

文章编号 1004-924X(2024)09-1320-10

激光共焦干涉面形快速高精度自动测量

赵家豪, 杨 帅*, 杨 铮, 崔 健, 邱丽荣, 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 10081)

摘要:针对传统球面面形干涉测量中手动调整被测件姿态精度低、速度慢的问题,提出了激光共焦干涉面形快速高精度自动测量方法。该方法通过共焦精密定焦技术实现了对被测件共焦位置的高精度轴向定位;通过五维自动调整架对被测件进行姿态调整,实现了被测件的高精度横向定位;通过 Zernike 拟合对被测件进行精调以减小离焦误差和倾斜误差,实现了对干涉面形的零条纹调整。最终实现了激光共焦干涉面形自动测量。构建了激光共焦干涉面形测量系统,实验表明:该方法的面形测量结果与 Zygo 干涉仪的测量结果相差 0.0006λ ,重复测量精度可达 0.0019λ ,平均单次干涉面形测量时间为 16.5 s ,与手动调整至零条纹相比测量效率提高了 1.56 倍。该方法为干涉面形的快速高精度测量提供了一种有效的手段。

关键词:激光共焦测量;移相干涉;共焦法;姿态调整;Zernike 拟合;自动测量

中图分类号:TH741;TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243209.1320

Laser confocal interference surface rapid and high-precision automatic measurement

ZHAO Jiahao, YANG Shuai*, YANG Zheng, CUI Jian, QIU Lirong, ZHAO Weiqian

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

* Corresponding author, E-mail: yangshuai_bit@163.com

Abstract: Considering the low accuracy and slow speed of measuring objects with spherical surfaces using traditional interferometry due to manual adjustments, an automatic laser confocal interferometric method is proposed for rapid and high-precision measurement of surface shapes. This method utilizes precise confocal fixed-focus technology for accurate confocal axial positioning of the object. The object's posture is adjusted using a five-dimensional workbench. Zernike fitting is employed to minimize defocus and tilt errors, achieving zero-order fringe adjustment and automatic determination of the surface shape. A laser confocal interferometric measurement system was developed for this purpose. Experimental results show that the difference between the automatic interference measurement results and those of the Zygo interferometer is 0.0006λ , with a repeatability accuracy of 0.0019λ . The average measurement time for a single surface is 16.5 s , improving measurement efficiency by 1.56 times compared to manual adjustments. This method offers an ef-

收稿日期:2023-11-21;修订日期:2024-01-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U22A6006);民用航天技术预先研究项目(No. D020402)

fective solution for the rapid and precise measurement of interferometric surface shapes.

Key words: laser confocal measurement; phase-shift interference; laser confocal; posture adjustment; Zernike fitting; automatic measurement

1 引言

高精度球面元件广泛应用于工业相机镜头^[1]、轴承滚珠^[2]、光刻机物镜^[3]、激光核聚变^[4]等精密光学系统和机械系统中,其自身的加工精度直接决定了系统的整体性能。高精度球面元件加工必须以高精度检测为支撑,检测精度很大程度上决定了元件的加工精度。球面光学元件面形的高精度检测在其加工和制造过程中具有重要意义。在球面面形测量领域,一般采用移相干涉测量法^[5-8]进行表面形貌检测,该方法测量精度高、速度快,目前在球面元件面形检测方面的应用最广泛。

在球面干涉测量中,被测元件的球心必须与测量光束的焦点重合,元件姿态的精密调整是实现高精度测量的重要前提。但传统球面元件姿态调整通常通过测量人员手动操作完成,其精度和效率难以大幅提高,并且在装调过程中会引入倾斜误差与离焦误差,需要对被测光学元件的姿态进行多次调整,以减小这些误差带来的精度损失。为达到最高测量精度,通常需要将参考镜与被测光学元件产生的干涉条纹调至零条纹。通过手动调整难以实现对被测镜快速、高精度的姿态调整,这严重制约了干涉面形测量精度和效率的提升。2017年,郭东福等提出了一种子孔径零条纹自动快速调节方法^[9],通过分析干涉条纹数量对拼接误差的影响,利用拼接位移台对角位移偏差进行自动补偿,实现了子孔径拼接干涉的快速调整,提高了测量速度与效率。但该方法没有对离焦方向误差进行补偿,因此无法实现球面光学元件的面形检测。2019年,郭浩等提出了球面元件姿态自动调整方法^[10],建立了机构调整量与姿态偏移量的数学模型,依据CCD实时反馈的光斑位置分析被测件的姿态偏差,并通过

调整机构对姿态偏差进行自动快速调整,实现了对球面元件曲率半径和焦距等尺寸参数的全自动测量。

课题组在前期研究中提出了激光共焦检测方法来精准定焦^[11-12],该方法利用共焦光强响应曲线的峰值点精确对应测量光束焦点这一特性来定焦被测表面的共焦位置,有效提高了定焦精度与测量效率。由此可见,激光共焦技术是一种高精度、高灵敏的定焦手段,可用于指导干涉测量中被测元件姿态的精密调整。

本文提出了激光共焦干涉面形快速高精度自动测量方法。该方法将共焦与干涉测量相结合,通过共焦定点技术,实现对被测件共焦点的高精度轴向定位,通过Zernike拟合^[13-15]分析倾斜量和离焦量,借助五维自动调整架对被测件姿态进行自动调整,最终实现干涉零条纹的面形测量,显著提高了测量精度和测量效率,从而为干涉面形的快速高精度测量提供了一种有效的测量手段。

