

文章编号: 1672-8785(2022)07-0021-08

## 空间冷光学长波红外相机的设计与验证

李明旭 王书新 刘 强 苗健宇 王忠善 何 欣

(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:** 为满足红外成像产品在复杂多变环境下的适应性并实现产品的使用功能, 对空间冷光学长波红外相机设计进行了研究。首先进行了相机的结构设计; 然后运用 Partam/Nastran 有限元软件对相机进行了分析, 探究了温降和重力对各透镜面形的影响, 计算了相机的前三阶模态, 并对相机进行了波像差测试; 最后在真空低温环境下完成了相机的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 测试。试验结果表明, 相机中心视场面形的均方根 (Root Mean Square, RMS) 值优于  $1/50\lambda$ , MTF 计算值为 0.18719, 满足低温红外相机成像的精度要求。

**关键词:** 低温; 长波红外相机; 波像差; 调制传递函数测试

中图分类号: V19 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.07.004

## Design and Verification of the Space-cold Optical Long-wave Infrared Camera

LI Ming-xu, WANG Shu-xin, LIU Qiang, MIAO Jian-yu, WANG Zhong-shan, HE Xin

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

**Abstract:** In order to meet the adaptability of infrared imaging products in complex and variable environments and realize the function of the products, the design of the space-cold optical long-wave infrared camera is studied in this paper. Firstly, the structural design of the long-wave infrared camera is performed. Then, Partam/Nastran finite element software is used to analyze the camera. The influence of temperature drop and gravity on the surface shape of all the lens are studied, and the first three order modes of the camera are calculated. Then, the wave aberrations of the camera are tested. Finally, the modulation transfer function test of the camera in a vacuum environment is completed. The experimental results indicate that the root-mean-square value of the camera is better than  $1/50\lambda$ , and the calculated value of MTF is 0.18719, which can meet the accuracy requirements of the low-temperature infrared camera.

**Key words:** low temperature; long-wave infrared camera; wave aberration; modulation transfer function test

---

收稿日期: 2022-03-29

作者简介: 李明旭(1996-), 男, 吉林公主岭人, 硕士, 研究实习员, 主要从事空间光学仪器光机结构设计方面的研究。E-mail: limingxu@ciomp.ac.cn

## 0 引言

在外层宇宙空间中,低温是航天器面临的特殊环境之一,低温技术也是航天技术的重要组成部分。随着对空间探索的不断深入,红外遥感技术的发展也逐渐成熟<sup>[1-3]</sup>。长波红外相机对环境适应性好,具有很好的穿透性,可以探测到可见光系统难以探测到的目标,在卫星对地观测应用中日趋广泛<sup>[4-7]</sup>。

随着温度变化区间的增大,长波红外相机光机结构系统的设计难度会急剧变化。由于透镜元件与机械支撑结构的热膨胀系数存在差异,光学系统会产生热应力和热变形。在温度和机械结构的作用下,长波红外相机会产生面形形变以及结构件的形变。与室温环境相比,低温环境与重力影响下的相机焦距会发生偏移,像面位置会发生变化,进而影响系统的成像质量<sup>[8-9]</sup>。因此需要合理地设计机械结构,以保证长波红外相机的成像质量<sup>[10-12]</sup>。相机由光学系统和机械结构组成,机械结构又是光学系统的支柱,因此机械结构的设计精度决定成像质量的高低。

## 1 长波红外相机的光机结构设计

长波红外相机的设计指标如下:相机中心视场面形 RMS 值优于  $1/50\lambda$ , 243 K 真空环境下的 MTF 值大于 0.16。

### 1.1 低温红外光学系统设计

如图 1 所示,低温红外光学系统由五片透镜组成:第一片和第三片透镜材料为 ZnSe,第二片透镜材料为 ZnS,后两片透镜材料为 Ge。ZnSe 的机械强度好,对  $10.6\ \mu\text{m}$  波长光的吸收很小且吸收率低,同时具有很高的热冲击承受力,因此是长波红外相机的绝佳光学材料。ZnS 透镜的透光区域较宽,便于光学系统装校;ZnSe 透镜与 ZnS 透镜交替使用,可使长波红外透过率更高,成像效果更好。Ge 透镜折射率高,在长波区域使用;由于系统的像差较小,更容易将透镜设计成接近理想透镜。在长波红外波段,ZnSe 材料色散系数低,而

