



普通高等教育机电类“十三五”规划教材

# 现代加工技术

XIANDAI JIAGONG JISHU

肖继明◎主 编

0000 00 0 0 0 0 00 0 0  
0000 0 00 0 0 00000 0 0  
0 0 00 0 0 0 0 0



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

# 现代加工技术

肖继明 主 编



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了现代加工技术,内容包括切削加工技术、磨粒加工技术、特种加工技术、复合加工技术、微细加工技术、纳米加工技术、绿色加工技术、难加工材料和难加工结构加工技术。本书重点阐述了基于材料去除的各种新加工技术的原理、特点及应用,简要介绍了基于增材和变形的各种新加工技术的原理、特点及应用。内容系统、先进、实用,满足机械工程类本科专业宽口径、创新型人才培养的要求。

本书既可作为高等院校机械设计制造及其自动化等相关专业本科生和硕士研究生的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考书。

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。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代加工技术/肖继明主编. —北京:电子工业出版社, 2018.9

普通高等教育机电类“十三五”规划教材

ISBN 978-7-121-34353-7

I. ①现… II. ①肖… III. ①特种加工—高等学校—教材 IV. ①TG66

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第115539号

策划编辑:赵玉山

责任编辑:刘真平

印 刷:北京京师印务有限公司

装 订:北京京师印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

开 本:787×1092 1/16 印张:20.5 字数:524.8千字

版 次:2018年9月第1版

印 次:2018年9月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 [zllts@phei.com.cn](mailto:zllts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

本书咨询联系方式: [zhaoy@phei.com.cn](mailto:zhaoy@phei.com.cn)。

# 前 言

加工技术已有很久的历史，它伴随着人类社会的诞生而出现，伴随着人类社会的进步而发展。一方面，人类社会在发展中不断发明新的产品、新的材料，对加工技术不断提出新的需求，促成了新的加工原理和方法不断诞生和成长，使得加工技术生机勃勃、持续发展。尤其是人类社会进入 20 世纪以后，现代数学、系统论、控制论和信息论等理论及学科的创建和发展，新材料技术、数控技术、自动化技术和微电子技术的诞生和发展，从根本上改变了加工技术的手工、低效的传统面貌，使之迈向自动、高效的现代化技术体系。另一方面，加工技术的发展，新的加工方法不断涌现，在效率、精度、成本等诸多方面都在难以想象的程度上拓展了人类开发和制造新产品的能力。今天，人们依托先进的加工技术，以前所未有的速度更新现有的产品，不断创造新的产品，从而极大地丰富了人类社会的物质生活，有力地推动了科学技术的整体发展，加快了人类认识自我和外部世界的进程。

近年来随着新技术的应用，机械制造业的面貌发生了极大的变化。高等院校的机械设计制造及其自动化专业也面临着改进，要求更新教学内容，增设新课程和改进老课程以跟上机械制造技术的发展，满足机械工程类本科专业宽口径、创新型人才培养的要求。为此作者根据多年从事科研和教学工作的经验，特编写本书。

本书在内容和结构安排上充分考虑了一般机械类专业本科生的培养要求，本着全面、系统、先进、实用的指导思想进行编写。期望使学生在掌握传统切削（磨削）基础理论的基础上，紧跟加工技术的发展，了解现代切削加工技术、磨粒加工技术、特种加工技术、复合加工技术、微细加工技术、纳米加工技术、绿色加工技术、难加工材料和难加工结构加工技术的原理、特点及应用等基本知识，培养学生具有综合运用课程知识的能力和对加工方案分析设计的基本能力。

本书由肖继明教授任主编。第 1、2、5、9 章由肖继明教授编写，第 3 章由杨明顺副教授编写，第 4 章由袁启龙副教授编写，第 6 章由郑建明教授编写，第 7 章由王权岱副教授编写，第 8 章由李鹏阳教授编写，杨振朝讲师、肖旭东讲师分别参加了第 2 章、第 9 章部分内容的编写，全书由肖继明教授负责统稿。本书由李言教授和李淑娟教授主审，他们提出了许多宝贵意见，谨向他们表示衷心的感谢！

