

# 自准校正单透镜检验凸非球面的方法研究

戚丽丽, 郑列华, 叶璐, 张金平\*

中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200080

**摘要** 针对凸非球面大口径、大相对孔径、全口径检验难的问题, 提出了一种利用自准校正单透镜检验凸非球面的方法。该方法通过在单透镜的凸面镀半反半透膜构成自准校正透镜, 校正非球面的球差, 从而实现大口径凸非球面的全口径检验。依据三级像差理论, 推导了初始结构参数计算公式, 介绍了检验光学系统的设计方法; 对口径为 240.62 mm、相对孔径为 0.48 的凸扁球面光学检验系统进行了模拟设计。系统优化后的残余波像差峰谷(PV)值为 0.00025 $\lambda$ , 均方根(RMS)值为 0.0001 $\lambda$  ( $\lambda = 632.8$  nm)。将该方法用于工程项目中口径为 287 mm、相对孔径为 0.74 的凸双曲面反射镜检验中, 测得镜面 RMS 为 0.021 $\lambda$ , 验证了该方法的可行性。最后对该方法的适用性以及像差校正能力进行分析。研究结果表明: 该方法可以实现任意偏心率凸非球面的全口径检验, 在大口径、大相对孔径凸非球面全口径检验时具有较大优势。

**关键词** 光学设计; 凸非球面; 自准校正透镜; 三级像差理论

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0822001

## Convex Aspheric Surface Testing Method Using an Autocollimation Lens

Qi Lili, Zheng Liehua, Ye Lu, Zhang Jinping\*

Shanghai Institute of Technology and Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200800, China

**Abstract** Testing the full-aperture of convex aspheric surface with large aperture and large relative aperture is challenging. To solve this problem, we propose a convex aspheric surface testing method using an autocollimation lens in this study. In the proposed method, a self-aligning lens is formed by plating a semi-inverted semi-permeable film onto the convex surface of a single lens to correct the spherical aberration of the aspheric surface, enabling the full-aperture testing of the large-aperture convex aspheric surface. We derive initial structure parameters using the third-order aberration theory, and then introduce the design method in detail. We design and simulate an optical system to test a convex oblate spheroid with an aperture of 240.62 mm and relative aperture of 0.48, and then perform a tolerance analysis of the system. The peak valley (PV) value of the residual aberration of the optimized system is 0.00025 $\lambda$  and the root-mean-square (RMS) error is 0.0001 $\lambda$ . The proposed method is also applied in testing a practical convex hyperboloid with an aperture of 287 mm and relative aperture of 0.74. We obtain an RMS of 0.021 $\lambda$ , which verifies the feasibility of the proposed method. Finally, the applicability of this method and the aberration correction ability are analyzed. In summary, the proposed method can be used to test the full-aperture of any eccentricity convex aspheric surface, and it has great advantages in testing full-aperture of convex aspheric surface with large aperture and large relative aperture.

**Key words** optical design; convex aspheric surface; autocollimation lens; third-order aberration theory

**OCIS codes** 220.1000; 220.1250; 220.4830; 220.4840

## 1 引 言

非球面凭借着优良的光学特性在光学系统中得到了越来越广泛的应用<sup>[1-2]</sup>, 但大口径非球面的加工和检验一直还存在着一些困难<sup>[3]</sup>, 特别是大口径凸非球面的高精度检验还面临着技术瓶颈。

目前, 高精度非球面面形检验的主要方法是零

位干涉检验法, 包括无像差点法和零位补偿检验法<sup>[4]</sup>。

无像差点法, 主要用于二次曲面的检验<sup>[5]</sup>。其中, Hindle 球检验方法是凸二次非球面的经典检验方法<sup>[6]</sup>, 尤其在诸如微晶、碳化硅和金属等不透明材料制成的凸非球面反射镜的检验中, 该方法因其具有设计简单、检验精度高等优点经常被采用, 但是不

