不确定条件下不同交货期窗口的 Job Shop 调度①

李　平, 顾幸生
(华东理工大学自动化研究所, 上海 200237)

摘要: 研究了具有不同交货期窗口的 Job Shop 的提前/ 拖期调度问题,并考虑了处理时间的不确定性,采用三角模糊数表示处理时间的不确定性,提出了基于遗传算法的求解算法. 仿真实验验证了算法的有效性.

关键词: Job Shop 生产调度; 不确定性; 提前/ 拖期; 不同交货期窗口; 遗传算法
中图分类号: O224　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1007 - 9807(2004)02 - 0022 - 05

0　引　言

现代准时生产制(JIT)要求工件按时加工,准时交货. 因此提前/ 拖期调度问题已引起人们的极大关注,并取得了许多研究成果[1,2]. 提前/ 拖期调度问题规定不论任务的完成时间早于还是晚于交货期都将受到惩罚. 交货期窗口的调度问题是提前/ 拖期调度问题的更一般表述. 但是以往对交货期调度的研究大都没有考虑生产中其他的不确定性因素,例如产品处理时间的不确定,产品处理量的不确定,突发事件的不确定等[3,4].

本文在研究不同工件带有不同交货期窗口的 Job Shop 调度问题时,综合考虑了产品处理时间的不确定性,因为在生产实际中这种不确定性是很普遍的. 采用三角模糊数描述处理时间的不确定性,并应用遗传算法进行求解. 从实际生产和理论研究两方面看都有着广阔的应用和发展前景.

1　问题描述

1.1　模糊处理时间的表达

采用三角模糊数描述不确定的处理时间. 三角模糊数 $\tilde{r}$,记为 (r^L, r^M, r^U),其隶属度函数为

$$\mu(r) = \begin{cases} \dfrac{r - r^L}{r^M - r^L} & r^L \le r \le r^M \\ \dfrac{r^U - r}{r^U - r^M} & r^M < r \le r^U \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \tag{1}$$

隶属度函数如图 1 所示.

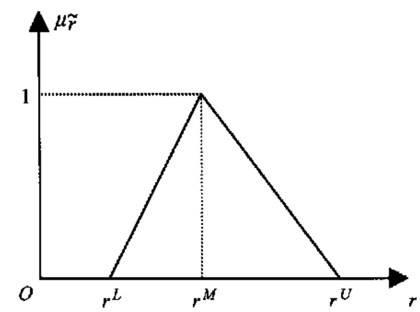

图 1　隶属度函数
Fig. 1 Membership function

定义两个模糊数 $\tilde{r} = (r^L, r^M, r^U)$ 和 $\tilde{t} = (t^L, t^M, t^U)$ 的加法(+)运算为[5]

$$\tilde{r} + \tilde{t} = (r^L + t^L, r^M + t^M, r^U + t^U) \tag{2}$$

极大(max)运算为

$$\max\{\tilde{r}, \tilde{t}\} = \tilde{r}(\vee)\tilde{t} = (r^L \vee t^L, r^M \vee t^M, r^U \vee t^U) \tag{3}$$

1.2　描述调度问题的变量

J ——工件集合, $J = \{1, 2, \cdots, n\}$, 即工件总数为 n 个;

① 收稿日期: 2002 - 11 - 25; 修订日期: 2003 - 04 - 01.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60274043); 国家高技术研究发展计划资助项目(2002AA412610).
作者简介: 李　平(1977 —), 女, 山东济南人, 硕士.

M ——生产单元集合, $M = \{1, 2, \cdots, m\}$, 即处理单元有 m 台;

S_i ——工件 i 的加工顺序集, $S_i = \{s_{i1}, s_{i2}, \cdots, s_{ip_i}\}$, $i \in J$, 其中, $s_{ik} \in M$, 表示工件 i 的第 k 道工序所需的生产单元, p_i 为工件 i 的工序总数;

O_j ——生产单元 j 上进行的操作顺序集, $O_j = \{o_{j1}, o_{j2}, \cdots, o_{jq_j}\}$, $j \in M$, 其中 $o_{jk} \in J$, 表示生产单元 j 上第 k 步操作的工件, q_j 为生产单元 j 上的操作工件总数;

$\widetilde{P}_{ij}$ ——工件 i 在生产单元 j 上的处理时间, 是在一定区间变化的不确定量, 用三角模糊数表示;

