

空间红外大口径折射式低温镜头设计与验证

行麦玲, 刘义良, 裴景洋, 胡 斌, 杨天远

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 针对目标探测类空间红外相机大范围成像、高灵敏度探测、高精度定位等应用需求, 文中提出采用像方远心光路和低温光学技术结合的解决方案, 设计了物方视场角 $8^\circ \times 8^\circ$ 、入瞳口径 265 mm、工作温度 200 K 的像方远心折射式光学系统。镜头最大口径 280 mm, 采用多级分散的弹性支撑设计, 解决大口径低温透镜装框、透镜组件支撑和镜头整体安装各环节的热应力卸载问题。在保证高刚度和低漏热的情况下, 使低温下透镜的热应力对镜头能量集中度的影响降低到可接受范围内。镜头完成装调及室温下像质确认后, 进行了力学振动试验, 并将其制冷到 200 K 水平测试像质, 测试结果表明, 镜头能量集中度达到轴上 75%, 边缘视场 72%。

关键词: 低温光学; 大口径折射式镜头; 弹性支撑; 像方远心

中图分类号: V447⁺.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0414002

A large aperture cryogenic lenses designed and verified for space-based infrared sensor

Xing Mailing, Liu Yiliang, Pei Jingyang, Hu Bin, Yang Tianyuan

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Telecentric and cryogenic optical system is a good solution to space-based IR sensor with wide field, sensitivity and determination of accurate orientation. A refractive telecentric optical system was designed with squared field of view in 8 degrees, entrance pupil of 265 millimeters and operating at 200 K. The aperture of the lens was 280 millimeters. By multilevel spring holders, the opto-mechanism got a available tradeoff between enough stiffness at room temperature and stress-free at 200 K, accordingly prevents thermal stress on lens and heat leakage from room temperature supports to cryogenic lens. After lenses alignment, vibration test and image test at operating temperature were performed. The ensquared energy reached 75% on axis and 72% off-axis respectively.

Key words: cryogenic optics; large aperture refractive lenses; spring holder; telecentric

收稿日期: 2019-12-13; 修订日期: 2020-01-20

作者简介: 行麦玲 (1978-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事星载红外遥感器技术方面的研究。Email: 6920890@qq.com

0 引言

随着天基战略武器技术的飞速发展,高威胁武器目标呈现出作战范围大、辐射微弱、机动性强、飞行速度快等特点,对空间红外目标探测相机探测范围、探测灵敏度和定位精度的要求越来越高。相机红外镜头是实现这些核心性能的关键组件,要求具备大视场、大口径、小畸变以及均匀的像面照度等性能。为了抑制红外镜头的光机辐射,光学系统通常采用出瞳与探测器冷光阑匹配的形式。这种系统形式的缺点是在大视场大口径情况下成像畸变大,像面照度均匀性差,影响相机探测灵敏度和定位精度。

采用像方远心光路可解决畸变大和照度不均匀问题,但是光机辐射却得不到抑制,大大限制了红外相机的极限灵敏度。因此,高灵敏度红外探测仪器通常需要采用低温光学系统^[1-4]。而大口径低温光学系统的结构实现涉及热应力卸载、漏热抑制等约束,是需要攻克的难点之一,对折射式系统来说尤为突出。

目前采用较大口径低温红外折射式镜头的空间相机有 Euclid 卫星和 Landsat8 卫星载荷^[5-7],而其透镜口径均未超过 180 mm。

针对天基红外高灵敏度、高精度目标探测应用需求,文中提出采用像方远心光路和低温光学技术结合的解决方案,设计了紧凑型的大口径、大视场、像方远心折射式低温红外光学系统。针对大口径折射式低温镜头结构实现难点,提出一种多级分散的弹性支撑设计方法,进行了仿真分析和试验验证。

