

基于多元约束的小型软 X 射线偏振望远镜光学设计及优化

张 玲^{1,2}, 沈正祥^{1,2}, 刘 娜^{1,2}, 余 俊^{1,2}, 王占山^{1,2}

- (1. 同济大学 先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092;
2. 同济大学 物理科学与工程学院 精密光学工程技术研究所, 上海 200092)

摘 要: 作为揭示物质在强磁场、强引力场中的行为方式以及天体辐射偏振产生原因的重要手段, X 射线偏振探测在近 40 年来一直是高能天体物理的研究热点。小型软 X 射线天文偏振探测望远镜采用抛物面聚焦方式将 X 射线会聚至探测器处, 通过在反射镜表面镀制多层膜实现高反射率和能量分辨。文中对小型天文偏振望远镜抛物面的两种空间布局方式, 即中心环绕旋转式镜面布局和交叉对称式镜面布局进行了理论分析, 构建了综合集光面积和制作难度的优化模型, 基于多元约束方式进行了参数优化。结果显示, 在系统口径受限、探测器有一定尺寸的实际应用环境中, 参数优化后的交叉对称式镜面布局方案较常规中心环绕式设计更有优势, 既能获得较大的集光面积, 又能兼顾镜面加工的可行性。

关键词: X 射线偏振; 望远镜; 光学设计; 多元约束; 优化

中图分类号: O434.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0718002

Optical design and optimization of the small-scale soft X-ray polarization telescope based on multi-constraints

Zhang Ling^{1,2}, Shen Zhengxiang^{1,2}, Liu Na^{1,2}, Yu Jun^{1,2}, Wang Zhanshan^{1,2}

- (1. Key Laboratory of Advanced Micro-Structure Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The probe of the X-ray polarization in high-energy astrophysics has been a research focus over the past 40 years, and it has been an efficient way to reveal matters' behaviors under circumstances of extreme magnetic and gravitational fields, and to understand the causation of polarization. The small-scale soft X-ray polarization telescope usually focus soft X-ray into the detection zone, and the surface type of the telescope is paraboloid. The mirror of the telescope is deposed with multilayer, it can reflect soft X-ray with a rather high reflectivity and a high energy resolution, which satisfies the Bragg condition. Here, two kinds of design configurations for a soft X-ray polarimetry mission based on paraboloidal surface shape were presented. Some calculations and analyses were done under the limitation of a specific size of the whole system. The relation was summarized between collected area, the complexity of the fabrication, and other practical application factors. The result of the optimization demonstrates that the optimized choice for the design can guarantee the practical utilization in reality.

Key words: X-ray polarimetry; telescope; optical design; multi-constraints; optimization

收稿日期: 2016-11-06; 修订日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11105099, 10978002); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ04016403)

作者简介: 张玲(1992-), 女, 硕士生, 主要从事 X 射线光学系统设计方面的研究。Email: 1334099@tongji.edu.cn

导师简介: 沈正祥(1980-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事先进光学制造技术、光学仪器研制等方面的研究。

Email: shenzx@tongji.edu.cn

0 引言

近年来依靠 X 射线成像^[1]、光谱以及时变探测等技术进行的天文观测使 X 射线天文学得到了很大的发展。但迄今为止,由于缺乏先进有效的探测手段,X 射线天文偏振探测依然是一个空白领域。

研究者们所关注的一些高能天体物理热点问题,如极端密度下的物质状态方程、极端引力场中的动力学过程和广义相对论效应、相对论喷流的形成和准直机制、高能带电粒子的加速过程等,具体表现在中子星、吸积黑洞、超新星遗迹等天体上,因偏振测量可以反映上述天体的磁场、几何、辐射机制等重要信息,同时 X 射线不受法拉第旋转效应影响,其偏振状态不会在传播过程中改变,所以,通过对等天体所辐射 X 射线的偏振进行有效的探测,分析辐射传输过程中的非对称性和强磁场带来的效应,能够从根本上帮助解决以上高能天体物理面临的核心问题^[2]。然而,至今唯一有效的升空观测是仅利用小平面的石墨晶体拼接成旋转抛物面探测器对蟹状星云进行了探测^[3],但该抛物面晶体探测器灵敏度较低,不适用于其他待测天体的测量。X 射线偏振探测也成为亟待开启的天文观测新窗口。

