

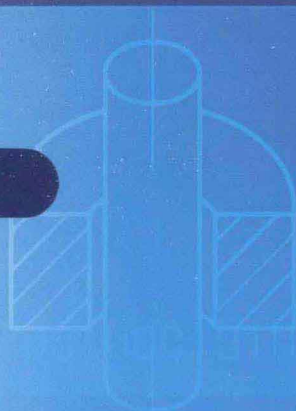


普通高等教育“十二五”规划教材

先进制造技术

曹岩 主编

杜江 闫莉 副主编



XIAN
ZHIZAO
JISHU



化学工业出版社



普通高等教育“十二五”规划教材

先进制造技术

曹岩 主编

杜江 闫莉 副主编

常州大学图书馆
藏书章

XIANJIN
ZHIZAO
JISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

本书包括先进制造技术概论、先进制造系统的基础理论、先进制造系统建模与分析、先进设计技术、先进装备技术、先进工艺技术、先进制造管理技术、先进制造模式、制造业信息化等，全面讲解先进制造技术的基本概念、原理和方法，重点讲述其关键技术和应用技术，在各章中穿插典型应用实例，并兼顾介绍其应用现状以及发展趋势。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、工业工程的本科生教材，也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校的机电一体化、数控技术及应用、机械制造及自动化等专业的教材，还可作为工程技术人员和管理人员的参考资料或培训教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

先进制造技术/曹岩主编. —北京: 化学工业出版社,
2013. 5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-122-16837-5

I. ①先… II. ①曹… III. ①机械制造工艺-高等学校-教材 IV. ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 057857 号

责任编辑: 高 钰

文字编辑: 张绪瑞

责任校对: 王素芹

装帧设计: 史利平

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: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{4}$ 字数 324 千字 2013 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

先进制造技术是集机械、电子、信息、材料、能源和管理等各项技术而发展起来的高新技术，它是发展国民经济的重要基础技术之一。20 世纪 70 年代以来，以计算机信息技术为基础的高新技术得到迅猛发展，为传统制造业提供了新的发展机遇，先进制造技术已越来越受到世界各工业化国家的重视，对其内涵的认识也越来越清晰，先进制造技术已在我国得到了广泛的使用。

先进制造技术的发展趋势主要如下：常规制造工艺的优化；新型加工方法的发展（如激光加工技术、电磁加工技术、超塑加工技术以及复合加工技术等）；专业、学科间的界限逐渐淡化并消失（如制造技术冷热加工之间、加工过程、检测过程、物流过程、装配过程之间，设计、材料应用、加工制造之间）；制造过程逐渐走向一体化；工艺设计由经验走向定量分析；信息技术、管理技术与工艺技术紧密结合。

通过本课程的学习使学生从总体上全面了解现代制造系统的构成和体系结构，掌握先进制造系统所涉及的新概念、新技术和新方法。为今后走上工作岗位从事制造行业的工程技术工作、管理工作和决策工作树立正确的观念，打下理论基础。

本教材在编写上具有如下特色：

- 内容的完整性和系统性：全面系统地介绍现代先进制造技术的基本概念、原理、方法、技术和系统，重点讲解其基础技术、关键技术和应用技术。

- 内容选择的实用性、综合性、先进性：讲解方法和思路上突出多样性和实用性，考虑到数控技术的迅速发展及企业应用的日益广泛，除注意内容安排的系统性、完整性之外，并体现其最新发展趋势。

- 编写方式的渐进性：强调通俗易懂，由浅入深，并力求全面、系统和重点突出；各章都列有相应的学习目标与要求，并附有思考与练习题。

- 突出应用性和实践性：本书注重理论与实践的结合，将基本知识的阐述与广泛的应用与实例结合在一起，便于学生自学和教师讲授。

- 以基本概念、基本原理、基本方法为基础，以基础技术、关键技术和应用技术为主干，以能力培养和应用技能为目标，注重理论讲解和典型实例介绍相结合。

本书可作为机械设计制造及其自动化专业、工业工程专业的本科生教材，也可作为高等职业学校、高等专科学校、成人院校的机电一体化、数控技术及应用、机械制造及自动化等专业的教材，还可作为工程技术人员和管理人员的参考资料或培训教材。

该书由曹岩主编，负责内容规划和统稿；由杜江、闫莉副主编并负责内容校对。第 1～3 章由曹岩、雷蕾编写；第 4、8 章由千学明编写；第 5 章由于广伟编写；第 6 章由杜江编写；第 7 章由于广伟、王智杰编写；第 9 章由周占峰编写。

