

doi: 10.3788/gzxb20174604.0422005

应用于软 X 射线成像探测的 Angel 型龙虾眼 光学系统研究

胡慧君, 宋娟, 李文彬, 孙书坤, 金东东, 王文丛, 邵思霏

(山东航天电子技术研究所, 山东 烟台 264000)

摘 要: 龙虾眼光学聚焦系统是一种模仿龙虾视觉的光学系统, 适用于卫星平台上的软 X 射线成像探测. 根据掠入射原理, 分析和计算了 Angel 型龙虾眼光学系统采用不同金属镀膜时光子能量和全反射临界角、反射率的定量关系; 提出一种计算龙虾眼光学系统有效探测面积的方法, 推导了相关的理论计算公式并进行了蒙特卡罗仿真试验, 理论计算值与蒙特卡罗仿真结果吻合很好, 龙虾眼 X 射线光学系统在 1~10 keV 能段的有效面积与光子能量近似呈负指数关系, 具体的参量与镀膜的粗糙度有关.

关键词: X 射线探测; 脉冲星导航; 光学聚焦系统; 反射率; 有效面积

中图分类号: TH74

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)04-0422005-7

Research on Angel Lobster-eye Focusing Optical System Applied in Soft X-ray Detection

HU Hui-jun, SONG Juan, LI Wen-bin, SUN Shu-kun, JIN Dong-dong,

WANG Wen-cong, SHAO Si-pei

(Shandong Institute of Space Electronic Technology, Yantai, Shandong 264000, China)

Abstract: Lobster-eye is an optical focusing system that simulates the lobster vision, and is very suitable for applying in the X-ray pulsar imaging detection on the satellite platforms. Based on the principle of grazing incidence, theoretically quantitative relationship between photon energy and full reflection critical angle and reflectivity for different metallic film are studied. A method for calculating the effective detection area of the Angel lobster-eye optical system is proposed, and formulas are deduced. Monte-Carlo experiment results is agree with the theoretical figure. In the range of 1~10 keV, the effective detection area of the lobster-eye optical system is approximately negative exponential function of photon energy, specific parameters depending on film roughness.

Key words: X-ray detection; Pulsar navigation; Optical focusing system; Reflectivity; Effective area

OCIS Codes: 220.2740; 220.4830; 040.7480; 040.1880; 340.7440; 340.7480; 160.4670

0 引言

X 射线脉冲星^[1]自主导航技术, 是一种基于 X 射线脉冲星发射的高稳定脉冲信号和脉冲星空间位置, 为航天器提供位置参量的导航技术^[2]. 它具有可靠性高、稳定性好、准确度高、不受地面控制等明显优势^[3]. 脉冲星是一种高速旋转的中子星, 且具有极其稳定的周期性^[4], 毫秒级脉冲星的自转周期长期稳定度可以达到 $10^{-19} \sim 10^{-21}$, 被誉为自然界最稳定的天文时钟^[5], 脉冲星在自转过程中, 磁轴和自转轴并不重合, 两个磁极各有一个辐射波束. 当星体自转且磁极波束扫过安装在地面或航天器上的探测器时, 探测器就能够接收到

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2013CB733000)资助

第一作者: 胡慧君(1978-), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为脉冲星导航理论、算法和探测技术. Email: wubian_2002@163.com

通讯作者: 宋娟(1984-), 女, 工程师, 博士, 主要研究方向为脉冲星导航探测技术. Email: songjuan513@126.com

收稿日期: 2016-10-28; 录用日期: 2017-02-09

<http://www.photon.ac.cn>

一个脉冲信号. X 电磁波频段是脉冲星发射的高能 X 射线, 其辐射能量集中, 易于被小型化设备探测与处理. 因此, X 射线探测技术是能够实现 X 射线脉冲星导航的关键技术之一.

X 射线脉冲星导航探测器可分准直型^[6]和聚焦型两种. 准直型探测器前端为准直器, 可以限制探测器视场, 后端为光电转换器件, 实现光信号到电信号的转换. 准直型探测器具有结构简单、成本低等优点, 但由于本身没有聚光功能, 空间背景噪声较大, 限制了其在空间 X 射线观测方面的进一步发展.

