



“十三五”国家重点图书出版规划项目

排序与调度丛书 (二期)

同类制造资源 网络共享与调度

李凯 周陶 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书提出了同类制造资源网络共享与调度框架,并重点针对网络制造资源的外部性、在线性和异址性三个方面的新特点开展了较为系统的研究工作。针对网络制造资源的外部性,考虑了网络共享制造资源数量及其可用时间区间提前预知的情形,构建了具有不可用时段的平行机调度模型,设计了优化方法;针对网络制造资源选择时带来的机器租用成本和机器数量变化,结合现实中机器租用成本的常见定价方式,分别研究了仅考虑固定成本、仅考虑可变成本,以及同时考虑固定成本和可变成本约束的平行机调度问题;针对网络制造资源的异址性,研究了直接配送方式下设置或者不设置配送中心两种情形对生产配送协同调度的影响,以及考虑成本约束的异址机器生产配送协同调度问题。

本书可作为排序与调度、运营管理、决策理论与方法、系统工程等相关课程的教学参考书,也可供各类制造资源优化调度领域的从业者、研究者学习参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

同类制造资源网络共享与调度/李凯,周陶著.—北京:清华大学出版社,2023.6

(排序与调度丛书.二期)

ISBN 978-7-302-62051-8

I. ①同… II. ①李… ②周… III. ①智能制造系统—研究 IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 193725 号

责任编辑:佟丽霞

封面设计:常雪影

责任校对:王淑云

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市龙大印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 170mm×240mm

印 张: 14.75

字 数: 280 千字

版 次: 2023 年 6 月第 1 版

印 次: 2023 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 99.00 元

产品编号: 084536-01

《排序与调度丛书》编辑委员会

主 编

唐国春(上海第二工业大学)

副 主 编

万国华(上海交通大学)

沈吟东(华中科技大学)

吴贤毅(华东师范大学)

顾 问(按姓氏拼音排序,中英文分开排序)

韩继业(中国科学院数学与系统科学研究院)

林诒勋(郑州大学)

秦裕瑗(武汉科技大学)

涂肇生(南开大学)

越民义(中国科学院数学与系统科学研究院)

Bo Chen(陈礴)(英国华威大学)

T.C.Edwin Cheng(郑大昭)(香港理工大学)

Nicholas G. Hall(美国俄亥俄州立大学)

Chung-Yee Lee(李忠义)(香港科技大学)

Michael Pinedo(美国纽约大学)

编 委(按姓氏拼音排序)

车阿大(西北工业大学)

陈志龙(美国马里兰大学)

高 亮(华中科技大学)

黄四民(清华大学)

李荣珩(湖南师范大学)

刘朝晖(华东理工大学)

谈之奕(浙江大学)

唐加福(东北财经大学)

唐立新(东北大学)

王 冰(上海大学)

王军强(西北工业大学)

张 峰(上海第二工业大学)

张玉忠(曲阜师范大学)

周支立(西安交通大学)

清华大学出版社

丛书序言

我知道排序问题是从 20 世纪 50 年代出版的一本名为 *Operations Research*（《运筹学》，可能是 1957 年出版）的书开始的。书中讲到了 S. M. 约翰逊（S. M. Johnson）的同顺序两台机器的排序问题并给出了解法。约翰逊的这一结果给我留下了深刻的印象。第一，这个问题是从实际生活中来的。第二，这个问题有一定的难度，约翰逊给出了完整的解答。第三，这个问题显然包含着许多可能的推广，因此蕴含了广阔的前景。在 1960 年左右，我在《英国运筹学》（季刊）（当时这是一份带有科普性质的刊物）上看到一篇文章，内容谈到三台机器的排序问题，但只涉及四个工件如何排序。这篇文章虽然很简单，但我也从中受到一些启发。我写了一篇讲稿，在中国科学院数学研究所里做了一次通俗报告。之后我就到安徽参加“四清”工作，不意所里将这份报告打印出来并寄了几份给我，我寄了一份给华罗庚教授，他对这方面的研究给予很大的支持。这是 20 世纪 60 年代前期的事，接下来便开始了“文化大革命”，倏忽十年。20 世纪 70 年代初我从“五七”干校回京，发现国外学者在排序问题方面已做了不少工作，并曾在 1966 年开了一次国际排序问题会议，出版了一本论文集 *Theory of Scheduling*（《排序理论》）。我与韩继业教授做了一些工作，也算得上是排序问题在我国的一个开始。想不到在秦裕琰、林诒勋、唐国春以及许多教授的努力下，跟随着国际的潮流，排序问题的理论和应用在我国得到了如此蓬勃的发展，真是可喜可贺！

众所周知，在计算机如此普及的今天，一门数学分支的发展必须与生产实际相结合，才称得上走上了健康的道路。一种复杂的工具从设计到生产，一项巨大复杂的工程从开始施工到完工后的处理，无不牵涉排序问题。因此，我认为排序理论的发展是没有止境的。我很少看小说，但近来我对一本名叫《约翰·克里斯托夫》的作品很感兴趣。这是罗曼·罗兰写的一本名著，实际上它是以贝多芬为背景的一本传记体小说。这里面提到贝多芬的祖父和父亲都是宫廷乐队指挥，当贝多芬的父亲发现他在音乐方面是个天才的时候，便想将他培养成一名优秀的钢琴师，让他到各地去表演，可以名利双收，所以强迫他勤学苦练。但贝多芬非常反感，他认为这样的作品显示不出人的气质。由于贝多芬有如此的感受，他才能谱出如《英雄交响曲》《第九交响曲》等深具人性的伟大乐章。我想数学也是一样，只有在人类生产中体现它的威力的时候，才能显示出数学这门学科的光辉，也才能显示出作为一名数学家的骄傲。

任何一门学科，尤其是一门与生产实际有密切联系的学科，在其发展初期那些引发它成长的问题必然是相互分离的，甚至是互不相干的。但只要研究继续向前发展，一些问题便会综合趋于统一，处理问题的方法也会与日俱增、深入细致，可谓根深叶茂，蔚然成林。我们这套丛书已有数册正在撰写之中，主题纷呈，蔚为壮观。相信在不久以后会有不少新的著作出现，使我们的学科呈现一片欣欣向荣、繁花似锦的局面，则是鄙人所厚望于诸君者矣。

越民义

中国科学院数学与系统科学研究院

2019 年 4 月

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，为社会提供消费品的社会生产制造部门。制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。新一代信息技术的飞速发展使得互联网功能愈加强大，构建了一个以互联网为核心的人-机-物互联大系统，为制造资源网络共享提供了信息基础，成为制造模式创新的重要驱动力量，引发了“互联网+”环境下的制造变革。

本书立足于新一代信息技术与制造业深度融合的“互联网+”环境背景，研究网络共享的同类制造资源调度方法，以期对网络共享同类制造资源的高效利用提供理论与方法支撑。从调度理论的角度来看，网络共享制造资源具有外部性、在线性和异址性的特点，与传统制造资源的调度有明显区别。我们把通过网络共享的制造资源这种以租代买的特性定义为网络制造资源的“外部性”。与传统运作方式下制造资源购置发生在生产制造之前，企业生产调度往往不考虑制造资源使用成本的调度情境不同，“互联网+”环境下通过网络共享的外部制造资源以租用方式使用，因此考虑网络共享制造资源外部性的调度问题应平衡网络制造资源租用成本与生产效率的矛盾。我们把网络共享制造资源因分属不同企业而在生产周期内加入或退出生产系统，以及由此造成的调度周期内可用状态变化的现象定义为网络制造资源的“在线性”。与传统运作方式假定平行机的个数预知且固定的情境不同，网络共享制造资源的外部性进一步导致了机器的在线性，即调度周期内机器数量发生变化，因此考虑网络制造资源在线性的调度问题应重视制造资源数量变化对调度目标的影响与优化。我们把网络虚拟空间零距离联结而在现实物理空间存在较大位置差异的现象定义为网络制造资源的“异址性”。网络制造资源的异址性使得机器选择对生产之后的配送环节产生巨大影响，因此考虑网络制造资源异址性的调度问题应综合优化生产配送整体效率。

