

大非球面度快焦比中大口径高次非球面检测

何丽^{1,2} 武中华^{1,2,3} 康燕^{1,2} 苏志德^{1,2}

¹中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 近年来,大口径、大非球面度、快焦比、高次非球面光学元件在天文光学、空间光学和地基空间目标探测与识别等领域得到了越来越广泛的应用。目前对此类光学元件的检测一般采用零位补偿法或消回程误差的非零位检测法。其中消回程误差的非零位补偿法处理过程复杂,缺乏检测直观性,且测量精度无法保证,故在针对一些面形精度要求非常高的镜面时并不适用。以口径为 1020 mm、焦比为 1/0.5、非球面度为 1.8 mm、高次项达 6 次的凹高次非球面反射镜检测为研究基础,提出了分阶段设计零位补偿检验光路的新思路,以满足此类镜面在粗抛、精抛、干涉仪检测等不同研制与检验阶段的需求。最终检测面形精度达到了 $\lambda/50$ 。

关键词 光学设计; 大口径非球面检测; 非球面研制; 零位补偿器设计; 组合检验

中图分类号 TN247; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.122201

High Order Aspheric Testing with Large Asphericity, Fast Focal Ratio and Large Diameter

He Li^{1,2} Wu Zhonghua^{1,2,3} Kang Yan^{1,2} Su Zhide^{1,2}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

²Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In recent years, the optical element with large diameter, large asphericity, fast focal ratio, high-order aspheric has been used in astronomical optics, space optics and space target detection and recognition with ground-based systems and other fields more and more widely. At present we commonly use null lens testing system or partial compensation system with eliminating return error process to test such optical elements. Among them, partial compensation system with eliminating return error process is complex and lack of testing intuitiveness, and the measurement accuracy cannot be guaranteed. Therefore, in the testing of some mirror with very high surface error precision requirement, this method is not applicable. Base on the test of concave high-order aspherical mirror with diameter of 1020 mm, coke ratio of 1/0.5, aspherical degree of 1.8 mm, high-order term of 6, an idea to design zero compensation testing light path by stages is proposed, which can satisfy the requirement of different stages of developing and testing such as rough polishing, fine polishing, interferometer testing. Final, its surface accuracy achieves $\lambda/50$.

Key words optical design; large diameter aspheric testing; aspherical processing; null lens system design; combination testing

OCIS codes 220.1000; 220.1250; 220.4830; 220.4840

收稿日期: 2016-07-15; **收到修改稿日期:** 2016-08-15; **网络出版日期:** 2016-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(11203049)

作者简介: 何丽(1981—),女,硕士,高级工程师,主要从事大口径非球面光学检测与光学系统设计方面的研究。

E-mail: lhe@niaot.ac.cn

1 引言

目前的非球面检测方法主要有接触式轮廓仪、无像差点法、零位补偿法以及使用计算全息图等,这些方法对常规的非球面检验及研制有非常好的指导作用^[1-2]。

随着科技的发展,受天文观测、空间光学、军事应用等需求的推动,高精度、大口径、大非球面度、快焦比的高次非球面光学元件设计得到迅速发展。随之而来的就是对此类高难度非球面镜面的检测,尽管目前常见的检测方法能够满足绝大部分非球面镜的检测需求,但若想以单一的检测方法应对大口径、大非球面度、快焦比的高次非球面镜显然并不现实^[3-5]。另外,在面对此类高难度、高精度镜面时,许多检测方法都存在弊端。

根据检测方法的不同,可以将非球面的研制过程分为4个阶段:铣磨成型阶段、细磨与粗抛光阶段、精抛光阶段及干涉仪定量检测阶段。在细磨与粗抛光阶段,大部分非球面可使用轮廓仪、三坐标测量机等仪器进行测量,以达到快速收敛面形的目的;但在面对大口径光学元件时,受仪器自身测量口径限制及镜面自重太大、难以搬动移位等原因的影响,轮廓仪等测量仪器的应用受到限制。

