

## 基于虚拟光阑调制的刀口法自动定量检测技术

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** 依靠算法提高光学测量精度的方法和应用越来越广泛, 由于刀口法在光学非球面检测中的应用有其独特性, 本文提出了在非焦点处采样, 对应 CCD 像面上辅以虚拟光阑调制的刀口法环带, 实现定量检测。以检测一个凹球面为例, 将其与干涉仪标准方法的检测结果进行对比, 其中主要环带位置偏差不超过 1%, 峰谷(PV)值和均方根(RMS)值误差均在 7% 左右, 可以实现至少  $\lambda/15$  左右的检测灵敏度。该研究为光学车间检测提供了一种定量化检测的新思路, 优化了光学加工与检测的效率, 为自动化刀口仪的研制奠定了基础。

**关键词** 光学检测; 刀口仪; 自动化; 光学仪器

中图分类号 TH741

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231031

## 1 引言

光学非球面元件的面形检测在光学先进加工和制造过程中具有相当重要的指导意义<sup>[1]</sup>。光学非球面元件的表面面形检测方法主要包括傅科刀口阴影检测法、干涉仪检测方法、轮廓仪检测法、计算全息法、相位偏折术法、原子力显微镜检测法以及哈特曼传感器检测法<sup>[2-6]</sup>等等。其中传统的傅科刀口阴影检测法在检验各种光学表面方面极为有效, 具有检测设备简单、检测结果精度高、表面误差检测响应灵敏度高、检测便捷等优点, 在非球面检测中仍然普遍使用。

随着科学的发展和技术的进步, 刀口仪的应用方向逐渐往数字化和自动化发展。柯达公司首先在这一领域进行了探索<sup>[7-8]</sup>, 他们通过刀口的运动来积分亮度变化数据, 同时创新性地使用 CCD 相机来采集数字化的刀口阴影检测图, 最后定量解算待测镜面表面面形的峰谷(PV)值和均方根(RMS)值, 但需要将刀口仪精密调整至焦点处才能进行检测, 自动化和量化的程度较为有限。近几十年来关于刀口仪的数字化研究也有一些进展, Yuan 等<sup>[9]</sup>使用刀口阴影检测图的灰度差别的分布来定量化解算大口径的光学镜面表面的波前加工误差。Jing 等<sup>[10]</sup>使用几何建模分析结合灰度分布来对刀口检测法获得的阴影图进行处理, 以量化解算待测镜面的面形。张均<sup>[11]</sup>研究了数字化刀口仪, 利

用其建模出的几何算法定量化地测量和解算了大口径光学镜面表面面形。王小鹏等<sup>[12-13]</sup>设计和搭建了一套数字化刀口仪系统, 并利用其开发的定量化算法模型检测和解算了非球面光学元件表面包含了 PV 和 RMS 值的一系列参数, 其数学解算模型与 Jing 等和张均的类似, 均为空间几何建模。范珂等<sup>[14]</sup>对刀口法的定量检测进行了研究, 也建立了相关的空间几何数学模型并进行了模拟解算实验。上述工作十分全面地研究了刀口法光学检测的几何关系, 但仍须在焦点处进行检测并且自动化程度有限。Cheng 等<sup>[15]</sup>使用 CCD 和傅里叶变换在频域上来处理刀口阴影检测图, 并解算了待测元件的表面波前误差。在另一项研究中, Rodriguez 等<sup>[16-18]</sup>通过物理光学方法对刀口法的物理理论和灰度进行了更深入的研究, 用以解算光学元件的表面面形信息。上述报道的刀口法光学检测方面的研究, 一般通过将刀口仪的刀口在焦点处横向切割主光轴运动来获得一系列的刀口阴影检测图, 再对阴影图进行分析以获取镜面的表面面形信息。前人的研究通过数字图像采集及处理技术和自动控制技术使得刀口法光学检测在数字化和自动化方面取得了较好的进展, 但均须将刀口仪的刀口调整至待测镜面的焦点位置才能进行检测工作。

传统的在焦点处横向切割刀口进行定量化检测方法确实可以很好地进行定量化检测, 但仍需人工操作,

收稿日期: 2023-05-23; 修回日期: 2023-06-15; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-09-15

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: \*zhyjiao@siom.ac.cn; \*\*jqzhu@siom.ac.cn

检测效率较低。本质上,在焦点处的信息获取,能得到比较高的信噪比。实际上,沿焦点附近的光轴扫描,也能得到可以提取的信息,为此,本文作者团队前期发展了基于轴向扫描的自动化刀口检测技术<sup>[19]</sup>,通过对刀口阴影检测图使用环带提取算法和梯度插值函数提取环带信息以及确认焦点处的阴影图,规避了找焦点困难的问题,为刀口仪的自动化发展奠定了基础。但在非焦点处的阴影图,不同环带信号相互耦合,导致图像信噪比退化,提取的环带误差信息精度有限。为了更好地测量非球面镜的环带误差,Ritchey<sup>[20]</sup>最先提出使用一个具有不同环带位置开缝的光阑用于刀口阴影法检测,这样刀口在沿主光轴纵向移动时,如果发现环带明暗发生变化,就可以观察到各个环带区域的横向像差量。Couder<sup>[21]</sup>提出了一种通用性更强的光阑,利用待测镜面表面各个环带区域的位置的几何关系进行设计,可以很好地观察整个镜面。传统的加光阑方法虽然优化了环带误差的检测,但受到光阑的形状和图像处理等因素的制约,并且传统实体光阑不能灵活使用,只能在固定位置开缝,而光阑开缝的边缘会产生部分硬边衍射效应,不利于检测结果的准确性,而且增加了系统复杂度。

本文提出了基于虚拟光阑调制的刀口法环带误差

定量检测技术,利用物面实体光阑和像面虚拟光阑的物象对应,实现对待测镜面产生的轴向多幅刀口阴影检测图进行子环带分割,通过每个环带对应图像灰度沿轴向的演变特性来确定该环带对应的轴向焦点位置,从而实现整个面形的自动化和定量化求解,进而有效地实施定量化和高效率的光学检测。

## 2 检测原理

本节主要介绍加设了虚拟光阑进行刀口法定量化光学检测的方法原理、数学模型和解算方法。传统加光阑检测的方法是在物面前加实体光阑,露出待测环带,从而进行检测。如图 1 所示,本文所提的方法是在 CCD 采集得到的阴影图上加载数字化光阑,相当于在像面上加载光阑,同样起到露出待测环带的作用,而且便于操作、适用性强。对于环带在物面和像面上的对应关系,设露出的环带在镜面上的半径为  $r$ ,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),露出环带所在的圆环半径为  $r_1$ (单位为 pixel),则实际露出的环带所在的半径  $r$  与数字图像上的环带位置的换算关系可表示为

$$r = \frac{r_1}{R_1} r_1。 \quad (1)$$

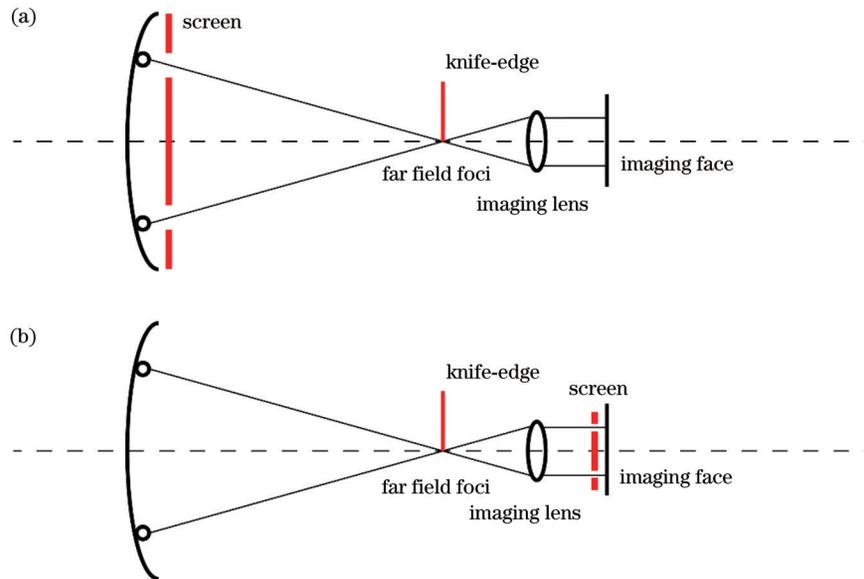


图 1 位置原理示意图。(a) 加载传统实体光阑的示意图;(b) 加载数字化掩膜光阑的示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of position principle. (a) Schematic diagram of loading traditional solid screen; (b) schematic diagram of loading digital mask screen

