

文章编号: 1672-8785(2024)10-0008-06

大规模红外焦平面耦合界面特性评估

马思宇¹ 别枢佑² 王 静¹ 石 洁¹ 郭成达¹

孟炎雄¹ 孙 焕¹ 练敏隆¹ 张一凡^{1*}

(1. 北京空间机电研究所, 北京 100094;

2. 上海卫星工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 针对大面阵、长线列等大规模红外焦平面的耦合界面低温冷变形及微振动位移量进行综合评估, 以确保焦平面探测器耦合后芯片低温变形量、低温应力以及像元位移量能满足应用需求。通过共轭显微系统对某型号处于 80 K 工作温度下的红外焦平面进行取点采样, 可获得多点的三维坐标系; 随即对坐标系进行平面拟合, 得到该焦平面的低温变形量及微振动位移量。此红外焦平面低温变形量的仿真计算值为 $18\ \mu\text{m}$, 实测结果为 $19\ \mu\text{m}$; 微振动位移量的推论值为 $0.7\ \mu\text{m}$, 实测结果为 $0.9\ \mu\text{m}$ 。两项实测值均满足指标要求。此型号红外相机在轨成像清晰、层次丰富, 表明该方法更加真实、有效地评估出耦合界面低温变形量及微振动位移量, 可为后续型号项目提供可靠、有效的保障。

关键词: 大规模红外探测器; 耦合特性; 低温平面度; 微振动

中图分类号: V414 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.10.002

Characteristics Evaluation of Coupling Interface of Large-Scale Infrared Focal Plane

MA Si-yu¹, BIE Shu-you², WANG Jing¹, SHI Jie¹, GUO Cheng-da¹, MENG Yan-xiong¹,

SUN Huan¹, LIAN Min-long¹, ZHANG Yi-fan^{1*}

(1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China)

Abstract: The low temperature deformation and micro-vibration displacement of the coupling interface of large-scale infrared focal plane (such as large array and long line array) are comprehensively evaluated to ensure that the chip deformation, stress and pixel displacement at low temperature can meet the application requirements after the coupling of focal plane detector. The point sampling of the infrared focal plane of a certain model at 80 K operating temperature is carried out by the conjugated microscopic system to obtain a multi-point three-dimensional coordinate system, and then the plane fitting of the coordinate system is carried out to obtain the low-temperature deformation and micro-vibration displacement of the focal plane. The low temperature deformation of the infrared focal plane is $18\ \mu\text{m}$ by simulation and $19\ \mu\text{m}$ by measurement. The deduced value of micro-vibration displacement is $0.7\ \mu\text{m}$, and the measured result is $0.9\ \mu\text{m}$. Both measured values

收稿日期: 2024-07-27

作者简介: 马思宇(1990-), 男, 北京人, 工程师, 主要从事空间遥感器制冷应用方面的研究。

*通讯作者: E-mail: npuzyf@163.com

meet the index requirements. The image of this model of infrared camera is clear in orbit and rich in layers, which indicates that the method is more realistic and effective to evaluate the low temperature deformation and micro-vibration displacement of the coupled interface, and can provide reliable and effective guarantee for the subsequent model projects.

Key words: large-scale infrared detector; coupling characteristic; low temperature flatness; micro-vibration

0 引言

随着红外遥感卫星空间分辨率指标的大幅提高, 大面阵、长行列成为红外焦平面重要的发展方向。此类大规模红外探测器需要制冷机提供 40~110 K 的工作温度, 以降低芯片噪声和提高探测器的灵敏度。因此, 制冷机与探测器耦合界面的低温变形量以及微振动位移量成为影响红外遥感器成像品质的关键因素^[1-2]。

无论是面阵型还是线列型探测器, 由于探测器与制冷机之间耦合的材料属性不同(主要是热膨胀系数不同), 其从常温 300 K 降低至工作温度(40~110 K)的过程中, 会产生较大的耦合应力。这种低温耦合应力的增加使得探测器成像时各像元间存在一定的高度差, 影响成像质量^[3-4], 严重时会造成探测器芯片失效。

