

置换流水车间调度问题的水波化学反应算法

姜强强^{1,2}, 张其亮²

(1. 浙江大学 软件学院, 浙江 宁波 315048;
2. 江苏科技大学 电气与信息工程学院, 江苏 张家港 215600)

摘要:流水车间调度问题广泛存在于工程应用中,优化调度不仅可以提高企业的生产效率、降低生成成本,还能提高资源的利用率。基于以最小化最大完工时间为目标的置换流水车间调度问题,提出一种新的混合水波化学反应优化算法。将原始的水波优化算法与化学反应优化算法进行了混合,在新的算法中去除了化学反应优化算法的合成与分解反应,保留撞墙和互撞反应,使用中央缓冲能量为分子及时补充动能并对分子进行突变操作,以保持全局搜索能力;对水波优化算法进行了离散化处理,利用迭代贪婪重构传播算子、路径重连重构折射算子、局部搜索重构碎浪算子,同时引入淘汰劣解策略,离散的水波优化算法改善了局部搜索能力和收敛速度。通过标准实例测试,验证了所提算法的有效性。

关键词:置换流水车间调度问题;化学反应优化;水波优化;混合算法

中图分类号:TP301.6

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2019)06-0001-06

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.06.001

Hybrid Wave Chemical Reaction Optimization for Permutation Flow-shop Scheduling Problem

JIANG Qiang-qiang^{1,2}, ZHANG Qi-liang²

(1. School of Software, Zhejiang University, Ningbo 315048, China;
2. School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University of Science & Technology,
Zhangjiagang 215600, China)

Abstract: The flow shop scheduling problem is widely used in engineering application. Optimal scheduling can not only improve the production efficiency and reduce the cost, but also improve the utilization rate of the resources. Based on the permutation flow-shop scheduling problem (PFSP) with the goal of minimizing the makespan, we propose a new algorithm mixing water wave optimization (WWO) and chemical reaction optimization (CRO). In the new algorithm, the synthesis and decomposition reaction in CRO are removed while on-wall ineffective collision and intermolecular ineffective collision are preserved. Meanwhile, it will replenish kinetic energy for molecules in time with the help of central buffer energy and actuate molecular mutation operations to maintain global searching capability. By reconstructing propagation operator based on iterative greedy, reconstructing the refraction operator based on path relinking, reconstructing breaking operator based on the local search, and introducing the strategy of ruling out inferior solution, the proposed discrete WWO is to improve the local search and convergence speed. Then, the effectiveness of the proposed algorithm is validated through sufficient experiments.

Key words: permutation flow-shop scheduling problem; water wave optimization; chemical reaction optimization; hybrid algorithm

0 引言

置换流水车间调度问题(permutation flow-shop scheduling problem, PFSP)是一类典型的组合优化问题,并已证明是NP难题^[1]。PFSP有大批量生产加工的应用背景,对PFSP的优化调度不仅可以提高生产

效率,还可以提高资源的利用率,多年来已经得到广泛而深入的研究并取得了较好的成果。

如今,混合群体优化算法成为一个关注较高的研究方向,这些研究促使求解PFSP问题进入新的阶段。文献[2]针对粒子群早熟的缺点,提出了一种结合迭

收稿日期:2018-07-02

修回日期:2018-11-14

网络出版时间:2019-03-06

基金项目:国家自然科学基金(11401262)

作者简介:姜强强(1993-),男,硕士研究生,研究方向为优化算法、车间调度;张其亮,副教授,博士,通信作者,研究方向为智能算法、优化调度理论。

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20190306.0907.036.html>

代贪婪算法的混合粒子群算法,使用迭代贪婪算法对停滞的粒子和全局最优粒子进行变异,然后利用模拟退火思想概率接受新值,跳出局部极值。文献[3]基于模糊化处理和蜂群寻优的特点,提出模糊人工蜂群算法,将模糊输入输出机制引入算法保持蜜源访问概率的动态更新,避免陷入局部极值。文献[4]提出混合离散人工蜂群算法,加入离散差分进化与变邻域搜索策略,雇佣蜂阶段接受新个体采用模拟退火的概率突跳机制,使用锦标赛方法进行选择,在侦察蜂阶段对锦标赛选择的个体执行破坏重建操作。文献[5]提出一种混合的迭代局部搜索算法,将基于超启发式的变邻域下降算法嵌入迭代局部搜索算法中。文献[6]提出一种结合集束搜索的迭代贪婪算法,首先利用基于构建启发式的快速集束搜索来评估部分工件序列,然后将构建启发式算法用于产生初始解。文献[7]结合 NEH 启发式构造初始解的策略提出一种混合的猴群算法,初始种群的生成采用随机方式和基于 NEH 的方式,同时利用 SPV 规则完成工件编码。

