

不确定条件下的中间存储时间有限的 Flow Shop 提前/拖期调度问题

徐震浩, 顾幸生

(华东理工大学 自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 生产调度是企业生产过程中一个重要的部分, 在实际生产调度过程中, 会存在各种各样的不确定性. 本文针对不确定条件下的具有不同交货期窗口的 Flow Shop 提前/拖期调度问题, 考虑了产品中间存储时间的有限性, 用模糊数学的方法来表示产品的不确定处理时间, 在模糊规划理论的基础上建立了相应的调度模型. 并借鉴生物免疫系统的概念和机理, 提出了解决此类特殊问题的模糊免疫调度算法. 仿真结果表明了该模型的有效性和算法的较好的收敛效率.

关键字: 提前/拖期调度; 不确定性; α -截集; 中间储罐

中图分类号: O224 **文献标识码:** A

Earliness and tardiness flow shop scheduling problems under uncertainty with finite intermediate storage

XU Zhen-hao, GU Xing-sheng

(Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: Production scheduling is an important part in the factories, and there are various uncertainties in the production scheduling of industrial processes in reality. The earliness/tardiness Flow Shop scheduling problems with different due windows are discussed in the paper, which is typical of the finite intermediate storage time of products. The uncertain processing time is dealt with by fuzzy mathematics, and a scheduling model is then established based on the fuzzy programming theory. Furthermore, a fuzzy scheduling algorithm is proposed by analogy with the concept and the principle of biological immune system. Finally, the effectiveness of the fuzzy scheduling model and the high efficiency of the proposed method are demonstrated by simulation results.

Key words: earliness /tardiness scheduling; uncertainty; α -level set; intermediate storage

1 引言 (Introduction)

企业的优化生产调度对增强企业的竞争力、提高企业的经济效益和社会效益将会产生重要的作用^[1]. 近年来, 随着准时制 (JIT) 的发展, 以准时生产为目标的提前/拖期 (earliness/tardiness, E/T) 生产调度问题已成为一个活跃的研究领域. 在实际的生产中, 产品提前或拖期生产都不能使企业满足客户的最低要求, 提前生产要占用流动资金, 增加产品存储费用, 而拖期生产要向客户支付违约罚款. 因此, 企业实施准时化生产所追求的目标是, 在计划期内充分利用有效的制造能力资源, 合理地制定主生产计划, 尽可能极大化客户的满意水平, 使提前/拖

期惩罚最小, 从而提高企业声誉, 增大企业生产利润的获得.

在实际的生产情况中, 有些调度参数很难用精确的数值来表示, 往往是不确定的, 并且在企业的生产过程和调度过程中会存在各种各样的不确定因素. 因此, 在提前/拖期调度问题中考虑产品的处理时间不确定性的问题是符合生产实际情况的.

目前, 对于不确定的因素主要采用随机变量和模糊数学进行描述, 但在实际生产中, 很难对一些不确定的因素做出概率分布上的估计, 而只能凭经验或历史数据进行大致的区间估算, 因此采用模糊数学来描述生产调度中的不确定因素变得十分重要^[2].

2 不确定条件下的中间存储时间有限的提前/拖期调度问题的数学模型 (Model of E/T problem with finite intermediate storage under uncertainty)

2.1 问题描述 (Problem statement)

需要生产的产品批量集 $N(i = 1, 2, \dots, n)$ 、生产设备单元集 $M(j = 1, 2, \dots, m)$ 、产品的处理时间 $\tilde{T}_{ij}$ 包括装配时间、传输时间、加工时间及清洗时间等是变化的不确定量, 采用模糊数表示. 其中: i 表示产品批号, j 表示生产单元号; 定义 $\tilde{S}_{ij}$ 和 $\tilde{C}_{ij}$ 分别表示产品 i 在设备单元 j 上的开始时间和完成时间, $\tilde{c}_i$ 为产品 i 的完工时间, 即 $\tilde{c}_i = \tilde{C}_{im}$; MST_{ij} 为第 i 批产品在生产单元 j 和 $j+1$ 间的中间储罐存储策略; 产品 i 的交货期窗口为 $[e_i, t_i]$, 其中 e_i, t_i 分别表示产品 i 的最早和最晚交货期, 当 $\tilde{c}_i < e_i$, 称产品 i 提前, 而 $\tilde{c}_i > t_i$, 则产品 i 拖期. 如果产品在其交货期窗口内完工, 则没有惩罚; 否则不论产品提前或者拖期, 都将对产品进行惩罚; 产品 i 的提前惩罚权重 h_i , 拖期惩罚权重 w_i , 一般地 $h_i \leq w_i$.

