自动化学报
ACTA AUTOMATICA SINICA

基于Petri网的组合设备建模与调度综述

袁凤连 黄波 王际鹏 潘春荣

A Survey of Modeling and Scheduling of Cluster Tools Based on Petri Nets

YUAN Feng-Lian, HUANG Bo, WANG Ji-Peng, PAN Chun-Rong

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16383/j.aas.c210951

您可能感兴趣的其他文章

批处理机上具有两类释放时间的工件集竞争调度问题

The Competing Job Sets Scheduling Problems With Two Types of Release Dates on Batching-Machine

自动化学报. 2020, 46(1): 168-177 https://doi.org/10.16383/j.aas.2018.c170536

智能体Petri网融合的多机器人多任务协调框架

Multi-robot-multi-task Coordination Framework Based on the Integration of Intelligent Agent and Petri Net

自动化学报. 2021, 47(8): 2029-2049 https://doi.org/10.16383/j.aas.c190400

基于Q学习的受灾路网抢修队调度问题建模与求解

Modeling and Solving the Repair Crew Scheduling for the Damaged Road Networks Based on Q-Learning

自动化学报. 2020, 46(7): 1467-1478 https://doi.org/10.16383/j.aas.c180081

双时间尺度下的设备随机退化建模与剩余寿命预测方法

Degradation Modeling and Remaining Useful Life Prediction with Bivariate Time Scale

自动化学报. 2017, 43(10): 1789-1798 https://doi.org/10.16383/j.aas.2017.c160509

基于蓝海信息网络的海洋环境平行监测体系建模研究

Architecture of Marine Environmental Parallel Monitoring System Based on the Lanhai Information Network

自动化学报. 2020, 46(8): 1582-1591 https://doi.org/10.16383/j.aas.c180361

航天器任务调度模型、算法与通用求解技术综述

Survey on Models, Algorithms and General Techniques for Spacecraft Mission Scheduling

自动化学报. 2021, 47(12): 2715-2741 https://doi.org/10.16383/j.aas.c190656

基于 Petri 网的组合设备建模与调度综述

袁凤连 [1] 黄 波 [1] 王际鹏 [2] 潘春荣 [3]

摘 要 组合设备是半导体晶圆制造的核心装备, 其调度与控制优化是半导体制造领域极具挑战性的课题. Petri 网因其强大的建模能力和简约的图形化表达优势, 被广泛地应用于组合设备的建模与调度. 对基于 Petri 网的组合设备建模与调度方法进行综述, 归纳总结了组合设备的结构类型、晶圆流模式、调度策略及 Petri 网建模方法, 并系统阐述组合设备的 7 类典型调度问题, 包括驻留时间约束、作业时间波动、晶圆重入加工、多品种晶圆加工、加工模块 (Process module, PM) 故障、PM 清洗和组合设备群. 最后, 讨论了当前组合设备调度存在的挑战及后续可能的研究方向.

关键词 晶圆制造, Petri 网, 组合设备, 建模, 调度

引用格式 袁凤连, 黄波, 王际鹏, 潘春荣. 基于 Petri 网的组合设备建模与调度综述. 自动化学报, 2023, **49**(5): 929−948

DOI 10.16383/j.aas.c210951

A Survey of Modeling and Scheduling of Cluster Tools Based on Petri Nets

YUAN Feng-Lian[1] HUANG Bo[1] WANG Ji-Peng[2] PAN Chun-Rong[3]

Abstract Cluster tools are the core equipment of semiconductor wafer manufacturing. Their scheduling and controlling are challenging topics in the field of semiconductor manufacturing. Petri nets have the advantages of powerful modeling capacity and simple graphical descriptions. They are thus widely used in modeling and scheduling of cluster tools. This paper summarizes the research on cluster tools modeling and scheduling based on Petri nets. It presents structures and types of cluster tools, wafer flow patterns, scheduling strategy, and Petri net-based methods. It also addresses seven typical scheduling problems of cluster tools, including wafer residency time constraints, activity time variation, wafer revisiting, multi-type wafer flow patterns, process module (PM) failure, PM cleaning, and multi-cluster tools. Finally, the challenges existing in the cluster tools scheduling field and some possible future research directions are given.

Key words Wafer fabrication, Petri net, cluster tool, modeling, scheduling

Citation Yuan Feng-Lian, Huang Bo, Wang Ji-Peng, Pan Chun-Rong. A survey of modeling and scheduling of cluster tools based on Petri nets. *Acta Automatica Sinica*, 2023, **49**(5): 929−948

集成电路产业是信息技术产业的核心, 也是支撑社会经济发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业. 晶圆是构成集成电路的硅晶载体, 而半导体晶圆制造是当今最先进和最复杂的制造工业之一. 组合设备是一种高度自动化的晶圆制造装备, 其高效的单晶圆加工技术可显著提高晶圆制造的生产效率和良品率[1−2]. 组合设备的结构和其加工技术可确保晶圆加工的柔性、可重构性和有效性, 有助于提高设备空间利用率及减少成本投入[2−3]. 然而, 组合设备是一类极其昂贵的设备[4]. 因此, 研究如何有效地控制晶圆生产过程, 提高该类设备的吞吐量, 从而提高晶圆生产效率和加工质量具有重大的理论意义和工程价值.

Petri 网对离散事件系统具有强大的建模能力, 能较好地描述系统冲突、并发、异步、内部环路等结构特性, 同时还具备可视化的图形表示及严密的数学理论作为支撑, 被广泛应用于离散事件系统的建模、分析、调度和控制[5−7]. 组合设备是一类典型的离散事件系统, 其晶圆加工过程存在激烈的资源共享与竞争. 受限于多维约束耦合的加工环境, 组合设备的调度与控制显著区别于其他类型的制造系统[8−10]. 归结起来, 组合设备在晶圆制造过程主要分为如下几类复杂调度问题.

1) 晶圆驻留时间约束调度[11−25]. 晶圆驻留时间约束是指晶圆在加工模块 (Process module, PM) 中加工完后驻留在 PM 的时间约束[11−12]. 例如低压化学气相沉积工艺, 晶圆加工完后必须在 20 秒内取出, 否则残余高温和化学气体将会损坏或污染晶

收稿日期 2021-10-08 录用日期 2022-06-06
Manuscript received October 8, 2021; accepted June 6, 2022
本文责任编委 谢永芳
Recommended by Associate Editor XIE Yong-Fang
1. 南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094 2. 湖北工业大学机械工程学院 武汉 430068 3. 江西理工大学机电工程学院 赣州 341000
1. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094 2. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000

圆表面. 光刻的镀膜和显影过程也有类似的驻留时间限制. 对于大多数晶圆加工工艺, 晶圆驻留时间需要严格控制. 为保障晶圆加工质量, 应尽量减少或消除晶圆加工完成后的驻留时间.

2) 作业时间波动调度[26−37]. 作业时间波动是指在实际的生产系统中, 作业时间存在随机扰动[26]. 例如晶圆校准故障、PM 处理延迟、通信延迟、计算机处理延迟等异常事件, 都会造成作业时间波动, 从而导致晶圆加工延迟[27]. 晶圆加工延迟有可能导致在确定时间设定下获得的可行调度变得无法执行, 因而同时考虑晶圆驻留时间约束和作业时间波动的组合设备调度是一个研究难点.

3) 晶圆重入加工调度[38−52]. 晶圆重入加工是指晶圆在制造过程中需要在相同的条件下多次进入相同的 PM 重复加工, 例如原子层沉积工艺需要多次沉积达到离子层所需厚度[38]. 晶圆重入加工是有别于流水线调度与车间调度的一个重要特点. 对于具有重入加工的组合设备, 可供选择的调度方案急剧增加, 使得最优调度的求解更为困难, 设备鲁棒性更难保障且极容易造成系统死锁[39].

4) 多品种晶圆调度[53−66]. 由于晶圆尺寸增大和客户对晶圆的定制化需求, 当前晶圆制造趋向于多品种、小批量的特点, 组合设备需要同时混合生产多品种晶圆及批量切换晶圆[53−54]. 不同品种晶圆的加工工艺、加工路径、约束条件等都不统一, 多约束耦合致使调度复杂性呈指数增长, 如何避免“维数灾难”成为多品种晶圆调度需要解决的首要问题. 此外, 多品种晶圆调度对提高组合设备生产效率和满足定制化需求意义重大.

5) PM 清洗调度[67−74]. PM 清洗是指每加工完若干枚晶圆后, 系统执行清洗操作, 以清除 PM 中残留的化学物质和杂质颗粒, 保持 PM 洁净[67−68]. 晶圆对加工环境洁净度要求极高, PM 清洗越来越多地用于刻蚀、化学气相沉积及物理气相沉积等工艺[69]. PM 清洗工艺可在一定程度上提高晶圆的质量, 然而会降低设备的运行效率. 如何在晶圆生产质量和生产率之间取得平衡是调度 PM 清洗的关键.

6) PM 故障调度[75−79]. 虽然定期维护有助于提高设备的可靠性[75], 但仍然无法避免 PM 故障的发生. 如果处理不当, PM 故障会降低设备生产效率, 导致系统死锁乃至加工停滞. 因此, 有效地处理此类故障对于提升设备利用率和鲁棒性具有重要意义.

7) 组合设备群调度[80−99]. 相对于单一组合设备的建模和调度, 组合设备群的建模和调度更为复杂. 组合设备群除了具有单组合设备的典型加工需求外, 还具有其独有的特征[80−84]: a) 组合设备的拓扑结构和机械手构型多变; b) 缓冲模块容量为 1 或 2; c) 各单组合设备之间的耦合依赖; d) 缓冲模块拥塞的“传播”致使整个系统的生产周期难以确定; e) 缓冲模块会引起每台组合设备中的晶圆数目多变, 导致难以形成稳定的晶圆加工; f) 多个机械手并发作业与多维多约束耦合致使系统调度模型极其复杂.

当前基于 Petri 网的组合设备建模和调度大多分散于各类科技文献中, 缺少全面的梳理和呈现. 为此, 本文对基于 Petri 网的组合设备相关理论和调度方法进行整理归纳, 综述当前研究现状, 探讨组合设备调度的一些潜在研究方向. 本文首先归纳组合设备基本结构和分类、晶圆流及调度策略; 然后分析面向进程 Petri 网 (Process-oriented Petri net, POPN) 和面向资源 Petri 网 (Resource-oriented Petri net, ROPN) 对晶圆制造中组合设备的建模; 重点梳理和剖析 POPN 与 ROPN 在晶圆制造几类典型调度问题中的应用、最新进展和存在问题; 最后提出进一步可能的研究方向.

1 组合设备

本节主要归纳单组合设备与组合设备群的基本结构和分类, 总结组合设备在晶圆制造过程中的常见晶圆流及机械手常用调度策略.

1.1 单组合设备

根据组合设备中机械手结构差异, 可分为单臂组合设备、双臂组合设备, 如图 1 所示. 通常双臂机械手由 2 个固定在相反方向的手臂构成. 由于内部空间限制, 一台组合设备通常由 4 ~ 6 个 PM、1 个传输模块 (Transport module, TM) 和 2 个用于装卸晶圆盒的真空锁组成. 所有 PM 呈径向排列, TM 被安放在组合设备的中央位置, 晶圆由 TM 依次在 PM 之间进行传递与加工.

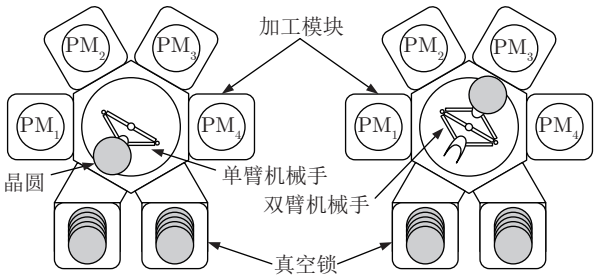


图 1 组合设备示意图

Fig. 1 Sketch of cluster tools

在一台组合设备中, 一个晶圆盒可容纳 25 枚晶圆[16]. 首先由 TM 将一枚待加工的晶圆从真空锁中卸载, 然后按照预先设定的工艺依次载入各 PM 中, 在所需 PM 加工完后, TM 再将其放回真空锁. 组合设备采用单晶圆加工技术, 即一个 PM 一次只加工一枚晶圆, 这种独特的加工技术能有效应对大尺寸晶圆加工需求并保证晶圆的质量[11].

1.2　组合设备群

由 d ($d \geq 2$) 台单组合设备, 彼此之间通过缓冲模块连接成线型或树型的设备称为组合设备群或 d-组合设备. 若组合的设备全部是单/双臂, 则称为单/双臂组合设备群[85]; 若组合的设备既有单臂也有双臂, 则称为混合组合设备群[86−87]. 因此, 根据构成组合设备群的单台设备类型, 可分为单臂、双臂及混合组合设备群. 根据合成的拓扑结构和单台设备类型组合又可分为线型单臂、线型双臂、线型混合、树型单臂、树型双臂、树型混合 6 类组合设备群.

图 2 和图 3 分别表示线型混合和树型单臂组合设备群, 带箭头曲线表示晶圆的加工路径. 将带有真空锁的设备称为头设备, 记为 C_1. C_1 与各设备之间存在一条有向路径, 若 C_j 至 C_1 的距离大于 C_i 至 C_1 的距离, 则称 C_j 为 C_i 的下游设备; 反之, 则称 C_j 为 C_i 的上游设备[86]. 除了头设备, 若 C_i 只有一台相邻的上游设备, 而没有下游设备, 则称 C_i 为叶设备. 线型组合设备群中只有 1 台叶设备, 如图 2 中 C_d. 树型组合设备群中至少存在 2 台叶设备, 如图 3 中 C_3 与 C_5. 若 C_i 至少存在 3 台相邻设备, 则称 C_i 为叉型设备, 如图 3 中 C_2. 叉型设备只存在于树型组合设备群且 1 台树型组合设备群至少存在 1 台叉型设备[87].

