



21st CENTURY  
实用规划教材

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材

精密



与特种加工技术

主 编 袁根福 祝锡晶  
副主编 闫伟林 陈远龙 尹成龙



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

TG66/11

2007

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

# 精密与特种加工技术

主 编 袁根福 祝锡晶  
副主编 闫伟林 陈远龙 尹成龙  
参 编 李 华 吴林峰 梁华琪



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书收集了国内外大量的文献资料,较系统地讲述了精密和特种加工技术的主要内容,全书共11章,除概论外,其余各章的内容分别为精密切削加工、精密磨削加工、电火花加工、电火花线切割加工、电化学加工、激光加工技术、电子束和离子束加工、超声波和超高压水射流加工、复合加工、其他精密与特种加工技术。

本书可作为机械制造及其自动化专业本科学生的教材,同时也可作为从事机械制造业的工程技术人员参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

精密与特种加工技术/袁根福,祝锡晶主编. —北京:北京大学出版社,2007.8

(21世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-12167-2

I. 精… II. ①袁… ②祝… III. ①精密切削—高等学校—教材 ②特种加工—高等学校—教材

IV. TG506.9 TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第074906号

书 名:精密与特种加工技术

著作责任者:袁根福 祝锡晶 主编

责任编辑:郭穗娟

标准书号:ISBN 978-7-301-12167-2/TH·0008

出 版 者:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址:<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱:[pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者:北京大学印刷厂

发 行 者:北京大学出版社

经 销 者:新华书店

787mm×1092mm 16开本 19.5印张 450千字

2007年8月第1版 2007年8月第1次印刷

定 价:29.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024

电子邮箱:[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 丛书总序

殷国富\*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来，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发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，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模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性与可重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适

---

\*殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998年对本科专业目录进行了第3次大的修订。调整后的机械大类专业变成4类8个专业,它们是:机械类4个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类1个专业(测控技术与仪器);能源动力类2个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类1个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的一系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类专业的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于21世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社和中国林业出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

2006年1月

# 前 言

制造业在国民经济中起着支配作用，是决定一个国家经济发展水平的最基本因素，而机械装备的设计制造又是制造业中的核心产业。大学机械专业人才的培养担负着为机械装备产业输送设计制造工程技术人才的重任，而人才培养质量直接关系到我国机械领域的创新和机械产品质量的提高。

中华人民共和国成立后一直到改革开放前，我国高校机械类专业设置基本上参照苏联模式，以产品、部门、行业系统为界限设置专业，专业面较窄。20世纪80年代中期，为了适应改革开放的历史潮流，经当时的国家教育委员会批准设置了机械设计与制造专业，覆盖了原40多个机械产品类老专业，形成了当时高校专业中设置院校、在校人数最多和专业面最宽的专业。到20世纪90年代末，教育部根据形势的发展，又将机械设计与制造、机械制造工艺与设备、机电一体化及控制、汽车拖拉机设计这几个大专业合并为机械设计制造及其自动化专业。这是目前我国高校中专业面最宽、招生规模最大的26个专业之一。2005年机械专业本科学士生数量达到190385人。当前，我国高等教育开始步入大众化阶段，在大众化阶段，高等教育的人才培养目标已经不是精英教育，而主要是增加培养应用型人才的数量，这是从许多发达国家高等教育大众化历程中总结出来的经验。另一方面，科学技术对经济和社会的发展起着巨大促进作用，高等院校只有培养出大量高素质的应用型人才，把科学技术成果大量应用到实际中去，这种作用才能真正体现出来。这给以培养工程应用型人才为主的高校带来了巨大的发展机会和发展潜力。具体到机械专业来说，我国在国际制造大国地位的确立，需要大量高素质的工程应用型机械专业人才，因此，很多原来没有开设机械专业的一般地方本科院校和相当数量的新办本科院校都开设了机械设计制造及其自动化专业。由于这些院校受客观条件和人才培养目标的限制，必然冲击了原来几乎千篇一律的办学模式，带来了机械专业办学规模、办学层次、办学类型、办学特色等方面的多样性，从而有关工程应用型本科机械专业人才的培养的问题已经受到广泛关注。办好工程应用型本科机械专业，培养工程应用型本科机械专业人才，对提升我国机械工业整体水平，提高我国机械行业在经济全球化背景下的国际竞争力具有同样重要作用。