本书在编写过程中参考引用了大量同人著作或论文中的内容及插图，有些在参考文献中可能并未列出，对此深感不敬，在此深表感谢！

由于编者水平有限，缺点错误在所难免，恳请广大师生、读者批评指正。

编 者  
2018 年 1 月

## 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱  
电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 加工与加工技术	1
1.2 现代加工技术的产生及发展	2
1.3 现代加工技术的特点	2
1.4 现代加工技术的地位及分类	3
1.4.1 现代加工技术的地位	3
1.4.2 现代加工技术的分类	4
1.5 现代加工技术的发展趋势	4
复习思考题	7
第 2 章 切削加工技术	8
2.1 切削加工概述	8
2.1.1 切削加工的基本概念	8
2.1.2 切屑形成机理	11
2.1.3 切削力	16
2.1.4 切削热与切削温度	18
2.1.5 刀具材料	19
2.1.6 刀具磨损和刀具寿命	23
2.2 高速切削加工	25
2.2.1 高速切削理论的提出和定义	26
2.2.2 高速切削加工的特点(优点)	28
2.2.3 高速切削的关键技术	30
2.2.4 高速切削机理的研究	41
2.2.5 高速切削加工工艺	43
2.2.6 高速切削技术的发展及应用	44
2.3 精密与超精密切削加工	48
2.3.1 精密与超精密切削加工的概念	48
2.3.2 精密切削加工机理	49
2.3.3 精密切削加工的关键技术	52
2.3.4 精密与超精密机床的发展趋势	53
2.4 深孔钻削技术	54
2.4.1 深孔钻削的特点	54
2.4.2 深孔钻削系统及刀具	54
复习思考题	57

<b>第3章 磨粒加工技术</b> .....	59
3.1 磨粒加工概述 .....	59
3.1.1 固结磨粒加工 .....	59
3.1.2 游离磨粒加工 .....	68
3.2 高速磨削技术 .....	69
3.2.1 高速磨削概述 .....	69
3.2.2 高速磨削的关键技术 .....	69
3.2.3 高速磨削工艺 .....	71
3.2.4 高速磨削的应用 .....	72
3.2.5 高速磨削的发展前景 .....	73
3.3 缓进给磨削技术 .....	74
3.4 精密和超精密磨削技术 .....	76
3.4.1 精密和超精密磨削的概念 .....	76
3.4.2 精密和超精密磨削机理 .....	76
3.4.3 精密和超精密磨削工艺 .....	77
3.4.4 精密和超精密磨削砂轮及修整 .....	78
3.4.5 精密和超精密磨削的特点及应用 .....	80
3.5 研磨加工技术 .....	80
3.5.1 研磨加工的定义 .....	80
3.5.2 研磨加工机理探讨 .....	81
3.5.3 研磨加工的分类 .....	81
3.5.4 研磨加工的特点 .....	82
3.5.5 研磨加工工艺 .....	83
3.5.6 研磨加工的应用 .....	84
3.6 抛光加工技术 .....	89
3.6.1 抛光加工的定义 .....	89
3.6.2 抛光加工机理 .....	89
3.6.3 抛光加工方法 .....	89
3.6.4 抛光加工要素与工艺 .....	95
3.7 其他磨削加工技术 .....	97
3.7.1 珩磨加工技术 .....	97
3.7.2 砂带磨削技术 .....	110
复习思考题 .....	113
<b>第4章 特种加工技术</b> .....	115
4.1 电火花加工技术 .....	115
4.1.1 电火花加工原理 .....	115
4.1.2 电火花加工的特点及应用 .....	117
4.1.3 电火花线切割加工 .....	117

