

求解流水车间批量流集成调度的离散入侵杂草优化算法

桑红燕¹, 潘全科^{2†}

(1. 聊城大学 计算机学院, 山东 聊城 252059; 2. 华中科技大学 数字制造装备与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 提出一种离散入侵杂草优化算法, 用来解决最大完工时间目标的流水车间批量流集成调度问题. 该调度问题包含两个紧密耦合的子问题: 批次分割问题和考虑启动时间的批次调度问题. 设计了两段字符串编码, 用来表示两个子问题. 与基本入侵杂草优化算法不同, 所提算法基于适应度和年龄确定杂草种子数量, 基于正切函数和连续邻域操作产生种子. 8种邻域算子的混合应用与局部搜索增强了算法的求解能力. 仿真实验表明了所提算法的有效性.

关键词: 流水车间; 批量流; 入侵杂草优化; 邻域搜索

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

A discrete invasive weed optimization algorithm for the integrated lot-streaming flow shop scheduling problem

SANG Hong-yan¹, PAN Quan-ke^{2†}

(1. College of Computer Science, Liaocheng University, Liaocheng Shandong 252059, China;

2. State Key Lab of Digital Manufacturing Equipment Technology,

Huazhong University of Science Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: An effective discrete invasive weed optimization (DIWO) algorithm is presented to minimize the maximum completion time for an integrated lot-streaming flow shop scheduling problem, which can be modeled as two closely coupled sub-problems. One sub-problem is a lot-splitting problem, and the other is a batch scheduling problem with separable setup times. A two-stage string encoding is designed to represent the two sub-problems. Unlike the basic invasive weed optimization algorithm, the presented DIWO determines the number of seeds for each individual not only based on its fitness but also based on its age. In addition, the DIWO generates a seed based on the tangent function and the continuous neighborhood operation. Eight neighborhood operators and a local search procedure are developed. The mixed application of the eight neighborhood operators and the local search procedure significantly enhance the performance of the DIWO. The computational results based on extensive experiment demonstrate the effectiveness of the presented DIWO algorithm.

Key words: flow shop; lot-streaming; invasive weed optimization; neighborhood search

1 引言(Introduction)

批量流调度问题(lot streaming scheduling problem, LSSP)广泛存在于变压器芯片和瓷砖等生产过程中^[1-2]. 批量流技术缩短了机器等待闲置时间, 降低了在线库存, 加快了工件在生产过程中的流动. 但由于批量流调度不仅要考虑生产作业的合理安排和生产资源的有效分配(批次调度), 而且要考虑加工批次的适当分割(批次分割), 因此对其求解也就更加困难.

入侵杂草优化算法(invasive weed optimization algorithm, IWO)是一种新型智能优化算法^[3]. 与模仿动

物群智能的优化算法不同^[4-5], 它模仿自然界中杂草入侵的过程, 具有很强的鲁棒性和适应性. 已被成功应用于压电致动器优化和天线设计等^[6-7]工程领域. 但IWO针对连续优化问题设计, 采用浮点数编码, 不能直接应用于组合优化问题. 基于IWO的优化机制和流水车间批量流集成调度的特点, 设计了一种离散IWO(discrete IWO, DIWO)调度算法. 仿真试验表明了所提方法的有效性.

2 问题描述(Problem description)

流水车间批量流集成调度问题描述为: n 个加工批

收稿日期: 2014-01-24; 录用日期: 2014-09-02.

†通信作者. E-mail: panquanke@gmail.com;

国家自然科学基金项目(61174187, 61104179, 61374187), 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-13-0106), 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20130042110035), 山东省高等学校科技计划项目(J14LN28)资助.

Supported by National Science Foundation of China (61174187, 61104179, 61374187), Program for New Century Excellent Talents in University (NCET-13-0106), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20130042110035) and a Project of Shandong Province Higher Educational Science and Technology Program (J14LN28).