如图 2 所示,首先将刀口仪调节至光轴上,将刀口仪的刀口沿光轴纵向切割,会得到一系列明暗变化的刀口阴影图,根据环带误差的位置,刀口阴影图也会相应地有不同的变化,如第一排阴影图所示。用数字化环带状掩膜光阑经过平均划分待测镜面整个口径,分为了 1、2、3 一直到  $n$  区。在这里先露出了 1 区,因此沿光轴采集的一系列阴影图加设完掩膜会有如图 2 第二

排阴影图所示的变化,该环带曲率中心所对应的轴向位置为  $b$ ;然后按顺序露出来 2 区一直到  $n$  区,展示了加设掩膜的阴影图的变化,同时也展示了这一系列环带对应的曲率中心的位置。

如果直接观察阴影图,其中代表环带位置的明暗变化会受到阴影图中其他位置明暗关系的干扰,如果人为利用算法加入一个掩膜,只关注阴影图中环带位

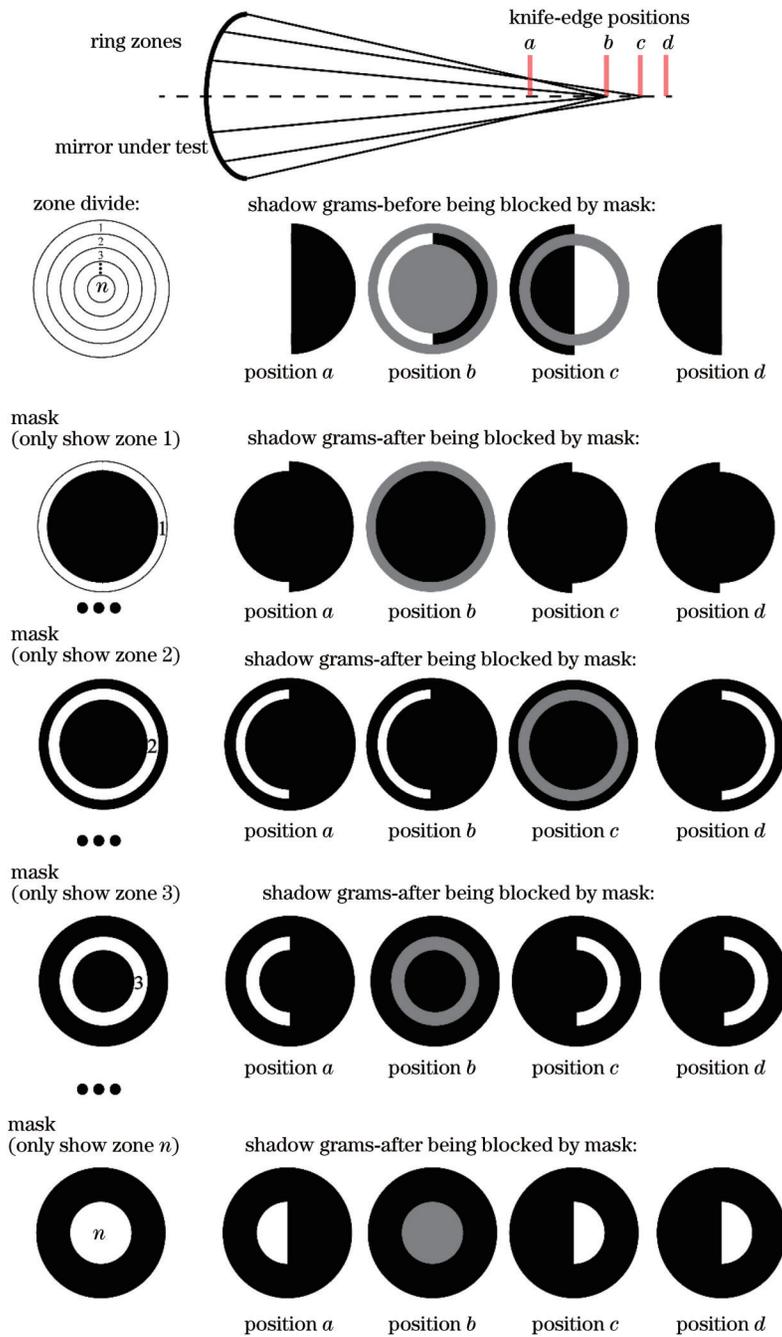


图 2 将沿光轴采集到的一系列阴影图加设掩膜光阑并寻找位于目标环带曲率中心的阴影图的原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of principle of adding a mask screen to a series of shadow grams collected along optical axis and searching for shadow grams located at curvature center of target ring

置处的明暗变化,可以很好地分辨特定位置上的环带误差,即在这一系列加设虚拟光阑掩膜的阴影图中,由于环带曲率中心对应的阴影图上露出的环带最接近全灰,因此该阴影图的整体方差最小。在计算阴影图方差之前,应该先对阴影图进行滤波和去噪声处理,这样计算结果更为可靠和精确。阴影图方差计算公式为

$$S = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{[a_i - \text{mean}(a)]^2}}{n}, \quad (2)$$

式中:*a*代表单个像素的灰度值;*n*代表总像素数;计算结果*S*表示该组阴影图的方差值。环带掩膜光阑的定

义公式为

$$f_n(x) = \begin{cases} 0, & x < \frac{R}{N} \times n \text{ or } x > \frac{R}{N} \times (n+1) \\ 1, & \frac{R}{N} \times n \leq x \leq \frac{R}{N} \times (n+1) \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $f_n(x)$ 表示透过率函数;*R*为待测镜面半径大小;*N*为全口径等分的环带数目;*n*为第*n*个露出环带。

掩膜可以人为设定被遮挡的部分和露出的部分,即可以人为调整和设定目标观测的环带的位置,通过数字图像处理直接加载在实验获得的刀口阴影图上,实现环带误差的有效检测。如果掩膜设定露出的环带

宽度过大,依然会受到信噪比损失的困扰。理论上环带宽度越小,检测分辨率越高,环带宽度可以低至 1 个像素。但是环带宽度如果过低,会有噪声信号干扰,因此本文在讨论部分进行了分析并给出了环带宽度设置的推荐值。在实际实验中还会遇到的一个问题就是在焦点处信噪比最好,刀口可以很好地过滤本底噪声,清晰地展示出环带信息;而在非焦点位置采集到的阴影图信噪比会降低,因此可以通过使用环带状虚拟掩膜光阑对阴影图的划分来突出目标环带,这样每一个环带对应的曲率中心位置的阴影图可以更好地识别与判读,尽可能地减少在非焦点处采集得到的阴影图信噪比降低以及本底噪声带来的影响。

为了解决环带误差位置的不确定性,使得方法具有普适性,并且提高检测精度,保证光阑尺寸小于误差环带宽度,避免不同环带误差的相互干扰,本文所提方法首先设置一系列环状光阑  $\delta R_1, \delta R_2, \dots, \delta R_n$  从内到外对整个待测镜面进行环状口径分割,如图 3 所示,所有光阑掩膜叠加起来形成一个完整的口径;然后对一系列  $P(z_1), P(z_2), \dots, P(z_m)$ , 乘以径向环带光阑掩膜  $\delta R_1$ , 获取环带滤波的一系列阴影图  $P\delta 1(z_1), P\delta 1(z_2), \dots, P\delta 1(z_m)$ , 如图 4 所示。为了保证检测精度,首先对这一系

