

文章编号 1004-924X(2010)11-2375-09

# 光谱成像仪 CCD 组件的稳态/瞬态热分析与验证

郭 亮<sup>1,2</sup>, 吴清文<sup>1</sup>, 颜昌翔<sup>1</sup>, 刘 巨<sup>1</sup>, 陈立恒<sup>1</sup>, 朴仁官<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**针对光谱成像仪 CCD 器件温度过高产生的热噪声和暗电流会导致成像质量下降,对 CCD 组件进行了稳态/瞬态热分析。采用有限元数值分析方法,建立了 CCD 组件传热的数值模型。根据 CCD 组件的结构特点和导热路径,应用有限元热分析软件 IDEAS-TMG 建立了有限元热分析模型,在给定温度边界条件下对 CCD 组件进行了稳态和瞬态仿真分析。给出了 CCD 组件的热响应性能、组件中关键部件的稳态温度分布云图以及随时间变化的瞬态温度曲线。稳态分析结果表明,CCD 器件工作过程中的平均温度水平为 27.1℃;瞬态分析结果表明 CCD 器件在工作时的升温速率为 2.5℃/min,最高温度为 37.8℃。验证试验结果与数值分析结果吻合较好,验证了数值分析的正确性和温度预示的有效性。稳态试验过程中 CCD 器件的温度为 26.8℃,瞬态试验过程中温升速率为 2.4℃/min。所获得的稳态和瞬态分析结果能够满足热控指标要求,为提高 CCD 组件的可靠性和热设计优化提供了理论依据。

**关键词:**空间光学;光谱成像仪;CCD 组件;热分析;热试验

**中图分类号:**TP73;TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20101811.2375

## Thermal analysis and verification of CCD components in spectral imagers at steady and transient states

GUO Liang<sup>1,2</sup>, WU Qing-wen<sup>1</sup>, YAN Chang-xiang<sup>1</sup>, LIU Ju<sup>1</sup>, CHEN Li-heng<sup>1</sup>, PIAO Ren-guan<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** As the thermal noise and dark-currents caused by the temperature increment of CCD components will degrade the imaging quality of spectral imagers, a numerical analysis model for the heat transfer in a CCD component was established by the finite element analysis method. According to the design feature and heat transfer path in the CCD component, the numerical simulation thermal analysis model of the CCD component was built by a finite element thermal analysis software IDEAS-TMG. Based on the given temperature boundary condition, the thermal analysis of CCD component on steady and transient states was carried out. The thermal response performance of CCD component, steady-state temperature profile and the transient temperature curves of key parts in the CCD component were given. The steady-state thermal analysis shows that the averaged temperature value of CCD de-

收稿日期:2010-09-26;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国防预研基金资助项目(No. O5001SA050)

vice is 27.1 °C and the transient thermal analysis shows that the temperature rise coefficient is 2.5 °C/min, and the highest temperature is 37.8 °C. These results are coincident with the analysis results well, and verifies the correctness of numerical simulation and the validity of temperature prediction. Furthermore, the averaged temperature value and the temperature rise coefficient of CCD device on steady and transient tests are 26.8 °C and 2.4 °C/min respectively, which demonstrates the results obtained can meet the requirements of heat control, and can supply theoretical warrants for the reliability and optimization of thermal design.

**Key words:** space optics; spectral imager; CCD component; thermal analysis; thermal test

## 1 引言

据统计,55%的电子设备失效是由温度过高引起的,过热损坏已成为电子设备的主要故障形式,因此对电子设备进行热设计,实施有效的热控制是提高产品可靠性的关键,对可靠性要求高的航空航天电子系统尤为如此<sup>[1-3]</sup>。随着现代科技和空间遥测技术的不断发展以及信息量的增大,对空间光学 CCD 成像传感器分辨力的要求不断提高,虽然通过优化驱动系统设计等方法能够降低 CCD 组件功耗<sup>[4]</sup>,但 CCD 组件的功耗还是越来越大<sup>[5]</sup>。研究表明,器件过热是 CCD 器件失效的主要原因之一,它不仅严重地限制了 CCD 器件的性能及可靠性的提高,也降低了 CCD 器件的工作寿命<sup>[6-8]</sup>。