在精抛光阶段,可使用消回程误差的非零位检测法对非球面进行检测,但消除回程误差的过程本身非常复杂,期间不可避免地会引入新的误差,测量精度难以保证与验证,且检测过程缺乏直观性。因此,非零位检测法在应对高难度、面形精度要求较高的非球面时并不完全适用。

传统付科法检测所需的设备简单,检测过程非常直观,定性分析检测精度高且易于准确判断局部误差,相较于其他检测方法仍然有较大优势。但受到检测系统对被检面形弥散斑大小的限制,传统的零位补偿系统配合付科检测法在应对大口径、大非球面度、快焦比的高难度高次非球面时难以直接应用。

本文以口径为1020 mm、焦比为1/0.5、非球面度 $\delta=1.8$ mm、高次项达到6次项的凹高次非球面镜的检测为研究基础,提出了一套检验光路设计的新方法,该方法将检测过程分为粗抛阶段、精抛阶段及干涉仪定量检测阶段,根据不同阶段不同的检测及研制需求,设计不同的检测系统,与付科法或干涉仪配合使用,以应对此类高难度镜面的检验需要。

2 检测系统设计方案

2.1 待检面面形特点

研究对象的非球面方程为^[6]

$$x = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (K+1)c^2y^2}} + Ay^4 + By^6, \quad (1)$$

式中 $c = \frac{1}{R_0}$, $K = -0.97$, $A = -4.4915 \times 10^{-11}$, $B = -7.98 \times 10^{-18}$ 。

根据非球面方程得到该非球面的非球面度及非球面梯度曲线分别如图1和图2所示。图1为非球面与最佳比较球面偏离量的曲线,即非球面沿半径方向所对应的非球面度,可以看到,在非球面的中心与边缘处非球面度最大,接近1.8 mm;在371~510 mm范围内,非球面度变化率非常大,接近0.013。从图2可见,非球面梯度变化量非常大,说明非球面的研制及检测难度将非常大。

