

文章编号 1004-924X(2012)03-0571-08

空间遥感相机碳纤维机身结构设计

郭 疆*, 邵明东, 王国良, 孙继明

(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:针对离轴三反相机光学系统对机身结构的要求,采用碳纤维复合材料制备关键部件,设计了合适的相机机身结构。设计的离轴三反相机采用的复合材料占整机重量的32%。机身结构为非对称形,光学系统中主、次镜间距为850 mm,反射镜接口定位精度要求间隔为0.005 mm、偏心为0.005 mm、倾斜为5"。通过有限元软件对设计结果进行分析、优化和检验,完成了机身结构的优化设计。计算结果表明,该机身结构具有较好的刚度、较轻的重量,能够满足光学设计对间隔、偏心和倾斜的要求。对总装完成的相机进行了力学环境试验和热真空试验,结果证明了该相机机身结构在力、热等环境条件下稳定性良好,其一阶谐振频率在120 Hz以上,相机调制传递函数在0.2以上,满足离轴三反空间相机各反射镜对空间位置精度和稳定性的要求。

关键词:空间遥感相机;碳纤维复合材料;机身结构;有限元分析

中图分类号:V447.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122003.0571

Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera

GUO Jiang*, SHAO Ming-dong, WANG Guo-liang, SUN Ji-ming

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

* Corresponding author, E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn

Abstract: For demands of optical systems in a off-axis three-mirror camera on the optical-mechanical structure, an appropriate optical-mechanical structure was designed by taking Carbon Fiber Composite (CFC) as the key components of the camera. The weight of CFC in designed camera makes up 32% that of the total system. Furthermore, this optical-mechanical structure is asymmetric, the system spacing in the primary, secondary mirror is 850 mm, and the mirror positioning accuracy demands its interval, eccentric and tilt to be 0.005 mm, 0.005 mm, and 5", respectively. The Finite Element method was used to analyze and optimize the design, results show that the optical-mechanical structure has better stiffness, lighter weight, and can meet the requirements of optical system for intervals, eccentrics and tilts. A mechanics environmental test and a thermal vacuum test were performed, and results demonstrate that the optical-mechanical structure in the camera has excellent stability in mechanics, thermal and other environmental conditions, its first order harmonic frequencies are above 120 Hz, and the modulation transfer function is more than 0.2. These results prove that the proposed

收稿日期:2011-02-28;修订日期:2011-03-18.

基金项目:中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

structure can provide reasonable spatial location and stability for the reflective mirrors in off-axis three-mirror cameras.

Key words: space remote sensing camera; Carbon Fiber Composite (CFC); optical-mechanical structure; Finite Element Analysis (FEA)

1 引言

星载高分辨率相机光学系统经历了从折射到反射,从共轴到离轴^[1-4]的发展过程。折射式光学系统需采用特殊材料来消除二级光谱^[5],由于光学材料的限制,难以做到大口径和轻量化设计;反射式光学系统受材料的限制较小,孔径可以做得较大,便于轻量化设计,完全没有色差,且系统光能利用率高。同轴反射系统视场小,中心有遮拦严重影响成像质量;离轴三反射系统不存在中心遮拦,可优化的变量多,可在提高光学系统视场大小的同时,极大地改善系统的成像质量^[6-8]。本文的相机光学系统采用的就是离轴三反光学系统。

在空间遥感成像领域,为了得到目标的高分辨率图像,从而提高空间遥感相机的成像质量,最直接的方法是减小 CCD 器件的像元尺寸,但减小 CCD 器件的像元尺寸将使 CCD 感光度降低、信噪比减小、动态范围变小以及灵敏度损失,而且制作高密度小像元尺寸的 CCD 器件受制作工艺和量子效率等因素的限制,所以采用减小 CCD 器件像元尺寸的方法来提高图像分辨率是较为有限的。增加光学系统的焦距是提高目标图像分辨率的另一方法,但增加焦距会导致空间光学遥感器光学元件和整个遥感器体积、质量的增加,而光学系统对单个光学元件的空间位置精度及其稳定性的要求也更难保证,也就是对用以承载和固定光学元件的相机机身结构提出了更高的要求。同时长焦距大口径相机的机身结构占整个空间光学遥感器质量的 40%~60%,几乎包络了整个空间光学遥感器的体积,所以减少机身结构的质量对空间光学遥感器的轻量化设计有着重要意义。

