

基于 Petri 网与 GA 算法的 FMS 调度优化

郝 东 蒋昌俊 林 琳

(同济大学计算机科学与工程系 上海 200092)

(国家高性能计算机工程技术研究中心同济分中心 上海 200092)

摘要 提出了一种应用遗传算法解决柔性制造系统调度优化问题的新方法。首先用 Petri 网对柔性制造系统进行建模,然后应用遗传算法对该模型进行调度并获取近似最优解。在该算法中,用 Petri 网模型的激发序列作为染色体,采用期望值方法作为选择算子,总加工时间作为适应度函数,两点交叉法作为交叉算子,交叉点选择能到达相同标记的转移。对于变异算子,首先从染色体上随机选择一点作为变异点,然后从这点开始应用变异算法,该变异算法类似于 Petri 网的可达树算法。由于算法中的选择、交叉和变异算子都是对 Petri 网模型中的元素进行操作,与问题空间中的元素无关,因此,与其它调度算法相比,它有较高的通用性。既可以处理典型的 Job-Shop 问题,也可以处理小批量、多品种的 FMS(Flexible Manufacturing System)调度问题。文中通过实验验证了算法的有效性。

关键词 生产调度;Petri 网;遗传算法;柔性制造系统

中图法分类号 TP393

Petri Net Based Modeling and GA Based Scheduling for FMS

HAO Dong JIANG Chang-Jun LIN Lin

(Department of Computer Science & Engineering, Tongji University, Shanghai 200092)

(Tongji Branch, National Engineering & Technology Center of High Performance Computer, Shanghai 200092)

Abstract In this paper a new way of applying GA algorithm to optimize FMS (Flexible Manufacturing System) scheduling is presented. First Petri net is used to model FMSs. Then GA algorithm is used to schedule the Petri net model, and a near optimized result is got. In the algorithm the firing sequences of the Petri net model are used as chromosomes. The authors choose the expected value model as selection operator. The fitness function is the makespan of the FMS and Power Scaling is used. The authors choose the two-point crossover method as crossover operator. The crossover points are chosen at the transitions if they can reach the same marking in the Petri net model. As to the mutation operator authors choose a mutation point randomly from the chromosome and apply a mutation algorithm which is similar to the Petri net reachability tree algorithm. Because the selection operator, the crossover operator and the mutation operator don't deal with the elements in the problem space, with the elements of Petri net model, the above algorithm compared with other scheduling algorithms, can be used in a wider range. Besides, the effect of the algorithm is proved by the experiment given in the paper.

Keywords scheduling; Petri net; GA algorithm; flexible manufacturing system

收稿日期:2004-04-28;修改稿收到日期:2004-10-10.本课题得到国家自然科学基金(60125205,90412013)、国家“八六三”高技术研究发展计划项目基金(2004AA014340)、国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2003CB316902)、上海高校网络技术 E-研究院(200306)、上海市重大计划项目基金和上海重点计划项目基金资助. 郝 东,男,1978 年生,硕士研究生,主要从事 Petri 网理论、FMS 调度优化、网格技术方面的研究. E-mail: donhoff_h@163.com. 蒋昌俊,男,1962 年生,博士,教授,博士生导师,研究方向为并发理论、软件形式化技术、网格计算等. 林 琳,女,1980 年生,硕士研究生,主要从事 Petri 网理论、并行计算、网格技术方面的研究.

1 引言

随着时代的发展,传统的单一品种、大批量生产制造方式已经逐渐不适应市场的要求,多品种、小批量的生产方式得到更广泛的应用。与传统方式相比,多品种、小批量的生产方式由于采用了柔性制造技术,能够及时确定客户需求,并按照订单调整生产计划和流程,进行生产。因此,这种生产方式更加适应市场多变的要求。

在这种多品种、小批量的生产方式中所采用的制造系统就是柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)。它由数控加工设备和设备间完成加工接续的自动材料传输系统组成,系统并存着异步推进的不同工艺流。并发、共享和加工路径的多样性等特点在提高系统生产力的同时,也为系统管理提出了很多新的挑战。在一定条件的制约下,如何统筹安排系统的制造行为,以获得优化的系统运行效率,这就是所谓的 FMS 制造调度优化问题。

Petri 网是 Petri 博士于 1962 年提出的一种系统描述和分析的工具,它适于描述并发、资源共享、加工途径多样性等离散事件动态系统的许多特征,因此非常适用于 FMS 制造的调度优化^[1]。同时,作为一种形式化的工具,应用 Petri 网的相关理论,可以有效地解决系统中的死锁问题。

目前,关于这方面的研究,主要可以分为两大类。一类是基于构造 Petri 网可达图的启发式搜索算法。例如,Shih 和 Sekiguchi^[2]在利用 Petri 网仿真 FMS 功能的过程中,利用局部调度解决冲突, Lee 和 DiCesare^[3]用人工智能的算法给出了一个解决生产调度问题的框架;Sun 和 Cheng^[4]对 Lee 的方法进行了改进,提出了有限扩展的 A* 算法;薛雷和郝跃^[5]则利用增强确定时间 Petri 网(下文简称增强 DTPN)和类 A* 算法进行了多目标优化,并在模型上弥补了前人在模型中没有考虑的柔性制造系统中存在的一些重要因素,如设备故障、定期维护、设备优先级和操作优先级等。这些方法在优化上起到了一定的作用,但是,由于启发函数往往和具体应用有关,而 Petri 网又存在众所周知的状态爆炸问题,因此,这些方法往往最终变成一种类似的广度查找算法,执行效率不高。

