

文章编号 1004-924X(2013)02-0416-07

基于碳纤维复合材料的空间相机高 比刚度主承力板优化设计

安 源*, 贾学志, 张 雷, 金 光

(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:提出了复合材料和金属预埋件互嵌整体成型的设计方法。根据同轴三反光学系统中光学元件的空间布局和碳纤维复合材料的工艺特点和材料属性,设计了一种碳纤维基体与钛合金预埋件互为镶嵌的相机主承力板。首先,以碳纤维复合材料基体为核心,优化设计了基体的筋格形式和厚度,并对金属预埋件进行了布局和轻量化设计;然后,分析了碳纤维主承力板的模态和变形;最后,进行了振动环境试验,验证了设计及分析的准确性。检测和试验表明,纤维主承力板的最大外接圆直径为 $\Phi 870$ mm,厚度为 130 mm,质量为 15.6 kg,平均体密度仅为 0.313 g/cm³,主承力板一阶频率达到 479.2 Hz,满足了空间相机的高动态刚度、轻质量、高安装精度要求。

关 键 词:空间光学相机;碳纤维复合材料;主承力板;金属预埋件

中图分类号:V414.3;V447 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0416

Optimizing design of CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera

AN Yuan*, JIA Xue-zhi, ZHANG Lei, JIN Guang

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

* Corresponding author, E-mail: any@ciomp.ac.cn

Abstract: A design method of composite materials and metals embedded with each other was put forward. On the basis of the space layout of optical elements in a coaxial three-mirror optical system and the technological properties and attributes of the Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP), the main backbone of the camera was designed and manufactured with CFRP and titanium by this method. First, the core body of main backbone was made up of CFRP, and the gridding and thickness were optimized with topology analysis. Then, the metal embedded parts were arranged according to an optical lens, every metal embedded parts were lightweighted and the mode and the deformation of the main backbone were analyzed. Finally, the results of design and analysis were verified by a vibration test. The experiment and test indicate that the CFRP main backbone is 15.6 kg, the circumscribed circle diameter is $\Phi 870$ mm, and the height is 130 mm. Furthermore, the average density and the first mode

收稿日期:2012-09-27;修订日期:2012-12-14.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AA7020103)

frequency are 0.313 g/cm^2 and 479.2 Hz , respectively. These results prove that the CFRP main backbone can meet the requirements of light weight, high dynamic stability and good surface precision for space cameras.

Key words: space optical camera; Carbon Fiber Reinforced Plastic(CFRP); main backbone ;metal embedded part

1 引 言

随着空间光学相机分辨率指标的不断提高,相机轻小型化已成为设计的主要发展方向。通常相机结构的轻小型化主要有两个途径,一是采用低密度的材料,另一个是结构设计的轻量化。

碳纤维复合材料(CFRP)具有高比刚度、低密度、低膨胀系数和模量可设计等优点。不仅兼顾了常用金属材料的各项优点,其各项性能指标还优于传统的金属材料,另外将其应用于空间光学相机也符合空间光学相机光、机、热一体化设计的发展需求,是空间光学相机材料的理想选择^[1]。

国外已将 CFRP 广泛应用于地面、航空、航天等多个领域的轻量化结构中,并已成功应用于空间光学相机中,美国的 HiRISE 高分辨率相机,其主承力板、桁架杆、遮光罩等主要支撑结构产品均采用(CFRP)。我国在空间领域对复合材料的研究是从 20 世纪 60 年代开始的,主要将其应用在通信卫星和气象卫星上,如蜂窝夹层结构太阳能电池壳、仪器安装板、蜂窝夹层结构抛物面天线反射器、天线反射板、支撑结构件、支撑筒等。在空间光学遥感器领域,CFRP 主要被应用在遮光罩、遥感器支架、光阑板等强度要求较高的结构件中^[2-3],而应用于连接和支撑光学元件的具有高刚度、高精度要求的大尺寸结构件上,国内尚无报道。

本文根据同轴三反光学系统中光学元件的空间布局和碳纤维复合材料的工艺特点和材料属性,设计了一种碳纤维基体与钛合金预埋件互为镶嵌的相机主承力板,通过优化设计碳纤维基体和金属预埋件的结构,成功研制了以 T700 碳纤维为基体的主承力板。