作者所在的科研团队紧密结合合肥工业大学的工科大学特色，长期围绕制造企业运营管理中的优化理论与方法开展研究工作，密切关注“互联网+”环境下的制造变革及其带来的管理问题，并且得到了国家自然科学基金及省、部级课题的大力支持。在同类制造资源网络共享与调度方面，团队在前人研究工作的基础上，提出了一个同类制造资源网络共享与调度框架，并重点针对网络制造资源的外部性、在线性和异址性三个方面的新特点开展了较为系统的研究工作。针对网络制造资源的外部性，考虑了网络共享制造资源数量及其可用时间区间提前预知

的情形，构建了具有不可用时段的平行机调度模型，设计了相应的优化方法。针对网络制造资源选择时带来的机器租用成本和机器数量变化，结合现实中机器租用成本的常见定价方式，分别研究了仅考虑固定成本、仅考虑可变成本，以及同时考虑固定成本和可变成本约束的平行机调度问题。针对网络制造资源的异址性，研究了直接配送方式下设置和不设置配送中心两种情形对生产配送协同调度的影响，以及考虑成本约束的异址机器生产配送协同调度问题。

本书是基于团队近十年来在同类制造资源网络共享与调度方法方面的科研工作整理而成的。李凯教授主持了本书相关课题的研究工作，提出了本书的主要思想和学术观点，制定了本书的详细框架，组织了本书的整理过程，对全书进行了统稿和最终定稿。周陶博士协助李凯教授参加了相关课题的研究工作和书稿整理工作，对本书进行了认真审查。参加相关课题研究和书稿整理工作的还有徐淑玲、肖巍、陈健福、刘静、张丽敏、夏露露、张晗、张勋、石梅、李会、张惠娟、解超、潘雨倩、邢松、杨阳、关银银、张博、李思源、邵子明、黄梦雨、吴文雅、李艳等。团队在研究过程中参考了大量的国内外相关研究成果。

衷心感谢国家自然科学基金（项目号：71521001、72271070、71871076、71471052、71690235、72201112），以及安徽省自然科学基金杰青项目 2208085J07 的支持！衷心感谢团队所在的“过程优化与智能决策”教育部重点实验室为团队创造了良好的科研环境和学术氛围！衷心感谢唐国春教授对包括本书在内的“排序与调度丛书”所做的大量工作！衷心感谢沈吟东教授、王军强教授和中国运筹学会排序专委会的其他老师对本书认真细致的审稿和修改建议！衷心感谢所有参考文献的作者！衷心感谢清华大学出版社为本书的出版做了大量精心细致的工作！

“互联网+”环境下的网络制造资源共享与调度是一个理论研究与管理实践的前沿领域，团队仅针对同类制造资源，探索网络共享与调度的特点和优化方法，研究工作只是此领域的冰山一角，加上作者水平有限，定有疏漏之处，恳请读者批评指正。

作 者

2023 年 2 月 10 日于合肥

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	典型制造模式演化与发展	1
1.2	“互联网 +”环境下的先进制造模式	5
1.3	制造资源网络共享与调度新特征	8
1.4	主要内容结构	9
	参考文献	11
第 2 章	同类制造资源网络共享调度理论新挑战	13
2.1	同类制造资源网络共享框架	13
2.1.1	国内外研究现状	13
2.1.2	基于 Agent 的同类制造资源网络共享系统模型	16
2.1.3	基于 Agent 的同类制造资源网络共享调度流程分析	17
2.2	考虑机器成本的调度研究现状综述	18
2.2.1	考虑机器固定成本的调度	19
2.2.2	考虑机器可变成本的调度	19
2.2.3	研究机遇与挑战	20
2.3	在线调度研究现状综述	22
2.3.1	在线单机调度	22
2.3.2	在线平行机调度	23
2.3.3	研究机遇与挑战	24
2.4	异址机器生产配送协同调度研究现状综述	28
2.4.1	不考虑库存的生产配送协同调度	28
2.4.2	考虑库存的生产配送协同调度	29
2.4.3	研究机遇与挑战	31
	本章小结	34
	参考文献	35
第 3 章	网络共享环境下考虑固定成本约束的平行机调度	43
3.1	问题背景与研究现状	43
3.2	作业等长情形下考虑固定成本的最小化 Makespan 平行机调度	46

3.2.1	问题描述	46
3.2.2	算法设计	48
3.2.3	实验结果	57
3.3	考虑固定成本的最小化 Makespan 平行机调度	59
3.3.1	问题描述	59
3.3.2	算法设计	60
3.3.3	实验结果	69
3.4	考虑固定成本的最小化最大延迟时间平行机调度	70
3.4.1	问题描述	70
3.4.2	算法设计	72
3.4.3	实验结果	76
3.5	考虑固定成本的最小化 Makespan 与租用成本加权之和平行机调度	78
3.5.1	问题描述	78
3.5.2	算法设计	80
3.5.3	实验结果	86
	本章小结	90
	参考文献	91
第 4 章	网络共享环境下考虑可变成本约束的平行机调度	93
4.1	问题背景与研究现状	93
4.2	考虑可变成本的最小化 Makespan 及总完工时间平行机调度	94
4.2.1	问题描述	94
4.2.2	算法设计	95
4.2.3	实验结果	104
4.3	考虑可变成本的最小化最大延迟时间平行机调度	109
4.3.1	问题描述	109
4.3.2	算法设计	111
4.3.3	实验结果	115
4.4	同时考虑固定成本与可变成本的最小化总延迟时间平行机调度	118
4.4.1	问题描述	119
4.4.2	算法设计	123
4.4.3	实验结果	129

本章小结	134
参考文献	135
第 5 章 网络共享环境下具有不可用时段的平行机调度	137
5.1 问题背景与研究现状	137
5.1.1 问题背景	137
5.1.2 研究现状	138
5.2 具有不可用时段的一般平行机调度	144
5.2.1 问题描述	145
5.2.2 算法设计	145
5.2.3 实验结果	153
5.3 考虑原材料变质的具有不可用时段的平行机调度	155
5.3.1 问题描述	155
5.3.2 算法设计	160
5.3.3 实验结果	165
本章小结	167
参考文献	167
第 6 章 网络共享环境下异址平行机生产配送协同调度	172
6.1 问题背景与研究现状	172
6.1.1 问题背景	172
6.1.2 研究现状	173
6.2 直接配送情形下带有配送中心的异址机器调度	176
6.2.1 问题描述	176
6.2.2 算法设计	178
6.2.3 实验结果	181
6.3 直接配送情形下不带有配送中心的异址机器调度	184
6.3.1 问题描述	184
6.3.2 算法设计	186
6.3.3 实验结果	191
6.4 考虑成本的异址机器生产配送协同调度	195
6.4.1 问题描述	196
6.4.2 算法设计	197
6.4.3 实验结果	203

本章小结	206
参考文献	206
第 7 章 总结与展望	210
附录 英汉排序与调度词汇	215
索引	223

清华大学出版社

第 1 章 绪 论

制造业是国民经济的主体，制造模式是制造企业为实现生产目标而采取的生产要素组织方式。随着科学技术及经济社会发展，制造模式不断演化与发展，以实现制造资源集成的不断优化。特别是新一代信息技术的飞速发展及其与制造业的深度融合，催生了网络协同制造、云制造、社会制造等先进制造模式，极大地提高了资源配置效率和生产效率。本章首先简要回顾典型制造模式演化与发展历程，进而概述“互联网+”环境下催生的先进制造模式，然后分析“互联网+”环境下制造资源网络共享与调度的特点，最后简单介绍本书的主要内容结构。

1.1 典型制造模式演化与发展

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，为社会提供消费品的社会生产制造部门。制造业是经济社会和科技进步发展的原动力，具有不可替代的基础性作用。制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基^[1]。

