

文章编号 1004-924X(2015)08-2280-08

离轴多反射镜系统支撑结构的设计与装调

梅 贵*, 翟 岩, 苗健宇, 浦前帅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对离轴多反射式空间相机设计了一种胶接桁架支撑结构。采用 T700 碳纤维复合材料制造桁架杆, 钛合金材料制造杆接头, J133 环氧树脂胶作为黏合剂, 桁架杆两端的钛合金接头作为相机各组件的接口。给出了装调和胶接的辅助设备及相关的方法和步骤: 即利用工装进行预装调, 确定杆接头位置; 然后通过抹胶完成正式装调, 利用定位销钉实现杆接头复位; 最后在室温下固化 5~7 天, 拆除工装和销钉后桁架装调完毕。有限元分析和力学振动试验表明, 固化完成的桁架一阶谐振频率优于 90 Hz, 所支撑镜头的一阶谐振频率优于 70 Hz。对力学试验前后桁架的各反射镜接口平面度进行了测量, 结果显示其最大相对偏差为 5.3%, 平面度均优于 0.15 mm。得到的结果表明该桁架的刚度及尺寸稳定性均满足设计要求。

关键词:离轴多反射镜系统; 支撑结构; 桁架; 碳纤维复合材料; 装调

中图分类号:V447.3; TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2280

Design and alignment of support structure for off-axis multi-mirror system

MEI Gui*, ZHAI Yan, MIAO Jian-yu, PU Qian-shuai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: meigui840428@163.com

Abstract: A support structure with an adhesive truss was designed for a space camera with off-axis multi-mirror systems. The struts of this truss were manufactured with T700 made of carbon fiber composites, fittings were manufactured with titanium alloys, the adhesive was J133 epoxy resin and casting titanium fittings were bonded on both ends of the truss struts to provide interfaces for other subassemblies of the camera. The methods and steps for assist alignment equipment and gluing the subassemblies were described particularly. Firstly, preliminary assembly and alignment were done to ensure the precise locations of struts and fittings using the assistance equipment. Then, the formal alignment was performed with the help of locating pins, and the struts and fittings were restored in the correct initial positions and bonded with adhesives. Finally, the structure was solidified at room temperature for 5—7 days, and the assembly and alignment were finished after dismantling the assistance equipment and pins. The results of finite element analysis and vibration test indicate that the first-or-

收稿日期: 2014-03-27; 修订日期: 2014-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61108066)

der natural frequencies of the truss and the lens supported by the truss are more than 90 Hz and 70Hz, respectively. Interfaces of mirror subassemblies were measured before and after vibration tests, and the results show that the flatness has been reached to 0.15 mm and the maximum relative error of interface flatness is 5.3%. The conclusion is that the stiffness and dimensional stability of the truss well meet the design requirements.

Key words: off-axis multi-mirror system; support structure; truss; carbon fiber composite; alignment

1 引 言

随着现代军事、科研等领域要求的不断提高,空间相机正朝着大口径、长焦距、高轻量化的方向发展^[1]。在总成直至在轨工作的整个过程中,空间相机会经历严酷的热、力学环境等考验。为了保证成像质量,空间相机的支撑结构需要具有良好的强度、刚度以及高度的热、力学稳定性。

目前,空间相机支撑结构主要有整体式(包括整体铸造框架结构、薄壁圆筒式结构等)、桁架式以及组合支撑等方式^[2-4]。国内外的中小型同轴空间相机多采用薄壁圆筒式结构,典型的有 Wordview-1、Geoeye-1 等相机;大型同轴相机主次镜系统多采用桁架式结构,如哈勃空间望远镜(HST)、多反射镜式望远镜(MMT)等^[5-8];大型离轴三反式系统多采用框架与桁架杆组合支撑方式,如 LandSat-7 搭载的光学成像遥感器。国内外的光机系统设计师对空间相机的支撑结构开展了多种形式的分析与研制。张雷、贾学志、李志来等介绍了同轴空间相机的碳纤维桁架结构^[9-11]; Paul R. Yoder 较为详细地分析了主次镜系统的桁架结构支撑方式^[12];刘磊、郭疆等分析了轻型离轴三反式空间相机前后框架与桁架杆、连接筒组合的支撑方式^[13-14];辛宏伟等介绍了某大型离轴三反系统桁架与上下框架组合支撑结构的设计^[15]。

