

X 射线聚焦望远镜的支撑结构与力学实验分析

谢文亮^{1,2}, 沈正祥^{1,2}, 余俊^{1,2}, 王占山^{1,2}, 黄帆³, 陈昌亚³, 范峰⁴

- (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;
3. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 4. 上海利正卫星应用技术有限公司, 上海 200240)

摘要: 掠入射 X 射线聚焦望远镜的支撑框架结构设计是望远镜研制的关键技术之一。国内规划中的 XTP 卫星低能聚焦望远镜拟采用基于超薄玻璃的 X 射线聚焦望远镜方案, 针对望远镜样机严苛的光学和力学性能要求, 经过结构选型优化, 设计了一种一体化的六边形桶式望远镜支撑结构。利用有限元软件对支撑结构进行了模态分析和频率响应分析, 并与力学实验进行了对比验证。结果表明, 该支撑结构具有较大的结构刚度, 望远镜结构在发射环境下不会发生破坏性改变, 满足力学性能要求。该支撑框架结构简洁、装配精度高, 具有良好的工艺性, 为望远镜的研制提供了参考。

关键词: 掠入射 X 射线望远镜; 结构设计; 力学分析; 振动试验

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0418002

Design and mechanical experiment analysis of support structure for X-ray focusing telescope

Xie Wenliang^{1,2}, Shen Zhengxiang^{1,2}, Yu Jun^{1,2}, Wang Zhanshan^{1,2}, Huang Fan³,
Chen Changya³, Fan Feng⁴

- (1. Key Laboratory of Advanced Micro-Structured 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;
3. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;
4. Shanghai Lizheng Satellite Application Technology Limited Company, Shanghai 200240, China)

Abstract: The design of the support frame structure of grazing incidence X-ray telescope is one of the key technologies in the development of telescope. The low energy focusing telescope of XTP satellite was planned, which adopted the X-ray focusing telescope based on the ultrathin glass. According to the rigorous optical and mechanical performance requirements for telescope prototypes, a hexagon barrel type telescope support structure was designed after structure selection and optimization. The modal analysis and frequency response analysis of the support structure were carried out by using the finite element software, and the results were compared with the mechanical experimental results. The results show that the support structure has a large structural rigidity, and the structure of the telescope will not be destroyed when it is launched, which can meet the requirements of mechanical properties. The support frame has the

收稿日期: 2017-11-10; 修订日期: 2017-12-20

基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11427804); 科技部国家重大科学仪器设备开发专项子课题(2012YQ04016403); XX 重大专项资助课题

作者简介: 谢文亮(1991-), 男, 硕士生, 主要从事嵌套式 X 射线聚焦望远镜装配方面的研究。Email: 1433536@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

advantages of simple structure, high assembling precision and good manufacturability as well. It provides a reference for telescope development.

Key words: grazing incidence X-ray telescope; structure design; mechanical analysis; vibration test

0 引言

近20年来,国际上先后发射了多颗X射线天文卫星,如钱德拉天文望远镜^[1]、牛顿望远镜^[2]、朱雀望远镜^[3]、NuSTAR望远镜^[4]等,采用Wolter-I型或圆锥近似Wolter-I型掠入射望远镜,结合超薄反射镜镜片多层嵌套结果,实现了高角分辨率和大集光面积的X射线天文观测。国内规划中的X射线时变与偏振探测(eXTP)卫星,拟对黑洞、中子星、磁星等极端天体进行高精度观测,计划搭载11台基于热弯玻璃的嵌套式低能X射线聚焦望远镜,目标实现角分级角分辨率和平方米级集光面积^[5]。

基于热弯玻璃的嵌套式圆锥近似Wolter-I型聚焦望远镜芯轴为中空圆柱体,通过环氧树脂将石墨间隔条粘结在芯轴表面上,再利用超薄环氧树脂将超薄玻璃镜片粘接在石墨隔条上方,形成“石墨间隔条-环氧树脂-超薄玻璃镜片”的“三明治”型结构,实现超薄镜片的多层嵌套集成装配。为了减小反射镜片截面的遮挡,增大有效集光面积,选用的超薄玻璃镜片厚度仅为300 μm^[6]。

