腔室清洗的单臂组合设备初始暂态调度

郭文有, 潘春荣†

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为了提升腔室洁净度, 晶圆厂需对组合设备腔室进行清洗操作, 从而提高晶圆的加工质量. 考虑腔室清洗时间和晶圆驻留时间的约束条件下, 本文研究了单臂组合设备的初始暂态调度问题. 首先, 提出了机械手的初始暂态活动规则, 并对机械手活动序列进行描述, 实现了系统的初始暂态可调度性; 其次, 对机械手在初始暂态和稳态的活动时间进行了建模; 然后, 根据系统的时间特性, 建立了初始暂态调度的线性规划模型; 最后, 通过实例验证了该方法的有效性. 与已有的虚拟晶圆方法相比, 该调度方法能有效减少初始暂态的完工时间, 提高了组合设备的晶圆生产效率.

关键词: 组合设备; 腔室清洗; 初始暂态; 晶圆制造

引用格式: 郭文有, 潘春荣. 腔室清洗的单臂组合设备初始暂态调度. 控制理论与应用, 2024, 41(2): 303 – 310

DOI: 10.7641/CTA.2023.11198

Scheduling of start-up process for single-arm cluster tools with chamber cleaning operations

GUO Wen-you, PAN Chun-rong†

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: In order to improve the cleanliness of chambers, fabs generally perform chamber cleaning operations on cluster tools, thereby improving wafer quality. The start-up process scheduling problem is addressed considering the time constraints of wafer residency and chamber cleaning. Firstly, start-up process activity rule of robot is proposed and the sequence of robot activities is described to achieve the start-up process schedulability. Secondly, the activity time of robot in the start-up process and steady state is modeled. Then, a linear programming model for start-up process scheduling is developed based on the time characteristics. Finally, examples are given to verify the validity of the proposed approach. Compared with the virtual wafer method proposed by the predecessors, the scheduling scheme can effectively reduce makespan and improve the wafer productivity of single-arm cluster tools.

Key words: cluster tool; chamber cleaning operation; start-up process; wafer fabrication

Citation: GUO Wenyou, PAN Chunrong. Scheduling of start-up process for single-arm cluster tools with chamber cleaning operations. *Control Theory & Applications*, 2024, 41(2): 303 – 310

1 引言

组合设备(cluster tool)作为一种半导体晶圆加工设备, 它主要由若干加工腔(process chamber, PC)、真空锁(loadlock, LL)和传输模块组成[1]. 根据结构差异, 传输模块可分为单臂、双臂机械手. 机械手一般被安放在设备中央, PC和LL模块则径向排列在四周[2], 如图1所示. 设备运行中, 晶圆由机械手夹持, 依次在LL和PC间传输和加工[3].

为了提升晶圆加工质量, PC内部需具备高洁净、无污染的加工条件. 基于此, 晶圆产线一般会对PC进行清洗操作, 其中包括定周期清洗[4]和动态清洗[5]. 若清洗周期为1, 称1–周期清洗[6–7]. 由于采用了腔室清洗操作, 原有的最优稳态调度方案[8–9]不再适用.文献[6]基于保持部分PC空闲的调度思路, 提出了改进的拉式策略, 有效改善了单臂组合设备的晶圆加工瓶颈. 在文献[6]的基础上, 文献[10]提出了1–周期清洗条件下的单臂组合设备Petri网模型, 并进一步建立了可实现稳态最优调度的算法. 由于工艺差异, 不同工

收稿日期: 2021−12−08; 录用日期: 2023−03−17.
†通信作者. E-mail: chunrongpan@163.com.
本文责任编委: 胡跃明.
国家自然科学基金项目(72161019), 江西省高等学校井冈学者特聘教授岗位资助.
Supported by the National Natural Science Foundation of China (72161019) and the Funded by Distinguished Professor Program of Jinggang Scholars in Institutions of Higher Learning, Jiangxi Province.

序PC的内部环境存在区别. 若对PC进行定周期清洗, 可能会存在部分PC清洗过度的情形, 进而浪费有限的生产资源. 基于此, 文献[5]提出了一种动态清洗的策略, 即PC满足条件时再执行清洗操作, 并根据单臂组合设备的运行特性, 进一步提出了可获取可行调度方案的机械手活动规则和调度算法.

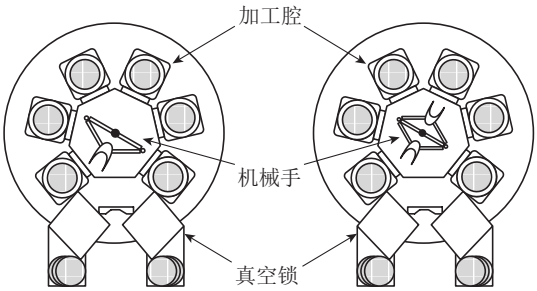


图 1 组合设备

Fig. 1 Cluster tools

组合设备加工晶圆过程中, 稳态与暂态加工过程往往伴随出现. 有效的调度方法可以得到可行的暂态加工方案. 文献[9]首次将虚拟晶圆法运用于暂态调度, 实现了系统在暂态与稳态之间的顺利切换. 该方法通用性强却无法保证设备最优运行. 对暂态进行优化调度有助于提升晶圆生产效率, 降低生产成本. 为解决具有晶圆驻留时间约束[11–15]、重入工艺[16–17]、设备复杂结构[18–19]等约束的组合设备暂态调度问题, 文献[11–19]基于数学规划方法或启发式方法, 提出了最优的暂态调度算法, 确保系统运行效率最大化.

对于1–周期腔室清洗的单臂组合设备调度问题, 现有的研究工作主要停留于调度策略开发[6]、稳态调度[10]、稳态故障响应[20]和终止暂态调度[7], 而初始暂态的调度研究工作尚未见于相关报道. 基于此, 本文根据系统运行特性, 提出了机械手活动规则和初始暂态调度算法, 分别实现了系统在初始暂态过程中的可调度性和加工方案的最优性, 有效解决了单臂组合设备初始暂态调度问题.

