猫眼法绝对测量干涉仪出射波前

苏东奇 苗二龙 曲 艺 隋永新*

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超精密工程研究中心, 吉林 长春 130033

摘要 由于非共光路误差是菲索干涉仪进行高精度检测中最重要的误差因素之一,而非共光路误差是由于非理想的光学系统即干涉仪的出射波前不理想造成的,所以为了测量干涉仪的出射波前来评估干涉仪非共光路误差的大小,提出一种利用干涉仪猫眼位置绝对测量干涉仪出射波前的方法。该方法基于干涉仪自身的面形测量功能,操作非常简单,只需要一块反射镜就能够实现干涉仪出射波前的测量。该方法通过至少三个猫眼位置的测量得到干涉仪出射波前的自身剪切数据,然后通过基于旋转平移的绝对检测算法直接得到干涉仪的出射波前的二维波前数据。实验结果表明:该方面能够实现不包括Power在内均方根(RMS)值约为15 nm的测量精度。该方法能够准确测量干涉仪出射波前,从而评估干涉仪非共光路误差。

关键词 测量; 光学检测; 猫眼; 菲索干涉仪; 波前

中图分类号 O439; O435.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.1208002

Absolute Testing of Interferometer Wavefront Using Cat′s-Eye Test

Su Dongqi Miao Erlong Qu Yi Sui Yongxin

Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, *China*

Abstract The retrace error is one of the most important factors for high precision testing of Fizeau interferometer. The wavefront of interferometer is the mainly factor of retrace error. So in order to measure the wavefront of interferometer, a method of testing the wavefront of interferometer is proposed, which is based on the measuring function of interferometer itself and is very easy to carry on. Just an additional reflection flat is needed. In this method at least three cat′s-eye test results are used to get shearing of the wavefront, which is used to solve the wavefront map by shift-rotation absolute testing algorithm. Experimental results show that the wavefront testing uncertainty is about [root mean square (RMS)] 15 nm without the Power term. It can be utilized to test the wavefront quality of interferometer precisely, and the retrace error farther.

Key words measurement; optical inspection; cat′s-eye test; Fizeau interferometer; wavefront

OCIS codes 120.4630; 120.3940; 120.3930; 120.3180

1 引 言

菲索干涉仪是目前高精度面形检测和高精度波像差检测等光学检测领域主要应用的工具之一,菲索干涉仪检测之所以能够实现高精度,主要是因为其共光路的特点,即参考光路和被测光路在干涉仪内部是共光路的,能够消除大部分系统误差。然而完全的共光路是一种理想情况,任何干涉仪系统都会有一定的波前误差,从而导致非共光路,特别是在球面干涉腔中参考面和被测面曲率半径之比远离1的时候,比如在两者曲率半径之比为5,干涉仪波前Slop最大为100 μrad时,那么引起的测量误差峰谷(PV)值为9 nm,这对于高精度检测是较大的误差[1]。所以测量干涉仪的出射波前对于高精度检测是非常重要的,同时通过测量还可以在一定程度下进行回程误差的补偿,从而提高测量精度。

收稿日期: 2015-06-24; **收到修改稿日期**: 2015-08-12

基金项目: 国家科技重大专项(2009ZX02205)

作者简介: 苏东奇(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事超精密光学检测方面的研究。E-mail: dqsu@hotmail.com

*通信联系人。E-mail:suiyx@sklao.ac.cn

干涉仪准直光束出射波前的检测方法主要有五菱镜扫描法、剪切干涉法和夏克-哈特曼波前传感器测量方法等[2-10]。五菱镜法需要搭建五菱镜运动扫描平台，需要拼接才能得到完成波前数据。而利用哈特曼波前传感器进行干涉仪波前测量需要搭建另外的光路进行缩束，并且搭建的光路需要进行标定，操作复杂。本文提出一种方法直接利用干涉仪本身的测量功能，利用一块反射镜测量猫眼位置数据就能完成球面干涉仪出射波前的测量，操作简单，该方法同样适用于平面干涉仪，猫眼数据的测量利用角反射镜代替即可，原理方法完全相同。Langenbeck[2]提出过用角锥棱镜测量准直波前的方法，但是无法恢复出整个波前信息，刘兆栋[5]在此基础上提出角锥棱镜扫描法，需要扫描进行测量，也不能应用于球面波前的测量。本文主要针对球面干涉仪进行说明，采用多项式拟合波前，结合旋转平移绝对检测算法[11]，能够完全高精度恢复球面干涉仪的出射波前。

