

文章编号: 1001-0920(2002)06-856-03

# 基于多目标的半导体生产线满意调度

王中杰<sup>1</sup>, 吴启迪<sup>1</sup>, 有杰<sup>2</sup>

(1. 同济大学 CIMS 研究中心, 上海, 200092; 2. 吉化染料厂, 吉林省 吉林市 132002)

**摘要:** 在分析生产线性能指标的基础上, 选择出用于优化的目标, 并针对基于单目标的调度策略所存在的局限性, 采用满意的概念, 根据模糊规则与比较法提出了基于多目标的满意调度。实验表明该调度方法较单目标调度策略有很大的优越性, 从而为实现生产线的整体优化提供了解决的途径。

**关键词:** 半导体生产线; 多目标; 满意调度

中图分类号: O 224      文献标识码: A

## Satisfactory scheduling for semiconductor manufacturing line based on multi-object

WANG Zhong-jie<sup>1</sup>, WU Qi-di<sup>1</sup>, YOU Jie<sup>2</sup>

(1. CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Dyestuff Factory, Jilin Chemical Industrial Co. Ltd., Jilin 132002, China)

**Abstract:** The objects for optimization are selected by analyzing the performance targets of the manufacturing line. Aiming at the defects of the scheduling policies based on single-object, a policy of satisfactory scheduling based on multi-object is proposed by introducing the concept of satisfaction and employing fuzzy rules and comparative law. Experiments prove that this policy has more advantages than that based on single-object, which provides a way of performing overall optimization of the manufacturing line.

**Key words:** semiconductor manufacturing line; multi-object; satisfactory scheduling

## 1 引言

半导体制造业是技术密集、资金密集、收益高且产品更新速度快的高新技术产业, 加快新产品的开发速度和上市速度、降低成本、提高产品质量和服务质量, 是提高企业市场竞争力和适应市场变化的根本途径。实现上述目标的关键是具有良好的芯片生产线的调度管理。

半导体生产线的结构复杂、设备多且加工特性

各异, 具有严重的可重入性, 这些特点均给半导体生产线的调度带来了极大的困难。近 10 年来, 国外已有许多研究人员在理论和实践方面做了大量工作, 如 Kumar 等。国内在该领域的研究相对较少, 起步也较晚, 所得成果不多。尽管研究人员针对半导体生产线的调度问题做了许多研究, 但基本上处于初级阶段, 还存在许多问题, 如多数调度方法都基于单目标进行优化<sup>[1-3]</sup>, 而实际上是不能满足要求的。针对这种问题, 本文提出了基于多目标的满意调度。

收稿日期: 2001-09-17; 修回日期: 2001-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(79970030); 上海市博士后科学基金项目

作者简介: 王中杰(1971—), 女, 辽宁建昌人, 博士后, 从事复杂工业过程的建模与优化控制、生产计划与调度等研究; 吴启迪(1947—), 女, 浙江永嘉人, 校长, 教授, 博士生导师, 从事控制理论与应用、自动化系统工程等研究。

## 2 半导体生产线的性能指标

所谓半导体生产线的优化调度问题, 是以一定的准则来筛选各种可行方案, 并找到这个条件下的最佳方案。半导体生产线常用的性能指标包括: 产品的成品率  $Y$ 、产品的制造周期  $W$ 、生产率  $P$ 、生产线的在制品水平  $N$ 、平均排队队长  $\bar{N}$  和等待时间  $W_d$ 、设备利用率  $\eta$  及拖期率  $\eta_b$ 。

以上指标从不同侧面反映了生产线的性能, 它们不完全一致, 有的是相互关联、相互制约的。如由 Little 公式<sup>[4]</sup> 知, 对开环系统, 当投料速率一定时, 生产线上的在制品数与制造周期成正比; 而对于闭环系统, 生产线上的在制品数恒定, 故投料速率与制造周期成反比。Wein<sup>[5]</sup> 指出, 成品率与制造周期为减函数关系, 即生产率一定时, 长制造周期导致低成品率。直观上是由半导体受尘埃污染而导致次品的特殊性造成的。特别地, 可认为成品率与制造周期呈线性函数关系, 而次品的产生服从泊松分布, 即随机一致分布。Wein 又指出, 假设在理想情况下, 成品率与制造周期无关, 并近似认为生产线为一单服务器的排队系统, 且其服务时间与工件输入速率满足指数分布, 则生产率与制造周期呈高度非线性关系, 即制造周期为生产率的递增凸函数, 当生产率接近系统的容量时, 制造周期也趋于无限。然而, 当成品率与制造周期相关时, 制造周期并不是生产率的增函数。当投料速率超过某一个值而导致较大的制造周期时, 则很难不产生次品。