2 问题描述

采用1–周期清洗的组合设备, $\boldsymbol{m}=(m_1,m_2,\cdots,m_n)$表示晶圆流, 其中$n$代表工序数, m_i表示工序i中PC数量, $i=N_n=\{1,2,\cdots,n\}$. $\boldsymbol{z}=(z_1,z_2,\cdots,z_n)$表示为清洗流, $\boldsymbol{e}=\boldsymbol{m}-\boldsymbol{z}=(e_1,e_2,\cdots,e_n)$表示为加工流, z_i表示工序i保持空闲[6]的PC数量, $i\in N_n$. 真空锁通常称为工序0或工序$n+1$, 用于暂存晶圆.

组合设备加工单一批次晶圆时, 系统依次经历初始暂态、稳态和终止暂态, 如图2所示. 系统大部分时间处于稳态, 此时所有工序都处于满负荷加工状态(系统内共有$\sum\limits_{i=1}^{n}e_i$片晶圆正在加工), 且单臂机械手执行改进的拉式策略[6]进行晶圆加工. 系统从所有腔室处于空闲状态到稳态初始时刻, 这个加工过程称为初始暂态[21]. 稳态结束到系统内部无腔室加工晶圆, 称为终止暂态[16]. 初始暂态是本文研究的加工过程, 现给出如下定义.

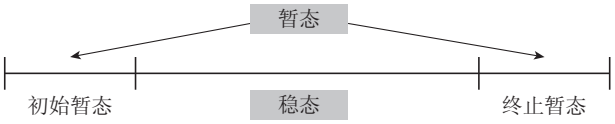


图 2 单一批次的晶圆加工过程

Fig. 2 One lot wafers process

定义 1 单臂组合设备加工单一批次晶圆过程中, 机械手在真空锁完成第1片晶圆的卸载, 到机械手在第1道工序完成第$\sum\limits_{i=1}^{n}e_i$片晶圆的装载, 这个过程称为初始暂态.

根据上述定义可知, 对初始暂态进行调度, 就是对单臂机械手进行合理调度, 得到完工时间最小, 同时可以确保系统能够顺利运行并过渡至稳态的加工方案.

3 机械手活动规则

机械手稳态下的活动规则不再适用于初始暂态, 需进一步提出有效的活动规则.

为了方便描述系统状态, 首先现给出如下定义.

定义 2 系统处于初始暂态时, 若工序i有e_i片晶圆正在加工, 工序j处于空闲状态, 定义系统状态为S_d, 其中$d\in\Omega_n=N_n\cup 0$, $i\in N_d$, $d<j\leqslant n$, e_i为工序i加工流分量.

根据定义2可知, 初始暂态可表示为系统从状态S_0转移至S_n的过程.

定义 3 定义机械手在工序i的基本活动单元U_i, U_i的活动组成为: 移至工序$i-1$ →等待晶圆载出→载出晶圆并移至工序i →等待载入→载入至工序i, $i\in N_{n+1}$.

定义 4 当系统处于状态S_{d-1}与S_d之间时, 机械手第j次在工序i执行活动单元U_i, 可表示为$T_d(i,j)$, $d\in N_n$, $i\in N_d$.

现提出如下机械手初始暂态活动规则:

1) $T_1(1,1)\to T_1(1,2)\to\cdots\to T_1(1,e_1)$;

2) $T_d(d,1)\to T_d(d-1,1)\to\cdots\to T_d(1,1)\to T_d(d,2)\to\cdots\to T_d(d,e_d)\to T_d(d-1,e_d)\to\cdots\to T_d(1,e_d)$, $d\in N_n\backslash\{1\}$.

当处于时刻$T_n(1,e_n)$, 系统到达状态S_n. 根据上述规则, 工艺参数$\boldsymbol{m}=(1,3,2)$, $\boldsymbol{z}=(0,1,1)$的初始暂态, 可表示为如图3所示过程, 其中, PC_il表示工序i处的j号腔室, $i\in N_n$, $0<j\leqslant m_i$.

根据上述活动规则, 对系统从状态S_0转移至S_n过程中的机械手活动序列进行描述. 状态S_0转移至S_1:

机械手在真空锁载出晶圆1→移至工序1→等待晶圆载入→载入至工序1($e_1 = 1$, 则系统到达状态S_1)→移至真空锁→等待晶圆载出→载出晶圆2并移至工序1→等待晶圆载入→载入至工序1→ $\cdots$ →卸载晶圆e_1并移至工序1→等待晶圆载入→载入至工序1. 至此, 系统处于状态S_1.

