

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2513997

“高分五号”卫星高光谱相机结构与验证*

刘书锋^{1,2}, 刘银年^{1,2}, 曹开钦^{1,2}, 柯有龙^{1,2}, 贾晓伟^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083; 2. 红外科学与技术全国重点实验室 上海 200083)

摘要:“高分五号”卫星搭载的可见短波红外高光谱相机 AHSI 是我国高分专项的核心载荷之一。现有离轴三反相机结构设计多应用于可见光相机及多光谱相机,而高光谱相机则由望远镜、光谱仪及探测器组成特殊架构,AHSI 光路长达 3 m,包含 3 套离轴系统及 22 个离轴光学元件,导致系统在有限空间内复杂度及敏感性高,结构设计需解决复杂光路布局与空间环境稳定性挑战。研究基于新材料的相机一体化结构构型,是 AHSI 结构设计亟待解决的主要问题。首次系统性揭示了 AHSI 材料选型、结构设计、仿真分析与试验验证全流程。高光谱相机采用 55% 高体分 SiCp/Al 复合材料作为光机系统主支撑结构材料,结构设计采用将离轴三反望远镜、奥夫纳光谱仪及探测器等一体集成于复合材料光机框架上,实现了复杂紧凑系统布局、高刚性、高稳定性与轻量化的协同优化,采用超声波辅助梯度钎焊工艺完成光机框架组合焊接,通过有限元分析和力学试验验证了相机结构设计强度和刚度特性。高光谱相机在轨成像质量及辐射特性测试结果与地面保持一致,充分证明了高光谱相机结构设计有效性和稳定性。AHSI 是国际上首台同时兼顾宽覆盖和宽谱段的高光谱相机,为我国国土资源调查等国家重大战略需求提供了有力支撑。

关键词:“高分五号”卫星;高光谱相机;结构设计;高体分 SiCp/Al 复合材料;模态分析;力学试验

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590·20

Structural design and verification of the hyperspectral imager for the Gaofen-5 Satellite

Liu Shufeng^{1,2}, Liu Yinnian^{1,2}, Cao Kaiqin^{1,2}, Ke Youlong^{1,2}, Jia Xiaowei^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai 200083, China)

Abstract: The visible and shortwave infrared hyperspectral imager (AHSI) onboard the Gaofen-5 satellite represents a core payload within China's high-resolution Earth observation program. Unlike conventional off-axis three-mirror cameras primarily used for visible or multispectral imaging, hyperspectral imagers require a specialized architecture comprising a telescope, spectrometer, and detector array. The AHSI features an extended 3-meter optical path integrating three off-axis systems and 22 off-axis optical components, presenting significant challenges in terms of structural complexity, alignment precision, and environmental robustness within constrained space. To address these challenges, this study presents the design and implementation of a novel integrated structural configuration using advanced composite materials. A systematic methodology encompassing material selection, structural design, simulation analysis, and experimental validation is established. The opto-mechanical framework utilizes a high-volume fraction (55%) SiCp/Al composite as the primary structural material, offering superior stiffness-to-weight performance. The design unifies the off-axis three-mirror telescope, Offner spectrometer, and detector assemblies into a compact and rigid composite structure, optimizing mechanical stability and mass efficiency. The framework is fabricated using an ultrasonic-assisted gradient brazing process to ensure precise bonding and structural integrity. Structural strength and stiffness are confirmed through finite element modeling and mechanical testing. On-orbit imaging results show strong agreement with ground-based calibration data, verifying the design's environmental adaptability and long-term stability. As the first hyperspectral imaging instrument worldwide to achieve simultaneous wide swath coverage and broad spectral range, AHSI demonstrates the viability of advanced composite-based structural solutions for complex spaceborne optical systems. It delivers critical

收稿日期: 2025-04-30 Received Date: 2025-04-30

* 基金项目: 国家高分辨率对地观测系统重大专项 (A0106/1112) 项目资助

technical support for strategic national applications, including land resource management and environmental monitoring.

Keywords: Gaofen-5 satellite; hyperspectral imager; structural design; high-volume fraction SiCp/Al composite; modal analysis; mechanical testing

0 引 言

1983 年,美国国家航天局成功研制出了第 1 台机载光谱成像仪,标志着高光谱成像技术的开创^[1]。高光谱成像技术是光学遥感的重要分支,可以同时获取观测目标的图像和连续光谱,也可实现目标空间特征与光谱特征的同步探测,即通常所说的图谱合一^[2-3]。2000 年以来,美国、中国、意大利、德国、日本、印度、俄罗斯等国纷纷开展星载高光谱成像技术的开发与应用研究。宽谱宽幅是高光谱业务化运行的关键,也是国际上高光谱技术发展的难点和制高点^[4]。

可见短波红外高光谱相机 (advanced hyperspectral imager, AHSI) 是我国高分辨率对地观测系统“高分五号”卫星上的主载荷之一,由中国科学院上海技物所研制,以 60 km 幅宽、30 m 的地面分辨率和 5~10 nm 的光谱分辨率,同时获取地物在 0.4~2.5 μm 范围内连续谱段的空间信息和光谱信息。相机在可见近红外谱段 (0.4~1.0 μm) 的光谱分辨率为 5 nm,短波红外谱段 (1.0~2.5 μm) 的光谱分辨率为 10 nm^[5]。AHSI 的幅宽、光谱通道数及信噪比等性能指标处于国际领先水平,是国际上首台同时兼顾宽覆盖 (60 km) 和宽谱段 (0.4~2.5 μm) 的高光谱相机,支撑了首次突破全国陆域矿物填图,以及首次突破星载点源甲烷排放探测,为我国生态环境监测、国土资源调查及气候变化研究等国家重大战略需求提供了有力支撑。

高光谱相机与传统相机在结构设计上的区别主要体现在:

- 1) 高光谱相机需要更高精度的光学元件和复杂的光路设计,以保持光谱和空间分辨率,确保各波段的光谱信息能够准确成像。
 - 2) 高光谱相机由主光学望远镜、光谱仪分光系统及探测器组件组成,光谱仪分光系统需要具备高精度和高稳定性,而传统相机仅由主光学望远镜及探测器组件组成。
 - 3) 高光谱相机系统组成复杂,需确保主光学望远镜、光谱仪分光系统及探测器的协同工作,对温度及振动等环境因素敏感,需要具备高稳定性措施。
- 高光谱相机结构系统对于实现高光谱相机布局至关重要。AHSI 光路长达 3 m,包含 3 套离轴系统及 22 个离轴光学元件,布局紧凑且复杂度高,采用 2.83 小 F 数 (F number) 光学系统,焦深小,成像敏感性高;AHSI 需要实现像面与光谱的双重匹配,调制传递函数 (modulation

transfer function, MTF) 优于 0.2,横向光谱偏差优于 1 nm,光谱畸变优于 0.2 pixels,波像差变化量优于 10%,成像及光谱精度高;需要实现 2 000×256 大规模面阵探测器与相机光路对接集成及耦合,实现相机光学、电子学、热控、星上定标等多个系统完美统一集合。

高光谱相机结构系统对确保高光谱相机稳定性具有重要意义,相机的光学性能在很大程度上取决于相机结构在外界环境影响下的稳定性。相机从研制、发射到在轨运行的全过程,会遭受到振动、冲击、噪声及空间真空热环境、微重力等外界载荷和环境因素的考验,这都对结构系统提出很高的要求。

1 高光谱相机主支撑结构选型分析

AHSI 光路图及技术参数如图 1 及表 1 所示。

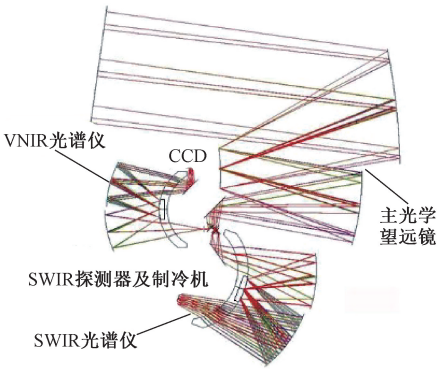


图 1 高分五号高光谱相机 (AHSI) 光路图
Fig. 1 Optical path diagram of the Gaofen-5 hyperspectral imager (AHSI)

表 1 高分五号高光谱相机 (AHSI) 技术参数
Table 1 Technical specifications of Gaofen-5 hyperspectral imager (AHSI)

序号	名称	技术指标
1	轨道高度	705 km
2	幅宽	60 km
3	空间分辨率	30 m
4	光谱分辨率	VNIR; 5 nm@ 0.40~1.0 μm SWIR; 10 nm@ 1.0~2.5 μm
5	光谱范围	0.4~2.5 μm
6	光学口径	250 mm
7	F 数	2.83

离轴三反无中心遮拦,环境适应性好,具有较大的光能利用率,像方远心度好,可以实现大视场或面视场设计,同时后方可以对接多个模块,易于实现高集成度系统设计。AHSI 主光学望远镜采用离轴三反结构形式,为提高系统信噪比,设计为 2.83 小 F 数光学系统。

AHSI 小 F 数光学系统对结构稳定性要求的显著提升和离轴三反光学系统非对称性的加剧,是影响成像质量的主要因素,主支撑结构在光机结构中具有材料选择广泛和形式多样的优点^[6]。因此合理的设计高光谱相机主支撑结构是相机研制的关键,目前应用于离轴三反相机的主支撑结构构型主要有:薄壁筒式、框架式、桁架式等形式^[7]。

薄壁筒式主支撑结构刚度高、结构稳定性好、方便检测和装调且利于温度控制和杂散光的抑制,一般用于对结构稳定性要求很高,而对重量控制较为宽松的支撑结构中。如美国 Digital Globe 公司的 Quickbird-2 商用卫星搭载的空间遥感器就是采用薄壁筒式主支撑结构^[8],如图 2 所示。

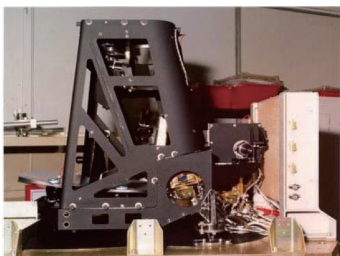


图 2 美国 Quickbird-2 卫星
Fig.2 Quickbird-2 satellite (USA)

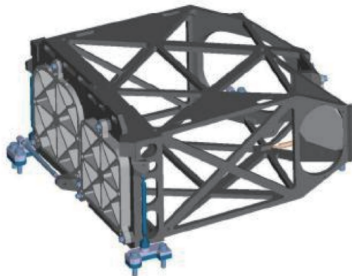
框架式主支撑结构的刚度十分优异,空间稳定性好,轻量化程度一般,适用于中小型离轴系统的主支撑结构。如美国的 EO-1,如图 3(a)所示,德国的 MTG-IRS^[9],如图 3(b)所示。国内对于框架式遥感相机主承力结构有许多研究,长春光机所宋伟阳等研制的某型号大型空间离轴三反相机主支撑结构即为框架式^[10],如图 3(c)所示。

桁架式支撑结构的特点是比刚度、装配灵活、形式简单及轻量化程度高,具有很强的可设计性,普遍适用于大中型离轴空间相机中。如日本研制的 2023 年发射的光学 ALOS-3 卫星^[11],如图 4 所示。

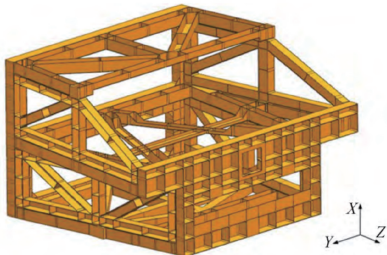
薄壁筒式结构是传统结构形式,存在热稳定性差以及对振动敏感等问题。桁架式结构轻量化程度高,但在整体性及稳定性方面存在劣势。框架式支撑结构整体性好,稳定性高,装调工艺简单,易于实现中小型离轴三反相机的高刚度、高稳定支撑,但框架式结构存在轻量化不足的缺点,随着新型材料的出现,研究基于新型材料的新



