



国防科技图书出版基金

先进光学元件 微纳制造与精密检测技术

Micro-nano Manufacturing and Precision
Measuring Technology for Advanced Optics

郭隐彪 杨平 王振忠 杨炜 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

国防工业出版社

先进光学元件微纳制造 与精密检测技术

Micro-nano Manufacturing and Precision Measuring
Technology for Advanced Optics

郭隐彪 杨平 王振忠 杨炜 编著

T1174
J3

国防工业出版社

·北京·



图书在版编目(CIP)数据

先进光学元件微纳制造与精密检测技术 / 郭隐彪等
编著. —北京:国防工业出版社, 2014. 11
ISBN 978 - 7 - 118 - 09613 - 2

I. ①先... II. ①郭... III. ①光学元件 - 制造 ②光学
元件 - 精密测试 IV. ①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 223953 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21¼ 字数 403 千字

2014 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 108.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需

要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金 评审委员会

主任委员 李德仁 国防科技大学

副主任委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

委员 王德明 国防科技大学

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

序

进入新世纪以来,先进消费光电系统以及高精度军用光电系统呈现出跨越式发展,已成为国民经济发展和国防建设的重要热点领域。如何实现高精度光学元件的批量制造,从传统的经验传承向确定性工业化制造转变,是先进光学制造与检测领域研究所面临的挑战和机遇。

本书以非球面光学元件的制造技术为代表,完整阐述了以超精密、确定性为特征的先进光学制造系统;重点论述了超精密磨削成形理论、磨削加工关键技术以及超精密机床设计技术;围绕实现确定性抛光,详细阐述了气囊抛光原理以及进动运动控制技术;介绍了基于坐标测量和干涉测量的非球面面形误差测量技术,加工轨迹规划原理和数据处理方法,以及不同加工阶段光学元件亚表面缺陷的检测方法。本书内容丰富,理论分析深入,既涵盖了国内外先进光学制造技术领域的发展,又概括了作者多年积累的该领域科学研究成果,对于从事此方面研究的科技人员具有重要的参考价值和指导意义。

作者郭隐彪博士和他的研究团队长期从事超精密光学制造技术研究,积累了丰富的研究经验,率先在国内提出大口径非球面光学元件的超精密磨削制造技术体系,研制出我国大型固体激光装置所需大口径异型非球面透镜,并成功实现了超精密磨削机床的国产化,成果显著。相信本书的出版将帮助感兴趣的读者以及科研人员对此领域有系统的了解并获得启发,促进国内先进光学制造领域研究工作的进步。



2014年7月

前 言

高技术需求牵引和市场竞争的驱动是现代先进光学制造技术发展的基本动力。先进光学元件由于其自身特殊的光学功能特性,使其在航天、航空、国防以及高科技民用领域得到了广泛的关注和应用。先进光学元件开发的核心,主要是实现高精度的制造和检测。探寻先进光学元件的高效、高精度制造与生产技术,是当前光学制造领域的必然发展趋势,同时对光学制造业和光学制造研究与生产者提出了严峻的挑战和新的发展机遇。光学非球面作为先进光学元件的典型代表,由于其较球面光学元件具有更出色的锐度和更高的分辨力,可矫正光学系统像差、改善像质、扩大视场、增大作用距离、减少光能损失,获得高质量的图像效果和高品质的光学特性,使得非球面在国防以及高科技民用领域得到了越来越广泛的应用。

本书较为全面地介绍了国内外近年来先进光学领域取得的最新进展,以及作者在该领域从事的课题研究和主要成果。本书内容分为8章:

第1章绪论。首先介绍先进光学元件的特点,以及先进光学元件的应用领域和制造技术要求;然后总结先进光学元件的制造与检测技术及装备所涉及的技术领域与系统,概括性地介绍光学元件的模压成形技术、超精密切削加工技术、超精密磨削加工技术、精密研抛加工技术;最后介绍先进光学元件的检测与评价技术。

