

文章编号 1004-924X(2018)05-1148-08

星载红外探测器组件寿命试验研究及系统设计

洪 津¹, 王征云^{1,2*}, 胡亚东¹, 张元贞^{1,2}, 孙晓兵¹

(1. 中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要:探测器是航天有效载荷中完成光电转换的核心部件,且一旦发射升空,几乎不可能对其进行维护、修理和更换。采用经过筛选的无寿命数据的商业红外探测器存在风险,热电制冷器(TEC)的使用寿命是探测器组件寿命的薄弱环节,其可靠性对探测器的正常使用具有重要影响。因此,对红外探测器组件的寿命试验研究至关重要。首先分析了某航天载荷红外探测器的工作模式及 TEC 的失效机理,制定了恒定应力结合定数截尾的加速寿命试验方案降低时间成本;然后,从硬件和软件的两个部分详细地阐述了红外探测器寿命试验系统的搭建,并展示了设备实物图和红外探测器温度循环效果图;最后,运行寿命试验系统,试验时间累积约 170 d,红外探测器温度循环累积约 30 000 次。试验结果指出:两种型号星载红外探测器经过寿命试验后 G12180 相对光谱响应率最大变化 1.45%,G12183 相对光谱响应率最大变化 4.44%,G12180 组件热电制冷器制冷驱动电流最大增加了 4.30%,G12183 组件热电制冷器制冷驱动电流最大增加了 7.50%,探测器组件的使用寿命和性能变化满足航天载荷需求。

关键词:航天载荷;红外探测器;恒定应力;定数截尾;寿命试验;温度循环

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20182605.1148

Research of life test and design of system for satellite-borne infrared detector assembly

HONG Jin¹, WANG Zheng-yun^{1,2*}, HU Ya-dong¹, ZHANG Yuan-zhen^{1,2}, SUN Xiao-bing²

(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

* Corresponding author, E-mail: fisher_wz@mail@163.com

Abstract: The detector is the core component of the photoelectric conversion in the satellite-borne, and once launched, it is almost impossible for the maintenance, repair and replacement. Using The screened commercial infrared detector without life data has the risk. The service life of the thermoelectric cooler(TEC) is the weak link of the life of detector assembly, and its reliability has an important influence on the normal use of the detector. Therefore, it is important to study the life test of the infrared detector assembly. Firstly, the working mode of the satellite-borne infrared detector and the failure mechanism of TEC were analyzed. The accelerated life test method with constant stress

收稿日期:2017-10-11;修订日期:2017-11-06.

基金项目:国家国防科工局高分专项(民用部分)资助项目(No. 32-Y20A22-9001-15/17);中国科学院重点资助项目(No. KGFZD-125-13-006)

combined with fixed number truncation was developed to reduce the time cost. Secondly, the hardware and software of the infrared detector life test system was described in detail, demonstrated the equipment and temperature cycle of the infrared detector; Finally, the life test system was operated, the test time accumulated for about 170 days, and the temperature cycle of the infrared detector accumulated about 30 000 times. The test result indicated that the maximum changes of the relative photosensitivity of G12180 and G12183 were 1.45% and 4.44%, respectively. The maximum increments of the cooling current of G12180 and G12183 component TEC were 4.30% and 7.50%, respectively. It can be seen that the life and performance changes of the detector assembly meet the aerospace load requirements.

