

doi:10.3788/gzxb20144303.0322004

## 双胶合透镜法检测大相对孔径凸非球面透镜

陈钦芳, 马臻, 赵蒙, 方虎, 王虎

(中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学技术研究室, 西安 710119)

**摘 要:**大相对孔径凸非球面的检测一直是非球面制造的难点. 本文结合两片大相对孔径凸椭球面透镜的检测, 提出采用同种材料胶合的检测方法, 并基于该检测方法加工得到了相对孔径分别为 2.7 和 2 的两块凸椭球面透镜. 经检测, 两块非球面透镜检测系统的最终波像差均方根值都优于  $1/30\lambda$  ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ), 在实际光学系统应用中, 系统的分辨率和弥散斑大小均满足系统的指标要求. 产品的使用情况验证了本文采用的同种材料胶合的检测方法在理论和实践上是可行的, 与传统的光学补偿法检测大非球面度、高陡度非球面相比, 本文采用的胶合透镜法极大地简化了检测系统结构, 降低了系统的装调难度, 是一种有效的高准确度凸非球面检测方法.

**关键词:**光学检测; 非球面; 补偿法检测; 胶合透镜; 大相对孔径; 椭球面

**中图分类号:** V19; O435.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2014)03-0322004-5

## Testing of Large Relative Aperture Convex Aspheric Lens with Doublets

CHEN Qin-fang, MA Zhen, ZHAO Meng, FANG Hu, WANG Hu

(The Space Optical Technology Research Department, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** It is difficult to fabricate and test convex aspherical surfaces, especially for steep convex aspherical surfaces. Based on the analysis of the conventional null test, a simple test system with cemented doublet for two steep convex ellipsoids was discussed. The wavefront of the both test system was less than  $1/30\lambda$  RMS (Root Mean Square,  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ). The convex aspheric lens had their successful application in practical optical system. The result showed that the null test for convex aspheric lens discussed in this paper is valid. Compared with the traditional test method, the cemented doublet offsets the spherical aberration generated by the sphere surface of the lens. So the proposed test method decreases the amount of the spherical aberration generated by the aspherical lens, with fewer elements, and reduces the system's alignment difficulty. It was demonstrated to be an effective, high-precision testing method.

**Key words:** Large relative aperture; Convex aspheric lens; Ellipsoid; Doublet; Null test

**OCIS Codes:** 220.4840; 220.1250; 220.2740; 220.4610

## 0 引言

小型凸非球面光学元件在录像镜头、显示投影、眼科医疗检查和光盘写入与读出光头等技术领域有着广泛的应用, 因此对凸非球面元件制造的研究也就愈显得重要<sup>[1-6]</sup>.

非球面制造包括加工和检测, 检测是用于指导加工的, 从某种意义上讲, 它比加工本身更重要<sup>[7-8]</sup>. 目前, 南京天光所和苏州大学在小型凸非球面透镜检测方面的研究比较多, 如有限距离的凸双曲面透镜补偿

检测、利用二次非球面透镜的自消球差条件检测非球面和传统的透镜组补偿法检测非球面透镜等<sup>[9-11]</sup>. 本文针对某光学系统中两块大相对孔径凸椭球面透镜, 提出采用同种材料玻璃胶合检测的方法, 抵消凸非球面透镜的球面一面对检测系统的球差贡献量, 大大简化了检测系统的结构, 降低了检测系统的制造准确度要求. 利用该方法加工了相对孔径分别为 2.7 和 2 的两块凸椭球面透镜, 得到了较为理想的结果. 实践表明胶合透镜法检测凸非球面透镜提高了非球面的加工效率, 并且保证非球面的加工准确度.