望远镜芯轴是望远镜的唯一的支撑体和核心受力构件,望远镜的芯轴通过螺栓与望远镜的支撑结构相连接,支撑结构通过螺栓安装固定在XTP卫星顶部的载荷安装平板上。支撑结构与芯轴连接时的应力将直接对望远镜的芯轴和超薄镜片产生形变,影响望远镜的光学性能。同时,望远镜及其支撑框架在发射升空过程中,将承受非常大的加速度、振动、冲击和噪声等严苛的力学环境考验,因此望远镜支撑结构在保证其轻量化的前提下,具有较高的刚度,减轻局部动态耦合效应的作用,从而降低传递至望远镜的动载荷和动应力^[7-9]。望远镜置于卫星顶部,距离星箭连接环约有5.5 m的高度,在卫星发射时运载激励将不可避免地产生放大作用,对望远镜的整体结构稳定性带来了严峻的挑战。此外,工作时温度的变化将造成支撑框架变形,引起望远镜的光轴的偏离,导致长焦距掠入射望远镜的焦点在探测器

上出现漂移,影响系统的光学性能。因此,望远镜的支撑结构设计是嵌套式掠入射X射线聚焦望远镜研制的关键技术之一。

文中针对国内XTP卫星的嵌套式X射线聚焦望远镜载荷样机的研制需求,经过选型优化,设计了一种一体化六边形桶式支撑结构。通过有限元软件MSC NASTRAN对载荷结构进行模态分析以及频率响应分析,以考察载荷结构的强度,并进行相应力学试验验证框架的结构稳定性,结果表明:该支撑结构刚度高,满足了望远镜的力学要求。且该支撑框架结构简洁,装配精度高,具有良好的工艺性。

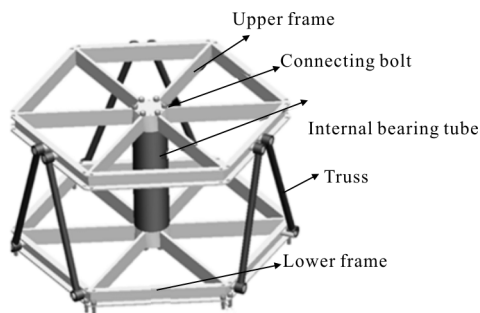
1 望远镜支撑框架设计

1.1 支撑结构方案选择

大口径光学系统的支撑结构,有薄壁连接筒式、桁架式、薄壁连接筒与支撑杆组合式等^[10],其中以桁架结构的使用居多,如EO-1卫星上的陆地成像仪、Hubble望远镜、NuSTAR望远镜、SPOT5卫星上高分辨率相机等,这主要得益于桁架式结构具有高刚度、轻质量的优点。根据嵌套式掠入射望远镜的结构特点,课题组比较设计了3种望远镜支撑结构方案,如图1所示。

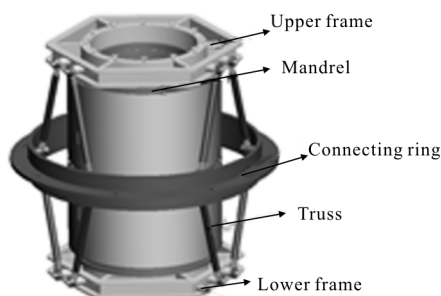
图1(a)为桁架式望远镜支撑结构、图(b)的双截桁架式望远镜支撑结构为两种望远镜支撑用的桁架式参考连接框架。结构桁架式望远镜支撑结构参考了某轻型相机的支撑桁架结构^[11],载荷结构形式简单,质量较轻,但载荷结构与平台直接连接,卫星平台的激励将直接传递至载荷,容易引起望远镜芯轴的大形变,影响超薄反射镜片的安全性。双截桁架式望远镜支撑结构参考了美国NuSTAR卫星望远镜载荷连接结构^[12],载荷通过连接环上的螺栓孔固定在卫星平台,避免望远镜与平台直接接触,减小了平台传递至载荷的激励,且采用桁架结构,质量较轻,但该方案对侧向支撑不够,抗扭转能力较低,且该方案对桁架的加工精度要求高,装配时望远镜需伸入连接框架内部进行装配,操作空间小,在操作时极易