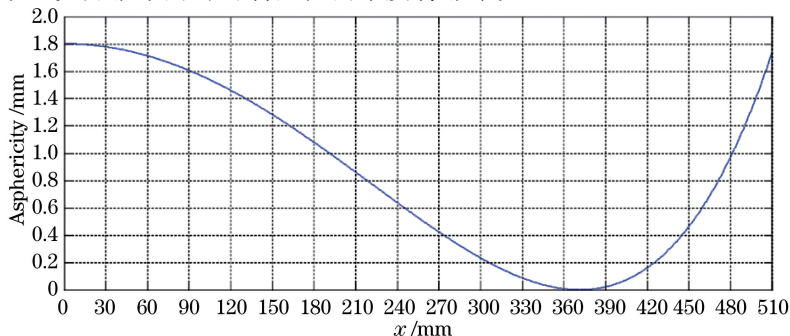


图1 非球面度曲线

Fig. 1 Asphericity curve

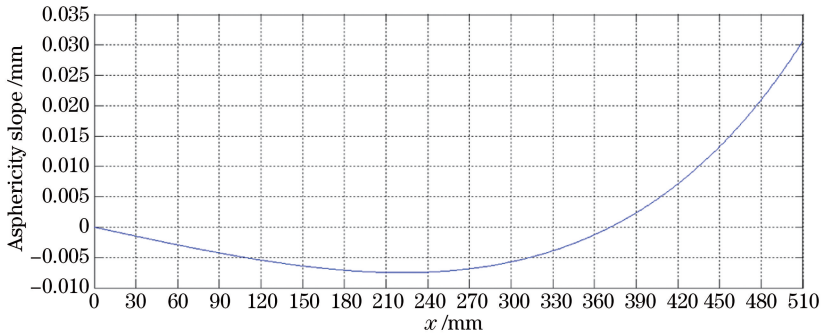


图 2 非球面梯度曲线

Fig. 2 Asphericity slope curve

2.2 检测方案设计

一般情况下,非球面经过细磨、粗抛光后,面形收敛程度良好,可直接用零位补偿系统进行检验。但是,本文中的非球面,其非球面度太大($\delta=1.8\text{ mm}$)、非球面度梯度变化量大、焦比大(接近 $1/0.5$),因此在经过铣磨成型、细磨、粗抛光甚至是在精抛光前期面形误差仍较大,可达到微米量级甚至更大,从而造成检测光线发散或收敛严重。非球面的光线偏离情况如图 3 所示,可以看到,第一种情况是光线发散太大,未能全部收敛至零位补偿系统;第二种情况是光线收敛太大,超出了补偿系统所能检测的弥散斑大小。以上两种情况在高难度非球面检测过程中极易出现,故单一的零位补偿系统是不足以解决检测问题的。

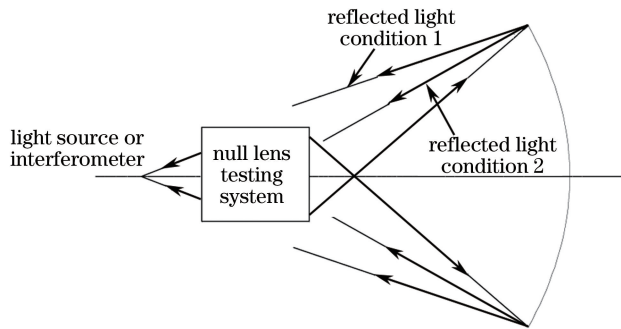


图 3 非球面光线偏离情况示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the light deviation from the aspheric surface

针对这一难题,提出了一种分为两个误差阶段的补偿光路设计的新方法。即根据被检非球面在不同检测、研制阶段的面形特点及检测需求,设计不同误差阶段的部分零位及零位补偿检验系统来完成误差两级收敛检验。设计思路如图 4 所示。

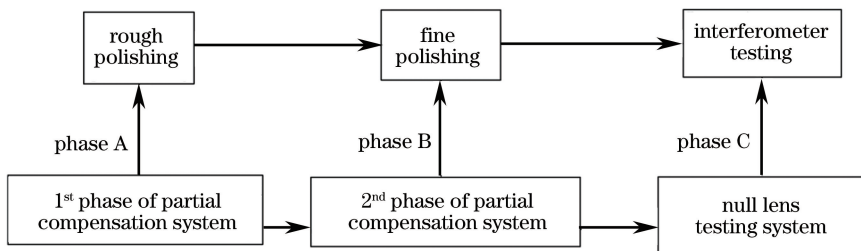


图 4 检测系统设计思路

Fig. 4 Design ideas of the testing system

详细的检测系统设计思路如下:

A 阶段:在镜面粗抛阶段,使用第一阶段部分零位补偿光路进行大误差向小误差的收敛检验。

B 阶段:在镜面精抛光阶段,使用第二阶段部分零位补偿光路进行小误差向干涉仪测量的收敛检验。

C 阶段:最终实现高精度的零位补偿检验目标。

3 检测系统设计结果

3.1 粗抛光阶段检测系统结构的确定(A 阶段)

依据上文分析,在镜面研制的粗抛阶段,高精度的零位补偿系统无法直接应用,故根据本文非球面形接近椭球面这一特性,设计出近似椭球面无像差点检测的系统结构,配合付科法进行检测,该系统本身没有焦点,具有较大的法线像差,并与非球面的法线像差方向相反,可以对非球面的法线像差进行部分补偿。检验光路如图 5(a)所示。

