

光学非球面面形轮廓检测技术

焦松峰¹, 谢启明³, 刘尧², 王一卓¹, 范威¹, 游津京¹, 杨永华³, 张宸钢²

(1. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 云南北方光学科技有限公司, 云南 昆明 650200;

3. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650221)

摘要: 随着科技的进步, 尖端产品和先进光电系统对光学系统的成像质量要求越来越高, 光学非球面元件能有效地校正像差、减少系统所需光学元件数量、减轻系统重量, 因此被广泛应用。其特殊的面形特征决定了它的加工和检测相对于球面更加困难, 而检测精度直接决定了加工精度, 非球面检测技术的重要性显而易见。根据测量原理对光学非球面的检测技术进行了概述; 根据目前直接面形轮廓法在光学非球面的加工中应用最广的情况, 结合最新检测手段, 重点介绍了非球面直接面形轮廓法测量技术; 并介绍了近年来日益受到人们关注的自由曲面及面形轮廓法在自由曲面检测的应用; 最后总结了光学非球面检测技术的现状和发展趋势。

关键词: 非球面; 检测精度; 直接面形轮廓法; 自由曲面

中图分类号: TH74 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)05-0534-07

Optical Aspheric Surface Profile Testing Technology

JIAO Songfeng¹, XIE Qiming³, LIU Yao², WANG Yizhuo¹,
FAN Wei¹, YOU Jinjing¹, YANG Yonghua³, ZHANG Chengang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

2. Yunnan Northern Optical Technology Co. LTD., Kunming 650200, China; 3. Kunming Institute of Physics, Kunming 650221, China)

Abstract: With the progress of science and technology, cutting-edge products and advanced photoelectric systems have increasingly higher requirements regarding the imaging quality of the optical system. Optical aspheric elements, which are widely used, can effectively correct the aberration, reduce the number of optical elements required by the system, and reduce the weight of the system. Because of the specific surface characteristics, machining and testing such systems are more difficult than for spherical particles; the testing accuracy directly determines the processing accuracy, and the importance of aspheric testing technology is obvious. Herein, the testing technology of optical aspheric surface is summarized according to measuring principle; As direct surface profilometry is widely used in optical aspheric surface machining, combined with the latest testing methods, the measurement technology of aspheric surface direct surface profilometry is mainly introduced; The application of freeform surface and surface profilometry in freeform surface testing, which has attracted increasing attention in recent years, is introduced; Finally, the present situation and development trend of aspheric surface testing technology are summarized.

Key words: aspherical surface, testing accuracy, direct surface profilometry, free-form surface

0 引言

非球面按照面形的不同可以分为两类, 即旋转对称与非旋转对称非球面, 后者通常称为自由曲面, 其中轴对称非球面按照子午截面曲线类型, 又分为二次非球面和高次非球面^[1]。光学非球面元件与光学球面、

传统平面元件相比形状多样且具有更大的自由度和灵活性^[2]。然而在检测难度上非球面光学元件要远远难于平面及球面光学元件, 所以其应用依然无法和球面及平面光学元件的应用规模相比。早期的非球面光学元件大多是简单的小矢高、小口径元件, 加工和检测精度相对较低。20世纪八九十年代, 在工业发达国

收稿日期: 2022-09-17; 修订日期: 2022-12-12。

作者简介: 焦松峰(1995-), 男, 硕士生, 主要从事单点金刚石车削和非球面检测方面的研究。E-mail: 1639548057@qq.com。

通信作者: 谢启明(1966-), 男, 研究员高级工程师, 硕士, 主要从事单点金刚石切削工艺、复杂表面及自由曲面超精密加工工艺、光学零件的检测技术方面的研究。E-mail: 646010668@qq.com。

家中,中、小型红外透镜的加工精度是表面粗糙度 R_a $0.01\sim0.005 \mu\text{m}$, 形状精度 $0.5\sim0.1 \mu\text{m}$ ^[3]。随着基于计算机数控技术的单点金刚石车削、磁流变抛光以及离子束抛光等现代精密加工技术的出现,使加工纳米级面形精度的非球面成为可能,对非球面的检测技术提出了更大的需求和更高的挑战。近二十年来,受红外热成像技术、空间光学等领域的发展和推动,高精度、大矢高、大口径非球面光学元件的设计与加工需求迅速增大^[4-8],面形检测成为制约非球面光学元件更大规模应用的关键因素之一,光学非球面的检测技术已成为超精密加工领域的一个重要研究方向。