由定义可知, 在投料速率一定的情况下, 成品率与生产率成正比。平均排队队长反映了生产线的在制品水平。平均等待时间反映了制造周期。生产线的 WIP 水平过低, 会导致设备利用率低。但从直观上讲, 低水平的 WIP 有利于保证按期交货。

由上面的分析可知, 上述各性能指标之间有的是相互一致的, 如成品率与生产率; 而有的却是相互矛盾的, 如长制造周期会导致低成品率。但对于开环系统, 制造周期与 WIP 水平是一致的, 而较低的王 IP 水平又会导致较低的设备利用率。这样, 如欲使一个性能指标达到最好, 则其它方面的性能可能很坏, 因此在实际生产中最好综合使用, 综合考虑生产线的性能。

## 3 满意调度

“满意”这一概念最先是针对控制问题提出的<sup>⑥</sup>, 本文将其做了进一步延伸。首先, 将适用范围

由连续系统的控制问题扩展到离散系统的调度问题。其次, 由基于模型扩展到基于启发式规则。最后, 由在线实现扩展到可离线实现。

将延伸后的“满意”概念应用于调度问题中, 就构成了满意调度。满意调度的实现过程就是进行模糊决策的过程。在满意调度中, 系统约束和优化目标均采用模糊语言描述, 设  $X$  为某优化目标所有可取值的集合, 则模糊优化目标可表示为

$$\mu_G: X \quad [0, 1] \quad (1)$$

优化目标所满足的约束可表示为

$$\mu_C: X \quad [0, 1] \quad (2)$$

因此, 在模糊决策中, 模糊目标和模糊约束没有区别。

设某系统有  $N$  个优化目标, 则最后的决策是在模糊信息下寻找满意的调度策略, 使得

$$\max \Psi(f_1(X), \dots, f_N(X)) \quad (3)$$

其中,  $\Psi(\cdot)$  为模糊运算, 可理解为经济效益最大;  $f_i(X)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ) 为各优化目标。

在该模糊运算中, 各优化目标的重要度由相应的优化目标及目标间的相对重要度决定。描述目标间相对重要度的模糊术语如图 1 所示。

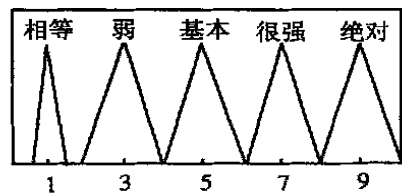


图 1 用于目标比较的模糊术语

## 4 基于多目标的半导体生产线满意调度

在有关半导体生产线的文献中, 关于设备调度的研究最多。所谓设备调度, 就是指当设备前有多个工件等待加工时, 按何决策决定下一个要加工的工件, 如图 2 所示。设备调度是半导体生产线优化的重要组成部分。

由于调度策略的选择是按一定准则进行的, 不同的调度策略依据的准则也不同。例如, 比值法 ( $W(a, b)$ ) 旨在提高设备的利用率, 而平均制造周期波动平滑法 (FSMCT) 则致力于使制造周期最小。由于目前已有的调度策略多是基于单目标的, 这对于高品质的生产线是不能满足要求的。在实际生产线中, 往往需要综合考虑各项性能指标, 以使生产线