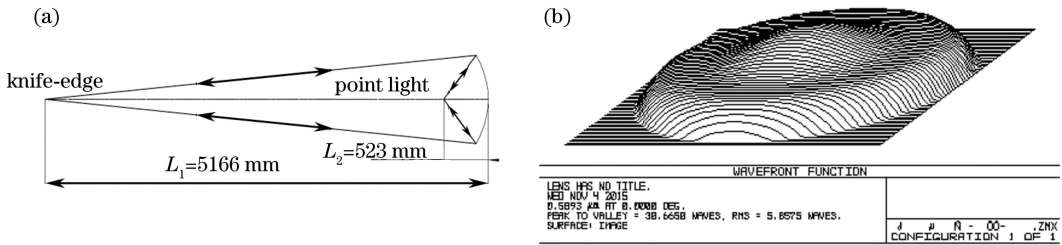


图 5 A 阶段的部分零位补偿检验。(a)光路图;(b)理论残留像差

Fig. 5 Partial zero compensation testing of phase A. (a) Optical path; (b) theoretical residual aberration

设计理论残差均方根(RMS)为 2.93λ 左右,如图 5(b)所示。虽然理论残留像差相对较大,但在粗抛光阶段,被检面自身存在的像差要远远大于这个值。检测系统参数测量误差分析如表 1 所示。

表 1 A 阶段系统的参数测量误差分析

Table 1 Parameters measurement error analysis of the system in phase A

System parameter	Value /mm	Tolerance /mm	Change in R_0 /mm	Change in conic
L_1	5166	± 0.5	± 0.0004	0
L_2	523	± 0.02	± 0.05	0

A 阶段部分零位补偿系统的优势在于:1) 不同于常规的零位补偿检验光路对被检面弥散斑大小的限制,这种检测方法对被检面弥散斑大小没有过多限制,前期使用可以达到快速修正面形的目的;2) 系统各个参数的测量精度对待检非球面光学参数的影响非常小,可以准确地控制光学参数。

3.2 精抛光阶段检测系统结构的确定(B 阶段)

经过 A 阶段部分零位补偿检验光路的应用,在精抛光前期,被检镜的面形误差已经完成了大误差向小误差的收敛,检验光路也随之升级。

B 阶段检验光路是在 A 阶段的基础上,加入一块部分零位补偿镜,进一步抵消被检面的法线像差,但因单块透镜不能完全补偿非球面的像差,故在设计时本着补偿镜易于加工装配的理念,将透镜初始结构设定为平凸镜,材料为 K9 玻璃。同样配合付科法进行检测,最终的检验光路如图 6(a)所示。

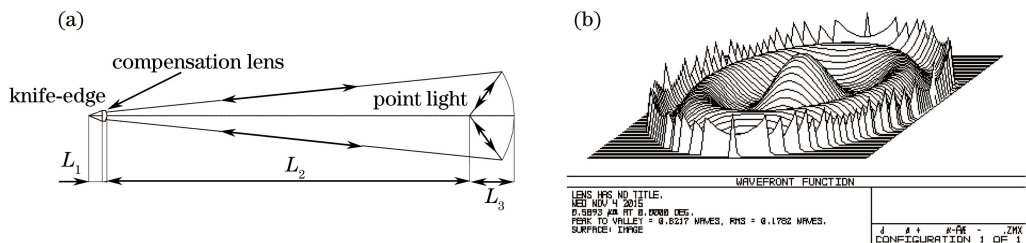


图 6 B 阶段的部分零位补偿检验。(a)光路图;(b)理论残留像差

Fig. 6 Partial zero compensation testing of phase B. (a) Optical path; (b) theoretical residual aberration

随着部分补偿透镜的加入,系统理论残留像差较 A 阶段的检验光路大大缩小,设计残留像差 RMS 下降为 0.09λ 左右,如图 6(b)所示。检测系统参数测量误差分析见表 2。

