

面向集成电路制造的基于 Petri 网的生产调度

薛 雷 郝 跃

(西安电子科技大学微电子所,陕西西安 710071)

摘 要: 本文提出了一个新的面向集成电路(IC)制造的调度方法,核心内容包括两方面:首先,用本文提出的扩展定时 Petri 网对 IC 生产工艺进行描述;其次,对所得 Petri 网模型的状态空间进行搜索,得到以 Transition 序列表示的最优或近似最优调度.该方法可以很好地描述 IC 制造系统中存在的多制造路径、资源共享、可变晶片组及并发等特性,通过引入测试弧增强 Petri 网的建模能力,进而在调度模型上对设备维护、设备优先级以及操作优先级进行描述,而且支持多目标的评价函数,使得到的调度结果更具实用价值.文中给出试验结果表明了算法的有效性.

关键词: 生产调度; Petri 网; 启发式搜索

中图分类号: TN454.06

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2001) 08-1064-04

Petri Net Based Scheduling for Integrated Circuits Manufacturing

XUE Lei, HAO Yue

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

Abstract: Petri net modeling combined with heuristic search provides a new scheduling method for Integrated Circuits (IC) manufacturing systems. The method includes two steps. First, it formulates the scheduling problem with extended timed-place Petri net model. Second, with the help of heuristic function to limit the search space, it applies a search algorithm to reachability graph of the Petri net model to find an optimal or near optimal feasible schedule in terms of the firing sequence of the transitions. Introducing the test arc to traditional timed-place Petri net, this paper proposed a new Petri net, the extended timed-place Petri net. It can concisely represent not only features of IC manufacturing system, such as routing flexibility, shared resources, varied lot sizes, etc., but also the device maintenance, device priority and operation priority. Therefore, the schedule obtained is more practical. Experimental results are presented to show the effectiveness of the method.

Key words: scheduling; Petri net; heuristic search

1 引言

集成电路(IC)制造系统是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.系统中并存着异步推进的不同工艺流,并发、资源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?这就是所谓的生产调度问题^[1].本文正是针对 IC 制造系统,给出一种基于 Petri 网模型的生产调度算法.

Petri 网^[2](PN's)可以很好地描述并发、资源共享、加工途径多样性等离散事件动态系统(EDDS)的诸多特征,在一个统一的形式化方法下,精确地描述制造系统中的资源、加工行为以及它们之间的相互关系,所以被广泛地用在柔性制造系统(FMS)的研究中^[3,4].但是利用它来解决 IC 生产调度问题在文献中还没有看到,相关研究包括,Shih 和 Sekiguchi^[5]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^[6]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^[7]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,而以上的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的性能.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有实际意义.

本文的研究针对以上不足,给出了一个实用有效的调度方法.以下分三个部分进行论述,首先给出建立 IC 制造过程 PN's 模型的模块化方法,在模型中通过引入测试弧对系统设备维护和各种优先级问题进行了建模;第三节对调度算法进行描述,并给出实例;最后给出结论.

2 模型建立

PNs 是研究 DEDS 强有力的图形化数学工具. 普通 PNs 只能描述系统的控制结构, 而不能描述系统随着时间发展演变的特性, 为了支持系统性能的研究, 出现了各式各样的定时 PNs^[2], 本文为了支持 IC 制造过程的建模, 在确定时间 PNs (DTPNs) 的基础上提出一种增强 DTPNs 模型:

定义 增强 DTPNs 是一个七元组 $N = (P, T, I, O, H, m_o)$, 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 $P \cap T = \emptyset$ 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; $O: P \times T \rightarrow N$ 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; $\tau: P \rightarrow R^{\ominus} \setminus \{0\}$ 是给 Place 集合 P 的每个元素定义一个操作时间的函数; $m_o: P \rightarrow I^{\ominus} \setminus \{0\}$ 是定义从 Place 集合 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 下被使能当且仅当
 $(\forall p \in P, m(p) \geq I(p, t)) \wedge (\forall p \in P, H(p, t) = 0, m(p) < H(p, t))$

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'

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

DTPNs 系统的状态在任意时刻都是确定的, 这样便于对系统的状态进行把握. 进一步通过测试函数 H 引入 P 到 T 的测试弧, 用它来描述系统维护、设备优先级和操作优先级, 极大地增强了 PNs 的建模能力.