培养工程应用型本科机械专业人才，必须树立全新的教育思想和教育观念。与传统的本科机械专业教育不同，应用型本科机械专业教育主要是培养基层第一线的技术应用型人才，强调学用结合，重视将知识直接转化为现实的生产力。因此，工程应用型本科机械专业应当有别于以往一般本科机械专业的人才培养模式，我们认为其人才培养目标是：应具有机械设计制造及其他相关知识能力和综合素质，德、智、体、美、技全面发展，面向生产、管理、服务等第一线或实际岗位，并具有可持续发展的潜力的高级应用型专门人才。在工程应用型本科人才培养目标中，编者特别提到其中“技”字和“专门人才”。工程应用型本科机械专业人才应当具备熟练的技术应用能力和一定的技能，这有别于一般工程研究型本科机械专业人才。同时，工程应用型本科机械专业人才在通识教育的基础上，需要掌握一定的专门技术，即工程应用型本科机械专业是“专才”教育，而不是像工程研究型大学那样进行“通才”教育，这也是应用型人才的特征。

精密与特种加工技术在现代制造业中起着举足轻重的作用，它是先进制造技术的重要组

成部分，其技术水平的高低也代表了一个国家制造业水平的高低。近年来，随着电子技术、计算机技术和自动控制技术的发展，精密与特种加工技术获得了飞跃发展和广泛应用。我国将由制造业大国向制造业强国转变，因此，工程应用型本科机械专业人才了解和掌握一些精密与特种加工技术是很有必要的。根据工程应用型本科机械专业人才培养特点，编者立足于扩大读者知识面，以实用为主，把本书编成适于应用型人才培养的一本教材。

本书各章的编者如下：袁根福(第 1、7 章)，祝锡晶(第 2、3、11 章)，陈远龙(第 6 章)，闫伟林(第 4 章)，李华(第 5 章)，吴林峰(第 8、9 章)，尹成龙(第 10 章)，梁华琪参加了第 7 章的编写工作，全书由袁根福统稿。

本书的内容涉及知识面比较广泛，由于编者水平有限，书中定然存在不足之处，恳请广大读者给予批评和指正。

编 者

2007 年 3 月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> ..... 1	3.2.2 磨削温度与磨削液..... 47
1.1 精密与特种加工技术的产生及发展..... 1	3.2.3 磨削质量和裂纹控制..... 51
1.2 精密与特种加工方法与分类..... 2	3.3 精密磨削加工的机床及其应用..... 57
1.2.1 概述..... 2	3.3.1 概述..... 57
1.2.2 加工方法及其分类..... 2	3.3.2 精密磨削机床的结构及特点... 58
1.3 精密加工与经济性..... 4	3.4 精密研磨与抛光..... 64
<b>第 2 章 精密切削加工</b> ..... 5	3.4.1 研磨加工机理..... 64
2.1 概述..... 5	3.4.2 抛光加工机理..... 65
2.1.1 概念..... 5	3.4.3 精密研磨与抛光的主要工艺 因素..... 66
2.1.2 精密切削加工分类..... 7	3.4.4 研磨盘与抛光盘..... 67
2.2 精密切削加工机理..... 8	3.4.5 研磨剂与抛光剂..... 67
2.2.1 切削变形和切削力..... 8	3.4.6 非接触抛光..... 68
2.2.2 切削热和切削液..... 16	小结..... 72
2.2.3 刀具磨损、破损及耐用度..... 18	思考题..... 73
2.3 切削加工机床及应用..... 23	<b>第 4 章 电火花加工</b> ..... 74
2.3.1 精密机床发展概况..... 23	4.1 概述..... 74
2.3.2 精密机床的精度指标..... 24	4.1.1 电火花加工的概念..... 74
2.3.3 精密主轴部件..... 25	4.1.2 电火花加工的特点..... 74
2.3.4 床身和精密导轨部件..... 27	4.1.3 发展概况..... 75
2.3.5 进给驱动系统..... 28	4.1.4 应用前景..... 75
2.3.6 在线检测与误差补偿技术..... 31	4.2 电火花加工的基本原理及机理..... 76
2.4 功率超声车削..... 32	4.2.1 电火花加工的基本原理..... 76
2.4.1 功率超声车削装置..... 33	4.2.2 电火花加工的机理..... 77
2.4.2 基本原理和特点..... 34	4.3 电火花加工中的一些基本规律..... 81
小结..... 36	4.3.1 影响材料放电腐蚀的主要 因素..... 81
思考题..... 37	4.3.2 电火花加工的加工速度和工具 的损耗速度..... 85
<b>第 3 章 精密磨削加工</b> ..... 38	4.3.3 影响加工精度的主要因素..... 88
3.1 概述..... 38	4.3.4 电火花加工的表面质量..... 89
3.1.1 磨削的基本特点..... 38	4.4 电火花加工机床..... 91
3.1.2 精密磨削加工的分类..... 39	4.4.1 机床型号、规格及分类..... 91
3.2 磨削加工机理..... 43	
3.2.1 磨削过程及磨削力..... 43	



