

文章编号 1004-924X(2019)10-2136-08

软 X 射线掠入射望远镜的成像质量评价

刘 鹏^{1,2}, 陈 波^{1*}, 张亚超^{1,2}, 何玲平¹, 王孝东¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了评价软 X 射线掠入射望远镜的成像质量, 提出了一种利用 ZEMAX 和 MATLAB 相结合的像质评价方法。根据这种方法编写的像质评价程序不仅考虑了孔径衍射、几何像差和装调误差等因素对成像质量的影响, 而且加入了望远镜面形误差和 X 射线散射效应的影响。利用勒让德-傅里叶多项式和用户自定义表面, 在 ZEMAX 中建立带有面形误差的筒状反射镜表面模型, 实现对真实面形的掠入射反射镜的仿真; 根据 Harvey-Shack 散射理论建立了 ZEMAX 中的 BSDF 散射模型, 实现对 X 射线散射的仿真。搭建 X 射线有限远成像实验装置, 对像质评价程序进行了验证。实验结果和仿真结果对比表明: 实验光斑和仿真光斑的光强分布基本一致, 以实验结果为基准, 仿真光斑的半高全宽横向和纵向的相对误差分别为 14.7% 和 11.3%。说明像质评价程序的仿真结果基本符合真实情况, 对掠入射光学系统的设计和加工具有一定的指导意义。

关 键 词: X 射线光学; 掠入射望远镜; 像质评价; 表面散射; 面形误差

中图分类号: O434.19 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192710.2136

Imaging quality evaluation of soft X-ray grazing incidence telescope

LIU Peng^{1,2}, CHEN Bo^{1*}, ZHANG Ya-chao^{1,2}, HE Ling-ping¹, WANG Xiao-dong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: chenb@ciomp.ac.cn

Abstract: In order to evaluate the imaging quality of the soft X-ray grazing incidence telescope, an image quality evaluation method using ZEMAX and MATLAB is proposed. The image quality evaluation program written according to this method not only considers the aperture diffraction, the geometric aberration and the alignment errors, but also adds the telescope surface figure errors and the surface scatter effects. Using the Legendre-Fourier polynomial and User Defined Surface, a cylindrical mirror model with figure errors is created in ZEMAX, to simulate the real surface profile grazing incidence telescope. The BSDF scattering model is established according to the Harvey-Shack surface scattering theory to simulate X-ray scattering. The X-ray finite distance imaging experimental facility is built for verifying the image quality evaluation program. The comparison between the experimental results and the simulation results of the image quality evaluation program shows that the light intensity distribution of the experimental spot and simulation spot is basically the same. Using

收稿日期: 2019-02-01; 修订日期: 2019-04-05.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. U1631117); 天文联合基金资助项目 (No. U1731114)

the experimental result as a standard, the relative errors of the horizontal and longitudinal directions of the simulated spot FWHM were 14.7% and 11.3%, respectively. It is proved that the simulation results of the image quality evaluation program are credible and have certain guiding significance for the design and processing of the grazing incidence optical system.

Key words: X-ray optics; grazing incidence telescope; image quality; surface scattering; figure errors

1 引 言

太阳是空间天气变化的源头,当太阳爆发剧烈活动时,会对近地空间产生巨大扰动。这种扰动会对航天器的安全运行、GPS 定位、电波传输以及输电网络等人类正常活动产生严重的影响。为了预报空间天气的变化,观测引起空间天气变化的耀斑、日冕抛射物和冕洞等现象,尤其是伴随这些现象产生的软 X 射线波段的辐射,具有非常重要的意义^[1]。软 X 射线的折射率用复数表示^[2],其值略小于 1,无法采用传统的折射或反射的方式进行聚焦成像。但是当软 X 射线以掠入射(入射角接近 90°)的方式入射到反射表面时,会发生全反射现象。根据全反射现象研制的软 X 射线掠入射望远镜,是对太阳活动观测,预测空间天气变化的重要仪器之一。到目前为止,美国的 GOES 系列卫星,欧洲航天局的 XMM 牛顿卫星以及日本的日出卫星等^[3-6],搭载的掠入射望远镜成功地完成了空间观测任务。

