

文章编号 1004-924X(2013)08-1929-07

用计算全息图校正非球面的畸变

高松涛^{1,2*}, 王高文¹, 张 健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:针对用计算全息图(CGH)对非球面进行检测时出现的非对称畸变,分析了3种基本的畸变模型,提出了一种有效的校正非对称畸变的方法。该方法采用较少的拟合参数即可实现对非对称畸变的精确校正,从而可以较大程度地减少畸变校正所需要的数据点对,避免过度拟合效应。通过光学仿真模拟分析了整个干涉仪系统的畸变,并利用以上方法对畸变进行了校正。仿真结果显示,畸变校正的相对残差小于0.2%。最后,设计并制作了处于离轴工作状态的CGH,并用此CGH对非球面进行了检测。利用上述畸变校正方法对测量的非球面面形进行校正,并用校正之后的结果进行加工迭代,最终非球面面形的收敛精度达到1.8 nm(RMS),得到的结果验证了提出的畸变校正方法的可靠性。

关键词:非球面检测;畸变校正;干涉仪;计算全息图

中图分类号:O436.1;O438.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132108.1929

Correction of distortion in asphere testing with computer-generated hologram

GAO Song-tao^{1,2*}, WANG Gao-wen¹, ZHANG Jian¹, SUI Yong-xin¹, YANG Huai-jiang¹

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

* *Corresponding author, E-mail: gaost965@gmail.com*

Abstract: On the basis of the asymmetric distortion from asphere measurement by a Computer-generated Hologram(CGH), three basic distortion models were analyzed, and an effective correction method for asymmetric distortion was proposed. By using a few fitted parameters, the method can correct the asymmetric distortion accurately, reduce data point pairs needed by distortion correction and can avoid over-fitting effect. Furthermore, the distortion of whole interferometric system was simulated, and its distortion was corrected by the proposed method. The simulating result shows that the relative residual of the correction is less than 0.2%. Finally, an off-axis CGH was designed and fabricated to verify the reliability of the correcting method and an asphere surface was tested with this CGH. Then, the correcting method mentioned above was used to correct the testing result, and the correcting result was taken to fabricate the asphere iteratively. The experiments show that the aspheric surface figure

收稿日期:2013-01-04;修订日期:2013-02-21.

基金项目:国家重大专项资金资助项目(No. 2009ZX02205)

converges at 1.8 nm RMS (Root Mean Square) eventually. These results verify the reliability of the correction method.

Key words: aspheric surface testing; distortion correction; interferometer; Computer-generated Hologram (CGH)

1 引言

移相干涉仪作为高精度面形检测仪器,在完成面形测量的同时,还要实现 CCD 像素坐标到实际镜面坐标的映射,以使加工设备在正确的空间位置进行工作。面形测量主要通过 PZT 移相^[1]或者波长移相^[2]来实现;像素坐标到实际镜面坐标的映射则通过干涉仪对被测镜的成像来实现(在干涉图上可以看到被测镜的特征点或者标记点)。如果干涉仪的成像系统没有像差,像素坐标到实际镜面坐标的映射是简单的线性映射;但是,实际上干涉仪都不可避免地存在像差^[3-6]。球差、彗差和像散等像差降低了干涉仪成像的清晰度,导致镜面的特征点或者标记点变得模糊,从而产生相位平滑效应^[4-5];而畸变则破坏了像素坐标到实际镜面坐标的线性映射关系^[6-7]。因此,研究系统畸变的影响效果及校正方法十分重要。

当前的商用移相干涉仪视场都比较小,并且成像系统都进行了像质优化,像差较小,可以直接对球面和平面进行零位检测;而非球面的零位检测,还需要补偿镜或者计算全息图作为补偿器,将干涉仪的球面波转换为与待测非球面相匹配的非球面波。拼接法^[8]可以不用补偿器,但是其测量精度往往低于零位补偿法。对补偿器进行设计时,由于补偿器的所有自由度都用于相位补偿,所以补偿器本身往往存在较大的像差。尽管移相干涉仪本身的像差较小,但当补偿器置于测试光路中时,整个干涉测量系统会有较大的像差。如果补偿器或者被测非球面不具有轴对称性,如补偿器处于偏心工作状态或者被测非球面为离轴非球面,整个光学系统失去了轴对称性,系统畸变也会失去轴对称性。为了将非球面的检测结果用于指导光学加工,需要对系统畸变进行准确建模,从而获得像素坐标和实际镜面坐标的映射关系。

