

李圣怡 戴一帆 等编著

大中型光学非球面镜 制造与测量新技术

New Technology for Manufacturing and Measurement
of large and Middle-scale aspheric surfaces



国防工业出版社

National Defense Industry Press

大、中型光学非球面镜 制造与测量新技术

New Technology for Manufacturing and Measurement
of large and Middle-scale aspheric surfaces

李圣怡 戴一帆 等编著

国防工业出版社
<http://www.ndip.cn>



图书在版编目(CIP)数据

大中型光学非球面镜制造与测量新技术 / 李圣怡等
编著. —北京:国防工业出版社, 2011. 8

ISBN 978 - 7 - 118 - 07237 - 2

I. ①大... II. ①李... III. ①非球面透镜 - 制
造 - 技术②非球面透镜 - 测量技术 IV. ①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 071046 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 × 960 1/16 印张 41 1/4 字数 772 千字

2011 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 168.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

《大中型光学非球面镜制造与测量新技术》

编委会名单

(上篇 制造技术)

李圣怡	戴一帆	解旭辉	彭小强
郑子文	王贵林	周 林	石 峰
焦长君	周旭升	杨 智	

(下篇 测量技术)

李圣怡	戴一帆	陈善勇	郑子文
吴宇列	尹自强	贾立德	胡晓军
王 卓			

前 言

光学非球面镜是在通常的球面镜上增加了高次曲率,它具有球面镜诸多无法比拟的优点,如非球面透镜能够消除光线传播过程中的球面像差,提高聚焦和校准的精度,在不增加独立像差个数的前提下,增加了设计变量个数,从而增加了像差校正的自由度,能够校正高分辨率透镜的像差。

光学非球面镜的应用,带来出色的锐度和更高的分辨率。采用非球面技术设计的光学系统,可以矫正像差、改善像质、扩大视场、增大作用距离、减少光能损失,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性,同时使镜头的小型化设计成为了可能,使得光学非球面镜在航空、航天、国防以及高科技民用领域得到了广泛的应用。

国防科技大学精密工程研究室成立于1981年。近三十年来,开展了诸如超精加工机床研制、超精密磨削、光学研磨抛光、大中型和微型光学零件制造、微机电与微系统等领域的研究工作。光学非球面镜的加工、检测是当前超精密加工技术和光学加工技术研究的热点,特别是大中型光学非球面镜的制造和检测,其难度很大。我们在2004年—2009年期间承担了国家重大基础研究(973)项目,针对大中型光学非球面镜的制造和检测的新技术的基础理论进行了研究,取得了许多进展。因此,我们将项目研究的主要内容和部分成果编为专著——《大中型光学非球面镜制造与测量新技术》,该书分为上、下两篇——制造技术、测量技术。

上篇制造技术,主要介绍相关的光学非球面镜加工原理以及我们科研团队在现代光学非球面镜加工新方法 with 理论方面的研究成果。

制造技术篇,共分六章,主要内容如下:

第一章对现代光学非球面镜加工的技术基础进行全面介绍,包括现代光学系统对非球面镜的要求、光学非球面镜的制造特点、超光滑表面制造技术的特点和实现方法,以及光学非球面镜的经典研抛方法、现代数控研抛方法、可控柔体研抛方法等。

第二章主要介绍我们在光学非球面镜确定性研抛基础理论、数学分析和建模方法等方面所做的研究,包括非球面加工的确定性成形原理及成形过程理论分析、基于全口径线性扫描方式和极轴扫描方式的面形修正理论与技术、光学非球面成形的频谱特征、熵最大研抛原理等。本章作为确定性研抛加工具有普遍意义的理

论基础,将对光学非球面镜加工起到指导作用。

第三章主要介绍基于小尺寸研抛工具的 CCOS 光学非球面加工技术。首先介绍了小尺寸研抛工具 CCOS 加工过程中存在的主要技术难题,然后介绍我们研制的双转子小工具 CCOS 加工机床、驻留时间算法及分析、边缘效应下的去除函数建模、光学表面小尺度制造误差的产生原因与修正方法等;最后以 $\phi 500\text{mm}$ 抛物面镜加工作为例子介绍了 CCOS 加工的全过程和检测结果。

