

文章编号: 2095-2163(2024)02-0133-07

中图分类号: TP301

文献标志码: A

# 考虑运输时间的柔性作业车间调度问题研究

冯旭青, 尹瑞雪

(贵州大学 机械工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:** 针对工件实际加工过程中工件转移的重要性, 对运输时间的柔性作业车间调度问题进行优化研究, 建立了以最小化最大完工时间和总碳排放量为优化目标的调度数学模型, 并提出了一种改进的 NSGA-II 算法。算法采用基于工序和机器特征的双链式编码方法, 设计了针对工件运输时间的插入式解码操作; 为探索到更优的前沿解设计了一种局部邻域搜索策略; 基于非支配解引入了节能低碳策略进行排放量调整; 通过仿真实验对比结果, 表明了改进 NSGA-II 算法及其求解考虑运输时间的柔性作业车间调度问题的有效性。

**关键词:** 柔性作业车间; 运输时间; NSGA-II 算法; 局部邻域搜索策略

## Research on the flexible job shop scheduling problem considering transportation time

FENG Xuqing, YIN Ruixue

(School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Given the significance of workpiece transfers in actual machining processes, this study conducts optimization research on the flexible job shop scheduling problem considering transportation time. It establishes a scheduling mathematical model with the objectives of minimizing the maximum completion time and the total carbon emissions. Furthermore, an improved NSGA-II algorithm is proposed. The algorithm utilizes a dual-chain coding method based on operation and machine characteristics, along with an insertion-based decoding operation for workpiece transportation time. Additionally, this research introduces a local neighborhood search strategy to explore better Pareto front solutions and incorporates an energy-saving and low-carbon strategy for emission adjustment based on non-dominated solutions. Through comparative simulation experiments, the results demonstrate the effectiveness of the enhanced NSGA-II algorithm in addressing the flexible job shop scheduling problem with transportation time considerations.

**Key words:** flexible job shop; transport time; NSGA-II algorithm; local neighborhood search strategy

## 0 引言

随着工业的不断发展, 制造业处于能源消耗的主体位置。据研究表明, 中国制造业在全国范围内消耗的电能达 50% 以上, 随之产生的二氧化碳排放量不少于 26%<sup>[1]</sup>。降低制造能源消耗主要有两种方法, 一是研发高性能的节能机床设备, 但往往需要高额成本投入; 二是车间调度优化, 在基于现有的企业资源条件下, 在一定程度上可以满足节能减排的需求。

柔性作业车间调度问题 (Flexible Job Shop Schedule Problem, FJSP) 自 1990 年被首次提出以来<sup>[2]</sup>, 由于其工件加工路径柔性及设备选择灵活性

的特点, 已是相关调度研究领域的重点之一。研究人员就 FJSP 的优化求解展开了大量的研究, Ding 等<sup>[3]</sup>从编码和解码操作、粒子间通信机制等方面对粒子群优化算法进行改进; 王玉芳等<sup>[4]</sup>设计了一种改进的混合蛙跳算法优化最大完工时间; 赵小惠等<sup>[5]</sup>改进了蚁群算法, 用以提高 FJSP 优化求解的效率; 李宝帅等<sup>[6]</sup>通过引入正余弦算法策略改进鲸鱼优化算法, 以实现完工时间的优化; 杜凌浩等<sup>[7]</sup>设计了种群间的协同策略来优化完工时间; Li 等<sup>[8]</sup>提出了一种改进多目标蜂群算法, 以优化最小化最大完工时间、机床总负载以及最大机床负载; 吴秀丽等<sup>[9]</sup>为求解总成本和提前/延期惩罚双目标分布式 FJSP 模型, 提出了改进差分进化算法。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (51765010)。

**作者简介:** 冯旭青 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 绿色设计与制造。

**通讯作者:** 尹瑞雪 (1976-), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向: 绿色设计与制造。Email: yinruixue@sina.com

收稿日期: 2023-02-17

综上所述,以往研究多以加工时间相关目标为主,缺少对车间生产的碳排放及机床能源消耗相关调度优化目标的关注,且优化时间指标多以单目标优化为主。此外,要求工件加工当前工序的加工结束时即可开始下一道工序的加工,在调度模型中加以这一约束,从而忽略了加工过程中工件在机器间转移所消耗的运输时间。通常来说,车间中机床按加工精度、加工方式等可分为多种,且用途不完全相同。工件不同工序也需要在具有不同加工工艺的机床上完成加工,并且工件转移过程消耗的运输时间与加工时间存在耦合关系。