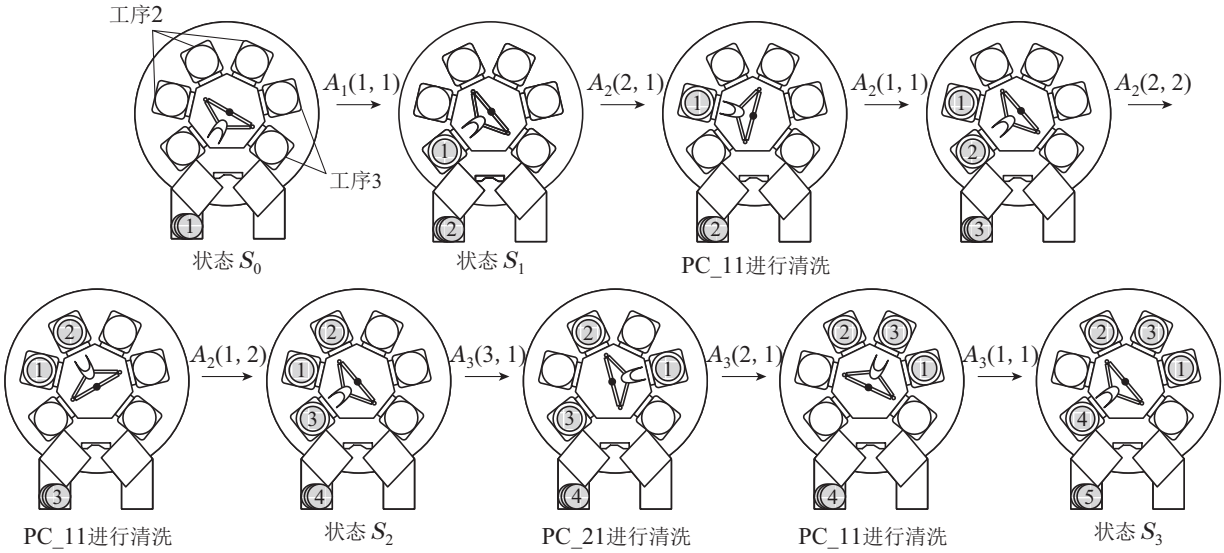


图 3　初始暂态加工过程

Fig. 3 Illustration of start-up process

状态S_{d-1}转移至S_d, $d \in N_n \backslash \{1\}$: 移至工序$d-1$(当$d = 2$且$e_1 = 1$, 无此活动)→等待晶圆载出→载出晶圆并移至工序$d$ →等待晶圆载入→载入至工序d →移至工序$d-2$ →等待晶圆载出→载出晶圆并移至工序$d-1$→等待晶圆载入→载入至工序$d-1$ → $\cdots$ →移至真空锁→等待晶圆载出→载出晶圆并移至工序1→等待晶圆载入→载入至工序1. 此活动序列执行e_d次, 系统到达状态S_d. 当系统到达状态S_n, 初始暂态结束, 系统进入稳态.

4　初始暂态建模与调度

4.1　活动时间建模

机械手的初始暂态活动规则实现了设备的可运行, 为进一步得到初始暂态加工方案, 需对系统中的各类活动进行时间建模.

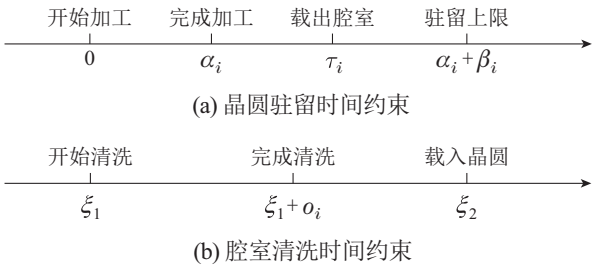
组合设备运行时, 机械手在每个工序载入和载出晶圆的时间相等, 设为λ; 机械手旋转移动的时间较短, 设为μ. 机械手在工序i载出或载入晶圆前存在等待时间, 时间非负. 当系统处于状态S_{d-1}与S_d之间时, 对系统内事件的活动时间进行描述, $d \in N_n$. 具体如表1所示.

假设α_i表示工序i的加工时间, β_i表示晶圆在工序i完成加工后在腔室可停留的最大时间, 则晶圆驻留时间τ_i应满足约束$\tau_i \in [\alpha_i, \alpha_i + \beta_i]$, 如图4(a)所示, $i \in N_d$. 此外, 应满足腔室清洗时间约束, 即晶圆载入PC加工时, 清洗操作需已完成. 假设工序i的腔室在ξ_1时刻完成晶圆的载出并开始清洗, 该腔室在ξ_2时刻开始下一次晶圆的载入, o_i表示工序i中腔室完成清洗的预定时间, 则应满足腔室清洗时间约束$\xi_2 \geqslant \xi_1 + o_i$, 如图4(b)所示, $i \in N_d$.

表 1　机械手活动时间说明

Table 1 Illustration of robot activities time

活动说明	时间
机械手装载一片晶圆至工序i, $i \in N_d$	λ
机械手从工序i卸载一片晶圆并移至工序$i+1$, $i \in N_d$	$\lambda + \mu$
机械手空载状态下旋转至工序i, $i \in N_{d-1}$	μ
机械手在工序i等待晶圆装载, $i \in N_d$	$[0, \infty)$
机械手在工序i等待晶圆卸载, $i \in N_{d-1}$	$[0, \infty)$



(a) 晶圆驻留时间约束

(b) 腔室清洗时间约束

图 4　晶圆驻留时间与腔室清洗时间约束

Fig. 4 Time constraints of wafer residency and chamber cleaning

当系统处于S_{d-1}与S_d时, 给出机械手在工序i的活动时间分布, 如表2所示, $d \in N_n$, $1 \leqslant k \leqslant e_d$.

定义φ_d为系统进入稳态后的第d个稳态周期. 同时给出系统处于稳态φ_d时, 机械手在工序i处的稳态活动时刻, 如表3所示, 其中$d \geqslant 1, i \in \Omega_n$.

表 2 初始暂态时间分布

Table 2 Time distribution of start-up process

含义	表达式
开始第k片晶圆卸载	$t(d,i,k,2), i \in \Omega_{d-1}$
完成第k片晶圆卸载	$t(d,i,k,2)+\lambda, i \in \Omega_{d-1}$
完成第k片晶圆装载	$t(d,i,k,1), i \in N_d$
开始第k片晶圆装载	$t(d,i,k,1)-\lambda, i \in N_d$
第k片晶圆被卸载前的等待时间	$\omega(d,i,k,2), i \in \Omega_{d-1}$
第k片晶圆被装载前的等待时间	$\omega(d,i,k,1), i \in N_d$

表 3 稳态时间分布

Table 3 Time distribution of steady state

含义	表达式
开始晶圆卸载	$t(n+d,i,1,2)$
完成晶圆卸载	$t(n+d,i,1,2)+\lambda$
完成晶圆装载	$t(n+d,i,1,1)$
开始晶圆装载	$t(n+d,i,1,1)-\lambda$
晶圆被卸载前的等待时间	$\omega(n+d,i,1,2)$
晶圆被装载前的等待时间	$\omega(n+d,i,1,1)$

4.2 调度分析

假定组合设备在初始暂态过程中顺利运行, 且机械手活动序列已知, 下面结合系统所受约束, 建立调度模型, 获取初始暂态方案.

