



国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

数字制造的 基本理论与关键技术

Fundamental Theories and Key
Technologies of Digital Manufacturing

周祖德 谭跃刚 著



武汉理工大学出版社

WUTP Wuhan University of Technology Press



国家出版基金资助项目

湖北省学术著作出版专项资金资助项目

数字制造科学与技术前沿研究丛书

数字制造的基本理论与关键技术

周祖德 谭跃刚 著

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

本书首先详细介绍了数字制造的形成背景及数字制造的定义和内涵,然后对数字制造的基本理论、先进技术、可靠性技术、制造信息管控等相关内容做了较全面的阐述,重点介绍了数字制造的几何计算原理与方法、数字制造信息学、制造系统可靠性、数字制造系统动力学模型及其分析、数字制造的网络数控系统和资源智能管控、数字制造系统的误差分析与数据处理等内容,并结合数字制造技术的发展,分析了数字制造的前沿问题,同时展望了数字制造的应用前景。

本书可供从事制造技术领域研究和开发的科研人员和工程技术人员参考,也可供高等院校相关专业的教师和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字制造的基本理论与关键技术/周祖德,谭跃刚著. —武汉:武汉理工大学出版社,2016.12
(数字制造科学与技术前沿研究丛书)

ISBN 978-7-5629-5406-4

I. ①数… II. ①周… ②谭… III. ①数字技术—应用—机械制造工艺 IV. ①TH16-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 272957 号

项目负责人:田 高 王兆国

责任编辑:王兆国

责任校对:梁雪姣

封面设计:兴和设计

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市洪山区珞狮路 122 号 邮编:430070)

<http://www.wutp.com.cn>

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉中远印务有限公司

开 本:787×1092 1/16

印 张:18

字 数:460 千字

版 次:2016 年 12 月第 1 版

印 次:2016 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1—1500 册

定 价:69.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87515778 87515848 87785758 87165708(传真)

• 版权所有,盗版必究 •

数字制造科学与技术前沿研究丛书

编审委员会

顾 问: 闻邦椿 徐滨士 熊有伦 赵淳生

高金吉 郭东明 雷源忠

主任委员: 周祖德 丁 汉

副主任委员: 黎 明 严新平 孔祥东 陈 新

王国彪 董仕节

执行副主任委员: 田 高

委 员(按姓氏笔画排列):

David He	Y. Norman Zhou	丁华锋	马 辉	王德石
毛宽民	冯 定	华 林	关治洪	刘 泉
刘 强	李仁发	李学军	肖汉斌	陈德军
张 霖	范大鹏	胡业发	郝建平	陶 飞
郭顺生	蒋国璋	韩清凯	谭跃刚	蔡敢为

秘 书: 王汉熙

总责任编辑: 王兆国

总 序

当前,中国制造 2025 和德国工业 4.0 以信息技术与制造技术深度融合为核心,以数字化、网络化、智能化为主线,将互联网+与先进制造业结合,正在兴起全球新一轮数字化制造的浪潮。发达国家特别是美、德、英、日等制造技术领先的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,最近大力倡导“再工业化、再制造化”的战略,明确提出智能机器人、人工智能、3D 打印、数字孪生是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这几大数字化制造技术的突破,打造数字化设计与制造的高地,巩固和提升制造业的主导权。近年来,随着我国制造业信息化的推广和深入,数字车间、数字企业和数字化服务等数字技术已成为企业技术进步的重要标志,同时也是提高企业核心竞争力的重要手段。由此可见,在知识经济时代的今天,随着第三次工业革命的深入开展,数字化制造作为新的制造技术和制造模式,同时作为第三次工业革命的一个重要标志性内容,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力,数字化制造的相关技术已逐步融入制造产品的全生命周期,成为制造业产品全生命周期中不可缺少的驱动因素。

数字制造科学与技术是以数字制造系统的基本理论和关键技术为主要研究内容,以信息科学和系统工程科学的方法论为主要研究方法,以制造系统的优化运行为主要研究目标的一门科学。它是一门新兴的交叉学科,是在数字科学与技术、网络信息技术及其他(如自动化技术、新材料科学、管理科学和系统科学等)与制造科学与技术不断融合、发展和广泛交叉应用的基础上诞生的,也是制造企业、制造系统和制造过程不断实现数字化的必然结果。其研究内容涉及产品需求、产品设计与仿真、产品生产过程优化、产品生产装备的运行控制、产品质量管理、产品销售与维护、产品全生命周期的信息化与服务化等各个环节的数字化分析、设计与规划、运行与管理,以及整个产品全生命周期所依托的运行环境数字化实现。数字化制造的研究已经从一种技术性研究演变成为包含基础理论和系统技术的系统科学研究。

作为一门新兴学科,其科学问题与关键技术包括:制造产品的数字化描述与创新设计,加工对象的物体形位空间和旋量空间的数字表示,几何计算和几何推理、加工过程多物理场的交互作用规律及其数字表示,几何约束、物理约束和产品性能约束的相容性及混合约束问题求解,制造系统中的模糊信息、不确定信息、不完整信息以及经验与技能的形式化和数字化表示,异构制造环境下的信息融合、信息集成和信息共享,制造装备与过程

