

反射式偏振相移动态点衍射干涉技术的研究

王晨^{1,2}, 周游¹, 鲁棋¹, 徐天柱¹, 刘世杰^{1*}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所精密光学制造与检测中心, 上海 201800;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 为了抑制环境振动引入的测量误差, 实现对球面光学元件面形的动态检测, 提出了一种基于微偏振片阵列的反射式针孔点衍射干涉系统。该干涉系统使用短相干激光光源获得两束相干光, 通过调节两束偏振光的光强比调节干涉条纹的对比度, 利用集成微偏振片阵列 CCD 相机采集的单帧图像获得 4 幅相移干涉图, 实现动态检测。用该干涉系统和 ZYGO 干涉仪测量同一凹面镜样品, 得到的面形结果相吻合, 验证了该干涉系统测量结果的准确性。在实验测量平台上外加电动机产生振动条件, 结果表明, 当振动速度小于 $16 \mu\text{m/s}$ 时, 都可得到较准确的面形测量结果, 表明该干涉系统的抗振性能较好。

关键词 测量与计量; 干涉测量; 球面面形; 点衍射干涉仪; 偏振相移

中图分类号 TH741

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1004003

Research on Reflective Polarization Phase-Shifting Dynamic Point Diffraction Interferometry

Wang Chen^{1,2}, Zhou You¹, Lu Qi¹, Xu Tianzhu¹, Liu Shijie^{1*}

¹Precision Optical Manufacturing and Testing Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract In order to suppress the measurement error caused by environmental vibration and realize the dynamic detection of spherical optical elements, a reflective point diffraction interference system based on micro polarizer array is proposed in this work. The interference system uses a short coherent laser source to obtain two coherent beams. The contrast of interference fringes is adjusted by adjusting the light intensity ratio of two polarized beams. Four phase-shifting interferograms are obtained by a single frame image collected by a CCD camera with integrated micro polarizer array to realize dynamic detection. The measurement results of the same concave mirror sample with the interference system and ZYGO interferometer are consistent, which verifies the accuracy of the measurement results of the interference system. On the experimental measurement platform, the vibration condition of the motor is added, and the results show that when the vibration velocity is less than $16 \mu\text{m/s}$, more accurate surface shape measurement results can be obtained, which indicates that the anti-vibration performance of the interference system is good.

Key words measurement and metrology; interferometry; spherical surface; point diffraction interferometer; polarization phase-shifting

OCIS codes 120.3180; 120.6660; 240.5440; 050.1970

1 引言

随着现代光学技术的快速发展, 现代光学系统对光学球面元件的面形质量要求越来越高, 而高质

量面形的光学元件需要用高精度的检测技术表征。点衍射干涉技术^[1]是一种测量光学球面元件面形的高精度方法, 其基本原理是利用点衍射获得理想的球面波前, 避免了传统 Twyman-Green 型^[2]和

收稿日期: 2020-04-24; 修回日期: 2020-05-09; 录用日期: 2020-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(11602280)

* E-mail: shijieliu@siom.ac.cn

Fizeau 型^[3]干涉仪中标准参考镜面形误差测量精度受限的缺点,具有亚纳米级以上的测量精度,且稳定性强、成本低,对球面光学元件的面形检测具有重要意义^[4-8]。

为了进一步提高点衍射干涉仪的测量精度,人们采用相移技术获得多组相移干涉图。目前相移点衍射干涉检测技术主要采用压电陶瓷(PZT)相移技术,这是一种时域相移方法^[9-13],利用 PZT 驱动被测样品移动并在不同时间采集多幅相移干涉图。由于每幅干涉图受环境振动的影响不同,而该方法局限于静态球面面形的检测,对检测系统的抗振性能要求较高。因此,需要寻找一种在不影响球面面形检测精度的前提下,降低系统隔振要求和成本的相移方法。

随着微纳加工技术^[14]的发展,基于微偏振片阵列的偏振相移技术逐渐取代传统的 PZT 相移技术,被广泛应用于动态偏振测量和相位测量^[15-21]。利用集成微偏振片阵列 CCD 相机可在同一时间、同一空间位置采集多幅相移干涉图,每幅干涉图受环境振动的影响相同,因此,这种偏振动态相移方法对环境振动不敏感。在点衍射干涉仪方面,Millerd 等^[22-23]提出了一种透射式动态点衍射干涉仪,通过一种特殊的超薄偏振点衍射板和微偏振片阵列实现了用 CCD 瞬时采集 4 幅相移干涉图。但这种透射式点衍射干涉仪中只有参考光是通过点衍射生成的,不能保证测试光自身的误差精度,测量精度不高,且只能测量透射波前,不能测量球面光学元件的表面面形。