触碰镜片,从而对镜片造成损伤,安全性较差。



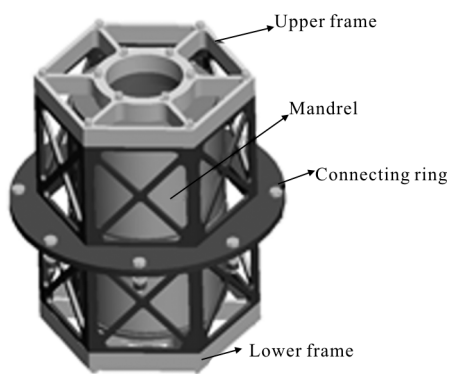
(a) 桁架式望远镜支撑结构

(a) Trussed support structure for telescope



(b) 双截桁架式望远镜支撑结构

(b) Double-stub truss support structure for telescope



(c) 多边形桶式望远镜支撑结构

(c) Polygonal barrel support structure for telescope

图 1 望远镜支撑结构设计

Fig.1 Support structure design of telescope prototype

为了克服以上缺点,文中提出一种多边形桶式望远镜支撑结构作为望远镜的连接框架。载荷整体构型如图 1(c)所示,主要由上框架、下框架和一体化的六边形桶式连接框架组成,上下框架在其内圈通过 6 个 M5 螺栓与望远镜的中心芯轴相连,其外圈通过 6 个 M5 螺栓与连接框架相连,与卫星平台相连接的法兰接口在连接框架的中间位置,通过螺栓

固定在卫星平台上,避免与平台直接接触,一定程度上减小了平台传递至载荷的激励。该方案装配过程简单、安全,很大程度地降低了镜片出现损伤的风险,具有良好的工艺性。为了控制结构装配过程中的应力,确保结构具有良好的稳定性,框架结构各组件接口的平面度均控制在 $8\ \mu\text{m}$ 内。

1.2 支撑框架材料选择

钛合金、复合材料、铝合金因其具有强度高、断裂韧度大、抗腐蚀性能好的优点,在航天航空工业领域得到广泛的应用^[13]。嵌套式望远镜芯轴及其支撑框架结构的材料选择将直接影响望远镜的力学性能、光学性能。

表 1 为三种芯轴与支撑框架备用材料的属性,铝合金 7075-T6 相较于钛合金和部分高强度的复合材料,在质量方面有明显的优势,望远镜样机的芯轴及其支撑框架若采用铝合金 7075-T6,芯轴质量仅为 4.5 kg,望远镜芯轴及支撑框架的总质量为 7.4 kg,满足载荷结构的轻量化设计的要求,降低发射成本。

表 1 芯轴支撑框架备用材料的属性

Tab.1 Candidate material property of mandrel and support structure

Material	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Nickel-chromium-iron alloy 903	Aluminum alloy 7075-T6
Density	4.54	8.25	2.81
Young's modulus	114	147	72
Poisson's ratio	0.32	0.226	0.33
Yield strength	860	1 100	503
Thermal conductivity	7.1	-	130

嵌套式望远镜的装配精度为微米量级,载荷结构的温度变化较大或者结构的温度梯度较大,将导致支撑框架发生形变,造成望远镜镜片的几何参数变化以及长焦距望远镜的光轴出现偏转,因此望远镜工作过程中会对其进行温度控制,铝合金 7075-T6 热传导能力方面具有非常明显的优势,可以保证系统性能的稳定。在杨氏模量、屈服强度方面,铝合金 7075-T6 与 Ti 合金接近但存在一定的差距,后续将进一步对望远镜支撑结构的强度进行仿真及试验验证。

