

大口径凸非球面面形检测方法研究

宋 强^{1,2} 杨宝喜^{1,2} 袁 乔¹ 李 璟¹ 朱 菁^{1,2} 黄惠杰^{1,2}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出了在非球面检验中以反射镜补偿法线像差的方法,用于大口径凸非球面透镜的检测,克服了在检测大口径非球面透镜时一般需要采用多片透镜补偿的困难,降低了设计难度和装调难度,节约了加工成本。设计并研制了大口径凸非球面透镜检测系统,对误差来源进行了分析并给出消除方法。对直径 $\Phi 270$ mm 的凸非球面透镜进行检测,测得的非球面面形误差峰谷(PV)值与均方根(RMS)值分别为 0.585λ 和 0.083λ 。该方法为大口径非球面透镜检测提供了技术参考,能够适用于大口径透镜粗抛光阶段中的面形检测。

关键词 测量;光学测量;光学制造;非球面;零位补偿

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0408003

Study on Large Convex Aspherical Lens Testing

Song Qiang^{1,2} Yang Baoxi^{1,2} Yuan Qiao¹ Li Jing¹ Zhu Jing^{1,2} Huang Huijie^{1,2}

(¹ *Laboratory of Information Optics and Opto-Electronics Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*
² *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract A surface measurement method of convex aspherical lens with large clear aperture is proposed based on an aspherical compensation mirror. It overcomes the difficulty that multiple lenses are needed for compensating the normal aberration of convex aspherical lens. In addition, it simplifies the design and reduces the cost. Aspherical lens measurement system with large diameter is designed and implemented. Source of error is systematically analyzed, and elimination method of error is also proposed. In order to verify the feasibility of the proposed method, a convex aspherical lens with an aperture of 270 mm is inspected. The peak valley (PV) value and root mean square (RMS) of the tested aspherical surface are 0.585λ and 0.083λ , respectively. This method provides a technical reference for large aperture aspherical surface testing, and also can be used in the field of rough polishing testing.

Key words measurement; optical measurement; optical fabrication; aspherical surface; null compensation

OCIS codes 220.3740; 220.1250; 220.3620

1 引 言

近几十年来随着光学加工技术的进步,非球面反射镜在离轴三反光学系统^[1-2]、高分辨光栅光谱仪^[3]领域有着广泛的应用。非球面透镜同时也是深紫外光刻机中的重要元件^[4-5],具有消除系统部分高级像差,增大视场,简化光学系统结构的重要作用,与此同

时其面形精度也是影响光学成像的关键因素。大口径非球面镜面形检测一直以来都是难点和热点^[6-7]。为了对非球面的面形进行测量,科研人员进行了大量的研究。根据测量方法的不同,可以将检测方法分为非干涉测量法与干涉测量法两类。

在非干涉测量法中,一种是利用刀口阴影法对

收稿日期: 2013-10-17; 收到修改稿日期: 2013-10-29

基金项目: 国家国际科技合作专项(2011DFR10010)、国家科技重大专项(2011ZX02402)

作者简介: 宋 强(1987—),男,硕士研究生,主要从事高数值孔径光学光刻技术与光电检测等方面的研究。

E-mail: songqiang@siom.ac.cn

导师简介: 杨宝喜(1972—),男,硕士,高级工程师,主要从事光学系统设计、光电检测和高数值孔径光学光刻技术等方面的研究。E-mail: yangbx@siom.ac.cn(通信联系人)

面形进行评估,但是面形误差难以准确量化,只能应用于低精度面形误差的非球面加工;另一种非干涉测量方案是利用高精度轮廓仪对非球面镜面形进行扫描测量,在中小口径非球面的测量中,其测量精度可以达到亚纳米^[8-9],但是在口径 $\Phi 200$ mm 以上的非球面检测方面,高精度测量未见报道,此外在针对大口径面形检测时,在效率上是低于干涉法的。