由于编者水平和经验有限，疏漏在所难免，恳请读者提出宝贵意见，我们会在适当时机进行修订和补充，在此深表谢意。

编者

2013 年 3 月

目 录

第 1 章 先进制造技术概论	1
1.1 先进制造技术的基本概念及发展概况	1
1.1.1 制造的概念、本质和实现方式	1
1.1.2 制造系统与制造技术	2
1.1.3 传统制造业及其技术发展	2
1.1.4 现代制造及其技术发展	3
1.1.5 制造业发展过程中竞争的焦点和策略	4
1.1.6 先进制造技术与制造模式的发展历程	4
1.1.7 先进制造系统的发展演变	5
1.2 先进制造技术的基本内容与体系结构	6
1.2.1 先进制造技术的定义	6
1.2.2 先进制造技术的内涵和特点	6
1.2.3 先进制造技术体系结构	7
1.2.4 先进制造技术的学科内容	7
1.2.5 先进制造技术的发展趋势	9
思考题	10
第 2 章 先进制造系统的基础理论	11
2.1 先进制造系统的基本构成	11
2.1.1 先进制造系统基本概念	11
2.1.2 先进制造系统基本构成和特点	11
2.2 先进制造系统的信息制造观	12
2.3 先进制造系统的三流理论	13
2.4 先进制造系统的控制方式	15
2.4.1 先进制造系统对控制结构的要求	15
2.4.2 先进制造系统集中式控制结构	16
2.4.3 先进制造系统递阶式控制结构	16
2.4.4 先进制造系统分布式控制结构	17
2.5 先进制造系统的总体结构	19
2.6 先进制造系统的功能构成	20
思考题	23
第 3 章 先进制造系统建模与分析	24
3.1 概述	24
3.2 先进制造系统建模方法	24

3.3 先进制造系统功能模型·····	24
3.4 先进制造系统性能模型·····	25
3.5 制造过程的建模、仿真和优化的发展方向·····	26
思考题·····	27
第4章 先进设计技术 ·····	28
4.1 概述·····	28
4.2 计算机辅助设计·····	30
4.2.1 计算机辅助概念设计·····	30
4.2.2 计算机辅助产品造型设计·····	35
4.3 计算机辅助工艺技术·····	43
4.3.1 计算机辅助工艺设计基本概念·····	43
4.3.2 变异式 CAPP 系统的开发和实现过程·····	48
4.4 计算机辅助制造技术·····	50
4.4.1 计算机辅助制造技术概述·····	50
4.4.2 手工编程·····	51
4.4.3 CAD/CAM 集成编程·····	55
4.5 计算机辅助分析技术·····	61
4.5.1 计算机辅助分析的概念·····	61
4.5.2 分析的方法与技术·····	61
4.5.3 仿真技术·····	68
4.5.4 计算机辅助分析系统简介·····	69
思考题·····	70
第5章 先进装备技术 ·····	71
5.1 概述·····	71
5.2 数控机床·····	74
5.3 加工中心·····	75
5.4 工业机器人·····	77
5.5 传送装置和自动化仓库·····	78
思考题·····	80
第6章 先进工艺技术 ·····	82
6.1 快速成型制造·····	82
6.1.1 快速成型制造的产生背景·····	82
6.1.2 快速成型制造的原理、特征和基本工艺过程·····	82
6.1.3 典型快速成型制造工艺·····	83
6.1.4 RPM 技术的应用·····	85
6.2 精密、超精密加工技术·····	85
6.2.1 精密和超精密加工的概念·····	85

6.2.2	精密和超精密加工的机理、类型和方法	86
6.2.3	精密和超精密加工的研究内容	86
6.2.4	精密和超精密加工的地位和作用	88
6.2.5	典型精密和超精密加工工艺	88
6.3	微细加工技术	89
6.3.1	微细加工的起源、概念和特征	89
6.3.2	微细加工的理论基础	90
6.3.3	微细加工的类型和方法	90
6.3.4	典型微细加工工艺	91
6.4	纳米制造技术	93
6.4.1	纳米制造的概念和内容	93
6.4.2	纳米制造的特点	93
6.4.3	典型纳米制造技术	94
6.4.4	纳米制造的发展方向	95
6.5	激光加工技术	96
6.5.1	激光加工的原理和特点	96
6.5.2	激光加工系统的组成	97
6.5.3	典型激光加工工艺	98
6.5.4	激光加工技术的发展趋势	100
6.6	特种加工技术	101
6.6.1	电火花加工	103
6.6.2	电化学加工	109
6.6.3	超声波加工	113
6.6.4	水喷射加工	120
6.6.5	电子束和离子束加工	123
	思考题	132

第7章 先进制造管理技术 134

7.1	计算机集成制造技术	134
7.1.1	概述	134
7.1.2	计算机集成制造的概念和构成	135
7.1.3	计算机集成制造的未来发展	137
7.1.4	CIMS应用工程典型案例	138
7.2	制造资源计划技术	142
7.2.1	制造资源计划的形成	142
7.2.2	制造资源计划的概念和原理	142
7.2.3	制造资源计划的结构	143
7.2.4	制造资源计划的应用	143
7.3	企业资源计划技术	146
7.3.1	企业资源计划概念的提出	146