2 望远镜支撑结构的力学性能分析

2.1 模态分析

文中采用有限元分析软件 MSC NASTRAN 对望远镜支撑框架进行模态分析。铝合金 7075-T6 的基本参数见表 1, 为了保证计算速度以及计算结果的精度, 有限元模型简化为支撑结构螺栓连接部位均为刚性连接, 无相对位移, 如图 2 所示。

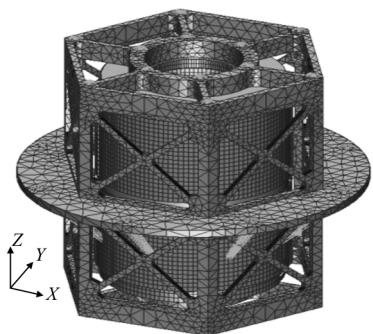
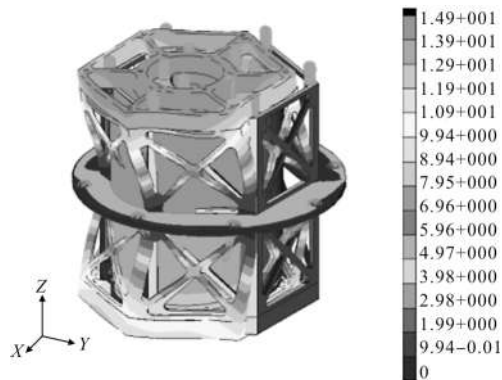


图 2 望远镜支撑结构的有限元模型

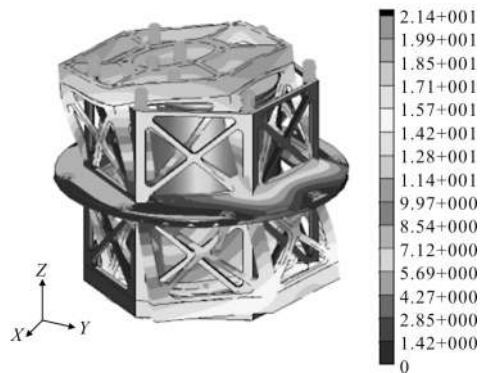
Fig.2 Finite element model of telescope support structure

图 3 为望远镜各方向下的一阶模态振型, 沿 X、



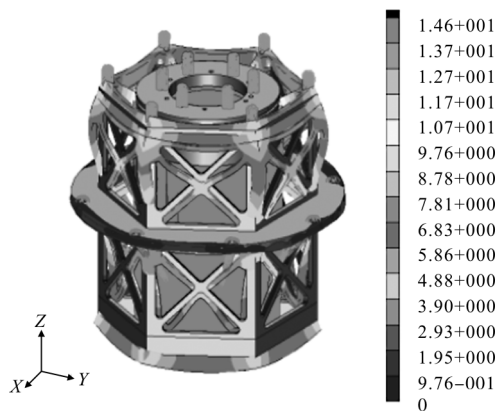
(a) X 方向一阶弯曲

(a) X direction first order bending



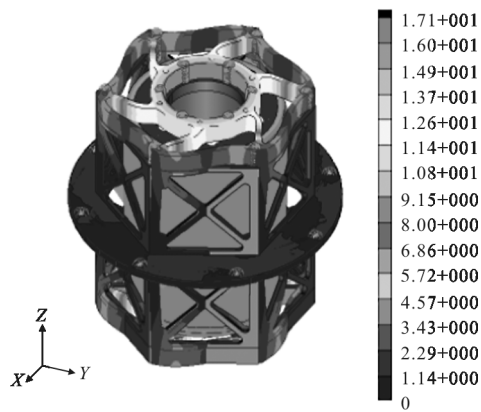
(b) Y 方向一阶弯曲

(b) Y direction first order bending



(c) 纵向振型

(c) Longitudinal modal



(d) 扭转振型

(d) Torsion mode

图 3 望远镜结构的模态振型

Fig.3 Modal shapes of telescope prototype structure

Y 向的横向一阶弯曲时在支撑结构的上框架上出现最大位移, 在沿 Z 轴纵向振动和扭转时在望远镜芯轴上出现最大位移。模态分析结果见表 2, 望远镜在不同振型下的基频均在 409 Hz 以上, 远高于卫星平台的振动频率高于 120 Hz 的要求, 支撑框架具有较大的结构刚度。

