

# 半导体生产线建模方法与调度策略研究进展

曹政才, 乔 非, 吴启迪

(同济大学 CIMS 研究中心, 上海 200092)

**摘 要:** 半导体生产线是典型多重入复杂的制造系统, 具有可重入性、复杂性、不确定性、多目标和多约束等特点, 其优化调度问题是近年来控制领域的一个重要研究方向. 本文根据近些年来这一研究方向上的主要研究成果, 系统评述了国内外半导体生产线调度的建模方法和调度策略的研究进展, 分析和讨论它们各自的主要优缺点和适用范围, 简要介绍了重调度判定依据及所采用的方法, 并指出半导体制造领域中值得进一步研究的一些问题和可能发展的方向.

**关键词:** 半导体生产线; 建模; 调度; 重调度

**中图分类号:** TP278 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2006) 12A-2518-08

## Research Progress of Modeling Methods and Scheduling Strategies for Semiconductor Wafer Fabrication

CAO Zheng cai, QIAO Fei, WU Qi-di

(CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Semiconductor wafer fabrication is a class of typical re-entrant complicated manufacturing system, which has important characteristics such as re-entrant process flows, complexity, uncertainty, multi-objective and multi-constraint. Nowadays, optimized scheduling problem for wafer fabrication is an important research branch in the control. In this paper, the research progress of modeling methods and scheduling strategies for semiconductor wafer fabrication are systemically reviewed according to the main research achievements in recent years, and their primary virtues and deficiencies are also analyzed and discussed, furthermore, their applicable cope are also presented. On the other hand, the criterions and methods of rescheduling are briefly generalized. Some problems worthy of further study and probably developing trends in the semiconductor manufacturing field are presented.

**Key words:** semiconductor wafer fabrication; modeling; scheduling; rescheduling

## 1 引言

半导体制造是当今最复杂的制造过程之一, 具有不确定性、可重入流、混合加工、设备负载不均衡等明显区别于其它制造业的显著特点, 是一典型的离散事件动态系统, 因而给半导体生产线建模和优化调度带来极大的复杂性<sup>[1~4]</sup>. 因此, 设计出一类能真正解决现场实际问题的用于调度、控制与性能分析的工具, 可以改变目前人工调度与控制的不准确现状, 实现计算机控制生产过程具有重要意义. 本文主要针对半导体制造系统生产计划与调度进行研究, 重点介绍其建模技术、调度策略及重调度问题等, 并讨论了进一步研究的若干方向.

## 2 半导体生产线调度特点分析

### (1) 可重入性

在半导体制造过程中, 重入是系统的本质, 即工件在加工

过程中的不同阶段可能重复访问某些设备. 由于“重入”现象的存在, 使得每台设备需加工的工件数大大增加, 再加上生产线上产品种类、数量及其组合的不同, 以及各产品工艺流程的复杂程度不同, 使得半导体生产线的调度与控制问题比一般制造系统更加复杂.

### (2) 工艺流程复杂性

生产线上流动的具有不同工艺流程的产品多达几十种, 使得生产线上的在制品对设备使用权的竞争非常激烈.

**加工模式复杂性:** 设备的加工方式主要有四种: 单片加工、串行批量加工、单卡并行批量加工、多卡并行批量加工. 其中并行批量加工设备使半导体生产线改变了经典调度问题中一台设备一次只能加工一个工件的约束, 这也是半导体生产线调度问题区别于经典调度问题的重要原因之一.

### (3) 高度不确定性

半导体生产线是典型的离散事件动态系统, 存在各种各

样的不确订性事件. 这些不确定性事件主要由设备情况变化、客户需求变化、加工瓶颈变化、新产品试制、临时工艺更改等. 不确定性事件发生会影响生产线运行, 造成系统性能指标恶化.

#### (4) 多目标

生产线调度目标主要包括基于加工时间的指标、基于交货期的指标和基于成本的其它指标. 多数优化准则下的生产调度问题都是 NP 难题. 实际作业过程一般都追求多项相互冲突的性能指标.

#### (5) 多约束

生产线中人力、设备、信息等多种资源相互制约, 生产线调度实际是在许多等式和不等式约束下寻求优化问题.

综上所述, 半导体生产线优化调度是具有明确制造应用背景和相当大研究难度的技术领域. 传统的解析建模和调度方法很难适应实际问题的需要, 因而在充分了解实际半导体生产线生产工艺流程的基础上, 深入分析生产计划、投料策略及调度策略间的关系, 将先进的建模技术与智能优化算法相结合, 探索解决半导体生产线优化调度问题的新途径.

### 3 半导体生产线调度模型

对半导体生产线进行优化调度研究时, 需要借助抽象化模型语言来准确描述系统行为特征及变化规律. 研究模型的基础上, 还可以对半导体制造过程的特征和行为加以分析和提炼, 而分析的结果又可以作为模型改进和调度方法研究的依据. 因此有效的建模工具和建模方法是实现半导体制造过程优化调度的一个重要因素.

很多学者对半导体芯片制造模型进行了研究, 提出了多种模型主要有排队网络模型、仿真模型、Kelly 模型、Brownian 模型、流体网络模型、马尔可夫模型、Petri 网模型、基于流体网络优化模型、群体智能调度模型等.

