

带驻留约束的双臂集束型设备群的调度方法

周炳海, 刘明祥, 周淑美

(同济大学 机械与能源工程学院, 201804 上海)

摘要: 为提高集束型设备群的生产效率,在考虑加工不同种类晶圆条件下,研究带驻留约束的双臂集束型设备群的建模与调度问题.提出虚拟缓冲模块概念,引入时间区间集来描述系统的运行状态,并以此建立调度问题的非线性规划模型;结合数学模型,提出一种以时间区间集为核心的基于虚拟缓冲模块概念和交换策略的调度算法;对所提出的算法进行了仿真分析.结果表明:所构建的算法运行时间短,调度1个Lot数量的晶圆仅仅需要0.5 s左右,响应时间快;与研究问题域的下界比较,算法的结果接近下界;当设备因子大于5时,周期延长率 R 已经全部小于0.05,取得了较好的调度效果,表明算法是可行且有效的.

关键词: 集束型设备群; 双臂机械手; 驻留约束; 时间区间集; 调度

中图分类号: F270; TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)01-0083-07

Scheduling method for dual-blade multi-cluster tools with residency constraints

ZHOU Binghai, LIU Mingxiang, ZHOU Shumei

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, 201804 Shanghai, China)

Abstract: To improve the production efficiency of multi-cluster tools, modeling and scheduling problems of dual-blade multi-cluster tools with residency constraints and multi-type wafers were researched. Firstly, based on the proposed conception of virtual buffer modules, time interval sets were introduced to characterize the running states of the system. Then a non-linear mathematical model of the problems was formulated, and a scheduling algorithm was presented based on the conception of virtual buffer modules and the swap scheduling strategy. Finally, experiments were carried out to evaluate the proposed algorithm. Results indicated that, when scheduling a lot wafers, the running time of the constructed algorithm is only about 0.5 seconds, and the response time of the algorithm is also quick. Comparing a lower bound of the research problem domain, solutions are close to the lower bound. When the device factor is greater than 5, the cycle elongation R is less than 0.05. The algorithm achieves good results.

Key words: multi-cluster tools; dual-blade robot; residency constraints; time interval set; scheduling

随着300 mm晶圆制造技术的问世,集束型设备群正在被越来越广泛地应用于半导体制造过程中.目前,如何优化半导体集束型设备群的调度问题,已成为提升半导体制造系统整体效率的关键途径.对单个集束型设备调度的研究已比较成熟.例如Perkinson等^[1]和Venkatesh等^[2]对单个单臂和双臂集束型设备稳态下的产能进行了分

析,建立了单臂、双臂集束型设备的分析模型,提出了基础调度周期(fundamental period, FP)的计算方法,并建立了单臂机械手调度的拉动(pull)策略和双臂机械手的交换(SWAP)策略.

研究集束型设备群调度问题的文献报道较少,已有文献主要关注同种晶圆产品在稳态下的调度方法.例如Yi^[3]等在不考虑机械手搬运时间,仅仅考虑集束型设备群加工同种晶圆产品的情况下,对其进行了产能和FP分析,给出了一种分解方法来构建集束型设备群的FP下界,并给出了相应的优化调度方法.Chan^[4-5]等在考虑机械手搬运时间为非零情况下,对集束型设备群调

收稿日期: 2013-03-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71071115; 61273035).

作者简介: 周炳海(1965—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 周炳海, bhzhou@tongji.edu.cn.

度问题进行了研究,构造了一种基于资源约束的分析模型,并给出了相应的调度方法.上述文献主要关注集束型设备群在稳态下的产能分析,且均没有考虑晶圆加工过程中的晶圆在处理腔中的驻留约束现象.文献[6-12]对带驻留约束的单个集束型设备调度问题进行了研究.然而 Chan^[4-5]等已经指出,集束型设备群调度问题的复杂性使得现有的方法均不能直接推广应用于集束型设备群的调度问题中.文献[13]对带驻留约束的单臂集束型设备群进行了研究,提出了一种基于时间约束集的建模与调度方法.

本文在提出虚拟缓冲模块(virtual buffer module, V_{BM})概念的基础上,结合时间区间集概

念^[14],进行了带驻留约束的双臂集束型设备群的调度问题研究.

1 问题描述

根据 SEMI 标准 E21-96 定义,一个集束型设备一般由卡匣模块(load lock, L_L)、单臂或双臂机械手搬运模块(robot module, R_M)以及若干个晶圆加工模块(process module, P_M)组成. L_L 的功能是存储晶圆, R_M 负责完成晶圆的搬运、装载或卸载任务, P_M 负责晶圆的加工.一个集束型晶圆制造设备群通常包含多个由缓冲模块(buffer module, B_M)相互连接的集束型设备,如图 1 所示,其中 C_h 表示第 h 台单个集束型设备.