表 2 B 阶段系统的参数测量误差分析

Table 2 Parameters measurement error analysis of the system in phase B

System parameter	Value /mm	Tolerance /mm	Change in R_0 /mm	Change in conic
R_1	Infinity	0	0	0
R_2	-79.4	± 0.004	± 0.0004	$\pm 9 \times 10^{-6}$
Thickness	35.1	± 0.01	± 0.00089	$\pm 1.3330^{-5}$
L_1	81.01	± 0.01	± 0.0013	$\pm 2510^{-5}$
L_2	4728.27	± 0.5	± 0.0087	$\pm 3.8330^{-5}$
L_3	524.29	± 0.02	± 0.033	$\pm 2.4330^{-5}$

精抛阶段部分零位补偿检验光路的优点为:只使用一块结构简单的部分零位补偿透镜,就可以将设计理论残留像差控制在 $\lambda/10$ 左右,并完成了小误差向干涉仪检测收敛的需求。

3.3 干涉仪检验阶段检测系统结构的确定(C 阶段)

在干涉仪检验阶段,设计了“改正型无像差点补偿系统”及“三片式 Offner 补偿器”两套检测系统,以实现对比检验。

首先根据被检镜参数及三级像差理论确定补偿器的初始结构,即通过主动引入一定量的轴向球差来补偿光线在非球面法线方向的偏离量^[7-10]。

被检高次非球面面形误差是以两倍关系引入光路的,故得出:

$$2 \times (S_1 + S_2) + S = 0, \quad (2)$$

式中 S_1 为补偿镜轴向球差系数, S_2 为场镜轴向球差系数, S 为被检高次非球面球差系数。

设补偿镜的焦距、垂轴放大率、折射率及透镜形状因子分别为 f'_1, m_1, n_1, B_1 ; 场镜的焦距、垂轴放大率、折射率及透镜形状因子分别为 f'_2, m_2, n_2, B_2 。高次非球面近轴曲率半径为 R, K 为二次项系数,则有:

$$S = -\frac{y^4}{32 \times R^3} \times K, \quad (3)$$

$$m = m_1 \times m_2, \quad (4)$$

$$P_i = \left(\frac{n_i}{n_i - 1}\right)^2 + \frac{n_i + 2}{n_i (n_i - 1)^2} \times \left[B_i + \frac{2(n_i^2 - 1)(m_i + 1)}{(n_i + 2)(m_i - 1)} \right]^2 - \frac{n_i (m_i + 1)^2}{(n_i + 2)(m_i - 1)^2}, i = 1, 2. \quad (5)$$

$$S_1 = f'_1 P_1 (m_2 - m)^4 / 4, \quad (6)$$

$$S_2 = f'_2 P_2 (1 - m_2)^4 / 4, \quad (7)$$

根据下式可得出补偿镜及场镜的曲率半径:

$$\begin{cases} r_{i,1} = \frac{2(n_i - 1)f'_i}{B_i + 1} \\ r_{i,2} = \frac{2(n_i - 1)f'_i}{B_i - 1} \end{cases}, i = 1, 2. \quad (8)$$

3.3.1 改正型无像差点补偿系统

改正型无像差点补偿系统是在精抛阶段部分零位补偿器的基础上,再加入一片补偿镜,完全补偿被检镜高次项带来的像差,使其“成为”椭球面,则可按照“无像差点”法进行检验,称之为改正型无像差点检验光路,如图 7(a)所示。

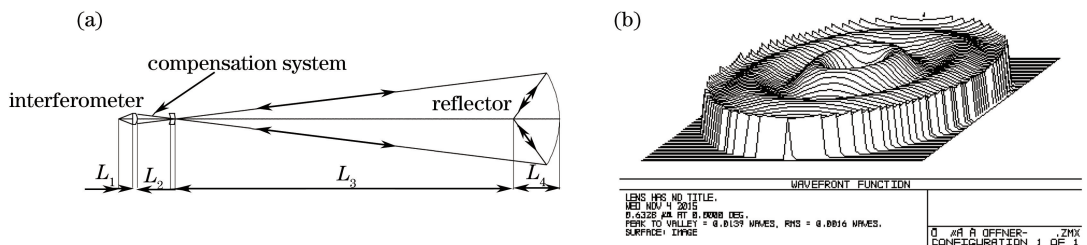


图 7 改正型无像差点检验。(a)光路图;(b)理论残留像差

Fig. 7 Correction type no aberration point testing. (a) Optical path; (b) theoretical residual aberration

