

半导体封装测试制造系统 运行优化理论与技术

SEMICONDUCTOR



倪妍婷 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

国家自然科学基金项目 (No. 51505042) 和
四川省教育厅重点项目 (No. 17ZA0088) 成果

半导体封装测试制造系统 运行优化理论与技术

SEMICONDUCTOR



倪妍婷 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

半导体封装测试制造系统运行优化理论与技术/倪妍婷著. —武汉: 武汉大学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-307-19034-4

I. 半… II. 倪… III. 半导体工艺—封装工艺—测试—智能制造系统 IV. TN305.94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320205 号

责任编辑: 王金龙

责任校对: 汪欣怡

版式设计: 马 佳

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 虎彩印艺股份有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 11.25 字数: 163 千字 插页: 1

版次: 2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19034-4 定价: 29.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

相比传统的 Job-Shop 和 Flow-Shop 生产模式，半导体生产具有较为复杂的生产制造过程，从客户需求预测，生产计划制订，再到生产线生产调度实施，整个过程流程长、数据量繁杂。相应地，由于其内在的复杂性、动态随机性、多目标、多约束等特性，半导体生产计划与控制问题一直以来是生产管理领域的重点和难点课题。目前在半导体生产制造优化研究方面，从生产预测、库存控制、生产计划、生产调度等方面，大多数研究聚焦在具体某一个阶段或某一个方面独立地进行研究，而面对如此复杂的生产管理体系，实现生产上下游协同性交互，增强系统整体对动态变化的适应性等方面还有待进一步深入。

本著作从系统化、协同化的角度构建适合半导体封装测试生产自身特点的协同体系结构，运用分布式人工智能技术中的多智能体对该系统进行模块化封装，对生产计划与调度中的具体问题建模，研究生产协同过程中的关键技术和协商机制，并进行协商优化。具体地，本著作的主要工作包括以下几个方面：

(1) 首先对国内外生产计划与调度领域的研究现状进行综述，在此基础上，进一步深入讨论了半导体生产制造系统的特点及其在协同性研究方面所取得的一些进展和存在的不足，并指出了半导体生产协同性发展的趋势。之后，对本书采用的协同性关键技术主体多智能体进行了研究，对其在制造过程应用方面进行了综述，指出了其内在的特点及其在协同性研究方面的优势。

(2) 针对半导体封装测试生产的内在复杂性和动态随机性，构建了基于多智能体的生产管理混合控制体系结构。具体描述了该体系结构中的 Agent 属性及其功能、Agent 内部功能模块和体系间各

个 Agent 间数据逻辑关系。搭建整体框架的同时，为接下来封装测试生产阶段的各个环节之间的协同性分析和讨论奠定了基础。

(3) 针对半导体封装测试工厂生产制造过程中生产计划分配的协同性问题，运用分布式多 Agent 技术对生产分配过程进行模块化封装。在传统合同网协议基础上进行改进，嵌入“产能注册矩阵”的模式构建了多 Agent 协商模型，提出了智能体间招标—投标—中标的交互机制。对投标过程的产能平衡问题，运用启发式算法进行了优化。

(4) 在大批量定制生产环境下，讨论了生产计划与调度的协同性问题。应用面向订单封装 ATO 生产模式，对二者进行多 Agent 模块化划分，建立了基于多 Agent 的半成品延迟分化协同模型。该模型以半成品仓库 SFGI 为耦合点，对生产计划与调度过程的原材料、在制品、半成品、订单等多因素进行分析，并确立了其相互间的量化关系。

(5) 在基于半成品延迟分化模型的基础上，针对调度与订单智能体间信息交互复杂和冲突制约问题，运用对策论对多 Agent 之间的协商机制问题进行讨论，并将“阈值保证”和“触发补偿”机制引入到多 Agent 协商过程中。同时对协商中的纳什平衡稳定性问题进行了初步讨论，确定多 Agent 博弈赢得函数及其约束条件。运用启发式遗传基因算法寻求博弈双方的赢得函数的纳什均衡解，达到调度 Agent 与订单 Agent 的协同优化和冲突平衡。

