

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.012

# 基于改进离散蜉蝣算法的双资源柔性车间 可持续调度方法\*

侯天天, 张守京\*

(西安工程大学 机电工程学院, 陕西 西安 710600)

**摘要:** 在目前对柔性车间调度问题所进行的研究中, 大多忽略了工件运输时间这一因素, 并且也很少对可持续发展的经济、环境和社会 3 个要素进行综合优化。针对这些问题, 提出了一种考虑运输时间的双资源柔性车间调度问题(DRCFJSPT)模型。首先, 以完工时间、生产成本、能耗和人体工程学风险为优化目标, 构建了柔性车间调度数学模型, 并结合多目标模型的特点, 设计了一种改进离散蜉蝣算法(IDMA), 并对模型进行了求解; 然后, 采用熵值法评价了帕累托解集, 基于三层编码并考虑了运输时间的插入式解码方式, 设计了混合初始化方法, 离散改进了蜉蝣更新方式; 最后, 为了验证 IDMA 求解 DRCFJSPT 的性能, 采用 MATLAB, 对某机床零件加工企业生产数据进行了实验, 并将其结果与采用非支配排序遗传算法(NSGA)-II 得到的结果进行了对比分析。研究表明: 改进算法的解集质量和收敛性能均显著优于参考算法, 通过改进算法求得最优解的最大完工时间为 35.94 h, 加工成本为 6 003.95 元, 能耗为 2 054.54 kW·h, 人体工程学风险值为 138.16; 该结果可为实际复杂的柔性车间调度环境提供清晰准确的调度方案。

**关键词:** 调度模型; 考虑运输时间的双资源柔性车间调度问题; 双资源约束; 运输时间; 可持续发展; 改进离散蜉蝣算法; 非支配排序遗传算法 II

中图分类号: TH186

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2023)03-0407-08

## Dual resource flexible job shops sustainable scheduling based on improved discrete mayfly algorithm

HOU Tian-tian, ZHANG Shou-jing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The influence of transportation time was often ignored and the three elements of economy, environment and society of sustainable development were less comprehensively optimized in the research of flexible job shop scheduling. Aiming at this problem, a dual-resource constrained flexible job shop scheduling problem considering transportation time(DRCFJSPT) was proposed. Firstly, a mathematical model was constructed with completion time, production cost, energy consumption and ergonomic risk as optimization objectives, and an improved discrete mayfly algorithm (IDMA) was designed to solve the model combined with the characteristics of multi-objective model. Then, the entropy method was used to evaluate the Pareto solution set. Based on the three-layer coding, the insertion decoding method considering the transportation time was designed. The hybrid initialization method was designed. The update method of the mayfly was discretely improved. Finally, in order to verify the performance of IDMA in solving DRCFJSPT, an experiment was carried out on the production data of a machine tool parts processing enterprise using MATLAB, and the results were compared with the results obtained by using the non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA)-II. The experimental results show that the solution set quality and convergence performance of the improved algorithm are significantly better than the reference algorithm. The maximum completion time of the optimal solution obtained by the improved algorithm is 35.94 h, the processing cost is 6 003.95 yuan, the energy consumption is 2 054.54 kW·h, and the ergonomic risk value is 138.16, which provides a clear and accurate scheduling scheme for the actual complex scheduling environment.

**Key words:** scheduling model; dual-resource constrained flexible job shop scheduling problem considering transportation time(DRCFJSPT); dual resource constrained; transportation time; sustainable development; improved discrete mayfly algorithm (IDMA); non-dominated sorting genetic algorithm II(NSGA-II)

收稿日期: 2022-07-21

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFB1707205)

作者简介: 侯天天(1997-), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事智能算法和车间生产调度方面的研究。E-mail: 912371623@qq.com

通信联系人: 张守京, 男, 博士, 副教授, 硕士生导师。E-mail: zhangshoujing@xpu.edu.cn

## 0 引 言

近年来,全球资源消耗、能源短缺和生态污染问题日益突显。随着可持续发展、低碳经济、绿色制造等概念的陆续提出,制造企业正面临着新一轮的转型升级挑战<sup>[1,2]</sup>。

生产调度作为制造过程中的关键一环,涉及物料、机器和人员等多种资源的协调应用,对经济、环境和社会的可持续发展影响重大<sup>[3]</sup>。在生产过程中,常用的经济指标有时间、提前/延期时间和成本等;环境指标有能耗、碳排放和噪声等;社会指标有工人疲劳度、满意度和操作风险等。由于人力成本的增加,熟练工人的短缺,工人资源日益成为制约生产的重要因素。

人机双资源约束柔性车间调度问题(DRCFJSP)是在 FJSP 的基础上,既考虑了机器资源,同时还考虑了工人的因素,因此,其更适用于对可持续调度方面的问题进行求解。

在优化指标方面,张洪亮等人<sup>[4]</sup>以总提前/拖期惩罚值和总能耗为目标,提出了一种考虑交货期的 DRCFJSP 节能调度方法;但该研究未考虑可持续发展的社会指标。以完工时间、成本和能耗为目标,肖华军<sup>[5]</sup>构建了 DRCFJSP 模型,并在其中引入了开关机策略和延迟加工策略,以便降低闲置的能耗;但该研究未考虑该策略对工人满意度等的影响因素。张守京等人<sup>[6]</sup>以生产时间、生产成本和绿色制造评价系数为目标,提出了一种考虑工人差异的 DRCFJSP 调度模型;但该研究未考虑工人操作的风险差异。TAN Wei-hua 等人<sup>[7]</sup>以完工时间和工人疲劳度为目标,提出了一种考虑工人疲劳意识的 DRCFJSP 调度方法;但该研究未将环境指标纳入优化目标。

