

基于成组技术的柔性调度的两层遗传方法

顾擎明

(江宁经济技术开发区管委会·南京, 211100)

宋文忠

曹丽娟

(东南大学自动化研究所·南京, 210096) (新加坡国立大学机械工程系·119260, 新加坡)

摘要: 研究用遗传算法解决柔性调度问题, 在工艺的约束条件下, 通过对柔性制造系统中工件的加工路线和加工顺序的优化来提高调度质量, 利用两层寻优的遗传方法可以有效地解决这一过程的寻优问题, 仿真实验说明了这一方法的有效性.

关键词: FMS; 柔性调度; 成组技术; 遗传算法

A Flexible Scheduling Method of Bilevel Genetic Algorithm Based on Group Technology

Gu Qingming

(Administrative Committee of Jiangning Economic and Technical Development Zone·Nanjing, 211100, P. R. China)

Song Wenzhong

(Institute of Automation, Southeast University·Nanjing, 210096, P. R. China)

Cao Lijuan

(Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore·119260, Singapore)

Abstract: The method for flexible scheduling with genetic algorithm is studied. We improve the quality of scheduling by optimizing routine and sequence of processes in flexible manufacturing system under the restriction of technology. Bilevel-optimizing Genetic algorithm is capable of solving this optimization problem effectively. In the end, the corresponding simulation is successfully done.

Key words: FMS; flexible scheduling; group technology; genetic algorithm

1 引言(Introduction)

加工路线是对调整度的一个约束, 如果能对它作弱化处理, 则调度质量将会得到提高. 加工路线的约束是由工艺约束和技术约束合成的, 其中工艺约束是指对工件的加工次序的约束, 这对柔性制造系统(FMS)仍是必要的; 技术约束是指某个工件的某个工序必须到指定的设备上加工完成, 由于 FMS 的高度柔性, 工件的加工路径可随着刀具在加工中心上配置方案的不同而改变. 为使机器的利用率最高, 可以将工序按其使用刀具的情况进行分组.

成组方法已有多种^[1], 但是传统方法应用于复杂成组问题时遇到了困难, 成组结果不很理想. 本文提出基于遗传算法的工序成组方法. 遗传算法是一种简便而有效的组合优化方法, 其基本原理最早由 Holland 及其学生提出. Rudolph^[2]用齐次有限马尔科夫链证明了标准简单遗传算法收敛不到全局最优解. Eiben 等^[3]用马尔科夫链对保留最优个体的遗传

算法进行了全局收敛性分析, 自适应遗传算法(AGA)则是全局收敛的.

定义 1^[4] 具有比例复制和自适应交换及突变操作的遗传算法, 称为自适应遗传算法, P_c 及 P_m 自适应变化为:

$$P_c = \begin{cases} k_1(f_{\max} - f_c)/(f_{\max} - \bar{f}), & f_c \geq \bar{f}, \\ k_2, & f_c < \bar{f}; \end{cases}$$
$$P_m = \begin{cases} k_3(f_{\max} - f_m)/(f_{\max} - \bar{f}), & f_c \geq \bar{f}, \\ k_4, & f_m < \bar{f}. \end{cases} \quad (1)$$

其中 f_{\max} 是群体中的最大适合度, \bar{f} 是群体的平均适合度, f_c 是用于交换的两个串中较大的适合度, f_m 是变异串的适合度. P_c 与 P_m 的自适应调整与算法的收敛程度成反向, 有效地防止了算法收敛于局部最小; 同时, 个体的适合度愈大, 相应的 P_c 与 P_m 愈小; 使好的进化结果得以保存.

基于遗传算法的调度方法,虽然国内外已有研究,但是研究对象多数是 Job Shop 型,而且遗传算法的编码成为 GA 直接应用于柔性调度的难题.本文研究利用 AGA 在有限资源约束下讨论柔性调度问题.

2 M 台机床上 N 个工件柔性调度问题的建模(Model transformation of N/M flexible scheduling)

FMS 调度问题描述如下:一个柔性加工系统,有 m 个加工中心和一个集中的缓冲区;每个加工中心有一个容量为 $W_k (k = 1, \dots, m)$ 的刀具库,每把刀有规定的使用寿命 T_h 和备份 $B_h (h = 1, \dots, H)$;缓冲区(含托板)的工位数量 NB 有限;有一批待加工的工件,每个工件按工艺次序可能需要多次装夹入线加工,工件的每次装夹入线占用一个托板,称为一个工序,工件 i 包含工序数 o_i ,令 $l = \sum_{i=1}^n o_i$ 是任务集的总工序数.调度的任务是如何配置 m 个加工中心的刀具库中的刀具,并按排工件的入线次序,使得目标函数最优.

