

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311599

基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法*

杜卓, 王伟, 王允, 崔健, 赵维谦

(北京理工大学“复杂环境智能感测技术”工信部重点实验室 北京 100081)

摘要:针对测量球面透镜焦距过程中存在偏心误差导致测量光轴与透镜实际轴线不重合的问题,提出了一种基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法,通过驱动工作台旋转测得透镜偏心误差的大小及方向,实现了对被测透镜的误差采集;通过分析误差大小及方向驱动姿态调整电机,消除了测量过程中由于存在偏心误差对焦距测量精度产生的影响;通过构建系统,优化系统参数,实现了激光差动共焦焦距高精度测量;最终实现基于偏心抑制的焦距高精度测量,解决了焦距测量时测量光轴与透镜实际轴线不重合从而对测量结果产生影响的问题。基于该系统进行了焦距测量实验,实验表明:测量焦距为100 mm透镜时,该方法相对重复测量精度(RMS)可达到0.000 503%。该方法显著提高了焦距测量的精度及重复测量精度,为焦距的精密测量提供了一种有效的途径。同时,该方法可应用到镜组加工与装配中,提高镜组的成像质量与测量精度。

关键词: 焦距;激光差动共焦;中心偏;姿态调整;高精度

中图分类号: TH741 TN249 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High-precision measurement method of laser differential confocal length based on eccentricity suppression

Du Zhuo, Wang Wei, Wang Yun, Cui Jian, Zhao Weiqian

(MIIT Key Laboratory of Complex-Field Intelligent Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Considering that the eccentricity error in the process of measuring the focal length of spherical lens results in the uncoincident measured optical axis relative to the actual axis of lens, a high-precision measurement method of laser differential confocal length based on eccentric suppression is proposed, where the size and direction of the lens' center deviation are measured by rotating the table to realize the error acquisition of measured lens. By analyzing the error value and direction driving attitude adjustment motor, the influence of eccentricity error on the accuracy of focal length measurement is eliminated during the measurement process. By constructing the system and optimizing the system parameters, the high-precision measurement of laser differential confocal length is realized. Finally, the high-precision measurement of focal length based on eccentricity suppression is realized, which solves the problem that the measurement results are affected by the uncoincident measured optical axis relative to the actual axis of the lens during focal length measurement. Based on this system, the focal length measurement experiment results show that the relative repeatability measurement accuracy (RMS) can reach 0.000 503% when the focal length is measured with a 100 mm lens. This method significantly improves the accuracy of focal length measurement and repeated measurement accuracy, which provides an effective way for precision measurement of focal length. At the same time, this method can be utilized for the processing and assembly of the lens group to improve the imaging quality and measurement accuracy of the lens group.

Keywords: focal length; laser differential confocal; central bias; position adjustment; high precision

0 引言

球面光学元件被广泛应用于激光核聚变^[1]、光刻

机^[2]和摄影成像系统^[3]等诸多领域中。而焦距作为球面光学元件的核心参数,其精度会直接影响到整个光学系统的成像质量^[4],因此对焦距进行高精度的测量成为保障光学系统性能的迫切需求。

收稿日期:2023-06-27 Received Date: 2023-06-27

* 基金项目:民用航天技术预先研究项目(D020402)、中央高校基本科研业务费专项资金(2023CX01006)项目资助

目前常见的焦距测量方法主要有4类,分别为基于几何光学成像原理方法^[5-8]、基于泰伯效应和莫尔条纹技术方法^[9-11]、基于干涉技术方法^[12-16]和基于光学定焦方法^[17]。基于几何光学成像原理方法可满足普通条件下测量需求,但测量精度偏低,而且测量精度难以得到进一步提升。相比之下,基于泰伯效应和莫尔条纹技术方法具有测量精度高、测量范围大、测量效率高等优点,但其无法测量被测镜曲率半径,不能实现透镜有效焦距与后顶焦距的精确换算。基于干涉技术方法根据参考镜焦距和被测镜与参考镜轴向间隔来测得待测焦距,提高了测量精度且能实现各段焦距测量,但由于干涉条纹对空气扰动、温度变化、地面抖动等环境因素非常敏感,导致测量过程中干涉条纹偏移明显,限制了此方法在复杂环境中的应用。基于光学定焦方法是指找到光学系统焦点的过程,该方法克服了以上问题,主要包括清晰度法、干涉法和差动共焦法。其中清晰度法的相对测量精度受衍射极限影响约为 5×10^{-4} ^[18];干涉法利用干涉条纹的相位信息解算出被测表面形貌结构,相对测量精度约为 3×10^{-5} ^[19];差动共焦法利用光强差动共焦曲线对被测透镜猫眼点以及焦距点进行定焦测量,定焦精度达到 $0.2 \mu\text{m}$ ^[20],相对测量精度在 10^{-6} 量级,为焦距测量提供了有效途径。但在实际测量中,由于加工时每片透镜加工条件不同,导致每片透镜存在不同方向和大小的中心偏,且测量时装卡透镜存在位姿误差,这些误差的存在影响了透镜焦距测量的准确性,而上述方法不能消除此误差带来的影响。减少偏心误差对透镜焦距的影响,是提高透镜焦距测量精度的关键。

