

文章编号 1004-924X(2026)04-0559-12

车载长波红外线列扫描成像系统光机结构设计

黄姜卿^{1,2*}, 于洋^{1,2}, 丁学专^{1,2}, 蹇毅^{1,2}, 张承泓^{1,2}, 李争^{1,2}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:针对车载光电系统对作用距离和环境适应性的要求, 设计了长波红外线列扫描成像系统的光机机构。基于光学探测需求与红外材料限制, 采用带保护窗口的折反式光学方案, 结合校正透镜组实现像差校正和动态调焦功能, 使系统在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内能够正常工作。提出基于工程塑料的柔性窗口组件结构, 在实现轻量化的同时提升密封与抗振性能; 构建铝制主镜室与殷钢支撑杆相结合的复合式主光学结构, 有效抑制宽温变引起的热变形; 设计多自由度次镜调节机构, 兼顾装调精度与工程效率。有限元分析结果表明, 整机质量为 28.3 kg 时, 一阶固有频率为 204 Hz, 额定振动载荷下最大应力为 53.9 MPa, 结构动态刚度和强度满足车载使用要求。经实验室测试, 系统对目标成像清晰、噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD) 为 40 mK; 外场试验中, 系统在经历振动环境后, 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温条件下仍能稳定成像, 验证了其光机结构具有优异的环境适应性和工程实用性。

关键词: 车载; 折反式; 线列探测器; 扫描成像; 光机结构

中图分类号: TN216 文献标识码: A

doi: 10. 37188/OPE. 20263404. 0559

CSTR: 32169. 14. OPE. 20263404. 0559

Opto-mechanical structure design of vehicle-mounted long-wave infrared linear array scanning imaging system

HUANG Jiangqing^{1,2*}, YU Yang^{1,2}, DING Xuezhuan^{1,2}, JIAN Yi^{1,2},

ZHANG Chenghong^{1,2}, LI Zheng^{1,2}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: huangjiangqing@mail.sitp.ac.cn

Abstract: To meet the requirements of operating distance and environmental adaptability for vehicle-mounted optoelectronic systems, an opto-mechanical structure of a long-wave infrared linear array scanning imaging system was designed. Based on the optical detection requirement and infrared material constraints, a catadioptric optical scheme with a protective window was adopted, and a correction lens group was integrated to correct aberrations and achieve dynamic focusing function, enabling the system to work normally within the temperature range of $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. A flexible window component structure based on engineering plastic was proposed to achieve lightweight while improving sealing and anti-vibration performance. A composite primary optical structure combining an aluminum main mirror chamber and

收稿日期: 2025-10-09; 修订日期: 2025-12-24.

基金项目: 中国科学院上海技术物理研究所三期创新项目 (No. Q-ZY-108)

Invar support rods was constructed to effectively suppress thermal deformation caused by wide temperature variation. A multi-degree-of-freedom adjustment mechanism for the secondary mirror was designed to balance alignment accuracy and engineering efficiency. Finite element analysis results show that with a total mass of 28.3 kg, the opto-mechanical structure's first-order natural frequency is 204 Hz, and the maximum stress under rated vibrational load is 53.9 MPa, indicating that the structural dynamic stiffness and strength meet the requirement of vehicle-mounted applications. Laboratory tests show that the system achieves clear target imaging with a Noise Equivalent Temperature Difference (NETD) of 40 mK. In field tests, the system still maintains stable imaging performance at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ after undergoing a vibration environment, which verifies the excellent environmental adaptability and engineering practicality of the opto-mechanical structure.

Key words: vehicle-mounted; catadioptric; linear detector; scanning imaging; opto-mechanical structure

1 引言

在环境监测、气象预测等领域,对车载光电系统的需求日益增长,尤其是在复杂环境和恶劣天气条件下的高分辨率、远距离成像能力^[1-2]。长波红外作为重要的大气透过窗口,被广泛应用于红外成像系统^[3]。传统车载长波红外系统多采用折射式光学系统,体积、重量与扫描速率受到限制。随着观测目标速度加快,作用距离要求提升,对系统成像分辨率与口径提出了更高的要求^[4]。受限于红外材料的种类、加工难度和成本,折射式系统难以实现大口径设计^[5],无法满足当前远距离、高分辨率的探测需求。

折反式光学系统结合折射与反射元件优势,能够在有限空间内实现长焦距与大视场,并有效校正像差,提升成像质量。将其与长波红外成像技术结合,有望突破折射式系统的口径瓶颈,实现高性能红外成像。目前,折反式系统的研究多集中于星载平台,如 J. Topaz^[6]等研制的 VEN μ S 卫星超光谱相机和李春来^[1]等设计的星载长波红外焦平面系统均采用 RC 主光学系统,前者光学口径 250 mm,后者口径 200 mm。李建林^[7]与胡晨霞^[8]等分别报道了用于星敏感器与中波红外成像的折反式系统,前者工作于可见近红外波段,后者采用制冷型中波探测器,均不适用于长波线列探测器的扫描成像模式。车载平台与星载在环境条件上差异显著,这对系统的体积重量、抗振性能及宽温适应能力提出了特殊挑战。

针对上述问题,本文开展长波红外线列扫描成像系统光机结构的设计与验证。光学设计上,

采用带保护窗口的折反式构型,集成校正透镜组实现像差校正和宽温域动态调焦。结构设计上,提出基于工程塑料的柔性窗口组件,兼顾轻量化、密封与抗振性能;构建铝制主镜室与殷钢支撑杆相结合的复合式主光学结构,抑制热致形变和保持主次镜相对位移;设计多自由度次镜调节机构,提升装调精度与效率。经外场试验验证,系统在经历振动、高温、低温等复杂环境后仍能保持清晰成像,光机结构表现出优异的环境适应性与工程实用性。

2 成像系统主要技术参数

长波红外线列扫描成像系统(以下简称成像系统)采用长波红外线列探测器与方位转台匀速转动相结合的技术方案,实现对 360° 空域的快速扫描成像,其工作原理如图 1 所示。系统工作时,方位转台以恒定角速度连续旋转,系统内部的线列探测器在转动过程中执行积分与读出操作,对