由此可见,有关于 DRCFJSP 的研究较少能够综合优化经济、环境和社会 3 个指标。

在工件运输时间方面,戴敏等人<sup>[8]</sup>提出了一种运输资源和加工资源集成调度模型,研究了机器间工件运输时间对完工时间和能耗的影响;但该研究未考虑工人约束对能耗的影响。王凌等人<sup>[9]</sup>提出了一种考虑工件在机器间和工厂间转移的运输时间的分布式 FJSP 调度方法;但该研究未考虑多车间环境下的工人约束。

因此,考虑工件运输时间的研究常忽略工人约束的影响,难以适用于实际调度环境。

在多目标问题求解算法方面,张守京等人<sup>[10]</sup>提出了一种非支配排序遗传算法(NSGA)-II,用于求解多

目标 FJSP,设计了基于拥挤度的自适应交叉算子,并通过引入竞争选择方法,提高了算法的求解质量;但该算法未针对优化目标进行初始化,导致其寻优效率不高。高滔等人<sup>[11]</sup>以时间、能耗和机器负荷为目标,设计了一种基于遗传与贪婪算法思想的混合算法,采用遗传算子对工序进行了寻优,采用贪婪算子对机器进行了寻优,提高了寻优效率;但其采用独立寻优策略,导致求解的稳定性不高。

综上所述,虽然群智能优化算法在求解多目标问题上有较大优势,但在如何提高该算法的求解质量、效率和稳定性方面,仍然需要进行不断的深入探索。

鉴于此,笔者以完工时间和生产成本作为经济指标,以能耗为生态指标,以人体工程学风险值<sup>[12]</sup>为社会指标,构建考虑运输时间的双资源柔性车间调度问题(DRCFJSPT)模型,并提出一种改进的离散蜂群算法对该模型进行求解;最后,通过生产实例验证该改进算法的可行性和优越性。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

DRCFJSPT 可描述为:某调度周期内, $w$  名操作工人( $W = \{W_1, W_2, \dots, W_w\}$ )操作  $m$  台加工机器( $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ ),加工  $n$  个工件( $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$ );任一工件  $i$  有  $n_i$  个工序( $O_i = \{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{in_i}\}$ ),同一工件的工序之间有优先级约束。

机器分为数控机床和普通机床,工人负责数控机床的上下料和调试等准备工作,负责普通机床的准备和机加工全过程;机器的等待和准备过程均为空载状态,机加过程为负载状态;机器和工人的技能水平和柔性程度存在差异;不同机器加工不同工序的人体工程学风险值采用工效学评价工作表(ergonomic assessment worksheet, EWAS)评估<sup>[13]</sup>;

当同一机器上相邻两工序为同一工件的工序时,工人只需进行第一道工序的准备工作,中间准备时间忽略不计。

### 1.2 模型建立

基于上述描述与假设,笔者构建调度目标为完工时间、加工成本、能耗和人体工程学风险的 DRCFJSPT 数学模型。

(1) 最小化完工时间( $T$ )。其表达式如下:

$$\min(T) = \min(\max\{T_i\}) = \min(\max\{ET_{ijks}\}) \quad (1)$$

式中: $T_i$ —工件  $i$  的完工时间; $ET_{ijks}$ —工人  $s$  操作机器  $k$  加工  $O_{ij}$  的结束时间。

(2) 最小化加工成本( $C$ )。其表达式如下:

$$\begin{aligned} \min(C) = \min(C_m + C_w + C_y) = \\ \min\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^w (MT_{ijks} c_k^{\text{work}} X_{ijks}) + \right. \\ \left. \sum_{k=1}^m (T_k - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{s=1}^w MT_{ijks} X_{ijks}) c_k^{\text{idle}} + \right. \\ \left. \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^w WT_{ijks} c_s X_{ijks} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m Y_{ijkl} c_y Y_{ijkl}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $C_m$ —机器总成本; $C_w$ —工人总成本; $C_y$ —运输总成本; $PT_{ijks}$ —工序 $O_{ij}$ 的实际准备时长; $MT_{ijks}$ —工序 $O_{ij}$ 的实际机加时长; $WT_{ijks}$ —工人 $s$ 加工 $O_{ij}$ 的实际操作时长; $c_k^{\text{work}}$ —机器 $k$ 负载单位时间成本; $c_k^{\text{idle}}$ —机器 $k$ 空载单位时间成本; $c_s$ —工人 $s$ 单位时间成本; $c_y$ —运输单位时间成本; $Y_{kl}$ —机器 $k, l$ 间的运输时间; $X_{ijks}$ —决策变量,工人 $s$ 操作机器 $k$ 加工 $O_{ij}$ 时为1,否则为0; $Y_{ijkl}$ —决策变量,工件 $i$ 从机器 $l$ 运输到机器 $k$ 加工 $O_{ij}$ 时为1,否则为0。

