

稳态调度下单臂组合设备时间延迟分析与优化

潘春荣[†], 熊文清

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 在半导体晶圆制造过程中, 驻留时间延迟过长对晶圆质量具有消极影响. 本文研究单臂组合设备稳态调度中如何合理地分配机械手等待时间, 抵消驻留时间延迟的问题. 首先, 采用Petri网模型描述晶圆制造过程, 分析了单臂组合设备稳态调度的时间特性, 获得了稳态下工序驻留时间延迟计算表达式. 其次, 通过解构机械手等待时间对驻留时间延迟的影响机理, 提出了一种机械手等待时间分配优先级规则. 进一步, 将虚拟瓶颈工序用于辅助分配机械手等待时间, 结合优先级规则, 提出了一种单臂组合设备稳态调度启发式算法. 最后, 通过例子验证了算法的可行性与有效性. 与传统拉式策略和尽早加工策略对比, 该算法能有效地减少单臂组合设备稳态调度下的驻留时间延迟并能满足晶圆制造的严格要求.

关键词: 晶圆制造; 组合设备; 启发式算法; 调度; Petri网

引用格式: 潘春荣, 熊文清. 稳态调度下单臂组合设备时间延迟分析与优化. 控制理论与应用, 2019, 36(10): 1719–1729

DOI: 10.7641/CTA.2019.80527

Analysis and optimizing of time delay for single-armed cluster tools under steady schedule

PAN Chun-rong[†], XIONG Wen-qing

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

Abstract: In semiconductor wafer fabrication processes, excessive residency time delaying has negative effects on the product quality. This paper is devoted to regulating the robot waiting times in single-armed cluster tools under steady state such that the wafer residency time delay can be offset as much as possible. First, a plant model based on Petri net is built for describing the wafer fabrication processes. Based on the introduced model, analytical expressions for calculating the residency time delay are derived as well as temporal properties of the system. Second, in the light of the deconstruction to the time delay mechanisms caused by the robot waiting, a priority rule for assigning robot waiting times is presented. Third, with the presented priority rule and virtual bottleneck approach, a heuristic algorithm is developed to properly assign the robot waiting time for single-armed cluster tools under the steady state. Finally, illustrative examples are given to validate the feasibility and efficacy of the proposed methodology. Compared with the conventional backward strategy and the earliest starting strategy, the wafer residency time delay can be significantly reduced by the proposed method such that strict wafer residency time constraints can be better met.

Key words: wafer fabrication; cluster tools; heuristic algorithm; scheduling; Petri net

Citation: PAN Chunrong, XIONG Wenqing. Analysis and optimizing of time delay for single-armed cluster tools under steady schedule. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1719–1729

1 引言

半导体芯片制造是当前最为先进和复杂的制造过程之一, 分为晶圆制备、晶圆制造、晶圆测试、芯片封装和成品测试5个阶段. 其中, 晶圆制造是半导体芯片制造过程中最复杂、最关键的环节. 随着晶圆尺寸的增大, 传统的批量加工模式已经难以适应晶圆制造过

程中的复杂工艺需求. 例如, 在化学气相沉积工艺过程中, 晶圆尺寸的增大给气体均匀扩散提出了更高的要求. 采用传统的批量加工方式, 势必会带来严峻的晶圆质量风险. 组合设备独有的单晶圆加工技术能有效地应对上述工艺难题, 并显著提高晶圆生产率和良品率^[1], 因而被广泛应用于晶圆制造过程. 组合设备

收稿日期: 2018-07-16; 录用日期: 2019-03-13.

[†]通信作者. E-mail: chunrongpan@163.com.

本文责任编辑: 赵千川.

国家自然科学基金项目(51665018), 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心开放课题(FERC006)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51665018) and the Open Project of Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule (FERC006).

可提供一个高柔性、可重构的加工环境,具有高产能、短周期、低成本及高空间利用率等特点^[2].一台组合设备一般由多个加工模块(processing module, PM)、真空锁(load lock, LL)、校准模块(aligner, AL)、冷却模块(cooler, CL)和机械手(robot)组成^[3].各模块呈径向分布,并由计算机控制.待加工晶圆从真空锁卸载,按照工艺配方要求依次访问PM,完成既定加工后经CL冷却并返回真空锁.根据机械手结构不同,组合设备分为单臂/双臂组合设备,如图1所示.

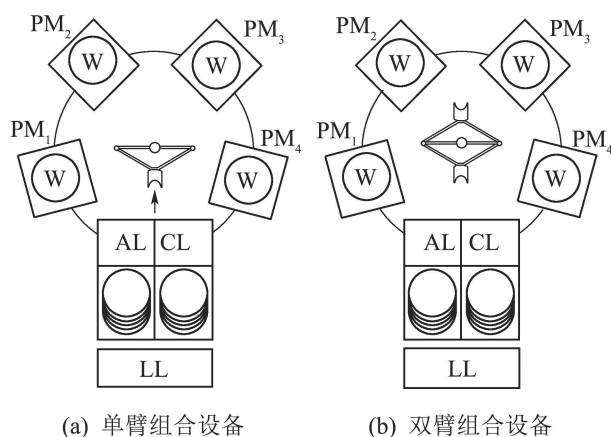


图1 组合设备

Fig. 1 Cluster tools

针对组合设备的调度问题,国内外学者提出了多种建模方法及调度方案^[4-12].研究表明,稳态时组合设备运作状态存在两种情形^[5]:加工临界或运输临界.加工临界时,机械手拥有空闲时间,系统周期由PM加工时间决定;运输临界时,机械手处于忙碌状态,系统周期为机械手作业时间的函数.晶圆在PM间的流动由机械手操作,调度的核心是机械手的任务派遣.通常,机械手的作业时间远小于晶圆在PM中的加工时间.因此,组合设备一般工作在加工临界状态^[6].若不考虑时间约束,对于单臂组合设备,文献[7]指出拉式调度策略是最优的.对于双臂组合设备,交换策略简化了机械手的任务并缩短了系统周期,是一种高效的调度策略^[8].然而在实际的工业生产中,一些晶圆制造工艺存在严格的驻留时间约束,晶圆在PM中加工完毕后必须在限定时间内卸载,否则会导致晶圆损伤甚至报废.为检测系统可调度性并求解最优调度,文献[9]构建了单臂组合设备面向资源的Petri网模型,提出了系统可调度性充要条件及最优调度求解算法.在此基础上,文献[10]通过虚拟加工模块平衡工序负载,首次提出了无共享PM的多品种混合加工调度的可调度性判定条件,并给出相应的解析式及调度算法.此外,在一些制造工艺中,晶圆需多次访问相同的PM,如原子层沉积工艺(atomic layer deposition, ALD),导致组合设备的调度与控制更加复杂.文献[11]通过构建Petri网模型,解决了驻留时间约束下的双臂组合设备重入稳态调度问题.文献[12-13]则构建了可视化模

型对具有重入加工的系统进行仿真,并对其暂态过程进行优化.

晶圆驻留时间延迟为晶圆在PM中加工完毕至卸载前的等待时间,简称时间延迟.上述晶圆驻留时间约束就是针对时间延迟的限制.高质量晶圆的加工环境更为严格,晶圆在PM中加工完毕后,由于PM中含有残留气体及高温,在PM中的驻留会导致晶圆表面的质量问题^[14].换言之,时间延迟会对晶圆质量产生消极作用,且该影响随着时间延迟的增加而扩大,因此减少时间延迟可提高晶圆质量.另外,单臂组合设备没有缓冲区,调度设备控制系统时间延迟具有挑战性.首先,文献[15-16]针对作业时间波动下单臂组合设备稳态调度问题提出两级实时调度体系,上级调度求出正常条件下的离线调度方案,下级调度通过实时调度策略合理地设置机械手等待时间,减少作业时间波动的影响.在此基础上,文献[17-18]通过找出离线调度的最小周期,得出晶圆延迟上界的计算公式.文献[19]认为文献[18]中的晶圆延迟上限计算公式并不精确而是被高估,并给出了作业时间波动下单臂组合设备精确的晶圆延迟上限的计算公式.