$\widetilde{c}_i$ ——工件 i 的完成时间, 由于各工序处理时间的不确定性, $\widetilde{c}_i$ 也是模糊的;

$\widetilde{S}_{i_k j_l}$ ——工件 i 在生产单元 j 上的操作开始时间, 下标 i_k 表示工件 i 的第 k 道工序, j_l 表示处理单元 j 的第 l 步操作;

$\widetilde{T}_{i_k j_l}$ ——工件 i 在生产单元 j 上的完成时间, 下标 i_k 表示工件 i 的第 k 道工序, j_l 表示处理单元 j 的第 l 步操作;

$[e_i, t_i]$ ——工件 i 的交货期窗口, 其中 e_i、t_i 分别为最早和最晚交货期;

h_i ——工件 i 的提前惩罚权重;

w_i ——工件 i 的拖期惩罚权重, 一般 $h_i \leq \omega_i$, 表示拖期将受到更严厉的惩罚.

1.3　数学描述

本文考虑的是一种简化的 Job Shop 问题, 即设备间具有无限中间储罐的情形.

1) 工件 i 在生产单元 j 上的开始时间

a) $i \neq 1, j \neq 1$

$$\widetilde{S}_{i_k j_l} = \max\left\{\widetilde{T}_{i_{k-1} s_{ik-1}}, \widetilde{T}_{O_{jk-1} j_{l-1}}\right\} \quad i \in J, \quad j \in M, k = 1, 2, \cdots, p_i, l = 1, 2, \cdots, q_j \tag{4}$$

其中: $\widetilde{T}_{i_{k-1} s_{ik-1}}$ 为工件 i 的第 $k-1$ 道工序的完成时间; $\widetilde{T}_{o_{jk-1} j_{l-1}}$ 为处理单元 j 上第 $l-1$ 步操作的完成时间. 开始时间取这两者的最大值保证了工件 i 的第 k 道工序必须在第 $k-1$ 道工序完成后才能开始, 同时保证了某一时刻某一个处理单元只能加工一个工件.

b) $k-1, l>1$

$$\widetilde{S}_{i_k j_l} = \widetilde{T}_{o_{jk-1} j_{l-1}} \quad i \in J, j \in M \tag{5}$$

c) $l = 1, k > 1$

$$\widetilde{S}_{i_k j_l} = \widetilde{T}_{i_{k-1} s_{ik-1}} \quad i \in J, j \in M \tag{6}$$

2) 每个生产操作的完成时间

$$\widetilde{T}_{i_k j_l} = \widetilde{S}_{i_k j_l} + \widetilde{P}_{ij} \quad i \in J, j \in M, k = 1, 2, \cdots, p_i, \quad l = 1, 2, \cdots, q_j \tag{7}$$

3) 每个工件的完成时间

$$\widetilde{c}_i = \max\left\{\widetilde{T}_{i_{pi} j_{qj}}\right\} \quad \forall i \in J, j \in M \tag{8}$$

4) 工件的提前/拖期惩罚值

$$\widetilde{g}_i(\widetilde{c}_i) = h_i \max(0, e_i - \widetilde{c}_i) + \omega_i \max(0, \widetilde{c}_i - t_i) \tag{9}$$

定义调度目标函数

$$\widetilde{G} = \widetilde{g}_1(\widetilde{c}_1) + \widetilde{g}_2(\widetilde{c}_2) + \cdots + \widetilde{g}_n(\widetilde{c}_n) \tag{10}$$

根据前面模糊数加法运算的定义, 目标函数值 $\widetilde{G}$ 同样为三角模糊数, $\widetilde{G} = (G^L, G^M, G^U)$.

最优调度问题就是求一工件最优加工顺序使目标函数 $\widetilde{G}$ 最小, 即调度的目标是使企业由于产品的提前和拖期受到的惩罚最小.

