

制造工程管理中的 优化理论与方法

杨善林 周永务 李 凯 等著



科学出版社

内 容 简 介

本书从生产批量与定价联合优化、生产调度优化、机器调度优化、库存控制优化、物流路径优化、供应链协调与优化六个方面较系统地研究了制造工程管理中的优化理论与方法。本书的研究内容包括：允许供货延迟、库存和生产能力受限、考虑市场细分等情形下的批量与定价联合优化问题；释放时间和加工时间受能耗约束的生产调度优化问题；维护时段可调、加工时间可变的带预防性维护的机器调度优化问题；间歇性、连续性等多种生产策略和制造环境下的最优库存控制问题；带时间窗约束的物流路径优化问题及其主要衍生问题；多种生产和订购模式下供应链运作决策的协同匹配问题；最后以多家大型联合企业为背景，研究了制造工作管理中优化理论与方法应用中的有关问题。

本书可供相关领域研究人员阅读，也可作为相关专业研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

制造工程管理中的优化理论与方法 / 杨善林等著. —北京：科学出版社，2012

ISBN 978-7-03-034808-1

I. ①制… II. ①杨… III. ①制造业—工程管理—研究
IV. ①F407.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 124842 号

责任编辑：马 跃 / 责任校对：田 贺
责任印制：阎 磊 / 封面设计：蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本：889×1194 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张：29 3/4 插页：1

字数：840 000

定价：126.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

序 一

2001 年中国工程院组织了 25 位院士和 40 多位专家对我国制造业的现状、作用、地位及发展趋势和对策进行调查研究，撰写了“新世纪如何提高和发展我国制造业的研究报告”，该报告在以翔实的国情数据与世界各国进行比较分析的基础上，论述了制造业在我国国民经济和社会发展中的关键地位和作用。该报告指出：20 世纪下半叶，我国自力更生、艰苦奋斗，启动了工业化进程，建立了较为完整的工业体系，培养了数代优秀的科学家和工程师，为经济发展、社会进步和国防建设做出了历史性的贡献，制造业体系的建立和已经取得的成就为我国 21 世纪的工业化、现代化建设打下了良好的基础。但是与发达国家相比，我国的制造能力和技术水平不高，创新能力不足，市场竞争力不强，经济建设和高技术产业所需的许多装备仍依赖进口。

经济社会的快速发展和科学技术的突飞猛进对制造业提出了更新、更高的要求，为制造业提供了广阔的发展空间。在加速科技进步和产业结构升级中，制造业作为经济社会发展和科技进步的原动力，其不可替代的基础性作用进一步显现。以信息技术为代表的新科技革命正在引领全球制造业发生深刻的变革，先进的制造技术正在向智能化、网络化、绿色化、服务化和全球化方向发展，制造业也随之迈入了崭新的发展阶段。我国应该抓住这一有利时机，采取一切可能的措施，建立强大的制造业。制造业的发展，需要科学的制造工程管理理论与方法的支撑。杨善林教授及其团队结合我国制造工程管理的实践，坚持研究制造工程管理中的优化理论与方法，不仅可以为制造型企业的优化管理决策提供科学的依据，对降低企业的资源消耗和制造成本以及提高企业的经营效益和客户满意度发挥积极作用，而且对于提升我国制造业的整体竞争力、建设制造强国，也具有至关重要的意义。

制造工程管理是一个十分复杂的系统工程。杨善林教授及其团队按照理论与实践相结合的思路，以我国多家大型联合企业为背景，从生产批量与定价联合优化、生产调度优化、机器调度优化、库存控制优化、物流路径优化、供应链协调与优化六个方面系统深入地开展了研究工作。在生产批量与定价联合优化方面，分别对允许供货延迟、库存能力受限、生产能力受限、考虑市场细分等情形下的定价与批量联合决策问题进行了深入的研究；在生产调度优化方面，重点研究了高耗能领域中如何在生产调度的过程中同时实现能耗的控制；在机器调度优化方面，主要研究了维护时段可调、加工时间可变的带预防性维护的机器调度优化问题；在库存控制优化方面，着重研究了连续性生产策略下制造企业的最优生产库存计划问题；在物流路径优化方面，针对企业内部物流配送，研究了带时间窗约束的物流路径优化问题及其主要衍生问题；在供应链协调与优化方面，针对制造商生产的弹性和销售商订购的灵活性，研究了多种生产和订购模式下供应链运作决策的协同匹配问题等。上述研究工作取得了非常有意义的理论成果和应用成效。

杨善林教授及其团队怀着对促进中国经济与社会发展的使命感和责任感，致力于发现生产实际问题，凝练其中的科学问题，进而通过研究实践，最后将其上升到理论高度，然后再应用于实践，