第2章先进光学元件加工装备技术。从超精密机床设计理论出发,围绕模块化设计及机床有限元优化两部分内容分析先进光学元件加工装备结构特点,重点介绍主轴、导轨等超精密机床关键部件技术及实现超精密加工的相关机床数控技术。对光学非球面平面磨削加工机床技术水平进行总结。最后简要分析超精密加工刀具和超硬磨料砂轮。

第3章先进光学元件磨削技术。总结超精密磨削加工关键技术,对超精密磨削过程机理及主要参数简要分析。介绍各种高精度超硬砂轮修整技术。重点分析小口径非球面、大口径轴对称非球面、自由曲面等类型元件的加工控制方法和工艺软件设计开发。最后简要分析超声振动复合磨削加工技术发展应用情况。

第4章先进光学元件抛光技术。针对平面光学元件抛光技术,从抛光原理、抛光轨迹控制和抛光材料去除三个方面进行详细阐述非球面光学元件抛光技术。详细阐述气囊抛光原理、轴对称非球面气囊抛光进动运动控制及自由曲面气囊抛光

进运动控制技术。

第5章先进光学元件精密检测技术。介绍国内外先进光学元件领域中大口径光学非球面面形误差的两类先进测量原理,在对这两类原理相应技术的分析和对比的基础上,研究和介绍基于坐标测量技术的检测方法,解决光学非球面所开发的高精度检测平台系统相关技术问题。

第6章先进光学元件精密检测中的数据处理技术。以大口径非球面为分析对象,分别介绍基于坐标测量和干涉测量的轨迹规划原理及数据处理方法。重点讨论基于坐标测量技术的数据处理方法在光学元件在线检测系统中的具体应用。

第7章先进光学元件制造加工环境监控技术。总结先进光学元件超精密加工的加工环境控制技术。介绍加工环境无线监控设备,以及加工环境无线监控嵌入式系统的硬件设计方法。重点介绍搭建加工环境监控的嵌入式系统软件架构,磨削机床振动信号监控实验、磨削加工过程磨削点温度同步检测实验,以及磨削加工故障视频诊断实验验证。

第8章先进光学元件制造的亚表面损伤检测与控制。重点介绍不同光学制造加工阶段产生的亚表面缺陷与特征描述,亚表面损伤的检测技术和表征方法等,内容方面着重介绍高效磨削和确定性抛光阶段的亚表面损伤程度检测及控制技术。

本书的主要读者对象为从事光学、光学工程的研究(特别是从事先进光学元件开发)、设计、制造和检测技术人员和管理人员,同时也适合其他相关专业领域的研究技术人员阅读和参考。此外,还可供高等院校学生、研究生、教师参考。

本书由厦门大学微纳米加工与检测联合实验室郭隐彪教授统稿。第1章、第8章由毕果编写;第2章、第3章由王振忠、朱睿编写;第4章、第7章由杨炜、朱睿编写;第5章、第6章由杨平编写。本书得到成都精密光学工程研究中心许乔研究员和王健研究员的大力支持和帮助,实验室研究生潘日、杨峰、林晓辉、张东旭、王詹帅等人对有关章节的内容整理和图表制作等给予了积极协助,在此一并表示感谢。

书中讨论的部分研究内容是在国家高技术“863”计划、国家科技重大专项、福建省科技重大专项、国家自然科学基金和厦门市科技计划等项目支持下进行的,谨在此对上述项目的资助部门致以诚挚的谢意。

本书在编写过程中参考了有关的教材、专著、网络和论文,在此对相关作者表示衷心的感谢。由于作者的知识水平有限,经验不足,且时间仓促,本书内容无法包容正在不断发展中的先进光学元件的微纳制造与精密检测技术领域的全部范畴,难免存在不足和纰漏,望各位专家与读者不吝赐教。