4.2	电解加工技术	120
4.2.1	电解加工原理	120
4.2.2	电解加工的特点及应用	120
4.3	电铸加工技术	123
4.3.1	电铸加工原理	123
4.3.2	电铸加工工艺过程	123
4.3.3	电铸加工的工艺特点	125
4.3.4	电铸加工应用	125
4.4	高能束加工技术	127
4.4.1	激光束加工技术	127
4.4.2	电子束加工技术	131
4.4.3	离子束加工技术	135
4.5	水射流及磨料水射流加工技术	137
4.5.1	水射流加工技术	137
4.5.2	磨料水射流加工技术	138
	复习思考题	140
<b>第5章</b>	<b>复合加工技术</b>	<b>141</b>
5.1	概述	141
5.1.1	复合加工的概念及发展	141
5.1.2	复合加工的方法及分类	141
5.2	振动切削技术	142
5.2.1	振动切削概述	142
5.2.2	振动切削的工艺效果	144
5.2.3	有关振动切削机理的主要观点	147
5.2.4	超声振动切削	148
5.2.5	低频振动切削	151
5.3	振动磨削技术	155
5.3.1	超声振动磨削技术	156
5.3.2	超声振动清洗砂轮	158
5.3.3	超声振动修整砂轮	159
5.4	振动研磨与振动珩磨技术	160
5.4.1	振动研磨技术	160
5.4.2	超声振动珩磨技术	162
5.5	磁化切削技术	163
5.5.1	磁化切削的概念	163
5.5.2	磁化切削的形式和工作原理	163
5.5.3	磁化切削的工艺效果	165
5.5.4	磁化切削机理探讨	165



5.6	加热切削技术 .....	166
5.6.1	加热切削的概念 .....	166
5.6.2	加热切削的发展 .....	166
5.6.3	加热切削机理探讨 .....	167
5.6.4	加热切削的关键技术与工艺 .....	170
5.6.5	加热切削的应用 .....	173
5.7	低温切削技术 .....	174
5.7.1	低温切削的概念 .....	174
5.7.2	低温切削的发展 .....	174
5.7.3	低温切削的特点 .....	175
5.7.4	低温切削的分类 .....	176
5.7.5	低温切削的应用 .....	177
5.8	电解机械复合加工技术 .....	178
5.8.1	电解磨削技术 .....	178
5.8.2	电解珩磨技术 .....	180
5.8.3	电解研磨复合光整加工技术 .....	181
5.9	超声电火花(电解)复合加工技术 .....	185
5.9.1	超声电火花复合加工技术 .....	185
5.9.2	超声电解复合加工技术 .....	186
5.10	电解电火花磨削加工技术 .....	188
5.10.1	MEEC法 .....	188
5.10.2	新MEEC法 .....	189
5.11	其他复合加工方法简介 .....	191
5.11.1	电火花磨削 .....	191
5.11.2	化学机械研磨 .....	192
5.11.3	超声数控分层仿铣加工技术 .....	193
5.11.4	断续磨削-机械脉冲放电复合加工技术 .....	194
5.11.5	超声振动辅助气中放电加工 .....	195
	复习思考题 .....	196
<b>第6章</b>	<b>微细加工技术 .....</b>	<b>197</b>
6.1	概述 .....	197
6.1.1	微细加工的概念 .....	197
6.1.2	微细加工的特点 .....	198
6.2	微细加工机理 .....	198
6.2.1	微切削去除机理 .....	198
6.2.2	原子、分子加工单位的微细加工机理 .....	200
6.3	微细加工方法 .....	201
6.3.1	微细加工方法的分类 .....	201

