




普通高等学校“十四五”规划机械类专业精品教材

精密加工技术

JINGMI JIAGONG JISHU

| 主编 姜晨 叶卉

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

普通高等学校“十四五”规划机械类专业精品教材

精密加工技术

主 编 姜 晨 叶 卉

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 提 要

全书共9章,内容涉及精密与超精密技术概述、精密与超精密加工机床及关键部件、精密与超精密切削加工、精密与超精密磨削、超精密研磨与抛光、精密测量与在线检测技术、精密特种加工技术、微细加工技术,以及纳米技术等,向读者介绍了各类精密超精密加工技术的机理、特点、类型与应用,紧密结合精密加工技术的国内外研究现状与发展前景。本书有特色的地方在于:对精密加工的支撑技术——精密测量与在线检测技术——作专门的介绍之后,更在每一章末尾安排了与精密加工技术相关的思政小课堂模块,让读者能够在学习精密加工技术专业知识的同时对精密加工领域中的中华文化、历史有所了解,对国家政策、导向有所认识,树立积极向上、科学严谨的工作态度。

本书可作为普通高等学校机械工程类专业的本科生及研究生教材,也可供从事机械制造加工的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

精密加工技术/姜晨,叶卉主编. —武汉:华中科技大学出版社,2021.4
ISBN 978-7-5680-7004-1

I. ①精… II. ①姜… ②叶… III. ①精密切削-高等学校-教材 IV. ①TG506.9

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第061796号

精密加工技术

Jingmi Jiagong Jishu

姜 晨 叶 卉 主 编

策划编辑:万亚军

责任编辑:邓 薇

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉开心印印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:308千字

版 次:2021年4月第1版第1次印刷

定 价:36.00元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

精密和超精密加工技术是综合了机械制造、精密测量和计算机控制等众多学科知识的一门系统工程技术,对尖端技术和国防工业的发展有重要影响。“精密加工技术”课程是机械工程类专业的重要专业课,旨在培养学生具备机械领域精密加工与制造的专业知识。

近年来多种新技术在精密加工中得以应用,为适应当前科学技术迅速发展的新形势,结合“三全育人”教育理念和工程教育认证的要求,笔者编写了本书。本书主要涉及精密超精密加工方法与原理、精密测量与在线检测技术、精密特种加工技术及微细加工技术、纳米技术等,除了介绍精密加工技术的基础理论外,还结合工程需求与科学发展态势,特别介绍了相关加工方法的工程应用现状与研究进展。与传统的精密加工技术类教材有所不同,本书增加了精密加工的支撑技术——精密测量与在线检测技术——等相关内容,同时每一章都设置了与课程内容紧密相关的思政小课堂模块,使专业知识更加新颖、生动。

本书在编写中力求保持内容的完整性和系统性。第1章精密与超精密加工技术概述,主要介绍了精密加工技术的内涵和发展趋势;第2章精密与超精密加工机床及关键部件,主要介绍了国内外典型精密加工机床的特点,并专门介绍了精密加工机床的主轴和导轨部件;第3章精密与超精密切削加工,主要介绍了金刚石刀具、精密切削的关键要素对切削过程的影响,以及超声波振动切削技术;第4章精密与超精密磨削,重点介绍了砂轮磨削过程及磨削表面与亚表面质量控制技术,也对砂带磨削进行了介绍;第5章超精密研磨与抛光,介绍了研抛加工的机理和特点,特别介绍了多种新发展的柔性抛光加工技术;第6章精密测量与在线检测技术,主要介绍了精加工工件的加工误差与表面粗糙度测量技术,以及机床在线检测原理;第7章精密特种加工技术,对电加工技术和高能束加工技术两大类都进行了较为全面的介绍;第8章微细加工技术,主要介绍了微细加工机理和方法,特别介绍了集成电路与印制电路板制作技术;第9章纳米技术,主要对纳米级测量和加工方法的原理及应用进行介绍,并介绍了微型机械和微型机电系统。

本书可作为普通高等学校机械工程类专业本科生及研究生教材,也可供从事机械制造加工的科技人员参考。

本书由上海理工大学姜晨、叶卉主编,其中第1、2、3、8章及第9章由姜晨编写,第4章至第7章由叶卉编写,全书由姜晨统稿。本书得到了2019年“上海高校课程思政整体改革领航高校”建设项目、2019年度上海理工大学一流本科系列教材建设项目资助,以及上海理工大学机械工程学院各位领导、老师的支持与帮助。郝宇、李晓峰等研究生参与了本书图表编排和文字素材的整理、校对工作。编者在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中可能存在疏漏及欠妥之处,竭诚欢迎读者批评指正。

