

# 光学学报

## 基于刀口仪轴向移动的自动化非球面检测技术

华翔<sup>1,2,3</sup>, 焦兆阳<sup>1,2\*\*</sup>, 朱健强<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理重点实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院中国工程物理研究院高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了解决自动化刀口仪面临的如何搜索并收敛到特征点的核心问题,提出一种基于刀口仪轴向移动的非球面检测技术,实现了在搜索过程中提取环带误差信息,一方面在搜索过程中动态获得波前特性,另一方面可以加速收敛找到特征点。利用所提方法对不同参数的镜面环带误差进行检测,所得带差位置与干涉仪检测结果的相对误差小于 3.3%,验证了所提方法的有效性。所提方法为刀口仪的自动化测量提供了一个便捷的解决方案,为进一步提高非球面加工效率提供了技术支撑。

**关键词** 测量; 刀口仪; 自动化; 光学检测; 光学仪器

中图分类号 TH741

文献标志码

DOI: 10.3788/AOS202242.2312003

### Automatic Aspheric Surface Testing Technology Based on Axial Movement of Knife-Edge Instrument

Hua Xiang<sup>1,2,3</sup>, Jiao Zhaoyang<sup>1,2\*\*</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>National Laboratory on High Power Laser and Physics, Chinese Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** To solve the core problem of how to search and converge to the feature points faced by the automatic knife-edge instrument, this paper proposes an aspheric surface testing technology based on the axial movement of the knife-edge instrument to realize the extraction of ring-belt errors during the search process. By this technology, the wavefront characteristics are dynamically obtained during the search process, and the convergence can be accelerated to find the feature points. The mirror ring-belt errors of different parameters are tested, and the relative error between the tested ring-belt error position and the test result of the interferometer is less than 3.3%, which verifies the effectiveness of the method. The proposed method provides a convenient solution for the automatic measurement of the knife-edge instrument and provides technical support for further improving the efficiency of aspheric surface processing.

**Key words** measurement; knife-edge instrument; automation; optical testing; optical instrument

## 1 引言

非球面光学元件面型检测在现代光学先进加工制造技术中具有十分重要的指导意义<sup>[1-2]</sup>。非球面检测方法主要有傅科刀口阴影检测法、干涉仪检测方法、轮

廓检测法、计算全息法、相位偏折术检测法、原子力显微镜检测法以及哈特曼传感器检测法<sup>[3-9]</sup>等。其中,刀口法是一种检测非球面加工表面波前环带误差中普遍使用的重要方法,在检验光学表面方面极其有效,具有设备简单、检测精度高、灵敏度高、检测速度快等特点。

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-05-03; 录用日期: 2022-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(62105343)、上海市自然科学基金(19ZR1464400)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA25020202)

通信作者: \*jqzhu@siom.ac.cn; \*\*zhyyjiao@siom.ac.cn

此外,由于通用的干涉仪只能检测加工后期的较小误差,因此刀口仪在光学加工前期粗加工的检测中具有不可替代的地位。

随着科学技术的进步,刀口仪逐渐往数字化、自动化方向发展。柯达公司<sup>[10-11]</sup>曾在这一领域进行过研究,他们使用CCD相机采集数字化的刀口阴影图,经过刀口运动对亮度变化数据进行积分,解算待测镜面的峰谷(PV)值和方均根(RMS)误差,但定量化程度和自动化程度有限,并且需要将仪器精密调整至焦点处才能进行检测。针对刀口仪的数字化研究已经开展很多年:Yuan等<sup>[12]</sup>使用阴影图的灰度偏差分布来降低大口径光学镜的量化表面波前加工误差;Jing等<sup>[13]</sup>使用几何分析结合灰度分布对刀口检测法获得的阴影图进行量化分析;张均<sup>[14]</sup>研究了数字化刀口仪,利用其提出的几何算法定量化测量了大口径光学镜面;王小鹏等<sup>[15-16]</sup>搭建了一套数字化刀口仪,并利用其开发的定量化算法检测了非球面光学元件的一系列参数,其数学模型与Jing等<sup>[13]</sup>和张均<sup>[14]</sup>类似,均为几何模型;范珂等<sup>[17]</sup>进行了刀口法定量检测研究,并建立相关几何数学模型进行模拟实验。上述工作较为全面地研究了刀口仪检测的几何关系,但自动化程度有限,仍需在焦点处进行检测。Cheng等<sup>[18]</sup>使用CCD和傅里叶变换来处理刀口阴影图,并解算了表面波前误差。Villa等<sup>[19-21]</sup>通过物理光学方法对刀口法的物理理论和灰度给予了深层次的研究,以解算表面波前加工误差数据。上述关于刀口仪的研究,一般通过刀口在焦点处横向运动获得一系列刀口阴影图,再对阴影图进行分析,从而获得镜面波前加工误差。由于使用了数字图像采集及处理技术和自动控制技术,刀口仪在数字化方向上取得了迅速发展,但检测过程中均需要人工先找到待测镜面焦点即特征点位置,再执行具体的检测步骤,也就是说自动化刀口仪面临的通过搜索并收敛到特征点的这一核心问题还亟待解决。