7.3.2	企业资源计划的结构	147
7.3.3	企业资源计划的管理思想	147
7.3.4	企业资源计划的新发展	148
7.3.5	企业资源计划的应用实例——MD 电力公司 ERP 项目管理关键 因素分析	148
7.4	制造执行系统技术	151
7.4.1	制造执行系统的概念	151
7.4.2	制造执行系统的功能与构成	152
7.4.3	制造执行系统的作用和意义	152
7.4.4	制造执行系统的应用实例——MES 助力国防军工制造信息化	153
7.5	全面质量管理技术	155
7.5.1	全面质量管理的概念和特点	155
7.5.2	全面质量管理的基本内容	156
7.5.3	全面质量管理的工作方法	156
7.5.4	全面质量管理的实施	157
7.5.5	全面质量管理的应用实例——基于 TQM 的某石化项目施工 质量管理	157
	思考题	159
第 8 章	先进制造模式	160
8.1	基本概念	160
8.1.1	制造模式的作用	160
8.1.2	制造模式的分类	161
8.2	并行工程	164
8.2.1	并行工程的发展	164
8.2.2	并行工程的原理	165
8.3	敏捷制造	166
8.3.1	敏捷制造技术的发展	166
8.3.2	敏捷制造的基本原理	167
8.4	网络化制造	169
8.4.1	网络化制造的发展	169
8.4.2	网络化制造的原理	170
8.5	绿色制造	172
8.5.1	绿色制造的发展	172
8.5.2	绿色制造的原理	174
8.5.3	绿色制造的技术途径（再制造工程）	175
8.6	虚拟制造系统	178
8.6.1	虚拟制造的基本概念	178
8.6.2	虚拟制造的特点	178
8.6.3	虚拟制造系统的原理	179

8.7 可重组制造	182
8.7.1 可重构制造的发展	182
8.7.2 可重构制造系统的原理	182
8.8 精良生产	187
8.8.1 精良生产的发展	187
8.8.2 精良生产的原理	188
思考题	189
第9章 制造业信息化	191
9.1 信息化的制造	191
9.2 制造业信息化的定义	191
9.3 制造业信息化的内涵	191
9.4 制造业信息化的意义	192
9.5 制造业信息化技术的主要内容	192
9.5.1 设计数字化	192
9.5.2 制造装备数字化	194
9.5.3 生产过程数字化	195
9.5.4 管理数字化	195
9.5.5 企业数字化	196
9.6 制造业信息化的实现模式	197
9.7 制造业信息化案例	198
思考题	200
参考文献	201

第1章 先进制造技术概论

1.1 先进制造技术的基本概念及发展概况

1.1.1 制造的概念、本质和实现方式

制造 (Manufacture) 一词源于拉丁语 “manu” (意为 “用手工”) 和 “facere” (意为 “制作”)。英语词典里对它的定义为 “用体力劳动或机械制作某物体, 尤指以大规模的方式运作”。这一简单的定义说明了某种意义的历史趋势。实际中, 制造过程模型一直在发展变化 (见表 1-1)。人们从不同的角度, 可以把制造看成是一种艺术, 一种技术, 一门科学和一种商务。

表 1-1 最近四个世纪的制造

18 世纪初	用铁砧和铁锤操作的人	对工艺过程缺乏理解	工匠与家庭作坊
19 世纪	蒸汽机床	对工艺过程理解加强	位于城市中的工厂
20 世纪	计算机辅助设计、规划与制造	采用闭环控制的有限的工艺过程模型	工厂自动化程度提高
21 世纪	网络和信息系统	可靠的工艺过程和智能控制	全球企业及虚拟制造公司

目前, 把制造分为 “小制造” 和 “大制造”。“小制造” 是指传统的机械制造, 即通过机器和工具将原材料转变为有用产品的过程, 重点是加工和装配。“大制造” 是指产品生命周期中, 从供应市场到需求市场整个供需链中的所有活动, 包括市场分析、经营决策、工程设计、加工装配、质量控制、销售运输、售后服务直至产品报废处理。它强调的是产品的整个生命周期过程。该过程不仅包含物质的转化, 而且还包含了信息向物质的转化, 即信息的物化。因此, 从信息的角度看, “大制造” 是一个使原材料的熵降低、使产品的信息含量增高的过程。

“制造” 的含义与 “生产” 密切相关。生产活动是人类赖以生存和发展的最基本活动。生产可被定义为一个将生产要素转变为经济财富, 并创造效益的输入输出系统。生产系统的输入是生产要素, 包括: ①作为生产对象的原材料 (Material); ②作为直接生产资料的机器 (Machine)、设备、工具和间接生产资料的厂房、道路等; ③作为劳动力的主体人 (Man); ④资金 (Money); ⑤支持生产活动的信息 (Message)、知识和方法等。常称为 “5M” 要素。生产系统的输出是生产财富, 包括有形财富 (产品) 和无形财富 (服务、信息)。在创造生产财富的同时, 必然产生一定的经济效益和社会效益。效益有 “正效益” 和 “负效益” 之分: 正效益指生产的财富能够满足人们物质生活和精神生活的需要, 生产活动本身能够促进社会健康发展; 负效益指生产活动给社会带来的负面影响, 如对自然界生态环境的破坏、各种各样的污染 (包括精神污染) 等。有效地将生产要素转变为生产财富十分重要。转变效率可以用生产率来度量, 生产率可以定义为输出与输入之比。因此, 制造可以理解为制造企业的生产活动, 即制造也是一个输入输出系统。