上述研究通过实时调度策略仅对作业时间波动产生的时间延迟进行分析,而没有优化离线调度产生的固有时间延迟.如何有效地减少该部分时间延迟仍是悬而未决的问题.对此,本文研究了正常条件下单臂组合设备稳态调度系统的时间延迟优化问题,分析了晶圆制造过程的时间特性,并设立机械手等待时间分配优先级规则.同时,在保证系统调度周期最优性的情况下,开发了一种用于抵消晶圆制造过程中各工序时间延迟的启发式算法.若不能完全抵消,利用该算法可平衡工序的时间延迟,最终提高晶圆质量并优化稳态调度.

2 系统建模

2.1 晶圆加工过程

为了清晰地分析组合设备稳态调度时各系统参数的时间特性,需要对晶圆加工过程进行建模.晶圆在加工时访问PM的顺序称为晶圆流程模式,表示为 $(m_1, m_2, \dots, m_n)$,其中: n 代表晶圆加工工序的数量; m_i 代表第 i 道工序并行PM的数量, $i \in \mathbb{N}_n = \{1, 2, \dots, n\}$.例如晶圆流程模式为 $(1, 2, 1)$,表示共有3道加工工序、4个PM,其中PM₂和PM₃为第2道工序的并行模块,晶圆访问PM顺序为PM₁ → PM₂(或PM₃) → PM₄.组合设备加工晶圆时会经历初始暂态、稳态和终止暂态3个状态.系统初态为空闲状态,机械手从真空锁卸载第1个未加工晶圆时,初始暂态开始.当系统有 $\sum_{i=1}^n m_i$ 枚晶圆同时加工时,系统进入稳态.当所有未加工晶圆均已载入设备时,系统稳态过程结束并进入终止暂态.直到所有PM中无晶圆加工,终止暂态结束,系统回到空闲状态.稳态时系统周期性运转,若不考

虑系统的并行模块, 晶圆流模式为 $(1, 1, \dots, 1)$ 时, 单臂组合设备机械手的作业序列为: 移动至 PM_n 并等待 $\rightarrow$ 从 PM_n 中卸载晶圆 $\rightarrow$ 移动至真空锁并等待 $\rightarrow$ 载入晶圆至真空锁 $\rightarrow$ 移动至 PM_{n-1} 并等待 $\rightarrow$ 从 PM_{n-1} 中卸载晶圆 $\rightarrow$ 移动至 PM_n 并等待 $\rightarrow$ 载入晶圆至 PM_n $\rightarrow$ 移动至 PM_{n-2} 并等待 $\rightarrow \dots \rightarrow$ 从 PM_i 中卸载晶圆 $\rightarrow$ 移动至 PM_{i+1} 并等待 $\rightarrow$ 载入晶圆至 PM_{i+1} $\rightarrow$ 移动至 PM_{i-1} 并等待 $\rightarrow \dots \rightarrow$ 从真空锁卸载晶圆 $\rightarrow$ 移动至 PM_1 并等待 $\rightarrow$ 载入晶圆至 PM_1 . 至此, 系统经历一个完整的周期, 机械手下一步移动至 PM_n 等待卸载晶圆继续下一个周期. 当等待时间为零时, 机械手可直接执行任务. 上述系统运行过程中仅机械手等待时间为变量, 其余机械手动作为定值. 因此, 组合设备调度研究的实质是分析机械手应何时等待且等待多长时间.

2.2 Petri网建模

组合设备晶圆制造系统属于典型的离散事件动态系统. Petri网可清晰直观地描绘晶圆加工过程中的异步并发事件及各工序的逻辑关系, 因此本文采用Petri网作为系统建模工具. Petri网模型由令牌、库所、变迁和有向弧组成, 具体定义和性质可参见文献[20–22]. 令库所 p_i 表示第 i 道工序的PM, $K(p_i) = m_i$ 表示该工序的晶圆最大容量为 m_i , 当库所 p_i 有令牌时, 表示第 i 道工序的PM正在加工晶圆, $i \in \mathbb{N}_n$. 真空锁视作第0道工序, 用库所 p_0 表示. 由于设备真空锁为冗余配置, 所以可令 $K(p_0) = \infty$. 库所 q_{i1} 中有令牌时, 表示机械手等待装载晶圆至第 i 道工序. 库所 q_{i2} 中有令牌时, 表示机械手等待从第 i 道工序卸载晶圆. 库所 r 表示机械手状态, 且 $K(r) = 1$. 当库所 r 中有令牌时, 机械手处于空闲状态; 反之, 机械手夹持有一枚晶圆. 变迁 s_{i1} 触发表示机械手将晶圆装载至第 i 道工序, 变迁 s_{i2} 触发表示机械手将晶圆从第 i 道工序卸载并在移动至第 $i+1$ 道工序, 变迁 y_i 触发表示机械手空载移动至第 i 道工序. 将有向弧连接各变迁与库所, 表示其输入输出关系, 构成图2所示Petri网. 稳态时, 第 i 道加工工序有 m_i 个晶圆正在加工, 即库所 p_i 中有 m_i 个令牌. 不失一般性, 令系统初始状态 $M_0(p_i) = m_i (i \in \mathbb{N}_n)$, $M_0(r) = 1$, 令 $M_0(p_0) = \infty$ 确保系统各PM中总有晶圆加工.

模型描述了正常条件下单臂组合设备晶圆加工稳态过程, 由于Petri网具有异步并发的特性, 图2存在潜在死锁情形. 例如, 当系统为初始状态 M_0 时, 变迁 y_i 满足使能条件可触发, $i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$. 假设变迁 y_0 触发, 则机械手从真空锁卸载新的晶圆. 然而此时系统状态有 $M(p_1) = K(p_1)$ 成立, 表明第1道工序中所有的并行PM已被占用, 机械手无法将晶圆载入 PM_1 中. 此时机械手无法执行任何操作, 系统发生死锁. 为解决上述死锁, 提出以下控制规则^[8].

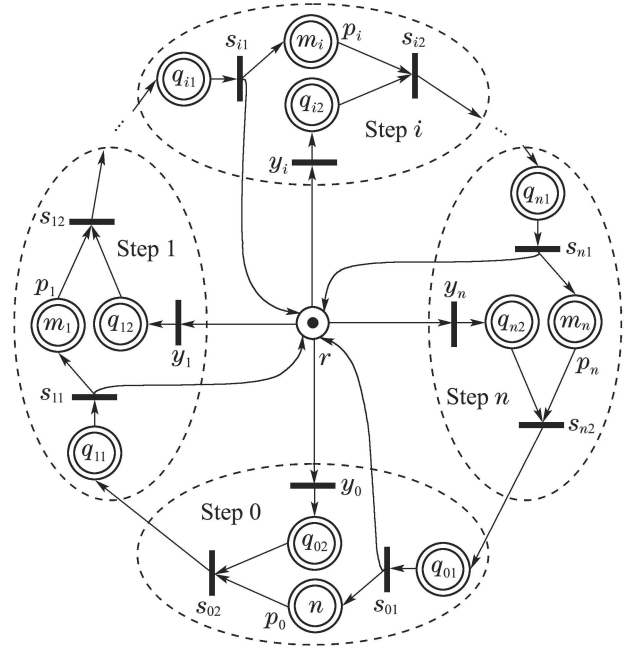


图 2 单臂组合设备面向资源Petri网模型

Fig. 2 The resource-oriented Petri net model for single-armed cluster tools

定义 1 若在标识 M 有 $M(p_{i+1}) = m_{i+1} - 1$, 则变迁 y_i 是可触发的, $i \in \mathbb{N}_{n-1} \cup \{0\}$; 若有 $M(p_i) = m_i$, 则变迁 y_n 是可触发的, $i \in \mathbb{N}_n$.

根据定义1, 系统开始于初始状态 M_0 时, 仅有变迁 y_n 是可触发的, 随后 s_{n2} 和 s_{01} 触发导致 $M(p_n) = m_n - 1$. 根据定义1变迁 y_{n-1} 可触发, 由此类推, 变迁的触发序列为

$$\begin{aligned} y_{n-1} &\rightarrow s_{(n-1)2} \rightarrow s_{n1} \rightarrow y_{n-2} \rightarrow s_{(n-2)2} \rightarrow \\ s_{(n-1)1} &\rightarrow \dots \rightarrow y_{(n-i)} \rightarrow s_{(n-i)2} \rightarrow \\ s_{(n-i+1)1} &\rightarrow \dots \rightarrow y_1 \rightarrow s_{12} \rightarrow s_{21} \rightarrow \\ y_0 &\rightarrow s_{02} \rightarrow s_{11}. \end{aligned}$$

系统状态演化序列为 $M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow \dots \rightarrow M_i \rightarrow \dots \rightarrow M_n$. 至此, 一个周期完成, 该Petri网模型在定义1控制规则下无死锁.

