

Wolter型X射线嵌套望远镜成像质量分析

赵大春^{1,2} 陈波¹ 刘鹏^{1,2} 何玲平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 X射线成像技术在空间探测中的应用日渐广泛,为了提高孔径利用率和系统有效面积,通常采用Wolter-I型嵌套望远镜对空间X射线源进行会聚成像。由于传统的光学设计软件在分析掠入射系统方面存在一定的缺陷,因此使用MT_RAYOR工具库自编程序对X射线望远镜进行成像质量分析。MT_RAYOR用于Wolter-I型嵌套结构望远镜系统的分析,具有全面、准确和快捷的优势。基于MT_RAYOR,对用于0.2~20 keV波段成像的嵌套型双锥结构望远镜进行了系统设计,从有效面积、点扩展函数、能量集中度等方面进行了成像质量分析。该结构在10 keV以内保持500 cm²以上的稳定有效面积,在硬X射线波段的有效面积也可达到250 cm²以上,系统工作波段跨度大、稳定性高。分析了辐条和反射面的面形误差对系统在实验中成像质量的影响,对望远镜系统的优化和装调具有指导作用。

关键词 成像系统; X射线望远镜; 分辨率; MT_RAYOR; 面形误差

中图分类号 O434.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0311002

Image Quality Evaluation of Wolter X-Ray Nested Telescope

Zhao Dachun^{1,2} Chen Bo¹ Liu Peng^{1,2} He Lingping¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

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

Abstract X-ray imaging technology has developed fast in spatial explorations. In order to obtain higher throughput and larger effective area, Wolter-I nested telescope structure is usually adopted to focus and image the spatial X-ray sources. Traditional optical analysis software is imperfect in the analysis of grazing incident system. Therefore, programs are written using the MT_RAYOR tools to evaluate the image quality of Wolter X-ray nested telescope. MT_RAYOR has an advantage of being general, accurate, convenient and fast in predicting grazing incident Wolter-I nested structures. Based on MT_RAYOR, the structure parameters of nested conical telescope working at 0.2~20 keV are designed, and detailed image quality analysis are presented, including the effective area, point spread function, and encircled energy function. The system can achieve a stable effective area of about 500 cm² at 0.2~10 keV, and the effective area keeps above 250 cm² in hard X-ray region, thus, the system has a wide range of working wavelength and good stability. Furthermore, the spokes and surface deformation profile are taken into consideration in order to evaluate the effects on image quality. The results have directive significance to optimization and assembling of the telescope system.

Key words imaging systems; X-Ray telescope; resolution; MT_RAYOR; surface deformation

OCIS codes 110.2960; 110.6770; 110.7440; 340.7450

1 引言

随着空间技术的不断发展,空间环境预报和空间探测要求越来越精确的实时观测数据,使用X射线望

收稿日期: 2015-09-16; 收到修改稿日期: 2015-10-20

基金项目: 中国科学院长春光机所创新基金(Y3CX1SS145)

作者简介: 赵大春(1990—),女,博士研究生,主要从事短波光学的收集以及成像方面的研究。E-mail: zixuan9003@163.com

导师简介: 陈波(1961—),男,博士,研究员,博士生导师,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(通信联系人)

望远镜对空间 X 射线进行观测具有重大的科研和应用价值。天基 X 射线成像观测的工作波段包括 0.2~2 keV 的软 X 射线、2~10 keV 中等能量波段以及 10 keV 以上的硬 X 射线波段^[1-2]。从 20 世纪 90 年代开始,世界范围内的空间观测计划层出不穷,如 ASAC, GEMS, Suzaku, Astro-H, NuSTAR 等探测计划都携带 X 射线成像仪载荷^[3-4]。由于 X 射线特殊的光学特性,这些探测计划的光学系统大多采用由共焦的抛物面和双曲面组成的 Wolter-I 型结构以及基于该结构的改进系统,如双曲面-双曲面反射系统,以及把二次曲面近似成双锥面的反射系统^[5]。目前,软 X 射线望远镜的发展比较成熟,在此基础上,硬 X 射线波段的观测需要通过减小掠入射角和使用高效的多层膜,以及提高探测器效率等方法增大系统的反射率和有效面积并提高成像分辨率^[6]。

