

文章编号 1004-924X(2025)08-1179-11

基于全视场外差干涉的中心偏差测量技术研究

杨永康^{1,2}, 刘安琪¹, 张文喜^{1,2*}, 伍 洲^{1,2}

(1. 中国科学院 空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学 光电学院, 北京 100049)

摘要: 为了满足对光学镜头的中心偏差测量精度需求越来越高的要求, 本文提出了基于全视场外差干涉的中心偏差测量方法。该方法采用了实际透镜光轴作为测量基准, 通过测量被测透镜的反射光束与参考光束产生的干涉条纹获取波前并进行 Zernike 多项式拟合, 然后将 Zernike 倾斜项系数转换为被测透镜的中心偏差, 实现了对中心偏差的高精度测量, 解决了对外部旋转台的依赖。基于外差干涉和中心偏差检测原理, 分析了激光强度波动和外差频率波动对波前和中心偏差测量结果的影响, 结果表明, 测量误差与激光强度波动和外差频率波动正相关, 且受到被测镜曲率, 中心偏差影响。搭建了基于外差干涉的中心偏测量系统, 实现了中心偏差的高精度测量, 并与仿真结果进行了对比。仿真结果表明该系统的测量精度不低于 0.06", 并通过实验验证了仿真结果。研究结果表明与传统的自准直法中心偏测量方法相比, 外差干涉的测量方法可以实现更高的测量精度。

关键词: 外差干涉; 干涉测量; 中心偏差; 装调设备

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A

doi: 10.3718/OPE.20253308.1179

CSTR: 32169.14.OPE.20253308.1179

Research on centering error measurement technology based on full-field heterodyne

YANG Yongkang^{1,2}, LIU Anqi¹, ZHANG Wenxi^{1,2*}, WU Zhou^{1,2}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. School of Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn

Abstract: To meet the increasing demands for greater precision in measuring the centering error of optical lenses, this paper proposed a centering error measurement method based on full-field heterodyne interferometry. This method used the actual optical axis of the test lens as the measurement reference, obtained the wavefront by measuring the interference fringes generated by the reflected beam of the measured lens and the reference beam, and performed Zernike polynomial fitting. The tilt coefficients of the Zernike polynomials were then converted into the centering error of the test lens, achieving high-precision measurement of the centering error and eliminating the reliance on an external rotational stage. Based on heterodyne interference and centering error principle, the influence of laser intensity fluctuations and heterodyne frequency fluctuations on wavefront and decenter measurement results was analyzed. The results showed

收稿日期: 2025-01-14; 修订日期: 2025-02-24.

基金项目: 中国科学院科研仪器设备研制项目 (No. PTYQ2024TD0036)

that measurement errors were positively correlated with laser intensity and heterodyne frequency fluctuations and were also affected by the curvature and decenter of the test lens. A decenter measurement system based on heterodyne interferometry was constructed, achieving high-precision decenter measurement, which was compared with simulation results. The simulation results show that the measurement accuracy of the system is not less than $0.06''$, and experimental results validated the simulations. The study indicates that, compared to traditional autocollimation-based decenter measurement methods, the heterodyne interferometry method can achieve higher measurement accuracy.

Key words: heterodyne interferometry; interferometry technology; centering error; assembling apparatus

1 引言

随着科学技术的发展,光学系统已经广泛用于民用、工业检测、医疗、科研等领域,精密光学仪器及对应的光学系统结构变得越来越复杂,例如遥感相机的口径达到 $300\sim 500\text{ mm}$,实现了 0.1 m 级的空间分辨率,光学零件作为主要部件对其精度的要求也越来越高^[1]。影响仪器精度的主要因素包括设计、加工和装调。光学装校是实现光学仪器系统功能的重要一步^[2]。

在多镜片构成的系统中,由于在实际生产过程中的各种因素,各镜片的光轴与系统光轴存在偏差,即中心偏差,导致光轴一致性无法保证,以及成像的像散性和畸变的不对称性,极大影响光学仪器的整体质量^[3]。此时就需要仪器测量中心偏大小,辅助装校工作的进行。

现有的中心偏测量设备分为接触式和非接触式。接触式存在精度低,可能划伤表面等问题,只适用于透镜加工阶段^[4]。非接触式可用于各阶段的中心偏测量。目前主流商业光学定心技术基于自准直法,德国 Trioptics 公司,美国 OATI 公司等公司基于此方法推出了多款定心测量仪^[5-6],精度可达 $0.5''$ 。并基于自准直法不断改进,如 MultiLens 技术能够对多达 40 个或更多表面的物镜测量^[7],或是通过差动共焦技术提高自准直法测量过程中的定焦精度^[8-9]。自准直法采用对被测镜的焦点或反射球心成像并旋转被测镜的方法^[10-11],当透镜存在偏心时,旋转透镜会导致焦点像或球心像在探测器面以圆形路径运动,通过测算该圆形轨迹的直径可以得到偏心量以进行反馈调整。该方法由于原理简单、结果直观,在光学装校领域应用广泛,产品化程度较高。然而,该方法的测量基准是透镜转台机械旋转轴的轴线,

其旋转精度直接影响了中心偏差的测量精度。其次测量时需要将物镜调焦至待定心透镜的球心位置,否则会引入定焦误差^[12],被测镜的姿态偏差也会直接累加到被测样品的中心偏差中^[13]。并且在数据处理环节,从探测的像点运动轨迹计算透镜中心偏差时至达到亚像元级别的探测精度。这些因素限制了自准直法的测量精度。

本文提出了基于全视场外差干涉的中心偏差测量方法,利用参考镜的光轴为基准光轴,使被测镜反射的光束与参考光束之间发生干涉,同时结合外差移相技术,通过两个低频差的声光移频器产生的拍频信号来实现全视场移相^[14-15],从而得到精确的干涉结果,并以此反演波前分布,通过 Zernike 多项式拟合波前,根据 Zernike 多项式系数计算中心偏差。外差干涉作为一种光学检测方式,具有非接触度高以及灵敏度高等优点,广泛应用于精密检测领域^[16]。使用基于外差干涉的方法测量中心偏差,可以从原理上解决现有中心偏差测量仪对外部旋转台的依赖和定焦误差等问题,实现高灵敏度、高准确度的定心测量,满足高水平装校要求。