编 者

2020年10月于上海

目 录

第 1 章 精密与超精密加工技术概述	(1)
1.1 精密加工与先进制造技术	(1)
1.1.1 先进制造技术产生的背景.....	(1)
1.1.2 先进制造技术的内涵.....	(2)
1.1.3 先进制造技术的特点.....	(3)
1.1.4 先进制造技术的体系结构.....	(4)
1.2 精密与超精密加工技术	(5)
1.2.1 精密与超精密加工的概念.....	(5)
1.2.2 精密与超精密加工的技术内涵.....	(6)
1.2.3 精密与超精密加工的作用.....	(6)
1.2.4 精密与超精密加工的难点.....	(7)
1.2.5 精密与超精密加工的方法.....	(7)
1.2.6 精密与超精密加工系统组成	(10)
1.3 精密与超精密加工的发展趋势.....	(10)
复习思考题	(12)
思政小课堂	(12)
第 2 章 精密与超精密加工机床及关键部件	(13)
2.1 典型超精密加工机床.....	(13)
2.1.1 美国的典型超精密加工机床	(13)
2.1.2 德国的典型超精密加工机床	(16)
2.1.3 英国的典型超精密加工机床	(17)
2.1.4 日本的典型超精密加工机床	(18)
2.1.5 中国的典型超精密加工机床	(18)
2.2 超精密加工机床主轴部件.....	(22)
2.2.1 液体静压轴承	(22)
2.2.2 空气静压轴承	(23)
2.2.3 主轴的驱动方式	(24)
2.3 精密导轨部件.....	(25)
2.3.1 超精密加工机床的总体布局	(25)
2.3.2 常用的导轨部件	(26)
2.3.3 床身及导轨的材料	(27)
2.3.4 微量进给装置	(28)
复习思考题	(29)
思政小课堂	(30)

第3章 精密与超精密切削加工	(31)
3.1 金刚石刀具	(31)
3.1.1 概述	(31)
3.1.2 金刚石刀具切削部分的几何形状	(32)
3.1.3 晶面的选择	(33)
3.1.4 金刚石刀具上的金刚石的固定方法	(34)
3.2 精密切削加工过程及控制	(36)
3.2.1 精密切削加工的切削过程	(36)
3.2.2 精密切削加工时的切削参数及其对加工质量的影响	(37)
3.2.3 精密切削加工时切削热的影响及控制	(39)
3.2.4 精密切削加工的刀具寿命	(42)
3.2.5 精密与超精密切削加工时的最小切削厚度	(46)
3.3 超声波振动车削加工	(48)
3.3.1 超声波振动车削装置	(48)
3.3.2 超声波振动车削的原理及特点	(49)
复习思考题	(51)
思政小课堂	(51)
第4章 精密与超精密磨削	(53)
4.1 固结磨粒加工特点及原理	(53)
4.1.1 固结磨粒加工	(53)
4.1.2 固结磨具	(54)
4.1.3 固结磨粒磨削原理	(58)
4.1.4 磨削温度和磨削液	(59)
4.2 精密与超精密磨削加工技术	(62)
4.2.1 精密与超精密磨削加工的概念	(62)
4.2.2 精密与超精密磨削加工机理	(62)
4.2.3 精密与超精密磨削对机床的要求	(64)
4.3 磨削加工表面及亚表面质量控制	(64)
4.3.1 磨削加工表面质量	(65)
4.3.2 硬脆非金属材料磨削亚表面缺陷及控制	(66)
4.4 砂带磨削	(68)
4.4.1 涂覆磨具	(69)
4.4.2 复杂曲面的超精密砂带磨削	(70)
4.4.3 砂带磨削装置及组成	(70)
复习思考题	(70)
思政小课堂	(71)
第5章 超精密研磨与抛光	(72)
5.1 精密研磨加工及应用	(72)
5.1.1 研磨加工机理	(72)
5.1.2 研磨加工分类	(73)

5.1.3	研磨加工的特点	(74)
5.1.4	研磨工艺	(74)
5.1.5	研磨加工应用实例	(76)
5.2	精密抛光加工技术	(77)
5.2.1	精密抛光加工机理	(77)
5.2.2	精密抛光加工特点	(78)
5.2.3	精密抛光工艺	(78)
5.3	精密抛光加工方法及应用	(81)
5.3.1	化学-机械抛光技术	(81)
5.3.2	固结磨料抛光技术	(83)
5.3.3	气囊抛光技术	(84)
5.3.4	磁场辅助抛光技术	(86)
	复习思考题	(91)
	思政小课堂	(92)
第6章	精密测量与在线检测技术	(93)
6.1	几何量精密测量基础	(93)
6.1.1	概述	(93)
6.1.2	计量器具分类	(93)
6.1.3	计量器基本认识	(93)
6.2	几何尺寸的精密测量	(94)
6.3	几何误差的测量	(96)
6.3.1	几何误差的测量原则	(96)
6.3.2	直线度误差的测量和评定	(96)
6.3.3	平面度误差的测量与评定	(100)
6.3.4	圆度误差的测量与评定	(101)
6.4	表面粗糙度的测量	(101)
6.4.1	表面粗糙度的常用测量方法	(102)
6.4.2	表面粗糙度的其他测量方法	(103)
6.5	精密测量设备介绍	(103)
6.6	在线检测技术	(107)
6.6.1	在线检测技术概况	(107)
6.6.2	数控机床在线检测系统	(107)
	复习思考题	(111)
	思政小课堂	(111)
第7章	精密特种加工技术	(113)
7.1	特种加工的分类和特点	(113)
7.1.1	特种加工的分类	(113)
7.1.2	特种加工的特点	(114)
7.2	电火花加工技术	(114)
7.2.1	电火花加工的原理和过程	(114)