收稿日期: 2019-11-18; 修回日期: 2019-12-19; 录用日期: 2019-12-30

\* E-mail: Qiliisme@126.com

能用于无消像差点扁球面( $e^2 < 0$ ,  $e$  为非球面偏心率)的检测,并且该方法存在中心遮挡的问题,在检验大口径凸非球面时,还存在所需 Hindle 球口径较大、材料选择和加工装调难度变大等问题<sup>[7-8]</sup>。

1921 年俄罗斯科学家 Линник 首先提出零位补偿法的设想,并将此方法应用于实际检验中,后来 Couder、Dall、Ross、Maksutov、Offner 等对该方法做了进一步改进。零位补偿检验方法,是利用补偿透镜对非球面进行零位补偿干涉检验,该方法可以实现高次非球面的面型检验,也可以完成大口径非球面的检验,但是补偿镜片本身含有非球面,因此补偿器的设计、加工、装调和检验较复杂<sup>[9-10]</sup>。

为克服以上问题,改进 Hindle 球检验<sup>[7-8]</sup>、子孔径拼接<sup>[11]</sup>、干涉零位补偿检验<sup>[12]</sup>、计算全息<sup>[13-14]</sup>、背向零位补偿检验<sup>[15]</sup>等方法不断被提出,凸非球面的检验方法也一直在探究中。

本文针对大口径、大相对孔径凸非球面检验难的问题,提出一种自准校正透镜凸面自准检验凸非球面的方法,该方法在单透镜的凸面镀半反半透膜,并以凸面作为自准面,构成自准光学系统,利用自准校正透镜校正凸非球面的像差,能够实现包括无消像差点的凸扁球面在内的大口径、大相对孔径凸非球面的全口径检验。

## 2 自准校正单透镜检验凸非球面的原理和光学系统设计方法

### 2.1 基本原理

利用自准校正透镜凸面自准检验凸非球面反射镜的原理如图 1 所示,图中,Ⅰ为自准校正透镜,Ⅱ为待检凸非球面反射镜,自准校正透镜的 1 面镀半反半透膜,3 面和 7 面为凸非球面反射镜的待检面。

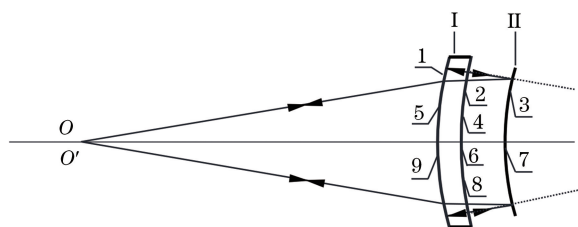


图 1 检验原理图

Fig. 1 Schematic diagram

从光轴物点  $O$  发出的光线经自准校正透镜 1 面和 2 面折射到待检凸非球面 3 面,经待检凸非球面 3 面反射到自准校正透镜 4 面,经 4 面折射到自准校正透镜 5 面,经 5 面自准反射,光线按原路返

回,依次分别经过自准校正透镜 6 面、待检非球面 7 面、自准校正透镜 8 面和 9 面,最终到达像点  $O'$ ,与物点  $O$  重合,达到利用自准校正透镜校正待检凸非球面像差的目的,其中 5 面起光线自准作用,因此,自准校正透镜可同时起到自准光线和校正凸非球面像差的作用。

### 2.2 光学系统设计方法

检验光学系统的设计步骤为:先根据三级像差理论求解规范化条件下的光学系统初始结构参数,然后根据实际光学系统设计对初始结构参数进行整体缩放,最后在光学系统设计软件中进行优化。

#### 2.2.1 三级像差理论

根据三级像差理论,图 1 所示光学系统消球差条件为球差系数  $S_1 = 0$ ,即

$$S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_{03} P_3 + h_{03}^4 K_3 + h_4 P_4^- + h_5 P_5^- + h_6 P_6 + h_{07} P_7 + h_{07}^4 K_7 + h_8 P_8^- + h_9 P_9^- = 0, \quad (1)$$