传统刀口仪检测非球面一般在焦点处进行测量,本质上属于在特征点获取信息,具有信噪比高和灵敏度高的优点。从逻辑上讲,刀口仪的自动化流程应依次包括自动寻找光轴、搜索特征点,采集阴影图以及完成检测。可见,自动化刀口仪检测必然存在一个搜索推扫的过程,而搜索过程中获取的数字图像本身就包含了待测样品的波前信息,但并未被充分挖掘。为此,在原有刀口仪数字化研究的基础上,本文提出一种基于刀口仪轴向移动的自动化检测方法,目的是实现刀口仪检测光学元件的自动化。利用刀口仪沿光轴纵向自动扫描,解决了刀口不在焦点处时采集到的图像无法判读待测镜面加工误差有效信息的问题,具有在自动化过程中完成信息提取的核心技术,同时计算采集到的图像特征函数,可以得出焦点位置的阴影图。本文方法既可以在轴向搜索过程中获得动态波前特性,又可以快速收敛到焦点,为进一步提高非球面加工效率提供新的思路。

## 2 基于刀口仪轴向移动的非球面带差检测方法

刀口仪检测原理如图1(a)所示,通过刀口仪上的点光源发出一束激光,并辐照在待测透镜表面,然后反射回来一束光,将待测透镜的面型信息成像于和点光源共轭的刀口位置,待测透镜表面的起伏就可以通过成像光束由刀口区分,使有像差的范围内出现阴影,进而获得其表面波前加工误差。刀口仪主要应用于非球面初始加工过程的检测,在非球面加工过程中,首先建立一个接近于目标非球面的最适球面,然后通过研磨和修饰环带的加工方法,把球面一环一环地加工成非球面。原来的球面在检测过程中会沿光轴呈现出一系列焦点,而通过非球面光学加工,会将各环带对应的焦点收敛到一个位置。如图1(b)所示,对于一个初始加工的近标准球面,其球面上不同位置的环带误差与轴上不同位置的焦点有一一对应的关系。镜面环带位置在主光轴上的对应关系如图2所示,假设入射光高度为 $r$ ,待测球面的曲率半径为 $R$ ,则 $r$ 高度的入射光经透镜折射在光轴的位置和理想焦点的距离 $\Delta L$ 为

$$\Delta L = \frac{R}{2\sqrt{1-(r/R)^2}} \quad (1)$$

刀口仪沿光轴纵向扫描的图像如图1(b)所示,轴向上,在典型加工误差区域出现连续并且较宽的环带误差,可以通过刀口沿光轴移动,在纵向依次解调出环带误差信息,如图1(b)模拟出的刀口阴影图b、c、d所示,每一个沿光轴方向的位置对应待测镜面加工误差的一个环带。如图2所示,设环带误差在镜面上的半径为 $r$ ,镜面的口径为 $2r_1$ ,从刀口阴影检测图检测到的数字图像口径为 $2R_1$ (单位为pixel),环带误差所在的圆环半径为 $r_1$ (单位为pixel),则真实的环带误差所在的半径 $r$ 与数字图像上的环带位置的换算关系可表示为

$$r = \frac{r_1}{R_1} r_1 \quad (2)$$

进一步地,对于一个比较接近球面的初期加工透镜,可以通过几个特殊的检测环带误差位置,定量拟合出待测镜面的球差系数,以更好地指导光学加工。 $r_1$ 、 $r_2$ 和 $r_3$ 为待测镜面半径, $\Delta L_1$ 、 $\Delta L_2$ 与 $\Delta L_3$ 为 $r_1$ 、 $r_2$ 和 $r_3$ 对应的球差, $Z_1$ 、 $Z_2$ 和 $Z_3$ 为 $r_1$ 、 $r_2$ 和 $r_3$ 环带的法线延长线与主光轴的交点位置, $Z_0$ 为近轴光线与主光轴的交点位置。建立待测镜面半径上的环带误差和刀口沿主光轴移动距离的关系,各参量关系为

$$\Delta L_1 = Z_1 - Z_0 = A_1 r_1^2 + A_2 r_1^4, \quad (3)$$

$$\Delta L_2 = Z_2 - Z_0 = A_1 r_2^2 + A_2 r_2^4, \quad (4)$$

$$\Delta L_3 = Z_3 - Z_0 = A_1 r_3^2 + A_2 r_3^4. \quad (5)$$

联立各参量关系公式,可以求得系数 $A_1$ 、 $A_2$ 和 $Z_0$ ,求解过程如下:

$$A_1 = \frac{Z_1 r_2^4 - Z_2 r_1^4 - Z_1 r_3^4 + Z_3 r_1^4 + Z_2 r_3^4 - Z_3 r_2^4}{(r_1^2 - r_2^2)(r_1^2 r_2^2 - r_1^2 r_3^2 - r_2^2 r_3^2 + r_3^4)}, \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{Z_1 r_2^2 - Z_2 r_1^2 - Z_1 r_3^2 + Z_3 r_1^2 + Z_2 r_3^2 - Z_3 r_2^2}{(r_1^2 - r_2^2)(r_1^2 r_2^2 - r_1^2 r_3^2 - r_2^2 r_3^2 + r_3^4)}, \quad (7)$$