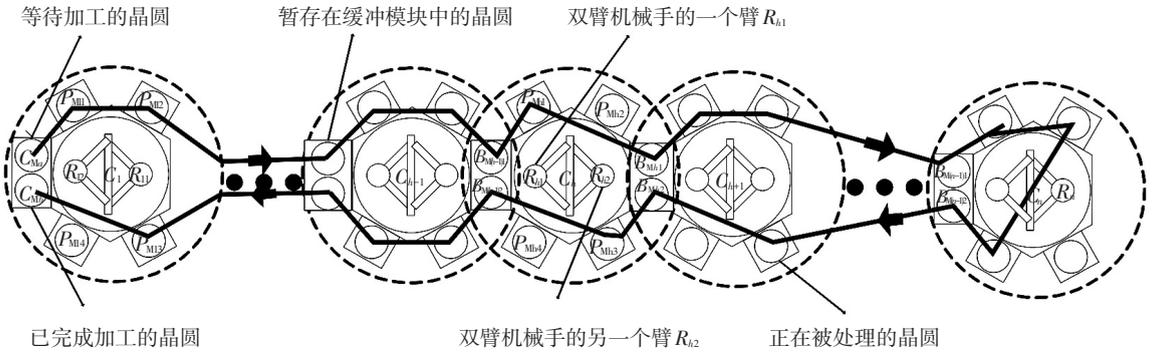


图 1 双臂集束型设备群示意图

为有效地描述集束型设备群调度问题,假设:

- ①每一个集束型设备最多和两个集束型设备连接;
- ②两个相邻的集束型设备由两个 B_M 连接,其中一个 B_M 用于暂存进入集束型设备的晶圆,一个 B_M 用于暂存离开集束型设备的晶圆, B_M 最多只能储存一片晶圆,晶圆在 B_M 的处理时间为 0,驻留约束时间没有限制;
- ③所有的 R_M 采用双臂机械手,机械手的两臂呈 180° 角放置,每次允许搬运一片晶圆,在不同模块间的晶圆移动时间固定;
- ④每个 P_M 一次只能加工一片晶圆;
- ⑤晶圆在 P_M 中有驻留时间约束,即加工完成后,晶圆在 P_M 内驻留时间有限制,超过该时间上限,晶圆的产品质量会下降,甚至会变成次品;
- ⑥要调度的晶圆具有不同的晶圆流模式,也即是有不同的晶圆种类,并且晶圆允许跳过在同一个集束型设备中的某一个或几个 P_M .

符号定义如下:

C_{T_m} 为一个集束型设备群,其中下标 m 表示这个集束型设备群中包含的单集束型设备的数目;

J_i 为当前调度的晶圆;

C^h 为在该集束型设备群中的第 h 个集束型

设备;

R_{h1}, R_{h2} 分别表示第 h 个集束型设备的机械手的两只手臂;

$B_{M_{hj}}$ 为用于连接 C^h 和 C^{h+1} 的缓冲模块;

$V_{B_{M_{hj}}}$ 为假设的存在于 $P_{M_{h(j-1)}}$ 和 $P_{M_{hj}}$ 之间的虚拟的缓冲模块;

M_{HL} 为晶圆进入 $B_{M_{(h-1)2}}$ 之前在 C^h 的实际上最后一道工序的序号;

M_h 为 C^h 与 C^{h+1} 连接前 C^h 中处理模块的数目;

M_H 为 C^h 中的处理模块的数目;

a_{ij} 为跳过的工序数,若晶圆没有跳过任何工序,则 $a_{ij} = 0$;若晶圆在 $P_{M_{hj}}$ 或 $B_{M_{hj}}$ 之后跳过了 k 个工序,则 $a_{ij} = k$;

$t_{p,i,hj}$ 为 J_i 在工序 $P_{M_{hj}}$ 上所需的加工时间;

t_p 为晶圆 J_i 在晶圆流模式上的各个处理模块 $P_{M_{hj}}$ 的加工时间的集合;

$t_{u,i,hj}$ 为 J_i 在工序 $P_{M_{hj}}$ 上最大允许驻留时间;

t_u 为晶圆在晶圆 J_i 流模式上的各个处理模块 $P_{M_{hj}}$ 的最大允许驻留时间的集合;

$t_{PVB,hj}$ 为虚拟的连接存储模块 $V_{B_{M_{hj}}}$ 所需要的加工时间 $t_{PVB,hj} = 0$;

$t_{UVB, hj}$ 为用于连接的存储模块 $V_{B_{Mhj}}$ 最大允许驻留时间 $t_{UVB, hj} = \infty$;

T_i 为 J_i 各工序需要加工时间集合, 即 $T_i = \{t_{P, i, 11}, t_{P, i, 12}, \dots, t_{P, i, mj}, \dots, t_{P, i, 14}\}$;

$T_{P, i, hj}$ 为 J_i 在 P_{Mhj} 上允许停留的时间区间 $T_{P, i, hj} = [t_{P, i, hj}, t_{P, i, hj} + t_{U, i, hj}]$;

$t_{F, i, hj}$ 为 J_i 在 P_{Mhj} 中的实际停留时间;

$t_{S, i, hj}$ 为 J_i 在 P_{Mhj} 中的开始时间;