Key words: aerospace load; infrared detector; constant stress; fixed number truncation; life test; temperature cycle

1 引言

InGaAs 红外探测器探测性能优良,以量子效率、等效并联电阻、工作温度、响应率等参数性能方面的优势,在空间遥感和探测领域得到了广泛的应用^[1]。短波红外波段已经成为地表偏振探测的经典波段被 NASA 的 Research Scanning Polarimeter (RSP)、Aerosol Polarimetry Sensor (APS)^[2]和中国科学院安徽光学精密机械研究所的航天多角度偏振辐射计^[3]、大气校正仪所采用^[4]。

对红外探测器的高精度温度控制可以有效地降低本底及提高探测器探测灵敏度、提高系统信噪比^[5]。基于帕尔贴效应的热电制冷器是实现红外探测器制冷的理想器件^[6-8],广泛应用于半导体激光器^[9]、CCD 成像^[10]等需要温控的器件。为了降低功耗,延长器件的使用寿命和配合遥感设备成像器件的使用周期,某航天载荷处于轨道阳面时红外探测器工作,处于轨道阴面时红外探测器不工作,相应地要求红外探测器组件热电制冷器工作电流发生变化,使红外探测器组件经历从环境温度到工作温度的温度交变过程。由于制冷器制冷电流较小($<1\text{ A}$),且工作电流缓慢连续变化以降低对制冷器的冲击,因而制冷电流冲击对探测器组件寿命的影响很小。红外探测器组件在高低温循环过程中对器件造成较大的热冲击导致器件的损坏失效^[11-12]。

红外探测器是航天遥感仪器设备中完成光电转换的核心部件,其可靠性对整个系统设备带来重要影响,加速寿命试验(ALT)被广泛应用于航天器件的可靠性及寿命评估。文献^[13]指出李久祥等(2001)提出通过加快产品薄弱环节的失效来

确定自然贮存条件下的贮存寿命;文献^[14]指出风云二号(2002)中的探测器工作寿命的估计采用无替换定时截尾的寿命试验方案;文献^[15]介绍了美国国家宇航局(NASA)针对航空产品开展了广泛的加速寿命试验;由于大部分涉及保密问题,对寿命试验系统和试验方法鲜有详细的论述。

文中着眼于某航天载荷星载红外探测器的工作模式,以温变速率作为加速应力,采用恒定应力结合定数截尾的加速寿命试验方法,设计星载红外探测器组件寿命试验系统,并完成对同批次两种型号 InGaAs 红外探测器的寿命试验,验证红外探测器组件的工作寿命和考察性能的变化情况。

2 需求分析、试验方法及试验目的

2.1 需求分析

目标探测器组件含热电制冷器(TEC),利用热电效应,实现电能与热能的转换。帕尔贴效应指出:当两种不同的导体组成电路且通有直流电时,在一个接头处会散发热量形成冷端,在另一个接头处会吸收热量形成热端。

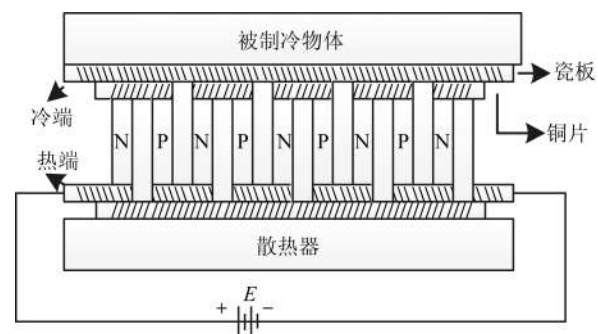


图1 TEC结构示意图

Fig. 1 Structure of thermoelectric cooler

图 1 是 TEC 结构示意图, N 型半导体和 P 型半导体两种材料具有不同的热膨胀系数, 当两种类型的材料温度发生变化时, 由于热胀冷缩的性质, 发生一定的热变形, 在接触处热变形的扩展受到阻碍, 其内部产生热应力, 热应力的大小取决于接触材料的热膨胀系数之差和温度变化的速度及幅度, 引起材料的疲劳及结构损伤, 随着温度循环次数的增加, 最终造成器件的损坏失效。

星载红外探测器在轨运行时间 5 年, 每轨探测器工作一次, 探测器工作时制冷至工作温度。回温或降温速率为 $3.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 即在 8 min 内产生 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差。每轨运行时间约为 90 min, 则 5 年探测器累计工作约 30 000 次, 热电制冷器温度循环约 30 000 次, 在系统设备不间断工作的条件下完成试验需约 500 d, 时间成本高昂, 甚至存在寿命试验结束之前就因性能落后而被淘汰的可能。同时, 星载探测器经济成本高昂, 且寿命试验具有破坏性质, 即作为试验样品的探测器无法继续使用, 难以实现大规模的统计研究。

