

面向单臂组合设备中紧急订单的调度

李金成, 潘春荣

江西理工大学机电工程学院, 江西 赣州 341000

基金项目: 国家自然科学基金(72161019); 江西省高等学校井冈学者特聘教授岗位资助项目

通信作者: 潘春荣, crpan@jxust.edu.cn 收稿/录用/修回: 2022-07-05/2022-10-26/2022-11-16

摘要

随着晶圆制造模式向多品种、小批量的转变, 在实际生产过程中频繁出现紧急订单插入的情况, 不合理的调度策略将降低组合设备生产效率。为了提高组合设备的生产柔性, 研究了在考虑晶圆逗留时间约束条件下, 单臂组合设备面对紧急插单时的调度问题。首先, 对紧急插单的加工过程进行分析, 提出针对单臂组合设备的机械手调度规则, 实现了加工过程的可调度性。其次, 对于因加工参数不同产生的两种加工状态, 分别推导出可调度性判断条件, 然后给出用于求解机械手等待时间的数学解析式。最后, 提出组合设备面对紧急插单时的最优调度算法, 并通过实例验证和对比分析的方法验证了该调度方法的有效性。

关键词

晶圆制造
组合设备
时间约束
紧急订单
中图法分类号: TP278
文献标识码: A

Scheduling of Single-armed Cluster Tools with Emergency Order Insertion

LI Jincheng, PAN Chunrong

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

Abstract

Urgent order insertion frequently occurs in the production process when the wafer manufacturing mode is changed to multi-variety and small batch. Such an unreasonable scheduling strategy reduces the production efficiency of cluster tools. Thus, in this study, we examine the scheduling problem of single-arm cluster tools faced with urgent order insertion under the constraints of wafer residence time so as to improve the production flexibility of cluster tools. For this, we first analyze the processing process of the urgent insertion order. Then, we propose the scheduling rules of the robot for single-arm cluster tools to realize the scheduling of the processing process. The schedulability judgment conditions are derived for two kinds of machining states caused by different machining parameters, respectively. Accordingly, the mathematical analytical formula for solving the waiting time of the robot is derived. Finally, an optimal scheduling algorithm is proposed for cluster tools in the face of urgent order insertion, and the effectiveness of the scheduling method is verified by an example and comparison analysis.

Keywords

semiconductor manufacturing;
cluster tool;
time constraint;
urgent order

0 引言

组合设备 (cluster tool) 是一种具有高柔性、可重构性的晶圆加工设备, 可以提高晶圆的生产率和良品率^[1], 目前被广泛应用于晶圆生产中。组合设备通常由 4~6 个加工模块 (processing model, PM)、真空锁 (load-lock, LL)、机械手、校准模块 (aligner, AL) 和冷却模块 (cooler, CL) 组成。这些模块集成在密闭真空环境中, 呈径向分布并通过计算机精准控制^[2]。根据机械手的结构差异可分为单臂组合设备和双臂组合设备, 如图 1 所示。

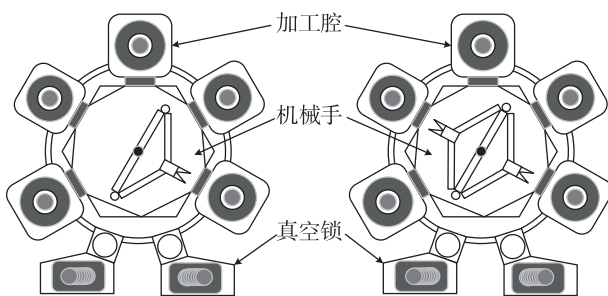


图 1 组合设备

Fig.1 Cluster tools

组合设备调度时受诸多约束条件的限制。如在实际生产中, 为防止晶圆受损影响质量, 晶圆在特定工序完成加工之后, 其停留在 PM 的时间存在严格限制, 这段时间称为晶圆逗留时间约束 (wafer residency time constraint, WRTC)^[3]。组合设备运行时还可能出现加工模块故障、腔室清洗和作业时间波动等多种情况^[4], 造成了组合设备调度的复杂性, 目前研究表明组合设备调度可以归类为 NP 难问题^[5]。

对于约束条件下的组合设备调度与控制问题, 学术界做了大量研究, 目前研究成果主要集中于加工单品种晶圆的稳态调度^[6-8]。在考虑多品种晶圆加工时, 文[9]针对两种晶圆在单、双臂组合设备加工时共享其中一个加工模块的情形, 分别提出了交替拉式策略 (alternating backward) 和交替交换策略 (alternating swap sequence), 并采用启发式调度算法, 使组合设备的晶圆加工周期得以缩短。为克服因共享加工腔室数量造成的局限性, 文[10]基于虚拟模块法和启发式调度算法, 首次提出多向拉式序列 (multiplex backward sequence), 增强了单臂组合设备加工具有复杂晶圆流模式的多品种晶圆调度算法的通用性。针对具有并行工序的多品种晶圆加工问题, 文[11]通过周期计划法, 解决了加工负载

平衡问题, 提高了加工腔室的利用率。在此基础上, 文[12]采用多路交换策略 (multiplex swap sequence) 和虚拟模块法, 平衡了非对称加工工序的工作负载, 并根据提出的调度算法, 实现了组合设备在加工多品种晶圆时稳定高效的周期调度。在实际生产中若出现紧急订单, 多品种晶圆加工方案可解决原有订单和紧急订单的同时加工的问题, 但不能有效缩短紧急订单完工时间, 导致交货周期延长。

近年来, 在晶圆生产过程中组合设备暂态加工频繁出现, 暂态调度受到学者的关注^[13], 且暂态调度为紧急插单的主要研究对象, 文[14]首次对特殊晶圆流模式下双臂组合设备的初始与终止暂态调度过程进行了优化。文[15]在此基础上开发出相应的线性规划模型, 缩短了单臂组合设备初始暂态调度时间。以上研究均未考虑实际生产中存在的逗留时间约束。文[16]在研究面对具有逗留时间约束下组合设备的批次切换问题, 采用 Petri 网描述小批次晶圆的加工过程与调度方式, 并使用线性规划模型求解出机械手最优等待时间, 解决了批次切换时组合设备的非周期调度问题。为完善调度规则, 文[17]根据上下两批次晶圆流模式不同 (difference in flow patterns, DFP) 提出了可避免死锁的调度策略, 基于组合设备机械手的不同分别建立了拉式和交换对于切换时的调度规则, 该调度规则可应对任何晶圆流模式, 减少在切换时的时间花费。在文[17]的基础上, 文[18]推导出组合设备在面对批次切换时最大完工时间表达式, 可更准确地估算完工时间, 进一步提高算法准确性。针对暂态与稳态间切换问题, 文[19]提出虚拟晶圆法。该方法的核心思想是在暂态调度时引入虚拟晶圆, 之后可将暂态加工过程视为若干次稳态周期调度, 使系统无需改变调度策略就可在暂态与稳态之间平稳切换。虽然该方法通用性强、求解简单, 但会导致机械手无效等待时间过长, 延长系统完工时间, 降低系统运行效率。在实际生产中晶圆加工是一个整体过程, 若只考虑批次之间的切换调度而忽略稳态加工过程, 则该方案缺少工程应用价值。

在现阶段研究成果基础上, 本文针对单臂组合设备在面对紧急订单时提出相应调度规则, 且基于线性规划和推导闭式解的方法, 获取系统最优方案的调度算法, 实现了考虑紧急订单插入加工情形下的单臂组合设备平稳且高效的运行。

1 调度分析与策略

在工业生产中根据产品的多样性和加工设备的差异性存在不同阶段的加工过程,首先了解本产品加工流程对调度至关重要。本文研究的组合设备对晶圆加工时,系统会依次经历以下3个阶段:

1) 初始暂态:组合设备开始加工前,所有模块处于空闲状态。机械臂取出存放在真空锁中第一片未加工的晶圆片进入系统加工时初始暂态开始,之后按照晶圆加工步骤依次进入加工模块进行加工,直至充满组合设备内全部所需加工腔室时初始暂态结束。这个过程称为初始暂态,且机械手活动时间不具有周期性。

2) 稳态:初始暂态后组合设备进入稳态,即组合设备所需加工腔室满负荷工作。此过程机械手活动时间具有周期性。

3) 终止暂态:当机械手从真空中取出最后一块未加工的晶圆进入组合设备时,系统进入终止暂态,直至最后一块晶圆完成最后一道工序的加工,并通过机械手重新装载回真空锁时,终止暂态结束。此过程机械手活动状态与1)类似,同样不具有周期性。

通过对传统加工流程的分析提出如图2所示的加工思路:首先将原有批次晶圆切换为紧急订单晶圆的插入阶段,其次完成插单晶圆的加工的稳态阶段,最后切换回原有批次晶圆,继续加工剩余晶圆的退出阶段。其中,前后两次切换为暂态加工过程。

