

# 光栅横向剪切干涉仪系统误差的校正方法

张璐<sup>1,2\*\*</sup>, 向阳<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对光栅横向剪切干涉仪研究了旋转绝对检测的方法,并用前 36 项 Zernike 多项式标定出剪切装置的系统误差非对称项。研究表明,将面形检测的绝对算法应用于检测镜头系统波像差,在干涉仪系统误差消除后可以达到相对理想的检测精度。实验数据的重复性的均方根可以达到 0.14 nm。

**关键词** 测量; 光刻镜头; 绝对检测; 光栅横向剪切干涉仪; 系统波像差

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0804008

## Correction Algorithm of Systemic Errors in Grating Lateral-Shearing Interferometer

Zhang Lu<sup>1,2\*\*</sup>, Xiang Yang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

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

**Abstract** The rotation absolute algorithm is studied for the grating lateral-shearing interferometer, and the first 36-term Zernike polynomials are used to characterize the asymmetric term in the systemic errors of the shearing setup. The research results show that the relatively ideal measurement precision can be obtained after the systemic errors are removed if the absolute algorithm of surface figure testing is used to the testing of wavefront aberration in lens system. In addition, the RMS of the repeatability of the experimental data can approach 0.14 nm.

**Key words** measurement; lithographic lens; absolute testing; grating lateral-shearing interferometer; systemic wavefront aberration

**OCIS codes** 120.3180; 120.3940; 120.4800

## 1 引言

光刻物镜是光刻机的核心组件,其精度会直接影响光刻机的特征线宽和套刻精度。研发高精度的光刻物镜需要有对应的高精度光刻物镜系统波像差检测设备。检测光刻物镜系统波像差的方法主要有 Hartmann-Shank 法<sup>[1-2]</sup>、点衍射干涉法<sup>[3-4]</sup>和光栅剪切干涉法<sup>[5-6]</sup>等。对于波长为 193 nm 的光刻镜头,在系统误差校正后采用光栅剪切干涉法更容易实现超高精度的绝对检测。

绝对检测的原理是通过消除参考平面误差的影响来获得被测面的绝对面形信息,绝对检测技术主

要用于面形测量<sup>[7]</sup>。早在 20 世纪 70 年代, Jensen 等<sup>[8-9]</sup>提出了一种基于两个球面三个位置的球面面形绝对检测方法。Parks<sup>[10]</sup>提出了单次旋转法,通过两次测量以及求解相应的 Zernike 多项式来获得被测面形的低频信息。后来,学者们在三位置法以及单次旋转法的基础上又提出了两位置法<sup>[11]</sup>和旋转平均法<sup>[12]</sup>。

近年来,用于面形检测的方法及应用越来越多<sup>[13-18]</sup>,而这些绝对方法同样可以用于光学系统的波前检测<sup>[19]</sup>。根据光栅横向剪切干涉仪的原理,猫眼位置测量以及平移测量无法适用于该设备,只能使用旋转绝对检测方法。本文实验中的剪切装置使

收稿日期: 2018-03-15; 修回日期: 2018-04-13; 录用日期: 2018-04-19

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX02005)

\* E-mail: y.xiang@sklao.ac.cn; \*\* E-mail: zhanglu314@mails.ucas.ac.cn

用较大的转台,可以避免旋转角度误差,但是在旋转时被测镜头会产生微小的偏心误差,根据光栅剪切干涉仪的原理,其相应位置的相位会发生变化,从而产生可变系统误差。关于旋转绝对检测方法,单次旋转法<sup>[10]</sup>的检测过程简单,只需两次测量,但是由于不能确定偏心误差较小的旋转角度位置,该算法的精度会受到影响;平均旋转法<sup>[12]</sup>理论上具有较高的精度,但这种方法需要多次的旋转,会引入更多的随机系统误差。针对光栅横向剪切干涉仪,Mack等<sup>[13]</sup>提出的误差分离法同样可以用来检测光刻镜头的系统波像差,而且对偏心产生的可变系统误差免疫。本文在光栅横向剪切干涉检测设备上,研究了Mack等的误差分离绝对检测方案,并通过实验对比分析了该算法与单次旋转法消系统误差后的结果。