$t_{L, i, hj}$ 为 J_i 在 P_{Mhj} 中的离开时间;

$t_{FB, i, hj}$ 为 J_i 从 C^h 进入 B_{Mhj} 后的实际停留时间;

$t_{SB, i, hj}$ 为 J_i 从 C^h 进入 B_{Mhj} 中的时间;

$t_{LB, i, hj}$ 为 J_i 从 C^h 进入 B_{Mhj} 后的离开时间;

t_{UD} 为机械手卸载 J_i 的时间, 为常数;

t_{LD} 为机械手装载 J_i 的时间, 为常数;

$t_{M, i, hj}$ 为把 J_i 从 $P_{Mh(j-1)}$ 搬运到 P_{Mhj} 需要的时间, 含装卸时间, 为常数 t_M ;

$t_{FVB, i, hj}$ 为 J_i 从 $C_{Tm} (m = 1, 2, \dots, n)$ 进入虚拟的存储模块 $V_{B_{Mhj}}$ 后实际停留时间;

$t_{SVB, i, hj}$ 为 J_i 从 $C_{Tm} (m = 1, 2, \dots, n)$ 进入虚拟的存储模块 $V_{B_{Mhj}}$ 中的时间;

$t_{LVB, i, hj}$ 为 J_i 从 $C_{Tm} (m = 1, 2, \dots, n)$ 进入虚拟的存储模块 $V_{B_{Mhj}}$ 后的离开时间;

$t_{MV, i, hj}$ 为把 J_i 从工序 $j - 1$ 搬运到虚拟的存储模块 $V_{B_{Mhj}}$ 需要的时间, 含装载和卸载的时间;

$t_{TMRES, i, hj}$ 为 J_i 从 P_{Mhj} 卸载后到被装载到下一个处理模块之间在机械手的手臂上驻留的时间;

$T_{TW, i, hk}$ 为 K 等于 1 或 2, 表示第 h 个集束型设备的机械手的两只手臂 R_{h2} 或 R_{h1} 对的可用时间区间;

$T_{FL, i, hj}$ 为在当前调度下, J_i 在 P_{Mhj} 可行的结束时间区间集, 包含有 $\phi l(i, h, j)$ 个区间, 即有 $T_{FL, i, hj} = \{T_{FL, i, hj, 1}, T_{FL, i, hj, 2}, \dots, T_{FL, i, hj, \phi l(i, h, j)}\}$;

$T_{FSB, i, hj}$ 为在当前调度下, J_i 在 B_{Mhj} 可行的开始时间区间集, 包含有 $\phi bs(i, h, j)$ 个区间, 即有 $T_{FSB, i, hj} = \{T_{FSB, i, hj, 1}, T_{FSB, i, hj, 2}, \dots, T_{FSB, i, hj, \phi bs(i, h, j)}\}$.

$T_{PWVB, i, hj}$ 为虚拟的模块缓冲模块中 $V_{B_{Mhj}}$ 可用的时间区间集;

$T_{FSVB, i, hj}$ 为在当前调度下, 用时间区间集来表示 $V_{B_{Mhj}}$ 的可行的开始存储时间 ($t_{SVB, i, hj}$).

由假设 ③ 可知, 晶圆在任意一个 P_M 或 B_M 的开始时间或结束时间的差值至少大于或等于 R_M 完成一次晶圆装载的时间, 于是可得

$$\begin{aligned} |t_{S, i_1, h j_1} - t_{S, i_2, h j_2}| &\geq t_{UD}, \\ |t_{L, i_1, h j_1} - t_{L, i_2, h j_2}| &\geq t_{UD}, \end{aligned}$$

$$|t_{S, i_1, h j_1} - t_{L, i_2, h j_2}| \geq t_{UD},$$

$$|t_{SB, i_1, h j_1} - t_{SB, i_2, h j_2}| \geq t_{UD},$$

$$|t_{LB, i_1, h j_1} - t_{LB, i_2, h j_2}| \geq t_{UD},$$

$$|t_{SB, i_1, h j_1} - t_{LB, i_2, h j_2}| \geq t_{UD}.$$

由假设 ④ 可知, 任意一个 P_M 或 B_M 都不可能同时拥有两个或两个以上的晶圆, 于是有

$$t_{L, i+1, hj} - t_{F, i+1, hj} \geq t_{L, i, hj} + t_{ud},$$

$$t_{LB, i+1, hj} - t_{FB, i+1, hj} \geq t_{LB, i, hj} + t_{ud}.$$

由于双臂机械手采用 SWAP 策略, 其对晶圆的移动不是一个连续的动作, 由假设 ⑥ 可知, 晶圆在晶圆流模式上相邻的 P_M 之间的开始时间和结束时间的关系必须满足如下关系:

$$t_{S, i, h(j+1+a_{ihj})} = t_{L, i, hj} + t_M + 2t_{UD} + t_{LD} + t_{TMRES}, \quad (1)$$

$$t_{S, i, h(1+a_{ihj})} = t_{LB, i, (h-1)1} + t_M + 2t_{UD} + t_{LD} + t_{TMRES}, \quad (2)$$

$$t_{S, i, h(Mh'+1+a_{ihj})} = t_{LB, i, h2} + t_M + 2t_{UD} + t_{LD} + t_{TMRES}, \quad (3)$$

$$t_{SB, i, h1} = t_{LB, i, hM1} + t_M + 2t_{UD} + t_{LD} + t_{TMRES}, \quad (4)$$

$$t_{SB, i, h2} = t_{LB, i, (h+1)M1} + t_M + 2t_{UD} + t_{LD} + t_{TMRES}. \quad (5)$$

