

最优子种群遗传算法求解柔性流水车间调度问题

王金鹏, 朱洪俊, 周俊

(西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘要: 为了验证最优子种群遗传算法在解决柔性流水车间调度问题时相比于传统遗传算法的优越性, 分析了柔性流水车间调度问题的特点, 并运用一种新的编码方法和新的遗传算法求解了该问题。考虑到最优个体保护策略法对复杂问题容易使种群收敛陷入局部最优解, 为了提高精度、加快较优个体的产生并避免陷入局部最优解, 首先提出了一种合理、全面的编码方法, 并运用最优子种群遗传算法来求解柔性流水车间调度问题。最后运用实例验证了最优子种群遗传算法的有效性、优越性和编码方式的合理性。

关键词: 柔性流水车间; 最优子种群遗传算法; 最优个体保护策略法; 编码方法

中图分类号: TP301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)02-0442-03

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.02.009

Optimal sub-population genetic algorithm for flexible flow shop scheduling problem

WANG Jin-peng, ZHU Hong-jun, ZHOU Jun

(College of Manufacturing Science & Engineering, Southwest University of Science & Technology, Mianyang Sichuan 621010)

Abstract: In order to verify the optimal sub-population genetic algorithm is better than traditional genetic algorithm in solving the flexible flow shop scheduling problem, this paper analyzed the characteristics of the flexible flow shop scheduling problem, and applied a new coding method and the new genetic algorithm to solve the problem. This paper considered the protection strategy method of optimal individual made populations easy to converge to a local optimal solution in solving complex issues. In order to improve accuracy, speed up the production of better individuals and avoid falling into local optimal solution, this paper proposed a rational, comprehensive encoding method and used optimal sub-population genetic algorithm to solve flexible flow shop scheduling problem. Finally, the use of examples verifies the effectiveness and superiority of optimal sub-population genetic algorithm and the rationality of coding.

Key words: flexible flow shop scheduling; optimal sub-population genetic algorithm; protection strategies method of optimal individual; encoding method

柔性流水车间调度问题是一般 Flow-Shop 调度问题的推广,但是更加复杂,它的主要特征是在某些工序或者所有工序上存在并行机器。它具有很强的代表性,相当普遍地存在于化工、钢铁、制药等流程工业中。在柔性流水车间调度问题中,每个工件的每一道工序可以在几个可选择的机器上进行加工,并且选择不同的加工机器所需要的加工时间也是不同的。这增加了调度的灵活性,更加符合生产的实际情况,是急需解决的一类调度问题。

与一般 Flow-Shop 调度问题相比,柔性流水车间调度问题削弱了机器约束,加大了机器的不确定性,扩大了可行解的搜索范围,是更复杂的 NP-hard 问题。目前,求解柔性流水车间调度问题已经提出了分支定界法、启发式算法等,但这些算法只能解决规模较小的生产调度问题,并且在编码方法上不完善,可能产生非法解。本文在全新编码方法下运用遗传算法鲁棒性好、通用性强、计算能力优良且具有隐含并行性和全局搜索能力的特点,求解了柔性流水车间调度问题。遗传算法求解柔性流水车间调度问题的文献相对较多。王克喜等人^[1]采用构造型启发式算法和随机方法共同产生初始种群,结合了遗传算法的全局搜索性能;沈斌等人^[2]运用一种新的自适应遗传算法,

对柔性流水车间调度问题进行了改进,以提高求解效率。

本文针对柔性流水车间调度问题的特点,在新的编码方式下运用最优子种群遗传算法,从而使求解速度和求解质量都有了明显提高。

1 柔性流水车间调度问题描述

柔性流水车间调度问题可描述为:需要加工多个工件,所有工件的加工线都相同,都需要一次通过几道工序,所有工件加工工序中至少有一道工序存在着多台并行机器。需要解决的问题是确定并行机的分配情况以及同一台机器上工件的加工顺序,即 N 个工件 $\{W_1, W_2, W_3, \dots, W_N\}$, S 道工序 $\{J_1, J_2, J_3, \dots, J_S\}$, 每道工序 J_i 有 Z_i 台并行机 ($1 \leq i \leq S, 1 \leq Z_i \leq n, \sum Z_i > S$), 如图 1 所示,目标是 minimize 最大流程时间。

