

# 基于双回转相位板的非球面子孔径测量技术

宋 兵 陈善勇 王贵林

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 子孔径拼接技术与补偿检验技术的结合能够增加干涉仪的横向和垂直动态测量范围,适用于大口径、大非球面度的非球面的面形测量。利用一对相向回转的 Zernike 相位板作为近零位补偿器,产生可变的像差,补偿不同非球面在不同离轴位置的子孔径像差,使其剩余像差减小到干涉仪的垂直动态测量范围内。通过计算两个待测非球面的子孔径像差,求解 Zernike 相位板的相位函数;同时结合四台阶刻蚀工艺和载频技术,成倍提高衍射效率并隔离干扰衍射级次的影响。以同温层红外线天文台(SOFIA)望远镜的凸双曲面次镜和凹非球面反射镜为例,验证了该近零位补偿器实现不同非球面的子孔径像差补偿的能力,表明其具有良好的面形适应性。

**关键词** 测量;双回转相位板;近零位补偿器;非球面

**中图分类号** TB96 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1112007

## Subaperture Testing Technique of Aspheres Based on Counter-Rotating Phase Plates

Song Bing Chen Shanyong Wang Guilin

(College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** Subaperture stitching interferometry in combination with null test can extend the lateral and vertical dynamic range of measurement, which is applicable to surface figure measurement for large aperture and high-departure aspheres. By employing a pair of counter-rotating Zernike phase plates as near-null optics, variable aberration is generated to balance most of the aberration for subapertures at different locations on various aspheric surfaces. The residual aberration is hence reduced within the vertical dynamic measurement range of a standard interferometer. The subaperture aberration of two test aspheres is calculated to solve the phase function of the Zernike plates. Meanwhile, the four-step etching process and power carrier are introduced to double the efficiency of diffraction and isolate the disturbance orders of diffraction. Finally the flexibility of the near-null optics is well demonstrated by applying it to the convex hyperbolic secondary mirror of stratospheric observatory for the infrared astronomy (SOFIA) telescope and a concave asphere. All subaperture aberrations are successfully reduced by the near-null optics, which shows its good adaptability to surface shape.

**Key words** measurement; counter-rotating phase plate; near-null optics; asphere

**OCIS codes** 120.4630; 120.6650; 220.4840

## 1 引 言

大口径凸非球面广泛应用于大型空间、地基和深空探测望远镜系统中,其中的次镜,是参与高质量成像的重要组成元件。例如波音 747 机载的 2.5 m 同温层红外线天文台(SOFIA),次镜为 352 mm 口径

的 SiC 凸双曲面<sup>[1]</sup>;弗伯太空望远镜(JWST)望远镜的次镜为凸双曲面,口径约 740 mm<sup>[2]</sup>。

凸二次非球面可以利用一对无像差点,实现零位测试(Hindle 检验方法)。但是无像差点法受到测量光路的限制,不易实现,要求 1.5~2 倍或更大

**收稿日期**: 2013-06-05; **收到修改稿日期**: 2013-07-01

**基金项目**: 国家 973 计划(2011CB013200)

**作者简介**: 宋 兵(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: koochie123@163.com

**导师简介**: 陈善勇(1980—),男,博士,副教授,主要从事精密工程、光学加工与检测技术等方面的研究。

E-mail: mesychen@yahoo.cn(通信联系人)

口径的 Hindle 球面也增加了成本和难度,而且不适用于高次非球面。Smith 等<sup>[3]</sup>总结了大口径凸非球面次镜的 9 种测量方法,其中最具代表性的 3 种是 Hindle 检验、非球面测试样板和背面透过检验法。非球面测试样板法的样板口径大于被测凸非球面的口径,样板本身的材料均匀性、加工、检测与装调等是限制测量精度提高的主要障碍<sup>[4]</sup>。背面透过检验法是将凸非球面当作凹面检测,从而避免了凸面检测的难题,但是要求被测镜使用均匀性极高的熔石英等透光材料,且不再适用背面减重结构,对面形精度控制和整个光学系统的轻量化十分不利。

