

多层嵌套掠入射光学系统研制及在轨性能评价

左富昌 梅志武 邓楼楼 石永强 贺盈波 李连升 周昊 谢军 张海力 孙艳

Development and in-orbit performance evaluation of multi-layered nested grazing incidence optics

Zuo Fu-Chang Mei Zhi-Wu Deng Lou-Lou Shi Yong-Qiang He Ying-Bo Li Lian-Sheng Zhou Hao
Xie Jun Zhang Hai-Li Sun Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 030702 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20191446

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191446>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于矢量像差理论的离轴反射光学系统初始结构设计

Initial configuration design of off-axis reflective optical system based on vector aberration theory

物理学报. 2019, 68(13): 134201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190299>

自适应非凸稀疏正则化下自适应光学系统加性噪声的去除

Removal of additive noise in adaptive optics system based on adaptive nonconvex sparse regularization

物理学报. 2017, 66(12): 129501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.129501>

X射线脉冲星导航动态模拟实验系统研制与性能测试

Development and performance test of dynamic simulation system for X-ray pulsar navigation

物理学报. 2017, 66(5): 059701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.059701>

铜基底上双层至多层石墨烯常压化学气相沉积法制备与机理探讨

Preperations of bi-layer and multi-layer graphene on copper substrates by atmospheric pressure chemical vapor deposition and their mechanisms

物理学报. 2017, 66(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.66.058101>

在轨空间目标光学特性宏观表征模型的反演重构

Inversion and reconstruction of the macroscopic photometric characterization model for on-orbit space object

物理学报. 2017, 66(15): 154201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.154201>

透射光学系统像平面一阶散射光照度分布规律研究

The research on the illumination distribution law of the first-order scattered light in the focal plane of transmission optical system

物理学报. 2017, 66(4): 044201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.044201>

多层嵌套掠入射光学系统研制及在轨性能评价*

左富昌^{1)†} 梅志武¹⁾ 邓楼楼¹⁾ 石永强¹⁾ 贺盈波¹⁾ 李连升¹⁾
周昊¹⁾ 谢军²⁾ 张海力¹⁾ 孙艳¹⁾

1) (北京控制工程研究所, 北京 100190)

2) (北京空间飞行器总体设计部, 北京 100194)

(2019年9月22日收到; 2019年10月17日收到修改稿)

X射线掠入射光学系统是我国首颗脉冲星导航试验卫星主载荷聚焦型脉冲星探测器的核心部件, 在增大探测面积、提高探测器灵敏度方面发挥着重要作用, 实现了国内首次在轨验证. 针对脉冲星导航探测 X 射线光子到达时间的特点, 开展了基于单次抛物面镜反射的掠入射聚焦光学系统设计, 通过理论计算与推导, 获得了可制造的光学系统反射镜设计参数, 光学系统理论有效面积为 $15.6 \text{ cm}^2@1 \text{ keV}$, 对设计的光学系统进行了聚焦性能仿真, 全视场范围内均满足探测器聚焦要求, 开展电铸镍复制工艺研究, 完成了芯轴的超精密控形加工, 在此基础上制造了 4 层金属反射镜, 利用北京同步辐射 4B7B 光束线测试了各层反射镜的反射率, 基于实测反射率的光学系统有效面积为 $13.2 \text{ cm}^2@1 \text{ keV}$. 最后基于在轨观测数据, 评价得到光学系统的有效面积为 $4.22 \text{ cm}^2@1 \text{ keV}$, 分析了地面标定有效面积与在轨评价有效面积存在差别的原因, 验证了设计、仿真与制造方法的正确性, 为大面积掠入射光学系统的研制奠定了基础.

关键词: 多层嵌套, 掠入射光学系统, 研制, 性能评价

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j, 07.85.-m, 81.65.Ps

DOI: 10.7498/aps.69.20191446

1 引言

近年来, 随着我国航天事业的迅速发展, 提高航天器自主导航能力、减少对地面测控站的依赖、降低导航系统的运维成本, 已成为航天技术领域的重点发展方向之一. X 射线脉冲星导航作为新一代全自主导航体制, 受到了人们的广泛关注^[1-5]. 2017 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 在国际空间站成功搭载中子星内部结构探测器 (neutron star interior composition explorer, NICER) 载荷, 验证了 X 射线脉冲星导航的可行性, NICER 集成了 56 台单次反射抛物面形光学系统, 有效面积达 $1800 \text{ cm}^2@1.5 \text{ keV}$ ^[6-8], 仪器探测灵敏度达到

$10^{-5} \text{ ph}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{keV})$. 我国于 2016 年 11 月 10 日发射了脉冲星导航试验卫星 01 星 (X-ray pulsar navigation test satellite No. 1, XPNAV-1), 成功实现了首次在轨“看见”软 X 射线脉冲星, 在轨验证了掠入射聚焦型脉冲星探测器的探测体制. XPNAV-1 的科学载荷为掠入射聚焦型脉冲星探测器^[9], 采用单次反射抛物面形光学系统, 探测灵敏度为 $10^{-3} \text{ ph}/(\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{keV})$, 成功恢复了 Crab 脉冲星轮廓, 获得了 Crab 脉冲星的流量、能谱、光子到达时间等辐射特性^[10,11].

