

## 圆锥近似 Wolter-I 型 X 射线望远镜用柱面反射镜面形 误差检测方法

刘 娜<sup>1,2</sup>, 沈正祥<sup>1,2</sup>, 马 彬<sup>1,2</sup>, 魏振博<sup>1,2</sup>, 徐旭东<sup>1,2</sup>, 王占山<sup>1,2</sup>

- (1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

**摘 要:** 基于热弯玻璃的圆锥近似 Wolter-I 型 X 射线聚焦望远镜采用在凸柱面镜模具上热弯超薄玻璃的反射镜片制作方式, 柱面镜低频面形误差和中频波纹度是影响望远镜聚焦性能的主要因素, 因此高精度快速检测凹凸柱面镜中低频表面误差是研制中的关键技术。传统的柱面样板法无法检测超薄镜片, 且只能检测对应样板半径的面形, 检测效率低, 无法满足要求。采用基于计算全息为零位补偿干涉检测法和激光扫描两种方法, 对超光滑凸柱面模具和超薄凹柱面镜片进行快速定量检测, 计算了两种检测方法的功率谱密度, 通过表面的斜率误差拟合得到点扩散函数曲线和半功率直径。结果表明: 两种方法都能够快速定量表征中低频表面误差对 X 射线望远镜角分辨率的影响, 为提高反射镜制作精度和改善 X 射线望远镜聚焦性能提供了技术支持。

**关键词:** 圆锥近似 Wolter-I 望远镜; 柱面镜检测; 面形误差; 计算全息干涉检验; 激光扫描  
**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0417001

### Figure error measurement method of cylindrical reflection mirror for conic approximate Wolter-I X-ray type telescope

Liu Na<sup>1,2</sup>, Shen Zhengxiang<sup>1,2</sup>, Ma Bin<sup>1,2</sup>, Wei Zhenbo<sup>1,2</sup>, Xu Xudong<sup>1,2</sup>, Wang Zhanshan<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The manufacturing technology of cylindrical mirror used in conic approximate Wolter-I X-ray focusing telescope is hot slumping glass segments, which makes the thin glass substrate replicated on the convex surface of cylindrical mandrel. The most important errors of cylindrical glass are the figure error and ripple error, which are the major factors affecting the focusing performance of telescope. Therefore, the high-precision and quickly measuring low and mid spatial frequency error of concave surface and convex surface of cylindrical glass is the key technology in manufacturing process. The traditional test plate can't meet the requirements because it can only measure specific surface with the same of radius of the test plate inefficiently and can't measure the thin glass. The convex surface of smooth cylindrical

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(11427804); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ04016403); XX 重大专项

作者简介: 刘娜(1990-), 女, 硕士生, 主要从事非球面镜检测方面的研究。Email: 1433527@tongji.edu.cn

导师简介: 沈正祥(1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术、光学仪器研制等方面的研究。

Email: shenzx@tongji.edu.cn

mandrel and concave surface of thin cylindrical glass were measured by an interferometer with both computer generated hologram (CGH) and laser scanner quickly and quantitatively. Also, with the two testing methods, the power spectral density (PSD) of cylindrical glass was calculated and the point spread function (PSF) and half power diameter (HPD) were plotted by fitting slope error. It demonstrates that the two methods can characterize the influence of the low and mid spatial frequency error on the angular resolution of X-ray telescope, which benefit for improving the precision of the manufacturing mirror and the focusing performance of X-ray telescope.