解决电子设备过热,提高产品可靠性的相关技术称为电子设备热技术。它主要包括:热分析、热设计及热测试 3 大技术,是发现解决电子设备热缺陷不可缺少的技术手段<sup>[9]</sup>。热分析技术分为稳态和瞬态分析两种,对于缩短电子产品的研制开发周期、提高电子产品设计的合理性以及可靠性而言,稳态分析和瞬态分析都是必不可少的,两者计算结果的对比分析能够为热设计优化提供依据<sup>[10-11]</sup>。热分析方法主要有分析方法和数值方法。其中分析方法对高阶偏微分方程缺乏有效的求解方法,只能求解一些简单的问题;而随着现代计算机技术的飞速发展,用数值方法求解传热学问题所占的比重越来越大<sup>[9]</sup>。目前,数值方法主要分有限元法(Finite Element Method, FEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)和有限体积法(Finite Volume Method, FVM)3 种。

有限元法的数学基础是广义变分原理,最大的优点是能够对复杂的几何形状进行求解,允许局部加密网格,计算精度较高<sup>[12]</sup>。

本文利用有限元热分析软件 IDEAS-TMG 对光谱成像仪 CCD 组件进行稳态和瞬态热分析,通过仿真结果的对比,分析验证了热设计方案的正确性,同时为提高 CCD 组件的可靠性和热设计优化提供了理论依据,对热试验以及在轨工作温度预测有重要的指导意义。

## 2 热传导问题描述<sup>[12-14]</sup>

### 2.1 稳态热传导

常物性、稳态的温度场控制方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\Phi}{\kappa} = 0, \quad (1)$$

式中,  $T$  表示组件的温度,  $\Phi$  表示组件内热源,  $\kappa$  为材料的导热率。经有限元空间离散后,稳态热传导方程为:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{P}, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{K}$  为热传导矩阵,  $\mathbf{T}$  为节点温度矩阵,  $\mathbf{P}$  为温度载荷矩阵,求解式(2)可得到组件各个节点温度。

### 2.2 瞬态热传导

常物性、瞬态的温度场控制方程为:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \Phi, \quad (3)$$

式中,  $\rho$  为材料密度,  $c$  为材料热容,  $t$  为时间。经有限元空间离散后,瞬态热传导方程为:

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{C} \cdot \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} = \mathbf{P}, \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{C}$  为热容矩阵,  $\frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t}$  为节点温度对时间的导

数矩阵。对式(4)采用向后差分,得:

$$\left(K + \frac{C}{\Delta t}\right) \cdot T_t = \frac{C}{\Delta t} \cdot T_{t-\Delta t} + P_t, \quad (5)$$

通过上式迭代计算得出节点的温度矩阵  $T$ 。

### 2.3 边界条件

热传导问题通常有 3 类边界条件,其中第 3 类边界条件在 CCD 组件热分析中不予考虑。初始温度条件和热边界条件定义如下:

$$T(x, y, z)|_{t=0} = T_0(x, y, z), \quad (6)$$

$$T(x, y, z)|_s = T_w(x, y, z), \quad (7)$$

$$\kappa_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_c} = -q(x, y, z), \quad (8)$$

$$\kappa_n \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{S_e} = \sigma \epsilon (T^4 - T_E^4), \quad (9)$$

式中,  $T_0$  为初始时刻的温度值,  $T_w$  为给定边界的温度值,  $T_E$  为环境温度值,  $S_c$  表示导热边界,  $S_e$  表示辐射边界,  $n$  为边界的法线方向,  $q$  为流过组件表面的热流强度,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数,  $\epsilon$  为组件表面发射率。

## 3 热分析模型

### 3.1 CCD 组件的结构

CCD 组件的结构剖面图如图 1 所示, CCD 器件的热量通过导热块导到组件外罩上。

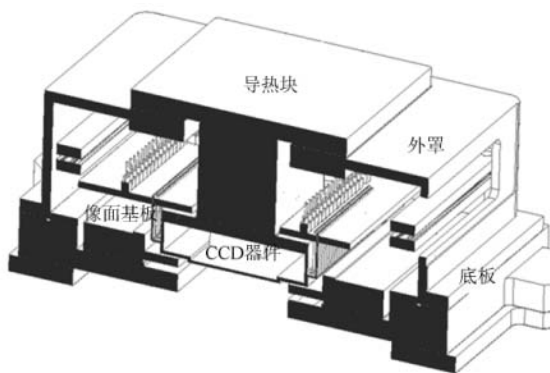


图 1 CCD 组件结构剖面图

fig. 1 Cross-sectional view of CCD component structure

根据结构图确定 CCD 器件的导热路径,经合理地简化和等效处理,建立了 CCD 组件的热分析模型。

### 3.2 有限元热分析模型

考虑到 CCD 组件的结构设计的特点以及散热方式的特殊性,建立了 CCD 组件的热分析有限元模型,如图 2 所示:

