第 15 卷第 6 期
1998 年 12 月

控制理论与应用
CONTROL THEORY AND APPLICATIONS

Vol. 15, No. 6
Dec., 1998

基于成组技术的一种柔性调度方法

顾擎明　宋文忠
（东南大学自动化研究所·南京，210096）

摘要：研究柔性制造系统中工件的加工调度问题，通过对加工路线作弱化处理来提高调度质量，即在工艺约束条件下确定工序的成组优化. 利用遗传算法可以有效地解决这一过程的寻优问题. 仿真实验表明方法有效.

关键词：FMS；柔性调度；成组技术；遗传算法；动态瓶颈资源

1 引　言

传统的 Job-Shop 是加工路线完全给定的加工系统，一般对现场的实际约束也不能充分考虑. 加工路线是对调度的一个约束，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，这一点对柔性制造系统（FMS）仍然是必要的；技术约束是指某个工序必须到指定的加工设备上加工完成，由于 FMS 使用了高度柔性的计算机控制的物流和信息流，这个约束就没有必要了. 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，为了使刀具费用最省，每班加工工件数最多，可以将工序按其使用刀具情况进行分组.

成组方法已有多种[1]，如秩排序分群算法、键能算法、集群辨识算法，这些算法对可分集群算法效果是好的. 对于不是绝对可分集群，Kusiak 等提出了推广的集群辨识算法，但它过多地依赖于人的经验. 数学规划算法也被用于分群，如 P-中位模型、广义 P-中位模型、二次规划模型等，但这些算法不仅运算时间长，而且所得结果并非很好.

遗传算法的基本原理最早由 Holland 及其学生提出，它模拟生物进化过程中的自然选择和遗传变异的基本原则来进行搜索和学习，采用从自然机理中抽象出来的算子对参数编码字符串进行操作，在迭代中并行地对参数空间的不同区域进行搜索，使搜索朝着全局最优的方向进行. 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.

本文提出基于遗传算法的工序成组方法，在有限资源约束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，再最终确定工件的加工顺序.

2 遗传算法简介

遗传算法广泛地应用于系统辨识、函数优化、机器学习、自动控制等领域，近年来，它在解决大量不同约束条件下的复杂搜索问题方面，越来越受到重视.

遗传算法将优化问题的可行解按某种形式编码为一组字符串——染色体；每个染色体对应一个寻优空间上的目标函数值，称为适合度. 串中一位或数位编码构成一个基因，代表个体的各个属性，总特性由全部基因综合确定. 多个可行解的集合构成群体，在群体迭代过程中通过相应的基因交换和变异操作，实现串的优化. 遗传算法的基本操作包含以下部分：

初始化种群　初始化种群是将一组初始可行解编码为染色体. 一般采用专家知识或经验知识作为启发式信息，利用专家知识确定初始化种群，以规则形式表示的专家知识优先进入初

本文于 1996 年 11 月 4 日收到. 1997 年 12 月 4 日收到修改稿.

始化种群，默认了专家知识规则的高适合度，其次保证染色体的形式安全性和形式优化.

复制 复制是将父代的个体信息传到子代. 比例复制时，个体的复制概率由其适合度与种群适合度和之比确定. 复制遵守优胜劣汰的原则，在现有群体中寻优，使得群体中的优秀个体数量不断增加，使整个进化过程朝着更优化的方向进行.

交换 交换是染色体之间基因的互换过程，每一代的各个个体按一定的概率交换其部分基因，从而产生新个体. 如柔性调度问题，以所有工序的加工路径构成染色体 $[a_1, a_2, \cdots, a_L]$，其中 a_i 为自然数编码($a_i \leqslant M$，M 为机床数). 鉴于基因交换是随机的，首先确定交换点的位置 S_c，其次选择交换点个数 N_c，对$[a_1, a_2, \cdots, a_L]$和$[b_1, b_2, \cdots, b_L]$进行交换，任取 $S_c = 1, N_c = 1$，生成的子染色体为$[b_1, a_2, \cdots, a_L]$和$[a_1, b_2, \cdots, b_L]$. 还有其它一些复杂的交换方式.

变异 变异是染色体链中基因的突变过程，通过变异可避免迭代寻优过程陷入局部最优. 同交换一样，变异也可以产生新个体，不同的是变异发生的概率远远小于交换发生的概率. 在遗传算法中，变异的发生是随机的，变异过程通常用变量的属性的突然改变来实现. 本文中，柔性调度问题的基因变异按特变体方式变化：$\bar{a}_i = \begin{cases} a_i + 1, & \text{if} \quad a_i \neq M, \\ 1, & \text{if} \quad a_i = M. \end{cases}$

评判 评判是对个体生存能力的评价，评判的标准是遗传算法的重要问题之一. 通常的方法是采用后验控制标准，即将个体用实际的数据测试，误差小的个体生存，以达到优化的目的. 如果有个体满足算法的各种参数要求，或算法达到条件界限，则算法结束；否则，按群体规模复制个体作为第二代种群，重复迭代过程，直到算法结束.

