

文章编号 1004-924X(2015)05-1297-07

## 应用高精度旋转法的干涉仪检测误差校正

韩冬松<sup>1,2,3\*</sup>, 何 昕<sup>1</sup>, 魏仲慧<sup>1</sup>, 李一芒<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100039;

3. 中国人民解放军防化研究院, 北京 102205)

**摘要:**针对利用高精度菲索型干涉仪和旋转平均法对光学元件进行面形绝对检测时对旋转精度的要求,提出了一种旋转误差校正模型来修正面形绝对检测中的旋转非对称项误差。首先基于经典  $N$  步旋转平均法理论,通过泽尼克多项式给出面形误差的数学表达形式;然后根据旋转角度所引起的误差修正泽尼克系数进而修正旋转非对称项误差;最后用数值仿真及实验的方法验证了校正模型的正确性。在旋转角度误差为  $0.1^\circ$  条件下的仿真结果显示: $N$  步旋转平均法所得面形误差 RMS 值为真实面形的 10.13%,校正后面形误差 RMS 值为真实面形的 6.79%;实验结果显示: $N$  步旋转平均法所得面形误差 RMS 值为真实面形的 10.28%,校正后面形误差 RMS 值为真实面形的 5.77%。这些结果证明所提出的校正模型准确可靠,提高了旋转平均法的检测精度。

**关键词:**菲索干涉仪;旋转平均法;旋转非对称项面形误差;面形绝对检测;泽尼克多项式

**中图分类号:**TH744.3;TB92 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1297

## Error correction of interferometer detection with high-accuracy rotation method

HAN Dong-song<sup>1,2,3\*</sup>, HE Xin<sup>1</sup>, WEI Zhong-hui<sup>1</sup>, LI Yi-mang<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Research Institute of Chemical Defense of the Chinese People's  
Liberation Army, Beijing 102205, China)*

\* *Corresponding author, E-mail:281054872@qq.com*

**Abstract:** According to the requirements of absolute flatness detection of optical elements for rotation accuracy by using high-accuracy rotation method based on a Fizeau interferometer, a rotary error correction model was proposed to correct the rotationally asymmetric deviation in the detection. Firstly, on the theoretical basis of the classical  $N$ -step rotation average method, a mathematical expression of surface deviation was given by Zernike polynomials. Then, the Zernike coefficient was corrected according to the error caused by the rotation angle and the rotationally asymmetric deviation was corrected. Finally, the correctness of the calibration model was verified by numerical simulation

收稿日期:2014-07-20;修订日期:2014-09-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60902067);吉林省重大科技攻关项目(No. 112DGG001)

method and an actual experimental test. In the conditions in rotation error of  $0.1^\circ$ , the simulation shows that the absolute detection error (Root Mean Square, RMS) is 10.13% by using the N-step rotation average method, and it can be promoted to 6.79% after being corrected. Moreover, the experiment shows that the detection error (RMS) is 10.28% by using the same method, and it is promoted to 5.77% after being corrected. These results demonstrate that the proposed calibration model is accurate and reliable, which improves the detection accuracy of the rotational averaging method and reduces the rotationally asymmetric deviation to the proportion of 27.2%.

**Key words:** Fizeau interferometer; rotational averaging method; rotationally asymmetric surface deviation; absolute flatness detection; Zernike polynomial

## 1 引言

在研制 193 nm 光刻机过程中,对其投影物镜的光学元件面形均方根 RMS 精度要求为 1~2 nm,对部分关键元件的要求更高。为达到上述加工精度,需确定光学元件面形,因此采用高精度检测仪器实现面形绝对检测具有重要意义。

目前对光学元件面形检测的主要方法是通过干涉仪测量实现的干涉检测方法,其中绝对检测 (Absolute Measurements) 在干涉检测中运用较多,常用的绝对检测方法有单次旋转法 (Single-rotation Method)<sup>[1-3]</sup>、N 步旋转平均法 (N-step Averaging Method)<sup>[4-9]</sup>、多序列独立测量法 (Multi-independent Series of Measurement Method)<sup>[10-11]</sup> 等。国内对干涉仪测量精度也进行了大量研究。苗二龙等对超高精度干涉仪进行了误差分析<sup>[12]</sup>;明名等对大口径光学元件检测进行了研究<sup>[13]</sup>;陈伟对光学元件干涉检测数据的定位处理方法进行了研究<sup>[14]</sup>;宣斌对应力双折射对偏振相移干涉检测的影响进行了研究<sup>[15]</sup>。单次旋转法利用最小二乘法对测量数据拟合 Zernike 多项式,通过一次旋转测量就可计算出光学元件旋转非对称面形误差。多序列独立测量法是一种改进的 N 步旋转平均法,多序列独立测量法要求至少进行 2 个独立的测量序列 (M, N),利用数值处理的手段来求出更高阶的 Zernike 多项式。

