

文章编号: 1005-5630(2015)05-0441-06

# 基于有限元的 X 射线聚焦望远镜结构分析

王 赛<sup>1,2</sup>, 伊圣振<sup>1,2</sup>, 王 新<sup>1,2</sup>, 穆宝忠<sup>1,2</sup>

(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 上海 200092)

**摘要:** 针对我国 X 射线时变与偏振卫星(XTP)项目中高能 X 射线聚焦望远镜的研制需求,初步设计了嵌套式、类 Wolter-I 型 X 射线望远镜并进行了结构优化。基于 X 射线望远镜的光学设计理论,给出了嵌套式聚焦望远镜的光学结构参数。利用有限元分析软件 ABAQUS,建立了嵌套式 X 射线聚焦望远镜的有限元模型。采用基础激励法模拟了 X 射线聚焦望远镜模型的随机振动,得到了望远镜结构的应力分布。通过切换层的方式,降低了望远镜结构的应力,达到了多层膜承受应力的要求。该研究为 XTP 项目中的 X 射线望远镜载荷设计提供了参考。

**关键词:** X 射线聚焦望远镜; 光学设计; 有限元分析; 随机振动

**中图分类号:** TH 743 **文献标志码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1005-5630.2015.05.013

## Analysis of X-ray focusing telescope structure based on finite element method

WANG Sai<sup>1,2</sup>, YI Shengzhen<sup>1,2</sup>, WANG Xin<sup>1,2</sup>, MU Baozhong<sup>1,2</sup>

(1. MOE Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** For the X-ray timing and polarization (XTP) project in China, the optical structure of nested conical Wolter-I X-ray telescope was designed and optimized. Based on the theory of optical design of X-ray telescope, the optical parameters were calculated. By ABAQUS, the finite element model of nested telescope was established. The base-excitation method was used to carry out random vibration analysis. By switching layers, the stress of the telescope structure was reduced, which can meet the requirement of multilayers' stress. This research provides a support for the design of X-ray telescope in XTP project.

**Keywords:** X-ray focusing telescope; optical design; finite element analysis; random vibration

## 引 言

X 射线天文望远镜是观测宇宙中辐射 X 射线天体的重要设备,探测目标包括黑洞、脉冲星、X 射线双星、超新星遗迹和太阳活动区等。自上世纪 70 年代以后,美国航天局(NASA)、日本航天局(JASA)和欧洲航天局(ESA)先后发射了多个聚焦式 X 射线望远镜,如 Einstein 望远镜<sup>[1]</sup>、Chandra 望远镜<sup>[2]</sup>、ASCA 望远镜<sup>[3]</sup>、XMM-Newton 望远镜<sup>[4]</sup>、Nustar 望远镜<sup>[5]</sup>等。目前正在研制中的 X 射线望远镜项目包括日本

收稿日期: 2015-01-22

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项课题(课题编号: XDA04060605)

作者简介: 王 赛(1990—),男,硕士研究生,主要研究类 Wolter-I 型 X 射线望远镜的结构设计。E-mail: 1234034ws@tongji.edu.cn

通信作者: 穆宝忠(1975—),男,教授,主要从事 X 射线成像研究。E-mail: mubz@tongji.edu.cn

的 Astro-H 望远镜<sup>[6]</sup>、美国 Nicer 望远镜<sup>[7]</sup>、欧洲的 LOFT 望远镜<sup>[8]</sup>和 Athena 望远镜<sup>[9]</sup>等。近年来,以黑洞及中子星等为观测目标的 X 射线时变与偏振探测卫星(XTP)的相关研究已在国内快速展开<sup>[10]</sup>,X 射线聚焦望远镜是该规划中卫星的重要载荷之一。