**Key words:** conic Wolter-I telescope; cylindrical glass measurement; figure error; CGH interferometry; laser scanner

## 0 引言

观测宇宙中天体如黑洞、中子星、超新星遗迹等辐射的 X 射线, 对于研究天体在极端条件下的物理现象, 探究宇宙起源及其演化过程具有重要的意义<sup>[1]</sup>。为了满足 X 射线天文观测的需求, 通常采用 X 射线聚焦望远镜对 X 射线进行收集, 嵌套式聚焦望远镜能够提供更高的角分辨率, 更大的集光面积, 国际上正开展高精度 X 射线聚焦望远镜的研究<sup>[2]</sup>。

采用圆锥近似类 Wolter-I 型望远镜结构<sup>[3]</sup>, 通过系统集成装配的过程中, 将柱面镜压制或磨成锥面, 有效降低了镜片的制作难度和成本。望远镜超薄镜片的制作方法主要包括 XMM-Newton 望远镜采用的镍电镀复制法<sup>[4]</sup>、SUZAKU 望远镜采用的环氧树脂复制法<sup>[5]</sup>和 NuSTAR 望远镜采用的超薄玻璃热弯成型法<sup>[6]</sup>。综合考虑加工成本、工艺难度和镜片质量, 超薄玻璃热弯法是目前主流的柱面镜制作方法。超薄平面玻璃放置在石英柱面模具上, 经加热达到软化点后, 超薄玻璃在重力作用下弯曲成柱面, 复制了柱面模具的面形, 因此玻璃热弯工艺直接决定了超薄热弯镜片的面形精度。柱面反射镜片的中低频表面误差是影响望远镜聚焦性能的主要因素<sup>[7]</sup>, 为了提高望远镜系统的聚焦性能, 需要对凹凸柱面镜的该类误差进行检测。传统的柱面镜检测方法是样板法<sup>[8]</sup>, 只能检测对应样板半径的面形, 检测效率低, 由于接触被测镜片, 容易划伤表面, 且无法对超薄镜片进行检测。因此, 高精度快速检测凹凸柱面镜中低频表面误差是圆锥近似 Wolter-I 型 X 射线望远镜研制中的关键技术。

文中针对圆锥近似 Wolter-I 型望远镜用柱面反射镜片的精度要求和热弯玻璃过程中产生误差的特点, 介绍了基于计算全息零位补偿干涉检测法和激光扫描仪两种方法, 对超光滑凸柱面模具和超薄凹柱面镜片进行快速定量检测, 通过功率谱密度函数(Power Spectral Density, PSD)和半功率直径(Half Power Diameter, HPD)两个指标对比结果, 综合给出 X 射线聚焦望远镜的镜片检测方法, 同时确定柱面镜表面误差对系统成像质量的影响。

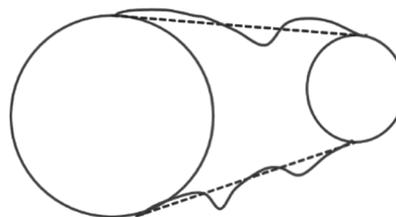
## 1 柱面镜误差分析

为了研究方便, 将玻璃热弯后的圆柱反射镜表面单位法向量 $\hat{n}$ 分解为<sup>[9]</sup>:

$$\hat{n} = \vec{n}_0 + \vec{n}_\parallel + \vec{n}_\perp \quad (1)$$

式中: 当 $\hat{n} = \vec{n}_0$ 时, 为理想柱面镜法向量;  $\vec{n}_\parallel$ 为实际镜片表面法向量平行于圆柱轴方向的分量;  $\vec{n}_\perp$ 为实际镜片表面法向量垂直于光轴方向的分量。