因此,考虑到工件各工序在机器间的转移过程客观存在,本文在以上研究的基础上,将运输时间的柔性作业车间调度问题(Flexible Job Shop Scheduling Problem with Transportation time, FJSP-T)作为研究对象,构建以最小化最大完工时间和总碳排放量为优化目标的调度优化模型,并设计了一种

改进的NSGA-II算法进行求解。通过与常用的多目标优化算法就标准案例和实例进行测试对比分析,验证了INSGA-II算法的有效性。

## 1 FJSP-T问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

考虑运输时间的柔性作业,车间调度问题可描述为:有 $n$ 个工件等待分配到 $m$ 台机器上完成其加工任务。每个工件 $J_i$ 有一道或多道工序,同一个工件中的工序加工顺序为已知;每道工序可供加工的机器不止一台,组成各工件的可加工机器集。每道工序根据调度规则,从其加工机器集中选择其一;已知工序在机器之间进行转移所消耗的运输时间;以及在其可加工机器集中各加工机器上的加工时间与碳排放量,根据选择加工机器的不同而改变。

### 1.2 模型建立

为方便建立调度优化模型,参数定义见表1。

表1 FJSP-T模型参数表

Table 1 Parameters of FJSP-T model

符号	参数含义
$n$	工件总数
$m$	机器总数
$J$	所有工件的集合, $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}, i \in [1, n]$
$M$	所有机器的集合, $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}, j \in [1, m]$
$P_i$	工序数
$C_{\max}$	最大完工时间
$P_{ij}^k$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上的加工时间
$O_{ij}$	工件 $i$ 的第 $j$ 道工序
$C_i$	工件 $i$ 的完工时间
$T_k^o$	$M_k$ 的开机时间
$T_k^c$	$M_k$ 的关机时间
$T_k^{pre}$	$M_k$ 的待机时间
$T_{ijk}^{ob}$	工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上加工时间
$T_{ij,h}^k$	工序 $O_{i(j-1)}$ 的加工机器 $M_h$ 运输到工序 $O_{ij}$ 加工机器 $M_k$ 的运输时间
$E_k^o$	$M_k$ 在开机状态下单位时间碳排放量
$E_k^c$	$M_k$ 在关机状态下单位时间碳排放量
$E_k^{pre}$	$M_k$ 在待机状态下单位时间碳排放量
$E_k^{ob}$	$M_k$ 在加工状态下单位时间碳排放量
$P^{trans}$	运输设备功率
$\delta$	电能碳排放转换因子
$Y_{ij}^k$	决策变量,若工序 $O_{ij}$ 在机器 $M_k$ 上加工,则 $Y_{ij}^k = 1$ , 否则取 0
$X_k^{oc}$	决策变量,若机床 $M_k$ 上所有工件加工完成,则 $X_k^{oc} = 1$ , 否则取 0
$X_{ijk}$	决策变量,若工序 $O_{ij}$ 在机床上加工,则 $X_{ijk} = 1$ , 否则为 0

本文综合考虑最大完工时间和总碳排放量,将建立双目标协同优化的 FJSP-T 模型表示如下:

目标函数:

(1)最小化最大完工时间(单位:min)

最大完工时间是衡量工厂能否准时完成加工任务的重要指标,对其优化在一定程度上能提高车间的生产效率,可用式(1)~式(2)计算:

$$f_1 = \min C_{\max} = \min(\max\{C_i\}), i \in [1, n] \quad (1)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^{P_i} \sum_{k=1}^m (P_{ij}^k + T_{ij,h}^k) \cdot Y_{ij}^k, h \in [1, m] \quad (2)$$

(2)最小化总碳排放量(单位:kgCO<sub>2</sub>)