(1) 排队网络模型<sup>[5]</sup> 因能直观描述生产线的加工过程而被用于半导体制造系统的建模中. 然而, 系统复杂度的提高带来的维数灾害是很难对模型求得解析解.

(2) 离散事件仿真模型通过对实际生产环境的建模来模拟实际生产环境, 从而避免了对调度问题进行理论分析的困难. 许多学者将离散事件仿真模型用于研究半导体芯片制造调度, 通过使用仿真机制评价各种规则, 选择对于给定作业和性能指标最好的规则. 例如, Rose、Kim 等<sup>[6, 7]</sup>将离散事件仿真模型用于芯片制造过程调度, 生成优化的调度方案. 离散事件仿真模型存在的问题是: 在某些情况下仿真方法要花太多的时间来运行, 并且, 从某种情况出发而建立的仿真方法不能用于另一种情况, 即当环境变化时, 需要根据变化了的环境重新建造模型、重新进行试验以找到合适的规则集, 缺乏柔性.

(3) 研究初期, 人们使用 Kelly 网来描述半导体芯片制造模型<sup>[8]</sup>, Kelly 模型要求在机器不失效的情况下, 工件输入呈泊松分布, 采取先入先出的调度策略. 但是, 实际上大多数系统都不满足 Kelly 网条件.

(4) Brownian 模型<sup>[9]</sup> 是开环排队网络的一种近似模型, 它是以重载流理论为基础, 通过对传统的工件流平衡方程进行

合适的时空缩放后取极限而得到. 重载流下取极限, 轻载机器被略去, 得到的模型只关注瓶颈机器. 应用 Brownian 模型可以对系统某些性能进行近似分析, 但对于某些复杂的网络结构, 不存在近似 Brownian 模型.

(5) 流体网络模型是制造系统中研究比较活跃的一个分支, 例如, Billings 等人建立了流体网络模型来研究半导体芯片制造调度<sup>[10]</sup>. 该方法在研究稳定性方面取得了一些结果, 但系统性能分析仍未取得显著成果.

(6) Kuma 将半导体芯片制造抽象为可重入排队网络, Meyn 等<sup>[11]</sup>对可重入排队网络建立了马氏决策模型 (Markov), 研究了相应的策略递推和值函数递推动态规划算法. 但由于动态规划算法易产生“维数灾难”, 因此已有的结果还只是理论上的.

(7) 由于 Petri 网<sup>[12]</sup> 在处理动态离散事件和复杂系统的特性时具有图形表示和数学描述的双重功能, 因此成为研究半导体芯片制造的强有力工具, 可用于系统建模、离散事件仿真、性能分析、以及调度, 尤其对并行和并发行为的系统建模有效. 用 Petri 网可以分析系统是否存在死锁, 并对可达性及其它性能进行估计. 例如, Chiang 等人<sup>[13]</sup>建立了半导体芯片制造的 Petri 网模型, 并使用遗传方法获得具有鲁棒性的调度方案; 乔非等<sup>[14]</sup>提出了基于有色 Petri 网的半导体生产线分层调度模型.

(8) 卫军胡等<sup>[15]</sup> 给出了芯片制造过程优化调度模型, 在流体网络模型的基础上建立了以减小平均在制品水平为目标的半导体制造系统的调度模型. 这些模型通常很难求解, 但它们是可分解的, 即可以把整个调度周期上的调度问题分解为一系列子区间上的调度子问题. 在半导体生产环境下, 子问题可以进一步简化. 把上述结果当作调度规则直接应用于基于仿真的调度方法, 可以克服流体网络模型的近似性, 同时, 由于充分利用了系统全局的状态信息, 提高了仿真调度的优化能力. 但不能保证整个系统的其它性能指标, 得不到其全局最优调度解.

(9) 李莉等根据蚁群生态系统的群体行为, 给出了基于群体智能构建半导体生产线调度模型<sup>[16, 17]</sup>. 该模型将集中优化控制与分布式动态控制相结合, 既保证了系统的动态性, 使之具有鲁棒性、自组织性、自适应性与可扩展性, 又保证了系统的全局优化. 但是所提出的模型与算法只是处在理论与仿真阶段, 未在半导体生产线原型上进行仿真验证其有效性与优化性.

上述模型都有其局限性, 由于半导体芯片制造一般包含数十个甚至上百个加工站和数百道工序, 对于这样复杂的系统, 使用任何单一建模工具都会遇到很多的困难. 到目前为止, 仍没有一个通用的模型可以较好地解决该领域的所有问题. 因此, 这一领域的研究还面临许多挑战, 尚处于初级阶段.

### 4 半导体生产线调度算法

作为最复杂的制造系统之一, 半导体制造系统调度得到许多领域研究人员的关注. 不同的研究人员研究重点不同, 有些人关注瓶颈设备调度, 有些人关注批加工设备调度, 有些

人则关注工件调度;不同的研究人员使用的方法也可能不同,但大致可以归纳五类:基于运筹学的方法、基于启发式规则、基于人工智能的方法、基于计算智能的方法以及基于群体智能的方法.