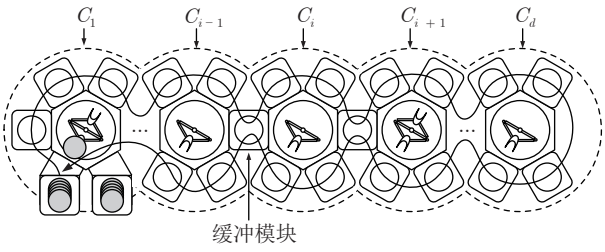


图 2　线型混合组合设备群

Fig. 2　Linear hybrid multi-cluster tools

1.3　晶圆流模式

晶圆在组合设备内的加工路径用晶圆流模式描述. 通常晶圆流模式可分为串行、串−并行、重入和多品种混流 4 种类型. 由于组合设备可重构, 因而可配置不同 PM 和执行不同加工路径实现晶圆制造过程中不同的晶圆流[14].

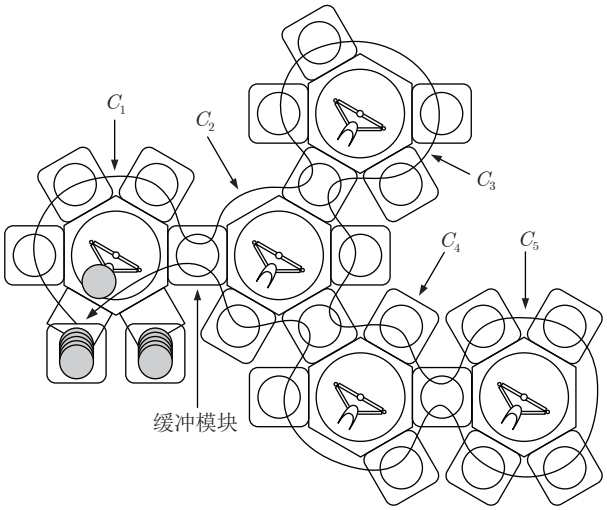
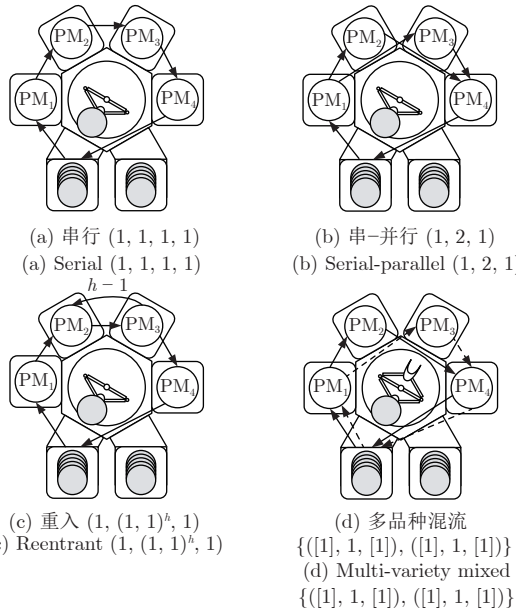


图 3　树型单臂组合设备群

Fig. 3　Tree-like single-arm multi-cluster tools

系统中每一道工序只配置一个 PM 执行串行加工, 其晶圆流表示为 (1, 1, ⋯, 1). 图 4(a) 所示单臂组合设备中的 4 道工序由 4 个 PM 串行加工, 其晶圆流表示为 (1, 1, 1, 1). 系统配置 m_i ($m_i > 1$) 个 PM 并行执行第 i 道工序, 其晶圆流可表示为 (m_1, m_2, ⋯, m_n). 图 4(b) 所示单臂组合设备的 3 道工序由 4 个 PM 串−并行加工, 其中 PM_1 参与第 1 道工序, PM_2 和 PM_3 为并行模块, 参与第 2 道工序, PM_4 参与第 3 道工序, 其晶圆流表示为 (1, 2, 1).

系统配置一个或若干个 PM 执行重入加工, 其



(a) 串行 (1, 1, 1, 1)
(a) Serial (1, 1, 1, 1)

(b) 串−并行 (1, 2, 1)
(b) Serial-parallel (1, 2, 1)

(c) 重入 (1, (1, 1)^h, 1)
(c) Reentrant (1, (1, 1)^h, 1)

(d) 多品种混流
{([1], 1, [1]), ([1], 1, [1])}
(d) Multi-variety mixed
{([1], 1, [1]), ([1], 1, [1])}

图 4　组合设备不同晶圆流模式

Fig. 4　Different wafer flow patterns for cluster tools

晶圆流可表示为 $(m_1, \cdots, (m_i, \cdots, m_j)^h, \cdots, m_n)$, 其中 $(m_i, \cdots, m_j)^h$ 表示重入模块, h 是重复加工次数. 图 4(c) 所示单臂组合设备中的 4 道工序由 4 个 PM 执行加工, 其中 PM_2 和 PM_3 是重入模块. 系统执行第 1 道工序后, 重复执行 h 次第 2 和第 3 道工序, 再执行第 4 道工序, 其晶圆流表示为 $(1, (1, 1)^h, 1)$.

通常同一批次的晶圆, 其晶圆类型一致, 即加工的晶圆具有相同晶圆流和加工时间. 由不同类型的晶圆混合在同一批次中加工而形成的晶圆流, 称为多品种混流[60−61]. 图 4(d) 为双臂组合设备两种类型的晶圆混合加工, 实线/虚线表示晶圆类型 1/2 的加工路径, 其晶圆流为 {([1], 1, [1]), ([1], 1, [1])}, 其中 $[\cdot]$ 表示共享 PM.

1.4 机械手调度策略

组合设备加工晶圆的过程, 一般可分为初始暂态、稳态与终止暂态 3 个阶段[16]. 初始暂态是指系统由空闲状态逐步转入满载加工状态的过程. 终止暂态是指系统由满载加工状态逐步转入空闲状态的过程. 稳态是指组合设备满载加工晶圆的状态, 此时加工效率最高. 在稳态下, 组合设备呈 k ($k \geq 1$) 晶圆周期加工晶圆. k-晶圆周期是指在一个连续的 TM 作业周期内, 有 k 枚晶圆进入组合设备, 同时有 k 枚晶圆从组合设备离开[14].

稳态下组合设备主要呈现加工主导或传输主导两种加工状态[16]. 在加工主导状态下, TM 存在空闲时间, 系统周期由 PM 的加工时间决定; 在传输主导状态下, TM 无空闲时间, 系统周期表现为 TM 任务时间的函数. 通常 TM 的装载、卸载、移动时间远小于 PM 加工时间, 因此组合设备在稳态运行时常处于加工主导状态. 处于加工主导状态的单臂组合设备, 拉式策略是最优调度策略[100−101]; 对于双臂组合设备而言, 交换策略是最优调度策略[102−103].

图 5 是采用拉式策略调度晶圆流为 (1, 1, 1, 1) 的单臂组合设备. TM 在 1-晶圆周期内执行以下任务序列: 移动至工序 n ($n = 4$) 并等待 → 从工序 n 中卸载一枚晶圆 → 移动至真空锁 → 将晶圆载入至真空锁 (有一枚加工完的晶圆离开组合设备) → 移动至工序 $n-1$ 并等待 → 从工序 $n-1$ 卸载一枚晶圆 → 移动至工序 n → 将晶圆载入至工序 n → $\cdots$ → 移动至工序 i 并等待 → 从工序 i 卸载一枚晶圆 → 移动至工序 $i+1$ → 将晶圆载入至工序 $i+1$ → 移动至工序

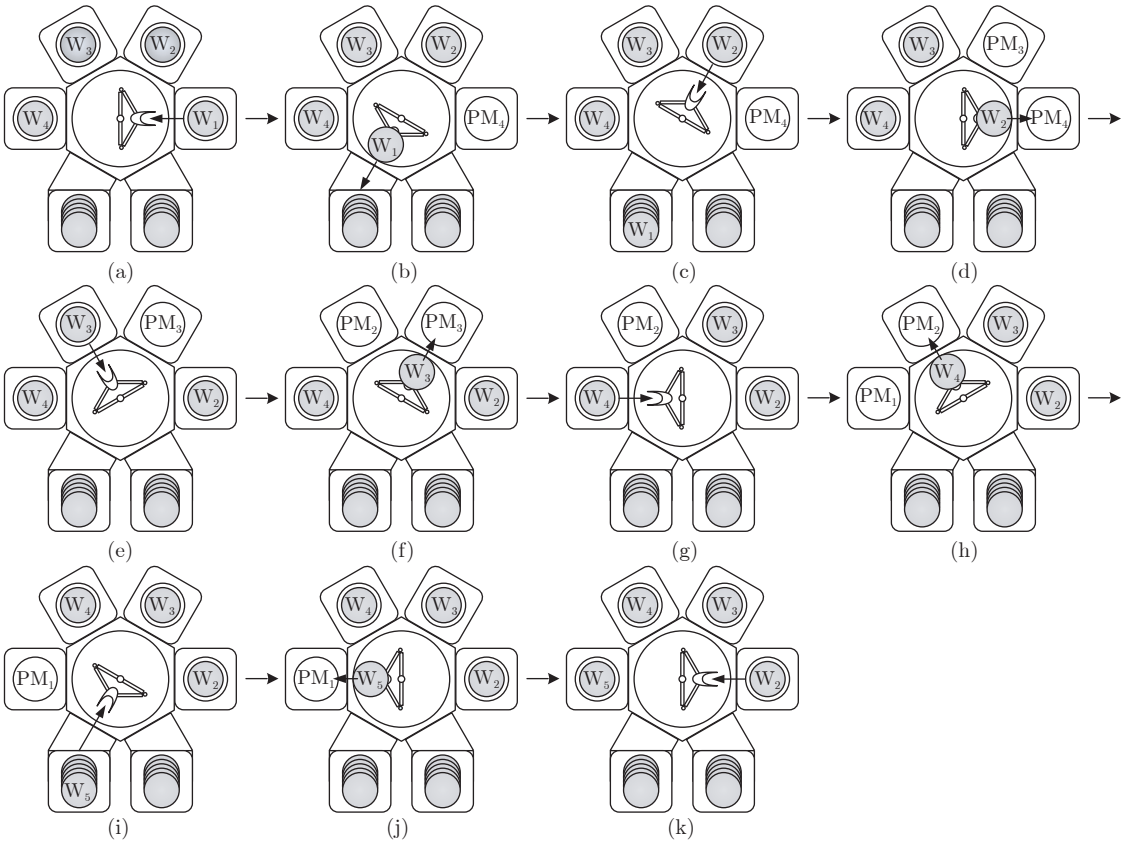


图 5 晶圆流为 (1, 1, 1, 1) 的拉式策略

Fig. 5 Backward strategy for wafer flow pattern (1, 1, 1, 1)

$i-1$ 并等待 → 从工序 $i-1$ 卸载一枚晶圆 → ⋯ → 移动至工序 1 并等待 → 从工序 1 中卸载一枚晶圆 → 移动至工序 2 → 将晶圆装载入工序 2 → 移动至真空锁并等待 → 从真空锁卸载一枚晶圆 (有一枚未加工的晶圆进入组合设备) → 移动至工序 1 → 将晶圆装载入工序 1. 采用拉式策略, TM 在 1-晶圆周期内作业顺序是: 工序 n → 工序 $n-1$ → ⋯ → 工序 1.

图 6 是采用交换策略调度晶圆流为 (1, 1, 1, 1) 的双臂组合设备. TM 在 1-晶圆周期内执行以下任务序列: 从真空锁中卸载一枚晶圆 (此时 TM 的一个机械手持有晶圆, 另一个是空载状态, 有一枚未加工的晶圆进入组合设备) → 移动至工序 1 并等待 → 执行交换操作 → 移动至工序 2 并等待 → 执行交换操作 → ⋯ → 移动至工序 i 并等待 → 执行交换操作 → ⋯ → 移动至工序 n ($n=4$) 并等待 → 执行交换操作 → 移动至真空锁 → 将完成加工的晶圆装入真空锁 (有一枚加工完的晶圆离开组合设备). TM 在工序 i 执行交换操作顺序为: 空载的机械手从工序 i 中卸载晶圆, 旋转, 持有晶圆的机械手将晶圆装载至工序 i. 采用交换策略, TM 在 1-晶圆周期内的作业顺序是: 工序 1 → 工序 2 → ⋯ → 工序 n.

2　组合设备 Petri 网建模

组合设备加工晶圆的过程中存在同步、并发、资源共享与竞争等特性. Petri 网能动态地描述此类系统特性. 基于 Petri 网对晶圆制造的组合设备建模主要分为 POPN 和 ROPN 两类. POPN 和 ROPN 方法分别以 Lee 等[12] 和 Wu 等[7, 17] 为主导.

2.1　面向进程的 Petri 网建模

POPN 是对制造过程的加工序列和资源进行建模. S*PR 是自动化制造系统中应用广泛的一类 Petri 网, 也是 POPN 中的一种子类. 下面给出 S*PR 对自动化制造系统建模的一般定义.