本文提出了基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法。通过分析不同中心偏对焦距的影响,得出该系统的误差模型。驱动气浮回转工作台转动测得透镜的偏心误差,根据测得的偏心误差大小及方向驱动调整机构对透镜进行姿态调整从而消除偏心误差对透镜焦距测量的影响。与传统测量方法相比,本方法由于消除了透镜的偏心误差,极大提高了焦距测量的精度及重复测量精度。

1 测量原理

通过分析传统差动共焦测量方法中偏心误差对焦距测量产生的影响,提出一种基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法,此测量方法能够有效减小由偏心误差导致的测量光轴与被测镜光轴不重合对焦距测量产生的影响,从而提高测量的精度及重复测量精度。

1.1 激光差动共焦焦距测量原理

激光器出射激光经激光聚焦物镜形成发散光束,光束经针孔滤波后折转通过准直物镜形成平行光。外接不

同焦距聚焦物镜后形成最终测量光锥。当测量光锥顶点分别打在被测透镜上表面猫眼点和焦距点时,光锥能原路反射形成测量光路。测量光锥经分光棱镜折转由电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)接收,其中一条由大视场粗瞄 CCD₁接收,用于粗略采集经透镜反射后的光强信息与透镜特殊表面的位置信息。另一条光锥经显微物镜放大后由精瞄 CCD₂、CCD₃接收,两个精瞄 CCD 位于光束焦点附近,离焦距分别为 M 和 $-M$ 。将两 CCD 采集到的光强信息做差从而得到激光差动共焦光强曲线,光强曲线到过零点时光栅尺采集到的位置信息即为此时透镜特殊表面位置。此光强曲线将采集峰值点转变为采集过零点,使系统不仅大大提高了轴向分辨力及精度,也提高了承受噪声能力。

当被测件不存在偏心误差时,透镜的机械轴与测量光轴重合。将测量光锥汇聚点分别打在被测透镜猫眼点及焦距点,CCD 采集到的光斑处于靶面中心,且转动旋转台时 CCD 靶面上光斑不动。此时测得的差动共焦光强响应曲线为 $I_A(z)$ 和 $I_B(z)$,响应曲线的过零点 Q_A 和 Q_B 即为被测透镜的猫眼点及焦距点,光锥位于猫眼点时直线光栅采集的位置信息 l_a 与光锥位于焦距点时直线光栅采集的位置信息 l_b 的距离差即为被测透镜的顶焦距即图 1 中的 l_F 。

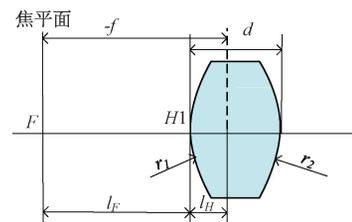


图1 焦距计算参数

Fig. 1 Measurement parameters of focal length

如图 1 所示,根据焦距测量公式可得到最终焦距 F 为:

$$F = l_F + l_H = l_b - l_a - r_1 d / [n(r_2 - r_1) + (n - 1)d] \quad (1)$$

由公式得出对于同一透镜主平面上与上表面之间距离 l_H 只与透镜本身参数有关,而 l_F 随着不同测量状态可能产生一定偏差,故以下主要对透镜顶焦距 l_F 部分做分析。

1.2 偏心误差影响

当被测透镜存在偏心误差时,被测镜的焦距点及上表面顶点所连轴线与测量光轴不同轴,对焦距测量结果造成影响。而偏心误差又可分为透镜自带偏心误差及装卡时姿态误差引入的偏心误差,以下对这两方面因素做分析。