由于集束型设备群的特殊的结构, 晶圆在不同集束型设备之间的移动必须通过 B_M 进行中转, 所以在约束条件 (1) ~ (5) 中应满足如下约束:

$$j + 1 + a_{ihj} \leq M_h,$$

$$M_h + 1 + a_{ihj} \leq M_H.$$

由假设条件 ⑤ 可知, 晶圆在 P_M 中的时间应该大于其处理时间, 于是可得

$$t_{F, i, hj} \geq t_{P, i, hj}, \quad j = 1, 2, \dots, M_H, \quad h = 1, 2, \dots, n;$$

$$t_{F, i, hj} \leq t_{P, i, hj} + t_{U, i, hj}, \quad j = 1, 2, \dots, M_H, \quad h = 1, 2, \dots, n;$$

对晶圆的搬运必须发生在机械手的两只机械臂中的某一个机械臂的可用的时间区间内, 于是有

$$\exists q \in \{1, 2, \dots, \phi t(i, h)\} : [t_{S, i, hj} - t_M, t_{S, i, hj}] \subseteq T_{TW, i, hk, q},$$

$$j = 1, 2, \dots, M_h; h = 1, 2, \dots, n; k = 1 \text{ or } 2.$$

晶圆在 P_M 中的实际停留的时间区间必须在 P_M 的某个可用时间区间内, 于是有

$$\exists k \in \{1, 2, \dots, \phi(i, h, j)\} : [t_{S, i, hj}, t_{L, i, hj}] \subseteq T_{PW, i, hj, k},$$

$$j = 1, 2, \dots, M_h; h = 1, 2, \dots, n.$$

同理, 对 B_M 也是如此:

$$\exists p \in \{1, 2, \dots, \phi b(i, h, j)\} : [T_{SB, i, hj}, T_{LB, i, hj}] \subseteq T_{PWB, i, hj, p},$$

$$j = 1, 2; h = 1, 2, \dots, (n - 1).$$

调度目标是最小化晶圆加工的 makespan, 即

$$\min t_{S, i, (M_1 +)}$$

至此,在对调度问题进行分析的基础上,关于在多晶圆流模式条件下,带有驻留约束的双臂集束型设备群调度问题的数学模型已经建立.

2 计算方法

首先,引入文献[14]中有关时间区间集运算的定义,具体描述如下:

定义 1 假设有时间区间集 $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 和时间区间集 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, $T_1, \dots, T_n, S_1, \dots, S_n$ 为时间区间:1) T 和 S 的交集,用 $T \cap S$ 表示; 2) T 和 S 的并集,用 $T \cup S$ 表示.

定义 2 假设有时间区间集 $T = \{[L_1, H_1], [L_2, H_2], \dots, [L_n, H_n]\}$ 和区间 $Q = [a, b]$:1) T 和 Q 的和用符号 $T \oplus Q$ 来表示, $T \oplus Q = \{[L_1 + a, H_1 + b], [L_2 + a, H_2 + b], \dots, [L_n + a, H_n + b]\}$; 2) \min 和 \max 函数分别用 $\min T = L_1$ 和 $\max T = H_n$ 来表述.

2.1 算法流程

算法的核心思想是引入 V_{B_M} 概念,将双臂集束型设备群的调度问题转化为带有 V_{B_M} 的单臂集束型设备群的调度问题进行研究. V_{B_M} 的依据是基于双臂的搬运机械手实际上相当于在每两个相邻的 $P_M(B_M)$ 之间增加了一个 B_M ,当晶圆产生驻留约束时,机械手可以暂时存储晶圆,相当于为晶圆提供了一个 B_M .双臂的机械手转化为单臂的机械手,同时在集束型设备里的每两个模块之间增加了一个 V_{B_M} ,虚拟化处理如图 2 所示. P_M 之间的圆圈表示为 V_{B_M} .