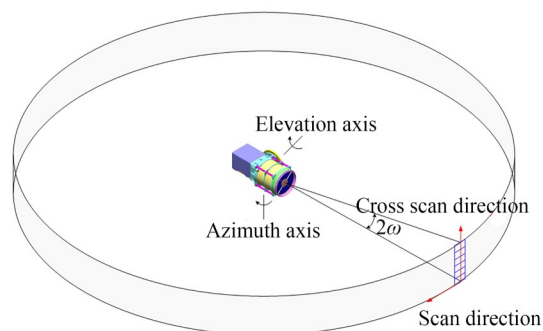


图 1 成像系统工作原理

Fig. 1 Operating principle of imaging system

景物逐行并扫形成全景图像。通过引入俯仰方向上的机械转动,系统可进一步扩展探测范围,实现更大空域范围内的目标搜索。

成像系统由光学、机械、电子学等部分组成,支撑法兰为系统的安装接口,与载车固连,整体结构如图 2 所示。

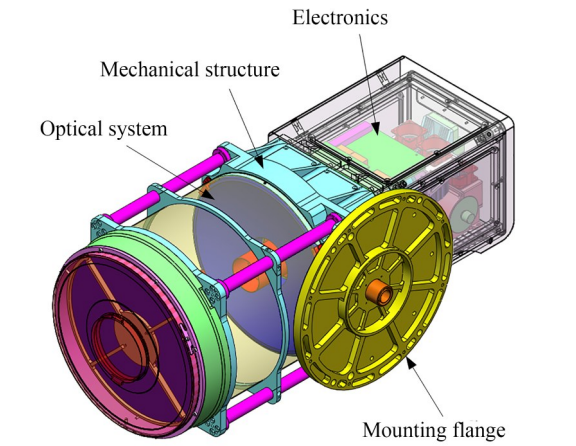


图 2 成像系统总体结构

Fig. 2 Overall structure of the imaging system

成像系统主要技术参数如表 1 所示,探测器选用国产制冷型长波 576×6 红外焦平面探测器,像元尺寸为 25 μm(扫描方向)×28 μm(垂直扫描方向),探测器的 576 元应用于垂直扫描方向。

表 1 成像系统主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of imaging system

Parameter	Value
Waveband/μm	7.7~10.3
<i>f</i> /mm	465
Full FOV/(°)	2
F number	1.67
Pixel number	576×6
Weight/kg	≤30
Working temperature/°C	−40~+60

3 光学系统设计

光学系统的结构形式根据成像系统的焦距、相对孔径和视场角综合确定^[9],在追求高成像质量的同时,还需对其体积、布局以及环境适应性进行统筹考虑。常见的结构形式主要包括折射式、反射式和折反式三种^[10]。针对本系统光学口径为 278 mm 的要求,折射式系统难以实现;而反射式系统虽然容易实现大口径设计,但其视场通常较小,不利于目标搜索应用。因此,本系统采用折反式的光学结构形式。

折反式系统属于开放式光路结构,在野外长期工作时易受温度变化、风沙雨雪等环境因素的影响。为保证系统在恶劣条件下的环境适应性和工作稳定性,在前端设计保护窗口。设计的光学系统如图 3 所示,包括窗口、反射式主光学系统(卡塞格林结构)和折射式校正透镜组。其中主镜为抛物面,次镜为双曲面,校正透镜组由四片透镜组成(透镜 1~透镜 4)。

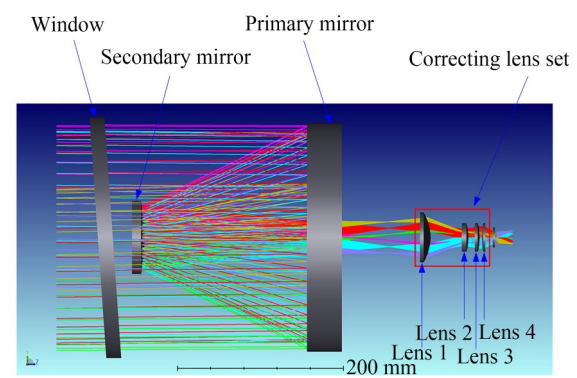


图 3 光学系统光路图

Fig. 3 Optical path diagram of optical system

窗口选用锗单晶,主镜选用微晶玻璃(Zerodur),次镜选用熔石英,窗口及反射镜的材料属性如表 2 所示。

表 2 窗口及反射镜材料属性

Tab. 2 Material properties of window and mirrors

材料	密度 $\rho/(g\cdot mm^{-3})$	弹性模量 <i>E</i> /GPa	导热系数 $\lambda/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$	热胀系数 $\alpha/(10^{-6}\cdot K^{-1})$	泊松比 μ
锗	5.35	102	59	6.1	0.28
Zerodur	2.53	91	1.64	0.05	0.24
熔石英	2.19	72	1.4	0.5	0.17

光学系统调制传递函数(MTF)曲线如图4所示。在空间频率18 lp/mm处,除边缘视场外,其余各视场的MTF均大于0.4,系统像质接近衍射极限,成像效果理想。

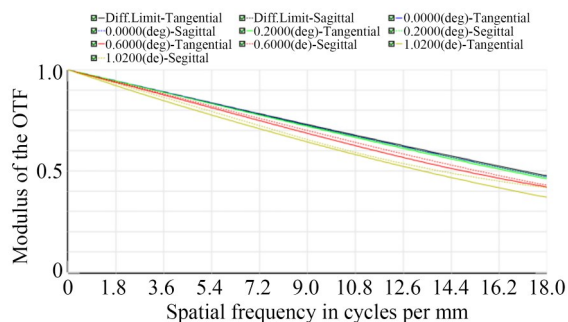


图4 光学系统MTF曲线图

Fig. 4 MTF of optical system

由于光学系统焦距较长,在宽温度范围内易发生明显的焦距变化。为保证系统在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下正常工作,需引入调焦功能。系统调焦通常通过两种方式实现:一是调节红外探测器的轴向位置,二是调整校正透镜的间隔以进行焦距补偿。本系统采用的红外探测器为分置式制冷型器件,其体积与重量较大,不利于精密位移,因此选用第二种方式。

图5和图6分别为光学系统在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下经调焦后的MTF曲线。结果表明,在该温度范围内,通过调焦可使光学系统的MTF得到有效恢复,接近常温设计指标,光学系统具有良好的温度适应性与像质稳定性。

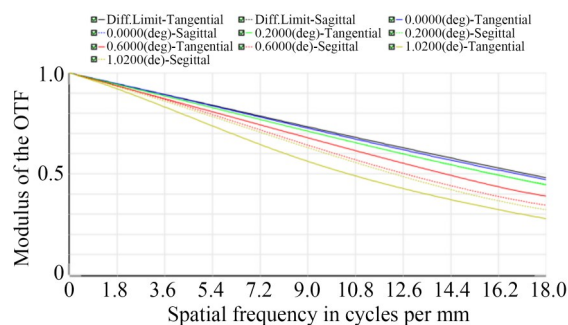


图5 光学系统 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 调焦后MTF图

Fig. 5 MTF of optical system after focusing at $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