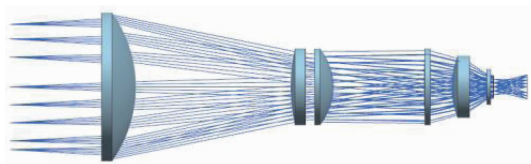


图 1 低温红外光学系统

Ge 材料具有相对较高的色散系数,因此透镜的组合可以有效地校正色差。

### 1.2 长波红外相机结构设计

在长波红外相机中,镜筒对光学元件起支撑保护作用,是光学元件的最大承载体,镜筒选用 TC4 材料。该材料优异的刚度性能可以起到很好的支撑及抗变形作用。图 2 所示为低温光机结构系统设计。其中,镜筒采用阶梯轴方式,可以更好地保证各透镜组的同轴性<sup>[13]</sup>。镜筒周围与镜框接触处预留点胶孔,镜框之间配有隔圈,便于在装调过程中调节透镜间隔。

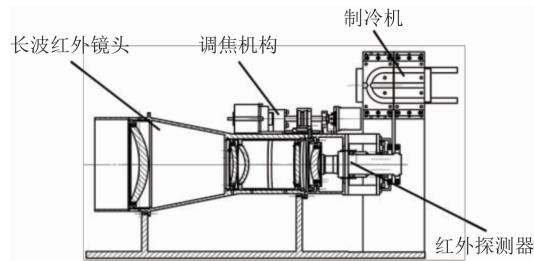


图 2 长波红外相机结构

相机将用于低温冷光学试验,但加工装调均在常温下进行。在温度的变化下,相机的像距也会发生变化,因此需要设计调焦系统。镜片沿着光轴方向的移动可以有效调节光学系统的透射效果,起到变换视场和调节焦面位置的作用<sup>[14-17]</sup>。图 3 为相机调焦系统的示意图。将相机的最后一块透镜设计为调焦镜。调焦系统采用步进电机作为驱动装置。滚轴丝杠将步进电机的转动变换为沿光轴的直线运动,带动调焦镜片作直线运动,从而调节焦面位置在低温环境下的变化。采用编码器反馈调焦镜的位置。直线导轨选择一对平行的双直线导轨,提高了调焦机构运动的稳定性。整个调焦系统尺寸在  $60\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 210\text{ mm}$  的包络中,极大地提高了空间利用率。

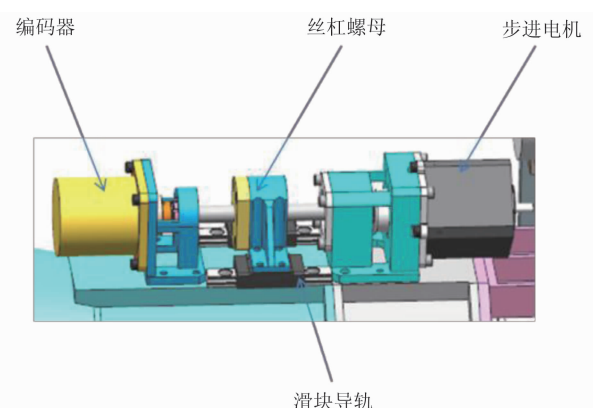


图 3 相机调焦系统的示意图

此外需要考虑透镜的约束问题。红外相机的光学系统精度要求较高, 光学镜片为球形表面。为提高光学元件轴向和径向的安装精度, 透镜安装采用三点式。镜片的左侧预留压圈的安装位置, 并选用螺纹压圈固定。镜框采用柔性支撑的方式, 可以有效适应温度变化对各材料形变的影响, 从而防止低温环境下发生由挤压力过大导致的镜片破坏。

在长波红外相机装配过程中, 先将透镜安装入镜框, 并用压圈压紧, 随后将装好的透镜组件依次装入镜筒中。调整透镜中心, 使其与镜框中心同轴。将透镜安装到镜框内并用压圈固定, 检验透镜的中心误差与面形精度是否满足要求。图 4 所示为装配好的长波透镜组件。



图 4 长波红外镜组

装配透镜组件时, 需要对每个组件进行精密研磨、调整, 然后按顺序将它们依次装入镜筒中, 并通过修调隔圈来调节透镜间隔。由于红外透镜对可见光的阻断性, 普通的定心仪无

法满足红外相机装配过程中的定心需求, 因此可能会存在一定的偏心误差。

### 1.3 有限元分析

为探究温度和重力对各透镜面形的影响, 建立了长波红外相机有限元模型。该模型包含 201060 个节点、119134 个单元。

#### 1.3.1 静力学分析

为考查透镜组件光机结构的力热稳定性, 对透镜组件在力学环境和热环境下的位移、转角及反射镜面形进行了建模分析。在静力学分析时, 约束平台底部连接孔处节点。静力学分析工况如下: (1) 50 K 均匀温降作用下反射镜的面形精度及位置变化; (2) 重力作用下透镜的面形精度及位置变化。