本文针对离轴三反相机光学系统对机身结构的要求,设计了以碳纤维复合材料制作主要部件的机身结构,并通过有限元软件验证了设计的合理性。最后,对使用该机身结构的相机进行了传递函数测试和力学、热学等环境试验。

2 光学系统对相机结构形式的要求

在本文相机的离轴三反光学系统中,主、次、三镜都使用了二次非球面镜,为了校正球差、彗差、像散和畸变,主镜和次镜采用了双曲面,三镜采用椭球面。系统具有 3 个半径、3 个非球面和 2 个间隔共 8 个变量,可以用来满足光学系统焦距和校正球差、彗差、像散以及其它高级像差的设计要求。

图 1 为离轴三反式航天遥感相机光学系统图。

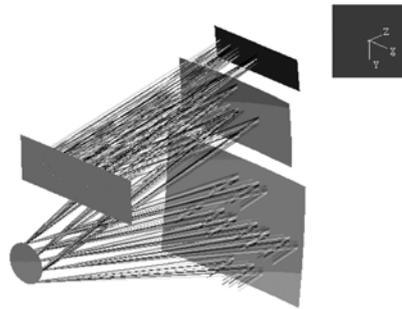


图 1 离轴三反式光学系统

Fig. 1 Off-axis three-mirror reflective optical system

该相机光学系统采用离轴三反、无中心遮拦、无中间像的全反射式光学系统,设计中将次镜确定为光阑位置,主、次镜的间隔与次镜、三镜的间隔相同,可以避免主镜和像面之间直接入射的杂光。该相机光学系统的设计调制传递函数为: $MTF=0.50$ 。

通过光学设计软件的计算,对光学零件的面形公差和各光学零件位置公差提出了具体要求。光学零件的面形公差由反射镜的支撑结构来保证,光学零件位置公差主要由相机机身刚度、机身热稳定性、反射镜装调误差以及反射镜支撑结构刚度几方面共同决定,通过对反射镜位置公差在以上各个影响环节的分配,最终确定反射镜与相机机身接口的位置公差分配如下表:

表1 反射镜与相机机身接口的位置公差分配

Tab.1 Position tolerance distribution of mirror and camera interface

位置误差类型		允差值 (与理论位置的偏差)
主镜轴向位置误差	TTHIZ	±0.005 mm
次镜轴向位置误差	TTHIZ	±0.002 mm
第三镜轴向位置误差	TTHIZ	±0.004 mm
主镜 X 偏心误差	TEDX	±0.005 mm
次镜 X 偏心误差	TEDX	±0.002 mm
第三镜 X 偏心误差	TEDX	±0.004 mm
主镜 Y 偏心误差	TEDY	±0.005 mm
次镜 Y 偏心误差	TEDY	±0.002 mm
第三镜 Y 偏心误差	TEDY	±0.004 mm
主镜绕 X 轴倾角	TETX	2"
主镜绕 Y 轴倾角	TETY	2"
次镜绕 X 轴倾角	TETX	5"
次镜绕 Y 轴倾角	TETY	5"
第三镜绕 X 轴倾角	TETX	4"
第三镜绕 Y 轴倾角	TETY	4"

从表中可以看出,为保证空间遥感相机光学系统成像质量,相机机身材料必须具有高比刚度、低线膨胀系数的特性,机身结构必须具备高稳定性、高刚度,才能保证光学系统反射镜在 850 mm 的间隔下,为相机的各个成像光学元件提供稳定的位置精度。

3 整体碳纤维机身结构

3.1 机身结构的设计原则

机身结构的设计要考虑光学系统中的光路结构,各反射元件位置、通光孔径大小,杂光抑制要求,将光学元件的位置精度分解在机身结构的精度指标作为设计的输入条件,综合考虑各反射镜接

口、焦平面接口、电子学接口、热控接口以及卫星平台接口等接口关系,通过选用材料利用率高的结构材料,设计合适的结构形式,在满足强度、刚度和其他各项技术指标的前提下充分降低质量。归结起来相机机身结构的设计基本要求如下^[12]:

(1) 优良的结构强度和刚度

保证机身结构能适应严酷的运载力学环境,构件不产生微屈服;保证在重力场和微重力场两种不同的力学环境变换下,机身结构的变形不会引起光学元件的面形精度和各光学元件之间相对空间位置变化超出由光学设计规定的允许值。

(2) 良好的尺寸稳定性

良好的尺寸稳定性是在整个遥感相机研制和使用寿命期内保证光学系统成像质量稳定的前提。

(3) 合理的约束

机身结构与反射镜组件接口应避免过约束,6 个自由度的约束要既坚实,又不超定位,防止应力由机身结构向光学元件传递,引起反射镜面形精度的下降;同时机身机构与星平台的连接也要避免过约束,避免星平台的温度应力向相机传递。

(4) 高的动态刚度及合理的模态分布

在卫星平台上,相机是一个质量最大的系统,其自然频率应尽量避开整星的自然频率和星上薄弱设备诸如肼瓶、太阳翼等的谐振频率,否则当卫星和相机在运载过程中发生谐振,极易造成卫星或相机的破坏,而卫星的自然频率较低,而且关键频率点相邻较近,所以要求相机应有高的动态刚度及合理的模态分布。

3.2 机身结构材料选择

理想的空間遥感相机机身结构材料应具有高比刚度,低线膨胀系数,良好的稳定性,较好的工艺性。但在实际工程运用中很难找到非常理想的结构材料。表 2 是常用的空间遥感相机的结构材料^[13-14]:

表2 空间遥感相机常用典型结构材料性能

Tab.2 Material performance of typical structure

材料名称	密度 ρ (g/cm ³)	弹性模量 E (10 ¹⁰ Pa)	热导率 λ W/(m·K)	比热容 C J/(kg·K)	比刚度 E/ ρ (10 ⁷ N·mm/g)	线膨胀系数 d_t (10 ⁻⁶ /K) (213~393 K)
铝合金(LC9)	2.8	7.1	142	904	2.54	23.6
铁镍合金(4J32)	8.1	14.1	13.9	—	1.74	0.3~1.0
钛合金(TC4)	4.44	10.9	7.4	611	2.45	9.1
铸钛合金 ZTC4	4.40	11.4	8.8	577	2.59	8.9
碳纤维复合材料	1.6	纵向 9.5	70	—	5.28	0~3

从表 2 中可以看出 M40J 碳纤维复合材料具有密度小、比刚度高,且热膨胀系数可设计等特点^[15-18],就材料的机械性能来讲是空间遥感相机较为理想的结构材料,但由于该材料为非金属材料,具有各向异性,真空释放可凝挥发物,吸湿后易变形和机械性能下降等一些不利的方面,所以在空间遥感相机实际应用过程中,设计人员很少将其作为相机主结构大量使用,但在一些相机中作为简单杆件或遮光罩应用较为常见^[19-20]。

本文的相机机身结构大量采用了碳纤维复合材料,根据碳纤维材料的特性,采取了一系列的工艺措施和结构形式对其不利方面进行规避,充分发挥有利条件,满足相机机身机构对材料的要求。

3.3 机身结构方案设计

国内外大型空间遥感相机采用了碳纤维复合材料作为主结构最为典型的是桁架结构,之所以采用桁架结构是因为桁架结构的材料利用率最高,能充分发挥碳纤维复合材料的优势,通过对杆件单元合理的铺层设计可以较容易地控制每个杆件的轴向线膨胀系数,而杆件的径向是设计不需要关心的问题,由此解决了碳纤维的各向异性问题。由于杆件属于较规则形状,容易对其进行防潮、防辐照、防可凝挥发物的工艺处理,所以桁架机构基本规避了碳纤维复合材料的缺点。桁架结构通过二力杆作为主要的支撑单元,容易实现大空间结构高轻量化的目的,最大程度地利用了材料,但一般来讲桁架结构一阶谐振频率很低,不适合本相机的要求。