聚焦型脉冲星探测器是 X 射线脉冲星自主导航的核心设备, 相同有效面积的聚焦型探测器的灵敏度比非聚焦型探测器高两个数量级^[12]. X 射线掠入射光学系统是聚焦型脉冲星探测器的核心部

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFB0503300) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zfch-2004@163.com

件, 近年来国内多家单位开展了较深入的研究. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所基于玻璃抛光工艺, 研究了用于太阳软 X 射线观测的光学系统^[13], 同时研究了玻璃热弯工艺^[14]; 同济大学研究了玻璃热弯工艺, 研制了光学系统样机, 测试的角分辨率达到 65"^[15,16]; 中国科学院西安光学精密机械研究所基于玻璃热弯工艺, 研制了 Wolter-I 型 X 射线聚焦镜^[17], 旨在将 Wolter 型光学系统应用于 X 射线通信领域^[18]; 哈尔滨工业大学研究了掠入射金属反射镜加工工艺^[19]; 北京控制工程研究所分别开展了基于玻璃抛光和电铸镍复制的掠入射光学系统研究^[20,21].

本文以 XPNV-1 掠入射聚焦型脉冲星探测器的多层嵌套掠入射光学系统为研究对象, 主要研究单次反射抛物面形光学系统设计与仿真分析、基于电铸镍复制工艺的金属反射镜制造、反射镜性能测试; 基于在轨观测数据, 评价了光学系统的有效面积, 验证了光学设计与制造方法, 为大面积掠入射光学系统的研制奠定了基础.

2 光学系统研制

2.1 光学设计

对于探测大量 X 射线光子到达时间的脉冲星导航而言, 需要牺牲成像所需的高角分辨率, 提高光子通量, 获得仪器的高灵敏度. 使用多层嵌套的抛物面反射镜, 可获得更大的有效面积, 更适合于脉冲星自主导航. NICER 和 XPNV-1 的在轨性能表明, 单次反射掠入射聚焦型光学系统满足脉冲星导航的需求, 在提高导航精度方面起到了核心作用.

单层抛物面反射镜光路如图 1 所示.

图 1 所示为 $x-y$ 平面内入射到抛物面光学反射镜上的三束平行 X 射线的反射情况. 从图 1 可

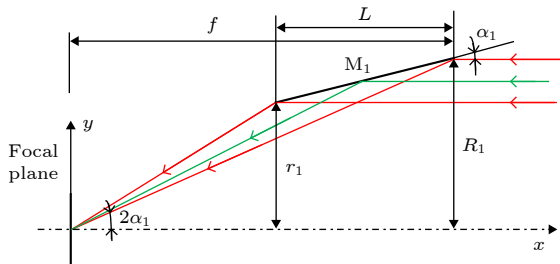


图 1 单层反射镜光路图

Fig. 1. Schematic of optical path of a parabolic mirror.

以看出, 由于抛物面具有会聚作用, 三束平行的 X 射线经其反射后改变方向, 聚焦到一点.

抛物面反射镜的面形公式为

$$x = \frac{1}{2r_0} \cdot y^2 - \frac{r_0}{2}, \quad (1)$$

其中, r_0 为抛物面顶点曲率半径, x 为抛物面轴向坐标, y 为抛物面径向坐标.

对于掠入射抛物面反射镜, 其顶点曲率半径很小, 通常在反射镜参数初始计算中将其忽略, 即抛物面的面形公式可以简化为

$$x \approx \frac{1}{2r_0} \cdot y^2. \quad (2)$$

假设最外层反射镜 M_1 的入口端掠入射角为 α_1 , 焦距为 f , 反射镜长度为 L , 则最外层反射镜的大端半径 R_1 , 顶点曲率半径 $r_{0,1}$, 小端半径 r_1 , 以及几何集光面积 A_1 分别为

$$\begin{cases} R_1 = f \cdot \tan(2\alpha_1), \\ r_{0,1} = f \cdot \tan^2(2\alpha_1)/2, \\ r_1 = \sqrt{2 \cdot r_{0,1} \cdot (f - L)}, \\ A_1 = \pi(R_1^2 - r_1^2). \end{cases} \quad (3)$$

以小端直径为准设计内层反射镜, 会出现内层大端直径小于外层小端直径的情况, 即会有部分入射光从两层反射镜之间直接通过, 而不发生反射. 但通过分析可知, 若以次外层大端直径正好等于外层小端直径为准则设计镜头, 则次外层小端会遮挡外层反射镜反射的光线, 使其无法到达焦平面, 造成更大的无效几何集光面积.

因此, 要以内层反射镜不遮挡外层反射镜反射的光线为原则, 开展嵌套光学系统设计. 假定最外层反射镜为第 1 层, 为了使各层反射镜具有相同的焦距, 越往内层, 反射镜之间的间隙应该越小. 相邻反射镜之间的关系示意图如图 2 所示.

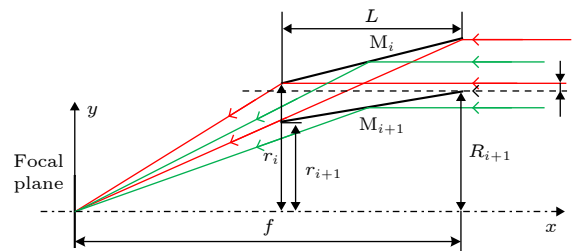


图 2 相邻反射镜之间的关系

Fig. 2. Relationship between adjacent mirrors.

