吉林一号轻型高分辨空间相机碳纤维桁架支撑技术

宋可心[1]，张雷[1,2]，贾学志[1,2*]，苏志强[1]

[1]长光卫星技术有限公司，吉林 长春 130102；

[2]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130022

摘要 从吉林一号卫星某空间相机的实际应用角度出发，提出采用基于碳纤维复合材料的高精密薄壁筒和桁架杆作为主、次反射镜间的支撑结构，并完成相关设计和工程分析。深入开展相关振动、静力和温度稳定性试验，分析和试验结果表明，所提的支撑结构具有较好的结构稳定性和抗视轴抖动性能，碳纤维桁架的质量仅为 2.11 kg，当基频达到 186 Hz 时，在重力和 4 ℃温升条件下的稳定性优于 1″。对在轨获取的全色遥感影像进行动态传函(MTF)分析，结果表明空间相机在轨动态 MTF 值为 0.08，进一步证明 CFRP 桁架结构支撑技术的可靠性和有效性。

关键词 光学设计；空间相机；碳纤维复合材料；桁架；视轴抖动；稳定性

中图分类号 V447 **文献标志码** A **doi**：10.3788/AOS202040.2122002

Carbon Fiber Truss Support Technology for JL-1 Light High Resolution Space Camera

Song Kexin[1], Zhang Lei[1,2], Jia Xuezhi[1,2*], Su Zhiqiang[1]

[1]*Chang Guang Satellite Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin* 130102, *China*;

[2]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130022, *China*

Abstract From the perspective of the actual application of a space camera on the JL-1 satellite, this paper proposed to use high-precision thin-walled tubes and truss rods based on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) as the support structure between the primary and secondary mirrors. Besides, related design and engineering analysis are completed. Furthermore, relevant vibration, static and temperature stability tests are carried out in depth. The analysis and test results show that the proposed support structure has good structural stability and resistance to the line of sight jitter and the mass of the carbon fiber truss is only 2.11 kg. Additionally, when the fundamental frequency reaches 186 Hz, the stability under gravity and 4 ℃ temperature rise is better than 1″. The dynamic modulation transfer function (MTF) analysis of the panchromatic remote sensing images obtained in orbit shows that the in-orbit dynamic MTF value of the space camera is 0.08, which further proves the reliability and effectiveness of the truss structure support technology based on CFRP.

Key words optical design; space camera; carbon fiber composite; truss; visual axis shake; stability

OCIS codes 220.3630; 280.4788; 350.3850; 350.4600

1 引 言

近年来，随着遥感载荷技术的不断发展，在高时间分辨率和高空间分辨率的需求驱动下，遥感载荷星座化成为了未来发展的必然趋势。以国内商业航天大背景为契机，逐步涌现出了以吉林一号为代表的新型轻质高分辨率遥感卫星星座[1]。在保证高分辨率的前提下，空间相机的轻量化成为了当前的研究热点。

空间光学相机的轻量化必须采用性能更优异的轻质材料，而碳纤维复合材料(CFRP)因其具有质量轻、比模量高、可设计性和抗振性能高等优异性能，广泛应用于卫星结构、精密支撑结构件和光学镜体等航天领域[2]。美国国家航空航天局(NASA)设计的哈勃望远镜采用了全碳纤维桁架式支撑结构[3]，在力、热以及振动等耦合的条件下具有优异的

收稿日期：2020-04-25；**修回日期**：2020-05-14；**录用日期**：2020-07-17

基金项目：国家重点研发计划(2016YFB0500904)、吉林省科技发展计划(20180201107GX)

* **E-mail**：xuezhi0817@163.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

