

深空探测相机超轻主支撑结构优化设计

刘奉昌^{1,2}, 李 威^{1*}, 董吉洪¹, 赵伟国¹, 赵海波¹, 李晓波¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 根据深空探测相机轻质高刚度、高性能的要求,设计了一种超轻主支撑结构。深空探测相比于地球探测环境更加严苛,主支撑结构作为主承力结构,其在发射、在轨环绕阶段都应具有高稳定性,来保持各光学元件之间的相对位置不变。与传统方法相比,文中采用拓扑优化得到清晰的主支撑结构的最佳传力路径,然后通过尺寸优化来提高主支撑结构基频。最后进行轻量化设计,其前后框架结构轻量化率达到 90% 以上。仿真分析和试验结果表明,主支撑结构满足公差要求且基频(80.264 Hz)远远高于整星一阶频率,应用光学测量的方法振前、振后前框架相对于后框架倾角为 3"、0.3",满足光学系统的公差要求,具有较好的稳定性。大量级力学试验后系统的波像差 $<\lambda/14$,满足光学系统成像质量要求。
关键词: 深空探测; 主支撑结构; 超轻; 拓扑优化; 尺寸优化

中图分类号: TP703; V447+.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1214003

Optimization design of the ultra-light main supporting structure of deep space detection camera

Liu Fengchang^{1,2}, Li Wei^{1*}, Dong Jihong¹, Zhao Weiguo¹, Zhao Haibo¹, Li Xiaobo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: According to the requirements of light weight and high stiffness of deep space exploration camera, an ultra-light main support structure was designed. The deep space exploration was more severe than the earth exploration environment. As the main bearing structure, the main supporting structure should have high stability in launching and orbiting to keep the relative position between the optical components. In contrast to traditional methods, topology optimization was used to obtain optimal load path with clear topological results of the main support structure, and then the fundamental frequency of the main support structure was improved by size optimization. At last, the lightweight design was adopted, and the weight reduction rate of the front and rear frame structures was over 90%. The results of finite element analysis and test show that the integrated main supporting structure can meet the requirements of tolerance and the basic frequency (80.264 Hz) is much higher than the requirement of 1st frequency of satellite. The method of applying optical measurement has a tilt angle of 3" and 0.3" relative to the rear frame before and after the vibration, which satisfies the tolerance requirements of the optical system and has good stability. The

收稿日期: 2019-10-05; 修订日期: 2019-11-15

基金项目: 国家重点科技项目(Y3HD1SA130)

作者简介: 刘奉昌(1994-),男,硕士生,主要从事空间光学遥感器光机结构设计与分析方面的研究。

Email: liufengchang17@mails.ucas.edu.cn

导师简介: 李威(1970-),男,研究员,硕士生导师,博士,主要从事空间光学遥感器总体设计方面的研究。Email: leew2006@ciomp.ac.cn

wavefront aberration of the system after a large number of mechanical experiments is below $\lambda/14$, which satisfies the imaging quality requirements of optical systems.

Key words: deep space exploration; main supporting structure; ultra-light; topology optimization; size optimization

0 引言

随着空间光学技术的飞速发展和人类对地外星球的好奇,使探测任务向深空探测方向发展。通过深空探测,有利于了解地球气候的形成和地质特征、太阳系的起源、生命的演化等重大科学问题。从 20 世纪 50 年代开始至今,共发射了超过 240 颗深空探测器^[1],欧美国家在深空探测方向起步较早,攻克了技术难题并积累了大量经验。我国深空探测项目已经付诸实施,主支撑结构作为主要承力结构,其刚度和稳定性直接影响成像质量。