7.2.2	电火花加工的特点及类型	(116)
7.2.3	电火花加工的工艺及应用	(117)
7.3	电化学加工	(119)
7.3.1	电化学加工的原理和过程	(119)
7.3.2	电化学加工的特点及类型	(121)
7.3.3	电化学加工的工艺及应用	(122)
7.4	离子束加工	(131)
7.4.1	离子束加工的概念及原理	(131)
7.4.2	离子束加工的特点	(132)
7.4.3	离子束加工的工艺及应用	(132)
7.5	电子束加工	(134)
7.5.1	电子束加工的概念及原理	(134)
7.5.2	电子束加工的特点	(134)
7.5.3	电子束加工的工艺及应用	(135)
7.6	激光加工	(136)
7.6.1	激光加工的概念及原理	(136)
7.6.2	激光加工的特点	(137)
7.6.3	激光加工的工艺及应用	(138)
	复习思考题	(141)
	思政小课堂	(141)
第8章	微细加工技术	(143)
8.1	微细加工技术的出现	(143)
8.1.1	制造技术自身加工的极限	(143)
8.1.2	微细加工出现的历史背景	(143)
8.2	微细加工的概念及其特点	(144)
8.2.1	微细加工的概念	(144)
8.2.2	微细加工的特点	(145)
8.3	微细加工机理	(146)
8.3.1	切削厚度与材料剪应力的关系	(146)
8.3.2	材料缺陷分布对其破坏方式的影响	(146)
8.3.3	各种微细加工方法的加工机理	(147)
8.4	微细加工方法	(148)
8.4.1	微细加工方法分类	(148)
8.4.2	光刻加工技术	(149)
8.4.3	立体复合工艺	(152)
8.5	集成电路与印制线路板制作技术	(154)
8.5.1	集成电路制作技术	(154)
8.5.2	印制线路板制作技术	(156)
	复习思考题	(157)
	思政小课堂	(158)

第 9 章 纳米技术	(159)
9.1 概述	(159)
9.1.1 纳米技术的特点	(159)
9.1.2 发展纳米技术的重要性	(159)
9.1.3 纳米技术的主要内容	(160)
9.2 纳米级测量和扫描探针测量技术	(160)
9.2.1 纳米级测量方法简介	(160)
9.2.2 基于 F-P 标准具的测量技术	(161)
9.2.3 X 射线干涉测量技术	(161)
9.2.4 扫描隧道显微测量技术	(161)
9.2.5 微观表面形貌的扫描探针测量和其他扫描测量技术	(163)
9.3 纳米级加工和原子操纵	(165)
9.3.1 纳米级加工的物理实质分析	(165)
9.3.2 纳米级加工精度	(166)
9.3.3 使用 SPM 进行原子操纵	(166)
9.3.4 使用 SPM 加工微结构	(168)
9.4 微型机械、微型机电系统及其制造技术	(172)
9.4.1 微型机械、微型机电系统	(172)
9.4.2 微型机械和微型机电系统的制造技术	(174)
复习思考题	(178)
思政小课堂	(179)
参考文献	(180)

华中科技大学出版社

第1章 精密与超精密加工技术概述

1.1 精密加工与先进制造技术

精密加工是先进制造技术的重要组成部分,要理解精密加工技术的内涵,首先需要了解先进制造技术的概念。先进制造技术(advanced manufacturing technology, AMT)一词源于美国,是为了提高制造业的竞争力和促进国家经济增长而提出的。目前,先进制造技术已经是一个国家经济发展的重要手段之一,许多发达国家都十分重视先进制造技术的发展水平和发展速度,利用它进行产品革新、扩大生产和提高国际经济竞争力。

先进制造技术是重要的基础技术之一,对我国的制造业发展有着举足轻重的作用。尤其在经济全球化条件下,随着国际分工的深化,出现国际产业大转移、制造业布局大调整的趋势。其中,广泛采用先进制造技术和先进制造模式,是当今国际制造业发展的突出表现。以制造业快速发展为标志的工业化阶段,是经济发展的必经阶段。把握先进制造业的发展趋势,借鉴有益的国际经验,对于我国实施“十四五”发展战略,推动制造业转型升级,具有重要的现实意义。