2.2 数学模型 (Mathematical model)

则处理时间不确定条件下的中间存储时间有限的 Flow Shop 提前/拖期调度问题的数学模型如下:

$$\begin{aligned} \min \{ \tilde{G} &= \sum_{i=1}^n [h_i \max(0, e_i - \tilde{c}_i) + w_i \max(0, \tilde{c}_i - t_i)] \} \\ \text{s. t. } \tilde{S}_{ij} &\geq \tilde{S}_{(i-1)j} + \tilde{T}_{(i-1)j}, & (1) \\ \tilde{S}_{ij} &\geq \tilde{S}_{(i-1)(j+1)} + \tilde{T}_{(i-1)(j+1)} - MST_{ij} - \tilde{T}_{ij}, & (2) \\ \tilde{S}_{ij} &\geq \tilde{S}_{(i-1)(j+1)} - \tilde{T}_{ij}. & (3) \end{aligned}$$

2.3 模型转换 (Model transformation)

由模糊数学理论可知, 对于模糊数学模型的求解有多种方法, 本文采用以 α -截集为基础的求解方法. α 也可称为置信水平, 因此, 在给定的置信水平下, 原模糊数学模型可以转化为下面的两个规划问题.

置信水平 α 下可能的最优规划:

$$\begin{aligned} \min \{ G_{\alpha}^L &= \sum_{i=1}^n [h_i \max(0, e_i - c_{i\alpha}^L) + w_i \max(0, c_{i\alpha}^L - t_i)] \} \\ \text{s. t. } S_{ij\alpha}^L &\geq S_{(i-1)j\alpha}^L + T_{(i-1)j\alpha}^L, \\ S_{ij\alpha}^L &\geq S_{(i-1)(j+1)\alpha}^L + T_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^L, \\ S_{ij\alpha}^L &\geq S_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - T_{ij\alpha}^L. & (4) \end{aligned}$$

置信水平 α 下可能的最坏规划:

$$\begin{aligned} \min \{ G_{\alpha}^R &= \sum_{i=1}^n [h_i \max(0, e_i - c_{i\alpha}^R) + w_i \max(0, c_{i\alpha}^R - t_i)] \} \\ \text{s. t. } S_{ij\alpha}^R &\geq S_{(i-1)j\alpha}^R + T_{(i-1)j\alpha}^R, \\ S_{ij\alpha}^R &\geq S_{(i-1)(j+1)\alpha}^R + T_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^R, \\ S_{ij\alpha}^R &\geq S_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - T_{ij\alpha}^R. & (5) \end{aligned}$$

因此, 规划(4)和(5)为原模糊问题的最优目标值 $\tilde{G}$ 提供了一个 α -截集的闭区间 $[G_{\alpha}^L, G_{\alpha}^R]$, 它使决策者获得问题的最优目标值在一定可能性水平下的变化范围.