基于 (3) 式中最外层反射镜的参数以及其他内层反射镜的参数递推公式如下:

$$\begin{cases} r_{i+1} = r_i - L \cdot \tan(2\alpha_i) + L \cdot \tan \alpha_i - t, \\ r_{0,i+1} = r_{i+1}^2 / (2f - 2L), \\ R_{i+1} = \sqrt{2 \cdot r_{0,i+1} \cdot f}, \\ \alpha_{i+1} = \arctan(R_{i+1} / f) / 2, \\ A_{i+1} = \pi(R_{i+1}^2 - r_{i+1}^2), \end{cases} \quad (4)$$

其中, t 为反射镜厚度; M_i 表示第 i 层反射镜, 从外至内 $i = 1, 2, 3, \dots, N$; N 为光学系统层数; α_{i+1} 为第 $i + 1$ 层反射镜的入口端掠入射角.

设计的四层嵌套掠入射光学系统参数如表 1 所列.

表 1 光学系统设计参数
Table 1. Designed parameters of the optics.

项目	数值
能量范围/keV	0.2—10
视场/arcmin	$2\omega = 15$
焦距/mm	1100
掠入射角范围/(°)	0.98—1.25
反射镜长度/mm	120
反射镜厚度/mm	0.5
几何面积/cm ²	30

2.2 聚焦性能分析

采用基于空间向量反射的光线追迹方法对掠入射光学系统进行聚焦性能分析, 仿真结果见表 2. 视场范围内的任一光线会在探测器敏感面上形成光斑, 光斑的大小和质心位置随视场发生变化, 边

缘视场的光斑位于直径 5 mm 的硅漂移探测器 (silicon drift detector, SDD) 敏感元范围内, 满足仪器要求.

2.3 反射镜制造

采用 XMM-Newton, eRosita 等的电铸镍复制工艺制造掠入射光学反射镜 [22,23], 该工艺主要包括芯轴超精密加工和反射镜复制, 芯轴超精密加工分为超精车、化学镀镍、磨削、抛光和检测, 反射镜复制分为芯轴镀金、清洗、电铸镍和脱模, 芯轴可重复使用, 实现相同规格反射镜的多次复制, 工艺路线如图 3 所示.

采用长程轮廓仪检测对光学系统性能影响最大的芯轴斜率误差, 检测结果如图 4 所示, 斜率误差的均方根值为 0.42 μm .

制造的芯轴、反射镜、装配完成的光学系统, 以及整星上的光学系统如图 5 所示.

2.4 反射率测试

X 射线反射率取决于反射镜表面粗糙度和镀膜材料, 粗糙度均方根值 σ 与反射率 R 存在以下关系:

$$R(\theta, \lambda) = \left| \frac{\sin \theta - \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\varepsilon - \cos^2 \theta}} \right|^2 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (5)$$

其中, λ 为 X 射线波长, θ 为掠入射角, ε 为反射镜材料决定的系数. 为了提高反射率, σ/λ 必须尽量小, 对于光学系统的设计能段 0.2—10 keV, 表面粗糙度必须优于 0.5 nm (RMS). 白光干涉仪、原

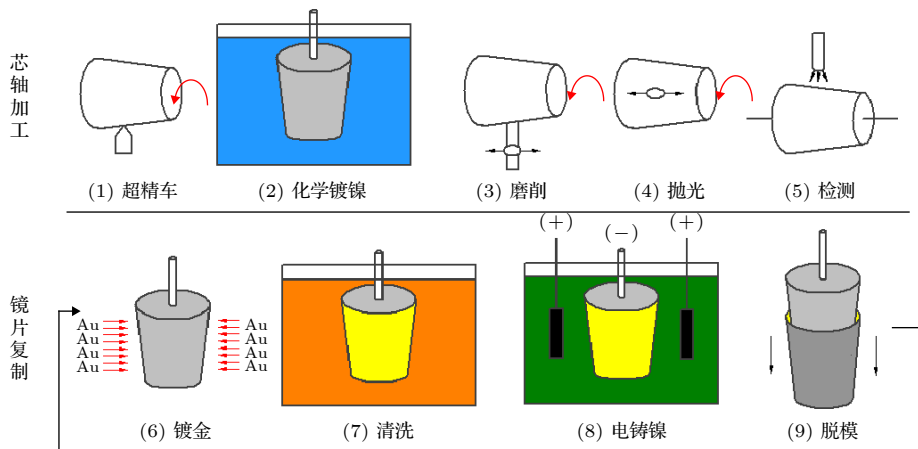


图 3 反射镜加工工艺流程

Fig. 3. Fabrication process for mirrors.

子力显微镜等现有粗糙度检测设备均无法直接检测圆筒状反射镜内表面的粗糙度, 因此根据 (5) 式, 可通过测试反射率间接推导反射镜的粗糙度水平.

