

# 基于改进 NSGA-II 算法的高维多目标柔性冲压车间生产调度优化

唐艺军<sup>1</sup>, 王艳灵<sup>1</sup>, 孙浩强<sup>2</sup>

(1. 辽宁工程技术大学 工商管理学院, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 辽宁工程技术大学 电子与信息工程学院, 辽宁 葫芦岛 125000)

**摘要:** 为了优化柔性冲压车间的生产调度、减少车间的生产能耗、实现绿色可持续发展, 以车间总能耗、最大完工时间、总拖期、设备总负载最小为目标, 建立了高维多目标柔性车间调度模型。提出改进的二代非支配排序遗传算法 NSGA-II, 该算法优化了局部搜索操作、精英选择策略、交叉和变异概率。根据柔性冲压车间的生产实例, 利用传统和改进的 NSGA-II 算法分别对 4 个目标函数进行求解, 并对各目标的优化迭代过程进行对比, 验证了改进算法的有效性。同时, 采用优劣解距离法选取一个调度方案, 与基于传统 NSGA-II 算法求出的生产调度方案相比, 改进算法得出的调度方案的车间总能耗降低了 22.1%、最大完工时间缩短了 14.8%、设备总负载减少了 11.6%。

**关键词:** 柔性冲压车间; 高维多目标; NSGA-II 算法; 生产调度; 车间总能耗

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.11.028

**中图分类号:** TH186 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 11-0204-08

## Production scheduling optimization on high dimensional multi-objective flexible stamping workshop based on improved NSGA-II algorithm

Tang Yijun<sup>1</sup>, Wang Yanling<sup>1</sup>, Sun Haoqiang<sup>2</sup>

(1. School of Business Administration, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125000, China)

**Abstract:** In order to optimize the production scheduling of flexible stamping workshop, reduce the production energy consumption of workshop, and achieve green and sustainable development, a high dimensional multi-objective flexible workshop scheduling model was established with the goal of minimizing the total energy consumption of workshop, the maximum completion time, the total delay time and the total equipment load, and an improved second-generation non-dominated sorting genetic algorithm NSGA-II was proposed, which optimized the local search operations, elitist selection strategy, crossover and variance probabilities. Then, the four objective functions were solved by the conventional and improved NSGA-II algorithms based on the production example of flexible stamping workshop, and the effectiveness of the improved algorithm was verified by comparing the optimization iterative process of each objective. At the same time, a scheduling scheme was selected by using the technique for order preference by similarity to an ideal solution, compared with the production scheduling scheme based on the traditional NSGA-II algorithm, the scheduling scheme obtained by the improved algorithm reduced the total energy consumption of workshop by 22.1%, the maximum completion time was shortened by 14.8%, and the total equipment load was reduced by 11.6%.

**Key words:** flexible stamping workshop; high dimensional multi-objective; NSGA-II algorithm; production scheduling; total energy consumption of workshop

冲压产品因具有强度高、重量低等优点被广泛应用于汽车制造、电器生产、电子产品制造等领域, 因此冲压行业在制造行业中占有重要地位。由于客

户需求逐渐多样化, 冲压车间也逐步从大规模的生产模式转变为多品种小批量的柔性生产。此外, 在当前提倡绿色发展的背景下, 需要优化冲压车间的生产调度来合理分配设备及工件的加工顺序, 从而提高车间的生产效率、降低能耗<sup>[1]</sup>, 因此对冲压车间调度优化的研究具有重要意义。

冲压车间的生产调度问题属于柔性作业车间调度问题 (Flexible Job-shop Scheduling Problem, FJSP)<sup>[2]</sup>, 依据优化目标的数量差异可以进一步分为单目标 FJSP 和多目标 FJSP<sup>[3]</sup>。此外, 多目标

收稿日期: 2023-03-22; 修订日期: 2023-06-22

基金项目: 辽宁省社科基金 (L18ASZ002); 煤炭部教改项目 (2021MXJG116)

作者简介: 唐艺军 (1974-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 38831574@qq.com

通信作者: 王艳灵 (1998-), 女, 硕士研究生

E-mail: yanl3017@163.com

FJSP 又可以分为高维 FJSP (求解目标大于 3 个) 和低维 FJSP。目前, 在求解 FJSP 时可以分为最优化方法和智能算法, 其中, 最优化方法由于计算难度高, 对于大规模问题不适用; 近年来学者们多使用智能算法对 FJSP 进行求解, 如蜂群算法<sup>[4]</sup>、粒子群算法<sup>[5]</sup>、模拟退火算法<sup>[6]</sup>、变邻域搜索算法<sup>[7]</sup>和遗传算法<sup>[8]</sup>等。王小梅等<sup>[9]</sup>以能耗和完工时间为优化目标建立模型, 对遗传算法交叉和变异算子进行改进, 提供了多种可选的方案来对冲压件生产进行调度优化。周春生等<sup>[10]</sup>采用遗传算法进行多层编码来求解以最大完工时间、总加工成本和总加工能耗为目标构建的模型, 在一定程度上减少了冲压车间的能耗。刘世平等<sup>[11]</sup>以完工时间和能耗为优化目标, 通过改进 NSGA-II 算法并与原算法进行对比分析, 从而为冲压车间选出更优的调度方案。朱先萌等<sup>[12]</sup>以加工成本、换模次数和最大完工时间最小建立目标模型, 利用遗传算法进行求解, 并借助加权法对方案进行评价来提高冲压车间生产效率。陈帆<sup>[13]</sup>针对冲压车间的节能问题, 以能耗和完工时间为目标, 通过混合遗传算法和模拟退火进行求解, 并验证了改进的算法对于节能生产更加有效。综上所述, 大多数学者在研究冲压车间的调度时一般优化了 2 个或 3 个目标, 关注目标较少, 无法满足复杂的生产决策需要, 因此, 高维多目标柔性冲压车间调度是目前需要深入研究的。