4.4.2 机床主体部分 .....	92	5.4.1 电火花线切割控制系统 .....	139
4.4.3 脉冲电源 .....	94	5.4.2 电火花线切割编程 .....	141
4.4.4 自动进给调节系统 .....	97	5.4.3 ISO 代码的手工编程方法 .....	146
4.4.5 工作液循环过滤系统 .....	102	5.4.4 自动编程 .....	148
4.5 电火花成形加工的应用 .....	104	5.5 电火花线切割的应用 .....	149
4.5.1 冲模的电火花加工 .....	104	5.5.1 影响线切割工艺指标的 因素 .....	149
4.5.2 小孔电火花加工 .....	106	5.5.2 线切割加工工艺及其应用 .....	152
4.5.3 异型小孔的电火花加工 .....	108	小结 .....	154
4.5.4 型腔模的电火花加工 .....	109	思考题 .....	156
4.6 其他电火花加工技术 .....	114	<b>第 6 章 电化学加工</b> .....	158
4.6.1 电火花小孔磨削 .....	116	6.1 概述 .....	158
4.6.2 电火花对磨和跑合加工 .....	117	6.2 电化学加工基本原理 .....	159
4.6.3 电火花共轭回转加工 .....	117	6.2.1 电化学反应过程 .....	159
4.6.4 聚晶金刚石等高阻抗材料的 电火花加工 .....	119	6.2.2 电极电位 .....	159
4.6.5 电火花表面强化和刻字 .....	119	6.2.3 电极的极化 .....	163
4.6.6 曲线孔的电火花加工工艺 .....	121	6.2.4 金属的钝化和活化 .....	164
小结 .....	121	6.3 电解加工 .....	165
思考题 .....	123	6.3.1 电解加工过程及其特点 .....	165
<b>第 5 章 电火花线切割加工</b> .....	125	6.3.2 电解加工的基本规律 .....	168
5.1 概述 .....	125	6.3.3 电解液 .....	174
5.1.1 电火花线切割加工及其发展 历程 .....	125	6.3.4 电解加工设备 .....	179
5.1.2 电火花线切割加工的特点 .....	126	6.3.5 电解加工的应用 .....	185
5.1.3 电火花线切割加工的应用 范围 .....	127	6.4 电铸及电刷镀加工 .....	190
5.1.4 电火花线切割技术的应用现状 及发展趋势 .....	128	6.4.1 电铸 .....	191
5.2 电火花线切割加工原理 .....	130	6.4.2 电刷镀加工 .....	194
5.2.1 高速走丝电火花线切割 加工原理 .....	130	小结 .....	196
5.2.2 低速走丝电火花线切割 加工原理 .....	131	思考题 .....	198
5.3 电火花线切割机床 .....	132	<b>第 7 章 激光加工技术</b> .....	199
5.3.1 电火花线切割机床的型号与 主要技术参数 .....	132	7.1 激光原理与特点 .....	199
5.3.2 电火花线切割加工设备 .....	132	7.1.1 激光的产生 .....	199
5.4 电火花线切割系统和编程技术 .....	139	7.1.2 激光工作原理 .....	200
		7.1.3 激光特性 .....	201
		7.2 材料加工用激光器简介 .....	202
		7.2.1 激光加工常用激光器 .....	202
		7.2.2 激光加工基本设备的组成 .....	203
		7.3 激光切割和打孔技术 .....	203

