

文章编号 1004-924X(2023)23-3405-09

激光差动共焦透镜中心偏的自动测量

王 伟, 杜 卓, 程 然, 赵维谦, 王 允, 邱丽荣*

(北京理工大学 光电学院 复杂环境智能感测技术工信部重点实验室, 北京 100081)

摘要:针对现有中心偏差测量方法中测量精度低、透镜姿态调整人为干扰大的问题,提出一种差动共焦透镜中心偏自动测量方法。该方法通过差动共焦定焦技术,依据差动共焦轴向光强响应曲线的过零点精确对应被测镜特征点这一特性,实现对被测镜猫眼点及共焦点的精准定位;通过高精度气浮转轴驱动被测镜旋转,用位移传感器、圆光栅记录被测镜的位置信息,结合五维位姿自动调整机构,实现对被测镜姿态的高精度校正,消除姿态偏差,提高测量精度;最终,搭建了激光差动共焦透镜中心偏自动测量系统,实现了透镜中心偏的高精度自动测量。实验结果表明:透镜中心偏的测量精度可达 0.41%,测量重复性优于 100 nm。与现有的人工单次测量相比,该方法的测量重复性较好、随机误差小、测量精度高,为高精度透镜中心偏自动测量提供了一种技术途径。

关键词:激光测量;差动共焦;中心偏;自动调整;自动测量;姿态偏差

中图分类号: TN249; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233123.3405

Automatic measurement of center deviation of lens of laser differential confocal

WANG Wei, DU Zhuo, CHENG Ran, ZHAO Weiqian, WANG Yun, QIU Lirong*

(MIIT Key Laboratory of Complex-field Intelligent Exploration, School of Optics and Photonics,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: qiugrass@126.com

Abstract: To address the problems of low measurement accuracy and significant human interference in lens position adjustment in existing center deviation measurement methods, this paper proposes an automatic measurement method for the center deviation of differential confocal lenses. This method uses differential confocal focusing technology to precisely locate the cat's eye and confocal points of the measured lens, based on the fact that the zero point of the differential confocal axial light intensity response curve corresponds precisely to the characteristic point of the measured lens. The high-precision air-bearing rotating shaft drives the rotation of the measured mirror, while the displacement sensor records the position information of the measured mirror. In combination with the five-dimensional posture automatic adjustment mechanism, the high-precision correction of the attitude deviation of the measured mirror was realized, the eccentricity error was eliminated, and the measurement accuracy was improved. Finally, a laser differential confocal lens center deviation measurement system was established, which automatically measured the

收稿日期:2023-07-13;修订日期:2023-08-10.

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 2023CX01006);民用航天技术预先研究项目(No. D020402);国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(No. 51825501)

lens center deviation with high precision. The experimental results show that the measurement accuracy of the lens eccentricity can reach 0.41%, while the measurement repeatability is greater than 100 nm. Compared with the existing manual single measurement method, the proposed method has good repeatability, small random error, and high measurement accuracy. It serves as a new technical approach for the automatic measurement of lens eccentricity with high precision.

Key words: laser measurement; differential confocal; centrality deviation; automatic adjustment; automatic measurement; position deviation

1 引言

随着球面元件在激光点火、光刻机、航天相机等领域的应用越来越多,对球面元件关键参数测量精度和效率的要求日益提高^[1-3]。中心偏作为光学元件的核心参数,其精度会直接影响光学系统的共轴性和成像质量,因此,对中心偏的高精度测量和校正具有重要意义^[4]。

现有的中心偏测量方法分为接触式和非接触式两大类。传统的接触式测量方法存在测量精度低、容易划伤元件表面等问题,因此,国内外主流的中心偏测量仪都采用非接触式测量法,如差动共焦法、干涉法、激光定心法等^[5-7]。非接触式测量方法采用旋转法对被测样品的中心偏进行测量,根据旋转式中心偏测量原理可知,被测镜的姿态偏差会直接累加到被测样品的中心偏差中^[8-9],因此,非接触式中心偏测量方法需要在测量前精确调整被测镜的姿态,保证被测镜机械外圆中心轴(机械轴)和测量光轴同轴以减少测量误差^[10]。目前,被测镜姿态调整机构按照调整方式分为手动调整和电动调整两种^[11-14]。手动调整机构通过人工利用微分螺杆进行微位移调整,调整精度低,人为干扰大,不具有自锁能力,并且存在调整时间长、重复定位精度低,以及对操作人员的技术水平要求高等问题。与手动形式相比,电动调整机构具有定位精度高、响应速度快、可锁紧力矩的特点,但是现存的电动调整机构大多结构复杂且在中心偏测量过程中缺少有效的自动调整算法,大大限制了加工、检测效率^[15-17]。