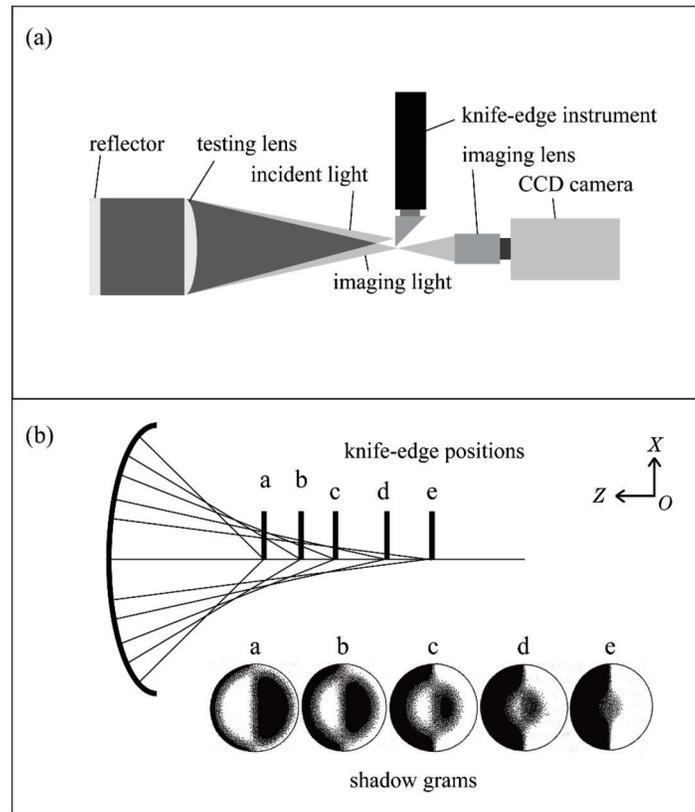


图 1 原理与方法示意图<sup>[22]</sup>。(a)刀口仪检测原理图;(b)刀口沿光轴前后切割方法示意图

Fig. 1 Schematic of principle and method<sup>[22]</sup>. (a) Schematic of knife-edge instrument; (b) schematic of front and rear cutting method of knife-edge along optical axis

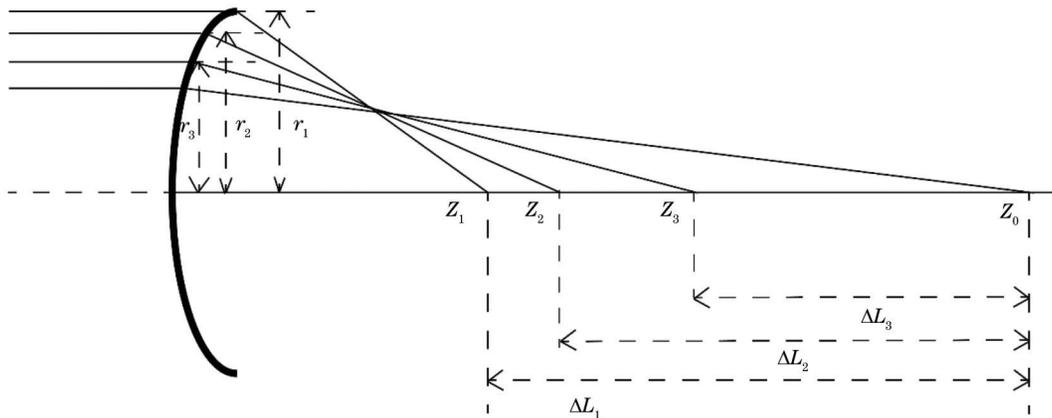


图 2 待测镜面上的环带误差在光轴上的对应关系

Fig. 2 Corresponding relationship between the ring-shaped polishing belts on the mirror to be measured and the optical axis

$$Z_0 = \frac{-Z_3 r_1^4 r_2^2 + Z_2 r_1^4 r_3^2 + Z_3 r_1^2 r_2^4 - Z_2 r_1^2 r_3^4 - Z_1 r_2^4 r_3^2 + Z_1 r_2^2 r_3^4}{(r_1^2 - r_2^2)(r_1^2 r_2^2 - r_1^2 r_3^2 - r_2^2 r_3^2 + r_3^4)} \quad (8)$$

已知环带所在的半径  $r$ , 可以求得  $r$  对应在主光轴上的移动距离  $\Delta L$ , 并且可以在已知刀口沿光轴方向移动距离的情况下, 拟合出纵向球差。

实际上, 有了轴向的多幅阴影图之后, 通过对图像的分析 and 判读可以更快地找到焦点位置。一般来说, 使用梯度差值函数算法可以方便找到位于焦点的图像, 该方法的定义<sup>[23]</sup>为

$$F = \sum_{x=1}^{M-1} \sum_{y=1}^{N-1} [ |f(x+1, y) - f(x, y)| + |f(x, y+1) - f(x, y)| ], \quad (9)$$

式中:  $f$  函数表示图像在  $(x, y)$  位置的灰度值;  $F$  为该梯度差值函数的梯度差值总和。梯度差值函数算法利用图像像素之间的差值总和确定图像的清晰度, 进而确定在焦点处的图像。

用于刀口阴影检测图的判据为寻找最小的  $F$  值, 虽然焦点处环带信息最为丰富, 但环带的灰度和整体图像的灰度都比较接近全灰, 即整体上对比度最低, 对刀口阴影图做上述差值算法处理后, 差值之和最小的即为焦点处的阴影图。因此, 将轴向扫描得到的一系列刀口阴影检测图代入此梯度差值函数, 可以计算出梯度差值总和最小的阴影图, 该阴影图所在位置即为焦点位置。

