

作业车间调度的非合作博弈模型与混合自适应遗传算法

周光辉¹, 王蕊¹, 江平宇¹, 张国海^{1,2}

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 山东理工大学轻工与农业工程学院, 255049, 山东淄博)

摘要: 采用博弈理论,建立了一种基于非合作博弈的作业车间任务调度模型. 在该任务调度模型中,将源于不同客户的制造任务映射为非合作博弈模型中的局中人,并将与制造任务包含的工序集所对应的可选加工设备映射为可行方案集,使各制造任务的加工完成时间和成本组合形成的多目标综合指标映射为收益函数,从而将对任务调度模型的求解转换为寻求非合作博弈模型的 Nash 均衡点. 通过设计的爬山搜索混合自适应遗传算法、自适应交叉和变异算子,实现了对该任务调度非合作博弈模型的 Nash 均衡点的有效求解,同时算例仿真结果也验证了所提出的调度方法的正确性.

关键词: 作业车间调度; 博弈论; Nash 均衡点; 混合自适应遗传算法

中图分类号: TH166 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0035-05

Non-Cooperation Game Model and Hybrid Adaptive Genetic Algorithm for Job-Shop Scheduling

ZHOU Guanghui¹, WANG Rui¹, JIANG Pingyu¹, ZHANG Guohai^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Light Industry & Agriculture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China)

Abstract: To meet the competition requirements of jobs submitted by different customers in job-shop scheduling, taking the maximal profit of each job as the scheduling objective, a non-cooperation game model is proposed. In this job-shop scheduling game model, the players correspond to the jobs submitted by related customers, the strategies of each job correspond to the alternative machines related to operations of this job, and the payoff of each job is defined as the weighted composite of finishing time and cost. Therefore, obtaining the optimal scheduling results is determined by the Nash equilibrium point of this non-cooperation game. To find the Nash equilibrium point efficiently, a hybrid adaptive genetic algorithm based on hill-climbing method is designed as well as the adaptive crossover operator and mutation operator. A numerical case study demonstrates the validity of the job-shop scheduling strategy.

Keywords: job-shop scheduling; game theory; Nash equilibrium point; hybrid adaptive genetic algorithm

在网络化制造、敏捷制造等先进制造模式中,源于不同客户制造任务之间的竞争(包括交货期、成本

等)已成为影响作业车间任务调度的一个关键因素,并导致了在作业车间调度中,不同任务都希望自身

利益最大化,从而形成了先进制造模式下作业车间任务调度的新需求^[1-2].

传统的作业车间任务调度以作业车间为主体,在综合考虑所有制造任务需求因素的基础上,执行调度操作,达到总体最优目标^[3-5].该方法忽略了各制造任务之间存在的竞争,因此本文采用博弈论理论^[2,6],提出了一种具有完全信息的作业车间任务调度非合作博弈模型.将源于不同客户的制造任务映射作为博弈模型中的局中人,将与制造任务包含的工序集对应的可选加工设备映射为可行方案集,把各制造任务的加工完成时间和成本组合形成的多目标综合指标映射为收益函数,因此对该任务调度模型的求解就归结为寻求非合作博弈模型的 Nash 均衡点,在该均衡点上,即可得到满足各客户制造任务利益均衡的调度结果.对于 Nash 均衡点的具体求解可通过设计爬山搜索的混合自适应遗传算法进行解算.

1 竞争驱动的作业车间任务调度描述

竞争驱动的作业车间任务调度问题可描述为:在某作业车间中,包含 m 台设备,客户提交 n 个待加工任务,每个任务包含多道工序,加工同一工序的设备有多台,工序的加工时间和加工费用随机床的性能而变化;任务的库存费用与存储时间成正比,任务的调度不仅受设备资源限制,而且受成本(包括加工成本、存储成本、和拖期惩罚成本)的影响,任务调度的目标是各任务的完成时间和成本的综合目标值最小.设定的假设条件为:①当某个任务的某道工序在某台设备上加工时,在完成之前不能被中断;②所有的任务机会均等,不存在优先权;③不同工序不能同时在某台设备上加工;④各任务的加工工序和加工时间已知,且不随加工排序的改变而改变,任务的装卸时间在加工时间内计算;⑤不考虑运输时间.