#### 4.1 运筹学的方法

运筹学是一门应用科学,它广泛应用现有的科学技术知识和数学方法,解决实际中提出的专门问题,为决策者选择最优决策提供定量依据<sup>[18]</sup>.半导体制造过程调度中最常用的一些运筹学方法:数学规划和排队论.如 Shenai 等人<sup>[19,20]</sup>使用随机整数规划方法或随机动态规划模型研究芯片制造过程的生产计划问题;Hwang<sup>[21]</sup>等人设计了基于拉格朗日松弛算法的分层半导体生产线调度模型,以获得优化的生产调度方案.Kubiak<sup>[22]</sup>等人讨论了使用最短加工时间工件排序以及动态规划算法获得最小化加工周期的方法.

由于半导体芯片制造规模大,具有高度不确定性,因此,基于运筹学的方法从根本上说仍然是静态调度方法,在求解半导体芯片制造生产计划与调度难题时,常常要对实际生产过程进行假设,得到的通常是带有静态实质的生产计划与调度方案,只是给不确定事件预留出了时间.但它可以为半导体生产线的实时调度提供一定的指导,可以系统地解决复杂约束、多目标优化等问题,如 Leachman 等人<sup>[23,24]</sup>提出的方法,因此基于运筹学的方法虽然不适合动态调度,但在生成中长期的生产计划与确定短期生产目标上具有一定优势.

#### 4.2 启发式规则

启发式规则通常是经过理论推导、定性分析得来的,也可以根据人们的实际经验总结出的,经过大量的仿真或实践证明是有效的和有利于调度目标的,其调度效果从长期和整体上看是有效的和可行的.启发式规则以其简单性和快速性成为半导体制造过程动态调度的首选,因而获得广泛关注,至今仍是研究重点.

Kumar 等人<sup>[25~28]</sup>提出了一系列用于半导体生产线实时调度的启发式规则,如针对交货期的最小剩余时间、最小交货期优先、最小操作交货期优先、临界值调度,针对加工周期的最短加工时间、最长加工时间,针对工件等待时间的先序先服务、后序先服务、先到优先以及针对负载平衡的流程控制与均衡生产等.

由于半导体制造系统的调度问题本身的复杂性较高,采用启发式调度规则把调度问题分解为单个设备的工件选择问题,这虽然使调度问题大大简化,但因决策时主要依据的是系统当前的和局部的信息,因而不能保证解的最优性,也无法确定离最优解的距离.

#### 4.3 人工智能方法

人工智能的发展推动了半导体生产线生产计划和调度理论的研究.半导体调度中常采用方法:基于实例推理、人工神经网络和多智能体系统.

##### (1) 基于实例推理

基于实例推理方法<sup>[29]</sup>源于人类具有记忆、学习、理解及推理方面的研究,人的记忆是动态的,能够随着不断的学习而增加,也能根据情况变化作出相应的调整.当遇到一个新的情

景时,人们总是联想起以前遇到过的类似情况及其结果只要有一个以前的旧实例可作为参考,人们就会找到它并将其作为制订决策的模型.

Chi 等人<sup>[30]</sup>在开发的硅片交货期制定专家支持系统中使用该方法,结果表明该方法在制定交货期的准确性方面优于其它交货期制订方法.对使用基于实例推理方法解决调度问题的系统来讲,成功的应用实例需保存到实例库中,为解决新的应用积累参考实例.该方法从本质上属于基于某种规则的调度,很难得到系统全部信息,不能保证解的最优性.

##### (2) 人工神经网络

人工神经网络<sup>[31]</sup>是一种并行处理机制的网络,且它可以通过学习而获得外界知识,知识分布存储各个神经元之间连接权值上,它可以完成输入模式到输出模式的复杂映射,具有容错能力强和运行速度快的特点,因而它已经成功地应用到半导体制造领域中.

金辉宇<sup>[32]</sup>尝试用神经元动态规划解决可重入生产系统中的调度问题,实验表明得到了较好的结果.该方法优点是不需要准确的数学模型,可以直接用过程数据来解决半导体调度问题.但是此方法还存在一些问题,如网络结构如何选取等.此外,在诊断过程中,常常自学习,自诊断,因此如何将无导师训练算法引入到调度算法,也是一直探讨的方向.

##### (3) 多智能体系统

多智能体系统(Multi-Agent System, MAS)是分布式人工智能研究的一个重要分支.研究的对象是一组在逻辑上或物理上分离的 Agent 之间行为的协调.学术界对 Agent 的定义一般认为每个 Agent 具有一定的独立解决问题能力,它们通过赋予的规则进行彼此之间的共同协作来完成比较复杂的任务.利用 Multi-Agent 系统的思想,可对半导体制造系统调度问题进行建模,将系统中与调度有关的对象分为管理 agent、投料 agent、工件 agent、设备 agent、运输 agent 与人员 agent 等几种,能够比较贴切地得到所要描述半导体制造系统调度问题中的行为特征及变化规律.

吴继伟等人<sup>[33]</sup>根据半导体生产线的特点,把整个生产线设计成有多个智能体(各加工中心),同时把各种影响智能体策略的因素转换为一个统一的效用函数来表示,由各加工中心根据当前的生产情况用动态规划方法来选择加工工件.该方法根据需求不断调整各种参数,能动态实时地计算每一时刻智能体的决策局势,因而可适应环境变化的要求.采用多智能体方法对半导体生产进行调度,提高了半导体生产线设备的利用率,缩短了单位工件的加工时间.通过调整影响效用函数的参数,实现了半导体工件的灵活生产.