第四章主要介绍离子束抛光技术。首先介绍了离子束修形抛光的基本原理和相关模型;然后介绍在我们研制的离子束抛光机床上进行的部分理论和实验研究的一些结果和体会,包括离子束加工去除函数理论建模和试验、离子束抛光的小尺度误差演变等;最后以 CVD SiC 平面镜、微晶玻璃球面镜和抛物面镜作为例子,介绍了我们用离子束修形抛光的全过程与检测结果。

第五章主要介绍磁流变抛光技术。首先介绍了磁流变抛光技术的发展历史及基本原理;然后介绍在我们研制的磁流变抛光机床上进行的部分理论和实验研究的一些结果和体会,包括磁流变抛光材料去除机理与数学模型、磁流变抛光机床的设计与分析、磁流变抛光液及其性能测试、磁流变抛光过程的工艺参数优化方法、磁流变抛光表面成形技术以及我们对平面镜、球面镜和抛物面镜的加工实例。最后介绍了我们对磁射流抛光技术的初步研究。

第六章主要介绍确定性光学加工误差的评价方法。首先介绍了常用的光学加工误差评价方法;然后介绍了我们在光学加工误差的评价方面所做的研究,包括采用小波变换结合功率谱密度特征曲线的光学加工局部误差的评价方法、基于 Harvey-Shack 散射理论的光学加工误差评价方法、基于光学性能分析的频带误差评价方法等;最后介绍了上述研究方法在光学非球面镜加工、测量中的应用。

下篇测量技术,主要介绍相关的大中型光学非球面镜测量原理以及我们科研团队在大中型光学非球面镜加工过程中面形误差和亚表面损伤等测量领域的研究成果。

测量技术篇共分五章,主要内容如下:

第一章主要介绍大中型光学镜面制造中测量技术的基本概念与特点。大中型光学镜面在不同制造阶段,甚至在同一个制造阶段,需要用到多种测量技术来实现其面形误差和亚表面质量的检测。本章针对当前应用较广泛的几种测量技术进行简要介绍,包括坐标测量技术、各种干涉测量技术、CGH 技术、相位恢复技术以及亚表面质量检测技术;并以近年来国内外大中型光学镜面制造中测量新技术的典型实例为背景,分析测量原理及测量系统的整体结构设计和性能指标等。

第二章主要介绍光学非球面镜坐标测量技术。首先介绍光学非球面镜坐标测

量技术在制造中的地位与特点,以及国内外典型的测量方案与测量系统;然后,着重介绍我们开发的两种大中型非球面坐标测量系统——直角坐标测量系统和摆臂式测量系统,以及这两个系统研制中所涉及的关键技术问题。

第三章主要介绍我们所研究的子孔径拼接干涉测量方法及测量系统。从原理上看,子孔径拼接测量方法既可用于零位测试,也可用于非零位测试,本章主要介绍基于标准干涉仪、不需要辅助补偿镜的非零位子孔径拼接测量的关键技术问题。

第四章主要介绍我们针对大中型光学镜面制造中的在位检测难题,对相位恢复测量方法及测量系统所进行的研究和探讨。相位恢复是一种非干涉测量方法,硬件上它只需要 CCD 相机和简单的光学系统,利用光波场的衍射模型及算法来测量被测镜的面形误差,并且具有对环境不敏感的特点。

第五章主要介绍我们针对大中型光学镜面制造中亚表面质量检测与保障方面的部分研究成果。本章分别介绍光学磨削、研磨和抛光加工过程中亚表面损伤产生的机理、检测技术和表征方法;在实验研究方面重点介绍了磁流变抛光法和 HF 酸差动化学蚀刻速率测试法,以及亚表面质量保障技术。

本书主要由本研究室老师和学生的研究成果整理而成,也参考了大量前人的研究成果和经验,我们力求在参考文献中详细给出,但可能不甚全面,在这里对有关作者表示歉意。由于作者水平有限,而大中型光学非球面镜制造与测量新方法 with 理论发展很快,对于某些新技术和新进展我们未作深入研究,因此不便录入,也特表遗憾。此外,由于我们实验室的条件有限,涉及的大型光学零件加工的机会和能力有限,希望本书涉及的共性基础理论与方法能对读者起着抛砖引玉的作用。

