

文章编号 1004-924X(2008)11-2187-06

# 大功率焦平面器件的热控制

罗志涛,徐抒岩,陈立恒

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 空间光学部,吉林 长春 130033)

**摘要:** 为了实现大功率焦平面器件(FPA)的热控制,根据焦面组件的结构特点,通过仿真计算与试验相结合的方法,对大功率焦平面的热控设计进行了研究。介绍了大功率焦平面器件的主要热设计要求,分析了大功率焦平面器件、小散热空间并安装在移动构件上的焦面组件热设计的特点。利用 I-DEAS 有限元分析软件建立了热分析计算模型,并利用 TMG 模块进行分析计算。进行了试验验证,并根据试验给出了焦平面器件升温拟合曲线。最后,根据热设计实例提出如何合理地选择大功率焦平面器件的热控制方式。结果表明,50 W 大功率焦平面器件连续工作 2 min 时,在有 12 °C 冷源的情况下,能够控制焦平面器件 $<35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,满足焦平面器件设计要求。

**关键词:** CCD;焦平面;焦面组件;热控制;热设计

**中图分类号:** TP732;TN386.5 **文献标识码:** A

## Thermal control of high-power focal plane apparatus

LUO Zhi-tao, XU Shu-yan, CHEN Li-heng

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

**Abstract:** In order to realize the thermal control of high-power Focal Plane Apparatus (FPA), the thermal design of FPA was studied according to the structure characteristics of the FPA by simulation and experiment. The main requirements of the thermal design of high-power FPA were introduced and the feature of thermal design of a focal plane assembly was analyzed. Then, the thermal performance was simulated by means of code TMG. A thermal test was carried out and the temperature fit curve of FPA according to the thermal test was given. Finally, the method for choosing the thermal control mode rationally was put forward according to thermal design example. The results show that the temperature of 50 W high-power FPA can be controlled to lower than  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  when it works for 2 min continuously in  $12\text{ }^{\circ}\text{C}$  cool source. It can meet the design requirements of FPA.

**Key words:** CCD;focal plane;focal plane assembly;thermal control;thermal design

## 1 引言

焦平面器件是空间 CCD 光学遥感器的重要组成部分,其主要功能就是完成空间 CCD 光学遥感器的图像摄取工作,主要包括光电信号转换、存储和转移输出电信号等。其性能的好坏直接影响遥感器的成像质量以及能否正常工作。同时,一般焦平面器件使用说明书也提出:焦平面器件每升高  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右,暗信号增加一倍。所以,控制好焦平面器件的温度,成为获得高质量成像的一个重要因素。随着科学技术的发展和进步,航空航天焦平面器件也向着更高的技术水平迈进<sup>[1-2]</sup>,焦平面器件的功率也随之越来越大。

大功率焦平面器件使用,以及对高分辨率、大视场、高频率、长寿命、高可靠性等工作需求的提高,给空间光学遥感器焦平面器件的散热带来了巨大的压力。因此对大功率焦平面器件的热控制研究是十分必要的。本文在仿真分析计算和试验的基础上,以某空间光学遥感器大功率焦平面器件热控系统为例,提出了一种大功率焦平面器件的热控方法。

## 2 大功率焦平面器件热控设计

### 2.1 焦平面器件热控设计考虑因素

温度水平是焦平面器件热设计首要考虑因素。焦平面器件使用的用途和环境不同,对于温度的要求差别比较大。空间红外 CCD 光学遥感器对焦平面器件要求的温度一般都相对较低,多控制在  $-70\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,甚至更低;对于空间可见光 CCD 光学遥感器,焦平面器件可以控制在  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下。

温度场的均匀性对于拼接长度较长的焦平面组件也是的一个重要因素。此外,还有焦平面组件热膨胀系数的匹配性;在振动时,热控组件是否会对焦平面器件造成损坏;热控组件对于焦平面器件的压力是否会导致器件变形等因素都是在焦平面热控设计中需要考虑的因素。