定义 1[5]**.** 一个 S*PR 网 $N=(P_0\cup P_R\cup P_A, T, F, W)$ 由一组子网 $N^x=(\{p_0^x\}\cup P_R^x\cup P_A^x, T^x, F^x, W^x)$ 及共享公共库所组成, 即 $N=\cup_{x\in\mathbf{N}_J}N^x$, $\mathbf{N}_J=\{i\in\mathbf{N}^+=\{1,2,\cdots\}|N^i$ 是 N 的第 i 个进程子网$\}$, 其中:

1) $\{p_0^x\}$、P_R^x、P_A^x 分别称为 N^x 的空闲库所、资源库所和活动库所;

2) $P_A^x\neq\emptyset$, $P_R^x\neq\emptyset$, $p_0^x\notin P_A^x$, $(\{p_0^x\}\cup P_A^x)\bigcap$

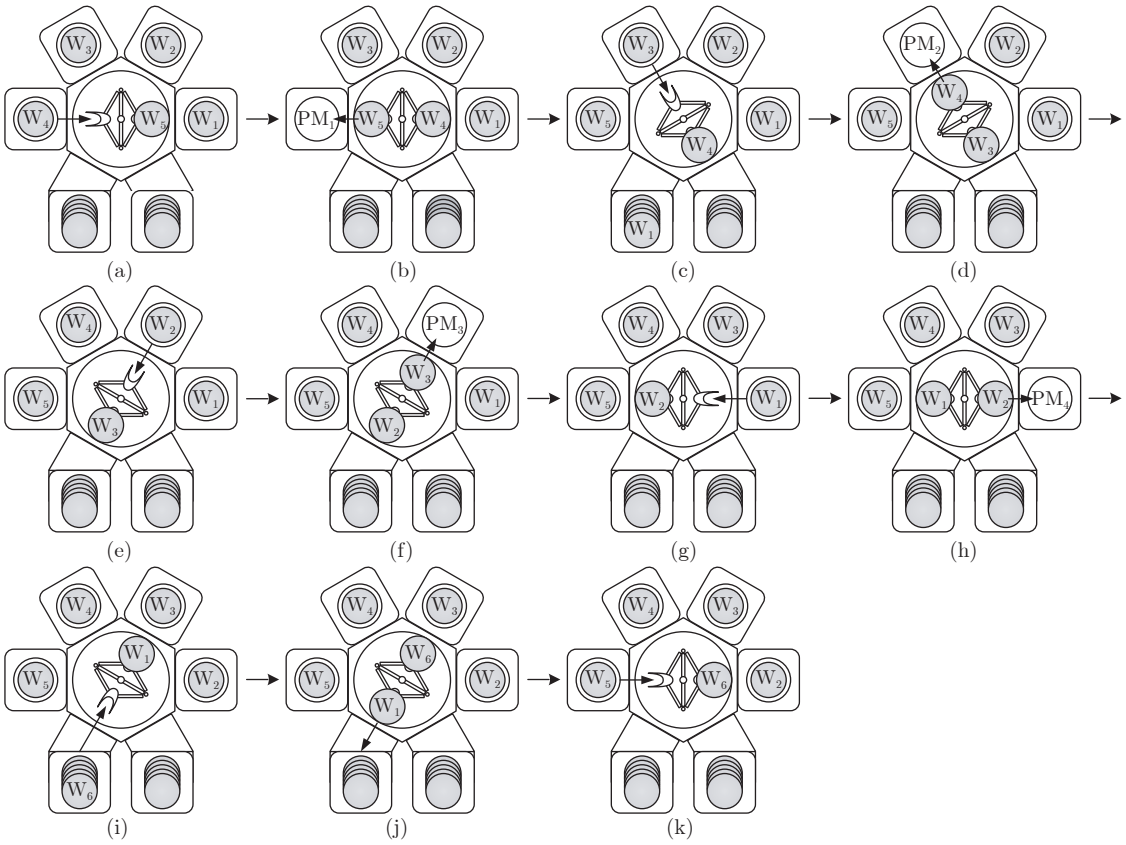


图 6　晶圆流为 (1, 1, 1, 1) 的交换策略

Fig. 6　Swap strategy for wafer flow pattern (1, 1, 1, 1)

$P_R^x = \emptyset$;

3) $W = W_A \cup W_R$, 其中 W_A: $((P_A \cup P_0) \times T) \cup (T \times (P_A \cup P_0)) \to \{0, 1\}$ 有 $\forall x \neq y \in \mathbf{N}_J$, $((P_A^y \cup \{p_0^y\}) \times T^x) \cup (T^x \times (P_A^y \cup \{p_0^y\})) \to \{0\}$ 且 W_R: $(P_R \times T) \cup (T \times P_R) \to \mathbf{N} = \{0, 1, \cdots\}$;

4) N^x, N^y $(x \neq y)$ 可通过只共享一组公共资源库所合并;

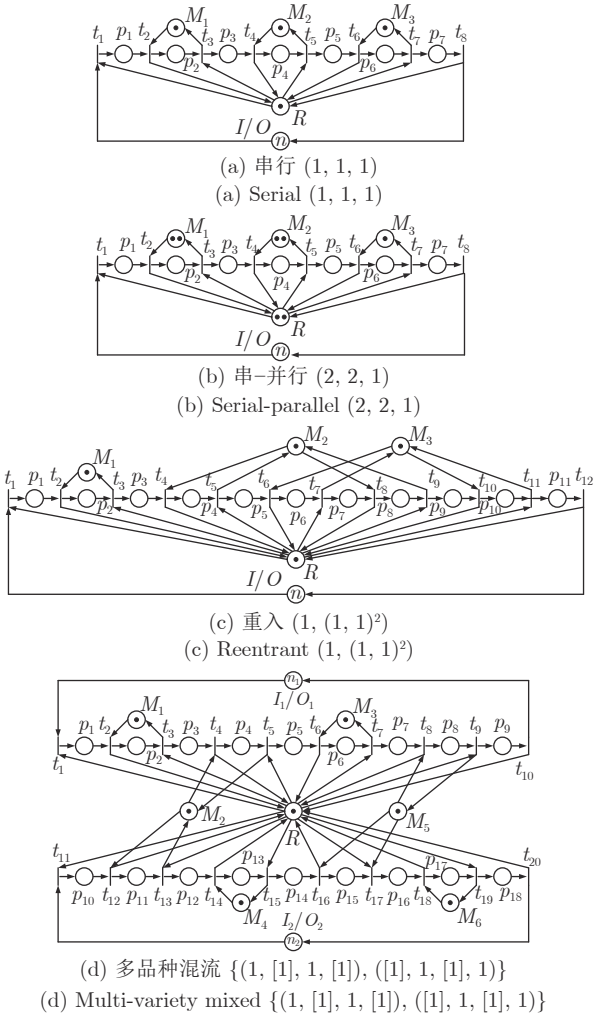
5) $\forall r \in P_R$, 存在唯一一个 P-半流 I_r, 使得 $\|I_r\| \cap P_R = \{r\}$, $\|I_r\| \cap P_0 = \emptyset$, $\|I_r\| \cap P_A \neq \emptyset$, 与 $I_r(r) = 1$ 成立, 其中 $P_A = \cup_{r \in P_R}(\|I_r\| \setminus \{r\})$;

6) 若从 N^x 中删除 P_R^x 中的资源库所及其相关的有向弧, 生成的子网 $N^{x'}$ 是一个强连通状态机.

采用 POPN 对组合设备的晶圆制造过程进行建模, 几种常见晶圆流的 POPN 模型如图 7 所示. p_i 表示操作库所, 存在托肯表示 PM 正在加工晶圆或正在搬运晶圆. M_i 与 R 表示资源库所, R 托肯数为 1/2 表示单/双臂机械手, M_i 托肯数表示工序 i 中并行 PM 的数量. I/O 表示真空锁, 其托肯数表示晶圆数量. 变迁 t_i 表示 TM 装载一枚晶圆至真空锁或 PM 中, 或从其中卸载一枚晶圆.

图 7(a) 表示串行晶圆流 (1, 1, 1) 由 PM_1 至 PM_3 串行加工. 图 7(b) 表示串−并行晶圆流 (2, 2, 1) 由 PM_1 至 PM_5 串−并行加工, 其中 M_1 与 M_2 的托肯数为 2 分别表示 PM_1 与 PM_2 并行, PM_3 与 PM_4 并行. 图 7(c) 表示重入晶圆流 $(1, (1, 1)^2)$ 由 PM_1 至 PM_3 加工. 先后发射变迁 $t_4 \sim t_{11}$ 表示 TM 将晶圆装载至 PM_2 与 PM_3 及从其中卸载晶圆, 实现 PM_2 与 PM_3 的重入加工. 图 7(d) 表示多品种混流 {(1, [1], 1, [1]), ([1], 1, [1], 1)}, 其对应加工路径是 $PM_1 \to PM_2 \to PM_3 \to PM_5$ 和 $PM_2 \to PM_4 \to PM_5 \to PM_6$.

采用 POPN 对组合设备群建模就是分别对每一台组合设备及缓冲模块进行建模. 图 8 为由一台单臂和双臂组合设备及一个缓冲模块构成的混合组合设备群 POPN 模型, 其中资源库所 M_{11}、M_{13}、M_{21}、M_{22}、M_{23} 和 B 分别表示单臂和双臂设备的 5 个 PM 及缓冲模块. B 中托肯数表示缓冲模块容量, 其他变迁和库所与单组合设备一样.



(a) 串行 (1, 1, 1)
(a) Serial (1, 1, 1)

(b) 串−并行 (2, 2, 1)
(b) Serial-parallel (2, 2, 1)

(c) 重入 $(1, (1, 1)^2)$
(c) Reentrant $(1, (1, 1)^2)$

(d) 多品种混流 {(1, [1], 1, [1]), ([1], 1, [1], 1)}
(d) Multi-variety mixed {(1, [1], 1, [1]), ([1], 1, [1], 1)}

图 7 不同晶圆流的 POPN 模型

Fig. 7 POPN models for different wafer flow patterns

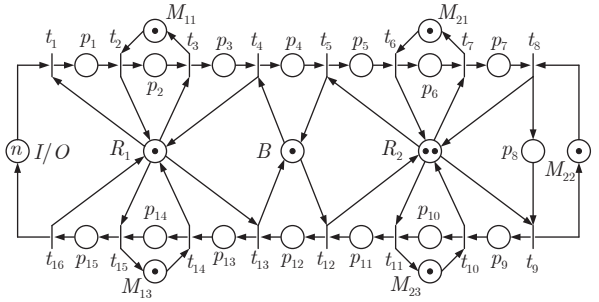


图 8 混合 2-组合设备的 POPN 模型

Fig. 8 The POPN model for a hybrid 2-cluster tools

2.2 面向资源的 Petri 网建模

Wu 等[7] 开创性提出 ROPN 对自动化制造系统进行建模, 并用于组合设备的建模、分析、调度与控制[17]. ROPN 建模方法视零部件制造过程为动态资源分配过程, 用一个库所表示一类资源, 同时让待加工零部件竞争各类资源. 下面给出 ROPN 对自动化制造系统建模的形式化定义.

定义 2[7]**.** 自动化制造系统的 ROPN 被定义为一个多元组 $N = (P \cup \{p_0\}, T, I, O, M, K)$, 其中:

1) P 是有限库所集, 表示不同种类的资源;

2) $\{p_0\}$ 是空闲库所, 表示装卸中心, 可容纳原材料及成品;

3) T 是有限变迁集, 表示工件在不同资源之间传递, 同时满足 $P \cup T \neq \emptyset$ 且 $P \cap T = \emptyset$;

4) $I : P \times T \to \mathbf{N}$ 是输入函数;

5) $O : P \times T \to \mathbf{N}$ 是输出函数;

6) $M : P \to \mathbf{N}$ 是系统标识或状态;

7) $K : P \to \mathbf{N}^+$ 是容量函数, K_p 表示资源 $p \in P$ 可容纳的最大托肯数.

采用 ROPN 对组合设备的晶圆制造过程进行建模, 将真空锁视为不具备加工功能的第 0 与 $n+1$ 道工序, 资源库所 p_i ($i \in \mathbf{N}_n$)、R 用一个双圆圈表示各类资源. p_i ($i \in \mathbf{N}_n^+$) 的托肯数为 m_i 表示第 i 道工序有 m_i 个 PM 执行并行加工. p_0 的托肯数表示真空锁中晶圆数量. R 的托肯数为 1/2 表示是单/双臂.

图 9 表示晶圆流为 $(m_1, m_2, \cdots, m_n)$ 单臂组合设备的 ROPN 模型. 采用拉式策略对单臂组合设备进行建模, q_i ($i \in \mathbf{N}_n$) 表示 TM 从第 i 道工序卸载晶圆前的等待. 变迁 s_{i1}、s_{i2} 分别表示 TM 向第 i 道工序载入及从其中卸载一枚晶圆. 变迁 x_i 表示 TM 持有一枚晶圆从工序 i 移动至工序 $i+1$ 的作业. 变迁 y_i ($i \in \mathbf{N}_{n-1}$) 表示 TM 空载下从工序 $i+2$ 移动至工序 i 的作业. 变迁 y_n 表示 TM 空载下从工序 1 移动至工序 n 的作业. 库所 z_{ij} ($j \in \{0, 1\}$) 用于连接相邻两道工序的辅助库所.

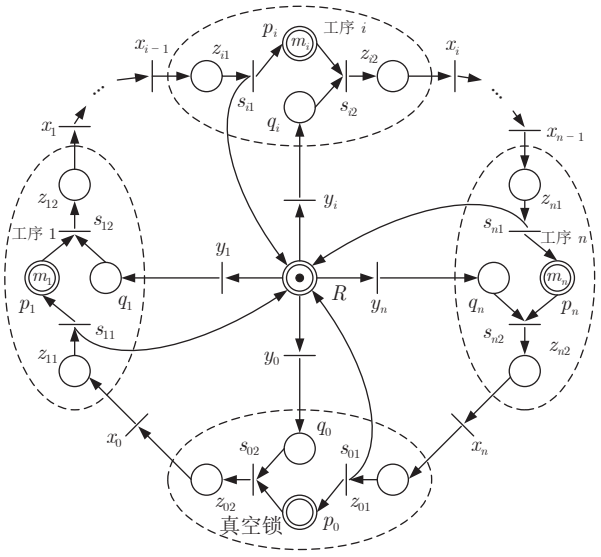


图 9　单臂组合设备的 ROPN 模型

Fig. 9　The ROPN model for a single-arm cluster tool

图 10 表示晶圆流为 $(m_1, m_2, \cdots, m_n)$ 双臂组合设备的 ROPN 模型. 采用交换策略对双臂组合设备进行建模, 时间库所 q_{ij} ($i \in \mathbf{N}_n^+$; $j \in \mathbf{N}_3^+$) 分别表示 TM 在第 i 道工序执行交换过程、交换前及交换后的等待时间. 变迁 u_{i1}、l_{i1} 分别表示 TM 从第 i 道工序卸载和装载一枚晶圆的作业. 变迁 x_0 表示 TM 从真空锁中卸载一枚晶圆且移动至工序 1 的作业, 变迁 x_i 表示 TM 从工序 i 移动至工序 $i+1$ 的作业. 为防止 ROPN 模型进入死锁状态, 需要添加一个控制库所 c, 保障模型无死锁运行.