结构稳定性；欧洲航天局(ESA)发射的远红外、微波范畴 Herschel 空间望远镜，其主反射镜的结构为大孔径拼接式 CFRP 夹层(碳纤维面板＋碳纤维蜂窝芯子)[4]，该望远镜在 70 K 的温度下的表面误差和干涉图谱等各项测试结果都满足反射镜的设计要求。郭疆等[5]在实验室的条件下完成了主、次反射镜间距为 850 mm 的离轴三反相机光学系统中碳纤维机身的研制。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所张雷等[6]完成了主、次反射镜间距为650 mm的同轴相机光学系统中碳纤维机身的研制，但未经过在轨的实际验证。空间遥感相机采用的次反射镜支撑形式有薄壁筒式、桁架杆式、薄壁筒与桁架杆组合式和可展开桁架方式等[5-9]。薄壁筒式结构具有低程度的轻量化、易加工和易装调等特点，广泛应用在中小型空间相机中。桁架式结构基于变构件弯曲载荷为拉压载荷的结构设计理念，具有质量轻、比刚度高和适于长焦距光学系统布局等优点，广泛应用在国内外的大中型空间遥感相机中[3,10]。

本文从实际应用的角度出发，首先采用高性能的 CFRP 对主、次反射镜间薄壁筒和桁架杆组合的支撑结构进行设计和工程分析，并通过力学环境试验来验证工程分析结果的准确性，然后采用光学测量的方法定量验证该支撑结构具有优异的尺寸稳定性，最后对在轨获取的全色遥感影像进行动态传函(MTF)分析。试验结果表明，CFRP 桁架结构支撑技术具有可靠性和有效性。

2　高精密桁架结构的设计

2.1　光学系统的设计要求

对吉林一号新型轻质高分辨率遥感卫星星座的某同轴卡式光学系统展开研究，光学系统中的地面像元分辨率优于 0.8 m，动态 MTF 优于 0.07，其主、次反射镜间的位置关系如图 1 所示。该光学系统结构中，主反射镜与次反射镜的空间间距为430 mm，要求次反射镜的位置公差包括轴向偏离相对于主反射镜不大于 20 μm、横向位移不大于10 μm和倾转角度不大于 6″等。基于此，在温度和重力等载荷作用下，要求桁架结构的倾转角度不大于 3″，横向和轴向的偏离量分别小于 5 μm 和10 μm，质量小于 2.5 kg。

2.2　构型的选择

根据光学系统的边缘光线追迹原理，完成次反射镜支撑结构的空间布局，设计的薄壁筒式和薄壁筒桁架组合式构型如图 2 所示。

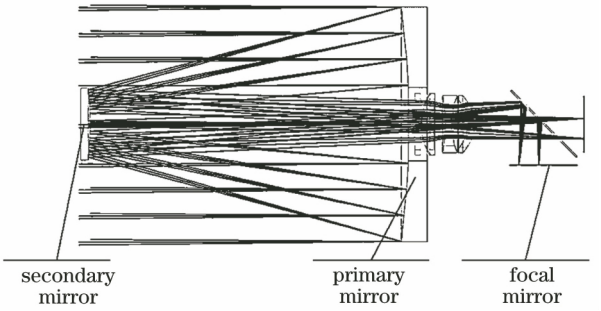

图 1　主、次镜的位置关系示意图

Fig. 1　Schematic of positional relationship between primary and secondary mirrors

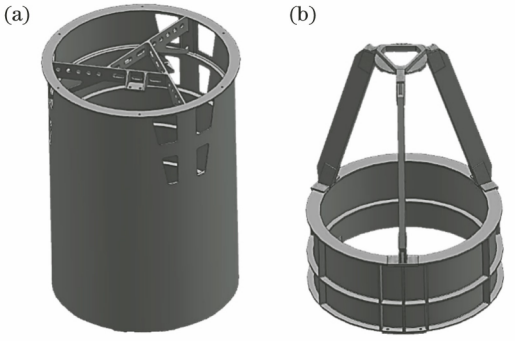

图 2　次反射镜支撑结构的构型。(a)薄壁筒式；(b)薄壁筒桁架组合式

Fig. 2　Configuration of secondary mirror support structure. (a) Thin-walled tube type; (b) thin-walled tube truss combined type