另一类主要是依靠遗传算法(简称 GA 算法)来实现调度优化。在这方面, Muth 和 Thompson^[6]最早使用遗传算法对一个 10×10 的 Job-Shop 问题进行了优化;Lin 和 Fu^[7]等使用着色时间 Petri 网和

GA 算法对一个 Wafer Probe Center 进行了建模和调度;Chung 和 Fu^[8]等使用 TPPN 和基因算法对一个 FMS 系统进行了建模和调度;Huang^[9]等使用 QCPN(Queueing Colored Petri Net) 和 GA 对 Wafer 制造进行了建模和调度;Xu 和 Wu^[10,11]也使用了 Petri 网和 GA 对 FMS 系统进行了建模和调度,并先后提出两个算法。这些方法对于快速有效地优化 FMS 调度起到了较好的作用。但是,总的来说,这些方法有以下不足:一是没有充分发挥 Petri 网的作用,如文献[10,11]中 Petri 网仅被用来检验是否有死锁;二是在染色体的编码上,这些方法与具体问题结合较亲密,这有利于获得较好地优化结果,但是也牺牲了一定的通用性。例如文献[6,10,11]中的算法主要适合解决 Job-Shop 类型的问题,并不适合解决 FMS 系统中的调度,因为这类调度存在多加工路径、有时需要考虑对机器的维修或者每个 Job 要加工多个产品的情况,这时,这些方法就显得通用性不足。此外, Lin 和 Fu^[7] 及 Huang^[9] 的算法是对循环加工过程的调度,更适合于对大批量生产的调度。

针对上述不足,本文从以下两方面来解决问题:(1)在文献[5]的基础上,提出了简化的 Petri 网加工模块,用这些模块建立的 FMS 模型不仅保证无死锁,而且这些模块对 FMS 系统具有足够的描述能力;(2)运用 GA 算法为 FMS 系统进行调度优化,其中染色体编码使用 FMS 系统的 Petri 网模型的激发序列作为染色体,而交叉和变异也只是对 Petri 网模型中的元素进行操作,没有直接对问题空间中的元素进行操作,因此,只要所要调度的问题可以用 Petri 网模型描述出来,就可以用这个算法进行调度,提高了算法的通用性。

本文第 2 节介绍增强时间 Petri 网(简称 DTPN)以及为 FMS 系统建模的模块;第 3 节详细介绍本文中遗传算法的编码方法、交叉方法、变异方法等;第 4 节用本文算法对一个 IC 制造例子进行实验;第 5 节进行总结。

2 增强 DTPN 模型与模块

2.1 增强 DTPN^[5] 的定义

增强 DTPN,即增强确定时间 Petri 网,是 Petri 网的子类,本文用它来对 FMS 建模。定义如下:

增强 DTPN 是一个七元组 $N = (P, T, I, O, H, \Lambda, m_0)$, 其中,

$P = \{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 是有限的 Place 集合, $m > 0$;

$T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 是有限的 Transition 集

合, $n > 0$, 满足 $P \cup T \neq \emptyset$ 且 $P \cap T = \emptyset$;

$I: P \times T \rightarrow N$ 是 Place 集合 P 到 Transition 集合 T 的输入函数;

$O: T \times P \rightarrow N$ 是 Transition 集合 T 到 Place 集合 P 的输出函数;

$H: P \times T \rightarrow N$ 是 Place 集合 P 到 Transition 集合 T 的测试函数;

$\Lambda: T \rightarrow R^+ \cup \{0\}$ 是给 Transition 集合 T 的每个元素定义一个操作时间的时间函数;

$m_0: P \rightarrow N^+ \cup \{0\}$ 是从 Place 集合 P 到正整数集合的初始标记函数.

运行规则:

$t \in T$ 在标记 m 被使能, 当且仅当

$$(\forall p \in P, m(p) \geq I(p, t)) \wedge$$

$$(\forall p \in P, H(p, t) \neq 0, m(p) < H(p, t)).$$

若 $t \in T$ 在标记 m 下被使能, 按照如下激活规则产生新标记 m' :

$$\forall p \in P, m'(p) = m(p) - I(p, t) + O(p, t).$$

2.2 建模模块

2.2.1 死锁情况的出现与解决

在 FMS 系统中, 死锁情况的出现主要表现在资源分配的冲突上. 例如, Job_1 和 Job_2 的加工都需要机器 1 和机器 2 共同完成, Job_1 已经获得了机器 1 的使用权, 等待机器 2 的使用权, 同时, Job_2 获得了机器 2 的使用权, 等待机器 1 的使用权, 在这种情况下, 如果两个 Job 都不是可以抢占的, 就会发生死锁. 如下图 1 的两个 Job 的加工过程, t_2 需要 m_2 中的令牌才能激发, t_6 需要 m_1 中的令牌才能激发, 两个 Job 都只获得了完成加工所需要的一部分资源, 另一部分被对方获得, 形成死锁.