1.1.2 制造系统与制造技术

著名科学家钱学森对系统定义为：“系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的、具有特定功能的有机整体。”在日本的 JIS 标准中，系统被定义为：“许多组成要素保持有机的秩序向同一目的行动的集合体。”制造作为一个系统，具有一般系统的共性。一种基本定义为：制造系统指按一定制造模式将制造过程所涉及的各种相互关联、相互依赖、相互作用的有关要素组成的具有将制造资源转变为有用产品这一特定功能的有机整体，制造模式主导了制造系统的具体结构、组成要素间的相互关联、系统内外的信息交换以及整个系统的运行方式。国际著名制造系统工程专家、日本京都大学人见胜人教授在 1994 年指出，制造系统可从三个方面来定义。

(1) 结构方面：制造系统可视为若干硬件（生产设备、工具、运输装置、厂房、劳动力等）的集合体，为使硬件充分发挥效能，必须有软件（生产信息、制造技术等）支持。工厂设计时，即是从制造系统硬件和软件结构入手进行合理布局。

(2) 转变特性：制造系统是一个将生产要素转变为产品的输入输出系统，其主要功能便是转变功能。从技术的角度出发，制造是通过加工和装配把原材料变为产品的过程，该过程总是伴随着系统各种硬件和软件的作用。从经济的观点出发，制造过程的转变可以理解为通过改变生产要素的形态或性质使其不断增值的过程。研究制造系统的转变特性，主要是从工程技术和经济的角度，研究如何使转变过程更高效。

(3) 程序特性：所谓程序指一系列按时间和逻辑安排的步骤，从这个角度，制造系统可视为一个生产产品的工作程序，包括计划、实施和控制。研究制造系统的程序特性，主要从管理角度研究如何使生产活动达到最佳化。

由此，可将制造系统简单定义为：制造系统是包含从原材料供给到售后服务的整个制造过程和其涉及的硬件、软件所组成的具有特定功能的有机整体。

制造技术是为了有效完成制造活动所施行的一切手段的综合。这些手段包括运用一定的知识、技能，操纵可以利用的物质、工具，采取各种有效的策略、方法等。

1.1.3 传统制造业及其技术发展

由于传统制造是以机械-电力技术为核心的各类技术相互联结和依存的制造工业技术体系，其支撑技术的发展，决定了传统制造业的生产和技术有如下特点：

① 单件小作坊式生产加高度的个人制造技巧，大量的机械化刚性规模生产加一体化的组织生产模式，再加细化的专业分工。

② 制造技术的界限分明及其专业的相互独立。

③ 制造技术一般仅指加工制造的工艺方法，即制造全过程中某一段环节的技术方法。

④ 制造技术一般只能控制生产过程中的物质流和能量流（原材料到产品的物质流运过程，能量的投入、转换和消耗过程）。

⑤ 制造技术与制造生产管理的分离。

19 世纪末 20 世纪初，内燃机的发明，自动机床、自动线的相继问世，以及产品部件化、部件标准化和科学管理思想的提出，掀起制造业革命的新浪潮。20 世纪中期，电力电子技术和计算机技术的迅猛发展及其在制造领域所产生的强大的辐射效应，更是极大地促进了制造模式的演变和产品设计与制造工艺的紧密结合，也推动了制造系统的发展和管理方式的变革。同时，制造技术的新发展也为现代制造科学的形成创造了条件。回顾制造技术的发展，从蒸汽机出现到今天，主要经历了三个发展阶段。

(1) 用机器代替手工, 从作坊形成工厂

20 世纪初, 各种金属切削加工工艺方法陆续形成, 近代制造技术已成体系。但是机器(包括汽车)的生产方式是作坊式的单件生产。它产生于英国, 在 19 世纪先后传到法国、德国和美国, 并在美国首先形成了小型的机械工厂, 使这些国家的经济得到了发展, 国力大大增强。

(2) 从单件生产方式发展成大批量生产方式

推动这种根本变革的是两位美国人: 泰勒和福特。泰勒首先提出了以劳动分工和计件工资制为基础的科学管理理论, 成为制造工程学科的奠基人。福特首先推行所有零件都按照一定的公差要求来加工(零件互换技术), 1913 年建立了具有划时代意义的汽车装配生产线, 实现了以刚性自动化为特征的大批量生产方式, 它对社会结构、劳动分工、教育制度和经济发展, 都产生了重大影响。它在 20 世纪 50 年代发展到了顶峰, 产生了工业技术的革命和创新, 传统制造业及其大工业体系也随之建立和逐渐成熟, 形成了以机械-电力技术为核心的各类技术相互联结和依存为特点的制造工业技术体系。

