

晶圆重入加工的组合设备终止暂态的调度与分析

潘春荣[†], 黎 良

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 晶圆重入是半导体组合设备加工中典型的复杂加工工艺, 分析和优化暂态加工过程对于晶圆重入加工具有重要意义. 为了满足加工需求和提高组合设备的加工性能, 基于稳态重入加工的双臂组合设备Petri网模型和1-晶圆周期调度策略, 采用虚拟晶圆的加工模式分析了系统的终止暂态过程, 讨论了系统终止暂态的加工时间分布, 并给出相应的解析式进行描述. 利用eM-Plant仿真平台建立了重入加工的双臂组合设备终止暂态的仿真模型, 并用例子验证了1-晶圆周期调度的可行性及解析式的有效性, 为研究晶圆重入加工过程的优化提供了有效方法和手段.

关键词: 晶圆制造; 组合设备; 重入加工; Petri网; 建模; 调度; 仿真

中图分类号: TP278; TP391.9

文献标识码: A

Scheduling and analysis of final transient process for cluster tools with wafer revisiting

PAN Chun-rong[†], LI Liang

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

Abstract: For some semiconductor fabrication processes in cluster tools, wafer revisiting is a typical and complicate process. Analysis and optimization of the transient process is of great significance for wafer processing. Based on the Petri net and 1-wafer cyclic schedule, in order to meet processing requirements and improve processing performance of cluster tools, the final transient process for dual-arm cluster tools with wafer revisiting is analyzed by using virtual wafer processing mode. Then, the processing time of final transient process in different conditions is described by some expressions. For final transient process with wafer revisiting to be analyzed more intuitively, a simulation model is developed by using eM-Plant as a simulation platform. With this model, illustrative examples are given to show the feasibility of 1-wafer cyclic schedule and effectiveness of the expressions. Thus, the simulation model provides an effective tool for researchers to study the optimization of wafer fabrication with revisiting.

Key words: wafer fabrication; cluster tools; revisiting; Petri net; modeling; scheduling; simulation

1 引言(Introduction)

晶圆制造属于技术、资金密集型产业, 其制造过程非常复杂, 且生产过程有许多异于传统制造过程的工艺特性^[1]. 随着晶圆直径不断增大, 加工工艺也越来越复杂, 传统的批量加工技术难以满足蚀刻、化学气相沉积和快速高温加工等加工工艺的要求. 因此, 为保证高效率、高质量和低成本的制造要求, 大直径晶圆广泛地采用自动化组合设备(cluster tools)进行加工^[2-3], 其单晶圆片加工技术有效地提高了晶圆的生产率和成品率^[4-5].

为了组合设备的有效运行, 国内外学者对组合设备进行了广泛研究^[6-9], 主要是针对组合设备的建模和生产率进行分析, 提出了有效的建模方法及提高生

产率的方法. 同时, 通过研究表明组合设备稳态运行分为两种不同的加工过程: 加工临界和传输临界. 由于加工模块的作业受机械手作业的影响, 所以组合设备调度和控制的关键是对机械手作业进行调度. 对于组合设备来说, 机械手在加工模块之间的旋转时间可认为是一个常量, 并且相对于晶圆的加工时间较短^[10], 因此, 机械手调度较为复杂. 按照机械手的类型, 组合设备可分为单臂型和双臂型, 其调度具有不同的加工策略. 文献[11]指出拉式调度策略对于单臂组合设备是最优的. 对于双臂组合设备, 采用交换策略(swap strategy)是一个有效的调度策略^[12], 原因是该策略简化了机械手的作业并缩短了生产周期.

组合设备的晶圆加工常常出现重入加工过程, 例

的ALD的加工过程可以表示为 $(m_1, (m_2, m_3)^k)$, 其中 m_1, m_2 和 m_3 分别表示第1, 第2和第3道工序的加工模块数量, 重入可以包含一道或多道工序, 如图2所示. 鉴于两道工序之间或多道工序间的重入加工过程的研究有异曲同工之处, 因此, 本文只讨论具有代表性的两道工序的重入加工, 而且每道工序的加工模块数量都为1的情况, 即 $m_1 = m_2 = m_3 = 1$, 故ALD重入加工的流程模式为 $(1, (1, 1)^k)$.

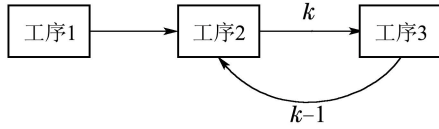


图2 ALD晶圆重入加工流程

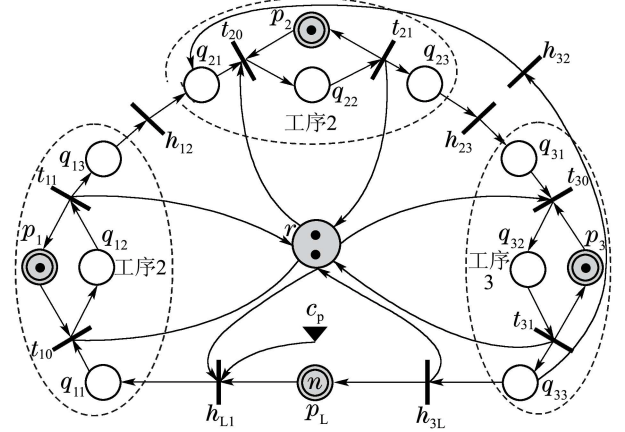
Fig. 2 Wafer follow for the ALD process

3.2 系统Petri网建模(Petri net modeling)

在组合设备中, 机械手和加工模块是有限的制造资源, 而且受时间的约束. 用赋时Petri网(timed Petri net, TPN)模拟制造系统能直观、方便地处理晶圆加工的并行、异步事件及各工序的逻辑关系^[7,9], 并能根据调度的需求判定机械手是否需要等待及等待多长时间, 从而满足不同的晶圆产品的加工需求. 一个赋时Petri网可以表示为 $PN = (P, T, I, O, M, K)$, 其中 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ 和 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 分别代表有限库所和变迁的集合, 满足 $P \cup T \neq \emptyset, P \cap T = \emptyset$; $I: P \times T \rightarrow N = (0, 1, 2, \dots)$ 为输入函数, $O: P \times T \rightarrow N$ 为输出函数; $M: P \rightarrow N$ 称为标识(marking), 表示 P 中令牌(token)的数量和分布, M_0 为系统的初始标识; $K: P \rightarrow (1, 2, 3, \dots)$ 称为容量函数, $K(p)$ 表示 $p \in P$ 的最大容量. 变迁的输入库所集定义为 $\bullet t = \{p: p \in P, I(p, t) > 0\}$, 其输出库所集则用 $t \bullet = \{p: p \in P, O(p, t) > 0\}$ 来表示. 如果 $M(p) \geq I(p, t)$, $K(p) \geq M(p) - I(p, t) + O(p, t)$, 则变迁 t 是使能的, 当变迁 t 触发后产生新的标识 $M'(p) = M(p) - I(p, t) + O(p, t)$. 由此可知, 只有当 $t \bullet$ 中所有的库所具有足够的空间, 且 $\bullet t$ 中所有库所具有足够的令牌, t 才能触发^[4,21].