对于空间光学遥感器而言,主支撑结构形式主要有框架式、薄壁承力筒式、桁架式。美国 NASA 的新千年计划 (NMP) 于 2000 年发射的第一颗对地观测卫星 EO-1 上搭载的高级陆地成像仪 ALI (Advanced Land Imager) 采用了框架式主支撑结构^[2],2015 年,韩国的 kompsat-3A 卫星的高分相机就采用薄壁承力筒作为相机的主支撑结构^[3]。由于深空探测环境较地球探测更加恶劣,主支撑结构应满足低质量、高刚度、高强度、高稳定性的要求,考虑质量和安装空间的要求,框架式、薄壁承力筒式难以满足要求;桁架式结构比刚度高、装配灵活、形式简单、敞开性好,具有很强的可设计性,桁架式主支撑结构的原理是将弯曲载荷转化为拉压载荷^[4],此设计有效地利用材料承受拉压载荷能力远大于承受弯曲载荷的特性,提高了相机结构自身的刚度。综合考虑超轻量化、高刚度、高稳定、制造工艺难度等因素,文中采用桁架式主支撑结构为深空探测相机主支撑结构。国内外许多学者对桁架式结构进行研究,2019 年日本将发射其研制的离轴三反光学 ALOS-3 卫星,具有 0.8 m 的全色分辨率,幅宽 50 km,其采用了桁架式支撑结构^[5]。2012 年,李志来研究的某型号长焦距同轴空间相机,主次镜距离长达 2.6 m,主镜口径达 1 125 mm,其采用了多层桁架结构形式^[6]。魏磊研究长焦距空间相机主支撑结构,对其主支撑结构进行

多目标拓扑和随机响应尺寸优化设计,得到了桁架式主支撑结构^[7]。

文中针对深空探测项目重要载荷进行研究,其主支撑结构总重量 ≤ 13.5 kg,基频 ≥ 70 Hz,深空探测相机采用全碳化设计(即光学元件采用碳化硅,结构件选用碳纤维复合材料或碳化硅铝基复合材料),在减轻重量的同时具有材料的高匹配度。建立以加权刚度为目标,质量和次镜三个方向的变形为约束的拓扑优化,通过优化桁架杆的内外径来提高主支撑结构基频,然后进行轻量化设计得到主支撑结构。利用有限元方法对优化结果进行了性能分析,优化设计的主支撑结构满足各项指标要求,最后进行试验验证其刚度及稳定性。

1 主支撑结构材料选取

深空探测相机主支撑结构需要经历比地球更加严苛的力热环境影响,因此材料的选取尤为重要,空间相机结构材料向轻质、高强、稳定等方面发展,目前,常用的主支撑结构材料有殷钢、铝、钛、碳化硅铝基复合材料、碳纤维复合材料等等,其详细参数如表 1 所示,比刚度 E/ρ 和热稳定性 λ/α 是衡量材料好坏的重要指标,文中引入综合品质因数 $(E/\rho) \times (\lambda/\alpha)$ 来衡量材料在力学和热力学方面的综合性能^[8]。深空探测主支撑结构主要由前后框架结构、桁架杆及接头组成。前后框架结构是光学元件及其他组件的主承力结构,对其轻量化要求较为严格。因此前后框架结构采用综合品质因数高的材料来承受外界振动和冲击,并且控制温度变化时的变形量,消除温度梯度来保证其刚度、热尺寸稳定性和热稳定性。与此同时桁架杆需进行被动热补偿设计来满足整体线膨胀系数要求,综合考虑前后框架架构、桁架杆接头采用 60SiC/Al、桁架结构采用 M40J,反射镜采用 SiC,由 SiC、M40J 和 60SiC/Al 构成的全碳化光机结构具有良好的热匹配性、热稳定性和高比刚度,可以在保证成像质量的前提下,实现深空探测的超轻量化要求。

表 1 常用航天材料性能参数

Tab.1 Performance parameters of common used spatial materials

Material	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	E/GPa	$\alpha/^{\circ}\text{C}$	$\lambda/\text{mW}\cdot(\text{mm}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$	μ	$(E/\rho)\times(\lambda/\alpha)$
M40J	1.56	145	Designable	Designable	0.3	Designable
60SiC/Al	2.94	213	8.0×10^{-6}	230	0.23	2 082.9
TC4	4.44	109	8.9×10^{-6}	6.8	0.34	18.7
4J32	8.1	141	0.65×10^{-6}	13.9	0.25	372.3
LC4	2.85	68	21.4×10^{-6}	155	0.33	172.8
SiC	3.2	400	2.4×10^{-6}	155	0.17	8 072.9