目前,国际上提出的大型 X 射线偏振探测项目,是利用大面积高分辨聚焦望远镜对目标源 X 射线进行聚焦,在焦平面处放置高灵敏度偏振探测器的技术方案,这种大型探测装置具有高信噪比和强光子收集能力,如国内规划的 X 射线时变与偏振探测(XTP)卫星^[4]。另外,美国航空航天局曾提出利用中小型卫星 GEMS 进行首次高灵敏度偏振测量^[5],以及意大利向欧空局 ESA 提出的小型卫星项目 XIPE^[6],均针对 X 射线偏振探测,但由于制作与经费等原因,以上项目最终被取消。目前国内科学家也提出了类似的小型探测计划 LAMP (The Lightweight Asymmetry and Magnetism Probe)^[7],将基于微小型卫星平台开展 X 射线天文偏振探测研究。

由于 45°角 Bragg 衍射的反射率与 X 射线的偏振方向有关,s 光(偏振方向垂直于入射反射平面)的反射率较高,p 光(偏振方向位于光路平面内)的反射率接近 0,因此,小型观测任务中常利用旋转抛物面多层膜^[8]反射镜在临近 45°角附近反射聚焦 X 射线

并测量不同角度下的反射流强,以此来获得入射光束的偏振度^[9]。软 X 射线偏振探测望远镜中 Bragg 衍射除利用一定晶格尺寸的晶体外,随着 X 射线多层膜技术的发展,也可由多层膜来实现。如偏振望远镜 PLEXAS (A Polarimeter for Low Energy X-ray Astrophysical Sources)^[10]中的偏振探测,当 X 射线以 Bragg 角入射于镜面后能将带有偏振信息的 X 射线聚焦至探测区域,镜面可同时实现能量选择和偏振探测。

但针对实际应用的望远镜光学设计,往往有太多的约束条件和限制因素,使得像常规的全口径圆周旋转抛物面的设计带来集光面积降低、镜片制作难度增大等不利结果。文中针对国内小型软 X 射线天文偏振探测的需求,开展望远镜光学系统的设计研究。在严格的几何空间约束条件下,对影响系统集光面积、镜面加工难易程度的因素进行了分析,从优化镜面空间构型着手,对决定系统空间构型的参数进行了计算和分析,建立了多元约束的优化模型,给出了最优化选型依据及合理解释,并结合实际参数设计了具体系统,模拟分析了系统的光学性能。

1 望远镜光学系统参数选择和镜面布局

1.1 旋转抛物面望远镜光学参数定义

对于系统全口径为 Φ 的抛物面望远镜,截面视图如图 1 所示,入射的 X 射线集光角度范围在 $\theta_1 \sim \theta_2$,若探测器尺寸为 $a \times b$ (垂直入射光线平面内的俯视尺寸),抛物线方程为 $y^2=2pz$,入射角范围可知离轴抛物面反射镜两边界点坐标分别为 $A(p \tan \theta_1, \tan \frac{\tan^2 \theta_1}{2})$, $B(p \tan \theta_2, \tan \frac{\tan^2 \theta_2}{2})$,则实际有效通光区域半径 D 与 p 有关。

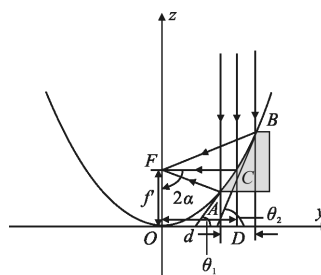


图 1 离轴抛物面反射镜参数示意图

Fig.1 Schematic diagram of off-axis parabolic mirror

1.2 望远镜镜面布局方案的影响因素

对于 X 射线偏振望远镜, 系统的集光面积是一个关键指标, 决定了望远镜的探测能力和科学目标的实现, 在实际的望远镜光学设计中应尽可能地增大系统集光面积来提高探测效率。

集光面积取决于系统的口径、集光角度的大小, 光学系统口径、焦距等都受载荷平台的总体结构尺寸约束, 同时探测器和镜片固定结构也会占据一部分尺寸空间, 因此望远镜光学设计的最大难度是在系统口径受限的情况下如何获得最大的有效集光面积。光学系统镜面分割、探测器空间位置布局方式的优化是提高望远镜集光面积的一个重要方法。

