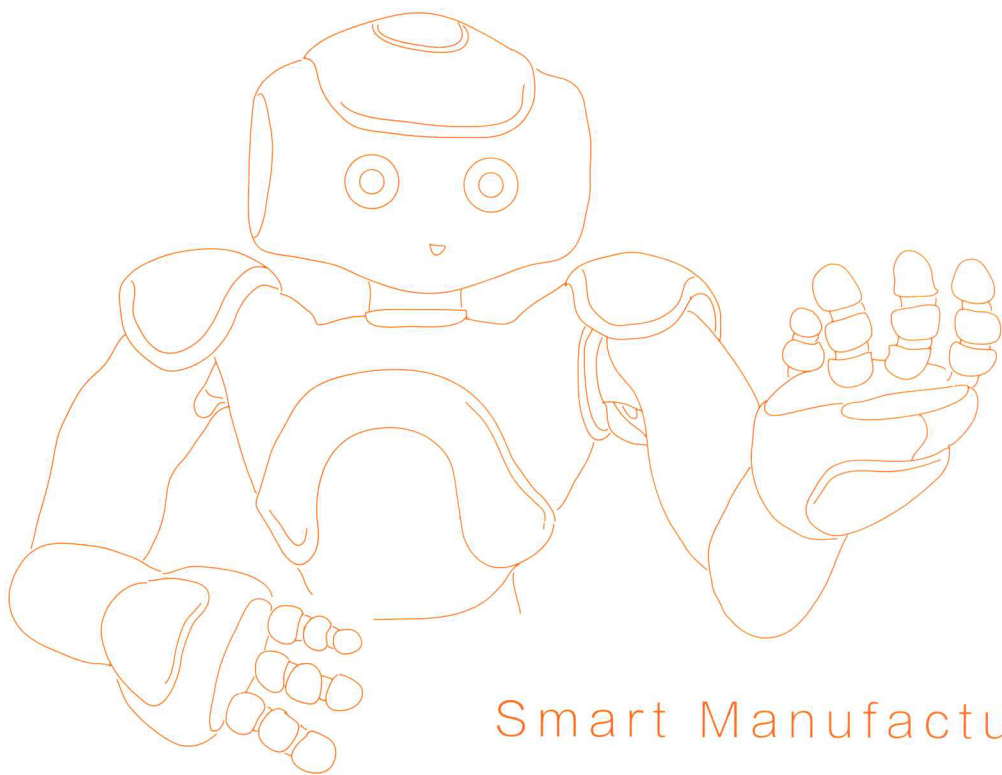


国家自然科学基金项目支持



Smart Manufacturing

# 智能制造

理念、系统与建模方法

刘敏 严隽薇 / 编著

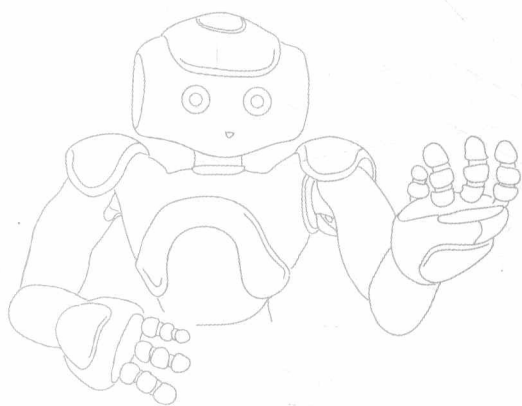
移动互联网 物联网、大数据、人工智能

化、服务化、协同化

纵览智能互联时代制造模式变革

清华大学出版社





Smart Manufacturing

# 智能制造

理念、系统与建模方法

刘敏 严隽薇 / 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

移动互联网、大数据、人工智能等新一代信息技术与制造业深度融合,孕育了智能制造的新理念。

本书以智能制造理念为起点,讲述了新一代信息技术对传统制造企业的渗透、支持、冲击和融合,给制造业带来的挑战和机遇,以及制造模式的变革、制造系统的发展及建模方法论;探讨了包括智能产品、智能制造过程、智能管理和服务、智能制造模式、智能制造基础关键技术等内容的智能制造技术体系,以及面向网络协同的智能工厂架构和智能企业协作框架;详细介绍了智能制造系统的组成、制造系统的建模方法和相关的基础关键技术等内容。

本书可供自动化、机械、计算机、管理工程等领域的管理人员、技术人员参考,也可作为相关专业高年级本科生和研究生的选修课教材。

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。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

智能制造:理念、系统与建模方法/刘敏,严隽薇编著.—北京:清华大学出版社,2019  
ISBN 978-7-302-50624-9

I. ①智… II. ①刘… ②严… III. ①智能制造系统—研究 IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 154734 号

责任编辑:梁颖 常建丽

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

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:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印装者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:190mm×245mm 印 张:25