1.4　模型转化

以上建立了该问题的模糊规划模型, 对于模糊规划常用的解决思路是运用某种数学和实际应用中可行的变换方法将其化为清晰的规划问题求解. 本文引用"中间值最大隶属度"的思想[6] 和 Zimmermann 算法[7], 将非线性 Job Shop 模糊规划模型转化为清晰的单目标非线性规划模型.

$$\max\{\Gamma\alpha^L + (1-\Gamma)\alpha^U\} \tag{11}$$

$$\text{s.t.}\quad \alpha^U \geq \mu_i \geq \alpha^L \quad i = 1, 3 \tag{12}$$

$$\mu_2 \geq \alpha^U \tag{13}$$

$$\alpha^L, \alpha^U \in [0, 1] \tag{14}$$

Zimmermann 算法采用极大-极小运算, 是一种无补的运算. 在决策过程中, 对所有因素的重视程度是一样的, 决策结果无法反映隶属度非最小因素的变化. 设定原模型的 G^L、G^M 和 G^U 分别为最悲观、最可能和最乐观值. 在实际决策过程中, 往往对于这三个目标的要求是不一样的. 因此要对它进行改进, 引入补与算子 Γ, Γ 由决策者给定, 代表决策者在积极与消极决策间的倾向, Γ 值越小, 决策越积极; 反之, 则决策越消极. 采用补与算子解决了单纯极大-极小运算无补的缺点, 使决策结果既反映最悲观情况下的满意度, 又能反映非

悲观情况下的满意度的变化,是一种综合考虑不同情况下最优决策的算子.

同时将三者分别最优化即可构成清晰的多目标线性规划模型,并由此可确定最悲观值、最可能值和最乐观值三者的满意隶属度函数 $\mu_i(i=1,2,3)$,用 $\mu_i(i=1,2,3)$ 中的最小值确定 α^L,$\mu_i(i=1,2,3)$ 中的最大值确定 α^U. 由于在实际决策过程中,对于决策者而言,常常希望在综合考虑最坏和最好等各种情况后,使结果在最可能的情况下尽量最好,也即所得的结果在最可能的情况下具有最高的满意程度,所以在上面的模型中,令最可能情况下的满意隶属度 μ_2 取隶属函数中的最大值,满意隶属度的最小值则在最悲观和最乐观这两种极端情况下产生. 这样,既可以综合考虑三种情况下的隶属度,又能保证所得到的结果在实际中有较好的适应性. 这样就将最初的模糊规划转化为清晰的单目标非线性规划,最后,将 $\Gamma\alpha^L+(1-\Gamma)\alpha^U$ 作为目标函数,即遗传算法中的适应度函数,运用遗传算法求解.

2 算法

遗传算法将问题求解表示成"染色体"适者生存过程,通过"染色体"群一代代不断地进化,最终求得问题最优解(或满意解).

本文采用的遗传算法要点:

1) 染色体编码　采用"按段编码"的编码方法. 用自然码表示工件序号,染色体总长度为总的工序数. 按照处理单元对染色体进行分段,每一段代表一个处理单元,每段染色体由该处理单元上所要处理的工件序号的自然码排列组成,基因的位置代表该处理单元上工件的处理顺序.

2) 初始化　根据工件和工序数随机产生初始种群,以这些染色体作为初始点进行迭代.

3) 适应性函数　适应性函数表示个体在生存竞争中的生存能力,是演化过程中进行选择的唯一依据,本文选取转化后的清晰单目标 $\Gamma\alpha^L+(1-\Gamma)\alpha^U$ 作为适应性函数.

4) 选择策略　采用轮盘式选择策略.

5) 遗传算子　遗传算法的遗传算子主要包括繁殖、交叉和变异 3 个基本算子.

繁殖　将选中的个体原样复制到子代.

交叉　因为是按照处理单元分段编码的,所以交叉也按段进行. 设有 m 个处理单元,则染色体分了 m 段,随机产生一个 $[1,m-1]$ 之间的整数 k,以 k 为界限将父代分为两段,则每个子代个体由一个父代个体的 1 到 k 段和另一个父代个体的 $k+1$ 到 m 段两部分构成,例如,$m=4$,$k=2$ 的情况

parent 1: 1 3 2　2 4 | 4 3 1　3 1 2

parent 2: 3 1 2　4 2 | 3 1 4　1 2 3

经过交叉

child 1: 1 3 2　2 4　3 1 4　1 2 3

child 2: 3 1 2　4 2　4 3 1　3 1 2

变异　根据按段编码的方式,用文献[8]的方法,在"均匀变异"的基础上增加了"倒位"操作,即随机选择染色体的一段,将该段中的自然码按照与原来相反的顺序重新放置,其它各段则根据均匀变异的原理随机产生新的序列代替原来的序列,由此产生新的个体."均匀变异"使变异具有较大的自由度,增加的"倒位"操作产生较大的变异程度.