的数字化智能控制、制造能力与制造全生命周期的服务优化等。本系列丛书试图从数字制造的基本理论和关键技术、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造机械动力学、数字制造可靠性基础、数字制造智能控制理论、数字制造误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控等多个视角构成数字制造科学的完整学科体系。在此基础上,根据数字化制造技术的特点,从不同的角度介绍数字化制造的广泛应用和学术成果,包括产品数字化协同设计、机械系统数字化建模与分析、机械装置数字监测与诊断、动力学建模与应用、基于数字样机的维修技术与方法、磁悬浮转子机电耦合动力学、汽车信息物理融合系统、动力学与振动的数值模拟、压电换能器设计原理、复杂多环耦合机构构型综合及应用、大数据时代的产品智能配置理论与方法等。

围绕上述内容,以丁汉院士为代表的一批我国制造领域的教授、专家为此系列丛书的初步形成,提供了他们宝贵的经验和知识,付出了他们辛勤的劳动成果,在此谨表示最衷心的感谢!

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》的出版得到了湖北省学术著作出版专项资金项目的资助。对于该丛书,经与闻邦椿、徐滨士、熊有伦、赵淳生、高金吉、郭东明和雷源忠等我国制造领域资深专家及编委会讨论,拟将其分为基础篇、技术篇和应用篇3个部分。上述专家和编委会成员对该系列丛书提出了许多宝贵意见,在此一并表示由衷的感谢!

数字制造科学与技术是一个内涵十分丰富、内容非常广泛的领域,而且还在不断地深化和发展之中,因此本丛书对数字制造科学的阐述只是一个初步的探索。可以预见,随着数字制造理论和方法的不断充实和发展,尤其是随着数字制造科学与技术制造企业的广泛推广和应用,本系列丛书的内容将会得到不断的充实和完善。

《数字制造科学与技术前沿研究丛书》编审委员会

前 言

本书从数字制造的形成背景、定义和内涵出发,提出了数字制造的理论体系,详细阐述了构成数字制造的基本理论与关键技术,具体包括:数字制造的形成背景、数字制造计算几何学、数字制造信息学、数字制造系统的机械动力学、数字制造系统的可靠性基础、数字制造的网络数控理论与技术、数字制造系统测量误差理论与数据处理、数字制造资源智能管控、数字制造的关键技术、数字制造的前沿与应用前景等内容。

全书共分 10 章,第 1 章重点介绍了制造科学与技术的进化路线、第三次工业革命与数字制造、各种制造模式与数字制造的区别等;第 2 章主要介绍了数字制造几何基础、数字制造计算模型、制造过程的复杂性求解以及制造数据的可计算性、可控性和可预测性等;第 3 章全面介绍了制造信息的合理表述、优化配置,制造信息的度量和物化,制造信息的自组织与合成,制造信息的数据挖掘以及制造信息的共享与安全;第 4 章包括数字制造机械系统中常见的动力学问题、数字制造机械系统的动力学原理与方法,数字制造机械系统动力学分析与设计及数字制造机械系统动力学数值仿真算法;第 5 章重点介绍了数字制造系统可靠性的概念、数字制造系统可靠性的数学基础、数字制造系统可靠性的置信度和置信区间以及数字制造系统可靠性分析方法等;第 6 章主要介绍了数字制造智能控制的定义、特点,数字制造智能控制的主要研究内容,数字制造递阶智能系统以及数字制造模糊控制理论等;第 7 章主要介绍了数字制造系统测量误差理论与数据处理,数字制造系统测量误差的基本性质与理论基础,数字制造系统误差的合成与分配,数字制造系统的测量不确定度及数字制造系统动态测试与数据处理基本理论和方法;第 8 章主要介绍了数字制造资源智能管控的概念、架构,数字制造资源智能管控模型,数字制造资源智能管控建模方法以及数字制造资源智能管控系统等;第 9 章重点介绍了数字化设计技术、数字化工艺技术、基于嵌入式的数字化控制技术、数字化加工与 3D 打印技术、数字化资源共享技术、数字化监测技术等;第 10 章主要介绍了云制造与云服务、生物制造与生物机电一体化、数字制造的新材料科学和技术、数字制造的极端制造以及数字制造的可持续制造等。周祖德、陈涛、姜平、宋春生、谭跃刚、龙毅宏、金新娟、魏勤、郭顺生、刘明尧、魏莉、徐文君等分别编写了本书的相关章节,周祖德、谭跃刚负责相关章节的修改并负责全书的统稿。

本书适合于机电、自动化和计算机通信专业的博士、硕士研究生使用,也可作为计算机控制与应用、机电一体化、数字制造、智能制造、先进制造技术与系统等领域的研究人员和专业技术人员的参考书。

