

具有多品种晶圆混合加工的单臂组合设备调度

潘春荣[†], 王际鹏

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 为了提高晶圆制造中组合设备的生产效率, 在考虑晶圆驻留时间约束条件下, 研究没有共享加工模块的多品种晶圆混合加工的单臂组合设备调度问题. 首先, 采用面向资源的Petri网模型描述多种晶圆产品的混合加工过程, 引入控制变迁避免模型的死锁, 采用赋时库所和赋时变迁模拟系统资源的活动时间. 其次, 通过虚拟加工的方法平衡工序的负载, 基于系统Petri网模型和拉式调度策略, 推导出单臂组合设备在多品种晶圆混合加工情形下的可调度性判定条件, 并以解析形式描述. 最后, 提出了系统稳态调度求解算法并以实例验证了算法的有效性和可行性.

关键词: 组合设备; Petri网; 混合加工; 调度; 晶圆制造

中图分类号: TP305 文献标识码: A

Scheduling for single-armed cluster tools with mixed-processing of multi-variety wafers

PAN Chun-rong[†], WANG Ji-peng

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

Abstract: To improve the production efficiency of cluster tools, wafer residency time constraints considered and without PM sharing, scheduling of single-armed cluster tools with mixed-processing of multi-variety wafers are addressed. Firstly, a resource-oriented Petri net (ROPN) model is developed to describe the wafer fabrication process. Controlled transitions are introduced into models to avoid deadlock, and time is associated with places and transitions to model activity times. Secondly, workloads among the processing steps are balanced via virtual process modules. Analytic expressions for testing schedulability are derived based on the Petri net and backward scheduling strategy. Finally, a scheduling algorithm for the steady state is presented. Meanwhile, illustrative examples are given to verify the validity of the scheduling algorithm proposed.

Key words: cluster tools; Petri net; mixed-processing; scheduling; wafer fabrication

1 引言(Introduction)

组合设备(cluster tools)具有高柔性、可重构的特点, 其独特的单晶圆加工技术能有效提高晶圆制造的生产率和良品率^[1], 因而被广泛应用于晶圆制造工艺. 组合设备一般由加工模块(processing module, PM)、真空锁(load lock, LL)、搬运模块(transfer module, TM)、校准模块(aligner, AL)和冷却模块(cooler, CL)组成. 各模块集成在密闭真空环境中, 呈径向分布并由计算机控制. TM按机械手结构分为单臂和双臂两种, 相应设备称为单臂/双臂组合设备. 由于内部空间狭窄, 没有缓冲, 以致组合设备的调度控制非常复杂. 已经证明, 组合设备调度问题属于NP-Hard问题.

相对于双臂组合设备, 单臂组合设备具有更高的

性价比. 对于单臂组合设备调度与控制问题, 工业界和学术界做了大量的研究并提出了多种调度方法. 文献[2-3]研究了单臂组合设备的产能问题, 并给出了基本周期的计算方法. 在实际的工业生产中, 很多晶圆制造工艺都存在严格的逗留时间约束^[4]. 晶圆在PM完成加工后须在规定的时间内卸载, 否则会出现晶圆损伤甚至报废^[5]. 文献[6]采用赋时事件图研究了考虑晶圆驻留时间约束的单臂组合设备稳态调度问题; 文献[7]通过建立单臂组合设备通用Petri网模型, 得出系统可调度充要条件的解析表达式及求解算法. 虽然组合设备各个模块的作业活动受计算机精确控制, 但作业时间波动的情形仍然存在^[8]. 文献[9]研究了单臂组合设备在作业时间波动下的调度问题, 并提出了减弱

收稿日期: 2016-02-27; 录用日期: 2016-05-27.

[†]通信作者. E-mail: chunrongpan@163.com; Tel.: +86 797-8312137.

本文责任编辑: 张化光.

国家自然科学基金项目(71361014, 51665018), 江西省教育厅项目(GJJ150673)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (71361014, 51665018) and Education Department of Jiangxi Province (GJJ150673).

作业时间波动影响的实时控制策略和晶圆延迟上界的计算表达式. 在文献[9]有关晶圆延迟上界研究的基础上, 文献[10]提出了上下两级调度策略来解决作业时间波动情形下的单臂组合设备实时调度问题. 文献[11]认为文献[9-10]中晶圆延迟上界的计算并不精确, 并给出了单臂组合设备在作业时间波动下晶圆延迟的精确计算方法, 修正了文献[9-10]中部分不能调度情形的判定. 除了作业时间波动给调度带来的困难, 组合设备也会有故障的发生^[12]. 文献[13]研究了单臂组合设备的并行模块出现故障时的调度问题, 并提出了相应的故障响应策略, 实现暂态的平稳过渡; 文献[14]利用虚拟晶圆的方法避开故障模块对晶圆的污染, 从而保证晶圆加工的顺利进行; 文献[15]提出了4种故障响应策略, 实现了故障发生时一个周期调度到另一个周期调度的有效过渡. 此外, 重入加工是晶圆制造工艺常见的情形, 例如原子层沉积工艺(atomic layer deposition, ALD), 需要晶圆多次重复进入PM中加工达到所需的离子层厚度, 这使组合设备的调度与控制变得更加复杂^[16]. 文献[17]研究了晶圆重入加工情形下的单臂组合设备调度问题, 提出了系统死锁避免的方法; 文献[18]引入时间约束集, 提出了基于事件驱动的调度算法; 文献[19]针对有3个PM的单臂组合设备的重入加工问题, 提出了启发式调度算法; 文献[20]采用面向资源的有色赋时Petri网模型描述单臂组合设备的晶圆重入加工过程, 研究了经典重入模式 $(m_i, m_{i+1})^h$ 的调度问题.

由于晶圆尺寸增大和客户需求的变化, 现今晶圆制造趋向于多品种、小批量的特点, 组合设备系统需要频繁地更换调度方案, 导致设备调试时间延长, 设备利用效率降低. 文献[21-25]研究了组合设备暂态过程, 并提出了减小暂态过程的优化调度方法. 在此基础上, 文献[26-27]提出在单臂组合设备上加工两种不同晶圆产品在线切换的调度方法, 但只能解决部分晶圆流的切换问题, 而且容易造成PM闲置. 文献[28-29]研究了两种不同晶圆产品混合加工的组合设备调度问题. 基于以上研究基础, 本文对文献[28-29]的研究进行拓展, 在考虑晶圆驻留时间约束的情况下, 研究无PM共享多品种晶圆混合加工的单臂组合设备调度问题, 采用面向资源的Petri网(resource-oriented petri net, ROPN)描述晶圆加工过程, 并提出可行的稳态调度方案.

2 系统建模(System modeling)

2.1 晶圆混合加工过程(Mixed-processing of wafers)

对于无重入加工和PM共享的 k 种晶圆混合加工, 晶圆流程模式可表示为 $\{(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n_1}), (m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})\}$. 其中:

m_{ij} 表示第 i 种晶圆第 j 道工序中的并行PM数量, $i \in \mathbb{N}_k = \{1, 2, \dots, k\}$, $j \in \mathbb{N}_{n_i} = \{1, 2, \dots, n_i\}$. 晶圆在加工过程中依靠机械手动作实现既定的工艺流程, 因此组合设备调度的关键在于机械手调度. 对于单臂组合设备, 机械手动作采用拉式策略效率最高^[4, 14, 26]. 以具有 n 道工序的晶圆加工为例, PM_i 表示第 i 道工序的加工模块. 拉式策略下机械手重复回溯访问 $PM_n, PM_{n-1}, PM_{n-2}, \dots, PM_1$, 访问过程为: $PM_n \rightarrow LL_B \rightarrow PM_{n-1} \rightarrow PM_n \rightarrow PM_{n-2} \rightarrow PM_{n-1} \rightarrow PM_{n-3} \rightarrow PM_{n-2} \rightarrow \dots \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_2 \rightarrow LL_A \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_n$. 拉式策略执行的是周期性动作序列, 系统各项资源的动作序列是确定的, 并且有助于实现单臂组合设备周期调度.

