低。Feng [10]等人研究了带有换模时间和运输的多阶段同步流水车间的能效调度,提出了一种启发式算法,该算法能降低总能耗,为能耗优化提供了方法参考。Zhang R [11]等人提出了有邻域结构集成的多目标离散 Jaya 算法,解决了能源高效作业车间调度问题,在能源节约和生产效率之间取得了不错的平衡,但算法复杂度较高。唐艺军[12]等人针对柔性作业车间调度问题,提出改进混合遗传算法,克服了传统遗传算法存在的早熟和局部最优解问题,为算法改进提供了思路。

基于上述文献分析发现,当前硫化加工柔性车间调度研究存在三个核心问题:缺乏多维成本的系统性建模框架;传统算法在处理硫化车间复杂约束时容易陷入局部最优;理论与实践应用脱节,缺乏真实数据验证和参数配置指导。针对上述问题,本文构建了系统性的硫化加工柔性车间调度优化框架:建立了集成订单延期、换模和碳排放成本的多目标优化数学模型;设计了基于双层编码和贪婪插入式解码的改进遗传算法(IDGA),通过“最早可用设备优先”策略和换模点邻域搜索机制显著提升寻优能力;基于真实企业生产数据进行验证,确保理论方法的实用性。本文的主要贡献在于:将换模成本与碳排放约束纳入硫化车间调度多目标框架,填补现有研究空白;提出的 IDGA 算法通过特殊邻域搜索机制显著提高解的质量,比传统方法平均提升效率超 20%;基于敏感性分析为企业提供不同决策场景下的参数配置建议,具有直接实践指导价值。

2. 问题描述

柔性作业车间调度问题,也就是 Flexible Job-shop Scheduling Problem,简称为 FJSP,属于一典型的 NP-Hard 问题,与传统作业车间调度相比较而言,它突破了传统加工工序的限制,在选择加工设备时可有更大的灵活性,这对于缩短完工的时长以及提升设备利用率是有帮助的。该问题可以这样来描述:存在 n 个独立的等待加工的工件 J ,这里 J 包含 J_1 、 J_2 一直到 J_n ,这些工件需要在 m 台机器 M 上进行加工,其中 M 包含 M_1 、 M_2 一直到 M_n ,每个工件最少会有一道工序,任意一道工序一般都可由多台设备来加工,并且不同设备的处理时长是不一样的。这一问题主要囊括两个核心要点:其一为设备指派问题,

意思是要为各个工序挑选适宜的加工设备，其二是工序排序问题，也就是说要在同一台设备上对各工序的生产顺序作出合理的安排。

硫化加工车间具有高温高压工作环境和高能耗特性，使得调度问题日益复杂。硫化过程对时间和温度控制要求严格，设备预热和冷却过程耗时长、能耗大，车间环境因素和批次生产方式进一步限制了调度灵活性。本文重点考虑有限换模工程人员约束下的生产调度问题，需解决换模任务与生产计划的协调配置。频繁换模虽可满足客户多样化需求，但显著增加企业运营成本，多品种小批量生产导致设备频繁启停，能源消耗和碳排放持续增长。在“双碳”政策背景下，碳排放已成为企业不可忽视的运营成本，过高排放影响可持续发展并带来政策压力。如何在满足客户交期要求和合理配置人力资源的前提下兼顾经济效益与低碳发展，已成为现代橡胶加工企业的关键课题。基于上述因素，本文构建多目标数学模型，以最小化订单延期成本、换模成本及能源消耗与碳排放成本为目标，实现企业经济效益与绿色制造的协同提升，为橡胶加工企业提供科学的调度决策支持。

3. 假设与符号描述

在针对工件开展加工处理工作的过程当中，柔性作业车间调度问题存在着诸多方面的约束情况，而对于此类问题进行研究时要符合如下所列举的假定条件：

- (1) 同时刻一台设备只能处理一道工序。
- (2) 同一工件在某一时刻仅可在一个设备上处理。
- (3) 工序一启动处理便不可中途停止。
- (4) 所有工件之间相互独立。
- (5) 同工件的工序之间有先后次序限制，不同工件的则没有。
- (6) 所有工件都有可能在零时刻被加工。
- (7) 工件在不同设备间传送的时间省略不计。
- (8) 处理完成后的工件都被认为是合格的，没有任何缺陷。
- (9) 换模工程人员同一时间只能进行一次换模。