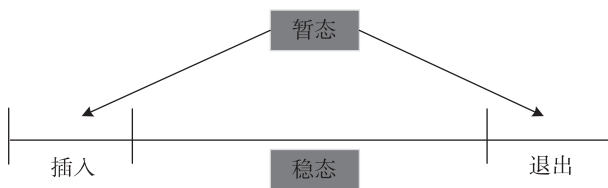


图2 紧急订单加工过程

Fig.2 Urgent order processing

整个加工过程分为插入-稳态-退出3个阶段。为方便各阶段周期表达,定义组合设备插入与退出的暂态加工过程为 M_{sr} ,稳态加工过程为 M_{s0} 。其中 $r \in N_n$, $N_n = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 为组合设备完成一轮加工腔室晶圆更新的循环操作。

在得出初步调度方案后,还需考虑在运行过程中会出现的其他问题。比如,在实际工业生产中待加工的晶圆由晶圆盒装载,并通过真空锁进入组合设备,一个晶圆盒通常装有25枚具有相同加工工

艺的晶圆。当其他种类晶圆要紧急加入组合设备进行加工时,因加工参数和约束条件的限制,容易发生机械手活动冲突。为避免系统发生死锁,现提出如下晶圆流程模式的差异(difference in flow patterns, DFP)概念^[17]:

定义1 在组合设备面对紧急订单插入过程中,DFP表示后批次晶圆所需延迟步骤总数。

DFP计算过程如式(1)所示, d_i^a 、 d_i^b 表示前后两批次晶圆加工流程中第 $i-1$ 和第 i 个共享加工腔室(包括第 i 个)之间的加工腔室数量,其中第0个共享加工腔室表示为真空锁。DFP表示因第共享加工模块致下一批次晶圆加工延迟的步骤数量。

$$\begin{cases} d_i = \max\{d_i^a - d_i^b, 0\}, i \in N_n \\ \text{DFP} = \sum_{i=1}^n d_i \end{cases} \quad (1)$$

基于调度思路和DFP避免死锁策略,针对以晶圆盒为单位的紧急订单晶圆插入加工时,稳态调度时同样可采用传统拉式策略^[14],但对于切换时的暂态过程稳态调度策略不再适用。为了确保系统从切换状态 M_{sr} 顺利过渡至稳态 M_{s0} ,提出适用于紧急插单时的机械手暂态调度规则。

定义2 机械手在工序 i 的基本活动集为 H_i , H_i 的活动组成为:移动至工序 $i-1$ →在工序 $i-1$ 处等待晶圆卸载→从工序 $i-1$ 处卸载晶圆并移动至工序 i →装载至工序 i , $i \in N_n$ 。

定义3 当系统处于切换状态时,定义活动集 $B_r(i_c)$ 为机械手在循环 r 时在晶圆批次 c 的工序 i 处执行活动集 H_i , $i \in N_n$, $r \in N_n$, $c \in (a, b)$ 。

基于传统拉式策略,提出切换暂态时调度策略:

在插入过程中, n_a 和 n_b 为原晶圆与紧急订单晶圆的工序数量,其中 $n \in N$ 。当 $r \in [1, \text{DFP}]$ 时,插单晶圆还未进入组合设备,系统中有原晶圆在加工。此时调度规则为: $B_1(n_a + 1) \rightarrow B_1(n_a) \rightarrow B_1(n_a - 1) \rightarrow \dots \rightarrow B_1(2_a) \rightarrow B_2(n_a + 1) \rightarrow B_2(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{\text{DFP}}(n_a + 1) \rightarrow B_{\text{DFP}}(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{\text{DFP}}(\text{DFP}_a + 1)$ 。

其中, n_a 表示 a 类晶圆的第 n 锅加工步骤。

当 $r \geq \text{DFP} + 1$ 时,紧急订单的晶圆进入组合设备,此时分为两种情形:

情形1 $n_a > n_b + \text{DFP}$ 。该情形表示紧急订单的晶圆刚到达稳态加工时,前一批次晶圆还未全部退出组合设备,此时机械手执行原有工作序列。当上一批次晶圆完全退出组合设备完成切换过程,此情形调度规则为:

$$1) B_{\text{DFP}+1}(n_a + 1) \rightarrow B_{\text{DFP}+1}(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{\text{DFP}+1}$$

$(DFP_a + 2) \rightarrow B_{DFP+1}(1_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+n_b}(n_a + 1) \rightarrow B_{DFP+n_b}(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+n_b}(DFP_a + n_b + 1) \rightarrow B_{DFP+n_b}(n_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+n_b}(1_b), r \in [DFP + 1, DFP + n_b];$

2) $B_{DFP+n_b+1}(n_a + 1) \rightarrow B_{DFP+n_b+1}(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+n_b+1}(DFP_a + n_b + 2) \rightarrow B_{DFP+n_b+1}(n_b + 1) \rightarrow B_{DFP+n_b+1}(n_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+n_b+1}(1_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_a}(n_a) \rightarrow B_{n_a}(n_b + 1) \rightarrow B_{n_a}(n_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_a}(1_b), r \in [DFP + n_b + 1, n_a + 1].$

情形 2 $n_a \leq n_b + DFP$ 。该情形表示紧急订单的晶圆还未到达稳态或刚到达稳态时, 上一批次的晶圆已经完全退出组合设备, 此时机械手继续执行作业任务, 当紧急订单的晶圆到达稳态时完成切换过程, 此情形调度规则为:

1) $B_{DFP+1}(n_a + 1) \rightarrow B_{DFP+1}(n_a) \rightarrow \dots \rightarrow B_{DFP+1}$

$(DFP_a + 2) \rightarrow B_{DFP+1}(1_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_a}(n_a + 1) \rightarrow B_{n_a}[(n_a - DFP - 1)_b] \rightarrow B_{n_a}[(n_a - DFP)_b] \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_a}(1_b), r \in [DFP + 1, n_a];$

2) $B_{n_a+1}[(n_a - DFP - 2)_b] \rightarrow B_{n_a+1}[(n_a - DFP - 1)_b] \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_a+1}(1_b) \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_b+DFP}(n_b) \rightarrow B_{n_b+DFP}(n_b - 1) \rightarrow \dots \rightarrow B_{n_b+DFP}(1_b), r \in [n_a + 1, DFP + n_b].$

对于该调度规则, 晶圆仍遵循先进先出原则 (first in first out, FIFO)。如图 3 所示, 原晶圆加工工序为 $LL_1 \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_2 \rightarrow PM_3 \rightarrow LL_2$, 紧急订单的加工工序为 $LL_1 \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_3 \rightarrow LL_2$ 。在第 $r = 1$ 轮循环时, 机械手根据调度规则移动到 PM_3 , 并逐个访问正在工作的加工腔室 PM_3 、 PM_2 和 PM_1 , 当机械手将 PM_1 中完成第一道工序的晶圆移动进 PM_2 时, 本次循环完成后开始第 2 轮循环。