干涉法是一种非接触测量方法,利用光的干涉原理获取面形,具有测量速度快、精度高等特点。现代干涉检测方法可以分为零位补偿干涉法与非零位补偿干涉法。非零位补偿技术主要有子孔径拼接法和剪切干涉法^[10-12]。子孔径拼接法,能够高精度测量大口径非球面,但缺点是其装调对准困难,子孔径拼接算法复杂,计算时间缓慢^[10]。剪切干涉具有无需参考波面的优势,但是因其测量得到的是差分波面的斜率信息,需要后续的相位解包裹算法重构出波前信息,数据处理较为繁琐^[12]。由于这些缺陷的存在,零位补偿干涉技术在非球面检测方面仍然具有重要地位。20 世纪 70 年代,Wyant 等^[13-14]提出计算全息(CGH)检测法以来,小相对口径非球面检测领域取得了成功,但是针对大相对口径非球面检测,仍然存在困难;因为对大相对口径非球面而言,其对应的 CGH 空间频率将非常高,加工非常困难,价格昂贵^[15]。利用透镜补偿法可以检测大口径非球面面形,常用的主要有 Hindle 球法和 Offner 透镜补偿法^[16],但是 Hindle 球法存在中心遮拦,无法测量到非球面中心区域的面形;另外当被测非球面口径较大时,辅助透镜的口径往往要比被测非球面大数倍,带来检测难度的大幅提高;Offner 透镜补偿法往往需要一个补偿透镜组,加工和装调都很困难,成本相对较高^[17]。为了克服以上方法的缺陷,须设计一个可行的方案对大口径非球面透镜进行检测。

本文基于补偿法检测非球面原理,提出反射镜补偿法^[18],利用一个非球面反射镜来补偿大口径非球面透镜的法线像差,使之形成一个无焦光学系统,利用干涉仪测量其出瞳波面,获取非球面的面形误差。对一块口径 $\Phi 270$ mm 的非球面透镜进行检测,验证了该方法检测大口径非球面面形的可行性。

2 非球面检测光学系统设计

2.1 非球面的法线像差

对于非球面透镜,面上每一点的法线不会相交于同一点。法线像差可以定义为非球面上各点处的法线与光轴的交点到非球面顶点曲率中心的距

离^[19]。图 1 为非球面法线像差产生的示意图, O 是非球面顶点, X 轴是光轴, Y 轴是非球面口径, R_0 是非球面顶点的曲率半径, N 是对应非球面顶点曲率中心, N_1 是非球面上一点 P 的法线与光轴的交点, γ 是非球面法线与光轴的夹角。根据法线像差的定义可知,图 1 中 NN_1 即为法线像差(记为 ΔN)的大小,可以表示为

$$\Delta N = x + \left(\frac{y}{\tan \gamma} \right) - R_0, \quad (1)$$

式中

$$\gamma = \arctan \left[\frac{y}{R_0 - (1+k)x} \right]. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,得到简化后的法线像差

$$\Delta N = -kx. \quad (3)$$

由(1)式可以看出,非球面的法线像差与非球面口径大小是相关的,大口径非球面的法线像差相对较大,并且由(3)式可以看出当二次曲线常数 k 是负数时产生正球差,为正时产生负球差。在设计补偿镜时,需要根据非球面不同口径计算法线与光轴的交点,还需要根据被测非球面的二次曲线常数的符号选择补偿器,计算出补偿器的结构参数。

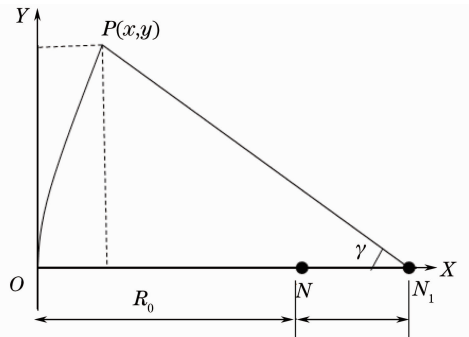


图 1 非球面法线像差示意图

Fig. 1 Schematic diagram of normal aberration of aspherical surface

针对大口径非球面透镜检测,可以采用反射镜补偿法,将反射镜置于被测非球面透镜后方,用于补偿非球面透镜的法线像差。对于大口径非球面透镜的面形检测,采用球面反射镜无法满足补偿其法线像差的要求,需要将反射镜设计为非球面。在加工上,目前超精密单点金刚石车床已经成熟地应用到高精密光学元件的制造上,其零件加工的面形精度已经可以控制在亚微米,具有加工方便、面形精度高等优点^[18],能够满足这里对反射镜的加工要求。