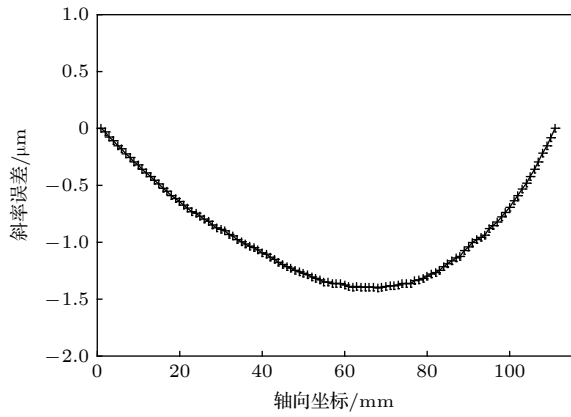


图 4 芯轴斜率误差

Fig. 4. Measured slope profile residual of mandrel.

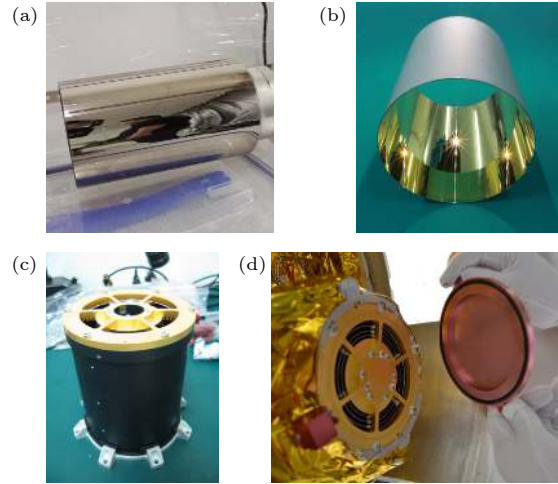


图 5 (a) 复制芯轴; (b) 复制的反射镜; (c) 光学系统; (d) 发射前的光学系统

Fig. 5. (a) Mandrel; (b) mirror replicated; (c) optics assembly; (d) optics on the satellite.

表 2 不同视场下的聚焦情况

Table 2. Focusing performance at different FOVs.

视场/(°)	像斑点列图	质心位置/mm	内环半径/mm	外环半径/mm
0		0	0	0.005
0.05		0.99	0.95	1.03
0.1		1.96	1.84	2.07
0.125		2.43	2.28	2.58

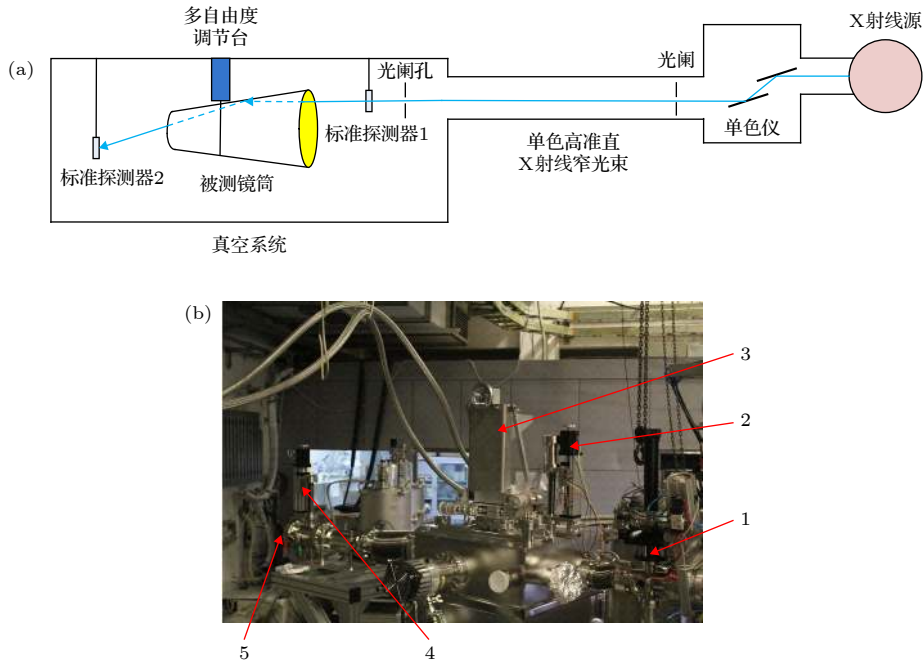


图 6 (a) 反射率测试系统示意图; (b) 反射率测试系统实物图, 其中 1, 光阑孔及调整装置; 2, 标准探测器及调整装置; 3, 反射镜调整装置; 4, 测试探测器及调整装置; 5, 观察窗

Fig. 6. (a) Schematic of reflectivity measurement system; (b) photo of reflectivity measurement system, where, 1, aperture and its adjusting device; 2, standard detector and its adjusting device; 3, mirror adjusting device; 4, measurement detector and its adjusting device; 5, observation window.