2 工作原理

2.1 中心偏测量系统的构成

中心偏测量系统的构成如图 1 所示。短相干激光器发出的光通过光纤耦合器分为两束,一路分别进入声光移频器(Acoustic Optical Modulator, AOM)后接入光纤延迟线。一路通过 AOM 后进入空间光路,AOM 的驱动电路能够严格锁定相位和频率,两路 AOM 采用低频差的固定频率输出,使得测量光路和参考光路产生低频外差,实现全视场移相。通过空间光路的位移和光

纤延迟线组合可以调整两路激光的光程差,从而实现光程匹配。被分束的这两路的光最终在光纤耦合器处合束。通过光程匹配和短相干技术可以使被测表面反射的光与参考光在探测器上干涉,防止其他表面反射光束的干扰。

光源部分产生的短相干外差光束会先经过光阑和分光镜,入射到参考镜和被测镜上。参考镜平面反射的光作为参考光束,测量光束经被测镜反射后,

会携带其中心偏差信息,图1中红色和蓝色

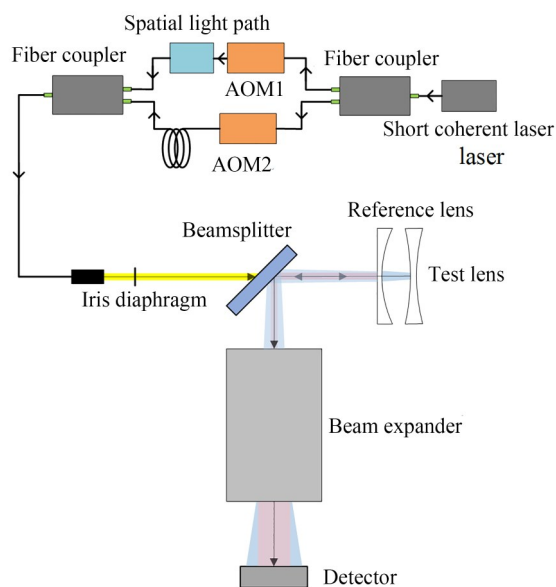


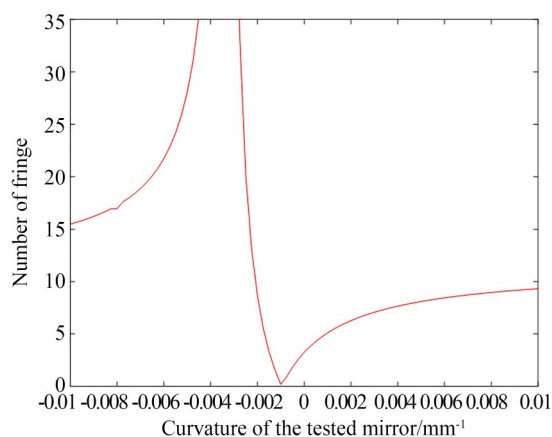
图1 中心偏测量系统原理图

Fig. 1 Block diagram of centering error measuring system

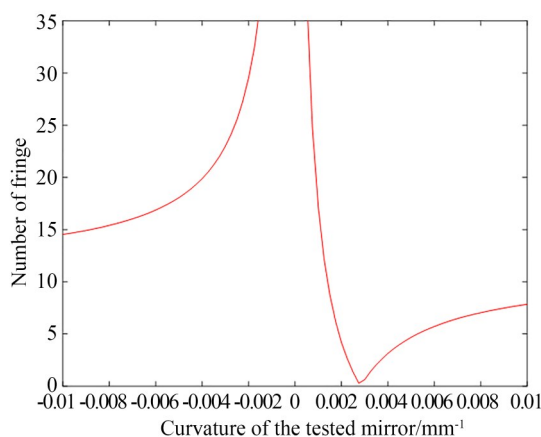
分别代表了参考光束和测量光束(彩图见期刊电子版)。这些光经过分束镜反射和扩束系统后进入相机并发生干涉。通过分析含有相位信息的干涉图即可获得被测镜的中心偏差。

待测平面或曲面反射的光与参考光如果直接进入相机进行干涉,则在大部分情况下都会导致相机上的干涉条纹过多,此时待测面轻微的偏心就使得条纹十分密集,导致超过了相机的分辨能力,从而难以找到有效的干涉图进行测量,条纹过于密集也会影响相位解缠和波前拟合等计算操作。设定在整个视野内的条纹数小于30时,可以找到干涉图并进行测量操作,对应的曲率范围均为可测量的范围。

为了在相机上生成条纹数适中的干涉图,扩大测量范围,需要在相机前安装扩束镜,放大干涉图,使得探测相机上的干涉条纹减少。图2(a)进行了展示当参考镜选取曲率半径500的平凹透镜,测量对象为被测镜的首个表面时,该表面不同曲率与干涉图条纹数的关系。由于干涉图条纹数小于30时,才能进行有效的分析和测量,所以该表面曲率在小于 -0.0045 或大于 -0.0028 时,能够进行测量。使用3倍扩束镜,保证了一个参考镜可以对尽可能多曲率的被测镜进行测试。对于曲率不在测量范围内的被测镜,可以通过更换参考镜的方式完成测量,如图2(b)所示。综上所述可以得出使用3倍扩束时,该系统可以对各种曲率的被测镜进行测试。



(a) 曲率半径500的平凹透镜
(a) Planoconcave lens with a curvature radius of 500



(b) 曲率半径200的平凸透镜
(b) Planoconvex lens with a curvature radius of 200

图2 使用不同参考镜时条纹数与被测镜曲率的关系

Fig. 2 Relationship between stripe number and curvature of the test lens when using different reference lens

