

基于批次拆分机制的IMODE算法求解成品 卷烟生产调度问题

安裕强^{1,2} 张源^{3*} 邹平¹ 陶翼飞⁴

- 1.昆明理工大学管理与经济学院,昆明,650500
- 2.红云红河(烟草)集团有限责任公司物流中心,昆明,650000
- 3.红云红河(烟草)集团有限责任公司昆明卷烟厂,昆明,650202
- 4.昆明理工大学机电工程学院,昆明,650500

摘要:针对成品卷烟生产调度问题,结合卷烟企业生产实际,以承担成品卷烟生产任务的卷包车间为研究对象,将其转换为异构并行机分批调度问题,以卷包机组的总切换次数和同停综合评价时间为目标建立符合成品卷烟生产工况的仿真优化模型,并设计一种基于批次拆分机制的改进多目标差分进化(IMODE)算法进行求解。为满足分批生产特点,该算法采用一种不规则的矩阵编码方式表示可行解,基于反向批次学习策略生成初始种群,通过矩阵向量间的差分运算更新种群个体,采用批次拆分机制详细划分批次批量,并对子代个体进行邻域搜索,在选择操作中引入改进精英保留策略,以提高算法的寻优能力。最后基于不同订单量和车间规模的卷烟企业生产实例进行实验对比,验证了IMODE算法的性能及其在解决成品卷烟生产调度问题上的有效性。

关键词:异构并行机;批次拆分;总切换次数;同停综合评价时间;多目标差分进化算法

中图分类号:TS452

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.08.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



IMODE Algorithm for Solving Cigarette Product Production Scheduling Problems Based on Lot-size Splitting Mechanism

AN Yuqiang^{1,2} ZHANG Yuan^{3*} ZOU Ping¹ TAO Yifei⁴

- 1.Faculty of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500
- 2.Logistics Center, HongyunHonghe Tobacco(Group)Co., Ltd., Kunming, 650500
- 3.Kunming Cigarette Factory, HongyunHonghe Tobacco(Group)Co., Ltd., Kunming, 650202
- 4.Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650500

Abstract: To address the production scheduling problem of cigarette products, the tobacco packing workshop responsible for the production tasks was taken as the research object, considering the actual production conditions of cigarette enterprises. This problem was transformed into a unrelated parallel machines lot-size scheduling problems. An optimization model was established to simulate the production conditions of cigarette products, with the total number of switches of tobacco packing machines and the comprehensive evaluation time of simultaneous stoppage as the objectives. An improved multi-objective differential evolution (IMODE) algorithm was designed to solve the problems based on a lot-size splitting mechanism. To accommodate lot-size production characteristics, the algorithm used an irregular matrix encoding method to represent feasible solutions, generated the initial population based on a reverse lot-size learning strategy, updated population individuals through differential operations between matrix vectors, and performed detailed neighborhood searches of the child individuals by splitting lot-size into smaller ones, an improved elitism retention strategy was introduced during the selection processes to enhance the algorithm's optimization capability. Finally, experiments based on production instances of cigarette enterprises of different orders and workshop scales demonstrate the performance of IMODE and the effectiveness in solving the scheduling problems of cigarette products production.

收稿日期:2024-06-11

基金项目:云南省科技厅基础研究专项(202401AT070374);

红云红河烟草(集团)有限责任公司科技项目(HYHH2021XX04)

Key words: unrelated parallel machine; lot-size splitting; total number of switches; comprehensive evaluation time of simultaneous stoppage; multi-objects differential evolution (MODE) algorithm

0 引言

成品卷烟生产调度问题属于多机组、多牌号、多约束的分批生产组织模式^[1],其调度特点如下:①卷烟厂卷包车间完成卷烟成品的生产加工,该车间由多台型号不同的卷包机组组成,每台机组的产能不完全相同,属于异构并行机^[2];②各卷烟品牌可划分为多个批次在不同的机组中同时生产,且各批次的批量不完全相同;③品牌与机组间因工艺约束而存在生产适应性匹配关系,即每台机组无法生产所有卷烟品牌;④机组在切换不同类型的品牌时需进行调试和准备工作,该过程需消耗一定时间,即换牌调整时间^[3];⑤为保证生产同步性,生产同一品牌的多台机组应同时结束该品牌生产,即同时完工。因此,成品卷烟生产调度过程实质为异构并行机分批调度^[4],具有环节关联多、约束复杂、批量调度的生产特点,导致该问题的复杂程度较高、算法设计求解难度大。

目前多数卷烟企业在制定生产计划时仍基于经验或软件辅助排产,难以确保生产计划的准确性,导致排产结果维护成本高,为此国内学者针对卷烟生产调度开展了大量研究。金剑等^[5]基于eM-Plant仿真软件建立了卷烟多阶段的生产仿真优化系统,简化了实际生产中复杂的卷烟生产计划求解与优化问题。沈倩等^[6]提出基于产能过滤算法的仿真技术框架,并初步运用于卷烟排程系统中,但运用的生产规模较小。柴剑彬等^[7]针对卷烟生产中的调度集成问题,以完工时间、切换次数、生产质量、库存成本为目标,构建整数规划模型进行排产优化,但未考虑品牌与机器间的适应性加工关系。王伟玲等^[8]针对卷烟机组的生产计划调度问题,以切换时间和加工成本为目标,将卷烟工单视为不可拆分的整体,基于归一化数学理论进行排产设计。荀洪凯等^[9]针对卷烟生产过程中的不相关卷包机器分批调度问题,采用一种启发式狼群算法进行优化,但未考虑机器切换品牌时的切换耗时。已有研究大多将研究重点集中在卷烟整体生产流程的排程优化,对成品卷烟分批调度的研究报道较少,尤其在多品牌、大批量的卷包生产中,未分批优化不仅降低了算法的寻优质量,而且增加了与实际生产的偏差,此外已有研究中对优化目标、运用规模 and 实际约束考虑不足,多数研究以完工时间^[10]、切换次数^[10]或加工成

本^[10]为目标进行求解,缺少对同停综合评价时间^[11]的优化。同停综合评价时间表示各机组与最后完工机组的完工时间差值之和,若机组间的完工时间差异较大,则在生产末期为保障部分机组的生产,动力部门需始终保持额定供能负荷,以维持所有公共设备的运行,造成过饱和资源配置和额外能源消耗。

