

文章编号 1004-924X(2011)10-2349-06

干涉仪成像畸变引起测量误差的校正方法

刘满林¹, 杨 旺¹, 许伟才^{1,2*}

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要:根据光学系统的波像差理论和干涉检测原理,分析了干涉仪系统的成像畸变对测量结果的影响,提出了对干涉仪系统的成像畸变进行标定和校正的方法。重点讨论了被测面的摆放存在倾斜和离焦两种情况下产生的测量误差,并提出了误差校正方法。实验中对同一个被测面进行多次测量,结果显示,干涉图样为3个条纹时的面形测量结果为30.96 nm PV, 6.32 nm RMS, 10个条纹时的面形测量结果为41.25 nm PV, 8.22 nm RMS。校正后两次测量的PV值差降低到1.42 nm, RMS值差为0.4 nm。实验结果表明:提出的畸变校正方法可以有效地降低测量误差,提高测量结果的复现性,为高精度面形测量提供参考。

关键词:干涉检测;成像畸变;测量精度;误差校正

中图分类号: TH744.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2349

Calibration of measuring error caused by interferometric imaging distortion

LIU Man-lin¹, YANG Wang¹, XUE Wei-cai^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

* *Corresponding author, E-mail: weicai.xx@163.com*

Abstract: Based on the wavefront aberration theory and interferometric theory, the influences of imaging distortion in an interferometer on measuring results are analyzed and calibration and correction methods for the imaging distortion are proposed. The measurement errors caused by misalignments of the test surface (tip/tilt and defocus) are discussed mainly. An experiment is carried out to measure the same surface under different number of fringes. The test results show that the surface shapes are 30.96 nm PV and 6.32 nm RMS for 3 fringes, and 41.25 nm PV and 8.22 nm RMS for 10 fringes, respectively. After the calibration, the difference of the results are declined to 1.42 nm PV and 0.4 nm RMS. The experiment proves that the calibration solution referred in this paper can improve the measurement accuracy.

Key words: interferometric measurement; image distortion; measurement accuracy; measuring error calibration

1 引言

干涉仪测量误差可以分为随机误差和系统误差两大类。通过多次测量求平均的方法可以有效降低随机误差的影响,而系统误差却无法通过求平均的方法去除,所以在高精度面形测量时必须对干涉仪系统误差进行标定和校正。

干涉仪系统误差源有很多种,如:参考面面形误差、系统成像畸变、非共光路误差、探测器量化误差等。

关于标定参考面面形误差的研究已经比较深入,早在 1967 年 G. Schulz 和 J. Schwider 就提出光学平面的绝对标定方法——三面互检法^[1-2]。对球面进行绝对标定的最初原理是由 A. E. Jen-son 于 1974 年提出的,并应用于泰曼-格林干涉仪上。进入 90 年代,绝对标定已经成为光学测量研究领域的热点,国内外有很多文献详细论述了参考面绝对标定的方法^[3-6]。目前一些商用干涉仪软件,例如 ZYGO 的 MetroPro,已经集成了绝对标定的程序。

如何校正干涉仪的非共光路误差、探测器量化误差也有相当的报道^[7-11],然而关于校正干涉仪系统成像畸变误差的研究却比较少。L. A. Selberg 在 1987 年曾经论述过在高精度面形检测中,校正干涉仪成像畸变误差的重要性^[12],但是并没有详细论述其校正方法。

本文详细论述了干涉仪成像畸变对测量精度的影响,提出了误差标定校正的方法,并进行了实验验证。

2 干涉仪成像畸变导致的测量误差

干涉仪的光学系统具有双重职能:其一是产生 1 个准直光束,其二是将被测面共轭成像到 CCD 上。图 1 为一个 Fizeau 型干涉仪的典型光学结构示意图。

干涉仪成像畸变对测量精度的影响表现在被测波面经过干涉仪光学系统后发生变形。

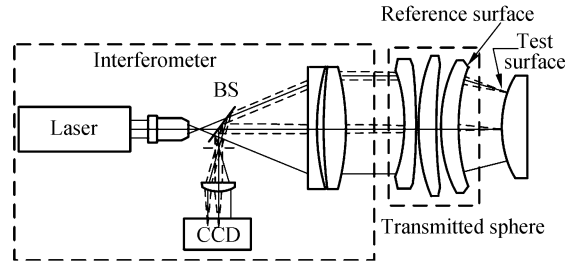


图 1 Fizeau 干涉仪系统结构示意图

Fig. 1 Framework of Fizeau interferometer

假设 ρ_c 为干涉图样的径向坐标, ρ_t 为被测表面的径向坐标, m 为系统放大率, ρ_c, ρ_t 之间有以下对应关系:

$$\rho_c = m\rho_t, \quad (1)$$

如果干涉仪成像系统有畸变,这种对应关系就会被破坏,假设标准镜头畸变系数为 ε ,则被测表面与干涉图样之间的对应关系变为:

$$\rho_c' = m\rho_t(1 + \varepsilon\rho_t^2), \quad (2)$$

则由于畸变引起的径向坐标位移可表示为:

$$\Delta\rho = \rho_c' - \rho_c = m\varepsilon\rho_t^3. \quad (3)$$

被测波面可由一系列正交多项式之和表示,如式(4)所示。

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n,k} a_{nk}\rho^n \cos k\theta + b_{nk}\rho^n \sin k\theta. \quad (4)$$

被测波面经过系统后,由于畸变的影响,径向坐标 ρ 产生了非线性变化,用 $\rho + \Delta\rho$ 代入式(4),对式(4)进行展开,由于干涉仪系统畸变值是一个小量(一般商用干涉仪系统畸变不大于 1%),只取 ε 的一次项: $(1 + \varepsilon)^n \approx 1 + n\varepsilon$,可得到以下关系:

$$a_n\rho'^n \rightarrow a_n\rho^n + a_n n\varepsilon\rho^{n+2}, \quad (5)$$

根据式(5)可进一步导出:

$$a_{nc} = \begin{cases} a_{nt} & n=0, 1 \\ a_{nt} + a_{(n-2)t}(n-2)\varepsilon & n=2, 3, \dots \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可以看出,由于畸变的影响,带有低阶波像差的被测波面经过光学系统后会衍生出高阶像差,其大小与畸变大小成正比。

例如,当被测面倾斜安装时,被测波面表达式为 $W(\rho, \theta) = a_1\rho\sin\theta$,经过系统后,被测波面变为 $W(\rho, \theta) = a_1\rho\sin\theta + a_1\varepsilon\rho^3\sin\theta$,测量结果引入了彗差项。同理,当被测面有轴向位置误差,即被测

波面带有离焦时会引入球差项。

3 干涉仪系统成像畸变校正

降低干涉仪系统成像畸变对测量精度影响的一个简单方法是尽量在零干涉条纹下进行测量。但在高精度测量时,例如测量精度要求达到 nm 数量级时,由于严格的零条纹实际上无法实现,所以必须进行畸变校正。

如果已知干涉仪系统的具体光学参数,可以通过光线追迹计算出畸变引起的测量误差。在使用商业干涉仪无法确知其光学系统具体参数的情况下,可以通过畸变敏感矩阵校正畸变对测量精度的影响。

根据式(4)~(6)可知,干涉仪系统成像畸变引起的测量误差与干涉仪系统成像畸变可以近似成线性关系,而且与被测波面的波像差成正比。

例如干涉仪系统存在 1% 成像畸变,当被测面离焦 1 个条纹时引起的测量误差约为 12 nm,而一个面形精度 PV 值为 $\lambda/40$ 的被测面,由于面形精度引起的测量误差在 1 nm 以下。

在高精度测量时,由于被测面高阶波像差都很小,畸变引起的测量误差主要表现为被测面倾斜和离焦所导致的测量误差,所以在畸变校正时,主要校正由于倾斜和离焦引起的测量误差。

则畸变引起的测量误差可由式(7)表示:

$$\Delta W = \mathbf{C}_x(x, y) \nabla_x \mathbf{M} + \mathbf{C}_y(x, y) \nabla_y \mathbf{M} + \mathbf{S}(x, y) \nabla^2 \mathbf{M}, \quad (7)$$

