

制冷机姿态变化对组件输出均匀性的影响

孙浩, 郭亮, 石纲, 杨微, 赵玲
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:分置式斯特林制冷机是红外探测器组件常用的制冷方式,具有冷量大,寿命长等特点。本文以耦合分置式斯特林制冷机的长波 576×6 碲镉汞红外探测器组件为例,进行了姿态翻转时的探测器组件均匀性变化试验,表征斯特林制冷机在不同翻转姿态情况下对探测器组件输出非均匀性的影响,并提出了优化耦合尺寸以及驱动控制器的方法。

关键词:分置式斯特林制冷机;姿态翻转;均匀性

中图分类号:TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.06.014

Influence of posture change of split Stirling cooler on the uniformity

SUN Hao, GUO Liang, SHI Gang, YANG Wei, ZHAO Ling
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract:The split Stirling cooler is the common cooling way for the IRFPA, which has the characteristics of large cooling power and long life, etc. Taking LW 576×6 MCT IRFPA as an example, the experiment of the uniformity variation is carried out when the posture of the detector is turning. The influence of the posture of split Stirling cooler on the uniformity is analyzed, and the coupling size and cooler controller are optimized.

Key words:split Stirling cooler; different gesture; uniformity

1 引言

红外探测器以全天候观测的优势在天文观测、红外遥感等领域得到了广泛应用^[1]。基于第二代焦平面探测器的高性能热成像系统成为各国尤其是美国、英国、法国等军事技术发展和武器装备的重点^[2],也是空间遥感仪器、海洋海岸带成像和环境检测红外相机等航天项目的核心部件^[3]。

目前,二代碲镉汞红外焦平面探测器组件的研制已基本成熟,其波长可覆盖长波、中波、短波,单片阵列规模可达 576×6、1024×6、640×512(25 μm)以及 1280×1024 等。各长线列以及大面阵碲镉汞红外探测器组件采用的制冷方式均为分置式斯特林制冷机。分置式斯特林制冷机具有效率高、结构紧

凑、操作简便、启动降温快、制冷温度范围广、制冷量变化范围大等特点^[4]。

本文介绍了采用分置式斯特林制冷机的碲镉汞长波 576×6 红外探测器组件工作原理,提出了分置式斯特林制冷机压缩机与探测器杜瓦组件相对位置变化对图像非均匀性的影响,并给出了相应的优化方法。

2 长波 576×6 探测器组件

长波 576×6 探测器组件由长波 576×6 混成芯片、微型杜瓦以及分置式斯特林制冷机构成,如图 1 所示。采用的分置式斯特林制冷机为 1.5 W 线性分置式斯特林制冷机。

长波 576×6 探测器芯片需工作在低温环境,工

作温度为 77 K,需真空微型杜瓦保证探测器芯片工作在低温环境,并由分置式斯特林制冷机提供冷源,将探测器芯片所处的工作环境制冷到 77 K。

为表征探测器芯片的工作温度,在微型杜瓦内部、探测器芯片旁边封装了两个表征探测器芯片工作温度的测温二极管,在常温下,测试二极管电压值约为 0.663 V,温度越低测温二极管的电压值越高,在探测器芯片工作温度的 77 K 附近,测试二极管的电压值约为 1.061 V,在制冷到温后,探测器芯片的工作温度,即测温二极管的电压值应保持稳定。

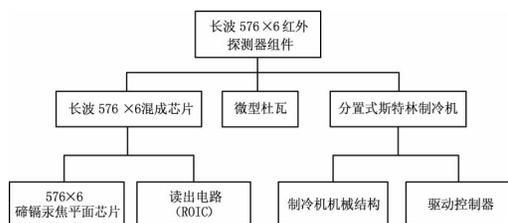


图 1 长波 576 × 6 红外探测器组件构成

Fig. 1 The structure of LW 576 × 6 IRFPA

长波 576 × 6 探测器组件选用的 1.5 W 线性分置式斯特林制冷机是一种自由排出器与自由压缩活塞组成的“双自由型低温制冷机”。采用的线性驱动减少了运动部件,简化了结构,并大幅减小了振动,它包括压缩机模块和膨胀机模块,两个模块之间通过可弯曲的金属管相连。压缩机的活塞由线性电机驱动,膨胀机端的冷指与杜瓦耦合。此外,分置式斯特林制冷机的控制采用专用的驱动控制器来进行,斯特林制冷机驱动控制器包含电源变化电路、二极管电压反馈电路以及控温点设定电路。斯特林制冷机的驱动控制器采用数模混合电路进行控制调节。