2.2 设计结果与分析

一般形式的非球面满足

$$Z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + A_1r^4 + A_2r^6 + \dots + A_nr^{2(n+1)}, \quad (4)$$

式中 Z 是矢高, r 是光线入射高度, c 是顶点曲率, k 是二次曲线常数, A_1, A_2, \dots, A_n 为非球面的高阶项系数。这里被检测非球面透镜的口径为 $\Phi 270$ mm, 中心厚度 $d = 52.24$ mm, 材料是熔石英; 一面是凸非球面, 曲率 $c = 1/278.3$ mm, $k = -1.782$, 高阶项系数均为 0; 另一面是凸球面半径 $R = 863$ mm。

根据反射镜补偿法消除非球面法线像差的原理, 首先计算出补偿镜的结构参数, 再利用 Code V 软件进行优化设计, 得到如图 2 所示的大口径非球面透镜

检测光路, 表 1 是检测光路结构参数。其中非球面反射补偿镜的光学结构参数为: $c = 1/158.7492$ mm, $k = 3.1273, A_1 = -1.1239 \times 10^{-7}, A_2 = -2.9793 \times 10^{-12}, A_3 = -1.0024 \times 10^{-15}$ 。

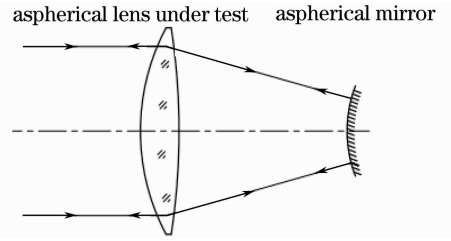


图 2 大口径非球面透镜检测光路

Fig. 2 Structure sketch of reflection-type compensator

表 1 检测光路结构参数
Table 1 Data of system structure

Surface number	Surface type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
Objective	Spherical	Infinity	Infinity	
Stop	Conic	278.300	52.2400	Fuse silica
2	Spherical	-863.000	53.8000	
3	Spherical	Infinity	227.1078	
4	Aspherical	158.7492	-227.1078	Mirror
5	Spherical	Infinity	-53.8000	
6	Spherical	-863.000	-52.2400	Fuse silica
7	Conic	278.300	-50.0000	
8	Spherical	Infinity	0	

2.3 检测系统误差分析与去除方法

大口径非球面透镜检测光路中引起的面形测量误差主要来自以下四个因素:

- 1) 非球面透镜检测光路的系统误差;
- 2) 待测非球面透镜中球面的面形误差;
- 3) 非球面反射镜的实际面形误差;
- 4) 待测非球面透镜和非球面反射镜的对准误差。

检测光路在出瞳处的波像差 W 可以表示为

$$W = W_0 + W_1 + W_2 + W_3 + W_4, \quad (5)$$

式中 W_0 是非球面的面形误差, W_1 是系统残余波像差, W_2 是由非球面透镜球面面形误差经过检测光学系统后在出瞳处的波像差, W_3 是由非球面反射镜的面形误差引起的在检测系统出瞳处的波像差, W_4 是反射式补偿镜的调整引起的波像差。

检测光路在 0° 视场时, 检测光路的残余波像差如图 3 所示, 峰谷值(PV, 记为 P_V)为 $P_V = 0.018\lambda$, 均方根(RMS, 记为 R_{MS})为 $R_{MS} = 0.005\lambda$ ($\lambda = 632.8$ nm)。