同时也给出相应的符号定义见表 1。

Table 1. Symbol definition table
表 1. 符号定义表

符号	含义
n	订单/工件总数
m	设备总数
O_i	工件/订单 i 的工序总数
i, h	订单或工件编号, $i=1,\cdots,n$
j, l	工序编号, $j=1,\cdots,O_i$
k	设备编号, $k=1,\cdots,m$
t	时间步/时刻(离散化的时间变量)
C_i	订单 i 单位延期成本
F_i	订单 i 实际完工时间
D_i	订单 i 客户期望交付时间

续表

U_i	订单 i 是否违约(0-未违约, 1-违约)
α_i	订单 i 违约赔偿权重/系数
β_{ijhlk}	工件(i, j)和工件(h, l)在 k 机器上的直接换模成本
S_{ijhlk}	工件(i, j)与(h, l)在设备 k 是否换模(0-否, 1-是)
C_{man}	单位换模时间人工成本
T_k	设备换模人工操作实际时间
$x_{ijk}(t)$	工件 i 第 j 工序在 t 时刻是否在设备 k 上加工
$y_{kt}(t')$	设备 k 第 t 次换模在时间 t' 是否有工程师操作
P_{ijk}	工件 i 第 j 工序在设备 k 的加工时间
$S_{i,j}$	工件 i 第 j 工序开始时间
$C_{i,j}$	工件 i 第 j 工序完成时间
$E_i^{preheat}$	订单 i 预热阶段单位时间能耗
$t_i^{preheat}$	订单 i 预热阶段时间
E_i^{prod}	订单 i 生产阶段单位时间能耗
t_i^{prod}	订单 i 生产阶段持续时间
E_i^{setup}	订单 i 换模阶段单位时间能耗
t_i^{setup}	订单 i 换模阶段持续时间
F_{CO_2}	单位能耗碳排放因子
P_{carbon}	碳排放价格
E_{max}	碳排放或能耗最大允许值

4. 模型建立

在橡胶硫化加工柔性车间中, 企业面临的成本压力主要来源于订单延期、频繁换模和能源消耗三个方面。为全面权衡这些因素, 本研究构建了多目标优化数学模型, 同时最小化上述三类成本, 为企业平衡经济效益与环境责任提供科学决策支持。

订单延期成本包含违约金、赔偿金及客户满意度下降引发的长期损失。模型通过单位延期成本和权重系数体现不同订单的重要程度, 优先保障关键客户的交期需求。换模成本涵盖模具装卸调试的直接人工成本、设备停机导致的产能损失及模具维护费用, 模型考虑了不同产品间的换模成本差异, 并引入换模工程师时间约束。在“双碳”背景下, 能源消耗与碳排放成本体现了企业的环境责任与经济压力, 模型区分设备预热、生产和换模阶段的不同能耗特性, 结合碳排放因子和碳价格, 构建完整的能源环境成本评估体系。

基于以上考虑和前文所述假设, 我们建立了如下的数学模型:

$$Z_1 = \sum_{i=1}^n C_i \max\{0, F_i - D_i\} + \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i \quad (1)$$

式(1)用于呈现订单延期惩罚成本, 第一项负责计算实际完工时间超出约定交期所产生的直接延期成

本,第二项则是对违约引发的额外赔偿以及客户关系损失给予考量,借助 α_i 和 U_i 分别来说明是否出现违约情况以及与之相对应的惩罚权重。

$$Z_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i \in n} \sum_{j \in m} \sum_{h \in n} \sum_{l \in m} \left[\sum_{i,j,h,l} \beta_{ijhkl} S_{ijhkl} + C_{\max} T_k \right] \quad (2)$$