由表 1 和表 2 可知, 静力学工况引起的透镜面形及位置变化均在公差允许范围内。

#### 1.3.2 模态分析

为考核相机结构在发射及运载工况下是否会发生破坏或变形, 对相机组件进行了模态分析。表 3 列出了前三阶模态的分析结果。可以看出, 长波红外相机的固有频率满足要求。

## 2 波像差测试

对于光学系统几何像质的评价, 可选择的方式有很多。本文研究的长波红外相机的成像质量要求较高, 所以需要进一步研究主光线经过红外系统后的面形变化。RMS 值与峰谷 (Peak Value, PV) 值均可反映出面形的变化: PV 值反映的是面形变化的峰值, RMS 值反映的是面形变化的均值。本文通过对长波红外相机波像差的测试来检测面形的变化。

长波红外光的波长为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$ , 在可见光的波长范围之外。相关研究表明, 波长为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  的长波红外光具有很好的穿透性。本文选用的 Zygo 红外干涉仪发射出波长为  $10.6 \mu\text{m}$  的长波红外光。它们透过长波红外镜组, 经球面反射镜反射后形成长波红外镜组的波像差。图 6 所示为长波红外相机中心视场的波像差 (面形优于  $1/50\lambda$ )。

表 1 50 K 温降引起的各透镜面形和位置变化

| 透镜      | 表面      | 面形/nm |       | 刚体位移/ $\mu\text{m}$ |       |       | 转角/"  |       |       |
|---------|---------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |         | PV    | RMS   | $D_x$               | $D_y$ | $D_z$ | $R_x$ | $R_y$ | $R_z$ |
| 长波红外_L1 | Face-1  | 107.2 | 11.96 | 1                   | 0.2   | -21   | 0.05  | 0.4   | 0     |
|         | Face-2  | 89.8  | 10.7  | 1                   | 0.3   | -21   | 0.05  | 0.4   | 0     |
|         | 公差      | —     | 25.3  | 90                  | 90    | 100   | 25    | 25    | —     |
| 长波红外_L2 | Face-3  | 39.2  | 4.8   | 1.3                 | 0.3   | -69.8 | 0.06  | 0.5   | 0     |
|         | Face-4  | 48.9  | 6.1   | 1.3                 | 0.3   | -69.8 | 0.06  | 0.5   | 0     |
|         | 公差      | —     | 25.3  | 60                  | 60    | 100   | 15    | 15    | —     |
| 长波红外_L3 | Face-5  | 145.2 | 18.2  | 1.1                 | 0.4   | -80   | 0.14  | 0.2   |       |
|         | Face-6  | 113.5 | 13.5  | 1.1                 | 0.4   | -80   | 0.14  | 0.2   |       |
|         | 公差      | —     | 25.3  | 30                  | 30    | 20    | 8     | 8     | —     |
| 长波红外_L4 | Face-7  | 9.56  | 0.96  | 1.3                 | 0.3   | -121  | 0.1   | 0.39  | 0     |
|         | Face-8  | 10.6  | 1.2   | 1.3                 | 0.3   | -121  | 0.1   | 0.39  | 0     |
|         | 公差      | —     | 25.3  | 40                  | 40    | 50    | 8     | 8     | —     |
| 长波红外_L5 | Face-9  | 7.5   | 0.7   | 50                  | 13.6  | 166   | 4.5   | 103   | 6.0   |
|         | Face-10 | 15.3  | 1.4   | 50                  | 13.6  | 166   | 4.5   | 103   | 6.0   |
|         | 公差      | —     | 25.3  | 20                  | 20    | 20    | 6     | 6     | —     |