在式(7)中 M 为测量结果的原始数据; $\nabla_x \mathbf{M}(x, y)$ 和 $\nabla_y \mathbf{M}(x, y)$ 为被测波面梯度的 x 和 y 方向分量矩阵, $\nabla^2 \mathbf{M}(x, y)$ 为被测波面的离焦量矩阵; $\mathbf{C}_x(x, y)$, $\mathbf{C}_y(x, y)$ 和 $\mathbf{S}(x, y)$ 分别为被测波面梯度 x, y 方向分量的误差敏感矩阵和被测面离焦的误差敏感矩阵。 $\nabla_x \mathbf{M}$, $\nabla_y \mathbf{M}$ 和 $\nabla^2 \mathbf{M}$ 可以根据测量原始数据 M 计算得出,某些商业干涉仪软件可以直接提供。 $\mathbf{C}_x(x, y)$, $\mathbf{C}_y(x, y)$ 和 $\mathbf{S}(x, y)$ 可以用 Zernike 拟合的方法得到,如式(8)所示。

$$\mathbf{C}(x, y) = \sum_i c_i \cdot Z_i(x, y). \quad (8)$$

拟合过程如下:

(1) 调整被测面使其尽量达到零条纹,进行第一次测量,结果为 M_1 ,调整被测面沿 x 方向的倾斜量,在不同干涉条纹数的情况下作多次测量,测量结果为 M_n ;

(2) 用非零条纹测量的结果 M_n 减去零条纹测量的结果 M_1 ,得出每次测量的差值 D_n 。将 D_n 作 Zernike 拟合, $D_n = \sum a_{ni} \cdot Z_i(x, y)$ 。

(3) 根据 a_{ni} 的变化趋势计算出倾斜对测量结果的影响,即根据 a_{ni} 拟合出 x 方向梯度的敏感矩 $\mathbf{C}_x(x, y)$ 的第 i 项 Zernike 系数 c_{xi} 。同理可以得到 y 方向梯度敏感矩阵 $\mathbf{C}_y(x, y)$ 和离焦的敏感矩阵 $\mathbf{S}(x, y)$ 。

得到系统的误差敏感矩阵后,根据式(7)算出由畸变所引起的测量误差 ΔW ,从而可以对测量结果进行校正。

4 实验与结果

4.1 测量误差

用干涉仪两次测量同一个被测面,第一次测量时,调整被测面尽量减少干涉条纹;第二次测量时,轻微调整被测面的倾斜量和轴向移动量,在条纹较多的情况下进行测量。根据第二节所得结论,由于干涉仪成像畸变的影响,第二次测量结果与第一次相比,会具有额外的球差和彗差。

实验中使用的干涉仪为 Zygo GPI 移相干涉仪,参考镜头为 Zygo F/0.65 标准镜头,被测面为富士 F/0.7 标准镜头的参考面。两个标准镜参考面面形标称精度 PV 值均为 $\lambda/20$ 。实验装置如图 2 所示。