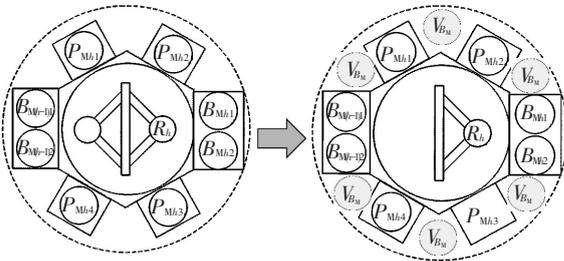


图 2 虚拟化示意图

基于上述核心思想,算法的流程见图 3. 首先,将双臂机械手的一个手臂虚拟为存在于相邻的 $P_M(B_M)$ 的 V_{B_M} . 这样,带驻留约束的双臂集束型设备群的调度问题就转化为相应的带驻留约束带 V_{B_M} 的单臂集束型设备群的调度问题. 最后,利用 V_{B_M} 上的开始和结束的时间就是晶圆在 R_M 的其中一个机械手的开始和结束时间,结合 SWAP 策略,并以此为依据对此进行修正,得到修正的 SWAP 调度策略,进而完成调度.

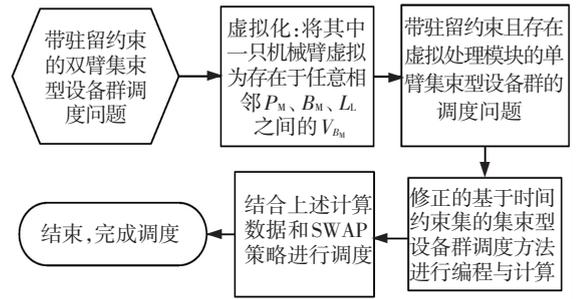


图 3 基于 SWAP 策略的算法流程

2.2 各模块的调度时间节点确定

针对已经转化后的带有驻留约束和 V_{B_M} 的单臂集束型设备群调度问题,需要计算调度的时间节点,即晶圆在转化后的晶圆流模式上的各个模块(包括 P_M, B_M, V_{B_M} 和 R_M)的开始和结束时间.各模块的调度时间节点确定步骤如图 4 所示. 逆序策略为计算 P_M 的开时间取可行时间区的最大值;计算 B_M 的开始时间取可行区间最小值.

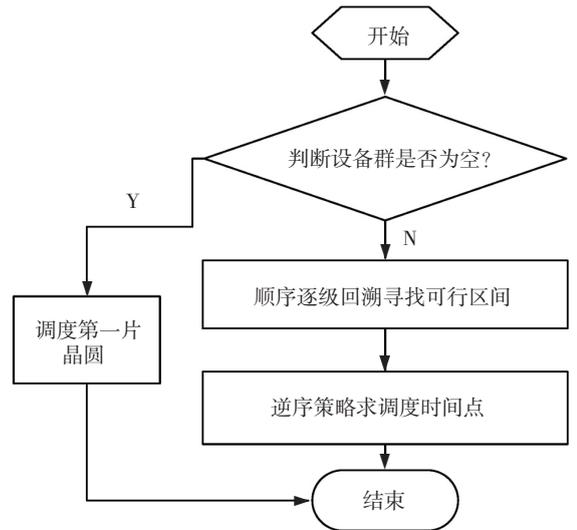


图 4 各模块的调度时间节点确定

具体的计算方法如下:

首先,在计算可行时间区间集部分,关于 V_{B_M} 的可行的开始和结束时间区间集 $T_{FSVB,i,hj}$ 和 $T_{FLVB,i,hj}$ 的计算,根据计算基于的模块的不同,可以分为以下 3 种情况:

1) 上一模块是 L_L ,即计算是基于 L_L 的,那么计算的方法如下:

$$T_{FSVB,i,hj} = ((T_{PWVB,i,hj} \oplus [-t_m/2, 0]) \cap T_{TW,i,hj} \oplus [t_m/2, 0]),$$

$$T_{FLVB,i,hj} = T_{FSVB,i,hj}.$$

2) 上一个模块是 P_{Mhk} ,即计算是基于上一个 P_M 的调度结果,那么计算方法如下:

$$T_{FSVB,i,hj} = T_{FLVB,i,hj} = (((T_{PWVB,i,hj} \cap (T_{FL,i,hk} \oplus [t_m/2, t_m/2])) \oplus [-t_m/2, 0]) \cap T_{TW,i,hj}) \oplus [t_m/2, 0].$$

(3) 如果上一个处理模块是 $B_{Mh'k'}$, 即计算是基于 B_M 计算结果的, 那么计算的方法如下:

$$T_{FSVB,i,h1} = (((T_{PWVB,i,hj} \cap (T_{FLB,i,h'k'} \oplus [t_M/2, t_M/2])) \oplus [-t_M/2, 0]) \cap T_{TW,i,hj}) \oplus [t_M/2, 0].$$

其次, 晶圆在进入 P_M 之前必须先“进入” V_{B_M} , 所有处理模块的计算都是基于 $V_{B_Mh''k''}$ 计算结果的, 其计算方法如下:

$$T_{FS,i,hj} = (((T_{PW,i,hj,k} \oplus [0, -t_{p,i,hj}]) \cap (T_{FLVB,i,h''k''} \oplus [t_M/2, t_M/2])) \oplus [-t_M/2, 0]) \cap T_{TW,i,h} \oplus [t_M/2, 0],$$

$$T_{FL,i,hj} = (T_{FS,i,hj,l} \oplus [t_{p,i,hj}, t_{p,i,hj} + t_{u,i,hj}]) \cap (T_{PW,i,hj,u} \oplus [t_{p,i,hj}, 0]).$$