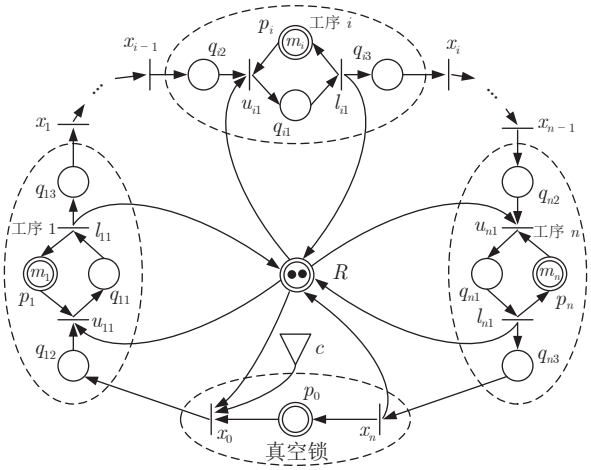


图 10　双臂组合设备的 ROPN 模型

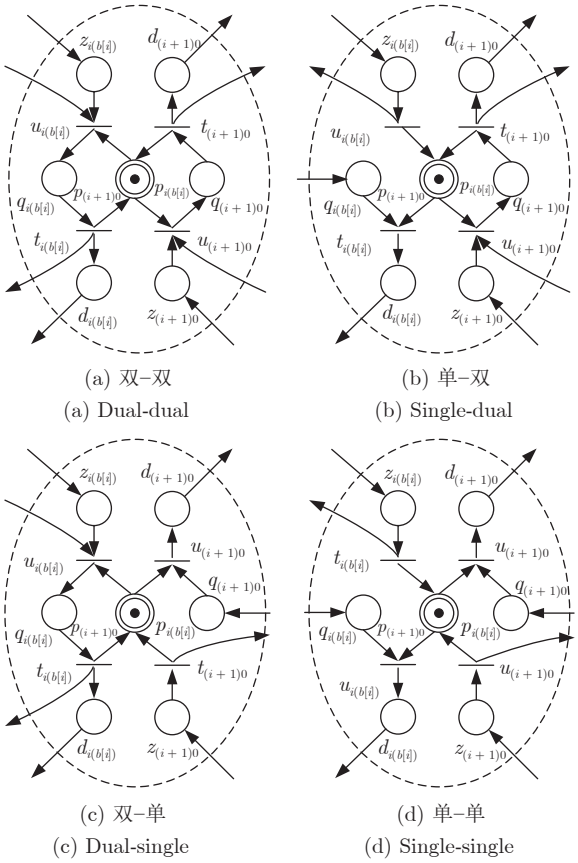
Fig. 10　The ROPN model for a dual-arm cluster tool

采用 ROPN 对具有重入模块的组合设备进行建模时, 只需要在重入模块中增加连接两道工序的宏变迁和一个保障模型无死锁运行的控制库所[45−47]. 以图 10 为例, 对于 $(m_i, \cdots, m_j)^h$ 的重入模块, 只需要在库所 q_{j3} 与 q_{i2} 之间增加宏变迁 t_{ji} 和控制库所 c.

采用 ROPN 对组合设备群建模, 先将组合设备群分解成单组合设备和缓冲模块, 再分别建模. 将连接相邻设备的缓冲模块视为一个 PM 的输出与输入模块, 如第 i 个缓冲模块用库所 $p_{i(b[i])}$ 和 $p_{(i+1)0}$ 分别表示 C_i 中第 $b[i]$ 道工序和 C_{i+1} 中的第 0 道工序. 根据单组合设备类型的不同, 相邻设备的组合方式可分为双−双、单−双、双−单和单−单 4 种情形[84]. 对于双−双情形, C_i 中第 $b[i]$ 道工序模型由 $z_{i(b[i])}$、$u_{i(b[i])}$、$q_{i(b[i])}$、$p_{i(b[i])}$、$t_{i(b[i])}$、$d_{i(b[i])}$ 及相互连接的有向弧构成. C_{i+1} 中第 0 道工序模型由 $z_{(i+1)0}$、$q_{(i+1)0}$、$d_{(i+1)0}$、$u_{(i+1)0}$、$t_{(i+1)0}$、$p_{(i+1)0}$ 及相互连接的有向弧构成, 其 ROPN 模型见图 11(a). 类似可得单−双、双−单、单−单的 ROPN 模型, 见图 11(b) ~ 图 11(d).

2.3　组合设备 POPN 与 ROPN 建模比较

POPN 和 ROPN 都能有效应用于晶圆制造过程中组合设备的建模. POPN 是基于活动序列和资源共享对晶圆加工过程的动态行为进行顺序建模. ROPN 是构建以资源为核心, 以托肯访问资源路径模拟晶圆制造过程. 下面从建模能力、模型通用性、



(a) 双–双 (b) 单–双

(a) Dual-dual (b) Single-dual

(c) 双–单 (d) 单–单

(c) Dual-single (d) Single-single

图 11 邻接组合设备 ROPN 模型

Fig. 11 The ROPN model of adjacent cluster tools

模型结构 3 个方面对 POPN 和 ROPN 进行比较.

1) POPN 建模能力比 ROPN 更强. POPN 采用显式建模, 建模规范常见 S*PR 网和 S^3PR 网[5]. ROPN 采用隐式建模, 不能直观显示晶圆加工路径, 需要引入控制规则描述晶圆加工过程[7].

2) ROPN 比 POPN 模型通用性更强. POPN 是一种确定活动序列的建模过程, 不同晶圆流和加工状态需要建立不同的模型. ROPN 是独立于晶圆流的建模方式, 即使晶圆流和加工状态都不同, 模型结构也不会改变[16].

3) ROPN 比 POPN 模型结构更简约. POPN 对加工步骤采取顺序建模, 其加工的过程可能出现聚合、分解与重入, 使得其所表示托肯的数量可能在模型演化过程中循环增加, 导致无限网的出现. ROPN 以资源为核心进行建模, 每一类资源用一个库所表示, 其资源种类是有限的, 因此, ROPN 是有限网[7]. 此外, ROPN 是一种模块化、结构化建模方法, 各子系统/进程的资源界限清晰[16].

3 基于 Petri 网的单组合设备调度

本节归纳和分析晶圆制造中驻留时间约束、作业时间波动、晶圆重入加工、多品种晶圆、PM 清洗、PM 故障几类典型调度问题及调度方法, 并对比分析基于 POPN 与 ROPN 在解决这几类调度问题中的现有方法和优缺点.

3.1 晶圆驻留时间约束调度

调度具有驻留时间约束的组合设备, 除了要使系统的生产周期时间最小或吞吐量最大, 同时要保证系统满足可调度性[16], 即晶圆在工序 i 的驻留时间 τ_i 满足不等式 $a_i \le \tau_i \le a_i + \delta_i$, 其中 a_i 为晶圆在工序 i 的加工时间, δ_i 为晶圆在工序 i 加工完后允许停留的最长时间.

1) 基于 POPN 模型的调度

Kim 等[11] 首次采用时延事件图 (一种 POPN 的子类) 提出晶圆驻留时间约束的系统性分析方法. 根据所建立双臂组合设备时延事件图描述稳态下晶圆动态加工过程. 晶圆驻留时间约束取决于如何平衡每道加工工序间负荷的均衡程度. 为此, 提出全等待交换策略, 即通过延长晶圆在 TM 的等待时间, 从而减少晶圆在 PM 内的驻留时间. 根据所建立的时延事件图将调度问题转化为求解线性规划问题, 若线性规划模型存在可行解, 则系统是可调度的.

Lee 等[12] 引入负时间库所和负标识, 结合时延事件图得到双臂组合设备负事件图 (一种 POPN 的子类). 在此模型的基础上, 建立线性规划模型, 并提出驻留时间约束的双臂组合设备可调度性判定的充分必要条件. Lim 等[13] 进一步基于负事件图模型提出一类 TM 无干涉序列的可调度性条件, 并证明此序列在大多数情况下是最优的. 在晶圆流、装卸时间参数一致的情况下, 随机生成 PM 的加工时间组成实例. TM 无干涉序列在随机生成的 29 908 个实例中[13], 满足可行调度实例的比例为 81.16%, 性能优于拉式与交换序列.

除了采用时延事件图和负事件图模型研究组合设备的可调度性和最优性, 综合运用面向进程时延 Petri 网 (一种 POPN 的子类) 与混合整数规划模型研究系统的可调度性与最优性, 也是一个重要方法. Jung 等[14] 针对不同晶圆流模式、设备类型、驻留时间约束等要求建立时延 Petri 网, 结合模型及其状态演化方程特性, 建立混合整数规划模型寻找系统最优调度. Roh 等[15] 研究所有可能 k-晶圆周期调度中的最大晶圆延迟. 通过分析最坏情况下的晶圆延迟与最大周期、并行 PM 数量、非瓶颈工序和瓶颈工序之间的关系, 建立混合整数规划模型优化最坏情况下的晶圆延迟.

2) 基于 ROPN 模型的调度

Wu 等[16] 首次建立单臂组合设备 ROPN 模型,

通过分析 PM 工作负载的上界和下界, TM 作业时间及系统周期之间的关系, 给出系统可调度的条件, 并提出解析表达式获得 TM 等待时间的最优 1-晶圆周期调度. 基于同样的研究思路, Wu 等[17] 分析驻留时间约束下双臂组合设备的可调度性及最优性. 文献 [16−17] 都是假设在加工主导状态下, 单/双臂组合设备采用拉式/交换策略是最优调度 TM 作业顺序的策略. Yang 等[18] 不限于采取拉式策略调度单臂组合设备 TM 顺序, 进一步分析稳态下系统满足驻留时间约束的可调度性和最优性.

对于驻留时间约束的单臂组合设备暂态过程的可调度性和最优性, Qiao 等[19] 建立初始暂态 ROPN 模型描述设备运行的动态过程. 针对各道工序工作负载可以合理均衡的情况, 提出解析调度算法; 对于其他情况, 建立线性规划模型寻找可行且最优调度. 基于同样思路, Zhu 等[20] 优化终止暂态过程. 文献 [19−20] 只考虑晶圆流为串行, Yang 等[21] 进一步考虑晶圆流为串−并行的初始与终止暂态过程, 并建立两个线性规划模型对暂态过程进行可调度性和最优性分析. Qiao 等[22] 针对单臂组合设备晶圆批量切换, 系统维护, PM 故障等引起的终止暂态过程进行可调度性和最优性分析.

为保障和提升晶圆加工质量, 减少晶圆延迟有助于优化组合设备的加工周期. Zhu 等[23−24] 研究了晶圆后置加工时间优化问题, 通过调节机械手等待时间, 同时达到多个调度目标: a) 最大化系统的吞吐量; b) 最小化后置加工时间之和; c) 最小化各道工序的后置加工时间之差. Xiong 等[25] 基于 ROPN 模型采用拉式和尽早加工策略分析单臂组合设备的稳态运行行为, 对瓶颈工序存在晶圆延迟的上游工序, 通过适当调整机械手的等待时间减少晶圆延迟.

3) 评论

基于 POPN 模型分析组合设备的可调度性和最优性主要有时延事件图、负事件图、时延 Petri 网. 负事件图相比时延事件图的结构更复杂, 但具有更强的连通性和建模能力[12]. 时延 Perti 网中去掉冲突库所和与之连接的有向弧, 剩余模型结构为时延事件图[14]. 时延事件图中每个库所只有一个输出与输入变迁, 在一定程度上可以消除模型有冲突的库所, 提高运算效率. 采用时延 Petri 网建立混合整数规划模型寻找系统最优调度, 模型简单易理解; 其次, 对于晶圆重入加工或多品种晶圆加工的驻留时间约束, 也能进行处理. 然而, POPN 模型都无法克服组合爆炸问题[48].

基于 ROPN 模型调度组合设备将一个复杂的离散优化问题转换为决定 TM 等待时间的连续优化问题[48], 并利用组合设备的运行特点, 可获得解析表达式的最优解. 基于 ROPN 模型的可调度性和最优性分析[16−21], 不但模型简单、通用性强, 而且能描述系统的暂态与稳态的加工过程, 同时为分析驻留时间约束下的作业时间波动、晶圆重入加工、多品种晶圆加工、PM 故障及组合设备群的可调度性和最优性奠定了理论基础.

3.2 作业时间波动调度

在实际的生产系统中 PM 处理延迟、通信延迟或计算机处理延迟等异常事件的发生会引起作业时间随机扰动, 称为作业时间波动. 此时, 组合设备的 PM 与 TM 作业时间不是一个确定的值, 而是一个区间. 调度作业时间波动的组合设备主要考虑问题: 一是调度组合设备在作业时间波动下恢复到稳态加工的可行性与最优性; 二是组合设备在作业时间波动下满足驻留时间约束的可调度性和最优性.

1) 基于 POPN 模型的调度

Kim 等[26] 首次分析双臂组合设备在作业时间波动下恢复到稳态加工的可行性. 通过适当延迟 TM 活动时间, 使中断的调度模式在有限的时间内继续运行. 采用极大法代数系统理论和时延事件图, 提出系统稳态运行的条件. Kim 等[27] 将此理论推广到单臂组合设备. Kim 等[28] 将此理论和模型应用到一种鲁棒性的反馈控制方法, 该方法使系统在作业时间波动后恢复到稳态且不违反驻留时间约束.

Kim 等[29] 基于时延 Petri 网模型, 采用尽早加工和交换策略, 首次提出驻留时间约束和作业时间波动的双臂组合设备的可调度条件, 将系统分为始终可调度和总是不可调度两种情形, 并给出这两种情形的判定条件, 然而该判据趋于保守. Lim 等[30] 采用负事件图建模提出一类不限于拉式与交换的自适应调度策略, 不仅使调度模式尽可能稳定, 而且能根据加工时间的变化对任务进行重调度, 使组合设备周期时间最小, 同时满足晶圆驻留时间约束.

2) 基于 ROPN 模型的调度

Wu 等[31] 首次建立双臂组合设备 ROPN 模型, 分析作业时间波动对晶圆延迟的影响, 提出一种两层架构的实时调度策略. 在上层假定系统在无作业时间波动下, 获得满足晶圆驻留时间约束的离线调度; 在底层, 通过观测设备运行状态在线调整 TM 等待时间. 实时调度的基本思想: 通过离线调度获得第 i 道工序 TM 的等待时间为 ω_i; 在实时调度中, 若观测到 TM 到达第 i 道工序的时间为 ν_i 之后; 若 $\omega_i \geq \nu_i$, 则第 i 道工序 TM 的等待时间为 $\omega_i - \nu_i$; 若 $\omega_i < \nu_i$, 则 TM 的等待时间为 0. 通过实时调度方

法尽可能抵消作业时间波动引起的晶圆驻留时间延迟. 在此基础上, Wu 等[32] 修正了文献 [29] 对于不可调度情形的判定, 并提出更精确的晶圆延迟上界, 进一步分析系统的可调度性和最优性[33].