利用增强 DTPNs 对 IC 制造过程进行建模之前, 为了便于论述, 首先对一个 IC 制造系统如下抽象, 有 n 种产品 $J = \{J_i \mid i = 1, \dots, n\}$ 在由 m 个不同的资源 $R = \{R_i \mid i = 1, \dots, m\}$ 组成的系统中生产, 产品 J_i 必须按工艺顺序经过如下的工艺步 $O_i = \{O_{i,j} \mid j = 1, \dots, s_i\}$. 每一个工艺步 $O_{i,j}$ 可以由资源组 $R_{i,j} = \{R_{i,j,k} \mid R_{i,j,k} \subseteq R\}$ 中任何一个资源完成, 对应的操作时间为 $C_{i,j} = \{C_{i,j,k} \mid k = 1, \dots, \#R_{i,j}\}$. 在制造过程中必须满足如下限制: (a) 资源是独占的, 而且是非抢先的. (b) 同一个产品的生产顺序必须保证, 而不同产品之间没有顺序要求.

针对上述抽象, 以下给出 Place 和 Transiti 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 , $m_o(P_i^R)$ 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, $m_o(P_i^I)$ 表示该 J_i 产品要加工的个数; 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; $m_o(P_{i,j,k}^O)$ 表示资源 R_j 可以连续加工多少个产品就必须维护, $m_o(P_{i,j,cnt}^M)$ 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^{Mc} 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^O 表示系统输出缓冲区, $m(P^O)$ 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^{Mc} 表示资源 R_j 的维护操作结束.

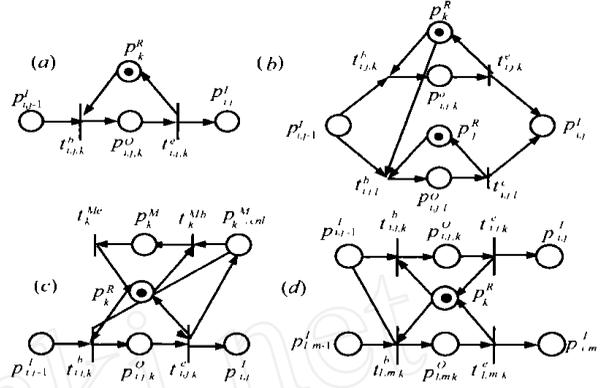


图 1 基本子网

在以上语意基础上, 建模采用至底向上^[2,7] (BottomUp) 的模式构造方法, 至底向上的方法可以概括为两点: 分解和综合. 首先把系统分成若干个功能独立的子系统, 在不考虑子系统之间交互的前提下对每个子系统进行独立地建模. 具体到 IC 制造系统, 按照工艺步划分子系统, 对系统中每一个工艺步进行建模, 所得到的不同工艺步的 PNs 模型称之为基本子网, 这些子网含有表示它们之间交互作用的部分, 然后把把这些共同的部分按照一定要求合并, 就得到整个制造过程的完整 PNs 模型. 图 1 给出 IC 制造系统的基本子网, 图中无向弧是测试弧. (a) 最基本的操作步子网, 其它子网都是在它的基础上细化一些特性得到的; (b) 设备优先级模型, 测试弧 $(P_{i,j,cnt}^M, t_{i,j,k}^b)$ 使得资源 P_k^R 优先于资源 P_i^R 被使用, 只有当资源 P_k^R 不可用时, 才使用资源 P_i^R ; (c) 设备维护模型, 当资源 P_k^R 连续加工 k 个产品后, 测试弧 $(P_{k,cnt}, t_{i,j,k}^b)$ 就禁止了 $t_{i,j,k}^b$, 而使表示维护操作开始的 t_k^{Mb} 激活进行设备维护, 维护操作 P_k^{Mc} 完成后, t_k^{Mc} 激活开始 P_k^R 的新一轮加工; (d) 操作优先级模型: 测试弧 $(P_{i,j-1}^I, t_{i,m,k}^b)$ 的引入使得产品 J_i 的第 j 步操作优先于产品 J_i 的第 m 步操作使用资源 P_k^R .