2　猫眼法绝对检测干涉仪波前

2.1　猫眼位置测量

由于本文提出的方法基于球面干涉仪猫眼位置的测量或者平移干涉仪角反射镜的测量。所以这里首先对猫眼位置的数据进行分析。球面干涉仪的猫眼位置如图1所示，干涉仪和球面标准镜的形成球面波前，其中一部分光被球面参考面反射原路返回干涉仪，称之为参考波前，透射的球面波前被一平面反射镜在会聚点反射返回干涉仪，称之为被测波前，反射回的波前与参考波前正好旋转180°；两者干涉形成猫眼位置干涉。

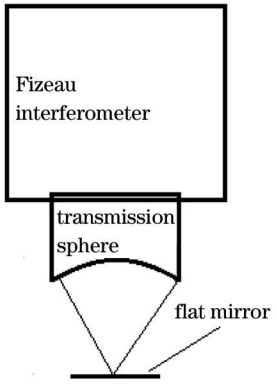


图1　球面干涉仪猫眼位置测量示意图

Fig.1　Cat′s-eye test configuration of spherical interferometer

假设 W_g 为干涉仪透射波前，为了表示方便把干涉仪透射波前定义为参考面之前的透射波前，S_R 表示参考面面形，正方向朝镜子外侧(即图1中朝下)；参考面反射回的参考波前表示为

$$W_R = 2W_g + 2nS_R\,, \tag{1}$$

式中 n 为标准具材料折射率。

反射镜反射回的被测波前为

$$W_C = \left[W_g + (n-1)S_R\right]_{(\mathrm{rot}\,180)} + W_g + (n-1)S_R\,, \tag{2}$$

猫眼位置干涉仪测量得到的波前为

$$W_{CatsEye} = 1/2(W_R - W_C) = 1/2\left\{[W_g - W_{g(\mathrm{rot}\,180)}] + [nS_R - nS_{R(\mathrm{rot}\,180)}] + S_R + S_{R(\mathrm{rot}\,180)}\right\}, \tag{3}$$

式中下标括号表示光路中波前的旋转，括号内数字表示旋转度数。一般参考面面形PV值为1/20或者1/40，比干涉仪出射波前小很多，在这里可以忽略或者通过绝对检测的方法减去，得到

$$W_{\mathrm{CatsEye}} = 1/2[W_g - W_{g(\mathrm{rot}\,180)}]\,, \tag{4}$$

即猫眼位置测量得到的为干涉仪出射波前与其本身旋转180°的结果。其旋转中心与反射面的法线相关，假设反射面法线垂直干涉仪光轴，那么旋转中心在干涉仪中心。这样干涉仪波前中的旋转对称部分就会被减去，留下的仅仅为旋转非对称部分。

