

生物地理学算法求解柔性作业车间调度问题*

张国辉¹, 聂黎², 毛学港³

(1. 郑州航空工业管理学院 管理科学与工程学院, 郑州 450015; 2. 上海第二工业大学 机电工程学院, 上海 201209; 3. 郑州市科学技术局, 郑州 450007)

摘要: 针对柔性作业车间调度问题, 对生物地理学优化算法中的迁移操作和突变操作进行改进, 提出一种改进的生物地理学优化算法。在算法初始阶段采用混合初始化的方法, 提高初始种群质量; 对迁移操作和突变操作采用不同选择方法, 提高算法全局搜索能力, 加快收敛速度。通过编程仿真对柔性作业车间调度问题标准测试算例进行运算, 并与其他文献中的计算结果进行比较, 验证了该算法是可行和有效的, 也可用于其他车间调度问题中。

关键词: 生物地理学优化算法; 柔性作业车间调度问题; 智能优化算法; 迁移操作

中图分类号: TP301

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)04-1005-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.04.011

Solving flexible Job-Shop scheduling problem based on biogeography-based optimization algorithm

ZHANG Guo-hui¹, NIE Li², MAO Xue-gang³

(1. School of Management Science & Engineering, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450015, China; 2. School of Mechanical & Electronic Engineering, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China; 3. Zhengzhou Administration of Science & Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: For the flexible Job-Shop scheduling problem (FJSP), this paper proposed the improved biogeography-based optimization algorithm (BBO), modified the migration operator and mutation operator. In the initial stage of the algorithm, it adopted hybrid initialization approach to improve the quality of the initialization population. Then it used different methods of migration operator and mutation operator to improve the ability of global search and to accelerate the convergence speed. By programming and simulation to solve the benchmark problem of FJSP, it compared results with the other results in the literature. Computational results show that the proposed BBO algorithm is an effective and efficient approach and can also be used for other shop scheduling problems.

Key words: biogeography-based optimization (BBO) algorithm; flexible Job-Shop scheduling problem (FJSP); intelligence optimization algorithm; migration operator

0 引言

柔性作业车间调度问题(FJSP)是传统作业车间调度问题(Job-Shop scheduling problem, JSP)的扩展^[1]。在传统的作业车间调度问题中,每个工件的加工工序是确定的,每一道工序的加工机器和加工时间也是确定的。而在柔性作业车间调度问题中,每个工件的每一道工序可以在多个可选的加工机器上进行加工,并且不同的加工机器所需要的加工时间是不同的,增加了调度的灵活性,比较符合生产的实际情况。

与传统的作业车间调度问题相比,柔性作业车间调度问题减少了机器约束,增加了加工机器的不确定性。求解柔性作业车间调度问题时,不仅要对其工序进行排序,而且还面临对可选机器选择的问题,扩大了可行解的搜索范围,使调度问题更加

复杂,是比JSP更加复杂的NP-hard问题。目前,求解FJSP的常用方法有人工蜂群(artificial bee colony, ABC)算法^[2]、禁忌搜索(tabu search, TS)算法^[3]、遗传算法(genetic algorithm, GA)^[4]、差分进化(differential evolution, DE)算法^[5]以及它们之间的混合方法等。虽然在求解结果上取得了一定的效果,研究学者仍在寻求新的方法求解FJSP。

生物地理学优化(biogeography-based optimization, BBO)算法是Simon^[6]受生物地理学理论的启发,通过模拟生物种群间的迁移规律构造出的一种新型全局智能优化算法。BBO算法具有参数少、收敛速度快、搜索精度高等特点。BBO算法在经济不匹配问题^[6]、函数优化^[7]、多目标优化^[8]等连续优化方面已得到应用,取得了很好的效果;而在离散优化方面,如车间调度问题等极少应用。本文利用生物地理学优化算法,针对FJSP的特点,改进和设计更加适用的、更加有效的BBO算法来解决FJSP。

收稿日期: 2013-07-11; **修回日期:** 2013-08-24 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61203179); 国家教育部人文社会科学研究青年基金资助项目(12YJC630285)