编 者

2015 年 9 月

目 录

1	数字制造的形成背景	(1)
1.1	制造科学与技术的进化路线	(2)
1.2	第三次工业革命与数字制造	(6)
1.3	各种制造模式与数字制造的区别	(9)
	参考文献	(15)
2	数字制造计算几何学.....	(16)
2.1	数字制造几何基础.....	(16)
2.2	数字制造计算模型.....	(37)
2.3	制造过程的复杂性求解.....	(43)
2.4	制造数据的可计算性、可控性和可预测性	(63)
	参考文献	(68)
3	数字制造信息学.....	(69)
3.1	制造信息的合理表述、优化配置	(69)
3.2	制造信息的度量和物化.....	(73)
3.3	制造信息的自组织与合成.....	(76)
3.4	制造信息的数据挖掘.....	(78)
3.5	数字制造信息共享与安全.....	(84)
	参考文献	(87)
4	数字制造系统的机械动力学.....	(90)
4.1	数字制造机械系统中常见的动力学问题.....	(90)
4.2	数字制造机械系统的动力学原理与方法.....	(91)
4.3	数字制造机械系统的动力学分析与设计.....	(93)
4.4	数字制造机械系统动力学数值仿真算法	(114)
	参考文献.....	(117)
5	数字制造系统的可靠性基础	(118)
5.1	数字制造系统的可靠性	(118)
5.2	数字制造系统的可靠性描述	(120)
5.3	数字制造系统可靠性的概率分布	(124)
5.4	数字制造系统的可靠性分析	(128)
	参考文献.....	(130)

6	数字制造的网络数控理论与技术	(132)
6.1	数控技术发展历程回顾	(132)
6.2	基于嵌入式的网络数控系统	(136)
6.3	面向服务的网络数控系统	(142)
6.4	云数控	(166)
	参考文献	(168)
7	数字制造系统测量误差理论与数据处理	(171)
7.1	数字制造系统测量误差的理论基础	(171)
7.2	数字制造系统测量误差的基本处理方法	(174)
7.3	数字制造系统的测量不确定度	(178)
7.4	数字制造系统动态测量误差与数据处理的基本理论和方法	(185)
	参考文献	(197)
8	数字制造资源智能管控	(199)
8.1	数字制造资源智能管控的概念、架构	(199)
8.2	数字制造资源智能管控模型	(203)
8.3	数字制造资源智能管控建模方法	(206)
8.4	数字制造资源智能管控系统	(213)
	参考文献	(222)
9	数字制造的关键技术	(223)
9.1	数字化设计技术	(223)
9.2	数字化工艺技术	(225)
9.3	基于嵌入式的数字化控制技术	(228)
9.4	数字化加工与 3D 打印技术	(234)
9.5	数字化资源共享技术	(239)
9.6	数字化监测技术	(247)
	参考文献	(251)
10	数字制造的前沿与应用前景	(253)
10.1	3D 打印——世界制造业革命	(253)
10.2	面向服务的数字制造	(255)
10.3	生物制造与生物机电一体化	(263)
10.4	数字制造的新材料科学和技术	(264)
10.5	数字制造的极端制造	(265)
10.6	数字制造的可持续制造	(267)
	参考文献	(272)

1

数字制造的形成背景

20 世纪中叶以来,随着微电子、自动化、计算机、通信、网络、信息等科学技术的迅猛发展,全球掀起了以信息技术为核心的新浪潮。以“网络化”、“信息化”为标志的 21 世纪,极大地改变了人类获得、处理、交流及利用信息和知识的方式,使人们的生活方式、生产方式及社会结构发生了史无前例的变化。在此基础上,各个行业的新概念、新理论、新技术、新思想和新方法层出不穷。冠以数字的各种新理念不断出现,如数字图书馆、数字流域、数字家居、数字企业、数字经济,以及作为描述整个地球上各类信息的时间序列与空间分布的共同框架的数字地球等概念和研究工作不断被推出,并已开始进入我们的生活。随着市场需求的快速变化和全球性的经济竞争以及高新技术的迅猛发展,以信息技术为核心的新浪潮也进一步推动了制造业的深刻革命,极大地拓展了制造活动的深度和广度,促进了制造业朝着自动化、智能化、集成化、网络化和全球化的方向发展。从而导致了制造信息的表征、存储、处理、传递和加工的深刻变化,使制造业由传统的能量驱动型逐步转向为信息驱动型。数字化已逐渐成为制造业中产品全生命周期不可缺少的驱动因素,数字化制造也就成为一种用以适应日益复杂的产品结构、日趋个性化和多样化的消费需求及日益形成的庞大制造网络的一种全新制造模式。

当前,全球正在兴起新一轮数字化制造浪潮。发达国家特别是美、英、德、日等先进制造技术发达的国家,面对近年来制造业竞争力的下降,大力倡导“再工业化、再制造化”战略,明确提出智能机器人技术、人工智能技术、3D 打印技术是实现数字化制造的关键技术,并希望通过这三大数字化制造技术的突破,巩固和提升制造业的主导权。以美国为例,2014 年 2 月 25 日,总统奥巴马宣布了构建制造业中心的最新进展:首先是 2013 年 5 月承诺的 3 个国家制造业中心,继新一代电子电力制造业中心在 1 月份成立之后,国防部下属的数码制造与设计创新中心和轻量级现代金属制造业中心正式成立;除此之外,2014 年 4 个制造业中心构建计划中的首个——先进复合材料制造业中心也于今天成立。至此,2013 年 3 个国家制造业中心筹建计划已经完成,2014 年的 4 个制造业中心也拉开帷幕。由此可见,美国对先进制造技术和数字设计与制造的高度重视。