制造模式是制造企业为实现生产目标而采取的生产要素组织方式。先进制造模式应当以获取生产有效性为首要目标，以制造资源集成为基本原则，以组织的创新和人因的发挥^[2]为工作重点。关于制造资源的充分利用和有效组织，杨善林等^[3]认为可以采用工程管理的思想来实现，并指出了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。解决制造工程管理问题的思路：可以先将复杂的大系统分解为若干相对简单的子系统，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。

人类早期的生产制造模式以工匠和手工作坊为主，制造能力相对低下，生产任务主要由一个人或者若干具有亲戚朋友关系的人完成，因此管理主要靠感情或威信维系。18 世纪蒸汽机的发明，带动了现代化制造工厂的出现，生产管理的重要

要性也得以凸显。在此阶段,泰勒^[4]、甘特、吉尔布雷斯夫妇等一批科学家致力于探索提高生产效率的科学管理理论,奠定了管理科学的基础。

20 世纪初,亨利·福特创造了人类历史上第一条汽车流水生产线,开启了 20 世纪以来的大规模生产方式。流水生产是指加工对象按照一定的工艺路线和一定的节拍,从前道工序“流”到后道工序,连续完成作业的生产过程。由于设备以生产线方式组合,生产组织过程中制造对象像水一样依次“流”过这些设备,因此将该方式称为流水生产线方式。流水线生产的主要特点是高度分工,生产率高,产品质量稳定。生产过程中,流水线生产具有明显的节奏性和较高的连续性,生产线上各个工作站、全体员工必须按同一节拍工作。流水线生产方式的出现,标志着作坊式的单件生产模式演变为以高效的自动化专用设备和流水线生产为特征的大规模生产方式,为人类创造了巨额物质财富。

第二次世界大战以后,日本经济的腾飞引起了美国的关注。1985 年美国麻省理工学院筹资 500 万美元,确定了一个名为“国际汽车计划”的研究项目。该项目组从 1984 年到 1989 年,用了 5 年时间对 14 个国家的近 90 个汽车装配厂进行实地考察,并于 1990 年著出了《改变世界的机器》一书,把日本丰田的生产方式定名为精益生产(lean production)。精益生产是一种将思想理念、市场需求、管理体系、工具方法和组织架构等作为改进对象,使企业的生产系统能够灵活应对不停变化的用户需求,并将生产环节中的所有多余、无用的东西精简化,最终使包括市场供销在内的生产各方面均呈现出最好结果的一种生产管理方式。精益生产的特点是以简化组织和强调人的能动性为核心,以高质量为基本前提,力求低消耗、高效率、零库存,杜绝一切浪费,力争做到准时(just in time, JIT)。

随着物质财富的积聚,当人们的基本物质需求得以满足后,随之而来的个性化需求对消费者而言越发重要,也越来越受到企业重视,并由此提出了柔性生产。柔性生产的思想是通过系统结构、人员组织、运作方式和市场营销等方面的改革,使生产系统能对市场需求变化做出快速的适应,同时消除冗余无用的损耗,实现多品种、小批量,力求使企业获得更大的效益。柔性生产是在成本效益的基础上,以“及时”作为反馈结果,快速适应产品品种变化的生产方式。相较于传统生产制造成本居高不下、生产过程存在极大浪费等现象,柔性生产所具备的切线时间短、小批量、多品种等生产特点,既弥补了传统生产方式的劣势,又保持了传统生产自动化流水线的基本特性。

随着计算机技术的发展与应用,出现了物料需求计划(Material Requirement Planning, MRP)、闭环 MRP、制造资源计划(Manufacturing Resources Planning, MRP-II)、企业资源计划(Enterprise Resource Planning, ERP)等软件,为企业生产制造管理乃至企业整体的管理提供支撑。MRP 的目标是根据企业生产计划

和物料清单 (bill of materials, BOM) 规定的零部件相关需求, 在尽量控制库存的前提下实现有效采购, 保证企业生产的正常进行。由于 MRP 没有考虑到生产企业现有的生产能力和采购等有关条件的约束, 闭环 MRP 将生产能力计划、车间作业计划和采购作业计划纳入 MRP, 形成闭环系统, 从而在计划执行过程中, 车间、供应商根据反馈信息进行计划调整与平衡, 形成“计划—执行—反馈”的闭环系统。MRP-II 进一步丰富发展了闭环 MRP 的功能, 将对资金流的控制考虑进来, 实现了物流资金流合一、企业内各部门数据共享、模拟预见功能、计划的一致性与可行性、管理的系统性和协同性、动态应变性等。ERP 进一步突破了 MRP-II 的局限性, 可满足集团化多工厂协同工作统一管理的要求, 实现了企业之间的信息共享和交流, 促进了企业整体资源的集成管理。

随着经济全球化发展, 市场竞争日趋激烈, 同时信息技术的发展为整合制造企业的上下游利益相关方提供了便利, 为此产生了供应链管理思想。供应链是围绕核心企业, 通过对信息流、物流、资金流的控制, 从采购原材料、制成中间产品及最终产品, 最后由销售网络把产品送到消费者手中的将供应商、制造商、分销商、零售商, 直到最终用户连成一个整体的功能网链结构^[5]。供应链管理是一组方法, 它用于有效地集成供应商、制造商、中间商和最终顾客, 以便以准确的数量、正确的地点和恰当的时间生产和分发商品, 从而在满足服务水平需求的同时最小化整个供应链系统范围内的成本^[6]。从制造企业角度来看, 供应链管理思想是将企业生产管理的约束条件和目标从企业内部拓展到供应链整体, 企业生产不仅要关注自身的制造能力和获利水平, 同时也要兼顾供应链上下游利益相关方的利益水平, 以期实现企业自身的可持续良性发展。

为赢得市场, 制造企业必须增强自身的产品开发能力。传统的串行开发模式是一个由设计、加工、测试、修改组成的循环过程, 在产品的设计过程中不能及早考虑制造过程及质量等问题, 势必造成设计与制造脱节, 从而导致产品开发周期长且成本高。并行工程 (concurrent engineering) 是一种对产品及其相关过程 (包括制造过程和支持过程) 进行并行、集成化处理的系统方法和综合技术。这种生产模式的应用使得产品的设计过程和制造过程统一起来, 将原来分别进行的工作实现时间和空间上的交叉和重叠, 大大缩短了产品开发周期; 同时, 并行工程在设计时考虑的是产品整个生命周期的全过程, 因此减少了许多不必要的工作, 从而有效提高了企业的竞争力。

虚拟制造 (virtual manufacturing) 是在社会高度信息化、计算机技术广泛应用与应用及柔性市场需求推动下产生的新思想、新概念。虚拟制造的概念最早由美国人提出, 是以并行工程为基础发展而来的。虚拟制造是利用虚拟现实技术, 在计算机上完成制造过程的技术。采用此技术, 在实际制造之前, 可以对产品的

功能和制造性、经济性等方面的潜在问题进行分析和预测,实现产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检测及企业各级的管理控制等,增强制造过程中各级的决策和控制能力。虚拟制造技术在产品的设计阶段对产品的整个生命周期进行建模、仿真和优化,从而更加高效、经济、灵活地组织生产,达到缩短产品研发周期、降低研发成本、优化产品质量和提高生产效率的目的。

计算机技术应用于制造企业管理,出现了各种自动化子系统(设计、制造、装配、质量保证和物料传送等)。计算机集成制造系统(computer integrated manufacturing system, CIMS)是在自动化技术、信息处理技术与现代制造技术的基础上,通过计算机网络及软件将产品设计制造过程中各种孤立的自动化子系统有机集成,形成具有高效率、高柔性且适用于多品种、小批量生产的集成化和智能化制造系统。CIMS 集成了精益生产和并行工程等技术,将市场分析、预测、经营决策、产品设计、工艺设计和加工制造等企业的生产经营活动有机结合起来,形成一个良性的循环管理系统,提高企业对市场的应变能力和抗风险能力。

