

# 自准校正透镜位于共轭后点前的凹非球面检验

赵鹏玮<sup>1,2</sup>, 戚丽丽<sup>1</sup>, 张金平<sup>1</sup>, 郑列华<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海技术物理研究所光电制造工程中心, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对目前检验方法制约大口径、大相对孔径凹非球面反射镜的应用, 提出一种基于贴合双透镜的大口径、大相对孔径凹非球面检验方法。与 Offner 检验方法不同, 检验光路中的透镜在反射前后的光路中分别作为校正透镜和自准镜。根据三级像差理论推导初始结构, 给出利用单透镜和贴合双透镜检验凹抛物面的残余像差曲线图, 并对其进行分析。实验结果表明, 自准校正透镜位于共轭后点前的检验方法可以用于大口径、大相对孔径凹非球面反射镜的检验。所提方法从加工、装配和使用等方面考虑更简单方便, 为凹非球面检验提供新的思路, 并且为利用三透镜检验更大口径和相对孔径的凹非球面打下基础。

**关键词** 光学设计; 共轭校正; 非球面检验; 三级像差理论; 自准校正透镜; 场镜; 共轭前点的后校正

中图分类号 O435.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2022002

## Testing of Concave Aspheric Surface with Self-Collimating and Correcting Lens in Front of Back Conjugate Point

Zhao Pengwei<sup>1,2</sup>, Qi Lili<sup>1</sup>, Zhang Jinping<sup>1</sup>, Zheng Liehua<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Photoelectric Manufacturing Engineering Center, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Because of the current testing methods restricting the application of large-aperture, large-relative aperture concave aspheric mirrors, a large-aperture, large-relative aperture concave aspheric surface testing method based on near-double-lens is proposed. Different from the Offner testing method, the lens in the testing optical path is used as a correcting lens and a self-collimating-lens in the optical path before and after reflection. The initial structure is derived according to the third-order aberration theory. The testing results of using a single lens and a near-double-lens as correcting lens are shown in diagrams respectively and analyzed. The experimental results show that the testing method in which the self-collimating lens is located in front of the conjugate back point can be used for the testing of large-aperture, large-relative-aperture concave aspheric mirrors. The proposed method is simpler and more convenient in terms of processing, assembly and use, and provides a new idea for the testing of concave aspheric surfaces, and lays a foundation for the use of three lenses to test concave aspheric surfaces with larger apertures and relative apertures.

**Key words** optical design; conjugate correction; aspheric surface testing; third-order aberration theory; self-collimating and correcting lens; field lens; back correction on front conjugate point

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

## 1 引 言

非球面反射镜因其具有十分优异的光学性能, 在一些大口径和高精度的光学系统中起到十分重要的作用, 并在空间大口径望远镜、空间遥感以及高能

激光系统中得到广泛应用。著名的哈勃空间望远镜<sup>[1]</sup>以及詹姆斯·韦伯空间望远镜<sup>[2]</sup>, 其主镜和次镜都采用的是非球面反射镜。为了获得更好的成像效果, 非球面反射镜的口径制作得越来越大, 这对大口径非球面反射镜的加工和检验带来巨大挑战。

收稿日期: 2020-05-26; 修回日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0504700)

\* E-mail: dimo818@126.com

大口径非球面反射镜的检验精度是影响其加工质量的重要因素之一<sup>[3-4]</sup>。零位补偿法是一种高精度的非球面检验方法,其中 Offner 方法是最常用的一种检验方法,具有精度高和加工装调方便<sup>[5-8]</sup>等优点。采用 Offner 方法检验大口径非球面反射镜,检验光路较长,补偿法距差的能力无法满足检验的要求。折反射补偿检验方法可以有效缩短检验光路的长度,提高检验能力<sup>[9-11]</sup>。此外,计算全息法通过计算全息图生成与待检面一致的波前<sup>[12-13]</sup>以实现高精度检验,子孔径拼接法可以拓宽检验范围<sup>[14-15]</sup>,但这两种方法在加工装调等方面较为复杂,限制了应用范围。