#### 4.4 计算智能

计算智能算法都是以人类、生物的行为方式或物质的运动形态为背景,经过数学抽象建立算法模型,通过计算机的计算来求解组合最优化问题.计算智能算法以模型的抽象为其关键点,以数学为理论基础.主要包括模拟退火算法、遗传算法与人工免疫算法.

##### (1) 模拟退火

SA 是基于 Monte Carlo 迭代求解的一种全局概率型搜索

算法, 该算法是一种串行优化算法每步仅随机尝试当前状态邻域中的一个状态, 同时通过控制“温度”来控制状态更新概率, 从而在搜索过程中具有避免局部极小的能力并最终趋于全局最优<sup>[34]</sup>. 初始温度、退温函数、状态产生方式、抽样稳定准则是影响 SA 性能的关键因素.

V Jain 等人<sup>[35]</sup>提出基于 GSPN 和 SA 的半导体生产线调度优化, 通过 GSPN 对生产线进行建模, 然后应用 SA 对该模型进行调度并获取最优解. 实验结果表明: 该方法比现有分派规则更能明显提高系统加工周期和减低脱期率. 但是 SA 取得优良性能要求较高初温、较长抽样步数和降低终止温度, 因而搜索时间很长.

#### (2) 遗传算法

遗传算法<sup>[36]</sup>是按照自然界“优胜劣汰, 适者生存”法则提出的一种全局优化自适应概率搜索算法. 遗传算法通过对当前群体施加选择、杂交、变异等一系列操作, 产生出新一代的群体, 并逐步使群体进化到最优解状态.

Huang Wen 等人<sup>[37]</sup>使用排队的 Petri 网与 GA 对半导体生产线的建模、调度和预测的研究, 采用排队的 Petri 网对系统进行建模, 然后由 GA 对该模型进行调度并获取近似最优解. 在该算法中, 染色体表示多种调度策略(工件投料控制、机器选择策略、分派规则和批加工策略)的合成. 利用模型中的排队理论固有的特性, 来预测生产线上情况, 可以提高系统的准时交货率和降低系统的脱期率. 由于该算法存在计算效率低、容易造成早熟的现象且收敛于局部最优解等特点, 因此近年来多种群并行协同遗传算法获得了越来越广泛的关注和应用.

#### (3) 人工免疫算法

免疫算法<sup>[38]</sup>是借鉴生物免疫系统原理建立起来的一种新的并行优化算法, 该算法采用高变异克隆选择为主要的搜索方式, 全局搜索能力强, 种群模式收敛效应不明显, 能够有效保持种群模式的多样化, 因而不易产生早熟现象, 用于求解具有多模态性质的函数优化问题具有较好的效果.

余建军等人<sup>[39]</sup>针对生产线调度这个优化问题的难处理性, 提出了基于动态评价的免疫算法用于求解生产线调度问题, 并建立了调度的模型, 构造了抗体, 设计了免疫算子. 仿真结果不但验证了它的有效性, 而且表明此算法优于其它算法.

针对半导体生产线调度这个优化问题的难处理性, 利用人工免疫方法来求解半导体生产线调度问题. 该算法不是直接用于工件投料控制、工件分派和工件的排序问题, 而是以规则调度为主线, 依托免疫算法进行全局搜索来获得较好的权重组合, 每当免疫算法完成它的优化过程, 就会生产一个优化的调度策略, 这样会大大提高算法的计算效率, 可能成为近期研究热点.

总之, 计算智能方法用于半导体芯片制造生产计划和调度的并不多, 基于计算智能的搜索算法计算时间长, 只适合于解决小规模的问题, 因此还不能满足半导体生产线大规模、带有复杂约束以及多目标优化调度的需要, 不具有广泛应用的价值. 使用计算智能解决半导体生产线调度难题, 如何改进其计算效率是关键.

## 4.5 群体智能

群体智能是受启发于群居生物的群体行为并模拟抽象而成的算法和模型, 在没有集中控制且不提供全局模型的前提下, 群体智能为寻找复杂的分布式问题的解决方案提供了基础.

应用在半导体制造系统调度算法有: 模拟生物蚁群智能寻优的蚁群优化算法和信息素算法以及模拟鸟群运动模式的微粒群算法.

#### (1) 蚁群优化算法

蚁群优化算法是群体智能的典型实现模型之一, 是一种分布式智能模拟算法<sup>[40]</sup>. 基本思想是模仿蚂蚁依赖信息素进行通信而显示出的社会行为. 该算法是一种随机的通用试探法, 可用于求解各种不同的组合优化问题、各种调度问题, 具有通用性和鲁棒性, 是基于总体优化的方法.

该算法首先应用于旅行商问题并获得了极大的成功, 其后, 又被用于求解指派问题、Job shop 调度问题、图着色问题和网络路由问题等. 文献[41]结果表明优于模拟退火算法和禁忌搜索算法. 实践证明, 蚂蚁算法是一种鲁棒性强、收敛性好、实用性广的优化算法, 但同时也存在一些不足, 如收敛速度慢和容易出现停滞现象等.