按照公式(1), 可以将圆柱面形误差分为三类: 轴向误差、同相圆度误差和异相圆度误差。如图 1 所示, 虚线代表理想柱面, 实线代表实际柱面。其中轴



(a) 轴向误差  
(a) Axial error

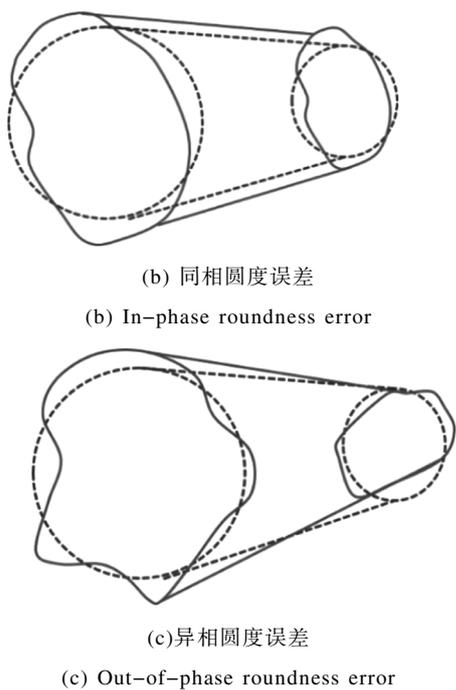


图 1 柱面镜误差类型  
Fig.1 Types of cylindrical mirror error

向误差是指圆柱母线方向的缺陷；圆度误差表示去除理想的圆形横截面后，半径沿着方位角方向的变化，如果在整个光轴范围内半径的变化一致，称为同相圆度误差，该误差不会对掠入射光子的反射产生影响。如果随着光轴位置不同，半径改变不一致，称为异相圆度误差。由于该类误差使面形沿着光轴产生倾斜变化，因此对掠入射光子的反射产生的影响较大。

在这三类误差中，轴向上的法向量分量 $\vec{n}_{\parallel}$ 是改变 X 射线传播方向，使其偏离聚焦位置的主要因素，因此轴向面形误差对系统的聚焦性能影响最大<sup>[10]</sup>，因此，在实际过程中，一般只需要测量轴向误差，实现柱面镜的快速测量与性能评价。

## 2 柱面镜检测方法和表征指标

采用基于计算全息为零位补偿干涉检测法和激光扫描两种方法，对超光滑凸柱面模具和超薄凹柱面镜片进行快速定量检测。

### 2.1 柱面镜检测方法

#### (1) 基于计算全息为零位补偿干涉检测法

计算全息 (Computer Generated Hologram, CGH) 属于衍射光学元件，如图 2 所示，CGH 作为零位

补偿镜，将入射的平面波转换为理想的柱面波，使光线垂直入射到待测表面，经柱面镜反射后与参考光发生干涉，根据干涉条纹的缺失、变形来计算待测柱面面的面形<sup>[11]</sup>。

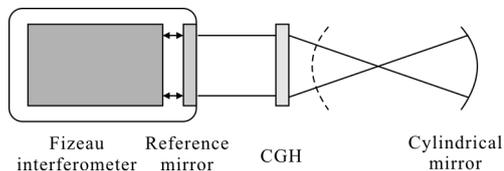


图 2 CGH 干涉法测量柱面镜原理图

Fig.2 Cylindrical mirror measured by the interferometer with CGH

CGH 的长度和宽度分别为 60、52 mm，焦距为 105 mm，因此可以对柱面镜的凹面和半径小于 105 mm 的凸面镜进行检测，测量误差 PV 小于  $0.1\lambda$  ( $\lambda=632.8$  nm)。该测试方法光路装调简单，具有更高的稳定性，测试速度快、检测精度高，通过平移旋转待测柱面镜，可以实现对不同区域的拼接测量。

#### (2) 激光扫描仪检测超薄柱面镜

激光扫描仪用来测量反射镜的倾斜误差，由主平台和线性位移台两部分组成，如图 3 所示。He-Ne 激光器发出的光束通过两个转向镜后入射到五棱镜上，光线偏转  $90^\circ$  后依次经过分光镜、 $45^\circ$  反射镜、旋转镜，到达竖直放置的待测柱面镜，光线经柱面镜表面反射后按原路返回，最后被位敏探测器接收。激光扫描仪是通过测量反射光束的偏离来计算表面斜率，进而拟合镜片表面面形。