根据数学模型和假设条件,竞争驱动的作业车间任务调度目标就是寻求使得每个制造任务均能达到综合目标值最小、利益均衡的调度结果.

2 任务调度的非合作博弈模型

设任务的调度非合作博弈模型为三元组^[7],即

$$\left. \begin{aligned} G &= (N, S_i, U_i) \\ J_i &= \{O_{i,j} \mid 0 \leq j < Q_i\} \\ N &= \{J_i \mid 0 \leq i < n\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: N 为局中人(制造任务)集;任务 J_i 包含 Q_i 道工序; $O_{i,j}$ 为 J_i 的第 j 道工序; U_i 为 J_i 的收益函数;

S_i 为 J_i 的可行方案(对应于 J_i 的可选加工设备)集.令 M 为面向 N 的所有可选加工设备的集合,记为 $M = \{f_k \mid 0 \leq k < m\}$,据此得出

$$S_i \subseteq M; \quad M \equiv \prod_{i=0}^{n-1} S_i$$

在描述收益函数的表达式中,给出如下定义:① $t_{i,j}^p(f_k)$ 为 J_i 的 $O_{i,j}$ 在 f_k 上的加工时间, $f_k \in S_i$;② $t_{i,j}^s(f_k)$ 为 J_i 的 $O_{i,j}$ 在 f_k 上的开始加工时间;③ t_i^c 为 J_i 的完工时间;④ r_k^p 为 f_k 的加工费率;⑤ a_i 为 J_i 拖期的一次性惩罚金额, r_i^a 为 J_i 拖期一次性惩罚金额外的单位拖期时间惩罚费率;⑥ r_i^b 为 J_i 提前完工的单位时间库存费率;⑦ t_i^d 、 t_i^c 、 t_i^l 分别为 J_i 的交货期、提前时间、拖期时间,且有

$$t_i^e = \max(0, t_i^d - t_i^c); \quad t_i^l = \max(0, t_i^c - t_i^d) \quad (2)$$

基于以上定义,可得出 J_i 的加工成本为

$$c_{1,i} = \sum_{j=0}^{Q_i-1} r_k^p t_{i,j}^p(f_k) \quad (3)$$

J_i 的拖期惩罚费用和提前完工库存费用(假设这两项费用分别为滞后时间和提前时间的线性函数)为

$$c_{2,i} = a_i + r_i^a t_i^l + r_i^b t_i^e = a_i +$$

$$r_i^a \max(0, t_i^c - t_i^d) + r_i^b \max(0, t_i^d - t_i^c) \quad (4)$$

据此得出 J_i 的总成本为

$$\left. \begin{aligned} c_i &= c_{1,i} + c_{2,i} = \sum_{j=0}^{Q_i-1} r_k^p t_{i,j}^p(f_k) + a_i + \\ &r_i^a \max(0, t_i^c - t_i^d) + r_i^b \max(0, t_i^d - t_i^c) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

调度以各制造任务的完工时间和成本构成的多目标综合指标的优化为目标,由于时间和成本的取值处于不同的归一化的范围,所以需对时间和成本进行归一化处理.根据对生产率和成本的要求分别确定权重系数,实现多目标优化问题向单目标优化问题的转化,进而得出 J_i 的收益函数为

$$\left. \begin{aligned} U_i(s) &= \omega_1 t_i^c + \omega_2 c_i / 10 \\ \omega_1 + \omega_2 &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: ω_1 为时间权重系数; ω_2 为成本权重系数,并受如下约束

$$t_{i,j+1}^s(f_{k+1}) \geq t_{i,j}^s(f_k) + t_{i,j}^p(f_k) \quad (7)$$

$$t_{i,j}^s(f_k) \geq t_{x,y}^s(f_k) \quad (8)$$

式中: $i, x=0, \dots, n-1; j=0, \dots, Q_i-1; y=0, \dots, Q_x-1$.