2.2 中心偏的测量

本文通过 Zernike 多项式拟合对干涉结果定量分析, Zernike 多项式由在单位圆内正交完备的幂级数展开多项式的集合构成^[17], 通过幂级数展开的方式对波像差进行表述与类别划分, Zernike 多项式的几个较低阶次项的意义与一般光学现象有关。在无中心偏差时, 波前仅包含球差, 离焦等轴上像差, 有中心偏差时会出现倾斜, 慧差等轴外像差。其中 Zernike 倾斜项 Z_1, Z_2 (第 1, 2 项) 对反射面的倾斜较敏感, 且光路中各面的倾斜对这两项 Zernike 系数的影响相互独立, 因此本文通过 Zernike 倾斜项来计算待测透镜的中心偏差。

中心偏差是用光学表面定心顶点处的法线与基准轴的夹角来度量, 所以首先需要有一个明确的基准轴。本系统使用了一个平凹透镜或平凸透镜作为参考镜, 并以该参考镜的实际光轴作为基准光轴。如图 3 所示。为了确保参考镜光轴为系统的基准光轴, 在安装测量系统的过程中, 先使参考镜的前后表面进行干涉, 同时调节扩束镜和探测相机, 使干涉结果 Zernike 倾斜项为 0。调节后可以对被测镜测量。

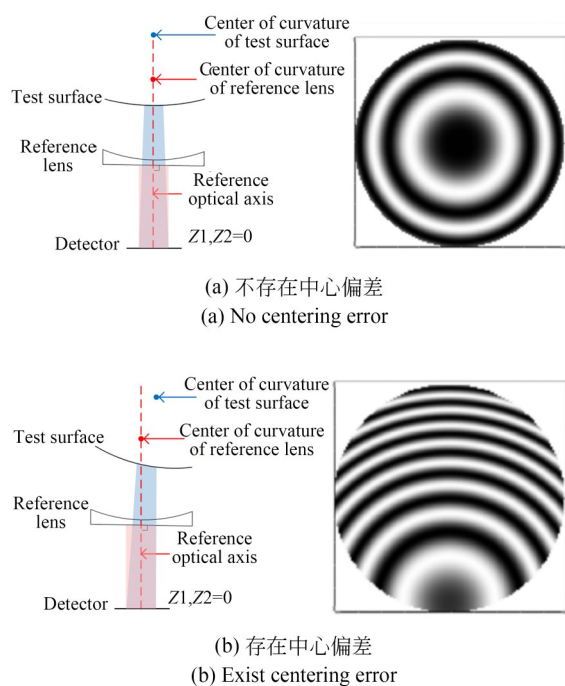


图 3 中心偏差的测量

Fig. 3 Measurement of centering error

在对被测镜进行测量时, 在无中心偏差情况下, 干涉图为环形条纹, 环形条纹中心位于图像中心, Zernike 的倾斜项系数为 0, 如图 3(a) 所示。在有中心偏差情况下, 环形条纹中心位置会发生偏离, 如图 3(b) 所示。对干涉图生成的波前进行 Zernike 拟合。根据 Zernike 的倾斜项系数, 可定量地测量当前待测透镜的中心偏差的大小。如式(1):

$$\begin{cases} \chi_1 = k \cdot Z_1 \\ \chi_2 = k \cdot Z_2 \\ \chi = k \sqrt{(Z_1 + Z_2)^2} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: Z_1, Z_2 表示第 1, 2 项 Zernike 系数; χ 表示待测面中心偏差, 单位: 秒("); χ_1, χ_2 表示中心偏差在 x, y 方向上的分量; k 表示中心偏差与对应方向上 Zernike 系数的比例, 该比例与系统结构与被测镜曲率有关。

3 误差分析

进行测量时, 需要得到干涉图并对干涉图进行 Zernike 多项式拟合, 影响外差干涉及 Zernike 多项式拟合结果的影响因素有激光器的强度与波长波动、外差频率的波动。

3.1 激光强度波动

两束外差光能量发生起伏变化时, 由于相位解调需要不同时间的干涉条纹图, 在一个移相周期内的光束能量的波动会对测量引入额外的误差项, 进而影响移相测量的精度。此时对应的干涉测量信号大小可以描述为如下公式^[18]:

$$\begin{aligned} I_i(x, y) = & (E_1 + \Delta E_1)^2 + \\ & (E_2 + \Delta E_2)^2 + (E_3 + \Delta E_3)^2 + \\ & 2(E_1 + \Delta E_1)(E_2 + \Delta E_2) \cos[\Delta\omega t - \varphi(x, y)], \end{aligned} \quad (2)$$

其中: $I_i(x, y)$ 为 N 步移相过程中 t 时刻的干涉图, E_1, E_2 分别为参考光和测量光的振幅, E_3 为背景光振幅, $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3$ 为相应的强度波动, $\Delta\omega$ 为外差频率, φ 为被测相位。由于 $\Delta E^2/E^2$ 较小, 因此能量波动可近似为振幅波动 $\Delta E/E$ 的两倍。使用 $N+1$ 步移相算法, 其计算公式可以表达为如下形式:

$$I_i = A + B \cos \left[\varphi + \frac{(i-1)2\pi}{N} \right],$$

$$i = 1, 2, \dots, N+1, \quad (3)$$

$$\tan \varphi = \frac{\sum_{i=2}^N I_i \sin \left[\frac{(i-1)2\pi}{N} \right]}{\frac{I_1 + I_{N+1}}{2} + \sum_{i=2}^N I_i \cos \left[\frac{(i-1)2\pi}{N} \right]}, \quad (4)$$

其中,干涉信号的直流量 A 与交流量 B 可由上述干涉光强公式计算得到:

$$A = (E_1 + \Delta E_1)^2 + (E_2 + \Delta E_2)^2 + (E_3 + \Delta E_3)^2, \quad (5)$$

$$B = 2(E_1 + \Delta E_1)(E_2 + \Delta E_2). \quad (6)$$

以第二步移相($i=2$)时强度波动对被测相位 ϕ 的影响为例,假设直流量 A 与交流量 B 的强度波动分别为 x_1, x_2 ,即:

$$I_2 = (A + x_1) + (B + x_2) \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{N} \right]. \quad (7)$$