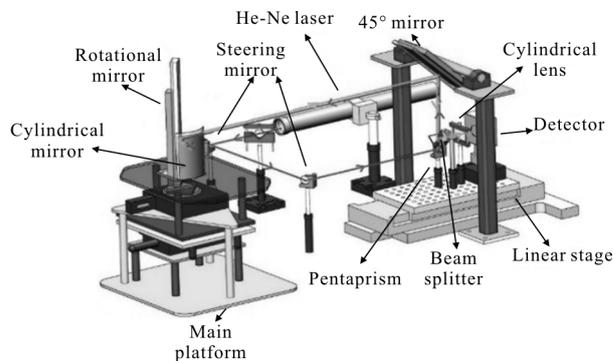


图 3 激光扫描仪测量柱面镜光路图

Fig.3 Cylindrical mirror measured by laser scanner

系统进行测量时，线性位移台上五棱镜的水平运动通过  $45^\circ$  反射镜转换成光束的竖直运动，

实现对柱面镜母线的扫描, 旋转镜的转动改变光束的方向, 实现对柱面不同位置母线的扫描。激光扫描仪的分辨率为 0.254 mm, 其测量倾斜误差小于 3", 检测区域面积大、动态范围大、检测效率高。

### 2.2 超薄柱面镜表征指标

#### (1) 功率谱密度函数

柱面镜低频面形误差和中频波纹度是影响望远镜聚焦性能的主要因素, 因此引入 PSD 评价柱面镜不同空间频段范围内的表面质量进行评价。PSD 函数的定义<sup>[12]</sup>:

$$S(f_x) = \lim_{L \rightarrow \infty} \left[ \frac{2}{L} \left| \int_{-L/2}^{L/2} Z(x) \exp(-i2\pi f_x x) dx \right|^2 \right] \quad (2)$$

对于一维的功率谱密度函数:

$$S(f_x) = \frac{[A(f_x)]^2}{\Delta f_x} \quad (3)$$

式中:  $f_x$  为空间频率;  $\Delta f_x$  为频率间隔;  $A(f_x)$  为频率  $f_x$  的 Fourier 频谱振幅。

#### (2) 半功率直径

在光学系统中, 点扩散函数(PSF)反映光学系统的聚焦性能, 在掠入射聚焦望远镜中, 通常采用环绕能量为一半时的 HPD 作为评价光学系统聚焦性能的参数<sup>[13]</sup>。为了评价镜片的面形误差, 同样可以使用 PSF 函数和 HPD 作为柱面镜的表征指标。由 CGH 干涉测量的面形误差数据计算表面的倾斜误差, 并对拟合得到的 PSF 曲线进行积分, 进而得到 HPD 值, 可以更加直观的反映柱面镜表面误差对系统成像质量的影响。

轴向倾斜误差:

$$\theta_i = \frac{r_{i+1} - r_{i-1}}{2 \times \Delta z} \times \frac{180}{\pi} \quad (4)$$

式中:  $r_i$  为镜片表面轴向高度测量值;  $\Delta z$  为轴向分辨率;  $\theta_i$  为轴向倾斜误差。

通过 King-Profile 方程拟合镜片表面倾斜误差, 获得镜片的归一化<sup>[14]</sup>PSF:

$$\text{PSF} = \left[ 1 + \left( \frac{\theta - \theta_0}{r} \right)^2 \right]^{-\alpha} \quad (5)$$

式中:  $\theta_0$ 、 $r$ 、 $\alpha$  分别文拟合参数, 其中  $\theta_0$  为 PSF 偏移,  $r$  为 PSF 宽度,  $\alpha$  为 PSF 指数。

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \text{PSF} d\theta = 2 \times \int_{-\theta_k}^{+\theta_k} \text{PSF} d\theta \quad (6)$$

$$\text{HPD} = 2 \times \theta_k \quad (7)$$

由公式(7)进一步获得系统的 HPD。

### 3 柱面检测结果分析

(1) 两种不同工艺条件下的超薄柱面反射镜面形

图 4 和图 5 分别是对两种不同面形状精度的镜片的检测结果。基于 CGH 的零位补偿干涉法空间分辨率较高, 适合高精度的测量, 但当局部区域面形精度较差时, 容易出现超出测量范围的情况, 如图 5(a) 所示。激光扫描仪的空间分辨率相对较低, 适合快速的大区域测量, 但是轴向扫描的方式使其测量结果的横向关联性较弱。两种方法相结合, 可以实现对超光滑柱面模具的高精度测量和超薄柱面反射镜的大区域快速测量。