基于非合作博弈模型,作业车间任务调度问题就转化为针对相关约束的 Nash 均衡点求解,即满足^[2-6]

$$U_i(s_0^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i^*, s_{i+1}^*, \dots, s_{n-1}^*) \leq U_i(s_0^*, \dots, s_{i-1}^*, s_i, s_{i+1}^*, \dots, s_{n-1}^*), \quad \forall s_i \in S_i \quad (9)$$

式中: s_i^* 为 J_i 的最优策略。

3 混合自适应遗传算法的设计

为实现对任务调度非合作博弈模型的 Nash 均衡点的有效求解,提高遗传算法的全局搜索能力,引入了爬山搜索方法,并通过设计自适应交叉概率与变异概率,提出了混合自适应遗传算法,来完成对模型的求解操作。算法的具体流程如图 1 所示。

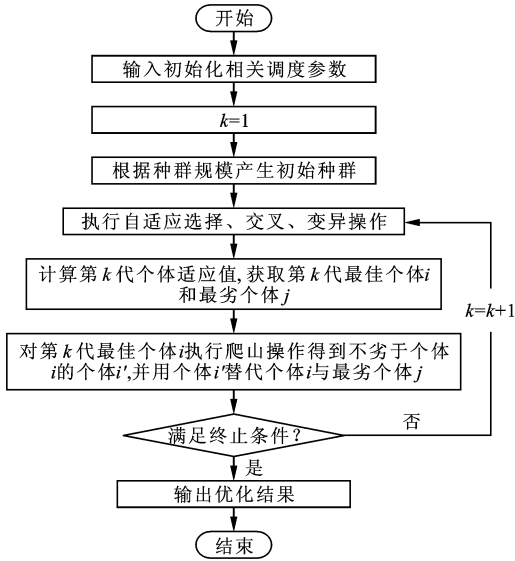


图 1 混合自适应遗传算法流程

3.1 染色体编码与适应度函数设计

针对任务调度非合作博弈模型的求解特征,染色体编码策略采用加工设备的编码方式实现,具体编码结构见文献[2]。为实现作业车间任务调度的各制造任务利益最大化,达到利益均衡目标,设计混合遗传算法的适应度函数为

$$F^k(U_0^k, U_1^k, \dots, U_{n-1}^k) = \left(\sum_{i=0}^{n-1} (U_i^k - \hat{U}_i)^2 \right)^{1/2} \quad (10)$$

$$\hat{U}_i = \min \left\{ \omega_1 t_i^c + \omega_2 \frac{\sum_{j=0}^{Q_i-1} r_k^p t_{i,j}^p(f_k) + r_i^b(t_i^d - t_i^c)}{10} \right\} \quad (11)$$

$$F^k(U_0^k, U_1^k, \dots, U_{n-1}^k) < \xi \quad (12)$$

式中: U_i^k 表示 J_i 在第 k 代时的收益值; U_i 为 J_i 的理想收益值,其值来源于假定在作业车间中仅存在 J_i 的情况下,时间成本综合收益最小时的效益值; ξ 为阈值,用来确定求解 Nash 均衡点的条件。当式

(10)满足式(12)时,认为算法已达到 Nash 均衡。

3.2 算法的进化操作

在本文提出的混合遗传算法中,进化操作由选择、交叉、变异与爬山 4 种算子组成。选择算子采用轮盘赌方法,交叉算子采用两点交叉的方案,对于变异算子,在某道工序所对应的可选加工设备集中进行选择变异。具体交叉与变异方法参看文献[2]。

爬山搜索法为一种基于邻域搜索技术的搜索方法,其局部搜索能力较强,效率较高^[7-8]。在本算法中,针对交叉与变异得到的当前种群中的最佳个体,执行爬山操作,具体的算法流程见文献[9]。

交叉概率 P_c 和变异概率 P_m 的设计合适与否对遗传算法的行为和性能起关键性作用,为有效实现对任务调度非合作博弈模型 Nash 均衡点的求解,在改进 Srinivas^[10]提出的交叉概率与变异概率计算方法的基础上,提高混合遗传算法的自适应性,给出的计算式如下

$$P_c = \begin{cases} \frac{(P_{c1} + P_{c0})}{2} + \frac{(P_{c1} - P_{c0})}{2} \cos \frac{F' - F_{avg}}{F_{max} - F_{avg}} \pi & F' \geq F_{avg} \\ \frac{(P_{c1} + P_{c2})}{2} + \frac{(P_{c1} - P_{c2})}{2} \cos \frac{F_{avg} - F'}{F_{avg} - F_{min}} \pi & F' < F_{avg} \end{cases} \quad (13)$$