### 3 仿真分析

所提出的自动化检测方法的核心在于刀口沿光轴在焦点附近进行纵向切割, 即使刀口没有放置在理论焦点处, 也可通过对系列阴影图像的判读提取出待测镜面的环带误差信息, 比如镜面位置和宽度等信息。可见, 所提方法的优点在于对刀口仪放置位置的要求不高, 在检测过程中沿光轴依次检测出待测镜面的环带加工信息, 效率较高。该方法的关键问题在于能否通过灰度变化来反映光束波前的结构。如图 3 所示, 经过 Zemax 软件模拟, 将平行光入射到一个曲率半径为 100 mm、口径为 20 mm 的具有环带误差的球面平凸透镜, 在透镜焦点前后模拟出一系列阴影图, 如图 3(a) 所示。使用梯度算法处理阴影图, 由于阴影图的环带位置有一个明显的灰度跳变, 梯度算法可以很好地寻找其位置, 并将灰度变化较大位置的对比度增大, 从而实现图像锐化处理, 模拟刀口阴影图环带的提取效果, 结果如图 3(b) 所示。从图 3(b3)、(b4) 可以看出, 利用梯度算法可提取到明显的环带。距焦点处较远的模拟阴影图出现一些硬边衍射, 经过处理后会出噪声,

这是因为软件所使用的光源相干性较强, 实际实验中使用的光源相干性较弱, 不存在此现象。为了寻找焦点位置, 又计算了图 3(a) 中模拟阴影图的梯度差值总和, 实际焦点位于第 3 幅阴影图所在位置附近, 图 3(a1)~(a5) 所示阴影图的  $F$  值分别为 412237、393218、393168、410352、419481, 说明第 3 幅阴影图最为接近焦点位置的图像, 这与预设的结果吻合。

接下来, 对所提方法可达到的实验精度进行分析。通常来讲, 对于常规 CCD 相机的动态范围, 其最小可检测辐照度是探测器噪声的函数, 由探测器制造商给出, 可以使用不同的量进行描述, 如单像素的最小光通量、最小可检测辐照度、噪声等效辐照度、噪声等效温度差(仅用于红外系统)等。在现代技术水平下, 这些值通常非常小, 在定义最小可检测辐照度时, 一个常用的方式是将其设定为相当于单个量化灰度的级别:  $E_{\min} = E_{\max} / 2^b$ , 其中  $E_{\max}$  为典型场景在探测器上辐照度,  $b$  为灰度量位数。根据 Zemax 软件的模拟结果, 灰带对应的灰度值  $E_i \approx 0.7E_{\max} \gg E_{\min}$  ( $b=8$ ), 因此利用探测器足以进行灰带检测。CCD 的最小分辨率灵敏度更高, 人眼对于灰度变化和提取的能力明显逊于 CCD 相机和数字图像处理中像素级别的分辨能力。人眼能分辨的最小对比度仅为 2%, 刀口检测法的灵敏度理论极限为  $\lambda/100$  左右, 在离焦位置进行检测, 阴影图像的信噪比会降低。对于这种情况的图像灰度变化, CCD 是完全有能力分辨的, 通过数字图像处理及信号增强还可以进一步提升所提检测方法的精度, 因此理论上实验的精度可以与人眼的识别精度相当, 甚至优于人眼识别精度。

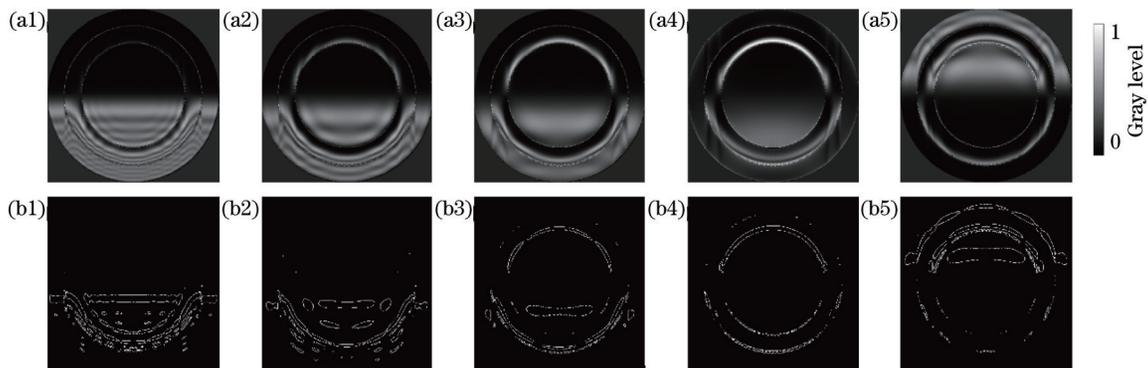


图 3 模拟结果。(a) 利用 Zemax 软件模拟得到的凸球面焦点前后的刀口阴影检测图像;(b) 环带的提取结果

Fig. 3 Simulation results. (a) Knife-edge shadow grams of convex sphere before and after focal point simulated by Zemax software; (b) extraction results of the annulus

### 4 实验与结果分析

经过上述分析, 确定了图像处理的方法和流程。实际上, 采集到原始图像之后, 还可对含有目标带差的信息实施进一步的图像增强处理。所提方法的流程如下: 1) 对刀口仪和待测镜面光轴进行耦合, 并将刀口移动至靠近理想焦点前后的位置。2) 沿光轴移动刀口仪, 先向靠近待测元件方向移动, 直至阴影图出现明显