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(No. 61107008)资助

**第一作者:** 陈钦芳(1982-), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为非球面的加工和检测. Email: cqf2009@opt.ac.cn

**收稿日期:** 2013-04-25; **录用日期:** 2013-08-26

<http://www.photon.ac.cn>

# 1 凸非球面透镜的检测

凸非球面透镜 I 和 II 的材料均为融石英玻璃,透镜 I 的非球面定点曲率半径  $R=29.98\text{ mm}$ ,二次非球面系数  $k=-0.379$ .图 1 是该非球面的非球面度和非球面陡度,透镜 I 非球面的最大非球面度  $88.9\ \mu\text{m}$ ,透镜 II 的非球面曲率半径为  $R=40.30\text{ mm}$ ,二次非球面系数  $k=-0.754$ ,最大非球面度为  $60.4\ \mu\text{m}$ ,透镜 II 和透镜 I 的非球面同是椭球面.因此下面将主要介绍非球面透镜 I 的检测,设计要求非球面的面形准确度为  $1/10\lambda$ 均方根值(Root Mean Square RMS) ( $\lambda=632.8\text{ nm}$ ).

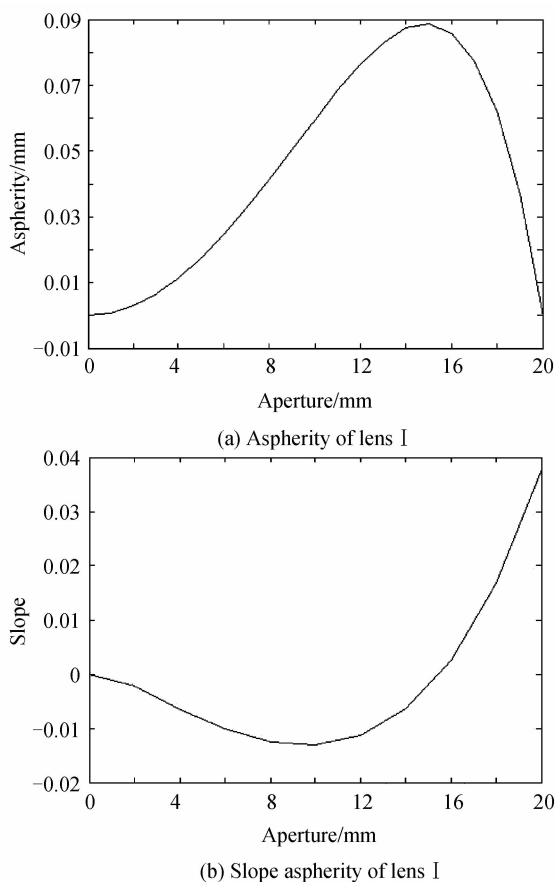


图 1 非球面透镜 I 的非球面度和陡度  
Fig. 1 Aspberity and slope of the aspheric lens I

## 1.1 凸非球面透镜检测方案

非球面补偿法检测分为光学补偿和法线像差补偿.光学补偿的特点是检测光线沿不同角度入射到被检非球面表面,如无像差点法;法线像差补偿即所有检测光线沿被检非球面法线入射<sup>[12-13]</sup>.法线像差补偿法通常比光学补偿准确度高,法线像差补偿法检测凸非球面透镜,需要一束相对口径相同的会聚光束,故相应的补偿镜口径应大于被检镜或与之相当,因此法线像差补偿法适合中小口径的凸非球面.本文中的非球面透镜虽然口径小,但是它的相对口径大,如果采用法线像差补偿法检测,则相应的补偿器结构就会很复杂,这样检测系统的准确度就会受限,因此本文采用光学补

偿法检测这两块凸椭圆透镜.

光学补偿法光路设计如果将凸椭圆面对入射发散光束,光线在该面上的入射角太大,它所产生的球差量就很大,检测系统对该面的加工和装调公差很灵敏,检测的难度就很高.如图 2 所示的传统光学补偿法检测光路,采用了 4 片补偿镜和一片平面自准镜,但是检测系统的结构也很复杂,这主要是因为透镜 I 是双凸透镜.

