



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



“中国制造2025”
出版工程

复杂制造系统的 可重构计划与调度

乔非 吴莹 马玉敏 著



化学工业出版社

“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



“中国制造2025”
出版工程

复杂制造系统的 可重构计划与调度

乔非 吴莹 马玉敏 著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书包括3篇内容,第1篇可重构体系篇,针对复杂制造系统的生产计划与调度整体需求与特点,构建具有可重构能力的生产计划与调度体系结构,并讨论体系结构的可重构特性以及体系的重构过程和方法。第2篇可重构单元篇,在复杂制造系统生产计划与调度体系的整体框架下,分别讨论体系结构中的四个核心单元,即中期生产计划单元、短期生产计划单元、实时调度单元和重调度单元。第3篇可重构实施篇,首先给出了实施本书体系结构设计可重构计划与调度体系原型系统的实现,然后应用此原型系统,结合案例对单元级和系统级的体系结构重构过程加以分析说明。

本书面向从事复杂制造系统计划、调度和优化等相关领域研究工作的科研人员,微电子等复杂制造行业的生产管理或工程技术人员,也可作为系统工程、工业工程、自动化、机械工程等专业院校研究生和教师的学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

复杂制造系统的可重构计划与调度/乔非,吴莹,马玉敏著.
—北京:化学工业出版社,2018.12
“中国制造2025”出版工程
ISBN 978-7-122-33227-1

I. ①复… II. ①乔…②吴…③马… III. ①制造业-生产计划-研究-中国②制造业-生产调度-研究-中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第250364号

责任编辑:宋辉
责任校对:王鹏飞

文字编辑:陈喆
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装有限公司
710mm×1000mm 1/16 印张20½ 字数382千字 2019年5月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 98.00 元 版权所有 违者必究

科学是永无止境的，它是一个永恒之谜。

——爱因斯坦



“中国制造2025”
出版工程

《“中国制造 2025” 出版工程》

编 委 会

主 任

孙优贤（院士）

副主任（按姓氏笔画排序）

王天然（院士） 杨华勇（院士） 吴 澄（院士）

陈 纯（院士） 陈 杰（院士） 郑南宁（院士）

桂卫华（院士） 钱 锋（院士） 管晓宏（院士）

委 员（按姓氏笔画排序）

马正先 王大珩 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔 非 任春年 伊廷锋 刘 敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李 莉 李 慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴 飞 吴 澄 吴伟国 宋 浩 张 平

张 晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈 为

陈 刚 陈 纯 陈 杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗 映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺 威 桂卫华 柴 毅 钱 锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康 锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢 颖 谢胜利 蔡 登 管晓宏 魏青松

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于 2015 年 5 月 8 日发布了“中国制造 2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造 2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及 2025 年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016 年 8 月 19 日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造 2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D 打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造 2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造 2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造 2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几点特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘云鹤

前言

制造业是国民经济发展的重要支柱，制造业的先进程度标志着一个国家的发展水平。随着现代制造业在环境、结构、过程等多方面表现出的复杂性日益增强，对复杂制造系统的运营管理与优化也提出了更高的要求。复杂制造系统技术密集，资金密集，例如，在半导体集成电路芯片制造生产线上，投资的 75% 用在设备上，相比于通过增加贵重设备来提高产能的方式，以改进生产计划与调度策略来优化生产也能收到良好效果，价格动辄数千万甚至上亿的设备如果少空闲几分钟，则将节省数目可观的成本。

生产计划与调度是复杂制造企业生产活动和组织管理的重要环节，是提高企业经济效益的有效途径，对于提高企业生产管理水平、节约成本、提升市场竞争力、快速收回投资以及获得更高的经济效益有着十分重要的意义。而复杂制造系统的调度优化毫无疑问是众多调度问题中颇具挑战性的一类，得到了国内外工业工程、控制工程、人工智能、应用数学、运筹学、计算机科学、管理科学、系统工程等领域的研究人员及工程技术人员的广泛关注，成为学术界和应用界的研究热点之一。

以多重入特征明显的半导体制造系统为代表的一类复杂制造系统，因其在工艺流程、多样性约束、生产方式等方面的复杂要求及来自内外部制造环境的动态不确定性，为其制造过程的生产计划和调度控制的研究带来了更大的挑战。近十多年来，虽然有大批学者投身这一领域的研究，也取得了相当可观的成果积累，但主要的研究工作还是集中于对生产计划与调度中各个子问题的求解，如能力计划、投料控制、实时调度等。无论是从模型到方法的理论研究，还是从优化问题到控制策略的技术探索，都难以填充研究与应用之间的鸿沟，究其原因，已有的研究成果在系统性和灵活性上的不足可能是制约因素之一。