### 2.2 大功率焦平面器件的特点

大功率焦平面器件具有体积小、质量小、热容小、功耗大等基本特点<sup>[3]</sup>。随着科技的发展、大功率焦平面器件的使用和技术指标要求的提高,给

航天焦平面器件的散热带来更高的难度和要求。以某系列型号为例,焦平面器件的体积为  $60\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,质量仅为  $15\text{ g}$ ,热容也仅为  $12\text{ J}/^{\circ}\text{C}$ 。在功耗上,以往航空光学遥感器的单片焦平面器件功耗为  $1\text{ W}$  左右。但近些年,有些单片焦平面器件功耗已接近  $10\text{ W}$ ;在数量上,以往一般为  $1\sim 2$  片。近些年,达到了  $5$  片;在连续工作时间上,以往要求连续工作  $20\text{ s}$ ,现在要求具备连续工作  $120\text{ s}$  的能力。从这些指标不难看出,仅从发热量上就增加了  $150$  倍以上,总功耗为  $50\text{ W}$ ,发热量达到  $6\text{ }000\text{ J}$ ,这些热量能够使不散热的焦平面器件升温  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

除此之外,大功率焦平面器件的安装结构往往还具有结构复杂、电缆多、散热空间小等特点,例如:焦平面器件背后的放大电路板几乎需要占用器件背部的全部面积;通信电缆要通过复杂结构,最短路程到达控制箱;多器件拼接的复杂性高,安装结构精度高等,这些特点使热控受到很大的散热空间限制和导热材料的安装限制,给热设计带来相当大难度;对于一些空间光学遥感器还有焦平面组件需要移动调焦的特点,所以,又必须要解决柔性的高效导热问题。这些特点对于焦平面器件的热控制都是非常不利的,功率越大,这些因素导致的热控难度也就越凸显。同时,焦平面器件对于温度又是非常敏感的器件,焦平面器件对其本身的工作温度要求非常严格<sup>[4]</sup>,一个相对稳定的工作温度对焦平面器件来说也是非常重要的。所以必须解决这些难题,设计合理有效的散热通道,以保证 CCD 器件的工作温度需求。

### 2.3 大功率焦平面器件热控制系统构成

建立热控制方案要考虑大功率焦平面器件的特点、功耗、温度指标要求以及基本结构形式等综合因素。主要思想是增加器件位置的热容,吸收器件热量,缓解快速升温;同时尽可能减小散热通道热阻,使散热通道温差最小。在满足焦平面器件总体要求的前提下,力求简单、可靠,尽可能采用成熟的热控技术和实施工艺,以保证热控系统的高可靠性。其中,增加器件位置的热容是解决大功率焦平面器件热控制的关键。

以某空间光学遥感器大功率焦平面器件热控系统为例,焦平面器件总功耗为  $50\text{ W}$ (分为  $5$  路,每路  $10\text{ W}$ )。要求温度水平控制在  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下,热控系统的构成如图 1 所示。

从图 1 中可以看出,热控系统主要包括导热铝块、导热铝板、热管、冷板、导热填料以及热控涂层等辅助热控措施<sup>[5-6]</sup>。

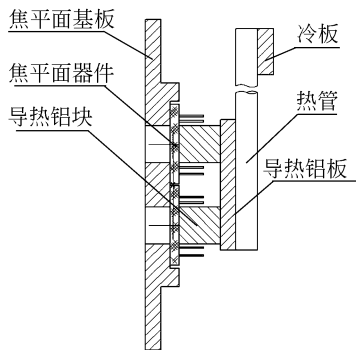


图 1 大功率焦平面器件热控系统示意图

Fig. 1 Scheme of thermal control system for high-power FPA

为了增大焦平面器件位置的热容并改变以往焦平面器件背部散热空间狭小的问题,在焦平面器件背部安装的 PCB 板中间开了散热通道的孔。等截面的导热铝块通过 PCB 板的孔,直接从焦平面器件背部将热量导出,增大了功率焦平面器件附近的热容,缩短了散热通道距离,增大了散热通道截面积,从而大大减小了散热通道热阻。依据大功率焦平面器件的升温特性和结构特点,可以适当增加铝块质量和截面积,或采用相变材料来增大热容。等截面导热铝块穿过 PCB 的安装方式缓解了焦平面器件小热容、小散热空间的问题。

