

基于条纹反射方法的 Angel 型龙虾眼 X 射线镜片面型测试

张诗赜¹, 黎龙辉^{1*}, 孙建宁^{1,2}, 金戈¹, 顾燕¹, 吕峰¹, 张振¹, 姜博文¹,
徐昭¹, 陈托¹, 廖亦戴¹, 郭右利⁵, 凌志兴^{3,4}, 张臣^{3,4**}

¹北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211106;

²微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

³中国科学院国家天文台, 中国科学院空间天文与技术重点实验室, 北京 100012;

⁴中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

⁵大连鉴影光学科技有限公司, 辽宁 大连 116023

摘要 研制了一套结构简单、易于操作的条纹反射测量系统,用以测试 Angel 型龙虾眼 X 射线镜片的的面型。通过电荷耦合器件(CCD)相机拍摄 40 mm×40 mm 口径的龙虾眼镜片的条纹反射图像,计算得到了龙虾眼镜片面型的斜率误差分布,并通过积分得到了龙虾眼镜片的面型误差均方根及峰谷值,分别为 0.81 μm 和 6.34 μm。该结果与 Zygo 干涉仪得到的面型分布规律大体一致。基于条纹反射方法重复测量面型得到的均方根和峰谷值的标准差分别为 0.017 μm 和 0.11 μm,验证了条纹反射方法测量龙虾眼镜片面型的可行性。利用蒙特卡罗方法对待测龙虾眼镜片的面型误差进行 X 射线聚焦成像模拟,得到面型误差引起的弥散十字焦斑的半峰全宽为 0.23 mm,对应的角分辨率为 2.11'。该光学测量系统的建立为龙虾眼镜片的球面热成形提供了参考依据。

关键词 X 射线光学; Angel 型龙虾眼; 条纹反射; 面型误差; 聚焦成像

中图分类号 O434.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0934001

Surface Measurement of Angel Lobster Eye X-Ray Lens Based on Fringe Reflection

Zhang Shikun¹, Li Longhui^{1*}, Sun Jianning^{1,2}, Jin Ge¹, Gu Yan¹, Lü Feng¹,
Zhang Zhen¹, Jiang Bowen¹, Xu Zhao¹, Chen Tuo¹, Liao Yidai¹,
Guo Youli⁵, Ling Zhixing^{3,4}, Zhang Chen^{3,4**}

¹North Night Vision Technology Co. Ltd, Nanjing, Jiangsu 211106, China;

²Science and Technology on Low-Light-Level Night Version Laboratory, Xi'an, Shaanxi 710065, China;

³National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

⁴College of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁵Dalian Jianying Optical Technology Co. Ltd, Dalian, Liaoning 116023, China

Abstract A fringe reflection measurement system with simple structure is developed to measure the surface of an angel lobster eye X-ray lens, and it is easy to operate. First, a fringe reflection image of the lobster eye lens whose size is 40 mm×40 mm is taken by a charged coupled device camera, and the slope error distribution of the lens surface is calculated. The root mean square (RMS) and peak-to-valley (PV) values of the lobster lens obtained by the fringe reflection measurement system are 0.81 μm and 6.34 μm, respectively. The measurement results of the proposed system are consistent with those of the Zygo interferometer. The standard deviations of the RMS and PV values obtained by repeated surface measurements are 0.017 μm and 0.11 μm, respectively. The feasibility of the fringe reflection measurement system for measuring the surface of an angel lobster eye X-ray lens is verified. Then,

收稿日期: 2019-03-04; 修回日期: 2019-04-08; 录用日期: 2019-05-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA15310101-01)、国家自然科学基金重点支持项目(Y713021V01)

* E-mail: bnulh@163.com; ** E-mail: chzhang@nao.cas.cn

the X-ray focus imaging simulation is performed for the measurement of the surface error of the lobster eye lens based on the Monte Carlo method. The full width at half maximum of the diffuse focal spot caused by the surface error is approximately 0.23 mm, and the corresponding angular resolution is $2.11'$. This optical measurement system provides a reference for the spherical forming of the lobster eye lens.