无论是 N 步旋转平均法还是多序列独立测量方法,在实际检测过程中,旋转角度都会存在一定的误差,由于检测结果是基于泽尼克多项式进行描述的,因此泽尼克多项式系数反映了由旋转角度误差引起的面形检测误差。本文针对此问题提出校正泽尼克多项式系数拟合的方法,用于修正 N 步旋转平均法中由旋转角度误差引起的面

形检测误差,即修正面形检测结果中的旋转非对称面形误差,并通过计算机仿真分析和面形绝对检测实验验证了该方法的可行性和正确性。

## 2 误差校正方法的理论分析

为了有针对性地分析采用 N 步旋转平均法进行绝对检测时因位置偏离所产生的误差,假定参考面误差、环境扰动误差和干涉仪自身误差可以通过相关手段进行有效的分离,则测量的光程差  $W$  可以表示为:

$$W = T_0 + T_s, \quad (1)$$

式中:  $T_0$  为光学元件的真实面形,  $T_s$  为支撑引起的面形误差。

N 步旋转平均法的检测原理<sup>[4]</sup>为:将支撑绕光轴旋转  $\alpha_j = j \times \frac{360^\circ}{N}$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ) 角,然后对光学元件进行检测,为了叙述方便,令  $\alpha_0 = 0^\circ$ ,  $N$  为支撑绕光轴旋转的次数,  $W_j$  表示第  $j$  次旋转支撑的检测结果,通过 Zernike 多项式  $W_j$  可表示为:

$$W_j(\rho, \theta) = T_0(\rho, \theta) + T_{sj}(\rho, \theta), \quad (2)$$

$$T_{sj}(\rho, \theta) = T_{s0}(\rho, \theta + \alpha_j) =$$

$$\sum_{l,k} R_l^k(\rho) [c_{j,lk} \cos(k\theta) + \tilde{c}_{j,lk} \sin(k\theta)], \quad (3)$$

$$c_{j,lk} = c_{0,lk} \cos(k\alpha_j) + \tilde{c}_{0,lk} \sin(k\alpha_j)$$

$$\tilde{c}_{j,lk} = \tilde{c}_{0,lk} \cos(k\alpha_j) - c_{0,lk} \sin(k\alpha_j)$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (4)$$

式中:  $c_{0,lk}$ 、 $\tilde{c}_{0,lk}$ 、 $c_{j,lk}$ 、 $\tilde{c}_{j,lk}$  为对应项的 Zernike 系数;  $T_{sj}(\rho, \theta)$  是在重力作用下由支撑引起的面形误差。为了求平均时叙述方便,将  $T_{sj}(\rho, \theta)$  改写成如下形式:

$$T_{sj}(\rho, \theta) = T_{\text{sym}}(\rho) + T_{\text{asyj}}(\rho, \theta) + T_{kN0}(\rho, \theta). \quad (5)$$

对检测结果求平均得如下结果:

$$W_{ave}(\rho, \theta) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} W_j(\rho, \theta) =$$

$$T_o(\rho, \theta) + \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} T_{sj}(\rho, \theta) =$$

$$T_o(\rho, \theta) + T_{sym}(\rho) + T_{kN\theta}(\rho, \theta), \quad (6)$$

式中:  $T_{sym}(\rho)$  是重力作用下支撑引起的旋转对称项面形误差, 支撑旋转时对应的 Zernike 多项式系数不改变;  $T_{asyj}(\rho, \theta)$  是重力作用下支撑引起的旋转非对称项面形误差(不包括  $T_{kN\theta}(\rho, \theta)$  项); 求平均时  $T_{asyj}(\rho, \theta)$  自动消除; 这是因为重力作用下支撑引起旋转非对称项面形误差对应 Zernike 多项式系数满足:

$$\sum_{j=0}^{N-1} c_{j, lk} = \sum_{j=0}^{N-1} \tilde{c}_{j, lk} = 0. \quad (7)$$

$$T_{kN\theta}(\rho, \theta) =$$

$$\sum_{l, k} R_l^{kN}(\rho) [c_{0, lkN} \cos(kN\theta) + \tilde{c}_{0, lkN} \sin(kN\theta)]. \quad (8)$$