2.3 作业时间建模

上述Petri网模型仅模拟了晶圆制造过程的结构顺序, 而晶圆制造过程中各事件触发的时间至关重要. 为了使得模型更符合运行逻辑, 还应对模型中库所和变迁进行赋时. 对库所赋时代表令牌需要在该库所中停留一段时间方可触发其后置变迁, 对变迁赋时代表该变迁触发一段时间后方可将令牌输出至其后置库所. 表1规定了晶圆制造过程中系统动作所占用的时间, c_0, c, α, a_i 为定值, 由晶圆工艺决定, 其中 a_i 表示第 i 道工序的晶圆加工时间; ω_{i1}, ω_{i2} 为变量, 由实际调度策略决定. 例如, 根据图2及表1, 令牌在库所 p_i 中驻留时间 $\tau_i \in [a_i, \infty)$ 后, 才能触发变迁 s_{i2} , 表示晶圆在 PM_i 中共停留时间 τ_i . 同样地, 变迁 s_{i1} 触发经过时间 c 后方

可将令牌输出至库所 p_i 中,表示机械手将晶圆载入至 PM_i ,并花费时间 $c(i \in \mathbb{N}_n)$.注意真空锁库所 p_0 为赋时库所,其对应时间为零.

表1 赋时库所和赋时变迁时间

Table 1 Time durations associated with places and transitions

符号	动作说明	时间
s_{i1}	机械手装载晶圆至 PM_i 或真空锁, $i \in \mathbb{N}_n$	c
s_{i2}	机械手从 PM_i 中卸载晶圆 并移动至 PM_{i+1} , $i \in \mathbb{N}_{n-1}$	$c + \alpha$
s_{n2}	机械手从 PM_n 中卸载晶圆 并移动至 PM_n	$c + \alpha$
s_{02}	机械手从真空锁卸载晶圆 校准后移动至 PM_1	$c_0 + \alpha$
y_i	机械手空载由 PM_{i+2} 旋转至 PM_i , $i \in \mathbb{N}_{n-2} \cup \{0\}$	α
y_{n-1}	机械手由真空锁移动至 PM_{n-1}	α
y_n	机械手由 PM_1 移动至 PM_n	α
p_i	晶圆在 PM_i 中加工	$\tau_i \in [a_i, \infty)$
q_{i2}	机械手在 PM_i 或真空锁 等待卸载晶圆, $i \in \mathbb{N}_n$	$\omega_{i2} \in [0, \infty)$
q_{i1}	机械手在 PM_i 或真空锁 等待装载晶圆, $i \in \mathbb{N}_n$	$\omega_{i1} \in [0, \infty)$

至此,组合设备晶圆制造过程模型构建完成.图2所示Petri网模型描绘了晶圆加工过程的动态行为.模型中各库所变迁的触发序列表示组合设备各系统动作之间的承接关系.稳态调度时,系统各动作时间决定了调度周期.下面基于Petri网模型,对组合设备稳态调度进行分析.

3 调度分析

稳态时,单臂组合设备各道工序周期性加工晶圆,机械手执行晶圆在各 PM 间的运输.正常条件下,根据图2所示Petri网模型,晶圆完成第 i 道工序需经历以下序列,其中括号内代表动作所花费的时间: $s_{i2}(c + \alpha) \rightarrow$ 在 $q_{(i+1)1}$ 中等待 $(\omega_{(i+1)1}) \rightarrow s_{(i+1)1}(c) \rightarrow y_{(i-1)1}(\alpha) \rightarrow$ 在 $q_{(i-1)2}$ 中等待 $(\omega_{(i-1)2}) \rightarrow s_{(i-1)2}(c + \alpha) \rightarrow$ 在 q_{i1} 中等待 $(\omega_{i1}) \rightarrow s_{i1}(c) \rightarrow$ 在 PM_i 中加工晶圆 $(\tau_i) \rightarrow$ 再一次触发 $s_{i2}(c + \alpha)$. 通过上述序列,当晶圆在 PM 中的驻留时间为 a_i 时,考虑并行模块,可得第 i 道工序的生产周期下界 θ_{iL} ,其计算公式为

$$\theta_{1L} = \frac{a_1 + c_0 + 3c + 3\alpha + \omega_{02} + \omega_{11} + \omega_{21}}{m_1}, \quad (1)$$

$$\theta_{iL} = \frac{a_i + 4c + 3\alpha + \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}}{m_i}, \quad i \in \mathbb{N}_{n-1} \setminus \{1\}, \quad (2)$$

$$\theta_{nL} = \frac{a_n + 4c + 3\alpha + \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}}{m_n}. \quad (3)$$

式(1)–(3)表示第 i 道工序完成单个晶圆加工的生产周期下界.令 $\omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}$ 为第 i 道工序已分配等待时间, $\omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}$ 为第 n 道工序已分配等待时间.调节各工序已分配等待时间可改变该工序的生产周期大小,从而获得理想的调度周期.其中 ω_{n2} 未在上述公式中,表明库所 q_{n2} 的等待时间 ω_{n2} 对任意工序的生产周期无影响.若除去机械手等待时间,可得第 i 道工序的工作负载 ϑ_i ,如下:

$$\vartheta_1 = \frac{a_1 + c_0 + 3c + 3\alpha}{m_1}, \quad (4)$$

$$\vartheta_i = \frac{a_i + 4c + 3\alpha}{m_i}, \quad i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}. \quad (5)$$

各工作负载描述了系统工作的平衡情况,其中工作负载最大的工序为瓶颈工序,令其对应第 k 道加工工序.若第 i 道工序已分配等待时间不为零时,该工序的生产周期增加.因此,通过机械手的合理调度可平衡晶圆生产周期,实现稳定高效的周期性加工.为了进一步分析系统各参数的时间特性,晶圆驻留时间的计算至关重要,由文献[17]可得

$$\begin{aligned} \tau_1 = & m_1 \times [2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0 + \sum_{d=0}^n \omega_{d2} + \\ & \sum_{d=0}^n \omega_{d1}] - (3c + c_0 + 3\alpha + \omega_{02} + \omega_{11} + \omega_{21}) = \\ & m_1 \times \psi - (3c + c_0 + 3\alpha + \omega_{02} + \omega_{11} + \omega_{21}), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \tau_i = & m_i \times [2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0 + \sum_{d=0}^n \omega_{d2} + \\ & \sum_{d=0}^n \omega_{d1}] - (4c + 3\alpha + \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}) = \\ & m_i \times \psi - (4c + 3\alpha + \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}), \\ & i \in \mathbb{N}_{n-1} \setminus \{1\}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tau_n = & m_n \times [2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0 + \sum_{d=0}^n \omega_{d2} + \\ & \sum_{d=0}^n \omega_{d1}] - (4c + 3\alpha + \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}) = \\ & m_n \times \psi - (4c + 3\alpha + \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}), \end{aligned} \quad (8)$$

其中: $\psi = 2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0 + \sum_{d=0}^n \omega_{d2} + \sum_{d=0}^n \omega_{d1} = \psi_1 + \psi_2$ 表示机械手周期; $\psi_1 = 2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0$ 为表示已知的机械手总动作时间,

该值为恒定值, 由晶圆的工艺决定: $\psi_2 = \sum_{d=0}^n \omega_{d2} + \sum_{d=0}^n \omega_{d1}$ 表示机械手总等待时间. 当机械手周期确定后, ψ_2 可由公式 $\psi_2 = \psi - \psi_1$ 求解. 若第 i 道工序中晶圆实际的驻留时间为 τ_i , 则各工序的实际生产周期为

$$\theta_1 = \frac{\tau_1 + c_0 + 3c + 3\alpha + \omega_{02} + \omega_{11} + \omega_{21}}{m_1}, \quad (9)$$

$$\theta_i = \frac{\tau_i + 4c + 3\alpha + \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}}{m_i}, \quad i \in \mathbb{N}_{n-1} \setminus \{1\}, \quad (10)$$

$$\theta_n = \frac{\tau_n + 4c + 3\alpha + \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}}{m_n}, \quad (11)$$