作者简介: 张国辉(1980-),男,河南新乡人,副教授,博士,主要研究方向为车间调度、智能优化算法(zgh09@zzia.edu.cn); 聂黎(1978-),女,讲师,博士,主要研究方向为车间调度; 毛学港(1976-),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为车间调度、机械工程。

1 柔性作业车间调度问题描述

柔性作业车间调度问题比传统作业车间调度问题更加接近实际调度情况,也更加复杂,其可以用数学模型描述为: n 个工件 $\{J_1, J_2, \dots, J_n\}$,在 m 台机器 $\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$ 上加工,每个工件 J_i 包含 n_i 个工序 $\{O_{i1}, O_{i2}, \dots, O_{ini}\}$,每个工序可以在多台机器上加工。调度目标是为每个工件的每道工序选择最合适的加工机器、确定每台加工机器上各个工件工序的最佳加工顺序以及开工时间,使整个系统的某些性能指标达到最优。其中,每个工件中工序的加工顺序已知,且在每台加工机器上的加工时间确定。其他约束条件如下:

- 同一台机器同一时刻只能加工一个工件;
- 每道工序一旦开始加工不能中断;
- 不同工件之间或机器之间具有相同的优先级;
- 不同工件的工序之间没有先后约束,同一工件的工序之间有先后约束;
- 所有工件在零时刻都可以被加工;
- 所有机器在零时刻都可以开始加工。

求解柔性作业车间调度问题时包括机器选择和工序排序两个子问题。也就是说,每个工序需要先在各自的可选加工机器集中确定加工机器,然后对确定的所有加工机器上的工序进行排序。根据工序的可选加工机器集中机器数目的不同,可以分为完全柔性 FJSP 和部分柔性 FJSP。当所有工序中每一道工序的可选加工机器集都为所有的机器时,是完全柔性 FJSP;相反,如果只要存在一个工序的可选加工机器集不是所有的机器就为部分柔性 FJSP。如表 1 所示为表示 4 个工件 5 台机器的 FJSP 实例,依据上文所述,此问题为完全柔性 FJSP。

表 1 4×5 柔性作业车间调度问题实例

工件	工序	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
J_1	O_{11}	2	5	4	1	2
	O_{12}	5	4	5	7	5
	O_{13}	4	5	5	4	5
J_2	O_{21}	2	5	4	7	8
	O_{22}	5	6	9	8	5
	O_{23}	4	5	4	54	5
	O_{31}	9	8	6	7	9
J_3	O_{32}	6	1	2	5	4
	O_{33}	2	5	4	2	4
	O_{34}	4	5	2	1	5
J_4	O_{41}	1	5	2	4	12
	O_{42}	5	1	2	1	2

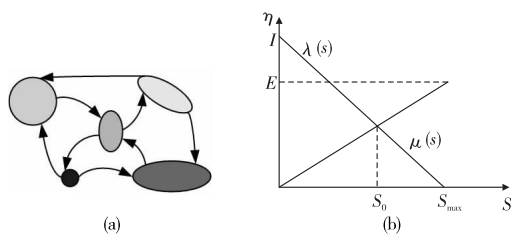
注: J_1 表示工件1, O_{12} 表示工件1的第2道工序

2 生物地理学优化算法

BBO 是以生物地理模型为基础的一种全局群体智能优化算法,主要描述了物种如何产生、灭绝以及迁移的过程。BBO 就像遗传算法或粒子群算法一样,是以种群为基础的算法,利用种群中被选取的每个个体来解决全局优化的问题。遗传算法中,每个染色体会解码成对应的适应度值进行比较,然后通过交叉、变异进行迭代优化。在 BBO 中,是以栖息地作为个体进行操作,如图 1(a)所示。每个栖息地(habitat)用栖息适宜指数(habitat suitability index, HSI)表示,与 HSI 相关的因素有

降雨量、植被多样性、地貌特征、土地面积和温度等,将其称为适宜指数变量(suitability index variables, SIV)。HSI 是影响栖息地物种分布、物种迁入和物种迁出的重要因素之一。具有较高 HSI 的栖息地,有较多的物种种类,物种数量逐渐趋于饱和,栖息地的迁入率降低、迁出率增加;相反,HSI 较低的栖息地仅能供养较少的物种,种群的迁入率提高。栖息地的 HSI 与该栖息地物种种类多样性成正比。HSI 高的栖息地表示好的个体,HSI 低的栖息地表示差的个体。