离轴三反光学系统从光学结构形式上看,主、三镜相邻且处在光学系统的一端,次镜到主、三镜的间隔较远,而折叠镜主要是为了缩短机身的长度,把焦平面调整到适合安装的位置,所以折叠镜的空间位置精度要求较低,相对于主次三反射镜较易保证。所以在机身结构设计上如果先将主、三镜通过一个刚性结构固定在一起就容易保证主、三镜除间隔精度外的其他位置精度,接下来就很容易解决主、三镜与次镜的间隔和次镜的位置相对于这个刚性结构的问题了。根据以上分析,可以把主要问题分解逐一解决。首先,设计一个固连主、三镜的刚性(相对)结构—后框架,根据次镜通光口径和整个光学系统结构设计一个固定次镜的刚性(相对)结构—前框架,在前后框架之间只要能够保证间隔和连接刚度足够高,就能满足光学

设计的要求。设计要求在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 的温度变化范围内,前后两个框架的间隔满足 $(850 \pm 0.006) \text{ mm}$ 的要求,从表 2 中可以计算出,除 4J32 和碳纤维外其他均不满足要求,4J32 的比刚度太小,在该间隔下要保证刚度后其质量为 87.75 kg;根据碳纤维复合材料线胀系数可设计的特点,通过对碳纤维铺层的设计使得轴向线胀系数小于 1.2,可以满足 $(850 \pm 0.006) \text{ mm}$ 的间隔要求,而与 4J32 等刚度的碳纤维构件的重量只有 9.8 kg,可见通过使用碳纤维材料,会使相机机身重量大为降低。

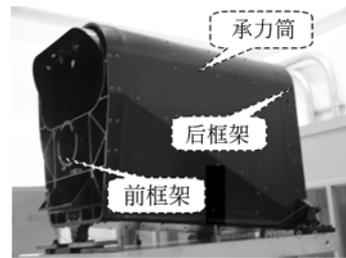


图 2 本文相机结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of proposed camera

通过对相机机身结构设计的结果进行建模,采用有限元分析、对比、迭代和优化设计,最终设计出的该相机机身结构如图 2 所示,该结构主要由前框架,承力筒和后框架 3 个零件构成,前框架主要用于固定连接次镜和折叠镜,该零件为碳纤维复合材料,承力筒呈筒状结构,也为碳纤维复合材料,主要用于连接前后两个框架,保证前后框架的位置关系,后框架的材料为 ZTC4。

采用有限元软件仿真分析相机机身结构的刚度以及在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围内反射镜在不同重力方向下的位置稳定性来验证相机机身结构设计的合理性,相机有限元模型如图 3 所示,框架组件模态计算结果如表 3 所示,相机振型如图 4~6 所示。

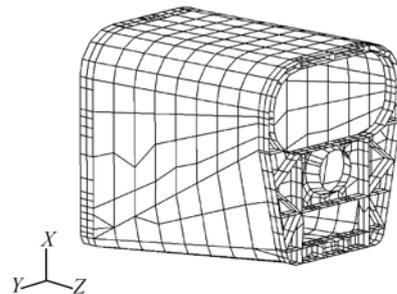


图 3 框架组件有限元模型

Fig. 3 FEM model of framework component

表 3 框架组件模态计算

Tab. 3 Calculation of framework component model

阶数	频率/Hz	振型
1	126	沿 y 向振动(图 4)
2	237	沿 x 向振动(图 5)
3	269	绕 z 向转动(图 6)

