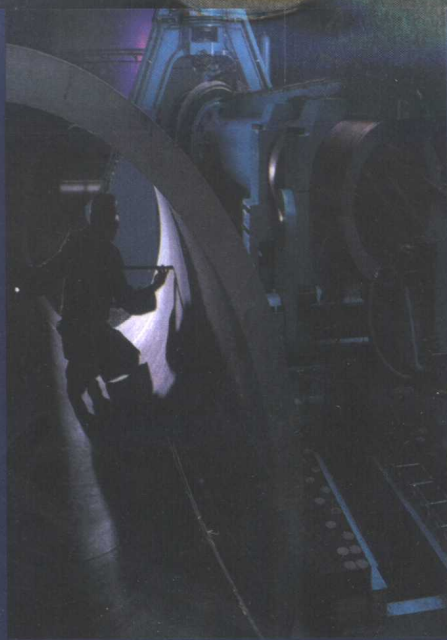


WUTP

普通高等学校机械设计制造
及其自动化专业新编系列教材



主 编 王贵成 张银喜

精密与特种加工

Jingmi Yu Tezhong Jiagong

武汉理工大学出版社

普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材

精密与特种加工

主编 王贵成
张银喜

武汉理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工/王贵成,张银喜主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2001.7
ISBN 7-5629-1734-5

I. 精… II. ①王… ②张… III. 机械加工-精密与特种加工-教材 IV. TH161

内容提要

本书是机械设计制造及其自动化专业新编系列教材之一。它涵盖了原机械制造类专业教学中精密加工、特种加工和微细加工等课程的教学内容。全书以系统讲述精细加工工艺为主线,以阐明现代加工技术的基本原理和方法为基础,以实现机械、物理、化学和复合精密加工的综合交叉和融合为重点,以培养和激发创新思维和能力为目标,全面构建出集精密加工、特种加工和复合加工等技术为一体的新课程体系。

本书分为六章。内容包括:精密切削加工,精密磨削加工,电火花加工,电化学加工,高能束加工和复合加工等,较系统地反映了国内外本领域的技术现状及发展趋势。可作为高等工业院校机械设计制造及其自动化专业及相关专业的教材,也可供从事精密加工、特种加工、微细加工等技术研究的工程技术人员和研究生参考。

出版者:武汉理工大学出版社(武汉市:武昌珞狮路122号 邮编:430070)

印刷者:武汉理工大学出版社印刷厂

发行者:各地新华书店

开本:880×1230 1/16

印张:11

字数:350千字

版次:2001年7月第1版 2001年7月第1次印刷

印数:1~5000册

定价:16.50元

(本书如有印装质量问题,请向承印厂调换)

普通高等学校
机械设计制造及其自动化专业新编系列教材
编审委员会

顾问:陈心昭 王益群 蔡 兰 束鹏程 孙宗禹
洪迈生

名誉主任:杨叔子

主任:张福润 高鸣涵

副主任:杨海成 李永堂 周彦伟 杨明忠

委员:(按姓氏笔画顺序排列)

王建中	王贵成	王益群	司徒忠	刘玉明
吕 明	许明恒	孙宗禹	孙树栋	朱喜林
陈心昭	李永堂	李 言	李杞仪	陈作柄
杨叔子	杨明忠	陈奎生	陈统坚	严拱标
杨海成	张福润	束鹏程	罗迎社	周彦伟
洪迈生	钟志华	赵 韩	钟毓宁	陶文铨
夏 季	高鸣涵	殷国富	董怀武	曾志新
韩荣德	傅祥志	谭援强	蔡 兰	魏生民

总责任编辑:刘永坚 田道全

秘 书 长:蔡德明

出版说明

高等学校的教材建设向来是学科建设和教学改革的重要内容,其对教学过程和教学效果的重要影响是教育界所公认的。但教材建设与教学需要之间的矛盾永远存在也是一个客观的事实。正因为如此,教材建设才具有永恒的意义。特别是在这世纪交替的时期,中国的高等教育所面临的两个重大变革——高等学校本科专业目录调整和高等学校管理体制及布局结构调整,都对高校的教材建设提出了更高的要求。随着专业的合并,新专业的专业面拓宽,原有老专业的教材明显不能适应新专业的教学要求;调整后高校规模扩大,招生人数增加,对教材的需求也随之激增。在新的专业目录中,机械设计制造及其自动化专业与原有专业目录有了较大的变化,涵盖了原有的9个专业。相应的专业业务培养目标、教学要求、课程设置、学时数要求、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。为适应新专业的培养目标和教学要求,武汉理工大学出版社在经过全面、细致和深入调研的基础上,组织编写了这套面向全国普通高等学校的新的系列教材。

本套教材面向全国普通高等学校,在保证内容要反映国内外机械学科最新发展的基础上,以满足一般院校的本科专业教学要求,实现专业的业务培养目标为基本原则。遵照全国高校机械工程类专业教学指导委员会制订的专业培养方案和教学计划设置课程体系,突出“系列”的特色,首批编写、出版的21种教材可基本满足一般院校本科教学需要。编写中强调各门课程之间的联系和衔接,强调教材整体风格的统一和协调,力求在加强基础、协调内容、适当降低难度、努力拓宽知识面向、适应科技发展、更新内容并大力引入多媒体教学手段等方面取得进展,以形成特色,更好地满足不同学校的教学需求。