通过对光学非球面面形检测技术相关期刊的收集、整理和研究,对目前光学非球面常用的面形检测技术进行了概述。其中,直接面形轮廓法通用性强,应用范围广,世界上主要面形检测仪器生产商均推出了相应检测设备,进一步提高了该技术在光学非球面加工领域应用推广的程度,本文结合典型的仪器设备,对直接面形轮廓法进行较全面的介绍。另外,自由曲面及其面形检测技术的研究在世界范围内方兴未艾,直接面形轮廓法在自由曲面面形检测的应用,使自由曲面的研究重点从设计更多的扩展到实际应用。最后,总结了光学非球面检测技术的现状和发展趋势。

1 非球面面形检测技术概述

非球面光学元件是表面形状偏离球面的光学元件^[9-10],如图1所示。一般地,非球面由以下通用方程表示:

$$Z = \frac{Cr^2}{\{1 + [1 - (1 + k)cr^2]^{0.5}\}} + Ar^4 + Br^6 + Cr^8 + Dr^{10} + \dots$$

式中: Z 表示平行于对称轴的表面轮廓; r 表示距非球面对称轴的水平距离; k 为非球面系数; A 、 B 、 \dots 表示非球面修正系数; C 为非球面的顶点曲率。

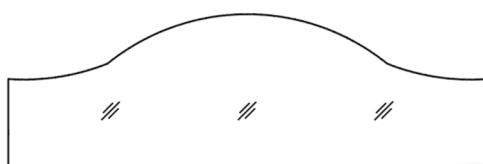


图1 非球面光学元件示意图

Fig. 1 Diagram of aspherical optical elements

按照测量原理的不同,非球面光学元件面形检测方法可以分为以下三大类:

1) 几何光线法。几何光线法是用几何学研究光的传播和成像规律的方法,运用光的直线传播原理,采

用非接触式测量,包括哈特曼法、刀口阴影法、朗奇法等^[11]。哈特曼法无需辅助元件,动态范围大^[12]。刀口阴影法设备简单,速度快,结果直观,灵敏度高,适于现场检测^[12]。朗奇法制作简单,使用方便,检测精度在微米或亚微米量级^[13]。

2) 干涉法。干涉法检测是基于光波叠加原理^[14],光波在干涉场中产生亮暗交替的干涉条纹,通过对干涉条纹的分析处理来获取被测量零件的相关信息^[15]。干涉法是精密抛光时期面形检测的重要方法。干涉法主要包括零位检测与非零位检测,零位检测主要有无像差点法、补偿镜法、全息法等;非零位检测主要有部分补偿法、子孔径拼接法、剪切干涉法等^[11]。干涉法对震动和气流扰动敏感。

3) 直接面形轮廓法。直接面形轮廓法使用探针对光学元件的表面进行扫描,以此来获得光学非球面面形相关数据。目前,直接面形轮廓法是非球面面形检测的主流方法,虽然轮廓法相对效率较低,但应用范围广,可用作非球面成型、研磨、抛光、镀膜后各阶段的面形检测^[11]。

综上所述,几何光线法检测仪器简单、检测速度较快,但检测精度不如干涉法。干涉法精度高和灵敏度较高、测试范围较广,但对检测设备、环境和操作要求也较高。直接面形轮廓法由于通用性强,操作方便,成为国内外各研究机构和企业广泛使用的光学非球面面形检测方法。然而,面形轮廓检测仪的设计和制造技术基本上都掌握在国外发达国家手中,对我国光学非球面和尖端产品的研制和发展构成很大的隐患。

光学非球面面形检测方法多种多样,从古老的刀口阴影法,到当今以 Lufoscan 和 NMF 轮廓仪为代表的非接触三维轮廓法,无论是传统方法还是现代方法,都是采用离线检测的方式来完成,这样不仅降低效率,而且还由于二次装夹带来的误差影响加工精度。近年来有学者提出了在线检测的方法,在线检测最大的优势是不再需要对工件进行反复装夹,这样不仅可以消除装夹误差、对刀误差和跳动误差等,而且可以节省时间,提高效率。目前,在线检测还未被广泛应用的主要原因就是测量精度较低,无法达到离线检测的精度水平。通过不断研究,人们总结出影响机床在线检测系统精度的误差来源主要为机床的热误差、几何误差以及测头误差^[16],这将是在线检测技术需要解决的问题。