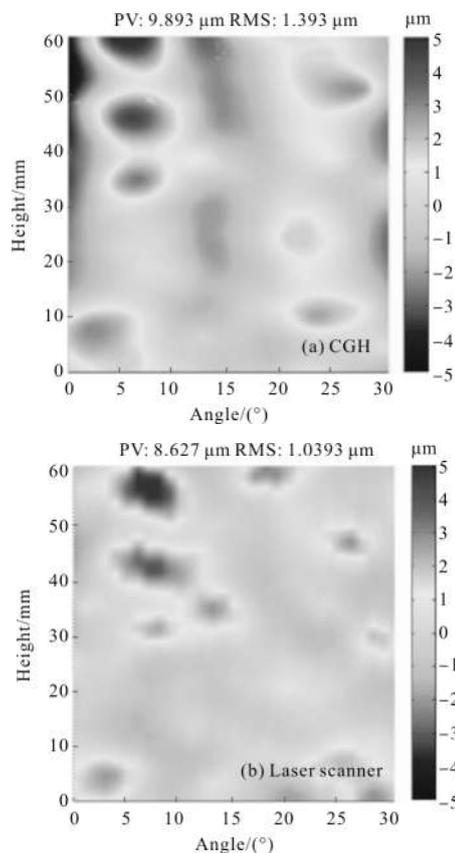


图 4 中等面形精度的柱面镜同一区域测试结果

Fig.4 Same area measurements result of medium surface accuracy cylindrical mirror

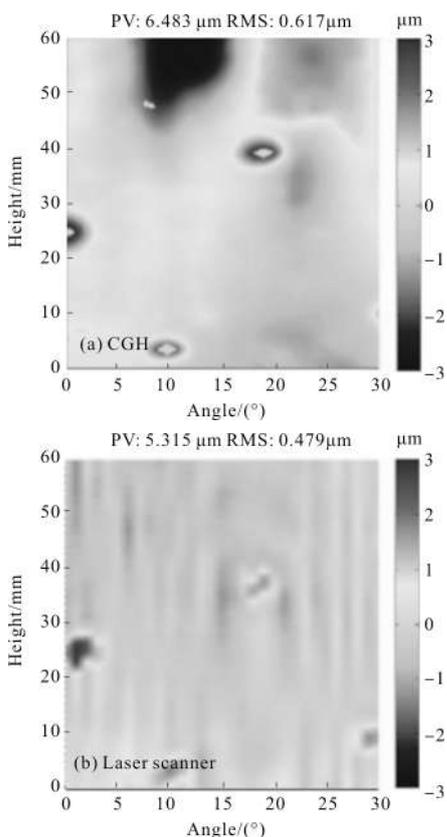
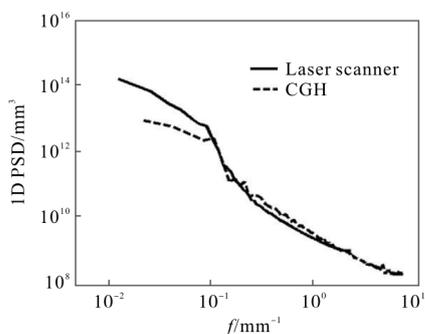


图 5 较好面形精度的柱面镜同一区域测试结果

Fig.5 Same area measurements result of better surface accuracy cylindrical mirror