李锐钢等^[9]用一维正交多项式为基底,通过

最小二乘法拟合得到了像素坐标和实际镜面坐标的映射关系,实现了畸变校正,但是此方法仅适用于轴对称系统;王会峰^[10]直接采用一元线性回归和逐次逼近的方法求解畸变中心,以一维正交多项式为基底拟合畸变,达到了比较高的校正精度,但是此方法同样仅适用于轴对称系统,不能用来校正非轴对称畸变。Zhao 等^[11-14]建立了二维矢量正交多项式,并以此多项式为基底实现了对非对称畸变的校正,但此方法计算比较复杂,需要较多的采样点,并且可能出现“过度拟合”效应。针对前人工作中的问题,本文首先分析了 3 种基本的畸变模型,提出了一种校正非对称畸变的方法;而后针对一高次非球面,设计了一种处于离轴工作状态的计算全息图 (Computer-generated Hologram, CGH),通过光学仿真验证了此畸变模型的准确性;最后,利用制作的 CGH 完成了对非球面的检测,通过论文所提出的畸变校正方法对畸变进行了校正,并将校正结果用于加工迭代,通过实验上验证了该畸变校正方法的可靠性。

2 畸变模型

2.1 畸变分类

根据畸变的来源及影响效果,畸变可以分为 3 类:径向畸变、偏心畸变和薄棱镜畸变。

2.1.1 径向畸变

径向畸变主要来源于不完善的光学设计,可分为桶形畸变和枕形畸变,其畸变量可以表示为^[15]:

$$\delta_{\rho} = k_1 \rho^3 + k_2 \rho^5 + k_3 \rho^7 + \dots + k_n \rho^{2n+1}, \quad (1)$$

其中: δ_{ρ} 为径向畸变沿半径方向的畸变量, k_1, k_2, k_3, k_n 等为径向畸变系数, ρ 为坐标点距畸变中心的距离。由于这种畸变仅与径向距离有关,所以具有轴对称性。

如果在平面直角坐标系下,则径向畸变可以表达为:

$$\begin{cases} \delta_{xr} = x(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6 + \dots + k_n\rho^{2n}) \\ \delta_{yr} = y(k_1\rho^2 + k_2\rho^4 + k_3\rho^6 + \dots + k_n\rho^{2n}) \end{cases}, \quad (2)$$

其中: δ_{xr} 为径向畸变沿 x 方向的畸变量, δ_{yr} 为径向畸变沿 y 方向的畸变量; $\rho = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$, (x_0, y_0) 为畸变中心。

2.1.2 偏心畸变

偏心畸变主要来源于光学元件装调过程中的偏心误差,不具有轴对称性,其畸变量可以表示为^[16]:

$$\begin{cases} \delta_{rd} = 3(j_1\rho^2 + j_2\rho^4 + j_3\rho^6 + \dots) \sin(\varphi - \varphi_0) \\ \delta_{td} = (j_1\rho^2 + j_2\rho^4 + j_3\rho^6 + \dots) \cos(\varphi - \varphi_0) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} \delta_{xd} = p_{11}xy + p_{12}(3x^2 + y^2) + (p_{21}xy + p_{22}(3x^2 + y^2))\rho^2 + \dots + (p_{n1}xy + p_{n2}(3x^2 + y^2))\rho^{2n-2} \\ \delta_{yd} = p_{11}(x^2 + 3y^2) + p_{12}xy + (p_{21}x^2 + 3y^2) + p_{22}xy)\rho^2 + \dots + (p_{n1}(x^2 + 3y^2) + p_{n2}xy)\rho^{2n-2} \end{cases}, \quad (5)$$