(3) 柔性化、集成化、智能化和网络化的现代制造技术

20 世纪 80 年代以来所产生的现代制造技术沿着 4 个方向发展: 传统制造技术的革新、拓展; 精密工程; 非传统加工方法; 制造系统的柔性化、集成化、智能化和网络化。

1.1.4 现代制造及其技术发展

自然科学的进步促进了新技术的发展和传统技术的革新、发展及完善, 产生了新兴材料技术(新冶炼技术、新合金材料、高分子材料、无机非金属材料、复合材料等), 新切削加工技术(数控机床、新刀具、超高速和精密加工), 大型发电和传输技术, 核能技术, 微电子技术(集成电路、计算机、电视、广播和雷达), 自动化技术, 激光技术, 生物技术和系统工程技术。

另外, 人类社会在跨入 20 世纪后, 物质需求不断提高, 在科学和技术进步的同时, 受到地球有限资源和环境条件约束, 随着全球市场的逐渐形成, 世界范围的竞争日益加剧, 日益提高的生活质量要求与世界能源的减少和人口增长的矛盾更加突出。因此, 社会发展对其经济支撑行业——制造业及其技术体系提出了更高的要求, 要求制造业具有更加快速和灵活的市场响应、更高的产品质量、更低的成本和能源消耗以及良好的环保特性。这一需求促使传统制造业在 20 世纪开始了又一次新的革命性的变化和进步, 传统制造开始向现代制造发展。现代制造及其技术的形成和发展特点如下。

① 在制造的生产规模上, 从少品种大批量→单件小批量→多品种变批量的发展。

② 生产方式上, 呈现出从劳动密集型→设备密集型→信息密集型→知识密集型的发展和变化。

③ 制造装备的发展过程是从手工→机械化→单机自动化→刚性自动线→柔性自动线→智能自动化。

④ 在制造技术和工艺方法上, 现代制造在发展中, 其特征表现为: 重视必不可少的辅助工序, 如加工前后处理; 重视工艺装备, 使制造技术成为集工艺方法、工艺装备和工艺材料为一体的成套技术; 重视物流、检验、包装及储藏, 使制造技术成为覆盖加工全过程(设计、生产准备、加工制造、销售和维修, 甚至再生回收)的总和, 不断发展优质高效低耗的工艺及加工方法, 以取代落后工艺; 不断吸收微电子、计算机和自动化等高新技术成果, 形成 CAD、CAM、CAPP、CAT、CAE、NC、CNC、MIS、FMS、CIMS、IMT、

IMS等一系列现代制造技术，并实现上述技术的局部系统集成，形成从单机到自动生产线等不同档次的自动化制造系统。

⑤ 引入工业工程和并行工程概念，强调系统化及其技术和管理的集成，将技术和管理有机地结合在一起，引入先进的管理模式，使制造技术及制造过程成为覆盖整个产品生命周期，包含物质流、能量流和信息流的系统工程。

1.1.5 制造业发展过程中竞争的焦点和策略

市场经济环境下，制造企业的竞争力是企业生存和发展的根本条件。从一百多年前福特（Ford）汽车的生产线开始，为提高企业的整体效益，根据不同时期的竞争焦点，产生了不同的技术和管理模式（见表 1-2）。一个企业的竞争力可以包含许多方面，但归根结底都要反映在企业的产品和服务对市场的适应程度方面。当今时代，用户或市场对产品的要求可以归纳为以下六个方面：交货期短（T：Time to Market）、质量优良（Q：Good Quality）、价格低廉（C：Low Cost）、服务优质（S：High Service）、环境清洁（E：Clean Environment）、知识创新（K：Knowledge Creation），称之为制造企业竞争力六要素。

表 1-2 制造业各主要发展阶段的管理模式和经营策略

时期	制造业竞争焦点	相应的技术、管理对策与特点
1910~1940	降低产品成本	流水线、标准化，以质量管理为核心的部门间协调
1950~1970	提高企业整体效益及产品质量	统计过程控制、数控(NC)技术、成组技术、CAD、CAM 等的应用
20 世纪 80 年代	全面满足用户在交货期(T)、质量(Q)、价格(C)、服务(S)方面的要求，称为 TQCS	JIT(Just in Time)、CAD/CAM、CIMS 等。特点：信息集成
20 世纪 90 年代	在 TQCS 与环境(E)条件下快速开发质量、性价比高的新产品	CAD/CAPP/CAM/PDM、CIMS、并行工程 CE(Concurrent Engineering)、敏捷制造 AM(Agile Manufacturing) 特点：过程集成
21 世纪	加入知识创新(K)的新产品	现代集成制造系统(Contemporary Intergrated Manufacturing System)、虚拟制造(Virtual Manufacturing) 特点：企业集成、制造业信息化