根据(2)~(8)式,将初始结构代入 ZEMAX 软件进行优化,补偿器材料为 K9 玻璃,最终理论残留像差 RMS 为 0.0008λ ,检测系统像质非常好,如图 7(b)所示。误差分析见表 3。

表 3 改正型无像差点检验系统的参数测量误差分析

Table 3 Parameters measurement error analysis of the correction type no aberration point testing system

System parameter	Value /mm	Tolerance /mm	Change in R_0 /mm	Change in conic
R_1	Infinity	0	0	0
R_2	-35.538	± 0.002	± 0.0005	$\pm 4 \times 10^{-6}$
R_3	-85.283	± 0.004	± 0.00012	0
R_4	-51.505	± 0.003	$\pm 7 \times 10^{-6}$	0
Thickness 1	28.11	± 0.01	± 0.00042	$\pm 1 \times 10^{-6}$
Thickness 2	17.91	± 0.01	± 0.000081	$\pm 4 \times 10^{-6}$
L_1	80	± 0.01	± 0.00063	$\pm 2 \times 10^{-6}$
L_2	150	± 0.01	± 0.000053	$\pm 3 \times 10^{-6}$
L_3	5026.15	± 0.5	± 0.01	$\pm 3.7 \times 10^{-5}$
L_4	525.23	± 0.02	± 0.033	$\pm 2.5 \times 10^{-5}$

改正型无像差点检验光路的优点在于:1) 系统各个参数的测量精度误差所引起的被检面光学参数的变化量非常小,可以非常精确地控制光学参数;2) 测量时光线在被检非球面上发生了两次反射,故其对被检面面形误差检测精度提高了一倍。

3.3.2 三片式 Offner 补偿器

目标非球面检测难度非常大,常规的双透镜组不足以补偿其像差,在此情况下,将传统的 Offner 补偿法进行改进,增加一片透镜帮助校正像差,如图 8(a)所示。

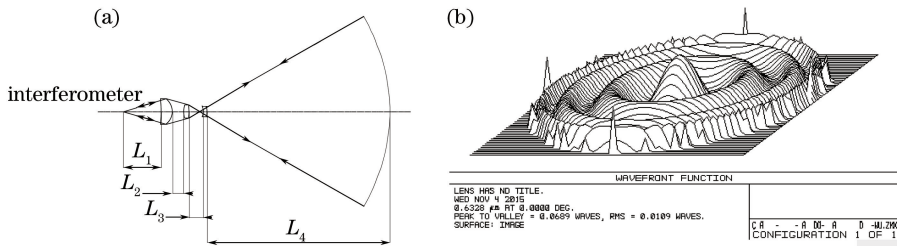


图 8 三片式 Offner 系统。(a)光路图;(b)理论残留像差

Fig. 8 Three-piece Offner system. (a) Optical path; (b) theoretical residual aberration

以(2)~(8)式为设计依据,补偿器材料为 K9 玻璃,代入 ZEMAX 软件进行优化,最终系统的设计理论残留波像差达到了 0.011λ (RMS)。满足了测试的精度要求。误差分析见表 4。

表 4 三片式 Offner 检测系统的参数测量误差分析

Table 4 Parameters measurement error analysis of three-piece Offner testing system