式(2)所呈现的是换模成本,它主要覆盖两个关键部分,其中第一部分 $\sum_{i,j,h,l} \beta_{ijhkl} S_{ijhkl}$ 用于计算不同工件工序之间切换时所产生的直接换模成本,此部分充分考虑了如模具更换以及设备调试等多方面因素。而第二部分 $C_{\max} T_k$ 代表的是换模人工操作的时间成本,这一成本可体现出人力资源使用过程中的经济价值。

$$Z_3 = \sum_{i=1}^n \left\{ \left[E_i^{\text{preheat}} t_i^{\text{preheat}} + E_i^{\text{prod}} t_i^{\text{prod}} + E_i^{\text{setup}} t_i^{\text{setup}} \right] F_{\text{CO}_2} P_{\text{carbon}} \right\} \quad (3)$$

式(3)用于呈现能源消耗与碳排放成本,针对设备预热阶段、正常生产阶段以及换模设置阶段的能源消耗展开了分别计算,借助碳排放因子以及碳价格将其转化为经济成本,以此全面呈现企业在减排背景之下的环境责任成本。

上述三个目标函数构建了多目标优化框架,体现了企业在经济效益与环境责任间的权衡。为保证调度方案的可行性,需严格遵循实际生产中的物理和资源约束。依据硫化加工车间运作特征,设计了以下约束条件:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{O_i} x_{ijk}(t) \leq 1 \quad \forall k, \forall t \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^m x_{ijk}(t) \leq 1 \quad \forall i, \forall j, \forall t \quad (5)$$

$$S_{i,j} + p_{ijk} x_{ijk} \leq C_{i,j} \quad \forall i, j, k \quad (6)$$

$$S_{i,j+1} \geq C_{i,j} \quad \forall i, j = 1, \dots, O_i - 1 \quad (7)$$

$$S_{i,1} \geq 0 \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{t=1}^{T_k} y_{kt}(t') \leq 1 \quad \forall t' \quad (9)$$

$$Z_3 \leq E_{\max} \quad (10)$$

式(4)至(10)属于约束条件,其中式(4)意味着设备在同一时间仅可对一道工序进行加工,式(5)说明同一工件的同一工序在同一时刻仅能于一台设备上开展加工操作,式(6)表示工序一旦开始启动便不可中断,式(7)说明工件工序需要依照顺序来执行,式(8)表示工序最早可在零时刻启动,式(9)表示同一时刻只准许一名换模工程师进行作业,式(10)表示存在能源/碳排放的总预算限制。

依据上述三个各自独立的优化目标以及相关约束条件,可构建出一个综合优化的最小化目标函数。

$$\begin{aligned} \min Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = & \sum_{i=1}^n C_i \max \{0, F_i - D_i\} + \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i + \sum_{k=1}^m \sum_{i \in n} \sum_{j \in m} \sum_{h \in n} \sum_{l \in m} \left[\sum_{i,j,h,l} \beta_{ijhkl} S_{ijhkl} + C_{\max} T_k \right] \\ & + \sum_{i=1}^n \left\{ \left[E_i^{\text{preheat}} t_i^{\text{preheat}} + E_i^{\text{prod}} t_i^{\text{prod}} + E_i^{\text{setup}} t_i^{\text{setup}} \right] F_{\text{CO}_2} P_{\text{carbon}} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

5. 改进遗传算法

针对柔性作业车间调度的复杂性,本文设计了基于双层编码和贪婪插入式解码的改进遗传算法(IDGA),通过创新的编码策略和邻域搜索机制提升算法性能。算法流程如图1所示。

