

控制与决策

Control and Decision

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

朱艳艳, 徐震浩, 顾幸生

引用本文:

朱艳艳, 徐震浩, 顾幸生. 工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解[J]. *控制与决策*, 2021, 36(5): 1127–1136.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1036>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于正态云模型的状态转移算法求解多目标柔性作业车间调度问题](#)

State transition algorithm based on normal cloud model for solving multi-objective flexible job shop scheduling problem

控制与决策. 2021, 36(5): 1181–1190 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1233>

[带不相关并行机和有限缓冲MHFS调度的混合启发式算法](#)

Hybrid heuristic algorithm for multi-stage hybrid flow shop scheduling with unrelated parallel machines and finite buffers

控制与决策. 2021, 36(3): 565–576 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0835>

[顺序依赖的调整时间和拖期的无缝钢管热轧批量调度算法](#)

Hot-rolled batch scheduling algorithm for seamless steel tube with sequence-dependent setup times and tardiness

控制与决策. 2021, 36(2): 505–512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0723>

[基于预防维护的单机调度问题](#)

Single-machine scheduling problem with preventative maintenance activities

控制与决策. 2021, 36(2): 395–402 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0626>

[基于机床超低待机状态的流水车间能耗调度](#)

Energy consumption scheduling in flow shop based on ultra-low idle state of numerical control machine tools

控制与决策. 2021, 36(1): 143–151 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0433>

工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解

朱艳艳, 徐震浩[†], 顾幸生

(华东理工大学 信息科学与工程学院, 上海 200237)

摘要: 针对一类工序加工时间不确定的可重入调度问题,以提前/拖期惩罚区间大小为目标构建调度模型,并设计一种兼顾区间极值和区间跨度的方法对惩罚区间进行定量比较,同时可根据生产的实际需求或调度人员的倾向灵活调节区间极值和区间跨度所占的比重. 根据调度模型,提出一种变邻域化学反应优化算法(VNCRO),并设计4种化学反应. 其中:碰壁反应采用粒子群算法中对最优粒子的跟踪思想和变步长邻域搜索方法,加速算法收敛,同时使局部搜索更加精细;双分子碰撞反应可使种群内分子进行信息交流. 结合所设计的全局搜索分解反应和合成反应,可使局部搜索与全局搜索达到更好的平衡. 通过仿真实验验证模型的可靠性,并通过与CRO、DICA、IDABC、DWOA算法的性能比较,说明VNCRO算法在解决工序加工时间不确定的可重入调度问题的优越性.

关键词: 加工时间不确定; 区间数; 可重入调度; 变邻域搜索; 化学反应优化算法; 提前/拖期惩罚

中图分类号: TP301

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.1036

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 朱艳艳, 徐震浩, 顾幸生. 工序加工时间不确定的可重入调度问题的求解[J]. 控制与决策, 2021, 36(5): 1127-1136.

Solution of reentrant scheduling problem with uncertain processing time

ZHU Yan-yan, XU Zhen-hao[†], GU Xing-sheng

(School of Information Science and Technology, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Aiming at a kind of reentrant scheduling problem that processing time is difficult to accurately express, an scheduling model is constructed taking E/T penalty interval is as the objective. A method considering interval extreme value and interval span is designed to compare different penalty intervals for E/T quantitatively. At the same time, the proportion of interval extreme value and interval span can be adjusted according to the actual demand or the tendency of schedulers. In addition, according to the established scheduling model, a variable neighborhood chemical reaction optimization algorithm (VNCRO) is proposed. Four kinds of chemical reactions are designed. The on-wall ineffective collision adopts the idea of tracking the optimal particle in the PSO algorithm and the method of variable step size neighborhood. The inter-molecular ineffective collision makes the information exchange among the molecules in the population. Combined with the decomposition reaction and synthesis reaction, the local search and the global search reach a better balance. The reliability of the model is verified by simulation experiments. By comparing with CRO, DICA, IDABC, DWOA algorithms, the superiority of the VNCRO algorithm in resolving reentrant scheduling problem with uncertain processing time is illustrated.

Keywords: uncertain processing time; interval number; reentrant scheduling; variable neighborhood search; chemical reaction optimization algorithm; E/T penalty

0 引言

可重入调度(re-entrant lines)^[1]是一类特殊的调度问题,即指工件在不同的加工阶段可能会访问相同的某些设备,具有一定的难度. 近年来,大量学者针对该问题的不同方面做了深入的研究. Chettha等^[2]研究了带有时间窗约束的可重入流水车间调度问题;

轩华等^[3]考虑了生产过程中前后工序之间物料传递的运输时间,建立了循环可重入调度模型; Qian等^[4]研究了不同工件重入次数不同的循环流水调度; 王娜^[5]对 mini-fab 模型进行修改,建立一个能够加工两种产品的6机10工序可重入生产系统,研究多产品可重入生产系统的性能影响因素和性能评估; Nose

收稿日期: 2019-07-19; 修回日期: 2019-11-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573144, 61673175, 61603139).

责任编辑: 王伟.

[†]通讯作者. E-mail: xuzhenhao@ecust.edu.cn.

等^[6]研究了以最小化总负载为目标的带有释放时间的可重入作业车间问题。

在实际生产过程中,由于工人的操作差异、机器的磨损等,工序的加工时间很难用一个确定的值表示. 区间数只需获得工序加工时间的上界和下界,数据相对容易获得,但区间数很难直接比较大小,特别是两区间部分重合时,这给调度结果的比较和处理带来了困难. 针对这一问题,Lei^[7]通过区间扩张原理证明了基于区间数的调度问题的合理性;杨宏安等^[8]以一个区间比另一个区间大的程度,即区间可能度来比较提前/拖期惩罚区间的大小;Yu等^[9]以受惩罚区间可能度总和最小为目标函数,将不确定的区间数转化为确定的实数,构建不确定加工时间的流水车间模型;乔威等^[10]以工件受惩罚可能度的总加权和最小,设计了带精英交叉策略的遗传算法. 目前,衡量区间大小的方法大多采用区间可能度函数. 到目前为止,针对工序加工时间不确定的可重入调度问题的研究成果很少,本文针对这个问题做一些探索性研究.

化学反应优化算法是由Lam等^[11]于2010年提出的基于种群的智能优化算法,自他们对化学反应算法的收敛性进行验证以后,各种改进的化学反应算法被广泛应用于求解TSP^[12]、作业车间调度^[13]等问题,并在求解离散优化问题上展现了良好的性能.

本文以优化提前/拖期(E/T)惩罚和增强调度的鲁棒性为目标,采用区间数来处理不确定的加工时间,构建可重入调度模型,并根据模型的特点,提出一种变邻域化学反应优化算法(variable neighborhood chemical reaction optimization algorithms, VNCRO),同时设计VNCRO算法的4种基本反应,通过正交实验方法来讨论参数对反应过程的影响,利用仿真和算法对比的结果来验证该模型的可靠性和算法的优越性.