假设 s_{ij} 表示第 i 工件的第 j 个工序(\bar{J}_{ij})的操作起始时刻, t_{ij} 是其加工时间; $\bar{T}_{ijh} (h \leq H, H$ 为刀的类型总数)表示加工 \bar{J}_{ij} 使用第 h 刀的时间; $Z_{ijk} = 1$ (或 0) 表示 \bar{J}_{ij} 分在(或未分在)第 k 组; $\bar{b}_i(t) = 1$ (或 0) 表示在时刻 t 工件 i 占用(或不占用)一个缓冲区,调度结果是将全部工序分成 m 组,设 C_k 为第 k 组的加工完成时刻,定义目标函数为最小加工完成时间,我们得到下面的数学模型:

$$\min F = \max_{k=(1,2,\dots,m)} \{C_k\}; \quad (2)$$

约束条件:

$$S_{ij} - S_{ij+1} + t_{ij} \leq 0, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, o_i; \quad (3)$$

$$S_{il} \geq 0; \quad (4)$$

$$S_{ij} - S_{pq} + t_{ij} \leq 0 \quad \text{或} \quad s_{pq} - s_{ij} + t_{pq} \leq 0, \quad \text{当 } Z_{ijk} = Z_{pqk} = 1; \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^m Z_{ijk} = 1; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \bar{b}_i(t) \leq NB; \quad (7)$$

$$\sum_{h=1}^H \text{int}[(\sum_i \sum_j \bar{T}_{ijh} Z_{ijk}) / T_h] \leq W_k; \quad k = 1, \dots, m; \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^m \text{int}[(\sum_i \sum_j \bar{T}_{ijh} Z_{ijk}) / T_h] \leq B_h; \quad h = 1, \dots, H. \quad (9)$$

其中,式(3)表示一个工件只能在加工完前一道工序以后才可以加工后一道工序;式(4)表示一个工件的第一道工序的起始加工时刻大于或等于 0;式(5)中 \bar{J}_{ij} 和 \bar{J}_{pq} 是在同一台机床上的操作,该式表示在一台机床上不会同时加工一个以上的工件;式(6)表示任何一个工序只能属于一个工序组;式(7)保证在时刻 t ,加工工件占有缓冲区总和不大于一车间里的有限缓冲区数; $\text{int}[\cdot]$ 为取整函数,式(8)确保加工每组工序所需刀具数总和不大于一刀库容量;式(9)表示所需每类刀具数总和不大于一其备份.

3 基于成组技术的柔性调度方案设计(Design of flexible scheduling method based on group technology)

柔性调度问题从数学意义上讲,大多属于 NP 难问题,在实际运用中,往往求助于启发式算法.我们提出基于成组技术的柔性调度的两层遗传方法,首先构造算法 A 优化加工路线,即以工件的工序为入组单位,在机床的刀具约束条件下将工序分组;其次按算法 B 优化加工排序,即根据成组结果和工艺约束,构成典型的 Job Shop 系统,再按 Job Shop 调度规则进行优化排序.在以上步骤中利用 AGA 解决这一过程的寻优问题(见图 1).

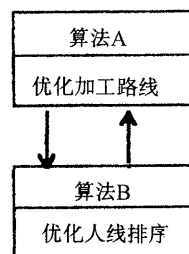


图 1 基于成组的柔性调度的两层遗传方法
Fig. 1 A flexible scheduling method of bilevel genetic algorithm based on group technology

算法 A

Step 1 采用自然数编码,确定群体规模 N_1 . 遵守约束条件(6), (8) 和(9) 随机地产生 N_1 个候选解,组成工件的加工路径初始解集.

Step 2 定义适合度函数为 $f = 1/F$.

Step 3 按照算法 B 求每个候选解的优化排序及适合度.

Step 4 判断是否达到最优解或到了预定迭代次数,是则结束寻优过程;否则按候选解的适合度比例复制留取一定数目的个体,转 Step 5.

Step 5 按照交换率 P_c 在候选解群体中随机地选取数对候选解进行基因交换操作,剔除不符合条件(8),(9)的子解.

Step 6 按照变异率 P_m 选取候选解进行变异操作,剔除不符合条件(8),(9)的子解.由交换和变异生成的新解与父代一起构成新群体,转 Step 3.