1.1.1 先进制造技术产生的背景

在第二次世界大战及战后时期,美国制造业得到了空前的发展,并形成了一支强大的研究开发力量,成为当时世界制造业的霸主。第二次世界大战后国际形势发生了很大的变化,军事对峙和显示实力刺激制造业发展的背景减弱了。

1945年7月,时任美国总统科学顾问的麻省理工学院(MIT)前工学院院长范内瓦·布什(Vannevar Bush)提交给杜鲁门总统的战后科学研究规划报告《科学——永无止境的前沿》(Science: Endless Frontier),使第二次世界大战后的十几年中,美国政府对美国高校的研究资助几乎增加了100倍。

至20世纪70年代,随着日、德经济的恢复,美国制造业遇到了强有力的挑战,其汽车业、家用电器业、机床业、半导体业、应用电子业、钢铁业的霸主地位相继逊位,连奉为至宝的航天、航空业也遇到了强有力的竞争,出口产品的竞争力大大落后于日、德,对外贸易逆差与日俱增,导致经济滞胀,发展缓慢。而日本在过去几十年内抓住新的科技革命的机会,引进外国先进技术,重视教育,不断主动地采用制造新技术,已成为仅次于美国的资本主义经济大国。

20世纪80年代初,美国一批有识之士相继发表言论,如麻省理工学院一批学者集体撰文《夺回生产优势——美国制造业的衰退及对策》,反思了制造技术与国民经济、制造技术与国力的至关重要的相互依赖关系,强调了制造技术的重要性。在此背景下,克林顿政府相继提出了两个颇有号召力的口号——“为了美国的利益发展技术”和“技术是经济的发动机”,强调了具有明确的社会经济目标的关键技术的重要性,制订了国家关键技术计划,并对其技术政策做了重大调整。

1993年,美国政府批准了由联邦科学、工程与技术协调委员会(FCCSET)主持实施的先进制造技术计划,先进制造技术就在这样一个社会经济背景下诞生了。由此,美国很快扭转了

经济颓势,重新成为世界上最具竞争力的国家。

1.1.2 先进制造技术的内涵

虽然先进制造技术至今还没有一个严格的定义,但它却是国际上形成广泛共识的一个概念和已被公认的一个技术术语。这一广泛共识是:传统制造技术不断地汲取计算机、信息、自动化、新材料和现代系统管理技术,并将其综合应用于产品的研究与开发、设计、生产、管理和市场开拓、售后服务,从而取得显著的社会效益和经济效益,将这些综合技术统称为先进制造技术。

先进制造技术的范畴一般包括以下四个部分。

- (1) 现代设计技术。
- (2) 先进制造工艺技术。
- (3) 制造系统综合自动化技术。
- (4) 现代生产经营和管理技术。

近年来,随着科学技术的不断发展和学科间的相互融合,先进制造技术迅速发展,不断涌现出新技术、新概念,如成组技术(GT)、敏捷制造(AM)、并行工程(CE)、快速原型制造技术(RPM)、虚拟制造技术(VMT)、智能制造(IM)等。

1. 成组技术

揭示和利用事物间的相似性,按照一定的准则分类成组,同组事物采用同一方法进行处理,以便提高效益的技术,称为成组技术(GT)。在机械制造工程中,成组技术是计算机辅助制造的基础。将成组哲理用于设计、制造和管理等整个生产系统,可改变多品种小批量生产方式,获得最大的经济效益。

成组技术的核心是成组工艺。它是将结构、材料、工艺相近的零件组成一个零件族(组),按零件族制订工艺进行加工,以扩大批量、减少品种、采用高效方法、提高劳动生产率。零件的相似性是广义的,在几何形状、尺寸、功能要素、精度、材料等方面的相似性为基本相似性;以基本相似性为基础,在制造、装配等生产、经营、管理方面所导出的相似性,称为二次相似性或派生相似性。

2. 敏捷制造

敏捷制造(AM)是指企业实现敏捷生产经营的一种制造哲理和生产模式。敏捷制造包括产品制造机械系统的柔性、员工授权、制造商和供应商关系、总体品质管理及企业重构。敏捷制造借助于计算机网络和信息集成基础结构,构造由多个企业参加的VM(virtual machine,虚拟机)环境,以竞争合作的原则,在虚拟制造环境下动态选择合作伙伴,组成面向任务的虚拟公司,进行快速和最佳生产。

3. 并行工程

并行工程(CE)是对产品及其相关过程(包括制造过程和支持过程)进行并行、一体化设计的一种系统化的工作模式。在传统的串行开发过程中,设计中的问题或不足,要分别在加工、装配或售后服务中才能被发现,然后再修改设计,改进加工、装配或售后服务(包括维修服务);而并行工程就是将设计、工艺和制造结合在一起,利用计算机互联网并行作业,大大缩短生产周期。

