

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210539

激光差动共焦透镜中心偏测量系统设计与实现*

章广威, 崔健, 邱丽荣, 王允, 赵维谦

(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:针对国内外透镜中心偏高精度测量的迫切需求,研制了一套激光差动共焦透镜中心偏测量系统。该系统从中心偏非接触测量的核心定焦原理入手,结合激光差动共焦定焦技术,解决了清晰度法定焦精度差的难题。在光学测量系统误差分析的基础上,对系统再次优化设计,并利用差动共焦轴向光强响应曲线过零点的位置与被测镜猫眼和共焦点精确对应这一特性,实现了透镜中心偏的高精度测量。通过实验表明,该系统测量精度为0.49%,与传统的清晰度法定焦测量相比,透镜中心偏的测量精度有效提高了6倍。该系统将差动共焦定焦技术有效的应用于透镜中心偏测量中,提高了被测镜猫眼和共焦位置的定焦能力,实现了高精度测量系统的设计,在光学测试和透镜加工及装配领域具有广阔的应用前景。

关键词:差动共焦;透镜中心偏;定焦技术;高精度

中图分类号: TH741 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design and implementation of laser differential confocal centering error of the lenses measurement system

Zhang Guangwei, Cui Jian, Qiu Lirong, Wang Yun, Zhao Weiqian

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

Abstract: To meet the urgent needs of high-precision measurement of centering error at home and abroad, a laser differential confocal centering error of the lenses measurement system is developed. The system starts from the core fixed focus principle of center-offset non-contact measurement, and combines the laser differential confocal fixed focus technology to solve the problem of poor resolution of the legal focus accuracy. On the basis of the error analysis of the optical measurement system, the system is optimized again and the position precisely corresponds to the cat's eye and the confocal point of the lens under test, which realizes the high-precision measurement of the centering error of lenses. Compared with the traditional sharpness legal focus measurement, experiments show that the measurement accuracy of the system is 0.49%, and the measurement accuracy of the centering error of lens is effectively improved by 6 times. The system effectively applies the differential confocal fixed focus technology to the centering error of lenses measurement, improves the fixation ability of the catenary and confocal position of the measured mirror, and realizes the design of a high precision measurement system, which has a broad application prospect in the field of optical testing and lens processing and assembly.

Keywords: differential confocal; centering error of lenses; fixed focus technology; high-precision

0 引言

随着光学系统在航天、航空和精密测量领域的应用越来越多,对光学透镜的精度要求也越来越高^[1-2]。然而透镜在生产加工、胶合磨边的过程中,存在一定的

质量缺陷,破坏光学共轴条件,产生了中心偏,它不仅破坏了理想光学的理论基础,造成光学系统成像质量的下降,而且在一定程度上影响了透镜测量设备对其他光学参数的测量,是光学透镜的一个重大误差。因此,透镜中心偏的测量和校准,对于提高光学系统的性能非常重要。

收稿日期: 2022-10-09 Received Date: 2022-10-09

* 基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0701203)、基础加强计划技术领域基金项目(2019-JCJQ-JJ-280)资助

目前,透镜中心偏测量技术可分为接触式和非接触式两种。与接触式测量相比,非接触式光学测量具有精度高、元件无划伤等优点^[3],广泛应用于国内外透镜中心偏测量仪,其种类较多,如:自准直成像清晰度法定焦测量、激光反射式定心测量、干涉偏心测量等^[4-6]。

德国 Opticentric[®] 中心偏测量仪采用自准直成像清晰度法定焦原理,系统操作简单,但是曲率半径重复测量精度低,而且共焦位置的识别主要利用清晰度法定焦技术,测量误差较大,制约了中心偏测量的精度^[7-8];美国光学对准技术股份有限公司 (Opto-Alignment Technology Incorporated, OATI) 生产的 LAS 系列中心偏差测量仪采用激光反射式定心原理,解决了 Opticentric[®] 中心偏测量仪曲率半径重复测量精度相对较低且共焦位置识别误差较大的问题,自身共焦位置的定焦精度提升到 5 μm ,但系统整体测量精度依旧较低,难以实现中心偏的高精度测量,而且当测试镜头的球面中心像分布范围较小时,在测量过程中会出现大量的杂散光,影响系统的测量精度^[9]。

综上所述,主流的中心偏测量仪器普遍存在测量透镜中心偏所需的曲率半径和球心差参数时,对于猫眼和共焦位置识别的准确度不高,致使系统的定焦能力差的问题,导致了透镜中心偏测量精度较低。因此,研发一种基于高精度定焦技术的透镜中心偏测量系统具有重要的意义^[10-11]。