上述研究通过实验证明了群体优化算法对于求解 PFSP 问题的有效性。为了进一步提高求解质量,文中研究了新兴的化学反应优化 (chemical - reaction optimization, CRO) 与水波优化 (water wave optimization, WWO),提出一种混合的水波化学反应优化 (wave chemical reaction optimization, WCRO) 算法,同时引入迭代贪婪、路径重连等策略,力求混合算法在局部搜索、全局搜索以及收敛速度上均具有良好的表现,最后通过与其他算法进行实验测试对比证明该算法的可行性。

1 PFSP 问题的数学描述

PFSP 问题一般描述为 n 个工件需要在 m 台机器上加工,每个工件需要经过 m 道工序;每道工序要求不同的机器; n 个工件在 m 台机器上的加工顺序相同;每个工件在每台机器上的加工时间表示为 p_{ij} (i 为第 i 个工件, j 为第 j 台加工机器)。记 $\pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n\}$ 为所有工件的一个排列, $C(\pi_i, j)$ 为工件 π_i 在机器 j 的加工完成时间,则各工件在每台机器上的加工完成时间的数学模型如下:

$$C(\pi_1, 1) = p_{\pi_1, 1} \quad (1)$$

$$C(\pi_i, 1) = C(\pi_{i-1}, 1) + p_{\pi_i, 1} \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$C(\pi_1, j) = C(\pi_1, j-1) + p_{\pi_1, j} \quad j = 2, 3, \dots, m \quad (3)$$

$$C(\pi_i, j) = \max\{C(\pi_{i-1}, j), C(\pi_i, j-1)\} + p_{\pi_i, j} \quad i = 2, 3, \dots, n; j = 2, 3, \dots, m \quad (4)$$

式 1 表示第 1 个工件在第 1 台机器上的完工时间;式 2 表示第 i 个工件在第 1 台机器上的完工时间;

式 3 表示第 1 个工件在第 j 台机器上的完工时间;式 4 表示第 i 个工件在第 j 台机器上的完工时间。

加工的总完工时间 $C_{\max}(\pi)$ 计算如下:

$$C_{\max}(\pi) = C(\pi_n, m) \quad (5)$$

PFSP 问题的目标是寻找一个工件排列序列 π^* 使得 $C_{\max}(\pi^*)$ 最小,如式 6 所示:

$$C_{\max}(\pi^*) \leq C_{\max}(\pi_n, m) \quad (6)$$

2 求解 PFSP 问题的 WCRO 算法

2.1 PFSP 问题编码

文中 PFSP 问题的解采用离散编码方式,每个工件用一个整数代表,工件从 0 开始标记, $\{0, 1, \dots, n-1\}$ 为 n 个工件标记,如 $n=5$ 的一种工件序列为 $\{2, 3, 1, 4, 0\}$ 。

在 WCRO 算法中,每个工件序列对应种群中个体的结构,工件序列的完工时间对应个体的适应度值。

2.2 WCRO 算法概述

文中将 CRO 算法与 WWO 算法混合,提出了一种新的混合水波化学反应优化算法 (WCRO),算法框架如图 1 所示。

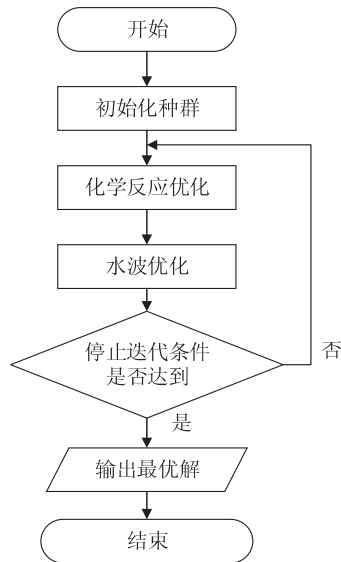


图 1 WCRO 算法框架

WCRO 算法首先初始化种群,然后进入由 CRO 与 WWO 协作完成的迭代优化阶段,化学反应优化针对种群个体,即随机选择种群中的个体进行化学反应优化操作,水波优化则针对整个群体进行优化操作,迭代完成后输出最优解。