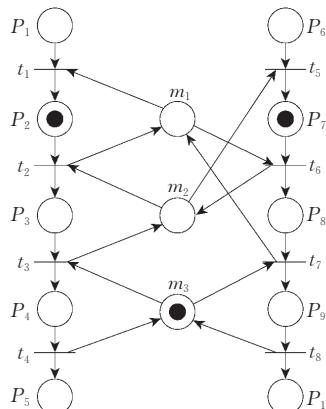


图 1 两 Job 加工过程

对于 Petri 网中死锁的解决, 已经有许多人做过研究, 如文献[12]中通过计算 Petri 网中的虹吸结构来解决死锁问题. 在 FMS 系统中对于死锁的

解决还可以通过添加表示缓冲区的 Place 来加以解决. 例如上面两个 Job 的例子, 添加缓冲区后的 Petri 网如图 2 所示, 这时已经不会再发生如上所述的死锁了. 文献[10]中在 GA 算法中通过嵌入查找虹吸结构的算法来解决死锁问题, 文献[11]中在 GA 算法中通过嵌入动态添加缓冲区的算法来解决死锁问题, 而本文通过下面小节所介绍的建模模块, 使得所构造出的 Petri 网模型不含有可能会导致死锁的结构. 因此, 在算法中不必考虑死锁这一问题. 该方法本质就是添加表示缓冲区的 Place.

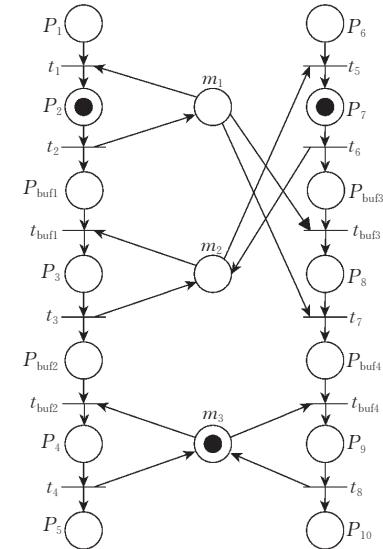


图 2 无死锁的两 Job 加工过程

2.2.2 建模模块

薛雷和郝跃在文献[5]中提出了使用 Petri 网模块为 FMS 系统建模的方法和几种加工模块. 该方法建立的 FMS 模型不含有导致死锁的结构. 本文在此基础上加以扩展, 使用下图 3 所示 5 个模块及图 4 所示的 4 个简化模块, 为 FMS 系统建模.

图 3 中 Place 和 Transition 的含义如下: P_k^R 表示资源 R_k ; $P_{i,j}^I$ 表示作业 J_i 完成第 j 步操作, 在缓冲区中等待下一步处理; $P_{i,j,k}^O$ 表示作业 J_i 的第 j 步在资源 R_k 上进行加工; $P_{k,cnt}^M$ 表示资源 R_k 自从上次维修后至今已连续加工了多少个产品; P_k^M 表示正在进行资源 R_k 的维护操作; $t_{i,j,k}^B$ 表示作业 J_i 使用资源 R_k 开始进行第 j 步的加工; $t_{i,j,k}^E$ 表示作业 J_i 结束使用资源 R_k 的第 j 步加工; t_k^{Mb} 表示资源 R_k 的维修工作开始; t_k^{Me} 表示资源 R_k 的维修工作结束.

若不考虑设备优先级模块, 其它模块可以进一步简化为图 4, 其中 Place 和 Transition 的含义与图 3 类似, 这里不再赘述. 与图 3 相比, 这些模块精简掉一些 Place 和 Transition, 有利于简化 FMS 系统 Petri 网模型的结构.