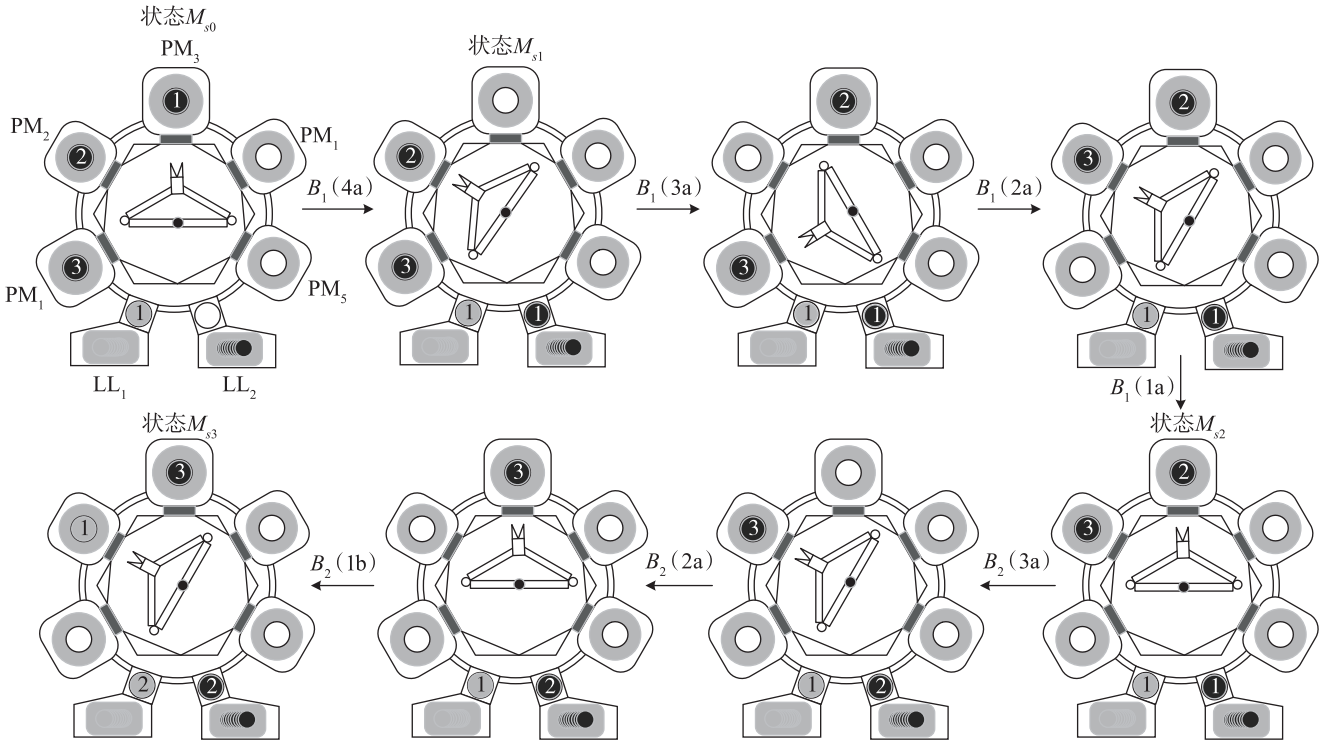


图 3 插入阶段组合设备循环示意图

Fig.3 Schematic diagram of cluster tools cycle in insertion stage

2 机械手时间建模与活动分析

2.1 作业时间建模

机械手活动规则可确保组合设备在面对紧急订单加工过程的顺利运行, 但却无法求解具体机械手活动时间。为了对切换暂态及周期稳态进行调度, 首先要对系统各类活动进行时间建模。

假设机械手每次的装载和卸载时间完全相同, 均表示为 λ , 机械手每次移动的时间较短, 认为机

械手在任意两模块之间旋转时间相等, 表示为 μ 。晶圆在 PM 内的加工时间, 为了满足逗留时间约束 $\tau_i \in [\alpha_i, \alpha_i + \beta_i], r, i \in N_n$ 其中 α_i 表示工序 i 的加工时间, β_i 表示晶圆在工序 i 处完成加工后可在腔室停留的最大时间。对机械手在开始和完成 r 轮循环第 i 道工序卸载和装载时刻分别用 $t(r, i, 1)$ 和 $t(r, i, 2), r, i \in N_n$ 表示。机械手在工序 i 处等待卸载晶圆的的时间表示为 ω_{ri} , 其中 $r, i \in N_n$ 。具体如表 1 所示。

表1 机械手活动时间及说明
Tab.1 Robot activity time and description

活动说明	时刻
机械手携带晶圆从工序 $i-1$ 移动至工序 $i, i \in N_n$	μ
机械手不携带晶圆从工序 $i-1$ 移动至工序 $i, i \in N_n$	μ
机械手卸载晶圆从工序 $i, i \in N_n$	λ
机械手装载晶圆至工序 $i, i \in N_n$	λ
机械手在工序 i 处等待 卸载晶圆 $i \in N_n$	$[0, \infty)$
完成第 i 道工序的晶圆装载	$t(r, i, 1), r, i \in N_n$
开始第 i 道工序的晶圆卸载	$t(r, i, 2), r, i \in N_n$
机械手在工序 i 处等待 卸载晶圆的的时间	$\omega_{ri}, r, i \in N_n$

2.2 机械手时间分析

组合设备加工紧急订单过程复杂,需对各阶段机械手活动时间进行分析,根据上文所提出的活动时间建模并参考文[19]分析可得,在组合设备稳态加工时机械手的周期时间为 $\psi = 2(n+1)(\mu + \lambda) + \sum_{i=1}^{n_b} \omega_{ri}^b = \psi_{1r} + \psi_{2r}, r=0$ 。此时 ψ_{1r} 为 $r=0$ 时机械手加工紧急订单晶圆在稳态时一个生产节拍所花费的时间。其中, ψ_{1r} 为已知, ψ_{2r} 由机械手调度决定。由于组合设备状态的不同 ψ_{1r} 也随之改变,组合设备无论处于切换还是稳态时,设备内正在工作的加工模块都处于串行连续的过程,因此组合设备要求每一道工序的生产节拍相等即 $\theta = \theta_1 = \theta_2 = \dots, \theta_n = \psi$, 上述为稳态下的 ψ_{1r} 。组合设备在切换状态时的 ψ_{1r} 如下所示:

当 $1 \leq r \leq \text{DFP}$ 时,此时下批次晶圆还未进入系统,设备内原有晶圆不断减少。此时,机械手作业时间为 $\psi_{1r} = 2(n_a/n_b - r + 1)(\mu + \lambda)$ 。

当 $r > \text{DFP}$ 时,下批次晶圆进入组合设备之后,因为晶圆流模式的不同, ψ_{1r} 分为两种情形:

I) 当 $n_a/n_b > n_b/n_a + \text{DFP}$ 时,会出现前一批次晶圆还未完全结束加工,后一批次晶圆已经处于稳态加工状态。此时,机械手工作分为共同加工两批次晶圆至后批次晶圆到达稳态与前批次晶圆完全退出两阶段,机械手作业时间为

$$\psi_{1r} = \begin{cases} 2(n_a/n_b - \text{DFP} + 1)(\mu + \lambda), & \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_b/n_a + \text{DFP} + 1 \\ 2(n_a/n_b + n_b/n_a - r + 2)(\mu + \lambda), & n_b/n_a + \text{DFP} + 2 \leq r \leq n_a/n_b \end{cases}$$

II) 当 $n_a/n_b \leq n_b/n_a + \text{DFP}$ 时,会出现前一批次晶圆已经全部卸载,后一批次晶圆还未处于稳态加工状态。此时,机械手工作分为共同加工两批次晶圆与单独加工紧急插单晶圆两阶段,机械手作业时间为

$$\psi_{1r} = \begin{cases} 2(n_a/n_b - \text{DFP} + 1)(\mu + \lambda), & \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_a/n_b \\ 2(r - \text{DFP})(\mu + \lambda), & n_a/n_b + 1 \leq r \leq n_b/n_a + \text{DFP} \end{cases}$$

晶圆逗留时间为晶圆开始进入某道工序的加工腔室到晶圆离开该加工腔室所花费的时间,该机械手经历一定的作业时间和等待时间。由于晶圆流模式的不同,机械手等待时间的表达式也不相同。下面列出不同情况的机械手等待时间的表达式。

当 $1 \leq r \leq \text{DFP}$ 时,通过上述描述和分析晶圆第 i 步的逗留时间为

$$\psi_{2r} = \sum_{j=r-1}^{i-2} \omega_{(r-1)j}^{a/b} + \sum_{j=1}^{n_a/n_b} \omega_{ij}^{a/b}, r \leq i \leq n_a/n_b$$

当 $\text{DFP} + 1 \leq r \leq n_a/n_b$ 时,对于前后两批次晶圆在第 i 步的逗留时间分别为

$$\psi_{2r} = \begin{cases} \sum_{j=r-1}^{i-2} \omega_{(r-1)j}^{a/b} + \sum_{j=1}^{n_a/n_b} \omega_{ij}^{a/b} + \sum_{j=0}^{r-\text{DFP}-2} \omega_{(r-1)j}^{a/b}, & r \leq i \leq n_a/n_b \\ \sum_{j=0}^{i-2} \omega_{(r-1)j}^{b/a} + \sum_{j=0}^{r-\text{DFP}-1} \omega_{ij}^{b/a} + \sum_{j=r}^{n_a/n_b} \omega_{ij}^{a/b}, & 1 \leq i \leq r - \text{DFP} - 1 \leq n_a/n_b \end{cases}$$

当 $n_a/n_b + 1 \leq r \leq n_b/n_a + \text{DFP}$ 时,系统中仅剩后批次晶圆,对于后批次晶圆而言在第 i 步的逗留时间为

$$\psi_{2r} = \sum_{j=0}^{i-2} \omega_{(r-1)j}^{b/a} + \sum_{j=i}^{r-\text{DFP}-1} \omega_{ij}^{b/a}, 1 \leq i \leq r - \text{DFP} - 1 \leq n_b/n_a$$

3 算法设计

在实际生产中,调度规则能否实现实时调度是评判其工程应用价值的关键点。其中,实时调度的条件为:提供必要信息、具有快速切换机制和系统实时处理三方面。本文研究的组合设备在加工晶圆时,首先由于其运行过程中的任务时间(如装卸时间、加工时间、晶圆移动时间等)皆为定值,从而满足提供必要信息。其次由于组合设备通常由终端计算机控制,在紧迫的外部事件请求中断时系统能及