表 2 载荷结构模态分析

Tab.2 Results of mode analysis

Modal/Hz	Formation
587	X direction first order bending
554	Y direction first order bending
481	Longitudinal modal
409	Torsion mode

2.2 频率响应分析

XTP 卫星发射时提供给卫星平台输入激励约为

0.6~0.8 g, 在卫星顶部即载荷安装面将产生 6~8 倍的放大作用, 因此仿真与力学试验中输入激励达到 5 g, 将基本覆盖望远镜实际发射时的受力。在望远镜连接框架上的 X、Y 及 Z 分别输入 5 g 正弦加速度激励, 通过模态叠加法计算望远镜结构上测点的频率响应, 频率响应分析时模态阻尼比取为 5%。

望远镜支撑结构的加速度响应曲线如图 4 所示, 支撑结构在基频处出现的动态响应最大, X、Y、Z 方向出现的加速度响应分别为 52.3、70.5、48.5 g, 放大倍数分别为 10.5、14.1、9.7。图 5 显示支撑结构在连接框架的上端处应力最大, 应力高达 32.9 MPa, 远小于铝合金 7075-T6 的抗拉强度极限。

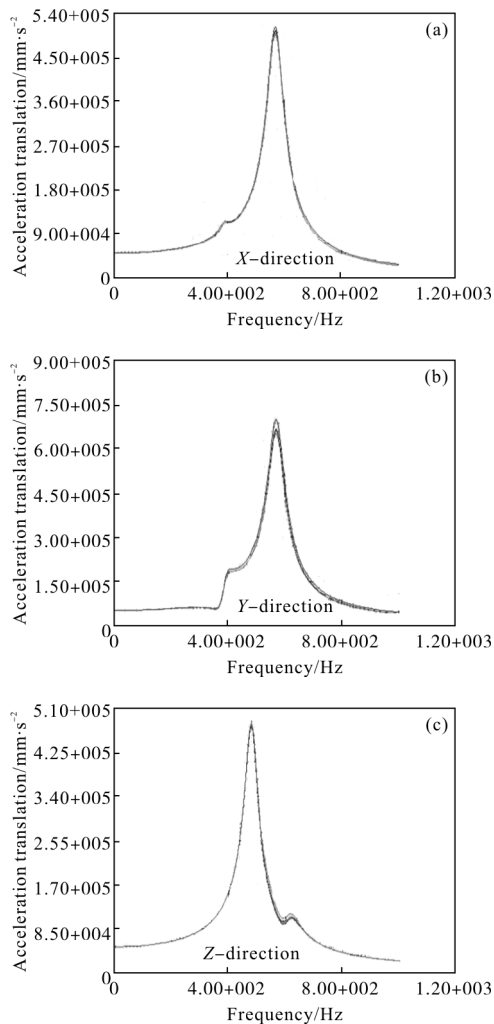


图 4 望远镜的 XYZ 方向的加速度响应

Fig.4 Acceleration response curve of telescope in XYZ direction

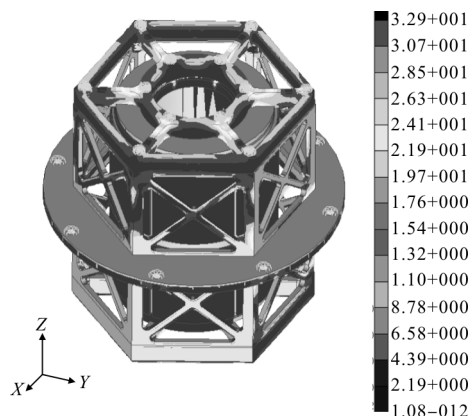


图 5 望远镜的应力云图

Fig.5 Stress contour diagram of telescope

3 望远镜支撑结构力学试验

考虑到振动、过载等因素对嵌套式聚焦望远镜的影响, 研究望远镜对主动段振动力学环境的适应能力, 必须要在地面实验室再现聚焦望远镜地面运输和发射飞行所经历的振动环境, 以考验望远镜结构经受该环境的能力^[14]。望远镜连接框架、力学试验工装与振动试验台连接状态如图 6 所示, 通过螺栓安装在振动试验台上方, 支撑结构的连接框架上安装了应变花以及加速度传感器。