2 原理

图1为激光共焦干涉面形自动测量原理光路,点光源S发出的光经偏振分束镜PBS, $\lambda/4$ 波片和分束镜BS1后由准直镜透镜 L_c 准直成平行光束,参考物镜 L_o 将平行光会聚成测量光束。当被测元件处于共焦位置时,由被测元件反射回来的光束沿原光路返回,经分束镜BS1分成两路,一路进入粗瞄CCD,显示当前光斑的位置信息;另一路经偏振分束镜PBS,由分束镜BS2分成两路,一路进入共焦模块,用于精准定面,由点探测器D接收并记录;另一路进入干涉CCD,用于干涉面形测量,当被测光斑与参考光斑在粗瞄视场里重合后发生干涉,干涉CCD采集干涉图。

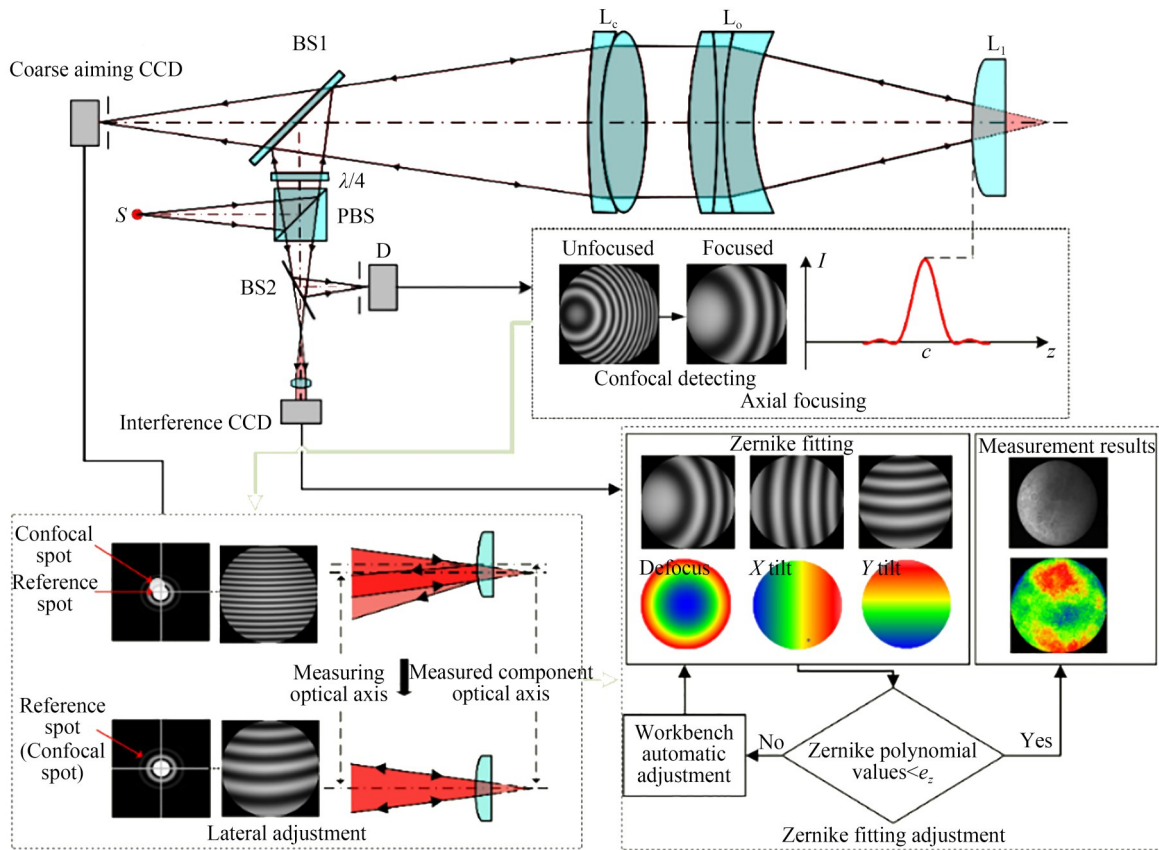


图1 激光共焦干涉面形自动测量原理

Fig. 1 Schematic diagram of automatic measurement of surface shapes using laser confocal interferometry

2.1 共焦高精度轴向定位原理

依据粗瞄 CCD 记录的光斑位置信息与干涉测长仪记录的轴向距离信息,可以得到共焦点的共焦光强响应曲线,从而实现对被测元件共焦点的精确定焦。如图 1 所示,以一个凸面透镜为例阐述被测元件轴向定位原理。点光源 S 发出的光经过参考物镜 L_0 会聚后,光线过球心,此时形成的反射光经分束镜 BS1 和 BS2 反射进入共焦模块。点探测器 D 在会聚点前后捕捉到光强信息,对光强信息进行归一化处理得到光强响应信号为 $I(u, v)$,由于光强响应信号的轴向分量与横向分量相互独立,互不影响。当被测元件位于共焦位置时,仅考虑沿光轴方向的光强强度响应。因此,横向分量的归一化极坐标 $v=0$,通过惠更斯-菲涅耳衍射积分公式得到共焦光强响应信号^[16]:

$$I(u, 0) = \left| \int_0^{2\pi} \int_0^1 \exp[-i2kw(\rho, \theta)] \exp(iu\rho^2) \rho d\rho d\theta \right|^2, \quad (1)$$