System parameter	Value/mm	Tolerance/mm	Change in R_0 /mm	Change in conic
R_1	Infinity	0	0	0
R_2	-103.653	± 0.005	± 0.007	$\pm 3.4 \times 10^{-5}$
Thickness 1	61.888	± 0.01	± 0.003	$\pm 9 \times 10^{-6}$
R_3	127.372	± 0.006	± 0.005	$\pm 5.4 \times 10^{-5}$
R_4	-460.488	± 0.023	± 0.0012	$\pm 1.4 \times 10^{-5}$
Thickness 2	29.949	± 0.01	± 0.006	$\pm 5 \times 10^{-6}$
R_5	-73.483	± 0.004	± 0.001	$\pm 2.4 \times 10^{-5}$
R_6	-85.89	± 0.004	± 0.002	$\pm 3.3 \times 10^{-5}$
Thickness 3	22.007	± 0.01	± 0.0032	$\pm 1.4 \times 10^{-4}$
L_1	253.514	± 0.02	± 0.008	$\pm 2.6 \times 10^{-5}$
L_2	66.157	± 0.01	± 0.0003	$\pm 6 \times 10^{-5}$
L_3	96.225	± 0.01	± 0.013	$\pm 1.5 \times 10^{-5}$
L_4	975.826	± 0.02	± 0.02	$\pm 7 \times 10^{-6}$

三片式 Offner 检测系统的优点在于:1) 可以精确控制被检镜光学参数;2) 光路过程装调简单;3) 对被检镜的面形误差测量精度较高,可以与第一种改正型无像差点检验光路形成对比测量。

4 高精度零位补偿器装调及误差分析

4.1 改正型无像差点检验

两片式补偿器结构简单,对装调的要求相对宽松,经过计算补偿器的公差要求如表 5 所示。

表 5 改正型无像差点检验系统的装配公差分配

Table 5 Allocation of assembly tolerance of correction type no aberration point testing system

Lens No.	Eccentricity	Tilt / (")	Interval /mm
Len 1	Reference plane	Reference plane	± 0.2
Len 2	0.02	15	

装配时使用中心偏差测量仪控制补偿器的倾斜与偏心,精度可以达到倾斜 $\pm 2''$ 、偏心 $\pm 2 \mu\text{m}$ 。使用镜面定位仪控制镜间隔,精度可以达到 $\pm 1 \mu\text{m}$,最终结果如表 6 所示。

表 6 两片式补偿器镜片之间倾斜、偏心与间隔测量结果

Table 6 Tilt, eccentric and interval measurement results between two-piece compensator lens

Lens No.	Eccentricity	Tilt / (")	Interval /mm
Len 1	Reference plane	Reference plane	+0.012
Len 2	0.008	6.30	

将表 6 的结果代入 ZEMAX 软件,得到最终补偿器装调残余波像差 RMS 为 0.0028 λ ,满足检测使用要求。

4.2 三片式 Offner 检验

三片式 Offner 补偿器包含两片补偿镜及一片场镜。高精度的三片式补偿器对各镜片尤其是两片补偿镜之间的装配公差要求极为严格。精确测量加工结束后镜片的曲率半径 R 和厚度 d ,代入 ZEMAX 软件中反复计算得到补偿器的三片镜片之间的装配误差分配如表 7 所示。

表 7 三片式 Offner 补偿器的装配公差分配

Table 7 Allocation of assembly tolerance of three-piece Offner compensator

Lens No.	Eccentricity /mm	Tilt / (")	Interval /mm
Len 1	Reference plane	Reference plane	± 0.01
Len 2	0.005	7	± 0.02
Len 3	0.005	7	

同样使用中心偏差测量仪及镜面定位仪进行装配,最终装调结果如表 8 所示。

表 8 三片式 Offner 补偿器镜片之间倾斜、偏心与间隔测量结果

Table 8 Tilt, eccentric and interval measurement results of three-piece Offner compensator lens

Lens No.	Eccentricity	Tilt / (")	Interval /mm
Len 1	Reference plane	Reference plane	+0.01
Len 2	0.0035	5.3	+0.015
Len 3	0.0042	4.4	