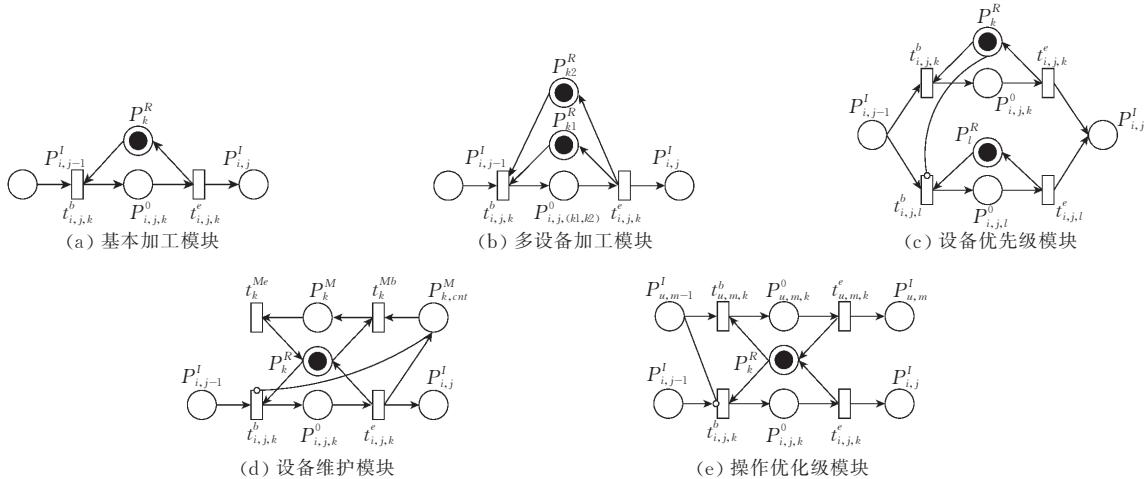


图 3 建模模块

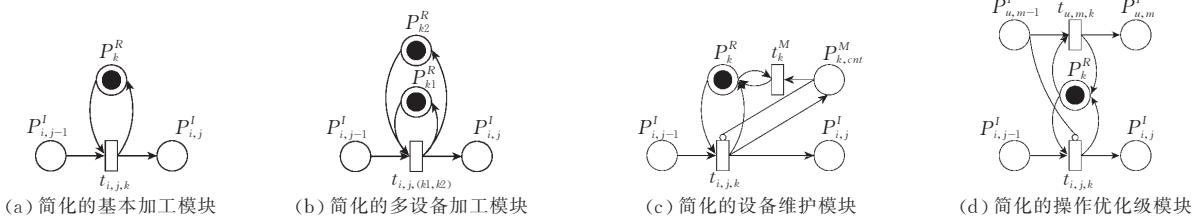


图 4 简化的建模模块

使用图 3 和图 4 的 9 个模块, 经过简单的拼接, 就可以对生产加工过程进行建模。这些模型即可以刻画 Job-Shop 问题, 也可以对具有多加工路径、要求每个 Job 加工多个产品的 FMS 系统进行描述。

3 调度算法

正如前文所述, 关于生产调度的算法主要分为两类。遗传算法具有全局搜索能力, 目前得到了越来越多的应用, 本文也采用遗传算法。文献[6, 10]和文献[11]都尝试了用遗传算法来优化生产调度, 并取得较好的结果。这些方法在对染色体的编码方面, 基本上都是采用把各个 Job 的操作分配到各个机器上的编码方式, 算法与所需解决的问题结合紧密。当问题的类型发生了变化时, 例如需要考虑对设备的定期维护, 或者需要考虑每个 Job 加工多个产品, 这种编码方式就不再合适, 需要改进。而改变编码方式, 也就意味着改变算法, 所以, 这些算法在通用性方面受到限制。

本文充分利用 Petri 网模型, 在对染色体编码时, 不是对问题空间中的元素(如各个 Job 的操作)编码, 而是对 Petri 网模型空间中的元素编码, 提高了算法的通用性。具体的说, 就是以 Petri 网中转移的激发序列作为染色体, 每一个 Petri 网模型的激发序列就代表了一个可行的调度方案。这使得算法与 Petri 网模型结合紧密, 而与所需解决的问题无

关。要解决的问题只需映射为对应的 Petri 网模型即可。本文第 2 节中给出的 9 个模块, 对于各种类型的生产调度问题都能进行描述。

3.1 染色体编码

对于一个 Petri 网(本文是其子类 DTPN), 若存在激发序列 $\sigma = t_1 t_2 t_3 \dots t_i t_j \dots t_{n-1} t_n$, 使得 $m_0[\sigma > m_f]$, 则 σ 是一条染色体, 其中 m_0 是初始标记, m_f 是结束标记, $t_1, t_2, t_3, \dots, t_i, t_j, \dots, t_{n-1}, t_n \in T$ 。

3.2 适应度函数与定标

根据 DTPN, 可以计算每一个染色体 σ 的总时间, 也就是整个加工调度的时间, 记为 $time(\sigma)$ 。由于遗传算法要求越好的解有越大的适应度, 因此取适应度函数为

$$f(\sigma) = \begin{cases} C_{\max} - time(\sigma), & \text{当 } time(\sigma) < C_{\max}, \\ 0, & \text{其它情况} \end{cases}$$

其中, C_{\max} 是一个合适的输入值。

由于乘幂标^[6]的定标方法具有灵活简单、不会产生负适应度的特点, 本文采用乘幂标的定标方法。即

$$f'(\sigma) = f^K(\sigma),$$

其中 K 为一个输入参数, 本文取为 1.005。

3.3 选择算子

本文采用期望值方法^[6]作为选择算子, 即群体中每一个个体在下一代生存的期望数目为

$$M = \frac{f'(\sigma_i)}{\sum f'(\sigma_i)} \cdot n,$$

其中, n 为父代群体的数量.