Wolter-I 型掠入射望远镜是软 X 射线望远镜中的一种,它由抛物面和双曲面远离顶点的部分组成,两个二次曲面共轴且有一个公共的焦点。软 X 射线以接近 90°的角度入射到反射镜上,经过抛物面和双曲面的两次反射聚焦成像。对于传统的可见光波段的成像系统,成像质量主要受到孔径衍射、几何像差和装调误差的影响。但由于软 X 射线在反射时散射现象严重,所以在评价掠入射望远镜成像质量时必须考虑到表面散射的影响。James E. Harvey 等开发了一个名为 PSFGraz 的 MATLAB 代码,用于掠入射望远镜成像质量的工程分析^[7]。PSFGraz 不仅可以从孔径衍射、几何像差、表面散射和装调误差等方面分析成像质量,而且也可从光学加工误差、环境误差

以及探测器影响等多个方面进行像质评价。国内也对 X 射线掠入射成像系统的光学设计以及成像质量进行了研究。李春芳采用向量形式的二次非球面光路计算公式,利用 MATLAB 编写光线追迹程序并分析了几种常见的初级像差对望远镜结构设计和成像质量的影响^[8]。李顺等则利用 ZEMAX 的动态数据交换(DDE)接口与 MATLAB 建立链接,利用 MATLAB 生成入射光线的坐标阵列,保证足够的光线参与光线追迹,将 ZEMAX 作为光线追迹的程序,再由 MATLAB 根据追迹结果和孔径衍射的点扩散函数(Point Spread Function,PSF)计算系统的成像质量^[9]。

本文根据线性理论以及 Harvey-Shack 表面散射理论^[10-11],提出了一种利用 ZEMAX 和 MATLAB 相结合的掠入射望远镜像质评价方法。该方法不仅考虑了孔径衍射、几何像差和装调误差等因素对成像质量的影响,而且加入了反射镜面形误差和表面散射的影响。通过 X 射线有限远成像实验对仿真结果进行了验证。

2 掠入射望远镜 PSF 的计算

2.1 掠入射望远镜 PSF 计算模型

PSF 是评价光学系统成像质量的基本工具。在掠入射望远镜光学系统中,成像质量的退化受到各种独立不相关因素的影响^[10-11],例如孔径衍射、几何像差、表面散射以及其它潜在误差(装调误差、环境误差等)。将掠入射望远镜看作线性系统,系统的 PSF 可以简单地表示为上述因素各自的 PSF 卷积的结果,如图 1 所示。图中几何像差包含光学系统设计残差和面形误差,而装调误差以及环境误差归为混合误差(REPSF)中。环境误差虽然出现在 PSF 计算模型中,但本文的像质评价程序中并未考虑其造成的影响。

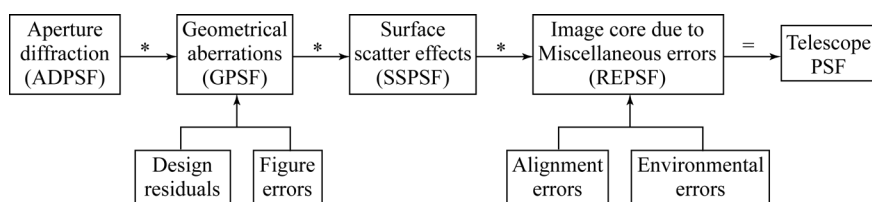


图 1 掠入射望远镜 PSF 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PSF calculation model for grazing incidence telescope

