

横向剪切干涉中非共光路误差的识别与补偿

刘丙才^{1,2}, 李 兵¹, 田爱玲², 高 芬¹

- (1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;
2. 西安工业大学 陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室, 陕西 西安 710032)

摘 要: 由于相移式横向剪切干涉不需要标准参考波面, 因此它可以缩小干涉腔长、甚至实现绝对的共光路干涉, 从而最大程度上降低了空气扰动和振动的影响, 但实验室设计的相移式横向剪切干涉测量装置中的分束棱镜、剪切平板和五棱镜的制造误差仍然造成了发生错位的两波面间产生非共光路误差。通过剪切干涉测量装置中调整误差和非共光路误差的对比分析, 提出了非共光路误差的计算方法, 并在测试结果中进行非共光路误差的补偿。实验结果发现补偿非共光路误差后的面形误差与 ZYGO 干涉仪的测量结果非常接近。

关键词: 非共光路误差; 横向剪切干涉; 误差补偿

中图分类号: O436.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2406-05

Compensation and identification of non-common path error in lateral shearing interferometry

Liu Bingcai^{1,2}, Li Bing¹, Tian Ailing², Gao Fen¹

- (1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Shaanxi Province Key Laboratory of Thin Films Technology and Optical Test, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: Because standard reference wave-front is not needed in lateral shearing interferometry (LSI), interferometry cavity can be shorten, even absolute common path interferometry could be achieved, and it is immunity to air turbulence and vibration. Therefore, non-common path error between two shearing wave-fronts which come through different cubic prisms, shear plate and pentaprism is not avoided. In this paper, calculation method of non-common path error was proposed by contrast analysis between adjustment error and non-common path error in shearing interferometry, and non-common path error in surface measurement result was compensated. Lastly, experiment results demonstrate the surface result after compensation is in accordance with ZYGO interferometer.

Key words: non-common path error; lateral shearing interferometry; error compensation

收稿日期: 2014-12-20; 修订日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(51275398, 51075322); 西安工业大学校长基金(XAGDXJJ0903)

作者简介: 刘丙才(1981-), 男, 讲师, 主要从事光学干涉测量及三维轮廓测量方面的研究。Email: liubingcai@xatu.edu.cn

0 引言

横向剪切干涉技术是一种直接测量波面相位分布的光学测量方法,它将待测波前进行横向错位干涉,不需要高精度的参考平面,因而可以最大程度地缩小干涉腔长、甚至实现绝对的共光路干涉,从而大大降低了空气扰动和振动的影响;横向剪切干涉图的条纹密度与待测波前无关,只与待测波前的微分有关,因而能够测量更大偏离量的表面面形偏差。因此,横向剪切干涉测量方法不仅应用于平面和球面光学元件的面形测量,而且可以测量一定深度的非球面元件。

由于横向剪切干涉的诸多优势,它已成为国内外研究的热门课题。Steinchen W 等^[1-2]开发了数字散斑剪切干涉仪;P. Ferraro 等^[3-5]将数据全息技术与横向剪切干涉有机结合;Tippur HV^[6-8]提出了实时剪切干涉技术;中国科学院上海光学精密机械研究所开发了空间相移横向剪切干涉仪^[9];西安工业大学^[10-12]开发了相移式横向剪切干涉仪。同时,也有许多的研究人员对此测量方法做了进一步的研究,Miyakawa R^[13]和 Vidal J^[14-15]分析了横向剪切干涉仪的系统误差和定位误差;Steinchen W^[2]和 J. N. Petzing^[16]进行了剪切干涉仪的振动分析;西安工业大学对剪切干涉仪的非球面测量深度进行了详细的分析^[12],但是在横向剪切干涉测量装置中需要楔形棱镜、平行平板、直角棱镜或双光栅等剪切装置将测试光束分成相互错位的两束光,一般情况下,这两束相互错位的光线经过不同的路径或不同的光学元件,由于光学元件自身存在制造误差,不可避免地会引入两光路间的非共光路误差。文中提出一种相移式横向剪切干涉中错位波面的非共光路误差识别方法,并对实际测试结果进行了非共光路误差的补偿。

1 理论分析

1.1 横向剪切干涉原理

如图 1 所示为基于压电相移的横向剪切干涉测量光路图。激光器发出的稳频激光经中性密度滤光片、平面反射镜、扩束镜、准直镜后得到测试口径为 20 mm 的平行光束,平行光束经分束立方棱镜后,入射到被测平面光学元件上,由被测平面光学元件反