聚焦型探测器具备背景噪声小、灵敏度高等特点, 是未来空间 X 射线观测的主要发展趋势. 然而, 由于 X 射线波长极短, 几乎所有介质对其的折射率都接近于 1, 因此传统的通过折射的方式很难实现聚焦. 目前, X 射线的聚焦多采用掠入射的方式, 典型的掠入射光学系统包括 K-B 型光学系统^[7]、Wolter 型光学系统^[8]等, 这些光学系统虽然具有较高的空间分辨力, 但是存在焦距过长、重量过大等缺点, 不能满足脉冲星导航探测器小型化需求.

龙虾眼(lobster-eye)是一种模仿龙虾^[9]视觉的光学系统, 它由多个通道的掠入射反射镜构成, 结构上的球对称性决定了它没有特定的光轴, 任意方向上的聚焦能力都相同, 因此具有其它掠入射光学系统无法企及的大视场特性. 龙虾眼光学系统又可分为 Schmidt^[10]和 Angel 型^[11], 其中, Schmidt 型光学系统是由两个一维结构的多组平面反射镜正交叠加得到, 构造相对简单, 适合于大型、高集光面积的系统; 而 Angel 型光学系统由许多排列在球面上的微小矩形元胞组成^[12], 构造复杂, 但具有焦距短、重量轻等特点, 有利于脉冲星导航小型化探测器研制. 本文主要对 Angel 型龙虾眼光学系统的聚焦特性进行研究.

1 龙虾眼聚焦原理

龙虾眼光学系统由许多排列在球面上的微小矩形元胞组成, 与实际的龙虾眼结构相似. 入射的 X 射线光子在光学系统矩形元胞侧壁上发生全反射, 从而改变 X 射线传播方向, 通过光学系统的几何结构设计实现对 X 射线光子的聚焦功能.

龙虾眼光学系统矩形元胞的侧壁为反射镜面, 矩形元胞的由 X 和 Y 两个方向正交侧壁组成, 见图 1 所示, X 射线在 X 方向侧壁发生奇数次反射, 在 Y 方向的侧壁发生偶数次反射后的光为 OE 光, 在 X 方向侧壁发生偶数次反射, 在 Y 方向的侧壁发生奇数次反射后的光为 EO 光, 在 X 方向 Y 方向的侧壁都发生奇数次反射的光为 OO 光, 在 X 方向 Y 方向的侧壁都发生偶数次反射的光为 EE 光. EO 光和 OE 光都实现 X 射线单方向聚焦, 聚焦后形成 X 方向和 Y 方向十字架, OO 光实现 X 射线两个方向聚焦, X 射线聚焦在焦平面中心焦点处, EE 光不能实现 X 射线聚焦, 在焦平面形成背景.

龙虾眼光学系统微型聚焦元胞反射面垂直于半径为 R 的球面上, 且矩形元胞反射面延长线都通过这一圆弧的曲率中心. 设龙虾眼光学系统的焦距为 f , X 射线源物距为 l_s , 则像距 l_f 可以根据球面反射镜的高斯公式^[13]求出, 即

$$\frac{1}{l_s} - \frac{1}{l_f} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (1)$$

当龙虾眼光学系统作为脉冲星探测器镜头使用时, $l_s = \infty$, 物距 $l_f = f = R/2$, 即平行入射的 X 射线汇聚在龙虾眼的焦平面上.

龙虾眼光学系统聚焦效率和有效面积主要由镜头几何参量及表面镀层材料决定, 龙虾眼聚焦镜头几何参量包括: 镜面曲率半径 r , 镜面宽度 a , 镜面长度 h , 镜面厚度 t , 镜面数量 n , 见图 2.

