

仪器与测量

eXTP 聚焦镜电子偏转器仿真分析与设计*

郑人洲¹⁾ 强鹏飞¹⁾ 杨彦佺²⁾ 闫永清^{1)†} 李悦¹⁾ 盛立志^{1)‡} 陈勇²⁾

1) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

2) (中国科学院高能物理研究所, 粒子天体物理重点实验室, 北京 100049)

(2024 年 11 月 27 日收到; 2024 年 12 月 27 日收到修改稿)

X 射线聚焦望远镜是进行空间 X 射线观测的核心设备, 为保证其观测结果的准确性, 需要对进入聚焦镜的低能电子进行有效偏转, 达到降低本底噪声的目的. 本文针对增强型 X 射线时变与偏振空间天文台 (enhanced X-ray timing and polarimetry mission, eXTP) 聚焦镜电子偏转器研制工作, 满足聚焦镜光学系统对于低能电子的偏转需求, 兼顾轻量化、电子偏转能力以及电磁兼容性能等问题, 采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了电子偏转器及聚焦镜镜片的全物理仿真模型, 分析了磁感应强度分布、电子偏转轨迹以及磁场对聚焦镜镜片的影响, 完成了电子偏转器电磁参数设计. 模拟结果表明, 电子偏转器周围空间中磁感应强度沿半径方向减小, 两根辐条正中间磁感应强度最大值可达 0.027 T. 在磁感应强度平面及纵向分布中, 当半径大于 280 mm 或纵向距离大于 60 mm 时, 磁感应强度小于 5×10^{-5} T (0.5 Gs), 满足电磁兼容性能设计要求. 当入射角 $\leq 10^\circ$ 时, 电子偏转效率随电子能量和入射角增大而减小, 50 keV 能量以下电子偏转效率可达 100%, 满足电子偏转设计要求. 聚焦镜镜片底端距离电子偏转器 130 mm 时, 聚焦镜镜片在磁场的作用下, 应力大小仅为 10^{-3} N/m² 量级, 形变大小仅为 10^{-5} mm 量级, 表明磁场不会对聚焦镜的光学性能产生影响. 这些结果为 eXTP 聚焦镜电子偏转器的研制工作提供了重要参考.

关键词: 聚焦镜, 电子偏转器, 磁场, 偏转效率, 形变**PACS:** 95.55.Ka, 07.55.Db**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241649**DOI:** 10.7498/aps.74.20241649

1 引言

现代物理研究的两大主要方向已经成为生命起源及宇宙起源研究, 作为全波段观测的重要组成部分, 空间 X 射线观测是天体物理和空间天文学研究的重要手段, 占空间天文卫星的一半左右. NASA 和 ESA 在未来 20 年天文学战略规划中就包括了探寻恒星、星系和黑洞, 寻找太阳系外宜居类地行星, 以及揭秘宇宙基本物理规律. 我国也在

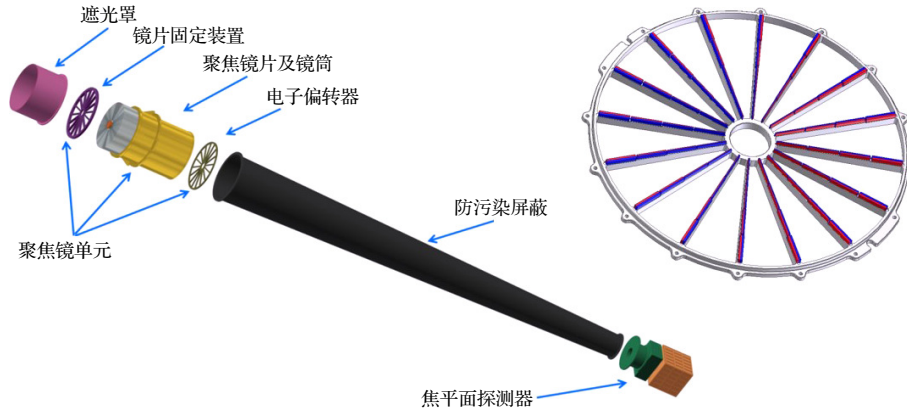
相关方面进行了布局, 规划在 2016—2030 年进行一黑 (黑洞)、两暗 (暗物质、暗能量)、三起源 (宇宙、天体、系外生命起源) 等空间科学研究^[1-4].

X 射线聚焦望远镜是进行空间 X 射线观测的核心设备. 然而, 在空间轨道上, 电子会在探测器中产生噪声本底^[5], 因此, 通常需要在探测器前安装电子偏转器, 用来偏转空间电子, 使沿聚焦镜入射的电子被偏转, 不能入射到焦平面探测器处, 从而可以有效减小电子等带电粒子产生的背景噪声, 其结构示意图如图 1 所示^[6]. 电子偏转器一般包括

* 国家自然科学基金 (批准号: 42327802, 62271483)、国家重点实验室基金 (批准号: SKLIPR2021)、陕西省自然科学基金基础研究计划 (批准号: 2023-JC-ZD-40, 2024JC-YBQN-0003) 和中国博士后科学基金第 76 批面上项目 (批准号: 2024M763511) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yanyongqing@opt.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn

图 1 聚焦镜及电子偏转器结构示意图^[6]Fig. 1. Schematic diagram of the structure of focusing telescope and electron deflector^[6].

一个轮毂和若干根辐条, 在每根辐条上都布置有多块永磁铁, 在相邻辐条之间会形成静磁场, 电子进入这一区域会发生偏转, 从而不能进入焦平面探测器. 2024 年 1 月 9 日我国发射的爱因斯坦探针 (EP) 卫星以及国外 Swift, eROSITA, XMM-Newton, ATHENA 等卫星载荷上均设计有电子偏转器^[7-15]. 爱因斯坦探测器卫星携带了一个宽视场 X 射线望远镜 (wide-field X-ray Telescope, WXT) 和两个后随 X 射线望远镜 (follow-up X-ray telescopes, FXT). 其中, WXT 的电子偏转器采用了圆形磁场设计以减小磁漏和磁矩, 16 个相同的矩形 NdFeB 永磁块按一定顺序安装在正方形框架中, 每 4 个永磁块具有相同的磁化方向, 相邻两个有 90° 的相位差. 在设计过程中, 通过模拟电子运动路径优化了电子偏转器结构, 减小了电子通过磁场区域时的偏转路径长度^[14]. FXT 的电子偏转器采用了环形辐条磁体设计, 外边框为环形辐条结构, 16 根辐条上每根布置 5 个规格的 NdFeB 永磁块, 磁化方向垂直于半径, 沿环向每个规格的永磁块磁化方向相位差为 22.5° , 总磁矩为零, 可实现对 25 keV、入射角 $\pm 5^\circ$ 、偏转距离 1120 mm 的电子偏转效率为 100%. ATHENA 宽视场成像仪 (wide field imager, WFI) 上采用的磁偏转器磁场强度可达 0.38 T, 高度为 5 cm, 可实现对 76 keV 质子进行有效偏转^[16]. SIMBOL-X 望远镜的磁偏转器也采用了环形辐条磁体设计, 24 根辐条上每根布置 3 个规格的 NdFeB 永磁块, 质子偏转的最大能量可达 25 keV^[13]. 在这些研究中, 均对带电粒子在磁场中的运动路径以及偏转效率进行仿真分析, 进一步完成了磁偏转器的

结构设计. 然而, 关于磁场对光学系统影响的讨论较少, 很难给光学系统性能变化评估和磁偏转器安装位置选择提供有效的指导, 非常有必要开展相关方面更深入的研究.