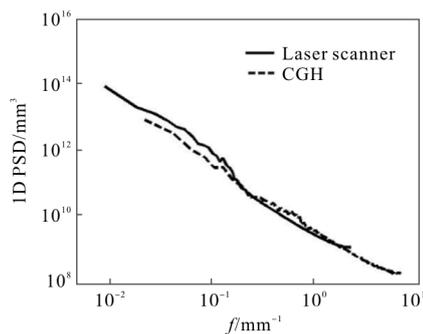
(2) 两种检测仪器测量结果的 PSD 比较

图 6(a)、(b)分别为通过以上测试结果获得的柱面镜 PSD 曲线,其中干涉仪测量的空间频率范围是  $0.017\sim 5.618\text{ mm}^{-1}$ ,激光扫描仪测量的空间频率范围是  $0.007\sim 1.969\text{ mm}^{-1}$ 。由图可知,这两种方法所测量的空间频率不同,干涉仪测量的空间频率较高,可以获得镜片表面更多细节信息;激光扫描仪测量的采样频率更低,可以对较低的面形精度进行测量,两种方法相结合,实现对柱面镜中低频表面误差的测量。



(a) 中等面形精度的柱面镜

(a) Cylindrical mirror of medium surface accuracy



(b) 较好面形精度的柱面镜

(b) Cylindrical mirror of better surface accuracy

图 6 柱面镜 PSD 曲线

Fig.6 PSD curve of cylindrical mirrors

(3) 两种检测仪器测量结果的 HPD 比较

利用两种方法测量柱面镜的表面面形,分别计算其倾斜误差,通过拟合和积分得到 PSF 曲线和 HPD 值。图 7(a)~(c)分别为两种方法测量的中等

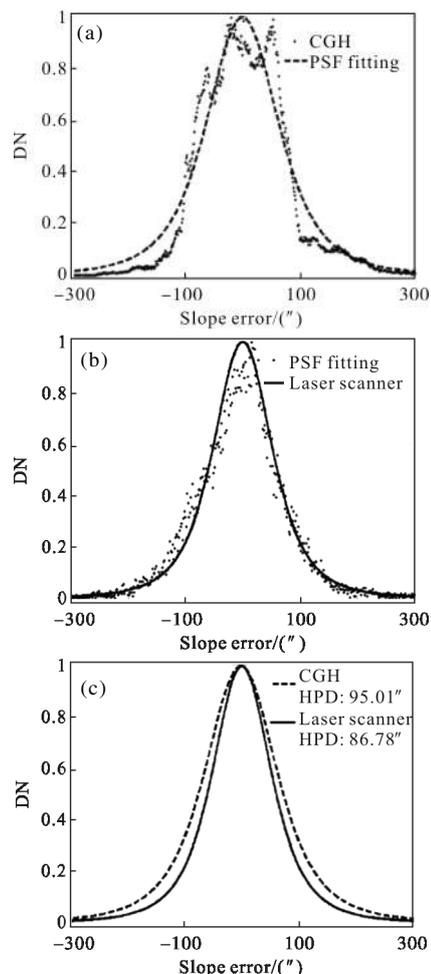


图 7 中等面形精度的柱面镜倾斜误差拟合 PSF 曲线  
Fig.7 Fitting PSF curve of medium surface slope error accuracy cylindrical mirror

精度柱面镜倾斜误差拟合 PSF 曲线, 其 HPD 分别为 90.01"、86.78"; 图 8(a)~(c) 分别为较好面形精度柱面镜倾斜误差拟合 PSF 曲线, 其 HPD 分别为 49.22"、43.63"。