## 2 消系统误差算法

将误差分离法<sup>[13]</sup>的原理应用在光栅横向剪切干涉仪上,被测镜头在初始位置处的系统波像差可以表示为

$$W(\rho, \theta) = T_r(\rho, \theta) + W_s(\rho, \theta), \quad (1)$$

式中  $T_r(\rho, \theta)$  表示被测镜头系统波像差的真实值,  $W_s(\rho, \theta)$  为由干涉仪引起的恒定系统误差,  $\rho$  为极坐标系的径向坐标,  $\theta$  为方位角坐标。光刻镜头系统波像差的前 36 项 Zernike 多项式非对称项可以表示为

$$T(\rho, \theta) = \sum_{n=0}^{10} \sum_{m=0}^5 R_n^m(\rho) (a_n^m \cos m\theta + a_n^{-m} \sin m\theta), \quad (2)$$

式中  $R_n^m$  为 Zernike 多项式的径向函数,  $m$  为角向因子,  $n$  为径向因子,  $a_n^m$ 、 $a_n^{-m}$  为系统波像差系数。系统波像差系数可以简化为  $a_n^{\pm m} = (a_n^m, a_n^{-m})$ ; 同理,实验测得的系统波像差  $W(\rho, \theta)$  的系数可表示为  $x_n^{\pm m} = (x_n^m, x_n^{-m})$ , 系统误差  $W_s(\rho, \theta)$  的系数可表示为  $a_{sn}^{\pm m} = (a_{sn}^m, a_{sn}^{-m})$ 。

当镜头转动  $\varphi$  角度时,其系统波像差为

$$T(\rho, \theta + \varphi) = \sum_{n=0}^{10} \sum_{m=0}^5 R_n^m(\rho) \cdot [a_n^m \cos m(\theta + \varphi) + a_n^{-m} \sin m(\theta + \varphi)], \quad (3)$$

则系统波像差系数为  $a_{\varphi n}^{\pm m} = a_n^{\pm m} \cdot |A|$ , 其中

$$|A| = \begin{bmatrix} \cos m\varphi & -\sin m\varphi \\ \sin m\varphi & \cos m\varphi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

可见,当  $\cos m\varphi = -1$  时,  $a_{\varphi n}^{\pm m} = -a_n^{\pm m}$ 。则所提算法需要测量透镜在四个角度  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $180^\circ$  (顺时针或逆时针均可) 位置处的系统波像差。

被测镜头在不同角度位置处的系统波像差非对称项系数组合如下:

$$x_{\pm 45n}^{\pm m} + x_n^{\pm m} = a_{\pm 45n}^{\pm m} + a_n^{\pm m} + 2a_{sn}^{\pm m}, \quad (5)$$

$$x_{\pm 90n}^{\pm m} + x_n^{\pm m} = a_{\pm 90n}^{\pm m} + a_n^{\pm m} + 2a_{sn}^{\pm m}, \quad (6)$$

$$x_{\pm 180n}^{\pm m} + x_n^{\pm m} = a_{\pm 180n}^{\pm m} + a_n^{\pm m} + 2a_{sn}^{\pm m}. \quad (7)$$

对于干涉仪的系统误差,其角向因子  $m=4$  的系数可以由(5)式求出;角向因子  $m=2$  的系数可以由(6)式求出;角向因子  $m=1, 3, 5$  的系数可以由(7)式求出,即

$$a_{sn}^{\pm 4} = \frac{x_{\pm 45n}^{\pm 4} + x_n^{\pm 4}}{2}, \quad (8)$$

$$a_{sn}^{\pm 2} = \frac{x_{\pm 90n}^{\pm 2} + x_n^{\pm 2}}{2}, \quad (9)$$

$$a_{sn}^{\pm 1,3,5} = \frac{x_{\pm 180n}^{\pm 1,3,5} + x_n^{\pm 1,3,5}}{2}. \quad (10)$$

## 3 实验分析

为了验证误差分离法<sup>[13]</sup>在光栅横向剪切干涉仪上的检测精度,在剪切干涉仪装置上进行了实验,实验光源的工作波长为  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ 。研发的光栅横向剪切干涉仪工作原理<sup>[20-21]</sup>如图 1 所示。用光栅横向剪切干涉仪采集到两个正交方向上的九幅剪切干涉图,再通过九步相移算法<sup>[22]</sup>以及波前重建算法,可以得到被测镜头在初始位置的系统波像差。在初始位置进行重复性实验,得到被测镜头系统波像差的重复性的均方根可以达到  $0.14 \text{ nm}$ 。