表 2 重力引起的各透镜面形和位置变化

| 透镜      | 表面     | 面形/nm |      | 刚体位移/ $\mu\text{m}$ |       |       | 转角/"  |       |       |
|---------|--------|-------|------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|         |        | PV    | RMS  | $D_x$               | $D_y$ | $D_z$ | $R_x$ | $R_y$ | $R_z$ |
| 长波红外_L1 | Face-1 | 32.9  | 6.1  | 4.6                 | -0.2  | 0     | 0     | 3.2   | 0.6   |
|         | Face2  | 31.5  | 5.7  | 4.6                 | -0.2  | 0     | 0     | 3.2   | 0.6   |
|         | 公差     | —     | 25.3 | 90                  | 90    | 100   | 25    | 25    | —     |
| 长波红外_L2 | Face3  | 2.88  | 0.47 | 2.8                 | 0     | 0.3   | 0     | 2.6   | 0.6   |
|         | Face4  | 2.68  | 0.45 | 2.8                 | 0     | 0.3   | 0     | 2.6   | 0.6   |
|         | 公差     | —     | 25.3 | 60                  | 60    | 100   | 15    | 15    | —     |
| 长波红外_L3 | Face5  | 11.4  | 1.9  | 3.2                 | 0     | 0.6   | 0     | 2.12  | 0.6   |
|         | Face6  | 9.8   | 1.65 | 3.2                 | 0     | 0.6   | 0     | 2.12  | 0.6   |
|         | 公差     | —     | 25.3 | 30                  | 30    | 20    | 8     | 8     | —     |
| 长波红外_L4 | Face7  | 1.5   | 0.3  | 2.9                 | -0.1  | 0.4   | 0     | 2.48  | 0.6   |
|         | Face8  | 1.45  | 0.3  | 2.9                 | -0.1  | 0.4   | 0     | 2.48  | 0.6   |
|         | 公差     | —     | 25.3 | 40                  | 40    | 50    | 8     | 8     | —     |
| 长波红外_L5 | Face9  | 1.42  | 0.3  | -0.2                | 0     | -4.2  | 0     | 13.3  | -0.05 |
|         | Face10 | 1.3   | 0.3  | -0.2                | 0     | -4.2  | 0     | 13.3  | -0.05 |
|         | 公差     | —     | 25.3 | 20                  | 20    | 20    | 6     | 6     | —     |

表 3 相机前三阶模态分析结果

|    | 频率/Hz | 振型      | 图示     |
|----|-------|---------|--------|
| 一阶 | 432.2 | 绕 Y 轴摆动 | 图 5(a) |
| 二阶 | 448.4 | 绕 X 轴摆动 | 图 5(b) |
| 三阶 | 775.6 | 绕 Z 轴摆动 | 图 5(c) |

对相机的不同视场进行波像差测试。分别取 $\pm 0.5$ 视场、 $\pm 0.7$ 视场与边缘视场,得到了图 7 所示的波像差。可以看出,中心视场的

面形最优,边缘视场面形优于 $1/25\lambda$ 。

将相机整体旋转 $90^\circ$ ,测试不同视场的波像差。图 8 所示为中心视场的波像差(面形优于 $1/50\lambda$ )。

对长波红外相机的不同视场进行波像差测试。分别取 $\pm 0.5$ 视场、 $\pm 0.7$ 视场与边缘视场,得到了图 9 所示的波像差。可以看出, $0.7$ 视场的面形最优,其原因是在装配过程中