增强型 X 射线时变与偏振空间天文台 (enhanced X-ray timing and polarimetry mission, eXTP) 是硬 X 射线调制望远镜 (HXMT)——“慧眼”卫星之后我国的下一代旗舰级 X 射线天文卫星, 其核心科学目标可概括为: “一奇 (黑洞)、二星 (中子星和夸克星)、三极端 (极端引力、磁场和密度)”. eXTP 计划配置 2 种有效载荷: 能谱测量 X 射线聚焦望远镜阵列 (spectroscopic focusing array, SFA) 和偏振测量 X 射线聚焦望远镜阵列 (polarimetry focusing array, PFA), 也将采用电子偏转器的设计^[6,17,18].

本文针对 eXTP 聚焦镜电子偏转器研制工作, 兼顾轻量化、电子偏转能力以及电磁兼容性能等问题, 采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立电子偏转器及聚焦镜镜片的全物理仿真模型, 完成电子偏转器的电磁参数设计. 首先分析磁铁周围空间中的磁感应强度分布, 明确磁场对电子偏转的有效作用区域, 校核电子偏转器的平面及纵向漏磁情况; 进一步通过仿真电子进入磁场区域的偏转轨迹, 量化电子偏转效率的变化规律, 验证电子偏转器的指标参数; 最后针对聚焦镜镜片在磁场中的磁化过程, 分析聚焦镜镜片的磁感应强度分布、应力分布、形变大小以及聚焦镜镜片与电子偏转器距离改变时上述关键参数的变化规律, 为聚焦镜光学性能变化评估和电子偏转器安装位置选择提供参考.

2 电子偏转器仿真设计

2.1 电子偏转器技术指标

在“增强型 X 射线时变与偏振探测 (eXTP) 空间天文台”项目中, 中国科学院西安光学精密机械研究所负责 X 射线聚焦镜电子偏转器的研制工作. 为保证 eXTP 聚焦镜观测结果的准确性, 需要对进入聚焦镜的低能电子进行有效的偏转, 达到降低本底噪声的目的. 根据 eXTP 聚焦镜光学系统对于低能电子的偏转需求, 设计电子偏转器需满足以下条件:

- 1) 根据卫星轨道高度和空间电子能量及通量分布情况^[18], 可偏转电子能量应不低于 25 keV;
- 2) 根据聚焦镜多层嵌套镜片几何结构, 通过镜片间隙出射的电子与聚焦镜光轴的夹角不大于 5° , 偏转电子入射角应在 $\pm 5^\circ$ 以内;
- 3) 聚焦镜焦距为 5250 mm, 焦平面探测器距离聚焦镜 5250 mm, 电子应在 5250 mm 距离内完全偏转;
- 4) 电子偏转效率应达到 100%.

2.2 电子偏转器材料

电子偏转器法兰材料为铝合金, 型号为 AA7075, 结构强度较高, 满足卫星力学条件, 同时, AA7075 为无磁材料, 相对磁导率为 1, 对磁铁的磁感应强

度分布没有影响. 磁铁材料为常见的磁性较强的钕铁硼 (NdFeB) 材料, 美国的阿尔法磁谱仪 (alpha magnetic spectrometer, AMS) 使用钕铁硼材料永磁体, 经过 20 年没有发现明显的磁场衰减^[19,20], 表明钕铁硼材料在外太空环境中运行寿命可以满足系统总体要求. 螺丝材料为钛合金, 型号为 TC4. 粘合胶选择 EC2216, 其抗剪切强度可达 26 MPa, 可以保证整体结构的稳定. 其他材料参数如表 1 所示.

2.3 电子偏转器电磁参数设计方案

2.3.1 电子偏转器全物理仿真模型

采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立电子偏转器及聚焦镜镜片的全物理仿真模型, 如图 2 所示. 结合聚焦镜镜头的环形结构, 电子偏转器采用轴对称环形磁场设计方式, 每根辐条上粘接 5 块磁铁, 辐条数为 24 根, 与聚焦镜辐条数相同, 对 X 射线没有遮挡, 可以保证聚焦镜有效面积不受影响. Wolter-1 型聚焦镜由抛物面和双曲面构成, 二者共焦点, 镜片材料为金属镍, 最外层镜片口径为 $\Phi 492$ mm, 镜片长度为 600 mm (300 mm 抛物面镜+300 mm 双曲面镜). 综合考虑聚焦镜镜片口径 (磁铁覆盖口径 $\Phi 175$ mm— $\Phi 459$ mm)、辐条宽度 (磁铁最大宽度为 4 mm)、磁铁结构强度 (磁铁最小宽度为 1.8 mm)、磁铁粘接难度 (磁铁间距为 2 mm) 并经过多轮电磁参数仿真迭代后, 初步

表 1 电子偏转器各材料参数
Table 1. Material parameters of the electron deflector.

名称	材料/型号	数量	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	杨氏模量/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$)	泊松比	质量/kg
电子偏转器法兰	AA7075	1	2800	70000	0.33	0.339
磁铁	NdFeB	120	7400	140000	—	0.224
螺丝	TC4	—	7900	210000	0.3	0.003
粘合胶	EC2216	—	—	—	—	—

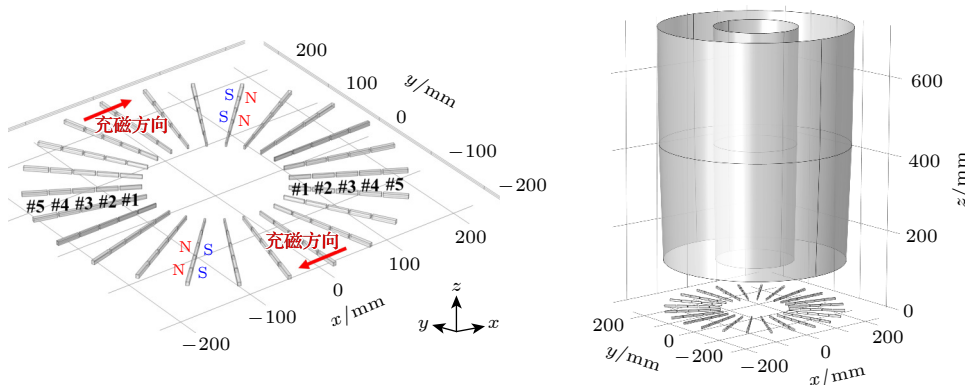


图 2 电子偏转器及聚焦镜镜片全物理仿真模型

Fig. 2. Full physical simulation model of the electron deflector and focusing telescope mirrors.

设计了电子偏转器钕铁硼 (NdFeB) 磁铁结构参数, 如表 2 所示. 通过磁场、粒子追踪的多物理场耦合仿真, 分析磁铁周围空间中的磁感应强度分布、电子进入磁场区域的偏转轨迹以及磁场对聚焦镜片的影响.

表 2 电子偏转器钕铁硼 (NdFeB) 磁铁结构设计参数
Table 2. Structure design parameters of the electron deflector NdFeB magnet.