字 数:593千字

版 次:2019年4月第1版

印 次:2019年4月第1次印刷

定 价:79.00元

---

产品编号:077887-01

# 前言

本书旨在对原书《现代集成制造系统概论：理念、方法、技术、设计与实施》(2004年出版)进行修订、更新、补充,结合近年来全球有关智能制造理念的科研实践,同时更名为“智能制造：理念、系统与建模方法”。原书用于研究生课程“现代集成制造系统概论”。该课程是20世纪90年代中期开始为系统工程专业开设的,其宗旨是使研究生掌握计算机集成制造系统和现代集成制造系统的理论、方法、技术,具有设计与实施制造系统的能力。原书自2004年出版后作为研究生课程“现代集成制造系统概论”的教材一直使用至今。

随着信息、机械、自动化、系统工程和管理等学科的发展,特别是以移动互联网、大数据、人工智能、物联网、云计算等为代表的新一代信息技术推进了智能制造(Smart Manufacturing)技术的快速发展,结合课题组获得的丰硕科研成果,我们感到必须加深与拓宽课程的内容,特别是需要编写能反映新一代信息技术环境下智能制造技术沿革、新内涵以及相关成果的教学参考书。因此,对原书内容进行了调整,增加了“新一代信息技术的发展及其对制造业的影响”“制造模式的变革”“制造系统的发展及智能制造的概念”“智能制造的技术构成及新一代信息技术支撑的智能工厂体系结构”“智能制造系统的组成”“面向智能制造的参考体系结构”等相关内容。本书对原课程目标进行了改革和更新,使研究生能够在及时获取新一代信息技术环境下智能制造领域中的最新理念、系统、方法与技术的基础上,掌握从事制造系统相关工程设计与实施需要的基本能力。

本书以智能制造理念为起点,讲述新一代信息技术对传统制造业企业的渗透、支持和冲击,给制造业带来的挑战和机遇,以及智能制造技术及系统的发展与沿革,并且系统介绍了智能制造的理念、技术、系统及建模方法等内容。在编写过程中,我们以国内外最新的研究成果和实践经验充实本书的内容;以系统论、方法论为指导,提升本书的学术水平,强化课程的科学性和系统性。我们将多年来科研中遇到的问题、获得的成果加以总结、系统化,并与国家的智能制造战略指导思想融合,较全面、系统地阐述了“智能制造理念、系统与建模方法”。本书可使读者直接面对国民经济建设主战场,在实施“中国制造2025”“新一代人工智能”以及“信息化和工业化深度融合”的重大战略中发挥作用。相信本书的出版具有很好的学术价值。

本书共7章。第1章对智能互联时代的制造业、制造模式的变革、制造系统的发展

及制造系统的建模方法论进行综述,并为本书内容的展开进行铺垫;第2章分别从德国“工业4.0”的智能制造技术、美国工业互联网的智能制造技术和“中国制造2025”的智能制造等角度介绍智能制造模式,并探讨包括智能产品、智能制造过程、智能管理和服务、智能制造模式、智能制造基础关键技术等内容的智能制造技术体系、面向网络协同的智能工厂架构和智能企业协作框架;第3章介绍智能制造系统的基本组成,包括智能研发与设计系统、智能生产系统、智能管理与服务系统以及面向流程工业的制造系统;第4章介绍面向制造系统集成的支撑平台;第5章介绍制造系统的建模方法体系,包括建模方法论、多种系统参考体系结构、建模方法和建模工具的应用等内容;第6章讨论制造系统的总体设计技术;第7章介绍制造系统的基础关键技术。

本书既注重系统性和科学性,又注重实用性;既有综合性,又有专门深入的论述。其主要特色是:系统介绍新一代信息技术环境对制造业的影响、智能制造模式的产生和发展,以及当前流行的智能制造观,如“工业4.0”“工业互联网”和“中国制造2025”等;详细介绍智能制造技术体系及其系统构成,包括智能研发与设计系统、智能生产系统、智能管理与服务系统、产品智能服务系统等内容;系统介绍智能制造系统的建模方法体系,如建模方法论、参考体系结构和建模方法工具等;注重智能制造系统强调的关键技术,如制造系统的基础理论和支持技术、信息技术、计算机辅助技术、集成平台技术、制造过程控制技术,以及制造技术的新发展等,较全面地阐述实际系统开发中已采用或正在兴起的技术。本书涉及面广、内容丰富,努力反映出国家智能制造和新一代人工智能的战略部署及实施情况。

本书受到国家自然科学基金项目“互联网与大数据环境下面向高端装备制造的智能工厂运营优化(No.71690234)”和“面向MRO(维护、维修、运行)网络环境的维护服务协同优化与调度研究(No.61573257)”的资助。本书的编写经过多轮研究生教学实践的检验,效果较好。全书由刘敏和严隽薇策划、编写并统稿,特别感谢戴毅茹和凌卫青在本书前一版中做了大量工作,以及马玉敏提出宝贵的修改建议。本书得到同济大学电子与信息工程学院系统工程专业博士生章锋、李玲、徐高威等同学的协助,他们为本书多个章节的素材编写工作付出了辛勤劳动,谨在此对他们表示衷心的感谢。