射后形成携带有被测件面形误差的测试光束,测试光束经过由分光立方棱镜、五棱镜及平面平晶组成的横向剪切装置,最后形成干涉条纹由 CCD 成像系统接收,并送至计算机进行图像数据处理。此外,平面反射镜、光立方棱镜及 CCD 成像系统组成的光学调整装置可以辅助进行被测件的快速调节;压电陶瓷驱动五棱镜实现错位波面间的光程差调节,以得到若干幅相移剪切干涉图像。

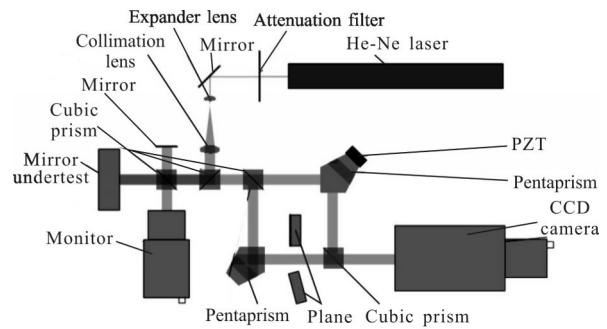


图 1 横向剪切干涉测量光路图

Fig.1 Optical path schematics of lateral shearing interferometry

由图 2 可以看出,干涉区域所得的干涉条纹为待测波面 $\phi(x,y)$ 经分光立方棱镜、五棱镜和平面平晶所产生的两个相互错位量为 s 的等振幅波面重叠区域相干涉所形成的。

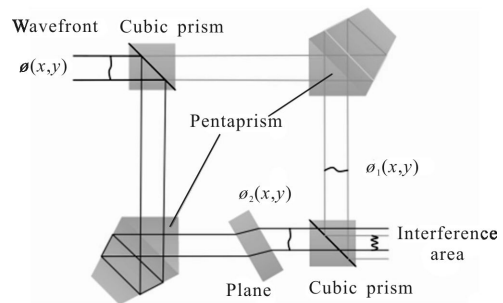


图 2 横向剪切装置

Fig.2 Lateral shear device

假设由被测件反射回来的波面相位为 $\phi(x,y)$, 则通过剪切装置后两横向(x 方向)的错位波面理论上可表示为:

$$\begin{aligned} \phi_1(x,y) &= \phi(x,y) \\ \phi_2(x,y) &= \phi(x+s,y) \end{aligned} \quad (1)$$

则两错位波面的相位差为:

$$\Delta\phi_x(x,y) = \phi(x+s,y) - \phi(x,y) \approx \frac{\partial\phi(x,y)}{\partial x} s \quad (2)$$

则两错位波面在干涉区域的光强分布为:

$$I(x, y, l) = \alpha + \beta \cos[\Delta\phi(x, y) - l] \quad (3)$$

式中: α 为干涉条纹的背景; β 为干涉条纹的对比度; l 为固接在压电陶瓷上的五棱镜所引入的相位差。

对公式(3)进行傅里叶级数展开, 并整理可得:

$$\Delta\phi_x(x, y) = \frac{1}{2k} \operatorname{arctg} \frac{\sum_{i=0}^{N-1} I(x, y, l_i) \sin \frac{2\pi}{N} i}{\sum_{i=0}^{N-1} I(x, y, l_i) \cos \frac{2\pi}{N} i} \quad (4)$$

式中: N 为光强变化一周期内对干涉区域的图像采集次数, 该测量系统中通过压电陶瓷驱动五棱镜可实现任意步长的干涉图像采集, 从而求出波面的相位差 $\Delta\phi(x, y)$, 根据公式(2)通过积分运算即可求出被测波面在 X 方向上的一维分布。

1.2 误差分析

如图 2 所示的横向剪切装置包括分光立方棱镜、五棱镜和平面平晶, 在实际的横向剪切干涉光路搭建过程中, 测试光束所通过的横向剪切装置部分采用非共光路设计, 因而相互错位的两波面分别通过不同的光学元件, 由于光学元件自身存在的制造误差和调整误差会造成两波面间的相位差发生变化, 将这部分波面偏差为非共光路误差。

为了准确地计算非共光路误差, 首先选用高精度的平面反射镜作为被测元件, 并且将剪切平面平晶移除, 此时测试波面经五棱镜和分光立方棱镜再次相遇后的相位差 $\Delta\phi_1(x, y)$ 可表示为:

$$\Delta\phi_1(x, y) = \varepsilon_1(x, y) + \delta_1(x, y) \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_1(x, y)$ 为分光立方棱镜和五棱镜制造误差造成的相位变化; $\delta_1(x, y)$ 为分光立方棱镜和五棱镜安装过程引入的调整误差。