1 问题描述

以半导体 mini-fab 可重入生产线为例,如图1所示,3组设备都存在重入现象.

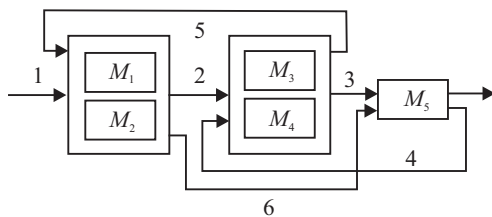


图1 mini-fab可重入生产线示意

假设在初始时刻, n 个工件 $J_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 投入到可重入生产线中加工,总机器数为 m , 工序数为 λ , 设备组数为 s ; 第 k 个设备组包含的并行机数量为 $\pi_k (k = 1, 2, \dots, s)$; O_i^j 表示工件 J_i 的第 j 道工

序,其加工时间 T_i^j 为区间, $[T_i^j] \in [T_i^j, \bar{T}_i^j]$; 工序 O_i^j 的加工机器为 $M\{O_i^j\}$, $[R_M]$ 为机器 $M\{O_i^j\}$ 的释放时间, $[S_i^j]$ 为工序 O_i^j 的开工时间, $[C_i^j]$ 为工序 O_i^j 的完工时间; $[C_i] = [\underline{C}_i, \bar{C}_i]$ 为工件 J_i 的完工时间, 工件 J_i 的交货期是个确定且已知的时间窗; $[d_i] = [d_i, \bar{d}_i] (i = 1, 2, \dots, n)$; e_i, t_i 分别是工件 J_i 的提前和拖期惩罚系数; $[C_{ET}^i] (i = 1, 2, \dots, n)$ 为工件 J_i 的提前拖期/惩罚区间. 调度目标是确定工序的加工顺序和加工机器,使各工件的E/T惩罚之和最小,并且在工序加工时间变化时,对E/T惩罚的影响较小.

1.1 目标函数

如果工序加工时间用区间数表示,则E/T惩罚也必然是区间数. 同时优化E/T惩罚区间和增强调度的鲁棒性,构成了一个双准则目标函数. 本文借鉴Ghrayeb^[14]和Wang等^[15]对双准则理论的研究成果,设计一个度量E/T惩罚区间大小的判别标准.

假设E/T惩罚区间为 $[C_{ET}] = [\underline{C}_{ET}, \bar{C}_{ET}]$, 减小 $[C_{ET}]$, 可以通过减小区间的上下界限来完成,即减小下式来完成:

$$R_1 = \underline{C}_{ET}, \tag{1}$$

$$R_2 = \bar{C}_{ET}. \tag{2}$$

在实际生产过程中,任何干扰都可能会改变工序的加工时间,从而影响产品的交货期和E/T惩罚. 如果区间的跨度较大,即

$$R_3 = \bar{C}_{ET} - \underline{C}_{ET} \tag{3}$$

较大,则工序加工时间较大的变化所引起的E/T惩罚的波动也可能会较大;减小这个跨度,工序加工时间的变化所引起的E/T惩罚的波动范围就会减小,其鲁棒性就会相对增强.

观察到 R_1 和 R_3 的变化趋势是相互冲突的,而 R_2 和 R_3 的变化趋势是相同的,所以,本文考虑将相互冲突的两部分 R_1 和 R_3 折衷作为评判E/T惩罚区间的标准,即

$$RC_{ET} = \alpha_1 R_1 + \alpha_2 R_3. \tag{4}$$

其中: RC_{ET} 是 R_1 和 R_3 折衷后的结果, α_1 和 α_2 是非负权重.

1.2 问题的数学模型

本文的目标函数是

$$\min(RC_{ET}). \tag{5}$$

工序 O_i^j 开始加工,需要工序 O_i^{j-1} 加工完成,并且工序的加工机器 $M\{O_i^j\}$ 空闲,所以工序 O_i^j 的开始加工时间为 $[C_i^{j-1}]$ 和 $[R_M]$ 的区间取大运算,即

$$[S_i^j] = [C_i^{j-1}] \vee [R_M] = [\max(\underline{C}_i^{j-1}, \underline{R}_M), \max(\overline{C}_i^{j-1}, \overline{R}_M)]. \quad (6)$$

工序 O_i^j 的完工时间 $[C_i^j]$ 为工序 O_i^j 的开始时间 $[S_i^j]$ 与其加工时间 $[T_i^j]$ 之和,即

$$[C_i^j] = [S_i^j] + [T_i^j] = [\underline{S}_i^j + \underline{T}_i^j, \overline{S}_i^j + \overline{T}_i^j]. \quad (7)$$

工件的完工时间和交货期都是区间数,二者的关系存在6种情况,如图2所示.

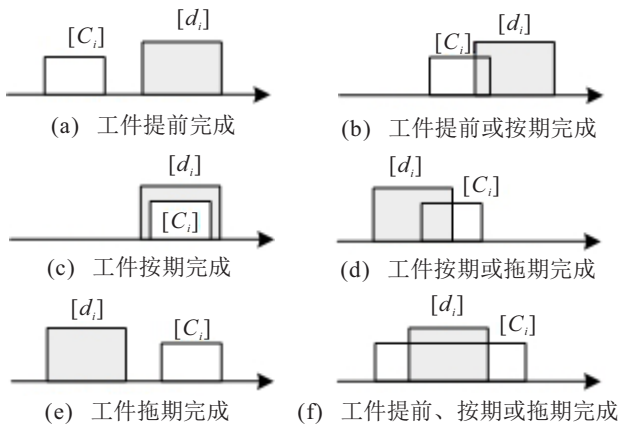


图2 完工时间和交货期关系

由图2(a)看出,该工件的提前区间为 $[d_i - \overline{C}_i, d_i - \underline{C}_i]$,拖期区间为 $[0, 0]$;由图2(b)看出,该工件的提前区间为 $[0, d_i - \underline{C}_i]$,拖期区间为 $[0, 0]$;由图2(c)看出,该工件的提前区间为 $[0, 0]$,拖期区间为 $[0, 0]$. 归纳以上3种情况,工件的提前区间为

$$[E_i] = (d_i - [C_i]) \vee (0, 0) = [\max(0, d_i - \overline{C}_i), \max(0, d_i - \underline{C}_i)]. \quad (8)$$

由图2(d)看出,该工件的拖期区间为 $[0, \overline{C}_i - \underline{d}_i]$,提前区间为 $[0, 0]$;由图2(e)看出,该工件的拖期时间为 $[\underline{C}_i - \underline{d}_i, \overline{C}_i - \underline{d}_i]$,提前区间为 $[0, 0]$. 归纳以上两种情况,工件的拖期时间为

$$[T_i] = ([C_i] - \underline{d}_i) \vee (0, 0) = [\max(0, \underline{C}_i - \underline{d}_i), \max(0, \overline{C}_i - \underline{d}_i)]. \quad (9)$$

由图2(f)看出,该工件的提前区间 $[0, d_i - \underline{C}_i]$,拖期区间为 $[0, \overline{C}_i - \underline{d}_i]$,提前区间与拖期区间并存,二者的最小值都是0. 在实际生产过程中,工件只会存在提前或拖期一种情况,所以在预测时,取二者的较大值就可以预测出提前/拖期的惩罚区间^[8],即

$$[C_{ET}^i] = e_i \cdot [E_i] \vee t_i \cdot [T_i] = [\max(e_i \cdot \underline{E}_i, t_i \cdot \underline{T}_i), \max(e_i \cdot \overline{E}_i, t_i \cdot \overline{T}_i)]. \quad (10)$$

因此,所有工件的提前/拖期之和为

$$[C_{ET}] = \sum_{i=1}^n [C_{ET}^i], \quad (11)$$

其中 n 为工件的总数.