文献[18]采用Petri网对晶圆重入加工流程模式 $(1, (1, 1)^k)$ 的双臂组合设备进行建模, 如图3所示, 用 r 表示双臂的机械手, 真空锁用 p_L 表示, 它可以容纳待加工的晶圆, 故 $K(p_L) = \infty$. 在每道工序中只有一个加工模块, 可用库所 p_i 表示工序 i 的加工模块, $i \in N_3 = (1, 2, 3)$, $K(p_i) = 1$. 双臂机械手同一时间最多能夹持两枚晶圆, 故 $K(r) = 2$. 在组合设备运行时, 根据系统调度的需要, 机械手在 p_i 中交换前、中、后期具有一个等待时间, 因此, 在PN模型中加入库所 q_{i1}, q_{i3} 来描述机械手在 p_i 中交换前、后的等待状态, 且 $K(q_{i1}) = K(q_{i3}) = 1$, 库所 q_{i2} 则表示机械手在 p_i 中交换时双

臂同时夹持一枚晶圆的等待状态, $K(q_{i2}) = 2$. 当 $M(q_{i3}) = 1$ 且 $M(r) = 1$ 时, 触发变迁 h_{L1} , 一个令牌进入 q_{i1} , 同时一个令牌从库所 r 中移出, 此时系统可能发生死锁. 为了避免系统死锁, 加入控制库所 c_p 作为变迁 h_{L1} 的输入库所^[22]. 令 u 为 c_p 的控制函数, 若 $u(c_p) = 1$, 变迁 h_{L1} 可以触发, 否则不可以触发. 因此, 规定当 $M(q_{i1}) = 0$ 且 $M(q_{i3}) = 0$ 时, $u(c_p) = 1$; 其他情况下, $u(c_p) = 0$ ^[18].

图3 晶圆流程模式 $(1, (1, 1)^k)$ 的PN模型Fig. 3 PN model for wafer follow pattern $(1, (1, 1)^k)$

在PN模型中, 时间变迁 h_{L1} 用来模拟机械手从真空锁卸载一枚晶圆至 p_1 , 变迁 h_{12}, h_{23} 分别模拟机械手从 $p_1 \rightarrow p_2$ 和 $p_2 \rightarrow p_3$, h_{3L} 代表机械手夹持一枚已加工完成的晶圆从 p_3 移至 p_L . 由ALD重入加工过程 $(1, 1)^k$ 可知, 重入工序为 p_2 和 p_3 , 因此, 变迁 h_{32} 表示机械手夹持晶圆从 $p_3 \rightarrow p_2$, 变迁 t_{i0} 和 t_{i1} 表示机械手在 p_i 中交换, $i \in N_3$, t_{i0} 表示从 p_i 中卸载一枚晶圆, t_{i1} 表示装载一枚未加工的晶圆至 p_i . 由于 q_{33} 可触发变迁 h_{3L} 或 h_{32} , 导致系统资源的冲突. 用 W_d 表示一个令牌, $W_d(q)$ 代表第 d 枚晶圆在第 q 道工序加工. 至此, 上述Petri网模型描述了晶圆重入加工过程的逻辑关系.

4 具有晶圆重入加工的双臂组合设备终止暂态分析(Analysis of final transient process for dual-arm cluster tools with wafer revisit)

4.1 1-晶圆周期调度(1-wafer cyclic schedule)

令 $Z_f = W_d(q)$, $f \in (1, \dots, 4)$, 则系统的加工状态可用标识 $M = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4\}$ 来表示. 如系统的状态 $M = \{W_3(1), W_1(4), W_2(3), W_4(1)\}$ 代表第1, 2, 3枚晶圆分别在PM2, PM3, PM1中加工其第4道, 第3道和第1道工序, 而机械手夹持第4枚晶圆准备加工第1道工序. 为了优化系统的加工周期, 文献[18]采用改进的交换策略(MSBS)使系统从状态 $M_1 = \{W_3(1), W_1(4), W_2(3), W_4(1)\}$ 开始加工, 其中: 晶圆 $W_2(3)$ 是首次进入加工模块PM3, $W_1(4)$ 是第2次进入加工

模块PM2. 通过触发机械手作业序列 $\sigma_1 = \{s_1 \rightarrow h_{12} \rightarrow s_2 \rightarrow h_{23}\}$, 使 $M_1 \rightarrow M_2 = \{W_4(1), W_3(2), W_2(3), W_1(5)\}$, 触发 $\sigma_2 = \{s_3 \rightarrow h_{32} \rightarrow s_2 \rightarrow h_{23}\}$ 和 $\sigma_3 = \{s_3 \rightarrow h_{3L} \rightarrow h_{L1}\}$, 使 $M_2 \rightarrow M_3 = \{W_4(1), W_2(4), W_1(5), W_3(3)\} \rightarrow M_4 = \{W_4(1), W_2(4), W_3(3), W_5(1)\}$, 其中 s_i 表示机械手在 p_i 中交换(即卸载 $\rightarrow$ 旋转 $\rightarrow$ 装载). 由此可知 σ_2 形成一个局部循环, 而 σ_1 和 σ_3 形成一个全局循环. 因此, 在 $M_1 \rightarrow M_4$ 这个周期内共包含一个局部循环和一个全局循环, 且一枚晶圆从 p_L 中卸载, 而另一枚加工好的晶圆立即返回到

p_L , 由此表明在双臂组合设备ALD工艺实现了1-晶圆周期调度.

4.2 终止暂态加工过程分析(Analysis of final transient process)

对于晶圆流程模式 $(1, (1, 1)^2)$, 终止暂态是指系统拥有3枚晶圆处于加工状态且真空锁中没有待加工的晶圆, 直至该3枚晶圆全部完成加工的一个过程. 为此, 本文采取基于1-晶圆周期调度的虚拟晶圆 W_0 的方法来完成终止暂态的调度, 单位周期内的系统状态 $M_1 \rightarrow M_4$ 变化图如图4所示.