式中: $h_i$  为光线入射到第  $i$  ( $i = 1, 2, 3 \dots$ ) 面上的入射高度,光线入射到待检凸非球面上的高度为  $h_{03}$ 、 $h_{07}$ ,  $h_5$  为光线入射到自准校正透镜的最高高度,为自准校正透镜的最大通光口径的一半,其中  $h_{03} = h_{07}$ ,  $h_1 = h_9$ ,  $h_2 = h_8$ ,  $h_4 = h_6$ ;  $P_i$  为光线经过第  $i$  面对应镜面的  $P$  值,  $P_i, P_i^-$  分别代表光线沿光轴方向和逆光轴方向时经过镜面的情况,  $P_1 = P_9^-$ ,  $P_2 = P_8^-$ ,  $P_3 = P_7$ ,  $P_4^- = P_6$ , 5 面为自准面,不具有球差校正效果,  $P_5^- = 0$ 。设定自准校正透镜材料折射率为  $n$ ,介质的折射率为  $n_i$ ,  $n_1 = n_2' = n_3 = 1$ ,  $n_6' = n_7 = 1$ ,  $n_1' = n_2 = n_5' = n_6 = n$ ,  $n_3' = n_4 = n_7' = n_8 = n_9' = -1$ ,  $n_4' = n_5 = n_8' = n_9 = -n$ ;  $K_3 = K_7 = -\frac{n_3' - n_3}{r_{03}^3} e_3^2$ ,  $r_{03}$  为待检凸非球面反射镜的顶点曲率半径,  $e_3^2$  为待检凸非球面的偏心率平方;  $u_i$  为光线入射孔径角,  $u_1 = u_9'$ ,  $u_1' = u_2 = u_8' = u_9$ ,  $u_2' = u_3 = u_7' = u_8$ ,  $u_3' = u_4 = u_6' = u_7$ ,  $u_4' = u_5 = u_5' = u_6$ 。另外,设定规范化条件  $h_{03} = 1$ ,  $r_{03} = 1$ , 则有  $u_3' + u_3 = 2$ ,  $K_3 = K_7 = 2e_3^2$ , 化简消球差条件(1)式,可得  $S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2 + P_3 + 2e_3^2 + h_4 P_4^- = 0$ , 即

$$e_3^2 = -\frac{h_1 P_1 + h_2 P_2 + P_3 + h_4 P_4^-}{2}. \quad (2)$$

即待检凸非球面的像差由自准校正透镜面 1、面 2 和面 4 校正。

#### 2.2.2 系统初始结构求解

##### 1) 各面之间的规范化间距

$d_{i,i+1}$  表示第  $i$  面到第  $i+1$  面的距离,  $d_{12}$  为自准

校正透镜厚度。设定各面之间的规化间距:薄透镜时  $d_{12}=0$ , 加厚后自准校正透镜厚度  $d_{12}=-d_{45}=-d_{56}=-d_{89}=0.05$ , 自准校正透镜 2 面与凸非球面待检面的距离  $d_{23}=-d_{34}=d_{67}=-d_{78}=0.05$ 。

2) 待检凸非球面结构参数

设定规化条件  $h_{03}=1, r_{03}=1$ , 凸非球面的放大率  $\beta=u_3/u'_3$ , 根据近轴公式

$$n'_3 u'_3 - n_3 u_3 = \frac{(n'_3 - n_3) h_{03}}{r_{03}}, \quad (3)$$

化简可得

$$u'_3(1 + \beta) = 2, \quad (4)$$

$$P_3 = -\frac{(u'_3 - u_3)^2}{2} = -2\left(\frac{2\beta}{1 + \beta} - 1\right)^2. \quad (5)$$

3) 自准校正透镜结构参数

(1) 自准校正透镜 1 面的前截距  $l_1$

$$l_1 = h_1/u_1. \quad (6)$$

(2) 自准校正透镜两个面的曲率半径  $r_1, r_2$

自准校正透镜 1 面和 5 面是同一个面, 2 面和

4 面是同一个面, 所以  $r_1=r_5, r_2=r_4$ , 根据近轴公式  $n'_i u'_i - n_i u_i = \frac{(n'_i - n_i) h_i}{r_i}$ , 有  $r_1 = \frac{(n-1)h_1}{nu'_1 - u_1}$ ,

$$r_2 = \frac{(n-1)h_2}{nu'_2 - u'_2}, r_4 = \frac{(n-1)h_4}{nu'_4 - u_4}, r_5 = \frac{h_5}{u'_4}.$$