编著者

2014年6月于厦门大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 先进光学元件的应用及制造技术要求	1
1.1.1 先进光学元件的特点	1
1.1.2 先进光学元件的应用	2
1.1.3 先进光学元件的制造技术要求	6
1.1.4 先进光学元件的制造技术范畴	10
1.2 先进光学元件的制造技术	14
1.2.1 光学元件的模压成形技术	15
1.2.2 光学元件的精密切削技术	16
1.2.3 光学元件的精密磨削加工技术	19
1.2.4 光学元件精密研抛技术	21
1.2.5 精密光学加工环境控制技术	24
1.3 先进光学元件的检测与评价技术	25
1.3.1 先进光学元件的检测要求及难点	25
1.3.2 光学元件的检测技术	27
1.3.3 光学误差的评价方法	29
参考文献	31
第 2 章 先进光学元件加工装备技术	33
2.1 机床设计理论	33
2.1.1 机床设计要求	33
2.1.2 机床设计方法	35
2.2 超精密机床关键部件及技术	44
2.2.1 主轴部件	46
2.2.2 直线导轨部件	50
2.2.3 微位移进给部件	52
2.3 超精密机床数控技术	55
2.3.1 数控技术	55

2.3.2	超精密加工数控系统	60
2.3.3	开放式数控系统	66
2.3.4	超精密磨床数控电气设计实例	69
2.4	超精密磨削加工装备	70
2.4.1	超精密加工装备技术综述	70
2.4.2	超精密磨削成形机床	74
2.5	超精密加工工具技术	78
2.5.1	超精密切削加工刀具技术	78
2.5.2	超精密磨削砂轮技术	81
	参考文献	83
第3章	先进光学元件磨削技术	84
3.1	超精密磨削加工发展	84
3.1.1	先进光学元件磨削技术概述	84
3.1.2	延性磨削和镜面磨削	85
3.2	超精密磨削过程分析	88
3.2.1	超精密磨削机理	88
3.2.2	磨削过程基本参数	89
3.3	超精密磨削加工关键技术	94
3.4	砂轮修整	96
3.4.1	杯形砂轮修整	97
3.4.2	ELID 在线电解修整	101
3.4.3	放电修整	103
3.4.4	激光修整	105
3.4.5	微小型磨削砂轮修整技术	107
3.5	非球面磨削加工技术	108
3.5.1	微小非球面加工技术	108
3.5.2	大口径非球面磨削加工技术	112
3.5.3	自由曲面磨削加工技术	118
3.6	工艺软件设计开发	123
3.6.1	数控编程格式	124
3.6.2	微小型非球面工艺软件开发实例	126
3.6.3	大口径非球面工艺软件开发实例	128
3.7	超声振动复合磨削加工技术	133
3.8	加工实例	135
	参考文献	139

第4章 先进光学元件抛光技术	140
4.1 超精密抛光加工发展	140
4.2 平面光学元件抛光技术	143
4.2.1 平面抛光原理	143
4.2.2 平面抛光轨迹控制	143
4.2.3 平面抛光材料去除模型	148
4.3 非球面光学元件抛光技术	162
4.3.1 非球面气囊抛光原理	162
4.3.2 轴对称非球面气囊抛光进动运动控制	164
4.3.3 自由曲面气囊抛光进动运动控制	174
4.3.4 气囊抛光材料去除模型	183
参考文献	187
第5章 先进光学元件精密检测技术	191
5.1 基于坐标测量的非球面元件检测技术	191
5.1.1 摆臂式轮廓检测法	192
5.1.2 长行程轮廓检测法	201
5.1.3 五棱镜轮廓检测法	202
5.2 基于波面干涉测量的非球面检测技术	205
5.2.1 零位干涉检测技术	206
5.2.2 非零位干涉检测技术	211
5.3 光学非球面精密检测平台	216
5.3.1 小型光学非球面精密检测平台	216
5.3.2 大型光学非球面精密检测平台	220
参考文献	224
第6章 先进光学元件精密检测中的数据处理技术	229
6.1 先进光学元件检测轨迹规划	229
6.1.1 基于坐标测量的轨迹规划	229
6.1.2 基于子孔径干涉测量的轨迹规划	237
6.2 大口径光学元件检测中的数据处理技术	238
6.2.1 分段轮廓测量的数据处理技术	238
6.2.2 子孔径拼接的数据处理技术	243
6.3 光学元件在线检测系统数据处理技术研究	249
6.3.1 数据处理系统总体设计	249