Key words X-ray optics; Angel lobster eye; fringe reflection; surface error; focus imaging

OCIS codes 340.7470; 220.3630

1 引 言

1979年,Angel^[1]根据龙虾眼的结构,首次提出了基于正方形阵列结构来研制龙虾眼型X射线天文望远镜的构想。龙虾眼型系统具有特殊的正交结构,故其在各个方向的聚焦成像能力都相同。理论上,龙虾眼型系统的视场可达到 4π 空间立体角,这是其他掠入射光学系统无法达到的。同时,龙虾眼型系统具有体积小、质量小、有效面积大等特性,其单位有效面积与质量比是金属材质Wolter-I型望远镜的1000倍,目前已被广泛应用于X射线天文领域^[1-5]。

龙虾眼X射线镜片的制作需要将平面镜热弯成一个具有较大曲率半径的球面镜,热成形的球面质量是影响镜片成像角分辨率的重要因素。对镜片球面面形的检测和评估是镜片制造工艺和质量的重要评价手段,也是发现质量问题、改进工艺参数的依据。目前,国内针对龙虾眼镜片面形测试方面的研究起步较晚,还没有一套简易的面形测试设备。针对龙虾眼镜片的的面形测试技术主要有接触式轮廓检测技术和非接触式面形干涉测量技术^[6-7]。接触式轮廓仪的测量采样密度低、扫描周期长、存在划伤镜片表面膜层的风险^[6]。非接触式干涉仪的测量速度快且精度高,但通常需配合光学补偿器件使用,且其动态范围小,对测试环境要求高,易受温度气流和振动的影响^[7]。条纹反射是一种基于光线反射原理的面形测量技术,无需光学补偿元件及复杂的光路调节,仅需采集黑白相间的正弦条纹图像即可获得全口径面形。该技术具有抗干扰性强、动态范围大且设备结构简单^[8-13]等特点,可很好地实现对龙虾眼镜片面形的快速测量。

本文基于条纹反射方法建立了一套适合于测量Angel型龙虾眼镜片的的面形测量系统,将测量结果与Zgyo干涉仪的测量结果相比,验证了该项技术的可行性。利用蒙特卡罗方法对表面斜率误差进行模拟仿真,得到了面形误差对龙虾眼镜片聚焦性能的影响。

2 实验原理

2.1 龙虾眼聚焦成像的原理

Angel型龙虾眼X射线(MPO)镜片是一种基于掠入射反射原理对X射线进行会聚的光学透镜,由数百万个同时指向球心的方形微通道(微米尺度)阵列构成,其结构如图1(a)所示。这种球面蜂窝结构的对称性保证了视场内的无差别成像,通道内壁的表面粗糙度可达到纳米量级。如果将龙虾眼镜片用于天文X射线领域,则默认物距为无穷远。入射的平行X射线经过球面阵列结构后会改变X射线的传输方向,在焦距 f 为曲率半径 R 的一半位置处,即 F 处聚焦形成清晰的十字像。当镜片面形存在误差时,垂直于镜片表面指向球心 O 的方孔通道的轴线会相应地改变方向(指向 O'),进而出射光线聚焦在 F' 处,从而导致成像质量下降,如图1(b)所示。

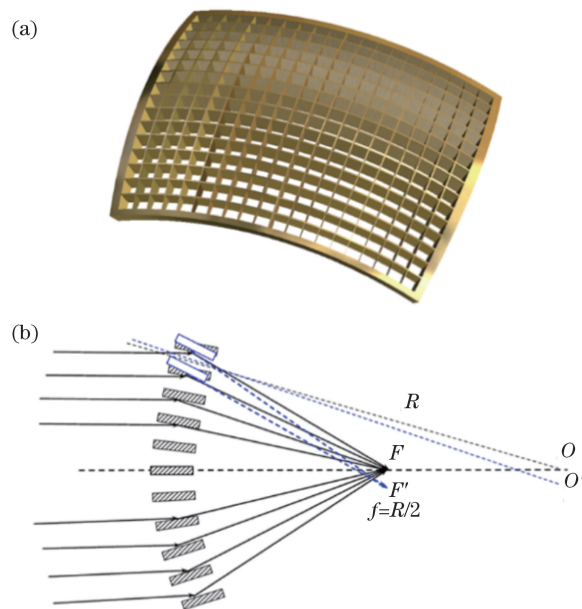


图1 龙虾眼镜片聚焦成像示意图。(a)结构示意图;
(b)聚焦成像原理

Fig. 1 Diagrams of focus imaging of lobster eye lens.