计算机网络技术与制造业深度融合,为制造企业共享资源提供了思路。1994年,美国通用汽车公司、里海大学等在美国国防部的资助下形成了《21 世纪制造企业战略》报告,提出了敏捷制造(agile manufacturing, AM)的思想,即基于当时的全美工业网络,为制造企业建立智能 Agent 与互联网的联接,一旦客户需求出现,智能 Agent 通过互联网协商与协作,通过构建面向客户订单任务的虚拟企业,从而快速配置技术、管理和人员等各种资源,以有效和协调的方式响应用户需求,以实现制造的敏捷性。

计算机网络技术的飞速发展和信息物理系统(cyber-physical systems, CPS)的构建,为物理世界与信息世界的交互与融合提供了物质基础。数字孪生(digital twin)是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、忠实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段^[7]。美国国防部最早提出数字孪生技术,并将它用于航空航天飞行器的健康维护与保障。德国西门子公司将数字孪生技术用于构建和整合制造流程的生产系统模型,支持企业进行全要素、全流程、全业务和全价值链的集成^[8]。通过物理世界与信息世界的实时通信与反馈,数字孪生将成为“互联网+”环境下实现智能制造和智慧生产与服务的重要手段。

随着社会生产方式的不断改变,大规模定制(mass customization, MS)的优点日益凸显,并成为企业强有力的竞争优势之一。大规模定制是一种集企业、客户、供应商、员工和环境于一体,在标准技术、现代设计方法、信息技术和先进制造技术的支持下,以大批量生产的低成本、高质量和高效率为客户提供产品和服务,以满足客户个性化需求的一种生产方式。大规模定制这一生产方式融合了精

益生产、低成本和时间竞争等管理思想，同时也得到了生产、组织、信息等技术平台的支持，为企业的良好发展注入了新的活力。

1.2 “互联网 +”环境下的先进制造模式

新一代信息技术的飞速发展使得互联网功能愈加强大，形成现代先进制造发展的新环境。以射频识别 (radio frequency identification, RFID) 技术为典型代表的智能感知技术与识别技术打通了世界万物与互联网终端的信息交互；IPv6 将 IP 地址数从 IPv4 的 $2^{32} - 1$ 个拓展到 $2^{128} - 1$ 个，打破了互联网对终端数量的限制，推动形成了物联网。移动通信技术和宽带技术的飞速发展，一方面减少了人对桌面计算机的依赖；另一方面有效地缩短了网络延迟，形成了移动互联网，实现了人-机-物互联。随着人们生产生活对互联网依赖性的提升，包含海量结构化、半结构化和非结构化数据的大数据蕴含了大量珍贵信息，被誉为“未来的石油”。超大规模的云计算中心和互联网边缘节点计算能力的有效衔接与整合，以及具有低延时和位置感知特点的雾计算的出现，提高了对大数据的处理能力。信息物理系统综合了计算、网络 and 物理环境，通过 3C (computer, communication, control) 技术的有机融合与深度协作，在万物互联的基础上实现了基于互联网的反向远程控制。区块链利用非对称密钥实现去中心化的分布式安全，为互联网上交易的信任和安全问题提供了解决方案。随着人、机、物交流互动愈加频繁，新一代人工智能也在全新的信息环境和海量数据基础上持续演进。上述新一代信息技术构建了一个以互联网为核心的人-机-物互联大系统，成为制造模式创新的重要推动力量，引发了“互联网 +”环境下的制造变革。

世界各国政府密切关注新一代信息技术引发的工业革命，以期在“互联网 +”环境下塑造更加强大的制造业。美国自 2009 年发布《重振美国制造业框架》以来，先后推出“先进制造业合作伙伴”计划、“先进制造业国家战略”计划，以推动美国的“再工业化”战略。美国的“再工业化”实质是以高新技术为依托，发展高附加值的制造业，从而重新拥有强大竞争力的新工业体系。2018 年 10 月 5 日，美国先进制造技术委员会发布了《先进制造业美国领导力战略》报告，再次强调先进制造是美国经济实力的引擎和国家安全的支柱。2019 年 2 月 7 日，美国白宫发布了未来工业发展规划，重点关注人工智能、先进制造技术、量子信息科学和 5G 技术，确保美国未来工业在全球的主导地位。在美国的这些战略中，融合新一代信息技术的先进制造始终处于核心位置。

德国政府于 2010 年 7 月发布了《德国 2020 高技术战略》报告，并在 2013 年 4 月的汉诺威工业博览会上正式推出了“工业 4.0”战略，希望利用信息物理系统

将生产中的供应、制造、销售信息数据化、智慧化，最后达到快速、有效、个性化的产品供应。2019年2月5日，德国经济和能源部发布了《国家工业战略2030》，旨在进一步有针对性地扶持重点工业领域，提高工业产值，保证德国工业在欧洲乃至全球的竞争力。

为改变我国制造业“大而不强”的局面，国务院于2015年5月19日正式印发了《中国制造2025》，对我国新一代信息环境下的制造业发展予以布局。同年，《国务院关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》进一步提出推动互联网与制造业融合，提升制造业数字化、网络化、智能化水平，加强产业链协作，发展基于互联网的协同制造新模式。2017年10月18日，党的十九大报告强调“建设现代化经济体系，必须把发展经济的着力点放在实体经济上，把提高供给体系质量作为主攻方向，显著增强我国经济质量优势。加快建设制造强国，加快发展先进制造业，推动互联网、大数据、人工智能和实体经济深度融合，在中高端消费、创新引领、绿色低碳、共享经济、现代供应链、人力资本服务等领域培育新增长点、形成新动能”。2017年11月27日，国务院正式发布了《关于深化“互联网+先进制造业”发展工业互联网的指导意见》。2019年1月18日，工信部印发了《工业互联网网络建设及推广指南》，大力推动工业互联网建设，以期形成相对完善的工业互联网顶层设计。“互联网+”环境对制造业的深刻影响已经受到举世瞩目。

“互联网+”环境下，新一代信息技术与制造技术相结合，突破了空间地域对企业生产制造范围和制造方式的约束，实现了企业间的协同和社会资源的共享与集成，更加高效、高质量、低成本地为消费者提供各种产品和服务。“互联网+”以强大动力推动着制造业生产方式、组织形式、商业模式、管理理念不断创新，催生了新的先进制造模式。例如：

(1) 网络协同制造 (networked collaborative manufacturing)。随着新一代信息技术的飞速发展，通过互联网实现上下游供应商、合作伙伴和客户的实时连通，有效利用供应链内及供应链间信息，将串行工作变为并行工程，实现供应链内及跨供应链的企业间产品设计、制造、管理和商务等过程合作的生产模式，极大提高供应链的反应速度和资源利用效率，从而产生了网络协同制造模式。网络协同制造强调通过互联网深化企业之间的资源共享与协作，使生产过程管理从传统的企业内部拓展到企业之间。

(2) 云制造 (cloud manufacturing)。云制造的概念最早由我国李伯虎院士团队^[9]提出。云制造是一种融合了先进制造技术及云计算、物联网、面向服务、高性能计算和智能科学技术等信息技术的先进制造模式，它将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化，构成虚拟化制造资源和制造能力池，并进行统一、集中的

智能化管理和经营,实现多方共赢、普适化和高效的共享和协同。同时,通过网络和云制造服务平台,能够为用户提供可随时获取的、按需使用的、安全可靠的、优质廉价的制造全生命周期服务。云制造进一步发展为智慧云制造模式^[10],将形成一种基于泛在网络及其组合的、人-机-物-环境-信息深度融合的、提供智慧制造资源与智慧能力随时随地按需服务的智慧制造服务互联系统。

