

控制与决策

Control and Decision

考虑模糊作业时间的再制造加工车间多目标调度方法

郭钧, 钟精诚, 杜百岗y, 吴锐, 李益兵

引用本文:

郭钧, 钟精诚, 杜百岗y, 等. 考虑模糊作业时间的再制造加工车间多目标调度方法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1497–1504.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1187>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

求解区间柔性作业车间调度的多目标进化算法

Multi-objective evolutionary algorithm to solve interval flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2019, 34(5): 908–916 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1492>

考虑能耗与质量的机床构件生产线多目标柔性作业车间调度方法

Multi-objective flexible job shop scheduling method for machine tool component production line considering energy consumption and quality

控制与决策. 2019, 34(2): 252–260 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0131>

改进人工蜂群算法求解分布式柔性作业车间调度问题

Improved artificial bee colony algorithm for distributed and flexible job-shop scheduling problem

控制与决策. 2019, 34(12): 2527–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0336>

具有空闲时间的云制造作业车间调度方法

Job shop scheduling method with idle time in cloud manufacturing

控制与决策. 2017, 32(5): 811–816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.0447>

多阶段人机协同求解动态柔性作业车间调度问题

Multi-stage man-machine cooperated scheduling method for dynamic flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2016, 31(1): 169–172 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2014.1214>

考虑模糊作业时间的再制造加工车间多目标调度方法

郭 钧, 钟精诚, 杜百岗[†], 吴 锐, 李益兵

(武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 针对再制造加工过程中作业时间的不确定性以及现行车间调度问题中多目标并行的特点, 以三角模糊数描述再制造加工车间作业时间的不确定性, 建立以完工时间、加工成本、设备负载平衡和加工能耗为目标的再制造加工车间调度模型, 并提出一种基于多种群协同进化的混合人工鱼群算法对模型进行求解. 该算法采用多种群协同进化的思想提高单种群混合人工鱼群算法的搜索能力, 并考虑对多目标再制造加工车间调度问题的适用性, 最后以个体分散程度为指标更新 Pareto 解集中的最优解. 仿真实验验证了所提出方法的可行性.

关键词: 再制造加工车间调度; 模糊作业时间; 多目标优化; 混合人工鱼群算法; 多种群协同

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Multi-objective optimization method of remanufacturing reprocessing shop scheduling with fuzzy processing time

GUO Jun, ZHONG Jing-cheng, DU Bai-gang[†], WU Rui, LI Yi-bing

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the uncertainty of remanufacturing processing time and multi-objective parallelism that exists in the job-shop scheduling problems. A multi-objective scheduling model of remanufacturing job-shop considering completion time, cost, load balancing and energy consumption is established based on triangular fuzzy operation time of work-piece. Besides, a multi-population hybrid artificial fish swarm algorithm is applied to solve the proposed model. In this algorithm, a multi-population co-evolution strategy is used to improve the efficiency of the algorithm. And then, the Pareto solution set is updated with individual dispersion as the evaluation criterion. Finally, one case of the remanufacturing job-shop scheduling problem is presented to illustrate the feasibility of the proposed method.

Keywords: remanufacturing reprocessing shop scheduling; fuzzy operation time; multi-objective optimization; hybrid artificial fish swarm algorithm; multi-population co-evolution

0 引 言

再制造是将可利用的废旧品经过拆卸、再制造加工和重新装配等工序使其恢复到“新品”状态的过程, 对缓解资源短缺和资源浪费的矛盾具有重要的现实意义^[1]. 再制造加工的对象是废旧产品经过回收拆卸后的废旧件, 废旧回收品的使用工况、失效模式和失效程度存在一定的差异性, 导致回收件的质量差异和再制造加工时间的不确定性, 加深了再制造生产调度的复杂程度. 同时, 再制造生产调度问题还需保证作业时间之外的其他调度因素以满足企业需求, 如再制造加工成本、降低能源消耗和减少环境污染等. 通过资源分配、操作排序和运作模式的合理优化, 实现增效、节能、减排、降耗, 以提高经济效益, 同时实现制造过程的绿色化, 从而达到再制造节能减排的现实意

义^[2]. 多重优化目标和不确定的加工时间构成了再制造加工独特的调度环境. 因此, 如何科学地衡量再制造加工时间以及平衡各调度目标之间的冲突关系, 保证企业采用合理可行的调度方案已成为再制造企业提高生产管理水平的关键环节之一.

目前, 对于再制造加工调度问题, 国内外已有众多学者对其进行了深入研究. 针对调度过程中作业时间的不确定性, 李聪波等^[3]研究了以平均作业时间为基准的再制造系统生产调度模型, 并设计了基于关键链理论的不确定性生产调度方法对模型进行求解; 刘明周等^[4]采用模糊随机变量表示废旧件加工时间, 以最大完工时间作为优化目标, 建立了基于模糊随机机会约束的再制造加工车间生产调度问题模型; Jamrus 等^[5]针对半导体加工中作业时间

收稿日期: 2018-09-03; 修回日期: 2019-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705386); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2018-IVB-010).

责任编委: 王凌.

[†]通讯作者. E-mail: dbg767@163.com.

