

高等学校机械设计制造及其自动化专业教材

现代机械加工 新技术

韩荣第 王 扬 张文生 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校机械设计及其自动化专业教材

现代机械加工新技术

韩荣第 王 扬 张文生 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍近些年来为适应制造业的发展而出现的现代机械加工最新技术,包括高速与超高速切削技术,硬态和干式(绿色)切削技术,振动切削与磨削技术,加热辅助切削与低温切削技术,特殊切削加工方法及磨削加工最新技术等,还较系统详尽地介绍不锈钢、高温合金、钛合金、工程陶瓷及复合材料等五种难加工新材料的切削与磨削加工技术。

本书内容新颖、资料丰富、数据齐全、图文并茂、语言精炼、理论联系实际。

本书既可作为高等工科院校机械设计制造及其自动化专业、航空宇航制造工程专业本科生和硕士研究生的教材,又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

现代机械加工新技术/韩荣第,王扬,张文生编著. —北京:电子工业出版社,2003. 4

高等学校机械设计及其自动化专业教材

ISBN 7-5053-8640-9

I. 现… II. ①韩…②王…③张… III. 机械加工—高等学校—教材 IV. TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 025291 号

责任编辑:朱怀永

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:23.25 字数:474.7 千字

版 次:2003 年 4 月第 1 版 2003 年 4 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:29.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077

前 言

随着科学技术的迅猛发展,特别是航天航空工业的发展,对产品性能的要求越来越高。要适应这种要求,一是要努力提高零部件加工精度和表面质量的要求,二是要采用性能更优异的难加工新材料。这就对机械制造业提出了严重的挑战,制造企业必须超前研制新装备、新工艺和新技术,亦即采用机械加工新技术。

为适应 21 世纪机械制造业发展的这种需求,作者根据多年从事科研工作和教学工作的经验,特编写《现代机械加工新技术》一书。

全书共 15 章。前 10 章重点介绍近些年逐步发展起来的高速与超高速切削技术、硬态切削技术、干式(绿色)切削技术、振动切削与磨削技术、加热辅助切削与低温切削技术、特殊切削加工方法以及磨削加工新技术,还将很有发展前景的复合加工技术和高能束加工与射流加工技术的原理、特点、机理及应用情况做了介绍;后 5 章重点介绍五种典型难加工新材料——不锈钢、高温合金、钛合金、工程(精细)陶瓷和复合材料的切削加工技术。

全书内容新颖丰富,重点突出,理论联系实际,图文并茂,结构严谨,语言精炼;既可作为机械设计制造及其自动化专业和航空宇航制造工程专业的本科生、硕士研究生的教材,又可作为相关工程技术人员的参考书。

全书主要由哈尔滨工业大学韩荣第教授、王扬教授和黑龙江科技学院张文生副教授编写。其中第 1, 2, 7, 8, 13, 14, 15 章由韩荣第编写;第 3, 4, 5 章由张文生编写;第 6, 9, 10 章由王扬编写;第 11, 12 章由韩滨和张文生编写。全书由韩荣第统稿,由中国高校金属切削与先进制造技术研究会理事长、哈尔滨工业大学袁哲俊教授主审。

由于水平和时间所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请批评指正。

主 编

2003 年 3 月于哈尔滨

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 先进制造技术	1
1.2 21 世纪的先进制造工艺技术	3
1.3 机械加工技术	4
1.4 本课程的内容	7
思考题	8
第 2 章 高速与超高速切削技术	9
2.1 概述	9
2.1.1 高速切削的概念与高速切削技术	9
2.1.2 高速与超高速切削的特点	10
2.1.3 高速与超高速切削技术的研究发展现状	11
2.1.4 高速与超高速切削对机床的新要求	13
2.2 实施高速与超高速切削的关键技术	13
2.3 独特的主轴结构单元	14
2.3.1 电主轴单元	14
2.3.2 主轴轴承	17
2.3.3 电主轴的冷却和轴承的润滑	18
2.3.4 电主轴的动平衡	19
2.4 高速直线驱动进给单元	20
2.4.1 高速直线进给传动方式分析	21
2.4.2 高速直线电动机进给单元	22
2.5 高速与超高速切削刀具技术及其系统	31
2.5.1 适用高速与超高速切削的刀具材料	31
2.5.2 高效安全可靠的刀具结构	33
2.5.3 高速切削刀具与机床连接的刀柄系统	35
2.5.4 高速切削用新型夹头	37
2.5.5 高速切削刀具的动平衡性能	38
2.5.6 高速与超高速切削刀具的监测技术	40
2.6 高性能的数控和伺服驱动系统	40