(3) 社会制造(social manufacturing)。“互联网+”环境下,消费者与企业通过网络世界能够随时随地参加到生产流程之中,社会需求与社会生产能力将实时有效地结合在一起。社会制造就是利用3D打印、网络技术和社会媒体,通过众包等方式让社会民众充分参与产品的全生命制造过程,实现个性化、实时化、经济化的生产和消费模式。社会制造最大的特色就是消费者可将需求直接转化为产品,即“从想法到产品”,并使得任何人都可通过社会媒体和众包等形式参与其设计、改进、宣传、推广、营销等过程,并可以分享其产品的利润。社会制造理念为社会化制造资源的高效组织与利用、制造企业的服务化转型与新业态形成、制造业整体利益水平的改善等提供了新思路^[11]。

(4) 智能制造(intelligent manufacturing)。智能制造是新一代信息技术、新一代人工智能与先进制造技术相结合的产物,是一个非常宽泛的概念,具有丰富的内涵,上述“互联网+”环境下的先进制造模式均可以视为推动和实现智能制造的一些技术或理念。不同国家、地区、企业及科研人员对智能制造的理解也不尽相同。美国的“工业互联网”强调智能设备、智能系统和智能决策,德国的“工业4.0”强调智能生产和智能工厂,“中国制造2025”把智能制造作为两化深度融合的主攻方向。李培根和邵新宇^[12]定义智能制造是面向产品的全生命周期,以新一代信息技术为基础,以制造系统为载体的制造模式,在其关键环节或过程具有一定自主性的感知、学习、分析、决策、通信与协调控制能力,能动态地适应制造环境的变化,从而实现某些优化目标。周济^[13]认为智能制造是一个大系统工程,要从产品、生产、模式、基础四个维度系统推进,其中智能产品是主体,智能生产是主线,以用户为中心的产业模式变革是主题,以CPS和工业互联网为基础。

新一代信息技术的飞速发展,正在逐步形成一个人-机-物泛在互联的“互联网+”环境。在此环境中,企业的机器设备等制造资源、人类的智慧资源、智能互联产品功能和性能状态变化的信息资源等互联互通,为各类资源的充分共享和有效利用提供了信息基础。尽管各类资源在互联网的信息世界中零距离互联,然而制造过程的协作最终须落实在现实世界中,由此带来了在线、分布式异址资源有效利用的优化调度问题。本书拟针对“互联网+”环境下制造资源共享和调度特点进行探索,重点研究同类网络制造资源共享与调度方法,为“互联网+”环境下先进制造模式中的制造资源优化调度提供参考。

1.3 制造资源网络共享与调度新特征

“互联网+”环境下，网络协同制造、云制造、社会制造、数字孪生、智能制造等先进制造模式实质上均是旨在通过互联网实现制造资源有效整合，及时响应客户需求，为客户提供高质量低成本的产品或服务。互联网为制造企业提供了全新的商业服务模式和服务支撑平台。通过互联网云平台，制造型企业可以将各类制造资源虚拟化并实时发布制造资源利用状态，实现空置资源使用权的线上交易；通过对虚拟的制造资源进行智能化管理，实现制造资源的高度共享和协同，最终实现多方共赢。制造资源网络共享不仅能够促进制造型企业共赢，对国家和整个社会来说，它还能够将巨大的社会制造资源池连接在一起，实现制造资源与服务的开放协作、高度共享，降低制造资源的浪费，这对促进我国制造业由大做强和供给侧改革有重要意义。

对于制造企业而言，“互联网+”环境下的制造资源共享延伸了企业生产运作的边界，企业生产制造从企业内部拓展到企业外部，从而充分利用整个社会资源。以海尔智能互联工厂为例，海尔利用 COSMOPlat（卡奥斯工业互联网平台）将用户需求和整个智能制造体系连接起来，在用户需求的驱动下，通过开放性平台汇集设备商、模块商、机器人公司、企业内部互联工厂等一流制造资源。此类新型制造模式对制造企业生产运作管理产生了巨大影响，带来了新的管理问题，如“互联网+”环境下制造资源的虚拟化和网络发布与发现问题、网络制造资源使用的安全问题、网络制造资源所属企业的交互与协作问题、网络共享制造资源成本与利润分配问题、网络云平台本身的运营成本优化问题等。

本书研究网络共享的同类制造资源调度方法，以期为同类网络制造资源的高效利用提供理论与方法支撑。其中，同类制造资源表示为网络共享环境下的同类机或同型机。从调度理论的角度来看，网络共享的制造资源与传统制造资源的调度有明显区别，主要体现在：

（1）外部性。我们把通过网络共享的制造资源这种以租代买的特性定义为网络制造资源的外部性。在传统运作方式下，制造企业运营过程经历了厂址选择、设施布置，再到生产需求预测、生产计划、生产调度等环节，制造资源购置发生在生产制造之前，企业生产调度往往不考虑制造资源的使用成本。然而，在“互联网+”环境下，通过网络共享的外部制造资源以租用方式使用，即使制造能力与生产效率完全相同的制造资源，也会因所在地理位置、当地经济状况、能源消耗成本等各方面区别而可能存在租用价格的巨大差异。考虑网络制造资源外部性的调度问题应考虑网络制造租用成本与生产效率的协调。

（2）在线性。我们把网络共享制造资源因分属不同企业而在生产周期内加入

或退出生产系统,以及由此造成的调度周期内可用状态变化的现象定义为网络制造资源的在线性。在传统运作方式下,生产调度往往假定制造企业预先购置的制造资源在调度周期内一直可用,因此假定平行机的个数是预知且固定的。然而,在“互联网+”环境下,通过网络租用的制造资源其使用权的权重一般低于该制造资源所属企业自身的使用权,由此带来调度周期内机器数量变化,颠覆了传统平行机调度问题的基本假设。因此,考虑网络制造资源在线性的调度问题应考虑制造资源数量变化对调度目标的影响与优化。

(3) 异址性。我们把网络虚拟空间零距离联结而在现实物理空间存在较大位置差异的现象定义为网络制造资源的异址性。“互联网+”构建了一个制造资源实时互联互通的环境,然而制造资源共享是一个典型的 O2O (online to offline) 模式,即线上引发合作,线下执行制造过程。由于通过网络共享的制造资源在现实中可能存在巨大的空间位置差异,从而对生产环节后的配送环节产生巨大影响。因此,考虑网络制造资源异址性的调度问题应考虑异址制造资源的生产配送协同优化。

1.4 主要内容结构

新一代信息技术的飞速发展及它与制造业的深度融合,为制造资源提供了一个泛在互联的“互联网+”环境,为制造资源网络共享提供了极大便利。与传统制造资源调度相比,网络共享制造资源的调度问题具有新的特点。本书在现有研究工作的基础上,较系统地研究了同类制造资源网络共享与调度问题,重点针对网络共享的同类制造资源的外部性、在线性和异址性进行了深入研究,探索这些调度问题的优化方法。

本书的结构框架如图 1.1 所示。本书章节安排如下:

第 1 章为绪论。该章简要介绍了典型制造模式演化与发展的背景知识,尤其是近年来新一代信息技术飞速发展所构建的“互联网+”环境下的一些先进制造模式,说明制造资源网络共享的应用前景,进而简单分析了网络共享制造资源的外部性、在线性和异址性的新特点,最后介绍了本书的主要内容及结构安排。

第 2 章为同类制造资源网络共享调度理论新挑战。该章在回顾制造资源网络共享相关文献的基础上,提出一个同类制造资源网络共享框架,并对考虑网络共享制造资源的外部性、在线性和异址性三个特点的调度问题涉及的有关研究工作进行综述,提出同类制造资源网络共享为调度理论与方法带来的机遇与挑战。