设系统的初始时间为0. 当系统处于S_0与S_1时, 有

$$t(1,0,1,2)=\omega(1,0,1,2)=\omega(1,1,1,1)=0. \quad (1)$$

从真空锁卸下第1片晶圆后, 机械手移至工序1. 经一定等待, 进行晶圆载入. 期间机械手一共用了$2\lambda+\mu$个单位时间. 则有

$$t(1,1,1,1)=t(1,0,1,2)+2\lambda+\mu+\omega(1,1,1,1). \quad (2)$$

当第1片晶圆载入工序1后, 若$e_1=1$, 则到达状态S_1. 若$e_1>1$, 机械手继续返回真空锁, 载出其他晶圆. 当出现此情况, 则有

$$t(1,0,k,2)=t(1,1,k-1,1)+\mu+\omega(1,0,k,2),\ 2\leqslant k\leqslant e_1, \quad (3)$$

$$t(1,1,k,1)=t(1,0,k,2)+2\lambda+\mu+\omega(1,1,k,1),\ 2\leqslant k\leqslant e_1. \quad (4)$$

当系统状态为S_1, 且$e_1=1$, 存在$t(2,1,1,2)=t(1,1,1,1)+\omega(2,1,1,2)$. 由于工序1无法载入晶圆, 因此机械手继续停留在该PC处. 若$e_1>1$, 存在$t(2,1,1,2)=t(1,1,e_1,1)+\mu+\omega(2,1,1,2)$. 根据先进先出原则, 机械手在工序1完成第$e_1$片晶圆载入后, 需要时间$\mu$移至工序1中加工第1片晶圆的腔室, 进行晶圆的载出. 当系统从状态S_{d-1}转移至S_d时, $d\in N_n\backslash\{1\}$, 则有

$$t(d,d-1,1,2)=t(d-1,1,e_{d-1},1)+\mu+\omega(d,d-1,1,2),\ 2\leqslant d\leqslant n. \quad (5a)$$

若$d=2, e_1=1$, 则

$$t(2,1,1,2)=t(1,1,1,1)+\omega(2,1,1,2), \quad (5b)$$

$$t(d,d-1,k,2)=t(d,1,k-1,1)+\mu+\omega(d,d-1,k,2),\ 2\leqslant d\leqslant n,\ 2\leqslant k\leqslant e_d. \quad (6a)$$

若$d=2, e_1=1$, 则

$$t(2,1,k,2)=t(2,1,k-1,1)+\omega(2,1,k,2),\ 2\leqslant k\leqslant e_2. \quad (6b)$$

$$t(d,d-m,k,2)=t(d,d-m+2,k,1)+\mu+\omega(d,d-m,k,2),\ 2\leqslant d\leqslant n,\ 2\leqslant m\leqslant d,\ 1\leqslant k\leqslant e_d. \quad (7)$$

$$t(d,d-m+1,k,1)=t(d,d-m,k,2)+2\lambda+\mu+\omega(d,d-m+1,k,1),\ 2\leqslant d\leqslant n,\ 1\leqslant m\leqslant d,\ 1\leqslant k\leqslant e_d. \quad (8)$$

式(5)–(7)代表机械手在载出晶圆时所受的活动约束; 式(8)表示机械手在载入晶圆时所受的活动约束. 式(5b)中若$e_1=1$, 机械手将不移动; 对于式(6), 当系统处于S_1与S_2之间, 若$e_1=1$, 机械手在工序1载出晶圆前将不会移动.

当系统处于稳态时, 定义在工序i处, 晶圆被载入前机械手的等待时间为W_{i1}, 晶圆被载出前机械手的等待时间为$W_{i2}, i\in\Omega_n$. 假设在初始暂态正式调度前已求得稳态调度时的结果, 即W_{i1}和W_{i2}已知, $i\in\Omega_n$. 令$\delta=\max\{e_i,d_i|i\in N_d\}$. 与式(5)–(8)类似, 有

$$t(n+1,n,1,2)=t(n,1,e_n,1)+\mu+\omega(n+1,n,1,2). \quad (9)$$

$$t(n+k,n,1,2)=t(n+k-1,1,1,1)+\mu+\omega(n+k,n,1,2),\ 2\leqslant k\leqslant\delta. \quad (10)$$

$$t(n+k,0,1,1)=t(n+k,n,1,2)+2\lambda+\mu+\omega(n+k,0,1,1),\ 1\leqslant k\leqslant\delta. \quad (11)$$

$$t(n+k,n-m,1,2)=t(n+k,n-m+2,1,1)+$$

$$\mu+\omega(n+k,n-m,1,2),$$
$$1\leqslant k\leqslant\delta,\ 1\leqslant m\leqslant n. \tag{12}$$

$$t(n+k,n-m+1,1,1)=$$
$$t(n+k,n-m,1,2)+2\lambda+\mu+$$
$$\omega(n+k,n-m+1,1,1),$$
$$1\leqslant k\leqslant\delta,\ 1\leqslant m\leqslant n. \tag{13}$$

系统处于初始暂态时, 机械手在各工序的等待时间往往不等, 但处于不同稳态周期时, 机械手在各工序的等待时间应前后相等, 且等待时间均为非负. 存在

$$\omega(n+l,m,1,f)=\omega(n+k,m,1,f)=W_{mf},$$
$$m\in\Omega_n,\ f\in\{1,2\},\ l\neq k\text{且}l,k\in N_\delta, \tag{14}$$

$$\omega(n+k,m,1,f)\geqslant 0,\ m\in\Omega_n,\ f\in\{1,2\},\ k\in N_\delta. \tag{15}$$

$$\omega(d,d-m,k,f)\geqslant 0,\ 1\leqslant d\leqslant n,\ 1\leqslant m\leqslant d,$$
$$1\leqslant k\leqslant e_d,\ f\in\{1,2\}. \tag{16}$$

为求得晶圆驻留时间, 假设工序i中晶圆在时刻$t(d,i,j,1)$完成载入, d,i和j已知. 在系统时刻$t(d,i,j,1)$后, 定义$M_1(p_k)$为工序k中驻留的晶圆数量. 下面将分两类情形, 对驻留时间约束进行分析.

