DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513909

基于参考环的透镜多参数差动共焦测量方法

刘金晨,刘昱含,应荣辉,邱丽荣,赵维谦
(北京理工大学光电学院 北京 100081)

摘 要:单个透镜的几何参数误差累积效应对光学系统整体的成像质量影响尤其突出,在透镜的多种几何参数中,中心厚度、楔形误差和中心偏差对成像质量的影响较为显著。针对光学透镜中心厚度、中心偏差、楔形误差等几何参数测量及面形关联表征的难题,提出了一种基于参考环辅助定位的差动共焦光学透镜几何多参数综合测量方法。该方法利用激光差动共焦测量曲线零点与传感器焦点精确对应的特性,实现了光学透镜单一表面的高精度定焦测量;通过共基准参考环辅助定位方法,实现了光学透镜双侧表面翻转测量过程中的精确定位;通过参考环姿态配准方法,实现了光学透镜表面关联配准及面形重构,最终实现了光学透镜几何多参数的综合测量及评价。通过对透镜的几何多参数进行综合测量,可以有针对性地对系统整体进行优化设计,减少了重复定位误差和累积误差,有助于提高系统的精度,改善成像质量,进而提升光学系统的整体综合性能。经实验验证,该方法对光学透镜厚度的测量误差<1.200 μm,中心偏差的测量误差优于 1.000 μm,楔形误差<0.002°,该方法为光学透镜几何多参数测量提供了一种新的技术途径。

关键词: 光学透镜;参考环定位;几何多参数测量;差动共焦
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

A differential confocal comprehensive measurement method of lens geometry multi-parameters based on reference ring positioning

Liu Jinchen, Liu Yuhan, Ying Ronghui, Qiu Lirong, Zhao Weiqian
(*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

Abstract: The cumulative effect of geometric parameter errors of a single lens has a particularly prominent influence on the overall imaging quality of the optical system. Among various geometric parameters of the lens, the center thickness, wedge error, and center deviation have a significant influence on the imaging quality. To address the difficult problems in measuring geometric parameters such as thickness, center deviation, and wedge error of optical lenses and characterizing the correlation of multi-surface shapes, this article proposes a differential confocal optical lens geometric multi-parameter comprehensive measurement method based on reference ring-assisted positioning. This method uses the characteristics of the precise correspondence between the zero point of the laser differential confocal measurement curve and the focus of the sensor to achieve high-precision fixed-focus measurement of a single surface of the optical lens. Through the common reference ring-assisted positioning method, the precise positioning of the optical lens during the flip measurement of the double-sided surface is achieved. Through the reference ring attitude alignment method, the position correlation alignment and surface reconstruction of the double-sided surface of the optical lens are achieved. Finally, the comprehensive measurement and evaluation of the optical lens geometric multi-parameters are achieved. By conducting comprehensive measurements of multiple geometric parameters of the lens, the overall system can be optimized in a targeted manner, reducing repetitive positioning errors and cumulative errors. This helps improve the system′s accuracy, enhances imaging quality, and ultimately boosts the overall comprehensive performance of the optical system. Experimental verification shows that the measurement error of the optical lens thickness is less than 1.200 μm, the measurement error of the center deviation is better than 1.000 μm, and the wedge error is less than 0.002°. This method provides a new technical approach for the measurement of optical lens geometric multi-parameters.

Keywords: optical lens; reference ring positioning; geometric multi-parameter measurement; differential confocal

收稿日期:2025-04-10 Received Date: 2025-04-10

0 引 言

光学透镜可以调控光线的传播方向和波前相位分布,改善成像质量,成为现代光学系统实现功能的核心单元。透镜的像差补偿与功能协同可以显著提升系统综合性能,被广泛应用在医学内窥成像[1]、混合光子集成[2]、X 射线成像[3-4]、连续变焦光学[5]等领域。透镜的材料、几何参数及组合方式的科学设计,直接决定了光学系统性能的优劣。由多透镜协同组成的复合光学系统凭借高光线透过率、低像差与色散校正能力[6],已成为精密光学的关键技术载体,其中单个透镜几何参数误差的累积效应对系统成像影响尤为突出。因此,综合测量光学透镜的几何参数可以有针对性地进行系统优化,提升光学系统的整体性能。在透镜的多种几何参数中,中心厚度、楔形误差及中心偏差对成像结果影响较为显著[7]。由于其相互耦合,单一参数测量难以准确全面表征透镜的几何误差,因此亟需一种光学透镜几何多参数综合测量及评价方法。