本书涉及的范围比较广,讨论的问题比较新,也比较复杂,书中难免有不足之处,欢迎广大读者批评指正。

作者

2018年5月

# 目录

<b>第 1 章 智能互联时代的制造业</b>	<b>1</b>
1.1 制造业发展史	1
1.1.1 蒸汽动力时代	2
1.1.2 电力时代	2
1.1.3 信息经济时代	5
1.1.4 智能互联时代	11
1.2 信息技术对制造业的影响	15
1.2.1 信息技术及其社会作用	15
1.2.2 信息技术对制造业的挑战	18
1.3 制造模式的变革	22
1.3.1 制造模式模型	22
1.3.2 制造模式的发展阶段	25
1.3.3 各工业强国制造模式的变革过程	31
1.3.4 中国智能制造的部分内容	36
1.4 制造系统的发展	40
1.4.1 计算机集成制造系统的基本概念	40
1.4.2 现代集成制造系统的基本概念	43
1.4.3 智能制造系统的基本概念	48
1.5 制造系统的建模方法论	51
1.5.1 企业建模理论与方法	51
1.5.2 工程项目开发生命周期	54
1.5.3 系统的实施方法	55
参考文献	55
<b>第 2 章 智能制造的技术体系</b>	<b>57</b>
2.1 “工业 4.0”的智能制造技术	58
2.1.1 智能工厂的概念	58

2.1.2	“工业 4.0”的核心特征	65
2.1.3	“工业 4.0”的基本特征	68
2.2	工业互联网的智能制造技术	68
2.2.1	物联网	69
2.2.2	智能设备	69
2.2.3	智能数据	70
2.2.4	智能决策	70
2.3	“中国制造 2025”的智能制造技术	70
2.4	智能制造的技术体系	71
2.4.1	智能制造技术的构成及体系结构	71
2.4.2	新一代信息技术支撑的智能工厂体系结构	79
2.4.3	面向网络协同的智能企业协作框架	82
	参考文献	83
<b>第 3 章</b>	<b>智能制造系统的组成</b>	<b>85</b>
3.1	制造企业的功能和生产组织方式	85
3.1.1	传统制造企业的生产组织方式	86
3.1.2	现代制造企业的生产组织方式	87
3.2	智能研发与设计系统	88
3.2.1	研发与工艺设计系统概述	88
3.2.2	产品创新设计与研发管理模式	89
3.2.3	产品研发与工艺设计系统	95
3.2.4	基于产品定义模型的智能研发和设计方法	100
3.3	智能生产系统	103
3.3.1	智能生产系统的组成	103
3.3.2	面向智能生产过程的几个概念	110
3.4	智能管理与服务系统	111
3.4.1	智能管理与服务技术体系	111
3.4.2	智能运营管理与服务系统	113
3.4.3	智能物流与供应链系统	120
3.4.4	产品智能服务系统	124
3.5	面向流程工业的智能制造系统	125
3.5.1	连续型制造业的特点	125
3.5.2	流程工业的制造系统	128
	参考文献	136
<b>第 4 章</b>	<b>面向制造系统集成的支撑平台系统</b>	<b>137</b>
4.1	企业整体解决方案的集成平台	137

4.2	网络化制造服务平台	141
4.3	集成化企业建模与诊断系统	143
	参考文献	148
<b>第5章</b>	<b>制造系统的建模方法体系</b>	<b>149</b>
5.1	信息系统的建模方法论	149
5.2	制造系统的参考体系结构	150
5.2.1	面向集成制造的参考体系结构	150
5.2.2	面向智能制造的参考体系结构	186
5.2.3	“中国制造 2025”的智能制造参考架构	197
5.2.4	虚实结合的智能制造参考架构	197
5.3	制造系统的建模方法及工具	199
5.3.1	IDEF 系列方法	199
5.3.2	GRAI 建模方法	212
5.3.3	ARIS 控制视图的过程链方法	218
5.3.4	面向对象的 I <sub>2</sub> DEF 方法	226
5.3.5	采用 UML 类图语言的 VEMS 建模方法	238
5.4	面向企业整体解决方案的建模工具应用	247
5.4.1	引言	247
5.4.2	企业诊断阶段	250
5.4.3	需求分析阶段	252
5.4.4	系统设计阶段	254
5.4.5	实施与运行维护阶段	256
5.4.6	面向企业整体解决方案的建模工具	258
	参考文献	274
<b>第6章</b>	<b>制造系统的总体设计技术</b>	<b>275</b>
6.1	系统的需求分析	275
6.1.1	企业现状分析	275
6.1.2	企业面临的问题及对策分析	279
6.1.3	系统的需求与目标	282
6.2	系统总体方案的制定与描述	284
6.2.1	制定总体方案的指导思想	285
6.2.2	系统总体设计的内容	286
6.3	分系统的总体设计	290
6.4	设计标准与规范	291
6.4.1	国际标准	291
6.4.2	ISO/TC184	292