2 相机主支撑结构设计

为了增大视场，深空探测相机采用离轴三反光学系统(如图 1 所示)，根据光学系统建立 780 mm×570 mm×780 mm 的主支撑结构外包络，对应各反射镜组件尺寸建立预留空间，各镜子组件之间的相对位置关系影响成像质量，为了得到良好的像质，光学设计要求主支撑结构位置精度要求见表 2。

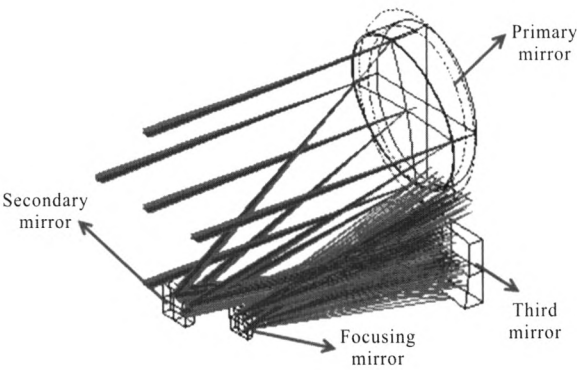


图 1 光学系统
Fig.1 Optical system

表 2 前后框架位置精度要求

Tab.2 Requirements of front and rear frame position accuracy

Framework	Deformation/mm			Angle/($^{\circ}$)		
	ΔX	ΔY	ΔZ	θ_x	θ_y	θ_z
Back frame	Datum			Datum		
Front frame	0.03	0.03	0.03	5	5	None

2.1 主支撑结构拓扑优化

文中基于变密度法^[9]对深空探测相机主支撑结构进行优化设计，根据材料的分布找到结构的最佳传力路径^[10]。以每个单元的相对密度作为设计变量，同时引入密度与材料弹性模量的假设函数关系，即

SIMP^[11]材料插值数学模型：

$$E=p^pE_0$$

式中： E 为设计单元的材料特性，即弹性模量； ρ 为材料密度； E_0 为材料弹性模量的初值； p 为惩罚因子(体单元故取 3)，主要使单元密度在 0~1 之间寻找最优分布。

文中采用离轴三反光学系统，次镜位于深空探测相机的前端，其轴间距、俯仰偏差都会带来像质的下降，是整个系统中最为敏感的组件，同时调焦组件可对离焦进行实时矫正，所以重点考虑前框架次镜组件和调焦组件的影响对主支撑结构设计进行优化。由于火星高分相机的装调过程较为特殊，在试验室装调时，其重力方向沿 y 轴方向，然而高分相机由三个支脚侧向安装在火星探测器上，重力方向为 x 方向(发射方向)，所以在优化桁架杆时需要同时考虑两个方向的重力工况来确保次镜的变形小于公差范围，达到良好的成像质量。图 2 为初始拓扑模型、次镜及调焦镜质量点通过 RBE2 连接在前框架上，前后框架之间的材料作为设计区域，约束有限元模型的底部。

拓扑优化数学模型

Find：

$$X=\{x_1,x_2,\cdots,x_i\}^T$$

$$\text{Min}C_w=\alpha C_x+\beta C_y$$

Subject to:

$$m\leq M$$
$$d_x\leq 0.03$$
$$d_y\leq 0.03$$
$$d_z\leq 0.03$$
$$0<x_{\min}\leq x_e\leq 1$$