其中: $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ 等为偏心畸变系数(角度吸收到偏心系数中)。

2.1.3 薄棱镜畸变

薄棱镜畸变来源于光学元件或者探测器装调过程中的倾斜误差,由于其实作用效果相当于薄棱镜而得名。薄棱镜畸变可以表示为^[17]:

$$\begin{cases} \delta_{rp} = (i_1\rho^2 + i_2\rho^4 + i_3\rho^6 + \dots) \sin(\varphi - \varphi_0) \\ \delta_{tp} = (i_1\rho^2 + i_2\rho^4 + i_3\rho^6 + \dots) \cos(\varphi - \varphi_0) \end{cases}, \quad (6)$$

其中: δ_{rp}, δ_{tp} 分别表示薄棱镜畸变沿径向和切向方向的畸变量, φ 为极坐标的极角, φ_0 为切向畸变最大位置处的极角值。

将公式(6)带入公式(4)中,并将公式做进一步的化简,可得:

$$\begin{cases} \delta_{xp} = q_{11}\rho^2 + q_{21}\rho^4 + q_{31}\rho^6 + \dots + q_{n1}\rho^{2n} \\ \delta_{yp} = q_{12}\rho^2 + q_{22}\rho^4 + q_{32}\rho^6 + \dots + q_{n2}\rho^{2n} \end{cases}, \quad (7)$$

其中: δ_{xp}, δ_{yp} 分别表示薄棱镜畸变沿 x, y 方向的畸

其中: δ_{rd}, δ_{td} 分别表示偏心畸变沿径向和沿切向的畸变量, j_1, j_2, j_3 等为偏心畸变系数, φ 为极坐标的极角, φ_0 为切向畸变最大位置处的极角值。

考虑到极坐标到直角坐标的变换关系,偏心畸变沿 x, y 方向的畸变量可以表示为:

$$\begin{cases} \delta_{xd} = \delta_{rd} \cos \varphi - \delta_{td} \sin \varphi \\ \delta_{yd} = \delta_{rd} \sin \varphi + \delta_{td} \cos \varphi \end{cases}, \quad (4)$$

其中: δ_{xd}, δ_{yd} 分别表示偏心畸变沿 x, y 方向的畸变量。

将公式(3)带入到公式(4)中,并将公式做进一步的化简,可得:

变量, $q_{11}, q_{12}, q_{21}, q_{22}$ 等分别表示薄棱镜畸变系数。

2.2 畸变校正方法

设 (X, Y) 为无畸变的坐标点, (x, y) 为存在畸变的坐标点。要完成畸变校正,则需要寻找映射函数 $f(x, y)$ 和 $g(x, y)$, 使得对于任意畸变坐标点 (x_i, y_i) , 都有:

$$\begin{cases} f(x_i, y_i) = X_i \\ g(x_i, y_i) = Y_i \end{cases}, \quad (8)$$

其中: (X_i, Y_i) 为无畸变的坐标点。

考虑到成像系统的放大倍率 m , 并结合 2.1 中 3 种基本的畸变模型, 则有:

$$\begin{cases} X_i = mx_i + \delta_{xr} + \delta_{xd} + \delta_{xp} \\ Y_i = my_i + \delta_{yr} + \delta_{yd} + \delta_{yp} \end{cases}. \quad (9)$$

如果将径向畸变展开到第三阶, 将偏心畸变展开到第二阶, 将薄棱镜畸变展开到第一阶, 将它们带入公式(9), 并写成矩阵形式, 则有:

$$\begin{pmatrix} m \\ k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ p_{11} \\ p_{12} \\ p_{21} \\ p_{22} \\ q_{11} \\ q_{12} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dots \\ X_i \\ Y_i \\ \dots \end{pmatrix}. \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} x_i & x_i\rho_i^2 & x_i\rho_i^4 & x_i\rho_i^6 & x_iy_i & 3x_i^2 + y_i^2 & x_iy_i\rho_i^2 & (3x_i^2 + y_i^2)\rho_i^2 & \rho_i^2 & 0 \\ y_i & y_i\rho_i^2 & y_i\rho_i^4 & y_i\rho_i^6 & x_i^2 + 3y_i^2 & x_iy_i & (x_i^2 + 3y_i^2)\rho_i^2 & x_iy_i\rho_i^2 & 0 & \rho_i^2 \end{pmatrix}$$