反射率测试系统见图 6, 安装于中国科学院高能物理研究所的北京同步辐射 4B7B 束线末端, 主要由光阑孔及调整装置、前置标准探测器、反射镜安装真空腔体、反射镜调整装置、后置探测器和观察窗组成。将反射镜固定在多自由度调节台上, 由单色仪选出的一定波长的 X 射线经滤片滤除高次谐波, 通过光阑将杂散光滤除, 照射到前置探测器上, 得到入射光强度, 将前置探测器移出光路, 再由后置探测器测出反射镜反射的反射光强度, 二者比值即为反射镜在特定波长下的反射率, 通过单色仪的能量扫描, 获得反射镜随波长变化的反射率曲线。

以入口端的掠入射角作为反射镜的平均掠入射角, 通过调整反射镜相对于光束线的角度, 分别测试了四层反射镜在其平均掠入射角下 0.08—1.6 keV 能量范围的反射率, 结果见图 7, 从外至内四层反射镜的反射率典型值分别为 0.679@1 keV, 0.596@1 keV, 0.658@1 keV 和 0.719@1 keV。从图 7 可以看出, 反射镜 2 和反射镜 4 的平均掠入射角小于反射镜 1 的, 实测反射率却低于反射镜 1 的, 根据 (5) 式推导得到反射镜 2 和反射镜 4 的均方根粗糙度分别为 0.95 和 0.87 nm, 反射镜 1 的均

方根粗糙度为 0.41 nm, 表明反射镜的加工工艺稳定性有待进一步提高。

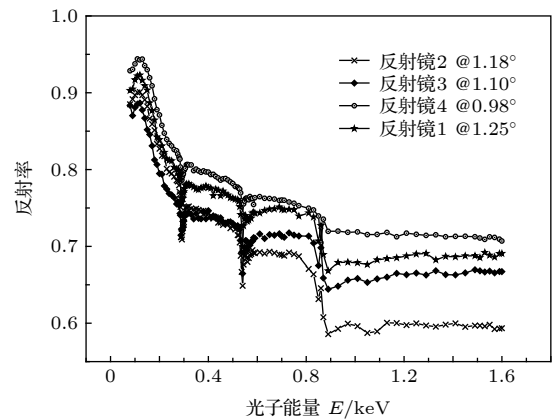


图 7 实测反射率

Fig. 7. Measured reflectivity.

2.5 地面标定有效面积

掠入射光学镜头的有效面积 A_{eff} 定义为: 能够在光学系统焦平面产生光子通量的理想光学系统的面积, 可通过以下公式得到:

$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_{\text{eff},i} \approx \sum_i A_i R(\theta, \lambda). \quad (6)$$

以表面粗糙度为 0.5 nm(RMS) 和反射面镀金为输入条件, 计算反射镜在平均掠入射角下的反射率, 结合图 7 中各层反射镜的实测反射率, 以及反射镜的几何集光面积与结构对反射镜的遮挡面积, 得到光学系统的理论有效面积曲线和基于实测反射率的有效面积, 结果如图 8 所示.

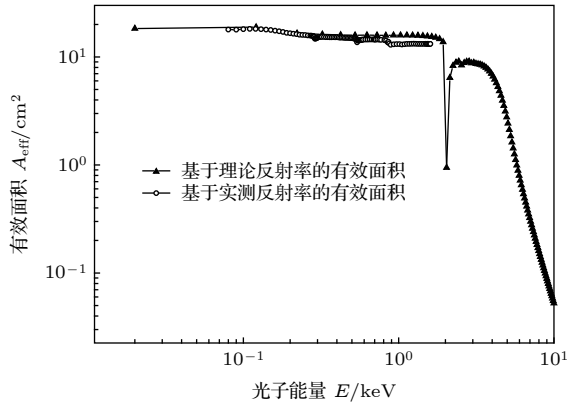


图 8 基于实测反射率与理论反射率的有效面积

Fig. 8. Effective areas based on measured and theoretical reflectivity.

从图 8 可知, 基于理论反射率的有效面积典型值为 $15.6 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$, 基于实测反射率的有效面积典型值为 $13.2 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$. 两个典型值存在差别的主要原因是反射率测试过程中标准探测器调整误差、掠入射角测量误差、入射光发散角和反射镜表面粗糙度局部较差等.

3 在轨性能评价

自 2016 年 11 月 10 日入轨以来, 掠入射聚焦型脉冲星探测器取得了大量观测数据, 通过在轨数据分析、观测目标源特性分析, 以及脉冲星探测器的设计参数, 对多层嵌套掠入射光学系统的在轨有效面积进行了评价.

3.1 目标源特性

在探测器主任务期间, 进入 Crab 脉冲星观测状态, 获取了探测器在不同时段内的 Crab 观测数据. 探测器观测 Crab 脉冲星, 每个观测时段内探测器观测到的光子计数率平均流量如图 9 所示. 在主任务观测期间, 探测器观测得到的光子计数率稳定, 平均计数率为 $14.7 \text{ counts/s}^{[11,24]}$.

对探测器得到的光子能量信息进行统计, 得

到 Crab 脉冲星的能谱信息, 能谱 0.5—5.0keV 能段内的光子能谱信息如图 10 所示, 可以得到脉冲星辐射的光子能量近似呈幂律谱分布.

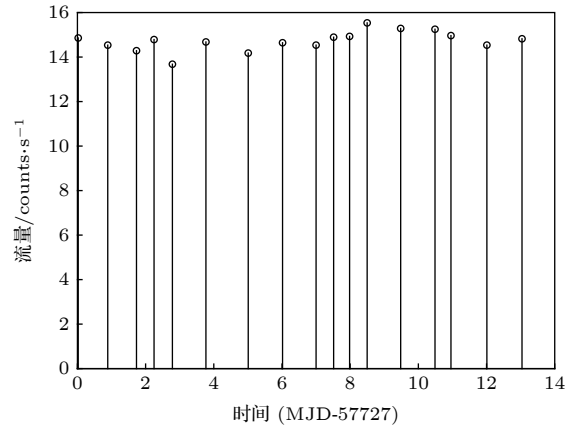


图 9 Crab 脉冲星流量时变特性

Fig. 9. Time-varying characteristics of Crab pulsar flux.