4. 快速原型制造技术

快速原型制造技术(RPM)是集计算机辅助设计与制造(computer-aided design and manufacturing, CAD/CAM)技术、激光加工技术、数控技术和新材料技术等领域的最新成果于一体的零件原型制造技术。它不同于传统的用材料去除方式制造零件的方法,而是用一层一层

积累材料的方式构造零件模型。它利用所要制造零件的三维 CAD 模型数据直接生成产品原型,并且可以方便地修改 CAD 模型后重新制造产品原型。该技术不像传统的零件制造方法那样需要制作木模、塑料模或陶瓷模等,可以把零件原型的制造时间减少为几天、几小时,大大缩短了产品开发周期,降低了开发成本。随着计算机技术的快速发展和三维 CAD 软件应用的不断推广,越来越多的产品基于三维 CAD 设计开发,使得快速原型制造技术的广泛应用成为可能。快速原型制造技术已广泛应用于航空航天、汽车、通信、医疗、电子、家电、玩具、军事装备、工业造型(雕刻)、建筑模型、机械等领域。

5. 虚拟制造技术

虚拟制造技术(VMT)以计算机支持的建模、仿真技术为前提,对设计、加工制造、装配等全过程进行统一建模,在产品的设计阶段,实时并行模拟出产品未来制造全过程及其对产品的影响,预测出产品的性能、产品的制造技术、产品的可制造性与可装配性,从而更有效、更经济地灵活组织生产,使工厂和车间的设计布局更合理、有效,以达到产品开发周期最短化、成本最小化、产品设计质量最优化、生产率最高化。虚拟制造技术填补了 CAD/ CAM 技术与生产全过程、企业管理之间的技术缺口,在产品投产之前就把产品的工艺设计、作业计划、生产调度、制造过程、库存管理、成本核算、零部件采购等企业生产经营活动在计算机上加以显示和评价,使设计人员和工程技术人员在真实制造产品之前,通过计算机虚拟产品来预见可能发生的问题和后果。虚拟制造技术的关键是建模,即将现实环境下的物理系统映射为计算机环境下的虚拟系统。采用虚拟制造技术生产的产品是虚拟产品,但具有真实产品所具有的一切特征。

6. 智能制造

智能制造(IM)是制造技术、自动化技术、系统工程与人工智能等学科互相渗透、互相交织而形成的一门综合技术。其具体表现为:智能设计、智能加工、机器人操作、智能控制、智能工艺规划、智能调度与管理、智能装配、智能测量与诊断等。它强调通过智能设备和自治控制来构造新一代的“智能制造系统模式”。

智能制造技术具有自律能力、自组织能力、自学习与自我优化能力、自修复能力,因而适应性极强,而且由于采用虚拟现实技术(VR 技术),人机界面更加友好。因此,智能制造技术的研究开发对于提高生产率与产品品质、降低成本,提高制造业市场应变能力、国家经济实力和国民生活水平,具有重要意义。

“工业 4.0”是以智能制造为主导的第四次工业革命,或革命性的生产方法,即通过充分利用信息通信技术和网络空间虚拟系统——信息物理系统(cyber-physical system, CPS)相结合的手段,将制造业向智能化转型。智能工厂、智能生产、智能物流是“工业 4.0”的三大主题。

1.1.3 先进制造技术的特点

先进制造技术的特点在于:

(1) 先进制造技术不是一项具体的技术,而是一项面向工业应用的综合技术。

先进制造技术并不限于制造过程本身,它涉及市场调研、产品开发及工艺设计、生产准备、加工制造、售后服务等产品生命周期的所有内容,并将它们结合成一个有机的整体。

(2) 先进制造技术的先进性是建立在不断汲取其他相关领域新技术的基础上的,是动态的、相对的。

先进制造技术通过不断吸收各种高新技术成果,并将其渗透到企业生产的所有领域和产品生命周期的全过程,实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产。

(3) 创新是先进制造技术的灵魂,并贯穿于制造全过程。

先进制造技术提倡的创新涵盖产品创新、生产工艺过程创新、生产手段创新、管理创新、组织创新和市场创新等。

(4) 技术与管理的结合是先进制造技术的一个突破,新的制造模式层出不穷是人类生产活动的一大进步。

先进制造技术的发展针对某一具体制造目标(如汽车制造、电子工业),有明确的需求导向,不以追求技术高新为目的,注重最好的实践效果,以提高企业竞争力和促进国家经济增长及综合实力为目标。

(5) 市场和工业领域的需求是先进制造技术的出发点与归宿,是先进制造技术发展的动力和目标。

先进制造技术的成败取决于市场检验,企业是先进制造技术的创新主体。

(6) 先进制造技术是驾驭生产过程的系统工程。

先进制造技术特别强调计算机技术、信息技术、传感技术、自动化技术、新材料技术和现代系统管理技术在产品设计、制造和生产组织管理、销售及售后服务等方面的应用。它要不断吸收各种高新技术成果,并与传统制造技术相结合,使制造技术成为能驾驭生产过程的物质流、能量流和信息流的系统工程。