其中 θ_i 代表第 i 道工序的实际生产周期, $i \in \mathbb{N}_n$. 由式 (9)–(11) 可知, 当 θ_i 保持不变, 机械手等待时间增加导致晶圆驻留时间缩短, 而晶圆加工时间为定值, 故晶圆时间延迟减少. 由式 (6)–(11) 可知, 第 i 道工序已分配等待时间增加, 则第 i 道工序周期增加且第 i 道晶圆驻留时间减小, $i \in \mathbb{N}_n$. 因此, 当系统周期确定时, 通过调节等待时间以减少时间延迟是可行的. 此外, 根据文献 [8], 单臂组合设备稳态调度时应满足以下定理:

定理 1 单臂组合设备达到稳态时, 各工序有相同的生产周期, 且与机械手周期相等, 则有

$$\theta = \theta_1 = \theta_2 = \cdots = \theta_n = \psi. \quad (12)$$

等式 (12) 描述了单臂组合设备稳态周期调度的基本特征. 为满足定理 1, 可通过适当地调节机械手等待时间, 直到所有工序生产周期相等. 文献 [8] 指出, 单臂组合设备稳态调度下最优周期由系统瓶颈工序决定. 令 $\vartheta_{\max} = \max\{\vartheta_i, i \in \mathbb{N}_n\}$ 表示系统瓶颈工序周期, 通过合理地分配机械手等待时间. 除瓶颈工序外, 其余工序周期大小增加至 $\theta_i = \vartheta_{\max} (i \in \mathbb{N}_n)$, 使得单臂组合设备稳态调度有最优系统周期 $\vartheta_{\max}$. 同时考虑上述时间特性分析与系统最优周期条件, 当抵消时间延迟时, 若第 i 道工序分配了过多的机械手等待时间, 使得 $\theta_i > \vartheta_{\max}$, 则系统周期的最优性被破坏. 因此, 为保护系统周期最优性, 应限制已分配等待时间的大小. 令 γ_i 表示 $\omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}$ 的上界, $i \in \mathbb{N}_{n-1}$; γ_n 表示 $\omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}$ 的上界. 当系统处于最优周期时, 其计算公式如下:

$$\gamma_1 = m_1 \times \vartheta_{\max} - (a_1 + 3c + c_0 + 3\alpha), \quad (13)$$

$$\gamma_i = m_i \times \vartheta_{\max} - (a_i + 4c + 3\alpha), \quad i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}. \quad (14)$$

当第 i 道工序已分配等待时间达到上界 γ_i 时, 根据式 (6)–(8), 晶圆驻留时间达到下界且 $\tau_i = a_i$, $i \in \mathbb{N}_n$. 此时各工序生产周期 $\theta_i = \vartheta_{\max}$ 保持不变, 系统周期

达到最优. 同时晶圆驻留时间减小, 晶圆时间延迟缩短. 因此, 通过本节分析, 单臂组合设备稳态调度时, 合理地调节机械手等待时间可同时满足以下两个目标: 1) 保证系统周期的最优性; 2) 尽可能抵消晶圆时间延迟. 若时间延迟无法完全抵消时, 则尽可能使得各工序时间延迟平衡. 令 z_i 表示第 i 道工序时间延迟, 该问题可用如下数学规划表示:

$$\min(\max\{z_i, i \in \mathbb{N}_n\}), \quad (15)$$

$$\min \sum_{i=1}^n z_i, \quad (16)$$

$$\text{s.t. } z_i = \tau_i - a_i, \quad i \in \mathbb{N}_n, \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^n \omega_{i1} + \sum_{i=0}^n \omega_{i2} = \psi_2, \quad (18)$$

$$\omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01} \leq \gamma_n, \quad (19)$$

$$\omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1} \leq \gamma_i, \quad i \in \mathbb{N}_{n-1}, \quad (20)$$

$$\omega_{i1} \geq 0, \quad \omega_{i2} \geq 0, \quad i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}. \quad (21)$$

第一优先级目标函数 (15) 表示求解出所有可调度方案的最大时间延迟中的最小值, 保证系统时间延迟的平衡性; 第二优先级目标函数 (16) 表示系统总时间延迟最小. 以上两个目标函数是针对上文目标 2) 提出的. 对于目标 1), 约束条件中各项参数的计算满足 $\psi = \vartheta_{\max}$ 则可保证系统周期最优性. 式 (17) 表示晶圆时间延迟的求解公式; 式 (18)–(21) 分别表示等待时间分配的约束条件, 分配机械手等待时间时应满足各道工序等待时间分配上下限.

4 机械手等待时间分配优先级规则

当系统处于稳态调度下最小周期时, 由于机械手总等待时间为定值, 各工序之间的等待时间大小相互影响. 当机械手在某加工步骤增加等待时间, 必在其他加工步骤减少等待时间. 机械手等待时间的设置决定了系统调度方案构成. 求解上述数学规划的关键是分析机械手等待时间与各工序时间延迟的关系. 根据驻留时间公式及时间延迟定义, 当系统稳态调度最小周期时, 第 i 道工序时间延迟计算公式如下:

$$z_1 = \tau_1 - a_1 = m_1 \times \vartheta_{\max} - (a_1 + c_0 + 3c + 3\alpha + \omega_{02} + \omega_{11} + \omega_{21}), \quad (22)$$

$$z_i = \tau_i - a_i = m_i \times \vartheta_{\max} - (a_i + 4c + 3\alpha + \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}), \quad i \in \mathbb{N}_{n-1} \setminus \{1\}, \quad (23)$$

$$z_n = \tau_n - a_n = m_n \times \vartheta_{\max} - (a_n + 4c + 3\alpha + \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}). \quad (24)$$

计算公式中除等待时间为变量外, 其余皆为定值. 根据上述公式可知, ω_{i1} 对第 i 道和第 $i-1$ 道工序中的时间延迟存在影响, $i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}$; ω_{i2} 仅对第 $i+1$ 道工序中的时间延迟存在影响, $i \in \mathbb{N}_{n-1} \cup \{0\}$. 当等待时间资源有限, 通过设置等待时间可精确控制每道工序

时间延迟大小. 由式(22)–(24)可知, 通常晶圆载入PM前的等待时间可比从PM中卸载前的等待时间抵消更多的时间延迟. 例如当 $\omega_{(i+1)1}$ 减少 ξ 个时间单位, 保持第 $i+1$ 道与第 i 道工序时间延迟不变, ω_{i2} 与 $\omega_{(i-1)2}$ 需同时增加 ξ 个时间单位, 这比之前多消耗 ξ 个时间单位的机械手等待时间.

若存在已知的调度, 其各工序等待时间已分配完毕. 令

$$\begin{aligned}\omega_i &= \omega_{(i-1)2} + \omega_{i1} + \omega_{(i+1)1}, i \in \mathbb{N}_{n-1}, \\ \omega_0 &= \omega_{n2} + \omega_{01} + \omega_{11}, \omega_n = \omega_{(n-1)2} + \omega_{n1} + \omega_{01}, \\ \psi_{21} &= \sum_{i=0}^n \omega_{i1}, \psi_{22} = \sum_{i=0}^n \omega_{i2}.\end{aligned}$$

根据式(13)–(14)(22)–(24)可得 $z_i = \gamma_i - \omega_i (i \in \mathbb{N}_n)$, 并推导出总时间延迟计算公式

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n z_n &= \sum_{i=1}^n (\gamma_i - \omega_i) = \sum_{i=1}^n \gamma_i - \sum_{i=1}^n \omega_i = \\ &= \sum_{i=1}^n \gamma_i - [2\psi_{21} + \psi_{22} - (\omega_{n2} + \omega_{01} + \omega_{11})] = \\ &= \sum_{i=1}^n \gamma_i - \psi_2 - [\psi_{21} - (\omega_{n2} + \omega_{01} + \omega_{11})] = \\ &= \sum_{i=1}^n \gamma_i - \psi_2 - \sum_{i=2}^n \omega_{i1} + \omega_{n2}.\end{aligned}\quad (25)$$

根据分配的等待时间对晶圆总时间延迟的影响, 式(25)中的结果分成3个部分: 1) $\sum_{i=1}^n \gamma_i - \psi_2$ 在最小周期条件下为定值, 其数值由系统特性决定; 2) 随着 $\sum_{i=2}^n \omega_{i1}$ 增加, 系统总时间延迟减小, 其对应库所为 q_{i1} , $i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}$. ω_{01} (或 ω_{11})不影响系统总时间延迟的大小, 但影响第 n 道(或第1道)工序的时间延迟, 其对应库所为 q_{01} (或 q_{11}); 3) 随着 ω_{n2} 增加, 系统总时间延迟增加, 其对应库所为 q_{n2} . 注意 $\omega_{i2} (i \in \mathbb{N}_{n-1} \cup \{0\})$ 并不影响系统总时间延迟, 但由式(22)–(24)可知其影响第 $i+1$ 道工序时间延迟, 其对应库所为 q_{i2} . 当总时间延迟为零时, 系统参数满足 $\sum_{i=2}^n \omega_{i1} - \omega_{n2} = \sum_{i=1}^n \gamma_i - \psi_2$, 此时系统延迟无法减少, 否则将干扰晶圆的正常加工时间.