1) 偏移量型误差

当透镜存在径向中心偏或装卡时存在径向偏移量

时,测量光路如图 2(a)、(b)所示,此时焦平面位置随透镜偏移方向变化,但仍与原焦平面位置重合。当测量光锥打在转轴与焦平面交点时,出射光仍是平行光。但猫眼点位置发生变化,测量结果 F' 为测量得出的焦距值, F 为实际焦距值,测量值与实际值间的偏差 ΔF 为:

$$\Delta F = F' - F = l'_F - l_F = R - \sqrt{R^2 - d^2} \quad (2)$$

其中, R 为透镜的曲率半径, d 为透镜机械轴与光轴的径向偏移量。

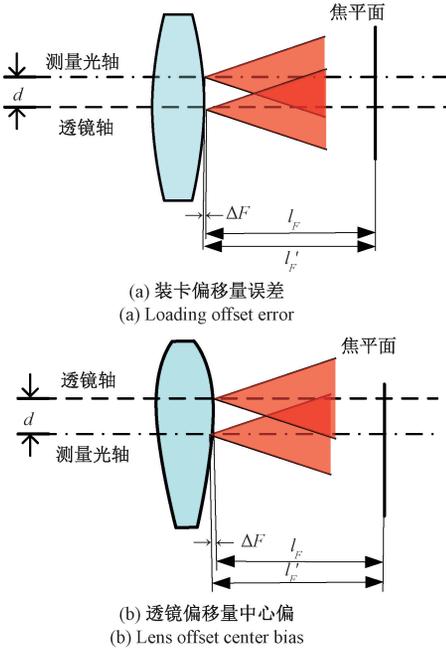


图 2 偏移量型误差及偏移量型中心偏
Fig. 2 Offset-type error and offset-type center bias

2) 偏角型误差

当透镜存在偏角中心偏或装卡产生角度偏移量时,测量光路如图 3(a)、(b)所示,此时被测镜猫眼点与测量光轴有角度为 θ 的偏角量,导致透镜焦平面随透镜光轴同时旋转 θ 。猫眼点位置不变,但焦距点位置发生变化,测量结果 F' 为测量得出的焦距值, F 为实际焦距值,测量值与实际值间的偏差 ΔF 为:

$$\Delta F = F' - F = l'_F - l_F = F / \cos \theta - F \quad (3)$$

其中, F 为透镜实际焦距, θ 为透镜焦距点及上表面顶点所连轴线与光轴夹角。

3) 组合型误差

由上述分析可得出透镜本身存在的中心偏误差与装卡时产生的姿态误差对焦距测量结果的影响相同,故组合误差只对装卡姿态误差做分析。当透镜既存在偏移量型误差又存在偏角误差时,测量光路如图 4 所示,此时透镜光轴与测量光轴存在 θ 的偏角,且从测量光轴与透镜上表面交点处向透镜光轴径向做法线存在大小为 d 的径

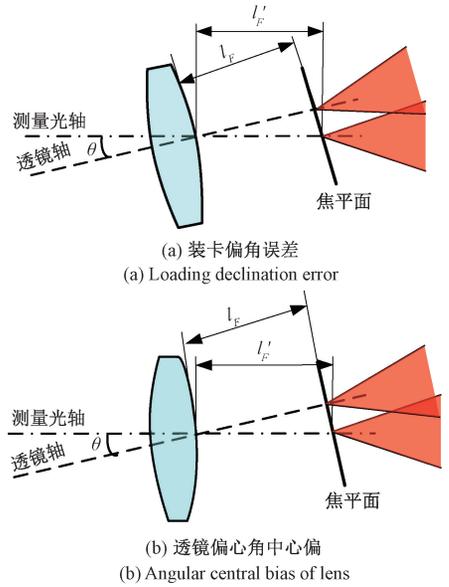


图 3 偏角型误差及偏角型中心偏
Fig. 3 Declination error and declination center bias

向平移偏差。此时被测镜猫眼点与焦距点同时存在偏差,当误差存在时焦距测量结果为 F' , F 为实际焦距值,测量值与实际值间的偏差 ΔF 为:

$$\Delta F = F' - F = l'_F - l_F = F / \cos \theta + (R - \sqrt{R^2 - d^2}) / \cos \theta - F \quad (4)$$