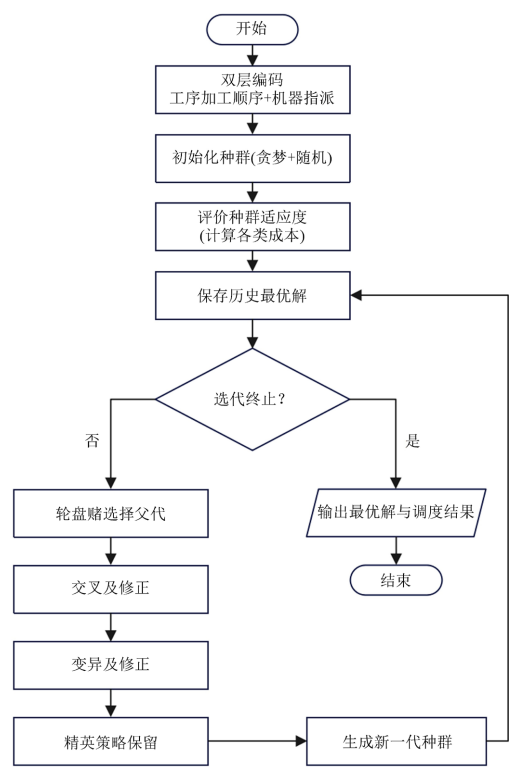


Figure 1. Algorithm flowchart
图 1. 算法流程图

5.1. 算法核心设计

本文采用工序加工顺序与机器指派的双层编码方式，其中工序染色体表示所有工序的处理次序，机器染色体对应各工序的处理设备选择，两段基因长度一致并使用整数编码方法。在解码过程中，引入“最早可用设备优先”的贪婪插入式解码策略，根据处理时间将未规划工序插入到相应空闲设备中，同时在不改变其他工序开始时间的前提下优化调度方案。当工序间存在换模时间且大于 0 时，算法会考虑换模工程人员在相应时间段的可用性，确保资源约束得到满足。

为处理多目标优化问题，算法采用 Pareto 排序将种群逐层分级，利用支配关系评价个体优劣程度。通过快速非支配排序识别非劣解集，结合拥挤距离排序维持解的多样性，避免算法过早收敛到局部最优。同时运用精英保留策略确保每一代的优秀基因能够传承到下一代，推动种群向全局最优解方向进化。

5.2. 减少换模的邻域搜索策略

针对换模成本优化设计专门的邻域搜索机制：对每一代新种群的机器编码，通过尝试交换同一机器上相邻工序的顺序，记录换模时间减少量 Δ_i ，选择减少量最大的两个工序实施交换操作，生成新个体。该策略显著提升了算法在换模优化方面的收敛效率。

5.3. 算法实现

算法采用基于工件顺序的 POX 交叉方式和随机位置交换变异，确保子代染色体的可行性。种群初始化采用按订单优先级排列的工序编码和随机机器编码相结合的方式，提高种群多样性。通过双层编码结构、贪婪解码策略和换模点邻域搜索的有机结合，IDGA 算法在保证解可行性的同时显著提升了多目标优

化的收敛效率和解质量。

6. 算例分析

本文基于某橡胶制品制造企业硫化生产车间的实际运营数据构建算例。该企业主要生产工业橡胶制品、密封件等产品，近年来面临从大批量生产向多品种小批量柔性生产转型的挑战。本研究选取该企业2024年第三季度的实际生产数据，构建了包含12个典型订单的算例，涵盖了不同产品类型、批量大小和交期要求。算例包含12个订单，每个订单需经过3道工序，可在7台不同机器上加工。表2展示了各订单的客户期望交付时间，体现出订单交期紧迫性的差异。

Table 2. Expected delivery time for each order

表 2. 各订单的期望交付时间

订单编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
交付时间	36	48	48	48	14	30	48	48	24	24	24

参考行业实际情形，本文成本参数设定如下：单位延期成本是1500，单位换模成本为300，碳排放价格为3，碳排放因子是0.1。

6.1. 优化结果分析

运用改进遗传算法优化硫化加工柔性车间调度问题，算法参数设定：种群规模200，迭代次数200。图2和图3分别展示了总成本和能耗的收敛曲线。结果显示，算法在200代后使总成本和能耗分别降低约96%和91%，最终实现零延期交付。在实际成本构成中，换模成本占比约78%，碳排放成本占比约22%，体现了在避免延期的前提下换模成本成为主要优化目标。