(a) EO-1



(b) MTG-IRS



(c) 长光所某型号离轴三反相机主支撑结构
(c) Main support structure of a certain model of off-axis three-mirror camera

图 3 国内外框架式主支撑结构

Fig.3 Domestic and international frame-type main support structures

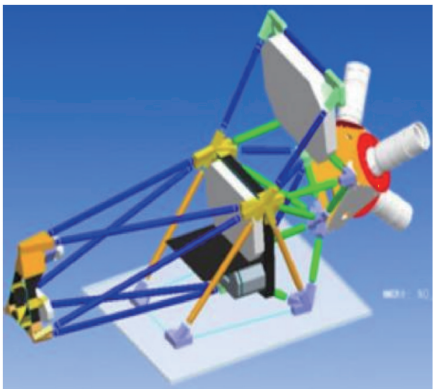


图 4 日本 ALOS-3 卫星桁架式主支撑结构
Fig.4 Truss-type primary support structure of japanese ALOS-3 satellite

型结构形式,既保持稳定性,同时实现轻量化,是离轴三反相机结构系统亟待解决的主要问题。

2 主支撑结构材料选择分析

高光谱相机主支撑结构的材料选择影响系统的光学性能、轻量化、结构和热稳定性^[12],即需要材料具有低密度、高弹性模量、低热胀系数及高热导率,比刚度定义为弹性模量与密度的比值(E/ρ),值越大材料的刚性越好,可以提高结构系统的频率特性,热稳定性系数定义为热导率与热胀系数的比值(λ/α),值越高表明结构的温度

梯度及热变形小。
综合品质因数为比刚度(E/ρ)与热稳定性系数(λ/α)的乘积(E/ρ) $\times$ (λ/α)^[13],用于评价材料力热综合性能,值越高表明材料在轻量化、刚度和热稳定性上的协同性能越优。表 2 给出了铝合金(Al)、钛合金(TC4)、15% 低体积分数碳化硅颗粒增强铝基(SiCp/Al)、55% 高体积分数碳化硅颗粒增强铝基(SiCp/Al)和殷钢(4J32) 5 种常用于空间相机结构材料的相关参数,基于此通过比较分析确定高光谱相机主支撑结构材料。

表 2 相机常用材料属性
Table 2 Material properties of typical camera components

材料名称	密度 ρ / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	模量 E/GPa	比刚度 (E/ρ)	热导率 λ / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$)	热胀系数 α / (10^{-6} K)	热稳定性 (λ/α)
Al	2.78	70	25.2	120.0	22.70	5.3
TC4	4.44	114	25.7	6.8	9.20	0.7
15% 低体分 SiCp/Al	2.84	97	34.2	140.0	17.00	8.2
55% 高体分 SiCp/Al	2.94	213	72.4	235.0	8.00	29.4
4J32	8.10	141	17.4	13.9	0.65	21.4

碳化硅(SiC)弹性模量、比刚度极高,有利于抑制面形变化,也可高度轻强量化,同时具有导热率高、热畸变低等特性^[14]。高体分 SiCp/Al 复合材料 SiC 颗粒体份 55%;组织均匀(大坯料密度差异在 4‰以内)、致密(基本达到理论密度);界面干净,材料的微观结构特征如图 5 所示。55% 高体分 SiCp/Al 复合材料具有优良的比刚度,源于其组分材料通过微观力学耦合实现的协同效应;导热性能良好,源于 Al 合金基体电子导热与 SiC 声子导热双通道导热协同作用;材料的综合品质因数高出其余材料 1 个量级,综合分析最终确定采用 55% 高体分 SiCp/Al 复合材料为高光谱相机光机系统主支撑结构材料。

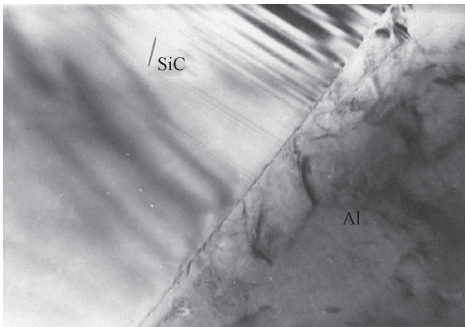


图 5 高体分 SiCp/Al 复合材料的微观结构特征
Fig. 5 Microstructural characteristics of high-volume fraction SiCp/Al composite

3 高光谱相机结构设计

AHSI 主光学望远镜为离轴三反,分光组件为奥夫纳光谱仪。自主提出采用高体分 SiCp/Al 复合材料光机框架结构集成 AHSI 光机系统,主光学望远镜、视场分离器、光谱仪组件及探测器均在光机框架上进行集成,形成光机组件,设计模型图如图 6 所示。