3 M 台机床上 N 个工件调度问题的建模

柔性调度问题描述如下：一个柔性加工系统，有 M 个加工中心和一个集中的缓冲区 NB；每个加工中心有一个容量为 $W_k(k = 1, 2, \cdots, M)$ 的刀具库，每把刀有规定的使用寿命 T_h 和备份 $B_h(h = 1, 2, \cdots, H; H$ 为刀的类型总数)；有 N 件待加工的工件，按工艺次序，工件的每次装夹占用一个缓冲区，称为一个工序，工件 i 包含工序数为 l_i，调度的任务是如何配置 M 个刀具库中的刀具，并安排工件的加工次序，使得性能指标最优.

假设 s_{ij} 和 t_{ij} 分别表示工序(i, j)的操作起始时刻和加工时间；$\overline{T}_{ijh}$ 表示加工工序(i, j)使用第 h 种刀的时间，T_h 及 B_h 分别为每种刀规定的使用寿命和备份；W_k 为加工中心的刀具库容量；$Z_{ijh} = 1$(或 0) 表示工序(i, j) 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) 缓冲区. 调度结果是将全部工序分成 M 组，令 $C = \max\limits_{k \in k(1, 2, \cdots, M)} \{C_k\}$，$C_k$ 为第 k 组的完工时刻，使 C 最小的成组问题又称为 M 划分问题. 该问题可用下面的数学模型来描述：

$$\min C \tag{1}$$

$$\text{s.t.} \quad s_{ij} - s_{ij+1} + t_{ij} \leqslant 0, (i = 1, \cdots, N; j = 1, \cdots, l_i), \tag{2}$$

$$s_{i1} \geqslant 0, \tag{3}$$

$$s_{ij} - s_{pq} + t_{ij} \leqslant 0 \text{ 或 } s_{pq} - s_{ij} + t_{pq} \leqslant 0, \quad \text{当} \quad Z_{ijk} = Z_{pqk} = 1, \tag{4}$$

$$\sum_{k=1}^{M} Z_{ijk} = 1, \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{N} \bar{b}_i(t) \leqslant NB, \tag{6}$$

$$\sum_{h=1}^{H} \text{int}[(\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{l_i} \overline{T}_{ijh} Z_{ijk}) / T_h] \leqslant W_k, \quad (k = 1, \cdots, M), \tag{7}$$

$$\sum_{k=1}^{M}\mathrm{int}[(\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{l_i}\overline{T}_{ijh}Z_{ijk})/T_h]\leqslant B_h,(h=1,\cdots,H). \tag{8}$$

其中式(2)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(3)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(4)确保在一台机床上不会同时加工一个以上的工件;式(5)表示任何一个工序只能属于一个工序组;式(6)保证在时刻 t,加工工件占用缓冲区总和不大于车间里的有限缓冲区数;int( )为取整函数,式(7)表示每一加工中心加工工件所需刀具总数不大于刀库容量;式(8)表示所需每类刀具数总和不大于其备份.

4 基于成组技术的柔性调度方案设计

柔性调度问题大多属于NP完备问题,在实际运用中,往往求助于启发式算法. 我们设计两层寻优的启发式调度方法——基于工序成组的柔性调度方法(图1),首先以工序为成组单位,在机床的刀具约束条件下将工序分组,即由算法1优化工件的加工路线;然后根据成组结果,构成典型的Job-Shop系统,再按基于动态瓶颈资源的启发式调度方法进行调度和排序,即按算法2优化加工排序. 在以上步骤中利用遗传算法解决这一过程的寻优问题.

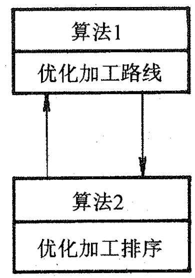

图1 基于工序成组的柔性调度方法

算法1 1) 采用自然数编码,遵守约束条件(5)、(7)和(8)随机地产生候选解,组成工件的加工路径初始解集,按照算法2求每个候选解的优化排序及目标函数值.

2) 对所有个体进行评判,按群体规模复制个体.

3) 按照预定的交换率在候选解群体中随机地抽取数对候选解进行交换操作,剔除不符合条件(7)、(8)的子解.