光线入射高度为  $h$ , 则有

$$\begin{cases} h_1 = h_2 + d_{12}u'_1 \\ h_2 = h_{03} + d_{23}u'_2 \\ h_4 = h_{03} - d_{34}u'_3 \\ h_5 = h_4 - d_{45}u'_4 \end{cases} \quad (7)$$

在进行初始结构求解时, 先设定该自准校正透镜为薄透镜, 则  $h_1=h_2, h_4=h_5$ , 利用近轴公式, 可得孔径角  $u'_1, u'_4$  与  $u_1$  关系为

$$u'_1 = u_1 - \frac{2(n-1)}{n(1+\beta)}\left(\beta - \frac{h_2}{h_4}\right), \quad (8)$$

$$u'_4 = \frac{1}{n}\left[\frac{h_4}{h_2}\left(nu'_1 - \frac{2\beta}{1+\beta}\right) + \frac{2}{1+\beta}\right]. \quad (9)$$

(3) 自准校正透镜各面的  $P$

$$\begin{cases} P_1 = \left(\frac{u'_1 - u_1}{1/n'_1 - 1/n_1}\right)^2 \left(\frac{u'_1}{n'_1} - \frac{u_1}{n_1}\right) = n \left(\frac{u'_1 - u_1}{n-1}\right)^2 (u'_1 - nu_1) \\ P_2 = \left(\frac{u'_2 - u_2}{1/n'_2 - 1/n_2}\right)^2 \left(\frac{u'_2}{n'_2} - \frac{u_2}{n_2}\right) = \frac{n}{(n-1)^2} \left(\frac{2\beta}{1+\beta} - u'_1\right)^2 \left(\frac{2\beta n}{1+\beta} - u'_1\right) \\ P_4 = \left(\frac{u'_4 - u_4}{1/n'_4 - 1/n_4}\right)^2 \left(\frac{u'_4}{n'_4} - \frac{u_4}{n_4}\right) = -\frac{n}{(n-1)^2} \left(u'_4 - \frac{2}{1+\beta}\right)^2 \left(u'_4 - \frac{2n}{1+\beta}\right) \end{cases} \quad (10)$$

因此, 设定起始孔径角  $u_1$ , 待检非球面放大率  $\beta$ , 即可求解自准校正透镜为薄透镜时的初始结构参数, 再保持自准校正透镜为薄透镜时的  $u_2, u'_4, h_2, h_4, r_2, r_4$  不变, 将他们代入上述公式再次求解  $u_1, h_1, h_5, r_1, r_5$ , 从而确定加厚后的自准校正透镜的初始结构参数。

在实际光学系统设计时, 待检凸非球面反射镜  $e^2$  已知, 根据(2)式, 设定规化条件以及凸非球面的放大率  $\beta$  后, 即可求解给定  $e^2$  时所对应的起始孔径角  $u_1$ , 进而求解出所需自准校正透镜的曲率半径  $r_1, r_2$ 、通光口径  $2h_5$  和前截距  $l_1$  等, 从而完成初始结构参数的确定。

2.2.3 光学系统实际尺寸求解

完成初始结构参数求解后, 根据光学系统实际结构尺寸要求, 将求解得到的初始结构参数按比例整体缩放, 然后利用光学设计软件优化得出实际光学系统参数。

3 自准校正单透镜检验凸非球面的方法分析

对该检验方法的分析主要包括: 对该检验方法适用性的分析、对该方法用于不同相对孔径凸非球面检验时像差校正情况的分析以及该方法用于不同偏心率的凸非球面检验时像差校正情况的分析。

3.1 对该检验方法适用性的分析

根据上文初始结构参数的求解方法, 拟合出待检凸非球面放大率  $\beta = -1/5, \beta = -1/9, \beta = 0, \beta = 1/7, \beta = 1/3$  时起始孔径角  $u_1$  与待检凸非球面偏心率平方  $e^2$  的关系曲线如图 2 所示。