本文利用差动共焦轴向响应曲线的过零点位置对被测镜的猫眼和共焦点进行高精度定位,并结合本实验室课题组提出的差动共焦定焦技术^[12-13],设计并构建了激光差动共焦透镜中心偏测量系统,解决了自准直成像清晰度法定焦和激光反射式定心测量过程中定焦精度差的问题,极大提高了猫眼和共焦位置的定焦能力,实现了透镜中心偏的高精度测量,有效降低环境的噪声,提高系统的抗干扰能力,为测试装配和机械加工过程中的偏心测量提供有效的途径。

1 透镜中心偏测量原理

透镜中心偏是通过测量曲率半径和球心差参数依据公式求解得出,两者主要测量步骤为:1) 测量曲率半径时,光学传感器出射测量光束,它主要定焦在被测镜的猫眼和共焦位置,两者之间的距离即为曲率半径值;2) 测量球心差时,测量光束移动到被测镜的共焦位置,被测镜旋转一周后,光斑轨迹拟合得到球心差。因此,中心偏参数测量的精度主要受限于被测镜猫眼和共焦位置定焦的准确性。目前常用的定焦方法有清晰度法定焦技术和差动共焦定焦技术。

1.1 清晰度法定焦技术测量中心偏

采用清晰度法定焦测量中心偏最具有代表性的是 Trioptics 公司研制得 Opticentric[®] 中心偏测量仪,其工作原理如图 1 所示。自准直仪沿测量光轴方向移动,当出射光束会聚点与被测件球心和表面重合时,人眼恰好可以从电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)像面中观察到十字分划板的清晰共轭像,以此方法实现对被测件的猫眼位置 L_A 与共焦位置 L_B 进行清晰度法定焦,从而实现了被测件表面和球心位置的定位。测量曲率半径时,通过步进电机运动脉冲数实时显示 $L_A L_B$ 测量两点之间的距离,即被测件的曲率半径值 R_{AB} ; 测量中心偏时,测量光束位于被测镜的共焦位置,当其随转台旋转时,成像在探测器上的轨迹为圆,其直径与被测镜的中心偏成正比^[14]。

$$c = \arcsin \frac{D}{4\beta R_{AB}} \quad (1)$$

其中, c 表示被测镜的中心偏, D 表示像面轨迹圆的直径, β 表示自准直仪放大系统的放大倍率。

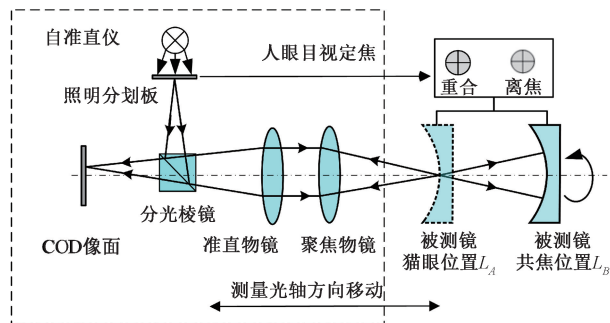


图1 清晰度法定焦测量光路图

Fig. 1 Optical path diagram for focal measurement of the sharpness method

由上述测量过程可得:中心偏测量结果中主要的误差源是测量时清晰度法的定焦误差 $\Delta\theta_1$ 。通常情况下,人眼目视的定焦误差极限在几十微米左右,随着计算机图像处理技术的发展,产生了图像处理模板、快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)频域分析、信息熵、小波分解等多种算法^[15],以图像处理为基础的自动化调焦技术使定焦精度进一步提升,十字线图像处理误差 δ_c 为 3 个像元,CCD 一个像元对应 4 μm ^[16],定焦误差为:

$$\Delta\theta_1 = \delta_c \times 4 = 12 \mu\text{m} \quad (2)$$

因此,清晰度法定焦测量虽然在一定程度上提高了定焦精度,但系统测量精度依旧受限于图像处理的误差和像元尺寸,测量过程中所需要的位置信息依靠步进电机脉冲记录,以旋转轴的位置信息来实现被测镜的轴向定焦,测量过程中如果控制不当,会出现脉冲同步丢失的情况,系统测量误差较大,难以实现透镜中心偏的高精度测量。

1.2 差动共焦定焦技术测量中心偏

差动共焦透镜中心偏测量方法通过一次夹持被测镜来实现透镜曲率半径和球心差的测量,进而计算得到透镜的高精度中心偏值。主要光路原理如图2所示,激光器发出光束通过显微物镜会聚后,经准直物镜准直后由聚焦物镜会聚形成测量光束,它由被测镜反射后被分光棱镜1分成两路。