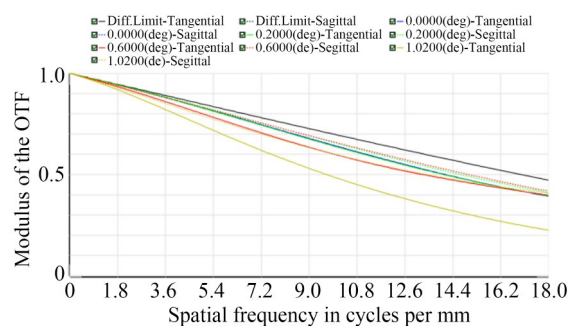


图6 光学系统 $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 调焦后MTF图

Fig. 6 MTF of optical system after focusing at $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

4 机械结构设计

4.1 结构参数对成像性能的影响

成像系统的像质主要受力学环境与宽温度范围两大因素影响。鉴于系统为驻车工作模式,力学环境的影响主要表现为运输及安装过程中的振动与冲击。在该工况下,核心要求是确保光机结构不发生破坏或塑性形变,其引起的弹性形变在振动停止后可恢复,故无需考虑力学环境对像质的额外影响。温度对成像系统的影响主要体现在以下三个方面^[11]:

- (1) 光学元件因环境温度变化导致折射率改变,温度梯度会进一步引发折射率梯度变化;
- (2) 光学元件因热应力作用产生面形畸变;
- (3) 结构热变形导致光学元件发生刚体位移。

对于本系统,由于具备调焦功能,光学元件折射率变化及刚体位移带来的影响已在光学设计热分析阶段予以考虑,并可通过调焦机构进行补偿,因此仅需重点分析光学元件由热应力引起的面形变化对系统像质的影响。

4.1.1 光学元件热应力面形误差分析

4.1.1.1 窗口

窗口作为透射元件,在热应力作用下会产生应力双折射效应,进而引入波前误差,施加应力与波前误差的关系满足表达式^[12]:

$$\sigma_{w, \text{window}} = K_s \cdot S_w \cdot t_w, \quad (1)$$

其中: $\sigma_{w, \text{window}}$ 为窗口的波前误差; K_s 为锗单晶的应力光学系数,取值约 $3.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$; S_w 为窗口承受的最大主应力; t_w 为窗口厚度。

4.1.1.2 主镜

热应力将导致主镜的面形发生畸变。镜面

上任意点的法向变形量引入的波前误差可表示为^[12]:

$$W_1(x, y) = 2 \cdot \delta_1(x, y), \quad (2)$$

其中: $W_1(x, y)$ 为主镜的波前误差; $\delta_1(x, y)$ 为主镜镜面的实际法向轮廓与理想面形偏差值; (x, y) 为主镜镜面任意点二维坐标。

基于此,可计算由整个主镜面形变化导致的波前误差的均方根值:

$$\sigma_{W1} = \sqrt{\frac{1}{A_1} \iint_A [W_1(x, y) - \overline{W_1}]^2 dx dy} = 2 \cdot \sigma_{1rms}, \quad (3)$$

其中: σ_{W1} 为主镜波前误差的均方根值; A_1 为主镜的有效通光面积; $\overline{W_1}$ 为主镜波前误差在整个通光区域内的平均值; σ_{1rms} 为主镜面形的均方根值,该值可通过仿真或实测求得。

4.1.1.3 次镜

同理,可计算由次镜面形变化导致的波前误差的均方根值:

$$\sigma_{W2} = \sqrt{\frac{1}{A_2} \iint_A [W_2(x, y) - \overline{W_2}]^2 dx dy} = 2 \cdot \sigma_{2rms}, \quad (4)$$

其中: σ_{W2} 为次镜波前误差的均方根值; A_2 为次镜的有效通光面积; $\overline{W_2}$ 为次镜波前误差在整个通光区域内的平均值; σ_{2rms} 为次镜面形的均方根值,该值可通过仿真或实测求得。

4.1.2 温度变化下系统总波前误差

系统的总波前误差可由各主要误差源的均方根值进行求解:

$$\sigma_{W, total} = \sqrt{\sigma_{W, window}^2 + \sigma_{W1}^2 + \sigma_{W2}^2}, \quad (5)$$

其中, $\sigma_{W, total}$ 为系统总波前误差。

4.1.3 波前误差对系统MTF的影响

基于傅里叶光学理论,当系统存在小尺度波前误差时,实际MTF可通过范西特-泽尼克近似计算^[13]:

$$MTF(f) = MTF_0(f) \cdot \exp \left[- \frac{2\pi^2 \sigma_{W, total}^2 \lambda^2 f_N^2 f^2}{1 + \left(\frac{\lambda f_N f}{r} \right)^2} \right], \quad (6)$$

其中: $MTF(f)$ 为系统的实际MTF; $MTF_0(f)$ 为系统的理想MTF; λ 为系统工作波段中心波

长,取值 $9 \mu\text{m}$; f_N 为系统空间频率,取值 18 lp/mm ; f 为系统焦距,取值 465 mm ; r 为光学孔径半径,取值 139 mm 。

4.2 机械结构设计

机械结构设计需优先满足光学系统的成像质量要求,重点是控制反射镜的面形精度并保持光学系统与探测器间尺寸关系的稳定性;其次应满足工程应用提出的各类环境适应性要求,包括力学振动、温度变化及防雨防尘等条件。

在整机布局方面,系统的质量分布应尽量靠近支撑法兰中心,使质心与中心轴基本重合;同时采用对称结构形式以降低系统的转动惯量,从而提高成像系统的整体稳定性。成像系统机械结构主要包括窗口组件、主光学组件、校正透镜组件、探测器成像组件和箱体组件等部分,总体结构布局如图7所示。

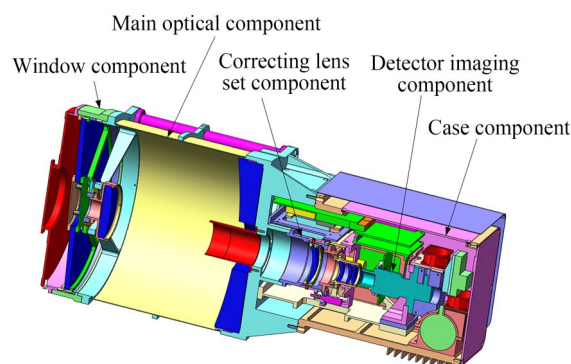


图7 成像系统机械结构布局

Fig. 7 Mechanical structure layout of imaging system

4.2.1 窗口组件

窗口外径为 $\Phi 285 \text{ mm}$,厚度为 8 mm ,径厚比达 $36:1$ 。在成像系统面临严格的空间包络和重量约束的条件下,如何兼顾窗口组件结构的强度与稳定性,并同时实现系统的密封功能,是窗口组件结构设计的关键和难点。