目前,虽然 3D 打印技术等数字化制造、智能制造技术尚未成熟,应该说,在产品设计、复杂和特殊产品生产、个性化服务等方面已显现其独特优势。据美国国家情报委员会预测,到 2030 年,3D 打印技术有可能改变发展中国家和发达国家的制造业工作模式。应该说,当前已经出现了新工业革命的端倪,但要经历较长时间才能对经济发展产生逐步深刻的影响,对其认识也是一个动态深化的过程。但由于其蕴含的一系列革命性变化,将有可能对不同国家、不同产业,特别是制造业的竞争力产生深远影响,对此已经引起了制造业领域专家的高度重视和动态跟踪。

可以这样认为,大力发展数字设计与制造已经成为全球制造业的共识,必将引发制造业一场新的革命。目前,对于数字制造,国内外学术界尚没有明确的定义。这里不妨引用中国科学技术出版社于2004年出版,由周祖德编著的《数字制造》一书中的相关描述。所谓数字制造,指的是在虚拟现实、计算机网络、快速原型、数据库和多媒体等支撑技术的支持下,根据用户的需求,迅速收集制造资源信息。对制造产品信息、工艺信息和资源信息进行分析、建模、规划和重组,实现对产品设计和功能的仿真、评估以及原型制造,进而通过数字化技术快速生产出达到用户所要求性能的产品的整个制造过程^[4]。也就是说,数字制造实际上就是在对设计和制造过程中进行数字化的描述而建立起的数字空间中完成产品的全生命周期的设计和制造过程。要深入了解数字制造的形成背景,首先需要对制造科学与技术的进化路线有一个粗略的了解。

1.1 制造科学与技术的进化路线

由美国 Prentice-Hall 出版社于2001年出版的《21世纪制造》一书中,P. K. Wright 在全面论述什么是制造的基础上明确地提出,制造是一门艺术、一种技术、一门科学和一种商务,他第一次对制造的进化路线给出了非常清晰的论述^[1]。

1.1.1 制造作为一种技巧和一种技术

制造是人类生存和发展的基础,“直立和劳动创造了人类,而劳动是从制造工具开始的”。可以这样认为,没有制造就没有人类的生存。制造随着人类的进步而进步;制造技术,则随着人类社会的发展而发展。自从有人类以来,制造就伴随人类的生存而发展。人类为了生存,用石器制造简单的工具用来打猎,制造原始的器具用作炊具,加工粗糙的毛皮用于取暖,大约在史前石器时代,这种简单的制造工具和制造方法的出现使人类得以生存,使人类的群居生活成为可能。这种制造方法和制造工艺经历了相当长的发展时期,从石器时代到青铜器时代再到铁器时代。这一历史阶段的制造,是以个人的技艺、独门技巧和工艺而存在,因此可以这样认为,在人类历史的长河中,在相当长的历史时期,制造是作为一种技巧、一门独有的艺术而存在。

制造作为一种技术的出现,大概可以追溯到18世纪70年代至20世纪70年代这段历史时期。将制造从一种纯艺术或至少是工匠活动转变成一种技术的分水岭,应该是1770—1820年间发生于英国的工业革命。由于蒸汽机的发明和逐步被工业界采用,以及由蒸汽机驱动的各类机械在各工业领域的广泛应用,从而大大提高了生产率,并促进了工商业活动的发展。在这段时期,随着当时人们的健康条件与生活环境的逐日改善,人口数量不断增加,这种日益增加的人口为大众市场营销和形成大批量生产产品的工厂,以及充实工厂所需的劳动力提供了条件。可以这样认为,人口的增加、工厂的形成以及市场的繁荣进一步促进了产品的大规模运作和有中产阶级经营的小工商活动的兴起,制造活动已经不能只靠个人的技艺而取得成功,需要更多人的合作,需要先进技术推动。由于第一次工业革命的兴起,作为一种技巧、一门艺术而存在的制造,很自然地逐步发展,成了一种可以为更多人掌握、为更多人服务和应用的一门技术。

随着制造技术的进步和人类的不断发展,要想在制造业中取胜,光靠优良的技术是不够

的。要真正在制造业中取胜,必须要在制造理念和制造本身的概念上适应科学和技术的快速发展,因此从 20 世纪 80 年代至今,伴随着其他相关科学的发展,制造作为一门科学也就自然形成了。19 世纪 80 年代以来,在制造领域涌现出众多新方法、新概念、新理念,极大地推动了制造业的发展。这些新概念和新理念(如自动化制造、敏捷制造、并行制造、计算机集成制造、虚拟制造、智能制造等)相互促进发展,充实了制造的内涵,促进了制造概念的升华。从此开始,制造不再是一种简单的技能或技术,而是逐步形成了一门科学,包括工程科学、管理科学、信息科学在内的制造科学。

1.1.2 制造中的系统科学和管理科学

Harrington、Merchant 和 BJORKE 等人最早将计算机用于制造业,他们提出用计算机集成制造(Computer Integrated Manufacturing, CIM)概念将整个制造系统的所有运作自动化、优化、集成。CIM 概念是联系制造学、系统学以及其他相关学科的桥梁。以 Harrington、Merchant 和 BJORKE 为代表的 CIM 时代包涵了每种制造工艺的物理过程(如机加工、焊接或半导体制造)、控制问题(如对机器人在各类制造机械中的伺服控制)以及柔性制造系统(Flexible Manufacturing System, FMS)的排序(如对机加工零部件或 IC 晶片的生产)。其结构化的分类将最初的 CIM 概念与相关科学问题相联系,使制造从工程学发展成制造学,从单元技术发展成为系统学。