根据以上关于单臂组合设备稳态调度下单道工序时间延迟和总时间延迟的分析, 提出如下机械手等待时间分配优先级规则:

优先级规则 在单臂组合设备稳态调度时, 各工序机械手等待时间分配至库所遵循规则: $q_{i1} (i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}) > q_{01}, q_{11}$ 和 $q_{i2} (i \in \mathbb{N}_{n-1} \cup \{0\}) > q_{n2}$, 即在组合设备中调度各道工序等待时间, 优先将机械手等待时间分配至库所 $q_{i1} (i \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\})$; 其次分配至库所 q_{01}, q_{11} 和 $q_{i2} (i \in \mathbb{N}_{n-1} \cup \{0\})$, 最后分配至库所 q_{n2} .

对机械手进行调度时, 该优先级规则能使机械手等待时间合理高效地抵消系统时间延迟. 系统周期提

前确定时, 机械手等待时间分布还应满足定理1与各道工序已分配等待时间上界 γ_i . 以此为基础, 使用优先级规则分配机械手等待时间, 在保证系统周期的最优性条件下, 尽可能抵消时间延迟.

5 调度算法

当晶圆流程模式和晶圆工艺参数确定时, 通过公式 $\psi_2 = \vartheta_{\max} - \psi_1$ 可求出最小周期稳态调度下机械手总等待时间, 该值为定值. 由式(18)可知, 若 $\omega_{n2} = 0$, 且系统参数 $\sum_{i=1}^n \gamma_i > \psi_2 + \sum_{i=2}^n \omega_{i1}$ 恒成立时, 此时系统时间延迟无法完全抵消. 因此, 调度等待时间抵消时间延迟存在两种情况: 1) 等待时间充足; 此时通过调度令系统满足 $\omega_i = \gamma_i$ 使 $\tau_i = a_i, i \in \mathbb{N}_n$. 即所有工序晶圆驻留时间等于晶圆的加工时间, 晶圆完成后立即从PM中卸载; 2) 等待时间不足; 则将等待时间合理分配, 使各道工序时间延迟尽可能短且平衡.

在实际的调度中, 为满足定理1并保证系统周期的最优性, 将瓶颈工序周期视为系统周期并用于分配实际系统的机械手等待时间. 对于上述两种情况, 本文提出设置虚拟瓶颈工序的方法辅助分配机械手等待时间, 首先将各道工序分别设置为工作负载最大的工序, 称为虚拟瓶颈工序. 方法如下, 以第 i 道工序假设为虚拟瓶颈工序时, 令集合 $A_i = \{k, \vartheta_k \leq \vartheta_i, i \in \mathbb{N}_n, k \in \mathbb{N}_n\}$ 表示工作负载小于或等于第 i 道工序工作负载的工序编号集合. 同时, 由该集合内编号的工序构建一个虚拟的生产系统, 且仅对虚拟系统内的工序分配机械手等待时间. 在该虚拟系统中, 第 i 道工序的工作负载最大, 类似于瓶颈工序在原系统中工作负载最大. 因此, 将虚拟瓶颈工序的工作负载称为虚拟系统周期, 并通过优先级规则为该虚拟系统分配机械手等待时间. 注意, 该虚拟系统分配机械手等待时间时仍需考虑工作负载大于虚拟系统瓶颈周期的工序影响, 但并不对此类工序分配等待时间. 综上所述, 计算步骤为: 1) 以不同工序视为虚拟瓶颈工序, 并找出工作负载小于虚拟系统周期的工序构建虚拟系统, 使用优先级规则分配机械手等待时间, 将其生产周期增加至虚拟系统周期, 同时保持其余工序生产周期不变; 2) 求解出此虚拟系统所花费的机械手等待时间之和, 称之为虚拟总等待时间; 3) 找出原系统总等待时间可满足的最大虚拟总等待时间, 与之相减求得剩余等待时间, 使用优先级规则将其分配. 具体做法如下:

将所有 $\vartheta_i, i \in \mathbb{N}_n$ 从大到小排列, 可得数列 $\{\vartheta_{(1)}, \vartheta_{(2)}, \dots, \vartheta_{(n)}\}$, 且 $\vartheta_{(1)} = \vartheta_{\max} = \vartheta_k$ 成立. 其中以 $\vartheta_{(j)} (j \in \mathbb{N}_n)$ 为虚拟瓶颈工序时, 令各工序可分配等待时间虚拟上界为

$$\begin{aligned}\gamma_1^j &= \max\{[m_1 \times \vartheta_{(j)} - (a_1 + c_0 + 3c + 3\alpha)], 0\}; \\ \gamma_i^j &= \max\{[m_i \times \vartheta_{(j)} - (a_1 + 4c + 3\alpha)], 0\}, \\ i &\in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}.\end{aligned}$$

遵循优先级规则分配所得调度方案称为 S_i , 方案中虚拟等待时间分配结果为 ω_{i1}^j 和 ω_{i2}^j , 虚拟总等待时间为 ψ_2^j . 由式(4)–(5)(9)–(11)(22)–(24)可得, 生产周期由工序工作负载、已分配等待时间除以并行PM数量及时间延迟除以并行PM数量3部分组成. 以图3为例, 该晶圆有5道加工工序, 其中完整柱状表示各道工序的生产周期, 系统瓶颈工序为第1道加工工序. 以 $\vartheta_{(2)} = \vartheta_2$ 为虚拟系统周期时, 集合 $A_2 = \{2, 3, 4, 5\}$ 且使用优先级规则所得的调度方案如图3(a)所示, 其工序可分配等待时间虚拟上界为 γ_i^2 ($i \in \mathbb{N}_n$), 其等待时间分配结果为 ω_{i1}^2 和 ω_{i2}^2 , 虚拟总等待时间为 ψ_2^2 . 随后, 以 $\vartheta_{(3)} = \vartheta_4$ 为虚拟系统周期时, 集合 $A_4 = \{3, 4, 5\}$, 如图3(b)所示, 以此类推, 利用优先级规则分别求解其等待时

间分配方案. 得到一系列虚拟总等待时间 $\psi_2^{(j)} = \{\psi_2^1, \psi_2^2, \dots, \psi_2^n\}$. 虚拟系统周期越大时, 所需虚拟总等待时间越多, 故 ψ_2^j 为递减数列. 以 $\vartheta_{(n)}$ 为虚拟系统周期时, 系统中可分配等待时间的虚拟上界皆为零, 故 $\psi_2^n = 0$ 恒成立. 数组 $\psi_2^{(j)}$ 将自然数域分为 n 个区间, 即 $[\psi_2^n(0), \psi_2^{n-1}), [\psi_2^{n-1}, \psi_2^{n-2}), \dots, [\psi_2^1, \infty)$. 找出 ψ_2 所处区间, 若 $\psi_2 \in [\psi_2^1, \infty)$, 则系统等待时间充足, 可抵消所有工序时间延迟, 并将剩余等待时间分配至 ω_{n2} ; 若 $\psi_2 \in [\psi_2^j, \psi_2^{j-1})$ ($j \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}$), 则说明系统所有的等待时间能满足调度 S_j , 但无法满足调度 S_{j-1} . 以调度方案 S_j 为基础, 令 $\Delta\psi_2 = \psi_2 - \psi_2^j$ 为剩余等待时间. 利用优先级规则与枚举法将剩余等待时间分配, 最终等待时间分配结果如图3(c)所示.