2 非球面面形轮廓检测技术

根据探针测量方式的不同可以分为接触式和非接触式两种,前者使用机械探针,后者使用光学探针。

2.1 接触式轮廓法

采用轮廓法的测量仪器一般称轮廓仪，接触式轮廓仪的测量原理如图2所示，非球面光学元件置于工作台上，当机械探针接触到光学元件表面后，在轮廓仪系统中设置滑行速度，机械探针匀速滑过元件表面时，传感器感知到测量表面的位置变化，分别在X和Z方向上进行采样，探针滑行结束后，采样结果转化为电信号，最后经过处理，电信号转化为数据。这些数据与事先标定的数据进行比对，从而得出被测表面与理论表面的误差。轮廓仪得到的主要参数是面形峰谷值PV和均方根值RMS，以及表面粗糙度等。这种检测方法主要应用于中小口径的非球面光学元件。该方法在测量硫系玻璃和有色金属等较软材料时，会对已加工表面造成划伤，影响工件表面质量。接触式轮廓仪无法对非旋转对称的非球面光学元件面形进行测量。

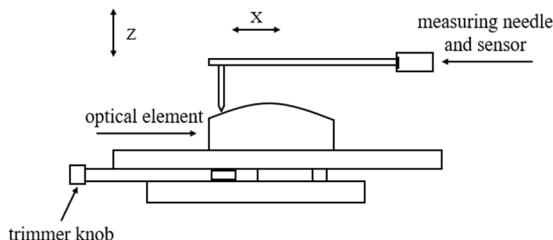
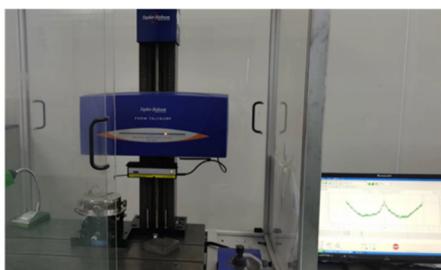


图2 接触式轮廓仪测量原理

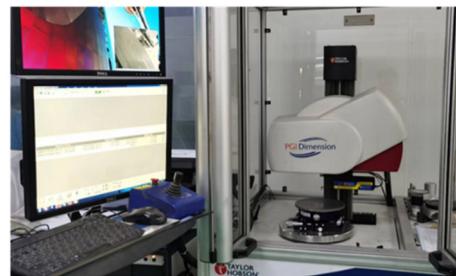
Fig.2 Measuring principle of contact profilometer

当今世界上生产轮廓仪的企业主要有英国的泰勒霍普森、德国蔡司、马尔和日本东京精密等公司。泰勒霍普森公司无论在国外还是国内都占据了相当大的市场份额，是此类轮廓仪最著名的生产商，典型产品有PGI 1240和PGI Dimension轮廓仪（如图3所示）。PGI 1240是一台适用于中小型尺寸的非球面测量仪器，测量最大直径 $\phi 200\text{ mm}$ ，可提供12.4 mm的测量范围，垂直分辨率高达0.8 nm。PGI Dimension测量直径超过 $\phi 200\text{ mm}$ ，测量几乎不受非球面陡度的限制，边缘测量角度最大达到85°。由于是接触式测量设备，即使测量探头与工件表面的接触应力再小，也有损伤表面的可能性，探头还存在损耗，而且针对不同的面形须配备不同的探头。



(a) 泰勒霍普森 PGI 轮廓仪 1240

(a) Taylor Hopson PGI profilometer 1240



(b) 泰勒霍普森 PGI Dimension 轮廓仪
(b) Taylor Hopson PGI dimension profilometer

图3 接触式轮廓仪

Fig. 3 Contact profilometer

2.2 非接触式轮廓法

非接触轮廓仪和接触式轮廓仪的主要区别是将机械探针换成光学探针，对被测件材料的软硬程度和材料表面粗糙度没有选择，可实现对非球面轮廓的无损检测，将非接触式轮廓法成功应用于商业领域的典型产品有荷兰的NMF（如图4(a)所示）和英国泰勒霍普森公司的Luphoscan（如图5(a)所示），下面结合这两款产品对非接触式轮廓法进行介绍。

