



光学非球面镜 制造中的面形测量技术

李圣怡◎等编著

THE FORM ERROR MEASUREMENT
TECHNOLOGY IN
MANUFACTURING OF ASPHERIC
OPTICAL COMPONENTS

国防科技大学出版社

国家重点基础研究发展计划（973计划）项目

“空间光学先进制造基础理论及关键技术研究”（2011CB013200）资助



光学非球面镜 制造中的面形测量技术

THE FORM ERROR MEASUREMENT
TECHNOLOGY IN
MANUFACTURING OF ASPHERIC
OPTICAL COMPONENTS

李圣怡 戴一帆 陈善勇 关朝亮 胡 皓 宋 辞 铁贵鹏 编著

贵州师范学院内部使用

国防科技大学出版社

内 容 简 介

非球面光学元件是在通常的球面光学元件上增加了曲率变化,它与球面光学元件相比具有系统光学性能好、质量轻等诸多优点。采用非球面技术设计的光学系统,可在航空、航天、国防以及高科技民用领域广泛应用。

本书首先介绍了光学非球面镜制造中的面形测量技术的基本概念与特点。然后以科研成果为基础,全面系统介绍了光学非球面镜坐标测量技术,基于子孔径拼接的干涉测量技术,基于相位恢复的非干涉测量技术,表面及亚表面质量检测与保障技术等。

本书可供从事精密和超精密机床设计和制造、光学加工工艺、光学加工测量与控制等相关研究领域的工程技术人员参考,也适合大专院校相关专业的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

光学非球面镜制造中的面形测量技术/李圣怡等编著. —长沙:国防科技大学出版社,2016.8

ISBN 978 - 7 - 5673 - 0125 - 2

I. ①光… II. ①李… III. ①光学—非球面透镜—测量技术 IV. ①TH74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 161435 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:王 嘉 责任校对:梁 慧

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×960 1/16 印张:22.25 字数:412 千

2016 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—800 册

ISBN 978 - 7 - 5673 - 0125 - 2

定价:58.00 元

前言

光学非球面镜的曲率连续变化,为优化光学系统设计提供了更多自由度,但同时也带来了制造和检测上的难题。与传统光学制造方法不同,现代非球面镜制造的核心思想是确定性加工,通过准确测量面形误差,指导加工工具在确定的位置实现误差高点的精确定量修除,达到提高面形精度的目的。因此可以说,面形测量精度直接决定了光学加工的精度和效率。光学镜面的加工一般经历铣磨、研磨、抛光几个阶段,伴随加工精度的不断提高,测量方法不尽相同,其中铣磨阶段的面形测量以坐标测量为代表,研抛阶段则以波面干涉测量为主。不同加工阶段如何选择合适的测量方法,不同测量方法如何满足各工序的有效衔接,以及如何解决复杂面形或大口径平面和凸面的测量,都是光学制造中普遍关心的热点问题。基于衍射计算的相位恢复技术作为一种新的面形测量技术,特别适合于研抛初期的在位面形测量,进一步提高非球面相位恢复测量精度是关键。亚表面质量直接影响成像质量和激光损伤阈值等重要性能指标,如何检测评价和控制加工过程中引入的亚表面损伤,也是提高加工效率并实现表面完整性总体指标所必须解决的一个关键问题。2004年以来,国防科技大学超精密加工团队承担了国家自然科学基金、国家重大基础研究等一系列科研项目,开展光学非球面镜制造过程中的面形测量技术研究,深入研究了高精度坐标测量技术、子孔径拼接测量方法、相位恢复在位检测技术和亚表面质量检测技术,能够很好地解决高精度非球面镜制造过程中的面形测量难题。2011年,总结部分成果由国防工业出版社出版了《大中型光学非球面镜制造与测量新技术》一书。近年来,进一步系统整理和提炼研究工作的新进展,出版本书。本书面向非球面镜在不同阶段制造过程中的面形测量需求,着重介绍了直角坐标式和摆臂式轮廓测量、子孔径拼接干涉测量、相位恢复和亚表面质量检测与保障等几种新的方法,这些方法代表了非球面镜制造中面形测量技术的发展前沿。本书共分为五章:

第1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、亚表面质量的检测。本章简要介绍当前应用较广泛的几种测量技术,包括坐标测量技术、各种干涉测量技术、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2章主要介绍光学非球面坐标测量技术。首先介绍光学非球面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,然后着重介绍自行开发的两种非球面坐标测量系统:大口径非球面直角坐标测量系统和大型非球面摆臂式测量系统,以及这两个系统研制中所涉及的关键技术问题。

第3章主要介绍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4章主要介绍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5章主要介绍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。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。

本书主要基于国防科技大学超精密加工团队研究工作整理而成,也吸收了很多本领域的研究成果,虽然尽可能在参考文献中进行了标注,但难免会有遗漏,在这里向有关作者表示歉意。由于作者水平有限,而光学非球面镜制造过程中的面形测量技术发展很快,一些新的理论和方法因我们研究不够深入未能列入,在此表示遗憾。最后,要感谢王卓、贾立德、丁玲艳等研究室所有在职和调离的老师,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,还要特别感谢学校科研部和国防科技大学出版社,正是他们的大力支持才使本书顺利出版。

作者
2016年5月

第 1 章 大中型光学镜面制造中的测量技术	(1)
1.1 绪 论	(1)
1.1.1 大中型光学镜面的需求概述	(1)
1.1.2 大中型光学镜面制造中的测量概况	(5)
1.2 大中型光学镜面制造中的坐标测量技术原理	(7)
1.3 大中型光学镜面制造中的干涉零位测量技术	(8)
1.3.1 干涉零位测量技术基本原理	(8)
1.3.2 大中型平面和球面的零位测试技术	(10)
1.3.3 二次非球面曲面的无像差点法零位测试技术	(11)
1.3.4 非球面镜的补偿检验技术	(15)
1.3.5 计算机生成全息图测试技术	(18)
1.4 大中型光学镜面制造中的非零位测量技术	(26)
1.4.1 剪切干涉测量	(27)
1.4.2 高分辨率 CCD 方法	(28)
1.4.3 欠采样干涉测量方法	(28)
1.4.4 长波干涉测量方法	(29)
1.4.5 双波长干涉测量方法	(29)
1.4.6 子孔径拼接干涉测量方法	(30)
1.5 相位恢复技术	(31)
1.6 亚表面质量检测技术	(31)
1.7 大中型光学镜面制造中的测量实例	(32)
1.7.1 中国 2.16m 天文望远镜反射镜测量	(32)

1.7.2	GMT 望远镜主镜测量	(34)
1.7.3	JWST 望远镜主镜测量与像质检验	(38)
1.7.4	GTC 望远镜主镜测量	(42)
1.7.5	MMT 望远镜次镜测量	(44)
1.7.6	SPICA 望远镜主镜与系统波前测量	(45)
1.7.7	QED Technologies 公司子孔径拼接干涉测量	(46)
1.7.8	大型平面镜制造中的在位检测	(48)
	参考文献	(51)

第2章 光学非球面坐标测量技术

(55)

2.1	光学非球面坐标测量技术的研究现状与发展趋势	(55)
2.1.1	光学非球面坐标测量技术的地位和特点	(55)
2.1.2	光学非球面坐标检测国内外研究现状与发展趋势	(56)
2.2	大口径非球面直角坐标测量技术	(66)
2.2.1	直角坐标测量系统的设计	(66)
2.2.2	大型非球面镜直角坐标测量原理	(74)
2.2.3	基于多截线测量的光学非球面面形误差分析与评定	(76)
2.2.4	加工检测实例—— $\phi 500\text{mm}$ 非球面镜的加工与检测	(87)
2.3	大型非球面摆臂式测量技术	(90)
2.3.1	测量原理分析	(91)
2.3.2	测量系统结构设计	(95)
2.3.3	测量系统精度分析与建模	(97)
2.3.4	摆臂式轮廓法测量非球面顶点曲率半径优化算法	(104)
2.3.5	测量算法仿真与测量试验	(107)
2.4	基于多段拼接的高陡度非球面坐标检测理论与算法	(111)
2.4.1	测量原理与数学模型	(111)
2.4.2	基于最小二乘的迭代算法	(114)
2.4.3	分段轮廓的自动划分与算法仿真	(117)
2.4.4	测量试验	(119)
	参考文献	(121)