的不确定性,采用区间数表示加工时长,提出了最小化 makespan 的柔性作业车间调度 (flexible job-shop scheduling problem, FJSP) 模型; Xu 等^[6] 采用三角模糊数表示加工时长的不确定性,以最大完工时间作为优化目标,构建了基于模糊作业时间的 FJSP 调度模型. 上述文献主要是以最大完工时间为目标,通过引入模糊变量将传统的单目标 FJSP 扩展到更加适应于实际情况的模糊环境中. 针对车间调度问题的不同性能指标,张铭鑫等^[7] 将最小化加工时间和成本作为再制造加工调度问题的目标,构建了模糊交货期约束下的多目标再制造决策规划模型; Lu 等^[8] 以最大完工时间、噪音污染和能量消耗为目标,构建了多目标焊接车间调度优化模型; 雷德明^[9] 以最小化总碳排放和平均延迟时间为目标,建立了低碳 FJSP 模型. 上述文献对于加工调度优化目标的选择主要集中在完工时间、加工成本和能耗等指标中的一个或两个,对于综合考虑多个目标协同优化的研究较少. 因此,如何根据再制造加工时间不确定性的特点,综合考虑作业效率、能源消耗、工作站负载以及企业收益等经济性和技术性指标,从车间层面对再制造加工调度问题的研究有待进一步深入.

在车间调度求解算法研究方面, Wang 等^[10] 通过引入可变领域搜索 (VNS) 方法加强算法的局部搜索能力,提出了一种混合人工蜂群算法求解模糊柔性作业车间调度问题 (fuzzy flexible job-shop scheduling problem, FFJSP); Gao 等^[11] 设计了一种离散和谐搜索算法求解 FFJSP 模型; 吴秀丽等^[12] 设计了基于集成种群多样性机制和讨论机制的双机制头脑风暴优化算法求解 FJSP; 韩玉艳等^[13-14] 考虑存在有限缓冲区和机械故障的因素,分别提出了离散 NSGA-II 算法和多目标进化鲁棒调度算法对多目标批量流水线调度问题进行了求解.

人工鱼群算法 (artificial fish swarm algorithm, ASFA) 是一种通过模拟自然界鱼群的觅食、群聚和追尾行为来搜索领域内最好食物点行为的一种优化算法,该算法具有优异的全局搜索能力以及收敛速度快、鲁棒性强的特点. 赵敏等^[15] 采用步长参数分解和采用柔性参数设置等改进策略,提出了一种基于改进 ASFA 求解 FJSP 问题; Ge 等^[16] 利用分布估计对鱼群的捕食行为进行修正以提高算法的全局搜索能力,提出了一种高效的 ASFA 求解 FJSP 问题. 上述文献都选择在原有启发式算法和群智能算法的基础上进行改进,局限于单种群算法的框架之中,没能避免算法单次寻优结果的不稳定性.

为此,本文在借鉴现有研究成果的基础上,考虑回收品状况的差异性,采用符合再制造回收品特性的模糊变量描述加工作业时间的不确定性,并从再制造加工的技术性、经济性和绿色性 3 个方面考虑,建立以最大模糊完工时间、设备负载均衡、加工成本和能源消耗为优化指标的多目标模糊再制造加工车间调度模型. 在模型求解上,根据多目标加工调度问题中目标之间相互冲突以及搜索空间高度复杂的特点,采用 Pareto 解集原则和多种群协同进化的思想,对 ASFA 进行改进,使其能够收敛到 Pareto 最优前沿面上的非凸区域,提出一种基于 Pareto 思想的多种群协同进化混合 ASFA,该算法为 AFSA 在离散优化领域的应用推广提供了参考依据.

1 多目标再制造加工车间调度问题描述

1.1 问题描述与建模

再制造加工调度可以描述为: 加工过程中有 m 台具有一种或者多种作业能力的加工设备, n 个损伤程度各异的待加工工件,每个工件的加工时间、成本和能耗等指标随着工件自身损伤程度和加工设备的不同而变化. 该模型满足如下假设:

- 1) 所有待加工工件在初始时刻均可以被加工,所有的加工设备在初始时刻都可使用;
- 2) 不同待加工工件之间具有相同的优先级;
- 3) 每个待加工工件需要多道加工工序,每道加工工序可选择的设备可以不只一台,但其只能在其中的一台设备上加工,一旦选定,加工过程不能中断;
- 4) 每台加工设备在同一个时刻只能加工一个工件,且设备不会发生故障;
- 5) 所有待加工工件都经过可再制造性检测,可经过完整的加工工序;
- 6) 忽略待加工工件在设备之间的运送时间,且工作准备时间包含在加工时间之内.

