

# 环形子孔径扫描锥形镜面形检测方法研究

严焱<sup>1,2</sup>, 唐锋<sup>1\*</sup>, 王向朝<sup>1</sup>, 卢云君<sup>1</sup>, 郭福东<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出一种新的基于环形子孔径扫描的锥形镜面形测量方法, 该方法可实现大口径、不同锥角的锥形镜面形的通用化测量。使用微动扫描台移动锥形镜, 同时测量待测锥面法线方向若干环带的相位, 提取有效像素并通过插值拼接得到被测锥形镜的面形。该方法可实现锥角大于  $96.4^\circ$  的锥形镜面形的测量, 测量口径可达 100 mm 以上, 理论测量精度达到  $\lambda/4$  PV ( $\lambda$  为波长; PV 为峰谷值)。使用 ZYGO 公司 4 英寸 (1 inch = 2.54 cm) 的 DynaFiz 干涉仪对一个标称角度为  $140^\circ$  的凸面锥形镜顶部的面形进行检测, 被测样品旋转  $90^\circ$  前后的面形检测结果与使用 Taylor-Hobson 公司 LuphoScan 轮廓仪检测结果一致, PV 值相差  $0.54 \mu\text{m}$ , 验证了该方法的可行性。

**关键词** 测量; 干涉测量; 面形检测; 环形子孔径扫描; 锥形镜; 零位测试

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1004001

## Measuring Axicon Surface By Using Annular Sub-Aperture Scanning Method

Yan Yan<sup>1,2</sup>, Tang Feng<sup>1\*</sup>, Wang Xiangzhao<sup>1</sup>, Lu Yunjun<sup>1</sup>, Guo Fudong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory of Information Optics and Optoelectronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Herein, a novel method for measuring axicon surface based on annular sub-aperture scanning is proposed. This method successfully performs the general measurement of axicon surfaces with a large diameter and different cone angles. A micro-motion scanner is used to move the axicon step by step while the wave measuring interferometer records several ring phases in the normal direction of axicon. The surface is computed by extracting effective pixels and the interpolation-stitching. The proposed method successfully measures an axicon with a cone angle greater than  $96.4^\circ$  and a diameter above 100 mm. Results in the normal direction of the surface are exclusively used, and a theoretical measurement accuracy up to  $\lambda/4$  PV ( $\lambda$  is wavelength; PV is peak valley) is achieved. In the experiments, the top surface of a convex axicon (with a nominal angle of  $140^\circ$ ) is measured by a 4-inch (1 inch = 2.54 cm) DynaFiz interferometer of ZYGO company. Two measurements are performed with the axicon rotated at  $90^\circ$ . Both results are in good agreement with the measurement results of the LuphoScan profiler of Taylor-Hobson company, and the difference in PV values is  $0.54 \mu\text{m}$ . These results demonstrate the good feasibility of the proposed method.

**Key words** measurement; interferometry; surface detection; annular sub-aperture scanning; axicon; null-test

**OCIS codes** 120.3180; 120.4630; 120.6650

## 1 引言

锥形镜是一种旋转对称的锥形光学元件, 它所具有的特性为其轴线上的一点光源将沿其轴线形成一系列的像点<sup>[1]</sup>; 当锥形镜的平面朝向准直光束时, 准直光束将变为环形<sup>[2]</sup>; 高斯光束通过锥形镜即产生

近似无衍射的类贝塞尔光束<sup>[3-5]</sup>, 可用于产生等离子体及环形激光束整形<sup>[6]</sup>。锥形镜被广泛应用于光学成像系统<sup>[7]</sup>和高分辨率光学相干层析技术中<sup>[8]</sup>。锥形镜也是投影光刻机照明系统的核心器件之一, 用于产生环形照明模式。光学系统中的锥形镜一般要求具有较高的面形精度, 高精度的锥形镜面形检测方法

收稿日期: 2019-03-26; 修回日期: 2019-04-22; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家科技重大专项课题(2017ZX02101006)

\* E-mail: tangfeng@siom.ac.cn

是保证锥形镜加工精度的必要手段,因此研究高精度的锥形镜面形检测方法具有重要意义。

目前,可用于锥形镜面形检测的方法主要包括轮廓仪测量方法和零位补偿法。前者主要采用坐标测量机<sup>[9]</sup>、接触式和非接触式轮廓仪<sup>[10-12]</sup>;而后者主要是通过制造补偿器使入射到待测元件表面的波前与其理论波前匹配,得到干涉零级条纹,从而获取元件的面形信息。典型的零位补偿测量技术包括计算全息法<sup>[13-15]</sup>和补偿镜法<sup>[16]</sup>。零位补偿法的测量精度高,但是补偿器制作复杂且成本高,对于不同锥角的待测件需加工不同的补偿器,测量通用性不足。在光学车间,轮廓仪是进行锥形镜面形检测的主要器件。但是对于凹锥镜,由于探头空间尺寸的限制,锥形镜顶部直径约为 8 mm 区域的面形无法检测。

ZYGO 公司报导了一种环形子孔径扫描干涉仪<sup>[17]</sup>,它可实现对旋转对称非球面的通用化测量。该干涉仪可测的最大非球面度为 800 μm,最大形状误差为 10 μm。由于锥形镜的干涉条纹相对非球面更为密集,可分辨环带更窄,且 ZYGO 公司没有提供针对锥形镜面形检测的算法及测量流程,所以其环形子孔径扫描测量工作站不支持锥形镜面形检测。

本文提出一种基于环形子孔径扫描的锥形镜面形测量方法,并对测量原理、数据处理与系统对准流程、环形干涉条纹宽度和干涉对比度在扫描测量中的变化规律进行了分析论述;此外,还进行了锥形镜顶部面形测量实验,验证了该方法测量锥形镜面形的可行性。该方法有望实现锥形镜面形的高精度通用化测量,即采用同一套硬件测量系统能够测量较宽范围内不同锥角、口径的锥形镜,且凸锥镜和凹锥镜均可测量。

## 2 环形子孔径扫描测量原理

### 2.1 基本测量原理

环形子孔径扫描法测量锥形镜面形的基本原理如图 1 所示,波面测量干涉仪(本文采用 Fizeau 干涉仪)发出的平面波经透射球面标准镜(TS)转换成球面波,锥形镜摆放在扫描位移台上,且旋转对称轴与干涉仪的光轴接近重合,锥形镜径向方向记为  $h$ ,轴向移动方向记为  $w$ ;当锥形镜位于轴向  $w_1$  位置时,入射到锥形镜上的球面波中仅有  $h_1$  处的光线垂直于锥形镜表面, $h_1$  附近的光线反射回干涉仪并形成环带干涉条纹,解相位就能获得锥形镜在  $h_1$  位置圆上的面形分布;扫描位移台轴向移动锥形镜至  $w_2$  处,则测量区域为径向位置  $h_2$  处的环带区域;通过