常用的窗口组件结构材料包括镁合金、铝合金和钛合金。其中镁合金的密度较小,但其强度较低、热膨胀系数较大;铝合金和钛合金的强度高于镁合金,但密度较大,均不适用于对轻量化和稳定性要求较高的本系统。基于上述限制,本研究首次提出采用工程塑料(PC)作为支撑结构材料,该工程塑料密度为 1.2 g/cm^3 ,且具有良好

的机械性能与热稳定性。

窗口组件设计如图 8 所示,为适配卡式系统的中心遮拦结构,窗口设计有中心孔,减重的同时便于固定。窗口由保持架进行夹持固定,构成完整的窗口组件。组装前,在保持架的安装面上均匀涂覆一层薄硅胶,并用工装压平,该工艺一方面可实现可靠的密封,另一方面能有效缓冲装配应力。组装完成的窗口组件被固定在组件安装架内,通过隔圈实现预设角度的倾斜安装,以抑制冷反射。设计完成的窗口组件总重为 3.381 kg,其中锗窗口重 2.535 kg,支撑结构仅重 0.846 kg,占总重的 25%。

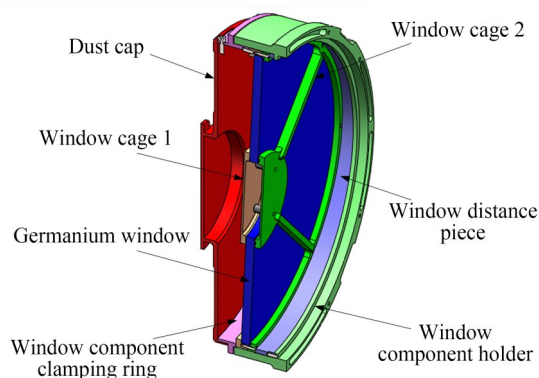


图 8 窗口组件

Fig. 8 Window component

在常温室内环境下,工程塑料的有效寿命可达 5~10 年或更长,但其实际寿命显著受温度、应力、环境介质(尤其是湿度)及材料改性水平的综合影响。成像系统的设计寿命为 8 年,为确保该材料在严苛工况下的长期可靠性,材料上选用抗水解级专用牌号,结构上圆滑设计以消除应力集中,同时对暴露在外部的表面进行防护处理以有效隔绝水汽、紫外辐照等环境因素。

4.2.2 主光学组件

主光学组件的结构设计包括主镜支撑结构、次镜支撑结构和主次镜间支撑结构的设计。支撑结构材料的选择需重点考虑其支撑刚度和与镜体材料的热膨胀特性匹配。主镜作为成像系统的核心光学元件及全系统的装调基准,其面形稳定性直接影响成像质量。

主镜外径为 $\Phi 285$ mm,边缘厚度为 41.1 mm,中心厚度为 26.4 mm,成像系统的典型工作

俯仰角约为 2.8° ,接近水平使用。主镜采用周边支撑方式,通过四周粘胶和轴向限位的方式固定在主镜室,如图 9 所示。主镜室采用一体化设计,前端固定主镜,后端安装校正透镜组组件,可有效保证主光学和后光学的同轴精度。微晶玻璃的热膨胀系数为 $0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,从热适配角度考虑,主镜室的材料应选择与微晶玻璃相匹配的殷钢(4J36),但是殷钢材质的主镜室重量大、成本高。经综合权衡,选用硬铝合金(2A12)作为主镜室材料,由于微晶玻璃与铝合金的热膨胀系数相差显著,设计时需充分考虑二者热失配带来的影响。主镜室在温度变化下的径向尺寸变化可按公式(7)计算^[14]:

$$\Delta L = \alpha \cdot L \cdot \Delta T, \quad (7)$$

其中: α 为铝合金的热膨胀系数,取值 $22.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; L 为等效作用长度,取主镜外径 $\Phi 285$ mm; ΔT 为相对于装配环境(20°C)的温度变化值,高温工况($+60^\circ\text{C}$)为 40°C ,低温工况(-40°C)时为 60°C 。计算可得,主镜室在该温域内的径向尺寸变化范围为 -0.39 mm(收缩)至 $+0.26$ mm(膨胀)。为减小因热膨胀差异引起的主镜面形变化,在主镜与主镜室之间预留单边 0.5 mm 的配合间隙。装配时,采用专用工装通过中心孔实现二者的同心定位,待主镜固定完成后再将工装拆除。依据工程经验,胶层厚度设计为 2 mm,同时在灌胶层中均匀制造蜂窝孔,以吸收和释放材料膨胀和收缩时产生的应力。

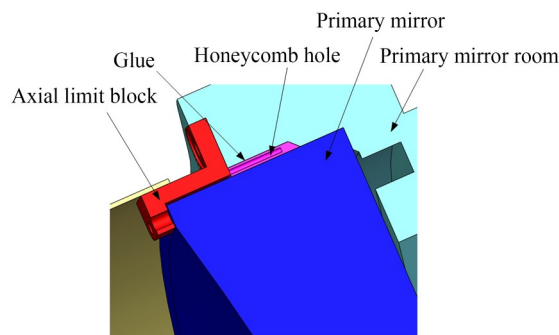


图 9 主镜支撑结构

Fig. 9 Primary mirror support structure

次镜同样采用周边支撑方式,通过四周点胶和轴向压圈限位的方式将次镜固定在次镜室,如图 10 所示。次镜外径为 $\Phi 88$ mm,中心厚度为 15

mm,由于次镜尺寸较小,径厚比相对较大,兼顾次镜的装配效率,次镜室材料选用钛合金。

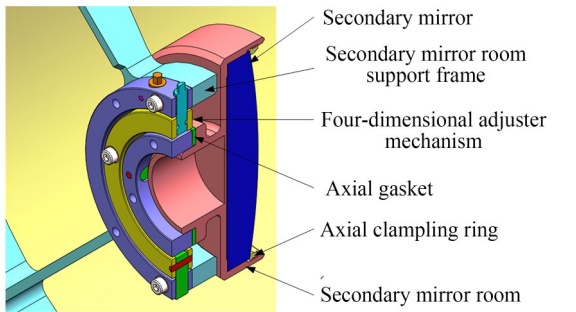


图 10 次镜支撑结构
Fig. 10 Secondary mirror support structure

设计四维调节机构对次镜进行装调,该机构主要由内环、中环和外环等组成,内环与次镜室连接,外环与次镜室支撑架连接,通过内环与外环之间的相对运动可以实现次镜在横向平移、横向转动、纵向平移和纵向转动两个方向四个自由度的精确调节,如图 11 所示。结合修配轴向垫片的厚度,可以实现次镜三个方向五个自由度的位置校准。通过使用四维调节机构,不仅有助于放宽主光学结构的加工公差、降低制造成本,还可以显著提高主光学的装调效率。