子孔径拼接方法基于“以小拼大”的思想,通过依次测量并拼接若干子孔径,得到全口径的面形误差,具有同时增大测量范围和提高横向分辨率的优点。该方法从 20 世纪 80 年代初提出以来,在测量原理和算法上都有较大发展<sup>[5-6]</sup>。由于子孔径的非球面度比全口径减小了,子孔径拼接方法可以直接测量一些非球面,包括凸非球面<sup>[7]</sup>。但是因为处于非零位测试状态,当非球面度增加时将导致子孔径数目太多而极大地增加了拼接测量难度。美国 QED 公司在 2010 年推出了利用可变零镜技术的非球面子孔径拼接工作站(ASD)<sup>[8]</sup>。可变零镜实际上是一对 Risley 棱镜,即一对楔形平板,两个平板相向回转时主要引入彗差;调整两个平板相对干涉仪光轴的整体倾斜,主要引入像散。通过这两个自由度,补偿子孔径的大部分像差。该方法的缺点是需要两个调整自由度,对准比较困难;并且需要调整补偿器的整体倾斜,存在圆形孔径畸变问题,同时要求波面干涉仪与被测镜面之间预留足够多的空间,不利于测试光路安排。

本文提出了一种新的可用于非球面子孔径测量的近零位补偿器,通过一对相向回转的 Zernike 相位板产生大小可调的像差,补偿不同形状非球面在不同位置子孔径的大部分像差,达到近零位测试条件,即到达被测子孔径的测试波前既不是与之完全匹配,也不是球面波,而是接近子孔径面形。该方案的优点是只需要一个调整自由度,结构简单紧凑,并且通过同步制作测试图样与辅助对准图样,能够实现测量光路的精确对准。

## 2 用于近零位补偿的双回转相位板设计

根据 Zernike 多项式的回转性质,一对 Zernike 相位板回转时能够产生大小变化的纯 Zernike 模式<sup>[9]</sup>。例如相位板的相位函数由 Zernike 多项式的  $Z_5$ ( $45^\circ$ 方向的像散与离焦)和  $Z_7$ (彗差与  $Y$  倾斜)两

项组成:

$$\begin{cases} aZ_5 = a\rho^2 \sin(2\theta) \\ bZ_7 = b(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\rho$  为归一化孔径坐标的极半径, $\theta$  为归一化孔径坐标的方位角, $a$  为  $Z_5$  多项式系数, $b$  为  $Z_7$  多项式系数;另一个相位板的相位函数也由  $Z_5$  和  $Z_7$  两项组成,不过多项式系数与第一个相位板互为相反数。当这一对相位板相向回转时,如图 1 所示,就能够产生大小变化的像差,且由 Zernike 多项式的  $Z_4$ ( $0^\circ$ 方向的像散与离焦)和  $Z_6$ (彗差与  $X$  倾斜)两项组成。

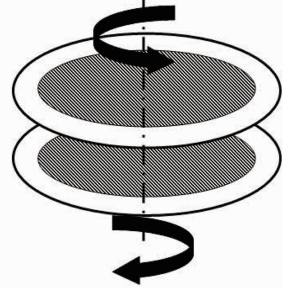


图 1 双回转相位板

Fig. 1 Counter-rotating phase plates

相位板可用计算机生成全息图(CGH)实现。传统补偿检验的 CGH 设计是根据单一的被测非球面,计算相位函数;而采用一对相位板时,因为没有完全补偿非球面的像差,相位函数需要根据不同非球面上不同离轴位置的子孔径像差进行设计。

### 2.1 非球面子孔径的像差系数

利用光学设计软件对非球面各个子孔径的像差进行分析,确定像差系数。以两个凸非球面反射镜为例,其中凸双曲面的二次常数 $-2.1172$ ,顶点曲率半径  $772.48$  mm,口径  $360$  mm。选择  $f/10.7$  的波面干涉仪镜头;根据子孔径重叠区大小确定离轴子孔径的中心法线与光轴的夹角  $\alpha$  分别为  $3.8^\circ$ 、 $7.6^\circ$  和  $11.4^\circ$ 。如图 2 所示,三圈离轴子孔径绕被测镜面光轴等角度间隔分布,角度间隔分别为  $45^\circ$ 、 $24^\circ$  和  $18^\circ$ 。由于回转对称性,同一圈子孔径的像差相同,因此只需计算三圈子孔径中沿  $x$  方向离轴的三个子孔径的像差。

在光学设计软件(如 Zemax)里建立非球面离轴子孔径的测量模型,如图 3 所示,其中第一相位板和第二相位板采用 Zernike Fringe Phase 建模,相位函数暂设为 0,口径为  $100$  mm。计算图 2 中三圈离轴子孔径的像差,主要由 Zernike 多项式的  $Z_4$  和  $Z_6$  两项组成:

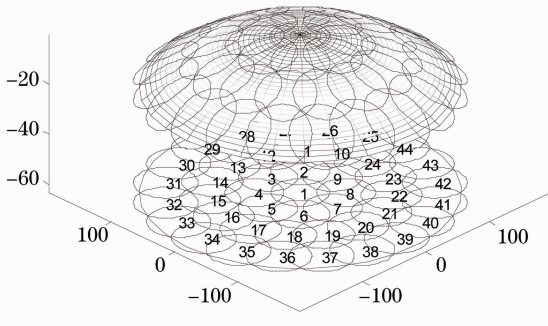


图 2 凸双曲面反射镜的近零位子孔径划分  
Fig. 2 Subaperture layout of near-null position of a convex hyperbolic mirror

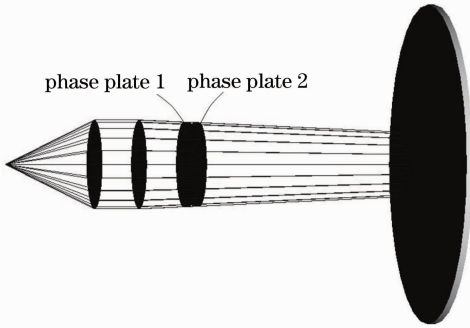


图 3 非球面子孔径的像差计算模型  
Fig. 3 Aberration calculating model of aspheric subapertures

$$\begin{cases} Z_4 = \rho^2 \cos(2\theta) \\ Z_6 = (3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta \end{cases} \quad (2)$$

计算得到三圈离轴子孔径像差对应  $Z_4$  的系数分别为  $10.98095\lambda$ 、 $44.28098\lambda$ 、 $100.58339\lambda$ ，对应  $Z_6$  的系数分别为  $4.60648\lambda$ 、 $9.53234\lambda$ 、 $15.18158\lambda$ （其中  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$  为波面干涉仪光源的波长）。此时的子孔径如果采用干涉仪直接测量，将会得到密集条纹而无法解析。

同时考虑某高次凸非球面，顶点曲率半径为  $1023.76 \text{ mm}$ 、二次常数为 0、有效口径  $320 \text{ mm}$ 、4 次项系数  $-1.868 \times 10^{-10}$ 、6 次项系数  $-5.48 \times 10^{-16}$ 。采用三圈离轴子孔径，对应  $Z_4$  和  $Z_6$  的系数分别为  $2.48578\lambda$ 、 $10.53178\lambda$ 、 $26.04423\lambda$  和  $1.13212\lambda$ 、 $2.46846\lambda$ 、 $4.27858\lambda$ 。

## 2.2 相位函数设计

计算各离轴子孔径的像差并获得其中对应

Zernike 多项式的  $Z_4$  和  $Z_6$  两项系数，取其一半，分别用  $x_i$  和  $y_i$  表示，

$$\begin{cases} x_i = 2x_0 \sin(2\gamma_i) \\ y_i = 2y_0 \sin(\gamma_i) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $i = 1, 2, \dots, n$  为离轴子孔径的序号。求解 (3) 式即得到所求的相位函数。求解后得到的  $x_0$  和  $y_0$  即为相位板的相位函数中对应多项式  $Z_5$  和  $Z_7$  的系数， $\gamma_i$  是测量第  $i$  个子孔径时对应的相位板绕光轴顺时针方向的回转角度；另一个相位板则取相反数。解得  $x_0 = 50.2392\lambda$ 、 $y_0 = 16.4955\lambda$ ， $\gamma_i$  依次取值为  $1.6308^\circ$ 、 $6.4176^\circ$ 、 $14.9618^\circ$ 、 $0.3709^\circ$ 、 $1.5191^\circ$ 、 $3.7096^\circ$ ，且方程组的残差对于每个子孔径都小于  $2\lambda$ 。于是得到第一相位板和第二相位板的相位函数分别为  $W_5 + W_7$  和  $W'_5 + W'_7$ ，即

$$\begin{cases} W_5 = 50.2392\lambda \rho^2 \sin(2\theta) \\ W_7 = 16.4955\lambda (3\rho^2 - 2) \sin \theta \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} W'_5 = -50.2392\lambda \rho^2 \sin(2\theta) \\ W'_7 = -16.4955\lambda (3\rho^2 - 2) \sin \theta \end{cases}. \quad (5)$$

上面的像差计算结果表明，大部分非球面引入的像差主要是彗差和像散，因此上述两个相位板相向回转时，产生大小可调的  $Z_4$  和  $Z_6$ ，能够补偿子孔径的大部分像差。