6) 停止准则　达到预先设定的最大迭代次数或某代算法的种群适应度平均值等于该代最优的运算结果则停止.

3 仿真及分析

上述算法用 MATLAB 语言编程,并对 5 个加工工件、5 个处理单元的 Job Shop 调度问题仿真. 本文讨论的 Job Shop 调度中所有的工件不一定都要经过所有的处理单元,并且,每个工件的加工路径是固定不变的,但所有工件的加工路径并不一定相同.

表 1　模糊 Job Shop 调度问题加工工件处理时间表

Table 1　Fuzzy processing time of Job Shop scheduling problem

工件	机器 1	机器 2	机器 3	机器 4	机器 5
1	(28,30,32)		(48,50,54)	(28,30,32)	(37,40,43)
2		(68,70,73)	(24,25,26)	(32,35,38)	
3	(32,35,38)	(48,50,54)	(37,40,43)	(53,55,58)	(68,70,73)
4	(73,75,79)	(48,50,54)	(32,35,38)	(9,10,12)	(28,30,32)
5	(19,20,23)	(24,25,26)	(43,45,47)	(56,60,63)	

表 1 为采用三角模糊数表示的工件在相应处理单元上的模糊处理时间. 其中空白处表示该工件不经过该处理单元进行加工. 表 2 为加工工件的加工序列,其中自然数代表处理单元的序号. 表 3 给出了工件对应的交货期窗口和提前/拖期权重.

表 2　工件的加工序列

Table 2　Processing sequence of fuzzy Job Shop problem

工件	加工序列
Job 1	1,3,5,4
Job 2	2,3,4
Job 3	3,1,2,5,4
Job 4	1,2,3,4,5
Job 5	3,1,4,2

表 3　交货期窗口及提前/拖期权重

Table 3　Due windows and Earliness/Tardiness penalties

工件	1	2	3	4	5
交货期窗口	350,400	350,400	300,350	300,350	250,300
提前/拖期权重	3,3	4,5	2,3	2,3	5,5

采用上述算法,取 $\Gamma = 0.1$,种群数 *Popsize* = 80,进化代数 *Gennum* = 120,对问题进行 10 次仿真,取最好结果(见图 2). 图 2 中,曲线为每代最优值演化曲线. 随算法的不断演化,目标函数值越来越趋于最优并趋向稳定,说明了算法的收敛性.

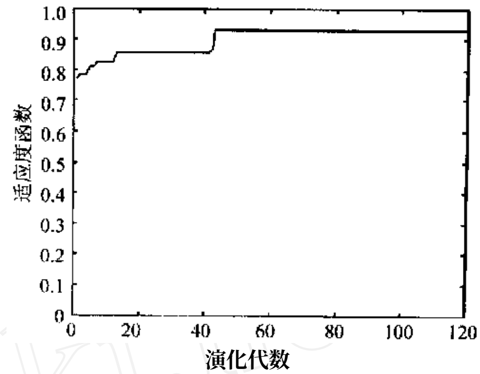

图 2　最优值演化曲线

Fig. 2 Graph of optimal results

Job Shop 调度问题的完成时间与所有处理单元上操作的顺序有关,不能由起始序列唯一确定,因而 Job Shop 与 Flow Shop 相比更加复杂,也更好地反映了工业过程的生产实际. 所以,确定工件交货期的难度也较大,人们希望在保证工件正常完工的前提下,交货期越早越好,而交货期过早,容易导致很多工件无法完工. 所以工件的交货期和完工时间是密切相连的,要做好两者的权衡. 表 4 为不同交货期下分别计算 10 次,比较平均最优目标值和平均完成时间即平均 *m αtesp αt*. 可见,如果交货期较早,则最优目标值较小,而完成时间较短,调度越积极;如果交货期较晚,则最优目标值较大,而完成时间较长,调度越消极. 证明了交货期对调度结果的影响.