然后将带有一定倾斜角度的剪切平面平晶移至工作位置, 此时相互剪切的波面的相位差为:

$$\Delta\phi_2(x, y) = \Delta\phi_1(x+s, y) - \Delta\phi_1(x, y) + \varepsilon_2(x, y) + \delta_2(x, y) \quad (6)$$

式中: $\varepsilon_2(x, y)$ 为平面平晶制造误差造成的相位变化; $\delta_2(x, y)$ 为平面平晶安装过程引入的调整误差。

光学元件的调整误差包括倾斜误差和离焦误差, 由于横向剪切装置中采用的器件全部都是平面光学元件, 装调过程中不会产生离焦现象, 因而在调整误差中只需要考虑倾斜误差; 平面光学元件的制造误差包括光学平行度误差和面形偏差, 光学平行度误差会造成角度误差和棱差, 从而引起两错位波

面间的倾斜, 而光学元件面形偏差所造成的波面误差很容易与被测件的面形偏差混淆在一起, 严重影响测量系统的精度。因此, 对公式(5)和(6)重新定义:

$$\Delta\phi_1(x, y) = \varepsilon_1'(x, y) + \delta_1'(x, y) \quad (7)$$

$$\Delta\phi_2(x, y) = \Delta\phi_1(x+s, y) - \Delta\phi_1(x, y) + \varepsilon_2'(x, y) + \delta_2'(x, y) \quad (8)$$

式中: $\varepsilon_1'(x, y)$ 和 $\delta_1'(x, y)$ 分别为五棱镜、分光立方棱镜和调整所造成的倾斜误差和面形误差; $\varepsilon_2'(x, y)$ 和 $\delta_2'(x, y)$ 分别为平面平晶所造成的倾斜误差和面形误差。

从上述分析可知, 通过移除剪切平面平晶状态下的干涉图可以重建波面信息 $\Delta\phi_1(x, y)$, 然后采用 Zernike 多项式拟合方法可以分别获得 $\varepsilon_1'(x, y)$ 和 $\delta_1'(x, y)$; 通过剪切平面平晶工作状态下的干涉图重建可以得到 $\Delta\phi_2(x, y)$, 结合 Zernike 波面拟合和 $\Delta\phi_1(x, y)$, 可以获得平面平晶所造成的非共光路误差 $\varepsilon_2'(x, y)$ 和 $\delta_2'(x, y)$ 。

2 实验及分析

图 3 为实验室搭建的相移式横向剪切干涉测量装置, 该装置的光源选用西格玛光机的 05-LHR-021 型氦氖激光器, 其波长为 632.8 nm; 相移装置选用德国 PI 公司的 S-303.CD 型压电陶瓷致动器; 干涉图像采集选用尼康 AF-S 70-300 mm $f/4.5-5.6$ GIF-EDVR 型成像镜头和微视图像的 MV-VE200SM 型 CCD 相机作为干涉图像采集器件。在测量系统中, 激光光束通过中性滤光片和扩束准直装置, 经被测件和横向剪切装置后分别到达监视器和 CCD 相机, 从而获得横向剪切干涉图。