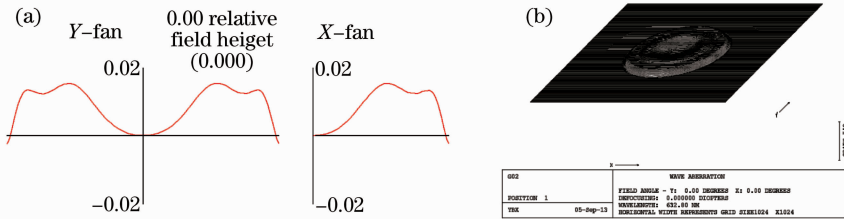


图 3 检测光路的波像差。(a) 垂轴波像差; (b) 出瞳波像差

Fig. 3 Optical path difference of compensator system. (a) Vertical axis wave aberration; (b) wave aberration at pupil

被检测非球面透镜的球面面形误差 $P_V = 0.064\lambda, R_{MS} = 0.0059\lambda$ ($\lambda = 632.8$ nm), 如图 4 所示。

采用单点金刚石车床对设计的非球面反射镜进行加工, 其口径 $\Phi 98$ mm, 材料是无氧铜, 加工后的实物如图 5 所示。

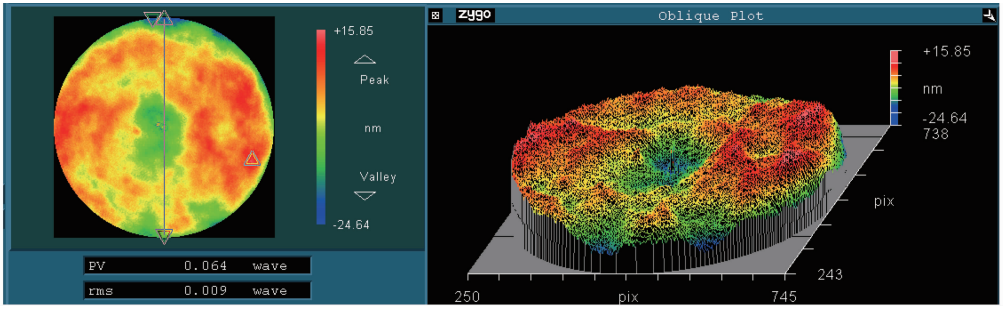


图 4 待测非球面透镜的球面面形误差

Fig. 4 Surface error of spherical surface of tested aspherical lens

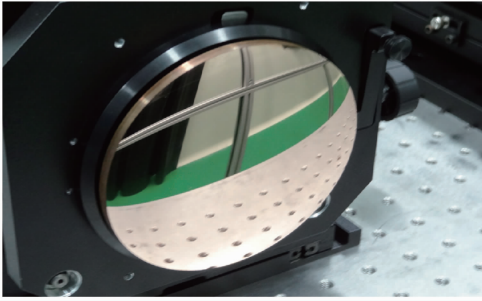


图 5 凸非球面反射补偿镜实物图

Fig. 5 Real product photo of aspherical mirror

利用子孔径拼接干涉仪测试非球面反射镜的面形误差, $P_V = 0.267\lambda$, $R_{MS} = 0.04\lambda$, 如图 6 所示。

为了得到由非球面反射镜和被测非球面透镜球面的面形误差对检测结果的影响, 需要将图 4 和图 6 的面形误差数据导入到图 2 所设计的非球面检测光学系统中, 进行光线追迹, 得到出瞳处的波像差 $W_2 + W_3$ 。

在检测光路中, 被检测非球面透镜固定不动, 需要将非球面反射镜的光轴与其对准。在 XYZ 坐标系下, 非球面反射镜有 6 个自由度, 分别是沿 X、Y、Z 轴的平动 l_x 、 l_y 、 l_z 和绕轴的转动 θ_x 、 θ_y 、 θ_z , 由于在该坐标系下非球面反射补偿镜是关于 Z 轴旋转对称的, 所以不会引入误差。根据刚体运动的旋转矩阵可以求得, 在两个不同的测量位置位移矢量可以表示为^[20]