现有测量方法可对透镜厚度、中心偏差、楔形误差分别进行测量,但受透镜几何结构复杂性和测量原理限制,尚无一种高精度的透镜多参数综合测量手段。在厚度测量方面,目前主要采用非接触式的机器视觉法、共焦法、激光三角法、干涉法以及接触式测量方法。2011 年 Park 等[8]采用机器视觉法实现对透镜中心厚度的测量,相机获取透镜上下表面反射光束图像,采用边界跟踪算法解算光束中心坐标,计算获得透镜厚度,精度达 5 μm,但其精度受测量工作台角度定位误差制约,且仅适用于透明或半透明材料。2022 年李春艳等[9]提出基于光谱共焦法的径向梯度折射率透镜厚度测量方法,该方法基于光学拉格朗日函数和光线弧微分方程建立厚度测量模型,通过精密位移台模拟透镜偏心,完成了抑制偏心的厚度测量,测量精度为 4.6 μm,但对测量光的光强均匀性要求较高;2022 年罗勇强[10]采用直射式双图像传感器(charge-coupled device,CCD)激光三角法,实现了多种波长激光对不同面形及材料透镜的中心厚度测量,该方法依赖于图像处理算法精度,并且测量精度易受透镜倾斜影响;2019 年刘经佑等[11]针对低相干光干涉法的光程差调节精度不足问题进行改进优化,采用透过式干涉法对透镜中心厚度进行测量,通过调节新增的楔形棱镜组之间的位置关系实现了对参考光程的连续精密调节,利用前后干涉条纹的变化以及楔形棱镜组的移动距离,实现对透镜厚度的测量,精度达 2 μm;2022 年郭江等[12]采用接触式测量方法,设计了一种自适应口径中心厚度测量装置,利用千分表上下表杆间的距离变化实现透镜中心厚度测量,但接触式测量易损伤样品,影响样品精度。

在中心偏差测量方面,主要分为接触式和非接触式测量。接触式测量易对样品表面造成不可逆损伤,且测量精度有限。非接触式测量常用方法包括束腰变换法、联合变换法、差动共焦法和光谱共焦法等。2008 年陈钦芳[13]基于双光束束腰变换原理,将反射光斑作为反馈调整透镜位姿,实现轴对称非球面透镜中心偏差测量,精度达 10″,但受限于轴对称面形约束,不适用于任意面形的透镜;2015 年李春才等[14]提出双相位编码联合变换互相关峰检测法,可同步解算偏差矢量,精度为 0.3 μm,但其结果对成像质量及像差敏感;2023 年王伟等[15]提出基于差动共焦定焦的透镜中心偏测量方法,利用差动共焦轴向响应曲线过零点特性,结合五维位姿闭环校正系统,实现透镜倾斜与偏心误差的自动补偿,测量精度达 0.41%,重复性优于 100 nm;2020 年 Fu 等[16]结合自准直定心与光谱共焦位移传感技术,实现高阶非球面透镜中心偏差非接触测量,精度达 2 μm,但该方法需经过多次测量和局部修正。

在楔形误差测量方面,2015 年邵平等[17]提出基于动态干涉仪与补偿镜组的楔角检测方法,通过标准楔块及自准直平行光管构建误差标定体系,但其方法核心是面向楔形透镜加工装调阶段的标准传递问题,主要用于面形加工参考。

综上所述,当前光学透镜几何参数测量技术普遍存在单参数独立检测的局限性,多次独立测量易引入额外的测量误差,且难以准确关联多次测量结果进行透镜多参数表征,对透镜中心厚度、中心偏差、楔形误差的综合测量方法有待研究。基于此,提出了一种基于共基准参考环辅助定位的光学透镜几何多参数综合测量方法,将光学透镜的几何多参数在同一精准参考基准下进行测量及评价,获得透镜的厚度、中心偏差及楔形误差仅需借助共基准参考环进行综合测量,减少了额外的定位误差,可以更准确地反映出透镜的几何特征。

1 测量原理

基于激光差动共焦测量技术以及共基准参考环辅助定位,实现对光学透镜的几何多参数综合测量。利用激光差动共焦测量技术,在极坐标系下对透镜单侧表面进行纳米级分辨率的动态定焦扫描,获取单侧表面的面形轮廓数据;通过精密加工的共基准参考环与刚性测量底座构建全局测量基准,补偿重复装夹误差,实现透镜翻转测量过程中的准确定位,获得整体面形数据;将得到的测量数据进行拟合,利用上下两侧参考环的几何位置关系,采用刚体变换矩阵对双侧面形数据进行最小二乘拟合配准,同步解算透镜厚度、中心偏差及楔形误差,误差示意如图 1 所示,实现对光学透镜几何多参数的综合测量与评价。

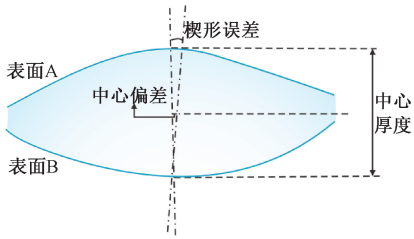


图 1　透镜厚度、中心偏差与楔形误差示意

Fig. 1　Illustration of lens thickness, center deviation and wedge error

1.1　差动共焦测量与共基准参考环辅助定位

采用如图 2 所示工装进行透镜的定位与测量,工装双侧表面的最外侧圆环即为参考环,工装用钢珠定位在支撑测量底座上,用于翻转测量时的快速定位,参考环工装的测量底座和定位钢珠可以确保其在测量平台中的位置准确。由于采用共基准参考环定位法,单侧面形数据与同侧对应的参考环一起进行测量,参考环的相对位置固定,根据参考环之间固定的相对位置关系,即可对透镜的双侧面形进行位置配准,将透镜的双侧测量结果进行关联,进而可以消除测量时由手动翻转等原因而引入的位置误差。

