

半导体黄光区调度问题研究

马慧民^{1,2}, 许圣良¹, 叶春明²

MA Hui-min^{1,2}, XU Sheng-liang¹, YE Chun-ming²

1. 上海电机学院 经济管理学院, 上海 200245

2. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093

1. Business School, Shanghai Dianji University, Shanghai 200245, China

2. Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China

E-mail: ie_hero@yahoo.com

MA Hui-min, XU Sheng-liang, YE Chun-ming. Research on semiconductor photolithography scheduling problem. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(36): 234-236.

Abstract: The problem of semiconductor photo area scheduling was studied. The model of semiconductor photo area scheduling was put forward and the method based on binary Particle Swarm Optimization(PSO) algorithm was proposed to solve this problem. The detailed realization of the method was illustrated. The example was computed. By comparison of the result, it can be found that the PSO is available and effective to solve the semiconductor photo area scheduling problem.

Key words: semiconductor photo area; Particle Swarm Optimization(PSO); scheduling

摘要: 对半导体黄光区调度问题进行了研究, 建立了半导体黄光区调度的数学模型, 分别提出了用于求解该问题的启发式方法和粒子群算法方案, 阐明了两种算法方案的具体实现过程。通过对仿真实例进行计算和结果比较, 表明了粒子群算法优于启发式方法, 取得了不错的优化效果。

关键词: 半导体黄光区; 粒子群算法; 调度

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2008.36.068 **文章编号:** 1002-8331(2008)36-0234-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP29

半导体制造业是一种自动化程度极高的产业, 在这种自动化程度较高的系统中, 使生产过程合理、高效运行的调度问题变得非常复杂, 其控制与调度问题引起了学术界与工业界的普遍关注^[1-3]。

半导体制造业中的黄光区, 不仅工艺复杂、设备维护频繁而且设备也最为昂贵, 因此, 黄光区是每个半导体制造企业最为关注的区域之一。但是, 目前针对黄光区的生产调度研究非常少, 研究的主要方法也是基于仿真的方法^[4-6]或启发式规则方法^[7-9], 本文提出运用二进制粒子群算法对问题进行求解, 取得了较好的效果。

首先根据黄光区的制造特点, 建立黄光区生产调度的数学模型, 然后提出运用二进制粒子群算法求解黄光区调度问题的具体方案, 最后通过一个企业生产的实例证明二进制粒子群算法比常用的先来先服务调度策略具有优越性和有效性。

1 问题描述和模型建立

1.1 问题描述

首先根据黄光区设备制造的特点, 将问题具体描述如下:

(1) 有 k 台不完全相同的光刻机, 每台光刻机有多个工艺

类型(Recipe), 不同机台的工艺类型不完全相同。

(2) 机台的加工单位为一个 lot(一盒产品), 一个 lot 开始加工, 就不能被中断。

(3) 有 I 个 lot, P 个工艺类型, 每个 lot 对应特定的工艺类型, 但可以选择不同的设备, 只要设备可以加工该工艺。

(4) 每个 lot 的加工时间由工艺类型和加工机器共同决定, 同一工艺类型在不同的光刻机上的加工时间可能不同。

(5) 如果设备转换工艺类型, 需要更换光刻板, 更换一块光刻板的时间固定。

(6) 黄光区调度的目标是使一批 lot 经过该区域的时间跨度最短, 也就是要使 lot 尽快通过黄光区, 本文假设每个 lot 的到达时间可以预测确定。

1.2 模型建立

模型的符号说明如下:

I : 加工产品 lot 的编号, $i=1, 2, 3, \dots, I$;

J : 设备 k 所加工的 lot 数量, $j=1, 2, \dots, J_k$;

K : 所有设备的编号, $k=1, 2, 3, \dots, K$;

P : 产品工艺类型编号, $p=1, 2, \dots, P$;

P_{jk} : 设备 k 第 j 个加工 lot 的工艺号码;

基金项目: 上海市高校选拔培养优秀青年教师科研专项基金(the Research Fund for Selecting and Cultivating Excellent Youth Teacher of Shanghai Higher Education No.29-017-2); 上海市重点学科建设项目(Shanghai Leading Academic Discipline Project No.T0502)。