然而半导体生产线存在多重入加工流, 即工件在加工过程中的不同阶段会重复访问某些机器, 不同加工阶段的工件可能在同一机器前等待加工. 因此, 在多重入制造过程中存在着多个环, 这就无法将这种类型的调度问题转化为最短路径问题来求解. 另外, 蚁群优化算法在调度问题求解中仍然是基于搜索的方式进行的, 还是需要较长的计算时间, 从而对解决动态实时调度问题仍具有一定的局限性.

#### (2) 信息素算法

信息素算法是一种模拟蚂蚁觅食行为中基于信息素的间接通讯方式的动态调度算法<sup>[42]</sup>. 该算法主要由两个子算法构成, 即工件选择合适设备等待加工的调度算法与设备选择合适工件优先加工的调度算法.

李莉、乔非等<sup>[43]</sup>在充分理解群体智能思想的基础上, 模拟蚂蚁生态系统的基于信息素的间接交互方式, 提出基于信息素的半导体生产线动态智能调度算法, 仿真结果表明, 该算法能够获得较好的 MOVEMENT、加工周期、生产率、设备利用率与准时交货率的性能. 但由于该算法从本质上来看, 仍然是基于规则的, 其最大局限性在于缺乏系统整体性能的把握和预见能力.

#### (3) 微粒群优化算法

微粒群算法的基本思想来源于对鸟群简化社会模型的研究及行为模拟<sup>[44]</sup>. 它与其它进化算法的相似之处是: 也根据对环境的适应度将群体中的个体移动到好的区域; 不同之处在于: 不像其它进化算法那样对个体使用进化算子, 而是将每个个体看作是寻优空间中的一个没有质量没有体积的微粒, 在搜索空间中以一定的速度飞行, 通过对环境的学习与适应, 根据个体与群体的飞行经验的综合分析结果来动态调整飞行速度.

夏蔚军等人<sup>[45]</sup>利用微粒群优化的全局搜索能力和高搜

索效率以及模拟退火算法的局部搜索能力,发展了一种快速、且易于实现的新的混合启发式算法,并将其应用于求解标准调度问题.计算结果表明该算法是一种求解调度问题的可行且高效的方法.但是微粒群优化算法只能求取生产过程的全局解,局部最优解搜索能力较弱.

从以上分析可以看出,调度算法均基于简单的理想模型,往往依靠人工经验为主,研究成果主要通过仿真模型来进行验证,能够实际应用到的在半导体生产线调度的研究成果还比较少.

## 5 半导体制造系统重调度

由于半导体制造环境的高度不确定性,如设备故障、新订单投放等,原本优化的调度方案很可能不再适应现场的环境,必须采取合适的重调度手段,以降低在制品、提高机器利用率、满足生产约束、缩短生产周期、满足订单交货期、提高生产效率等等.

### 5.1 重调度判定策略

重调度策略用于决定引发何种重调度,其判断的关键有两个:一是是否存在设备临界故障;二是是否存在匹配点.如果存在设备临界故障,则需要重新生成考虑设备维护的调度方案.否则,判断是否存在匹配点,如果存在匹配点,则进行局部修正式重调度;否则,进行全局修正式重调度.

### 5.2 重调度方法

重调度方法用于生成同时考虑偏差成本与初始目标函数的优化的重调度方案.主要考虑局部修正式重调度方法与全局修正式重调度方法.

#### (1) 局部修正式重调度方法

局部修正式重调度方法仅对重调度点之后的部分受影响的加工任务进行重调度,该方法尽可能地保持原调度. Bean 等人提出的匹配调度方法<sup>[46,47]</sup>就是一种典型的局部修正式重调度方法,该方法的关键是如何确定匹配点.另外, Smith 等人<sup>[48]</sup>提出了基于约束的调度修补方法来部分修改调度方案,其中修改部分的长度由冲突段来决定.

局部修正式重调度方法通过对原始调度方案的最小净改变来形成新的调度方案,尽管计算量小,重调度稳定性好,但这种方法需要较多的人为干预,并且应用在复杂制造系统中,有时难以实现.

#### (2) 全局修正式重调度方法

全局修正式重调度方法重调度点之后的所有加工任务进行重调度.主要包括简单的右移重调度与全局重调度方法<sup>[49,50]</sup>.右移重调度将重调度点之后的加工任务延后一定的时间(即在调度甘特图中将相应的加工任务向右移动),使得调度方案变得可行,如 Abumaizar 和 Svestka 所做的研究<sup>[51]</sup>.这种方式简单易懂,实现方便,调度稳定性最大,但是对于资源的利用不是很充分.

全局重调度方法对重调度点之后的所有加工任务,基于原有的调度方案按照生产现场情况进一步修正,有利于解决任务之间的冲突与矛盾,但计算量比局部修正式大,对生产现场的影响也较大.目前关于全局重调度方法的研究还很少见,

李莉等人<sup>[52]</sup>提出了一种基于群体智能的全局修正式重调度方法,其主旨思想是利用生产现场的实时信息修正原有调度方案,以获得更加符合现场生产实际的优化的重调度方案.