双臂组合设备只有 TM 交换过程的等待时间会影响 PM 工作负载, 而单臂组合设备 TM 的任何等待时间都会影响 PM 工作负载. 因此, 调度具有驻留时间约束和作业时间波动的单臂比双臂组合设备更复杂[34−36]. Qiao 等[34] 建立单臂组合设备作业时间波动的 ROPN 模型, 在文献 [16] 调度理论的基础上, 分析作业时间波动引起的晶圆延迟上界, 并提出实时调度策略, 进一步研究组合设备在驻留时间约束和作业时间波动下的可调度性和最优性[35−37].

3) 评论

基于 POPN 模型调度组合设备主要研究系统在作业时间波动下恢复到稳态的可行性和最优性[15, 26−27], 以及组合设备在作业时间波动下满足驻留时间约束的可调度性和最优性[28−30], 充分利用线性系统理论研究组合设备的周期特性. 而基于 ROPN 模型调度主要考虑组合设备在作业时间波动下满足驻留时间约束的可调度性和最优性[31−35]. 采用实时调度策略抵消作业时间的波动, 此策略是简单的解析式控制规则. 因此, 该方法非常高效[36], 也是解决作业时间波动问题的一个重要思路.

3.3 晶圆重入加工调度

原子层沉积是典型的重入加工工艺, 与传统的化学气相沉积相比, 它可以很容易控制粒子的生成, 并且使用更低的处理温度达到离子层所需厚度, 已经被越来越多应用于沉积工艺[38]. 与晶圆无重入加工相比, 调度晶圆重入加工的组合设备更复杂[9]. 晶圆多次进入特定 PM 执行相同工艺加工, 致使组合设备容易陷入不可控的暂态, 极易造成设备拥塞, 甚至系统死锁直至加工停滞. 调度晶圆重入加工的组合设备主要关注: 一是系统无死锁下的最优调度; 二是驻留时间约束下系统的可调度性和最优性.

1) 基于 POPN 模型的调度

Zuberek[38] 首次对晶圆重入加工的单臂组合设备建立变迁时延 Petri 网模型, 并利用库所不变量分析组合设备的周期特性, 但未给出最优调度策略. Lee 等[39] 建立多种重入流模式的 POPN 模型, 提出防止系统死锁的充分必要条件, 同时根据模型特点和状态方程, 建立混合整数规划模型求解系统最优调度. 但算法复杂性随着 Petri 网模型的增大呈指数增长, 计算效率不高. 采用分枝界定算法[104−105], 在一定程度上可减少解的搜索空间, 提高算法的效率.

2) 基于 ROPN 模型的调度

Wu 等[40] 首次建立原子层沉积工艺晶圆流为 $(1, (1, 1)^h)$、$(1, (1, 2)^h)$ 和 $(1, (2, 1)^h)$ 的单臂组合设备 ROPN 模型, 提出一种系统无死锁运行的充分必要条件和递阶式调度体系, 将死锁避免与调度技术相结合, 所建模型本身和所提的死锁避免策略可以消除所有不可行的状态. 因此, 最优调度只在可行空间中搜索, 极大地降低了调度单臂组合设备重入加工的复杂度.

Wu 等[41] 建立晶圆流为 $(1, (1, 1)^2)$ 的双臂组合设备 ROPN 模型并提出采用交换策略系统会进入一个 3-晶圆周期运行. 在一个稳定周期内, 系统经历 3 个涉及重入加工的局部循环和 3 个涉及所有工序的全局循环. 系统经历 3 个局部循环后, 转入全局循环, 经过 3 个全局循环后再次切换到局部循环, 如此重复运行. 由于从局部循环进入全局循环, 系统将处于一种动态过程中. 在这种情形下系统可能无法达到稳态, 此时系统的周期也将达不到下界. Qiao 等[42] 建立晶圆流为 $(1, (1, 1)^h)$ 的双臂组合设备 ROPN 模型, 并推导出不同情况下系统可达稳态的条件. Wu 等[43] 针对系统周期达不到下界的情况, 提出 2-晶圆周期调度, 但这仍然不是最优的周期. 为此, Qiao 等[44] 采用改进传统的交换策略, 通过调节系统初始状态使系统达到 1-晶圆周期. 在周期时间意义上, 减少局部和全局周期的数量可以提高重入过程的吞吐量, 因此 1-晶圆周期是最优的.

Qiao 等[45] 建立晶圆流为 $(1, (1, 1)^h)$ 的双臂组合 ROPN 模型, 基于文献 [44] 的 1-晶圆周期调度策略, 提出满足驻留时间约束性条件及获得最优调度的算法. Qiao 等[46] 基于同样的模型, 针对文献 [45] 达不到 1-晶圆周期的情形, 提出第一步未进行交换操作的改进 1-晶圆周期调度策略, 再研究其可调度性和最优性.

调度具有晶圆重入的单臂组合设备比双臂更难在工序之间平衡 PM 的工作负载, 系统更容易陷入死锁[47]. 因此, 在驻留时间约束下调度具有重入加工的单臂组合设备更为复杂. Yang 等[47] 在文献 [40] 基础上, 针对晶圆流为 $(1, (1, 1)^2)$ 的单臂组合设备采取 TM 不同作业序列进行可调度性分析; 如果系统是可调度的, 则提出相应的解析式算法找到最优调度.

针对具有作业时间波动和驻留时间约束晶圆重入加工的双臂组合设备, Qiao 等[49−50] 首次对此类调度问题进行研究, 通过分析作业时间波动对晶圆延迟时间的影响, 提出一种鲁棒的离线调度和实时控制策略组成的实时调度算法, 并研究系统的可调度

性与最优性.

3) 评论

采用 POPN 模型对晶圆重入加工的组合设备进行调度, 可供选择的调度方案随重入次数的增加而急剧增加, 使得混合整数规划模型搜索最优解的效率不高. 分支界定算法在一定程度上可以提高算法的效率[104−106]. 但随着驻留时间约束与作业时间波动的加入, POPN 模型复杂性也相应增加. 因此, 在驻留时间约束与作业时间波动下, 基于 POPN 模型对晶圆重入加工的相关研究较少[14].

采用 ROPN 模型对晶圆重入加工的组合设备进行调度, 将死锁控制与调度策略相结合, 可消除不可行解, 降低系统模型复杂性[39−40]. 此外, 基于 ROPN 模型能较好地分析晶圆的状态演变过程, 通过解析式算法可获得系统最优 1-晶圆周期调度. 在最优 1-晶圆周期的基础上, 可进一步研究系统在驻留时间约束下的可调度性和最优性[45−52].

3.4 多品种晶圆调度

多品种晶圆调度包括晶圆混流调度与批量切换调度. 多品种晶圆混流调度是指在一个调度周期内, 有多种不同类型的晶圆进入和离开组合设备[53]. 多品种晶圆批量切换调度是指由调度一种类型晶圆的加工切换到另外一种晶圆类型的加工[54]. 下面从多品种晶圆的混流和批量切换调度进行归纳.

1) 多品种混流调度

针对无共享 PM 多品种混流调度, Lee 等[55] 提出并行拉式与交换策略, 建立混合整数规划模型寻找 TM 的最优排序. 在此基础上, Lee 等[56] 进一步研究有共享 PM 多品种混流调度问题, 提出交替拉式和交换序列达到最小周期调度的最优性条件, 并指出最优性条件适用于大多数实际情况; 若条件不满足, 则采用交替拉式和交换序列相结合的启发式调度方法寻求系统最小周期.

针对具有相同晶圆流但加工时间不同的多品种晶圆, Ko 等[57] 将工作负载的概念扩展到多品种晶圆加工, 并证明双臂组合设备中传统交换序列是最优的调度策略, 同时指出并行 PM 应尽可能被共享以平衡 PM 工作负载和减少系统周期时间. 在此基础上, Ko 等[58] 研究多品种混流并行 PM 如何影响双臂组合设备的晶圆延迟, 提出根据并行 PM 与工作负载的关系, 适当延迟 TM 作业时间可以减少晶圆延迟并能获得系统的最小周期.

针对有驻留时间约束无 PM 共享的多品种晶圆混流加工, 潘春荣等[59] 建立单臂组合设备多品种混流的 ROPN 模型并描述其加工过程, 通过引入虚拟晶圆加工方法平衡各道工序的负载, 采用拉式策略调度 TM 作业, 提出多品种晶圆混流加工的可调度和不可调度的判定条件, 并给出稳态调度的求解算法. 针对有驻留时间约束和 PM 共享的多品种混流调度, Wang 等[60−61] 提出复合拉式与交换序列调度 TM 作业, 为处理多资源间的竞争行为, 采用虚拟模块技术平衡每道工序工作负载, 并给出系统可调度的充分必要条件和寻找周期调度的多项式复杂度算法.

2) 多品种切换调度

针对晶圆批量切换问题, Kim 等[62] 建立两种批次的 POPN 切换模型和混合整数规划模型, 并采用分支界定算法寻找系统最优调度. 晶圆批量切换易引起系统出现更多的暂态过程, 从而降低生产效率甚至会造成系统死锁. 针对此问题, Lee 等[63] 建立两批次切换的 POPN 模型, 根据两批次的晶圆流差异模式提出死锁避免策略, 并提出批次切换拉式及交换是最优序列的充分必要条件.

针对晶圆批量切换的时间优化, Lee 等[65] 在给定 TM 任务序列下推导两批次晶圆切换完工时间的解析表达式, 并给出晶圆批量切换周期时间最小的调度算法. Lee 等[66] 进一步考虑晶圆流为并行的单臂组合设备在不限定 TM 作业顺序, 通过分析晶圆批量切换完工时间, 给出减少设备空闲和延迟时间的解析式算法.

3) 评论

基于 POPN 模型调度多品种混合晶圆的加工与切换, 其相关研究不多[53, 57−58, 62−64], 所考虑的假设条件也具有局限性, 例如只考虑加工的晶圆流一致[57−58]及两种类型的晶圆[62−63], 这在一定程度限制了加工多品种晶圆特性的应用. 基于 ROPN 模型的多品种晶圆混流与批量切换研究相对较少[59], 这是因为 ROPN 模型对多品种晶圆的描述需要引入颜色, 颜色的引入使得系统调度模型复杂且不直观. 此外, 针对驻留时间约束下多品种晶圆调度的相关研究较少. 然而, 驻留时间约束是工业上低压化学气相沉积工艺、光刻镀膜和显影工艺中不可缺少的约束.

3.5 PM 清洗调度

PM 清洗工艺是指 PM 加工完预定 m 枚晶圆后对 PM 进行清洗, 常用于化学气相沉积工艺, 是薄膜沉积过程中的一个关键步骤[67−68]. 在半导体制造过程中, 有 50% ~ 80% 的清洗工艺采取每加工完一枚晶圆对 PM 进行清洗一次, 即当 $m = 1$, 称之为吹扫工艺[69]. 加工涉及晶圆清洗、刻蚀和沉积工艺的组合设备主要采用吹扫工艺. PM 清洗调度组

合设备主要关注: 一是拉式和交换策略调度 TM 作业是否还是最优的策略; 二是如何调度 PM 与 TM 的作业, 使系统能周期性加工晶圆和清洗 PM.

Kim 等[68] 首次建立 PM 清洗的双臂组合设备事件图模型, 提出采用拉式和交换策略获得系统最小周期时间的充分条件. 对于 $m = 1$, 采用交换和拉式策略计算并比较系统的最小周期时间, 多数情况下拉式比交换策略具有更短的周期时间; 对于 $m > 1$, 通过结合拉式策略和启发式算法开发的新策略, 比拉式和交换策略具有更高的生产率.

Yu 等[69−70] 建立 PM 清洗单臂与双臂组合设备时延事件图模型, 提出并行 PM 保持部分 PM 加载晶圆和部分 PM 被清洗的改进拉式和交换策略. 对于单/双臂组合设备, 采取 PM 部分加载的改进拉式、混合改进拉式和交换策略调度 TM, 系统可进入最优周期运行. Yu 等[71] 进一步探究 PM 清洗对晶圆延迟时间的影响, 对于非瓶颈工序, 较长的清洗时间有助于减少晶圆延迟. 然而, 随着瓶颈负载清洗时间的增加, 非瓶颈负载的晶圆延迟也会增加. 因此, 合理安排并行 PM 和保持部分 PM 定期清洗, 有助于平衡系统的生产质量和生产率.

Yang 等[72] 在文献 [69] 基础上, 采取 PM 部分加载的改进拉式策略, 建立具有 PM 清洗的单臂组合设备 ROPN. 根据 ROPN 模型结合单臂组合设备的运行特性建立吹扫工艺和驻留时间约束条件的线性规划模型, 研究稳态下系统的可调度性和最优性. 潘春荣等[73] 在文献 [69, 72] 基础上, 进一步对 PM 清洗和驻留时间约束的终止暂态过程进行可调度性分析和优化.

当前基于 Petri 网对 PM 清洗调度的研究尚处于起步阶段[68−70, 72−73]. 采取调度策略是拉式、交换及其改进策略且大多考虑 $m = 1$ 的情况[68−70]. 针对具有驻留时间约束清洗工艺的可调度性和最优性分析[72−74] 已取得初步进展, 但其他复杂情形如晶圆重入加工和多品种混合流等的相关研究较少. 然而原子层沉积工艺是组合设备典型的重入加工, 需要执行 PM 清洗操作.

3.6 PM 故障调度

当串行配置的某一个 PM 发生故障时, 组合设备必须停机检修, 直至故障得以修复. 对于发生故障 PM 内的晶圆, 应立即卸载并将其返回真空锁; 对于发生故障后 PM 内的晶圆进入暂态过程, 继续后续模块的加工[76−77]. 当并行的某一 PM 发生故障时, 系统将进入一个暂态过程, 之后系统将以性能降级的方式继续运行. 当前基于 Petri 网在 PM 故障的调度研究并不多见, 主要是基于 ROPN 模型[76−79].