本套教材集中了全国30多所著名大学的专家、教授和中青年教学骨干,分别担任系列教材的主编、主审和参编,组成了一个阵容强大、结构合理的编审委员会。特别是第二届全国高校机械工程类专业教学指导委员会主任委员杨叔子院士欣然出任编审委员会名誉主任,更增加了编审委员会的权威性。正是由于编委会成员务实、高效的工作,全体编审人员高度的责任心和严谨的治学精神,本套教材才能在这样短的时间内完成编写、出版的任务。杨叔子院士亲自为系列教材作序,更使全套教材光彩倍增!但我们深知,院士为一套教材作序,在国内是十分少见的,这充分体现了杨院士对教学改革及教材建设的热切关注和积极支持。这既是杨院士对编委会此前工作的鼓励和肯定,同时也是对编委会今后工作的指导和鞭策。我们一定不会辜负杨院士以及全国众多院校师生的期望。本套教材首期21种出齐后,一方面我们将在使用教材的广大师生提出意见和建议的基础上不断修订和完善,同时还将根据学校教学改革和课程设置的需要及时增补新的教材,使这套教材真正成为既能满足学校当前教学需要,又能起到推动专业教学内容和课程体系改革作用的一套精品教材。

武汉理工大学出版社

2001.6

序

20世纪,人类文明达到了前所未有的高度。由于相对论、量子论、基因论、信息论等科学技术成就的取得,现在人类在物质领域已深入到基本粒子世界,在生命科学领域已深入到分子水平,在思维科学领域则主要是数学和脑科学的巨大进步。科学技术的迅猛发展,促使科学技术综合化、整体化以及人文和科技相互渗透、相互融合的趋势加速。

近20年来,我们在经济战线上坚持市场取向的改革,实行以公有制为主体、多种所有制经济共同发展的基本经济制度,进行经济结构的战略性调整,推动两个根本性转变以及全方位、多层次、宽领域的对外开放,致使我国的经济体制也发生了巨大的变革。随着社会主义市场经济体制的建立和不断完善,社会对人才需求的多样性、适应性要求不断增强。

在人类即将跨入21世纪的时候,我国高等教育战线在教育要“面向现代化,面向世界,面向未来”的思想指引下,开展了起点高、立意新、系统性强、有组织、有计划、有步骤的教学改革工程。伴随着教学改革的不深入,素质教育的观念、大工程的观念、终身教育以及回归工程的观念日益深入人心,人们对拓宽本科教育口径、加强和扩展本科教育共同基础的要求日益强烈。

1998年8月,教育部正式颁布了新的普通高等学校本科专业目录,专业总数由原来的500多种减少至249种。新专业目录的颁布,突破了传统的、狭隘的专业教育观念,拓宽了人才培养工作的视野,为人才培养能较好地适应科学技术和社会进步的需要创造了条件。许多学校也都以专业调整、改造和重组为契机,大力调整人才知识、能力和素质结构,拓宽基础,整合课程,构建新的专业平台,柔性设置专业方向,不断深化人才培养模式的改革。

教材建设是学校的最基本建设之一。教学改革的深入发展必然要求有相适应的教材。为适应新的专业培养目标和教学要求,组织编写出版供“机械设计制造及其自动化”新专业的教学用书,特别是系列教材就显得十分迫切和重要了。武汉理工大学出版社的领导和编辑们为改变目前国内已出版的机械类专业教材普遍存在的内容偏深、知识面偏窄的倾向,决定面向全国普通高等学校机械工程类专业的学生出版一套系列教材,这是一个非常好的决策。他们的这一决定也得到了全国几十所院校机械工程系的领导和众多专家、教授的积极响应和大力支持,并提出了许多建设性的意见,其中一些教授如合肥工业大学校长陈心昭教授、燕山大学校长王益群教授、江苏理工大学校长蔡兰教授、西安交通大学副校长束鹏程教授、西北工业大学常务副校长杨海成教授等还非常乐意地承担了该系列教材的主编、主审及编审委员会工作。

编写教材除了应该具有针对性外,还应努力编出特色。根据武汉理工大学出版社和教材编审委员会的决定,该系列教材将完全按照第二届全国高校机械工程类专业教学指导委员会提出的机械设计制造及其自动化宽口径专业培养方案中所设置的课程来编写,这就保证了该套教材可以具有课程体系新、专业口径宽、改革力度大的特点,并可以满足不同院校办出各自专业特色的需要。

按照教材编审委员会的规划,该套教材首批将推出21种,包括机械工程概论、画法几何及机械制图、画法几何及机械制图习题集、机械原理、机械设计、理论力学、材料力学、工程热力学、工程材料、机械制造技术基础、材料成型基础、工程测试、数控技术、机械工程控制基础、液压与气压传动、机械CAD/CAM、机械工程项目管理、机电系统设计、现代设计方法、精密与特

种加工、机械工程专业英语等,涵盖了机械设计制造及其自动化专业的主要专业基础课和部分专业选修课而形成系列,因而可以较好地满足该专业的教学需要。也正是由于是系列教材,各门课程之间的联系和衔接在教材的策划、组织和编写过程中,都可开展充分的讨论和进行仔细的协调,因此有利于保证整套教材风格统一,内容分配合理,既相互呼应,又避免不必要的重复。

我殷切地希望,这套教材在加强基础、协调内容、适当降低难度、努力拓宽知识面向、适应科技发展、更新内容和大力引入多媒体等现代教育技术手段上取得进展,真正成为能满足普通高等学校本科生需要的优秀教学用书,在众多的机械类专业教材中,争芳斗艳,别具特色。

按照武汉理工大学出版社的计划,这套系列教材首批将在2001年秋季全部出齐。金无足赤,人无完人,书无完书。我相信,在读者的关心与帮助下,随着这套教材的不断发行、应用与改进,必将促进机械设计制造及其自动化专业教学用书质量的进一步提高,推动机械类专业教学内容和课程体系改革的进一步深入。

只木独秀难成林,千紫万红才是春!