本文提出了激光差动共焦透镜中心偏自动测量方法,利用电感测微仪、圆光栅结合多维自动调整机构实现对被测镜姿态偏差的自动检测与调整;设计并搭建了激光差动共焦透镜中心偏自动测量系统,结合测量系统自动扫描控制方法

实现透镜中心偏的重复测量,有效抑制了被测镜姿态偏差和人为干扰对透镜中心偏测量的影响,为机械加工和测试装配过程中的中心偏自动测量提供了一种有效途径。

2 原理

通过分析姿态偏差的产生原因、计算姿态偏差对中心偏测量结果的影响,提出并设计了基于透镜姿态偏差自动调整的透镜中心偏自动测量系统,其原理如图1所示。激光差动共焦透镜中心偏自动测量过程主要分为被测样品姿态偏差自动调整和中心偏自动测量两部分。测量步骤如下:

(1)将被测镜通过自定心三爪卡盘固定在自动调整平台上,气浮转轴驱动被测镜旋转一周,同时利用电感测微仪和圆光栅实时记录被测镜的径向跳动信息和角度信息,结合系统自动调整算法,消除被测镜姿态偏差;

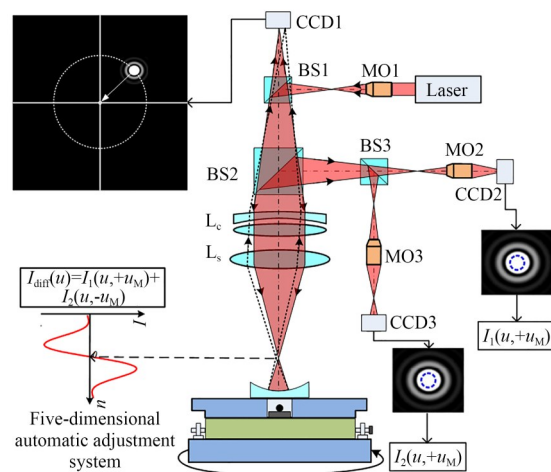


图1 差动共焦中心偏自动测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of automatic measurement of differential confocal eccentricity

(2)利用差动共焦轴向响应曲线过零点与被测镜特征点精准对应这一特性,实现被测镜猫眼点和共焦点的精准定位;

(3)直线电机将测量光锥通过直线度为 $0.8 \mu\text{m}/\text{m}$ 的气浮导轨移动至被测镜的共焦点,同时气浮转轴驱动被测镜旋转一周,系统自动采集反射光斑轨迹,数据处理后得到被测镜的中心偏。

2.1 透镜中心偏自动测量及姿态偏差

激光器发出的光束经过准直物镜 L_c 和聚焦物镜 L_s 形成测量光锥,测量光锥经被测镜反射后由分光棱镜 BS2 分为两路:一路直接通过分光棱镜 BS1 透射,由粗瞄电荷耦合元件 (Charge Coupled Device, CCD) CCD1 接收,系统软件对该探测器接收的光斑光强响应曲线进行数据处理,记

$$I(u, u_M) = I_1(u, +u_M) - I_2(u, -u_M) = \left| \int \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2}\right) \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2} - \frac{i u_M \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2 - \left| \int \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2}\right) \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2} + \frac{i u_M \rho^2}{2}\right) \rho d\rho \right|^2 = \sin^2(u/2 - u_M/4) - \sin^2(u/2 + u_M/4), \quad (1)$$

式中:

$$\begin{cases} u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D^2}{f_0^2} \right) z \\ u_M = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D^2}{f_c^2} \right) M \end{cases}, \quad (2)$$

其中: λ 为光源波长; f_0 为聚焦物镜的焦距; f_c 为准直物镜的焦距; D 为系统的有效通光口径, 其为 准直物镜口径 D_2 与 聚焦物镜口径 D_3 的最小值。当离焦量 $u=0$ 时, $I(u, u_M)=0$, 由此可见, 差动共焦光强响应曲线的过零点精准对应被测镜的共焦位置。