第3章 子孔径拼接测量方法	(126)
3.1 概述	(126)
3.1.1 子孔径拼接测量的基本原理	(126)
3.1.2 子孔径拼接测量的发展概况	(127)
3.2 子孔径拼接基本算法	(130)
3.2.1 两个子孔径拼接的数学模型	(131)
3.2.2 子孔径同步拼接模型与算法	(132)
3.3 子孔径拼接迭代算法	(133)
3.3.1 数学模型	(134)
3.3.2 迭代算法	(138)
3.3.3 大中型光学镜面的粗-精拼接策略	(142)
3.4 子孔径划分方法	(143)
3.4.1 子孔径的粗略划分	(143)
3.4.2 计算子孔径的最佳拟合球	(145)
3.4.3 子孔径划分的仿真验证	(148)
3.5 子孔径拼接测量工作站	(154)
3.5.1 子孔径拼接工作站的机械构型设计	(154)
3.5.2 子孔径拼接工作站的运动学模型	(157)
3.6 子孔径拼接测量的实验验证	(159)
3.6.1 大型光学平面反射镜的子孔径拼接测量	(159)
3.6.2 大型平面透射波前的子孔径拼接测量	(162)
3.6.3 大型球面反射镜拼接测量	(170)
3.6.4 超半球面的子孔径拼接测量	(175)
3.6.5 非球面镜拼接测量	(185)
3.7 子孔径拼接测量方法的发展趋势	(189)
参考文献	(193)
附录 A 线性化位形优化子问题的推导	(197)
附录 B 线性最小二乘问题的分块顺序 QR 分解程序	(200)
第4章 光学镜面相位恢复在位检测技术	(201)
4.1 相位恢复检测技术综述	(201)
4.1.1 相位恢复在位检测技术的意义	(201)

4.1.2	相位恢复方法应用	(202)
4.1.3	相位恢复算法理论	(204)
4.2	相位恢复测量的基本原理和算法	(206)
4.2.1	相位恢复测量原理	(206)
4.2.2	光场衍射传播计算	(209)
4.2.3	镜面检测相位恢复算法	(211)
4.3	球面波的相位恢复检测	(216)
4.3.1	测量装置	(216)
4.3.2	大口径球面镜的测量	(217)
4.4	亚像素分辨率相位恢复测量	(220)
4.4.1	亚像素分辨率相位恢复测量原理	(221)
4.4.2	亚像素光强约束函数设计	(224)
4.4.3	亚像素分辨率镜面测量实验	(226)
4.5	非球面镜的相位恢复检测	(229)
4.5.1	非球面度	(229)
4.5.2	非球面镜离焦光场特性	(230)
4.5.3	非球面相位恢复测量规划	(233)
4.5.4	APR 算法设计	(236)
4.5.5	口径 170mm 抛物面镜的检测实验	(239)
4.5.6	非球面的近轴共轭点法相位恢复检测	(242)
4.6	大动态范围相位恢复	(246)
4.6.1	大动态范围测量算法	(246)
4.6.2	参数共轭梯度算法	(249)
4.6.3	初抛镜面检测实验	(250)
4.7	离轴非球面相位恢复检测	(253)
4.7.1	相位恢复离轴镜检测原理	(254)
4.7.2	离轴椭球镜检测实验	(258)
	参考文献	(264)

第 5 章 光学零件亚表面质量检测与保障技术

5.1	亚表面质量概述	(269)
5.1.1	亚表面质量的概念	(269)
5.1.2	亚表面质量对光学零件使用性能的影响	(270)