每一个零件的每一道工序都可以在加工该工序的任意一台并行机上加工,但是加工时间可以不同,如表 1 所示。

表 1 是一个包括 4 个工件、3 道工序、10 台机器的柔性流水车间调度问题的加工机器和加工时间表。其中, M_1, M_2, M_3, M_4 表示三个工件的第一道工序 J_1 能选择对应四台并行机器进行加工,但是对应的加工时间不同。

收稿日期: 2011-07-05; 修回日期: 2011-09-06

作者简介: 王金鹏(1985-),男,山东阳信人,硕士研究生,主要研究方向为智能调度、企业建模、机械工艺等(xin_puofeng@126.com);朱洪俊(1964-),男,四川绵阳人,教授,博士,主要研究方向为生物医学信号处理、小波分析、虚拟仪器等;周俊(1986-),男,四川人,硕士研究生,主要研究方向为越障机械机构。

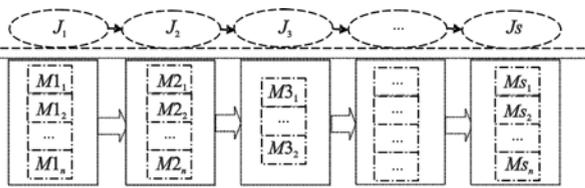


图1 柔性车间机器分布

表 1 柔性流水车间调度问题实例

工件	J_1				J_2				J_3		
	M_{11}	M_{12}	M_{13}	M_{14}	M_{21}	M_{22}	M_{23}	M_{24}	M_{31}	M_{32}	M_{33}
W_1	3	2	3	3	4	2	3	5	1	2	7
W_2	3	4	5	2	3	4	2	2	3	6	5
W_3	2	3	5	4	7	5	3	1	9	7	8
W_4	4	5	2	3	4	3	2	5	6	3	5

注: J_i 表示工序 i ; M_{i1} 表示工序 i 的第一台并行机

此外,在加工过程中还需要满足下列约束条件:a)不同工件具有相同的优先级;b)不同工件的工序没有先后约束,同一工件的工序有先后约束;c)所有工件在零时刻都可以被加工;d)同一台机器上在同一时刻只能加工一个工件;e)同一工件的同一道工序在同一时刻只能被一台机器加工;f)每个工件的每道工序一旦开始加工就不能中断。

本文只考虑一个性能指标,即最大完工时间 T_M :

$$\min T_M = \min(\max(C_k)), 1 \leq k \leq m \quad (1)$$

其中: C_k 是机器 M_{sp} 的完工时间($1 \leq p \leq S$), M_{sp} 是最后一道工序第 p 台并行机。

2 基于柔性流水车间调度问题的改进 CA 编码方法

面对柔性流水车间调度问题的求解,首先考虑的就是编码方法,编码的目的主要是使优化问题解的表现形式适合于遗传算法中的遗传运算。由于需要加工多个工件,所有工件的加工路线都相同,都需要依次通过几道工序,并且在所有工序中至少有一道工序存在着多台并行机器。当目标是最大流程时间最短时,确定并行机器的分配情况以及同一台机器上工件的加工排序问题。

基于柔性流水车间调度特点的编码方法如下:假设要加工 W 个工件,每个工件都要依次经过 S 道加工工序,每道工序的并行机器数为 $Z_i(1 \leq i \leq S)$,所有工序中至少有一道工序存在并行机,即至少有一个 Z_i 大于 1。下面构造一个 $S \times W$ 维的随机矩阵:

$$A_{s \times w} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1w} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2w} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{s1} & a_{s2} & \dots & a_{sw} \end{bmatrix}$$

其中:矩阵的元素 a_{ij} 为区间 $(1, Z_i + 1)$ 上的一个随机实数,表示工件 j 的第 i 个工序在第 $\text{int}(a_{ij})$ 台并行机上加工,函数 $\text{int}(x)$ 表示对实数 x 取整。可能会出现 $\text{int}(a_{ij}) = \text{int}(a_{ik}), j \neq k$, 表明多个工件在同一台机器上加工同一道工序。这时,假如是第一道工序($i=1$),则按照 a_{ij} 的升序来加工工件;假如不是第一道工序($i>1$),则根据每个工件的前一道工序的完成时间来确定其加工顺序,前一道工序先完成的先加工,若完成时间相同,则也按照 a_{ij} 的升序来加工。