接受实践的检验，并指导实践。杨善林教授及其团队所践行的这条学术研究的道路可以称得上是中国管理学界值得推崇的范例。因此，我愿意向读者推荐这本学术著作，并为之作序。

汪应洛

中国工程院院士
西安交通大学教授

2012 年元旦

序 二

杨善林教授等编写了新著《制造工程管理中的优化理论与方法》，请我作序。我认真读完这部厚厚的书稿以后，感觉这是一部非常全面、系统而又具有创新性的学术专著。于是欣然执笔为之作序，并向广大读者推荐。

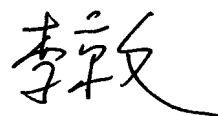
制造业是一个国家国民经济的物质基础，是高技术产业化的载体和实现现代化的重要基石。任何一个大国的崛起都离不开制造业的支撑。改革开放以来，我国制造业广泛融入国际产业分工体系，在世界制造体系中的分量与日俱增。特别是加入 WTO（世界贸易组织）以来，由于我国潜在的巨大市场和丰富的劳动力资源，世界的制造企业纷纷涌入我国，这使得我国成为世界的制造中心。目前，我国制造业的产值已经超过了美国，成为世界第一制造大国，工业制成品总量、工业品出口量等指标已居世界前列，家电等若干产品的产量已居世界第一位，经济总量已超过日本成为世界第二大经济体。但是，与发达国家相比，我国的制造业仍然处于初级发展阶段，仍然以低端制造业为主，产品附加值不高，出口物品主要是劳动密集型产品，技术含量低，单位 GDP（国内生产总值）的能耗居高不下，在自主知识产权的创新设计、先进制造工艺和装备及现代化管理等方面与发达国家仍然存在很大差距。随着劳动力成本的不断上升以及能源资源价格的不断上涨，我国正在失去原有的制造业的发展优势。因此要赢得激烈的国际竞争优势，我国制造业必须要加快转型升级，走新型工业化道路。在转变制造业发展方式的过程中，必然伴随着经营管理理念、经营管理模式和经营管理方法的变革，这就对管理科学工作者提出了严峻的挑战。杨善林教授领导的研究团队紧密结合我国制造业的发展实际，深入研究了制造工程管理中的优化理论与方法，这对于建设制造强国，提升我国的核心竞争力无疑具有非常重要的意义。

制造工程管理是对从产品的概念设计，到正式生产运营，再到产品最终销售的全过程所进行的系统化管理。在制造工程管理过程中，有许多相互关联的优化问题，如制造流程设计优化、物料采购与资源配置优化、生产计划与调度优化、库存控制与物流配送优化、供应链协同优化等，能否有效地解决这些优化决策问题，将直接影响制造资源的有效利用以及生产效率和效益的提升。作者以我国多家大型联合企业为背景，从生产批量与定价联合优化、生产调度优化、机器调度优化、库存控制优化、物流路径优化、供应链协调与优化六个方面系统深入地研究了制造工程管理中的优化理论与方法，取得了许多创新成果，对制造工程管理优化理论及其应用的发展做出了重要贡献。这也是我见到的第一部系统研究制造工程管理中优化理论与方法的学术著作。

从研究路径和研究方法来看，本书的形成也是很有特点的。杨善林教授领导的研究团队长期从事过程优化与智能决策理论、信息管理与信息系统技术及其在工程管理中的应用等方面的研究工作。他们博览群书，从中外理论文献中进行理论研究、分析，更重要的是他们坚持从企业工程管理实际中提炼科学问题，进行深入的理论研究，并将获得的有价值的理论成果用于解决企业在工程管理中遇到的难题，在应用过程中，既通过实践检验理论的科学性和合理性，又用理论指导管理实践。这是一条理论联系实际，从实践中来，到实践中去的科学路径，也是本书之所以具有较高学术

价值和实用意义的重要原因之一。我认为，在中国的学术界应该大力弘扬他们所践行的这条理论与实践相结合的研究路径和研究方法。理论与实践相结合，说起来容易，做起来很难。杨善林教授领导的科研团队长期深入到企业中，不畏艰苦，不受干扰，执著追求，用科学的方法发现和解决我国企业工程管理中的实际问题，这是值得推崇的。也希望他们坚持下去，为我国的经济发展和进步做出更大的贡献。