为方便讨论,引入如下数学符号:

M : m 台加工设备的集合, $M = \{M_k\}, k = 1, 2, \dots, m$;

J : n 个待加工工件的集合, $J = J_i, i = 1, 2, \dots, n$;

$O_{i,j}$: 待加工工件 J_i 的第 j 道加工工序, $j = 1, 2, \dots, l$;

R_{j_1, j_2}^i : 待加工工件 J_i 的加工工序关系变量,若工序 O_{i, j_1} 在工序 O_{i, j_2} 前执行,则 $R_{j_1, j_2}^i = 1$, 否则 $R_{j_1, j_2}^i = 0$;

$S_{i,j}$: 待加工工件 J_i 第 j 道工序的可使用设备的集合, $S_{i,j} \in M$;

$PT_{i,j,k}$:待加工工件 J_i 第 j 道工序在设备 M_k 上的加工时间;

$CT_{i,j}^k$:待加工工件 J_i 第 j 道工序在设备 M_k 上的完成时间;

C_k :加工设备 M_k 在单位时间内的加工费用;

E_k :加工设备 M_k 的运行功率;

\overline{E}_k :加工设备 M_k 的空载功率;

$\alpha_{i,j,k}$:决策变量,若工序 $O_{i,j}$ 选择在设备 M_k ($k \in S_{i,j}$) 上加工,则 $\alpha = 1$, 否则 $\alpha_{i,j,k} = 0$.

本文在考虑企业的多样性需求的基础上,最终确定如下最大完成时间、负载平衡、加工成本、加工绿色性4个优化目标:

1) 最大完成时间.

最大完成时间是指在满足加工工艺和加工设备可用的前提下,最后时刻的完工时间,即

$$T_{\max} = \max\{T_{\max}^k | k = 1, 2, \dots, m\}, \quad (1)$$

其中 T_{\max} 为加工设备 M_k 上最后一个工序的加工完成时间. 加工最大完成时间调度目标是求解 n 个待加工工件的最优加工调度顺序,使总完工时间 T_{\max} 最小.

2) 负载平衡.

负载平衡是指在加工过程中,各加工设备负载的平衡程度. 负载小表示任务所用的加工设备都得到合理利用,负载较平衡,有

$$L = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(t_k - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m t_k \right)^2}, \quad (2)$$

其中 t_k 为加工设备 M_k 处于加工状态的总时间.

3) 加工成本.

加工成本是指在加工特定零件的过程中所产生的加工费用,是影响再制造加工调度的指标之一. 加工成本越低,回收再制造所创造的价值便越高,有

$$C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l \sum_k PT_{i,j,k} \alpha_{i,j,k} C_k. \quad (3)$$

4) 加工绿色性.

考虑到可量化性,本文仅以加工过程中加工设备所消耗的能源作为绿色性程度的度量指标,有

$$E = \sum_{k=1}^m \left(\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^l PT_{i,j,k} \alpha_{i,j,k} \right) E_k + \overline{T}_k \overline{E}_k \right), \quad (4)$$

其中 \overline{T}_k 为加工过程中设备 M_k 的空闲时间.

本文提出的再制造加工车间调度模型的目标不仅考虑了经典调度目标的总完成时间 T 和机床使用平衡负载 L ,还考虑了加工过程的总成本 C 和总能耗 E ,通过选择最优加工工序次序和各工序的最优加工

设备获得4个目标的Pareto优化调度方案. 该模型约束条件如下:

$$(1 - R_{j_1, j_2}^{i_1, i_2})(CT_{i_1, j_1}^k Q_{i_1, j_1}^k - CT_{i_2, j_2}^k Q_{i_2, j_2}^k) \geq (1 - R_{j_1, j_2}^{i_1, i_2})PT_{i_1, j_1, k}, k \in (S_{i_1, j_1} \cap S_{i_2, j_2}); \quad (5)$$

$$(1 - R_{j_1, j_2}^{i_1, i_1})(CT_{i_1, j_1}^{k_1} Q_{i_1, j_1}^{k_1} - CT_{i_1, j_2}^{k_2} Q_{i_1, j_2}^{k_2}) \geq (1 - R_{j_1, j_2}^{i_1, i_1})PT_{i_1, j_1, k_1}, k_1 \in S_{i_1, j_1}, k_2 \in S_{i_1, j_2}; \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^m Q_{i,j}^k = 1. \quad (7)$$

其中:式(5)表示在同一时间内,一台加工设备只能加工一个工序,式(6)表示在不能同时加工工件的不同工序,式(7)表示同一工序只能在一台设备上加工.

1.2 模糊作业时间及其数学描述

由于废旧回收品存在服役年限、使用工况以及失效模式等诸多不确定因素,实际的再制造加工作业时间具有波动性,精确的加工作业时间不贴近实际情况. 本文采用三角模糊数(triangular fuzzy numbers, TFN)表示再制造加工车间中待加工零部件的加工时间,表征加工时间在其估计值上下波动. 加工作业时间表示为三元组,即

$$PT_{i,j,k} = (pt_{i,j,k}^1, pt_{i,j,k}^2, pt_{i,j,k}^3),$$

其中 $pt_{i,j,k}^1, pt_{i,j,k}^2, pt_{i,j,k}^3$ 分别表示待加工工件 J_i 的第 j 道工序在设备 M_k 上加工的乐观时间、最可能时间以及悲观时间. 相应数值可通过TFN代数运算获得,设 A 和 B 为三角模糊数,有

$$A = (A^1, A^2, A^3), B = (B^1, B^2, B^3).$$

1) 加法操作: $A + B = (A^1 + B^1, A^2 + B^2, A^3 + B^3)$.