高精度的动态检测技术是球面面形检测技术的发展趋势,因此,本文提出了一种基于像素微偏振片阵列(PMA)的反射式针孔点衍射干涉系统。为了验证该干涉系统对球面面形检测的准确性,与 ZYGO 干涉仪进行了对比实验,并利用电机产生振动条件进行面形测量,分析了系统的抗振性能。利用时域有限差分法(FDTD)仿真分析了聚焦物镜和针孔之间的对准误差对光强透过率的影响,并讨论了干涉条纹对比度与两束偏振光的光强比例关系。

2 基本原理

2.1 点衍射干涉原理

基于微偏振片阵列的动态点衍射干涉系统结构如图 1 所示。该光学系统中,短相干激光器发出的光经准直扩束系统和 1/2 波片(HWP)后,被偏振分光棱镜(PBS)分解为 p 光和 s 光,其中,HWP 用于调节 p 光和 s 光的光强比。光束前后两次通过反射

镜 A 和 B 前面的 1/4 波片(QWP),p 光由反射镜 A 反射回偏振分光棱镜后变为 s 光,称为光束 A,s 光由反射镜 B 反射回偏振分光棱镜后变为 p 光,称为光束 B。两束光的偏振方向互相垂直,分别会聚到点衍射模板的针孔处。由针孔衍射产生理想球面波,一部分球面波直接经 QWP、成像透镜和 PMA 后到达 CCD 探测器,也被称为参考光;另一部分球面波到达被测样品,经被测样品反射后回到点衍射模板,并经模板表面的金属 Cr 膜反射后到达 CCD 探测器,也被称为检测光。

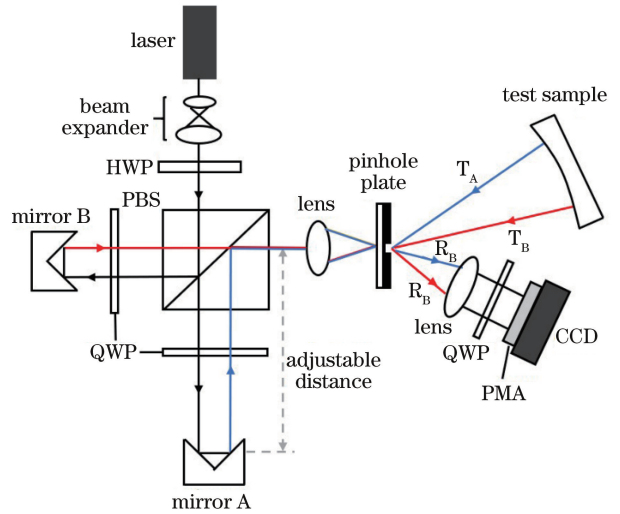


图 1 基于 PMA 的动态点衍射干涉系统
Fig. 1 Dynamic point diffraction interferometer based on PMA

由于光束 A(s 光)和光束 B(p 光)都经针孔衍射形成检测光和参考光,CCD 探测器共接收到 4 束光,分别称为检测光 A(T_A)、参考光 A(R_A)、检测光 B(T_B)和参考光 B(R_B),其干涉组合理论上共有 6 种,分别为 $T_A T_B$ 、 $T_A R_A$ 、 $T_A R_B$ 、 $T_B R_A$ 、 $T_B R_B$ 、 $R_A R_B$ 。反射镜 A 可沿光轴移动调节光程,假设反射镜 A 与反射镜 B 到偏振分光棱镜的距离差值为 d ,则 p 光和 s 光之间的光程差为 $2d$,针孔到球面的距离(待测球面元件的曲率半径)为 R ,若 $d=R$,则 R_A 与 T_B 的光程基本相同,而 T_A 光程过大, R_B 光程过小,即 T_A 的光程 $> R_A$ 的光程 $= T_B$ 的光程 $> R_B$ 的光程,对应的光程匹配情况如图 2 所示。由于系统光源的相干长度小于 $2d$,因此,只有 R_A 与 T_B 能发生干涉,而 T_A 和 R_B 与其他光超出了光源的相干长度,不能发生干涉,被 CCD 探测器采集后作为背景光,在后续图像处理中需要滤除。可通过 HWP 调节光束 A 和光束 B 的分光比,从而调节两束干涉光 R_A 和 T_B 的光强比,以获得对比度更好的