1.1.6 先进制造技术与制造模式的发展历程

20 世纪末，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的迅猛发展及其在控制领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了制造活动的深度和广度，急剧地改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织结构，产生一大批新的制造技术和制造模式（见图 1-1）。现代制造业已成为发展速度快、技术创新能力强、技术密集和知识密集部门。

由于国内外市场竞争加剧，科学技术发展迅速，产品更新换代速度加快及人们对产品多样化的需求增加，使得机械制造业向多品种小批量生产方式发展。为适应这种变化，美国、日本等国开展了大量的对策研究。提出了许多新观点、新思想、新概念，先后诞生了许多先进制造技术、模式与系统，例如柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）、CIMS、并行工程（Concurrent Engineering, CE）、精良生产（Lean Production, LP）、智能制造系统（Intelligent Manufacturing System, IMS）、敏捷制造系统（Agile Manufacturing System, AMS）、全能制造系统（Holonc Manufacturing System, HMS）、虚拟制造系统（Virtual Manufacturing System, VMS）、全球制造（Globalization Manufacturing, GM）系统等。图 1-1 从企业运行空间和技术演变的角度展示了先进制造技术与制造模式的

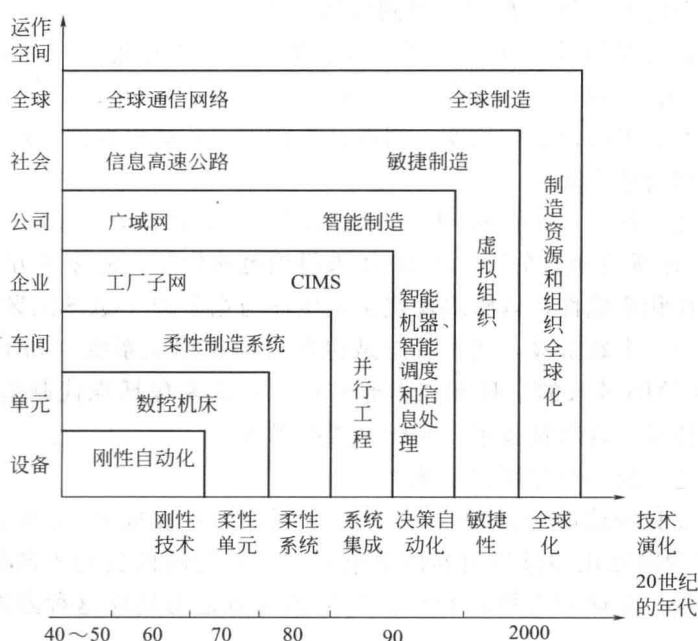


图 1-1 制造自动化发展模式及趋势

发展历程。

1.1.7 先进制造系统的发展演变

为了更好地研究和发展先进制造系统，就要对制造系统的发展历史有必要的了解。从技术层面看，制造系统的发展经历了以下几个阶段。

(1) 刚性制造系统

该阶段在 20 世纪 50 年代前已基本形成。当时为适应大批量生产的需要，采用专用机床和自动单机等组成流水生产线和自动生产线，形成了很有特色的一类典型制造系统。其最大特点是可实现固定产品的高生产率生产，但很难实现产品生产的改变，因此一般将其称为刚性制造系统。

(2) 单机柔性加工系统

单机柔性加工系统是指以单台数控（Numerical Control, NC）加工设备为核心构成的小型自动化或半自动化加工系统。该阶段开始于 20 世纪 50 年代初，到 70 年代已基本成熟。70~80 年代，由于计算机技术的迅速发展，传统 NC 迅速被计算机数控（Computer Numerical Control, CNC）取代，出现了 CNC 控制的单机柔性加工系统。

单机柔性加工系统中的数控加工设备通常包括数控车床、数控铣床、加工中心等，辅助设备包括自动上下料装置、机械手等，引入的新技术包括数控技术、计算机辅助编程技术等。数控加工柔性好、加工质量高，适于多品种、中小批量（包括单件产品）生产，因此单机柔性加工系统发展迅速、应用广泛，并成为后来发展 FMC、FMS 等更高级别制造系统的基础。

(3) 多机柔性加工系统

多机柔性加工系统包括计算机直接数控（Direct Numerical Control, DNC）加工系统、柔性制造单元（Flexible Manufacturing Cell, FMC）、柔性制造系统（Flexible Manufacturing System, FMS）、柔性制造生产线（Flexible Manufacturing Line, FML）等。这类系统

出现于 20 世纪 60 年代末, 70 年代以后得到快速发展。

此阶段强调制造过程的柔性和高效率, 适于多品种、中小批量产品的生产。主要技术有: 成组技术 (Group Technology, GT)、DNC、FMC、FMS、FML、离散系统理论与方法、算法仿真技术、车间计划与调度、制造过程监控、计算机控制与通信网络等。