本文采用三角模糊数 $\tilde{x} = (x_1, x_2, x_3)$ 来表示处理时间的不确定性, 由于模糊加法和极大运算具有可分解性, 因此

1) 当 $i = 1, j = 1$ 时:

$$\begin{cases} S_{ij\alpha}^L = 0, C_{ij\alpha}^L = S_{ij\alpha}^L + T_{ij\alpha}^L = T_{ij\alpha}^L, \\ S_{ij\alpha}^R = 0, C_{ij\alpha}^R = S_{ij\alpha}^R + T_{ij\alpha}^R = T_{ij\alpha}^R; \end{cases} \quad (6)$$

2) 当 $i = 1, j > 1$ 时:

$$\begin{cases} S_{ij\alpha}^L = C_{i(j-1)\alpha}^L, \\ S_{ij\alpha}^R = C_{i(j-1)\alpha}^R, \\ C_{ij\alpha}^L = S_{ij\alpha}^L + T_{ij\alpha}^L = C_{i(j-1)\alpha}^L + T_{ij\alpha}^L, \\ C_{ij\alpha}^R = S_{ij\alpha}^R + T_{ij\alpha}^R = C_{i(j-1)\alpha}^R + T_{ij\alpha}^R; \end{cases} \quad (7)$$

3) 当 $i > 1, j = 1$ 时:

$$\begin{cases} S_{ij\alpha}^L = \max(C_{(i-1)j\alpha}^L, C_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^L, S_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - T_{ij\alpha}^L), \\ C_{ij\alpha}^L = S_{ij\alpha}^L + T_{ij\alpha}^L; \\ S_{ij\alpha}^R = \max(C_{(i-1)j\alpha}^R, C_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^R, T_{ij\alpha}^R, S_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - T_{ij\alpha}^R), \\ C_{ij\alpha}^R = S_{ij\alpha}^R + T_{ij\alpha}^R; \end{cases} \quad (8)$$

4) 当 $i > 1, j > 1$ 时:

$$\begin{cases} S_{ij\alpha}^L = \max(C_{(i-1)j\alpha}^L, C_{i(j-1)\alpha}^L, C_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^L, S_{(i-1)(j+1)\alpha}^L - T_{ij\alpha}^L), \\ C_{ij\alpha}^L = S_{ij\alpha}^L + T_{ij\alpha}^L; \\ S_{ij\alpha}^R = \max(C_{(i-1)j\alpha}^R, C_{i(j-1)\alpha}^R, C_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - MST_{ij} - T_{ij\alpha}^R, T_{ij\alpha}^R, S_{(i-1)(j+1)\alpha}^R - T_{ij\alpha}^R), \\ C_{ij\alpha}^R = S_{ij\alpha}^R + T_{ij\alpha}^R; \end{cases} \quad (9)$$

5) 产品 i 的完成时间:

$$c_{i\alpha}^L = C_{im\alpha}^L, c_{i\alpha}^R = C_{im\alpha}^R; \quad (10)$$

6) 则得到 α 水平下的目标函数:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{ G_{\alpha}^L = \sum_{i=1}^n [h_i \max(0, e_i - c_{i_{\alpha}}^L) + \\ w_i \max(0, c_{i_{\alpha}}^L - t_i)] \}, \\ \min \{ G_{\alpha}^R = \sum_{i=1}^n [h_i \max(0, e_i - c_{i_{\alpha}}^R) + \\ w_i \max(0, c_{i_{\alpha}}^R - t_i)] \}. \end{array} \right. \quad (11)$$

因此,通过所求的 $G_{\alpha}^L, G_{\alpha}^R$, 就可以得到目标函数的最优值的 α -截集的闭区间 $[G_{\alpha}^L, G_{\alpha}^R]$. 下面结合模糊免疫调度算法求解.

3 模糊免疫调度算法 (Fuzzy scheduling algorithm based on the immune algorithm)

自然免疫系统是复杂的自适应系统, 有效地使用多种机制防御外部病原体, 是高度分布式、并行、具有复杂信息处理特征的生物系统^[3, 4]. 在此借鉴生物免疫系统的特点和机理, 提出解决不确定性调度问题的免疫算法 (immune algorithm, IA), 模拟生物抗体浓度自适应调节的过程, 即根据抗体的浓度自适应地调节搜索方向和解群的分布, 从而大大提高算法克服局部收敛的能力^[5, 6].