薄壁筒式结构因其具有高刚度和易装调等优点，广泛应用在中小型空间相机中，但是其具有热控功耗高和轻量化程度低的缺点，在质量要求严格的条件下不能成为优选的构型。桁架式结构基于变构件弯曲载荷为拉压载荷的结构设计理念，具有质量轻、比刚度高、结构紧凑、尺寸稳定和适于长焦距光学系统布局等优点，在保证光学系统高空间分辨率的同时，可以最大程度地降低结构质量且热耗低。表 1 为两种构型参数的对比结果，其中 TC4 为钛合金材料。从表 1 可以看到，薄壁筒桁架组合式结构是轻型高分辨空间相机次反射镜支撑结构的优选构型。

表 1　次反射镜支撑结构的性能参数对比

Table 1　Comparison of performance parameters of secondary mirror support structure

Structure type	Material	Mass /kg	Base frequency /Hz	Power /W
Cylinder type	TC4	4	288	5.2
Cylinder/truss type	TC4	3	254	1.4

2.3　主承力系统的优化设计

2.3.1　数学模型

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

以 TC4 钛合金材料为主的主承力系统质量很难满足设计指标的要求，为此寻求新型可工程化的轻质结构材料。CFRP 因其具有比刚度大、热畸变小和线胀系数可设计等优点，可以获得热稳定性好和质量轻的桁架结构[11]，该结构能够有效满足光学系统的高精密要求。复合材料结构的力学性能是通过优化单层铺设角度来实现的，试验以多点结构柔度最小作为目标，将结构的最大应力不超过允许使用的应力和质量不超过 2.5 kg 作为约束条件，建立的模型可表示为

$$Y=\min[\max(\delta_i)],\ \text{s.t.}\ \sigma_{\max}\leqslant\bar{\sigma},\tag{1}$$

式中：δ 为结构柔度；i 为节点数量，$i=1,2,\cdots,I$；$\sigma_{\max}$ 为节点最大应力；$\bar{\sigma}$ 为节点许用应力。鉴于多目标优化求解代价高，采用 K-S 函数将多目标优化模型转换为单目标优化设计模型，表达式为

$$Y=\min(a_1\theta_1+\cdots+a_n\theta_n+b_1\theta_1^2+\cdots+b_n\theta_n^2),$$
$$\text{s.t.}\ c_1\theta_1+\cdots+c_n\theta_n\leqslant\bar{\sigma},\tag{2}$$

式中：$\theta_1,\theta_2,\cdots,\theta_n$ 为铺设角度，其中 n 为铺层数量；a、b 和 c 为目标函数的系数，可采用响应面法而确定。采用二次规划的方法对(2)式进行求解，经过有限次数的迭代后即可获得最佳的铺设角度。

2.3.2　设计优化过程

鉴于主承力系统的特异性，分别对主承力系统的薄壁筒区域和桁架区域进行局部优化设计。CFRP 主承力系统是由单层板按照不同的角度铺设而成的，单层板的厚度约为 0.15 mm，结构如图 3 所示。考虑到复合材料工艺生产的可行性、光学系统的遮拦比以及相机镜头宏观体积预算，桁架的横截面面形为优选的回字形，初步确定桁架宽度为 L_1、薄壁筒外径为 r_2，薄壁筒厚度 h 由光学系统的口径 r_1 与相机镜头质量和薄壁筒外径尺寸 r_2 决定，并采用拓扑优化法进一步确定主要的设计参数 L_1、L_2、h 及桁架厚度 d 的初值。利用软件编程并结合可操作的生产工艺，计算薄壁筒区域和桁架区域的最佳铺设结果。经过几次迭代优化后，最终确定主承力系统的薄壁筒壁厚、桁架壁厚和横截面的长宽尺寸。CFRP 主承力系统中桁架结构的最终质量为 2.11 kg，满足总体指标的设计要求。