情形 1.1　若$\sum\limits_{k=i}^{n}M_1(p_k)\leqslant\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$, 假设该晶圆开始载出的时刻为$t(b,i,z,2)$, 那么$b$的取值应满足$\sum\limits_{l=i+1}^{b-1}e_l<\sum\limits_{k=i}^{n}M_1(p_k)\leqslant\sum\limits_{l=i+1}^{b}e_l$, $z=\sum\limits_{k=i}^{n}M_1(p_k)-\sum\limits_{l=i+1}^{b-1}e_l$. 随着$b$和$z$的确定, 存在

$$\alpha_i\leqslant t(b,i,z,2)-t(d,i,j,1),\ i\in N_n, \tag{17a}$$
$$t(b,i,z,2)-t(d,i,j,1)\leqslant\alpha_i+\beta_i,\ i\in N_n. \tag{17b}$$

情形 1.2　若$\sum\limits_{k=i}^{n}M_1(p_k)>\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$, 假设该晶圆开始载出的时刻为$t(n+r,i,1,1)$, 那么$r=\sum\limits_{k=i}^{n}M_1(p_k)-\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$, 存在

$$\alpha_i\leqslant t(n+r,i,1,2)-t(d,i,j,1),$$
$$i\in N_n,\ r\in N_\delta, \tag{18a}$$
$$t(n+r,i,1,2)-t(d,i,j,1)\leqslant\alpha_i+\beta_i,$$
$$i\in N_n,\ r\in N_\delta. \tag{18b}$$

为了满足清洗时间约束, 假设工序i的PC在时刻$t(d,i,j,2)+\lambda$完成晶圆载出, d,i和j已知. 定义在系统时刻$t(d,i,j,2)$前, $M_2(p_k)$为工序k中的驻留晶圆数. 下面分两类情形, 对PC所受的清洗时间约束分析.

情形 2.1　若$z_i+j+\sum\limits_{k=i+1}^{n}M_2(p_k)\leqslant\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$, 假设该PC开始载入新晶圆的时刻为$t(b,i,z,1)$. b满足$\sum\limits_{l=i+1}^{b-1}e_l<z_i+j+\sum\limits_{k=i+1}^{n}M_2(p_k)\leqslant\sum\limits_{l=i+1}^{b}e_l$, $z=z_i+j+\sum\limits_{k=i+1}^{n}M_2(p_k)-\sum\limits_{l=i+1}^{b-1}e_l$. 故存在

$$t(b,i,z,1)-t(d,i,j,2)-2\lambda\geqslant o_i,\ i\in N_n. \tag{19}$$

情形 2.2　若$z_i+j+\sum\limits_{k=i+1}^{n}M_2(p_k)>\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$, 假设该PC下一次开始载入新晶圆进行加工的时刻为$t(n+r,i,1,1)-\lambda$, 那么$r=z_i+j+\sum\limits_{k=i+1}^{n}M_2(p_k)-\sum\limits_{l=i+1}^{n}e_l$. 因此有

$$t(n+r,i,1,1)-t(b,i,j,2)-2\lambda\geqslant o_i,\ i\in N_n. \tag{20}$$

至此, 建立了由式(1)–(21)组成的线性规划模型(linear programming model, LPM), 用于实现最优调度方案的求解.

$$\min\sum_{f=1}^{2}\sum_{k=1}^{e_d}\sum_{m=0}^{d-1}\sum_{d=1}^{n}\omega(d,m,k,f). \tag{21}$$

采用机械手初始暂态活动规则进行调度, 式(1)–(16)确保机械手满足机械手活动序列以及等待时间非负约束, 式(17)–(20)保证了系统满足晶圆驻留时间约束和腔室清洗时间约束. 式(21)作为目标函数, 通过最小化机械手的总等待时间, 实现初始暂态完工时间最优. 单台设备一般包含4–6个腔室, 根据LPM建立的实际模型规模较小, 可用求解器求解.

本文对初始暂态进行研究的前提是稳态可以周期调度. 若稳态不可调度, 求解暂态方案便无意义.

定理 1　采用1–周期清洗的单臂组合设备的稳态可以周期调度, 那么根据LPM求解的方案是可行且最优的.

证　可行性证明. 因为稳态可以进行周期性调度, 则可采用虚拟晶圆法对初始暂态进行调度. 具体调度过程为: 当系统处于S_0与S_1之间时, 操作$T_1(1,1)$, $T_1(1,2),\cdots,T_1(1,e_1)$在系统中依次进行. 对$T_1(1,1)$与$T_1(1,2)$间的活动序列进行描述: $T_1(1,1)\to U_{n+1}\to U_n\to U_{n-1}\to\cdots\to U_3\to U_2\to T_1(1,2)$. 其中, U_{n+1}至U_2的活动是机械手的虚拟操作. 此序列完成后, 继续执行后续活动, 直至$T_1(1,e_1)$时刻结束, 此时, 系统从状态S_0转移至状态S_1. 上述机械手的虚拟操作花费的时间, 看成是机械手在工序1的等待时间. 根据此方式, 系统将到达状态S_1. 当系统处于状态S_{d-1}到达S_d之间时, 同样把机械手对虚拟晶圆操作花费的时间看成机械手在工序1的等待时间, $d\in N_n\backslash\{1\}$. 系统将最终到达状态S_n. 至此可知, 通过LPM求解的方案是可行的.