2) 取大操作:为了衡量三角模糊数之间的大小关系, Sakawa 等^[17] 提出判定方法,此后又有许多学者重新进行了定义. 本文采用 Lei^[18] 提出的判别规则,令

$$F(A) = \frac{A^1 + 2A^2 + A^3}{4}, F(B) = \frac{B^1 + 2B^2 + B^3}{4}.$$

有:

1) 若 $F(A) > (<)F(B)$, 则 $A > (<)B$;

2) 若 $F(A) = F(B)$, 则比较 A^2 与 B^2 的大小,若 $A^2 > (<)B^2$, 则 $A > (<)B$;

3) 若 $F(A) = F(B)$ 且 $A^2 = B^2$, 则比较 A 与 B 的区间大小,若 $A^3 - A^1 > (<)B^3 - B^1$, 则 $A > (<)B$.

2 基于多种群混合ASFA的再制造加工调度方法

2.1 编码和解码

本文采用基于工序和设备的双重编码方式,每个解都由加工序列和设备序列两部分构成, $O_{i,j}$ 在加工序列中表现为第 j 个出现的 i 元素,其在设备序列中对应的元素即为加工 $O_{i,j}$ 的设备.

2.2 种群初始化

为降低种群初始解随机性对算法搜索过程的影响,对于加工序列的生成,根据9:1的比例分别采用随机初始化和高复杂度工件优先加工的初始化方法.工件 i 的加工复杂度 H_i 由工件上所有未执行的加工工序在各加工设备上的最大能耗之和衡量,即

$$H_i = \sum_{j=1}^l \max\{E_k \text{PT}_{i,j,k} \alpha_{i,j,k}\}, i = 1, 2, \dots, n, \\ k = 1, 2, \dots, m, j \notin G_i, \quad (8)$$

其中 G_i 为工件 i 上已处理的加工工序集合.

加工序列生成后,需要根据加工工序依次分配对应的加工设备.对于随机生成的加工序列,则随机分配一个可行加工设备;对于按照高复杂度优先加工规则生成的加工序列,则给对应序列分配效率高的加工设备.本文采用3种设备分配方式,分别将三角模糊数中的乐观值、最可能值和悲观值作为设备加工效率的评价,并以此为依据将加工工序分配给加工效率最高的设备,根据三角模糊数的数学特性,使用这3种设备分配方式的比例为1:2:1.

2.3 鱼群行为

2.3.1 觅食行为

觅食行为是在人工鱼视野范围内搜索优于当前人工鱼位置的“食物点”,作为当前人工鱼的可移动位置,并将满足可移动位置条件的人工鱼放入集合 P 作为Pareto最优解集,即为各种群的共享数据.两人工鱼 $X_1(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^n)$ 与 $X_2(x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^n)$ 之间的距离表示为

$$L(X_1, X_2) = \sum_{i=1}^n \text{sgn}|x_1^i - x_2^i|. \quad (9)$$

在觅食行为中,首先查找当前人工鱼视野范围内的所有人工鱼,若存在支配当前人工鱼的非劣解,则觅食成功,否则随机从当前种群的剩余个体中选择一个作为参考人工鱼,与当前人工鱼作为父代执行交叉操作,直到子代符合可移动位置的要求或达到最大尝试次数.若觅食操作没有搜索到可移动的“食物点”,则执行随机行为,参照遗传算法变异操作,随机改变

当前人工鱼中加工序列中的一个工序的位置,或将工序的加工设备初始化为一个随机的可行设备.最后,将变异之后的个体作为可移动“食物点”.

2.3.2 群聚行为

群聚行为是人工鱼向视野范围内的鱼群中心游动以寻找更优“食物点”的行为,鱼群中心点的位置由中心加工序列和中心设备序列构成,中心加工序列为与其他个体中加工序列的“距离”之和最小的序列,中心设备序列为所有个体中各工序所对应出现次数最多的设备组成.若满足种群拥挤度条件 $N_p/Q \leq \delta$ 且中心位置个体支配当前人工鱼,则群聚成功,将中心位置的个体放入集合 P 中,并将当前人工鱼移动到中心位置,否则群聚失败,执行觅食行为.其中: N_p 为当前人工鱼视野范围内的人工鱼数量, Q 为种群数量, δ 为鱼群拥挤度.

2.3.3 追尾行为

追尾行为中,若当前人工鱼视野范围内所有人工鱼中存在优于该个体的非劣解,且视野范围内的人工鱼数量满足种群拥挤度条件,则追尾成功,将所有非劣解加入集合 P 中,否则追尾失败,执行觅食行为.

2.4 Pareto最优解集更新

集合 P 中记录了各子种群迭代过程中产生的较优解,为保证集合 P 的多样性以及对子种群的指导作用,集合 P 的每次更新需要筛除集合中的支配解.当集合 P 中的非劣解数量超出之前设定的最大容量 P_Num ,需要在集合 P 中选出较优的 P_Num 个个体组成新的Pareto最优解集.新的Pareto解集必须具有良好的多样性与覆盖性,本文在借鉴已有研究的基础上^[19-20],以分散度为依据更新Pareto解集.对于多目标函数问题,个体总体分散度为个体在每个目标函数上的分散度之和,对某一目标函数 f_k 而言,个体 i 的分散度为

$$D_{k,i} = \frac{|f_{k,i+1} - f_{k,i-1}|}{f_{k,\max} - f_{k,\min}}, D_{k,1} = D_{k,P_Num}, \\ i = 2, 3, \dots, P_Num - 1. \quad (10)$$

其中:个体在种群中的位置由对应函数值的大小决定, $f_{k,i}$ 为个体 i 在目标函数 f_k 上的函数值, $f_{k,\max}$ 和 $f_{k,\min}$ 为目标函数 f_k 在集合 P 所提供的解空间中的最大值和最小值.