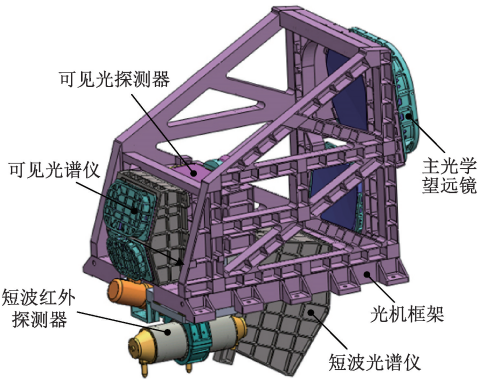
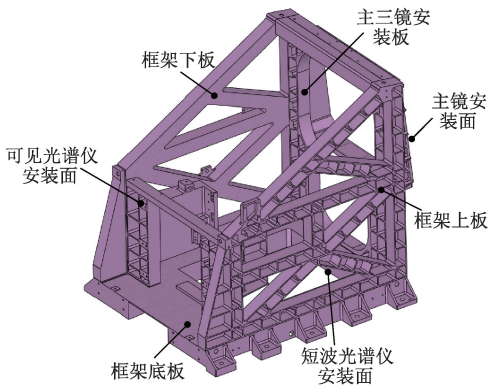
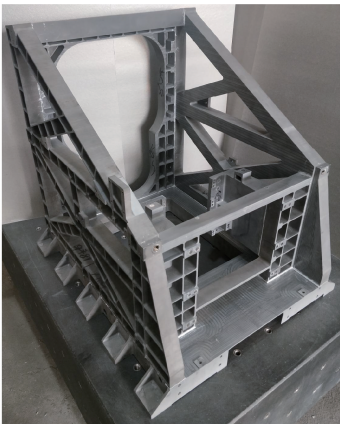


图 6 AHSI 光机组件结构设计模型
Fig. 6 Structural design model of AHSI opto-mechanical assembly

光机框架的包络尺寸为 800 mm 见方,设计模型图如图 7(a)所示,采用单件无法成型,需采用多件拼接而成,机械连接方法包括螺钉连接、胶接和焊接等。与螺钉连



(a) 光机框架结构设计模型示意图
(a) Schematic diagram of the opto-mechanical frame structure design model



(b) 焊接后实物
(b) Physical drawing after welding

图 7 光机框架结构设计模型示意图及焊接后实物
Fig. 7 Design model schematic diagram and post-welding physical diagram of opto-mechanical frame structure

接和胶接相比,焊接具有刚度大、整体性好等优点。将传统的焊接方法直接应用在高体分铝基复合材料上的效果较差。超声波辅助钎焊工艺既可以在大气条件下不使用钎剂去除铝合金表面的氧化膜,又可以促进锌铝合金对陶瓷的湿润作用,其焊接性能良好。光机框架共由 8 件单板焊接组成,共有 11 条焊缝,通过超声波钎焊 6 次拼接完成。框架焊接使用 3 种温度的钎料,分别是 380℃ 低温锌铝钎料、420℃ 中温锌铝钎料和 460℃ 高温锌铝钎料,形成了梯度焊接模式,焊接温度由高到低,避免后一道焊缝的加热导致前一道焊缝发生熔化。为了保证焊接装配精度,每一次装配焊接前都先模拟焊接过程,测试升温及降温时零件与卡具的位置变化,微调卡具,补偿实际热变形尺寸与理论热变形尺寸的误差。光机框架焊后实物如图 7(b) 所示,焊后最大平面度误差 $<0.2\text{ mm}$,最大外形尺寸误差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 范围内,对光机框架拼接焊缝进行了 X 射线无损检测,均满足研制要求。光机框架组

焊后进行高温去应力处理,精加工前进行多道高低尺寸稳定性处理。采用高精密三坐标检测尺寸,进行光机框架尺寸稳定验证试验,光学尺寸变化量优于 0.02 mm ,满足光学容差要求。精加工后进行残余应力检测 $<50\text{ MPa}$ 。

AHSI 机构组件用于引入对地辐射光线,实现在轨高精度光谱定标和辐射定标,实现像移补偿功能提高信噪比,机构组件设计模型图如图 8 所示。

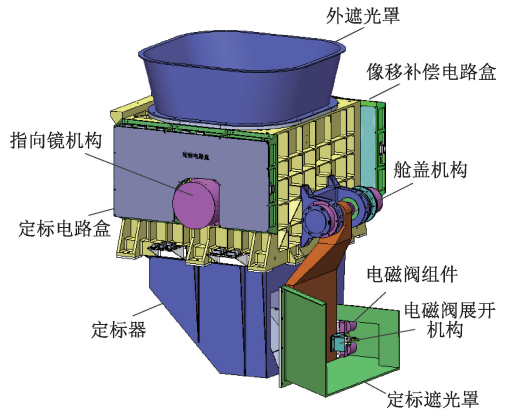


图 8 AHSI 机构组件设计模型
Fig. 8 Design model of AHSI mechanism assembly

AHSI 采用铝合金相机支架集成光机组件及机构组件形成高光谱相机整机结构,并提供与整星的机械安装接口,确保力、热变化的均匀性。整机结构模型图如图 9 所示。

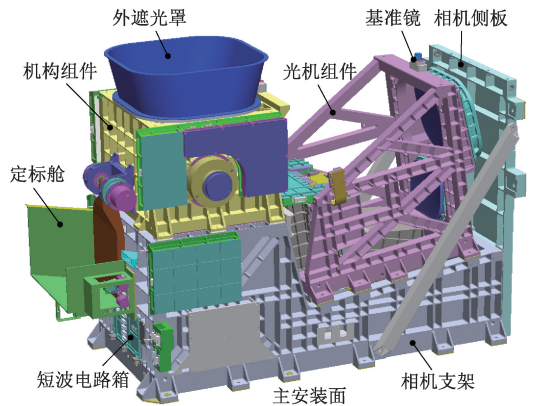


图 9 AHSI 相机主体整机结构模型
Fig. 9 Structural model of AHSI main assembly

AHSI 相机主体与卫星双面安装,相机主体安装于卫星+Z 面载荷舱中部靠近太阳帆板一侧,副安装面为卫星+X 面载荷舱顶板,副安装面通过火工品在轨释放。相机主体星上安装图如图 10^[15] 所示。