图 2 所示为耦合 1.5 W 线性分置式斯特林制冷机的长波 576 × 6 探测器组件。

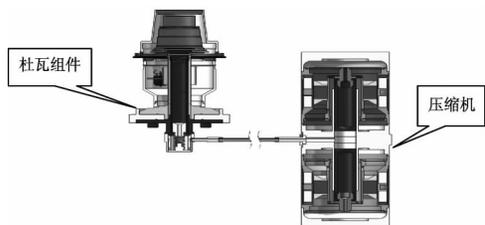


图 2 长波 576 × 6 红外探测器组件结构示意图

Fig. 2 The sketch map of LW 576 × 6 IRFPA

3 姿态翻转对图像非均匀性的影响

在红外探测器组件实际使用过程中,会面临各种不同的使用条件,包括高低温、振动等,其中也包

括红外探测器组件进行各种姿态的变化,在姿态变化过程中,红外探测器组件需保持图像的输出稳定,达到红外探测及跟踪的目的。其中图像的非均匀性变化是衡量图像质量的重要指标。

采用耦合 1.5 W 分置式斯特林制冷机的长波 576 × 6 红外探测器组件,对分置式斯特林制冷机姿态翻转时的图像非均匀性变化进行试验。试验步骤如下所示:

a) 红外探测器组件制冷到温后,采用两点法进行校正,校正温度为 20 °C 和 35 °C;

b) 将黑体温度设置为 25 °C,采集该温度下的红外图像;

c) 将探测器组件窗口始终面对 25 °C 黑体,并旋转探测器组件,使压缩机与杜瓦组件的相对位置发生变化,如 90 °C、45 °C 等,记录旋转后红外探测器组件二极管电压值,并采集图像;

d) 将探测器组件的姿态重新回到初始位置,再次采集二极管电压值以及红外图像;

e) 调节斯特林制冷机驱动控制器,将探测器组件的二极管恢复到校正时的温度值,采集红外图像;

采用上述方法,对长波 576 × 6 探测器组件姿态变化情况下的组件进行测试,测试结果如表 1 所示。

表 1 不同姿态下的长波 576 × 6 探测器组件图像情况

Tab. 1 The image of LW 576 × 6 IRFPA in different gesture

序号	测试条件	电平图	二极管值/V	标准偏差	电平图情况
1	黑体温度降为 25°		1.06105	2.15	图像均匀,标准差较小
2	面对 25° 黑体旋转		1.06180	4.31	图像非均匀性变化很明显
3	回到原始位置		1.06130	2.75	二极管电压值无法恢复,图像无法恢复。
4	调节二极管后		1.06105	2.20	二极管电压值恢复后,图像基本恢复

从表 1 可以看出:

a) 在转动过程中,测温二极管电压值变化 0.75 mV,图像非均匀性变化明显,标准偏差变化明显;

b) 旋转完成,探测器组件的压缩机与杜瓦组件

的相对位置回到原始状态后,图像无法恢复,测温二极管电压值变化 0.25 mV,标准偏差为 2.7;

c) 调节二极管电压值后,标准偏差变小,图像基本恢复正常。

图 3 所示为旋转前后探测器组件每个像元的输出电平变化,可以看出,在探测器组件测温二极管温度变化 0.75 mV 时,探测器组件输出电平变化约 13 mV。

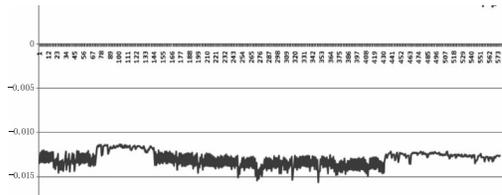


图 3 旋转时温度二极管与探测器电平变化情况

Fig. 3 The detector output volt and the diode volt when the gesture changes

根据上述长波 576 × 6 红外探测器组件的姿态翻转试验,在姿态翻转过程中,探测器组件输出图像的非均匀性变化是由于在翻转过程中,分置式斯特林制冷机的制冷闭环控制过程中,探测器芯片的工作温度发生变化导致。