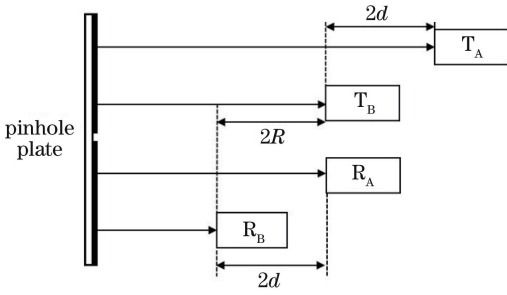


图 2 光程匹配示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical path matching

干涉条纹。

2.2 偏振动态相移原理

微偏振片阵列中每相邻 4 个偏振片组成一个相移单元,每个单元中 4 个偏振片的偏振方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° ,偏振片的尺寸与 CCD 探测器的像素单元尺寸相同,将每个偏振片和 CCD 像素单元一一对准集成在一起就形成了偏振相机。对于光束 R_A 和 T_B ,其透过 CCD 探测器前的 QWP 时,为互相垂直的线偏振光,经 QWP 后被调制为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光,经 PMA 后,CCD 像素单元记录的干涉光强与微偏振片单元的透偏振方向有关,对应的干涉光强可表示为^[24]

$$I(\alpha) = \frac{1}{2} [I_{rs} + I_{tp} + I_{ts} + I_{tp} - 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \sin(2k\varphi - 2\alpha)] = \frac{1}{2} [I_r + I_t - 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \sin(2k\varphi - 2\alpha)], \quad (1)$$

式中, α 为微偏振片阵列上某一相移单元的偏振方向, $I(\alpha)$ 为该单元对应 CCD 像素记录的干涉光强, $I_r = I_{rs} + I_{tp}$, $I_t = I_{ts} + I_{tp}$, I_{rs} 和 I_{tp} 分别为参考光 R_A 和检测光 T_B 的光强,两束光能够发生干涉形成干涉条纹, I_{ts} 和 I_{tp} 分别为检测光 T_A 和参考光 R_B 的光强,两束光不能发生干涉,只是被 CCD 采集作为背景光强, φ 为光束 R_A 和 T_B 之间的相位差,用于评估被检测样品的面形误差。

CCD 探测器每相邻 4 个像素单元记录的干涉光强可表示为

$$\begin{cases} I(0^\circ) = \frac{1}{2} [I_r + I_t - 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \sin(2k\varphi)] \\ I(45^\circ) = \frac{1}{2} [I_r + I_t + 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \cos(2k\varphi)] \\ I(90^\circ) = \frac{1}{2} [I_r + I_t + 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \sin(2k\varphi)] \\ I(135^\circ) = \frac{1}{2} [I_r + I_t - 2\sqrt{I_{rs}I_{tp}} \cos(2k\varphi)] \end{cases} \quad (2)$$

可将偏振 CCD 探测器每相邻 4 个相移单元记录的干涉光强近似为一个超像素单元在 4 步相移获得的干涉光强,但该方法会降低图像的空间分辨率。因此,采用插值平均方法^[25]从 CCD 采集的单帧图像插值得到 4 幅同等分辨率的相移图像并计算相位差 φ ,可表示为

$$\varphi = \arctan \left[\frac{I(135^\circ) - I(45^\circ)}{I(0^\circ) - I(90^\circ)} \right]. \quad (3)$$

由于光束 T_A 和 R_B 不会与其他光束发生干涉,只会作为背景光叠加到 CCD 记录的光强信息中,且相邻像素的光强基本相同。因此,根据(3)式计算两相邻单元灰度值的差值时,可消除掉背景光,不影响相位计算结果。

3 实验结果与分析

3.1 球面面形检测实验及对比实验

图 3 为搭建的动态点衍射干涉系统实验装置,该系统采用的半导体激光器型号为 LSR635NL,波长 $\lambda = 635 \text{ nm}$,光源光谱宽度约为 1 nm ,相干长度约为 0.4 mm 。移动反射镜 A 的电控位移台行程为 25 mm ,定位精度为 0.05 mm ,满足两束相干光光程匹配的调节精度。聚焦物镜的倍率为 $50\times$,数值孔径为 0.42 ,衍射模板上的针孔直径为 $2 \mu\text{m}$,基底为熔石英玻璃,表面镀 Cr 膜,膜厚度为 300 nm 。CCD 探测器的型号为 Sony IMX250MZR CMOS,有效像素为 $2448 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$,帧频为 24 frame/s ,像元和微偏振片阵列的单元大小相同,均为 $3.45 \mu\text{m} \times 3.45 \mu\text{m}$ 。