6.4.3	国家标准	296
	参考文献	299
<b>第7章</b>	<b>制造系统的基础关键技术</b>	<b>300</b>
7.1	制造系统的基础理论和支持技术	300
7.1.1	离散事件动态系统理论	300
7.1.2	系统集成技术与企业优化技术	304
7.1.3	系统仿真技术	307
7.1.4	传统的智能技术与方法	309
7.1.5	机器学习方法	315
7.1.6	新一代人工智能技术	326
7.2	制造系统中的信息技术	327
7.2.1	产品数据管理技术	327
7.2.2	制造网络技术	333
7.2.3	产品数据交换技术	338
7.2.4	产品全生命周期管理技术	343
7.2.5	智能传感技术	346
7.2.6	信息物理系统技术	349
7.3	计算机辅助技术	349
7.3.1	计算机辅助设计	349
7.3.2	计算机辅助工艺规划	353
7.3.3	计算机辅助制造	357
7.3.4	计算机辅助质量管理	360
7.4	制造系统的集成平台技术	366
7.4.1	软构件及其标准接口	366
7.4.2	制造系统应用集成平台	371
7.5	制造过程控制技术	375
7.5.1	数字控制技术	375
7.5.2	柔性制造技术	377
7.5.3	传统的智能制造技术	380
7.6	制造技术的新发展	383
	参考文献	390

# 第 1 章

## 智能互联时代的制造业

制造业是人类创造生存和发展所需人造物的活动的总称。它奠定了人类物质文明的基础,是国民经济的支柱产业。社会由低级向高级的发展很大程度上取决于人类造物活动的水平。目前,人类走进了智能互联时代,伴随社会发展的制造业是如何演进的?又会发展成何种新的模式、新的制造系统?从制造业的发展史中可以了解,并可能得到有益的启示。

### 1.1 制造业发展史

从原始时代开始,人们就使用工具和制造工具。从石器时代到青铜器、铁器时代这段时期,生产力水平低下,主要是人力、畜力、局部利用水力和风力以及简单的工具;制造技术主要依靠手工技艺;生产方式采用的是手工,或半手工、半机械化的手工业作坊式生产方式。

随着手工业的兴起,在 13 世纪末到 16 世纪的 200 多年中,商业、交通、航海、造船和建筑业均开始得到发展。特别是从 17 世纪后期,相继有:英国科学家牛顿发明的力学三大定律成为后来机械学的力学理论基础;法国数学家笛卡儿创立了解析几何学;德国数学家莱布尼茨确定了微积分学;18 世纪中叶,美国富兰克林发现了电,阐述了正负电荷现象,为电磁、电力研究与应用提供了前提条件。这一系列自然科学的进步促进了制造业的发展,孕育着机器生产时代的到来。简单来说,从世界经济发展史的角度看,世界生产方式经历了四次重大的变革(表 1.1),在每次变革过程中,都会有一些国家会奇迹般地崛起。

表 1.1 世界历史性生产方式的变革和国家的崛起

变革	时间	技术变革	生产方式变革	崛起国家	崛起的原因
第一次工业革命:蒸汽动力	18 世纪 70 年代—19 世纪 50 年代	机器动力代替人力	工厂的出现代替手工工厂	英国	利用生产技术、方式的变革和进步,即劳动分工与标准化

续表

变革	时间	技术变革	生产方式变革	崛起国家	崛起的原因
第二次工业革命：电力	19世纪80年代—20世纪20年代	电力、化学、石油、新动力、新材料	企业集团、托拉斯的出现，大规模流水生产	美国、德国	利用新兴生产方式及促进新技术，即福特的大批量生产方式
第三次工业革命：信息经济	20世纪40年代末—20世纪末	信息技术及网络、核能、生物技术、新材料	中小企业的兴起、大企业的联盟	日本、德国、美国	利用高科技产业的发展与技术的进步，包括日本的精益制造、德国的柔性制造、美国的敏捷制造等生产方式
第四次工业革命：智能互联	2012年—	移动互联网、大数据、人工智能、云计算、物联网等新一代信息技术	智能制造、服务型制造、客户化定制	美国、德国、中国	利用创新能力，即技术创新、商业模式创新、生产组织方式创新，以及制度体系创新等，如“工业互联网”“工业4.0”与“中国制造2025”

### 1.1.1 蒸汽动力时代

1776年，英国机械师瓦特发明的第一批新型蒸汽机制造成功并应用于实际生产。依靠蒸汽动力，纺织业、机器制造业取得了革命性的变化，汽车、火车、汽船等交通工具相继得到生产，煤炭、石油和钢铁等行业也得到了相应的发展。蒸汽机的发明，将人类社会带入了蒸汽动力时代，蒸汽机成了大工业时代普遍应用的发动机，引发了第一次工业革命。第一次工业革命标志着由机器占统治地位的近代工业化大生产时期的开始。19世纪初，交通工具也相继出现了许多创造发明，从1807年美国富尔敦制造出第一艘汽船，到1814年英国工程师史蒂芬发明蒸汽机车，到1830年世界上第一条客运铁路投入运行。交通工具的发展促进了机械制造业的发展。工业革命也为资本主义发展和机器大生产创造了广阔的前景。