序号	长度/mm	宽度/mm	高度/mm	剩磁/T
#1	26	1.8	5	1.4
#2	26	2.5	5	1.4
#3	26	3	5	1.4
#4	26	3.5	5	1.4
#5	30	4	5	1.4

2.3.2 磁感应强度分布

图 3(a) 所示为电子偏转器周围空间的磁感应强度分布, 图 3(b) 所示为磁场方向, 当沿电子入射方向观察时, 磁场方向为顺时针方向. 图 4(a) 所示为磁铁中心所在平面的磁感应强度分布, 图 4(b), (c) 所示分别为磁感应强度 x 分量和 y 分量分布,

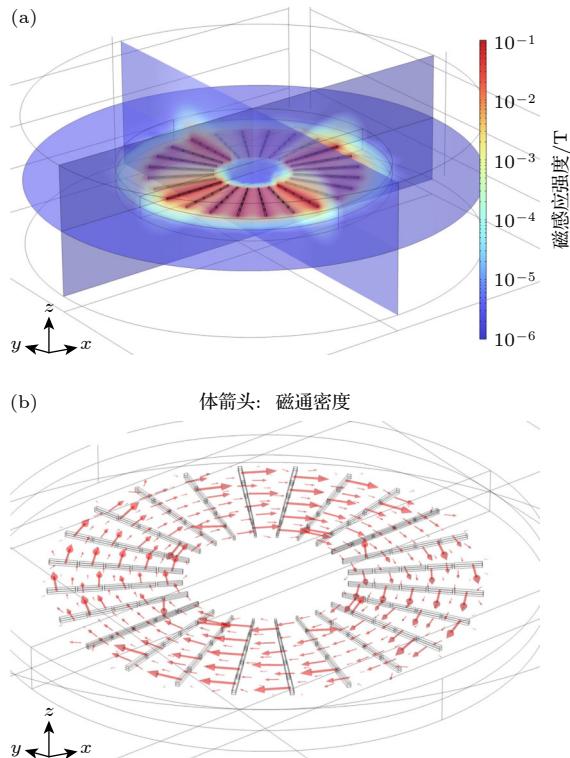


图 3 电子偏转器周围空间 (a) 磁感应强度分布, 右侧彩色图例表示磁感应强度; (b) 磁场方向

Fig. 3. (a) Distribution of magnetic flux density, the color legend on the right represents the magnetic flux density; (b) magnetic field direction around the electron deflector.

可以看到, 越接近磁铁和中心位置, 磁感应强度越大; x 轴两侧磁感应强度 x 分量方向相反, y 轴两侧磁感应强度 y 分量方向相反, 符合顺时针方向分布. 图 5 给出了磁感应强度沿两根辐条之间半径的分布情况, 磁感应强度沿半径方向减小, 两根辐条正中间磁感应强度最大值为 0.027 T. 值得注意的是, 相邻辐条所构成扇区的对称轴处的磁感应强度相比其他半径方向上的更弱, 因此需要特别关注该区域的电子偏转情况.

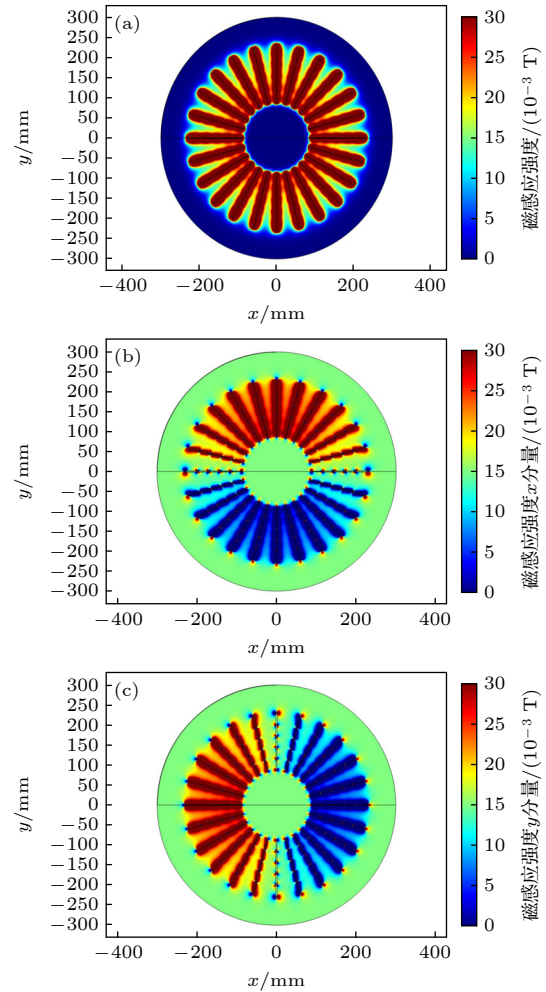


图 4 磁铁中心所在平面 (a) 磁感应强度; (b) 磁感应强度 x 分量; (c) 磁感应强度 y 分量分布

Fig. 4. Distribution of (a) magnetic flux density; (b) x component of magnetic flux density; (c) y component of magnetic flux density in the magnet center plane.

根据整星总体系统要求, 聚焦镜电子偏转器一定区域以外的磁感应强度应小于 0.5 Gs (1 Gs = 10^{-4} T), 即地磁强度, 才能对整星系统中其他部件的磁敏感元器件没有影响, 因此, 需要对电子偏转器的平面及纵向漏磁进行校核. 图 6 所示为半径

500 mm 范围内磁感应强度的平面分布, 半径大于 280 mm, 磁感应强度小于 5×10^{-5} T (0.5 Gs), 表明对周围设备的影响可以忽略. 如图 7 所示为磁感应强度的纵向分布, 距离大于 60 mm, 磁感应强度小于 5×10^{-5} T, 满足电磁兼容性能设计要求.

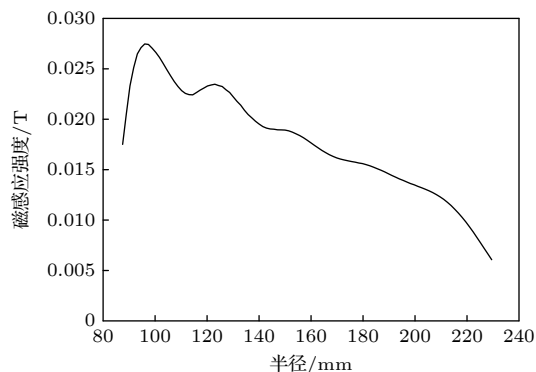


图 5 磁感应强度沿两根辐条之间半径的分布情况

Fig. 5. Distribution of magnetic flux density along the radius between two spokes.

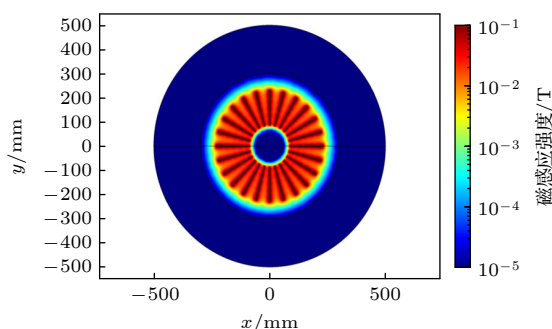


图 6 半径 500 mm 范围内磁感应强度平面分布

Fig. 6. Plane distribution of magnetic flux density within a radius of 500 mm.