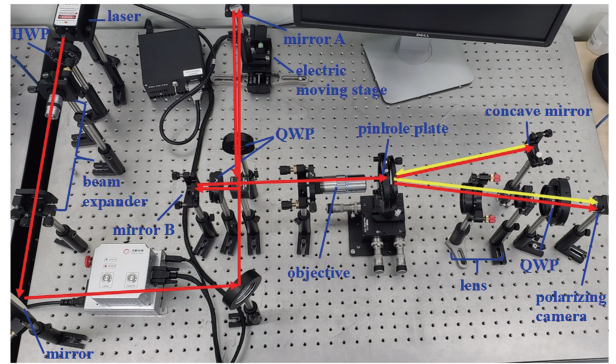


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of the experiment

被测样品为 Thorlabs 光电科技有限公司生产的凹面反射镜,型号为 CM254-150-E02,表面质量为 $20\sim 10 \text{ S/D}$,其中, S/D 表示划痕/麻点数,曲率半径 $R = 300 \text{ mm}$,口径 $\Phi = 25.4 \text{ mm}$,反射率约为 99% 。用图 3 所示的实验装置测量凹面镜的面形偏差,采集得到的相移干涉图如图 4 所示。图 4(a)为

相机采集的单帧图像,图 4(b)为将图中不同透偏振方向单元取出,并采用插值平均法获得的 4 幅分辨

率相同、偏振方向不同的干涉条纹图像,分别代表偏振方向为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 时的干涉图像。

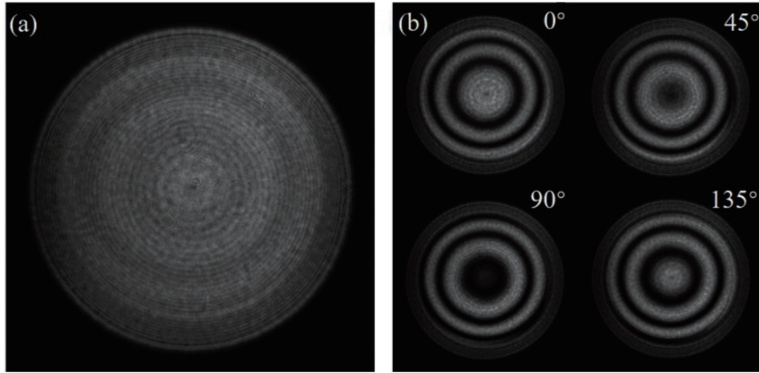


图 4 实验采集的干涉图。(a)单帧图像;(b)4幅相移干涉图

Fig. 4 Interferogram collected by experiment. (a) Single image; (b) four phase-shifting interferograms

采用 4 步相移算法和相位解包算法恢复待测镜的表面面形,面形测量结果取有效口径的 92%,即 23.4 mm。如图 5(a)所示,被测波面的峰谷值(PV)为 25.124 nm,均方根值(RMS)为 2.764 nm。为验证所提动态点衍射干涉测量方法的有效性,在相同实验条件下,用 ZYGO 球面干涉仪测量了同一凹面镜的面形。ZYGO 干涉仪已通过自校准,空腔重复性精度的 RMS 为 0.257 nm,测量不确定度为

0.063 nm,所用标准参考镜的口径为 100 mm,面形精度的 PV 为 31.65 mm(有效口径的 95%)。待测镜的测量结果取口径为 23.4 mm,仅占参考镜口径的 24.6%,满足测量精度的要求,测量结果如图 5(b)所示,其 PV 和 RMS 分别为 25.675 nm 和 2.732 nm。两种方法得到的面形误差测量结果基本一致,PV 和 RMS 的相对误差仅为 2.1%和 1.2%,验证了所提动态点衍射干涉系统测量结果的准确性。

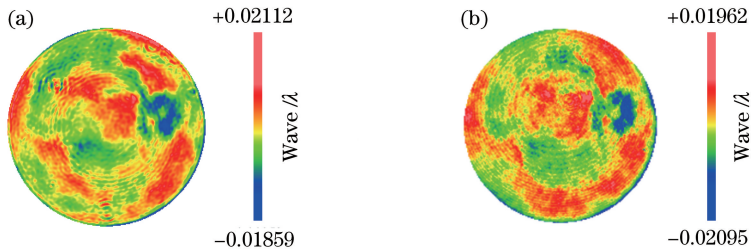


图 5 面形测量结果。(a)点衍射干涉系统;(b)ZYGO 球面干涉仪

Fig. 5 Measurement results of surface shape. (a) Point diffraction interferometer; (b) ZYGO spherical interferometer