面向21世纪,希望无限,谨为之序。

中国科学院院士、华中科技大学教授 **杨叔子**
全国高校机械工程类专业教学指导委员会主任委员

2000年11月18日

前 言

为适应教育部颁布的新专业目录中“机械设计制造及其自动化”专业教学需要,根据全国普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材编审委员会的统一安排,我们结合先进制造工艺技术发展及近年来专业教学改革与探索的实践,编写出《精密与特种加工》一书。

本教材在编写中以下几个方面进行了大胆的探索和尝试:

1. 综合性 现代机械制造技术的发展呈现出高度分化又高度综合,而以高度综合为主的趋势,各学科、专业之间不断渗透、交叉和融合,其界限逐渐淡化甚至消失。在教材系统构建方面突出其综合交叉,以拓宽知识视野,逐步树立大工程教育观和学习观。

2. 先进性 机械制造技术的基础是制造工艺,经过优化后的常规工艺以及新型加工工艺才能实现优质、高效、低耗、清洁加工的目标。在教材内容取舍方面,在确保其系统完整的基础上注重学术上的先进性,尽可能吸收本领域及相关领域取得的最新成果,使教材具有鲜明的时代特征。

3. 实用性 精密加工、特种加工和复合加工都是当前机械制造业生产中常用的最重要的加工技术,也是先进制造工艺技术的重要组成部分。此次教材编写突破了传统模式,将精密加工、特种加工和复合加工有机地整合为一本教材,是教材建设与改革中的大胆尝试,在构建一门全新课程体系的同时,我们非常重视其实用范围,期望它能成为新时期创新创业型人才培养的有力支撑。

本书以系统讲述精细加工工艺为主线,以阐明现代机械加工技术基础原理和方法为基础,以实现机械、物理、化学和复合精密加工的综合交叉和融合为重点,以激发和培养创新意识、创新思维和创新能力的目标,力图构建出集精密加工、特种加工和复合加工技术为一体的现代精密与特种加工技术新体系。

本教材是普通高等学校机械设计制造及其自动化专业新编系列教材之一,由江苏理工大学王贵成和太原理工大学张银喜主编。具体章节的编写人员如下:绪言:王贵成;第一章:王树林、王贵成;第二章:张银喜、赵丽洁;第三章:张银喜;第四章:华希俊;第五章:张永康;第六章:任家隆、赵丽杰、王贵成。

由于本书编写是一种探索和尝试,错误和不当之处在所难免,殷切地希望广大师生及读者提出宝贵意见。

主 编

2001年3月于镇江

目 录

0 绪言	(1)
0.1 精密与特种加工在制造业中的地位和作用	(1)
0.2 本课程的性质和任务	(2)
0.2.1 本课程的性质	(2)
0.2.2 本课程的主要任务	(2)
1 精密切削加工	(3)
1.1 概述	(3)
1.1.1 概念	(3)
1.1.2 精密切削加工分类	(4)
1.1.3 精密加工与经济性	(5)
1.2 精密切削加工机理	(5)
1.2.1 切削变形和切削力	(5)
1.2.2 切削热和切削液	(10)
1.2.3 刀具磨损、破损及耐用度	(12)
1.3 精密切削加工机床及应用	(15)
1.3.1 精密机床发展概况	(15)
1.3.2 精密机床的精度指标	(16)
1.3.3 精密主轴部件	(17)
1.3.4 床身和精密导轨部件	(18)
1.3.5 进给驱动系统	(20)
1.3.6 在线检测与误差补偿技术	(23)
1.3.7 典型精密和超精密机床简介	(24)
1.4 超精密切削加工简介	(26)
1.4.1 超精密切削加工发展概况及应用	(26)
1.4.2 超精密切削加工的特殊性	(26)
1.4.3 超精密切削加工技术发展展望	(27)
思考题和习题	(28)
2 精密磨削加工	(29)
2.1 概述	(29)
2.1.1 概述	(29)
2.1.2 精密磨削加工的分类	(29)
2.2 精密磨削加工机理	(32)
2.2.1 磨削过程及磨削力	(32)
2.2.2 磨削温度与磨削液	(35)
2.2.3 磨削质量和裂纹控制	(38)
2.3 精密磨削加工的机床及应用	(42)
2.3.1 概述	(42)
2.3.2 精密磨削机床的结构及特点	(43)
2.4 超精密磨削加工简介	(47)
2.4.1 超精密磨削的特点	(47)