2 光学系统形式及主承力板功能

空间光学相机结构设计的目标为保证各光学元件稳定的相对位置关系,同时尽可能地降低整

机质量。图 1 为基于同轴三反光学系统的空间光学相机中光学元件和主承力板的布局。其中,主承力板作为相机的核心支撑结构,是相机光学及结构部件的集成安装板。为了确保在复杂的环境下各光学元件具有稳定的相对位置关系,要求主承力板具备较高的动态刚度、良好的尺寸稳定性和高精度的安装表面。

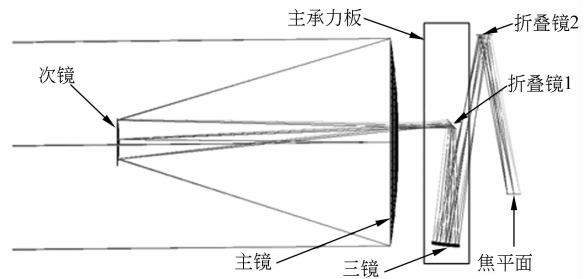


图 1 光学系统组成及主承力板的位置

Fig. 1 Optical system and location of main backbone

碳纤维材料在结构刚度、强度、耐热性、密度等方面的诸多优势使其成为了主承力板设计的首选材料^[4-5]。同时为了克服碳纤维表面精度低的缺点,采用了在光学元件安装表面预埋金属件的方法,通过对金属表面的研磨来保证安装表面达到微米级的精度。

3 主承力板优化设计

碳纤维主承力板由碳纤维基体和钛合金预埋件组成,其中碳纤维基体起主承力作用,金属预埋件则是保证光学元件的高安装精度,同时二者之间也需保证高的连接刚度和稳定度,因此主承力板的设计重点包括:碳纤维基体的优化设计、轻量化金属预埋件设计及金属预埋件的镶嵌设计,其主要指标见表 1。

表 1 碳纤维主承力板的设计要求

Tab. 1 Design requirements of main backbone made of CFRP

外形尺寸要求	质量要求	模态要求
$\leq \Phi 900 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$	$\leq 20 \text{ kg}$	$\geq 400 \text{ Hz}$

根据光学元件的尺寸和安装位置,主承力板外形初步选择为近似三角形,将各光学元件安装处留有金属预埋件,主承力板初步方案模型如图 2 所示。

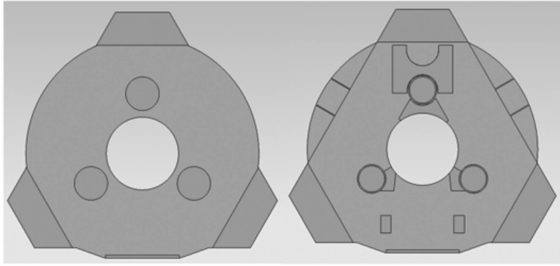


图 2 碳纤维主承力板方案图

Fig. 2 Program figure of main backbone made of CFRP

主承力板设计时需考虑碳纤维基体的成型方法和铺层工艺,既要保证在所需的方向上获得足够的刚度和合适的热膨胀系数,还要保证金属预埋件与碳纤维结合时的工艺性和成型后的整体性^[6-7]。

3.1 碳纤维基体的优化设计

在碳纤维基体的设计上,由于相机主承力板所承受的外载荷的位置固定,且其约束位置也固定,根据碳纤维复合材料成型工艺将主承力基板分为上、下面板和筋格 3 部分。碳纤维基体的优化主要包括主承力板的筋格拓扑结构和上面板、下面板、筋格的厚度。建立主承力板碳纤维基体的有限元模型如图 3 所示。

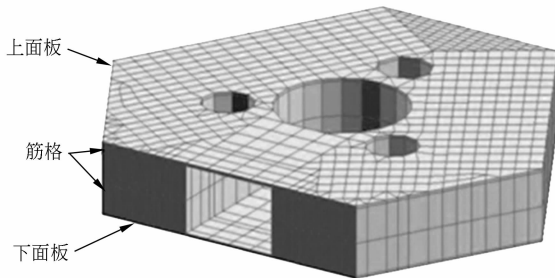


图 3 主承力板碳纤维基体有限元模型结构图

Fig. 3 Finite element model of CRFP of main backbone

首先利用 patran 软件对筋格的构型进行拓扑优化设计,将主承力板碳纤维基体的最小柔度作为优化目标,得到碳纤维基体的筋格拓扑模型如图 4 所示。其次,对碳纤维基体的上、下面板和中间筋格的厚度进行优化设计,初步拟定上、下面板厚度为 $H_1 = H_3 = 4$ mm,按照 $[45/0/-45/$