(6) 运用 JADE 平台开发技术，设计和开发了基于多 Agent 的计划与调度协同交互平台。具体介绍了系统的软硬件开发环境、系统设计包图和类图以及完成主体协商过程的各 Agent 功能模块和界面。为进一步深化开发和系统的扩展研究及应用尝试了可行的设计实现。

本书是目前较为完整地针对半导体封装测试生产制造领域从生产结构、生产建模、生产计划与调度控制等几个方面阐述其理论与技术的著作。本书基于作者十几年来在半导体制造领域的工作和研究经验的融合，本着理论与实践相结合的原则，不仅追求学术性，而且注重实际应用。本书内容不仅适用于理论教学，同时可以为芯片制造生产现场提供指导。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 半导体制造系统优化研究背景	3
1.2 半导体制造系统优化研究意义	4
1.3 半导体生产研究国内外现状	6
1.3.1 生产计划与调度研究现状	6
1.3.2 动态调度的研究现状	15
1.4 半导体生产研究发展趋势	23
第 2 章 半导体生产工艺与制造流程概述	26
2.1 半导体制造工艺简介	26
2.2 半导体封装测试制造工艺介绍	27
2.3 封装测试生产线特点	30
2.4 半导体封装测试生产加工任务、资源及数学描述	32
第 3 章 半导体封装测试生产计划与调度协同性体系结构	38
3.1 半导体制造系统体系结构	38
3.1.1 制造系统体系结构分类	38
3.1.2 基于多智能体的混合式体系结构设计方法	40
3.1.3 半导体封装测试生产计划与调度协同性问题描述	44
3.2 基于多智能体的半导体封装测试协同生产混合体系 框架	47
3.2.1 构建基于多智能体的封装测试生产管理混合 控制体系结构框架	48
3.2.2 混合体系结构中各 Agent 属性及功能描述	49

3.2.3 组件 Agent 内部结构及功能	50
3.3 体系结构中 Agent 之间数据和功能逻辑关系	52
第 4 章 半导体封装测试分布式生产计划协同优化	55
4.1 分布式多工厂协同生产计划分配流程	55
4.1.1 长期能力计划(战略层计划)	56
4.1.2 管理层计划(中期生产计划)	57
4.1.3 作业层计划	58
4.2 基于多智能体的多工厂协同生产计划模型	61
4.2.1 协同生产计划模型前提假设	61
4.2.2 基于改进合同网协议的多智能体生产计划协商 模型	62
4.3 基于启发式算法的产能平衡智能体投标值优化	66
4.3.1 产能平衡的优化目标函数确定	70
4.3.2 基于启发式算法的投标值优化求解	73
4.3.3 实例应用	73
第 5 章 半导体封装测试生产计划与调度协同性优化理论	77
5.1 大规模定制下的面向订单装配(ATO)模式应用	77
5.1.1 大规模定制生产概述	77
5.1.2 ATO 模式下动态塔调度问题分析	83
5.2 动态调度与实时订单多智能体协同模型	84
5.2.1 符号与假设	84
5.2.2 半成品延迟分化(SFGDD)模型设计	86
5.3 模型优化参数设定和多智能体间功能模块划分与 关系讨论	88
5.3.1 SFGDD 协同优化参数设定	88
5.3.2 多智能体间功能模块划分与关系讨论	89
5.4 基于对策论的多 Agent 协商机制	91
5.4.1 基于对策论的多 Agent 协商六元组概念定义	93
5.4.2 基于对策论的多 Agent 协商机制建立	94

5.5	纳什均衡理论下赢得函数建立	96
5.5.1	纳什平衡稳定性讨论	96
5.5.2	基于惩罚指数函数的赢得函数	97
5.6	多智能体遗传算法纳什平衡寻优	98
5.6.1	启发式编码设计	99
5.6.2	启发式遗传算法流程设计	99
第6章	半导体封装测试调度方法优化理论及技术	103
6.1	概述	103
6.2	基于遗传基因算法的生产调度方法	104
6.2.1	遗传算法的基本原理	105
6.2.2	遗传操作符	105
6.2.3	遗传算法的特点	106
6.2.4	生产调度中采用的遗传算子	107
6.3	基于粒子群算法的调度方法	110
6.3.1	标准粒子群算法及特点	110
6.3.2	标准粒子算法	110
6.3.3	算法特点	111
6.3.4	粒子群算法对半导体生产调度求解的重要步骤	112
6.4	基于智能体算法的调度方法	116
6.4.1	人工智能及多智能体技术基本理论	116
6.4.2	Multi-Agent 技术在生产调度中的建模	119
6.4.3	Multi-Agent 技术在生产调度中的应用	125
6.5	基于仿真的生产调度方法	128
6.5.1	仿真数据库的建立	129
6.5.2	基于事件的面向对象的技术	130
6.5.3	仿真系统流程设计	132
6.5.4	仿真关键参数和未来事件的设计	134
6.5.5	生产线仿真初始数据获取	135