2.5 种群更新

为减少种群初始化的随机性对算法的影响,采用精英保留策略,随机选择集合 P 中的部分优秀个体加入到子种群中,按照个体支配情况和分散程度,选择

出 Q 个体作为下一次迭代的初始种群. 其中, 集合 P 记录了各子种群每一次迭代的最优个体, 作为各种群之间信息共享的媒介, 有利于种群之间的协同进化和算法的快速收敛.

2.6 算法步骤

step 1: 初始化算法参数: 最大迭代次数 T_{max} , 种群数量 N , 子种群容量 Q , 人工鱼视野 $visual$, 尝试次数 n_{try} , 拥挤度因子 δ 等.

step 2: 根据加工任务的模糊加工时间矩阵生成 N 个初始子种群, 初始化集合 P 为空集.

step 3: 计算子种群中所有个体对应的各目标函数值, 按照下式进行归一化处理:

$$S_k^i = \frac{f_k^i - f_k^{\min}}{f_k^{\max} - f_k^{\min}}, \quad k = 1, 2, 3, 4. \quad (11)$$

将各函数值转化为 $0 \sim 1$ 之间的无量纲表达式, 并按照 Pareto 最优解更新规则筛选非劣解, 更新集合 P .

step 4: 对子种群中的所有个体, 执行人工鱼的群聚行为和追尾行为, 生成新种群.

step 5: 随机选择集合 P 中部分优秀个体加入新种群中, 按照精英保留策略选择下一次迭代的初始种群.

step 6: 若算法迭代次数达到设定值, 则转至 step 7, 否则转至 step 3.

step 7: 输出集合 P 作为最优加工方案, 算法结束.

3 实验仿真与分析

为验证所提出算法对再制造加工车间调度问题的适用性和可行性, 将混合人工鱼算法在单种群和多种群两种模式下分别进行实验, 并与文献 [21] 多种群遗传算法的寻优结果进行对比分析. 在 2.80 GHz CPU、Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ 处理器、4 GRAM、Windows10 系统的配置环境下, 通过 C++ 语言和 Matlab R2013b 软件对算法进行实现.

表 1 为 10 个工件在 8 台设备上加工的调度实例中各算法的参数设置, 表 2 和表 3 为加工工序和设备

的基础信息, 图 1 为各算法所求的 Pareto 解集在各目标函数上的空间分布图. 图 1 中: 菱形为多种群人工鱼算法, 三角形为单种群人工鱼算法, 星形为多种群遗传算法. 图 2 为加工方案对应的模糊甘特图. 对比各算法的求解结果可知, 多种群的混合人工鱼算法所求得的 Pareto 解不仅在最大加工完成时间、负载平衡和加工能耗的最大值、平均值、最小值上最优, 在加工成本上的函数值也部分优于其余两种算法的结果, 且在多个目标函数值跨度上优于单种群混合人工鱼算法, 具有更好的分散程度.

综上所述, 在对于不同算法寻优结果的横向对比中, 多种群 ASFA 能获得相对较优的 Pareto 解, 在各目标函数上的优化各有侧重, 较为合理地解决了各目标函数之间的冲突. 在 Pareto 解的数量上, 多种群 ASFA 也求得了分布范围较广的多组解, 表明多种群 ASFA 相较于单种群 ASFA 和多种群的遗传算法, 具有较优的全局搜索能力. 通过对实例求解的纵向对比可发现, 多种群 ASFA 总能搜索到最优的再制造加工方案, 具有良好的搜索稳定性, 在对多目标再制造加工车间调度问题的适用性上优于其余两种算法.

为进一步表明多种群 ASFA 在求解多目标再制造加工车间调度问题上的优越性, 采用反世代距离 (inverted generational distance, IGD) 这一指标衡量 3 种算法在求解问题时所得最优解集的优劣性. IGD 是用于描述算法所得 Pareto 前沿与真实 Pareto 前沿之间的拟合程度, IGD 越小表明对应算法的 Pareto 解集的收敛性和多样性越好, 算法的性能也越优.

多种群 ASFA、多种群遗传算法与单种群 ASFA 在不同规模算例下所得 Pareto 最优解的 IGD 指标如表 4 所示. 由表 4 可见, 多种群 ASFA 的 IGD 指标为 0.0872, 同样优于其余两种算法的 IGD 值, 表明多种群 ASFA 在不同规模算例下, 不仅能够获得更为优秀的非支配解, 而且该算法所求得的最优前沿分布在 3 种算法中最贴近真实 Pareto 前沿. 同时表明多种群 ASFA 在 3 种算法中具有较好的寻优能力, 能够有效处理多目标车间调度优化问题.