李圣怡和戴一帆组织了全书的编著工作。

上篇:第一章由李圣怡和戴一帆编写;第二章由李圣怡、焦长君和周旭升编写;第三章由郑子文、王贵林和周旭升编写;第四章由解旭辉、焦长君和周林编写;第五章由彭小强、戴一帆和石峰编写;第六章由戴一帆、王贵林和杨智编写。

下篇:第一章由李圣怡、陈善勇和戴一帆编写;第二章由郑子文、贾立德和尹自强编写;第三章由陈善勇和李圣怡编写;第四章由吴宇列、李圣怡和胡晓军编写;第五章由戴一帆、王卓和吴宇列编写。

最后,还要特别感谢研究室所有的老师,以及所有毕业离去和在读的研究生,正是他们的辛勤劳动才使本书内容形成了体系。还要特别感谢国防工业出版社,正是他们的大力支持才使本书顺利出版。

作者
2010 年 8 月

前 言

光学非球面镜是在通常的球面镜上增加了高次曲率,它具有球面镜诸多无法比拟的优点,如非球面透镜能够消除光线传播过程中的球面像差,提高聚焦和校准的精度,在不增加独立像差个数的前提下,增加了设计变量个数,从而增加了像差校正的自由度,能够校正高分辨率透镜的像差。

光学非球面镜的应用,带来出色的锐度和更高的分辨率。采用非球面技术设计的光学系统,可以矫正像差、改善像质、扩大视场、增大作用距离、减少光能损失,从而获得高质量的图像效果和高品质的光学特性,同时使镜头的小型化设计成为了可能,使得光学非球面镜在航空、航天、国防以及高科技民用领域得到了广泛的应用。

国防科技大学精密工程研究室成立于1981年。近三十年来,开展了诸如超精加工机床研制、超精密磨削、光学研磨抛光、大中型和微型光学零件制造、微机电与微系统等领域的研究工作。光学非球面镜的加工、检测是当前超精密加工技术和光学加工技术研究的热点,特别是大中型光学非球面镜的制造和检测,其难度很大。我们在2004年—2009年期间承担了国家重大基础研究(973)项目,针对大中型光学非球面镜的制造和检测的新技术的基础理论进行了研究,取得了许多进展。因此,我们将项目研究的主要内容和部分成果编为专著——《大中型光学非球面镜制造与测量新技术》,该书分为上、下两篇——制造技术、测量技术。

上篇制造技术,主要介绍相关的光学非球面镜加工原理以及我们科研团队在现代光学非球面镜加工新方法 with 理论方面的研究成果。

制造技术篇,共分六章,主要内容如下:

第一章对现代光学非球面镜加工的技术基础进行全面介绍,包括现代光学系统对非球面镜的要求、光学非球面镜的制造特点、超光滑表面制造技术的特点和实现方法,以及光学非球面镜的经典研抛方法、现代数控研抛方法、可控柔体研抛方法等。

第二章主要介绍我们在光学非球面镜确定性研抛基础理论、数学分析和建模方法等方面所做的研究,包括非球面加工的确定性成形原理及成形过程理论分析、基于全口径线性扫描方式和极轴扫描方式的面形修正理论与技术、光学非球面成形的频谱特征、熵最大研抛原理等。本章作为确定性研抛加工具有普遍意义的理

论基础,将对各类光学非球面镜加工起到指导作用。

第三章主要介绍基于小尺寸研抛工具的 CCOS 光学非球面加工技术。首先介绍了小尺寸研抛工具 CCOS 加工过程中存在的主要技术难题,然后介绍我们研制的双转子小工具 CCOS 加工机床、驻留时间算法及分析、边缘效应下的去除函数建模、光学表面小尺度制造误差的产生原因与修正方法等;最后以 $\phi 500\text{mm}$ 抛物面镜加工作为例子,介绍了 CCOS 加工的全过程和检测结果。

第四章主要介绍离子束抛光技术。首先介绍了离子束修形抛光的基本原理和相关模型;然后介绍在我们研制的离子束抛光机床上进行的部分理论和实验研究的一些结果和体会,包括离子束加工去除函数理论建模和试验、离子束抛光的小尺度误差演变等;最后以 CVD SiC 平面镜、微晶玻璃球面镜和抛物面镜作为例子,介绍了我们用离子束修形抛光的全过程与检测结果。