1 镜头设计

1.1 低温光学系统设计

光学系统工作波段为 3~5 μm,物方视场角 8°×8°,入瞳口径 265 mm,焦距 530 mm,工作温度 200 K。

综合考虑成像性能指标需求,以及镜头低温制冷对结构紧凑型的要求,设计采用像方远心折射式光学系统,光路图如图 1 所示。

光学系统结构参数如表 1 所示,系统由六片透镜组成,全部为球面面型,材料选用锗和硅。

光学系统性能设计结果见表 2 和图 2。作为点目标探测系统,成像质量用像元能量集中度衡量^[8-9]。

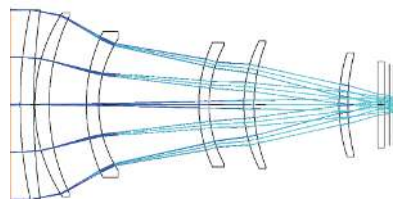


图 1 镜头光路图

Fig.1 Optical system layout

表 1 光学系统结构参数

Tab.1 Structure parameters of the optical system

Surf. No.	Radius/mm	Space/mm	Material
1(Stop)	717.1	21.7	
2	1118.5	1.7	Si
3	268.5	23.0	
4	329.5	59.7	Si
5	269.6	20.0	
6	195.1	160.9	Ge
7	237.6	16.5	
8	200.9	55.8	Ge
9	225.3	16.5	
10	270.8	136.6	Si
11	279.2	13.9	
12	329.3	47.6	Ge

表 2 光学系统性能设计结果

Tab.2 Design result of the optical system

Parameter	Value
Incident angle of chief ray/(°)	0.5
Ensquared energy	0.85
Relative illumination	2%
Distortion	-0.08%

用蒙特卡洛法分析光学系统能量集中度可知,200 K 时,在像元尺寸 30 μm 情况下,各视场能量集中度达到 0.85 以上,如图 2(a) 曲线所示。该光学系统在常温像质也良好,只需调节焦面位置即可。

除上述光学特性优异之外,该系统在低温镜头工程实现方面具有明显优势:

(1) 光学元件全部为球面,相比非球面,球面透镜的加工与装调公差敏感度更低,低温结构更容易成功实现;