2.6.1	用矢量控制原理的 PWM 交流变频控制器	40
2.6.2	高性能高灵敏度的伺服驱动系统	41
2.6.3	精简指令集计算机系统结构的 CNC 系统	42
2.6.4	其他辅助控制技术	43
2.7	高速与超高速切削技术的应用领域	43
	思考题	44
第 3 章	硬态切削技术	46
3.1	硬态切削的概念	46
3.2	硬态车削的特点	46
3.3	硬态车削的必要条件	47
3.3.1	硬态车削刀具	47
3.3.2	硬态车削的切削用量	48
3.3.3	硬态车削机床	50
3.4	硬态车削的应用与展望	50
	思考题	51
第 4 章	干式（绿色）切削技术	52
4.1	概述	52
4.2	干式切削技术的特点及实施的必要条件	52
4.2.1	干式切削技术的特点	52
4.2.2	实施干式切削的必要条件	53
4.3	实施干式（绿色）切削可采用的方法	56
4.3.1	风冷却切削	56
4.3.2	液氮冷却干式切削	58
4.3.3	准（亚）干式切削	59
4.3.4	用水蒸气作冷却润滑剂	60
4.3.5	射流注液切削	61
4.4	干式切削技术的发展现状及应用	62
4.4.1	干式切削技术的发展现状	62
4.4.2	干式切削技术的应用举例	62
4.5	当前的任务	63
4.5.1	对切削液的新要求	63
4.5.2	切削液的发展趋势	63
4.5.3	限制使用切削液中的有害添加剂	64
4.5.4	研制新环保型添加剂	65

思考题	65
第 5 章 振动切削与磨削技术	67
5.1 概述	67
5.1.1 传统切削与振动切削	67
5.1.2 振动切削特点	68
5.1.3 振动切削机理的几种观点	71
5.1.4 振动切削研究现状	73
5.2 振动切削过程解析	74
5.2.1 振动切削改变实际切削速度	74
5.2.2 振动切削改变刀具工作角度	76
5.2.3 振动切削过程中的消振作用	77
5.2.4 切削力波形改变切削过程	80
5.3 典型振动切削装置及其应用	82
5.3.1 对振动切削装置的基本要求	82
5.3.2 振动切削装置分类	82
5.3.3 机械振动切削装置	83
5.3.4 超声振动切削装置	85
5.3.5 振动切削在难加工材料加工中的应用	86
5.4 振动磨削技术	88
5.4.1 超声振动磨削	88
5.4.2 超声振动清洗砂轮磨削	92
5.4.3 超声振动修整砂轮	93
5.5 振动研磨技术	94
5.5.1 概述	94
5.5.2 振动研磨机理	95
思考题	96
第 6 章 加热辅助切削与低温切削技术	97
6.1 概述	97
6.1.1 加热辅助切削的概念	97
6.1.2 加热辅助切削的发展概况	97
6.2 加热辅助切削的加热方法与加热辅助切削	98
6.3 加热辅助切削机理探讨	102
6.4 低温切削技术	105
6.4.1 概述	105

6.4.2 低温切削特点	106
6.4.3 低温切削分类	106
6.4.4 低温切削的应用	107
思考题	108
第7章 特殊切削加工方法	109
7.1 磁化切削	109
7.1.1 概念	109
7.1.2 磁化切削的分类	109
7.1.3 刀具磁化装置	110
7.1.4 磁化切削效果	111
7.1.5 磁化切削机理探讨	115
7.2 真空中切削	116
7.2.1 真空度对铜和铝切削的影响	116
7.2.2 真空度对中碳钢和钛合金切削的影响	117
7.2.3 真空中的高速与超高速切削	119
7.2.4 在氧气和氩气气氛中的高速与超高速切削	119
7.3 惰性气体保护切削	120
7.4 绝缘切削	121
7.5 电熔爆切削	121
思考题	121
第8章 磨削加工新技术	122
8.1 高效磨削新技术	122
8.1.1 重负荷荒磨	122
8.1.2 缓进给大切深磨削	122
8.1.3 高速与超高速磨削	124
8.1.4 砂带磨削	125
8.2 超硬磨料的高效磨削技术	126
8.2.1 超硬磨料的性能分析及应用	126
8.2.2 超高速磨削典型新工艺介绍	127
8.3 超硬磨料砂轮的修整技术	131
8.3.1 超硬磨料砂轮修整的概念	131
8.3.2 超硬砂轮修整方法	131
8.4 高精度小粗糙度磨削技术	134
8.4.1 砂轮表面磨粒应有微刃性和等高性	134