关于分批调度的相关研究中,朱颖颖等^[12]基于等量分批方式求解并行机调度问题,但该方式未对批次批量进行详细拆分,与实际生产存在偏差。EREMEEV等^[13]采用启发式方式划分单一产品的批次批量,以期缩短最大完工时间或完工时间总和。宋君乐等^[14]以最小化最大完工时间为优化目标,采用启发式分区编码设计各品牌批次批量的划分方式,同样未对批次批量进行详细拆分。刘东洋等^[15]在考虑装配工艺约束的情况下,采取等量分批策略求解模块化批量装配生产调度问题。谢法吾等^[16]在考虑批量划分约束和子批混排加工约束的情况下,采用非等量方式划分批次批量,用于求解作业车间分批调度问题。ALI等^[17]针对并行机绿色分批调度问题,提出一种交互式模糊规划方法划分批次批量,并采用NSGA-II和MOGWO两种多目标元启发式算法进行求解。上述文献均采用等量或非等量方式划分批次批量,但无论采用何种方式,划分后的各批次批量在优化计算中均为不可变批量,未充分考虑批次批量的详细优化,使得各批次完工时间差异较大、相同品牌批次无法同时完工,而在成品卷烟生产过程中,为增强生产过程的同步性,划分后的各品牌批次可进一步进行拆分生产。

本文以承担成品卷烟生产加工任务的卷烟厂卷包车间为研究对象,建立符合卷包生产工况的仿真模型,并以总切换次数和同停综合评价时间为优化目标,设计一种基于批次拆分机制的改进多目标差分进化^[18](improved multi-objective differential evolution, IMODE)算法求解,通过对不同订单量和车间规模的卷烟生产实例进行实验分析,验证该算法在求解相关卷烟生产调度问题上的优越性。

1 问题分析

1.1 背景介绍

本文主要研究成品卷烟分批生产调度问题,

图1为成品卷烟生产流程示意图,卷包车间中各卷包机组负责将合格的嘴棒、烟丝和商标等辅料加工为不同的卷烟成品,并经装箱后存入成品库。

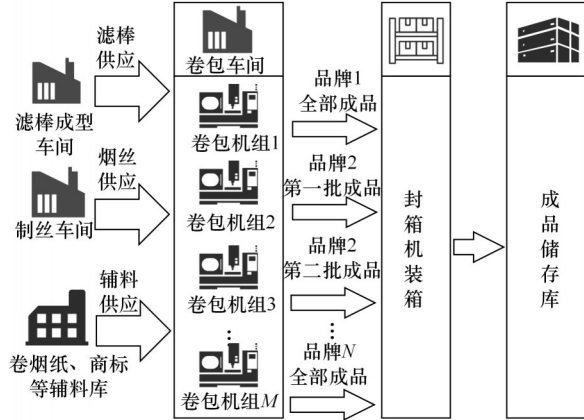


图1 成品卷烟生产流程

Fig.1 Flow of cigarette product production

在当前以消费市场为主要拉动力量的卷烟产销模式下,卷烟企业通常以月为单位进行订单式生产,由于卷烟销售量呈现整体趋势变动性和季节波动性的特征,每月订单量存在差异,总体可分为小、中、大订单量生产^[19],小订单即非饱和生产,中订单即一般饱和生产,大订单即饱和生产。实际工况下为在当月内完成订单任务,在符合品牌工艺约束的情况下,卷包车间的多台异构机组可同时生产相同牌号的卷烟成品,为此成品卷烟生产调度问题可视为异构并行机分批调度问题进行求解,卷包机组即为异构并行机器,卷烟品牌数即为待加工产品数,品牌订单量即为各产品需加工的数量。综上,该问题可描述如下:卷包车间共有M台异构卷包机组,需在规定期限内生产N种卷烟品牌,其中各品牌可分为多个非等量批次在异构机组中同时生产,相同品牌在各机组上的生产时间不完全相同。已知各卷包机组与品牌的生产适应性匹配关系,问题的目标为优化N种卷烟品牌的最佳分批生产方案,即合理划分品牌批次批量,并指派各批次的生产机组和生产顺序,最大程度地减少机组的总切换次数和同停综合评价时间。

1.2 数学模型

成品卷烟生产调度问题的数学模型定义参数如下:N表示待加工的卷烟品牌数;n为品牌编号,n=1,2,⋯,N;M表示卷包机组数量;m为机组编号,m=1,2,⋯,M;J_n表示第n种卷烟品牌的订单产量;D_{nm}表示机组m需生产品牌n的批次批量;W_{nm}表示机组m针对品牌n的生产能力,箱/

min;N_m表示机组m需生产的品牌数;X_{n,m}表示品牌n在机组m上的生产情况,若品牌n在机组m上生产则其值为1,否则为0;Y_{n,m,i}表示品牌n在机组m的第i道加工序列上的生产情况,若品牌n在机组m的第i道序列上生产则其值为1,否则为0;P_m表示卷包机组m的完工时间;P_{n,m}表示卷包机组m关于品牌n的完工时间;P_{max}表示M台卷包机组的最大完工时间;B_{n,m}表示卷包机组m关于品牌n的开始生产时间;T_c表示规定生产周期;S_{n₁,n₂,m}表示品牌n₁与n₂在机组m上的切换调整时间。以机组的总切换次数和同停综合评价时间为目标,建立的目标函数如下:

$$\min (F_1, F_2) \tag{1}$$

$$F_1 = \min \left\{ \sum_{m=1}^M \left(\sum_{n=1}^N X_{n,m} - 1 \right) \right\} \tag{2}$$

$$F_2 = \min \left\{ \sum_{m=1}^M (P_{\max} - P_m) \right\} \tag{3}$$

该问题存在的约束条件如下:

$$N_m = \sum_{n=1}^N X_{n,m} \tag{4}$$

$$P_m = \sum_{n=1}^N W_{nm} D_{nm} + \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{n_1=1}^N \sum_{n_2=1}^N Y_{n_1,m,i} Y_{n_2,m,i+1} S_{n_1,n_2,m} \tag{5}$$

$$P_{\max} = \max (P_1, P_2, \dots, P_m) \tag{6}$$

$$P_{n,m} = B_{n,m} + W_{nm} D_{nm} \tag{7}$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N B_{n,m} \geq 0 \quad \text{if } X_{n,m} = 1 \tag{8}$$

$$\left. \begin{aligned} \sum_{n=1}^N P_{n,m_1} = P_{n,m_2} = \dots = P_{n,M} \\ \text{if } \sum_{n=1}^N X_{n,m_1} = X_{n,m_2} = \dots = X_{n,M} = 1 \end{aligned} \right\} \tag{9}$$

$$P_{\max} \leq T_c \tag{10}$$

$$S_{n_1,n_2,m} = 0 (n_1 = n_2) \quad S_{n_1,n_2,m} > 0 (n_1 \neq n_2) \tag{11}$$

$$\sum_{m=1}^M X_{n,m} \geq 1 \tag{12}$$

$$\sum_{n=1}^N X_{n,m} \geq 1 \tag{13}$$

$$J_n = \sum_{m=1}^M D_{nm} \tag{14}$$

式(2)和式(3)分别为目标函数式(1)中总切换次数和同停综合评价时间的计算公式,即M台卷包机组的切换总数和总同停综合评价时间;式(4)为各卷包机组生产的卷烟品牌数计算公式;式(5)为各卷包机组完工时间的计算公式;式(6)为生产N个卷烟品牌最大完工时间的计算公式;式(7)为卷包机组m关于品牌n的完工时间计算公式;式(8)表示所有品牌均在0时刻或0时刻后开始生产;式(9)表示卷包并行机组中关于任意品牌的完工时间均相等;式(10)表示卷包并行机组的最大完工时间需满足规定生产周期;式(11)表示