1) 编码方案. Flow Shop 调度问题是一类有序问题 (sequencing problem or ordering problem), 即目标函数值不仅与表示解的数值有关, 而且与其在编码字符串中的位置有关. 所以, 采用字符编码方法. 根据 Flow Shop 的生产特性, 以每个字符代表一个加工产品, 编码中每个产品只能出现一次, 字符在编码中出现的顺序就是加工产品的加工顺序;

2) 产生初始抗体. 如果记忆细胞库中的抗体数为空, 则随机产生初始解抗体群 P_N ; 否则, 从记忆细胞库中提取记忆抗体 P_M , 和随机产生的抗体群 P_r , 共同组成初始解抗体群 P_N ;

3) 对初始解抗体群中的抗体进行评价. 抗体与抗原、以及抗体之间的匹配程度是用亲和力描述的, 亲和力通常有两种形式, 即抗体和抗原之间的亲和力 ax_v , 以及抗体与抗体之间的亲和力 ay_{vw} .

抗体与抗原之间的亲和力

$$ax_v = \frac{1}{1 + \text{opt}_v}, \quad v \in \mathbb{I}. \quad (12)$$

其中 opt_v 表示抗原和抗体之间的结合度, 本文采用总的提前 / 拖期惩罚值来表示 opt_v , 即 $\text{opt}_v = \min(\sum [h_i \max(0, e_i - \bar{c}_i) + w_i \max(0, \bar{c}_i - t_i)])$.

在此采用信息熵理论来表示抗体之间的亲和力, 和群体中抗体的多样性. 如果群体中有 N 个抗体, 每个抗体由 M 位基因组成, 每位可供选择的字母表中共有 S 个字母: $k_1, k_2, \dots, k_s$, 则这 N 个抗体

的信息熵为

$$H(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M H_j(N). \quad (13)$$

其中: $H_j(N) = \sum_{i=1}^s (-P_{ij} \log P_{ij})$, $H_j(N)$ 为 N 个抗体中第 j 位的信息熵, P_{ij} 为 N 个抗体中第 j 位是字母 k_i 的概率. 如果在位置 j 上所有抗体的等位基因都相同, 那么 $H_j(N)$ 等于零.

则抗体与抗体之间的亲和力

$$ay_{vw} = \frac{1}{1 + H(2)}, \quad v, w \in \mathbb{I}. \quad (14)$$

抗体与抗体之间的亲和力表示两个抗体之间的相似程度, 当抗体相似时, 亲和力比较大, 反之, 则比较小;

4) 记忆单元更新. 在上一步的基础上, 将与抗原的亲和力较大的抗体加入到记忆单元中. 由于记忆细胞库中的抗体包含着上一代中与抗原亲和力较大的信息, 而每代解群体中的抗体是由记忆库中的记忆抗体和更新后产生的新抗体组成的, 所以采取整体更新的策略更新记忆库后, 记忆库中的记忆抗体包含了当代得到的最好解的信息;

5) 抗体的促进和抑制. 根据抗体群中抗体的亲和力, 计算抗体的浓度和期望繁殖率, 期望繁殖率低的抗体将受到抑制. 抗体的浓度, 表示抗体在群体中所占的比率, 而抗体的繁殖率则表示它在整个群体中的选择率.

抗体的浓度:

$$R_v = \frac{1}{N} \sum_{w=1}^N K_{vw}, \quad v, w \in \mathbb{I}. \quad (15)$$

式中 $K_{vw} = \begin{cases} 1, & ay_{vw} \geq T, \\ 0, & ay_{vw} < T, \end{cases}$ T 表示阈值.

抗体的期望繁殖率:

$$E_v = \frac{ax_v}{R_v}, \quad v \in \mathbb{I}. \quad (16)$$

将抗体按期望繁殖率排序, 抽取繁殖率较大的抗体组成辅助抗体群 P_s . 从式(16)中可以看出, 与抗原亲和力大的抗体和低密度的抗体生存机率较大. 由于亲和力大的抗体得到促进, 而高密度的抗体受到抑制, 所以体现了控制机制的多样性;

6) 解群体的更新. 在辅助群体 P_s 中, 采用轮盘赌的选择策略来选择进行交叉和变异的抗体, 使种群中的抗体都有被选择的机会, 采用交叉和变异运算后, 得到更新后的抗体群 P_r , 将其与记忆抗体群 P_M 合并作为新的解群体 P_N , 即 $P_N = P_r \cup P_M$;

7) 如果达到终止条件, 则结束运算; 否则, 转向

步骤3 执行.