根据图 2 中  $u_1$  与  $e^2$  的关系曲线, 可以看出, 在设定的待检凸非球面放大率  $\beta$  内, 待检凸非球面的偏心率平方  $e^2$  变化范围很大, 但是当起始孔径角  $u_1 > 0$  时, 由于光线为会聚光线, 在实际光学系统设计中, 目前大口径的会聚光线不能通过激光干涉仪

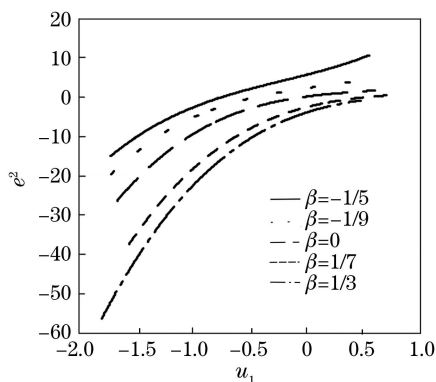


图 2  $u_1$  与  $e^2$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $u_1$  and  $e^2$

得到,因此,当设定  $\beta > 0$  时,主要可检验  $e^2 < 0$  的凸非球面,当设定  $\beta < 0$  时,既可检验  $e^2 < 0$  的凸扁球面,也可检验  $e^2 > 0$  的凸非球面。

### 3.2 对不同相对孔径凸非球面的像差校正情况的分析

利用该方法分别设计了凸非球面口径  $\Phi = 300$  mm 时顶点曲率半径  $r$  分别为 600, 800, 1000, 1200, 1400, 1500 mm, 偏心率平方  $e^2 = 1$  的凸抛物面光学检验系统,自准校正透镜均采用 K9 光学玻璃,通过优化设计,以上几组光学系统的残余波像差与凸非球面的相对孔径关系如图 3 所示。

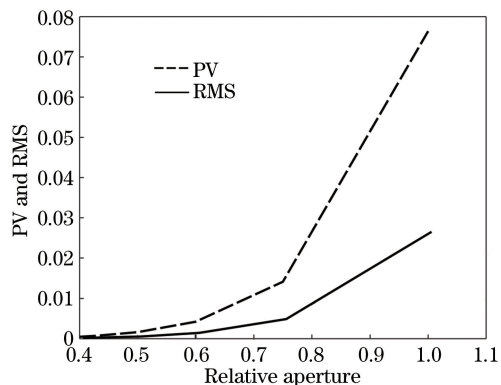


图 3 相对孔径与残余波像差关系图

Fig. 3 Relationship of relative aperture and residual aberration

由图 3 可知,系统残余波像差在凸非球面相对孔径小于 0.75 时变化缓慢,当相对孔径大于 0.75 时随相对孔径的增大而快速增大,但当凸非球面口径  $\Phi = 300$  mm,顶点曲率半径  $r = 600$  mm,相对孔径  $NA = 1$  时,系统残余波像差峰谷(PV)值小于  $0.08\lambda$ ,均方根(RMS)值小于  $0.03\lambda$ ,因此,该方法在对大口径、大相对孔径的凸非球面检验时是比较有利的。

### 3.3 对不同偏心率的凸非球面的像差校正情况的分析

根据上文的理论基础,以优化后系统残余波像差 PV 值不大于  $0.1\lambda$  为标准,对凸非球面顶点曲率半径固定时不同  $e^2$  的凸非球面检验光学系统进行了设计,求出不同  $e^2$  时该方法可以校正的最大待检凸非球面反射镜口径,以及对应的相对孔径,如图 4 所示。