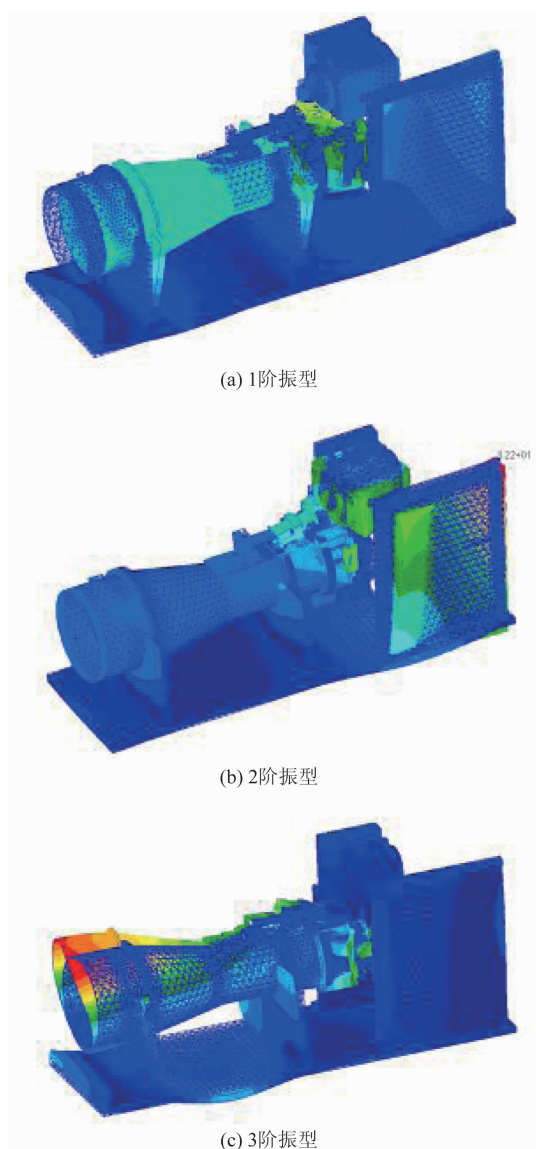


图 5 长波红外相机的前三阶模态振型图

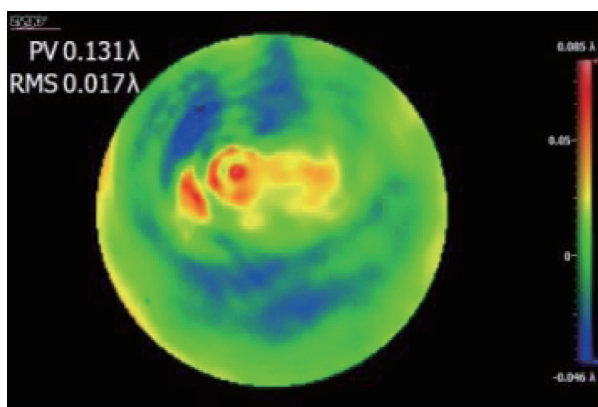


图 6 长波红外相机中心视场波像差

存在少量的偏心。但中心视场的面形仍优于  $1/50\lambda$ , 因此相机仍满足设计要求。

### 3 MTF 测试

为检测低温红外相机的成像品质, 需要对红外相机进行测试。本文采用 MTF 测试结果作为评定相机质量的判断依据。MTF 利用线性滤波理论, 将傅里叶变换应用到光学分析模型中, 反映了长波红外光通过相机后到达探测器的光强大小。通常认为, MTF 数值越高, 探测器接收到的光强越大, 光学系统的成像品质越好。

长波红外相机通过靶标所成的像为明暗相间的条纹, 其 MTF 计算方法为

$$MTF = \frac{\pi}{4} \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (1)$$

式中,  $V_1$  为亮条纹像素 (Digital Number, DN) 值,  $V_2$  为暗条纹 DN 值。

试验中, 在真空低温环境下将黑体、靶标、相机及探测器等均放置在真空罐中, 如图 10 所示。当真空度达到测试要求后, 通液氮来降低环境温度, 将其保持在 100 K; 对相机施加控温系统, 使其温度保持在 243 K。通过调节调焦机构来调整焦面位置, 找到并记录最佳焦面位置, 然后再计算 MTF 值。

图 11 为真空测试相机的示意图。在 100 K 的真空环境中, 电性组件与相机组件需要包覆多层, 以防温度过低对光学元件及电性元件造成影响。制冷机与辐冷板通过热管连接, 接触面涂以导热脂。在真空环境下, 制冷机产生的热量通过热管传递到辐冷板, 然后由辐冷板辐射到冷黑空间。

图 12 为低温下测试的 MTF 靶标成像图。在试验条件下对长波红外相机测量 5 次。根据试验结果中亮暗条纹的 DN 值, 得到了图 13 所示的计算结果。为减小测量的随机误差, 取 5 次测量结果的平均值。真空低温环境下测试系统的 MTF 值为 0.18719。