Qiao 等[76−77] 建立单臂组合设备 ROPN 模型动态描述系统故障行为, 并提出故障响应策略使系统可以从故障前的可行周期调度转到故障后的另一个周期调度而不违反晶圆驻留时间约束. 该故障响应策略的思想是结合虚拟晶圆处理的方式, 当某一个 PM 发生故障后, 将虚拟晶圆载入故障 PM, 将实体晶圆载入正常 PM, 调整载入组合设备的晶圆数量保证系统继续稳态运行. 基于同样的思想, 针对具有驻留时间约束 PM 故障的双臂组合设备, Qiao 等[78] 提出三种故障响应策略, 使系统能顺利从暂态进入到新的稳态而不违反驻留时间约束.

针对具有驻留时间约束重入模块 PM 故障的双臂组合设备, 潘春荣等[79] 建立 ROPN 模型, 分析系统稳态与暂态调度的时间特性, 提出相应的暂态过渡的运行控制方法, 并讨论 PM 故障后系统稳态运行的可调度性与不可调度性问题.

3.7 小结

拉式与交换策略简单直观[70]、稳定且容易操作[21], 已被证明是生产率最大化意义上的运行方式[100−103]. 因此, 在组合设备的建模中普遍采用拉式或交换及其改进策略调度 TM 的作业顺序. 表 1 总结了这两种策略及其改进策略在上述讨论调度问题中的应用. 基于上述讨论, 表 2 从组合设备的主要特征、Petri 网模型、调度方法、调度目标总结了晶圆制造的 6 类典型调度问题和解决方法. 组合设备的调度虽已取得一些进展, 但随着市场对芯片的个性化追求和半导体芯片发展的摩尔定律接近极限, 需要在生产管理中寻求更好的调度策略和解决方案.

表 1 拉式与交换策略在组合设备的应用

Table 1 Backward and swap strategy in cluster tools

调度问题	拉式/改进拉式	交换/改进交换
驻留时间约束	文献 [16, 19–21, 25, 34–35]	文献 [11–12, 17]
作业时间波动	文献 [30, 34–36]	文献 [29–33]
晶圆重入加工	文献 [14, 36, 38–40, 47]	文献 [41–46, 48–50]
多品种晶圆	文献 [53, 56, 59, 62–63, 66, 72]	文献 [54–57, 62–63]
PM 故障	文献 [76–77]	文献 [78–79]
PM 清洗	文献 [69–70, 72–73]	文献 [68, 70–71]

4 基于 Petri 网的组合设备群调度

本节在组合设备群建模和单组合设备调度优化的基础上, 进一步总结 Petri 网在组合设备群调度的现有问题及其特点. 组合设备群调度主要从以下几个问题展开研究: 1) 组合设备群的拓扑结构不同, 所建的模型和调度策略是否也不尽相同? 2) 对于 k-

表 2　组合设备的典型问题及调度方法

Table 2　Typical problems and scheduling methods of cluster tools

调度问题	相关文献	系统特征	Petri 网类型	调度方法	调度目标
驻留时间约束	[11]	双臂	POPN	变迁发射顺序	最小周期时间
	[12]	双臂	POPN	变迁发射顺序	可调度性分析
	[13]	单/双臂	POPN	TM 无干涉序列	最小周期时间
	[14]	单/双臂	POPN	变迁发射顺序	最小周期时间
	[15]	双臂	POPN	混合整数规划	优化最坏情况下 k-晶圆周期
	[16–17]	单/双臂, 加工主导	ROPN	TM 等待时间	最优 1-晶圆周期
	[19–21]	单臂, 暂态过程, 加工主导	ROPN	TM 等待时间	优化暂态过程
	[18, 25]	单臂, 传输与加工主导	ROPN	TM 等待时间	最小周期时间
作业时间波动	[26]	单/双臂, 驻留时间约束	POPN	延迟 TM 发射时间	稳态运行
	[27]	单臂	POPN	延迟 TM 发射时间	恢复到稳态
	[28]	单/双臂, 驻留时间约束	POPN	反馈控制法	最小周期时间
	[29]	双臂, 驻留时间约束	POPN	TM 变迁发射顺序	可调度的充分必要条件
	[30]	单/双臂, 驻留时间约束	POPN	自适应调度	最小周期时间
	[31–36]	单/双臂, 驻留时间约束	ROPN	实时调度	最小周期时间
晶圆重入加工	[38]	单臂	POPN	库所不变量分析	稳态的性能分析
	[39]	单臂, 不同晶圆流	POPN	变迁发射顺序	最小周期时间
	[40–44]	单/双臂	ROPN	TM 等待时间	最小周期时间
	[45–48]	单/双臂, 驻留时间约束	ROPN	TM 等待时间	最小周期时间
	[49–50]	单/双臂, 驻留时间约束和作业时间波动	ROPN	实时调度	最小周期时间
多品种晶圆	[56]	单/双臂, 混流, PM 共享	POPN	启发式调度	最小周期时间
	[57]	双臂, 混流, PM 共享	POPN	变迁发射顺序	最小周期时间
	[58]	双臂/混流, 并行, 驻留时间约束	POPN	变迁发射顺序	晶圆延迟最少
	[59]	单臂/混流, 驻留时间约束	ROPN	虚拟加工	可调度性
	[53]	单臂/混流	POPN	自循环控制法	系统无死锁运行
	[62]	单/双臂, 切换, 驻留时间约束	POPN	混合整数规划	最少完成时间
	[63]	单/双臂, 切换	POPN	混合整数规划	最少完成时间
PM 清洗	[68]	双臂, $m \geq 1$	POPN	启发式调度	最小周期时间
	[69–70]	单/双臂, $m = 1$	POPN	部分加载	最小周期时间
	[71]	双臂, $m = 1$	POPN	部分加载	最小晶圆延迟
	[72]	单臂, $m = 1$, 驻留时间约束	ROPN	线性规划	最小周期时间
	[73]	单臂, $m = 1$, 驻留时间约束, 暂态	ROPN	线性规划	优化暂态过程
PM 故障	[76–77]	单臂, 驻留时间约束	ROPN	故障响应策略	可行调度
	[79]	双臂, 重入, 驻留时间约束	ROPN	虚拟晶圆	优化暂态过程

晶圆周期调度, 是否总存在 k-晶圆周期调度使得产能最大? 3) 缓冲模块容量是否影响系统产能? 4) 混合组合设备群与单类别组合设备群的模型和调度策略是否有差别? 围绕这些关键性问题, 主要从调度不同拓扑结构及具有不同约束的组合设备群进行归纳.

4.1　线型组合设备群的调度

Ding 等[88] 首次对组合设备群建立赋时事件图模型, 并提出一种基于仿真模型寻找最优 k-晶圆周期调度的搜索方法. 该方法能动态描述组合设备群的晶圆加工过程, 但基于仿真模型获得的解并不精确. Yi 等[89] 提出一种对组合设备群进行分解的调度方法, 该分解方法的提出是组合设备群调度理论的一个重要进展. 然而所建模型忽略 TM 的移动时间, 不符合系统实际生产要求.

相对于 k-晶圆周期调度, 1-晶圆周期调度易于控制和实现[80−81]. Zhu 等[80] 将组合设备群进行分解, 建立缓冲模块容量为 1 的线型单臂 ROPN 模型, 将分解后的组合设备群调度问题转换为如何分配若干台单臂组合设备 TM 等待时间. 采用拉式策略证明在加工主导状态下系统都存在一个最优 1-晶圆周期, 并提出生产周期可达下界的充分必要条件.

当此条件不满足时, 通过给生产周期一个最小增量可获取系统的最优 1-晶圆周期调度. 在传输主导状态下, Yang 等[81] 证明缓冲模块容量为 1 的单臂组合设备群也存在最优 1-晶圆周期调度.

组合设备群的调度复杂性主要来源于各组合设备间耦合依赖. 因此, 需要协调好各个 TM 的作业, 使缓冲模块能有效地配合. Yang 等[82] 探讨缓冲模块容量对系统性能的影响, 并证明在加工主导状态下缓冲模块容量为 2 的组合设备群也存在生产周期可达下界的 1-晶圆周期调度. Bai 等[83] 提出优化配置缓冲模块容量达最优 1-晶圆周期下界的充分必要条件, 并提出相应配置缓冲模块容量最少的算法.

Yang 等[84] 建立混合组合设备群 ROPN 模型, 将混合组合设备群分解为若干台单组合设备. 分解后的单/双臂组合设备采用拉式/交换策略, 并证明在加工主导状态下系统存在最优 1-晶圆周期调度.

4.2 树型组合设备群的调度

树型组合设备群与线型组合设备群的区别在于前者包含叉型设备, 后者不包含[90]. 一个叉型设备有多个下游设备, 一个非叉型设备只有一个. 因此, 树型组合设备群, 其耦合关系存在于任何两个相邻或不相邻的组合设备之间, 其拓扑结构也比线型复杂. Chan 等[91] 首次分析树型组合设备群, 将组合设备群分解为若干台单组合设备, 并提出系统可分解的充分条件, 然而并未给出最优 k-晶圆周期调度.

针对缓冲模块容量为 1 的树型单臂组合设备群, Zhu 等[85] 采用剪枝方法将树型组合设备群转化为线型, 再利用线型组合群的分解方法建立单组合设备和邻接缓冲模块的 ROPN 模型. 采用拉式策略协调叉型设备中 TM 及其下游设备中多个 TM 的作业, 实现系统最优 1-晶圆周期, 并证明系统在加工主导状态下存在最优 1-晶圆周期调度. 针对混合组合设备群的调度, 分解后采用拉式和交换策略调度 TM 的作业, Yang 等[86] 提出在加工主导状态下系统可达最优 1-晶圆周期下界的条件, 并证明在加工主导状态下系统总存在最优 1-晶圆周期调度[87].

4.3 具有不同约束的组合设备群调度

针对晶圆驻留时间约束下组合设备群的可调度性与最优性问题, Zhu 等[92] 考虑缓冲模块容量为 1 的单臂线型组合设备群, 在文献 [80] 存在最优 1-晶圆周期调度的基础上引入驻留时间约束, 提出晶圆驻留时间约束的单臂线型组合设备群可调度的充分必要条件, 并给出求解最优调度的解析式算法. Yang 等[93] 考虑缓冲模块容量为 1 的混合组合设备群, 在文献 [82] 存在最优 1-晶圆周期调度的基础上引入驻留时间约束, 进而研究系统的可调度性与最优性. Liu 等[94] 考虑缓冲模块容量为 2 的单臂组合设备群, 提出非线性规划模型和启发式搜索算法研究系统的可调度性. 然而并不能保证能找到最优解, 且其所提的可调度性条件也只是充分的.

针对驻留时间约束组合设备群初始和终止暂态过程的调度, Zhu 等[95] 建立组合设备群暂态过程的 ROPN 模型并描述其动态行为, 提出线性规划方法研究系统暂态过程的可调度性与最优性, 并证明在稳态下, 如果系统是可调度的, 那么暂态过程也是可调度的. 针对驻留时间约束与作业时间波动组合设备群的可调度性与最优性问题, Yang 等[96] 通过分析晶圆驻留时间与作业时间的变化规律, 提出一个两级实时操作体系结构和实时控制策略, 推导作业时间波动下晶圆驻留时间延迟上界的算法, 并进一步研究系统的可调度性和最优性.

4.4 小结

组合设备群结构独特且流程复杂, 相对于单组合设备, 组合设备群的相关研究起步较晚. 表 3 从组合设备群的拓扑结构、系统特征、缓冲模块容量、设备运行状态、调度策略、模型方法、调度目标总结了组合设备群的代表性研究成果. 通过表 3 比较可知: 1) 组合设备群的研究目标大多数是周期调度, 而非周期调度较少[95, 97]; 2) 调度策略大多局限于拉式或交换策略; 3) 基于 Petri 网对组合设备群建模大多采用 ROPN 方法且研究的模型结构较简单.

5 总结与展望

半导体晶圆制造系统是当今最先进和最复杂的制造系统之一. 从上世纪 90 年代开始, 学术界基于 Petri 网对晶圆制造中组合设备的建模与调度问题进行了大量的研究, 并在一些具有挑战性问题上取得了显著的进展. 5G、人工智能、自动驾驶等新赛道融入市场, 半导体材料、技术、工艺等在迅速更新迭代, 对晶圆制造也提出更高的要求与挑战, 基于 Petri 网在组合设备的建模和调度尚有如下开放性问题有待深入开展.

1) 多约束多品种耦合调度. 随着半导体芯片中电路的宽度缩小到 10 nm 以下[22], 为保证晶圆加工质量, 组合设备的调度和控制受到严格操作要求, 如驻留时间约束和 PM 清洗等. 工业上为应对快速、多变的市场需求, 满足定制化、个性化的客户要求, 混流与小批量生产也越来越多地应用于晶圆制造中. 多品种生产模式更加复杂, 同时考虑不同工艺的加工路线和约束条件将加大模型复杂度. 因此,

表 3　不同组合设备群及调度方法

Table 3　Different multi-cluster tools and scheduling methods

相关文献	拓扑结构	系统特征	缓冲模块容量	运行状态	调度策略	模型方法	调度目标
[80, 82]	线型	单臂	1 或 2	加工主导	拉式	ROPN	最优 1-晶圆周期
[81]	线型	单臂	1	传输主导	拉式	ROPN	最优 1-晶圆周期
[83]	线型	单臂	1 或 2	加工主导	拉式	ROPN	最优缓冲模块配置
[84]	线型	混合	1	加工主导	拉式/交换	ROPN	最优 1-晶圆周期
[85]	树型	单臂	1	加工主导	拉式	ROPN	最优 1-晶圆周期
[86–87]	树型	混合	1	加工主导	拉式/交换	ROPN	最优 1-晶圆周期
[88]	线型	单/双臂	1	无固定	无固定	POPN	最优 k-晶圆周期
[89]	线型	混合	1 或 2	无固定	拉式/交换	分解法	最优 k-晶圆周期
[91]	树型	单臂	1 或 2	无固定	拉式	递归与分解法	最小周期
[92]	线型	单臂, 驻留时间约束	2	加工主导	拉式	ROPN	最优 1-晶圆周期
[93]	线型	混合, 驻留时间约束	1	加工主导	拉式/交换	ROPN	最优 1-晶圆周期
[94]	线型	单臂, 驻留时间约束	2	无固定	无固定	启发式	最小化最大完工时间
[95]	线型	单/双臂, 驻留时间约束, 暂态	1	加工主导	拉式/交换	线性规划	最优 1-晶圆周期
[96]	线型	双臂, 驻留时间约束, 作业时间波动	1	加工主导	交换	实时调度	最优 1-晶圆周期
[97]	线型	单/双臂, 驻留时间约束	2	无固定	无固定	改进动态规划	最优 Pareto
[98]	线型	单/双臂/混合, 驻留时间约束	2	无固定	无固定	POPN	最优 1-晶圆周期

如何构建 Petri 网在组合设备的多约束多品种耦合建模和调度是值得研究的问题.