算法遵守约束条件,算法 A 的解是有效解;AGA 的应用保证算法 A 是收敛的,算法 A 解的染色体表示可以描述为 $\{a_1, a_2, \dots, a_l\}$, 其中 a_l 是工序的加工路径,取 1 至 m 之间的自然数. P_c 及 P_m 变化按(1)式,下面给出交换和变异的具体操作.

交换:鉴于基因交换是随机的,首先确定染色体中交换点的位置 S_c ,其次选择交换点个数 L_c .例如对染色体 $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_l\}$ 和 $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_l\}$ 进行交换,任取 $S_c = 2, L_c = 2$,生成的新染色体为 $\{a_1, b_2, b_3, \dots, a_l\}$ 和 $\{b_1, a_2, a_3, \dots, b_l\}$.

变异:变异的发生是随机的,例如染色体 $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_l\}$,第 2 个基因的变异生成新染色体 $\{a_1, \overline{a_2}, a_3, \dots, a_l\}$,其中 $\overline{a_2} \in [1, m]$.

在算法 A 中,当候选解确定了工件的加工路径后,就构成典型的 Job Shop 调度问题.

算法 B

Step 1 采用事件序号编码,确定群体规模 N_2 .遵守工件的工艺约束条件(3),(4)和(5)随机地产生 N_2 个候选解,组成工件的加工排序初始解集.

Step 2 遵守条件(7),计算初始候选解的适合度 f .

Step 3 对所有个体进行评判,按候选解的适合度比例复制并保留最优个体,留取一定数目的个体.

Step 4 按照交换率 P_c 在解群体中随机地选取数对候选解进行基因交换操作.

Step 5 按照变异率 P_m 选取候选解进行基因变异操作.

Step 6 遵守条件(7),求由交换和变异生成子解的适合度,子解与父代一起构成新群体.

Step 7 判断是否到达最优解,是则结束寻优过程.若非,判断是否到了预定迭代次数,是则结束寻优过程;否则转 Step 3.

算法遵守约束条件,算法 B 的解是有效解;AGA 的应用保证算法 B 是收敛的,算法 B 解的染色体表示可以描述为 $\{\overline{J}_{ij} | i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, o_i\}$, \overline{J}_{ij} 在染色体中的位置,即加工顺序, P_c 及 P_m 变化按(1)式,下面给出交换和变异的具体操作.

交换:采用权值交叉法.设 S_u 和 S_v 是有效解,计算工序加工顺序的权值 $\omega_1(\overline{J}_{ij}) = \sigma \times \overline{J}_{S_u ij} + (1 - \sigma) \times \overline{J}_{S_v ij}$,其中 $\sigma \in (0, 1)$ 随机产生,按 $\omega_1(\overline{J}_{ij})$ 值将 \overline{J}_{ij} 排序生成子串 S_u' ;再计算 $\omega_2(\overline{J}_{ij}) = (1 - \sigma) \times \overline{J}_{S_u ij} + \sigma \times \overline{J}_{S_v ij}$,按 $\omega_2(\overline{J}_{ij})$ 值将 \overline{J}_{ij} 排序生成子串 S_v' .例如对 $S_1 = (\overline{J}_{21}, \overline{J}_{11}, \overline{J}_{12}, \overline{J}_{22}, \overline{J}_{23}, \overline{J}_{31}, \overline{J}_{13}, \overline{J}_{32})$ 和 $S_2 = (\overline{J}_{11}, \overline{J}_{12}, \overline{J}_{13}, \overline{J}_{31}, \overline{J}_{21}, \overline{J}_{32}, \overline{J}_{22}, \overline{J}_{23})$ 进行交换,任取 $\sigma = 0.6$,生成子染色体 $S'_1 = (\overline{J}_{11}, \overline{J}_{12}, \overline{J}_{21}, \overline{J}_{22}, \overline{J}_{31}, \overline{J}_{13}, \overline{J}_{23}, \overline{J}_{32})$ 和 $S'_2 = (\overline{J}_{11}, \overline{J}_{12}, \overline{J}_{21}, \overline{J}_{13}, \overline{J}_{31}, \overline{J}_{22}, \overline{J}_{23}, \overline{J}_{32})$.