2.2.1 NMF 轮廓仪

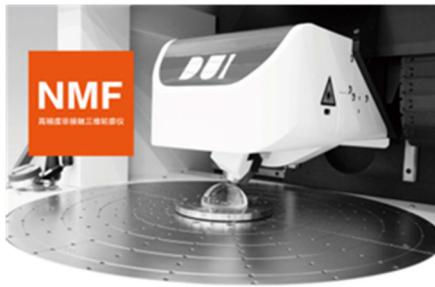
NMF是基于新一代圆柱测量框架的超高精度三维光学轮廓绝对测量装备，是一款可用于非接触式高精度测量非球面、离轴面、自由曲面、阵列镜等各类面形的革命性测量设备。NMF目前可测量口径350/600/800/1000 mm的光学元件，集通用性、集成化、非接触、快速、高精度等特性于一体，集成差动共焦和双频激光干涉仪的光谱共焦测头具备极强的测试能力，可测量各种研磨、抛光、镀膜元件，高精度运动控制系统和校准系统与非接触光学测头相结合，实现了快速精准的三维光学轮廓形貌绝对测量。

NMF三维轮廓仪测量原理如图4(b)所示，被测元件安放在气浮主轴上，主轴以最大1转/s的速度旋转。非接触式共焦测头安装在旋转轴平轴上，测量时测头法向实时垂直于被测表面，同时，测头还可分别沿R轴（径向）和Z轴（垂直方向）移动。

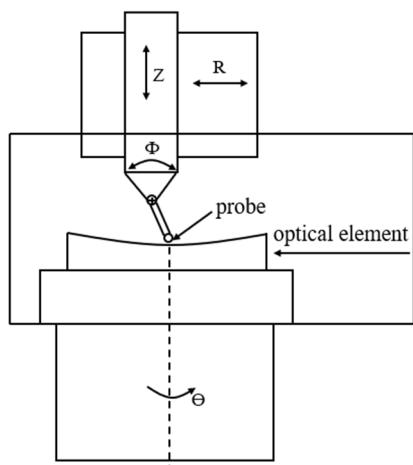
2.2.2 Luphoscan 轮廓仪

Luphoscan轮廓仪有260、420等系列，是一款基于多波长干涉传感技术的高速非接触式3D非球面光学面形测量系统，Luphoscan轮廓仪通过激光测距的方法来测量，测量原理如图5(b)所示，传感器的位置由R、Z和T轴控制，传感器在被测工件表面按照预设路径进行扫描，同时被测工件在C轴上自身进行旋转，传感器对整个面形进行螺旋式扫描。扫描过程中传感器始终垂直于被测面，从而保证了传感器与被测点之间的距离保持恒定。利用多波长干涉传感技术可

以灵活地测量绝对距离,即使被测光学非球面元件表面存在缺口也可以实现检测,因为该技术不受光束间断的影响。



(a) NMF 非接触三维轮廓仪^[17]
(a) NMF contactless 3D profilometer^[17]



(b) NMF 测量原理
(b) Principle of NMF measurement

图4 NMF 轮廓仪及测量原理

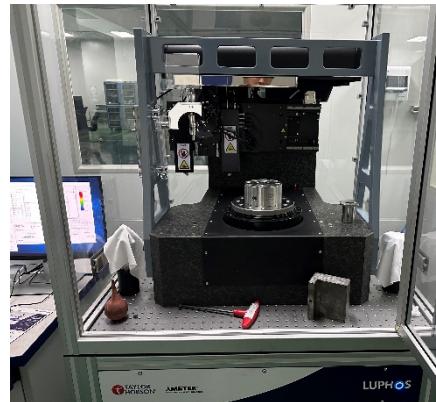
Fig.4 NMF profilometer and measuring principle

Luphoscan 轮廓仪采用光学探针,对镀膜后的光学表面,如果膜层的透过波段和探针的工作波段有重叠,探针发出的光束会在膜层之间发生透射和反射,干扰检测结果,使仪器得出错误的数据,这一定程度限制了此类轮廓仪对镀膜后表面的面形检测。