第五章主要介绍磁流变抛光技术。首先介绍了磁流变抛光技术的发展历史及基本原理;然后介绍在我们研制的磁流变抛光机床上进行的部分理论和实验研究的一些结果和体会,包括磁流变抛光材料去除机理与数学模型、磁流变抛光机床的设计与分析、磁流变抛光液及其性能测试、磁流变抛光过程的工艺参数优化方法、磁流变抛光表面成形技术以及我们对平面镜、球面镜和抛物面镜的加工实例。最后介绍了我们对磁射流抛光技术的初步研究。

第六章主要介绍确定性光学加工误差的评价方法。首先介绍了常用的光学加工误差评价方法;然后介绍了我们在光学加工误差的评价方面所做的研究,包括采用小波变换结合功率谱密度特征曲线的光学加工局部误差的评价方法、基于 Harvey-Shack 散射理论的光学加工误差评价方法、基于光学性能分析的频带误差评价方法等;最后介绍了上述研究方法在光学非球面镜加工、测量中的应用。

下篇测量技术,主要介绍相关的大中型光学非球面镜测量原理以及我们科研团队在大中型光学非球面镜加工过程中面形误差和亚表面损伤等测量领域的研究成果。

测量技术篇共分五章,主要内容如下:

第一章主要介绍大中型光学镜面制造中测量技术的基本概念与特点。大中型光学镜面在不同制造阶段,甚至在同一个制造阶段,需要用到多种测量技术来实现其面形误差和亚表面质量的检测。本章针对当前应用较广泛的几种测量技术进行简要介绍,包括坐标测量技术、各种干涉测量技术、CGH 技术、相位恢复技术以及亚表面质量检测技术;并以近年来国内外大中型光学镜面制造中测量新技术的典型实例为背景,分析测量原理及测量系统的整体结构设计和性能指标等。

第二章主要介绍光学非球面镜坐标测量技术。首先介绍光学非球面镜坐标测

量技术在制造中的地位与特点,以及国内外典型的测量方案与测量系统;然后,着重介绍我们开发的两种大中型非球面坐标测量系统——直角坐标测量系统和摆臂式测量系统,以及这两个系统研制中所涉及的关键技术问题。

第三章主要介绍我们所研究的子孔径拼接干涉测量方法及测量系统。从原理上看,子孔径拼接测量方法既可用于零位测试,也可用于非零位测试,本章主要介绍基于标准干涉仪、不需要辅助补偿镜的非零位子孔径拼接测量的关键技术问题。

第四章主要介绍我们针对大中型光学镜面制造中的在位检测难题,对相位恢复测量方法及测量系统所进行的研究和探讨。相位恢复是一种非干涉测量方法,硬件上它只需要 CCD 相机和简单的光学系统,利用光波场的衍射模型及算法来测量被测镜的面形误差,并且具有对环境不敏感的特点。

第五章主要介绍我们针对大中型光学镜面制造中亚表面质量检测与保障方面的部分研究成果。本章分别介绍光学磨削、研磨和抛光加工过程中亚表面损伤产生的机理、检测技术和表征方法;在实验研究方面重点介绍了磁流变抛光法和 HF 酸差动化学蚀刻速率测试法,以及亚表面质量保障技术。

本书主要由本研究室老师和学生的研究成果整理而成,也参考了大量前人的研究成果和经验,我们力求在参考文献中详细给出,但可能不甚全面,在这里对有关作者表示歉意。由于作者水平有限,而大中型光学非球面镜制造与测量新方法 with 理论发展很快,对于某些新技术和新进展我们未作深入研究,因此不便录入,也特表遗憾。此外,由于我们实验室的条件有限,涉及的大型光学零件加工的机会和能力有限,希望本书涉及的共性基础理论与方法能对读者起着抛砖引玉的作用。

李圣怡和戴一帆组织了全书的编著工作。

上篇:第一章由李圣怡和戴一帆编写;第二章由李圣怡、焦长君和周旭升编写;第三章由郑子文、王贵林和周旭升编写;第四章由解旭辉、焦长君和周林编写;第五章由彭小强、戴一帆和石峰编写;第六章由戴一帆、王贵林和杨智编写。