2 化学反应优化算法(CRO)

化学反应优化算法以化学反应中能量守恒为理论基础,模拟反应中产生的新分子释放能量,逐渐达到稳定的过程. 化学反应优化算法中的分子对应问题的解,4种化学反应代表了算法的搜索过程.

2.1 分子结构

CRO算法中的分子结构主要表示了待解决问题的编码方式. 本文所研究的问题中含有并行机部分,因此,调度过程需要解决工序排序和机器分配的问题,即问题的可行解中需要包含对应的这两部分编码. 以包含3工件、3机器、3工序的某产品的加工过程为例,如图3所示.

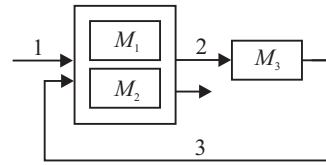


图3 两设备组3工序的可重入生产线示意

工序编码为

$$[2 \ 3 \ 1 \ 3 \ 3 \ 1 \ 1 \ 2 \ 2],$$

机器编码为

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

工序编码的长度是所有工件的工序之和,即加工过程的总工序数. 其中数字代表某工件的序号,序号第几次出现,代表某工件加工到第几道工序. 机器编码为一个 $n \times m$ 的矩阵, n 为工件数, m 为工序数. 第 i 行第 j 列的数字是 m , 表示 i 工件的第 j 道工序在机器 m 上加工.

2.2 单分子反应

2.2.1 碰壁反应

为了达到搜索速度与搜索广度的平衡,采用两类邻域结构来实现碰壁反应.

1) 经验学习类邻域结构.

针对编码方案中的工序编码,借鉴粒子群算法中粒子跟踪最优值的思想,采用复制当前最优分子 G_{best} 的部分工序来实现分子的碰壁反应.

如图4所示, molecule N 复制 G_{best} 的位置为3、4、5(随机选择的位置),在 molecule A 的工序编码中从后往前删除掉 molecule N 中已复制的原子(molecule A 中标记下划线的原子删除),然后将 molecule A 的工序编码中剩余的原子按顺序插入到 molecule N 中.

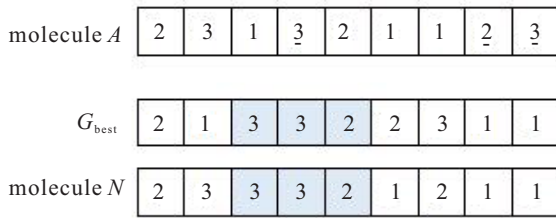


图4 工序编码的经验学习类邻域结构

针对编码方案中的机器编码,引入汉明距离的概念,将选中分子的机器编码与当前最优分子的机器编码做比较,找出不同点的个数.如果不同点个数大于2,则任选一个不同点,将该点所对应的加工机器转换成其可用设备组里的其他机器;如果不同点的个数等于0或1,则任选一个点的机器换成其所在设备组的其他机器.

2) 变步长邻域搜索.

如果只有经验学习类的邻域结构,则分子将迅速向当前局部最优方向靠近,但是很容易陷入局部最优.为了避免出现这种现象,设计基于扰动机制和变步长搜索策略的邻域搜索方法对当前解的邻域进行深度搜索.有

$$\text{stepSize} = \begin{cases} \text{round}(\text{moleLen} \times e^{-T_d(t/T_0)}) + 2, & t < 0.5T_0; \\ 2, t \geq 0.5T_0, \text{rand} > 0.5; \\ 1, \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

其中: moleLen表示工序编码的长度, T_d 是常数, T_0 是邻域搜索的总次数.本文设计的步长是个整数,代表一个分子中参与反应的原子的个数.根据步长和搜索代数,按下式进行邻域搜索:

$$\omega_1 = \begin{cases} \text{PM}(\omega), t < 0.5T_0; \\ \text{swap}(\omega), t \geq 0.5T_0, \text{rand} > 0.5; \\ \text{mutate}(\omega), \text{otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

邻域搜索的方法:

1) $\text{PM}(\omega)$: 随机确定作用在工序编码和机器编码的原子个数 n_1 、 n_2 , $n_1 + n_2 = \text{stepSize}$,为每个原子随机生成一个对应实数.针对工序编码,根据实数从小到大选出前 n_1 个原子,并按实数从小到大重新排列原子位置;针对机器编码,根据实数从小到大选出前 n_2 个原子,随机换成其所在机器组的其他机器.

2) $\text{swap}(\omega)$: 针对工序编码,采用工序交换的方法,随机选择两个位置,将这两个位置的原子进行互换,形成一个新的分子工序编码.

3) $\text{mutate}(\omega)$: 针对机器编码,采用单点变异的方

法,随机选择机器编码中的一个机器,并在该机器所对应的可用设备组中随机选择一台其他的机器替换原来的机器.

2.2.2 分解反应

分解反应是将一个分子分解成两个或多个分子的过程,为了平衡全局搜索与搜索速度,本文考虑将一个分子分解成两个分子.

分子工序编码采用部分反转的方式来实现.随机选择一个位置 r_1 , $r_1 \in (1, l - 1)$ (l 表示工序编码的长度),保留分子中 $(1, r_1)$ 位置的原子,将 $(r_1 + 1, l)$ 位置的原子反转,作为分解后 molecule1 的工序编码;保留分子中 $(r_1 + 1, l)$ 位置的原子,将 $(1, r_1)$ 位置的原子反转,作为分解后 molecule2 的工序编码.

分子机器编码采用部分机器在设备组随机产生的方式.随机选择一个位置 r_1 , $r_1 \in (1, l - 1)$,将原子 $(1, r_1)$ 对应的机器保留,将原子 $(r_1 + 1, l)$ 对应的机器在该机器所在设备组随机选取作为分解后 molecule1 的机器编码;将原子 $(r_1 + 1, l)$ 对应的机器保留,将 $(1, r_1)$ 位置对应的机器在该机器所在设备组随机选取作为分解后 molecule2 的机器编码.

2.3 双分子反应

2.3.1 双分子碰撞反应

双分子碰撞反应是两个分子相互碰撞,各自发生轻微的变化,进而产生两个新分子的过程,属于局部搜索过程.