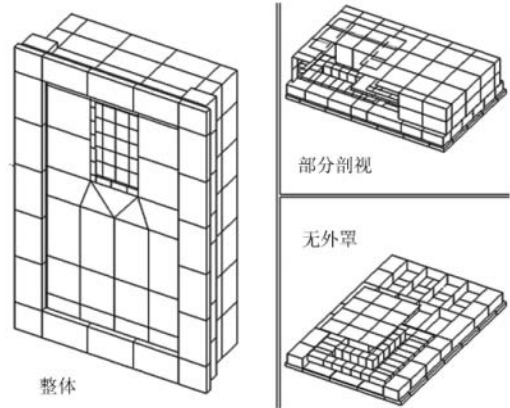


图 2 CCD 组件热分析模型

Fig. 2 Thermal analytic model of CCD component

热分析模型共划分了 3050 个单元,建立了 12 对热耦合。在建模过程主要考虑了以下几点:

(1) CCD 组件壳体、印刷线路板、线路板框均为薄壳结构,采用 Shell 单元划分计算网格;

(2) 大功率元器件(如电源模块等)均采用 Solid 单元进行模拟,单元尺寸按照实际封装尺寸进行计算;

(3) 按照 CCD 组件在光谱成像仪中所处位置的温度设定环境温度为  $25^{\circ}\text{C}$ ;

(4) 元器件与印刷线路板之间所发生的热传导采用 IDEAS-TMG 的热耦合功能实现,耦合系数  $h$  采用如下公式计算确定:

$$h = N_p \cdot \left[ k_p \times \frac{A_p}{l_p} \right] \times \frac{1}{A_c}, \quad (10)$$

式中,  $k_p$  为元器件管脚的导热系数,  $A_p$  为管脚的横截面积,  $l_p$  为管脚的有效长度,  $A_c$  为组件的面积,  $N_p$  为管脚的数量。

(5) 忽略印刷线路板与组件壳体之间通过接插件所发生的热传导;

(6) 忽略元器件管脚与周围部件之间的热辐射传递;

(7) 忽略印刷线路板之间通过接插件所发生的热传导;

热分析模型中所用到的主要材料参数见表 1。

表 1 材料主要参数

Tab. 1 Main parameters for materials

材料名称	发射率 $\epsilon$	导热率 $\lambda/(W/(m \cdot K))$	密度 $\rho/kg/m^3$	比热 $c/(J/(kg \cdot K))$
铝合金	0.8	140	2 800	921
合金钢	0.8	13.9	8 180	460
导热垫	—	3.5	—	—
银箔	—	400	10 530	230
导热脂	—	1.5	—	—
铁镍钴合金	0.5	20.6	8 100	460
陶瓷	0.5	18	3 600	795
环氧玻璃布	0.2	14	1 750	500

表 2 接触热阻参数值

Tab. 2 Parameter values of contact thermal resistance

组部件之间的连接关系		接触热阻数值 ( $^{\circ}C/W$ )
部件 1	部件 2	
CCD 器件	导热垫	0.817
导热垫	导热块	0.408
导热块	组件外框	2.209
CCD 器件	像面基板	10.753
像面基板	底板	2.801
底板	组件外框	2.199