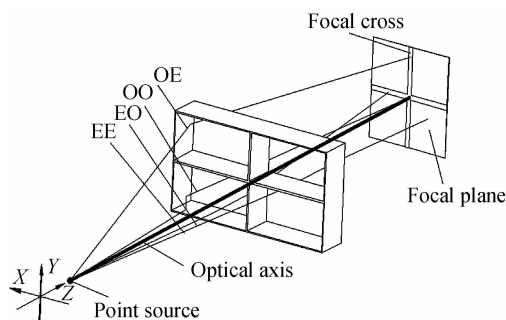


图 1 龙虾眼聚焦方式

Fig. 1 Focusing mode of lobster-eye

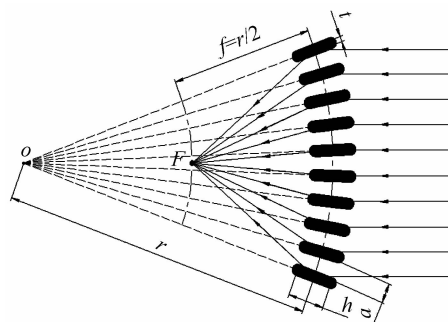


图 2 龙虾眼聚焦镜头设计参量

Fig. 2 Focusing lens design parameters of lobster-eye

龙虾眼光学系统聚光效率和有效面积还与 X 射线的光子能量以及反射镜膜层的物理性质有关. 原子序数越高的材料的全反射临界角越大, 因此为提高反射效率, 需要采用高原子序数金属膜作为反射膜层. 结合脉冲星辐射特性, 龙虾眼聚焦镜头微孔阵列长宽比选择为 50^[14], 龙虾眼光学系统的参量为: 聚焦镜头外形尺寸 40 mm×40 mm; 镜面曲率半径 $r=750$ mm; 镜面宽度 $a=20$ μm ; 镜面长度 $h=1$ mm; 表面粗糙度 1 nm.

2 Angel 龙虾眼的聚焦特性分析

2.1 全反射临界角

根据菲涅耳定律可以得到

$$\theta_r = \theta_i \quad (2)$$

$$\cos \theta_i = n \cdot \cos \theta_r \quad (3)$$

式中 θ_i 和 θ_r 分别为入射光线和反射光线与界面之间的夹角, θ_t 为折射光线与界面之间的夹角. 由于 X 射线在介质内部随传播距离呈负指数衰减, 并且 X 射线在介质中的吸收系数 β 较大, 因此基于折射方式的聚焦原理不适用于 X 射线. 在计算 X 射线光束的折反射时, 采用折射率的实部近似 $n \approx 1 - \delta$, 在 X 射线波段 $\delta < 10^{-4}$, 因此折射率 n 略小于 1, 由式(3)可知, 在 X 射线发生全反射时, $\theta_t = 0$, 全反射临界角 θ_c 满足 $\cos \theta_c = n \rightarrow 1$, θ_c 趋近于 0, 为无穷小量, 采取二阶近似可得到临界角 θ_c 为

$$\theta_c = \sqrt{2\delta} \quad (4)$$

δ 和 β 描述介质的极化特性, 与原子的散射因子 $f = f_1 + i \cdot f_2$ 有关, 即

$$\delta = \frac{r_e \lambda^2 N f_1}{2\pi} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4), 做适当近似处理可得全反射临界角的计算公式为

$$\theta_c = \sqrt{\frac{r_e N Z}{\pi}} \lambda \sim \frac{\sqrt{Z}}{E} \quad (6)$$

式中^[15], $r_e = 2.8178 \times 10^{-15}$ m, 为电子经典半径, λ 为入射 X 射线波长, N 为原子数密度, $f_1 = Z - \left(\frac{Z}{82.5}\right)^{2.37} + \frac{1}{\pi r_e h c} \int_0^\infty \frac{\epsilon^2 \sigma_a(\epsilon)}{E^2 - \epsilon^2} d\epsilon$, $f_2 = \frac{\sigma_a}{2\lambda r_e}$, Z 是介质的原子序数, E 是入射光子能量.