Wolter-I 型系统是掠入射结构,传统光学分析软件如 Zemax,在追迹掠入射结构时存在一定缺陷,由于采样过低等原因,无法获得有意义的像差系数和系统的点扩展函数(PSF)、传递函数以及环绕能等像质评价函数^[7-8]。因此使用 MT_RAYOR 工具库编程进行光线追迹,用来计算分析嵌套 Wolter-I 型结构的 PSF、能量集中度等,以及辐条和面形误差对成像质量的影响。MT_RAYOR 工具库专门用于分析掠入射 X 射线望远镜系统,使用 Yorick 编译语言和弹性影像传送系统(FITS)数据存储格式^[9]。可对理想的嵌套结构(包括一层)X 射线望远镜,以及存在散射和面形误差的系统进行光学计算分析。反射面的面形误差可以通过工具库的函数生成随机数据,也可以根据面形检测结果生成真实数据。MT_RAYOR 可以根据掠入射系统的孔径特点分布光线,不会出现大量光线未经反射元件直接到达像面,以至于像质分析采样不足的情况。

使用 MT_RAYOR 编程对嵌套型双锥面结构进行成像质量的分析。该双锥面结构在设计时充分考虑了硬 X 射线波段的反射率,使望远镜系统的工作波段跨度较大,在 0.2~20 keV 的范围内都有充足的有效面积。成像质量分析主要包括系统的有效面积,面形误差、圆度误差以及辐条对成像质量的影响等。

2 圆锥嵌套结构的建立

单层的 Wolter-I 型结构孔径遮拦比可以达到 98% 以上,二次曲面的曲率在反射面长度范围内变化不明显,因此旋转抛物面和旋转双曲面可以用锥面代替。圆锥嵌套的结构降低了非球面反射镜的加工难度和成本,同时能够保证系统的有效面积,但是成像分辨率有所下降,轴上点不再呈完美像^[10]。当不同孔径的圆锥组成嵌套系统,为了提高孔径利用率,以及减少像面上的杂光分布从而提高成像质量,采用主镜的内层镜面恰好不遮挡相邻主镜反射光线的排列方式。

MT_RAYOR 内部包含多种函数,可以实现对一次反射或两次反射嵌套结构的建立。反射结构的系统文件包含内外口径、反射面长度和厚度、系统焦距以及嵌套结构层与层的间距等参数。在此基础上,可以通过创建反射率和散射文件、建立辐条和面形误差数据、引入像面的背景噪声、以及设置像面尺寸或建立探测器文件等对影响系统成像质量的因素进行分析。使用 MT_RAYOR 进行系统分析的流程如图 1 所示。