4 姿态变化对非均匀性影响的优化方法

长波 576 × 6 探测器组件的在姿态变化过程中的非均匀性变化主要由于分置式斯特林制冷机的温度控制不稳造成,其温度稳定性越差,探测器的非均匀性变化就越剧烈。

分置式斯特林制冷循环的流程图如图 4 所示。

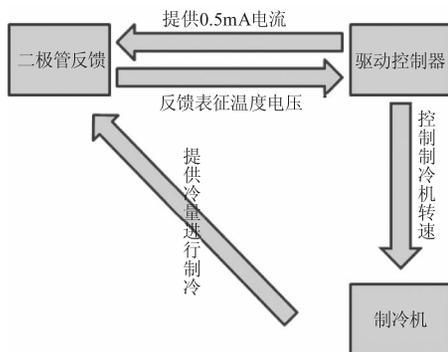


图 4 分置式斯特林制冷机制冷循环流程图

Fig. 4 The flow chart of splite stirling cooler

根据斯特林制冷机的温度循环流程图,为提高姿态变化时的斯特林制冷机控温稳定性,需对制冷机驱动控制器进行优化,同时提高制冷机与杜瓦组

件的耦合效率。

4.1 制冷机与杜瓦组件耦合间隙影响

分置式斯特林制冷机与真空微型杜瓦的耦合采取插入式方法,即将分置式斯特林制冷机的冷指直接插入微型杜瓦内部,因此需分置式斯特林制冷机与微型杜瓦深度的尺寸匹配最佳,达到最佳的制冷效率,提高在姿态变化时的制冷机反应速率。

选取多个深度不同的微型杜瓦以及不同冷指长度的分置式斯特林制冷机进行耦合后的测试,测试结果如表 2 所示。

表 2 不同耦合间隙在姿态变化时的探测器组件二极管电压值情况

Tab. 2 The diode volt change in different clearance

编号	杜瓦深度 /mm	冷指长 /mm	密封圈厚 /mm	耦合尺寸 /mm	姿态变化过程中的二极管电压变化/mV
1	60.50	60.50	0.08	0.08	0.3
2	60.49	60.48	0.07	0.08	0.3
3	60.51	60.48	0.09	0.12	1
4	60.50	60.46	0.08	0.12	1.1
5	60.52	60.46	0.09	0.15	1.9
6	60.51	60.52	0.07	0.06	0.3

从表 2 中可以看出,分置式斯特林制冷机与微型杜瓦的耦合距离不应太大,如果耦合距离太大,制冷机的冷指与探测器过远,则制冷机与杜瓦冷头之间的热阻增大,冷量不能全部传输到杜瓦,直接导致探测器的降温时间过长,旋转时的控温能力变差。耦合尺寸若超过 0.1 mm,则在姿态变化过程中的二极管电压值变化将超过 1 mV,且耦合距离越远,姿态变化时的二极管电压值变化越剧烈,图像的非均匀性将越差。

4.2 驱动控制器的影响

采用两种分置式斯特林制冷机驱动控制器进行了姿态变化控温试验,两种分置式斯特林制冷机驱动控制器的输出交流频率有差异,其中 A 驱动控制器的输出交流频率为 56 Hz,B 驱动个控制器的输出交流频率为 54 Hz。表 3 和图 5 所示为不同制冷机驱动控制器在探测器组件姿态变化时的控温二极管情况。

从表 3 可以看出:

a) 两种斯特林制冷机驱动控制器的变化趋势一致,姿态变化后,均可达到新的平衡;

b) 驱动控制器 A 在姿态变化后的二极管电压值变化较大, 达到 0.84 mV; 驱动控制器 B 在姿态变化后的二极管电压值变化较小, 为 0.38 mV。

表 3 不同制冷机驱动控制器在姿态变化时的二极管电压值情况

Tab. 3 The diode volt change in two different cooler controller

组件状态	驱动控制器 A 二极管电压值/V	驱动控制器 B 二极管电压值/V
探测器组件制冷到温后	1.06219	1.05977
旋转后	1.06303	1.06015
旋转后一分钟	1.06234	1.05994
旋转后两分钟	1.06258	1.05995
旋转后三分钟	1.06270	1.05997
旋转后四分钟	1.06267	1.05999
旋转后五分钟	1.06266	1.06000
回到初始位置	1.06208	1.05965
回到原位一分钟	1.06238	1.05990
回到原位两分钟	1.06251	1.05999
回到原位三分钟	1.06250	1.06000
回到原位四分钟	1.06251	1.06001
回到原位五分钟	1.06250	1.06003