本文首先提出一种不同于零位补偿检验的方法。将自准校正透镜放置在待检非球面反射镜的共轭后点前,用来实现凹非球面的检验,透镜背离待检反射镜的一面为自准面,光路中的透镜同时起到校正透镜、场镜和自准镜的作用。然后介绍所提方法的原理以及初始光路的推导过程。最后对不同顶点曲率半径的凹抛物面的计算结果进行介绍和分析。

## 2 原 理

从光轴上一点  $O'$  发出的光线经过非球面反射镜反射后,会聚在光轴上另一点  $O''$ ,如图 1 所示。这两点是一对互为物像关系的点,彼此互为共轭点,其中靠近待检非球面反射镜的点  $O''$  为共轭前点,远离反射镜的点  $O'$  为共轭后点。点  $O'$  和点  $O''$  将光轴分成三个部分,使用罗马数字 I~III 分别表示前区、中区和后区。光学检验方法中,校正透镜位于共轭后点  $O'$  前。检验光路如图 2 所示,其中数字 1~9 表示光线在传播过程中依次经过的 9 个透射面或反射面。同一个表面上的多个数字表示光线多次经过这个面,  $u_3$  为凹非球面反射面 3 的入射角,  $u'_3$  为凹非球面反射面 3 的出射角,  $u_5$  为自准校正透镜面 5 的自准角,  $l_5$  为反射面的前截距,  $d_{23}$  为镜面 2 和 3 的间距。

从图 2 可以看到,自准校正透镜位于共轭后点  $O'$  前,光线从光轴上点  $O$  发出,经过校正透镜面 1 和 2 折射后在共轭后点  $O'$  处成虚像,经过共轭后点  $O'$  的光线被待检反射镜 3 反射后成像在共轭前点  $O''$  处,经过共轭前点  $O''$  的光线入射到自准校正透镜面 4 和 5,并在自准校正透镜面 5 处自准反射,使光线沿原路返回。

检验光路中的前后两个共轭点并不是非球面的消像差点,因此经过待检反射镜反射后的光线会产生像差,这些像差可以使用自准校正透镜来校正。所提的检验方法中,自准校正透镜靠近待检非球面

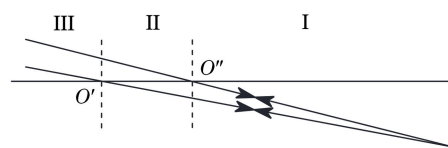


图 1 共轭点划分光轴的结果

Fig. 1 Result of dividing optical axis by conjugate points

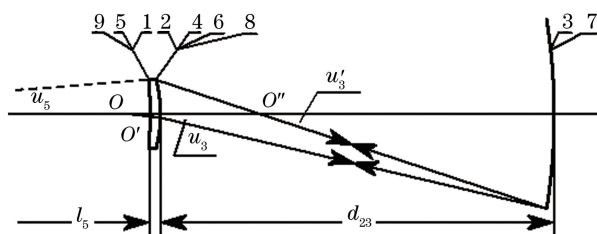


图 2 检验光路示意图

Fig. 2 Schematic of testing optical path

的共轭后点,这是入射光线与光轴的一个交点,且光线在校正透镜面 1 和 2 上的入射高度很小。因此在光线被待检非球面反射前的光路中,自准校正透镜可以作为场镜以校正系统中的高级球差,反射后的光线经过待检反射镜的共轭前点并入射到自准校正透镜,其可以校正反射镜产生的像差。由于共轭前点和共轭后点在空间上是两个分开的点,因此自准校正透镜在反射前后的光路中分别起到校正高级球差和像差的作用。

## 3 公式推导

根据图 2 对公式进行推导,各参数的符号定义符合几何光学的符号定义<sup>[16]</sup>。首先设定规范化条件,待检反射镜的曲率半径  $r_{03} = -1$ ,光线在待检反射镜上的入射高度  $h_{03} = -1$ ,反射镜上下两端与近轴曲率中心连线形成的角  $u_{03} = 1$ 。光线在自准校正透镜面 4 的入射高度  $h_4$  与  $h_{03}$  的比值为口径比,即  $\alpha_1 = 0.1$ ,透镜的厚度  $d_{12} = 0.004$ ,光线在透镜面 2 上的入射高度  $h_2 = -0.004$ 。