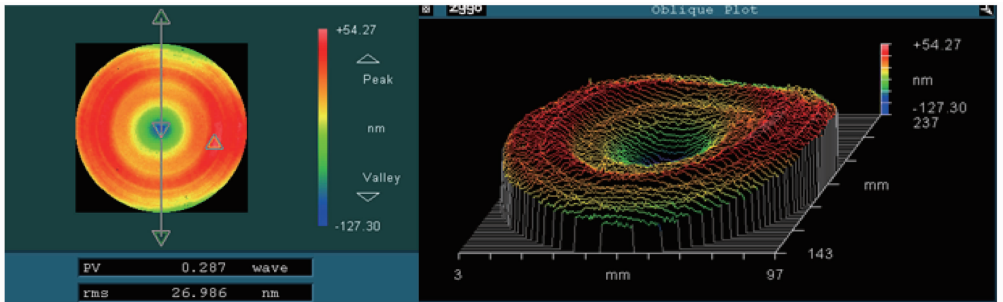


图 6 非球面反射补偿镜实际面形误差图

Fig. 6 Surface shape of aspherical mirror

$$\Sigma = \begin{bmatrix} l_x - z\theta_y \\ l_y + z\theta_z \\ l_z + x\theta_y - y\theta_x \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由非球面反射补偿镜运动所产生的波像差可以表示为

$$W_4 = 2(\Sigma \cdot N), \quad (7)$$

式中 N 是反射式补偿镜的单位法线, 可以通过 (1) 式求导得到。

根据 (6)、(7) 式可以得到倾斜和位移引起的波像差, 按照三级塞得像差展开, 满足

$$W_4 = C_1 + C_2 r \cos \theta + C_3 r \sin \theta + C_4 r^2 + C_5 r^3 \cos \theta + C_6 r^3 \sin \theta + C_9 r^4, \quad (8)$$

式中

$$\begin{aligned} C_1 &= 2l_z - 3/8, & C_2 &= 2(cl_x + \theta_y), \\ C_3 &= 2(cl_y - \theta_x), & C_4 &= c^2 l_z, & C_5 &= kc^3 l_x, \\ C_6 &= kc^3 l_y, & C_9 &= 0.5(k+1)c^4 l_z. \end{aligned} \quad (9)$$

在实际检测系统中, 可以将非球面反射镜置于五维调整架上, 通过调节倾斜和位移, 观察干涉仪分析软件界面中塞得和系数变化, 使各项系数都小到可忽略为止, 这样就减少了补偿镜的倾斜和平移带来的影响。因此, 被测非球面的面形误差满足

$$W - W_2 - W_3 = W_0. \quad (10)$$

可以将实际测量到的非球面反射镜的面形误差 W_2 和非球面透镜球面部分的面形误差 W_3 导入到所设

设计的检测系统中,利用光线追迹软件对其检测系统光线追迹,在出瞳处得到此时出瞳的波面,再将实际检测的波面减去此时出瞳波面即可得到由非球面面形误差引起的在出瞳处的波像差。至此检测系统中的误差源已经找到消除的办法。

3 检测与计算处理

检测装置结构如图 7 所示。把干涉仪、待测非球面透镜、非球面反射镜全部置于精密气浮平台上,将各个元件进行对准,使检测光路中的各个元件全部共光轴。其中非球面反射镜被置于五维调整架上,五维调整架可以上下平移、左右平移、前后平移、沿 X 轴倾斜和沿 Y 轴倾斜,对其进行调整。从干涉仪发出的激光束经过标准镜,分为两路,一路被标准镜反射回到干涉仪中作为参考光,另外一路透射过标准镜,经过被测非球面透镜折射入射到设计好的非球面反射镜上,如果被测非球面是理想的非球面,