式中 u 为归一化的轴向坐标,其数学表达式为:

$$u = \frac{\pi}{2\lambda} \left(\frac{D}{f_0} \right)^2 \cdot z, \quad (2)$$

其中: D/f_0 为参考物镜 L_0 的相对孔径, z 为轴向坐标, ρ 为被测表面的归一化径向坐标, θ 是变量 ρ 对应的极角, $w(\rho, \theta)$ 为被测表面的面形误差。

当 $w(\rho, \theta) < \lambda/4$ 时,面形误差对激光共焦干涉测量系统中响应信号 $I(u, 0)$ 的影响被忽略。 $I(u, 0)$ 可以简化为:

$$I(u, 0) = \left[\frac{\sin(u/2)}{u/2} \right]^2 = [\text{sinc}(u/2)]^2. \quad (3)$$

通过共焦光强响应曲线 $I(z)$ 的峰值点对共焦位置进行高精度轴向定位,共焦位置的共焦光强响应曲线的峰值位置精确对应被测光学元件的焦点位置,如图 2 所示。定焦后,干涉条纹数量越少,由离焦误差引起的测量误差就越小。理论上干涉条纹为 0 条时,离焦误差最小。这里仅考

虑共焦轴向定焦情况下干涉条纹的最小有效数量显著小于未定焦情况下干涉条纹的有效数量。共焦轴向定焦后,干涉条纹数量显著减少,测量误差显著降低。

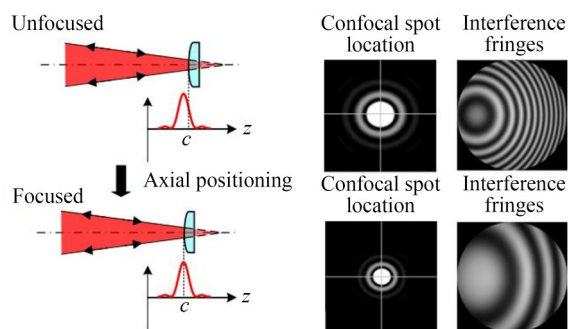


图2 共焦光斑轴向定位原理

Fig. 2 Schematic of axial positioning of confocal spot

2.2 基于五维自动调整架的横向定位原理

共焦点精准定焦后,需对被测元件进行横向定位。理想状态下,被测元件光轴与测量光轴同轴,被测元件不存在姿态偏差。但由于实际装调过程中存在装调误差,被测元件光轴与测量光轴往往不同轴,这种情况下共焦光斑与参考光斑无法完全重合,需将元件姿态偏差调整到误差允许范围内。

元件存在姿态偏差且失调量过大会导致共焦光斑与参考光斑不重合,无法发生干涉。此时,需要通过五维自动调整架调整被测元件姿态以减小失调量。首先,计算在粗瞄视场里共焦光斑质心坐标 (x_1, y_1) 相对参考光斑质心坐标 (x_2, y_2) 的失调量。质心坐标的计算公式如下:

$$\begin{cases} x = \sum_{(i,j) \in U} i \cdot f(i,j) / \sum_{(i,j) \in U} f(i,j) \\ y = \sum_{(i,j) \in U} j \cdot f(i,j) / \sum_{(i,j) \in U} f(i,j) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: x, y 分别为光斑的横、纵坐标, $f(i, j)$ 是坐标为 (i, j) 的像素点的灰度值, U 是图像区域集合。

根据光斑的失调量,确定调整机构的调整过程,对元件姿态进行初步自动调整。当共焦光斑与参考光斑的质心坐标差值小于设定像素阈值

e_h 时,即:

$$\begin{cases} |x_1 - x_2| < e_h \\ |y_1 - y_2| < e_h \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $e_h = 1$,表示共焦光斑与参考光斑的质心坐标完全一致,横向定位粗调完成。此时,两光斑在干涉CCD视场里发生干涉形成非零级干涉条纹,如图1(b)所示。

2.3 基于Zernike拟合的干涉自动调整原理

被测元件的轴向定位与横向定位完成后,存在残余的离焦偏差与倾斜偏差。为进一步减小偏差,需基于Zernike拟合进行干涉自动调整。通过移相采集得到5幅干涉图,对5幅干涉图进行算法处理,通过Zernike拟合得到由 q 项Zernike多项式表示的离散波面函数 $w(\rho, \theta)$:

$$w(\rho, \theta) = a_1 Z_1(\rho, \theta) + a_2 Z_2(\rho, \theta) + \dots + a_q Z_q(\rho, \theta) = \mathbf{a}^T \mathbf{Z}, \quad (6)$$

式中: $a_1 \sim a_q$ 为Zernike多项式系数, ρ 为距原点的长度, θ 为相对原点的角度,Zernike多项式 $Z(\rho, \theta)$ 可写成如下形式:

$$Z_q(\rho, \theta) = (n+1)^{\frac{1}{2}} R_n^0(\rho), \quad m=0$$

$$\begin{cases} m \neq 0 \\ Z_{\text{even } q}(\rho, \theta) = [2(n+1)]^{\frac{1}{2}} R_n^m(\rho) \cos m\theta \\ Z_{\text{odd } q}(\rho, \theta) = [2(n+1)]^{\frac{1}{2}} R_n^m(\rho) \sin m\theta \end{cases}, \quad (7)$$

式中: n 和 m 均为整数,且有 $n-m \geq 0$ 为偶数; n 为多项式中 ρ 的最高阶,它表示多项式的径向阶数; m 为方位角频率。

径向多项式 R_n^m 定义为:

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left(\frac{n+m}{2} - s\right)! \left(\frac{n-m}{2} - s\right)!} \rho^{n-2s}. \quad (8)$$