轴向扫描测量,就可得到锥形镜不同径向扫描位置所对应的同心圆上的面形,再通过数据拼接就可获得待测锥形镜的全口径面形。

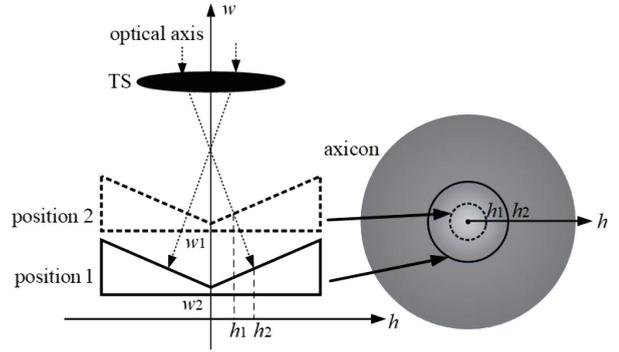


图 1 环形子孔径扫描方法测量锥形镜面形原理示意图

Fig. 1 Principle of annular sub-aperture scanning method for measuring axicon surface

图 2(a)是利用干涉仪检测锥形镜表面的光程差示意图,锥形镜的锥角为  $\beta$ ,锥形镜表面法线与光轴的夹角为  $\alpha$ , $O'$  点为锥形镜中心, $O$  点为球面波中心。图中  $h_1$  处为探测波面与锥形镜表面相切位置,此处光程差为  $p_1$ 。可见, $p_1$  为光程差  $p$  的极值, $h_1$  为光程差在径向上的极值点。 $p_1$  测量结果不包含系统误差,为零位测量结果。在  $h_1$  附近一段区域的干涉条纹可分辨,图 2(b)为锥形镜的实测干涉图。在对应的相位图中找出径向极值像素,该像素即为该次扫描得到的同心圆上的面形测量结果。

### 2.2 扫描间隔确定

由于干涉测量为相对测量,波面干涉仪在各扫描位置测得的相位是光程差  $p_1$  对应干涉相位的  $2\pi$  包裹小数部分,完全分立的测量无法准确确定干涉相位的  $2\pi$  倍数,所以相邻轴向扫描间隔之间光程差的变化应满足 Nyquist 采样定理,即小于半个波长,从而可以建立不同扫描测量间的准确相位变化关系。扫描间隔  $l$  应满足

$$2 \cdot l \cdot \cos \alpha \leq \frac{\lambda}{2}. \quad (1)$$

为提高计算效率,锥形镜检测中的面形计算间隔可选为扫描间隔的倍数。扫描过程中,在非面形计算的扫描位置,仅计算几个采样像素的相位,以获得待测锥面若干条母线上的相位变化;认为任意一个环带上的相位均为连续变化,即可根据这些母线上的点确定相应环带的  $2\pi$  的整数倍相位。根据上述连续采样点的相位值,用补偿相位测量结果的波长整数倍部分减去理想锥形相位变化量,即可得到锥形镜的面形偏差。

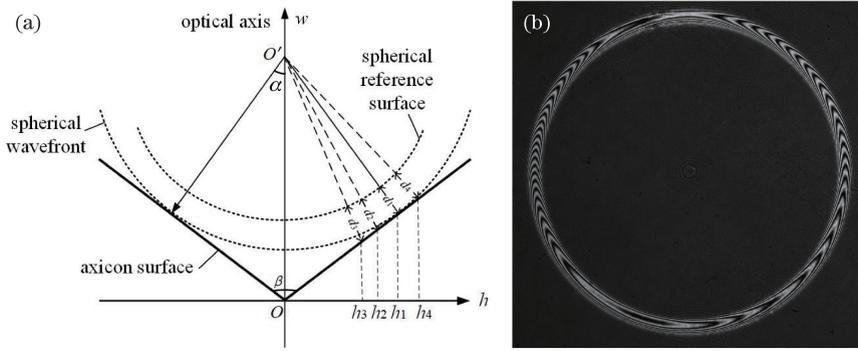


图2 干涉仪检测锥形镜面形示意图。(a)干涉仪检测锥形镜时的光程差;(b)实测锥形镜干涉图

Fig. 2 Schematic of using interferometer to measure axicon surface. (a) Optical path difference when axicon surface is measured by interferometer; (b) measured interferogram of axicon

此外,对于上述一条母线上的测量结果,记两个测量点的扫描间隔为  $\Delta w$ ,理想锥形镜在两个测量点间的光程差  $p$  为  $\Delta w$  在法线方向的映射,即  $\Delta w \cdot \cos \alpha$ ,根据此关系可准确获得待测锥形镜的锥角。

在轴向扫描间隔足够准确的条件下,使用激光位移测量干涉仪对扫描距离进行监测时,扫描间隔可与面形计算间隔相同,仅需满足锥形镜面形偏差的 Nyquist 采样条件。

### 2.3 扫描数据插值拼接

选定扫描间隔后,每个轴向采样点及其拼接测量结果如图3所示。轴向间隔为  $\Delta w$  的扫描位置  $w_1 \sim w_4$  的拼接测量结果分别对应像素  $n_1 \sim n_4$ ,即不同扫描位置对应的拼接结果具有不同的半径和像素数。而波面测量干涉仪在不同扫描位置测得的相位结果的半径或像素数基本不变,因此,需对波面干涉仪的相位测量结果进行插值,然后放入图3拼接

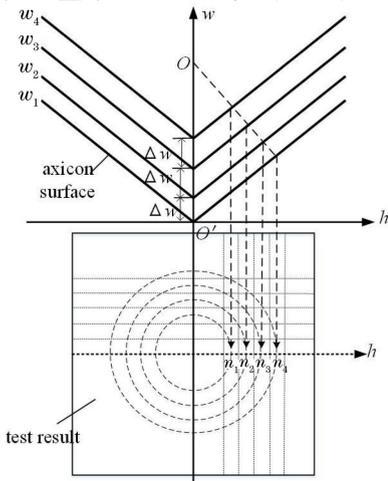


图3 锥形镜面形数据插值拼接原理

Fig. 3 Principle of data interpolation-stitching of axicon surface

测量结果的对应环带位置,就可实现扫描测量数据的拼接。

### 2.4 扫描倾斜、平移误差与对准流程

锥形镜扫描过程中会存在扫描倾斜和扫描平移误差;扫描倾斜即扫描过程中扫描台的俯仰和偏摆运动导致锥形镜的倾斜角发生变化;扫描平移即扫描过程中球面标准镜聚焦点横向偏离被测锥形镜对称轴,通常由扫描台直线度误差、扫描台扫描轴与干涉仪光轴的夹角误差,以及锥形镜对称轴与干涉仪光轴的夹角误差引起。扫描台倾斜误差与扫描台平移误差均会引起环带内载波干涉条纹密度和方向的变化,如图4所示( $x, y$ 轴为相互垂直的锥形镜表面径向方向),导致倾斜相位误差。