最优性证明. 对于单臂组合设备的调度, 文献[6]指出改进的拉式策略是最优的. 本文采用的机械手活动规则是基于改进的拉式策略提出的, 且LPM以最小化为目标, 故所得方案为最优. 定理1成立. 证毕.

综上分析, 对1–周期清洗的单臂组合设备初始暂态进行调度, 调度流程可概括为: 输入加工参数, 判断能否进行稳态周期调度[10], 若可行, 则进一步求解稳态与初始暂态方案. 具体的流程如图5所示.

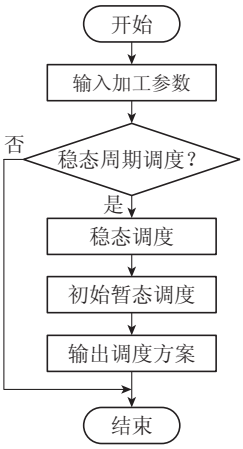


图 5 初始暂态调度流程图

Fig. 5 Flow chart scheduling with start-up process

5 算例

本节将运用LPM对相关实例进行初始暂态调度, 在配置为酷睿i5-10 210U / 1.60 GHz / 16 GB / DDR4 RAM的计算机上利用Gurobi v9.5.1进行模型求解. 然后将求解结果与虚拟晶圆方案进行对比, 进一步验证LPM的有效性.

例 1 晶圆流$\boldsymbol{m}=(1,1,2)$, 晶圆加工参数: $\alpha_1=30$ s, $\alpha_2=30$ s, $\alpha_3=32$ s, $\beta_1=\beta_2=\beta_3=30$ s; PC清洗参数: $o_1=40$ s, $o_2=40$ s, $o_3=140$ s; 机械手活动参数: $\lambda=8$ s, $\mu=2$ s. 经计算: $\boldsymbol{z}=(0,0,1)$, $\boldsymbol{e}=(1,1,1)$.

1) 可计算得到稳态下的生产周期为108 s, 机械手在工序的等待时间分别为$W_{02}=10$ s, $W_{21}=8$ s, $W_{31}=10$ s, $W_{01}=W_{11}=W_{12}=W_{22}=W_{32}=0$. 若使用虚拟晶圆法进行调度, 则初始暂态完工时间为$108\times(\sum\limits_{i=1}^{3}e_i-1)+2\lambda+\mu+W_{11}=324$ s.

2) 使用LPM求解初始暂态调度, 可求得初始暂态完工时间为190 s. 具体的调度结果如表4所示, 并根据结果绘制如图6所示的调度甘特图.

表 4 算例1机械手等待时间

Table 4 Robot waiting time of Example 1

初始暂态	机械手等待时间/s
状态S_0至S_1	–
状态S_1至S_2	$\omega(2,1,1,2)=30,\omega(2,2,1,1)=10,$ $\omega(2,0,1,2)=8$
状态S_2至S_3	$\omega(3,3,1,1)=8,\omega(3,2,1,1)=18$

3) 综上结果, LPM求解得到的完工时间相比于虚拟晶圆方案减少了18.80%.

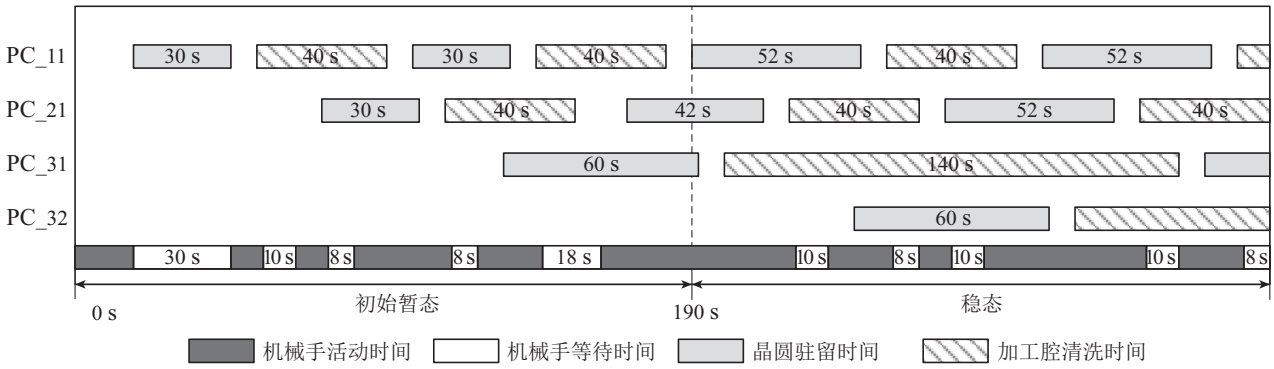


图 6 算例1调度甘特图

Fig. 6 Gantt chart of scheduling result for Example 1

例 2 晶圆流$\boldsymbol{m}=(3,2,2)$, 晶圆加工参数: $\alpha_1=140$ s, $\alpha_2=60$ s, $\alpha_3=90$ s, $\beta_1=\beta_2=\beta_3=20$ s; PC清洗参数: $o_1=120$ s, $o_2=100$ s, $o_3=120$ s; 机械手活动参数: $\lambda=5$ s, $\mu=2$ s. 经计算: $\boldsymbol{z}=(1,1,1)$, $\boldsymbol{e}=(2,1,1)$.

1) 可计算得到稳态下的生产周期为116 s, 机械手在工序的等待时间分别为$W_{02}=50$ s, $W_{21}=10$ s, $W_{01}=W_{11}=W_{12}=W_{22}=W_{31}=W_{32}=0$. 若使用虚拟晶圆法进行调度, 则初始暂态完工时间为$116\times(\sum\limits_{i=1}^{3}e_i-1)+2\lambda+\mu+W_{11}=360$ s.