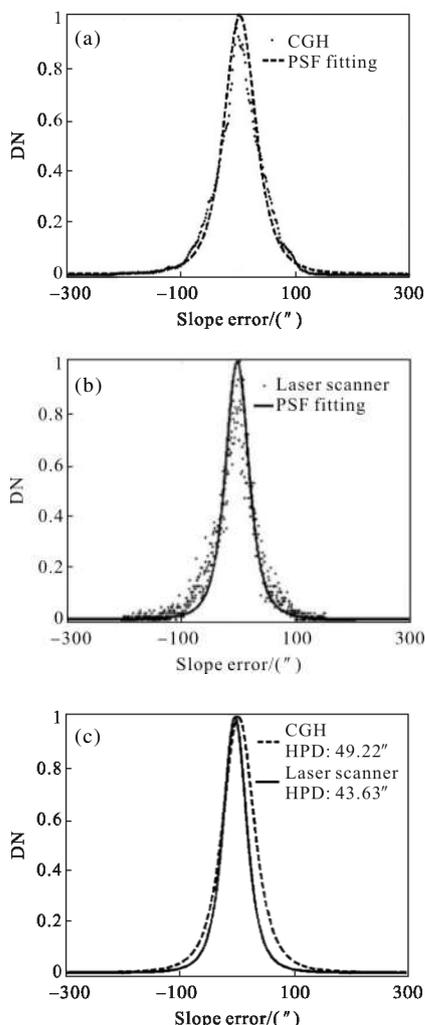


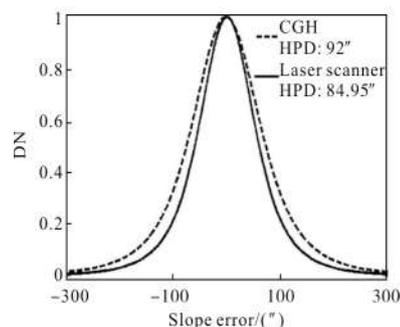
图 8 较好面形精度的柱面镜面形倾斜误差拟合 PSF 曲线  
Fig.8 Fitting PSF curve of better surface slope error accuracy cylindrical mirror

根据 X 射线望远镜的聚焦性能评价方法, 为了降低仪器系统噪声对测量结果的影响, 利用 5 阶 Butterworth 低通滤波器进行 5 mm 滤波<sup>[15]</sup>, 图 9 为两组结果通过 5 阶 Butterworth 滤波器进行 5 mm 滤波后拟合的 PSF 曲线, 使用两种方法测量得到的 HPD 均有所降低。

(4) 检测精度分析

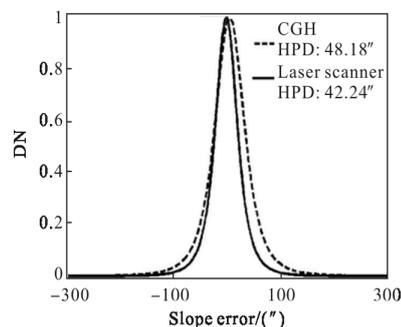
为了确定基于计算全息零位补偿干涉检测法的测量误差对 HPD 值的影响, 考察 PV 约为 0.1 λ

且测量面积相同的 3 个不同镜片, 如图 10 所示, 其 HPD 的平均值为 1.53", 而激光扫描仪的测量误差小于 3", 两种方法都可以满足望远镜用超薄柱面反射镜的高精度检测要求, 其测量的轴向误差采用 PSF 拟合得到 HPD, 可以很好的表征柱面镜的面形质量, 直观的反映面形误差对望远镜系统成像质量的影响。



