

某星载 CCD 器件散热用热电制冷器的性能试验

江世臣¹, 胡炳亭¹, 付鑫¹, 康奥峰¹, 董瑶海²

(1. 上海卫星工程研究所 空间机热一体化技术实验室, 上海 200240;
2. 上海航天技术研究院, 上海 201109)

摘要: 某地球静止轨道卫星光学相机由于 CCD 器件功耗较大, 并要求处于较低的工作温度水平, 经论证确定采用热电制冷器对 CCD 的温度进行主动控制。设计了热电制冷器性能地面试验装置, 分别在大气和真空环境中选用国内外不同型号的热电制冷器进行对比试验研究。试验得到了安装方式对冷热端温差的影响、输入功耗与冷热端温差的对应关系、负载功率与冷热端温差的对应关系以及大气和真空环境对制冷器的性能影响等数据。试验结果表明, 在 CCD 负载下, 制冷器冷热端的温差最大可达到 45.8℃, 能够满足 CCD 的低温工作需求。

关键词: 热电制冷器; 地球静止轨道; 散热; 性能试验

中图分类号: TN37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)01-0123-06

Experiment on thermoelectric coolers' performance using for heat dissipation of satellite CCDs

Jiang Shichen¹, Hu Bingting¹, Fu Xin¹, Kang Aofeng¹, Dong Yaohai²

(1. Laboratory of Space Mechanical and Thermal Integrative Technology, Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Because of high power and low temperature level requirement, thermoelectric coolers were used for heat dissipation of CCDs on a geostationary earth orbit satellite camera. Experimental setup for evaluating thermoelectric coolers' performance was designed. Domestic and oversea thermoelectric coolers were tested in atmosphere and vacuum respectively. Effects of installation, environment pressure, input power and heat load on the temperature difference of thermoelectric coolers' hot and cold faces were obtained experimentally. The experimental results showed that, for present CCDs' heat load on a geostationary orbit satellite, the maximum temperature difference between cold and hot faces was 45.8℃, which satisfied the requirement for running at low temperature level.

Key words: thermoelectric cooler; geostationary earth orbit; heat dissipation; performance test

收稿日期: 2013-05-10; 修订日期: 2013-06-25

基金项目: 风云四号科研试验卫星工程项目

作者简介: 江世臣(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要从事航天器热控制方面的研究。Email: jiangshichen@tsinghua.org.cn

0 引言

某三轴稳定地球静止轨道卫星上的光学相机内部安装有 CCD 器件, 功耗为 2 W 且在轨长期工作, 为了获取良好的成像质量, 要求 CCD 器件工作在 $-25\sim 5^{\circ}\text{C}$ 。由于受相机在星上的布局位置所限, 难以寻找良好的散热面, 采用传统的热管结合外部散热板的方式很难保证 CCD 器件的温度范围。为了确保 CCD 器件温度尽量维持在低温水平, 拟采用热电制冷器对 CCD 器件的温度进行主动控制。为了寻求合适的热电制冷器, 获取实际应用条件下的性能参数, 需根据实际应用情况开展热电制冷器性能试验研究, 为热电制冷器在星上的应用提供指导。