7.3.1 激光切割 .....	203	9.1.4 超声波加工的应用 .....	235
7.3.2 激光打孔 .....	207	9.2 超高压水射流加工 .....	237
7.4 激光焊接技术 .....	208	9.2.1 超高压水射流加工原理 .....	237
7.4.1 激光焊接技术的兴起及 发展 .....	208	9.2.2 超高压水射流加工设备 .....	238
7.4.2 激光焊接的原理及特点 .....	208	9.2.3 超高压水射流加工的工作参数 及其对加工的影响 .....	239
7.4.3 激光焊接的形式与质量 .....	210	9.2.4 超高压水射流加工的特点 .....	240
7.5 激光表面技术 .....	211	9.2.5 超高压水射流加工的应用 .....	241
7.5.1 激光表面技术分类 .....	211	小结 .....	241
7.5.2 激光相变硬化 .....	212	思考题 .....	242
7.6 激光重熔 .....	213	<b>第 10 章 复合加工</b> .....	243
7.7 激光合金化 .....	214	10.1 概述 .....	243
7.8 激光熔覆 .....	214	10.2 复合切削加工(切削复合加工) .....	243
7.9 其他激光加工简介 .....	215	10.3 化学机械复合加工 .....	245
7.9.1 激光铣削技术与应用 .....	215	10.4 超声电火花(电解)复合加工 .....	247
7.9.2 激光快速成形技术 .....	217	10.4.1 超声电火花复合加工简介 ...	247
小结 .....	218	10.4.2 超声电解复合加工 .....	248
思考题 .....	218	10.4.3 超声电解复合抛光 .....	249
<b>第 8 章 电子束加工和离子束加工</b> .....	219	10.4.4 超声电火花复合抛光 .....	250
8.1 电子束加工 .....	219	10.5 电化学机械复合加工 .....	250
8.1.1 电子束加工的基本原理 .....	219	10.5.1 电解磨削复合加工 .....	251
8.1.2 电子束加工的特点 .....	221	10.5.2 电解珩磨复合加工 .....	253
8.1.3 电子束加工设备 .....	222	10.5.3 电解研磨复合加工 .....	254
8.1.4 电子束加工应用 .....	223	10.6 复合加工的技术发展趋势 .....	255
8.2 离子束加工 .....	226	小结 .....	255
8.2.1 离子束加工的基本原理 .....	226	思考题 .....	257
8.2.2 离子束加工的特点 .....	227	<b>第 11 章 其他精密与特种加工技术</b> .....	258
8.2.3 离子束加工装置 .....	227	11.1 功率超声光整加工 .....	258
8.2.4 离子束加工的应用 .....	228	11.1.1 功率超声珩磨 .....	258
小结 .....	229	11.1.2 功率超声研磨 .....	259
思考题 .....	230	11.1.3 功率超声抛光 .....	260
<b>第 9 章 超声波加工和超高压水射流加工</b> .....	231	11.1.4 功率超声压光 .....	261
9.1 超声波加工 .....	231	11.2 化学加工 .....	261
9.1.1 超声波特性及其加工的基本 原理 .....	231	11.2.1 化学铣切加工 .....	261
9.1.2 超声波加工的特点 .....	232	11.2.2 光化学腐蚀加工 .....	264
9.1.3 超声波加工设备 .....	233	11.2.3 化学抛光 .....	269
		11.2.4 化学镀膜 .....	269