相位测量结果随 x_1, x_2 的变化如式(8)和式(9):

$$\frac{d\varphi}{dx_1} = \frac{d \tan \varphi}{dx_1} \frac{d\varphi}{d \tan \varphi} =$$

$$\lim_{x_1 \rightarrow 0} \frac{(\tan \varphi' - \tan \varphi)}{x_1} \frac{d\varphi}{d \tan \varphi} =$$

$$\frac{\sin \left[\frac{2\pi}{N} \right] \cos^2 \varphi}{\frac{I_1 + I_{N+1}}{2} + \sum_{i=2}^N I_i \cos \left[\frac{(i-1)2\pi}{N} \right]}, \quad (8)$$

$$\frac{d\varphi}{dx_2} = \frac{d \tan \varphi}{dx_2} \frac{d\varphi}{d \tan \varphi} =$$

$$\lim_{x_2 \rightarrow 0} \frac{(\tan \varphi' - \tan \varphi)}{x_2} \frac{d\varphi}{d \tan \varphi} =$$

$$\frac{\sin \left[\frac{2\pi}{N} \right] \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{N} \right] \cos^2 \varphi}{\frac{I_1 + I_{N+1}}{2} + \sum_{i=2}^N I_i \cos \left[\frac{(i-1)2\pi}{N} \right]}. \quad (9)$$

可以看出光强波动产生的误差,与强度波动的大小为线性关系,且对于不同的被测相位影响不同。实际测量时,在 $N+1$ 步移相中,每一步都会产生此类型的误差,因此实际误差为 $N+1$ 个此类型误差的叠加。干涉测量时,干涉图上各点的被测相位 φ 不同,且被测相位在 $[0, 2\pi]$ 范围内。因此仿真了该误差的叠加结果,设定光束能

量按照正态分布统计规律随机波动,先随机生成了每一步移相时的激光强度波动 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3$,将该波动代入移相公式可得受到激光波动影响后解算出的相位,和相位误差 $\Delta\varphi$ 的大小。然后就可以研究相位误差 $\Delta\varphi$ 和被测相位 φ 的关系。图4展示了相位误差随被测相位变化的一次仿真结果。可以看出,在被测相位一个周期内的相位误差与正弦分布较类似,将相位误差对被测相位的影响按正弦分布处理,即:

$$\Delta\varphi = a \sin(\varphi + b), \quad (10)$$

其中, a, b 由每一步移相时的 $\Delta E_1, \Delta E_2, \Delta E_3$ 确定,根据此式进一步分析对波前的影响。

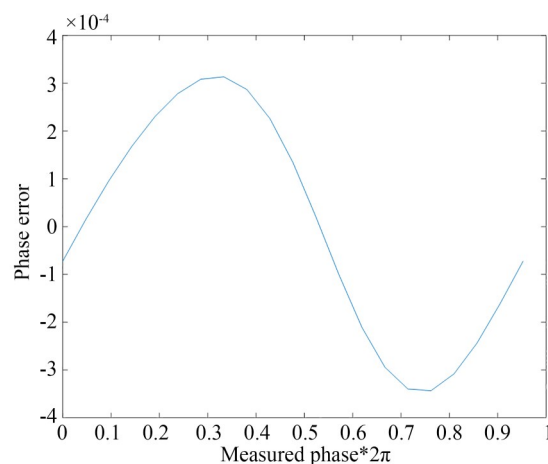


图4 激光强度波动导致的相位误差与被测相位的关系
Fig. 4 Relationship between phase error caused by laser intensity and measured phase

由于相位误差与被测相位有关,因此对于不同的波前,激光功率变化导致的Zernike倾斜项变化也不同。当干涉图环形条纹中心位于图像中心,即波前不存在倾斜时,激光功率变化对Zernike倾斜项无影响。本系统测得的波前经Zernike多项式拟合后,Zernike系数主要由第1,2项Zernike系数倾斜项(Z_1, Z_2)和第3项Zernike系数离焦项(Z_3)影响测量结果。倾斜项代表了待测镜的中心偏差。离焦项代表了条纹数,数值上为条纹数的一半,该系数由被测镜的位置与曲率决定。

为了研究Zernike系数测量误差与光束能量波动的关系,设定光束能量波动范围为正态分布标准差的3倍,光路中有四个反射面(对比度

0.25), 即 $\Delta E_1 = \Delta E_2 = \Delta E_3 / 6$, $N=10$, 仿真 100 次, 得到式(10)中的 100 个 a, b 。假设中心偏差的方向为 x 方向, 此时 Z_2 为 0, 将上述仿真得到的 100 个 a, b 带入不同的波前, 得到 100 个 Zernike 倾斜项误差, 计算其不确定度。在不同波前, 光强波动幅度范围为 $0 \sim 0.2\%$ 时的 Zernike 倾斜项的误差如图 5 所示。

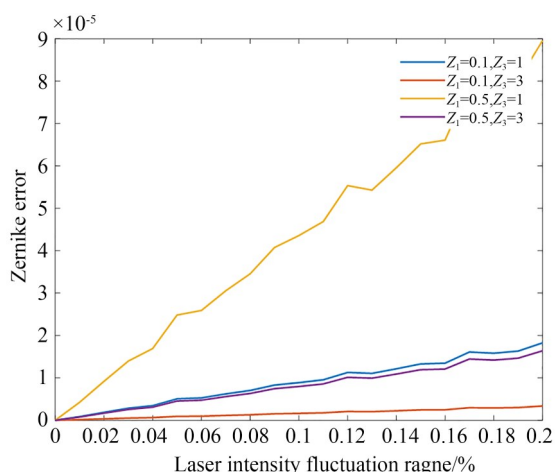


图 5 Zernike 系数测量误差与激光能量波动关系

Fig. 5 Relation between Zernike coefficient measurement error and laser energy fluctuation