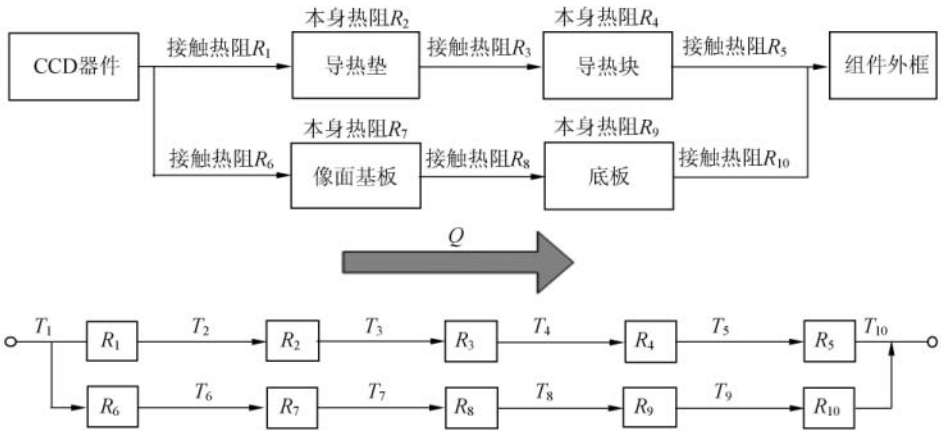


图 3 CCD 器件的导热路径

Fig. 3 Heat transfer channel of CCD component

按照图 1 所示 CCD 组件结构设计的实际情况, CCD 器件的导热路径以及简化后的热阻分析模型如图 2 所示。

根据图 3 中各个组部件之间的连接关系, 计算出热分析模型中使用的接触热阻参数值见表 2。

4 稳态热分析

稳态分析计算中, 导热计算方法采用 TMG 中最稳定和最精确的单元 CG(重心)法。

按照轨道周期平均功耗进行 CCD 组件稳态分析, 其中 CCD 器件的峰值功耗为 3 W, 驱动及处理板上的峰值功耗为 5 W, 设定轨道周期为 90 min, 工作时间为 5 min, 因此 CCD 器件轨道周期

平均功耗为 0.17 W, 驱动及处理板上的轨道周期平均功耗为 0.28 W, 两者的功耗设定曲线如图 4 所示。

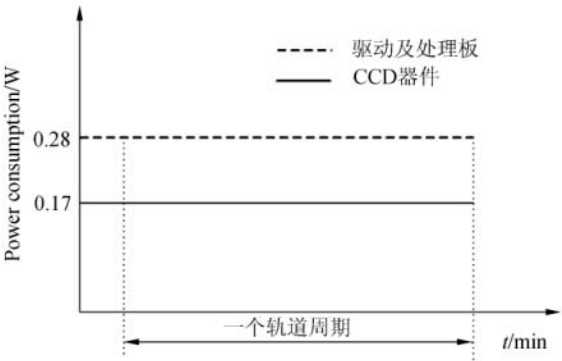


图 4 稳态热分析功耗曲线

Fig. 4 Power consumption curve of steady-state thermal analysis

CCD 组件整体的稳态温度分布云图如图 5 所示,图中左侧图为整体外部图,右侧图为去掉部分外壳后的剖视图。从图中温度分布可以看出,作为最大功耗热源的 CCD 器件的温度最高。

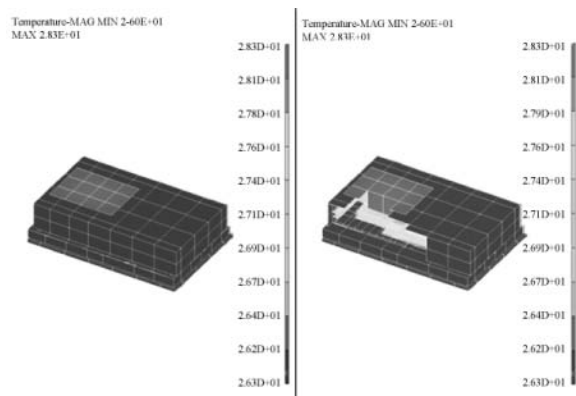
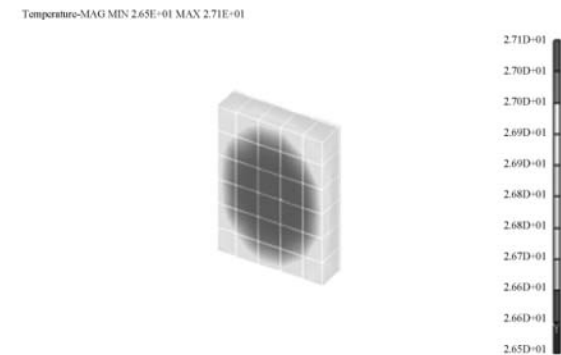


图 5 CCD 组件稳态温度分布云图

Fig. 5 Steady-state temperature distribution of CCD component

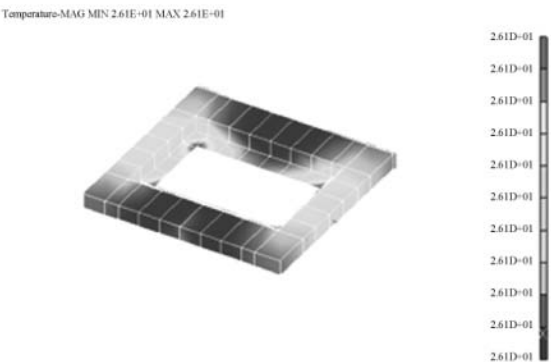
组件中的关键部件如 CCD 器件、导热块以及像面基板的稳态温度分布如图 6 中(a),(b),(c),(d)所示。