6.3.2	微细加工的基础技术	202
6.3.3	硅微细加工技术	202
6.3.4	光刻加工技术	203
6.4	LIGA 技术及准 LIGA 技术	205
6.4.1	LIGA 技术原理	205
6.4.2	准 LIGA 技术	207
6.4.3	LIGA 技术及准 LIGA 技术的应用	208
6.5	微细加工技术应用	208
6.6	生物加工技术	213
6.6.1	生物加工简介	213
6.6.2	生物加工分类	213
6.6.3	生物加工的特点	214
	复习思考题	215
<b>第 7 章</b>	<b>纳米加工技术</b>	<b>216</b>
7.1	概述	216
7.1.1	基本概念	216
7.1.2	纳米材料	216
7.1.3	纳米加工	219
7.1.4	纳米加工的关键技术	221
7.1.5	纳米技术的应用前景	222
7.2	基于 SPM 的纳米切削加工	223
7.2.1	扫描探针显微镜的工作原理	223
7.2.2	扫描探针显微技术的关键技术和特点	225
7.2.3	扫描探针显微技术用于纳米切削加工	225
7.3	纳米器件与 DNA 单分子加工	226
7.3.1	原子排列	226
7.3.2	分子排列与分子开关	227
7.3.3	纳米器件	228
7.3.4	DNA 单分子操纵	232
7.4	碳纳米管	233
7.4.1	单根碳纳米管的操纵	233
7.4.2	碳纳米管的机械特性	235
7.4.3	碳纳米管的应用	236
	复习思考题	238
<b>第 8 章</b>	<b>绿色加工技术</b>	<b>240</b>
8.1	概述	240
8.1.1	绿色加工的定义及分类	240
8.1.2	绿色加工的研究内容	241

8.1.3	绿色加工的发展 .....	241
8.2	绿色加工基本理论 .....	243
8.2.1	绿色加工的基本特征 .....	243
8.2.2	绿色加工的基本程序 .....	244
8.2.3	评价指标体系 .....	246
8.3	干式切削技术 .....	247
8.3.1	干式切削的特点 .....	247
8.3.2	干式切削的实施条件 .....	248
8.3.3	实施干式切削的方法 .....	255
8.4	准(亚)干式切削技术 .....	258
8.4.1	微量润滑切削技术 .....	258
8.4.2	其他准(亚)干切削技术 .....	260
8.5	干式磨削技术 .....	261
8.5.1	干式磨削的特点 .....	261
8.5.2	干式磨削的实施条件 .....	261
8.5.3	强冷风干式磨削 .....	261
8.5.4	点磨削 .....	262
8.6	准干式磨削技术 .....	263
8.7	快速成型技术 .....	264
8.7.1	概述 .....	264
8.7.2	快速成型的工艺方法 .....	266
8.7.3	3D 打印技术 .....	271
8.8	其他绿色加工工艺技术 .....	274
8.8.1	直接成型技术 .....	274
8.8.2	少(无)切削加工技术 .....	277
8.8.3	高压水射流切割技术 .....	280
	复习思考题 .....	280
<b>第9章</b>	<b>难加工材料和难加工结构的加工技术 .....</b>	<b>282</b>
9.1	概述 .....	282
9.1.1	材料的切削加工性 .....	282
9.1.2	难加工材料 .....	283
9.1.3	难加工结构 .....	288
9.2	难加工材料的加工技术 .....	288
9.2.1	钛合金加工 .....	288
9.2.2	高温合金加工 .....	290
9.2.3	不锈钢加工 .....	293
9.2.4	高强度钢和超高强度钢加工 .....	295
9.2.5	复合材料加工 .....	298

9.2.6 硬脆性材料加工 .....	301
9.3 难加工结构的加工技术 .....	303
9.3.1 薄壁件的加工 .....	303
9.3.2 叶片及涡轮盘的加工 .....	306
9.3.3 阵列孔及微孔的加工 .....	310
复习思考题 .....	313
参考文献 .....	314