8.4.2	磨床要有足够好的性能	135
8.4.3	工艺参数选择要合理	135
8.5	磨削加工最新技术	136
8.6	先进磨削方法在难加工材料加工中的应用举例	137
8.6.1	高温合金的缓进给大切深磨削	137
8.6.2	钛合金的磨削	139
8.6.3	热喷涂(焊)层的磨削	144
8.7	超硬砂轮在线电解修整 ELID 磨削技术及应用	145
8.7.1	ELID 磨削原理	145
8.7.2	ELID 磨削机理与应用	145
	思考题	147
第 9 章	复合加工技术	148
9.1	概述	148
9.2	机械去除与电解复合加工技术	149
9.3	磁场辅助研抛加工技术	153
	思考题	155
第 10 章	高能束加工与射流加工技术	156
10.1	激光加工技术	156
10.1.1	概述	156
10.1.2	激光加工的基本设备	160
10.1.3	激光加工工艺及应用	163
10.2	电子束加工技术	167
10.2.1	概述	167
10.2.2	电子束加工装置	168
10.2.3	电子束加工的应用	169
10.3	离子束加工技术	172
10.3.1	概述	172
10.3.2	离子束加工装置	174
10.3.3	离子束加工的应用	176
10.4	射流加工技术	179
10.4.1	概述	179
10.4.2	高压水射流加工装置	181
10.4.3	高压水射流切除与切断机理	182
10.4.4	高压水射流(WJ、AWJ)切割应用范围	183

思考题	183
第 11 章 不锈钢的切削加工	184
11.1 概述	184
11.2 不锈钢的切削加工特点	188
11.3 不锈钢的车削加工	190
11.4 不锈钢的铣削加工	196
11.5 不锈钢的钻削加工	199
11.6 不锈钢的铰孔	201
11.7 不锈钢攻螺纹	203
思考题	206
第 12 章 高温合金的切削加工	207
12.1 概述	207
12.2 高温合金的切削加工特点	208
12.3 高温合金的车削加工	212
12.3.1 正确选择刀具材料	212
12.3.2 选择合理的刀具几何参数	215
12.4 高温合金的铣削加工	220
12.5 高温合金的钻削加工	223
12.6 高温合金的铰孔	226
12.7 高温合金攻螺纹	227
12.8 高温合金的拉削	228
思考题	232
第 13 章 钛合金的切削加工	233
13.1 概述	233
13.1.1 钛合金的分类	233
13.1.2 钛合金的性能特点	234
13.2 钛合金的切削加工特点	237
13.3 钛合金的车削加工	240
13.3.1 正确选择刀具材料	240
13.3.2 选择合理的刀具几何参数	242
13.3.3 切削用量选择	242
13.4 钛合金的铣削加工	244
13.4.1 正确选择刀具材料	244
13.4.2 选择合理的刀具几何参数	244

13.4.3 铣削方式的选择	245
13.4.4 铣削用量	245
13.5 钛合金的钻削加工	250
13.6 钛合金攻螺纹	254
13.6.1 选择性能好的刀具材料	254
13.6.2 改进标准丝锥结构	255
13.6.3 采用跳齿结构	255
13.6.4 采用修正齿丝锥	255
13.6.5 切削液的选用	256
13.6.6 螺纹底孔直径的选取	257
13.6.7 攻螺纹速度的选取	257
思考题	258
第 14 章 工程陶瓷材料的切削加工	259
14.1 概述	259
14.1.1 陶瓷材料的分类	259
14.1.2 陶瓷制品的制备	260
14.1.3 陶瓷的组织结构	261
14.2 工程陶瓷材料的特性及脆性破坏机理探讨	262
14.2.1 与切削加工相关的陶瓷材料的性能	262
14.2.2 陶瓷材料脆性破坏机理探讨	265
14.3 工程陶瓷材料的切削	265
14.3.1 陶瓷材料的切削加工特点	265
14.3.2 几种陶瓷材料的切削加工	270
14.4 工程陶瓷材料的磨削	284
14.4.1 陶瓷材料的磨削特点	285
14.4.2 正确选择金刚石砂轮的性能参数	289
14.4.3 新型金刚石砂轮的开发	298
14.4.4 提高陶瓷材料磨削效率的其他方法	301
14.4.5 陶瓷材料的研磨与抛光	301
思考题	302
第 15 章 复合材料的切削加工	303
15.1 概述	303
15.1.1 复合材料的概念	303
15.1.2 复合材料的分类	303