2.4.2	超精密磨削机理	(48)
2.4.3	超精密磨床	(48)
2.4.4	精密和超精密砂带磨削	(50)
2.4.5	研磨	(52)
2.4.6	超精研磨	(55)
2.4.7	磁性研磨	(55)
	思考题和习题	(56)
3	电火花加工	(57)
3.1	概述	(57)
3.1.1	概述	(57)
3.1.2	实现电火花加工的条件	(57)
3.1.3	电火花加工的特点和用途	(57)
3.1.4	电火花加工工艺方法分类	(58)
3.2	电火花加工原理	(58)
3.2.1	基本原理	(58)
3.2.2	电火花加工机理	(59)
3.2.3	影响材料放电腐蚀的因素	(61)
3.2.4	电火花加工的基本工艺规律	(63)
3.3	电火花加工机床	(66)
3.3.1	电火花成型加工机床	(66)
3.4	电火花加工的应用	(73)
3.4.1	电火花成型加工的应用	(73)
3.4.2	电火花线切割加工的应用	(79)
	思考题和习题	(80)
4	电化学加工	(81)
4.1	概述	(81)
4.2	电化学加工基本原理	(81)
4.2.1	电化学加工过程	(81)
4.2.2	涉及电化学加工过程的相关概念	(82)
4.3	电解加工	(85)
4.3.1	电解加工的基本原理和特点	(85)
4.3.2	电解加工的电极反应	(86)
4.3.3	电解液	(88)
4.3.4	电解加工的基本工艺规律	(91)
4.3.5	提高电解加工精度的途径	(97)
4.3.6	电解加工的基本设备	(99)
4.3.7	电解加工的应用	(101)
4.4	电铸、电刷镀及复合镀加工	(105)
4.4.1	电铸加工	(105)
4.4.2	电刷镀加工	(109)
4.4.3	复合镀	(112)
	思考题和习题	(112)
5	高能束加工	(114)
5.1	概述	(114)
5.2	离子束加工	(114)

5.2.1	离子束加工的基本原理	(114)
5.2.2	离子束加工设备	(115)
5.2.3	离子束加工应用	(116)
5.3	电子束加工	(122)
5.3.1	电子束加工的基本原理和特点	(122)
5.3.2	电子束加工设备	(123)
5.3.3	电子束加工应用	(124)
5.4	激光加工	(127)
5.4.1	激光加工的主要特点	(127)
5.4.2	激光加工设备	(127)
5.4.3	我国近年激光技术应用进展	(129)
5.4.4	激光加工的主要应用	(129)
	思考题和习题	(137)
6	复合加工	(138)
6.1	概述	(138)
6.1.1	概述	(138)
6.1.2	复合加工的分类	(138)
6.2	复合切削加工	(138)
6.2.1	超声振动切削	(139)
6.2.2	磁化切削加工	(142)
6.2.3	低(高)温切削加工	(144)
6.3	电解机械复合加工	(147)
6.3.1	复合电解磨削	(147)
6.3.2	复合电解珩磨	(151)
6.3.3	电解研磨复合光整加工	(152)
6.4	超声电火花(电解)复合加工	(155)
6.4.1	超声电火花复合加工	(155)
6.4.2	超声电解加工	(156)
6.5	电解电火花磨削加工	(158)
6.5.1	MEEC法	(158)
6.5.2	新MEEC法	(158)
	思考题和习题	(161)
	参考文献	(162)

0 绪 言

0.1 精密与特种加工在制造业中的地位和作用

制造业是将制造资源(物料、能源、设备、工具、资金、技术、信息和人力等)通过制造过程转化为可供人们使用与利用的工业品和生活消费品的行业。制造业是国民经济的基础,它创造了人类社会财富的60%~80%。从某种意义上讲,制造技术水平的高低是衡量一个国家国民经济和综合国力的重要指标之一。

制造技术的发展是由社会、政治和经济等诸多因素决定的。纵观近两百年制造业发展的历史进程,不难看出:技术推动和市场牵引是影响其发展的最主要和最直接的因素。在科学技术发展的推动下,制造业的资源配置沿着“劳动密集→设备密集→信息密集→知识密集”的方向发展;在市场需求不断变化的驱动下,制造业的生产规模沿着“小批量→少品种→大批量→多品种变批量”的方向发展;与之相适应,制造技术的生产方式沿着“手工→机械化→单机自动化→刚性流水自动化→柔性自动化→智能自动化”的方向发展。精密加工和特种加工都是机械制造业生产的主要加工方法,是新世纪知识经济时代先进制造工艺技术的重要组成部分,在制造业乃至社会发展进程中起到非常重要的作用。

精密加工是指加工精度和表面质量达到极高精度的加工工艺,通常包括精密切削加工和精密磨削加工,在不同制造业发展时期其最高技术指标有所不同。如20世纪60年代,一般加工精度为 $100\mu\text{m}$,精密加工精度为 $1\mu\text{m}$,超精密加工精度为 $0.1\mu\text{m}$;20世纪90年代,一般加工精度达到 $5\mu\text{m}$,精密加工为 $0.05\mu\text{m}$,超精度加工精度达到 $0.005\mu\text{m}$;而到20世纪末,一般加工精度达到 $1\mu\text{m}$,精密加工为 $0.01\mu\text{m}$,而超精密加工为 $0.001\mu\text{m}$ (1nm)。加工精度的不断提高对提高机电产品的性能、质量和可靠性,改善零件的互换性,提高装配效率等都具有至关重要的作用。精密和超精密加工已成为当前国际经济竞争,尤其是发展尖端技术、发展国防工业并取得竞争优势的关键技术。如英国Rolls-Royce公司将飞机发动机转子叶片的加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$,则发动机压缩效率从89%上升到94%;美国MX战略导弹(可装10个核弹头)制导系统的陀螺仪精度比民兵Ⅲ型洲际导弹陀螺仪的精度提高一个数量级,其命中的圆概率误差由500m减小到50~150m;齿轮的齿形及齿距误差从3~ $6\mu\text{m}$ 降低到 $1\mu\text{m}$,则单位齿轮箱重量所能传递的扭矩将提高近1倍。可见,精密工程、微米工程和纳米技术已成为世界制造技术领域的制高点,是现代制造技术的前沿,也是明天技术的基础。