图 3 给出了几种金属材料的临界反射角与 X 射线入射能量的关系: 对比同一曲线不同能量点下的临界反射角可知, X 射线光子能量越大, 全反射临界角越小; 对比不同曲线可知, 原子序数越高的材料的全反射临界角越大. 为提高龙虾眼镜头反射膜的反射效率, 采用金属铱作为膜材料, 可将 1keV 光子的临界角增大到 4°.

2.2 反射率

对于理想光滑表面, 根据菲涅耳公式以掠入射角 θ 入射的 X 射线光子的反射率可以表示为

$$R(\theta, E, Z) = \frac{(a - \sin \theta)^2 + b^2}{(a + \sin \theta)^2 + b^2} \quad (7)$$

式中, a, b 是掠入射角 θ , X 射线光子能量 E 及介质材料 Z 和密度 ρ 的函数, 即

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{[(\sin \theta)^2 - 2\delta]^2 + 4\beta^2} + [(\sin \theta)^2 - 2\delta]} \quad (8)$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\sqrt{[(\sin \theta)^2 - 2\delta]^2 + 4\beta^2} - [(\sin \theta)^2 - 2\delta]} \quad (9)$$

根据式(7)~(9), 计算出不同的掠入射角下 X 射线光子能量和反射率之间的曲线关系, 见图 4.

根据图 4 可获知以下信息: 反射率随光子能量的增大而减小, 随掠入射角的增大而减小; 反射率的截断

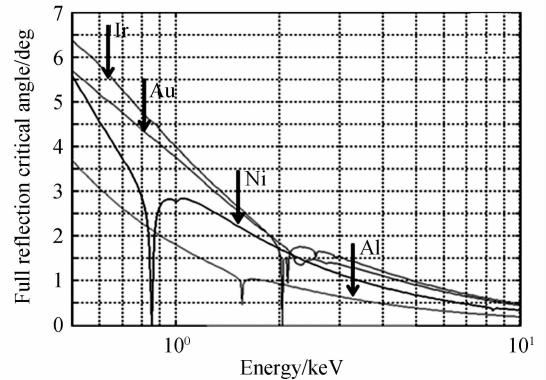


图 3 全反射临界角与 X 射线光子能量的关系
Fig. 3 Relation between Full reflection critical angle and X-ray photon energy

值随掠入射角的增大而左移。

实际上,受制于工艺水平等因素的限制,理想表面是不存在的,介质表面总是凹凸不平,因此需要对算法进行修正.通常用粗糙度指标 σ 衡量薄膜凹凸不平的程度,修正后的反射率与粗糙度等其他参量的关系为^[16]

$$\tilde{R} = R(\theta, E, Z) \cdot e^{-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta}{\lambda}\right)^2} \quad (10)$$

根据式(10)计算不同光子能量入射时,铱膜反射率在粗糙度 1 nm 时的随掠入射角与反射率的关系曲线如图 5 所示,通过该图可以直接查找关心的参量情况.

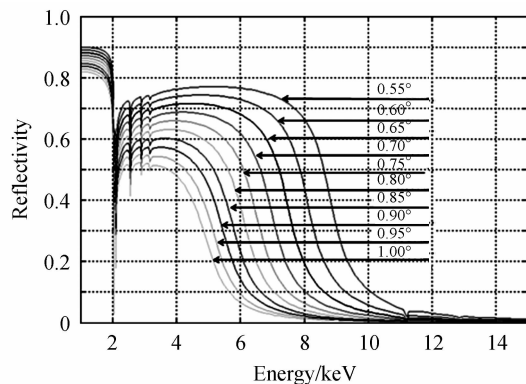


图 4 铱反射率与 X 射线能量的关系
Fig. 4 Reflectivity vs X-ray energy

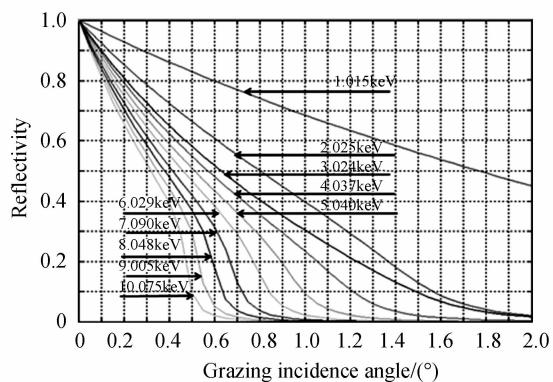


图 5 铱反射率与掠入射角的关系曲线@1 nm 粗糙度
Fig. 5 Reflectivity vs grazing incidence @ 1 nm roughness