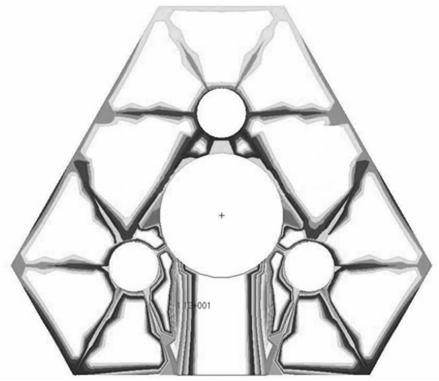


图 4 碳纤维基体筋格图

Fig. 4 Tendon trellis of main backbone made of CFRP

$90]_4$ 铺层,单层厚度 $t = 0.125$ mm,共 32 层。中间筋格厚度 $H_2 = 6$ mm,按照 $[45/0/-45/90]_6$ 铺层,共 48 层,单层厚度 $t = 0.125$ mm。

针对本文主承力板铺层厚度优化过程,其数学模型描述如下:

(1) 目标函数:

$$\min W(X) = \min \sum_{i=1}^n W_i(X) = \min \sum_{i=1}^n \rho_i t_i s_i$$

式中: W_i 为第 i 区域材料的重量; ρ_i 为第 i 区域材料的密度; t_i 为第 i 区域材料的厚度; s_i 为第 i 区域材料的面积。

(2) 设计变量:

优化设计变量为 3 个区域碳纤维层压板的厚度,通过单层厚度 t 的变化优化出层压板的厚度,上面板、中间筋格和下面板的厚度分别设定为 H_1, H_2, H_3 ^[8-9]。

(3) 约束条件:

根据设计要求,主承力板的基频应大于 400 Hz

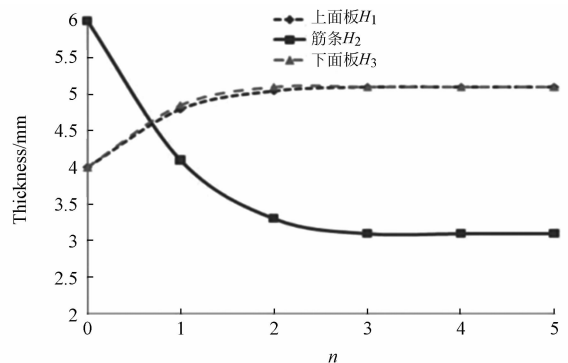


图 5 碳纤维基体厚度优化曲线

Fig. 5 Thickness optimized curve of main backbone made of CRFP

才能满足相机力学环境的要求。

在 Patran 中将约束条件、载荷、响应和优化目标设置后,经过 Nastran 迭代之后,得到优化过程曲线如图 5、图 6、图 7 所示。

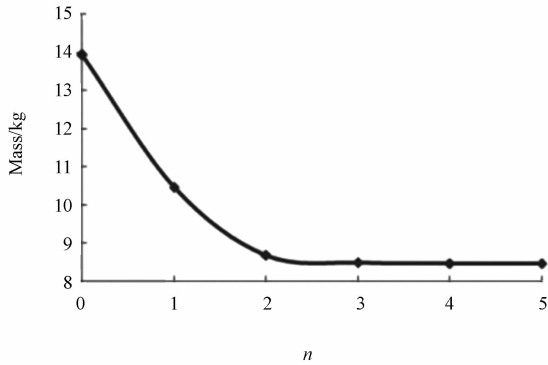


图 6 碳纤维基体质量变化曲线

Fig. 6 Mass curve of main backbone made of CRFP

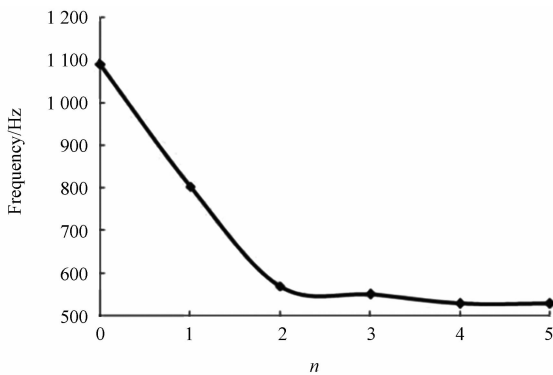


图 7 碳纤维基体基频变化曲线

Fig. 7 Frequency curve of main backbone made of CRFP

从图 5、图 6、图 7 中可以看出,经过 2 次迭代后碳纤维筋格厚度明显下降,上、下面板的厚度增加,质量呈明显下降趋势,经过 5 次迭代后至最优值。最终碳纤维厚度由 4 mm 增加到 5 mm,筋格厚度由初始设计的 6 mm 减少到 3 mm,主承力板碳纤维基体的质量由初始的 13.9 kg 减少到 8.4 kg,质量减少 39.56%,碳纤维基体的基频由初始的 1 090.9 Hz 减少到 528.8 Hz 后达到稳定。

3.2 主承力板的预埋件和成型方案设计

为了最大程度地降低主承力板质量,将连接同一光学元件的安装基准面按照实际接触面的位置进行分体设计^[10-11],并对金属预埋件的外形尺寸和结构形式进行优化设计。图 8 为经过轻量化设计的钛合金预埋件的布局图。

为保证碳纤维基体和金属预埋件联接的可靠

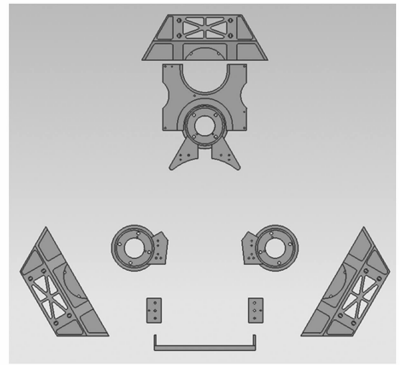


图 8 轻量化后的金属预埋件布局

Fig. 8 Layout of metal embedded parts

性和稳定性,在碳纤维基体与金属埋件的成型方案上创新性地采用了互为镶嵌、一体成型的设计,在主承力板整体成型时将金属预埋件加强筋嵌入到碳纤维基体中,如图 9 所示。即使用于联接的胶层失效,二者之间由于配合严密也不会出现脱落、松动等现象。

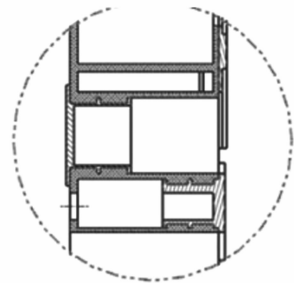


图 9 碳纤维主体与钛合金预埋件镶嵌结构图

Fig. 9 Structure of carbon fiber body and embedded parts

通过将碳纤维缠绕到金属预埋件的结构中,使金属预埋件与碳纤维之间多个方向多个接触面立体镶嵌,使得在受力的时候二者始终保持良好的接触,并且变形一致,尤其当受到与接触面方向垂直的力时,由于金属预埋件的上下面同时与碳纤维接触,碳纤维基体同时受到来自上接触面的拉力和下接触面的推力,减小了对金属件与碳纤维之间胶层和碳纤维层间拉力的依赖,既提高了结构的可靠性,又保证了各接触面变形的一致性。

最终主承力板设计三维模型如图 10 所示,外接圆尺寸为 870 mm,厚度为 130 mm,质量仅为 15.61 kg,质量组成见表 2,平均体密度为 0.313 g/cm³。

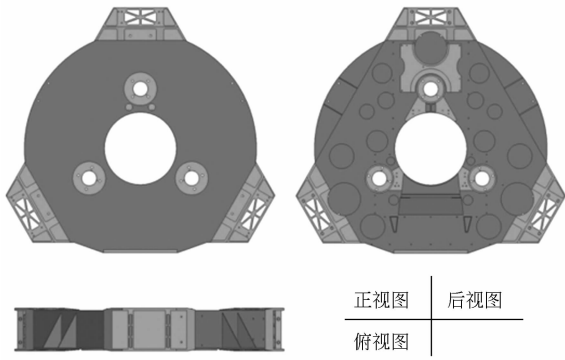


图 10 碳纤维主承力板三维设计图

Fig. 10 Three dimensional model of main backbone

表 2 主承力板质量组成表

Tab. 2 Mass component of main backbone

零件名称	材料	质量/kg
碳纤维基体	T700	8.782
主镜安装埋件	钛合金	1.062
次镜安装埋件	钛合金	3.651
三镜安装埋件	钛合金	0.366
第一折叠镜安装埋件	钛合金	0.458
第二折叠镜安装埋件	钛合金	0.525
焦面安装埋件	钛合金	0.766
合计		15.61