为了扩展工作于掠入射条件下的 X 射线望远镜的集光面积,其光学系统是在 Wolter-I 型的基础上,采用多层嵌套的结构形式。由于 X 射线望远镜载荷在发射升空过程中,将受到火箭发动机工作噪声及气动力激振等因素的影响,会产生随机振动载荷,影响望远镜结构的可靠性。为保证 X 射线望远镜在发射时随机振动环境下的可靠性,如何设计嵌套集成超薄反射镜的望远镜结构一直是 X 射线聚焦望远镜研究中的关键问题。在结构设计阶段,有限元方法是开展此类分析的重要手段<sup>[11]</sup>。如 Astro-H 望远镜设计中,基于有限元模态分析方法得到了望远镜反射镜的振型频率为 64 Hz 时,反射镜的边缘变形比中心处大;振型频率为 118 Hz 时,反射镜的中心变形比边缘处大<sup>[6]</sup>;在 Nustar 望远镜设计中,通过随机振动有限元模拟分析了望远镜物镜的应力分布,得到了 133 层的嵌套式结构中最内 5 层为受力较集中区域且应力较大,其应力值约为 2 MPa,从而选择比外层更宽的石墨垫片(1.6 mm)进行装配连接,以增强望远镜内层结构的支撑作用<sup>[5]</sup>。本论文将结合 XTP 卫星对聚焦式 X 射线望远镜的光学性能要求,采用有限元分析软件 ABAQUS 来研究望远镜模型在受到随机激励下的动力学响应,从而获得望远镜结构的应力分布,为 XTP 项目中 X 射线聚焦望远镜载荷的结构设计和装配参数提供支持。

### 1 X 射线聚焦望远镜的光学设计

在嵌套式 X 射线望远镜的结构中,常采用圆锥近似结构代替 Wolter-I 型结构,即以圆锥面代替旋转抛物面主镜和旋转双曲面副镜,其光学结构如图 1 所示。

沿轴光线入射至主镜发生一次反射至副镜,再由副镜二次反射至焦平面形成聚焦斑。图 1 中, $f$  为系统焦距, $t$  为镜面厚度, $L_p$  为主镜沿轴长度, $L_h$  为副镜沿轴长度, $\theta_N$  为第  $N$  层镜面掠入射角度,主镜和副镜具有相同的掠入射角度, $r_N$  为第  $N$  层副镜末端点的纵坐标值, $R_N$  则为第  $N$  层副镜中点的纵坐标值。第  $N$  层镜面的掠入射角度与焦距的关系可由式(1)表示。

$$\tan 4\theta_N = \frac{R_N}{f} \quad (1)$$

层与层之间设计的原则是内层镜面恰好不挡外层镜面的零视场入射光线,并保证所有嵌套层的主光线均聚焦于原点,从而得出相邻两层之间的关系如下式<sup>[12]</sup>:

$$\Delta r_N = \tan 4\theta_N \cdot L_h - \tan 3\theta_N \cdot L_h + t \quad (2)$$

$$r_{N+1} = r_N - \Delta r_N \quad (3)$$

$$r_{N+1} = f \cdot \tan 4\theta_{N+1} - \frac{L_h}{2} \tan 3\theta_{N+1} \quad (4)$$

式中  $\Delta r_N$  为第  $N$  层与第  $N+1$  层镜面之间的间隔。由上述公式可知,确定最外层口径  $R_{out}$  和系统焦距  $f$  的情况下,内层镜面的口径  $r_N$  和掠入射角度  $\theta_N$  能够被逐层计算得到。同时,限制最内层口径  $R_{in}$ ,则系统的嵌套层数确定。

根据科学目标和卫星平台的要求,初步确定以下初始参数:焦距 4.5 m;望远镜的外口径由天文观测区决定,针对 6 keV 的主观测能段,最大工作掠入射角可以达到约  $0.7^\circ$ ,对应的相对孔径  $D/F=0.1$ ,因此选择最外层直径为 450 mm;最内层口径主要依据热弯法制备高精度反射镜的技术能力,选择  $D_{in} = 100$  mm 作为初始参数;镜片采用厚度为 0.21 mm 的 D263 玻璃。结合式(2)~(4),设计得到望远镜的初