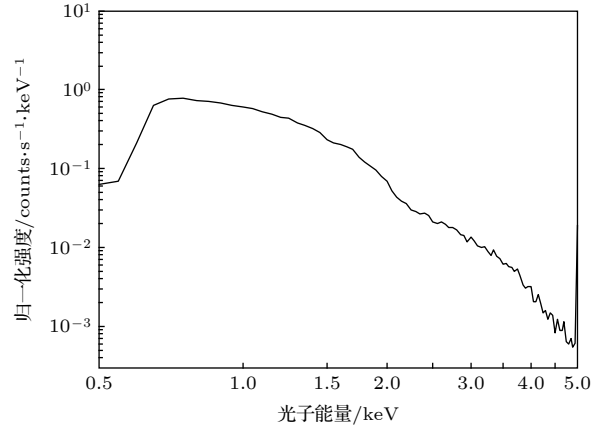


图 10 Crab 脉冲星能谱特性

Fig. 10. Spectra of Crab pulsar flux.

Crab 星云软 X 射线波段辐射从约 $100'' \times 100''$ 的天区发出. Crab 星云软 X 射线波段辐射由两部分组成: 星云背景辐射和 Crab 脉冲星辐射.

Crab 星云的辐射流强符合以下分段拟合的解析式 (单位: $\text{counts/cm}^2/\text{s}/\text{keV}$):

$$\begin{cases} I(E) = 20.7555 - 124.6E + 187E^2, & 0.3\text{--}0.5 \text{ keV}; \\ I(E) = -13.925 + 38.59E - 19.5E^2, & 0.5\text{--}0.9 \text{ keV}; \\ I(E) = 8.52853 - 4.65161E + 0.71452E^2, & 0.9\text{--}5.0 \text{ keV}. \end{cases} \quad (7)$$

其中, I 为辐射流强, E 为 X 射线光子能量.

3.2 SDD 量子效率

嵌套型 X 射线掠入射光学系统将 Crab 脉冲星 X 射线光子聚焦到 SDD 探测器上, 因此 SDD 探测器的响应曲线也会影响光学系统的性能评价.

根据 SDD 探测器使用手册, 分段拟合得到 0.2—5.0 keV 的 SDD 量子效率解析式如下:

$$\begin{cases} QE(E) = -0.30125 + 1.34673E - 0.37946E^2, \\ \quad 0.2 - 1.6 \text{ keV}; \\ QE(E) = 0.19147 + 0.26572E - 0.02258E^2, \\ \quad 1.6 - 5.0 \text{ keV}. \end{cases} \quad (8)$$

3.3 有效面积评价

光学系统在 0.3—5.0 keV 能量范围内的效率为

$$\begin{aligned} \eta_{\text{in-orbit}}(E) &= \frac{F_{\text{observer}}(E)}{F_{\text{radiated}} \cdot QE(E)} \\ &= \frac{F_{\text{observer}}(E)}{I(E) \cdot QE(E) \cdot A_{\text{ap}}}. \end{aligned} \quad (9)$$

有效面积为

$$A_{\text{eff}}(E) = \frac{F_{\text{observer}}(E)}{I(E) \cdot QE(E)}. \quad (10)$$

根据观测数据 F_{observer} , Crab 脉冲星目标源特性 (7) 式和 SDD 探测器响应曲线 (8) 式, 计算得到光学系统的有效面积曲线如图 11 所示.

从图 11 可以看出, 光学系统有效面积最大值为 $6.84 \text{ cm}^2 @ 0.7 \text{ keV}$, 典型值为 $4.22 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$; 0.3—0.7 keV 能量范围内有效面积随能量增大而增大, 0.7—5.0 keV 能量范围内有效面积随能量增大而减小.

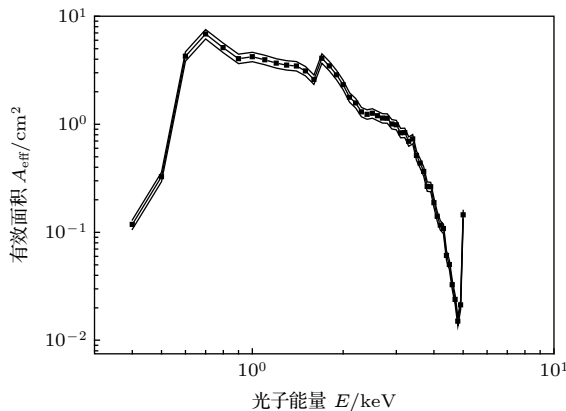


图 11 基于观测数据评价的有效面积曲线

Fig. 11. Evaluated effective area based on in-orbit data.

3.4 结果分析

对比地面标定有效面积曲线和在轨评价有效面积曲线可知, 典型值从 $13.2 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$ 下降为 $4.22 \text{ cm}^2 @ 1 \text{ keV}$, 且 0.3—0.7 keV 能段的在轨评价有效面积变化趋势与理论结果不符, 原因分析如下.