采用最小二乘算法, 通过公式(10)即可完成

畸变校正。

3 仿真计算

为了从数值上验证所提出的畸变校正方法, 论文针对一高次非球面(参数如表 1 所示)设计了 CGH 补偿器。文献[18-20]论述了 CGH 的设计

方法, 故本文在此不再重述。为了完全分离不同的衍射级次, 避免衍射级次的干扰, CGH 补偿器处于离轴工作状态, 如图 1 所示。其中, Focus 为干涉仪 Transmission Sphere 形成的焦点, 干涉仪内部的光学系统为同轴系统。由于整个光学系统失去了轴对称性, 所以系统畸变呈现出非轴对称性。

表 1 非球面的参数

Tab. 1 Parameters of asphere

D/mm	R/mm	K	A_4	A_6	A_8	A_{10}	A_{12}	A_{14}
170	392.946 5	0	1.424×10^{-8}	5.646×10^{-14}	-2.386×10^{-18}	-2.322×10^{-23}	5.512×10^{-28}	-4.036×10^{-33}

注: 非球面方程为 $z = \frac{h^2/R}{1 + \sqrt{1 - (1+K)(1/R)^2}} + \sum_{n=1}^6 A_{2n+2} h^{2n+2}$, z 为非球面的矢高, D 为非球面的口径直径, R 为顶点曲率半径, K 为二次曲面常数, $A_4 \sim A_{14}$ 为高阶项系数。

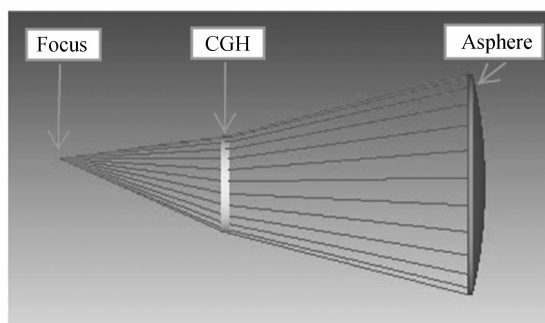


图 1 用 CGH 补偿器检测非球面的光路

Fig. 1 Light path of asphere in CGH testing

为了查看 CGH 本身引入的畸变, 在非球面上设置均匀的采样网格, 利用光学设计软件的光线追迹, 可以看到网格在 CGH 上的投影形状, 如图 2 所示。图中网格中心明显偏离主光轴, 这是由于 CGH 处于离轴工作状态所致; 另外, 从图中也可以看到明显的桶形畸变, 这是由 CGH 的衍射引起的。

由于不能获得干涉仪内部光学系统的参数, 因此很难从光学设计上获得干涉仪自身的几何畸变; 但是, 考虑到普通干涉仪的视场都很小, 一般畸变也都较小, 并且主要是径向畸变, 因此可以通过引入低阶径向畸变来进行仿真。

设 CCD 的像素数为 $1\ 024 \times 1\ 024$, 并假定干涉仪本身的畸变中心为像面中心, 干涉仪的畸变量为 2% (即 k_1), 结合 CGH 引入的畸变, 总的系统畸变如图 3 中的红色“×”所示, 图中的绿色“+”为 CGH 引入的畸变(彩图见期刊电子版)。

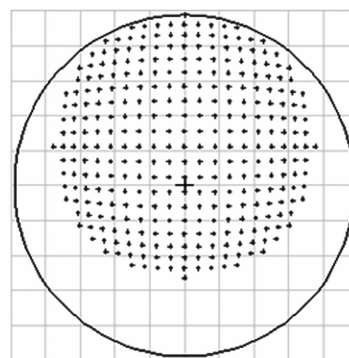


图 2 非球面上的均匀采样网格在 CGH 上的投影

Fig. 2 Footprint diagram on CGH of uniformly sampling grids on asphere

由于干涉仪自身的畸变中心位于图像的中间部分, 所以图像中间区域上的红色“×”与绿色“+”位置基本重合, 且干涉仪自身的径向畸变在畸变中心附近的影响较小, 在远离畸变中心位置处的影响较大; 由于采样点上端距图像中心距离远, 所以采样点上端红色“×”与绿色“+”的位置偏差较大。由于 CGH 不具有轴对称性, 并且图像中心与 CCD 中心不重合, 总体的畸变呈现出明显的非对称性。