图 10 高光谱相机相机主体星上安装图

Fig. 10 On-orbit installation diagram of hyperspectral imager main assembly

4 高光谱相机结构仿真分析

对 AHSI 相机主体进行了有限元分析。在建模时,对相机主体结构模型进行了合理的简化,边界条件取为相机主体与星体固定连接处固支条件。

4.1 相机主体模态分析

通过对 AHSI 相机主体有限元模型进行约束模态分析,获得的前 4 阶模态频率振型结果及一阶模态振型图分别如表 3 所示及图 11 所示。

表 3 AHSI 相机主体的前 4 阶模态

Table 3 First four modal orders of AHSI main assembly

模态阶数	模态频率/Hz	振型描述
1	87.67	相机整体 Y 向摆动
2	108.10	焦平板电路盒振动
3	124.60	相机整体扭转
4	133.30	Sw 光谱仪结构摆动

分析结果表明:AHSI 相机主体的一阶模态频率为 87.67 Hz,满足卫星总体对相机主体模态频率>80 Hz 的要求,避免了 AHSI 与卫星发生共振造成破坏。

4.2 相机主体加速度分析

在 X、Y、Z 这 3 个方向分别施加 16.875 G 的加速度。3 个方向加速度分析最大等效应力结果如表 4 所示,Y 方向的应力分布图如图 12 所示。

AHSI 相机主体 3 个方向加速度分析中 Y 向加速度分析相机主体应力较大,最大应力为 89.2 MPa,产生部位位于光机框架安装脚附近,材料为高体分 SiCp/Al 复合材

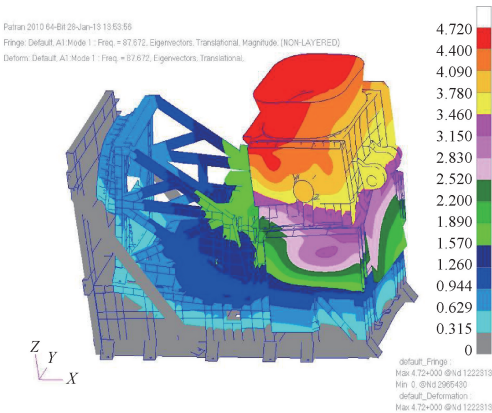


图 11 AHSI 相机主体一阶模态振型图

Fig. 11 Mode shapes of the first four modal orders for AHSI main assembly

表 4 加速度分析最大等效应力

Table 4 Maximum equivalent stress in acceleration

	analysis (MPa)					
方向	相机主体	相机支架	光机框架	扫描框架	光谱仪	短波制冷机杜瓦
X 向	52.8	51.4	45.9	35.1	30.3	52.8
Y 向	89.2	81.6	89.2	48.2	19.6	19.4
Z 向	42.1	32.8	42.1	31.0	24.7	21.4

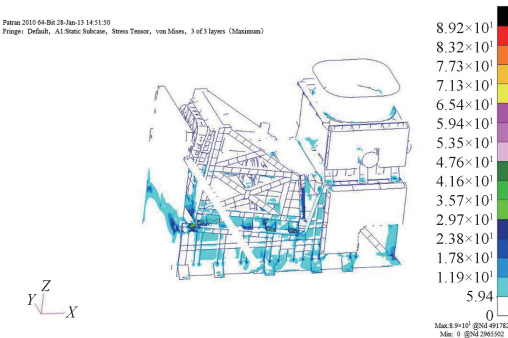


图 12 相机主体 Y 向加速度分析应力分布

Fig. 12 Y-axis acceleration-induced stress distribution on main assembly

料,屈服极限为 300 MPa,其次为相机支架 81.6 MPa,材料为 LD10 铝合金,屈服极限为 270 MPa,加速度分析应力均远小于对应材料的屈服强度;其余组部位应力均处于较低水平,相机结构设计具有足够的强度裕度。

5 高光谱相机试验验证

以 AHSI 光机框架为装调基准,集成主光学望远

镜、可见光谱仪、短波光谱仪、可见光探测器及短波红外探测器形成光机组件。AHSI 相机主体实物图如图 13 所示。

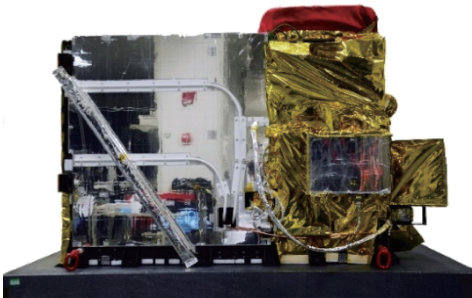


图 13 AHSI 相机主体实物

Fig. 13 Physical prototype of AHSI main assembly

AHSI 相机主体按卫星规定的试验条件进行了验证级正弦振动试验,相机主体验证级正弦振动试验的现场照片如图 14 所示。

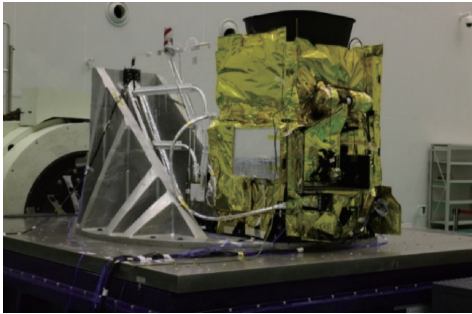


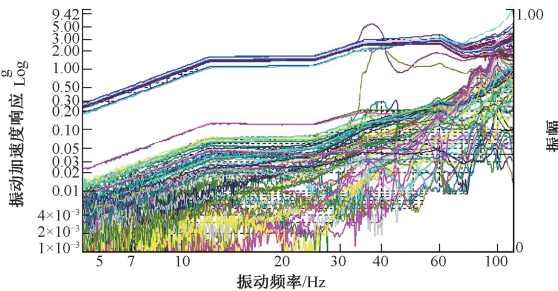
图 14 AHSI 相机主体力学试验现场照片

Fig. 14 Mechanical testing setup for AHSI main assembly

相机主体验收级正弦振动试验共布三向加速度测点 33 个,图 15(a)~(c)中给出了正弦振动试验 3 个方向的测点响应汇总图,曲线的横坐标为振动频率,模拟火箭发射过程振动频率,纵坐标为相机不同部位振动测点的振动加速度响应,曲线可反映相机主体结构不同部位在不同频率下的动态特性,获取相机主体正弦放大倍数及一阶频率特性,验证相机主体能否承受发射阶段的振动环境。