5.2	亚表面损伤的产生机理	(274)
5.2.1	磨削和研磨损伤产生机理	(274)
5.2.2	抛光损伤产生机理	(277)
5.3	磨削和研磨亚表面损伤检测技术	(280)
5.3.1	损伤性检测技术	(280)
5.3.2	无损检测技术	(285)
5.3.3	亚表面损伤检测实验	(289)
5.3.4	基于表面质量关联的亚表面检测技术	(295)
5.4	亚表面损伤表征方法	(305)
5.4.1	磨削过程	(305)
5.4.2	研磨过程	(306)
5.5	亚表面损伤深度预测方法	(312)
5.5.1	磨削过程亚表面损伤深度预测	(312)
5.5.2	研磨过程亚表面损伤深度预测	(314)
5.6	加工参数对亚表面损伤深度的影响规律	(318)
5.6.1	磨削过程参数对亚表面裂纹深度的影响	(318)
5.6.2	研磨过程参数对亚表面裂纹深度的影响	(321)
5.7	亚表面质量保障技术	(324)
5.7.1	抛光亚表面损伤的表现形式	(324)
5.7.2	抛光亚表面损伤检测	(327)
5.7.3	抛光亚表面损伤模型	(333)
5.7.4	传统抛光亚表面损伤的抑制策略	(334)
5.7.5	复合加工及后处理技术提高激光损伤阈值	(338)
	参考文献	(342)

第 1 章

大中型光学镜面制造中的测量技术

1.1 绪 论

1.1.1 大中型光学镜面的需求概述

平面、球面和非球面是现代光学系统中应用最多的光学表面形式。非球面是形状上偏离球面的表面,其局部曲率在表面范围内是变化的。以光轴为 Z 轴,式(1.1)是国际上采用的回转对称非球面的数学方程

$$z = \frac{r^2/R}{1 + \sqrt{1 - (K+1)r^2/R^2}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + \dots \quad (1.1)$$

其中 r 为垂直光轴方向的径向坐标, R 为顶点曲率半径, K 为非球面的二次常数, $K = -e^2$, e 为偏心率。式中后面各项表示非球面的高次项,当只取右边第一项时,表示严格的二次曲面。表 1.1 给出了不同二次常数对应的曲面类型。

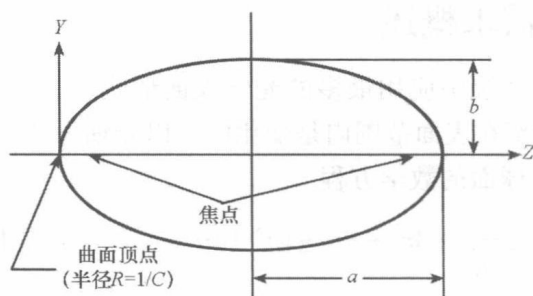
表 1.1 不同二次常数对应的曲面类型

二次常数	$K=0$	$K < -1$	$K = -1$	$-1 < K < 0$	$K > 0$
曲面类型	球面	双曲面	抛物面	椭球面	扁球面

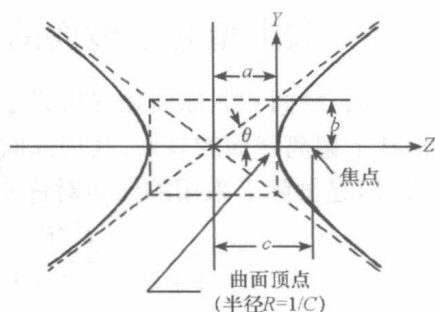
人们更熟悉的二次曲面的方程是用长短轴参数表示的形式,表 1.2 是几种二次曲面的参数方程及其关系。为了与光学设计、检验和加工的习惯一致,将坐标系原点建立在曲面顶点上。其中椭球面和双曲面的母线对应的几何图形如图 1.1 所示。

表 1.2 二次曲面的参数方程及其关系

曲面类型	方程	参数意义	参数关系
椭球面	$\frac{(z-a)^2}{a^2} + \frac{r^2}{b^2} = 1$	a :长半轴, b :短半轴, 两焦点之间 距离 $2c$	$a^2 - b^2 = c^2, a = \frac{R}{1-e^2},$ $c = \frac{eR}{1-e^2}, e = \frac{c}{a}, R = \frac{b^2}{a}$
双曲面	$\frac{(z-a)^2}{a^2} - \frac{r^2}{b^2} = 1$		$a^2 + b^2 = c^2, a = \frac{R}{e^2-1},$ $c = \frac{eR}{e^2-1}, e = \frac{c}{a}, R = \frac{b^2}{a}$
抛物面	$z = \frac{r^2}{2R} = \frac{r^2}{4f}$	f :焦距	$R = 2f$