为了验证动态点衍射干涉系统的稳定性,采用上述实验装置对待测镜进行了 12 次重复性测量,得到面形误差的 PV 和 RMS 如图 6 所示。可以发现,

12 次测量得到的 PV 和 RMS 的均值分别为 25.25 nm 和 2.765 nm,重复性精度分别为 1.47 nm 和 0.144 nm,这表明所提的动态点衍射干涉测量方法的测量重复性较高。

3.2 系统的抗振性能实验

基于 PZT 相移的传统相移干涉仪易受周围环境振动的影响,而实验所提的动态点衍射干涉系统利用集成了 PMA 的 CCD 探测器,可从瞬时采集的单帧图像中获得 4 幅相移干涉图,对环境的振动不敏感,对系统的隔振要求较低。为验证本系统的抗振性能,对动态点衍射干涉系统进行了抗振性能实验。

在无外加振动情况的重复性实验中,将 12 次测量得到的面形误差 RMS 均值和重复性精度作为被

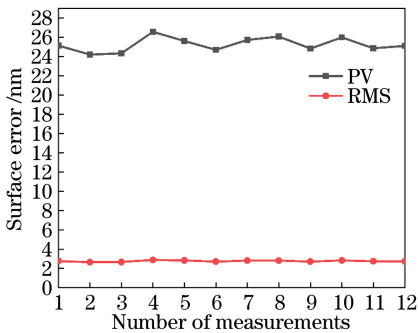


图 6 12 次重复性实验测量得到的 PV 和 RMS

Fig. 6 PV and RMS measured by 12 repeated experiments

测镜的真实面形误差。当环境温度、湿度、相位复原算法等其他实验条件不变时,在点衍射干涉实验装置平台上引入额外的机械振动(由电动机产生,频率为 50 Hz),图 7 为无外加振动和引入外加振动时平

台的振动响应频谱图及对应的 4 幅相移干涉图。可以看出,相比无外加振动的情况,引入的外加振动振速为 $16 \mu\text{m/s}$ 时,干涉条纹产生位移较小且对比度有所降低。

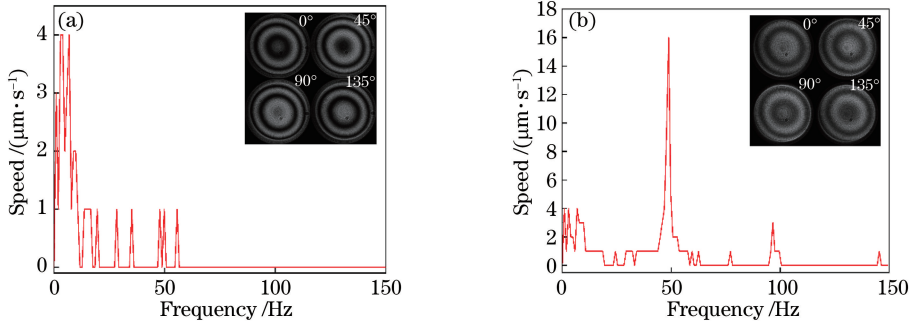


图 7 平台的振动频谱图及对应的相移干涉图。(a)无外加振动(b)存在外加振动

Fig. 7 Vibration spectrum diagrams of the platform and the corresponding phase-shifting interferograms.

(a) Without external vibration; (b) with external vibration

在图 7(b)的振动情况下连续采集 30 帧相移干涉图,解算得到 30 幅相位图,通过相位平均消除振动造成的随机误差^[26],不同数量相位图平均后得到的面形误差 RMS 如图 8 所示。可以看出,对 18 幅及以上的相位图进行平均后,RMS 逐渐收敛,在真实测量值(2.765 ± 0.072) nm 范围内浮动。因此,可认为在振动情况下,采用 18 幅相移干涉图平均后计算得到的面形误差为最终测量结果。表明该系统具有较高的抗振能力,在振动情况下也能得到准确的面形结果,可为动态点衍射干涉检测的环境振动要求提供一定的参考。