(2) 相比反射式系统,该设计结构紧凑,在工程实

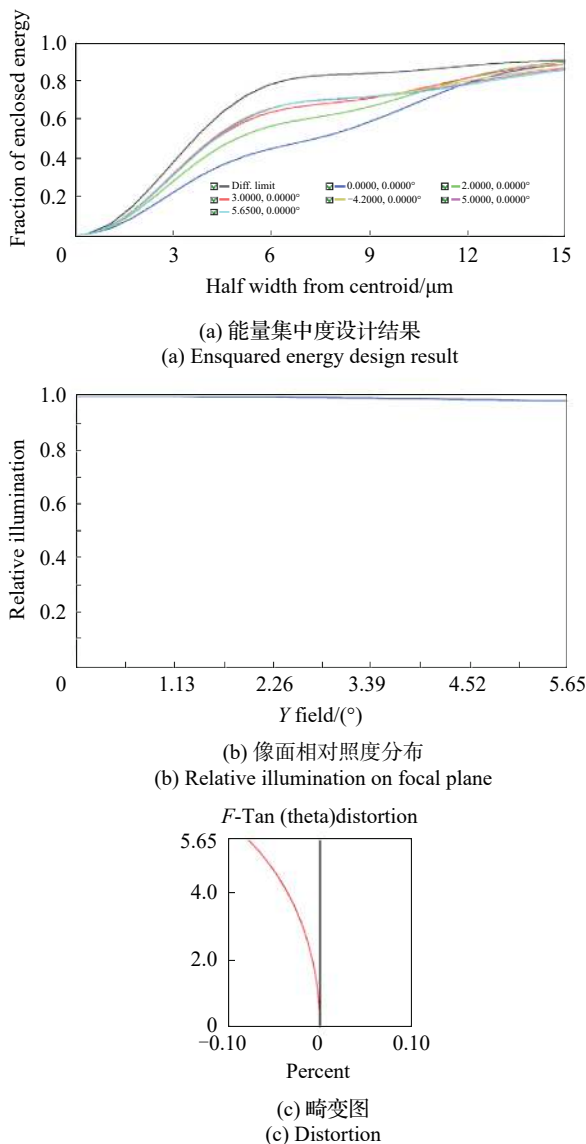


图 2 光学系统性能设计结果图示

Fig.2 Diagrams of optical system design results

现中,一方面使制冷量需求减小,非常有利于空间相机制冷系统的实现;另一方面在用于视轴指向类的载荷需求时,利于实现视轴快速指向。

1.2 低温镜头结构设计

该镜头口径设计结果为 280 mm。低温镜头结构设计的难点在于常温支撑刚度和低温下热应力卸载的折中^[10]。作为星载红外相机的重要部组件,镜头结构会经历卫星发射过程中的振动与冲击,因此结构首先应具有一定的刚度以适应相应的力学条件,这一需求与结构热应力卸载需求相矛盾,加大了低温折射式镜头的结构实现难度,而对于口径 200 mm 以上的透

镜来说尤为突出。

为了解决大口径低温透镜热应力卸载问题,采用多级分散弹性支撑设计,将外部常温边界到内部低温边界的整个应力卸载链路分割为若干个环节,以降低每个环节的卸载实现难度,同时加长了热传递路径,从而增加了低温端到高温端的热阻,可以大大减小漏热,降低镜头制冷量需求。