对于大型离轴多反射镜系统,其支撑结构不仅要顾及通常的质量、刚度、稳定性等问题,还要考虑数量较多的反射镜组件导致的接口布置、光路遮拦和装调空间问题,由于它们在设计时受到的限制较多,相关的参考文献较少,故成为此类光机系统设计的技术难点之一。本文针对这一问题,以某离轴多反射式空间相机为研究对象,设计了其支撑结构,并论述了装调方法,有限元软件分析与力学环境试验均给出了较好的结果。

2 光学系统组成

某空间相机主光学系统如图 1 所示,其由摆镜、主镜、次镜、三镜、折叠镜 1 和折叠镜 2 共 6 块反射镜组成前组缩束系统,与后组折射系统共同实现大相对孔径,即大口径、长焦距这一目标。主镜、次镜和三镜均采用二次非球面,用以校正系统的球差、彗差、像散和畸变。

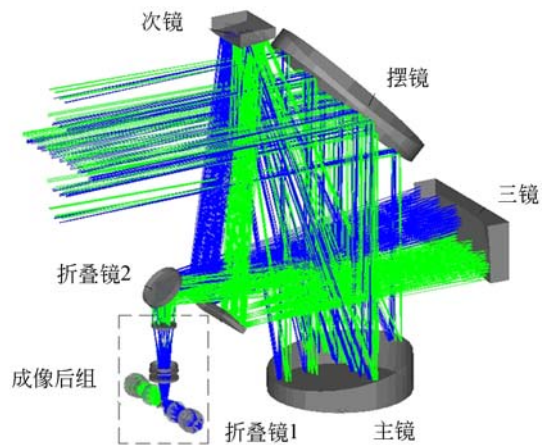


图 1 某空间相机光学系统

Fig. 1 Optical system of a space camera

3 系统支撑结构设计

3.1 支撑方案的选择

由于各反射镜与入光口共同形成一个封闭多边形,如选择整体铸造框架的形式,将得到一个周边共 6~7 个开口的大型框架结构,不仅铸造难度高,整体刚度也难以保证,此外,该结构三维模型设计质量达到近 100 kg,整机质量超过 250 kg,无法满足相机系统的质量要求;如将支撑结构设计成框架与桁架杆组合支撑的结构,考虑到反射镜的空间分布,需要约 3 个独立框架来支撑全部

反射镜,而它们之间依靠桁架杆实现稳定连接较为困难,难以保证整体支撑效果。

基于以上原因,本文将支撑结构设计成桁架形式,利用多通接头将所有桁架杆胶接形成稳定结构,各反射镜组件安装于多通接头设计好的接口上。

3.2 材料的选取

桁架杆采用 T700 碳纤维复合材料制造,该材料已广泛应用于航空、航天等领域内的轻量化结构中^[16],具有低密度和高弹性模量的特性,比刚度高,热膨胀系数小并且可以根据需求设计。接头采用钛合金材料制造,这是由于碳纤维复合材料的机械切削加工性能差,难以作为相机其他组件的接口材料,而钛合金可以弥补这一不足;钛合金与碳纤维复合材料的电位差较小,不易发生电偶腐蚀问题^[17]。另外,钛合金与碳纤维复合材料之间的黏接工艺较为成熟^[18-20],已经成功应用在多个空间载荷上。由此设计的桁架结构既可以最大程度地减轻空间相机的质量,又能够保证结构支撑刚度与热稳定性。

3.3 桁架初始设计

由图 1 可知光学系统沿入射光方向左右对称,依据这一特点,在初始设计时可以将桁架简化为上下(装调时的状态)两个呈镜像关系的桁架杆平面通过竖杆连接而成的空间结构,因此只要设计出桁架杆平面就可以得到整个桁架的初步结构。

按照光学设计数据可以确定各组件接口处的关键杆和关键节点(即杆接头),如图 2(a)所示,杆 I~VII 分别对应摆镜、三镜、主镜、折叠镜 2、折叠镜 1、遮光罩和次镜,节点 1~7 为相应的杆接头。然后根据桁架静定条件确定每个桁架杆平面内的杆数量,由结构力学知识可知,决定一个桁架静定的必要条件是杆的数量等于节点总的自由度,对于平面桁架来说,有如下关系:

$$m=2n-3, \quad (1)$$

式中: m 为杆数量, n 为节点数量。当 $n=7$ 时,由式(1)求得 $m=11$,可以得到桁架杆平面内杆数量为 11,只要在图 2(a)中添加 4 根杆即可满足静定条件。从几何的观点来看,有很多种添加方式,但是综合考虑相机与卫星的接口位置和安装方式等因素,杆的最佳布置方式如图 2(b)所示,其中节点 1、节点 3 和节点 4 这 3 处接头提供与卫星的