车间加工过程中,能耗大多由机床加工生产过程中产生,机床一次开机关机碳排放量(Q<sup>oc</sup>)、待机碳排放量(Q<sup>pre</sup>)、加工碳排放量(Q<sup>ob</sup>)以及运输碳排放量(Q<sup>trans</sup>),可用式(3)~式(7)计算得出:

$$f_2 = Q^{CP} = Q^{oc} + Q^{pre} + Q^{ob} + Q^{trans} \quad (3)$$

$$Q^{oc} = Q^o + Q^c = \sum_{k=1}^m (E_k^o \cdot T_k^o + E_k^c \cdot T_k^c) \cdot X_k^{oc} \quad (4)$$

$$Q^{pre} = \sum_{k=1}^m E_k^{pre} \cdot T_k^{pre} \quad (5)$$

$$Q^{ob} = \sum_{k=1}^m E_k^{ob} \cdot T_{ijk}^{ob} \cdot X_{ijk} \quad (6)$$

$$Q^{trans} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{P_i} P_{ij}^{trans} \cdot T_{ij,h}^k \cdot \delta, h \in [1, m], k \in [1, m] \quad (7)$$

式(3)中, Q<sup>CP</sup> 为总碳排放量,式(4)~式(7)中, Q<sup>o</sup>、Q<sup>c</sup>、Q<sup>pre</sup>、Q<sup>ob</sup> 和 Q<sup>trans</sup> 分别为机器 M<sub>k</sub> 处于开机、关机、待机、加工状态以及运输过程的碳排放总量。

约束条件:

$$T_{ij,h}^k \geq 0, i \in [1, n], k \in [1, m], j, h \in [1, m] \quad (8)$$

$$T_{il,h}^k = 0, i \in [1, n], k \in [1, m], j, h \in [1, m] \quad (9)$$

$$C_i \geq 0, i \in [1, n] \quad (10)$$

$$Ts_{ij}^k \geq P_{i(j-1)}^k + T_{i(j-1),h}^k \quad (11)$$

式(8)和式(10)分别约束每道工序在机器之间的运输时间和每道工序完工时间为非负;式(9)约束任何一个工件的第一道工序都不考虑运输时间;式(11)约束工序的开工时间不小于前一道工序的加工时间与运输时间之和。

## 2 NSGA-II 算法改进

### 2.1 编码与解码

为了解决调度车间的工序排序以及机器指派这

两个子问题,本文根据工序以及机器的特征,采用并行双链式实数编码方法如图 1 所示,上下编码染色体长度相当。上层表示工序编码染色体,以工件号及其出现的次数表示工序号;下层是机器编码染色体,其中编码数字代表了同一位置工序所选择的加工机器号。同一位置(用 index 表示)的工序与机器基因构成基因信息组, index = 1 表示工序 O<sub>21</sub> 在机器 M<sub>1</sub> 上加工,所有位置的工序与机器编码组成一个 FJSP-T 的调度可行方案。

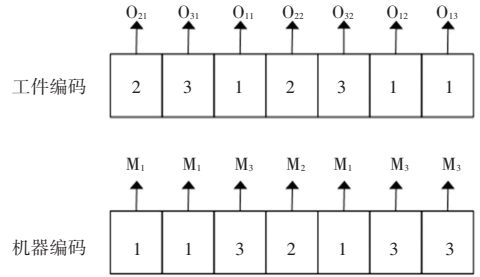


图 1 编码染色体

Fig. 1 Coding chromosomes

初始化种群采用随机初始化生成方式,即将所有工序随机排序方式获取工序编码方案,避免算法优化初期消耗过多的时间,而着重迭代过程中更加优秀调度解的探索。工序编码方案确定后,对应工序基因在其可加工机器集中任选一台加工机器构成机器编码染色体,按该方法生成大小为 Popsiz 的初始种群。

解码操作是对编码染色体的翻译过程,在满足调度约束的条件下,为工序指派加工机床以获取调度方案<sup>[10]</sup>。工件在转移过程中,消耗的运输时间会增加工件总完工时间从而改变调度结果,因此在解码操作中基于运输时间设计改进的插入式解码方法,根据工件与机器的不同状态可分为:

(1)工序是首道工序,所选的加工机器是首次进行加工,则不考虑运输时间直接安排加工。

(2)工序是首道工序但不是其加工机器上的首道加工工序,则判断该工序在所选加工机器上的加工顺序,取出前一道工序结束加工的时间,将其作为此工序的开始加工时间。

(3)工序是非首道工序,机器非首次加工,考虑该工序与同一个工件的上道工序是否在同一机器上加工,如果是同一机器加工无需进行工件转移,则该工序的开始时间为同一个工件上道工序的完工时间,否则本工序需要考虑运输时间;若当前加工机器上存在可进行工序插入的时间段,将其加入到允许