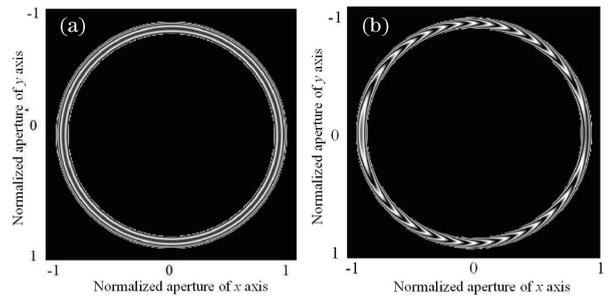


图4 锥形镜仿真干涉图。(a)理想锥形镜干涉图仿真结果;(b)存在平移和倾斜误差的锥形镜干涉图仿真结果

Fig. 4 Simulated interferograms of axicon. (a) Ideal interferogram of axicon in simulation; (b) interferogram of axicon with translation and tilt errors in simulation

经计算,当锥形镜锥角为  $140^\circ$  时,距离锥形镜中心 20 mm 口径位置处,  $10''$  的倾斜误差导致约  $0.93 \mu\text{m}$  的相位倾斜、 $10 \mu\text{m}$  的横向误差导致约  $6.86 \mu\text{m}$  的相位倾斜。一般情况下,高精度扫描台的角方向偏离误差可小于  $\pm 10''$ ,直线度误差可小于

10  $\mu\text{m}$ , 所产生的相位倾斜较为有限, 即扫描倾斜误差的影响较小。扫描轴与干涉仪光轴的夹角误差, 以及锥形镜对称轴与干涉仪光轴的夹角误差将导致扫描平移随着扫描距离的增加而线性增大。当扫描距离较大时, 扫描平移误差是影响锥形镜扫描测量的主要因素。该问题的解决方式有两种。

1) 当扫描倾斜和扫描平移误差较小时, 不影响干涉相位的正确获取; 对于高精度被测锥形镜, 假设锥形镜面形在同一环带上不会有倾斜加工误差, 干涉条纹载波及其变化均由扫描倾斜和平移引起, 在相位测量结果中, 可直接去除倾斜相位成分。本文实验部分仅对锥形镜顶部面形的测量进行实验验证, 轴向扫描距离不超过 8 mm, 该扫描距离内的扫描平移误差可控制在 2  $\mu\text{m}$  以内, 且能够进行正确的相位获取, 因此采用该方式。

2) 美国 Zygo 公司针对非球面环形子孔径扫描拼接提出采用对准测量流程进行扫描倾斜及平移的检测, 并在扫描测量时进行补偿<sup>[18]</sup>, 在锥形镜扫描时可参考该方法补偿扫描倾斜与平移误差。通过扫描测量平面镜, 精确获得扫描过程中的可重复倾斜误差; 测量锥形镜时, 通过干涉相位倾斜量的变化计算扫描平移量与扫描距离的关系。在被测锥形镜承载台中增加 XY 调整台及倾斜调整台, 以在扫描过程中同步反向补偿扫描平移量和倾斜量。该方法适用于大范围扫描拼接。

### 3 分析与仿真

#### 3.1 锥形镜扫描测量过程中干涉条纹宽度与干涉对比度的变化

以凹面锥形镜测量光路为例分析锥形镜扫描测量过程中的光路变化, 如图 5 所示。

当被测锥形镜在扫描位置 1 时, 正入射到锥形镜母线的射线  $OA$  沿原路返回, 与球面标准镜返回的参考光干涉。 $OB$  为斜入射至锥形镜母线的射线, 与  $OA$  之间的夹角为  $\delta$ 。 $OB$  经反射后返回至球面标准镜光轴上的  $C$  点, 由于  $\delta$  角很小, 有

$$L_{OC} \approx 2 \cdot L_{OA} \cdot \tan \delta \approx 2d\delta, \quad (2)$$

式中:  $L_{OC}$  为  $O$  点到  $C$  点的距离;  $L_{OA}$  为  $O$  点到  $A$  点的距离, 并令  $L_{OA} = d$ 。只有  $C$  点在球面标准镜焦深(Dof)以内的光线能够返回干涉仪与参考光发生干涉。

当  $d = 0$ , 即测量锥形镜顶点时, 最大张角  $\delta$  范围的光线能够返回干涉仪, 并且光强与参考镜反射光强相当, 干涉对比度为 1, 干涉条纹数量最多。

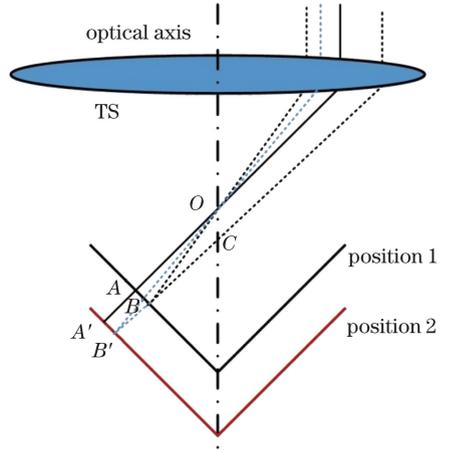


图 5 锥形镜扫描测量过程中的光路变化

Fig. 5 Change of optical path during scanning of axicon

当  $d$  在较小范围内增大时, 斜入射光线基本返回干涉仪, 相同张角范围内光程差的范围增大, 即波面干涉仪每个像素内相位的变化量增大, 干涉条纹密度增加, 正入射光线附近的干涉条纹随着  $d$  的增大而变窄。

当  $d$  继续增大时, 相同张角范围内的斜入射光线经锥形镜反射后在球面标准镜汇聚点位置的光斑越来越大, 而仅有在球面标准镜焦深范围内的光线能够返回干涉仪, 且返回干涉仪后与参考光的干涉区域基本不变。这使得一方面返回干涉仪的光强随着径向扫描位置的增大而减小, 并与  $d$  的平方成反比, 干涉对比度则随着  $d$  的增大而呈线性下降; 另一方面, 在干涉区域内, 具有不同光程差的斜入射光线的范围变小, 干涉条纹密度不再增加, 干涉条纹宽度基本保持不变。