变异:采用插入变异法.随机选定变异点的位置以及长度,将变异点按下式插入随机产生的新位置:

$$\overline{J}_{ij} = \begin{cases} r_1 \in [1, \overline{J}_{ij+1}), & \text{如 } j = 1; \\ r_2 \in (\overline{J}_{ij-1}, \overline{J}_{ij+1}), & \text{其它;} \\ r_3 \in (\overline{J}_{ij-1}, l], & \text{如 } j = o_i. \end{cases}$$

4 典型调度问题的讨论(Discussion of typical questions)

过度简化的调度问题数学模型虽然便于理论研究,但是它难以用于复杂的实际生产过程.在实际生产过程中尚有效货期限、优先级调度等约束条件.本文方法能够有效地解决受复杂条件约束的优化调度问题.

4.1 有效货期要求的调度(Scheduling with due date)

生产过程需要考虑交货期要求.我们希望加工工件的完工期与交货期吻合,但由于复杂的实际因素的影响,两者很难恰好吻合.当完工期大于交货期时,惩罚 w_l ,表示加工违期利润损失;当完工期小于交货期时,惩罚 w_e ,表示完工工件的库存费用. w_l 和 w_e 的值根据实际选定.

对于有交货期要求的调度问题,在算法 A 中重新定义目标函数为:

$$F = \min \left\{ \max_{k \in (1, 2, \dots, m)} \{C_k\} + \sum_{i=1}^n f_1(d_i - c_{i o_i}) \right\}. \quad (10)$$

其中

$$f_1(x) = \begin{cases} -w_l x, & x < 0, \\ w_e x, & x \geq 0. \end{cases}$$

d_i 是工件 i 的交货期, $c_{i o_i}$ 是工件 i 的完工期.

4.2 有优先级的调度(Scheduling with priority)

在实际生产过程中,按工件的重要程度不同确定加工的调度优先级.在调度算法中:对于特急任务,必须优先安排加工;对于次急任务,安排次优先

加工;对于一般任务,优先级较低,安排在特急任务完成后再加工,在“再调度”中它们的加工顺序可重新安排.重新定义算法 A 的目标函数为:

$$F = \min \left\{ \max_{k \in \{1,2,\dots,m\}} \{C_k\} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n f_2(r_i - r_j) \right\}. \quad (11)$$

其中

$$f_2(x) = \begin{cases} w_r x e^{-(c_{i_0} - c_{j_0})T}, & x > 0 \text{ 且 } c_{i_0} < c_{j_0}, \\ 0, & \text{其它.} \end{cases}$$

r_i 是工件 i 的优先级, r_i 越大,表示优先级越高, T 是

常数, w_r 是违反优先级约束的惩罚因子.

5 仿真实例(Simulation examples)

搜索柔性调度问题的近优调度方案:一个柔性制造系统中有 3 台机床,4 个缓冲区,要求加工 10 只工件,加工工序使用刀具数据如表 1,每台机床的刀具容量为 32 把,每种刀的备份为 6 把,刀具的工作寿命为 2 小时.有交货期要求,取 $w_l = 2, w_e = 0.1$. 目标函数为

$$F = \min \left\{ \max_{k \in \{1,2,3\}} \{C_k\} + \sum_{i=1}^n f_1(d_i - c_{i_0}) \right\}.$$

以工序为入组单位,总结表 1 得到表 2.