将装调的结果代入 ZEMAX 软件,最终得到补偿系统残余波像差 RMS 为 0.03 λ ,即面形 RMS 为 0.015 λ ,补偿器满足检测使用要求。

5 面形检测结果

经过 4 种光路分阶段的合理应用,最终,两种零位补偿检验方法面形检测结果均达到了 $\lambda/50$ (RMS),如图 9 所示,圆满地达到了任务的要求。

6 结 论

在高难度非球面镜检测方法上打破惯性思维,不拘泥于任何一种单一的检测方法,不苛求传统意义上对

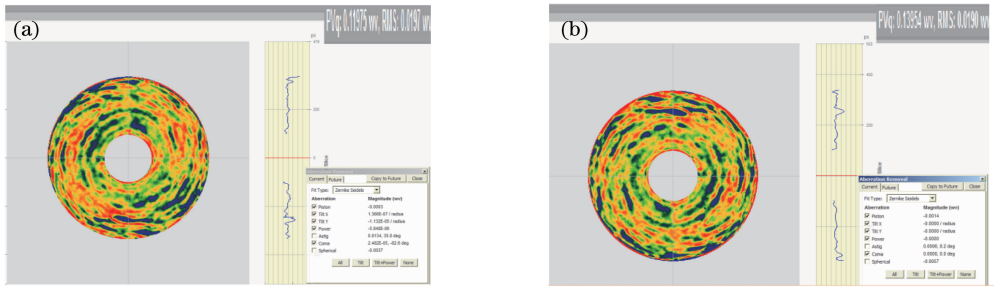


图9 检测结果。(a)改正型无像差点检测系统;(b)三片式 Offner 系统

Fig. 9 Testing results. (a) Correction type no aberration point testing system; (b) three-piece Offner system

检测系统理论残留像差大小的限制,不致力于消除非零位补偿检验光路理论残留像差,而是因时制宜地在镜面的不同研制阶段,根据检测的要求和镜面面形特点,设计满足实际使用要求的检测系统,最终面形精度达到了RMS为 $\lambda/50$,证明了这种检测方案设计理念的实用性、可靠性。另外,这种检测方法的设计理念在面对更大口径、大非球面度、快焦比、大离轴量的高次非球面镜时将同样具有指导意义。

参 考 文 献

- Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, *et al.* Surface testing methods of aspheric optical elements[J]. Chinese Optics, 2014, 7(1): 26-46.
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.
- Guo P J, Yu J C. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror[C]. SPIE, 2006, 6150: 61502N.
- Burge J H, Benjamin S, Caywood D, *et al.* Fabrication and testing of 1.4-m convex off-axis aspheric optical surfaces[C]. SPIE, 2009, 7426: 74260L.
- Ye Lu, Zhang Jinping, Zheng Liehua, *et al.* Design of back null compensator test method of convex aspherical surface [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(4): 0422002.
叶 璐, 张金平, 郑列华, 等. 沛凸非球面背向零位补偿检验的设计方法[J]. 光子学报, 2015, 44(4): 0422002.
- Yuan Lǔjun, Chen Tao. Manufacturing technology for high order aspheric surface[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(2): 335-342.
袁吕军, 陈 韬. 高次非球面的工艺技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(2): 335-342.
- Pan Junhua. Optical aspheric design, processing and testing[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.
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.
- 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. 二 Offner 补偿器的结构设计及装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- Guo Peiji, Yu Jingchi. Some problems about compensator designing[J]. Optical Technique, 2006, 32(1): 118-120.
郭培基, 余景池. 景设计非球面检测用补偿器应注意的几个问题[J]. 光学技术, 2006, 32(1): 118-120.
- Wu Fan. The design of Offner compensator for aspheric testing[J]. Applied Optics, 1993, 14(3): 12-17.
伍 凡. 非球面零检验的 Offner 补偿器设计[J]. 应用光学, 1993, 14(3): 12-17.
- Li Yang, Li Xinnan. Null compensator for convex secondary asphere of very large optical telescope[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(3): 564-569.
李 洋, 李新南. 新极大口径光学望远镜凸非球面副镜的补偿检测法研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 564-569.