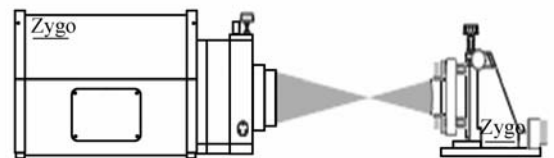


图 2 实验系统示意图

Fig. 2 Framework of experimental setup

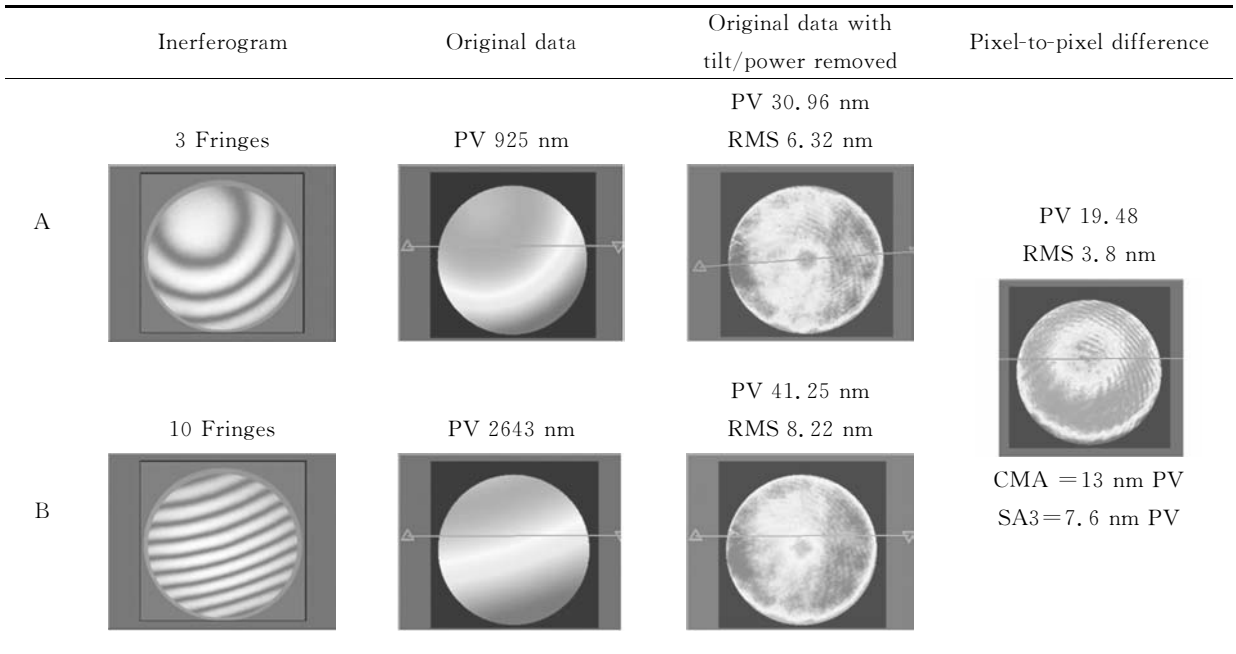


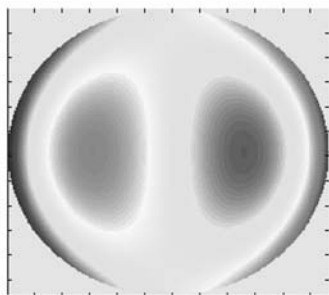
图 3 畸变引起的测量误差
Fig. 3 Measuring errors caused by imaging distortion

实验测量结果如图 3 所示。图中第 1 列为 2 次测量的干涉图样,第 2 列为测量的原始数据,第 3 列为使用干涉仪软件 MetroPro 去除倾斜/离焦后的数据,在测量精度要求不高时,一般认为第 3 列的结果即被测面面形。第 4 列为第 3 列中 2 次测量结果的点对点偏差。

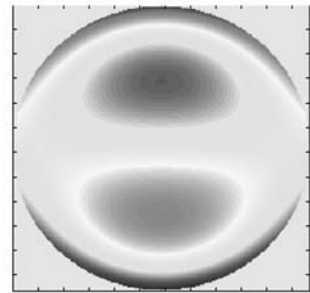
从图中可以看出,在干涉图样为 3 个条纹下的测量结果和 10 个条纹下的测量结果 PV 值相差 10 nm,两次测量去除离焦和倾斜后的点对点偏差明显含有彗差和球差,和理论预测的结果符合的很好。

4.2 误差校正

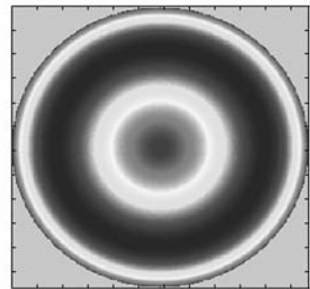
根据第三节所述步骤方法对以上两次测量结果进行校正。首先拟合出该干涉仪实验平台的误



(a) 误差敏感矩阵 C_x
(a) Sensitivity functions C_x



(b) 误差敏感矩阵 C_y
(b) Sensitivity functions C_y



(c) 误差敏感矩阵 S
(c) Sensitivity functions S

图 4 误差敏感矩阵
Fig. 4 Sensitivity functions

差敏感矩阵,如图 4 所示。得到系统的误差敏感矩阵后,根据式(7)计算出由畸变所引起的测量误差 ΔW ,进而对测量结果进行校正。

校正的结果如图 5 所示,图中第 1 列为校正前 2 次测量结果,第 2 列为根据本文提出的畸变校正方法计算出的由干涉仪系统成像畸变所引起

的测量误差,第 3 列为经过校正后的测量结果,第 4 列为校正后 2 次测量结果的点对点偏差。从图中可以看出,校正后 2 次测量结果 PV 值偏差 $< 1.5 \text{ nm}$,RMS 值的偏差 $< 0.5 \text{ nm}$ 。2 次测量的点对点偏差 RMS 值 $< 1 \text{ nm}$,可见文中提出的畸变校正方法有效地提高了测量再现性。