图 6 是实际测量得到的一个标称锥角为  $143^\circ$  的凹面锥形镜不同口径处的干涉图(干涉仪相机分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 球面标准镜  $F$  数为 0.75), (a)~(d) 对应的测量口径分别为 4, 28, 100, 148 mm, 可分辨条纹宽度约为 26, 22, 15, 15 pixel, 均可以实现正确的相位测量。

由图 6 可见, 随着测量口径的增大, 干涉条纹对比度逐渐降低。不同口径处干涉图条纹对比度变化如图 7 所示, 干涉条纹对比度随着测量口径的增大接近线性下降。干涉条纹宽度及对比度的变化验证了上述分析的正确性。

图 8 所示为实际测量得到的一个标称锥角为  $140^\circ$  的凸面锥形镜不同口径处的干涉图(干涉仪相机分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 球面标准镜  $F$  数为 0.75)。图 8(a)~(d) 中, 对应的测量口径分别为 3.2, 8.3, 10.9, 22.4 mm, 可分辨条纹宽度分别为

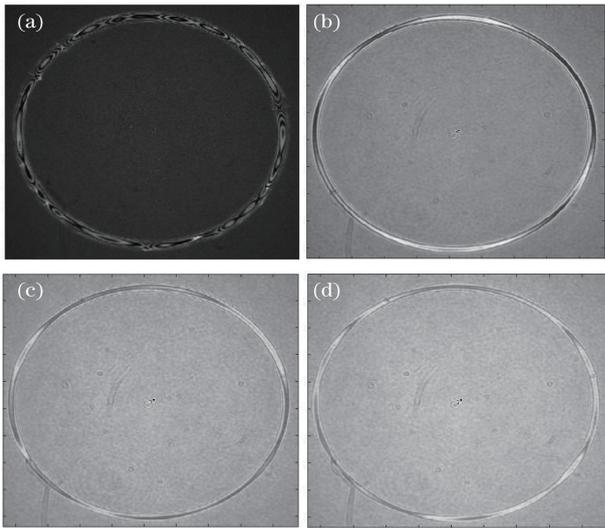


图 6 不同口径处的凹面锥形镜干涉图。

(a) 4 mm; (b) 28 mm; (c) 100 mm; (d) 148 mm

Fig. 6 Interferograms of concave axicon for different diameters. (a) 4 mm; (b) 28 mm; (c) 100 mm; (d) 148 mm

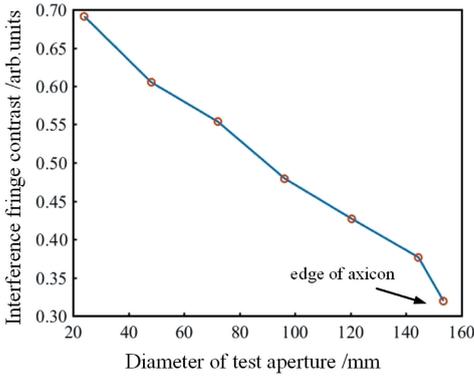


图 7 锥形镜不同口径处的干涉条纹对比度

Fig. 7 Interference fringe contrast of axicon for different diameters

40, 3, 10, 16 pixel。条纹宽度总体变化规律与凹面锥形镜相同,但由于测量凸面锥形镜时光路更短,返回干涉仪的光线相对凹面锥形镜更多,干涉条纹在变窄阶段出现了宽度为 3 pixel 的最小值。干涉条纹最窄部分的相位解包裹较为困难,需要增加对角像素解包裹路径,或者采用更高空间分辨率的干涉仪,这些均是限制该方法测量凸面锥形镜面形的重要因素。此外,由于球面标准镜口径与曲率半径的限制,该方法不能实现对更大口径凸面锥形镜的测量。

### 3.2 测量空间分辨率分析

#### (1) 切向横向分辨率

对于波面测量干涉仪,可以近似认为锥形镜被测圆环面与干涉仪探测器面为共轭成像关系,因此,干涉条纹中心所在的圆与锥形镜被测位置的横切圆对应,横切圆的周长除以干涉图上该圆周的像素数,

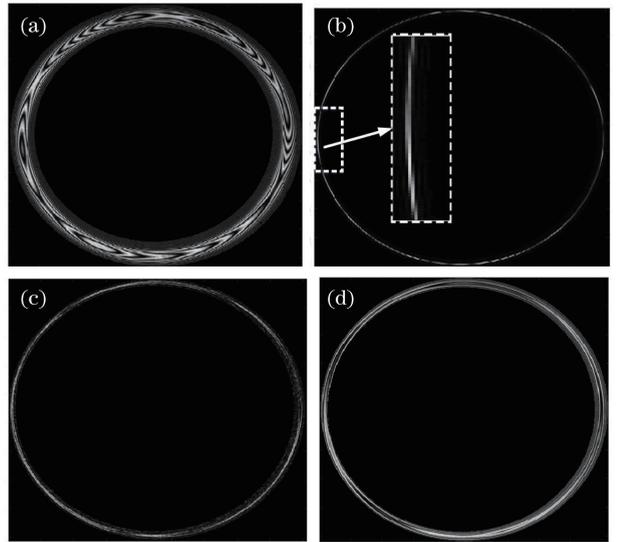


图 8 不同口径处的凸面锥形镜干涉图。

(a) 3.2 mm; (b) 8.3 mm; (c) 10.9 mm; (d) 22.4 mm

Fig. 8 Interferograms of convex axicon for different diameters. (a) 3.2 mm; (b) 8.3 mm; (c) 10.9 mm; (d) 22.4 mm

即约为切向横向分辨率  $\Delta h$ 。对于不同锥角的锥形镜,采用  $F$  数最匹配的球面标准镜,配合干涉仪变倍功能扩展干涉仪接收像素数,可以实现锥角不同时,干涉条纹中心所在圆的大小基本相同,这使得切向横向分辨率与被测锥形镜的锥角无关。图 9 是干涉仪分辨率为 1024 pixel  $\times$  1024 pixel 时,锥形镜不同径向位置  $h$  处的切向横向分辨率  $\Delta h$ 。可见,测量的径向位置  $h$  越大,切向横向分辨率越低。

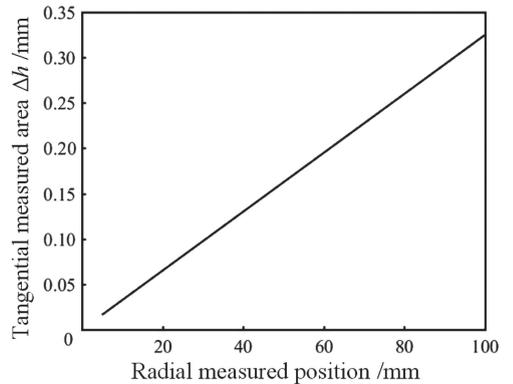


图 9 锥形镜不同径向位置处的切向横向分辨率

Fig. 9 Tangential (lateral) resolution on axicon surface at different radial positions