从制造工艺的物理过程可知,原始的科学方法和原理确实可以用于制造工艺分析。例如,材料加工及半导体各工艺的物理过程就可以用物理理论来解释,如原子的位错理论对塑性变形的解释及晶格物理对晶体管的解释。同时,当金属通过塑性变形过程(如机加工与锻压)而改变形状时,可采用通用的标准方法(如有限元分析)来预测各种材料加工与处理工艺中的应力,制造工程中的力学方法和理论也就逐步形成。另外,结合机械加工过程中对连杆、凸轮及驱动机械控制动力学分析与摩擦学理论以及液压系统的分析与控制,另一门制造业中关于机械控制的理论也就自然建立了。

此外,柔性制造系统(FMS)规划涉及用离散事件仿真、统计建模、优化及排队理论等分析方法。近几年来,人工智能领域又增添了所谓基于约束的推理这一科学方法。随着制造系统中支持调度操作的数学理论的成熟,它在制造系统生产排序过程中起着非常重要的作用。尽管在制造中存在以上许多的工程科学方法,但如果不与系统管理和系统组织方法相结合,则它们不能真正发挥作用。

20 世纪 80 年代后期,以全面质量管理(TQM)、准时生产(JIT)、并行工程(CE)及精益制造为代表的管理和组织科学与以 CIM 为代表的工程科学相结合,开始对美国制造业的进步产生重要影响,为 20 世纪 90 年代的经济增长奠定了基础。丰田汽车公司原来所倡导的“丰田生产系统”是通过柔性制造系统“拉动(pull)”产品生产来减少在制品,而不是像传统制造中所做的将不必要的部件“推进(push)”已经很拥挤的生产线。及时(Just-In-Time, JIT)制造通常用来描述这种运作方式。精益制造(Lean Manufacturing, LM)是强调减少在制品与库存。同时,丰田公司还倡导一种质量控制新方法。在传统的质量控制(QC)定义中,零部件制造完成后对它进行检验,看其是否符合设计的尺寸范围。如果检验不合格,则将其报废。与其相反,今天丰田公司所用的“新”方法则将注意力集中在生产活动中的测量。因此,工作重点不是等到制造完毕后再进行检验和将不合格的零部件报废,而是将检验贯穿于零部件所有经过的工序全过程。另外,机器要预先调整好以防止次品的出现。这种实践被称为在线(in-process)

质量控制或全面质量管理(TQM)。不仅如此,它还将责任分摊到每个工人和(或)每台机器上,而不是等问题留到由检验员去发现。于是,TQM 加入到 CIM 中,后者包括并行工程(Concurrent Engineering,CE)、企业集成(虚拟公司)和顾客需求。在新的理念中,并行工程有时也叫同步设计,用于解决制造领域中的系统集成和实时控制与管理服务。大多数美国公司过去习惯于“隔墙制造”(over-the-wall manufacturing)。总之,CIM 加入管理和组织科学,形成了新的制造集成,即系统科学的理论和概念。

开放式结构制造与敏捷制造的新概念贯穿了整个 20 世纪 90 年代。快速重组(reconfigurable)企业要能对“交货期、质量及产品品种”有要求的新消费者做出反应。到了 20 世纪 90 年代中期,基于 Internet 的制造成为以上这些新概念的扩展,强调通过 Internet 来分享设计与制造服务。Internet 与视听会议的出现及方便的航空旅行给日益增加的全球性商务铺平了道路。大型企业可以分布在全球各地而协调工作,例如利用一个国家的优秀设计队伍而将生产转移到劳动力相对便宜和制造效率更高的另一个国家去。进入 21 世纪,制造科学逐步发展成为除了组织和管理科学还包括信息科学在内的,更为广泛的一门科学。

1.1.3 制造科学的多学科交叉

结构开放的制造、敏捷制造、网络化制造和虚拟制造都是激动人心的新兴制造理念和制造模式。诸如 Web 的新的工程科学技术提供了生产和服务的新渠道。然而,制造信息、制造过程和制造管理要比以前更需要一种全新的和更广阔的视野。数字化制造与数字制造科学已经悄然进入我们的生活。现代科学技术的迅速发展,特别是由于微电子技术、计算机技术、网络技术和信息技术的迅速发展,使得制造理论、制造技术、制造工业、制造科学的面貌、内涵也随之发生了根本性、革命性的变化。

制造科学得益于计算科学和数学的相关理论的发展。多媒体计算机系统和通信网络能实现并行性、分布式、虚拟协作、远程操作和监控。电子商务和计算机网络可以实现数字化制造企业中的远程销售、生产、维护和管理。为了表达、计算和推导物理参数和制造过程中的调度和管理,必须强调利用来自计算科学和数学中的智能方法建立计算模型。计算制造学和制造智能学围绕制造科学应运而生。

信息理论也促进了制造领域的发展。从更大范围来说,所有的制造活动都涉及人的因素,也涉及信息处理、表征和传递等。制造资源的优化配置和有效运作都与信息理论有关。这些相关的研究将由以信息技术为基础的制造信息学来解决。