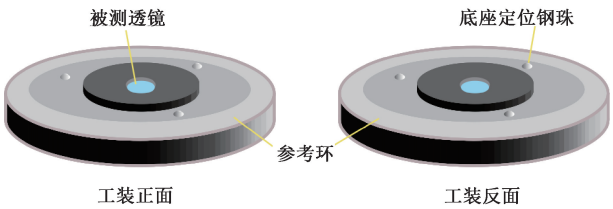


图 2　带有参考环的工装及单侧面形测量

Fig. 2　Fixture with reference ring and single-side profile measurement

测量流程如图 3 所示,首先将被测光学透镜安装固定在带有参考环的圆盘工装上,圆盘工装上的定位钢珠与测量底座上对应的凹槽可以保证在透镜翻转测量过程中,被测透镜与参考环的相对位置不改变,避免引入翻转定位误差。将固定好透镜的圆盘工装放置在专用底座上,再将底座放置在工作台上,使透镜中心与测量回转中心重合。在测量光学透镜一侧的形状及其相对于参考环的位置后,将圆盘工装翻转,再对另一侧的面形以及对应参考环进行单点测量,获得面形数据。

利用激光差动共焦传感器对透镜的双侧表面及参考环进行单点测量,可以获得所需的面形数据。由于所使用的测量系统零点位置固定,因此传感器可直接获得测量点的绝对位置坐标,并且由于共基准参考环的相对位置固定,因此可以利用参考环间的位置关系,将两侧的测

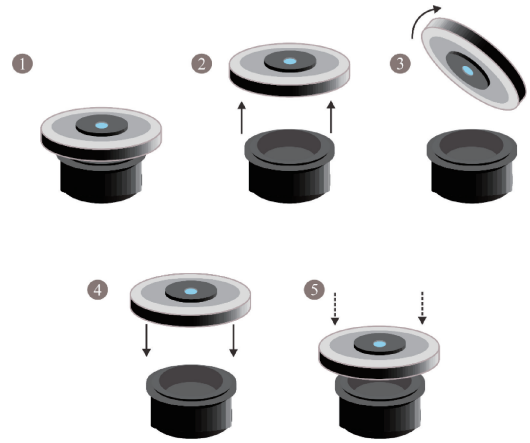


图 3　工装带动透镜翻转测量流程

Fig. 3　Tooling drives lens flip measurement process

量结果进行关联,对双侧表面的参考环测量结果进行拟合重构配准,再根据配准数据对所测得的两侧面形数据进行拟合计算,以补偿定位误差以及透镜翻转测量时引入的误差,即可确定被测光学透镜的楔形误差、中心偏差以及透镜中心厚度。

对于透镜面形及参考环测量,本系统激光差动共焦传感器采用的差动共焦光路原理[18-21]如图 4 所示。

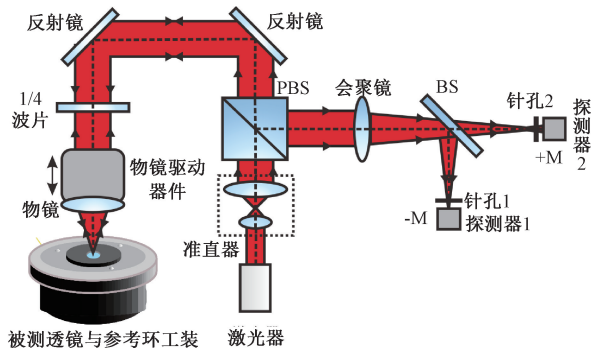


图 4　激光差动共焦测量光路

Fig. 4　Laser differential confocal measurement optical path

激光器发出的测量光经准直器调节扩束后进入测量光路,经过偏振分光镜(polarizing beam splitter, PBS)、反射镜和 1/4 波片后进入物镜,会聚后垂直照射到样品表面。从样品表面返回的光线带有被测面形信息,再经过反射镜和 PBS 重新进入测量光路。测量光通过会聚镜后,经过分光镜(beam splitter, BS)分成两路进入光电探测器。探测器 1 位于会聚镜焦点距离后方$-M$处,记录信号为$I_1(u,-u_M)$;探测器 2 则位于焦点距离前方$+M$处,记录信号为$I_2(u,+u_M)$。探测器的离焦量M和归一化离焦量u_M之间的关系为:

$$u_M=\frac{\pi}{2\lambda}\left(\frac{D}{f_c}\right)^2 M \tag{1}$$

其中，D/f_c 为透镜的相对孔径。

对两路信号作差即可得差动信号 $I(u, u_M)$[22-24]，即：

$$I(u,u_M)=I_1(u,-u_M)-I_2(u,+u_M)=\left[\frac{\sin[(2u-u_M)/4]}{(2u-u_M)/4}\right]^2-\left[\frac{\sin[(2u+u_M)/4]}{(2u+u_M)/4}\right]^2 \tag{2}$$