的处于焦前的特征, 再向远离待测元件的方向移动, 以较大间距连续采集焦点附近的阴影图, 计算采集到的图像梯度差值总和  $F$ , 找到  $F$  值最小的阴影图, 其所在位置最接近焦点。3) 将沿光轴采集的图像进行二值法去噪声和中值法去孤立点处理, 然后进行灰度均衡算法处理, 把偏暗或偏亮的图像进行明暗均衡化, 这样可以将处于灰色区域的环带信息更好地呈现出来。4) 采集得到的一系列图像中, 在有环带误差的位置,

灰度会有一个跳变,也就是理论上黑白交界的地方,即使离焦图像存在一定的对比度退化,用梯度算法也可以很好地寻找其跳变位置。使用拉普拉斯梯度算子处理图像,其基本思想是当邻域的中心像素灰度低于它所在邻域内的其他像素的平均灰度时,此中心像素的灰度应该进一步降低;当邻域的中心像素灰度高于它所在邻域内的其他像素的平均灰度时,则进一步提高中心像素的灰度,从而实现图像锐化处理,更好地获得阴影图的环带信息。5)提取边缘信息,得到以灰色环带为基础的环带误差信息,由此可以得到待测镜面的环带误差信息。6)减小扫描间距,在焦点前后复扫,计算采集到的原始图像的梯度差值总和  $F$ ,找到  $F$  值最小的阴影图,其所在位置最为接近焦点。通过上述步骤不仅可以得到更精确的阴影图所在焦点位置,还可以看到离焦点更近的阴影图上环带信息的变化更加敏感,验证了前述环带提取步骤的准确性。

#### 4.1 实验

实验光路如图 4 所示,把刀口置于口径为 75 mm、曲率半径为 150 mm 的平凸透镜焦点左右的位置,在平凸透镜后面加反射镜,在刀口后面放置 Vimba CCD 相机,该 CCD 相机配置了一个 Computar 成像镜头,这样平凸透镜表面反射刀口仅点光源的像就会呈现在 CCD 相机上面。刀口仪置于可沿 X、Y 轴平移的电动位移台上。在实验过程中可以看到,环带由外及内、图像采集位置由前到后扫描。实验结果如图 5 所示,其中:图 5(a)为实验选取的沿光轴采集的一系列阴影图,间距约为 1 mm;图 5(b)所示为经过数字图像处理流程后得到的图像,灰色的区域对应不同的球差位置,

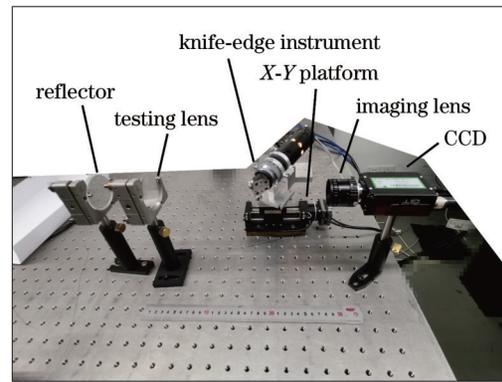


图 4 实验光路图

Fig. 4 Experimental optical path

在沿光轴移动过程中采集的阴影图像;图 5(c)所示为最终的图像处理结果,已标记出环带位置。图像采集位置由前到后,CCD 相机的帧率为 30 frame/s,位移台在每秒内的移动距离为 200 步,由步长为  $1.8^\circ$  的步进电机驱动,丝杆的螺距为 1 mm,因此只要阴影图的采集间距远小于焦深,阴影图采集的间隔理论上可以达到  $4\ \mu\text{m}$  左右。所使用的阴影图为从大量数据中选择的具有代表性的典型图像,实际间距为 1 mm 左右。如果改变实验透镜参数,应该依据焦深来确定从焦前到焦后的扫描范围,并根据采集得到的阴影图选取间距。阴影图处理的起始位置应该在具有明显焦前和焦后特性的图像所在位置之间,即前后出现明显半亮半暗的阴影图之间。本实验重点关注焦前区域,这是因为环带,尤其是实际加工过程中最明显的 70% 半径位置的环带,在轴向上的对应点集中在焦前。

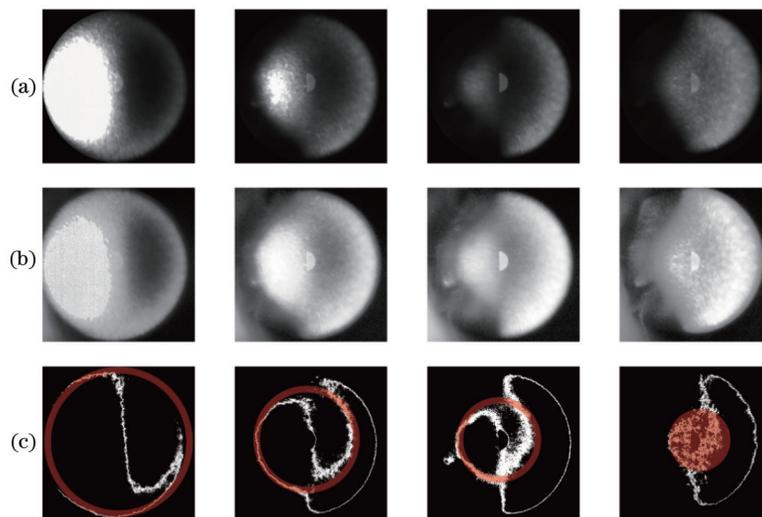


图 5 使用平凸透镜时的实验结果。(a)沿光轴采集的刀口阴影检测图;(b)对采集的刀口阴影检测图进行灰度直方图均衡化处理后的图像;(c)对采集的刀口阴影检测图进行灰度处理后并标记环带的结果

