

引用格式: ZHOU Jian-biao, ZHANG Mu-yang, LIANG Yan-mei. Correction Methods of Adjustment Errors for the Parallel Plate-based Lateral-shearing Interferometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3):0322003

周健彪,张慕阳,梁艳梅.平行平板横向剪切干涉仪装调误差的矫正方法研究[J].光子学报,2020,**49**(3):0322003

平行平板横向剪切干涉仪装调误差的矫正方法研究

周健彪,张慕阳,梁艳梅

(南开大学 现代光学研究所,天津 300350)

摘 要:对平行平板双光路横向剪切干涉仪的装调进行了研究,提出了一种矫正两个平行平板之间角度误差的方法.输出激光的波前采用 Zernike 多项式拟合,经过理论推导,发现两个方向差分波前求解出的倾斜像散之差与平行平板的角度误差存在线性关系,利用两个方向倾斜像散之差来矫正两个平行平板之间的角度误差.在平行平板横向剪切干涉仪的装调过程中使两个方向差分波前的倾斜像散之差为零即可以使两个方向的平行平板之间的角度误差值为零.进一步地从实验上证明了这个线性关系,对于所用的实验系统,当离焦像差为 $-3.224\ 7 \pm 0.001\ 8$,两个方向差分波前的倾斜像散之差波动范围为 $\pm 2.0 \times 10^{-3}$ 时,平行平板的角度误差可以控制在 $8.82''$ 之内,高阶像差对平行平板的角度误差调节精度的影响约为 $1.63''$.该方法具有装调简单、精确度高,易于流程化操作的优点.

关键词:横向剪切干涉仪;平行平板;波前测量;角度误差;倾斜像散

中图分类号: TP394.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204903.0322003

Correction Methods of Adjustment Errors for the Parallel Plate-based Lateral-shearing Interferometer

ZHOU Jian-biao, ZHANG Mu-yang, LIANG Yan-mei

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China*)

Abstract: The adjustment of the parallel plate dual-path lateral-shearing interferometer was investigated and a method to correct the angle error of the parallel plate was proposed. The wavefront of the laser is fitted with the Zernike polynomial. Based on theoretical derivation, it is found that the difference between oblique astigmatism of wavefront in two directions has a linear relationship with the angle error of the parallel plate. Therefore, the difference between oblique astigmatism of wavefront in two directions can be used as a feedback to adjust the angle error of the parallel plate. The angle error of two parallel plates can approach zero by making the difference between oblique astigmatism of wavefront in two directions is equal to zero during adjusting the parallel plate lateral-shearing interferometer. The linear relationship was further proved by experiments. When defocus aberration is $-3.224\ 7 \pm 0.001\ 8$ and the fluctuation range of the difference between oblique astigmatism of wavefront in two directions is $\pm 2.0 \times 10^{-3}$, the experimental angle error of two parallel plates for our experimental system can be controlled within $8.82''$. The effect of higher-order aberrations on the accuracy of angle error adjustment is approximately $1.63''$. This method has the advantages of easy adjustment, high accuracy, and easy process operation.

Key words: Lateral-shearing interferometer; Parallel plate; Wavefront measurement; Angle error; Oblique astigmatism

OCIS Codes: 220.4610; 220.4830; 120.3180; 120.4630; 120.4800

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61875092, 11374167),天津市科技支撑重点项目(No.17YFZCSY00740)

第一作者:周健彪(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为光学干涉技术. Email: 2120170255@mail.nankai.edu.cn