(3) 最小化能耗( $E$ )。其表达式如下:

$$\begin{aligned} \min(E) = \min(E^{\text{fix}} + E^{\text{work}} + E^{\text{idle}} + E_y) = \\ \min(\max\{T_i\}) e^{\text{fix}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^w (MT_{ijks} X_{ijks} e_k^{\text{work}}) + \\ \sum_{k=1}^m (T_k - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{s=1}^w MT_{ijks} X_{ijks}) e_k^{\text{idle}} + \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^m Y_{ijkl} Y_{ijkl} e_y \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $E^{\text{idle}}$ —机器空载能耗; $E^{\text{work}}$ —机器负载能耗; $E^{\text{fix}}$ —车间固定能耗; $E_y$ —运输能耗; $e_k^{\text{idle}}$ —机器 $k$ 空载功率; $e_k^{\text{work}}$ —机器 $k$ 负载功率; $e^{\text{fix}}$ —车间固定功率; $e_y$ —运输功率。

(4) 最小化人体工程学风险( $R$ )。其表达式如下:

$$\min(R) = \min\left(\sum_{s=1}^w R_s\right) = \min\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^w R_{ijk} X_{ijks}\right) \quad (4)$$

式中: $R_s$ —工人 $s$ 的人体工程学风险值; $R_{ijk}$ —机器 $k$ 加工 $O_{ij}$ 的人体工程学风险值。

其中:

$$R_{ijk} = PI_{ijk} + MMHI_{ijk} + FI_{ijk} + EP_{ijk} \quad (5)$$

式中: $PI_{ijk}$ —姿势指数和特殊姿势的风险点的总和; $MMHI_{ijk}$ —人工物料搬运指数; $FI_{ijk}$ —动作力量指数; $EP_{ijk}$ —其他未考虑的风险点。

在调度过程中,DRCFJSPT 数学模型需满足以下约束条件:

(1) 所有工件、机器及工人零时刻均可用;

(2) 工件间相互独立,没有优先级约束;

(3) 加工过程连续无中断,即 $ET_{ijks}$ 的表达式为:

$$ET_{ijks} = ST_{ijks} + PT_{ijks} + MT_{ijk} \quad (6)$$

式中: $ST_{ijks}$ —工人 $s$ 操作机器 $k$ 加工 $O_{ij}$ 的开始时间。

(4) 工序开始时间受工艺、运输、工人和机器因素的约束,即:

$$ST_{ijks} \geq \max(ET_{i(j-1)lr} + Y_{kl} Y_{ikl}, ET_{i'j'kr}, ET_{i'j'ls}) \quad (7)$$

(5) 任一机器和工人最多同时加工一道工序,即:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{n_i} X_{ijks} = 1 \quad (8)$$

(6) 每个工件同一时刻只能在两个机器间运输,即:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_f} \sum_{l=1}^{m_p} Y_{ikl} = 1 \quad (9)$$

(7) 同一机器上加工的两道工序时间无交叉,即:

$$[ST_{ijks}, ET_{ijks}] \cap [ST_{hgkr}, ET_{hgkr}] = \phi \quad (10)$$

(8) 同一工人加工的两道工序时间无交叉,即:

$$[ST_{ijks}, ET_{ijks}] \cap [ST_{hgls}, ET_{hgls}] = \phi \quad (11)$$

## 2 模型求解

蜂群算法(MA)是一种群智能优化算法,其结合了在车间调度领域应用广泛的粒子群算法、遗传算法和萤火虫算法的优点<sup>[14,15]</sup>。传统的MA常用于求解连续问题<sup>[16]</sup>,而DRCFJSPT为离散问题,因此,为使MA更适用于求解车间调度领域问题,笔者提出一种IDMA算法。

IDMA算法的具体求解过程如下。

### 2.1 熵值法评价帕累托解集

采用帕累托排序的方式求解多目标问题<sup>[17]</sup>,需评价解集选出最优解,用于蜂群更新和最终调度。为了避免主观因素的干扰,此处笔者采用熵值法<sup>[18]</sup>,即针对某个指标,用信息熵值来判断其离散的程度,分析该指标影响综合评价的程度,即利用信息熵计算出各个指标的权重。

采用熵值法的评价步骤为:

(1) 根据各指标不同解的值构造评价矩阵,分别统一各目标值的量纲,得到归一化的评价矩阵;

(2) 采用求和法计算各指标下不同解的比重;

(3) 计算各指标的熵值和信息熵冗余度;

(4) 计算各指标的熵权;

(5) 采用加权求和法评价解集中的各个解。

### 2.2 编码与解码

在求解 DRCFJSPT 时,通常需要考虑工序排序、机器选择和工人选择 3 个子问题,因此,笔者采用三层编码方式,即工序编码(process code, PC)、机器编码(machine code, MC)和工人编码(worker code, WC),并且 3 个向量元素一一对应。