如图 1(b)所示,该模型为单个栖息地的物种迁徙模型,横坐标为栖息地种群数量 S ,纵坐标为迁移比率 η , $\lambda(s)$ 和 $\mu(s)$ 分别为种群数量的迁入率和迁出率。当种群数量为 0 时,种群的迁入率 $\mu(s)$ 为 0,种群的迁入率 $\lambda(s)$ 最大;当种群数量达到 $S_{\max}$ 时,种群的迁入率 $\lambda(s)$ 为 0,种群迁出率 $\mu(s)$ 达到最大;当种群数量为 S_0 时,迁出率和迁入率相等,此时达到动态平衡状态。



其中: S -种群数量; η -迁移比率; $\lambda(s)$ -迁入率; $\mu(s)$ -迁出率; I -迁入率函数最大值; E -迁出率函数最大值; S_0 -平衡点; $S_{\max}$ -栖息地种群最大容量

图 1 生物地理学迁移模型

3 BBO 算法求解柔性作业车间调度问题

3.1 编码与解码

编码和解码是指栖息地个体与调度方案之间的相互转换,是利用群体智能优化算法求解问题的首要问题。有效的编码是要在不产生非可行解的情况下,也能够非常容易地表达和操作完全柔性 FJSP 和部分柔性 FJSP。如前文所述,柔性作业车间调度问题由两个子问题组成,本文在设计编码时由两部分组成,即机器选择(machine selection, MS)和工序排序(operation sequence, OS),如图 2 所示。每部分的长度都为所有工件的工序数之和。

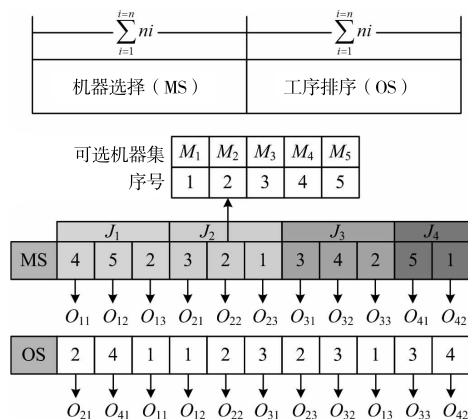


图 2 栖息地个体编码方式

1) 机器选择 每个位置用整数表示,依次按照工件及每个工件中工序的顺序进行排列,每个整数表示当前工序选择的加工机器在可选加工机器集中的序号,而不是对应的机器号。这样编码能够保证后续迁徙、突变操作中产生的解仍然是可行

解,防止冗余信息的产生。如图2所示,MS部分中,工件 J_2 第二道工序 O_{22} 的位置为2,表示选择加工机器集 $\{M_1, M_2, M_3, M_4, M_5\}$ 中第二个机器进行加工,即机器 M_2 。

2) 工序排序 每个位置用工件的工件号直接表示,从左到右依次对同一个工件号进行统计,工件号出现的顺序表示该工件工序间的加工先后顺序。工件号出现的次数等于工件的工序数。如此编码柔性很高,可满足调度规模变化、工件工序数不定等各种复杂情况。如图2所示,工序排序部分 $[2\ 4\ 1\ 1\ 2\ 3\ 2\ 3\ 1\ 3\ 4]$,第1个2表示工件 J_2 的第一道工序 O_{21} ,当再次出现2时,表示工件 J_2 的第二道工序 O_{22} ,以此类推,可以转成工序的形式为 $[O_{21}\ O_{41}\ O_{11}\ O_{12}\ O_{22}\ O_{31}\ O_{23}\ O_{32}\ O_{13}\ O_{33}\ O_{42}]$ 。

3.2 迁移操作

BBO算法利用迁移操作,使各栖息地之间的信息进行有效交换,进而能够使优良个体进行保留,也进一步扩大解空间的搜索范围。

迁移操作的流程是:a)计算每个栖息地的栖息适宜指数HSI并且进行降序排序;b)根据迁入率 $\lambda(s)$ 选择需要迁入的栖息地,再根据迁出率 $\mu(s)$ 选择需要与其交换的相邻栖息地;c)从相邻栖息地中随机选取SIV替代该栖息地中的SIV;d)计算每个栖息地的HSI。迁入率 $\lambda(s)$ 、迁出率 $\mu(s)$ 分别定义为

$$\begin{cases} \lambda(s) = I(1 - S/S_{\max}) \\ \mu(s) = ES/S_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