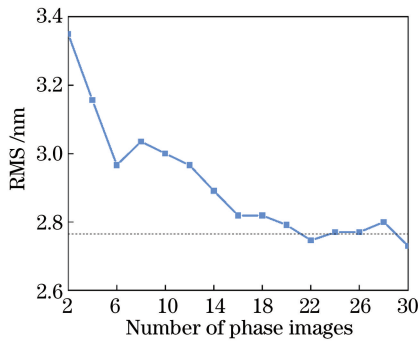


图 8 不同数量相位图平均后得到的 RMS

Fig. 8 RMS obtained by averaging different numbers of phase images

4 分析与讨论

4.1 对准误差对光强透射率的影响

在上述点衍射干涉检测系统中,相干光 R_A 和 T_B 分别由两束不共轴的线偏振光通过点衍射生成,由于存在装调误差,导致两束会聚光与针孔对准位置可能不一样,s 光和 p 光通过针孔的光强透过率也不一样^[27]。如果其中一束光的对准偏差较大,则点衍射生成对应的相干光束光强会过小,从而影响干涉条纹的对比度,降低检测精度。因此基于 FDTD 建立三维针孔衍射模型,计算和分析聚焦光束和小孔间存在对准误差时的光强透过率。三维针孔衍射的仿真参数和实验所用的元器件参数一致,如表 1 所示。模型采用高斯光源,入射光为偏振方向沿 y 方向的线偏振光,波长 $\lambda = 635 \text{ nm}$,空间步长 $\Delta l = \lambda/20$,时间步长 $\Delta t = \Delta l/2c$, c 为真空中的光速。仿真区域在 x 方向的长度 $200\Delta l = 6.33 \mu\text{m}$,在 y 和 z 方向的长度 $150\Delta l = 4.75 \mu\text{m}$ 。针孔点衍射板的金属膜层为 Cr,厚度为 300 nm ,针孔是直径为 $2 \mu\text{m}$ 的空气层,物镜数值孔径 NA,即汇聚球面波的 NA 为 0.42,吸收边界层为具有良好吸收特性的完全匹配层(PML)。

表 1 针孔衍射仿真模型的参数

Table 1 Parameters of pinhole diffraction simulation model

Wavelength λ / nm	Space step $\Delta l / \text{nm}$	Simulation area / μm			Pinhole diameter / μm	Pinhole thickness / nm	NA	Absorbing boundary
		x	y	z				
635	31.64	6.33	4.75	4.75	2	300	0.42	PML

聚焦光束与小孔之间的对准误差包括平移、倾斜和离焦,在所提的点衍射系统中,两束线偏振光都通过同一个聚焦物镜汇聚到同一个针孔,倾斜和离焦误差对两束光透过率的影响相同,因此只考虑平移对准误差对光强透过率的影响。如图 9 所示,入射光沿 x 轴方向,聚焦光束与小孔之间可能会出现沿 z 轴的横向偏移和沿 y 轴的纵向偏移对准误差。

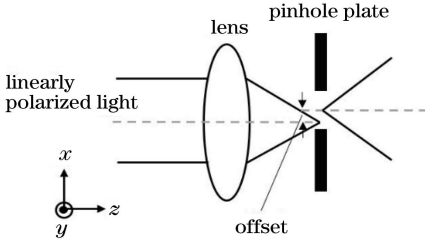
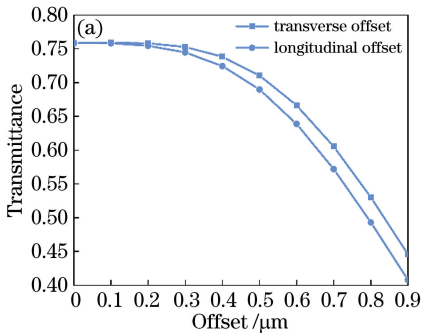


图 9 聚焦光束与小孔之间的平移对准误差

Fig. 9 Translation alignment error between focusing beam and pinhole



采用上述仿真模型,计算得到存在不同横向偏移量和纵向偏移量时的光强透过率,如图 10 所示。其中,图 10(a)为只存在横向或纵向偏移时,光强透过率随偏移量的变化情况,可以发现,光强透过率随偏移量的增大而减小,横向和纵向偏移量为 $0.3 \mu\text{m}$ 时,光强透过率比无偏移时分别减小了 0.8% 和 1.8% ;当横向或纵向偏移量小于 $0.3 \mu\text{m}$ 时,光强透过率变化不大;当横向或纵向偏移量大于 $0.3 \mu\text{m}$ 时,光强透过率会迅速减小。图 10(b)为同时存在横向和纵向偏移时光强随偏移量的变化情况,可以发现,当横向和纵向偏移量均为 $0.2 \mu\text{m}$ 时,光强透过率仅比无偏移时减小了 1.0% ,因此,在实际装调过程中,为了使光通过小孔的透过率较高,同时保证两束线偏振光的透过率基本相等,需使两束聚焦光与小孔之间的横向和纵向对准偏差都在 $0.2 \mu\text{m}$ 以内。