11.3 水射流及磨料流加工技术.....	270	流程.....	283
11.3.1 水射流加工原理.....	270	11.6.2 光刻加工应用及关键技术 ...	284
11.3.2 水射流加工工艺及应用.....	272	11.6.3 光刻技术的极限和发展 前景.....	290
11.4 等离子体加工 .....	275	11.7 磁性磨料加工.....	291
11.4.1 基本原理 .....	275	11.7.1 加工原理.....	292
11.4.2 材料去除速度和加工精度....	277	11.7.2 磁性磨料.....	292
11.4.3 设备和工具.....	277	11.7.3 加工工艺参数对加工质量的 影响.....	293
11.4.4 实际应用 .....	277	11.7.4 应用实例.....	293
11.5 挤压珩磨 .....	278	小结 .....	295
11.5.1 基本原理 .....	278	思考题 .....	297
11.5.2 挤压珩磨的工艺特点.....	279	<b>参考文献 .....</b>	<b>298</b>
11.5.3 黏弹性磨料介质.....	280		
11.5.4 夹具 .....	280		
11.5.5 挤压珩磨的实际应用.....	281		
11.6 光刻技术 .....	283		
11.6.1 光刻加工的原理及其工艺			

# 第 1 章 概 论

## 1.1 精密与特种加工技术的产生及发展

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,是国民经济的基础。因此,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。制造技术的发展已经有几千年的历史,从石器时代、青铜器时代、铁器时代到现代的高分子塑料时代;从手工制作、机器制作到现代的智能控制自动化制作;从一般精度加工、精密加工到现代的超精密加工及纳米加工,精密加工和特种加工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,代表了当前先进制造技术发展的重要方向,在制造业乃至社会发展进程中起到非常重要的作用。

但是从第一次产业革命以来,一直到第二次世界大战以前,在这段长达 150 多年都靠传统的机械切削加工(包括磨削加工)的漫长年代里,并没有产生精密与特种加工的迫切要求,由于现代科学技术的迅猛发展,机械、电子、航空和国防工业等各领域,要求尖端科学技术产品向高精度、高速度、大功率、小型化方向发展,以及要求在高温、高压、重负荷等极端条件下长期可靠地工作。为了适应这些要求,各种新结构、新材料和复杂形状的精密零件大量出现,其形状越来越复杂、材料的强韧性越来越高,零件表面精度、粗糙度和某些特殊要求也越来越高,因此,对机械制造技术提出了下列新的课题。

(1) 解决各种难加工材料的加工问题。如硬质合金、钛合金、耐热钢、不锈钢、淬火钢、金刚石、宝石、石英以及硅等各种高硬度、高强度、高韧性、高脆性的金属和非金属材料加工。

(2) 解决各种特殊复杂型面的加工问题。如各种热锻模、冲裁模、冷拔模和注射模的模腔和型孔、整体涡轮、喷气涡轮机叶片、炮管内膛线、喷油嘴、喷丝头小孔等。

(3) 解决各种超精密、光整或需要特殊要求零件的加工问题。如精密光学透镜、航空航天陀螺仪、伺服阀、高灵敏度的红外传感器部件、大规模集成电路、光盘基片、复印机和打印机的感光鼓、微型机械和机器人零件、细长或薄壁件等各种对表面质量和精度要求比较高的零件的加工。

要解决上述一系列问题,仅依靠传统的机械切削加工(包括磨削加工)方法是难以实现的,人们相继研究和开发各种新的加工方法,因此,精密与特种加工技术就是在这种前提下产生和发展起来的。目前精密与特种加工技术已成为零件制造的重要工艺技术手段,成为世界制造技术领域的制高点,是现代制造技术的前沿。

## 1.2 精密与特种加工方法与分类

### 1.2.1 概述

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。其最高技术指标不是固定不变的,而是随时代有所不同。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  $0.1\mu\text{m}$ ;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  $0.001\mu\text{m}$  ( $1\text{nm}$ )。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。

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,也称为非传统加工技术。自苏联学者拉扎连柯夫妇在 1943 年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、模具及复杂型面加工、零件精细加工等领域已成为重要的加工方法或仅有的加工方法。