(a) Diagram of structure; (b) principle of focus imaging

2.2 条纹反射原理

条纹反射方法是利用简单的光线反射原理进

行光线追踪的,如图 2 所示。如果待测镜片面形为理想情况,则镜片凹面的最低点一般被设为坐标原点 $O(0,0,0)$,液晶显示器(LCD)屏幕上一点 $p(x_s, y_s, z_s)$ 发出的光线照射到镜片表面 $M(x_m, y_m, z_m)$ 处发生反射,出射后的光线会与电荷耦合器件(CCD)相机靶面交于理想位置 $I(x_i, y_i, z_i)$ 处。当被测镜片面形存在一定误差时, $M(x_m, y_m, z_m)$ 点的法向量 \mathbf{n} 相对于理想面形的法向量 \mathbf{n}_0 会偏转一定的角度(α),则根据光线全反射原理可知,出射反射光线的偏转角度为 2α ,此时屏幕上 p 点出射的光线经镜面反射后与相机靶面相交于 $C(x_c, y_c, z_c)$ 处。

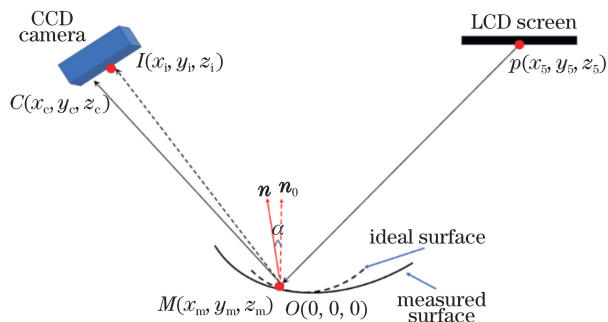


图 2 条纹反射测试原理图

Fig. 2 Schematic of fringe reflection measurement

对于屏幕上发光区域的任何一组光线来说,在已知屏幕出射点 $p(x_s, y_s, z_s)$ 、对应镜片反射点 $M(x_m, y_m, z_m)$ 和相机收集位置坐标 $C(x_c, y_c, z_c)$ 的情况下,可以通过对相机进行标定得到相机的理想位置坐标 $I(x_i, y_i, z_i)$,则垂直于镜片表面反射点 M 处指向球心的法线方向偏差(一般也称为待测镜片表面斜率误差) z_x, z_y 可以表示为^[11-12]

$$z_x = \tan \alpha \approx \frac{x_c - x_i}{2\sqrt{(x_c - x_m)^2 + (y_c - y_m)^2 + (z_c - z_m)^2}}, \quad (1)$$

$$z_y = \tan \beta \approx \frac{y_c - y_i}{2\sqrt{(x_c - x_m)^2 + (y_c - y_m)^2 + (z_c - z_m)^2}}. \quad (2)$$

在计算斜率误差时需提供合适的初始面形估计,结合区域波前重构法^[14]反复迭代,最终通过积分可求得待测镜片的三维面形。

2.3 实验装置

为了验证条纹反射方法检测龙虾眼 X 射线镜片面形的可行性,与大连鉴影光学科技有限公司共同研制了一套结构简单、易于操作的条纹反射测试系统,该系统包括 LCD 屏幕、高分辨率 CCD 相机和

待检龙虾眼镜片三部分。其中:龙虾眼镜片的尺寸为 $40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$,厚度为 1.25 mm ,球面曲率半径约为 750 mm ,方孔通道直径为 $20 \text{ }\mu\text{m}$,壁厚为 $6 \text{ }\mu\text{m}$;CCD 相机的分辨率为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $5.8 \text{ }\mu\text{m}$;LCD 显示屏的分辨率为 $3480 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $125.5 \text{ }\mu\text{m}$ 。测试时,为了减小误差和尽可能测量镜片更大的面积尺寸,需要在镜片平放时能在 CCD 相机中心观察到镜片上的光线反射到 LCD 屏幕的中心位置。CCD 相机和 LCD 屏幕放置在镜片凹面顶点上方 680 mm 处,CCD 相机距 LCD 屏幕中心位置 155 mm 。实验装置如图 3 所示。