网络制造资源共享的外部性影响到机器租用成本和机器数量变化。针对机器

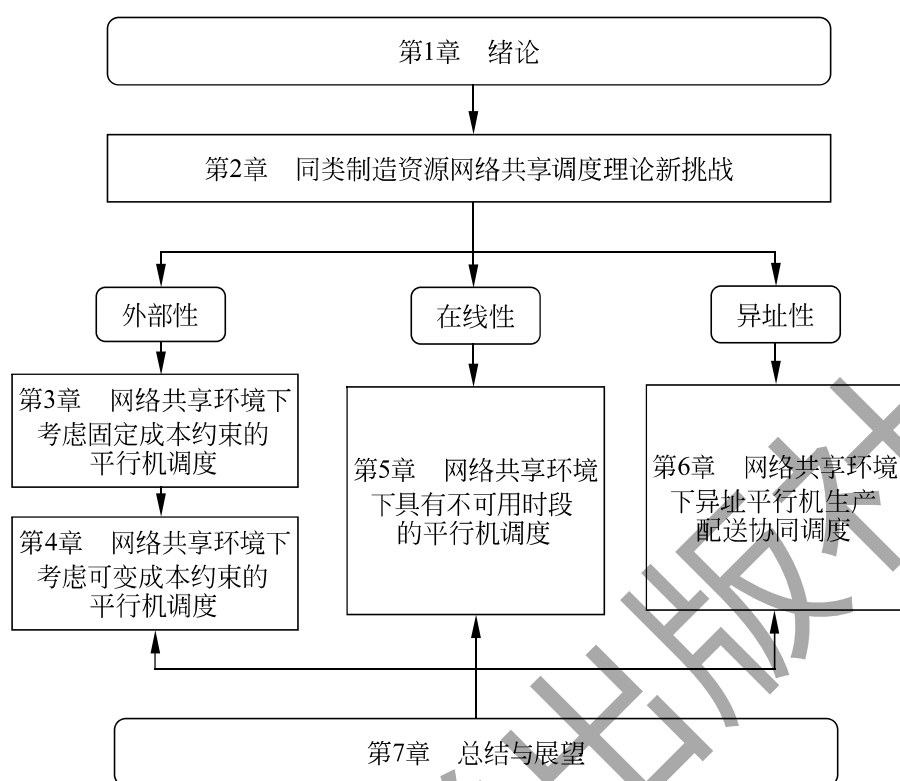


图 1.1 本书的结构框架图

租用成本的定价方式不同，第 3 章和第 4 章分别研究了考虑固定成本和可变成本的平行机调度。第 4 章也研究了同时考虑固定成本与可变成本约束的平行机调度。

第 3 章为网络共享环境下考虑固定成本约束的平行机调度。该章假定机器使用成本固定且提前预知，首先研究了加工时间相同的标准作业通过网络共享的平行机加工如何使得 Makespan（制造跨度）最小化的问题，进而拓展到加工时间不同的问题情形；然后研究了考虑固定成本约束下的最小化最大延迟时间的平行机调度问题；最后研究了一类考虑固定成本约束的、目标为最小化 Makespan 与机器租用成本加权和的平行机调度问题。

第 4 章为网络共享环境下考虑可变成本约束的平行机调度。该章考虑了通过网络共享的机器租用采用按使用的单位时长定价的方式，机器的使用费用根据使用时长来确定。由于通过网络平台获取的制造资源分属不同企业，因此单位时长的使用成本可能存在差异。首先，从作业可中断情形出发，构建问题最优解决方案；其次，基于可中断问题的最优解，分别为最小化最大完工时间、最小化总完工时间、最小化最大延迟时间的平行机调度问题设计算法；最后，假定机器使用成本包括固定成本和可变成本两部分，研究了两台同类机的最小化总延迟时间平行机调度问题。

第5章为网络共享环境下具有不可用时段的平行机调度。假定在一个生产计划周期内,通过互联网平台获得的网络制造资源数量、具体空间位置、制造能力及可用制造时段等制造资源参数信息均是预知的。由于此时制造资源数量是固定的,因此可以将此类考虑在线性的机器调度问题抽象为确定型的具有不可用时段的平行机调度问题加以解决。该章首先对具有不可用时段的平行机调度问题的背景及国内外研究现状进行综述;其次仅考虑不可用时段对平行机调度的影响,研究了具有不可用时段的一般平行机调度问题;最后针对一些特殊生产环境,研究了一类考虑原材料变质的具有不可用时段的平行机调度问题。

第6章为网络共享环境下异址平行机生产配送协同调度。在直接配送模式下,传统的考虑尾时间的平行机调度问题因机器处于同一地理位置,所以不同订单的配送时间或配送距离是一维向量;而在异址的平行机调度系统中,同一订单的配送时间或配送距离因机器空间位置差异而不同,因此是一个二维矩阵。该章考虑了直接配送模式下的异址机器生产配送协同调度,针对设置一个配送中心或不设配送中心两种情形,调度目标是服务跨度最小化。该章还考虑了采用第三方物流配送,且单位体积的配送费用也不同的情形,研究了在不超过成本总预算的前提下,最小化最大完工时间及最小化总完工时间的异址机器生产配送协同调度问题。

第7章为总结与展望。该章对全书工作进行了总结,并对“互联网+”环境下制造资源共享与调度的研究方向做了展望。

参考文献

- [1] 国务院. 中国制造 2025[R]. 2015-05-19. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.
- [2] 汪应洛, 孙林岩, 黄映辉. 先进制造生产模式与管理的研究 [J]. 中国机械工程, 1997, 8(2): 63-73.
- [3] 杨善林, 周永务, 李凯, 等. 制造工程管理中的优化理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [4] TAYLOR F. The principles of scientific management[M]. London: Routledge/Thoemmes Press, 1911.
- [5] 马士华, 林勇. 供应链管理 [M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [6] SIMCHI-LEVI D, KAMINSKY P, SIMCHI-LEVI E. Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies[M]. 3rd ed. New York: The McGraw-Hill Companies, 2008.
- [7] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.

- [8] 向峰, 黄圆圆, 张智, 等. 基于数字孪生的产品生命周期绿色制造新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1505-1514.
- [9] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 等. 云制造——面向服务的网络化制造新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-7, 16.
- [10] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 云制造——一种智能制造的模式与手段 [M]//国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 智能制造. 北京: 电子工业出版社, 2016: 129-181.
- [11] 江平宇, 冷杰武, 丁凯. 社群化制造模式的边界效应分析与界定 [J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(4): 829-837.
- [12] 李培根, 邵新宇. 智能制造的内涵和特征 [M]//国家制造强国建设战略咨询委员会, 中国工程院战略咨询中心. 智能制造. 北京: 电子工业出版社, 2016: 39-71.
- [13] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向 [J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.

第 2 章 同类制造资源网络共享调度 理论新挑战

“互联网+”环境下，制造企业可以将各类制造资源虚拟化并实时发布其使用状态，实现闲置资源使用权的线上交易。通过对虚拟制造资源的智能化管理，实现制造资源的高度共享和协同，最终促进多方共赢。从网络制造资源交易过程来看，这是一种 O2O 的业务处理模式。从互联网角度来看，网络制造资源共享是网络众包模式在制造业中的应用，是一种具有广泛应用前景的新型制造模式。本章首先在简要综述制造资源网络共享方式的基础上，构建一个基于 Agent（代理）的同类制造资源网络共享系统模型，并对系统运作流程进行分析；接着从同类网络制造资源的外部性、在线性和异址性三个特点展开相关文献综述并提出同类制造资源网络共享调度的研究机遇与挑战。

2.1 同类制造资源网络共享框架

2.1.1 国内外研究现状

物联网、云计算和大数据等新一代信息技术的发展，不仅促进了新兴的电子信息装备制造业的迅速发展，还通过渗透和辐射，使传统制造业也发生了明显的变革。信息化在提高制造企业管理水平、转换经营机制、建立现代企业制度、改善原有制造模式、有效降低成本、加快技术更新、增强市场竞争力、提高经济效益和企业竞争力等方面均有着现实和深远的意义。O'Rourke^[1] 认为新兴信息技术有力地推动了“快时尚”和“精益制造”的发展，使得制造型企业能够提供给客户最想要的产品。以网络为中心的生产方式推动整个制造业价值链的进步，使生产过程中的每一个元素变得“智能”，从而实现从资源到产品整个生命周期的优化^[2]。