表 1 算法参数设置

算法	迭代次数	种群数量	种群大小	视野范围	拥挤度因子	尝试次数	交叉率	变异率
多种群混合 ASFA	200	5	40	50	0.8	15	—	—
单种群混合 ASFA	200	—	200	50	0.8	15	—	—
多种群遗传算法	200	5	40	—	—	—	0.8	0.01

表2 加工设备信息

设备号	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
运行功率/W	300	260	560	280	680	330	750	342
空载功率/W	60	45	120	35	180	106	150	95
加工单价/(元/S)	0.0074	0.0046	0.0091	0.0085	0.0065	0.0057	0.0085	0.0037

表3 工序模糊加工时间

	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8
O_{11}	-	-	-	(10, 12, 15)	-	(9, 10, 14)	(7, 9, 13)	-
O_{12}	(14, 17, 21)	-	-	-	(13, 17, 22)	(7, 10, 12)	-	(11, 15, 19)
O_{13}	-	(19, 24, 26)	-	(7, 11, 14)	-	-	(7, 10, 14)	-
O_{21}	-	-	(13, 16, 20)	(6, 10, 14)	(17, 21, 27)	(10, 14, 17)	-	(12, 17, 22)
O_{22}	(6, 8, 9)	(9, 12, 16)	-	-	(14, 19, 23)	(8, 11, 15)	-	-
O_{23}	-	-	-	(11, 15, 21)	-	(18, 21, 28)	(19, 25, 26)	-
O_{24}	-	-	-	-	(14, 18, 22)	-	(7, 9, 11)	-
O_{25}	(9, 12, 15)	(13, 15, 18)	-	(10, 14, 17)	(6, 9, 12)	-	(8, 10, 14)	-
O_{26}	-	(7, 9, 12)	-	(6, 7, 8)	(7, 10, 12)	(6, 8, 11)	-	-
O_{31}	-	(10, 14, 17)	-	-	-	-	(13, 17, 22)	-
O_{32}	-	(20, 23, 28)	(19, 23, 25)	(13, 17, 21)	-	(14, 18, 22)	-	-
O_{33}	-	-	(17, 20, 25)	(6, 9, 11)	(20, 22, 27)	-	-	(17, 21, 25)
O_{34}	(4, 7, 10)	-	(8, 10, 14)	-	(5, 8, 11)	(7, 11, 14)	(6, 9, 12)	-
O_{41}	-	(12, 18, 20)	-	-	-	(13, 17, 20)	(15, 18, 21)	-
O_{42}	-	-	-	-	-	-	(9, 12, 16)	-
O_{43}	-	(5, 8, 11)	(8, 11, 15)	(7, 8, 10)	-	-	(7, 9, 12)	(15, 20, 22)
O_{51}	-	-	(21, 24, 27)	(6, 10, 13)	(12, 16, 19)	-	-	-
O_{52}	-	-	-	(14, 17, 20)	-	-	-	(7, 8, 12)
O_{61}	-	(17, 20, 26)	-	-	-	-	(20, 22, 25)	-
O_{62}	-	-	(15, 18, 22)	-	-	-	(16, 19, 23)	-
O_{63}	(16, 19, 23)	-	(13, 17, 19)	(14, 16, 19)	(12, 16, 18)	-	-	(13, 18, 20)
O_{71}	-	-	(10, 16, 19)	-	(11, 17, 20)	(14, 16, 18)	-	-
O_{72}	-	-	-	-	-	(17, 20, 23)	(21, 22, 27)	-
O_{73}	-	-	-	-	-	(16, 18, 21)	(19, 23, 27)	-
O_{74}	-	-	-	-	-	(8, 10, 14)	-	(21, 24, 26)
O_{81}	(8, 11, 15)	-	-	-	-	-	(18, 21, 25)	(17, 21, 23)
O_{82}	(20, 25, 29)	(7, 11, 13)	-	-	-	-	-	-
O_{83}	(23, 24, 26)	(15, 18, 21)	-	-	-	(24, 25, 27)	-	(16, 20, 23)
O_{91}	-	(11, 12, 14)	(6, 9, 11)	-	-	(10, 14, 17)	-	-
O_{92}	(19, 24, 26)	-	(7, 11, 13)	(18, 21, 23)	-	(20, 22, 28)	(23, 25, 28)	-
O_{93}	-	-	-	-	-	(14, 16, 19)	-	(17, 19, 23)
O_{94}	-	(5, 6, 8)	-	(6, 8, 11)	(5, 7, 10)	-	(7, 10, 12)	-
O_{95}	(8, 9, 11)	(8, 12, 13)	-	(3, 6, 9)	(8, 11, 13)	(7, 8, 10)	(7, 10, 13)	-
$O_{10,1}$	-	(16, 19, 22)	-	-	-	-	(19, 21, 25)	(22, 23, 24)
$O_{10,2}$	-	(17, 18, 19)	-	-	-	(22, 24, 27)	-	(8, 12, 16)