1.3 中心对称式的镜面布局设计

由于偏振探测结果对空间对称性有要求, 偏振望远镜的设计常用中心环绕旋转式镜面布局方案, 如 LAMP^[7]。图 1 中的旋转抛物面, 若已知抛物线顶点处曲率半径, 则可以确定镜面参数, 系统的集光面积:

$$S = \pi p^2 (\tan^2 \theta_2 - \tan^2 \theta_1) \quad (1)$$

集光角度范围已知时, p 值越大, 系统集光面积 S 越大。在系统口径受限情况下, 镜面外边缘到达口径边界时, 对应集光面积 S 最大。

针对特定观测任务和观测目标, 将镜片做垂直切分, 切除量为相邻镜面内圈俯视间隔 τ (对应圆心角为 δ), 每组镜片再四等分, 切除量为相邻镜面内圈俯视间隔 ε (对应圆心角为 σ), 如图 2(a) 所示; 各镜片经过平移和旋转分别聚焦于各探测器的四个象限的中心位置, 如图 2(b) 所示。

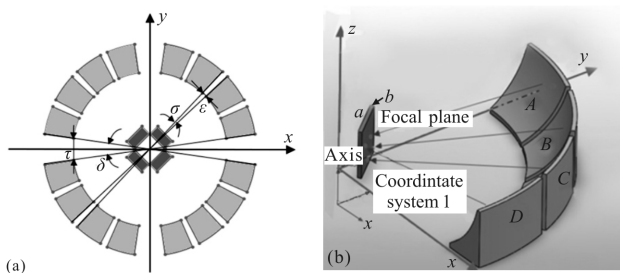


图 2 中心对称旋转抛物面反射镜镜面布局示意图

Fig.2 Layout configuration of central symmetry rotating parabolic mirror

由于系统口径受限、探测器占据一定空间时, 中心环绕旋转式排布在很大程度上会限制系统的集光面积。同时, 由于入射角为 45° 附近, 导致反射镜面

为大离轴量、高陡度的抛物面, 其加工难度非常大, 需要在设计的时候考虑选择合适的镜片参数, 尽可能降低镜片制作以及检测难度^[10]。

2 交叉对称式望远镜镜面布局设计和优化

另一种镜面布局方式为交叉对称式排布, 如图 3 所示, 可避免中心对称的不利影响, 这一布局中系统实际有效集光面积由每镜组的离轴量与扩展圆心角共同决定, 如 PLEXAS^[11]。三组镜面互成 120° 交叉对称式排布, 每组镜片相对其他镜片的位置, 由抛物面顶点曲率半径 p 以及对应圆心角 φ 来确定; 为了避免镜片对会聚光束的遮挡, 还需要限定内圈镜组间距 s 。

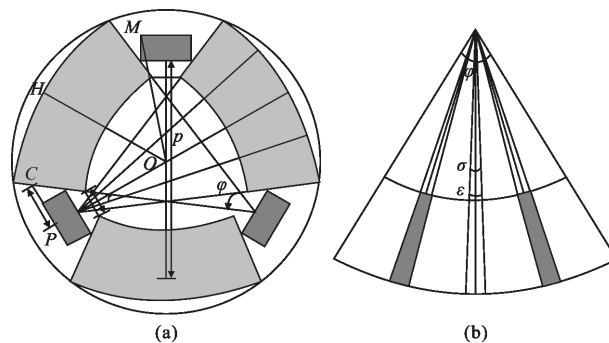


图 3 交叉对称式镜面布局及镜片分割示意图

Fig.3 Layout configuration of crossing symmetry rotating parabolic mirror

但在考虑包络尺寸限制下, 增大集光面积仍会受其他设计因素的制约和影响, 最终构型的设计是由多变量影响综合决定的。为获得较优的设计结果需对各参数进行优化组合, 以下结合实例建立交叉对称式的设计模型, 对不同镜面布局多元约束下的参数选择进行计算和分析。

2.1 交叉对称式的镜面布局优化设计

2.1.1 交叉对称式布局优化模型建立

根据图 3 所示, 相比中心环绕旋转式布局, 交叉对称式布局较为复杂, 在追求更大集光面积时需要综合考虑抛物面反射镜和探测器的空间位置, 避免光线遮挡, 因此镜面布局中需要考虑如下约束条件。