相同品牌间的切换耗时为0,不同品牌间的切换耗时必大于0;式(12)表示每种卷烟品牌至少可由一台卷包机组加工;式(13)表示每台机组至少可加工一种卷烟品牌;式(14)表示各卷烟品牌的订单产量是固定且已知的,在生产过程中不可变更。

2 算法设计

目前在异构并行机分批调度、车间批量调度、卷烟排产等领域的研究中,多目标差分进化^[20](multi-objective differential evolution, MODE)算法得到了广泛应用,验证了该算法具有较优的性能,但针对成品卷烟分批生产特点。传统多目标差分进化算法无法准确在一段编码中表示机器、品牌、批次批量和加工顺序的对应关系,为此,本文基于异构并行机分批调度的特点设计一种不规则的矩阵编码方式,并结合反向批次学习策略生成初始种群、矩阵差分运算更新种群个体、批次拆分机制进行邻域搜索、改进精英保留策略筛选个体,进而构造出改进多目标差分进化算法进行求解。

2.1 编码与解码

采用 M 行 N 列的矩阵表示一个可行解,其中行向量表示机组数,列向量表示品牌数,矩阵中每个元素均由数组 (n, d, k) 组成,数组中的符号分别为牌号编码、批次总量和顺序编码,其中牌号编码为自然数编码,其余两种均为实数编码,在 $[0, 1]$ 中随机生成。图2a是以3台并行卷包机组生产3个品牌的可行解编码示意图,编码得到初始可行解后需进行整合操作得到最终的编码个体,整合操作如图2b所示,具体操作如下:合并每台机组中牌号相同的批次编码,即批次总量进行累加,顺序编码保留最大值,合并后空闲位置用“0”补充,即无效编码,完成后如图2c所示。

解码操作需确定每台机组的生产品牌、对应批量和生产顺序,解码过程如下:①顺序解码。合并后对每台机组中有效批次编码的顺序元素基于ROV规则进行升序排列,得到该批次在机组中的生产序列,如图3a所示,以机组1为例,其生产序列如下:先生产品牌1,再生产品牌2,最后生产品牌3,同理可得其余机组的生产序列,完成后如图3b所示;②批量解码。根据批次总量编码确定批次批量,计算公式为: $J_n \times (\text{批次总量} / \text{品牌总量})$,以品牌1为例,品牌1被划分为3个批次分别在机组1、2、3中生产,其中机组1需生产品牌1的批量

为: $J_1 \times (0.5 / (0.5 + 0.3 + 0.2))$,若所有品牌的需求各为1000箱,则机组1需生产品牌1共计500箱,品牌2共计1000箱,品牌3共计600箱,同理可得其余品牌的批次批量,完成后如图3c所示。

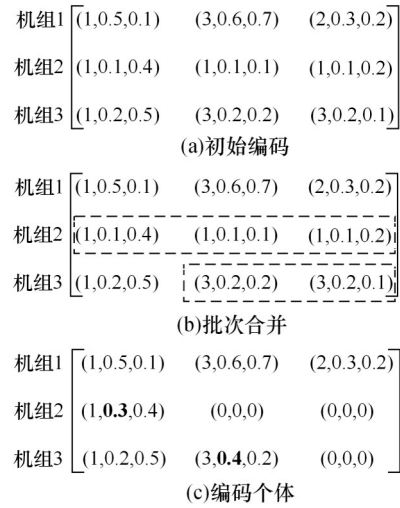


图2 矩阵编码图

Fig.2 Matrix encoding diagram

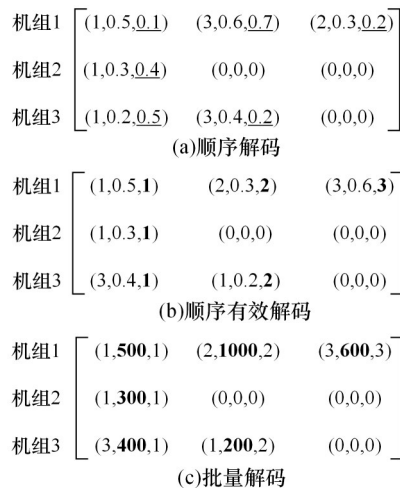


图3 矩阵解码示意图

Fig.3 Matrix decoding diagram

2.2 种群初始化

求解不相关并行机分批调度问题时,各批次所含数量对初始种群质量的影响较大,为此本文针对批次总量编码进行反向批次学习策略^[21]生成反向批次种群,其变换过程如下:首先计算原始个体中各品牌的批次总量之和,仍以图2a的个体进行说明,如品牌1的总量为 $0.5 + 0.1 + 0.1 + 0.1 + 0.2 = 1$;其次计算反向批次,以机组3中品牌1的一个批次 $(1, 0.2, 0.5)$ 为例,其反向批次总量为 $1 - 0.2 = 0.8$,可得其反向批次编码为 $(1, 0.8, 0.5)$,若某品牌只有一个批次则反向批次编码不变,同理可得其余批次的反向批次编码,其变换过程如图4所示。

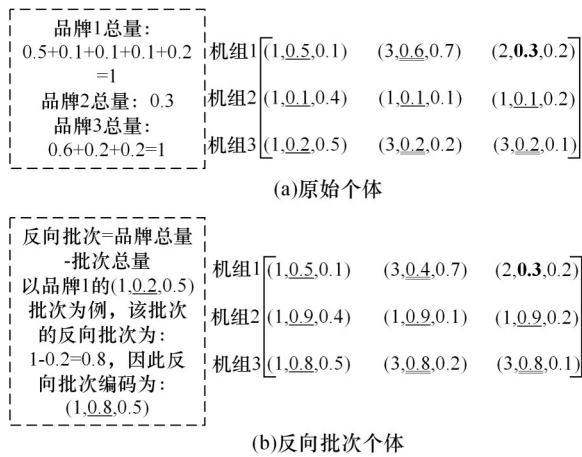


图4 反向批次学习策略

Fig.4 Reverse lot-size learning strategy

综上,IMODE算法的种群初始化过程如下:首先随机生成原始种群,然后基于反向批次学习策略生成原始种群的反向批次种群,并与其原始种群个体进行Pareto快速非支配排序^[22],选择排序较优的个体组成最终的初始种群。