#### (2) 径向横向分辨率

3.1 节中已说明干涉仪在径向的实测区域会远小于切向,下面进行定量分析。以球面标准镜的下半部分焦深限制为例,如图 10 所示,球面波中心为  $O$  点,此时的法向测量点为  $A$ 。

图中  $CD$  垂直于  $OA$ ,  $(L_{AD} + L_{OA}) \times \tan \delta =$

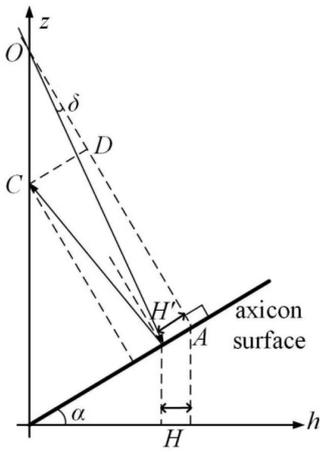


图 10 焦深限制下的横向测量范围示意图

Fig. 10 Schematic of horizontal measured area under focal depth limitation

$L_{CD} = L_{OC} \times \sin \alpha$ ,  $L_{AD}$ ,  $L_{OA}$ ,  $L_{CD}$ ,  $L_{OC}$  分别为 A 点到 D 点的距离、O 点到 A 点的距离、D 点到 C 点的距离, 以及 O 点到 C 的距离。下半区全部横向测量区域  $H = L_{OA} \times \tan \delta \times \cos \alpha$ , 即 H 与不同测量半径 h 有如下关系:

$$H = h \times \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \times \tan \delta \times \cos \alpha =$$

$$h \times \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \times \frac{L_{OC} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{2h / \sin \alpha - L_{OC} \cdot \cos \alpha} =$$

$$\frac{h \cdot L_{OC} \cdot \cos \alpha}{2h / (\sin \alpha \cos \alpha) - L_{OC}} \approx$$

$$\frac{1}{2} L_{OC} \cdot \cos^2 \alpha \cdot \sin \alpha. \quad (3)$$

当测量半径 h 远大于焦深  $L_{OC}$  时, 近似关系成立。焦深约为  $\lambda / NA^2$ , NA 为数值孔径, 焦深为  $\mu\text{m}$  量级, 因此近似条件基本都成立。即测量口径增大到一定数值时, 横向测量区域的大小不再发生明显变化。图 11 给出了锥角  $\beta$  和锥面上的径向测量区域宽度  $H'$  的关系曲线, 可见, 径向实测区域宽度小于  $0.5 \mu\text{m}$ ; 锥角增大时, 径向实测区域有变大趋势。

### 3.3 测量动态范围与可测量口径、锥角分析

本方法可测的锥角范围主要受球面标准镜 F 数的限制, 根据图 2(a), 应有  $\alpha \leq \arcsin[1/(2 \times F)]$ , 目前商用球面标准镜的最小 F 数为 0.75。因此  $\alpha \leq \arcsin(1/1.5) = 41.8^\circ$ , 可进行面形测量的锥形镜的锥角应满足  $\beta = (180^\circ - \alpha) \geq 96.4^\circ$ 。

凸面锥形镜的可测量口径主要受限于球面标准镜与凸面锥形镜的几何光路。这里主要对凹面锥形镜的可测量口径和测量动态范围进行讨论, 可测量口径受限于干涉对比度和锥形镜的面形误差两个因素。

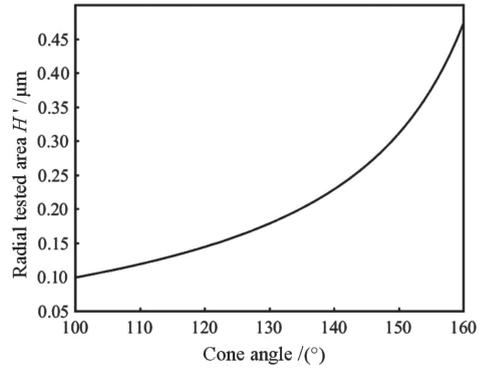


图 11 不同锥角下的径向测量区域

Fig. 11 Radial measured area at different cone angles

#### 1) 干涉对比度对可测量口径的影响

图 7 实验数据中, 以 35% 干涉对比度为阈值, 可以得到锥角为  $140^\circ$  的锥形镜的最大可测口径约为 150 mm。干涉对比度与球面波中心至锥形镜表面的距离 d 成反比, 而锥角越大时, 相同测试口径位置处的 d 越大。受干涉对比度下降的限制, 不同锥角下可测的最大口径如图 12 所示。可见, 锥角与可测口径接近线性相关。本方法在锥角小于  $160^\circ$  时适用于大口径锥形镜测量, 在锥角大于  $160^\circ$  时可用于锥顶角区域的面形测量。

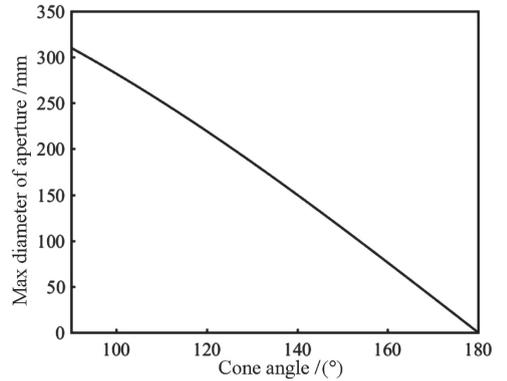


图 12 干涉对比度限制下不同锥角下可测的最大口径

Fig. 12 Maximum measurable diameter can be tested at different cone angles under interference contrast limitation

#### 2) 被测锥形镜切向面形梯度对可测量口径的影响

测量口径较大时, 径向测量区域仅为亚微米量级, 该区域内的面形变化可不考虑, 但系统切向空间分辨率随着径向测量位置的增大而变差, 因此, 测量动态范围与可测量口径相互制约。图 13 给出了不同锥角的锥形镜在局部切向面形梯度误差为  $100 \sim 800 \mu\text{rad}$  时的最大可测口径, 仿真干涉仪相机分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ 。当切向面形梯度误差大于  $300 \mu\text{rad}$  时, 需考虑面形误差对可测量口径的