6.3.2	数据预处理	249
6.3.3	误差补偿及结果	252
	参考文献	257
第7章	先进光学元件制造加工环境监控技术	259
7.1	超精密加工环境监控技术概述	259
7.1.1	加工环境监控与诊断技术进展	260
7.1.2	嵌入式无线监控和诊断技术进展	261
7.2	超精密加工环境无线监控系统原理	262
7.2.1	加工环境无线监控系统构成	262
7.2.2	加工环境无线监控对象	263
7.2.3	加工环境无线监控系统网络	265
7.3	加工环境无线监控系统技术体系	266
7.3.1	系统硬件组成	266
7.3.2	系统软件组成	270
7.4	加工环境无线监控系统监控实例	273
	参考文献	279
第8章	光学元件制造的亚表面损伤检测与控制	282
8.1	亚表面损伤概述	282
8.1.1	表面质量与完整性的研究内容	282
8.1.2	亚表面损伤的表现形式	284
8.1.3	亚表面损伤对元件光学性能的影响	291
8.2	亚表面损伤的形成机理	292
8.2.1	亚表面裂纹的形成机理	293
8.2.2	亚表面层残余应力的形成机理	296
8.2.3	亚表面层材料组织变化机理	298
8.3	亚表面损伤的检测与评价	300
8.3.1	损伤性检测技术	300
8.3.2	无损检测技术	304
8.3.3	亚表面损伤的评价	306
8.3.4	亚表面损伤的预测	308
8.4	光学元件制造的亚表面损伤控制	311
8.4.1	脆性材料的延展性去除加工技术	311
8.4.2	脆性材料的半延展性去除加工技术	313
	参考文献	314

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The application and the manufacturing technical requirements of advanced optics	1
1.1.1 Characteristics of advanced optics	1
1.1.2 Applications of advanced optics	2
1.1.3 Manufacturing technical requirements of advanced optics	6
1.1.4 Manufacturing technology categories of advanced optics	10
1.2 Manufacturing technology of advanced optics	14
1.2.1 Die forming technology of advanced optics	15
1.2.2 Precision cutting technology of advanced optics	16
1.2.3 Precision grinding processing technology of advanced optics	19
1.2.4 Precision polishing technology of advanced optics	21
1.2.5 Environmental control technology for precision optical processing	24
1.3 Testing and evaluation technology of advanced optics	25
1.3.1 Detection requirements and difficulties of advanced optics	25
1.3.2 Detection technology of advanced optics	27
1.3.3 Evaluation methods of Optical error	29
References	31
Chapter 2 Processing and equipment technology of advanced optics	33
2.1 Machine tool design theory	33
2.1.1 Design requirements of machine tool	33
2.1.2 Design methods of machine tool	35
2.2 Key parts and technology of ultra precision machine tool	44
2.2.1 Spindle components	46