红外探测器寿命试验周期长, 且试验过程中需要对探测器的状态、参数进行实时监测和记录。这种寿命试验几乎无法通过人工完成, 必须设计开发出红外探测器寿命试验专用试验系统。

此红外探测器寿命试验系统具有以下特点:

- (1) 能够实现多组样本同时进行寿命试验;
- (2) 能够实时监测探测器性能、寿命试验设备运行状况;
- (3) 友好的人机界面, 实现操作自动化、各路的独立控制。

2.2 试验方法

本文寿命试验与其他寿命试验不同之处在于: 不需要建立寿命模型估算红外探测器的最大使用寿命, 只需要验证其在使用期间功能的完整性和考察性能的变化情况。

针对高昂的时间和经济成本, 本文寿命试验采用在同一批产品中随机抽样选取一定数量的探测器, 并采用恒定应力结合定数截尾的加速寿命试验方法在不改变探测器失效模式与机理的前提下缩短试验时间。同时, 选取不参与寿命试验的同型号红外探测器作为参考探测器用于对比, 计算相对光谱响应率, 消除探测器性能测试系统变动造成的影响。

恒定应力结合定数截尾的加速寿命试验方法是指在试验过程中, 选定一组高于正常应力水平

S_0 的加速应力水平 S_1 , 将一定数量的样品在此应力水平下进行寿命试验, 直到有一定数量的样品失效或达到要求的试验次数为止^[16-18]。温度循环对红外探测器组件的影响主要有以下两点:

(1) 热电制冷器(TEC)内部 N 型半导体和 P 型半导体两种材料具有不同的热膨胀系数, 在其接触处因温度变化产生的热应力会导致材料的损伤, 影响 TEC 的使用寿命及制冷效率;

(2) 红外探测器因温度循环引起内部邻接处材料的疲劳损伤, 会影响使用寿命及探测性能。

综合上述分析, 本文将温变速率这一应力作为主要研究对象, 随机抽取 4 只两种型号同批次星载红外探测器进行加速寿命试验, 累积进行约 30 000 次的温度循环, 温变速率由 $3.12\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 提升至 $12.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。并每隔 8 000 次暂停寿命试验, 对试验探测器进行一次全面的性能检查。

2.3 试验目的

(1) 验证热电制冷器在长期工作后的功能完整性及考察性能的变化情况;

(2) 考察探测器受温度循环影响后的性能变化情况及使用寿命。

3 寿命试验系统设计

图 2 为星载红外探测器组件寿命试验系统设计框图, 使用计算机给探测器驱动器发送指令, 配置各路探测器寿命试验的参数、启动寿命试验系统。探测器驱动器将获取的探测器状态信息发送至计算机用于显示和存储。系统由硬件设计和软件设计组成。

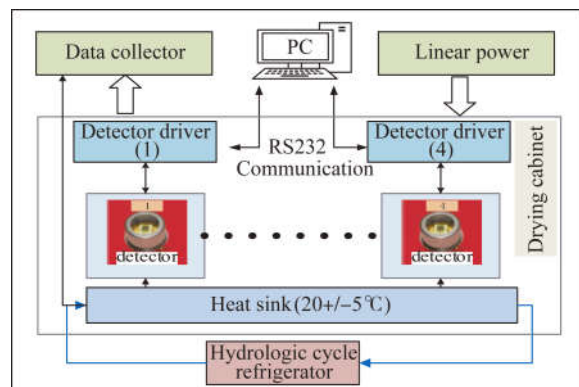


图 2 红外探测器组件寿命试验系统框图

Fig. 2 Life test system diagram for infrared detector assembly

3.1 硬件设计

硬件系统关键技术主要有控温模块和信号遥测模块。

3.1.1 探测器控温模块

红外探测器组件寿命试验系统需要控温的有两个部分,分别是控制探测器的环境温度和探测器的工作温度。环境温度保持恒定于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的作用有两点:

(1)探测器制冷至工作温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,以实现温差稳定于 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

(2)热电制冷器(TEC)热端良好的散热可以提高制冷效率和确定制冷电流。

寿命试验系统对多路红外探测器同时进行试验,使用导热系数大的紫铜材料作为热沉,与探测

器紧密贴合,并使用水循环制冷机(YKKY DX-2015)对热沉进行温度控制,温控精度为 $\pm 1^{\circ}$ 。

寿命试验系统针对温度循环设计了探测器高精度温控的子系统,由探测器驱动器实现探测器的制冷与回温。图3为红外探测器高精度温控硬件系统框图。

子系统采用ARM控制器(STM32, DAC, 12 bit)产生控制信号,经由探测器制冷驱动电路形成温控信号作用于目标探测器,实现制冷。同时,经由探测器数据采集电路(ADC, 12 bit)采集红外探测器内部的热敏电阻获得红外探测器的温度反馈信号,反馈信号作用于ARM控制器,调整控制信号强度,实现高精度温控系统的闭环控制。

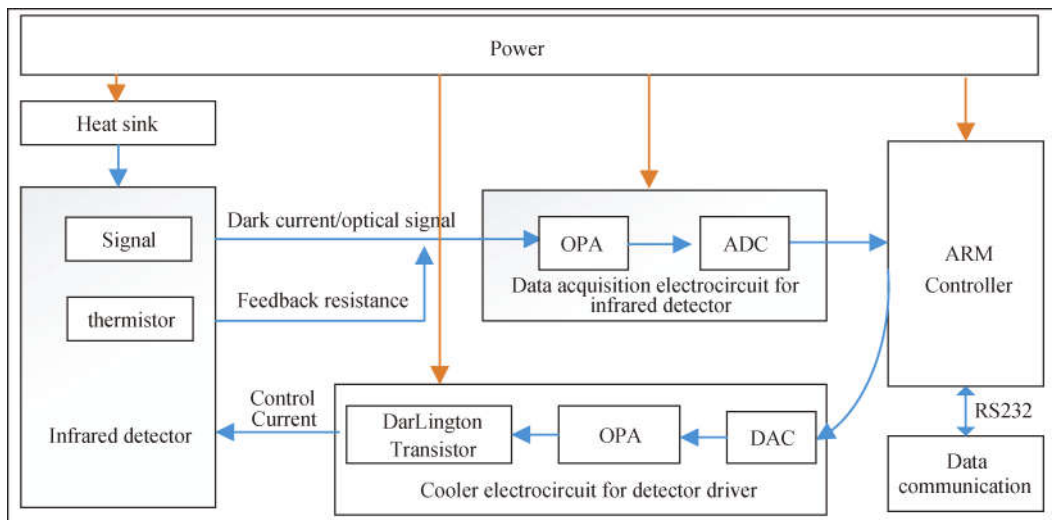


图3 红外探测器高精度温控系统框图

Fig. 3 High precision temperature control system diagram for short-wave infrared detector

3.1.2 信号遥测模块

为了能够实时监测寿命试验系统的运行情况以及探测器在寿命试验过程中的功能与性能变化状况,需对如下的参数进行实时监测:探测器的信号,探测器热沉的温度,探测器的温度以及探测器制冷驱动电流、制冷驱动电压。

通过探测器驱动器内部的采集电路遥测获取探测器的信号,使用温度采样电路采集探测器内部的热敏电阻获取探测器温度。使用数据采集器(KEYSIGHT34972A)遥测获得探测器热沉温度与探测器制冷驱动电流、驱动电压并于计算机显示并存储。