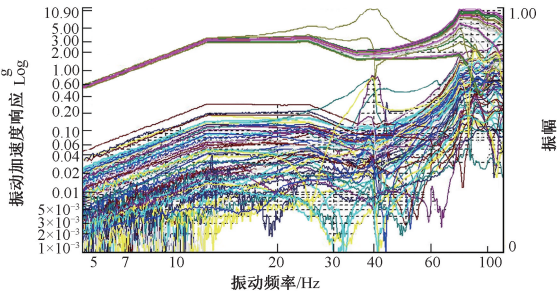
每个方向振动试验结束后,对相机主体进行了检查,结构完好,无损伤,所有紧固件均无松动,试验前预振及试验后复振获取了相机特征级振动曲线,特征峰值频率均无漂移,如表 5 所示,试验获取相机的一阶频率为 85.51 Hz,与相机主体有限元分析的结果 87.67 Hz 高度一致,并满足卫星总体对相机主体一阶频率的要求。

试验前及每个方向试验后,对相机进行通电检测,



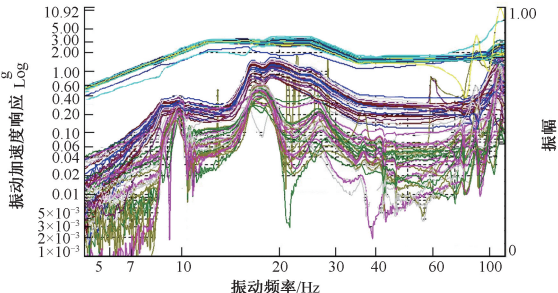
(a) 测点X向验收级响应叠加图

(a) Overlay graph of X-direction acceptance-level response at measurement points



(b) 测点Y向验收级响应叠加图

(b) Overlay graph of Y-direction acceptance-level response at measurement points



(c) 测点Z向验收级响应叠加图

(c) Overlay graph of Z-direction acceptance-level response at measurement points

图 15 振动试验测点验收级响应叠加图

Fig. 15 Superimposed diagram of acceptance-level response at vibration test measurement points

表 5 相机主体预振及复振一阶频率结果

Table 5 Main assembly pre-vibration and post-vibration first- order frequency results (Hz)

振动方向	试验前预振一阶频率	试验后复振一阶频率	变化量
X 向	106.66	105.20	1.46
Y 向	85.51	86.10	0.59
Z 向	120.78	121.62	0.84

观察相机图像及指令执行情况,相机遥测数据正常,图像无异常情况;力学试验前后进行相机的性能测试,测试结果如表 6 所示,相机静态 MTF 测试结果稳定一致,满足要求。

表 6 高光谱相机力学试验前后静态 MTF 测试结果表

Table 6 Static MTF test results before/after mechanical testing

波长/视场 /nm	-1		0		+1	
	力学前	力学后	力学前	力学后	力学前	力学后
450	0.51	0.52	0.49	0.52	0.49	0.52
650	0.55	0.57	0.54	0.59	0.54	0.55
850	0.54	0.57	0.54	0.53	0.53	0.55
950	0.52	0.56	0.50	0.54	0.50	0.52
1 150	0.49	0.53	0.53	0.57	0.52	0.51
1 550	0.49	0.51	0.56	0.58	0.50	0.53
1 950	0.54	0.58	0.53	0.57	0.50	0.51
2 350	0.50	0.54	0.53	0.55	0.53	0.54

6 高光谱相机在轨成像与应用

6.1 在轨成像

AHSI 于 2018 年 5 月 9 日搭载于“高分五号”卫星发射入轨,经在轨测试,在空间及卫星环境、推扫像移、大气扰动等因素综合影响下,AHSI 在轨动态 MTF 测试结果 0.26~0.37,MTF 刃边测试场景如图 16 所示,达到了较高的水平,可以说明 AHSI 的像质在卫星入轨后与地面相比几乎没有变化。



图 16 高光谱相机在轨动态 MTF 刃边测试场景

Fig. 16 On-orbit dynamic MTF knife-edge test scenario

将 AHSI 在轨信噪比测试结果与实验室测试结果进行了对比,结果如图 17 所示。相机峰值在信噪比可见近红外(visible and near infrared, VNIR) 达到近 700,在短波

红外(short wave infrared, SWIR) 达到近 500^[16],显著优于 EO-1/Hyperion 信噪比(VNIR:200,SWIR:100)。

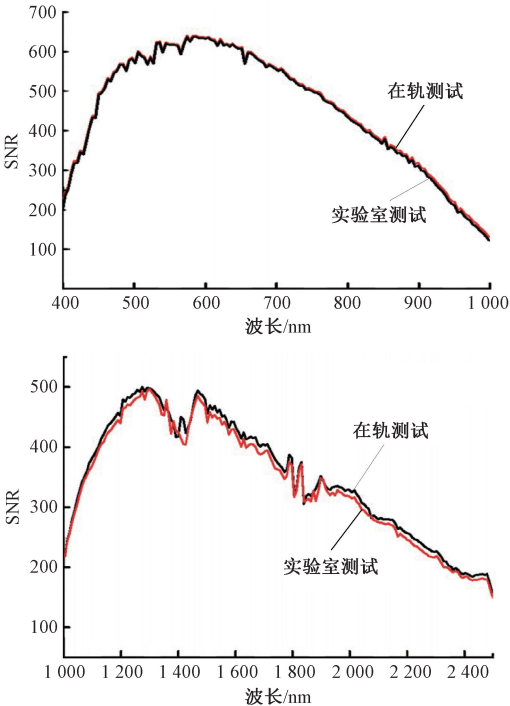


图 17 高光谱相机在轨与地面信噪比测试对比结果

Fig. 17 Comparison results of on-orbit and ground SNR tests for hyperspectral imager