当有旋转误差  $\Delta\alpha_j$  时, 式(7)不再成立, 旋转平均法的检测结果将会引入新的误差, 为了校正这部分误差, 需要对支撑引起旋转非对称项面形误差对应 Zernike 多项式系数进行校正, 进而对

$$c_{j, lk}(\text{ideal}) = \frac{c_{j, lk}(\text{truth}) \cos(k\Delta\alpha_j) + \tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) \sin(k\Delta\alpha_j)}{\cos^2(k\Delta\alpha_j) - \sin^2(k\Delta\alpha_j)} = \frac{c_{j, lk}(\text{truth}) \cos(k\Delta\alpha_j) + \tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) \sin(k\Delta\alpha_j)}{\cos(2k\Delta\alpha_j)}$$

$$\tilde{c}_{j, lk}(\text{ideal}) = \frac{c_{j, lk}(\text{truth}) \sin(k\Delta\alpha_j) + \tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) \cos(k\Delta\alpha_j)}{\cos^2(k\Delta\alpha_j) - \sin^2(k\Delta\alpha_j)} = \frac{c_{j, lk}(\text{truth}) \sin(k\Delta\alpha_j) + \tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) \cos(k\Delta\alpha_j)}{\cos(2k\Delta\alpha_j)}$$

$$j=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (12)$$

由式(10)可以看出, 只需将第  $j$  次旋转结果的 Zernike 系数即公式(11)中  $c_{j, lk}(\text{truth})$ 、 $\tilde{c}_{j, lk}(\text{truth})$  校正为公式(12)中的 Zernike 系数  $c_{j, lk}(\text{ideal})$ 、 $\tilde{c}_{j, lk}(\text{ideal})$ , 式(7)即可实现, 即可校正由于旋转误差  $\Delta\alpha_j$  引入的新的误差项。  $\Delta\alpha_j$  可以由实验测得或基于式(11)利用非线性方程求根的方法数值求解, 因此采用计算机仿真方法和实验测量方法均可对由旋转误差  $\Delta\alpha_j$  引入的新误差项。

### 3 仿真实验与分析

采用口径为 152.4 mm, 厚度为 26.8 mm 的平面镜为模拟待测对象, 验证误差校正方法的正确性。平面镜的光轴竖直放置, 支撑采用 3 点球支撑, 负载为重力, 其支撑分布如图 1 所示。

旋转结果进行校正。当存在旋转误差  $\Delta\alpha_j$  时, 式(3)、(4)可改写为:

$$T_{sj}(\rho, \theta) = T_{s0}(\rho, \theta + \alpha_j + \Delta\alpha_j) =$$

$$\sum_{l, k} R_l^k(\rho) [c_{j, lk}(\text{truth}) \cos(k\theta) + \tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) \sin(k\theta)]$$

$$j = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (9)$$

$$c_{j, lk}(\text{ideal}) = c_{0, lk} \cos(k\alpha_j) + \tilde{c}_{0, lk} \sin(k\alpha_j)$$

$$\tilde{c}_{j, lk}(\text{ideal}) = \tilde{c}_{0, lk} \cos(k\alpha_j) - c_{0, lk} \sin(k\alpha_j)$$

$$j=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (10)$$

$c_{j, lk}(\text{truth})$ 、 $\tilde{c}_{j, lk}(\text{truth})$  改写为:

$$c_{j, lk}(\text{truth}) =$$

$$c_{0, lk} \cos(k\alpha_j + k\Delta\alpha_j) + \tilde{c}_{0, lk} \sin(k\alpha_j + k\Delta\alpha_j) =$$

$$c_{j, lk}(\text{ideal}) \cos(k\Delta\alpha_j) - \tilde{c}_{j, lk}(\text{ideal}) \sin(k\Delta\alpha_j)$$