1) 反射镜污染, 导致 X 射线光子散射, 造成反射率下降. 如图 4(d) 所示, 星箭对接前将光学系统前端的防尘盖取下, 对光学系统状态进行目视检查, 肉眼可见明显的颗粒状污染物, 反射镜表面的洁净度较测试反射率时出现了明显的恶化; 国外研究过颗粒污染物和分子污染物对 X 射线光子的散射作用 [25,26], 研究表明, X 射线能量越低, 污染物造成有效面积下降越大, 可作为反射镜污染造成有效面积下降和低能段变化趋势与理论不符的证据, 后续将深入研究反射镜污染对光学性能的影响.

2) 空间热变形导致光学系统与后端 SDD 探测器之间的相对位置发生变化, 造成反射的部分 X 射线光子无法入射到探测器敏感元. X 射线掠入射聚焦型脉冲星探测器整体为细长筒状结构, 长径比达 10:1, 光学系统和 SDD 探测器的工作温度相差近 $70 \text{ }^\circ\text{C}$, 加之复杂热环境的影响, 仪器整体易发生非均匀热变形, 导致光学系统与 SDD 探测器之间产生相对位置偏差. 同时, 镜片发生热变形也可能是 X 射线偏出探测器敏感范围, 造成有效面积下降.

3) 此外, Crab 脉冲星在 0.3—0.7 keV 能段的流强低, 且 SDD 探测器在 0.3—0.7 keV 能段的量子效率低, 从而造成该能段有效面积评价的不确定度增大.

4 结 论

通过多层嵌套型掠入射光学系统的光学设计和各层反射镜之间的递推关系推导, 获得了合理的光学系统初始结构参数, 并开展了聚焦性能分析; 在此基础上, 采用电铸镍复制工艺加工了超光滑金属反射镜, 并测试了其反射率, 最后根据在轨数据分析、观测目标源特性分析和脉冲星探测器设计参数, 评价了光学系统的在轨有效面积, 发现热变形和污染造成了有效面积的下降. 因此, 后续在大面积多层嵌套 X 射线掠入射光学系统研制过程中,

除控制光学系统本身的精度外, 还需要严格控制环境因素, 同时需要考虑在轨环境, 深入开展空间环境适应性设计与分析工作。

感谢中国科学院高能物理研究所刘树虎老师在反射率测试方面的指导与交流, 感谢中国科学技术大学的邱克强、刘正坤老师在芯轴面形测试方面的讨论。

参考文献

- [1] Paul S R, Kent S W, Michael N L, Michael T W 2006 *J. Guid. Control Dynam.* **29** 1
- [2] Keith C G, Zaven A, Takashi O 2012 *Proc. SPIE* **8443** 844313
- [3] Jason W M, Munther A H, Luke M B W, Jennifer E V, Samuel R P, Sean R S, Wayne H Y, Zaven A, Paul S R, Kent S W, Ronald J L, Keith C G 2015 *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference* Kissimmee, USA, January 5-9, 2015 AIAA 2015-0865
- [4] Xiong K, Wei C L, Liu L D 2016 *Acta Astronaut.* **128** 473
- [5] Wang Y D 2016 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [王奕迪 2012 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [6] Craig M, Jack S, Teruaki E, Michael L, Beverly J L 2018 *Proc. SPIE* **10699** 106991V
- [7] Takashi O, Yang S, Erin R B, Teruaki E, Larry O, Richard K, Larry L, John K, Sean F, Ai N, Steven J K, Zaven A, Keith G 2016 *Proc. SPIE* **9905** 99054X
- [8] Luke M B W, Jason W M, Munther A H, Samuel R P, Sean R S, Wayne H Y, Paul S R, Michael T W, Matthew K, Kent S W, Zaven A, Keith C G, Lucas G, Ismael C, Paul D, Ben S, Andrew L 2018 *Proceedings of SpaceOps Conference* Marseille, France, May 28-June 1, 2018 p2538
- [9] Li L S, Deng L L, Mei Z W, Lv Z X, Liu J H 2018 *JME* **54** 23 (in Chinese) [李连升, 邓楼楼, 梅志武, 吕政欣, 刘继红 2018 *机械工程学报* **54** 23]
- [10] Zhou Q Y, Wei Z Q, Jiang K, Deng L L, Liu S W, Ji J F, Ren H F, Wang Y D, Ma G F 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 050701 (in Chinese) [周庆勇, 魏子卿, 姜坤, 邓楼楼, 刘思伟, 姬剑锋, 任红飞, 王奕迪, 马高峰 2018 *物理学报* **67** 050701]
- [11] Deng L L, Mei Z W, Li L S, Wang Y, Shi H, Xiong K, Lv Z X, Mo Y N, Wang L, Zuo F C, Chen J W, Shi Y Q, Xu C 2017 *Proc. IAC* **7** 4347
- [12] Brian R, Ron E, Darell E, Misha G, Jeffery K, Steve O D, Chet S, Martin W 2004 *Proc. SPIE* **5168** 0277
- [13] Wang Y G, Cui T G, Ma W S, Chen B, Chen B 2011 *Optics and Prec. Eng.* **19** 743 (in Chinese) [王永刚, 崔天刚, 马文生, 陈斌, 陈波 2011 *光学精密工程* **19** 743]
- [14] Zhao D C 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [赵大春 2016 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]
- [15] Liao Y Y, Shen Z X, Huang Q S, Wang Z S 2017 *Proc. SPIE* **10399** 103990L
- [16] Shen Z X, Yu J, Ma B, Zhang Z, Huang Q S, Wang X Q, Wang K, Zuo F C, Lü Z X, Wang Z S 2018 *Proc. SPIE* **10699** 106991B
- [17] Li L S, Qiang P F, Sheng L Z, Liu Z, Zhou X H, Zhao B S, Zhang C M 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 200701 (in Chinese) [李林森, 强鹏飞, 盛立志, 刘哲, 周晓红, 赵宝升, 张淳民 2018 *物理学报* **67** 200701]
- [18] Sheng L Z, Zhao B S, Qiang P F, Liu D 2016 *Proc. SPIE* **10328** 103280M
- [19] Kong F X 2018 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [孔繁星 2018 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [20] Zuo F C, Mei Z W, Ma T, Deng L L, Shi Y Q, Li L S 2016 *Proc. SPIE* **9796** 97961O
- [21] Zuo F C, Deng L L, Mei Z W, Li L S, Lü Z X 2014 *Proc. SPIE* **9250** 925004
- [22] Peter F, Heinrich B, Bernd B, Wolfgang B, Vadim B, Konrad D, Josef E, Michael F, Roland G, Gisela H, Benedikt M, Elmar P, Peter P, Christian R, Reiner S 2012 *Proc. SPIE* **8443** 84431S
- [23] David H L, Norbert S, Fred A J 2012 *Opt. Eng.* **51** 011009
- [24] Shi Y Q, Deng L L, Lü Z X, Mei Z W 2018 *Acta Astronomica Sin.* **59** 44 (in Chinese) [石永强, 邓楼楼, 吕政欣, 梅志武 2018 *天文学报* **59** 44]
- [25] Odell S L, Elsner R F, Kolodziejczak J J, Weisskopf M C, Hughes J P, Speybroeck L P V 1992 *Proc. SPIE* **1742** 171
- [26] Kellogg E, Chartas G, Graessle D E, Hughes J P, Speybroeck L P V, Zhao P, Weisskopf M C, Elsner R F, Odell S L 1992 *Proc. SPIE* **1742** 183