列阴影图进行滤波和去噪声处理,然后再计算这些阴影图的图像方差,若这一系列图中灰度方差最小的图为  $P\delta 1(zR_1)$ , 则说明  $R_1$  环带对应的聚焦点在光轴上  $zR_1$  处;最后使用不同的环带光阑掩膜函数重复上述步骤,共计处理阴影图  $n \times m$  次,则可以获取不同环带  $R_n$  环带对应轴上的焦点  $zR_n$ 。该方法的特点是用一系列阴影图来获取一个特定环带的焦点位置,利用  $z$  向位置变化带来的灰度变化来提取信息,精度更高。

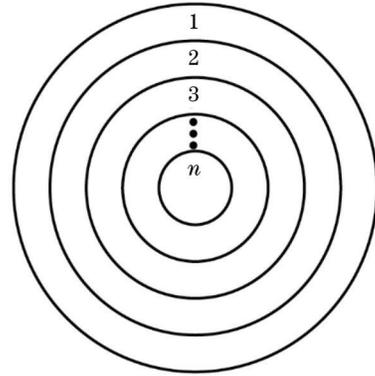


图 3 环带状光阑掩膜分割示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ring belt screen mask segmentation

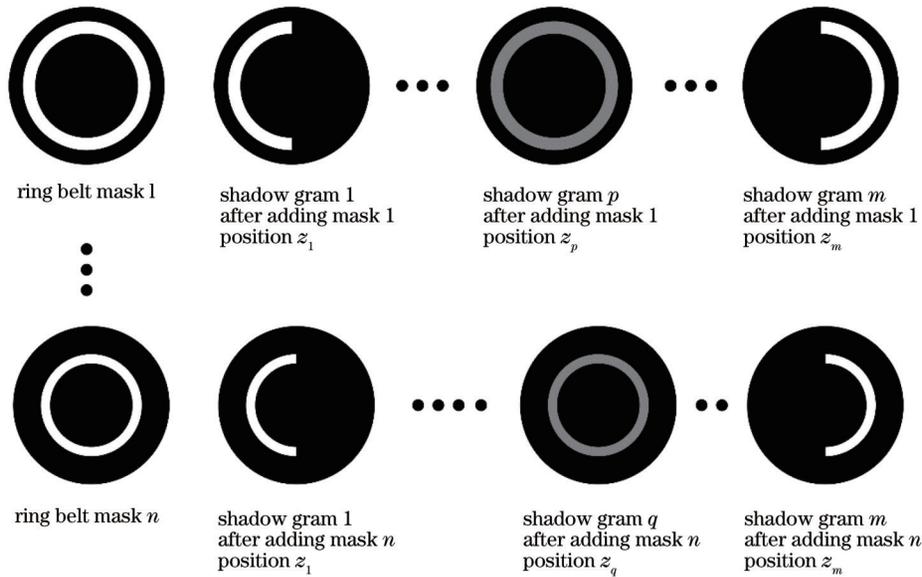


图 4 加载环带状光阑掩膜及图像处理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading ring belt screen mask and image processing

在真实的检测中,待测镜面的理论曲率半径  $R$  已知,曲率中心到待测镜面中心的距离是可以简单的实验室的尺子测量的。理论上曲率中心已知,但实际的曲率中心与理论值有偏差,根据现有的球面加工工艺,通过加工样品与样板的比对检测,精度可以控制在千分之一左右,这里尺子测量的精度为 0.5 mm 左右,只进行简单复核;再根据式(5)中的参数关系,  $L$  值对最终计算结果影响较小。并且待测镜面上环带所处位

置的  $r$  值可以通过阴影图上环带相对位置及待测镜面口径换算出来。因此  $L$  可以通过环带在镜面表面的相对位置和待测镜面的表面的面形函数求解出来,如图 5 所示。

$$L = \sqrt{R^2 - r^2}. \quad (4)$$

而缺陷环带的真实曲率中心,可以通过该环带对应阴影图上的明暗转化位置得到,由于阴影图是通过位移台匀速自动移动的同时由 CCD 相机等间距自

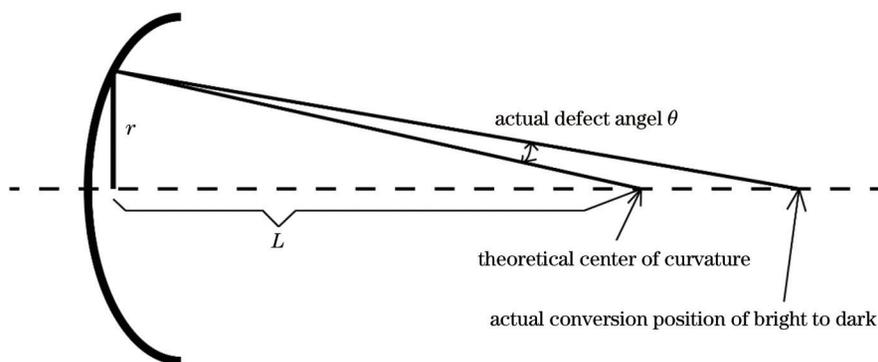


图 5 检测原理图

Fig. 5 Schematic diagram of testing

动采集,因此每张阴影图都附带位置信息,于是环带实际的曲率中心到待测镜面的距离 $L'$ 也可以知道。于是待测环带的真实误差 $\theta$ 可由如下公式求出:

$$\theta = \arctan\left(\frac{L}{r}\right) - \arctan\left(\frac{L'}{r}\right), \quad (5)$$

式中, $\theta$ 为缺陷位置法线与理想表面法线的夹角,即代表缺陷的真实程度。将 $\tan \theta$ 乘以该环带的真实宽度即为该环带缺陷的具体高度值。最后对所有缺陷位置的高度值由外环带到内环带进行积分即可得到待测镜面的表面面形。

### 3 原理仿真

本节介绍了本文所提方法的原理性仿真,使用了一个较为简单的模型并且划分出较少的环带,以便于清晰地展示所提方法的可行性和正确性。首先使用 Zemax 光学设计软件进行了模拟实验,使用了口径为 20 mm、曲率半径为 100 mm 的凹球面镜,在其 0.5 倍和 0.8 倍半径处设置了两个深度为 $\lambda/2$ 、宽度为 2 mm 的环带,首先模拟出该镜面在其曲率中心前后沿主光轴分布的刀口阴影检测图 5 张,如图 6 所示。



图 6 Zemax 光学设计软件模拟的一系列沿光轴分布的刀口阴影检测图

Fig. 6 A series of knife-edge shadow grams distributed along optical axis simulated by Zemax optical design software

然后以阴影图的整个口径为基础由内而外等分出 20 个环带,在图像处理算法中每次露出一个环带作为数字掩膜光阑,处理这 5 张阴影图,然后循环往复,共计处理 $20 \times 5$ 次。在每组 5 张阴影图的处理过程中,计算它们的方差,找出方差最小的阴影图,如图 7 方框内的阴影图,其所在位置即为该环带曲率中心的位置,进而可以利用前文第 2 节的原理和公式计算出该环带与完美环带的绝对误差值。阴影图批量处理方法如图 7 所示。

从图 8 可以看出,计算结果中环带的位置与 Zemax 模拟的环带位置相对应,环带深度的计算结果也较为一致,初步验证了本文所提方法的正确性和可行性。在尝试了对更小的环带缺陷进行模拟和计算后,如图 8(c)所示为模拟环带缺陷大小为 $\lambda/30$ 时的面形计算结果。可以发现,当环带缺陷的曲率中心在轴向上的聚焦点与完美镜面的聚焦点的间距小于 0.3 mm 左右,即 1 倍焦深大小,对应的绝对缺陷大小小于 $\lambda/30$ 时,最终的计算结果无法分辨环带,这对于实际实验中的采样间距具有指导意义。