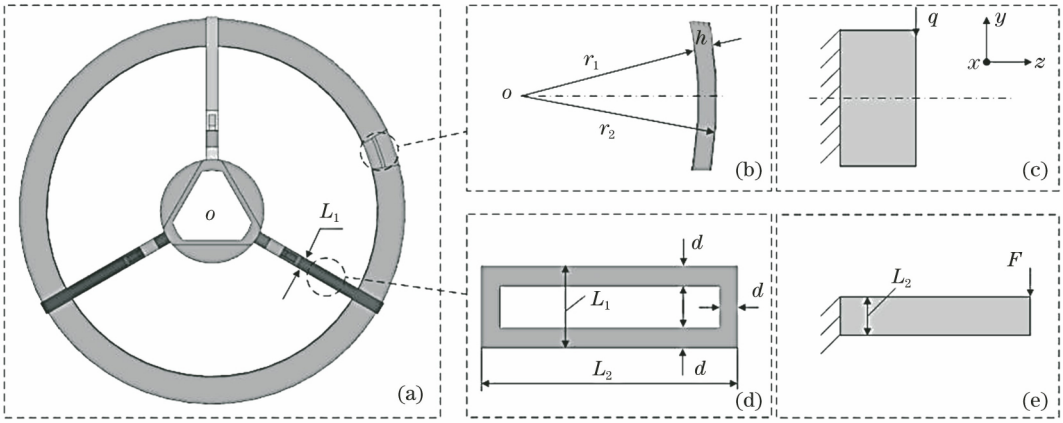

图 3　主承力系统的尺寸优化策略。(a)主承力结构；(b)筒壁结构；(c)薄壁筒极限受力状态；(d)桁架横截面构型；(e)单桁架极限受力状态

Fig. 3　Size optimization strategy of main bearing system. (a) Main bearing structure; (b) tube wall structure; (c) limit force state of thin-walled tube; (d) truss cross-sectional configuration; (e) single truss limit force state

2.4　CFRP 桁架结构的工程分析

对桁架结构进行有限元建模分析，次反射镜在三个方向重力作用下的中心位置偏移与倾角旋转结果如表 2 所示。从表 2 可以看到，中心位置偏移与倾角旋转结果均满足光学系统中位置公差的总体要求。视轴抖动是影响光学载荷动态 MTF 的关键因素之一，桁架结构作为主承力的支撑结构是光学载荷抗视轴抖动机械设计的关键结构，在轻质量的前提下其动态刚度越大越好。在次反射镜配重的条件下，桁架结构的一阶振型为垂轴平面的平动，频率为 186 Hz，则抗低频正弦激励的性能优异，桁架结构的一阶振型如图 4 所示。在垂直光轴的方向，基于模态法对视轴的位移响应在像平面坐标系下进行解耦，量化得到视轴在像平面内的位移变化，结果如表 3 所示，其中 R 表示径向方向。从表 3 可以看到，在高阶模态频谱区间，桁架结构的视轴抖动很小，且动力学性能优异。温度梯度的变化会导致结构内部产生热应变，引起次反射镜的中心位置发生偏移和倾转，进而影响光学系统的成像质量。对桁架结构施加 4 ℃等温度梯度载荷，量化其在热载荷作

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

用下次反射镜中心位置的变化情况，结果如表 2 所示。从表 2 可以看到，该桁架结构表面包覆的高热导率材料可以有效降低温度梯度变化对桁架结构内部热应变的影响，进而提高桁架结构的综合导热性能。