## 2.3 辅助对准图样与载频

Zernike 相位板可用 CGH 实现，CGH 的图案除了用作像差补偿的部分外，还可以在同一个基板上制作对准图案，用于对准相位板与波面干涉仪的初始位置以及两个相位板之间的初始位置，从而简化子孔径测量的校准与对准过程，提高测量精度。如图 4 所示，CGH 用作像差补偿的图案制作在两个相位板的中心区域，而辅助对准图案制作在边缘区域。

采用一对 CGH 进行光学面形测量时，测试光束两次透过 CGH，必须考虑衍射效率  $\eta$  和干扰级次。通过制作 4 台阶型 CGH，可将 +1 级衍射效率从 40% 提高到 81%。各级衍射效率如表 1 所示<sup>[10]</sup>，可见有可能造成干扰的衍射级次  $m$  主要是一 3 级和 +5 级，衍射效率分别是 9.01% 和 3.24%。考虑到干扰级次两次透过双 CGH 后的衍射效率很低，造成的鬼像可以忽略不计。同时为了进一步分离其他衍射级次造成的干扰，还可以引入离焦载频方式。

表 1 四台阶 CGH 的各级衍射效率

Table 1 Diffraction efficiency of each orders of four-step CGH

$m$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
$\eta/\%$	1.65	0	0	0	9.01	0	0	0	81.06	0	0	0	3.24	0	0

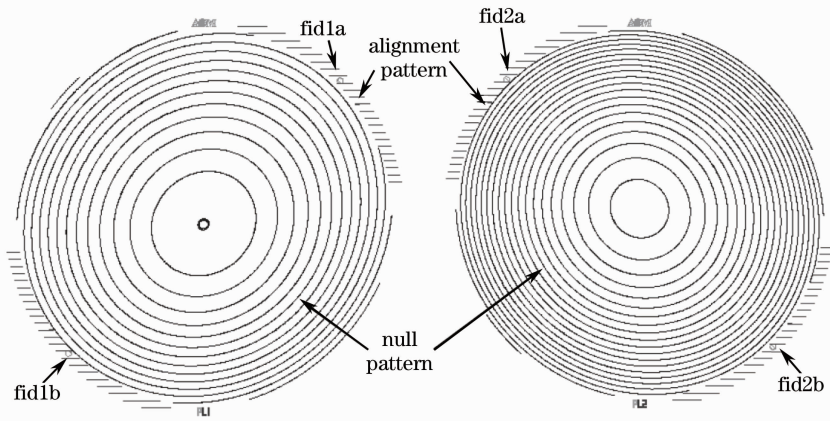


图 4 双回转相位板的测试图样与辅助对准图样

Fig. 4 Test pattern and assisted alignment pattern of counter-rotating phase plates

引入离焦载频的另一个优点是可以将干涉仪的球面镜头替换为平面镜头,从而相位板相对干涉仪只需要对准二维倾斜。最终设计得到的相位函数如图 4 所示,主要由 Zernike 多项式的  $Z_3$  (离焦)、 $Z_4$  和  $Z_6$  组成。

#### 2.4 子孔径的剩余像差

由于近零位补偿器不需要完全补偿非球面的像差,测试光束第一次通过相位板和经过非球面子孔

径反射后第二次通过相位板所经过的光程是不同的,因此在确定相位函数后,还需要根据实际子孔径像差大小调整回转角度,进一步减小子孔径的剩余像差。经验证,上述两个凸非球面反射镜的子孔径在经过近零位补偿后的剩余像差分别如图 5 和图 6 所示,其中 PV 为峰谷值,RMS 为均方根值,在干涉仪的垂直测量范围之内。