透镜元件的弹性支撑方式为镜框内径环面上的卸载槽设计。通过卸载槽在低温下的微量形变,降低镜框的局部刚度,热应力得以卸载。

整个镜头的弹性支撑方式为轻量化筒状支撑框的薄片型连接耳设计,通过连接耳在低温下的微量形变,降低镜头支撑框径向刚度,对透镜间接产生的热应力得以卸载。

镜框卸载槽设计形式见图 3。



图 3 镜片装框的应力卸载设计模型图

Fig.3 Lens holder with stress-free design

镜头支撑框连接耳设计如图 4 所示。

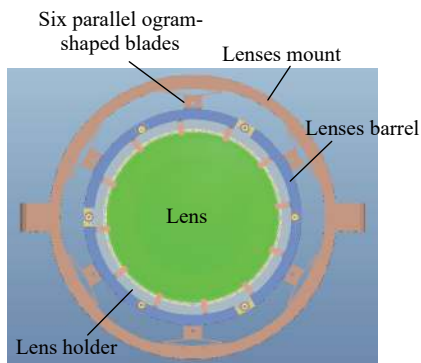


图 4 镜头支撑框与镜筒连接的应力卸载设计模型图

Fig.4 Lenses mount connected to lenses barrel by stress-free design

对镜头结构设计结果做力学分析可知,整个低温镜头模态为: X 向频率为 66 Hz, Y 向频率为 53 Hz, Z 向频率为 78 Hz, 振形如图 5 所示。

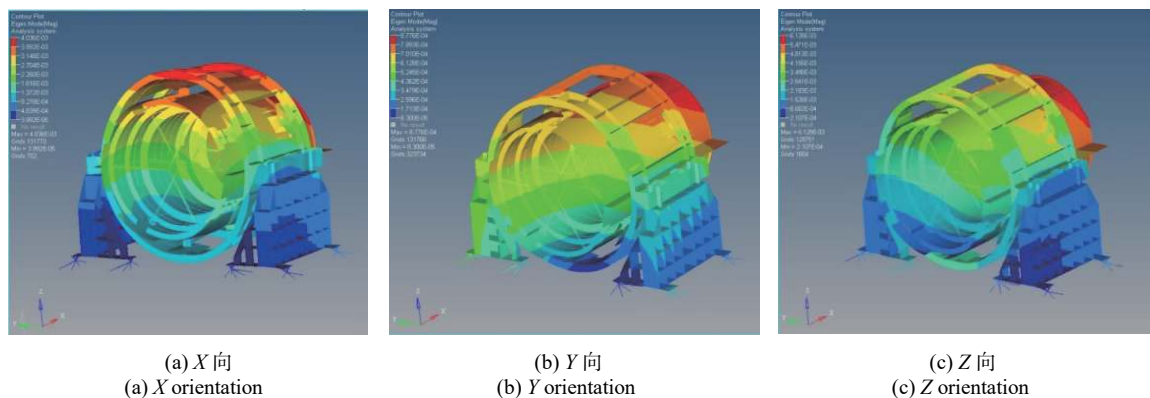


图 5 镜头模态分析结果

Fig.5 Mode analysis result of lenses assembly

结构设计完成后,得到各镜片面形参数,再代入光学设计软件分析得到,各视场能量集中度均值达到 79%。

2 试验验证

镜头装调完成后,先后进行了力学试验和低温试验验证,最终镜头在 200 K 时能量集中度轴上视场达到 75%,边缘视场达到 72%,该结果包含了透镜材料、光学加工、装调和热应力等全部环节的影响因素。

2.1 力学试验验证

力学试验进行了正弦和随机振动,试验顺序为 Z(垂直光轴且沿竖直方向)/Y(垂直光轴且沿水平方向)/X(沿光轴方向),如图 6 所示。

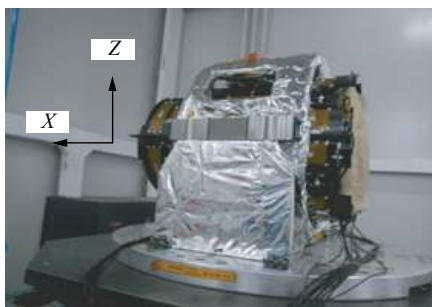


图 6 镜头力学振动试验现场照片

Fig.6 Lenses on vibration test

各方向振动量级如下:

(1) 扫频: 输入 0.5 g; 5~2 000 Hz; 2 oct/min;

(2) X/Y 轴正弦振动: 输入最大 4.2 g; 5~100 Hz;

2 oct/min;

(3) Z 轴随机振动: 输入最大 5.5 g; 5~100 Hz;

2 oct/min;

(4) X/Y 轴随机振动: 输入总均方根加速度 3 grms。

振动试验扫频结果为: X 向频率为 64 Hz, Y 向频率为 50 Hz, Z 向频率为 74 Hz,与设计仿真结果的一致性较好。

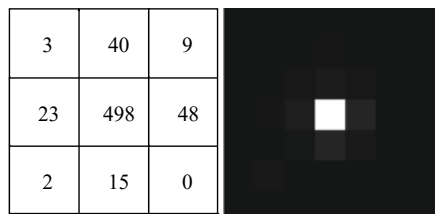
振动后在实验室条件下采用中波红外面阵成像仪对低温镜头的能量集中度进行测试。中波红外面阵成像仪的像元阵列大小为 320×256,像元间距 30 μm。测试时,由黑体、针孔相位靶标和平行光管为镜头提供准直光束。面阵成像仪采集镜头最佳像面处的针孔靶标图像。针孔尺寸和光管焦距形成的角度对应相机瞬时视场的六分之一,使针孔尺寸对能量集中度的影响可忽略。在多个针孔像斑中,选取中心像元值最大的像斑做计算,此时对应着像斑在探测器像元上相位分布最好的情形。镜头针孔像斑在图像上的响应值分布见图 7。

在图像上提取针孔像斑所占的像元值,并按照公式(1)计算镜头像元能量集中度^[9]:

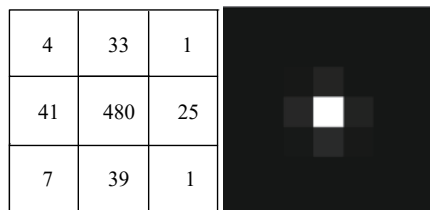
$$\eta_{EE} = \frac{DN(i_c, j_c)}{\sum_{i=1, j=1}^{i=3, j=3} DN(i, j)} \quad (1)$$

式中: η_{EE} 为像元能量集中度; (i, j) 为像元行列位置; (i_c, j_c) 为像斑中心像元的行列位置; $DN(i, j)$ 为像斑覆盖区域内第 i 行、第 j 列的像元值。