导师(通讯作者):梁艳梅(1970-),女,教授,博士,主要研究方向为光学干涉技术研究及其应用. Email: ymliang@nankai.edu.cn

收稿日期:2019-10-11;录用日期:2020-02-16

0 引言

横向剪切干涉技术在光学元件的检测和测量^[1-2]、光学系统的校准和检验^[3-4]、高能激光束质量的评价^[5]及温度场研究^[6-7]等方面具有重要应用.横向剪切干涉技术利用差分波前求解待测波前时,若采集的两个方向剪切干涉图不正交会降低波前测量的准确度.DUBRA A 等提出使用两块楔形玻璃板和两个波带片来实现正交剪切干涉图的采集^[8],但系统中使用光学折转器件较多、装置复杂,不便调节.HASEGAWA M 等提出基于二维光栅的四波横向剪切干涉技术来实现两个正交剪切干涉图的同时采集^[9],但该方法需要确定级次选择窗口的位置和大小,装置设计和调整难度较大.此外,在光栅栅距和级次选择窗口的位置和大小确定后,干涉仪的剪切量即被固定,因此,该方法不适用于剪切量需要调整的情况.浙江大学凌瞳等通过引入随机编码混合光栅^[10-11]可以去除级次选择窗口,并使得剪切量在一定范围连续可调.但是为了避免随机编码混合光栅的夫琅禾费衍射中其它衍射级次的干扰,需要专门定制合适的光栅.

平行平板横向剪切干涉技术具有装置结构简单、元件价格低廉、剪切量易于调节、重构波前分辨率高等优点^[12].但是在实验中,由于需要分别采集两个方向的剪切干涉图,导致基于平行平板的横向剪切干涉仪相比基于二维光栅的四波横向剪切干涉仪更难获得正交的剪切干涉图.在平行平板横向剪切干涉仪中,减小两个光路平行平板之间的角度误差值是获得正交剪切干涉图的关键.本文理论推导证明当两个平行平板之间的角度误差较小时,该角度误差和两个方向差分波前求解出的倾斜像散之差存在线性函数关系,提出可以通过计算两个方向差分波前的倾斜像散之差来求解平行平板的角度误差,在平行平板横向剪切干涉仪的装调过程中使两个方向差分波前的倾斜像散之差为零即可以使两个方向平行平板之间的角度误差值为零.研究表明,这种方法的实验矫正精度可达 $8.82''$.

1 方法

1.1 理论推导

一般情况下,波前方程 $w(x, y)$ 在直角坐标系下可表示为 Zernike 多项式

$$w(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4[2(x^2 + y^2) - 1] + a_5(x^2 - y^2) + 2a_6xy + \dots \quad (1)$$

式中, $a_1 \sim a_6$ 为对应的 Zernike 系数,其中, a_4 为离焦像差, a_6 为倾斜像散.

为了降低剪切干涉仪装调的难度,通常使用较为简单的波前进行装调.在不考虑高阶像差的影响时,取前六项 Zernike 系数不为零,装调的波前 $w'(x, y)$ 可以表示为

$$w'(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4[2(x^2 + y^2) - 1] + a_5(x^2 - y^2) + 2a_6xy \quad (2)$$

利用平行平板对 $w'(x, y)$ 做 x 方向的波前剪切,当其剪切量为 s_x 时,可得到差分波前 $\Delta w'_x(x, y)$

$$\Delta w'_x(x, y) = w'(x + s_x, y) - w'(x, y) = 0 + a_2s_x + 0 + 2a_4(2xs_x + s_x^2) + a_5(2xs_x + s_x^2) + 2a_6s_xy \quad (3)$$

以上述平行平板为基准,利用另一个平行平板做 y 方向的波前剪切.当 y 方向的剪切量为 s_y 时,在理想情况下, y 方向的差分波前 $\Delta w'_y(x, y)$ 表示为

$$\Delta w'_y(x, y) = w'(x, y + s_y) - w'(x, y) = 0 + 0 + a_3s_y + 2a_4(2ys_y + s_y^2) - a_5(2ys_y + s_y^2) + 2a_6s_yx \quad (4)$$

如果 y 方向的平行平板在 x 方向上有一个角度 δ 的旋转,则会引入一个相对于 x 方向的剪切量 s_δ ,则 y 方向的差分波前与 $\Delta w'_x(x, y)$ 不垂直.其差分波前 $\Delta w''_y(x, y)$ 则表述为

$$\Delta w''_y(x, y) = w'(x + s_\delta, y + s_y) - w'(x, y) = a_3s_y + 2[a_4 - a_5/2 + a_6s_\delta/(2s_y)](2ys_y + s_y^2) + 2(a_6s_y + 2a_4s_\delta + a_5s_\delta)x + 2a_4s_\delta^2 + a_2s_\delta + a_5s_\delta^2 - a_6s_\delta s_y + 2a_6s_y s_\delta \quad (5)$$

式(3)可以写为

$$\Delta w'_x(x, y) = a_2s_x + 2(a_4 + a_5/2)(2xs_x + s_x^2) + 2a_6s_xy \quad (6)$$

令 $a_{4x} = a_4 + a_5/2$ 和 $a_{6x} = a_6$, a_{4x} 和 a_{6x} 可以通过拟合 $\Delta w'_x(x, y)$ 得到.