### 1.2.2 加工方法及其分类

虽然精密与特种加工方法非常多,但如果按照加工成形的原理和特点来分类,可分为去除加工、结合加工和变形加工三大类,它们既涵盖了利用刀具进行的切削加工和磨削加工等传统加工方法,又涵盖了非传统加工方法中的利用机、光、电、声、热、化学、磁、原子能等能源来进行加工的特种加工方法,而且还包括了利用多种加工方法的复合作用形成的复合加工方法。表 1-1 列出了各种常用的精密与特种加工的分类、加工方法和原理、所达到的精度以及表面粗糙度和应用情况。

(1) 去除加工又称分离加工,是从工件上去除一部分材料。车削、铣削、磨削、研磨和抛光等传统的加工方法,以及特种加工中的电火花加工、电解加工等,都属于这种加工方法。

(2) 结合加工是利用各种方法把工件结合在一起,按结合的机理和方法又可以分为附着、注入和连接三种方法。附着加工(沉积加工)是在工件表面上覆盖一层物质,来改变工件表面性能,如电镀和各种沉积等;注入加工(渗入加工)是在工件表层注入某些元素,使其与基材结合,以改变工件表面的各种性能,如氧化、渗碳和离子注入等;连接加工是把工件通过物理和化学方法连接在一起,如焊接和粘接等。

(3) 变形加工又称流动加工,是利用力、热等手段使工件产生变形,改变其尺寸、形状和性能,如锻造、铸造、液晶定向凝固等。

发展先进制造技术已经成为一个国家经济发展的重要手段之一,精密与特种加工技术作为先进制造技术的重要组成部分,反映了当前的高科技的技术水平,是一个国家制造业水平的重要标志之一,随着科学技术的发展,精密与特种加工方法将显得越来越重要,目前,很多学者正在这方面做着大量的研究和实验工作,各种新的精密与特种加工技术将不

断出现，以满足科学和工业技术发展的需要。

表 1-1 常用精密与特种加工方法

分类	加工成形原理	主要加工方法	精度( $\mu\text{m}$ )/表面粗糙度 $R_a(\mu\text{m})$	应用举例
刀具切削加工	切削加工	精密、超精密车削	1~0.1/0.05~0.008	金属件球体、光学反射镜
		精密、超精密铣削		金属件各种多面体
		精密、超精密镗削		金属件活塞销孔
		精密微孔钻削	20~10/0.2	金属和非金属材料件喷嘴、印制电路板
磨料加工	磨削	精密、超精密砂轮和砂带磨削	5~0.5/0.05~0.008	金属和非金属材料件的外圆、孔、平面
	研磨	精密、超精密、磁粉、滚动和油石研磨	10~1/0.01	金属和非金属材料件的外圆、孔、平面
	抛光	精密、超精密抛光、喷射抛光、水合抛光等	1~0.001/0.01~0.008	金属和非金属材料件的平面、圆柱面
	珩磨	精密珩磨	1~0.1/0.025~0.01	金属件孔
特种加工	电火花加工	电火花成形加工	50~1/2.5~0.02	金属型腔模
		电火花线切割加工	20~3/2.5~0.16	金属冲模
	电化学加工	电解加工	100~3/1.25~0.06	金属型孔、型面、型腔
		电铸	1/0.02~0.012	金属成形小零件
	化学加工	蚀刻	0.1/2.5~0.2	金属、非金属和半导体刻线、图形
化学铣削		20~10/2.5~2	金属的下料和成形加工	
复合加工	激光加工		10~1/6.3~0.12	各种材料打孔、切割、焊接、热处理、熔覆
	电子束加工		10~1/6.3~0.12	各种材料微孔、镀膜、焊接、蚀刻
	离子束加工		0.01~0.001/0.02~0.01	各种材料蚀刻、注入
	超声波加工		30~5/2.5~0.04	脆性材料的型孔、型腔
复合加工	电解	精密电解磨削、研磨和抛光	20~0.1/0.08~0.008	金属的外圆、孔、平面
	超声	精密超声车削、磨削和研磨	5~0.1/0.1~0.008	难加工脆性材料的外圆、孔、平面
	化学	机械化学研磨、抛光和化学机械抛光	0.1~0.01/0.01~0.008	各种材料的外圆、孔、平面、型面