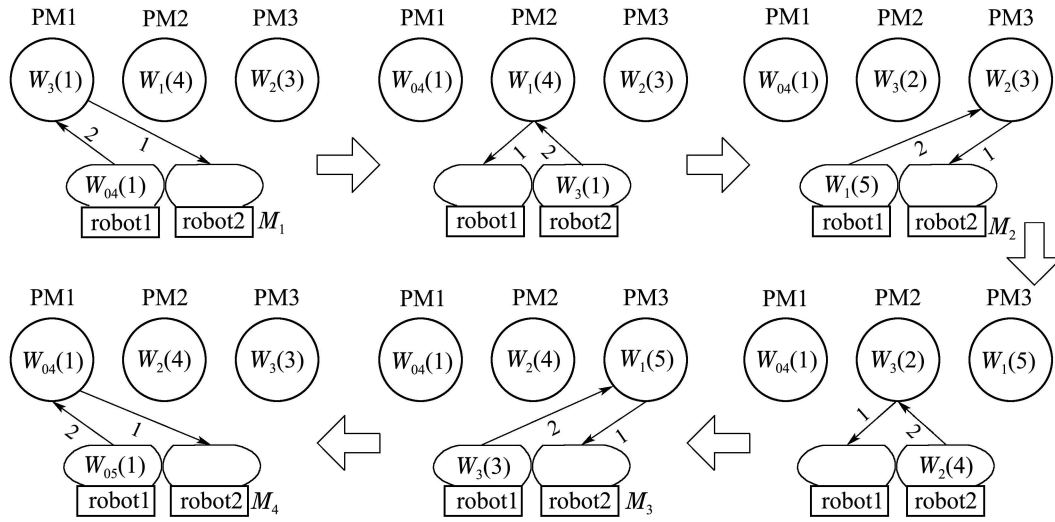


图4 系统状态的变化图

Fig. 4 Evolution of the system state

相应的机械手运动如下: 从 p_L 卸载一个待加工的晶圆 $W_{04}(1) \rightarrow$ 旋转至 $p_1 \rightarrow$ 等待 p_1 中的晶圆 $W_3(1)$ 完成加工 $\rightarrow$ 在 p_1 处交换, 将晶圆 $W_{04}(1)$ 载入 $p_1 \rightarrow$ 旋转至 $p_2 \rightarrow$ 等待 p_2 中的晶圆 $W_1(4)$ 完成加工 $\rightarrow$ 在 p_2 处交换, 将晶圆 $W_3(1)$ 载入 $p_2 \rightarrow$ 旋转至 $p_3 \rightarrow$ 等待 p_3 中的晶圆 $W_2(3)$ 完成加工 $\rightarrow$ 在 p_3 处交换, 将晶圆 $W_1(4)$ 载入 $p_3 \rightarrow$ 旋转至 $p_2 \rightarrow$ 等待 p_2 中的晶圆 $W_3(2)$ 完成加工 $\rightarrow$ 在 p_2 处交换, 将晶圆 $W_2(3)$ 载入 $p_2 \rightarrow$ 旋转至 $p_3 \rightarrow$ 等待 p_3 中的晶圆 $W_1(5)$ 完成加工 $\rightarrow$ 在 p_3 处交换, 将晶圆 $W_3(2)$ 载入 $p_3 \rightarrow$ 旋转至 p_L , 卸载已加工好的晶圆 $W_1(5) \rightarrow$ 从 p_L 卸载一个待加工的晶圆 $W_{05}(1) \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转至 p_L , 卸载已加工好的晶圆 $W_2(5) \rightarrow$ 从 p_L 卸载一个待加工的晶圆 $W_{06}(1) \rightarrow \dots \rightarrow$ 旋转至 p_L , 卸载已加工好的晶圆 $W_3(5)$. 因此, 经过连续3个加工周期后, 3个实体晶圆被移出 p_i , 系统的状态为 $M_0 = \{W_{06}(1), W_{04}(4), W_{05}(3), \emptyset\}$ (其中, $\emptyset$ 表示机械手臂为空闲状态), 即终止暂态加工过程结束, 系统回到空闲状态, 并准备下一批晶圆的加工.

4.3 终止暂态的加工时间分布(Time distribution of final transient process)

若不考虑机械手的等待时间, 由机械手的作业序列 $\sigma = \{h_{L1} \rightarrow s_1 \rightarrow h_{12} \rightarrow s_2 \rightarrow h_{23} \rightarrow s_3 \rightarrow h_{3L}\}$ 和 $\sigma_2 = \{s_3 \rightarrow h_{32} \rightarrow s_2 \rightarrow h_{23}\}$ 可知, 机械手在一个全局循环和一个局部循环中的作业时间分别为 $\psi_1 = \alpha + \beta + 3\lambda + 4\mu$ 和 $\psi_2 = 2\lambda + 2\mu$, 作业时间为 $\psi = \psi_1 + \psi_2 = \alpha + \beta + 5\lambda + 6\mu$, 其中: α 和 β 分别表示卸载和装载一枚晶圆的的时间, μ 表示机械手由 $p_i \rightarrow p_j$ 的旋转时间. 用 A_i, λ 分别表示晶圆在加工模块 p_i 中的加工时间和交换时间, 则在工序 i 中完成一枚晶圆加工的时间为 $\Pi_i = A_i + \lambda$. ξ_i^k 表示第 k 枚晶圆在 p_i 中加工后的延迟时间. 重入过程的加工周期为 $\Pi_{\text{local}} = \max\{\Pi_2, \Pi_3, \psi_2\}$, $\Pi_{1-\text{WC}}$ 表示系统采用1-晶圆周期调度的周期. 根据文献[18], 对于1-晶圆周期调度的单位周期内, p_3 的总延迟时间仅为 ξ_3^1 , 与3-晶圆周期的调度相比较少. 当 $\Pi_1 \leq \Pi_{\text{local}} + \psi_1$, $\Pi_3 > \Pi_2$ 时, $\Pi_{1-\text{WC}} = 2\Pi_{\text{local}} + \xi_3^1$. 若 $\Pi_3 \leq \Pi_2$, 只需用 ξ_2^1 代替 ξ_3^1 . 因此, 基于1-晶圆周期调度的重入

加工, 只需讨论 $\Pi_3 > \Pi_2$ 的情况, 得出以下性质^[18]:

性质 1 若 $\Pi_1 \leq \Pi_{\text{local}} + \psi_1$, $\Pi_3 > \Pi_2$, $\Pi_3 \leq \psi_1$, 则系统稳态的周期为

$$\Pi_{1-\text{WC}} = \begin{cases} \Pi_3 + \psi_1, & \Pi_3 \geq \psi_2, \\ \psi_2 + \psi_1, & \Pi_3 < \psi_2. \end{cases} \quad (1)$$

性质 2 若 $\Pi_1 \leq 2\Pi_{\text{local}}$, $\Pi_3 > \Pi_2$, $\Pi_3 > \psi_1$, 则系统稳态的周期为

$$\Pi_{1-\text{WC}} = 2\Pi_3. \quad (2)$$

性质 3 若 $\Pi_1 > 2\Pi_{\text{local}}$, $\Pi_3 > \Pi_2$, $\Pi_3 \geq \psi_1$, 则系统稳态的周期为

$$\Pi_{1-\text{WC}} = \Pi_1. \quad (3)$$

性质 4 若 $\Pi_1 > \Pi_{\text{local}} + \psi_1$, $\Pi_3 > \Pi_2$, $\Pi_3 < \psi_1$, 则系统稳态的周期为

$$\Pi_{1-\text{WC}} = \Pi_1. \quad (4)$$

因此, 上述确定了基于1-晶圆周期调度的稳态周期. 由于第1枚晶圆完成加工的时间不同, 终止暂态结束的时间有所不同, 而当系统达到稳态后, 另外两枚晶圆完成加工的时间都是周期性的, 故只需要对不同条件下第1枚晶圆完成加工的时间进行分析. 对于晶圆流程模式(1, (1, 1)²)可知, 晶圆在 p_1 中加工一次, 在 p_2 , p_3 中分别加工两次, 故令 ω_{i1}^k 表示晶圆在 p_i 中第 k 次交换前机械手的等待时间, 晶圆在 p_1 中交换前机械手的等待时间为 ω_{11} , 在 p_2 和 p_3 中交换前的等待时间为 ω_{21} (ω_{21}^1 和 ω_{21}^2), ω_{31} (ω_{31}^1 和 ω_{31}^2), 所以在第1枚实体晶圆加工期间, 机械手总等待时间为 $\omega = \sum_{i=1}^3 \omega_{i1}$. 因此, 经过分析基于1-晶圆周期调度的双臂组合设备终止暂态加工过程, 得出以下结论.