最后, 关于 B_M 的可行开始和结束时间区间的计算. 与 P_M 类似, B_M 的计算也都是基于相应的 $V_{B_Mh''k''}$ 计算结果的, 其相应的计算公式如下:

$$T_{FSB,i,hj} = (((T_{PWB,i,hj} \cap (T_{FLVB,i,h''k''} \oplus [t_M/2, t_M/2])) \oplus [-t_M/2, 0]) \cap T_{TW,i,h}) \oplus [t_M/2, 0].$$

通过上述公式, 按照晶圆流模式上各模块的顺序, 可以一次计算出相应的可行和结束时间区间集. 在此基础上进行调度时间点的计算.

首先是关于晶圆在各个 V_{B_M} 的开始和结束时间点计算, 下面对几种不同的情况进行分析.

1) 上一个模块是用于存储已加工完成的晶圆的 L_L , 则

$$t_{SVB,i,hn} = \min(T_{FSVB,i,hn}),$$

那么晶圆的最早完工时间显然是 $t_{LVB,i,hn} + t_M/2$.

2) 如果上一个模块是 P_{Mhk} , 即计算是和上一个 P_M 相关联的, 则

$$t_{LVB,i,hn} = t_{S,i,hk} - t_M/2,$$

$$t_{SVB,i,hn} = \min(T_{FSVB,i,hn} \cap [0, t_{LVB,i,hn}]).$$

3) 如果上一个模块是 $B_{Mh'k'}$, 即计算是和上一个 B_M 相关联的, 则

$$t_{LVB,i,hn} = t_{SB,i,h'k'} - t_M/2,$$

$$t_{SVB,i,hn} = \min(T_{FSVB,i,hn} \cap [0, t_{LVB,i,hn}]).$$

其次是关于晶圆在 B_M 的开始和结束时间的计算, 其计算肯定是基于 $V_{B_Mh''k''}$ 的, 相应的计算公式如下:

$$T_{FSB,i,hj} = (((T_{PWB,i,hj} \cap (T_{FLVB,i,h''k''} \oplus [t_M/2, t_M/2])) \oplus [-t_M/2, 0]) \cap T_{TW,i,h}) \oplus [t_M/2, 0].$$

最后是晶圆在各个 P_M 上的开始和结束时间的计算. 由于 P_M 的计算也必定是基于 $V_{B_Mh''k''}$ 的, 所以其计算的方法可归纳如下:

$$t_{L,i,hn} = t_{SVB,i,h''k''} - t_M/2,$$

$$t_{S,i,hn} = \max(([t_{L,i,hn} - t_{p,i,hn} - t_{u,i,hn}, t_{L,i,hn} - t_{p,i,hn}]) \cap T_{FS,i,hn}).$$

2.3 基于修正的 SWAP 策略调度

对于集束型设备群的调度就是要在满足各种要求的情况下, 确定各个机械手的动作顺序和时间, 以实现预定的调度目标. 对于不带驻留约束限制的双臂集束型设备来说, SWAP 策略是其基本的调度策略, 并且是已经被证明了的优化的调度策略^[2]. 对于带有驻留约束的双臂集束型设备群来说, 双臂机械手在调度上最大的功能就是提供了一个临时的“缓冲”模块. 双臂机械手的这一作用也正因为带驻留约束的集束型设备群的调度提供了新的调度空间. 在本文的算法中, 将双臂虚拟为单臂, 晶圆在 V_{B_M} 上的开始和结束的时间就是晶圆在双臂 P_M 的其中一个模块的开始和结束时间, 结合修正的 SWAP 策略, 可得到对集束型设备群的调度. 对于不带驻留约束限制的集束型设备群来说, SWAP 策略就是完全根据晶圆的加工时间来确定机械手各个动作的时间和顺序. 在考虑驻留约束限制的情况下, 根据 2.2 节的调度, 首先可以确定的一个机械手的各个动作的时间, 再根据晶圆在虚拟处理模块上的开始和结束时间确定另一只机械手的相应的开始和结束时间, 从而可以确定双臂机械手对晶圆的搬运的动作顺序和时间, 从而完成调度.

3 仿真实验与分析

为了有效地评价本文提出的调度算法, 选取文献 [3] 构造的基础调度周期 (fundamental period, F_P) 下界作为 benchmark, 并且与文献 [3] 提出的下界的非 V_{B_M} 调度方法进行对比, 期望通过对下界的综合使用来更加有效地评价本文的算法. 周期延长率^[13]

$$R = \frac{FP_Z - FP_B}{FP_B} \times 100\%,$$

表示因为驻留约束而相对于 F_{PB} 的延时率, R 越小, 越接近 F_{PB} , 即本文提出的算法性能越好.

$$C_F = \frac{t_{pmax} + t_M}{(N + N^* + 1)t_M},$$

表示集束型设备群中 R_M 的繁忙程度, C_F 越大, 晶圆的最大处理时间和 R_M 完成一次搬运所需时间的比例越大, 说明 R_M 越空闲, 反之表明 R_M 越繁忙.