此处以分别有 2、3、3、2 道工序的 4 个工件为例,其中,车间内有 6 台机器和 4 名工人。

其编码示意图如图 1 所示。

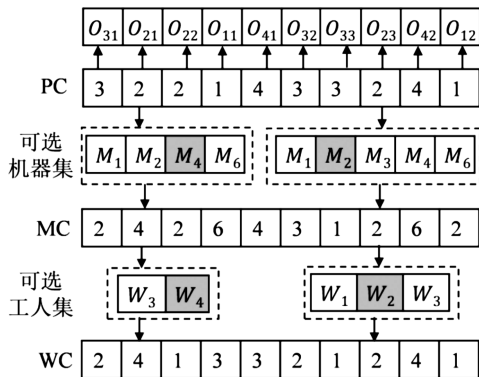


图 1 编码示意图

图 1 中:三层编码同时从左到右依次读取;PC 中数字为工件号,数字出现的次数为该工件的工序号,对应的 MC 和 WC 中的数字分别表示机器号和工人号;可行解编码只包含资源分配信息,完整的调度方案需通过解码获得。

笔者提出一种考虑运输时间的插入式解码方式。针对每个工序,根据工艺、运输时间、机器类型以及机器和工人的空闲时窗等约束,将其安排在最早可完工的空闲时窗内。

具体的解码步骤如下:

- (1)同时遍历 PC、MC 和 WC,获得工序、机器和工人,以及机器和工人的空闲时窗;
- (2)计算工序加工时间和运输时间;
- (3)将工序插入到机器与工人的首个公共可用空闲时窗内;
- (4)确定工序实际的起止时间,更新空闲时窗,解码下一工序,直至所有工序完成。

### 2.3 混合初始化

初始种群质量对算法的收敛速度和寻优能力有着重要影响。在设置初始解时,可依据优化目标来提升解的质量。此外,为避免种群陷入局部最优,还应保证其多样性。为此,笔者设计了混合初始化规则,随机生成 PC。

在为工序选择机器和工人时,笔者分别采用累计

最短加工时间、最小加工成本、最小能耗、最小人体工程学风险值和随机选择的 5 种方式(其比例各占 20%),获得对应的 MC 和 WC。

### 2.4 蜉蝣更新

#### 2.4.1 位置更新

雄蜉蝣根据自身历史最优和种群最优位置调整其速度和方向,当处于最优位置时,随机舞蹈;雌蜉蝣受优秀雄蜉蝣的吸引,调整自身方向和速度,当不被吸引时,则随机飞行。

根据编码特点,改进雄雌蜉蝣位置更新公式如下<sup>[19]</sup>:

$$mx_i^{t+1} = \begin{cases} \text{if } fitness(mx_i^t) < fitness(gbest) \\ a_2 \otimes f_3(a_1 \otimes f_2(g \otimes f_1(mx_i^t), pbest_i), gbest) \\ \text{else, } g \otimes f_1(mx_i^t) \end{cases} \quad (12)$$

$$fx_i^{t+1} = \begin{cases} \text{if } fitness(fx_i^t) < fitness(mx_i^t) \\ a_3 \otimes f_2(g \otimes f_1(fx_i^t), mx_i^t) \\ \text{else, } g \otimes f_1(fx_i^t) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $mx_i^t$ —雄蜉蝣当前位置;  $fx_i^t$ —雌蜉蝣当前位置;  $fitness$ —个体适应度;  $f_1$ —变异操作;  $f_2, f_3$ —交叉操作;  $g$ —惯性权重,即变异概率;  $a_1, a_2, a_3$ —交叉概率;  $pbest_i$ —雄蜉蝣个体历史最优位置;  $gbest$ —种群最优位置;  $\otimes$ —以左边的概率执行右边的操作。

式(12)表示:当雄蜉蝣当前位置劣于种群最优位置时,雄蜉蝣根据  $pbest_i$  和  $gbest$  进行位置更新,否则以概率  $g$  随机飞行;

式(13)表示:当雌蜉蝣当前位置劣于雄蜉蝣位置时,雌蜉蝣追随雄蜉蝣移动,否则以概率  $g$  随机飞行。

其中,  $g$  采用二次函数的动态权重,变化范围为  $[g_{min}, g_{max}]$ 。

变异操作如图 2 所示。



图 2 变异操作

$f_1$  变异操作采用基于三层编码的混合变异,基于 PC 的变异采用如图 2(a)的交换变异,任选两个不同变异点的基因交换位置,并根据工序调整 MC 和 WC;

基于 MC 的变异采用如图 2(b) 的替换变异,随机选择两道工序,分别从两工序的可选机器集中,任选一个机器替换当前机器,并为替换后的新机器选择可用工人;