第7章 基于 JADE 的系统平台开发	138
7.1 基于 JADE 的平台开发环境介绍	138
7.2 系统软件体系架构设计	145
7.2.1 面向智能体的设计方法	145
7.2.2 系统开发环境	146
7.2.3 软件体系架构	147
7.3 仿真系统设计与功能界面	148
7.3.1 多工厂环境下生产计划协同交互平台	148
7.3.2 生产计划与调度协同交互平台	152
参考文献.....	157
后记.....	173

第1章 概 述

半导体封装测试是半导体制造企业的非常重要的工序，可以分成两部分：封装和测试。封装主要是通过晶元贴膜、切割、芯片粘合、固化、半成品检验等步骤制作芯片；测试则主要是对芯片的功能进行检测，电性能测试、老化测试、激光刻蚀、倒贴焊球、真空包装等，并且按照功能类型，将产品分类。半导体产品种类繁多，生产流程复杂，需要多种多样的资源种类，且资源结构具有多重性，因此导致半导体制造企业的生产能力计划问题远比一般车间作业复杂。它属于大规模生产企业。生产线设备与加工工序数量很大，人为因素颇多，站点设备还具有组批(多卡)生产。尽管很多文章研究了半导体生产规划问题，但是大多数研究的问题都集中在晶元片生产领域。目前，晶元芯片的生产计划控制研究相对成熟一些，但对于封装测试工厂来说，生产能力规划方面研究资料颇少。

本章通过对封装测试制造企业的特点及生产管理现状的分析，阐述了封装测试制造企业在我国制造业及国民经济发展中的地位 and 重要性，生产管理中存在的问题和管理瓶颈。在此基础上，对国内外封装测试企业生产管理技术方面的研究状况进行了综述。提出了生产管理中存在的问题，以及现有研究存在的不足之处，阐述了本课题的研究目的及意义，确定了本课题的主要研究内容以及章节的安排。

从封装测试的定义来讲，半导体的生产首先是芯片的生产，如二极管、三极管、集成电路，然后就是封装测试。芯片制造后的一系列工序是将晶元片分割成单个的芯片，并安放和连接到一个封装体上，这个工艺过程叫封装，为了剔除不合格品而进行按标准的各种测量和筛选，这个工艺过程叫测试。

目前的芯片封装测试技术正朝着小尺寸、高速度、高集成的方向发展,从而导致新的工艺和设备不断涌现。随着设备的不断更新和规模的不断扩大,以及制造业的竞争加剧,生产线的产能平衡和生产计划与控制提出了更高的要求。并且,该行业的设备和原材料的投入需要大量的资金,对于不同的产品,设备的生产加工能力不尽相同,如何提高设备的利用率以及降低在制品的库存来降低生产周期,就成为当前封装测试企业保持竞争优势的极具挑战性的任务,因此,生产过程中任务的调度就成为核心问题。任务调度是制约生产良性发展的瓶颈。静态调度是指在制造系统状态和加工任务确定的前提下,形成优化的调度方案的过程。以某一时刻 t_0 的制造系统状态 $U(t_0)$ 、确定的工件信息(具体的加工任务描述)及时间长度 T_0 (一般称为调度深度)为输入,采用适当的调度算法,在满足约束条件及优化目标的情况下,生成调度周期 $[t_0, t_0+T_0]$ 内的调度方案。静态调度的约束条件包括系统资源、产品的工艺流程、交货期等,优化目标包括工件的平均加工周期、设备利用率、生产率等。该调度方案一经产生,所有工件的加工方案就被确定了,在以后的加工过程中也不再改变。然而,对于实际生产线来说,由于工序较多,随着随机事件和不确定因素的发生,仅仅依靠静态调度几乎是不可能的,必须实施动态调度。动态调度就是对调度执行过程中发生的不确定事件和其他改变作出反应,然后去更新一个存在的生产调度的过程。在实际制造系统中,封装测试企业是比一般车间作业复杂的生产系统。动态调度是在系统状态的基础上对下一段时期作周期计划活动,以原调度中未执行的部分作为起点重新搜索一个新的适应变化环境的调度过程。在大规模生产制造环境下,动态调度的实施是不可避免的。而对于封装测试动态调度的研究,目前相关的系统的研究资料很少。