在利用BBO算法求解FJSP时,为适应FJSP的特点,式(1)中的 S 和 $S_{\max}$ 表示栖息地个体的栖息适宜指数HSI,也就是说, S 为每个个体的栖息适宜指数即优化目标最大完工时间, $S_{\max}$ 表示当前所有栖息地中栖息适宜指数的最大值。为简单起见,假设有 $E=I$,则 $\lambda(s) + \mu(s) = E$ 。

3.3 突变操作

当外部自然界发生了疾病或自然灾害等意外事件时,栖息地的生态环境发生变化,栖息地的栖息适宜指数HSI会发生突然的变化,导致该栖息地脱离平衡点。在BBO算法中,将这种突然改变的操作称之为突变(mutation)操作。

突变操作在进化算法中是一个核心操作,突变增加种群的多样性,提供更多的搜索目标。在BBO算法中,如何根据种群数量给出相应的突变率是非常重要的。在求解FJSP时,对突变率进行了改进。突变率的变化根据迭代次数和栖息地的栖息适宜指数进行改变:

$$m(s) = m_{\max} \times \text{curstep}/g_{\max} \times |HSI_i - \overline{HSI}|/\overline{HSI} \quad (2)$$

其中: $m_{\max}$ 为最大突变率;栖息地数量为 N ;curstep为当前迭代次数; $g_{\max}$ 为最大迭代次数; HSI_i 表示栖息地 i 的适应指数; $\overline{HSI}$ 表示所有栖息地适宜指数的平均值。

在式(2)中,第一部分是最大突变率,保证迭代一开始就会发生突变;第二部分与迭代次数有关,随着迭代次数增加发生突变概率增加;第三部分与个体HSI有关,适宜指数较高或较低的个体发生突变概率提高,防止个体陷入局部最优。突变操作的流程步骤为:

```
for i = 1 to N do
  if rand(0, 1)之间随机小数小于 m(s) then
    突变操作
  end if
end for
```

栖息地个体的突变操作分别对机器选择部分和工序排序

部分进行。如图3所示,MS部分中随机选择一个工序,工件 J_2 的工序 O_{22} 的可选加工机器中最短的加工时间为5,对应的机器为 M_1 和 M_5 ,对应序号为1和5,那么发生突变后为1。OS部分,随机选择两个工序进行互换。