从图 13 中可以看出, 低温环境下相机的测量结果离散性较小, 标准差仅为 0.01%; MTF 计算结果优于设计指标, 满足相机的设计要求。

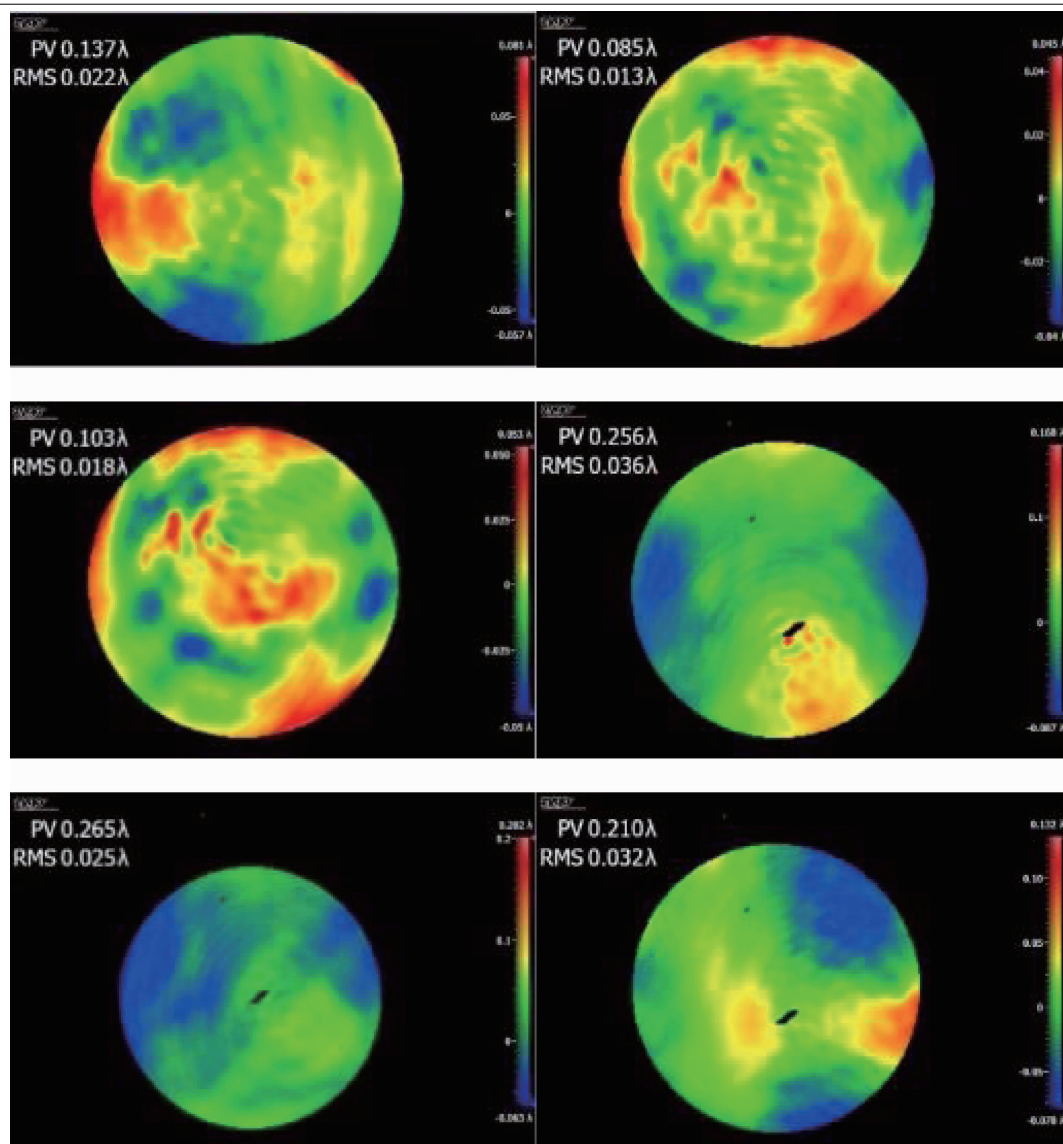


图 7 边缘视场波像差

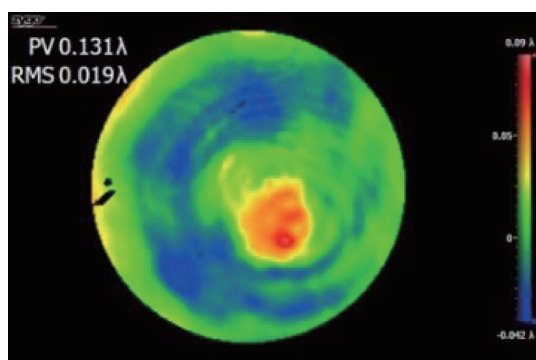


图 8 旋转 90°时中心视场的波像差

#### 4 结束语

长波红外相机采用钛合金镜筒，镜框采用柔性结构，可以有效适应低温引起变形的影

响。通过设计调焦机构，可以调节相对位置焦面在低温环境下的变化。对相机在重力及温降工况下的面形变化进行了有限元分析，并计算了模型的前三阶模态。各透镜在 50 K 温降条件下的安全裕度均满足要求，说明其材料选择及结构设计的合理性。利用几何像差的原理对相机进行了波像差测试。结果表明，两个方向上的相机中心视场均优于  $1/50\lambda$ 。然后对相机进行了低温环境下的 MTF 测试。MTF 计算结果为 0.18719，满足相机的设计要求。在未来的研究中，将对长焦距、高分辨率、智能化的红外相机进行更深层次的探索。