因为组合设备大部分时间工作在稳态, 所以本文只讨论单臂组合设备的稳态加工. 稳态时, 系统有 $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} m_{ij}$ 枚晶圆在单臂组合设备内加工. 令 PM_{ij} 为第 i 种晶圆第 j 道工序的加工模块, $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$. 则机械手的作业序列为: 旋转到 PM_{kn_k} 并等待 \rightarrow 从 PM_{kn_k} 中卸载晶圆并载入 $LL_B \rightarrow$ 旋转到 $PM_{k(n_k-1)}$ 并等待 \rightarrow 从 $PM_{k(n_k-1)}$ 中卸载晶圆并载入 $PM_{kn_k} \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转到 PM_{k1} 并等待 \rightarrow 从 PM_{k1} 中卸载晶圆并载入 $PM_{k2} \rightarrow$ 旋转到 LL_A 并等待 \rightarrow 从 LL_A 中卸载晶圆并载入 $PM_{k1} \rightarrow$ 旋转到 $PM_{(k-1)n_{k-1}}$ 并等待 \rightarrow 从 $PM_{(k-1)n_{k-1}}$ 中卸载晶圆并载入 $LL_B \rightarrow$ 旋转到 $PM_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ 并等待 \rightarrow 从 $PM_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ 中卸载晶圆并载入 $PM_{(k-1)n_{k-1}} \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转到 $PM_{(k-1)1}$ 并等待 \rightarrow 从 $PM_{(k-1)1}$ 中卸载晶圆并载入 $PM_{(k-1)2} \rightarrow$ 旋转到 LL_A 并等待 \rightarrow 从 LL_A 中卸载晶圆并载入 $PM_{(k-1)1} \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转到 PM_{1n_1} 并等待 \rightarrow 从 PM_{1n_1} 中卸载晶圆并载入 $LL_B \rightarrow$ 旋转到 $PM_{1(n_1-1)}$ 并等待 \rightarrow 从 $PM_{1(n_1-1)}$ 中卸载晶圆并载入 $PM_{1n_1} \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转到 PM_{11} 并等待 \rightarrow 从 PM_{11} 中卸载晶圆并载入 $PM_{12} \rightarrow$ 旋转到 LL_A 并等待 \rightarrow 从 LL_A 中卸载晶圆并载入 $PM_{11} \rightarrow$ 旋转到 PM_{kn_k} 并等待. 设备又回到初始状态, 形成一个周期性的加工过程. 机械手在旋转到 PM_{ij} 后的等待时间, 以及晶圆在 PM_{ij} 内加工完毕后等待机械手卸载的时间都不是定值, 而是随调度策略、调度方案变化. 而晶圆加工完毕后在PM内的停留时间是有限制的, 组合设备调度的目标就是在不违反晶圆驻留时间约束的情况下使得机械手的等待时间尽可能短.

2.2 加工过程建模(Fabrication process modeling)

ROPN模型能清晰简洁地描述组合设备晶圆制造过程中复杂的异步、并发、共享与冲突等逻辑关系, 因此本文采用ROPN建模. 有关ROPN模型的相关定义、性质及建模方法可参考文献[7, 30].

用库所 p_{ij} 表示第 i 种晶圆第 j 道工序的并行PM, 且有 $K(p_i) = m_{ij}$. 组合设备的真空锁用于未加工晶圆的载入和加工完毕晶圆输出的缓存区, 类似于自动化制造系统 (automatic manufacturing system, AMS) 中的输入/输出缓存区, 用库所 p_0 表示, 且 $K(p_0) = \infty$. 库所 p_r 表示机械手状态, 且 $K(p_r) = 1$. 当库所 p_r 中有令牌时, 则代表机械手处于空闲状态. 变迁 x_{ij} 表示将第 i 种晶圆从第 j 道工序卸载出来并装载入第 $j+1$ 道工序, 变迁 y_{ij} 表示机械手空载旋转到第 i 种晶圆第 j 道工序并等待卸载晶圆. 库所 q_{ij} 用于连接变迁 y_{ij} 和变迁 x_{ij} , 表示活动 x_{ij} 的结束和活动 y_{ij} 的开始. 将各库所和变迁按照第 i 种晶圆的加工路径排列, 并用有向弧连接各库所和变迁, 构成如图1所示子网.

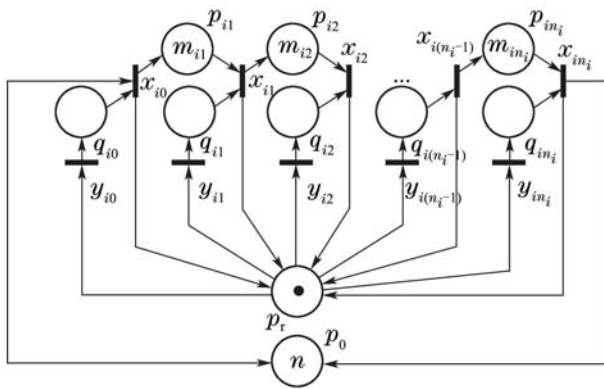


图 1 系统ROPN模型子网

Fig. 1 The subnet for system ROPN

将系统ROPN模型各子网合并, 相邻子网间用库所 p_i 连接. 当库所 p_i 获得令牌时, 表示第 $i+1$ 种晶圆所有工序的加工完成, 系统开始加工第 i 种晶圆, 这样便实现了晶圆按照类别依次进入设备的过程. 稳态时, 第 i 种晶圆的第 j 道工序有 m_{ij} 个晶圆在加工, 即库所 p_{ij} 内有 m_{ij} 个令牌. 不失一般性, 令 $M_0(p_{ij}) = m_{ij}$, $M_0(p_r) = 1$, $M_0(p_0) = n$, $M_0(q_{ij}) = 0$, 表示初始标识.

图2所示模型描述单臂组合设备加工无PM共享的 k 种晶圆时的稳态过程, 但是, 图2中模型存在潜在死锁情形. 初始状态时, 即初始标识 M_0 时, 变迁 y_{ij} ($i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i} \cup \{0\}$) 是进程使能和资源使能的, 模型中所有变迁 y_{ij} 都可触发. 例如, 触发变迁 y_{i0} , 变迁 x_{i0} 获得令牌触发, 随后令牌进入 p_{i1} 产生新的标识 M , 且有 $M(p_{i1}) = m_{ij} + 1 > K(p_{i1})$. 而标识 M 是死标识, 导致系统发生死锁, 在这个过程中变迁 x_{i0} 仅是进程使能而非资源使能. 为了避免系统PN模型死锁, 需对变迁 x_{ij} 的上游变迁 y_{ij} 进行限定, 即变迁 y_{ij} 必须是受控的. 含有受控变迁的ROPN, 称为受控ROPN. 受控变

迁必须同时具备进程使能、资源使能和受控使能时才能够触发. 受控变迁 y_{ij} 的控制规则如下:

定义 1 若在标识 M 有 $M(p_{i(j+1)}) = m_{i(j+1)} - 1$, 则变迁 y_{ij} 是受控使能的, $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_{i-1}} \cup \{0\}$; 若有 $M(p_{ij}) = m_{ij}$, 则变迁 y_{kn_k} 是受控使能的, $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$.

根据定义1可知, 系统在初始标识 M_0 时, 变迁 y_{ij} ($i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_{i-1}} \cup \{0\}$) 是进程使能和资源使能的, 但不是受控使能, 故不能触发. 变迁 y_{in_i} ($i \in \mathbb{N}_{k-1}$) 只是进程使能和受控使能, 但是不是资源使能, 所以不能触发. 只有变迁 y_{kn_k} 同时是进程使能、资源使能和受控使能的, 因而在标识 M_0 只有变迁 y_{kn_k} 可触发. 首先触发变迁 y_{kn_k} , 随后触发变迁 x_{kn_k} , 系统到达标识 M_1 . 接着依次触发变迁 $y_{k(n_k-1)}, x_{k(n_k-1)}, \dots, y_{k0}, x_{k0}$, 系统达到标识 M_{n_k+1} . 然后触发变迁 $y_{(k-1)n_{k-1}}, x_{(k-1)n_{k-1}}$ 到达标识 M_{n_k+2} . 按照上述触发规则运行, 最后达到标识 $M_{\sum_{i=1}^k n_i+k-1}$, 这时变迁 y_{10} 可以触发, 随后触发变迁 x_{10} 系统到达标识 $M_{\sum_{i=1}^k n_i+k}$. 而标识 $M_{\sum_{i=1}^k n_i+k}$ 等价于标识 M_0 , 系统运行了一个周期. 因此, 图2所示系统ROPN模型是无死锁的.