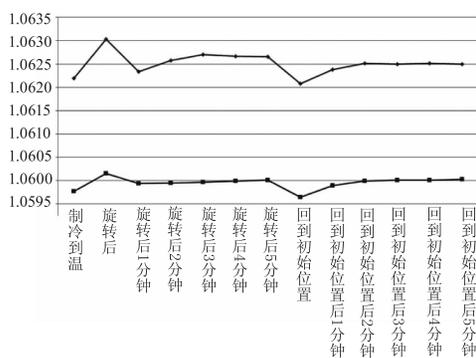


图 5 两款驱动控制器的控温情况对比图

Fig. 5 The diode volt change in two different cooler controller

c) 在姿态变化后的稳定时间上, 驱动控制器 A 的稳定时间为 4 min, 驱动控制器 B 的稳定时间近为 1 min 左右;

d) 在回复初始状态的二极管电压值方面, 驱动控制器 A 的二极管电压值变化为 0.31 mV, 驱动控制器 B 的二极管变化为 0.26 mV。

根据上述测试结果, 驱动控制器 B 的温度控制在姿态变化过程中的情况良好, 优于驱动控制器 A。

为进一步验证, 将驱动控制器 A 的输出频率调整后, 进行了重复测试, 测试结果如表 4 所示。

表 4 驱动控制器 A 更改输出频率前后姿态变化时二极管电压值

Tab. 4 The diode volt change in different cooler controller output frequency

控制器类型	初始位置 二极管电压值	翻转后 二极管电压值	回初始位置 二极管电压值
56 Hz	1.06219 V	1.06303 V	1.06208 V
54 Hz	1.06106 V	1.06133 V	1.06107 V

从表 4 可以看出, 更改分置式斯特林制冷机驱动控制器后, 姿态变化前后二极管变化从 0.84 mV 减小到 0.27 mV, 再次回到初始位置后, 二极管差异从 0.11 mV 减小到 0.01 mV。相应的电平图如表 5 所示。

表 5 驱动控制器 A 更改输出频率前后姿态变化时的图像非均匀性情况

Tab. 5 The uniformity of the image in different cooler controller output frequency

控制器类型	测试条件	电平图	标准差情况
56Hz	目标黑体温度为 25° 时的电平图		2.03
	目标黑体温度为 25° 时旋转电平图		5.86
54Hz	目标黑体温度为 25° 时的电平图		2.07
	目标黑体温度为 25° 时旋转电平图		2.71

通过对驱动控制器输出频率的更改试验, 测试得到的红外图像非均匀性在姿态变化时得到了较好的控制, 但仍无法保证完全一致。

红外图像的非均匀性在分置式斯特林制冷机姿态变化时的质量, 除取决于斯特林制冷机的耦合尺寸、驱动控制器等因素外, 与红外探测器芯片本身的像元稳定性、即与像元对工作温度的适应性也有一定的关系。

5 结论

本文介绍了分置式斯特林制冷机与微型杜瓦的耦合尺寸的优化试验以及驱动控制器输出频率的优化试验, 并验证了在分置式斯特林制冷机姿态变化情况下的耦合尺寸、驱动控制器输出频率与图像输出非均匀性的关系, 通过优化, 可大幅提高姿态变化时的图像非均匀性。

参考文献:

- [1] WANG Chenggang, DONG Haijie. Butted mannar analysis of long linear infrared focal plane detectors of MCT [J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 920 - 923. (in Chinese)
王成刚, 东海杰. 超长线列碲镉汞红外探测器拼接方式对比分析[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 920 - 923.
- [2] LIU Ning, CHEN Qian, GU Guohua, et al. Improving method of frame frequency for 576×6 thermal imager [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 387 - 391. (in Chinese)
刘宁, 陈钱, 顾国华, 等. 576×6 热像仪帧频提高方法 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 387 - 391.
- [3] XIA Wang, WANG Xiaokun, LIN Chun, et al. Dewar for $12.5 \mu\text{m}$ long linear HgCdTe IRFPA [J]. Laser & Infrared, 2012, 42(4): 389 - 392. (in Chinese)
夏王, 王小坤, 林春, 等. $12.5 \mu\text{m}$ 长线列碲镉汞焦平面杜瓦组件 [J]. 激光与红外, 2012, 42(4): 389 - 392.
- [4] LI Yingsheng, CHEN Yuchang, CHEN Guangwen. Comparison of minicoolers used in IR systems [J]. Infrared Technology, 1991, 13(2): 29 - 32. (in Chinese)
李应胜, 陈宇昌, 陈光文. 用于红外系统的制冷机比较 [J]. 红外技术, 1991, 13(2): 29 - 32.