针对柔性冲压车间的高维多目标调度问题, 本文构建了以最大完工时间、设备总负载 (所有设备加工所有冲压件的所用时长之和)、车间总能耗、总拖期为 4 个优化目标的数学模型, 提出了改进的 NSGA-II 算法进行求解, 并通过优劣解距离法 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, TOPSIS) 从可行解中得出满意的生产调度方案, 为生产决策提供帮助。

## 1 冲压车间多目标调度模型

### 1.1 问题描述

冲压车间调度问题描述为: 在一个冲压车间中, 需要加工的冲压件有  $n$  种 (批次), 记为  $J = \{J_1, J_2, J_3, \dots, J_n\}$ , 可利用的加工设备有  $k$  台, 记为  $M = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_p, \dots, M_k\}$ ,  $1 \leq p \leq k$ , 第  $i$  种冲压件的工序数为  $q_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 第  $i$  种冲压件包含的工件数为  $B_i$ , 每种冲压件的各工序可以选择在不同的设备上加工, 在不同的设备上所

需要的时间和能耗不尽相同。冲压车间进行调度时主要考虑两部分: (1) 为冲压件的各工序选择合适的加工设备; (2) 为加工设备上的各工序进行排序, 从而使构建的目标函数较优。

根据实际生产情况, 对该问题做出如下假设:

(1) 各种冲压件生产过程中必须按照预定的工艺流程进行生产;

(2) 冲压件有多个加工工序, 某些工序可选的加工设备不止一台, 但该工序在设备里只能选择一台进行加工;

(3) 一台设备同一时刻只能处理某种冲压件的某一道工序;

(4) 冲压件的某道工序一旦选择某台设备进行加工后不能中断。

### 1.2 建立多目标模型

#### 1.2.1 符号定义

多目标模型相关符号及含义见表 1。

表 1 模型相关符号及含义

Table 1 Model-related symbols and meanings

符号	含义
$n$	冲压件的种类数
$J_i$	第 $i$ 种冲压件
$q_i$	第 $i$ 种冲压件的工序个数
$B_i$	第 $i$ 种冲压件包含的工件数
$k$	加工设备总数
$M_p$	第 $p$ 台加工设备
$O_{ij}$	第 $i$ 种冲压件的第 $j$ 道工序
$S_{ijp}$	第 $i$ 种冲压件的第 $j$ 道工序在第 $p$ 台设备上加工开始的时刻
$L_{ijp}$	第 $i$ 种冲压件的第 $j$ 道工序在第 $p$ 台设备上加工停止的时刻
$t_{ijp}$	第 $i$ 种冲压件的第 $j$ 道工序在第 $p$ 台设备上加工的时间
$C_i$	第 $i$ 种冲压件加工完成的时间
$d_i$	第 $i$ 种冲压件的交货期
$CE$	车间辅助能耗
$PE$	各设备的加工能耗总和
$SE$	各设备的空载能耗总和
$TE$	冲压件的运输能耗总和
$Q$	车间固定功率
$pe^p$	第 $p$ 台设备的单位加工能耗
$se^p$	第 $p$ 台设备的单位空闲能耗
$P$	单位运输能耗
$t_p$	第 $p$ 台加工设备的空转时间
$H_{ijp}$	第 $i$ 种冲压件由加工第 $(j-1)$ 道工序时的设备转移至第 $p$ 台设备上加工第 $j$ 道工序的运输时间
$x_{ijp}$	取 0 或 1, 第 $i$ 种冲压件的第 $j$ 道工序在第 $p$ 台设备上加工时为 1, 否则为 0

### 1.2.2 目标函数的建立

结合实际生产需要,以最大完工时间、总拖期、设备总负载、车间总能耗最小为优化目标。

#### (1) 最大完工时间 $f_1$

将所有待加工的冲压件加工完成所需要的时间视为最大完工时间,其可以看作企业是否能按时完成订单以及生产效率高低的指标,计算公式为:

$$f_1 = \max(C_i | i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

#### (2) 总拖期 $f_2$

各批次冲压件加工完成后延期交货的时间总和视为总拖期,因为提前完工会增加企业的库存成本,但延期交货时间过长会影响企业的信誉,所以在生产过程中需提高对该指标的重视,该指标函数值大于等于零,且最小时代表最优,其计算公式为:

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \max[C_i - d_i, 0] \quad (2)$$

#### (3) 设备总负载 $f_3$

各批次冲压件加工完成时,所有设备的总运行时间,计算公式为:

$$f_3 = \sum_{p=1}^k \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{i=1}^n t_{ijp} \times x_{ijp} + \sum_{p=1}^k t_p \quad (3)$$

#### (4) 车间总能耗 $f_4$

随着时代的发展,国家更加注重绿色化生产,所以对车间能耗的关注也逐步提高,在满足生产的条件下,使车间各种能耗总和最小时为最优。冲压设备主要分为启动、加工、空载 3 种加工状态,但冲压设备启动和停止时间很短,消耗的能量忽略。此外,在批量生产过程中有上下料过程,在此过程中设备处于空载状态,能耗和冲压设备型号及空载时间有关;而且不同工序在不同设备上加工时,还需要运输工具完成转移,视为运输能耗,简化为只与运输时间和运输工具的功率有关。故本文车间总能耗  $f_4$  是由各设备的加工能耗总和  $PE$ 、各设备的空载能耗总和  $SE$ 、冲压件的运输能耗总和  $TE$ 、车间辅助能耗  $CE$  组成的,计算公式为:

$$f_4 = PE + SE + TE + CE \quad (4)$$

$$PE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{p=1}^k t_{ijp} \times x_{ijp} \times pe^p \quad (5)$$

$$SE = \sum_{p=1}^k se^p \times t_p \quad (6)$$

$$TE = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{q_i} \sum_{p' \geq 2}^k H_{ijp'} \times x_{ijp'} \times P \quad (7)$$

$$CE = Q \times \max(C_i | i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (8)$$

式中:  $p'$  为加工设备序号,  $p' \in [2, k]$ 。

综上可得到冲压车间的生产调度多目标函数  $f$  如下:

$$f = \min(f_1, f_2, f_3, f_4) \quad (9)$$

$$\sum_{p=1}^k x_{ijp} = 1 \quad (10)$$

$$C_i + H_{ijp} \leq S_{i(j+1)p} \quad (11)$$

$$S_{i(j+1)p} \geq L_{ijp} \quad (12)$$

式 (10) 表示一台冲压机在某一时刻只能对一种工件的一道工序进行加工,式 (11) 表示冲压件在运输完成后才能继续加工下一道工序,式 (12) 表示冲压件必须按照预定的各工序的先后顺序进行加工。

## 2 改进 NSGA-II 算法设计

NSGA-II 算法是一种基于帕累托最优概念的遗传算法,用于解决某些多目标优化的问题,为了提高算法的运行和寻优能力,本文主要从局部搜索、精英保留策略、交叉和变异概率 3 方面对 NSGA-II 算法进行改进,并通过 TOPSIS 法从可行解里选出满意解,生成对应的生产调度甘特图,改进的算法具体流程见图 1。

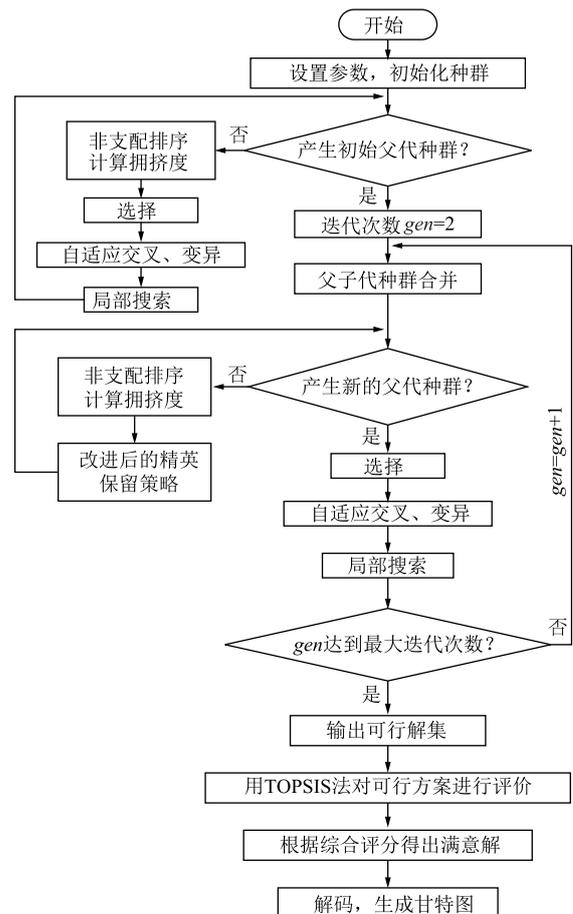


图 1 改进算法的流程图

Fig. 1 Flow chart of improved algorithm

### 2.1 染色体的编码和解码设计

根据冲压车间的特点，在进行生产调度优化时需要为每批次冲压件的工序选择合适的设备以及对同一台设备上不同批次冲压件的加工工序的先后顺序进行安排，所以文中采用基于工序排序和设备分配的双层编码，如图 2 所示。