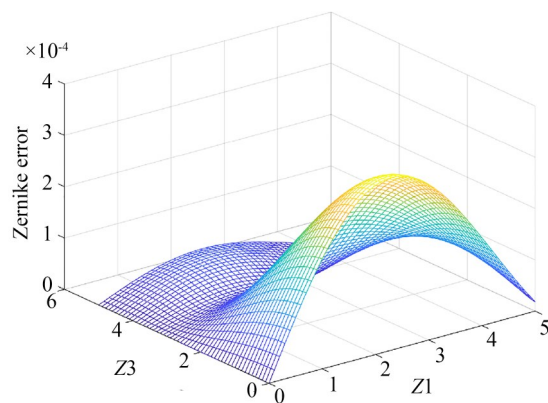
可以看出 Zernike 系数误差与光强波动幅度成正比。为了研究在特定光强波动, 不同波前下的最大误差, 设定光束能量波动 0.2% , 不同波前, 即 Z_1, Z_3 不同大小情况下, Zernike 倾斜项的不确定度如图 6(a)。

在测量特定曲率和位置的被测镜时, 波前的 Z_3 和中心偏差与对应方向上 Zernike 倾斜项系数的比例 k 也会确定, 由式(11)可得光束能量波动最终导致的中心偏差大小:

$$\frac{d\chi}{dZ_1} = k. \quad (11)$$

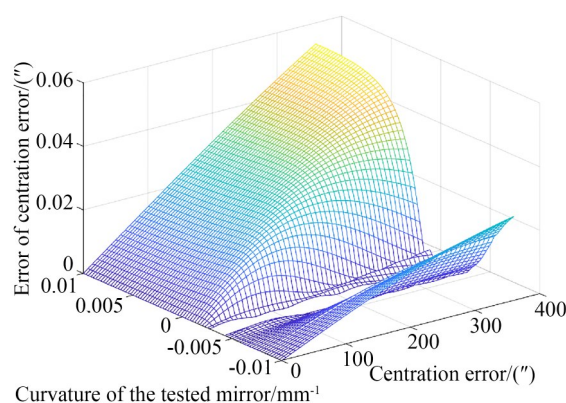
因此可将图 6(a) 中的横纵坐标 Z_1, Z_3 转换为被测镜的中心偏差和曲率, 得到中心偏差测量结果的不确定度 σ_1 与被测镜的中心偏差和曲率的关系如图 6(b)。

综上, 激光强度波动造成的中心偏差测量误差影响因素包括激光强度波动程度, 被测镜的曲率和中心偏差。在被测镜曲率 $-0.01 \sim 0.01 \text{ mm}^{-1}$, 中心偏差 $360'' (0.1^\circ)$ 以内时, 激光强度波



(a) Zernike 不确定度与波前 (Z_1, Z_3) 的关系

(a) Relationship between Zernike error and wavefront (Z_1, Z_3)



(b) 中心偏差不确定度与被测镜曲率和中心偏差的关系

(b) Relationship between the measurement error of centering error and the curvature and centering error of the test lens

图 6 0.2% 激光能量波动导致的不确定度

Fig. 6 Error caused by 0.2% laser energy fluctuation

动 0.2% 造成的中心偏差测量不确定度最大值为 $0.05''$ 。

3.2 激光波长波动

待测面形信息是通过解算相位获得的, 实际测量情况下激光器工作波长波动会导致相移步长发生改变, 引入随机的测量误差。设激光器工作波长为 λ_0 , 将激光器的波长变化视为满足均匀分布的随机过程, 则实际波长可描述如下:

$$\lambda(j) = \lambda_0 + \Delta\lambda_0(j) = \lambda_0[1 + \epsilon_\lambda \text{rand}(j)], \quad (12)$$

其中: $\text{rand}(j)$ 表示均值为 0, 满足 $[-1, 1]$ 之间随机均匀分布的随机数, ϵ_λ 为激光器稳定度大小。测量波前 φ 与波长的关系为:

$$\varphi = 4\pi nh/\lambda, \quad (13)$$

其中: n 为折射率, h 为参考面与测量面之间的距离。

离。波长变化引入的相位误差为:

$$\Delta\varphi(t) = \varphi\Delta\lambda(t)/\lambda_0. \quad (14)$$

设定波长短期稳定性在 0.02 nm 范围,引入的相位误差约为 $2.8 \times 10^{-5}\varphi$,与图 4 中激光强度导致的相位误差相比小了一个量级,所以不是主要误差。

3.3 外差频率波动

外差频率波动主要作用于初始相位解调环节,设 f_H 为两束光的频率差,使用采样频率为 f_s 的探测器采集 N 组数据, f_M 为解调频率,且采样频率 $f_s = Nf_M$, $N \geq 2$,第 i 步移相时,即 t_i 时刻的干涉光强为:

$$I_i = A + B \cos(2\pi f_H t_i + \phi), \quad (15)$$

$$t_i = \frac{i-1}{f_s} = \frac{i-1}{Nf_M}. \quad (16)$$

理想情况下,外差频率 f_H 与解调频率 f_M 之间严格相等,此时光强交流部分为:

$$I_{ac,i} = B \cos\left[2\pi \frac{i-1}{N} + \phi\right]. \quad (17)$$

但由于外差频率存在波动,实际外差频率与解调频率不等,假设在第 x 步移相期间,外差频率为 $f_{H,x}$,外差频率的偏差 Δf_x 为:

$$\Delta f_x = f_{H,x} - f_M. \quad (18)$$

此时光强交流部分为:

$$I_{ac,i} = B \cos\left[2\pi \left(\frac{i-1}{N} + \frac{1}{N} \sum_{x=1}^i \frac{\Delta f_x}{f_M}\right) + \phi\right]. \quad (19)$$

第二步移相时的外差频率误差导致的误差为例,第二步移相时的光强交流部分表示为:

$$I_{ac,2} = B \cos\left[2\pi \frac{1}{N} \left(1 + \frac{\Delta f_2}{f_M}\right) + \phi\right]. \quad (20)$$

相位测量结果随 Δf_2 的变化如式(21):

$$\frac{d\varphi}{d\Delta f_2} = \frac{\frac{2\pi}{Nf_M} \sin\left[\varphi + \frac{2\pi}{N}\right] \cos^2\phi}{\frac{I_1 + I_{N+1}}{2} + \sum_{i=2}^N I_i \cos\left[\frac{(i-1)2\pi}{N}\right]}. \quad (21)$$