### 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内，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，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，取得了显著的经济效益。

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，当前某些精密产品还得依赖进口，还有些精密产品靠老工人手工艺制造，因而废品率极高。例如，现在生产的某种高精度惯性仪表，在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。

## 第 2 章 精密切削加工

**教学提示：**精密切削加工技术涉及的方法很多，本章主要介绍精密切削加工的分类、精密切削加工的机理分析、精密切削加工机床和应用以及功率超声车削等基本知识。

**教学要求：**通过本章的学习，要求学生在掌握普通切削加工的基础上，了解精密切削加工的相关知识，重点掌握精密切削加工的机理，以及精密切削加工机床的各组成部件，同时了解功率超声车削这种特种加工技术。

### 2.1 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，提高其产品在国际上的竞争力。

#### 2.1.1 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  $0.02\sim 0.1\mu\text{m}$  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，如图 2.1 所示。2000 年后，普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度已经分别达到  $1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$  及  $0.001\mu\text{m}$  ( $1\text{nm}$ )。由此可见，精密加工正在向其终极目标——原子级精度逼近，也就是实现“移动原子”。

现代机械工业之所以致力于提高零件加工精度，其主要原因在于以下三个方面。

(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  $R_a$  由  $0.5\mu\text{m}$  减少到  $0.3\mu\text{m}$ ，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  $1\mu\text{m}$ ，则齿轮箱单位质量所能传递的扭矩将提高近 1 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  $300\text{bit}/\text{m}^2$  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。



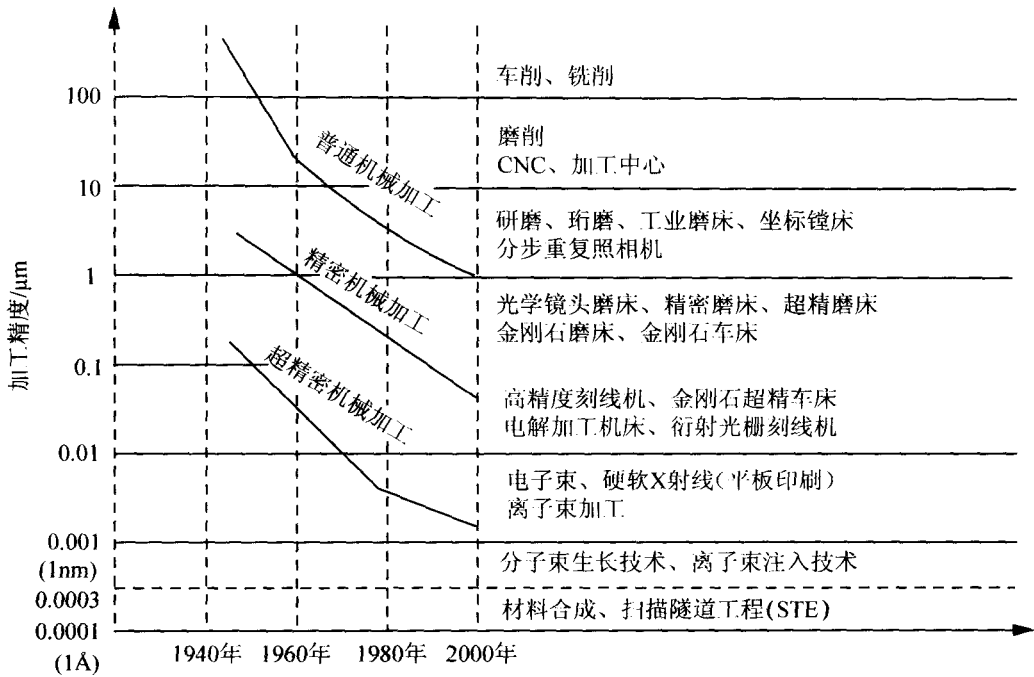


图 2.1 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势预测

(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，不仅需要精密的机械设备和工具，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。目前的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。早期的精密主轴轴承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