那么经过非球面反射镜反射的光将原路返回,如果被测非球面与理想非球面有几何偏差那么,返回的光束波面中就带有面形信息,与参考光干涉,在干涉图上可以显现出来,再用相移干涉法对干涉条纹进行波面重建,获取面形的几何偏差信息。通过判读波面误差图可以分析出面形偏差的位置,指导加工。为验证所提方案的可行性,这里以研制过程中所需要的大口径凸非球面透镜为例,按照图 7 所示装调好,检测装置实物图如图 8 所示。

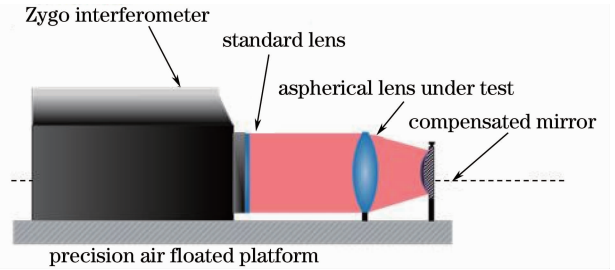


图 7 检测系统结构示意图

Fig. 7 Setup diagram of measurement system

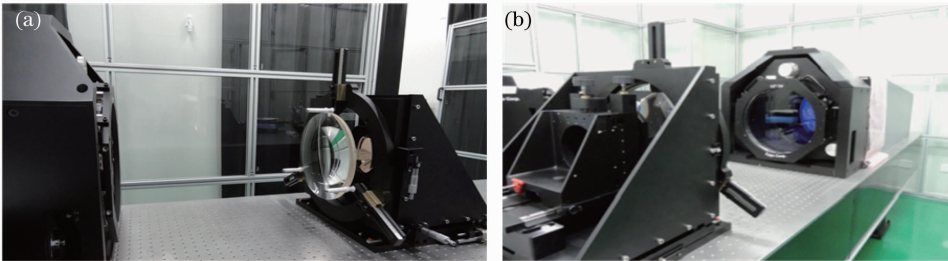


图 8 非球面检测系统实验装置图。(a) 侧视图; (b) 前视图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup of aspherical measurement system. (a) Side view; (b) front view

初步调节好检测光学系统,使得到的干涉条纹图密度满足干涉仪可探测范围。在干涉仪软件中观察塞得系数,多次调节五维调整架,使各项塞得系数

小到可忽略为止,完成检测光路的对准。最后测量的面形分布如图 9 所示。

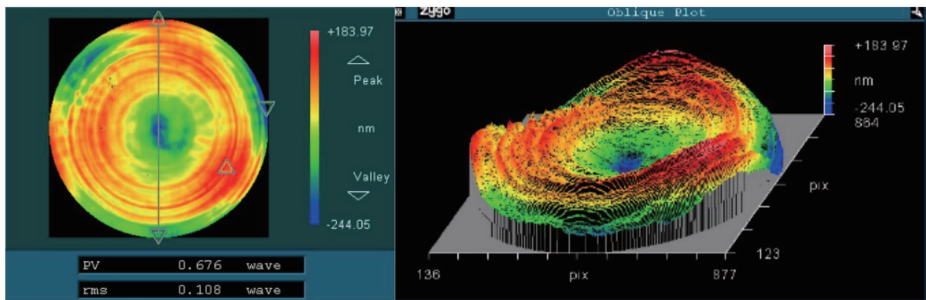


图 9 面形分布

Fig. 9 Surface shape of aspherical lens

考虑到实际的非球面反射镜面形对出瞳处波面的影响,系统检测出来的并非是非球面透镜的面形误差分布,因此按照第 2.3 节讨论过的误差去除方法,将实际测得的球面与非球面反射镜的实际面形

误差数据转换为 INT 格式文件,在 Code V 中将其导入到检测光路中,通过光线追迹的方法,得出此时的出瞳处波像差,如图 10 所示。将测量到的波面减去它就可得到非球面透镜非球面引起的面形误差,