对分子工序编码,采用优先工序交叉(POX)操作来实现双分子碰撞过程;对分子机器编码,采用随机选择一个工件 J ,将两父代分子的机器编码中工件 J 对应的机器互换来实现双分子碰撞过程.

2.3.2 合成反应

合成反应是将两个分子合并成一个分子的过程,产生的新分子与原分子有很大的不同.

分子工序编码采用保留两个分子工序编码所对应的相同部分,而对应不同的部分则随机分配,如图5所示.

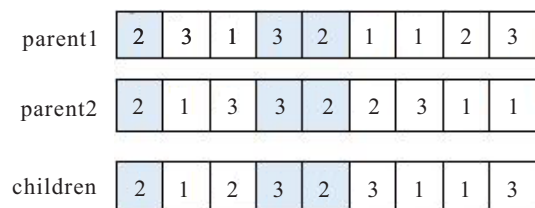


图5 分子工序编码的合成反应

分子机器编码采用保留两个分子机器编码中所对应的相同部分,而对应不同的部分则在原机器所在设备组中随机选取.

2.4 算法流程

变邻域化学反应算法的流程如图6所示。

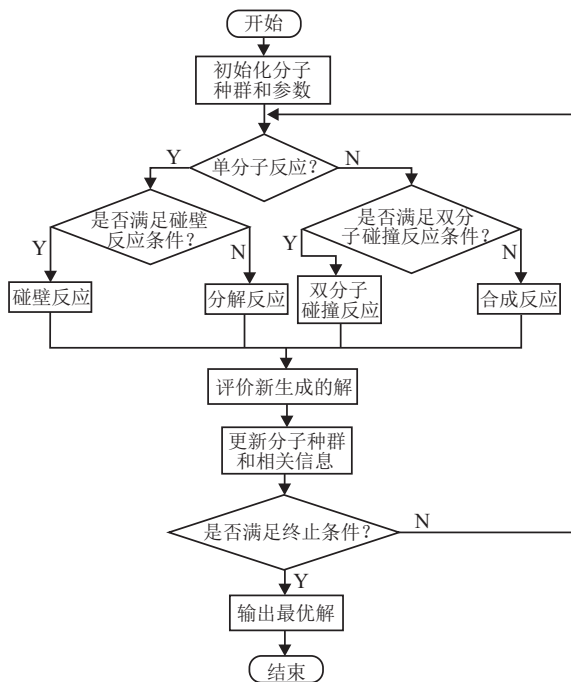


图6 化学反应优化算法流程

碰撞反应过程如下。

step 1: 用轮盘赌选择60%的分子参与反应。

step 2: 每个分子以1/2的概率选择参与经验学习类反应和变步长邻域搜索反应。

step 3: 计算新分子 ω' 的势能 $PE_{\omega'}$ 。若原分子 ω 的势能 PE_{ω} 、动能 KE_{ω} 之和 $PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'}$,则此次反应成功;否则反应失败。

分解反应过程如下。

step 1: 用轮盘赌选择一个分子 ω 参与反应。

step 2: 同时发生基于工序编码和基于机器编码的反应,产生两个新分子 ω'_1, ω'_2 。

step 3: 计算新分子的势能 $PE_{\omega'_1}, PE_{\omega'_2}$,若原分子 ω 的势能 PE_{ω} 、动能 KE_{ω} 之和 $PE_{\omega} + KE_{\omega} \geq PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2}$,则此次反应成功;否则,计算原分子 ω 的势能 PE_{ω} 、动能 KE_{ω} 、缓冲区能量 $buffer$ 之和,若 $PE_{\omega} + KE_{\omega} + buffer \geq PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2}$,则此次反应成功;否则反应失败。

双分子碰撞反应过程如下。

step 1: 用轮盘赌选择40%的分子参与反应。

step 2: 原分子 ω_1, ω_2 以1/2的概率发生基于工序编码的反应和基于机器编码的反应,产生新分子 ω'_1, ω'_2 。

step 3: 计算新分子的势能 $PE_{\omega'_1}, PE_{\omega'_2}$,若 $PE_{\omega_1} + PE_{\omega_2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2} \geq PE_{\omega'_1} + PE_{\omega'_2}$,则此次反应成功;否则反应失败。

合成反应过程如下。

step 1: 用轮盘赌选择两个分子 ω_1, ω_2 参与反应。

step 2: 同时发生基于工序编码和基于机器编码的反应,产生新分子 ω' 。

step 3: 计算新分子的势能 $PE_{\omega'}$ 。若 $PE_{\omega_1} + PE_{\omega_2} + KE_{\omega_1} + KE_{\omega_2} \geq PE_{\omega'}$,则此次反应成功;否则反应失败。

3 仿真实验

3.1 参数设置

化学反应优化算法的参数,对算法的收敛性和收敛速度等具有很大的影响。为了选取到综合性能最优的参数,本文采用Taguchi OA设计法^[16]来选取化学反应算法的参数。

化学反应优化算法包含5个主要参数:初始动能 $initKE$ 、动能损失率 $KELossRate$ 、单分子反应概率 $singleRate$ 、碰撞反应概率 $singleColl$ 以及双分子碰撞概率 $doubleColl$ 。根据多次实验,利用design-expert软件进行分析得知 $KELossRate$ 、 $singleRate$ 、 $singleColl$ 这三个值对响应值的影响显著,因此,在设置参数时要注意这三个参数的权衡。本文算法的参数值设置为: $initKE = 20, KELossRate = 0.3, singleRate = 0.8, singleColl = 0.9, doubleColl = 0.7$ 。

3.2 算例仿真

算例1选取5个工件在mini-fab半导体生产线上进行加工,工序加工时间和交货期如表1所示。

表1 算例1工序的加工时间和交货期

对象	工序1	工序2	工序3	工序4	工序5	工序6	交货期
工件1	(5, 7)	(3, 4)	(4, 9)	(6, 9)	(3, 5)	(7, 10)	(40, 46)
工件2	(3, 5)	(4, 6)	(5, 8)	(7, 9)	(8, 12)	(3, 6)	(56, 70)
工件3	(2, 4)	(3, 7)	(4, 5)	(6, 8)	(15, 19)	(4, 6)	(60, 84)
工件4	(4, 5)	(2, 6)	(5, 8)	(4, 10)	(6, 8)	(4, 6)	(40, 50)
工件5	(3, 4)	(15, 16)	(5, 7)	(4, 8)	(5, 6)	(6, 7)	(50, 60)

在仿真实验中,所有工件的提前惩罚系数都是0.4,所有工件的拖期惩罚系数都是0.6,分子种群大小为100,最大反应次数根据问题规模做出相应的调整,权重系数 $\alpha_1 = 0.7, \alpha_2 = 0.3$ 。

图7为算例1最优调度的甘特图, $RC_{ET} = 7.2$,提前/拖期惩罚区间为 $[0, 24]$,最大反应次数为200。梯形甘特图的左侧斜线代表工序的开始时间,右侧斜线代表该工序的完工时间。从甘特图中可以看出,越靠后的工序,其梯形的倾斜度越大,即工件的开始加工时间的跨度和完工时间的跨度增大。出现这种情况的原因是不确定性的累加。前面工序的不确定性会影响到后面的工序,再加上后面工序自身的不确定

性,使得后面工序的不确定性更加显著.