在式(5)中,令 $a_{6y}s_y = a_6s_y + 2a_4s_\delta + a_5s_\delta$, 其中, a_{6y} 可以通过拟合 $\Delta w''_y(x, y)$ 得到.则有

$$a_{6y} = a_6 + 2(a_4 + a_5/2)s_\delta/s_y \quad (7)$$

将 $a_{4x} = a_4 + a_5/2$ 和 $a_{6x} = a_6$ 带入式(7),并令 $\Delta a_6 = a_{6y} - a_{6x}$ 可得

$$\Delta a_6 = 2a_{4x}s_\delta/s_y \quad (8)$$

设 y 方向的平行平板厚度为 d , 折射率为 n , 在 x 方向旋转的角度为 δ (本文把这个角度称为平行平板之间的角度误差), 则剪切量 s_δ 和 δ 满足

$$s_\delta = \frac{d \sin(2\delta)}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \delta}} \quad (9)$$

当 δ 较小时, 由式(8)和式(9)取近似可以得到

$$\Delta a_6 = \frac{4a_{4x}d}{s_y n} \delta \quad (10)$$

式(10)表明, δ 较小时, Δa_6 和 δ 存在线性关系. 当 Δa_6 为零时, δ 为零, 因此, 可以用 Δa_6 来矫正平行平板的角度误差.

对式(10)中 δ 求导可得

$$\frac{d(\Delta a_6)}{d\delta} = \frac{4a_{4x}d}{s_y n} \quad (11)$$

式(11)表明, $4a_{4x}d/s_y n$ 越大, Δa_6 对 δ 的变化越敏感, 因此, 在平行平板参数不变时, 可以通过增加 a_{4x} 的值或减小 s_y 的值来提高 δ 的矫正精度.

1.2 平行平板角度误差的矫正方法

本文以安装的第一个平板为基准, 通过上述方法来矫正第二个平板相对于第一个平板的角度误差. 利用如图 1 所示的平行平板横向剪切干涉仪的实验装置示意图来说明本文的方法. 图中, He-Ne 激光器(Laser)发出的激光经过物镜(L_1)扩束, 在物镜的焦点处放置针孔滤波器(P), 光束经过准直镜(L_2), 经由分束棱镜(BS)一分为二, 光束在 x 和 y 两个方向上经过平行平板(GP- x 和 GP- y)前后表面反射, 由两个 CCD(CCD- x 和 CCD- y)分别采集 x 和 y 方向的干涉条纹. 其中, 以平行平板 GP- x 为基准.

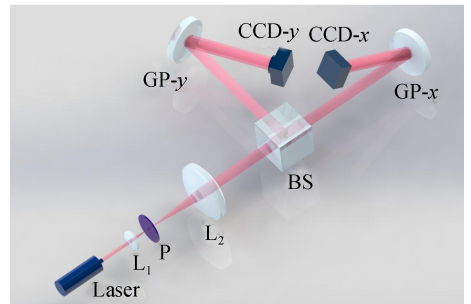


图 1 平行平板横向剪切干涉仪实验装置的示意图
Fig.1 Schematic diagram of the parallel plate-based lateral-shearing interferometer

平行平板装调的流程图如图 2 所示. 为了减小平行平板之间的角度误差, 两个方向平行平板装调过程为: 首先安装 GP- x , 使用波前拟合程序^[13-15] 计算得到 a_{4x} 和 a_{6x} ; 再安装 GP- y , 同理求出 a_{6y} , 计算得到 Δa_6 , 调节 Y 平行平板角度直至 $|\Delta a_6| < p$. 其中 p 决定于平行平板干涉仪采用的激光器输出波前的稳定性.