按照上述方法测试并分析计算得到,力学振动后,镜头轴上视场能量集中度 78%,边缘视场能量集中度 76%。



(a) 轴上视场
(a) On-axis



(b) 边缘视场
(b) Off-axis

图 7 镜头力学振动试验后针孔像斑像元值与灰度图

Fig.7 Digital number and gray show of the pinhole image after vibration test

2.2 低温试验

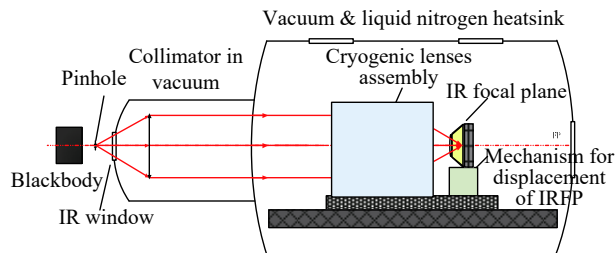
力学试验后,开展低温试验完成了镜头 200 K 时的能量集中度测试,低温试验现场及能量集中度测试光路布局见图 8。测试系统由黑体、靶标、平行光管、红外窗口、真空罐、中波红外面阵成像仪、成像仪位置调节机构等组成。试验时,启动真空罐液氮热沉,并采取镜头主动控温措施。黑体、靶标和真空平行光管构成无限远模拟点源。靶标和黑体位于真空罐外,黑体辐射通过罐壁上的红外窗口入射到位于罐内光管抛物面反射镜上,为被测镜头提供准直光束。成像仪放置在调节机构上,可在真空低温环境下实现三维平移,调节焦面位置。

根据此试验需求进行了专项热设计与热实施,试验过程中,透镜 1 与透镜 6 的温度作为产品控温状态的主要检测指标,各自有两个测温点,分布在透镜水平方向两侧,以监测周向温度均匀性^[11]。

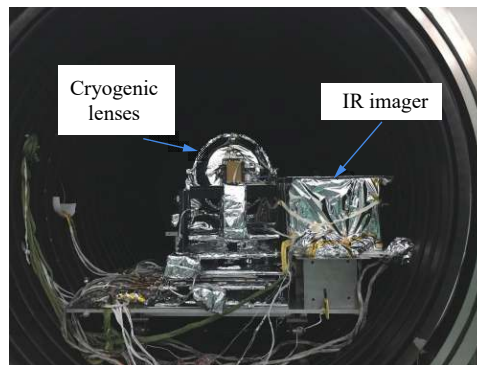
整个镜头由常温降至 200 K 大约 30 h。镜头到温后透镜温度记录见表 3。透镜 1 与透镜 6 轴向温差约 4 K。透镜 1 的周向温度梯度小于 0.1 K,透镜 6 的周向温度梯度小于 0.2 K。

真空低温下该镜头的针孔像斑灰度分布见图 9。

经计算,轴上能量集中度 75%,边缘视场能量集中度 72%。相比力学试验后常温测试结果,轴上能



(a) 镜头能量集中度测试布局图
(a) Layout of ensquared energy measurement



(b) 低温试验现场
(b) Cryogenic test

(IR imager: IR camera and thermal control equipments)

图 8 镜头 200 K 能量集中度测试与试验

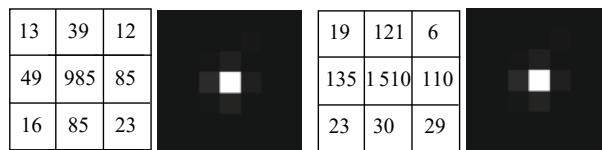
Fig.8 Ensquared energy test of the lenses at 200 K

表 3 镜头温度记录表

Tab.3 Test result of lens temperature

	Temperature/K
+Y side of lens 1	199.86
-Y side of lens 1	199.78
+Y side of lens 6	195.31
-Y side of lens 6	195.22

