

基于旋转平均补偿算法的旋转非对称面形绝对检测

张艳微^{1,2} 苏东奇¹ 隋永新¹ 杨怀江¹

¹ 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
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 旋转法是一种用于获得被测面旋转非对称面形的绝对检测技术。旋转平均补偿算法是在 N 次等间隔旋转的基础上增加一次不同角度的旋转测量, 称为 $N+1$ 次旋转法。通过附加的一次旋转测量, 采用泽尼克多项式拟合求解旋转平均法的丢失面形。推导了理论计算公式, 仿真分析了存在旋转角度和偏心误差时, 补偿算法的有效性以及附加旋转角度对补偿面形计算精度的影响。验证实验的结果与仿真相符, 表明在选择合适的附加角度之后, 该算法可有效补偿丢失信息。与旋转平均法相比, 只需增加一次旋转, 就能得到更完整的面形, 极大地提高了检测效率和精度, 实验中补偿率达到 61%, 检测精度提高了约 1 倍。

关键词 测量; 误差补偿; 旋转平均法; 旋转非对称面形; 绝对检测

中图分类号 O436.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0708007

Absolute Testing of Rotationally Asymmetric Surface Deviation with the Method of Rotation-Averaging and Compensation

Zhang Yanwei^{1,2} Su Dongqi¹ Sui Yongxin¹ Yang Huaijiang¹

¹ State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The rotation method is an absolute testing to obtain rotationally asymmetric surface. A compensation method based on rotation-averaging needs a different rotation measurement besides N equally spaced azimuthal measurements, which is called $N+1$ rotation method. The losing surface of rotation-averaging method can be obtained with the additional measurement data and Zernike polynomial fitting. The theoretical formulas are derived and the validity of compensation method is simulated. The impact of additional rotation angle on algorithm accuracy is presented. The experimental result is consistent with simulation very well which proves that the losing surface can be compensated effectively by this method with an appropriate angle. Compared with the rotation-averaging method, this method can greatly improve the testing efficiency and accuracy by just adding one additional measurement. The compensation ratio is 0.61 and the accuracy is improved by a factor of 1.

Key words measurement; error compensation; rotation-averaging method; rotationally asymmetric surface; absolute testing

OCIS codes 120.6650; 120.4630; 120.3180; 120.4800; 120.3940

1 引言

当今科技对面形的检测要求越来越高, 传统的检测技术获得的结果都耦合了测量仪器的系统误差, 而绝对检测技术^[1-5]可以剔除系统误差, 获得被测面的绝对面形, 提高检测精度。旋转检测法^[6-7]

是绝对检测技术中一种获得旋转非对称面形的技术, 主要包括两种方法: 单次旋转法和多次旋转平均法。单次旋转法^[8]需要一次旋转, 由被测面旋转前后的检测数据, 采用泽尼克多项式拟合, 获得被测面的旋转非对称面形, 但受限于有限的泽尼克项数, 得

收稿日期: 2014-01-06; 收到修改稿日期: 2014-02-09

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 张艳微(1989—), 女, 硕士研究生, 主要从事面形绝对检测技术方面的研究。E-mail: yanwei8919@163.com

导师简介: 杨怀江(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事紫外光刻技术、信息安全、光学加工与检测等方面的研究。

E-mail: yanghj@sklao.ac.cn

到的只是低频面形,往往不能满足检测需求;多次旋转平均法需要多次等间隔旋转测量,可得到高频面形,但检测周期长,并且会丢失一部分面形。Kim等^[9]提出了任意 N 步算法,与单次旋转法相似,旋转角度任意,通过迭代和最小二乘法求解面形,降低了对角度误差的敏感度,但得到仍然为低频面形;Song等^[10-11]等提出了旋转平均法的一种补偿算法,即 $N+1$ 次旋转法,初步证明了此算法的有效性,但未对附加旋转角度的选择进行分析。

本文阐述了 $N+1$ 次旋转法的基本原理,进行了系统的仿真与实验分析,并重点分析了附加旋转角度对补偿面形计算精度的影响。

2 基本原理

$N+1$ 次旋转法需要 N 次等间隔测量,每次的旋转角度为 $\varphi = 2\pi/N$,和一个不同的附加旋转角度 θ_0 。

测量结果用 W 表示,它包括被测面面形误差 T 、参考面面形误差 R 、环境扰动引起的面形误差 E 以及干涉仪自身误差 S 。其中环境扰动项可通过精密的环控系统以及多次平均来降低,目前商用干涉仪的测量重复性能达到万分之一,且菲索干涉仪的共光路特点使得干涉仪本身系统误差极小,完全能满足高精度检测需求^[12],所以后两项误差此处忽略不计。