次按照相同工艺路径经过 m 台机器加工. 每个加工批次可等分成若干独立的转移批量. 在转移批量开始加工之前, 有一段机器准备时间. 考虑约束: ① 同一台机器上, 一个加工批次加工完成后方可加工另一批次; ② 所有机器上, 各加工批次的生产次序完全相同; ③ 任何时刻, 一台机器只能加工一个转移批量, 一个转移批量也只能在一台机器上进行加工; ④ 批量运输时间包含在加工时间内; ⑤ 同一台机器上相邻转移批量之间, 机器可空闲. 已知各加工批次包含的工件数, 单个工件在各机器上所需加工时间和准备时间, 要求确定加工分批与生产次序, 使得完成 n 个加工批次所需时间最小.

3 离散入侵杂草优化算法(Proposed DIWO)

提出一种离散入侵杂草优化调度算法, 组成环节如下:

3.1 编码(Encoding)

提出两阶段字符串编码, 即 $A = \{(l_1, l_2, \dots, l_n), (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)\}$ 分别表示批次分割和批次调度, 如图 1 所示.

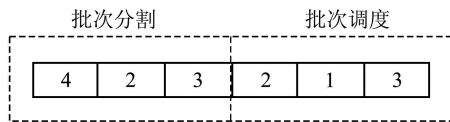


图 1 问题编码

Fig. 1 Representation for the problem

批次分割部分 $l_j \in [l_{\min}, l_{\max}]$ 表示加工批次 j 的分批数量, l_{\min} 和 l_{\max} 为最小和最大分批数, B_j 为加工批次 j 的总工件数, 则 j 的第 k 个转移批量所包含的工件数量计算如下:

$$b_{j,k} = \begin{cases} \lceil B_j/l_j \rceil, & k \leq \text{mod}(B_j, l_j), \\ \lfloor B_j/l_j \rfloor, & \text{其他}. \end{cases} \quad (1)$$

批次调度部分为全部加工批次的一个完整序列 $(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, $\pi_d \in J$, $d = 1, 2, \dots, n$, 表示各加工批次的生产顺序.

3.2 初始化(Initialization)

批次分割部分各加工批次在区间 $[l_{\min}, l_{\max}]$ 上按照均匀分布产生一个随机数作为分批数. 批次调度部分采用 GLOVE 发生器^[8]产生一组分布均匀的批次排列. 对于一个给定排列 π , GLOVE 发生器可得到 $\frac{n}{2}$ 个分散均匀的排列. 随机变化给定排列, 就得到足够多的初始批次调度. 从所得批次分割序列和批次调度中随机选择两个配对组合, 可得到一个 DIWO 个体. λ 个这样的个体, 就构成了一个分散性较好的初始种群.

3.3 生长繁殖-空间扩散(Reproduction and spatial dispersal)

3.3.1 种子数量(The number of seeds for a weed)

IWO 基于个体适应度产生种子, 种子数量 Ψ_i 计算如下:

$$\Psi_i = \lfloor \Psi_{\min} + \frac{\Psi_{\max} - \Psi_{\min}}{f_{\max} - f_{\min}} \times (f_i - f_{\min}) \rfloor, \quad (2)$$

式中: f_i 表示个体的适应值, f_{\max} 和 f_{\min} 为群体最好和最差适应值, Ψ_{\max} 和 Ψ_{\min} 为最大和最小种子数量, $\lfloor \cdot \rfloor$ 为下取整函数.

提出一种基于适应度和年龄的种子数量确定方法. 定义年龄为个体所经历的迭代次数. 年轻个体经历的迭代次数少, 它们周围的区域较少被探索. 而这些个体又是生存竞争的优胜者, 它们周围很可能存在较好解, 应该加强对其邻域的探索. 故考虑年龄因素产生的个体数量为

$$\Psi'_i = \lfloor \Psi_{\max} - \frac{\Psi_{\max} - \Psi_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}} \times (A_i - A_{\min}) \rfloor, \quad (3)$$

式中: A_{\max} 与 A_{\min} 为种群中个体的最大与最小年龄, A_i 为个体 X_i 的年龄.

综合考虑适应度与年龄因素, 杂草个体产生的种子数量为

$$\zeta_i = \frac{\Psi_i + \Psi'_i}{2}. \quad (4)$$

3.3.2 邻域操作算子(Neighborhood operators)

针对批次分割部分 $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$, 设计两种操作算子, 即随机变异和 ± 1 变异. 随机变异随机选择一个批次分割 l_j , 在区间 $[l_{\min}, l_{\max}]$ 中产生一个不同于 l_j 的随机整数代替 l_j . ± 1 变异随机选择一个批次分割 l_j , 在区间 $[0, 1]$ 中产生一个随机数, 若该随机数小于 0.5, 则令 $l_j = l_j + 1$; 否则令 $l_j = l_j - 1$.