图 10 光强透过率随偏移量的变化曲线。(a)一个方向偏移;(b)两个方向偏移

Fig. 10 Change curve of light intensity transmittance versus offset. (a) Offset in one direction; (b) offset in two directions

4.2 干涉条纹对比度分析

干涉条纹的对比度会影响相位解算精度,因此需要在干涉测量中获得对比度较好的干涉条纹图。在所提的动态点衍射干涉系统中,只有光程基本相同的光束 R_A 和 T_B 会发生干涉形成干涉条纹,其余光会作为背景光叠加到 CCD 记录的光强信息中,影响干涉条纹的对比度。干涉场某点附近干涉条纹的对比度 K 可表示为^[28]

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_{rs}I_{tp}}}{I_{rs} + I_{rp} + I_{ts} + I_{tp}}, \quad (4)$$

式中, I_{\max} 和 I_{\min} 分别为干涉光强的最大值和最小值。通过仿真分析可知,聚焦物镜与小孔之间的横向和纵向对准偏差都小于 $0.2 \mu\text{m}$ 时, s 光和 p 光通过小孔的透射率相同,假设透过率均为 T ,待测镜的反射率为 R_t ,则 $I_{rs} = T \cdot I_s$, $I_{rp} = T \cdot I_p$, $I_{ts} = T \cdot I_s \cdot R_t$, $I_{tp} = T \cdot I_p \cdot R_t$,其中, I_s 和 I_p 分别为 s 光和 p 光的光强。假设 p 光的光强是 s 光光强的

ϵ 倍,即 $I_p = \epsilon I_s$,则对比度 K 为

$$K = \frac{\sqrt{R_t}}{1 + R_t} \cdot \frac{2\sqrt{\epsilon}}{1 + \epsilon}. \quad (5)$$

图 11 为不同反射率待测镜对应的干涉图对比度 K 与光强比值 ϵ 的关系,可以发现,当 $I_s = I_p$,即

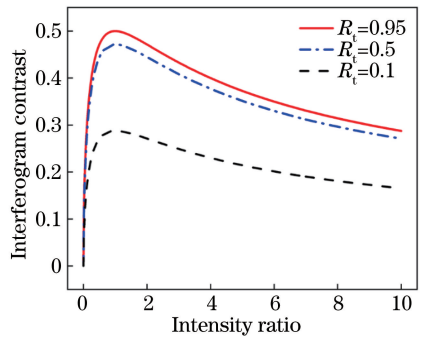


图 11 待测镜的干涉图对比度与光强比的关系

Fig. 11 Relationship between the contrast of the interferogram of the mirror under test and the light intensity ratio

$\epsilon = 1$ 时,干涉条纹对比度 K 达到最大值。转动 HWP 可以改变 p 光和 s 的光强比,使 ϵ 在 0.8~1.2 范围内,对比度 K 大于 0.49,从而获得对比度较好的干涉条纹图。

5 结 论

研究了用于高精度球面面形检测的动态点衍射干涉检测技术,利用微偏振片阵列相移技术可瞬时采集 4 幅相移干涉图,从而实现动态测量。与 ZYGO 球面干涉仪的对比实验验证了该系统测量的准确性,在测试平台上引入由电机产生的振动进行凹面镜的面形检测,结果表明,相位平均法能有效抑制振动引入的随机误差,得到准确的面形测量结果。该干涉检测方法降低了系统测量的隔振要求,提高了测量系统的环境适应性。