此外, 常规的制冷机微振动测试是对制冷机本身进行测量评估^[5-6], 无法真实有效地测量出制冷机通过耦合链路传递到探测器像元上的微振动位移的偏移量。此位移的偏移量超过 1/10 像元时会导致探测器成像模糊、失真, 严重时会导致成像扭曲。因此, 有必要对红外焦平面在低温状态下的平面度以及制冷机传递到探测器像元上的位移量进行有效、量化的测量评估。

本文通过共轭显微测试系统(以下简称“测试系统”)对低温环境下的红外焦平面分别进行非接触式的平面度测试与微振动位移量测试, 然后结合仿真、推算值进行比对分析, 给出相应的评估结论。

1 测试原理

测试系统主要由光学系统、高精度导轨(X、Y、Z)、显微摄像系统、图像采集及处理系统、运动控制系统等构成, 如图 1 所示。

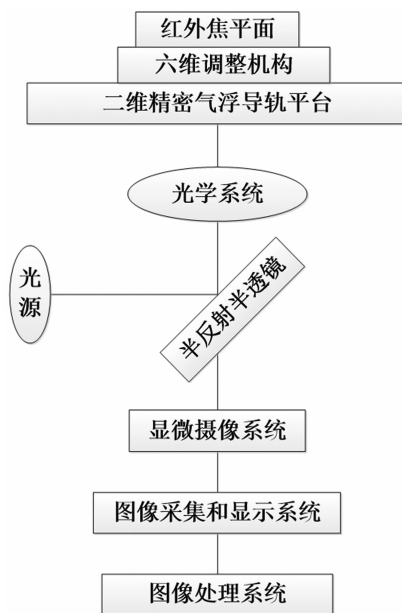


图 1 测试系统原理图

测试系统的光源先通过半反射半透镜、光学系统产生平行光, 并辐照至红外焦平面的探测器像元上。像元表面的反射光线再通过光学系统由显微摄像系统接收; 经过图像采集和显示系统的处理后可获得更加清晰的数字化像元图像; 最后通过图像处理系统获得焦平面上各像元的三维坐标值。焦平面像元坐标位置关系如图 2 所示。

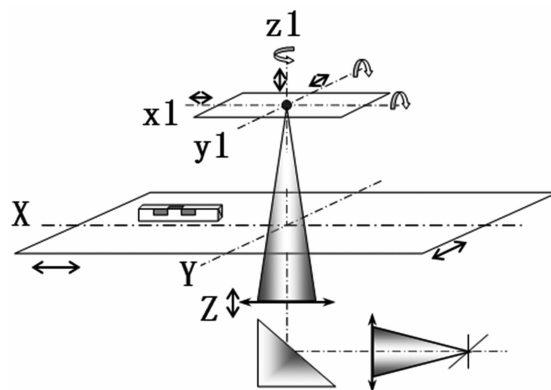


图 2 坐标位置关系示意图

表 1 列出了测试系统的测量行程及精度指标。

表 1 测量行程及精度

参数	X 向	Y 向	Z 向
测量行程/mm	1000	400	50
测量精度/ μm	0.1	0.1	0.2

2 低温平面度测试

文献[7]提供了大致的低温平面度测试方法, 本文在其基础上进行了优化。

2.1 测试方法

将某型号 8 模块拼接型探测器制冷机组件通过专用的测试工装固支在测试系统的机械接口上, 整体固支的状态如图 3 所示。为了保证测试的准确性, 本文选用的测试工装为探测器制冷机组件实际使用的支撑结构。

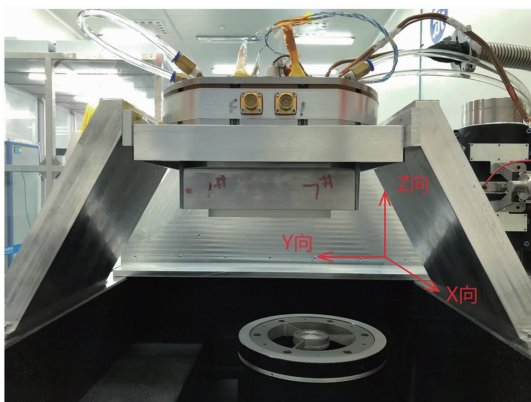


图 3 测试状态及坐标系

由于探测器组件是在常温、常压的状态下进行拼接和耦合, 与在轨成像时的低温、真空状态不同, 测试应分别进行常温常压测试、常温真空测试和低温真空测试。将三次的测试结果进行迭代处理, 随后对处理后的像元坐标系进行平面拟合, 修正测试误差, 最终得出相对准确的平面度测量值。具体步骤如下:

(1) 探测器制冷机组件通过测试工装整体螺接固定在测试平台上。对 8 个模块 16 个测点进行坐标系提取, 获得常温、常压状态下的测点坐标系。

(2) 将真空泵连接探测器杜瓦进行抽真空, 待真空度降至 10^{-4} Pa 以下时对测点进行坐标

系提取, 获得常温、真空状态下的测点坐标系。将两组数据迭代处理, 可得出地面真空状态下结构应力对焦平面各坐标系的影响值。此地面真空状态仅仅是为探测器组件制冷而建立的环境条件。该状态导致探测器杜瓦内外存在压力差, 对焦平面的面型具有一定影响, 故需要剔除该因素。

(3) 将制冷机开机进行制冷降温, 待探测器芯片温度降至工作温度(80 K)时, 对测点进行坐标系提取, 获得低温、地面真空状态下的测点坐标系。将该组坐标系与步骤(2)中地面真空影响因素进行迭代处理, 得出低温、在轨真空状态下的测点坐标系。

(4) 将 8 个模块 16 个测点沿光轴方向(图 3 中 Z 向)的测量结果减去中间模块测点的测量结果, 得到相对偏差量, 形成测点偏差量曲线。

(5) 将每个模块的两个测点结果取平均, 表征该模块中心沿光轴方向的位置, 再减去 D4 模块沿光轴方向的位置量, 然后采用直角坐标旋转方式, 消除测试时焦平面与测试系统光轴不垂直引入的整体歪斜影响, 得到各测点偏离焦平面整体的结果。