2.2 孔径衍射的 PSF

波长越短孔径衍射效应越小,但掠入射望远镜有一个遮拦比较大的环形孔径,增强了衍射效应,所以孔径衍射的效应能否忽略,具体要看其它因素对系统成像质量的影响是否远大于孔径衍射的影响。根据傅里叶光学的线性定理,环形孔径衍射场的复振幅分布可以由两个不同半径的圆形孔径衍射场复振幅分布的差求得,所以环形孔径在衍射极限下的 PSF 表示为:

$$\text{ADPSF}(\theta) = \frac{1}{(1-\epsilon^2)^2} \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} - \epsilon^2 \frac{2J_1(\epsilon Z)}{\epsilon Z} \right]^2, \quad (1)$$

其中: $J_1(Z)$ 是第一类贝赛尔函数, $Z = \frac{2\pi R\theta}{\lambda}$, θ 为角半径, λ 为衍射光波长, R 为环形孔径外圆半径, ϵ 为遮拦比。

2.3 ZEMAX 仿真的 PSF

ZEMAX 非序列模式下的仿真主要考虑了三个因素的影响,分别是几何像差、表面散射和装调误差。几何像差包括光学设计残差和面形误差,其中面形误差的引入较为困难。因为 Wolter-I 型掠入射望远镜是一个筒状结构,且有非常大的遮拦比,环形 Zernike 系数无法适用。为了解决这一难题,采用在柱面坐标中正交的勒让德-傅里叶 (Legendre-Fourier, L-F) 多项式^[12-13]描述面形误差,利用用户自定义表面来实现 ZEMAX 中带有面形误差的筒状反射镜的建模。

在柱面坐标系中,掠入射望远镜的母线方程表示为:

$$r(z, \theta) = \sqrt{2(z+z_0)/c - (1+k)(z+z_0)^2} + h_{\text{error}}(z, \theta), \quad (2)$$

其中: z 为镜筒轴向坐标, r 为径向坐标, θ 为方位角, z_0 是圆锥曲线顶点的轴向坐标, c 为顶点曲率, k 为圆锥系数。而 $h_{\text{error}}(z, \theta)$ 是一组 L-F 多项式,用来描述面形误差,其表达式如下:

$$h_{\text{error}}(z, \theta) = \sum_{n=0} \left\{ a_n P_n(Z) + \sum_{m=1} [b_{nm} P_n(Z) \cos(m\theta) + c_{nm} P_n(Z) \sin(m\theta)] \right\}, \quad (3)$$

其中: a_n , b_{nm} 和 c_{nm} 为 L-F 多项式的参数, $P_n(Z) = P_n(2(z-z_0)/L)$ 为第 n 项勒让德多项式, L 为镜筒轴向的长度, z_0 为镜筒轴向中点的坐标。因为勒让德多项式在 -1 到 $+1$ 的区间内正交,所以轴向坐标 z 需要经过变换来保证多项式的正交关系。利用式(3)对反射镜的面形误差进行拟合,再将拟合结果带入式(2),就可以得到附带面形误差的反射镜镜筒的方程,然后通过用户自定义表面来实现 ZEMAX 中的建模。对 Wolter-I 型掠入射望远镜的主镜和次镜分别建模,这样可以通过设置镜筒的位置和倾斜参数来引入装调误差。

表面散射则根据 Harvey-Shack 表面散射理论^[10-11],通过建立双向散射分布函数 (Bidirectional Scattering Distribution Function, BSDF) 的散射模型来实现。BSDF 是一个统称,由 Bartell 和 Dereniak 在 1980 年提出^[14],一般包括反射和透射两个部分,透射与本文无关,所以只计算反射部分。基于 Harvey-Shack 表面散射理论,根据光学表面的功率谱密度 (Power Spectral Density, PSD) 曲线,采用 FFTLog 算法计算不同掠入射角的双向反射分布函数 (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF),将计算得到的多组 BRDF 数据按照指定格式保存在一个扩展名为 BSDF 的数据交换文件中。利用该文件就可以在 ZEMAX 中任意非序列物体表面建立 BSDF 散射模型。

在 ZEMAX 非序列模式中,载入主镜和次镜的 DLL 文件,输入主次镜的位置和倾斜参数。设置波长和反射镜的表面反射率(根据反射镜表面材料计算得到),建立 BSDF 散射模型,添加光源和探测器,经过光线追迹后,就可以得到探测器