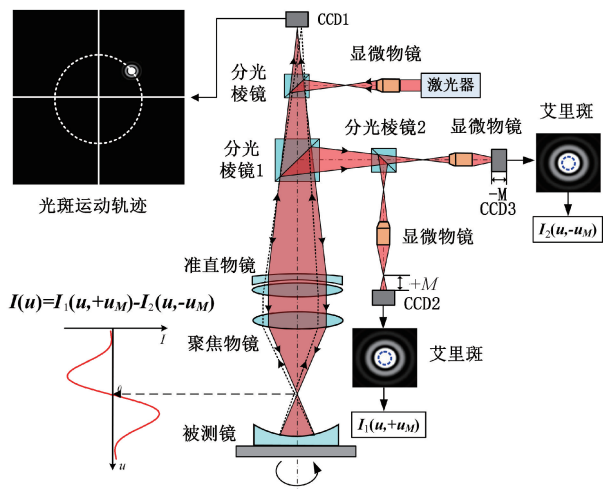


图2 测量原理

Fig. 2 The measurement principle

一路是光束通过分光棱镜1折射并被显微物镜放大后形成差动共焦探测区域,该区域由分光棱镜2和两个探测器组成,CCD2和CCD3探测器位于光束焦点附近,离焦量分别为 M 和 $-M$ 。两探测器作用是记录反射光斑的光强,利用反射光在探测器中光强信号的强弱变化来反映被测点与焦平面的相对位置,其测量曲线用于轴向定焦测量,通过归一化处理抑制样品表面反射率差异影响,提高光路轴向分辨率,进而实现对镜头的高精度定焦测量。 u 为轴向位移 z 的归一化坐标, u_M 为探测器离焦量 M 的归一化坐标,两路强度信号 $I_1(u, +u_M)$ 和 $I_2(u, -u_M)$ 相减得到差动共焦强度信号 $I(u)$ ^[17]。

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

式中:

$$\begin{cases} u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D^2}{f_0^2} \right) z \\ u_M = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D^2}{f_c^2} \right) M \end{cases} \quad (4)$$

式中: λ 为激光器光源的波长; 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_1 的最小值。

另外一路光束直接通过分光棱镜1透射回去,由自准直CCD1直接接收,该探测器作用是通过测量自准直光路中CCD1的图像获得光斑运动轨迹,拟合得到球心差用于计算被测镜的中心偏。

测量过程利用差动共焦轴向光强曲线的零点精确识别被测镜的猫眼位置和共焦位置,直线光栅以纳米精度实时记录两者位置,分别为 L_1 和 L_2 ,曲率半径 R 为:

$$R = L_1 - L_2 \quad (5)$$

精密气浮回转系统带动被测镜旋转一周,系统采集反射光斑轨迹,在CCD1靶面上形成半径为 r 的拟合圆,实际被测镜的球心差是经过聚焦物镜放大后的球心偏差为 a ,放大倍率为 β ,公式为:

$$a = r/2\beta \quad (6)$$

根据测得的球心差 a 和曲率半径 R ,得到被测镜的中心偏 X 为:

$$X = \arcsin(a/R) = \arcsin[r/(2\beta R)] \quad (7)$$

相对于清晰度法定焦测量中心偏,差动共焦技术是结合纳米直线光栅精确记录位置信息,实现曲率半径和球心差测量时猫眼位置和共焦位置的高精度定焦,有利于提高中心偏的测量精度,解决了光学参数测量领域中高精度定焦的共性难题,因此本系统的设计是基于该理论构建的。

2 透镜中心偏测量系统设计

2.1 系统总体框图设计

根据差动共焦定焦技术测量中心偏原理,构建的系统总体框图如图3所示,它主要包括激光差动共焦自准直测头、气浮回转系统、直线升降系统和集成测控系统。

每部分功能如下:1)激光差动共焦自准直测头包括光源模块、分光模块、差动探测模块、成像模块,它实现了对被测镜中心偏测量和精确定焦;2)气浮回转系统和直线升降系统都是以气浮结构为核心,具有高精度、无摩擦的特性,两者以直线导轨和气浮转轴为基础,分别配合点接触误差解耦球头和自动调整平台实现高精度升降驱动和被测镜的高精度回转扫描;3)集成测控系统控制差动共焦自准直测头的轴向移动和自动调整平台的旋转运动,实时接收直线光栅反馈的位置信息及CCD采集的图像,从而完成高精度透镜中心偏的测量,为进一步提高系统测量精度,以系统误差理论为基础,再次对系统结构进行优化。