采用所提出的畸变校正方法对图 3 中的畸变进行校正, 校正结果如图 4(a)所示, 校正残差如图 4(b)所示, x 方向的标准差为 0.34 pixel, y 方向的标准差为 0.23 pixel。由图可知, 此方法虽然仅用了 10 个参数(即 $m, k_1, k_2, k_3, p_{11}, p_{12}, p_{21}$,

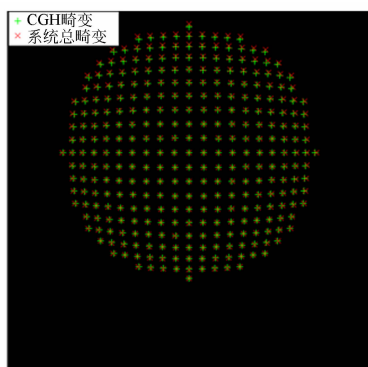


图 3 仿真生成的畸变示意图

Fig. 3 Distortion generated by simulation

p_{22} , q_{11} 和 q_{12}), 但是其校正精度较高, 校正的相对残差小于 0.2% (最大残差小于 1 pixel, 非球面在 CCD 上的成像半径约为 500 pixel)。

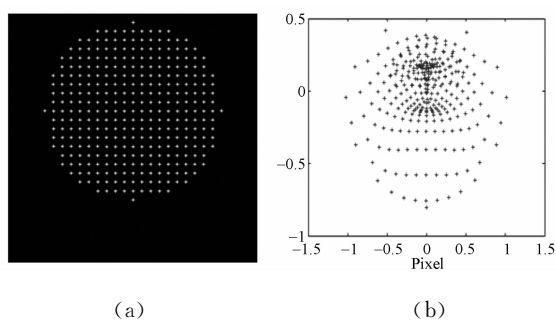
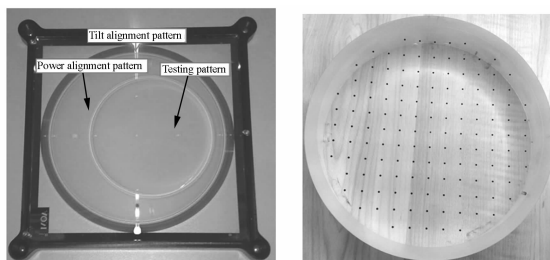


图 4 (a) 图 3 畸变的校正结果; (b) 畸变校正残差
Fig. 4 (a) Correction result of Fig. 3; (b) Correcting residual

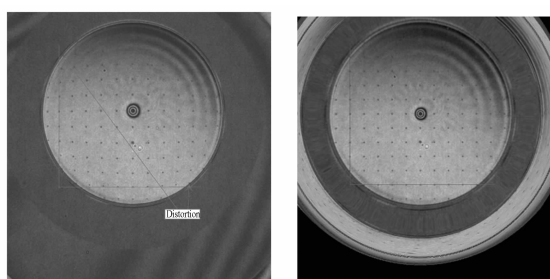
4 实验验证

针对表 1 中的非球面, 本文设计制作的 CGH 如图 5(a) 所示。CGH 的刻蚀区分为 3 个部分, 分别用于 CGH 的倾斜调整、CGH 的离焦调整和非球面的零位检测。为了完成畸变校正, 需要在待测非球面上做网格标记点, 如图 5(b) 所示, 网格点沿 x 方向和 y 方向的间距都为 11 mm。利用 CGH 对此非球面进行检测时, 零条纹状态下的干涉图如图 5(c) 所示。由于 CGH 引入较大的像差, 所以干涉图上的标记点较为模糊, 并且在离中心较远的区域有明显的畸变。采用手动或者图像处理的方法, 可以找到干涉图上标记点的像素坐标位置, 利用所提出的畸变校正方法可以获得 CCD 像素坐标和实际镜面坐标的二维映射关系。