位置,更新完工时间。

## 2.2 交叉和变异操作

交叉和变异操作是算法迭代优化求解调度最优解的核心环节,通过基因交叉重组和突变保留个体中优秀基因并保持种群的多样性,还可以增强算法的搜索性能。

以染色体 P1 和 P2 为例,描述工序编码染色体和机器编码染色体进行交叉操作后产生子代染色体 C1 的过程。P1 和 P2 的总工序数为 8,工件总数为 3,机器总数为 3;工序染色体采用 POX 交叉<sup>[11]</sup>;机器染色体进行交叉操作方法如下:

(1) 随机生成一个元素仅为 0 和 1,且长度等于总工序数的数组,如 [0,0,1,1,0,0,1,0],其中 0 元素所在位置为  $N = [1,2,5,6,8]$ ;

(2) 依次找到  $N$  中元素对应 P1 中工序号的加工机器,将其与父代 P2 中对应工序的加工机器进行交换。

经过机器交叉操作后,工序没有发生变换,对应机器交叉点的机器进行交叉,如图 2 所示。



图 2 机器交叉示意图

Fig. 2 Machine cross diagram

染色体在进行变异操作时采用动态变异概率,用式(12)计算:

$$P_m = P_0 + \beta(\text{gen}/\text{Maxgen}) \quad (12)$$

式中:  $P_m$  为动态变异概率,  $P_0$  为初始变异概率,  $\beta$  为变异概率调整系数,  $\text{gen}$  和  $\text{Maxgen}$  表示当前和最大迭代次数。

工序变异执行两个变异点工序互换的方式,进行工序互换得到新染色体可能存在非可行解,需再进行染色体修复;机器变异则是再随机生成两个变异点,将两变异位置的机器分别更换为各自在其加工机器集中的最短加工时间的机器。

## 2.3 局部邻域搜索策略和节能策略

通过对种群中每个染色体进行邻域搜索,帮助

算法在寻优过程中跳出局部收敛。本文设计了一种局部领域搜索策略,对工序采用两点变异,将两个变异位置工序进行互换后,对其机器编码染色体采用单点变异的方式,先确定变异点为变异位置的工序从其可加工机器集中任意择其一,从而构成了其局部邻域解。重复上述操作,直至种群中所有个体完成其邻域解的探索。

为进一步挖掘车间节能潜力,引入调度节能方法中常用的关机重启策略<sup>[12]</sup>,该策略旨在减少各机床待机时段能量消耗,以实现节能减排的最终目标。若机床的待机时间过长,将考虑是否使用关机重启策略,而机床重启次数过多会在一定程度上减少使用时间,从而降低机床的寿命。因此,机床是否采用关机重启策略,需要满足条件约束,即机床待机时长大于当前机床关机重启策略的时间;且待机碳排放要高于机床关机重启的能量消耗,以确保在不损坏机床寿命的同时实现节能减排。

## 2.4 算法实现步骤

INSGA-II 算法主要步骤描述如下:

- (1) 设置算法初始化参数,其中包括种群规模、迭代次数、交叉概率等,并生成初始化种群;
- (2) 通过锦标赛方法选出适合繁殖的染色体,组成父代种群;
- (3) 对父代种群中的个体通过基因突变和相互交叉的方式,探索出新的解,组成子代种群;
- (4) 合并子父种群个体后,解码并进行非支配排序和拥挤度的计算,获得下一代种群个体;
- (5) 如果达到算法终止条件,即最大迭代次数,则输出最优的 pareto 前沿解集,否则转至步骤 2 继续迭代求解。

## 3 实验分析

本文算法在 MATLAB R2016b 软件上实现,运行环境为:12th Gen Intel(R) Core(TM) i5-12500H 2.50 GHz 处理器,16.0 GB 的内存。INSGA-II 算法参数设置为:种群规模  $\text{Popsiz} = 100$ ,迭代次数  $\text{Maxgen} = 100$ ,交叉概率  $P_c = 0.8$ ,初始变异概率  $P_0 = 0.05$ ,变异概率调整系数  $\beta = 0.4$ 。