2.3 作业时间建模(Activity times modeling)

图2所示模型描述的是单臂组合设备加工无PM共享的 k 种晶圆时的稳态加工状态, 模型只定义了系统的结构关系, 还不能完整描述系统运行逻辑. 晶圆制造过程是一个典型的离散事件动态系统, 事件的触发时间至关重要. 系统资源的活动需要占用时间, 如晶圆在PM内的加工、机械手的旋转、晶圆的装载等, 因此需要对系统进行活动时间进行建模. 假设 ζ 表示机械手的活动时间, 且 $\zeta \in [\zeta_1, \zeta_2]$, 这意味着机械手执行一个任务所需时间为 $\zeta \in [\zeta_1, \zeta_2]$. 类似地, 假设 ξ 表示晶圆在PM内停留的最长时间, 且 $\xi \in [\xi_1, \xi_2]$, 这意味着晶圆在PM完成加工并等待机械手卸载的总时长为 $\xi \in [\xi_1, \xi_2]$. 如果将 ζ (或者 ξ)与变迁 t 关联, 则表示变迁 t 触发所需的时间为 ζ (或者 ξ). 如果将 ζ (或者 ξ)与库所 p 关联, 则表示库所 p 中的令牌需要在库所 p 停留的时间至少 ζ (或者 ξ)才能输出至下一变迁. 一般认为, 机械手装/卸载晶圆的的时间相等^[7-8], 设为 ρ . 令 α_{ij} 为PM i_j 完成晶圆的加工所需的时间, δ_{ij} 为晶圆完成加工后在PM i_j 内允许滞留的最长时间. 与晶圆在PM内的加工时间和晶圆的装载卸载时间相比较, 机械手在各模块间的旋转时间较短, 因此可以认为机械手在任意两模块间的旋转时间相等, 设为 θ . 对于图2所示模型, 赋时库所和赋时变迁如表1所示.

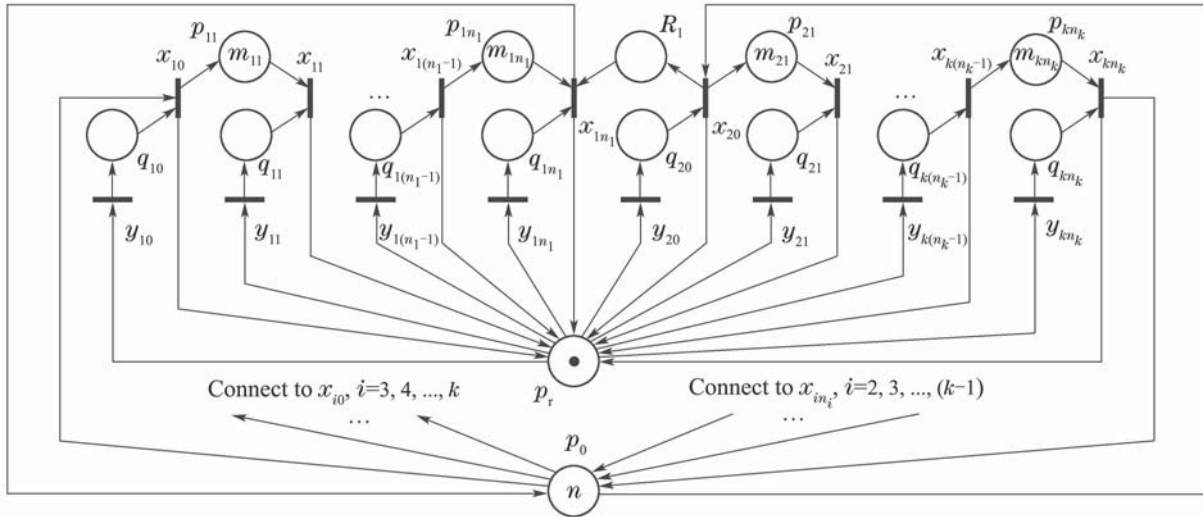


图2 系统ROPN模型

Fig. 2 ROPN model for system

表1 赋时库所和赋时变迁时间

Table 1 Time durations associated with places and transitions

| 符号 | 说明 | 时间 |
|------------|---|--|
| p_{ij} | $i \in \mathbb{N}_k, i \in \mathbb{N}_{n_i}$, 晶圆在 PM_{ij} 内加工 | $\tau_{ij} \in [\alpha_{ij}, \alpha_{ij} + \delta_{ij}]$ |
| x_{i0} | $i \in \mathbb{N}_k$, 机械手将晶圆从 LL_A 中卸载并载入 PM_{i1} | $2\rho + \theta$ |
| x_{ij} | $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i-1}$, 机械手将晶圆从 PM_{ij} 中卸载并载入 $PM_{i(j+1)}$ | $2\rho + \theta$ |
| x_{in_i} | $i \in \mathbb{N}_k$, 机械手将晶圆从 PM_{ij} 中卸载并载入 LL_B | $2\rho + \theta$ |
| y_{i0} | $i \in \mathbb{N}_k$, 机械手空载旋转到 LL_A 并等待从中卸载晶圆 | $\theta + \omega_{i0} \in [\theta, \infty)$ |
| y_{ij} | $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$, 机械手空载旋转到 PM_{ij} 并等待从中卸载晶圆 | $\theta + \omega_{ij} \in [\theta, \infty)$ |

上述Petri网模型能够描述稳态时晶圆加工过程以及相关异步事件、活动的逻辑关系,但并不能保证系统Petri网模型在时间约束下的活性,因为晶圆在PM内的加工活动存在时间约束.晶圆在 PM_{ij} 中停留的总时间包括晶圆的加工时间、晶圆在 PM_{ij} 内等待卸载所需时间,停留的总时间不能超过阈值.因此,有如下定理.

定理1 若在任意可达标识 $M \in \mathbb{R}(M_0)$ 和时刻 t ,当变迁 $x_{ij}(i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i} \cup \{0\})$ 可触发时,对任意库所 p_{ij} 中的令牌有 $\tau_{ij} \in [\alpha_{ij}, \alpha_{ij} + \delta_{ij}]$,则

单臂组合设备Petri网模型是活的.

如果设备运行时违反晶圆驻留时间约束,即违反定理1时,系统稳态调度就变得不可行.也就是说,系统Petri网的活性等同于组合设备稳态调度的可行性.显然,组合设备Petri网模型的活性不仅跟参数 $\rho, \theta, \alpha_{ij}, \delta_{ij}$ 相关,也与 ω_{ij} 相关,这些参数也决定了系统调度的可行性. ρ 和 θ 由组合设备本身的特性决定, α_{ij} 和 δ_{ij} 与晶圆的工艺要求相关,而 ω_{ij} 由具体的调度确定.当晶圆的工艺确定后, $\rho, \theta, \alpha_{ij}$ 和 δ_{ij} 就是定值, ω_{ij} 随调度要求和目标的变化而变化.因此,系统Petri网的活性由调度决定.

3 调度分析(Scheduling analysis)

稳态时,单臂组合设备内有 k 种晶圆正在加工,总共有 $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} m_{ij}$ 枚晶圆,分配 $\sum_{j=1}^{n_i} m_{ij}$ 个PM用于第 i 种晶圆的加工.晶圆按照第 k 种、第 $k-1$ 种、 \dots 、第2种、第1种的顺序依次进入设备内进行加工,各种类型晶圆的加工活动相互独立.对于第 i 种晶圆的第 j 道工序, $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$,根据图2所示系统ROPN模型可知系统资源活动需按下列顺序执行:触发变迁 x_{ij} (费时 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 $y_{i(j-1)}$ (费时 $\theta + \omega_{i(j-1)}$) \rightarrow 触发变迁 $x_{i(j-1)}$ (费时 $2\rho + \theta$) \rightarrow 晶圆在第 j 道工序加工(费时 τ_{ij}) \rightarrow 再次触发变迁 x_{ij} .可知完成第 i 种晶圆的第 j 道工序加工所花时间为 $4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \tau_{ij}$,考虑到该工序有 m_{ij} 个并行PM用于晶圆的加工,令第 i 种晶圆的第 j 道工序的固有生产节拍以及节拍的下界、上界分别为 Φ_{ij} , Φ_{ijL} , Φ_{ijU} ,则有

$$\begin{cases} \Phi_{ij} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \tau_{ij}}{m_{ij}}, \\ \Phi_{ijL} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \alpha_{ij}}{m_{ij}}, \\ \Phi_{ijU} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \alpha_{ij} + \delta_{ij}}{m_{ij}}, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \phi_{ij} = \frac{4\rho + 3\theta + \tau_{ij}}{m_{ij}}, \\ \phi_{ijL} = \frac{4\rho + 3\theta + \alpha_{ij}}{m_{ij}}, \\ \phi_{ijU} = \frac{4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij}}{m_{ij}}. \end{cases} \quad (2)$$

式(1)描述了晶圆制造过程中每一种晶圆的每一道工序生产节拍, 即晶圆在每一道工序的真实加工时间. 上述表达式考虑了机械手的等待时间, 当式(1)去除机械手等待时间 $\omega_{i(j-1)}$ 时刻, 可获得式(2). 式(2)描述了晶圆在每一道工序的工作负载, 机械手调度的目标就是调节等待时间以平衡晶圆的工作负载, 实现稳定高效的加工.