4 仿真试验 (Simulations)

在仿真试验中,以 10 个加工产品 (Job)、5 个处理单元 (Unit) 的调度问题为例. 表 1 是产品的不确定处理时间,用模糊数表示,表中括号内的 3 个数分别表示了可能的最小加工时间、最可能加工时间和可能的最大加工时间;表 2 是加工产品在生产单元之间的中间储罐最大存储时间 MST_{ij} ,其中 Btwn 表示不同的生产单元之间的中间储罐;表 3 是不同产品对应的交货期窗口及提前/拖期惩罚权重.

表 1 产品的模糊处理时间
Table 1 Fuzzy processing time of jobs

产品	处理单元				
	1	2	3	4	5
1	(115 135 139)	(19 23 26)	(92 111 126)	(32 33 38)	(36 38 43)
2	(81 87 103)	(66 80 93)	(82 87 106)	(77 92 95)	(35 42 44)
3	(77 79 86)	(24 25 30)	(59 67 81)	(116 137 151)	(113 137 146)
4	(8 10 14)	(117 123 138)	(10 11 16)	(68 79 82)	(97 111 129)
5	(72 88 92)	(19 21 26)	(11 12 18)	(27 33 39)	(2 6 7)
6	(118 143 149)	(92 99 111)	(82 95 100)	(86 101 116)	(15 17 20)
7	(25 27 28)	(5 8 10)	(66 70 84)	(46 51 53)	(51 60 64)
8	(23 29 32)	(119 134 135)	(58 69 81)	(101 104 126)	(113 117 143)
9	(99 104 111)	(72 78 95)	(45 56 68)	(1 3 6)	(105 109 119)
10	(110 130 154)	(114 130 134)	(31 35 41)	(14 18 19)	(48 56 63)

表 2 中间储罐的最大存储时间 MST_{ij}
Table 2 Maximal time of the intermediate storage MST_{ij} s

Btwn	Job									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-2	20	10	7	16	9	13	18	23	11	13
2-3	18	6	12	21	19	20	6	5	10	24
3-4	11	15	16	17	23	1	12	18	11	23
4-5	17	15	14	4	2	6	18	4	6	7

表 3 产品的交货期窗口及提前/拖期惩罚权重
Table 3 Due-date windows and penalty weights of products

产品	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
交货期窗口	[350,450]	[300,400]	[850,1000]	[550,650]	[700,800]	[250,300]	[300,350]	[400,500]	[350,450]	[500,600]
提前/拖期惩罚权重	2, 3	2, 3	3, 4	5, 5	4, 4	2, 2	4, 4	3, 4	3, 5	2, 3

图 1,2 是当 $\alpha = 0.7$ 时的演化曲线. 图中:横坐标表示进化代数,纵坐标表示得到的惩罚值,上面的曲线 avg-axN 是解群体的亲和力平均值倒数曲线,表示每次演化计算中解群体中所有抗体与抗原亲和力平均值的倒数;中间曲线 avg-mem 是记忆抗体目标平均值曲线,对应的是每次迭代运算时记忆库中所有记忆抗体个体目标值的平均值;下面的曲线 pop-opt 表示解群体中的最优值曲线,表示每代解群体中的最优目标值.

令 $\alpha = 0$,步长为 0.1,逐次求解的详细结果见表 4. 由表中可以看出,当置信水平 α 的值增加时,对应的目标值则因可行域的减小而趋于集中,即目

标值可能所在的区间不断减小,对于相同的 α 值,可能会得到相同的目标值,但会得到不同的排序结果,能给决策者提供较大的决策空间.