3.4 交叉算子

交叉算子的操作如下:

(1) 将群体中的染色体随机配对, 设 σ 和 σ' 为配对的两条父染色体;

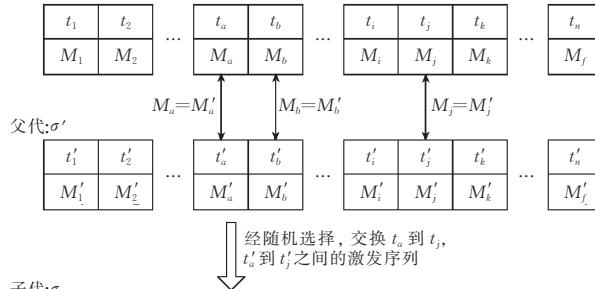
(2) 按照 σ 和 σ' 所代表的激发序列对转移逐个激发, 生成中间标记;

(3) 在 σ 和 σ' 中查找具有相同标记的基因座, 并将每一对具有相同标记的基因座记录下来;

(4) 在查找到的具有相同标记的基因座对中, 随机选取两对, 将这两对之间的基因片断(即激发序列)进行交换.

图 5 展示了这一过程: 父代染色体 σ 和 σ' 中, 共有 3 对基因座对应的标记是相同的, 即 $M_a = M'_a$, $M_b = M'_b$, $M_j = M'_j$, 经随机选择, 选择了 (t_a, t'_a) 和 (t_j, t'_j) 这两对基因座, 然后交换这两对基因座之间的基因片断(即激发序列).

父代: σ



子代: σ

t_1	t_2
M_1	M_2

 \dots

t_a	t'_b
M_a	M'_b

 \dots

t'_i	t_j	t_k
M'_i	M_j	M_k

 \dots

t_n
M_f

子代: σ'

t'_1	t'_2
M'_1	M'_2

 \dots

t'_a	t_b
M'_a	M_b

 \dots

t_i	t'_j	t'_k
M_i	M'_j	M'_k

 \dots

t'_n
M'_f

图 5 染色体交叉过程

3.5 变异算子

遗传算法中, 导入变异算子的目的在于使遗传算法具有局部随机搜索能力.“当遗传算法通过交叉算子已接近最优解邻域, 利用变异算子的这种局部随机搜索能力可以加速向最优解收敛”(文献[6]第 85 页).

由于本文采用激发序列作为染色体编码, 若随机改变激发序列中的一个转移, 极有可能会导致该染色体为不可行解. 以前的研究主要有两类方法来解决这一问题: 一是随机改变染色体, 若生成了不可行解, 再进行改正; 第二类方法是在进行变异时保证不会产生不可行解. 本文的变异算法属于第二类. 下面是算法步骤:

1. 初始化: OpenTable 清空, CloseTable 清空, ChildTable 清空, ResultTable 清空, 把初始标识 m_0 放入 OpenTable;

2. 从染色体 σ 中随机选择一个基因座, 将该基因座所对应的 Marking 放入 OpenTable;

3. 如果 OpenTable 不空, 转步 4; 否则转步 8;

4. 从 OpenTable 中取出一个标识 m , 放入 CloseTable;

5. 找到标识 m 下所有使能的 Transition;

6. 激活每一个使能的 Transition, 产生 m 的子标识 m' , 计算 m' 的到达时间, 设置父亲标识为 m ;

7. 对 m 的每个子标识 m' , 如果 m' 是结束标识, 把 m' 放入 ResultTable; 否则放入 ChildTable, 转步 3;

8. 若 ChildTable 不空, 转步 9; 否则转步 10;

9. 从 ChildTable 中, 按照标识的时间的大小选取前 N (N 为自然数, 是算法的输入参数之一) 个标识, 放入 OpenTable, 并丢弃其余标识, 然后转入步 3;

10. 从 ResultTable 中取出时间最小的一个标识, 得到生成该标识的转移和父标识, 如此递归得到一个激发序列;

11. 将染色体 σ 的变异基因座之前的激发序列与步 10 中得到的激发序列连接, 得到新染色体 σ' , 该染色体即为变异后的染色体.

由于变异算子只是遗传算法迭代过程中的一步, 上述变异算子中的 N 不宜取太大, 否则影响遗传算法的效率. 本文推荐 $N=10$ (在后面的实验中也设置 N 为 10).

4 实验

本文对一个实际 IC 生产线的光刻单元进行了调度. 该问题可抽象如下: 有两种 Job, 每种 Job 需加工 3 个产品, 每个 Job 都有 3 个阶段, 每个阶段有多台机器可以完成这一阶段的任务, 如表 1. 要求优先选用排在前面的机器, 例如, Job_1 的第 2 阶段, 当 M_2, M_3, M_4 三台机器都可用时, 优先选择 M_2 , 次选择 M_3 , 最后选择 M_4 . 调度过程中要考虑对机器进行定期维护. 对机器的维护时间为 5, 每个机器每加工两次必须维修一次, 加工时间见表 2.