结果如图 11 所示。

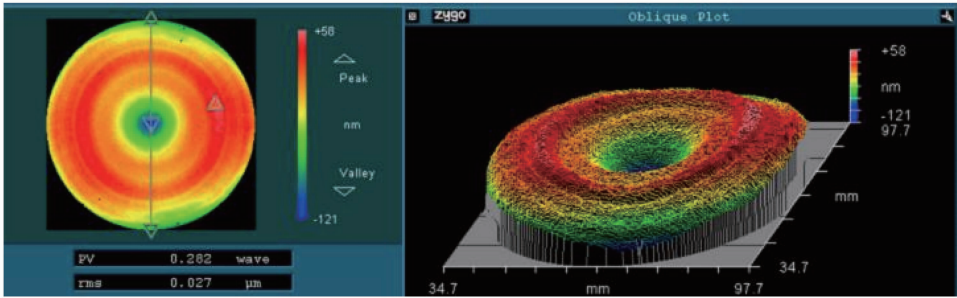


图 10 非球面反射补偿镜面形和球面面形误差引入后出瞳处面形分布

Fig. 10 Pupil map with real surface shape of compensated mirror and spherical surface of testing aspherical lens

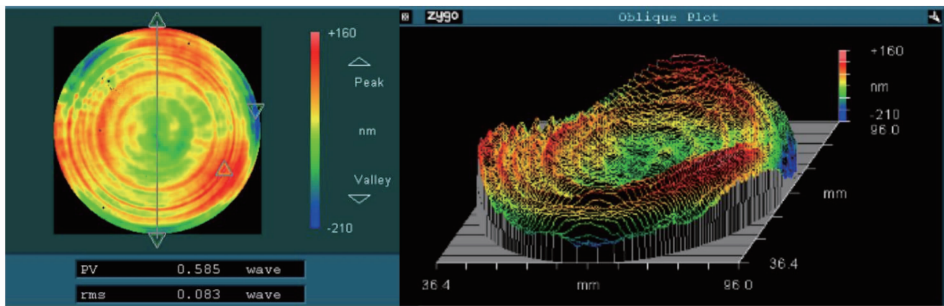


图 11 被测非球面面形误差

Fig. 11 Surface-shape error of tested aspherical surface

由图 11 可知,被测非球面的面形误差 $P_V = 0.585\lambda$, $R_{MS} = 0.083\lambda$ 。实验结果表明本文所提方案在实验上已经可以实现对大口径凸非球面透镜进行全口径检测,为了更进一步提高检测精度,将来可以进一步提高非球面反射补偿镜的加工精度,并采取一定的措施减小对准误差。

4 结 论

以往的零位补偿法,对大口径非球面透镜的检测需要设计较为复杂的补偿结构,系统装调困难,引入的误差较多。利用非球面反射镜法能够实现对大口径凸非球面透镜的面形进行检测,结构紧凑,易于装调;利用现代单点金刚石加工工艺可以快速得到高精度的反射面,缩短了工期,节省了时间。本文对该方案的基本原理进行了分析,设计并研制了一套大口径非球面检测系统,通过对口径为 $\phi 270$ mm 凸非球面透镜的测量与数据分析,获得了全口径的面形误差分布,验证了该方案的可行性。该方案为大口径非球面透镜检测提供了一种技术手段,适用于中等精度面形检测,可应用于非球面透镜的粗抛光阶段。下一步将研究如何进一步提高检测精度,拓展该检测方法的应用范围。