(位于像面)上的照度分布。当光源为一束平行光时,则像面上的照度分布即为 ZEMAX 仿真得到的 PSF。将它传输到 MATLAB 编写的像质评价程序中,就可以计算得到系统的 PSF、能量集中度和调制传递函数等像质评价标准。

3 像质评价方法的验证

为了验证像质评价程序仿真结果是否正确,需要将仿真结果与实验结果进行对比。由于 X 射线在正入射的情况下反射率极小,无法通过平行光管获得直径较大的平行光束。为了获得近似的平行光束,国外一般采用将 X 射线源放在距离

待测装置较远的位置来检测望远镜。例如:美国马歇尔太空飞行中心 500 m 长的 X 射线定标装置^[15]。这种检测装置成本较高,一般研究所难以实现。本文目的仅仅是验证像质评价程序的仿真结果是否正确,所以将 X 射线光源放在距离望远镜较近的位置,让 Wolter-I 型望远镜对它进行成像,将有限远成像的实验结果与仿真结果进行对比,若二者结果一致,则证明仿真方法可行。

3.1 有限远成像实验

实验采用的 X 射线光源参数见表 1,阳极工作电压为 4 kV,钨灯丝电压为 4 V,电流为 4 A,产生 X 射线的波长为 1.33 nm(铜的 $L\alpha$ 谱线),光斑尺寸约为 5 mm。

表 1 X 射线光源参数
Tab. 1 Parameters of X-ray source

参数	材料	功耗	电压/kV	发射电流/mA	冷却方式	工作气压/Pa
阳极	铜	1 kW(最大)	0~15		水冷 3.5 L/min 压力 3~5 bar	$10^{-8} \sim 10^{-3}$
阴极	钨	22 W		0~100		

有限远成像实验装置如图 2 所示,在邻近光源的位置处固定一个打有半径为 0.2 mm 针孔的铜片,铜片距望远镜前端 4.5 m。先在可见光波段对实验装置进行调节,然后再换回 X 射线光源。在真空环境下,X 射线穿过针孔后被望远镜反射,最终聚焦成像在 X 射线探测器上。图 3 为探测器成像区域的截图,像元数为 151 pixel $\times$ 151 pixel,像元尺寸为 13.5 $\mu\text{m}\times$ 13.5 μm ,探测器的积分时间为 5 min。