定理 1 若 $\Pi_2 \leq \psi_2$ 且 $\Pi_3 \leq \psi_2$, 终止暂态的加工时间为

$$\Phi = \begin{cases} \psi + 2\Pi_{1-\text{WC}}, & \lambda < \Pi_1 \leq \alpha + \mu + \lambda; \\ \Pi_1 + \beta + 4\lambda + 5\mu + 2\Pi_{1-\text{WC}}, & \alpha + \mu + \lambda < \Pi_1 \leq \Pi_{\text{local}} + \psi_1. \end{cases} \quad (5)$$

证 ① 开始加工时, 系统有3枚实体晶圆, 机械手从真空锁开始卸载第1枚虚拟晶圆, 并按工艺依次旋转、装载至各加工模块进行加工. 每个晶圆从开始加工到结束, 机械手的作业时间为 $\psi = \psi_1 + \psi_2$. 若 $\lambda < \Pi_1 \leq \alpha + \mu + \lambda$, $\Pi_2 \leq \psi_2$ 且 $\Pi_3 \leq \psi_2$, 则可知第1枚虚拟晶圆经过卸载、旋转到 p_1 时(花费时间 $\alpha + \mu$), p_1 的实体晶圆已经完成加工, 即 $\omega_{11} = 0$;

而当机械手第1次夹持晶圆旋转到 p_2 时, p_2 中的晶圆已经加工了 $\alpha + \lambda + 2\mu$ 个时间单位, 此时机械手在 p_2 中交换前也无需等待, 故 $\omega_{21}^1 = 0$, 同理根据时间的推算可得 $\omega_{21}^2 = \omega_{31}^1 = \omega_{31}^2 = 0$, 故第1枚实体晶圆加工期间, 机械手夹持晶圆在各加工模块中交换前都不需要等待, 第1枚实体晶圆加工时间即为机械手的作业时间 ψ . 因此, 在上述条件下, 可得组合设备在终止暂态阶段的加工时间 $\Phi = \psi + 2\Pi_{1-\text{WC}}$;
② 当 $\Pi_2 \leq \psi_2$, $\Pi_3 \leq \psi_2$ 且 $\alpha + \mu + \lambda < \Pi_1 \leq \Pi_{\text{local}} + \psi_1$ 时, 可知 $\omega_{11} = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda$, 同理根据时间的推算可得等待时间 $\omega_{21}^1 = \max\{\Pi_2 - \Pi_1 - \mu, 0\} = 0$, 因此, 可知机械手第1次在工序 p_3 中交换晶圆前所需要的等待时间为

$$\omega_{31}^1 = \max\{\Pi_3 - \Pi_1 - \psi_2, 0\} = 0,$$

$$\omega_{21}^2 = \max\{\Pi_2 - \psi_2, 0\} = 0,$$

$$\omega_{31}^2 = \max\{\Pi_3 - \psi_2, 0\} = 0,$$

故

$$\Phi = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda + \psi + 2\Pi_{1-\text{WC}} = \Pi_1 + \beta + 4\lambda + 5\mu + 2\Pi_{1-\text{WC}}.$$

因此, 定理1成立. 证毕.

通过定理1可知, 在 $\Pi_2 \leq \psi_2$ 且 $\Pi_3 \leq \psi_2$ 的情况下, 终止暂态的加工时间随着工序1的加工时间和机械手的作业时间的变化而变化. 一般情况下, 机械手的卸载和旋转时间可作为常量, 并且比晶圆的加工时间短^[10], 接下来讨论 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$ 的情况.

定理 2 若 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$, 且工序2的加工时间满足 $\psi_2 < \Pi_2 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, 终止暂态的加工时间为

$$\Phi = \begin{cases} \Pi_1 + \Pi_2 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 2\Pi_{1-\text{WC}}, & \Pi_3 < \Pi_2; \\ \Pi_1 + \Pi_3 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 2\Pi_{1-\text{WC}}, & \Pi_2 \leq \Pi_3 \leq \Pi_1 + \psi_2; \\ 2\Pi_3 + \beta + \mu + 2\Pi_{1-\text{WC}}, & \Pi_3 > \Pi_1 + \psi_2. \end{cases} \quad (6)$$

证 ① 若 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$, 机械手夹持第1枚虚拟晶圆在 p_1 中交换作业前的等待时间为常量 $\omega_{11} = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda$. 当机械手在 p_1 中交换晶圆后旋转至 p_2 时, $\omega_{21}^1 = \max\{\Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu, 0\}$, 若 $\psi_2 < \Pi_2 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, 则可知机械手第1次在 p_2 中交换前的等待时间 $\omega_{21}^1 = 0$. 当交换晶圆后旋转至 p_3 时, 便可得到 $\omega_{31}^1 = \max\{\Pi_3 - \Pi_1 - \psi_2, 0\}$, 若

$\Pi_3 < \Pi_2$, 可知机械手第1次在工序 p_3 中交换晶圆前需要的等待时间 $\omega_{31}^1 = 0$, 同理可以得到等待时间 $\omega_{21}^2 = \Pi_2 - \psi_2$, $\omega_{31}^2 = \max\{\Pi_3 - \Pi_2, 0\} = 0$, 故

$$\Phi = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda + \Pi_2 - \psi_2 + \psi + 2\Pi_{1-WC} = \Pi_1 + \Pi_2 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 2\Pi_{1-WC};$$

② 当 $\psi_2 < \Pi_2 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$ 且 $\Pi_2 \leq \Pi_3 \leq \Pi_1 + \psi_2$ 时, 与条件①的不同在于工序3的加工时间要大于工序2的加工时间, 故交换前的等待时间 $\omega_{31}^2 = \Pi_3 - \Pi_2$, 因此, $\Phi = \Pi_1 + \Pi_3 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 2\Pi_{1-WC}$; ③ 当 $\psi_2 < \Pi_2 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$ 且 $\Pi_3 > \Pi_1 + \psi_2$ 时, 可知在全局循环加工过程中,

$$\begin{aligned} \omega_{11} &= \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda, \\ \omega_{21}^1 &= \max\{\Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu, 0\} = 0, \\ \omega_{31}^1 &= \max\{\Pi_3 - \Pi_1 - \psi_2, 0\} = \Pi_3 - \Pi_1 - \psi_2, \end{aligned}$$

而在局部循环中, $\omega_{21}^2 = \max\{\Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3, 0\}$, 此时, 等待时间分为两种情况: 1) 若 $\Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3 \geq 0$, 则 $\omega_{21}^2 = \Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3$, $\omega_{31}^2 = 2\Pi_3 - \Pi_1 - \Pi_2 - \psi_2$, 可知 $\omega_{21}^2 + \omega_{31}^2 = \Pi_3 - \psi_2$; 2) 若 $\Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3 < 0$, 则 $\omega_{21}^2 = 0$, $\omega_{31}^2 = \Pi_3 - \psi_2$. 因此, 机械手第2次在工序 p_2 和工序 p_3 中交换晶圆前的总等待时间均为 $\Pi_3 - \psi_2$, 故 $\Phi = 2\Pi_3 - \alpha - 5\lambda - 5\mu + \psi + 2\Pi_{1-WC} = 2\Pi_3 + \beta + \mu + 2\Pi_{1-WC}$. 因此, 定理2成立.

证毕.