卡式系统可采用的主次镜间支撑结构主要包括筒式和桁架式两种^[15]。结合筒式和桁架式两种支撑结构的优点,创新地提出了一种复合式的主次镜间支撑结构。该结构采用拼接式构型,由铝合金主镜室、殷钢支撑杆、钛合金次镜室支撑架和铝合金蒙皮等组成,如图 12 所示。主镜室与次镜室支撑架在圆周上均布四个位置对应的安装支耳,两者通过支撑杆连接。为提高轻量化水平,支撑杆设计为空心结构并采用焊接工艺。

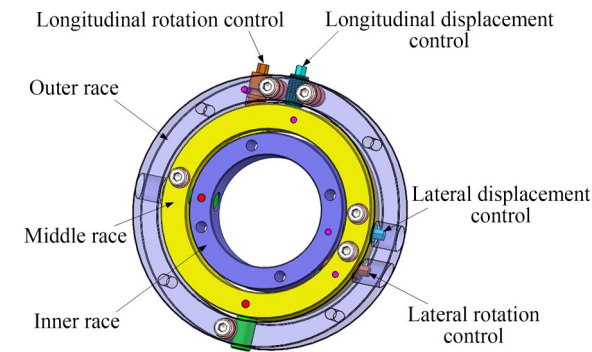


图 11 四维调节机构
Fig11 Four-dimensional adjuster mechanism

次镜室支撑架采用四翼梁十字交叉构型,其翼片与窗口组件的四翼严格对齐。铝合金蒙皮采用 1 mm 厚的铝合金板材辊圆焊接制成,两端通过螺接的方式分别与主镜室和次镜室支撑架固连,装配完成后对贴合面进行整体灌封以实现密封,具有生产效率高、成本低的优点。

主光学组件零部件及密封胶完全固化的主要材料属性如表 3 所示。

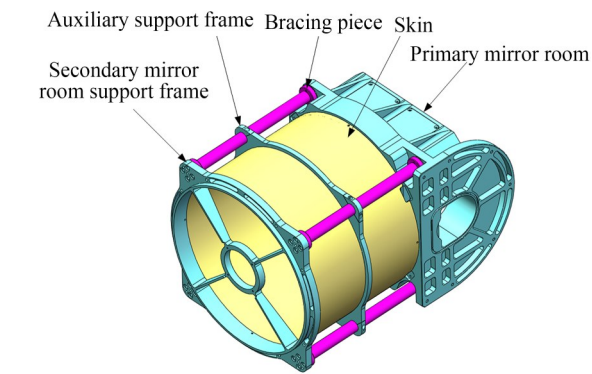


图 12 主次镜间支撑结构
Fig. 12 Support structure between primary and secondary mirror

表 3 主光学组件结构材料属性
Tab. 3 Material properties of main optical component

材料	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{mm}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	热胀系数 $\alpha/(10^{-6}\cdot\text{K}^{-1})$	泊松比 μ
4J36	8.3	150	14.7	2.4	0.25
TC4	4.4	109	9.6	8.9	0.29
2A12	2.78	71	121.8	22.9	0.33
PC	1.12	2.6	0.2	60	0.38
密封胶	1.12	0.001 5	0.17	300	0.49

4.2.3 校正透镜组组件

基于功能划分,将透镜1划分为前组,透镜2至透镜4划分为后组。所有透镜均通过镜筒和压圈实现固定。透镜1为调焦镜片,采用凸轮机构实现调焦,调焦行程 $\pm 5\text{ mm}$ 。后组三片透镜设计为相同外径,安装在同一镜筒中,充分保证同轴度,透镜间隔通过精密研磨隔圈厚度进行控制。校正透镜组组件结构如图13所示。

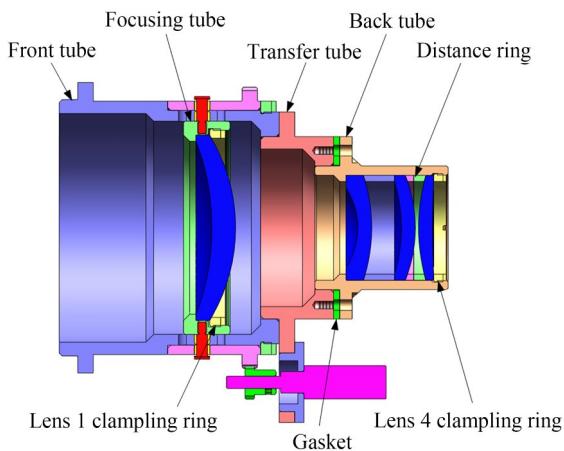


图13 校正透镜组组件

Fig. 13 Correcting lens set component

5 有限元分析

5.1 有限元建模

为确保成像系统在经历力学环境后不发生结构破坏或塑性形变,对光机结构进行刚度和强度分析。在关键的传力路径上,几何模型与设计结构保持一致;对于螺纹孔等非关键特征,依据能量与刚度等效原则进行合理简化,使简化后的结构件在整机质量和刚度贡献上均等效于设计状态。根据以上原则,建立的成像系统有限元模型如图14所示,该模型共包含171 728个节点和89 349个实体单元。

在模型连接方面,根据零部件实际装配关系定义,该模型中所有的连接均为接触对。有限元模型的整体约束施加于支撑法兰安装面,采用固定几何体约束(限制全部6个自由度),与实际情况一致。