2.2 测试结果

(1) 常温、常压状态下各测点偏离焦平面整体的结果如图 4 所示。

(2) 常温、真空状态下各测点偏离焦平面整体的结果如图 5 所示。

(3) 80 K 状态下各测点偏离焦平面整体的结果如图 6 所示。

(4) 消除测试时焦平面与测试系统光轴不垂直引入的整体歪斜影响, 得到各测点在 80 K 环境下偏离焦平面整体的结果(见图 7)。

(5) 经数据处理得出 8 个模块在 80 K 环境下的共面度为 $19 \mu\text{m}$ 。各模块偏离焦平面整体的结果如图 8 所示。

2.3 评估结论

通过此测试方法对某型号 8 模块拼接型探测器焦平面进行了 80 K 的低温平面度测试。

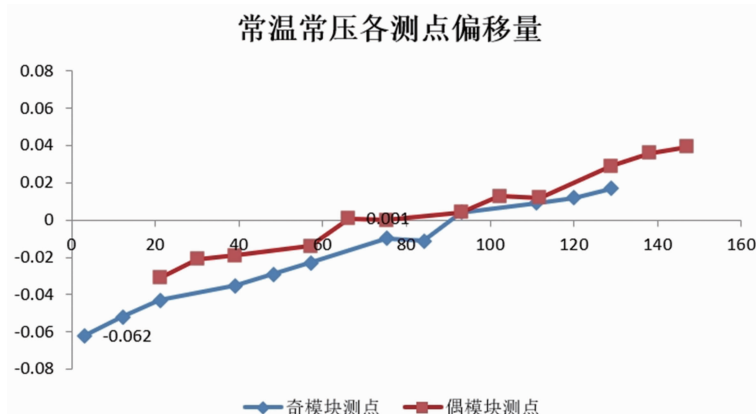


图 4 常温常压下测点的偏移量

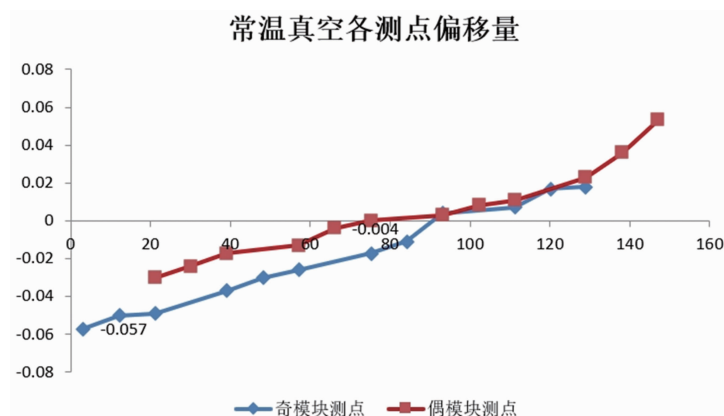


图 5 常温真空下测点的偏移量

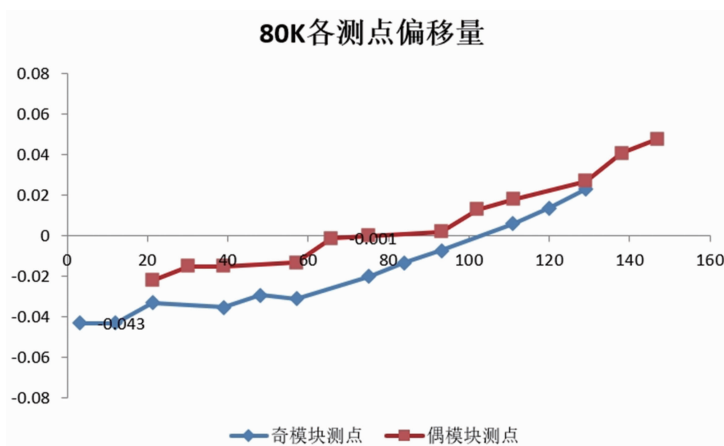


图 6 80 K 状态下测点的偏移量

测试结果为 $19\ \mu\text{m}$, 与仿真结果基本一致, 验证了该型号在解决焦平面低温形变问题上的设计工艺的有效性。

3 微振动测试

文献[8]介绍了 3 种常规制冷机微振动测量方法, 分别给出了压电传感器测量法、激光

干涉测量法、扰振力测量法的优缺点。此类方法均是对制冷机本身的微振动水平进行评价。本文所述的耦合界面综合特性中的微振动, 是指制冷机经过耦合链路传递到探测器芯片上反映出的振动位移量。测试结果仅用于评价探测器制冷机组件抑振措施的有效性, 不作为评价制冷机微振动水平的依据。

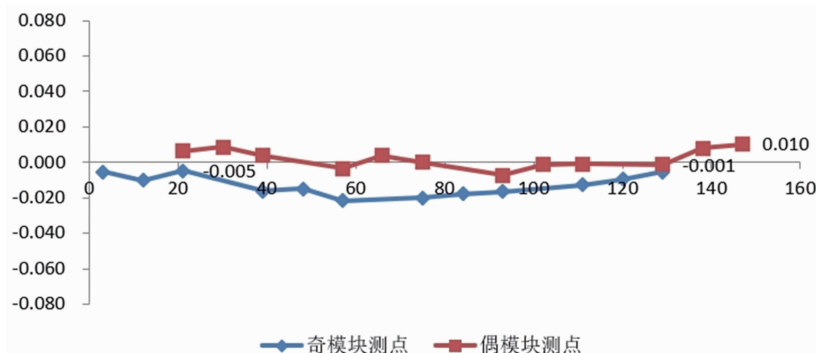


图 7 测点方向校正后的偏移量

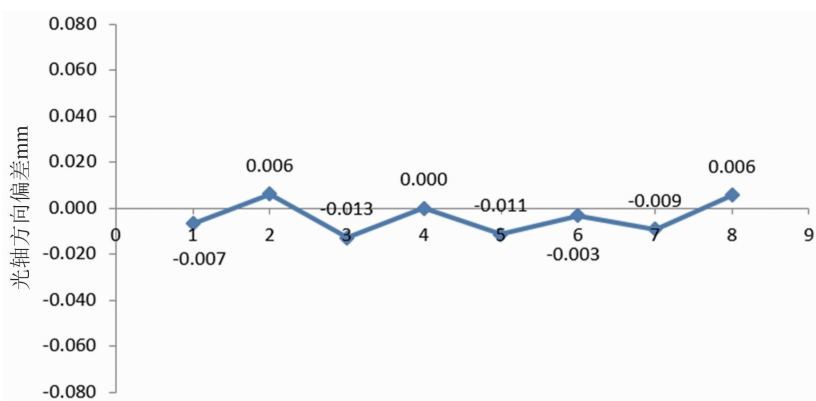


图 8 各模块校正后的偏移量

3.1 测试方法

以参试上述低温平面度测试的某型号 8 模块拼接型探测器制冷机组件为例,可继续将该组件通过测试工装固支在测试系统的机械接口上。整体固支状态如图 3 所示。唯一不同于上述低温平面度测试的试验状态是,微振动测试时需将测试系统与参试组件之间的气浮平台打开,使组件处于“浮地”状态,从而消除制冷机对测试系统传递的微振动影响。