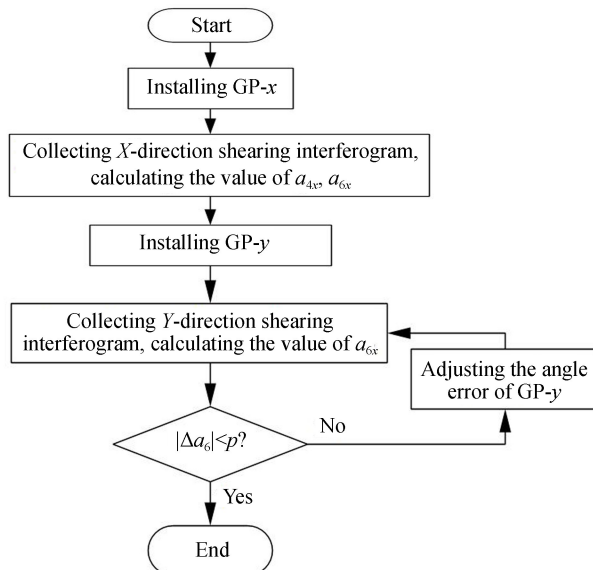


图 2 平行平板角度误差矫正流程

Fig.2 Flow chart of adjustment of the angle error of the parallel plate

2 实验

本文搭建了平行平板剪切干涉实验装置来验证平板之间角度误差(δ)与波前拟合的 Zernike 系数 Δa_6 之间的线性关系,根据该实验装置计算了方法的矫正精度和重复性.搭建的实验装置和采集的剪切干涉图如图 3 所示,图中对元件的符号描述与图 1 一致,左上角的两个图分别是 CCD-x 和 CCD-y 采集的干涉条纹.两个 CCD 采用同一个外部触发,保证在没有旋转光学元件的情况下,X 和 Y 两个方向剪切干涉图同时采集.该装置可用于随时间连续变化波前的动态测量.

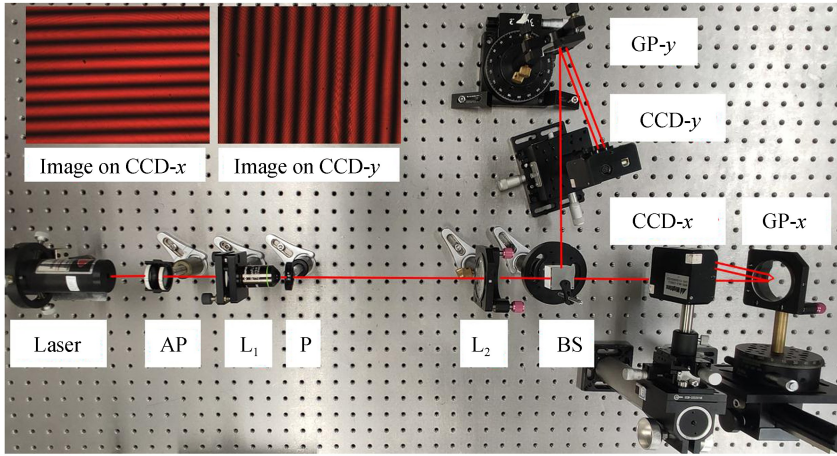


图 3 实验装置和剪切干涉图

Fig.3 Experimental setup and shearing interferograms

实验采用西格玛重载旋转台(型号:KSP-656M-M6)来调节平行平板的角度,该旋转台微分头的最小读数为 $52.2''$.采用的平行平板厚度为 4 mm,折射率为 1.516 3.在实际装调时,通过前后移动准直镜的位置来增加装调波前的离焦像差 a_4 ,进而使 $a_{4,x}$ 增加,以提高 δ 的矫正精度.