通过网络实现制造资源共享，使得企业资源的优化利用范围从企业内部拓展到企业外部，乃至整个社会甚至全球，能够更最大限度地促进制造资源整合与优化

利用,是云制造、网络协同制造、社会制造等“互联网+”环境下制造新模式的核心思想,制造资源网络共享已经成为一种较为普遍的现象。通过图 2.1 可以看出,制造资源网络共享与电子商务相比,二者的区别仅仅在于前者销售的是具体产品,而后者销售的是制造资源的使用权。

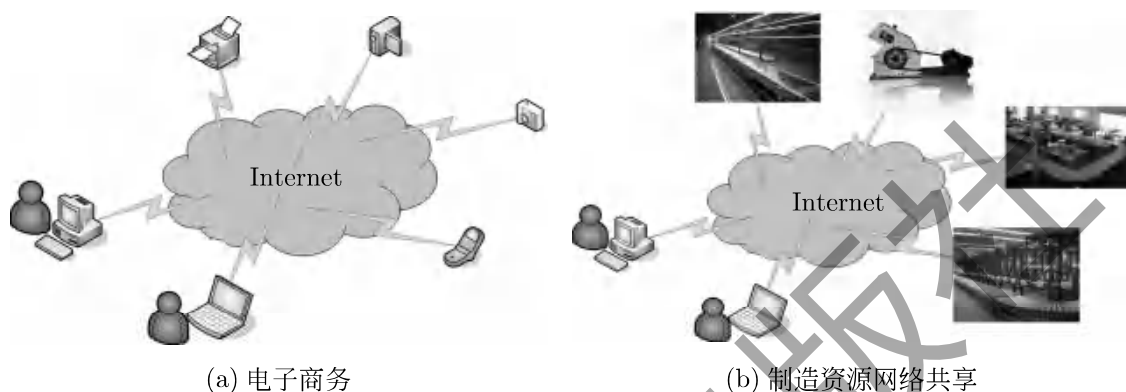


图 2.1 制造资源网络共享与电子商务对比

“互联网+”环境下,制造新模式实质上是通过利用新一代信息技术促进制造资源网络共享。以云制造为例,云制造是云计算的思想应用在制造业所产生的一种新型制造模式,基于互联网的相关服务的发现、使用和交付模式,通过网络以按需、易扩展的方式获得所需资源,而这些资源必须是虚拟化的资源。云是网络、互联网的一种比喻说法。随着云计算模式受到人们的认可和在各种行业中的推广应用,实体制造资源通过虚拟化,可以通过网络发布其使用状态,并提供给互联网上的远端企业、客户或第三方平台使用,从而实现了线上使用权交易、线下生产制造,催生了云制造模式的出现。通过对一些中小型企业制造资源的整合,云制造平台能够形成大型甚至超大型的虚拟企业,完成单个中小型企业完成不了的生产任务。另外,区域云制造平台通过整合区域内闲置制造资源,能够实现现有制造资源的充分利用,这对于我国这样的制造大国具有至关重要的现实意义。

目前,制造资源网络共享引发的先进制造模式受到了国内外研究学者的关注。1999 年, Montreuil 等^[3] 首先提出了网络制造的概念,强调了互联网环境下,企业信息整合对处于制造网络中的企业的巨大影响。Panetto 和 Molina^[4] 认为,企业的信息和资源应该是开放和共享的,对于新环境下的制造行业来说,资源的互操作性和企业的整合是关键。在企业信息充分整合与共享环境下, Kishore 等^[5] 提出了基于多代理架构的业务信息系统的理念和框架。Valilai 和 Houshmand^[6] 提出了一种面向服务的方法,以建立分布式制造代理商集成和协作的云制造平台。Argoneto 和 Renna^[7] 提出了一个基于 Gale-Shapley 模型的合作博弈算法和模糊引擎匹配技术的框架。Subashini 和 Kavitha^[8] 也强调了云计算技术的重要

性,认为在这种基于云计算的制造模式中,不同企业资源共享过程中的信息安全问题成为制约网络共享制造模式发展的重要因素。

我国学者开展了大量关于云制造模式的研究工作。Wang 和 Xu^[9] 研究了一种以标准化数据模型描述云服务及相关特性并面向个人用户和企业用户、可交互操作的云制造系统。Xu^[10] 阐述了云计算技术在现代制造业中的巨大作用,并构建了云平台以促进以互联网为基础的新型制造模式的发展。在这种制造模式下,各种制造资源都得到了有效的整合。Jiang 等^[11] 研究了一种基于云代理的云制造集成服务模式,以控制和协调云制造终端节点效率。Tao 等^[12] 研究了云制造的四种典型服务平台,即公共、私人、社区和混合服务平台,以及实现云制造模式的关键技术。Kang 等^[13] 提出了能力成熟度模型集成(capability maturity model integration, CMMI)安全模型来防止云制造系统遭受匿名攻击。Wang 等^[14] 拓展了云制造的概念,考虑到在云制造过程中重用废旧电器和电子设备的问题,提出了“云再制造”的概念。Cao 等^[15] 研究了处理资源集成的方法,并设计了针对资源选择的工作过程优先级(working procedure priority-based algorithm, WPPBA)算法,证明了其可行性。张霖等^[16] 阐述了云制造系统中“制造云”的构建过程,设计了一个面向设计仿真的云服务平台原型。李伯虎院士等^[17] 对我国实施云制造的思路和发展提出了建议。李京生等^[18] 探讨了云制造平台下动态制造资源能力服务化的分布式协同生产调度技术。

表 2.1 列出了近期一些关于制造资源网络共享框架方面的文献。上述关于制造资源网络共享的研究仍处于概念与框架层面,同类制造资源网络共享从理论框架到实际应用,再到考虑网络共享的同类制造资源优化调度,无论是管理理论还是管理实践,均有很多工作亟待研究。

表 2.1 制造资源网络共享框架研究成果

分类	文献	说 明
系统原型(框架)	[3]	网络制造的概念
	[5]	综合业务信息系统框架
	[6]	分布式制造代理的集成协作
	[14]	基于云制造过程中的设备使用,提出云再制造
系统平台实现技术	[7]	基于模糊引擎匹配技术和基于 Gale-Shapley 模型的合作博弈算法
	[8]	服务交付模型中的安全技术
	[9]	标准化数据模型的云服务平台
	[11]	云制造集成服务模型
	[12]	四个典型的服务平台和关键技术
	[13]	CMMI 安全模型

2.1.2 基于 Agent 的同类制造资源网络共享系统模型

图 2.2 描述了同类制造资源网络共享框架。资源拥有者在云平台上进行注册，并将这些闲置资源的详细信息实时发布和更新；云平台对这些资源进行分配和集中式管理；有制造需求的用户根据资源的相关描述进行选择和使用，最后对云平台和闲置资源拥有者提供的服务进行反馈和评估。