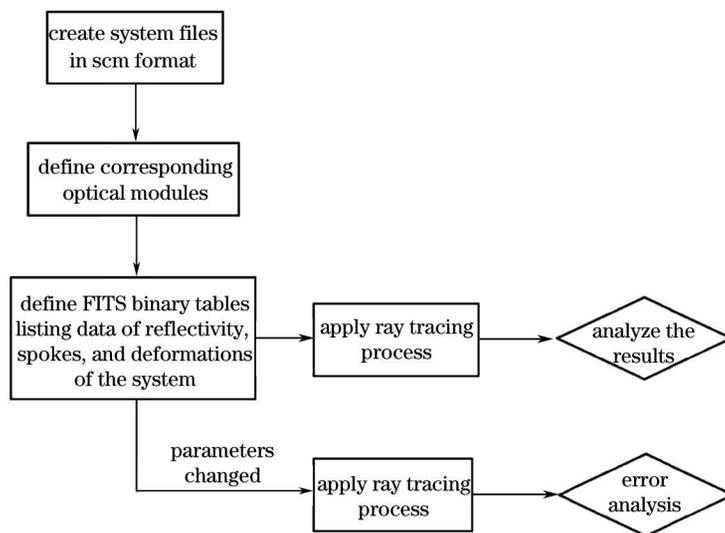


图 1 像质分析流程图

Fig.1 Flow diagram of image quality analysis

3 成像质量分析

3.1 有效面积

X射线望远镜的主要参数如表1所示。嵌套结构示意图如图2所示。系统共有133层嵌套反射面,最大口径约191 mm。

表1 X射线嵌套双锥望远镜参数

Table 1 Optics configuration of X-ray nested conical telescope

Parameter	Value
Focal length /m	10
Maximum diameter /mm	191
Minimum diameter /mm	54
Conical shell length /mm	225
Gap about joint /mm	4
Mirror thickness / μm	200
Shells	133
Maximum graze angle /($^\circ$)	0.3

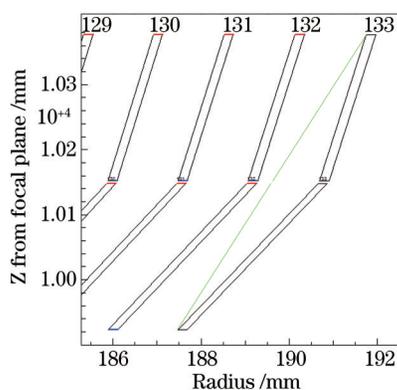


图2 嵌套结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of nested structure

广泛应用于软X射线望远镜的单金属膜层在硬X射线波段反射率非常低,导致系统在10keV的有效面积降低至软X射线波段的10%以下。而且,由于掠入射望远镜的视场角近似等于系统的平均掠入射角^[11],如果通过减小掠入射角来提高硬X射线波段的反射率,会导致系统的视场角非常小。因此,反射面的膜层必须采用多层膜结构。采用W/B₄C多层膜,该膜层在不同工作波段和掠入射角下的反射率如图3所示。

系统在0.2~20 keV的轴上有效面积如图4所示。两条曲线分别表示不存在辐条以及考虑辐条时的轴上有效面积随能量的变化。X射线嵌套望远镜的主体支架结构使用了12根辐条,每根辐条的宽度约7 mm,辐条上根据嵌套反射层间隔设计出凹槽,锥形反射面由内向外逐层固定在凹槽中。

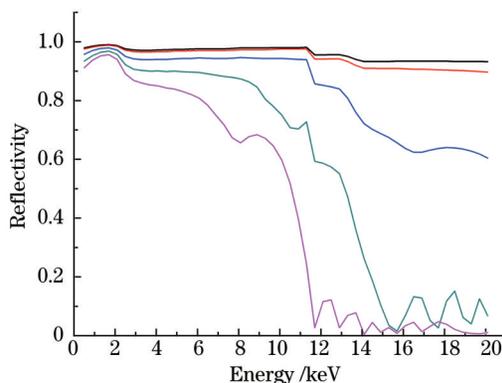


图3 W/B₄C多层膜不同掠入射角的反射率曲线。曲线由上到下掠入射角依次为:2、5、8、11、14 mrad

Fig.3 Reflectivity curves of W/B₄C multilayers at different grazing incident angles. The grazing incident angles of the curves from top to bottom is 2, 5, 8, 11, 14 mrad, respectively

由图4可以看出,不考虑辐条时,系统在10 keV以内基本保持稳定的有效面积,大约600 cm²;然后随着

X 射线能量的增加逐渐下降,在 20 keV 时,有效面积约 300 cm²,大约是 10 keV 波段有效面积的 50%。辐条引起的光线遮挡会减小系统的有效面积,在 10 keV 内有效面积可达到约 500 cm²;在 X 射线能量 20 keV 时,减小到 250 cm²左右。辐条使系统的有效面积减小了大约 17%。