工序编码	3	2	4	3	2	1	3	4	1	4
设备编码	1	4	1	6	4	3	3	6	3	5

图 2 基于工序、设备的双编码

Fig. 2 Double-encoding based on process and equipment

上述编码方式包括两部分，前半部分代表各批次冲压件加工的工序排列，相同的数字代表同一批次，每个相同数字第  $j$  次出现时，代表该批次的第  $j$  道工序；后半部分是设备的选择，每一个数字分别代表前半部分各批次工件的工序所选择的设备编号。如图 2 所示，前半部分的工序编码 [3, 2, 4, 3, 2, 1, 3, 4, 1, 4] 中第 1 个 4 代表第 4 批次冲压件的第 1 道工序；后半部分的设备编码 [1, 4, 1, 6, 4, 3, 3, 6, 3, 5] 中的第 2 个 1 代表第 4 批次冲压件的第 1 道工序在第 1 台设备上加工，后续的编码含义同上。解码是把编码转化为车间调度方案的过程，本文使用 Salido M A 等<sup>[14]</sup>所提的插入式贪婪式解码算法。

### 2.2 适应度函数

把最大完工时间  $f_1$ 、总拖期  $f_2$ 、设备总负载  $f_3$  和车间总能耗  $f_4$  的多目标函数  $f$  作为适应度函数。

### 2.3 选择操作

选择操作是把本代种群中部分优良个体选出进入下一代，使下一代解的质量优于本代，并且促使解集向着最优解存在的区域进化的重要步骤，文中采用二元锦标赛选择法。

### 2.4 交叉和变异操作

交叉操作有利于算法实现全局搜索，文中采用张志鹏等<sup>[15]</sup>改进的 IPOX (Improved Precedence Operation Crossover) 交叉方法，对工序部分和设备选择部分分别进行交叉操作。

(1) 工序交叉。首先在种群中选出两个染色体并记为  $F1$  和  $F2$ ，然后把染色体上的工件分为  $D$  和  $E$  两个集合，按照图 3 进行工序交叉，交叉后的染色体为  $S_1$  和  $S_2$ ，在图 3 中， $D=\{2, 3\}$ ， $E=\{1, 4\}$ 。

(2) 设备交叉。设备交叉原理和工序交叉相同，选出基于设备编码的父代染色体记为  $MF1$  和

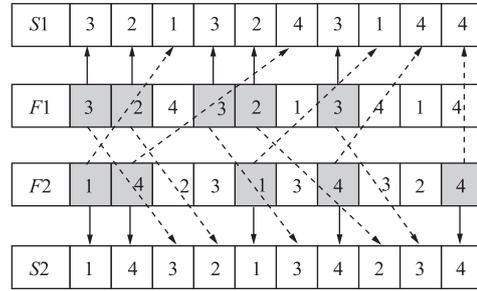


图 3 工序交叉过程

Fig. 3 Crossover process of processes

$MF2$ ，交叉后的染色体为  $MS1$  和  $MS2$ ，交叉过程如图 4 所示。

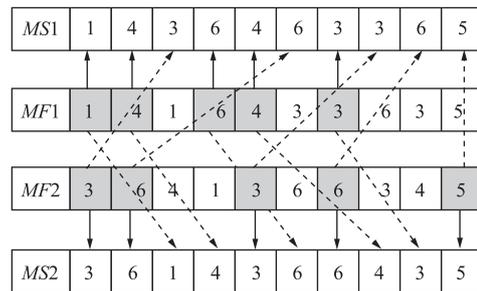


图 4 设备交叉过程

Fig. 4 Crossover process of equipment

本文采用随机选择两点来交叉的方法进行变异操作，如图 5 所示。具体步骤为：首先，生成两个属于  $[1, n']$  的随机整数，并且两数不相等 ( $n'$  为所有工件工序的总数量)，把这两个数对应的工序进行交叉变异，因为某个工件的工序加工顺序是有规定的，若通过这种方式产生了非法解，就需要按图 5 进行修正以得到可行解。以图 5 为例，随机选择的交叉位为工序编码的第 1 位和第 6 位，在进行变异后，原来第 3 批次的第 1 道工序变成了第 2 道工序，导致不符合预定的加工顺序，此时将变异后各工序对应的设备编号进行调整得到可行解。

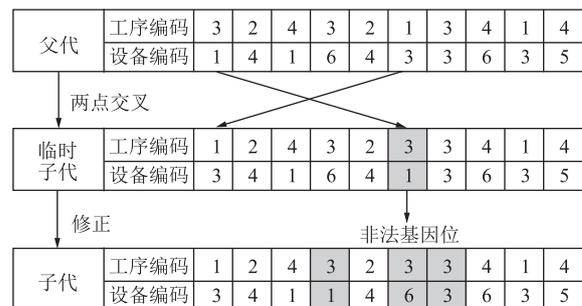


图 5 两点变异过程

Fig. 5 Two-point variation process

## 2.5 改进的自适应交叉和变异概率

交叉概率越大时,已有个体结构改变的几率也越大,但若原个体较优,反而破坏了可行解;交叉概率较小时,容易使算法陷入局部最优。因此,可以使较优个体的交叉概率较小,较差个体的交叉概率较大,计算公式如下:

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f_{\text{avg}} - f_a)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f'_a > f_{\text{avg}} \\ P_{c1} & f'_a \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_c$  为交叉概率,  $P_c \in [P_{c2}, P_{c1}]$ ,  $P_{c2}$  和  $P_{c1}$  分别为交叉概率的最小值和最大值,本文中  $P_{c1}$ 、 $P_{c2}$  为 0.9 和 0.5;  $f'_a$  为所选个体的最大适应度值;  $f_a$  为交叉前个体  $a$  的适应度值;  $f_{\text{max}}$  和  $f_{\text{avg}}$  分别为种群中所有个体适应度值的最大值和平均值。

变异操作可改变个体中一个或多个基因的值,其操作的执行依赖于变异概率的设置,对变异概率进行自适应调整,计算公式如下:

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\text{avg}} - f_a)}{f_{\text{max}} - f_{\text{avg}}} & f'_a > f_{\text{avg}} \\ P_{m1} & f'_a \leq f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $P_m$  为变异概率,  $P_m \in [P_{m2}, P_{m1}]$ ,  $P_{m2}$  和  $P_{m1}$  分别为变异概率的最小值和最大值,本文中  $P_{m2}$  和  $P_{m1}$  为 0.005 和 0.100。

## 2.6 引入局部搜索操作

为了寻找更优方案,在非支配排序等级为 1 的点和除去该点之外拥挤度距离排名前 5 的点周围进行局部搜索,把搜索后的个体同之前的个体进行比较,保留性能较好的个体,从而寻找到更优的解,以保证解的均匀分布和广泛性。

## 2.7 改进的精英保留策略

传统的精英保留策略首先对非支配层级较低的部分进行选取,一旦种群中个体数量满足要求,则不会

再选择非支配层级高的个体进入新种群,用这种方式进行选择时拥挤度距离就只作用于最后选中的非支配层,导致种群缺乏多样性。由式(15)可确定各可支配层需要删除的个体数量,使各个层级的个体均有机会进入新的父代种群,而且非支配层级的等级越低,删除的个体比例越小,保留下来的越多,这既有利于把精英解保留下来也增加了种群的多样性。

$$Q_m = \begin{cases} \left\lceil \frac{mQ_e}{1 + 2 + \dots + M'} \right\rceil & 1 \leq m \leq M' - 1 \\ Q_e - \sum_{g=1}^{M'-1} Q_g & m = M' \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $Q_m$  为非支配层  $m$  所需要舍弃的个体数量;  $\lceil \cdot \rceil$  为向下取整函数符号;  $M'$  为非支配层级的数量;  $Q_e$  为合并后的父子种群超出新的父代种群的个体数量;  $Q_g$  为非支配层  $g$  所需要舍弃的个体数量。

## 3 实例验证与分析

### 3.1 案例介绍

以某冲压车间为例来验证改进的 NSGA-II 算法对其生产调度模型的有效性,该车间在某一生产周期内要生产 5 种冲压件  $J_1 \sim J_5$ ,加工过程包括剪切、冲裁、折弯、翻边等工序,车间可用的设备为 8 台 ( $M_1 \sim M_8$ ),每种冲压件需要加工的数量、所规定的交货期、在各个设备上的加工时间、空载时间、所需的单位加工能耗和单位空载能耗如表 2 所示。此外,由于冲压机在加工不同的工序时需要换模,但各个模具和冲压机的不同,这个时间是不同的,统一把换模调整时间简化为 30 min;使用功率为 7.5 kW 的电动叉车来进行各工件在不同冲压机之间的运输;各冲压机放置的距离间隔相同,电动叉车在相邻冲压机之间的运输时间为 300 s。

表 2 冲压件各工序的加工信息

Table 2 Processing information of each process for stamping parts

冲压件	工序	批量/个	交货期/h	单个冲压件的各工序在设备上的加工时间/s								空载时间/s	单位时间加工能耗/J
				$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$		
$J_1$	$O_{11}$	300	8	12	10	—	—	—	—	—	—	8	57326
	$O_{12}$			—	—	—	16	19	18	—	—	11	47672
	$O_{13}$			—	—	—	—	—	11	13	14	9	35928
$J_2$	$O_{21}$	200	7	12	14	11	—	—	—	—	—	9	67931
	$O_{22}$			—	—	—	15	13	16	—	—	10	58248
	$O_{23}$			—	—	—	—	—	10	13	12	7	42306
	$O_{24}$			—	—	—	—	—	16	14	12	8	33620