从图中温度分布可以看出,CCD 器件的稳态温度水平为 27.1 ℃;导热块的稳态温度水平为 26.3 ℃;像面基板的稳态温度水平为 26.1 ℃。



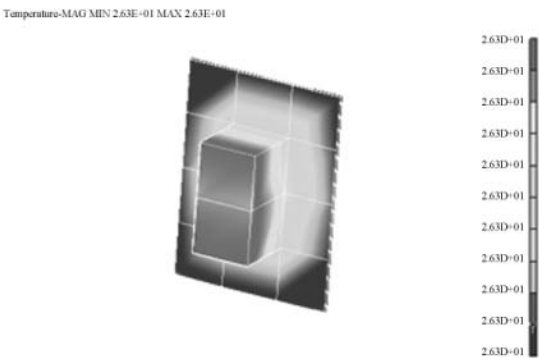
(a)CCD 器件

(a)CCD component



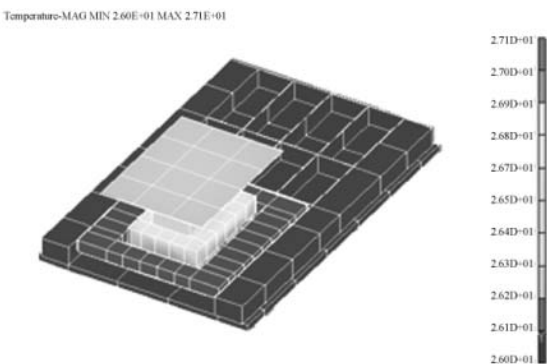
(b)像面基板

(b)Base plate of image surface



(c)导热块

(c)Heat-transfer block



(d)组合体

(d)Assembly parts

图 6 关键部件稳态温度分布云图

Fig. 6 Steady-state temperature distribution of key parts in CCD component

## 5 瞬态热分析

瞬态分析计算中,导热计算同样采用单元

CG(重心)法;瞬态分析采用向后差分格式控制,求解方法采用共轭梯度(Conjugate Gradient)法。

按照每个轨道周期 CCD 组件工作 1 次进行瞬态热分析,其中 CCD 器件的峰值功耗为 3 W,驱动及处理板上的峰值功耗为 5 W,设定轨道周期为 90 min,工作时间为 5 min,两者的功耗设定曲线如图 7 所示。

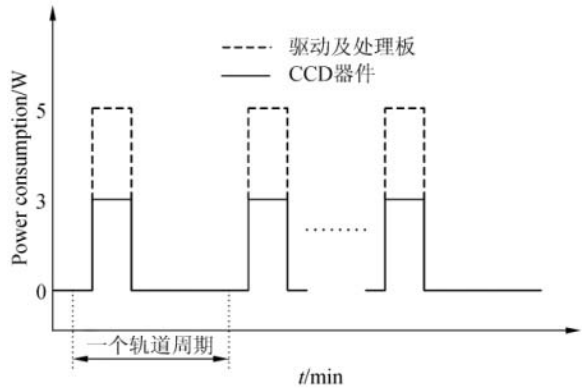


图 7 瞬态热分析功耗曲线

ig. 7 Power consumption curve of transient thermal analysis

CCD 器件温度时间变化曲线如图 8 所示。

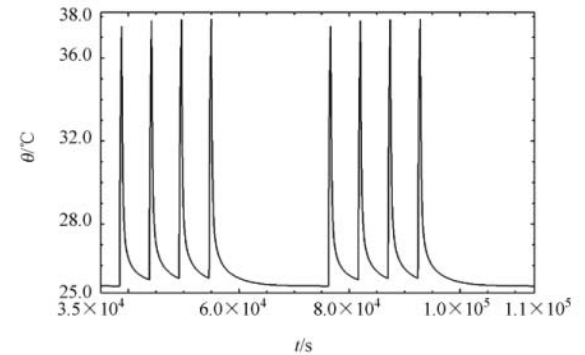


图 8 CCD 器件的温度-时间变化曲线

Fig. 8 Temperature-time curve of CCD component

导热块的温度时间变化曲线如图 9 所示。

CCD 像面基板的温度时间变化曲线如图 10 所示。

从图中曲线可以看出,CCD 器件的热容量最低,温度曲线变化趋势最为明显,其温升速率为 2.5℃/min,瞬态温度最高值为 37.8℃;导热块温度的温升速率为 0.56℃/min,瞬态温度最高值为 28.1℃;CCD 像面基板的温升速率为 0.25℃/min,瞬态温度最高值为 26.2℃。