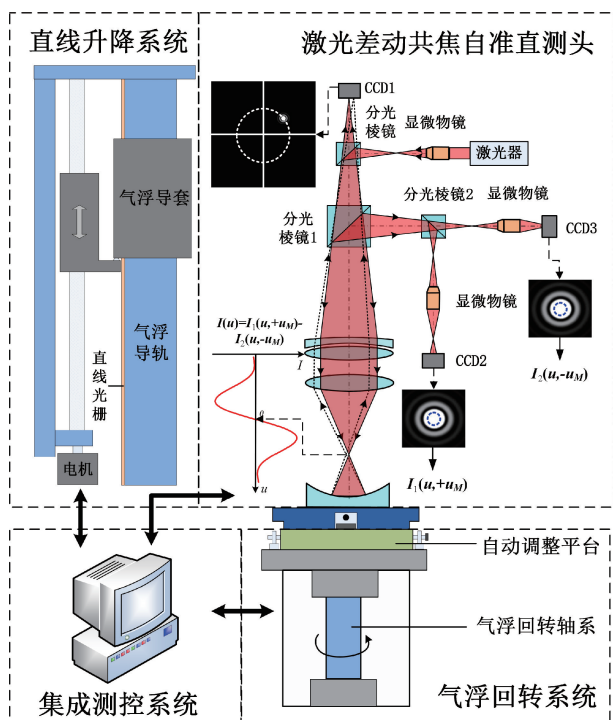


图3 测量系统总体框图

Fig. 3 Overall diagram of the measurement system

2.2 系统误差分析

影响透镜中心偏测量精度的因素主要有:1)测量系统的轴向定焦误差,包括直线光栅的测长误差 σ_1 、气浮导轨直线度误差 σ_2 、定焦误差 σ_3 ;2)中心偏的径向测量误差,包括气浮转轴的径向跳动误差 σ_4 、被测镜光轴与气浮转轴中心不重合引起的同轴度误差 σ_5 ^[18]。

1) 直线光栅的测长误差 σ_1

测量系统采用 Renishaw TONIC 系列直线光栅记录被测镜轴向位置,采集被测镜的猫眼位置和共焦位置信息,进而确定曲率半径 R ,其测长精度为 0.5×10^{-5} ,该误差服从正态分布^[19],则测长误差满足:

$$\sigma_1 = R \times 0.5 \times 10^{-5} / 2 \quad (8)$$

2) 气浮导轨直线度误差 σ_2

测量系统采用的自行研制的高精度气浮导轨,利用余气回收原理减少气浮气流对测量环境干扰。在导轨的装配中,精磨保证了导轨的直线度,在有效行程1000 mm范围内直线度优于 $1 \mu\text{m}$ ^[20],则气浮导轨直线度引起的误差满足:

$$\sigma_2 = R \times 1 \mu\text{m} / 1000 \quad (9)$$

3) 定焦误差 σ_3

当测量光束探测猫眼位置和共焦位置时存在定焦误差,CCD探测的反射光斑不能收束到最小。该误差主要受轴向响应曲线过零点处斜率和CCD探测器的信噪比影响。由式(3)得归一化离焦量为 $U_M = 5.21$ 时,差动共

焦曲线过零点处有最大斜率 $S_{\text{MAX}} = -0.54$ ^[21],则定焦误差满足:

$$\sigma_D = \frac{\lambda}{2\pi \cdot NA^2} \cdot \frac{1}{SNR \cdot S_{\text{MAX}}} = \frac{1.18\lambda}{SNR \cdot (D/f')^2} \quad (10)$$

式中: SNR 为CCD探测器的信噪比, λ 为激光器波长, D/f' 为聚焦物镜的相对孔径。

当系统设计的聚焦物镜的相对孔径 $D/f' = 0.16$ 、 $NA = 0.08$ 、CCD探测器的信噪比 $SNR = 200:1$,差动共焦定焦误差 $\sigma_D = 0.146 \mu\text{m}$ 。差动共焦定焦时引入的偏心测量误差 σ_3 为:

$$\sigma_3 = \sigma_D \times n \times \sin u = \sigma_D \times NA = 0.012 \mu\text{m} \quad (11)$$

由式(2)可得,清晰度法的定焦误差 $\Delta\theta_1$ 为 $12 \mu\text{m}$,定焦性能对偏心测量的影响如图4所示,在相同系统前提下,清晰度法定焦引入的偏心测量误差 σ_c 为:

$$\sigma_c = \Delta\theta_1 \times n \times \sin u = \Delta\theta_1 \times NA = 0.96 \mu\text{m} \quad (12)$$

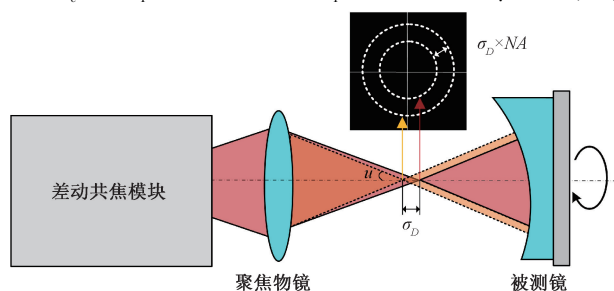


图4 定焦误差对偏心测量的影响

Fig. 4 Influence of the focusing error on the decentration measurement

从两者的偏心测量误差可以得到:差动共焦定焦技术所引入的偏心测量误差较小,具有较高的中心偏的测量精度。

4) 气浮转轴的径向跳动误差 σ_4

实际测量过程中,气浮转轴的轴向跳动只会影响探测器上光斑画圆的位置,对其大小没有影响,但径向跳动会直接累加到透镜中心偏的测量结果中,如图5所示。利用电感传感器对该项误差进行测试,最大径向跳动小于 40 nm ^[22],则该误差满足:

$$\sigma_4 = 0.040 \mu\text{m} \quad (13)$$

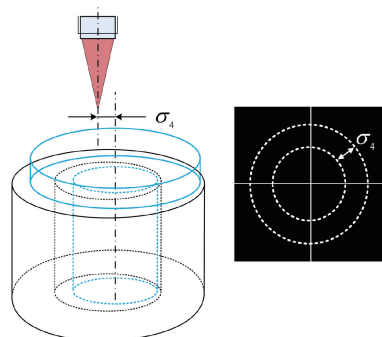


图5 气浮转轴径向跳动的影响

Fig. 5 Influence of radial runout of air-floating shaft

5) 同轴度误差 σ_5

被测镜夹持在自动调整平台上,不可避免存在倾斜和偏心的位姿误差,该误差对中心偏的高精度测量影响较大,如图6所示。为减小被测镜基准轴与系统测量基准的误差,测量前需要用高精度平晶校准测量系统的倾斜度,用标准球来校准测量系统的偏心率,最终反射光斑在 CCD 探测器上的路径为一个像素以内,那么引入的同轴度误差满足:

$$\sigma_5 = \sigma_b / 2\beta_1\beta_2 \quad (14)$$

式中: σ_b 为 CCD 的读数误差,系统的放大倍数 $\beta_1 = 2$,利用像素细分技术来提高中心偏测量分辨能力,像素细分倍数 $\beta_2 = 10$ 。

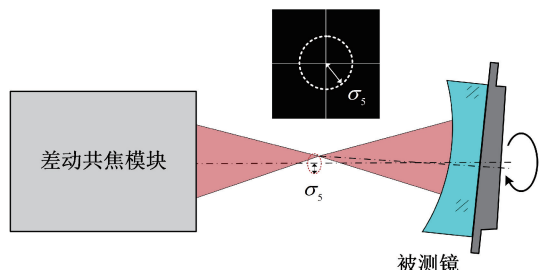


图6 同轴度误差对偏心测量的影响

Fig. 6 Influence of concentricity error on the decentration measurement

6) 误差合成

综合以上几项误差,由于各项误差间无明显关联,当系统理论设计聚焦物镜的相对孔径 $D/f' = 0.16$,被测镜参数 $R = 31.62 \text{ mm}$,CCD 探测器的信噪比 $SNR = 200:1$ 、读数误差 $\sigma_b = 3.2 \text{ }\mu\text{m}$,根据式(8)~(14)得到各项误差为: $\sigma_1 = 0.079 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_2 = 0.032 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_3 = 0.012 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_4 = 0.040 \text{ }\mu\text{m}$, $\sigma_5 = 0.080 \text{ }\mu\text{m}$ 。则本文构建的激光差动共焦透镜中心偏测量系统的系统误差 σ_R 为:

$$\sigma_R = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2}}{R}\right) = \quad (15)$$

$$\arcsin\left(\frac{0.192}{31.62 \times 10^3}\right) = 1.252''$$

由误差分析可得:定焦误差 σ_3 和同轴度误差 σ_5 的大小跟 CCD 的像素有关,设计系统的 CCD 探测器采用海康 MV 系列高端型面阵相机,像素为 $3.2 \text{ }\mu\text{m}$,靶面大小为 2000×2000 ;气浮导轨直线度误差 σ_2 越小,中心偏测量精度越高,所以直线升降系统采用实验室自行研制的高精度气浮导轨,根据现实的加工工艺,在 1000 mm 有效行程范围内导轨的直线度优于 $1 \text{ }\mu\text{m}$;气浮转轴的径向跳动误差 σ_4 会直接叠加在中心偏误差测量中,产生误差概率较大,因此气浮转轴选用空间回转误差自分离精密气浮轴系,径向跳动和轴向跳动都优于 40 nm ;为了减

小外界振动对于系统调试和测量的影响,基台整体采用了隔振设计。

通过光学系统各项误差源的影响机理可得,清晰度法定焦误差为 $0.96 \text{ }\mu\text{m}$,差动共焦定焦误差为 $0.012 \text{ }\mu\text{m}$,不同的定焦方法产生的系统误差差异很大,因此,系统结合差动共焦定焦技术,可以进一步提高轴向定焦精度,实现透镜中心偏高精度测量。