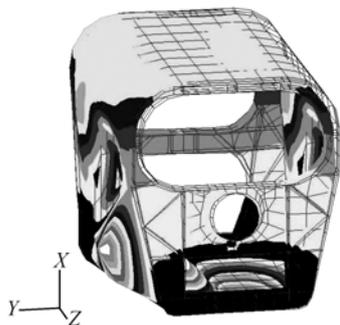


图 4 框架组件一阶振型

Fig. 4 The first order model for framework component

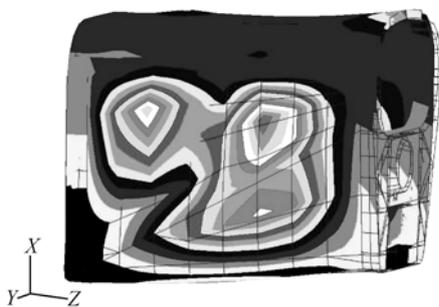


图 5 框架组件二阶振型

Fig. 5 The second order model for framework component

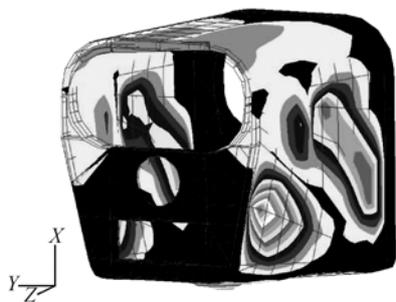


图 6 框架组件三阶振型

Fig. 6 The third order model for framework component

表 4 不同重力方向下,±5℃ 温度变化范围内反射镜位置变化的计算结果

Tab. 4 Computed mirror position changes in difference gravity directions at ±5℃

位置误差类型		允差值 (与理论位置的偏差)
主镜轴向位置误差	TTHIZ	0.004 5 mm
次镜轴向位置误差	TTHIZ	0.001 7 mm
第三镜轴向位置误差	TTHIZ	0.002 7 mm
主镜 X 偏心误差	TEDX	0.003 3 mm
次镜 X 偏心误差	TEDX	0.001 1 mm
第三镜 X 偏心误差	TEDX	0.001 8 mm
主镜 Y 偏心误差	TEDY	0.002 9 mm
次镜 Y 偏心误差	TEDY	0.001 3 mm
第三镜 Y 偏心误差	TEDY	0.002 5 mm
主镜绕 X 轴倾角	TETX	1.08"
主镜绕 Y 轴倾角	TETY	0.6"
次镜绕 X 轴倾角	TETX	1.8"
次镜绕 Y 轴倾角	TETY	1.6"
第三镜绕 X 轴倾角	TETX	1.8"
第三镜绕 Y 轴倾角	TETY	3.3"

相机在不同重力方向下和±5℃ 温度变化范围内反射镜位置变化最大值如表 4 所示。

从以上计算结果可以看出,相机机身结构具有较好的动、静态刚度,各反射镜在不同重力方向下和±5℃ 温度变化范围内其位置精度满足反射镜与相机机身接口的位置公差分配。

3.4 整体碳纤维机身基本结构参数

图 7 是采用 M40J 碳纤维复合材料轻量化的空间遥感相机机身结构。本相机机身结构的 3 部分具体结构尺寸如下:

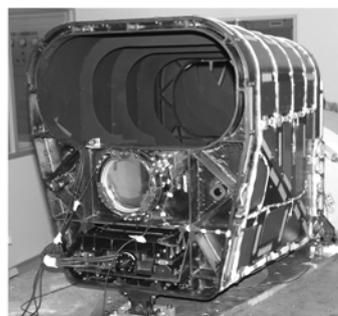


图 7 相机结构

Fig. 7 Camera structure

前框架保留了有效的结构材料,其余的去除,其形状如图 8 所示,前框架尺寸为 $700\text{ mm} \times 610\text{ mm} \times 50\text{ mm}$,轻量化筋厚为 6 mm ,底面厚为 10 mm ,根据光学系统的需要进行充分的轻量化,其重量为 5.35 kg ;

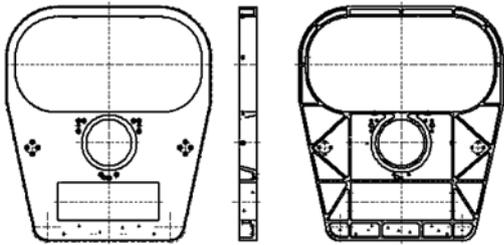


图 8 本文相机前框架

Fig. 8 Front framework for camera

承力筒结构如图 9 所示,承力筒两端根据前后框的形状设计,整体为桶状结构,尺寸为 $891.5\text{ mm} \times 622\text{ mm} \times 750\text{ mm}$,与前后框连接的壁厚为 6 mm ,其余壁厚为 3 mm ,其重量为 13 kg ;后框架结构如图 10 所示,尺寸为 $740\text{ mm} \times 612\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,除接口外,壁厚均为 4 mm 。