算法采用多目标优化问题求解中得到广泛应用的覆盖率  $C$ <sup>[13-14]</sup> 和非支配解数量  $V_n^i$  作为算法评价指标。覆盖率  $C$  的计算方法如式(13):

$$C(X,Y) = \frac{1}{|Y|} (|\{y \in Y | \exists x \in X: x > y\}|) \quad (13)$$

式中:  $X, Y$  分别表示算法 X、Y 的非支配前沿解,  $|Y|$

为算法 Y 非支配解集的大小,  $C(X, Y)$  的值越大表示算法 X 越好。此外,  $V_n^i$  表示算法 i 的最优非支配解的个数, 其值越大越好。

### 3.1 算法比较分析

为验证 INSGA-II 算法在 FJSP 优化求解的有效性, 选取 Kacem 等人<sup>[15]</sup>提出的不同规模标准案例进行仿真测试, 优化目标为最大完工时间。将 INSGA-II 算法(记为 A)与 IWOA 算法<sup>[16]</sup>(记为 A1)、HA 算法<sup>[17]</sup>(记为 A2)和强化学习的 INSGA2 算法<sup>[18]</sup>(记为 A3)均求解不同大小的测试案例, 比较各算法的最优解, 并计算 INSGA-II 对比其余算法的提升效果见表 2。其中,  $n \times m$  为  $n$  个工件在  $m$  台机器上加工, “—”表示文献未给出求解结果, 加粗体为测试案例的最优解。

表 2 Kacem 案例求解结果比较

Table 2 Comparison of solutions on Kacem case

算例 $n \times m$	A1	A2	A3	A	算法对比提升效果/%		
					A1	A2	A3
4×5	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	<b>11</b>	0	0	0
8×8	<b>14</b>	15	15	<b>14</b>	0	6.7	6.7
10×7	13	13	13	<b>11</b>	15.38	15.38	15.38
10×10	<b>7</b>	<b>7</b>	—	<b>7</b>	0	0	—
15×10	14	12	15	12	14.29	20	0

分析表 2 可知, INSGA-II 算法在前 4 个 Kacem 案例上取得了调度最优解; 在 Kacem10×7 案例的最优解表现优于 IWOA 算法、INSGA2 算法以及 HA 算法, 提升效果达到 15.38%; Kacem8×8 案例相较于 HA 和 INSGA2 算法提升了 6.7%, 与 IWOA 算法取得同样的最优解。此外, INSGA-II 算法在 Kacem15×10 案例优化求解中相较于 HA 算法达到了 20%。由此可知, 本文提出的 INSGA-II 算法表现出了 FJSP 的优化求解相较于其他算法的有效性。

### 3.2 改进策略有效性验证

为了进一步验证算法设计的局部搜索策略与关机重启策略的有效性, 选用文献<sup>[19]</sup>中 6 个工件在 6 台机器上加工的柔性制造车间加工实例进行测试。该柔性制造车间实例包括: 工序在机器上的加工时间、加工单位碳排放量卸载时间、机器启动、卸载; 准备阶段的单位碳排放量(单位:  $\text{kg}(\text{CO}_2)/(\text{kW} \cdot \text{h})$ )以及启动时间(单位: min)单位碳排放量。参考文献[14]拓展运输设备功耗为 2 kW, 运输时间和实例数据详见表 3~表 5; 电能碳排放转换因子参照文献[20]设置为 0.804 2; 参照文献[12], 加工任务中所有机床最大允许关机重启次数为 3。

表 3 实例运输时间

Table 3 The transportation time of different instances

机器	机器					
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>
M <sub>1</sub>	0	6.74	6.77	8.66	10.85	9.92
M <sub>2</sub>	6.74	0	6.32	7.68	8.65	7.20
M <sub>3</sub>	6.77	6.32	0	7.83	4.46	6.16
M <sub>4</sub>	8.66	7.68	7.83	0	8.25	6.91
M <sub>5</sub>	10.85	8.65	4.46	8.25	0	7.77
M <sub>6</sub>	9.92	7.20	6.16	6.91	7.77	0

表 4 柔性制造车间各工件在机器上的加工数据

Table 4 Machining data of workpieces on machine in flexible manufacturing workshop