Fig. 5 Experimental results using a plano-convex lens. (a) Knife-edge shadow grams collected along the optical axis; (b) images processed by gray histogram equalization algorithm for collected knife-edge shadow grams; (c) results of the ring-shaped polishing belts after gray processing of collected knife-edge shadow grams

前述实验样品为透射式样品,为了验证所提方法的普适性,采用另一块口径为 50 mm、曲率半径为

480 mm,经过环带加工的凹球面反射镜进行进一步的验证实验。由于非球面是由球面经过环带加工与修饰

得到的,因此选用经过环带加工的球面镜作为待测镜,可以更好地反映所提方法用于环带加工误差检验的实用性。实验得到的结果如图 6 和图 7 所示,图 6 所示为实验采集到的图像和经过前述算法处理后的结果,经过图 6(b)的灰度均衡后再设置阈值,提取到的环带信

息如图 6(c)所示,可以看到明显的环带信息。图 7 所示为利用所提算法得到的环带与干涉仪检测结果的对比,可以看出主要的环带以镜面中心为原点,从 95% 到 80%,再到 50%,最后到 40% 镜面半径等位置的环带都被检测出来。

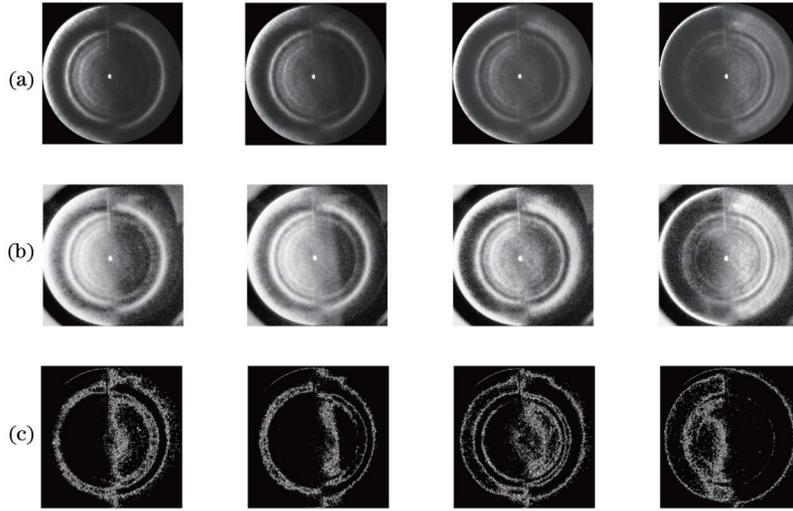


图 6 使用凹球面反射镜时的实验结果。(a)沿光轴采集的刀口阴影检测图;(b)对采集的刀口阴影检测图进行灰度直方图均衡化处理后的图像;(c)对采集的刀口阴影检测图进行灰度处理后的结果

Fig. 6 Experimental results using a concave spherical mirror. (a) Knife-edge shadow grams collected along the optical axis; (b) images processed by gray histogram equalization algorithm for the collected knife-edge shadow grams; (c) results of gray processing of the collected knife-edge shadow grams

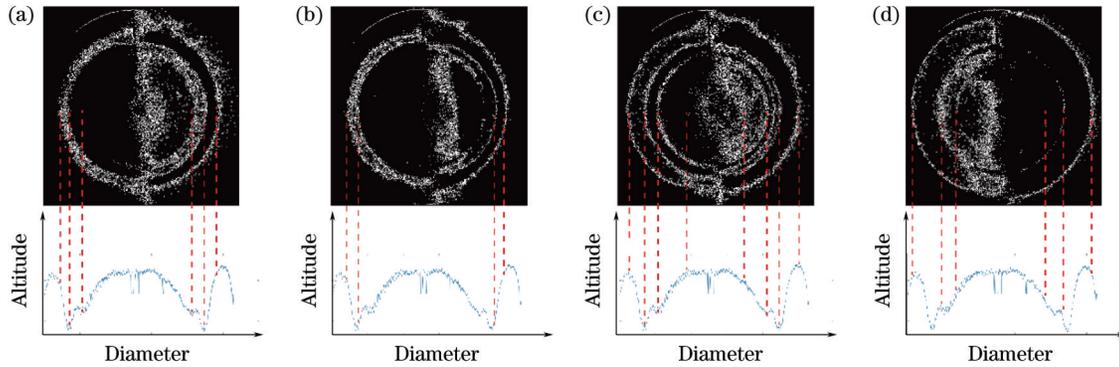


图 7 不同环带半径下,利用所提算法得到的环带与干涉仪检测结果的对比。(a) 0.95r;(b) 0.80r;(c) 0.50r;(d) 0.40r

Fig. 7 Comparison of ring-shaped polishing belt measured by proposed method and the interferometer under different ring radii. (a) 0.95r; (b) 0.80r; (c) 0.50r; (d) 0.40r