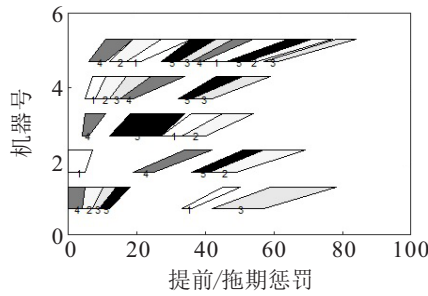


图7 算例1最优调度的甘特图

图8是算例1 RC_{ET} 平均值和最优值的收敛曲线,可以清晰地看出,算法在前期平均值的收敛曲线有轻微的波动,说明算法在试图跳出局部最优,实现全局搜索.

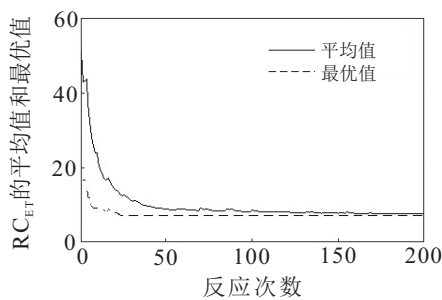


图8 算例1中 RC_{ET} 的平均值和最优值的变化曲线

3.3 结果分析

针对以区间数表示工序加工时间不确定的问题,杨宏安等^[8]、Yu等^[9]以区间可能度为基础构建目标函数,在完全提前(即图2(a))的情况下,其提前可能度为1,目标函数没有考虑具体提前多长时间;在完全拖期(即图2(e))的情况下,其拖期的可能度为1,也没有考虑具体拖期多长时间.这两种情况可能会造成计算的提前/拖期惩罚较大.在完全按期(即图2(c))时,预计的完工时间区间完全在交货期时间窗内,其提前/拖期可能度为0.以上3种情况都没有考虑该工件预计完工时间的最小值与最大值的跨度.在实际生产过程中,既要尽量降低区间的极值,也要尽量减小

预计结果的范围,以使生产者更好地安排后续的生产任务和预估收益,提高整体的生产效益.

相对鲁棒性是指实际调度结果与调度计划预期结果的偏差.在本文中,提前/拖期惩罚区间的最小值是理想情形下的最优结果,可以作为调度计划预期结果;提前/拖期惩罚区间的最大值是最差情形下的调度结果,可以作为实际调度结果的一种情况.所以,本文构建的鲁棒性指标为

$$R = (\bar{C}_{ET} - \underline{C}_{ET}). \quad (15)$$

针对不同规模算例下,分别采用 RC_{ET} 为目标函数和文献[9]的 f 为目标函数的提前/拖期惩罚范围和鲁棒性,各算例独立运行10次取平均值,结果如表2所示.

为了验证本文采用的目标函数计算的E/T区间较小,采用文献[17]的区间可能度比较方法,表示一个区间大于另一个区间的程度,即

$$P(a \geq b) = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{(\bar{a} - \bar{b}) + (a - b)}{|\bar{a} - \bar{b}| + |a - b| + l_{ab}} \right), \quad (16)$$

其中 l_{ab} 表示两个区间相交部分的长度.

利用式(16)计算以上所有算例以 RC_{ET} 为目标函数的E/T惩罚区间比文献[9]的 f 为目标函数的E/T惩罚区间大的可能度,计算结果分别为0.1463、0.2530、0.0580、0.2572、0.1665、0.2586、0.1071、0.1981、0.0249、0.0608、0,全部小于0.5,说明本文的调度结果E/T惩罚区间大的可能性很小.从鲁棒性对比可以看出,本文计算结果的鲁棒性大部分比较好,只有 $3 \times 3 \times 3$ 和 $10 \times 6 \times 5$ 两个算例,本文计算的鲁棒性较差.但是,本文采用的目标函数可以根据生产者的倾向,调整区间极值和区间跨度所占的权重 α_1 和 α_2 ,使E/T惩罚区间极值和E/T惩罚的波动范围达到预期的要求;而文献[9]采用的目标函数区间极值和区间跨度的比重是不可控的,即区间极值和鲁棒性是不可控的.

表2 两种目标函数的调度结果E/T惩罚和鲁棒性对比

算例规模	RC_{ET} 为目标函数的E/T惩罚	f 为目标函数的E/T惩罚	RC_{ET} 为目标函数的鲁棒性	f 为目标函数的鲁棒性
$3 \times 3 \times 3$	[4.4, 28]	[19.4, 33.8]	23.6	14.4
$5 \times 3 \times 3$	[0, 9.2]	[0, 18.18]	9.2	18.18
$10 \times 3 \times 3$	[0, 20.9]	[14.04, 59.14]	20.9	45.1
$5 \times 5 \times 5$	[0, 6.04]	[0, 11.74]	6.04	11.74
$10 \times 5 \times 5$	[3.78, 95.72]	[46.92, 150.3]	91.94	103.38
$5 \times 6 \times 5$	[0, 24]	[6.6, 33.64]	24	24
$10 \times 6 \times 5$	[64.8, 255.46]	[192.24, 359.88]	190.65	167.64
$5 \times 6 \times 10$	[0, 5.04]	[0, 12.72]	5.04	12.72
$10 \times 6 \times 10$	[0.26, 50.53]	[45.3, 105.42]	50.27	60.12
$5 \times 12 \times 10$	[43.2, 162.42]	[135.2, 267]	119.22	131.8
$10 \times 12 \times 10$	[252.48, 589.74]	[703.86, 1189.7]	337.26	485.84