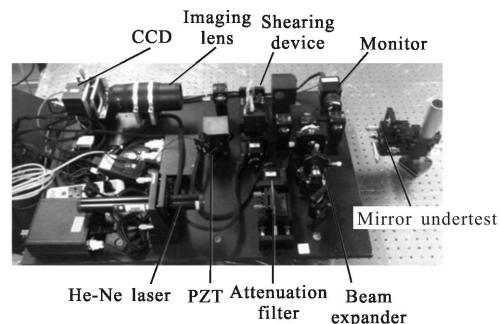


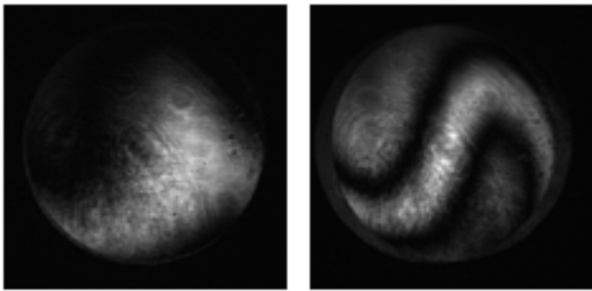
图 3 横向剪切干涉测量装置图

Fig.3 Experiment device of lateral shearing interferometry

2.1 非共光路误差的计算

为了获得横向剪切干涉测量装置的非共光路误差, 选择高精度平面反射镜作为被测件, 首先将平面

平晶移除(即:剪切装置中不存在剪切量),通过压电陶瓷驱动五棱镜,可获得四步相移干涉条纹图(如图 4(a)所示),通过相位计算、相位解包裹和 Zernike 多项式拟合可以获得中间线消除倾斜量后的一维波面曲线 $\delta_1'(x,y)$ (如 5(a)所示);然后将平面平晶置于工作状态,采集四步相移干涉条纹图(如图 4(b)所示),重复上述计算过程,并去除 $\delta_1'(x,y)$ 的影响,可以获得中间线的一维波面曲线 $\delta_2'(x,y)$,如图 5(b)所示。



(a) 移除剪切平晶 (b) 带有剪切平晶
(a) Without plano (b) With plano

图 4 干涉图

Fig.4 Interferograms

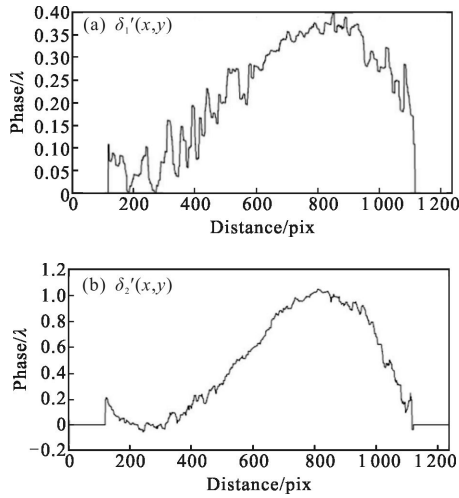


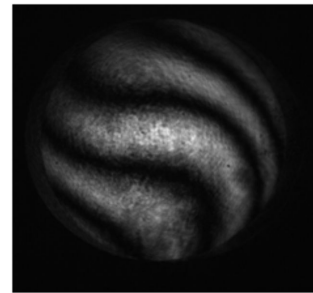
图 5 非共光路误差的一维波面曲线

Fig.5 One direction wavefront curve for non-common path error

2.2 非共光路误差的补偿

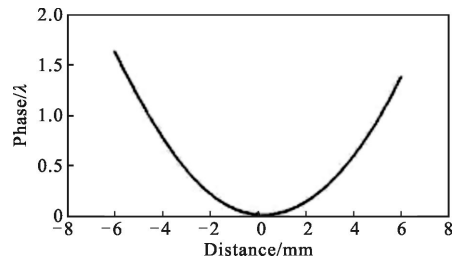
为了验证横向剪切干涉测量装置中非共光路误差的影响,选择口径为 12 mm 的平面反射镜作为被测件,将剪切平面平晶置于工作状态,得到如图 6(a)所示的一维横向剪切干涉图,以剪切量为采样间隔,在干涉图的中线上选取采样点,并通过积分运算获得被测光学元件的一维面形偏差,其测试结果如图 6 所示,其中图 6(b)为未进行误差修正的被测件

面形偏差;图 6(c)为补偿非共光路误差后的面形偏差。从图 6(b)和(c)可以看出,未进行非共光路误差补偿的测试结果的对称性较差,这主要是由于非共光路误差在积分过程中的累计作用引起的。通过与如图 7 所示的 ZYGO 干涉仪测试结果相比较,可以获得如图 8 所示的非共光路误差补偿前后横向剪切干涉测试结果的残差曲线图,从图中可以看出,非共光路误差补偿后,其测量误差明显减小。