根据以上误差分析和结构设计,研制的激光差动共焦透镜中心偏测量系统如图7所示。

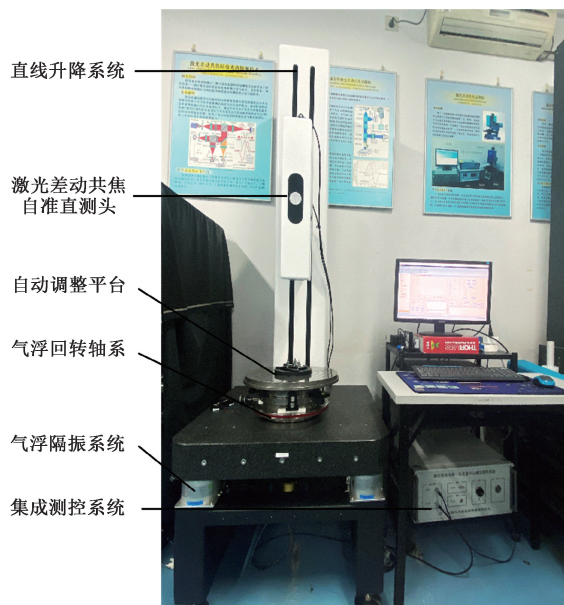


图7 测量系统实物图

Fig. 7 Physical map of the measurement system

3 实验验证

为了验证测量系统的中心偏测量精度,本文采用大恒光电生产的直径为 12 mm 的弯月透镜作为实验对象进行被测镜中心偏测量实验。实验主要包括两个步骤:1) 差动共焦自准直测头沿着气浮导轨直线移动,利用差动共焦定焦技术精确定焦,直线光栅记录相应位置,分别为顶点 L_1 和球心 L_2 ,根据式(5)计算得到曲率半径 R ;2) 当测头的测量光束聚焦在被测镜共焦位置附近时,系统上下扫描并从 CCD2 和 CCD3 中获取归一化处理后的光强响应曲线 $I_1(u, +u_m)$ 和 $I_2(u, -u_m)$,两者相减得到共焦位置的差动共焦光强响应曲线 $I(u)$,如图8所示。系统精确定位到共焦位置后,气浮转轴带动被测镜旋转一周,系统自动采集反射光斑轨迹,数据拟合得到球心差为 a ,如图9所示。对于被测镜的曲率半径和球心差的测量,本系统与采用清晰度法定焦技术的 Opticentric[®] 中心偏测量仪的进行对比实验,结果如表1所示。

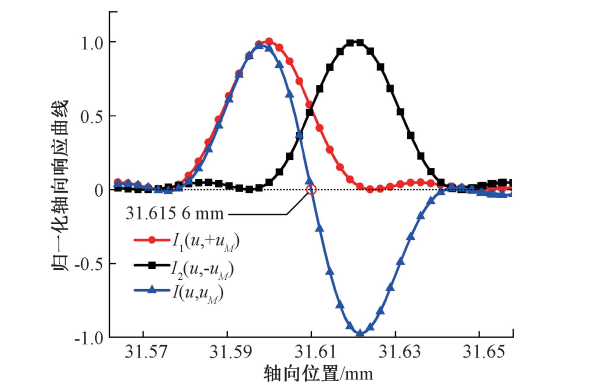


图 8 共焦点位置的光强响应曲线

Fig. 8 Light intensity response curve at the common focus position

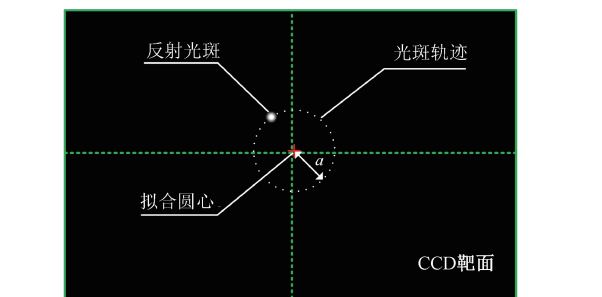


图 9 反射光斑轨迹图

Fig. 9 Reflection spot trajectory diagram

表 1 曲率半径和球心差实验结果对比

Table 1 Comparison of experimental results between radius of curvature and spherical center aberration

测量次数	差动共焦透镜中心偏测量系统		Opticentric [®] 中心偏测量仪	
	曲率半径	球心差	曲率半径	球心差
	/mm	/μm	/mm	/μm
1	-31.616 0	3.46	-31.615 2	3.43
2	-31.615 6	3.43	-31.615 2	3.64
3	-31.615 5	3.44	-31.615 2	3.40
4	-31.615 6	3.44	-31.616 9	3.38
5	-31.615 7	3.43	-31.615 2	3.46
6	-31.615 6	3.46	-31.615 2	3.46
7	-31.615 6	3.47	-31.616 9	3.40
8	-31.615 4	3.43	-31.616 9	3.63
9	-31.615 6	3.42	-31.616 9	3.51
10	-31.615 7	3.43	-31.616 9	3.63
平均值	-31.615 6	3.44	-31.616 1	3.49
标准差	0.000 16	0.02	0.0009 0	0.10