设总共有 x 个离散数据点对应 $w_i(\rho_i, \theta_i)$,令 $z_{ij} = Z_j(\rho_i, \theta_i)$,其中 $i=1, 2, \dots, x; j=1, 2, \dots, q$ 。代入式(6)得到:

$$\begin{cases} z_{11}a_1 + z_{12}a_2 + \dots + z_{1q}a_q = w_1 \\ z_{21}a_1 + z_{22}a_2 + \dots + z_{2q}a_q = w_2 \\ \vdots \\ z_{x1}a_1 + z_{x2}a_2 + \dots + z_{xq}a_q = w_x \end{cases}. \quad (9)$$

令 $Z=(z_{ij})$, $a=(a_1, a_2, \dots, a_q)^T$, $W=(w_1, w_2, \dots, w_x)^T$, 由式(9)结合广义逆矩阵理论可求得拟合系数向量 a :

$$a=(Z^T Z)^{-1} Z^T W. \quad (10)$$

通过拟合系数 a , 以及 Zernike 多项式 Z 可以求出每一项结果。由于 Zernike 多项式在半径为 r 的单位圆内连续数据点上具有正交性, 项与项之间不会相互影响。因此, 可以用 Zernike 多项式来进一步调整被测元件姿态。其中, 第 2, 3 项 $\rho \cos \theta, \rho \sin \theta$ 分别代表被测波前相对参考波前沿 X, Y 方向倾斜而产生的波像差, 对应拟合系数 a_2, a_3 与被测元件 X, Y 方向姿态偏差角度 θ_x, θ_y 的关系如下:

$$\begin{cases} \theta_x \approx a_2/r \\ \theta_y \approx a_3/r \end{cases} \quad (11)$$

通过五维自动调整架对 θ_x, θ_y 进行角位移补偿, 实现被测元件姿态的横向精确调整。第 4 项 $2\rho^2-1$ 代表被测波前相对参考波前离焦而产生的波像差。离焦项计算原理如图 3 所示。

被测波前焦点在参考波前焦点轴向距离 L 处, 两波前矢高分别为 h_1, h_2 , 则被测波前相对参考波前的离焦量 W_4 如下:

$$W_4 = \sum_{i=1}^x z_{i4} a_4 = h_1 - h_2. \quad (12)$$

$$L = W_4 \sqrt{1 - \left(\frac{r}{R_2}\right)^2} / \left(\sqrt{1 - \left(\frac{r}{R_2}\right)^2} - 1 \right) = W_4 \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2f_{\text{number}}}\right)^2} / \left(\sqrt{1 - \left(\frac{1}{2f_{\text{number}}}\right)^2} - 1 \right). \quad (15)$$

由式(15)可知, 共焦位置的离焦量与轴向位移量呈线性关系, 因此, 通过五维自动调整架对离焦量进行线性补偿, 实现被测元件的轴向精确调整。

被测元件通过 Zernike 拟合自动调整原理如图 1(c) 所示。根据每次移相后得到的 Zernike 多项式结果来确定五维自动调整架的调整过程, 迭代调整直至倾斜项与离焦项结果小于 Zernike 多项式系数阈值 e_z 。理论上 e_z 为 0 时, 干涉条纹数量为 0, 但是经过多次实验尝试, e_z 为 0.2 时基本上接近 0 条纹。为了权衡精度与效率, 取 $e_z=0.2$, 表示当被测元件的离焦量、 X 倾斜量与 Y 倾斜量均小于 0.2λ 时, 干涉条纹接近 0 条, 干涉自动调整最终完成。

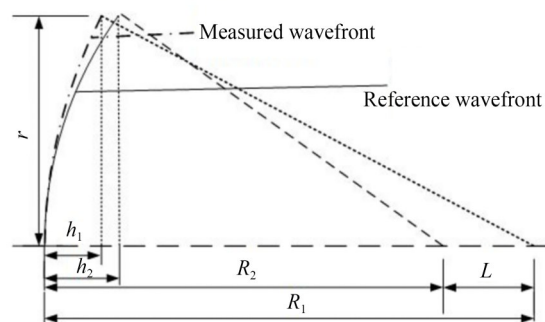


图 3 离焦量与矢高的关系

Fig. 3 Relationship between defocus term and vector height

L 与 W_4 的关系由几何关系得到, 即:

$$\begin{aligned} W_4 = h_1 - h_2 = & \left(R_1 - \sqrt{R_1^2 - r^2} \right) - \left(R_2 - \sqrt{R_2^2 - r^2} \right) = \\ & L - \frac{2LR_2 + L^2}{\sqrt{R_2^2 - r^2} + \sqrt{(R_2 + L)^2 - r^2}}. \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到 R_2 远大于 L , 则式(13)可化简为:

$$W_4 = L \left(1 - \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 - r^2}} \right). \quad (14)$$

对于出射平行光有 $R_2 \approx f'$, $f_{\text{number}} \approx R_2/2r$, f' 为参考物镜 L_0 的焦距, f_{number} 为 L_0 的 F 数。由式(14)可得:

3 实 验

3.1 共焦干涉面形自动测量系统

为了验证上述方法的正确性及可行性, 搭建了共焦干涉面形自动测量系统, 如图 4 所示。该系统由干涉仪主机、五维自动调整架、测长干涉仪、气浮导轨和计算机主控系统组成。