$$\tilde{c}_{j, lk}(\text{truth}) =$$

$$c_{0, lk} \cos(k\alpha_j + k\Delta\alpha_j) - \tilde{c}_{0, lk} \sin(k\alpha_j + k\Delta\alpha_j) =$$

$$\tilde{c}_{j, lk}(\text{ideal}) \cos(k\Delta\alpha_j) - c_{j, lk}(\text{ideal}) \sin(k\Delta\alpha_j)$$

$$j=0, 1, 2, \dots, N-1. \quad (11)$$

光学检测时  $\Delta\alpha_j \leq 0.01$  rad, 进行 Zernike 插值时,  $k \leq 78$ , 所以  $2k\Delta\alpha_j < \frac{\pi}{2}$  利用公式(11)可以求得:

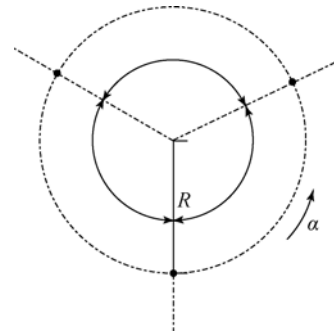


图 1 平面镜 3 点支撑分布简图

Fig. 1 Diagram of plane mirror with 3-point support distribution

通过 MATLAB 软件生成绝对面形所对应的 Zernike 系数, 仿真模型建立后, 可得到光学元件真实面形  $T_o$  和支撑引起的面形误差  $T_s$ , 通过美国 Zygo 公司为其干涉仪所配备的分析软件分别对  $T_o$  和  $T_s$  进行分析结果如图 2, 3 所示。

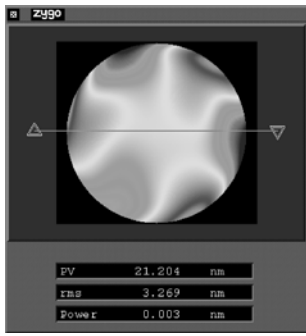


图 2 光学元件真实面形  
Fig. 2 Absolute flatness of optics

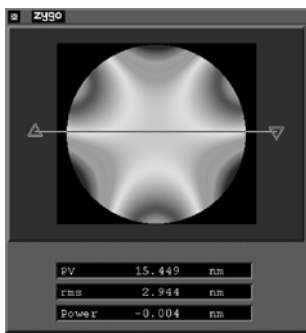


图 3 支撑引起的面形误差  
Fig. 3 Surface deviation caused by support

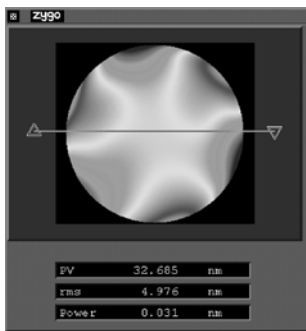
设定旋转平均法的步数  $N=4$ , 旋转角度误差为  $0.1^\circ$ , 则可确定绝对检测过程中平面镜的 4 个测量位置, 如表 1 所示。

表 1 旋转序列及其对应角度

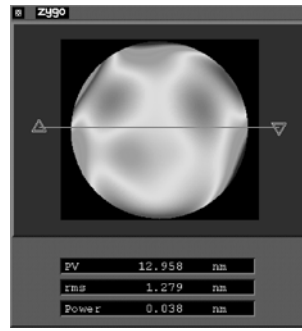
Tab. 1 Rotation sequences and angles ( $^\circ$ )

序列	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
角度	0	-89.9	-179.9	89.9

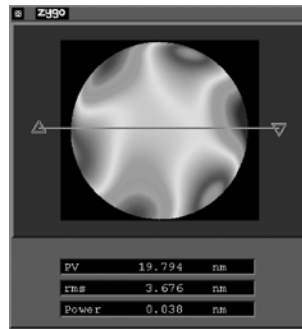
支撑机构按表 1 所示依次旋转相应角度后可得到面形结果及相关参数如图 4 所示。



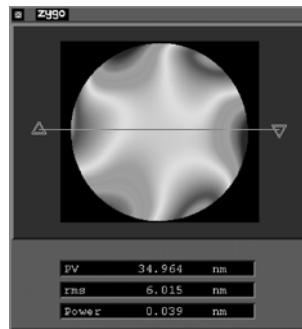
(a) 支撑旋转  $0^\circ$  的面形结果  
(a) Surface of support rotation  $0^\circ$