(1) 对于上述三个设计变量, 假设顶点曲率半径 p 以及对应圆心角 φ 确定, 则系统直径 d 最小的情况是三镜组内圈镜片相邻点接触, 忽略探测器尺寸考虑镜面与光线遮挡问题, 则焦点位置必须在触点之外, 由几何关系可得, 单组镜片对应圆心角 $\varphi < 60^\circ$ 。

(2) 同以上假设,若 p 和 φ 确定,影响望远镜口径 Φ 的参量只有内圈镜组间距 s ,考虑最小预留装调空间以及间距 s 对系统口径 Φ 的负调节,可分别对 $s \geq s_{1,2,3}$ 多种情况(可接受最小预留空间 s 值附近)进行计算分析来考虑间距 s 的影响。

(3) 再考虑设计参数中探测器的尺寸,在探测器与镜片未相碰且预留出至少 1 的装调空间下,须保证图 3 中 $CP \geq \frac{a}{2} + l$ 。

(4) 系统全口径尺寸限制在 Φ 以内,须保证图 3 中 $OH \leq \Phi/2, OM \leq \Phi/2$ 。

2.1.2 集光面积最优化计算方法

经分析可知,对集光面积的最优化计算可以归结为多元非线性不等式约束优化问题,利用可行域内的迭代能够找到极小点。可行域内的迭代是通过构造障碍函数对迭代方向进行控制,从而使迭代始终保持在可行域内。

考虑如下—阶最优化问题:

$$\begin{cases} \min f(X) \\ \text{s.t. } g_i(X) \geq 0, i=1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (2)$$

式中: X 为变量; $f(X)$ 为目标函数,通过构造增广目标函数,将有约束优化问题转化为无约束优化问题,增广目标函数 $F(X)=f(X)+r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(X)}$, r_k 为第 k 次迭代罚因子,迭代过程中 r_k 依靠缩小系数使目标函数靠近最优解, $r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(X)}$ 为惩罚项^[12]。此最优化算法

可通过 Matlab 优化工具箱的相关函数来实现。

实际设计中,三组镜片中分隔的四片镜片在两两间距为 ε ,对应圆心角为 σ ,如图 3 所示。目标集光面积函数可表示为:

$$S = \pi p^2 (\tan^2 \theta_2 - \tan^2 \theta_1) \cdot \frac{(\varphi - \sigma)}{120} \quad (3)$$

式中: $\sigma = 6 \sinh^{-1} \frac{\varepsilon}{2p^2 \tan \theta_1} \cdot \frac{180}{\pi}$, 对于精度的控制可设置函数公差为 10^{-4} ,将集光面积作为目标函数利用 Matlab 进行计算分析。

2.2 综合优化方案

对三个变量的优化调控单从集光面积角度来考虑显然是不充分且偏离实际加工的,大离轴量的高陡度非球面的制作难度也是镜面设计的参考指标,优化参数选择需要同时考虑两种的影响。加工工艺中所关注的修磨去除量只与抛物线参数 p 有关,与变量 φ 无关。计算表明,非球面度是决定离轴非球面

的加工难易程度的指标,可直接由 p 值大小反映, p 越小,加工越容易进行。

由于涉及三个变量在约束条件内可以自由组合,同时优化分析难度较大,因此考虑从控制集光面积,尽可能降低加工难度的角度出发来分析问题。同时最终的计算与分析均可表明 2.1.1 参数优化模型(2)中的内圈镜组间距 s 对最终结果的影响(在接受最小 s 值附近对 s 的微调)是较小的,可考虑将 s 值固定为最小值附近漂移至右侧可接受的最大限度,分别再给出一定集光面积值 $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, \dots$ 后寻求最小顶点曲率半径 $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, \dots$,再对相对应的 S 与 p 进行拟合,将离散的对应关系拟合为连续曲线,并求出两者的关系式。为保证拟合效果,拟合方法选择了正交最小二乘法。由构造的正交多项式 $\{p_n(x)\}$ 来表示曲线函数:

$$f(x) = \sum_{i=0}^n c_i p_i(x) \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_0(x) = 1 \\ p_1(x) = (x - \alpha) p_0(x) \\ p_{k+1}(x) = (x - \alpha_{k+1}) p_k(x) - \beta_k p_{k-1}(x) \end{cases} \quad (5)$$