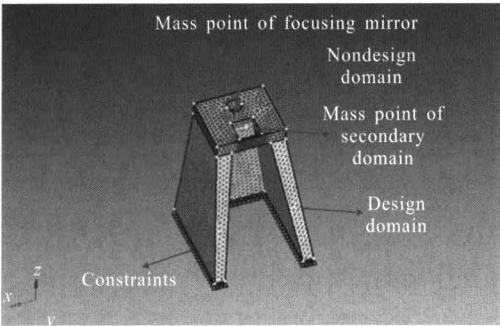


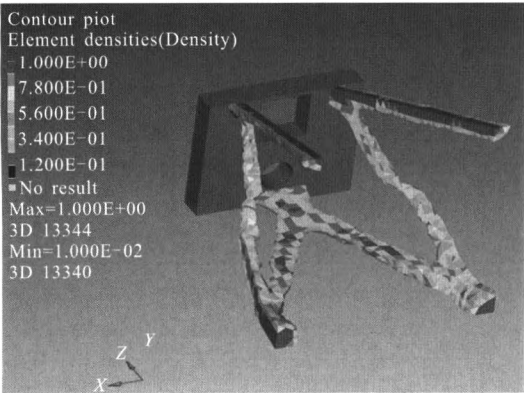
图 2 初始主支撑结构模型

Fig.2 Initial model of main support structure

目标函数为在 x,y 方向重力工况下整个主支撑结构的柔度最小,即刚度最大(由于 x 方向为火箭发射方向,所以权重 x 方向 0.7, y 方向 0.3); M 为总体给予的除后框架外主支撑结构的质量上限,质量约束可转化为体积分数; d_x,d_y,d_z 表示次镜延 x,y,z 三个方向的位移; x_j 对应第 j 单元变量, $x_{\min}$ 为单元设计变量下限^[12]。

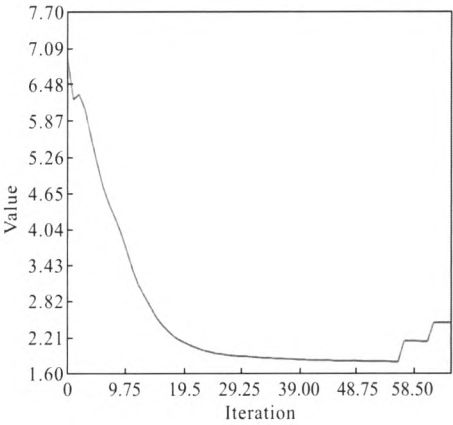
用 Optistruct 软件采用序列近似图规划法对主支撑结构进行拓扑优化。

经过 65 次迭代得到拓扑优化结果如图 3(a)所示,从图中分析可知红色部分代表密度为 1,而蓝色部分代表密度趋于 0(因此被去除掉),剩余高密度分



(a) 拓扑优化结果

(a) Topology optimization result



(b) 目标函数迭代曲线

(b) Iteration curve of objective function

图 3 拓扑优化结果和迭代曲线

Fig.3 Topology optimization result and iteration curve

布区域,可以清晰看出桁架式主支撑结构适合采用六杆支撑,通过拓扑优化可获得指导性的概念设计,虽然结构相对于清晰可知,但是仍然需要经过详细设计来得到。如图 3(b)所示,加权柔度经过 65 次迭代从 6.9 降到 2.5。

2.2 主支撑结构尺寸优化

通过以柔度最小为目标的拓扑优化寻找到主支撑结构最佳材料分布,但是拓扑优化始终为概念设计,对于细节参数可进行进一步的尺寸优化,所以为了提高基频对桁架杆的内外径进行尺寸优化。尺寸优化模型如图 4 所示。

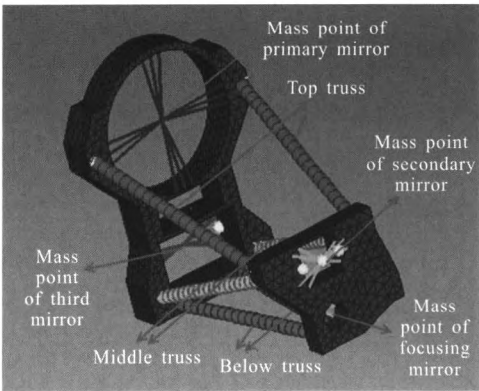


图 4 尺寸优化模型

Fig.4 Size optimization model

尺寸优化数学模型如下:

Find:

$$r_i, R_i$$
$$\max \omega_1^2$$

Subject to

$m \leq M$

$17 \leq r_i \leq 19$

$18 \leq R_i \leq 20 (i=1-3)$

采用 OptiStruct 软件进行尺寸优化经过四次迭代结果,如表 3 所示。

表 3 尺寸优化结果

Tab.3 Size optimization result

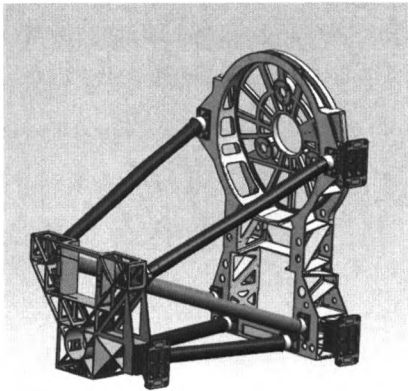
	S	Z	X
r_i	17	17	17
R_i	20	20	20

从优化结果可以看出上桁架、中桁架、下桁架的尺寸一致,外径为 20 mm,内径为 17 mm。基频由初始结构的 122 Hz 变为 144 Hz,提高 18%。因此,尺寸优化不仅提高了基频,同时降低了制造难度,节约了成本。

2.3 前后框架结构轻量化设计

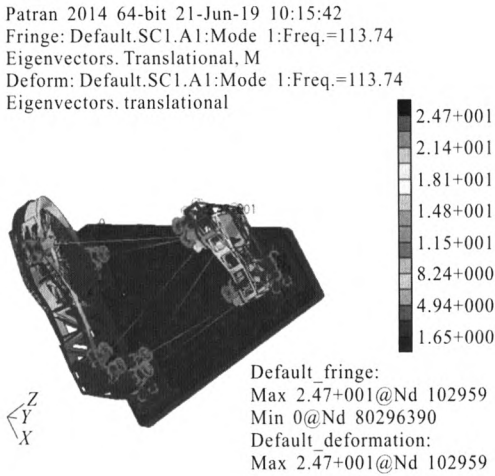
根据课题的要求,深空探测器主支撑结构对质量要求较为严格,去除各镜子组件的情况下,主支撑结构的质量不大于 13.5 kg,四个反射镜组件总质量约为 8.9 kg,对主支撑结构进行轻量化设计,轻量化的主支撑结构如图 5(a)所示。

经过优化设计主支撑结构来寻找最佳传力路径并且降低质量,超轻量化是深空探测相机的特点之一,主光机结构不仅采用了全碳化设计,还做了较大的轻量化处理,质量由 59 kg 变为 12.82 kg。轻量化率达到 78.2%,前后框架的轻量化率都超过 90%以上,由图 5(b)可知,轻量化后的主支撑结构模型基频降到 113.7 Hz,仍远远高于设计要求。



(a) 主支撑结构模型

(a) Main support structure model



(b) 轻量化后一阶模态

(b) Lightweight first-order mode

图 5 主支撑结构模型及基频

Fig.5 Main support structure model and 1st frequency

3 有限元分析

主支撑结构作为深空探测遥感器的主要承力结构,其应具备良好的刚度来保证各光学元件之间的相对位置关系,主支撑结构的一阶频率频应远大于系统的基频来避免共振。根据深空探测遥感器主支撑轻量化设计,其前后框架结构采用厚度为 3 mm 的薄壁结构,结合深空探测相机的结构特点,前后框架采用壳单元(QUAD4),桁架杆采用梁单元(BAR2),光学组件和安装支脚等其他结构组件主要采用实体单元(HEX8),在 patran 中进行有限元仿真分析。有限元模型如图 6 所示。