2.1 平行平板角度误差 δ 与 Δa_6 的关系

装调时,采用前六项 Zernike 拟合系数为:0, $-31.391\ 1$, $-31.391\ 7$, $-3.224\ 7$, $0.000\ 2$ 和 $-0.038\ 8$ 的激光波前进行平行平板角度误差和 Δa_6 之间关系的研究.由于激光器输出光的波前随时间会发生微小波动,装调过程中很难保证 $a_{6,y}$ 和 $a_{6,x}$ 严格相等.当剪切角度为 8° ,在某一位置重复测量同一波前时,进行 Zernike 系数拟合,得到 $a_{4,x}$ 波动范围为 $-3.224\ 7 \pm 0.001\ 8$, Δa_6 的波动范围为 $\pm 2.0 \times 10^{-3}$.根据式(10)计算,可得实验所用装置的 δ 矫正精度为 $8.82''$.在装调时,当 $a_{6,y}$ 和 $a_{6,x}$ 的差值 $|\Delta a_6|$ 在 2.0×10^{-3} 内,即 $p = 2.0 \times 10^{-3}$ 时,即可认为平行平板的角度误差已被矫正.

实验中步进调节平行平板角度,每次调节 $52.2''$.使用前六项 Zernike 系数对采集的差分波前拟合,可得 δ 和 Δa_6 关系如图 4 所示,图中圆圈为数据点,直线为根据数据点拟合的直线.从图中可以看出, δ 和 Δa_6 存在

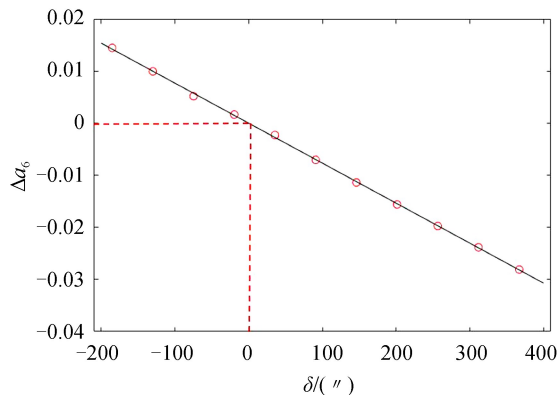


图 4 平行平板角度误差和 Δa_6 的关系

Fig.4 Relationship between the angle error of the parallel plate and Δa_6

线性关系,当 $\Delta a_6=0$ 时, $\delta=0$.线性拟合的结果为 $\Delta a_6=-7.678 \times 10^{-5} \delta-4.089 \times 10^{-6}$,其拟合优度 (R^2 值) 为 0.999 7.

2.2 平行平板角度误差与 Δa_6 关系的重复性实验

为了验证该方法的重复性,使用前六项 Zernike 系数对采集的差分波前拟合,对不同的步进角度进行了实验.实验分为三组,每组平行平板的角度误差起始角度相同,步进角度分别为 $52.2''$, $104.4''$ 和 $156.6''$,实验结果如图 5 所示.可以看出,三组数据中当平板角度误差相同时, Δa_6 的值近似相等,最大差值为 0.001 8,三组数据在同一条直线上, R^2 值为 0.998 7,这证明了不同步长下平板角度误差和 Δa_6 的对应关系的重复性.

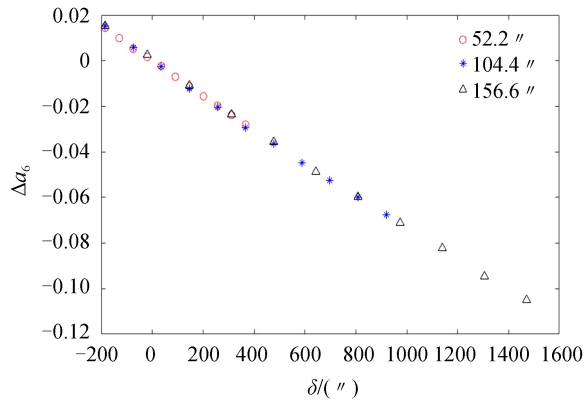


图 5 平行平板角度误差和 Δa_6 的关系的重复性实验结果

Fig.5 Repeatability of relationship between the angle error of the parallel plate and Δa_6