制造过程和生物过程的相似性给制造领域中的诸如适应性、自制性、智能性等问题提供了新的解决方法。显而易见,这些问题属于仿生制造学的研究范围。

制造也不能缺少高质量的管理和运作。企业、合作和制造资源整合中存在着的人因、合作和竞争并不仅仅是一种技术问题。技术管理学是研究这些问题的基础。近几年来有普及趋势的 3D 打印等智能化加工方式,高度融合了信息技术与制造技术。其主要特点是,用计算机程序直接控制生产设备,完成特殊的、高难度的加工流程。其核心优势在于,既可以用相对较低的成本生产少量产品,又可以随时重复生产、不断改进设计。这就使得个性化产品的生产时间缩短、成本下降,产品的多样化设计空间大为扩展。智能化加工进一步提高了生产制造的数字化、个性化程度,降低了参与生产制造的技能门槛、资金门槛,使符合市场需求的新发明、新创意,能够更快地转化为成熟的产品设计。

显然,制造学科发展成多学科交叉的趋势是不可避免的。随着制造科学和技术的发展和进步,越来越多的其他学科知识将应用到今日的制造领域中,从而形成新的制造科学的基础。

由此可见,基于以上特点,制造已经成为一个以多学科为基础的系统学科,并逐步成为系统的制造科学。

1.1.4 制造与商务的关系

在技术进步的任何时刻,总是存在某一“推”、“拉”因素的综合,从而一方面产生促进制造设计与制造过程的有效方法,另一方面产生更加苛刻的消费者。从数字化制造发展趋势来看,在生产制造方式上,智能化加工、个性化产品将在整个制造业中占据更加重要的地位。在电气革命达到高潮、信息技术革命开始孕育和萌发的 20 世纪,发达国家先后在交通工具、家用电器、电子信息产品等主流工业产品领域,建立了强大的批量生产能力,已经能够满足人们的基本需求。进入 21 世纪以后,人们新增的物质需求,集中体现为产品的特质,而非数量、质量。因此,只有满足人们对个性化产品的消费需求,才能使物质生产充分服务于更高层次的精神需求,从而开拓新的经济增长空间。

随着数字制造的广泛深入,电子商务风起云涌,传统的制造企业如果不能适应这一变革,必将在激烈的市场竞争中被淘汰。因此美国汽车三巨头已联合起来开展电子商务。通用电气公司还专门成立了通用信息服务公司,为制造企业提供有关电子商务的各种服务。康柏、惠普、日立、三星等 12 家国际知名的信息产业公司联合宣布,联手组建一家电子商务公司,运作开放式的网上交易,旨在降低购销成本,实现及时业务处理,减少库存以及提供更高质量的服务。

制造企业特别是中小型传统企业,根据自身的特点,逐步开始采用以下三种方式切入商务和电子商务。

一是拓展新市场、新产品和新服务。例如,制造厂商不仅销售产品,还可以在網上为客户提供产品快速开发的技术服务,建立产品创新联盟。接受用户反馈信息,与之成为互动关系。又如,制造厂商可在互联网上对原物料直接进行多家产品评估、审核、签订电子商务合同,直至生产制造部件,从而节减了物料采购环节和人力物力资源。

二是网上客户服务和客户关系管理。例如客户可以访问制造企业的虚拟产品展览室,下载产品的三维模型,参与产品的设计,及时了解产品的制造进度和质量。此外,客户的意见可以直接、同步地反映给各有关部门,而不仅仅是销售人员,从而使问题能够及时得到处理,并自动建立客户档案,实现客户关系管理的自动化。

三是网上供应链管理。越来越多的中小型制造企业采取产品设计和装配两头在内,零部件加工制造在外的制造策略。大量零部件外包加工后,运用电子商务可以加强采购和物流方面的协作,实现数据自动处理和交换,加快资金周转,保证交货准时并大幅度降低运营成本,以挖掘新的利润空间。

上述三项战略在实质上都是为了消除传统经济中制造企业难以克服的障碍,例如:订单处理速度低下、销售区域差异导致价格差异、不必要的中间商盘剥,从而提高了交易和市场的效率。

对企业而言,制造与商务和电子商务的关系不是孤立的,商务与电子商务涉及产品生产和商务过程整体产业链的各方。它改变了制造厂商、供应商和客户之间单纯的钱货交易关系,使

得供应商可以参与产品的制造和运输,客户能够参与所买产品的设计和制造,企业与企业之间建立更加密切的伙伴关系,营销仅仅是整个链上的最后一个环节。

互联网和电子商务缩短了制造企业与最终客户之间的距离,客户有可能参与所购买产品的设计,使产品更加适合客户的个性和爱好。由于这种制造模式所生产的每一个(或一小批)产品是不一样的,由若干模块组成不同的款式,按照不同的客户需要来制造,所以称为大量定制。采用电子商务和企业应用可以将传统的商务过程缩短上百倍时间,并节约大量的旅行和通信费用。

电子商务不是简单的商务电子化,而是企业后台整个运营系统的信息化以及流程重组和优化。由于制造业和零售业全球采购的趋势,迫使构成产业链的所有企业进一步加强管理、降低经营成本,增加抗竞争、抗风险的能力。因此,有远见的企业家已经将注意力从单纯的销售策略转向提高企业创新、采购管理水平,并通过电子商务活动从中挖掘新的利润空间。