实验中采集图像的间隔为 1 mm,以中间图像所处位置为零坐标参考位置,选取 75% 半径处环带的第 1 幅阴影图位置、80% 半径处环带的第 3 幅阴影图和 40% 半径处环带的第 4 幅阴影图的参数按照式(3)~(5)列出如下方程:

$$486 - Z_0 = A_1 \times 0.75^2 + A_2 \times 0.75^4, \quad (10)$$

$$488 - Z_0 = A_1 \times 0.8^2 + A_2 \times 0.8^4, \quad (11)$$

$$489 - Z_0 = A_1 \times 0.4^2 + A_2 \times 0.4^4, \quad (12)$$

即可求出该镜面对应的球差公式

$$\Delta L = -57.516r^2 + 69.291r^4 + 496.429. \quad (13)$$

该球差公式可以对待测镜面面型上环带误差进行

拟合和预测,是对所提方法量化的探索,旨在根据球差的分布情况更好地指导后续的加工收敛方向设计。

经过前述对环带误差提取实验的验证后,进一步展示了焦点位置的确定方法。图 8 为所选取的有代表性的沿光轴自动采集的一系列刀口阴影检测图像。通过计算其梯度差值总和可以找到该梯度函数收敛位置所在的阴影图。图 9 所示为一系列焦点附近的阴影图的梯度差值总和,该值最小的阴影图即为最接近焦点处的图像,其所在位置即为实验得出的焦点位置。

#### 4.2 误差分析

如图 7 所示,干涉仪的检测结果在 0.40r 的环带以内是一个大的环状平面,在 0.50r、0.80r、0.95r 处有明

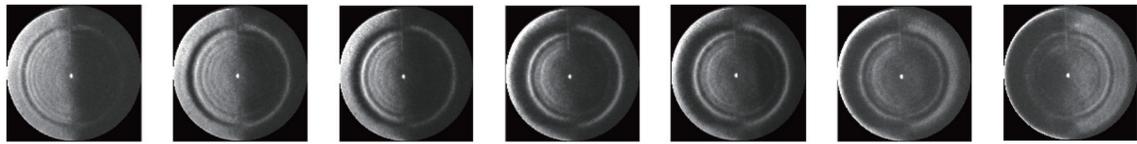


图8 沿光轴采集的一系列刀口阴影图

Fig. 8 A series of knife-edge shadow grams collected along the optical axis

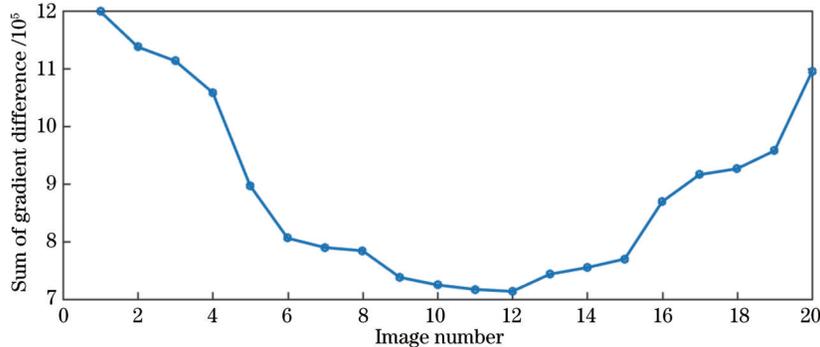


图9 焦点附近刀口阴影图梯度差值总和的计算结果

Fig. 9 Calculation result of gradient difference sum of knife-edge shadow grams

显的环带信息,经过图像处理后的环带可以反映环带误差的位置,环带宽度与干涉仪测量得出的环带误差基本吻合,绝对误差均不超过3 pixel。如表1所示,通过比对于干涉仪测得的各个半径处的环带信息和图像处理提取的环带信息可以发现,在90 pixel的环带半径上,误差不超过3 pixel。因此,利用所提图像处理方法提取的环带半径与干涉仪测得的环带位置的相对误差可以控制在3.3%以内。

表1 各环带误差值

Table 1 Error value of each ring-shaped polishing belts

Ring belt location	0.40r	0.50r	0.75r	0.80r	0.95r
Radius /pixel	90	110	170	180	200
Absolute error /pixel	3	3	2	2	3
Relative error /%	3.3	2.7	1.2	1.1	1.5

接下来,对焦点位置的检测误差进行分析:1)由扫描间距引入的误差。目前的算法可以保证找到最接近焦点处的已采集图像,当有两幅图像的梯度差值之和非常接近时,说明焦点位置就在两幅图像之间,此时可以缩小图像采集间距,找到更加精确的焦点位置,因此焦点的误差取决于预期采样间距的大小。实验中焦点的精确位置在距离镜面后表面498.7 mm处,使用1 mm的采样间距采集的阴影图通过梯度差值算法可以将检测焦点的结果定位在499 mm处,此时再将采样间距缩小为0.2 mm可以更精确地将实验测得的焦点位置定位在498.7 mm左右,这样就非常逼近实际焦点的精确位置了。需要指出的是,当扫描间距过大时,分析得到的位置可能并不是焦点,因此针对不同焦距的透镜要选择合适的扫描间距。2)由轴向扫描位置误差带来的焦点绝对位置误差。驱动刀口仪移动的位移台由步长为1.8°的步进电机控制,丝杆的螺距为

1 mm,使用TMCL控制卡进行8细分,理论上分辨率可达1 μm内,重复定位精度为5 μm左右,因此对于每次移动1 mm距离的采样间隔几乎不产生误差和影响。

## 5 结 论

提出并验证了一种基于刀口仪轴向移动的自动化非球面环带误差检测方法。该方法通过自动采集沿光轴在焦点前后位置的数字化图像,对非焦点处信噪比稍低的阴影图进行图像判读和信息提取,以恢复出焦点处信噪比较高的刀口阴影图信息,本质上通过位移的调制实现了待测非球面的环带误差的有效解调与检测。实验验证了整个自动化流程,刀口仪可在搜索过程中获得待测镜面环带加工误差信息,并通过梯度差值算法实现了焦点位置及其阴影图的确认。所提方法为刀口仪的自动化测量提供了一个便捷的思路,为进一步提高非球面光学加工和检测效率提供了参考。