### 4 实验设置与结果

本文实验光路如图 9 所示,把刀口置于待测镜面曲率中心左右的位置,在刀口后面放置 Daheng CCD 相机,其分辨率为 2048 pixel $\times$ 2048 pixel,单个像元尺寸为 3  $\mu\text{m}$ ,该 CCD 相机配置了一个 Computar 成像镜头,该镜头的焦距为 50 mm,这样待测镜面表面反射刀口仪点光源的像经过成像镜头就会呈现在 CCD 相机上面。刀口仪置于可 X-Y 轴平移的电动位移台上。其中 CCD 相机的位置是固定的,因此理论上刀口仪移动所采集的阴影图会有在像面上离焦的问题干扰,但实际使用的成像系统的景深较大,经过计算,系统的景深为 83.17 mm,而刀口仪的移动范围为 20 mm,因此可以满足刀口仪在移动范围内对于本实验参数下所采集的阴影图的清晰度。

如图 10 所示为刀口仪沿着主光轴纵向移动,同时进行阴影图采集,得到的一系列阴影图结果。待测镜面理论曲率半径为 489 mm,口径为 50 mm。可以看出

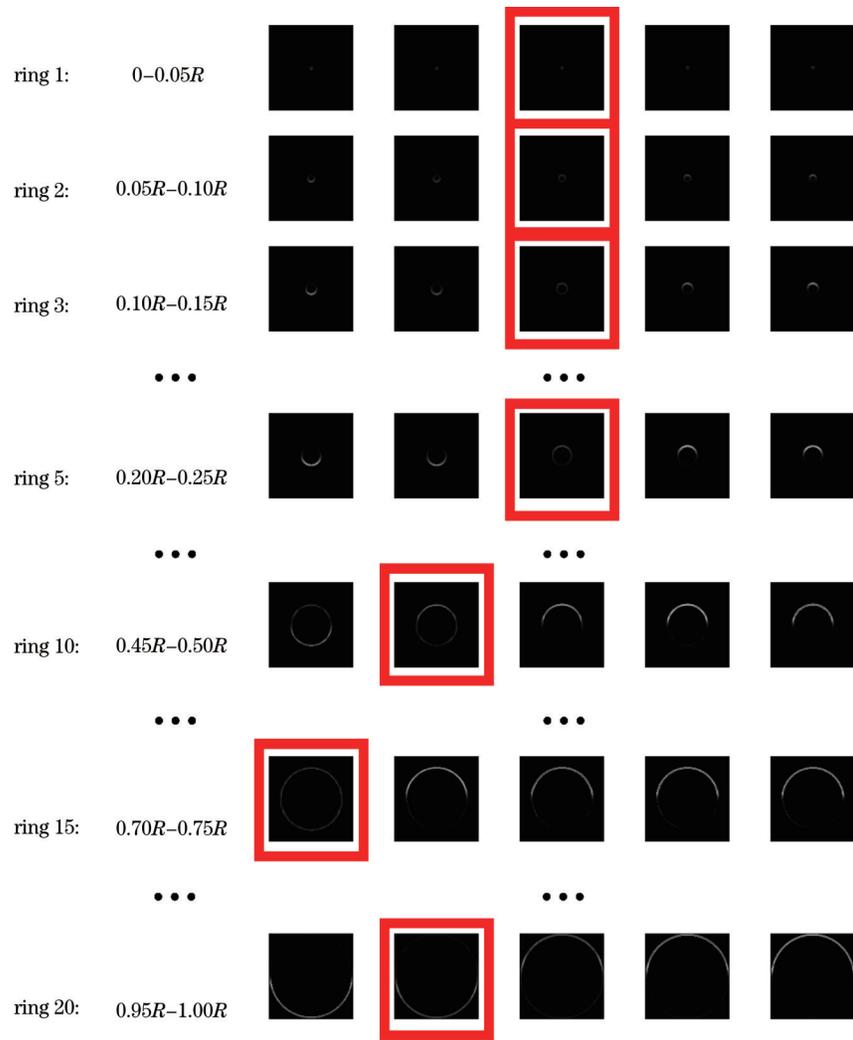


图 7 阴影图处理过程示意图

Fig. 7 Schematic diagram of shadow grams processing

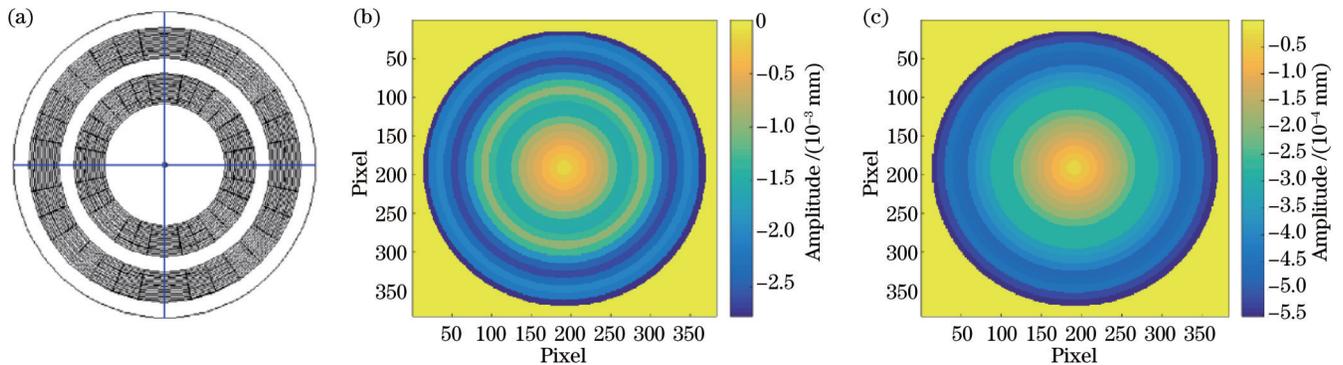


图 8 使用 Zemax 和所提方法模拟结果的示意图。(a) 使用 Zemax 模拟的环带位置示意图；(b) 所提方法模拟环带缺陷大小为  $\lambda/2$  时的面形计算结果；(c) 所提方法模拟环带缺陷大小为  $\lambda/30$  时的面形计算结果

Fig. 8 Schematic diagrams of simulation results using Zemax and proposed method. (a) Schematic diagram of ring position simulated using Zemax; (b) surface shape calculation results simulated using proposed method when defect size is  $\lambda/2$ ; (c) surface shape calculation results simulated using proposed method when ring defect size is  $\lambda/30$

阴影图的环带信息较为丰富，为判读带来了一些不便。

将刀口仪沿着主光轴从近于待测镜面到远于待测

镜面自动移动 20 mm 的距离，移动刀口仪的同时连续采集刀口阴影图。在这一过程中采集了约 90 张阴影图，把环带分为 10 份，对其批量加设不同位置的环带，

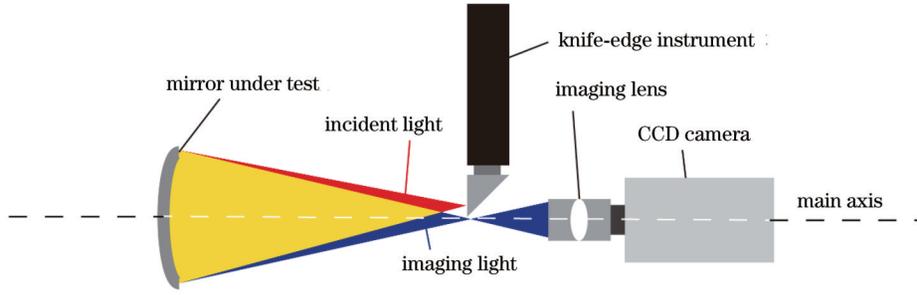


图 9 实验系统设置图

Fig. 9 Experimental system setup diagram

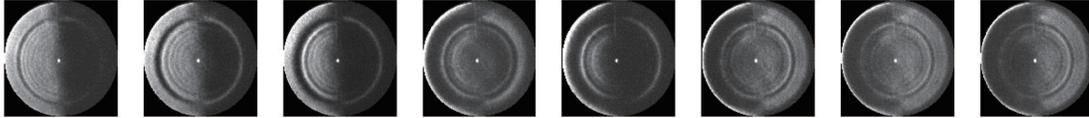


图 10 沿光轴采集到的有代表性的一系列阴影图的示意图

Fig. 10 Schematic diagram of a representative series of shadow grams collected along optical axis