(7) 先进制造技术是面向全球竞争的技术。

随着全球市场的形成,市场竞争变得越来越激烈。先进制造技术正是为适应这种激烈的市场竞争而出现的。因此,一个国家的先进制造技术的主体应该具有世界先进水平,应能支持该国制造业在全球市场上的竞争力。

1.1.4 先进制造技术的体系结构

先进制造技术由主体技术群、支撑技术群和制造技术环境三个部分构成,这三个部分相互联系、相互促进,组成一个完整的体系,每个部分均不可缺少,否则就很难发挥预期的整体功能效益。图 1-1 所示为该体系结构的框图。

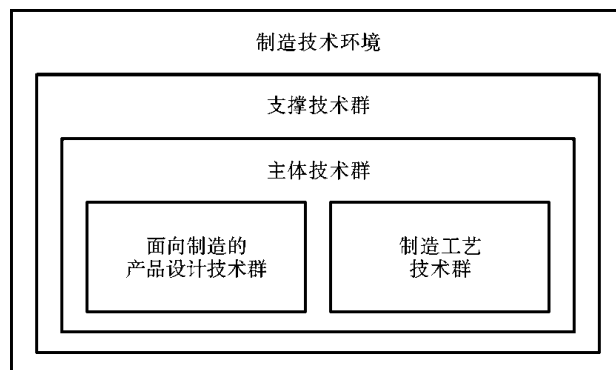


图 1-1 先进制造技术的体系结构

1. 主体技术群

主体技术群包括两个基本部分——面向制造的产品设计技术群和制造工艺技术群。

1) 面向制造的产品设计技术群

面向制造的产品设计技术群指用于生产准备(制造准备)的工具群和技术群。设计技术对

新产品开发生产费用、产品质量,以及新产品上市时间都有很大影响。产品和制造工艺的设计可以采用一系列工具,例如计算机辅助设计(CAD)及工艺过程建模和仿真等,生产设施、装备和工具,甚至整个制造企业都可以采用先进技术更有效地进行设计。近几年发展起来的产品和工艺的并行设计具有双重目的,一是缩短新产品上市的周期,二是可以将生产过程中产生的废物减少到最低程度,使最终产品可回收、可再利用,因此该并行设计对实现面向保护环境的制造而言是必不可少的。

2) 制造工艺技术群

制造工艺技术群指用于物质产品(物理实体产品)生产(如注塑成型、铸造、冲压、磨削等)的过程及设备。随着高新技术的不断渗入,传统的制造工艺和装备正在产生质的变化。制造工艺技术群是有关加工和装配的技术,也是制造技术或生产技术的传统领域。

2. 支撑技术群

支撑技术群指支持产品设计和制造工艺取得进步的基础性的核心技术。基本的生产过程需要一系列的支撑技术,诸如测试和检验、物料搬运、生产(作业)计划的控制,以及包装等。它们也是用于保证和改善主体技术协调运行的技术,是工具、手段和系统集成的基础技术。支撑技术群包括以下内容。

(1) 信息技术:主要涉及接口和通信、数据库技术、集成框架、软件工程、人工智能、专家系统和神经网络、决策支持系统等。

(2) 标准和框架:主要涉及数据标准、产品定义标准、工艺标准、检验标准、接口框架。

(3) 机床和工具技术。

(4) 传感器和控制技术:主要涉及单机加工单元和过程的控制、执行机构、传感器和传感器组合、生产作业计划。

(5) 其他。

1.2 精密与超精密加工技术

从先进制造技术的实质来看,先进制造技术主要有精密与超精密加工技术和制造自动化两大领域。前者追求加工上的精度和表面质量极限;后者包括了产品设计、制造和管理的自动化,不仅是快速响应市场需求、提高生产率、改善劳动条件的重要手段,而且是保证产品质量的有效举措。两者有密切的关系,有许多精密与超精密加工要依靠自动化技术才能达到预期指标,制造自动化通过精密与超精密加工才能准确、可靠地实现。两者具有对全局的决定性的作用,是先进制造技术的支柱。在制造自动化领域,已经进行了大量有关计算机辅助制造软件的开发,还进行了计算机集成制造(CIM)技术,生产模式如精良生产、敏捷制造、虚拟制造,以及清洁生产和绿色制造等的研究。这些都代表了当今社会高新制造技术的一个重要方面。但是,作为制造技术的主战场——产品的实际制造,必然要依靠精密与超精密加工技术。例如,计算机工业的发展不仅要在软件上,还要在硬件上,亦即在集成电路芯片上有很强的设计、开发和制造能力。目前我国集成电路的制造水平制约了计算机工业的发展。当代的精密工程、微细工程和纳米技术是现代制造技术的前沿、未来技术的基础。