(b) 支撑旋转  $-89.9^\circ$  的面形结果  
(b) Surface of support rotation  $-89.9^\circ$



(c) 支撑旋转  $-179.9^\circ$  的面形结果  
(c) Surface of support rotation  $-179.9^\circ$



(d) 支撑旋转  $89.9^\circ$  的面形结果  
(d) Surface of support rotation  $89.9^\circ$

图 4 面形结果及相关参数

Fig. 4 Results of surface and relevant parameters

采用  $N$  步旋转平均法得到的面形结果和采用第 2 节中提出的校正方法所得到的面形结果分别如图 5、6 所示。

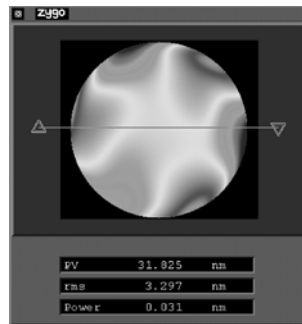


图 5 旋转平均检测仿真结果

Fig. 5 Simulation results of rotational averaging detection

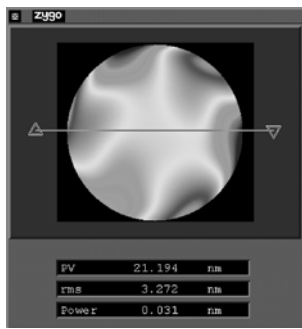
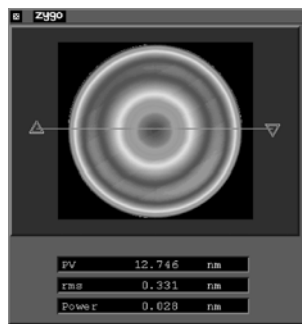


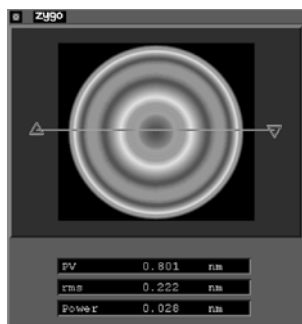
图 6 校正后仿真结果

Fig. 6 Simulation results after correcting



(a) 面形  $S_{R-N}$

(a) Surface of  $S_{R-N}$



(b) 面形  $S_{C-N}$

(b) Surface of  $S_{C-N}$

图 7 校正模型准确性分析

Fig. 7 Accuracy analysis of calibration model

仿真实验结果显示,真实面形的面形均方根 RMS 为 3.269 nm,采用经典 N 步旋转平均法得到 RMS 值为 3.297 nm,采用本文校正算法所得 RMS 值为 3.272 nm,同 N 步旋转平均法结果相比,所提校正算法所得 RMS 值更接近仿真实验中设置的绝对面形。为进一步比较校正后结果的准确性与合理性,将旋转平均法结果和校正后结果与图 2 所示的光学元件真实面形做面形相减, N 步旋转平均法所得面形与真实面形相减结果记为  $S_{R-N}$ ,校正后面形与真实面形相减结果记为

$S_{C-N}$ ,面形  $S_{R-N}$ 、 $S_{C-N}$ 如图 7 所示,结果显示:面形  $S_{R-N}$ 的 RMS 值是真实面形的 10.13%,面形  $S_{C-N}$ 的 RMS 值是真实面形的 6.79%。校正模型准确可靠。

#### 4 检测实验结果与分析

干涉测量实验采用菲索型立式干涉仪,口径为 102 mm,系统分辨率为  $1024 \times 1024$ 。实验过程中,元件精密装配,温控条件优于  $0.01^\circ\text{C}$ ,振动条件优于 VC-E 标准,测量 RMS 重复性优于 0.1 nm,能够进行旋转误差校正。检测时支撑实际旋转角度分别为  $0^\circ$ 、 $-89.950^\circ$ 、 $-179.981^\circ$  和  $89.949^\circ$ ,支撑旋转  $-89.95^\circ$  时的检测面形如图 8 所示。采用经典 N 步旋转平均法结果如图 9 所示。