安装接口和相机吊装搬运接口。桁架杆平面结构确定后,可以相应得到桁架整体初步结构,如图 2(c)所示。

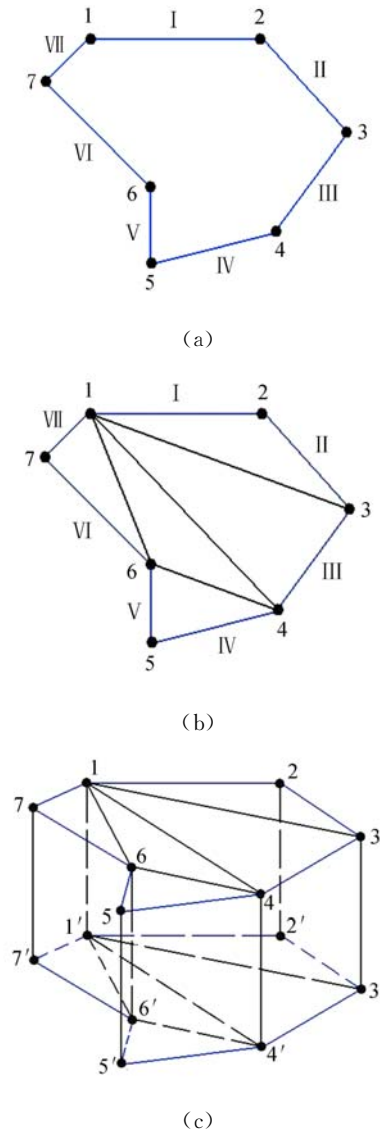


图 2 桁架初始设计过程

Fig. 2 Preliminary design process of a truss

3.4 桁架设计优化

桁架的初步结构确定后,根据各安装组件和相应接口的设计方案,需要对桁架进行优化,如图 3 所示,在维持基本结构不变的前提下增加了部分杆和接头。为了消除桁架杆对光路的遮拦同时便于反射镜等组件的安装,设计中上下两层杆平面的连接不可避免地采用了不够稳定的四边形结构(相对于三角形稳定结构而言),因此在各关键接口位置增加 45° 斜拉杆,用以提高整个桁架结

构的刚度和稳定性。

由于桁架的整体刚度主要取决于杆的刚度,在选定材料的情况下,杆的内外径不仅决定了桁架的质量,也会影响桁架谐振频率。受到国内碳纤维杆加工条件的限制,一般杆的壁厚不小于 2.5 mm;为了满足发射要求,不产生共振破坏,要求整机发射方向基频 ≥ 70 Hz,垂直发射方向基频 ≥ 50 Hz,经过多次整机实体模型工程分析并考

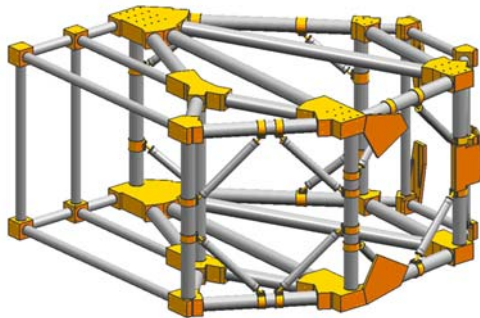


图 3 某空间相机桁架结构示意图

Fig. 3 Truss geometry of a space camera

虑充分的设计余量,桁架一阶固有频率要求大于 90 Hz。由此选取桁架杆的总质量为优化目标,杆的内外径为优化变量,得到以下优化模型:

$$\begin{aligned} \min m(d_1, d_2) &= \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \rho l_i (d_2^2 - d_1^2) \\ \text{s. t. } &\begin{cases} d_2 > d_1 > 0 \\ d_2 - d_1 \geq 2.5, \\ f_1 \geq 90 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: m 为桁架杆的总质量, ρ 为杆密度, n 为杆数量, d_2 、 d_1 分别为杆的外径和内径, l_i 为杆长, f_1 为桁架的一阶固有频率。