1.2.1 精密与超精密加工的概念

所谓精密与超精密加工,是指加工精度和表面质量达到极高程度的加工工艺。通常将加

工精度在 $1\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 Ra 为 $0.1\sim 0.02\ \mu\text{m}$ 的加工称为精密加工, 而将加工精度高于 $0.1\ \mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 Ra 小于 $0.01\ \mu\text{m}$ 的加工称为超精密加工。

不同的发展时期, 其技术指标有所不同。图 1-2 所示为 1983 年, 日本田口教授经大量考察精密与特种加工工厂后, 对当代各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势的预测。

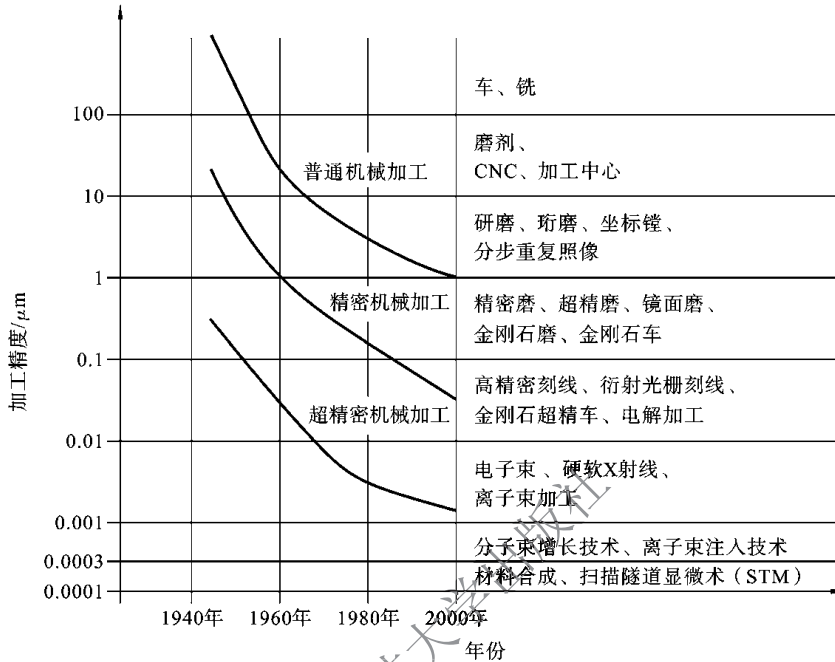


图 1-2 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势

1.2.2 精密与超精密加工的技术内涵

精密与超精密加工包括微细加工、超微细加工、光整加工、精整加工等加工技术。

微细加工技术是指制造微小尺寸零件的加工技术, 超微细加工技术是指制造超微小尺寸零件的加工技术。它们是针对集成电路的制造要求而提出的, 由于尺寸微小, 其精度用去除厚度的绝对值来表示, 而不是用所加工尺寸与尺寸误差的比值来表示。

光整加工一般是指减小表面粗糙度数值和提高表面层力学性能的加工方法, 不着重于提高加工精度, 其典型加工方法有珩磨、研磨、超精加工及无屑加工等。实际上, 这些加工方法不仅能提高表面质量, 而且可以提高加工精度。

精整加工是与光整加工对应的, 指既要减小表面粗糙度数值和提高表面层力学性能, 又要提高加工精度(包括尺寸精度、几何精度)的加工方法。

1.2.3 精密与超精密加工的作用

现代机械工业之所以致力于提高零件加工精度, 主要原因在于以下三个方面。

(1) 提高零件加工精度可提高产品的性能和质量, 提高产品的稳定性和可靠性。

英国劳斯莱斯(Rolls-Royce)^①公司的资料表明, 将飞机发动机转子叶片的加工精度由 60

① 本书中若干公司名、单位名采用业内通讯的简称或缩写。

μm 提高到 $12\ \mu\text{m}$, 加工表面粗糙度 Ra 由 $0.5\ \mu\text{m}$ 减小到 $0.3\ \mu\text{m}$, 则发动机的压缩效率将从 89% 提高到 94% 。20 世纪 80 年代初, 苏联从日本引进了 4 台精密数控铣床, 用于加工螺旋桨曲面, 使其潜艇的水下航行噪声大幅度下降, 即使使用精密的声呐探测装置也很难发现潜艇的行踪, 此事震惊了西方有关国家的国防部门。

(2) 提高零件加工精度可促进产品的小型化。

传动齿轮的齿形及齿距误差直接影响了其传递转矩的能力。若将该误差从目前的 $3\sim 6\ \mu\text{m}$ 降低到 $1\ \mu\text{m}$, 则齿轮箱单位质量所能传递的转矩将提高近 1 倍, 从而可使目前的齿轮箱尺寸大大缩小。IBM(国际商业机器公司)开发的磁盘, 其记忆密度由 1957 年的 $300\ \text{bit}/\text{m}^2$ 提高到 1982 年的 $254\ \text{万}\ \text{bit}/\text{cm}^2$, 提高了近 1 万倍, 这在很大程度上应归功于磁盘基片加工精度的提高和表面粗糙度数值的减小。