2.3 基于 NEH_GRASP 初始化种群

为了得到多个质量较高且多样性的初始解,采用文献[8]提出的基于 NEH 的贪婪随机自适应搜索算法 (NEH_GRASP)。NEH_GRASP 算法在构造解时,首先对每一个候选元素赋予一个贪婪函数值,将每个工件在所有机器上加工完成的时间作为贪婪函数值,

并按照从大到小进行排序;其次,将排在前面的候选元素选入到约束候选表中;然后,从约束候选表中随机选择一个元素构造初始解;重复上述操作直至初始解中包含所有的工件。NEH_GRASP 算法一次生成一个初始解,经过多次执行可获得多个质量较高且多样性的初始解。

2.4 化学反应优化

CRO 算法是一种模拟化学反应变化的群体优化算法^[9]。反应中的分子通过不断进行撞墙、分解、互撞以及合成四种反应实现能量的转化以寻求更低的势能。CRO 算法具有保持种群多样性、全局搜索能力好的优点,而分解与合成反应在整个算法中的作用不明显^[10-11],因此只保留撞墙和互撞反应。分子动能随反应的进行逐渐降低,则反应所需条件也愈加难以满足,为了使反应持续进行,在反应前加入分子动能是否过低的判断,当 $KE < LowKE$ (低动能阈值) 时,使用缓冲能量 buffer 将分子能量补充至初始动能的状态,同时使用 NEH_GRASP 算法重新生成分子结构,如果 buffer 不足则不进行此操作。

2.4.1 撞墙

撞墙反应指单个分子与容器壁碰撞后分子结构发生改变的过程,使得分子对应的解突变,防止算法陷入局部最优,文中采用基于随机互换方式实现撞墙操作。首先随机选择一个分子,然后针对分子的结构即工件序列,随机选择两个不同的位置工件进行交换,如图 2 所示。

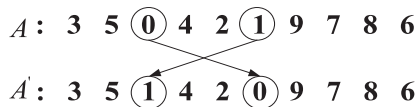


图2 撞墙反应的分子结构变化

2.4.2 互撞

互撞反应是指两个分子间发生碰撞后分子结构发生变化,发生碰撞的两个分子间进行信息交换,文中采用基于位置的交叉操作 (position-based crossover, PBX)。随机选择两个分子,记互撞前后分子对应的工件序列分别为 A 、 B 和 A' 、 B' 。首先,确定保留信息的长度 d 且 $d \in [1, n]$;其次,随机选择 A 中的几个位置,将选中位置的工件直接保留到 A' 序列中对应的位置;最后,先在 B 中找出第一步选中的工件在本序列中的位置,再将其余工件按顺序放入 A' 中的空缺位置,如图 3 所示。

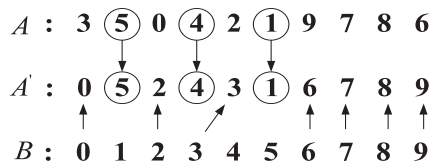


图3 分子碰撞反应的结构变化

B' 生成的规则与 A' 相同,先从 B 中随机选择保留的工件,再从 A 中选择剩余工件补充空缺位置。

2.5 水波优化

WWO 算法是一种以浅水波理论为基础,通过模拟水波的传播、碎浪、折射操作在搜索空间中进行寻优的新兴元启发式优化算法^[12-13]。

WWO 算法用于求解连续优化问题,而文中求解 PFSP 问题采用了离散的编码方式,因此,需要设计离散的水波优化算法的求解问题,同时引入迭代贪婪、路径重连、淘汰机制来改善算法的局部搜索能力和收敛的速度。

离散 WWO 算法包括四个阶段:传播、折射、碎浪以及淘汰劣解。算法对每个水波执行传播操作,传播后的水波适应度值、波长、波高发生改变。适应度值的变化情况决定是否执行碎浪操作,波高的变化情况决定是否进行折射或淘汰劣解操作。记工件序列 π_i 为第 i 个水波, λ_i 为波长, h_i 为波高。

2.5.1 传播

水波的波长决定传播范围,适应度越好其波长越小,传播操作的搜索空间也越小。迭代贪婪 (iterated greedy, IG) 算法^[14]通过在原始解上进行破坏、构造操作来获得一个更优质的解,以该算法作为传播操作算子。