(4) 计算机集成制造系统

计算机集成制造系统 (Computer Intergrated Manufacturing System, CIMS) 是 20 世纪 80 年代出现的一种新型制造系统, 近 20 年来得到迅速发展, 而今正方兴未艾。其特点是制造全过程的系统性和集成性, 以解决现代企业生存与竞争的 TQCS 问题。CIMS 既可看作是制造自动化发展的一个新阶段, 又可看作是包含自动化加工系统 (如 FMS) 的一个更高层次的制造系统。CIMS 涉及的学科和技术非常广泛, 主要包括现代制造技术、管理技术、计算机技术、信息技术、自动化技术、系统工程技术等。

(5) 跨企业制造系统和全球制造系统

跨企业制造系统和全球制造系统于 20 世纪末提出, 正在成为 21 世纪的发展方向。近 20 年来, 随着市场的国际化和世界贸易的急剧发展, 各种跨国公司不断涌现, 大幅度推进了制造全球化的进程。全球制造概念和全球制造系统就是为适应这种发展形势而提出和产生的。

全球制造是根据全球化的产品需求, 通过网络协调和运作, 把分布在世界各地的制造工厂、供应商和销售点连接成一个整体, 从而能够在任何时间与全世界任何一个角落的用户或供应商打交道, 由此构成具有统一目标的在逻辑上为一整体而物理上分布于全世界的跨企业和跨国制造系统, 从而完成具有竞争优势的产品制造和销售。与合作伙伴甚至竞争对手建立全球范围的设计、生产和经营联盟网络, 以此加速产品开发和生产过程, 提高产品质量和市场响应速度, 并向用户提供最优的服务, 从而确保竞争优势, 取得共同发展。网络技术是全球制造系统最重要的技术基础。

1.2 先进制造技术的基本内容与体系结构

1.2.1 先进制造技术的定义

先进制造技术 (Advanced Manufacturing Technology, AMT) 的概念是在 20 世纪 80 年代末期提出的。目前, 比较被人们接受的定义是: “先进制造技术是以人为主体的, 以计算机为重要工具, 不断吸收机械、光学、电子、信息 (计算机和通信、控制理论、人工智能等)、材料、环保、生物以及现代系统管理等领域的最新科技成果, 涵盖产品整个生命周期的各个环节的先进工程技术的总称”, 它面向包括机械制造、电子产品制造、材料制造、石油、化工、冶金以及民用消费品制造等在内的 “大制造业”, 以提高对动态多变的产品市场的适应和竞争能力为核心, 以实现优质、灵活、高效、清洁生产 and 提供优质、快捷服务, 取得理想经济效益为目标。

1.2.2 先进制造技术的内涵和特点

由先进制造技术的定义可以得出先进制造技术的内涵是 “使原材料成为产品而采用的一系列先进技术”, 其外延则是一个不断发展更新的技术体系, 不是固定模式, 它具有动态性和相对性, 不能将其简单理解为 CAD、CAM、FMS、CIMS 等各项具体的技术。

可以总结, 先进制造技术的主要特点如下。

① AMT 是一项综合性技术。AMT 不是一项具体的制造技术,而是利用系统工程的思想和方法,将各种与制造相关的技术集合为一体,贯穿从市场分析、产品设计、加工制造、生产管理、市场营销、维修服务直至产品报废、回收再生的全过程。AMT 强调计算机技术、信息技术和现代管理技术在制造中的综合应用,强调人的主体作用,强调人、技术、管理的有机结合。

② AMT 是一项动态发展技术。AMT 没有一个固定的模式,它的实现规模、实现程度、实现方法以及侧重点要与其所处时期、所属企业的具体情况相结合,并与企业的周围环境相适应。AMT 也不是一成不变的,而是动态发展的,它不断吸收和利用各种高新技术,并将其渗透到制造系统的各个部分和制造活动的整个过程。

③ AMT 是面向全球竞争的技术。由于信息技术的飞速发展,每一个国家每一个企业都处在全球市场中。为了适应国际市场竞争,必须提高企业综合效益(经济效益、社会效益和生态环境效益)及对市场的反应能力,而采用先进制造技术是达到这一目标的重要途径。

④ AMT 是面向 21 世纪的技术。AMT 是制造技术发展的新阶段,它在保留传统制造技术的有效成分的同时,吸收并充分利用一切高新技术,使制造产生质的飞跃。AMT 强调环保,突出能源效益,重视产品回收和再利用,遵循可持续发展战略。

1.2.3 先进制造技术体系结构

1994 年,美国联邦科学、工程和技术协调委员会(FCCSET)下属的工业和技术委员会先进制造技术工作组提出将先进制造技术分为三个技术群:①主体技术群,包括面向制造的设计技术群和制造工艺技术群;②支撑技术群;③制造基础设施环境。这三个技术群相互联系、相互促进,组成一个完整的体系。图 1-2 给出了先进制造技术的体系结构。