4 碳纤维主承力板分析与试验

4.1 设计分析

在对碳纤维主承力板的结构进行优化设计的基础上,建立有限元模型,通过 patran 有限元分析所得到的主承力板的一阶频率振型如图 11 所示,前 5 阶频率值见表 3 所示。

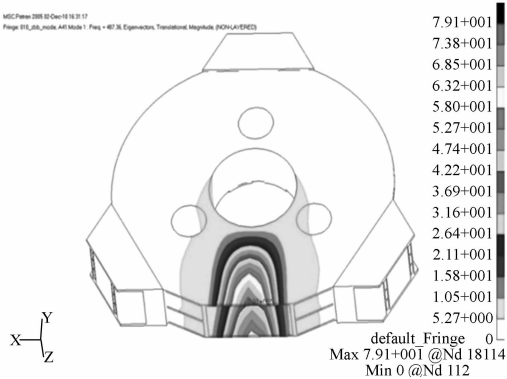


图 11 主承力基板一阶自然频率阵型

Fig. 11 First natural frequency of main backbone

表 3 主承力基板前 5 阶自然频率

Tab. 3 The first five order natural frequencies of main backbone

模态数	频率/Hz
1	487.8
2	542
3	583.6
4	794.5
5	802.6

为考核主承力板在恶劣条件下的承受能力,在承载 30 kg 主镜的条件下,将 15 g 过载工况施加到主承力板上,得到过载工况下主背板的应变云图,如图 12 所示。主背板的最大应变为 0.026 mm,发生在主镜安装处,此时碳纤维基体上的最大应力仅为 13.3 MPa,满足结构的安全要求。

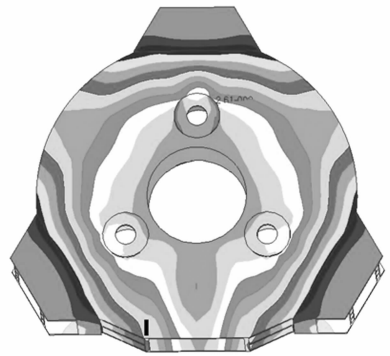


图 12 主承力板 15 g 过载应力图

Fig. 12 Main backbone stress response with 15 g overload

4.2 试验结果

按照上述的设计和分析,完成了碳纤维主承

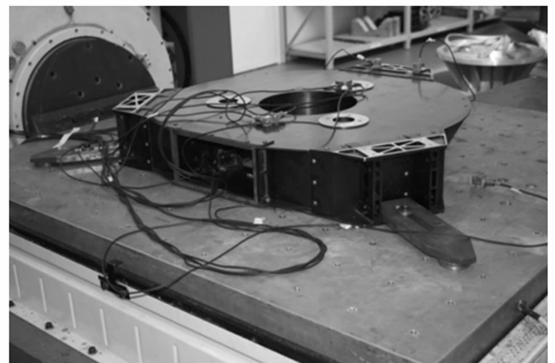


图 13 主承力板的特征扫描振动试验

Fig. 13 Frequency scan vibration test of main backbone

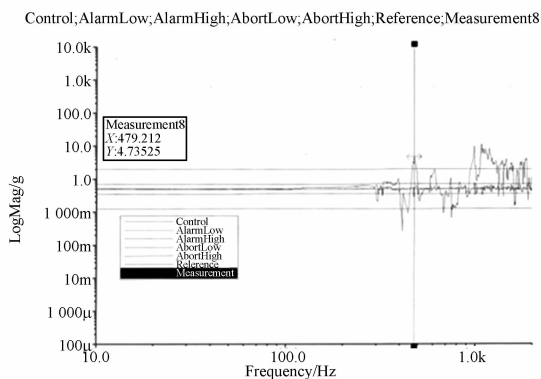


图 14 主承力板扫频振动试验响应曲线

Fig. 14 Response curve of sweep vibration experiment for main backbone

力板的研制,对碳纤维主承力板进行特征频率扫描(如图 13 所示)。试验结果表明碳纤维主承力板一阶频率达到 479.2 Hz(如图 14 所示),具有较高的刚度,满足设计要求。