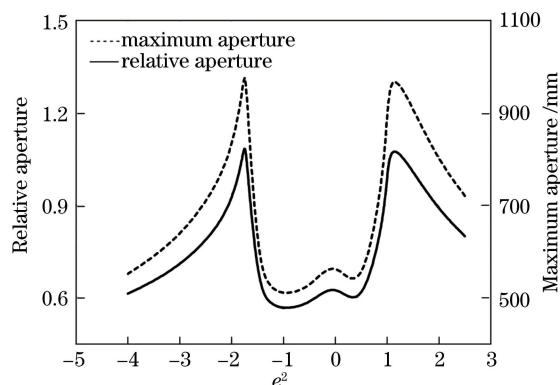


图 4  $e^2$  与最大口径、相对孔径关系曲线

Fig. 4 Relationship between  $e^2$  and maximum aperture, relative aperture

由图 4 可知,利用凸面自准的自准校正透镜检验凸非球面时,对不同偏心率的非球面像差校正情况不同,对  $e^2 = -1.75$  和  $e^2 = 1.75$  附近范围的待检凸非球面具有很强的像差校正能力。

## 4 模拟设计及公差分析

### 4.1 模拟设计

以口径  $\Phi = 240.62$  mm,顶点曲率半径  $r = 1000$  mm,偏心率平方  $e^2 = -1.75$  的凸扁球面检验为例,自准校正透镜材料采用 K9 光学玻璃进行实际光学系统设计。优化后的系统残余波像差 PV 值为  $0.0005\lambda$ ,RMS 值为  $0.0002\lambda$ ,由于光线两次经过待检凸非球面,光学系统实际波像差 PV 值为  $0.00025\lambda$ ,RMS 值为  $0.0001\lambda$ 。

优化后系统结构参数如表 1 所示,最终设计结果如图 5 所示。图 5 为光学系统设计结果,图 5(a)为光学系统结构图,图 5(b)为光学系统纵向球差曲线,图 5(c)为光学系统波前图。

### 4.2 公差分析

以实例设计中的光学检验系统为例利用 Zemax 软件进行公差分析。以 RMS 小于  $0.02\lambda$  为标准进行分析,结果显示对自准校正透镜的折射率



表 1 光学系统结构参数

Table 1 Structure parameters for optical system

Surf	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
OBJ	Standard	Infinity	1378.8717		0.0000	0.0000
1	Standard	712.4152	50.0000	K9	237.7161	0.0000
2	Standard	1994.4464	50.0000		237.5778	0.0000
STO	Standard	1000.0000	-50.0000	MIRROR	240.6200	1.7500
4	Standard	1994.4464	-50.0000	K9	270.1104	0.0000
5	Standard	712.4152	50.0000	MIRROR	286.5439	0.0000
6	Standard	1994.4464	50.0000		270.1104	0.0000
7	Standard	1000.0000	-50.0000	MIRROR	240.6200	1.7500
8	Standard	1994.4464	-50.0000	K9	237.7178	0.0000
9	Standard	712.4152	-1378.8717		237.7178	0.0000
IMA	Standard	Infinity	-		0.0000	0.0000

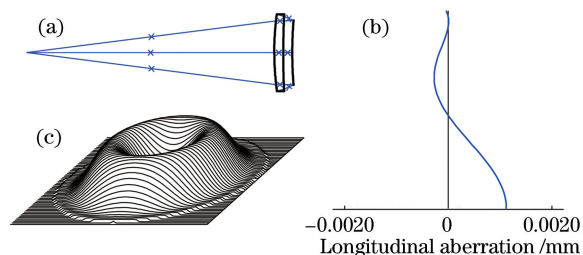


图 5 光学系统设计结果。(a)结构图;  
(b)纵向球差曲线;(c)波前图

Fig. 5 Design results of optical system. (a) Layout;  
(b) longitudinal aberration; (c) wavefront map

不均匀性  $\Delta n$  要求不大于  $\pm 10 \times 10^{-6}$ , 这对于良好的透射材料很好实现; 对自准校正透镜自准面 1 面的 RMS 误差要求小于  $0.04\lambda$ , 自准校正透镜面 2 面的 RMS 误差要求小于  $0.063\lambda$ , 即对于自准校正透镜的面型精度要求不高, 自准校正透镜的加工和检验难度低; 对自准校正透镜 2 面的曲率半径公差要求不能大于  $\pm 0.06$  mm, 但对自准面 1 面的曲率半径公差要求不能大于  $\pm 0.02$  mm, 这是因为自准校正透镜 1 面的曲率半径公差对光学系统的检验精度影响较大, 故在实际应用时要严格控制 1 面曲率半径的精度; 分析自准校正透镜在检验光路中调整时偏心的公差为  $47''$ , 倾斜的公差为  $\pm 0.05$  mm, 即通过调整可以减小自准校正透镜在光路中的位姿误差。