2.3 差分进化操作

差分进化操作由变异和交叉组成^[23],本文可行解采用矩阵表示,因此该过程是矩阵向量间的差分运算,即对于 g 代个体 $X_{i,g}$,随机选择两个不同的个体进行变异操作得到变异个体 $V_{i,g+1}$:

$$V_{i,g+1} = X_{i,g} + F|X_{r_1,g} - X_{r_2,g}| \quad (15)$$

式中, r_1, r_2 为在种群中随机选择与个体 i 不同的互异整数,且 $r_1 \neq r_2$; F 为缩放因子, $F \in [0, 2]$; $X_{r_1,g} - X_{r_2,g}$ 为差分向量^[23],对差分向量取绝对值是为防止矩阵差分运算过程中产生无效编码。

变异后,通过交叉操作产生新个体 $U_{i,g}$:

$$U_{j,i,g+1} = \begin{cases} V_{j,i,g+1} & rand_j[0, 1] \leq CR \text{ 或 } r(i) = j \\ X_{j,i,g} & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

式中, CR 为交叉概率, $CR \in [0, 1]$; $rand_j[0, 1]$ 为 $[0, 1]$ 内第 j 次计算的随机数; $r(i)$ 为行向量维度内的随机正数^[23]。

2.4 批次拆分机制

求解并行机分批调度问题时,由于各机组所分配的加工品牌和加工批量不同,导致各机组生产时间差异较大、生产同一品牌的机组无法完工时间,进而影响算法的寻优性能,且难以保持生产的同步性。为此,本文设计一种批次拆分机制对新生成的子代个体进行邻域搜索,以提高求解质量,具体步骤如下:

1) 设置批次批量的最小拆分单位 L_{min} ,单位:箱。

2) 针对分批数大于1的品牌 n_1 ,分别寻找并行机组中关于品牌 n_1 完工时间最长和最短的两台机组,记为 M_{max} 和 M_{min} 。

3) 在 M_{max} 机组中,以最小拆分单位为基准拆分品牌 n_1 的批次批量,并将拆分的最小单位批量并入 M_{min} 机组的相同生产批次中。

4) 重新计算并行机组中关于品牌 n_1 的完工时间,并更新所有并行机组的同停综合评价时间。

5) 转步骤2),若并行机组中关于品牌 n_1 的完工时间相等,则切换品牌种类转步骤2),直至满足并行机组中关于任意品牌 n 的完工时间均相等。

图5为三机组三品牌的简易批次拆分示意图,反映了批次拆分机制对生产过程的影响。图5a中原始生产甘特图的的品牌1和3均存在完工时间不等的情况,为此针对品牌1,机组1的完工时间最长,机组2的完工时间最短,应用最小拆分单位对机组1的品牌1批量进行拆分,并将拆分后的批量加入机组2的品牌1批量中,重复该步骤直至机组1和2同时完成品牌1的生产,完成后如图5b所示,新甘特图中,并行机组的同停综合评价时间得以缩短。同理,针对品牌3再次应用批次拆分操作后,得到最终的生产甘特图(图5c),最终方案中,同停综合评价时间得以再次缩短。

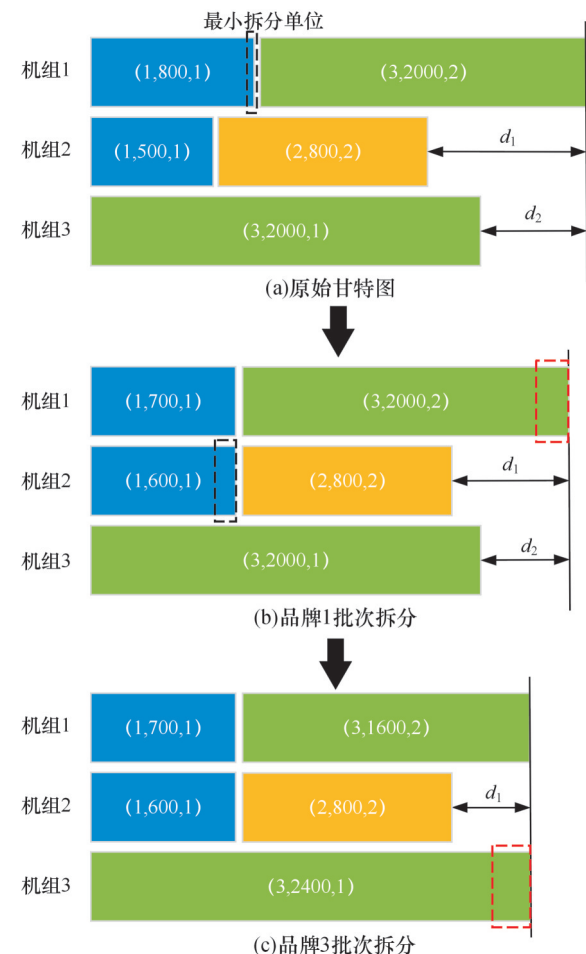


图5 批次拆分示意图

Fig.5 Lot-size split diagram

2.5 改进精英保留策略

多目标差分进化算法是依次将各非支配层级中的个体全部放入新父代种群,直至满足种群规模,该方法可确保子代种群包含当前所有的优良个体,但易使算法陷入局部极值^[24],因此,本文结合 Pareto 分级对精英保留策进行改进,具体步骤如下:

1)为保证种群质量,将合并种群中的 Pareto 前沿解集全部加入新父代种群,若前沿解集所含个体数量超过种群规模 K ,则依据拥挤度^[25]大小选择最优的 K 个个体加入。

2)若前沿解集的个体数量小于 K ,为增加种群的多样性,则剩余个体依据其他层级中非支配解的数目等比例进行筛选,并与步骤 1)中加入的个体组成新父代种群。选择函数如下:

$$K_i = \begin{cases} |H_i| & i = 1, |H_i| \leq K \\ K & i = 1, |H_i| > K \\ \frac{|H_i|}{2K - |H_i|} (K - |H_i|) & i \geq 2, |H_i| < K \end{cases} \quad (17)$$

式中, K 为种群规模; K_i 为在第 i 级非支配层中选择的个体数目; H_i 为第 i 级非支配层; $|H_i|$ 为第 i 级非支配层中所含个体数量。

2.6 IMODE 算法步骤

IMODE 算法(流程图见图 6)步骤描述如下:

- ①设置 IMODE 算法的参数值和迭代终止条件;
- ②基于反向批次学习策略生成 K 个个体作为初始种群;
- ③计算初始种群个体的多目标值,并基于其目标值进行 Pareto 非支配排序;
- ④基于二元锦标赛机制^[26]选择待进化种群;
- ⑤矩阵差分进化操作生成子代种群;
- ⑥基于批次拆分机制进行领域搜索,根据搜索结果更新子代种群;
- ⑦将父代种群与子代种群合并,并进行 Pareto 非支配排序与层级划分;
- ⑧基于改进精英保留策略在各层级中筛选 K 个个体生成新父代种群;
- ⑨判断是否满足迭代终止条件,若满足则输出 Pareto 最优解集,否则转步骤 ④。