是为序。



中国工程院院士

中国社会科学院学部委员

俄罗斯科学院外籍院士

中国管理科学与工程学会理事长

北京工业大学、北京师范大学、中央财经大学教授

2012年元月5日于北京

前 言

制造业是指对采掘的自然物质资源和工农生产的原材料进行加工和再加工，为国民经济其他部门提供生产资料，为全社会提供日用消费品的社会生产制造部门，在我国国民经济中占有重要地位。它不仅是吸纳劳动力就业和扩大出口的关键产业，也是高技术产业化的主要载体和实现现代化的重要基石，是衡量国家竞争力的重要标志。目前，我国制造业的产值已经超过了美国，成为世界第一制造大国。但是，与发达国家相比，我国的制造业仍然处于初级发展阶段，产品附加值不高，出口物品主要是劳动密集型产品，技术含量低，单位 GDP 的能耗居高不下，在自主知识产权的创新设计、先进制造工艺和装备及现代化管理等方面与发达国家仍然存在很大差距。制造工程管理是对一个产品从研发设计，到正式生产运营，直至产品最终销售的全过程所进行的管理过程，工程管理水平的高低直接关系到制造资源能否有效利用、生产效率能否提高和经济效益能否提升。因此，研究制造工程管理中的优化理论与方法，不仅可以为制造型企业的优化管理决策提供科学依据，对降低企业的资源消耗和运营成本以及提高企业的经营效益和客户满意度发挥积极作用，而且对于提升我国制造业的整体竞争力、建设制造强国，也具有至关重要的意义。

随着经济技术的发展和消费文化的演变，顾客对产品或服务的需求越来越个性化，而且瞬息万变。这种多变的市场环境对制造业提出了更高的要求，给制造业带来了空前的发展机遇和巨大的发展压力。企业在降低产品成本和提高产品质量的同时，必须及时有效地提供多元化的、顾客满意的甚至青睐的新产品，以满足顾客日益个性化的需求，进而引导顾客的需求倾向，甚至创造出顾客的新需求。由于受资源、能力和环境等因素的限制，制造型企业要想快速响应多变的个性化需求，在变化多端的市场中占领先机，就需要对制造过程中所涉及的各个环节进行优化协调与高效运营。因此，制造工程管理实践面临的一个巨大挑战就是如何优化协调制造系统的各个环节的运作决策，使制造系统更具有柔性和敏捷性，以便快速响应市场的变化，甚至导向市场的变化。

在制造工程管理实践中，存在大量的优化决策问题，其关键的科学问题主要包括制造流程优化、生产计划与调度优化、生产过程的控制与优化、采购与库存优化以及企业内部物流优化与供应链优化协调等。这些关键的科学问题不仅关系到企业成本控制、效益提高以及对市场响应的敏捷性等方面，甚至影响到企业品牌形象的树立和企业的可持续发展。这些关键的科学问题的本质可以抽象为在一定约束条件下优化特定目标的优化决策问题，企业内部的具体环境和生产条件、同行业的国内外竞争状况以及国家对企业生态保护和节能降耗等方面的严格要求构成了决策问题的约束条件，而其目标往往是企业利润最大化、成本或能耗最小化、客户平均等待时间最小化等。制造工程管理中的优化理论与方法的研究对象是制造系统，研究制造工程管理中的优化理论与方法，必须在对制造过程中的各种优化决策问题进行科学提炼的基础上，深入研究相应的建模理论和求解方法，并在制造工程管理的实践中经受检验，然后才能获得有理论意义和实用价值的研究成果。

目前，已有的制造工程管理中的优化理论与方法研究主要是从运筹学和管理科学的视角，针对制造过程中一些特定环节的优化决策问题展开的，研究成果比较丰富。例如，在生产调度方面的理

论成果就有针对整个生产线流程或生产线流程上的瓶颈机器或大型设备的调度问题两类。像流水作业、车间作业、开放作业等串行调度问题是针对不同生产环境下整个生产流程的，而单机、平行机调度问题则是针对生产线上的重要设备；库存控制问题自 1915 年 Harris 提出经济订货批量模型以来，也一直是国内外众多学者关注的热点之一，并取得了丰硕的研究成果，但多数集中在连续时间无限周期情形下的批量问题以及离散时间多周期情形下不考虑定价的批量问题；还有车辆路径问题 (vehicle routing problem, VRP) 也有较广泛的研究成果，但绝大部分研究的是确定性 VRP 问题；除此之外，还有许多其他优化问题，如下料问题、装箱问题等方面的研究成果。这些优化决策方法无论是生产调度优化还是车辆路径优化等都是企业制造工程中的局部优化，然而在实际的制造工程系统中，物料采购、物流配送和生产调度等各个环节是相互关联与相互协作的，只有当这些研究成果能够在不同环节间很好地衔接和匹配时，才能够真正具有实用价值，同时各个环节的决策必须能从制造工程系统优化的角度很好地协调，这样才能使制造工程系统具有更好的柔性和敏捷性，进而为制造工程系统带来更大的效益。因此，对于制造工程管理而言，将制造工程系统各个环节联合起来进行更大范围的联合优化是其未来理论方法研究的必然趋势。