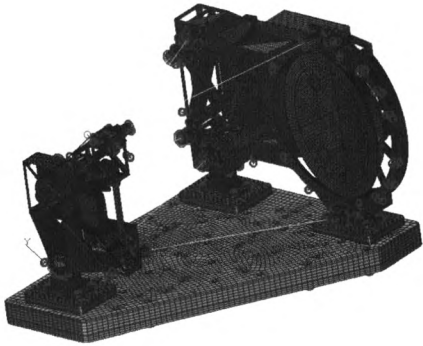


图 6 深空探测相机有限元模型

Fig.6 Finite element model of deep space exploration camera

3.1 静力学分析

深空探测主支撑结构静力学分析主要涉及 1 g

重力下变形和 1 g 重力下前框架相对于后框架的倾角变化,验证光学元件的相对位置关系满足成像质量要求,同时具有较好的稳定性。

由图 7 所示,深空探测超轻量化主支撑结构最大重力变形发生在前框架上,大小为 0.014 7 mm,由此可知前框架相对于后框架的三个方向变形均小于 0.03 mm,同时次镜三个方向的位移也小于 0.03 mm;由表 4 结果可知,在 1 g 重力工况下,前框架相对于后框架倾角变化在带载情况下为 0.25"、0.1",仿真结果可知变形量和稳定性均能满足设计要求。

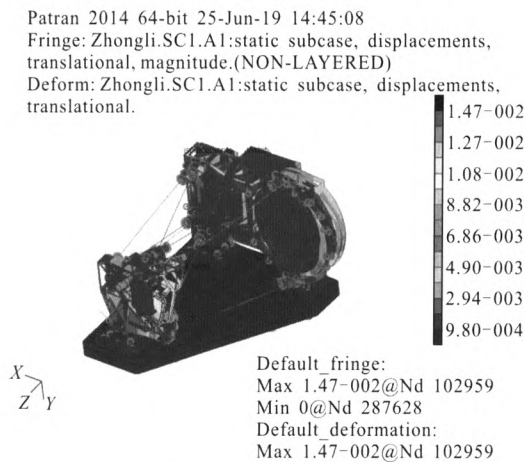


图 7 1g Y 向重力变形

Fig.7 1g Y-direction to gravity deformation

表 4 稳定性仿真结果

Tab.4 Stability simulation result

Main support structure		Angle change/(°)			
		No load simulation results		Load simulation results	
		θ	$\Delta\theta$	θ	$\Delta\theta$
Back frame	X	-1.03	0	-2.46	0
	Y	-0.95	0	-1.31	0
Front frame	X	-1.19	-0.16	-2.71	-0.25
	Y	-0.89	0.06	-1.21	0.1

3.2 动力学分析

模态分析的主要目的是获取结构的动态特性,即系统的固有频率、阻尼、振型等^[13],避免主支撑结构受严苛的动力学环境影响,保证结构良好的动态响应特性。对主支撑结构进行约束模态分析,约束深空探测相机工装安装点。主支撑结构前三阶模态结

果如表 5 所示、一阶模态阵型如图 8 所示。

表 5 前三阶模态结果

Tab.5 First 3rd modal result

Order	Frequency/Hz	Formation
1	80.26	X-direction swing
2	118.54	Z-direction swing
3	148.79	Y-direction swing