3 仿真实验

3.1 卷烟实例

为验证 IMODE 算法在不同订单需求、不同车间生产规模下的求解性能,本文采用三种规模、三类订单的生产数据进行九组仿真实验,其中三种规模表示小、中、大三种不同规模卷烟厂卷包车间的生产数据,三类订单分别对应各卷烟厂的小订单量生产(A类)、中订单量生产(B类)、大订单量生产(C类),其生产模式均符合不相关并行机分批调度,生产信息见表 1~表 3。

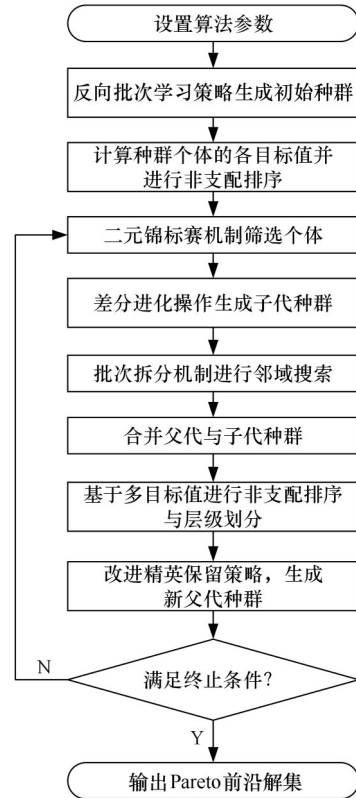


图 6 IMODE 算法流程图

Fig.6 Framework of IMODE

表 1 A 类卷烟订单实例信息

Tab.1 The cigarette order instances information of A type

规模	小	中	大
投产机组/台	13	27	43
品牌数	7	10	12
订单量/万箱	3.15	6.52	11.7
单日生产时长/h	15	17	17
当月工作日/d	21	21	21

表 2 B 类卷烟订单实例信息

Tab.2 The cigarette order instances information of B type

规模	小	中	大
投产机组/台	13	27	43
品牌数	8	10	13
订单量/万箱	4.09	9.11	14.23
单日生产时长/h	17	17	17
当月工作日/d	21	21	21

表 3 C 类卷烟订单实例信息

Tab.3 The cigarette order instances information of C type

规模	小	中	大
投产机组/台	13	27	43
品牌数	8	10	13
订单量/万箱	5.46	12.17	17.04
单日生产时长/h	19	19	19
当月工作日/d	22	22	22

由表1~表3可知,A、B类订单实例需在21个工作日内完成生产任务,C类订单实例需在22个工作日内完成生产任务,各机组的加工时间和切换调整时间均以机组的实际产能和切换耗时为准。九组实例中,各机组与品牌间均存在生产适应性匹配关系,以中规模实例进行说明,其卷烟品牌与机组间的生产适应性匹配关系见表4,符号√表示卷包机组可生产该品牌,符号×表示不可生产该品牌。

表4 中规模实例机组牌号生产适应性匹配
Tab.4 Medium-scale instance machine brand production suitability matching

	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10
M1	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
M2	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
M3	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
M4	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×
M5	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M6	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M7	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M8	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M9	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M10	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M11	√	×	×	×	√	×	×	×	×	×
M12	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M13	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M14	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M15	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M16	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M17	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M18	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M19	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M20	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M21	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M22	×	√	×	×	×	×	×	×	×	×
M23	×	√	×	×	×	√	×	×	√	×
M24	×	√	×	√	×	√	×	√	√	×
M25	×	√	×	×	×	√	×	×	√	×
M26	×	√	√	√	×	×	×	√	×	×
M27	×	×	×	×	×	×	√	×	×	√

3.2 评价指标

为验证IMODE算法的性能,算法的评价指标选择解集个数(number of solutions, NS)、反世代距离(inverted generational distance, IGD)和超体积(hypervolume, HV),其中NS为前沿解数量;IGD表示真实Pareto前沿面中的解与算法寻优所得非支配解集间的最小距离之和,用于评价算法的综合性能^[27]。由于本文求解问题为卷烟生产实

例,故将应用算法所求解集合并进行非支配排序,将排序后的前沿解集作为真实Pareto前沿解,进行IGD指标的计算;HV表示Pareto解集所支配区域的体积大小,用于评价解集的收敛性^[27]。

3.3 仿真模型

由于卷包车间生产过程具有较强的离散动态性^[28],且卷包并行机组与上下游工序间存在复杂的约束关系,为高度体现卷包车间实际生产工况,并验证IMODE算法在求解该问题的有效性,本文采用仿真优化模型对问题进行求解。该模型及算法均依据实际生产信息在工业仿真软件Plant Simulation中建立,编程语言为Simtalk 2.0,图7所示为中规模卷包车间仿真模型,其中控制参数模块为算法运行过程中需调用的变量;数据统计模块负责保存种群进化过程中的最佳个体编码,并记录个体的目标值;优化算法模块为IMODE的程序代码,实现对目标的迭代优化。仿真模型在硬件为AMD Ryzen 7 5800H的计算机上运行,设置算法的种群数量为50,设置最大迭代次数 G_{max} 为500。

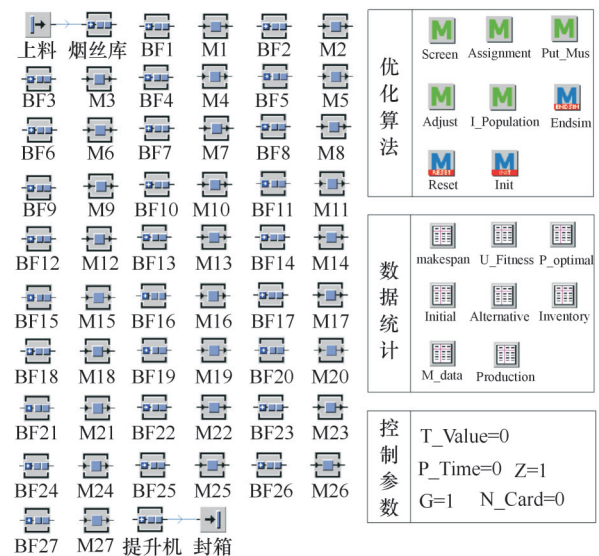


图7 卷包车间并行机组仿真模型

Fig.7 Simulation model of parallel machines in tobacco packing workshop

4 结果分析

4.1 参数分析

采用 $L_9(3^3)$ 正交试验分析变异缩放因子 F 、交叉概率 CR 和批次批量最小拆分单位 L_{min} 的参数取值,其中变异缩放因子和交叉概率参考文献^[29]设计水平实验值 F 为 $[0.1, 0.5, 0.9]$, CR 为 $[0.3, 0.5, 0.6]$,批次批量最小拆分单位结合不同卷包机组单位产能设计水平实验值 L_{min} 为 $[3, 5, 8]$ 。正交试验数据选择中规模A类订单量的卷