图 3、图 4 是当 $\alpha = 0.7$ 时,最优规划和最坏规划得到的 Job 序列的甘特图,其中横坐标是单位时间 t ,纵坐标表示处理单元 (U),最优的目标值是 327.2,最差的目标值是 526.

为了检验模型和算法的性能,在其他参数不变的情况下,置信水平取不同的值,经过多次的仿真,分析所得到的目标函数的情况,所得的结果如表 5,6 所示,其中 Mean 表示的得到的目标值的平均值.

从表中可以看出,随着置信水平 α 的增大,目标

函数值越来越小,即总的提前/拖期惩罚值越来越小,调度结果越好,但在 α 变化的各种情况下,算法

都表现出了良好的收敛性,说明了算法的可行性和有效性.

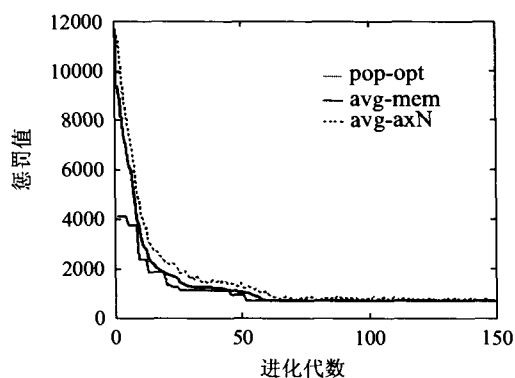


图1 最优规划演化曲线($\alpha=0.7$)

Fig. 1 Graph of the optimal programming($\alpha=0.7$)

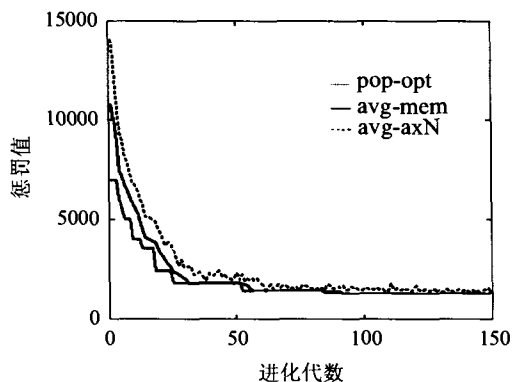


图2 最坏规划演化曲线($\alpha=0.7$)

Fig. 2 Graph of the worst programming($\alpha=0.7$)

表4 α 不同情况下的调度结果

Table 4 Scheduling results α

α	最优规则		最坏规则		α	最优规则		最坏规则	
	Job 序列	目标函数	Job 序列	目标函数		Job 序列	目标函数	Job 序列	目标函数
0	74110386925	857	74138692105	2236	0.6	74138610925	395.8	74138610925	653
0.1	47138610925	588.8	74138610925	1922.4	0.7	74138610925	327.2	74138610925	526
0.2	74132861095	934.4	74138610925	1602.8	0.8	74138610925	292.8	74138610925	399.8
0.3	71438610925	708.9	74138610925	1313	0.9	74138610925	269.2	74138610925	307.3
0.4	74138610925	603.2	74138610925	1059	1	74138610925	266	74138610925	266
0.5	74138610925	492	74138610925	831					