可以看出外差频率波动产生的误差与光强波动产生的误差类似,与外差频率波动的大小为线性关系,对于不同的被测相位影响不同。实际外差频率导致的误差为 $N+1$ 个此形式函数的叠

加。与研究激光强度波动时方法类似,先仿真生成每一步移相时的 Δf ,检测这些外差频率误差对各被测相位的总的影响,然后得到被测相位在一个周期 $[0, 2\pi]$ 范围内,相位误差的大小,该误差随被测相位的变化情况为一个正弦函数,如图 7 所示。

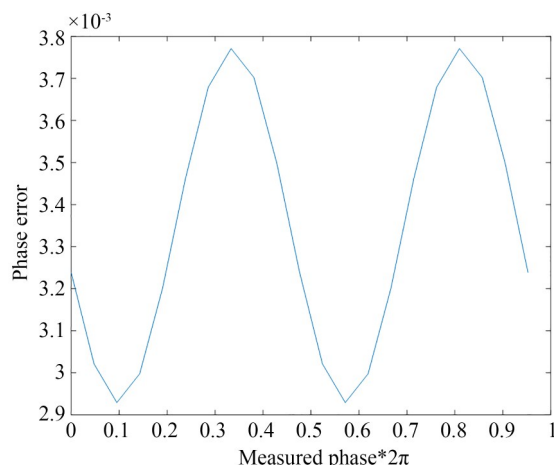


图7 外差频率波动导致的相位误差与被测相位的关系
Fig. 7 Relationship between phase error caused by heterodyne frequency and measured phase

受误差影响后的相位 $\Delta\varphi$ 可表示为:

$$\Delta\varphi = a \sin(2\varphi + b), \quad (22)$$

其中, a, b 的大小与每一步移相时的 Δf 有关。由式(22)可以看出,与激光强度波动导致的误差类似,外差频率波动导致的 Zernike 倾斜项变化也与原始波前的倾斜项和离焦项有关。

设外差频率名义值为 10 Hz,探测器采样频率为 100 Hz,光路中共有四个反射面(对比度 0.25), $N=10$ 。将不同等级范围的频差变化视为均匀分布的随机过程,对每个等级的频差,重复 100 次随机过程,得到 100 个 a, b ,将这 100 个 a, b 代入干涉图中,计算对 Zernike 倾斜项的影响并计算其不确定度。在不同波前,频差偏差波动范围为 0.003~0.03 Hz 时的 Zernike 倾斜项的误差如图 8 所示。可以看出 Zernike 系数误差与外差频率波动幅度成正比。为了研究在特定外差频率波动幅度,不同波前下的最大误差,设定外差频率波动幅度波动 0.02 Hz,不同波前,即 Z_1, Z_3 不同大小情况下, Zernike 倾斜项的不确定度如图 9(a)。

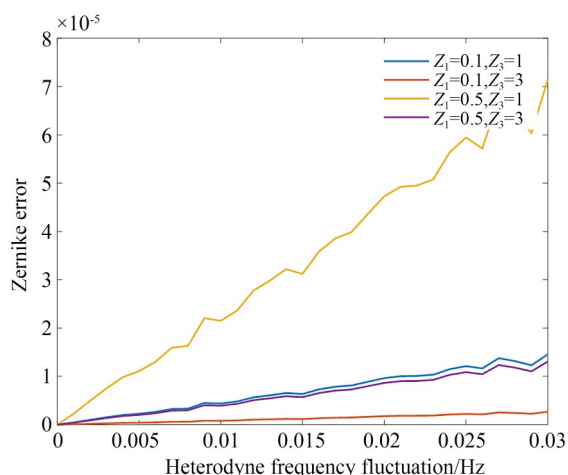
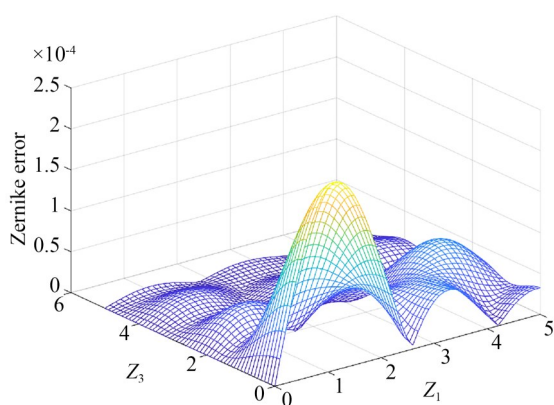
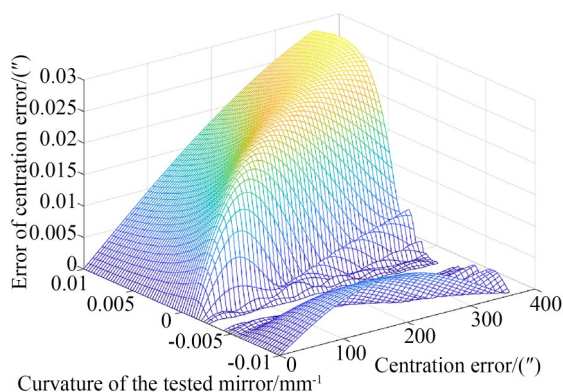


图 8 Zernike 系数测量误差与外差频率波动关系

Fig. 8 Relationship between Zernike coefficient measurement error and heterodyne frequency fluctuation

(a) Zernike 不确定度与波前(Z_1, Z_3)的关系(a) Relationship between Zernike error and wavefront (Z_1, Z_3)

(b) 中心偏差不确定度与被测镜曲率和中心偏差的关系

(b) Relationship between the measurement error of centering error and the curvature and centering error of the test lens

图 9 0.02 Hz 外差频率波动导致的不确定度

Fig. 9 Error caused by 0.02 Hz heterodyne frequency fluctuation

将图 9(a)中的横纵坐标 Z_1, Z_3 转换为被测镜的中心偏差和曲率, 得到中心偏差测量结果的误差不确定度 σ_2 与被测镜的中心偏差和曲率的关系如图 9(b)。