破坏操作选择 d 个工件并从原始序列 π 中移除, π 被分成两部分: π_d 包含 d 个工件, π_r 包含 $n-d$ 个工件。构造操作从 π_d 中依次选择工件尝试插入 π_r 中所有可能位置,选择一个使 π_r 适应度最好的位置。

记操作完成后的水波为 π' ,如果 π' 适应度更好,替换原来的 π ,否则原水波波高减 1。DWWO 算法中波长决定 IG 算法中破坏长度 d ,即 $d = \lambda_i$,每次迭代波长发生如下改变:

$$c_1 = \begin{cases} C_{\max}(\pi_i) - C_{\text{best}}, & C_{\max}(\pi_i) - C_{\text{best}} > 0 \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (7)$$

$$c_2 = C_{\text{worst}} - C_{\text{best}} \quad (8)$$

$$\lambda_i = \lambda_{\max} - \lambda_{\min} \cdot e^{-c_1/(c_2+\varepsilon)} \quad (9)$$

其中, λ_{\max} 、 λ_{\min} 分别为最长波长与最短波长; $C_{\max}(\pi_i)$ 为当前水波的适应度; C_{worst} 、 C_{best} 分别为当前最优解与最差解的适应度; $\varepsilon = 0.001$ 避免出现除数为 0 的情况。

2.5.2 折射

当水波经过传播后波高减小为 0 时,进行折射。利用路径重连 (path relinking, PR) 完成折射使当前水波 π_i 保持向最优水波 π^* 的学习性。文中采用基于交换的 PR 算法,通过交换工件位使起始解向目标解靠拢,此过程会产生部分中间解,选择适应度最好的中间解作为 PR 算法的结果。

2.5.3 碎浪

如果传播后的水波的适应度比当前最优解更好,对水波 π_i 执行碎浪操作,此操作能进一步对最优解的附近范围搜索。以基于插入的局部搜索算法完成碎浪操作,首先,随机生成一个具有 n 个工件的序列 π' ,令 π 作为每次操作的结果;其次,依次遍历 π' 中的工件,并在当前水波 π_i 中找到对应的工件并插入所有可能插入的位置,找到一个适应度最好的工件序 π'' ;然后将 π'' 与当前解 π 进行比较,如果更优则用 π'' 替换 π 。

2.5.4 淘汰劣解

淘汰劣解是一种概率性的接受较差解的操作,引入此操作有助于加快收敛速度。如果当前水波 π_i 传播后得到的工件序列 π' 比原来更差,水波高度减 1 后高度变为 0 时,根据 $\text{rand} < \alpha$ (α 为算法参数,rand 是 0 到 1 之间的随机数)条件决定是否淘汰群体中适应度最差的水波,如果满足淘汰条件,将 π' 替换群体中最差水波,否则舍弃 π' 。

2.6 WCRO 算法设计

基于上述 WCRO 算法的框架设计,并且针对化学反应算法和离散水波优化算法给出的具体实现,WCRO 具体程序流程设计如下:初始阶段以 NEH-GRASP 算法生成高质量、多样性的种群,然后进入迭代优化阶段,包括执行两种分子碰撞的化学反应优化和混合搜索策略的离散水波优化,在水波优化进行深度局部寻优前先以化学反应优化执行全局搜索,防止陷入局部最优。

伪代码如下:

- 1:基于 NEH-GRASP 算法初始化种群
- 2:While (迭代停止条件未满足)
- 3:If($\text{rand}(0,1) \geq \text{MoleColl}$)
- 4:随机选择一个分子 m 执行撞墙反应
- 5:Else
- 6:随机选择两个分子 m_1 、 m_2 执行互撞反应
- 7:End if

- 8:For $i = 1 : \text{PopSize}$
- 9:对 π_i 执行传播操作得到 π'_i
- 10:If($C_{\max}(\pi'_i) < C_{\max}(\pi_i)$)
- 11:If($C_{\max}(\pi'_i) < C_{\text{best}}$)对 π'_i 执行碎浪操作
- 12:End if
- 13: $\pi_i = \pi'_i$
- 14:Else
- 15: $h_i = h_i - 1$
- 16:If($h_i = 0$)
- 17:对 π_i 执行折射操作
- 18: $h_i = h_{\max}$
- 19:Else
- 20:If($\text{rand}(0,1) < \alpha$)淘汰劣解
- 21:End if
- 22:End if
- 23:End if
- 24:根据式 7~9 更新波长 λ_i
- 25:End for
- 26:End while