2.2.2	Linear guide components	50
2.2.3	Micro displacement feed components	52
2.3	NC technology of ultra precision machine tool	55
2.3.1	Numerical control technology	55
2.3.2	Ultra precision machining for CNC system	60
2.3.3	Open numerical control system	66
2.3.4	Electrical design example of numerical control for ultra-precision grinding machine	69
2.4	Ultra – precision grinding equipment	70
2.4.1	Review of ultra precision machining equipment and Technology	70
2.4.2	Ultra precision grinding forming machine	74
2.5	Ultra – precision machining tools technology	78
2.5.1	Ultra precision cutting tool technology	78
2.5.2	Ultra precision grinding technology	81
	References	83
Chapter 3	Grinding technology of advanced optics	84
3.1	Development of ultra – precision grinding processing	84
3.1.1	Overview of grinding technology for advanced optics	84
3.1.2	Ductile grinding and mirror grinding	85
3.2	Process analysis of ultra – precision grinding	88
3.2.1	Ultra precision grinding mechanism	88
3.2.2	Basic parameters of the grinding process	89
3.3	Key technology of ultra – precision grinding	94
3.4	Grinding wheel dressing	96
3.4.1	Cup wheel dressing	97
3.4.2	ELID dressing	101
3.4.3	Contact discharge dressing	103
3.4.4	Laser dressing	105
3.4.5	Grinding wheel dressing technology of micro aspherics	107
3.5	Grinding technology for aspheric surface	108
3.5.1	Processing technology of micro aspherics	108
3.5.2	Grinding technology of large aspherics	112
3.5.3	Grinding processing technology of free surface	118
3.6	Design and development of process software	123

3.6.1	Format of NC programming	124
3.6.2	Examples of software development for micro aspheric technology	126
3.6.3	Examples of software development for large aspheric technology	128
3.7	Ultrasonic vibration of grinding technology	133
3.8	Manufacture instance	135
	References	139
Chapter 4	Polishing technology of advanced optics	140
4.1	Development of ultra – precision polishing processing	140
4.2	Polishing technology for plane optics	143
4.2.1	Principle of surface polishing	143
4.2.2	Surface polishing trajectory control	143
4.2.3	Material removal model of plane polishing	148
4.3	Polishing technology for aspheric optics	162
4.3.1	Bonnet polishing principle for aspheric optics	162
4.3.2	Bonnet polishing precession control for axisymmetric aspherics	164
4.3.3	Bonnet polishing precession control for freeform surface ..	174
4.3.4	Material removal model of bonnet polishing	183
	References	187
Chapter 5	Precision measuring technology of advanced optics	191
5.1	Aspheric surface measuring technology based on coordinate measuring	191
5.1.1	Detection method based on swing arm profiler	192
5.1.2	Detection method based on long trace profiler	201
5.1.3	Detection method based on penta prism profiler	202
5.2	Aspheric surface measuring technology based on wavefront testing	205
5.2.1	Detection technology of null interference	206
5.2.2	Detection technology of non null interference	211
5.3	Precision measuring platform for optical aspheric surface	216
5.3.1	Precision measuring platform for small size optical aspherics	216

5.3.2	Precision measuring platform for large size optical aspherics	220
	References	224

Chapter 6 Data processing technology of precision measurement for

	advanced optics	229
6.1	Measurement Trajectory planning for advanced optics	229
6.1.1	Trajectory planning based on coordinate measuring	229
6.1.2	Trajectory planning based on sub aperture interferometry	237
6.2	Data processing technology of measurement for large aperture optics	238
6.2.1	Data processing technology of profile stitching method	238
6.2.2	Data processing technology of sub aperture stitching method	243
6.3	Data processing technology of on – line measurement system for optics	249
6.3.1	Overall design of data processing system	249
6.3.2	Data preprocessing	249
6.3.3	Error compensation and results	252
	References	257

Chapter 7 Monitoring technology of manufacturing environment for

	advanced optics	259
7.1	Summary of monitor technology for ultra – precision machining environment	259
7.1.1	Progress in processing environment monitoring and diagnosis technology	260
7.1.2	Development of embedded wireless monitoring and diagnosis technology	261
7.2	Principle of wireless monitoring system for ultra – precision machining environment	262
7.2.1	Wireless monitoring system for machining environment	262
7.2.2	Wireless monitoring object of processing environment	263
7.2.3	Network of wireless monitoring system of processing environment	265