



# 基于 Petri 网的启发式生产调度

薛雷 郝跃

(西安电子科技大学微电子研究所 西安 710071)

(E-mail: hopexuel@hotmail.com)

**摘要** 提出一种新的柔性制造系统调度方法. 该方法可以通过引入测试弧增强普通 Petri 网的建模能力, 可以对系统中的设备维护、设备优先级以及操作优先级进行建模, 并进一步利用搜索算法对模型的状态转换空间进行启发式搜索得到优化调度. 文中的实例展示了算法的有效性.

**关键词** 生产调度, 柔性制造系统, Petri 网, 启发式搜索

**中图分类号** TN43

## PETRI NET BASED HEURISTIC SEARCH FOR SCHEDULING

XUE Lei HAO Yue

(Institute of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071)

(E-mail: hopexuel@hotmail.com)

**Abstract** This paper provides a new scheduling method for flexible manufacturing systems (FMS). Through introducing the test arc to traditional timed-place Petri net, a new Petri net, the extended timed-place Petri net, is proposed. It can concisely represent not only general features of FMS, but also the device maintenance, device priority, and operation priority. By the use of search method to reachability graph of constructed models, the optimized scheduling is obtained. Experimental results are presented to show the effectiveness of the method.

**Key words** Scheduling, flexible manufacturing system, Petri net, heuristic search

## 1 引言

在柔性制造系统(FMS)中,在满足工艺要求的前提下,如何统筹安排各种不同工艺的制造顺序、分配系统资源、获得优化的系统运行效率?这就是所谓的生产调度<sup>[1]</sup>问题.针对调度问题已经提出了很多方法<sup>[2]</sup>,例如排队论模型、数学规划、系统仿真、控制理论等,但是这

些方法描述问题的能力很有限,所以寻找更加有效的方法是很有必要的.

Petri 网<sup>[3]</sup>(PN's)作为一种描述离散事件动态系统(DEDs)的强有力的图形化的数学工具,被广泛地用来分析 DEDs 的系统性能<sup>[4]</sup>.在文献中接触到的与生产调度有关的 PN's 研究中,Shih 和 Sekiguchi<sup>[5]</sup>在利用 PN's 仿真 FMS 功能的过程中利用局部调度解决冲突;Lee 和 DiCesare<sup>[6]</sup>用人工智能的算法  $A^*$  给出了一个解决生产调度问题的框架;Sun 和 Cheng<sup>[7]</sup>对 Lee 的方法进行了改进,提出了有限扩展的  $A^*$  算法.共同的不足是,首先是柔性制造系统中存在的设备故障、定期维护、设备的优先级和操作的优先级等都是影响系统性能的不可忽略的重要因素,而以上研究在模型上没有考虑它们,因此得到的调度在实际系统中不能获得预期性能;其次,他们的评估函数都是单目标的,而实际生产系统的性能是由多目标决定的,所以多目标评价函数更具实际意义.

本文的研究正是针对以上不足,给出了一个实用有效的调度方法.

## 2 模型的建立

普通 PN's 只能描述系统的控制结构,而不能描述系统随着时间演变的特性,为了支持系统性能研究,本文在确定时间 PN's(DTPN's)基础上提出一种增强 DTPN's 模型.

**定义 1.** 增强 DTPN's 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  $P \cup T = \emptyset$  且  $P \cap T = \emptyset$ ,

$I: P \times T \rightarrow N$  是  $P$  到  $T$  的输入函数,

$O: P \times T \rightarrow N$  是  $T$  到  $P$  的输出函数,

$H: P \times T \rightarrow N$  是  $P$  到  $T$  的测试函数,

$\Lambda: P \times R^{\oplus} \cup \{0\}$  是给  $P$  的每个元素定义一个操作时间的函数,

$m_0: P \rightarrow I^{\oplus} \cup \{0\}$  是定义从  $P$  到正整数集合的初始标记函数.

