

文章编号: 1003-501X(2011)11-0045-05

空间相机高速 TDI CCD 焦面 组件热设计及试验研究

王 栋, 闫 勇, 金 光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 受到质量和功耗的限制, 某相机焦平面组件热控不能采用传统辐射冷板与主动温度补偿结合的方法。基于相机宽温适应性的特点, 提出了降低相机工作温度与大热容焦面电箱结构储热相结合的被动热控方法, 通过相机热平衡试验在热真空罐中进行了验证, 并结合试验数据探讨了如何通过被动热控方法获取更低 TDI CCD 工作温度的问题, 给出了优化方案。试验结果表明: 高温试验工况下, 在相机要求的工作时间内, TDI CCD 器件的最高温度为 30℃, 比不采取热控措施时降低了 10℃, 焦面组件热设计合理, 满足工作需要。

关键词: TDI CCD; 热设计; 辐射制冷; 被动热控

中图分类号: V445.8

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2011.11.009

Thermal Control Method and Experimental Study of High-speed TDI CCD Focal Plane Used in Space-based Telescope

WANG Dong, YAN Yong, JIN Guang

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

Abstract: Excessively high temperature can greatly increase the thermal noise of TDI CCD, which will reduce the camera's image quality significantly, so thermal control methods must be taken to decrease the temperature of TDI CCD focal plane. One high-speed TDI CCD circuit, which had a difficulty in heat dissipation because of high power density, was discussed in detail. Limited by the mass and power consumption, traditional radiant cooling panel method couldn't be used. Based on the stronger temperature adaptability, the method of reducing the temperature of camera and using the large heat capacity character of electricity box was taken on the focal plane. Through the camera's thermal balance test, thermal control effect of the method was verified, and the optimization scheme was presented. The results show that, under high temperature cases, the maximum temperature of TDI CCD is 30℃, about 10℃ lower than nothing thermal control method was taken, and the method can satisfy TDI CCD's requirements well.

Key words: TDI CCD; thermal design; radiation refrigeration; passive thermal control

0 引 言

高分辨率及轻小型化是现代空间相机发展的趋势, 在这些需求的推动下, TDI CCD 器件得到了广泛应用。然而受到 TDI CCD 行转移周期的限制, 更高相机分辨率指标将使 TDI CCD 输出的信息速率大大增加(十几兆甚至几十兆)。随之而来的一个问题是: TDI CCD 芯片及其后续电路系统功率密度急剧增大, 焦面组件散热面临挑战。过高的环境温度将使 CCD 产生热噪声, 严重影响 CCD 器件的成像性能, 因此必须对 TDI

收稿日期: 2011-07-05; 收到修改稿日期: 2011-08-05

基金项目: 国家 863 计划项目(2007AA12Z113)

作者简介: 王栋(1982-), 男(汉族), 山东聊城人。副研究员, 博士, 主要研究工作是空间光学传感器结构及热设计。E-mail:simest@163.com。

CCD 焦面组件温度进行严格控制。

某空间相机采用高速 TDI CCD 焦面组件,但由于对重量和功耗指标限制严格,不能采用传统的辐射冷板式散热方案,根据相机自身具有较高温度适应性($0^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$)的特点,提出了降低相机温度水平与结构储热相结合的焦面组件热设计方法,通过相机热平衡试验验证了方案的可行性,并根据试验结果提出了焦面组件热设计的改进方案。

1 高速 TDI CCD 焦面组件

TDI CCD 焦面组件由 CCD 驱动电路板、CCD 预放电路板、焦面基板及焦面电箱四部分组成(如图 1 所示)。其中,驱动电路板实现 TDI CCD 的驱动功能;预放电路板实现 TDI CCD 视频信号的预放和阻抗匹配功能。TDI CCD 器件根据需要进行拼接后固定在焦面基板上并与预放电路板进行安装。