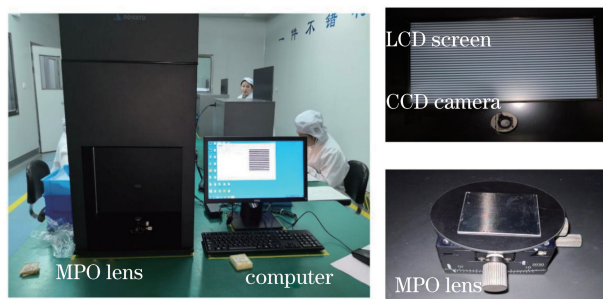


图 3 条纹反射面形测试设备图

Fig. 3 Setup for fringe reflection surface measurement

首先,基于正弦函数在计算机中生成正弦条纹图像数据文件,利用 LCD 屏幕显示出黑白相间的正弦条纹图像,如图 4 所示;然后,采用 CCD 相机收集经过龙虾眼镜片表面反射的黑白相间的条纹图像,并送至计算机进行处理,得到图像的相位图和镜片斜率误差分布图;最后,通过积分运算获得镜片表面各点的曲率,计算得出镜片表面的面形分布。

3 结果与讨论

3.1 条纹反射测试结果

利用条纹反射面形测试设备进行测试时,将龙虾眼镜片平放在垫板上,然后用计算机控制 LCD 屏幕显示周期为 30 pixel 的水平和垂直两个方向正交的正弦条纹,通过 CCD 相机数据采集从龙虾眼镜片反射回来的图像,经计算机处理后获得龙虾眼镜片的面形,如图 5(a)所示。由图 5(a)可知,镜片顶角区域的面形发生了较为严重的形变,这是因为龙虾眼镜片在球面热压成形阶段,顶角区域的位移最大,在退火冷却过程会产生较大的应力反弹,导致顶角位置存在较大的面形误差,这对加工来说是非常重要的信息。经过计算可以得到龙虾眼镜片球面面形精度的均方根(RMS)为 $0.81 \text{ }\mu\text{m}$,峰谷(PV)值为

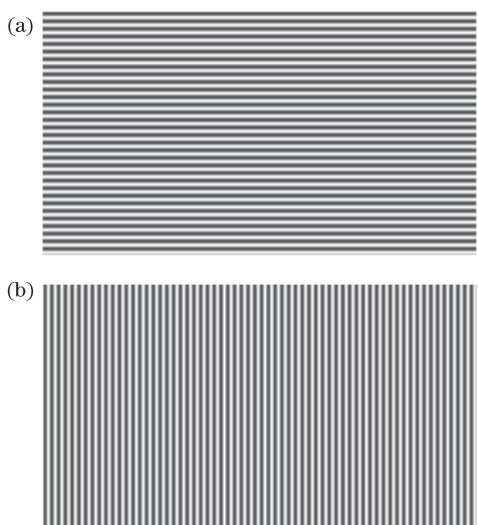


图 4 LCD 屏幕发出的黑白条纹图像。

(a) X 方向; (b) Y 方向

Fig. 4 Fringe intensity images from LCD screen.

(a) X direction; (b) Y direction

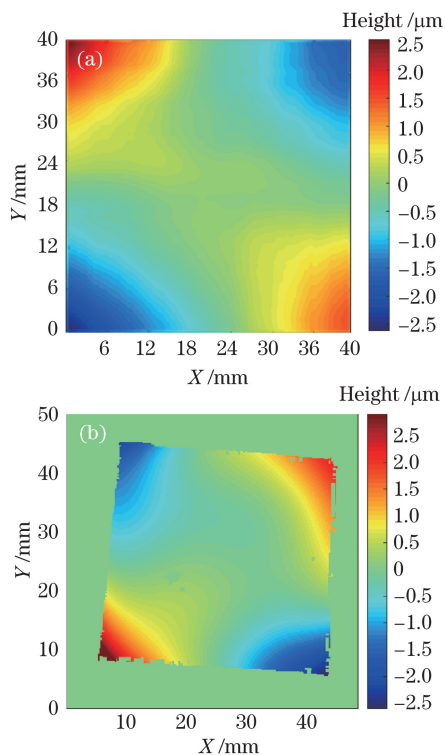


图 5 龙虾眼镜片的测试面形图。(a) 条纹反射测试结果;