影响;面形梯度误差越大,可测量口径越小。由于切向横向空间分辨率与干涉仪空间分辨率成正比,所以采用高空间分辨率干涉仪有利于提高测量动态范围和可测量口径。

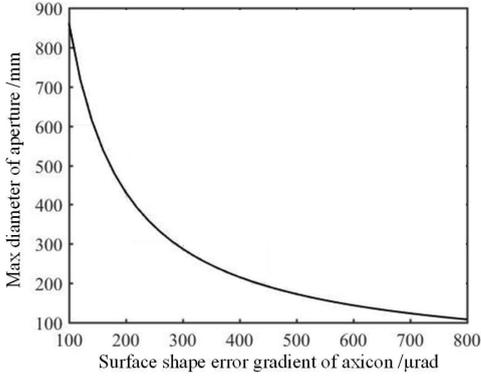


图 13 切向面形误差限制下锥形镜的测量口径范围  
Fig. 13 Measurable aperture range of axicon under tangential surface error limitation

### 3.4 检测精度分析

环形子孔径扫描法的测量原理是在锥形镜的一个环带上实现零位测量,在该环带上的测量精度仅受限于标准镜的面形误差。由于锥形镜的面形精度一般在波长量级,而球面标准镜的精度可达到  $\lambda/20$  PV 及以上,所以标准镜面形误差对系统测量精度影响不大。然而,测量时锥形镜会与干涉仪存在对准误差,并且面形检测结果是通过不同环带检测结果拼接得到的,因此检测系统会存在下述误差。

1) 坐标畸变:当扫描倾斜和扫描平移误差较大时,实际垂直于锥形镜表面光线的环带是椭圆,且环带对称中心会偏离锥形镜旋转中心,如图 14 所示。仿真干涉仪的分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ ,对  $140^\circ$  锥形镜径向 10 mm 处的环带面形进行检测后发现:倾斜角误差为  $2'$  时,极值像素环带移动一个像素;平移误差为  $15 \text{ }\mu\text{m}$  时,极值像素环带移动一个像素;随着测量径向位置的增大,平移误差的影响逐渐减小,倾斜误差的影响基本不变。

锥形镜及扫描台的初始对准误差是影响坐标畸变的主要因素,通过下面的对准流程可控制该误差。横向偏移和倾斜形成的坐标畸变在一定程度上会相互补偿。扫描初始状态下,通过调节 XY 位移台使干涉条纹数最少,然后进行扫描,通过干涉条纹相位变化与扫描距离的比值定量确定锥形镜的倾斜值和倾斜方向,精度可达到  $10''$ ,从而调节承载被测锥形镜的倾斜调整架,使得初始倾斜误差得到定量控制。同时调节 XY 位移台至干涉条纹最少,使得在初始安装状

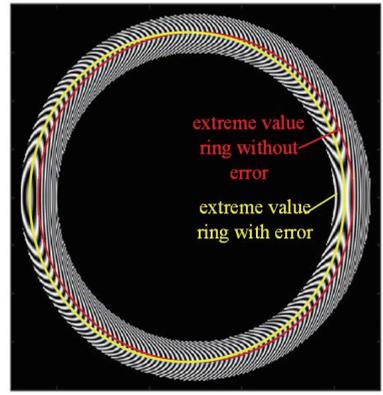


图 14 极值像素环带的坐标畸变示意图  
Fig. 14 Schematic of coordinate distortion in extreme value pixel ring

态下锥形镜倾斜和横向偏移均得到有效控制。

在扫描过程中,通过调节 XY 位移台补偿扫描产生的横向偏移。高精度扫描台扫描过程中角方向的偏离误差小于  $\pm 10''$ ,对坐标畸变的影响可忽略。

此外,当被测锥形镜面形较差时,经扫描平移误差反向补偿后干涉条纹中心仍会有所改变,需每隔一段扫描距离重新提取干涉条纹中心。

2) 回程误差: Fizeau 干涉仪存在载波时,参考光与测量光在干涉仪中的实际光路存在较小的差别,从而产生彗差等回程误差。在初始对准时,锥形镜的干涉条纹宽度在 10 pixel 以上,局部干涉条纹密度能够调节至每 10 pixel 内少于 1 条条纹,则全干涉场等效干涉条纹数量为 100 个左右。经测试, ZYGO 公司 DynaFiz 干涉仪在干涉条纹数量为  $80 \sim 150$ ,回程误差分别小于  $\lambda/20$  PV 和  $\lambda/10$  PV。因此,使用环形子孔径扫描测量锥形镜的回程误差小于  $\lambda/10$  PV,即单个环带的面形分布测试误差优于  $\lambda/10$  PV。

3) 拼接误差:本方法在不同环带之间不存在测量重叠区域,不同环带间的拼接精度取决于干涉相位的  $2\pi$  整数倍部分的精度。如前所述,干涉相位的  $2\pi$  整数倍部分通过高密度采样或者反馈位置测量系统确定。前者测量效率较低,且  $2\pi$  整数倍部分的精度受限于干涉腔的长度和干涉仪光源的波长稳定性;后者如激光位移测量干涉仪,其精度可以达到  $10^{-6}$  以内,干涉腔偏置距离可以调整至 0。因此,当扫描距离在 150 mm 以内时,拼接误差能够控制在 150 nm (约为  $\lambda/4$  PV) 以内。更大范围的扫描可以通过多个环带分别测量然后拼接实现。

可见,环形子孔径扫描锥形镜面形检测理论上可以实现  $\lambda/4$  PV 的面形检测精度,检测误差主

要受限于扫描台的定位精度。

### 4 锥形镜面形测量原理实验

利用所提出的环形子孔径扫描方法测量锥形镜面形的实验装置和光路原理图如图 15 所示。实验采用 ZYGO 公司 4 in(1 in=2.54 cm)的 DynaFiz 干涉仪,测量波长为 632.8 nm,探测器有效探测像素

为 1024 pixel×1024 pixel;球面标准镜  $F$  数为 0.75;微动扫描台采用日本神津公司的 ZA16A-W2C 垂向位移台,全行程为 -8~+8 mm,在 -4~+4 mm 行程范围内实测运行分辨率达到 80 nm。采用激光位移测量干涉仪对微动扫描台的行进距离进行监测,用以确定微动扫描台的扫描分辨率是否能够满足相移干涉测量的需求。