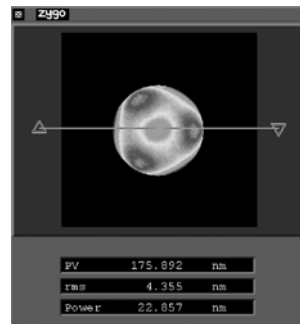


图 8 支撑旋转  $-89.95^\circ$  时的检测面形

Fig. 8 Detected surface of support rotation  $-89.95^\circ$

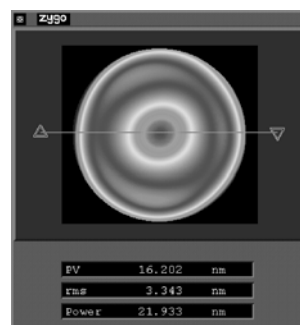


图 9 旋转平均法结果

Fig. 9 Result of rotational averaging method

根据式(12)校正后的结果如图 10 所示。

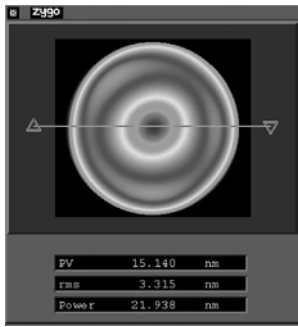


图 10 校正后结果

Fig. 10 Results after correcting

为了便于用实验的方法比较校正后结果的准确性与合理性,把平面镜去掉支撑后进行检测,检测结果作为光学元件的真实面形,检测结果如图 11 所示,对应 Zernike 面形记为  $S_c$ ,如图 12 所示。

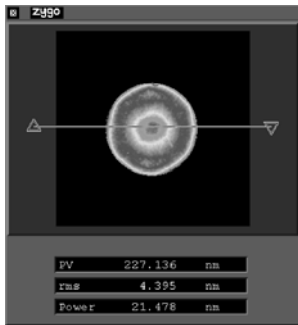


图 11 平面镜平台支撑检测结果

Fig. 11 Detected surface supported by flat plane

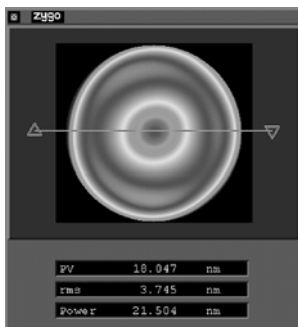


图 12 校正后结果中旋转非对称项面形误差

Fig. 12 Rotationally asymmetric surface deviation after correcting

将图 9 旋转平均法结果、图 10 校正后结果与图 12 所示的光学元件真实面形相减,  $N$  步旋转平均法所得面形与真实面形相减结果记为  $S_{RD-ND}$ ,校正后面形与真实面形相减结果记为  $S_{CD-ND}$ ,结果如图 13 所示。

结果显示:面形  $S_{RD-ND}$  的 RMS 值是真实面

形的 10.28%,面形  $S_{CD-ND}$  的 RMS 值是真实面形的 5.77%。由图 13 可以得出校正模型准确可靠。

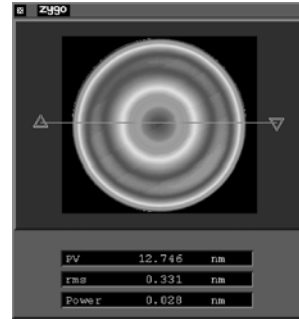
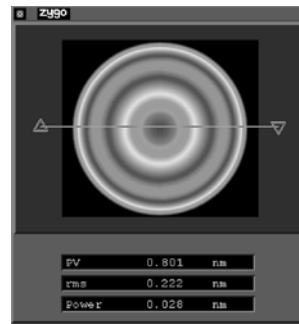
(a) 面形  $S_{RD-ND}$ (a) Surface of  $S_{RD-ND}$ (b) 面形  $S_{CD-ND}$ (b) Surface of  $S_{CD-ND}$ 

图 13 校正模型准确性分析

Fig. 13 Accuracy analysis of calibration model

## 5 结 论

本文提出了一种旋转误差校正模型以修正面形绝对检测中的旋转非对称项误差,用于高精度菲索型干涉仪进行的面形绝对检测。根据泽尼克多项式和  $N$  步旋转平均法的理论及数学表达式推导了误差校正公式,用数值仿真方法验证校正模型,最后用实验的方法验证了校正模型的准确性与可靠性。数值仿真结果显示,在旋转角度误差为  $0.1^\circ$  时,  $N$  步旋转平均法所得面形与真实面形相减所得面形 RMS 值为真实面形的 10.13%,校正后面形与真实面形相减所得面形 RMS 值为真实面形的 6.79%。实验证明,  $N$  步旋转平均法所得面形与真实面形相减所得面形 RMS 值为真实面形的 10.28%,校正后面形与真实面形相减所得面形 RMS 值为真实面形的 5.77%。所提出的校正模型准确可靠,提高了旋转平均法的检测精度。