时响应, 使禁止中断的时间间隔尽量短, 可避免耽误其它紧迫任务的特点, 满足具有快速切换机制。最后如要满足系统实时处理就需考虑算法的复杂程度。所以本文接下来对组合设备加工紧急订单调度的核心思想是在满足逗留时间约束和系统状态平稳切换的前提下, 尽可能使求解简单化。在进行算法设计前, 根据文[19]设置式(2)、式(3)求解加工节拍上下限 Π_{iL} 与 Π_{iU} 、加工节拍下限最大值 Π_{Lmax} 、加工节拍上限最小值 Π_{Umin} 与机械手工作节拍最大值 ψ_{1max} 。

$$\begin{cases} \Pi_{iL} = \frac{\alpha_i + \beta_i + 4\lambda + 3\mu}{m_i} \\ \Pi_{iU} = \frac{\alpha_i + 4\lambda + 3\mu}{m_i} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \Pi_{Lmax} = \max\{\Pi_{iL}, i \in N_n\} \\ \Pi_{Umin} = \min\{\Pi_{iU}, i \in N_n\} \\ \psi_{1max} = \max\{\psi_{1r}, r \in N_n\} \end{cases} \quad (3)$$

以下根据因加工参数而造成的不同负载情形分别进行讨论。

3.1 加工步骤负载非相对平衡

如果两批次晶圆在加工时的工作负载非相对平衡 $[\Pi_{1L}^a, \Pi_{1U}^a] \cap [\Pi_{2L}^a, \Pi_{2U}^a] \cap \dots \cap [\Pi_{(n_a)L}^a, \Pi_{(n_a)U}^a] \cap [\Pi_{1L}^b, \Pi_{1U}^b] \cap [\Pi_{2L}^b, \Pi_{2U}^b] \cap \dots \cap [\Pi_{(n_a)L}^b, \Pi_{(n_a)U}^b] = \emptyset$ 。此时前后批次晶圆工作负载差异较大。下面将根据系统所受约束, 建立切换时暂态调度线性规划模型, 具体建模过程为: 在加工调度紧急订单时插入和退出属于同种类型, 系统工况随循环次数 r 增加不断变化。首先以 $n_a > n_b + DFP$ 为例, 说明在负载不平衡时插入订单时如何建立 LPM1, 当下一批次晶圆到达稳态时, 上一批晶圆还未完全退出系统, 所以机械手需要 n_a 次循环。系统在刚接到紧急订单时 $r=0$, 为了保证 $M_{s1} \rightarrow M_{s2}$ 期间机械手的等待时间分布与前批稳态相同, 则有:

$$\omega_{1i}^a = \omega_{0i}^a, 1 \leq i \leq n_a \quad (4)$$

通过式(4)可知 $r=1$ 时在步骤 $i = n_a$ 处晶圆的卸载时间为

$$t_a(1, n_a, 2) = \omega_{1(n_a)}^a + \mu \quad (5)$$

在 $M_{sr} \rightarrow M_{s(r+1)}$ 过程中根据调度策略, 机械手将晶圆装载至 PM_i 后移动到 PM_{i-1} 进行等待, 前批次晶圆在切换过程中的装载和卸载时间为

$$\begin{aligned} t_a(r, i, 2) &= t_a(r, i+1, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^a, \\ &1 \leq r \leq n_a - 1, r \leq i \leq n_a - 1 \\ t_a(r, i, 1) &= t_a(r, i+1, 1) + \lambda + \mu, \\ &1 \leq r \leq n_a - 1, r+1 \leq i \leq n_a \end{aligned} \quad (6)$$

在 $n_a > n_b + DFP$ 时, 系统分为下一批次晶圆插入前和插入后两个阶段, 在下一批次晶圆插入前, 前批次晶圆的卸载时间根据拉式策略可知, 与上一轮循环的装载时间有关。在下一批晶圆插入后, 前一批次晶圆的卸载时间与后一批晶圆的装载时间有关。面对这两种情形系统中晶圆总数有不同的变化, 前批次晶圆在这两种情形的下在加工腔室和真空锁处卸载时间表达式如下:

$$\begin{aligned} t_a(r, n_a, 2) &= t_a(r-1, i, 1) + \lambda + \mu + \omega_{r(n_a)}^a, \\ &2 \leq r \leq DFP + 1, i = r \\ &t_b(r-1, 1, 1) + \lambda + \mu + \omega_{r(n_a)}^a, \\ &DFP + 2 \leq r \leq n_a \\ t_a(r, 0, 1) &= t_a(r, n_a, 2) + \lambda + \mu, \\ &1 \leq r \leq n_a \\ t_a(r, n_a, 1) &= t_a(r, 0, 1) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{r(n_a-1)}^a, \\ &1 \leq r \leq n_a - 1 \end{aligned} \quad (7)$$

式(4)~式(7)为前批次晶圆在各种情形下约束条件的表达式, 决定了机械手对于前批次晶圆开始卸载和开始装载的各种时刻。

对于后批次, 在 $r = DFP$ 时开始进入组合设备。在第 1 阶段 $DFP + 1 \leq r \leq n_b + DFP$ 时, 前一批次还未完全退出系统, 后一批次也未到达稳态, 且在后一批的加工步骤 $i = r - DFP - 1$ 时, 此时两批次晶圆共存共同在组合设备中加工。此时后一批次的装载和卸载约束条件表达式为

$$\begin{aligned} t_b(r, i, 2) &= t_b(r, i+1, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^b, \\ &DFP + 2 \leq r \leq n_b + DFP + 1, \\ &0 \leq r \leq r - DFP - 2, \\ t_b(r, i, 1) &= \begin{cases} t_b(r, i-1, 1) + \lambda + \mu, \\ DFP + 1 \leq r \leq n_b + DFP, 1 \leq i \leq r - DFP \\ t_a(r, r, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^b, \\ DFP + 1 \leq r \leq n_b + DFP, i = r - DFP - 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

在第 2 阶段 $DFP + n_b + 1 \leq r \leq n_a$ 时, 后批次晶圆已经到达稳态, 但前批次晶圆还未完全退出系统, 此时针对后批次晶圆在系统中稳态加工, 并有

加工完的晶圆返回真空锁,则有:

$$\begin{aligned}
 t_b(r, i, 2) &= t_b(r, i+1, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^b, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a, 0 \leq i \leq n_b, \\
 t_b(r, n_b, 2) &= t_a(r, i, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{r(n_b)}^b, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a, i = r \\
 t_b(r, i, 1) &= t_b(r, i-1, 2) + \lambda + \mu, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a, 1 \leq i \leq n_b, \\
 t_b(r, 0, 1) &= t_b(r, n_b, 2) + \lambda + \mu, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a \\
 t_b(r, n_b, 1) &= t_b(r, 0, 1) + \lambda + \mu + \omega_{r(n_b-1)}^b, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a
 \end{aligned} \quad (9)$$

式(8)、式(9)为后批次晶圆在各种情形下约束条件的表达式,决定了机械手对后批次晶圆开始卸载和开始装载的时刻。

为了保证从暂态切换到稳态时第一轮也满足逗留时间约束,则有:

$$\omega_{ri}^b = \omega_{(r+1)i}^b, r = n_b, 1 \leq i \leq n_b \quad (10)$$

为了保证机械手等待时间非负和前后两批晶圆在各个步骤的逗留时间满足逗留时间约束,存在式(11)、式(12):

$$\begin{cases} \omega_{ri}^a \geq 0, 1 \leq r \leq n_a, r \leq i \leq n_a \\ \omega_{ri}^b \geq 0, \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_b + \text{DFP}, 0 \leq i \leq r - \text{DFP} - 1 \\ \omega_{ri}^b \geq 0, n_b + \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_a, 0 \leq i \leq n_b \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \alpha_i^a \leq t_a(r, i, 2) - t_a(r-1, i, 2) \leq \alpha_i^a + \beta_i^a, \\ \quad r \leq i \leq n_a, 2 \leq r \leq n_a \\ \alpha_i^b \leq t_b(r, i, 2) - t_b(r-1, i, 2) \leq \alpha_i^b + \beta_i^b, \\ \quad r \leq i \leq r - \text{DFP} - 1, 2 + \text{DFP} \leq r \leq n_a \end{cases} \quad (12)$$

此时建立由约束条件(4)~(12)和机械手等待时间 ω_{ri} 为决策变量的目标函数(13)组成的线性规划模型,来求解负载非平衡状态下, $n_a > n_b + \text{DFP}$ 时的切换过程机械手最小等待时间。

$$\min \left\{ \sum_{r=1}^{n_a} \sum_{i=r}^{n_a} \omega_{ri}^a + \sum_{r=\text{DFP}+1}^{n_b+\text{DFP}} \sum_{i=0}^{r-\text{DFP}-1} \omega_{ri}^b + \sum_{r=n_b+\text{DFP}+1}^{n_a} \sum_{i=0}^{n_b} \omega_{ri}^b \right\} \quad (13)$$