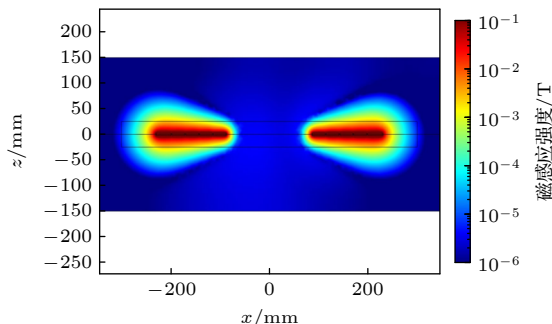


图 7 磁感应强度纵向分布

Fig. 7. Longitudinal distribution of magnetic flux density.

2.3.3 电子偏转轨迹

图 8 所示为电子偏转效率与电子能量和入射角的关系, 电子偏转效率定义为经过磁场偏转后未

到达电子偏转器下方 5250 mm 处 $\Phi 500$ mm 口径电子收集面的电子数量与总入射电子数量的比值, 入射角定义为电子入射方向与聚焦镜光轴的夹角. 可以看到, 当入射角 $\leq 10^\circ$ 时, 电子偏转效率随电子能量和入射角增大而减小, 50 keV 能量以下电子偏转效率可达 100%, 满足设计要求. 也可以看到, 对于 20° 入射角极限情况, 电子偏转效率随电子能量增大先减小后增大, 这与一侧 (左侧) 入射电子 (100 keV) 未从同侧偏转出去而从另一侧 (右侧) 直接出射有关, 如图 9 所示.

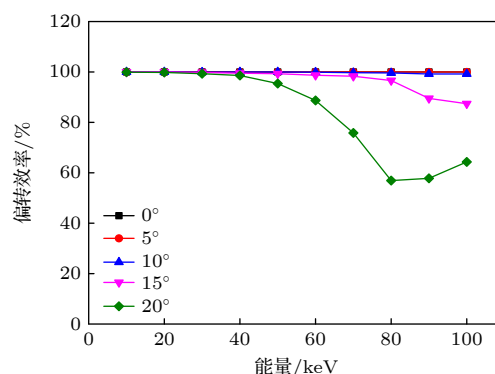


图 8 电子偏转效率与电子能量和入射角的关系

Fig. 8. Variations of electron deflection efficiency dependent on the electron energy and incidence angle.

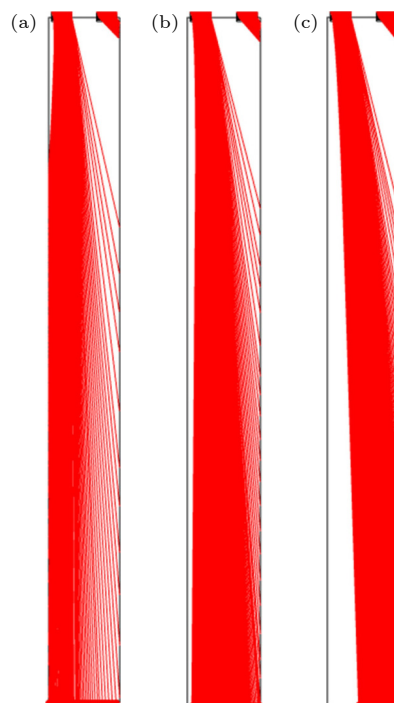


图 9 20° 入射角极限情况 (a) 60 keV; (b) 80 keV; (c) 100 keV 电子偏转轨迹

Fig. 9. For the 20° incident angle limit case: (a) 60 keV; (b) 80 keV; (c) 100 keV electron deflection trajectories.

图 10 所示为 5° 入射角时电子偏转效率与钕铁硼磁铁高度的关系, 可以看到, 当钕铁硼磁铁高度减小至 2 mm 时, 电子偏转效率有明显下降. 为满足对不同能量电子的偏转效率均为 100%, 在设计上留有冗余, 钕铁硼磁铁高度应达到 5 mm. 综合考虑聚焦镜镜片口径及辐条宽度限制 (保证聚焦镜有效面积), 钕铁硼磁铁长度及宽度优化空间较小, 表 2 中钕铁硼磁铁结构参数即为理想优化结果.

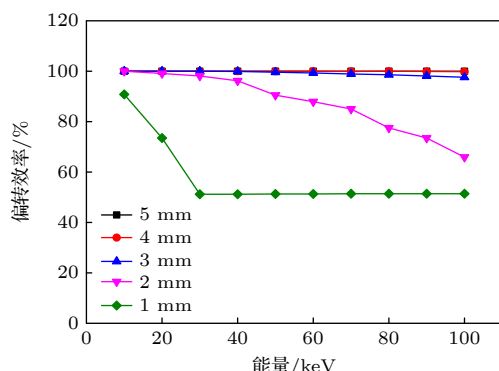


图 10 入射角为 5° 时电子偏转效率与钕铁硼磁铁高度的关系

Fig. 10. Variations of electron deflection efficiency dependent on the NdFeB magnet height at incident angle of 5° .

2.3.4 磁场对聚焦镜镜片的影响

为评估电子偏转器对聚焦镜光学性能的影响, 需要仿真分析聚焦镜镜片在磁场作用下的磁感应强度分布、应力分布以及形变大小. 如图 11 所示为聚焦镜镜片底端距离电子偏转器 130 mm 时聚焦镜镜片的磁感应强度分布, 镜片材料为金属镍, 聚焦镜镜片底端的磁感应强度仅达到 10^{-4} T 量级. 如图 12 所示为电子偏转器及聚焦镜镜片周围空间的磁感应强度分布, 由于磁化作用, 镜片磁感应强度大于周围空间磁感应强度; 而由于磁屏蔽效应, 镜片之间磁感应强度小于周围空间磁感应强度.

图 13 所示为聚焦镜镜片的应力分布, 应力大小仅 10^{-3} N/m² 量级. 如图 14(a) 所示为聚焦镜镜片的形变, 如图 14(b)–(d) 所示分别为镜片形变 x 分量、 y 分量和 z 分量, 可以看到, 镜片形变主要分布在 x 方向和 y 方向, 即镜片向内收缩; 形变大小仅 10^{-5} nm 量级, 而在聚焦镜的光学设计中, 要求镜片面型误差小于 1 μ m, 粗糙度小于 0.4 nm, 因此电子偏转器的磁场不会对聚焦镜的光学性能产生影响.

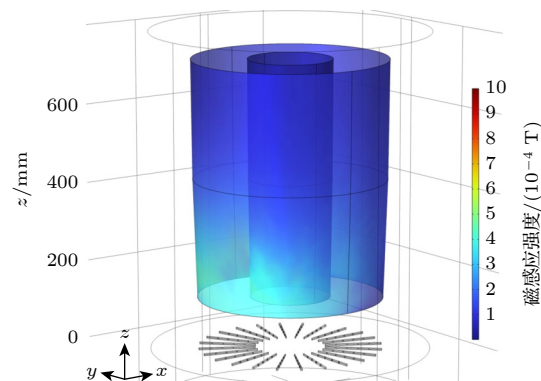


图 11 聚焦镜镜片磁感应强度分布

Fig. 11. Distribution of magnetic flux density of the focusing telescope mirrors.