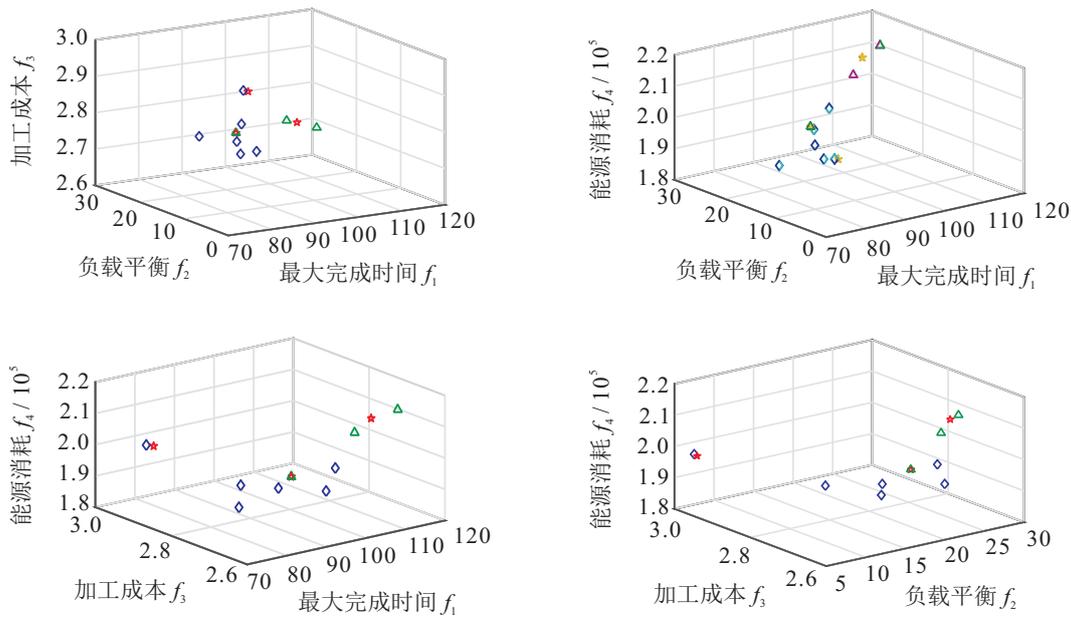


图1 Pareto最优解集空间分布对比

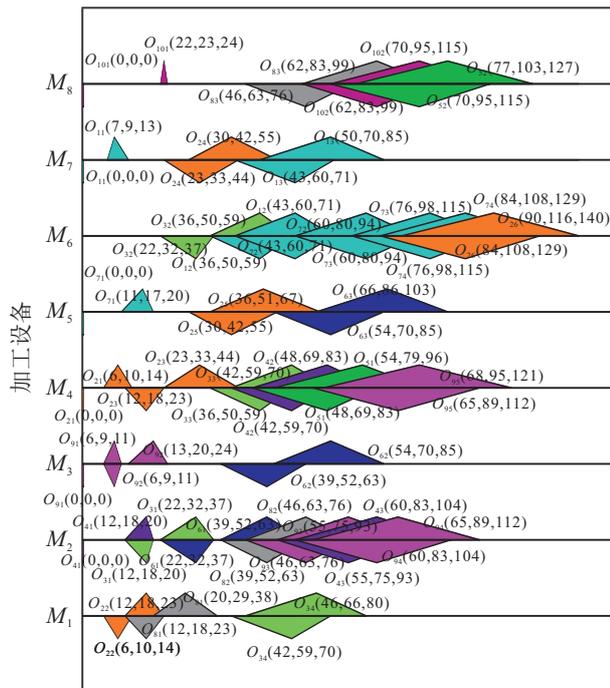


图2 加工方案模糊甘特图

表4 算法IGD指标

多种群人工鱼算法	多种群遗传算法	单种群人工鱼算法
0.0872	0.2338	0.5525

4 结论

本文根据再制造加工过程中的不确定性,使用三角模糊数描述再制造过程中的不确定加工时间,建立了多目标再制造加工车间调度模型. 针对模型中的模糊加工时间对解空间的复杂化以及多目标寻优问题中固有的冲突特性,提出了一种基于ASFA的多种群优化算法,引入遗传算法中的交叉和变异操作,对

人工鱼的搜索行为进行改进,以增强算法的寻优效率和全局搜索能力. 在最后的实验仿真中,通过与单种群ASFA和多种群遗传算法的寻优结果对比分析,表明了多种群ASFA在求解再制造加工车间调度问题中,都具有良好的应用效果. 所提出的算法可以有效应用于FFJSP问题,未来的研究方向是考虑高维多目标FJSP问题的求解算法.

参考文献(References)

[1] 刘琳, 刘光复, 宋守许, 等. 废旧机电产品再制造工艺过程的经济性分析[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2011, 34(8): 1121-1125.
(Liu L, Liu G F, Song S X, et al. Economic analysis of remanufacturing processes of end-of-life electro-mechanical products[J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2011, 34(8): 1121-1125.)

[2] 王凌, 王晶晶, 吴楚格. 绿色车间调度优化研究进展[J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 385-391.
(Wang L, Wang J J, Wu C G. Advances in green shop scheduling and optimization[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 385-391.)

[3] 李聪波, 刘飞, 易茜, 等. 基于关键链的再制造系统不确定性生产调度方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(15): 121-126.
(Li C B, Liu F, Yi Q, et al. A critical chain based uncertain production scheduling method for remanufacturing systems[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(15): 121-126.)