工件	加工时间/加工阶段单位碳排放量/卸载时间					
	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>	M <sub>5</sub>	M <sub>6</sub>
O <sub>11</sub>	9/3/1	13/2/1	—	13/2/1	—	13/2/1
O <sub>12</sub>	—	7/3/1	5/2.1/1	14/2/2	13/3/2	—
O <sub>13</sub>	—	5/2.4/1	—	—	15/2/1	7/1.7/1
O <sub>14</sub>	12/2/1	—	14/2/2	12/2/1	—	—
O <sub>15</sub>	6/3.1/1	6/3.2/1	8/1.5/1	7/2/1	4/1.2/1	8/1.5/1
O <sub>16</sub>	—	—	15/1.6/2	—	13/3/1	15/1.6/1
O <sub>21</sub>	13/1.5/1	—	4/1/1	16/2.3/1	11/2.5/1	—
O <sub>22</sub>	—	15/1.2/1	6/2.2/1	6/2.2/1	—	12/1.3/1
O <sub>23</sub>	5/2.3/1	—	13/1.6/1	10/2.6/1	13/2.3/2	—
O <sub>31</sub>	14/2.4/2	15/2.7/2	5/1/2	5/2.8/1	4/3.2/1	—
O <sub>32</sub>	—	6/2/1	7/2.1/1	—	16/1.2/1	12/2/3
O <sub>33</sub>	5/2.5/1	8/2.2/1	—	11/2.5/1	—	14/1/3
O <sub>34</sub>	—	6/1.5/1	17/2.1/1	14/2.4/1	12/2/1	—
O <sub>35</sub>	17/2.4/1	—	14/2.4/1	6/3/1	7/2.4/1	13/2.3/2
O <sub>41</sub>	19/3/1	—	20/3/2	13/2.5/1	15/2.4/2	—
O <sub>42</sub>	—	10/2.5/1	7/1/1	13/2.5/2	7/5/1	15/1.4/1
O <sub>43</sub>	4/2.5/1	8/2/1	—	—	—	15/2/2
O <sub>44</sub>	10/3.2/1	—	6/1.6/1	—	6/1.6/2	—
O <sub>45</sub>	15/2.6/2	8/2.3/1	15/1.7/2	13/2/2	—	—
O <sub>51</sub>	—	6/2.2/1	—	7/2.6/1	12/2/1	5/0.9/1
O <sub>52</sub>	8/4/2	—	12/2.6/1	15/2.5/2	—	8/0.6/1
O <sub>53</sub>	13/2.4/1	12/2.3/2	—	—	16/1.6/2	7/0.8/1
O <sub>54</sub>	—	4/2/1	6/2/1	6/3/2	12/1.4/1	—
O <sub>55</sub>	13/2.3/2	—	—	7/2.5/1	—	8/1.3/1
O <sub>56</sub>	11/2.8/2	3/2.5/1	10/2.5/1	12/2.4/1	15/1/2	5/0.9/1
O <sub>61</sub>	—	11/1.2/1	—	—	7/1/1	8/0.8/1
O <sub>62</sub>	—	—	8/2/1	12/3/1	—	4/1/2
O <sub>63</sub>	10/2.4/1	5/1/1	—	13/2.1/1	—	6/1/1
O <sub>64</sub>	16/2.2/2	—	8/1.7/2	—	—	12/1.1/2

表5 机器时间及各阶段单位碳排放量

Table 5 Machine time and unit carbon emissions in each stage

机器	时间/min		单位碳排放量/kg(CO <sub>2</sub> ) · (kW · h) <sup>-1</sup>			
	启动	重启	启动	准备	卸载	重启
M <sub>1</sub>	2.2	3	1.52	0.5	0.2	2.22
M <sub>2</sub>	1.4	2.5	1.75	0.4	0.15	2.3
M <sub>3</sub>	3.1	4.1	1.55	0.35	0.1	2
M <sub>4</sub>	1.5	2.8	1.68	0.42	0.15	2.25
M <sub>5</sub>	2.3	3.2	1.72	0.36	0.1	2.18
M <sub>6</sub>	1.6	2.6	1.45	0.25	0.1	1.8

本文 INSGA-Ⅱ 算法与不考虑关机重启策略的 INSGA-Ⅱ\_1 算法,以及不包含局部邻域搜索和关机策略的 NSGA-Ⅱ 算法采用相同的初始化参数。此外,复现文献[21]中提出的候鸟优化算法(Migrating Birds Optimization, MBO),其算法参数为:邻域解数量与共享解数量为10,巡回次数为3,鸟群大小为100,迭代次数为100。将 INSGA-Ⅱ 算法与3种比较算法求解柔性制造车间拓展实例,优化目标为问题模型中的最大完工时间 $f_1$ 与碳排放总量 $f_2$ ,独立求解10次并记录算法的最优解结果见表6,4种算法的 pareto 前沿分布情况如图3所示。