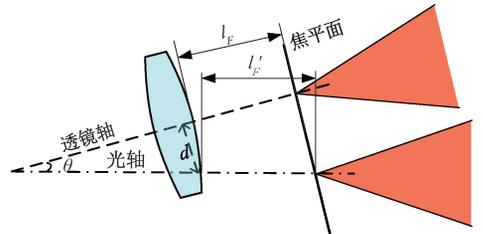


图 4 组合型误差
Fig. 4 Combined error

2 偏心误差调整原理

通过上述分析得到不同偏心误差对焦距测量结果产生的影响,利用基于偏心抑制的激光差动共焦透镜焦距测量系统对其进行调整。

透镜中心偏如图 5 所示,是指在透镜光学表面定心顶点处的法线与理想基准轴的偏移量。

假设透镜被测表面曲率半径为 r ,则透镜中心偏的计算公式为:

$$\chi = \arcsin(\alpha / r) \quad (5)$$

则:

$$\alpha = r \times \sin(\chi) \quad (6)$$

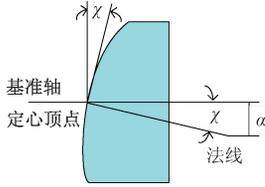


图5 中心偏定义

Fig. 5 Center-biased definition

通过测量系统得到被测镜此时的偏心误差,调整过程如下:

将反射镜放置于工作台上,传感测头出射平行光,伺服电机驱动丝杠转动带动传感测头上下移动,观察移动过程中精瞄 CCD₂、CCD₃ 靶面上光斑位置信息,并根据光斑位置驱动调整电机直至 CCD 上采集的光斑在传感测头上下移动时位于靶面中心且固定不动,则证明反射镜与测量光轴垂直。

将被测镜通过自定心三爪卡盘固定在工作台上。观察粗瞄相机 CCD₁,同时伺服电机驱动丝杠转动带动传感器上下移动,将测量光锥顶点移动到透镜焦平面附近,直至 CCD₁ 中探测到的光斑灰度值最大,证明光锥定位到被测镜焦平面上。粗略调整工作台及三爪卡盘姿态将探测光斑调整到 CCD₁ 靶面中心附近。力矩电机驱动工作台转动,在粗瞄 CCD₁ 中观测到光斑随转台转动画圆,其画圆半径 R_1 为:

$$R_1 = \beta_1 \times \alpha = f'_c / f'_o \times \alpha \quad (7)$$

其中 f'_c 为准直物镜焦距, f'_o 为会聚物镜焦距。

打开精瞄相机 CCD₂、CCD₃,并转动工作台,观察到 CCD₂、CCD₃ 中光斑轨迹画圆,则 CCD₂、CCD₃ 中光斑的画圆半径 R_2 为:

$$R_2 = \beta_2 \times \alpha = f'_c / f'_o \times \beta_{\text{显微}} \times \alpha \quad (8)$$

其中, $\beta_{\text{显微}}$ 为 CCD₂、CCD₃ 前显微镜放大倍数。

不断调整工作台及三爪卡盘姿态,观察 CCD₂、CCD₃ 中光斑画圆半径大小、位置及测得的中心偏值,当转动工作台过程中 CCD₂、CCD₃ 中采集到的光斑不画圆,即测得的中心偏值 α 无限趋近于 0 时,此时:

对于偏移量型误差:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \Delta F = F' - F = l'_F - l_F = R - \sqrt{R^2 - d^2} =$$

$$R - \sqrt{R^2 - \alpha^2} \approx 0 \quad (9)$$

对于偏角型误差:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \Delta F = F' - F = l'_F - l_F = F / \cos \chi - F =$$

$$F / \cos[\arcsin(\alpha/r)] - F \approx 0 \quad (10)$$

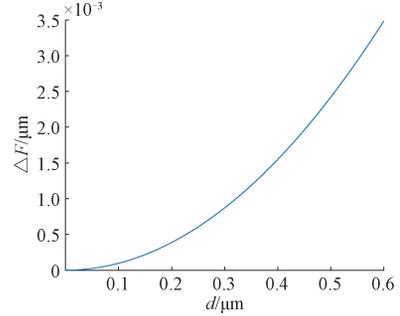
对于组合型误差:

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \Delta F = F' - F = l'_F - l_F = \frac{F + R - \sqrt{R^2 - \alpha^2}}{\cos[\arcsin(\alpha/r)]} - F \approx 0$$

$$(11)$$

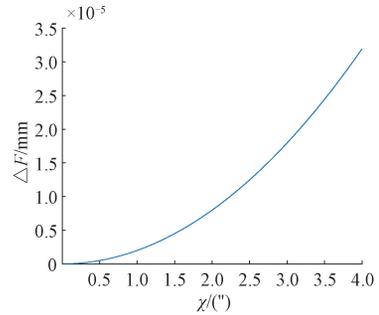
调整后测得的焦距值即为消除了加工时透镜自带的偏心误差及装卡时引入的姿态误差之后的真值,极大提高了被测焦距的精度及重复测量精度。