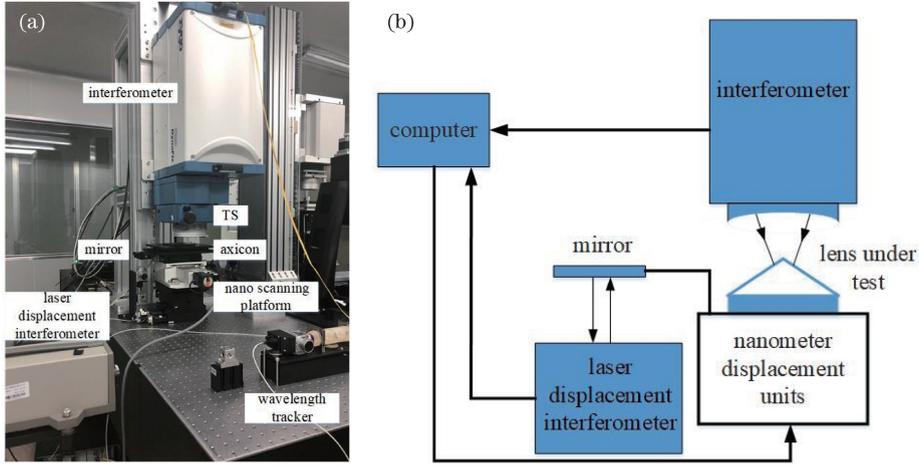


图 15 凸面锥形镜面形测量实验。(a)实验装置;(b)实验光路原理图

Fig. 15 Measuring surface of convex axicon. (a) Experimental setup; (b) principle of optical path of experiment

利用环形子孔径扫描方法测量一个标称角度为 140°的凸锥镜的面形。考虑微动扫描台的最大行程,选择扫描锥形镜轴向位置 14~22 mm 对应的区域进行面形拼接,设定扫描步长为 84 nm。采用五步相移算法<sup>[19]</sup>计算相位;相位解包裹采用质量图引导的相

位解包裹算法<sup>[20-21]</sup>,并保留对角像素解包裹路径。

图 16(a)~(c)为扫描行进至不同轴向位置时锥形镜的干涉图与相位图(2 mm 和 8 mm 处测量结果仅作对比,拼接从 14 mm 处开始,干涉条纹宽度无明显变化)。

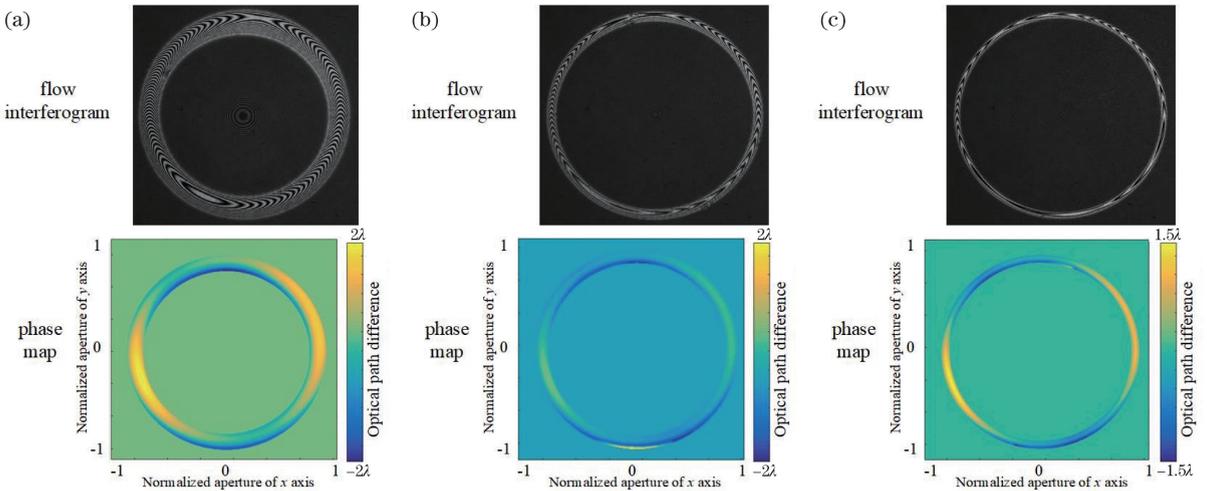


图 16 扫描至不同轴向处的干涉图和相位图。(a) 2 mm;(b) 8 mm;(c) 14 mm

Fig. 16 Interferograms and phase maps at different scanning positions. (a) 2 mm; (b) 8 mm; (c) 14 mm

令测量区域的面形复原图具有 80 pixel 的宽度,则计算相位图的采样间隔为 0.1 mm,提取第  $i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, 80$ )幅相位图中的有效像素点,通过数据拼接最终得到径向宽度为 2.7 mm 区域内锥形镜的面形,

对应径向位置为 4.5~7.2 mm,如图 17(a)所示,PV 值为  $3.18\lambda$ 。将锥形镜旋转 90°,再次测量,结果如图 17(b),PV 值为  $2.89\lambda$ ,两者 PV 值相差  $0.29\lambda$ ,约为被测面形 PV 值的 1/10,验证了本方法的正确性。使用

英国泰勒霍普森公司的 LumphoScan 420 轮廓仪对实验锥形镜相同区域进行测量,面形结果如图 17(c)所

示,PV 值为  $4.04\lambda$ 。与所提方法测得的面形分布基本一致,PV 值相差  $0.54\ \mu\text{m}$ ,验证了所提方法的可行性。

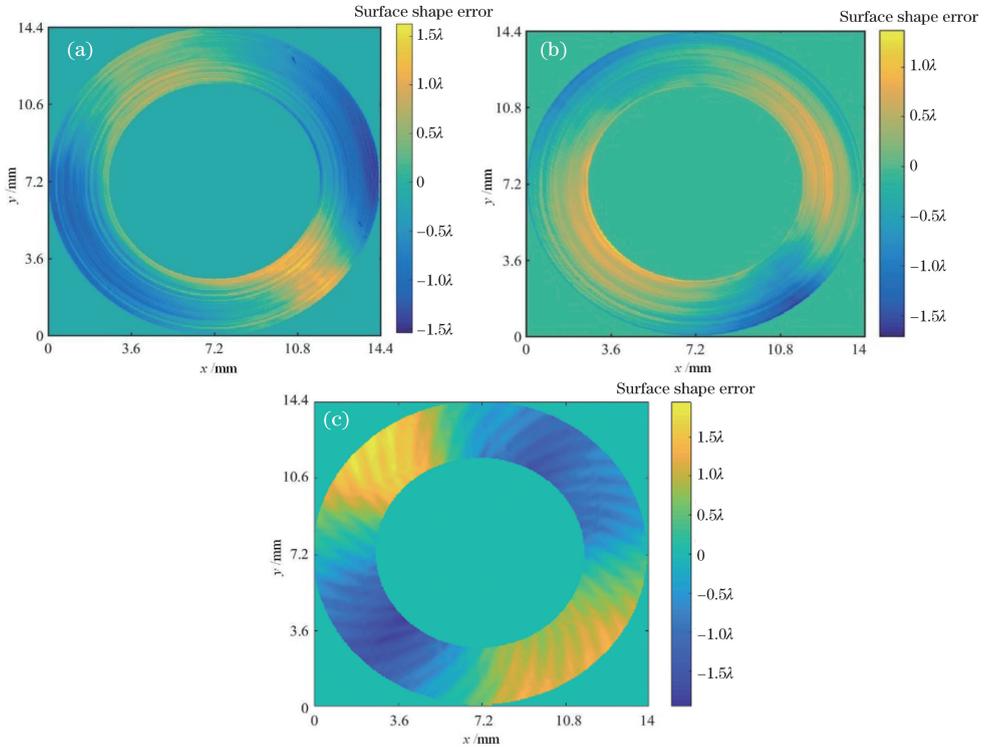


图 17 锥形镜面形测量结果。(a)环形子孔径扫描法;(b)环形子孔径扫描法(锥形镜旋转  $90^\circ$ );(c) LumphoScan 轮廓仪测量法  
Fig. 17 Measurement results of axicon surface. (a) By annular sub-aperture scanning method; (b) by annular sub-aperture scanning method with  $90^\circ$  rotation of axicon; (c) by LumphoScan profiler