### 1.1.2 电力时代

1820年，丹麦奥斯特发现了电磁效应，法国安培提出了电流相互作用定律；1821年，英国法拉第制作出了永磁电动机模型；1831年，法拉第总结出电磁感应定律，发明了发电机；1864年，英国麦克斯韦建立了电磁场理论。上述这些发明、发现为后来的电信、电器以及电动机、发电机的创造和应用奠定了理论和电力工业基础。此后，电话、电报、电灯相继问世。电力机器由于能耗仅2%，且清洁、操作方便、占用空间小、性能优良、价格低廉，因此与蒸汽机相比，具有明显的竞争优势。1875—1894年，法国试验应用电力，直接采用电动机驱动机床，推动了机床制造业的发展，结束了机床动力由人力、水力到蒸汽动力的时代。以电作为动力源改变了机器的结构，开拓了机电制造技术的新局面，人类从此开始进入电力时代。

19世纪下半叶,另一重大发明就是内燃机。1860年,法国李诺瓦以瓦斯为燃料发明了内燃机;1887年,德国发明家卡尔·本茨创造了高速汽油发动机;1893年,德国狄赛尔以重油为燃料,依据压缩燃料点火的引擎原理,研制成功了大马力柴油机,用于运输车辆动力;1896年,美国亨利·福特制造出轻巧、有力、安全、可靠的四轮汽车。麻省理工学院的J.沃麦克等在《改变世界的机器》一书中关于汽车制造业的这段发展史对认识信息时代制造业的诸多问题,应该能有所启示。

1894年,英国议会的一位议员要买一辆轿车,当时英国没有汽车制造厂,更没有任何销售商,因此这位议员只能到巴黎的P&L公司订制。P&L公司是当时世界有名的处于领先地位的轿车公司,主要产品是每年制造几百辆汽车。当时的制造方式是传统的单件生产:由具有高度技巧的工匠精心地制造汽车,这些工匠通晓机械设计的原理,熟悉他们要用的各种材料的性能。他们之中不少人就是小业主,在P&L内独立承包,甚至可以作为一个独立的机械制造作坊与P&L签订合同,承制某些零件和总成。

当时P&L的两位创始人与几个最接近的伙伴负责与顾客讨论,确定汽车的详细规格,订购主要的零件并最后装配成品。而绝大部分的工作,包括总体设计和工程设计,都是由分散在巴黎各处的各个作坊完成的。这种情况下,P&L公司从来就没有制造过两辆完全相同的汽车。因为即使按同样的蓝图造出来的汽车也不相同。原因在于P&L所有的承包商都不采用标准的计量器具。因此,当各种零件运到P&L工厂总装时,这些零件只是近似于所要求的规格。熟练的装配工先取两个零件,用锉将它们修整,使之配合良好。然后再挑第三个零件,使之与前面两个零件配合良好。这样一直干下去,直至整台汽车装出来,这种逐个的配合,产生了累计误差。因此,当装配工装最后一个零件时,这辆汽车和按同样蓝图制造的上一辆汽车在尺寸上的差别已经相当明显了。

这是典型的单件生产,其特点是:

(1) 劳动力在设计、机械加工和装配等方面都有很高的技艺,许多人从学徒开始,最后达到掌握单件生产的全面技艺,希望成为老板,经营自己的机械作坊,向装配汽车公司承包。

(2) 组织相当分散,一个企业主与所有各方(顾客、雇员及协作者)直接联系。

(3) 采用通用机床对金属和木材进行钻、磨等加工。

(4) 产量极低,成本高。

至1905年,欧洲已有几百家这类公司采用单件生产方式小量地制作汽车,这些独立承担大部分生产任务的小工厂没有能力开发新技术。1908年,福特汽车公司对生产技术做了一系列重大改进,开创了汽车的大量生产方式,汽车逐步进入欧美家庭,成为改造世界的机器,从而引发了制造业的又一次空前大发展(第二次工业革命)。

福特公司观察到,采用单件生产方式时,每个装配工的平均工作周期,即重复同样作业之前所经历的时间为8小时34分,这时每个装配工要完成同一辆汽车上的大部分装配工作。到1908年,福特公司实现了所有的零件完全可以互换,每个装配工只承担一项单一的工作,在装配大厅中来回走动,逐个对每辆汽车进行组装。到1913年,在移动的

装配线推出之前，福特公司的一个装配工的平均工作周期已从 8 小时 34 分缩短到 2.3 分。这时生产效率大为提高，因为工人对单一工作容易熟悉，工作起来速度会更快。另外，所有零件的修整时间都省掉了。福特公司又看到工人从一个装配工位到另一个工位，要花时间来回走动。于是，1913 年，福特公司推出了移动的总装线，工人站在一个地方装配某一零件。这样，工作周期又从 2.3 分缩短到 1.9 分，生产效率又大幅度提高。

福特的“大量生产方式”新技术克服了单件生产方式所固有的问题。大量生产方式的关键不是移动的组装线，而是零件的互换性，即所有零件全都可以互换，始终如一，而且连接非常方便。这种革新使组装线成为可能。这种大量生产方式减少了总装一辆汽车的工时。生产的汽车越多，每辆汽车成本降低越多。当福特的某种车型生产 200 万辆时，可使顾客的实际开支降低  $2/3$ 。为了吸引中等消费者这一市场目标，福特在设计汽车时，为汽车的使用和维护提供了前所未有的方便，普通人用一般的工具便可以修理一般的故障。这些优势把福特公司推到了世界汽车业的首位。这种大量生产方式推动汽车工业的进步达半个世纪以上。