(a) 椭球面



(b) 双曲面

图 1.1 椭球面与双曲面的母线

将球面透镜和非球面透镜的成像特性及其成像质量进行比较,如图 1.2(a)所示。球面透镜对轴上无穷远点成像时的球差较大,这是因为越靠近边缘,光线的入射角越大,发生折射后在光轴上不汇聚在一点,因此成像不够清晰;而非球面透镜面形自光轴向边缘越来越平坦,可逐渐减小入射角,其最终效果是使得所有光线都能聚集到光轴上同一点,即点物成点像。图 1.2(b)是哈勃望远镜获取的两组图片,其中上图成像不清晰,因为望远镜的非球面主镜修形错误引入了很大球差,下图成像更清晰,是通过在轨修复校正了像差之后的结果。

由于大中型光学透镜的材料均匀性和加工检验精度很难保证,在中大型光学系统中常采用反射式设计。但是反射式光学系统存在遮光问题,而且设计的光学元件数一般应尽可能少,为了达到所需性能要求,多采用非球面反射镜。非

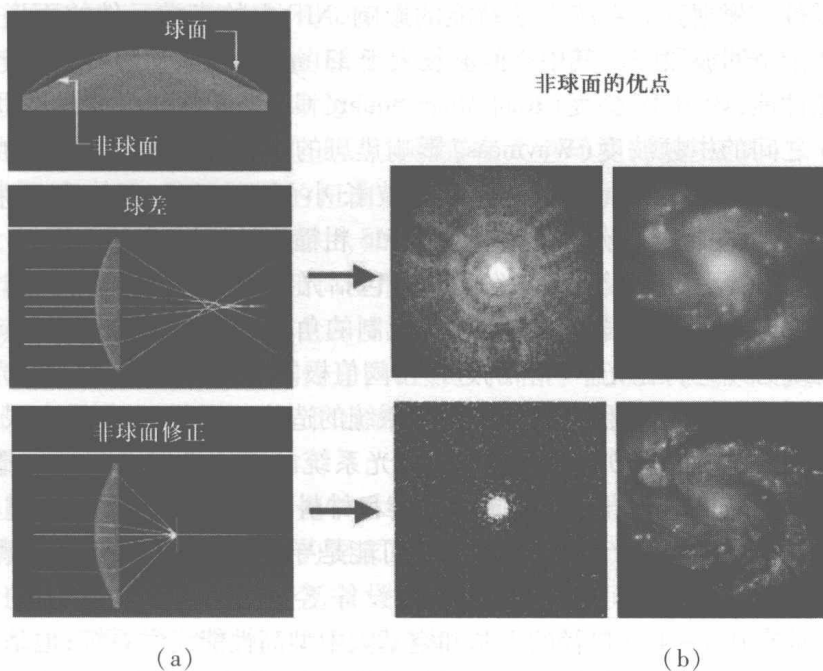


图 1.2 球面与非球面透镜的成像特性与成像质量

球面能够在矫正像差、改善像质、扩大视场和增大作用距离的同时有效简化系统的结构,减轻系统的质量,并使得光学系统的设计具有更大的灵活性,因而在现代光学系统中得到了越来越广泛的应用。

在**高能激光光学器件、激光核聚变和空间望远镜等光学系统中,在光学性能上主要体现了强激光、高聚能或高分辨率的特点。高能激光器不仅输出能量高,还要求有相当高的功率,例如平均功率应大于 10 kW,持续时间达数秒,激光能量在数万焦以上^[1]。为减小激光束的发散角,提高激光聚焦到目标上的光斑能量密度,需要把激光器输出光束扩展到较大口径发射。激光发射望远镜的面形误差会对激光束产生调制作用,从而影响远场光束质量,因此高能激光武器系统对大口径发射望远镜提出了很高的性能要求。其中低频面形误差主要影响目标上的能量集中度,而中高频误差会引起表面散射,造成能量损失,减少到达目标上的总能量。