此时偏移量误差及偏角误差对焦距测量产生的影响如图 6(a)、(b) 所示。



(a) 偏移量对焦距影响关系

(a) The influence of offset on focal length



(b) 偏角对焦距影响关系

(b) The relation between declination and focal length

图6 偏移量及偏角对焦距的影响

Fig. 6 The effect of offset and declination on focal length

为了达到 2 nm 的焦距测量精度,由图 6 能够得到平移量测量精度应达到 0.000 5 mm,偏角量测量精度应达到 2",由式(5)、(6)可得中心偏测量精度应达到 2"。

3 系统构建及分析

为了验证基于偏心抑制的差动共焦焦距高精度测量方法的正确性,搭建了如图 7 所示的测量系统。此测量系统主要由激光差动共焦自准直测头、气浮隔振底座、气浮旋转调整平台、气浮高精度直线升降系统以及集成测控系统 5 部分组成。

系统对焦距的测量精度主要取决于对偏心误差的采集与调整,其中对其影响最大两个因素分别为激光差动共焦自准直测头及气浮旋转调整平台,以下对这两部分做优化设计。

3.1 自准直测头优化

差动共焦定焦光路的最大工作距离 d_w 为 1 500 mm,

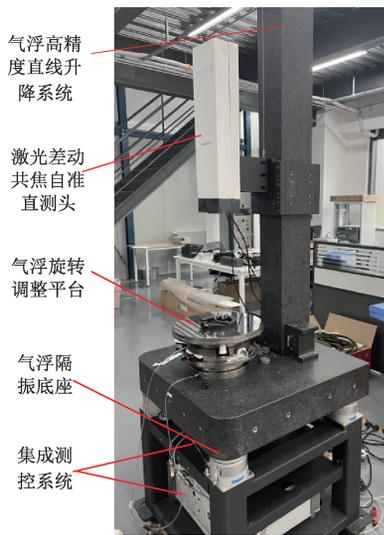


图 7 基于偏心抑制的激光差动共焦距高精度测量系统

Fig. 7 High-precision measurement system of laser differential confocal length based on eccentric suppression

角度最大测量范围为 1° , 准直物镜的最小通光孔径为:

$$D = 2d_w \times \tan(\omega) = 2d_w \times \tan(1^\circ) = 52.36 \text{ mm} \quad (12)$$

差动共焦自准直测头的准直物镜的最小通光孔径为 52.36 mm, 实际设计应该留一定的角度余量, 最终选定口径 $D=55 \text{ mm}$ 。

如今成像元件的像素尺寸基本为微米级别, 而一般商用自准直仪的准直镜焦距在 200~1 000 mm 之间, 设计像素细分倍数为 10 倍, 不同像素尺寸下准直物镜焦距和测量分辨率之间的关系如图 8 所示。

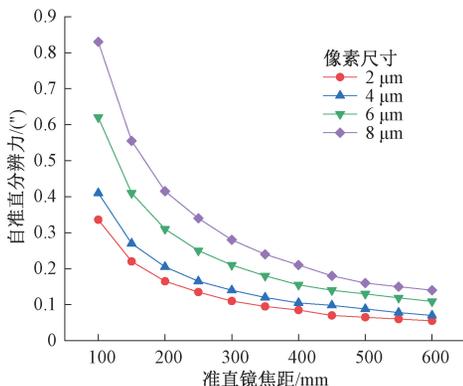


图 8 准直镜焦距与自准直角度测量分辨率之间的关系

Fig. 8 The relation between collimator focal length and self-collimating angle measurement resolution

为了达到 $\pm 2''$ 的中心偏测量精度, 设计自准直角度分辨率应该在 $0.1''$ 左右或者更小, 考虑到准直物镜的焦距

会影响传感测头的尺寸, 最终根据上图 8 选择准直物镜的焦距为 $f'_c = 300 \text{ mm}$ 。

选择像素大小为 $3.2 \mu\text{m}$ 、成像面积为 2.54 cm 的 Cmos 传感器作为自准直光路的探测像面, 自准直测头的横向与纵向角度测量范围设计为 $73.3'$, 实际测试结果为 $75.4'$ 。显微物镜放大倍数为 20 倍, 自准直测头精瞄相机的角度分辨率设计为 $0.108''$, 实际测试结果为 $0.057''$ 。