参 考 文 献

- [1] Smartt R N, Steel W H. Theory and application of point-diffraction interferometers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1975, 14: 351-356.
- [2] Howes W L. Lens collimation and testing using a Twyman-Green interferometer with a self-pumped phase-conjugating mirror[J]. Applied Optics, 1986, 25(4): 473-474.
- [3] Burge J H. Fizeau interferometry for large convex surfaces[J]. Proceedings of SPIE, 1995, 2536: 127-138.
- [4] Smartt R N. Special applications of the point-diffraction interferometer[J]. Proceedings of SPIE, 1979, 0192: 35-40.
- [5] Li Y, Yang Y Y, Wang C, et al. Point diffraction interference detection technology[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 391-414.
李瑶, 杨雨英, 王晨, 等. 点衍射干涉检测技术[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 391-414.
- [6] Guo R L, Yao B L, Gao P, et al. Parallel on-axis phase-shifting holographic phase microscopy based on reflective point-diffraction interferometer with long-term stability[J]. Applied Optics, 2013, 52(15): 3484-3489.
- [7] Liu G D, Lu B H, Sun H Y, et al. Improved phase-shifting diffraction interferometer for microsphere topography measurements [J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(7): 071202.
- [8] Dong G J, Tang F, Wang X Z, et al. Study on high precision magnification measurement of imaging systems [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0712007.
- [9] Kihm H, Kim S W. Oblique fiber optic diffraction interferometer for testing spherical mirrors [J]. Optical Engineering, 2005, 44(12): 125601.
- [10] Wang D D, Yang Y Y, Chen C, et al. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces [J]. Applied Optics, 2011, 50(16): 2342-2348.
- [11] Wang D D, Wang F M, Yang Y Y, et al. Modified polarization point diffraction interferometer with extended measurable NA for spherical surface testing [J]. Optik, 2013, 124(22): 5481-5485.
- [12] Yang Z M, Gao Z S, Yuan Q, et al. Radius of curvature measurement based on wavefront difference method by the point diffraction interferometer [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 56: 35-40.
- [13] Gao F, Ni J P, Li B, et al. Comparison and correction of errors caused by radial phase-shifting nonuniformity of test optics in multi-step phase-shifting [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0412002.
高芬, 倪晋平, 李兵, 等. 多步相移中被测件径向相移不均匀引入误差比较及校正[J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0412002.
- [14] Chen Y Q, Gao B P, Lin Y Z, et al. Metal wire grid terahertz polarizer fabricated by femtosecond laser micro-machining [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(8): 0802005.
陈燕青, 高炳攀, 林炎章, 等. 飞秒激光微加工制备金属线栅太赫兹偏振片[J]. 中国激光, 2018, 45(8): 0802005.
- [15] Tahara T, Ito K, Kakue T, et al. Parallel phase-shifting digital holographic microscopy [J]. Biomedical Optics Express, 2010, 1(2): 610-616.
- [16] Zhang Z G, Dong F L, Cheng T, et al. Electron beam lithographic pixelated micropolarizer array for real-time phase measurement [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(11): 114208.
- [17] Zhang Z G, Dong F L, Qian K M, et al. Real-time phase measurement of optical vortices based on pixelated micropolarizer array [J]. Optics Express, 2015, 23(16): 20521-20528.
- [18] Weng J W, Yuan Y L, Zheng X B, et al. Correction method for frame-transfer blurring effect of spaceborne polarization camera [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1228005.
翁建文, 袁银麟, 郑小兵, 等. 星载偏振相机帧转移模糊效应校正方法研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1228005.
- [19] Brock N, Kimbrough B T, Miller J E. A pixelated

- micropolarizer-based camera for instantaneous interferometric measurements [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8160: 81600W.
- [20] Nordin G P, Meier J T, Deguzman P C, et al. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry [J]. Journal of Optical Society of America A, 1999, 16(5): 1168-1174.
- [21] Xu Y Y, Shi K, Wang Y W, et al. Research progresses of phase-shifting interferometry technology and phase shift extraction method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 020004.
徐媛媛, 时刻, 王亚伟, 等. 相移干涉技术及相移获取方法研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 020004.
- [22] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Instantaneous phase-shift, point-diffraction interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5531: 264-272.
- [23] Millerd J E, Brock N J, Hayes J B, et al. Pixelated phase-mask dynamic interferometer [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5531: 304-314.
- [24] Su D T. Optical measurement techniques [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1996: 200.
苏大图. 光学测试技术 [M]. 北京: 北京理工大学, 1996: 200.
- [25] Zhang Z G, Dong F L, Cheng T, et al. Nano-fabricated pixelated micropolarizer array for visible imaging polarimetry [J]. The Review of Scientific Instruments, 2014, 85(10): 105002.
- [26] Liu Q. Research on vibration-resistant algorithm and experimental of phase-shifting interferometry [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2015: 109-110.
刘乾. 抗振动移相干涉测量算法与实验研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015: 109-110.
- [27] Chen Y K, Li Y, Wang C, et al. Wavefront analysis method of pinhole point-diffraction based on waveguide theory [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1112001.
陈元恺, 李瑶, 王晨, 等. 基于波导理论的针孔点衍射波前分析方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1112001.
- [28] Delhuille R, Miffre A, de Lesegno B V, et al. Fringe contrast in Mach-Zehnder atom interferometers [J]. Acta Physica Polonica Series B, 2002, 33(8): 2157-2172.