热电制冷器由于结构简单、无活动部件、体积小和无噪声等优点被应用在各个领域。航天器热控方面, 热电制冷器被广泛用于环路热管的储液器温度控制^[1]。电子器件行业, 采用热电制冷器对器件进行制冷, 解决各种散热问题^[2-3]。在其他工业行业, 广泛采用热电制冷器解决特殊部件的温度环境要求^[4]。国内某星载相机搭载在某太阳同步轨道卫星上, 其中的探测器安装在 PCB 上, 控温指标 $0\pm 1^{\circ}\text{C}$, 功耗为 0.4 W, 为了实现精确控温, 采用一个热电制冷器进行控温, 其冷端与探测器耦合, 热端通过辐射与高温区辐射换热^[5]。参考文献[6-7]中讨论了哈勃望远镜上探测器 CCD 采用热电制冷器达到 -80°C 的热控方案。采用一个四级的热电制冷器冷却 CCD 的承载结构, 制冷器热端与高导热的底板接触, 并采用热管将底板热量排散。参考文献[8]中对哈勃望远镜上 WFC 探测器 CCD 的热控方案进行了详细的描述, 特别强调了减少冷端部件与外界环境隔热的必要性。参考文献[9]叙述了 AGSI 成像仪的热设计, 其中的短波红外探测器采用了一个热电制冷器将冷端温度维持在 210 K, 制冷器的热端用铜带与热管连接, 热管与外部 260 K 的散热板连接。文中也指出为了使冷端维持在 210 K, 假如热端散热板的温度升高 20°C , 将使热电制冷器的输入功耗成倍增长。

可见, 从热电制冷器的实际应用来看, 制冷器的冷端和热端是热设计的重点。文中所述的光学载荷, 应用热电制冷器的重点是在一定输入功耗下, 冷端温度应满足 CCD 的温度要求, 另外星上

的散热面要有能力排散热电制冷器热端的热耗。文中根据光学载荷内部的结构特点设计了热电制冷器性能试验装置, 分别在大气和真空环境下选用国内外不同型号的热电制冷器进行试验, 得到了安装方式对冷热端温差的影响、输入功耗与冷热端温差的对应关系、负载功率与冷热端温差的对应关系以及大气和真空环境对制冷器的性能影响等数据, 对热电制冷器的性能和应用进行了有效的评估。

1 热电制冷器性能试验装置

热电制冷器性能试验装置由加热板、压块、热电制冷器、压板、热管和散热板组成, 如图 1 所示。加热板采用 GDA-508 导热硅橡胶粘贴在压块上, 上面粘贴电加热器模拟 CCD 负载功耗; 压块通过 4 个 M3

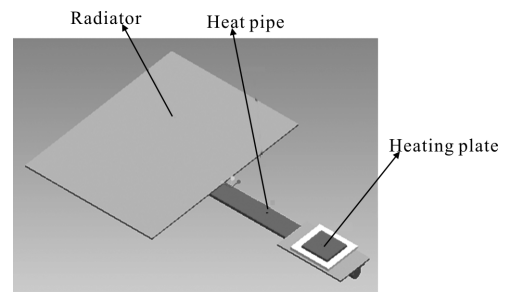


图 1 热电制冷器试验装置构型图

Fig.1 Experimental setup sketch of thermoelectric coolers' performance

螺钉与压板连接, 热电制冷器粘贴在压块与压板之间, 制冷器的冷、热端安装面涂覆 D3 导热硅脂; 压板下侧安装 Ω 形单孔铝氨热管将热量传递至散热板, 热管安装面涂覆 D3 导热硅脂; 在散热板上粘贴电加热器控制散热板的温度水平; 在各部件上粘贴热电偶进行温度测量。试验时热电制冷器、热管、压块和压板采用 20 层多层包覆减小空气对流和湿气的影。试验时, 试验件倾斜放置, 热端在下侧, 以克服重力对热管传热的影响。

试验系统原理图如图 2。热电制冷器正、负端接入直流电源, 可手动调节制冷器输入电流, 电流精度为 0.01 A; 加热板负载加热器和散热板加热器接入直流电源, 调节电流大小改变施加的功耗; 热电偶通过接插件接入温度采集系统, 在计算机上实时显示温度曲线, 热电偶精度为 0.1°C 。电阻测量误差 $0.01\ \Omega$ 。主要误差产生在回路导线电阻, 测量导线电