著者从 20 世纪 90 年代初开始涉足制造领域生产计划与调度的研究，先后围绕柔性制造、计算机集成制造等先进制造系统，积累了多年的科研、教学及工程经历。

近十多年来,进一步专注于对以半导体芯片制造为代表的复杂制造系统的生产计划与调度理论、方法和应用研究,同时也越来越体会到,对于复杂制造系统的调度优化管理,在不断改进模型、创新方法的基础上,更需要加强系统级的协同能力和对于复杂动态环境的应变能力。

鉴于此,本书从系统工程的角度切入,面向以半导体生产线为代表的多重复杂制造系统,研究提出一种可重构的生产计划与调度体系结构。该体系结构不仅把复杂的半导体制造过程所涉及的各类典型生产计划与调度问题科学合理地整合为一个有机体,将各部分各环节的常规方法及著者多年研究形成的方法成果等嵌入该体系之中,而且能够针对具体业务问题在体系结构层级上重新配置其业务系统,产生合理的方案,支持具体环境下的计划调度决策。

本书的主要内容来源于著者及其研究生们的科研积累,强调理论与实践的结合以及学术研究与工程应用的结合。着重研究具有集成性和灵活性的复杂制造系统生产计划与调度体系的构建及相关技术方法,并突出其可重构特征与可重构能力的设计与实现。全书包括3篇9章。

第1篇可重构体系篇,针对复杂制造系统的生产计划与调度整体需求与特点,构建具有可重构能力的生产计划与调度体系结构,并讨论体系结构的可重构特性以及体系的重构过程和方法,为后续内容建立框架和基础。

第2篇可重构单元篇,在复杂制造系统生产计划与调度体系的整体框架下,分别讨论体系结构中的四个核心单元,即中期生产计划单元、短期生产计划单元、实时调度单元和重调度单元。在分别概述各单元的概念、发展及一般方法的基础上,重点介绍了著者研究提出的若干针对复杂制造系统的计划与调度的新方法。这些单元问题及方法都可以借助于体系结构的集成化模型纳入生产计划与调度体系的框架之

中，并参与系统的重构过程。

第3篇可重构实施篇，首先给出了实施本书体系结构设计可重构计划与调度体系原型系统的实现，继而应用此原型系统，结合案例对单元级和系统级的体系结构重构过程加以分析说明。

本书面向从事复杂制造系统计划、调度和优化等相关领域研究工作的科研人员，系统工程、工业工程、自动化、机械工程等专业大专院校研究生和教师，微电子等复杂制造行业的生产管理或工程技术人员等，力图在生产计划与调度的系统化技术、方法、工具及应用案例等方面，为读者提供有价值的参考和帮助。

与本书内容相关的研究工作得到了国家自然科学基金项目（编号：71690234和61034004）等的资助，也得到了团队创始人吴启迪教授的指导和帮助。在本书编写过程中，丁小进、施斌、叶恺、李兆佳、郭璎宵、倪嘉呈、谷翔、李雯琳、于孝雨、高海、王正等研究生参与了研究工作，研究生王巧玲、邢俊霞协助了书稿整理，在此一并表示感谢。

限于水平和能力，本书难免有不妥之处，衷心希望各位读者不吝批评指正。





目录

第1篇 可重构体系篇

2 第1章 复杂制造系统概述

- 1.1 制造系统的复杂性 / 2
 - 1.1.1 制造系统的分类与特点 / 2
 - 1.1.2 工业制造系统的复杂性 / 5
- 1.2 多重入复杂制造系统运作概述 / 6
 - 1.2.1 多重入复杂制造系统概念及特征 / 6
 - 1.2.2 典型多重入复杂制造系统——半导体制造 / 6
 - 1.2.3 制造信息系统 / 8
- 1.3 复杂制造系统的生产计划与调度 / 10
 - 1.3.1 生产计划与调度概念 / 10
 - 1.3.2 中期生产计划问题与方法 / 11
 - 1.3.3 短期生产计划生产调度问题与方法 / 12
 - 1.3.4 动态调度问题与方法 / 13
- 1.4 复杂制造系统的发展趋势 / 15
 - 1.4.1 新一代互联网技术驱动下的制造系统发展趋势 / 15
 - 1.4.2 新型制造模式下计划调度的可重构意义 / 16
- 参考文献 / 17

19 第2章 可重构的复杂制造系统生产计划与调度体系

- 2.1 体系结构的一般概念 / 19
 - 2.1.1 体系结构和体系结构框架 / 19
 - 2.1.2 常用体系结构框架 / 20
 - 2.1.3 体系结构框架的概念模型 / 24