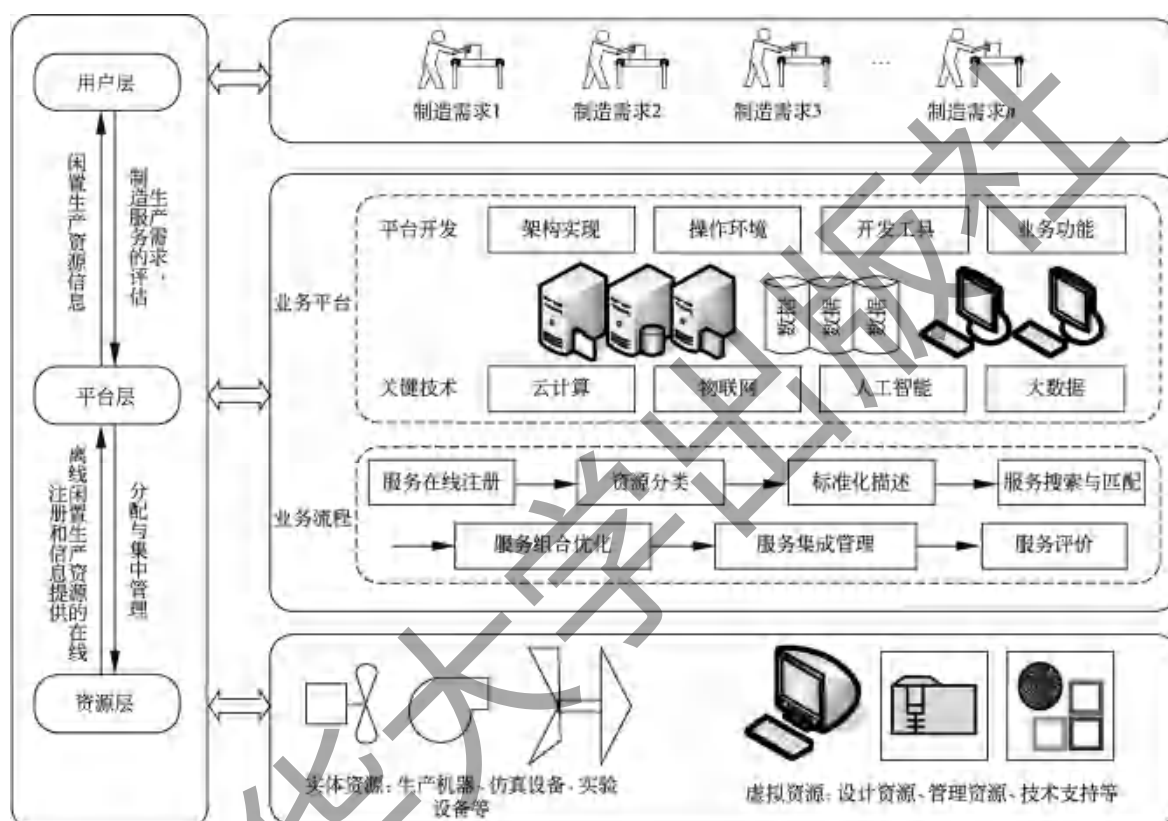


图 2.2 同类制造资源网络共享制造框架

基于 Agent 的同类制造资源网络共享流程：

- step 1** 客户 (Job-Agent) 通过互联网提交订单信息给网络云平台 Agent (Platform-Agent)。
- step 2** 网络云平台 Agent 通过互联网与制造资源 Agent (Machine-Agent) 交互，收集空闲资源 (机器) 信息，构建网络共享制造系统 (System-Agent)。
- step 3** 网络云平台 Agent 进行资源 (机器) 与订单 (作业) 的优化配置。
- step 4** 制造资源 Agent 按照一定加工次序完成分配的订单任务。
- step 5** 配送 Agent (Delivery-Agent) 按照一定配送方式，将已完工的订单产品配送至客户。

step 6 客户向网络云平台 Agent 提供服务评价信息;

step 7 网络云平台根据评价信息对制造资源 Agent 进行评估,用于下一次同类制造资源网络共享系统构建。

2.1.3 基于 Agent 的同类制造资源网络共享调度流程分析

本小节通过对基于 Agent 的同类制造资源网络共享调度流程进行分析,得到同类制造资源网络共享调度的特点。

(1) 在 Step 1 中, Job-Agent 将客户的制造需求提交给 Platform-Agent,同时提交这些订单的具体信息(加工时间、到达时间、交付期等经典调度参数)。从 Job-Agent 的角度来看,旨在提高客户满意度,如缩短服务跨度和减少作业延误。

(2) 在 Step 2 中, Platform-Agent 向 Machine-Agent 收集空闲机器的信息,并把这些信息提供给 Job-Agent。从而,客户可以全面了解这些闲置机器的相关信息,包括机器所在地理位置、收费标准、机器的特点(单机、平行机、混合机)等。

(3) 在 Step 3 和 Step 4 中,应在充分考虑机器状态的情况下完成订单的分配和加工。优化配置模式(主要包括集中式配置和分布式配置)。Machine-Agent 的目的是提高生产效率,如减少最大完工时间与总完工时间。

(4) 在 Step 5 中,选择合适的配送模式可以有效地减少配送过程的成本和时间,如即时配送(每个订单在完成处理后立即单独发货)、含有路径优化的批量配送(需要配送给不同客户的订单可以在同一批货物中一起配送)和可拆分交货(允许拆分订单并分批配送),同时还涉及有无集中配送中心、是否采用第三方物流(third-party logistics, 3PL)方式等。

(5) 在 Step 6 和 Step 7 中, Job-Agent 评估 Machine-Agent 提供的服务。Platform-Agent 建立公平客观的评估机制,从不同方面评估 Job-Agent 和 Machine-Agent 的效率。此外, Platform-Agent 的目标是寻求充足的客户资源和闲置机器资源,以最大化自身利润。

(6) 对于制造资源网络共享系统而言,系统的稳定性和效率在降低运营成本方面起着重要作用。

通过对上述基于网络云平台的制造资源共享流程进行分析,从调度理论角度来看,制造资源网络共享调度与传统的生产调度问题有很大区别。其一,制造资源的所有权属于企业外部,资源的使用权需要通过平台租赁获得,因此与传统假设机器属于企业内部不同,在调度模型中需要考虑机器成本对调度目标的影响;

其二，由于制造资源通过云平台搜索获得，因此在一个制造周期内，调度系统面临的制造资源数量是动态变化的，这与经典调度问题中假定机器数量固定有本质区别；其三，由于云平台上获得的同类制造资源的实际空间位置差异较大，因此制造资源与订单任务的匹配对生产之后的配送环节有巨大影响。在生产配送协同调度过程中，不仅要考虑制造资源的制造能力，同时也要兼顾其空间位置，有效降低配送成本。本书将制造资源抽象为具有加工能力的“机器”，并重点研究网络共享环境下的同类机及特殊情形同型机这两类平行机调度问题，及其对应的生产配送协同调度问题。

2.2 考虑机器成本的调度研究现状综述

1.3 节分析了同类制造资源网络共享的三个特征，共享制造模式与传统调度模式之间的第一个显著差异是是否考虑机器成本。在共享制造模式中，通过云平台获得每台闲置机器的使用权，不同工厂的机器成本（租赁成本和生产成本）差异很大。因此，除了传统的调度目标外，还应考虑机器成本的影响。表 2.2 列举了考虑机器成本的相关调度文献。

表 2.2 考虑机器成本的调度文献

假设	文献	研究问题	研究方法
1	[19]	$P_m \text{online} C_{\max}$	近似算法
		$P_m \text{online}, r_j C_{\max}$	近似算法
	[20]	$P_m \text{pmtn}, \text{non} - \text{pmtn} C_{\max} + \text{cost}$	近似算法
	[21]	$P_m C_{\max} + \text{cost}$	近似算法
	[22]	$P_m \text{online} \gamma \cdot H + W$	近似算法
	[23]	$P_m \text{rej}, \text{online} C_{\max} + \text{cost} + \text{penalty}$	近似算法
	[24]	$P_m \text{online}, \text{rej} C_{\max} + \text{cost} + \text{penalty}$	近似算法
k	[25]	$P_m \text{TC} \leq U C_{\max}$	近似算法
	[26]	$P_m \text{pmtn}, \text{non} - \text{pmtn} C_{\max}$	近似算法
		$P_m \text{pmtn}, \text{non} - \text{pmtn} \sum C_j$	近似算法
c_{ij}	[31]	$R_m \text{rma}, \text{cpt} TC$	多项式时间算法
	[32]	$P_m \text{pmtn}, \text{non} - \text{pmtn} C_{\max} + \text{cost}$	线性规划模型
		$P_m \text{pmtn}, \text{non} - \text{pmtn} \sum C_j + \text{cost}$	线性规划模型
	[33]	$P_m (\sum C_j, \text{MMC})$	近似算法
		$P_m (\sum C_j, \text{TMC})$	近似算法
		$P_m (C_{\max}, \text{MMC})$	近似算法
		$P_m (C_{\max}, \text{TMC})$	近似算法