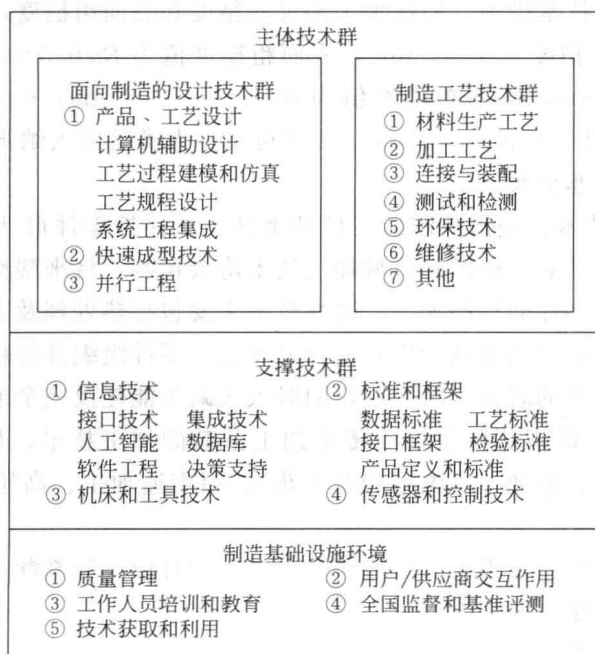


图 1-2 先进制造技术的体系结构

1.2.4 先进制造技术的学科内容

从先进制造技术的定义和内涵可以看出它不单指某一项具体的技术,而是横跨多个学

科,涵盖产品生命周期全过程的所有相关技术,涉及设计、制造工艺、加工自动化、管理以及特种加工等多个领域,可以归纳为如下几个学科方面。

(1) 先进设计技术

产品设计是制造业的灵魂。先进设计技术的主要内容和发展趋势如下。

① 设计方法现代化。设计方法包括产品动态分析设计,产品可靠性、可维护性及安全设计,产品优化设计,快速响应设计,创新设计,智能设计,仿真与虚拟设计,价值工程设计,模块化设计等。新的设计思想和方法不断出现,如并行设计、面向“X”的设计(Design for X, DFX)、健壮设计(Robust Design)、优化设计(Optimal Design)、反求工程设计(Reverse Engineering)等。

② 设计手段计算机化。表现在广泛应用有限元法、优化设计、计算机辅助设计、反求工程技术、CAD/CAM一体化技术、工程数据库。当前突出反映在数值仿真或虚拟现实技术在设计中的应用以及现代产品建模理论的发展上,并且向智能化设计方向发展。

③ 向全寿命周期设计发展。传统的设计只限于产品设计,全寿命周期设计则由简单的、具体的、细节的设计转向复杂的总体设计和决策,要通盘考虑包括设计、制造、检测、销售、使用、维修、报废等阶段的产品的整个生命周期。

④ 由单纯考虑技术因素转向综合考虑技术、经济和社会因素,注意考虑市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(2) 先进制造工艺技术

先进制造工艺技术包括精密和超精密加工、精密成形与特种加工技术等几个方面。

① 精密、超精密加工技术。是指对工件表面材料进行去除,使工件的尺寸、表面性能达到产品要求所采取的技术措施。根据加工的尺寸精度和表面粗糙度,可大致分为三个不同的等级:a. 精密加工,精度为 $3\sim 0.3\mu\text{m}$,表面粗糙度值为 $Ra\ 0.3\sim 0.03\mu\text{m}$;b. 超精密加工,精度为 $0.3\sim 0.03\mu\text{m}$,表面粗糙度值为 $Ra\ 0.3\sim 0.005\mu\text{m}$;c. 纳米加工,精度高于 $0.03\mu\text{m}$,表面粗糙度值小于 $Ra\ 0.005\mu\text{m}$ 。由此可见,人类已进入纳米级加工时代,超精加工的材料由金属扩大到非金属。

② 精密成形制造技术。是指从制造工件的毛坯、从接近零件形状向直接制成工件即精密成形或净成形的方向发展。据国际机械加工技术协会预测,将来塑性成形与磨削加工相结合,将取代大部分中小零件的切削加工。改性技术主要包括热处理及表面工程各项技术。主要发展趋势是通过各种新型精密热处理和复合处理达到零件组织性能精确、形状尺寸精密以及获得各种特殊性能要求的表面(涂)层,同时大大减少能耗及完全消除对环境的污染。

③ 特种加工技术。是指那些不属于传统加工范畴的加工技术,如高能束流(电子束、离子束、激光束)加工、电加工(电解和电火花)、超声波加工、高压水加工以及多种能源的组合加工。

先进制造工艺技术的一个重要发展趋势是:工艺设计由经验判断走向定量分析,加工工艺由技艺发展为工程科学。

(3) 制造自动化技术

制造自动化是指用机电设备工具取代或放大人的体力,甚至取代和延伸人的部分智力,自动完成特定的作业,包括物料的存储、运输、加工、装配和检验等各个生产环节的自动化。制造自动化技术涉及数控技术、工业机器人技术和柔性制造技术,是机械制造业最重要的基础技术之一。