3.2 旋转调整平台优化

调整电机可分为步进电机与伺服电机, 步进电机将脉冲转化为角位移, 电机的精度主要由步距角控制; 伺服电机通过磁场控制转子转动, 精度取决于编码器的精度。

调整平台调整范围不需太大, 精度分辨率 τ 需要在中心偏测量量级上为 $2''$ 。设计调整平台圆盘半径为 185 mm, 调整电机需达到的精度 μ 应符合式 (13):

$$\tau = \arcsin(\mu/185 \text{ mm}) \leq 2'' \quad (13)$$

则电机最小调整精度应小于 $1.8 \mu\text{m}$ 。因此选用步距角 $\alpha = 1.8^\circ$ 的步进电机、螺距为 0.25 mm 的单螺纹微分螺杆, 电机一个脉冲运动的距离 X 为:

$$X = 0.25 \text{ mm} / 360 / 1.8 = 1.25 \mu\text{m} \quad (14)$$

电机理论倾角最小分辨率 τ 为:

$$\tau = \arcsin(1.25 \mu\text{m} / 185 \text{ mm}) = 1.403'' \quad (15)$$

此时电机理论分辨率为 $1.403''$, 实际测试结果为 $1.114''$, 满足实验要求。

4 实验验证

为了验证基于偏心抑制的差动共焦距高精度测量方法的实际测量精度, 设计并搭建了激光差动共焦透镜焦距测量系统。

4.1 焦距测量实验

实验样品采用焦距为 100 mm 的平凸透镜, 透镜的焦距值经中国计量科学研究院标定为 99.330 mm 。在温度为 $(20 \pm 0.2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 40% 的环境下进行实验, 设定重复测量次数 $N = 10$, 利用高精度自动测量软件进行重复测量实验。

进行测量实验之前, 需将测量光轴和气浮回转轴调至严格同轴。将被测镜夹持在三爪卡盘上, 利用姿态调整系统按上述方案对透镜姿态进行调整。测量结果如表 1 所示。

为验证测量方法的正确性, 用激光差动共焦综合参数测量仪测试结果进行对比实验, 测量结果对比如表 1 和图 9 所示。

由上述数据对比, 激光差动共焦综合参数测量仪测量结果均值为 99.336 mm , 相对重复测量精度, 均方根 (root mean square, RMS) 为 2.1342×10^{-4} , 基于偏心抑

表1 焦距重复测量结果对比

Table 1 Comparison of repeatedly measured confocal length

测量次数	差动共焦测量结果	偏心抑制测量结果
1	99.321 mm	99.331 mm
2	99.359 mm	99.331 mm
3	99.319 mm	99.331 mm
4	99.318 mm	99.330 mm
5	99.351 mm	99.330 mm
6	99.353 mm	99.330 mm
7	99.313 mm	99.331 mm
8	99.348 mm	99.330 mm
9	99.367 mm	99.330 mm
10	99.313 mm	99.330 mm
平均值	99.336 mm	99.330 mm
标准差	21.2 μm	0.5 μm
重复测量精度	0.021 342%	0.000 503%

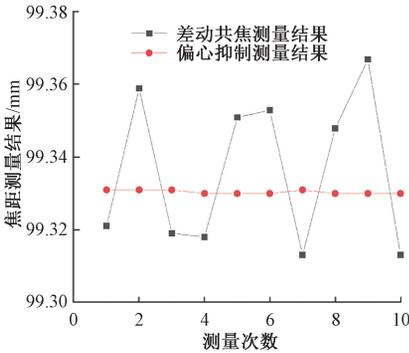


图9 焦距重复测量结果对比

Fig. 9 Comparison of repeatedly measured confocal length

制的激光差动共焦焦距高精度测量方法的测量结果均值为 99.330 mm, 相对重复测量精度 (RMS) 为 5.03×10^{-6} 。实验中因环境温度湿度等因素会对测量结果产生一定影响, 但结果对比可知基于偏心抑制的焦距高精度测量方法的精度及重复测量精度明显优于激光差动共焦综合参数测量仪, 验证了此方法的正确性。