取 $u_M=\pm 6$，仿真上述式(2)得到差动共焦响应曲线如图 5 所示。

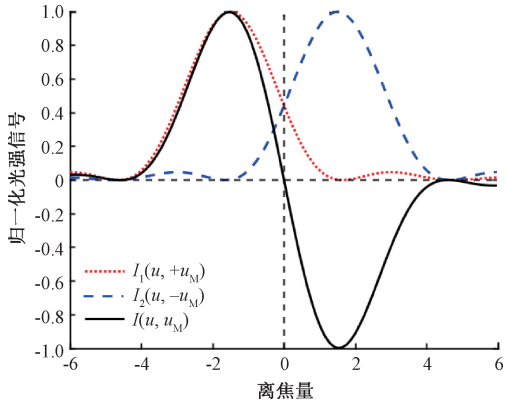


图 5 差动共焦光强信号曲线

Fig. 5 Differential confocal light intensity signal curve

通过对采集的两路前后焦光强信号作差，计算得到被测表面单点的差动共焦曲线。其零点附近曲线斜率较大，对被测透镜面形的轴向方向变化更为敏感，能够实现更高的轴向分辨率及测量灵敏度，因此可以利用这一特点来测量面形轮廓。在测量扫描过程中，通过差动共焦测量技术对被测面形单点精确定焦，获得三维面形数据以及参考环数据。

1.2 透镜面形拟合重构

光学透镜常采用泽尼克方法进行面形拟合评定。对于一个在极坐标系下的面形 $W(\rho,\theta)$，其泽尼克多项式的表达形式为：

$$W(\rho,\theta)=\sum_k a_k Z_k(\rho,\theta) \tag{3}$$

其中，$Z_k(\rho,\theta)$ 为第 k 项泽尼克多项式，a_k 为第 k 项多项式的系数，ρ 为测量拟合点的径向坐标，θ 为角坐标。泽尼克多项式可写为如式(4)所示的形式，其中 n 为主量子数，m 为角量子数，泽尼克多项式在单位圆内具有正交性。

$$\begin{cases} Z_{2k+1}(\rho,\theta)=\sqrt{2(n+1)}R_n^m(\rho)\cos m\theta, & m\neq 0 \\ Z_{2k}(\rho,\theta)=\sqrt{2(n+1)}R_n^m(\rho)\sin m\theta, & m\neq 0 \\ Z_k(\rho,\theta)=\sqrt{n+1}R_n^0(\rho), & m=0 \end{cases} \tag{4}$$

矩阵 $\boldsymbol{A}$ 包含每个数据点在各个泽尼克多项式上的值，对于每个数据点 (ρ_i,θ_i)，矩阵 $\boldsymbol{A}$ 可以表示为：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} Z_0^0(\rho_1,\theta_1) & Z_2^0(\rho_1,\theta_1) & Z_2^2(\rho_1,\theta_1) & \cdots & Z_{n_{\max}}^{m_{\max}}(\rho_1,\theta_1) \\ Z_0^0(\rho_2,\theta_2) & Z_2^0(\rho_2,\theta_2) & Z_2^2(\rho_2,\theta_2) & \cdots & Z_{n_{\max}}^{m_{\max}}(\rho_2,\theta_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_0^0(\rho_N,\theta_N) & Z_2^0(\rho_N,\theta_N) & Z_2^2(\rho_N,\theta_N) & \cdots & Z_{n_{\max}}^{m_{\max}}(\rho_N,\theta_N) \end{bmatrix} \tag{5}$$

为了得到最佳的泽尼克系数矩阵 $\boldsymbol{p}$，使用最小二乘拟合使得拟合面形与实际数据矩阵 $\boldsymbol{b}$ 之间的误差平方和最小，通过解正规方程即可求解泽尼克多项式的系数，即：

$$(\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A})\boldsymbol{p}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{b} \tag{6}$$

拟合得到的泽尼克系数可以用于分析光学面形的主要特征。每个系数代表了一个特定的泽尼克模式，描述了面形的主要误差或特征。进行泽尼克拟合后，通过计算 $W(\rho,\theta)$ 在 ρ 和 θ 方向的梯度来得到法向量。将其径向梯度 $\partial W/\partial\rho$ 和角向梯度 $\partial W/\partial\theta$ 转换到笛卡尔坐标系下，求得法向量 $\boldsymbol{N}$ 为：

$$\boldsymbol{N}=\frac{\left(-\frac{\partial W}{\partial x},-\frac{\partial W}{\partial y},1\right)}{\sqrt{\left(-\frac{\partial W}{\partial x}\right)^2+\left(-\frac{\partial W}{\partial y}\right)^2+1}} \tag{7}$$