X 射线成像望远镜存在一定的视场角,对于掠入射望远镜,通常定义有效面积达到轴上有效面积一半时的光源离轴角度为半视场角。图 5 是望远镜系统有效面积随光源离轴角度的变化。可以看出,当半视场角 7' 时,有效面积大约是轴上有效面积的一半。因此,系统的视场角大约 14'。

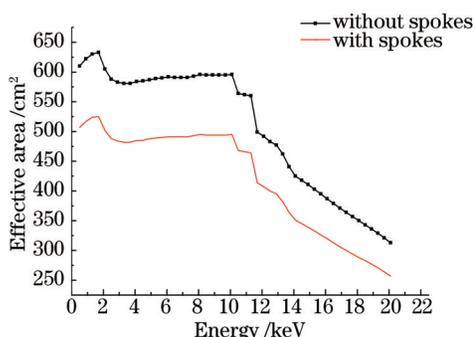


图 4 无辐条和有辐条时不同波段的轴上有效面积
Fig.4 On-axis effective area with spokes and without spokes

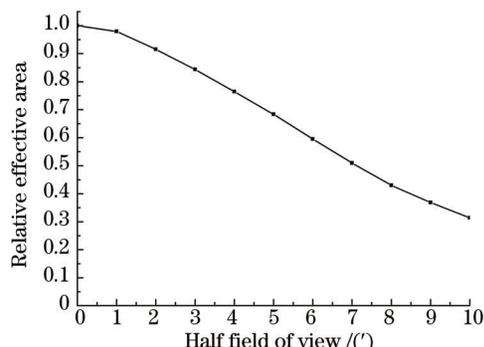


图 5 归一化有效面积随半视场角的变化
Fig.5 Normalized effective areas against half field of view

3.2 PSF 和能量集中度

反射面采用玻璃基底,使用长程轮廓仪对圆锥反射面样片的面形进行检测。沿母线方向对样品基底的检测得到,反射面的面形误差峰谷(PV)值约 17 μm,均方根(RMS)值约 6 μm,表面粗糙度大约 0.38 nm(RMS)。基于该检测结果对每层反射面生成面形误差数据,以 FITS 格式存储,用于 MT_RAYOR 程序对系统进行分析。FITS 是一种在天文学领域广泛使用的数据格式,MT_RAYOR 计算系统中数据的存储、传输和分析都依赖 FITS 格式的文件^[2]。文件主要参数以固定格式的美国标准信息交换码(ASCLL)出现在表头中,数据表格中的三维数据表示面形误差。其中,第一维数据代表反射面弧矢剖面绕圆周 0~2π 方位角的面形误差,第二维数据代表沿母线方向的采样点面形误差,第三维数据表示嵌套层序号。三维数据可以表示完整的筒状反射面面形误差。图 6 是某一层反射面的面形误差分布图。