当 $n_a \leq n_b + \text{DFP}$ 时,前批次晶圆退出系统后,后批次晶圆还未到达稳态。面对这种情况,系统需在前批次晶圆退出系统后继续循环,直至后批次晶圆到达稳态。本文在此前提下建立LPM2。同样,在此情形下 $r=0$ 为了保证 $M_{s1} \rightarrow M_{s2}$ 期间机械手的等待时间分布与前批稳态相同,则有:

$$\omega_{1i}^a = \omega_{0i}^a, 1 \leq i \leq n_a \quad (14)$$

此时与式(4)情况类似, $r=1$ 时在步骤 n_a 处晶圆的卸载时间为

$$t_a(1, n_a, 2) = \omega_{1(n_a)}^a + \mu \quad (15)$$

之后前后两批次晶圆同时在组合设备内加工,针对前后两批次晶圆在各阶段的装卸时间存在:

$$\begin{aligned}
 t_a(r, n_a, 2) &= t_a(r-1, i, 1) + \lambda + \mu + \omega_{r(n_a)}^a, \\
 &\quad 2 \leq r \leq \text{DFP} + 1, i = r \\
 &\quad t_b(r-1, 1, 1) + \lambda + \mu + \omega_{r(n_a)}^a, \\
 &\quad \text{DFP} + 2 \leq r \leq n_a \\
 t_a(r, 0, 1) &= t_a(r, n_a, 2) + \lambda + \mu, 1 \leq r \leq n_a \\
 &\quad t_a(r, n_a, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{r(n_a-1)}^a, \\
 &\quad 1 \leq r \leq n_a - 1
 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
 t_b(r, i, 2) &= t_b(r, i+1, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^b, \\
 &\quad \text{DFP} + 2 \leq r \leq n_b + \text{DFP} + 1, 0 \leq i \leq r - \text{DFP} \\
 &\quad t_b(r-1, 1, 2) + \lambda + \mu + \omega_{ri}^b, \\
 &\quad n_a + 1 \leq r \leq n_b + \text{DFP} + 1, i = r - \text{DFP} - 1 \\
 &\quad t_a(r, r, 2) + 2(\lambda + \mu) + \omega_{ri}^b, \\
 &\quad \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_a, i = r - \text{DFP} - 1
 \end{aligned} \quad (17)$$

在此情况下后批次晶圆在切换结束时到达稳态,在暂态过程中无加工完成的晶圆装载至真空锁,针对后批次晶圆装载的约束条件为

$$\begin{aligned}
 t_b(r, i, 1) &= t_b(r, i-1, 2) + \lambda + \mu, \\
 &\quad \text{DFP} + n_b + 1 \leq r \leq n_a, 1 \leq i \leq n_b
 \end{aligned} \quad (18)$$

为了保证从暂态切换到稳态时第一轮也满足逗留时间约束,存在:

$$\omega_{ri}^b = \omega_{(r+1)i}^b, r = n_b, 1 \leq i \leq n_b \quad (19)$$

此时,依然要满足逗留时间约束和等待时间非负,所以存在如下约束:

$$\begin{cases} \omega_{ri}^a \geq 0, 1 \leq r \leq n_a, r \leq i \leq n_a \\ \omega_{ri}^b \geq 0, \text{DFP} + 1 \leq r \leq n_b + \text{DFP} \\ 0 \leq i \leq r - \text{DFP} - 1 \\ \alpha_i^a \leq t_a(r, i, 2) - t_a(r-1, i, 2) \leq \alpha_i^a + \beta_i^a, \\ \quad r \leq i \leq n_a, 2 \leq r \leq n_a \\ \alpha_i^b \leq t_b(r, i, 2) - t_b(r-1, i, 2) \leq \alpha_i^b + \beta_i^b, \\ \quad r \leq i \leq r - \text{DFP} - 1, 2 + \text{DFP} \leq r \leq n_b + \text{DFP} \end{cases} \quad (20)$$

LPM2由约束条件(14)~(21)和机械手等待时间 ω_{ri} 为决策变量的目标函数(22)组成。用此求解负载非平衡状态下, $n_a \leq n_b + \text{DFP}$ 时的切换过程机

械手最小等待时间:

$$\min \left\{ \sum_{r=1}^{n_a} \sum_{i=r}^{n_a} \omega_{ri}^a + \sum_{r=DFP+1}^{n_b+DFP} \sum_{i=0}^{r-DFP-1} \omega_{ri}^b \right\} \quad (22)$$

根据 LPM1 和 LPM2, 给出负载非相对平衡系统切换时的计算方法 T-SloadImbalance (Transient load imbalance)。

算法 1(T-SloadImbalance): 求解紧急订单插入过程两批次晶圆负载非相对平衡插入与退出时单臂组合设备的调度。

1) 若 $n_a > n_b + DFP$, 则采用 LPM1 求解机械手等待时间。

2) 若 $n_a \leq n_b + DFP$, 则采用 LPM2 求解机械手等待时间。

通过上述线性规划模型, 可求解此情形下暂态时的机械手等待时间, 但为减少计算量以保证实时调度, 稳态加工时根据参考文献[19]可知, 如满足 $\sum_{i=0}^{n_b-1} \omega_{0i}^b \leq \Pi_{L_{max}}^b - \psi_{10}$ 时, 通过设置 $\omega_{0(i-1)}^b > 0$, $i \in E_b = \{i | i \in N_{n_b-1}, \Pi_{iL}^b < \Pi_{L_{max}}^b\} \neq \emptyset$, $F_b = N_{n_b-1} - E_b$ 。以缩短第 i 步的 τ_i^b , 从而满足晶圆的逗留时间约束。因此, $\omega_{0(i-1)}^b$ 与 $\omega_{0(n_b)}^b$ 的设置如式(23)和式(24)所示:

$$\omega_{0(i-1)}^b = \begin{cases} 0, & i \in F_b \\ \Pi_{L_{max}}^b - \alpha_i^b - \beta_i^b - 4\lambda - 3\mu, & i \in E_b \end{cases} \quad (23)$$

$$\omega_{0(n_b)}^b = \max \left\{ \Pi_{L_{max}}^b - \psi_{10} - \sum_{i=0}^{n_b-1} \omega_{0i}^b, 0 \right\} \quad (24)$$

综上所述, 给出在负载非相对平衡时的计算方法 S-SloadImbalance (steady-state load imbalance)。

算法 2(S-SloadImbalance): 求解紧急订单插入过程两批次晶圆负载非相对平衡稳态时单臂组合设备的调度。

1) 当满足 $\sum_{i=0}^{n_b-1} \omega_{0i}^b \leq \Pi_{L_{max}}^b \psi_{10}$ 时, 按式(23)与式(24)设置机械手等待时间。

2) 当不满足 $\sum_{i=0}^{n_b-1} \omega_{0i}^b \leq \Pi_{L_{max}}^b \psi_{10}$ 时, 判断为不可调度并退出算法。

3.2 加工步骤负载相对平衡

若前后批次晶圆在加工时工作负载相对平衡及 $[\Pi_{1L}^a, \Pi_{1U}^a] \cap [\Pi_{2L}^a, \Pi_{2U}^a] \cap \dots \cap [\Pi_{(n_a)L}^a, \Pi_{(n_a)U}^a] \cap [\Pi_{1L}^b, \Pi_{1U}^b] \cap [\Pi_{2L}^b, \Pi_{2U}^b] \cap \dots \cap [\Pi_{(n_a)L}^b, \Pi_{(n_a)U}^b] \neq \emptyset$, 所对应的机械手在加工腔室的等待时间也应保

持平衡, 则有如下定理。

定理 1: 考虑逗留时间约束的单臂组合设备在紧急插单时, 当满足 $\Pi_{L_{max}}^{ab} \leq \Pi_{U_{min}}^{ab}$ 时, $\psi_{1max} \leq \Pi_{U_{min}}^{ab}$ 时, 是可以调度的。