通过泽尼克拟合得到透镜双侧的面形方程，并计算出双侧面形的法向量。

1.3 面形配准及参数计算

利用共基准参考环间的固定位置关系，可以对透镜双侧表面的测量结果进行配准。对于共基准参考环，其面形为平面，表达式为：

$$z=a_0x+a_1y+a_2 \tag{8}$$

若测量得到的 q 个点 $(q\geqslant 3)$ 分别为 (x_i,y_i,z_i)，$i=0,1,\cdots,q-1$，对于拟合的面形方程，应使式(9)的目标函数最小，将式(9)两边分别对 a_0、a_1 和 a_2 求偏导，且应令偏导数为 0，求得系数矩阵后，代入式(8)即可得到参考环测量数据的面形方程拟合结果，得到的结果为平行于坐标轴的平面，分别将两侧的参考环所在的平面记为 $z_1=a_z$、$z_2=b_z$。

$$S=\min\sum_{i=1}^{n}[(a_0x_i+a_1y_i+a_2)-z_i]^2 \tag{9}$$

将参考环及透镜面形多圈测量数据分别投影到最佳拟合平面内，进行最小二乘圆拟合。圆的一般方程为 $(x-a)^2+(y-b)^2=R^2$，令 $c=R^2-a^2-b^2$，可得：

$$x^2+y^2-2ax-2by=c \tag{10}$$

应使得每个数据点到圆的距离的平方和最小，定义目标函数为：

$$S(a,b,c)=\sum_{i=1}^{N}\left[(x_i^2+y_i^2-2ax_i-2by_i-c)^2\right] \tag{11}$$

通过求解式(11)确定上表面参考环和下表面参考环的最佳拟合圆的圆心与半径分别为 $O_{az}(a_x,a_y)$、R_{r1} 和 $O_{bz}(b_x,b_y)$、R_{r2},则在空间坐标系中,参考环的最佳拟合圆心坐标为 $O_a(a_x,a_y,a_z)$、$O_b(b_x,b_y,b_z)$,计算需要的平移向量 $\boldsymbol{T}_1$,即:

$$\boldsymbol{T}_1=O_a-O_b=(a_x-b_x,a_y-b_y,a_z-b_z) \tag{12}$$

将测得的下表面数据点记为(ρ_2,θ_2,z_2),转化笛卡尔坐标系为 $P_B(x_2,y_2,z_2)$,将下表面所有点平移 $\boldsymbol{T}_1$,得到新的数据点(x_2',y_2',z_2'),在笛卡尔坐标系中,$x_2'=x_2+(a_x-b_x)$,$y_2'=y_2+(a_y-b_y)$,$z_2'=z_2+(a_z-b_z)$,在极坐标下,更新后的坐标变为(ρ_2',θ_2',z_2')。根据得到的两参考环的最佳拟合圆心位置与拟合半径数据,结合拟合得到的面形方程,可以对透镜双侧表面的面形测量数据进行配准,旋转矩阵 $\boldsymbol{R}_0$ 与配准平移向量 $\boldsymbol{T}_2$ 如式(13)所示,其中 L 为两参考环所在平面的距离。

$$\begin{cases}\boldsymbol{R}_0=\begin{bmatrix}-1&0&0\\0&1&0\\0&0&-1\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}0\\0\\-L\end{bmatrix}\end{cases} \tag{13}$$

对于透镜下表面任一测量点 $\boldsymbol{P}_B$,将其转换到与透镜上表面相同的笛卡尔坐标系下,得到配准最终结果 $\boldsymbol{P}_B'$ 的公式为:

$$\boldsymbol{P}_B'=\boldsymbol{R}_0^{-1}\cdot(\boldsymbol{P}_B-\boldsymbol{T}_2)-\boldsymbol{T}_1 \tag{14}$$

光学透镜的几何误差是由于其两个光学表面未对准造成的,因此透镜的楔形误差和中心偏差可以根据其双侧表面的光轴位置偏差来描述。如图 6 所示,透镜的绝对中心厚度 t 定义为从表面 A 的顶点到表面 B 的顶点的距离。两个光轴之间的角度定义为楔形误差 α。中心偏差 d 定义为透镜中心 $t/2$ 位置处两个表面光轴的位移。此定义与透镜方向无关,即先测量 A 面,然后测量 B 面,与先测量 B 面,然后测量 A 面得到的结果相同,有效减少了因透镜双侧表面测量顺序不同而引入的中心偏差测量结果误差。

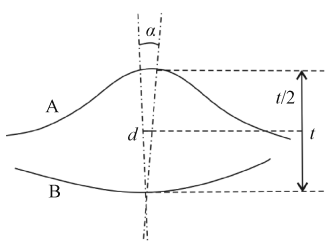


图 6　光学透镜多参数误差示意

Fig. 6　Illustration of multi-parameter errors of optical lenses

透镜双侧面形配准完成后,将得到的各面形每圈测量数据进行最小二乘拟合,来确定拟合圆的圆心(a_0,b_0)和半径 R_0,分别得到 A 面与参考环 A、B 面与参考环 B 的最小二乘最佳拟合圆心坐标为(a_A,b_A)、(a_{Aring},b_{Aring})、(a_B,b_B)、(a_{Bring},b_{Bring}),通过参考环最佳拟合圆心坐标值引入修正值,分别对应作差,则中心偏差可以表示为:

$$d=\frac{1}{2}\times\left[\left(\sqrt{a_A^2+b_A^2}-\sqrt{a_{Aring}^2+b_{Aring}^2}\right)+\left(\sqrt{a_B^2+b_B^2}-\sqrt{a_{Bring}^2+b_{Bring}^2}\right)\right] \tag{15}$$