表 1 工序的加工刀具及交货期

Table 1 Cutting tool and due date of the operations

工序/用刀	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	交货期
J1/1	0.3	0.4	0.6	0.5	0.5	0.3	0.6	0.5	0.3	0.5	0.6	0.6	0.3	0.6	0.5	0.4	0.7	0.5	0.1	0.6	...
J1/2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	1.0	0.7	0.0	0.5	0.5	0.0	0.0	0.0	1.0	0.3	0.0	0.6	0.1	0.4	25
J2/1	0.8	0.6	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.4	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	...
J2/2	0.0	0.6	0.2	0.5	0.2	0.3	1.0	0.9	0.3	0.1	0.4	0.7	0.8	0.9	1.0	0.0	0.1	0.6	0.6	0.7	15
J3/1	0.4	0.0	0.1	0.0	0.2	0.7	0.4	1.0	0.0	0.6	0.7	0.0	0.7	0.9	0.2	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	15
J4/1	1.0	0.5	0.1	0.6	0.2	1.0	0.3	0.5	0.2	0.7	0.7	0.0	0.0	0.7	0.3	0.6	0.0	0.0	0.4	0.4	...
J4/2	0.0	0.5	0.0	0.7	0.0	0.2	0.6	0.2	0.3	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	...
J5/1	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.7	0.0	0.0	0.0	0.5	0.0	0.5	0.0	5
J6/1	0.4	0.0	0.0	0.4	0.3	0.9	0.4	0.8	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.8	0.0	0.5	0.9	0.9	1.0	0.0	...
J6/2	0.0	0.0	0.8	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.8	0.3	0.0	0.4	0.6	0.0	0.7	0.0	0.8	0.0	0.0	0.4	...
J6/3	0.0	0.9	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	...
J7/1	0.5	0.0	0.5	0.7	0.3	0.6	0.5	0.6	0.8	0.2	0.3	0.4	0.3	0.8	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.1	...
J7/2	0.0	0.0	0.7	0.0	0.7	0.3	0.4	0.6	0.0	0.0	0.8	1.0	0.0	0.1	0.0	0.5	0.0	0.3	0.0	0.0	...
J7/3	0.6	0.3	0.2	0.0	0.7	0.4	0.1	0.0	0.5	0.2	0.3	0.6	0.8	0.0	0.3	0.5	0.0	0.9	0.8	0.0	...
J8/1	0.0	0.3	0.0	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...
J8/2	0.0	0.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	...
J9/1	0.9	0.9	0.5	0.7	0.4	0.9	0.9	0.7	0.5	0.2	0.7	0.0	0.2	0.9	1.0	1.0	0.0	0.3	0.1	0.8	...
J9/2	0.6	0.6	0.8	0.0	0.4	0.2	0.3	0.7	0.3	0.2	0.5	0.3	0.0	0.7	0.4	0.3	0.4	0.2	0.4	0.0	30
J10/1	0.3	0.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	...
J10/2	1.0	0.6	0.1	0.9	0.1	0.0	0.7	0.1	0.7	0.1	0.2	0.1	0.7	0.2	0.1	0.1	0.9	0.7	0.0	0.4	...
J10/3	0.0	0.0	0.6	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.3	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...

表 2 工件的加工参数

Table 2 Parameters of the parts

工件名	工序数	工序加工时间/h		
Part 1	2	9.4	6.3	
Part 2	2	4.7	9.9	
Part 3	1	6.9		
Part 4	2	8.2	4.7	
Part 5	1	2.8		
Part 6	3	7.5	6.2	2.9
Part 7	3	8.5	5.4	7.2
Part 8	2	2.8	3.9	
Part 9	2	9.6	9.3	
Part 10	3	3.0	7.7	3.1

从前文分析,我们利用基于工序成组的两层遗传方法确定调度方案.本例调度 10 个工件,共 21 道工序,任何工序可使用 3 台机床中的一台来完成,由算法 A 在刀具约束下优化加工路线,选定工序的加工机床为基因,按自然数编码,所有 21 个基因构成一个染色体;初始解在遵守式(6),(8)和(9)的前提下采用随机方式产生.按算法 B 优化加工排序,选定工序的加工顺序为基因,按事件序号编码,初始解在遵守式(3),(4)和(5)的前提下采用随机方式产生.定义适合度函数为 $f = 1 / \left\{ \max_{k \in \{1,2,3\}} \{C_k\} + \sum_{i=1}^n f_1(d_i - c_{i_0}) \right\}$.按 AGA 进行寻优过程.

整个寻优过程的仿真计算平均时间小于 120 秒,或平均不超过 15 次迭代全部个体解即已收敛于稳定优化解,可见遗传算法用于 FMS 的优化调度是一种简便高效的调度算法.根据优化解得到机床的刀具配置如图 2,工件的入线次序如图 3.

已知 $W_k = 32, B_h = 6, T_h = 2h (k = 1, \dots, m;$

$h = 1, \dots, H)$;随机产生其它加工数据,得到对应每一 $l \times H \times m$ 问题的 10 组仿真参数,用两层遗传方法搜索调度优化方案,并与简单遗传算法、神经网络方法^[5]比较性能指标^[6]:机器均衡率、机器利用率及仿真时间.本文方法具有明显的优势.