根据前面编码矩阵和真核细胞基因结构(图 2)的特点可以确定染色体。

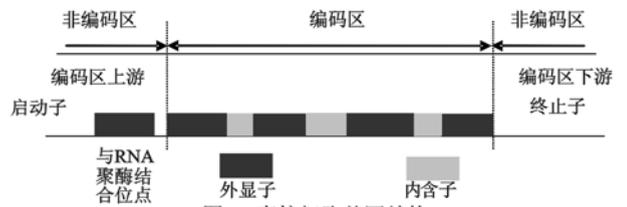


图2 真核细胞基因结构

染色体由一个编码区和两个非编码区共三段组成。其中,编码区上游包含了启动子和与 RNA 聚合酶结合位点等,即表达式(2)的 $w, S, \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & \dots & J_s \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_s \end{pmatrix}$, w 表示加工工件的数量, S 表示每个工件需要经过的工序数量, J_i 表示第 i 道工序, Z_i 表示加工第 i 道工序的并行机的数量。编码区下游包含了终止子等,即表达式(2)的 T_{mk} 。染色体的编码区由 S 个小段组成,每个小段包括 w 个基因(外显子),即由随机矩阵的每一行组成各个小段,各小段之间用标志符“0”隔开(内含子),表示不同的工序,因此编码区的长度为 $S \times W + W + 1$ 。染色体可表示为

$$\text{chromosome}_k = \left[w, S, \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & \dots & J_s \\ Z_1 & Z_2 & \dots & Z_s \end{pmatrix}, a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1w}, 0, a_{21}, \dots, a_{2n}, \dots, a_{s1}, \dots, a_{sw}, T_{mk} \right] \quad (2)$$

对于四个工件、三道工序、各工序的并行机数量分别是 4、4、3 的柔性流水车间调度问题,各机器的编号如图 3 所示。

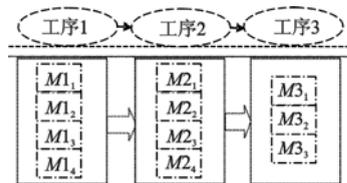


图3 柔性流水车间调度的机器编号

假设随机产生的编码矩阵并对其取整如下:

$$A = \begin{bmatrix} 1.5 & 2.8 & 2.3 & 4.1 \\ 2.1 & 3.7 & 2.4 & 3.8 \\ 1.6 & 2.5 & 3.2 & 2.9 \end{bmatrix}, \text{int}(A) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 2 & 4 \\ 2 & 3 & 2 & 3 \\ 1 & 2 & 3 & 2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据前面各并行机的编码规则,可得到各工件与机器的对应关系。矩阵的第 1 列的三个元素分别表示工件 1 的第一道工序在第一组并行机器 1 上加工,第二道工序在第二组并行机 2 上加工,第三道工序在第三组并行机 1 上加工;矩阵的第二列表示工件 2 第一道工序在第一组并行机 2 上加工……依此类推。以上得到的是机器的分配情况,从四个工件的加工路径可以看出,工件 2 和 3 的第一道工序都在第一组并行机器 2 上加工,因为 $2.3 < 2.8$,所以先加工工件 3。对于第二组并行机 2 和 3,由于它们分别要加工工件 1、3 和 2、4,此时要根据它们第一道工序的加工时间确定,如果加工完成时间相同,再比较产生数值的大小,依此类推。式(4)中 2_1 和 2_2 表示工件 2 和 3 的第一道工序都在第一组并行机器 2 上加工,先加工工件 3。

根据式(3)可以得到染色体的编码部分:

$$[1, 2_2, 2_1, 4, 0, 2, 3, 2, 3, 0, 1, 2, 3, 2]$$

根据式(2)和表 1 可得到染色体:

$$\text{chromosome}_1 = \left[4, 3, \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ 4 & 4 & 3 \end{pmatrix}, 1, 2_2, 2_1, 4, 0, 2, 3, 2, 3, 1, 2, 3, 2, 18 \right] \quad (4)$$