## 5 自准校正单透镜检验凸非球面方法的实际应用

将自准校正透镜凸面自准检验凸非球面的方法

应用于某工程项目中一块凸双曲面反射镜的光学加工与检验中, 该反射镜材料为碳化硅, 口径  $\Phi = 287$  mm, 相对孔径  $A = 0.74$ , 非球面偏心率平方  $e^2 = 2.814916$ , 自准校正透镜检验凸非球面的实物图如图 6 所示。



图 6 自准校正透镜检验凸非球面的实物图

Fig. 6 Picture of convex aspheric surface tested by self-aligning lens

利用激光干涉仪检验该凸非球面的检验结果如图 7 所示, 图 7(a) 为激光干涉仪检验干涉图, 图 7(b) 为检验干涉条纹图, 图 7(c) 为检验结果。

由检验结果可知, 目前待检非球面面型 PV 值为  $0.474\lambda$ , RMS 值为  $0.021\lambda$ , 达到了工程应用指标, 并且由干涉图可知, 该镜面还可以作进一步的加工完善。因此, 该方法对凸非球面的加工具有指导作用, 可以实现高精度的面型检验, 解决了检验时中心遮挡问题, 实现了非球面的全口径检验。

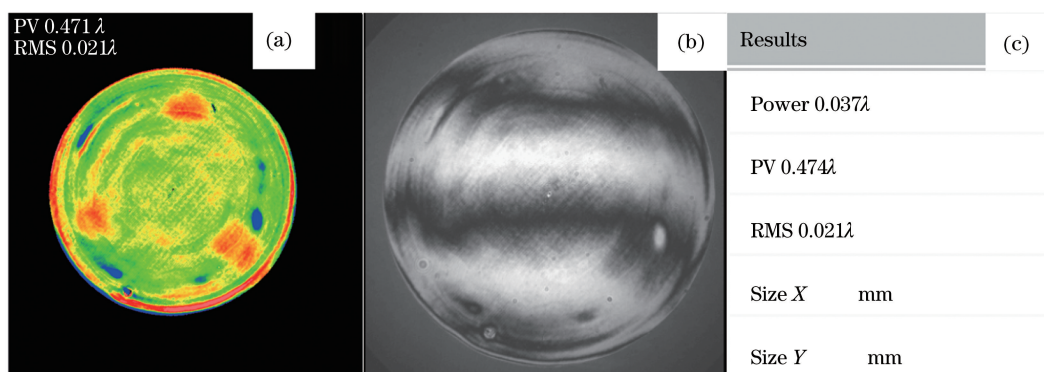


图 7 激光干涉仪对凸非球面的检验结果。(a)激光干涉仪检验干涉图;(b)检验干涉条纹图;(c)检验结果

Fig. 7 Test results of laser interferometer for convex aspheric surface. (a) Interferogram;

(b) interferent fringes figure; (c) testing results

## 6 结 论

本文提出了一种利用自准校正单透镜凸面自准检验凸非球面的方法。通过对该方法适用性和校正能力的理论分析,表明该方法可用于检验任意偏心率的凸非球面,对偏心率平方  $e^2 = -1.75$  和  $e^2 = 1.75$ 附近范围的凸非球面具有极好的像差校正能力;对口径为 300 mm、相对孔径不同的凸抛物面的光学检验系统优化设计后,可知在相对孔径  $A = 1$  时系统残余波像差 PV 值小于  $0.08\lambda$ , RMS 值小于  $0.03\lambda$ ,表明该方法具有检验大口径、大相对孔径凸非球面的优势;在光学系统模拟设计中,对口径为 240.62 mm,相对孔径  $A = 0.48$  的凸扁球面光学检验系统优化后波像差 PV 值为  $0.00025\lambda$ , RMS 值为  $0.0001\lambda$ ,将该方法应用于实际工程项目中口径为 287 mm,相对孔径  $A = 0.74$  的凸双曲面的检验,检验得到凸双曲面面型的 PV 值为  $0.474\lambda$ , RMS 值为  $0.021\lambda$ ,表明该方法可完成凸非球面的全口径高精度检验,验证了该方法的可行性。研究表明,该方法可用于包括没有消像差共轭点的凸扁球面在内的任意偏心率凸非球面的检验,解决了凸非球面大口径、大相对孔径检验难,以及中心遮挡的问题。接下来将对该方法继续改进,以提高该方法的像差校正能力,减小光学系统检验时的灵敏度,降低对加工公差的要求,降低实际应用时的加工和检验难度。