烟生产实例,最大迭代次数为500,每种参数组合方式分别运行10次,并将每次所求解集各目标值归一化后计算HV指标平均值,结果见表5。

由表5可得,参数组合4所求解集的HV平均

表5 正交试验结果

Tab.5 Orthogonal experiment results

组合	F	CR	L_{min}	平均值(HV)
1	0.1	0.3	3	0.477
2	0.1	0.5	5	0.482
3	0.1	0.6	8	0.475
4	0.5	0.3	5	0.549
5	0.5	0.5	8	0.507
6	0.5	0.6	3	0.516
7	0.9	0.3	8	0.489
8	0.9	0.5	3	0.493
9	0.9	0.6	5	0.501

表6 算法实验结果

Tab.6 Experimental results of algorithm

订单类型	规模	NSGA-II			MOWPA			MODE			IMODE		
		NS	IGD	HV	NS	IGD	HV	NS	IGD	HV	NS	IGD	HV
A类	小	4	0.234	0.315	4	0.106	0.378	4	0.138	0.351	4	0.095	0.543
	中	5	0.1	0.503	5	0.068	0.465	5	0.072	0.446	5	0.069	0.549
	大	5	0.071	0.37	6	0.036	0.455	6	0.076	0.327	6	0.036	0.471
B类	小	3	0.081	0.551	3	0.091	0.552	4	0.086	0.497	3	0.075	0.553
	中	2	0.306	0.285	4	0.083	0.359	4	0.06	0.395	4	0.034	0.397
	大	4	0.305	0.316	5	0.133	0.344	3	0.169	0.289	5	0.087	0.413
C类	小	3	0.11	0.314	5	0.106	0.416	4	0.125	0.355	4	0.069	0.421
	中	4	0.364	0.377	4	0.099	0.442	5	0.063	0.356	5	0.037	0.502
	大	5	0.269	0.317	6	0.081	0.491	6	0.144	0.371	6	0.079	0.489
	均值	3.89	0.204	0.372	4.67	0.089	0.434	4.56	0.104	0.376	4.67	0.065	0.482

对比不同规模和订单量的卷烟实例求解结果可得:在求解数量NS方面,IMODE算法求得的前沿解均值为4.67,与MOWPA算法结果相同,略大于其余两种算法结果,未表现出明显优势,但仍可求解出足够数量的非支配解,提供多种生产调度方案。在IGD方面,只有中规模A类实例中MOWPA算法的IGD值略小于IMODE算法的IGD值,其余问题中IMODE算法的IGD值均为最小,且IMODE算法的解集IGD均值为0.065,小于其余三种算法的IGD均值,这表明IMODE算法所求解集的解间距较小,更接近Pareto真实前沿面。在HV方面,只有大规模C类实例中MOWPA算法的解集HV值略大于IMODE算法的解集HV值,其余问题中IMODE算法的解集HV值均为最大,且IMODE算法的解集HV均值为0.482,大于其余三种算法的均值,这表明IMODE算法通过结合批次拆分机制等方法后,算法的收敛性得到明显改善。综上,IMODE算法在解决不同订单和不同规模问题时,所求解集

值最大,收敛性更优,因此确定IMODE的参数取值为: $F=0.5$ 、 $CR=0.3$ 、 $L_{min}=5$ 。

4.2 实验分析

针对多目标优化求解,非支配遗传算法II(non-dominant sorting genetic algorithm II, NSGA-II)^[30]具有较好的收敛性能,是应用最广泛的多目标算法之一,而多目标狼群算法(multi-objective wolf pack algorithm, MOWPA)^[31]也是一种在解决分批调度问题上具有较优性能的算法,因此,本文使用NSGA-II、MOWPA、MODE与IMODE共4种算法进行对比实验,对比算法中参数的取值参考文献[29-31]。综上,针对九组卷烟生产实例分别采用4种算法进行仿真实验,每组实验独立运算10次取最优解集,并将实验结果归一后计算各评价指标,结果见表6。

数量最多,综合性能更优,收敛性较好,证明了本文IMODE算法的有效性及其在求解卷烟生产调度问题时的优越性。

4.3 实例验证

本文在上述九组实验中选择卷烟企业普遍存在的三组中规模生产实例进行验证过程的详细说明,将三组中规模实例所求解集的目标值和实际生产数据填入表7,并将解集对应的最大完工时间填入表8,表7中*表示实际生产数据。

表7 实例结果

Tab.7 Results of instances

解集序号	中规模A类		中规模B类		中规模C类	
	F_1 /次	F_2 /h	F_1 /次	F_2 /h	F_1 /次	F_2 /h
1	3	1910.843	6	582.025	5	562.478
2	5	961.395	7	401.448	6	321.513
3	6	759.943	8	389.87	7	171.991
4	7	511.074	9	205.695	8	91.936
5	8	425.991	9*	217	9	47.694
6	8*	442			9*	55

表8 解集最长完工时间

Tab.8 Makespan of solution sets d

解集序号	P_{max}		
	中规模A类	中规模B类	中规模C类
1	20.67	20.45	21.91
2	18.45	20.02	21.38
3	17.91	19.49	20.97
4	17.24	19.11	20.15
5	17.02	—	19.97

由表7、表8可知,三组中规模实验的 Pareto 前沿解的完工时间分别在 21 d 或 22 d 之内,满足规定生产周期,且与实际生产结果对比,在切换总数相同的情况下,同停综合评价时间分别缩短了 16.009、11.305、7.306 h,提高了排产同步性,进一步验证了 IMODE 算法的合理性。同时各前沿解的总切换次数随着最大完工时间的减小而不断增大,说明两者互相制约,无法同时达到最小值,因此,管理者可依据实际生产情况在前沿解中选取合适的方案,作为最终的排产结果。其余六组实验经过相同方式进行验证,所得结论均一致。

图8为中规模C类实例解集5的排产甘特图,图中条形框内的数字代表所生产的卷烟品牌。由图8可知:①生产相同品牌的机组均同时完工,如机组M9~M11同时结束品牌5的生产,并同步切换品牌1,最终与机组M1~M8共同结束品牌1的生产,符合实际生产工况;②图8中机组进行切换时,所空区域为切换时间即非生产耗时;③机组M27的生产周期不足18d,其原因是在实际生产中与该机组适应性相匹配的卷烟品牌订单量较少,且该机组的产能较高,导致完工时间较短。