证明: 由前文可知在插入时, 当 $1 \leq r \leq DFP$ 时, $\psi = \psi_{1r} + \psi_{2r}$ 。此时令 $\omega_{ri}^a = 0$, $i = 0, 1, \dots, n_a$, $\zeta = \Pi_{L_{max}}^{ab} - \psi_{1r} \circ \omega_{r(n_a)}^a = \zeta$ 。因此 $\psi_{2r} = \zeta = \omega_{r(n_a)}^a = \max \{ \Pi_{L_{max}}^{ab} - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。据 $\theta = \theta_n = \psi$ 晶圆在步骤 i ($i = 1, 2, 3, \dots, n_a$) 时 $\tau_i^a = \psi - (4\lambda + 3\mu + \omega_{ri}^a) = \psi - (4\lambda + 3\mu) \geq (\alpha_i^a + 4\lambda + 3\mu) \psi - (4\lambda + 3\mu) = \alpha_i^a$, $\tau_i^a = \psi - (4\lambda + 3\mu + \omega_{r(i-1)}^a) = \psi - (4\lambda + 3\mu) \leq (\alpha_i^a + \beta_i^a + 4\lambda + 3\mu) - (4\lambda + 3\mu) = \alpha_i^a + \beta_i^a$, 其他阶段同理可证。因此当 $\Pi_{L_{max}}^{ab} \leq \Pi_{U_{min}}^{ab}$, $\psi_{1max} \leq \Pi_{U_{min}}^{ab}$ 时, 系统是可以调度的。

为了求解机械手等待时间, 给出紧急订单插入时两批晶圆负载平衡的计算方法 LoadBalance。

算法 3(LoadBalance): 求解紧急订单插入过程两批次晶圆负载相对平衡时单臂组合设备的调度。

I) 当 $r \in [1, DFP]$ 时, $\psi_{sr} = 2(n_a - r + 1)(\mu + \lambda)$, 机械手等待时间 $\omega_{ri}^a = 0$, $i = r \in [1, n_a - 1]$ 和 $\omega_{r(n_a)}^a = \max \{ \Pi_{r_{max}}^a - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。

II) 当 $n_a > n_b + DFP$ 时, 机械手等待时间如下:

(1) 若 $r \in [DFP + 1, n_b + DFP + 1]$, 则 $\psi_{sr} = 2(n_a - DFP + 1)(\mu + \lambda)$, 机械手等待时间 $\omega_{ri}^a = 0$, $i = r \in [1, n_a - 1]$, $\omega_{ri}^b = 0$, $r = i \in [0, r - DFP - 1]$ 和 $\omega_{r(n_a)}^a = \max \{ \Pi_{r_{max}}^a - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。

(2) 若 $r \in [n_b + DFP + 2, n_a]$, 则 $\psi_{sr} = 2(n_a + n_b - DFP + 2)(\mu + \lambda)$, 机械手等待时间 $\omega_{ri}^a = 0$, $i = r \in [1, n_a - 1]$, $\omega_{ri}^b = 0$, $r = i \in [0, r - DFP - 1]$, $\omega_{r(n_a)}^a = \psi_{s(r-1)} - \psi_{sr}$ 和 $\omega_{r(n_a)}^a = \max \{ \Pi_{r_{max}}^a - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。

III) 当 $n_a \leq n_b + DFP$ 时, 机械手等待时间如下:

(1) 若 $r \in [DFP + 1, n_a]$, 则 $\psi_{sr} = 2(n_a - DFP + 1)(\mu + \lambda)$, 机械手等待时间 $\omega_{ri}^a = 0$, $i = r \in [1, n_a - 1]$, $\omega_{ri}^b = 0$, $j \in [0, r - DFP - 1]$ 和 $\omega_{r(n_a)}^a = \max \{ \Pi_{r_{max}}^a - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。

(2) 若 $r \in [n_a + 1, n_b + DFP]$, 则 $\psi_{sr} = 2(r - DFP)(\mu + \lambda)$, 机械手等待时间 $\omega_{ri}^b = 0$, $i = r \in [0, r - DFP - 2]$ 和 $\omega_{r(n_a)}^b = \max \{ \Pi_{r_{max}}^b - \psi_{1(r-1)}, 0 \}$ 。

通过对上述不同情形进行分析后, 在满足提供必要信息、具有快速分析和系统实时处理的前提下, 整合出如图 4 所示的调度算法。

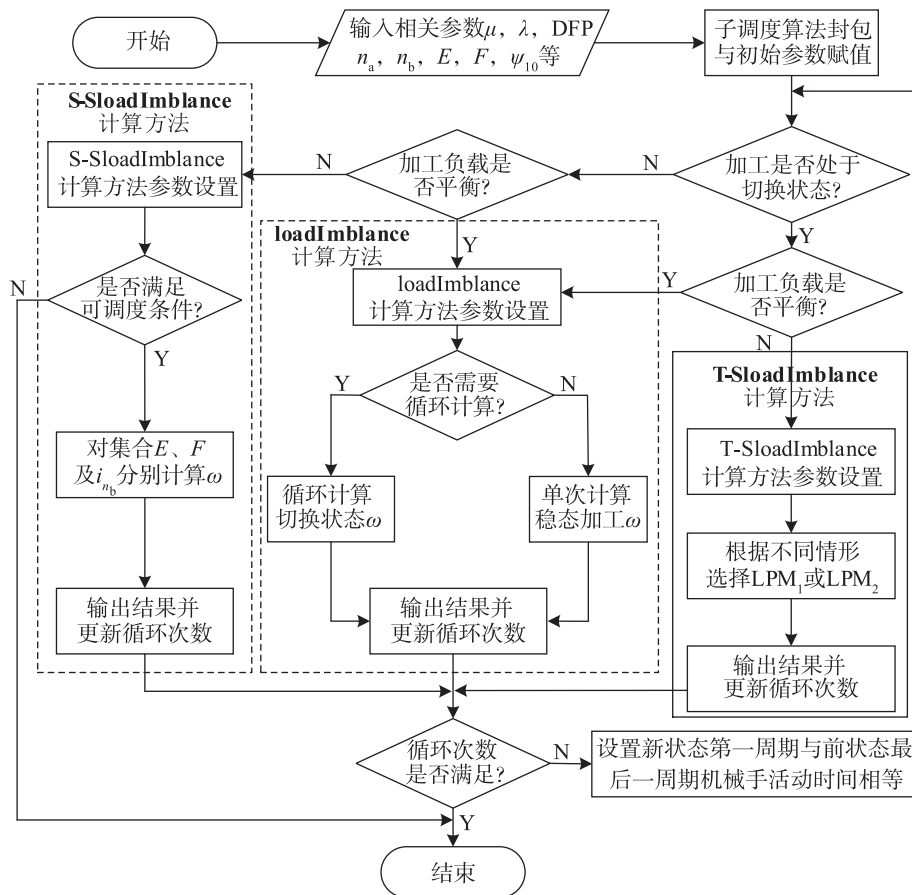


图4 调度算法流程图

Fig.4 Flow chart of scheduling algorithm

Step 0 $\mu, \lambda, DFP, n_a, n_b, E, F$ 等一系列参数进行初始化设置。

Step 1 将不同情形的调度方法进行封包。

Step 2 判断加工状态是否处于切换状态, 是则转 Step 3; 否则, 转 Step 4。

Step 3 判断切换状态时的加工负载是否平衡, 是则转 Step 3.1; 否则转 Step 3.2。

Step 3.1 调度方法 loadImblance 参数初始化设置。首先根据加工情形判断是否需要循环计算 ω , 其次计算各周期各工序机械手等待时间, 最后输出结果并更新循环次数。

Step 3.2 调度方法 T-SloadImblance 参数初始化设置。首先根据加工情形选择 LPM, 其次通过相应 LPM 求解机械手等待时间, 最后输出结果并更新循环次数。

Step 4 判断稳态时的加工负载是否平衡, 是则转 Step 3.1; 否则转 Step 5。

Step 5 调度方法 S-SloadImblance 参数初始化设置。首先判断是否满足可调度调度条件, 是, 则继续; 否则结束算法。其次, 对集合 E, F 与分

别计算机械手等待时间。最后, 输出结果并更新循环次数。

Step 6 判断循环次数是否返回原晶圆稳定加工状态。是, 则结束调度方法; 否, 则转 Step 7。

Step 7 设置新状态第一周期机械手活动时间 = 前状态最后一周期机械手活动时间后转 Step 2 继续循环。

4 实例

本文针对 LPM1 与 LPM2 在配置为酷睿 i5-6200U/2.3 GHz/8 GB/DDR4 RAM 的计算机上利用 LINGO 19.0 进行求解, 然后将求解结果与虚拟晶圆法进行对比, 进一步证明算法的有效性。其中, 各项加工参数均来源于参考文[19]和某晶圆生产厂商, 来源真实可靠。

例 1 单臂组合设备在遇到在紧急订单时, 原订单晶圆流模式为 $(1, 1, 1, 1, 1)$, 原订单晶圆加工工序: $LL_1 \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_2 \rightarrow PM_3 \rightarrow PM_4 \rightarrow PM_5 \rightarrow LL_2$, 各工序参数为: $\alpha_1^a = 92 \text{ s}, \alpha_2^a = 108 \text{ s}, \alpha_3^a = 105 \text{ s}, \alpha_4^a = 100 \text{ s}, \alpha_5^a = 95 \text{ s}$ 。紧急订单晶圆流模式为 $(1,$