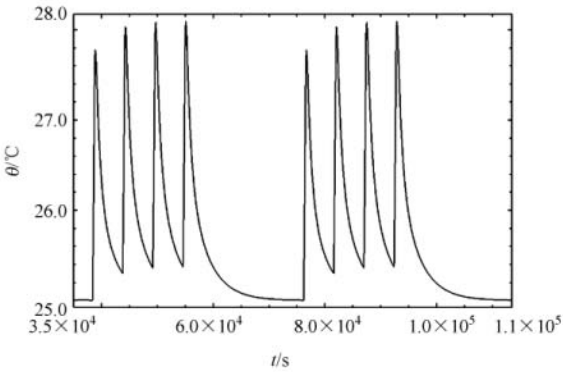


图 9 导热块的温度-时间变化曲线

Fig. 9 Temperature-time curve of heat transfer body

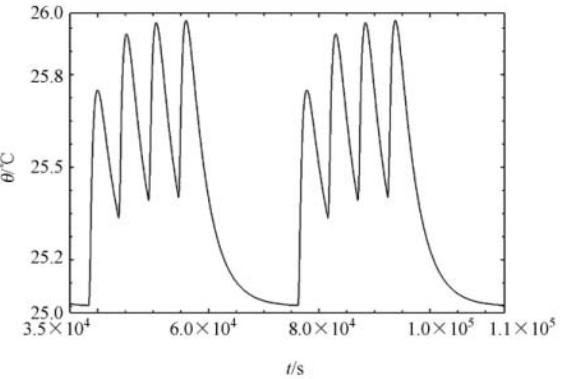


图 10 像面基板温度-时间变化曲线

Fig. 10 Temperature-time curve of base plate of image surface

## 6 试验结果

### 6.1 试验装置

为了验证热分析的正确性,进行了验证试验,试验装置如图 11 所示。

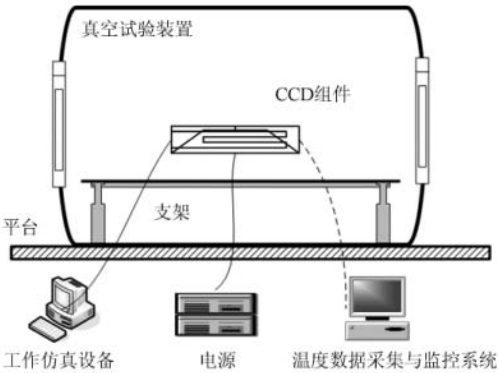
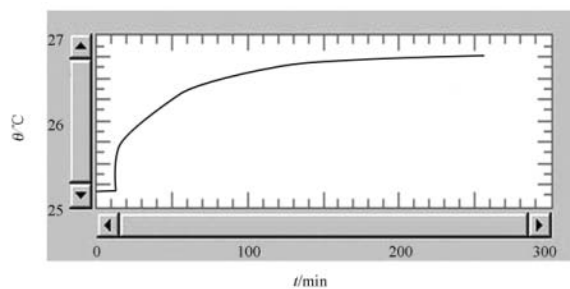


图 11 热试验装置示意图

Fig. 11 Diagrammatic sketch of thermal test device

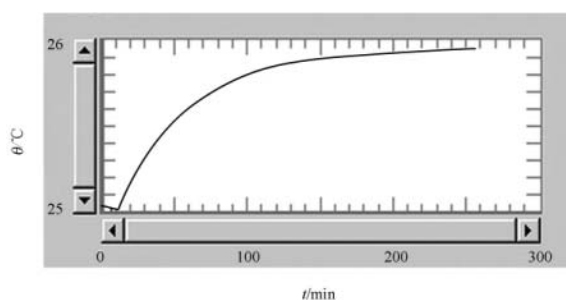
## 6.2 试验结果与分析

对应稳态分析的工作模式,CCD 器件与导热块的稳态温度曲线如图 12 所示。



(a) CCD 器件稳态温度曲线

(a) Steady-state temperature curve of CCD component



(b) 导热块稳态温度曲线

b) Steady-state temperature curve of heat transfer body

图 12 稳态试验温度曲线

Fig. 12 Steady-state temperature curves

对应瞬态分析的工作模式,CCD 器件与导热块的瞬态温度曲线如图 13 所示。

从试验获得的结果曲线中可以看出,CCD 器件稳态平衡温度为 26.8 °C,导热块稳态平衡温度为 25.9 °C;稳态试验结果比数值分析结果略低的原因是 CCD 组件的热量通过与试验装置之间的接触面散失了一部分。瞬态试验结果曲线与数值分析结果曲线吻合较好,CCD 器件在工作时的升