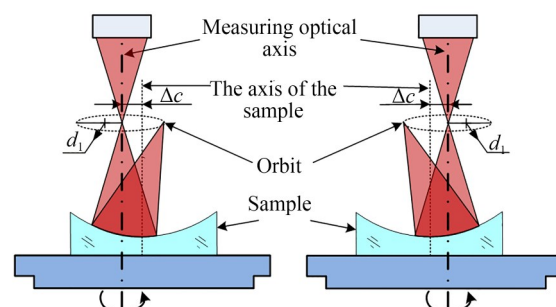
定焦完成后, 五维自动调整平台带动被测镜旋转一周, 系统采集反射光斑轨迹, 经过显微物镜和聚焦物镜放大后, 在粗瞄 CCD1 靶面上形成半径为 r 的拟合圆, 实际被测镜的中心偏为 a , 系统放大率为 α , 即有:

$$a = r/2\alpha. \quad (3)$$

如图 2(a) 所示, 当测量光轴与被测镜机械外圆轴之间存在姿态偏差 Δc , 且被测透镜表面不存在中心偏差时, 五维自动调整平台承载被测镜绕其回转轴旋转, 被测镜机械外圆轴与测量光轴之间的距离为定值, 返回光斑轨迹为圆, 测量光束

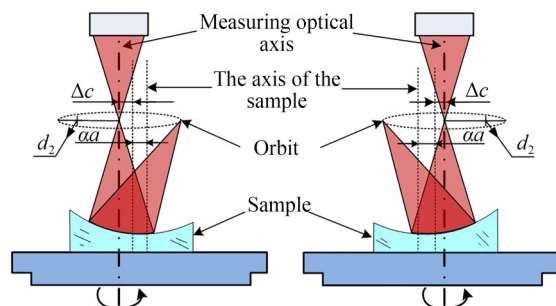
录被测镜共焦点返回光斑的空间位置信息, 计算被测镜的中心偏; 另一路经过分光棱镜 BS2 折射后进入差动共焦探测模块, 测量光束被分光棱镜 BS3 分成两束, 分别进入两个精瞄 CCD。精瞄 CCD2 和精瞄 CCD3 具有等量反向的离焦量, 用来对被测镜猫眼点和共焦点精准定焦^[18]。

将测量光束置于被测镜共焦点附近, 开始扫描, 测量光束经过被测镜反射后, 再次经过聚焦物镜 L_s 、准直物镜 L_c 和分光棱镜 BS2 进入差动共焦光路, 由精瞄 CCD2、精瞄 CCD3 接收, 二者的光强响应信号分别为 $I_1(u, +u_M)$, $I_2(u, -u_M)$, 其中 u 是轴向归一化光学坐标, CCD2 和 CCD3 的离焦量分别为 $+u_M$, $-u_M$ 。二者相减得到共焦点的差动共焦光强响应曲线信息如下:



(a) 被测镜机械轴偏离测量光轴但无中心偏

(a) Mechanical axis of the measured mirror deviates from the measuring optical axis without central deviation



(b) 被测镜机械轴偏离测量光轴且存在中心偏

(b) Mechanical axis of the measured mirror deviates from the measuring optical axis with a central deviation

图 2 姿态偏差对中心偏测量的影响

Fig. 2 Influence of attitude error on central eccentricity

会聚点和反射光束会聚点之间的距离为:

$$d_1 = 2\Delta c. \quad (4)$$

如图 2(b)所示,当被测镜存在中心偏 a 时,五维自动调整平台驱动被测镜绕其回转轴旋转,被测镜法线远离测量光轴,测量光束会聚点和反射光束会聚点之间的距离为:

$$d_2 = 2(\Delta c + \alpha a) = 2\Delta c + 2\alpha a. \quad (5)$$

此时,中心偏的实际测量值为:

$$a' = d_2/2\alpha = (2\Delta c + 2\alpha a)/2\alpha = \Delta c/\alpha + a. \quad (6)$$

由于姿态偏差的影响,中心偏的实测值不等于理论值,测量误差为 δ :

$$\delta = a' - a = \Delta c/\alpha. \quad (7)$$

由上述分析可知,姿态偏差会直接影响被测镜中心偏的测量精度。因此,在每次测量前都需要将被测镜机械外圆轴和测量光轴严格校准至同轴,以消除姿态偏差对中心偏测量结果的影响。

2.2 姿态偏差消除原理

针对透镜中心偏测量过程中被测镜机械轴偏离旋转轴引入的姿态偏差问题,提出一种透镜姿态自动调整方法,调整原理如图 3 所示。被测镜通过三爪卡盘固定在五维自动调整平台上,将电感测微仪探头定位在被测镜边沿,五维自动调整平台驱动被测镜旋转一周,选取一定的采样点数 $n=256$ (n 是 4 的整数倍)^[19],五维自动调整系统利用数字式电感测微仪和圆光栅实时采集所有采样点的相对径向位置坐标 Z_i 以及角度位置 θ_i ,并反馈给上位机,测量软件对接收到的信息进行数据处理,得到被测镜旋转一周的轨迹,如图 4 所示。