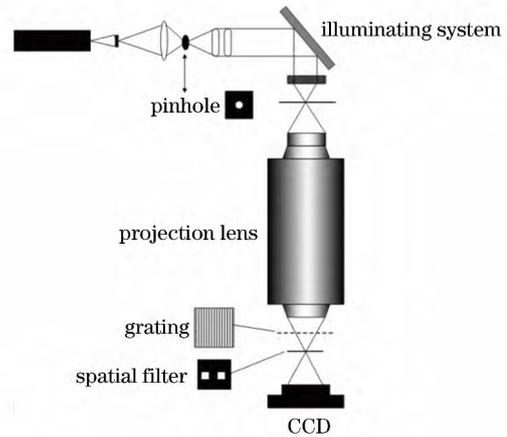


图 1 光栅横向剪切干涉仪原理图

Fig. 1 Schematic of grating lateral shearing interferometer

将被测镜头分别旋转  $45^\circ, 90^\circ$  和  $180^\circ$ , 依次测得各个角度下携带被测透镜系统波像差的横向剪切干涉图,如图 2 所示,并得到了透镜在这三个角度位置处的系统波像差。从图 2 可以看出,在旋转过程中,各角度位置的干涉图会发生微小偏移。为了使位移

量变得更加可观,通过数字图像处理技术估算出了  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  干涉图的中心坐标位置,分别为:  $0^\circ(452, 489)$ 、 $45^\circ(443, 481)$ 、 $90^\circ(443, 472)$ 、

$180^\circ(463, 460)$ 。消系统误差前,被测透镜在各个位置的系统波像差图如图 3 所示。分别用单次旋转法<sup>[10]</sup>和误差免疫法<sup>[13]</sup>对系统误差进行校正。

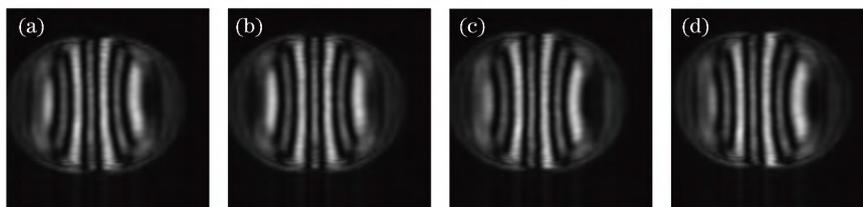


图 2 被测镜头在不同角度位置处的干涉图。(a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $180^\circ$

Fig. 2 Interferogram acquired when tested lens is at different angular positions. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $180^\circ$

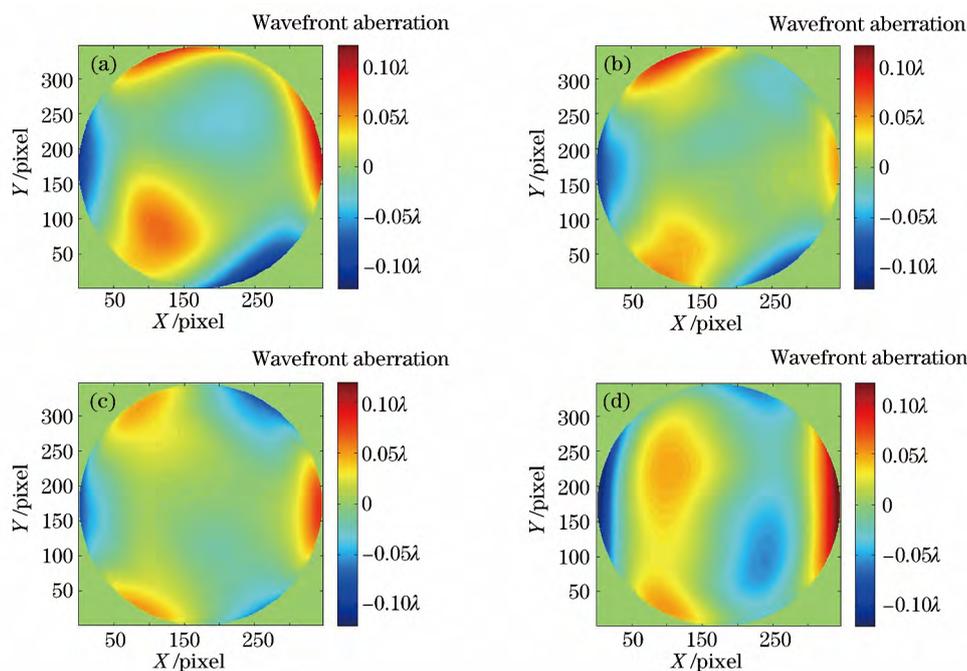


图 3 被测镜头在不同角度位置处的系统波像差图。(a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $180^\circ$