与高能激光器相应的是高功率激光器,功率在 1×10^7 kW 以上,持续时间为纳秒甚至更短(飞秒)的脉冲,短脉冲高功率激光适用于惯性约束聚变^[1]。以美国激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)工程的“国家点火装置”(National Ignition Facility, NIF)为例,整个装置的光学系统使用 7000 多件大口

径光学零件。根据其对系统光学性能的影响,NIF 中的光学元件的面形误差被划分为 3 个空间波段^[2]。其中空间波长大于 33 mm 的低频面形(Figure)主要决定了聚焦性能,由 RMS 梯度(Root-Mean-Square Gradient)控制;波长在 0.12mm 和 33mm 之间的中频波度(Waviness)影响焦斑的拖尾和近场调制,由功率谱密度(Power Spectral Density, PSD)控制;波长小于 0.12 mm 的高频粗糙度(Roughness)对丝状形成有重要影响,由 RMS 粗糙度控制。

在 NIF 激光驱动器设计中,光学元件(包括光学材料和光学薄膜)的激光损伤阈值是关键的设计依据之一。从成本控制的角度看,激光装置的总体设计指标要求系统必须运行在光学材料的近损伤阈值极限,否则无论是增加激光束路,还是扩大光学元件的口径,都将大幅增加系统的造价。因此,必须最大限度地提高光学元件的抗激光损伤能力,以提升激光系统的使用性能并降低制造成本。光学元件的激光损伤阈值不仅与光学薄膜和材料缺陷有关,光学制造过程引入的亚表面损伤同样对其产生影响,并且很可能是导致元件激光破坏的根源所在。

作为太空探测和空间目标监测的关键设备,空间光学、侦察卫星上的光学有效载荷要求有 0.4~4 m 口径的天基和空基大中型高性能光学系统;地基空间目标监测需 1~4 m 以上口径的大中型望远系统,高分辨率是其主要性能要求。以空间详查相机为例,它是详查卫星的有效载荷,旨在获取地面像元分辨率优于 0.5 m 的地物照片^[3]。美国早在 1990 年就发射了 KH-11 侦察卫星的改进型(或称 KH-12),其分辨率达到 0.1 m。根据瑞利(Rayleigh)判据,望远镜的角分辨率 $\beta = 1.22\lambda/D$,与口径 D 成反比,而卫星的高度大约在 200~300 km,为了获得高分辨率,要求相机口径至少在 0.5~1 m。而且为了增大系统的聚光本领,根本途径也是要增大望远镜的口径。这样的大口径光学系统通常希望相对口径做得比较大,以缩短镜筒,减轻系统重量,减小占用空间,从而缩减成本,同时增大相对口径(减小焦距)还可以增加系统的峰值光强。人们从发展进程的时间函数曲线预测,21 世纪大型反射式望远镜主镜的相对口径将大致分布在 1:1.5 和 1:1 之间^[4]。除了低频面形误差会影响成像系统的分辨率,降低峰值强度外,中高频误差同样会导致像质恶化。特别是中频误差产生小角度散射,在降低峰值强度的同时,还会显著增大光斑的尺寸,使图像核变得模糊^[5]。因此高分辨率成像系统还对中高频误差提出了严格要求,例如 TPF-C(Terrestrial Planet Finder Coronagraph)望远镜的次镜要求全口径内小于 5 个周期的尺度内的扰动为 6 nm RMS,5~30 个周期的尺度内的扰动为 8 nm RMS,而 30 个周期以上的尺度内的扰动为 4 nm RMS;JWST(James Webb Space Telescope)望远镜的次镜在相应尺度内的扰动分别为 34 nm RMS、12 nm RMS 和 4 nm RMS^[6]。

对于空间望远镜系统中的大中型光学元件而言,制造过程中引入的亚表面损伤程度及其数量决定了镜面的屈服强度,隐藏在光学元件中的严重的亚表面结构损伤会导致光学元件在发射过程中所产生的机械应力作用下失效。即使光学元件加工后满足性能指标,但是当其暴露在太空环境(温差极大)中,亚表面裂纹会进一步扩展,导致镜面的扭曲,难以满足严格的面形和平面度要求。此外,在大口径反射镜的镀膜过程中,如果镜体存在加工引发的残余应力,镀膜过程的高温使其释放,将会导致镜体变形,降低大镜的面形精度,最终影响成像系统的分辨率并降低峰值强度。在高性能透镜系统中,亚表面损伤导致光散射,进而降低图像对比度或调制系统传递函数,此外,由于亚表面损伤中存储了光能量,会引起最终成像的不稳定。因此都需要在制造过程中尽可能准确地控制亚表面损伤并加以消除。