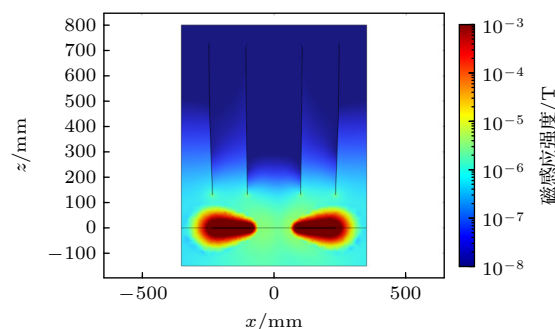


图 12 电子偏转器及聚焦镜镜片周围空间磁感应强度分布

Fig. 12. Distribution of magnetic flux density around the electron deflector and focusing telescope mirrors.

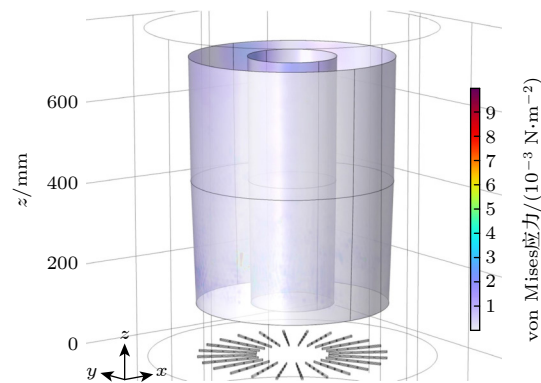


图 13 聚焦镜镜片应力分布

Fig. 13. Stress distribution of the focusing telescope mirrors.

图 15 所示为聚焦镜镜片底端距电子偏转器不同距离时聚焦镜镜片的磁感应强度分布, 随着聚焦镜镜片远离电子偏转器, 镜片受磁场影响的区域越来越小.

图 16 所示为聚焦镜镜片底端距离电子偏转器不同距离时电子偏转器及聚焦镜镜片周围空间的磁感应强度分布, 可以看到, 聚焦镜镜片会影

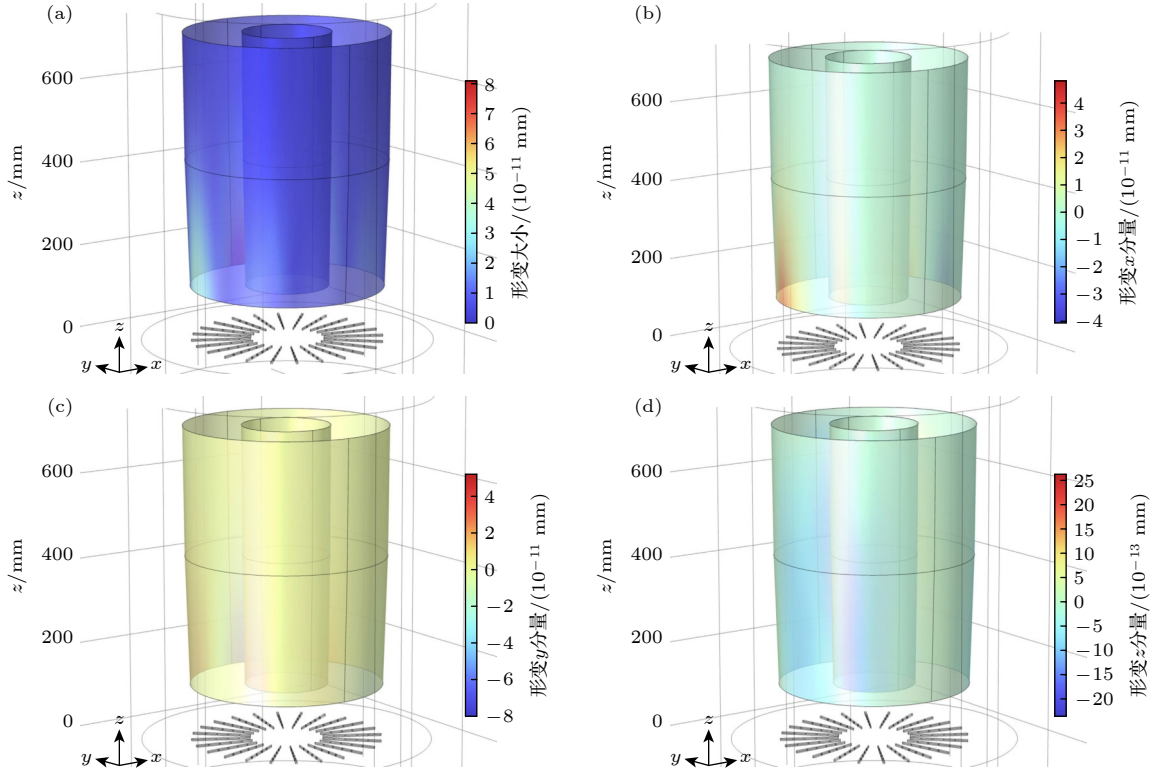

 图 14 聚焦镜镜片 (a) 形变大小; (b) 形变 x 分量; (c) 形变 y 分量; (d) 形变 z 分量

Fig. 14. (a) Deformation, (b) x component of deformation, (c) y component of deformation, and (d) z component of deformation of the focusing telescope mirrors.

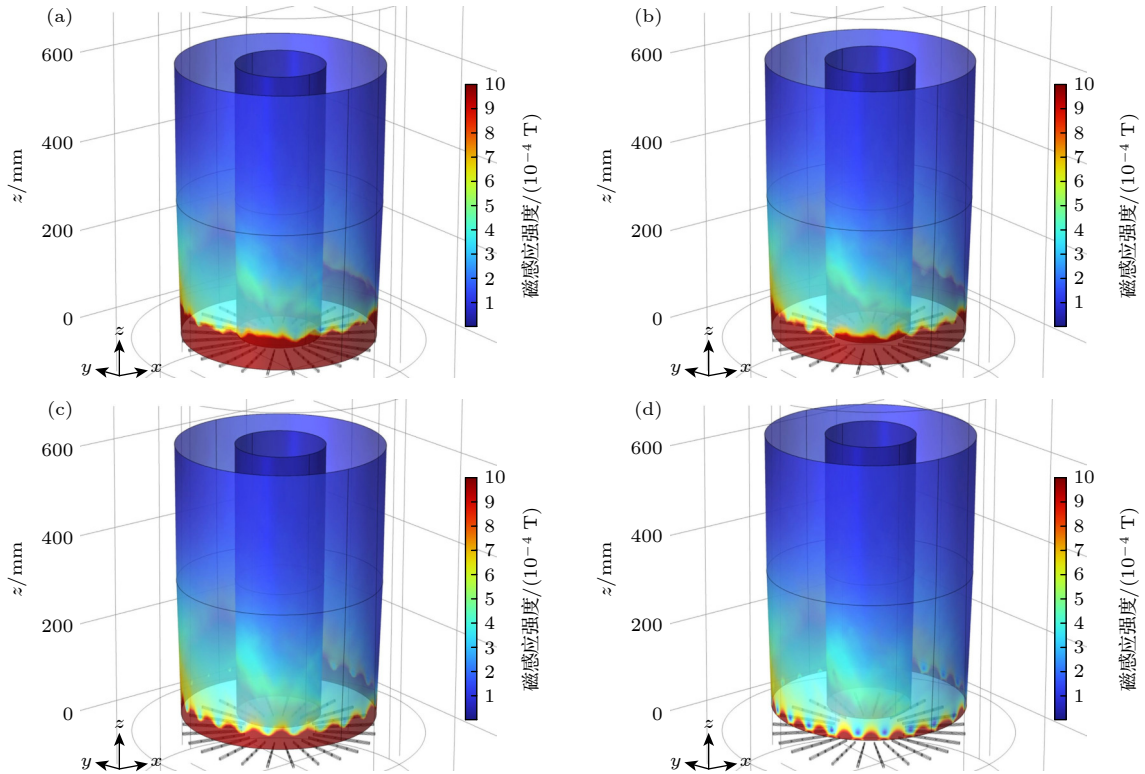


图 15 聚焦镜镜片底端距离电子偏转器 (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm 时聚焦镜镜片磁感应强度分布

Fig. 15. Distribution of magnetic flux density of the focusing telescope mirrors when the distance between the mirror bottom and electron deflector is (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, and (d) 60 mm.