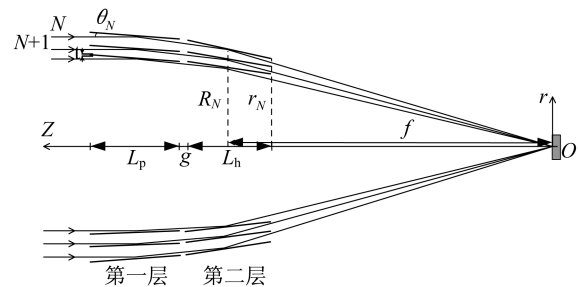


图 1 圆锥嵌套 Wolter-I 型 X 射线天文望远镜的光路结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nested conical Wolter-I X-ray astronomical telescope

始光学结构参数,如表 1 所示。

## 2 X 射线聚焦望远镜的有限元分析

### 2.1 嵌套式结构的有限元模型

望远镜的装配体以中心芯轴为支撑,由内向外逐层装配而成。层与层之间以石墨条为连接体,根据光学设计结果,将每层的石墨条加工成对应的口径和倾角<sup>[5]</sup>。X 射线望远镜的初始结构模型如图 2 所示。内层结构由 6 个 60°的扇区模块构成,外层由 12 个 30°的扇区模块构成。由于大口径反射镜的面形极难控制,根据目前的制备水平,外层反射镜选择了 30°扇角。60°扇区模块和 30°扇区模块的分界为第 53 层和 54 层,类似于 133 层的 Nustar 望远镜在第 67 层分界。外层的 30°扇区模块中,每个反射镜由 5 个石墨条支撑,石墨条间隔扇角为 7.5°;内层的 60°扇区模块中,每个反射镜同样由 5 个石墨条支撑,石墨条间隔扇角为 15°。反射镜采用肖特(Schott)公司的 D263 玻璃。芯轴采用 5 mm 厚度的钛合金材料,外径为 100 mm。芯轴、石墨垫片和玻璃反射镜之间使用型号为 F131 的环氧树脂粘结。材料的关键参数如表 2 所示。

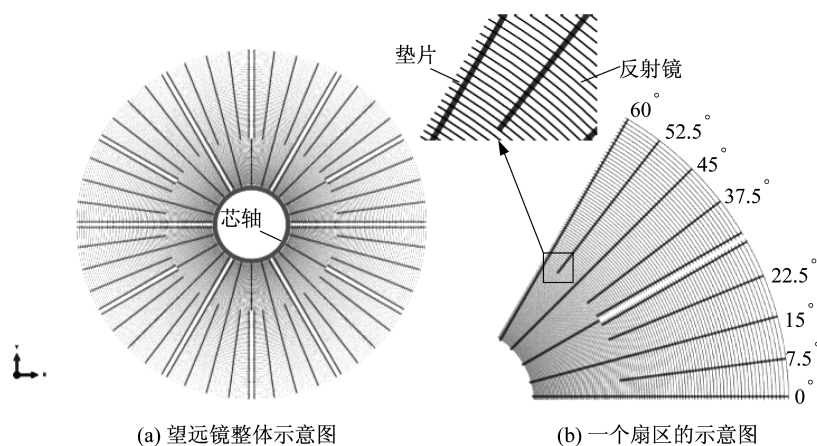


图 2 X 射线望远镜结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the X-ray telescope

根据光学设计所得到的每一层反射镜和石墨垫片的曲率半径,使用 ABAQUS 预处理模块,采用实体建模的方式,建立每一层的反射片和石墨垫片。在 ABAQUS 软件中网格化(MESH)模块,对几何体使用六面体单元进行有限元网格自动划分,网格类型为 C3D8。在有限元的预处理中,为了简化模型并且获得结构的整体应力分布,没有考虑环氧树脂层,将石墨垫片与反射镜、石墨垫片与中心芯轴的网格采用共节点的方式连接。