采用有限元分析法,经过优化可以得到统一的碳纤维杆内外径。但考虑实际的桁架相比分析模型刚度将有所下降,杆直径应略微增加;这些杆中有一部分对桁架的刚度贡献较小,可以用较细的杆代替;另外斜拉杆直径较大时,容易遮挡光路。因此最终确定了 3 种规格(指内外径)的碳纤维杆,桁架整体尺寸为 1 364 mm \times 1 267 mm \times 705 mm,设计总质量为 55.3 kg。

4 有限元分析

根据优化设计结果,对桁架进行有限元分析,采用 MSC. Patran 建模, MSC. Nastran 求解,材

料属性如表 1 所示,大型多通接头使用精密铸造钛合金 ZTC4,小型接头使用锻造钛合金 TC4。

表 1 桁架材料属性

Tab. 1 Material properties of a truss

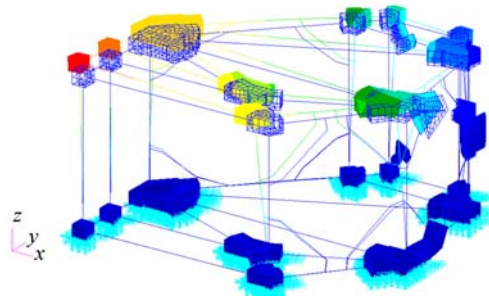
材料	密度 /(10 ³ kg/m ³)	弹性模量 /GPa	泊松比	线胀系数 /(10 ⁻⁶ /K)
TC4	4.44	109	0.34	9.1
ZTC4	4.44	110	0.29	8.9
T700	1.57	120	0.28	0.3

分析计算框架结构沿 3 个轴向的工作基频。表 2 和图 4 所示为相机的基频大小及振型情况。

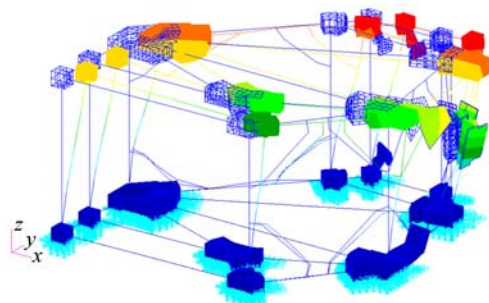
表 2 桁架 3 个方向固有频率

Tab. 2 Natural frequencies of truss in 3 directions

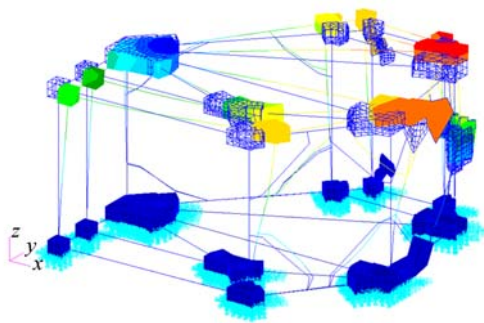
f /Hz	振型描述	示意图
98.10	沿 Z 轴方向移动	图(a)
133.52	沿 X 轴方向移动	图(b)
159.73	沿 Y 轴方向移动	图(c)



(a) Z-direction



(b) X-direction



(c) Y-direction

图 4 桁架 3 个方向模态

Fig. 4 Modes of truss in 3 directions

5 桁架的装调

5.1 工装设计

为了便于黏接工艺的实施,保证整个桁架的尺寸和位置精度,设计了一套工装用于桁架装调、胶接和固化。工装包括 2 块形状互为镜像的铝板,图 5 为所示为其中一块模型示意图,3 根等长度等外径的空心不锈钢柱,若干不锈钢压板,它们均具有满足使用要求的尺寸和形位精度。图 6 所示为工装与桁架的安装示意图,可以看出,工装的