作者所在的科研团队长期从事过程优化与智能决策理论、信息管理与信息系统技术及其在工程管理中的应用等方面的研究工作，并且得到了国家自然科学基金、国家“863”计划以及省、部和企业委托的课题的大力支持。在制造工程管理中的优化理论与方法的理论研究方面，团队在前人研究工作的基础上，主要从生产批量与定价联合优化、生产调度优化、机器调度优化、库存控制优化、物流路径优化、供应链协调与优化六个方面较系统地开展了研究工作。在生产批量与定价联合优化方面，分别对允许供货延迟、库存能力受限、生产能力受限、考虑市场细分等情形下的定价与批量联合决策问题进行了较深入的研究；在生产调度优化方面，重点研究了高耗能领域中如何在生产调度的过程中同时实现能耗的控制；在机器调度优化方面，主要研究了维护时段可调、加工时间可变的带预防性维护的机器调度优化问题；在库存控制优化方面，着重研究了连续性生产策略下制造企业的最优生产库存计划问题；在物流路径优化方面，针对企业内部物流配送，研究了带时间窗约束的物流路径优化问题及其主要衍生问题，如带多时间窗约束的物流路径优化问题、速度时变的物流路径优化问题；在供应链协调与优化方面，针对制造商生产的弹性和销售商订购的灵活性，研究了多种生产和订购模式下供应链运作决策的协同匹配问题等。在制造工程管理中的优化理论与方法的应用研究方面，团队以我国多家大型联合企业为背景，针对这些企业生产周期长、占用资金高与高能耗的特点，研究了原料采购优化、考虑节能降耗的生产过程优化、考虑定期维护的大型设备调度优化、企业内部频繁的物流路径优化以及产成品库存的优化控制等优化问题。

本书是在团队最近十多年来在制造工程管理优化理论与方法方面的科研工作的基础上整理而成的。杨善林教授主持了与本书相关的大部分课题的研究工作，提出了本书的主要思想和学术观点，制定了本书的详细大纲，组织了本书的整理过程，并对全书进行了统稿、改写和最终定稿。周永务教授主持了部分课题的研究工作，认真审查了有关优化模型的合理性和求解方法的有效性，并协助杨善林教授对全书进行了认真细致的审查，提出了许多宝贵的修改建议。李凯博士参加了相关课题的研究工作和书稿整理工作，并对全书各章进行了融合汇总。参加相关课题研究和书稿整理工作的还有王圣东、闵杰、戴道明、马华伟、马英等。在研究过程中，参考了大量的国内外有关研究成果。

在此，衷心感谢国家自然科学基金、国家“863”计划以及省、部的相关科研管理部门和有关企业对团队科研工作的大力支持！衷心感谢法国巴黎中央理工大学 (Ecole Centrale Paris) 储诚斌

教授和英国曼彻斯特大学 (The University of Manchester) 杨剑波教授、徐冬玲教授对团队成员的悉心指导! 衷心感谢所有参考文献的作者! 衷心感谢团队所在的“过程优化与智能决策”教育部重点实验室, 它为团队科研工作创造了良好的学术环境 and 研究条件! 衷心感谢科学出版社, 它为本书的出版做了大量的精心细致的工作!

制造工程管理中的优化理论与方法是一个在理论与实践两个方面要求都很高的研究领域, 加上作者的水平有限, 定有疏漏之处, 恳请读者批评指正。

作者

2012 年 2 月 21 日于合肥

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 制造业与先进制造技术	1
1.2 制造工程管理中常见的优化问题	2
1.3 主要内容结构	12
本章参考文献	14
第 2 章 优化理论基础	22
2.1 优化理论概述	22
2.2 制造工程管理中常见的优化模型	24
2.3 常见的优化方法	31
2.4 多目标优化方法	38
2.5 不确定性优化方法	44
2.6 本章小结	48
本章参考文献	49
第 3 章 生产批量与定价联合优化	53
3.1 生产批量与定价决策中的优化问题	53
3.2 国内外研究现状	55
3.3 允许供货延迟的批量与定价联合优化	59
3.4 库存能力受限的批量与定价的联合优化	72
3.5 生产能力受限的批量与定价联合优化	81
3.6 供货延迟且能力受限的批量与定价联合优化	92
3.7 基于市场细分的批量与定价联合优化	99
3.8 本章小结	111
本章参考文献	112
第 4 章 生产调度优化	118
4.1 生产调度中的优化问题	118
4.2 国内外研究现状	120
4.3 释放时间受能耗约束的生产调度优化	124
4.4 加工时间受能耗约束的生产调度优化	143