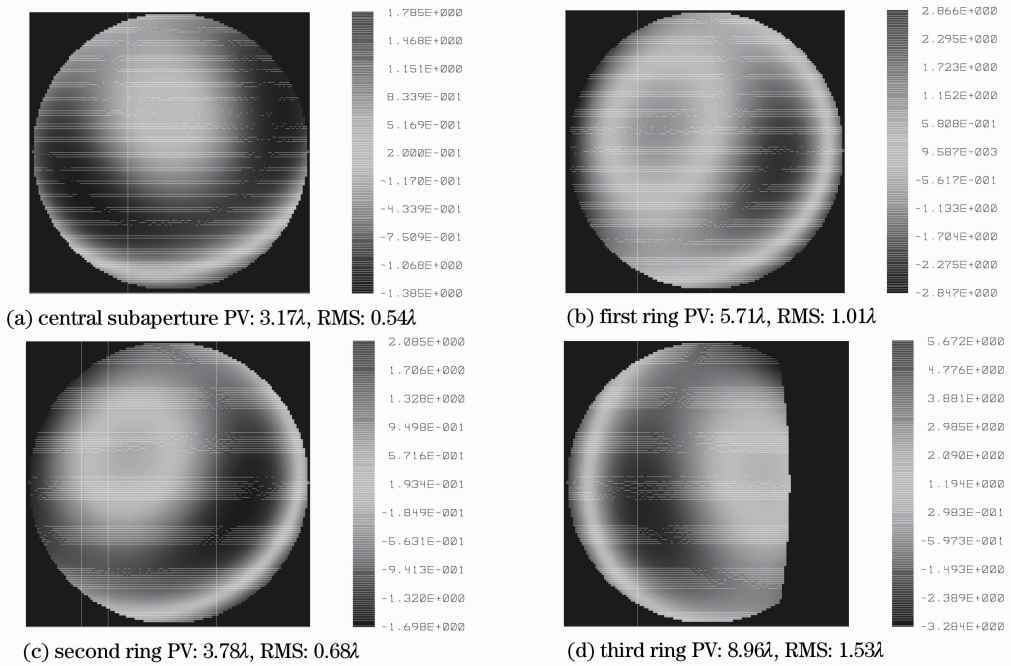


图 5 凸双曲面反射镜子孔径的剩余像差

Fig. 5 Residual aberration of subaperture of the convex hyperbolic mirror

分析各级衍射形成的干扰,当像面采用 3 mm 直径的小孔滤波时,按照光线经过 CGH 的先后顺序排列,除  $(-3, +5, -3, +5)$  或  $(+5, -3, +5,$

$-3)$  的衍射级次组合将形成较明显的鬼像外,其他衍射级次不会造成干扰。但是计算干扰级次  $(-3, +5, -3, +5)$  的衍射效率仅为 0.0008%,因此形成

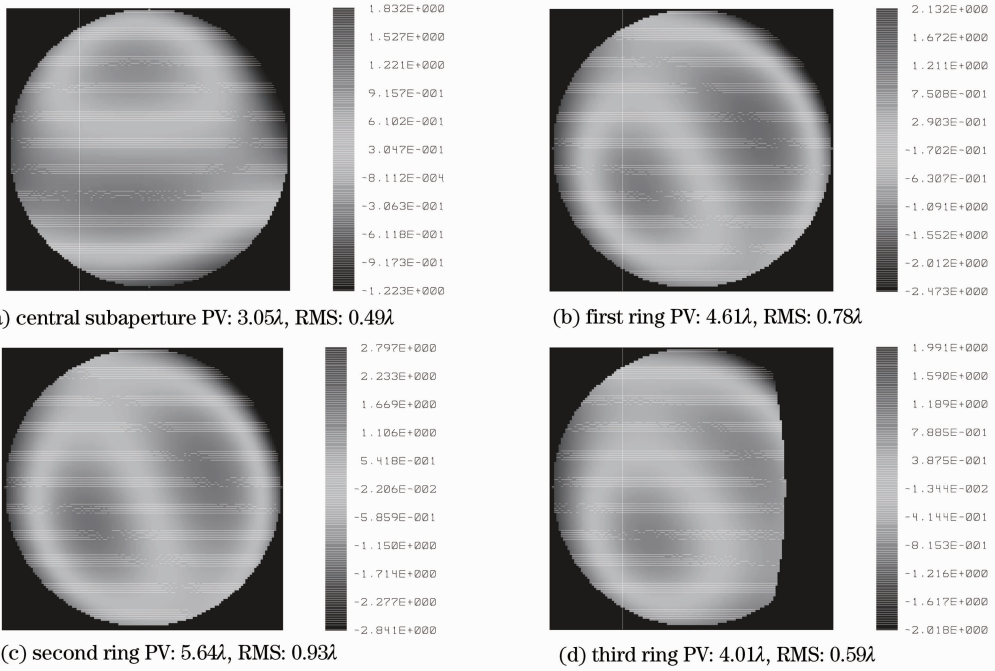


图 6 高次凸非球面反射镜子孔径的剩余像差

Fig. 6 Residual aberration of subaperture of the higher order convex asphere mirror