15.1.3	复合材料的发展与应用·····	305
15.1.4	复合材料的增强相（或分散相）·····	308
15.1.5	复合材料的增强机理·····	308
15.2	纤维增强树脂基复合材料 FRP 简介·····	309
15.2.1	FRP 的性能特点·····	309
15.2.2	影响 FRP 性能的其他因素·····	310
15.2.3	常用的 FRP·····	311
15.3	FRP 的切削加工·····	313
15.3.1	FRP 的切削加工特点·····	313
15.3.2	FRP 的车削加工·····	314
15.3.3	FRP 的钻孔·····	321
15.3.4	FRP 的铣削加工·····	335
15.3.5	切断加工·····	336
15.4	碳/碳（C/C）复合材料的切削加工·····	337
15.5	金属基复合材料的切削加工·····	337
15.5.1	切削加工特点·····	337
15.5.2	不同加工方法的切削加工特点·····	341
	思考题·····	351
	参考文献·····	352

第 1 章 绪 论

制造业是国民经济的基础产业，它的水平和实力反映一个国家的生产力水平和国防能力，决定着国家的经济竞争力和综合国力。

在整个制造业中，机械制造业占有特别重要的地位。因为机械制造业是国民经济的装备部，国民经济各部门的生产水平和经济效益在很大程度上取决于机械制造业所提供装备的技术性能、质量和可靠性。

先进制造技术是制造技术的最新发展，它早已超越了传统的制造技术、工厂与车间的边界，它包容了从市场需要、创新设计、工艺技术、生产过程组织与监控、市场信息反馈在内的工程系统。先进制造技术是以先进制造工艺技术、计算机应用技术为核心的信息、设计方法、工艺技术、物流工程及相应的管理工程集成的现代制造工程，是不断更新发展的高技术体系。

1.1 先进制造技术

先进制造技术包括下列内容^[1]：

- ① 先进制造工艺技术；
- ② 信息技术和综合自动化技术；
- ③ 先进管理技术。

1. 先进制造工艺技术

先进制造工艺技术离不开设备，先进制造工艺与设备是先进制造系统的工艺基础与装备，是实现优质、高效、低耗、清洁生产的基础，是产品质量和市场竞争力的基本保证。因此，先进制造工艺与设备是计算机集成制造技术的重要支柱之一。先进制造工艺技术包括以下内容：

(1) 少无余量精密成型技术

少无余量精密成型技术是实现高效与清洁生产的关键技术。

(2) 精密与超精密加工技术

精密与超精密加工技术大致可分为三个层次：一是用于汽车、飞机与精密机械的微米级（ $10\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ ）精密加工；二是用于磁盘与磁鼓制造的亚微米级（ $1\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ ）

精密加工；三是用于超精密光电子器件的毫微米级（ $0.1\mu\text{m}\sim 0.001\mu\text{m}$ ）精密加工，即纳米级加工。

（3）新材料的成型与加工技术

新材料的成型与加工是指高分子材料、复合材料、精细陶瓷与超硬材料等的成型和加工。

（4）构件或材料间的连接技术

构件或材料间的连接技术包括复合材料制作的精密零件间的粘接、精密焊接和铆接等连接技术。

（5）表面新技术

表面新技术包括表面改性、涂层、修饰技术等。

这其中，（2）、（3）两项所述技术都是与先进切削磨削加工技术——机械加工技术有关的。

2. 信息技术和综合自动化技术

信息技术和综合自动化技术是先进制造技术发展的高级阶段的重要组成部分。即在数据库技术、接口与通信、集成框架软件工程、人工智能专家系统和神经网络、决策与支持系统、系统监督与诊断等基础信息的基础上，实现将企业内外市场、技术、生产、经营有机地集合，实行统一控制与协调的计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System) 与敏捷制造 AM (Agile Manufacturing)。

3. 先进的管理技术

没有先进管理技术的完美配合很难形成先进制造技术。先进管理技术包括：数据标准、工艺标准、质量标准、生产计划与控制、质量管理、市场分析、用户与员工培训等先进管理技术的基础要素。