[4] 刘明周, 张玺, 刘从虎, 等. 不确定环境下再制造加工车间生产调度优化方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 206-212.
(Liu M Z, Zhang X, Liu C H, et al. Optimization method of remanufacturing reprocessing shop scheduling

- under uncertain conditions[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(10): 206-212.)
- [5] Jamrus T, Chien C F, Gen M, et al. Hybrid particle swarm optimization combined with genetic operators for flexible job-shop scheduling under uncertain processing time for semiconductor manufacturing[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, 31(1): 32-41.
- [6] Xu Y, Wang L, Wang S Y, et al. An effective teaching-learning-based optimization algorithm for the flexible job-shop scheduling problem with fuzzy processing time[J]. *Neurocomputing*, 2015, 148: 260-268.
- [7] 张铭鑫, 张玺, 彭建刚, 等. 不确定环境下再制造加工车间多目标调度优化方法[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 2016, 39(4): 433-439.
(Zhang M X, Zhang X, Peng J G, et al. Multi-objective optimization method of remanufacturing processing workshop scheduling under uncertain conditions[J]. *Journal of Hefei University of Technology: Natural Science*, 2016, 39(4): 433-439.)
- [8] Lu C, Gao L, Li X Y, et al. A multi-objective approach to welding shop scheduling for makespan, noise pollution and energy consumption[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 196: 773-787.
- [9] 雷德明. 基于新型教学优化算法的低碳柔性作业车间调度[J]. *控制与决策*, 2017, 32(9): 1621-1627.
(Lei D M. Novel teaching-learning-based optimization algorithm for low carbon scheduling of flexible job shop[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(9): 1621-1627.)
- [10] Wang L, Zhou G, Xu Y, et al. A hybrid artificial bee colony algorithm for the fuzzy flexible job-shop scheduling problem[J]. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(12): 3593-3608.
- [11] Gao K Z, Suganthan P N, Pan Q K, et al. An effective discrete harmony search algorithm for flexible job shop scheduling problem with fuzzy processing time[J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(19): 5896-5911.
- [12] 吴秀丽, 张志强, 李俊青. 求解离散调度问题的双机制头脑风暴优化算法[J]. *控制与决策*, 2017, 32(9): 1583-1590.
(Wu X L, Zhang Z Q, Li J Q. A brain storm optimization algorithm integrating diversity and discussion mechanism for solving discrete production scheduling problem[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(9): 1583-1590.)
- [13] 韩玉艳, 李俊青, 桑红燕, 等. 离散NSGA-II求解带有限缓冲区的多目标批量流水线调度问题[J]. *聊城大学学报: 自然科学版*, 2018, 31(1): 89-96.
(Han Y Y, Li J Q, Sang H Y, et al. Discrete NSGA-II for multi-objective lot-streaming flow shop scheduling problem with limited buffers[J]. *Journal of Liaocheng University: Natural Science*, 2018, 31(1): 89-96.)
- [14] Han Y Y, Gong D W, Jin Y C, et al. Evolutionary multiobjective blocking lot-streaming flow shop scheduling with machine breakdowns[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 184-197.
- [15] 赵敏, 殷欢, 孙棣华, 等. 基于改进人工鱼群算法的柔性作业车间调度[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(8): 1059-1065.
(Zhao M, Yin H, Sun D H, et al. Flexible job shop scheduling based on modified artificial fish swarm algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(8): 1059-1065.)
- [16] Ge H, Sun L, Chen X, et al. An efficient artificial fish swarm model with estimation of distribution for flexible job shop scheduling[J]. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2016, 9(5): 917-931.
- [17] Sakawa M, Kubota R. Fuzzy programming for multiobjective job shop scheduling with fuzzy processing time and fuzzy due date through genetic algorithms[J]. *European Journal of Operational Research*, 2000, 120(2): 393-407.
- [18] Lei D M. A genetic algorithm for flexible job shop scheduling with fuzzy processing time[J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(10): 2995-3013.
- [19] 薛臣, 江志刚, 张旭刚, 等. 废旧机械装备零部件重用组合多目标优化模型及应用[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(5): 76-85.
(Xue C, Jiang Z G, Zhang X G, et al. Multi-objective optimization model and application of components reuse combination for used mechanical equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(5): 76-85.)
- [20] 曹磊, 叶春明, 黄霞. 基于员工学习行为的多目标柔性车间调度[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(8): 2023-2033.
(Cao L, Ye C M, Huang X. Multi-objective flexible job-shop scheduling based on learning effect[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(8): 2023-2033.)
- [21] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 多目标模糊柔性车间调度中的多种群遗传算法[J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(9): 1954-1961.
(Liu A J, Yang Y, Xing Q S, et al. Multi-population genetic algorithm in multi-objective fuzzy and flexible job shop scheduling[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(9): 1954-1961.)

作者简介

郭钧(1982—), 男, 副教授, 博士, 从事再制造智能决策与优化等研究, E-mail: junguo@whut.edu.cn;

钟精诚(1997—), 男, 硕士生, 从事车间调度的研究, E-mail: 1343318943@qq.com;

杜百岗(1987—), 男, 副教授, 博士, 从事制造过程理论与优化等研究, E-mail: dbg767@163.com;

吴锐(1989—), 男, 博士生, 从事车间调度的研究, E-mail: wurui@whut.edu.cn;

李益兵(1978—), 男, 教授, 博士, 从事智能优化等研究, E-mail: ahlyb@whut.edu.cn.

(责任编辑: 郑晓蕾)