$k=1, 2, \dots$; 多项式满足条件:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_j(x_i) p_k(x_i) = 0, j \neq k \\ \sum_{i=1}^m \omega(x_i) (p_j(x_i))^2 > 0 \\ k=0, 1, \dots \end{cases} \quad (6)$$

α 和 β 通过 $\{p_n(x)\}$ 的正交性来确定:

$$\alpha_{k+1} = \frac{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_k^2(x_i)}{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_k^2(x_i)} \quad (7)$$

$$\beta_k = \frac{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_k^2(x_i)}{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_{k-1}^2(x_i)} \quad (8)$$

由最小二乘原理可得系数:

$$c_i = \frac{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) f(x_i) p_k(x_i)}{\sum_{i=1}^m \omega(x_i) p_k^2(x_i)} \quad (9)$$

递推过程通过 Matlab 编程实现。至此即可得出集光面积 S 与表征加工难易程度 p 的对应关系,对于另一变量则是已选定的 s_k 。

3 设计实例

3.1 望远镜设计与优化

所需设计的小型偏振望远镜指标参数如下:系统通光口径小于 450 mm, X 射线入射角度范围为

40°~50°, 探测器外形尺寸为 68 mm×35 mm×110 mm, 可探测面积为 16 mm×16 mm。若选用中心环绕旋转式的镜面布局方案, 则 p 值为 131, 集光面积 S 为最大值 386 cm²。抛物线边界点 A 和 B 的坐标分别为 (109.84, 46.08)、(156, 92.96)。虽然单个镜片截面端点横坐标差为 46.16 mm, 离轴镜面的非球面度和横向矢高较小, 但集光面积过小, 严重影响偏振探测性能。

若选用交叉对称式设计, 探测装置与镜组间预留尺寸选 $l=5$ mm, 对内圈镜组间距的设置根据实际情况选为 $s_1 \geq 5$ mm, $s_2 \geq 10$ mm, $s_3 \geq 15$ mm 三种情况。对集光面积最优的计算, 给定合理初值后, 在可行域内进行搜索计算, 根据设置的初值不同, 迭代次数略有差异, 得到最大集光面积为 811 cm², 各参量的值分别为 $p=326$, $\phi=43.2^\circ$, $s=15$ mm; 此参数所对应的单个镜片通光口径对角线长度 $L=114.93$ mm 并不大, 但非球面度梯度和横向矢高的变化如图 4 所示, 其极值超过 5 mm, 如此大的非球面度给加工带来极大困难^[13]。

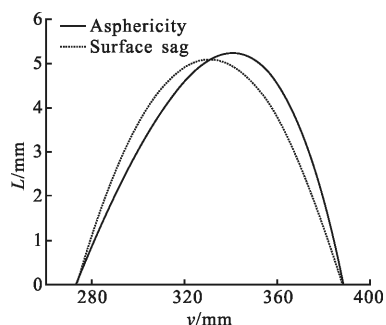


图 4 非球面度极值与矢高极值 p 的关系

Fig.4 Relationship between the extremum of asphericity and the value of p

再进行综合优化, 首先对 s_k 选取的验证, 以 $s_1 \geq 5$ mm 时离散集光面积下(500~850 cm²)对应最小 p 值的关系作为比较基准, 分别进行 $s_2 \geq 10$ mm, $s_3 \geq 15$ mm 情况下 S 与 p 的关系相对于基准做比较。如图 5 所示, 表明 s 范围对 p 值的影响较小, s_k 固定为 15 mm。再将离散关系拟合为连续关系, 拟合曲线如图 6(a) 所示, 对应关系式如下(取多项式最高次项为 3):

$$p=5.71 \times 10^{-8} S^3 - 1.85 \times 10^{-4} S^2 + 0.354 S + 114.04 \quad (10)$$

可见集光面积与最小顶点曲率半径成正相关。如图 6(b) 所示为集光面积与 p 值最小时的非球面度极值关系, 直观反映了集光面积与加工难易间的取舍关系, 集光面积越大, 抛物面反射镜的离轴量越大。