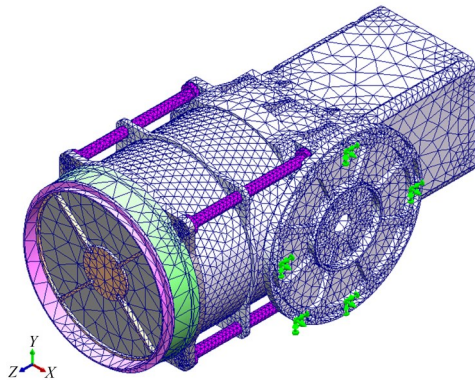


图14 成像系统有限元模型

Fig. 14 Finite element model of imaging system

5.2 模态分析

模态分析是评估结构刚度的重要手段,通过对比成像系统的基频与外界扰动频率,可判断光机结构是否具备足够的刚度。从图15可以看出,成像系统的一阶振型为绕Y轴的转动,其一阶固有频率为204 Hz,高于载体的激励频率(5~200 Hz),证明光机结构具有较高的刚度,可保障车载环境下的光学元件的稳定性。

表4列出了成像系统前4阶固有频率和振型。

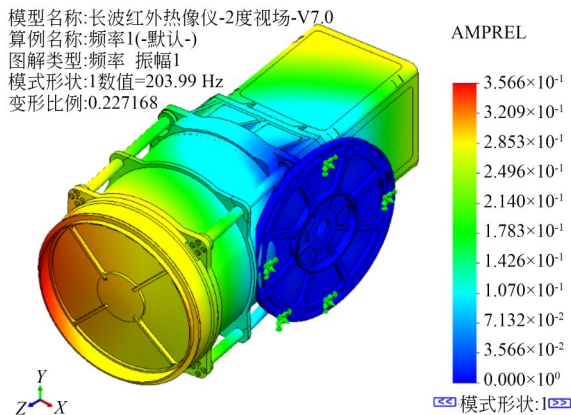


图15 成像系统1阶振型图

Fig. 15 First-order mode shape of imaging system

表4 成像系统前4阶模态分析结果

Tab. 4 Modal analysis result of imaging system

阶次	频率/Hz	振型描述
1	203.99	绕Y轴旋转
2	300.78	次镜组件绕Z轴旋转
3	359.92	绕X轴旋转
4	419.71	次镜组件沿Z轴平动

5.3 谐响应分析

强度分析主要用于评估成像系统在外部载荷作用下是否发生屈服或塑性形变,包括正弦振动条件下结构的应力及位移响应。车载平台的载荷条件为频率范围5~200 Hz、加速度为1.5 g、沿Y轴方向的正弦扫描振动,单次扫描时间12 min,据此对光机结构进行谐响应分析。

图16和图17分别为成像系统在正弦振动条件下各结构件的最大应力和最大位移响应分布,此时激励频率为200 Hz,对应扫描进行到12 min的时刻。从图16可以看出,最大Von Mises应力出现在主镜室与支撑法兰连接的加强筋处,其值为53.9 MPa,远低于硬铝合金的屈服应力325 MPa。从图17可以看出,最大位移出现在窗口组件的压圈处,位移量为3.7 μm 。根据以上分析可知,在规定的载荷条件下,成像系统不会发生屈服或塑性形变,结构强度满足使用要求。

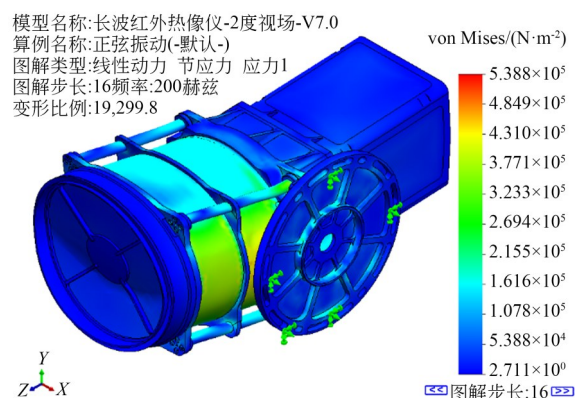


图16 正弦振动下应力云图

Fig. 16 Stress contour map under sinusoidal vibration

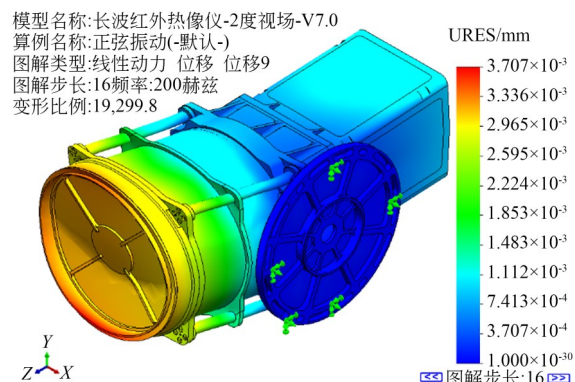


图17 正弦振动下位移云图

Fig. 17 Displacement contour map under sinusoidal vibration

5.4 热力学分析

温度变化引起材料热胀冷缩,而光机结构的约束会限制其自由变形,从而产生热应力。为评估成像系统的热稳定性,对其进行热力学分析。成像系统的工作温度范围为-40~60 $^{\circ}\text{C}$,内部热源集中在箱体组件内部,包括探测器与成像电路,其在稳定工作时的功耗分别为70 W和20 W。图18与图19分别为系统在+60 $^{\circ}\text{C}$ 与-40 $^{\circ}\text{C}$ 时的温度分布。高温工况(+60 $^{\circ}\text{C}$)下,系统最高温度为69.1 $^{\circ}\text{C}$,出现在探测器杜瓦处;主光学组件温度均匀,为59.6 $^{\circ}\text{C}$ 。低温工况(-40 $^{\circ}\text{C}$)下,系统最高温度为-30.7 $^{\circ}\text{C}$,同样出现在探测器杜瓦处;主光学组件温度均匀,为-40.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