实验采用 NewOpto-633-3-R 激光器, 波长为 632.8 nm, 选用 F 数为 0.75 的 Zygo lamuda 标准会聚镜作为参考物镜, 准直镜焦距为 1 000 mm。粗瞄 CCD 为 OK_AM1160, 干涉 CCD 为 Ueye camera。所用干涉测长仪为 Renishaw XL-80 型号干涉仪。导轨为实验室自研的高精度直线气浮导轨, 导轨行程为 600 mm, 直线度为 $1 \mu\text{m}$ 。被测件选用曲率半径为 12.7 mm 的标准球, 球度为 $0.04 \mu\text{m}$ 。

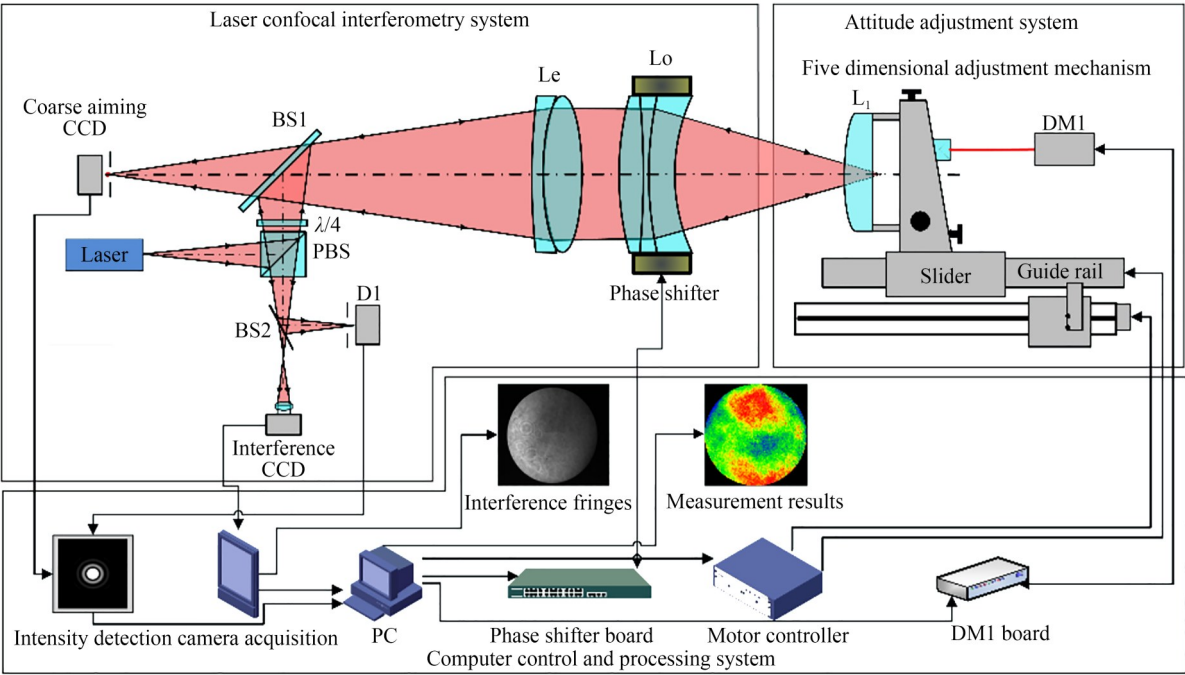


图 4 共焦干涉面形自动测量系统

Fig. 4 Automatic measurement system for surface shapes based on confocal interferometry

将曲率半径为 12.7 mm 的标准球装卡在五维自动调整架上,利用五维自动调整架的旋转电机调整被测件姿态。在共焦位置进行精准定位时,主轴电机驱动丝杠带动固定在气浮导套上的五维自动调整架和曲率半径为 12.7 mm 的标准球,在共焦位置附近沿光轴移动,同时粗瞄 CCD 实时探测光斑光强信息,测长干涉仪实时获取曲率半径为 12.7 mm 的标准球的位置信息,计算机主控系统确定调整方案。调整完成后对采集到的共焦位置光强信息进行归一化处理,得到共焦光强响应曲线实现精准轴向定焦。定焦后对被测件姿态进行横向定位,使参考光斑与被测光斑重合。定位完成后得到干涉图,依据干涉图进行干涉自动调整,对采集到的干涉图进行算法处理,通过 Zernike 拟合多项式来调整被测件姿态直至干涉条纹为零,最终完成干涉面形自动测量。

3.2 实验结果

菲索型干涉仪内部的参考光与测量光仅在零级条纹状态下经过相同光路,在非零级条纹下会产生波像差,且干涉条纹越多,误差越大。手动调整会引起参考面与被测面间产生倾斜偏心

和轴向偏心,使得被测元件在不同位置产生不同数量的干涉条纹,引入波像差,直接影响干涉面形的测量精度。如表 1 所示,以零干涉条纹时刻测量结果为参考值,分别对由倾斜和离焦导致条纹数量变化的被测元件进行干涉面形测量。结果表明,倾斜偏心 and 离焦偏心均会增大波像差,且干涉条纹大于 3 条时,残差 PV 值大于 0.02λ ,严重影响面形检测精度。

表 1 干涉条纹数量对波像差的影响

Fig. 1 Effect of interference fringe number on wave aberration

Fringe	Wave aberration PV (λ)	
	Tilted eccentricity	Axial eccentricity
1	0.005	0.008
3	0.021	0.021
5	0.025	0.043
7	0.031	0.067

基于图 4 所示的系统,对曲率半径为 12.7 mm 的标准球分别采用干涉面形自动测量和手动测量两种方法,比较其面形测量的精度与效率。以 Zygo 干涉仪测量结果为参考,如图 5 所