3 实验结果与分析

借助 Eclipse 开发平台,使用 Java 语言实现求解 PFSP 问题的 WCRO 算法,程序运行环境为 Windows 10 64 位操作系统、主频 3.4 G 的 Intel Core i3 系列 CPU、4G DDR3 内存。实验测试采用 Taillard^[15] 提出的 120 组基准测试案例。

3.1 参数设置

WCRO 算法涉及如下几个重要参数:最大迭代次数 MaxIteration、群体规模 PopSize、初始动能 InitialKE、动能损失率 KELossRate、单双分子反应决定因子 MoleColl、低动能阈值 LowKE、初始波高 h_{\max} 、最大波长 λ_{\max} 、最小波长 λ_{\min} 、淘汰劣解决定因子 α 。参考肖华军等^[16]有关 CRO 算法的研究以及 Zhao^[17]等有关 DWWO 算法的研究,对 WCRO 算法的参数设置如表 1 所示。

表 1 WCRO 算法参数取值

参数名	取值	参数名	取值
MaxIteration	5 000	MoleColl	0.5
PopSize	20	h_{\max}	4
InitialKE	1 000	λ_{\max}	$n/3$
LowKE	100	λ_{\min}	$\lambda_{\max}/2$
KELossRate	0.8	α	0.2

需要注意的是,在 500×20 的数据规模中,存在不同的解的完工时间差距较大的情况,太小的分子动能大规模问题中难以保证化学反应成功进行,因此在 500×20 规模的案例中,将参数 InitialKE 和 LowKE 分

别设置为 2 000 和 200,以此保证算法能够在所有测试案例中发挥作用。

3.2 基准实例测试

实验结果的对比以两种比较标准为例:平均误差

率(average error rate, ARE) 和平均相对百分偏差(average relative percentage deviation, ARPD), 算法针对每个案例独立运行 10 次。

公式如下:

$$ARE = \frac{\text{mean} - \text{opt}}{\text{opt}} \times 100\%$$
 (10)

$$ARPD = \frac{1}{k} \sum_i^k \frac{\text{best}_i - \text{opt}_i}{\text{opt}_i} \times 100\%$$
 (11)

表 2 WCRO、NCS 算法的 ARE 结果对比

问题	问题规模 $n \times m$	最优解	WCRO		NCS	
			Mean	ARE	Mean	ARE
Ta010	20×5	1 108	1 108	0.00	1 108	0.00
Ta020	20×10	1 591	1 597.8	0.43	1 606	0.94
Ta030	20×20	2 178	2 179.1	0.05	2 184	0.28
Ta040	50×5	2 782	2 782	0.00	2 782	0.00
Ta050	50×10	3 065	3 113	1.57	3 131.2	2.16
Ta060	50×20	3 696	3 828.3	3.58	3 860.6	4.45
Ta070	100×5	5 322	5 323	0.02	5 326	0.08
Ta080	100×10	5 845	5 855.4	0.18	5 891.4	0.79
Ta090	100×20	6 434	6 579.6	2.26	6 602.8	2.62
Ta100	200×10	10 675	10 735.2	0.56	10 734	0.55
Ta110	200×20	11 288	11 623.3	2.97	11 633.6	3.06
Ta120	500×20	26 457	26 826.9	1.40	26 897.2	1.66
平均值			1.09		1.38	

表 3 WCRO、VacGA、NEHLJP1 算法的 ARPD 结果对比

问题规模		WCRO	VacGA	NEHLJP1
n	m			
20	5	0.00	0.08	2.16
	10	0.03	0.93	3.68
	20	0.01	0.07	3.06
50	5	0.00	0.08	0.64
	10	0.83	2.34	4.25
	20	1.64	3.69	6.15
100	5	0.00	0.14	0.36
	10	0.40	1.44	1.72
	20	2.37	3.43	4.81
200	10	0.33	—	0.89
	20	2.37	—	3.65
500	20	1.33	—	1.62
平均值		0.78	1.35	2.75

由表 2 可知, 文中算法除了问题 Ta100 的求解结果比 NCS 算法稍有不足外, 对其余问题的求解结果均

其中, mean、best 分别表示算法所求得平均值和最优值; opt 为目前已知该案例的最优值。

为了完成性能测试, 选取近些年较新的算法: 新布谷鸟算法(NCS)^[18]、免疫遗传算法(VacGA)^[19]、改进 NEH 算法(NEHLJP1)^[20]与文中算法进行对比。对比结果如表 2 和表 3 所示。