$$P_m = \begin{cases} \frac{(P_{m1} + P_{m0})}{2} + \frac{(P_{m1} - P_{m0})}{2} \cos \frac{F - F_{avg}}{F_{max} - F_{avg}} \pi & F \geq F_{avg} \\ \frac{(P_{m1} + P_{m2})}{2} + \frac{(P_{m1} - P_{m2})}{2} \cos \frac{F_{avg} - F}{F_{avg} - F_{min}} \pi & F < F_{avg} \end{cases} \quad (14)$$

式中: F_{max} 为种群中的最大适应度值; F_{min} 为种群中的最小适应度值; F_{avg} 为种群的平均适应度值; F' 为交叉的 2 个个体中较大的适应度值; F 为要变异的个体的适应度值。当 $F' = F_{max}$ 时, $P_c = P_{c0}$, 适应度值最大的个体以最大的交叉概率被淘汰; 当 $F' = F_{min}$ 时, $P_c = P_{c2}$, 适应度值最小的个体将以最小交叉概率得到保护并进入下一代。同理,由式(14)可推导得到变异操作的类似结论。

4 实例仿真与分析

为验证所提出的作业车间任务调度非合作博弈

模型与混合自适应遗传算法的正确性,设计如下实例进行仿真、验证与分析.

4.1 初始条件与参数

在算例中,假定有 8 个客户向作业车间提交了 8 个不同的制造任务,并且每个任务由 8 道工序构成,同时该作业车间包含 8 台机床,每个客户都希望所提交的任务获得的利益最高(完成时间与成本的综合值尽可能小),并且尽量使其他任务所得利益最低.任务相关的工艺信息、交货期、费率等参数如表 1~表 4 所示.

表 1 制造任务的基本工艺信息

任务 编号	工序编号							
	0	1	2	3	4	5	6	7
J_0	(1,3)	(2,4)	(6,8)	(5,7)	(1,5)	(2,6)	(3,7)	(5,8)
	[4,6]	[6,5]	[5,7]	[4,7]	[3,4]	[6,5]	[3,4]	[5,6]
J_1	(2,4)	(6,8)	(1,3)	(5,7)	(8,3)	(1,5)	(3,4)	(2,6)
	[4,5]	[4,3]	[5,4]	[5,4]	[3,5]	[5,4]	[4,5]	[7,8]
J_2	(7,8)	(6)	(3,4)	(1)	(6)	(5,7)	(1,8)	(2,3)
	[7,6]	[5]	[4,6]	[5]	[6]	[6,4]	[6,5]	[7,8]
J_3	(4,5)	(1,6)	(6,7)	(3,8)	(1,4)	(5,8)	(6,7)	(2,3)
	[3,5]	[4,4]	[6,4]	[5,5]	[3,5]	[4,6]	[4,3]	[4,5]
J_4	(3,4)	(7,8)	(3,4)	(1,6)	(2,8)	(3,7)	(4,5)	(1,6)
	[3,4]	[5,5]	[4,3]	[6,7]	[5,6]	[5,6]	[3,4]	[4,5]
J_5	(1,6)	(4,5)	(3,8)	(2,7)	(1,3)	(2,4)	(5,7)	(1,6)
	[5,4]	[6,7]	[4,3]	[5,5]	[4,3]	[5,4]	[4,3]	[7,6]
J_6	(2,6)	(1,8)	(4,5)	(3,7)	(1,2)	(6,7)	(3,8)	(4,5)
	[3,4]	[5,4]	[5,6]	[4,6]	[3,4]	[5,4]	[4,5]	[6,5]
J_7	(5,6)	(3,4)	(7,8)	(1,2)	(3,7)	(1,4)	(5,8)	(2,6)
	[3,4]	[5,6]	[4,5]	[6,5]	[3,4]	[5,4]	[5,6]	[6,7]

注:圆括弧里的数字表示某任务的某道工序的可选加工设备;方括弧里的数字表示可选设备加工该工序所需的时间,单位为 min.