图 3 X 射线波段有限远成像的实验结果

Fig. 3 Experiment result of finite distance imaging in X-ray band

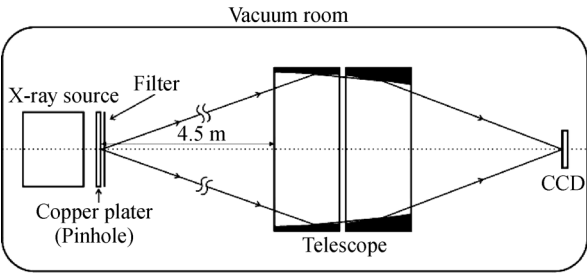


图 2 有限远成像实验装置示意图

Fig. 2 Experimental device for finite distance imaging

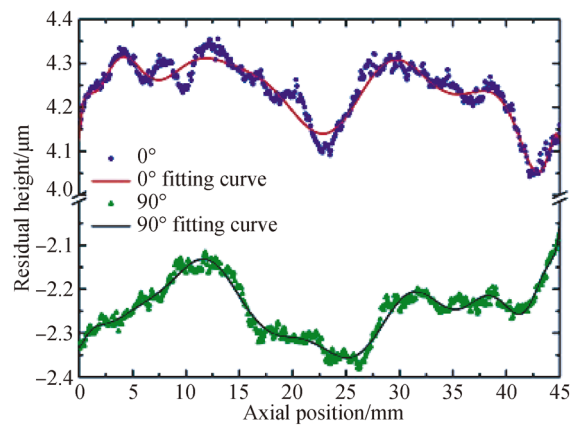
3.2 成像实验仿真

为了对有限远成像实验进行仿真,需要已知反射镜的表面质量,利用 Form Talysurf PGI 1000S 轮廓仪和 NewView 6300 3D 表面轮廓仪对望远镜进行检测。根据检测结果,利用式(3)对掠入射望远镜的表面轮廓误差进行拟合,拟合结果的残余误差的 PV 和 RMS 见表 2。图 4 为望远镜方位角为 0° 和 90°的轴向轮廓误差及其拟合曲线。图 5 是主镜

和次镜半径较大位置处截面的圆度。可以看出，L-F多项式不仅在光轴方向上拟合得很好，在垂直光轴的截面内拟合结果同样优秀。

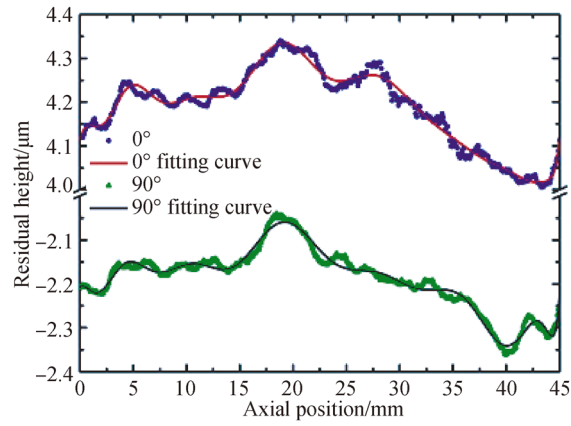
表 2 掠入射望远镜拟合结果残差的 PV 值和 RMS 值
Tab. 2 PV and RMS of residual errors of fitting result for grazing incidence telescope (nm)

	主镜	次镜
PV	160.6	175.0
RMS	18.8	22.9



(a)主镜轴向轮廓误差

(a) Axial profile errors of primary mirror

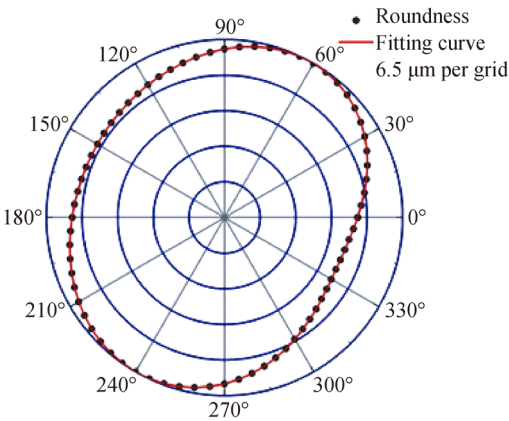


(b)次镜轴向轮廓误差

(b) Axial profile errors of secondary mirror

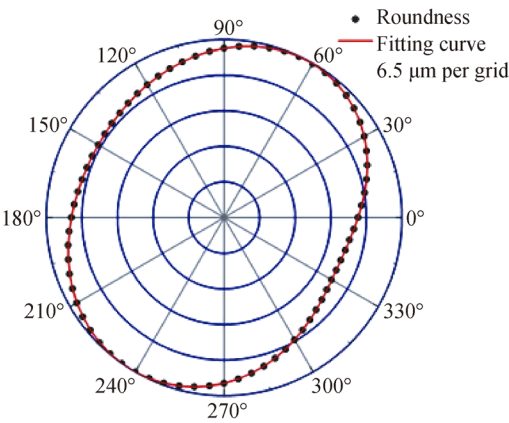
图 4 掠入射望远镜主镜和次镜方位角为 0° 和 90° 的轴向轮廓误差

Fig. 4 Axial profile errors of grazing incidence telescope for primary and secondary mirrors at azimuth angles of 0° and 90° respectively