综上, 外差频率波动造成的中心偏差测量误差影响因素包括外差频率波动程度, 被测镜的曲率和中心偏差。在被测镜曲率 $-0.01 \sim 0.01 \text{ mm}^{-1}$, 中心偏差 $360''$ 以内时, 外差频率波动 0.02 Hz 造成的中心偏差测量不确定度最大值为 $0.03''$ 。

将上述两种误差影响进行合成, 可得基于外差干涉的中心偏差测量系统总不确定度为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} = 0.06'' \quad (23)$$

4 测量实验与结果

4.1 中心偏测量实验

为了验证中心偏差测量的可行性与激光强度波动与外差频率波动对测量精度的影响, 本文搭建了基于全视场外差干涉的中心偏差测量系统, 如图 10 所示。

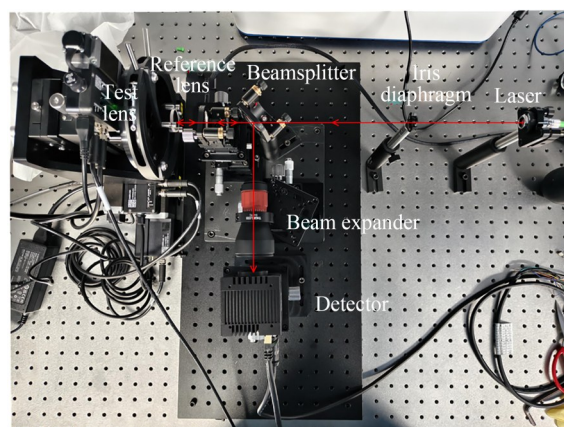


图 10 中心偏差测量系统

Fig. 10 Centering error measurement system

系统采用实验室自研的波长为 633 nm 的短相干外差激光器 KTY-SCD-10 作为光源, 通过光纤接入如上图所示的中心偏差测量系统。光束首先经过光纤准直镜进入空间光路, 然后通过光阑和分光镜后入射到曲率半径 500 的平凹参考镜上, 将曲率半径为 200 的平凸透镜作为被测镜, 被测镜安装在 Zaber 高精度电动旋转台 X-

RSW60A-E03 和高精度位移台 X-LSQ075B-E01 上,通过位移台和旋转台控制被测镜的位置姿态。被测镜反射的光束携带中心偏差信息与参考光束发生干涉,两束光经过 THORLABS 公司的 3 倍扩束镜 GBE03-A 后,使用分辨率为 $2\,048\times 2\,048$,像元尺寸 $5.5\,\mu\text{m}$ 的华腾威视相机 HT-XG402G 采集干涉图。实验光源的短期光强波动范围在 0.2% 以内,短期波长波动在 $0.02\,\text{nm}$ 以内,外差频率波动在 $0.02\,\text{Hz}$ 以内。

测量时,先调小光阑,当待测透镜存在中心偏差时,被测面前后表面反射光束在探测相机上所成的光斑存在偏离,如图 11(a)所示,调整透镜至两光斑与参考光束重合,可视为完成中心偏差粗调,此时待测透镜的偏心较小,可以获得清晰的干涉条纹。然后调节光程,结合被测镜和参考镜的实际距离,就可以找到被测面与参考面干涉产生的条纹,如图 11(b)所示。

4.2 测量结果与分析

为了验证中心偏测量时,激光强度波动和外差频率波动对测量结果的影响分析。粗调完成

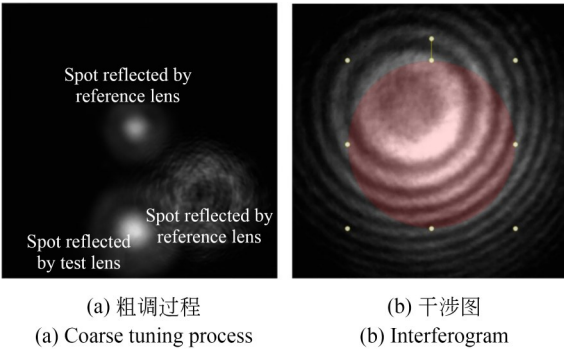


图 11 中心偏差测量过程
Fig. 11 Centering error measurement process

后,固定待测镜,重复测试 10 次干涉图,并用 Zernike 多项式拟合,根据倾斜项 Z_1, Z_2 计算被测镜的中心偏差。然后通过电动位移旋转台调整被测镜姿态,重复 10 次测量过程,并计算测量结果的不确定度,同时上文的误差分析部分计算了各种被测镜的测量不确定度,从中取出相应的仿真结果与测量结果对比,如表 1 所示。实验结果验证了中心偏差测量误差与激光强度波动,外差

表 1 中心偏差测量结果
Tab. 1 Results of centering error measurement

Times	Z_1	Z_2	Centering error / (")	Measu-rement error/(")	Theoret-ical error / (")
1	1.915 8	0.052 0	195.56	0.048	0.041
	1.918 8	0.052 2	195.87		
	1.917 8	0.052 5	195.77		
	1.918 4	0.054 2	195.84		
	1.918 0	0.053 8	195.80		
	1.920 4	0.052 8	196.03		
	1.920 4	0.053 5	196.04		
	1.918 8	0.053 1	195.87		
	1.917 8	0.053 4	195.78		
	1.916 6	0.052 8	195.65		
2	0.558 0	−0.066 6	57.28	0.025	0.019
	0.559 6	−0.066 2	57.44		
	0.558 4	−0.066 4	57.32		
	0.559 6	−0.066 6	57.44		
	0.559 8	−0.067 0	57.46		
	0.559 0	−0.066 0	57.37		
	0.559 2	−0.067 8	57.41		
	0.558 4	−0.067 2	57.33		
	0.560 4	−0.066 4	57.52		
	0.560 0	−0.066 4	57.48		