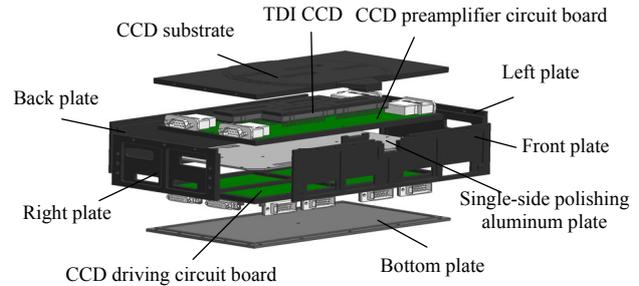


图1 高速TDI CCD焦面组件结构示意图

Fig.1 Structure of TDI CCD FPA

2 高速 TDI CCD 焦面组件热设计

2.1 热设计的约束条件

- 1) 质量约束。相机总质量受限,采取的热控措施不能显著增加相机总质量。
- 2) 功率约束。相机热控功耗及加热回路有限,不能使用主动热控。
- 3) 焦面组件安装在偏流机构上,热控措施不能影响偏流机构的运动性能。

2.2 热设计的基本思想

空间相机焦面组件热设计常用如图 2 所示的方法^[4-6]。将 TDI CCD 器件及其它大功率器件安装在金属导热条上,通过导热条将器件的热耗经过焦面箱壳体迅速导出至辐射冷板,为保证不影响运动机构的性能,辐射冷板与焦面箱壳体之间通过柔性导热索进行连接。

然而该相机特殊的设计约束条件限制了上述方法的使用,这是因为:一方面,在 CCD 不工作期间必须对冷板进行主动温度补偿才能确保器件温度不致过低;另一方面,冷板及柔性导热索等结构将大大增加系统质量;此外,尽管采用了柔性导热索对冷板和焦面电箱之间进行连接,但由于导热索本身仍具有一定的刚度,会对高精度的偏流机构产生较大影响。

从相机实际情况出发,确定如下设计思想:

- 1) 加强元器件与电路板、电路板与机壳之间的热传导效率,将热量迅速传递到焦面电箱上并向外排散;
- 2) 利用焦面电箱及偏流机构大热容的特点,采用结构储热方式降低温升速率;
- 3) 强化焦面电箱与相机本体间的辐射换热;
- 4) 适当降低相机温度水平。

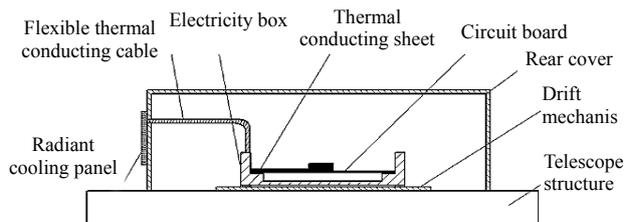


图2 空间相机焦面组件常用热控方案示意图

Fig.2 Common thermal control method of CCD FPA

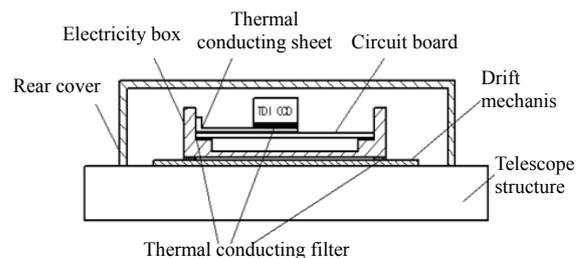


图3 TDI CCD 热设计方案示意图

Fig.3 Thermal control method used in the test

2.3 热设计方案

高速 TDI CCD 焦面组件采用如下热设计方案：

- 1) 将 CCD 器件背面涂导热涂料后安装于 2 mm 厚导热铝带上，铝带与电箱壁相连，接触界面填涂导热填料(图 3)；
- 2) 驱动电路板与预放电路板分别安装在各自的安装铝框架内，铝框架与焦面电箱直接相连(如图 1 所示)，安装界面间填涂导热填料；
- 3) 为降低驱动电路板散热对 TDI CCD 器件的影响，在两电路板之间增加一块单面抛光的铝板，抛光面朝向预放电路板(如图 1 所示)；
- 4) 焦面电箱与偏流组件安装界面为研磨面；
- 5) 焦面电箱允许染黑的界面均进行黑色阳极氧化处理，表面发射率 $\epsilon \geq 0.82$ 。