Fig. 3 Wavefront aberrations of tested lens at different angular positions. (a)  $0^\circ$ ; (b)  $45^\circ$ ; (c)  $90^\circ$ ; (d)  $180^\circ$

单次旋转法校正系统误差后,得到透镜在各个位置处的系统波像差图如图 4 所示。四个位置的被测镜头系统波像差图存在很大的差异。使用光栅横向剪切干涉仪检测镜头系统波像差时,单次旋转法不能免疫旋转过程中由偏心造成的可变系统误差,故检测精度不能达到预期结果。

通过误差分离法得到的被测镜头系统波像差图如图 5 所示。从图 5 可以看出,利用该算法得到的四幅被测镜头系统波像差图有明显的与角度相对应的旋转,而且其系统波像差图的差异和图 4 相比也较小,说明误差分离法更适用于校正来自光栅横向剪切干涉仪的系统误差。

消系统误差前后系统波像差的峰谷(PV)和均方根(RMS)值见表 1,可以看出,误差分离法对偏心

造成的可变系统误差不敏感,具有很强的适应性。图 6 所示是利用误差分离法和单次旋转法计算得到的系统误差的前 36 项 Zernike 多项式系数的对比图,可以清楚地看出两算法标定出的系统误差的差异,与理论分析相符。

## 4 结 论

为了降低光栅横向剪切干涉仪系统误差对被测镜头系统波像差的影响,对旋转绝对检测的方法进行了研究。结果表明,用于面形检测的绝对算法同样可以用于镜头的系统波像差检测,并标定出剪切干涉仪的系统误差;对于所提的光栅横向剪切干涉仪,误差分离法比单次旋转法更适于校正来自干涉仪的系统误差。

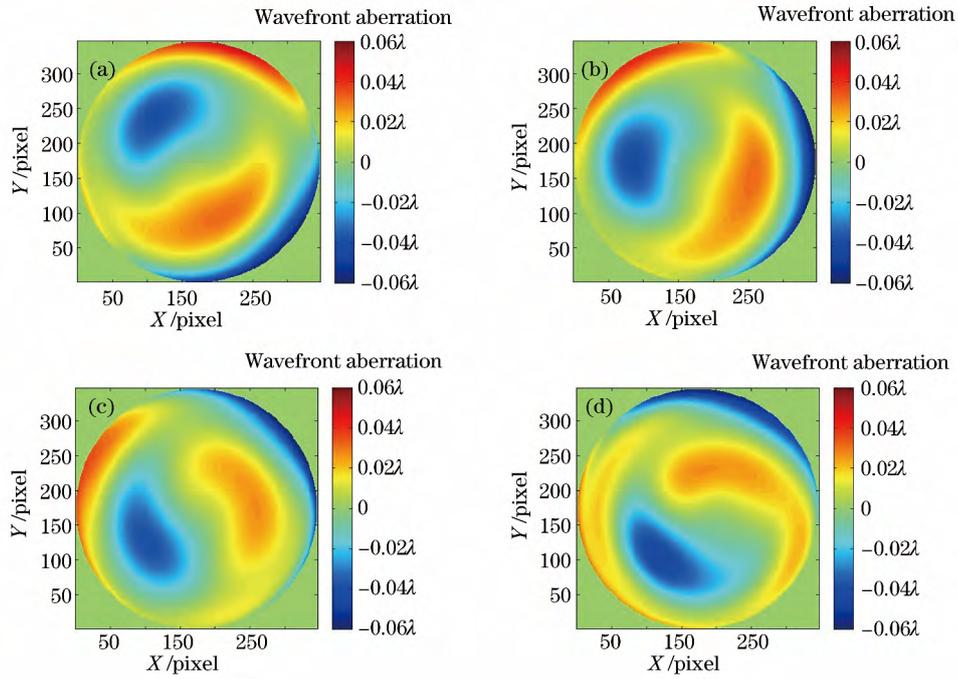


图 4 45° 单次旋转法消系统误差后不同角度位置处的系统波像差图<sup>[9]</sup>。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 180°