表 2 制造任务交货期与成本的相关参数

任务编号	t_i^d/min	$r_i^b/\text{元}\cdot\text{min}^{-1}$	$a_i/\text{元}$	$r_i^a/\text{元}\cdot\text{min}^{-1}$
J_0	43	10	35	15
J_1	48	10	35	15
J_2	60	10	35	15
J_3	45	10	30	15
J_4	45	10	30	15
J_5	45	10	30	15
J_6	50	10	30	15
J_7	54	10	35	15

表 3 加工设备工时费率

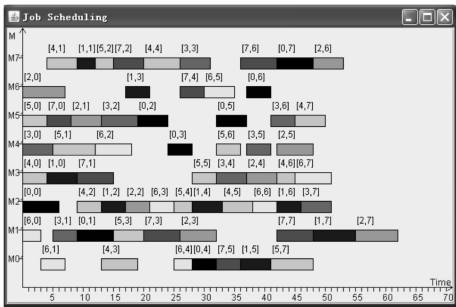
设备编号	f_0	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
$r_i^k/\text{元}\cdot\text{min}^{-1}$	18	12	15	11	16	21	14	16

表 4 混合自适应遗传算法的初始输入参数

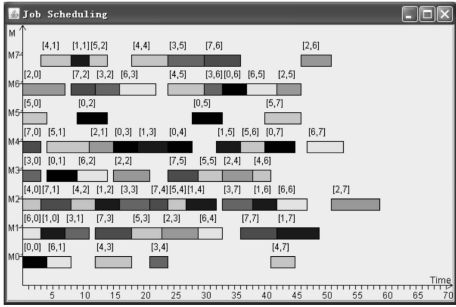
P_{c0}	P_{c1}	P_{c2}	P_{m0}	P_{m1}	P_{m2}
0.85	0.8	0.6	0.025	0.02	0.01
w_1	w_2	ξ	种群规模	最大迭代次数	
0.5	0.5	1.0	30	500	

4.2 仿真结果与分析

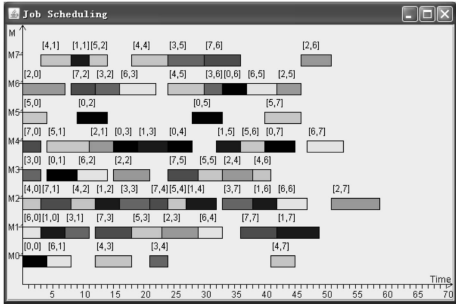
仿真结果如图 2 所示,图中 $[i,j]$ 中的 i 表示制造任务的编号, j 表示关联该任务的工序编号.算法在第 100 代时达到 Nash 均衡点,第 200 代时的调度结果与第 100 代时的相同,这表明了当算法一旦达到 Nash 均衡点后,每个制造任务均认为其收益已达到最优而不愿打破该均衡状态,同时也表明了所提出的任务调度非合作博弈模型和混合自适应遗传算法的有效性.



(a) 第 1 代



(b) 第 100 代(Nash 均衡点)



(c) 第 200 代

图 2 制造任务的调度甘特图

表 5 列出了不同代数时各制造任务选择的方案集(各任务工序所对应的加工设备集). 表 6 对第 1 代和第 100 代(Nash 均衡点)的任务调度结果进行了对比,可以看出,当任务调度达到 Nash 均衡点

后,除任务 J_6 的综合收益值有所增大(从 54.45 增至 58)外,其余 7 个任务的综合收益值均有不同程度的减小,各任务的收益达到相对的均衡状态,这与 Nash 均衡点的思想是相符的.

表 5 第 1、100 和 200 代制造任务的方案集

迭代代数	方案集(设备集)
1	$[(3,2,6,5,1,6,7,8,),(4,8,3,7,3,1,3,2),(7,6,3,2,4,5,8,2)(5,2,6,8,4,5,6,3),(4,8,3,1,8,3,4,6),(6,5,8,2,3,4,5,1),(2,1,5,3,1,7,3,4),(6,4,8,2,7,1,8,2)]$
100	$[(1,4,6,5,5,6,7,5),(2,8,3,5,3,5,3,2),(7,5,4,2,4,7,8,3),(4,2,7,3,1,8,7,3),(3,8,3,1,8,7,4,1),(6,5,8,2,3,4,5,6),(2,1,4,7,2,7,3,5),(5,3,7,2,3,4,8,2)]$
200	$[(1,4,6,5,5,6,7,5),(2,8,3,5,3,5,3,2),(7,5,4,2,4,7,8,3),(4,2,7,3,1,8,7,3),(3,8,3,1,8,7,4,1),(6,5,8,2,3,4,5,6),(2,1,4,7,2,7,3,5),(5,3,7,2,3,4,8,2)]$