调节机械手的等待时间只能平衡晶圆内层工序的工作负载, 但对于外层各晶圆种类间的工作负载间的相互关系难以实现平衡, 所以需要采用一定的策略加以平衡. 令机械手初步调节后第*i*种晶圆的工作负载为 ϕ_i , 由于各种晶圆间的加工作业相互独立, 所以可

以假设系统分配有 h_i 组虚拟的PM用于第*i*种晶圆的加工, 每组拥有 $\sum_{j=1}^{n_i}$ 个PM, 设置形式如图3所示. 加工时, 在 h_i 个生产节拍内系统分配 $h_i - 1$ 组虚拟的晶圆进入虚拟的PM中加工, 一组真实晶圆进入实际的PM中加工. 在虚拟加工部分, 机械手并不做任何动作, 而是等待一个生产节拍, 然后进行下一步的加工活动. 这样, 系统就可进一步平衡工作负载, 形成稳定的周期性加工. h_i 表征各种晶圆工作负载 ϕ_i 大小的相互关系, 考虑 h_i 后的生产节拍及工作负载为调度生产节拍及调度工作负载, 分别设为 ψ_{ij} 和 φ_{ij} , 对应的上、下界分别设为 $\psi_{ijU}, \psi_{ijL}, \varphi_{ijU}, \varphi_{ijL}$, 则有

$$\begin{cases} \psi_{ij} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \tau_{ij}}{m_{ij}h_i}, \\ \psi_{ijL} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \alpha_{ij}}{m_{ij}h_i}, \\ \psi_{ijU} = \frac{4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)} + \alpha_{ij} + \delta_{ij}}{m_{ij}h_i}, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \varphi_{ij} = \frac{4\rho + 3\theta + \tau_{ij}}{m_{ij}h_i}, \\ \varphi_{ijL} = \frac{4\rho + 3\theta + \alpha_{ij}}{m_{ij}h_i}, \\ \varphi_{ijU} = \frac{4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij}}{m_{ij}h_i}. \end{cases} \quad (4)$$

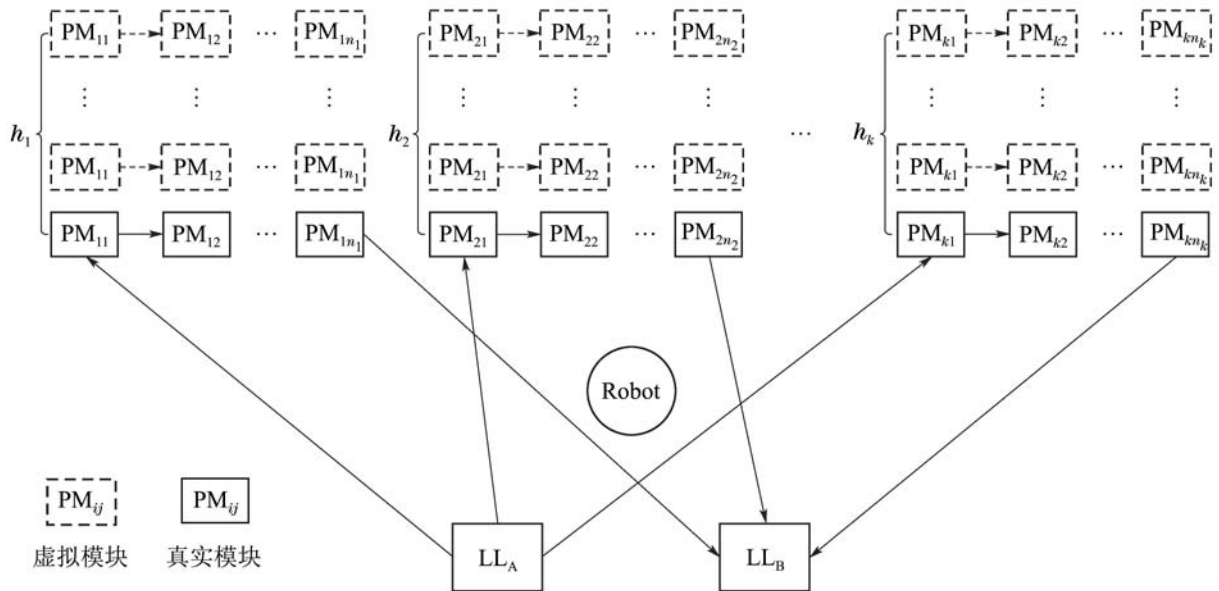


图 3 虚拟加工示意图

Fig. 3 Schematic diagram of virtual process

组合设备工作在稳态时, 设备内的加工模块都处于满负荷加工状态, 每个系统生产节拍都有一枚晶圆卸载和装载. 组合设备内晶圆的加工是一个串行连续的过程, 因此组合设备工作在稳态时必须要求

晶圆每道工序的生产节拍相等. 假设晶圆的某道工序生产节拍跟其他工序的生产节拍不一致, 必然导致在某一个生产周期内晶圆进出设备的数量不相等, 设备会脱离稳态的加工状态. 令系统的生产节

拍为 ψ_P , 所以, 对于无PM共享 k 种晶圆的混合加工, 若单臂组合设备工作在稳态, 则必须有

$$\psi_P = \psi_{11} = \psi_{12} = \cdots = \psi_{kn_k}. \quad (5)$$

由定理1可知, 具有晶圆驻留时间约束的组合设备调度的关键是使晶圆在PM内的停留时间不能超过阈值, 即 $\tau_{ij} \in [\alpha_{ij}, \alpha_{ij} + \delta_{ij}]$. 因此, τ_{ij} 的准确计算很关键. 晶圆载入和卸载出PM靠机械手完成, 所以, 晶圆在PM内的停留时间取决于机械手的调度及生产节拍. 根据图2系统ROPN模型, 稳态时机械手在一个生产周期内的动作过程为: 触发变迁 y_{kn_k} (旋转到 PM_{kn_k} 并等待, 花费 $\theta + \omega_{kn_k}$) \rightarrow 触发变迁 x_{kn_k} (从 PM_{kn_k} 中卸载晶圆并载入 LL_B , 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 $y_{k(n_k-1)}$ (旋转到 $PM_{k(n_k-1)}$ 并等待, 花费 $\theta + \omega_{k(n_k-1)}$) \rightarrow 触发变迁 $x_{k(n_k-1)}$ (从 $PM_{k(n_k-1)}$ 中卸载晶圆并载入 PM_{kn_k} , 花费 $2\rho + \theta$) $\rightarrow \cdots \rightarrow$ 触发变迁 y_{k1} (旋转到 PM_{k1} 并等待, 花费 $\theta + \omega_{k1}$) \rightarrow 触发变迁 x_{k1} (从 PM_{k1} 中卸载晶圆并载入 PM_{k2} , 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 y_{k0} (旋转到 LL_A 并等待, 花费 $\theta + \omega_{k0}$) \rightarrow 触发变迁 x_{k0} (从 LL_A 中卸载晶圆并载入 PM_{k1} , 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 $y_{(k-1)n_{k-1}}$ (旋转到 $PM_{(k-1)n_{k-1}}$ 并等待, 费时 $\theta + \omega_{(k-1)n_{k-1}}$) \rightarrow 触发变迁 $x_{(k-1)n_{k-1}}$ (从 $PM_{(k-1)n_{k-1}}$ 中卸载晶圆并载入 LL_B , 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 $y_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ (旋转到 $PM_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ 并等待, 花费 $\theta + \omega_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$) \rightarrow 触发变迁 $x_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ (从 $PM_{(k-1)(n_{k-1}-1)}$ 中卸载晶圆并载入 $PM_{(k-1)n_{k-1}}$, 花费 $2\rho + \theta$) $\rightarrow \cdots \rightarrow$ 触发变迁 y_{ij} (旋转到 PM_{ij} 并等待, 花费 $\theta + \omega_{ij}$) \rightarrow 触发变迁 x_{ij} (从 PM_{ij} 中卸载晶圆并载入 $PM_{i(j+1)}$, 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 $y_{i(j-1)}$ (旋转到 $PM_{i(j-1)}$ 并等待, 花费 $\theta + \omega_{i(j-1)}$) \rightarrow 触发变迁 x_{k0} (从 $PM_{i(j-1)}$ 中卸载晶圆并载入 PM_{ij} , 花费 $2\rho + \theta$) $\rightarrow \cdots \rightarrow$ 触发变迁 y_{11} (旋转到 PM_{11} 并等待, 花费 $\theta + \omega_{11}$) \rightarrow 触发变迁 x_{11} (从 PM_{11} 中卸载晶圆并载入 PM_{12} , 花费 $2\rho + \theta$) \rightarrow 触发变迁 y_{10} (旋转到 LL_A 并等待, 花费 $\theta + \omega_{10}$) \rightarrow 触发变迁 x_{k0} (从 LL_A 中卸载晶圆并载入 PM_{11} , 花费 $2\rho + \theta$). 在这个过程中, 每个变迁 x_{ij} 和变迁 y_{ij} 均只触发一次, $i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i} \cup \{0\}$. 所以机械手的生产节拍为