因此, 当 $\psi_2 < \Pi_2 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$ 时, 终止暂态的加工时间受限于工序3的加工时间 Π_3 . 当 $\Pi_3 < \Pi_2$ 时, $\Phi = \Pi_1 + \Pi_2 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 2\Pi_{1-WC}$; 而当 $\Pi_2 \leq \Pi_3 \leq \Pi_1 + \psi_2$ 时, 只需用 Π_3 代替 Π_2 即可得到系统终止暂态的加工时间; 当 $\Pi_3 > \Pi_1 + \psi_2$ 时, 用 Π_3 代替 Π_2 , $\Pi_3 - \psi_2$ 代替 Π_1 .

定理3 若 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$, $\Pi_2 \geq \Pi_1 + \lambda + \mu$, 终止暂态的加工时间为

$$\Phi = \begin{cases} 2\Pi_2 + \beta + \lambda + 2\mu + 2\Pi_{1-WC}, & \Pi_3 < \Pi_2; \\ \Pi_2 + \Pi_3 + \beta + \lambda + 2\mu + 2\Pi_{1-WC}, & \Pi_2 \leq \Pi_3 \leq \Pi_2 + \lambda + \mu; \\ 2\Pi_3 + \beta + \mu + 2\Pi_{1-WC}, & \Pi_3 > \Pi_2 + \lambda + \mu. \end{cases} \quad (7)$$

证 ① 由定理2可知, 当 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$ 时, 机械手在 p_1 中交换前的等待时间 $\omega_{11} = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda$, $\omega_{21}^1 = \max\{\Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu, 0\}$, 若 $\Pi_2 \geq \Pi_1 +$

$\lambda + \mu$, 则 $\omega_{21}^1 = \Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu$. 然而, 当 $\Pi_3 < \Pi_2$ 时, 交换前的等待时间

$$\begin{aligned} \omega_{31}^1 &= \max\{\Pi_3 - \Pi_2 - \lambda - \mu, 0\} = 0, \\ \omega_{21}^2 &= \max\{\Pi_2 - 2\lambda - 2\mu, 0\} = \Pi_2 - 2\lambda - 2\mu, \\ \omega_{31}^2 &= \max\{\Pi_3 - \Pi_2, 0\} = 0, \end{aligned}$$

因此, 可得机械手在 p_i 中的总等待时间 $\omega = 2\Pi_2 - \alpha - 4\lambda - 4\mu$, 故 $\Phi = \omega + \psi + 2\Pi_{1-WC} = 2\Pi_2 + \beta + \lambda + 2\mu + 2\Pi_{1-WC}$; ② 当 $\Pi_3 \leq \Pi_2 + \lambda + \mu$ 时, 得 $\omega_{11} = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda$, $\omega_{21}^1 = \Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu$, $\omega_{31}^1 = 0$, $\omega_{21}^2 = \Pi_2 - 2\lambda - 2\mu$, 前面已证. 但是, 当 $\Pi_2 \leq \Pi_3$ 时, 机械手交换晶圆前需要的等待时间 $\omega_{31}^2 = \max\{\Pi_3 - \Pi_2, 0\} = \Pi_3 - \Pi_2$, 所以 $\omega = \Pi_2 + \Pi_3 - \alpha - 4\lambda - 4\mu$, 故 $\Phi = \omega + \psi + 2\Pi_{1-WC} = \Pi_2 + \Pi_3 + \beta + \lambda + 2\mu + 2\Pi_{1-WC}$; ③ 若 $\Pi_2 \geq \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_3 > \Pi_2 + \lambda + \mu$ 且 $\Pi_1 > \alpha + \mu + \lambda$, 可知 $\omega_{11} = \Pi_1 - \alpha - \mu - \lambda$, $\omega_{21}^1 = \Pi_2 - \Pi_1 - \lambda - \mu$, 不同的是机械手夹持晶圆第1次在 p_3 中交换前需要等待, 即 $\omega_{31}^1 = \Pi_3 - \Pi_2 - \lambda - \mu$, 而且重入加工中, $\omega_{21}^2 = 2\Pi_2 - \Pi_3 - \lambda - \mu$, $\omega_{31}^2 = 2\Pi_3 - 2\Pi_2 - \lambda - \mu$, 因此, 机械手的总等待时间 $\omega = 2\Pi_3 - \alpha - 5\mu - 5\lambda$, 故 $\Phi = \omega + \psi + 2\Pi_{1-WC} = 2\Pi_3 + \beta + \mu + 2\Pi_{1-WC}$. 因此, 定理3成立. 证毕.

通过定理3可知, 当工序2的加工时间大于或等于 $\Pi_1 + \lambda + \mu$, 工序1的加工时间大于 $\alpha + \mu + \lambda$ 时, 终止暂态的加工时间不再受限于工序1的加工时间, 而是随着工序2和工序3的加工时间变化而变化. 当 $\Pi_3 < \Pi_2$ 时, $\Phi = 2\Pi_2 + \beta + \lambda + 2\mu + 2\Pi_{1-WC}$; 而当 $\Pi_2 \leq \Pi_3 \leq \Pi_2 + \lambda + \mu$ 时, 只需用 $\Pi_2 + \Pi_3$ 代替 $2\Pi_2$ 便可获得终止暂态加工时间的解析表达式; 当 $\Pi_3 > \Pi_2 + \lambda + \mu$ 时, 用 $2\Pi_3 - \lambda - \mu$ 代替 $2\Pi_2$.

上述内容分析了基于1-晶圆周期调度的晶圆流程模式(1, (1, 1)²)的双臂组合设备终止暂态阶段的加工时间分布情况, 可以看出, 对于双臂组合设备在不同的加工时间条件下, 可通过相应的解析式有效地求出终止暂态的加工时间.

5 双臂组合设备的仿真模型(A simulation model of dual-arm cluster tools)

文献[18]的PN模型可以描述一个离散事件系统的动态行为特征, 但组合设备的运行控制与调度是现场工程技术人员的日常工作, PN模型对于工程技术人员来说较抽象, 故针对组合设备调度可行性, 需要为工程技术人员提供一个易于理解、直观的图形化的仿真工具. eM-Plant是一种面向对象的、图形化

的建模和仿真工具,主要用于生产系统的建模与仿真.因此,本文基于PN模型和1-晶圆周期调度,采用eM-Plant对具有晶圆重入加工的双臂组合设备终止暂态过程进行建模和仿真,利用开发接口Method对事件的进程和对象属性的定义、参数的输入和输出控制等,最终实现复杂的生产系统和控制算法,获得终止暂态的加工时间,并验证系统调度的可行性.