参 考 文 献

- Liu Xiaomei, Xiang Yang. Research and design of telecentric off-axis three-mirror system with real entrance pupil[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122002.
- 刘晓梅, 向阳. 具有实入瞳的远心离轴三反系统研究与设计[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122002.
- Zhang Xiaofei, Chen Lizi, Du Shaojun. Optical system design of off-axis three-mirror camera with resolution of 1 m[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(6): 062204.
- 张晓飞, 陈力子, 杜少军. 1 m 分辨率离轴三反相机光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(6): 062204.
- Wu Jianfen, Zhao Lei, Chen Yongyan, et al.. Flat-field concave holographic grating with broad spectral region and high resolution [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0409002.
- 武建芬, 赵雷, 陈永彦, 等. 宽谱高分辨率凹面全息光栅光谱仪设计[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0409002.
- Hu Dawei, Li Yanqiu, Liu Xiaolin. Optical design of hyper numerical-aperture Schwarzschild projection lithographic lens[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0122004.
- 胡大伟, 李艳秋, 刘晓林. 超高数值孔径 Schwarzschild 投影光刻物镜的光学设计[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0122004.
- Tian Wei, Wang Ping, Wang Rudong, et al.. Simulation and experimental research of 193 nm projection lithography lens supporting[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0816002.
- 田伟, 王平, 王汝冬, 等. 193 nm 光刻投影物镜单镜支撑仿真分析及实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0816002.
- Wang Xiaokun, Wang Lihui, Deng Weijie, et al.. Measurement of large aspheric mirrors by non-null testing [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 520-528.
- 王孝坤, 王丽辉, 邓伟杰, 等. 用非零位补偿法检测大口径非球面反射镜[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 520-528.
- Liu Dong, Yang Yongying, Tian Chao, et al.. Analysis and correction of retrace error for nonnull aspheric testing[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(3): 688-696.

- 刘 东, 杨甬英, 田 超, 等. 非球面非零位检测中的回程误差分析与校正[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 688-696.
- 8 Lance D Lund. Direct contact profilometry of large aspherics[C]. SPIE, 1986, 645: 75-79.
- 9 P Su, J O Chang, E P Robert, *et al.*. Swing-arm optical CMM for aspherics[C]. SPIE, 2009, 7426: 74260J.
- 10 Wang Xiaokun, Zheng Ligong, Zhang Xuejun. Testing convex aspheres by subaperture stitching interferometry[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7): 2022-2026.
王孝坤, 郑立功, 张学军. 子孔径拼接干涉检测凸非球面的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2022-2026.
- 11 Yatagai T, Kanou T. Aspherical surface testing with shearing interferometer using fringe scanning detection method[J]. Opt Eng, 1984, 23(4): 357-360.
- 12 Fan Qi, Yang Hongru, Li Gaoping, *et al.*. Method for phase recovery from a single undersampled wrapped phase map[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0310002.
范 琦, 杨鸿儒, 黎高平, 等. 欠采样包裹相位图的恢复方法[J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0310002.
- 13 J C Wyant, V P Bennett. Using computer generated holograms to test aspheric wavefronts[J]. Appl Opt, 1972, 11(12): 2833-2839.
- 14 J C Wyant, P K O Neill. Computer generated hologram: null lens of aspheric wavefronts[J]. Appl Opt, 1974, 13(12): 2762-2765.
- 15 Hua Liu, Zhenwu Lu, Fengyou Li, *et al.*. Design of a novel hologram for full measurement of large and deep convex aspheric surfaces[J]. Opt Express, 2007, 15(6): 3120-3126.
- 16 Chen Xu, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design and tolerance analysis of Offner compensator [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(1): 88-93.
陈 旭, 刘伟奇, 康玉思, 等. Offner 补偿器的结构设计与装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- 17 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Qiudong, *et al.*. Optimization design of partially compensating lens based on Zemax[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622002.
孟晓辰, 郝 群, 朱秋东, 等. 基于 Zemax 的部分补偿透镜的优化设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622002.
- 18 Yang Baoxi, Yuan Qiao, Zeng Aijun, *et al.*. Method of Asphere Surface Testing[P]. Chinese: 103134442A. [2013-06-07].
杨宝喜, 袁 乔, 曾爱军, 等. 非球面面形的检测方法[P]. 中国: 103134442A. [2013-06-07].
- 19 Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surface[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 5.
潘军骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 5.
- 20 Chen Qinfang, Li Yingcai, Ma Zhen, *et al.*. Alignment of off-axis conic aspheric mirrors in stigmatic null test[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222001.
陈钦芳, 李英才, 马 臻, 等. 离轴二次非球面反射镜无像差点法检测的误差分离技术[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0222001.

栏目编辑: 何卓铭