表 4　不同交货期的比较

Table 4　Comparison of different due date

工件 1	工件 2	工件 3	工件 4	工件 5	平均最优值	平均 *m αtesp αt*
350,400	350,400	300,350	300,350	250,300	0.910 3	(405,428,457)
400,450	350,400	350,400	300,350	300,350	0.916 2	(429,452,483)
450,500	400,450	350,400	300,350	350,400	0.920 3	(447,473,505)

如图 3 所示,定义求得的优化目标函数值落入满意区间 $[x - \Delta, x + \Delta]$ 内的频率为该算法在该区间的落入频率 δ. 改变区间并分别进行 100 次仿真,比较在不同区间内优化目标函数值落入满意区间的频率情况,运行结果如表 5 所示,区间越趋向最优,落入频率就越小;相反,区间越远离最优,落入频率越大. 区间越大,频率越大;区间越小,频率越小. 另外,结果显示,在比较满意的区间内,优化目标函数值落入满意区间的频率已经相当高了,可见,该算法具有较高的寻优能力.

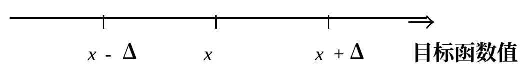

图 3　优化目标函数值落入满意区间的频率定义

Fig. 3 Definition of the frequency of optimal object function result in satisfied interval

表 5　优化目标函数值落入满意区间的频率

Table 5　Frequency of optimal object function result in satisfied interval

x	Δ	满意区间	落入频率/%
0.900 0	0.099 9	[0.800 1,0.999 9]	97
	0.059 9	[0.840 1,0.959 9]	96
	0.039 9	[0.860 1,0.939 9]	94
	0.029 9	[0.870 1,0.929 9]	93
0.910 0	0.029 9	[0.880 1,0.939 9]	92
	0.019 9	[0.890 1,0.929 9]	84
0.950 0	0.049 9	[0.900 1,0.999 9]	76
	0.029 9	[0.920 1,0.979 9]	26

4 结论

本文对带有不同交货期窗口的Job Shop的提前/拖期问题进行了研究,考虑了工件处理时间的不确定性,采用三角模糊数表示处理时间,建立了该调度问题的模型,并提出了基于遗传算法的调度算法. 仿真实验验证了该算法的有效性. Job Shop调度问题属于典型的NP完全问题,随着规模增大时其解决难度更加突出,甚至出现"死锁"问题而寻求不到最优解. 因此,对大规模调度的研究还有很多工作要做,具有广阔的研究空间.

参 考 文 献:

[1]Masatoshi S, Tetsuya M. An efficient genetic algorithm for job-shop scheduling problems with fuzzy processing time and fuzzy duedate [J]. Computers & Industrial Engineering, 1999, 36(4): 325—344.

[2]Baker K R. Sequencing with earliness and tardiness penalties: A review[J]. Oper. Res., 1990, 38(1): 22—36.

[3]顾幸生. 不确定条件下的生产调度[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2000, 26(5): 441—446.
Gu Xingsheng. Production scheduling under uncertainty[J]. Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2000, 26(5): 441—446. (in Chinese)

[4]Pistikopoulos E N. Uncertainty in process design and operations[J]. Computers Chem. Eng., 1995, 19(6): 553—563.

[5]方述诚, 汪定伟. 模糊数学与模糊优化[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
Fang Shucheng, Wang Dingwei. Fuzzy Mathematics and Fuzzy Optimal[M]. Beijing: Science Press, 1997.(in Chinese)

[6]刘 琦, 顾幸生. 基于模糊规划的处理时间不确定条件下的Job Shop问题[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2001, 27(5): 442—450.
Liu Qi, Gu Xingsheng. Job Shop problem under uncertain processing time based fuzzy programming[J]. Journal of East China University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2001, 27(5): 442—450. (in Chinese)

[7]Zimmermann H J. Description and optimization of fuzzy systems[J]. Int. J. General Systems, 1976, 2(3): 209—216.

[8]刘 琦. 不确定性条件下的生产计划与生产调度研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2000.
Liu Qi. The Study on Production Planning and Production Scheduling Under Uncertainty[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2000. (in Chinese)

Job Shop scheduling with uncertain processing time and distinct due windows

LI Ping, GU Xing-sheng
Research Institute of Automation, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

Abstract: The Job Shop scheduling problem with distinct due windows is discussed. Uncertain processing time is also considered, which is denoted by triangular fuzzy number, and two fuzzy operators are introduced also. Fuzzy programming model is established for the scheduling problem. Based on the algorithm of maximizing the membership function of middle value, the fuzzy programming model is transformed into deterministic programming model and an effective genetic algorithm is presented also. A great deal of simulation results are given to illustrate the efficiency of the proposed model and the scheduling algorithm.

Key words: Job Shop scheduling; uncertainty; earliness/tardiness; distinct due window; genetic algorithm