对于目前封装测试行业而言,由于工艺水平不高,通过对多家封装测试企业的实地调研发现,封装测试生产任务调度是封装测试企业管理中的瓶颈之一。生产线随时有不确定因素发生,各种变化和意外冲突频发,导致车间级的任务调度成了封装测试企业的生产管理中最为薄弱的环节,也是生产管理者最为棘手的问题。本研究

就是对复杂多变的大规模封装测试车间加工企业的任务动态调度进行系统的研究，探讨实用化的解决思路，来提高任务调度的效率。

1.1 半导体制造系统优化研究背景

随着多样化、个性化市场需求的日益增长，制造模式历经单件生产、大批量生产逐渐发展为大规模定制的模式。同时，随着计算机信息技术和网络化生产模式的日渐深入，传统的生产模式被逐渐取代，基于计算机信息的协同化生产模式将分布在不同地域范畴内的技术、设备、人力等制造资源连接起来成为一个整体，进行协同性生产计划分配、管理、调度，从而实现企业提高生产效率，减少在制品库存，增加了产品的多样性，最终提高了客户的订单满足率和良好的成品交付率。现代制造系统行业内竞争激烈，产品生命周期日渐缩短，原来简单的、局部的、常规的控制和仅凭经验的生产管理模式已经不能满足现代半导体生产的要求，而大批量生产模式下的刚性制造系统也不能适应动态变化的生产环境和客户要求。

半导体生产系统是目前世界上公认的最复杂的制造系统，与其他制造系统相比，其生产管理是一项极其复杂和繁琐的工作：在生产计划阶段，需要确定关系极其复杂和公式繁多的众多参数，由于存在多地域生产的情况，需要在多工厂环境下进行产能平衡和最大化需求满足；在生产调度阶段，面对动态变化的生产线，需要实时调整投放料，减少生产线在制品库存，降低库存成本和质量问题，而同时面对昂贵的生产设备，又需要最大化瓶颈设备利用率，减少浪费；在订单管理方面，为了赢得市场的竞争，需要实时调整订单的需求，并将这种动态变化反馈到生产调度中进行相应调整、干预，实现产品的交付和订单的满足。虽然半导体生产管理已有较长的研究历史，而且近年来更是成为学术界和工程界研究的热点，但面对如此复杂的生产管理体系，在改善计划效率、增加管理智能性，提高订单满足率，实现生产上下游协同性交互，增强系统整体上对动态变化的适应性等方面一直有着迫切的要求。协同性生产管理主要是通过建立协同生产自组织运行机制，挑选出生产制造过程

需要和满足协同生产要求的相关实体，并将它们组织成一个具有自组织能力的生产体系，协同一致地工作，共同实现统一的生产目标的一种生产管理活动。协同生产的主体是相互依赖却又相互独立的松耦合的生产实体，而协同化生产的目的是要使这些生产实体通过协商，协调，继而完成单一主体无法完成的生产任务，使协同生产效果优于单一主体生产之和。

随着计算机网络、通信技术的发展，分布式人工智能(DAI)技术的日渐成熟，采用网络技术和人工智能中的 Agent 技术来构建基于 Agent 的生产管理系统，实现分布、协作交互和动态并行处理功能的系统已完全成为可能。为了实现制造系统的敏捷性、可扩展性和可靠性，提升制造系统的性能，分布式自治制造系统作为一种新的制造系统组织结构有效地协调制造系统各组成部分的行为，它是集智能性、协同性、信息管理等特长于一身的先进制造技术的重要组成部分。近年来在分布式生产制造研究方面，多智能体系统(Multi-Agent System)、Holonc 制造系统、生物型制造系统等多种新型制造控制和组织模式被广泛研究和探索。而作为分布式人工智能技术重要组成部分的多智能体系统在供应量管理、企业内部外部集成、生产规划、车间调度、并行工程和运输安排等多方面得到了普及和应用。