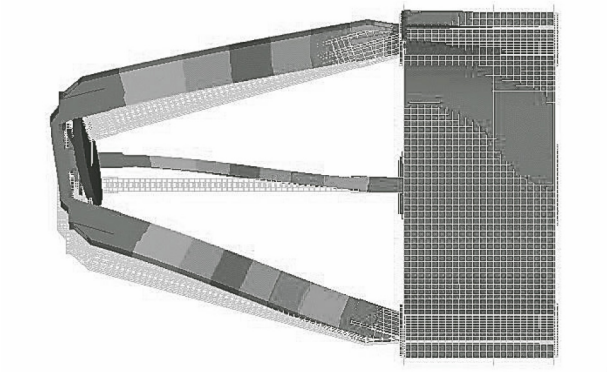

图 4　桁架的一阶振型

Fig. 4　1st order shape of truss

表 2　次反射镜在重力和热载荷作用下不同方向的中心位置变化结果

Table 2　Central position of subreflector changes in different directions under action of gravity and thermal loads

Load	Parameter	X	Y	Z
Gravity	Position /μm	3.1	3.9	5.0
	Title /(″)	2.6	2.9	0.7
Thermal	Position /μm	0.7	0.6	5.8
	Title /(″)	0.9	1.1	1.2

表 3　视轴在像平面坐标系下的抖动结果

Table 3　Jitter results of visual axis in image plane coordinate system

Frequency /Hz	X /μm	Y /μm	R /μm
186	0.05	0.24	0.25
220	0.02	0.10	0.10
287	0.30	1.82	1.84
493	0.01	0.29	0.29

3　试验验证

3.1　结构稳定性验证

采用光学测量的方法定量验证 CFRP 桁架结构在重力载荷、温度载荷和振动前后的结构稳定性。具体方法：将 CFRP 桁架力学试验件放置在一个稳定的平台上，在平台上架设倾转角度为 0.5″的 Leica 经纬仪，使得分别粘贴在次镜组件模拟件后端面的棱镜 1 和工装基准端面的棱镜 2 同时进入经纬仪的视场中，使用倾转角度优于 0.5″的 Leica 经纬仪分别测量次反射镜（棱镜 1）和工装基准端面（棱镜 2）的方位角和俯仰角。棱镜 1 和棱镜 2 的方位角差值，即为次反射镜相对于工装基准端面的方位角变化量；棱镜 1 和棱镜 2 的俯仰角差值，即为次反射镜相对于工装基准端面的俯仰角变化量。重力载荷、温度载荷和振动前后的结构稳定性均采用上述方法，其中在重力载荷作用下的结构稳定性测试，CFRP 桁架力学试验件需要加载等效配重并整体水平静放一周的时间，确保测量数据的准确性，与光学系统的要求指标相比，即可判定 CFRP 桁架结构的结构稳定性。CFRP 桁架结构稳定性的检测装置如图 5 所示，检测结果如表 4 所示。

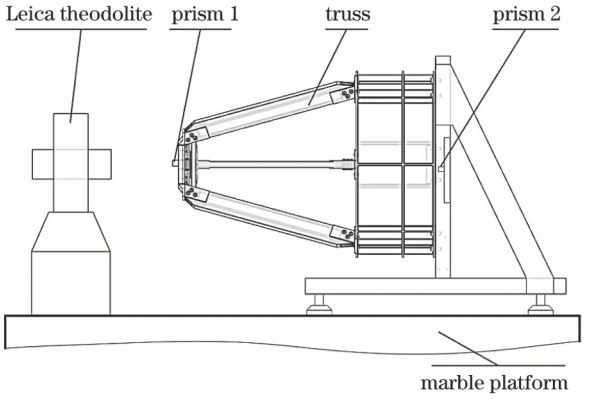

图 5　CFRP 桁架结构的稳定性检测装置

Fig. 5　Stability detection device of CFRP truss structure

表 4　CFRP 桁架结构的稳定性检测结果

Table 4　Stability test results of CFRP truss structure

Stage	Angle	Gravity load	Thermal load	Before vibration	After vibration
Initial	Pitch angle ψ_1 /(°)	90.75215	90.53844	90.75215	90.64923
	Orientation O_1 /(°)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
Final	Pitch angle ψ_2 /(°)	90.75228	90.53864	90.75228	90.64938
	Orientation O_2 /(°)	0.00011	0.00026	0.00011	0.00018
$\lvert\psi_1-\psi_2\rvert$ /(″)		0.468	0.720	0.468	0.540
$\lvert O_1-O_2\rvert$ /(″)		0.396	0.936	0.396	0.648