作者简介: 马慧民(1981-), 男, 上海电机学院经济管理学院讲师, 上海理工大学管理学院博士研究生, 主要研究方向为工业工程, 智能优化等。

收稿日期: 2008-08-28

修回日期: 2008-10-27

t_{ik} : 设备 k 加工产品 lot i 所需要的时间;

X_{ijk} : $X_{ijk}=1$, 表示 lot i 被安排给设备 k 第 j 个加工, 否则为 $X_{ijk}=0$;

r_i : 表示 lot i 的到达时间;

C_i : 表示 lot i 的完工时间;

C_{jk} : 表示第 k 设备加工第 j 个 lot 的完工时间;

T : 表示换一次光刻板的时间;

S_{jk} : $S_{jk}=1$, 表示设备 k 加工的第 j 和第 $j-1$ 个 lot 的产品工艺类型不同, 否则为 0。

数学模型建立如下:

$$\text{Min}Z = \text{Min}\{\text{Max} C_i\} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } C_i = C_{jk} = \max(C_{j-1,k}, r_i) + t_{ik} + T * S_{jk} \text{ if } X_{ijk} = 1 \quad (2)$$

$$C_{0k} = 0 \quad (3)$$

$$\sum_k \sum_j X_{ijk} = 1 \quad (4)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad (5)$$

$$S_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{if } (P_{j,k} - P_{j-1,k}) \neq 0 \\ 0 & \text{if } (P_{j,k} - P_{j-1,k}) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S_{0k} = 1 \quad (7)$$

目标式(1)表示使所有设备的总完工时间最小; 约束式(2)表示 lot i 的完工时间; 约束式(3)表示每组设备最早可以开工的时间为 0; 约束式(4)表示每个 lot i 有且只有一台设备进行加工; 约束式(5)表示决策变量为 0、1 调整变量。约束式(6)表示设备 k 加工的相邻两个 lot 的工艺类型是否相同, 如果相同则取 0, 否则取 1; 约束式(7)表示每台设备第一次加工时都需要更换光刻板。

2 求解黄光区调度问题的方法

由于半导体黄光区的调度问题是一个非常复杂的问题, 目前没有公认的最优化解决方案, 本文采用目前最常用的方法——先来先服务的启发式调度规则作为比较的基准, 证明基于二进制粒子群算法求解的有效性和优越性。

2.1 先来先服务规则方法

先来先服务(First In First Out, FIFO), 是一种半导体制造企业黄光区调度中广泛采用的启发式调度规则, 应用简单容易理解, 应用效果也普遍容易被使用者所接受。本文采用先来先服务调度时, 按照 lot 的到达时间进行排序, 从第一个 lot 开始, 选择加工此 lot 时间最短的设备进行加工, 如果此设备正在加工, 则选择加工时间第二短的设备, 以此类推, 如果, 所有设备都处在忙碌中, 则等待其中最空闲下来的能加工此产品 lot 工艺的设备来加工, 直到最后所有 lot 都安排有设备加工为止。

2.2 二进制粒子群算法方法

粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO), 是 1995 年由美国社会心理学家 James Kennedy 和电气工程师 Russell Eberhart 共同提出的, 是一种仿生学的方法, 源于对鸟群捕食行为的研究。Kennedy 和 Eberhart 在 1997 年提出了二进制的 PSO 算法, 但目前二进制 PSO 算法的应用研究还相对较少。马慧民等^[9-12]应用二进制粒子群算法解决了生产批量计划问题等, 本文借鉴文献[12]中半导体炉管区批调度问题的粒子群算法, 提出了一种求解黄光区调度问题的二进制粒子群算法, 取得了较好效果。

(1) 算法编码

应用粒子群算法解决该问题的关键是如何编码, 现给出此问题的编码方式:

$$x_{h,i,j}^k (i=1, 2, \dots, I, k=1, 2, \dots, K, h=1, 2, \dots, H, j=1, 2, \dots, J) \quad (8)$$

其中 K 表示最大迭代次数, H 表示种群的规模, I 表示产品 lot 的编号, J 表示二进制数所占位数(即设备总数用二进制数表示所占的位数)。

(2) 算法的具体流程

① 确定参数值

确定群体空间的种群规模 H 和最大进化次数 K , 确定学习因子 c_1 和 c_2 , 并令进化代数 $k=0$ 。

② 初始化所有粒子的位置和速度

群体空间中每个粒子的位置由公式(9)随机生成, 其中 $R(0, 1)$ 表示随机产生 $[0, 1]$ 之间的随机整数。

$$x_{h,i,j}^0 = R(0, 1) (h=1, 2, \dots, H, i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J) \quad (9)$$