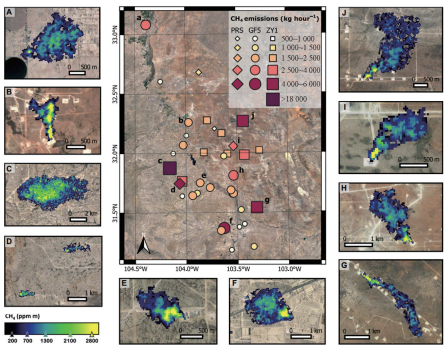
AHSI 在轨成像质量及辐射特性与地面保持一致,充分证明了高光谱相机结构系统的稳定性。国内外高光谱相机的性能指标表如表 7^[17-21]所示,AHSI 的幅宽、光谱通道数及信噪比等性能指标处于国际领先水平。

6.2 在轨应用

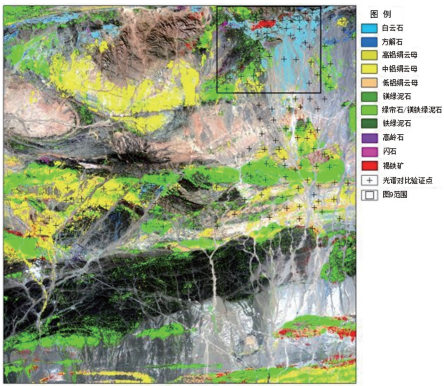
“高分五号”卫星高光谱相机为生态环境监测、国土资源调查及气候变化研究等国家重大战略需求提供了有力支撑。高光谱相机实现了相关地区二叠纪盆地甲烷排放点源及其羽流的精准监测,如图 18(a)^[22]所示,首次破解天基大范围点源甲烷排放量精准监测的国际性难题,为我国实现“碳达峰、碳中和”战略目标提供有力支撑。“高分五号”卫星高光谱相机数据是目前在 350~2 500 nm 谱段范围内光谱分辨率最高的,其在矿物识别上具有独特的技术优势,如图 18(b)^[22]所示,高光谱相机获取大区域矿物识别和填绘关键数据,构建了相应的全国矿物填图技术流程,于 2021 年首次完成了全国陆域(有效数据覆盖 80% 以上区域)白云石、方解石、绢云母、高岭石、地开石、褐铁矿、赤铁矿、绿泥石/绿帘石等 10 余种矿物、成分、丰度信息的提取和填绘。实现了全国高光谱卫星数据矿物识别的规模化生产,相较机载数据“高分五号”卫星高光谱相机矿物识别平均正确率优于 90%^[23]。

表 7 国内外高光谱相机性能指标

Table 7 Domestic and international hyperspectral imager performance specifications						
国家	德国	意大利	中国	日本	美国	美国
高光谱相机名称	EnMAP ^[17]	PRISMA ^[18]	GF-5/AHSI	ISS/HISUI ^[19]	ISS/EMIT ^[20]	Tanager ^[21]
轨道高度/km	652	615	705	400	400	404
幅宽/km	30	30	60	30	72	18
空间分辨率/m	30	30	30	30	60	30
光谱范围/ μm	0.42~2.45	0.40~2.50	0.40~2.50	0.40~2.50	0.41~2.45	0.40~2.50
光谱分辨率/nm	6.5(VNIR)	12	2.5(VNIR)	10(VNIR)	13	6.5
	10(SWIR)		10(SWIR)	12.5(SWIR)		
光谱通道数	240	239	330/660	185	~285	420
信噪比	325	500	600	375	600	600
光谱定标精度/nm	1.17	2.8	0.45	0.625		



(a) 高光谱应用于天基点源甲烷
(a) Application of hyperspectral technology in
space-based point-source methane detection



(b) 高光谱应用于矿物检测
(b) Application of hyperspectral technology
in mineral detection

图 18 高光谱相机应用天基点源甲烷及矿物检测
Fig. 18 Application of hyperspectral camera in space-based
point source methane and mineral detection

7 结 论

高光谱相机首次采用高体分 SiC_p/Al 复合材料集成

相机光机系统,成功满足了复杂紧凑系统布局、高刚性、高稳定性及轻量化要求。力学试验结果表明相机主体的一阶模态频率为 85.51 Hz,与有限元分析结果保持一致,满足卫星总体要求。高光谱相机在轨成像质量及辐射特性测试结果与地面保持一致,相机峰值信噪比在可见近红外达到近 700,在短波红外达到近 500,充分证明了相机结构设计的有效性和稳定性,首次实现高体分 SiC_p/Al 复合材料在星载高光谱相机上的应用。高光谱相机正朝着宽幅全谱段、高空间分辨率、超光谱、轻小型化等方向快速发展,对结构设计及验证提出了更高的要求及挑战,需结合光机热一体化分析及试验验证手段,利用新型结构材料的优势,展开对低温光学、主动光学、大口径光学结构支撑技术的研究。

参考文献

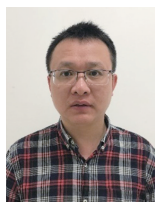
[1] 刘思田, 卢慧, 王栋, 等. 星载高光谱成像系统发展综述[J]. 航天返回与遥感, 2023,44(6):12-26.
LIU S T, LU H, WANG D, et al. Development analysis of spaceborne hyperspectral imaging system[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2023,44(6):12-26.
[2] 王建宇, 李春来. 高光谱遥感成像技术的发展与展望[J]. 空间科学学报, 2021,41(1):22-33.
WANG J Y, LI CH L. Development and prospect of hyperspectral imager and its application[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021,41(1):22-33.
[3] 赵春晖, 李晓慧, 王玉磊. 高光谱图像异常目标检测研究进展[J]. 电子测量与仪器学报, 2014,28(8):803-811.
ZHAO CH H, LI X H, WANG Y L. Research advance on anomaly detection for hyperspectral imagery[J].

- Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(8): 803-811.
- [4] 刘银年, 薛永祺. 星载高光谱成像载荷发展及关键技术[J]. 测绘学报, 2023, 52(7): 1045-1058.
LIU Y N, XUE Y Q. Development and key technologies of spaceborne hyperspectral imaging payload[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2023, 52(7): 1045-1058.
- [5] 刘银年. “高分五号”卫星可见短波红外高光谱相机的研制[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 25-28.
LIU Y N. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3): 25-28.
- [6] 曹明辉, 辛宏伟, 陈长征, 等. 微小型空间相机碳纤维整体式主框架轻量化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 54-61.
CAO M H, XIN H W, CHEN CH ZH, et al. A lightweight design of carbon fiber integrated main frame for the micro space camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 54-61.
- [7] 孔德成. 轻小型离轴三反空间相机主体结构设计及分析[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2018.
KONG D CH. Design and analysis of light-small off-axis TMA spacecamera main structure[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [8] NOVACK T, ESCH T, KUX H, et al. Machine learning comparison between WorldView-2 and QuickBird-2-simulated imagery regarding object-based urban land cover classification[J]. Remote Sensing, 2011, 3(10): 2263-2282.
- [9] FREUDLING M, KLAMMER J, LOUSBERG G, et al. New isostatic mounting concept for a space born three mirror anastigmat (TMA) on the meteosat third generation infrared sounder instrument (MTG-IRS)[C]. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, 2016, 9912: 497-504.
- [10] 宋伟阳, 解鹏, 王循. 大型空间离轴三反相机分体支撑结构设计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(3): 571-581.
SONG W Y, XIE P, WANG X. Design of lightweight split support structure for large space off-axis three mirror camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(3): 571-581.
- [11] SUZUKI S, KANKAKU Y, IMAI H, et al. Overview of ALOS-2 and ALOS-3[C]. Earth Observing Missions and Sensors, 2012: 852811.
- [12] 李伟艳, 吕群波, 刘扬阳, 等. 基于低体分 SiC/Al 主镜框的空间相机主支撑结构热特性分析与验证[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 207-217.
LI W Y, LYU Q B, LIU Y Y, et al. Thermal characteristics analysis and verification of primary supporting structure for spaceborne camera based on low volume SiC/Al primary mirror frame[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 207-217.
- [13] 任建岳, 陈长征, 何斌, 等. SiC 和 SiC/Al 在 TMA 空间遥感器中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2537-2543.
REN J Y, CHEN CH ZH, HE B, et al. Application of SiC and SiC/Al to TMA optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2537-2543.
- [14] 张成成, 何斌, 吕阳, 等. 小卫星空间跟踪遥感相机二维摆镜组件优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(7): 54-62.
ZHANG CH CH, HE B, LYU Y, et al. Optimization design of two-dimensional scanning mirror component of small satellite space tracking remote sensing camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(7): 54-62.
- [15] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高分五号卫星方案设计与技术特点[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 1-13.
SUN Y ZH, JIANG G W, LI Y D, et al. GF-5 satellite system design and technological characteristic[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 1-13.
- [16] 刘银年, 孙德新, 曹开钦, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机在轨辐射性能评估[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 352-359.
LIU Y N, SUN D X, CAO K Q, et al. Evaluation of GF-5 AHSI on-orbit instrument radiometric performance[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 352-359.
- [17] BAUR S, WACHTER R, BASILI P, et al. Calibration and characterization of the EnMAP hyperspectral imager[C]. Sensors, Systems, and Next-Generation

Satellites XXIII, 2019,11151:265-272.

- [18] COGLIATI S, SARTI F, CHIARANTINI L, et al. The PRISMA imaging spectroscopy mission: Overview and first performance analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2021,262(20):112499.
- [19] URAI M, TSUCHIDA S, YAMAMOTO S, et al. Initial onboard calibration results of the HISUI hyperspectral sensor [C]. 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2021: 1608-1610.
- [20] THOMPSON D R, GREEN R O, BRADLEY C, et al. On-orbit calibration and performance of the EMIT imaging spectrometer [J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 303:113986.
- [21] JOSHUA M, SALVAGGIO K, KEREMEDJIEV M, et al. Planet' s upcoming VIS-SWIR hyperspectral satellites [C]. Hyperspectral/Multispectral Imaging and Sounding of the Environment, 2023.
- [22] IRAKULIS-LOITXATE I, GUANTER L, LIU Y N, et al. Satellite-based survey of extreme methane emissions in the Permian basin[J]. Science Advances, 2021,7(27):abf4507.
- [23] 董新丰, 甘甫平, 李娜, 等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报, 2020,24(4):454-464.
DONG X F, GAN F P, LI N, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. Journal of Remote Sensing, 2020,24(4):454-464.

作者简介



刘书锋, 2006 年于华东交通大学获得学士学位, 2009 年于同济大学获得硕士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所高级工程师, 主要研究方向为高光谱与红外遥感技术。

E-mail:15921890299@163.com

Liu Shufeng received his B.Sc. degree from East China Jiaotong University in 2006, and received his M.Sc. degree from Tongji University in 2009. He is currently a senior engineer at the Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. His main research interest is the hyperspectral and infrared photoelectric remote sensing technologies.



刘银年 (通信作者), 1994 年于西北师范大学获得学士学位, 1997 年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位, 2005 年于中国科学院上海技术物理研究所获得博士学位, 现为中国科学院上海技术物理研究所研究员, 主要研究方向为高光谱与

红外遥感技术。

E-mail:ynliu@mail.sitp.ac.cn

Liu Yinnian (Corresponding author) obtained B.Sc. degree from Northwest Normal University in 1994, M.Sc. degree from the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM), Chinese Academy of Sciences (CAS) in 1997, and Ph.D. degree from the Shanghai Institute of Technical Physics (SITP), CAS in 2005. He currently serves as a researcher at SITP, CAS, with his primary research focused on hyperspectral and infrared remote sensing technologies.