以电子商务和企业应用集成为基础的供应链管理系统,已经成为明天赢家的关键。体现为是否拥有高效率、低成本的供应链和营销渠道,这将形成企业新的核心竞争力。企业如果不能适应全球采购网和电子商务的发展趋势,将有被淘汰出局的危险。制造商必须根据客户全球采购、集中采购和电子采购的发展趋势及时调整战略,抓住商机,开拓新的销售渠道。

中小型企业的发展态势,使企业领导者必须将注意力转向加强产业链的合作,转向提高价值链的管理,加强供应链管理,通过电子商务和企业应用集成,建立网络联盟企业,联合起来去竞争,必将引导制造业成为新经济时代的成功者。制造作为一种商务,既推动了商务的迅速发展,也促进了制造业本身的快速进步。

可以这样认为,数字制造作为新的制造科学与技术和新的制造模式,已成为推动 21 世纪制造业向前发展的强大动力。其重要特征表现在:产品数字表达的无二义性,可重用性(形式化描述与表示);产品开发和产品性能的可预测性(可制造性分析与产品性能预估),制造活动对于距离、时间和位置的独立性(网络环境);制造全生命周期知识对于各个学科的依赖性和交叉性(信息科学、材料科学、管理科学和系统科学等)。

1.2 第三次工业革命与数字制造

第一次工业革命始于 18 世纪下半叶英国纺织业的机械化。过去数以百计的织工在家中进行的费时费力的手工劳作被集中到一家棉纺厂里进行,由此诞生了工厂。第二次工业革命发生在 20 世纪初,当时亨利·福特掌握了流水线技术,由此开启了批量生产的时代。先前这两次工业革命提升了人们的生活水平,推动了社会的进步和发展。现在,第三次工业革命正在展开,而第三次工业革命的一个重要内容就是制造业的数字化。制造业的数字化所带来的变革不仅仅是制造领域,而是涉及材料、信息、自动化、管理、商务等诸多领域。

每次新工业革命对不同产业的影响有差异。第三次工业革命的数字化制造,其优势体现在对市场需求的快速反应和提供个性化产品,因此对那些贴近市场最终需求的产业影响较大。数字化制造将使得某些行业(特别是生产生活资料的行业)规模经济变得不明显,个性化定制、分散生产成为新特点。为更贴近市场、更快响应市场需求,企业会更多地选择在消费地进行本地化制造。从而将对全球产业分工格局和全球生产体系产生重大影响。

此外,第三次工业革命具有合作、分散、开放的特征,提出了体制机制适应性的新要求。第三次工业革命的组织模式与以往有很大不同,扁平化结构、分散合作式商业模式更为普遍,创

新型中小企业的作用更为突出,生产者与消费者的互动关系更为紧密,对市场需求的快速反应能力更为重要。这些变化对体制机制的适应性提出了新要求。20 世纪末,戴尔公司在个人计算机生产中提出“大规模个性化定制生产”的理念:在信息技术的支持下,通过整合外部供应链和内部装配管理流程,批量生产不同外观的、不同硬件配置的计算机。这种生产制造理念在“福特式”大批量自动化生产、“丰田式”需求拉动型精益生产的基础上,进一步提高了生产制造的数字化、智能化、个性化程度,开启了属于第三次工业革命时代的“大规模个性化”生产运营模式。但就生产制造的技术和流程而言,戴尔公司的模式仍属于电气革命时代所确立的生产制造方式。

近几年来有普及趋势的 3D 打印等全数字化加工方式,高度融合了信息技术、材料技术与制造技术。其主要特点是:用计算机程序直接控制生产设备,完成特殊的、高难度的加工流程。其核心优势在于:既可以用相对较低的成本生产少量产品,又可以随时重复生产、不断改进设计。这就使得个性化产品的生产时间缩短、成本下降,产品的多样化设计空间大为扩展。数字化加工进一步提高了生产制造的数字化、个性化程度,降低了参与生产制造的技能门槛、资金门槛,使符合市场需求的新发明、新创意,能够更快地转化为成熟的产品设计。此外,工业机器人在生产加工中的运用,可以完成某些过程复杂、费时耗力的标准化生产流程,也有利于解放劳动力。工业领域的一部分研发人员和制造工人,可以不再考虑“如何造”,多考虑“造什么”,从而增强了企业的研发能力,提升劳动的层次和价值^[2]。

美国波音公司在 Boeing777~787 和洛克希德马丁公司在 JFS(F35)的研制过程中,采用数字制造将研制周期缩短了 1/3,研制成本降低了 50%,开创了航空数字制造的先河。在数字制造的第二次浪潮中,波音公司在新一代战神航天运载工具的研制和 C130 的航空电子升级中,采用 MBD/MBI(基于模型的定义和作业指导书)大大减少因反复带来的一切弊病,可以降低创新产品的风险和加快创新产品投放市场的步伐。所以,数字制造缩短装配工期 57%,将数字制造推向制造现场的更深层次。

从技术进步趋势看,数字制造是一种“增量创新”。虽然在未来相当长的时间内,3D 打印机、工业机器人都不会完全取代传统的数控机床、自动化生产线,但增量部分足以成为经济增长、产业升级的关键。随着个性化需求在工业产品消费需求中的比例不断上升,与数字制造相关的装备制造、材料合成以及信息技术服务,都具有广阔的发展前景。随着全球化加速和信息化的不断深入,现有的工业生产模式正发生着深刻的变化。《经济学人》于 2012 年发表的《第三次工业革命》中描述了制造业数字化将引领第三次工业革命,在后续报道中更进一步指出智能软件、新材料、灵敏机器人、新型制造方法和基于网络的制造业服务模式将形成合力,产生促进人类经济社会进程变革的巨大力量。