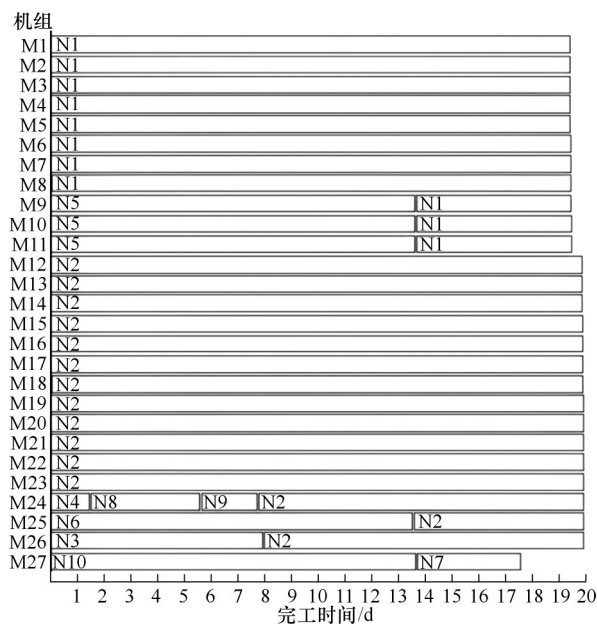


图8 中规模C类解集5的甘特图

Fig.8 Gantt diagram of medium-scale type C for solution set 5

综上,通过建立成品卷烟生产调度模型和算法的设计验证可实现多方案的卷烟生产调度,并计算出机组切换次数、各品牌的完工时间、机组间的完工时间差值,为卷烟企业优化生产过程中机组的换牌生产、完工收尾等工作提供信息保障,提高企业生产组织效率和精益管理水平。

5 结语

针对卷烟生产过程中的调度问题,本文以承担成品卷烟生产任务的卷包车间为研究对象,将卷包机组生产调度问题转换为异构并行机分批调度问题,并结合实际生产工况建立符合卷包生产约束条件的仿真模型,以总切换次数和同停综合评价时间为优化目标,设计一种改进多目标差分进化算法进行求解。该算法结合分批生产特点,设计一种不规则的矩阵编码方式,同时引入反向批次学习策略、改进精英保留策略和批次拆分机制,有效改善算法的寻优能力。最终通过与不同订单量和车间规模的卷烟生产实例进行实验分析,验证了IMODE的性能及其在解决卷烟生产调度问题时的有效性,为卷烟企业合理编制成品卷烟生产计划提供了技术支持。

未来,可通过卷包排产探索发展卷烟企业全流程的生产组织调度和生产模式的绿色低碳转型,并进一步研究该算法在不同复杂工况下的适用性。

参考文献:

[1] 欧阳世波,张森寒,谢俊明,等. 计及多目标约束的成品卷烟销售订单配送调度优化[J]. 中国烟草学报, 2024, 30(2): 80-91.
 OUYANG Shibo, ZHANG Miaohan, XIE Junming, et al. Optimization of Multi-objective Constrained Distribution Scheduling of Finished Cigarette Sales Orders[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2024, 30(2): 80-91.

[2] GAO Mengxing, LIU Chenguang, LIU Zigui, et al. A Tabu Search Algorithm for the Unrelated Parallel Machine Scheduling Problem with Varied Carbon Emission Constraints in Different Time Intervals[J]. Journal of the Operational Research Society, 2024, 75(6): 1111-1125.

[3] 李丹,周延辉,周明,等. 基于遗传算法的卷烟换牌排产与优化设计[J]. 烟草科技, 2019, 52(5): 94-99.
 LI Dan, ZHOU Yanhui, ZHOU Ming, et al. Scheduling of Cigarette Brand Change and Its Optimization

- Based on Genetic Algorithm[J]. Tobacco Science & Technology, 2019, 52(5): 94-99.
- [4] 郑堃, 练志伟, 顾新艳, 等. 采用改进两点交叉算子的改进自适应遗传算法求解不相关并行机混合流水车间调度问题[J]. 中国机械工程, 2023, 34(14): 1647-1658.
- ZHENG Kun, LIAN Zhiwei, GU Xinyan, et al. Hybrid Flow Shop Scheduling Problems with Unrelated Parallel Machine Solved by Improved Adaptive Genetic Algorithm (IAGA) with ITPX [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(14): 1647-1658.
- [5] 金剑, 金钊, 祁跃东. 卷烟生产计划排产模型建立与优化[J]. 计算机工程与应用, 2013, 49(18): 253-259.
- JIN Jian, JIN Zhao, QI Yuedong. Cigarette Production Scheduling Modeling and Optimization [J]. Computer Engineering and Applications, 2013, 49(18): 253-259.
- [6] 沈倩, 管在林, 张正敏, 等. 面向卷烟生产调度的集成产能过滤算法与仿真技术的优化框架[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(5): 1462-1471.
- SHEN Qian, GUAN Zailin, ZHANG Zhengmin, et al. Optimization Framework Based on Simulation Integrated Capacity Filtering Algorithm for Cigarette Production Scheduling [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(5): 1462-1471.
- [7] 柴剑彬, 刘赫, 贝晓强. 考虑机器调整次数和产品质量的卷烟批量计划和柔性流水车间调度集成问题[J]. 运筹与管理, 2019, 28(10): 165-174.
- CHAI Jianbin, LIU He, BEI Xiaoqiang. Integrated Problem for Lot Sizing and Flexible Flow Shop Scheduling Problem in the Tobacco Industry Considering Setup Times and Cigarette Quality[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(10): 165-174.
- [8] 王伟玲, 王晶. 卷烟多目标柔性流水调度问题[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(3): 97-99.
- WANG Weiling, WANG Jing. Study on Scheduling Problem Multi-objective Flexible Flow Ling for of Cigarette [J]. Machine Design & Research, 2014, 30(3): 97-99.
- [9] 荀洪凯, 陶翼飞, 张源, 等. 多目标启发式狼群算法求解不相关并行机分批调度问题[J]. 信息与控制, 2023, 52(1): 93-103.
- XUN Hongkai, TAO Yifei, ZHANG Yuan, et al. Multi-objective Heuristic Wolf Pack Algorithm for Unrelated Parallel Machine Batch Scheduling Problem [J]. Information and Control, 2023, 52(1): 93-103.
- [10] KORDMOSTAFAPOUR A, REZAEIAN J, MAHDAVI I, et al. Scheduling Unrelated Parallel Machine Problem with Multi-mode Processing Times and Batch Delivery Cost[J]. OPSEARCH, 2022, 59(4): 1438-1470.
- [11] TREMBLET D, THEVENIN S, DOLGUI A. Makespan Estimation in a Flexible Job-shop Scheduling Environment Using Machine Learning[J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(10): 3654-3670.
- [12] 朱颖颖, 吴正佳, 唐秋华, 等. 批次受限的双目标并行机等量分批调度[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(11): 3379-3390.
- ZHU Yingying, WU Zhengjia, TANG Qiuhua, et al. Bi-objective Parallel Machine Equally Lot-sizing and Scheduling Problem under Limited Number of Sublots [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(11): 3379-3390.
- [13] EREMEEV A V, KOVALYOV M Y, KUZNETSOV P M. Lot-size Scheduling of a Single Product on Unrelated Parallel Machines [J]. Optimization Letters, 2020, 14(3): 557-568.
- [14] 宋君乐, 陶翼飞, 可晓东, 等. 分区编码HBGWO算法求解并行机分批调度问题[J]. 机械设计, 2022, 39(10): 48-59.
- SONG Junle, TAO Yifei, KE Xiaodong, et al. Partition-encoding HBGWO Algorithm for Lot-sizing Scheduling Problem of Unrelated Parallel Machines [J]. Journal of Machine Design, 2022, 39(10): 48-59.
- [15] 刘东洋, 余军合, 战洪飞, 等. 基于改进双层遗传算法的模块化批量装配生产分批调度[J]. 机械制造, 2023, 61(6): 84-91.
- LIU Dongyang, YU Junhe, ZHAN Hongfei, et al. Modular Batch Assembly Production Scheduling Based on Improved Bi-level Genetic Algorithm [J]. Machinery, 2023, 61(6): 84-91.
- [16] 谢法吾, 李玲玲, 李丽, 等. 基于多目标混合进化算法的作业车间混排可变分批节能调度方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(13): 1576-1588.
- XIE Fawu, LI Lingling, LI Li, et al. Energy-efficient Job Shop Scheduling with Variable Lot Splitting and Sublots Intermingling Based on Multi-objective Hybrid Evolutionary Algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(13): 1576-1588.
- [17] FALLAHI A, SHAHIDI-ZADEH B, NIAKI S T A. Unrelated Parallel Batch Processing Machine Scheduling for Production Systems under Carbon Reduction Policies: NSGA-II and MOGWO Metaheuristics [J]. Soft Computing, 2023, 27(22): 17063-17091.
- [18] 魏书鹏, 唐红涛, 李西兴, 等. 考虑双资源约束的