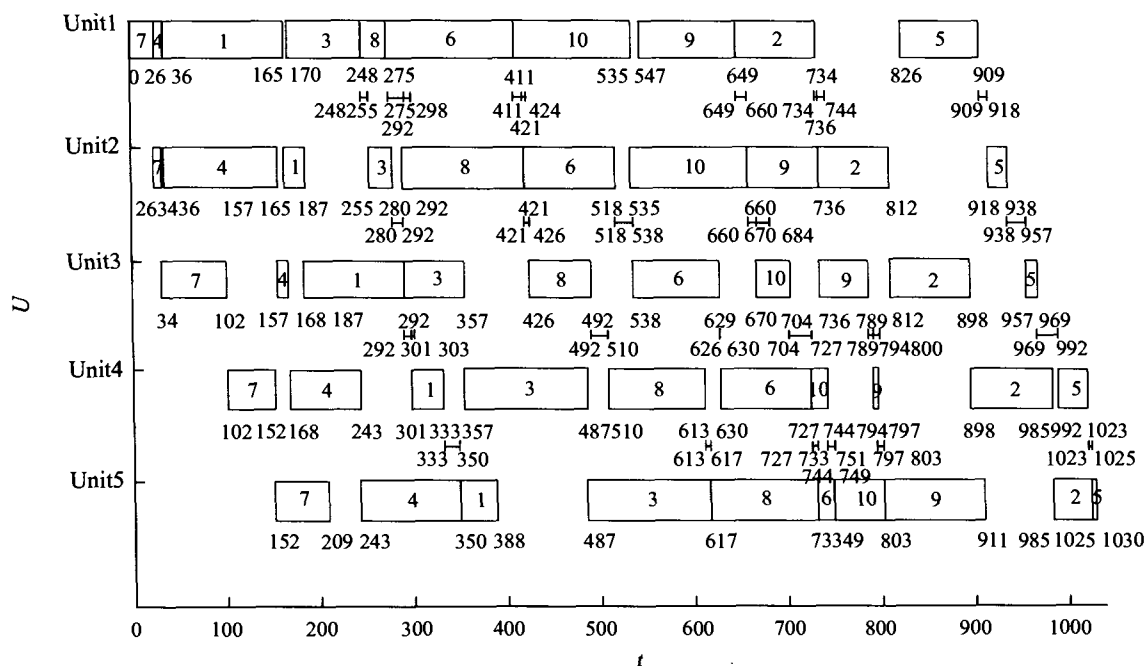


图3 调度结果的 Gantt 图(最优规划 $\alpha=0.7$)

Fig. 3 Gantt of scheduling result(the optimal programming $\alpha=0.7$)

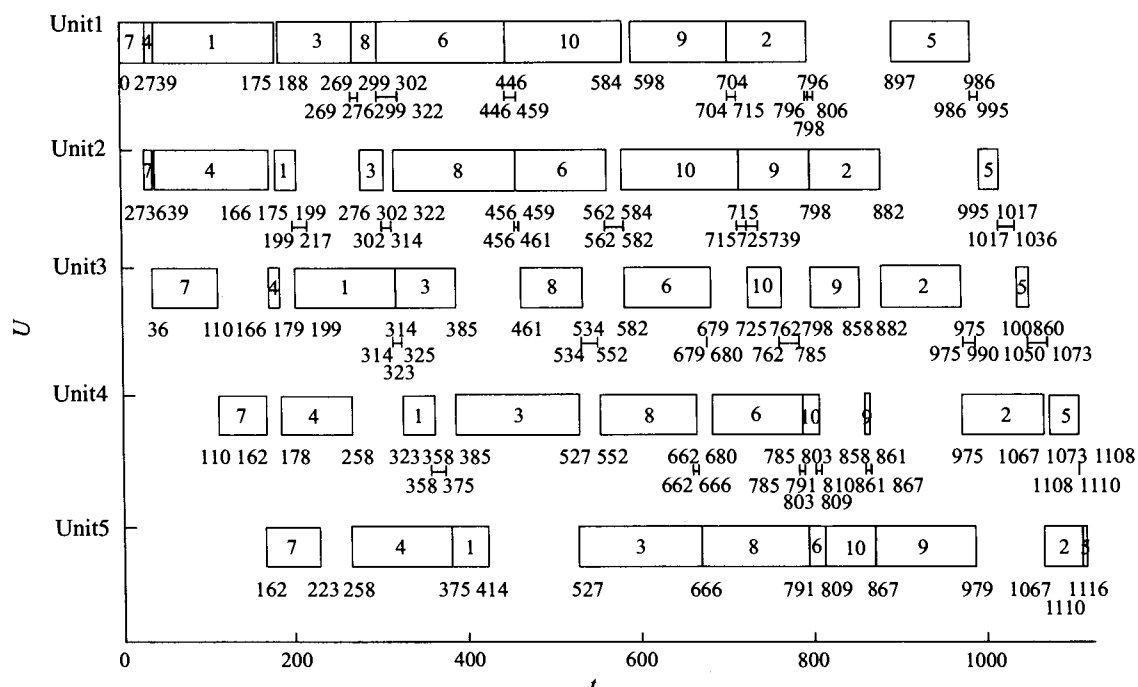


图 4 调度结果的 Gantt 图(最坏规划 $\alpha=0.7$)
Fig. 4 Gantt of scheduling result(the worst programming $\alpha=0.7$)