(b) Zygo 干涉仪测试结果

Fig. 5 Measurement surfaces of lobster eye lens. (a)

Measured fringe reflection; (b) testing results of Zygo interferometer

$6.34 \mu\text{m}$ 。为了进一步验证条纹反射方法的可行性,采用 Zygo 干涉仪对龙虾眼镜片的面形进行测量,测量结果如图 5(b)所示。Zygo 干涉仪测量得到的面形 RMS 值为 $0.75 \mu\text{m}$,PV 值为 $5.72 \mu\text{m}$ 。两种

方法测量的 RMS 和 PV 值的偏差分别为 $0.06 \mu\text{m}$ 和 $0.62 \mu\text{m}$ 。

两种测试方法得到的面形分布规律大体一致,但局部存在一定差异,比如:红色对角内部的黄色分界线,有一边的凹向不一致。这是因为在 Zygo 干涉仪测量镜片面形过程中,需要对镜片进行夹持,镜片面形受力容易产生形变,靠近镜片边缘的顶角区域存在较大色散而无法完成测量,检测面积尺寸要小一些,这也是两种方法测量得到的 RMS 和 PV 值存在一定差异的原因。

为了确定条纹反射测量龙虾眼镜片面形的重复测量精度,将龙虾眼镜片放置在垫板上不动,每隔 15 min 测量一次,连续测量 15 h,得到 60 组数据,结果如图 6 所示。由图 6 可知:设备开启稳定后,镜片面形的 RMS 值稳定,PV 值有很轻微的波动。重复测量得到的 RMS 和 PV 值的标准差分别为 $0.017 \mu\text{m}$ 和 $0.11 \mu\text{m}$,验证了条纹反射测量加工精度 (PV 值)为微米级龙虾眼镜片面形方法的可行性。

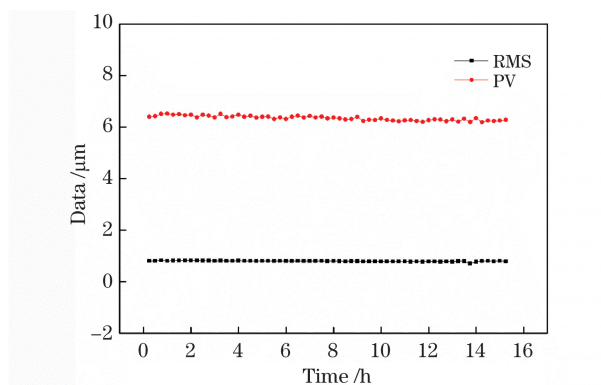


图 6 基于条纹反射方法重复测量龙虾眼镜片得到的面形数据

Fig. 6 Surface data of lobster eye lens obtained by repeated measurements based on fringe reflection method

3.2 蒙特卡罗模拟

龙虾眼镜片在两个维度上的表面斜率误差归一化曲线如图 7 所示,可知:镜片表面斜率误差基本服从高斯分布,经过函数拟合可以得到 X、Y 两个维度上的标准差分别为 0.21 mrad 和 0.19 mrad 。理想面形的表面斜率误差均为 0,然而,复杂的阵列结构难免存在工艺缺陷。当镜片面形存在误差时,垂直于镜片表面指向球心的法线方向会发生变化,方孔通道轴线的指向也会相应改变。为了验证镜片面形误差对龙虾眼镜片聚焦成像性能的影响,假设面形引起的方孔通道指向偏差服从表面斜率误差统计特性,采用蒙特卡罗方法建立了光线追踪程序^[15],对龙虾眼镜片的面形误差进行模拟仿真。模拟中的 X