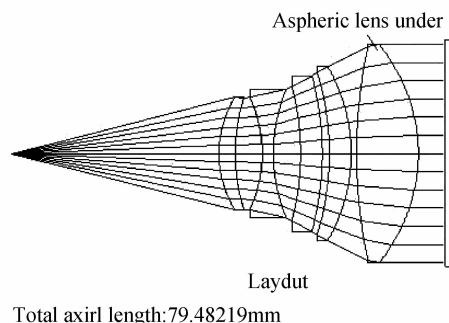


图 2 传统补偿法检测非球面透镜 I 的光路示意图  
Fig. 2 Traditional type of null test for aspheric lens I

由设计软件分析可知,在图 2 的检测光路中,补偿系统补偿的球差主要是由透镜 I 的球面产生的,虽然球面不是加工对象,但是非球面检测光路的设计又必须考虑它的存在.为此我们采用相同材料玻璃胶合的方法,使该球面暂时消失,而胶合镜的另一面为凹面,产生正球差,可补偿部分非球面产生的负球差,由于被加工非球面的非球面度太大,仍需再加入一块补偿透镜来平衡球差,因此凸非球面透镜 I 的最终检测光路如图 3.检测光路只需两片透镜和一片自准平面镜,检测系统的设计残余波像差为  $0.0010\lambda$ ,如图 4.限于篇

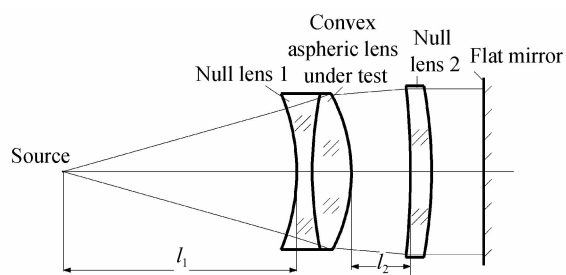
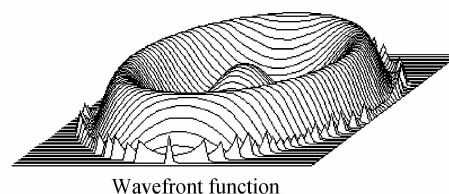


图 3 凸非球面透镜 I 检测光路示意图  
Fig. 3 Null test with doublet for aspheric lens I



0.6329  $\mu\text{m}$  at 0.0100mm  
Pbak to valley=0.0031 waves RMS=0.0010 waves  
exit pupil cormeter:4.7665E+001 milldmenters

图 4 非球面透镜 I 检测系统设计残余波像差  
Fig. 4 Residual wavefront of the null test with doublet

表 1 凸透镜 I 检测系统参量 (mm)

Table 1 Prescription of null lens (units in mm)

Surface	Radius	Thickness	Glass	Diameter	Conic
OBJ	Infinity	80.620		0	0
1	-53.62	3	F_SILICA	40	0
2	92.86	0		40	0
3	92.86	11.37	F_SILICA	40	0
STO	-29.96	3.25		40	-0.377
5	-127.06	6	F_SILICA	44	0
6	-82.41	5		44	
7	Infinity	-5	MIRROR	60	0
8	-82.41	-6	F_SILICA	44	0
9	-127.06	-3.25		44	0
10	-29.96	-11.37	F_SILICA	40	-0.377
11	92.86	0		40	0
12	92.86	-3	F_SILICA	40	0
13	-53.62	-80.620		40	0
IMA	Infinity	0		0	0

幅本文只列出了透镜 I 的检测系统的参量,透镜 II 的检测方法与透镜 I 一样,而且透镜 II 只只用了一块胶合透镜和一块补偿镜,结构更简单.见表 1.透镜 I 采用双胶合透镜法检测大大减小了补偿系统的球差补偿量,避免出现球差过度集中在某个面上的情况.与图 2 的检测系统比较,采用同种材料玻璃透镜胶合的方法大大简化了检测系统的结构,在满足非球面透镜的设计要求前提下,对补偿系统的加工和装配误差要求也可以放宽.