光路中各个元件的折射率为  $n_1 = 1, n'_1 = n_2 = n, n'_2 = n_3 = 1, n'_3 = n_4 = -1, n'_4 = n_5 = -n, n = 1.514664, n_i$  和  $n'_i$  分别为第  $i$  面前和后介质的折射率。待检凹非球面反射镜面 3 上光线的  $u_3$  与  $u'_3$ ,以及光线的前后截距  $l_3$  与  $l'_3$  的表达式为

$$u_3 = \frac{2(h_{03} - h_2)}{2h_{03} - (h_2 + h_4)}, \quad (1)$$

$$u'_3 = \frac{2(h_{03} - h_4)}{2h_{03} - (h_2 + h_4)}, \quad (2)$$

$$l_3 = h_{03}/u_3, \quad (3)$$

$$l'_3 = h_{03}/u'_3, \quad (4)$$

式中： $h_i$  为光线在第  $i$  面的入射高度； $u_i$  为第  $i$  面的自准角； $u'_i$  为第  $i$  面的出射角。反射镜面 3 产生的初级球差  $P_3$  和高级球差  $K_3$ <sup>[17]</sup> 的表达式为

$$P_3 = \left( \frac{u'_3 - u_3}{1/n'_3 - 1/n_3} \right)^2 \cdot \left( \frac{u'_3}{n'_3} - \frac{u_3}{n_3} \right), \quad (5)$$

$$K_3 = \frac{(n'_3 - n_3) e_{03}^2}{r_{03}^3}, \quad (6)$$

式中： $e_{03}$  为待检镜面 3 的偏心率。由于光线在透镜面 1 和 2 上的入射高度很小，因此自准校正透镜面 1 和 2 校正像差的能力较弱，而面 5 为自准面，不会产生像差。假设反射镜的像差全部由透镜面 4 来校正，可以得到

$$h_{03} P_3 + h_{03}^4 K_3 + h_4 P_4 = 0, \quad (7)$$

式中： $P_4 \sim P_9$  为与初级球差有关的变量。然后根据

$$P_4 = \left( \frac{u'_4 - u_4}{1/n'_4 - 1/n_4} \right)^2 \cdot \left( \frac{u'_4}{n'_4} - \frac{u_4}{n_4} \right) \quad (8)$$

来求解自准角，即  $u_5 = u'_4$ 。根据几何光学公式可以求解面 4 的前后截距  $l_4$  和  $l'_4$ ，以及面 3 和 4 的间距

$d_{34}$ 。并根据

$$(n'_4 - n_4) / r_4 = n'_4 / l'_4 - n_4 / l_4 \quad (9)$$

来求解面 4 的曲率半径  $r_4$ 。透镜面 2 的曲率半径  $r_2$  与  $r_4$  相同，即  $r_2 = r_4$ ，透镜面 2 的出射角  $u'_2$  与  $u_3$  相同，即  $u'_2 = u_3$ 。根据

$$h_2 (n'_2 - n_2) / r_2 = n'_2 u'_2 - n_2 u_2 \quad (10)$$

来求解透镜面 2 的入射角  $u_2$ ，进而求解前后截距  $l_2$  和  $l'_2$ 。面 5 为自准面，入射角  $u_5$  和出射角  $u'_5$  相同，曲率半径  $r_5$  与反射面的前后截距  $l_5$  和  $l'_5$  相同，光线在面 5 上的入射高度为  $h_5$ 。

从图 2 可以看到， $r_5$  与面 1 的曲率半径  $r_1$  相同。根据几何光学公式来求解光线在透镜面 1 上的入射高度  $h_1$  和后截距  $l'_1$ ，并根据

$$(n'_1 - n_1) / r_1 = n'_1 / l'_1 - n_1 / l_1 \quad (11)$$

来求解前截距  $l_1$ 。上述计算过程忽略由透镜面 1 和 2 产生的像差，在这一假设下计算得到的自准角  $u'_4$  与实际值存在偏差。为了得到实际的各个参数值，需要根据实际的像差公式，即

$$S_1 = h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_{03} P_3 + h_{03}^4 K_3 + h_4 P_4 + h_5 P_5 + h_6 P_6 + h_{07} P_7 + h_{07}^4 P_7 + h_8 P_8 + h_9 P_9, \quad (12)$$