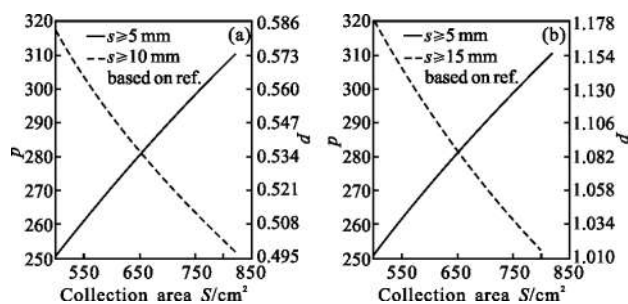


图 5 不同 s 范围一定集光面积下 p 值变化情况(以 $s \geq 5$ mm 为比较基准)

Fig.5 Variation range of the value of p in certain collected area within different range of s (in reference with $s \geq 5$ mm)

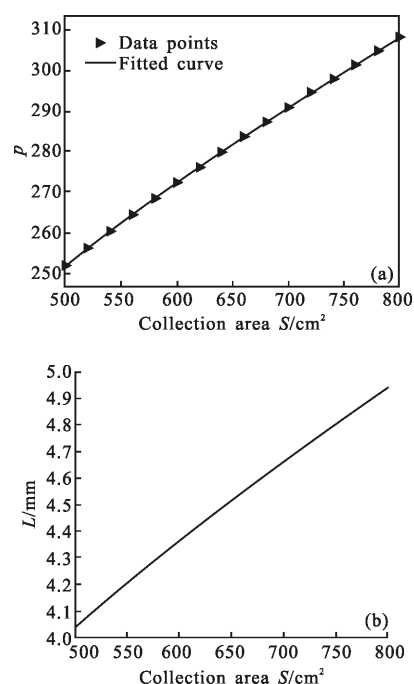


图 6 (a) $s \geq 15$ mm 时一定集光面积 S 与 p 最小值的连续关系和 (b) $s \geq 15$ mm 时一定集光面积 S 与可取最小非球面度极值的连续关系

Fig.6 (a) Continuous relationship between the collected area S and the minimum p when $s \geq 15$ mm and (b) Continuous relationship between the collected areas S and the minimum extremum of asphericity when $s \geq 15$ mm

3.2 光学性能模拟

根据以上分析结果, 选择设计参量分别为: $p=285$, $\varphi=46^\circ$, $s=15$ mm, 集光面积 $S=668$ cm²。光路模拟示意图及 1° 视场弥散斑点列图如图 7 所示, 从图中可以看到, 四个镜片经过适当的平移和旋转后分别聚焦于 CCD 的四个象限中央附近, 由于镜面平移和旋转量对于四镜片而言是左右对称的。图 8 给出了

相邻两镜在不同视场下弥散斑示意图, 其最大视场的弥散斑只有约 480 μm 。

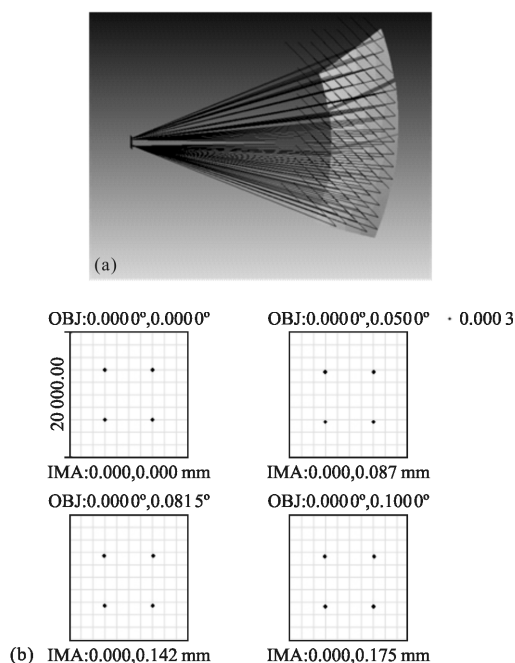


图 7 交叉对称式镜面聚焦光路及弥散斑情形示意图

Fig.7 Light path and the spot diagram of the optical system with the layout configuration of crossing symmetry