从上面几个典型的大中型光学系统可以看出,现代光学技术迅猛发展,对大中型光学零件提出了越来越高的要求,集中体现在以下几点:

- 1) 光学零件的面形越来越复杂,非球面开始被大量应用;
- 2) 非球面的口径和相对口径越来越大;
- 3) 对非球面在全口径内的高、中、低频面形误差均提出了严格要求,接近甚至达到纳米级;
- 4) 光学镜面亚表面质量的重要性日益凸显,必须在制造过程中进行严格控制。

1.1.2 大中型光学镜面制造中的测量概况

任何制造过程都是有误差的,被加工表面的实际形状与理想设计的名义面形存在偏差,这种偏差就是面形误差。现代光学零件检测技术必须满足非球面等复杂面形的三维全局误差测量,能够描述高、中、低频不同空间频段的误差细节,这样才能比较全面地评价精密光学零件的光学性能或用来指导加工。

大中型光学镜面的加工一般经历铣磨、研磨、抛光这样几个阶段(图 1.3),其中铣磨阶段通常要求达到 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右的面形精度,面形检测方法以坐标测量机(Coordinate Measurement Machine, CMM)为代表。光学镜面进入抛光阶段后,面形误差达到亚微米级,表面粗糙度也得到了显著改善,可用波面干涉仪进行高精度测量。研磨阶段的面形检测是决定抛光阶段能否收敛到高精度的关键因素,对应数十微米到亚微米级面形精度,通常还不是光学镜面,或者面形误差太大而难以实现常规的干涉测量,而通用的 CMM 又很难达到整个大口径上的高精度测量要求。目前在这一阶段的面形检测问题尤为突出,较为可行的方法是

采用红外波长的光学测量设备,例如红外干涉仪、红外 Hartmann 传感器等,或开发大范围高精度的坐标测量机。能否衔接铣磨、研磨、抛光三个阶段之间的检测与加工,是制约大中型光学镜面推广应用的一个关键技术。