$$\begin{aligned} \psi_T &= \sum_{i=1}^k \psi_i = \\ &= \sum_{i=1}^k [2(n_i + 1)(\rho + \theta) + \sum_{j=0}^{n_i} \omega_{ij}] = \\ &= 2\left(\sum_{i=1}^k n_i + k\right)(\rho + \theta) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{n_i} \omega_{ij}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中: $\psi_{t1} = 2\left(\sum_{i=1}^k n_i + k\right)(\rho + \theta)$, $\psi_{t2} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{n_i} \omega_{ij}$, ψ_i 为机械手完成第 i 种晶圆的生产节拍所花费的时间, ψ_{t1} 为已知定值, ψ_{t2} 由机械手调度决定.

由晶圆加工过程及机械手动作过程可知, 机械手调度是通过调节在不同工序的等待时间实现平衡工作负载, 调节的基础为 ψ_{t1} . 因此, 可以 ψ_{t1} 为参照量估计各类晶圆固有工作负载与机械手生产节拍的相对大小, 而二者的相对值直接跟需要配置虚拟模块组数相关. 因此, h_i 的取值可按如下公式设定:

$$h_i = \lceil \phi_{iL\max} / \psi_{t1} \rceil, \quad i \in \mathbb{N}_k, \quad (7)$$

其中: $\phi_{iL\max} = \max\{\phi_{ijL}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$, $\lceil x \rceil$ 表示取不小于 x 的最小整数. 式(7)取得的是最接近 $\phi_{iL\max} / \psi_{t1}$ 真实值的整数, 因而可以最大程度地反映各类晶圆工作负载相对机械手生产节拍的相对大小. 进一步, 可知进入设备的晶圆的混合比例为 $H_1 : H_2 : \cdots : H_k$, 其中

$$H_i = [h_1, h_2, \cdots, h_k] / h_i, \quad (8)$$

$[h_1, h_2, \cdots, h_k]$ 表示 h_1, h_2, \cdots, h_k 的最小公倍数.

观察系统ROPN模型和机械手动作过程, 可知当模型第 k 次触发变迁 $x_{i(j-1)}$ 时, 机械手将第 k 枚晶圆载入到 PM_{ij} , 第 $k + m_{ij} \times h_i$ 次触发变迁 $x_{i(j-1)}$ 时, 机械手从 PM_{ij} 卸载出第 k 枚晶圆, 这两个时刻间的时间差即为第 k 枚晶圆在内 PM_{ij} 停留的时间 τ_{ij} . 在这个时间段内, 变迁 $x_{ij}, y_{i(j-1)}, x_{i(j-1)}$ 总共触发了 $m_{ij} \times h_i - 1$ 次, 机械手在其他模块的活动执行了 $m_{ij} \times h_i$ 次, 所以

$$\tau_{ij} = m_{ij} \times h_i \times \psi_P - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}). \quad (9)$$

从上文所述晶圆加工过程、机械手动作过程以及式(3)(9)可知, 单臂组合设备在稳态时, 机械手和晶圆有相同的生产节拍, 即有

$$\psi_T = \psi_P = \psi_{11} = \psi_{12} = \cdots = \psi_{kn_k}. \quad (10)$$

4 可调度性判定(Schedulability test)

式(5)和(10)给出了无共享PM多品种晶圆混合加工时单臂组合在稳态的基本特征及要求, 但是系统各项生产节拍仅仅满足上述两式的要求还不足以获得可行调度. 因为晶圆加工除满足工艺要求及加工模块独特的加工环境外, 每一道工序还需满足晶圆驻留时间约束, 即求得的机械手调度必须使晶圆加工过程满足定理1的要求. 设 $\varphi_{L\max} = \max\{\varphi_{ijL}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$, $\varphi_{U\min} = \min\{\varphi_{ijU}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$, 则有如下定理.

定理2 对于 $\{(m_{11}, m_{12}, \cdots, m_{1n_1}), (m_{21},$

$m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})$ 模式无共享PM晶圆混合加工, 若 $\psi_{t1} \leq \varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$, 则单臂组合设备可以调度.

证 由 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$ 可知 $[\varphi_{11L}, \varphi_{11U}] \cap [\varphi_{12L}, \varphi_{12U}] \cap \dots \cap [\varphi_{1n_1L}, \varphi_{1n_1U}] \cap [\varphi_{21L}, \varphi_{21U}] \cap [\varphi_{22L}, \varphi_{22U}] \cap \dots \cap [\varphi_{kn_kL}, \varphi_{kn_kU}] \neq \emptyset$, 则在机械手无等待时存在 $\psi_P \in [\varphi_{L \max}, \varphi_{U \min}] \subset [\varphi_{ijL}, \varphi_{ijU}]$, 使得式(5)成立. 由式(6)可知 ω_{in_i} 不影响系统任一工序节拍 ψ_{ij} , 令 $\omega_{in_i} = (\varphi_{L \max} - \psi_{t1})/k$, $\omega_{i(j-1)} = 0$ ($i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$), 则

$$\begin{aligned} \psi_T &= \psi_{t1} + \psi_{t2} = \\ \psi_{t1} + \sum_{i=1}^k \sum_{j=0}^{n_i-1} \omega_{ij} + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} &= \varphi_{L \max} = \psi_P, \end{aligned}$$

即存在满足式(10)的调度. 此时由式(9)有

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= m_{ij} \times h_i \times \psi_T - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L \max} - (4\rho + 3\theta) &\geq \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{ijL} - (4\rho + 3\theta) &= \\ m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij}) / (m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta) &= \\ \alpha_{ij}, \tau_{ij} &= \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L \max} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) &\leq \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{U \min} - (4\rho + 3\theta) &\leq \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{ijU} - (4\rho + 3\theta) &= \\ m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij}) &+ \\ \delta_{ij}) / (m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta) &= \alpha_{ij} + \delta_{ij}. \end{aligned}$$

因此, 当 $\psi_{t1} \leq \varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$ 时, 系统可以调度.

证毕.

定理 3 对于 $\{(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n_1}), (m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})\}$ 模式无共享PM晶圆混合加工, 若 $\varphi_{L \max} < \psi_{t1} \leq \varphi_{U \min}$, 则单臂组合设备可以调度.

证 由 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$ 可知 $[\varphi_{11L}, \varphi_{11U}] \cap [\varphi_{12L}, \varphi_{12U}] \cap \dots \cap [\varphi_{1n_1L}, \varphi_{1n_1U}] \cap [\varphi_{21L}, \varphi_{21U}] \cap [\varphi_{22L}, \varphi_{22U}] \cap \dots \cap [\varphi_{kn_kL}, \varphi_{kn_kU}] \neq \emptyset$, 则在机械手无等待时存在 $\psi_P \in [\varphi_{L \max}, \varphi_{U \min}] \subset [\varphi_{ijL}, \varphi_{ijU}]$, 使得式(5)成立. 当 $\omega_{ij} = 0$ ($i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$) 时, 显然存在调度使 $\psi_T = \psi_{t1} = \psi_P$ 成立, 即存在满足式(10)的调度. 此时, 由式(9)有

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= m_{ij} \times h_i \times \psi_T - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ m_{ij} \times h_i \times \psi_{t1} - (4\rho + 3\theta) &> \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L \max} - (4\rho + 3\theta) &> \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{ijL} - (4\rho + 3\theta) &= \\ m_{ij} \times h_i (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij}) / (m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta) &= \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_{ij}, \tau_{ij} &= \\ m_{ij} \times h_i \times \psi_T - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) &\leq \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{U \min} - (4\rho + 3\theta) &\leq \\ m_{ij} \times h_i \times \varphi_{ijU} - (4\rho + 3\theta) &= \\ m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij}) / (m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta) &= \alpha_{ij} + \delta_{ij}. \end{aligned}$$

综上, 当 $\varphi_{L \max} < \psi_{t1} \leq \varphi_{U \min}$ 时, 系统可以调度.