### 2.2 随机振动分析

在结构动力学分析中,常采用模态分析的方法来确定和评价结构的振动特性,如确定结构的自然频率、振型、振型的参与系数等。在模态分析中,因振动被假定为自由振动,所以只有边界条件起作用,其它载荷对分析结果没有影响。望远镜结构是通过固定芯轴的方式与其他机械结构相连接固定,所以其边界条件是对芯轴的前后端面的自由度进行全约束<sup>[13]</sup>。

表 1 X 射线望远镜的光学结构参数

Tab. 1 Structural parameters of X-ray telescope

名称	参数
焦距	4.5 m
芯轴	内半径:45 mm 外半径:50 mm
嵌套层数	106
反射镜长度	200 mm
反射镜厚度	0.21 mm
反射镜内层半径	52 mm
反射镜外层半径	225 mm

表 2 材料的属性

Tab. 2 Properties of materials

参数	中心芯轴(钛)	石墨垫片	D263 玻璃
弹性模量/MPa	110 000	210 000	72 900
密度/(t · mm <sup>-3</sup> )	4.6 × 10 <sup>-9</sup>	2.24 × 10 <sup>-9</sup>	2.51 × 10 <sup>-9</sup>
泊松比	0.3	0.28	0.208

随机振动分析采用模态叠加法<sup>[14]</sup>,先对结构进行模态分析,采用 ABAQUS 软件的 Lanczos 算法,设置分析步为线性摄动步 (liner perturbation) 中的频率提取分析步 (frequency extraction),模态分析嵌套式望远镜模型。提取结构模态信息,所求的模态数量应该覆盖激励频率范围内,故只提取了前 30 阶固有频率和振型。表 3 为模态分析的固有频率数据,列出了前 5 阶固有频率数值,图 3 为望远镜结构的前两阶振型,可知前两阶振型反应了望远镜扇区整体的径向摆动,望远镜的各阶振型都主要是反应了扇区的摆动和扭曲。

表 3 模型的前 5 阶模态固有频率

Tab. 3 The first five modal natural frequency

阶数	频率/Hz
1	305.26
2	326.43
3	326.45
4	337.55
5	350.87

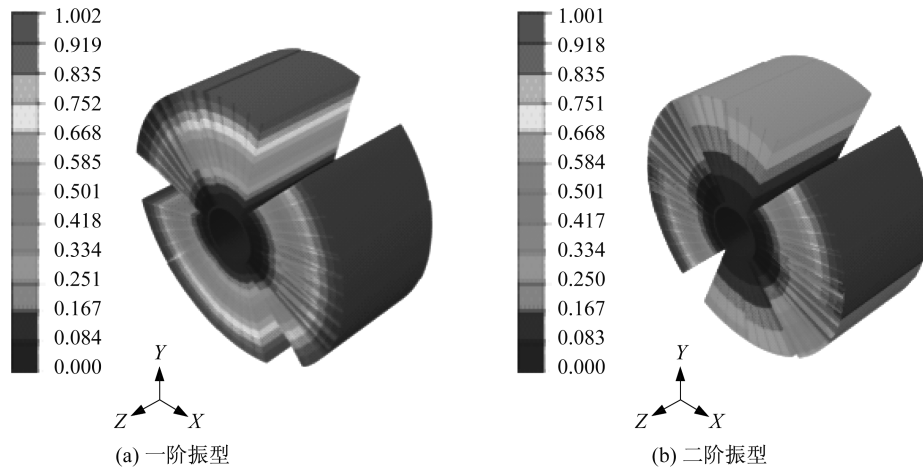


图 3 X 射线聚焦望远镜的一阶和二阶振型

Fig. 3 The 1 st and 2 nd modes of X-ray focusing telescope

模态分析是随机振动分析的基础,在完成模态分析后才能进行随机振动分析。随机振动也称为功率谱密度 (power spectral density, PSD) 分析,本分析采用加速度功率谱作为载荷,加速度功率谱见表 4,沿望远镜的轴向作用于芯轴。