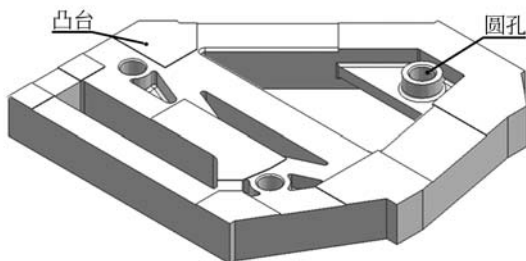


图 5 工装铝板模型示意图

Fig. 5 CAD model of a aluminum plate

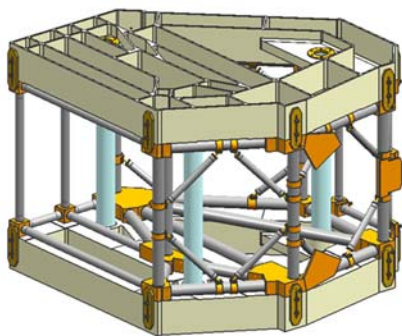


图 6 工装与桁架安装示意图

Fig. 6 Assembly of assistance equipment and the truss

自身及装配精度可以决定和保证桁架(包括整体和接口)的尺寸和形位精度。

5.2 预装调

预装调之前应复检所有碳纤维杆内外径和长度以及对应的杆接头胶接部分外径和长度,保证桁架的总体尺寸正确,胶接长度、胶层厚度合理。

装调工作在 $4\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的高精度气浮平台上进行,桁架分为 4 个部分,上下呈镜像关系的两桁架杆平面,竖直连接杆和斜拉杆。先将碳纤维杆与接头在两块工装铝板(分别称上铝板、下铝板)凸台上分别组装好成镜像关系,微调各杆方向和接头间距,使得所有碳纤维杆插入接头后可以沿轴向旋转自如,用压板、紧定螺钉将接头压紧于工装铝板上;接着借助 3 根不锈钢柱的导向与支撑,将竖直连接杆安装至上下桁架杆平面对应的接头处,需要注意的是上铝板重力应完全由 3 根钢柱承载;最后安装 45° 斜拉杆,同样要求杆可以沿自身轴线自由转动,即处于不受应力状态。至此,预装配工作完毕,桁架状态如图 6 所示,用记号笔记下所有接头相对于工装或者碳纤维杆的位置,并在两块铝板上面积最大的 4 块钛合金接头预留的销孔处打定位销,然后将桁架与工装全部拆分、清理,等待正式装调胶接。每一步装配和调整未达到预期目标时,应找出问题所在,进行修正。

5.3 正式胶接与固化

按照预装调的步骤,在各步之前对涉及的碳纤维杆和接头的胶接部分进行表面处理,然后均匀涂抹适量 J133 环氧树脂胶进行黏接。为了保证粘接后胶层的厚度均匀,在接头根部缠绕一圈适当厚度和宽度的金属带,然后插入碳纤维杆,这样胶层将不会受到杆重力导致的挤压应力的影响而均匀自然固化。所有钛合金接头应仔细调整,复位至预装调的状态(以定位销钉复位为准)。控制实验室温度在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度 $\leq 30\%$,在此条件下固化 $5 \sim 7\text{ d}$,拆除所有工装与定位销钉,桁架装调完成。

6 试验与分析

6.1 桁架力学性能测试

为了消除桁架由于黏合剂固化产生的应力,实测在给定的力学试验条件下的响应情况,检验胶接结构强度、刚度及稳定性,对固化完成的桁架

进行了振动测试,试验装置如图 7 所示。试验用设备为 LDS 电磁振动台,试验项目为:0.2g 特征扫频,正弦振动,随机振动。特征扫频试验用以考察桁架抵抗外界振动干扰的能力,桁架的固有频率,尤其是前几阶固有频率越高,表明其结构动态刚度越好;正弦和随机振动用来模拟载荷在运输、



图 7 桁架力学试验装置
Fig. 7 Testing equipment for the truss

发射等过程中经历的力学环境,振动量级按照经历的力学环境给定并适当提高,以此全面考察结构的稳定性和可靠性,即耐震能力。

表 3 所示为桁架在各条件下的 3 个方向的扫频结果对比,图 8 为力学试验后 Z 向扫频曲线,可以看出,试验结果与有限元分析结果较为吻合,偏差主要来源于有限元模型对胶接部分采用一体的近似处理,导致分析结果偏高;正弦和随机振动后扫频与初始扫频结果相比略有下降,由于桁架在黏接剂固化过程中为了保证形位精度,利用工装紧固约束,不可避免产生黏接应力,经过大量级的振动试验后得到充分释放,因此固有频率会有所下降,而正弦和随机振动后扫频结果基本一致,一方面表明应力释放后,桁架的固有频率趋于稳定;另一方面桁架能够承受模拟力学环境的考核而不发生任何破坏。桁架一阶固有频率达到 90.47 Hz,满足整机对桁架动态刚度的要求。