基于 WC 的变异采用如图 2(c) 的替换变异,随机选择两道工序,分别从两工序所选机器的可用工人集中,任选一个工人替换当前工人。

交叉操作如图 3 所示。

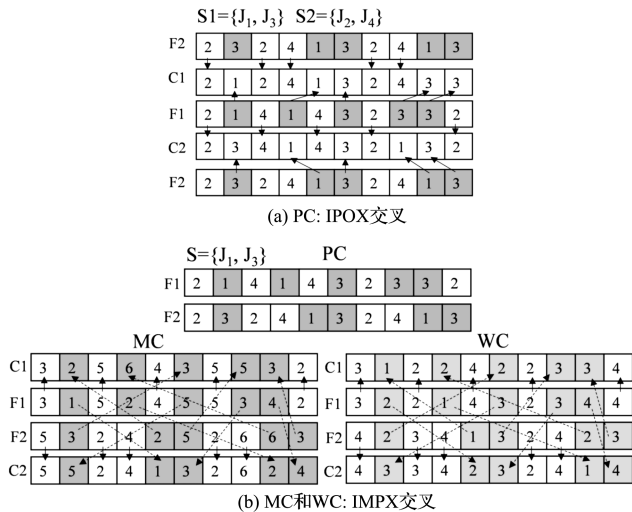


图3 交叉操作

(1)  $f_2$  交叉操作。基于 PC 的交叉采用如图 3(a) 的 IPOX (improved precedence operation crossover, IPOX) 交叉,将工件分为两个互无重合的非空集合如  $S1 = \{J_1, J_3\}$  和  $S2 = \{J_2, J_4\}$ ;将父代 F1 和 F2 分别包含 S1 和 S2 中的工序,复制到子代 C1 和 C2 中;将 F1 中包含 S2 的工序依次插入到子代 C2,将 F2 中包含 S1 的工序依次插到子代 C1;然后根据工序调整 MC 和 WC。

基于 MC 和 WC 的交叉采用如图 3(b) 的 IMPX 交叉(improved multi-point preservative crossover, IMPX),从工件中任选一个非空工件集合如  $S = \{J_1, J_3\}$ ,记录其包含的工序在 PC 中位置;将父代 F1 和 F2 中非记录位置的机器或工人分别复制到子代 C1 和 C2 中;将父代 F1 中记录位置的机器或工人依次插入到子代 C2 对应位置,将父代 F2 中记录位置的机器或工人依次插入到子代 C2 对应位置;

(2)  $f_3$  交叉操作。PC 保持不变,MC 和 WC 采用如图 3(b) 的 IMPX 交叉。

#### 2.4.2 交叉变异

为了扩大算法的全局搜索范围和局部搜索能力,笔者针对 DRCFJSPT 特性设计新的交配变异操作:对位置更新后的个体计算目标值,并快速非支配排序,分

别对雌雄种群采用二元锦标赛,选出精英个体,进行  $f_2$  交叉操作。

合并交叉后的子父代种群,计算其目标值,并快速非支配排序,非支配解集执行  $f_1$  变异操作,根据变邻域搜索的特点,在变异过程中,每获得一个新个体,便更新种群的非支配排序等级和拥挤度,保留优于当前解的新个体,帮助算法跳出局部最优。

#### 2.5 改进离散蜂群算法流程

改进离散蜂群算法(IDMA)流程图如图 4 所示。

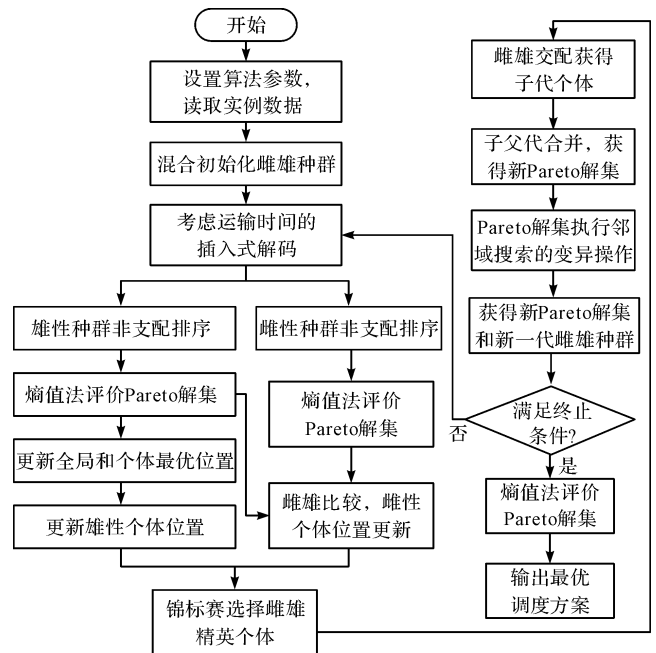


图4 IDMA 算法流程图

### 3 实例验证与分析

为了验证 IDMA 求解 DRCFJSPT 的性能,笔者以某机床零件加工企业生产数据为基准进行研究,并将其结果与 NSGA-II 进行对比分析。

某机床零件加工企业柔性车间示意图如图 5 所示。

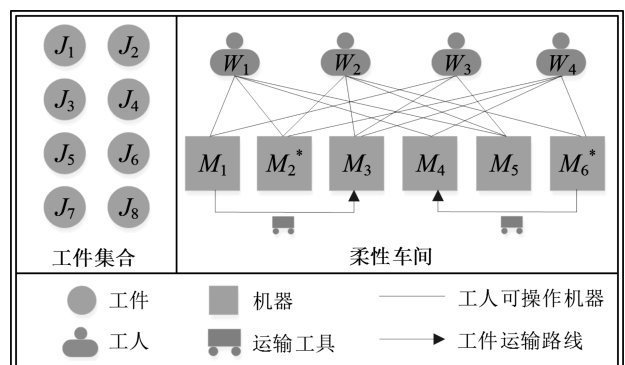


图5 柔性车间示意图

该实例中有 8 个工件、6 台机器(其中,  $M_2$  和  $M_6$  为数控机床)和 4 名工人。此外,笔者设置工序标准准备时间服从  $U[2,8]$  h;设置机器间的运输时间服从  $U[1,5]$  h;设置不同机器加工不同工序的  $PI$  服从  $U[0,1]$ ,  $MMHI$  服从  $U[0,3]$ ,  $FI$  服从  $U[0,4]$ ,  $EP$  服从  $U[0,2]$ ;该车间固定功率为 20 kW,运输功率为 2 kW,单位时间运输成本为 20 元/h。