3 基于最优子种群遗传算法的求解方法

1) 基本思想

a) 从某代种群中选出目标函数值最优的若干数量的个体,组成该代最优子种群,并完全复制到子代。子代的最优目标函数值总不高于父代,进化时不会出现振荡现象。

b) 父代中目标函数值较差的个体与父代中最优子种群中随机选取的个体进行交叉和变异,产生子代的部分个体。

c) 在最优子种群的个体间进行交叉和变异,产生部分个体。

2) 具体操作

a) 初始群体的产生。根据上述编码方法,随机产生编码矩阵并在可行域内随机产生个体,直至初始种群中个体数达到预定的种群规模 N 。

b) 复制。计算初始种群中各个体对应的数值 T_{mk} 并比较大小,产生最优子种群,然后将最优子种群中的最优个体复制到子代。

c) 交叉操作。

(a) 将最优子种群中其余个体分别与最优个体进行交叉变异,得到对应的子代个体。

(b) 根据前面染色体的编码方式,只要满足 $a_{ij} \leq Z_i$,就可以保证个体的合法性。因此,采用分段交叉的方法,对每一小段分别进行两点或者多点交叉,每段的交叉点可以相同,也可以不同,得到对应子代个体。

(c) 在父代中非最优子种群的个体,随机取出两个个体进行交叉,得到相应的子代个体。

d) 变异操作。对父代的所有染色体 $chromosome_k$,随机抽取 $chromosome_i, i = \text{int}(\text{rand} \times N) (1 \leq i \leq N)$;同样采用分段的方式,对于第 i 个小段的第 j 个基因 a_{ij} 应有 $Z_i - a_{ij}$ 来替代。显然,这种方法可以保证个体的合法性,同时也使其变异具有随机性。

4 方针与分析

以某柔性流水车间为例,现在需要加工 12 个工件,每个工件都需要经过铣、刨、磨三道工序,现有 3 台铣床、2 台刨床、4 台磨床,每台机床的加工能力不同,具体加工时间如表 2 所示。

表 2 工件在每个机器上的加工时间

工件	J_1			J_2		J_3			
	$M1_1$	$M1_2$	$M1_3$	$M2_1$	$M2_2$	$M3_1$	$M3_2$	$M2_3$	$M3_4$
W_1	2	2	3	4	5	2	3	2	3
W_2	4	5	4	3	4	3	4	5	4
W_3	6	5	4	4	2	3	4	2	5
W_4	4	3	4	6	5	3	6	5	8
W_5	4	5	3	3	1	3	4	6	5
W_6	6	5	4	2	3	4	3	9	5
W_7	5	2	4	4	6	3	4	3	5
W_8	3	5	4	7	5	3	3	6	4
W_9	2	5	4	1	2	7	8	6	5
W_{10}	3	6	4	3	4	4	8	6	7
W_{11}	5	2	4	3	5	6	7	6	5
W_{12}	6	5	4	5	4	3	4	7	5

最优子种群遗传算法采用 Visual C++ 编程,程序在环境为 P4 CPU,主频 2.66 GHz,内存为 512 MB 的个人计算机上运行。其他运行参数:种群规模 $P_s = 30$,迭代次数 $G = 100$,交叉概率 $P_c = 0.8$,变异概率 $P_m = 0.01$ 。目标函数最小值随着种群

的进化逐渐地减小,最后收敛到极值,目标函数平均值也随着种群的进化逐渐减小,最后趋于最优值。为了比较最优子种群遗传算法和最优个体保护策略法的差异性,同样对最优个体保护策略法进行了数据仿真,如图 4 所示。

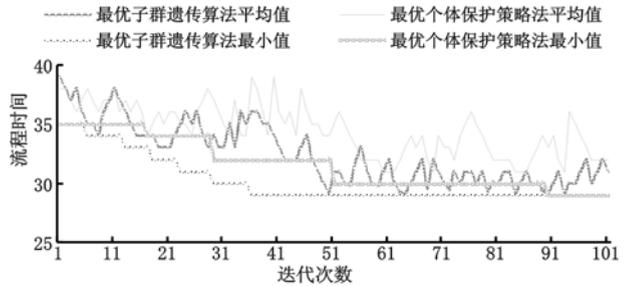


图 4 最优子种群遗传算法和最优个体保护策略法的平均值与最小值的变化曲线

为了确定最优子种群遗传算法的有效性,本文对仿真程序做了 8 次运算,记录下每次得到的目标函数的最小值,如表 3 所示。

表 3 20 次的运算结果

结果	次数																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
最优个体保护策略法最小值	30	31	31	29	31	29	31	31	30	29	30	31	31	29	31	30	29	31	30	29
最优子种群遗传算法最小值	29	29	29	29	30	29	29	29	29	29	30	29	29	29	29	30	29	29	29	29