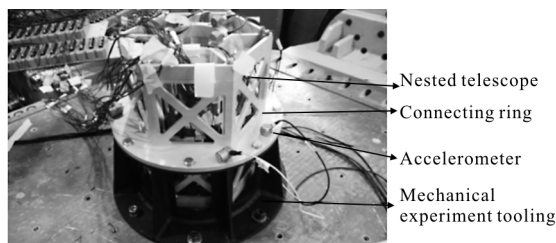


图 6 望远镜、支撑结构联接后与振动实验台的联接状态

Fig.6 Conjunction state of telescope and support structure on the vibration test bench

图 7~图 8 为望远镜支撑结构在 X 向的 5 g 正

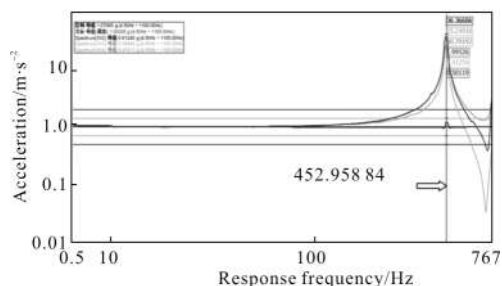


图 7 X 向 5 g 正弦振动满振曲线

Fig.7 Frequency response curve under 5 g sinusoidal vibration in X direction

弦振动满振曲线、加速度传感器频域图,图 9 为应变花显示值。

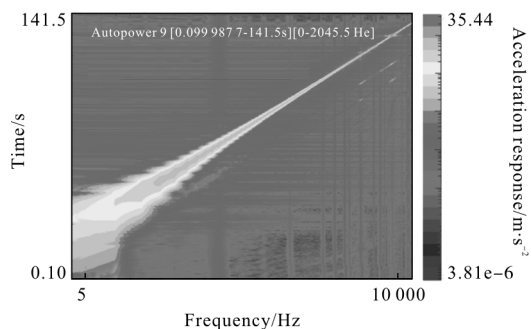


图 8 加速度传感器频域图

Fig.8 Frequency domain mapping of acceleration sensor

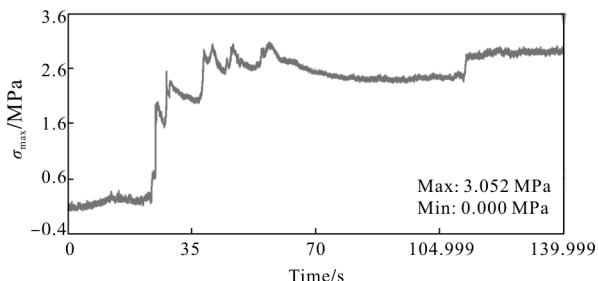


图 9 应变花数据

Fig.9 Strain rosette information

表 3 为试验结果,望远镜结构的 X 向一阶共振频率为 452.9 Hz, Y 向的一阶共振频率为 639.1 Hz, Z 向的一阶共振频率为 630.5 Hz,进一步验证了载荷结构可避免外界环境振动而产生共振;望远镜结构在 5 g 量级的正弦振动激励下,加速度传感器在 X 方向出现最大加速度响应为 35.44 g,放大倍数为 6.23 倍, Y 方向出现的最大加速度响应为 22.44 g,放大倍数为 6.688 倍, Z 方向出现的最大加速度响应为 133.82 g,放大倍数为 22.3 倍;望远镜结构测得应变花出现最大应力为 3.052 MPa。试验测得数据与仿真结果数值相近,进一步验证了载荷结构设