实验得出,该系统下弯月透镜的曲率半径测量平均值为-31.615 6 mm,标准差为 0.16 μm,球心差测量的平均值为 3.44 μm,标准差为 0.02 μm;清晰度法定焦技术测量曲率半径平均值-31.616 1 mm,标准差 0.90 μm,球心差测量的平均值为 3.49 μm,标准差为 0.10 μm。实验结果对比发现,利用差动共焦曲线过零点处斜率大,灵敏度高的特点,可以精准的定位被测镜的猫眼和共焦位置,测量中心偏所需参数曲率半径和球心差的重复测量精度提高了 5 倍左右,有效抑制了环境噪声,具有极高的抗干扰能力,大大提高了透镜中心偏的测量精度。

根据表 1 中的曲率半径和球心差依据式(7)计算得到透镜中心偏值,如表 2 和图 10 所示。

表 2 中心偏测量实验结果对比

Table 2 Comparison of experimental results of centering error

测量次数	差动共焦透镜中心偏测量系统	Opticentric [®] 中心偏测量仪
1	22.57"	22.38"
2	22.38"	23.75"
3	22.44"	22.18"
4	22.44"	22.05"
5	22.38"	22.57"
6	22.57"	22.57"
7	22.64"	22.18"
8	22.38"	23.68"
9	22.31"	22.90"
10	22.38"	23.68"
平均值	22.45"	22.80"
标准差	0.11"	0.67"
相对标准差	0.49%	2.94%

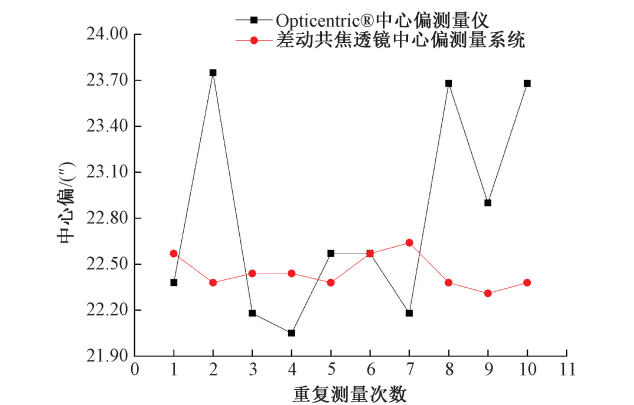


图 10 实验结果的重复性对比

Fig. 10 Repeatability comparison of experimental results

取该系统重复测量 10 次结果的平均值作为最终值与 Opticentric[®] 中心偏测量仪测量结果做对比, Opticentric[®] 中心偏测量仪的相对标准差为 2.94%, 该系统的相对标准差为 0.49%, 测量结果曲线波动较小, 测量精度有效提高了 6 倍, 实现了透镜中心偏高精度的测量。

4 结 论

本文基于差动共焦定焦技术, 设计并构建了激光差动共焦透镜中心偏测量系统, 通过分析光学系统各项误差源的影响机理, 对系统进一步优化设计, 实现了透镜中心偏的高精度测量。该系统的主要创新为: 1) 将差动共焦轴向光强响应曲线过零点位置与被测镜猫眼和共焦位置精确对应的特性应用于透镜中心偏测量系统中, 减小了被测镜的球心定焦误差, 同时提高了测量中心偏所需参数曲率半径和球心差的准确性, 实现了球面透镜中心偏的高精度测量; 2) 结合光学系统各项误差影响机理, 对系统进行优化设计, 进一步提升了透镜中心偏的重复测量精度。实验结果表明, 该系统测量中心偏的标准差为 0.11", 其测量精度相对于清晰度法定焦测量, 提高了 6 倍, 可达 0.49%, 该成果对高精度球面光学元件制造具有重要的参考价值。

由于非球面透镜的非球面对称轴的不确定性, 本系统只适用于球面透镜中心偏的高精度测量, 针对非球面透镜中心偏的测试需求, 在本文中心偏测量方法基础上引入空间位置传感器, 拟合非球面对称轴的空间位置, 实现非球面透镜中心偏的高精度测量。

参考文献

- [1] FENG X, MA Y, GAO L. Compact light field photography towards versatile three-dimensional vision[J]. Nature Communications, 2022, 13(1): 1-10.
- [2] LANGEHANENBERG P, HEINISCH J, BUB C, et al. High precision mounted lens production [J]. Optics Manufacturing, 2014, 5(2): 35-39.
- [3] TAO T, CHEN Q, FENG S, et al. High-precision real-time 3D shape measurement using a bi-frequency scheme and multi-view system [J]. Applied Optics, 2017, 56(13): 3646.
- [4] TORRE J, BORNEMANN B, RIZA N A. Smart optical shape sensor using electronically controlled lens and laser line illumination scanning [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(4): 1005-1012.
- [5] 艾华, 戴岑. 圆光栅衍射光干涉偏心测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 128-132.