续表 2

冲压件	工序	批量/个	交货期/h	单个冲压件的各工序在设备上的加工时间/s								空载时间/s	单位时间加工能耗/J	
				$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$	$M_7$	$M_8$			
$J_3$	$O_{31}$	400	6	10	12	—	—	—	—	—	—	—	8	60389
	$O_{32}$			—	—	—	—	18	19	16	—	—	12	42801
	$O_{41}$			12	13	—	—	—	—	—	—	—	9	70384
$J_4$	$O_{42}$	200	5	—	—	—	12	13	15	—	—	7	62610	
	$O_{43}$			—	—	—	—	—	15	13	14	8	54992	
	$O_{51}$			16	—	14	—	—	—	—	—	11	68763	
$J_5$	$O_{52}$	300	6	—	—	—	—	14	15	17	—	9	45028	
	$O_{53}$			—	—	—	—	—	17	15	13	10	38028	
各设备单位时间空载能耗/J				37000	34000	35500	33000	30600	32000	31600	30900			

3.2 结果分析

根据冲压车间的生产信息，在 MATLAB 软件中分别使用改进和传统的 NSGA-II 算法对冲压件加工的最大完工时间、总拖期、设备总负载、车间总能耗这 4 个目标进行优化求解，其中种群大小

设置为 200，迭代次数设置为 200，根据式 (13) 和式 (14) 来设置的自适应交叉和变异概率。在算法运行过程中各个目标的变化趋势如图 6 所示，可见改进后的算法收敛速度更快，得出的可行解更优。

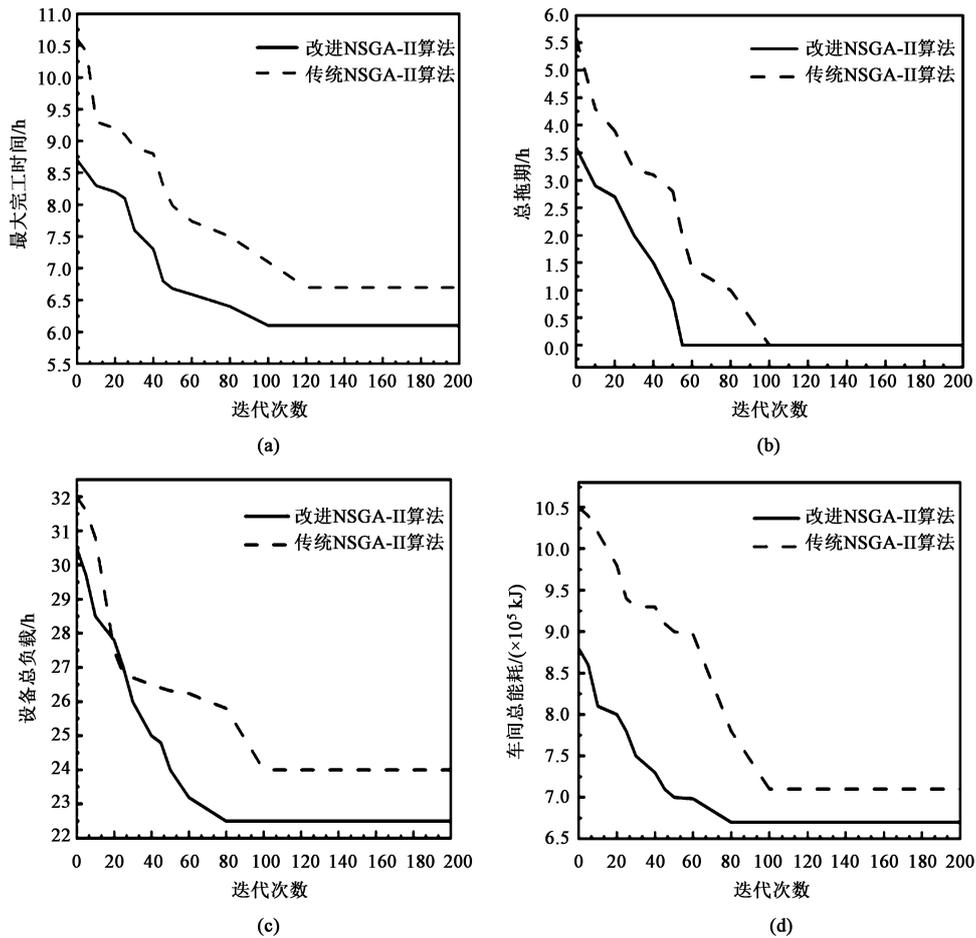


图 6 各目标函数在迭代过程中的变化趋势

(a) 最大完工时间 (b) 总拖期 (c) 设备总负载 (d) 车间总能耗

Fig. 6 Change trend of each objective function during iterative process

(a) Maximum completion time (b) Total delay time (c) Total equipment load (d) Total energy consumption of workshop

在算法运行求出可行方案后,根据管理层战略规划以及冲压车间的实际情况对所求解的 4 个目标设置决策权重为  $W=(0.3, 0.2, 0.2, 0.3)$ ,各目标的权重可根据企业发展需要进行调整,再采用 TOPSIS 法对可行方案进行排序,如表 3 所示。