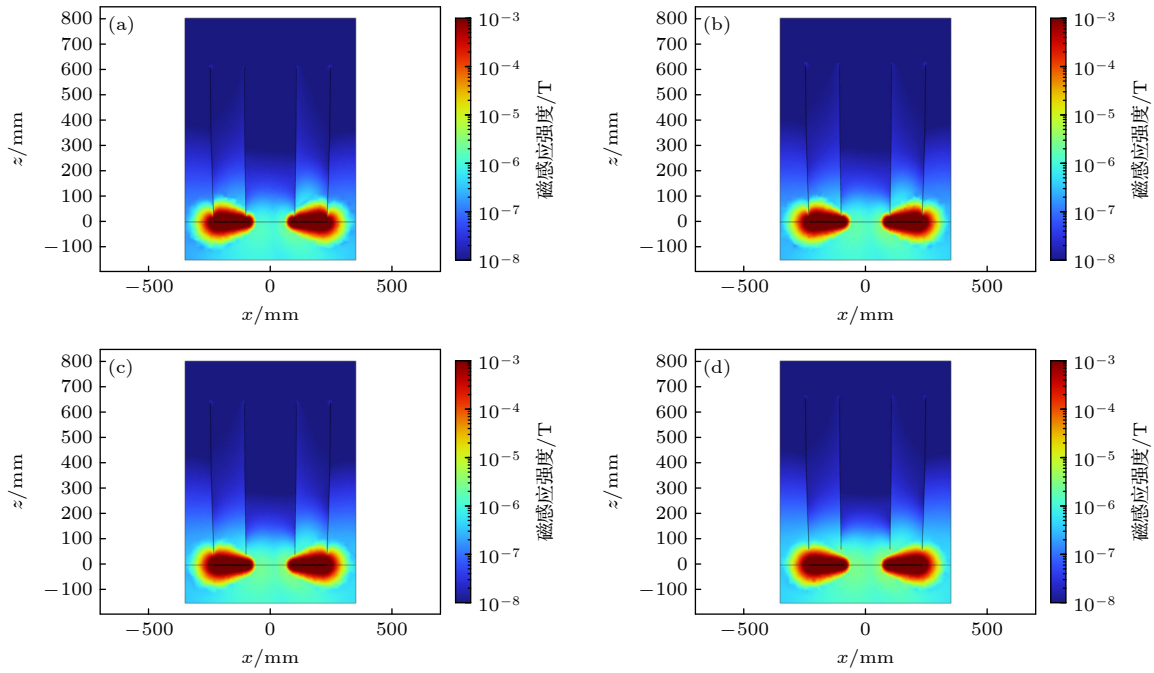


图 16 聚焦镜片底端距离电子偏转器 (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm 时电子偏转器及聚焦镜片周围空间磁感应强度分布

Fig. 16. Distribution of magnetic flux density around the electron deflector and focusing telescope mirrors when the distance between the mirror bottom and electron deflector is (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, and (d) 60 mm.

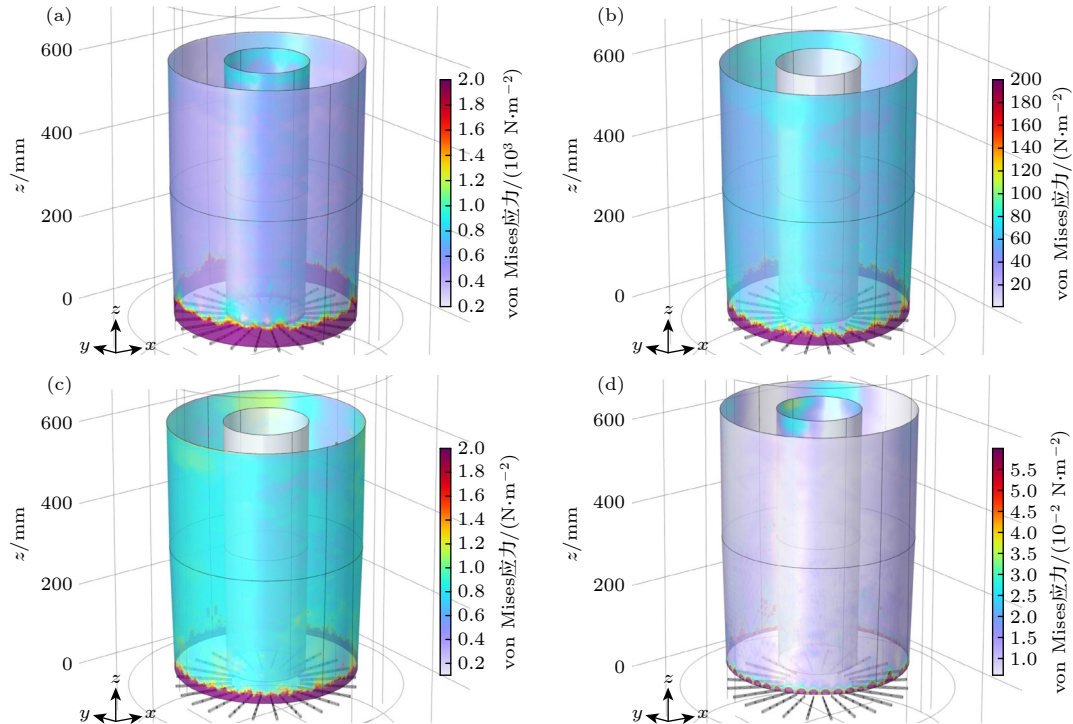


图 17 聚焦镜片底端距离电子偏转器 (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm 时聚焦镜片应力分布

Fig. 17. Stress distribution of the focusing telescope mirrors when the distance between the mirror bottom and electron deflector is (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, and (d) 60 mm.