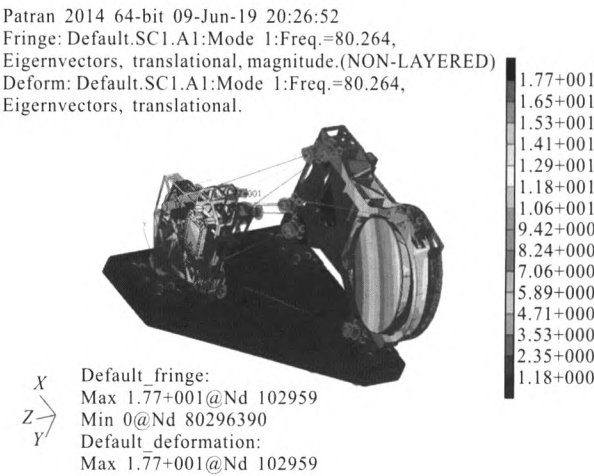


图 8 一阶模态

Fig.8 1st mode

4 试验验证

4.1 力学试验

为了验证结构设计性能和仿真分析的准确性,将带有工装的主支撑结构放置在振动台上,按照验收级力学试验条件进行了正弦、随机振动试验,图 9 为主支撑结构振动试验现场图,图 10 为主支撑结构在 X 方向(发射方向)振动时前框架上特征点的正弦特征扫描曲线,支撑结构在 X 向的固有频率为 80 Hz,工程分析的结果为 80.264 Hz,误差<1%。

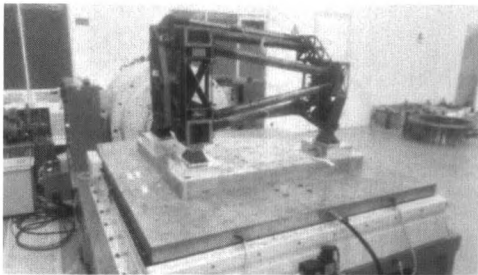


图 9 力学试验现场

Fig.9 Mechanical test site

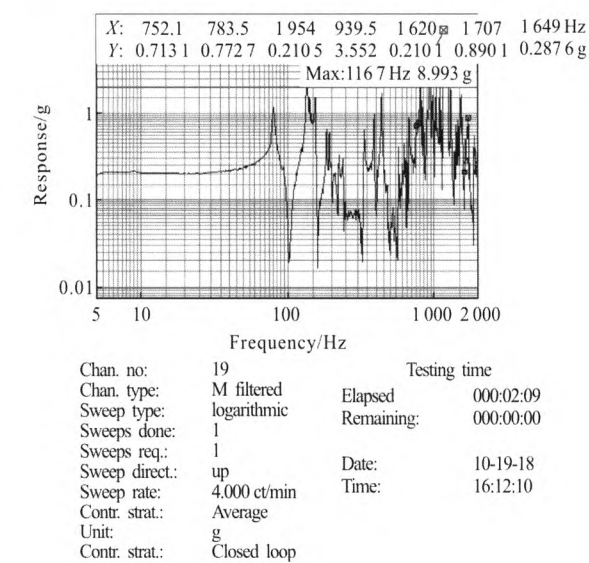


图 10 X 向正弦结果

Fig.10 X-direction sine result

系统的次镜和主镜对主支撑结构进行三个方向的正弦和随机振动试验，采用光学测量方法测定力学振动前后前框架相对于后框架是否满足光学设计要求,如图 11 所示。

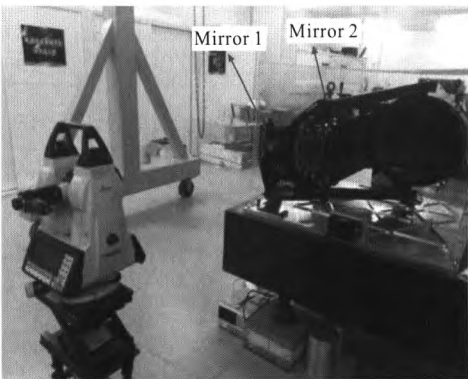


图 11 稳定性检测现场

Fig.11 Stability test site

4.2 结构稳定性检测

为了验证深空探测光学传感器主支撑结构的稳定性，在前框架及后框架相应位置处分别粘贴小平面反射镜,并使二者同时进入经纬仪视场,分别表征

由表 6 可知,在经历大量级力学试验后,主支撑结构前后框架结构仍保持较高的稳定性，前框架相对于后框架角力学试验前方位角变化为 3"、俯仰角变化为 0.3",满足 5"设计要求。通过试验和检测表明