4) 按照预定的变异率抽取候选解进行变异操作,剔除不符合条件(7)、(8)的子解.

5) 按照算法2求由交换和变异生成新解的优化排序,并计算对应的目标函数值. 由新解与父代一起构成新群体.

6) 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,否则转2).

在算法1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,按考虑动态瓶颈资源的启发式调度方法(遵守式(2)、(3)、(4)和(6))进行排序. 瓶颈资源包含瓶颈机器和瓶颈工件,考虑瓶颈资源的调度方法就是充分利用瓶颈资源,使调度策略向瓶颈资源适当倾斜,将更有利于性能指标的改善. 常规瓶颈资源的定义如下[4]:

定义1 按照工件的加工路径和加工时间表,全部机器中具有最大加工时间和(或加工次数和)的那台机器称为瓶颈机器(Bottle-Neck Machine).

定义2 按照工件的加工路径和加工时间表,全部工件中具有最大加工时间和(或加工次数和)的那个工件称为瓶颈工件(Bottle-Neck Part).

上述定义只是一种静态定义,事实上,随着调度的进行,各机器及工件的情况是不断变化的,调度策略对瓶颈资源的倾斜可能导致不合理的情况,即瓶颈工件的加工已完成或接近完成,而非瓶颈工件的加工尚未开始. 为避免这种不合理的情形,引入"动态瓶颈资源"的概念:

定义3 全部机器中,具有最大机器尚需加工时间和与该机器前已排序等待加工工件的加工时间和之差的那台机器称为动态瓶颈机器(Dynamic Bottle-Neck Machine).

定义4 当前可加工工序中,具有最大尚需加工时间和(或工序数和)的那个工件称为动态瓶颈工件(Dynamic Bottle-Neck Part).

引入符号：令 P_t 为前 $t-1$ 步已排完的部分工序 $\{O_1,O_2,\cdots,O_{t-1}\}$；$S_t$ 为第 t 步按工艺路径可参与排序的工序集；NJS 为调度中已使用的缓冲区数；σ 为 S_t 中 O_k 可开始的最早时刻；Φ_k 为 S_t 中 O_k 能完成的最早时刻，$\Phi_K=\sigma_k+t_k$，t_k 是 O_k 的加工时间.

算法 2 1) $t=1$，P_1 空，S_1 为最初的按工艺路径可参与排序的工序集，计算总工序数 L.

2) 搜索动态瓶颈机器，若有多台时，则任选一台，令 $\overline{P}=S_t$.

3) 当 NJS = NB 成立时，令 $\overline{P}=\overline{P}-\{S_t$ 中是工件第一道操作的工序$\}$.

4) 计算 $\Phi^*=\min\limits_{O_k\in P}\{\Phi_k\}$，并找出对应的加工机器 M^*，有多台时，优先选择动态瓶颈机器；否则，任选一台.

5) 找出满足条件 $\begin{cases}① \text{ 需在 } M^* \text{ 上加工} \\ ② \sigma_k<\Phi^*\end{cases}$ 的可排序工序构成 $\overline{S}$.

6) 对 $\overline{S}$ 中的可排序工序，若 M^* 为动态瓶颈机器，则按最大剩余加工时间(MWKR)启发式规则进行调度. 若 M^* 为非动态瓶颈机器，将该机器前的工序分成两类——A 类：工件尚需到瓶颈机器上加工；B 类：工件不需或不再需到瓶颈机器上加工. 调度中 A 类工件的优先级高于 B 类工件的优先级，对 A，B 类工件按 MWKR(或其它)启发式规则进行调度.

选定将加工工序 O_j.

7) 若工序 O_j 为工件的第一道操作，令 NJS = NJS + 1；若 O_j 为工件的最后一道操作，则 NJS = NJS − 1. 并调整非在线工件的起始可加工时间.

8) 令 $P_{t+1}=P_t+\{O_j\}$，$S_{t+1}=S_t-\{O_j\}+\{O_t\}$，$O_t$ 为 O_j 工序的后继工序；$t=t+1$.

9) 若 $t\leqslant L$，则转 2)；否则，停止.

5 仿真实验及分析

搜索以下问题的调度方案：一柔性制造系统中有 3 台机床，7 个缓冲区，要求加工 10 只工件. 已知每台机床的刀库容量为 35 把，每种刀的备份为 6 把，刀具的工作寿命为 2 小时，工件的加工刀具如图 2(刀具使用时间略)，目标函数为 $J=\min\{\max\limits_{k\in(1,2,3)}\{C_k\}\}$.