Fig. 4 Wavefront aberrations at different angular positions after systemic errors are removed by 45° single-rotation algorithm<sup>[9]</sup>. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 180°

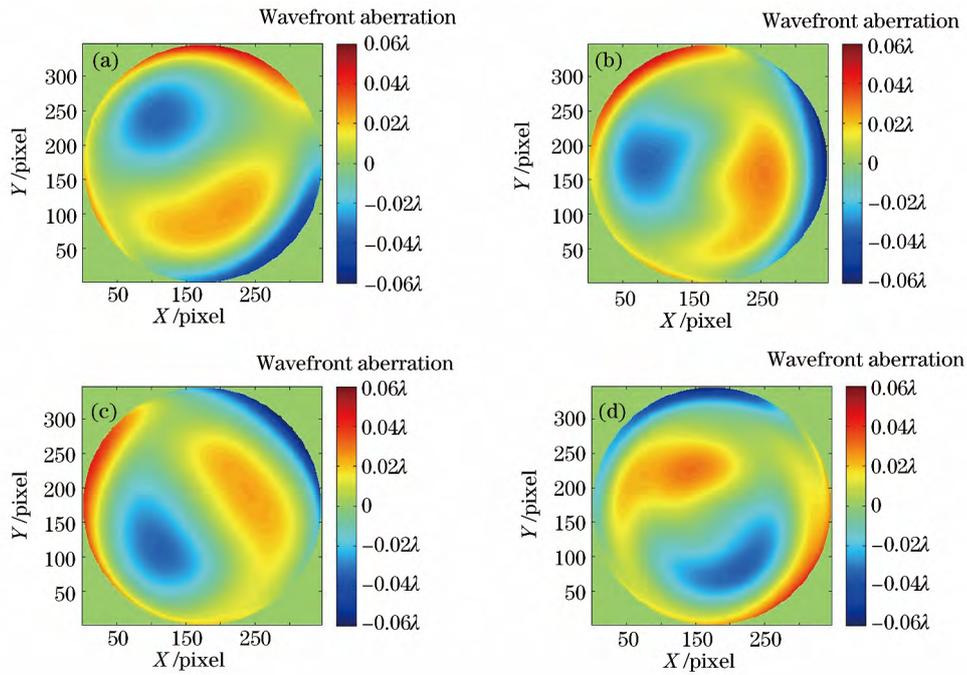


图 5 误差分离法消系统误差后不同角度位置处的系统波像差图<sup>[12]</sup>。(a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 180°

Fig. 5 Wavefront aberrations at different angular positions after systemic errors are removed by error separation algorithm<sup>[12]</sup>. (a) 0°; (b) 45°; (c) 90°; (d) 180°

表 1 消系统误差前后系统波像差的 PV 和 RMS 值

Table 1 PV and RMS values of wavefront aberrations before and after systemic errors are removed

Rotation angle	Before systemic error elimination		Single-rotation algorithm		Error separation algorithm	
	PV /10 <sup>-3</sup>	RMS /10 <sup>-3</sup>	PV /10 <sup>-3</sup>	RMS /10 <sup>-3</sup>	PV /10 <sup>-3</sup>	RMS /10 <sup>-3</sup>
0°	217.43λ	33.210λ	116.46λ	19.681λ	99.852λ	18.105λ
45°	192.40λ	26.185λ	117.36λ	19.802λ	111.71λ	18.509λ
90°	160.98λ	23.668λ	110.64λ	18.214λ	113.44λ	18.074λ
180°	274.95λ	36.529λ	97.950λ	18.846λ	101.86λ	17.586λ

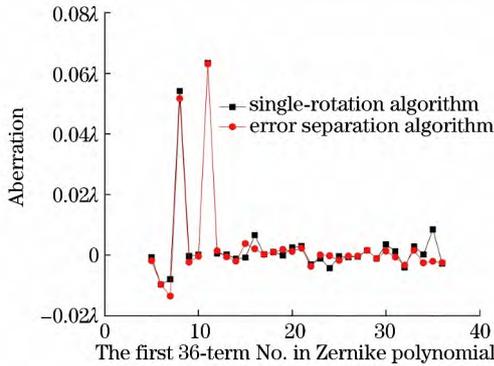


图 6 两种算法标定出的干涉仪系统误差前 36 项 Zernike 多项式系数

Fig. 6 Coefficients of the first 36-terms in Zernike polynomial of systemic errors acquired by two algorithms