量集中度降低了 3%,边缘视场能量集中度降低了 4%。该变化量较小,在可接受范围内,说明结构热应力卸载是成功的。



(a) 轴上视场
(a) On-axis

(b) 边缘视场
(b) Off-axis

图 9 200 K 镜头针孔像斑像元值与灰度图

Fig.9 Digital number and gray show of the pinhole image at 200 K

3 结 论

文中设计了大口径、大视场、像方远心折射式低温镜头光学系统,像质良好、畸变小、像面照度均匀,能够保证相机高灵敏度、高精度探测。设计了多级分散的弹性支撑结构,并通过试验验证:镜头能够经受住卫星发射振动力学条件。并且在 200 K 时,镜头像质良好。试验表明,文中提出的多级分散的弹性支撑方式有效解决了口径达 280 mm、工作温度 200 K 的低温镜头结构热应力卸载难题。该设计方法对实现大口径折射式低温镜头具有重要参考意义,在天基红外目标高精度探测遥感器中具有重要应用价值。

参考文献:

- [1] William D Rogatto, Joseph S Accetta, David L Shumaker. The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook VOLUME 3[M]. Michigan: Infrared Information Analysis Center Environmental Research Insititute of Michigan, Washington: SPIE Optical Engineering Press, 1993: 220-226.
- [2] Huang Zhiguo, Wang Jianli, Yin Limei. Development of cold optical infrared imaging terminal with multiband [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0904001. (in Chinese)
黄智国,王建立,殷丽梅,等.多波段冷光学红外成像终端研制[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0904001.
- [3] Ma Ning, Liu Yi, Li Jiangyong, et al. Review on key technologies of infrared cryogenic optics [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1195-1200. (in Chinese)
马宁,刘奕,李江勇,等.红外低温光学关键技术研究综述[J]. *激光与红外*, 2017, 47(10): 1195-1200.
- [4] Yin Limei, Liu Yingqi, Li Hongwen. Cryogenic optics technology applied for high accuracy infrared detecting [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(9): 535-540. (in Chinese)
殷丽梅,刘莹奇,李洪文.实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. *红外技术*, 2013, 35(9): 535-540.
- [5] Mottaghionab A, Thielea H, Gubbini E, et al. Gluing interface qualification test results and gluing process development of the EUCLID near-infrared spectro-photometer optical assembly[C]//Proc of SPIE, 2016, 9912: 991260-1-991260-12.
- [6] Gal C, Reutlinger A, Boesz A, et al. Test results of high precision large cryogenic lens holders[C]//Proc of SPIE, 2012, 8450: 84500P1-84500P13.
- [7] Dennis Reuter¹, James Irons¹, Allen Lunsford, et al. The Operational Land Imager (OLI) and the Thermal Infrared Sensor (TIRS) on the Landsat Data Continuity Mission (LDCM)[C]//Proc of SPIE, 2011, 8048: 804812-1-804812-7.
- [8] Jacob Egana, Kevin Rigg. Focus on the Positive: Lessons Learned from Focus Determination of Infrared Space Optics[C]//Proc of SPIE, 2016, 9953: 995305-1~995305-9.
- [9] Yang Tianyuan, Zhou Feng, Xing Mailing. A calculator method for ensquared esnergy of point source detecting sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2017, 38(2): 41-47. (in Chinese)
杨天远,周峰,行麦玲.一种点目标探测系统能量集中度计算方法[J]. *航天返回与遥感*, 2017, 38(2): 41-47.
- [10] Gabby Kroesa, Jan Kragta, Ramon Navarro, et al. Opto-mechanical design for transmission optics in cryogenic IR instrumentation[C]//Proc of SPIE, 2008, 7018: 70182D-1-70182D-12.
- [11] Wang Zhaoli, Liang Jingtao, Zhao Miguang, et al. Thermal design for lens mount of a cryogenic refractive optics [J]. *Cryogenics*, 2018(3): 30-34. (in Chinese)
王兆利,梁惊涛,赵密广,等.一种透射式低温光学系统的光机结构热设计[J]. *低温工程*, 2018(3): 30-34.