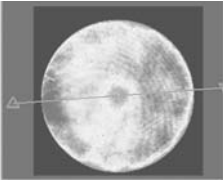
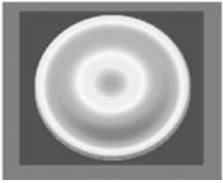
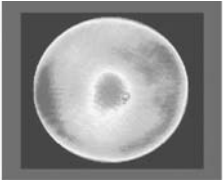
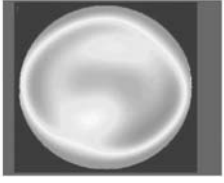
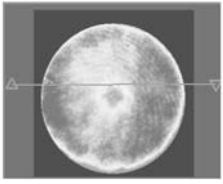

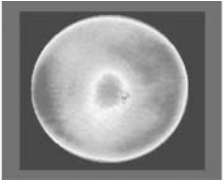
	Measurement results	Measuring error caused by imaging distortion ΔW	Results after calibration	Pixel-to-pixel difference after calibration
A	PV 30.96 nm RMS 6.32 nm 	RMS 3.1 nm 	PV 33.74 nm RMS 6.7 nm 	PV 8.4 nm RMS $< 1 \text{ nm}$ 
B	PV 41.25 nm RMS 8.22 nm 	RMS 3.4 nm 	PV 35.16 nm RMS 7.1 nm 	

图 5 畸变校正后的测量结果

Fig. 5 Measurement results after calibration

5 结 论

本文根据光学系统的波像差理论和干涉检测原理推导出干涉仪系统成像畸变对测量结果的影响,并提出了畸变误差的校正方法。

干涉仪系统的成像畸变会使带有低阶波像差的被测波面在经过光学系统后衍生出高阶像差,

特别是使被测面摆放存在倾斜和离焦时,由于系统畸变的影响测量结果会呈现出彗差和球差,降低测量精度。文章通过分析干涉仪系统畸变误差的产生机理,提出了畸变误差的校正方法。实验结果表明,经过畸变误差校正后,2 次测量结果的复现性误差从 10 nm 降低到 1.5 nm 以下,文章提出的畸变校正方法有效地降低了测量误差,提高了测量精度。

参考文献:

[1] SCHULZ G, SCHWIDER J. Precise measurement of planness [J]. *Applied Optics*, 1967, 6 (6): 1077-1084.

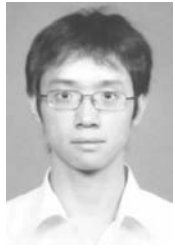
[2] SCHULZ G, SCHWIDER J. Establishing an optical flatness [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(4): 929-934.

[3] 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.

[4] BURKE J, DAVID S WU. Calibration of spherical reference surfaces for Fizeau interferometry: a comparative study of methods [J]. *Applied Optics*,

- 2010,49(31):6014-6023.
- [5] VANNONI M, MOLESINI G. Three-flat test with plates in horizontal posture [J]. *Applied Optics*, 2008, 47 (12):2133-2144.
- [6] VANNONI M, MOLESINI G. Absolute planarity with three-flat test: an iterative approach with Zernike polynomials [J]. *Optics Express*, 2008, 16 (1):341-354.
- [7] LIU D, YANG Y Y, TIAN CH, *et al.*. Practical methods for retrace error correction in nonnull aspheric testing [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9):7025-7035.
- [8] EVANS C J, KESTNER R N. Test optics error removal [J]. *Applied Optics*, 1996, 35 (7): 1015-1021.
- [9] CREATH K. Error sources in phase-measuring interferometry [C]. *SPIE*, 1992, 1720: 428-435.
- [10] 王孝坤, 王丽辉, 张学军. 干涉法实时测量浅度非球面技术[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(2):184-189.
- WANG X K, WANG L H, ZHANG X J. Testing asphere by subaperture stitching interferometric method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 184-189. (in Chinese)
- [11] 贺俊, 陈磊. 使用红外干涉仪测量非球面面形[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1):69-74.
- HE J, CHEN L. Measurement of aspheric surfaces by infrared interferometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1):69-74. (in Chinese)
- [12] SELBERG L A. Interferometer accuracy and precision [J]. *SPIE*, 1990, 1400:24-33.

作者简介:



刘满林(1985—),男,广东佛山人,研究实习员,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学设计的研究。E-mail: liuml@ciomp. ac. cn



杨旺(1984—),男,黑龙江绥化人,研究实习员,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事光学设计,高精度面形检测技术的研究。E-mail: yangwang@ciomp. ac. cn



许伟才(1983—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事光学设计的研究。E-mail: weicaixx@163. com