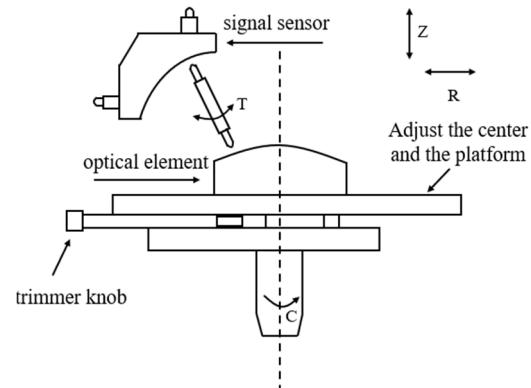
2.3 面形轮廓法在自由曲面面形检测的应用

2.3.1 自由曲面概述

光学自由曲面因面形复杂多变,矫正像差能力强,逐渐成为现代光学工程领域的研究热点^[18-19]。在非成像领域,将自由曲面应用于汽车后视镜,在镜面大小不变的情况下获得更大的视野,为行车安全提供更大的保障^[20]。在显示领域,自由曲面可用于头戴式显示器^[21-23]、微型投影仪^[24-25]等系统中。在成像领域,自由曲面主要应用于天文观测和空间光学系统中^[26-27]。



(a) 泰勒霍普森 Luphoscan 轮廓仪
(a) Taylor Hopson Luphoscan profilometer



(b) Luphoscan 轮廓仪测量原理
(b) Luphoscan profilometer measurement principle

图5 Luphoscan 轮廓仪及测量原理

Fig.5 Luphoscan profilometer and measurement principle

尽管光学自由曲面有着突出的优点,但依旧没有广泛发展到现代光学系统中,最主要的原因就是光学自由曲面不具备旋转对称性,面形检测成为了最大的难点。前文所述的 NMF 和 Luphoscan 不但提供了对自由曲面的检测方法而且是在非球面面形检测技术基础上发展而来的,主要包括三坐标测量法、轮廓仪法、摆臂式轮廓扫描法,以下结合典型仪器设备介绍轮廓仪法在光学自由曲面面形检测的应用。

2.3.2 自由曲面轮廓法检测技术

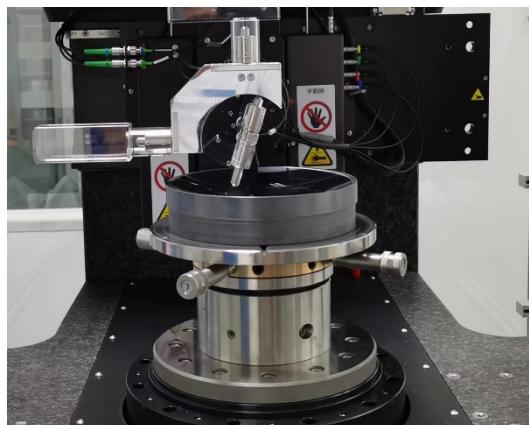
自由曲面是常规非球面一个新的分支,从测量原理上来说,自由曲面的轮廓检测和常规非球面完全一致,所不同的是,自由曲面没有旋转对称性,为了实现对自由曲面的轮廓测量,就需要更多的运动维度、更复杂的运动机构和控制精度来支撑其测量精度。前文所述的 LuphoScan 和 NMF 两款仪器率先实现了自由曲面面形轮廓检测,推动了自由曲面从理论研究到实际应用的进程。

LuphoScan 是对自由曲面进行快速、非接触、全三维测量的理想设备,LuphoScan260 检测自由曲面,需要在扩展软件里输入自由曲面参数,生成 4 轴 (3

个机械轴, 1个空气轴)轨迹, 然后在LuphoScan主界面调用轨迹, 按照螺旋线、双波长的方法进行扫描测量。LuphoScan在径向轮廓扫面的基础上, 增加了环形轮廓的测量, 通过径向与环形轮廓数据的拼接得到整个面形。

图6为LuphoScan测量硅单晶自由曲面的实例, 工件直径为164 mm。根据自由曲面的数学表达式生成相应的矢高表, 测量过程中, 信号传感器根据矢高表自动优化运动轨迹, 减小测量误差。该轮廓仪只能测量面形与球面基或非球面基偏离度较小的自由曲面。