(3) 提高零件加工精度可增强零件互换性, 提高装配生产率, 促进自动化装配, 推进自动化生产。

自动化装配是提高装配生产和装配质量的重要手段。自动化装配的前提是零件必须完全互换。这就要求严格控制零件的加工公差, 这导致对零件的加工精度要求极高, 而精密与超精密加工使之成为可能。

1.2.4 精密与超精密加工的难点

超微量去除技术是实现超精密加工的关键, 其难点如下:

- (1) 工具和工件表面微观的弹性变形和塑性变形是随机的, 精度难以控制;
- (2) 工艺系统的刚度和热变形对加工精度有很大影响;
- (3) 去除层越薄, 被加工表面所受的切应力越大, 材料就越不易被去除。

当去除厚度在 $1\ \mu\text{m}$ 以下时, 材料被去除的区域内产生的切应力急剧增大。因为当晶粒的尺寸为数微米时, 加工就需在晶粒内进行, 即把晶粒当作一个个不连续体进行切削。在晶粒内部, 大约 $1\ \mu\text{m}$ 的间隙内就有一个位错缺陷。

1.2.5 精密与超精密加工的方法

精密与超精密加工主要有以下几种分类方式。

(1) 精密与超精密加工按加工方式不同可分为切削加工、磨料加工(分固结磨料和游离磨料加工)、特种加工和复合加工四类, 见表 1-1。

表 1-1 常用精密与超精密加工方法

分类	加工方法	加工工具	精度/ μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
切削加工	精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具、人造聚晶金刚石刀具、立方氮化硼刀具、陶瓷刀具、硬质合金刀具	$1\sim 0.1$	$0.05\sim 0.008$	非铁金属及其合金等软材料	球、磁盘、反射镜
	精密、超精密铣削					多面棱体
	精密、超精密镗削					活塞销孔
	微孔钻削	硬质合金钻头、高速钢钻头	$20\sim 10$	0.2	低碳钢、铜、铝、石墨、塑料	印制电路板、石墨模具、喷嘴

续表

分类	加工方法	加工工具		精度/ μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	被加工材料	应用
磨料加工	精密、超精密 砂轮磨削	氧化铝、碳化硅、 立方氮化硼、金刚石 等磨料	砂轮	5~0.5	0.05~0.008	钢铁材料、脆性材料、 非金属材料	外圆、孔、 平面
			砂带				平面、外圆 磁盘、磁头
	研磨	精密、超精密 研磨	铸铁、硬木、塑料等研 具,氧化铝、氮化硅、金刚 石等磨料	1~0.1	0.025~0.008	钢铁材料、脆性材 料、非金属材料	外圆、孔、平面
		磨石研磨	氧化铝磨石、玛瑙磨石、 电铸金刚石磨石				平面
		磁性研磨	磁性磨料	10~1	0.01	钢铁材料	外圆、去毛刺
		滚动研磨	固结磨料、游离磨料、化 学或电解作用液体			钢铁材料等	型腔
	抛光	精密、超精 密抛光	抛光器,氧化铝、氮化铬 等磨料	1~0.1	0.025~0.008	钢铁材料、铝合金	外圆、孔、 平面
		弹性发 射加工	聚氨酯球抛光器、高压 抛光液	0.1~0.001	0.025~0.008	钢铁材料、非金属 材料	平面、型面
		液体动 力抛光	带有楔槽工作表面的抛 光器、抛光液	0.1~0.01	0.025~0.008	钢铁材料、非金属 材料、非铁金属材料	平面、圆柱面
		水合抛光	聚氨酯球抛光器、抛 光液	0.1	0.01	钢铁材料、非金属 材料	平面
		磁流体抛光	非磁性磨料、磁流体	0.1	0.01	钢铁材料、非金属 材料、非铁金属材料	平面
		挤压研抛	黏弹性物质、磨料	5	0.01	钢铁材料等	型面、型腔去 毛刺、倒棱
		喷射加工	磨料、液体	5	0.01~0.02	钢铁材料等	孔、型腔
		砂带研抛	砂带、接触轮	1~0.1	0.01~0.08	钢铁材料、非金属 材料、非铁金属材料	外圆、孔、 平面、型面
		超精研抛	研具(脱脂木材、细毛 毡)、磨料、纯水	1~0.1	0.01~0.08	钢铁材料、非金属 材料、非铁金属材料	平面
		超精加工	精密超 精加工	磨条、磨削液	1~0.1	0.025~0.01	钢铁材料等
	珩磨	精密珩磨	磨条、磨削液	1~0.1	0.025~0.01	钢铁材料等	孔