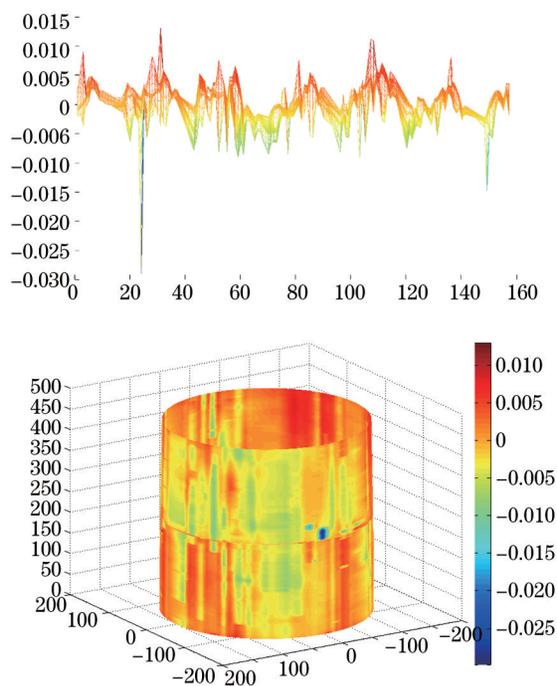


图 6 反射面面形误差分布
Fig.6 Reflecting surface deformation profile

在 MT_RAYOR 中引入上述面形误差,对 10^6 条光线进行追迹后得到像面光斑和光斑中心的二维 PSF 如图 7 所示^[13]。光源离轴 $7'$ 时的光斑主体呈椭圆状,杂光向光斑的一侧扩散,光斑中心偏离 0 视场的像面中心约 2 cm。对系统的能量集中度进行评估,用能量半高宽(HPD)反映系统的角分辨率,如图 8 所示,图中曲线分别表示 0 视场和光源离轴 $7'$ 时沿 X 轴方向的环绕能(EEF)。分析得出,在只考虑 X 方向视场,Y 方向视场为 0 时,X 方向边缘视场的光斑形状接近椭圆形,光斑中心产生约 2 cm 的位移。在面形误差 RMS 值 $6 \mu\text{m}$ 的情况下,轴上视场的系统角分辨率可达到 $55''$,而边缘视场的角分辨率则降低至 $64''$;对光斑 80% 能量集中度进行评估,轴上视场和边缘视场光斑的 80% 能量分别集中在半径约 3.2 mm 和 11.5 mm 的圆环内,边缘视场的杂光分布导致光斑的几何半径变大。

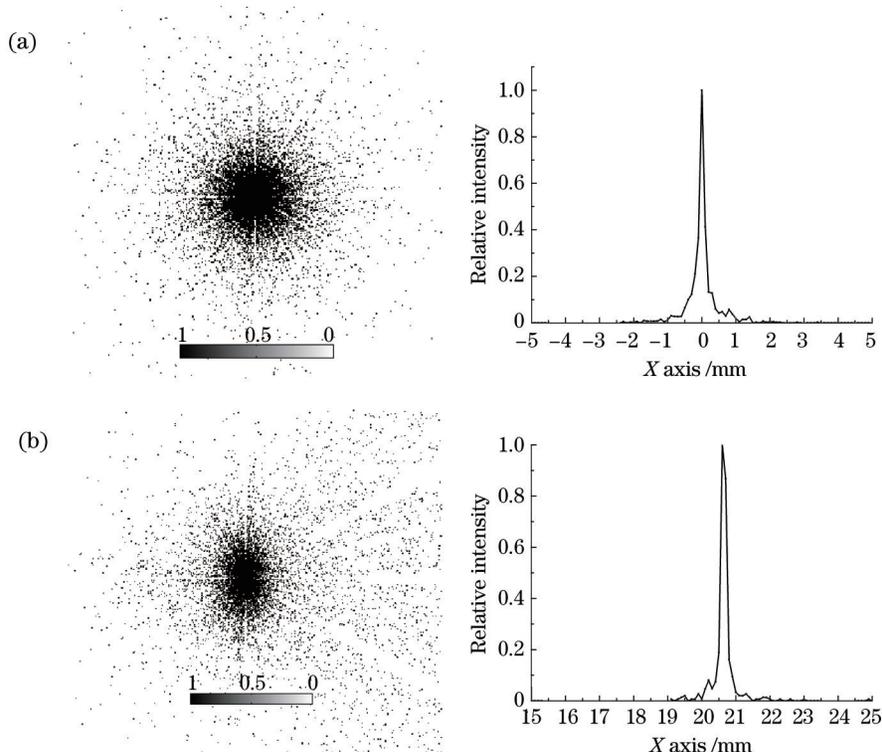


图 7 像面点列图和二维点扩展函数。(a) 0° 视场; (b) $14'$ 视场

Fig.7 Spot diagram on focal plane and 2D histogram of PSF. (a)Source on-axis; (b) $14'$ full field of view