计算环带位置相同时方差最小的阴影图,找出该环带对应的曲率中心位置。如表 1 所示,将阴影图 10 等分,不同环带位置对应不同采集位置的刀口阴影图。

由上述实验结果可以重建待测镜面的表面面形以及计算环带误差的真实曲率半径,重建及计算结果如图 11 所示。可以看出重建环带面形结果与干涉仪检测的标准结果具有很强的一致性,待测镜面上的主要环带均被检测出来,并且位置一一对应。图 11(a)为干涉仪检测出的标准结果,图 11(b)和 11(c)分别为处理实验数据得到的待测镜面曲率半径大小的相对结果及其真实计算结果。

如图 11 所示,本文根据环带信息计算了待测镜面的环带情况,绘出了面形重建结果的对比图,并与干涉仪检测的标准结果进行了对比,可以看出环带位置对应得较好,并且整体走势趋于一致,验证了本文提出的

表 1 不同环带曲率中心对应的刀口阴影图位置  
Table 1 Position number of knife-edge shadow gram corresponding to curvature centers of different bands

Number of ring belt	Ring belt position (Relative to radius size)	Position number of shadow gram
1	0-0.1	82
2	0.1-0.2	84
3	0.2-0.3	82
4	0.3-0.4	43
5	0.4-0.5	43
6	0.5-0.6	38
7	0.6-0.7	43
8	0.7-0.8	30
9	0.8-0.9	35
10	0.9-1.0	83

环带检测方法的正确性和有效性。

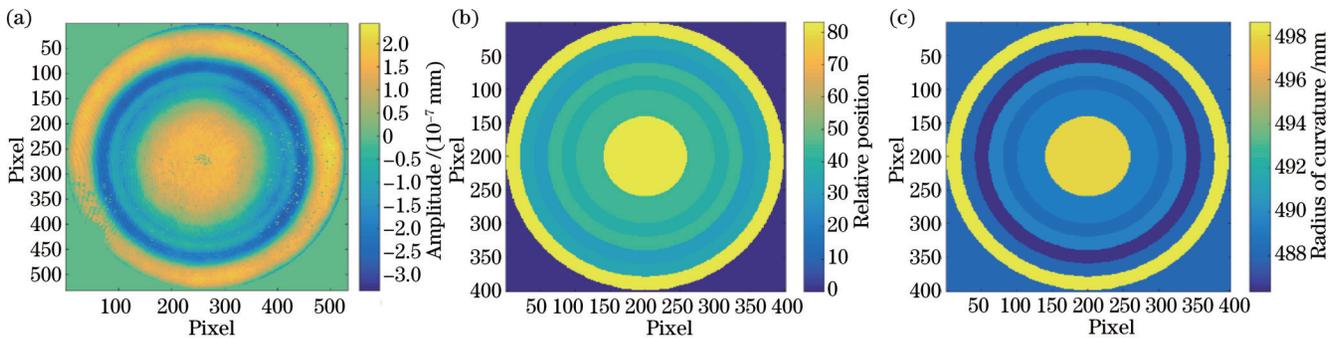


图 11 检测结果对比。(a) 干涉仪检测结果面形图;(b) 所提方法环带误差相对位置检测结果;(c) 不同位置环带误差曲率计算结果  
Fig. 11 Comparison of testing results. (a) Interferometer testing result profile; (b) ring error relative position testing results of proposed method; (c) calculation results of curvature of ring error at different positions

为了获得更好的结果,本文使用沿光轴移动 20 mm 采集的 60 张左右的阴影图,但将遮挡和露出阴影图的环带分为了 100 份,计算由算法掩膜露出从内

到外 100 等分的位置的阴影图的图像最小方差对应的位置,然后计算该位置环带对应的误差大小,最后从最外环到最内环进行积分,计算出待测镜面的表面波前

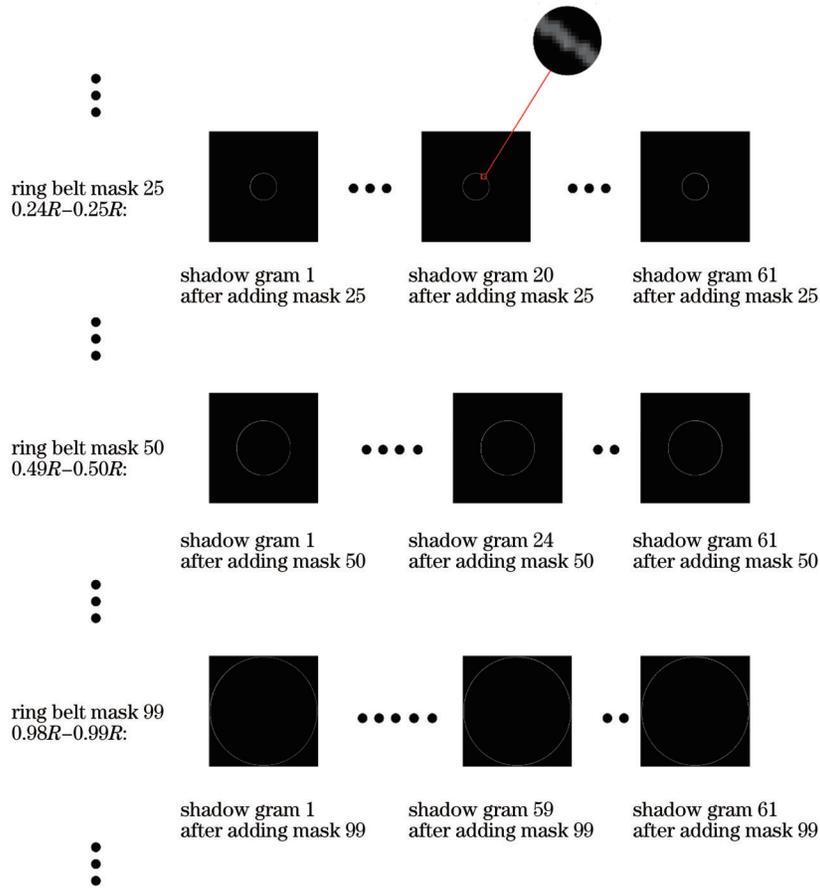


图 12 检测实验中阴影图处理过程示意图

Fig. 12 Schematic diagram of shadow gram processing in testing experiment

环带误差值。数据处理过程如图 12 所示,结合之前的原理图可以清楚地看到加载虚拟环带状掩膜光阑的数据处理过程。

如图 13 所示为本文所提检测方法检测结果与干涉仪检测结果的对比,可以看出结果较为一致,主要环带误差起伏的位置相同,面形整体总览一致。

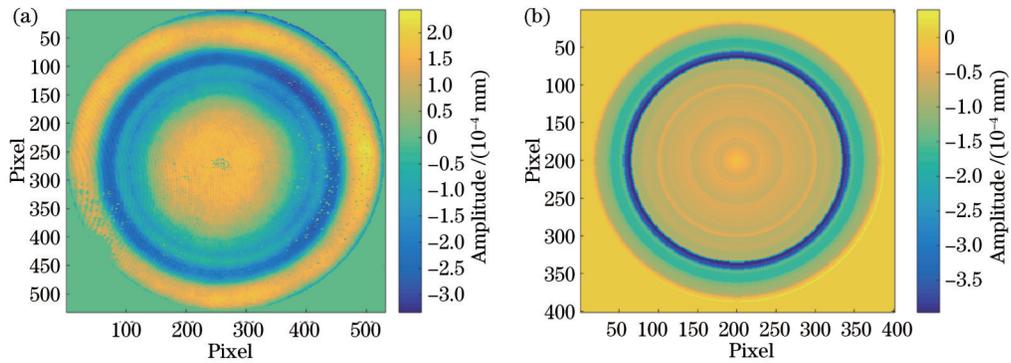


图 13 检测结果对比。(a) 干涉仪标准方法面形检测结果;(b) 所提方法面形检测结果

Fig. 13 Comparison of testing results. (a) Surface shape testing results of interferometer standard method; (b) surface shape testing results of proposed method