2.3 有效面积理论计算

龙虾眼光学系统由上百万个长方形元胞均匀排列在半径为 750 mm 的球面上组成,其外形见图 6 所示.

当一束平行光线入射时,龙虾眼光学系统的每个元胞的掠入射角 θ 不同,每一个元胞在 X、Y 两个维度的掠入射角变化趋势一致,图 7 展示的是其中一维临界角的示意图.

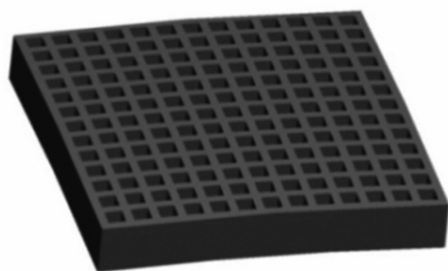


图 6 龙虾眼光学系统示意图
Fig. 6 Lobster-eye optical system

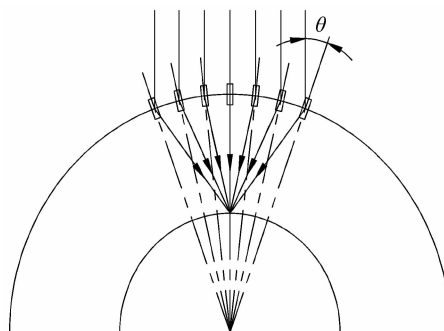


图 7 龙虾眼光学系统掠入射角示意图
Fig. 7 Grazing incidence of lobster-eye optical system

龙虾眼光学透镜有效收集面积为几何收集面积与反射率的乘积,当龙虾眼光学系统各参量确定后,掠入射角 θ 决定了光线在该元胞镜面上发生反射的反射率和反射次数,进而决定了该元胞有效面积.

如图 8 所示,入射 X 射线与方孔发生全反射的次数及成全反射组份所占比例与掠入射角有关,沿着掠入射方向将方孔向地面投影,若方孔投影正好落在区间 $[n-0.5, n+0.5]$, $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$, 则 X 射线发生 $|n|$ 次全反射;若方孔投影与两相邻区间 $[n-0.5, n+0.5]$ 、 $[n+1-0.5, n+1+0.5]$ 都部分重合,则入射 X 射线光束部分发生 $n+1$ 次全反射,部分发生 n 次全反射.

一束 X 射线束被分为四种情况,如图 1 所示 OE、OO、EO、EE 光束,真正聚焦的 X 射线束为 OO 光束,OE 和 EO 光为线聚焦光束,EE 光为未聚焦的 X 射线光束.以 OO 光束为例,计算龙虾眼的有效收集面积, n_x 表示光子在 X 轴方向上发生的反射次数, n_y 表示光子在 Y 轴方向上发生的反射次数, θ_x 和 θ_y 分别表示在 X、Y 方向上的掠入射角, X、Y 轴的定义参照图 9 中的坐标.