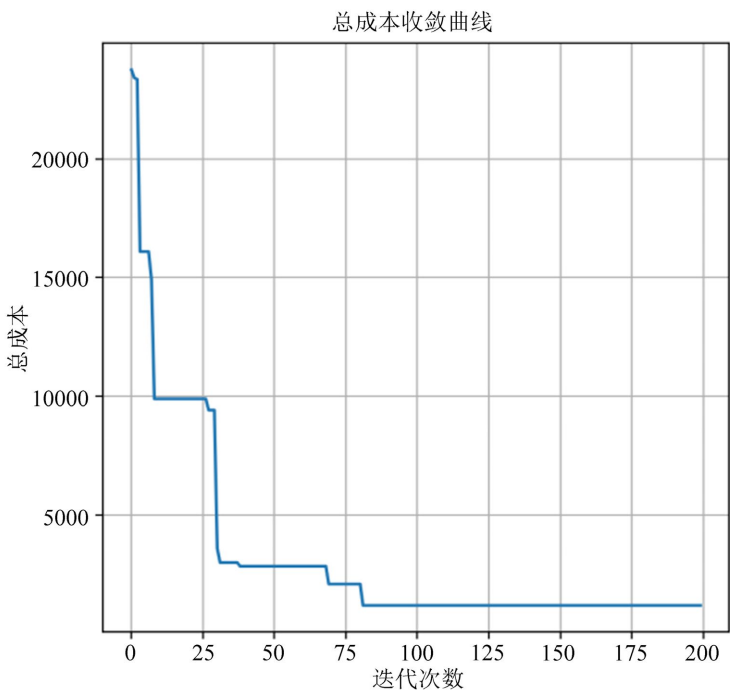


Figure 2. Total cost convergence curve diagram

图 2. 总成本收敛曲线图

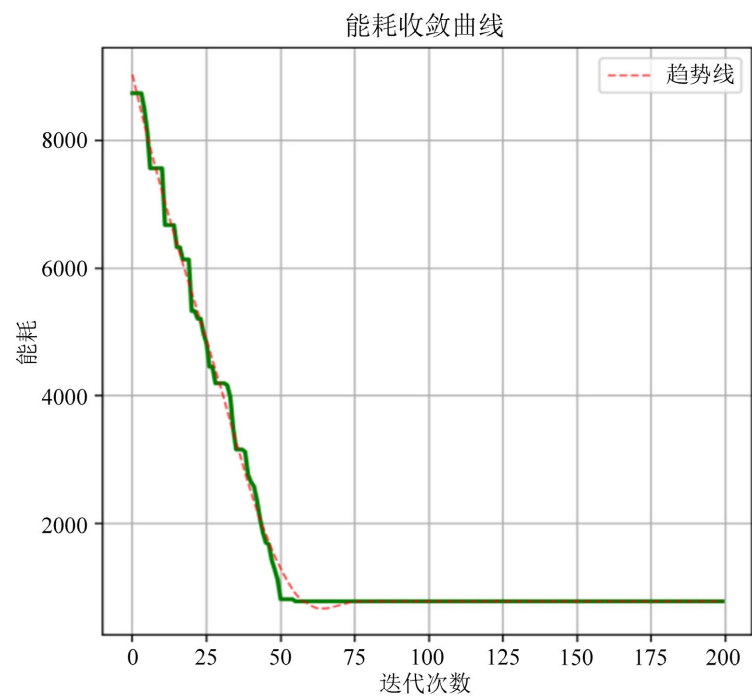


Figure 3. Energy consumption convergence curve diagram
图 3. 能耗收敛曲线图

算法十分重视避免延期, 在最终的最优解里实际延期成本是 0, 尽管在成本构成分析中不能直接看出延期成本的占比, 然而这恰好体现出算法成功把高权重目标优化到了最优状态, 在实际成本构成中, 换模成本与碳排放成本构成了主要部分, 其中换模成本占比大概为 78%, 碳排放成本占比约为 22%。此结果显示, 在避免延期的条件下, 换模成本成了主要的优化目标, 这契合橡胶加工企业多品种小批量生产模式对换模效率的重视。