表 3 TOPSIS 综合评价方案排序

Table 3 Ranking of TOPSIS comprehensive evaluation schemes				
可行调度方案序号	到正理想解的距离	到负理想解的距离	综合评分	综合排名
1	0.207	0.038	0.154	102
2	0.194	0.049	0.201	76
3	0.214	0.045	0.173	89
4	0.186	0.093	0.334	34
5	0.172	0.126	0.423	19
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
199	0.207	0.061	0.227	57
200	0.202	0.064	0.241	48

根据 TOPSIS 法求出的各方案排序得出满足多目标函数的较优方案,其对应的生产调度甘特图分别如图 7 和图 8 所示,其中 203 表示第 2 种冲压件的第 3 道工序,其他同理,可看出与传统调度所需要的车间总能耗  $8.968 \times 10^8$  J、最大完工时间 7.74 h、总拖期 0 h、设备总负载 26.24 h 相比,改进的 NSGA-II 算法求出的生产调度方案的车间总能耗下降了 22.1%、最大完工时间缩短了 14.8%,设备总负载缩短了 11.6%,表明改进的 NSGA-II 算法可以较好地优化冲压车间的生产调度。

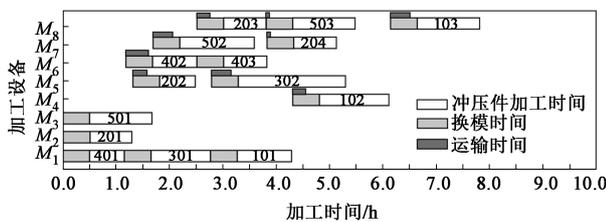


图 7 传统 NSGA-II 算法的生产调度甘特图

Fig. 7 Gantt chart of production scheduling for conventional NSGA-II algorithm

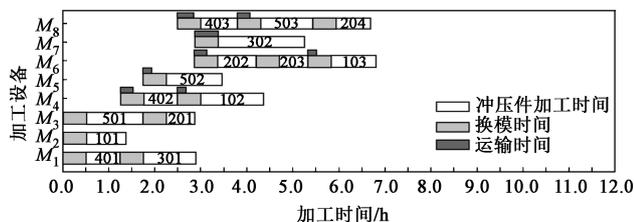


图 8 改进 NSGA-II 算法的生产调度甘特图

Fig. 8 Gantt chart of production scheduling for improved NSGA-II algorithm

## 4 结语

根据冲压车间的特点研究了冲压件生产调度的高维多目标优化问题,以最大完工时间、总拖期、设备总负载、车间总能耗最小为优化目标构建了数学模型,对 NSGA-II 算法的局部搜索、精英保留策略、交叉、变异概率进行了改进。根据冲压件生产车间的加工数据在 MATLAB 中分别使用传统和改进的 NSGA-II 算法对 4 个目标函数进行求解,对其迭代过程进行比较验证了算法的可行性并求出可行的调度方案。最后,采用 TOPSIS 法进行方案评价求出较优方案并生成对应的生产调度甘特图,与传统 NSGA-II 的生产调度甘特图进行比较,结果表明,使用改进的 NSGA-II 算法能减少冲压件生产的最大完工时间、设备总负载、车间总能耗,从而更好地优化冲压车间的生产调度。

### 参考文献:

- [1] 张晓丽. 考虑能耗和模糊交货期的柔性作业车间动态调度研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2019.  
Zhang X L. Research on Dynamic Scheduling of Flexible Job Shop Considering Energy Consumption and Fuzzy Delivery Time [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2019.
- [2] 张守京, 杜昊天, 侯天天. 求解多目标双资源柔性车间调度问题的改进 NSGA-II 算法 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (5): 771-778.  
Zhang S J, Du H T, Hou T T. An improved NSGA-II algorithm for solving multi-objective dual resource constrained flexible job shop scheduling problem [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41 (5): 771-778.
- [3] 吴定会, 孔飞, 田娜, 等. 教与同伴学习粒子群算法求解多目标柔性作业车间调度问题 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (6): 1617-1622, 1627.  
Wu D H, Kong F, Tian N, et al. Teaching and peer-learning particle swarm optimization for multi-objective flexible job-shop scheduling problem [J]. Journal of Computer Applications, 2015, 35 (6): 1617-1622, 1627.
- [4] Wang L, Zhou G, Xu Y, et al. An effective artificial bee colony algorithm for the flexible job-shop scheduling problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60: 303-315.
- [5] 吕媛媛, 樊坤, 瞿华, 等. 多目标粒子群算法求解混合多处理机任务作业车间调度问题研究 [J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43 (1): 218-224.  
Lyu Y Y, Fan K, Qu H, et al. Research on multi-objective particle swarm algorithm for solving hybrid job-shop scheduling with multiprocessor task [J]. Journal of Chinese Computer Systems,