而平面干涉仪下面加一角反射镜，如图2所示，通过分析会得到相同的式子，其中 W_g 表示的是干涉仪本

身和平面标准具的出射波前，这里也称之为猫眼位置的测量。

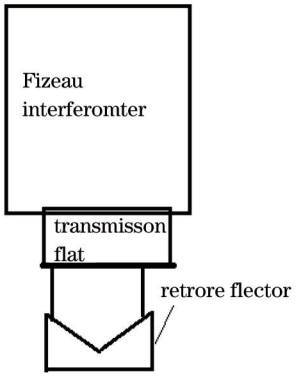


图2 平面干涉仪“猫眼”位置测量示意图

Fig.2 “Cat′s-eye” test configuration of plane interferometer

2.2 干涉仪出射检测

在球面猫眼位置测量时，定义干涉仪光轴方向为Z轴，垂直Z轴的为X，Y轴，将反射镜绕X轴旋转一定的角度，那么被测光反射回干涉仪的波前也会发生一定的旋转，在干涉仪中即得到另一个猫眼数据，该数据的被测波前与之前的被测波前在Y方向发生了一定的剪切，剪切量与反射镜的倾斜角度和球面标准镜的F数有关系，利用方程表示为

$$W_{\mathrm{CatsEye2}} = 1/2[W_g - W_{g(\mathrm{rot\,180_translate}Y1)}]\,. \tag{5}$$

倾斜不同的角度即得到剪切量的测量，如果分别绕着X，Y轴倾斜一定的角度得到

$$W_0 = 1/2[W_g - W_{g(\mathrm{rot\,180})}]\,, \tag{6}$$

$$W_1 = 1/2[W_g - W_{g(\mathrm{rot\,180_translate}PX)}]\,, \tag{7}$$

$$W_2 = 1/2[W_g - W_{g(\mathrm{rot\,180_translate}PY)}]\,, \tag{8}$$

那么联立(6)~(8)式即能够算出干涉仪出射波前。

如果把干涉仪波前利用泽尼克多项式表示：

$$W_g \approx \sum_{i=1}^{K} a_i Z_i\,, \tag{9}$$

式中Z_i为第i项泽尼克多项式，a_i为对应的泽尼克系数。把(4)~(8)式联立起来得到一个巨大的矩阵方程

$$\boldsymbol{G} \times \boldsymbol{X} = \boldsymbol{W}\,, \tag{10}$$

式中$\boldsymbol{X}$为a_i组成的列向量。$\boldsymbol{W}$为W_0，W_1，W_2中所有m个有效像素的测量值组成的长度为3 m的列向量。

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{W}_z - \boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot\,180})} \\ \boldsymbol{W}_z - \boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot\,180_translate}PX)} \\ \boldsymbol{W}_z - \boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot\,180_translate}PY)} \end{bmatrix}, \tag{11}$$

为$3m\times n$大小的矩阵，其中

$$\boldsymbol{W}_z = \begin{bmatrix} Z_4(x_1,y_1) & Z_5(x_1,y_1) & \cdots & Z_n(x_1,y_1) \\ Z_4(x_2,y_2) & Z_5(x_2,y_2) & \cdots & Z_n(x_2,y_2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_4(x_m,y_m) & Z_5(x_m,y_m) & \cdots & Z_n(x_m,y_m) \end{bmatrix}, \tag{12}$$

为泽尼克多项式在像素点上的值，为$m\times n$大小的矩阵；$\boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot180})}$为$\boldsymbol{W}_z$旋转180°之后对应位置的泽尼克多项式的值；$\boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot180_translate}PX)}$为$\boldsymbol{W}_z$旋转180°然后平移$PX$之后对应位置的泽尼克多项式的值；$\boldsymbol{W}_{z(\mathrm{rot180_translate}PY)}$为$\boldsymbol{W}_z$旋转180°然后平移$PY$之后对应位置的泽尼克多项式的值；$m$为有效像素的个数，$n$为所取泽尼克多项式的项数。

通过最小二乘解算得到X，即干涉仪出射波前的泽尼克系数。

需要说明的是，这种方法无法得到球面干涉仪波前的Power值，因为首先测量时Power本身由于离焦而测量不准确，另外测量过程中的倾斜误差在计算中的积分效应会产生Power。所以最终本方法无法准确测

量Power值，后面得到结果中的Power值被直接剔除掉了。利用平面干涉仪“猫眼”测量光路测量的至少两个倾斜值可以得到干涉仪本身的Power，但一般角反射镜面形较差，无法得到二维波前。