总之,尽管重调度研究已取得了一定的研究成果,但其中的重调度策略研究与全局修正式重调度方法的研究还比较缺乏;另外,综合考虑偏差成本与目标函数的重调度模型也有必要进一步深入研究.

## 6 结论

半导体制造系统的生产计划与调度问题,是现在半导体研究领域的重点和难点问题.在半导体生产过程建模中,常常面临无法预先知道,不可预测或动态变化的生产环境.大多数半导体制造过程调度问题已被证明是 NP 难问题,同时还具有典型的多约束、多目标、不确定、优化特征.调度方法通常是不完备,给出的解也不能保证是最优的,也无法确定离最优解的距离.但由于建模技术飞速发展以及人工智能、计算智能、群体智能理论等学科发展深入研究,为半导体制造系统的生产计划与调度问题的最终解决提供可能.但是对于复杂的应用,仍不能令人满意,因此现存的问题也正是该领域研究方向:

(1) Petri 网技术在近年来被引入到复杂生产制造过程的建模中,并取得很好的效果.由于半导体生产线具有设备多、产品种类多、可重入性等特点,采用常规的 Petri 网进行建模势必造成状态空间的爆炸,而无法分析系统性能.因而采用模糊逻辑和 Petri 网理论相结合,来描述近似或不确定环境信息,将是半导体智能建模技术重要研究方向之一.

(2) 人工智能可使半导体制造系统本身具有较好柔性和可解性.同时还能处理复杂的问题,因而在未来的调度策略中利用人工智能的各种方法,以知识为基础构成智能调度算法仍将是其研究趋势之一.

(3) 为了实现大规模半导体生产计划与调度,处理器结构将朝并行体行结构发展,包括建模功能的并行结构和调度算法功能的并行结构.

(4) 在一个智能调度系统中,使用单一的智能调度方法往往不能取得满意的效果,应综合采用多种智能调度方法,才能够取得良好效果.如:由于启发式规则简单易行,能够适用于大规模的调度问题,但其解决问题是局部的,不能寻求全局最优调度方案.但是随着计算机技术的迅速发展,CPU 运算速度已大大提高,使得对大规模离散制造系统的生产过程进行仿真运行所花的时间代价大大降低.因此对于半导体制造系统来讲,基于启发式规则和仿真技术相结合的调度方法研究变得可行,且有希望成为新的研究热点.

(5) 针对半导体制造系统的高度不确定性问题,借鉴计算认知、模糊逻辑和群体智能化方法协同进行重调度问题的研究也将是今后发展方向之一.

(6) 半导体制造系统是一个复杂的系统,这是一个涉及数学、自动化、管理、机械、电子、计算机、物理学等多学科的跨学科课题.任何新技术的出现都可能对该领域的研究带来突破性进展,因而对半导体生产计划与调度研究的同时,必须密切

关注相关学科的发展.

# 参考文献:

- [1] J H Chen, L C Fu, M H Lin, A C Huang. Petri net and GA-based approach to modeling, scheduling, and performance evaluation for wafer fabrication[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(5): 619– 636.
- [2] A R Moro, H Yu, G Kelleher. Hybrid heuristic search for the scheduling of flexible manufacturing systems using Petri nets[J]. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 2002, 18(2): 240– 245.
- [3] J G Yi, S W Ding, D Z Song. Steady state throughput and scheduling analysis of multi cluster tools for semiconductor manufacturing: A decomposition approach[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. Barcelona, Spain: IEEE Computer Society Press, 2005. 292– 298.
- [4] T C Chiang, Y S Shen, L C Fu. Adaptive lot/ equipment matching strategy and GA based approach for optimized dispatching and scheduling in a wafer probe center[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation [C]. New Orleans, LA: IEEE Computer Society Press, 2004. 3125– 3130.
- [5] P R Kumar. Re-Entrant Lines[J]. Special Issue on Queuing Networks, 1993, 13(1): 87– 110.
- [6] O Rose. Estimation of the cycle time distribution of a wafer fab by a simple simulation model[A]. Proceedings of the International Conference on Semiconductor Manufacturing Operational Modeling and Simulation[C]. San Francisco, CA, 1999. 133– 138.
- [7] Y D Kim, S O Shim, B Choi, H Hwang. Simplification methods for accelerating simulation based real time scheduling in a semiconductor wafer fabrication facility[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2003, 16(2): 290– 298.
- [8] F Baslett, K M Chandy, R R Muntz. Open, closed and mixed networks of queues with different classes of customers[J]. Journal ACM, 2001, 22(2): 248– 260.
- [9] 王中杰, 吴启迪. 半导体生产线控制与调度研究[J]. 计算机集成制造系统, 2002: 8(8): 607– 610.  
Wang Zhongjie, Wu Qidi. Research of control and scheduling on semiconductor manufacturing line[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002: 8(8): 607– 610. (in Chinese)
- [10] R Billings, J Hasenbein. A survey of applications of fluid models to semiconductor operations[A]. Proceedings of the International Conference on Modeling and Analysis of Semiconductor Manufacturing[C]. 2000. 97– 103.
- [11] R R Chen, S P Meyn. Value iteration and optimization of multi class queuing networks[J]. Queueing system, 1999, 32(13): 65– 97.
- [12] M C Zhou. Modeling, analysis, simulation, scheduling, and control of semiconductor manufacturing systems: A Petri net approach[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(3): 333– 357.
- [13] T C Chiang, A C Huang, L C Fu. Modeling, scheduling, and performance evaluation for wafer fabrication: a queueing colored Petri net and GA based approach[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2006, 3(3): 330– 338.
- [14] F Qiao, L Li, Q D Wu. Colored Petri net based hierarchical scheduling model for semiconductor production line[A]. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation [C]. Hangzhou, China, 2004, 4: 3014– 3018.
- [15] 卫军胡, 韩九强, 孙国基. 半导体制造系统的优化调度模型[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 133– 135.  
Wei Junhu, HAN Jiuqiang, SUN Guoji. Optimal Scheduling Models of Semiconductor Manufacturing [J]. Acta Simulata Systematica Sinica, 2001, 13(2): 133– 135. (in Chinese)
- [16] L Li, F Qiao, Q D Wu. Swarm intelligence based dynamic real time scheduling approach for semiconductor wafer fab[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 18(1), 2005. 3: 71– 74.
- [17] 李莉, 乔非, 吴启迪. 半导体生产线群体智能调度模型研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(22): 2006– 2009.  
Li Li, Qiao Fei, Wu Qidi. Research on swarm intelligence based scheduling model for semiconductor wafer fab[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(22): 2006– 2009.
- [18] Y X Shen, R C Leachman. Stochastic wafer fabrication scheduling[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2003, 16(1): 2– 14.
- [19] V D Shenai. A mathematical programming based procedure for the scheduling of lots in a wafer fab[D]. Master Thesis, Blacksbrug, Virginia, 2001. 9.
- [20] HODD et al. Capacity planning under demand uncertainty for semiconductor manufacturing[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 16(2), 2003: 273– 280.
- [21] T K Hwang, S C Chang. Design of a lagrangian relaxation based hierarchical production scheduling environment for semiconductor wafer fabrication[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(4): 566– 578.
- [22] W Kubiak, S Lou. Mean flow time minimization in reentrant job shops with a hub[J]. Operations Research, 1999, 44: 764– 776.
- [23] R C Leachman, D A Hodges. Benchmarking semiconductor manufacturing[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1996, 9(2): 158– 169.
- [24] Y F Hung, R C Leachman. A production planning methodology for semiconductor manufacturing based on iterative simulation and linear programming calculations[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1996, 9(2): 257– 269.