示,10次重复测量PV平均值为 $0.087\ 8\lambda$ 。实验条件为:温度 $(21.0\pm0.5)\ ^\circ\text{C}$,相对湿度 $(43\pm5)\%$ 。

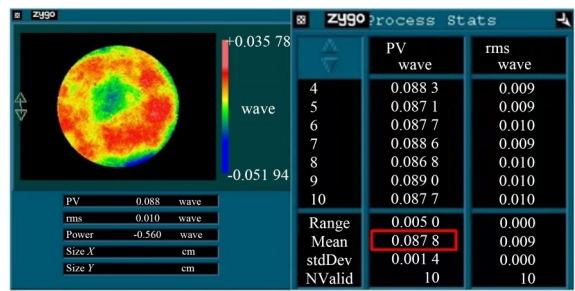


图5 Zygo干涉仪测得的曲率半径为12.7 mm的标准球面形

Fig. 5 Zygo interferometer measurement results of standard sphere with curvature radius of 12.7 mm

对标准球进行了10次共焦干涉面形自动测量,自动调整的干涉图如图6(a)所示,结果如表2所示。在干涉零条纹下面形PV值的均值为 $0.088\ 4\lambda$,平均单次自动测量时间为16.5 s。为验证自动测量方法的精度与效率,手动调整样品姿态使得干涉条纹数量分别达到0,3,5,7,得到的干涉图如图6(b)~6(e)所示。在不同条纹情况下分别进行10次重复性测量实验,得到手动调整至0条纹面形PV值均值为 $0.088\ 6\lambda$,单次测量时间为42.3 s;手动调整至3条纹面形PV值均值为 $0.111\ 3\lambda$,单次测量时间为27.5 s;手动调整至5条纹面形PV值均值为 $0.118\ 5\lambda$,单次测量时间为10.7 s;手动调整至7条纹面形PV值均值为 $0.142\ 5\lambda$,单次测量时间为6.9 s,结果如表2所示。

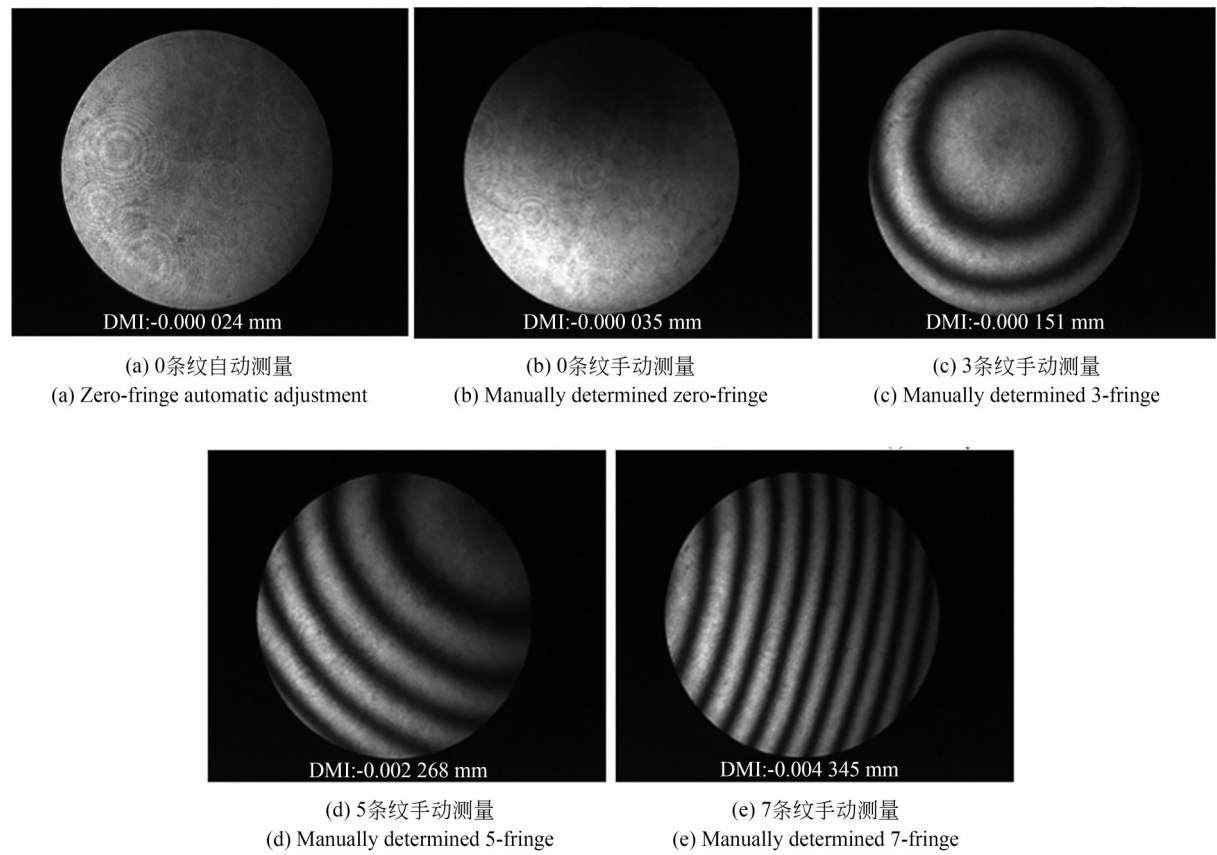


图6 干涉条纹自动调整与手动调整对比实验

Fig. 6 Comparison experiment of automatic and manual adjustment of interference fringes