相关符号定义如下: F_{PZ} 表示处理一批晶圆所需的平均周期时间; F_{PB} 表示文献 [3] 中的下界周期时间; t_{pmax} 表示晶圆在某个集束型设备中各个 P_M

的最大处理时间; t_M 表示完成一次搬运的时间; N 表示每个集束型设备中的 P_M 的数目; N^* 表示文献[3]中提出的 V_{B_M} 块的数目.

为了方便仿真,在不失一般性的前提下,本文假设晶圆在晶圆流模式上的各个加工时间 t_p 和驻留约束时间 t_u 服从相应的正态分布.此外,根据对集束型设备群调度研究的通行做法,本文假设机械手在不同模块间的搬运时间 $t_{M,i,hj}$ 、 $t_{MV,i,hj}$ 等相同,并用 T 表示.最后,假设集束型设备群中每个集束型设备含有的处理腔的数目相等,并用 N_p 表示.

3.1 运算时间分析

为了确定算法是否能够快速响应调度,对算法运行时间进行了仿真分析,实验设计如下:令 $m = 8; N_p = 6; T = 2; t_p \sim N(40, 10); t_u \sim N(30, 5)$; 依次令晶圆的数目为:5、10、15、20、25、30、35、40、45、50, 分别计算算法求得调度结果的时间. 程序运行的硬件环境为 320 G 硬盘、2 GB 内存和 2.13 GHz 主频英特尔处理器的 ACER 个人笔记本电脑.运行的结果如图 5 所示.

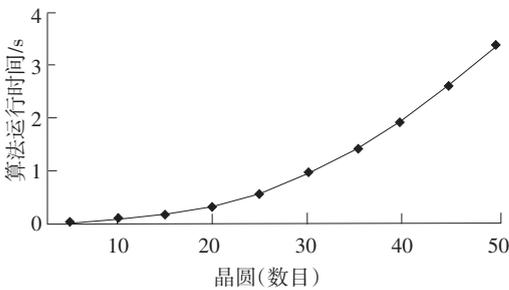


图 5 算法运行时间

由图 5 可以看出,当一次处理的晶圆数量为 25 片(1 个 Lot)时,算法的运行时间为 0.5 s,也就是说算法可以在 0.5 s 以内完成对 1 个 Lot 的优化调度.随晶圆数量的增加其算法的求解时间呈单调递增.完成两个 Lot 的调度仅用了 3.4 s 左右,可知算法产生调度解的时间是比较短的,响应时间较快.

3.2 设备因子对算法的影响

设备因子 C_F 是反映在集束型设备群内机械手的装载、卸载的时间和晶圆在各个 P_M 上加工时间的关系的指标.设备因子实际上反映的是在集束型设备群内机械手繁忙程度的函数.

实验的设计如下:令 $N_p = 4, T = 2; t_p \sim N(40, 10), t_u \sim N(30, 5)$; 分别令 $m = 2, 3, 4, 5$, 求出在 $C_F = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 时的 R 值,分析在各种情况下 C_F 对 R 影响.仿真结果如图 6 所示.

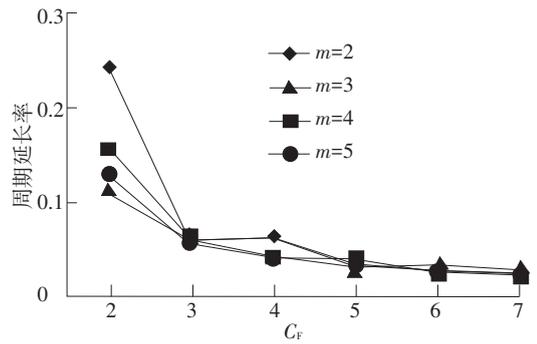


图 6 C_F 对算法的影响

由图 6 可以看出,周期延长率 R 基本上是随着 C_F 的逐渐增大而不断下降,且不同 m 值的仿真曲线的走向基本相同.当 $C_F > 5$ 时, $R < 0.05$,表明在不同 m 值的集束型设备群均取得了较好的调度效果.而且,在实际中机械手的搬运时间通常相对于晶圆的最大加工时间要小,从而 C_F 较大,所以本文提出的算法具有较好的实际意义.

3.3 集束型设备群结构对算法的影响

本节仿真的主要目的是要测试算法对不同的集束型设备群结构的适应性和优化性.

首先分析的是集束型设备群的 m 值对算法的影响.实验设计如下:令 $N_p = 4, T = 2; t_p \sim N(40, 10), t_u \sim N(30, 5)$; 分别令 $m = 2, 3, 4, 5, 6, 7$, 计算出相应的 R 值,分析 m 的变化对算法的性能影响,结果如图 7 所示.