导热铝块热量从焦平面器件传导到导热铝板。通过导热铝板解决了各片焦平面器件的热量汇集和温度均匀化的问题;然后再采用热管将热量导热到冷板,以最小的热阻将热量导到冷源。由导热铝块、导热铝板、热管、冷板构成的散热路径称为焦平面器件的散热通道。散热通道的设计要求尽可能用简单的结构形式和最小的热阻来提供最大散热通量。同时,增大散热通道靠近焦平面器件一端的热容,对焦平面器件瞬态的高发热量进行能量存储,缓解器件升温过快的问题以及散热通道对瞬态大散热通量的要求。然后通过散热通道中间的接触环节填充导热填料,并将焦平面基板、导热铝块、导热铝板喷涂高发射率黑漆等辅助措施,提高接触环节的传热系数,减小接触热

阻,增强辐射散热。

大功率焦平面器件的热量最终导到低温冷源。低温冷源的温度要求要根据散热通道温降来满足或者设计,以保证焦平面器件有足够的瞬态工作升温空间。

### 3 热计算及实验验证

#### 3.1 焦平面组件热控制设计计算

由于焦平面器件的工作模式为间歇式工作,即在摄像期间焦平面器件才产生热耗,尤其大功率焦平面器件产生的热耗是脉冲式,而且峰值很高。因此,对于大功率焦平面器件,控制瞬态发热升温是设计焦平面器件热控方式的主要目的。大功率焦平面器件的热计算应进行瞬态计算。单片焦平面器件的发热功耗为 10 W,体积热流密度达  $2.78 \text{ W/cm}^3$ ,5 片共 50 W,焦平面器件连续工作 2 min 时,器件温度达到最高值。所以按照发热功耗最大值进行计算,单片焦平面器件的发热功耗曲线如图 2 所示。

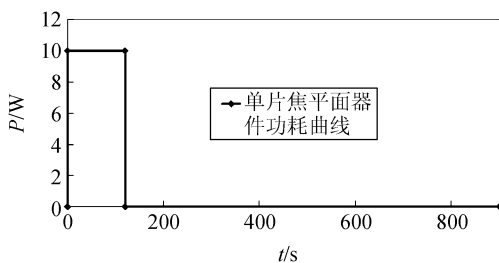


图 2 单片焦平面器件发热功耗曲线

Fig. 2 Curve of heat power for one FPA

利用 I-DEAS 有限元分析软件按照焦平面组件的结构建立有限元分析模型,瞬态计算部分边界条件及初始值根据以下参数进行计算:

总散热功耗:  $Q_{\text{total}} = 50 \text{ W}$ ;

冷板最高温度:  $t_{\text{cool plate}} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

焦平面器件最高温度:  $t_{\text{focal plane}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

计算初始温度:  $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

焦平面工作时间: 2 min。

利用 TMG 模块对模型进行瞬态热计算求解,计算结果见表 1,散热通道上,各结构件升温曲线如图 3 所示。

表 1 散热通道各个位置瞬态计算温度

Tab. 1 Transient calculation temperatures on the path to radiator

| 时间/s | 焦平面器件/C | 导热铝块冷端/C | 导热铝板冷端/C | 热管冷端/C |
|------|---------|----------|----------|--------|
| 30   | 24.9    | 16.2     | 13.9     | 12     |
| 60   | 27.7    | 18.2     | 14.6     | 12     |
| 90   | 29.6    | 19.8     | 15.3     | 12     |
| 120  | 31.0    | 20.9     | 16.1     | 12     |