阻用以修正输入功耗的数据。

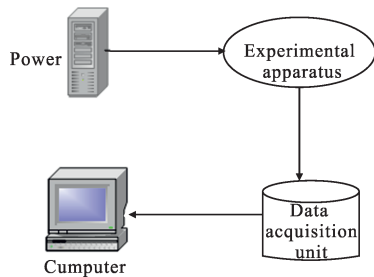


图2 试验系统原理图

Fig.2 Configuration of experiment system

2 试验内容及流程

2.1 试验内容

试验分别在大气环境和真空环境下对进口产和国产两种热电制冷器进行了试验。其中进口热电制冷器最大输入电流为 0.6A, 最大输入电压为 29.2V, 尺寸为 20 mm×20 mm×3.5 mm; 国产热电制冷器最大输入电流为 3.0A, 最大输入电压为 8.2V, 尺寸为 23mm×23mm×4mm。试验中, 冷端温度通过粘贴在冷端压块上的热电偶监测, 热端温度通过粘贴在热端压板上的热电偶监测。试验分别在大气和真空环境下进行, 主要试验内容包括:

- (1) 单片进口产热电制冷器性能试验;
- (2) 单片国产热电制冷器性能试验;
- (3) 两片国产热电制冷器真空环境性能试验。

2.2 试验流程

(1) 热电制冷器温差测试

热电制冷器施加初始电流, 待冷热端温度平衡后, 增大电流继续测试, 直至最大电流或电压。

(2) 热电制冷器加负载测试

半导体最大输入功耗工作, 打开负载加热器, 负载施加初始功耗, 待冷热端温度平衡后依次增大负载功耗进行测试;

(3) 半导体冷器输入功耗影响测试

负载一定的条件下, 减小热电制冷器的输入电压, 等待冷热端温度平衡后继续减小电压, 获取若干不同输入电压下的冷热端温度数据;

(4) 热电制冷器散热温度敏感性测试

负载一定的条件下, 热电制冷器在一定电压下工作, 调节散热板加热器使散热板温度变化, 获取不同散热板温度水平下的冷热端温度数据。

3 试验结果及分析

3.1 单片热电制冷器性能测试

为了比较单片热电制冷器的性能, 对进口产和国产两种制冷器进行了热真空试验。图3给出了两种制冷器冷热端温差与输入功耗的曲线, 可知两种制冷器的变化趋势类似, 在较小的输入功耗下温差的增幅明显。在相同输入功耗下, 两种制冷器温差相差 1℃左右。当进口产热电制冷器输入功耗为 13.3 W 时, 最大冷热端温差为 29.6℃; 当国产热电制冷器输入功耗为 10.9 W 时, 最大冷热端温差为 29.2℃。根据热电制冷器厂家的性能数据, 同类热电制冷器温差达到 60℃以上。这主要是因为不同的安装和测试方法引起的, 因此在应用中必须模拟实际情况进行热电制冷器的性能试验。

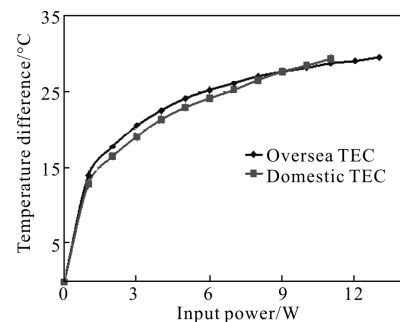


图3 无负载情况下输入功耗对冷热端温差的影响

Fig.3 Effects of input power on the temperature difference between TECs' cold and hot faces without heat load

为了测试冷端负载与热电制冷器冷热端温差的关系, 在冷端施加不同的负载进行试验。单片进口产热电制冷器输入功耗 13.3 W, 单片国产热电制冷器输入功耗 10.9 W。由负载功耗与冷热端温差的关系曲线可知随着负载功耗增大, 温差线性减小。图4给