针对批次调度部分 $\pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)$, 考虑插入和互换变异. 插入变异随机选择两个相异位置 d 和 d' ($d < d'$); 将 d' 位置上的加工批次插入到 d 位置的加工批次前面形成新的加工序列. 互换变异随机产生两个相异的位置 d 和 d' , 将这两个位置上的加工批次互换形成新的加工序列.

组合上述批次分割变异和批次调度变异可得到针对个体 $A = \{(l_1, l_2, \dots, l_n), (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n)\}$ 的 8 种邻域操作算子: ① 随机变异 L , 插入变异 π ; ② 随机变异 L , 互换变异 π ; ③ ± 1 变异 L , 插入变异 π ; ④ ± 1 变异 L , 互换变异 π ; ⑤ 随机变异 L , π 不变; ⑥ ± 1 变异 L , π 不变; ⑦ L 不变, 插入变异 π ; ⑧ L 不变, 互换变异 π .

3.3.3 基于正切函数的正态分布标准差(Standard deviation for the normal distribution based on tangent function)

空间扩散阶段种子在其父代附近以正态分布随机扩散. IWO 在进化过程中, 正态分布标准差 σ 从初始值 σ_0 逐渐减小到终值 σ_f :

$$\sigma = \frac{(\mu_{\max} - \mu)^\beta}{(\mu_{\max})^\beta} \times (\sigma_0 - \sigma_f) + \sigma_f, \quad (5)$$

式中: μ 是当前迭代次数, μ_{\max} 是最大代数, β 是非线

性调合指数.

当 β 值较大时,算法收敛快,但不能保证求解精度; β 值较小时虽然可以得到较为精确的解,但收敛慢且有时会陷入局部最优.正切函数 $\tan z$ 中,函数值随着自变量的减小而减小且减小速度也随之递减.根据正切函数的特点,得到

$$\sigma = \tan(0.875 \times \frac{\mu_{\max} - \mu}{\mu_{\max}}) \times (\sigma_0 - \sigma_f) + \sigma_f. \quad (6)$$

随着迭代次数 μ 的增加, σ 和衰减率逐渐减小,这与算法进化过程是一致的.开始时,较大的 σ 所产生的后代产生的后代个体距离它们的父代距离较远,算法偏重于全局搜索,随着算法的进化, σ 开始变小,算法局部搜索能力增强.

3.3.4 种子的产生(Seeds generating)

令邻域操作算子的执行次数服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$,所得随机数 α 的整数部分 $\lfloor \alpha \rfloor$ 作为操作算子执行次数.随机选择一种邻域操作算子,对杂草个体连续执行 $\lfloor \alpha \rfloor$ 次操作,新个体即为当前个体的种子.

3.4 竞争排除(Competitive exclusion)

将种群中的父代个体及子代个体按照适应值排序,选择较好且没有重复的 λ 个个体作为下一代的种群.

3.5 局部搜索策略(Local search procedure)

鉴于批次分割的 ± 1 变异与批次调度的插入变异有利于算法的集中搜索,提出基于这两种变异的局部搜索算法(如下).这两种变异均被赋予50%的选择概率.如果某种变异被选中,则对当前个体执行变异操作.在局部搜索过程中,如果杂草个体得到了改进,则算法退出;否则算法继续执行,直到执行 ϖ 次局部搜索.通过仿真实验,确定 $\varpi = 100$.

局部搜索算法:

LocalSearch(π, ϖ)

$nCnt = 0;$

while($nCnt < \varpi$) **do**

if($\text{rand}() \leq 0.5$)

$\pi' = \text{InserMutation}(\pi);$ //对批次调度部分
 执行插入变异

else

$\pi' = \pm 1 \text{Mutation}(\pi);$ //对批次分割部分
 执行 ± 1 变异

endif

if($f(\pi') < f(\pi)$)

$\pi = \pi';$

break;

endif;

$nCnt := nCnt + 1;$

endwhile

3.6 DIWO 的流程图(DIWO flow chart)

DIWO的流程图如图2所示.