优于 NCS 算法。从表 3 中数据可以看出, 文中算法对于求解 Taillard 所有问题得到的结果与最优解的误差

最小,与 VacGA 算法和 NEHLJP1 算法相比寻优性能更好。

4 结束语

基于 CRO 与 WWO 算法提出一种新的 WCRO 算法。使用 NEH_GRASP 算法生成高质量、多样性的种群,保留 CRO 中两种分子碰撞完成化学反应优化,设计离散型 WWO 算法并引入迭代贪婪、路径重连、淘汰机制,以 CRO 与 DWWO 协作完成算法的主要优化过程。

通过实验对比证明 WCRO 算法求解 PFSP 问题的可行性。未来可以将 WCRO 算法应用于 TSP、作业车间调度、混合流水车间调度等其他组合优化问题中,以进一步证明该算法的有效性。

参考文献:

- [1] GAREY M R, JOHNSON D S. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1979.
- [2] 张其亮,陈永生. 一种新的混合粒子群算法求解置换流水车间调度问题[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(6): 2028-2030.
- [3] 柳寅,马良,黄钰. 模糊人工蜂群算法的置换流水车间调度问题求解[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(4): 90-94.
- [4] 张素君,宁欣,顾幸生. 基于混合离散人工蜂群算法的置换流水车间调度[J]. 河南大学学报:自然科学版, 2017, 47(2): 194-201.
- [5] HIBA Y, SAOUSSEN K, BILEL D, et al. A hybrid ILS-VND based hyper-heuristic for permutation flowshop scheduling problem[J]. Procedia Computer Science, 2015, 60: 632-641.
- [6] FERNANDEZ-VIAGAS V, VALENTE H M S, FRAMINAN J M. Iterated-greedy-based algorithms with beam search initialization for the permutation flowshop to minimise total tardiness[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 94: 58-69.
- [7] MARICHEL V M K, TOSUNÖ, GEETHA M. Hybrid monkey search algorithm for flow shop scheduling problem under makespan and total flow time[J]. Applied Soft Computing, 2017, 55: 82-92.
- [8] 刘延凤. 置换流水车间调度问题的几种智能算法[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [9] 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.
- [10] NGUYEN T T, LIZhiyong, ZHANG Shiwen, et al. A hybrid algorithm based on particle swarm and chemical reaction optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(5): 2134-2143.
- [11] LIZhiyong, NGUYEN T T, CHEN Shaomiao, et al. A hybrid algorithm based on particle swarm and chemical reaction optimization for multi-object problems[J]. Applied Soft Computing, 2015, 35: 525-540.
- [12] ZHENG Yujun. Water wave optimization: a new nature-inspired metaheuristic[J]. Computers & Operations Research, 2015, 55: 1-11.
- [13] ZHENG Yujun, ZHANG Bei. A simplified water wave optimization algorithm[C]//2015 IEEE congress on evolutionary computation. Sendai, Japan: IEEE, 2015: 807-813.
- [14] RUIZA R, STÜTZLEB T. A simple and effective iterated greedy algorithm for the permutation flowshop scheduling problem[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 177(3): 2033-2049.
- [15] TAILLARD E. Benchmarks for basic scheduling problems[J]. European Journal of Operational Research, 1993, 64(2): 278-285.
- [16] 潘果. 混合智能算法及其在优化问题中的应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [17] ZHAO Fuqing, LIU Huan, ZHANG Yi, et al. A discrete water wave optimization algorithm for no-wait flow shop scheduling problem[J]. Expert Systems with Applications, 2018, 91: 347-363.
- [18] WANG Hui, WANG Wenjun, SUN Hui, et al. A new cuckoo search algorithm with hybrid strategies for flow shop scheduling problems[J]. Soft Computing, 2017, 21(15): 4297-4307.
- [19] TAYEBA F B, BESSEDIKA M, BENBOUZID M, et al. Research on permutation flow-shop scheduling problem based on improved genetic immune algorithm with vaccinated offspring[J]. Procedia Computer Science, 2017, 112: 427-436.
- [20] LIU W, JIN Y, MARK P. A new improved NEH heuristic for permutation flowshop scheduling problems[J]. International Journal of Production Economics, 2017, 193: 21-30.