4.5 释放时间与加工时间同时受能耗约束的生产调度优化	157
4.6 本章小结	169
本章参考文献	170
第5章 机器调度优化	176
5.1 机器调度中的优化问题	176
5.2 国内外研究现状	178
5.3 维护时段固定且加工时间恒定的单机调度优化	184
5.4 维护时段固定且加工时间可变的单机调度优化	202
5.5 维护时段可调的单机调度优化	219
5.6 带维护时段的多机调度优化	240
5.7 本章小结	247
本章参考文献	249
第6章 库存控制优化	256
6.1 库存控制中的优化问题	256
6.2 国内外研究现状	257
6.3 间歇性生产策略下的库存控制优化	262
6.4 连续性生产策略下的库存控制优化	267
6.5 通货膨胀环境下的库存控制优化	274
6.6 考虑信用支付策略的库存控制优化	287
6.7 变质性产品的库存控制优化	296
6.8 非立即变质性产品的库存控制优化	301
6.9 本章小结	309
本章参考文献	310
第7章 物流路径优化	316
7.1 物流路径决策中的优化问题	316
7.2 国内外研究现状	317
7.3 带单时间窗约束的物流路径优化	323
7.4 带多时间窗约束的物流路径优化	341
7.5 速度时变情形下带时间窗约束的物流路径优化	350
7.6 本章小结	355
本章参考文献	356
第8章 供应链协调与优化	362
8.1 供应链协调中的优化问题	362
8.2 国内外研究现状	364
8.3 单生产模式下期末二次订购的供应链协调与优化	365
8.4 单生产模式下期内二次订购的供应链协调与优化	378
8.5 两生产模式下期末二次订购的供应链协调与优化	391
8.6 两生产模式下期内二次订购的供应链协调与优化	397
8.7 本章小结	410

本章参考文献	411
第 9 章 制造工程管理优化应用实例	417
9.1 企业背景	417
9.2 企业原料采购计划优化	419
9.3 考虑节能降耗的生产调度优化	426
9.4 大型机器设备调度优化	432
9.5 企业内部物流路径优化	440
9.6 企业产成品库存控制优化	448
9.7 本章小结	456
本章参考文献	457
总结与展望	459



绪 论

1.1 制造业与先进制造技术

信息技术的飞速发展加快了经济全球化的进程，新一轮的世界产业结构调整正在不断推进，产业分工有国际化的趋势，我国正逐渐成为“世界工厂”，是名副其实的制造大国。

制造业是指对采掘的自然物质资源和工农生产的原材料进行加工和再加工，为国民经济其他部门提供生产资料，为社会提供日用消费品的社会生产制造部门^[1]。而工业是指开采资源并对其加工，从而为社会提供商品、服务或资源的生产部门的总称。制造业是工业的主体部分，是国家的基础性、前沿性、支柱性与战略性产业^[2]。

制造业是国家的命脉，其主要体现在^[3]：①制造业是国民经济的支柱产业和经济增长的发动机；②制造业是高技术产业化的载体和实现现代化的重要基石；③制造业是吸纳劳动力就业和扩大出口的关键产业；④制造业是国家安全的重要保障。杨叔子等^[2]认为人类社会的发展依赖四大物质文明支柱：材料、能源、信息和制造，并认为高度发达的制造业对国内是实现新型工业化和加速实现现代化的必备条件，对国外是衡量国家竞争力的重要标志，因此将制造比喻成“永远不落的太阳”。

我国政府一直非常重视制造业的发展。早在 2001 年，中国工程院就组织了 25 位院士和 40 多位专家对我国制造业的现状、作用、地位及发展趋势和对策进行了调查研究。调查^[4]表明，中国的制造业直接创造国民生产总值的 1/3，占工业生产的 4/5，为国家财政提供 1/3 以上的收入，贡献出口总额的 90%，制造业从业人员占全国工业从业人员的 90%。国家统计局 2009 年公布的官方数据表明，工业生产总产值占国民生产总值的 39.7%，而制造业占国民生产总值的比例超过 30%。由此可见制造业在我国国民经济中的重要地位。

对于如何发展制造业，美国在 20 世纪 80 年代提出了先进制造技术的概念，认为先进制造技术是以信息技术为支撑，研究并改造作用于产品整个生命周期的所有技术的总称，它综合了机械、电子、信息、生物、光学、材料、能源、环保、管理等领域领域的最新成果，目的是获得优质、高效、低耗、清洁的产品^[5]。所谓先进制造技术，其实就是制造技术加信息技术加管理科学，再加上有关科学技术交融而形成的制造技术^[6]。汪应洛等^[7]认为先进制造模式的首要目标是获取生产的有效性，其基本原则是制造资源的集成。可见，对各种制造技术以及人员进行有效集成，实现对资源的优化利用，同时兼顾能源、环保等人文环境，是先进制造技术的精髓所在。

制造型企业是制造业的基本单元，是实现先进制造的根本。在供应链的竞争模式下，许多大型

制造企业成为供应链上的核心企业。通过对国内某一大型汽车制造企业的调查发现,围绕该企业大大小小的供应商、分销商共一千八百余家。该企业具有雄厚的资金和研发实力、先进的运作理念,因而创造了供应链上的核心价值并成为实际的供应链主导者。在以制造型企业为核心的供应链中,制造型企业中的优化问题在供应链管理中占有重要地位。企业组织通常可以简单地划分为战略层、战术层和运作层,产品制造主要在企业的运作层。随着计算机网络技术的发展、信息系统的有效利用以及 RFID(射频识别)等先进技术的不断涌现,企业组织有向扁平化发展的趋势。因此,制造型企业之间的竞争也有向车间调度级发展的趋势^[8]。能否有效解决制造型企业制造工程管理中的优化问题,实现对企业资源的有效利用,直接影响到制造型企业的生产效率、生产成本以及对客户需求反应的敏捷程度。