群体空间中每个粒子的速度由公式(10)随机生成, 其中 v_{\max} 和 v_{\min} 表示速度的最大最小限制值。

$$v_{hij}^0 = v_{\min} + R(0, 1)(v_{\max} - v_{\min}) (h=1, 2, \dots, H, i=1, 2, \dots, I, j=1, 2, \dots, J) \quad (10)$$

③ 计算各粒子的适应值、粒子经历的最好位置和种群经历的最好位置

每个粒子的适应值即为所有设备总的最小完工时间。令 PB_h^k 表示第 h 个粒子进化 k 代所经历的最好位置, 令 GB^k 表示整个种群进化 k 代所经历的最好位置。如果 $k=0$, 则 $PB_h^0 = X_h^0$, 否则 PB_h^k 可由公式(11)计算, GB^k 可由公式(12)计算。检查结束条件是否满足, 如果满足则结束, 不满足则转步骤④。

$$PB_h^k = \begin{cases} PB_h^{k-1} & \text{if } f(x_h^k) < f(PB_h^{k-1}) \\ X_h^k & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$GB^k = \min(PB_h^k) \quad h=1, 2, \dots, H \quad (12)$$

④ 更新各粒子的速度和位置

为了有效地更新粒子群中粒子的速度和位置, 首先引入公式(13)和公式(14)。其中公式(13)的目的是使粒子的速度在最大最小速度范围之内。公式(14)的目的是使结果值处于 0 和 1 之间^[12]。

$$g(v_{hij}^k) = \begin{cases} v_{\max} & \text{if } v_{hij}^k > v_{\max} \\ v_{hij}^k & \text{if } v_{\min} \leq v_{hij}^k \leq v_{\max} \\ v_{\min} & \text{if } v_{hij}^k < v_{\min} \end{cases} \quad (13)$$

$$h(v_{hij}^k) = \frac{1}{1 + \left(\frac{v_{\max} - v_{hij}^k}{v_{hij}^k - v_{\min}} \right)^2} \quad (14)$$

令 $k=k+1$, 由公式(15)、(16)和(17)来更新粒子的位置和速度, 转步骤③。

$$\Delta v_{hij}^{k-1} = c_1 R(0, 1)(PB_{hij}^{k-1} - x_{hij}^{k-1}) + c_2 R(0, 1)(GB_j^{k-1} - x_{hij}^{k-1}) \quad (15)$$

$$v_{hij}^k = g(v_{hij}^{k-1} + \Delta v_{hij}^{k-1}) \quad (16)$$

$$x_{hij}^k = \begin{cases} 1 & \text{if } R(0, 1) < h(v_{hij}^k) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

3 仿真实验

3.1 实验设计

对于本文研究的问题, 采用实例数据进行了仿真实验, 粒子群算法运用 VB 编写程序。实验中设备和加工工艺的时间见

表1,其中空白表示相应的设备不能加工相应的工艺。实验中产品数据采用随机的方式产生,在8h(480min)内分别随机产生30个、40个和50个lot,产生的每个lot的工艺类型和到达时间随机确定,由于篇幅限制,列出如表2所示的30个lot的详细信息。根据半导体制造企业情况,假设其中第1台设备在第120至240分钟属于预维修时间,不能加工产品,每台光刻机手工更换光刻板的时间均为10min。

表1 各工艺类型在相应设备上的加工时间 min

工艺类型	设备							
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
P1	45		51	60	58		60	57
P2		45	58		50	61		
P3	50		60	55		48		42
P4	53		46	55		50		61
P5		53			55	48	59	
P6		60		53		63	47	56
P7	57		60	43	53		51	
P8	61	48		58	63		51	54
P9	53	60		55	47			50

表2 产生的30个lot的产品信息

Lot ID	工艺类型	到达时间/min	Lot ID	工艺类型	到达时间/min
1	P1	1	16	P3	174
2	P1	8	17	P8	192
3	P9	8	18	P6	233
4	P2	12	19	P7	244
5	P8	18	20	P7	246
6	P4	20	21	P3	246
7	P4	30	22	P2	266
8	P4	53	23	P4	377
9	P2	53	24	P3	379
10	P8	59	25	P1	389
11	P8	104	26	P2	399
12	P1	104	27	P3	440
13	P8	131	28	P5	449
14	P3	143	29	P4	469
15	P8	162	30	P4	479