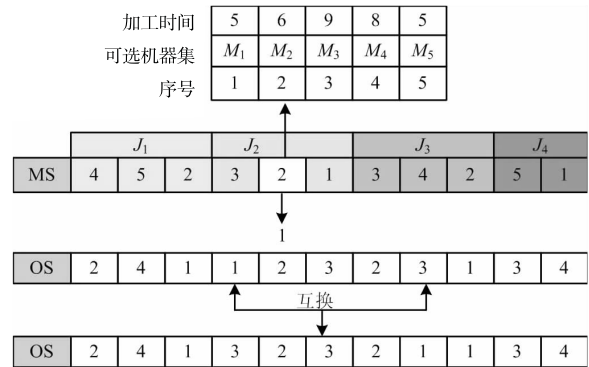


图3 栖息地个体突变操作

3.4 BBO求解FJSP流程

综上所述,基于生物地理学优化算法求解柔性作业车间调度问题的具体流程如图4所示。

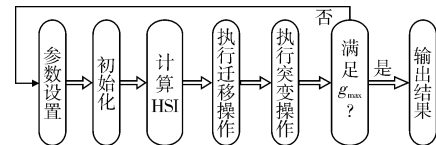


图4 BBO求解FJSP流程

a) 参数设置。设定栖息地数量 N 、最大迁入率 I 、最大迁出率 E 、最大突变率 $m_{\max}$ 、最大迭代代数 $g_{\max}$ 。

b) 栖息地个体初始化,采用文献[1]中混合方法进行种群的初始化。

c) 计算栖息地的栖息适宜指数HSI。

d) 执行迁移操作。根据迁入率 $\lambda(s)$ 和迁出率 $\mu(s)$ 对栖息地进行迁移操作,从而改变栖息地的适宜特征。

e) 根据 $m(s)$ 执行突变操作。

f) 判断迭代次数是否达到最大迭代次数 $g_{\max}$,若未达到,转到c);若达到,输出最优解或近似最优解。

4 实例仿真与结果分析

为了验证比较算法性能,使用与文献[9]相同的数据集进行测试,数据集包括10个柔性作业车间调度问题实例。10个问题由工件数10~20、机器数4~15进行组合,每组问题的加工工序数5~15个,每个问题中每道工序平均加工机器数1.43~4.10。

改进的遗传算法采用Visual C++编程,程序在环境为Intel Core2 CPU,主频2.00 GHz,内存为2.00 GB的个人电脑上运行。运行参数为:栖息地数量 $N=200$,最大迭代次数 $g_{\max}=100$, $I=E=1$,最大突变概率 $m_{\max}=0.01$,连续运行5次。

表2中给出了10个柔性作业车间调度问题实例的计算结果和其他文献中的计算结果。在表2中,第一栏是问题,第二栏 $n \times m$ 分别表示工件数和机器数, T_o 表示工序总数,Flex.表示每个工序平均加工机器数,(LB, UB)分别表示问题的最优解的下界和上界, $C_{\max}$ 表示最大完工时间的最优值, $AV(C_{\max})$ 表示最大完工时间的平均值。

从表2可以看出,对于10个测试实例,BBO算法取得了较好的测试结果。BBO算法与M&G^[10]相比较有8个问题取得

了相同的最优结果,与 GA^[11]相比较有 9 个问题取得更好或相同的结果。从 BBO 算法计算结果与其他算法比较,显示了提出的 BBO 算法求解 FJSP 的有效性。

在 10 个测试实例中,BBO 算法对于总工序数较小的小规模的 FJSP 上,都能够取得最优解,而且从平均解上看运行也比

较稳定;而在规模较大的 FJSP 上,虽然能够取得最优解,但是从平均解上看还不是很稳定。这其中主要原因还在于当规模变大时,染色体的规模也相应变大,在迁移操作和突变操作过程中,优良信息难以稳定地共享与传递。图 5 给出了 mk09 问题的最优解 $C_{\max} = 307$ 的甘特图。

表2 计算结果比较

问题	$n \times m$	T_o	Flex.	(LB,UB)	M&G ^[10]		GA ^[11]		BBO	
					$C_{\max}$	AV($C_{\max}$)	$C_{\max}$	AV($C_{\max}$)	$C_{\max}$	AV($C_{\max}$)
mk01	10 × 6	55	2.09	(36, 42)	40 *	40.0	40 *	40 *	40 *	40
mk02	10 × 6	58	4.01	(24, 32)	26 *	26.0	29	26 *	26 *	27.2
mk03	15 × 8	150	3.01	(204, 211)	204 *	204.0	204 *	204 *	204 *	204
mk04	15 × 8	90	1.91	(48, 81)	60 *	60.0	63	60 *	60 *	63.9
mk05	15 × 4	106	1.71	(168, 186)	173 *	173.0	181	173 *	173 *	173
mk06	10 × 15	150	3.27	(33, 86)	58 *	58.4	60	62	62	65.6
mk07	20 × 5	100	2.83	(133, 157)	144 *	147.0	148	144 *	144 *	145
mk08	20 × 10	225	1.43	(523)	523 *	523.0	523 *	523 *	523 *	523
mk09	20 × 10	240	2.53	(299, 369)	307 *	307.0	311	307 *	307 *	310.2
mk10	20 × 15	240	2.98	(165, 296)	198 *	199.2	212	201 *	201 *	203.6