本书拟针对制造工程管理中的优化问题进行研究,重点研究生产计划与调度、制造型企业内部物流、库存等方面的优化问题,探讨其建模与优化方法,为制造型企业提供相关的决策依据。

1.2 制造工程管理中常见的优化问题

制造工程管理是一类十分复杂的系统工程,任务目标多样、任务规模庞大、任务结构复杂,且具有随机性。解决这类复杂系统优化问题的基本思路是:先将复杂的大系统分解为若干个相对简单的子系统,以便实现对子系统的正确控制,再根据大系统的总任务和总目标,制定各子系统之间的协调策略,从而实现全局最优化。所谓优化问题就是指可以抽象为优化目标和约束条件两部分的决策问题。与制造工程相关的优化目标最明确的往往是企业利润的最大化,而企业在追求利润最大化的同时也要注意企业的社会责任,因此可以抽象出能耗最小化、客户平均等待时间最小化、平均运输路径最小化等若干其他优化目标。企业的具体环境和生产条件以及国家对企业生态、节能等方面的硬性要求构成了优化问题的约束条件。为了分析和解决制造工程的全局优化问题,可将其分解为制造工艺优化、产品配置优化及加工过程优化几大类问题,而在加工过程中,又存在生产批量与定价联合优化、生产调度优化、机器调度优化、库存控制优化、物流路径优化以及供应链协调与优化等问题。

1.2.1 制造工艺优化问题

制造工程管理中存在很多制造工艺优化问题。典型的制造工艺优化问题是生产流程优化问题。生产流程是指从原材料投入生产开始,经过加工转换,直至成品生产出来为止的全部过程。生产流程优化是对企业生产的某一段流程或者整个流程进行流程分析,对分析出的流程中不合理的地方利用流程优化技术进行优化。对生产流程进行优化可以提高生产效率、减少浪费、降低库存、降低资源消耗、提高产能等,进而提高对市场变化的适应度,增强企业的核心竞争力,提高企业的社会效益。

通常情况下,生产流程优化可从以下几个方面进行:改善工艺流程,消除多余或重复的作业;核定标准工时,进行人机操作分析,提高人员及设备效率;优化生产线设备布置,缩短等待和搬运时间;增加瓶颈工位数量,提高瓶颈工位产能;缩短加工时间等。

在生产流程优化方面,已有不少学者进行了研究,如文献[9]研究了钢铁生产流程优化问题,讨论了中国钢铁企业生产流程优化的现状和发展方向;文献[10]将发明问题的解决理论(TRIZ)应用于生产流程优化问题,提出了基于经典 IE(工业工程)与 TRIZ 的生产流程优化方法;文献[11]对

可移动式管道预制生产线的生产流程进行了设计和优化；文献[12]采用基于规则的专家系统技术对重型铸铁件生产流程优化系统的实现技术进行了研究；文献[13]从五个方面对万向钱潮股份有限公司的生产流程进行了优化。

为实现生产流程等工艺的优化，往往需要考虑厂址的优化选择。厂址选择是制造型企业的重要前期工作，是基础性、战略性的决策活动，在企业运营管理和发展中具有十分重要的地位，对企业的生产管理、经济效益和持续发展有着举足轻重的作用。厂址选择，必须要考虑工厂的初期投资规模，以后的运营成本（包括运输成本、动力和能源成本、各种税率以及劳动力成本等）、供销关系以及对城市建设、地区经济和自然环境的影响等，进行多方面的综合分析和多方案比较，最后取得最优方案，达到较好的企业经济效益、环境效益和社会效益，因此厂址选择是个多目标优化问题（multi-objective combinatorial optimization problem, MCOP）。

目前已有许多有关厂址选择的定性分析和定量分析的方法，随着科学的进步，近年来定量分析方法借助于计算机的应用，有了更长足的发展，为厂址选择决策提供了更为科学、系统的评价方法，常见的有模矢法、数学规划法（包括线性规划法）、比较矩阵法、重心法、评分优选法、判定优先次序法、德尔菲专家法、运输力耗费最小法以及模糊数学在厂址选择方面的应用如指令标定法、线性加权变换法、层次分析法等。

企业选址的合理与否可能影响工厂内场地配置、各分厂之间物流的合理性以及工艺流程的顺畅性，因此对整个制造流程的优化有着重要的作用。国内一些学者对制造型企业的厂址选择问题进行了研究，如文献[14]分析了既有厂址位置选择优化方法，重点研究了以层次分析法为依托的一种典型的系统综合评价方法；文献[15]应用三阶段博弈模型分析了双头垄断企业产品成本内生时的选址决策问题；文献[16]研究了工厂选址和生产规模确定的综合优化问题；文献[17]为基于供应链的加工企业的选址问题建立了数学规划模型；文献[18]运用整数线性规划建立了服装加工选址决策模型。