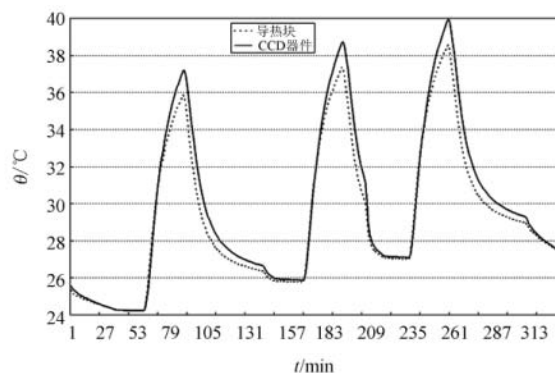


图 13 瞬态试验温度曲线

Fig. 13 Transient-state temperature curve

温速率为 2.4 °C/min,其最高温度比数值分析结果高是由于试验过程中试验装置本身温度上升所致。

## 7 结 论

严格控制光谱成像仪工作过程中 CCD 组件的温度是保证成像质量优良的重要技术组成,通过有限元热分析技术,可以验证 CCD 组件热控设计的正确性,为提高 CCD 组件的可靠性和热设计优化提供理论依据,对热试验以及在轨工作温度预测有重要的指导意义。本文利用有限元热分析软件对光谱成像仪 CCD 组件进行了稳态和瞬态分析,热试验结果验证了稳态/瞬态热分析的正确性和在轨温度预示的有效性。稳态分析结果表明 CCD 器件工作过程中平均温度为 27.1 °C;瞬态分析结果表明 CCD 器件在工作时的升温速率为 2.5 °C/min,瞬态最高温度为 37.8 °C,满足热控指标要求。验证试验结果与数值分析结果吻合较好,CCD 器件稳态平衡温度为 26.8 °C,在工作时的升温速率为 2.4 °C/min。

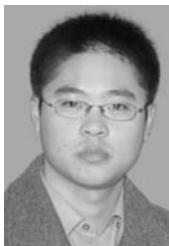
## 参考文献:

- [1] 付桂翠,高泽溪,方志强,等. 电子设备热分析技术研究[J]. 电子机械工程, 2004,20(1): 13-16.  
FU G C, GAO Z C, FANG ZH Q, et al.. A study on thermal analysis of electronic system [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2004, 20 (1): 13-16. (in Chinese)
- [2] 潘显坤,余建祖,高红霞. 航空电子元器件稳态和瞬态热分析[J]. 电子机械工程, 2005,21(1):22-28.

- PAN X K, YU J Z, GAO H X. Steady state and transient thermal analysis of airborne electronic components [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2005,21(1):22-28. (in Chinese)
- [3] 陈立恒,吴清文,罗志涛,等. 空间相机电子设备热控系统设计[J]. 光学精密工程,2009,17(9):2145-2152.  
CHEN L H, WU Q W, LUO ZH T, et al.. Design for thermal control system of electronic equip-