目前该碳纤维主承力板已成功应用于某型号任务中,并通过了各项试验考核,完全可以满足质量、刚度、精度及稳定性要求。

参考文献:

- [1] 乌崇德,傅丹鹰,益小苏.空间光学遥感器的发展对先进复合材料的需求[J].宇航材料工艺,1999,(4):11-15.
WU CH D, FU D Y, YI X S. Demands of advanced composite materials on developing space optical remote sensors [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1999, (4): 11-15. (in Chinese)
- [2] 张军强,颜昌翔.碳/环氧复合材料在航天有效载荷支撑结构中的应用[J].中国光学与应用光学,2009,2(2):79-84.
ZHANG J Q, YAN CH X. Application of carbon/epoxy composites to support structures of space payloads [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(2): 79-84. (in Chinese)
- [3] 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)

5 结论

根据同轴三反光学系统中光学元件的空间布局,结合碳纤维复合材料 T700 的工艺特点和材料属性,设计了一种碳纤维基体与钛合金预埋件互为镶嵌的相机主承力板,优化设计了碳纤维基体和金属预埋件的结构,完成了以 T700 碳纤维为基体的主承力板的研制。测试数据表明主承力板体密度仅为 0.313 g/cm^3 ,一阶频率达到 479.2 Hz,并应用于某型号任务中,可以满足空间光学精密仪器的高比刚度、高精度要求,为今后空间光学仪器中高精度的碳纤维材料结构件的设计提供了新的思路。

6 致谢

在碳纤维主承力板的设计和研制过程中,得到了哈尔滨玻璃钢研究院的林再文高级工程师、刘永琪高级工程师、陈浩然工程师、邹志伟工程师、刘芳芳工程师等人的帮助,在此表示感谢。

- [4] 陈世平.空间相机设计与试验[M].北京:宇航出版社,2003.
CHEN SH P. *Design and Test of Space Camera* [M]. Beijing: Yu-hang Publishing Company, 2003. (in Chinese)
- [5] STUTE T, WULZ G, SCHEULEN D. Recent developments of advanced structures for space optics at astrum [J]. *SPIE*, 5179: 292-302.
- [6] 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)
- [7] 王伟,杨伟,常楠,等.基于 MSC.PATRAN/NAS-TRAN 的变密度法拓扑优化系统[J].机械设计,2008,25(5):5-8.
WANG W, YANG W, CHANG N, et al.. Topological optimization system of variable density method based on finite element software [J]. *Journal of Machine Design*, 2008, 25(5): 5-8. (in Chinese)
- [8] 袁家军.卫星结构设计与分析[M].北京:宇航出版

社,2004.

YUANG J J. *Design and Analysis of Satellite Structure* [M]. Beijing: Yu-hang Publishing Company,2004. (in Chinese)

- [9] JESSEN N C, HANSULRIK N N, SCHROLL J. Carbon fibre reinforced plastic structures for instruments for very large and extremely large telescopes [J]. *SPIE*,58770:1-12.

- [10] 中国航空研究院. 复合材料结构设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

Chinese Aviation Academe. *Design Handbook of Composites Constructure* [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2001. (in Chinese)

- [11] MARTIN R N, ROMEO R C. Lightweight optical telescope structures fabricated from CFRP composites[J]. *SPIE*, 6665(66650A):1-7.

作者简介:



安 源(1980—),男,黑龙江安达人,博士,副研究员,主要从事空间遥感器的结构及机构设计。E-mail: any@ciomp.ac.cn



张 雷(1982—),男,山东菏泽人,博士,副研究员,研究方向为光学仪器设计与分析。E-mail: zhangleisong@tom.com



贾学志(1980—),男,河北唐山人,博士,助理研究员,主要从事空间相机结构设计。E-mail: xuezhi0817@163.com



金 光(1958—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,新技术室主任,主要从事空间遥感器的总体设计。E-mail: jing@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)