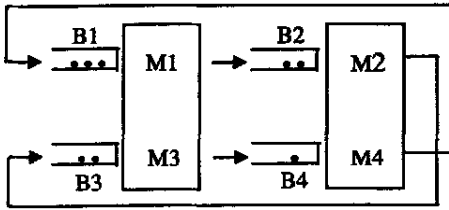


图 2 半导体生产线设备调度示意

的整体性能最优。

由于半导体生产线非常复杂,具有高度的可重入性,因此难以建模。即使在已有的基于单目标的调度策略中,大多数也是基于启发式的,极少数基于模型的调度策略也只适用于简单的系统,因此传统的优化方法不能用于半导体生产线的调度问题。

在半导体的性能指标中,经过分析选择,可用于优化的目标包括:制造周期、平均排队队长、设备利用率及拖期率。对于这些指标的满足,并没有一个严格的最优值存在,只要在实际生产中,这些指标能使生产者满意即可。

经分析可知  $N = 4$ ,下面采用文献[7]中的方法来寻求近优解。

令  $a_{ij}$  为两目标间的相对重要度,  $X_1, X_2$  为两个解,则定义一模糊集合  $B$  用于描述解的改善度,即

$$B = \{\text{better, equal, worse}\} \quad (4)$$

根据如下规则定义模糊变量  $r_{ij}$ :

1) 若  $f_i(X_2)$  优于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  优于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = 1$ ;

2) 若  $f_i(X_2)$  优于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  等于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{a_{ij}}{a_{ij} + 1}$ ;

3) 若  $f_i(X_2)$  优于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  差于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{a_{ij} - 1}{a_{ij} + 1}$ ;

4) 若  $f_i(X_2)$  等于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  优于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{1}{a_{ij} + 1}$ ;

5) 若  $f_i(X_2)$  等于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  等于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = 0$ ;

6) 若  $f_i(X_2)$  等于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  差于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{-1}{a_{ij} + 1}$ ;

7) 若  $f_i(X_2)$  差于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  优于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{1 - a_{ij}}{a_{ij} + 1}$ ;

8) 若  $f_i(X_2)$  差于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  等于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = \frac{-a_{ij}}{a_{ij} + 1}$ ;

9) 若  $f_i(X_2)$  差于  $f_i(X_1)$  且  $f_j(X_2)$  差于  $f_j(X_1)$ , 则  $r_{ij} = -1$ 。

则描述  $N$  个优化目标的最终模糊变量为

$$r = r_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, 4; i \neq j$$

采用  $\lambda$  截取法确定解的取舍, 即:

- 1) 若  $r > \lambda$ , 则  $X_1$  优于  $X_2$ ;
- 2) 若  $r < -\lambda$ , 则  $X_1$  差于  $X_2$ ;
- 3) 若  $-\lambda < r < \lambda$ , 则  $X_1$  等于  $X_2$ 。

其中  $\lambda$  为预先定义的一个实数。

基于多目标的半导体生产线满意调度的实现主要包括以下几方面:

- 1) 采用上述方法求出某种调度解;
- 2) 通过仿真或理论证明验证该调度策略是否能使生产线的整体性能令人满意, 如果不满意, 调整各单项指标的重要度, 并最终使综合性能令人满意;
- 3) 根据实时信息对调度过程进行监控, 以不断修正调度策略。

将上述满意调度方法应用于某 2 工作站 4 缓冲区的半导体生产线, 实验结果如表 1 所示。

## 5 结 论

采用满意概念, 根据模糊规则和比较法提出的基于多目标的半导体生产线满意调度解决了生产线综合性能最优的问题。而且通过控制优化目标间的相对重要度及截取值  $\lambda$ , 可以控制最终的调度结果。与基于单目标的调度策略相比, 更能适应产品种类多的生产线, 是今后调度策略发展的实用方向。

表 1 满意调度实验结果

调度策略	制造周期/h	平均排队队长	设备利用率	拖期率
比值法	974.44	23	0.988 2	0.000 53
平均制造周期波动平滑法	974.33	20	0.987 9	0.000 51
满意调度法	974.35	22	0.988 2	0.000 51

(下转第 862 页)

$$S(z^{-1}) = 2.7505 - 11.5437z^{-1} + 15.5506z^{-2} - 6.7823z^{-3}$$

绘制  $G^*(z)$  的奈奎斯特曲线如图 2 所示。

从图中可见  $\tilde{R} = 4$ , 由  $A(z^{-1})$  和  $T(z^{-1})$  可知  $\tilde{P} = 4$ , 于是  $\tilde{P} = \tilde{R}$ , 由定理 2 可知闭环系统稳定。