如图 14 所示,为了进一步验证方法在量化检测领域的可行性,将本文所提方法的剖面检测结果与干涉仪检测结果进行了对比,所使用的干涉仪是 4D 公司的泰曼-格林商用干涉仪,型号为 PhaseCam 4030。从对比中可以找出环带起伏位置的一致性,其中主要环带位置位于半径的 0.7191 倍和 0.7114 倍位置处,偏差

不超过 1%,PV 值和 RMS 值误差均在 7% 左右,其中 PV 值分别为  $0.7748\lambda$  和  $0.7207\lambda$ ,相差  $0.0541\lambda$ ,约  $30.0255\text{ nm}$ ;RMS 值分别为  $0.0569\lambda$  和  $0.0547\lambda$ ,相差  $0.0022\lambda$ ,约  $1.2210\text{ nm}$ 。结合之前的整体面形图进行判读可以确定本文所提方法具有较好的检测可信度,并且可以较好地指导光学加工和检测。

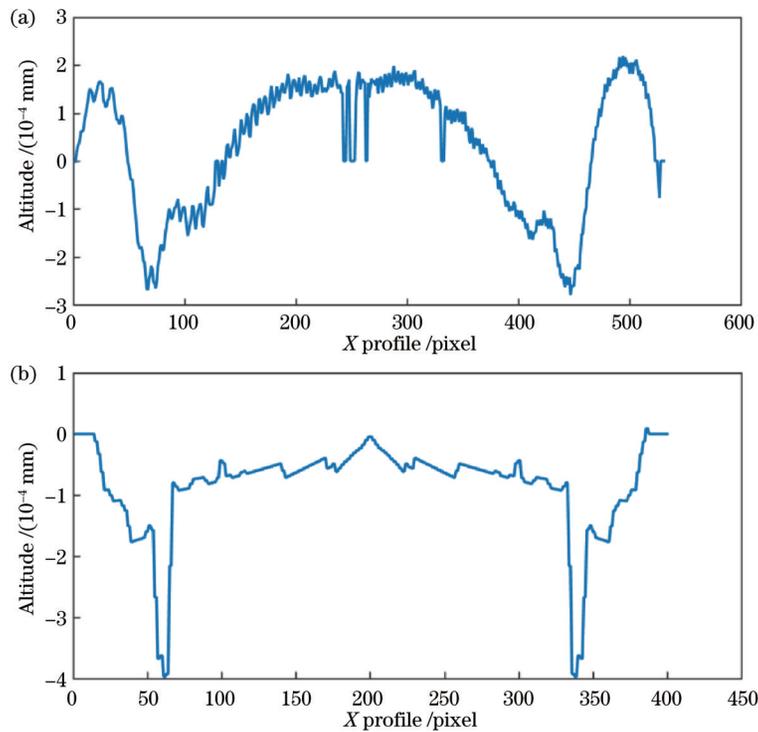


图 14 剖面检测结果对比。(a) 干涉仪标准方法剖面检测结果;(b) 所提方法剖面检测结果

Fig. 14 Comparison of profile testing results. (a) Profile testing results of interferometer standard method; (b) profile testing results of proposed method

## 5 分析与讨论

为了实验结果的准确性和可靠性,使得本文所提方法的参数选择具有一定的普适性,本节对不同参数下的实验及图像处理结果进行分析,主要针对不同的环带划分数量和不同阴影图采样间距对实验结果的影响进行量化的比对与解释,最后进行了实验误差分析。

### 5.1 不同环带数量划分的影响

如图 15 所示为控制阴影图采集间距为固定值  $0.3 \text{ mm}$  时,分别在图像处理过程中分割不同数量的环带后的表面波前误差的最终计算结果图,可以观察出分割出的环带越多,计算结果细节越丰富。在仅有 50 个环带时,计算结果呈锯齿状,说明欠采样;在分割出 100 个环带时的结果较为不错,可以满足检测要求以及指导光学加工;在分割出 200 个环带时,环带宽度仅为 1 个像素,会有噪声的干扰。由此,本文推荐环带宽度最好是稍大于或等于 2 个像素。

### 5.2 不同阴影图采集间距的影响

如图 16 所示,将阴影图的图像处理算法的环带分割数量固定为 100,计算不同采集间距的表面波前误差结果。可以看出间距越小,计算结果的细节越不丰富,甚至出现部分有效信息的丢失。通过观察发现采集间距为  $0.6 \text{ mm}$  及以下时,计算结果较好,可以有效检测以及指导光学加工。通过计算及实验,本文推荐阴影图的采集间距为待测镜面的 1 到 2 倍左右的焦深

较好。

### 5.3 实验误差分析

一般来说,常规 CCD 相机的动态范围内的最小可检测灵敏度与探测器噪声相关,由 CCD 的制造工艺和技术决定和给出,可以使用不同的物理量对其进行表述,如单个像素的最小光通量、最小可检测辐照度、噪声等效辐照度、噪声等效温度差等。在现有的技术下,这些值一般很小,在定义最小可检测辐照度时,一个常用的方法是将其最小可检测辐照度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的最大辐照度,  $b$  为灰度的量化位数。根据 Zemax 软件的模拟及实际实验,图像上的灰带对应的灰度值约为  $E_i \approx 0.7 E_{\max} \gg E_{\min}$  ( $b=8$ ), 因此利用探测器可以满足灰带检测的条件。而 CCD 的最小可分辨率的灵敏度更高,并且人眼识别灰度变化以及提取灰带的能力明显逊于 CCD 相机和数字图像处理中几百个灰度分布级别的分辨能力。人眼分辨灰度图像的最小对比度仅为 2%, 刀口阴影检测法的灵敏度极限理论可达  $\lambda/100$  左右,并且在离焦位置进行检测,阴影图像的信噪比会降低,人眼更难以分辨。而对于这种情况的阴影图的灰度分布,CCD 是完全有能力胜任的,通过有效的数字图像处理及信号增强算法可以进一步有效地提升刀口阴影检测法的精度。