2) 组合设备的多目标调度优化. 随着半导体材料和技术的更新迭代, 晶圆加工呈现多目标调度特性[23–24]. 当前研究大多侧重于单目标的调度, 但实际生产中需要综合考虑多种目标, 包括生产周期最短、晶圆吞吐量最大、生产成本最低、设备利用率最高、系统鲁棒性最强及资源消耗最小等. 如何针对晶圆制造组合设备中的多属性多目标特点, 建立其多属性 Petri 网模型及多目标状态可达图分析技术, 使多个相互冲突、不对称的目标达到 Pareto 最优[97, 107], 即资源分配的一种理想状态. 在该状态下, 并不存在一个更好的调度能在没有使任何目标境况变坏的前提下, 使得至少一个目标变得更好.

3) 不确定环境下组合设备的动态调度. 在实际晶圆加工过程中存在不确定性因素和突发事件, 如作业时间波动、PM 故障、PM 清洗等. 目前对这些不确定性因素的调度 (见表 1 和表 3) 大多数是单/双臂组合设备采用拉式/交换策略调度 TM 的作业顺序, 这两种静态的调度策略缺乏对环境的实时响应. 此外, 当组合设备位于系统运行瓶颈时, 1 个或 2 个 TM 的运行效率不高, 系统需要配置更多的 TM[108], 此时的拉式和交换策略不再适用. 因此, 如何针对这些因素寻求更好的调度策略, 尤其是开展不确定环境下的动态调度具有重要意义.

4) 复杂组合设备群的调度. 组合设备群的建模和调度已取得了一些成果[80–99], 但目前对组合设备群研究的模型和结构都较简单, 调度目标大多呈周期性且调度策略大多局限于拉式或交换策略. 实际半导体晶圆制造生产线一般由上百台设备组成, 每种产品的工艺流程包括几百道工序, 生产线上同时流动的产品种类也可能多达上百种, 属于大规模的复杂调度优化问题. 因此, 如何对这类问题进行 Petri 网有效建模分析和调度优化, 尤其是调度组合设备群在作业时间波动、PM 清洗及 PM 故障等复杂情形需要进一步深入研究.

5) 基于 Petri 网模型可达图的智能搜索调度. 当系统的规模较大时, 系统 Petri 网模型呈爆炸性增长[104–105], 通常无法在可接受的时间内运行处理调度结果. 精确计算方法如混合整数规划方法[14], 分支界定算法[105–106] 等因搜索速度太慢而无法获得最优调度时, 可利用 Petri 网模型的可达图结合使用启发式改进算法如 A* 算法[109–110]、非监督强化学习方法[108]、粒子群优化算法[111] 等在合理的时间范围内获得最优或次优调度. 因此, 如何基于可达图设计高效的启发式调度算法是值得关注的问题.

6) 基于 Petri 网的死锁控制应用. 死锁的发生会降低设备运行的效率. 基于 Petri 网的死锁控制在其他资源分配系统 (如自动化制造系统) 比较常见, 采用快速但通常只用于普通 Petri 网的网结构分析法[112] 和相对复杂但可用于广义 Petri 网并可实现行为最优死锁控制的可达图分析法[113–118]. Petri 网的建模分析与死锁控制方法还广泛应用于其他资源分配系统, 如软件管理系统[119]、交通控制

系统[120]、机器人任务系统[121] 与工业原油提炼过程[122] 等. 后续如何将不同特点系统的 Petri 网模型与死锁控制方法进行互融互通, 提升组合设备建模分析与死锁控制的效率, 也是值得研究的方向.

本文首先归纳了单组合设备与组合设备群的基本结构和分类及调度策略. 然后对比分析了 POPN 与 ROPN 对晶圆制造中组合设备的建模. 重点梳理和归纳了晶圆制造中的典型调度问题, 如驻留时间约束、作业时间波动、晶圆重入加工、多品种晶圆加工、PM 清洗、PM 故障及组合设备群. 探讨了上述各类调度问题的最新研究成果和所面对的挑战, 并展望了未来的可能研究方向, 期待为相关研究人员提供选题参考.

References

1 Bader M E, Hall R P, Strasser G. Integrated processing equipment. *Solid State Technology*, 1990, **33**(5): 149−154

2 Burggraaf P. Coping with the high cost of wafer fabs. *Semiconductor International*, 1995, **38**(3): 45−50

3 Singer P. The driving forces in cluster tools development. *Semiconductor International*, 1995, **18**(8): 113−118

4 Mönch L, Fowler J W, Dauzère-Pérès S, Mason S J, Rose O. A survey of problems, solution techniques, and future challenges in scheduling semiconductor manufacturing operations. *Journal of Scheduling*, 2011, **14**(6): 583−599

5 Huang B, Zhou M C. *Supervisory Control and Scheduling of Resource Allocation Systems: Reachability Graph Perspective*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2020.

6 Chen H, Wu N Q, Zhou M C. A novel method for deadlock prevention of AMS by using resource-oriented Petri nets. *Information Sciences*, 2016, **363**: 178−189

7 Wu N Q, Zhou M C. *System Modeling and Control With Resource-oriented Petri Nets*. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.

8 Lee T E. A review of scheduling theory and methods for semiconductor manufacturing cluster tools. In: Proceedings of the Winter Simulation Conference. Miami, USA: IEEE, 2008. 2127−2135

9 Pan C R, Zhou M C, Qiao Y, Wu N Q. Scheduling cluster tools in semiconductor manufacturing: Recent advances and challenges. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, **15**(2): 586−601

10 Pan Chun-Rong, Wang Ji-Peng. *Cluster Tool Scheduling and Its Optimal Control*. Changsha: Central South University Press, 2020.
(潘春荣, 王际鹏. 组合设备调度及其优化控制. 长沙: 中南大学出版社, 2020.)

11 Kim J H, Lee T E, Lee H Y, Park D B. Scheduling analysis of time-constrained dual-armed cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, **16**(3): 521−534

12 Lee T E, Park S H. An extended event graph with negative places and tokens for time window constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2005, **2**(4): 319−332

13 Lim Y, Yu T S, Lee T E. A new class of sequences without interferences for cluster tools with tight wafer delay constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, **16**(1): 392−405

14 Jung C, Lee T E. An efficient mixed integer programming model based on timed Petri nets for diverse complex cluster tool scheduling problems. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2012, **25**(2): 186−199

15 Roh D H, Lee T G, Lee T E. K-cyclic schedules and the worst-case wafer delay in a dual-armed cluster tool. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2019, **32**(2): 236−249

16 Wu N Q, Chu C, Chu F, Zhou M C. A Petri net method for schedulability and scheduling problems in single-arm cluster tools with wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2008, **21**(2): 224−236

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

18 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Su R, Qu T. Modeling and optimal cyclic scheduling of time-constrained single-robot-arm cluster tools via Petri nets and linear programming. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, **50**(3): 871−883

19 Qiao Y, Zhou M, Wu N Q, Zhu Q H. Scheduling and control of startup process for single-arm cluster tools with residency time constraints. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017, **25**(4): 1243−1256

20 Zhu Q H, Zhou M C, Qiao Y, Wu N Q. Petri net modeling and scheduling of a close-down process for time-constrained single-arm cluster tools. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(3): 389−400

21 Yang F J, Qiao Y, Gao K Z, Wu N Q, Zhu Y T, Ware S I, et al. Efficient approach to scheduling of transient processes for time-constrained single-arm cluster tools with parallel chambers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, **50**(10): 3646−3657

22 Qiao Y, Zhou M C, Wu N Q, Li Z W, Zhu Q H. Closing-down optimization for single-arm cluster tools subject to wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(11): 6792−6807

23 Zhu Q H, Zhou M C, Qiao Y, Wu N Q, Hou Y. Multi-objective scheduling of dual-blade robotic cells in wafer fabrication. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, **50**(12): 5015−5023

24 Zhu Q H, Zhou M C, Qiao Y, Wu N Q, Hou Y. Post-processing time-aware optimal scheduling of single robotic cluster tools. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, **7**(2): 597−608

25 Xiong W Q, Pan C R, Qiao Y, Wu N Q, Hsieh P H. Reducing wafer delay time by robot idle time regulation for single-arm cluster tools. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, **18**(4): 1653−1667

26 Kim J H, Lee T E. Schedule stabilization and robust timing control for time-constrained cluster tools. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, China: IEEE, 2003. 1039−1044

27 Kim J H, Zhou M C, Lee T E. Schedule restoration for single-armed cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2014, **27**(3): 388−399

28 Kim C, Lee T E. Feedback control of cluster tools for regulating wafer delays. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2016, **13**(2): 1189−1199

29 Kim J H, Lee T E. Schedulability analysis of time-constrained

cluster tools with bounded time variation by an extended Petri net. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, **5**(3): 490−503

30 Lim Y, Yu T S, Lee T E. Adaptive scheduling of cluster tools with wafer delay constraints and process time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2020, **17**(1): 375−388

31 Wu N Q, Zhou M C. Analysis of wafer sojourn time in dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2010, **23**(1): 53−64

32 Wu N Q, Zhou M C. Schedulability analysis and optimal scheduling of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, **9**(1): 203−209

33 Wu N Q, Zhou M C. Modeling, analysis and control of dual-arm cluster tools with residency time constraint and activity time variation based on Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, **9**(2): 446−454

34 Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. Petri net modeling and wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with residency time constraints and activity time variation. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2012, **25**(3): 432−446

35 Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. Real-time scheduling of single-arm cluster tools subject to residency time constraints and bounded activity time variation. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2012, **9**(3): 564−577

36 Pan C R, Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. A novel algorithm for wafer sojourn time analysis of single-arm cluster tools with wafer residency time constraints and activity time variation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, **45**(5): 805−818

37 Yang F J, Tang X, Wu N Q, Zhang C J, Gao L. Wafer residency time analysis for time-constrained single-robot-arm cluster tools with activity time variation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2020, **28**(4): 1177−1188

38 Zuberek W M. Cluster tools with chamber revisiting-modeling and analysis using timed Petri nets. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, **17**(3): 333−344

39 Lee H Y, Lee T E. Scheduling single-armed cluster tools with reentrant wafer flows. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, **19**(2): 226−239

40 Wu N Q, Chu F, Chu C B, Zhou M C. Petri net-based scheduling of single-arm cluster tools with reentrant atomic layer deposition processes. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, **8**(1): 42−55

41 Wu N Q, Chu F, Chu C B, Zhou M C. Petri net modeling and cycle-time analysis of dual-arm cluster tools with wafer revisiting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 2013, **43**(1): 196−207

42 Qiao Y, Wu N Q, Zhu Q H, Bai L P. Cycle time analysis of dual-arm cluster tools for wafer fabrication processes with multiple wafer revisiting times. *Computers & Operations Research*, 2015, **53**: 252−260

43 Wu N Q, Zhou M C, Chu F, Chu C B. A Petri net-based scheduling strategy for dual-arm cluster tools with wafer revisiting. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2013, **43**(5): 1182−1194

44 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. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, **26**(1): 100−110

45 Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. Scheduling of dual-arm cluster tools with wafer revisiting and residency time constraints. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, **10**(1): 286−300

46 Qiao Y, Wu N Q, Zhou M C. Schedulability and scheduling analysis of dual-arm cluster tools with wafer revisiting and residency time constraints based on a novel schedule. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, **45**(3): 472−484

47 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C, Li Z W. Scheduling of single-arm cluster tools for an atomic layer deposition process with residency time constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, **47**(3): 502−516

48 Wu Nai-Qi, Qiao Yan. A novel production scheduling methodology by using discrete event system control theories. *Control Theory & Applications*, 2021, **38**(11): 1809−1818
(伍乃骐, 乔岩. 应用离散事件系统控制理论求解生产调度的新方法. 控制理论与应用, 2021, **38**(11): 1809−1818)

49 Qiao Y, Wu N Q, Yang F J, Zhou M C, Zhu Q H. Wafer sojourn time fluctuation analysis of time-constrained dual-arm cluster tools with wafer revisiting and activity time variation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(4): 622−636

50 Qiao Y, Wu N Q, Yang F J, Zhou M C, Zhu Q H. Robust scheduling of time-constrained dual-arm cluster tools with wafer revisiting and activity time disturbance. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(6): 1228−1240

51 Pan Chun-Rong, Li Liang. Scheduling and analysis of final transient process for cluster tools with wafer revisiting. *Control Theory and Applications*, 2015, **32**(5): 655−664
(潘春荣, 黎良. 晶圆重入加工的组合设备终止暂态的调度与分析. 控制理论与应用, 2015, **32**(5): 655−664)

52 Pan C R, Qiao Y, Zhou M C, Wu N Q. Scheduling and analysis of start-up transient processes for dual-arm cluster tools with wafer revisiting. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, **28**(2): 160−170

53 Lu Y J, Qiao Y, Pan C R, Chen Y F, Wu N Q, Li Z W, et al. Modeling and control for deadlock-free operation of single-arm cluster tools with concurrently processing multiple wafer types via Petri net. *IEEE Access*, 2021, **9**: 70868−70882

54 Kim H J, Lee J H, Jung C, Lee T E. Closed-form expressions on lot completion time for dual-armed cluster tools with parallel processing modules. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, **16**(2): 898−907

55 Lee J H, Kim H J, Lee T E. Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, **11**(2): 525−536

56 Lee J H, Kim H J, Lee T E. Scheduling cluster tools for concurrent processing of two wafer types with PM sharing. *International Journal of Production Research*, 2015, **53**(19): 6007−6022

57 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. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, **16**(3): 1058−1070

58 Ko S G, Yu T S, Lee T E. Wafer delay analysis and workload balancing of parallel chambers for dual-armed cluster tools with multiple wafer types. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2021, **18**(3): 1516−1526

59 Pan Chun-Rong, Wang Ji-Peng. Scheduling for single-armed cluster tools with mixed-processing of multi-variety wafers. *Control Theory and Applications*, 2016, **33**(9): 1171−1181
(潘春荣, 王际鹏. 具有多品种晶圆混合加工的单臂组合设备调度.