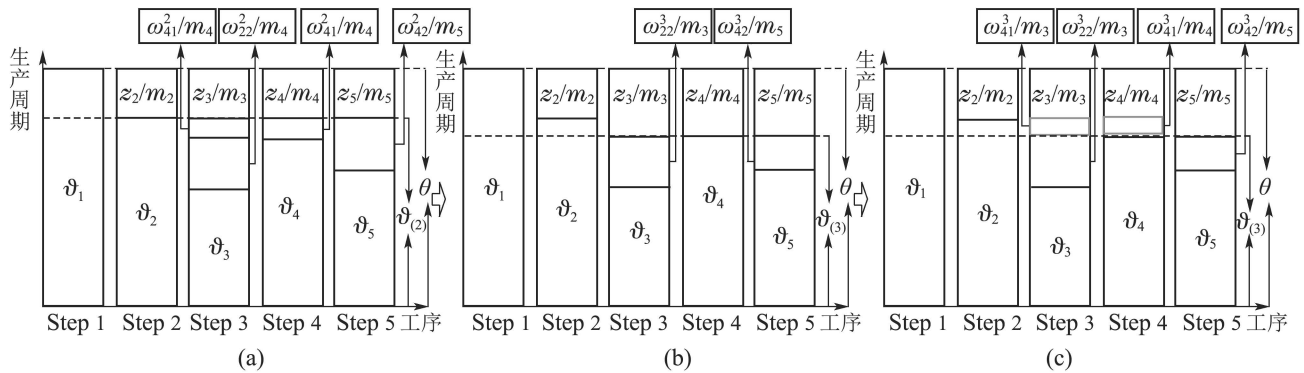


图 3 虚拟瓶颈工序求解调度过程

Fig. 3 Processing of solution scheduling from virtual bottleneck step

启发式算法如下:

算法 1 求解单臂组合设备稳态调度.

Input: $m_i, \vartheta_i, \{\vartheta_{(1)}, \dots, \vartheta_{(n)}\}, a_i, c_0, c, \alpha$ ($i \in \mathbb{N}_n$).

Output: $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \psi_2$ ($i \in \mathbb{N}_n$).

i) 初始化, 利用优先级规则得出不同虚拟瓶颈工序下的调度方案.

- 1) $\psi_2 = \vartheta_{(1)} - (2(n+1)\alpha + (2n+1)c + c_0)$
- 2) **While** $1 < j \leq n$:
- 3) $\gamma_1^j = \max\{[m_1 \times \vartheta_{(j)} - (a_1 + c_0 + 3c + 3\alpha)], 0\}$,
- 4) $\gamma_i^j = \max\{[m_i \times \vartheta_{(j)} - (a_i + 4c + 3\alpha)], 0\}$,
 $i \in \mathbb{N}_{(n-1)} \setminus \{1\}$,
- 5) $\omega_{01}^j = 0, \omega_{11}^j = 0, \omega_{n2}^j = 0$,
- 6) $i = 2$,
- 7) **While** $i \leq n$:
- 8) $\omega_{i1}^j = \min\{\gamma_{i-1}^j - \omega_{(i-1)1}^j, \gamma_i^j\}$,
- 9) $\omega_{(i-2)2}^j = \gamma_{i-1}^j - \omega_{(i-1)1}^j - \omega_{i1}^j$,
- 10) $i = i + 1$,
- 11) **End**

$$12) \quad \omega_{(n-1)2}^j = \gamma_n^j - \omega_{n1}^j - \omega_{01}^j,$$

$$13) \quad \psi_{21}^j = \sum_{i=0}^n \omega_{i1}, \psi_{22}^j = \sum_{i=0}^n \omega_{i2},$$

$$14) \quad \psi_2^j = \psi_{21}^j + \psi_{22}^j,$$

15) **End**

ii) ω_{i1}, ω_{i2} 求解, 分配机械手等待时间.

1) **If** $\psi_2 \in [\psi_2^1, \infty)$:

$$2) \quad \omega_{i1} = \omega_{i1}^1, i \in \mathbb{N}_n$$

$$3) \quad \omega_{i2} = \omega_{i2}^1, i \in \mathbb{N}_{n-1}$$

$$4) \quad \omega_{n2} = \psi_2 - \psi_2^1$$

5) **Else** $\psi_2 \in [\psi_2^j, \psi_2^{j-1})$, $j \in \mathbb{N}_n \setminus \{1\}$:

$$6) \quad \Delta\psi_2 = \psi_2 - \psi_2^j$$

7) **While** $\Delta\psi_2 > 0$:

$$8) \quad i = 1$$

9) **While** $\Delta\psi_2 > 0$ & $i \leq n - 1$:

10) **If** $\vartheta_i \leq \vartheta_{(j)}$ & $\vartheta_{i+1} \leq \vartheta_{(j)}$:

$$11) \quad \omega_{(i+1)1}^j = \omega_{(i+1)1}^j + 1$$

12) **Else if** $\vartheta_i \leq \vartheta_{(j)}$ & $\vartheta_{i+1} \geq \vartheta_{(j)}$:

$$13) \quad \omega_{(i-1)2}^j = \omega_{(i-1)2}^j + 1$$

14) **End**

```

15)       $\Delta\psi_2 = \Delta\psi_2 - 1$ 
16)      End
17)       $i = i + 1$ 
18)      End
19)      If  $\Delta\psi_2 > 0 \ \&\& \ i = n \ \&\& \ \vartheta_i \leq \vartheta_{(j)}$ :
20)           $\omega_{(i-1)2}^j = \omega_{(i-1)2}^j + 1$ 
21)           $\Delta\psi_2 = \Delta\psi_2 - 1$ 
22)      End
23)  End
24)  End
25)   $\omega_{i1} = \omega_{i1}^j, i \in \mathbb{N}_n$ 
26)   $\omega_{i1} = \omega_{i1}^j, i \in \mathbb{N}_n$ 

```

在第i)部分初始化, 语句1)–4)求解最优周期下的机械手总等待时间, 并计算不同虚拟瓶颈工序下的各道工序等待时间上界; $\omega_{01}^j, \omega_{11}^j$ 对调度的影响可由 $\omega_{(n-1)2}^j, \omega_{02}^j$ 代替, 将其设置为零; 语句5)–12)结合等待时间分配上界, 通过机械手等待时间分配优先级规则将等待时间分配至各道工序; 语句13)–15)求解该瓶颈工序下所花费的机械手总等待时间。

在第ii)部分分配机械手等待时间, 算法1对不同情况分别讨论: 若语句1)条件成立, 则表示等待时间充足, 以系统瓶颈工序所得的调度方案 S_1 分配等待时间, 并将多余的时间分配至 ω_{n2} ; 若语句5)满足则表示等待时间不充足, 则以调度方案 S_j 分配等待时间, 并将剩余的等待时间通过语句6)–24)使用优先级规则进行分配。直到将 ψ_2 完全分配, 获得机械手调度方案。

6 例子

本节通过例子验证算法1的有效性, 所得结果与传统拉式策略、尽早加工策略调度结果进行对比。稳态下传统拉式策略的等待时间分布规律在文献[9]中提出。尽早加工策略的调度特点可从文献[23]中获得。结合本文时间延迟计算公式可得出正常条件下传统拉式策略及尽早加工策略稳态调度结果。

例1 晶圆流程模式为(1, 2, 1), 晶圆访问PM顺序为 $PM_1 \rightarrow PM_2$ (或 PM_3) $\rightarrow PM_4$ 。晶圆加工参数为 $a_1 = 50$ s, $a_2 = 140$ s, $a_3 = 60$ s; 机械手动作参数为 $c_0 = 12$ s, $c = 8$ s, $\alpha = 2$ s; 通过计算得最小周期下机械手总等待时间为 $\psi_2 = 14$ s。

1) 使用传统拉式策略到达稳态调度时, 机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1} = \{0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2} = \{0, 0, 0, 14\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$), 从左至右分别为真空锁至第 n 道工序的分配方案; 各道工序时间延迟为 $z_i = \{6, 18, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 从左至右分别为第1道工序至第 n 道工序的时间延迟, 其中: 最大值为18 s, 总时间延迟为24 s。

2) 使用尽早加工策略到达稳态调度时, 其调度结果与传统拉式策略相同。

3) 通过算法1初始化后, 所得各项数据如下:

$\vartheta_i = \{92, 89, 98\}$, $\gamma_i = \{6, 18, 0\}$, $i \in \mathbb{N}_n$ 。

当以 $\vartheta_{(1)} = \vartheta_3$ 为虚拟系统瓶颈工序时, $\gamma_i^1 = \{6, 18, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 可得调度方案 S_1 : $\omega_{i1}^1 = \{0, 0, 6, 0\}$, $\omega_{i2}^1 = \{0, 12, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$), 虚拟总等待时间为 $\psi_2^1 = 18$ s;

当以 $\vartheta_{(2)} = \vartheta_1$ 为虚拟系统瓶颈工序时, $\gamma_i^2 = \{0, 6, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 可得调度方案 S_2 : $\omega_{i1}^2 = \{0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2}^2 = \{0, 6, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$), 虚拟总等待时间为 $\psi_2^2 = 6$ s;

根据算法第ii)部分可得 $\psi_2 = 14$ s $\in [\psi_2^2, \psi_2^1]$ 。因此, 该系统机械手总等待时间可满足调度方案 S_2 而无法满足调度方案 S_1 , 因此算法选择在方案 S_2 的调度基础上分配剩余等待时间 $\Delta\psi_2 = \psi_2 - \psi_2^2 = 8$ s。通过语句7)–27), 循环使用枚举法, 并优先将剩余机械等待时间分配至装载前, 最终求得机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1} = \{0, 0, 6, 0\}$, $\omega_{i2} = \{0, 8, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$)。各道工序时间延迟为 $z_i = \{0, 4, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为4 s, 总时间延迟为4 s。

结果显示时间延迟无法完全抵消, 算法1相比于传统拉式策略与尽早加工策略, 系统总时间延迟缩短了83.3%。为对比调度后时间延迟的平衡性, 本文使用方差进行评价。方差计算公式如下:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n}, \quad (26)$$

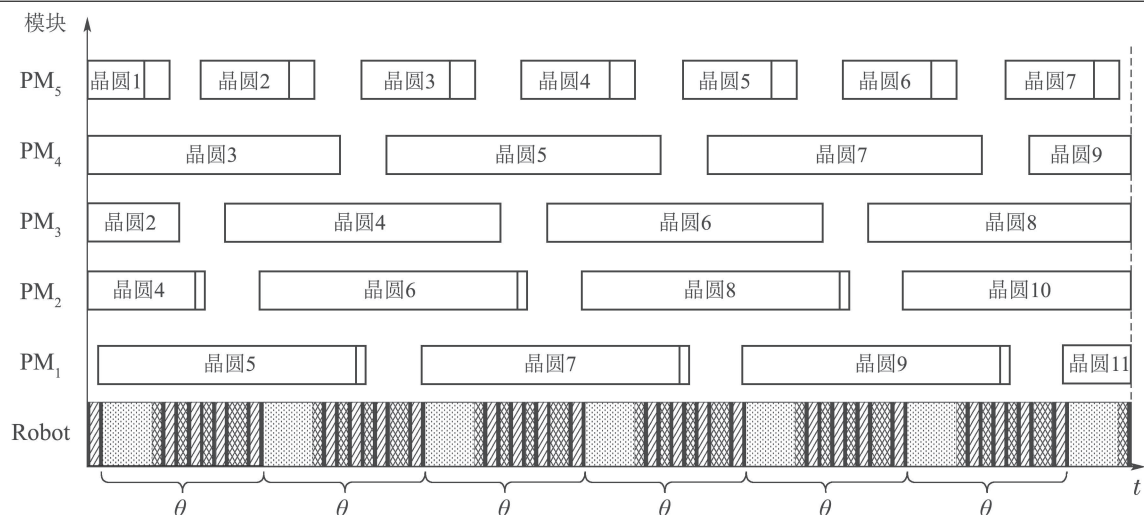
其中: s^2 代表方差, $\bar{z}$ 代表时间延迟的平均值。根据式(26), 算法1所得调度方案中系统工序时间延迟的方差为3.56(四舍五入并保留两位小数); 而使用传统拉式策略或尽早加工策略调度后所得系统工序时间延迟的方差为56。与传统拉式策略和尽早加工策略对比, 算法1所得调度方案中时间延迟更短且更为平衡。

例2 晶圆流程模式为(2, 2, 1), 晶圆访问PM顺序为 PM_1 (或 PM_2) $\rightarrow PM_3$ (或 PM_4) $\rightarrow PM_5$ 。晶圆加工参数为 $a_1 = 140$ s, $a_2 = 150$ s, $a_3 = 48$ s; 机械手动作参数为 $c_0 = 10$ s, $c = 5$ s, $\alpha = 2$ s; 通过计算得最小周期下机械手总等待时间为 $\psi_2 = 27$ s。

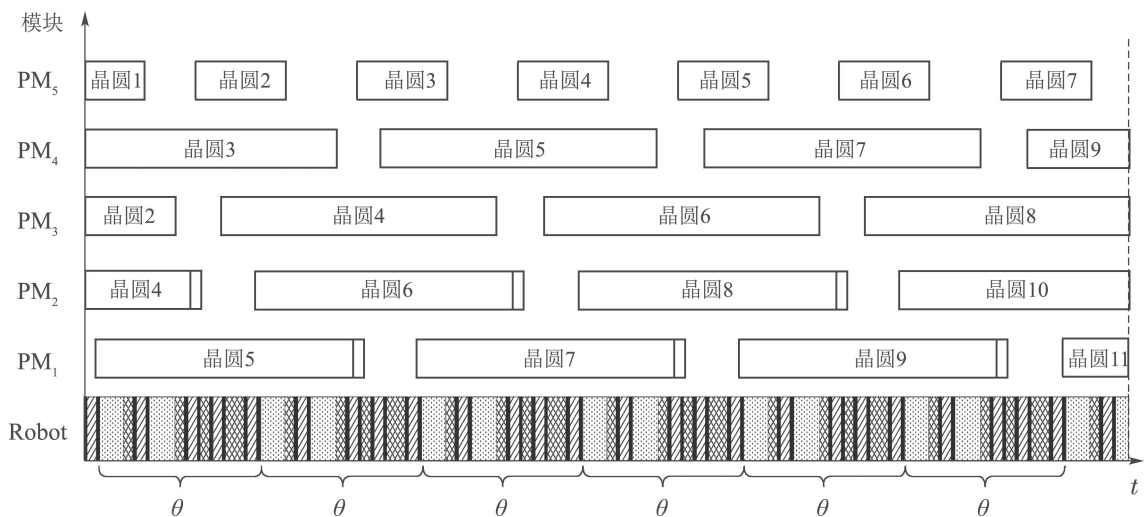
1) 使用传统拉式到达稳态调度时, 机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1} = \{0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2} = \{0, 0, 0, 27\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$), 各道工序时间延迟为 $z_i = \{5, 0, 14\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为14 s, 总时间延迟为19 s, 其调度甘特图如图4(a)所示。

2) 使用尽早加工策略到达稳态调度时, 机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1} = \{0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2} = \{0, 0, 14, 13\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$); 各道工序时间延迟为 $z_i = \{5, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为5 s, 总时间延迟为5 s, 其调度甘特图如图4(b)所示。

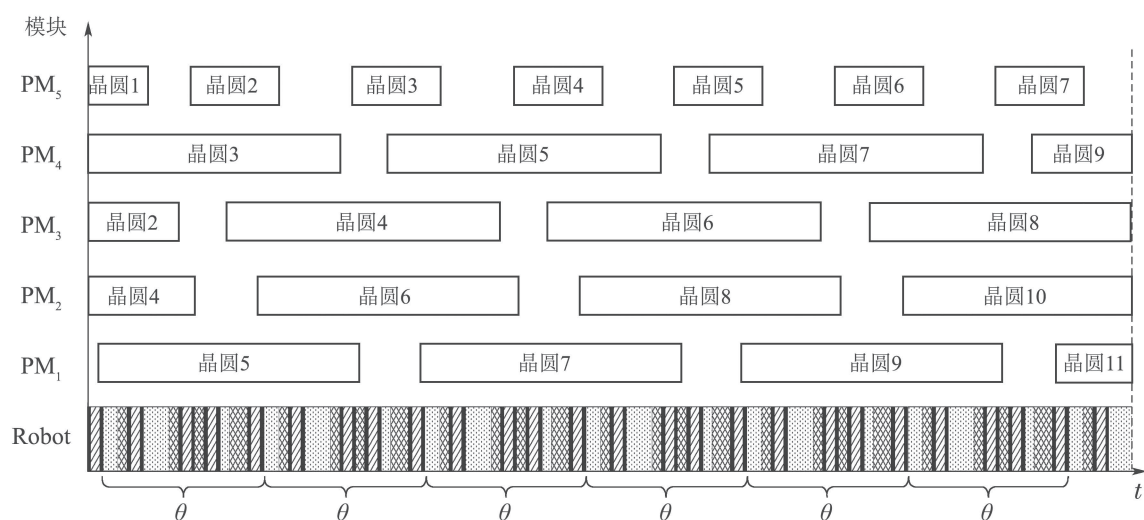
3) 由算法1得机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1} = \{0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2} = \{5, 0, 14, 8\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$)。各道工序时间延迟为 $z_i = \{0, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 最大值为0 s, 总时间延迟为0 s, 调度甘特图如图4(c)所示。