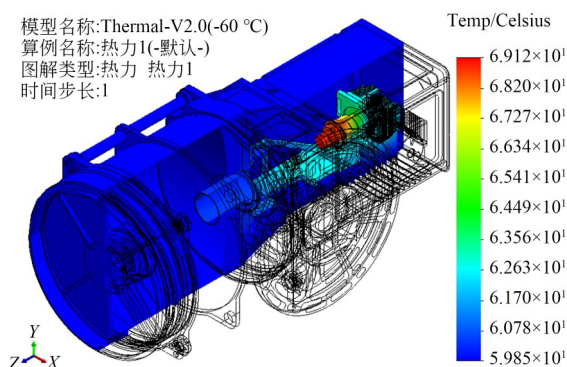


图18 成像系统+60 $^{\circ}\text{C}$ 时温度分布

Fig. 18 Temperature distribution of imaging system at +60 $^{\circ}\text{C}$

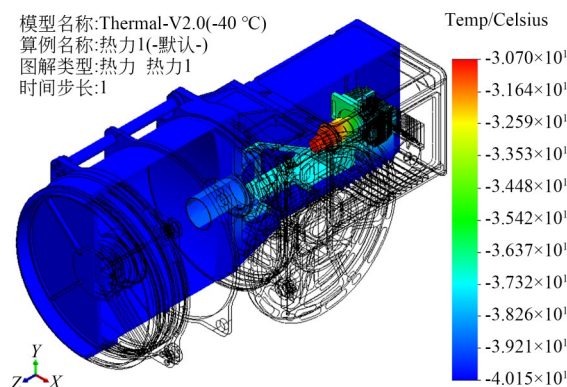


图19 成像系统-40 $^{\circ}\text{C}$ 时温度分布

Fig. 19 Temperature distribution of imaging system at -40 $^{\circ}\text{C}$

根据成像系统的温度分布,进行热力学分析,将系统在20 $^{\circ}\text{C}$ 装配环境下的状态定义为应变

为零时的参考温度。图 20 与图 21 分别为高温工况下成像系统的应力与位移分布。此时,结构最大应力为 239.2 MPa,出现在支撑法兰安装面,该处为局部应力集中,不影响整体应力评估;窗口、主镜与次镜的最大应力分别为 5.53 MPa, 3.19 MPa 和 2.17 MPa。通过导出位移数据并剔除整体刚体位移,得到主镜与次镜面形变化的均方根值为 0.074 μm 和 0.025 μm 。

在低温工况下,系统的应力与位移分布如图 22 和图 23 所示。该工况下最大应力为 440.2 MPa,同样集中于支撑法兰安装面;窗口、主镜与次镜最大应力分别为 10.27 MPa, 5.87 MPa 和 4.04 MPa。剔除刚体位移后,主镜与次镜面形变化的均方根值为 0.091 μm 和 0.064 μm 。

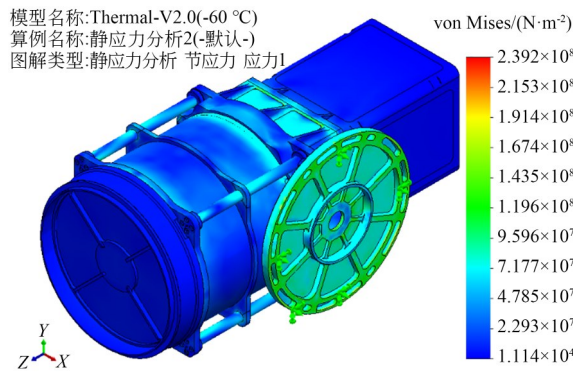


图 20 成像系统+60 °C热应力分布
Fig. 20 Thermal stress distribution of imaging system at +60 °C

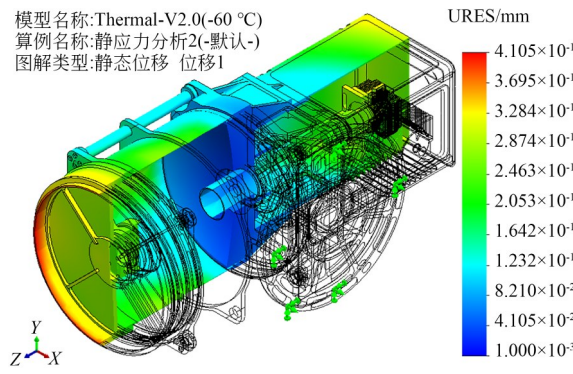


图 21 成像系统+60 °C热位移分布
Fig. 21 Thermal displacement distribution of imaging system at +60 °C

根据热力学仿真数据,依据 4.1 节波前误差及 MTF 理论计算方法,对成像系统在高、低温工况下的成像性能进行定量评估,如表 5 所示。

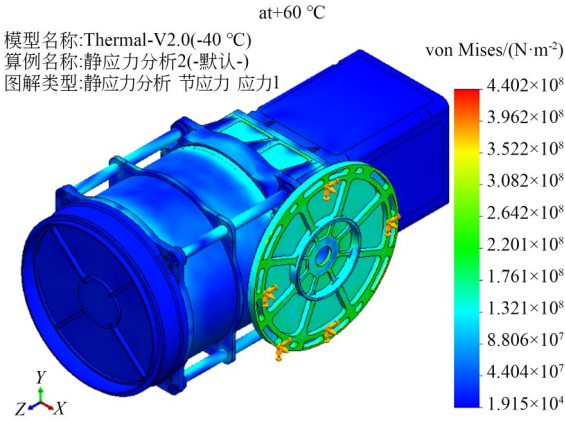


图 22 成像系统-40 °C热应力分布
Fig. 22 Thermal stress distribution of imaging system at -40 °C

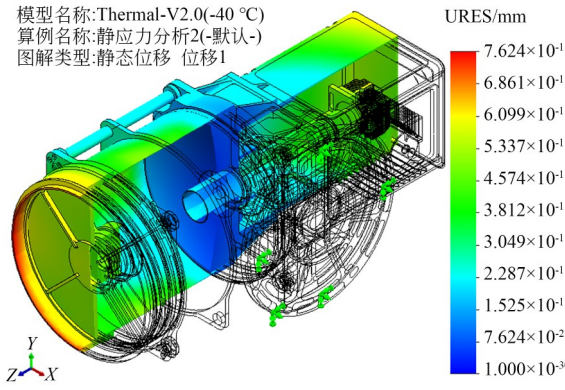


图 23 成像系统-40 °C热应力分布
Fig. 23 Thermal stress distribution of imaging system at -40 °C

表 5 高、低温工况下成像性能评估结果

Tab. 5 Imaging performance at high and low temperatures

评估参数	高温工况 (+60 °C)	低温工况 (-40 °C)
窗口最大应力/MPa	5.53	10.27
窗口波前误差/ μm	0.137	0.255
主镜波前误差/ μm	0.148	0.182
次镜波前误差/ μm	0.051	0.128
系统总波前误差/ μm	0.208	0.338
理论 MTF@18 lp/mm	0.469	0.393
实际 MTF@18 lp/mm	0.415	0.312

结果表明,所设计的光机结构在高温下具有良好的热稳定性,成像性能满足指标要求;但在

低温下,因材料收缩与热应力加剧,成像质量有所衰减,与高温性能相比存在一定差距。

6 实验室与外场成像

为验证长波红外线列扫描成像系统成像性能,系统研制完成后,在实验室内进行了成像测试。如图24所示,在周扫模式下,系统对十字靶标成像清晰,噪声等效温差(NETD)为40 mK。