表 3 桁架与镜头各情形下的固有频率

Tab. 3 Natural frequencies of the truss and lens under various conditions

试验对象	方向	有限元分析/Hz	初始扫频/Hz	正弦后扫频/Hz	随机后扫频/Hz	试验最大相对偏差/%
桁架	Z	98.10	94.03	91.55	90.47	3.6
	X	133.52	127.64	123.16	121.35	6.2
	Y	159.73	152.28	147.27	144.23	5.3
镜头	Z	83.69	78.86	77.61	77.38	1.9
	X	101.42	95.33	93.87	92.95	2.5
	Y	120.27	110.95	109.21	107.72	2.9

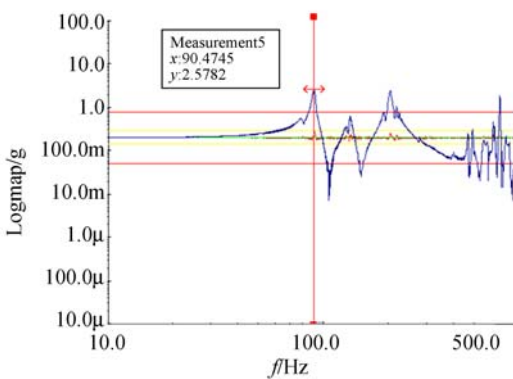


图 8 Z 向扫频响应曲线

Fig. 8 Response curve in Z-direction for frequency sweeping test

三坐标测量机分别检测了各反射镜接口处的平面度,图 9 所示为检测装置,结果如表 4 所示,试验前后的检测结果均优于设计指标 0.15 mm,且相对偏差较小,证明此桁架结构的稳定性满足使用要求。



图 9 桁架接口检测装置

Fig. 9 Measuring equipment for the truss interfaces

6.2 稳定性检测

支撑结构的尺寸稳定性直接决定了光学系统最终成像质量劣,在桁架力学振动试验前后利用

6.3 镜头力学试验

为了考察桁架的实际支撑性能,在各反射镜接口加工完成后进行黏接及组件级装配,然后通过接口过渡件安装于桁架上,成像后组用其安装基板和模拟件代替,紧固螺钉并点 D04 胶防止试验过程中发生松动,反射镜组件仅作为负载,无需光学调整。对镜头进行了振动试验,结果如表 3 所示,可以看出,尽管镜头的有限元分析和振动试

表 4 试验前后桁架各接口平面度

Tab. 4 Interface flatnesses of truss before and after vibration tests

位置	试验前 /mm	试验后 /mm	相对偏差/%	设计要求 /mm
摆镜组件接口	0.102	0.107	4.9	≤ 0.15
主镜组件接口	0.087	0.091	4.6	≤ 0.15
次镜组件接口	0.076	0.072	5.3	≤ 0.15
三镜组件接口	0.092	0.096	3.3	≤ 0.15
折叠镜 1 组件接口	0.089	0.090	1.1	≤ 0.15
折叠镜 2 组件接口	0.096	0.093	3.1	≤ 0.15

参考文献:

- [1] 范斌,王艳. 国外长焦距高分辨率遥感相机桁架结构研究[J]. 航天遥感与返回, 2008, 29(2): 35-41.
FAN B, WANG Y. Research on truss structure of foreign remote-sensing cameras with long focal length and high resolution [J]. *Spacecraft Recovering and Remote Sensing*, 2008, 29(2): 35-41. (in Chinese)
- [2] 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.
LI W, LIU H W. Structure stability of precision component made of carbon fiber composite in space optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2173-2179. (in Chinese)
- [3] 孙敬伟,吕天宇,姚丽双,等. 发射望远镜的设计与装调[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 369-375.
SUN J W, LV T Y, YAO L SH, et al.. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)
- [4] SEBASTIAN S, CHRISTOPH D, WOLFGANG H, et al.. Ultra precisely manufactured mirror as-

semblies with well defined reference structures [J]. *SPIE*, 2010, 773908: 1-10.