Development and in-orbit performance evaluation of multi-layered nested grazing incidence optics*

Zuo Fu-Chang^{1)†} Mei Zhi-Wu¹⁾ Deng Lou-Lou¹⁾ Shi Yong-Qiang¹⁾
He Ying-Bo¹⁾ Li Lian-Sheng¹⁾ Zhou Hao¹⁾ Xie Jun²⁾
Zhang Hai-Li¹⁾ Sun Yan¹⁾

¹⁾ (*Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China*)

²⁾ (*Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100194, China*)

(Received 22 September 2019; revised manuscript received 17 October 2019)

Abstract

On November 10, 2016, China launched an X-ray pulsar navigation test satellite (XPNAV-1) to investigate the X-ray pulsar navigation technology, and a lot of scientific observation data have been obtained. The X-ray grazing incidence optics is a critical component of the focusing pulsar telescope. It plays an important role in increasing the effective area and enhancing the sensitivity of the telescope. It is also the first grazing incidence optics verified in orbit in China. According to the characteristic that the times of arrival (TOA) of X-ray photons are measured in pulsar navigation, the grazing incidence focusing optics based on single-reflection paraboloid mirror is designed, and manufacturable mirror design parameters are obtained through theoretical calculation and derivation. The theoretical effective area of the designed optics is 15.6 cm² at 1 keV. The designed optics is then simulated to evaluate its focusing performance. It meets the focusing requirement in the full field of view. The electroforming nickel replication process used for manufacturing the mirrors for XMM-Newton and eRosita missions is investigated. A super-smooth mandrel is firstly fabricated and used for follow-up replication. An about-100 nm-thick gold layer is deposited on the mandrel, and serves as the reflection and release layer of the mirror. The nickel substrate of the mirror is electroformed on the gold layer. The mirror is finally obtained by releasing the nickel and gold layer from the mandrel. The patterns and roughness of the mandrel are then replicated onto the inner surface of the mirror. The 4-layered mirror is fabricated for the optics. The reflectivity for each layer of the 4-layered mirror is then measured with a dedicated facility on 4B7B beamline of BSRF. The effective area of the optics based on the above-measured reflectivity is 13.2 cm² at 1 keV. Finally, according to the in-orbit observation data, the effective area of the optical system is evaluated to be a typical value of 4.22 cm² at 1 keV, which is less than the ground-tested value. The reason for this is analyzed and it turns out to be due to the thermal deformation of mechanical structure and contamination of the mirrors. Therefore, in our future work, we will strictly control the environmental factors and implement space environmental adaptability design, while increasing the accuracy of the optics.

Keywords: multi-layer nested, grazing incidence optics, development, performance evaluation

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j, 07.85.-m, 81.65.Ps

DOI: 10.7498/aps.69.20191446

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFB0503300).

† Corresponding author. E-mail: zfch-2004@163.com