特种加工是将电能、热能、光能、声能和磁能等物理能量及化学能量或其组合乃至与机械能组合直接施加到被加工的部位上,从而实现材料去除的加工方法,也被称为非传统加工技术(通常人们将利用机械能,借助于刀具实现材料去除的方法称谓切削(磨削)加工,亦称为传统加工技术)。自原苏联学者拉扎连柯夫妇发明电火花加工新型方法近半个多世纪以来,相继出现了数十种特种加工新方法,如电解加工、超声波加工、放电成形加工、激光加工、电子束加工、离子束加工、化学加工等。特种加工技术在难加工材料加工(如耐热钢、不锈钢、钛合金、淬火钢、硬质合金、陶瓷、宝石、金刚石等高强度、高硬度、高韧性、高脆性以及高钝度金属和非金属的加工)、模具及复杂型面加工(如各种热锻模、冲裁模和冷拔模的模腔和型孔、整体涡轮、喷气涡轮机叶片、炮管内腔线以及喷油嘴和喷丝头的微小异型孔的加工等)、零件精细加工(如同服阀、低刚度的细长轴、薄壁筒和弹性元件等的加工)等领域已成为重要的加工方法或仅有的加工方法。以模具制造为例,据CIRP(国际生产工程研究会)报告,2000年工业产品零件粗加工的75%、精加工的50%及塑料零件的90%由模具成形完成。目前特种加工设备的90%以上用于模具加工,占模具加工总量的30%~50%,成为模具制造的重要工艺技术手段。随着航空航天、核能热电以及微电子工业的发展,产品向高精度、高速度、耐高温、耐高压、耐腐蚀、大功率、小型化和高可靠性方向发展,零件的特殊结构和新材料的应用对制造业提出了更高的要求,特种加工作为跨世纪的先进制造技术的重要组成部分将在21世纪人类社会进步及我国现代化建设中发挥重大作用。

综上所述,精密与特种加工在制造业的生产中占有极为重要的地位。有理由相信:随着先进制造技术的不断完善和发展,精密与特种加工技术将在机械制造业实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产,提高对动态多变的机电产品市场的适应能力和竞争能力的进程中发挥越来越大的作用。

0.2 本课程的性质和任务

0.2.1 本课程的性质

精密与特种加工是新的宽口径专业“机械设计制造及其自动化”的一门专业课程。本课程提供了先进制造工艺技术领域精密切削(磨削)加工、特种加工和复合加工相关知识,使读者对现代机械制造技术条件下精细加工工艺有较为系统的了解,并能够运用学到的知识对各种加工机理进行分析,对其加工过程进行有效控制,以降低加工成本、提高加工质量、提高劳动生产率并有效地缩短交货周期;同时作为一门专业课程还为相关课程的学习及后续开展的毕业(设计)研究提供加工理论、方法和制造工艺等方面必要的基础知识。

0.2.2 本课程的主要任务

(1)使学生从理论上认识精密切削(磨削)加工、特种加工和复合加工过程的一般现象和基本规律,能够按照零部件的加工要求去选择具体的加工方法,选择合理的加工工艺参数,并能运用所学的知识,分析和解决生产中出现的一些有关问题。

(2)初步掌握现代机械加工工艺实验研究的基本方法和技能,学会使用有关的测量仪器并进行相关的实验数据处理,对实验结果进行有效的判定和分析。

(3)对机械工程学科,特别是对目前先进制造工艺技术的发展趋势和成就有初步的了解。

1 精密切削加工

1.1 概 述

随着科学技术的发展,电子计算机、原子能、激光、宇航和国防等技术部门对零件的加工精度和表面质量要求越来越高。精密加工技术的研究及应用水平已成为衡量一个国家的机械制造业乃至整个制造业水平的重要依据。各国,特别是工业发达国家对精密加工技术极其重视,投入了大量的资金对其进行研究,以保证其尖端技术产品处于国际领先地位,提高其产品在国际中的竞争力。

1.1.1 概念

所谓精密加工,是指加工精度和表面质量达到极高程度的加工工艺。不同的发展时期,其技术指标有所不同。目前,在工业发达国家中,一般工厂能稳定掌握的加工精度是 $1\mu\text{m}$,与之相对应,将加工精度为 $0.1\sim 1\mu\text{m}$,加工表面粗糙度 R_a 在 $0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 范围内的加工方法称为精密加工。

当代多种加工方法所能达到的精度,及其发展趋势预测,见图1.1。由图中可见,2000年后,普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度可以分别达到 $1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$ 及 $0.001\mu\text{m}(1\text{nm})$ 。由此可见,精密工程正在向其终极目标——原子级精度逼近,也就是实现“移动原子”。