最优个体保护策略法运行 20 次后,有 6 次达到最小值,最优子种群遗传算法运行 20 次后,有 17 次达到最小值,说明最优子种群遗传算法能够更好地避免陷入局部最优。从图 4 和表 3 可以看出,最优子种群遗传算法的鲁棒性要优于最优个体保护策略法,并且效率更高。

得到的最好染色体为

$$chromosome_{\text{最优}} = \left[12, 3, \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ 3 & 2 & 4 \end{pmatrix}, 2_3, 3, 1, 3, 2_2, 1, 3, 3, \right. \\ \left. 1, 1, 2_1, 3, 0, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 2, 2, \right. \\ \left. 2, 0, 4, 3, 4, 2, 1, 1, 1, 1, 3, 1, 4, 3, 29 \right] \quad (5)$$

得到的柔性流水车间调度问题的并行机器任务分配甘特图如图 5 所示。从图 5 可以看出,各机器的加工任务比较紧凑,加工时间基本保持连续,这样可以使最终总的加工时间最短,从而说明得到的调度结果比较合理。

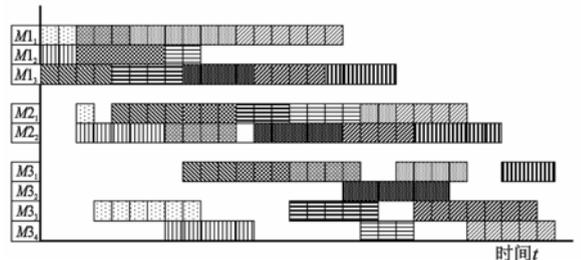


图 5 各组并行机器分配任务最佳甘特图

5 结束语

针对柔性流水车间调度问题研究出了一种新的遗传算法表示。该方法操作简单,不会产生非法染色体。(下转第 526 页)

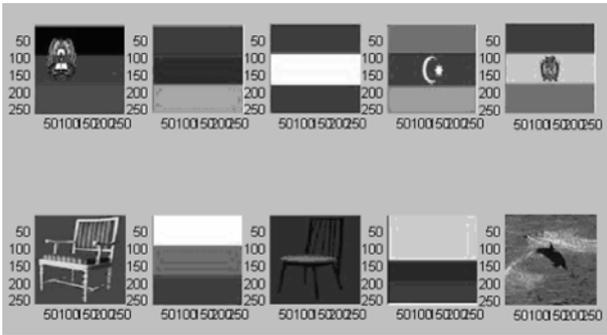


图13 基于PCA形状特征的国旗图像检索结果

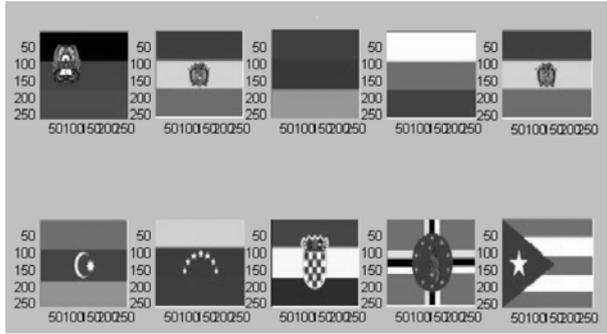


图14 基于MFA-DMFS多特征融合的国旗图像检索结果

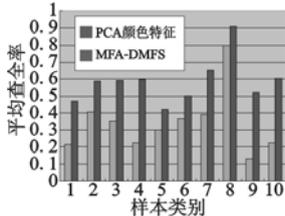


图15 颜色特征检索对比

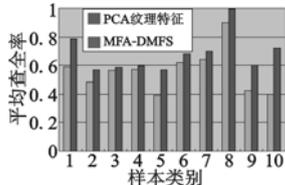


图16 纹理特征检索对比

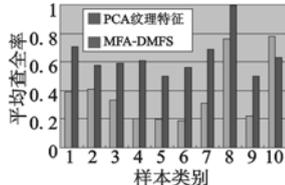


图17 形状特征检索对比

的多分类器融合算法,分两阶段产生用于构建不同基分类器的特征子集。在 UCI 标准数据集上,对 MFA-DMFS、Bagging、Boosting 方法构建的分类器融合进行了实验。实验结果表明,MFA-DMFS 的测试准确率始终优于 Bagging、Boosting,并且运行速度远高于 Bagging 和 Boosting 方法。经过分析发现,MFA-DMFS 性能较好是由于基分类器的分类性能较高以及基分类器间的差异性较大,进一步说明了构造好的多分类器融合算法,可从以下两方面着手:a)基分类器的分类准确率较高;b)基