3　实验验证

3.1　干涉仪出射波前测量实验

利用这种方法进行了Zygo公司的GPI干涉仪和4 inch(1 inch=2.53 cm)F=1.5参考面面形等级1/20 PV(RMS值为5 nm左右)的球面标准镜进行了出射波前检测。这里利用标记点进行剪切平移量(反射镜倾斜量)的控制，首先在参考面上做一标记点，比如用记号笔点点或者在镜片边缘粘接尖状标记。此次实际实验中利用了参考面上本身存在的灰尘点作为标记点。那么在猫眼位置进行检测时就会在对称的位置上形成一对标记，在倾斜反射面时其中一个标记点在干涉图上就会发生平移，标记点平移的像素数即为计算时的剪切量，这里采用的平移像素数为26。通过在放大的干涉图上直接目测标记点的像素坐标位置进行平移量(反射镜倾斜量)的控制，准确度认为在1 pixel之内。测量得到的原始位置数据如图3所示，利用被测波前在±X和±Y四个方向的平移之后得到的猫眼数据减去原始位置的数据得到的4个结果如图4所示。

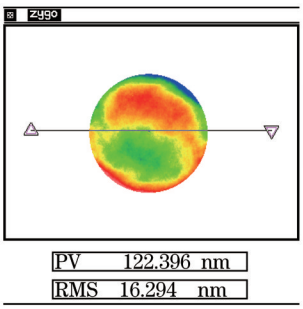


图3　原始位置的猫眼测量数据

Fig.3　Cat's-eye test result at original position

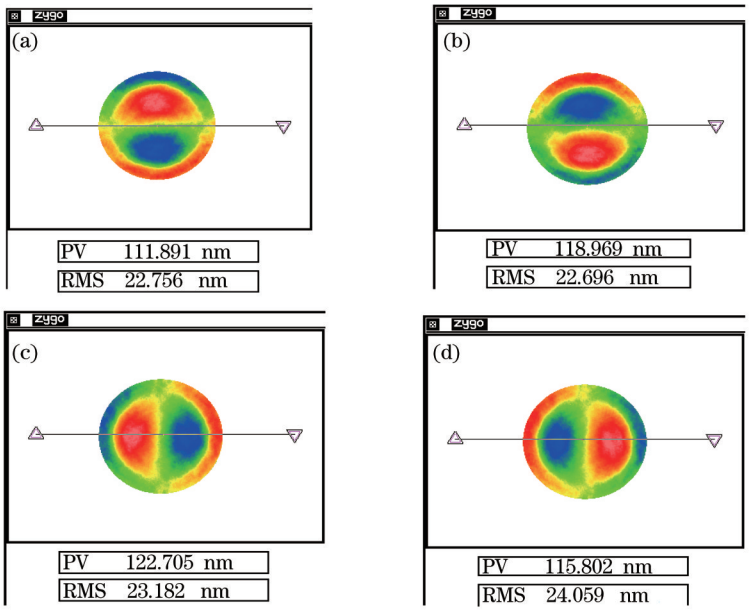


图4　被测波前在±X,±Y四个方向平移之后测量数据减去原始位置结果图，(a)~(d)分别为+Y方向，−Y方向，−X方向，+X方向平移之后测量数据减去原始位置数据。

Fig.4　Four results (a)~(d) getting by subtraction original data from the data of +Y, −Y, −X and +X translation

根据原始位置数据和被测波前平移之后的4个数据与原始位置数据的差值得到一个巨大的矩阵方程直接计算出干涉仪波前的36项泽尼克系数值，进而得到的二维波前如图6(a)所示。由于得到的是干涉仪和球面标准具总体的波前，所以利用图5所示的光路直接测量得到球面标准具的波前并利用之前两球面绝对检测得到的参考面的面形误差进行了补偿得到图6(b)的结果。干涉仪与标准具总体波前直接点对点减去标准