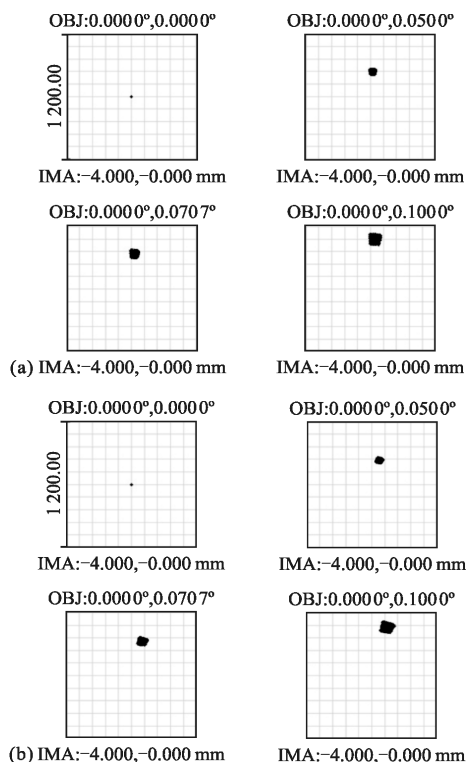


图 8 交叉对称式一组镜面中两独立镜片弥散斑示意图

Fig.8 Spot diagrams of separated mirrors in one optical set with the layout configuration of crossing symmetry

4 结 论

对于基于多层膜 Bragg 衍射的轻型 X 射线天文偏振望远镜的设计, 中心环绕旋转式离轴抛物镜面的典型布局通常由于系统口径的限制而导致系统集光面积受限, 影响整个系统的探测效率。文中通过交叉对称式镜面布局对系统进行了优化设计, 在综合平衡加工难度后分析了镜面设计中各参数的选择对结果的影响。从实例中可以看出, 交叉对称式布局的设计使系统集光面积得到较大提高, 如不考虑加工难易程度时, 集光面积可达到中心对称布局的两倍以上。在实际应用中考虑加工难度, 优化得到了接近中心布局 1.7 倍结果, 通过实际光路模拟, 验证了优化设计的可行性, 该方案设计为国内正在开展的相关天文偏振望远镜的研制提供了有益参考。

参考文献:

- [1] Chen Jie, Liu Longhua, Liu Gang, et al. X-ray imaging Fresnel zone plates and fabrication [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2007, 15(12): 1894–1899. (in Chinese)
- [2] Bellazzini R, Baldini L, Costa E, et al. X-ray polarimetry: a new window on the high energy sky [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2010, 623(2): 766–770.
- [3] Silver E H, Ziocck K, Weisskopf M C, et al. Bragg crystal polarimeters[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(7): 759–766.
- [4] Lu Fangjun, Zhang Shuangnan, Dong Yongwei. The X-ray timing and polarization satellite [C]//National Space Exploration Seminar, 2012.
- [5] Allured R, Fernández-Perea M, Soufli R, et al. A soft X-ray beam-splitting multilayer optic for the NASA GEMS Bragg Reflection Polarimeter [J]. *Experimental Astronomy*, 2012, 36(1–2): 371–388.
- [6] Allured R, Fernández-Perea M, Soufli R, et al. XIPE: the X-ray imaging polarimetry explorer [J]. *Experimental Astronomy*, 2013, 36(3): 1–45.
- [7] She R, Feng H, Muleri F, et al. LAMP: a micro-satellite based soft X-ray polarimeter for astrophysics [C]//SPIE, 2015, 9601: 96010–1–14.
- [8] Li Jia, Zhu Jie, Zhang Zhong, et al. Effect of Si barrier layers on the thermal stability of Al (1 wt.% Si)/Zr multilayers designed as EUV mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1335–1342. (in Chinese)
- [9] Li Yanan, Sun Xiaobing, Mao Yongna, et al. Spectral

- polarization characteristic of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 205–210. (in Chinese)
- [10] Marshall H L, Murray S S, Schnopper H W, et al. Realistic inexpensive soft X-ray polarimeter and the potential scientific return[C]//SPIE, 2003, 4843: 360–371.
- [11] Yang Haoyu, Tian Ailing, Liu Bingcai. Sub-aperture stitching interferometry for large parabolic mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1296–1300. (in Chinese)
- [12] Fu Yingding, Cheng Yuxiao, Tang Huiying. Optimization Theory Method [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 208–211. (in Chinese)
- [13] Shi Tu, Yang Yongying, Zhang Lei, et al. Surface testing methods of aspheric optical elements [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(1): 26–46. (in Chinese)