3 试验与分析

3.1 模拟焦面组件

验证试验中相机焦面组件采用模拟件代替。模拟焦面组件方案如下：

- 1) 试验焦面电箱状态与真实电箱相同；
- 2) 预放电路板上的发热器件由表面黑色阳极氧化处理的同尺寸铝块代替，铝块表面粘贴与器件热耗功率一致的电加热片，加热片表面喷涂黑漆；
- 3) 驱动电路板表面粘贴电加热片，功率为板上器件热耗总和，加热片表面喷涂黑漆；
- 4) 每一片 TDI CCD 均采用两个铝块进行模拟，模拟内热源的加热片粘贴在两铝块之间(如图 4 所示)。为验证导热带的换热效果，两组 CCD 中，一组安装在导热条上，另一组直接安装在预放电路板上。

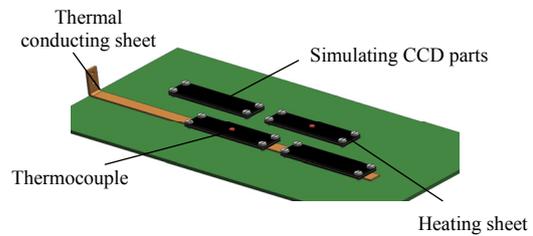


图 4 TDI CCD 热试验模拟件示意图

Fig.4 Simulating parts of TDI CCD used in the test

3.2 试验方案

试验系统如图 5 所示。试验时，TDI CCD 焦面组件按照实际在轨运行状态安装在相机本体上，外表面包覆多层隔热组件。

试验在热真空罐中进行，热真空罐的极限压力为 2×10^{-5} Pa，热沉温度为 100 K。

利用红外加热笼进行外热流模拟，共分为 4 个加热区，热流密度由各分区的热流计测量，并根据热流计反馈结果对各分区加热功率进行调节(如图 6 所示)。

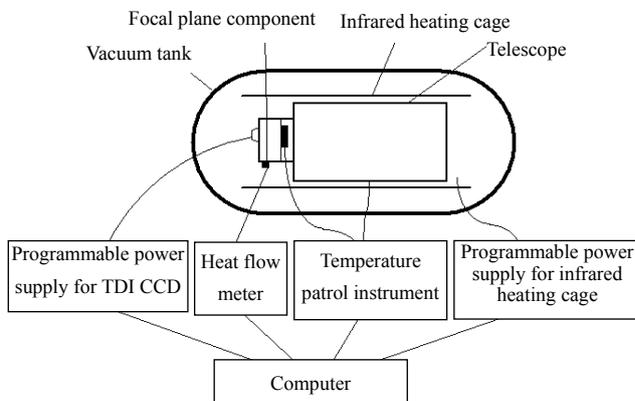


图 5 试验系统简图

Fig.5 Diagram of testing system

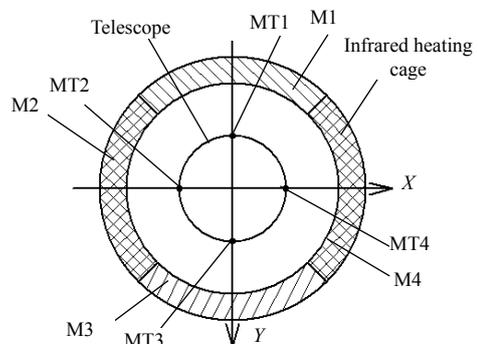


图 6 红外加热笼分区示意图

Fig.6 Subarea of infrared heating cage coverage

其中, 红外加热笼的控制温度由式(1)求得。

$$T = 4 \sqrt{\frac{q}{\varepsilon_h} \cdot \sigma} \quad (1)$$

式中: q 为相机相应分区吸收的外热流密度, 由热分析计算获得; ε_h 为相机表面半球发射率; σ 为波尔兹曼常数, $\sigma=5.67E-8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ 。