$N+1$ 次测量结果分别用 $W_1 \sim W_{N+1}$ 表示:

$$\begin{cases} W_1(\rho, \theta) = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta) \\ W_2(\rho, \theta) = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + \varphi) \\ \vdots \\ W_N(\rho, \theta) = R(\rho, \theta) + T[\rho, \theta + (N-1)\varphi] \\ W_{N+1}(\rho, \theta) = R(\rho, \theta) + T(\rho, \theta + \theta_0) \end{cases} \quad (1)$$

将被测面形 T 表示为旋转对称项 T_{RI} 和旋转非对称项 T_{RV} 之和,则 N 次等间隔测量结果的平均值为

$$\bar{W} = R + T_{\text{RI}} + \frac{1}{N} \{ T_{\text{RV}}(\rho, \theta) + T_{\text{RV}}(\rho, \theta + \varphi) + \dots + T_{\text{RV}}[\rho, \theta + (N-1)\varphi] \}. \quad (2)$$

将其中的旋转非对称面形用泽尼克多项式表示:

$$T_{\text{RV}}(\rho, \theta) + T_{\text{RV}}(\rho, \theta + \varphi) + \dots + T_{\text{RV}}[\rho, \theta + (N-1)\varphi] = \sum_{k,l} R_l^k [\cos(k\theta)(x_l^k A + x_l^{-k} B) + \sin(k\theta)(x_l^{-k} A + x_l^k B)], \quad (3)$$

式中 $A = \sum_{n=0}^{N-1} \cos(nk\varphi)$, $B = \sum_{n=1}^{N-1} \sin(nk\varphi)$ 。当 $k \neq cN$ (c 为整数) 时, $A = B = 0$, 被测面的旋转非对称面形可以通过下式求得:

$$W_1 - \bar{W} = (R + T) - (R + T_{\text{RI}}) = T_{\text{RV}}. \quad (4)$$

而当 $k = cN$ 时, $A = N$, $B = 0$, 此时 $W_1 - \bar{W} = 0$ 。这说明 N 次旋转平均法得到的面形会丢失掉辐角为 $cN\theta$ 的部分,当 N 比较小时,则会丢失重要的低频成分。

下面采用泽尼克多项式求解丢失面形, $W_{N+1}(\rho, \theta)$ 与 $W_1(\rho, \theta)$ 作差得

$$\begin{aligned} \Delta W(\rho, \theta) &= T(\rho, \theta + \theta_0) - T(\rho, \theta) = \\ &= T_{\text{RV}}(\rho, \theta + \theta_0) - T_{\text{RV}}(\rho, \theta). \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式用泽尼克多项式表示并整理可得

$$\begin{bmatrix} \cos(k\theta_0) - 1 & \sin(k\theta_0) \\ -\sin(k\theta_0) & \cos(k\theta_0) - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_1^{-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^k \\ a_1^{-k} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 a_1^k, a_1^{-k} 是对差值面形 ΔW 进行泽尼克拟合得到的系数,这里只需要求解满足 $k = cN$ 的系数。由(6)式求解出被测面的对应泽尼克系数 x_1^k, x_1^{-k} ,进而得

到丢失面形,但附加角度应该满足 $k\theta_0 \neq 2m\pi$ (m 为整数)。

3 仿真分析

为了评估 $N+1$ 次旋转法的有效性,对其进行仿真分析。仿真面形由 81 项泽尼克系数生成,其旋转非对称面形如图 1(a)所示, PV 表示峰谷值。4 次旋转平均法的计算误差如图 1(b)所示,主要为丢失的 4 叶和 8 叶面形,与理论相符。对丢失面形进行补偿之后,误差均方根(RMS)值在 10^{-15} nm 量级,由此可知 $N+1$ 次旋转法理论上精度很高。

实际测量中必定会存在误差,这里对旋转台的定位误差包括旋转角度误差和偏心误差进行仿真。各仿真参量如下:角度误差在 $\pm 0.5^\circ$ 范围内;偏心量在 ± 2 pixel (仿真 CCD 大小为 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$) 范围内; $N+1$ 次旋转法的附加旋转角度为 70° ,对应角度误差为 0.2° 。补偿之前与之后的计算误差如图 2 所示。