将 A 面法向量与参考环 A 的法向量夹角记为 α_A,B 面法向量与参考环 B 的法向量夹角记为 α_B,分别计算各表面与其对应参考环的夹角,可以有效减少翻转定位测量以及放置姿态引入的误差。楔形误差由 α_A 与 α_B 相减的绝对值得到,即:

$$\alpha=|\alpha_A-\alpha_B| \tag{16}$$

将透镜两表面的光轴分别与各表面的交点记为 $O_A(x_A,y_A,z_A)$、$O_B(x_B,y_B,z_B)$,由于采用共基准参考环辅助定位,两参考环所在平面平行,其位置距离固定,且测量数据点的坐标已经过配准转换到同一坐标系下,因此,透镜的中心厚度 t 由 O_A 与 O_B 的距离及楔形误差 α 得到,即:

$$t=\cos\alpha\times\sqrt{(x_A-x_B)^2+(y_A-y_B)^2+(z_A-z_B)^2} \tag{17}$$

2　实　　验

2.1　测量系统

测量系统采用极坐标平移-旋转扫描测量,其由可水平移动的 R 轴、可竖直移动的 Z 轴及下端连接的传感器转轴、音圈电机轴以及工作台回转主轴构成。激光差动共焦传感器安装于传感器转轴上,差动共焦测量头由音圈电机驱动。

差动共焦传感器采用中心波长 633 nm 的 He-Ne 激光光源,搭配数值孔径为 0.55 的显微物镜,结合自主研制的音圈电机(行程 4 mm,分辨率 0.125 nm)实现轴向纳米级定位。测量系统通过 R 轴(水平)、Z 轴(竖直)精密导轨(直线度≤1 μm/m)驱动传感器位移,利用激光干涉仪实时监测 R/Z 轴光学参考镜反射光线的光程差实现误差补偿;传感器转轴采用密珠轴承结构(径向回转误差≤30 nm),配备 HEIDENHAIN ERA4202C 圆光栅(角度误差≤2″),实现转轴角度的精确闭环控制;气浮回转主轴基于空气轴承的非接触支撑设计(径向跳动≤5 μm,轴向跳动≤3 μm),搭载 Renishaw 增量式圆光栅进行角度反馈(角度误差≤5″),为被测元件提供高精度旋转基准。

2.2 实验验证

实验所用的元件为平凸透镜,如图 7 所示,光学材料为 H-K9L,曲率半径为 413.44 mm,直径 ϕ=50.8 mm,焦距 f=800.0 mm,中心厚度 5±0.1 mm,中心偏差<2.18 μm,楔形误差<3′。

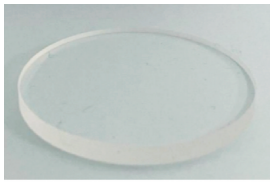


图 7 被测透镜

Fig. 7 The lens being measured

测量工装的参考环经过精密加工,其平面度优于 0.05 mm,偏心公差带<0.02 mm,表面粗糙度 Ra 为 0.4 μm。将被测透镜固定在带有参考环的工装上,以保证在测量过程以及工装翻转过程中透镜与参考环的位置相对固定,如图 8 所示。

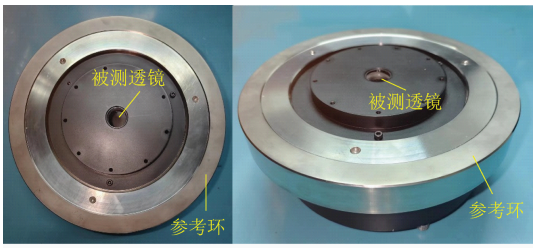


图 8 被测透镜安装固定

Fig. 8 Installation and fixation of the measured lens

在超净间对被测样品进行测量,环境温度为 21.2℃,湿度为 46.3%RH,如图 9 所示,将工件放置在主轴工作台中心处,采用激光差动共焦传感器对透镜进行双侧面形数据测量以及参考环位置测量。自由曲面测量仪选择被测面形为透镜安装位置,测量半径为 20 mm。

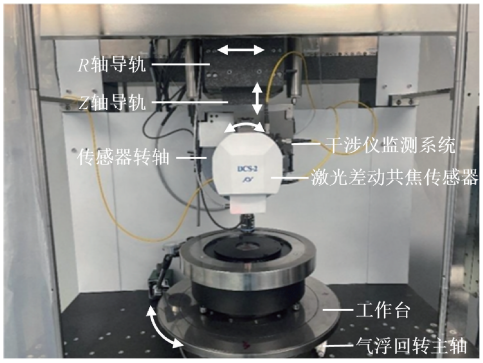
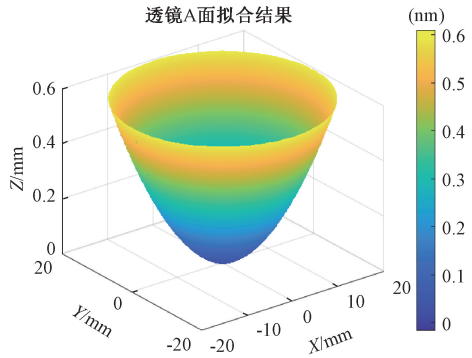