表 6 随机振动后主支撑结构稳定性实验数据

Tab.6 Experimental data of stability of main support structure after random vibration

Status	Before the vibration test/(")		After the vibration test/(")		Contrast/(")	
	Azimuth	Pitch	Azimuth	Pitch	ΔAzimuth	ΔPitch
Back frame	0°0'0"	90°7'44.2'	0°0'0"	90°7'44.3'	0"	0.1"
Front frame	359°56'12.5"	90°11'29.3"	359°56'9.5"	90°11'29.7"	3"	0.4"

深空探测相机主支撑结构在经受大量级振动试验后具有较好的结构稳定性，同时整个光学系统的波像差在 $\lambda/13\sim\lambda/14$ 之间,可满足成像质量要求。

5 结 论

文中结合具体工程应用，基于 SIMP 法的多目标拓扑优化设计,又进行桁架杆内外径尺寸优化,结合材料的综合品质因数设计全碳化的主支撑结构，整体轻量化率达到 90%以上，主支撑结构在刚度和稳定性方面进行仿真和试验对比，静力学分析变形量<0.03 mm,基频>70 Hz。通过光学测量方法,深空探测相机主支撑结前后框架角度变化满足 $\theta_x<5''$, $\theta_y<5''$ ，满足稳定性要求。在大量级力学试验后系统的波像差< $\lambda/14$,满足成像质量要求。故文中采用拓

扑优化、尺寸优化方法设计主支撑结构与以往的经验设计相比更加具有理论依据和工程价值。

参考文献：

[1] Ye Jianpei, Zou Leyang, Wang Dayi, et al. Development and prospect of chinese deep space exploration [J]. *Space International*, 2018(10): 4–10. (in Chinese)

[2] Middleton E M, Ungar S G, Mandl D J, et al. The earth observing one (EO-1) satellite mission: Over a decade in space [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2013, 6(2): 243–56.

[3] Kim Hyun-Ok, Kim Hee-Seob, Lim Hyo-Suk, et al. Space-based earth observation activities in south korea [Space Agencies] [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Magazine*, 2015, 3(1): 34–39.

- [4] Zhang Lei, Jia Xuezhi. Design and optimization of trussed supporting structure for off-axis three-mirror reflective space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 603–608. (in Chinese)
- [5] Iwata T, Ishida H, Osawa Y. Advanced Land Observing Satellite (ALOS): enabling technologies and platform performance [C]//SPIE, 2008, 7106: 71060H.
- [6] Li Zhilai. Truss support structure design between primary mirror and secondary mirror in long focal length space camera[J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(1): 89–93. (in Chinese)
- [7] Wei Lei, Zhang Lei, Gong Xiaoxue, et al. Design and optimization for main support structure of a large-area off-axis three-mirror space camera [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1094–1100.
- [8] Logut D, Breyse J, Toulemont Y, et al. Light weight monolithic silicon carbide telescope for space application [C]//SPIE, 2005, 5962: 59621Q.
- [9] Shao Mengqi, Zhang Lei, Li Lin, et al. Optimization design of supporting back plate for ultra-light space camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 333–340. (in Chinese)
- [10] Liu Zhongyu, Zhang Tao, Wang Ping, et al. Topology optimization design for main frame of infrared seeker's stabilization platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0218001. (in Chinese)
- [11] Qu Y, Wang W, Liu B, et al. Topology optimization design of space rectangular mirror[C]//Advanced Optical Design and Manufacturing Technology and Astronomical Telescopes and Instrumentation. International Society for Optics and Photonics, 2016, 10154: 1015421.
- [12] Zhang Limin, Han Xida, Lv Tianyu, et al. Topological optimization design for SM system of large aperture telescope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0818008. (in Chinese)
- [13] Zhang Yongqiang, Liu Zhaohui, Li Zhiguo, et al. Optimum structural design for collimation frame of space-based two-dimensional turntable [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(S1): S113003. (in Chinese)