鬼像的光强非常弱,可以忽略。

### 3 近零位补偿器的面形适应性

尽管近零位补偿器是针对两个凸非球面进行设计的,但是通过调整两个相位板的回转角度,可以产生不同的彗差与像散组合,从而灵活适用于不同形状的非球面。下面以 SOFIA 望远镜的次镜和某凹

非球面进行验证。

#### 3.1 SOFIA 望远镜的次镜

SOFIA 次镜是凸双曲面,顶点曲率半径为 954.5 mm,二次常数为-1.28,口径 352 mm,非球面度约 44.1 μm。划分为三圈离轴子孔径,子孔径的离轴量  $d_0$ 、相位板回转角度  $\gamma_i$  和补偿后剩余像差大小如表 2 所示,在干涉仪的垂直测量范围之内。

表 2 SOFIA 次镜的子孔径剩余像差

Table 2 Residual aberrations of subaperture of SOFIA's secondary mirror

Subaperture	First ring	Second ring	Third ring
$d_0/\text{mm}$	50.0040	100.1672	150.6498
$\gamma_i/(\text{^\circ})$	0.4862	2.1330	4.9387
Residual aberration / $\lambda$	PV 4.39; RMS 0.78	PV 4.55; RMS 0.81	PV 2.82; RMS 0.46

#### 3.2 凹非球面

上述近零位补偿器同样适用于凹非球面,与凸非球面测量不同,此时子孔径应是沿着一  $x$  方向离轴的。设凹非球面为顶点曲率半径 1400 mm、口径

540 mm 的凹抛物面,非球面度约 60.5 μm,采用三圈离轴子孔径,子孔径的离轴量  $d_0$ 、相位板回转角度  $\gamma_i$  和补偿后剩余像差大小如表 3 所示,在干涉仪的垂直测量范围之内。

表 3 凹非球面的子孔径剩余像差

Table 3 Residual aberrations of subaperture of the concave asphere

Subaperture	First ring	Second ring	Third ring
$d_0/\text{mm}$	80	160	240
$\gamma_i/(\text{^\circ})$	0.8505	3.0965	6.9197
Residual aberration / $\lambda$	PV 4.49; RMS 0.77	PV 4.40; RMS 0.74	PV 3.95; RMS 0.49

## 4 结 论

非球面离轴子孔径的像差大部分是彗差和像

散,因此利用一对相对回转的 Zernike 相位板,可以补偿不同形状非球面在不同离轴位置子孔径的大部

分像差,实现近零位的子孔径拼接测量。通过光学设计仿真验证,该近零位补偿器具有灵活适用于多种面形的像差补偿能力,改变了传统补偿检验“一对一”的模式。在此基础上结合子孔径拼接算法(例如 QED 公司的拼接算法<sup>[11]</sup>),对于检测大口径凸非球面甚至扩展应用于自由曲面具有很大优势。

## 参 考 文 献

- 1 M Fruit, P Antoine, J Varin, *et al.*. Development of the SOFIA silicon carbide secondary mirror [C]. SPIE, 2003, 4857: 274—285.
- 2 M Tricard, P E Murphy. Subaperture Stitching for Large Aspheric Surfaces [R]. Talk for NASA Tech Day, 2005.
- 3 W S Smith, G W Jones. Comparison of metrology methods for large astronomical secondary mirrors [C]. SPIE, 1994, 2263: 243—252.
- 4 Chang Jun, Li Fengyou, Weng Zhicheng, *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.
- 5 S Y Chen, S Y Li, Y F Dai, *et al.*. Iterative algorithm for subaperture stitching test with spherical interferometers [J]. J Opt Soc Am A, 2006, 23(5): 1219—1226.
- 6 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui, *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 883—888.  
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法 [J]. 光学学报, 2008, 28(5): 883—888.
- 7 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.
- 8 M Tricard, A Kulawiec, M Bauer, *et al.*. Subaperture stitching interferometry of high-departure aspheres by incorporating a variable optical null [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 547—550.
- 9 E Acosta, S Bará. Variable aberration generators using rotate Zernike plates [J]. J Opt Soc Am A, 2005, 22(9): 1993—1996.
- 10 I A Erteza. Diffraction Efficiency Analysis for Multi-Level Diffractive Optical Elements [R]. Sandia Report SAND951697, 1995.
- 11 P Murphy, G Devries, C Brophy, *et al.*. Stitching of Near-Nulled Subaperture Measurements; US, WO/2009/126269 [P]. 2009-10-15.

栏目编辑: 韩 峰