射线光源为平行光源,口径为 40 mm×40 mm,模拟的光线数量为 10⁶ 个,X 射线与方孔内壁的反射为全反射。模拟镜片参数与实验一致。

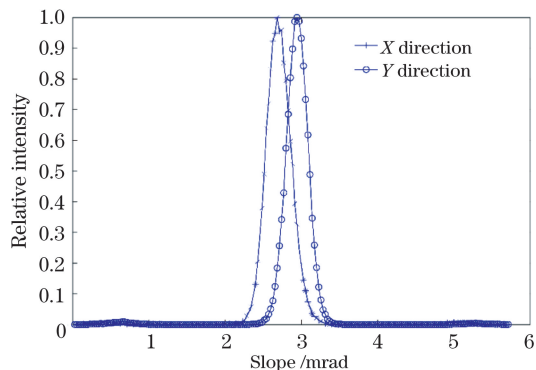


图 7 表面斜率分布归一化曲线

Fig. 7 Normalized curve of surface slope distribution

X 射线平行光源发出一束口径为 40 mm×40 mm 的光束照射到龙虾眼镜片的表面,之后光线进入方孔通道内壁,在焦距为曲率半径二分之一^[16]处聚焦形成清晰的十字焦斑,如图 8 所示。理想情况下,少数光线透射形成背景噪声,一次反射光线聚焦在十字臂上,二次反射光线聚焦在中心位置处,中

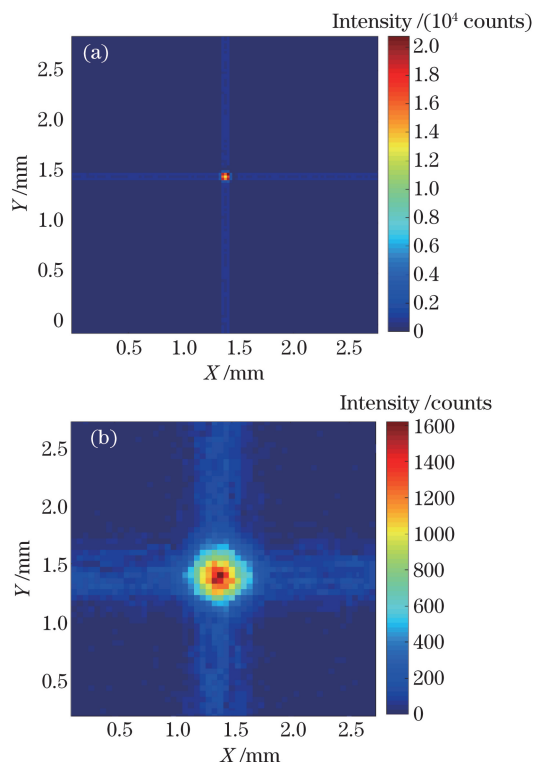


图 8 不同情况下焦距 375 mm 处的模拟成像结果。

(a)理想情况下;(b)面形存在误差的情况下

Fig. 8 Simulated imaging results at focus of 375 mm under different conditions. (a) Ideal condition; (b) condition with surface error

心焦斑的强度最大。当面形存在误差时,方孔通道的指向会发生改变,进入通道内壁的反射光线也会相应地改变出射方向,进而导致十字臂和中心焦斑弥散,成像质量变差。

龙虾眼镜片中心焦斑的光强分布曲线如图 9 所示,可见:理想情况下,十字线中心焦斑的光强增益为 22647;当存在面形误差时,中心焦斑的光强增益为 1625。经计算可以得到在理想和存在面形误差的情况下,半峰全宽(FWHM)分别为 0.02 mm 和 0.23 mm,对应的角分辨率分别为 0.18'和 2.11'。这是因为球面面形发生形变后,方孔通道指向的统计特性变差,角分辨率增大。镜片面形误差越大,斜率误差就越大,从而导致方孔统计特性变差,十字线聚焦性能降低,成像质量变差。为了进一步提高龙虾眼镜片的聚焦性能和成像质量,需要进一步改善龙虾眼镜片的面形质量。