有了这些子网, 通过把各个子网中表示输入输出缓冲区和资源的相同的 Place 按照制造工艺的要求合并, 就可以得到整个的调度模型. 特别值得一提的是, 通过在模型中引

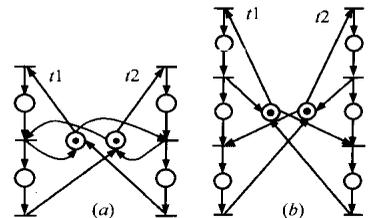


图 2 消除死锁

入表示输入输出缓冲区使得系统模型消除了一个产生死锁的必要条件: 占有资源的同时再请求新的资源. 在图 2(a) 所示的模型中, t_1, t_2 激活后系统就陷入了死锁, 通过引入输入输出缓冲得到如图 2(b) 所示的模型, 因为每个操作申请新资源之前都释放当前使用的资源, 所以消除了这种死锁.

3 调度算法

本文的调度算法是树的广度优先遍历和增强 DTPN 的运行机制相结合产生的。在逐层推进的遍历过程中,利用启发函数把深度优先的思想融入算法中,选择合适的向下一层推进的起始状态,这样可以根据精度要求有效地控制算法的时空复杂度。

算法描述

(1) 初始标记 OpenTable 和表中 ClosedTable 为空; (2) 把初始标记 m_0 放入 OpenTable 表中; (3) 如果 OpenTable 空, 返回错误, 结束算法; (4) 把 OpenTable 中取得第一个标记 m 移到 ClosedTable 中; (5) 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; (6) 否则, 找到在标记 m 下所有使能的 Transition; (7) 激活每一个使能的 Transition 产生 m 的孩子标记 m' , 计算每个孩子标记的代价函数 $g(m')$, 并设它们的父亲标记为 m ; (8) 对 m 的每个孩子标记 m' ; (a) 如果 m' 已经在 OpenTable 中, 如果当前的 $g(m')$ 小于 OpenTable 中 m 的, 则修改 OpenTable 中的 m 父亲标记为 m' ; (b) 如果 m' 已经在 CloseTable 中, 且它的 $g(m')$ 小于 CloseTable 中 m 的 $g(m)$, 则修改 CloseTable 中的 m 的父亲标记为 m' , 并把 CloseTable 中的 m 移回 OpenTable; (c) 否则, 计算 $f(m') = g(m') + h(m')$, 把 m' 按 f 的升序插入 OpenTable。 (9) 跳转到 3。

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

表 2 生产周期 $T(m)$ 的优化结果

启发函数	循环次数	探索深度	优化结果	
$h_1(m)$	962	38	85	
$h_2(m)$	= 0.1	1058	38	85
	= 0.3	1053	38	85
	= 0.5	1030	38	85
	= 1	884	38	85
	= 2	257	38	85
	= 3	95	40	93
	= 4	47	40	98
	= 5	45	40	98
= 6	41	40	98	
= 7	41	40	98	

该算法在 SUN Ultra-10 工作站上采用 Watcom C++ 开发, 并在一个实际 IC 生产线的光刻单元上进行了实际调度。该光刻工艺可以抽象地用表 1 来表示。分别采用启发函数 $h_1(m)$ 和 $h_2(m)$ 对生产周期 $T(m)$ 和操作成本 $C(m)$ 进行单目标优化得到表 2 和表 3 的结果。多目标优化采用加权的形式构造优化函数 $S(m) = T(m) + (1 - \alpha)C(m)$, 结果如下表 4 所示, 从实验结果可以看出: (1) 利用 $h_1(m)$ 得到的就是最优

表 3 生产成本 $C(m)$ 的优化结果

启发函数	循环次数	探索深度	优化结果	
$h_1(m)$	920	38	118.8	
$h_2(m)$	= 0.1	1019	38	118.8
	= 0.3	1010	38	118.8
	= 0.5	1004	38	118.8
	= 1	994	38	118.8
	= 2	651	38	118.8
	= 3	600	38	120.32
	= 4	139	38	130.29
	= 5	96	40	150.48
	= 6	51	40	172.23
	= 10	41	40	172.23

表 4 多目标优化结果

	循环次数	探索深度	优化结果			
			$T(m)$	$C(m)$	$S(m)$	
			$h_1(m)$			
$h_1(m)$	= 0.1	931	38	102	118.8	117.12
	= 0.4	994	38	102	118.8	112.08
	= 0.6	999	38	93	124.37	105.55
	= 0.9	973	38	85	133.0	89.80
$h_2(m)$	= 1	1041	38	93	124.37	105.55
	= 2	994	38	93	124.37	105.55
	= 3	954	38	93	124.37	105.55
	= 3.3	603	40	95	128.440	108.376
	= 3.5	329	40	96	137.33	112.532
	= 4	135	40	98	157.48	121.792