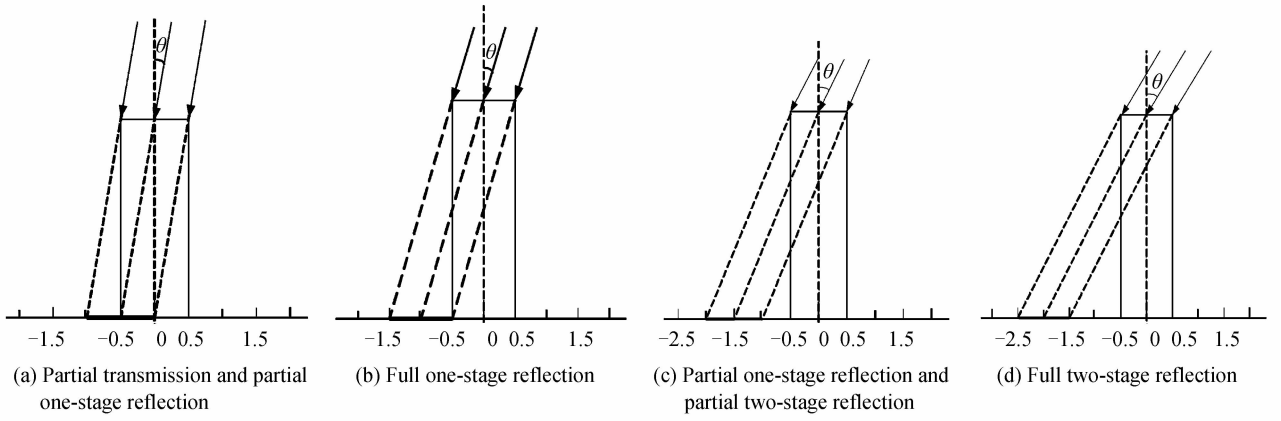


图 8 龙虾眼光学系统 X 射线的入射与反射分布

Fig. 8 Distribution of transmission and reflection of X-ray in lobster-eye optical system

$$\begin{cases}
 A_{OO1} = \sum_{n_x} \sum_{n_y} R^{(n_x+1)}(\theta_x) R^{(n_y+1)}(\theta_y) d_x \cdot d_y & n_x, n_y \text{ 为偶} \\
 A_{OO2} = \sum_{n_x} \sum_{n_y} R^{n_x}(\theta_x) R^{n_y}(\theta_y) (1-d_x) \cdot (1-d_y) & n_x, n_y \text{ 为奇} \\
 A_{OO3} = \sum_{n_x} \sum_{n_y} R^{(n_x+1)}(\theta_x) R^{n_y}(\theta_y) d_x \cdot (1-d_y) & n_x \text{ 为偶}, n_y \text{ 为奇} \\
 A_{OO4} = \sum_{n_x} \sum_{n_y} R^{n_x}(\theta_x) R^{(n_y+1)}(\theta_y) (1-d_x) \cdot d_y & n_x \text{ 为偶}, n_y \text{ 为奇}
 \end{cases} \quad (11)$$

综合以上四种情况可以得到 OO 光束(点聚焦)的有效收集面积为

$$A_{OO} = A_{OO1} + A_{OO2} + A_{OO3} + A_{OO4} \quad (12)$$

同理可求出针对 OE 光束、EO 光束和 EE 光束的集光面积的计算公式为

$$A_{OE} = A_{OE1} + A_{OE2} + A_{OE3} + A_{OE4} \quad (13)$$

$$A_{EO} = A_{EO1} + A_{EO2} + A_{EO3} + A_{EO4} \quad (14)$$

$$A_{EE} = A_{EE1} + A_{EE2} + A_{EE3} + A_{EE4} \quad (15)$$

2.4 有效面积仿真

有效面积是龙虾眼光学系统的一个关键性能指标,为了确定该参量与光子能量的定量关系^[17]采用蒙特卡洛(MC)方法进行仿真计算,单个元胞的结构如图 1 所示,单个龙虾眼光学系统的尺寸为 40 mm×40 mm,如图 6 所示,根据 2.3 节的理论公式,在该面积范围内随机均匀产生 100 000 个 1 keV 光子,经过龙虾眼光学系统后聚焦在其焦平面上,得到光强分布如图 9 所示.由图 9 可知龙虾眼光学系统焦平面中心点处 OO 光的光子数目最多,其次是十字交叉处的 OE、EO 光,最后是空白区和边缘区.统计 1 keV 能量点下,对 OO 光的收集效率为 11.9%,OE 光和 EO 光的收集效率为 26.8%,EE 光的收集效率为 15.9%.