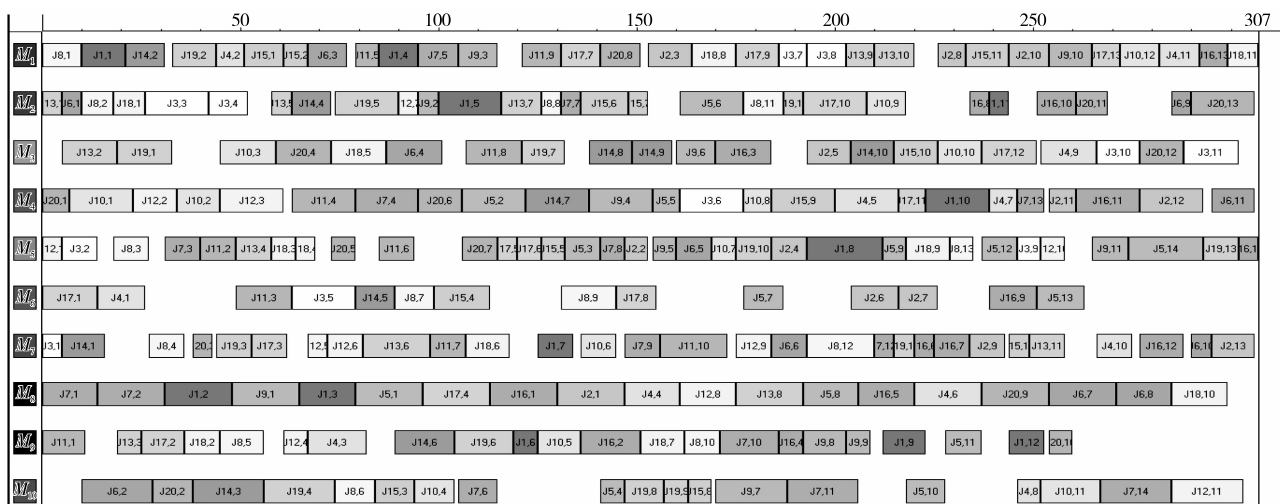


图5 mk09 甘特图

5 结束语

本文提出了一种基于生物地理学优化算法求解柔性作业车间调度问题。生物地理学优化算法是通过模拟生物种群间的迁移规律,构造出的一种新型智能优化算法。本文结合柔性作业车间调度问题特点,对迁移操作和突变操作进行了改进,提高了算法全局搜索能力。通过对柔性作业车间调度问题标准算例进行运算,并与其他文献中的计算结果进行了比较,结果表明该算法对于大部分问题能够找到最优解,验证了该算法的可行性和有效性。BBO 算法仍有许多改进之处,在今后的进一步研究中不断寻求 BBO 算法的最佳性能,可将 BBO 算法与其他智能优化算法进行结合,用于解决其他实际优化问题和复杂的工程问题。

参考文献:

- [1] 张国辉,高亮,李培根,等.改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题[J].机械工程学报,2009,45(7):145-151.
- [2] WANG Ling, ZHOU Gang, XU Ye, et al. An effective artificial bee colony algorithm for the flexible Job-Shop scheduling problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 60(1-4): 303-315.
- [3] LI Jun-qing, PAN Quan-ke, SUGANTHAN P N, et al. A hybrid ta-

bu search algorithm with an efficient neighborhood structure for the flexible Job-Shop scheduling problem [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 52(5-8): 683-697.

- [4] ZHANG Guo-hui, GAO Liang, SHI Yang. An effective genetic algorithm for the flexible Job-Shop scheduling problem [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(4): 3563-3573.
- [5] 蔡霞,李枚毅,王康,等.基于浮点型编码策略的差分多目标柔性车间调度优化[J].计算机应用研究,2013,30(4):999-1003.
- [6] SIMON D. Biogeography-based optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2008, 12(6): 702-713.
- [7] 蔡之华,龚文引, LING C X. 基于进化规划的新型生物地理学优化算法研究[J].系统工程理论与实践,2010,30(6):1106-1112.
- [8] 徐志丹,莫宏伟.生物地理信息优化算法中迁移算子的改进[J].模式识别与人工智能,2012,25(3):540-544.
- [9] BRANDIMARTE P. Routing and scheduling in a flexible Job-Shop by tabu search [J]. Annals of Operations Research, 1993, 41(3): 157-183.
- [10] MASTROLILLI M, GAMBARDILLA L M. Effective neighborhood functions for the flexible Job-Shop problem [J]. Journal of Scheduling, 2000, 3(1): 3-20.
- [11] CHEN H, IHLOW J, LEHMANN C. A genetic algorithm for flexible Job-Shop scheduling [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1999: 1120-1125.