- [ 25] S Kumar, P R Kumar. Fluctuation smoothing policies are stable for stochastic re entrant lines[ J]. Discrete Event Dynamic Systems, 1996, 6( 2): 361– 370.
- [ 26] S J Mason, J W Fowler, W M Carlyle. A modified shifting bottleneck heuristic for minimizing total weighted tardiness in complex job shops[ J]. Journal of Scheduling, 2002, 5: 247– 262.
- [ 27] R Dabbas. A new scheduling approach using combined dispatching criteria in semiconductor manufacturing systems[ D]. PHD Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ, 1999.
- [ 28] H Hwang, J U Sun. Production sequencing problem with reentrant work flows and sequence dependent setup times[ J]. Computers & Industrial Engineering, 1997, 33( 5): 773– 776.
- [ 29] 王遵彤. 半导体硅片加工生产线调度与控制问题研究[ R]. 上海: 同济大学博士后出站报告, 2005.  
Wang Zuntong. Research on Scheduling and Controlling for Semiconductor Wafer Fab[ R]. Shanghai: Postdoctoral Research Report of Tongji University, 2005. ( in Chinese)
- [ 30] C C Chiu, P C Chang, N H Chiu. A case based expert support system for due date assignment in a wafer fabrication factory[ J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003, 14: 287– 296.
- [ 31] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[ M]. 清华大学出版社, 2000.  
Yan Pingfan, Zhang Changshui. Artificial Neural Networks and Evolutionary Computation[ M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. ( in Chinese)
- [ 32] 金辉宇. 神经元动态规划在可重入生产系统调度中的应用[ D]. 沈阳: 沈阳自动化研究所工学硕士论文, 2001. 7.  
Jin Huiyu. Application of neuro dynamic programming in the scheduling of re entrant lines[ D]. Shenyang: Dissertation for the master Degree in Engineering of Shenyang Institute of Automation, 2001, 7. ( in Chinese)
- [ 33] 吴继伟, 萧蕴诗. 多智能体技术在半导体生产线调度中的应用[ J]. 计算机集成制造系统 CIMS, 2003, 9( 8): 641– 644.  
Wu Jiwei, Xiao Yunshi. Multi agent technology in scheduling of semiconductor production line[ J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2003, 9( 8): 641– 644. ( in Chinese)
- [ 34] B Hajek. Cooling schedules for optimal annealing[ J]. Math Oper Res, 1988, 13( 2): 311– 329.
- [ 35] V Jain, R Swarnkap, M K Tiwari. Modeling and analysis of wafer fabrication scheduling via generalized stochastic Petri net and simulated annealing[ J]. International Journal of Production Research, 2003, 41( 15): 3502– 3527.
- [ 36] 王凌, 郑大钟. Metaheuristic 算法研究进展[ J]. 控制与决策, 2000, 15( 3): 257– 262.  
Wang Ling, Zheng Da zhong. Meta heuristic algorithms: a review[ J]. Control and Decision, 2000, 15( 3): 257– 262. ( in Chinese)
- [ 37] H W Wen, L C Fu, S S Huang. Modeling, scheduling, and prediction in wafer fabrication system using queueing Petri net and genetic algorithm[ A]. Proceeding of IEEE international conference on robotics and automation[ C]. Seoul, Korea: IEEE Computer Society Press, 2001, 4: 3559– 3564.
- [ 38] X Q Zuo, Y S Fan. Solving the job shop scheduling problem by an immune algorithm[ A]. Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics[ C]. Guangzhou, China, 2005, 6: 3282– 3287.
- [ 39] 余建军, 孙树栋, 郑锋. 基于动态评价免疫算法的车间作业调度研究[ J]. 机械工程学报, 2005, 41( 3): 25– 31.  
Yu Jianjun, Sun Shudong, Zheng Feng. Job shop scheduling study by dynamic evaluation based immune algorithm[ J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41( 3): 25– 31. ( in Chinese)
- [ 40] 李士勇, 陈永强, 李研. 蚁群算法及其应用[ M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2004.  
Li Shiyong, Chen Yongqiang, Li Yan. Ant Colony Algorithm and Applications[ M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004. ( in Chinese)
- [ 41] Y J Li, T J Wu. A nested hybrid ant colony algorithm for hybrid production scheduling problems[ J]. Acta Automation Sinica, 2003, 29: 95– 101.
- [ 42] 李莉. 半导体生产线动态实时智能调度方法研究[ R]. 上海: 同济大学博士后出站报告, 2005.  
Li Li. Research on Dynamic real time Intelligent Scheduling for Semiconductor Wafer Fab[ R]. Shanghai: Postdoctoral Research Report of Tongji University, 2005. ( in Chinese)
- [ 43] L Li, F Qiao, H Jiang, Q D Wu. The Research on Pheromone Based Dynamic Intelligent Scheduling for Semiconductor Wafer Fabrication[ A]. Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation[ C], Hangzhou, China, 2004. 6: 2990– 2994.
- [ 44] 刘波, 王凌, 金以慧, 黄德先. 微粒群优化算法研究进展[ J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32( 3): 1– 6.  
Liu Bo, Wang Ling, Jin Yihui, Huang Dexian. Advances in particle swarm optimization algorithm[ J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 32( 3): 1– 6. ( in Chinese)
- [ 45] 夏蔚军, 吴智铭, 张伟, 杨根科. 微粒群优化在 Job shop 调度中的应用[ J]. 上海交通大学学报, 2005, 39( 3): 381– 385.  
Xia Weijun, Wu Zhiming, Zhang Wei, Yang Genke. Application of particle swarm optimization in the job shop scheduling problem[ J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39( 3): 381– 385. ( in Chinese)
- [ 46] J C Bean, R B John, E N Charles. Match up scheduling with multiple resources, release dates, and disruptions[ J]. Operations Research, 1991, 39( 3): 470– 483.
- [ 47] M S Akturk, G Elif. Match up scheduling under a machine