自动测量与手动测量共5组数据,图7为标准球测量结果。由表2可知,10次共焦面形干涉

自动测量结果的平均值为 $0.088\ 4\lambda$,Zygo干涉仪的测量结果为 $0.087\ 8\lambda$,两测量结果之间的差值

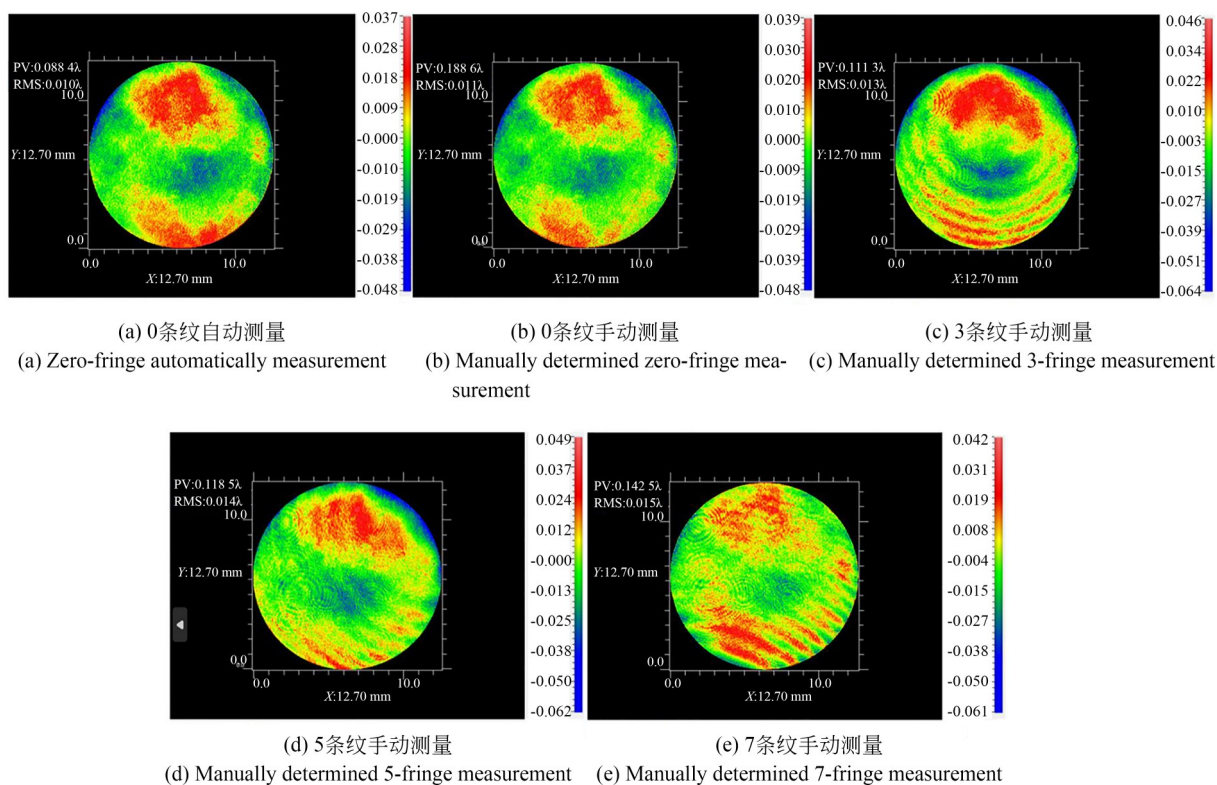


图 7 标准球测量结果

Fig. 7 Standard sphere measurement results

表 2 曲率半径为 12.7 mm 标准球的干涉面形测量结果

Tab. 2 Results of standard sphere interference surface with curvature radius of 12.7 mm

Measurement number	Automatic measurement	Manual measurement			
	0 fringe PV(λ)	0 fringe PV(λ)	3 fringes PV(λ)	5 fringes PV(λ)	7 fringes PV(λ)
1	0.088	0.089	0.107	0.124	0.127
2	0.085	0.092	0.115	0.129	0.135
3	0.087	0.093	0.111	0.127	0.128
4	0.092	0.086	0.106	0.113	0.143
5	0.086	0.085	0.115	0.109	0.143
6	0.089	0.088	0.11	0.117	0.147
7	0.088	0.085	0.109	0.123	0.139
8	0.091	0.086	0.126	0.114	0.156
9	0.087	0.093	0.109	0.116	0.154
10	0.091	0.089	0.105	0.113	0.153
Mean value	0.088 4	0.088 6	0.111 3	0.118 5	0.142 5
Difference	0.000 6	0.000 8	0.023 5	0.030 7	0.054 7
Time/s	16.5	42.3	27.5	10.7	6.9

为 0.000 6 λ 。重复测量精度计算公式如下:

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n}, \quad (16)$$

式中: n 为测量次数, $\bar{x}$ 为测量结果均值, x_i 为单次测量结果。

由式(16)和表 2 可以得出,10 次共焦面形干

涉自动测量的重复测量精度为 $0.001\ 9\lambda$ 。测量效率方面,自动测量方法的平均时间为 16.5 s ,而手动调整至零干涉条纹进行面形测量的平均时间为 42.3 s ,测量效率提高了 1.56 倍。与手动非零级干涉条纹测量相比,自动测量精度得到显著提升。