下篇:第一章由李圣怡、陈善勇和戴一帆编写;第二章由郑子文、贾立德和尹自强编写;第三章由陈善勇和李圣怡编写;第四章由吴宇列、李圣怡和胡晓军编写;第五章由戴一帆、王卓和吴宇列编写。

最后,还要特别感谢研究室所有的老师,以及所有毕业离去和在读的研究生,正是他们的辛勤劳动才使本书内容形成了体系。还要特别感谢国防工业出版社,正是他们的大力支持才使本书顺利出版。

作者
2010 年 8 月

上篇 制造技术

第一章 现代非球面光学研抛技术基础	2
1.1 光学非球面的优点及应用	2
1.1.1 光学非球面的优点	2
1.1.2 非球面光学零件在军用装备的应用	3
1.1.3 非球面光学零件在民用装备的应用	4
1.2 光学非球镜制造的特点	5
1.2.1 现代光学系统对非球面光学零件的要求	5
1.2.2 非球面光学零件的加工分析	9
1.3 超光滑表面制造技术	12
1.3.1 超光滑表面及应用	12
1.3.2 超光滑表面制造技术概述	15
1.3.3 基于机械微切削原理的超光滑表面制造技术	16
1.3.4 传统游离磨料抛光的超光滑表面制造技术	17
1.3.5 非接触超光滑抛光原理和方法	20
1.3.6 非接触化学机械抛光方法(CMP)	22
1.3.7 磁场效应辅助加工技术	23
1.3.8 粒子流加工技术	23
1.4 先进非球面光学研抛技术	25
1.4.1 非球面光学零件的经典研抛方法	25

1.4.2	非球面光学零件的现代数控研抛方法	26
1.4.3	非球面光学零件的可控柔体研抛技术	27
	参考文献	34
第二章	非球面光学研抛技术的基础理论	37
2.1	光学机械研抛技术的 Preston 方程及其应用	37
2.2	非球面加工的确定性成形原理	40
2.3	非球面加工的成形过程理论分析	42
2.3.1	非球面加工的成形过程双级数模型	42
2.3.2	去除函数尺寸大小对加工的影响	43
2.3.3	去除函数扰动影响	45
2.3.4	定位误差影响	48
2.3.5	离散间隔影响	49
2.4	全口径线性扫描方式面形修正理论	51
2.4.1	基于 Bayesian 的迭代算法	52
2.4.2	脉冲迭代方法	59
2.4.3	截断奇异值分解法	60
2.5	极轴扫描方式面形修正技术	62
2.5.1	去除函数具有(近似)回转对称特性	62
2.5.2	去除函数不具有回转对称特性	65
2.6	成形的频域分析	68
2.6.1	一般成形条件下的频谱特征	69
2.6.2	回转对称型去除函数的修形能力	70
2.7	熵最大研抛原理	71
2.7.1	研抛熵原理表述	72
2.7.2	最大熵原理在定偏心平面研抛中应用的实例	74
2.7.3	基于最大熵原理的双转子小工具加工工艺参数的选择的实例	77
2.7.4	基于熵增原理抑制磁流变修形中、高频误差的实例	78
	参考文献	83
附录 A	两维 Hermite 级数	85
附录 B	两维 Fourier 级数	87
附录 C	驻留时间双级数模型求解	88

附录 D 驻留时间双级数模型求解误差分析	90
第三章 基于小研抛盘工具的 CCOS 技术	92
3.1 基于小研抛盘工具的 CCOS 技术综述	92
3.1.1 小工具 CCOS 技术进展	92
3.1.2 研抛盘小工具 CCOS 技术的关键问题	94
3.2 AOCMT 光学非球面加工机床	96
3.3 去除函数的建模与分析	98
3.3.1 理想去除函数的特性	98
3.3.2 理论模型	99
3.3.3 实验模型	100
3.3.4 去除函数的修形能力分析	102
3.3.5 复杂形状研抛盘去除函数的建模和特性分析	105
3.4 CCOS 技术中驻留时间算法及分析	110
3.4.1 基于加工时间的脉冲迭代法	110
3.4.2 卷积效应对残留误差的影响	112
3.5 边缘效应下的去除函数建模	118
3.5.1 抛光模露边时的压力分布	119
3.5.2 边缘效应下的去除函数建模	121
3.6 光学表面小尺度制造误差的产生原因与修正方法	126
3.6.1 光学表面小尺度制造误差的产生原因与评价方法	126
3.6.2 小尺度制造误差的全口径均匀抛光修正法	128
3.6.3 小尺度制造误差的确定区域修正法	137
3.7 大中型非球面研抛加工控制策略及实验	140
3.7.1 大中型非球面的制造工艺路线和研抛加工控制策略	140
3.7.2 $\phi 500\text{mm}$ 抛物面镜加工实验	142
参考文献	145
第四章 离子束抛光技术	148
4.1 离子束抛光技术概述	148
4.1.1 离子束加工技术应用	148
4.1.2 光学镜面离子束抛光的基本原理与特点	150
4.1.3 光学镜面离子束抛光技术的发展	153