## 1.2 检测系统公差分析

补偿法检测中,补偿镜的曲率半径、厚度、间隔和折射率误差直接影响非球面的顶点曲率半径和二次非球面系数准确性<sup>[12-13]</sup>.表 2 是检测光路的公差灵敏度分析.检测系统中补偿镜的安装偏心要求小于 0.01 mm,平面镜的端跳小于 0.01 mm,现有的透镜定心工艺完全可以达到该检测系统对偏心要求.由于补偿系统的偏心引入的像差主要是彗差,在干涉图分析

表 2 检测系统的公差灵敏度分析

Table 2 Tolerances for null lens

Quantity	Tolerance	Radius error $\Delta R/\text{mm}$	Conic constant error $\Delta k$	Surface error ( $\lambda$ RMS)
Airspace $l_1/\text{mm}$	0.04	1.65E-02	-1.50E-05	2.49E-05
Null lens 1:				
Radius 1 (fringes)	2	3.90E-03	-9.00E-06	8.58E-06
Thickness/mm	0.03	0.024 4	-3.90E-05	4.54E-05
Radius 2 (fringes)	2	-4.00E-03	-0.000 458	1.633 E-03
Irregularity 1 (waves)	0.02 (RMS)			1.83E-02
Aspheric lens under test:				
Radius 1 (fringes)	2	0.004	0.000 458	3.95E-04
Thickness/mm	0.02	0.024 4	-3.90E-05	4.54E-05
Irregularity 1 (waves)	0.02 (RMS)			1.83E-02
Airspace $l_2/\text{mm}$	0.03	5.00E-04	-4.00E-06	9.22E-06
Null lens 2:				
Radius 1 (fringes)	2	0.003 7	-9.50E-05	4.20E-06
Thickness/mm	0.03	2.70E-03	-5.00E-05	1.77E-05
Radius 2 (fringes)	2	-3.90E-03	8.10E-05	1.79E-05
Irregularity 1 (waves)	0.02 (RMS)			1.83E-02
Irregularity 2 (waves)	0.02 (RMS)			1.83E-02
Index	2.0E-04	9.10E-03	-0.000 166	9.47E-06
Inhomogeneity	2.5E-07 (RMS)			1.60E-02
Flat mirror:				
Curvature (fringes)	3	-0.012 7	0.000 381	9.56E-05
Irregularity (waves)	0.015 (RMS)			3.00E-02
Residual Wavefront (waves)	0.001 (RMS)			0.001
RSS		4.23E-02	7.83E-04	5.00E-02

软件 Metropro 中,可以将该像差剔除<sup>[11]</sup>.在光学设计软件中,对检测系统中各补偿元件引入相应的偏心误差,剔除彗差后,检测系统的波像差接近设计的结果,因此上述的偏心要求是合理.由表 2 的分析结果可知

该非球面透镜检测系统的对非球面的顶点曲率半径和二次非球面系数的控制准确度分别是  $\Delta R=0.042 \text{ mm}$ ,  $\Delta k=0.000 8$ ,对非球面镜面面形误差影响为  $0.025\lambda \text{ RMS}$ .从表 2 中可以看出对镜面面形准确度影响最大

的因素主要是补偿镜面形误差和透镜折射率均匀性误差,它们都属于检测系统的偶然误差,可以通过在不同角度多次测量求平均的方法减小检测系统的偶然误差对非球面检测结果的影响<sup>[14-15]</sup>.

## 2 加工注意事项

非球面透镜的检测方案确定后,加工的工艺路线也就定了.首先是透镜的球面和非球面最佳比较球面的抛光成型,然后与补偿镜1胶合,要求胶的机械强度高,保证在加工过程中加工镜和补偿镜不能错位,且易于拆胶.最后完成非球面的修磨.凸非球面的最大修磨量在0.7带,加工中大小磨具搭配使用,尽量消除切带.