根据最小二乘原理计算出最小二乘圆圆心

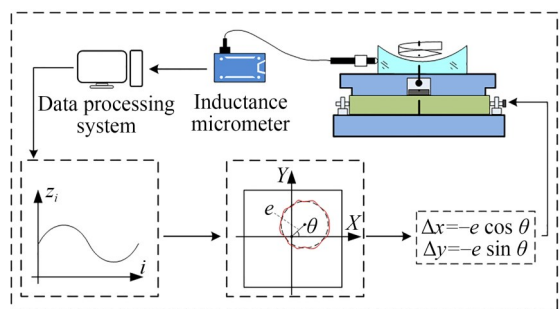


图 3 姿态偏差消除原理

Fig. 3 Schematic diagram of attitude deviation elimination

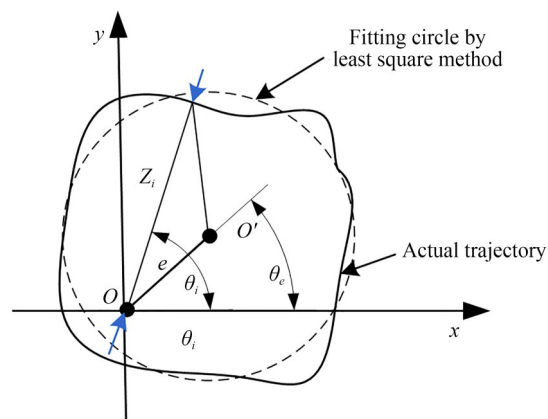


图 4 最小二乘拟合示意图

Fig. 4 Least square fitting diagram

坐标 $O'(x, y)$ 以及偏心量 e :

$$\begin{cases} x' = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i \cos \theta_i) \\ y' = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i \sin \theta_i) \\ e = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n (Z_i \cos \theta_i) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n (Z_i \sin \theta_i) \right]^2} \\ \theta_e = \arctan \left[\sum_{i=1}^n (Z_i \cos \theta_i) / \sum_{i=1}^n (Z_i \sin \theta_i) \right] \end{cases} \quad (8)$$

将偏心量 e 在 X 轴和 Y 轴两个方向上分解,如图 5 所示。分解得到点 $O'(x, y)$ 沿 X 轴方向移动的距离 Δx ,沿 Y 轴方向移动的距离 Δy :

$$\begin{cases} \Delta x = -e \cos \theta_e \\ \Delta y = -e \sin \theta_e \end{cases} \quad (9)$$

最后根据 $\Delta x, \Delta y$ 的大小和方向控制自动调整结构对被测镜进行姿态校正。由于受到机械

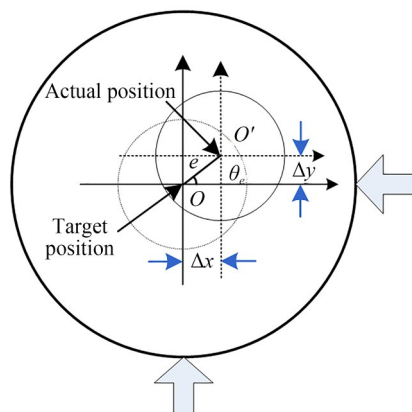


图 5 姿态误差分解

Fig. 5 Attitude error decomposition

结构装配误差以及自动调整机构性能的影响,实际上无法通过单次调整将被测镜机械轴与测量光轴校准至完全同轴,需要将调整后的姿态偏差值作为闭环输入,多次自动调整后,被测镜外圆的径向跳动 $Z_i \rightarrow 0$,即 $\Delta c \rightarrow 0$,此时中心偏的测量值为:

$$a' = \Delta c / \alpha + a = a. \quad (10)$$

3 透镜中心偏自动测量系统设计

激光差动共焦透镜中心偏自动测量系统结构如图 6 所示,它包括激光差动共焦自准直探测系统、透镜姿态自动调整系统、直线升降系统和集成测量控制系统。

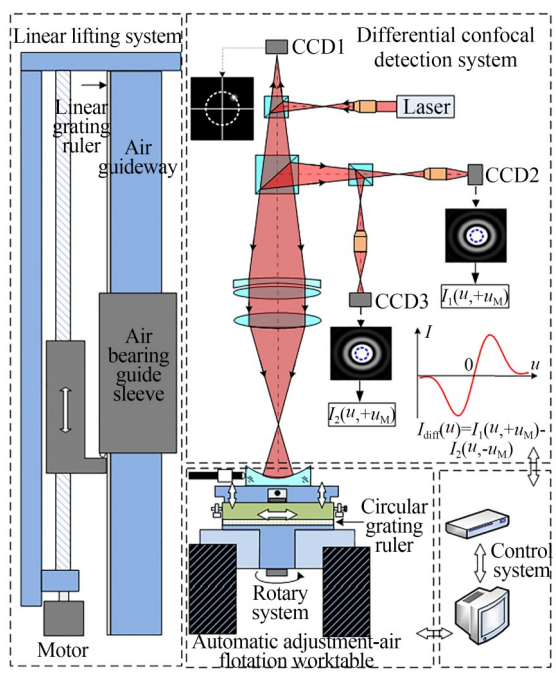


图 6 差动共焦透镜中心偏自动测量系统总体框图

Fig. 6 Overall block diagram of automatic measurement system for central deviation of differential confocal lens

每部分功能如下:(1)激光差动共焦自准直测头固定在气浮导轨套上,自动采集被测镜返回光斑的光强信号和位置信息;(2)透镜姿态自动调整系统以自研的高精度气浮回转轴为基准,径向跳动控制在 35 nm 以内,配合接触式电感测微仪和圆光栅实现被测镜姿态的自动监测与调整;

(3)直线升降系统采用余气回收式气浮导轨作为运动基准,消除余气对光学测量环境及精度的影响,导轨行程为 1 800 mm、全程直线度优于 $1 \mu\text{m}$,实现了自准直测头的高精度轴向移动;(4)集成测控系统控制差动共焦自准直仪测头的轴向移动和透镜姿态自动调整,实时采集被测镜边缘的径向跳动及直线光栅采集的测量光锥位置信息,并对粗瞄 CCD 采集的光强响应信息进行数据处理,从而完成透镜中心偏的高精度自动测量。

差动共焦自准直测头采用波长为 632.8 nm 的激光器作为测量系统的光源,CCD 探测器采用海康 MV 系列高端型面阵相机,靶面尺寸为 $4\,096 \times 3\,072$ pixel,每个像素的实际尺寸为 $3.2 \mu\text{m}$,经过像素细分后,相机分辨力可达 $0.1 \mu\text{m}$;为了减小外界振动对系统调试和测量的影响,基台整体采用气浮隔振设计。根据以上结构设计,研制的激光差动共焦透镜中心偏自动测量实验系统如图 7 所示。

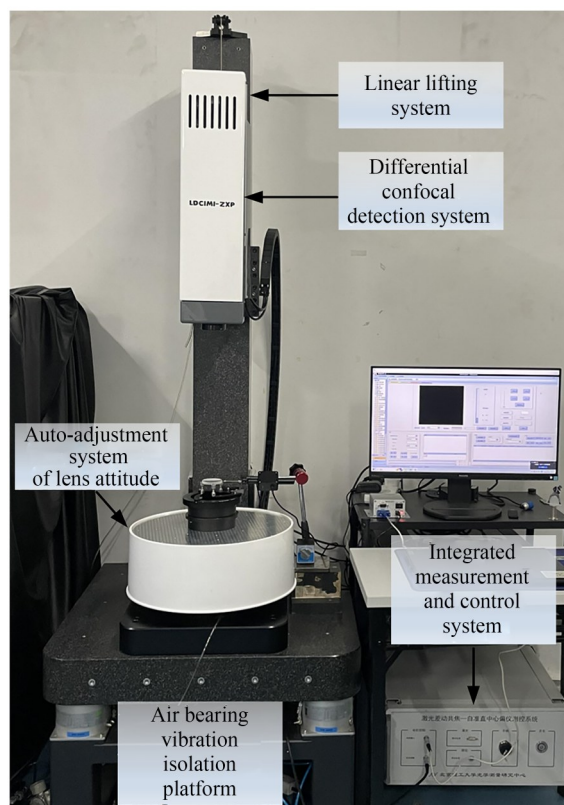


图 7 差动共焦透镜中心偏自动测量实验系统

Fig. 7 Experimental system for automatic measurement of central deviation of differential confocal lens

4 测量实验与结果

对激光差动共焦透镜中心偏自动测量系统进行相对误差计算,来验证激光差动共焦透镜中心偏自动测量方法的可靠性。

4.1 误差分析

影响透镜中心偏测量结果的主要因素有:

(1)气浮转轴动态跳动误差 σ_1 、光斑捕捉动态误差 σ_2 ; (2)定焦误差 σ_3 、被测镜的位姿调整误差 Δc 。

4.1.1 气浮转轴动态跳动误差

气浮转轴运行时的动态误差包含轴向跳动误差 Δv 、径向跳动误差 Δc 和角摆跳动误差 Δs ,气浮转轴误差的主要形式如图 8 所示。

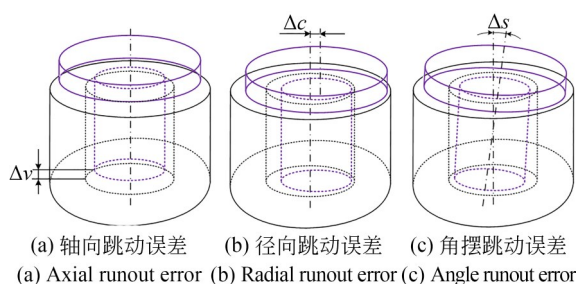


图 8 气浮转轴的动态误差

Fig. 8 Dynamic error of air bearing rotating shaft

在透镜中心偏自动测量过程中,气浮轴系的轴向跳动误差会给光斑带来少量离焦,但是轴向跳动误差 Δv 不会影响光斑画圆直径;气浮转轴的径向跳动误差 Δc 表示气浮转轴旋转时其旋转轴偏离气浮转轴理论轴线的距离,径向跳动误差会累加到透镜中心偏的测量结果中。

气浮转轴的角摆跳动误差用 Δs 表示,代表气浮转轴在旋转时发生倾斜。气浮转轴的角摆跳动误差同样可以分解为轴向跳动误差 Δs_v 和径向跳动误差 Δs_r ,其中轴向跳动误差可以忽略。利用电感测微仪对该项误差进行测试,最大径向跳动小于 35 nm,即:

$$\sigma_1 = 0.035 \mu\text{m}. \quad (11)$$

4.1.2 光斑捕捉动态误差

CCD 通过一定曝光时间对图像信息进行捕捉探测,对于静止的测量目标成像,不需要考虑曝光时间内物体位移引起的成像误差。但中心偏测量时需要旋转被测镜,使成像光斑在像面上

做画圆运动,这不可避免对光斑重心计算引入动态误差。透镜中心偏测量过程中,曝光时间 t 和转台旋转速度 ω 决定光斑形状,实际测试过程中曝光时间 $t = 1 \text{ ms}$,转台回转速度 $\omega = 4.5 \text{ rad/s}$,由弦心距离公式可得:

$$\sigma_2 = 1 - \cos\left(\frac{\omega t}{2}\right) = 0.008 \mu\text{m}. \quad (12)$$

4.1.3 定焦误差

透镜中心偏测量过程中,需要利用准直物镜将自准直仪的测量光束精确聚焦在被测透镜球心(被测镜共焦点)的同一平面,以减小定焦误差,如图 9 所示。

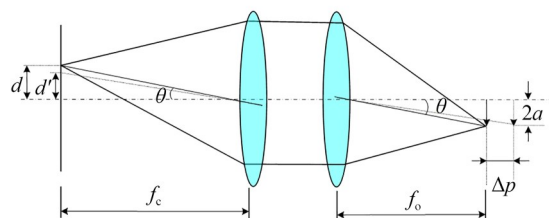


图 9 定焦误差

Fig. 9 Fixed focus error

测量中心偏时,激光差动共焦测量方法的定焦误差 $\sigma_D = 0.146 \mu\text{m}$ 。由于定焦误差的影响,像面上的光斑位置由 d 偏移至 d' 。

$$\begin{cases} \frac{d}{f_c} = \frac{2a}{f_o} \\ \frac{d'}{f_c} = \frac{2a}{f_o + \sigma_D} \end{cases} \quad (13)$$

定焦误差引起的光斑相对测量误差为:

$$\sigma_3 = d' - d = -2a \frac{f_c}{f_o} \cdot \frac{\sigma_D}{f_o + \sigma_D}. \quad (14)$$

4.1.4 被测镜的位姿调整误差

被测镜通过三转卡盘固定在五维自动调整工作台上,被测镜机械外圆轴和工作台回转轴之间必然存在姿态偏差,该姿态偏差对中心偏的测量影响极大。利用圆光栅和电感测微仪实时采集被测镜的径向跳动和角度信息,对被测镜的姿态偏差调整后,可将被测镜的径向偏差调整至 $0.1 \mu\text{m}$ 内,即:

$$\Delta c = 0.1 \mu\text{m}. \quad (15)$$

4.1.5 误差合成

系统设计时,自准直光路中聚焦物镜的焦距

f_c 为 300 mm, 测量物镜的焦距 f_o 为 150 mm; 被测样品的中心偏经中国计量院标定为 $18.870\ \mu\text{m}$ 。综上所述, 激光差动共焦透镜中心偏自动测量系统的测量误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \Delta c^2} = 0.129\ \mu\text{m}. \quad (16)$$