## 6 结 语

为了克服 GPC 稳定性定量分析的难点和参数设计的盲目性, 本文推导了 GPC 的闭环反馈系统, 采用频率特性方法来表示控制系统的性质, 指导 GPC 的参数设计。所获得的设计方法具有重要的工程实际意义, 为 GPC 的推广与应用开辟了一条有效的途径。

### 参考文献(References):

[1] Clarke D W, Mohtadi C, Tuffs P S. Generalized pre-

dictive control[J]. *Automatica*, 1987, 23(1): 137-160.

[2] Clarke D W, Mohtadi C. Properties of generalized predictive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 859-875.

[3] Rawlings J B, Muske K B. The stability of constrained receding horizon control[J]. *IEEE Trans on AC*, 1993, 38(10): 1512-1516.

[4] 席裕庚, 张峻. 广义预测控制系统闭环特性研究[J]. 中国科学(E 辑), 1996, 26(6): 519-527.

(Xi Yugeng, Zhang Jun. The closed-loop properties of generalized predictive control[J]. *Science in China(E)*, 1996, 26(6): 519-527.)

[5] 孙明玮, 陈增强, 袁著祉. 典型工业过程的无超调预测控制设计[J]. 控制与决策, 2000, 15(2): 213-216.

(Sun Mingwei, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. Non-overshoot predictive control design for typical industrial process[J]. *Control and Decision*, 2001, 15(2): 213-216.)

(上接第 855 页)

### 参考文献(References):

[1] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[2] 王群仙, 陈增强, 袁著祉. 基于 BP 网络的 PID 型预测自校正控制器[J]. 控制与决策, 1998, 13(2): 185-188.

(Wang Qunxian, Chen Zengqiang, Yuan Zhuzhi. PID structure predictive self-tuning controller based on BP neural network[J]. *Control and Decision*, 1998, 13(2): 185-188.)

[3] 李少远, 席裕庚. 具有模糊约束模拟的广义预测控制[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(11): 1631-1634.

(Li Shaoyuan, Xi Yugeng. Parameters tuning of generalized predictive control with fuzzy constraints simula-

tion[J]. *J of Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(11): 1631-1634.)

[4] 李少远, 席裕庚. 基于模糊目标和模糊约束的满意控制[J]. 控制与决策, 2000, 15(6): 674-677.

(Li Shaoyuan, Xi Yugeng. Satisfactory control based on fuzzy goals and fuzzy constraints[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(6): 674-677.)

[5] D W Clark, C Mohtadi. Properties of generalized predictive control[J]. *Automatica*, 1989, 25(6): 859-875.

[6] C E Rohrs, M Athans. Some design guidelines for discrete-time adaptive controllers[J]. *Automatica*, 1984, 20(5): 653-660.

(上接第 858 页)

### 参考文献(References):

[1] Li Shu, Tang Tom, Collins Donald W. Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication[J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1996, 9(1): 145-149.

[2] Lu Steve C H, Ramaswamy D, Kumar P R. Efficient scheduling policies to reduce mean and variance of cycle-time in semiconductor manufacturing plants[J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1994, 7(3): 373-388.

[3] Harrison J M, Wein L M. Scheduling networks of queues: Heavy traffic analysis of a two-station closed network[J]. *Oper Res*, 1990, 38(6): 1052-1064.

[4] Little J D. A proof for the queueing formula:  $N = \lambda W$  [J]. *Oper Res*, 1961, 9(3): 383-387.

[5] Wein L M. On the relationship between yield and cycle-time in semiconductor wafer fabrication [J]. *IEEE Trans on Semicond Manuf*, 1992, 5(2): 156-158.

[6] Yugeng X. Satisfactory control of complicated industrial process[J]. *Information and Control*, 1995, 24(1): 14-20.

[7] Yaron K, Gideon L. Multi-criteria scheduling optimization using fuzzy logic[A]. *Proc of the IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics[C]*, 1998. 445-450.