图 9 被测透镜面形测量

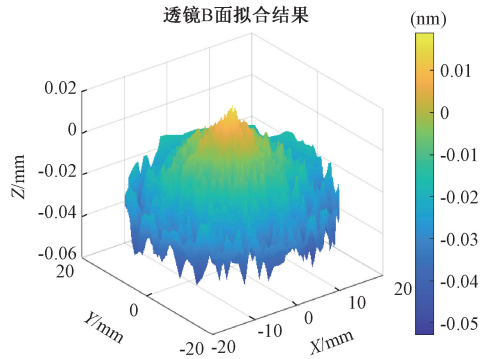
Fig. 9 Surface shape measurement of the lens

测得被测透镜的面形结果如图 10 所示,A 面面形残差结果如图 11(a)所示,B 面面形残差结果如图 11(b)所示。



(a) 透镜A面拟合结果

(a) Lens A surface fitting results



(b) 透镜B面拟合结果

(b) Lens B surface fitting results

图 10 被测透镜面形结果

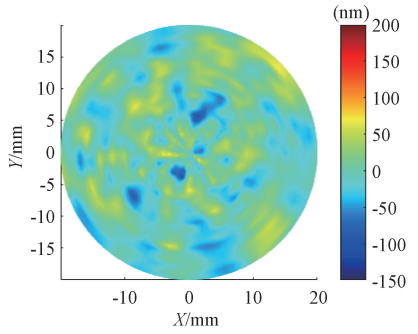
Fig. 10 Surface shape measurement results of the tested lens

对所测透镜进行 10 次重复测量,所得结果如表 1 所示。

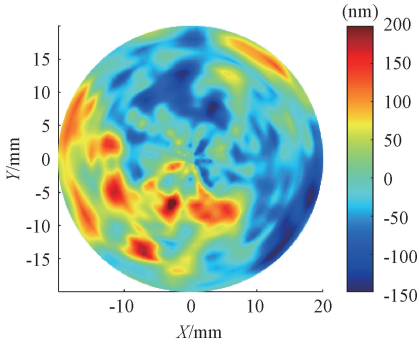
表 1 透镜多参数测量结果

Table 1 Lens multi-parameter measurement results

测量次数	楔形误差/(°)	中心偏差/μm	中心厚度/μm
1	0.020	−2.056	4 984.909
2	0.017	−2.424	4 997.781
3	0.018	−2.077	5 004.794
4	0.020	−1.876	5 003.990
5	0.018	−2.483	5 004.027
6	0.020	−1.869	4 990.995
7	0.018	−2.226	4 999.888
8	0.019	−2.152	5 000.252
9	0.018	−2.366	4 997.768
10	0.019	−1.902	5 004.354
平均值	0.019	−2.143	4 998.876
标准差	0.001	0.216	6.500



(a) 透镜A面面形残差图
(a) Residual diagram of lens A surface shape



(b) 透镜B面面形残差图
(b) Residual diagram of lens B surface shape

图 11　被测透镜面形残差图

Fig. 11　Residual diagram of the measured lens surface shape

经测量,被测光学透镜的楔形误差平均值为 0.019°,极差为 0.003°,标准差为 0.001°;中心偏差平均值为 -2.143 μm,极差为 0.614 μm,标准差为 0.216 μm;中心厚度平均值为 4 998.876 μm,极差为 19.885 μm,标准差为 6.500 μm,所测参数均与标称值相近;该方法具备光学透镜多参数综合测量能力,具有较好的精度,通用性强。

3　结　　论

针对光学透镜厚度、中心偏差、楔形误差、面形等几何参数综合测量及表征这一问题,提出了一种基于参考环精确辅助定位的光学透镜几何多参数综合测量及表征方法。利用差动共焦测量技术、多参考环辅助定位及面形配准方法,实现了对光学透镜的几何多参数综合测量及表征,可将透镜多参数在同一精确基准下进行测量,将透镜双面面形测量结果进行关联,从而实现对光学透镜形貌特征的评价,不仅可提升测量效率,还能避免多次测量引入的定位误差,提高测量精度。经实验测定,该方法精度楔形误差<0.002°,偏心误差<1.000 μm,厚度达到 1.200 μm,为光学透镜几何多参数测量提供了一种新的技术手段。

参考文献

[1] 上官佳伟, 李永亮, 冯海龙, 等. 大视场医用电子内窥镜光学成像系统研究综述[J]. 激光杂志, 2024, 45(8): 1-5.
SHANGGUAN J W, LI Y L, FENG H L, et al. A review of the research on optical imaging systems of large-field medical electronic endoscopes[J]. Laser Journal, 2024, 45(8): 1-5.

[2] DIETRICH P I, BLAICHER M, REUTER I, et al. In-situ 3D nanoprinting of free-form coupling elements for hybrid photonic integration[J]. Nature Photonics, 2018, 12(4): 241-249.