表 1 光刻单元加工过程

	$Job_1 (lot=3)$	$Job_2 (lot=3)$
1	M_1/M_2	$M_1/M_3/M_4$
2	$M_2/M_3/M_4$	$M_1/M_2/M_3$
3	$M_1/M_2/M_4$	M_4

表 2 光刻单元加工时间

	M_1	M_2	M_3	M_4
Job_1	第 1 阶段	15	20	/
	第 2 阶段	/	25	30
	第 3 阶段	20	20	/
Job_2	第 1 阶段	15	/	20
	第 2 阶段	25	25	30
	第 3 阶段	/	/	30

这个问题是一个典型的小批量、多品种的生产加工调度问题。系统中存在多加工路径、需考虑设备优先级和设备维护等特点，因此需要把第 2 节中介绍的设备优先级模块和设备维护模块结合起来使用。图 8~图 13 给出了该问题各个加工阶段的 Petri 网模型，图中具有相同名称的 Place(或 Transition)是同一个 Place(或 Transition)，Place 和 Transition 名称的含义可参见第 2.2.2 小节。用同样的 Petri 网模型，本文用文献[5]中的算法进行调度，得到了 175 的优化结果。

由于 GA 算法具有一定的随机性，本文做了 20 次实验，实验结果见表 3，图 6 显示了其中一次优化过程。实验环境为曙光 3000 系统，操作系统为

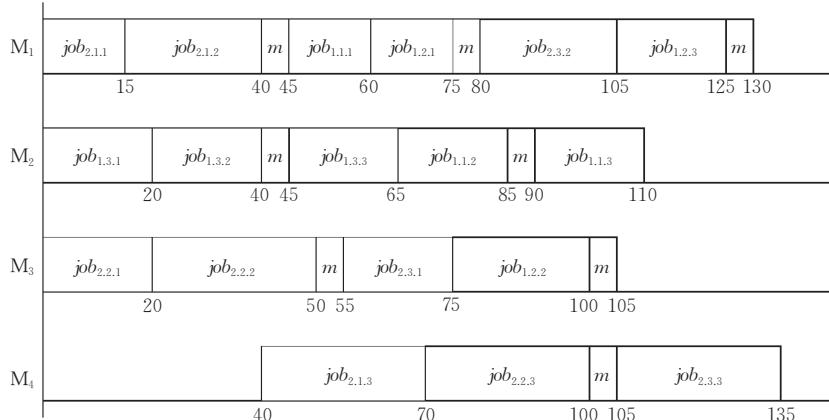


图 7 操作在机器上分配的 Gantt 图

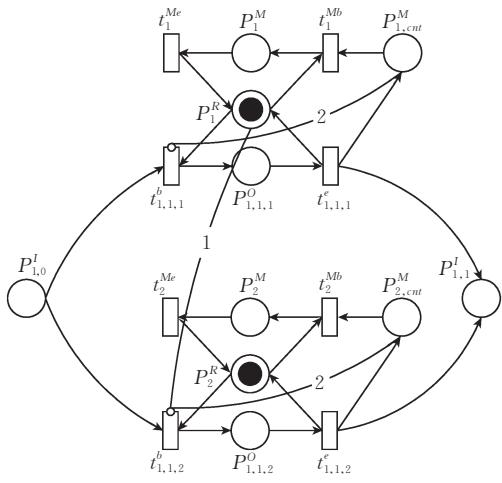


图 8 *Job*₁ 第 1 阶段加工过程的 Petri 网模型

从表 3 可以看到，20 次实验结果中共有 16 次获得了 135 的优化结果，3 次获得 140 的优化结果，1 次获得 155 的优化结果，全都优于 175 的优化结果，平均每次优化耗时 2min7s。因此，本文的算法对该问题给出了较好的调度效果，并且执行效率较高。

图 7 给出了其中一次实验结果在 4 台机器上分

AIX4.3.3，程序用 C 语言编写。实验中各参数设置为代沟 $G=0.85$ ，交叉概率 $P_c=0.9$ ，变异概率 $P_m=0.2$ ，初始群体数量 $Q=100$ ，迭代次数为 $GEN=100$ 。