3.2 软件设计

3.2.1 高精度温控系统与温度循环设计

短波红外探测器温度控制算法基于C编写,采用偏差跟踪补偿和PID复合控制的增量式算法模型,实现对短波红外探测器的高精度温度系统控制。该子系统具有超调量小,鲁棒性强,温控精度达 $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$ 。

为了满足寿命试验要求的升降温速率,首先根据升降温时间等分目标温度,然后采用定时的方式更改设定的温度值,最终达到目标温度值,完成温度的循环。程序流程图见图4。

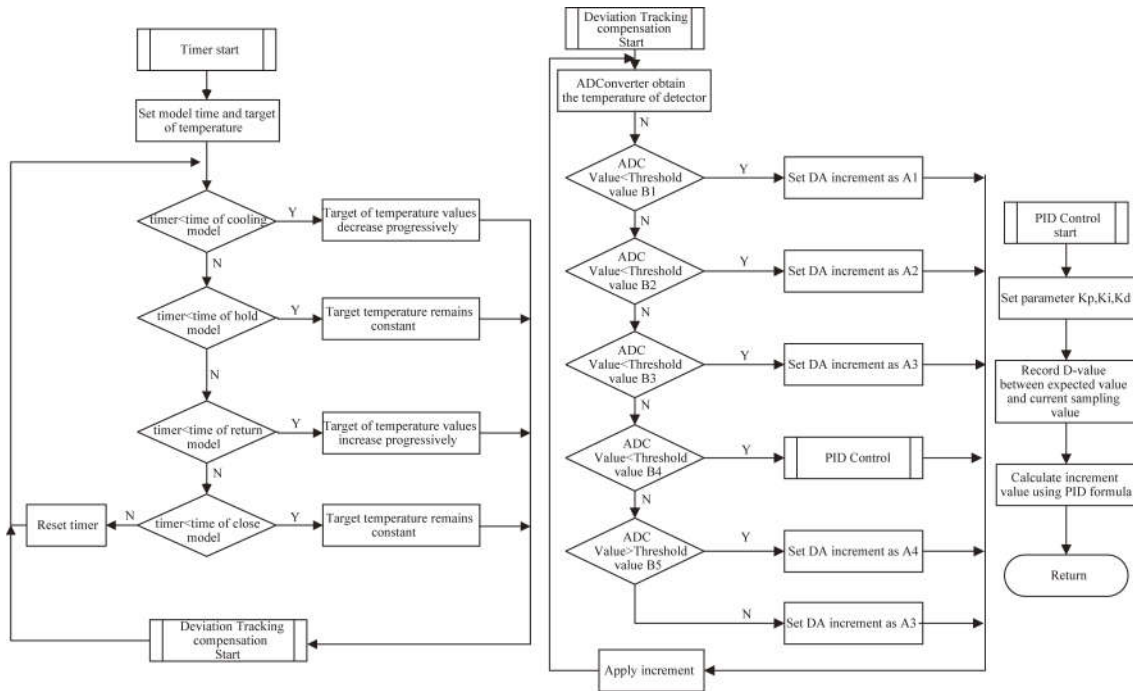


图 4 红外探测器温度循环程序流程图

Fig. 4 Flow chart of temperature cycle for infrared detector

3.2.3 寿命试验上位机设计

寿命试验上位机软件是基于 C# 编写的人机交互界面,界面示意图见图 5。主要功能为:

- (1)实现寿命试验系统通各道的参数配置,包括探测器制冷温度、信号增益等;
- (2)实现寿命试验系统各通道的独立的探测器温度及信号的实时显示、存储等。



图 5 寿命试验上位机控制界面

Fig. 5 Upper computer control interface for life test

3.3 系统运行及实物展示

图 6 为寿命试验过程中摘取某路寿命试验某几次的温度循环示意图,图示表明该寿命试验系统能够完成指定温变速率的温度循环。图 7 为寿命试验系统实物展示。

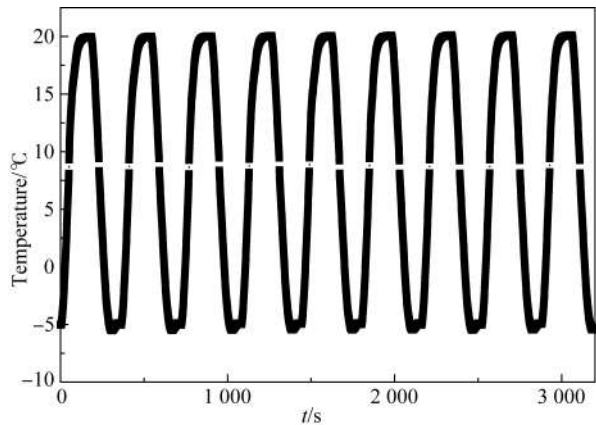


图 6 红外探测器温度循环

Fig. 6 Temperature cycle of infrared detector



图 7 寿命试验系统实物展示

Fig. 7 Display for life test system

4 试验结果及分析

4.1 探测器制冷电流的变化

经过长达 170 d 的探测器组件热电制冷器温度循环的加速寿命试验,在制冷温差为 25 °C,制冷温度为-5 °C 时,热电制冷器驱动电流随温度循环次数的变化见图 8。

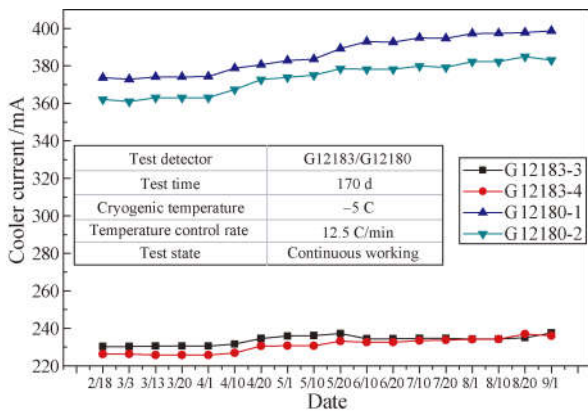


图 8 制冷驱动电流变动曲线

Fig. 8 Current variation curve of refrigeration drive

型号为 G12183 的红外探测器具有二级制冷器,因此制冷驱动电流小于具有一级制冷器型号为 G12180 的红外探测器,且随着循环次数的增加,制冷驱动电流逐渐增大,相比试验开始时,制冷至-5 °C 时,各型号的探测器制冷驱动电流增加百分比见表 1:

表 1 热电制冷器制冷驱动电流变化情况

Tab. 1 Current variation of thermoelectric refrigerator

探测器型号	G12180-1	G12180-2	G12183-3	G12183-4
驱动电流相对增加比例/%	3.13	4.30	7.50	6.65

G12180 制冷驱动电流最大增加了 4.30%, G12183 制冷驱动电流增加了 7.50%。制冷功率随着热电制冷器驱动电流增加而增加,在航天遥感仪器功耗分析中要留有一定的余量,确保热电制冷器的正常工作。

4.2 探测器相对标准探测器的光谱响应率变化

红外探测器温度循环每 8 000 次使用探测器性能测试系统对寿命试验探测器进行一次全面的性能测试,同时测试标准红外探测器作为对比消除光源的波动、测试设备的变动等产生的影响,计

算寿命试验探测器与标准探测器信号的比值。型号为 G12180 的探测器中心波长为 1 600 nm 和 1 370 nm,型号 G12183 的探测器中心波长为 2 250 nm。图 9 是型号为 G12180 和 G12183 各两只探测器在 170 d 温度循环加速寿命试验过程中,参加寿命试验探测器相对未参加试验的标准探测器的响应率变动曲线,曲线的波动具有一定的随机性,且变化幅度很小。