[3] LYUBOMIRSKIY M, SNIGIREVA I, VAUGHAN G, et al. 30-lens interferometer for high energy X-rays[C]. Proceedings of the 12th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, 2016: 040022.

[4] 伊圣振, 黄秋实, 齐润泽, 等. 等离子体诊断用多层膜 X 射线成像光学研究进展[J]. 光学精密工程, 2022, 30(21): 2783-2792.
YI SH ZH, HUANG Q SH, QI R Z, et al. Research progress of multilayer X-ray imaging optics for plasma diagnostics [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(21): 2783-2792.

[5] CHEN T F, WANG J, LIU J L, et al. Optical system design of continuous zoom objective lens with multi-conjugate distances[C]. Conference on Applied Optics and Photonics China, 2020: 115680B.

[6] LIM T Y, PARK S C. Achromatic and athermal lens design by redistributing the element powers on an athermal glass map[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18049-18058.

[7] LANGEHANENBERG P, HEINISCH J, STICKLER D. Smart and precise alignment of optical systems[C]. Optifab 2013,2013: 88842E.

[8] PARK J B, LEE J G, LEE M K, et al. A glass thickness measuring system using the machine vision method[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(5): 769-774.

[9] 李春艳, 李庚鹏, 刘继红, 等. 光谱共焦法偏心下径向梯度折射率透镜的厚度测量[J]. 光学 精密工程, 2022, 30(17): 2067-2076.
LI CH Y, LI G P, LIU J H, et al. Thickness

measurement of radial gradient index lens under eccentricity by spectral confocal method[J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(17): 2067-2076.

[10] 罗勇强. 透镜中心厚度测量系统结构设计及实验研究[D]. 西安:西安工业大学, 2022.
LUO Y Q. Structure design of lens center thickness measurement system and experimental study[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.

[11] 刘经佑, 雷枫. 基于透过式低相干光学干涉测量透镜中心厚度[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(12): 116-124.
LIU J Y, LEI F. Measurement of lens-center thickness based on low-coherence interference with transmitted illumination [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(12): 116-124.

[12] 郭江, 杨哲, 张蒙, 等. 口径自适应光学透镜中心厚度测量方法及装置[J]. 光学仪器, 2022, 44(6): 73-79.
GUO J, YANG ZH, ZHANG M, et al. Diameter-adaptive method and apparatus for center thickness measurement of optical lens[J]. Optical Instruments, 2022, 44(6): 73-79.

[13] 陈钦芳. 二次非球面反射镜和透镜中心误差测量的研究[D]. 西安:西安工业大学, 2008.
CHEN Q F. Study on measurement for centering errors of quadric mirrors and lens[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008.

[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 centering error based on joint transform correlator [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2785-2793.

[15] 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 ZH, CHENG R, et al. Automatic measurement of center deviation of lens of laser differential confocal[J]. Optics and Precision Engineering, 2023, 31(23): 3405-3413.

[16] FU X H, KANG SH F, LEI Y, et al. Research on technology of measuring and correcting the optical axis deviation of high-order aspheric lens[C]. Conference on Applied Optics and Photonics China, 2020:1156806.

[17] 邵平, 夏兰, 赵东峰, 等. 高功率激光装置终端楔形透镜的测量与调试[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 260-265.
SHAO P, XIA L, ZHAO D F, et al. Measurement and debugging of wedge-shaped lens in high power laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(4): 260-265.

[18] 许鑫, 姚竹贤, 王允, 等. 球型惯性元件配合间隙差动共焦精密测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(4): 1-8.
XU X, YAO ZH X, WANG Y, et al. Laser differential confocal-based high-precision measurement method for the matching clearance of spherical inertial element[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(4): 1-8.

[19] 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 for the latitude and longitude traces on the surface of ICF capsule [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 127-135.

[20] 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.

[21] 杜卓, 王伟, 王允, 等. 基于偏心抑制的激光差动共焦焦距高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(11): 39-46.
DU ZH, WANG W, WANG Y, et al. High-precision measurement method of laser differential confocal length based on eccentricity suppression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11): 39-46.

[22] ZHAO W Q, SUN R D, QIU L R, et al. Laser differential confocal radius measurement [J]. Optics Express, 2010, 18(3): 2345-2360.

[23] WANG X, QIU L R, ZHAO W Q, et al. Error analysis for a laser differential confocal radius measurement system[J]. Applied Optics, 2015, 54(5): 1078-1084.

[24] 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.

作者简介

刘金晨,2022 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及仪器。
E-mail:1076321062@qq.com

Liu Jinchen received his B. Sc. degree from Hebei University of Technology in 2022. He is currently a master's degree student at Beijing Institute of Technology. His main research interests include precision photoelectric testing technology and instruments.

刘昱含(通信作者),2018 年于北京理工大学获得学士学位,2024 年于北京理工大学获得硕博连读博士学位,现为北京理工大学博士后,主要研究方向为精密光电测试技术及仪器。
E-main:2449664655@qq.com

Liu Yuhan(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2018, and received his Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2024. He is currently a postdoctoral fellow at Beijing Institute of Technology. His main research interests include precision photoelectric testing technology and instruments.