简化后得到

$$S_1 = 2(h_1 P_1 + h_2 P_2 + h_{03} P_3 + h_{03}^4 K_3 + h_4 P_4), \quad (13)$$

来计算光学系统的实际像差系数<sup>[18]</sup>，经过两次计算后得到像差系数的差异，改变自准角  $u'_4$  值并重新计算光学系统的结构参数。重复这一步骤，直到实际像差系数的改变量小于设定的误差值。式中： $h_{07}$

为光线在面 7 上的入射高度。将规划结果输入 Zemax 软件中，经过优化后可以得到实际光路的参数。这一过程使用密接双透镜来代替自准校正单透镜，以提高校正像差的能力。自准校正透镜组的光焦度为正，此时贴合双透镜的结构形式有三种，结构如图 3 所示。经过计算发现，由正透镜和负透镜组合的透镜组均可以得到很好的结果。

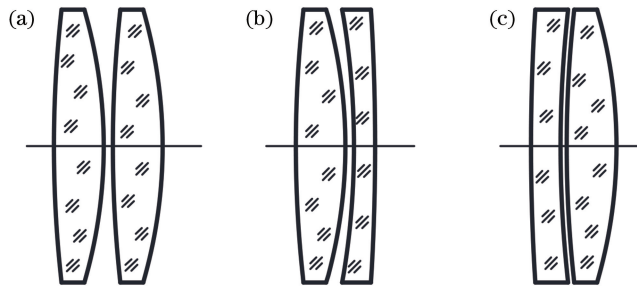


图 3 三种双贴合透镜。(a) 两片正透镜；(b) 正透镜在前面的正负透镜组；(c) 负透镜在前面的正负透镜组

Fig. 3 Three types of near-double-lens. (a) Two positive lenses; (b) positive and negative lens group with positive lens in front; (c) negative positive lens group with negative lens in front

## 4 实际光路设计

将计算得到的初始结构输入 Zemax 中，并根据实际情况对结构进行缩放，以调整透镜入瞳的位置和大小以及透镜的厚度。为了提高校正像差的能

力，将透镜从中间分开，从而形成两片密接的透镜。在此基础上对透镜进行优化，设计一个口径为 2 m、曲率半径为 8 m 的抛物面反射镜的检验光路，口径比为 0.1，光路如图 4 所示。表 1 为结构参数，其中 OBJ、STP 和 IMA 分别表示物面、光阑面和像面。

表 1 检验光路的系统参数

Table 1 System parameters of testing optical path

No.	Type	Radius /mm	Thickness /mm	Glass	Diameter /mm	Conic
OBJ	Standard	Infinity	14.00		0.00	0.00
1	Standard	-17760.00	25.00	K9	3.69	0.00
2	Standard	202.69	1.00		8.03	0.00
3	Standard	196.33	72.00	K9	8.32	0.00
4	Standard	-446.15	8416.48		20.70	0.00
STP	Standard	-8000.00	-8416.48	Mirror	2007.55	-1.00
6	Standard	-446.15	-72.00	K9	201.36	0.00
7	Standard	196.33	-1.00		201.78	0.00
8	Standard	202.69	-25.00	K9	200.00	0.00
9	Standard	-17760.00	25.00	Mirror	199.43	0.00
10	Standard	202.69	1.00		200.01	0.00
11	Standard	196.33	72.00	K9	201.78	0.00
12	Standard	-446.15	8416.48		201.37	0.00
13	Standard	-8000.00	-8416.48	Mirror	2007.30	-1.00
14	Standard	-446.15	-72.00	K9	20.72	0.00
15	Standard	196.33	-1.00		8.33	0.00
16	Standard	202.69	-25.00	K9	8.05	0.00
17	Standard	-17760.00	-14.00		3.71	0.00
IMA	Standard	Infinity			0.00	0.00

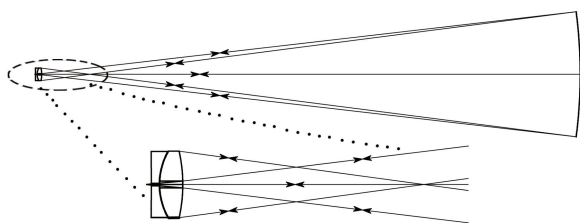


图 4 检验光路及局部放大图

Fig. 4 Testing optical path and partial enlarged view

整个光学系统残余像差的峰谷值  $W_{PV} = 0.0341\lambda$ , 均方根值  $W_{RMS} = 0.0120\lambda$ , 其中  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。系统的球差曲线如图 5 所示,  $W_{LA}$  为初级球差,  $H$  为光线在入瞳处的高度归一值, 波像差如图 6 所示。