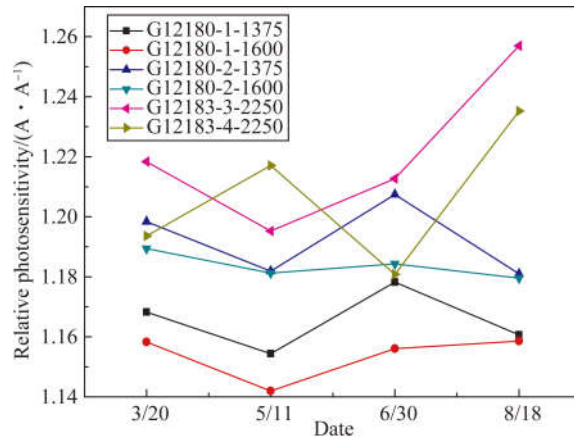


图 9 红外探测器相对光谱响应率的变动曲线

Fig. 9 Variation curve of relative photosensitivity for infrared detector

相对标准探测器的光谱响应率变化百分比见表 2,相对于 3 月 20 号的探测器,参加加速寿命试验后的两种探测器, G12180 相对光谱响应率最大变化 1.73%, G12183 相对光谱响应率最大变化 4.44%,寿命试验前后探测器性能变化较小,不影响星载探测器的使用。

表 2 红外探测器相对光谱响应率变化情况

Tab. 2 Relative photosensitivity change of infrared detector

DATE	型号:G12180-1		型号:G12180-2		G12183-3	G12183-4
	1 375	1 600	1 375	1 600		
5/11	-0.33	-0.55	-0.55	-0.68	-0.69	1.03
6/30	1.73	0.68	1.60	-0.43	1.08	-2.00
8/18	0.21	0.90	-0.62	-0.83	4.44	2.62

5 结 论

文中详细地阐述了星载红外探测器组件寿命试验系统的搭建,并提出了以温变速率作为加速应力,采用恒定应力结合定数截尾的加速寿命试

验方法。试验结果表明寿命试验系统在提高试验效率的同时还具有良好的稳定性和可扩展性,且适用于其他温度应力水平的寿命试验,不仅具有学术意义,而且具有巨大的工程应用价值。

G12180 和 G12183 两种参试星载红外探测器经历约 170 d、累积约 30 000 次的温度循环,扣

除探测器性能测试系统造成的测量误差,探测器相对光谱响应率变化较小。红外探测器制冷至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,热电制冷器制冷驱动电流随着温度循环次数的增加逐渐增大,因此在航天载荷功耗设计时要留有充分的余量。经测试后探测器组件的使用寿命和性能变化满足航天载荷的需求。

参考文献:

- [1] 张卫峰,张若岚,赵鲁生,等. InGaAs 短波红外探测器研究进展 [J]. 红外技术, 2012, 34(6): 361-365.
ZHANG W F, ZHANG R L, ZHAO L SH, *et al.*. Development progress of InGaAs short-wave infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(6):361-365. (in Chinese)
- [2] PERALTAR J, NARDELL C, CAIRNS B, *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [C]. Proceedings Volume 6786, MIPPR 2007: Automatic Target Recognition and Image Analysis; and Multi-spectral Image Acquisition, SPIE, 2007:67865L.
- [3] 汪方斌,洪津,孙晓兵,等. 航空多角度偏振辐射计信噪比估算与测量 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(2):387-394.
WANG F B, HONG J, SUN X B, *et al.*. Estimation and measurement of signal-to-noise ratio for aviation multi-angular polarimetric radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):387-394. (in Chinese)
- [4] 胡亚东,胡巧云,孙斌,等. 暗电流对短波红外偏振测量精度的影响 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8):2375-2381.
HU Y D, HU Q Y, SUN B, *et al.*. Impact of dark current on SWIR polarimetry accuracy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8):2375-2381. (in Chinese)
- [5] ONATB M, HUANG W, MASAUN N, *et al.*. Ultra-low dark current InGaAs technology for focal plane arrays for low-light level visible-shortwave infrared imaging [C]. Proceedings Volume 6542, *Infrared Technology and Applications XXXIII*, SPIE, 2007, 6542:65420L.
- [6] 黄岳巍,崔瑞祯,巩马理,等. 基于 TEC 的大功率 LD 恒温控制系统的研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2):143-147.
HUANG Y W, CUI R ZH, GONG M L, *et al.*. TEC based thermostat system for high-power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2):143-147. (in Chinese)
- [7] SHAN J D, WU G, TIAN X J. Study on large time-delay constant temperature control system based on TEC [J]. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2010, 17(S2):32-35.
- [8] ZANG H Q, LI Q. The automatic temperature system with fuzzy self-adaptive PID control in semiconductor laser [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics*, IEEE, 2009:1691-1694.
- [9] 田小建,尚祖国,高博,等. 980 nm 高稳定度激光泵浦源控制系统 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4):982-987.
TIAN X J, SHANG Z G, GAO B, *et al.*. Control system for 980 nm high stability laser pump source [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):983-987. (in Chinese)
- [10] 张泉,黄书华,赵欣,等. 机载成像光谱仪 CCD 制冷系统设计与实现 [J]. 光子学报, 2017, 46(3):0311004.
ZHANG Q, HUANG SH H, ZHAO X, *et al.*. The design and implementation of CCD refrigeration system of imaging spectrometer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(3):0311004. (in Chinese)
- [11] 任仁,吴礼刚,王小坤,等. 碲镉汞红外探测器高低温循环特性研究 [J]. 激光与红外, 2007, 37(S):941-943.
REN R, WU L G, WANG X K, *et al.*. Study on the thermal cycle characteristic of HgCdTe detector [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(S):941-943. (in Chinese)
- [12] 朱宪亮,张海燕,龚海梅. 航天 InGaAs 短波红外探测器步进应力加速寿命试验研究 [J]. 半导体光电, 2014, 35(6):1008-1012.
ZHU X L, ZHANG H Y, Gong Hai-mei. Study on step-stress accelerated life test for space InGaAs shortwave infrared device [J]. *Semiconductor Optoe-*

- lectronics*, 2014, 35(6):1008-1012. (in Chinese)
- [13] 李久祥. 整机加速贮存寿命试验研究 [J]. 质量与可靠性, 2004, (4):14-17.
- LI J X. Study on accelerated storage life test of complete machine [J]. *Quality and Reliability*, 2004, (4):14-17. (in Chinese)
- [14] 朱宪亮. 红外探测器组件可靠性试验研究 [D]. 上海:中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- ZHU X L. *Study on reliability test of infrared detector assembly* [D]. Shanghai:Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [15] MURRAYS F, HESHMAT H. Accelerated testing of space mechanisms [R]. NASA CR-198437. Latham, NY:NASA.
- [16] YANG SH H, LIU X G, WU Y N. The lifetime prediction model of stirling cryocooler for infrared detector assembly [C]. *Proceedings Volume 8907, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Infrared Imaging and Applications*, SPIE, 2013:89075L.
- [17] 张勇波, 傅惠民, 王治华. 恒定应力无失效加速寿命试验可靠性分析方法 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(3):520-524.
- ZHANG Y B, FU H M, WANG ZH H. Method for reliability analysis on constant-stress zero-failure accelerated life test [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2013, 28(3):520-524. (in Chinese)
- [18] LIN K S, CHEN Y X, XU D. Reliability assessment model considering heterogeneous population in a multiple stresses accelerated test [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, 165:134-143.

作者简介:



洪 津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,2008年于中科院安徽光机所评为研究员,主要研究光谱偏振遥感技术和航天遥感工程技术等。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn



王征云(1991—),男,江苏淮安人,硕士研究生,2015年于合肥工业大学获得学士学位,主要研究方向为光电获取技术。E-mail: fisher_wzymail@163.com