证毕.

定理 4 对于 $\{(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n_1}), (m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})\}$ 模式无共享PM晶圆混合加工, 若 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min} < \psi_{t1}$, 则单臂组合设备不可调度.

证 由 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$ 可知 $[\varphi_{11L}, \varphi_{11U}] \cap [\varphi_{12L}, \varphi_{12U}] \cap \dots \cap [\varphi_{1n_1L}, \varphi_{1n_1U}] \cap [\varphi_{21L}, \varphi_{21U}] \cap [\varphi_{22L}, \varphi_{22U}] \cap \dots \cap [\varphi_{kn_kL}, \varphi_{kn_kU}] \neq \emptyset$, 则在机械手无等待时存在 $\psi_P \in [\varphi_{L \max}, \varphi_{U \min}] \subset [\varphi_{ijL}, \varphi_{ijU}]$, 使得式(5)成立. 而 $\varphi_{U \min} < \psi_{t1}$, 可知在机械手无等待情形下 $\psi_T > \psi_P$, 故式(10)不能成立. 因此当 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min} < \psi_{t1}$ 时, 系统不存在机械手无等待的调度. 当机械手有等待时, 即 $\omega_{ij} = 0$ ($i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$) 不全为零时,

$$\begin{aligned} \psi_{ij} &= \varphi_{ij} + \omega_{i(j-1)} / (m_{ij} \times h_i) < \\ \varphi_{U \min} + \omega_{i(j-1)} / (m_{ij} \times h_i) &< \\ \psi_{t1} + \omega_{i(j-1)} / (m_{ij} \times h_i) &< \\ \psi_{t1} + \psi_{t2} = \psi_T, & \end{aligned}$$

可知在机械手有等待的情形下找不到可行解使式(10)成立. 综上, 当 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min} < \psi_{t1}$ 时, 不存在符合要求的机械手调度. **证毕.**

定理 5 对于 $\{(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n_1}), (m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})\}$ 模式无共享PM晶圆混合加工, 当 $\varphi_{U \min} < \varphi_{L \max}$ 时, 若

$$\psi_{t1} \leq \varphi_{L \max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L \max} - \varphi_{ijU}) m_{ij} \times h_i,$$

其中 $E = \{i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{L \max}\}$, 则单臂组合设备可以调度.

证 由 $\varphi_{L \max} < \varphi_{U \min}$ 可知 $[\varphi_{11L}, \varphi_{11U}] \cap [\varphi_{12L}, \varphi_{12U}] \cap \dots \cap [\varphi_{1n_1L}, \varphi_{1n_1U}] \cap [\varphi_{21L}, \varphi_{21U}] \cap [\varphi_{22L}, \varphi_{22U}] \cap \dots \cap [\varphi_{kn_kL}, \varphi_{kn_kU}] = \emptyset$, 则在机械手无等待时不存在 $\psi_P \in [\varphi_{L \max}, \varphi_{U \min}] \subset [\varphi_{ijL}, \varphi_{ijU}]$, 使得式(5)成立. 在机械手有等待时, 要使 $\varphi_{L \max} \leq \varphi_{U \min}$ 可知 $[\psi_{11L}, \psi_{11U}] \cap [\psi_{12L}, \psi_{12U}] \cap \dots \cap [\psi_{1n_1L}, \psi_{1n_1U}] \cap [\psi_{21L}, \psi_{21U}] \cap [\psi_{22L}, \psi_{22U}] \cap \dots \cap [\psi_{kn_kL}, \psi_{kn_kU}] \neq \emptyset$, 须有 $\psi_{ijU} \geq \varphi_{L \max}$, 即机械手

调度必须满足 $\omega_{i(j-1)} \geq m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})$, 其中 $i, j \in E$. 如此, E 和 $F = N_n - E$ 才有公共集而存在满足式(5)的调度, 且 $\psi_P \geq \varphi_{L\max}$. 令 $\omega_{i(j-1)} = 0, i, j \in F$, 若存在满足式(10)要求的调度, 则有

$$\begin{aligned} \psi_P &= \psi_{t1} + \sum_{i,j \in E} \omega_{i(j-1)} + \sum_{i,j \in F} \omega_{i(j-1)} + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} = \\ \psi_{t1} &+ \sum_{i,j \in E} [m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - \\ &(4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})] + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} = \end{aligned}$$

$$\psi_{t1} + \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} \geq$$

$\varphi_{L\max}$,

而 $\psi_{t1} \leq \varphi_{L\max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i$, 联

立两式可知 $\sum_{i=1}^k \omega_{in_i} \geq 0$. 综上可知, 当 $\varphi_{U\min} < \varphi_{L\max}$ 时, 若 $\psi_{t1} \leq \varphi_{L\max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i$, 其中 $E = \{i \in N_k, j \in N_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{L\max}\}$, 则存在满足式(10)要求的调度, 且系统最小节拍为 $\psi_P = \psi_T = \varphi_{L\max}$. 对于工序 $i, j \in E$,

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= m_{ij} \times h_i \times \psi_T - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) \geq \\ &m_{ij} \times h_i \times \psi_{ijL} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \omega_{i(j-1)}) / \\ &(m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \alpha_{ij}. \end{aligned}$$

由 $\tau_{ij} = m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)})$ 有 $\omega_{i(j-1)} = m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta) - \tau_{ij} \geq m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})$, 即 $\tau_{ij} \leq \alpha_{ij} + \delta_{ij}$. 对于工序 $i, j \in F$,

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) \geq \\ &m_{ij} \times h_i \times \phi_{ijL} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \omega_{i(j-1)}) / (m_{ij} \times h_i) - \\ &(4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &\alpha_{ij}, \tau_{ij} = \\ &m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) \leq \\ &m_{ij} \times h_i \times \psi_{ijU} - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &m_{ij} \times h_i \times (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij} + \\ &\omega_{i(j-1)}) / (m_{ij} \times h_i) - (4\rho + 3\theta + \omega_{i(j-1)}) = \\ &\alpha_{ij} + \delta_{ij}. \end{aligned}$$

综上, 当 $\varphi_{U\min} < \varphi_{L\max}$ 时, 若 $\psi_{t1} \leq \varphi_{L\max} -$

$\sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i$, 其中 $E = \{i \in N_k, j \in N_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{L\max}\}$, 则单臂组合设备可以调度.

证毕.

定理6 对于 $\{(m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1n_1}), (m_{21}, m_{22}, \dots, m_{2n_2}), \dots, (m_{k1}, m_{k2}, \dots, m_{kn_k})\}$ 模式无共享PM晶圆混合加工, 当 $\varphi_{U\min} < \varphi_{L\max}$ 时, 若 $\psi_{t1} > \varphi_{L\max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i$, 其中 $E = \{i \in N_k, j \in N_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{L\max}\}$, 则单臂组合设备不可调度.