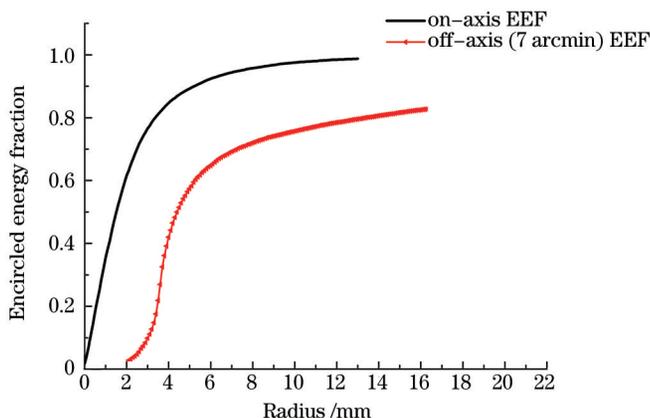


图 8 能量集中度

Fig.8 Encircled energy fraction

3.3 圆度误差

辐条对望远镜系统的影响主要体现在两个方面:首先,辐条引起的光线遮挡会减小系统的有效面积;其次,嵌套结构在由内层向外层组装到辐条的过程中,不可避免会对反射面产生拉伸或压迫的影响,导致圆锥

反射面的圆周产生偏离理想面形的圆度误差,这种圆度误差会影响像面的能量分布,从而降低系统分辨率。图9依次是反射面出现0, 10, 20, 30 μm 圆度偏差时,像面光斑的变化。

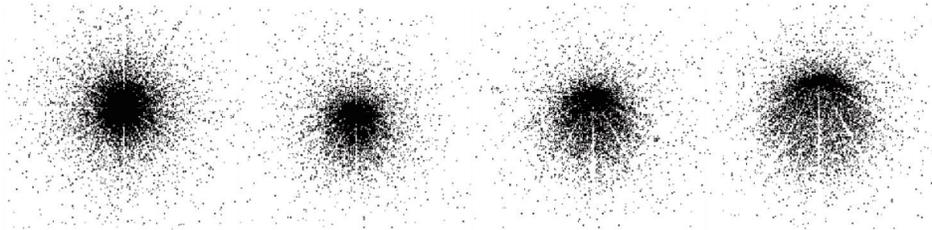


图9 圆度偏差对像面光斑的影响

Fig.9 Mirror bending effects on spot diagram

对追迹光线进行统计得出, 10^6 条平行光线从孔径入射, 大约 45% 的光线经过双锥面两次反射形成像面的会聚光斑, 其余的光线被入口处或出口处的辐条遮挡, 或经次镜反射后被相邻的镜面阻挡, 或只经过一次反射而形成像面杂光。装调引起的反射面圆度误差基本不影响光线到达像面的比例, 但是会引起光斑能量分布的变化, 使系统 HPD 变大, 从而降低分辨率。如图 10 所示。随着圆度误差从 0 μm 变化到 30 μm , 角分辨率从 55" 降低到了 116"。当存在拉伸的圆度偏差, 光斑将如图 9 所示向下弥散, 否则会向上弥散。装调时逐层组装嵌套反射面, 可用该结果分辨和校正圆度偏差。

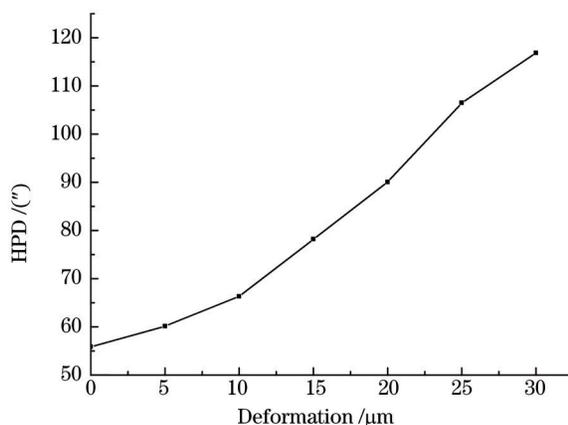


图10 圆度偏差对 HPD 的影响

Fig.10 Mirror bending effects on HPD

4 结 论

针对传统光学软件 Zemax 在掠入射系统分析方面的缺陷, 提出使用 MT_RAYOR 工具库编程对嵌套型双锥结构望远镜进行仿真分析。该望远镜系统由于较小的掠入射角、较多的层数, 以及使用 W/B₁C 多层膜, 获得了在硬 X 射线波段较大的有效面积, 在 20 keV 可达到 250 cm^2 以上的轴上有效面积, 不仅可用于软 X 射线波段成像, 还可用于硬 X 射线波段的观测。该系统视场角约 14'。