表 3 优化结果

优化结果	产生的次数
135	16
140	3
155	1

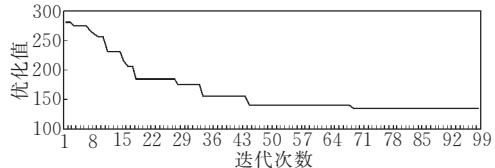


图 6 优化过程

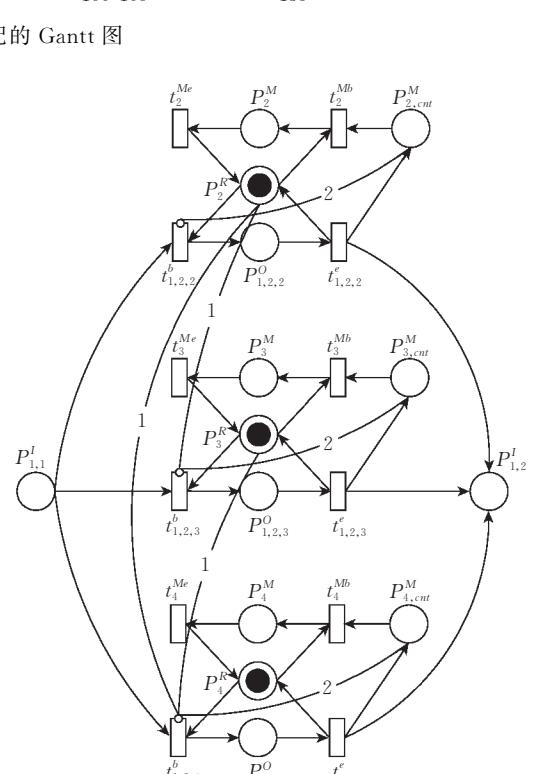
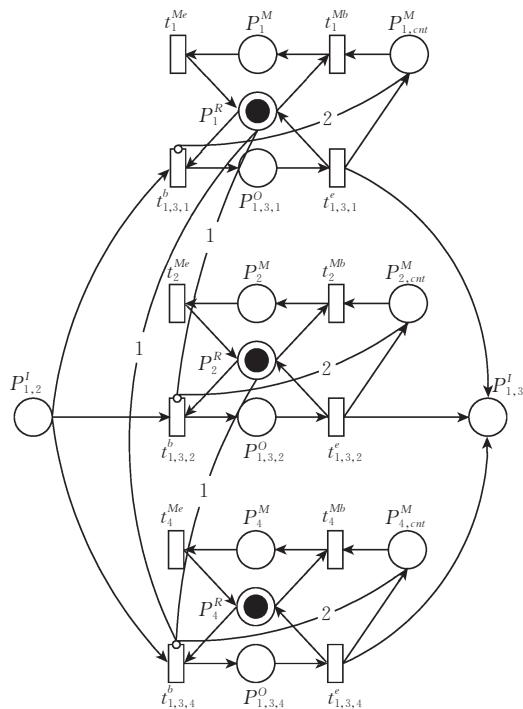
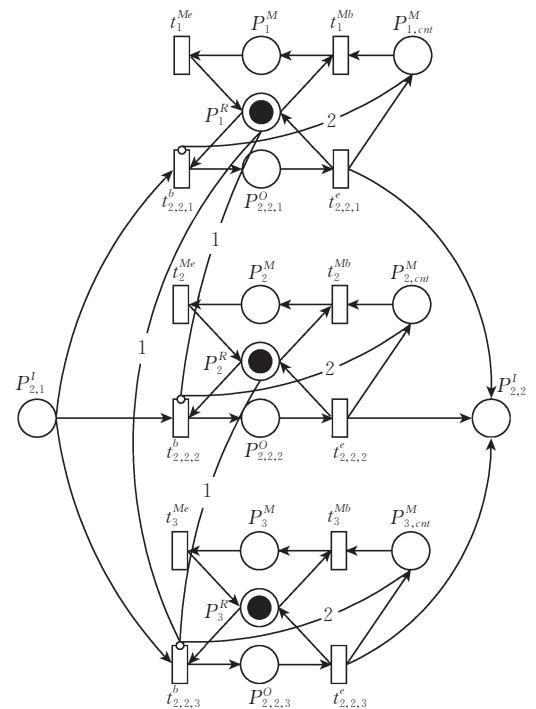
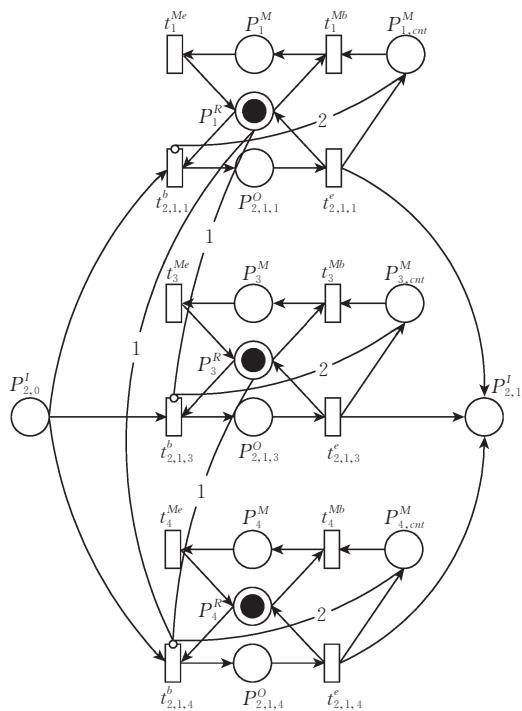
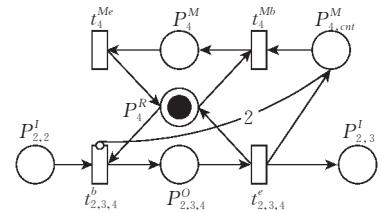


图 9 *Job*₁ 第 2 阶段加工过程的 Petri 网模型

图 10 Job_1 第 3 阶段加工过程的 Petri 网模型图 12 Job_2 第 2 阶段加工过程的 Petri 网模型图 11 Job_2 第 1 阶段加工过程的 Petri 网模型

配的 Gantt 图,其中符号含义如下: $job_{i,j,k}$ 表示 Job_i 的第 j 个工件的第 k 步操作; m 表示对机器进行维修; M_i 表示第 i 台机器。对该结果进行瓶颈分析,可以看出 M_4 是瓶颈,即在 4 台机器中最后一个完成分配的任务,且不论如何重新组合机器间的调度,已经不可能把机器 4 的任务完成时间进一步提前,所以该调度即为一个最优调度,即 $minimal makespan=135$ 。