* 针对 $\alpha = 0.6$ 的和函数进行
值, 生产周期和生产成本的单目标最优值分别是 118 和 118.8, 多目标的优化随着 α 的增大, 生产周期趋于它的单目标最优解, 而生产代价远离它的单目标最优解, 这是由于两目标之间互抗性使得它们不可能同时达到最优解, 只能通过 α 来反映优化的侧重点。(2) 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调度得到的最优值分别是 74 和 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。(3) 随着启发函数 $h_2(m)$ 权重增加, 循环次数在减小, 但是所得到的优化值的性能也在逐渐变差。这是因为当 α 比较小的时候, 搜索算法接近广度优先遍历, 所以探索的状态多, 主循环的循环次数也就多, 得到的优化值性能就好。而随着 α 增加, 算法接近深度优先, 算法主循环的循环次数减小, 探索的状态随之减少, 所以得到的优化值的性能就差, 求解时间和优化值性能之间存在互抗性, 合理选择在二者之间求得平衡是很关键的。(4) 利用 $h_2(m)$ 调度时, 如果 α 比较小 (< 1), 就使得启发函数值比当前状态到最终状态的优化目标的估计值小得多, 它只能增大各个状态的总估计代价的离散性, 为调度算法增加了很多的冗余状态, 对优化值没有贡献, 所以 α 的取值不能很小; 如果 α 比较大 (> 10), 此时进行的就是深度优先的调度, 得到的优化值没有意义, 所以 α 不能取得太大。如果 α 取合适, 小的循环次数而得

到性能良好的优化值的,例如对于生产周期当 $n = 3$ 的时候,整个调度算法只循环了 533 次就得到了最优解,对于生产成本来讲 $n = 2$ 时,也可以循环 651 次就得到最优解,多目标的优化在 954 次也得到了最优解,比利用 $h_1(m)$ 的循环次数都少。

4 结论

IC 制造系统的优化调度问题用传统优化算法很难解决,难点主要有两个方面:一是问题描述难;二是求解难。从文中给出的调度实例可以看出,该方法有效地克服了以上问题。文中提出的增强 DTPN s 除了具备传统 DTPN s 的建模能力之外,还可以对系统设备的维护、系统中的各种优先级等特性进行描述,得到 IC 制造过程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,可以在遍历模型状态空间的过程中,完成单目标或多目标调度问题的求解,不同的启发函数可以使算法在有限的时间复杂度内得到符合精度要求的近似最优解,使得该方法更具实用价值。

进一步的工作包括对系统中随机的特性进行建模,启发函数权的选取和符合相容条件的启发函数的构造方法的研究,以及交互式着色 PN s 调度软件的开发。

参考文献:

- [1] K R Baker , Introduction to Sequencing and Scheduling [M] . New York : John Wiley & Sons , 1974 .
- [2] Meng Chu Zhou , Mu Der Jeng . Modeling , analysis , simulation , scheduling , and control of semiconductor manufacturing systems : a Petri net approach [J] . IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing , Aug. 1998 , 11 (3) : 333 - 357 .
- [3] R Y Al-Jaar , A A Desrochers . Performance evaluation of automated manufacturing systems using generalized stochastic Petri nets [J] . IEEE Trans. on Robotics and Automation , 1990 , 6 (6) : 621 - 639 .

- [4] H P Hillion , J Pjroth . Performance evaluation of job-shop systems using timed event-graphs [J] . IEEE Trans. on Automatic Control , 1989 , 34 (1) : 3 - 9 .
- [5] H Shih , T Sekiguchi . A timed Petri net and beam search based on-line FMS scheduling system with routing flexibility [A] , IEEE International Conference on Robotics and Automation [C] , Sacramento , Apr. 1991 : 2548 - 2553 .
- [6] D Y Lee , F DiCesare . FMS scheduling using Petri nets and heuristic search [J] . IEEE Trans. on Robotics and Automation , 1994 , 10 (2) : 123 - 132 .
- [7] Tien-Hsiang Sun , Chao-Weng Cheng , Li-Chen Fu . A Petri net based approach to modeling and scheduling for an FMS and a case study [J] . IEEE Trans. on Industrial Electronics , Dec. 1994 , 41 (6) : 593 - 601 .

作者简介:



薛 雷 男, 1973 年 10 月出生于陕西省。分别于 1995 年和 1998 年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。现在西安交通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。



技术等。

郝 跃 男, 1958 年 3 月出生于重庆。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, 机电部有突出贡献专家, 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