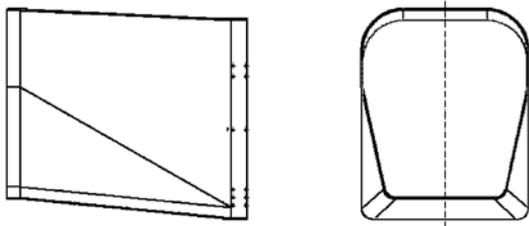


图 9 本文相机承力筒

Fig. 9 Supporting cylinder for camera

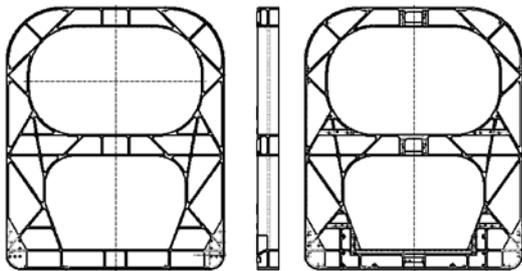


图 10 本文相机后框架

Fig. 10 Back framework for camera

4 试验验证结果

使用该机身结构的相机,在装调完成后进行鉴定级力学试验,主结构测点试验曲线如图 11 所示,从图中可以看出相机的一阶谐振频率为 121 Hz ,相机自身动态刚度较好,与之前的计算结果也较为吻合。

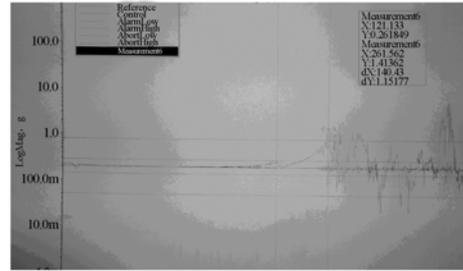


图 11 相机主结构测点试验曲线

Fig. 11 Measure point test curve of main structure

对装调好的相机系统进行调制传递函数测试,在奈奎斯特频率处的全视场平均调制传递函数为 0.227 ,且经过各项环境试验后,调制传递函数稳定,以上结果说明该结构具有很好的刚度和稳定性,能够很好地保证光学系统的要求。

5 结论

通过分析空间遥感相机光学系统的要求和光学零件的位置公差,得出了相机机身的公差要求,通过对材料的选取、结构形式的设计和优化,设计出了符合技术要求、工艺相对简单的碳纤维复合材料机身结构,并通过有限元软件进行了分析验证,表明所设计的机身结构满足空间遥感相机的使用要求。对相机力学、热学等环境试验后进行成像质量的检测,进一步验证了设计的合理性和正确性。

本文介绍的机身结构形式,解决了空间遥感相机机身质量与刚度之间的矛盾,提高了整个相机机身的整体动态特性,减轻了整个机身的重量,减少了发射成本,提高了有效载荷的功效,同时本结构的制造难度小,加工工艺性能好,便于遥感相机的工程化。