# 第1章 绪 论

## 1.1 加工与加工技术

### 1. 传统加工

传统加工指主要依靠人工操作,利用机械力完成的零部件加工方法,包括成形加工和切削加工。成形加工在此不做比较,主要比较切削加工。

切削加工是指利用机械力,采用切削刀具切除工件余量的方法。它的主要加工方法有车削、刨削、磨削、钻削、镗削及齿形加工等。车削主要用于加工各种回转表面,如外圆(含外旋转槽)、内圆(含内旋转槽)、端面(含台肩端面和切断)、锥面、螺纹表面和滚花面等;铣削主要用于加工各种平面、沟槽齿轮、凸轮等成形面及轮廓表面等;刨削主要用于加工平面、沟槽和直线形成曲面等;磨削主要是通过砂轮磨平面、外圆、内圆使其达到高的加工精度和低的表面粗糙度;钻削是用钻头在实体材料上加工出孔的方法;镗削是扩大已有孔孔径的方法;齿形加工是加工齿轮齿面的方法,包括铣齿、滚齿、插齿等。

### 2. 现代加工

现代加工也称“非传统加工”或“特种加工”,泛指利用电能、热能、光能、电化学能、化学能、声能及特殊机械能等能量达到去除或增加材料的加工方法,从而实现材料被去除、变形、改变性能或被镀覆等。因此,现代加工是指那些不属于传统加工工艺范畴的加工方法,它不同于使用刀具、磨具等直接利用机械能切除多余材料的传统加工方法。

现代加工是近几十年发展起来的新工艺,是对传统加工工艺方法的重要补充与发展,目前仍在继续研究开发和改进。它是直接利用光能、热能、声能、化学能和电化学能,有时也结合机械能对工件进行加工的方法。

### 3. 加工技术与现代加工技术

制造业的基础和核心是制造技术,它由设计技术、加工工艺技术、基础设施及其支撑技术组成。其中,加工工艺技术又是制造技术的核心,它由各种加工方法及其制造过程所决定。所谓加工技术,是指采用某种工具(包括刀具)或能量流通过变形、去除、连接、改性或增加材料等方式将工件材料制成满足一定设计要求的半成品或成品过程技术的总称。加工的目的是获得一定的表面几何形状,并具有一定的几何精度,有时还必须保证加工后的表面(或表面层)满足一定的力学、光学、组织、成分等物理方面的要求,尤其在航空航天、国防等特殊领域更是如此。现代加工技术则是指满足“高速、高效、精密、微细、自动化、绿色化”特征中一种以上特征的加工技术。

## 1.2 现代加工技术的产生及发展

传统的机械加工已有很久的历史，它对人类的生产和物质文明起到了极大的推动作用。例如，18世纪70年代发明了蒸汽机，但由于难以制造出高精度的汽缸而无法推广应用。直到制造出汽缸镗床，解决了汽缸的加工工艺，才使蒸汽机获得了广泛应用，引起了世界性的第一次产业革命。

现代加工技术是20世纪40年代发展起来的，由于材料科学、高新技术的发展和激烈的市场竞争、发展尖端国防及科学研究的需要，不仅新产品更新换代日益加快，而且产品要求具有很高的强度重量比和性能价格比，并正朝着高速度、高精度、高可靠性、高耐腐蚀、高温高压、大功率、尺寸大小两极分化的方向发展，各种新材料、新结构、形状复杂的精密机械零件大量涌现。如果加工工艺技术没有相应的改进，对这些零件的加工靠单纯提高强度的方法，不仅使总的加工成本增加，而且有时根本无法加工。在美国工件材料强度对国家标准机加工费用的影响如图1-1所示。鉴于这一问题的严重性，1960年著名切削家莫詹特(Merchant)强调机械加工方法需要更新概念。于是人们开始探索采用除机械能以外的电能、化学能、声能、光能、磁能等进行加工的方法。这些加工方法，在某种定义上来说，即不使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工。为区别现有的金属切削加工技术，称之为“现代加工技术”或“特种加工技术”。它们与一般机械加工的不同点是：