3.4 算法性能比较

变邻域化学反应优化算法(VNCRO)在分解反应上采用部分原子反转的方式;合成反应保留了两分

子对应相同的部分,既能够使分子发生较大的变化,跳出局部最优解,实现全局搜索,同时也降低了全局搜索的盲目性;碰壁反应采用变邻域搜索和变步长

表3 变邻域化学反应优化算法与CRO、DICA、IDABC、DWOA算法对比

算例规模	算法	EC _{ET} 最小值	RC _{ET} 最大值	平均值	最小值对应区间	最大值对应区间	区间平均值	最大迭代次数
3×3×3	VNCRO	10.16	10.16	10.16	[4.4, 28]	[4.4, 28]	[4.4, 28]	200
	CRO	10.16	10.16	10.16	[4.4, 28]	[4.4, 28]	[4.4, 28]	200
	DICA	10.16	10.16	10.16	[4.4, 28]	[4.4, 28]	[4.4, 28]	200
	IDABC	10.16	10.16	10.16	[4.4, 28]	[4.4, 28]	[4.4, 28]	200
	DWOA	10.16	10.16	10.16	[4.4, 28]	[4.4, 28]	[4.4, 28]	200
5×3×3	VNCRO	2.76	2.76	2.76	[0, 9.2]	[0, 9.2]	[0, 9.2]	200
	CRO	3.06	3.72	3.498	[0, 10.2]	[0, 12.4]	[0, 11.66]	200
	DICA	2.76	3.72	3.234	[0, 9.2]	[0, 12.4]	[0, 10.78]	200
	IDABC	3.06	4.14	3.426	[0, 10.2]	[0, 13.8]	[0, 11.42]	200
	DWOA	3.06	3.54	3.282	[0, 10.2]	[0, 11.8]	[0, 10.94]	200
10×3×3	VNCRO	6.24	6.42	6.27	[0, 20.8]	[0, 21.4]	[0, 20.9]	200
	CRO	8.58	11.28	10.16	[0, 28.6]	[0, 37.6]	[0.08, 33.76]	200
	DICA	6.24	9.04	7.284	[0, 20.8]	[0.4, 29.6]	[0.24, 23.96]	200
	IDABC	6.9	9.3	7.894	[0, 23]	[0, 31]	[0.16, 26.1]	200
	DWOA	6.24	6.84	6.36	[0, 20.8]	[0, 22.8]	[0, 21.2]	200
5×5×5	VNCRO	1.8	1.86	1.812	[0, 6]	[0, 6.2]	[0, 6.04]	200
	CRO	1.8	3.12	2.46	[0, 6]	[0, 10.4]	[0, 8.2]	200
	DICA	1.8	3.12	2.04	[0, 6]	[0, 10.4]	[0, 6.8]	200
	IDABC	2.04	3.66	2.838	[0, 6.8]	[0, 12.2]	[0, 9.5455]	200
	DWOA	1.8	2.94	2.39	[0, 6]	[0, 9.8]	[0, 7.97]	200
10×5×5	VNCRO	28.44	33.54	30.516	[1.8, 92.4]	[4.8, 105.4]	[3.78, 95.72]	200
	CRO	40.56	48.3	45.244	[15, 115.2]	[11.4, 145.8]	[13.42, 132.92]	200
	DICA	30.84	40.98	36.064	[3, 98.8]	[16.2, 115]	[8.14, 109.36]	200
	IDABC	32.28	49.04	40.528	[7.8, 97.2]	[20, 136.8]	[13.5, 117.06]	200
	DWOA	28.44	36	33.216	[1.8, 92.4]	[3.6, 115.2]	[15.4, 103.4]	200
5×6×5	VNCRO	7.2	7.2	7.2	[0, 24]	[0, 24]	[0, 24]	200
	CRO	7.2	8.58	7.908	[0, 24]	[1.2, 27]	[0.6, 25.56]	200
	DICA	7.2	9.42	7.806	[0, 24]	[3.6, 26.6]	[0.72, 25.06]	200
	IDABC	7.2	9.72	7.86	[0, 24]	[0, 26.4]	[0.06, 25.52]	200
	DWOA	7.2	8.7	7.752	[0, 24]	[0, 29]	[0.12, 25.68]	200
10×6×5	VNCRO	99.78	106.02	102.558	[58.8, 254.2]	[60, 273.4]	[64.8, 255.46]	300
	CRO	118.26	135.54	128.706	[82.8, 283.8]	[101.4, 316.6]	[93, 305.02]	300
	DICA	105.72	117.36	110.656	[67.2, 262.8]	[70.2, 297.6]	[72.84, 271.92]	300
	IDABC	110.16	122.52	117.606	[70.2, 273.6]	[82.2, 298.8]	[76.5, 290.02]	300
	DWOA	100.44	123.48	114.732	[64.8, 248.4]	[90, 291.6]	[79.2, 276.84]	300
5×6×10	VNCRO	1.44	1.62	1.512	[0, 4.8]	[0, 5.4]	[0, 5.04]	300
	CRO	2.16	3.18	2.773	[0, 7.2]	[0, 10.6]	[0, 9.22]	300
	DICA	1.5	2.52	1.872	[0, 5]	[0, 8.4]	[0, 6.24]	300
	IDABC	1.8	3.42	2.4	[0, 6]	[0, 11.4]	[0, 8]	300
	DWOA	1.5	3.12	2.263	[0, 5]	[0, 10.4]	[0, 7.11]	300
10×6×10	VNCRO	14.58	16.2	15.26	[0, 48.6]	[0, 54]	[0.26, 50.53]	300
	CRO	24.18	30.24	26.982	[3, 76.6]	[5.4, 93.6]	[3.72, 84.98]	300
	DICA	15.12	16.02	15.846	[0, 50.4]	[0, 53.4]	[0.12, 52.66]	300
	IDABC	15.24	22.08	19.422	[0, 50.8]	[1.2, 72]	[3.18, 60.5]	300
	DWOA	15.06	17.46	16.404	[0, 50.2]	[2.4, 55]	[0.84, 53.56]	300
5×12×10	VNCRO	64.2	67.92	66.006	[39, 162]	[47.4, 163.2]	[43.2, 162.42]	300
	CRO	83.7	90.66	86.934	[64.8, 192.6]	[62.4, 219]	[66.72, 200.82]	300
	DICA	65.82	78.72	72.858	[44.4, 160.2]	[67.2, 172.8]	[53.4, 171.66]	300
	IDABC	68.64	85.2	75.99	[38.4, 177.6]	[69, 192]	[54.66, 180.42]	300
	DWOA	66.3	79.14	71.3	[34.2, 165]	[64.2, 178.2]	[48.8, 172.6]	300
10×12×10	VNCRO	263.16	287.22	277.914	[235.8, 562.8]	[274.8, 591]	[252.48, 589.74]	1200
	CRO	362.34	396.9	381.894	[363.6, 723]	[392.4, 799.8]	[380.94, 765.06]	1200
	DICA	292.08	337.74	318.606	[264, 621.6]	[346.2, 664.2]	[307.46, 652.74]	1200
	IDABC	311.4	366.48	332.574	[307.8, 627.6]	[363.6, 736.8]	[317.04, 685.86]	1200
	DWOA	286.14	322.26	300.16	[258.6, 609]	[286.8, 691.8]	[269.6, 640.8]	1200

搜索的方式,使分子具有在不同的邻域、不同的深度搜索其局部最优解的能力,同时借鉴粒子群算法跟踪最优解的思想,使分子具有向当前最优分子学习的能力;双分子碰撞反应采用交叉的思想,使种群间的分子能够进行信息交流。