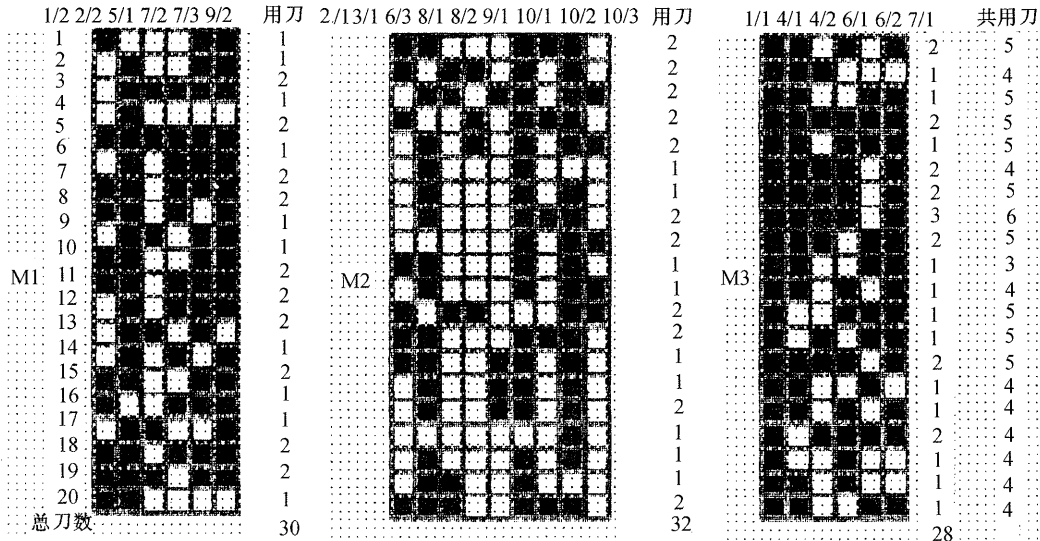


图 2 机床的刀具配置
Fig. 2 Tool group of the machines

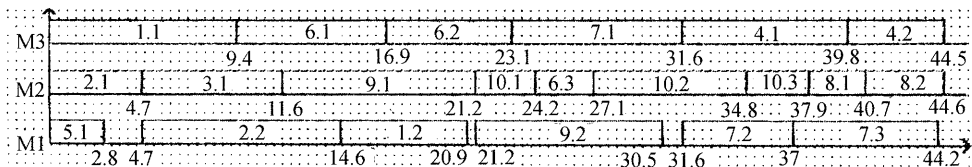


图 3 有交货期要求, 刀库容量为 32, 刀具备份为 6, 缓冲区数为 4 的调度结果

Fig. 3 Scheduling result under the restriction of due date, 32 tool-lib capacity, 6 tool backup and 4 buffers

6 结论 (Conclusion)

针对第 2 节描述的调度问题,全部工件的加工排序方式最大有 $Z = m^l \times \left(\frac{1}{O_1!} \times \frac{1}{O_2!} \times \dots \times \frac{1}{O_n!} \right) \times l!$, 调度的任务就是从这 Z 个排序选择最优或者是“好”的一种程度,本文利用 AGA 两级寻优,在工艺约束条件下将工序成组并同时配置加工中心的刀具,从而确定工件的加工路径,再最终确定加工工件的入线顺序.算法保持在较快到达稳定优化的方向上进行搜索,实验表明本文算法解调度问题时对神经网络方法、简单遗传算法的优化效果明显提高,并能有效地解决受复杂条件约束的典型调度问题.

参考文献 (References)

- Andrew Kusiak. Intelligent Manufacturing System. New Jersey: Prentice Hall. Inc., 1990
- Rudolph G. Convergence properties of canonical genetic algorithms. IEEE Trans. on Neural Networks, 1994, 5(1): 96 - 101
- Eiben A E, Aarts E H and Van Hee K M. Global Convergence of Ge-

- netic Algorithms; An Infinite Markov Chain Analysis. Parallel Problem Solving from Nature. Schwefel H P and Manner R Eds. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1991, 4 - 12
- Scrinvas M and Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithm. IEEE Trans. Syst. Man, and Cybern., 1994, 24(4): 656 - 666
- 赵正义.交互式调度理论研究:[博士后论文].南京:东南大学, 1996
- 顾肇明,宋文忠,曹丽娟.基于遗传的一种 Job-shop 调度方法.东南大学学报, 1997, 27(6): 71 - 75

本文作者简介

顾肇明 1971 年生.1992 年毕业于东南大学自动控制系.1995 年获东南大学自动化研究所硕士学位,1998 年在该所获博士学位.现在江宁经济技术开发区管委会工作.主要研究方向为 DEDS 理论,柔性制造系统及遗传算法等.

宋文忠 见本刊 1999 年第 2 期第 287 页.

曹丽娟 1972 年生.1994 年毕业于吉林工业大学机械工程系.1997 年获东南大学机械工程系硕士学位,现在新加坡国立大学机械工程系攻读博士学位.目前主要研究方向是虚拟现实,神经网络及遗传算法等.