表 6 第 1 代与第 100 代调度结果的对比

任务编号	完成时间/min		提前时间/min		库存成本/元		拖期时间/ min		拖期成本/元		总成本/元		综合收益	
	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代	第 1 代	第 100 代
J_0	48	45	0	0	0	0	5	2	110	65	762	676	62.10	56.30
J_1	55	49	0	0	0	0	7	1	140	50	698	579	62.40	53.45
J_2	62	59	0	2	0	10	2	0	65	0	825	686	72.25	63.80
J_3	51	38	0	7	0	70	6	0	120	0	792	639	65.10	50.95
J_4	50	45	0	0	0	0	5	0	105	0	726	673	61.30	56.15
J_5	48	46	0	0	0	0	3	1	75	45	678	668	57.90	56.40
J_6	51	53	0	0	0	0	1	3	45	75	579	630	54.45	58.00
J_7	48	42	6	12	60	120	0	0	0	0	723	749	60.15	58.45

5 结束语

本文针对竞争驱动的作业车间任务调度问题展开了研究,主要完成的工作包括:在分析先进制造模式下作业车间任务调度的竞争性新需求的基础上,基于博弈论思想,提出并建立了一种作业车间任务调度的非合作博弈模型,将作业车间的任务调度问题转化为寻求该博弈模型的 Nash 均衡点问题. 为实现对该非合作博弈模型的 Nash 均衡点的有效求解,提出了一种混合自适应遗传算法,给出了自适应交叉与变异算子、适应度函数及收敛条件. 采用相应的调度实例对上述理论、方法与模型进行了仿真分析,实例仿真结果表明,采用博弈论构建的任务调度非合作博弈模型与设计的混合自适应遗传算法能够很

好地解决竞争驱动的作业车间任务调度问题.

参考文献:

[1] JIANG Pingyu, ZHOU Guanghui, ZHAO Gang, et al. E-2-MES: an e-service-driven networked manufacturing platform for extended enterprises [J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2007, 20(2/3): 127-142.

[2] ZHOU Guanghui, JIANG Pingyu, ZHANG Guohai. Game theoretical framework for process plan decision of jobs in networked manufacturing [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Piscataway, NJ USA: IEEE, 2007: 1868-1873.

[3] SAKAWA M, MORI T. An efficient genetic algorithm

- for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy due date [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, 36(2): 325-341.
- [4] MATTFELD D C, BIERWIRTH C. An efficient genetic algorithm for job shop scheduling with tardiness objectives [J]. *European Journal of Operational Research*, 2004, 155(3): 616-630.
- [5] YUN Y S. Genetic algorithm with fuzzy logic controller for preemptive and non-preemptive job-shop scheduling problems [J]. *Computers & Industry Engineering*, 2002, 43(3): 623-644.
- [6] KIM B H. A new game-theoretic framework for maintenance strategy analysis [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 698-706.
- [7] ALI R Y. An effective hybrid immune-hill climbing optimization approach for solving design and manufacturing optimization problems in industry [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(6): 2773-2780.
- [8] 汪西原, 汪西莉. 启发式搜索策略(爬山法)的改进与实现 [J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 27(1): 58-65.
- WANG Xiyuan, WANG Xili. Improve and implement a heuristic search technique-hill-climbing [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 1999, 27(1): 58-65.
- [9] 周光辉, 张国海, 王蕊, 等. 采用实时生产信息的单元制造任务动态调度方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2009, 43(11): 56-60.
- ZHOU Guanghui, ZHANG Guohai, WANG Rui, et al. Dynamic job scheduling method based on real-time production information for manufacturing cell [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(11): 56-60.
- [10] SRINIVAS M, PATNAIK L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(4): 656-667.
- (编辑 管咏梅)