2) 使用LPM求解初始暂态调度, 可求得初始暂态完工时间为324 s. 具体的调度结果如表5所示, 并根据结果绘制如图7所示的调度甘特图.

3) 综上结果, LPM求解得到的完工时间相比于虚拟晶圆方案减少了10.00%.

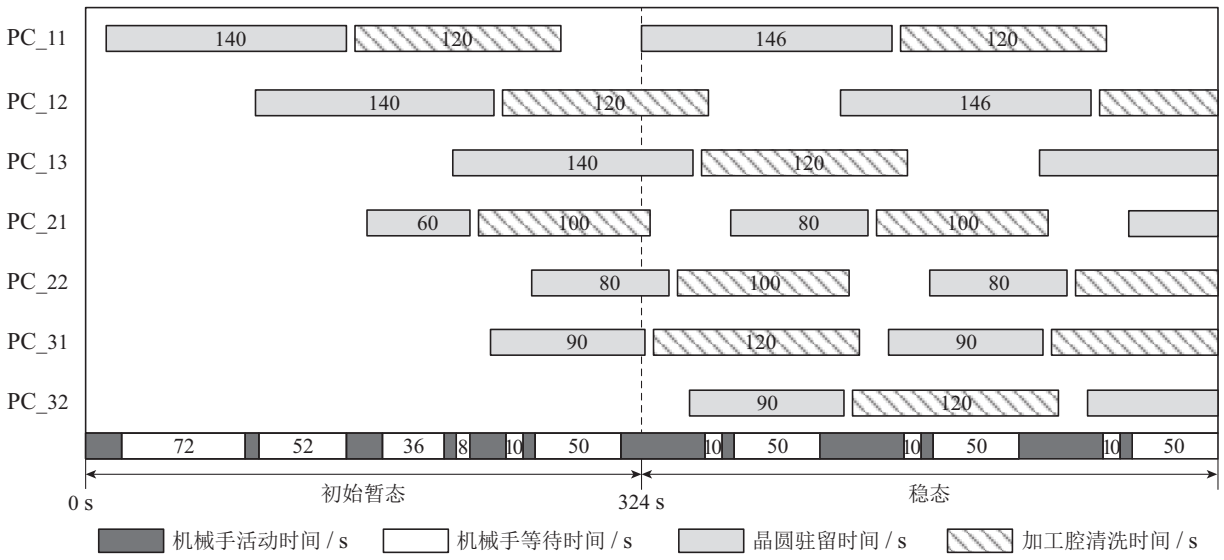


图 7　算例2调度甘特图

Fig. 7 Gantt chart of scheduling result for Example 2

表 5　算例2机械手等待时间

Table 5 Robot waiting time of Example 2

初始暂态	机械手等待时间/s
状态S_0至S_1	–
状态S_1至S_2	$\omega(1,1,2,1)=72, \omega(2,1,1,2)=52, \omega(2,1,1,1)=36$
状态S_2至S_3	$\omega(3,2,1,2)=8, \omega(3,2,1,1)=10, \omega(3,0,1,2)=50$

例 3　晶圆流$\boldsymbol{m}=(1,2,1)$, 晶圆加工参数: $\alpha_1=42$ s, $\alpha_2=65$ s, $\alpha_3=40$ s, $\beta_1=\beta_2=\beta_3=30$ s; PC清洗参数$o_1=30$ s, $o_2=120$ s, $o_3=45$ s; 机械手活动参数: $\lambda=5$ s, $\mu=3$ s. 经计算: $\boldsymbol{z}=(0,1,0)$, $\boldsymbol{e}=(1,1,1)$.

1) 可计算得到稳态下的生产周期为101 s, 机械手在工序的等待时间分别为$W_{11}=11$ s, $W_{22}=26$ s, $W_{01}=W_{02}=W_{12}=W_{21}=W_{31}=W_{32}=0$. 若使用虚拟晶圆法进行调度, 则初始暂态完工时间为$101\times(\sum\limits_{i=1}^{3}e_i-1)+2\lambda+\mu+W_{11}=226$ s.

2) 使用LPM求解初始暂态调度, 可求得初始暂态完工时间为189 s. 具体的调度结果如表6所示.

表 6　算例3机械手等待时间

Table 6 Robot waiting time of Example 3

初始暂态	机械手等待时间/s
状态S_0至S_1	–
状态S_1至S_2	$\omega(2,1,1,2)=42, \omega(2,0,1,1)=11$
状态S_2至S_3	$\omega(3,0,1,2)=4, \omega(3,2,1,1)=7, \omega(3,2,1,2)=35$

3) 综上结果, LPM求解得到的完工时间相比于虚拟晶圆方案减少了16.37%.

例 4　晶圆流$\boldsymbol{m}=(1,1,1)$, 晶圆加工参数: $\alpha_1=80$ s, $\alpha_2=100$ s, $\alpha_3=90$ s, $\beta_1=\beta_2=\beta_3=20$ s; PC清洗参数: $o_1=40$ s, $o_2=70$ s, $o_3=25$ s; 机械手活动参数: $\lambda=8$ s, $\mu=2$ s. 经计算: $\boldsymbol{z}=(0,0,0)$, $\boldsymbol{e}=(1,1,1)$.

1) 可计算得到稳态下的生产周期为186 s, 机械手在工序的等待时间分别为$W_{11}=W_{12}=20$ s, $W_{21}=28$, $W_{22}=38$, $W_{01}=W_{02}=W_{31}=W_{32}=0$. 若使用虚拟晶圆法进行调度, 则初始暂态完工时间为$186\times(\sum\limits_{i=1}^{3}e_i-1)+2\lambda+\mu+W_{11}=410$ s.

2) 使用LPM求解初始暂态调度, 可求得初始暂态完工时间为342 s. 具体的调度结果如表7所示.