证 由定理5可知, 当 $\varphi_{U\min} < \varphi_{L\max}$, $\psi_{t1} \leq \varphi_{L\max}$ 时, 机械手只在有等待时才可能存在满足式(5)的调度, 使 $\varphi_{L\max} \leq \varphi_{U\min}$ 可知 $[\psi_{11L}, \psi_{11U}] \cap [\psi_{12L}, \psi_{12U}] \cap \dots \cap [\psi_{1n_1L}, \psi_{1n_1U}] \cap [\psi_{21L}, \psi_{21U}] \cap [\psi_{22L}, \psi_{22U}] \cap \dots \cap [\psi_{kn_kL}, \psi_{kn_kU}] \neq \emptyset$. 此时, 须有 $\psi_{ijU} \geq \varphi_{L\max}$, 即机械手调度必须要满足下式:
 $\omega_{i(j-1)} \geq m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})$, 其中 $i, j \in E$. 如此, E 和 $F = N_n - E$ 才有公共集而存在满足式(5)的调度, 且 $\psi_P \geq \varphi_{L\max}$. 可令 $\omega_{i(j-1)} = 0, i, j \in F$, 若系统存在满足式(10)要求的机械手调度, 则

$$\begin{aligned} \psi_T &= \psi_{t1} + \sum_{i,j \in E} \omega_{i(j-1)} + \sum_{i,j \in F} \omega_{i(j-1)} + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} = \\ \psi_{t1} &+ \sum_{i,j \in E} [m_{ij} \times h_i \times \varphi_{L\max} - \\ &(4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})] + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} = \end{aligned}$$

$$\psi_{t1} + \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i + \sum_{i=1}^k \omega_{in_i} \geq$$

$\varphi_{L\max}$.

而

$$\psi_{t1} > \varphi_{L\max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i,$$

联立两式可知 $\sum_{i=1}^k \omega_{in_i} < 0$, 在实际调度中不可能存在机械手等待时间为负值的情况. 所以, 当 $\varphi_{U\min} < \varphi_{L\max}$ 时, 若 $\psi_{t1} > \varphi_{L\max} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{L\max} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i$, 其中 $E = \{i \in N_k, j \in N_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{L\max}\}$, 则系统不可调度. 证毕.

5 调度算法(Scheduling algorithm)

前文对于无PM共享 k 种晶圆的混合加工过程进行阐述和分析, 推导出系统可调度性判定的方法, 并给出相关参数的计算方法. 因此, 可通过如下过程求解稳态调度, 算法内容具体如下:

算法 1 求解无PM共享k种晶圆混合加工单臂组合设备稳态调度

输入: $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \rho, \theta, m_{ij} (i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i})$

输出: $H_i, \omega_{ij}, \psi_i (i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i})$

i) 初始化

- 1) $\psi_{t1} \leftarrow 2(\sum_{i=1}^k n_i + k)(\rho + \theta)$
- 2) $\phi_{ijL} \leftarrow (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij})/m_{ij}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$
- 3) $\phi_{iLmax} \leftarrow \max\{\phi_{ijL}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$
- 4) $\varphi_{ijL} \leftarrow (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij})/(m_{ij} \times h_i), i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$
- 5) $\varphi_{ijU} \leftarrow (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij})/(m_{ij} \times h_i), i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$
- 6) $\varphi_{Lmax} \leftarrow \max\{\varphi_{ijL}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$
- 7) $\varphi_{Umin} \leftarrow \max\{\varphi_{ijU}, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}\}$

ii) 混合比求解

- 1) $h_i \leftarrow \lceil \phi_{iLmax}/\psi_{t1} - 0.5 \rceil, i \in \mathbb{N}_k$
- 2) $H_i \leftarrow [h_1, h_2, \dots, h_k]/h_i, i \in \mathbb{N}_k$

iii) ω_{ij} 求解

- 1) If $\varphi_{Lmax} \leq \varphi_{Umin}$ then
- 2) If $\psi_{t1} \leq \varphi_{Lmax}$ then
- 3) $\omega_{i(j-1)} \leftarrow 0, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}$
- 4) $\omega_{in_i} \leftarrow (\varphi_{Lmax} - \psi_{t1})/k, i \in \mathbb{N}_k$
- 5) Else
- 6) If $\psi_{t1} \leq \varphi_{Umin}$ then
- 7) $\omega_{ij} \leq 0, i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i} \cup \{0\}$
- 8) Else
- 9) system cannot be scheduled
- 10) End If
- 11) End If
- 12) Else
- 13) If $\psi_{t1} \leq \varphi_{Lmax} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{Lmax} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i,$

$E = \{i \in \mathbb{N}_k, j \in \mathbb{N}_{n_i}, \varphi_{ijU} < \varphi_{Lmax}\}$

14) Then

15) $\omega_{i(j-1)} \leftarrow m_{ij} \times h_i \times \varphi_{Lmax} - (4\rho + 3\theta + \alpha_{ij} + \delta_{ij}), i, j \in E$

16) $\omega_{i(j-1)} \leftarrow 0, i, j \in F$

17) $\omega_{in_i} \leftarrow \{\varphi_{Lmax} - \sum_{i,j \in E} (\varphi_{Lmax} - \varphi_{ijU})m_{ij} \times h_i\}/k$
 $i \in \mathbb{N}_k$

18) Else

19) system cannot be scheduled

20) End If

21) End If

iv) 求解 ψ_i

1) $\psi_i \leftarrow 2(n_i + 1)(\rho + \theta) + \sum_{j=0}^{n_i}, i \in \mathbb{N}_k$

6 例子(Examples)

例 1 晶圆的混合加工模式为 $\{(1, 1), (2, 1)\}$, 其中晶圆产品A的加工参数为: $\alpha_{11} = 159$ s, $\delta_{11} = 26$ s, $\alpha_{12} = 168$ s, $\delta_{11} = 20$ s; 产品 B 的加工参数为: $\alpha_{21} = 379$ s, $\delta_{21} = 30$ s, $\alpha_{22} = 174$ s, $\delta_{22} = 15$ s. 机械手运动参数: $\rho = 12$ s, $\theta = 3$ s. 其中s为单位时间秒.

由已知条件可求得

$$\psi_{t1} = 2(4 + 2)(12 + 3) = 180 \text{ s}, \phi_{Lmax} = 216 \text{ s},$$

$$h_1 = \lceil \phi_{1Lmax}/\psi_{t1} - 0.5 \rceil = \lceil 225/180 - 0.5 \rceil = 1,$$

$$h_2 = \lceil \phi_{2Lmax}/\psi_{t1} - 0.5 \rceil = \lceil 231/180 - 0.5 \rceil = 1,$$

$$\varphi_{Umin} = 233 \text{ s}, \psi_{t1} < \phi_{Lmax} < \varphi_{Umin},$$

故系统可以调度. 稳态时, 进入设备的A, B两种晶圆产品的混合比为1:1. 通过上文所述调度算法求解系统稳态调度, 调度的甘特图如图4所示.

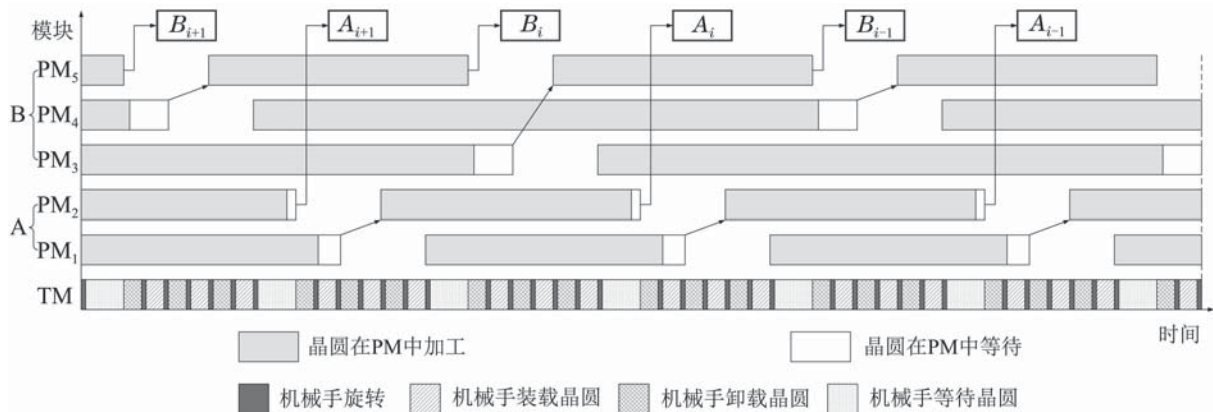


图 4 例1调度甘特图

Fig. 4 The Gantt chart of scheduling result for example 1

例2 晶圆混合加工模式为 $\{(1), (1, 1), (1, 1)\}$, 其中产品A的加工参数为 $\alpha_{11} = 120$ s, $\delta_{11} = 15$ s;