3.3 试验结果分析

在高温试验工况下, TDI CCD 的温度曲线如图 7 所示。

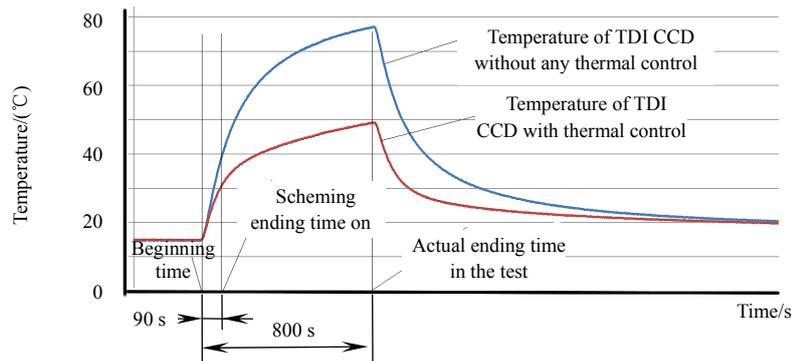


图 7 高温工况下 TDI CCD 的温度曲线

Fig.7 Temperature Graph of TDI CCD in high temperature case

由曲线可以看出: 在要求的工作时间内, TDI CCD 最高温度为 30°C , 基于结构储热的方案满足 TDI CCD 正常工作的需要。

金属导热带对降低 TDI CCD 器件温度具有明显的作用, 如将 TDI CCD 直接安装在电路板上, 在工作时间内, TDI CCD 器件温度将比有导热条安装时高出 10°C 左右。

3.4 热设计方案改进

为继续降低 TDI CCD 温度, 可对设计方案进行如下改进:

1) 由于相机具有较宽的工作温度范围, 根据需要可适当降低相机温度水平(试验中设定的相机工作温度为 15°C);

2) 由于 TDI CCD 安装尺寸的限制, 导热带在厚度方向上已无法增加, 但可采用具有更高导热率的铜带或银带代替铝带。

3) 探索新的被动制冷方式, 如相变制冷。相变过程中相变材料将吸收或放出热量(即潜热), 但材料的温度保持不变, 更适合高速 TDI CCD 焦面组件的温度控制。相机工作时, 相变材料吸收大功率器件发出的热量, 使焦面组件温度维持在熔点温度附近; 而当相机不工作时, 相变材料释放潜热, 维持界面温度基本不变。基于这方面的研究正在进行中。

4 结 论

随着相机分辨率水平的提高, TDI CCD 及其后续电路的功率密度持续增大, 焦面组件的散热面临挑战。受到质量和功率指标的限制, 对某空间相机焦面组件采用了全被动热控的设计方式。一方面通过降低传热路径上的热阻将 TDI CCD 器件发出的热量迅速导出至焦面电箱, 利用焦面电箱的大热容特点降低 TDI CCD 的升温速率; 另一方面通过降低相机本体温度水平和增大焦面电箱辐射换热的方式将热量迅速散发。为验证上述方案的可行性, 结合相机热平衡试验, 在热真空罐中进行了试验验证。试验结果表明: 在相机工作时间内, TDI CCD 器件的最高温度为 30°C , 比不采取热控措施时降低了 10°C , 焦面组件热设计满足正常工作的需要。另外基于试验数据, 对持续降低 TDI CCD 工作温度的被动热控方法进行了探讨。

参考文献:

- [1] 陈世平, 杨秉新, 王怀义, 等. 空间相机设计与试验 [M]. 北京: 宇航出版社, 2003.
- [2] 侯增祺, 胡金刚. 航天器热控制技术—原理及应用 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [3] 余建祖, 高红霞, 谢永奇. 电子设备热设计及分析技术 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- [4] 訾克明, 吴清文, 郭疆, 等. 空间光学遥感器 CCD 焦面组件热设计 [J]. 光学技术, 2008, **34**(3): 401-407.
ZI Ke-ming, WU Qing-wen, GUO Jiang, *et al.* Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote-sensor [J]. **OPTICAL TECHNIQUE**, 2008, **34**(3): 401-407.
- [5] 郭亮, 吴清文, 卢镠, 等. 光谱成像仪 CCD 组件的热分析及验证 [J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(10): 2440-2444.
GUO Liang, WU Qing-wen, LU E, *et al.* Thermal design and proof tests of CCD components in spectral imagers [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(10): 2440-2444.
- [6] 韩东, 吴清文, 卢镠, 等. 光谱成像仪 CCD 组件的热分析及验证 [J]. 光学 精密工程, 2009, **17**(11): 2665-2671.
HAN Dong, WU Qing-wen, LU E, *et al.* Thermal design of CCD focal plane assemblies for attitude-varied space cameras [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2009, **17**(11): 2665-2671.
- [7] 陈恩涛, 卢镠. 空间遥感器 CCD 组件热设计 [J]. 光学 精密工程, 2000, **8**(6): 522-525.
CHEN En-tao, LU E. Thermal engineering design of CCD component of space remote-sensor [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2000, **8**(6): 522-525.
- [8] 裴念强, 刘杰, 郭开华, 等. 一种空间热控箱及其在运行轨道中的热分析 [J]. 工程热物理学报, 2006, **27**(Z2): 73-76.
PEI Nian-qiang, LIU Jie, GUO Kai-hua, *et al.* A space thermal control box and its thermal analysis in orbit [J]. **JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS**, 2006, **27**(Z2): 73-76.

~~~~~  
( 上接第 44 页 )

- [9] 董磊, 刘欣悦, 王建立. 实验室环境内傅里叶望远镜技术的实现 [J]. 光学 精密工程, 2008, **16**(6): 999-1002.  
DONG Lei, LIU Xin-yue. Realization of Fourier telescope technology in laboratory [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2008, **16**(6): 999-1002.
- [10] 陈宝刚, 张景旭, 杨飞, 等. 傅里叶望远镜外场实验聚光镜子镜支撑模块的设计 [J]. 中国光学与应用光学, 2009, **2**(4): 229-333.  
CHEN Bao-gang, ZHANG Jing-xu, YANG Fei, *et al.* Design of segment support module of collecting light mirror in Fourier telescope for field experiment [J]. **Chinese Journal of Optics and Applied Optics**, 2009, **2**(4): 229-333.
- [11] 董磊, 王斌, 刘欣悦. 多光束傅里叶望远镜的关键技术 [J]. 中国光学与应用技术, 2010, **3**(5): 440-445.  
DONG Lei, WANG Bin, LIU Xin-yue. Introduction to key techniques of multiple beam Fourier telescope [J]. **Chinese Journal of Optics and Applied Optics**, 2010, **3**(5): 440-445.
- [12] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 傅里叶望远镜成像系统的实验研究 [J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 1-6.  
CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui. Experimental Research of Fourier Telescopy Imaging System [J]. **Acta Optica Sinica**, 2011, **31**(3): 1-6.
- [13] 陈卫, 黎全, 王雁桂. 基于全相位谱分析的傅里叶望远镜目标重构 [J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3441-3446.  
CHEN Wei, LI Quan, WANG Yan-gui. Object Reconstruction of Fourier-Telescopy Based on All-Phase Spectrum Analysis [J]. **Acta Optica Sinica**, 2010, **30**(12): 3441-3446.
- [14] 罗秀娟, 马彩文, 张羽, 等. 低轨道运动目标傅里叶望远镜发射器设计 [J]. 深圳大学学报: 理工版, 2011, **28**(4): 325-329.  
LUO Xiu-juan, MA Cai-wen, ZHANG Yu, *et al.* Design proposal of a Fourier telescopy transmitter for moving objects in low earth orbit [J]. **Journal of Shenzhen University: Science and Engineering**, 2011, **28**(4): 325-329.