(a)主镜圆度

(a) Roundness of primary mirror



(b)次镜圆度

(b) Roundness of secondary mirror

图 5 掠入射望远镜主镜和次镜的圆度

Fig. 5 Roundness of primary and secondary mirrors of grazing incidence telescope

图 6 是利用 Form Talysurf PGI 1000S 轮廓仪和 NewView 6300 3D 表面轮廓仪测量得到的 Wolter-I 型望远镜次镜的 PSD 曲线。因为每个检测设备都存在固定的带宽限制，所以 PSD 曲线由带宽不同的三段检测数据组成。空间频率从 $10^{-2} \sim 10^3 \text{ mm}^{-1}$ ，跨度为 5 个量级。PSD 的拟合曲线由一个高斯函数、两个洛伦兹函数与一个 K 相关函数组成，拟合曲线的表达式和拟合结果见图 6。

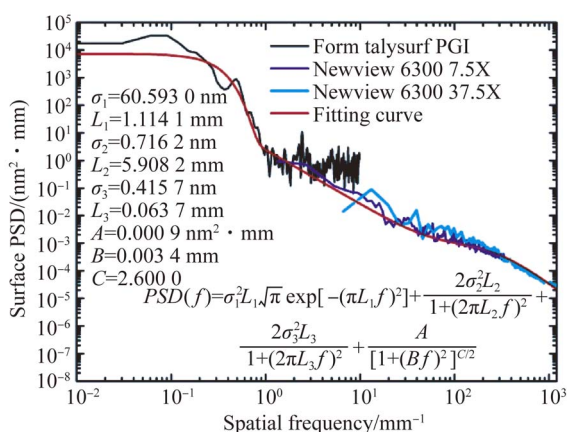


图 6 Wolter-I 型望远镜次镜的表面功率谱密度曲线

Fig. 6 Surface PSD of secondary mirror of Wolter type I telescope

实验所用的 Wolter-I 型掠入射反射镜的主镜和次镜加工在同一个基底上,通过精密的加工可以保证主次镜之间的相对偏差较小,装调误差可以忽略不计。根据之前测量得到的反射镜表面的质量数据,编译得到附带面型误差的主镜和次镜的 DLL 文件。由 PSD 的拟合曲线,根据 Harvey-Shack 表面散射理论,计算出不同掠入射角的 BRDF,最终生成一个反映反射镜表面散射性质的 BSDF 文件。



图 7 有限远成像仿真结果

Fig. 7 Simulation result of finite distance imaging

在 ZEMAX 非序列模式中,载入主镜和次镜的 DLL 文件,设置好反射镜的位置。在主镜和次镜的 Object properties 对话框 Coat/Scatter 选项卡中配置反射率文件,并建立 BSDF 散射模型。在距主镜前端 4.5 m 处,设置一个半径为 0.2 mm

的圆形面光源,波长设置为 1.33 nm。光源选择 Source Radial,这样可以通过设置光线出射角度的范围,减少追迹不参与成像的光线,缩短追迹时间。在像面位置添加探测器,像元大小参照实验所用探测器。经过光线追迹后,得到像面上的照度分布,将其与 MATLAB 计算的孔径衍射 PSF 进行卷积,最终结果如图 7 所示。

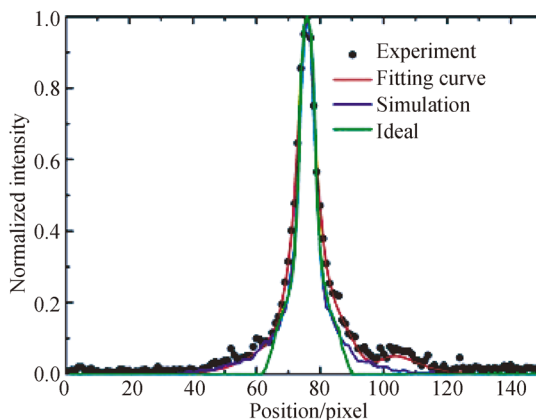
4 实验结果分析

实验测量得到的图像(如图 3)中存在背景噪声。我们选取实验图像边缘附近的区域计算得到的平均值作为背景噪声 N ,按照式(4)去除背景噪声并进行归一化:

$$I_N = \frac{I - N}{I_{\max} - N}, \quad (4)$$

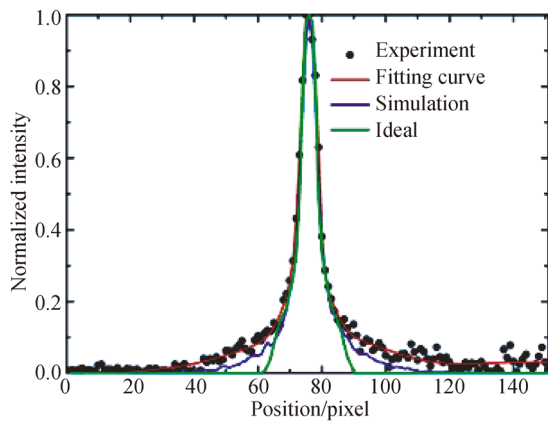
其中: I 为光强(或灰度值), $I_{\max}$ 表示图像中光强(或灰度值)的最大值, I_N 为归一化后光强。

将实验和仿真结果归一化后,以光斑中心为标准,按横纵两个方向进行比较。横向和纵向的一维光强分布如 8 所示。图中加入一个理想面形且不考虑散射的仿真结果作为参考。从图中明显可以看出,相比理想结果,考虑散射和面形误差的仿真结果更接近实验结果,但是仿真结果在光斑边缘处并没有完全与实验结果重合。这是因为噪声和杂光的强度相对较小,对光强较大区域(光斑中心)的影响不明显,反而在光强较小区域(光斑边缘)可以看出明显差异。



(a) 横向分布

(a) Horizontal distribution



(b)纵向分布

(b) Vertical distribution

图 8 实验和仿真图像光强分布的对比

Fig. 8 Comparison of intensity distribution between experiment and simulation

将光斑的半高全宽(Full Width Half Maximum, FWHM)作为评价标准,计算实验和仿真所对应的 FWHM,结果见表 3。从镜筒圆度数据(图 5)可以看出,镜筒的横截面并不对称且近似一个椭圆,只考虑几何光线追迹,在像面上的光强分布应该是非对称的。但是实验用的 Wolter-I 型反射镜的表面散射对成像的影响大于面形误差的影响,且散射点扩散函数的分布是对称的,所以仿真结果横向和纵向的 FWHM 分别为 6.4 和 6.3 pixel,二者近似相等。而实验结果的横向和纵向的 FWHM 分别为 7.5 和 7.1 pixel,其偏差相对仿真结果略

大,这是杂光分布不对称造成的。以实验结果为标准,仿真结果的 FWHM 横向的相对误差为 14.7%,纵向的相对误差为 11.3%。

表 3 实验和仿真光斑的半高全宽

Tab. 3 FWHM of spot in experiment and simulation (pixel)