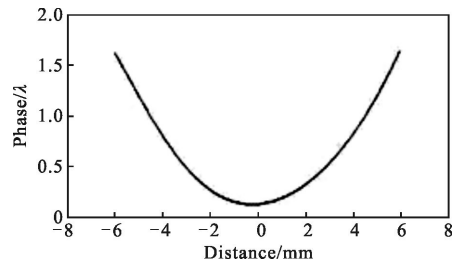
(a) 干涉图

(a) Interferogram



(b) 未补偿

(b) Without compensation



(c) 补偿后

(c) With compensation

图 6 横向剪切干涉测试结果

Fig.6 Measurement result of LSI

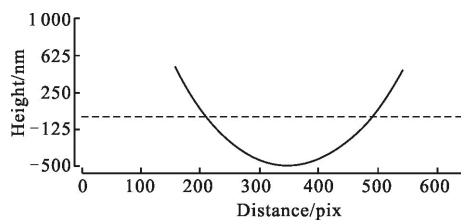


图 7 ZYGO 干涉仪测试结果

Fig.7 Measurement result of ZYGO

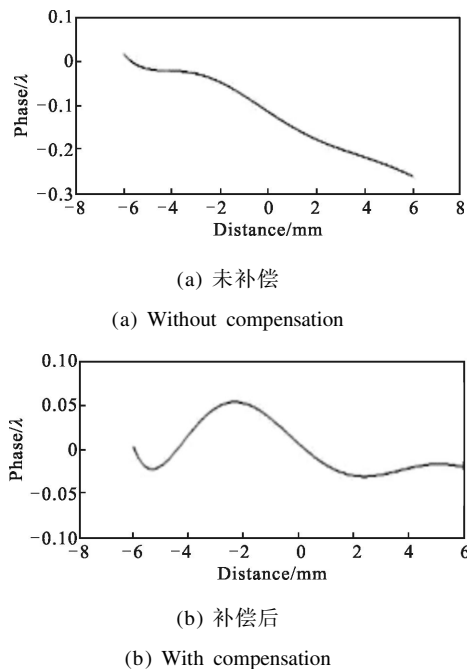


图8 横向剪切干涉测试误差曲线图

Fig.8 Curve of LSI error test

3 结论

鉴于横向剪切干涉测量装置中光学元件制造误差和调整误差的影响,提出了一种获取测量装置中非共光路误差的方法,并对实际测量的平面光学元件进行了非共光路误差的补偿,其补偿后的面形测试结果与ZYGO干涉仪的测试结果非常一致,其测试误差也明显减小。因此,该方法是横向剪切干涉测量装置中消除非共光路误差的一种有效手段。

参考文献:

- [1] Steinchen W, Yang L X, Kupfer G, et al. Application of laser diodes in digital speckle pattern shearing interferometry [C]//SPIE, 1998, 3415: 87-94.
- [2] Steinchen W, Yang L X, Kupfer G, et al. Vibration analysis by digital speckle pattern shearing interferometry [C]//SPIE, 1997, 3098: 158-165.
- [3] Ferraro P, Alfieri D, De Nicola S, et al. Quantitative phase-contrast microscopy by a lateral shear approach to digital holographic image reconstruction[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(10): 1405-1407.
- [4] Ferraro P, Alfieri D, De Nicola S, et al. Combining lateral shear interferometry with digital holography for quantitative phase microscopy[C]//SPIE, 2006, 6341:634115-1
- [5] Ferraro P, Del Core C, Miccio L, et al. Phase map retrieval in digital holography: avoiding the undersampling effect by a lateral shear approach[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(15): 2233-2235.
- [6] Tippur H V. Coherent gradient sensing—a fourier optics analysis and applications to fracture [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4428-4439.
- [7] Tippur HV. Simultaneous and real-time measurement of slope and curvature fringes in thin structures using shearing interferometry [J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(12): 3014-3020.
- [8] Tippur H V, X Liming. Real-time shearing interferometry for studying interfacial crack tip fields under quasi-static and dynamic loading conditions[C]//SPIE, 1995, 2544: 223-235.
- [9] Guo X, Zeng A, Huang H. Spatial phase-shifting lateral shearing interferometer[C]//SPIE, 2009, 7160: 71602D-1.
- [10] Wang Hongjun, Tian Ailing, Wang Jiyuan. The inspection technology of the displacement of shearon the lateral shearing interferomter based on Radon transform [J]. *Optical Technique*, 2006, (5): 785-786. (in Chinese)
- [11] Liu Bingcai, Tian Ailing, Wang Hongjun, et al. Selection and analysis of shearing displacement in lateral shearing interferometry [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, (3): 511-514. (in Chinese)
- [12] Liu B, Tian A, Wang H, et al. Analysis of asphericity measurement in lateral shearing interferometry [C]//SPIE, 2010, 7522: 75225C-1.
- [13] Miyakawa R, Naulleau P, Goldberg K. Analysis of systematic errors in lateral shearing interferometry for EUV optical testing[C]//SPIE, 2009, 7272:72721V-1.
- [14] Vidal J, Nicolas J, Campos J. Analysis of the positioning error on lateral shearing surface reconstruction with a Fizeau interferometer[C]//SPIE, 2009,7390: 73900N-1.
- [15] Vidal J, Nicolas J, Campos J. New method to improve the accuracy in a sequential lateral shearing interferometer [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(11): 134-140.
- [16] Petzing J N. Vibration analysis using fast speckle metrology [C]//SPIE, 1999. 3745: 134-140.