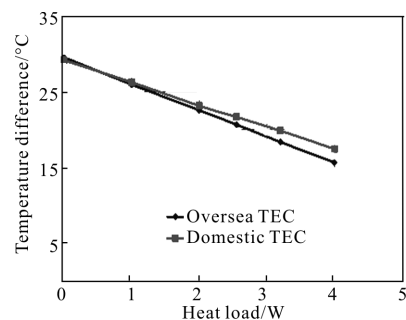


图4 负载功耗对制冷器冷热端温差的影响

Fig.4 Effects of heat load on the temperature difference between TECs' cold and hot faces

出了两种热电制冷器冷热端温差与负载功耗的曲线, 可知国产热电制冷器冷热端温差随着负载功耗的增大而减小的速度略小于进口制冷器。原因之一为: 进口热电制冷器输入电流已经达到了额定电流的 80%(国产制冷器工作在 60%的额定电流), 热端产生的热量向冷端传递, 反而减小了温差。

为了获取在一定负载下输入功耗与冷热端温差的关系, 分别在两种负载下进行了试验。由图 5 可知, 进口产制冷器输入功耗减小到 6.68 W(输入电压为 20 V)以后, 冷热端温差下降越明显; 由图 6 可知, 国产制冷器输入功耗减小到 9.32 W (输入电压约为 6 V)以后, 冷热端温差下降越明显。在试验中, 当工作电压达到额定电压的 80%以后, 冷热端温差的增加将很小, 并且会带来热端热量增大, 温度升高的问题。参考文献[10]也认为热电制冷器应进行降额使用, 并且在较低工作电压下具有较高的效率。

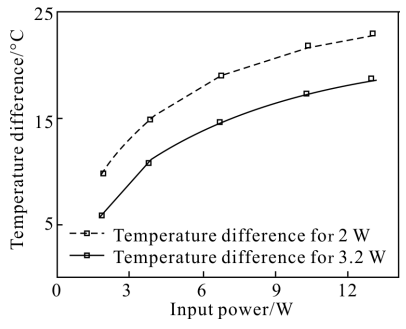


图 5 进口制冷器加负载时输入功耗对冷热端温差的影响

Fig.5 Effects of input power on the temperature difference between overseas TEC's cold and hot faces with 2 W and 3.2 W heat loads

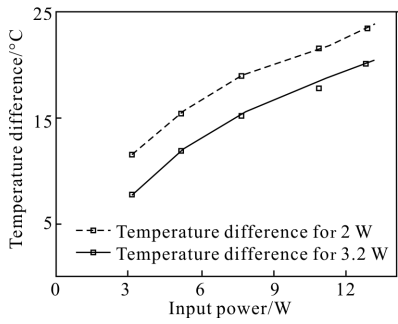


图 6 国产制冷器加负载时输入功耗对冷热端温差的影响

Fig.6 Effects of input power on the temperature difference between domestic TEC's cold and hot faces with 2 W and 3.2 W heat loads

为了测试热端温度对热电制冷器温度的影响,

调节散热板加热器改变温度水平进行试验。将进口热电制冷器负载调节为 2.55 W, 输入电压调整到 20 V。随着散热板温度的升高, 模拟加热板温度随之升高但幅度小于散热板升高的幅度, 冷热端温差略有增大, 但增大的幅度很小, 如图 7 所示。根据散热板温度的影响数据, 可针对星上散热板的温度水平评估冷端的温度水平。同时为了减小热端对冷端的热回流, 可以将热端结构表面进行镀金表面处理, 降低红外发射率。

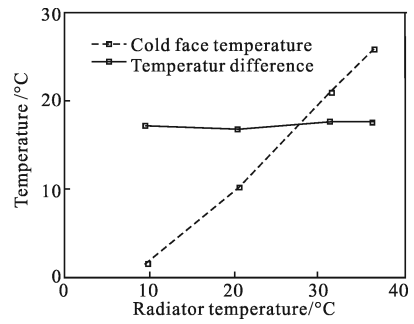


图 7 散热板温度对进口制冷器温差和冷端的影响
Fig.7 Effects of radiator temperature on the overseas TEC's temperature difference and cold face temperature