具波前数据的结果如图6(c)所示。

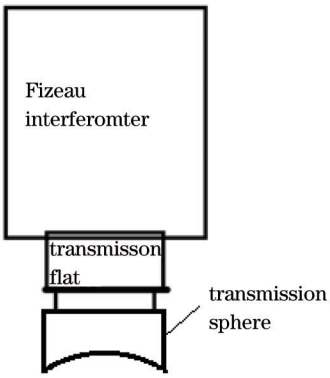


图5 平面干涉仪“猫眼”位置测量示意图

Fig.5 “Cat′s-eye” test configuration of flat interferometer

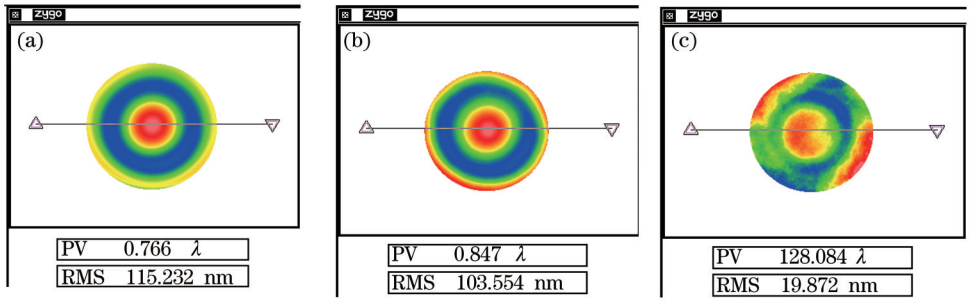


图6 利用本文方法得到F=1.5标准具和干涉仪波前结果。(a) 标准具和干涉仪本身总体波前; (b) 单独检测的标准具波前; (c) 两者点对点相减结果

Fig.6 Wavefront results of the interferometer and F=1.5 transmission sphere (TS). (a) Wavefront of interferometer with TS; (b) wavefront of TS; (c) subtraction result of (a) and (b)

3.2 实验验证及对比

为了进一步验证该方法的有效性,利用F=0.65的面形等级1/20(PV值)的标准具又一次进行了相同的实验,得到与图6相同性质的结果。此次平移量为12 pixel,得到的结果如图7所示,最终得到的干涉仪本身波前如图7(c),与图6(c)结果RMS数值相差较小,二维形状相差较大,利用F=0.65标准具得到图7(c)结果直接减去利用F=1.5标准具得到图6(c)中结果得到如图8所示结果,15 nm(RMS值),误差较大的原因主要来源于环境误差、平移量误差、相减对准误差和参考面标定误差。

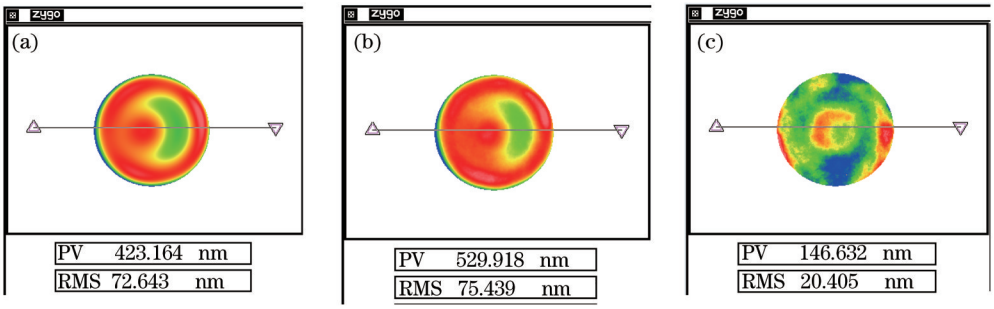


图7 利用本文方法得到F=0.65标准具和干涉仪波前结果。(a) 标准具和干涉仪本身总体波前; (b) 单独检测的标准具波前; (c) 两者点对点相减结果

Fig.7 Wavefront results of the interferometer and F=0.65 TS. (a) Wavefront of interferometer with TS; (b) wavefront of TS; (c) subtraction result of (a) and (b)