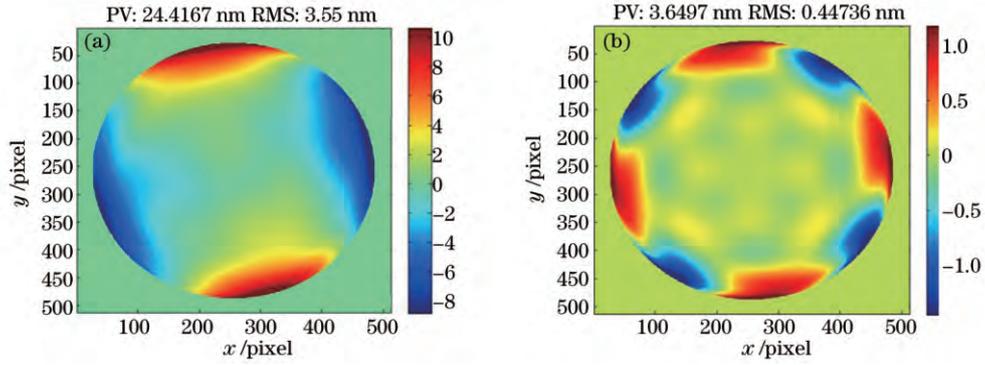


图 1 (a) 仿真面形的旋转非对称面形; (b) 4 次旋转平均法的计算误差

Fig. 1 (a) Rotationally asymmetric surface of simulation; (b) error of rotation-averaging method ($N=4$)

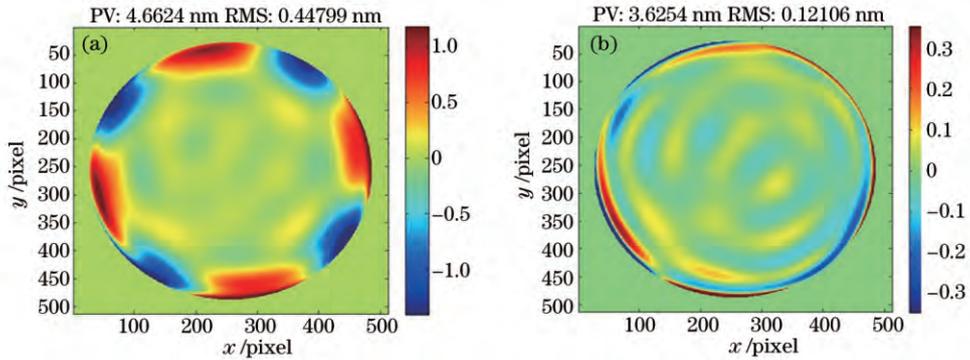


图 2 存在误差时的仿真结果。(a) 4 次旋转平均法的误差; (b) 4+1 次旋转法的误差

Fig. 2 Simulation result with error. (a) Error of rotation-averaging method ($N=4$);

(b) error of $N+1$ rotation method ($N=4$)

从图 1(b)和图 2(a)可以看出 4 次旋转平均法在添加误差之前与之后的仿真误差 RMS 分别为 0.44736 nm 和 0.44799 nm, 可见旋转平均法对角度和偏心误差的敏感度很小, 所以其主要误差来源是丢失的面形以及实验中系统和环境噪声引起的高频误差。而 $N+1$ 次旋转法在添加旋转误差之后, 误差 RMS 值从 10^{-15} nm 突变为 0.121 nm, 这是因为补偿面形是通过泽尼克拟合的方法得到的, 所以它对旋转误差的敏感度较高。但综合来看, $4+1$ 次旋转法与 4 次旋转平均法相比, 误差 RMS 值由 0.45 nm 减小到 0.12 nm, 如图 2(a)和 2(b), 表明 $N+1$ 次旋转法在

实际测量中能补偿丢失面形, 提高检测精度。

附加旋转角度的选择与补偿面形的计算精度有直接关系, 用不同的旋转角度分别计算出辐角为 4θ 的面形, 其误差 RMS 值与旋转角度的关系如图 3 所示。由于 4θ 面形旋转 90° 之后再相减, 面形几乎被抵消掉, 所以旋转角度在 90° 左右 ($85^\circ \sim 95^\circ$) 时计算误差较大。而当旋转角度小于 5° 时, 其相对误差较大, 因此计算误差也会偏大。对 $4+1$ 次旋转法, 需要补偿的还有 $8\theta, 12\theta, 16\theta$ 等面形, 旋转角度不能在 $22.5m$ 和 $30m$ (m 为整数) 左右。由此可知, 在实际测量中, 要根据补偿面形的辐角选择合适的附加角度。