利用此映射关系, 对图 5(c) 中干涉图的畸变进行校正, 校正结果如图 5(d) 所示。



(a) CGH 的实物图 (b) 在非球面上做的等间隔标记点
(a) Image of CGH (b) Uniformly-spaced fiducials on asphere



(c) 用 CGH 对非球面测量的干涉图 (d) 对畸变进行校正之后的干涉图
(c) Null interferogram of asphere with CGH (d) Interferogram after correction

图 5 实验及其结果

Fig. 5 Experiment and its results

在将面形图采用同样的映射关系进行校正之后, 输入到离子束面形精修设备^[21] 对非球面进行面形精修。经过多轮迭代加工之后, 最终的收敛面形如图 6 所示, 收敛精度为 1.8 nm RMS。

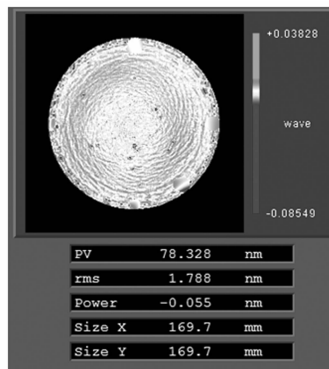


图 6 多轮加工迭代后最终的非球面面形图

Fig. 6 Eventual surface figure after several fabricating iteratively

5 结 论

为了用 CGH 对非球面检测时出现的非对称畸变进行校正,论文首先分析了 3 种基本的畸变模型,提出了一种有效的校正方法,采用较少的拟合参数实现了对非对称畸变的精确校正,从而可以较大程度地减少畸变校正所需要的数据点对,避免过度拟合效应。然后,通过光学仿真分析了

整个干涉仪系统的畸变,并利用论文所提出的校正方法对畸变进行校正,仿真结果显示校正残差小于 0.2%。最后,针对一个次非球面设计制作了一个处于离轴工作状态的 CGH,用此 CGH 完成了对非球面的检测,并用论文所提出的校正方法对畸变进行了校正。利用校正结果进行加工迭代,最终非球面面形的收敛精度达到了 1.8 nm RMS,从而在实验上验证了所提出的畸变校正方法的可靠性。

参考文献:

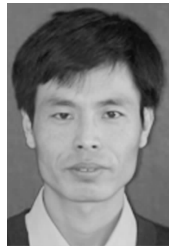
- [1] 吴栋,朱日宏,陈磊,等. 抗振型移相干涉仪中 PZT 移相器的改进[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 567-571.
WU D, ZHU R H, CHEN L, *et al.*. Improvement of PZT phase shifter in vibration-resistant phase-shifting interferometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 567-571. (in Chinese)
- [2] YU Y J, ZHANG B H, JIAO Y F. Algorithms of phase-shifting interferometer via wavelength tuning [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 560-566.
- [3] PAUL E M, THOMAS G B, DUNCAN T M. Measurement and calibration of interferometric imaging aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(34): 6421-6429.
- [4] ZHAO C Y, BURGE H. Imaging aberrations from null correctors [J]. *SPIE*, 2007, 6723: 67230L1-63270L12.
- [5] ZHOU P, BURGE H, ZHAO C Y. Imaging issues for interferometric measurement of aspheric surfaces using CGH null correctors [J]. *SPIE*, 2010, 7790: 7790L1-7790L12.
- [6] BURGE H, ZHAO C Y, ZHOU P. Imaging issues for interferometry with CGH null correctors [J]. *SPIE*, 2010, 7739: 77390T1-77390T12.
- [7] 刘满林,杨旺,许伟才. 干涉仪成像畸变引起测量误差的校正方法[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2349-2354.
LIU M L, YANG W, XU W C. Calibration of measuring error caused by interferometric imaging distortion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2349-2354. (in Chinese)
- [8] 王孝坤. 子孔径拼接检测非球面时调整误差的补偿 [J]. 中国光学, 2013, 6(1): 88-95.
WANG X K. Compensation of misalignment error on testing aspheric surface by subaperture stitching interferometry [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 88-95. (in Chinese)
- [9] 李锐钢,郑立功,薛栋林,等. 大口径高次、离轴非球面干涉测量中投影畸变的标定方法[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(4): 533-538.
LI R G, ZHENG L G, XUE D L, *et al.*. Calibration method for projection distortion in interferometric testing high order and off-axis aspheric surface with big aperture [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 533-538. (in Chinese)
- [10] 王会峰. 一种成像测量图像径向几何畸变的校正方法[J]. 应用光学, 2010, 31(1): 55-59.
WANG H F. Radial geometrical distortion correction in imaging measurement system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(1): 55-59. (in Chinese)
- [11] ZHAO C Y, BURGE H. An orthonormal series of vector polynomials in a unit circle, part I: basis set derived from gradients of Zernike polynomials [J]. *Opt. Express*, 2007, 15(26): 18014-18024.
- [12] ZHAO C Y, BURGE H. An orthonormal series of vector polynomials in a unit circle, part II: completing the basis set [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(9): 6586-6591.
- [13] ZHAO C Y, BURGE H. Orthonormal vector polynomials in a unit circle, application: fitting mapping distortions in a null test [J]. *SPIE*, 2009, 7426: 74260V1-74260V8.
- [14] NOVAK M, ZHAO C Y, BURGE H. Distortion mapping correction in aspheric null testing [J]. *SPIE*, 2008, 7063: 7063131-7063138.
- [15] WANG J H, SHI F H, ZHANG J, *et al.*. A new calibration model of camera lens distortion [J]. *Pattern Recognition*, 2008, 41: 607-615.
- [16] BROWN D C. Decentering distortion of lenses [J]. *Photogrammetric Eng. Remote Sensing*, 1966, 32(3): 444-462.

- [17] WENG J Y, COHEN P, HERNIOU M. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(10): 965-980.
- [18] 黎发志, 罗霄, 赵晶丽, 等. 离轴非球面的计算全息图高精度检测技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 709-716.
LI F ZH, LUO X, ZHAO J L, *et al.*. Testing of off-axis aspheric surfaces with CGH [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 709-716. (in Chinese)
- [19] PARIANI G, TRESOLDI D, SPANO P, *et al.*. Testing large flats with computer generated holograms [J]. *SPIE*, 2012, 8450: 84500Z1-84500Z8.
- [20] MASARU K, MIKIO K. Interferometric testing for off-axis aspherical mirrors with computer-generated holograms [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(19): 4291-4297.
- [21] 武建芬, 卢振武, 张红鑫, 等. 光学非球面离子束加工模型及误差控制[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(11): 2678-2683.
WU J F, LU ZH W, ZHANG H X, *et al.*. Model of ion beam figuring in aspheric optics and its error control [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11): 2678-2683. (in Chinese)

作者简介:



高松涛(1985—),男,河南郑县人,博士研究生,主要从事超高精度面形检测技术的研究。E-mail: gaost965@gmail.com



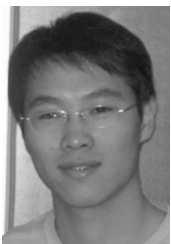
隋永新(1970—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事超高精度精密光学元件检测、光学信息融合等方面的研究。E-mail: suiyx@sklao.ac.cn



王高文(1986—),男,福建漳州人,硕士,助理研究员,主要从事光学加工与检测等方面的研究。E-mail: gaowen.wang@ciomp.ac.cn



杨怀江(1966—),男,辽宁丹东人,研究员,博士生导师,主要从事紫外光刻技术、光学信息融合、网络信息安全等方面的研究。E-mail: yanghj@sklao.ac.cn



张健(1983—),男,吉林长春人,博士,助理研究员,主要从事高精度光学加工的研究。E-mail: ciomp.jian@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)