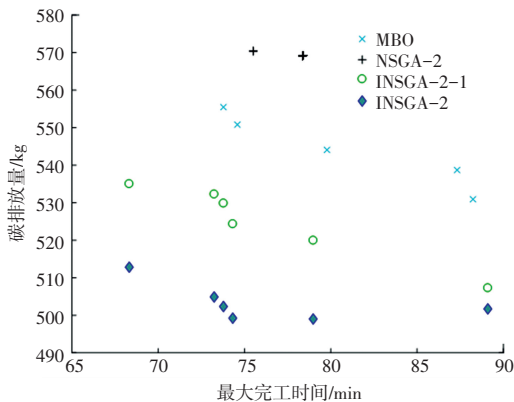


图3 不同算法 pareto 前沿分布图

Fig. 3 Pareto frontier distribution of different algorithms

采用 $C$ 和 $V_n^i$ 两个指标评价算法性能,在此柔性制造车间实例中, $C(\text{INSGA-Ⅱ}, \text{INSGA-Ⅱ}_1) = C(\text{INSGA-Ⅱ}, \text{NSGA-Ⅱ}) = C(\text{INSGA-Ⅱ}, \text{MBO}) = 1$ , $C(\text{INSGA-Ⅱ}_1, \text{INSGA-Ⅱ}) = C(\text{MBO}, \text{INSGA-Ⅱ}) = C(\text{NSGA-Ⅱ}, \text{INSGA-Ⅱ}) = 0$ ,覆盖率指标结果表明,INSGA-Ⅱ算法优化求解出的 pareto 解集优于其他3种算法获得的最优解; $V_n^i$ 指标结果表示为 $V_n^{\text{INSGA-Ⅱ}} = V_n^{\text{INSGA-Ⅱ}_1} = 6$ 是4种算法中探索到非支配前沿解数量最多的算法,二者表现出同样的搜索性能;但 INSGA-Ⅱ 算法在 $C$ 指标上优于 INSGA-Ⅱ\_1 算法,这也说明本文设计关机重启的节能策略能够有效降低碳排放量;其次 MBO 算法和 NSGA-Ⅱ 算

法的 $V_n^{\text{MBO}} > V_n^{\text{NSGA-Ⅱ}}$ ,MBO 算法常用多目标优化问题求解,其在 FJSP 的双目标优化求解同样具有较优的性能, $V_n^{\text{NSGA-Ⅱ}} = 2$ 说明 NSGA-Ⅱ 算法陷入了局部最优,缺少有效探索问题全局最优解的方法。INSGA-Ⅱ\_1 算法相较于 NSGA-Ⅱ 算法在最大完工时间和总碳排放量优化目标上多求解出4个最优解,说明前者的分布性更好。

结合表6中的非支配前沿解集,比较不同算法在两个调度目标上的优化效果,INSGA-Ⅱ 算法相较于 INSGA-Ⅱ\_1 算法在最大完工时间为68.32 min时,碳排放量降低了4.15%,相较于 NSGA-Ⅱ 和 MBO 算法 pareto 解在两目标上均有所降低,这进一步说明了局部邻域搜索策略和基于 pareto 最优解的节能策略的有效性。此外,本文 INSGA-Ⅱ 算法的非支配前沿在4种算法的非支配前沿对比图中可以看出,INSGA-Ⅱ 算法的 pareto 前沿位于其余3种算法的左下方,说明 INSGA-Ⅱ 算法可以求得更优的 pareto 前沿,这与上述对比算法中的两个测试性能指标分析结果一致。以上结果表明,INSGA-Ⅱ 算法可以有效地解决考虑运输时间的柔性作业车间调度问题。

表6 对比算法的非支配解集

Table 6 Comparison of the non-dominated solution set among different algorithms

算法	序号	最大完工时间/min	碳排放总量/kg(CO <sub>2</sub> )
MBO	1	73.78	555.477
	2	74.59	550.811
	3	79.78	544.072
	4	87.32	538.706
	5	88.24	530.918
	6	89.1	501.685
INSGA-Ⅱ	1	68.32	512.816
	2	73.24	504.871
	3	73.78	502.331
	4	74.32	499.217
	5	78.98	499.002
	6	89.1	501.685
INSGA-Ⅱ_1	1	68.32	535.032
	2	73.24	532.27
	3	73.78	529.86
	4	74.32	524.351
	5	78.98	519.957
	6	89.1	507.283
NSGA-Ⅱ	1	78.37	569.199
	2	75.51	570.424