4.2	光学镜面离子束抛光的基本理论	156
4.2.1	离子溅射过程描述	156
4.2.2	离子束抛光材料去除率	159
4.3	离子束抛光去除函数建模分析	167
4.3.1	离子束抛光去除函数理论建模	167
4.3.2	离子束抛光去除函数模型特性分析	172
4.3.3	离子束抛光去除函数模型试验建模	177
4.4	离子束加工系统设计与分析	180
4.4.1	系统构建	180
4.4.2	系统分析	181
4.5	离子束抛光面形误差收敛与精度预测预报	188
4.6	离子束抛光的小尺度误差演变	192
4.6.1	表面粗糙度演变	192
4.6.2	微观形貌演变	194
4.7	离子束抛光试验	199
4.7.1	平面光学镜面抛光试验	199
4.7.2	曲面修形试验	203
	参考文献	205

第五章 磁流变抛光技术 208

5.1	磁流变抛光技术概述	208
5.1.1	磁流体的应用	208
5.1.2	光学零件磁场效应辅助抛光技术的发展状况	210
5.1.3	确定性磁流变抛光技术发展状况	211
5.2	磁流变抛光材料去除机理与数学模型	216
5.2.1	磁流变抛光的材料去除机理	216
5.2.2	单颗磨粒所受载荷与压入深度理论计算	219
5.2.3	磁流变抛光区域流体动力学分析与计算	221
5.3	磁流变抛光机床	229
5.3.1	磁流变抛光机床结构的基本要求	229
5.3.2	磁流变抛光实验样机的机床结构	232
5.3.3	倒置式磁流变抛光装置的设计	233
5.3.4	磁流变液的循环控制系统	236

5.4	磁流变抛光液及其性能测试研究	240
5.4.1	磁流变抛光液研制的发展现状	240
5.4.2	磁流液的组成成分及性能评价	241
5.4.3	磁流变液的组成选择原则	246
5.4.4	磁流变抛光液配制实例	249
5.4.5	磁流变抛光液的性能测试研究	250
5.5	磁流变抛光工艺参数优化	256
5.5.1	磁流变抛光工艺参数正交实验	256
5.5.2	灰色关联分析	258
5.5.3	多项工艺指标的参数优化	261
5.5.4	加工过程综合优化	262
5.6	磁流变抛光的光学表面成形技术及加工实例	263
5.6.1	MRP 的计算机控制光学表面成形 (CCOS) 技术	263
5.6.2	光学零件磁流变成形抛光驻留时间求解基本算法	264
5.6.3	光学零件磁流变成形抛光实例	267
5.7	磁射流抛光技术研究	277
5.7.1	磨料射流抛光技术概述	277
5.7.2	磁射流聚束稳定性分析	280
5.7.3	磁射流抛光去除机理的 CFD 分析	284
5.7.4	光学零件磁射流修形抛光实验	287
	参考文献	290

第六章 确定性光学加工误差的评价方法 293

6.1	概述	293
6.2	常用的光学加工误差评价方法	294
6.2.1	光学加工误差的几何精度评价参数	295
6.2.2	基于功率谱密度特征曲线的光学加工误差评价	296
6.2.3	基于散射理论的光学加工误差评价	297
6.2.4	基于统计光学理论的光学加工误差评价	298
6.3	光学加工误差分布特征的分析方法	299
6.3.1	光学表面任意方向加工误差的评价与分析	299
6.3.2	光学表面局部误差的评价与分析	305
6.3.3	工艺方法对光学加工误差的影响分析	307