笔者采用 MATLAB2020a 进行验证,相关参数设置为:NSGA-II:种群规模为 200,交叉率为 0.9,变异率为 0.1。迭代次数均为 200;IDMA:雌雄种群数量各为 100,位置更新惯性权重  $g_{max} = 0.9, g_{min} = 0.4$ ,交叉概率  $a_1 = 0.6, a_2 = a_3 = 0.8$ 。

工序标准机加时间表如表 1 所示。

表 1 工序标准机加时间表/h

工件	工序	机器					
		$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
$J_1$	$O_{11}$	6	4	5	3	4	—
	$O_{12}$	10	—	8	7	7	9
	$O_{13}$	—	9	—	6	7	6
$J_2$	$O_{21}$	5	6	5	8	9	—
	$O_{22}$	—	8	6	5	5	7
	$O_{23}$	—	10	—	6	8	5
	$O_{24}$	10	8	9	7	5	7
$J_3$	$O_{31}$	10	—	—	8	7	7
	$O_{32}$	—	10	6	5	8	10
	$O_{33}$	2	4	6	7	—	8
$J_4$	$O_{41}$	4	2	5	6	8	7
	$O_{42}$	10	8	4	7	8	6
	$O_{43}$	8	7	8	4	2	3
$J_5$	$O_{51}$	4	2	6	5	8	—
	$O_{52}$	12	—	10	6	8	11
	$O_{53}$	—	6	5	8	10	4
	$O_{54}$	7	8	—	6	4	3
$J_6$	$O_{61}$	8	9	5	6	6	7
	$O_{62}$	11	—	9	10	8	8
	$O_{63}$	10	7	8	12	11	—
$J_7$	$O_{71}$	5	4	2	6	7	—
	$O_{72}$	—	9	—	9	11	9
	$O_{73}$	—	8	9	3	8	6
$J_8$	$O_{81}$	7	4	7	8	9	—
	$O_{82}$	5	9	—	8	5	6
	$O_{83}$	4	—	3	7	2	5

工人操作机器效率表如表 2 所示。

表 2 工人操作机器效率表

工人/机器	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$	$M_5$	$M_6$
$W_1$	0.96	0.89	—	1.13	0.82	—
$W_2$	—	1.05	0.94	—	0.90	0.83
$W_3$	0.85	—	0.85	—	1.1	—
$W_4$	—	0.95	1.11	0.89	—	0.92

单位时间成本和功率表如表 3 所示。

表 3 单位时间成本和功率表

序号	单位时间成本/(元·h <sup>-1</sup> )			功率/kW	
	工人	机器负载	机器空载	机器负载	机器空载
1	13	48	8	10	1.52
2	11	50	9	12	2.10
3	12	47	8	8	1.35
4	14	46	7	9	1.46
5	—	46	7	10	1.37
6	—	51	9	11	2.00

IDMA 和 NSGA-II 算法的帕累托解集分布图如图 6 所示。

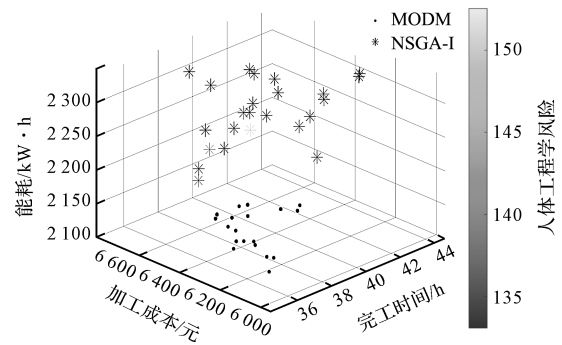


图 6 帕累托解集分布图

图 6 中:三维坐标轴与散点颜色的分别表示 4 个目标,IMDA 的解更趋近坐标原点,且其颜色较深,表明 IMDA 的 4 个目标值均明显优于 NSGA-II。

为了评估 2 组帕累托解集的质量与多样性,笔者采用中值距离(mean ideal distance, MID),同时实现 4 个最优目标的比率(the rate of achievement to four objectives simultaneously, RAS)、非支配解集的分散性(spread of non-dominated solution, SNS)和均匀性(spacing metric, SM)4 个指标<sup>[20]</sup>。

算法结果比较表如表 4 所示。

表 4 算法结果比较表

指标	算法		
	IDMA	NSGA-II	
最优解	$T/h$	<b>35.94</b>	39.38
	$C/元$	<b>6 003.95</b>	6 203.63
	$E/kW \cdot h$	<b>2 054.54</b>	2 283.02
	$R$	<b>138.16</b>	140.87
帕累托解集均值	$T/h$	<b>35.87</b>	40.13
	$C/元$	<b>6 044.53</b>	6 343.35
	$E/kW \cdot h$	<b>2 144.67</b>	2 237.74
帕累托解集评价指标	$R$	<b>136.06</b>	144.52
	MID	<b>6 415.41</b>	6 728.59
	RAS	<b>0.116 2</b>	0.201 8
	SNS	15.03	<b>20.70</b>
	SM	<b>92.71</b>	164.39