表 7　算例4机械手等待时间

Table 7 Robot waiting time of Example 4

初始暂态	机械手等待时间/s
状态S_0至S_1	–
状态S_1至S_2	$\omega(2,1,1,2)=80, \omega(2,0,1,1)=18$
状态S_2至S_3	$\omega(3,0,1,2)=20, \omega(3,2,1,1)=48, \omega(3,2,1,2)=60$

3) 综上结果, LPM求解得到的完工时间相比于虚拟晶圆方案减少了16.59%.

6　结束语

随着制造工艺的提升, 半导体厂商对晶圆加工环境的要求变得愈加严格. 腔室清洗操作可以有效改善腔室环境, 已广泛应用于组合设备的晶圆生产中. 在考虑驻留时间约束和清洗时间约束下, 本文对单臂组合设备的初始暂态过程进行了研究. 通过提出初始暂

态最优调度模型, 达到了降低企业生产成本的目的, 同时也为组合设备生产厂商定制设备算法提供了参考. 组合设备发生故障时, 已有的调度方案可能不再适应, 提出有效的调度算法, 对于组合设备的晶圆制造过程至关重要, 这是课题组下一步开展的研究工作.

参考文献:

[1] PAN C R, ZHOU M C, QIAO Y, et al. Scheduling cluster tools in semiconductor manufacturing: Recent advances and challenges. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(2): 586 – 601.

[2] YUAN Fenglian, HUANG Bo, WANG Jipeng, et al. A survey of modeling and scheduling of cluster tools based on petri nets. *Acta Automatica Sinica*, 2023, 49(5): 929 – 948.
(袁凤连, 黄波, 王际鹏, 等. 基于petri网的组合设备建模与调度综述. 自动化学报, 2023, 49(5): 929 – 948.)

[3] PAN Chunrong, WANG Jipeng. *Scheduling and Optimal Control of Cluster Tools*. Changsha: Central South University Press, 2019.
(潘春荣, 王际鹏. 组合设备调度及其优化控制. 长沙: 中南大学出版社, 2019.)

[4] KIM H J, LEE J H, LEE T E. Scheduling dual-armed cluster tools with cleaning processes. *International Journal of Production Research*. 2013, 51(12): 3671 – 3687.

[5] LI C, YANG F J, ZHEN L. Efficient scheduling approaches to time-constrained single-armed cluster tools with condition-based chamber cleaning operations. *International Journal of Production Research*, 2022, 60(11): 3555 – 3568.

[6] YU T S, KIM H J, LEE T E. Scheduling single-armed cluster tools with chamber cleaning operations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15(2): 705 – 716.

[7] PAN Chunrong, GUO Wenyou. Scheduling of close-down process for single-arm cluster tools with chamber cleaning operations. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(6): 784 – 794.
(潘春荣, 郭文有. 具有清洗工艺的单臂组合设备终止暂态调度. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 784 – 794.)

[8] WU N Q, ZHOU M C. A closed-form solution for schedulability and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with wafer residency time constraint based on steady schedule analysis. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(2): 303 – 315.

[9] WU N Q, CHU C B, CHU F, et al. A petri net method for schedulability and scheduling problems in single-arm cluster tools with wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(2): 224 – 237.

[10] YANG F J, WU N Q, GAO K Q, et al. Efficient approach to cyclic scheduling of single-arm cluster tools with chamber cleaning operations and wafer residency time constraint. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, 31(2): 196 – 205.

[11] KIM D K, LEE T E, KIM H J. Optimal scheduling of transient cycles for single-armed cluster tools with parallel chambers. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, 13(2): 1165 – 1175.

[12] KIM T K, JUNG C, LEE T E. Scheduling start-up and close-down periods of dual-armed cluster tools with wafer delay regulation. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(10): 2785 – 2795.

[13] QIAO Y, ZHOU M C, WU N Q, et al. Closing-down optimization for single-arm cluster tools subject to wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(11): 6792 – 6807.

[14] ZHU Q H, ZHOU M C, QIAO Y, et al. Petri net modeling and scheduling of a close-down process for time-constrained single-arm cluster tools. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(3): 389 – 400.

[15] QIAO Y, ZHOU M C, WU N Q, et al. Scheduling and control of start-up process for single-arm cluster tools with residency time constraints. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, 25(4): 1243 – 1256.

[16] PAN Chunrong, LI Liang. Scheduling and analysis of final transient process for cluster tools with wafer revisiting. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(5): 655 – 664.
(潘春荣, 黎良. 晶圆重入加工的组合设备终止暂态的调度与分析. 控制理论与应用, 2015, 32(5): 655 – 664.)

[17] PAN C R, QIAO Y, ZHOU M C, et al. Scheduling and analysis of start-up transient processes for dual-arm cluster tools with wafer revisiting. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, 28(2): 160 – 170.

[18] ZHU Q H, QIAO Y, WU N Q. Optimal integrated schedule of entire process of dual-blade multi-cluster tools from start-up to close-down. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, 6(2): 553 – 565.

[19] ZHU Q H, ZHOU M C, QIAO Y, et al. Scheduling transient processes for time-constrained single-arm robotic multi-cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, 30(3): 261 – 269.

[20] BAI Xueting. *Failure response strategy for single-arm cluster tools with purge operation*. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
(白雪婷. 具有吹扫操作的单臂组合设备故障响应策略. 赣州: 江西理工大学, 2021.)

[21] PAN Chunrong. *Scheduling and failure response of single-arm cluster tools via petri net modeling and simulation*. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2010.
(潘春荣. 单臂组合设备调度及故障响应的petri网建模和仿真. 广州: 广东工业大学, 2010.)

作者简介:

郭文有 硕士研究生, 目前研究方向为制造系统建模、优化与调度, E-mail: guosir1997@163.com;

潘春荣 教授, 博士生导师, 目前研究方向为机电一体化、制造过程的优化和控制、工业系统仿真, E-mail: chunrongpan@163.com.