为了保证检验光路对加工和装调过程中产生的误差不会过分敏感, 降低加工装调的难度, 对光学系统的参数进行公差分析。各个参数的公差可以分为

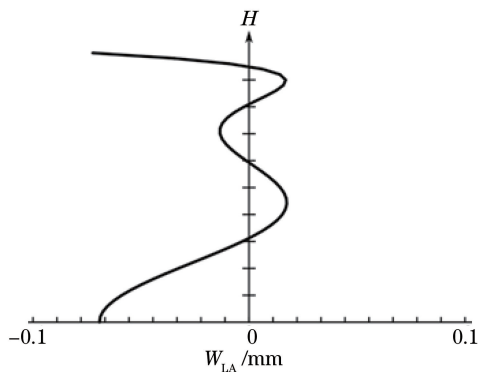


图 5 球差曲线

Fig. 5 Spherical aberration curve

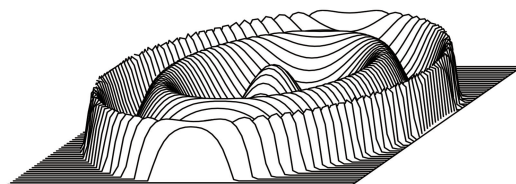


图 6 波像差图

Fig. 6 Wavefront map

两类, 有光学元件的加工公差和装调光路引入的误差。针对加工误差, 可以通过调整自准校正透镜组在光路中的位置减小透镜公差对光路产生的影响。自准校正透镜组的加工误差如表 2 所示。两片透镜的偏心误差在 0.05 mm 以内, 倾斜角度小于  $10''$ , 透镜折射率的精度为  $1 \times 10^{-6}$ , 面形误差小于 1/4 个光圈。

表 2 透镜组的公差范围

Table 2 Tolerance range of lens group

Parameter	Tolerance
$\Delta d_{12}$	$\pm 0.02$
$\Delta d_{23}$	$\pm 0.05$
$\Delta d_{34}$	$\pm 0.02$
$\Delta r_1$	$\pm 10.0$
$\Delta r_2$	$\pm 0.1$
$\Delta r_3$	$\pm 0.1$
$\Delta r_4$	$\pm 0.2$

从表 2 可以看到, 系统对于透镜组的公差要求还是较为宽松的, 目前的加工水平可以满足。装调过程中要求透镜组的偏心误差小于 0.05 mm, 倾斜角度小

于  $10''$ 。经过分析发现,透镜组上很小的倾斜角度和偏心误差对检验光路的残余像差影响较小,目前在实验室的水平下可以实现检验光路的装调。

## 5 分 析

### 5.1 特点与优势

提出的检验方法使用的是凹非球面反射镜中两个互为物像关系的点。检验光路中有实像点和虚像点两个,分别位于待检反射镜近轴曲率中心的前后。在 Offner 检验光路中只有一个实像点,补偿透镜位于像点的后方<sup>[19]</sup>,并将其作为对比点。共轭校正非球面检验光路中的一对共轭点将光轴分成三个区域,沿着光线传播的方向分别设为后区、中区和前区。所提的检验方法将自准校正透镜放置在共轭后点前,即后区和中区的边界附近,这可以减小检验光路的长度。由于自准校正透镜距离共轭前点的位置较远,光路中经过共轭前点入射到自准校正透镜的光线在透镜上的入射高度较高,此时自准校正透镜可以校正光路中的像差,实现对共轭前点的后校正。由于共轭后点与自准校正透镜的距离较近,光路中经过共轭后点入射到自准校正透镜的光线在透镜上入射高度很低,此时将自准透镜作为场镜。由于共轭后点与共轭前点在空间中的位置不同,因此光路中待检非球面反射镜反射前后的光线在自准校正透镜上的入射高度也不同,使得自准校正透镜可以同时作为校正镜和场镜来发挥作用。