	实验	仿真	相对误差/%
横向	7.5	6.4	14.7
纵向	7.1	6.3	11.3

5 结 论

本文提出了一种利用 ZEMAX 和 MATLAB 对软 X 射线掠入射望远镜成像质量进行评价的方法,并编写了像质评价程序。在像质评价程序中不仅包含孔径衍射、几何像差以及装调误差,而且加入了表面散射和面形误差的影响。搭建了 X 射线有限远成像实验装置,对像质评价程序的仿真结果进行了验证。实验结果表明:仿真结果与实验结果的光强分布基本一致,相对于实验结果,仿真结果的 FWHM 横向和纵向的相对误差分别为 14.7% 和 11.3%。由此说明,像质评价程序的仿真结果基本符合实际情况,可以用于评价掠入射望远镜的成像质量,对今后掠入射光学系统的设计、优化分析和加工制造等工作具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈波,陈淑妍,巩岩. 一种复合型空间软 X 射线——极紫外波段望远镜设计 [J]. 光学技术, 2004, 30(2): 242-244.
CHEN B, CHEN S Y, GONG Y. Design of a complex space soft X-ray and EUV telescope [J]. *Optical Technique*, 2004, 30(2): 242-244. (in Chinese)
- [2] 陈晨曦阳,金春水,王君,等. 小型掠入射式近边 X 射线吸收谱仪的设计 [J]. 中国光学, 2018, 11(2): 265-278.
CHEN C X Y, JIN C SH, WANG J, *et al.*. Design of a compact spectrometer under grazing incidence conditions for near-edge X-ray absorption spectroscopy [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(2): 265-278. (in Chinese)
- [3] LEMEN J R, DUNCAN D W, EDWARDS C G, *et al.*. The solar X-ray imager for GOES [C]. *Telescopes and Instrumentation for Solar Astrophysics*, SPIE, 2004: 65-76.
- [4] LUMB D H. X-ray multi-mirror mission (XMM-Newton) observatory [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 011009.
- [5] TAKAHASHI T, KOKUBUN M, MITSUDA K, *et al.*. Hitomi (ASTRO-H) X-ray astronomy satellite [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2018, 4(2): 021402.
- [6] 贺鹏飞,尤佳伟,戴瑛,等. X 射线聚焦望远镜镜片黏接装配的数值模拟和分析 [J]. 光学 精密工程, 2017, 25(5): 1242-1249.
HE P F, YOU J W, DAI Y, *et al.*. Numerical simulation and analysis of X-ray focusing telescope in mounting process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,

- 25(5): 1242-1249. (in Chinese)
- [7] HARVEY J E, ATANASSOVA M, KRYWONOS A, *et al.*. Systems Engineering Analysis of Five “As-manufactured” SXI Telescopes [C]. *Optical Modeling and Performance Predictions II*. SPIE, 2005: 58670F.
- [8] 李春芳. Wolter X 射线成像系统设计及成像质量分析 [D]. 大连:大连理工大学, 2007.
LI CH F. *Design and Imaging Quality Analysis of Wolter X-ray Imaging System* [D]. Dalian: Dalian University of technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 李顺, 巩岩, 张巍. 掠入射光学系统成像质量评价 [J]. 光电工程, 2010, 37(10): 64-70.
LI SH, GONG Y, ZHANG W. Image quality evaluation of grazing incidence optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(10): 64-70. (in Chinese)
- [10] HARVEY J E, PFISTERER R N. Evolution of the transfer function characterization of surface scatter phenomena [C]. *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces V*. SPIE, 2016: 99610E.
- [11] HARVEY J E. Integrating optical fabrication and metrology into the optical design process [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(9): 2224-2233.
- [12] GLENN P. Set of orthonormal surface error descriptors for near-cylindrical optics [J]. *Optical Engineering*, 1984, 23(4): 384-390.
- [13] SAHA T T. Image defects from surface and alignment errors in grazing incidence telescopes [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(10): 1296-1305.
- [14] BARTELL F O, DERENIAK E L, WOLFE W L. The theory and measurement of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) and bidirectional transmittance distribution function (BTDF) [C]. *Radiation Scattering in Optical Systems*. SPIE, 1980: 154-160.
- [15] WEST E, PAVELITZ S, KOBAYASHI K, *et al.*. Development of an EUV test facility at the marshall space flight center [C]. *Optics for EUV, X-Ray, and Gamma-Ray Astronomy V*. SPIE, 2011: 81471A.

作者简介:



刘 鹏 (1986—), 男, 吉林舒兰人, 博士, 2010 年于吉林大学获得学士学位, 主要从事非球面表面检测等方面的研究。E-mail: liupengsb@msn. cn

通讯作者:



陈 波 (1961—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1984 年于吉林大学获得学士学位, 1990 年、2003 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位, 主要从事软 X 射线-极紫外波段光学和空间光学等方面的研究。E-mail: chenb@ciomp. ac. cn