先进管理技术与先进制造技术的优化组合最终形成精益生产或敏捷制造技术。敏捷制造技术是以柔性生产技术和动态组织结构为特点，以高素质、协调良好的工作人员为核心，实行企业网络化集成，形成快速响应市场需求的社会化制造系统。它是以准时生产 JIT (Just In Time)、成组技术 GT (Group Technology) 和全面质量管理 TQC (Total Quality Control) 为支柱，并引入并行工程 CE (Concurrent Engineering) 和整体优化概念形成的。敏捷制造技术在空间和时间上合理地配置和利用生产要素，发挥了以人为核心的整体制造系统效益。

1.2 21 世纪的先进制造工艺技术

21 世纪先进制造工艺技术具体体现在下列方面^[2]:

(1) 切削与磨削加工的高精度化

精密零件的精度要求达到 nm 级, 切削与磨削加工的高精度化是今后技术革新的重要基本课题。

(2) 切削与磨削加工的高速化和高效率化

目前研究的主轴转速已达 300000 r/min 以上, 进给速度 $v_f=120$ m/min。用 PCD (Poly Crystalline Diamond) 刀具切削铝合金时, 切削速度可达 $v_c \geq 10000$ m/min; 用 CBN (Cubic Boron Nitrogen) 刀具切削球墨铸铁时, 切削速度 $v_c \geq 5000$ m/min。各国都在开展研究高速加工钢材及不锈钢、高温合金、钛合金等难加工材料的工作。

(3) 降低加工成本

加工成本若不能降低, 就无法使先进制造技术产生应有的经济价值。

(4) 缩短加工周期

制造业中计算机集成制造 CIM (Computer Integrated Manufacturing) 的采用, 使得工业产品的生产周期大幅度地缩短。

(5) 切削与磨削加工的自动化和无人化

产品从订货、生产到交货均可完全由 CIM 控制, 实现无人化车间。

(6) 使自动生产系统向多品种、小批量的自动化和无人化加工方向发展

(7) 开发新材料难加工材料的加工技术

Inconel 超耐热合金 (高温合金)、Ti 合金 (Ti-6Al-4V) 等已不局限用于航空航天领域, 在船舶、汽车、核能、石化、海水淡化设备、垃圾处理焚烧炉及热分解炉等各工业领域也已逐渐采用各种各样的难加工材料。包括有纤维增强塑料 FRP (Fiber Reinforced Plastics)、纤维增强金属 FRM (Fiber Reinforced Metal)、工程陶瓷、非晶态合金、高熔点金属及其合金的用量也在不断增多。

技术革新的历史也是材料不断革新的历史, 具有优异性能的新材料不断地被开发出来。一般认为, 新材料的切削加工都较困难。

21 世纪将是新材料和难加工材料应用不断增多的时代, 切削与磨削加工技术也将

面临更大地考验。

1.3 机械加工技术

机械加工技术通常是指切削和磨削加工技术。随着科学技术的发展与进步,尽管在过去的几十年里,不断出现了许多新的加工方法,如电物理加工、电化学加工、激光束和离子束加工、精密铸造和精密锻造成型加工方法等,并且得到了较广泛地应用和发展,但是切削和磨削加工仍是迄今为止机械制造应用最多、最广、最为主要的加工方法。据专家估计,机械制造中约有 30%~40% 工作量是切削和磨削加工,对于尺寸和形状的配合精度要求越高的零件(在微米内),就越必须经过切削和磨削加工来完成,至今还没有更好的加工方法。因此,重视切削和磨削加工技术的研究,不断提高切削和磨削加工技术水平,对提高一个国家的机械制造技术水平和机电产品的性能、质量及市场竞争力具有十分重要的意义,所以切削和磨削加工技术理所当然地受到了所有工业发达国家,如美、德、日、英等国的极大重视。

衡量一个国家的切削和磨削加工技术水平的高低可从三个方面考虑:一是考虑机械制造业中普遍采用的切削用量(v_c 和 f)达到的加工精度、生产效率和加工质量等;二是考虑在切削和磨削加工中的自动化、柔性化程度以及在超精密加工、难加工材料(如特硬、特软、特黏及特脆材料等)加工方面所具有的能力和水平;三是考虑切削和磨削加工中的材料消耗、能量消耗和所产生的环境污染(切削液和噪声污染)等^[3]。