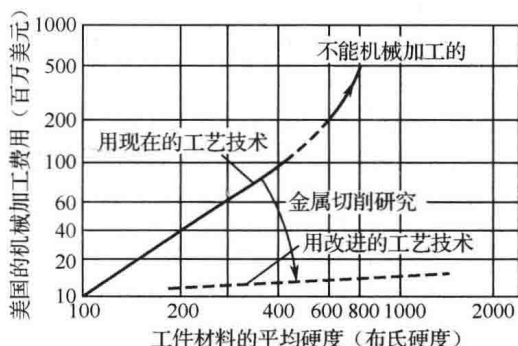


图 1-1 在美国工件材料强度对国家标准机加工费用的影响

- (1) 切除材料的能量不单纯是靠机械能，还可以用其他形式的能量。
- (2) 可以有工具，但工具材料的硬度可低于工件材料的硬度；也可以无工具。
- (3) 在加工过程中，工具和工件之间不存在显著的机械切削力。

## 1.3 现代加工技术的特点

现代加工方法由于不使用普通刀具来切削工件材料，而是直接利用能量进行加工，与传统的机械加工方法相比具有以下特点：

(1) 不用机械能，与加工对象的机械性能无关，有些加工方法，如激光加工、电火花加工、等离子加工、电化学加工等，是利用热能、化学能、电化学能等进行加工。这些加工方法与工件的硬度、强度等机械性能无关，故可以加工各种硬、软、脆、热敏、耐腐蚀、高熔

点、高强度、特殊性能的金属和非金属材料。

(2) 非接触加工, 不一定需要工具, 有的虽使用工具, 但与工件不接触, 所以工件不受大的作用力, 因而对工具和工件的强度、硬度和刚度均没有严格的要求, 故使刚性极低的元件及弹性元件得以加工, 并且工具硬度可低于工件硬度。

(3) 微细加工, 工件表面质量高, 有些特种加工(如超声波、电化学、水喷射、磨料流等)的加工过程都是微细进行的, 故不仅可加工尺寸微小的孔或狭缝, 还能获得高精度、极低粗糙度的加工表面。

(4) 不存在加工过程中的机械应变或大面积的热应变, 可获得较低的表面粗糙度, 其热应力、残余应力、冷作硬化等均比较小, 尺寸稳定性好。

(5) 两种或两种以上的不同类型的能量可相互结合形成新的复合加工技术, 其综合加工效果明显, 且便于推广应用。

(6) 对简化加工工艺、变革新产品的设计及零件结构工艺性等具有积极的影响。

(7) 但非传统加工方法的材料去除速度一般低于传统的机械加工方法, 这也是目前常规方法仍占主导地位的主要原因。

## 1.4 现代加工技术的地位及分类

### 1.4.1 现代加工技术的地位

一方面, 人类社会在发展中不断发明新的产品、新的材料, 对加工技术不断提出新的需求, 促成了新的加工原理和方法不断诞生及成长, 使得加工技术生机勃勃、持续发展。尤其是人类社会进入 20 世纪以后, 现代数学、系统论、控制论、信息论等理论和学科的创建与发展, 新材料技术、数控技术、自动化技术、微电子技术的诞生和发展, 从根本上改变了加工技术的手工、低效的传统面貌, 使之迈向自动、高效的现代化技术体系。另一方面, 加工技术的发展, 新的加工方法不断涌现, 在效率、精度、成本等诸多方面都在难以想象的程度上拓展了人类开发和制造新产品的能力。今天, 人们依托先进的加工技术, 以前所未有的速度更新现有的产品, 不断创造新的产品, 从而极大地丰富了人类社会的物质生活, 有力地推动了科学技术的整体发展, 加快了人类认识自我和外部世界的进程。