图 13 Job_2 第 3 阶段加工过程的 Petri 网模型

5 结 论

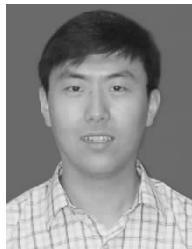
本文提出了一种应用遗传算法解决 FMS 系统调度优化问题的新方法。以往应用遗传算法主要解决一些 Job-Shop 类型的调度问题,算法与问题结合紧密,通用性不足,难以用来解决 FMS 系统的调度。本文的算法由于以 FMS 系统 Petri 网模型的激发序列为染色体,算法中的选择、交叉和变异算子都是对 Petri 网模型中的元素进行操作,与问题空间中的元素无关,因此,只要所调度优化的问题能够用 Petri 网模型描述出来即可。本文给出的模块化建模方法,使得所建模型能够充分描述各种系统,又能保证无死锁。因此,将本文提出的算法和模块化建模方法相结合,提高了算法的通用性,既可以解决 Job-Shop 类型的问题,也可以解决 FMS 系统的调度问题。文中用实验验证了算法的有效性。

今后进一步的研究工作是结合曙光 3000 和 AIX4.3.3 的并行能力,研究用 Petri 网对 FMS 系

统调度优化的并行算法.

参 考 文 献

- 1 Zhou M. C., Jeng M. D.. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A Petri net approach. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1998, 11(3): 333~357
- 2 Shih H., Sekiguchi T.. A timed Petri net and beam search based on-line FMS scheduling systems with routing flexibility. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, 1991, 2548~2553
- 3 Lee D. Y., DiCesare F.. FMS scheduling using Petri nets and heuristic search. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1994, 10(2): 123~132
- 4 Sun Tien-Hsiang, Cheng Chao-Weng, Fu Li-Chen. A Petri net based approach to modeling and scheduling and scheduling for an FMS and a case study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1994, 41(6): 593~601
- 5 Xue Lei, Hao Yue. Petri net based scheduling for integrated circuits manufacturing. *ACTA Electronica Sinca*, 2001, 29(8): 1064~1067(in Chinese)
(薛 雷,郝跃.面向集成电路制造的基于 Petri 网的生产调度.电子学报,2001,29(8): 1064~1067)
- 6 Chen Guo-Liang, Wang Xu-Fa *et al.*. The Theory & Application of Genetic Algorithm. Beijing: People's Posts & Telecommunications Publishing House, 1996(in Chinese)
- 7 Lin Shun-Yu, Fu Li-Chen, Chiang Tsung-Che, Shen Yi-Shuan. Colored timed Petri-net and GA based approach to modeling and scheduling for wafer probe center. In: *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Taipei, 2003, 1: 1434~1439
- 8 Chung Yung-Yi, Fu Li-Chen, Lin Ming-Wei. Petri net based modeling and GA based scheduling for a flexible manufacturing system. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control*, Tampa, Florida, 1998, 4: 4346~4347
- 9 Huang An-Chih, Fu Li-Chen, Lin Ming-Hung, Lin Shun-Yu. Modeling, scheduling, and prediction for wafer fabrication: Queueing colored Petri-net and GA based approach. In: *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Washington DC, 2002, 3: 3187~3192
- 10 Xu Gang, Wu Zhi-Ming. Deadlock-free scheduling method using Petri net model analysis and GA search. In: *Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications*, Glasgow, Scotland, 2002, 2: 1153~1158
- 11 Xu Gang, Wu Zhi-Ming. Deadlock-Free Scheduling Strategy for Automated Production Cell. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A*, 2004, 34(1): 113~122
- 12 Yuan Chong-Yi. The Principle of Petri Net. Beijing: Peking University Press, 1999(in Chinese)
(袁崇义著. Petri 网原理.北京:北京大学出版社, 1999)



HAO Dong, born in 1978, M. S. candidate. His research interests include Petri net theory, FMS scheduling algorithm, and grid technology.

Background

National Natural Science Foundation (No. 60125205) is focused on the behavior analyzing theory and method of Petri net. National Natural Science Foundation (No. 90412013) concentrates on the Grid resource organizing and managing model and technique. National Basic Research Program of China (973 Program)(2003CB316902) makes research on the verification theory and service integration of semantic Grid. National 863 Plan (2004AA014340) researches on the Grid technique in Transportation Information System. Shanghai Science & Technology Research Plan works on Grid architec-

(陈国良,王煦法等. 遗传算法及其应用. 北京:人民邮电出版社,1996)

- JIANG Chang-Jun, born in 1962, Ph. D., professor, Ph. D. supervisor. His research interests include concurrency theory, software formalization technology, and grid computing.
- LIN LIN, born in 1980, M. S. candidate. Her research interests include Petri net theory, parallel computing, and grid technology.

ture and its supporting technology. Shanghai College Grid Technique E-Academy works on the Grid-QoS based scheduling and charging middleware.

Authors' work explores Petri Net's modeling and analyzing theory, combines them with the GA algorithm and applies it to solve the FMS scheduling problem.

Authors' other research work includes: Modeling of IC Manufacturing System, Grid QoS Middleware research (mainly focus on Grid resources scheduling).