- 柔性机械加工车间逆调度问题研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(3): 457-471.
- WEI Shupeng, TANG Hongtao, LI Xixing, et al. Dual-resource Constrained Flexible Machining Workshop Inverse Scheduling Problem [J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(3): 457-471.
- [19] WANG Tianyu, CAI Changbing, GAO Yulei, et al. Adaptive Online Learning for System Identification and In-advance Optimization under Long Feedback Delay and Concept Drift in Cigarette Production [J]. Drying Technology, 2022, 40 (15) : 3340-3356.
- [20] ZHAO Fuqing, ZHANG Hui, WANG Ling, et al. A Multi-objective Discrete Differential Evolution Algorithm for Energy-efficient Distributed Blocking Flow Shop Scheduling Problem [J]. International Journal of Production Research, 2024, 62 (12) : 4226-4244.
- [21] SINGH M K, VERMA Y K. Refraction Reverse Learning Based Hybrid Namib Antenna Beetle Optimization for Resource Allocation in NB-IoT Platform [J]. Multimedia Tools and Applications, 2024, 83 (18): 53687-53713.
- [22] HOSSEINI S E, KARIMI O, ASEMANBAKHSH MALI. Experimental Investigation and Multi-objective Optimization of Savonius Wind Turbine Based on Modified Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II[J]. Wind Engineering, 2024, 48(3) : 446-467.
- [23] HARIZAN S, KUILA P, KUMAR A, et al. Multi-objective Evolutionary Algorithms for Coverage and Connectivity Aware Relay Node Placement in Cluster-based Wireless Sensor Networks [J]. Wireless Personal Communications, 2024, 135(2) : 979-1008.
- [24] BRAUN M, SHUKLA P. On Cone-based Decompositions of Proper Pareto-optimality in Multi-objective Optimization[J]. European Journal of Operational Research, 2024, 317(2) : 592-602.
- [25] HAGHGOEI A, IRAJPOUR A, HAMIDI N. A Multi-objective Optimization Model of Truck Scheduling Problem Using Cross-dock in Supply Chain Management: NSGA-II and NRGGA[J]. Journal of Modelling in Management, 2024, 19 (4) : 1155-1179.
- [26] KABIRI E, MAFTOUNI N. Multiple Objective Energy Optimization of a Trade Center Building Based on Genetic Algorithm Using Ecological Materials[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 9366.
- [27] CUI Hanghao, LI Xinyu, GAO Liang, et al. Multi-population Genetic Algorithm with Greedy Job Insertion Inter-factory Neighbourhoods for Multi-objective Distributed Hybrid Flow-shop Scheduling with Unrelated-parallel Machines Considering Tardiness [J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(12): 4427-4445.
- [28] 何文婕, 许玉江, 闫浩峰, 等. 一种面向卷烟混合生产线的优化调度模型研究[J]. 包装工程, 2022, 43(17): 298-307.
- HE Wenjie, XU Yujiang, YAN Haofeng, et al. Optimization Scheduling Model for Hybrid Production Line of Cigarette[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(17): 298-307.
- [29] 张源, 陶翼飞, 王加冕. 改进差分进化算法求解混合流水车间调度问题[J]. 中国机械工程, 2021, 32 (6): 714-720.
- ZHANG Yuan, TAO Yifei, WANG Jiamian. An Improved DE Algorithm for Solving Hybrid Flow-shop Scheduling Problems[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(6): 714-720.
- [30] NIU Wei, LI Junqing, JIN Hui, et al. Bi-objective Optimization Using an Improved NSGA-II for Energy-efficient Scheduling of a Distributed Assembly Blocking Flowshop [J]. Engineering Optimization, 2023, 55(5): 719-740.
- [31] 何李, 陶翼飞, 罗俊斌, 等. 基于两阶段狼群算法的自动化立体仓库作业集成优化[J]. 中国机械工程, 2022, 33(21): 2538-2546.
- HE Li, TAO Yifei, LUO Junbin, et al. Job Integrated Optimization of Automated Storage/Retrieval Systems Based on Two-stage Wolf Pack Algorithm [J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(21) : 2538-2546.

(编辑 陈勇)

作者简介: 安裕强, 男, 1985年生, 博士研究生、工程师。研究方向为供应链管理、决策支持系统及理论。E-mail: 59672319@qq.com。张源(通信作者), 男, 1996年生, 助理工程师、硕士。研究方向为卷烟排产与优化调度算法。E-mail: 403426571@qq.com。

本文引用格式:

安裕强, 张源, 邹平等. 基于批次拆分机制的IMODE算法求解成品卷烟生产调度问题[J]. 中国机械工程, 2025, 36(8): 1893-1903.

AN Yuqiang, ZHANG Yuan, ZOU Ping, et al. IMODE Algorithm for Solving Cigarette Product Production Scheduling Problems Based on Lot-size Splitting Mechanism[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(8): 1893-1903.