表 4 功率谱密度

Tab. 4 Power spectral density

频率范围/Hz	功率谱密度/(g <sup>2</sup> · Hz <sup>-1</sup> )
10~50	+3 dB/oct
50~400	0.176
400~1 000	-9 dB/oct

在望远镜芯轴的前后端面施加径向(即图 3 模型中的 X 方向)如表 4 的加速度功率谱,确定该方向振动下望远镜结构的应力情况,分析得到图 4 的应力云图。

根据分析结果,图 4 给出了望远镜模型轴向随机振动响应,其结构的应力主要集中在望远镜从第 1 层反射镜到 53 层的反射镜,最大应力出现在第 1 层石墨垫片和芯轴的连接处,即图 4 所示 A 点位置,在 53 层 60°扇区模块和 30°扇区模块的分界位置应力值比内层略小,即图 4 所示的 B 点位置。图 5 为两个位置 A 和 B 的应力均方值曲线,在 300~400 Hz 之间,应力值迅速增大且达到了最大值,即 A 点位置的最大应力值约为 50 MPa, B 点位置的最大应力值约为 40 MPa,说明此结构的随机响应主要以 400 Hz 频率之内的频率成分为主。望远镜的反射镜表面镀制 X 射线薄膜,通常薄膜所能承受的应力值约为十几个兆帕<sup>[5]</sup>,根据分析得到望远镜模型的应力值,尤其是 A、B 点位置的应力值远大于反射镜表面的多层膜能承受的应力大

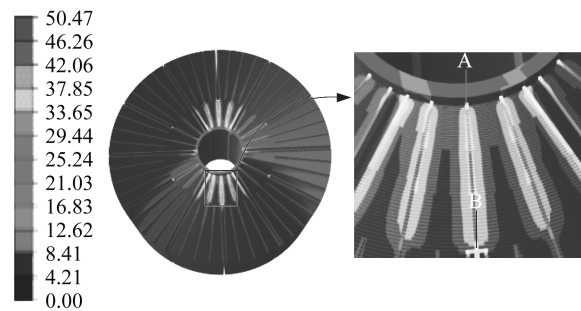


图 4 望远镜模型的应力云图

Fig. 4 Stress of the X-ray telescope model

大

小,可能会导致环氧树脂、薄膜、反射镜基底间脱离,破坏望远镜的结构。

上述装配方式的望远镜结构在受到随机激励下,内层反射镜承受应力很大,结构的可靠性难以保证。从图 3 的振型分析可以看出:望远镜结构若只由内层支撑结构的整体,每一个  $60^\circ$  扇区的摆动和扭曲都很大,导致结构的内 53 层随机振动的应力响应很大。在原有结构基本不变的情况下,在 53、54、55 层将反射镜位置切换,使得相邻独立的  $60^\circ$  扇区连接起来,这三层反射镜称之为切换层,如图 6 所示。模态分析了切换层方式的望远镜结构,如图 7 所示。