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

从表 4 可以看到，在重力载荷、温度载荷和振动等条件下，CFRP 桁架结构的俯仰角和方位角的变化量很小，均不超过 1″。相较于张雷等[6]研制的同轴空间相机碳纤维桁架的变化量为 4″和李威等[7]研制的 TC4 钛合金空间相机桁架的变化量为 5.2″，CFRP 桁架结构具有较高的结构稳定性，并满足光学系统的总体要求。

3.2　动力学验证

将 CFRP 桁架结构力学试验件放置在振动台上，传感器安装在次反射镜模拟镜面的背部，在空间环境中对试验件进行正弦扫描振动（频谱范围为5～100 Hz）和随机扫描振动（频谱范围为 10～2000 Hz）实验。CFRP 桁架结构力学试验件在垂直光轴方向试验得到 10～600 Hz 的频段范围内全部特征频率和相对应的响应幅值，结果如图 6 所示。工程分析与试验测试获取的特征频率对比结果如表 5 所示。从表 5 可以看到，相较于表 2 的视轴抖动分析结果，视轴在像平面坐标系下抖动所对应的特征频率与振动试验相吻合，相差小于 5%，验证有限元分析计算结果的正确性。

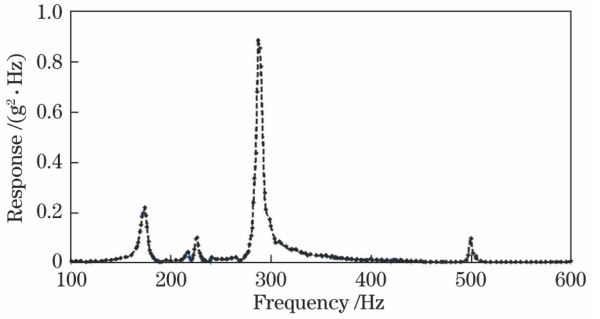

图 6　随机扫描振动的数据

Fig. 6　Randomly scan vibration data

表 5　工程分析与试验测试获取的特征频率在不同阶数对比

Table 5　Comparison of characteristic frequencies obtained by process engineering analysis and experimental testing in different orders　　unit: Hz

Order	1st	2nd	3rd	4th
Test	174	225	293	503
Engineering	186	220	287	493

4　在轨影像分析

当吉林一号星座某轻型高分辨空间相机在轨正常工作时，得到干净和锐利的全色遥感影像如图 7 所示。从图像端出发，采用刃边法[12]对轻型高分辨空间相机的 MTF 进行计算，计算结果如图 8 所示。计算表达式为

$$F_d = F_c \times F_a \times F_v \times F_t \times F_s \times F_f, \quad (3)$$

式中：F_d 为动态因素的 MTF；F_c 为静态因素的 MTF；F_a 为大气环境因素的 MTF；F_v 为振动因素的 MTF；F_t 为温度因素的 MTF；F_s 为相移因素的 MTF；F_f 为离焦因素的 MTF。由(3)式可知，在轨实际动态 MTF 值比理论静态小。空间相机在截止频率为 91 lp/mm 处对应的动态 MTF 值约为0.08，大于光学系统的设计指标(0.07)，且全色遥感影像获取的信息丰富，从而验证 CFRP 桁架结构支撑技术的可靠性和有效性。