采用环形子孔径扫描法对更靠近锥形镜中心的宽度为  $1.3\ \text{mm}$ (对应径向位置  $1.2\sim 2.5\ \text{mm}$ )的区域进行高采样密度测量,测量结果如图 18 所示,其面形分布与图 17 区域有较好的一致性,而采用 LumphoScan 设备已难以准确测量锥形镜中心部分的面形分布。

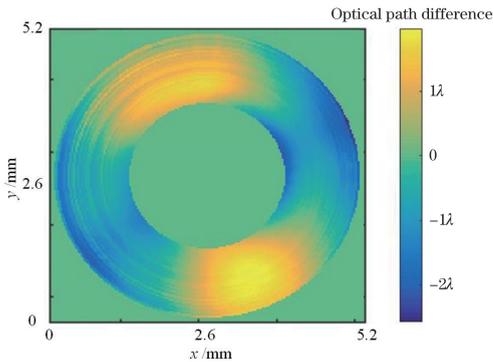


图 18 锥形镜中心宽度  $1.3\ \text{mm}$  区域的锥形镜面形测量结果  
Fig. 18 Measurement result of axicon surface in area within  $1.3\text{-mm}$  width near center

高精度、通用化测量方法。使用微动扫描台轴向移动锥形镜,同时采用波面测量干涉仪记录扫描相位图,通过扫描拼接得到锥形镜的完整面形。对环形干涉条纹宽度与干涉可见度在扫描测量中的变化规律、系统测量对准流程、测量空间分辨率,以及检测精度等因素进行分析论述。利用所提方法可实现锥角大于  $96.4^\circ$  的凹面和凸面锥形镜面形的测量,理论测量精度为  $\lambda/4\ \text{PV}$ 。可测量口径与锥角相关,对于  $140^\circ$  的锥形镜,凹面锥形镜可测量口径受干涉可见度的限制,可达到  $150\ \text{mm}$ ;凸面锥形镜可测量口径受球面标准镜口径与曲率半径的限制,可达到  $20\ \text{mm}$ 。

对一个标称角度为  $140^\circ$  的凸面锥形镜顶部面形进行测量,得到了局部环带区域内锥形镜的面形,通过样品旋转测试,及与 LumphoScan 轮廓仪测量结果进行对比后发现,所得面形具有一致性,验证了所提方法的可行性。

### 参 考 文 献

[1] McLeod J H. Axicons and their uses[J]. Journal of the Optical Society of America, 1960, 50(2): 166-

## 5 结 论

提出一种基于环形子孔径扫描的锥形镜面形的

- 169.
- [2] Zverev D, Barannikov A, Snigireva I, *et al.* X-ray refractive parabolic axicon lens [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28469-28477.
- [3] McGloin D, Garcés-Chávez V, Dholakia K. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(8): 657-659.
- [4] Arlt J, Dholakia K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon [J]. *Optics Communications*, 2000, 177: 297-301.
- [5] Monk S, Arlt J, Robertson D A, *et al.* The generation of Bessel beams at millimetre-wave frequencies by use of an axicon [J]. *Optics Communications*, 1999, 170(4/5/6): 213-215.
- [6] Ren J, Li S C, Li H, *et al.* Annular laser beam reshaping based on dual axicons [J]. *Laser Technology*, 2018, 42(1): 104-107.  
任驹, 李四川, 李航, 等. 基于双轴锥镜的环形激光束整形 [J]. *激光技术*, 2018, 42(1): 104-107.
- [7] Lü Q H, Zhai Z S. Effect of axicons on the depth-of-field of non-diffracting imaging system [J]. *Optoelectronic Technology*, 2008, 28(1): 29-33.  
吕清花, 翟中生. 轴锥镜对无衍射成像系统景深的影响 [J]. *光电子技术*, 2008, 28(1): 29-33.
- [8] Lee K S, Rolland J P. Bessel beam spectral-domain high-resolution optical coherence tomography with micro-optic axicon providing extended focusing range [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1696-1698.
- [9] Zhang L, Liu D, Shi T, *et al.* Optical free-form surfaces testing technologies [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 283-299.  
张磊, 刘东, 师途, 等. 光学自由曲面面形检测技术 [J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 283-299.
- [10] Geng A B, Wang B. Inversion method for aspheric surface equation derivation based on data measured from talysurf [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(4): 042204.  
耿安兵, 王彬. 基于轮廓仪测量数据的非球面方程反演技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(4): 042204.
- [11] Beutler A. 3D profilometry on aspheric and freeform lenses [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8082: 80821J.
- [12] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.  
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [13] Ma J, Pruss C, Häfner M, *et al.* Systematic analysis of the measurement of cone angles using high line density computer-generated holograms [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(5): 055801.
- [14] Chen Q, Zhang Y H, Qiu C K, *et al.* Method for measuring the cone angle and the shape of the axicon simultaneously using computer-generated holograms [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(28): 8290-8292.
- [15] 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.  
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.
- [16] Gao H M, Zhang X D, Fang F Z. Interferometry of a reflective axicon surface with a small cone angle using an optical inner surface [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(9): 095204.
- [17] Küchel M F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7389: 738916.
- [18] Küchel M F. Interferometric measurement of rotationally symmetric aspheric surfaces [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, 10316: 103160Q.
- [19] Hou L Z, Qiang X F, Sun X M. Analysis and comparison of errors in several phase-stepping algorithm with an arbitrary step [J]. *Optical Technique*, 1999, 25(5): 7-10.  
侯立周, 强锡富, 孙晓明. 几种任意步距步进相移算法的误差分析与对比 [J]. *光学技术*, 1999, 25(5): 7-10.
- [20] Bone D J. Fourier fringe analysis: the two-dimensional phase unwrapping problem [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(25): 3627-3632.
- [21] Zhang X Q. Research of phase unwrapping based on quality map [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.  
张晓秋. 基于质量图的相位展开方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.