根据测得的样品基底面形误差数据, 使用 MT_RAYOR 编程引入辐条结构和反射面的面形误差文件, 对望远镜系统的成像质量分析得出, 该系统轴上分辨率可达到 55"。辐条不仅会引起光线遮挡, 导致系统有效面积下降 17% 左右, 而且在装调过程中可能导致反射面出现圆度偏差。系统 HPD 随着圆度偏差上升, 当存在 30 μm 偏差时, 系统角分辨率将从 55" 下降至 116"。在装调过程中, 要根据光斑弥散方向及时逐层调整反射面的圆度误差。

参 考 文 献

- 1 P S Ray, S I Sheikh, P H Graven, *et al.*. Deep space navigation using celestial X-ray sources[C]. ION National Technical Meeting, 2008 (28-30): 101-109.
- 2 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822002.

- 朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822002.
- 3 P J Serlemitsos. The X-ray telescope onboard Suzaku[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2007, 59(sp1): S9-S21.
- 4 T Tadayuki, M Kazuhisa, R Kelley, *et al.*. The ASTRO-H X-ray observatory[C]. SPIE, 2012, 8443: 84431Z.
- 5 Cui Tiangang, Zhang Hongji, Ma Wensheng, *et al.*. Improvements of surface profile measuring device for Woltertype- I mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412007.
- 崔天刚, 张宏吉, 马文生, 等. Wolter I 型反射镜面形检测装置的改进[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412007.
- 6 F A Harrison, S Boggs, F Christensen, *et al.*. The nuclear spectroscopic telescope array (NuSTAR)[J]. SPIE, 2010, 7732: 77320S.
- 7 Shao Junming, Lu Hongnian, Cai Hui. A point spread function model for X-ray imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1148-1152.
- 邵军明, 路宏年, 蔡 慧. X射线成像的一种点扩展函数模型[J]. 2005, 25(8): 1148-1152.
- 8 Li Shun. The Study on Soft X-ray Grazing Incidence Imaging Optical System Design and Testing Technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 8-33.
- 李 顺. 软 X 射线掠入射成像光学系统设计及检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012: 8-33.
- 9 Li Wen. Research on Mass Storage and Access Technology in Virtual Observatory[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007: 24-43.
- 李 文. 虚拟天文台环境下的海量数据存储与访问技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 24-43.
- 10 Liu Hongying, Mu Baozhong, Wang Zhanshan. Optical design of Wolter- I X-ray astronomical telescope[J]. Optical Instruments, 2012, 34(6): 31-36.
- 刘宏颖, 穆宝忠, 王占山. Wolter- I 型 X 射线天文望远镜的光学设计[J]. 光学仪器, 2012, 34(6): 31-36.
- 11 Liao Zhou, Qiu Qi, Zhang Yudong. Numerical simulation of segmented telescope[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722002.
- 廖 周, 邱 琪, 张雨东. 分块拼接望远镜的数值仿真[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722002.
- 12 N J Westergaard. MT_RAYOR: A versatile raytracing tool for X-ray telescopes[C]. SPIE, 2011, 8147: 81470Y.
- 13 Zhao Xin, Liu Bin. Study on calculation method of the weighted coefficient in X-ray imaging based on variable energy[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0711003.
- 赵 霞, 刘 宾. 变能量 X 射线成像方法中权系数计算方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0711003.

栏目编辑: 韩 峰