致谢 感谢齐克奇对本文的帮助。

参 考 文 献

[1] Bueno J M, Acosta E, Schwarz C, et al. Wavefront measurements of phase plates combining a point-diffraction interferometer and a Hartmann-Shack sensor[J]. Applied Optics, 2010, 49(3): 450-456.

[2] Yu Y H, Dong W D, Xu Z H, et al. Method for blurred image restoration based on Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0828005.

余玉华, 董文德, 徐之海, 等. 基于哈特曼夏克波前传感器的模糊图像复原方法[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0828005.

[3] Ouchi C, Kato S, Hasegawa M, et al. EUV wavefront metrology at EUVA[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6152: 61522O.

[4] Yu C S, Xiang Y. Research progress of pinhole mask technology of point diffraction interferometer [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030004.

于长淞, 向阳. 点衍射干涉仪小孔掩模技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030004.

[5] Wyant J C. Double frequency grating lateral shear interferometer[J]. Applied Optics, 1973, 12(9):

2057-2060.

[6] Schreiber H, Schwider J. Lateral shearing interferometer based on two Ronchi phase gratings in series[J]. Applied Optics, 1997, 36(22): 5321-5324.

[7] Zhou P W, Ma H C. Research of statistical methods for mirror surface figure error [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041201.

周平伟, 马宏财. 镜面面形误差统计方法研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041201.

[8] Jensen A E. Absolute calibration method for laser Twyman-Green wavefront testing interferometers [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1973, 63: 1313A.

[9] Malacara D. Optical shop testing[M]. New York: John Wiley & Sons, 1992.

[10] Parks R. Removal of test optics errors [J]. Proceedings of SPIE, 1978, 153: 56-63.

[11] Creath K, Wyant J C. Testing spherical surfaces: A fast, quasi-absolute technique [J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4350-4354.

[12] Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal [J]. Applied Optics, 1996, 35(7): 1015-1021.

[13] Mack S K, Rich T, Webb J E, et al. Error separation technique for microlithographic lens testing with null configurations [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4346: 1328-1339.

[14] Schreiner R, Schwider J, Lindlein N, et al. Absolute testing of the reference surface of a Fizeau interferometer through even/odd decompositions[J]. Applied Optics, 2008, 47(32): 6134-6141.

[15] Su D, Miao E, Sui Y, et al. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials [J]. Optics Letters, 2012, 37(15): 3198-3200.

[16] Wang W, Zhang M, Yan S, et al. Absolute spherical surface metrology by differencing rotation maps[J]. Applied Optics, 2015, 54(20): 6186-6189.

[17] Song W, Wu F, Hou X. Method to test rotationally asymmetric surface deviation with high accuracy[J]. Applied Optics, 2012, 51(22): 5567-5572.

[18] Han Z G, Yin L, Chen L, et al. Absolute flatness

- testing of skip-flat interferometry by matrix analysis in polar coordinates [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(9): 2387-2392.
- [19] Zhang Q Y, Han S, Tang S H, *et al.* Study on functional relationship between transmitted wavefront Zernike coefficients and wavelengths[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0212002.
- 张齐元, 韩森, 唐寿鸿, 等. 透射波前 Zernike 系数与波长的函数关系研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0212002.
- [20] He X, Xiang Y. Phase-shifting technology of digital lateral shearing interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(9): 2244-2251.
- 何煦, 向阳. 数字横向剪切干涉仪相移技术 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(9): 2244-2251.
- [21] Zhang C L, Xiang Y, Yu C S. Development of pinhole filter in high precision interferometer [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 952-957.
- 张春雷, 向阳, 于长淞. 高精度干涉仪针孔空间滤波器研制 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 952-957.
- [22] Fang C. The analysis of phase shifting error in a 9 step phase shifting algorithm [J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 35(4): 21-23.
- 方超. 九步相移抗串扰算法的相移误差分析 [J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(4): 21-23.