3.2 两片国产热电制冷器性能试验

为了满足实际应用的需求, 对两片国产热电制冷器并联的情况进行试验。试验表明: 两片热电制冷器总输入功耗为 22 W 时, 冷热端最大温差为 52.9 °C。随着负载功耗的增大, 冷端温度上升, 冷热端温差减小。负载为 2.6 W 时, 冷热端最大温差为 46.4 °C。图 8 给出了负载功耗与冷热端温差的关系曲线, 负载每增大 1 W, 冷热端温差约减小 2.5 °C。

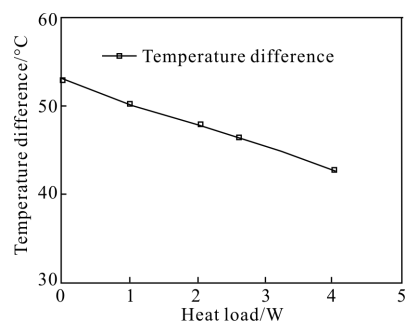


图 8 负载功耗对国产制冷器冷热端温差的影响
Fig.8 Effects of heat load on the temperature difference between domestic TECs' cold and hot faces

在两种负载下对输入功耗对冷热端温差的影响

进行了试验。由图 9 输入功耗与冷热端温差的关系曲线可知,单片半导体输入功耗减小到 8.99 W(输入电压约为 6 V)以后,冷热端温差下降越明显。因此,在实际应用时可以考虑最大输入电压为 6 V 左右。

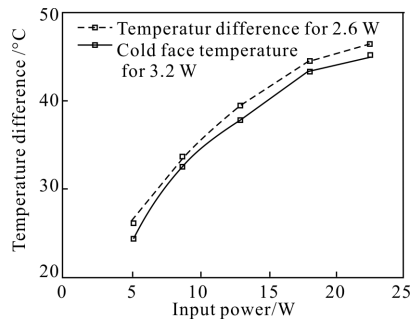


图 9 国产制冷器加负载时输入功耗对冷热端温差的影响

Fig.9 Effects of input power on the temperature difference between domestic TEC's cold and hot faces with 2.6 W and 3.2 W heat loads

3.3 大气、真空试验结果比较

图 10 比较了国产热电制冷器在大气环境和真空环境下对应输入电流下的冷热端温差数据。可见,在相同的输入电流下真空环境的冷热端温差比大气环境的温差高 4 °C 左右。因此,通过在冷端包覆多层的方法可以有效的减小对流引起的漏热。

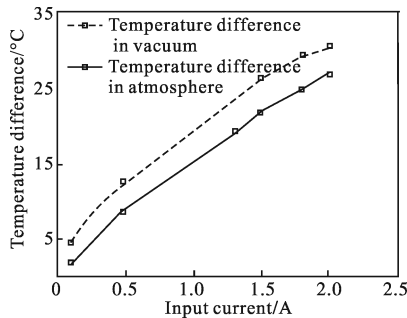


图 10 国产热电制冷器大气与真空数据比较

Fig.10 Comparison of data in atmosphere and vacuum for domestic cooler

3.4 热电制冷器在星上应用的评估

基于试验中得到的输入功率与冷热端温差的关系,对实际应用时热电制冷器热端的温度进行热分析以评估应用的可行性。半导体制冷器热端安装在铝板上,铝板的热量各通过 1 根外贴热管传递至仪器外部的独立散热板。热分析时在两块铝板上各施加 20 W 功耗。高温工况出现在冬至末期,热分析结

果表明铝板最高温度为 42.5 °C,散热板最高温度为 26 °C,根据试验热电制冷器在此输入功耗下的冷热端温差为 45.8 °C,即半导体冷端铝块的温度能维持在 0 °C 以下。