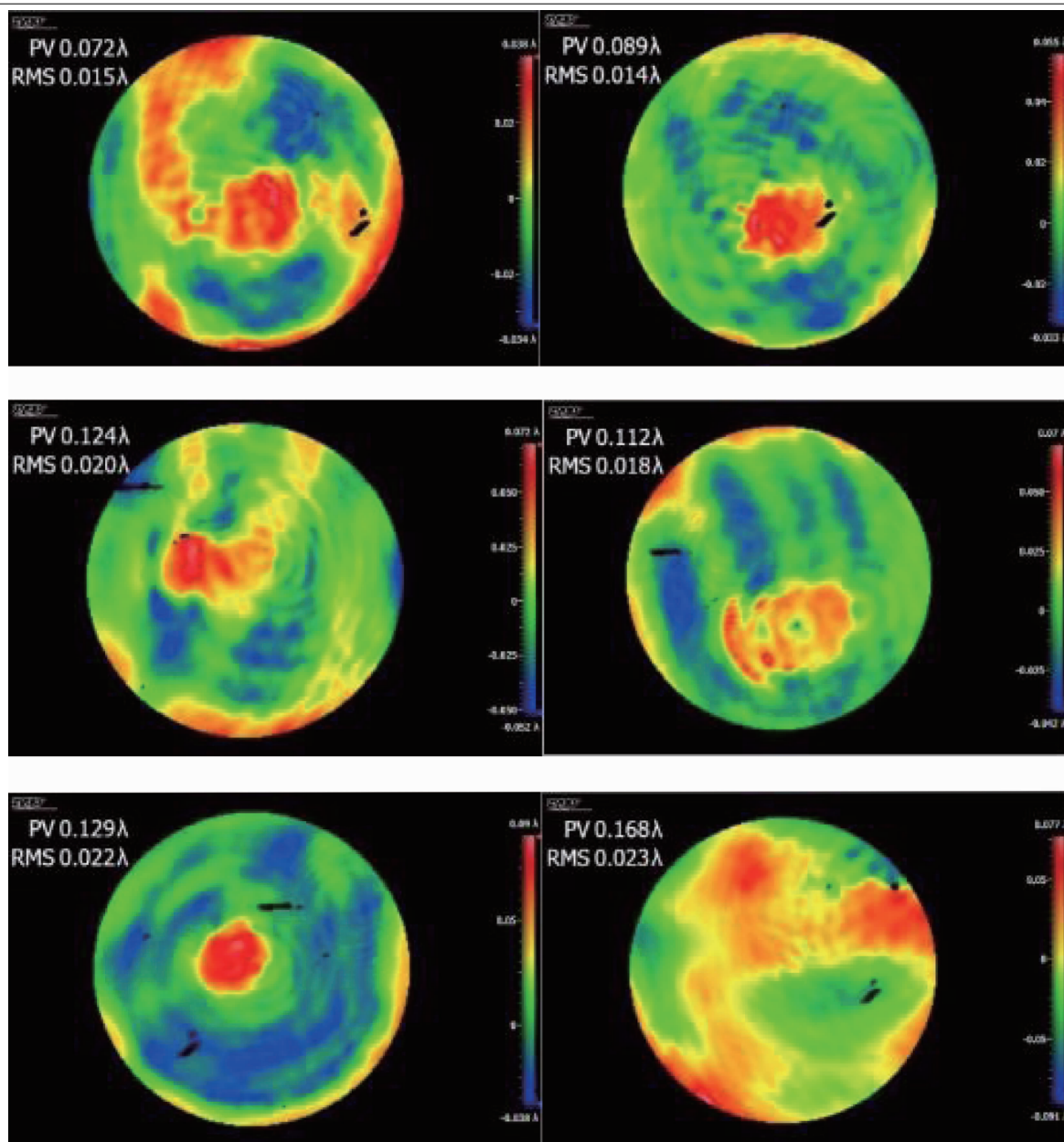


图 9 旋转 90°时边缘视场的波像差

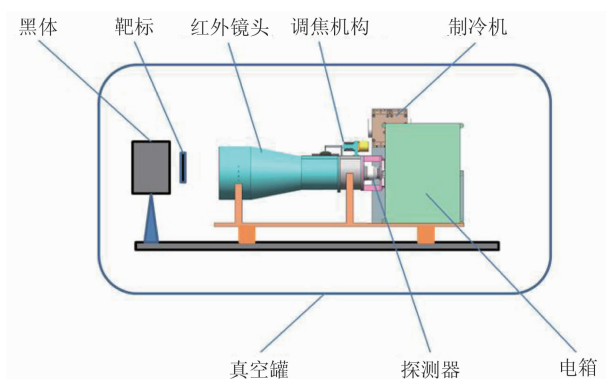


图 10 真空低温 MTF 测试

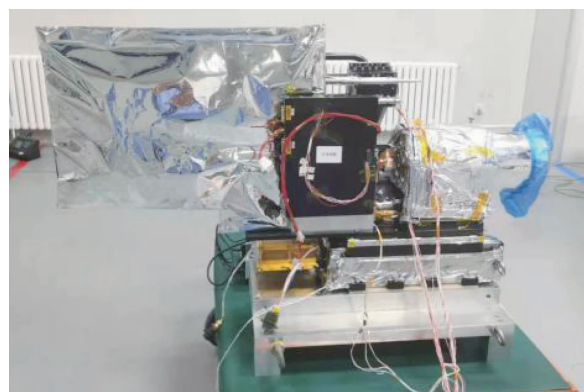


图 11 真空测试相机的示意图



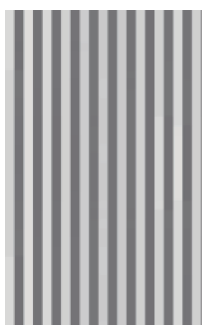


图 12 MTF 靶标成像图

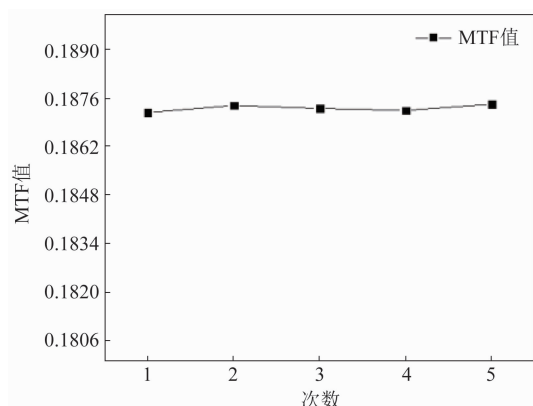


图 13 MTF 计算结果

### 参考文献

- [1] 沈满德. 高分辨率中红外温度自适应夜视成像系统 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1144-1146.
- [2] 白剑, 孙婷, 沈亦兵, 等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析 [J]. 光学学报, 1999, 19(7): 134-139.
- [3] Hudyma R M. Athermal MWIR Objectives [C]. SPIE, 1995, 2540: 229-235.
- [4] 王鑫, 张晖, 赵林, 等. 低温红外相机装调测试 [J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(12): 54-57.
- [5] 袁菁, 王安乐, 刘萌萌, 等. 低温光学显微成像技术的研究进展 [J]. 中国科技论文, 2015, 10(17): 1991-1996.
- [6] 张月, 周峰, 阮宁娟, 等. 空间红外天文望远镜低温制冷技术综述 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(5): 46-55.
- [7] 白瑜, 邢廷文, 李华, 等. 国外高变焦比中波红外相机的研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 795-802.