产品B的加工参数为

$$\alpha_{21} = 280 \text{ s}, \delta_{21} = 20 \text{ s},$$

$$\alpha_{22} = 258 \text{ s}, \delta_{22} = 28 \text{ s};$$

产品C的加工参数为

$$\alpha_{31} = 424 \text{ s}, \delta_{31} = 27 \text{ s},$$

$$\alpha_{32} = 436 \text{ s}, \delta_{32} = 24 \text{ s};$$

机械手运动参数为

$$\rho = 8 \text{ s}, \theta = 2 \text{ s}.$$

由已知条件可求得

$$\psi_{t1} = 2(5 + 3)(8 + 2) = 160 \text{ s},$$

$$h_1 = \lceil \phi_{1L \max} / \psi_{t1} - 0.5 \rceil = \lceil 158 / 160 - 0.5 \rceil = 1,$$

$$h_2 = \lceil \phi_{2L \max} / \psi_{t1} - 0.5 \rceil = \lceil 296 / 160 - 0.5 \rceil = 2,$$

$$h_3 = \lceil \phi_{1L \max} / \psi_{t1} - 0.5 \rceil = \lceil 462 / 160 - 0.5 \rceil = 3,$$

$$\phi_{L \max} = 159 \text{ s}, \phi_{U \min} = 162 \text{ s},$$

$$\phi_{L \max} < \psi_{t1} < \phi_{U \min},$$

故系统可以调度. 稳态时, 进入设备的晶圆产品A, B, C混合比例为6: 3: 2. 通过上文所述调度算法求解系统稳态调度, 调度甘特图如图5所示.

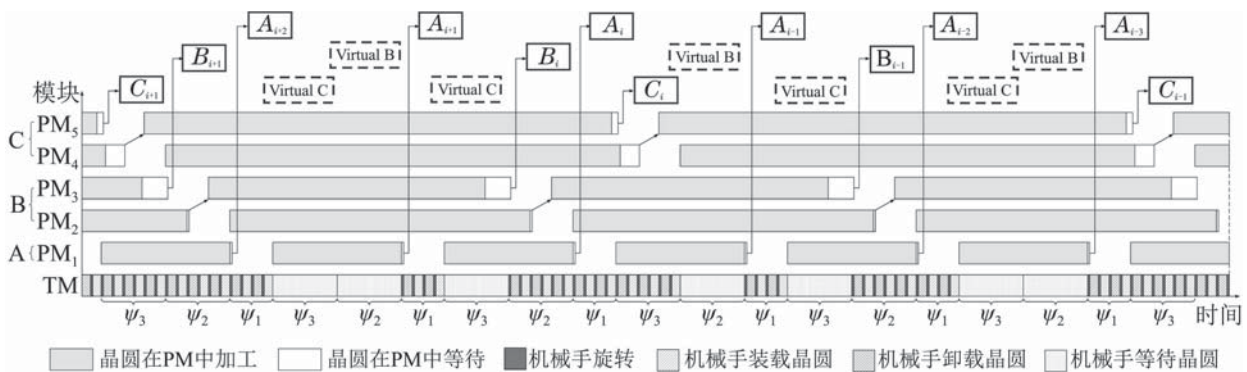


图5 例2调度甘特图

Fig. 5 The Gantt chart of scheduling result for Example 2

7 结论(Conclusions)

随着晶圆制造呈多批次、小批量的趋势, 晶圆产品的频繁切换, 使组合设备调试时间大幅度增加. 因此, 研究多品种晶圆混合加工的组合设备调度问题具有重要意义. 本文研究无共享PM多品种晶圆混合加工的单臂组合设备问题, 采用ROPN模型描述晶圆混合加工过程, 通过调节机械手的等待时间和虚拟加工的方法, 系统的工作负载实现平衡. 基于ROPN模型和加工时间的分析, 推导出系统可调度性判定条件, 并提出无PM共享多品种晶圆混合加工的单臂组合设备稳态调度的求解算法. 采用晶圆加工算例进行验证, 结果表明调度算法的有效性和可行性. 对于调度方案的最优性和作业时间波动条件下多品种晶圆混合加工的调度问题将是下一步的研究工作.

参考文献(References):

[1] LEE T E. A review of scheduling theory and methods for semiconductor manufacturing cluster tools [C] // *Proceedings of the 40th Conference on Winter Simulation*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 2127 – 2135.
 [2] 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.
 [3] PERKINSON T L, GYURCSIK R S, MCLARTY P K. Single-wafer cluster tool performance: an analysis of the effects of redundant chambers and revisitation sequences on throughput [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1996, 9(3): 384 – 400.
 [4] 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.
 [5] PAN Chunrong, WU Naiqi. Scheduling of cluster tools in wafer fabrication [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(3): 522 – 528.
 (潘春荣, 伍乃骐. 晶圆制造自动化组合设备的调度问题研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(3): 522 – 528.)
 [6] KIM J H. Stable schedule for a single-armed cluster tool with time constraints [C] // *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Piscataway, USA: IEEE, 2008: 97 – 102.
 [7] 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 [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, 21(2): 224 – 237.
 [8] KIM J H, LEE T E. 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.
 [9] QIAO Y, WU N Q, ZHOU M C. Petri net modeling and wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with residency time con-

- straints and activity time variation [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2012, 25(3): 432 – 446.
- [10] 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 [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, 9(3): 564 – 577.
- [11] PAN C R, QIAO Y, WU N Q. A novel algorithm for wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with wafer residency time constraints and activity time variation [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 45(5): 805 – 818.
- [12] YAO X D, FERNÁNDEZ-GAUCHERAND E, FU M C, et al. Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, 17(3): 345 – 356.
- [13] PAN Chunrong, WU Naiqi. Failure response policy for cluster tools with parallel processing module [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16(4): 887 – 895.
(潘春荣, 伍乃骐. 具有并行加工模块的组合设备故障响应策略 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 887 – 895.)
- [14] QIAO Y, WU N Q, PAN C R, et al. How to respond to process module failure in residency time-constrained single-arm cluster tools [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2014, 27(4): 462 – 474.
- [15] QIAO Y, PAN C R, WU N Q, et al. Response policies to process module failure in single-arm cluster tools subject to wafer residency time constraints [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 12(3): 1125 – 1139.
- [16] ZUBEREK W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using timed Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, 17(3): 333 – 344.
- [17] LEE H Y, LEE T E. Scheduling single-armed cluster tools with reentrant wafer flows [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, 19(2): 226 – 240.
- [18] LI Xin, ZHOU Binghai, LU Zhiqiang. Scheduling algorithm for cluster tools of wafer fabrications based on events-driven [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2009, 43(6): 898 – 901.
(李鑫, 周炳海, 陆志强. 基于事件驱动的集束型晶圆制造设备调度算法 [J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 898 – 901.)
- [19] CHEN Jia, ZHOU Binghai. Scheduling algorithm for cluster tools with residency and reentrant constraints [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(12): 2267 – 2673.
(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): 2267 – 2673.)
- [20] 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 [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(1): 42 – 55.
- [21] JIN H Y, MORRISON J R. Transient scheduling of single armed cluster tools: algorithms for wafer residency constraints [C] // *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 868 – 873.
- [22] KIM D K, LEE T E, KIM H J. Optimal scheduling of transient cycles for single-armed cluster tools [C] // *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 874 – 879.
- [23] 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 [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, 28(2): 160 – 170.
- [24] PAN Chunrong, WU Naiqi. Modeling and analysis of start-up transient processes of dual-arm cluster tools with wafer revisiting [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(8): 2072 – 2078.
(潘春荣, 伍乃骐. 组合设备重入加工的初始暂态的建模和分析 [J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(8): 2072 – 2078.)
- [25] PAN Chunrong, LI Liang. Scheduling and analysis of final transient process for cluster tools with wafer revisiting [J]. *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 [J]. 控制理论与应用, 2015, 32(5): 655 – 664.)
- [26] KIM H J, LEE J H, JUNG C, et al. Scheduling cluster tools with ready time constraints for consecutive small lots [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, 10(1): 145 – 159.
- [27] LEE J H, KIM H J, LEE T E. Scheduling lot switching operations for cluster tools [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, 26(4): 592 – 601.
- [28] LEE J H, KIM H J, LEE T E. Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(2): 525 – 536.
- [29] LEE J H, KIM H J, LEE T E. Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types with PM sharing [J]. *International Journal of Production Research*, 2015, 53(19): 6007 – 6022.
- [30] WU N Q, ZHOU M C. *System Modeling and Control with Resource-Oriented Petri Nets* [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.

作者简介:

潘春荣 (1973–), 男, 副教授, 硕士生导师, 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;

王际鹏 (1987–), 男, 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: wjp374779676@163.com.