3.2 实验结果和分析

根据30个lot的数据,用本文提出的二进制改进粒子群算法来仿真求解,令 $c_1=c_2=2$,种群规模 $N=180$,进化代数数为200代,得到优化结果详见表3。分别采用先来先服务方法和粒子群算法对随机产生的30个lot、40个lot和50个lot的问题进行了求解,求解得结果如表4所示。从表4可以看出,二进制粒子群算法的求解结果都比先来先服务调度结果有一定程度的改进。因此,本文算法在半导体制造黄光区调度中有较好的效果,对于提高黄光区调度具有现实意义。

4 结束语

首先,本文研究了半导体制造企业黄光区的生产调度问题,对问题进行了详细的描述,并针对问题建立了数学模型。然后提出了两种解决问题的方法——常用的启发式先来先服务方法和二进制粒子群算法,并对二进制粒子群算法的具体实施方案进行了详细的阐述。最后针对问题设计了仿真实例,通过仿真结果的比较表明了二进制粒子群算法优于先来先服务的调度方法,对改善黄光区的调度有稳定的效果,是解决此问题的有效方法。

表3 30个lot的粒子群算法调度结果

Lot ID	加工设备	完工时间	Lot ID	加工设备	完工时间
1	M1	56	16	M4	239
2	M1	101	17	M2	250
3	M1	303	18	M2	320
4	M3	80	19	M5	308
5	M8	82	20	M5	375
6	M8	153	21	M8	419
7	M3	136	22	M2	375
8	M4	118	23	M4	442
9	M2	108	24	M8	461
10	M8	217	25	M1	444
11	M8	271	26	M2	444
12	M5	172	27	M8	503
13	M8	325	28	M6	507
14	M8	377	29	M4	524
15	M5	245	30	M3	525

表4 先来先服务、PSO方法调度结果比较

Lot 数量	方法	完工时间	改进比例
30个lot	先来先服务	542	3.24%
	PSO方法	525	
40个lot	先来先服务	516	1.98%
	PSO方法	506	
50个lot	先来先服务	553	4.54%
	PSO方法	529	

参考文献:

- [1] Kumar P R.Re-entrant lines queuing systems:Theory and applications[J].Special Issue on Queuing Networks,1993,13(1):87-110.
- [2] 王中杰,吴启迪.半导体生产线控制与调度研究[J].计算机集成制造系统,2002(8):607-611.
- [3] Upasani A A,Uzsoy R,Sourirajan K.A problem reduction approach for scheduling semiconductor wafer fabrication facilities[J].IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing,2006,19(2):216-225.
- [4] 王令群,郑应平.光刻设备 TRACK 系统的无死锁调度算法[J].计算机工程与应用,2006,42(7):1-3.
- [5] 宁凝,钱省三,孟志雷.仿真技术在晶圆制造光刻区派工中的应用[J].半导体技术,2007,32(9):750-753.
- [6] Arisha A,Young P.Intelligent simulation-based lot scheduling of photolithography toolsets in a wafer fabrication facility[C]//Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference,2004:1935-1942.
- [7] Kim Sooyoung,Yea Seung-Hee.Shift scheduling for steppers in the semiconductor wafer fabrication process[J].IEE Transactions,2002,34(2):167-177.
- [8] Akcalt E,Nemoto K.Cycle time improvements for photolithography process in semiconductor manufacturing[J].IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing,2001,14:48-56.
- [9] Ma Hui-min,Ye Chun-ming,Zhang Shuang.Binary immune memory particle swarm optimization algorithm for the single level uncapacitated lot sizing problem[C]//The Proceeding of the 12th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management.Beijing:China Machine Press,2006:602-605.
- [10] 马慧民,柳毅,叶春明.基于粒子群算法求解单级多资源约束生产批量计划问题[J].工业工程与管理,2005,10(6):66-70.
- [11] 马慧民,叶春明.粒子群算法在贷款组合优化决策中的应用[J].计算机工程与应用,2006,42(14):219-221.
- [12] 马慧民,叶春明.半导体炉管区批调度问题的粒子群优化算法研究[J].计算机集成制造系统,2007,13(6):1121-1126.