由上述分析可知, 被测镜的位姿误差是最大的误差源, 经过激光差动共焦透镜中心偏测量系统自动调整后, 可将被测镜的位置误差减小至 $0.1\ \mu\text{m}$, 提高了测量精度。

4.2 中心偏测量实验

实验样品采用北京创思工贸定制的直径为 50.8 mm 的双凹透镜, 透镜的中心偏值经中国计量科学标准化研究院标定为 $18.870\ \mu\text{m}$ 。设定重复测量次数 $N=10$, 系统自动进行透镜中心偏重复测量实验。

为验证激光差动共焦透镜中心偏自动测量方法的科学性, 将差动共焦透镜中心偏自动测量系统的 10 次测量结果作为实验组, 将北京全欧光学检测仪器有限公司的 OptiCentric® 系列手动中心偏测量仪对样品中心偏的 10 次测量结果作为对照组, 进行对比实验。

进行中心偏测量实验前, 需要利用标准球和平面反射镜将差动共焦探头(测量光轴)、自动调整平台的回转轴、气浮导轨运动轴校准至严格同轴, 以减小系统误差, 测量结果如表 1 和图 10 所示。由测量结果可知, 基于透镜姿态自动调整的中心偏自动测量方法的测量精度为 0.41%、测

表 1 透镜中心偏重复测量实验结果

Tab. 1 Experimental results of repeated measurements of lens central deviation (μm)

Times	OptiCentric-IR300(MA-NU)	LDCRM-ZXP(MANU)	LDCRM ZXP(AUTO)
1	20.17	19.425	19.002
2	19.34	19.208	19.070
3	19.08	19.193	18.976
4	19.02	19.157	18.777
5	18.15	19.167	18.986
6	19.53	19.388	18.934
7	19.43	19.240	18.787
8	19.91	19.390	18.958
9	19.75	19.336	19.052
10	19.71	19.235	18.920
Avg	19.41	19.274	18.946
Sd	0.54	0.096	0.093
Accuracy	2.8%	2.1%	0.41%

注: OptiCentric®-IR300 为全欧手动中心偏测量仪, LDCRM-ZXP 为激光差动共焦透镜中心偏测量系统; MANU 代表手动测量模式, AUTO 代表自动测量模式

量标准差为 $0.093\ \mu\text{m}$, 远高于传统的手动调整透镜姿态的中心偏测量方法。

5 结 论

本文提出了一种透镜中心偏自动测量方法。通过分析透镜中心偏测量过程中位姿误差产生的原因, 设计了透镜姿态自动调整系统, 确保透镜机械外圆轴与测量光轴高度同轴, 有效解决了旋转式中心偏测量法中偏心误差对测量结果的影响, 调整精度可达 $0.1\ \mu\text{m}$; 同时, 利用高精度气浮转轴驱动镜片旋转, 有效避免了测试过程中镜片的跳动, 提高重复测量精度。实验结果表明: 透镜中心偏的测量精度为 0.41%, 为高精度透镜中心偏自动测量提供了一种可行方案。

本文提出的测量方法依赖被测镜的机械外圆实现对被测镜的姿态调整, 并将机械外圆轴作为测量基准, 因此只适用于机械外圆圆度较高的样品, 对于非球面以及其他形状样品, 可将系统改进为双光路系统, 测量样品相对于测量光轴的中心偏。

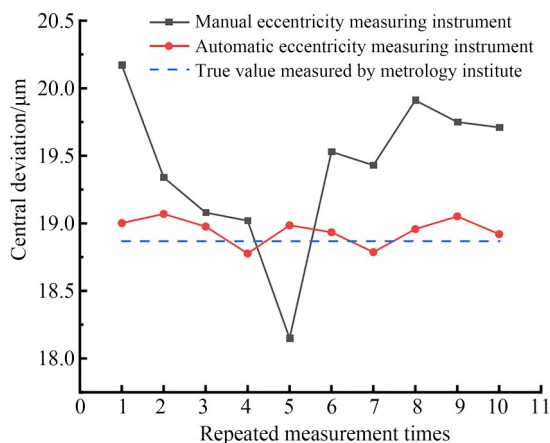


图 10 中心偏重复测量结果对比

Fig. 10 Comparison of repeated measurements of central deviation

参考文献:

- [1] GIL-SANTOS E, BAKER C, LEMAÎTRE A, *et al.* Scalable high-precision tuning of photonic resonators by resonant cavity-enhanced photoelectrochemical etching [J]. *Nature Communications*, 2017, 8 (1): 14267.
- [2] LIU B, WANG W, QU Y J, *et al.* Design of an adjustable bipod flexure for a large-aperture mirror of a space camera[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(15): 4048-4055.
- [3] PATANE P, NANDGAONKAR M. Review: Multipoint laser ignition system and its applications to IC engines [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106305.
- [4] 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 ZH D, *et al.* Center offset error of aspheric transmission type optical system aberration [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2022, 20(2): 134-139. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 李响. 光学定心装配折反式测量系统研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2019.
LI X. *Research on Refractive Measuring System for Optical Centering Assembly* [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [7] 闫思思, 刘缠牢. 基于激光干涉的透镜中心偏测量技术研究[C];西部光子学学术会议, 中国陕西西安, F, 2011.
YAN S S, LIU CH L. Research on measurement technology of lens center deviation based on laser interference [C]. *Western Photo Science Conference. Xi'an, Shanxi, China*, F, 2011. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 庄雨晴, 章广威, 赵维谦, 等. 五位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 Q, ZHANG G W, ZHAO W Q, *et al.* Differential confocal radius of curvature measurement method for five-dimensional position monitoring[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31 (7): 975-981. (in Chinese)
- [10] 张泉. 红外光学系统中心偏装调的研究[C]. 中国光学学会 2011 年学术大会, 中国广东深圳, F, 2011.
ZHANG Q. Research on center offset adjustment of infrared optical system [C]. *Academic Conference of Chinese Optical Society in 2011, Shenzhen, Guangdong, China*, F, 2011. (in Chinese)
- [11] 刘伟. 全自动测量轴圆度的 V 形法测量系统研究[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(5): 478-481.
LIU W. Automatic measurement system for axis roundness [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(5): 478-481. (in Chinese)
- [12] 张强. 光学镜头偏心误差的自动化测量技术研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
ZHANG Q. *Research on Automatic Measurement Technology of Optical Lens Eccentricity Error* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018. (in Chinese)
- [13] CARNEIRO DE ALBUQUERQUE B F, LUIS DE SOUSA F, MONTES A S. Multi-objective approach for the automatic design of optical systems [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6619-6643.
- [14] GUO D B, YIN L, YUAN G. New automatic optical design method based on combination of particle swarm optimization and least squares [J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 17027-17040.
- [15] 郭浩, 肖阳, 董松, 等. 激光共焦球面元件姿态自动调整系统[J]. *应用光学*, 2019, 40 (1) : 132-137.
GUO H, XIAO Y, DONG S, *et al.* Laser confocal automatic adjustment system for attitude of spherical component [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1):132-137. (in Chinese)
- [16] 曾付山. 透镜组中心偏自动化测量的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
ZENG F SH. *Research on Automatic Measurement of Lens Group Eccentricity* [D]. Wuhan:

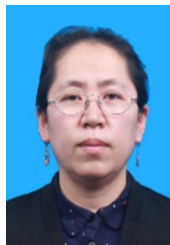
- Huazhong University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [17] ZINCHENKO S, MOISEIENKO V, TOVSTOKORYI O, *et al.* *Automatic Beam Aiming of the Laser Optical Reference System at the Center of Reflector to Improve the Accuracy and Reliability of Dynamic Positioning*[M]. *Advances in Computer Science for Engineering and Education IV*. Cham: Springer International Publishing, 2021: 3-14.
- [18] 章广威, 崔健, 邱丽荣, 等. 激光差动共焦透镜中心偏测量系统设计与实现[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(2): 24-31.
- ZHANG G W, CUI J, QIU L R, *et al.* Design and implementation of laser differential confocal centering error of the lenses measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(2): 24-31. (in Chinese)
- [19] 赵维谦, 王龙肖, 邱丽荣, 等. 激光聚变靶丸内表面轮廓测量系统的研制[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1013-1023.
- ZHAO W Q, WANG L X, QIU L R, *et al.* Development of inner-surface profile measurementsystem for ICF capsule[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1013-1023. (in Chinese)

作者简介:



王 伟(1999—),男,河北邢台人,硕士研究生,2017年于燕山大学获得学士学位,主要从事光学精密测量方面的研究。E-mail: 15612989290@163.com

通讯作者:



邱丽荣(1974—),女,黑龙江人,教授,1997年于西安交通大学获得学士学位,2005年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事精密光电测试技术与仪器等领域的研究。E-mail: qiu-grass@126.com