1.2.2 产品配置优化问题

随着经济技术的发展和消费文化的变化，现代企业必须在考虑产品成本和质量的同时，及时有效地提供多元化的产品供顾客选择，以最大限度地满足顾客的个性化需求，这样才能赢得市场占有率、提高企业竞争力。在这种情况下，20世纪90年代出现了一种新的生产方式：大规模定制（mass customization, MC），这种方式的基本思想是通过产品结构和制造过程的重组，把产品的定制生产问题转化为批量生产，以大批量生产的低成本和高效率为单个用户或小批量多品种的市场定制任意数量的定制产品。

产品配置是大规模定制的关键技术之一，是利用客户需求对配置模型进行实例化的过程，它是以产品结构模型为基础，在产品配置规则的约束下，设计出满足客户需求的产品。产品配置需要使用一定的产品配置方法并通过相应的产品配置系统来完成。如何在产品配置信息的基础上实现优化对快速响应客户需求、提高设计效率、降低成本起着重要的作用。

产品配置类似于我们通常所说的设计，即在对象的组成结构、规范和性质已知的情况下，根据一定的策略找出满足规范解的过程，是一种受到约束的设计，而并不涉及设计新的组件或组件间的规则。产品配置系统则相当于一个专家系统：产品配置系统将专家对产品的配置知识存储于知识库中，并用一定的产品配置方法根据用户输入系统的要求对知识库中的知识进行推理从而得到相应的配置结果反馈给用户^[19]。

近年来，国内外学者在理论上对产品配置进行了大量的研究，研究的重点放在配置方法上，通

常配置方法有侧重于配置知识表示和侧重于配置问题求解两种。早期出现的配置方法有基于规则(rule-based)的产品配置方法^[20]、基于结构(structure-based)的产品配置方法^[21]、基于约束(constraint-based)的产品配置方法^[22]、基于事例(case-based)的产品配置方法^[23]。这些产品配置理论模型表示配置知识的侧重点各不相同,还没有一个统一的产品配置模型。文献[24]和文献[25]提出了用产品配置的本体论(ontology)来表示和统一所有产品配置知识的概念,是一种统一的产品配置知识表示方法。文献[26]还提出了用描述逻辑(description logic)来表示和推理产品的配置知识。各种配置方法各有优缺点,目前还没有一种理想的产品配置方法既能够实现系统、通用和概念化地表示配置知识又可以进行快速有效的推理求解。

除了对产品配置方法的研究外,对产品配置知识的演化和维持、产品配置向实际应用的转化、产品配置的实际应用经验、产品配置系统与其他信息系统的集成、基于网络的产品配置、分布式产品配置等也都进行或开始了相应的研究。

1.2.3 加工过程优化问题

在厂址选择、生产流程、产品配置等方案确定之后,制造企业生产过程中也还存在着大量订单配置、资源配置、生产计划与调度、Hoist 调度、下料等加工过程优化问题。

订单配置优化问题广泛存在于订货型企业。订货型企业按照客户订单来安排生产,客户订单是企业利润的来源,支撑着企业的生存和发展。但是并不是所有的订单都能为企业带来客观的利润,其所带来的利润也各不相同,与此同时,企业的各种资源也是有限的。因此,企业如何在资源有限的条件下,在一定时间内安排订单生产,使生产既能满足客户的要求,又能实现企业资源的充分利用,使企业利润达到最大化就是订货型企业制订生产计划时的一个关键问题,这类问题被称为订单配置优化问题,也有文献称之为订单优先权确定问题。

该问题的常见求解方法有约束理论、线性规划理论、战略理论、层次分析法以及熵权法等。例如,文献[27]基于约束理论给出了该问题的一种启发式算法;文献[28]将生产战略、约束理论、层次分析法和线性规划结合起来,提出了一种生产战略与生产计划的集成方法,称之为战略生产排程方法;文献[29]提出了一种基于 RBF(径向基函数)神经网络的供应链环境下订单优先权确定方法。

通常情况下,加工系统中有多个工位和多个工件,每个工件由多个不同的工序完成,这些工件和工序之间存在着错综复杂的次序关系,每个工序的完成都需要调用相应的资源,包括人员、机器等,如何将有限的资源通过合理的配置,使得整个加工系统的性能最优,就是加工系统中的资源配置优化问题。