## 参 考 文 献

- [1] 李锐钢.  $F$ 数0.42大偏离量离轴非球面反射镜的光学加工[J]. 光学学报, 2014, 34(s1): s122001.  
Li R G. Optical manufacturing of  $F$  number of 0.42 large-deviation off-axis aspheric mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(s1): s122001.
- [2] 何宇航, 李强, 高波, 等. 基于计算全息元件的大口径非球面透镜透射波前检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 021202.  
He Y H, Li Q, Gao B, et al. Measurement of the transmission wavefront of a large-aperture aspheric lens based on computer-generated hologram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 021202.
- [3] Malacara Z. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Hoboken:

- John Wiley & Sons, 2006.
- [4] 贾文昕, 韩森, 张凌华, 等. 离轴椭圆柱面镜测量方法及调整误差分析[J]. 光学学报, 2021, 41(20): 2012004.  
Jia W X, Han S, Zhang L H, et al. Measurement method and alignment error analysis of off-axis elliptical cylindrical mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(20): 2012004.
- [5] 李建新. 哈特曼法像差自动测量系统图像处理算法的研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(6): 45-47.  
Li J X. Study on Image processing algorithms of automatic measurement system for Hartmann-based spherical-aberration[J]. Laser Journal, 2009, 30(6): 45-47.
- [6] 吴高峰, 陈强, 侯溪, 等. 干涉法测量非球面顶点半径和二次常数[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2804-2807.  
Wu G F, Chen Q, Hou X, et al. Interferometric testing the vertex radius and conic constant of a conic surface[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2804-2807.
- [7] 胡特, 张海涛, 庞永杰, 等. 计算全息检测非球面的模拟计算研究[J]. 激光杂志, 2009, 30(1): 44-46.  
Hu T, Zhang H T, Pang Y J, et al. Simulation of CGH testing aspherical surface[J]. Laser Journal, 2009, 30(1): 44-46.
- [8] 高锦瑞, 李大海, 赖恒, 等. 基于相位测量偏折术的透镜波前像差测量[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(2): 0212001.  
Gao J R, Li D H, Lai H, et al. Measurement of wavefront aberration of lens based on phase measuring deflectometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(2): 0212001.
- [9] 戚丽丽, 郑列华, 叶璐, 等. 自准校正单透镜检验凸非球面的方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0822001.  
Qi L L, Zheng L H, Ye L, et al. Convex aspheric surface testing method using an autocollimation lens[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0822001.
- [10] Vandenberg D E, Humbel W D, Wertheimer A. Quantitative evaluation of optical surfaces using an improved Foucault test approach[J]. Proceedings of SPIE, 1991, 1542: 534-542.
- [11] Vandenberg D E, Humbel W D, Wertheimer A. Quantitative evaluation of optical surfaces by means of an improved Foucault test approach[J]. Optical Engineering, 1993, 32(8): 1951-1954.
- [12] Yuan L J, Wu Z H. Research on technique of wavefront retrieval based on Foucault test[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7654: 765402.
- [13] Jing H W, Yang W, Fan B, et al. Quantitative measurement of optical surfaces using an improved knife edge[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7283: 72830W.
- [14] 张均. 大口径球面数字刀口检测技术的研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.  
Zhang J. Digital knife-edge testing technology on spherical mirror of large aperture[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
- [15] 王小鹏. 大口径非球面数字刀口仪测试技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.  
Wang X P. Research on digital knife-edge technique to measure the large aperture aspheric optical element[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [16] 王小鹏, 朱日宏, 王雷, 等. 数字刀口仪定量检验非球面光学元件面形[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112008.  
Wang X P, Zhu R H, Wang L, et al. Digitized Foucault tester for quantitative evaluation the surface of aspheric optical elements[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112008.
- [17] 范珂, 田爱玲. 刀口法检测光学元件面形的数值模拟研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(1): 011205.  
Fan K, Tian A L. Study on numerical simulation of knife-edge test to surface shape[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(1): 011205.
- [18] Cheng H B, Yam Y, Tong H. A quantitative knife-edge testing method for local deformation evaluation in optical aspheric fabrication[C]//2007 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, September 22-25, 2007, Scottsdale, AZ, USA. New York: IEEE Press, 2007: 818-822.
- [19] Villa J, Rodriguez G, de la Rosa I, et al. Foucault test: shadowgram modeling from the physical theory for quantitative evaluations[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2014, 31(12): 2719-2722.
- [20] Rodriguez G, Villa J, Ivanov R, et al. Foucault test: a quantitative evaluation method[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2016, 33(8): 1604-1611.
- [21] Rodriguez G, Villa J, Martinez G, et al. Towards the automatization of the Foucault knife-edge quantitative test [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10453: 104531T.
- [22] Harbour D A. Understanding Foucault[M]. Mayapuri Industrial Area: Sapphire Publications, 2013.
- [23] 熊锐, 顾乃庭, 徐洪艳. 一种适应多方向灰度梯度变化的自动对焦评价函数[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(4): 0418001.  
Xiong R, Gu N T, Xu H Y. An auto-focusing evaluation function adapted to multi-directional gray gradient change [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(4): 0418001.