5.1 模型框架(Model framework)

为实现系统的仿真,以具有代表性的重入加工晶圆流程模式(1, (1, 1)²)为例,通过将仿真系统的构件与Petri网中的资源和活动相对应,建立双臂组合设备系统的仿真模型,具体过程如下:

步骤1 设置对象及定义

在该模型中,采用加工对象SingleProc模拟3个加工模块PM1-PM3和机械手(robot1/2),用Source对象模拟真空锁LLA,表示待加工晶圆的投入;Drain对象模拟真空锁LLB,用来储存加工合格的晶圆产品。晶圆采用对象Entity表示,其中实体晶圆命名为Entity,虚拟晶圆命名为virtual。系统仿真过程的运行是通过在各Method对象编写的SimTalk程序来控制。双臂组合设备重入加工过程的仿真模型如图5所示。

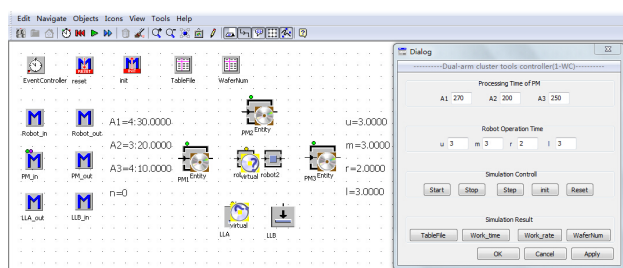
图 5 晶圆流程模式 $(1, (1, 1)^k)$ 的双臂组合设备仿真模型

Fig. 5 Simulation model of dual-arm cluster tools for wafer follow pattern $(1, (1, 1)^k)$

为了更好的控制重入加工机械手的运动, 定义一个外部变量 n (初始值为0), 当晶圆移动至PM2或真空锁LLB的前一步时, n 值自动加1, 实现控制变量. 在模型中加入重置对象reset和初始化对象init, 使系统自动删除所有对象的统计信息, 并将PM i 中的加工时间通过 A_i 表示. 为了缩短仿真过程, 模型中的真空锁LLA按照WaferNum表格中的内容, 生成3枚实体晶圆和3枚虚拟晶圆进入该仿真系统加工. TableFile表格用来记录每枚晶圆完成加工时的系统仿真时间及每枚晶圆的周期.

步骤2 参数化界面设计.

为了方便输入仿真参数,模型中采用eM-Plant中的对象Dialog和Method建立双臂组合设备的人机交互系统,如图5所示。同时采用方法autoexec实现系统自动进入人机界面^[23],其中:A1-A3表示为PM1-PM3的加工时间 A_i , u 为卸载时间 α , m 为旋转时间 μ , r 为双臂机械手自身旋转时间 $(\lambda - \alpha - \beta)$, l 为装载时间 β , s 为执行交换动作所需时间 λ 。通过向Dialog中输入相应时间参数就能控制晶圆的加工状态,实现仿真系统的参数化。

5.2 事件的触发与控制(Trigger and control of events)

eM-Plant的对象包括属性和事件,属性是对象的特性,事件是指对象的状态发生变化.由于组合设备是一种可重构的系统,晶圆流向并非固定的,有些需要重入加工.因此,在模型中需要通过开发Method对象来满足事件的触发,从而控制仿真模型的运行和状态变化.机械手的运动由晶圆进出各加工模块所触发的Method实现,其中,LLAout和LLBin分别控制机械手从真空锁中卸载和装载晶圆;PMin和PMout分别判断晶圆何时进出加工模块PM_i;Robotin和Robotout则分别实现晶圆何时装载至机械手,并将晶圆按工艺要求装载至相应的加工模块中进行加工.图6为终止暂态加工过程中机械手的控制策略.

为了使初始状态迅速过渡到稳态,假设初始状态的系统开始运行时, n 的值为0,3枚实体晶圆Entity依次进入加工模块PM2, PM3, PM1, 这样便形成虚拟稳态 $M = \{W_3(1), W_1(4), W_2(3), \Theta\}$. 当系统开始运行时, 首先判断系统是否达到稳态, 即在3个加工模块中是否有待加工的晶圆, 而判断加工模块内或机械手中是否有晶圆, 采用对象Single-Proc的属性occupied, empty进行查询^[19]. 若系统满足触发条件时, 机械手从一个加工模块旋转到另外一个模块或从真空锁旋转到加工模块的等待时间由wait语句控制. 当机械手旋转至相应的加工模块时, 需判断该加工模块内的晶圆是否加工完毕, 用Entity中的属性finished表示, .cont表示当前在模块中加工的晶圆. 若PM i 中晶圆未完成加工, 机械手需要等待其加工完成, 该操作由中断执行命令waituntil语句控制. 判断晶圆是否进行重入加工时, 由变量 n 来控制, $n = 2$ 时进入重入加工, $n = 3$ 时晶圆完成整个加工过程. 机械手卸载、旋转、装载晶圆的动作由move语句实现.

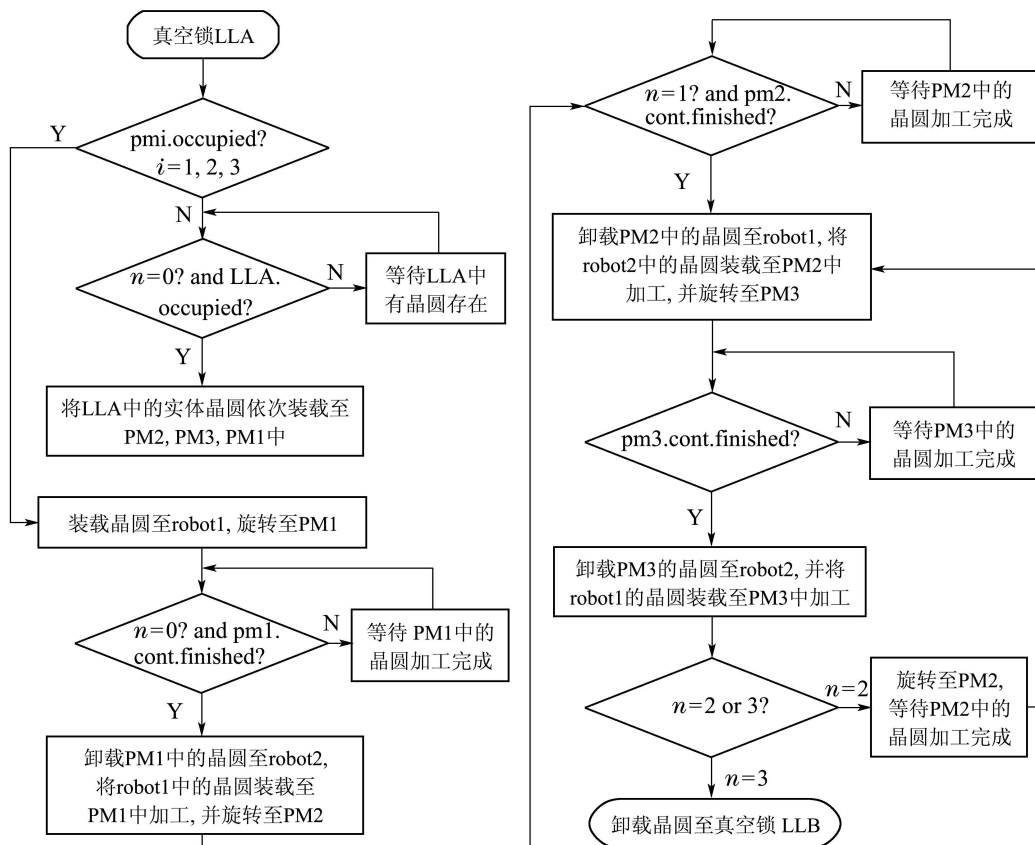


图6 机械手控制策略流程图

Fig. 6 Flow chart of manipulator control strategy

5.3 时间的模拟(Time simulation)

对于仿真模型的时间输入, 各加工模块的加工时间可由对象Singleproc的Processing time属性设置, 其值可反映到全局变量A1, A2, A3, 相应的Simtalk程序封装在init对象中. 机械手卸载、旋转、自身旋转、装载晶圆的的时间通过全局变量 u , m , r , l 设置. 由于不同的晶圆产品具有不同的加工时间, 因此, 模型制定了人机界面, 通过执行赋值程序可以快速实现时间的设置.