在 20 世纪中叶的美国, 曾经有很多学者鼓吹他们已进入“后工业化社会”, 认为制造业是“夕阳工业”, 主张经济的重心应由制造业转向信息、生物等高科技产业和第三产业, 结果导致美国在经济上竞争力明显下降, 许多产品的质量和性能落后于日本、德国等其他发达国家。到 20 世纪 80 年代, 美国政府开始意识到了问题的严重性, 于是在 1988 年投资开展了大规模“21 世纪制造企业战略”研究, 提出了“先进制造技术”(Advanced Manufacturing Technology, AMT) 的发展目标, 制订并实施了“先进制造技术计划”和“制造技术中心计划”。1991 年, 在美国白宫科学技术政策办公室发表的“美国国家关键技术”报告中, 重新确立了制造业在国民经济中的地位。

在我国, 人们已经逐渐认识到, 其他学科和工业的快速发展往往是以制造技术的不断发展为前提的这样一个事实。如在半导体制造领域, 随着加工技术的进步, 在单位面积上可以制造出的电子元件数量成百上千倍地增长, 集成电路芯片的集成度越来越高, 使得计算机以

及其他电子产品的体积不断减小,而性能却不断提高。我国航空航天、国防等某些特殊领域,加工制造技术常常成为瓶颈,产品在性能设计上虽然和工业先进国家相比相差不大,但是“做不好”的现象时有发生。我国民用产品的加工制造水平和工业发达国家相比,仍有很大的差距。如今,制造科学在世界上已广泛被认为是与信息科学、材料科学、生物科学并列的当今时代的四大支柱学科之一。

### 1.4.2 现代加工技术的分类

现代加工技术按加工机理和采用的能源不同可分为:

(1) 机械过程。利用机械力使材料产生剪切、断裂,以便去除材料,如超声波加工、水射流加工、磨料射流加工等。

(2) 热学过程。通过电、光、化学能等产生瞬时高温,熔化并去除材料,如电火花加工、高能束加工、热力去毛刺等。

(3) 电化学过程。利用电能转换为化学能对材料进行加工,如电解加工、电铸加工(金属离子沉积)等。

(4) 化学过程。利用化学溶剂对材料的腐蚀、溶解去除材料,如化学蚀刻、化学铣削等。

(5) 复合过程。利用机械、热、化学、电化学等的复合作用去除材料。常见方法有机械-化学复合(如机械化学抛光、电解磨削、电解珩磨等)、机械-热能复合(如加热切削、低温切削等)、热能-化学能复合(如电解电火花加工等),以及其他复合过程(如超声振动切削、超声电解磨削、磁力抛光等)。

## 1.5 现代加工技术的发展趋势

### 1. 追求更高的加工精度

获得更高的加工精度一直是加工技术孜孜不倦追求的目标。200多年前,在工业革命时代,去除加工技术的大家族中仅有普通切削加工,其加工精度最高约为1mm;而进入21世纪,在工业发达国家,即使对于大批量生产的普通零件,其加工精度也可达到 $1\mu\text{m}$ 。200年间,普通加工精度提高了约三个数量级,而精密加工精度已达到10nm的水准,更是提高了约五个数量级。现代加工技术之所以致力于提高加工精度,其主要目的在于:

(1) 提高产品的性能和质量,提高其稳定性和可靠性。

例如,飞机发动机转子叶片的加工误差从 $60\mu\text{m}$ 降至 $12\mu\text{m}$ ,加工表面粗糙度由 $Ra\ 0.5\mu\text{m}$ 减小到 $Ra\ 0.2\mu\text{m}$ ,发动机的压缩效率即可从89%提高到94%。又如,美国民兵III型洲际导弹系统的陀螺仪精度为 $0.03^\circ \sim 0.05^\circ/\text{h}$ ,命中精度的圆概率误差为500m;而MX战略导弹的陀螺仪精度提高了一个数量级,命中精度的圆概率误差即减小到50~150m。