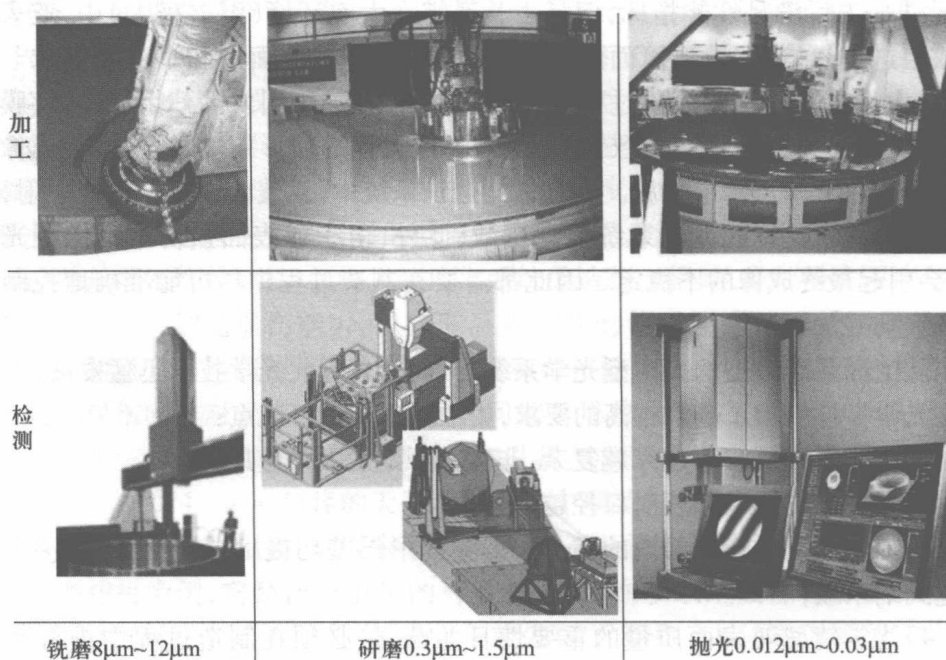


图 1.3 大中型光学镜面加工、检测的不同阶段

和铣磨加工等传统方式不同,现代大中型光学镜面制造技术的核心思想是确定性研抛。它不是依靠机床的运动精度进行创成加工的,不遵循切削加工中的机床误差复印原理,并且受装夹精度、加工力变形和热变形等众多因素的制约较小。确定性研抛通过面形测量技术建立光学镜面的三维误差模型,找出误差局部高点区域,用去除量精确可控的抛光模去除误差高点,最终实现零件精度逐步收敛的目的。可见现代大中型光学镜面制造技术的突出特点是确定性,要求对面形误差进行定量检测和修正。因此面形检测作为一种有效的反馈与评价手段,对于保证光学零件制造质量是必不可少的。理论上,只要测量精度足够高,确定性研抛技术就可加工得到相应高精度的零件。随着对大中型光学零件质量要求的不断提升,其质量标准的内涵也不断丰富,全口径、全波段(有效口径内波前的各种空间频率成分)的质量控制成为制造过程的新目标,而全口径、全波段面形误差的检测也就成为大中型光学零件检测的主要目标。

与此同时,现代光学系统中的大中型光学元件除了对生产周期、面形精度和

生产成本有严格的要求外,其亚表面质量也越来越受到人们的关注。亚表面损伤的存在增大了光学元件的材料去除量,并直接降低其使用寿命、长期稳定性、镀膜质量、成像质量和激光损伤阈值等重要性能指标。如何检测评价和控制加工过程引入的亚表面损伤以提高加工效率并实现表面完整性的总体指标,也正成为光学制造业必须解决的关键问题之一。

1.2 大中型光学镜面制造中的坐标测量技术原理

大中型光学镜面在不同制造阶段,甚至在同一个制造阶段,需要应用多种测量技术,实现其面形误差以及亚表面质量的检测。本节只对当前应用较广泛的几种测量技术进行介绍,其中坐标测量技术、子孔径拼接干涉测量技术、相位恢复技术以及亚表面测量技术,是本书的重点内容,在后面章节中还将分别进行详细阐述。

光学镜面坐标测量的基本原理是点-线-面的重构过程,即根据测量得到的一系列离散点的三维坐标,重构出被测镜面全口径上的三维面形,并通过数学运算得到面形误差。因而理论上坐标测量方法可以获得被测工件的任何几何参数,通用性很强。

坐标测量技术可以分为接触式测量和非接触式测量两类,包括常见的三坐标测量机和各种专用非球面轮廓仪。接触式测头由于测量力的存在,有划伤工件表面的危险,同时在曲面测量中侧向力对测量精度会产生影响,但测量数据可靠,环境适应能力强。非接触式测量法如光学探针法避免了接触式测头由于测量力的存在而产生的问题,但数据容易受工件表面粗糙度以及环境等因素的影响。因此开发高分辨率、小测量力的接触式测头,即微力接触式测量技术以及高精度光探针检测技术成为当前一个研究热点^[7-11]。

毫无疑问,干涉测量方法是当前非球面检测方法的主流。然而任何一种测量方法都有其自身的特点和应用范围,干涉检测、全息检测等光学测量方法主要是应用在非球面的最终检验中。而加工过程中的面形检测精度和效率,直接决定了镜面加工的效率 and 成本。尤其是研磨以及粗抛阶段,此时面形误差尚未达到光波长($\lambda = 0.6328\mu\text{m}$)量级,且表面粗糙度不佳,常规干涉检测存在困难。尽管 CO_2 红外干涉仪($\lambda = 10.6\mu\text{m}$)从理论上讲是非球面精磨粗抛阶段面形误差的理想检测方法,但是红外干涉仪存在价格昂贵、测量中光不可见而给调试带来困难等缺点^[12],因此坐标测量方法目前仍是研磨与粗抛光阶段面形检测的主要手段,也是顺利衔接研磨和抛光两个阶段的检测与加工的关键技术。