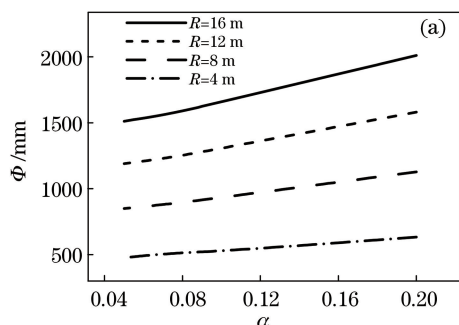


图 8 单透镜的检验能力。(a)最大口径;(b)最大相对孔径

Fig. 8 Single lens inspection ability. (a) Maximum aperture; (b) maximum relative aperture

从图 8 可以看到,对于不同顶点曲率半径的待检反射镜,其最大口径与口径比的关系呈近似线性,随着口径比的增大,最大口径逐渐增大,但增大的趋势较平缓,尤其是对于待检反射镜的顶点曲率半径较小的情况。对比图 8(a)和图 8(b)可以看到,当口径比固定时,随着顶点曲率半径的增大,最大口径逐渐增大,最大相对孔径逐渐减小。

所提方法可以在自准面上镀半反半透膜以实现光线的自准反射,从而避免由自准校正透镜造成的遮挡,实现对待检镜的全口径检验。实际检验过程中,为了使自准校正透镜加工方便,也可以在自准面上镀反射膜以实现光线的自准反射,在反射膜的中心位置留一个可以使入射光线通过,且口径为毫米量级的圆形不镀膜窗口,如图 7 所示,其中在斜线的部分镀反射膜。为了使图像表示清楚,中间的圆形窗口未按比例画出。

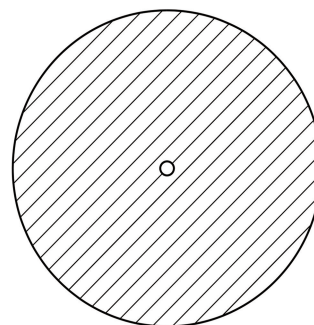
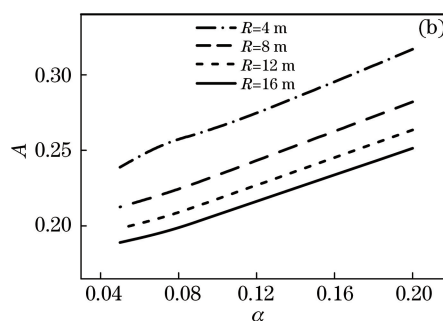


图 7 自准面上镀反射膜的示意图

Fig. 7 Schematic of reflective coating on self-collimating-surface

### 5.2 自准校正单透镜的检验能力

使用单个透镜作为自准校正透镜,以  $W_{PV} < 0.2\lambda$  为标准。在不同口径比的情况下,检验的最大口径以及最大相对孔径结果如图 8 所示,其中  $\Phi$  为最大口径, $A$  为最大相对孔径, $\alpha$  为口径比, $R$  为顶点曲率半径。