表 3 动力学试验结果

Tab.3 Mechanical vibration test result

	First order frequency/Hz	Sinusoidal vibration		Maximum stress /MPa
		Acceleration response(g)	Magnification	
X direction	452.9	35.44	6.23	
Y direction	639.1	33.44	6.688	3.052
Z direction	630.5	133.82	22.3	

计的合理性。

4 结 论

文中针对国内规划中的 XTP 卫星低能聚焦望远镜样机研制要求,经过结构选型和优化,提出了一种六边形桶式望远镜支撑结构设计方案。望远镜芯轴通过上下框架与一体化六边形桶式支撑框架连接,与卫星平台相连接的法兰接口在连接框架的中间位置,避免与平台直接接触,一定程度上减小了平台传递至望远镜的激励。采用有限元软件 MSC NASTRAN 对望远镜载荷结构进行模态分析和响应频率分析,并进行了力学振动试验,仿真结果与试验相近,结果表明:载荷在不同振型下基频均在 400 Hz 以上,均高于卫星平台的振动频率 120 Hz 的要求,载荷结构在正弦振动激励下不会出现破坏性改变,具有较大的刚度与结构稳定性,满足嵌套式聚焦望远镜载荷连接框架的设计要求。该结构简洁,装配工艺性好,为后续望远镜的研制提供了参考。

参考文献:

- [1] Weisskopf M C, Tananbaum H D, van Speybroeck L P, et al. Chandra X-ray Observatory (CXO): overview [C]// Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2000: 2-16.
- [2] Aschenbach B. In-orbit performance of the XMM-Newton X-ray telescopes: images and spectra [C]//International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2002: 8-22.
- [3] Niu S, Yan S P, Lei S J, et al. The orbital phase resolved spectroscopy of X-ray binary 4U 1822-371 with Suzaku[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2016, 16(4): 005.
- [4] Koglin J E, An H J, Blaedel K L, et al. NuSTAR hard X-ray optics design and performance [C]//SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7437: 74370C.
- [5] Zhang Shuangnan. Prospects for the development of high-energy astronomy in the world [J]. *International Space*, 2009(12): 6-12.
- [6] Zhu Dongyuan. Research on design and fabrication of EUV source collector [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [7] An Qichang, Zhang Jingxu, Zhang Limin. Dynamics analysis

- of telescope third mirror wire support structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2115–2119. (in Chinese)
- [8] Zhao Yongzhi, Shao Liang, Ming Ming. Assembly for large aperture telescope primary mirror support system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0918003. (in Chinese)
- [9] Fan Lili, Zhang Jingxu, Yang Fei. Impact of the supports of primary mirror in equatorial telescope on its surface deformation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(1): 173–177. (in Chinese)
- [10] Kong Lin, Wang Dong, Yao Jingsong. Precision temperature control for supporting trusses of lightweight space cameras [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(3): 712–719. (in Chinese)
- [11] Huang Xiaoming, Sun Jie, Li Jianfeng. Varying rules and mechanism of thermal expansion coefficient for pre-stretched 7050–T7451 aluminum alloy plate [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2013, 23(12): 3282–3288. (in Chinese)
- [12] Craig W W, An H J, Blaedel K L, et al. Fabrication of the NuSTAR flight optics [C]//SPIE Optical Engineering + Applications. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8147: 81470H.
- [13] Qi Guang, Wang Shuxin, Li Jinglin. Design and test verification of baffle for off-axis three-mirror space optical remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(4): 472–482. (in Chinese)