响电子偏转器周围空间的磁感应强度分布, 随着二者距离缩小, 空间磁感应强度上下分布越来越不对称。

图 17 所示为聚焦镜片底端距离电子偏转器不同距离时聚焦镜镜片的应力分布, 随着聚焦镜片远离电子偏转器, 镜片底端应力大小从 10 mm

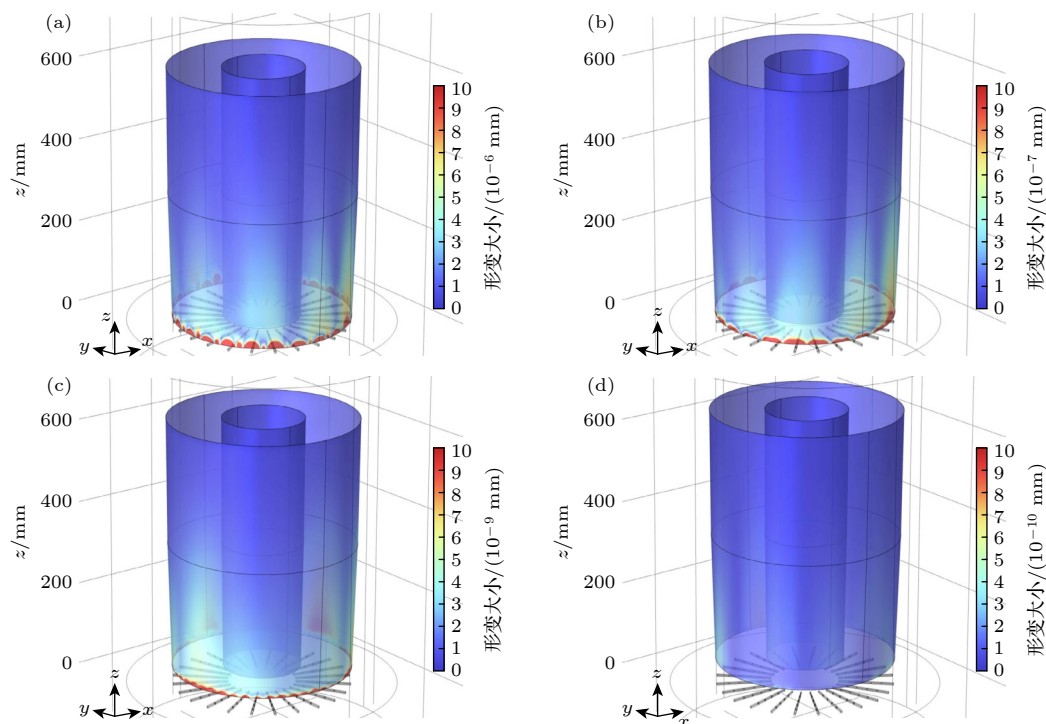


图 18 聚焦镜镜片底端距离电子偏转器 (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, (d) 60 mm 时聚焦镜镜片形变

Fig. 18. Deformation of the focusing telescope mirrors when the distance between the mirror bottom and electron deflector is (a) 10 mm, (b) 20 mm, (c) 40 mm, and (d) 60 mm.

时的 10^3 N/m^2 量级减小至 60 mm 时的 10^{-2} N/m^2 量级.

图 18 所示为聚焦镜镜片底端距离电子偏转器不同距离时聚焦镜镜片的形变, 随着聚焦镜镜片远离电子偏转器, 镜片底端形变大小从 10 mm 时的 nm 量级减小至 60 mm 时的 10^{-4} nm 量级, 表明要避免电子偏转器磁场对聚焦镜光学性能产生影响, 电子偏转器应距离聚焦镜镜片底端 10 mm 以上.

以上仿真结果表明, 电子偏转器钕铁硼 (NdFeB) 磁铁结构设计参数完全满足 eXTP 聚焦镜光学系统对于低能电子的偏转需求, 可实现对 25 keV、入射角 $\pm 5^\circ$ 以内、偏转距离 5250 mm 的电子偏转效率为 100%.

3 结 论

本文针对 eXTP 聚焦镜电子偏转器研制工作, 采用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 建立了电子偏转器及聚焦镜镜片的全物理仿真模型, 分析了磁感应强度分布、电子偏转轨迹以及磁场对聚焦镜镜片的影响, 完成了电子偏转器电磁参数设

计. 模拟结果表明, 电子偏转器周围空间中磁感应强度沿半径方向减小, 两根辐条正中间磁感应强度最大值可达 0.027 T. 在磁感应强度平面及纵向分布中, 当半径大于 280 mm 或纵向距离大于 60 mm 时, 磁感应强度小于 $5 \times 10^{-5} \text{ T}$ (0.5 Gs), 满足电磁兼容性能设计要求. 当入射角 $\leq 10^\circ$ 时, 电子偏转效率随电子能量和入射角增大而减小, 50 keV 能量以下电子偏转效率可达 100%, 满足电子偏转设计要求. 聚焦镜镜片底端距离电子偏转器 130 mm 时, 聚焦镜镜片在磁场的作用下, 应力大小仅 10^{-3} N/m^2 量级, 形变大小仅 10^{-5} nm 量级, 表明磁场不会对聚焦镜的光学性能产生影响. 以上仿真分析表明, 电子偏转器钕铁硼 (NdFeB) 磁铁结构设计参数完全满足 eXTP 聚焦镜光学系统对于低能电子的偏转需求, 可实现对 25 keV、入射角 $\pm 5^\circ$ 以内、偏转距离 5250 mm 的电子偏转效率为 100%, 为 eXTP 聚焦镜电子偏转器的研制工作提供了重要参考. 此外, 现有研究中还未考虑电子偏转器整体结构的力学可靠性, 未来还将开展卫星力学条件下的电子偏转器模态分析和振动响应分析, 进一步优化电子偏转器轮毂力学结构.

参考文献

- [1] Yuan W M, Zhang C, Chen Y, Sun S L, Zhang Y H, Cui W, Lin Z X, Huang M H, Zhao D H, Wang W X, Qiu Y L, Liu Z, Pan H W, Cai H B, Deng J S, Jia Z Q, Jin C C, Sun H, Hu H B, Liu F F, Zhang M, Song L M, Lu F J, Jia S M, Li C K, Zhao H S, Ge M Y, Zhang J, Cui W W, Wang Y S, Wang J, Sun X J, Jin G, Li L H, Chen F S, Cai Z M, Guo T, Liu G H, Liu H Q, Feng H, Zhang S N, Zhang B, Dai Z G, Wu X F, Gou L J 2018 *Sci. China: Phys. Mech.* **48** 039502 (in Chinese) [袁为民, 张臣, 陈勇, 孙胜利, 张永合, 崔伟, 凌志兴, 黄茂海, 赵冬华, 王文昕, 裴予雷, 刘柱, 潘海武, 蔡洪波, 邓劲松, 贾振卿, 金驰川, 孙惠, 胡海波, 刘飞飞, 张墨, 宋黎明, 卢方军, 贾淑梅, 李承奎, 赵海升, 葛明玉, 张娟, 崔苇苇, 王于仁, 王娟, 孙小进, 金戈, 黎龙辉, 陈凡胜, 蔡志鸣, 郭彤, 刘国华, 刘华秋, 冯骅, 张双南, 张冰, 戴子高, 吴雪峰, 苟利军 2018 *中国科学: 物理学 力学 天文学* **48** 039502]
- [2] Jeong S, Panasyuk M I, Reglero V 2018 *Space Sci. Rev.* **214** 25
- [3] Zhang S N, Santangelo A, Feroci M 2019 *Sci. China Phys. Mech.* **62** 25
- [4] Zand J J M, Bozzo E, Qu J L 2019 *Sci. China Phys. Mech.* **62** 029506
- [5] Aslanyan V, Keresztes K, Feldman C, Pearson J F, Willingale R, Martindale A, Sembay S, Osborne J P, Sachdev S S, Bicknell C L, Houghton P R, Crawford T, Chornay D 2019 *Rev. Scientif. Inst.* **90** 124502
- [6] Zhang S N, Santangelo A, Feroci M, et al. 2018 *Sci. China: Phys. Mech.* **62** 029502
- [7] Yuan W M, Zhang C, Feng H, et al. 2015 *Swift: 10 Years of Discovery*
- [8] Yuan W M, Chen Z, Ling Z, et al. 2018 *Proc. SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2018: Ultraviolet to Gamma Ray* **2018** 1069925
- [9] Chen Y, Cui W W, Han D W, et al. 2020 *Proc. SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray* **2020** 11444B
- [10] Gehrels N, Chincarini G, Giommi P, et al. 2004 *Astrophys. J.* **611** 1309
- [11] Willingale R 2000 *An electron diverter for the Swift Telescope XRA study note XRT-LUX-RE-011/1* (University of Leicester)
- [12] Friedrich P, Bräuninger H, Budau B, et al. 2012 *Proc. SPIE* **8443** 84431S
- [13] Spiga D, Fioretti V, Bulgarelli A, et al. 2008 *Proc. SPIE: Space Telescopes and Instrumentation 2008: Ultraviolet to Gamma Ray* 7011 70112Y
- [14] Wang L, Qin L, Cheng J, et al. 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 1
- [15] Lotti S, Mineo T, Jacquy C, et al. 2018 *Exp. Astron.* **45** 411
- [16] Fioretti V, Bulgarelli A, Molendi S, et al. 2018 *Astrophys. J.* **867** 9
- [17] Qi L Q, Li G, Xu Y P, et al. 2020 *Nucl. Instrum. Meth. A* **963** 163702
- [18] Qi L Q, Li G, Xu Y P, Chen Y, He H L, Wang Y S, Yang Y J, Zhang J, Lu F J 2021 *Exp. Astron.* **51** 475
- [19] Aguilar M, Alcaraz J, Allaby J, et al. 2002 *Phys. Rep.* **366** 331
- [20] Aguilar M, Cavasonza L A, Ambrosi G, et al. 2021 *Phys. Rep.* **894** 1

INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

Simulation analysis and design of electron deflector for
eXTP focusing telescope^{*}ZHENG Renzhou¹⁾ QIANG Pengfei¹⁾ YANG Yanji²⁾ YAN Yongqing^{1)†}LI Yue¹⁾ SHENG Lizhi^{1)‡} CHEN Yong²⁾¹⁾ (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)²⁾ (Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(Received 27 November 2024; revised manuscript received 27 December 2024)

Abstract

X-ray focusing telescope is the core equipment for space X-ray observation. In order to ensure the accuracy of the observation results, it is necessary to deflect the low-energy electrons entering the focusing telescope to effectively reduce the background noise. In this work, the electron deflector for enhanced X-ray timing and polarimetry mission (eXTP) focusing telescope is developed to meet the deflection requirements of low-energy electrons in the focusing telescope optical system, with the lightweight, ability to deflect electrons, and electromagnetic compatibility considered. The finite element analysis software COMSOL Multiphysics is used to establish the full physical simulation model of the electron deflector and focusing telescope mirrors. The magnetic flux density distribution, electron deflection trajectories and the effect of magnetic field on focusing telescope mirrors are analyzed, and the electromagnetic parameters of the electron deflector are designed. The simulation results show that the closer to the magnet and the center of electron deflector, the greater the magnetic flux density, and the maximum magnetic flux density in the middle of the two spokes can reach 0.027 T. When the radius is larger than 280 mm, the longitudinal distance is larger than 60 mm, the magnetic flux density is less than 5×10^{-5} T (0.5 Gs), i.e. the geomagnetic intensity, which meets the design requirements of electromagnetic compatibility performance. When the incidence angle is $\leq 10^\circ$, the electron deflection efficiency decreases with the increase of electron energy and incidence angle, and the deflection efficiency of electrons below 50 keV energy can reach 100%, which meets the design requirements of electron deflection. In addition, as the focusing telescope mirrors are away from the electron deflector, the area of mirrors affected by the magnetic field becomes smaller and smaller. When the distance between the mirror bottom and electron deflector is 130 mm, the magnetic flux density at the mirror bottom only reaches 10^{-4} T. Similarly, as the focusing telescope mirrors are away from the electron deflector, the stress at the mirror bottom decreases from 10^3 N/m² at 10 mm to 10^{-2} N/m² at 60 mm, and the deformation at mirror bottom decreases from $\sim$ nm at 10 mm to 10^{-4} nm at 60 mm. When the distance between the mirror bottom and electron deflector is 130 mm, the stress is only 10^{-3} N/m², and the deformation is only 10^{-5} nm, indicating that the magnetic field does not affect the optical properties of the focusing telescope. The above simulation analyses show that the design parameters of NdFeB magnet structure of the electron deflector fully meet the requirements of the eXTP focusing telescope optical system for the deflection of low-energy electrons. And the deflection efficiency of electrons with 25 keV energy, incidence angle within $\pm 5^\circ$, and deflection distance of 5250 mm is 100%. These results provide an important reference for developing electron deflector of eXTP focusing telescope.

Keywords: focusing telescope, electron deflector, magnetic field, deflection efficiency, deformation**PACS:** 95.55.Ka, 07.55.Db**DOI:** 10.7498/aps.74.20241649**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241649

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42327802, 62271483), the National Key Laboratory Foundation of China (Grant No. SKLIPR2021), the Natural Science Basic Research Program of Shaanxi Province, China (Grant Nos. 2023-JC-ZD-40, 2024JC-YBQN-0003), and the 76th General Program of the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2024M763511).

[†] Corresponding author. E-mail: yanyongqing@opt.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn

eXTP聚焦镜电子偏转器仿真分析与设计

郑人洲 强鹏飞 杨彦佶 闫永清 李悦 盛立志 陈勇

Simulation analysis and design of electron deflector for eXTP focusing telescope

ZHENG Renzhou QIANG Pengfei YANG Yanji YAN Yongqing LI Yue SHENG Lizhi CHEN Yong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 059502 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241649

CSTR: 32037.14.aps.74.20241649

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241649>

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

爱因斯坦探针后随X射线聚焦镜的粒子污染仿真

Particle contamination simulation of Einstein probe follow-up X-ray telescope focusing mirror

物理学报. 2023, 72(12): 120701 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230301>

磁化同轴枪操作参数对球马克产生及等离子体特性的影响

Effects of magnetized coaxial plasma gun operation on spheromak formation and plasma characteristics

物理学报. 2021, 70(20): 205202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210709>

铁酸铋薄膜光电流的磁场调制研究

Magnetic field modulation of photocurrent in BiFeO₃ film

物理学报. 2023, 72(6): 067501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222053>

基于移动渐近线算法的大角度偏转分束器的智能设计

Intelligent design of large angle deflection beam splitter based on method of moving asymptotes

物理学报. 2021, 70(23): 234102 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210117>

中高能重离子碰撞中的电磁场效应和手征反常现象

Electromagnetic field effects and anomalous chiral phenomena in heavy-ion collisions at intermediate and high energy

物理学报. 2023, 72(11): 112502 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230245>

不同外加磁场中Kaplan-Shekhtman-Entin-Wohlman-Aharony相互作用对量子失协非马尔科夫演化的影响

Effects of Kaplan-Shekhtman-Entin-Wohlman-Aharony interaction on quantum discord of non-markovian dynamics under different magnetic fields

物理学报. 2021, 70(22): 223401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211277>