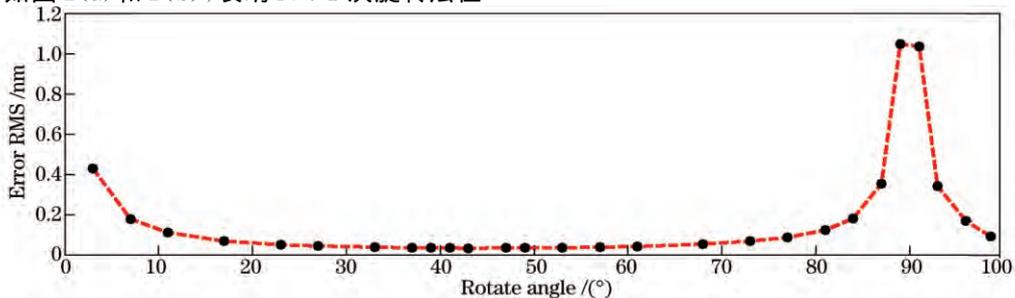


图 3 仿真 4θ 面形计算误差与旋转角度的关系

Fig. 3 Relationship between the calculation error of 4θ surface and the rotation angle

4 实 验

为了验证 $N+1$ 次旋转法的有效性,用 Zygo 立式干涉仪对口径为 170 mm 的球面镜进行检测。先进行重复性实验,满足要求后每旋转 1° 测量一次,得到 360 个检测数据。

4.1 重复性

进行重复性实验的目的是确认实验环境满足重复性要求。对同一被测面连续测量 100 次,其 RMS 平均值为 4.569 nm,标准差为 0.024 nm,相邻两次的测量结果之差如图 4,表明实验室当时的测量重复性的 RMS 值为 0.1 nm,满足亚纳米检测精度需求。

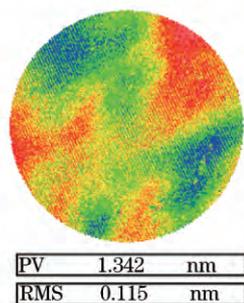


图 4 简单重复性实验结果

Fig. 4 Repeatability testing result

4.2 参考真值面形的获得

为了得到被测面较精确的面形,用 360 次旋转平均法计算被测面的旋转非对称面形,如图 5(a)所示。由于旋转平均法对角度和偏心误差的敏感度很小,且

干涉仪转台的精度较高,所以可忽略旋转误差的影响。360 次旋转平均法丢失的是辐角为 $360 c\theta$ 的部分,也可以忽略不计,而高频随机误差通过多次平均被减小。另外,图 5(b)是所得面形中的旋转对称部分,理论上不应存在,而实际上其 RMS 值只有总面形的 0.41%。以上分析说明求解出的面形精度很高,可以将此结果作为被测面的参考真值面形(TRV)。

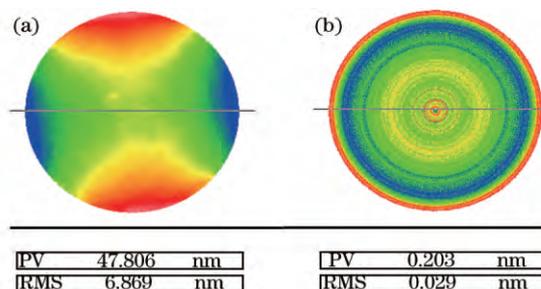


图 5 (a) 360 次旋转平均法得到的被测面形;

(b) 图 5(a)图中的旋转对称项面形

Fig. 5 (a) Tested surface obtained by the rotation-averaging method ($N = 360$); (b) rotationally symmetric surface of Fig. 5 (a)

4.3 旋转角度对补偿面形计算精度的影响

为了验证对附加旋转角度的仿真分析,实验中利用一系列角度测量值分别计算出 36 项 4θ (对应的泽尼克多项式为 Z_{16} 、 Z_{17} 、 Z_{27} 、 Z_{28} 、 \dots 、 Z_{475} 、 Z_{476}) 面形,其误差 RMS 值与旋转角度的关系如图 6 所示。旋转角度在 90° 左右($85^\circ \sim 95^\circ$)时计算误差明显变大,这与仿真结果相符。