对于顶点曲率半径为 4 m 的反射镜,在校正透镜口径比为 0.20 的情况下,可以检验的最大口径为 634 mm,最大相对孔径为 0.32。

### 5.3 自准校正密接双透镜的检验能力

将密接的双透镜作为自准校正透镜,可以大大提高光学系统的检验能力。密接双透镜有两种结构形式,分别为正透镜在前面的正负透镜组以及负透

镜在前的负正透镜组。无论是哪种组合方式,透镜组的光焦度一定为正。图 9 和图 10 分别为两种

组合方式在不同口径比的情况下,可以检验的最大口径和最大相对孔径的变化曲线。

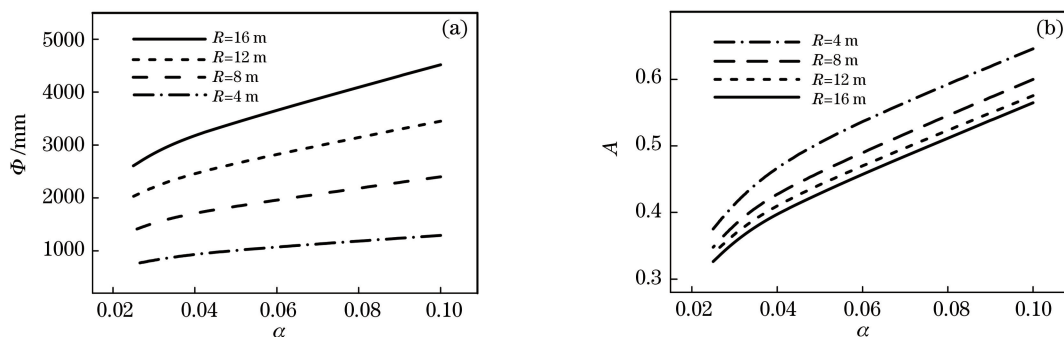


图 9 负正透镜的检验能力。(a)最大口径;(b)最大相对孔径

Fig. 9 Testing ability of negative and positive lenses. (a) Maximum aperture; (b) maximum relative aperture

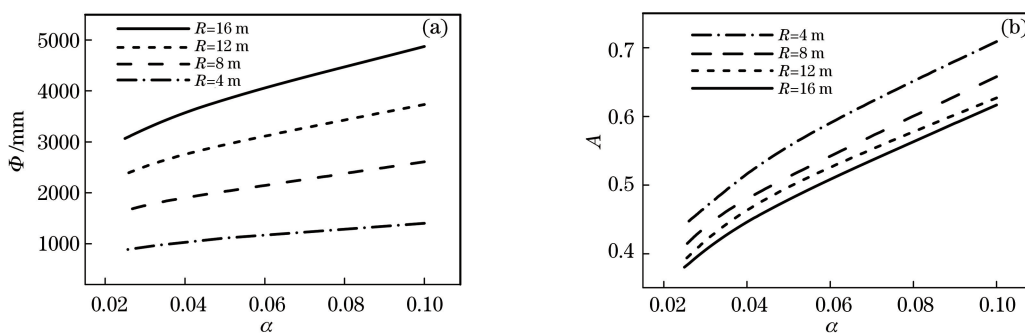


图 10 正负透镜的检验能力。(a)最大口径;(b)最大相对孔径

Fig. 10 Testing ability of positive and negative lenses. (a) Maximum aperture; (b) maximum relative aperture

从图 9 和图 10 可以看到,对于不同的顶点曲率半径,待检反射镜可检验的最大口径随着口径比的变化趋势是相同的,随着口径比的增大,可检验的最大口径与最大相对孔径逐渐增大。

对比图 9 和图 10 可以看到,当口径不变时,增大顶点曲率半径可以增大最大口径,但最大相对孔径逐渐减小。在相同的条件下,正负透镜组作为校正透镜可以检验的最大口径和最大相对孔径较大。对于顶点曲率半径为 4 m 的非球面反射镜,当校正透镜口径比为 0.10 时,负正透镜组作为校正透镜可以检验的最大口径为 1292 mm,最大相对孔径为 0.65,正负透镜组为作为校正透镜可以检验的最大口径为 1404 mm,最大相对孔径为 0.7。

## 6 结 论

提出一种新的检验凹非球面反射镜的方法,与 Offner 检验方法不同,将贴合双透镜作为自准校正透镜,并位于待检反射镜的共轭后点前,背离待检镜的一面为自准面。给出检验光路各参数的计算方法,给出顶点曲率半径为 8 m、口径为 2 m 的凹抛物面反射镜的检验光路及设计结果,并进行公差分析。

对检验方法的特点进行详细介绍,并分析透镜口径比的变化对检验能力的影响,以及不同曲率半径抛物面的检验结果。实验结果表明,自准校正透镜位于共轭后点前的检验方法可以用于大口径、大相对孔径凹非球面的检验,并且对于中等口径的凹非球面有十分出色的检验能力。

提出的检验方法在光路结构上与 Offner 检验方法有很大不同。两个共轭点将光轴分为三个区域,这三个区域分别定义为后区、中区和前区。位于共轭点前后的自准校正透镜可以同时作为校正透镜和场镜并起到校正像差的作用。由于检验光路的长度较短,自准校正透镜的口径也较小,这为光路的加工和装调提供方便。如果需要进一步提高透镜校正像差的能力,以实现超大口径、超大相对孔径凹非球面的检验,可以在光路中加入第三片透镜。关于第三片透镜的位置以及光路初始结构的计算方法,将会在后续的实验中进行详细说明。