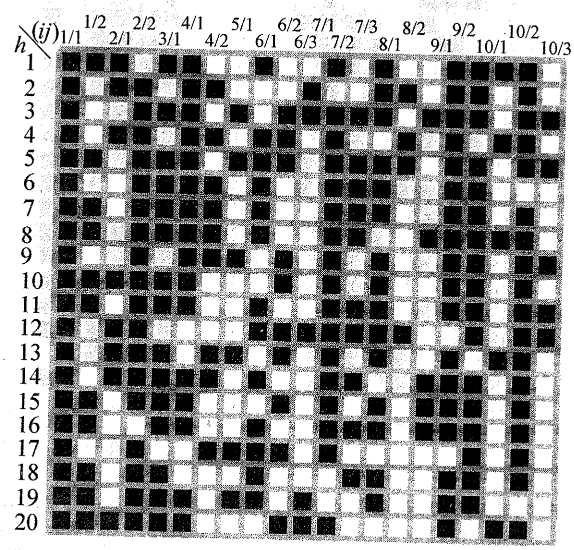

图 2 加工工序对刀具的需求

以工序为入组单位，总结图 2 得到工件的以下加工参数：

表 1 工件的加工工序及时间

工件名	工序数	工序加工时间(小时)			工件名	工序数	工序加工时间(小时)		
Part1	2	9.4	6.3		Part6	3	7.5	6.2	2.9
Part2	2	4.7	9.9		Part7	3	8.5	5.4	7.2
Part3	1	6.9			Part8	2	2.8	3.9	
Part4	2	8.2	4.7		Part9	2	9.6	9.3	
Part5	1	2.8			Part10	3	3.0	7.7	3.1

从前文分析，在有限资源和工艺约束条件下，利用基于工序成组的柔性调度方法确定最优

调度方案.本例调度10个工件,共21道工序,选定工序的加工路径为基因,取值范围为{1,2,3},所有21个基因构成一可行解 $\{a_{11},a_{12},\cdots,a_{101},a_{102},a_{103}\}$;取群体规模 $P=50$,交换率 $C=0.80$,变异率 $M=0.05$,以最优遗传算法产生下一世代;按算法1进行寻优过程.

初始化种群的选取对寻优过程的收敛速度影响很大,在遵守式(5)、(7)和(8)的前提下采用随机方式产生.按算法1,整个寻优过程的仿真计算平均时间小于5秒,或平均不超过20次迭代全部个体解即收敛于稳定优化解,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.遗传算法的搜索是以种群为单位向整个解空间扩展的,形成关于种群的Markov链,由于算法中产生交换和变异的随机性,因此有穷Markov链上的每一点都可经过有限步被访问.文[1]中古典算法较难用于复杂条件约束下的成组问题,本文方法比较柔性调度的神经网络方法[5]在运行时间,适应性和最优率方面具有较好的优势.

根据最优解得到3台机床的刀具配置如图3,工序的优化加工路径为{3,3,1,2,2,2,1,3,2,1,1,3,1,1,3,3,1,3,2,2,1},工件的加工次序如图4.