运行规则是,  $t \in T$  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  $m'$

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

为了便于论述,首先给出本文研究的制造系统的抽象:有  $n$  种产品  $J = \{J_i | i=1, \dots, n\}$  在由  $m$  个不同的资源  $R = \{R_i | i=1, \dots, m\}$  组成的系统中生产,产品  $J_i$  必须按工艺规程顺序经过如下的工艺步  $O_i = \{O_{i,j} | j=1, \dots, s_i\}$ , 每一个工艺步  $O_{i,j}$  可以由资源组  $R_{i,j} = \{R_{i,j,k} | R_{i,j,k} \subseteq R\}$  中任何一个资源完成,对应的操作时间为  $C_{i,j} = \{C_{i,j,k} | k=1, \dots, |R_{i,j}|\}$ . 在制造过程中资源是独占的,而且是非抢先的;同一个产品的工艺顺序必须保证,不同产品之间没有顺序要求. 针对上述抽象,以下给出 Place 和 Transition 在本文的模型中的特定语意.

1) Place 表示资源、操作和系统状态. 用  $p_i^R$  表示资源  $R_i$ ,  $m_0(p_i^R)$  表示系统中该资源的可用数目;用  $p_i^I$  表示系统输入缓冲区,  $m_0(p_i^I)$  表示该系统中尚未开始加工的  $J_i$  产品的个数;用  $p_{i,j,k}^O$  表示产品  $J_i$  的第  $j$  个工艺步  $O_{i,j}$  在资源  $R_{i,j,k}$  上加工;  $m(p_{j,cont}^M)$  表示资源  $R_j$  从上一次

维护至今已连续加工了多少个产品; $p_j^{Me}$  表示资源  $R_j$  的维护操作正在进行; $P_{i,j}^I$  表示产品  $J_i$  完成操作  $O_{i,j}$  后在缓冲区中等待下一步的处理; $p_i^O$  表示系统输出缓冲区, $m(p_i^O)$  表示产品  $J_i$  已经加工好的个数.

2) Transition 表示一个操作的开始或结束. 用  $t_{i,j,k}^b$  表示产品  $J_i$  的工艺步  $O_{i,j}$  在资源  $R_{i,j,k}$  上开始加工; $t_{i,j,k}^e$  表示产品  $J_i$  的工艺步  $O_{i,j}$  在资源  $R_{i,j,k}$  上加工完成, $t_j^{Mb}$  表示资源  $R_j$  的维护操作开始; $t_j^{Me}$  表示资源  $R_j$  的维护操作结束.

在以上语意基础上,建模采用至底向上<sup>[3,7]</sup>(Bottom-Up)的模块式构造方法.具体到 IC 制造系统,按照工艺步划分子系统,利用基本子网对系统中每一个工艺步进行建模.这些子网含有表示它们之间交互作用的共同部分,然后通过把这些共同部分按照一定要求合并,就得到整个制造过程的完整 PN's 模型.图 1 给出 IC 制造系统的几个主要的基本子网,图中无向弧是测试弧.