注:加粗数据—较优值

由表 4 可知:IDMA 最优解的目标值、解集的目标均值、评价指标 MID 和 RAS 均小于 NSGA-II,表明 IDMA 的解集质量较优,获得全局最优解的能力更佳;

IDMA 的 SNS 指标小于 NSGA-II,表明混合初始策略未显著提高 IDMA 的解集多样性;但 IDMA 的 SM 指标小于 NSGA-II,表明该策略使得 IDMA 解集分布更加均匀,稳定性更优<sup>[21,22]</sup>。

两种算法的帕累托解集目标均值迭代过程如图 7 所示。

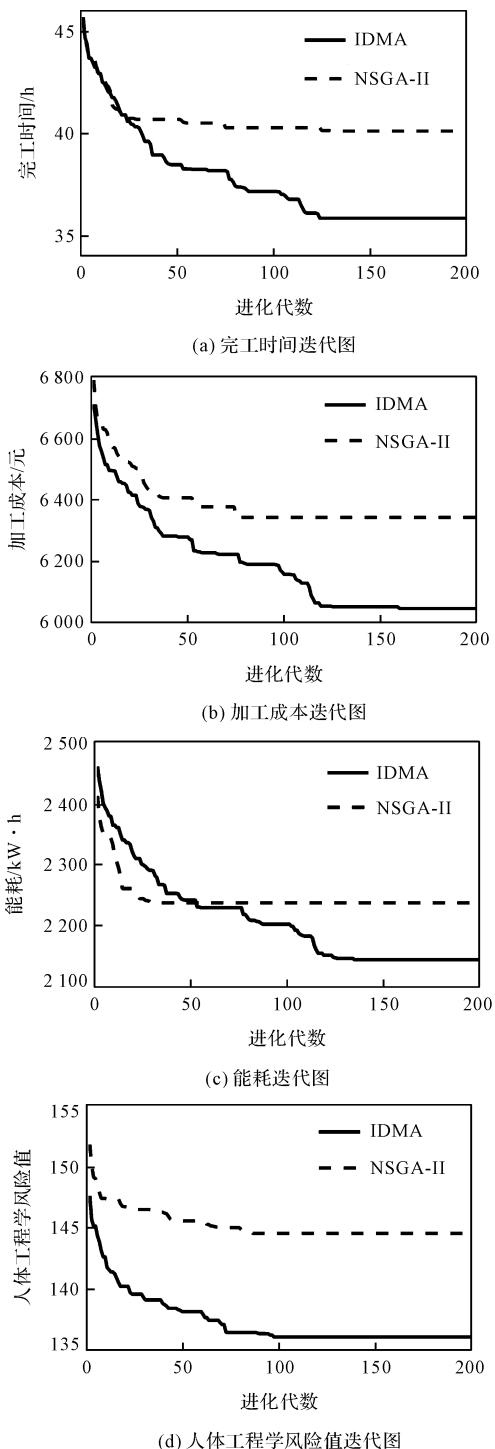


图 7 帕累托解集目标均值迭代图

由图 7 可知:虽然在 50 代以内 NSGA-II 有明显收敛趋势,但 50 代后,其收敛缓状态即慢慢趋于停滞,即陷入到局部最优;IDMA 前期收敛速度较快,50 代左右收敛到较优值,后期能够跳出局部最优,在 120 代左右寻找到最优值,表明其收敛性能要优于 NSGA-II。

因此,笔者选择 IDMA 的最优解作为最优调度方案。

最优调度机器甘特图如图 8 所示。

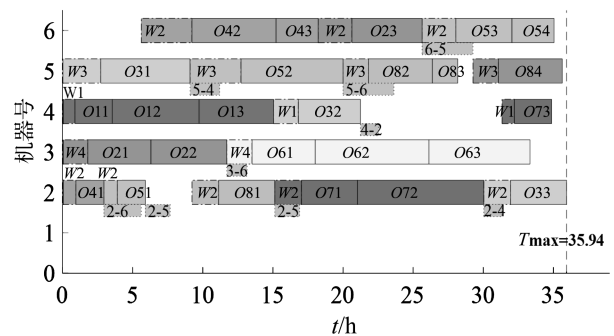


图 8 最优调度机器甘特图

注:W—工人号;O—工序号;短划线—工件运输前后机器号;点划线框—准备时间;实线框—机加时间;点线框—运输时间

最优调度工人甘特图如图 9 所示。

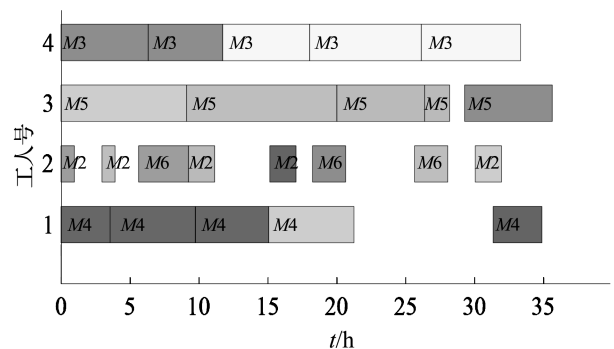


图 9 最优调度工人甘特图

注:M—机器号;实线框—工人操作时间

## 4 结束语

针对车间调度研究中常忽略运输时间的影响,且较少综合优化可持续发展的经济、环境和社会 3 个要素调度的问题,笔者提出了一种考虑工件运输时间的 DRCFJSPT 调度模型,以完工时间、加工成本、能耗和人体工程学风险值为优化目标;并根据模型的离散性和算法搜索特点,提出了一种改进的离散蜉蝣算法,对调度问题进行了求解;最后,通过实例验证,证明了该改进算法的可行性和优越性。