- 2022, 43 (1): 218-224.
- [6] 黎阳, 李新宇, 牟健慧. 基于改进模拟退火算法的大规模置换流水车间调度 [J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26 (2): 366-375.  
Li Y, Li X Y, Mou J H. Large-scale permutation flowshop scheduling method based on improved simulated annealing algorithm [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26 (2): 366-375.
- [7] Hansen P, Mladenović N, Moreno Pérez J A. Variable neighbourhood search: Methods and applications [J]. Annals of Operations Research, 2010, 175: 367-407.
- [8] 王春, 张明, 纪志成, 等. 基于遗传算法的多目标动态柔性作业车间调度 [J]. 系统仿真学报, 2017, 29 (8): 1647-1657.  
Wang C, Zhang M, Ji Z C, et al. Genetic algorithm for solving multi-objective dynamic flexible job shop scheduling [J]. Journal of System Simulation, 2017, 29 (28): 1647-1657.
- [9] 王小梅, 任伟娜, 吴琼宇. 基于遗传算法的柔性冲压车间生产调度多目标优化 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (10): 203-209.  
Wang X M, Ren W N, Wu Q Y. Multi-object optimization on flexible stamping workshop production scheduling based on genetic algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (10): 203-209.
- [10] 周春生, 刘志峰, 黄海鸿, 等. 基于遗传算法的冲压车间节能调度优化研究 [J]. 制造业自动化, 2018, 40 (5): 58-63, 98.  
Zhou C S, Liu Z F, Huang H H, et al. Energy-saving scheduling optimization study based on genetic algorithm in pressing job-shop [J]. Manufacturing Automation, 2018, 40 (5): 58-63, 98.
- [11] 刘世平, 刘武发. 冲压车间调度的动态拥挤度 NSGA-II 多目标优化方法 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 76-82.  
Liu S P, Liu W F. Multi-object optimization method on stamping workshop scheduling based on dynamic congestion degree NSGA-II algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 76-82.
- [12] 朱先萌, 姜兆亮, 魏清月, 等. 多品种小批量产品冲压计划排程多目标优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (9): 1907-1916.  
Zhu X M, Jiang Z L, Wei Q Y, et al. Multi-objective optimization for stamping plan scheduling of multi-varieties and small-batch products [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23 (9): 1907-1916.
- [13] 陈帆. 基于能耗优化的冲压车间调度问题研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.  
Chen F. Research on Stamping Workshop Scheduling Problem Based on Energy Consumption Optimization [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [14] Salido M A, Escamilla J, Barber F, et al. Energy efficiency, robustness, and makespan optimality in job-shop scheduling problems [J]. AI EDAM, 2016, 30 (3): 300-312.
- [15] 张志鹏, 黄明. 基于改进多目标遗传算法求解混合流水车间调度问题 [J]. 计算机应用与软件, 2015, 32 (10): 291-293, 314.  
Zhang Z P, Huang M. Solving hybrid flow-shop scheduling based on improved multi-objective genetic algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2015, 32 (10): 291-293, 314.

## 《锻压技术》杂志四篇论文荣获“2023 年度中国机械工程学会优秀论文”奖

近日, 中国机械工程学会公布了“2023 年度中国机械工程学会优秀论文”遴选结果的通知, 经过评审专家网上评议和终审评审专家委员会现场评定, 遴选出 108 篇优秀论文, 其中综述型 9 篇、基础研究论文 34 篇、应用研究论文 65 篇。《锻压技术》杂志共 4 篇论文入选“2023 年度中国机械工程学会优秀论文”。

### 《锻压技术》杂志获得“2023 年度中国机械工程学会优秀论文”奖清单

序号	论文题目	作者	单位	刊期
1	基于深度神经网络的 TA15 高温拉伸变形行为精确预测	唐学峰、黄振、温红宁、王欣、刘鹏、刘钊、王新云	华中科技大学、黛杰汉金(沧州)精密模具有限公司、上海电机学院	2021 年第 9 期
2	铝合金大型薄壁异型曲面旋压件的淬火变形规律	崔笑蕾、詹梅、樊晓光、李志欣、马飞、王隽文	西北工业大学、中国航天科技集团公司长征机械厂、中国商用飞机有限责任公司	2021 年第 6 期
3	带波纹薄壁不锈钢管的弯曲成形工艺	徐勇、靳鹏飞、田亚强、夏亮亮、张士宏、陆瀚、王卫星	华北理工大学、中国科学院金属研究所、苏州事达同泰汽车零部件有限公司	2020 年第 6 期
4	航发轴承基体高强韧组织形变-相变协同精确控制定量研究	王丰、杜宇辰、刘雨健、钱东升	武汉理工大学、湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心、中国航发哈尔滨轴承有限公司	2021 年第 9 期

恭喜以上论文作者获得“2023 年度中国机械工程学会优秀论文”奖!

感谢广大作者、读者对《锻压技术》杂志长久以来的信任与支持!《锻压技术》将不忘初心, 秉承办刊宗旨, 继续不懈努力, 努力刊登出更多锻压领域具有高影响力的文章, 努力为推动我国锻压领域的持续发展贡献力量!

《锻压技术》编辑部