6.2. 调度方案分析

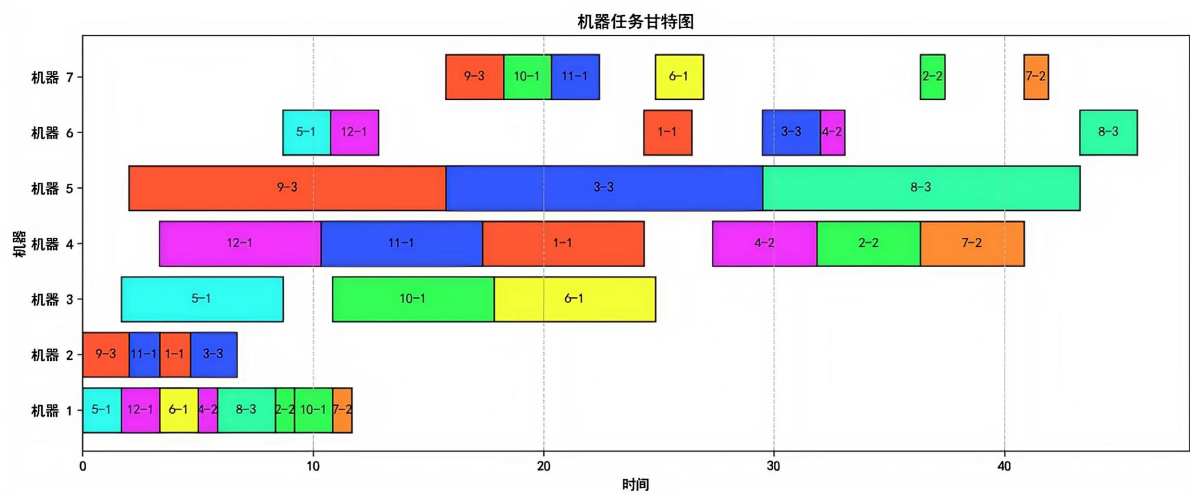


Figure 4. Machine task Gantt chart
图 4. 机器任务甘特图

图 4 展示了最优调度方案对应的甘特图。通过分析可以发现，算法优先安排了交期紧迫的订单(如订单 5 和订单 6)，实现了所有订单的按时交付；各台机器的工作负荷分布相对均衡，避免了设备过载和闲置；算法将相似产品类型的工序安排在连续时段加工，有效减少了换模次数和设备空闲时间，保证了生产过程的连续性。该调度方案展现了多目标优化的有效性，在确保订单按时交付的前提下实现了换模成本控制 and 能源消耗优化的协调统一。

6.3. 算法对比实验

为验证本文提出的改进遗传算法(IDGA)的有效性，选取标准遗传算法(SGA)、粒子群算法(PSO)、鲸鱼算法(WOA)及 NSGA-II 算法进行对比实验。所有算法采用相同参数设置：种群规模 200，迭代次数 200，在相同硬件环境下测试。

表 3 呈现出了各个算法在求解本文所提出的硫化加工柔性车间调度问题之际的性能对比结果。

Table 3. Comparison of performance metrics across algorithms

表 3. 各算法性能指标对比

算法	最优总成本	收敛速度(代)	最终能耗	换模次数
SGA	1287.5	95	876	32
IDGA	984.7	48	839	31
PSO	1232.4	79	893	34
WOA	1347.8	87	912	36
NSGA-II	1168.2	82	868	33

实验结果表明，IDGA 算法在总成本方面相较于 SGA、PSO、WOA 及 NSGA-II 分别实现了 23.5%、20.1%、26.9%和 15.7%的降低。在收敛速度方面，IDGA 表现突出，仅需 48 代即可达到稳定解，而其他算法需要 79~95 代。在能耗控制方面，IDGA 同样获得最优结果，最终能耗为 839，相较于基准 SGA 低约 4.2%。

综上所述，本文所提出的改进遗传算法，也就是 IDGA，在解的质量方面表现出色，其收敛速度较快，并且在多目标平衡方面也有着良好的性能，相较于比较算法有优势，它可有效地达成硫化加工柔性车间里订单按时交付、换模成本实现最小化以及能源消耗得以降低等多个目标，为橡胶加工企业的绿色转型以及高质量发展给予了有力的决策支持。