(a) 中等面形精度柱面镜

(a) Cylindrical mirror of medium surface accuracy



(b) 较好面形精度柱面镜

(b) Cylindrical mirror of better surface accuracy

图 9 滤波后拟合 PSF 曲线

Fig.9 Fitting PSF curve with filtering

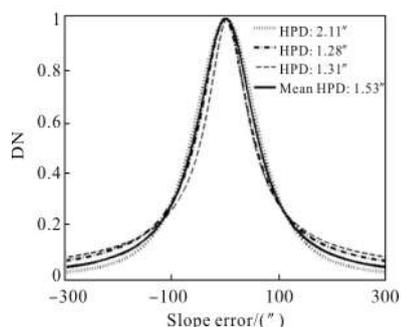


图 10 PV 为 0.1 λ 的面形倾斜误差对应的 HPD

Fig.10 HPD of surface slope error with PV approximately equal 0.1 λ

## 4 结论

基于计算全息为零位补偿干涉检测法和激光扫描两种方法均满足圆锥近似类 Wolter-I 望远镜用柱面镜的检测要求。两种测量方法相结合,实现了超光滑柱面模具的高精度检测和超薄柱面镜的大区域快速检测。此外,采用两种检测方法测量的面形误差,计算倾斜误差并拟合 PSF 曲线,通过积分得到 HPD 的方法评价柱面镜的面形质量,直观的反映了面形误差对掠入射聚焦系统成像质量的影响,为改进超薄镜片制作工艺、提高 X 射线光学系统的聚焦性能提供了技术支撑。

### 参考文献:

- [1] Yu Jianjie, Zeng Nixiang, Ye Lingyun, et al. Energy spectrum simulation method of X-ray pulsar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S1): 126-130. (in Chinese)  
俞建杰, 曾倪香, 叶凌云, 等. X 射线脉冲星能谱模拟方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 126-130.
- [2] Huang Chen, Wang Jianjun, Xue Li, et al. Next generation of astronomical telescope and survey mission (I)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217006. (in Chinese)  
黄晨, 王建军, 薛莉, 等. 下一代天文望远镜及巡天任务 (上)[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(2): 0217006.
- [3] Chen S, Ma S, Wang Z. Wolter-I-like X-ray telescope structure using one conical mirror and one quadric mirror[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(12): 123401.
- [4] Wei Z, Ge B, Jin X, et al. Development of manufacture of mirror glass substrate for X-ray timing and polarization observatory [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2016:2232214.
- [5] Hailey C J, Christensen F E, Craig W W, et al. Overview of segmented glass optics development for the Constellation-X hard X-ray telescope [C]//Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2003:12461487.
- [6] Madarasz E, Proserpio L, Breunig E, et al. Analysis on the use of vacuum oven for the indirect slumping of glass X-ray mirror segments [C]//SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2016:2232628.
- [7] Salmaso B, Brizzolari C, Basso S, et al. Slumped glass optics for X-ray telescopes: advances in the hot slumping assisted by pressure [C]//SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2015:2187639.
- [8] Malacara D, Roddier F. Optical shop testing [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 454-464.
- [9] Jimenez-Garate M A, Craig W W, Hailey C J. Fast optical metrology of the hard x-ray optics for the High Energy Focusing Telescope (HEFT) [C]//SPIE's International Symposium on Optical Science, 1998:331284.
- [10] Chalifoux B, Wright G, Heilmann R K, et al. Ion implantation for figure correction of thin x-ray telescope mirror substrates [C]//SPIE Optical Engineering + Applications, 2015:2189826.
- [11] Li Ming, Luo Xiao, Xue Donglin, et al. Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1246-1253. (in Chinese)  
李明, 罗霄, 薛栋林, 等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1246-1253.
- [12] Yang Fei, An Qichang, Zhang Jingxu. Mirror surface figure evaluation based on power spectral density [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 156-162. (in Chinese)  
杨飞, 安其昌, 张景旭. 基于功率谱的反射镜面形评价 [J]. 中国光学, 2014, 7(1): 156-162.
- [13] Yang Lihong, Zhao Bianhong, Zhang Xingxiang, et al. Gaussian fitted estimation of point spread function and remote sensing image restoration [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 181-188. (in Chinese)  
杨利红, 赵变红, 张星祥, 等. 点扩散函数高斯拟合估计与遥感图像恢复 [J]. 中国光学, 2012, 5(2): 181-188.
- [14] Bendinelli O, Parmeggiani G, Zavatti F. CCD star images: On the determination of Moffat's PSF shape parameters [J]. *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 1988, 9(1): 17-24.
- [15] Xia Zhilin, Zeng Xiang, Liu Shijie, et al. Filter calculation based on wavefront figures [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 3033-3040. (in Chinese)  
夏志林, 曾翔, 刘世杰, 等. 基于波面面形的滤波计算 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 3033-3040.