为了全面评价该组件的微振动水平,分别测试了制冷机在 100 W、140 W、180 W、220 W 输入时的微振动响应值。

测试系统通过系统内的光栅尺直接获得目标像元在光轴径向(即 X、Y 方向)的位移量。结合激光位移传感器得出像元在光轴轴向(即 Z 方向)的位移量。通过处理系统可以直接获得制冷机在各功率输出时对焦平面影响的位移量。

3.2 测试结果

在不同的制冷机输入功率下,目标像元三

个方向的微振动最大位移量如表 2 所示。目标像元在 Z 向的微振动位移量相对较大,组件在 220 W 输入功率下最大微振动幅值为 0.9 μm 。

表 2 像元位移量

输入功率/ W	X 向位移 量/ μm	Y 向位移 量/ μm	Z 向位移 量/ μm
100	0.1	0.2	0.4
140	0.1	0.2	0.6
180	0.2	0.3	0.8
220	0.2	0.4	0.9

3.3 评估结论

通过对组件进行不同输入功率下的微振动测试可知,制冷机在各个输入功率下均满足对红外焦平面像元位移影响量小于等于 3 μm 的指标要求。

通过与制冷机冷指微振动的位移量(见表 3)对比可知,该组件内部结构设计的微振动抑制效果明显,有效降低了制冷机微振动对探测器的影响。

表 3 制冷机冷指位移量

输入功率/ W	X 向位移 量/ μm	Y 向位移 量/ μm	Z 向位移 量/ μm
100	0.1	0.7	1.2
140	0.1	0.8	1.4
180	0.2	1.0	1.6
220	0.2	1.1	1.8

4 结束语

为进行大规模红外焦平面耦合界面的特性评估, 基于共轭显微系统分别提出了焦平面的低温平面度和微振动的测试方法。结合仿真分析、探测器成像比对证明了此低温平面度测试、微振动测试方法的有效性, 且比以往通过探测器成像来间接测试的方法更加直观、便捷。该评估方法可对大规模拼接型红外焦平面的结构设计合理性、耦合应力释放措施的有效性进行评估, 同时可对探测器制冷机组件的微振动抑制水平进行有效评估。本研究的评估与分析方法可为后续型号的探测器制冷机组件结构优化以及微振动抑制措施提供参考。

参考文献

- [1] 马军, 聂云松, 闫秀荣, 等. 机械制冷机微振动固支测力修正 [J]. 噪声与振动控制, 2019, 39(1): 110–115.
- [2] 武永见, 范俊杰, 崔世程. 高分辨率可见与红外一体遥感相机制冷机微振动分析及抑制 [J]. 光学与光电技术, 2022, 20(5): 115–121.
- [3] 邱民朴, 马文坡. 空间红外推扫成像系统探测器光学拼接方法 [J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(6): 51–58.
- [4] 吕玮东, 邓旭光, 练敏隆, 等. 空间用红外探测器拼接技术研究 [J]. 红外技术, 2022, 40(11): 980–989.
- [5] 张恒, 李世其, 刘世平, 等. 一种影响空间相机成像的制冷机微振动分析方法 [J]. 宇航学报, 2017, 38(11): 1226–1233.
- [6] 刘泽, 赵伟, 孙树泽. 斯特林制冷机的微振动地面测量试验 [J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2020, 38(3): 45–50.
- [7] 杨小乐, 周峰, 史漫丽, 等. 超长线列红外探测器拼接结构 [J]. 红外技术, 2023, 45(6): 567–574.
- [8] 白绍竣, 唐绍凡, 聂云松, 等. 空间机械制冷机微振动研究 [J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 51–56.
- [9] 徐丽娜, 东海杰, 赵艳华, 等. 多谱段集成长线列拼接 TDI 红外探测器技术 [J]. 上海航天, 2019, 2(6): 112–116.