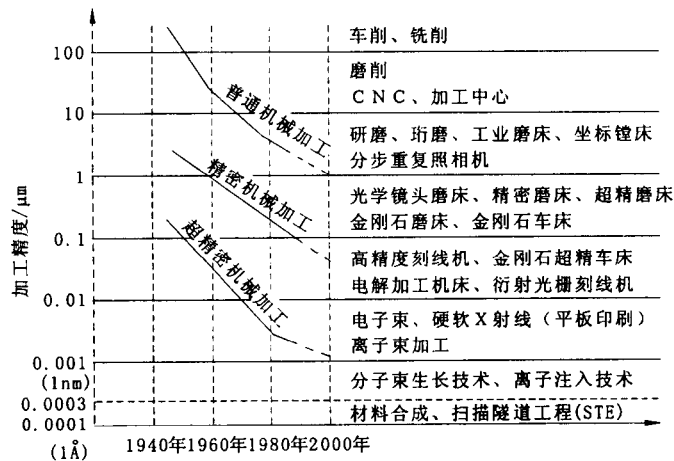


图 1.1 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势预测

现代机械工业之所以致力于提高零件加工精度,其主要的原因在于:

1. 提高零件的加工精度,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 Rolls-Royce 公司的资料表明,将飞机发动机转子叶片的加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$,加工表面粗糙度由 $R_a0.5\mu\text{m}$ 减少到 $R_a0.2\mu\text{m}$,则发动机的压缩效率将从89%提高到94%。20世纪80年代初,前苏联从日本引进了四台精密数控铣床,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,即使使用精密的声纳探测装置也很难发现潜艇的行踪,此事震惊了西方的国防部门。

2. 提高零件的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扭矩的能力。若将该误差从目前的 $3\sim 6\mu\text{m}$ 降低到 $1\mu\text{m}$,则齿轮箱单位重量所能传递的扭矩将提高近一倍,从而可使目前的齿轮箱尺寸大大缩小。IBM公司开发的磁盘,其记忆密度由1957年的 $300\text{bit}/\text{cm}^2$ 提高到1982年的 $254\text{万 bit}/\text{cm}^2$,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的减小。

3. 提高零件的加工精度可增强零件的互换性,提高装配生产率,促进自动化装配应用,推进自动化生产。自动化装配是提高装配生产率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,从而导致零件的加工精度要求极高,精密加工使之成为可能。

精密加工技术是一项涉及内容广泛的综合性技术,实现精密加工,不仅需要精密的机床设备和工具,也需要稳定的环境条件,还需运用计算技术进行实时检测和反馈补偿,只有将各个领域的技术成果集成起来,才有可能实现和发展精密加工。下面对这些关键技术进行简要介绍。

1. 精密加工机床 精密加工机床是实现精密加工的首要条件,各国投入了大量的资金对它进行研究。目前主要研究方向是提高机床主轴的回转精度,工作台的直线运动精度以及刀具的微量进给精度。精密机床主轴轴承要求具有很高的回转精度,转动平稳,无振动,其关键在于主轴轴承。早期的精密主轴采用超精密级的滚动轴承,而目前使用的精密主轴轴承是静、动态性能更加优异的液体静压轴承和空气静压轴承。工作台的直线运动精度是由导轨决定的。精密机床使用的导轨有滚动导轨、液体静压导轨、气浮导轨和空气静压导轨。为了提高刀具的进给精度,必须使用微量进给装置。微量进给装置有多种结构形式,多种工作原理,目前只有弹性变形式和电致伸缩式微量进给机构比较适用,尤其是电致伸缩微量进给装置,可以进行自动化控制,有较好的动态特性,在精密机床进给系统中得到广泛的应用。

2. 金刚石刀具 精密切削加工必须能够均匀地切除极薄的金属层,微量切除是精密加工的重要特征之一。金刚石刀具是精密切削中的重要手段。金刚石刀具具有两个重要的问题要解决:一是金刚石晶体的晶面选择,这对刀具的使用性能有重要的影响;二是金刚石刀具刃口的锋利性,即刀具刃口的圆弧半径,它直接影响到切削加工的最小切削深度,影响到微量切除能力和加工质量。先进国家刃磨金刚石刀具的刃口半径可以小到数纳米的水平。我国在这方面的研究相对落后,目前刃磨的金刚石刀具的刃口半径只能达到 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 。另外,当刃口半径小于 $0.01 \mu\text{m}$ 时,必须解决测量上的难题。

3. 精密切削机理 精密切削是微量切削,微量切削过程中许多机理方面的问题都有其特殊性,如积屑瘤的形成,鳞刺的产生,切削参数及加工条件对切削过程的影响,以及它们对加工精度和表面质量的影响,都与常规切削有很大的不同。因此,必须对这些切削机理方面的问题进行深入研究,掌握其变化规律,以便更好地利用精密加工技术提高零件的加工精度和表面质量。

4. 稳定的加工环境 精密加工必须在稳定的加工环境下进行,主要包括恒温、防振和空气净化三个方面的条件。精密加工必须在严格的多层恒温条件下进行,即不仅工作间应保持恒温,还必须对机床本身采取特殊的恒温措施,使加工区的温度变化极小。为了提高精密加工系统的动态稳定性,除在机床结构设计和制造上采取各种减振措施外,还必须用隔振系统来消除外界振动的影响。由于精密加工的加工精度和表面粗糙度要求极高,空气中的尘埃将直接影响加工零件的精度和表面粗糙度,因此必须对加工环境的空气进行净化,对大于某一尺寸的尘埃进行过滤。国外已研制成功了对 $0.1 \mu\text{m}$ 的尘埃有 99% 净化效率的高效过滤器。