(a) 基于传统拉式策略的调度甘特图



(b) 基于尽早加工策略的调度甘特图



(c) 基于算法1调度方案的调度甘特图



图 4 例2调度甘特图

Fig. 4 Gantt chart of scheduling result for example 2

结果显示算法1所得的调度方案无系统时间延迟,所有工序晶圆加工完毕即可从加工模块卸载。

例3 晶圆流程模式为(1, 1, 1, 1, 1), 晶圆访问PM顺序为 $PM_1 \rightarrow PM_2 \rightarrow PM_3 \rightarrow PM_4 \rightarrow PM_5$ 。晶圆加工参数为 $a_1=90\text{ s}$, $a_2=80\text{ s}$, $a_3=96\text{ s}$, $a_4=90\text{ s}$, $a_5=90\text{ s}$; 机械手动作参数为 $c_0=10\text{ s}$, $c=5\text{ s}$, $\alpha=3\text{ s}$; 通过计算得最小周期下机械手总等待时间为 $\psi_2=24\text{ s}$ 。

1) 使用传统拉式到达稳态调度时, 机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1}=\{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2}=\{0, 0, 0, 0, 0, 24\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$); 各道工序时间延迟为 $z_i=\{1, 16, 0, 6, 6\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为16 s, 总时间延迟为29 s。

2) 使用尽早加工策略到达稳态调度时, 机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1}=\{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$, $\omega_{i2}=\{0, 0, 0, 6, 6, 12\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$); 各道工序时间延迟为 $z_i=\{1, 16, 0, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为16 s, 总时间延迟为17 s。

3) 通过算法1可求得机械手等待时间分配方案为 $\omega_{i1}=\{0, 0, 1, 0, 0, 6\}$, $\omega_{i2}=\{0, 15, 0, 0, 0, 2\}$ ($i \in \mathbb{N}_n \cup \{0\}$); 各道工序时间延迟为 $z_i=\{0, 0, 0, 0, 0\}$ ($i \in \mathbb{N}_n$), 其中: 最大值为0 s, 总时间延迟为0 s。

结果显示算法1所得的调度方案无系统时间延迟,所有工序晶圆加工完毕即可从加工模块卸载。

7 结论

晶圆制造过程复杂, 提高晶圆的生产效率和改良产品质量是研究的重点。通过合理地调度机械手等待时间抵消时间延迟, 满足晶圆的加工工艺需求, 对改良晶圆产品质量具有重要意义。本文分析了单臂组合设备稳态调度的时间延迟特性, 找出机械手等待时间与时间延迟的关系; 提出了优先级规则用于合理地分配机械手的等待时间, 实现抵消时间延迟的目的; 开发了单臂组合设备稳态周期调度启发式算法, 优化了稳态调度方案。通过算例与传统拉式策略和尽早加工策略进行对比, 设计的算法可有效地减少系统时间延迟, 优化稳态调度。然而, 该启发式算法仅考虑了相邻工序之间的相互影响, 而没有考虑整个系统调度变化产生的影响。换言之, 该算法仅能保证系统周期的最优性, 却无法最优地抵消时间延迟, 这是未来需要解决的问题。

参考文献:

- [1] LEE T E. A review of scheduling theory and methods for semiconductor manufacturing cluster tools. *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 2127 – 2135.
- [2] BURGGRAAF P. Coping with the high cost of wafer fabs. *Semiconductor International*, 1995, 18(38): 45 – 50.

- [3] 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.
- [4] ZHOU Binghai, PAN Qingzhi, WANG Shijin. Modeling and performance analysis using Petri nets for cluster tools. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(35): 222 – 225.
(周炳海, 潘青枝, 王世进. 晶圆制造单元的Petri网建模和性能分析. 计算机工程与应用, 2006, 42(35): 222 – 225.)
- [5] 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.
- [6] BAI Liping, WU Naiqi. Modeling and analysis of cluster tool with revisiting in semiconductor manufacturing. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, 11(3): 320 – 325.
(白丽平, 伍乃骐. 半导体重入加工过程自动组合装置的建模与分析. 计算机集成制造系统, 2005, 11(3): 320 – 325.)
- [7] LEE T E, LEE H Y, SHIN Y H. Workload balancing and scheduling of a single-armed cluster tool. *Proceedings of the 5th Apiems Conference*. Gold Coast, Australia: APIEMS, 2004: 1 – 15.
- [8] VENKATESH S, DAVENPORT R, FOXHOVEN P, et al. A steady-state throughput analysis of cluster tools: dual-blade versus single-blade robots. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1997, 10(4): 418 – 424.
- [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] PAN Chunrong, WANG Jipeng. Scheduling for single-armed cluster tools with mixed-processing of multi-variety wafers. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(9): 1171 – 1181.
(潘春荣, 王际鹏. 具有多品种晶圆混合加工的单臂组合设备调度. 控制理论与应用, 2016, 33(9): 1171 – 1181.)
- [11] WU N Q, CHU F, CHU C B, et al. Petri net-based scheduling of single-arm cluster tools with reentrant atomic layer deposition processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(1): 42 – 55.
- [12] PAN Chunrong, WU Naiqi. Modeling and analysis of start-up transient processes of dual-arm cluster tools with wafer revisiting. *Computer Integrated Manufacturing System*, 2015, 21(8): 2072 – 2078.
(潘春荣, 伍乃骐. 晶圆重入加工的组合设备初始暂态建模和分析. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2072 – 2078.)
- [13] PAN Chunrong, LI Liang. Scheduling and analysis of final transient process for cluster tools with wafer revisiting. *Control Theory & Applications*, 2015, 32(5): 655 – 644.
(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.)
- [14] ROSTAMI S, HAMIDZADEH B, CAMPORESE D. An optimal periodic scheduler for dual-arm robots in cluster tools with residency constraints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(5): 609 – 618.
- [15] ROSTAMI S, HAMIDZADEH B, CAMPORESE D. An optimal periodic scheduler for dual-arm robots in cluster tools with residency constraints. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(5): 609 – 618.
- [16] WU N Q, ZHOU M C. Schedulability analysis and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(1): 203 – 209.

- [17] QIAO Y, WU N Q, ZHOU M C. Petri net modeling and wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2012, 25(3): 432 – 446.
- [18] QIAO Y, WU N Q, ZHOU M C. Real-time scheduling of single-arm cluster tools subject to residency time constraints and bounded activity time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(3): 564 – 577.
- [19] PAN C R, QIAO Y, WU N Q, et al. A novel algorithm for wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with wafer residency time constraints and activity time variation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 45(5): 805 – 818.
- [20] WU N Q, ZHOU M C. Colored timed Petri nets for modeling and analysis of cluster tools. *Asian Journal of Control*, 2010, 12(3): 253 – 266.
- [21] 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.
- [22] YANG F J, WU N Q, QIAO Y, et al. Modeling and optimal cyclic scheduling of time-constrained single-robot-arm cluster tools via Petri nets and linear programming. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems*, 2017: 1 – 13. DOI: 10.1109/tsmc.2017.2755599.
- [23] KIM J H. Stable schedule for a single-armed cluster tool with time constraints. *Proceeding of the 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Washington DC, USA: IEEE, 2008: 97 – 102.

作者简介:

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

熊文清 硕士研究生, 目前研究方向为制造系统建模、优化及调度, E-mail: wenqingxiongnb@163.com.