表 5 α 不同情况下的最优规划的目标函数
Table 5 Objective of the optimal programming at different α

α	N										Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	588.8	588.8	588.8	919.1	894.9	588.8	588.8	1052.4	588.8	919.1	731.83
0.3	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9	708.9
0.5	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0	492.0
0.7	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2	327.2
0.9	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2	269.2

表 6 α 不同情况下的最坏规划的目标函数
Table 6 Objective of the worst programming at different α

α	N										Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.1	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4	1922.4
0.3	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0	1313.0
0.5	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0	831.0
0.7	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0	526.0
0.9	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3	307.3

5 结论(Conclusion)

针对实际生产过程中广泛存在的不确定因素, 本文对不确定条件下的中间存储时间有限的, 且具有不同交货期窗口的 Flow Shop 提前/拖期调度问

题进行了研究, 在模糊截集的基础上建立了带有提前/拖期的中间存储时间有限的 Flow Shop 调度模型, 以产品的提前/拖期惩罚值作为目标函数进行优化. 并借鉴免疫系统的概念与理论, 提出模糊免疫调

度算法对模型进行求解,利用免疫记忆的机理,在算法中不断地整体更新记忆库和利用记忆细胞构造解群体. 仿真结果表明了该模型和算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] 顾幸生. 不确定条件下的生产调度[J]. 华东理工大学学报, 2000, 26(5): 441 ~ 446.
(GU Xingsheng. The production scheduling under uncertainty [J]. *J of East China University of Science & Technology*, 2000, 26(5): 441 ~ 446.)
- [2] CLAY R L, GROSSMANN I E. A desegregation algorithm for the optimization of stochastic planning models [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1997, 21(7): 751 ~ 774.
- [3] CHUN J S, JANG H K, HAHN S Y. A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other heuristic algorithms [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1998, 34(5): 2972 ~ 2975.
- [4] DASGUPTA D, NII A O. Immunity-based systems: A survey [C]// *Proc of IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics*. Orlando: IEEE Press, 1997, 1: 869 ~ 874.
- [5] XU Z H, GU X S. A hybrid method for scheduling problems of flow shop [C]// *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2004, 4: 2928 ~ 2932.
- [6] 徐震浩, 顾幸生. 用模糊截集解决不确定条件下的具有中间存储时间有限的 flow shop 调度问题[C]// 第五届全球智能控制与自动化大会. 杭州: 电力与电气工程师协会, 2004, 4: 2923 ~ 2927.
(XU Zhenhao, GU Xingsheng. Flow shop scheduling problems under uncertainty with finite intermediate storage based on fuzzy theory [C]// *Proc of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou: the Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2004, 4: 2923 ~ 2927.)

作者简介:

徐震浩 (1976—), 女, 博士, 主要研究方向为流程工业中的生产计划与调度, E-mail: lyshxzh@sina.com;

顾幸生 (1960—), 男, 博士, 华东理工大学教授, 博士生导师, 1993年7月毕业于华东理工大学自动控制与电子工程系, 获工学博士学位, 现任华东理工大学信息科学与工程学院副院长, 中国运筹学会不确定系统分会理事, 上海市系统工程学会理事, 上海市自动化学会自动化理论专业委员会副主任, 上海市化学化工学会化工自动化专业委员会副主任. 主要研究领域为控制理论与应用、复杂工业过程建模、控制与优化、生产计划与调度、故障检测与诊断等, 已发表学术论文 100 多篇, E-mail: xsgu@ecust.edu.cn.