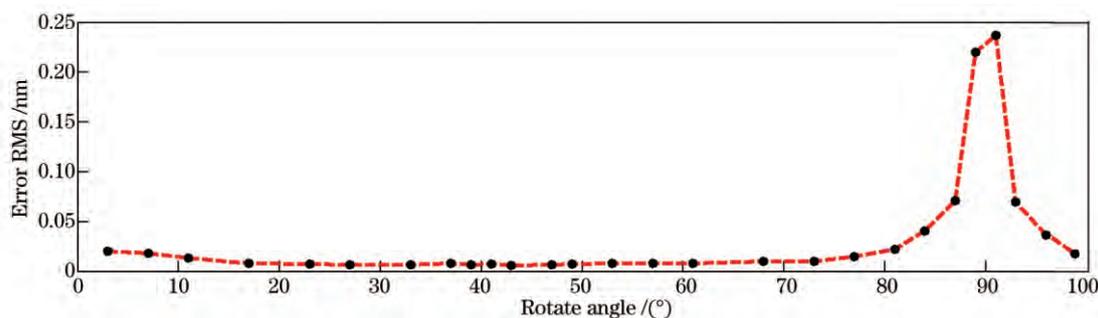


图 6 4θ 面形计算误差与旋转角度的关系

Fig. 6 Relationship between the calculation error of 4θ surface and the rotation angle

4.4 $4+1$ 次旋转法结果分析

以 $4+1$ 次旋转法为例,对辐角为 4θ , 8θ , 12θ , 16θ 的面形进行补偿,附加旋转角度为 79° ,补偿项数均为 36,各补偿面形如图 7 所示。再用 TRV 分别减去补偿之前与之后的面形,得到检测误差,如图 8 所示。

实验表明,旋转平均法的检测误差中有明显的

丢失掉的低频成分,如图 8(a)中的 4 叶误差。而 $4+1$ 次旋转法有效的补偿了一部分重要面形,补偿率为 61%,并将检测误差从 0.26 nm 改进到 0.1 nm,降低了约一半。另外,由于实验中被测面面形较好,补偿率只达到 61%,若被测镜的面形不好时,补偿率会更高。

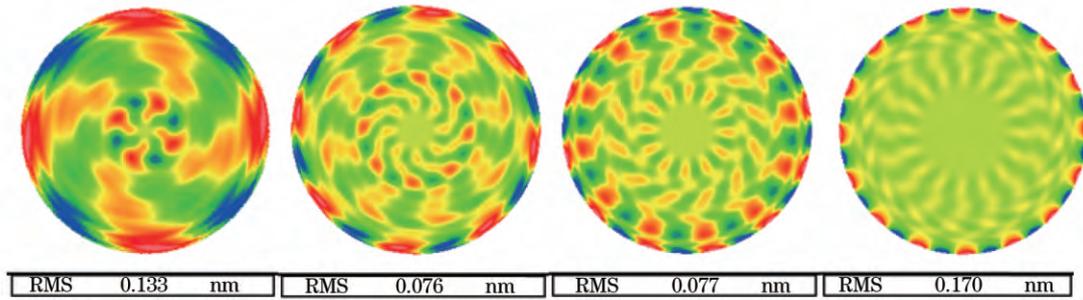
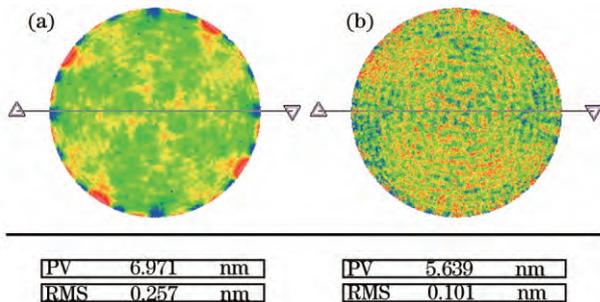
图7 4+1次旋转法的补偿面形,依次对应辐角为 4θ 、 8θ 、 12θ 、 16θ 的面形Fig. 7 Compensation surfaces of 4+1 rotation method, corresponds successively to 4θ 、 8θ 、 12θ 、 16θ surface

图8 (a) 4次旋转平均的检测误差;

(b) 4+1次旋转法的检测误差

Fig. 8 (a) Testing error of rotation-averaging method ($N=4$); (b) testing error of $N+1$ rotation method ($N=4$)

实验中旋转被测镜使用的是 Zygo 干涉仪的转台,通过对被测镜上的标记点坐标的计算,可以得到转台的旋转角度误差在 0.2° 以下。检测过程中,若转台发生径跳偏心,干涉仪会通过自动调整零条纹的功能来调整转台,使被测面中心位于光轴上,这样偏心误差可控制在 0.2 pixel 内。实验中的转台误差对旋转平均法的影响较小,但对补偿面形精度的影响较大。