在非球面修磨过程中要注意像散现象,像散的产生主要有两个方面:1)被加工件在机床上装夹不妥产生像散,而且非球面修磨时间愈长,愈容易产生像散,它是属于加工误差,可采用整盘修抛方法将其消除;2)补偿镜变形引入的像散,由于补偿镜相对比较薄,如果压圈上的太紧容易导致镜面变形,该象散不属于加工误差,在系统的装调中应避免这种现象的产生.

## 3 结果分析

图5是非球面透镜检测系统的实物图.图6是检测结果,非球面透镜I和II的最终检测结果都达到 $\sim 1/30\lambda$  RMS.将非球面透镜应用于实际的光学系统中,图7是最终系统的弥散斑测试结果.



图5 非球面透镜检测系统实物图

Fig. 5 Picture of the null test systems for aspheric lens

图7是全系统在0、0.5和0.8视场的弥散斑图,入射光源为白光.0视场的弥散斑直径小于 $4\mu\text{m}$ ,0.8视场的弥散斑小于 $12\mu\text{m}$ ,满足设计要求,现已交付客户使用.由于上述两块凸非球面镜的非球面度和陡度都很大,在加工中都是靠手工开非球面,所以表面有很多小碎带,不连续,高频误差大.从图6的干涉条纹可以看出条纹不光滑,而且手工开非球面也不易控制非球面的偏心.如果引入数控加工,非球面的面形质量会更好.本次加工的结果虽然没有达到我们预期的目标,但是通过该实验可以验证本文的检测方法是正确、可行的.因此,将来对这类大相对孔径的小型凸非球面透镜的制造,引入数控加工技术.

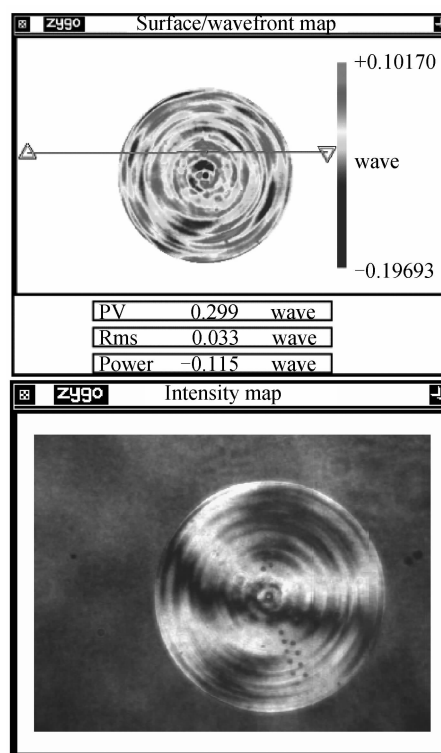


图6 非球面透镜I的检测结果

Fig. 6 Result of the null test for aspheric lens I

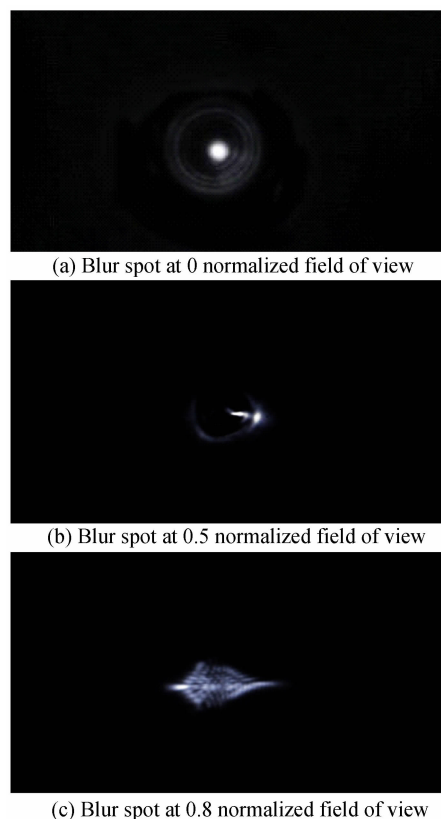


图7 光学系统在不同视场下的弥散斑测试结果

Fig. 7 Test of the spot diagram over the FOV

## 4 结论

针对小型凸非球面透镜的检测,采用了同种材料

透镜胶合的方法,抵消透镜的球面一面对非球面检测系统的球差贡献量,简化了检测系统结构,降低了检测系统的制造公差,对提高非球面透镜的加工效率、降低制造成本都有重要的意义。