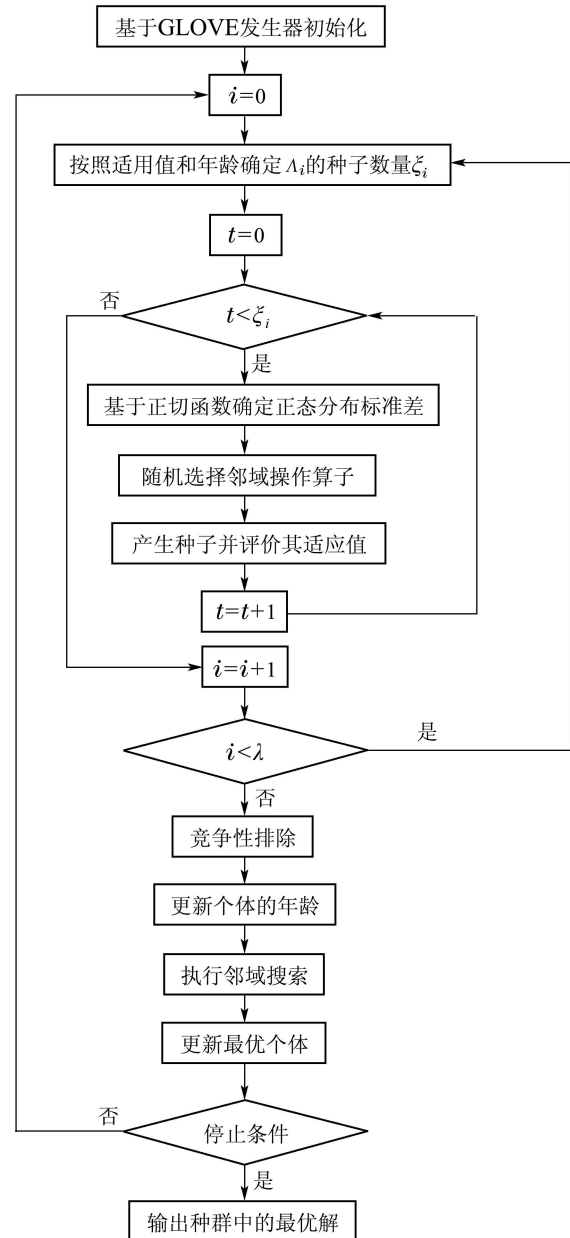


图2 DIWO流程图

Fig. 2 DIWO flow chart

3.7 DIWO的收敛性分析(Convergence analysis of DIWO)

从上述环节来看,DIWO的搜索过程满足马尔科夫性.在搜索过程中,群体从一状态 g 经过生长繁殖-空间扩散、竞争排除和局部搜索的连续作用而转变为状态 g' .这三种算子的转移概率矩阵是正确的、随机的.根据文献[9]定理3,DIWO构成的马尔科夫链的转移概率矩阵是正则的.又因为DIWO的竞争排除保留了最优解,进而根据文献[9]定理6,可知DIWO算法具有收敛到全局最优解的能力.

4 试验比较(Experimental comparison)

为了验证算法性能, 令 $m \in \{5, 10, 20\}$, $n \in \{5, 7, 10, 12, 15\}$. m 和 n 共有15种不同的组合, 每个组合产生10个调度实例. 其他生产数据服从以下均匀分布: $B_j \in U(100, 300)$, 单工件加工时间 $p_{j,k} \in U(1, 10)$, 转移批量的准备时间 $s_{j,k} \in U(10, 30)$, $l_{\min} = 1$, $l_{\max} = 10$.

比较 DIWO 与文献[10]的遗传算法 (genetic algorithm, GA)和文献[1]的人工蜂群算法(artificial bee

colony, ABC). DIWO的参数确定为: $\lambda = 20$, $\Psi_{\max} = 8$, $\Psi_{\min} = 2$, $\sigma_0 = 5$, $\sigma_f = 0.5$. GA的操作算子确定为: 锦标赛选择、相似块次序交叉、插入变异; GA的参数确定为: 交叉率0.5、变异率0.1、种群规模30. ABC的参数分别设定为: 蜂群规模20, 侦察蜂参数20, 局部搜索率0.1, 局部搜索步长 n^2 . 算法最大运行时间为 $\rho \times m \times n$ ms. 对每个实例执行30次独立运算. 在等于10, 20和30下, 算法所得相对百分偏差及其标准差(ARPI \pm SD)如表1所示.