上述故事表明，一种新的生产模式（大量生产方式）及其技术支持（零件的互换性，即公差与配合，是机械学科的一个基础技术），给制造业带来一个重大变革。但是，这场变革的深远意义不止于此，还表现在：

### 1. 劳动力的分工

不仅零件可以互换，工人也容易调换。临时招募的劳工互相不认识，甚至讲话也听不懂，但培训几小时甚至几分钟，他们便可以上生产线，生产出同样复杂的产品。同时，专业的分工也产生了，如工艺工程师、装备工程师、清洁工、修理工、领班等。只有检修工保留了过去装配工的许多技艺。工艺工程师中还要分工，如负责总装的工艺师和各零件作业的工艺师、电气工艺师等。随着时间的流逝，工程专业也越分越细，同专业的工程师可谈的话题越来越多，相反，不同专业的工程师之间的共同语言越来越少，这些功能障碍后来又会影响整个生产。

### 2. 组织结构

追求纵向一体化的生产组织模式，从原材料、制造到与汽车相关的所有功能都纳入到福特公司（福特公司可称得上是开了“大而全”的先河）。福特要把所有的工作都归并到厂内自制，是由于他对每个零件的尺寸偏差和交货期的严格要求。组织结构上用严格计划下的严格管理来代替市场经济，总部高级管理人员对公司内部的各个业务分部予以协调。这种纵向一体化的组织机构产生官僚体制特别严重，并且一经产生，几乎无法克服。

### 3. 工具的进步

为了代替技艺高超的工匠，福特用机床来完成同样的工作，这样减少了机床的调试时间。采用专门设计的工夹具可降低对工人的操作技艺要求。此外，按工艺的顺序安排下一道工序，安排专用的机床进行加工，又进一步提高了效率。刚性生产线因此便形

成了。

由于上述影响,福特汽车厂的汽车大量生产,普及家庭,反过来又促进了整个工业的发展。可以这样说,20世纪50年代以前的生产主线是追求大量生产方式,带动了整个工业的发展和社会的进步,而作为技术,机械学科起了关键作用。

18世纪末到20世纪初这100多年中,人类在制造领域进行了大量探索性实验、研究,解决了机械、热力、电磁、化学能量的转换问题,促进了从切削原理、金属材料、机械设计、技术测量到机床制造等一系列制造技术的迅速发展。金属切削理论方面的著名科学家,美国的F. W. 泰勒于1879年发表了《金属切削法》,并在研究切削速度对刀具寿命的影响的基础上,于1907年提出了泰勒公式。泰勒公式为提高切削效率和合理安排工人工作量以及建立科学的管理制度提供了理论依据。1798年,美国埃利·惠特尼提出了零件的标准化与互换性,并制造了单功能专用机床,采用量规生产单一零件,实现了互换性生产方式,使大量生产方式成为可能,完成了15000支枪的生产合同。19世纪末成套量块(块规)问世后,组合量块精度能达到 $2.54\mu\text{m}$ 。这种量块首先用于军事工业,制造出了符合口径的子弹。在19世纪—20世纪之交,机床制造业发展速度极快,能够制造出满足不同工艺,不同精度要求的普通、专用、自动、半自动等各类机床。

1894年以后,电力驱动的机床得到普遍应用,机床的规格与品种不断增多,加工划分细化,工艺趋向完善。1895年,美国制成多轴自动车床;1911年,格林利公司制造出组合机床;1945年,奥地利海德公司研制成电气仿形车床;1897年,德国制成万能滚齿机;1899年,法国制成螺旋伞齿轮机;1902年,美国研制出高效曲轴磨床,1905年制成行星式内圆磨床,1915年制成无心磨床;1917年,瑞士西普公司制成螺纹磨床;1917年,美国普拉特·惠特尼公司生产出坐标镗床;1934年,瑞士西普公司生产出带光学测量系统的液压坐标镗床。各种类型机床的创造、发明和发展使制造工艺日趋精确化,为后来的机械化流水线大生产提供了技术基础,机床行业从此成为倍受重视的基础产业。

这一时期,在组织管理理论方面也出现了颇有影响的新理论。其代表是美国F. W. 泰勒的科学管理理论——强化作业管理和制定完备的规章制度;美国阿尔弗雷德·斯隆的部门管理制度——科层制的金字塔式组织管理模式;法国法约尔的组织管理理论——注重企业内部各部门设计和部门之间关系的协调。

这些制造技术和组织管理理论的发展,为大量生产模式提供了技术基础,在汽车工业的带动下,机械工业、军事工业、化学工业和食品加工业等也相继进入大量生产时代,并为“二战”的军工生产准备了物质基础、技术基础和管理经验。通信和交通业的发展为企业的购销提供了强有力的工具,使市场竞争跨越地区。激烈的竞争促使企业不断采用新技术,改革企业的生产、经营和管理方式。