为了进一步分析有效面积与光子能量的关系,首先计算出不同光子能量下的光强分布图,然后分别统计每个能量点下 OO、OE/EO、EE 三类光对应的面积,有效面积计算公式为

$$EFA = EFA_1 + EFA_2 + EFA_3 \quad (16)$$

$$EFA_i = (n_i/N) \cdot GEA \quad i=1,2,3 \quad (17)$$

n_1 表示收集到的 OO 光的光子数目, n_2 表示收集到的 OE 和 EO 光的光子数目, n_3 表示收集到的 EE 光的光

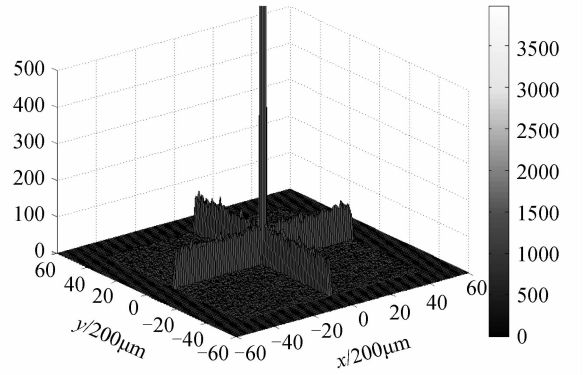


图 9 焦平面强度分布

Fig. 9 Intensity distribution at focal plane

子数目, EFA_1 、 EFA_2 、 EFA_3 分别表示对应光束的有效面积, N 表示入射的总的光子数目, GEA 表示龙虾眼系统的几何面积。

根据统计的数据绘制龙虾眼光学系统的有效面积与光子能量的关系如图 10 所示, true focus 表示的是聚焦 OO 光的有效面积和光子能量的关系; line focus 表示的是聚焦 OE 光和 EO 光的有效面积和光子能量的关系; back ground 表示的未聚焦的 EE 光有效面积与光子能量的关系, 表 1 中列出了三个能量点下的有效面积。

通过图 10 可知, 有效面积与光子能量呈负指数关系随着光子能量的增加, 有效面积迅速衰减。对比蒙卡模拟结果和理论计算结果曲线, 二者吻合很好。

表 1 不同光子能量有效面积

Table 1 The effective area at different X-ray photon energy

Photon energy/keV	Geometric area/mm ²	OO light effective area/mm ²	OE&EO light effective area/mm ²	EE light effective area/mm ²
1	16	1.9	4.3	2.55
2	16	0.7	2.5	2.55
3	16	0.35	1.8	2.55

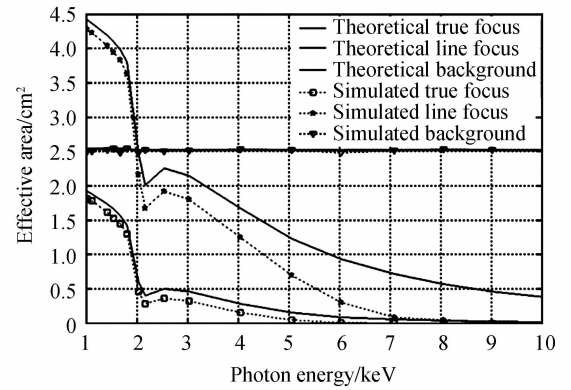


图 10 有效收集面积随 X 射线能量的变化 @ $\sigma=0.5 \text{ nm}$

Fig. 10 Effective collecting area vs X-ray energy @ $\sigma=0.5 \text{ nm}$

3 结论

本文从理论上分析了 Angel 型龙虾眼光学系统的全反射临界角、反射率和有效面积三个方面特性。根据临界反射角与 X 射线入射能量关系式, 计算出不同粗糙度下铱膜反射率随掠入射角的关系曲线, 根据这一曲线, 可直接查找出不同情况下反射膜的反射率, 为具体工程设计提供参考; 提出了一种计算龙虾眼 X 射线光学系统有效面积计算方法, 并采用蒙特卡洛方法进行仿真验证, 得出有效面积与光子能量的关系, 理论计算和蒙卡模拟结果吻合。根据这一关系可获知不同能量下的有效面积, 为具体探测器指标设计与计算提供依据。