- 2.2 面向生产计划与调度的体系结构框架 / 25
 - 2.2.1 制造系统生产计划与调度的研究路线 / 25
 - 2.2.2 面向生产计划与调度的体系结构框架的元素及关系 / 26
 - 2.2.3 面向生产计划与调度的体系结构框架的视角及模型 / 31
 - 2.2.4 面向生产计划与调度的体系结构框架的特点分析 / 36
- 2.3 复杂制造系统生产计划与调度体系结构的构建 / 37
 - 2.3.1 业务系统视角模型建立 / 38
 - 2.3.2 业务过程视角模型建立 / 42
 - 2.3.3 协同视角模型建立 / 45
 - 2.3.4 体系结构模型之间的集成和重构关系 / 49
- 2.4 可重构的复杂制造系统生产计划与调度集成体系 / 53
 - 2.4.1 体系结构的业务功能关系 / 53
 - 2.4.2 体系结构的业务过程逻辑 / 55
 - 2.4.3 体系结构的特点分析 / 57
- 参考文献 / 59

61 第3章 面向复杂制造系统的计划与调度重构

- 3.1 面向复杂制造系统的计划与调度体系重构概述 / 61
 - 3.1.1 可重构系统的结构及组成 / 61
 - 3.1.2 可重构的类别 / 62
 - 3.1.3 可重构系统的复用层次 / 63
- 3.2 可重构的内容与层次 / 66
 - 3.2.1 系统级重构 / 66
 - 3.2.2 组件级重构 / 68
 - 3.2.3 算法级重构 / 69
- 3.3 可重构系统的建立过程 / 70
- 3.4 复用层次的语义基础 / 72
 - 3.4.1 范畴论基础概念 / 73
 - 3.4.2 复用层次的语义基础 / 74
- 参考文献 / 80

第2篇 可重构单元篇

84 第4章 复杂制造系统的中期生产计划

- 4.1 中期生产计划概述 / 84
 - 4.1.1 投料计划概述 / 84
 - 4.1.2 维护计划概述 / 87
- 4.2 投料计划方法研究 / 89
 - 4.2.1 负荷均衡投料计划算法 / 90
 - 4.2.2 动态负荷均衡投料计划算法 / 93
 - 4.2.3 基于产能约束的混合智能投料算法 / 97
- 4.3 维护计划方法研究 / 99
 - 4.3.1 设备维护策略 / 99
 - 4.3.2 智能优化维护方法研究 / 101
- 4.4 协同计划方法研究 / 103
 - 4.4.1 投料计划与维护计划的协同 / 103
 - 4.4.2 维护计划与生产调度的协同 / 104
- 4.5 中期计划的可重构集成 / 107
 - 4.5.1 中期计划体系结构模型 / 107
 - 4.5.2 中期计划集成控制 / 112
 - 4.5.3 中期计划通用组件及接口 / 115
- 4.6 案例：考虑了生产调度的维护计划 / 116
 - 4.6.1 案例描述 / 116
 - 4.6.2 仿真模型 / 117
 - 4.6.3 仿真结果 / 117
- 参考文献 / 119

121 第5章 复杂制造系统的短期计划与调度

- 5.1 短期生产计划与调度概述 / 121
 - 5.1.1 短期生产计划与调度概念 / 121
 - 5.1.2 短期生产计划与调度方法 / 122
- 5.2 基于约束理论的 DBR 短期生产计划方法 / 125
 - 5.2.1 面向多重入制造系统实施的 DBR 分析 / 125
 - 5.2.2 基于 DBR 的分层调度算法 / 129

- 5.3 基于 SBO 的多目标调度优化方法 / 130
 - 5.3.1 面向复杂制造调度的 SBO 方法设计 / 131
 - 5.3.2 基于灰色关联度分析的优化目标选取 / 134
 - 5.3.3 基于 NSGA-II 算法的 SBO 多目标调度优化方法 / 136
 - 5.3.4 基于层次分析法的最优解选取 / 140
- 5.4 瓶颈区并行设备调度方法 / 142
 - 5.4.1 瓶颈区调度优化方法简介 / 142
 - 5.4.2 瓶颈区调度优化方法设计 / 142
 - 5.4.3 调度期内瓶颈区工序集预测方法 / 144
 - 5.4.4 瓶颈区调度任务的优化 / 146
- 5.5 短期计划与调度的可重构集成 / 150
 - 5.5.1 短期计划与调度体系结构的业务系统视角模型 / 150
 - 5.5.2 短期计划与调度体系结构的业务过程视角模型 / 155
- 5.6 案例：SBO 多目标调度优化方法 / 161
 - 5.6.1 基于 BenchMark6 模型的 SBO 仿真优化 / 161
 - 5.6.2 最优解选取 / 164
- 参考文献 / 166