### 1.1.3 信息经济时代

信息技术的发展历史可以上溯到人类起源的时候,但是今天一般所说的信息技术的发展阶段主要还是从计算机出现以后算起。从那时候起,大致可以分为数据处理时代、

个人计算机(Personal Computer, PC)时代、互联网(Internet)时代、移动互联网时代和智能互联时代(Era of Connected Intelligence)5个阶段,每个阶段分为启动、扩散、控制和集成等发展过程(图 1.1)。

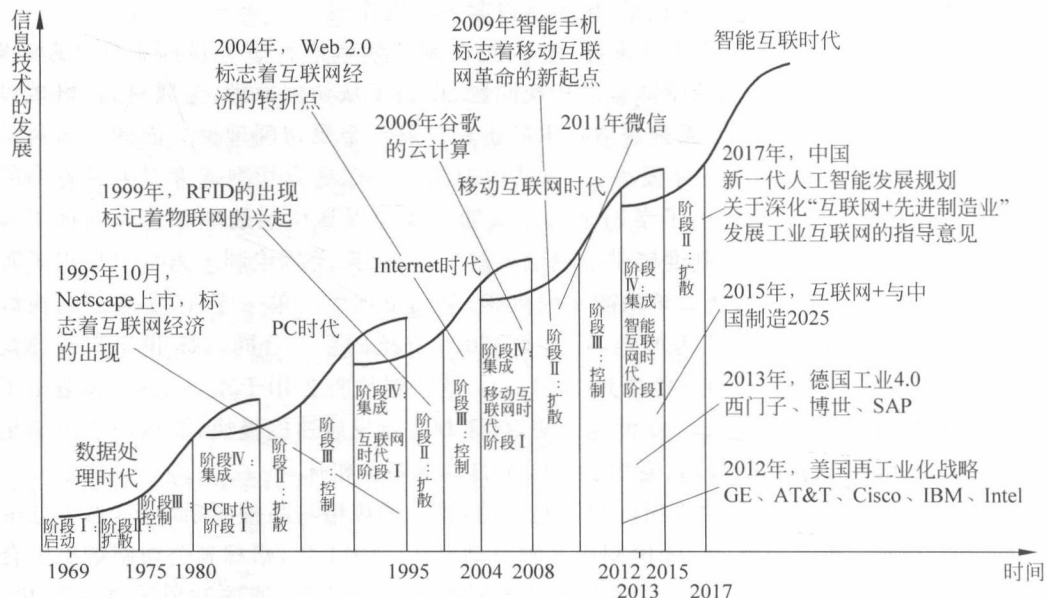


图 1.1 信息技术的发展历程

第一阶段开始于第二次世界大战期间,军事工业发展的需要促使电子技术的研究与开发异常活跃。美国陆军支持大学研制电子计算机,于1945年诞生了第一台电子计算机;贝尔实验室于1958年成功研制出集成电路;1971年出现了单片微处理机,之后在美国诞生了超大规模集成电路,电子计算机进入到超大规模集成电路为标志的第四代;1969年,美国莫迪康公司(Modicom)诞生了第一台可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC),PLC把智能融入机器和过程自动化,广泛应用于工业、基础设施和建筑业,标志着数据处理时代的到来。

第二阶段技术上的特征是源于1981年IBM的第一台桌上型个人计算机(PC)的出现与发展,从而使信息处理技术发生了革命性变化。但是,处理的范围还局限于单机,而且所能处理的信息也很简单,主要是文字和二维图形。

第三阶段技术上的特征是网络和通信技术使得信息跨地域的迅速流通和共享得以实现(1995年10月Netscape上市,标志着互联网时代的出现),在该阶段,信息主要通过门户网站、搜索引擎和社区进行单向传播。随着各国信息高速公路的建设,迎来了信息化进程中的网络时代。这个阶段的另一特征是信息处理等能力大大提高,能处理包括图形、图像、声音等多媒体信息。

第四阶段开始于2004年,以Web 2.0为标记;2009年,智能手机的出现标志着移动互联网进入快速发展阶段。在该阶段,信息连接方式以Wi-Fi、3G、4G为主,信息传播方

式主要通过社交网络平台、App、自媒体等实现双向互动。

第五阶段开始于2012年美国通用公司提出的工业互联网概念,随着2012年美国再工业化战略、2013年德国“工业4.0”制造战略、“中国制造2025”战略的推出,信息技术的发展进入智能互联时代。该阶段的连接方式主要有移动Wi-Fi和5G等,并以物联网、大数据、云计算、机器人、智能硬件和人工智能为手段,以智能设备为中心出发点实现整个网络世界之间的全方位智能互联、互动。随着智能互联时代的到来,人们能够很容易地通过各种途径得到大量各类信息,但其中有用信息的比例也随之减小了。如何有效地利用信息就成了亟待解决的问题。信息的智能化技术使得计算机真正能够成为人类智力的延伸。到那时,信息技术也就发展到它的成熟阶段。