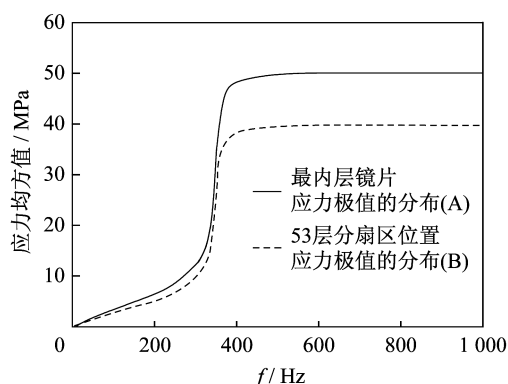


图 5 应力的均方根曲线

Fig. 5 RMS curve of the stress

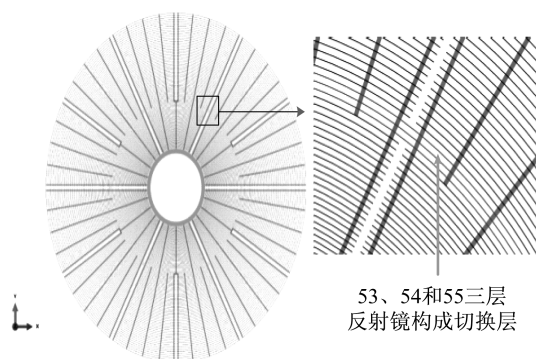


图 6 切换层方式的望远镜结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the X-ray telescope (layers 53-55 switched)

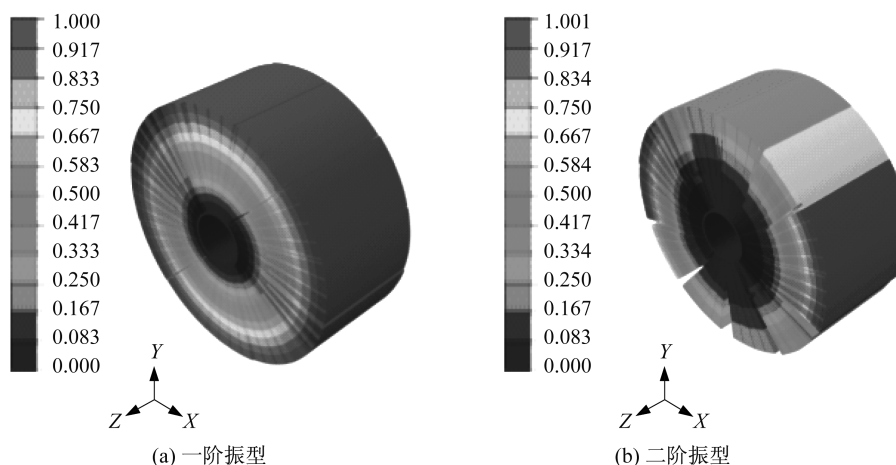


图 7 切换层方式望远镜结构的前两阶振型

Fig. 7 The 1st and 2nd modes (layers 53-55 switched)

针对切换层方式的望远镜结构,得到其第一阶和第二阶固有频率分别为 353.06 Hz、696.6 Hz,比较分析图 3 和图 7 得出:每一个  $60^\circ$  扇区的摆动和扭转比没有切换层方式的望远镜结构明显变小,位移的偏移幅值减小,且切换层方式的望远镜结构的固有频率提高了很多。

由图 8 分析可得,望远镜的应力集中在内 4 层和切换层的反射镜位置处,应力最大为 5 MPa,同样的位置,从图 9 应力曲线可知,在整个频率内,应力值增长缓慢,且 A 点应力值从最大值 50 MPa 减小为 5 MPa, B 点位置应力最大值从 40 MPa 减小为 2.5 MPa,其应力值都在多层膜、玻璃和环氧树脂承受的应力大小范围内<sup>[5]</sup>,图 5 与图 9 对比分析,说明了切换层方式的望远镜结构可以有效地降低望远镜结构在随机激励下的响应应力,明显地增强了望远镜结构的可靠性。