表 1 算法比较(ARPI \pm SD)
Table 1 Comparison of DIWO with GA and ABC (ARPI \pm SD)

ρ	10			20			30		
	DIWO	GA	ABC	DIWO	GA	ABC	DIWO	GA	ABC
5×5	1.34 \pm 0.21	3.53 \pm 0.63	2.53 \pm 0.42	1.32 \pm 0.20	3.40 \pm 0.62	2.41 \pm 0.42	1.31 \pm 0.20	3.38 \pm 0.61	2.40 \pm 0.43
5×10	1.87 \pm 0.46	4.07 \pm 0.85	3.16 \pm 0.73	1.84 \pm 0.44	3.91 \pm 0.83	3.02 \pm 0.73	1.83 \pm 0.43	3.89 \pm 0.84	3.00 \pm 0.70
5×20	2.10 \pm 0.35	4.23 \pm 0.73	3.38 \pm 0.57	2.05 \pm 0.31	4.13 \pm 0.72	3.29 \pm 0.55	1.93 \pm 0.30	3.99 \pm 0.71	3.11 \pm 0.52
7×5	1.99 \pm 0.33	4.21 \pm 0.67	3.04 \pm 0.53	1.96 \pm 0.27	4.08 \pm 0.67	2.98 \pm 0.48	1.81 \pm 0.25	3.94 \pm 0.62	2.93 \pm 0.46
7×10	2.02 \pm 0.25	4.27 \pm 0.60	2.84 \pm 0.49	2.00 \pm 0.19	4.14 \pm 0.54	2.91 \pm 0.39	2.07 \pm 0.16	4.12 \pm 0.51	2.90 \pm 0.35
7×20	3.63 \pm 1.91	5.80 \pm 2.32	4.81 \pm 2.13	3.60 \pm 1.90	5.71 \pm 2.35	4.71 \pm 2.13	3.58 \pm 1.92	5.68 \pm 2.32	4.70 \pm 2.12
10×5	3.60 \pm 1.50	5.78 \pm 1.96	4.88 \pm 1.75	3.59 \pm 1.55	5.67 \pm 1.95	4.75 \pm 1.76	3.56 \pm 1.54	5.65 \pm 1.95	4.73 \pm 1.76
10×10	4.10 \pm 1.83	6.30 \pm 2.23	5.35 \pm 2.09	4.08 \pm 1.85	6.22 \pm 2.25	5.31 \pm 2.08	4.05 \pm 1.83	6.21 \pm 2.25	5.30 \pm 2.08
10×20	3.06 \pm 1.21	5.26 \pm 1.65	4.18 \pm 1.46	3.05 \pm 1.20	5.18 \pm 1.64	4.17 \pm 1.45	3.04 \pm 1.19	5.17 \pm 1.63	4.14 \pm 1.46
12×5	3.50 \pm 1.09	5.74 \pm 1.61	4.38 \pm 1.41	3.46 \pm 1.07	5.50 \pm 1.54	4.27 \pm 1.38	3.39 \pm 1.02	5.43 \pm 1.52	4.23 \pm 1.36
12×10	7.49 \pm 4.27	9.77 \pm 4.68	8.73 \pm 4.47	7.45 \pm 4.26	9.67 \pm 4.69	8.64 \pm 4.47	7.45 \pm 4.29	9.65 \pm 4.67	8.63 \pm 4.45
12×20	7.73 \pm 3.95	9.89 \pm 4.35	8.89 \pm 4.17	7.71 \pm 3.96	9.80 \pm 4.36	8.80 \pm 4.16	7.70 \pm 3.94	9.78 \pm 4.37	8.79 \pm 4.16
15×5	9.58 \pm 4.46	11.73 \pm 4.85	10.76 \pm 4.64	9.56 \pm 4.36	11.66 \pm 4.86	10.67 \pm 4.67	9.50 \pm 4.34	11.65 \pm 4.87	10.65 \pm 4.65
15×10	6.71 \pm 3.04	8.88 \pm 3.42	7.89 \pm 3.22	6.70 \pm 3.01	8.77 \pm 3.44	7.79 \pm 3.23	6.68 \pm 3.02	8.76 \pm 3.42	7.78 \pm 3.24
15×20	6.81 \pm 2.98	8.98 \pm 3.36	7.73 \pm 3.19	6.73 \pm 2.96	8.82 \pm 3.37	7.62 \pm 3.19	6.66 \pm 2.95	8.76 \pm 3.41	7.59 \pm 3.17
均值	4.37 \pm 1.86	6.56 \pm 2.26	5.50 \pm 2.08	4.34 \pm 1.84	6.44 \pm 2.26	5.42 \pm 2.07	4.31 \pm 1.83	6.41 \pm 2.25	5.39 \pm 2.06