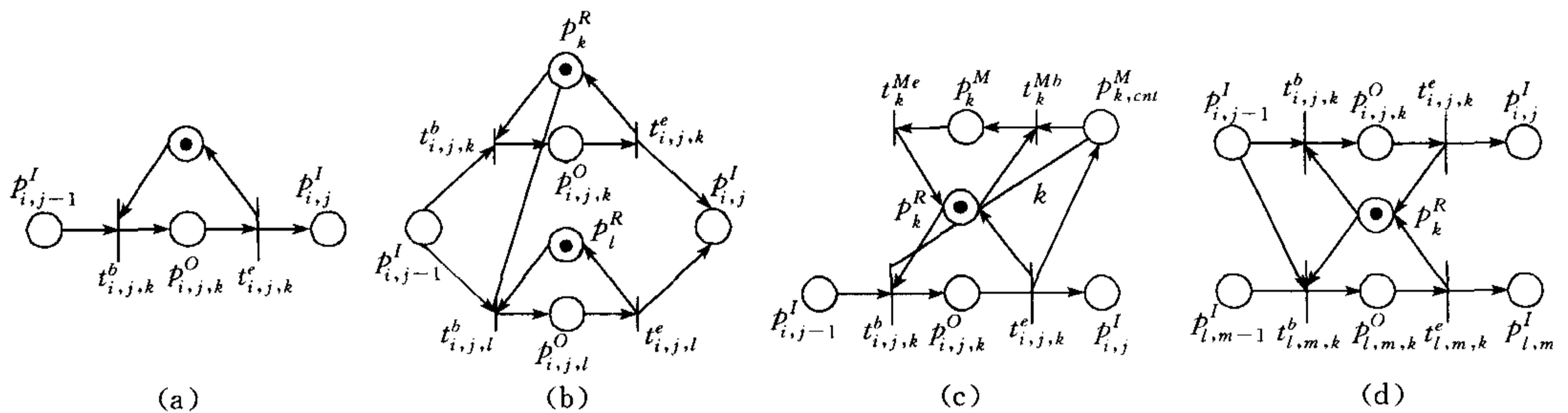


图 1 基本子网

### 3 调度算法及实例

得到了系统的增强 DTPN's 模型后,调度问题和算法就可以描述成以下的搜索优化问题.

搜索空间:系统 DTPN's 模型的状态空间.

搜索目标:找到使代价函数  $C: F \rightarrow R^+$  最小的从初始标记到最终标记的 Transition 激活序列, $F$  是系统增强 DTPN's 模型中初始标记到最终标记的所有可能 Transition 激活序列.

算法描述:

- 1) 把初始标记  $m_0$  放入 Open Table 表中;
- 2) 如果 Open Table 空,返回错误,结束算法;
- 3) 把 Open Table 中取得第一个标记  $m$  移到 Closed Table 中;
- 4) 如果  $m$  是目标状态,返回构造好的从初始状态出发到目标状态的优化路径,结束算法;
- 5) 否则,找到在标记  $m$  下所有使能的 Transition;
- 6) 激活每一个使能 Transition 产生  $m$  的孩子标记  $m'$ ,得到代价函数  $g(m')$ ,设父亲标记为  $m$ ;

7) 对  $m$  的每个孩子标记  $m'$

(i) 如果  $m'$  已经在 Open Table 中, 如果当前的  $g(m')$  小于 Open Table 中的  $m'$  的  $g(m')$ , 则修改  $m'$  父亲标记为  $m$ ,

(ii) 如果  $m'$  已经在 Close Table 中, 且它的  $g(m')$  小于 Close Table 中的  $m'$  的  $g(m')$ , 则修改  $m'$  的父亲标记为  $m$ , 并把 Close Table 中的  $m'$  移回 Open Table,

(iii) 否则, 计算  $f(m') = g(m') + h(m')$ , 把  $m'$  按  $f$  的升序插入 Open Table;

8) 跳转到 2).

该算法在 SUN Ultra-10 工作站上采用 Watcom C++ 开发, 分别利用启发函数  $h_1(m) = 0$

表 1 产品工艺描述

	$J_1(Lot=3)$	$J_2(Lot=3)$
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	$M_1/M_2/M_4$	$M_4$

和  $h_2(m) = -\omega * dep(m)$  对表 1 所示的制造系统的生产周期  $T(m)$  和操作成本  $C(m)$  进行单目标优化(结果如表 2), 多目标优化采用加权和的形式构造优化函数  $S(m) = \alpha T(m) + (1-\alpha)C(m)$ (结果如表 3 所示), 从实验结果可以看出:

表 2 生产周期  $T(m)$  和  $C(m)$  的单目标优化结果

启发函数	$T(m)$			$C(m)$		
	循环次数	探索深度	优化结果	循环次数	探索深度	优化结果
$h_1(m)$	962	38	85	920	38	118.8
$\omega=0.1$	1058	38	85	1019	38	118.8
$\omega=0.3$	1053	38	85	1010	38	118.8
$\omega=0.5$	1030	38	85	1004	38	118.8
$\omega=1$	884	38	85	994	38	118.8
$h_2(m)$ $\omega=2$	257	38	85	651	38	118.8
$\omega=3$	95	40	93	600	38	120.32
$\omega=4$	47	40	98	139	38	130.29
$\omega=5$	45	40	98	96	40	150.48
$\omega=6$	41	40	98	51	40	172.23

表 3 多目标优化结果

启发函数	循环次数	探索深度	优化结果			
			$T(m)$	$C(m)$	$S(m)$	
$h_1(m)$	$\alpha=0.1$	931	38	102	118.8	117.12
	$\alpha=0.4$	994	38	102	118.8	112.08
	$\alpha=0.6$	999	38	93	124.37	105.55
	$\alpha=0.9$	973	38	85	133.0	89.80
$h_2(m)^*$	$\omega=1$	1041	38	93	124.37	105.55
	$\omega=2$	994	38	93	124.37	105.55
	$\omega=3$	954	38	93	124.37	105.55
	$\omega=3.3$	603	40	95	128.440	108.376
	$\omega=3.5$	329	40	96	137.33	112.532

\* 针对  $\alpha=0.6$  的和函数进行.

1) 对没有考虑设备维护和设备优先级以及操作优先级的模型进行单目标调度  $\min(C(m)) = 74$ ,  $\min(T(m)) = 68.150$ , 它们和上面所得的最优值有明显的差异, 所以这些特性在建模时必须考虑;

2) 利用启发函数  $h_1(m)$  得到的是最优解, 利用  $h_2(m)$  不能保证得到最优解, 但是可以根据问题的精度选择合适的  $\omega$ , 在有限时间复杂度内得到可行解, 所以合理选择  $\omega$ , 在解的精

度和算法时间复杂度之间求得平衡是很关键的.

## 4 结论

文中提出的增强 DTPN's 除了具备传统 DTPN's 的建模能力之外,还可以对系统的设备维护、各种优先级等特性进行描述,得到对生产系统更完善更精确的刻画.利用图的广度优先遍历和增强 DTPN's 运行机制相结合而得到的调度算法,可以根据优化问题的精度要求,在有限时间复杂度内,完成单目标或多目标调度问题的求解.

## 参 考 文 献

- 1 Baker K R. Introduction to Sequencing and Scheduling. New York: John Wiley & Sons, 1974
- 2 Rodammer F. A recent survey of production scheduling. *IEEE Trans. System Man and Cybernetic*, 1988, **18**(6): 841~851
- 3 Zhou Meng-Chu. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A Petri net approach. *IEEE Trans. Semiconductor Manufacturing*, 1998, **11**(3):333~357
- 4 Al-Jaar R Y. Performance evaluation of automated manufacturing systems using generalized stochastic Petri nets. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1990, **6**(6):621~639
- 5 Shih H. A timed Petri net and beam search based on-line FMS scheduling system with routing flexibility. In: Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, CA. , 1991. 2548~2553
- 6 Lee D Y. FMS scheduling using Petri nets and heuristic search. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 1994, **10**(2):123~132
- 7 Sun Tien-Hsiang. A Petri net based approach to modeling and scheduling for an FMS and a case study. *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 1994, **41**(6):593~601

**薛 雷** 于 1995 年和 1998 年分别获得西安交通大学计算机应用学士学位和计算机系统结构硕士学位.现在西安电子科技大学微电子所攻读博士学位,主要从事离散事件动态系统、集成电路虚拟制造、面向对象的分布式计算及实时多任务操作系统的研究.

**郝 跃** 于 1985 和 1991 年分别获得西安电子科技大学硕士学位和西安交通大学博士学位,教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,国家有突出贡献中青年专家,IEEE 高级会员.目前主要的研究领域包括集成电路可制造性、可靠性的理论和方法论、新型半导体材料和器件、集成电路统计建模及仿真技术等.