控制理论与应用, 2016, **33**(9): 1171−1181)

60 Wang J P, Pan C R, Hu H S, Li L, Zhou Y. A cyclic scheduling approach to single-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, **16**(3): 1373−1386

61 Wang J P, Hu H S, Pan C R, Zhou Y, Li L. Scheduling dual-arm cluster tools with multiple wafer types and residency time constraints. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2020, **7**(3): 776−789

62 Kim H J, Lee J H, Jung C, Lee T E. Scheduling cluster tools with ready time constraints for consecutive small lots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2013, **10**(1): 145−159

63 Lee J H, Kim H J, Lee T E. Scheduling lot switching operations for cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, **26**(4): 592−601

64 Nishi T, Matsumoto I. Petri net decomposition approach to deadlock-free and non-cyclic scheduling of dual-armed cluster tools. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(1): 281−294

65 Lee J H, Kim H J. Makespan analysis of lot switching period in cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2016, **29**(2): 127−136

66 Lee J H, Kim H J. Completion time analysis of wafer lots in single-armed cluster tools with parallel processing modules. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017, **14**(4): 1622−1633

67 Qiao Y, Lu Y J, Li J, Zhang S W, Wu N Q, Liu B. An efficient binary integer programming model for residency time-constrained cluster tools with chamber cleaning requirements. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, **19**(3): 1757−1771

68 Kim H, Kim H J, Lee J H, Lee T E. Scheduling dual-armed cluster tools with cleaning processes. *International Journal of Production Research*, 2013, **51**(12): 3671−3687

69 Yu T S, Kim H J, Lee T E. Scheduling single-armed cluster tools with chamber cleaning operations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, **15**(2): 705−716

70 Yu T S, Lee T E. Scheduling dual-armed cluster tools with chamber cleaning operations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, **16**(1): 218−228

71 Yu T S, Lee T E. Wafer delay analysis and control of dual-armed cluster tools with chamber cleaning operations. *International Journal of Production Research*, 2020, **58**(2): 434−447

72 Yang F J, Wu N Q, Gao K Z, Zhang C J, Zhu Y T, Su R, et al. Efficient approach to cyclic scheduling of single-arm cluster tools with chamber cleaning operations and wafer residency time constraint. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2018, **31**(2): 196−205

73 Pan Chun-Rong, Guo Wen-You. Scheduling of closed-down process for single-arm cluster tools with chamber cleaning operations. *Control Theory and Applications*, 2021, **38**(6): 784−794
(潘春荣, 郭文有. 具有清洗工艺的单臂组合设备终止暂态调度. 控制理论与应用, 2021, **38**(6): 784−794)

74 Li C, Yang F J, Lu Z. Efficient scheduling approaches to time-constrained single-armed cluster tools with condition-based chamber cleaning operations. *International Journal of Production Research*, 2022, **60**(11): 3555−3568

75 Yao X, Michael E F G, Fu M C, Marcus S I. Optimal preventive maintenance scheduling in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2004, **17**(3): 345−356

76 Qiao Y, Wu N Q, Pan C, Zhou M C. How to respond to process module failure in residency time-constrained single-arm cluster tools. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2014, **27**(4): 462−474

77 Qiao Y, Pan C R, Wu N Q, Zhou M C. Response policies to process module failure in single-arm cluster tools subject to wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(3): 1125−1139

78 Qiao Y, Zhang S, Wu N Q, Zhou M C, Qu T. Efficient approach to failure response of process module in dual-arm cluster tools with wafer residency time constraints. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, **51**(3): 1612−1629

79 Pan Chun-Rong, Fu Jin-Chao. Faiure response policy revisting dual-arm cluster tools based on Petri nets. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, **25**(12): 3235−3245
(潘春荣, 付锦超. 基于 Petri 网的可重入双臂组合设备故障响应策略. 计算机集成制造系统, 2019, **25**(12): 3235−3245)

80 Zhu Q H, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Petri net-based optimal one-wafer scheduling of single-arm multi-cluster tools in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2013, **26**(4): 578−591

81 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C, Su R, Qu T. Petri net-based efficient determination of optimal schedules for transport-dominant single-arm multi-cluster tools. *IEEE Access*, 2018, **6**: 355−365

82 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Optimal one-wafer cyclic scheduling of single-arm multi-cluster tools with two-space buffering modules. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2014, **44**(12): 1584−1597

83 Bai P L, Wu N Q, Li Z W, Zhou M C. Optimal one-wafer cyclic scheduling and buffer space configuration for single-arm multi-cluster tools with linear topology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2016, **46**(10): 1456−1467

84 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Petri net-based polynomially complex approach to optimal one-wafer cyclic scheduling of hybrid multi-cluster tools in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2014, **44**(12): 1598−1610

85 Zhu Q H, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Optimal scheduling of complex multi-cluster tools based on timed resource-oriented Petri nets. *IEEE Access*, 2016, **4**: 2096−2109

86 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Optimal one-wafer cyclic scheduling of hybrid multi-robot cluster tools with tree topology. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(2): 289−298

87 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Su R. Polynomial approach to optimal one-wafer cyclic scheduling of treelike hybrid multi-cluster tools via Petri nets. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2018, **5**(1): 270−280

88 Ding S, Yi J, Zhang M T. Multi-cluster tools scheduling: An integrated event graph and network model approach. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2006, **19**(3): 339−351

89 Yi J G, Ding S W, Song D Z, Zhang M T. Steady-state throughput and scheduling analysis of multi-cluster tools: A decomposition approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2008, **5**(2): 321−336

90 Chan W K V, Yi J, Ding S. Optimal scheduling of multi-cluster tools with constant robot moving times, part I: Two-cluster analysis. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, **8**(1): 5−16

91 Chan W K V, Ding S W, Yi J G, Song D Z. Optimal scheduling of multi-cluster tools with constant robot moving times, part Ⅱ: Tree-like topology configurations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, **8**(1): 17−28

92 Zhu Q H, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Scheduling of single-arm multi-cluster tools with wafer residency time constraints in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2015, **28**(1): 117−125

93 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Zhou M C. Optimal one-wafer cyclic scheduling of time-constrained hybrid multi-cluster tools via Petri nets. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Systems*, 2017, **47**(11): 2920−2932

94 Liu M X, Zhou B H. Modelling and scheduling analysis of multi-cluster tools with residency constraints based on time constraint sets. *International Journal of Production Research*, 2013, **51**(16): 4835−4852

95 Zhu Q H, Qiao Y, Wu N Q. Optimal integrated schedule of entire process of dual-blade multi-cluster tools from start-up to close-down. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2019, **6**(2): 553−565

96 Yang F J, Wu N Q, Qiao Y, Su R, Zhang C J. Wafer sojourn time fluctuation analysis for time-constrained dual-arm multi-cluster tools with activity time variation. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2021, **34**(7−8): 734−751

97 Yan Y, Wang H G, Tao Q H, Fan W H, Lin T Y, Xiao Y Y. Noncyclic scheduling of multi-cluster tools with residency constraints based on Pareto optimization. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2020, **33**(3): 476−486

98 Bao T P, Wang H G. Cyclic scheduling of multi-cluster tools based on mixed integer programming. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2017, **30**(4): 515−525

99 Nishi T, Watanabe Y, Sakai M. An efficient deadlock prevention policy for noncyclic scheduling of multi-cluster tools. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, **15**(4): 1677−1691

100 López M J, Wood S C. Systems of multiple cluster tools: Configuration, reliability, and performance. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2003, **16**(2): 170−178

101 Dawande M, Sriskandarajah C, Sethi S. On throughput maximization in constant travel-time robotic cell. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2002, **4**(4): 296−312

102 Venkatesh S, Davenport R, Foxhoven P, Nulman J. A steady-state throughput analysis of cluster tools: Dual-blade versus single-blade robots. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 1997, **10**(4): 418−424

103 Sethi S P, Sidney J B, Sriskandarajah C. Scheduling in dual gripper robotic cell for productivity gains. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2001, **17**(3): 324−341

104 Kim H J, Lee J H, Lee T E. Time-feasible reachability tree for noncyclic scheduling of timed Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(3): 1007−1016

105 Jung C, Kim H J, Lee T E. A branch and bound algorithm for cyclic scheduling of timed Petri nets. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(1): 309−323

106 Kim H J, Lee J H, Lee T E. Noncyclic scheduling of cluster tools with a branch and bound algorithm. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2015, **12**(2): 690−700

107 Ma Yong-Jie, Chen Min, Gong Ying, Cheng Shi-Sheng, Wang Zhen-Yan. Research progress of dynamic multi-objective optimization evolutionary algorithm. *Acta Automatica Sinica*, 2020, **46**(11): 2302−2318
(马永杰, 陈敏, 龚影, 程时升, 王甄延. 动态多目标优化进化算法研究进展. 自动化学报, 2020, **46**(11): 2302−2318)

108 Kim H J, Lee J H. Scheduling of dual-gripper robotic cells with reinforcement learning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, **19**(2): 1120−1136

109 Huang B, Zhou M C, Abusorrah A, Sedraoui K. Scheduling robotic cellular manufacturing systems with timed Petri net, A* search, and admissible heuristic function. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2022, **19**(1): 243−250

110 Huang B, Zhou M C. Symbolic scheduling of robotic cellular manufacturing systems with timed Petri nets. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2022, **19**(1): 243−250

111 Han L B, Xing K Y, Chen X, Xiong F L. A Petri net-based particle swarm optimization approach for scheduling deadlock-prone flexible manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2018, **29**(5): 1083−1096

112 Feng Y X, Xing K Y, Liu H X, Wu Y C. Two-stage design method of robust deadlock control for automated manufacturing systems with a type of unreliable resources. *Information Sciences*, 2019, **484**: 286−301

113 Chen Y F, Li Z W. Design of a maximally permissive liveness enforcing supervisor with a compressed supervisory structure for flexible manufacturing systems. *Automatica*, 2011, **47**(5): 1028−1034

114 Huang B, Zhou M C, Wang C, Abusorrah A, Al-Turki A. Deadlock-free supervisor design for robotic manufacturing cells with uncontrollable and unobservable events. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2021, **8**(3): 597−605

115 Huang B, Zhou M C, Huang Y S, Yang Y W. Supervisor synthesis for FMS based on critical activity places. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2019, **49**(5): 881−890

116 Huang B, Zhou M C, Zhang P Y, Yang J. Speedup techniques for multi-objective integer programs in designing optimal and structurally simple supervisors of AMS. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, **48**(1): 77−88

117 Huang B, Zhou M C, Zhang G X, Ammari A C, Ahmed A, Fayoumi A G. Lexicographic multi-objective integer programming for optimal and structurally minimal Petri net supervisors of automated manufacturing systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, **45**(11): 1459−1470

118 Huang B, Zhou M C, Zhang G X. Synthesis of Petri net supervisors for FMS via redundant constraint elimination. *Automatica*, 2015, **61**: 156−163

119 Rui L, Chen X S, Gao Z P, Li W J, Qiu X S, Meng L M. Petri net-based reliability assessment and migration optimization strategy of SFC. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 2021, **18**(1): 167−181

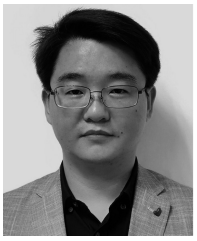
120 Luo J C, Zhou M C, Wang J Q. A place-timed Petri net-based method to avoid deadlock and conflict in railway networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, **23**(8): 10763−10772

121 Li Yong, Li Kun-Cheng, Sun Bai-Qing, Zhang Qiu-Hao, Wang Yi-Na, Yang Jun-You. Multi-robot-multi-task coordination frame work based on the integration of intelligent agent and Petri net. *Acta Automatica Sinica*, 2021, **47**(8): 2029−2049
(李勇, 李坤成, 孙柏青, 张秋豪, 王义娜, 杨俊友. 智能体 Petri 网融合的多机器人多任务协调框架. 自动化学报, 2021, **47**(8): 2029−2049)

122 Zhang S W, Wu N Q, Li Z W, Qu T, Li C D. Petri net-based approach to short-term scheduling of crude oil operations with less tank requirement. *Information Sciences*, 2017, **417**: 247−261

袁凤连 南京理工大学计算机科学与工程学院博士研究生. 主要研究方向为离散事件系统, Petri 网和晶圆制造系统.
E-mail: yuanfenglian@njust.edu.cn
(**YUAN Feng-Lian** Ph.D. candidate at the School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology. Her research interest covers discrete event systems, Petri nets, and wafer fabrication system.)

黄 波 南京理工大学计算机科学与工程学院教授. 主要研究方向为离散事件系统, Petri 网, 智能制造和机器人系统. 本文通信作者.
E-mail: huangbo@njust.edu.cn
(**HUANG Bo** Professor at the School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology. His research interest covers discrete event systems, Petri nets, intelligent manufacturing, and robotic systems. Corresponding author of this paper.)



王际鹏 湖北工业大学机械工程学院讲师. 主要研究方向为晶圆制造系统, 智能制造, 离散事件系统和 Petri 网.
E-mail: wangjipeng.tpk@gmail.com
(**WANG Ji-Peng** Lecturer at the School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology. His research interest covers wafer fabrication system, intelligent manufacturing, discrete event systems, and Petri nets.)

潘春荣 江西理工大学机电工程学院教授. 主要研究方向为制造系统的建模, 仿真, 调度与控制.
E-mail: mailto:crpan@jxust.edu.cn
(**PAN Chun-Rong** Professor at the School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology. His research interest covers modeling, simulation, scheduling, and control of manufacturing systems.)