## 参考文献:

- [1] HARIHARAN P. Interferometric testing of optical surfaces; absolute measurements of flatness [J]. *Optical Engineering*, 1997, 36(9):2478-2481.
- [2] GRECO V, TRONCONI R, VECCHIO C D, *et al.*. Absolute measurement of planarity with Fritz's method; uncertainty evaluation [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10):2018-2027.
- [3] RHEE H G. Self-calibration of high frequency errors of test optics by arbitrary N-step rotation [J]. *International Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, 2000, 1(2):115-123.
- [4] EVANS C J, KESTNER R N. Test optics error removal [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(7):1015-1021.
- [5] 宋伟红, 伍凡, 侯溪, 等. 基于平移旋转的球面绝对检测技术仿真分析[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(12):3229-3234.
- SONG W H, WU F, HOU X, *et al.*. Simulation analysis on absolute testing of spherical surface with shift-rotation method [J]. *High Power Laser Particle Beams*, 2011, 23(12):3229-3234. (in Chinese)
- [6] ICHIKAWA H, YAMAMOTO T. Apparatus and method for wavefront absolute calibration and method of synthesizing wavefronts [P]. U S: Patents 5982490, 1999.
- [7] OTAKI K, YAMAMOTO T, FUKUDA Y, *et al.*. Accuracy evaluation of the point diffraction interferometer for extreme ultraviolet lithography aspheric mirror [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2002, 20(1):295-300.
- [8] SONG W, WU F, HOU X. Method to test rotationally asymmetric surface deviation with high accuracy [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(22):5567-5572.
- [9] SONG W, WU F, HOU X, *et al.*. Absolute calibration of a spherical reference surface for a Fizeau interferometer with the shift-rotation method of iterative algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(3):033601-6.
- [10] GUENTHER S, WOLFGANG O. Method for the interferometric measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors [P]. U S: Patents 7277186, 2007.
- [11] WOLFGANG O. Method for the interferometric measurement of non-rotationally symmetric wavefront errors [P]. U S: Patents 6839143, 2005.
- [12] 苗二龙, 张健, 谷勇强, 等. 用于光刻投影物镜检测的高精度非干涉仪误差分析[J]. *中国激光*, 2010, 37(8):2029-2034.
- MIAO E L, ZHANG J, GU Y Q, *et al.*. Measurement error analysis of high precision fizeau interferometer for lithography projection objective [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, 37(8):2029-2034. (in Chinese)
- [13] 刘克, 李艳秋. 一种新的相移点衍射干涉仪系统误差标定方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(10):2923-2927.
- LIU K, LI Y Q. A new calibration method of systematic errors in phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10):2923-2927. (in Chinese)
- [14] 张建锋, 曹学东, 景洪伟, 等. 基于旋转法的干涉仪系统误差标定[J]. *光电工程*, 2011, 38(12):69-74.
- ZHANG J F, CAO X D, JING H W, *et al.*. Rotation method for system error calibration of interferometer [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(12):69-74. (in Chinese)
- [15] 石峰, 戴一帆, 彭小强, 等. 高精度光学表面磁流变修形[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):1859-1864.
- SHI F, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Magneto-rheological finishing for high-precision optical surface [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3):1859-1864. (in Chinese)
- [16] 王平, 田伟, 王汝冬, 等. 旋转支撑法去除元件面形测量的夹持误差[J]. *光学学报*, 2011, 31(8):126-134.
- WANG P, TIAN W, WANG R D, *et al.*. Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8):126-134. (in Chinese)

## 作者简介:



韩冬松(1987—),男,吉林白城人,博士研究生,主要从事动态干涉仪方面的研究。E-mail: 281054872@qq.com



何昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士研究生导师,主要从事光学精密仪器,光电测控设备等方面的研究。E-mail: hexin6627@sohu.com

(本栏目编辑:曹金)

(版权所有 未经许可 不得转载)