5. 误差补偿 当加工精度高于一定程度后,若仍然采用提高机床的制造精度,保证加工环境的稳定性等误差预防措施提高加工精度,这将会使所花费的成本大幅度增加。这时应采取另一种所谓的误差补偿措施,即是通过消除或抵消误差本身的影响,达到提高加工精度的目的。国外的一些著名精密机床,采用了误差补偿的方法,取得了很好的效果。

6. 精密测量技术 精密加工技术离不开精密测量技术,精密加工要求测量精度比加工精度高一个数量级。目前,精密加工中所使用的测量仪器多以干涉法和高灵敏度电动测微技术为基础,如激光干涉仪,多次光波干涉显微镜及重复反射干涉仪等。国外广泛发展非接触式测量方法并研究原子级精度的测量技术。Johannes 公司生产的多次光波干涉显微镜的分辨率为 0.5nm ,最近出现的隧道扫描显微镜的分辨率为 0.01nm ,是目前世界上精度最高的测量仪之一。最新的研究证实,在扫描隧道显微镜下可移动原子,实现精密工程的最终目标——原子级精密加工。

1.1.2 精密切削加工分类

根据加工表面及加工刀具的特点,精密切削加工可分为四类,见表 1.1。

精密切削研究是从金刚石车削开始的。应用天然单晶金刚石车刀对铝、铜和其它软金属及其合金进行切削加工,可以得到极高的加工精度和极低的表面粗糙度,从而产生了金刚石精密车削加工方法。在此基础上,又发展了金刚石精密铣削和镗削的加工方法,它们分别用于加工平面、型面和内孔,也可以得到极高的加工精度和表面质量。金刚石刀具精密切削是当前加工软金属材料最主要的精密加工方法。除金刚石刀具材料

外,还发展了立方氮化硼、复方氮化硅和复合陶瓷等新型超硬刀具材料,它们主要用于黑色金属的精密加工。

表 1.1 精密和超精密切削方法

切削方法	切削工具	精度(μm)	表面粗糙度 R_a (μm)	被加工材料	应用
精密、超精密车削	天然单晶金刚石刀具,人造聚	1~0.1	0.05~0.008	金刚石刀具:有色金属及其合金等软材料;其他材料	球、磁盘、反射镜
精密、超精密铣削	晶金刚石刀具,立方氮化硼刀				多面棱体
精密、超精密镗削	具,陶瓷刀具,硬质合金刀具				活塞销孔
微孔加工	硬质合金钻头、高速钢钻头	20~10	0.2		印刷电路板、石墨模具、喷嘴

1.1.3 精密加工与经济性

由于精密加工机床价格昂贵,加工环境条件要求极高,因此精密加工总是与高加工成本联系在一起。在过去相当长的一段时期,这种观点限制了精密加工的应用范围,它主要应用于军事、航空航天等部门。近十几年来,随着科学技术的发展和人们生活水平的提高,精密加工的产品已进入了国民经济和人民生活的各个领域,其生产方式也从过去的单件小批量生产走向大批量生产。在机械制造行业,精密加工机床不再是仅用于后方车间加工工具,卡具、量具,工业发达国家已将精密加工机床直接用于产品零件的精密加工,产生了显著的经济效益。

例如,加工一块直径为 100mm 的离轴抛物面反射镜,用金刚石精密车削工艺成本只有用研磨-抛光-手工修琢的传统工艺的成本的十几分之一,而且精度更高,加工周期由 12 个月缩短为 3 周。我国精密加工技术较落后,当前某些精密产品尚靠进口,还有些精密产品靠老工人手艺制造,因而废品率极高。例如现在生产的某种高精度惯性仪表,以十几台甚至几十台中才挑选出一台合格品,磁盘生产质量尚未完全过关,激光打印机的多面棱镜尚不能生产。

正因为精密加工具有优良的特性,因此得到了世界各国的高度重视。我国必须大力发展精密加工技术,使其为我国的国民经济创造出巨大的经济效益。

1.2 精密切削加工机理

金属切削过程,就其本质而言,是材料在刀具的作用下,产生剪切断裂、摩擦挤压和滑移变形的过程,精密切削过程也不例外。但在精密切削中,由于采用的是微量切削方法,一些对普通切削影响不显著的因素将成为影响精密切削过程的主要因素。因此,我们应该对精密切削的特殊性进行系统的研究,掌握其变化规律,以便更好地应用这一新技术。

1.2.1 切削变形和切削力

1.2.1.1 切削变形

(1) 过渡切削

为了研究微量切削过程的切削机理,了解切削过程中的各种现象,首先分析过渡切削过程。我们以回转刀具的切削情况为例,分析在过渡切削过程中刀具切削刃与工件表面的接触情况及工件材料的变形情况。

如图 1.2 所示为单刃回转刀具铣削平面的切削过程。为了反映整个工艺系统的弹性特性,假设刀具支持在具有一定弹性模数的支承上。图 1.2(b)为切削剖面的情况,从刀具切削刃和工件接触开始,刀具在工件上滑动一定的距离,工件表面仅产生弹性变形,在切削刃移开之后,工件表面仍能恢复到原来的状态。切削刃在工件表面上的这种滑动称为弹性滑动。随着刀具的继续回转,刀刃上的切削深度不断增大,在工件表面上开始产生塑性变形,在此塑性变形区内,切削刃的工件表面滑过之后,工件表面被刻划出沟痕,但此时并没有真正切除材料。切削刃在工件表面上的这种滑动称为塑性滑动。在塑性滑动之后,随着刀具切入深度的增加,前刀面上产生了切屑,开始了切削过程。图 1.2(b)中的点划线为切削刃的运动轨迹,实线为被加工表面上的轮廓线。由于工件表面上产生了弹塑性变形,所以切削刃的运动轨迹与被加工表面上形成的轮廓线不重合。