由于本文所提方法是采集灰度图像进行判断和计算,所采集的图像不可避免地会有噪声。对于噪声的影响,其中最主要的是相机的读出噪声,即无规律的扰

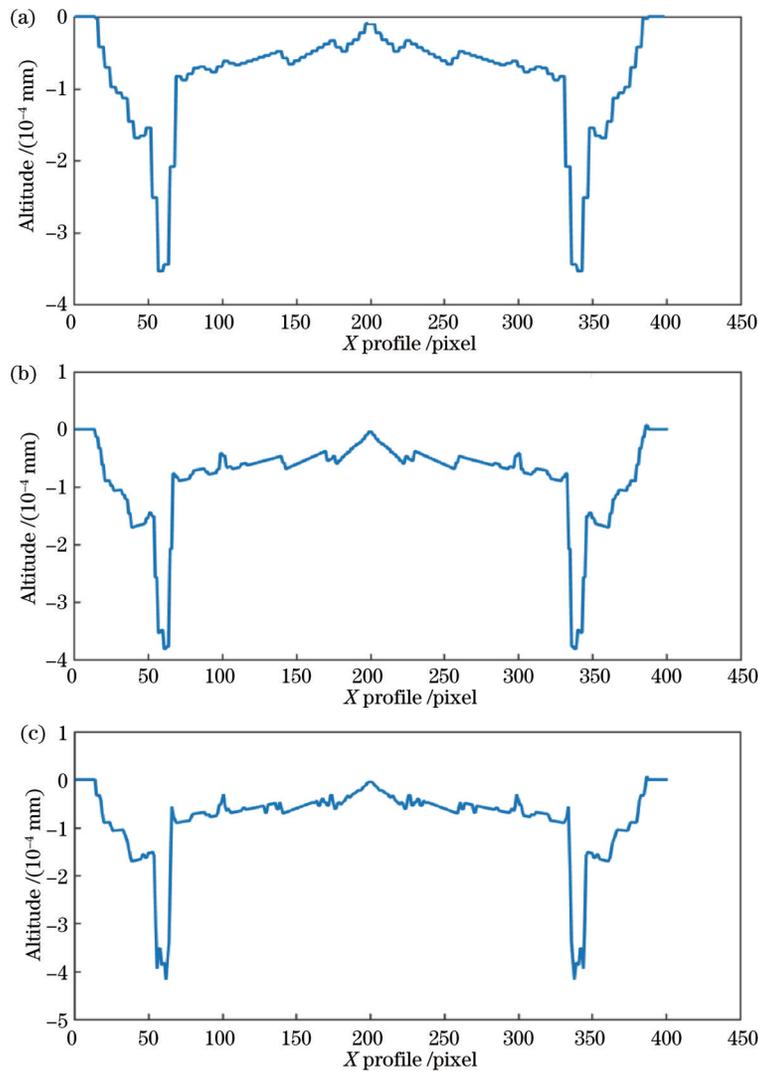


图 15 阴影图采集间距均为 0.3 mm、分割环带数量不同的表面波前误差计算结果。分割环带数分别为(a) 50 个;(b) 100 个;(c) 200 个

Fig. 15 Calculation results of surface wavefront errors when collection interval between shadow grams is 0.3 mm, and ring belt segmentation numbers are different. Ring belt segmentation numbers are (a) 50, (b) 100, and (c) 200, respectively

动,可以通过重复拍摄阴影图、多帧平均来降低该噪声;而对于热噪声,其噪点的位置基本固定,总体幅值和曝光时间成正比,可以通过相机硬件上的散热结构和软件上的减背景功能来抑制该噪声。而一般采用图像滤波的方法可以很好地去除大部分噪声。如图 17 所示,本文使用了一个窗口最大允许尺寸为 7 个像素的自适应中值滤波器对阴影图进行去噪处理<sup>[22]</sup>,降低噪声对于分辨率和计算结果的影响,使得结果更为准确可靠。

通过对本文所提方法的实验中环带误差绝对大小的计算和初步测算,在如图 14 所示的 0.67 倍半径处,最小的可检测的环带起伏为 40 nm 左右,意味着该方法检测灵敏度至少可以达到甚至优于  $\lambda/15$ 。由于 CCD 相机的位数有限以及部分噪声限制了所提方法的检测精度,如果采用更高位数的 CCD 相机可以更好地展示所提方法的最高检测灵敏度。

检测误差的另一个主要来源是位移系统绝对位置的误差。驱动刀口仪上刀口移动的电位移台为每步  $1.8^\circ$  的步进电机,电位移台上的滚轴丝杆的螺距为 1 mm,使用 Trinamic 公司生产的型号为 TMCL 的控制卡进行 8 细分,理论上位移分辨率可达  $1 \mu\text{m}$  甚至以下,重复定位精度在  $5 \mu\text{m}$  左右,因此对于实验中电位移台每次移动间隔 0.3 mm 甚至更大的距离几乎不产生定位和位移方面的误差和影响,而该定位精度对最终面形结果的影响经过换算为不大于 1.5 nm,该数值可以满足使用刀口法进行光学检测和加工的生产及实验阶段的精度要求。

传统刀口法需要首先将刀口仪与待测镜面主光轴对齐,再耗费时间将刀口调整至焦点处进行检测,并且只能进行定性检测,根据检测经验的不同大概需要五到数十分钟的调校和检测时间,对于检测经验要求较高;本文所提方法可以规避找焦点所耗费的时间,在对

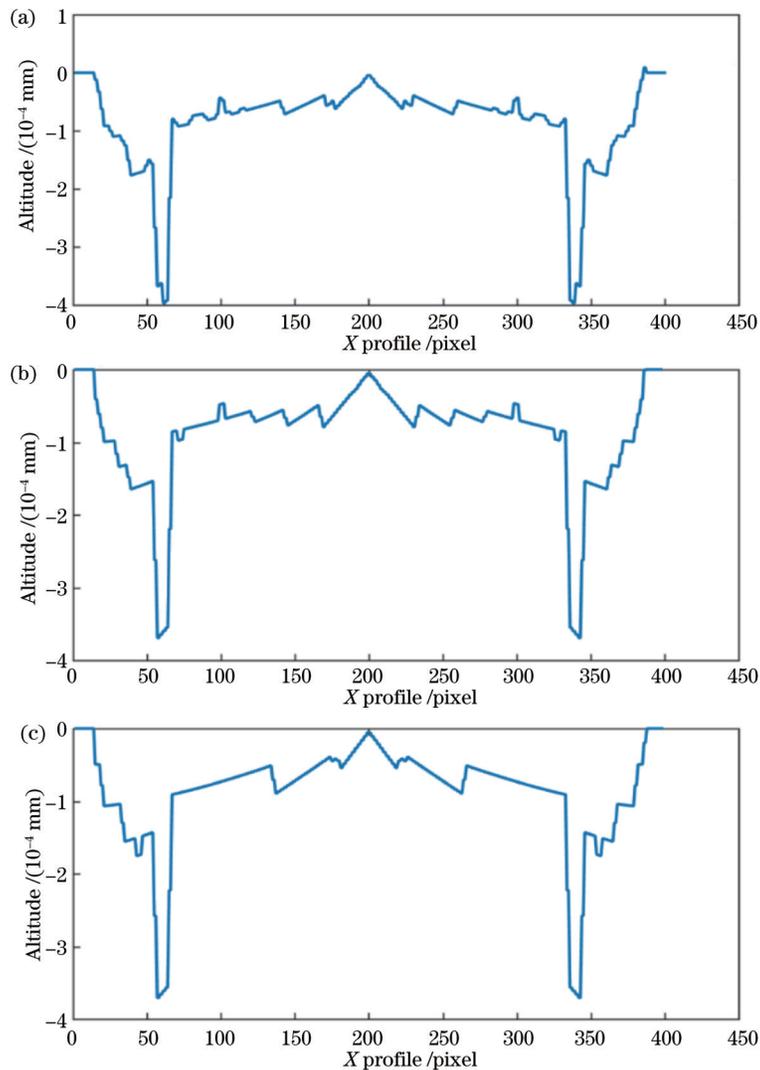


图 16 阴影图环带分割数均为 100、不同采集间距对应的表面波前误差计算结果。采集间距分别为(a) 0.3 mm;(b) 0.6 mm;(c) 0.9 mm

Fig. 16 Calculation results of surface wavefront errors corresponding to different collection intervals when number of shadow grams ring belt segmentation is 100. Collection intervals are (a) 0.3 mm, (b) 0.6 mm, and (c) 0.9 mm, respectively