1), 紧急订单加工工序为: $LL_1 \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_3 \rightarrow LL_2$, 各工序参数为 $\alpha_1^b = 110$ s, $\alpha_2^b = 105$ s。两批次晶圆逗最大留时间分别为: $\beta_i^a = \beta_j^b = 20$ s, $i \in N_{na}, j \in N_{nb}$ 。机械手任务时间分别为 $\lambda = 5$ s, $\mu = 2$ s。

1) 通过算法得出的机械手等待时间, 可推导出组合设备各阶段周期时间为: 插入阶段时间 660 s, 稳态的周期时间 136 s, 退出阶段时间 687 s。

2) 本例若采用虚拟晶圆法, 经计算得出插入和退出阶段时间皆为 872 s, 稳态周期时间与本文结果相同。

3) 两种调度算法相结果相对比, 本文暂态调度时间缩短 22.8%, 稳态调度时间保持不变。

表 2 例 1 机械手各阶段等待时间

Tab.2 Waiting time of robot in each stage of Example 1

阶段	周期	各工序机械手等待时间
插入	$M_{s1} \rightarrow M_{s2}$	$\omega_{11}^a = \omega_{12}^a = \omega_{13}^a = \omega_{14}^a = 0$ s, $\omega_{15}^a = 50$ s
	$M_{s2} \rightarrow M_{s3}$	$\omega_{20}^b = \omega_{22}^a = \omega_{23}^a = \omega_{24}^a = 0$ s, $\omega_{25}^a = 64$ s
	$M_{s3} \rightarrow M_{s4}$	$\omega_{30}^b = \omega_{31}^b = \omega_{33}^a = \omega_{34}^a = 0$ s, $\omega_{35}^a = 66$ s
	$M_{s4} \rightarrow M_{s5}$	$\omega_{40}^b = \omega_{41}^b = \omega_{42}^b = \omega_{44}^a = 0$ s, $\omega_{45}^a = 66$ s
	$M_{s5} \rightarrow M_{s6}$	$\omega_{50}^b = \omega_{51}^b = 0$ s, $\omega_{52}^b = 14$ s, $\omega_{55}^a = 66$ s
稳态	$M_{s0} \rightarrow M_{s1}$	$\omega_{00}^b = \omega_{01}^b = 0$ s, $\omega_{02}^b = 94$ s
	$M_{s1} \rightarrow M_{s2}$	$\omega_{10}^a = \omega_{11}^b = 0$ s, $\omega_{12}^b = 94$ s
	$M_{s2} \rightarrow M_{s3}$	$\omega_{20}^a = \omega_{21}^a = 0$ s, $\omega_{22}^b = 94$ s
	$M_{s3} \rightarrow M_{s4}$	$\omega_{30}^a = \omega_{31}^a = 0$ s, $\omega_{32}^a = 92$ s
	$M_{s4} \rightarrow M_{s5}$	$\omega_{40}^a = \omega_{41}^a = \omega_{42}^a = 0$ s, $\omega_{43}^a = 78$ s
退出	$M_{s5} \rightarrow M_{s6}$	$\omega_{50}^a = \omega_{51}^a = \omega_{52}^a = \omega_{53}^a = 0$ s, $\omega_{54}^a = 64$ s

例 2 单臂组合设备在遇到紧急订单时, 原订单晶圆流模式为(1, 1, 1, 1), 原订单加工工序为: $LL_1 \rightarrow PM_1 \rightarrow PM_2 \rightarrow PM_3 \rightarrow PM_4 \rightarrow LL_2$, 各工序参数为: $\alpha_1^a = 100$ s, $\alpha_2^a = 65$ s, $\alpha_3^a = 90$ s, $\alpha_4^a = 70$ s; 紧急

订单晶圆流模式为(1, 1, 1), 紧急订单加工工序为: $LL_1 \rightarrow PM_3 \rightarrow PM_4 \rightarrow PM_5 \rightarrow LL_2$, 各工序参数为: $\alpha_1^b = 120$ s, $\alpha_2^b = 87$ s, $\alpha_3^b = 94$ s。两批次晶圆最大逗留时间分别为: $\beta_i^a = 18$ s, $\beta_j^b = 12$ s, $i \in N_{na}, j \in N_{nb}$ 。机械手任务时间分别为 $\lambda = 6$ s, $\mu = 3$ s。

通过对上述加工参数分析可知, 本例属于加工时间不负载平衡的调度类型, 因此采用 T-SloadImbalance、S-SloadImbala 调度方法与调度算法可求得各阶段机械手等待时间, 如表 3 所示。

表 3 例 2 机械手各阶段等待时间

Tab.3 Waiting time of robot in each stage of Example 2

阶段	周期	各工序机械手等待时间
插入	$M_{s1} \rightarrow M_{s2}$	$\omega_{11}^a = 17$ s, $\omega_{12}^a = 0$ s, $\omega_{13}^a = 12$ s, $\omega_{14}^a = 14$ s
	$M_{s2} \rightarrow M_{s3}$	$\omega_{22}^a = 0$ s, $\omega_{23}^a = 20$ s, $\omega_{24}^a = 14$ s
	$M_{s3} \rightarrow M_{s4}$	$\omega_{31}^b = 0$ s, $\omega_{33}^a = 20$ s, $\omega_{34}^a = 49$ s
	$M_{s4} \rightarrow M_{s5}$	$\omega_{40}^b = 0$ s, $\omega_{41}^b = 50$ s, $\omega_{44}^a = 49$ s
	$M_{s5} \rightarrow M_{s6}$	$\omega_{50}^b = 0$ s, $\omega_{51}^b = 33$ s, $\omega_{52}^b = 66$ s
稳态	$M_{s0} \rightarrow M_{s1}$	$\omega_{00}^b = 0$ s, $\omega_{01}^b = 21$ s, $\omega_{02}^b = 14$ s, $\omega_{03}^b = 46$ s
	$M_{s1} \rightarrow M_{s2}$	$\omega_{10}^a = 0$ s, $\omega_{11}^b = 21$ s, $\omega_{12}^b = 14$ s, $\omega_{13}^b = 46$ s
	$M_{s2} \rightarrow M_{s3}$	$\omega_{20}^a = 0$ s, $\omega_{21}^a = 13$ s, $\omega_{22}^b = 14$ s, $\omega_{23}^b = 34$ s
	$M_{s3} \rightarrow M_{s4}$	$\omega_{30}^a = \omega_{32}^a = 0$ s, $\omega_{31}^a = 19$ s, $\omega_{33}^b = 42$ s
退出	$M_{s4} \rightarrow M_{s5}$	$\omega_{40}^a = \omega_{42}^a = 0$ s, $\omega_{41}^a = 29$ s, $\omega_{43}^a = 32$ s

1) 因两例具有相似性, 所以仅通过上述参数绘制如图 5 ~ 图 7 所示甘特图。从图中可知, 插入阶段时间为 632 s, 稳态的周期时间为 153 s, 退出阶段时间为 552 s。