研究表明:

(1) 考虑运输时间和工人的人体工程学风险,更加符合实际的调度车间,为企业实现可持续制造提供

了更为准确清晰的调度方案;

(2)相较于 NSGA-II, IDMA 中混合初始化策略在一定程度上保证了算法的多样性,并显著提高了其解集的均匀性;考虑运输时间的插入式解码方法,以及改进的蜉蝣更新公式和交叉变异方式,明显提高了算法的寻优性能,避免了早熟,帕累托解集在 4 个目标上均明显占优。

为了进一步优化需求多样的复杂制造车间环境,笔者在未来的研究中,将进一步对动态调度及多车间协同调度问题进行探索。

### 参考文献 (References):

- [1] SARTAL A, BELLAS R, MEJIAS A M, et al. The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: a literature review [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2020, 12(5):168-178.
- [2] 李金华. 中国绿色制造、智能制造发展现状与未来路径 [J]. *经济与管理研究*, 2022, 43(6):3-12.
- [3] 杜航明, 乔非. 基于博弈论的混合模因算法考虑人因的多目标可持续调度优化 [C]//2021 中国自动化大会论文集. [出版地不详]: [出版者不详], 2021:483-488.
- [4] 张洪亮, 徐静茹, 谈波, 等. 考虑交货期的双资源柔性作业车间节能调度 [J/OL]. *系统仿真学报*:1-13 [2022-08-30]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1306>.
- [5] 肖华军. 考虑能效的双资源柔性作业车间调度问题研究 [D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院, 2018.
- [6] 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.
- [7] TAN Wei-hua, YUAN Xiao-fang, WANG Jin-lei, et al. A fatigue-conscious dual resource constrained flexible job shop scheduling problem by enhanced NSGA-II: an application from casting workshop [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 160(2):543-557.
- [8] 戴敏, 张玉伟, 曾励. 考虑运输时间的绿色作业车间调度问题研究 [J]. *工业工程*, 2020, 23(2):41-48.
- [9] 王凌, 王晶晶. 考虑运输时间的分布式绿色柔性作业车间调度协同群智能优化 [J/OL]. *中国科学:技术科学*:1-15 [2022-08-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5844.TH.20220408.1527.010.html>
- [10] 张守京, 王彦亭. 基于改进 NSGA2 的柔性车间多目标智能调度问题研究 [J]. *现代制造工程*, 2020, 480(9):23-31.
- [11] 高滔, 叶春明. 一种遗传-贪婪融合算法求解多目标绿色柔性车间调度问题 [J]. *制造业自动化*, 2022, 44(2):128-132.
- [12] 唐娟, 龚本刚, 费志敏. 基于人体工程学风险测定的生产线员工岗位轮转研究 [J]. *安徽工程大学学报*, 2016, 31(3):32-35.
- [13] SCHAUB K, CARAGNANO G, BRITZKE B, et al. The European assembly worksheet [J]. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 2013, 14(6):616-639.
- [14] ZERVOUDARKIS K, TSAFARAK S. A mayfly optimization algorithm [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2020, 145(4):106-117.
- [15] 王义, 张达敏, 张琳娜, 等. 基于黄金正弦与自适应融合的蜉蝣优化算法 [J]. *计算机应用研究*, 2021, 38(10):3072-3077.
- [16] GUPTA J, NIJHAWAN P, GANGULI S. Parameter estimation of fuel cell using chaotic mayflies optimization algorithm [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2021, 4(12):171-183.
- [17] 宋昌兴, 阮景奎, 王宸. 基于混合多目标遗传算法的柔性作业车间调度问题研究 [J]. *机电工程*, 2021, 38(2):169-176.
- [18] 韩子延, 卜赫男, 景旭文, 等. 基于熵值法的船舶涂装工艺多目标评价模型 [J]. *船舶工程*, 2019, 41(12):148-152.
- [19] 陈少, 吉卫喜, 仇永涛, 等. 基于改进鸟群算法的双资源约束离散智能车间调度问题研究 [J]. *现代制造工程*, 2019, 47(4):20-26.
- [20] PENG Zhao, ZHANG Huan, TANG Hong-tao, et al. Research on flexible job-shop scheduling problem in green sustainable manufacturing based on learning effect [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing Journal of Intelligent Manufacturing*, 2022, 33(6):1725-1746.
- [21] 杨昆. 汽车焊装车间数字化工厂关键技术研究 [J]. *机械制造*, 2020, 58(11):28-31.
- [22] 华捷. 基于信息化技术的机械加工车间派工管理系统 [J]. *机械制造*, 2021, 59(2):82-85.

[编辑:李辉]

### 本文引用格式:

侯天天, 张守京. 基于改进离散蜉蝣算法的双资源柔性车间可持续调度方法 [J]. *机电工程*, 2023, 40(3):408-414.

HOU Tian-tian, ZHANG Shou-jing. Dual resource flexible job shops sustainable scheduling based on improved discrete mayfly algorithm [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(3):408-414.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>