由此可见,现代切削和磨削加工技术,即机械加工新技术,不仅涉及到了切削和磨削加工机理和工艺方法方面的问题,也涉及到所需的技术装备,包括机床、刀具、磨料、磨具、量具、量仪及监测监控技术等诸方面的问题。而且前者是发展和提高切削和磨削加工技术水平的依据,后者(技术装备)则是实现发展和提高切削和磨削加工技术水平的保证。二者必须同步发展,相互适应。

1. 机床技术的发展

为适应国民经济发展的需要,现代机床正在向高速化、高精度化和自动化方向发展。

(1) 机床的高速化

航空和航天工业、轿车工业的迅猛发展,迫切要求生产高效率。高效率的根本途径就是生产的高速化。特别是 20 世纪 90 年代以来,随着电主轴和直线进给电机在机床上地应用,使得机床的主运动和进给运动的速度大大提高。航空和航天工业是高速与超高速加工传统的应用领域,最新发展趋势是采用整体铝合金坯料“掏空”制造飞机的机

身和机翼等大型零件,用以代替传统的拼装结构。如,美国 CINCINNATI 公司以往用于飞机制造的铣床主轴转速为 15 000 r/min,现在已经提高到了 40 000 r/min,功率从 22 kW 提高到了 40 kW。Hyper Mach 铣床已提高到了 60 000 r/min,功率达 80 kW。Hyper Mach 铣床采用了直线电机,工作行程进给速度最大达 60 m/min,空行程快速达 100 m/min,加速度达 2g。该铣床试切一薄壁飞机零件,仅用了 30 min。意大利的 JOBS 公司 2000 年用于航空和模具工业的高速大型铣床 Linx,其主轴转速为 24 000 r/min,功率为 44 kW,进给速度为 60 m/min,加速度为 0.6g。据称,由于电主轴的高速和直线电机进给的高速,使得加工时间减少了 50%,机床结构大大简化,机床零件减少了 25%,使得维修也变得容易。

轿车工业也是高速加工应用的一个重要领域,据报导,现在已采用高速加工中心代替多轴组合机床,提高了产品生产的柔性,有利于产品的更新换代。上海通用汽车公司也已用高速加工中心代替部分组合机组成新生产线。

淬硬模具钢的加工也采用高速铣削,这又推动了电加工机床实现直线电机进给,也使电加工大大减少了加工时间,提高了模具加工的生产效率。

据报导,现在正在研制主轴转速为 300 000 r/min,直线进给速度达 200 m/min 的新加工中心。当然,这么高转速和这么快进给速度的机床也必须实现自动化和高精度才有意义。

(2) 机床的高精度化

要想满足航空和航天,特别是微电子产品和光学产品性能的要求,必须解决超精密加工技术问题,其核心是要有超精密加工机床。美国的超精密机床水平是全世界公认的。美国 pneumo 公司的 MSG-325 金刚石车床主轴回转精度可达 $0.025\mu\text{m}$,加工形状精度为 $0.1\mu\text{m}\sim 0.2\mu\text{m}$,加工有色金属工件的表面粗糙度 R_a 为 $0.01\mu\text{m}\sim 0.02\mu\text{m}$ 。

美国 1983 年研制的大型金刚石车床 DTM,可加工直径 $\phi 2100\text{ mm}$,质量为 4 500 kg 的工件;1984 年研制的大型光学金刚石车床 LODTM,可加工直径 $\phi 1625\text{ mm}$,质量为 1 360 kg 的工件。它们的主轴分别采用空气轴承和高压液体静压轴承,刚度高、动态特性好;采用精密数字伺服控制内装式 CNC 系统和激光干涉测长仪,以实现随机测量定位;用压电式微位移机构以实现刀具的微量进给(nm 级位移);用恒温油淋浴系统,使油温控制在 $20\pm 0.0005^\circ\text{C}$,以消除加工中机床的热变形;还采用了压电晶体误差补偿技术,使得加工精度达到 $0.025\mu\text{m}$,表面粗糙度 R_a 达 $0.0042\mu\text{m}$ 。DTM 既可加工平面、球面,又可加工非球曲面。

英国 1991 年研制成功了 OAGM2500 大型超精密机床,专门用于加工 X 射线天体望远镜的大型曲面反射镜,其工作台为 $2500\text{ mm}\times 2500\text{ mm}$,还有 $\phi 2500\text{ mm}$ 高精度回转工作台。机床采用精密数控驱动,用分辨率为 $2.5\mu\text{m}$ 的双频激光测量系统检测运动