参考文献

- [1] KASPI V M. Recent progress on anomalous X-ray pulsars[J]. *Astrophys Space*, 2007, **308**: 1-11.
- [2] SHUAI Ping, QU Guang-ji, CHEN Zhong-gui. Study on autonomous navigation technology for navigation constellation [J]. *China Engineering Science*, 2016, **8**(3): 20-30.
帅平, 曲广吉, 陈忠贵. 导航星座自主导航技术研究[J]. *中国工程科学*, 2006, **8**(3): 20-30.
- [3] YANG Ting-gao, ZHONG Chong-xia. Pulsar time stability and possible applications [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2004, **27**(2): 129-137.
杨廷高, 仲崇霞. 脉冲星时稳定性及可能应用[J]. *时间频率学报*, 2004, **27**(2): 129-137.
- [4] TATLOR J H. Millisecond pulsars-Nature's most stable clocks [C]. Proceedings of the IEEE, Las Vegas, Nevada, July 1991: 1054-1062.
- [5] SHENG Li-zhi, ZAO Bao-sheng, ZHOU Feng, et al. Performance of the detection system for X-ray pulsar based navigation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
盛立志, 赵宝升, 周峰, 等. X 射线脉冲星导航探测器性能研究[J]. *光子学报*, 2013, **42**(9): 1071-1076.
- [6] KODAMA R, IKEDA N, KATO Y, et al. Development of an advanced Kpatrick-Baez microscope [J]. *Optics Letter*, 1996, **21**(17): 1321-1323.
- [7] PETRE R, SERLEMITOS P J. Conical imaging mirrors for high-speed x-ray telescopes [J]. *Applied Optics*, 1985, **24**(12): 1833-1837.
- [8] OUYANG Ming-zhao. Research On the imaging mechanism of bionic lobster eyes optics [D]. Changchun: Changchun university of Science and Technology, 2014, 30-35.
欧阳名钊. 仿生龙虾眼光学成像机理研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014, 30-35.
- [9] SCHMIDT W K H. A proposed X-ray focusing device with wide field of view for use in X ray astronomy [J]. *Nuclear Instruments and Methods*, 1975, **127**: 285-292.

- [10] ANGEL J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes[J]. *The Astrophysical Journal*, 1979, **233**: 364-373.
- [11] COLLON M J, BEIJERSBERGENM W, Wallace K. X-ray imaging glass micro-pore optics[C]. SPIE. 2007, **6688** (668812): 1-13.
- [12] YANG Xia-jun, MU Bao-zhong, YI Sheng-zhen, *et al.* Study on parallel Schmidt lobster eyes X-ray optical system[J]. *Optical Instrument*, 2012, **34**(5): 55-61.
杨夏军,穆宝忠,伊圣振,等. 平行式 Schmidt 型龙虾眼 X 射线光学系统研究[J]. 光学仪器, 2012, **34**(5):55-61.
- [13] WU Ming-xuan, LIU Zhao-jun, RUAN Ning-juan, *et al.* Effect of Microvoids optical array on X-ray focusing performance[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2015, **36**(3): 69-77.
吴明轩,刘兆军,阮宁娟,等. 微孔光学阵列对 X 射线聚焦型能影响[J]. 航天返回与遥感, 2015, **36**(3):69-77.
- [14] ALBERT C, DOUGLAS V. X-ray Data Booklet. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.
- [15] POIARKOVA V, REHR J. Multiple-scattering x-ray-absorption fine-structure Debye-Waller factor calculation [J]. *Physical Review B*, 1999.
- [16] PEELE A G. Investigation of etched silicon wafers for lobster-eye optics[J]. *Review Of Scientific Instrument*, 1999, **70**: 126.