通过改变刀具的切入角 λ_k ,可以依次改变刀具与工件的最大干涉深度,从而可以得到如图 1.2(a)的曲

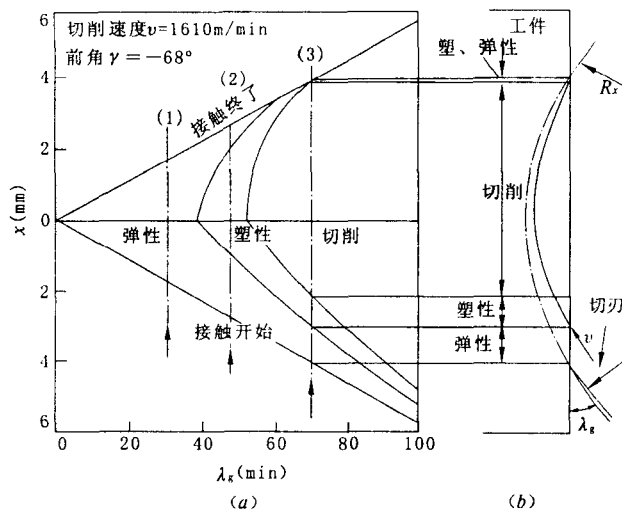


图 1.2 过渡切削过程

线。当切削刃的最大干涉深度很小时,即切入角 λ_g 很小时,便是图 1.2(a)中的(1)状态。此时,刀具仅在工件表面滑过,工件表面没有刀具切入的痕迹,在刀具和被加工表面的全部接触长度上处于弹性变形区域。当刀具与工件的最大干涉深度达到一定的数值时,形成如图 1.2(a)中的(2)的切削状态。在切削开始的一段长度内为弹性滑动区域,然后进入塑性变形区,在刀刃滑动过去后,在塑性变形区域内将留下沟痕,但并不产生切屑。继续增大刀具与工件的最大干涉深度,便形成图 1.2(a)中的(3)的切削状态。在切削刃和工件表面的接触初期为弹性滑动区域,随着切削深度的增大,之后为塑性滑动区域,再之后为切削区域,在工件表面上有塑性变形和除去切屑所形成的沟槽。随着切入深度的减小,之后又过渡到塑性变形区和弹性变形区。

必须指出,在塑性滑动区域内也存在弹性变形区,而在切削区域内则既存在切屑去除区,也存在塑性变形区和弹性变形区。

(2)最小切入深度

零件的最终工序的最小切入深度应等于或小于零件的加工精度(允许的加工误差)。因此,一种加工方法的最小切入深度反映了它的精加工能力。

根据过渡切削过程的分析可知,当切入深度太小时,切削刃对工作表面的作用只是弹性滑动或塑性滑动,并没有产生切屑,因此最小切入深度要受到一些因素的限制。

我们以车削过程为例,对最小切入深度问题进行分析。车削过程能够成立,主要应满足下列条件:

- ①切削过程应当是连续的、稳定的;
- ②应当保持有较高的加工精度和表面质量;
- ③刀具应有较长的使用寿命。

在精密切削中,采用的是微量切削方法,切入深度较小,切削功能主要由刀具切削刃的刃口圆弧承担,能否从被加工材料上切下切屑,主要取决于刀具刃口圆弧处被加工材料质点受力情况。如图 1.3 所示,我们分析正交切削条件下,切削刃口圆弧处任一质点*i*的受力情况。由于是正交切削,质点*i*仅有两个方向的切削力,即垂直力 p_{yi} 和水平力 p_{xi} 。水平力 p_{xi} 使被切削材料质点向前移动,经过挤压形成切屑,而垂直力 p_{yi} 则将被切削材料压向被切削零件本体,不能构成切屑形成条件。最终能否形成切屑,取决于作用在此质点上的切削力 p_{yi} 和 p_{xi} 的比值。

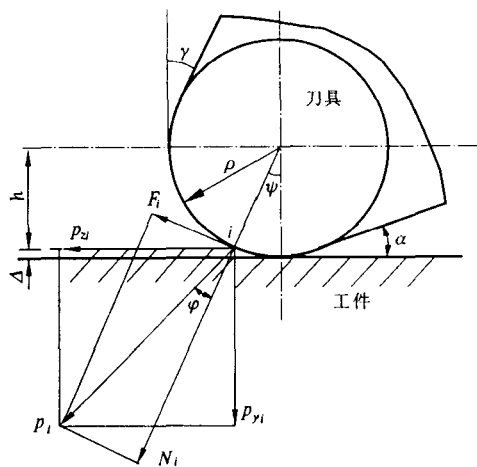


图 1.3 材料质点受力分析

根据材料的最大剪切应力理论可知,最大剪切应力应发生在与切削合力 p_i 成 45° 角的方向上。此时,若切削合力 p_i 的方向与切削运动方向成 45° 角,即 $p_{xi}=p_{yi}$,则作用在材料质点*i*上的最大剪应力与切削运动方向一致,该质点*i*处材料被刀具推向前方,形成切屑,而质点*i*