(2) 促进产品的小型化。

例如,将传动齿轮的齿形及齿距误差从3~ $6\mu\text{m}$ 降至 $1\mu\text{m}$ ,齿轮箱单位重量所能传递的扭矩即可提高近一倍,从而使齿轮箱的尺寸大大缩小。又如,IBM公司开发的磁盘,其记忆密度由1957年的 $300\text{b}/\text{cm}^2$ ,提高到1982年的 $2540000\text{b}/\text{cm}^2$ ,提高了近一万倍,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) 增强零件的互换性, 提高装配生产率, 促进自动化装配的应用, 推动自动化生产等。

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, 从而导致对零件的加工精度要求极高, 精密加工使之成为可能。

(4) 为高新技术的发展提供基础和手段。

导弹命中率精度由惯性仪的精度决定。而惯性仪是超精密加工的产品, 1kg 重的陀螺转子, 其质量中心偏离其对称轴 0.5nm, 将会引起 100m 的射程误差和 50m 的轨道误差。

## 2. 以高速实现高品质、高效率加工

航空和航天工业、轿车工业的迅猛发展, 集成电路制造等电子工业的日新月异, 都迫切要求实现高效率生产, 而实现高效率生产首先应实现高效率加工。目前, 由于高速主轴技术、直线电机技术、高速控制技术及刀具技术的发展和进步, 以加工的高速化实现加工的高品质、高效率已成为切削加工技术发展的重要特征。

在飞机制造业中, 为了降低飞机机身重量, 提高飞机的速度、机敏性, 以及载重能力等性能, 目前广泛采用整体结构代替传统的组装结构。飞机机身、机翼中的框、梁等大型零件采用一块整体毛坯件直接去除多余的部分, “掏空”而成。因此, 加工余量非常大, 最多时需要去除毛坯 95%以上的部分。同时, 加工结构也非常复杂, 加工变形问题突出。所以, 不仅对加工效率要求非常高, 而且对切削力、切削温度的要求也很苛刻。目前, 为保证在获得高品质的同时获得足够高的加工效率, 已广泛采用高速切削加工技术, 且加工速度越来越高。例如, 美国 Cincinnati 公司以往用于飞机制造的铣床主轴转速为 15000r/min, 现在已经提高到了 40000r/min, 功率从 22kW 提高到了 40kW。该公司现在已将铣床主轴转速提高到了 60000r/min, 功率提高到了 80kW。铣床采用直线电机, 工作行程进给速度最大可达 60m/min, 空行程快速则达到 100m/min, 加速度达  $2\text{m/s}^2$ 。由于采用高速电主轴和高速直线电机进给, 使得加工时间减少了 50%。高速铣削加工还成功用于典型薄壁零件——雷达天线的生产制造中, 较好地解决了薄壁加工容易变形的难题。

汽车工业也是高速加工技术应用的一个重要领域, 目前很多汽车制造商已采用高速加工中心代替多轴组合机床, 不仅可以保证加工质量, 提高加工效率, 而且还可以提高产品生产的柔性, 有利于产品的更新换代。

高速切削加工技术另一个应用得比较成功的领域是模具制造业, 尤其是塑料模具制造业, 其所有的先进企业均已采用高速铣削加工技术。同时, 直线电机技术在电加工机床上也开始应用, 从而大大提高了电加工效率, 有力地推动了模具加工技术的发展。

加工速度正在向更快的方向发展。目前正在研制的高速切削加工中心, 其主轴转速已达 300000r/min, 直线进给速度可达 200m/min。随着高速切削机床技术、高速刀具技术的发展, 以及人们对高速切削机理认识的不断加深, 高速切削加工技术的应用一定会越来越广泛。

## 3. 微细与纳米加工快速发展

从集成电路的诞生算起, 微细加工技术的历史还不到半个世纪, 可是微细加工技术的发展却表现出了惊人的速度。它的发展不仅使集成电路的集成度越来越高, 使得微电脑的功能越来越强大, 而且满足了人们对许多工业产品功能集成化和外形小型化的不断需求。目前生