图24 成像系统实验室测试结果

Fig. 24 Test result at laboratory

将成像系统与方位转台集成并固定安装在载车平台上,开展外场实景成像试验,在 $+40^{\circ}\text{C}$ 高温和 -30°C 低温环境下获取的全景图像分别如图25和图26所示。试验结果表明,系统经历振动工况后,在上述高、低温环境中均能保持图像清晰、细节分辨能力良好,未出现因结构失稳或热应力导致的像质劣化,有效验证了成像系统光机结构优异的温度与环境适应性。

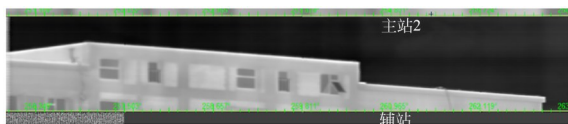


图25 成像系统外景成像结果($+40^{\circ}\text{C}$)

Fig. 25 Imaging result out-door($+40^{\circ}\text{C}$)

参考文献:

- [1] 李春来,林春,陈小文,等. 星载长波红外焦平面成像系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2253-2260.
LI C L, LIN C, CHEN X W, et al. Space-borne LWIR FPA imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2253-2260. (in Chinese)

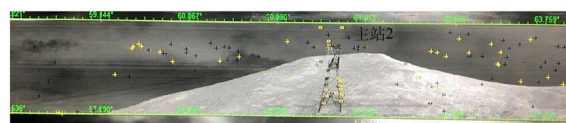


图26 成像系统外景成像结果(-30°C)

Fig. 26 Imaging result out-door(-30°C)

7 结 论

本研究针对车载平台对远距离高分辨率红外探测的需求,完成了折反式长波红外扫描成像系统光机结构的设计与验证。通过卡塞格林主光学系统与校正透镜组的协同配置,实现了大口径、长焦距的光学性能,并在此基础上进行了面向车载复杂工况的光机结构设计。

提出的工程塑料柔性窗口组件与复合式主光学结构,有效平衡了轻量化、密封性及宽温域形变控制的要求;多自由度次镜调节机构则在保证装调精度的同时提升了工程实施效率。有限元分析及实验验证表明,所研制的光机结构在 $-40\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内具有良好的热稳定性,在振动与低温复合环境中仍保持成像性能稳定。

本研究验证了折反式光机结构在车载平台上的可行性与适应性,所提出的结构设计方法与结论可为机载、舰载等移动平台的大口径红外系统光机设计提供有益参考。

作者贡献说明:

黄姜卿:论文构思和撰写,机械结构设计和有限元分析;

于洋:光学系统设计;

丁学专:光学系统设计指导;

蹇毅:有限元分析过程校核;

张承泓:成像数据整理和分析;

李争:技术方向和方案指导。

nese)

- [2] 卜正明,李满良. 陆基长波红外辐射测量技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2005, 24(4): 309-311.
BU Z M, LI M L. Study of ground-based lw infrared radiation measurement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, 24(4): 309-311. (in Chinese)
- [3] 张营. 长波红外高光谱成像仪光学技术研究[D].

- 上海:中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2016.
- ZHANG Y. *Optical Technology of Long-Wave Infrared Hyperspectral Imaging* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [4] 许照东, 刘欣, 董涛. 机载高分辨率连续变焦红外热像仪设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 619-621.
- XU Z D, LIU X, DONG T. Design of airborne high resolution and continuous magnification IR thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 619-621. (in Chinese)
- [5] 姜凯, 周泗忠, 王艳彬, 等. 大口径离轴折反式中波红外连续变焦系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2467-2471.
- JIANG K, ZHOU S Z, WANG Y B, *et al.* Design of large aperture off-axis catadioptric middle infrared continuous zoom system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2467-2471. (in Chinese)
- [6] TOPAZ J, TINTO F, HAGOLLE O. The VEN μ S super-spectral camera [J]. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites X*, 2006, 6361: 63611E.
- [7] 李建林, 雷广智, 白杨, 等. 大口径折反式星敏感器光学系统的光路设计[J]. 光子学报, 2020, 49(6): 0611002.
- LI J L, LEI G Z, BAI Y, *et al.* Optical path design for catadioptric star sensor with large aperture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(6): 0611002. (in Chinese)
- [8] 胡晨霞, 刘英, 王成龙, 等. 紧凑型折反式制冷型中波红外成像光学系统设计[J]. 光学学报, 2024, 44(9): 0922002.
- HU C X, LIU Y, WANG C L, *et al.* Design of compact catadioptric cooled mid-wavelength infrared imaging optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(9): 0922002. (in Chinese)
- [9] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2022(1): 72-78.
- SHAN Q S, XIE M L, LIU Z H, *et al.* Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system [J]. *Chinese Optics*, 2022(1): 72-78. (in Chinese)
- [10] 周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 352-356.
- ZHOU S C. *Introduction to Advanced Infrared Photoelectric Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2014: 352-356. (in Chinese)
- [11] 汪巧萍, 吕冀怀. 中分辨率宽覆盖 CCD 相机光机热分析[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(1): 28-31.
- WANG Q P, LÜ J H. Optical & mechanics thermal analysis for a mid-resolution wide coverage TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(1): 28-31. (in Chinese)
- [12] PAUL R. YODER J R. 光机系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 651-652.
- PAUL R. YODER J R. *Opto-mechanical Systems Design* [M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 651-652. (in Chinese)
- [13] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics (4th ed.)* [M]. New York: W. H. Freeman & Company, 2017: 320-325.
- [14] 王庆雷, 孙世君, 姜宏佳, 等. 光学遥感器光机结构热变形的高精度测量[J]. 光学精密工程, 2022, 30(8): 948-959.
- WANG Q L, SUN S J, JIANG H J, *et al.* High-precision thermal deformation measurement of optical remote sensor optical-mechanical structure [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(8): 948-959. (in Chinese)
- [15] 杨利伟, 李志来, 辛宏伟, 等. 小型红外相机结构设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3025-3031.
- YANG L W, LI Z L, XIN H W, *et al.* Design and analysis for structure of small infrared camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3025-3031. (in Chinese)

作者简介:



黄姜卿(1989—),男,江西都昌人,博士研究生,副研究员,2012年于同济大学获得硕士学位,主要从事红外系统光机一体化设计方面的研究。E-mail: huangjiangqing@mail. sitp. ac. cn