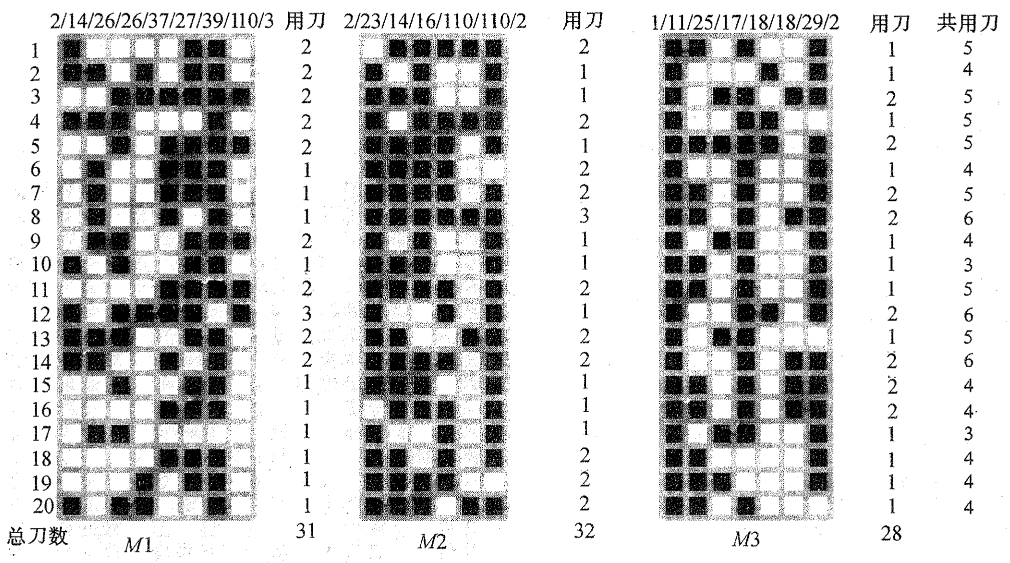

图 3 机床的刀具配置

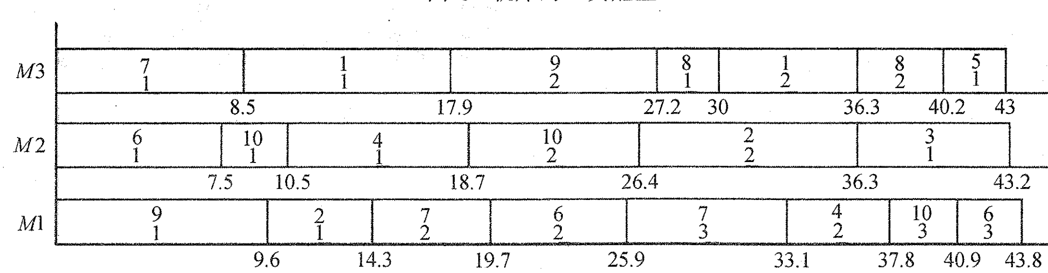

图4 刀库容量为35,刀具备份为6,缓冲区数为7的调度结果

引入仿真实验的统计指标.令 $P=\frac{1}{k}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M}t_{ij}$,$P$ 为 C 的一个下界估计,取 $CB_q=C/P_q$ 为解第 q 问题所得的机器承担加工任务量的均衡率,则 $E_{CB}=\frac{1}{r}\sum_{q=1}^{r}CB_q$ 是解 r 个问题时 CB_q 的均值,$D_{CB}=\frac{1}{r}\sum_{q=1}^{r}(CB_q-E_{CB})^2$ 是其方差;定义 $BY_q=(\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N}t_{ij})/\sum_{k=1}^{M}C_{kq}$ 为第 q 问题的机器

利用率，则 $E_{BY}=\frac{1}{r}\sum_{q=1}^{r}BY_q$ 为解 r 个问题时 BY_q 的均值，$D_{BY}=\frac{1}{r}\sum_{q=1}^{r}(BY_q-E_{BY})^2$ 为其方差.

现在我们用两层寻优方法搜索柔性调度问题的优化方案并计算统计指标，取 $N=10, M=3, NB=7, H=30, W_k=35, B_h=6$，工件加工用刀类型及使用时间随机产生，得到100组仿真参数. 最后求得 $E_{CB}=1.0120, D_{CB}=3.19\times10^{-5}, E_{BY}=0.9998, D_{BY}=3.600\times10^{-7}$，仿真结果是比较理想的. 当刀库容量、刀具备份或缓冲区数变化时，将引起统计指标的变化，表明了柔性调度对资源参数的敏感性，并且各调度结果也进一步说明了用遗传算法解决受复杂条件约束的调度问题的优势.

参 考 文 献

1 Andrew Kusiak. Intelligent Manufacturing System. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1990

2 Bertoni, A. and Dorigo, M.. Implicit parallelism in genetic algorithm. Artificial Intelligence, 1993, 61(1): 307−314

3 Eiben, A. E., Aarts, E. H. and Van Hee, K. M.. Global Covergence of Genetic Algorithms: An Infinite Markov Chain Analysis. Eds. Schwefel, H. P. and Manner, R., Parallel Problem Solving from Nature. Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1991, 4−12

4 缪巍巍. 考虑瓶颈资源的 Job-Shop 调度的启发式方法:[硕士论文]. 南京:东南大学, 1992

5 赵正义. 交互式调度理论研究:[博士后论文]. 南京:东南大学, 1996

A Flexible Scheduling Method Based on Group Technology

GU Qingming　and　SONG Wenzhong

(Institute of Automation, Southeast University · Nanjing, 210096, PRC)

Abstract: Workpiece scheduling in flexible manufacturing system is studied in this paper. We improve the quality of scheduling by relaxing restriction of processing routine, in detail, determine the group optimization of processes under the restriction of technology. Genetic algorithm is capable of solving this optimization problem effectively. The corresponding simulation is successfully done.

Key words: FMS; flexible scheduling; group technology; genetic algorithm; dynamic bottle-neck resource

本文作者简介

顾擎明　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，现在该所攻读博士学位. 目前主要研究方向为DEDS理论，柔性制造系统及遗传算法等.

宋文忠　见本刊1998年第4期第514页.