信息技术发展的这些阶段并不是截然分开的,而是相互重叠的。信息技术发展的最初那些阶段不仅没有结束,而且依然在发展过程中。在第一阶段中出现的那些技术不仅曾经是第二、三阶段技术发展的基础,而且现在也是,将来还是。例如,要想使计算机具有处理多媒体信息的能力,首先要不断提高单台计算机的处理能力,后期信息的智能应用更是离不开前几个阶段发展起来的基础技术。

随着信息技术的高速发展,计算机在信息采集、存取、处理与通信等方面的功能应用于制造领域,极大地推动了制造技术的发展。美国麻省理工学院在空军资助下,于1952年发明了世界上第一台数控(Numerical Controlled, NC)机床。该项发明震惊了当时的科技界、学术界和舆论界,被视为是机械发展史上崭新的一页,是第三次工业革命,意味着制造业开始进入信息时代。在其后的近40年时间里,以计算机技术、通信技术等为代表的信息技术广泛应用于制造业的各个领域,对制造业的渗透、支持与服务引发并加速了制造业全新的变革进程,这一因信息技术引领的工业革命也称为新技术革命。这些新技术的代表有计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing, CAM)、管理信息系统(Management Information System, MIS)、柔性制造(Flexible Manufacturing, FM)、计算机集成制造(Computer Integrated Manufacturing, CIM)、精良生产(Lean Production, LP)、并行工程(Concurrent Engineering, CE)、敏捷制造(Agile Manufacturing, AM)、智能制造(Intelligent Manufacturing, IM)等。

在新技术革命浪潮的冲击下,传统资本密集型、设备密集型、技术密集型生产与管理模式受到挑战,信息密集型和知识密集型生产与管理模式将取而代之。制造技术发生了质的飞跃,生产力的含义已转化为信息、自动化设备和人的智力劳动。以下是标志制造业进入信息时代、有代表性的新技术。

### 1. 数控机床

1952年,美国麻省理工学院研制成功世界上第一台三坐标数控铣床。1962年,高效率数控加工中心研制成功。1964年,采用半导体晶体管分立元件的第二代数控系统研制成功,使数控系统的体积大大减小、价格降低、可靠性提高,从而使工业界能够真正应用上数控机床和加工中心。1967年,采用集成电路的小型计算机数控(Computer



Numerical Control, CNC)系统研制成功,为多坐标联动曲面加工的前、后置处理提供了技术基础。1974年,使用微处理器数控系统装备的机床在工业界得到普遍应用,如日本有些企业数控机床占有率达70%,利用数控机床大大提高了生产率,并取得了良好的经济效益。实践证明,数控技术给生产带来的变革和产生的效益是一般的技术改造无法比拟的。

## 2. 计算机辅助制造技术

(1) 数控编程技术。1955年,麻省理工学院研制的自动编程工具(Automatically Programmed Tools, APT)解决了手工进行数控编程的难题,终于使数控机床走出实验室,投入实际生产、应用。

(2) 成组技术。50年代后期,成组技术(Group Technology, GT)形成专门学科。成组技术用于加工工艺,即将零件按某些工艺共性和结构共性归类分组,以便采用共同的工艺装备。成组技术还可以在工序相同的前提下,集中大批量加工,采用大批量生产的工艺和设备,从而取得很好的效益。计算机辅助制造中,为便于计算机存储数据和进行信息处理,需要建立零件分类编码系统。应用零件分类编码系统,通过成组工艺可以快速完成零件的工艺过程设计,也可以用于计算机辅助产品设计,提高设计效率和设计质量。

(3) 计算机辅助工艺过程设计。计算机辅助工艺过程设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)是借助计算机程序生成零件加工工艺过程文件,从而取代工艺师手工编制的烦琐、重复劳动,大幅度地提高工艺过程设计的效率、工艺规程的质量以及加快生产准备的进度。1976年,美国计算机辅助制造国际组织推出了CAPP系统,到80年代,其研究成果对提高机械制造的经济效益和实现工业生产自动化起了重要作用,受到世界各工业国家的广泛重视。

## 3. 计算机辅助设计技术

(1) 计算机辅助绘图。工程设计人员应用CAD技术可以从繁重的绘制工程图的工作中解放出来,将主要精力用于方案构思、创造发明、检查修改设计方案,以便能快速得到满意的设计结果。特别是按零件成组分类原则建立的参数图形库,可以直接调用参数图形,代入参数值即可得到设计结果。

(2) 实体造型。对于构形复杂、有创造性的以及外形有特殊要求的产品设计,传统做法费时、费事、成本过高。运用计算机实体造型技术可以清晰地显示出三维形体,再利用透视法彩色投影和高亮度显示,就能得到图像逼真的实体模型。实体模型一般是采用积木式的几何造型法,由基本几何形体按并集、割集和交集逻辑运算组合而成,或是用边界文件数据结构对物体进行描述,得到物体最终的面、边及顶点结构。实体造型能对设计质量进行快速工程分析,对运动装置进行动态仿真的结构性能分析,对零件的参数设计可以在二维和三维图形间自动转换,通过模型系统可以生成零件数控刀具轨迹,检验程序和数控加工程序。

(3) 有限元分析。对于复杂结构件的设计计算,利用CAD的有限元分析法能很好地