去掉 4+1 次旋转法检测误差 (RMS 为 0.101 nm) 中的低频成分 (前 81 项泽尼克面形) 之后,其 RMS 值为 0.095 nm,可见,检测误差中中高频信息占主要成分。中频误差的来源之一是转台的角度和偏心误差在补偿面形中引入的高阶像散、慧差以及三叶像差。另外,实验中对辐角大于 16θ 的缺失面形没有进行补偿,这是因为它们占的比重很小。由于补偿项数 (实验中为 36 项) 和补偿辐角有限,必定有一部分丢失面形未被补偿,因此,未补偿的面形也是中频误差来源之一。而高频误差则主要受系统与环境的随机噪声影响^[13]。

要进一步提高检测精度,除了降低噪声,还要增加转台精度和根据所需精度选择合适的补偿辐角和项数,同时进一步研究 $N+2$ 次旋转法来降低算法

对误差的敏感度。

5 结 论

阐述了旋转平均补偿算法即 $N+1$ 次旋转法的基本原理,重点对附加旋转角度与补偿面形计算精度的关系进行了仿真和实验分析,这对算法的应用有重要的指导意义。通过对 $N+1$ 次旋转法的实验验证,结果表明此算法可以对旋转平均法丢失的面形进行有效补偿,检测误差从 0.26 nm 降低到了 0.1 nm。由于实验中被测面形较好,补偿率只达到 61%,若镜片面形不好时,补偿率会更高,算法的优势更明显。残留的检测误差中主要是中高频成分,误差来源有旋转台的定位误差、未补偿的面形以及系统和高频噪声。与多次旋转平均法相比, $N+1$ 次旋转法可以使用较少的旋转次数,实现面形的高精度检测,实用性更强。

参 考 文 献

- Evans C J, Kestner R N. Test optics error removal[J]. Appl Opt, 1996, 35(7): 1015-1021.
- Wang W, Tan J, Wang T, et al.. Reference surface calibration of a Fizeau interferometer through even/odd synthesis[J]. Appl Opt, 2011, 50(20): 3482-3487.
- Parks R E. A practical implementation of the random ball test [C]. Optical Fabrication and Testing Rochester, 2006. OFMC12.
- Bloemhof E E. Absolute surface metrology by differencing spatially shifted maps from a phase-shifting interferometer[J]. Opt Lett, 2010, 35(14): 2346-2348.
- Lin Weihao, Lou Hongxin, Song Li, et al.. Absolute flatness measurement of optical elements in synchrotron radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0912005.
林维豪, 罗红心, 宋 丽, 等. 同步辐射用光学元件面形绝对检测方法的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0912005.
- Otto W. Method for the Interferometric Measurement of Non-Rotationally Symmetric Wavefront Errors; America, Patent 6839143[P]. [2005-01-04].
- Yang Peng, Wu Fan, Hou Xi. Simulation analysis of absolute measurement for rotationally asymmetric surface error[J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(1): 93-97.
杨 鹏, 伍 凡, 侯 溪. 旋转非对称面形误差绝对检测的仿真分析[J]. 光电工程, 2011, 38(1): 93-97.

- 8 Song Weihong, Wu Fan, Hou Xi. Study on the absolute testing of rotationally asymmetric surface deviation with the method of single rotation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0812006.
宋伟红, 伍凡, 侯溪. 基于单次旋转的旋转非对称面形误差绝对检测技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0812006.
- 9 Kim S W, Rhee H G, Kim B C. Arbitrary N-step algorithm for removal of higher order test optics errors[C]. 14th Annual Meeting of the American-Society-for-Precision-Engineering Monterey, 1999. 432-435.
- 10 W Song, F Wu, X Hou. Method to test rotationally asymmetric surface deviation with high accuracy[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(22): 5567-5572.
- 11 He Yuhang, Cai Liqun, Chen Bo, *et al.*. Error compensation method for mirror symmetry absolute measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412003.
何宇航, 柴立群, 陈波, 等. 镜面对称法绝对测量中的误差补偿方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412003.
- 12 Wang Ping, Tian Wei, Wang Rudong, *et al.*. Rotating chuck test for removing chuck error of optical surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812004.
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): 0812004.
- 13 Su Dongqi. Research on Absolute Testing of the Optical Surface Figure[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. 39-65.
苏东奇. 光学面形绝对检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013. 39-65.

栏目编辑:何卓铭