2.3 高阶像差对矫正精度的影响

以上理论推导和对实验数据的 Zernike 多项式波前拟合中没有考虑高阶像差.为了分析高阶像差对平板角度误差和 Δa_6 的关系以及对角度误差矫正精度的影响,分别使用 6 项、13 项和 20 项 Zernike 系数对同一套实验数据的差分波前进行拟合,分别得到 δ 和 Δa_6 的对应关系,结果如图 6 所示.对使用 6 项、13 项和 20 项得到的数据点进行直线拟合得到表 1 中的数据.其中, δ 和 Δa_6 的关系分别为 $\Delta a_{6-6}=-7.678 \times 10^{-5} \delta-4.089 \times 10^{-6}$ 、 $\Delta a_{6-13}=-7.736 \times 10^{-5} \delta-2.7 \times 10^{-4}$ 和 $\Delta a_{6-20}=-8.239 \times 10^{-5} \delta-3.7 \times 10^{-4}$,直线拟合的 R^2 值分别为:0.999 7、0.999 6 和 0.999 6.使用 13 项和 20 项 Zernike 系数相比于使用 6 项 Zernike 系数对波前拟合的斜率的相对误差约为 0.7% 和 7.3%.当 $\delta=0$ 时, Δa_{6-6} 、 Δa_{6-13} 和 Δa_{6-20} 分别为 -4.089×10^{-6} 、 -2.7×10^{-4} 和 -3.7×10^{-4} ,根据式(10)可得对应的角度误差分别为 $0.02''$ 、 $1.19''$ 和 $1.63''$.

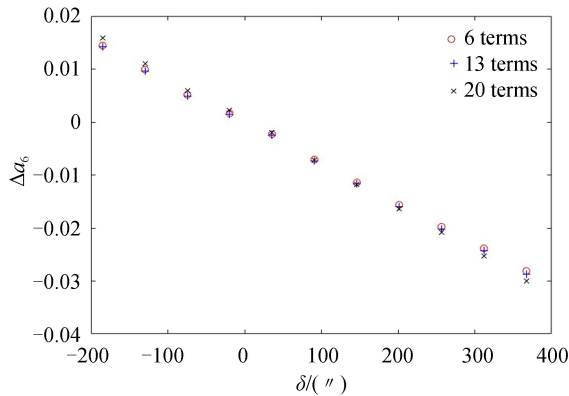


图 6 不同拟合项数时平行平板角度误差和 Δa_6 的关系

Fig.6 Relationship between the angle error and Δa_6 with different number of fitting terms

表 1 使用不同项数拟合结果对比

Table 1 Comparison of fitting results using different number of terms

Zernike terms	6 terms	13 terms	20 terms
Relationship of Δa_6 and δ	$\Delta a_{6-6} = -7.678 \times 10^{-5} \cdot \delta - 4.089 \times 10^{-6}$	$\Delta a_{6-13} = -7.736 \times 10^{-5} \cdot \delta - 2.7 \times 10^{-4}$	$\Delta a_{6-20} = -8.239 \times 10^{-5} \cdot \delta - 3.7 \times 10^{-4}$
R^2	0.999 7	0.999 6	0.999 6
Angle error at $\delta=0$	0.02''	1.19''	1.63''

3 结论

理论分析和实验结果表明,可以利用波前重构程序计算获得的波前 Zernike 系数 Δa_6 的值来矫正平行平板横向剪切干涉仪中平行平板之间的角度误差.该方法可以和计算机辅助装调相结合,利用计算机程序计算出波前 Zernike 系数,用 Δa_6 的值作为电动矫正平板角度误差的反馈,使得装调过程自动化.

装调时,剪切干涉仪激光器输出光的波前稳定性会影响平板装调的精度.对同一个波前重复测量时,由于波前的变化,会使得拟合的 Zernike 系数有微小的波动,其波动范围会影响平板装调的精度.在我们的实验中, a_{4x} 的波动范围为 $-3.224 7 \pm 1.8 \times 10^{-3}$, Δa_6 的波动范围为 $\pm 2.0 \times 10^{-3}$ 时,调节平板角度使 $|\Delta a_6| < 2.0 \times 10^{-3}$,可使得两平板之间的角度误差小于 $8.82''$.通过提高激光器的稳定性可以进一步提高装调精度.