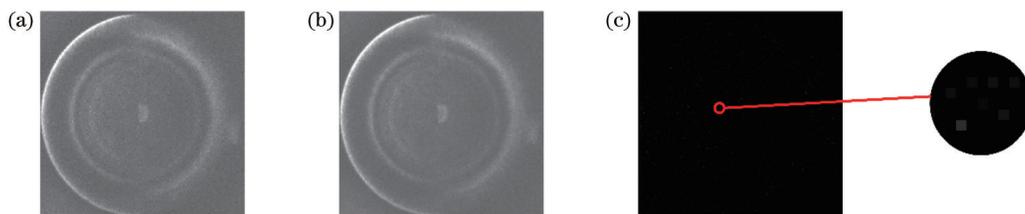


图 17 去噪过程示意图。(a) 去噪前的刀口阴影检测图;(b) 去噪后的刀口阴影检测图;(c) 去除掉的噪点示意图

Fig. 17 Schematic diagram of denoising process. (a) Knife-edge shadow gram before denoising; (b) knife-edge shadow gram after denoising; (c) schematic diagram of removed noise points

轴步骤完成后,通过刀口仪沿待测镜面主光轴自动移动同时自动采集轴向上的不同阴影图,仅需要数分钟即可进行量化的检测,在本文的实验中,刀口仪连续移动了 20 mm 的距离,采集了约 90 张阴影图,仅耗时 25 s;而数据读取和处理时间不超过 15 s。因此该方法提升了刀口法的检测效率,拓展了刀口法的使用场景。

## 6 结 论

本文提出并验证了一种基于算法加设虚拟掩膜光阑的量化和自动化刀口法光学检测方法。该方法在非焦点处自动采集待测镜面产生的轴向多幅刀口阴影检测图,将其进行子环带分割,通过每个环带对应图像灰度沿轴向的演变特性来确定该环带对应的轴向焦点

位置,从而实现整个面形的量化求解。利用图像处理算法控制环带光阑的位置,可以依次选出不同的环带,优化了传统实体光阑受限于只有在固定位置开缝而不能灵活使用且增加系统复杂度的问题。实验结果证明,该方法可以高精度以及量化地实现光学元件的表面面形检测,效率高、适用性强,对于光学加工和检测具有较强的指导意义。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Malacara D. Optical shop testing[M]. 3rd ed. Weinheim: Wiley, 2007.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Yuan L J, Wu Z H. Research on technique of wavefront retrieval based on Foucault test[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7654: 765402.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Rodríguez 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.
- [18] Rodríguez G, Villa J, Martínez G, et al. Towards the automatization of the Foucault knife-edge quantitative test[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10453: 104531T.
- [19] 华翔,焦兆阳,朱健强.基于刀口仪轴向移动的自动化非球面检测技术[J].光学学报,2022,42(23): 2312003.  
Hua X, Jiao Z Y, Zhu J Q. Automatic aspheric surface detection technology based on axial movement of knife-edge instrument[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(23): 2312003.
- [20] Ritchey G W. On methods of testing optical mirrors during construction[J]. The Astrophysical Journal Letters, 1904, 19: 53.
- [21] Couder A. Recherches sur les deformations des grands miroirs employes Aux observations astronomiques[D]. Paris: Faculte des Sciences Paris, 1931.
- [22] Gonzalez R C. Digital image processing using MATLAB[M]. 2nd ed. New York: Gatesmark, 2011.

# Automatic and Quantitative Testing Technology of Knife-Edge Method Based on Virtual Screen Modulation

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

<sup>1</sup>Key Laboratory of 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, China Academy of Engineering Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

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

## Abstract

**Objective** The surface shape testing of optical aspherical components has guiding significance in advanced optical processing and manufacturing processes. The traditional Foucault knife-edge shadow testing method is extremely effective in detecting various optical surfaces, with advantages such as simple testing equipment, high-accuracy testing results, high-sensitivity surface error testing response, and convenient testing. Thus, it is still widely employed in aspheric surface testing. Previous research has made sound progress in the digitization and automation of knife-edge optical testing through digital image processing technology and automatic control technology, but both require adjusting the knife edge of the knife-edge instrument to the focal position of the mirror to be tested before proceeding with further testing work. Meanwhile, although the traditional method of adding a screen optimizes the testing of ring belt error, it is limited by factors such as screen shape and image processing. Additionally, traditional physical screens cannot be flexibly adopted and can only be slotted at fixed positions. The edges of the slotted screen will produce some diffraction effects, which is not conducive to the accuracy of the testing results and increases system complexity. Therefore, we propose a knife-edge testing method based on virtual screen modulation for quantitative testing of ring belt error. By utilizing the object and image relationship between physical screens by the object surface and virtual screen by the image surface, we achieve subring ring belt segmentation of multiple axial knife-edge shadow grams generated by the mirror surface to be measured. The axial focus positions corresponding to each ring belt are determined based on the evolution characteristics of the corresponding image gray level along the axis. Finally, automation and quantitative solutions of the entire surface shape are achieved to implement quantitative and efficient optical testing.

**Methods** This method first sets up a series of circular screens  $\delta R_1, \delta R_2, \dots, \delta R_n$  and performs circular screen segmentation on the entire mirror surface to be tested from the inside out, and all screen masks are superimposed to form a complete screen. Then, a series of  $P(z_1), P(z_2), \dots, P(z_m)$  are multiplied by the radial annular diaphragm mask  $\delta R_1$ , a series of shadow grams  $P$  are obtained for bandpass filtering  $P\delta 1(z_1), P\delta 1(z_2), \dots, P\delta 1(z_m)$ . Meanwhile, to ensure the testing accuracy, we first filter and denoise this series of shadow grams, and then calculate the image variance of these shadow grams. If the image with the smallest gray variance in this series of images is  $P\delta 1(zR_1)$ , it indicates that the focusing point corresponding to the  $R_1$  ring is at  $zR_1$  on the optical axis. Finally, the above steps are repeated by different ring belt screen mask functions to process the shadow map  $n$  in total  $n \times m$  times, and the focal points  $zR_n$  corresponding to different ring belts  $R_n$  on the axis can be obtained. The characteristic of this method is to utilize a series of shadow grams to obtain the focal position of a specific ring belt, and to extract information using the grayscale changes caused by the  $z$ -direction position changes with higher accuracy.

**Results and Discussions** We validate the feasibility of the method in the field of quantitative testing and compare the profile testing results of the proposed method with the interferometric testing results. The employed interferometry is a commercial interferometer from 4D company, PhaseCam 4030. The comparison shows that the consistency of the undulating positions of the ring belt is consistent, and the main ring belt position is located at 0.7191 and 0.7114 times of the radius, with a deviation of no more than 1%. The error of peak-to-valley (PV) and root-mean-square (RMS) values is around 7%, and PV values are  $0.7748\lambda$  and  $0.7207\lambda$  with a difference of  $0.0541\lambda$ , which is about 30.0255 nm. RMS values are  $0.0569\lambda$  and  $0.0547\lambda$  with a difference of  $0.0022\lambda$ , which is approximately 1.2210 nm. Combined with the previous overall surface map for interpretation, results show that the proposed method has good testing reliability and can guide optical processing and testing. To ensure the accuracy and reliability of the experimental results and the universality of the parameter selection of this method, we also analyze the experimental and image processing results under different parameters. The main focus is on the quantitative comparison and explanation of the influence of different ring belt segmentation numbers and shadow gram sampling intervals on the experimental results. Finally, experimental error

analysis is conducted.

**Conclusions** We propose and verify a quantitative and automated knife-edge optical testing method based on algorithm adding virtual mask screens. This method automatically collects multiple axial knife-edge shadow grams generated by the tested mirror surface at non-focal points and divides them into subrings. Meanwhile, the axial focal positions corresponding to each ring belt are determined based on the evolution characteristics of the image gray level along the axis to achieve a quantitative solution of the entire surface shape. By adopting image processing algorithms to control the position of the circular screen, different circular screens can be selected in sequence. Finally, this optimizes the problem that traditional solid screens are limited to being slit in a fixed position and unable to be flexibly applied, with increased system complexity. The experimental results demonstrate that this method can achieve high-precision and quantitative surface shape testing of optical components, with high efficiency and strong applicability. Thus, this study has strong guiding significance for optical shop processing and testing.

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