图 7　卫星遥感影像

Fig. 7　Satellite remote sensing image

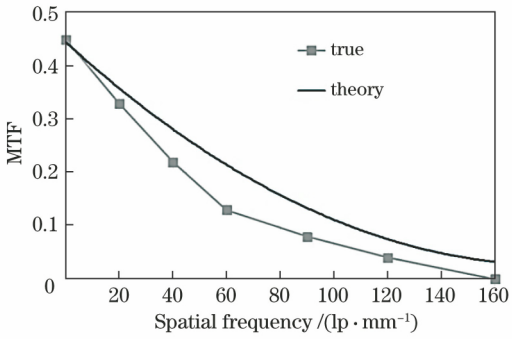

图 8　动态 MTF 曲线

Fig. 8　Dynamic MTF curves

5　结　论

从实际应用的角度出发，设计并研制高精密超轻量化 CFRP 桁架结构。通过工程分析计算 CFRP 桁架结构在重力和温度载荷的作用下次反射镜中心位置的变化，以及在随机振动的条件下抵抗视轴抖动的能力。为了验证结构的稳定性和工程分析的正确性，对 CFRP 桁架结构进行光学测量和力学测试。试验结果表明，高精密超轻量化 CFRP 桁架结构的质量仅为 2.11 kg，在重力载荷、4 ℃温升和振动等条件下的稳定性优于 1″，实现高轻量化和良好

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的稳定性。当一阶基频达到186 Hz,抗低频正弦激励和抗视轴抖动性能优异。最后,采用刃边法对在轨影像进行分析,结果表明相机动态MTF满足光学系统的指标要求,CFRP桁架结构对动态MTF的影响小。CFRP桁架结构已成功应用于吉林一号星座空间相机的复合材料高精密桁架的研制,其设计和试验方案可作为其他同型空间相机结构设计的技术参考。

参 考 文 献

[1] Xu W, Jin G, Wang J Q. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 1969-1978.
徐伟, 金光, 王家骐. 吉林一号轻型高分辨率遥感卫星光学成像技术[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(8): 1969-1978.

[2] Li W, Guo Q F. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Journal of Optics, 2011, 4(3): 201-212.
李威, 郭权锋. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 201-212.

[3] Lyon R G, Dorband J E, Hollis J M. Hubble space telescope faint object camera calculated point-spread functions[J]. Applied Optics, 1997, 36(8): 1752-1765.

[4] Catanzaro B E, Thomas J A, Small D W, et al. Optical metrology for testing an all-composite 2-m-diameter mirror[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4444: 207-223.

[5] Guo J, Shao M D, Wang G L, et al. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 571-578.
郭疆, 邵明东, 王国良, 等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(3): 571-578.

[6] Zhang L, Yao J S, Jia X Z, et al. Development of trusses made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(9): 1967-1973.
张雷, 姚劲松, 贾学志, 等. 同轴空间相机碳纤维复合材料桁架结构的研制[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(9): 1967-1973.

[7] Li W, Liu H W, Guo Q F, et al. Combined supporting structure of thin wall joint cylinder and supporting bar between primary mirror and second mirror in space camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(12): 2633-2641.
李威, 刘宏伟, 郭权锋, 等. 空间相机主次镜间的薄壁筒和支杆组合支撑结构[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(12): 2633-2641.

[8] Li Z L, Yang L W, Xu H, et al. Overview of deployable secondary mirror support truss for space telescope[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(3): 58-67.
李志来, 杨利伟, 徐宏, 等. 空间望远镜可展开次镜支撑桁架综述[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(3): 58-67.

[9] Dolkens D, Kuiper H. Design and end-to-end modelling of a deployable telescope[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 1056: 1056227.

[10] Zhai Y. Design of truss framework of multi-mirror optical system for large-scale space infrared camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(11): 2923-2930.
翟岩. 大型空间红外相机多反光学系统桁架杆框架的设计[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(11): 2923-2930.

[11] Li W, Liu H W. Structure stability of precision component made of carbon fiber composite in space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2173-2179.
李威, 刘宏伟. 空间光学遥感器中碳纤维复合材料精密支撑构件的结构稳定性[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(11): 2173-2179.

[12] Viallefont-Robinet F, Léger D. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3531-3545.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net