在Method中通过程序控制各模块的时间传送和机械手的作业, 并计算每枚晶圆加工完毕的时间及生产周期(其值为相邻两枚晶圆完成加工的系统仿真时间之差), 最后将仿真结果输入至TableFile表格. 晶圆开始加工时, 系统处于稳态过程, 那么在模拟终止暂态过程中, 除第1枚实体晶圆的周期是变化外, 其余实体晶圆的周期是等同的.

6 例子(Examples)

为了验证调度的可行性, 采用文献[18]中的加工参数进行仿真. 由于组合设备中机械手的作业时间一般是确定的, 在仿真中, 规定机械手卸载晶圆时间 α 、装载晶圆时间 β , 以及在各个模块之间的旋转时间 u 都为3 s. 机械手交换晶圆的的时间 $\lambda = 8$ s, 自身

旋转时间 $r = 2$ s. 因此, $\psi_1 = \alpha + \beta + 3\lambda + 4\mu = 42$ s, $\psi_2 = 2\lambda + 2\mu = 22$ s.

例1 工序1-3的加工时间分别为 $A1 = 270$ s, $A2 = 200$ s, $A3 = 250$ s.

通过建立的人机界面, 输入上述工序加工时间参数. 由参数可知 $\alpha + \mu + \lambda < \Pi_1 = 278 \leq 2\Pi_{\text{local}}$, $\Pi_{\text{local}} = \Pi_3 = 258$ s, $\psi_2 < \Pi_2 = 208 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_2 \leq \Pi_3 = 258 \leq \Pi_1 + \psi_2$, $\Pi_3 > \psi_1$, 因此, 根据上述条件, 采用式(2)和式(6)中的相关解析式可得 $\Phi = \Pi_1 + \Pi_3 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 4\Pi_3 = 1596$ s. 而通过模型的仿真时间图7可知, 第1枚晶圆的周期为9 min 24 s, 第2, 3枚晶圆的周期为8 min 36 s, 可以得到系统完成第3枚晶圆加工的时间为9 min 24 s + 8 min 36 s + 8 min 36 s = 26 min 36 s, 即系统终止暂态的加工时间 $\Phi = 1596$ s.

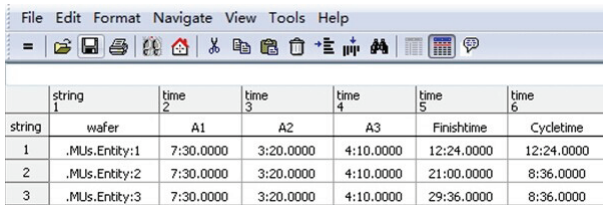
File Edit Format Navigate View Tools Help						
	string 1	time 2	time 3	time 4	time 5	time 6
string	wafer	A1	A2	A3	Finishtime	Cycletime
1	.MUs.Entity:1	4:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	9:24.0000	9:24.0000
2	.MUs.Entity:2	4:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	18:00.0000	8:36.0000
3	.MUs.Entity:3	4:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	26:36.0000	8:36.0000

图7 例1条件下的仿真时间

Fig. 7 Simulation time of Example 1

例2 工序1-3的加工时间分别为 $A1 = 450$ s, $A2 = 200$ s, $A3 = 250$ s.

在Dialog中输入上述工序加工时间参数. 由参数可得到 $\Pi_{\text{local}} + \psi_1 < \Pi_1 = 458 \leq 2\Pi_{\text{local}}$, $\Pi_{\text{local}} = \Pi_3 = 258 > \psi_1$, $\psi_2 < \Pi_2 = 208 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_2 \leq \Pi_3 = 258 \leq \Pi_1 + \psi_2$, 同理根据式(2)和式(6)可得 $\Phi = \Pi_1 + \Pi_3 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 4\Pi_3 = 1776$ s. 通过仿真模型可以得到系统完成第3枚晶圆加工的时间为29 min 36 s, 即系统终止暂态的加工时间 $\Phi = 1776$ s, 如图8所示.



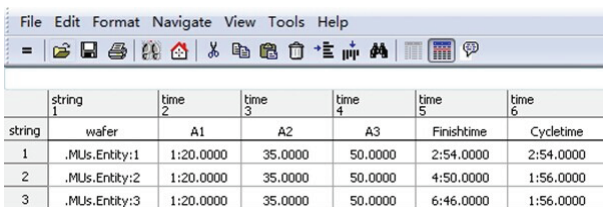
	string 1	time 2	time 3	time 4	time 5	time 6
string	wafer	A1	A2	A3	Finishtime	Cyclotime
1	.MUs.Entity:1	7:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	12:24.0000	12:24.0000
2	.MUs.Entity:2	7:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	21:00.0000	8:36.0000
3	.MUs.Entity:3	7:30.0000	3:20.0000	4:10.0000	29:36.0000	8:36.0000

图8 例2条件下的仿真时间

Fig. 8 Simulation time of Example 2

例3 工序1-3的加工时间分别为 $A1 = 80$ s, $A2 = 35$ s, $A3 = 50$ s.

由参数可知 $\Pi_{\text{local}} = \Pi_3 = 58 > \psi_1$, $\alpha + \mu + \lambda < \Pi_1 = 88 \leq 2\Pi_{\text{local}}$, $\psi_2 < \Pi_2 = 43 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_2 \leq \Pi_3 = 58 \leq \Pi_1 + \psi_2$, 同理根据式(2)和式(6)可得 $\Phi = \Pi_1 + \Pi_3 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 4\Pi_3 = 406$ s. 通过仿真模型可知系统完成第3枚晶圆加工的时间为6 min 46 s, 即系统终止暂态的加工时间 $\Phi = 406$ s, 如图9所示.



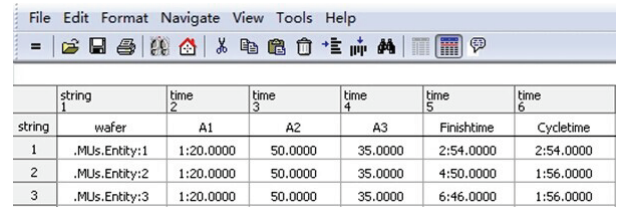
	string 1	time 2	time 3	time 4	time 5	time 6
string	wafer	A1	A2	A3	Finishtime	Cyclotime
1	.MUs.Entity:1	1:20.0000	35.0000	50.0000	2:54.0000	2:54.0000
2	.MUs.Entity:2	1:20.0000	35.0000	50.0000	4:50.0000	1:56.0000
3	.MUs.Entity:3	1:20.0000	35.0000	50.0000	6:46.0000	1:56.0000

图9 例3条件下的仿真时间

Fig. 9 Simulation time of Example 3

例4 工序1-3的加工时间分别为 $A1 = 80$ s, $A2 = 50$ s, $A3 = 35$ s.