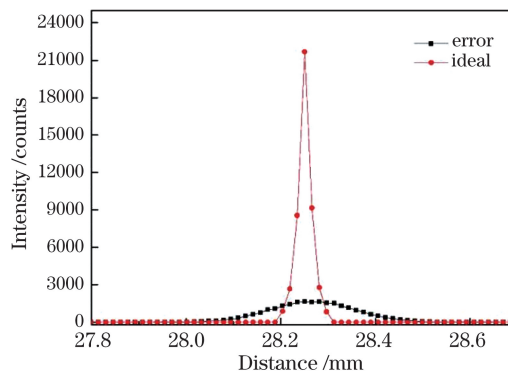


图 9 龙虾眼镜片中心焦斑的光强分布

Fig. 9 Light intensity distribution of focal spot of lobster eye lens

4 结 论

针对 Angel 型龙虾眼 X 射线镜片面形检测复杂、采用普通轮廓仪和干涉仪检测无法实现快速测试的问题,提出了一种基于条纹反射的龙虾眼镜片球面面形测量的新方法。通过 CCD 相机拍摄 40 mm×40 mm 口径的龙虾眼镜片,计算得到了镜片的三维面形误差 RMS 及 PV 值分别为 0.81 μm 和 6.34 μm,重复测量面形得到的 RMS 和峰谷 PV 值的标准差分别为 0.017 μm 和 0.11 μm,该结果与 Zygo 干涉仪的测量结果大体一致,验证了条纹反射方法测量龙虾眼镜片面形的可行性。运用蒙特卡罗方法对条纹反射检测反射镜面形进行仿真,得到了存在面型误差龙虾眼镜片聚焦成像的 FWHM 为 0.23 mm,对应的角分辨率为 2.11'。该测试系统可

用于指导球面热成形阶段的加工,并可在龙虾眼镜片测试领域具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes[J]. The Astrophysical Journal, 1979, 233: 364-373.
- [2] Ables J G. Fourier transform photography: a new method for X-ray astronomy[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1968, 1(4): 172-173.
- [3] Petre R, Serlemitsos P J. Conical imaging mirrors for high-speed X-ray telescopes[J]. Applied Optics, 1985, 24(12): 1833-1837.
- [4] Gondoin Ph, Aschenbach B, Brauning H, *et al.* X-ray performance of a qualification model of an XMM mirror module[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2808: 390-401.
- [5] Priedhorsky W C, Peele A G, Nugent K A. An X-ray all-sky monitor with extraordinary sensitivity[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996, 279(3): 733-750.
- [6] Wang Y H. Swing arm optical coordinate-measuring machine: high precision measuring ground aspheric surfaces using a laser triangulation probe[J]. Optical Engineering, 2012, 51(7): 073603.
- [7] 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.
- [8] Shao S C, Tao X P, Wang X K. On-machine surface shape measurement of reflective mirrors by ultra-precision turning based on fringe reflection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 071203.
邵山川, 陶小平, 王孝坤. 基于条纹反射的超精密车削反射镜的在位面形检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071203.
- [9] Liu Y K, Su X Y, Wu Q Y. Three-dimensional shape measurement for specular surface based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(11): 1636-1640.
- [10] Deng X T, Gao N, Zhang Z H. Calibration of system parameters based on direct phase measuring deflectometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061204.
邓小婷, 高楠, 张宗华. 基于直接相位测量术的系统参数标定方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061204.
- [11] Zhao W C, Zhou M, Liu H T, *et al.* The off-axis aspheric mirror testing based on the fringe reflection technique[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(7): 29-36.
赵文川, 周敏, 刘海涛, 等. 离轴非球面的条纹反射检测技术 [J]. 光电工程, 2018, 45(7): 29-36.
- [12] Yuan T, Zhang F, Tao X P, *et al.* Test of optical mirror surface using fringe reflection system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(9): 0912004.
袁婷, 张峰, 陶小平, 等. 条纹反射法检测光学反射镜面形 [J]. 光子学报, 2015, 44(9): 0912004.
- [13] Huang R, Su P, Burge J H, *et al.* High-accuracy aspheric X-ray mirror metrology using software configurable optical test system/deflectometry[J]. Optical Engineering, 2015, 54(8): 084103.
- [14] Jing H L, Su X Y, Liu Y K, *et al.* Specular surface measurement based on fringe reflection and analysis of 3D shape reconstruction technique[J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(10): 37-42.
荆海龙, 苏显渝, 刘元坤, 等. 基于条纹反射的镜面测量及三维重建算法分析 [J]. 光电工程, 2008, 35(10): 37-42.
- [15] Jin G, Li L H, Zhang C, *et al.* Numerical simulation of angel lobster eye X-ray micro pore optic lens[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0934001.
金戈, 黎龙辉, 张臣, 等. 基于 Angel 型龙虾眼 X 射线透镜的数值模拟 [J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0934001.
- [16] Chapman H N, Nugent K A, Wilkins S W. X-ray focusing using square channel-capillary arrays[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(6): 1542-1561.