1.2 半导体制造系统优化研究意义

半导体制造系统是一个复杂，高度不确定性的离散动态系统，半导体生产由于自身的多约束、多目标、可重入、大规模、计算复杂等特点，被称为继“Job-Shop”和“Flow-Shop”后的第三类生产系统。目前许多半导体企业在其生产制造阶段都采用了数字化技术，如 CAD、CAE、CAPP、CAM、MRPII、ERP 等系统。但由于其本身的高度复杂性和现有生产模式的局限性，使现有的数字化系统成为各自独立的“孤岛”，在生产计划与调度的过程中，缺乏全局性的协同考虑。

与此同时，协同制造、分布自治制造系统近些年得到一定的发

展，对分布离散式结构的协同工作有了一定的研究，但目前的协同制造更多地集中在生产制造供应链资源配给、虚拟企业间的协同规划、协同体系结构的研究上，但所构建的模型和设计方法对半导体这类复杂系统不太适用，如多工厂多约束产能分配和计划排程，复杂产品订单与动态调度协调等具体问题，不能简单地对现有协同设计模式进行套用，需要从根本上揭示半导体协同本质及其所需要的技术支持，从系统观和总体观的角度对半导体生产进行深入的探索和研究。

作为半导体制造系统后道的封装测试生产，由于其突出的产品的复杂性、多地域性和上下游生产计划和调度的高度变动性，其协同性问题和需求显得尤为突出，构建适合半导体封装测试生产自身特点的协同体系结构，对生产计划与调度中的具体问题进行建模，研究生产协同过程中的关键技术，如约束模型，协商机制和冲突消解等问题。

本研究利用多智能体的智能性、协同性、动态灵活等特性，对半导体封装测试生产计划和车间调度进行系统协同优化研究，建立生产计划与调度协同生产多层次体系框架和智能优化管理办法。从全局最优的角度出发，对半导体封装测试工厂生产管理的核心——生产计划和调度进行系统协同性的研究，建立基于人工多智能体的协商、报价、博弈机制的整体生产系统的管理方法。将理论结合实际，对目前半导体封装测试企业的研究模式进行总结和发展，为生产管理人员提供丰富、便捷、高效的辅助管理方法。

针对半导体封装测试生产特点，采用现代集成制造系统，多智能体协商，运筹学和供应链管理等理论、技术和方法，进行层次化系统构建，多工厂环境下生产计划协同交互，动态生产调度与订单协同优化。对半导体封装测试企业协同生产中的任务分解与分配，协同生产运作机制等问题进行了深入探讨。总之，以半导体封装测试为背景的智能性生产管理协同优化方法的研究和应用，对半导体封装测试领域乃至半导体生产领域，具有重要的研究意义和应用价值，对生产管理和研究人员，具有一定的参考价值。

1.3 半导体生产研究国内外现状

1.3.1 生产计划与调度研究现状

生产管理主要包括生产计划 (production planning) 和车间调度 (shop-floor scheduling), 二者之间密切相关, 计划的改变对车间的生产运行产生重要影响, 而车间的实际运行情况也会导致调度乃至计划的重新调整。车间调度又分为静态调度和动态调度, 生产计划和静态调度是制造系统开始生产前完成的, 而动态调度及各类设备的实时控制是伴随着生产过程的进行而实时完成的。生产计划的制订面向来自用户或预测的需求值, 主要解决的问题有: 根据客户需求或需求预测来确定计划周期内产品的类型和数量、各产品的加工路径、产品生产的优先权等; 调度面向车间生产, 是在满足约束的条件下对生产计划的细化分解, 同时尽可能地优化各种调度性能指标。

半导体生产制造问题是一系列复杂的系统性问题, 半导体制造过程涉及大量资源与行为的协调配合, 近些年来半导体制造系统生产管理得到许多研究人员的关注。从研究内容上, 主要集中在生产计划、动态调度方面, 如表 1-1 所示; 从研究方法上, 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得到了广泛的研究, 具体研究如表 1-2 所示:

表 1-1 半导体研究内容

	研究内容
生产计划	在需求不确定的条件下利用随机整数规划解决半导体制造产能计划的一般性问题
	生产过程模型单元 (PPM) 解决生产能力分配
	在动态不确定条件下, 对生产计划需求预测进行再预测分析
	将蚁群算法引入到连续时间生产计划的优化中, 建立连续时间生产计划模型

续表

	研究内容
生产调度	投料控制, 固定时间间隔投料, 防饥饿投料策略(SA), 恒定在制品控制等
	通过制品调度来进行产量、生产时间等方面的优化
	批加工设备调度、单机单类、多机多类
	设备维护调度, 基于使用时间、基于加工片数、基于设备条件
	动态实时智能调度、重调度

表 1-2 半导体研究方法分类

研究方法	研究内容
基于运筹学	分支界定法进行求解
	动态规划算法
	混合整数规划模型
	随机整数规划方法或随机动态规划模型
基于启发式规则	最小化拖后的工件数
	最小剩余时间、最小交货期优先、临界值调度
基于人工智能方法	人工神经网络
	模拟退火算法
	遗传基因算法
	蚁群算法
基于仿真	Simulaink/Simevents/Flexsim 等方法

车间作业计划又常称为车间作业调度, 是一类特殊的调度问题。调度问题的研究可以追溯到 1954 年, Johnson 提出了两台机器的流水车间调度问题并进行了研究。此后的近 50 年, 调度问题得到了理论界和工程界研究人员的广泛关注和研究, 尤其是在运筹学、工业工程和计算机科学等领域。调度问题通常涉及四个基本要

素：任务、资源、时间和性能指标针对这四个要素，调度的目的可简明地描述为：将任务在资源和时间上进行合理的分派。其中，“合理”程度的评价是以一个或一组性能指标为依据的。调度问题所涉及的实际问题范围非常广泛，如运输调度、电力调度、水资源调度、操作系统运行调度、人员调度、项目调度、制造系统生产调度等。由于制造业在经济发展中占据举足轻重的地位，使得制造系统的生产调度问题一直是最为引人关注的研究热点之一。制造系统生产调度问题的核心即是车间作业调度，或车间作业计划(Shop Scheduling)。在经典的车间作业计划问题中，任务通常是指工序级别的，即零件的加工工序；资源通常指加工设备或机器。根据这两个要素，通常可以对于车间作业计划类型进行如图 1-1 中的划分。

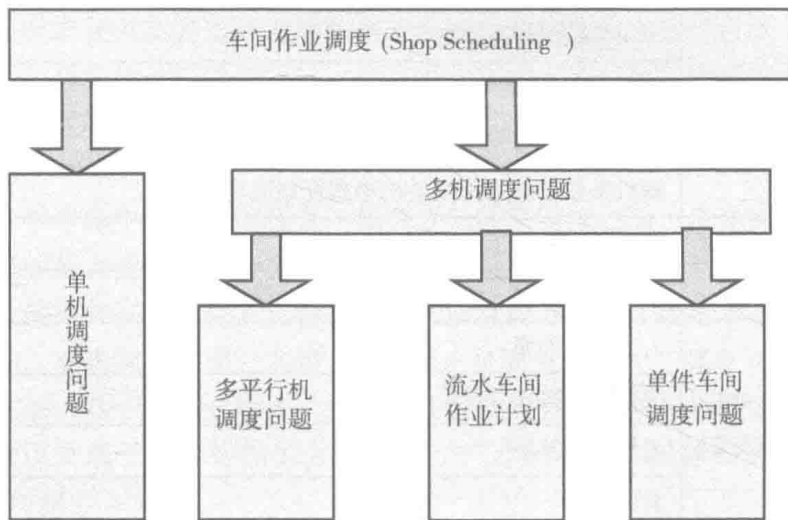


图 1-1 车间任务划分

单机调度问题是一类相对简单的车间作业计划问题。该类问题中，所有的操作都在单台机器上完成，调度的主要任务是在机器上对所有操作进行排序。相对地，在多机调度问题中，操作任务需要在多台机器上完成。多平行机问题是多机调度问题中相对简单的一类。在该类问题中，每个任务 (Job) 都只包括一个操作