由仿真参数可知 $\psi_2 < \Pi_2 = 58 < \Pi_1 + \lambda + \mu$, $\Pi_{\text{local}} = \Pi_2 = 58$ s, $\alpha + \mu + \lambda < \Pi_1 = 88 \leq 2\Pi_{\text{local}}$, $\psi_1 < \Pi_3 = 43 < \Pi_2$, 根据文献[18]的性质可知, 若 $\Pi_3 \leq \Pi_2$, 则 $\Pi_1\text{-WC} = 2\Pi_2$, 因此, 再结合式(6)可得 $\Phi = \Pi_1 + \Pi_2 + \beta + 2\lambda + 3\mu + 4\Pi_2 = 406$ s. 通过仿真模型可知系统完成第3枚晶圆加工的时间为6 min 46 s, 即系统终止暂态的加工时间 $\Phi = 406$ s, 如图10所示.



	string 1	time 2	time 3	time 4	time 5	time 6
string	wafer	A1	A2	A3	Finishtime	Cyclotime
1	.MUs.Entity:1	1:20.0000	50.0000	35.0000	2:54.0000	2:54.0000
2	.MUs.Entity:2	1:20.0000	50.0000	35.0000	4:50.0000	1:56.0000
3	.MUs.Entity:3	1:20.0000	50.0000	35.0000	6:46.0000	1:56.0000

图10 例4条件下的仿真时间

Fig. 10 Simulation time of Example 4

从上述例子及其仿真可以看出: 通过仿真得到的终止暂态的加工时间与解析表达式计算的结果一致, 说明该调度和仿真模型是正确的. 因此, 对于各道工序和机械手的任意加工时间和作业时间, 该仿真模型能够模拟终止暂态的加工时间, 并且比解析表达式的时间更直观. 对于重入次数 $k > 2$ 的晶圆流程模式 $(1, (1, 1)^k)$ 的终止暂态的控制过程将更加复杂, 目前还没有解析法分析终止暂态的优化控制问题, 但仿真是有一个有效的方法.

7 结论(Conclusions)

随着晶圆产品出现多批次、少批量的趋势, 组合设备的暂态加工过程的优化变得更为重要. 对于双臂组合设备而言, 1-晶圆周期调度为最优稳态调度. 因此, 本文基于1-晶圆周期调度对具有晶圆重入加工的双臂组合设备的终止暂态过程进行分析, 根据建立的Petri网模型得出了系统终止暂态加工时间的分布情况, 并采用解析式表示, 这为终止暂态的优化调度问题提供了研究基础. 为了更加直观的反映系统终止暂态的加工过程, 利用仿真平台eM-Plant建立了终止暂态过程的仿真模型, 最后, 通过例子获得了系统终止暂态的加工时间, 验证了调度的可行性和结论的正确性. 该仿真模型能弥补传统解析法的不足, 有助于研究复杂晶圆流程模式的重入加工过程.

通过对基于1-晶圆周期调度的终止暂态过程分析发现, 若采用虚拟晶圆的加工模式, 机械手不仅空载次数频繁, 而且执行交换作业前的等待时间较多, 这不利于提高终止暂态的加工效率. 因此, 需要对终止暂态的加工过程调度进行优化, 减少终止暂态的加工时间, 使系统能快速地切换至另一批晶圆产品的加工, 这将是下一步的研究工作.

参考文献(References):

- [1] PETER V Z. *Wafer Fabrication* [M]. 4th ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
(PETER V Z. 芯片制造 [M]. 第4版. 北京: 电子工业出版社, 2004.)
- [2] 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.

- [3] 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.
(PAN Chunrong, WU Naiqi. Scheduling of cluster tools in wafer fabrication [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(3): 522 – 528.)
- [4] 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 [J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(3): 320 – 325.
(BAI Liping, WU Naiqi. Modeling and analysis of cluster tool with revisiting in semiconductor manufacturing [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2005, 11(3): 320 – 325.)
- [5] 朱清华, 伍乃骐, 滕少华. 多组合设备的调度控制研究综述 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27(10): 1369 – 1375.
(ZHU Qinghua, WU Naiqi, TENG Shaohua. Survey of scheduling and control for multicluster tools [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(10): 1369 – 1375.)
- [6] 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.
- [7] ZUBEREK W M. Timed Petri nets in modeling and analysis of cluster tools [J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(5): 562 – 575.
- [8] 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 [J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(35): 222 – 225.
(ZHOU Binghai, PAN Qingzhi, WANG Shijin. Modeling and performance analysis using Petri nets for cluster tools [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2006, 42(35): 222 – 225.)
- [9] WU N Q, ZHOU M C. Colored timed Petri nets for modeling and analysis of cluster tools [J]. *Asian Journal Control*, 2010, 12(3): 253 – 266.
- [10] KIM J H, LEE T E, LEE H Y, et al. Scheduling analysis of timed-constrained dual-armed cluster tools [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, 16(3): 521 – 534.
- [11] LEE T E, LEE H Y, SHIN Y H. Workload balancing and scheduling of a single-armed cluster tool [C] // *Proceedings of the 5th Apiems Conference*. Gold Coast, Australia, 2004: 1 – 15.
- [12] VENKATESH S, DAVENPORT R, FOXHOVEN P, et al. A steady state throughput analysis of cluster tools: dual-blade versus single-blade robots [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1997, 10(4): 418 – 424.
- [13] 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.
- [14] 周炳海, 胡新宇, 孙超. 基于改进型多目标粒子群算法的晶圆制造系统瓶颈工作站调度 [J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2014, 35(1): 63 – 68.
(ZHOU Binghai, HU Xinyu, SUN Chao. Scheduling of bottleneck workstation in wafer fabrication systems based on improved multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2014, 35(1): 63 – 68.)
- [15] QIAO Y, WU N Q, ZHOU M C. Modeling and analysis of dual-arm cluster tools for wafer fabrication with revisiting [C] // *IEEE Conference on Automation Science and Engineering*. Trieste, Italy: IEEE, 2011: 90 – 95.
- [16] WU N Q, CHU F, CHU C B, et al. Petri net modeling and cycle-time analysis of dual-arm cluster tools with wafer revisiting [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, 43(1): 196 – 207.
- [17] WU N Q, ZHOU M C. A novel scheduling approach to dual-arm cluster tools with wafer revisiting [C] // *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. Seoul, Korea: IEEE, 2012: 1213 – 1218.
- [18] QIAO Y, WU N Q, ZHOU M C. A Petri net-based novel scheduling approach and its cycle time analysis for dual-arm cluster tools with wafer revisiting [J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, 26(1): 100 – 110.
- [19] 李飞, 伍乃骐. 虚拟晶圆制造双臂自动组合装置的实现 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(23): 2871 – 2875.
(LI Fei, WU Naiqi. A virtual dual-arm cluster tool in wafer fabrication [J]. *China Mechanical Engineering*, 2009, 20(23): 2871 – 2875.)
- [20] WU N Q, CHU F, CHU C B, et al. A novel approach to scheduling of single-arm cluster tools with wafer revisiting [C] // *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Bangalore, India: IEEE, 2009: 567 – 572.
- [21] 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.
- [22] HOLLOWAY L E, GUAN X Y, ZHANG L. A generalization of state avoidance policies for controlled Petri nets [J]. *IEEE Transactions on Automation Control*, 1996, 41(6): 804 – 816.
- [23] 潘春荣, 伍乃骐, 黄学佳. 基于eM-Plant的参数化虚拟组合设备 [J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(8): 1831 – 1840.
(PAN Chunrong, WU Naiqi, HUANG Xuejia. eM-Plant-based parameterization virtual cluster tool [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(8): 1831 – 1840.)

作者简介:

潘春荣 (1973–), 男, 博士, 副教授, 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;

黎良 (1989–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为自动制造系统的建模、优化调度与仿真, E-mail: taylorvic@126.com.