非球面透镜加工中采用胶合透镜法得到的最终产品成功应用于实际的光学系统中,因此该检测方法具有实际的工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 张宝安. 小型非球面加工和检测[D]. 苏州: 苏州大学, 2002: 1-3.
- [2] LI Shi-chun, HUA Deng-xin, SONG Yue-hui, *et al.* Fiber coupling system of space optical filed based on aspheric lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(9): 1053-1058.  
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 基于非球面透镜的空间光场光纤耦合系统研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(9): 1053-1058.
- [3] LÜ Ning, QIAO Yu-jing, YU Xiao-yang. A new metrology method of steep aspheric surface based on part compensating and sparse CCD [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **45**(5): 1174-1178.  
吕宁, 乔玉晶, 于晓洋. 一种基于部分补偿与稀疏阵列的深度非球面测量新方法[J]. 光子学报, 2008, **45**(5): 1174-1178.
- [4] WANG Xiao-kun. Measure of aspherical surfaces by laser tracker [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 379-383.  
王孝坤. 激光跟踪仪检测非球面面形的方法[J]. 光子学报, 2012, **41**(4): 379-383.
- [5] VEGA F, MILLÁN M S, WELLS B. Spherical lens versus aspheric artificial cornea for intraocular lens testing[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(10): 1539-1541.
- [6] LO Y H, LEONHARDT R. Aspheric lenses for terahertz imaging[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20): 15991-15998.
- [7] LI Jun-sheng, FAN Qi, MO Wei-dong, *et al.* A method for getting the best fitting spheric surface parameters for aspheric surface point diffraction measurement [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(12): 1865-1869.  
李均盛, 范琦, 莫卫东, 等. 用于非球面点衍射检测的最佳匹配球参量获取方法研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(12): 1865-1869.
- [8] 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.
- [9] PAN Jun-he, HU Ming-yong, SHEN Shi-dong, *et al.* The method of convex aspheric surface using lens for compensation tests with the beam incidence at a distance [J]. *Optical Technique*, 2010, **36**(3): 420-423.  
潘俊鹤, 胡明勇, 沈世东, 等. 有限距离的凸非球面的透镜补偿检测方法[J]. 光学技术, 2010, **36**(3): 420-423.
- [10] TAO Chun, PAN Jun-hua, HU Ming-yong. A new method of convex aspheric surface compensation tests [J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(1): 123-126.  
陶春, 潘君骅, 胡明勇. 一种凸非球面透镜补偿检测的新方法[J]. 光学技术, 2009, **35**(1): 123-126.
- [11] CHO M K, LIANG M, NEILL D R. Performance prediction of the LSST secondary mirror [C]. SPIE, 2009, **7424**: 740407-1~740407-11.
- [12] 普里亚耶夫. 光学非球面检测[M], 杨力译. 北京: 科学出版社, 1982.
- [13] PALUSINSKI I A. Advacements in null corrector design and certification[D]. University of Arizona, 2003: 167-170.
- [14] BURGE J H. Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes [D]. University of Arizona, 1993: 204-210.
- [15] ZHANG Zhong-yu, YU Jing-chi. Study of testing aspheric surface with null corrector [J]. *Optics and Precision engineering*, 1999, **7**(1): 125-129.  
张忠玉, 余景池. 用补偿镜测量非球面的研究[J]. 光学精密工程, 1999, **7**(1): 125-129.