breakdown[J]. European Journal of Operational Research, 1999, 11(2): 81– 97.

[ 48] S F Smith. OPIS: a methodology and architecture for reactive scheduling, Intelligent Scheduling[M]. San, Francisco: Morgan Kaufmann Press, 1994. 29– 66.

[ 49] 许潇红. 半导体制造过程中的重调度研究[D]. 上海: 同济大学工学硕士论文, 2006. 3.

Xu Xiaohong. Rescheduling in semiconductor manufacturing system[D]. Shanghai: Dissertation for the master Degree in Engineering of Tongji University, 2006, 3. ( in Chinese)

[ 50] 薛陈江. 基于模糊逻辑算法的半导体生产线设备维护调度研究[D]. 上海: 同济大学工学硕士论文, 2006. 3.

Xue Chenjiang. Fuzzy logic based machine maintenance scheduling for semiconductor fabrication facilities[D]. Shanghai: Dissertation for the master Degree in Engineering of Tongji University, 2006, 3. ( in Chinese)

[ 51] R J Abumaizar, J A Svestka. Rescheduling job shops under random disruptions[J]. International Journal of Production Research, 1997, 35( 5): 2065– 2082.

[ 52] 李莉, 乔非, 吴启迪. 半导体制造重调度研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17( 6): 612– 615.

Li Li, Qiao Fei, Wu Qidi. Research on rescheduling for semiconductor wafer fab[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17( 6): 612– 615. ( in Chinese)

作者简介:

曹政才 男, 1974 年出生于黑龙江富裕县, 现为同济大学 CIMS 研究中心博士后. 目前主要研究方向: 复杂过程的建模、优化与控制, 机器人传感技术、机器人智能控制. E-mail: giftczc@mail.tongji.edu.cn

乔非 女, 1967 年出生于安徽马鞍山, 现为同济大学电信学院教授. IEEE 会员, 研究方向为控制理论与控制工程、复杂系统建模、CMS 等.

吴启迪 女, 1947 年出生于上海, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 现为教育部副部长. 研究领域: 管理科学与工程、控制理论与控制工程、系统工程.