西门子成为位于芝加哥的数字化制造实验室的顶级合作伙伴以及独家的产品生命周期管理(PLM)软件供应商。西门子 PLM 软件首席执行官 Chuck Grindstaff 出席了美国白宫的发布会并表示:“我们很荣幸能够以技术合作伙伴和投资者的双重身份参与该数字化实验室项目,其目的在于促进创新并重振美国制造业。西门子的软件能够提高生产力和制造效率,加快产品上市速度,并提升灵活性。作为该项目的顶级合作伙伴和唯一的 PLM 供应商,西门子将持续提供战略性领导力和人力资源支持,推动并助力实现数字化实验室的潜力和愿景。”

从美国建立数字化制造实验室可以看出,随着科学技术的迅猛发展、市场需求的快速变化和全球性经济竞争的日趋激烈,新一代制造系统必须体现数字化、柔性化、敏捷化、客户化、网络化与全球化等基本特征。制造业在走向快速响应的市场和参与全球制造的竞争中,对数字

制造系统和数字制造技术的需求将日益迫切。伴随着网络化、信息化的飞速发展,必将推动数字制造技术的快速发展和广泛应用,未来的5~10年内,在不断完善数字制造基本理论和概念体系的基础上,数字制造技术将日趋完善,数字制造系统将成为新一代制造系统的主流,也必将成为各国在制造领域竞争的重要标志。我们可以这样认为,制造业的数字化将是一场波及全球的革命,从数字制造的形成和发展看,今后它将从以下几个方面向前推进,并引领第三次工业革命:

一是更灵巧的数字化装备机器人。今天的工业机器人,就像曾经的大型计算机一样,价格昂贵、安装费钱而且移动不便,下一代机器人就如同现在的个人电脑,非常适合于中小型企业。下一代制造业机械设备将会完全不同,不仅仅是相对便宜且易于操作,而且会和人们一道工作且取代人们的部分工作。它们会抓取、装运、暂存、拾取零部件以及进行清理打扫等,这些技能让它们可以应用于更广泛的领域。

二是满足数字制造的新材料的出现。目前,已经有很多新材料出现。碳纤维就是一个很好的例子,它已经被广泛应用于山地自行车、钓鱼竿、航空器和越来越多的汽车之上。碳纤维和钢材一样结实,但比后者轻一半。如果用这种材料制造一架飞机,可以飞得更远,若制造一辆汽车,可以跑得更快,这会帮助企业降低成本。其他新材料包括纳米颗粒,它会赋予产品一些新的特性。现在已经有一种利用纳米颗粒制造的玻璃,可以实现自动除尘。

三是基于网络的制造业服务商。在互联网上,这些服务商促成了完整的产业链。通过互联网,一家欧洲公司可以从另一家位于美国的公司获得设计图纸和样品,并在中国找到一家加工企业。在线制造业服务商,就像MFG.com一样,撮合全球大大小小的企业展开合作并相互购买产品和服务。

由此可见,数字化革命正在我们身边发生——软件更加智能、机器人更加巧手、网络服务更加便捷、制造业巨大的变革正在形成,它将改变制造商品的方式,并改变制造就业的格局,它将会取代传统的制造业所采用的各种各样的机械和制造模式,颠覆性地改变制造业的生产方式。

第三次工业革命对于制造业的影响和突破,可以从以下几个方面来认识。

未来制造业的突破之一:今后,如在沙漠中央工作的工程师发现自己缺少某件工具,他不必再让人从离他最近的城市送来,或者坐等快件寄来,而是只要坐下来,用自己的掌上电脑,简单地下载工具设计图,然后通过3D打印机,把工具“打印”出来即可。工程因为缺少一套设备而停工,或者客户抱怨说他们再也无法找到过去所购商品的配件,这样的情况终有一天会彻底改变,这就是数字化的“添加型制造”,它是未来制造业的突破之一。而且,随着3D打印的推广应用和不断升级换代,3D打印制造的应用范围之广将让人难以置信。传统生产设备正变得愈加精致灵巧:3D打印机通过层层叠加材料来制造产品,无需那些敲击、弯折与切削等工序,它彻底改变制造生产流程、模式和从事制造业人们的思维方式和就业方式^[3]。

未来制造业的突破之二:生产方式的转变以及生产组织的变化。生产方式像个轮子一样,兜了个圈子又回到了原点。从大规模的生产方式又转到了更加个性化的生产方式。未来的工厂将更加关注个性化定制。由于采用了新材料、新生产工艺、易操作的机器人以及在线制造服务协作的普及,制造业小批量生产变得更加合算,生产组织更加灵活,劳动投入更少。

未来制造业的突破之三:第三次工业革命不仅影响到如何制造产品,还将影响到在哪里制造产品。未来人们要想从事制造业,需要掌握更多的技能。大量的企业家能在网上与那些特立独行的技术怪才交换设计图,然后在家里把它们变成产品,接着把这些产品销售到全世界。