3.3 实验总结

通过实际实验验证得到三方面结论:对于一般商业球面干涉仪波前误差主要来自球面标准具;本方法

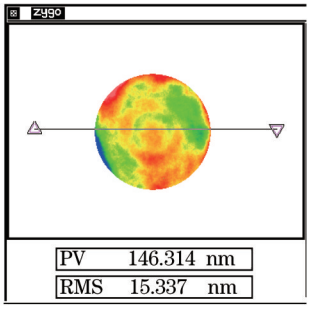


图8 利用F=1.5标准具得到的干涉仪自身波前和利用F=0.65标准具得到的干涉仪自身波前做差结果

Fig.8 Wavefront comparison results of subtraction data getting by F=0.65 TS from data getting by F=1.5 TS

得到干涉仪本身波前误差小于20 nm(RMS值),具体二维形状误差较大;该方法无法直接进行球面干涉仪波前的Power误差的测量,需要进一步研究。同时该实验在实验环境控制、实验条件、平移量的控制,点对点配准方法还需要改进以提高检测精度。

4 结　论

提出了干涉仪猫眼法测量球面干涉仪出射波前的方法,方法简单易操作,并且测量精度较高。通过实验验证了球面干涉仪的波前误差主要来自标准镜,并且估计干涉仪的波前误差为20 nm(RMS值)。得到干涉仪出射波前之后,能够定量估计干涉仪非共光路误差,有利于更好地进行检测不确定度评估,为高精度检测提高指导。

参 考 文 献

1 Sykora D M. A model for cavity induced errors with wavefront slope in high accuracy spherical Fizeau metrology[C]. Optical Fabrication and Testing, Optical Society of America, 2008: OWB7.

2 Langenbeck P. Improved collimation test[J].App Opt, 1970, 9(11): 2590-2593.

3 Liu Lei, Zeng Aijun, Zhu Linglin, *et al*.. Lateral Shearing interferometer for the wavefront test of small beam[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0108003.
刘　蕾, 曾爱军, 朱玲琳, 等. 可用于小口径光束波前检测的横向剪切干涉仪[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0108003.

4 Li Jing, Gong Yan, Hu Xinrong, *et al*.. A high-precision centroid detection method for Hartmann-Shack wavefront sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316002.
李　晶, 巩　岩, 呼新荣, 等. 哈特曼-夏克波前传感器的高精度质心探测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316002.

5 Liu Zhaodong. The Research of Calibration and Testing Techniques of ϕ600 mm Near-Infrared Phase-Shifting Fizeau Interferometer [D]. Nanjing: Nanjing University of Seience & Technology, 2011: 74-77.
刘兆栋. ϕ600 mm近红外相移斐索干涉仪校准及测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2011: 74-77.

6 Su P, Yu Y, Zhu Q, *et al*.. Self-referenced Hartmann testing: radial slope testing[C]. Photonics Asia 2002, International Society for Optics and Photonics, 2002: 140-145.

7 Ma Dongmei, Han Changyuan. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technique[J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(11): 90-95.

8 Lee Y W, Cho H M, Lee I W. Half-aperture shearing interferometer for collimation testing[J]. Opt Eng, 1993, 32(11): 2837-2840.

9 Sickinger H, Falkenstrfer O, Lindlein N, *et al*.. Characterization of micro lenses using a phase-shifting shearing interferometer[J]. Opt Eng, 1994, 33(8): 2680-2686.

10 Murty M. The use of a single plane parallel plate as a lateral shearing interferometer with a visible gas laser source[J]. Appl Opt, 1964, 3(4): 531-534.

11 Su Dongqi, Miao Erlong, Sui Yongxin, *et al*.. Absolute surface figure testing by shift-rotation method using Zernike polynomials[J]. Opt Lett, 2012, 37(15): 3198-3200.

栏目编辑: 何卓铭