4.2 不确定度分析

在差动共焦曲线的过零点处定焦误差 σ_1 与相对孔径 D/f' 满足式 (17), 本实验采用的激光器光源波长 λ 为 632.8 nm, 探测器信噪比 R_{SN} 为 150:1, 测量物镜的相对口径 D/f' 为 0.167, 差动共焦曲线的定焦误差 σ_1 为:

$$\sigma_1 = 1.18\lambda/R_{SN}(D/f')^2 = 0.18 \mu\text{m} \quad (16)$$

系统采用 LAMOTION RUS 系列增量型光栅尺进行轴向位置监测, 光栅尺测量精度为 $\pm 2.5 \mu\text{m}/\text{m}$, 其引入的测长误差 σ_2 为:

$$\sigma_2 = 2.5 \mu\text{m}/\text{m} \times F = 0.2483 \mu\text{m} \quad (17)$$

被测件轴线与测量光轴之间的夹角经中心偏测量系统调整后可达到 $1''$, 轴线不重合误差 σ_3 为:

$$\sigma_3 = F \times (1 - \cos\alpha) \approx 0.00040 \mu\text{m} \quad (18)$$

气浮导轨由实验室自行研制, 经精密研磨后在有效行程 1000 mm 范围内其直线度优于 $0.8 \mu\text{m}$ ^[21], 则气浮导轨直线度引起的误差 σ_4 满足:

$$\sigma_4 = F \times 0.8 \mu\text{m}/1000 = 0.0795 \mu\text{m} \quad (19)$$

在测量中, 气浮转轴会产生轴向跳动, 这种跳动会影响光斑在探测器上的画圆位置, 不会影响其画圆大小, 但这种跳动会累加到中心偏测量结果中且会影响直线光栅采集到的光锥位置信息^[22]。对该项误差进行测试, 测得该误差小于 40 nm, 则径向跳动误差 σ_5 满足:

$$\sigma_5 = 0.040 \mu\text{m} \quad (20)$$

综合考虑上述误差源对测量结果造成的影响, 该系统的测量误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 + \sigma_4^2 + \sigma_5^2} = 0.32 \mu\text{m} \quad (21)$$

该被测件的焦距测量结果的相对误差为:

$$\sigma/F = 0.32/99.330.531 = 3.22 \times 10^{-6} \quad (22)$$

由上式可得, 通过中心偏测量系统对被测透镜进行姿态调整, 测得的理论焦距相对重复测量精度 (RMS) 为 3.3×10^{-6} 。

5 结 论

本文提出了一种基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法。通过分析透镜生产加工时产生的中心偏误差以及测量装卡时产生的姿态误差, 建立系统误差模型。通过中心偏测量仪对透镜偏心进行测量并根据测量结果的大小及方向驱动调整机构对其进行误差调整, 确保由被测镜焦点与球面顶点建立的透镜像轴与测量光轴同轴, 有效解决了由透镜存在中心偏及装卡时产生的姿态误差对其产生的影响, 提高了球面透镜焦距的测量精度及重复测量精度。经过实验验证本方法测量焦距为 100 mm 透镜时相对测量精度达到 5.34×10^{-6} , 相对重复测量精度可达 5.03×10^{-6} 。同时, 该方法可应用到镜组加工与装配中, 提高镜组测量与成像的精度。

参考文献

- [1] 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.