由表1可知, DIWO算法得到了较优结果. 表明针对流水车间批量流集成调度问题, DIWO较ABC和GA更有效.

将DIWO应用于连杆加工车间实际调度问题. 4种不同的连杆零件(批量分别为200, 300, 150和200)依次经过卧式双端面磨床、八工位自动线、卧式双端面磨床、五工位自动线、立铣、八工位回转镗床、清洗机和测量机. 按照传统的流水车间调度方式, 最大完工时间为718000 s. DIWO集成优化后, 最大完工时间为61520 s, 可见DIWO有效地提高了生产率.

5 总结(Conclusions)

研究了流水车间批量流集成调度问题, 给出了一种离散入侵杂草优化算法, 提出了若干有效的优化技术: 两段字符串编码表达方法, 基于适应度和年龄的杂草个体后代种子数量的确定方法, 以及局部搜索策略等. 仿真实验表明了所提算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] PAN Q K, SUGANHAN P N, TASGETIREN M F, et al. A novel artificial bee colony algorithm for a lot-streaming flow shop scheduling problem [J]. *Information Sciences*, 2011, 181(12): 2455 – 2468.
- [2] 桑红燕. 流水车间批量流调度问题求解方法研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
(SANG Hongyan. *Research on methods for lot-streaming flow shop scheduling problems* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science Technology, 2013)
- [3] MEHRABIAN A R, LUCAS C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. *Ecological Informatics*, 2006, 1(4): 355 – 366.
- [4] 郑晓龙, 王凌, 王圣尧. 求解置换流水线调度问题的混合离散果蝇算法 [J]. *控制理论与应用*, 2014, 31(2): 159 – 164.
(ZHENG Xiaolong, WANG Ling, WANG Shengyao. A hybrid discrete fruit fly optimization algorithm for solving permutation flow-shop scheduling problem [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(2): 159 – 164.)
- [5] 王凌, 周刚, 许焯, 等. 求解不相关并行机混合流水线调度问题的人工蜂群算法 [J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(12): 1551 – 1557.
(WANG Ling, ZHOU gang, XU Ye, et al. An artificial bee colony algorithm for solving hybrid flow-shop scheduling problem with un-

- related parallel machines [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(12): 1551 – 1557.
- [6] MEHRABIAN A R, KOMA A Y. A novel technique for optimal placement of piezoelectric actuators on smart structures [J]. *Journal of The Franklin Institute*, 2011, 348(1): 12 – 23.
- [7] ROY G G, DAS S, CHAKRABORTY P, et al. Design of non-uniform circular antenna arrays using a modified invasive weed optimization algorithm [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(1): 110 – 118.
- [8] GLOVER F. A template for scatter search and path relinking [C] // *Artificial Evolution, Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1998, 1363: 1 – 51.
- [9] RUDOLPH G. Convergence analysis of canonical genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1994, 5(1): 96 – 101.
- [10] RUIZ R, MAROTO C, ALCARAZ J. Two new robust genetic algorithms for the flowshop scheduling problem [J]. *Omega*, 2006, 34(5): 461 – 476.

作者简介:

桑红燕 (1981–), 女, 博士, 讲师, 研究方向为智能优化调度算法,

E-mail: sanghongyanlcu@163.com;

潘全科 (1971–), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能优化调度算法,

E-mail: panquanke@gmail.com.