## 参 考 文 献

- [1] Lallo M D. Experience with the Hubble Space Telescope: 20 years of an archetype [J]. Optical

- Engineering, 2012, 51(1): 011011.
- [2] Lightsey P A, Charles A, Mark C, et al. James Webb Space Telescope: large deployable cryogenic telescope in space[J]. Optical Engineering, 2012, 51(1): 011003.
- [3] Qi L L, Zheng L H, Ye L, et al. Convex aspheric surface testing method using an autocollimation lens[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0822001.  
戚丽丽, 郑列华, 叶璐, 等. 自准校正单透镜检验凸非球面的方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0822001.
- [4] Zhao P W, Zhang J P, Ye L, et al. Catadioptric testing of large aperture convex hyperboloid surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1122003.  
赵鹏玮, 张金平, 叶璐, 等. 折反射检验大口径凸双曲面的研究[J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1122003.
- [5] Chen X, Liu W Q, Kang Y S, 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 补偿器的结构设计及装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 88-93.
- [6] Li K X, Yuan L Y, Hao P M, et al. Design of null compensator to concave aspheric mirror with large diameter and large relative aperture[J]. Optical Instruments, 2009, 31(4): 44-48.  
李可新, 袁立银, 郝沛明, 等. 大口径大相对孔径非球面凹镜的零位补偿器设计[J]. 光学仪器, 2009, 31(4): 44-48.
- [7] Zhao C C, Hu M Y, Zhang S W, et al. Research on compensation testing method for large-aperture and high-order aspheric surface[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072203.  
赵础鑫, 胡明勇, 张少伟, 等. 大口径高次非球面补偿检测方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072203.
- [8] Yao J G, Zhang J P, Zheng L H, et al. Study on interference null compensator testing[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(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, 35(6): 0622003.
- [9] Hu W Q, Ye L, He Y, et al. Catadioptric null compensation test of a concave paraboloidal mirror with 4 m aperture[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2017, 34(4): 394-399.  
胡文琦, 叶璐, 何勇, 等.  $\phi 4$  m 口径凹抛物面镜折反零位补偿检验[J]. 量子电子学报, 2017, 34(4): 394-399.
- [10] Pan J H. Optical aspheric design, fabrication and test[M]. Beijing: Science Press, 1994: 71-79.  
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 71-79.
- [11] Zhang L, Hu W Q, Zheng L H, et al. Catadioptric null compensating test[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(7): 1222001.  
张珑, 胡文琦, 郑列华, 等. 折反射式零位补偿检验[J]. 光子学报, 2016, 45(7): 1222001.
- [12] He Y H, Li Q, Gao B, et al. Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021202.  
何宇航, 李强, 高波, 等. 基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021202.
- [13] Xie Y, Chen Q, Wu F, et al. Concave aspherical surface testing with twin computer-generated holograms[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(7): 1313-1317.  
谢意, 陈强, 伍凡, 等. 用双计算全息图检测凹非球面[J]. 光学学报, 2008, 28(7): 1313-1317.
- [14] Wang X K, Zhang X J, Wang L H, et al. Mathematical model and simulation for testing aspheric surface by annular subaperture stitching interferometry[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(4): 527-532.  
王孝坤, 张学军, 王丽辉, 等. 环形子孔径拼接干涉检测非球面的数学模型和仿真研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(4): 527-532.
- [15] Wang X K, Wang L H, Zhang X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 192-198.  
王孝坤, 王丽辉, 张学军. 子孔径拼接干涉法检测非球面[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 192-198.
- [16] Zhang Y M. Applied optics[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 18-21.  
张以谟. 应用光学[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 18-21.
- [17] Hao P M. Design of auxiliary optical system of aspherical testing[M]. Beijing: Science Press, 2017: 13-16.  
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: 13-16.
- [18] Lin D J. Design of optical engineering system[M]. Beijing: China Machine Press, 1987: 41-67.  
林大键. 工程光学系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 41-67.
- [19] Malacara D. Optical shop testing[M]. Yang L, Wu F, et al., Transl. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 340-343.  
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: 340-343.