## 4 结束语

本文针对考虑运输时间柔性作业车间调度问题,建立了以最小化最大完工时间和总碳排放量为优化指标的柔性作业车间调度模型。

为了有效解决考虑运输时间的 FJSP,提出一种改进 NSGA-II 算法,通过采用基于工序与机器特征的双层编码方法,解码操作中设计的考虑了工件在机器之间的运输时间插入式解码方法,局部邻域搜索策略和关机重启策略来提高算法的寻优性能,进一步实现车间节能减排。

通过对多组标准案例和车间实例进行测试验算,验证了 NSGA-II 算法改进策略的有效性,也表明该算法可以有效的解决考虑运输时间的柔性作业车间调度问题。

## 参考文献

- [1] DAI M, TANG D, GIRET A, et al. Multi-objective optimization for energy-efficient flexible job shop scheduling problem with transportation constraints[J]. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 2019, 59:143-157.
- [2] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines[J]. *Computing*, 1990, 45(4):369-375.
- [3] DING H, GU X. Improved particle swarm optimization algorithm based novel encoding and decoding schemes for flexible job shop scheduling problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2020, 121:104951.
- [4] 王玉芳, 缪昇, 葛嘉荣. 面向柔性作业车间调度的改进混合蛙跳算法[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022, 579(5):187-192.
- [5] 赵小惠, 卫艳芳, 王凯峰, 等. 改进蚁群算法的柔性作业车间调度问题研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2022, 576(2):165-168.
- [6] 李宝帅, 叶春明. 混合鲸鱼优化算法求解柔性作业车间调度问题[J]. *计算机系统应用*, 2022, 31(4):244-252.
- [7] 杜凌浩, 向凤红. 改进多邻域候鸟优化算法的柔性作业车间调度研究[J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(12):299-306.
- [8] LI J, PAN Q. Chemical-reaction optimization for flexible job-shop scheduling problems with maintenance activity[J]. *Applied Soft Computing*, 2012, 12(9):2896-2912.
- [9] 吴秀丽, 刘夏晶. 差分进化算法求解分布式柔性作业车间调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(10):2539-2558.
- [10] 王亚昆, 刘应波, 吴永明, 等. 改进 NSGA-II 算法求解考虑运输约束的柔性作业车间节能调度问题[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(9):3028-3040.
- [11] 张国辉, 吴立辉. 求解柔性作业车间调度的 GATOC 混合方法[J]. *计算机工程与应用*, 2015, 51(23):266-270.
- [12] 孟磊磊. 面向高效节能的柔性作业车间调度问题建模与优化[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.
- [13] JIANG E D, WANG L, PENG Z P. Solving energy-efficient distributed job shop scheduling via multi-objective evolutionary algorithm with decomposition[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2020, 58:100745.
- [14] 张洪亮, 徐公杰, 鲍蕾, 等. 考虑运输时间的分布式柔性作业车间绿色调度[J]. *中国机械工程*, 2022, 33(21):2554-2563, 2645.
- [15] KACEM I, HAMMADI S, BORNE P. Pareto-optimality approach for flexible job-shop scheduling problems: hybridization of evolutionary algorithms and fuzzy logic[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2002, 60(3-5):245-276.
- [16] 栾飞, 蔡宗琰, 吴书强, 等. 求解低碳车间调度问题的改进鲸鱼算法[J]. *机械科学与技术*, 2020, 39(5):721-728.
- [17] MOHSEN Z. A heuristic algorithm for solving flexible job shop scheduling problem[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 71(1-4):519-528.
- [18] 李旻运. 基于改进的 NSGA-II 算法的多目标柔性车间调度问题的研究及应用[D]. 湖州:湖州师范学院, 2022.
- [19] 杨幸博, 罗国富, 宋俊杰, 等. 多目标柔性作业车间低碳调度研究[J]. *轻工学报*, 2020, 35(6):93-99.
- [20] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL]. [2022-9-29].
- [21] DUMAN E, UYSAL M, ALKAYA A F. Migrating birds optimization: A new metaheuristic approach and its performance on quadratic assignment problem[J]. *Information Sciences*, 2012, 217(24):65-77.