频率波动,被测镜的曲率与中心偏差的关系。

5 结 论

本文根据中心偏差测量高精度的要求,提出了基于外差干涉的中心偏差测量的方法。介绍了该系统的结构以及测量原理和方法。然后研究了该测量系统中激光强度波动和外差频率波动对测量精度的影响。激光强度波动 0.2% 引起的中心偏差测量不确定度不超过 0.05", 外差频率波动 0.02 Hz 引起的中心偏差测量不确定度不超过 0.03", 总不确定度不超过 0.06"。根据分析结果搭建了外差干涉中心偏差测量系统,该系统

的测量结果基本符合仿真结果。这些研究证明了外差干涉测量中心偏差的可行性,验证了外差干涉的测量方法测量高精度性能,有很大的发展潜力。

作者贡献声明:

杨永康:论文构思和撰写;理论分析,测量实验的设计及数据整理和分析;

刘安琪:测量方法的提出,提供实验资源;

张文喜:领导研究活动的进行,论文审核与编辑写作;

伍洲:测量实验数据分析,协调研究活动的进行。

参考文献:

- [1] 李文静,周金运,林清华. 折叠式激光投影光刻物镜的设计研究[J]. 光电工程, 2007, 34(9): 46.
LI W J, ZHOU J Y, LIN Q H. Design of fold laser projection lithography lens [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(9): 46. (in Chinese)
- [2] 祁猛,李宏,郭忠达,等. 中心偏误差对非球面透射式光学系统像差的影响[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2): 134-139.
QI M, LI H, GUO Z D, *et al.* Center offset error of aspheric transmission type optical system aberration [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2022, 20(2): 134-139. (in Chinese)
- [3] 郭帮辉. 基于镜面间隔和中心偏差测量的光学镜头辅助装调设备的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.
GUO B H. *Research on Optical Lens-Aided Assembly and Adjustment Equipment based on Mirror Interval and Center Deviation Measurement* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [4] BEIER M, GEBHARDT A, EBERHARDT R, *et al.* Lens centering of aspheres for high-quality optics[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2012, 1(6): 441-446.
- [5] GREEN M E, GARDEN R P. Active alignment technique for measuring tilt errors in aspheric surfaces during optical assembly using lens alignment station (LAS): US11391564[P]. 2022-07-19.
- [6] OYA N, RUPRECHT A, DUMITRESCU E. Measurement of the positions of centres of curvature of optical surfaces of a single or multi-lens optical system: US9863844[P]. 2018-01-09.
- [7] LANGEHANENBERG P, STUDER J, BERIŠA K. Complete and efficient opto-mechanical characterization of IR lens assemblies [C]. *Dimensional Optical Metrology and Inspection for Practical Applications XI*. SPIE, 2022: PC1209806.
- [8] 王伟,杜卓,程然,等. 激光差动共焦透镜中心偏的自动测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(23): 3405-3413.
WANG W, DU Z, CHENG R, *et al.* Automatic measurement of center deviation of lens of laser differential confocal[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(23): 3405-3413. (in Chinese)
- [9] 庄雨晴,章广威,赵维谦等. 五维位姿监测的差动共焦曲率半径测量[J]. 光学精密工程, 2023, 31(7): 975-981.
ZHUANG Y G, ZHANG G W, ZHAO W Q, *et al.* Differential confocal radius of curvature measurement method for five-dimensional position monitoring [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(7): 975-981. (in Chinese)
- [10] HOPKINS H H, TIZIANI H J. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1966, 17(1): 33-54.
- [11] 云自修. 中心偏检测仪器概况[J]. 西安工业大学学报, 1984, 4(2): 65-72.
YUN Z X. General situation of eccentric testing instruments [J]. *Journal of Xi'an Institute of Tech-*

- nology, 1984, 4(2): 65-72. (in Chinese)
- [12] 葛洪,王允,邱丽荣. 高精度共焦自准直中心偏测量装置[J]. 光学技术, 2018, 44(6): 681-685.
GE H, WANG Y, QIU L R. Confocal self-collimation decentration measurement structure with high accuracy [J]. *Optical Technique*, 2018, 44 (6): 681-685. (in Chinese)
- [13] 罗杰,刘子豪,刘一郡,等. 基于卡尔曼预测的差动共焦轮廓跟踪测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3): 25-32.
LUO J, LIU Z H, LIU Y J, *et al.* Differential confocal profile tracking measurement method based on Kalman prediction[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44 (3): 25-32. (in Chinese)
- [14] 伍洲,李杨,相里斌,等. 全视场外差长腔干涉测量技术[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0912003.
WU Z, LI Y, XIANGLI B, *et al.* Full-field heterodyne long-cavity interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912003. (in Chinese)
- [15] 樊国翔,李杨,张文喜,等. 全视场外差移相双波长干涉面形检测技术[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(9):132-140.
FAN G X, LI Y, ZHANG W X, *et al.* Full-field heterodyne phase shifting two-wavelength interferometry surface testing technologies [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9):132-140. (in Chinese)
- [16] 李星辉,崔璨. 光栅干涉精密纳米测量技术[J]. 光学精密工程, 2024, 32(17): 2591-2611.
LI X H, CUI C. Grating interferometric precision nanometric measurement technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(17): 2591-2611. (in Chinese)
- [17] MALACARA D. *Optical Shop Testing* [M]. Hoboken, NJ: Wiley, 2007.
- [18] MILLSTONE D B. *Edge Response Characterization of Interferometers and the Effect of Aberrations* [D]. Arizona: The University of Arizona, 2017.

作者简介:



杨永康(2001—),男,河南开封人,硕士研究生,2021年于华中科技大学获得学士学位,主要从事激光干涉测量方面的研究。

E-mail: yangyongkang22@mails.ucas.ac.cn

通讯作者:



张文喜(1979—),男,安徽宿州人,博士,研究员,博士生导师,2003年于中国科学技术大学获得学士学位,2006年于中国科学院西安光学与精密机械研究所获得硕士学位,2014年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事三维精密测量、激光干涉测量和振动测量的研究。

E-mail: zhangwenxi@aoe.ac.cn