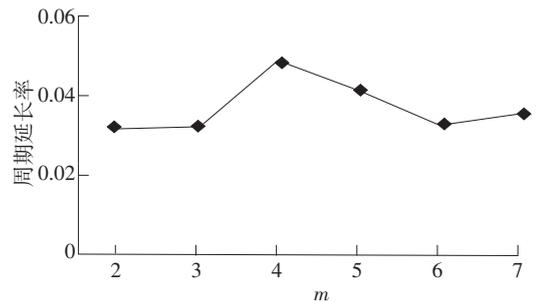


图 7 m 对算法性能影响

下面分析每个单集束型设备里的 P_M 的数量对算法性能的影响.实验设计如下:令 $m = 3, T = 2; t_p \sim N(40, 10), t_u \sim N(30, 5)$; 分别令 $N_p = 2, 4, 6, 8$, 计算其相应的 R 值,并分析 N_p 变化对算法的性能影响,结果如图 8 所示.

由图 7 所示,周期延长率 R 随着 m 的变化,虽然有波动,但总的来说,上下波动的范围在正负 0.01 以内,相对来说比较小.由此可见算法对于 m 变化具有较好的稳定性.从图 8 也可以看出类似的规律,即周期延长率 R 基本上比较平稳,没有发生太大的波动,算法对于 N_p 变化也具有较好的适应性.综上可知,本文构造的算法对不同配置的集

束型设备群具有良好的适应性。

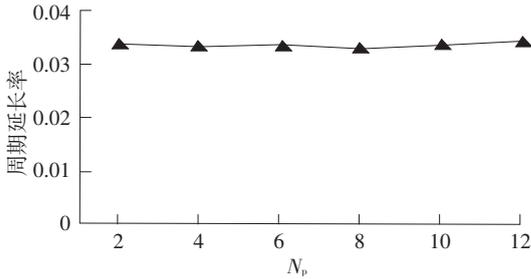


图 8 N_p 值对算法的影响

4 结 论

1) 在提出虚拟缓冲模块概念的基础上, 构造了基于修正 SWAP 策略的带驻留约束限制的可调度多种晶圆种类的双臂集束型设备群的调度算法, 为研究此类问题提供了一种调度方法。

2) 所构建的算法运行时间短, 在调度 1 个 Lot 数量的晶圆, 仅需 0.5 s 左右, 响应时间较短。

3) 由集束型设备群的配置对算法影响的分析可知: 当设备因子 >5 时, 周期延长率 R 已经全部 <0.05 , 表明算法取得了较好的调度效果; 另外, 随着 m 和 N_p 的变化, 周期延长率 R 虽然有些波动, 但总体波动相对较小, 算法对不同的集束型设备群的配置具有较好的适应性。

参 考 文 献

- [1] PERKINSON T L, MCLARTY P K, GYURCSIK R S, et al. Single-wafer cluster tool performance; an analysis of throughput[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1994, 7(3): 369-373.
- [2] VENKATESH S, DAVENPORT S, FOXHOVEN P, et al. A steady-state throughput analysis of cluster tools: dual-blade versus single-blade robots [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1997, 10(4): 418-424.
- [3] YI J, DING S, SONG D, et al. Steady-state throughput and scheduling analysis of multi-cluster tools: a decomposition approach [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(2): 321-336.
- [4] CHAN W, YI J, DING D. On the Optimality of one-unit cycle scheduling of multi-cluster tools with single-blade robots[C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway, New York, USA:IEEE, 2007: 392-397.
- [5] CHAN WKV, YI J, DING D. Optimal scheduling of k -unit production of cluster tools with single-blade robots [C]//IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. Piscataway, New York, USA: IEEE, 2008: 335-340.
- [6] ZHOU B H, LI X. Try and error-based scheduling algorithm for cluster tools of wafer fabrications with residency time constraints[J]. Journal of Central South University of Technology, 2012, 19(1): 187-192.
- [7] 陈佳, 周炳海. 带驻留与重入约束的集束型设备调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(12): 2667-2673.
- [8] WU N Q, ZHOU M. Schedulability analysis and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(1): 203-209.
- [9] WU N Q, ZHOU M. A closed-form solution for schedulability and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with wafer residency time constraint based on steady schedule analysis [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2010, 7(2): 303-315.
- [10] YAN Q, WU N Q, ZHOU M. Petri net modeling and wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with residency time constraints and activity time variation[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 25(3): 432-446.
- [11] LEE H T, LEE H Y, PARK D B. Schedulability analysis of time-constrained cluster tools with bounded time variation by an extended Petri Net [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2008, 5(3): 490-503.
- [12] ROSTAMI S, HAMIDZADEH B, CAMPORESE D. An optimal periodic scheduler for dual-arm robots in cluster tools with residency constraints[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(5), 609-618.
- [13] 刘明祥, 周炳海. 基于时间约束集的集束型设备群调度方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(3): 479-485.
- [14] DECHTER R, MEIRI I, PEARL J. Temporal constraint networks [J]. Artificial Intelligence, 1991, 49(1): 61-95.

(编辑 杨 波)