- ment in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(9):2145-2152. (in Chinese)
- [4] 盛翠霞, 张涛, 纪晶, 等. 高分辨率 CCD 芯片 FTF4052M 的驱动系统设计[J]. 光学精密工程, 2007,15(4):564-569.  
SHENG C X, ZHANG T, JI J, *et al.*. Design of CCD FTF4052M driver system with high sensitivity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4):564-569. (in Chinese)
- [5] 郭亮, 吴清文. 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 L, WU Q W. Thermal design and proof tests of CCD components in spectral imagers [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10):2440-2444. (in Chinese).
- [6] 丁延卫, 卢铎. 遥感器 CCD 驱动器热设计及其在摄像过程中的温度变化[J]. 光学技术. 2003,29(2):172-176.  
DING Y W, LU E. Thermal design of CCD driver and its temperature changing in the course of taking picture of space remote sensor [J]. *Optical Technique*, 2003,29(2):172-176. (in Chinese)
- [7] 陈恩涛, 卢铎. 空间遥感器 CCD 组件热设计[J]. 光学精密工程. 2000,8(6):522-525.  
CHEN E T, LU E. Thermal engineering design of CCD component of space remote-sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,8(6):522-525. (in Chinese)
- [8] 罗志涛, 徐抒岩, 陈立恒. 大功率焦平面器件的热控制[J]. 光学精密工程, 2008,16(11):2187-2192.  
LUO ZH T, XU SH Y, CHEN L H. Thermal control of high-power focal plane apparatus [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2187-2192. (in Chinese)
- [9] 吕永超, 杨双根. 电子设备热分析、热设计及热测试技术综述及最新进展[J]. 电子机械工程, 2007,23(1):5-10.  
LV Y CH, YANG SH G. A review of thermal analysis, thermal design and thermal test technology and their recent development [J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2007,23(1):5-10. (in Chinese)
- [10] SMITH B, BRUNSCHWILER T, MICHEL B. Comparison of transient and static test methods for chip-to-sink thermal interface characterization [J]. *Microelectronics Journal*, 2009,40:1379-1386.
- [11] SONAN R, HARMAND S, PELLE J, *et al.*. Transient thermal and hydrodynamic model of flat heat pipe for the cooling of electronics components [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008,51:6006-6017.
- [12] 陶文铨. 数值传热学(第二版)[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001:14-18, 28-43.  
TAO W Q. *Numerical Heat Transfer (second edition)* [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 2001:14-18. (in Chinese)
- [13] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998:20-116.  
YANG SH M, TAO W Q. *Heat Transfer (third edition)* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998:20-116. (in Chinese)
- [14] J. P. 霍尔曼. 传热学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:71-183.  
HOLMAN J P. *Heat Transfer* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005:71-183. (in English)

#### 作者简介:

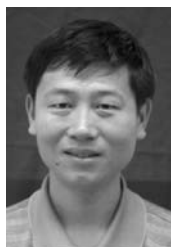


郭亮(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,助理研究员,2004年、2006年于哈尔滨工业大学分别获学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器的热控制、热分析与热试验技术方面的研究。E-mail: guoliang329@hotmail.com



吴清文(1968—),男,四川简阳人,研究员,博士生导师,1991年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1994年、1997年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事光学精密仪器 CAD/CAE 研究和空间光学遥感器热控技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn





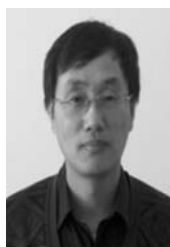
颜昌翔(1973—),男,湖北洪湖人,研究员,2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感技术方面的研究。E-mail: yancx@ciomp. ac. cn



刘 巨(1974—),男,吉林人,副研究员,1996年于石家庄铁道学院获得学士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器热控制技术方面的研究。E-mail: yanwuqiu@yahoo. com. cn



陈立恒(1979—),男,吉林农安人,助理研究员,2002年、2005年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2008年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间光学遥感器热控制技术方面的研究。E-mail: chenliheng3@163. com



朴仁官(1964—),男,吉林磐石人,硕士,副研究员,1987年在长春邮电学院(现吉林大学)获学士学位,1998年在长春光学精密机械与物理研究所研究生部获得学士,主要研究方向为光谱仪研制工作。E-mail: rgpiao@yahoo. com. cn

## ●下期预告

# 用于 FAIMS 系统的阵列式微法拉第筒离子检测器

王晓浩,唐 飞,张 亮

(清华大学 精密仪器与机械学系 精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

介绍了一种应用于 FAIMS 系统的阵列式微法拉第筒离子检测器,用于使 FAIMS 系统体积更小。该检测器具有结构简单、稳定性好、噪声小、量程大、可在大气压条件下工作等优点。阵列式微法拉第筒包括栅电极、敏感电极、屏蔽电极三部分。其中敏感电极由数十个直径为 200  $\mu\text{m}$  的硅圆柱经交错排列而成。通过典型的 MEMS 工艺制作,与平板型 FAIMS 系统的 MEMS 工艺完全兼容。Fluent 仿真结果表明,这种阵列式的设计,气体运动阻力较小,流场分布有助于载气中离子被充分吸收。与 KEITHLEY 237 电流表级联后,测得阵列式微法拉第筒的噪声水平在 0.5 pA 以下。实验测得丙酮样本的输出信号为 210 pA 左右。该阵列式微法拉第筒满足 FAIMS 系统的要求。