- sphericity measurement method of meridian and weft trace of laser fusion target pellet [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1):127-135.
- [2] 谭久彬. 超精密测量是支撑光刻机技术发展的基石[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(3):1-7.
- TAN J B. Ultra-precision measurement is the cornerstone supporting the development of lithography machine technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(3):1-7.
- [3] HWANG Y S, CHOI J, KIM E. Novel diffraction limit implied geometric lens imaging model based on a finite number of pixels for integral imaging display[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 166, DOI:10.1016/j.optlaseng. 2023. 107521.
- [4] 费贤翔, 李程鹏, 王文华, 等. 薄凸透镜焦距测量方法的改进[J]. 大学物理, 2020, 39(3):36-38.
- FEI X X, LI CH P, WANG W H, et al. Improvement of focal length measurement method of thin convex lens[J]. University Physics, 2020, 39(3):36-38.
- [5] ZHAO W Q, LI Z G, QIU L R, et al. Large-aperture laser differential confocal ultra-long focal length measurement and its system. [J]. Optics Express, 2015, 23(13), DOI:10.1364/OE.23.017379.
- [6] 程强, 胡海翔, 李龙响, 等. 离轴光学系统的畸变分析及焦距测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(22):2839-2846.
- CHENG Q, HU H X, LI L X, et al. Distortion analysis and focal length measurement of off-axis optical system[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(22):2839-2846.
- [7] 王梦晖, 赵高兴, 时其然, 等. 自由曲面成像光学系统的设计方法及其应用[J]. 光学学报, 2023, 43(8):222-242.
- WANG M H, ZHAO G X, SHI Q R, et al. Design method and application of freeform imaging optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8):222-242.
- [8] VÍCTOR M D, JESÚS M, ALEJANDRO M, et al. Calculation of the different focus positions for meridional and marginal rays of a plano-convex thick lens [J]. Optik, 2020, 223, DOI:10.1016/j.ijleo.2020.165606.
- [9] YANG W C, WANG Z Q, SHEN C W, et al. Research on focal length measurement scheme of self-collimating optical instrument based on double grating[J]. Sensors, 2020, 20(9), DOI:10.3390/s20092718.
- [10] YANG Z M, GAO Z S, WANG S, et al. Focal length and radius of curvature measurement using wavefront difference method [C]. Applied Optics & Photonics China, 2015.
- [11] 蒋正东, 朱荣刚, 陈磊, 等. 基于双朗奇光栅的焦距测量技术研究[J]. 应用光学, 2018, 39(5):687-690.
- JIANG ZH D, ZHU R G, CHEN L, et al. Research on focal length measurement technology based on double lunge grating [J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(5):687-690.
- [12] WEI X H, XU K Y, LIU A. The wavefront power spectral density measurement of aspheric lens with long focal-length using a computer-generated hologram [J]. Optics and Photonics Journal, 2022, 12(11), DOI:10.4236/opj.2022.1211017.
- [13] 肖林, 雷小华, 郭光辉, 等. 基于快速稀疏扫描干涉的动态间隙测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9):52-61.
- XIAO L, LEI X H, GUO G H, et al. Dynamic gap measurement method based on fast sparse sweep frequency interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9):52-61.
- [14] YANG G Q, MIAO L, ZHANG X, et al. High-accuracy measurement of the focal length and distortion of optical systems based on interferometry. [J]. Applied optics, 2018, 57(18), DOI:10.1364/ao.57.005217.
- [15] 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, 34(5):1-8.
- BU Y L, LI Q, LI Y H, et al. Development of laser differential confocal reflection ultra-large radius of curvature measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(5):1-8.
- [16] 常林, 何婷婷, 闫恪涛, 等. 考虑移相参数匹配的任意腔长下多表面干涉测量[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9):181-191.
- CHANG L, HE T T, YAN K T, et al. Multi-surface interferometry under arbitrary cavity length considering phase shift parameter matching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(9):181-191.
- [17] YANG Z M, GAO Z H, DOU J T, et al. Focal length measurement based on the wavefront difference method by

- a Fizeau interferometer [J]. Applied Optics, 2014, 53(25): 5598-5605.
- [18] 刘济豪, 卢荣胜, 张紫龙, 等. 焦距测量中线纹清晰度评价函数的研究 [J]. 光学学报, 2023, 43(9): 125-134.
- LIU J H, LU R SH, ZHANG Z L, et al. Focal length measures the sharpness of the midline Research on evaluation function [J]. Journal of Optics, 2023, 43(9): 125-134.
- [19] HSU W Y, LEE CH SH, CHEN P J, et al. Development of the fast astigmatic auto-focus microscope system [J]. Measurement Science and Technology, 2009, 20(4): 045902.
- [20] 杨帅, 邱丽荣, 汤亮, 等. 激光差动共焦干涉高精度测量技术及仪器 [J]. 光学学报, 2023, 43(15): 46-54.
- YANG SH, QIU L R, TANG L, et al. High-precision measurement technology and instrument of laser differential confocal interferometry [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 46-54.
- [21] 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.
- [22] 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 lens center bias measurement system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(2): 24-31.

作者简介



杜卓, 2021 年于河北工业大学获得学士学位, 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: dz19990114@163.com

Du Zhuo received his B. Sc. degree in 2021 from Hebei University of Technology, now he is a M. Sc. candidate in Beijing Institute of Technology. His main research interests is precision photoelectric testing technology and system.



赵维谦 (通信作者), 1988 年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位, 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) degree in 1988 from Harbin University of Science and Technology, received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Harbin Institute of Technology in 1993 and 2003, respectively. Now he is a professor in Beijing Institute of Technology. His main research interest is differential confocal theory and precise optical test technique.