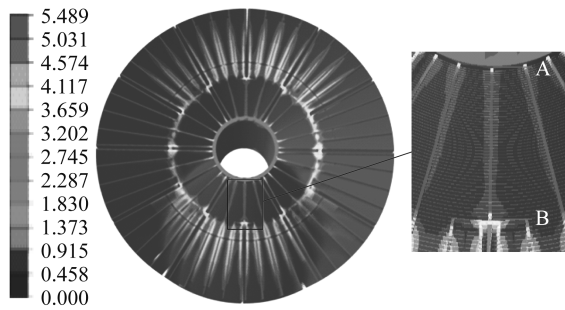


图 8 切换层方式的望远镜应力云图

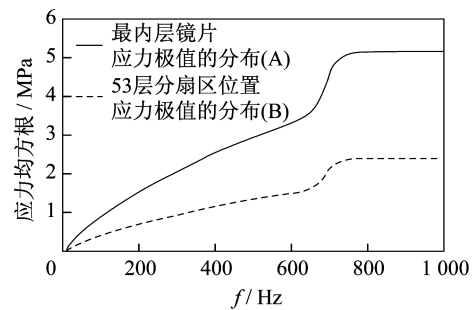
Fig. 8 Stress of the X-ray telescope  
(layers 53-55 switched)

图 9 应力的均方根曲线(切换层方式)

Fig. 9 RMS curve of the stress  
(layers 53-55 switched)

### 3 结 论

本论文基于 X 射线聚焦望远镜的初始光学结构,利用 ABAQUS 有限元分析软件,建立有限元模型并完成结构的模态及随机振动响应分析,结论如下:

(1) 对于 6 个独立的  $60^\circ$  扇区和 12 个  $30^\circ$  扇区(无切换层)的望远镜结构,内 53 层的反射镜和石墨垫片承受的应力较大,应力最大处在最内层,达到了 50 MPa,超过了多层膜可以承受的应力范围。

(2) 采用切换层方式的望远镜结构,其应力主要集中在内 4 层和切换层位置,最大应力约为 5 MPa,极大地降低了望远镜结构内层反射镜和分扇区 53 层反射镜受到的应力,可以满足多层膜、环氧树脂和玻璃的应力强度要求。

### 参考文献:

- [1] WEISSKOPF M C. The advanced x-ray astrophysics facility-an overview[J]. Astrophysical Letters and Communications, 1987, 26: 1-6.
- [2] WEISSKOPF M C, TANANBAUM H D, VAN SPEYBROECK L P, et al. Chandra X-ray observatory (CXO): overview[J]. SPIE, 2000, 4012: 2-16.
- [3] TANAKA Y, INOUE H, HOLT S S. The X-ray astronomy satellite ASCA[J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 1994, 46: L37-L41.
- [4] ASCHENBACH B. In-orbit performance of the XMM-Newton X-ray telescopes: images and spectra[J]. SPIE, 2002, 4496: 8-22.
- [5] CRAIG W W, AN H J, BLAEDEL K L, et al. Fabrication of the NuSTAR flight optics[J]. SPIE, 2011, 8147: 81470H-81470H-14.
- [6] KOSAKA T, IGARASHI T, AWAKI H, et al. Vibration properties of hard x-ray telescope on board satellite[J]. SPIE, 2010, 7732: 77323G-77323G-9.
- [7] GENDREAU K C, ARZOUMAIAN Z, OKAJIMA T. The neutron star interior composition explore R (NICER): an explorer mission of opportunity for soft x-ray timing spectroscopy[J]. SPIE, 2012: 844313-844313-8.
- [8] NERONOV A, BOYARSKY A, IAKUBOVSKIY D, et al. Potential of LOFT telescope for the search of dark matter[J]. Physical Review D, 2013: arXiv: 1312. 5178.
- [9] BAVDAZ M, RANDO N, WILLE E, et al. ESA-led ATHENA/IXO optics development status[J]. SPIE, 2011, 8147: 81470C.
- [10] CHEN S H, MU B Z, MA S, et al. Design of hard x-ray focusing telescope with a large field-of-view[J]. SPIE, 2014, 9272: 92721R-92721R-11.
- [11] 余成武, 卢欣. 有限元分析在航天器产品设计中的应用[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(4): 28-32.
- [12] 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.
- [13] 刘芳, 孟光. 随机振动载荷下电路板组件三维有限元模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(20): 61-64.
- [14] 张文元. ABAQUS 动力学有限元分析指南[M]. 中国图书出版社, 2005.

(编辑:张 磊)