致谢:本研究得到哈尔滨玻璃钢研究院的林再文、董鹏、王维的支持,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 颜昌翔,许杰,彭岩. 离轴三反空间光学望远系统的杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(2): 289-293.
YAN CH X, XU J, PENG Y. Stray light suppression of three-mirror off-axis space optical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 289-293. (in Chinese)
- [2] 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.
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]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2633-2641. (in Chinese)
- [3] 常军,姜会林,翁志成,等. 大视场、长焦距空间光学系统的设计[J]. 兵工学报, 2003, 24(1): 42-44.
CHANG J, JIANG H L WENG ZH CH, *et al.*. Design of wide angle space optical systems of long focal length [J]. *Acta Armamentarii*, 2003, 24(1): 42-44. (in Chinese)
- [4] 伍和云,王培纲. 离轴反射式光学系统设计[J]. 光电工程, 2006, 33(1): 34-37.
WU H Y, WANG P G. Designs of reflective off-axis system [J]. *Opto Electronic Engineering*, 2006, 33(1): 34-37. (in Chinese)
- [5] 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨[J]. 光学学报, 1982(3): 225-232.
JIANG H L. On the secondary spectrum [J]. *Acta Optica Sinica*, 1982(3): 225-232. (in Chinese)
- [6] JURANEK H J, SAND R, SCHWEIZER J, *et al.*. Off axis telescope the future generation of earth observation telescopes [J]. SPIE, 1998, 3439:104-115.
- [7] KORSCH D C. Reflective optics[J]. SPIE, 1987, 751:230-235.
- [8] 潘君骅. 具有三个二次曲面反射镜的光学系统研究[J]. 光学学报, 1988(8):717-721.
PAN J Y. A study of the optical system with three mirrors of second order surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 1988(8):717-721. (in Chinese)
- [9] 薛旭成,石俊霞,吕恒毅,等. 空间遥感相机 TDICCD 积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 857-863.
XUE X CH, SHI J X, LV H Y, *et al.*. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 857-863. (in Chinese)
- [10] 郑耿峰,张柯,韩双丽,等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 623-629.
ZHENG G F, ZHANG K, HAN SH L, *et al.*. Design of test system for motion images of space TDICCD cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 623-629. (in Chinese)
- [11] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [12] 刘磊,高明辉,李丽富,等. 大视场空间相机轻型遮光罩的研制[J]. 光学技术, 2009, 35(6): 822-824.
LIU L, GAO M H, LI L F, *et al.*. Development of light baffle of space camera with large field of view [J]. *Optical Technique*, 2009, 35(6): 822-824. (in Chinese)
- [13] 丁亚林,田海英,刘立国,等. 一种提高碳纤维复合材料框架结构应用性能的结构技术[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 287-290.
DING Y L, TIAN H Y, LIU L G, *et al.*. Use of pre-embedded parts to improve the performance of carbon fibre framework [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(3): 287-290. (in Chinese)
- [14] 田海英. 碳纤维复合材料应用于航天光学遥感器遮光镜筒[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 704-706.
TIAN H Y. Carbon fibre composite material used in space optical instrument [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(6): 704-706. (in Chinese)
- [15] 解永杰,张禹康,陈荣利,等. 小挠度碳纤维复合材料镜筒设计[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 728-731.
XIE Y J, ZHANG Y K, CHEN R L, *et al.*. Structure design of little distortion CFC lens barrel in space telescope [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(6): 728-731. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 王晓洁, 惠雪梅, 尤丽虹, 等. M40J/改性氰酸酯复合材料耐水性能研究[J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 244-248.
WANG X J, HUI X M, YOU L H, *et al.*. Studying water uptake effects on M40J carbon fiber/modified cyanate ester composite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 31(1): 244-248. (in Chinese)
- [18] 王永宪, 王兵, 任建岳. 空间相机碳纤维支撑结构改进及拓扑优化设计[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(4): 702-704.
WANG Y X, WANG B, REN J Y. Improvement of carbon fibre support structure and topology optimization design for space camera [J]. *Infrared and Laser Eng.*, 2009, 38(4): 702-704. (in Chinese)
- [19] 林再文. 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. Application of carbon fibre reinforced composite to space optical structure wide coverage and high resolution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1181-1185. (in Chinese)
- [20] 盛磊. 轻型空间相机遮光罩组件的研制[J]. *航天返回与遥感*, 2006, 2: 41-45.
SHENG L. Development of light baffle of space camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 2: 41-45. (in Chinese)

作者简介:



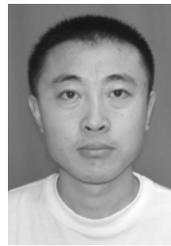
郭疆(1976—),男,新疆石河子人,副研究员,2000年于吉林大学(原吉林工业大学)机械制造及其自动化专业获得学士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: guojiang001@yahoo.com.cn



王国良(1972—),男,辽宁瓦房店人,副研究员,2004年于南京理工大学获得硕士学位,2008年于大连海事大学获得博士学位,主要从事图像处理与空间遥感成像技术的研究。E-mail: wglnj@yahoo.com.cn



邵明东(1983—),男,山东曹县人,助理研究员,2004年、2007年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感成像技术的研究。E-mail: shaomingd@tom.com



孙继明(1982—),男,吉林省吉林市人,助理研究员,2005年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光机结构设计。E-mail: mingjisun@163.com