国内已有一些学者对这类问题进行了研究,如文献[30]用时间 Petri 网模型对客车底盘总装线进行人员的配置优化,从而提高装配线的劳动生产率;文献[31]研究了农业企业的机器配置问题,建立了非线性规划模型以及进行优化配置的一般原则和方法,在作业量约束、农具配备量约束和作业期约束下,以最小化机组作业成本和作业适时性损失之和为目标函数,对机器台数、农具台数和机组作业天数(台班数)进行决策;文献[32]在零件加工时间服从指数分布的假设下,利用排队模型和数学规划,求解出在资源数量约束和资金约束情况下资源(人和机器)优化配置的方法,使得零件在系统中的平均排队时间最短;文献[33]以发动机再制造生产线为对象,建立发动机生产线仿真模型,通过对资源利用率、生产率等数据的分析,寻找生产线的瓶颈环节,通过改变设备配置实现生产线性能的优化,从而以最小的投入满足生产需求。

生产计划是关于企业生产运作系统总体方面的计划,是企业在计划期应达到的产品品种、质

量、产量和产值等生产任务的计划和对产品生产进度的安排。在企业实际生产运作过程中,按照执行期限的长短通常将生产计划分为年度计划、月计划、周计划等。生产计划反映的并非是某几个生产岗位或某一条生产线的生产活动,也并非产品生产的细节问题以及一些具体的机器设备、人力和其他生产资源的使用安排问题,而是指导企业计划期生产活动的纲领性方案。由于生产计划针对的时间周期较长,一般生产计划的优化问题是静态的,此类优化问题属于企业管理的中观层次。

在企业里,生产计划下达后,生产车间为了完成下达的生产计划,必须组织执行生产进度计划的工作。如何有效组织订单对应的作业,充分利用现有企业资源,尽可能满足更多客户的需求,提高客户需求反应的敏捷程度等,则需要通过生产调度优化来实现。生产调度以生产进度计划为依据,根据订单需求进行科学合理的资源分配,属于企业微观管理层面的优化问题。由于生产调度最终决策方案是将作业安排到具体的机器上并按照某种排序方式进行加工,因此通常也将对生产调度问题进行优化的理论称为排序论。

在理论研究领域,生产计划与生产调度有很大区别,主要体现在:①生产计划属中观层次,通常针对多个生产阶段,而生产调度属微观层次,通常仅针对一个生产阶段;②生产计划依赖更多的集成信息,而生产调度依赖具体的信息;③生产计划的目标通常与成本有关,而生产调度的目标常与作业的完工时间有关。因此长期以来对生产计划与生产调度的研究通常是分开的。对生产计划的研究一般基于库存理论^[34]或经济批量(lot sizing)^[35],而典型的生产调度模型解决的是如何有效利用机器资源完成一些作业^[36]。

然而,无论是生产调度还是生产计划,相关的研究成果最终必须集成到相应的供应链决策支持系统中才能够真正对企业具有实用价值,一些学者继而开始研究生产计划与生产调度的集成问题。例如,Brandimarte 和 Calderini^[37]以及 Palmer^[38]分别为一般的生产计划与调度集成问题构建了二阶段禁忌搜索(tabo search, TS)算法和模拟退火(simulated annealing, SA)算法,但他们没有考虑到工序的次序约束,并且二阶段的算法常常使得调度结果成本较大,难以获得问题最优解;Moon 等^[39]研究了一个由多个工厂组成的供应链中的生产计划与调度的集成问题;Lee 等^[40]研究了一个制造型企业主导的供应链中的生产计划与调度集成问题,其中某些作业允许外包;Kim 等^[41]研究了一个多级多项产品的生产计划与调度的集成问题;Moon 等^[42]研究了供应链环境下的生产计划与调度集成问题,目标是在最小费用和库存的前提下生产高质量的产品以满足客户需求;Kreipl 和 Dickersbach^[43]研究了 VMI(供应商管理库存)供应链模式下的生产计划与调度集成问题;Kreipl 和 Pinedo^[44]讨论了生产计划与调度集成模型如何用于设计构建供应链中的决策支持系统。

在制造型企业生产过程中,大量存在诸如自动搬运小车、机器人、托盘、抓钩等材料搬运装置,这些材料搬运装置虽然形式各异,然而就其实质而言都可以看成 Hoist。这些装置的调度会直接影响系统的生产率,其中最典型的就是在电镀生产线上由计算机控制的 Hoist 调度问题。例如,在汽车制造业中,Hoist 对其中的涂装过程及总装配线的生产效率影响重大。根据制造厂生产规模的大小,Hoist 的数量也可能不同,一种常见的分类方法是把 Hoist 调度问题划分为单 Hoist 调度问题和多 Hoist 调度问题。

Phillips 和 Unger^[45]首次提出 Hoist 调度问题,为其设计整数线性规划模型,并用分枝定界(branch-and-bound, B&B)算法求解具有 13 个生产槽的工业单 Hoist 调度问题。Shapiro 和 Nuttle^[46]首次研究了周期性的单 Hoist 调度问题,提出了数学规划模型并构建了一个分枝定界算法来寻求问题最优解;Armstrong 等^[47]提出了一个依赖于顺序的参数,并构建了基于这个参数的分枝定界程序;Chen 等^[48]利用图论的有关知识提出了一个多项式规则,并进而构造了一个分枝定界算法;