7 结 论

本文针对某大型离轴多反射镜系统,设计了以碳纤维复合材料作为杆,钛合金材料作为杆接头的胶接桁架支撑结构,并给出了装调辅助工装的设计和装调方法,解决了这一光学系统结构实现的难题。桁架与镜头的仿真分析和力学振动试验结果表明,该桁架结构具有较好的刚度,一阶谐振频率达到 90.47 Hz;良好的尺寸稳定性,力学试验前后,各接口的平面度变化很小,最大相对偏差 5.3%,且均满足设计指标 ≤ 0.15 mm;桁架支撑性能良好,镜头谐振频率大于 70 Hz,满足发射要求。本中的设计和装调方法可以为此类型光学系统的空间相机支撑结构设计提供技术参考。

- [5] 徐伟,朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 9-19.
XU W, PU Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on Pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 9-19. (in Chinese)
- [6] 孔林,王栋,姚劲松,等. 轻型空间相机支撑桁架的精确控温[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 712-719.
KONG L, WANG D, YAO J S, et al.. Precision temperature control for supporting trusses of light-weight space cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 712-719. (in Chinese)
- [7] 郭权峰. 同轴三反空间相机结构稳定性研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2012.
GUO Q F. *Research on structure stability of three-mirror cassegrain space camera* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [8] ANTEBI J, DUSENBERY D O, LIEPINS A A. Conversion of the MMT into a 6.5-m telescope: the optics support structure and enclosure[J]. *Proc.*

- SPIE, 1998, 513, 3352.
- [9] 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.
ZHANG L, YAO J S, JIA X ZH, *et al.*. Development of trusses made of carbon fiber composites for coaxial space remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1967-1973. (in Chinese)
- [10] 贾学志,张雷,金光. 空间相机桁架支撑结构满应力优化设计与试验[J]. 空间科学学报, 2013, 33(3): 346-352.
JIA X ZH, ZHANG L, JIN G.. Optimum design based on full stress ruler and test for truss of space camera [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, 33(3): 346-352. (in Chinese)
- [11] 李志来. 长焦距空间相机主次镜间桁架支撑结构设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(1): 89-93.
LI ZH L. 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)
- [12] PAUL R, YODER J. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Third edition, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2006: 706-729.
- [13] 刘磊. 空间光学遥感器轻型支撑结构研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
LIU L. *Research on light-weight frame of the space optical remote sensor*[D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2006. (in Chinese)
- [14] 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.
GUO J, SHAO M D, WANG G L, *et al.*. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 571-578. (in Chinese)
- [15] 辛宏伟,关英俊,柴方茂. 离轴空间遥感器主支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1257-1264.
XIN H W, GUAN Y J, CHAI F M. Design of main support of off-axis space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1257-1264. (in Chinese)
- [16] 安源,贾学志,张雷,等. 基于碳纤维符合材料的空间相机高比刚度主承力板优化设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(2): 416-422.
AN Y, JIA X ZH, ZHANG L, *et al.*. Optimizing design of CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 416-422. (in Chinese)
- [17] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1181-1185.
LIN Z W, LIU Y Q, LIANG Y, *et al.*. Application of carbon fiber reinforced composite to space optical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1181-1185. (in Chinese)
- [18] 崔永鹏,何欣,张凯. 钛合金和碳纤维的粘接技术[J]. 光学技术, 2012, 38(1): 125-128.
CUI Y P, HE X, ZHANG K. Technique of cementation between the titanium alloys and carbon fibers [J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 125-128. (in Chinese)
- [19] 刘良威,刘锦,李志慧,等. 复合材料桁架胶接装配技术[J]. 宇航材料工艺, 2013(4): 102-104.
LIU L W, LIU J, LI ZH H, *et al.*. Technology of cementing and assembling composite truss [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013(4): 102-104. (in Chinese)
- [20] 张凯,何欣,赵海平. 空间遥感相机桁架机身接头结构的设计和分析[J]. 红外, 2013, 34(10): 10-15.
ZHANG K, HE X, ZHAO H P. Design and analysis of joints for truss structure of space camera [J]. *Infrared*, 2013, 34(10): 10-15. (in Chinese)

作者简介:



梅 贵(1984—),男,江苏高邮人,助理研究员,2006年、2009年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感器光机结构设计的研究。E-mail: meigui840428@163.com



翟 岩(1974—),男,吉林长春人,副研究员,1997年于长春光学精密机械学院获得学士学位,2012年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间遥感器总体设计的研究。E-mail: zhaiy163@tom.com

(版权所有 未经许可 不得转载)