NMF是全球第一台实现高精度自由曲面&非球面测试能力的设备。NMF系列的OS软件可实现自

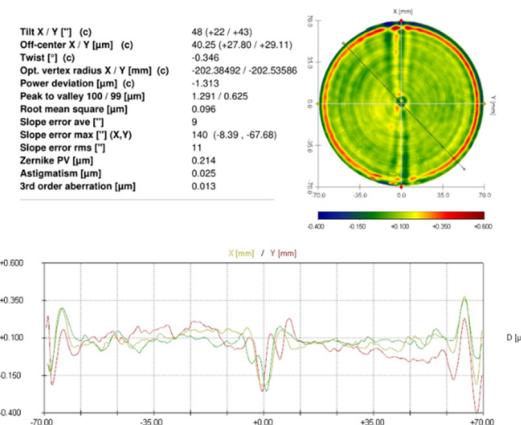


(a) 硅单晶自由曲面

(a) Free-form surface of silicon single crystal

由曲面、离轴元件居中测量和分析, 目前, 支持双锥型(Biconic)和多项式型(Polynomial)两种自由曲面输入方式。NMF轮廓仪对自由曲面扫描时有螺旋、往复、步进共焦3种扫描方式, 自由曲面测量不确定度 $<15\text{ nm RMS}$ 。NMF轮廓仪对最大口径为500 mm×100 mm的自由曲面的测量不确定度达到30 nm。图7为NMF测量凸自由曲面的实例^[17]。自由曲面偏离度±2 mm, 局部斜率11°, 测试口径R29.7 mm。

NMF是全采用轮廓法测量自由曲面通用性较强, 既可以测量凸面, 也可以测量凹面, 测量精度和效率较高, 然而目前面形轮廓法只能测量梯度变化较小的自由曲面^[18,27]。



(b) 面形检测结果

(b) Surface shape test results

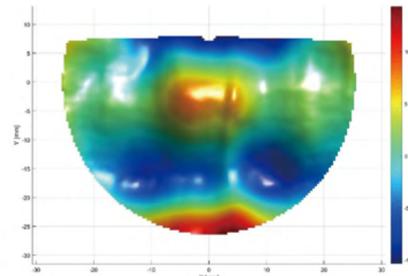
图6 LuphoScan 测量硅自由曲面

Fig.6 LuphoScan measures silicon free-form surfaces



(a) 凸自由曲面

(a) Convex free surface



(b) 面形检测结果

(b) Surface shape test results

图7 NMF 测量凸自由曲面^[17]

Fig.7 NMF measures convex free-form surfaces^[17]

3 结论与展望

随着科技的进步, 尖端产品和先进光电系统对光

学非球面元件的需求越来越大。一方面, 高精度非球面光学元件的制造离不开高精度的非球面检测技术; 另一方面, 非球面检测技术的发展又反过来促进了非

球面制造技术的发展及其应用的普及,可以说非球面检测技术是未来超精密加工领域一个极其重要的发展方向。总结起来,光学非球面面形检测技术呈现出以下特点和发展趋势。

- 1) 面形轮廓法仍是现在和未来相当一段时期内的主流光学非球面测量方法,其中,非接触无损测量及全口径三维轮廓测量将是该技术的主要发展方向;
- 2) 检测数据和加工设备共享、输出结果和相应标准兼容已成为标配;
- 3) 检测设备应具备测量速度快、稳定性好、精度高、检测流程自动化等特点;
- 4) 在线检测技术将是光学非球面检测技术研究的一个重要方向;
- 5) 有必要加快国产非球面检测仪器的研制和发展,实现光学非球面应用和发展的自主可控;
- 6) 降低非球面检测设备的成本,将更好地推动非球面加工技术的发展和非球面的应用普及。

参考文献:

- [1] 张小兵. 非球面光学元件加工及检测技术综述[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(2): 106-111.
ZHANG Xiaobing. Review on machining and testing technology of aspheric optical elements[J]. *Ordnance Materials Science and Engineering*, 2014, 37(2): 106-111.
- [2] FORBES G W. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 5218-5226.
- [3] 谢启明. 单点金刚石切削在红外光学的应用[D]. 昆明: 昆明物理研究所, 2002.
XIE Qiming. Application of Single Point Diamond Cutting in Infrared Optics [D]. Kunming: Kunming Institute of Physics, 2002.
- [4] 师途, 杨甬英, 张磊, 等. 非球面光学元件的面形检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(1): 26-46.
SHI Tu, YANG Yongying, ZHANG Lei, et al. Surface shape detection technology of aspherical optics[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26-46.
- [5] 闫峰涛, 范斌, 侯溪, 等. 基于子孔径拼接的 Hindle 球检测法[J]. 强激光与粒子数, 2012, 24(11): 2555-2559.
YAN Fengtao, FAN Bin, HOU Xi, et al. Hindle ball detection method based on sub aperture stitching[J]. *Intense Laser and Particle Number*, 2012, 24(11): 2555-2559
- [6] ALIKENS D M, WOLFE C R. Use of power spectral density(PSD) functions in specifying optics for the National Ignition Facility[C]//*Proc. of SPIE*, 1995, 2576: 2812292.
- [7] BRAY M. Stitching interferometry: how and why it works[C]//*Proc. of SPIE*, 1999, 3739: 259-273.
- [8] 刘崇. 非球面环形子孔径拼接干涉测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
LIU Chong. Research on Measurement Method of Aspheric Ring Subaperture Splicing Interference[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [9] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
PAN Junhua. *Design, Machining and Testing of Optical Aspheric Surface* [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004.
- [10] 王洪臣. 二次旋转曲面法线等距离线加工及机床研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2007.
WANG Hongchen. Normal Isometric Machining Method of Quadratic Rotary Surface and Machine Tool Development[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2007.
- [11] 贾世奎, 李成贵, 杨辉, 等. 非球面光学元件面形检测方法[J]. 上海计量测试, 2009, 36(5): 2-6.
JIA Shikui, LI Chenggui, YANG Hui, et al. Surface shape detection method of aspherical optical elements[J]. *Shanghai Metrological Measurement*, 2009, 36(5): 2-6.
- [12] 杨志文. 光学测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
YANG Zhiwen. *Optical Measurement*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1995.
- [13] 普里亚耶夫. 光学非球面检验[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
Priayev. *Optical Aspherical Testing*[M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [14] 马天宇. 基于激光干涉测量原理的轮廓测量系统[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2018.
MA Tianyu. Profile Measurement System Based on Laser Interferometry Principle[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2018.
- [15] 王孝坤. 激光跟踪仪检验非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, 41(4): 379-383.
WANG Xiaokun. A method to test aspheric surface shape with laser tracker[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 379-383.
- [16] 李静, 杨辉, 李杰. 自由曲面光学元件检测方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2019, 55(3): 31-33.
LI Jing, YANG Hui, LI Jie. Research on testing methods for free form surface optical elements[J]. *Aerospace Precision Manufacturing Technology*, 2019, 55(3): 31-33
- [17] 重庆孚纳科技有限公司. NMF 高精度非接触三维轮廓仪产品手册[Z]. 2021.
Chongqing Funa Technology Co. LTD. NMF High Precision Non-contact 3D Profiler Product Manual [Z]. 2021.
- [18] 张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(3): 283-299.
ZHANG Lei, LIU Dong, SHI Tu, et al. Surface shape detection technology of optical free-form surface [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299.
- [19] 吴仍茂. 自由曲面照明设计方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WU Renmao. Research on Design Method of Free-form Surface Lighting [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

- [20] TIAN F, YIN Z, LI S. Fast tool servo diamond turning of optical freeform surfaces for rear-view mirrors[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, **80**(9): 1759-1765.
- [21] 孟祥翔, 刘伟奇, 张大亮, 等. 双自由曲面大视场头盔显示光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(4): 196-201.
MENG Xiangxiang, LIU Weiqi, ZHANG Daliang, et al. Design of dual-free-form helmet display optical system with large field of view[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(4): 196-201.
- [22] 刘军, 黄玮. 反射式自由曲面头盔显示器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, **45**(10): 150-155.
LIU Jun, HUANG Wei. Optical system design of reflective free-form helmet-mounted display[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(10): 150-155.
- [23] WANG Q F, CHENG D W, WANG W T, et al. Design, tolerance, and fabrication of an optical see-through head-mounted display with free-form surface elements[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(7): C88.
- [24] 赵伟, 刘旭, 李海峰. 基于自由曲面阵列的激光投影显示照明系统设计[J]. 光学学报, 2018, **38**(6): 291-297.
ZHAO Wei, LIU Xu, LI Haifeng. Design of laser projection display lighting system based on free-form surface array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(6): 291-297.
- [25] 于百华. 基于自由曲面的超短焦投影物镜关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2019.
YU Baihua. Research on Key Technologies of Ultra-short focal projection objective Based on Free-form Surface[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [26] 朱日宏, 孙越, 沈华. 光学自由曲面面形检测方法进展与展望[J]. 光学学报, 2021, **41**(1): 161-178.
ZHU Rihong, SUN Yue, SHEN Hua. Advances and prospects of surface shape detection methods for optical free-form surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, **41**(1): 161-178.
- [27] MENG Q Y, WANG H Y, LIANGW J, et al. Design of off-axis three-mirror systems with ultrawide field of view based on an expansion process of surface free-form and field of view[J]. *Applied Optics*, 2019, **58**(3): 609-615.