- [8] 左腾, 吴耀. 中波红外相机光机热集成设计分析研究 [J]. 光学与光电技术, 2016, 14(3): 67-72.
- [9] 陈驰, 董亭亭, 潘海俊. 光致热效应的光机热集成分析方法 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13(3): 64-70.
- [10] 刘婷毓, 张景旭, 杨飞, 等. 近红外相机系统的设计与装调 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 669-674.
- [11] 周超, 杨洪波, 吴小霞, 等. 地基大口径望远镜结构的性能分析 [J]. 光学精密工程, 2011, 19(1): 138-145.
- [12] 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计 [J]. 光学精密工程, 2010, 18(8): 1833-1841.
- [13] 苗健宇, 张立平, 吴清文, 等. 测绘相机光学镜筒设计、加工及装配 [J]. 光学精密工程, 2008, 16(9): 1648-1653.
- [14] 杜一民, 贾学志, 安源, 等. 高分辨率空间相机调焦机构设计与分析 [J]. 红外技术, 2019, 41(4): 305-310.
- [15] 杨会生, 李志来, 樊延超, 等. 空间相机均力输出式调焦机构 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 796-803.
- [16] 浦前帅, 翟岩, 文大化, 等. 星载红外探测器调焦机构设计与分析 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2015, 38(2): 25-28.
- [17] 曹启鹏, 叶钊, 董小静, 等. 基于图像评价的国外空间相机调焦方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 90-97.