通过对实测波前的更高阶像差进行分析的结果表明,当考虑高阶项时,式(10)的线性性仍然是满足的,它们的影响体现在直线的斜率和常数项上.在装调时,斜率的大小并不会带来装调误差,只是斜率越大,收敛的越快.常数项会影响最后的装调精度,从实验结果来看,20 项拟合的常数项为 -3.7×10^{-4} ,对应的角度误差为 $1.63''$,这个值小于激光器输出波前不稳定引起的角度误差($8.82''$).因此,我们认为也可以忽略.

综上,我们得出以下结论,为了获得正交的剪切干涉图,本文针对平行平板双光路横向剪切干涉仪的装调提出了一种平行平板角度误差的矫正方法,从理论和实验上证明了这种方法的可行性.该方法装调简单、精确度高,易于流程化操作.

参考文献

- [1] CHATTERJEE A, DHANOTIA J, BHATIA V, *et al.* Simultaneous measurement of thickness and refractive index using wedge plate lateral shearing interferometry and Fourier transform method [C]. International Conference on Computer Applications In Electrical Engineering-Recent Advances, Roorkee, India; IEEE, 2017, 381-384.
- [2] FANG Chao. Research on lateral shearing interferometry in measurement of wavefront aberration of lithography lens [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2018.
方超. 光刻物镜系统波像差横向剪切干涉测量研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [3] OKUMAJ, IGASAKI Y. Collimation evaluation device and collimation evaluation method; U.S. 10/260987 [P]. 2019-4-16.
- [4] DISAWAL R, DHANOTIA J, PRAKASH S. Phase-shifting lateral shearing interferometry using wedge-plate and interferometric grating [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(31): 7534-7539.
- [5] ZOU Ji-ping, WATTELLIER B. Adaptive optics for high-peak-power lasers-an optical adaptive closed-loop used for high-energy short-pulse laser facilities; laser wave-front correction and focal-spot shaping [M]. Topics in Adaptive Optics, 2012.
- [6] DAI Xiang-jun, YUN Hai, SHAO Xin-xing, *et al.* Thermal residual stress evaluation based on phase-shift lateral shearing interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, **105**: 182-187.
- [7] CUI Bo-chuan. Research on multiwave lateral shearing interferometry based on diffractive optical elements [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2018.
崔博川. 基于衍射光学元件的多波前横向剪切干涉方法研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
- [8] DUBRA A, PATERSON C, DAINTY C. Double lateral shearing interferometer for the quantitative measurement of tear film topography [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(7): 1191-1199.
- [9] HASEGAWA M, OUCHI C, HASEGAWA T, *et al.* Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA [C]. SPIE, 2004, **5533**: 27-36.
- [10] LING Tong, LIU Dong, YUE Xiu-mei, *et al.* Quadriwave lateral shearing interferometer based on a randomly encoded hybrid grating [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(10): 2245-2248.
- [11] LING Tong, JIANG Jia-bin, ZHANG Rui, *et al.* Quadriwave lateral shearing interferometric microscopy with wideband sensitivity enhancement for quantitative phase imaging in real time [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 9.
- [12] 徐德衍. 剪切干涉仪及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987: 38-48.
- [13] WANG Hong-jun, ZHANG Cong, TIAN Ai-ling, *et al.* Selection of sampling points in two dimensional lateral shearing

interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0312002.

王红军, 张聪, 田爱玲, 等. 二维横向剪切干涉中采样点的选取[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0312002.

- [14] PENG Ai-hua, YE Hong-wei, LI Xin-yang. 2D lateral shearing wave-front reconstruction based on decoupling difference Zernike future defining coefficient method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0801001.

彭爱华, 叶红卫, 李新阳. 基于解耦差分泽尼克待定系数法的二维横向剪切波面重建算法[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0801001.

- [15] DAI Feng-zhao, TANG Feng, WANG Xiang-zhao, *et al.* Modal wavefront reconstruction based on Zernike polynomials for lateral shearing interferometry: comparisons of existing algorithms[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(21): 5028-5037.