为了验证本文所提出的变邻域化学反应优化算法(VNCRO)的优越性,选择随机生成的不同规模的算例进行算法性能测试,同时与CRO^[11]、DICA^[18]、IDABC^[19]、DWOA^[20]四种算法进行比较,对比算法的参数采用对应文献中的参数,5种算法运行时设定相同的迭代次数.各算例独立运行10次,得到的 RC_{ET} 最小值、最大值和平均值, RC_{ET} 最小值对应区间、最大值对应区间和区间平均值,如表3所示(5×6×5表示算例是5个工件,6道工序,5台机器)。

由表3可以明显看出,针对不同规模的算例,VNCRO算法的 RC_{ET} 最小值、最大值和平均值都优于CRO、DICA、IDABC、DWOA,随着算例规模的增大,这种优势更加明显。

图9给出了不同规模的算例下,5种算法 RC_{ET} 的平均值的收敛曲线(因算例规模的增大,算法的收敛速度下降,故大规模的算例反应次数增加)。从图9中可以看出:CRO的收敛速度和收敛精度都较差;VNCRO与DICA的收敛速度接近,VNCRO的收敛结果略好;IDABC算法的收敛速度较慢,收敛结果也略差;DWOA算法的收敛速度很快,收敛结果也较好。但是,从表3的数据可以看出,DWOA很容易陷入局部最优,其收敛速度快,平均值收敛结果好源于种群间个体迅速地被同化。

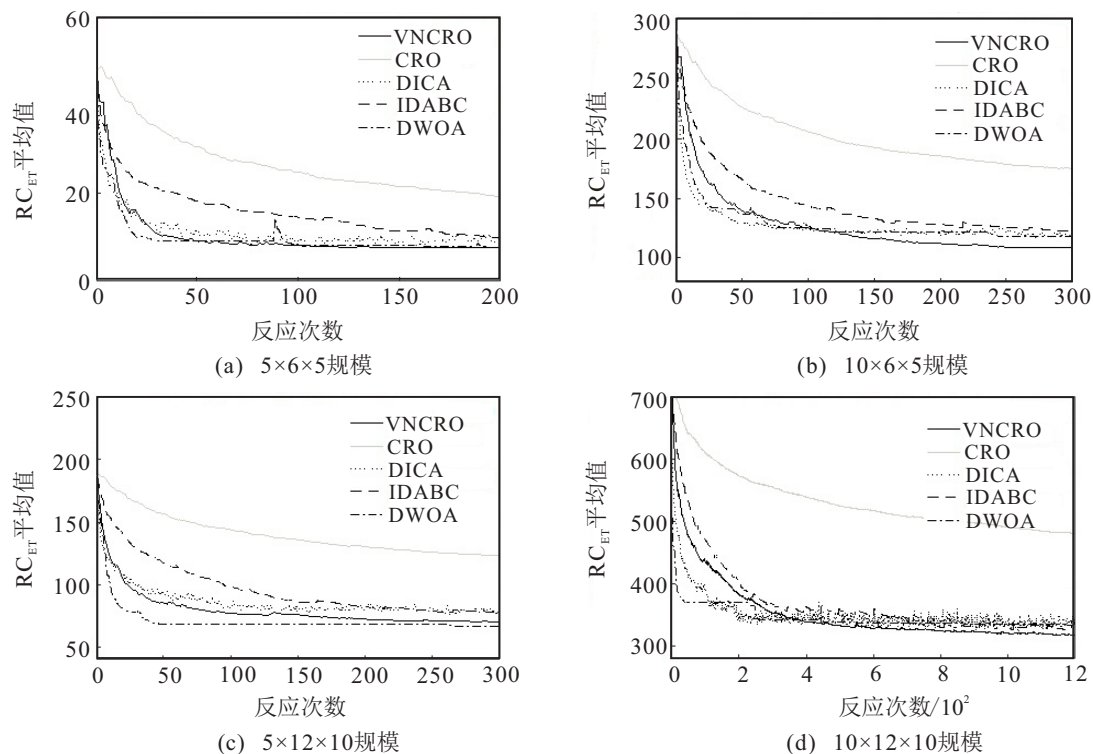


图9 5种算法收敛曲线对比

表4 不同算法的ARE和STD

算例规模	VNCRO		CRO		DICA		IDABC		DWOA	
	ARE/%	STD	ARE/%	STD	ARE/%	STD	ARE/%	STD	ARE/%	STD
3×3×3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5×3×3	0	0	26.78	0.2325	17.17	0.3088	24.13	0.3029	18.91	0.1698
10×3×3	0.48	0.0615	62.82	0.9161	16.73	0.7811	26.51	0.6581	1.92	0.2400
5×5×5	0.67	0.0240	36.67	0.4740	13.33	0.3757	57.67	0.4919	32.78	0.4263
10×5×5	13.44	2.2444	66.09	2.4644	32.39	3.3992	48.78	4.0694	16.79	2.9623
5×6×5	0	0	9.83	0.4700	8.42	0.7672	9.17	0.8366	7.67	0.6041
10×6×5	4.33	2.7709	29.22	4.8754	11.1	3.6954	18.08	3.4059	14.98	8.3644
5×6×10	2.92	0.0540	92.59	0.3653	30	0.3115	66.67	0.4717	57.15	0.4710
10×6×10	4.44	0.2786	85.06	1.7591	8.68	0.4526	33.21	1.9551	12.51	0.8284
5×12×10	2.81	0.9620	35.41	2.0487	13.49	3.6780	18.36	4.7729	11.061	5.6134
10×12×10	5.61	8.2785	45.12	11.3432	24.07	13.3333	26.38	18.3149	26.38	15.8141

为了评估算法的性能,从统计学的角度上分析算法的优越性和稳定性,计算各算法的平均结果与已知最优结果的相对百分偏差ARE和标准差STD(N 是独立运算的次数),即

$$ARE = \frac{\text{mean} - \min}{\min} \times 100\%, \quad (17)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RC_{ET}^i - \text{mean})^2}. \quad (18)$$

计算结果如表4所示.表4中ARE是该算法所求的平均解与所有算法所求的最优解相比较得出的相对偏差,ARE越小,算法所求的平均值与最优值就越接近,算法的性能就越好.从表4中还可以看出,VNCRO的ARE与CRO、DICA、IDABC、DWOA相比较小,说明本文所提出算法的性能较好.STD越小,说明算法的稳定性越好.从表4中还可以看出,VNCRO的STD与CRO、DICA、IDABC、DWOA相比几乎都较小,说明VNCRO的稳定性最好.

为了进一步确定VNCRO计算的E/T惩罚区间较小,利用式(16),以 $5 \times 12 \times 10$ 为例,计算5种算法区间平均值两两比较的可能度,得可能度矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.3036 & 0.4243 & 0.3927 & 0.4390 \\ 0.6410 & 0.5 & 0.6118 & 0.5909 & 0.6164 \\ 0.5657 & 0.3559 & 0.5 & 0.4606 & 0.5143 \\ 0.5884 & 0.3890 & 0.5366 & 0.5 & 0.5465 \\ 0.5543 & 0.3482 & 0.4853 & 0.4487 & 0.5 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

根据文献[21]的优序数排序法,VNCRO、CRO、DICA、IDABC、DWOA的E/T惩罚区间的优序数分别为0、4、2、3、1,VNCRO的E/T惩罚区间的优序数最小,其区间数小的可能度最大.以此方法计算其他规模的算例,VNCRO算法计算的区间数小的可能度都是最大.因此,VNCRO算法在计算工序加工时间不确定的可重入问题上与CRO、DICA、IDABC、DWOA相比性能最优.