第 6 章 复杂制造系统的实时调度

- 6.1 实时调度概述 / 171
 - 6.1.1 基于规则的实时调度方法 / 171
 - 6.1.2 基于数据的实时调度方法 / 173
- 6.2 基于数据的组合规则调度策略 / 175
 - 6.2.1 调度规则库的设计与选取 / 176
 - 6.2.2 性能指标集的设计与选取 / 178
 - 6.2.3 基于数据的实时调度 / 180
- 6.3 基于数据的瓶颈设备实时调度 / 184
 - 6.3.1 基于数据的瓶颈识别 / 185
 - 6.3.2 基于数据的瓶颈调度算法 / 189
- 6.4 实时调度的可重构集成 / 192
 - 6.4.1 实时调度的业务系统视角模型 / 193
 - 6.4.2 实时调度的业务过程视角模型 / 195
- 6.5 案例：基于数据的瓶颈设备实时调度 / 198
- 参考文献 / 202

第 7 章 复杂制造系统的重调度

- 7.1 重调度概述 / 204
 - 7.1.1 重调度策略的研究现状与发展 / 205
 - 7.1.2 重调度方法的研究现状与发展 / 206
 - 7.1.3 重调度评价的研究现状与发展 / 206
- 7.2 基于模糊 Petri 网推理的重调度策略 / 207
 - 7.2.1 面向重调度决策的模糊 Petri 网模型 / 208
 - 7.2.2 基于模糊推理的重调度决策 / 212
- 7.3 匹配重调度方法 / 217
 - 7.3.1 匹配时段与匹配区域 / 217
 - 7.3.2 单台设备匹配重调度方法 / 220
 - 7.3.3 设备组匹配重调度方法 / 224
 - 7.3.4 两种匹配重调度方法的比较分析 / 225
- 7.4 重调度评价 / 227
 - 7.4.1 稳定性评价 / 227
 - 7.4.2 有效性评价 / 228
- 7.5 重调度的可重构集成 / 228
 - 7.5.1 重调度的业务系统视角模型 / 228
 - 7.5.2 重调度的业务过程视角模型 / 229
- 7.6 案例：在线重调度 / 233
- 参考文献 / 236

第 3 篇 可重构实施篇

第 8 章 可重构体系原型系统设计

- 8.1 原型系统简介 / 240
- 8.2 原型系统设计 / 241
 - 8.2.1 原型系统基础架构设计 / 241
 - 8.2.2 数据层设计 / 242
 - 8.2.3 软件层设计 / 243
 - 8.2.4 仿真层设计 / 246
- 8.3 数据层实现 / 247
- 8.4 软件层实现 / 248
 - 8.4.1 数据接口定义实现 / 248

- 8.4.2 基础模型实现 / 250
- 8.4.3 体系结构组件实现 / 251
- 8.4.4 仿真模型接口实现 / 262
- 8.4.5 用户界面实现 / 262
- 8.5 仿真层实现 / 263
 - 8.5.1 模型库实现 / 264
 - 8.5.2 算法库实现 / 266
- 8.6 MRPSS 使用流程 / 267
- 参考文献 / 268

269 第 9 章 基于原型系统的可重构实施

- 9.1 原型系统基本使用界面 / 269
- 9.2 基于原型系统的可重构验证研究 / 272
 - 9.2.1 概述 / 272
 - 9.2.2 瓶颈区需求模型 / 273
 - 9.2.3 HP24Fab 模型简介 / 274
 - 9.2.4 重构验证过程及分析 / 275
- 9.3 基于原型系统的可重构优化研究 / 280
 - 9.3.1 概述 / 280
 - 9.3.2 生产线数据分析过程 / 282
 - 9.3.3 生产线数据表示与评估尺度 / 284
 - 9.3.4 生产线数据分析模型 / 290
 - 9.3.5 Minifab 模型 / 298
 - 9.3.6 Minifab 数据分析的重构过程案例 / 300
- 参考文献 / 306

307 附录 专业词语汇总表

312 索引

第1篇

可重构体系篇

本篇首先介绍复杂制造系统及其生产计划与调度体系，作为全书问题对象的引出；继而从宏观上给出可重构计划与调度的基本思想和体系框架，对体系结构的重构特性及通用方法和过程加以分析，为后续篇章建立基本概念和理论基础。