分类器间在对数据的分类上存在较大的差异。MFA-DMFS 在图像检索中的应用,克服了很多基于文本检索等方法在图像检索中难以应用的问题,与基于 PCA 的图像检索方法比较得出以下结论:a)MFA-DMFS 特征检索比 PCA 特征检索优越,提高了检索的效率;b)MFA-DMFS 特征检索能提高检索的通用性,即对不同的图像类,利用 MFA-DMFS 特征检索时,能保持一个稳定的较高的检索效率。

参考文献:

- [1] 孙亮,韩崇昭,沈建京,等.集成特征选择的广义粗集方法与多分类器融合[J]. 自动化学报,2008,34(3):298-304.
- [2] 刘汝杰,袁保宗,唐晓芳.一种新的基于聚类的多分类器融合算法[J]. 计算机研究与发展,2001,38(10):1236-1241.
- [3] 杨庚,王安琪,陈正宇,等.一种低耗能的数据融合隐私保护算法[J]. 计算机学报,2011,34(5):792-800.
- [4] 杨艺,韩德强,韩崇昭.基于排序融合的特征选择[J]. 控制与决策,2011,26(3):397-401.
- [5] XU L, KRZYSAK A, SUEN C Y. Methods of combining multiple classifiers and their applications to handwriting recognition[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1992, 22(3):418-435.
- [6] 彭凯,秦永彬,许道云.基于逻辑回归的客户稳定度建模[J]. 计算机工程,2011,37(9):12-15.
- [7] HO T K, HULL J J, SRIHARI S N. Decision combination in multiple classifier systems[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(6):66-75.
- [8] KITTLER J. Improving recognition rates by classifier combination: a theoretical framework[J]. Progress in Handwriting Recognition World Scientific, 1997, 35(3):231-248.
- [9] DIETTERICH T. An experimental comparison of three methods for construction ensembles of decision trees: bagging, boosting, and randomization[J]. Machine Learning, 2000, 40(2):139-157.
- [10] BROWN G, WYATT J, HARRIS R, et al. Diversity creation methods: a survey and categorization[J]. Information Fusion: A special issue on diversity in multiple classifier system, 2005, 6(1):5-20.
- [11] HO T H. The random subspace method for constructing decision forests[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8):832-844.
- [12] HU Qing-hua, YU Da-ren. Diversity measure for multiple classifier systems[C]//Proc of LNCS, vol 3613. Berlin: Springer, 2005.
- [13] 冯瑞利,蔡自兴,郭璠.基于 PCA 的可变框架模型 Retinex 图像增强算法[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(1):395-397.

(上接第 444 页)能够较好地解决柔性调度问题。通过最优种群遗传算法对柔性流水线车间调度问题进行求解,并与最优个体保护策略法进行了比较,最优种群遗传算法鲁棒性强、效率高,能够更好地避免陷入局部最优。

参考文献:

- [1] 王克喜,单汨源,黄敏镁.基于改进遗传算法的流水车间调度求解方法[J]. 系统工程, 2008, 26(10):116-118.
- [2] 沈斌,周莹君,王家海.基于自适应遗传算法的流水车间作业调度[J]. 计算机工程, 2010, 36(14):201-203.
- [3] 魏文果,蒋真真,于翔,等.基于改进遗传算法的流水车间调度研究与仿真[J]. 装备制造技术, 2011(2):10-12, 15.

- [4] 何法江,王明红,汤以范.遗传算法在车间流水作业调度中的应用[J]. 计算机应用, 2010, 30(s2):282-284.
- [5] 黄席樾,张著洪,何传江,等.现代智能算法理论及应用[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [6] 唐立新,吴亚萍.混合流水车间调度的遗传下降算法[J]. 自动化学报, 2002, 28(4):637-641.
- [7] 王涛,付宜利.一种改进的遗传算法在车间调度中的应用[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(5):392-395, 420.
- [8] MASTROLILLI M, GAMBARDELLA L M. Effective neighbourhood functions for the flexible job shop problem[J]. Journal of Scheduling, 2000, 3(1):3-20.