2) 本例若采用虚拟晶圆法, 经计算得出插入和退出阶段时间皆为 919 s, 稳态周期时间与本文结果相同。

3) 两种调度算法相结果相对比, 本文暂态调度

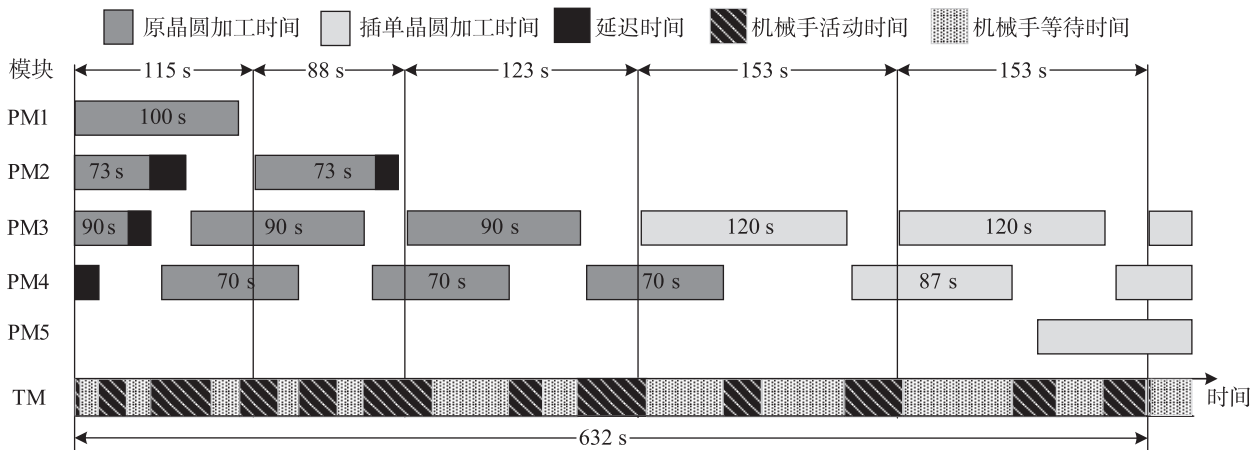


图 5 算例 2 插入过程甘特图

Fig.5 Gantt diagram of insert process of Example 2

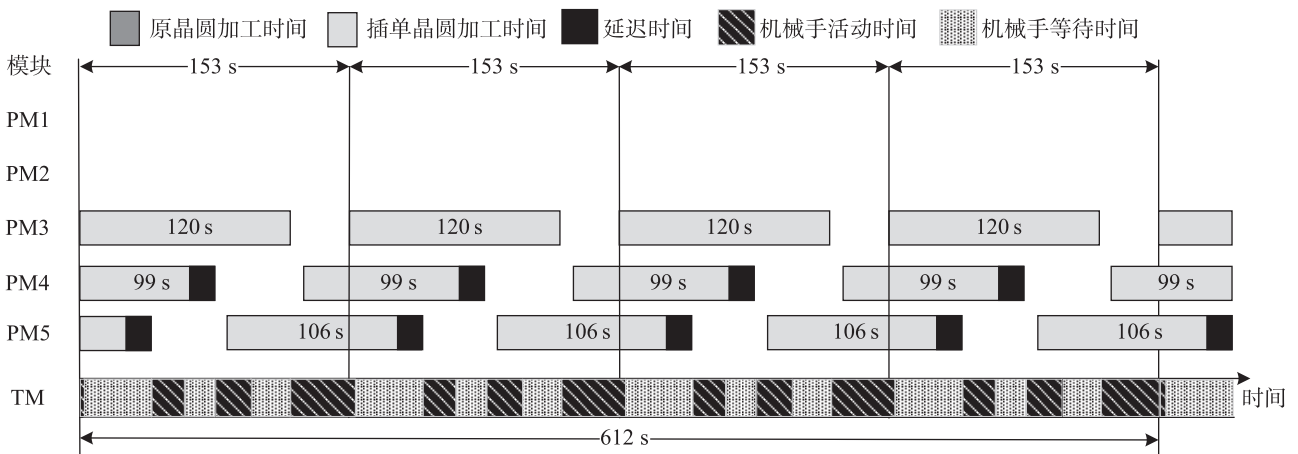


图6 算例2 稳态过程甘特图

Fig.6 Gantt diagram of steady state process of Example 2

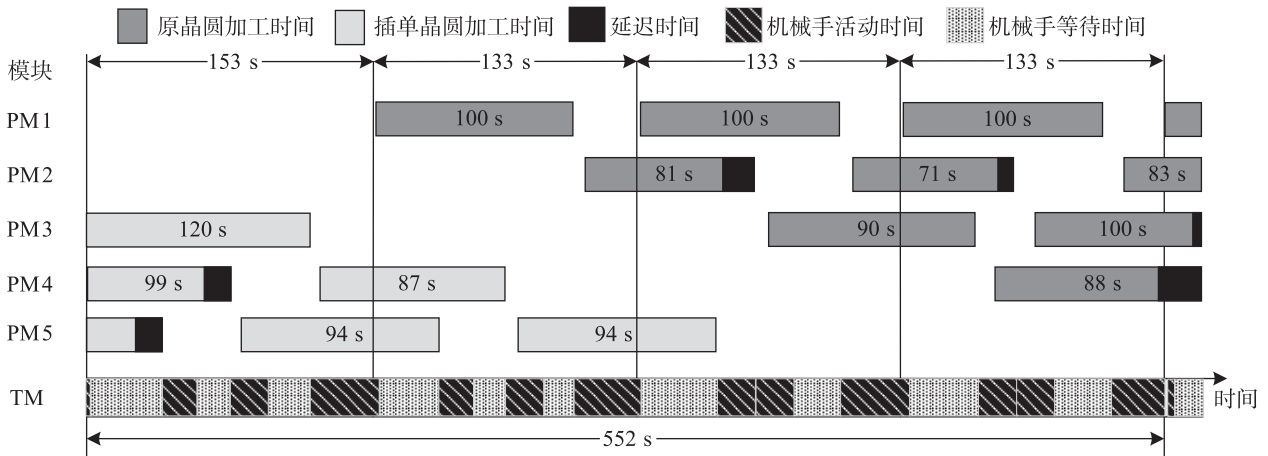


图7 算例2 退出过程甘特图

Fig.7 Gantt diagram of exit process of Example 2

时间缩短 35.4%，稳态调度时间保持不变。

5 结束语

半导体制造业中，有效提高组合设备的生产效率和降低生产成本至关重要，对于组合设备紧急插单调度问题，目前仍缺乏高效的调度策略与算法。本文通过建立调度策略，描述紧急订单插入时的加工过程。基于对调度策略的分析，推导出可调度性

判定条件，并通过相应的数学解析式求解机械手等待时间。本文调度策略可使组合设备在面对紧急插单时高效且稳定的运行，有效地缩短交货周期，从而降低生产成本。在实际生产中会出现多种晶圆流模式，且晶圆在加工时存在作业时间波动，在此情形下提出通用性更强的调度算法，对于组合设备晶圆加工过程至关重要，这是本文下一步研究工作。

参考文献

[1] 朱清华, 伍乃骐, 腾少华. 多组合设备的调度控制研究综述[J]. 控制理论与应用, 2012, 27(10): 1369 - 1375.
 ZHU Q H, WU N Q, TENG S H. Survey of scheduling and control for multicluster tools[J]. Control Theory & Applications, 2012, 27(10): 1369 - 1375.

[2] 闵雁, 伍乃骐. 半导体晶圆制造中组合设备运行和控制综述[J]. 工业工程, 2012, 15(2): 1 - 15.
 MIN Y, WU N Q. Review of operations and control of cluster tools in semiconductor wafer fabrication[J]. Industrial Engineering Journal, 2012, 15(2): 1 - 15.

[3] LEE J H, KIM H J, LEE T E. Scheduling cluster tools concurrent processing of two wafer types[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2014, 11(2): 525 - 536.

- [4] 潘春荣, 郭文有. 具有清洗工艺的单臂组合设备终止暂态调度[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(6): 784 – 794.
PAN C R, GUO W Y. Scheduling of close-down process for single-arm cluster tools with chamber cleaning operation[J]. Control Theory & Applications, 2021, 15(3): 784 – 794.
- [5] PAN C R, ZHOU M C, QIAO Y, et al. Scheduling cluster tools in semiconductor manufacturing: Recent advances and challenges[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2018, 15(2): 586 – 601.
- [6] YANG F J, WU N Q, GAO K Z, et al. Efficient approach to cyclic scheduling of single-arm cluster tools with chamber cleaning operations and wafer residency time constraint[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 31(2): 196 – 205.
- [7] 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[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(3): 871 – 883.
- [8] YU T S, KIM H J, LEE T E. Scheduling single-armed cluster tools with chamber cleaning operations[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2018, 15(2): 705 – 716.
- [9] 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.
- [10] WANG J P, PAN C R, HU H S, et al. A cyclic scheduling approach to single-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1373 – 1386.
- [11] KO S G, YU T S, LEE T E. Scheduling dual-armed cluster tools for concurrent processing of multiple wafer types with identical job flows[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16(3): 1058 – 1070.
- [12] WANG J P, HU H S, PAN C R, et al. Scheduling dual-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(3): 776 – 789.
- [13] ZHU Q H, ZHOU M C, QIAO Y, et al. Multi-objective scheduling of dual-blade robotic cells in wafer fabrication[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(12): 5015 – 5023.
- [14] KIM T K, JUNG C, LEE T E. Scheduling start-up and close-down periods of dual-armed cluster tools with wafer delay regulation[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(10): 2785 – 2795.
- [15] QIAO Y, ZHOU M C, WU N Q, et al. Scheduling and control of startup process for single-arm cluster tools with residency time constraints[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2017, 25(4): 1243 – 1256.
- [16] KIM H J, LEE J H, LEE T E, 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.
- [17] 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.
- [18] LEE J H, KIM H J. Makespan analysis of lot switching period in cluster tools[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2016, 29(2): 127 – 136.
- [19] 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.
- [20] YANG F J, QIAO Y, GAO K Z, et al. Efficient approach to scheduling of transient processes for time-constrained single-arm cluster tools with parallel chambers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 50(10): 3646 – 3657.

作者简介

李金成(1998 –), 男, 硕士生。研究领域为制造系统建模、优化及调度。

潘春荣(1973 –), 男, 博士, 教授, 博士生导师。研究领域为机电一体化系统, 制造过程的调度和优化控制。