- AI H, DAI C. Measuring method for eccentricity of circular grating diffraction light interference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 128-132.
- [6] LANGEHANENBERG P, HEINISCH J, STICKLER D. Smart and precise alignment of optical systems [C]. Optifab 2013, SPIE, 2013, 884: 571-578.
- [7] LANGEHANENBERG P, DUMITRESCU E, HEINISCH J, et al. Automated measurement of centering errors and relative surface distances for the optimized assembly of micro-optics[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 7926(1): 225-229.
- [8] 汪旋. 基于图像处理的航空相机自准直检测调焦技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2014.
- WANG X. Research on self-collimation, detection and focusing technology of aerial cameras based on image processing [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronics Technology), 2014.
- [9] NIU W, MA T, YANG J. Optical system design of high resolution centering instrument based on switchable lenses[C]. AOPC 2019: Optical Spectroscopy and Imaging, International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [10] XIN M A, ZC A, LC A, et al. Effects of fabrication deviations and fiber misalignments on a fork-shape edge coupler based on subwavelength gratings-science direct[J]. Optics Communications, 2020, 482: 126562.
- [11] WANG X, TANG S, ZHAO W, et al. Laser confocal auto-collimation decentration measurement for spherical lens[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(10): 105002.
- [12] 孙若端, 邱丽荣, 杨佳苗, 等. 激光差动共焦曲率半径测量系统的研制 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(12): 2833-2838.
- SUN R D, QIU L R, YANG J M, et al. Development of a laser differential confocal radius of curvature measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(12): 2833-2838.
- [13] 黄婧雯, 马仙仙, 刘子豪, 等. 激光聚变靶丸球面经纬迹线优化球度测量方法 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 127-135.
- HUANG J W, MA X X, LIU Z H, et al. Optimized sphericity measurement method of laser fusion target

- spherical longitude and latitude trace [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1):127-135.
- [14] 李春才, 巩岩. 采用联合变换相关的透镜中心偏差测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10):2785-2793.
LI CH C, GONG Y. Measurement of lens center deviation using joint transformation correlation [J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23 (10): 2785-2793.
- [15] 曾付山, 陈海清, 任温馨. 透镜组中心偏自动测量[J]. 光学仪器, 2007, 29(2):12-16.
ZENG F SH, CHEN H Q, REN W X. Automatic measurement of the center polarization of the lens group[J]. Optical Instruments, 2007, 29(2):12-16.
- [16] 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]. 北京: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 auxiliary adjustment equipment based on mirror interval and center deviation measurement[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014.
- [17] WANG X, QIU L, ZHAO W, et al. Error analysis for a laser differential confocal radius measurement system[J]. Applied Optics, 2015, 54(5):1078-1084.
- [18] 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. High-precision confocal self-collimation center deviation measurement device[J]. Optical Technology, 2018, 44(6):681-685.
- [19] TANG S, LI Y, QIU L, et al. High-precision laser transverse differential confocal radius measurement method[J]. Optics Express, 2021, 29(19):29960-29971.
- [20] 李彦宏, 杨帅, 唐顺, 等. 后置分光瞳激光差动共焦曲率半径测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29(10):2287-2295.
LI Y H, YANG SH, TANG SH, et al. Laser differential confocal curvature radius measurement with post-splitter pupil [J]. Optical Precision Engineering, 2021, 29(10):2287-2295.
- [21] 卜乙禄, 李琦, 李彦宏, 等. 激光差动共焦反射式超大曲率半径测量系统研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32(5):1-8.
BU Y L, LI Q, LI Y H, et al. Development of laser differential confocal reflection measuring system for super large radius of curvature [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 32 (5):1-8.
- [22] TIAN Y, YUN W, WANG L, et al. The centering and leveling adjustment and control technology for the ultraprecision turntable[C]. International Conference on Optical Instruments and Technology, 2015, DOI: 10.1117/12.2197530.

作者简介



章广威, 2020 年于河北工程大学获得学士学位, 现为北京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为精密光电测试技术与系统。

E-mail: 13161258086@163.com

Zhang Guangwei received his B. Sc. degree from Hebei University of Engineering in 2020. He is currently a master student at Beijing Institute of Technology. His main research interest is precision photoelectric testing technology and system.



赵维谦(通信作者), 分别在 1993 年和 2003 年于哈尔滨工业大学获得硕士学位和博士学位, 现为北京理工大学教授, 主要研究方向为差动共焦理论和精密光学检测。

E-mail: zwq669@126.com

Zhao Weiqian (Corresponding author) received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 1993 and 2003, respectively. He is currently a professor at Beijing Institute of Technology. His main research interests include differential confocal theory and precise optical test technique.