4 结 论

针对传统球面面形干涉测量中手动调整被测件姿态精度低、速度慢的问题,本文提出了一种激光共焦干涉面形快速高精度自动测量方法。该方

法将共焦与干涉测量相结合,通过共焦定点技术实现对被测件共焦点的高精度轴向定位,借助五维自动调整架对被测元件进行横向定位调整,通过 Zernike 拟合对元件姿态进行精确调整,有效减小了由于被测元件倾斜和离焦导致干涉条纹数量过多而造成的测量误差,实现了对面形的零条纹调整。实验结果表明:该方法的面形测量结果与 Zygo 干涉仪相差 $0.000\ 6\lambda$,重复测量精度可达 $0.001\ 9\lambda$,平均单次干涉面形测量时间为 16.5 s ,与手动调整至零条纹相比测量效率提升了 1.56 倍,有效提高了元件姿态调整效率,对实现干涉面形全自动高精度测量有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 薛嘉隆. 微小型大孔径广角车载镜头光学设计 [D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
XUE J L. *Optical Design of Compact Large Aperture and Wide-angle Automotive Lens* [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022. (in Chinese)
- [2] 宋玉杰. 航空轴承滚珠总成检测方法的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2022.
SONG Y J. *Research on Detecting Method of Aviation Bearing Assembly Ball* [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2022. (in Chinese)
- [3] 曹译莎, 唐锋, 王向朝, 等. 光刻投影物镜畸变检测技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922012.
CAO Y SH, TANG F, WANG X ZH, *et al.* Measurement techniques for distortion of lithography projection objective [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922012. (in Chinese)
- [4] 于杰. 超高精度相移点衍射干涉测量技术研究 [D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
YU J. *Study on Ultra-high Accuracy Phase Shifting Point Diffraction Interferometry* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [5] BRUNING J H, HERRIOTT D R, GALLAGHER J E, *et al.* Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses [J]. *Applied Optics*, 1974, 13(11): 2693-2703.
- [6] 胡晨辉, 陈磊, 黄晨, 等. 抑制移相干涉仪中相干噪声的多模光纤扩展光源研究 [J]. 光学学报, 2022, 42(19): 1906001.
- [7] HU CH H, CHEN L, HUANG CH, *et al.* Extended light source of multimode fibers for suppressing coherent noise in phase-shift interferometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(19): 1906001. (in Chinese)
- [7] 马瑞, 李楠, 何建国, 等. 多自由度激光干涉空间惯性质量块位姿测量 [J]. 光学精密工程, 2023, 31(11): 1593-1606.
- [8] MA R, LI N, HE J G, *et al.* Multi-degree-of-freedom measurement for space inertial test mass via laser interference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(11): 1593-1606. (in Chinese)
- [8] 杨宇琦, 李杨, 吕彤, 等. 混频对全视场外差动态干涉仪测量精度的影响 [J]. 光学精密工程, 2023, 31(9): 1267-1276.
- [9] YANG Y Q, LI Y, LÜ T, *et al.* Influence of frequency mixing on measurement accuracy of full-field heterodyne dynamic interferometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2023, 31(9): 1267-1276. (in Chinese)
- [9] 郭福东, 唐锋, 卢云君, 等. 子孔径拼接干涉的快速调整及测量 [J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2682-2688.
- [10] GUO F D, TANG F, LU Y J, *et al.* Rapid adjustment and measurement for subaperture stitching interferometry [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2682-2688. (in Chinese)
- [10] 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.
- [10] GUO H, XIAO Y, DONG S, *et al.* Laser confo-

- cal automatic adjustment system for attitude of spherical component [J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(1): 132-137. (in Chinese)
- [11] QIU L R, XIAO Y, ZHAO W Q, *et al.* Laser confocal interference multi-parameter measurement method for spherical lens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23): 2716-2719.
- [12] 邱丽荣, 王超峰, 赵维谦. 球面惯性元件激光共焦曲率半径测量系统[J]. *中国惯性技术学报*, 2019, 27(2): 266-271.
- QIU L R, WANG CH F, ZHAO W Q. Laser confocal radius measurement system for spherical inertial elements [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(2): 266-271. (in Chinese)
- [13] 高飞, 李晋惠, 田爱玲, 等. 基于Zernike多项式拟合三平面互检的误差分析[J]. *光子学报*, 2017, 46(9): 0912008.
- GAO F, LI J H, TIAN A L, *et al.* Error margin analysis of three-flat test based on zernike polynomials fitting [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(9): 0912008. (in Chinese)
- [14] 鄢静舟, 雷凡, 周必方, 等. 用Zernike多项式进行波面拟合的几种算法[J]. *光学精密工程*, 1999, 7(5): 119-128.
- YAN J ZH, LEI F, ZHOU B F, *et al.* Algorithms for wavefront fitting using zernike polynomial [J]. *Optics and Precision Engineering*, 1999, 7(5): 119-128. (in Chinese)
- [15] 吴伦哲, 徐学科, 吴令奇, 等. 非球面光学元件面形误差边缘处理方法(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220602.
- WU L ZH, XU X K, WU L Q, *et al.* Method of edge control on surface error in aspherical optics (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 3788/IRLA20220602. (in Chinese)
- [16] ZHAO W Q, QIU L R, XIAO Y, *et al.* Laser differential confocal interference multi-parameter comprehensive measurement method and its system for spherical lens [J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22813-22829.

作者简介:



赵家豪(1999—),男,河北沧州人,硕士研究生,2021年于河北工业大学获得学士学位,主要从事精密光学测量方面的研究。E-mail: 9032909050@qq.com

通讯作者:



杨帅(1994—),男,内蒙古满洲里人,博士,2015年、2021年于北京理工大学分别获得学士和博士学位,主要从事激光差动共焦-干涉精密检测方面的研究。E-mail: yangshuai_bit@163.com