4 结论

本文针对工序加工时间不确定情形下的可重入调度问题,以区间数来处理不确定时间,建立了相应的数学模型;针对获得的E/T惩罚也是区间数,难以直接进行比较的问题,构建了兼顾提前/拖期惩罚区间极值和区间跨度的目标函数,使得区间极值和区间跨度所占的比重是可控的.化学反应优化算法全局搜索能力强,但是收敛速度慢.本文针对原始的化学反应优化算法,利用粒子群算法中对最优粒子的跟踪

思想加速算法收敛,同时采用变步长邻域搜索方法使局部搜索更加精细;结合所设计的分解反应和合成反应这两种全局搜索行为,使所提出的改进的化学反应算法在局部搜索与全局搜索之间达到了较好的平衡.通过仿真实验及对结果的分析,验证了调度模型的正确性、所提出算法的有效性和优越性.

参考文献(References)

- [1] Kumar P R. Re-entrant lines[J]. *Queueing Systems*, 1993, 13(1/2/3): 87-110.
- [2] Chettha Chamnanlor, Kanchana Sethanan, Mitsuo Gen, et al. Embedding ant system in genetic algorithm for re-entrant hybrid flow shop scheduling problems with time window constraints[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, 28 (8): 1915-1931.
- [3] 轩华, 李冰, 王薛苑, 等. 带运输考虑的多阶段动态可重入混合流水线车间调度[J]. *控制理论与应用*, 2018, 35(3): 357-366.
(Xuan H, Li B, Wang X Y, et al. Multi-stage dynamic reentrant hybrid flowshop scheduling with transportation consideration[J]. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 357-366.)
- [4] Qian Bin, Wan Jing, Liu Bo, et al. A DE-based algorithm for reentrant permutation flow-shop scheduling with different job reentrant times[C]. 2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling (CISched). Singapore: IEEE, 2013: 22-27.
- [5] 王娜. 多产品可重入生产系统性能的影响因素探究与性能评估[D]. 大连: 大连理工大学系统工程研究所, 2017: 1-10.
(Wang N. Study on the performance factors and performance evaluation of multi-product reentrant manufacture system[J]. Dalian: Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, 2017: 1-10.)
- [6] Nose K, Hiramatsu A, Konishi M. Using genetic algorithm for job-shop scheduling problems with reentrant product flows[C]. The 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Spain: IEEE, 1999: 1339-1346.
- [7] Lei D M. Pareto archive particle swarm optimization for multi-objective fuzzy job shop scheduling problems[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*, 2008, 37(1/2): 157-165.
- [8] 杨宏安, 王周锋, 吕阳阳, 等. 工序加工时间不确定条件下作业车间调度问题的区间数求解方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2014, 20(9): 2231-2240.
(Yang H A, Wang Z F, Lv Y Y, et al. Interval number solving method for job-shop scheduling problem with processing time variability[J]. *Computer Integrated*

- Manufacturing Systems, 2014, 20(9): 2231-2240.)
- [9] Yu Aiqing, Gu Xingsheng. Application of cultural algorithms to earliness/tardiness flow shop with uncertain processing time[C]. The 3rd International Conference on Natural Computation (ICNC 2007). Haikou: IEEE, 2007: 637-641.
- [10] 乔威, 王冰, 孙洁. 用遗传算法求解一类不确定性作业车间调度问题[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(12): 2452-2455.
(Qiao W, Wang B, Sun J. Uncertain job shop scheduling problems solved by genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2007, 13(12): 2452-2455.)
- [11] Lam A Y S, Li V O K. Chemical-reaction-inspired metaheuristic for optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2010, 14(3): 381-399.
- [12] Samira Bouzoubia, Abdesslem Layeb, Salim Chikhi. Multi-objective chemical reaction optimization based decomposition for multi-objective traveling salesman problem[C]. Th 3rd World Conference on Complex Systems (WCCS). Morocco: IEEE, 2015: 1-6.
- [13] Bilel Marzouki, Olfa Belkahlia Driss, Khaled Ghedira. Chemical reaction optimization metaheuristic with greedy algorithm for flexible job shop scheduling problem[C]. 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS). Tunisia: IEEE, 2017: 1-8.
- [14] Ghrayeb O A. A bi-criteria optimization: Minimizing the integral value and spread of the fuzzy makespan of job shop scheduling problems[J]. Applied Soft Computing Journal, 2003, 2(3): 197-210.
- [15] Wang Bing, Yang Zhen. A particle swarm optimization algorithm for robust flow-shop scheduling with fuzzy processing times[C]. 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics. Ji'nan, 2007: 824-828.
- [16] Le D V, Go B S, Song M G, et al. Mathematical design of a pulsed power induction coilgun system using the taguchi method[C]. IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). Brighton: IEEE, 2017: 1-5.
- [17] 李德清, 谷云东. 一种基于可能度的区间数排序方法[J]. 系统工程学报, 2008, 23(2): 243-246.
(Li D Q, Gu Y D. Method for ranking interval numbers based on possibility degree[J]. Journal of Systems Engineering, 2008, 23(2): 243-246.)
- [18] 王程. 基于帝国竞争算法的带缓冲区的车间调度问题若干研究[D]. 上海: 华东理工大学信息科学与工程学院, 2018: 10-19.
(Wang C. Research on several scheduling problems with limited buffers based on imperialist competitive algorithm[D]. Shanghai: School of Information Science and Engineering, East China University of Science and Technology, 2018: 10-19.)
- [19] Cui Zhe, Gu Xingsheng. An improved discrete artificial bee colony algorithm to minimize the makespan on hybrid flow shop problems[J]. Neurocomputing, 2015, 148: 248-259.
- [20] Luan F, Cai Z Y, Wu S Q, et al. Optimizing the low-carbon flexible job shop scheduling problem with discrete whale optimization algorithm[J]. Mathematics, 2019, 7(8): 688.
- [21] 高峰记. 可能度及区间数综合排序[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(8): 2033-2040.
(Gao F J. Possibility degree and comprehensive priority of interval numbers[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2013, 33(8): 2033-2040.)

作者简介

朱艳艳(1991—),女,硕士生,从事生产计划与调度的研究, E-mail: zhuyanyan0318@163.com;

徐震浩(1976—),女,副教授,博士,从事生产计划与调度等研究, E-mail: xuzhenhao@ecust.edu.cn;

顾幸生(1960—),男,教授,博士生导师,从事系统工程、生产计划与调度等研究, E-mail: xsgu@ecust.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)