进一步考虑热电制冷器工作在更小的输入功耗状态,在两块铝板上各施加 15 W 功耗。铝板一个轨道周期内的温度如图 11 所示。可见,铝板最高温度为 28 °C,对应此输入功率下冷热端温差为 40.9 °C,能使半导体冷端铝块的温度维持在 0 °C 以下,且具有一定的余量。因此,在应用时可以考虑在满足制冷量的前提下使热电制冷器工作在较小的输入功耗下,以保持较高的制冷器 COP。

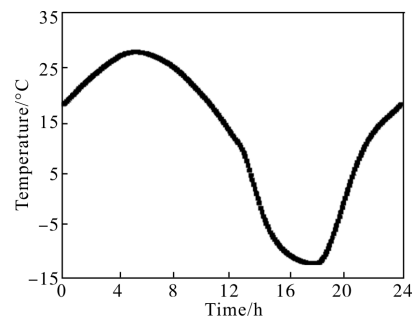


图 11 热端铝板温度

Fig.11 Temperature of aluminum plate on hot face

4 结论

根据某星载光学相机 CCD 器件的散热需求,选用热电制冷器作为主动热控方案。根据星上应用的实际情况设计了试验装置,在大气和真空环境下对热电制冷器的性能进行试验研究。试验得到了输入功耗与冷热端温差的关系、负载功耗与冷热端温差的关系等数据。一定负载下的冷热端温差数据为热电制冷器的应用积累了验证数据,同时试验数据也为选择合适的输入功耗提供了依据。结合试验数据,热分析计算表明半导体制冷方案可以满足 CCD 器件的散热需求。

参考文献:

- [1] Pei Nianqiang, Guo Kaihua, Liu Jie. Applied calculation of peltier cooler in one new LHP [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 2007, 29(1): 42-45. (in Chinese)
裴念强, 郭开华, 刘杰. 半导体制冷在新型环路热管的应用计算[J]. *低温物理学报*, 2007, 29(1): 42-45.

- [2] Shen Limei, Chen Huanxin, Zhang Wei, et al. Analysis of the crucial factors affecting the performance of thermoelectric cooling [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1866–1872. (in Chinese)
申利梅, 陈焕新, 张威, 等. 影响热电制冷性能的关键因素及其分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1866–1872.
- [3] Zhang Jiancheng. Study of heat transfer about heat pipe type cooler of semiconductor refrigerating element [J]. *Southeast University*, 2000, 30(5): 38–41. (in Chinese)
张建成. 半导体制冷的热管式散热器传热研究[J]. 东南大学学报, 2000, 30(5): 38–41.
- [4] Li Mingshan, Zhang Wenping, Wang Shiyu, et al. Optimal thermal dissipation of LD in high power DPL under high temperature environment [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 221–225. (in Chinese)
李明山, 张文平, 王石语, 等. 高温环境下大功率 DPL 的 LD 最佳散热效果[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 221–225.
- [5] Lian Xinhao, Yan Yinxue. Thermal design of focal plane assembly on space-borne camera based on thermo-electric cooling technology [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011.32(3): 43–50. (in Chinese)
连新昊, 颜吟雪. 基于热电制冷技术的某星载相机焦面组件热设计[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(3): 43–50.
- [6] Baggett S M, Hill R J, Kimble R A. The wide-field camera 3 detectors[C]//SPIE, 2008, 7021: 70211Q–1–11.
- [7] Marc D Rafal. Thermal design for the advanced camera for surveys[C]//SPIE, 1998, 3356: 301–307.
- [8] Gregory B Johnson. Thermal management for CCD performance on the advanced camera for surveys(ACS)[C] // SPIE, 1998, 3356: 284–291.
- [9] David E Neuberger, James C Bremer, Margo Mehoke. Advanced geosynchronous studies imager thermal design[C] // SPIE, 1999, 3750: 68–78.
- [10] Zhang Jianzhong, Wang Zesheng. Reliability design of the thermoelectric cooler [C]//Proceedings of The 8th Conference on Reliability, Chinese Institute of Electronics, 1996: 26–31.