7. 结论

随着多品种小批量生产模式在橡胶加工行业的广泛应用以及“双碳”战略目标的深入推进，硫化加工柔性车间面临着订单延期、换模成本控制和能源消耗优化等多重挑战。本文针对这一现实问题，构建了综合考虑订单延期成本、换模成本及碳排放成本的多目标优化数学模型，并设计了基于双层编码和贪婪插入式解码的改进遗传算法，为橡胶加工企业的绿色转型和高质量发展提供了理论支撑和决策依据。

研究在理论与方法方面的主要贡献包括：将换模成本与碳排放约束纳入硫化加工柔性车间调度的多目标优化框架，填补了现有研究在多维成本综合考量方面的空白；提出的改进遗传算法采用双层编码结构和贪婪解码策略，结合换模点专门邻域搜索机制，显著提升了算法的搜索效率和解质量；基于真实企业生产数据的算例验证表明，所提方法能够有效平衡订单按时交付、换模成本控制和能源消耗优化等多个目标，为企业提供了直接的实践指导价值。

本研究为橡胶加工行业在新发展格局下实现经济效益与环境责任的协调发展提供了有力的理论工具

和实践指导,对推动制造业绿色转型和高质量发展具有重要意义。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(72271161, 72331006);上海市 2021 度“科技创新行动计划”宝山转型发展科技专项项目(21SQBS01404);上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ038)。

参考文献

- [1] 胡小建, 苏海锐, 张修磊. 基于改进 NSGA-II 的轮胎智能制造硫化车间调度方法[J]. 橡胶科技, 2023, 21(11): 570.
- [2] Zhang, J., Wang, W., Xu, X. and Jie, J. (2022) Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Considering Transportation Constraints and Bounded Processing Times Using a Discrete Jaya Algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, **170**, Article ID: 108305.
- [3] 刘明豪, 蔡劲草, 王雷, 顾瀚, 张茂杉, 谭铁龙. 基于混合变邻域遗传算法的柔性车间调度研究[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 99-106.
- [4] Wang, S., Wang, L., Liu, M. and Xu, Y. (2022) A Knowledge-Enhanced Differential Evolution Algorithm for Distributed Flexible Job Shop Scheduling with Transportation Constraints. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **18**, 6276-6286.
- [5] Zhang, R. and Chiong, R. (2022) Solving the Energy-Efficient Job Shop Scheduling Problem: A Multi-Objective Discrete Jaya Algorithm with an Ensemble of Neighborhood Structures. *Omega*, **107**, Article ID: 102555.
- [6] Gong, G., Deng, Q., Chiong, R., Gong, X. and Han, H. (2020) A Memetic Algorithm for Multi-Objective Flexible Job Shop Scheduling Problem with Setup Times. *Knowledge-Based Systems*, **210**, Article ID: 106458.
- [7] Li, J.Q., Gao, K., Pan, Q.K., Pei, S. and Wang, S. (2021) An Energy-Aware Scheduling in Flexible Flow Shop with Sequence-Dependent Setup Time and Limited Buffer Using Robust Optimization Approach. *Journal of Cleaner Production*, **321**, Article ID: 128943.
- [8] Jin, F., Liu, S., Jiang, X., Tian, G. and Liu, H. (2022) Setup-Time Reduction and Job Shop Scheduling Optimization Oriented to Intelligent Manufacturing: Review and Prospects. *Journal of Manufacturing Systems*, **64**, 23-49.
- [9] 章佳媛, 张干, 梁心语, 叶佳林, 史彬. 大规模硫化车间调度问题研究[J]. 软件工程, 2022, 25(1): 18-21.
- [10] Luo, H., Du, B., Huang, G.Q., Chen, H. and Li, X. (2020) Hybrid Flow Shop Scheduling Considering Machine Electricity Consumption Cost. *International Journal of Production Economics*, **221**, Article ID: 107455.
- [11] Feng, Y., Huang, G., Yang, C., Yang, J. and Li, W. (2023) Energy-Efficient Scheduling of Multi-Stage Synchronized Flow Shop with Setup Times and Transportation. *Journal of Cleaner Production*, **382**, Article ID: 135305.
- [12] 唐艺军, 李雪. 基于改进混合遗传算法的柔性车间调度问题研究[J]. 现代制造工程, 2023(10): 8-14.