## 参 考 文 献

- [1] Burge J H, Benjamin S, Caywood D. Fabrication and testing of 1.4 m convex off-axis aspheric optical surfaces [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7426: 692-697.
- [2] Horst R T, Stuik R. Manufacturing and testing of a convex aspherical mirror for ASSIST [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8450: 84504X.
- [3] Pan J H. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004: 51-61.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验 [M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 51-61.
- [4] Malacara D. Optical shop testing [M]. Yang L, Wu F, et al, Transl. 3<sup>rd</sup> ed. Beijing: Press of Mechanical Industry, 2012: 340-347.  
Malacara D. 光学车间检测 [M]. 杨力, 伍凡, 等, 译. 3 版. 北京:机械工业出版社, 2012: 340-347.
- [5] Д. Т. Пуряев. Методы контроля оптических асферических поверхностей [M]. Yang Li, Transl. Beijing: Science Press, 1982: 243-244.  
Д.Т. 普利亚耶夫. 光学非球面检验 [M]. 杨力, 译. 北京: 科学出版社, 1982: 243-244.
- [6] Hao P M. Design of auxiliary optical system for aspheric surface testing [M]. Beijing: Science Press, 2017: 30-46.  
郝沛明. 非球面检验的辅助光学系统设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2017: 30-46.
- [7] Ma J, Zhu Z. Testing convex aspherical surfaces with optimized modified Hindle arrangement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 277-281.  
马杰, 朱政. 改进的 Hindle 方法检测凸非球面的研究 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 277-281.
- [8] Wang P, Zhao W C, Hu M Y, et al. Hindle testing of the off-axis convex asphere surface [J]. Optics and Precision Engineering, 2002, 10(2): 139-142.  
王鹏, 赵文才, 胡明勇, 等. 离轴凸非球面的 Hindle 检测 [J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 139-142.
- [9] Guo P J, Yu J Ch. Design and certification of a null corrector to test hyperboloid convex mirror [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6150: 259-263.
- [10] Xue D L, Zhang Z Y, Zheng L G, et al. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16

- (12): 2491-2496.
- 薛栋林, 张忠玉, 郑立功, 等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2491-2496.
- [11] Song Q, Yang B X, Yuan Q, et al. Study on large convex aspherical lens testing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0408003.
- 宋强, 杨宝喜, 袁乔, 等. 大口径凸非球面面形检测方法研究[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408003.
- [12] Yao J G, Zhang J P, Zheng L H, et al. Study on interference null compensator testing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 36(6): 0622003.
- 姚劲刚, 张金平, 郑列华, 等. 干涉零位补偿检验研究[J]. 光学学报, 2015, 36(6): 0622003.
- [13] Chang J, Li F Y, Weng Z C, et al. Testing large convex aspherical surface with computer-generated holography[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(10): 1266-1268.
- 常军, 李凤友, 翁志成, 等. 用计算全息法检测大口径凸非球面的研究[J]. 光学学报, 2003, 23(10): 1266-1268.
- [14] Li M, Yan L S, Xue D L, et al. Hybrid compensation testing of convex asphere with computer generated holograms and fold sphere[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 1122001.
- 李明, 闫力松, 薛栋林, 等. 计算机再现全息与辅助球面混合补偿检测凸非球面方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(11): 1122001.
- [15] Ye L, Zhang J P, Zheng L H, 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. 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.