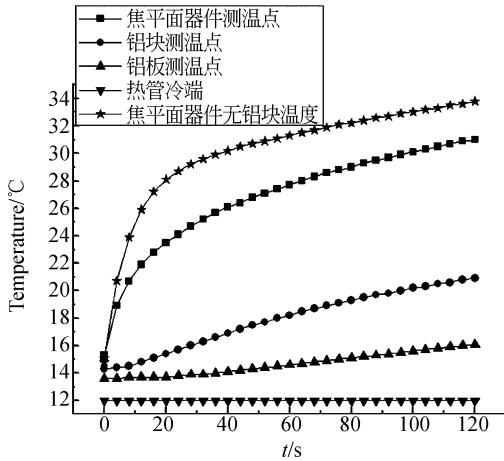


图 3 瞬态计算升温曲线

Fig. 3 Temperature-up curves of transient calculation

通过计算结果分析得出,焦平面器件连续工作 2 min,在刚开始工作非常短的时间内,如果计算中不考虑铝块热容时,焦平面器件会急剧升温(图 3 中星号曲线)。当计算中考虑导热铝块热容时,升温曲线会明显变缓。说明导热铝块的热容起到了很好的储热作用,缓解了器件快速升温。根据计算,焦平面器件工作 2 min 时,导热铝块储热 1 929 J,占其工作 2 min 时总发热量的 32.2%。导热铝板储热 750 J,占其总发热量的 12.5%。当焦平面器件与导热铝块达到一定的温差后,升温速度变缓。通过这一现象可以看出,焦平面器件自身热容很小、功耗很大时,其开始工作瞬时升温速度较快。说明焦平面器件产生的大部分热量都用来增加焦平面器件及与其连接的导热铝块的内能,热量导出的部分较小,导致局部升温较快。随着温差增大,热量导出部分的比例增大,升温速度变缓,直到焦平面器件工作到 2 min 结束。此时,从其背部的导热铝块到热管冷端只需 8.9 °C 的温差,说明从导热铝板到冷源的热阻较小,保证了器

件在 2 min 时间内产生的热量能够在短时间内导出,以便下一次工作。其中,焦平面器件 2 min 产生热量的 40% 左右在 2 min 内导出,其余的热量在 2 min 内通过辐射散出,或储存在其它结构件内并在非工作期间散掉。

综合以上分析,焦平面器件在 50 W、连续工作 2 min 的条件下,通过铝块、铝板存储和汇集热量,再由热管将热量导出到冷源的热控措施,能够满足焦平面器件的热控指标,热设计符合要求。这种储热缓解器件快速升温,延时将热量导出的方式能够解决大功率焦平面器件瞬态发热量大的问题。

### 3.2 实验验证

按照焦平面组件的结构形式进行热平衡试验<sup>[7]</sup>,验证了分析计算的正确性。在焦面组件散热通道的各结构件表面需要测温的位置粘贴热电偶温度传感器,采用 VXI 数据采集设备进行数据采集和记录并对散热通道各时间点进行温度监视。通过电加热片模拟焦平面器件功耗 50 W,通过连接到冷却循环泵的换热器模拟冷源。开启温度监控系统并模拟热源,并记录温度变化。实验数据及实验曲线见表 2 和图 4。

表 2 散热通道各个位置瞬态试验温度

Tab. 2 Transient test temperatures on the path to radiator

| 时间/s | 焦平面器件/C | 导热铝块冷端/C | 导热铝板冷端/C | 热管冷端/C |
|------|---------|----------|----------|--------|
| 30   | 22.0    | 17.1     | 15.6     | 13.7   |
| 60   | 29.2    | 18.7     | 16.4     | 14.0   |
| 90   | 30.8    | 19.7     | 17.1     | 14.4   |
| 120  | 32.2    | 20.7     | 18.0     | 15.0   |

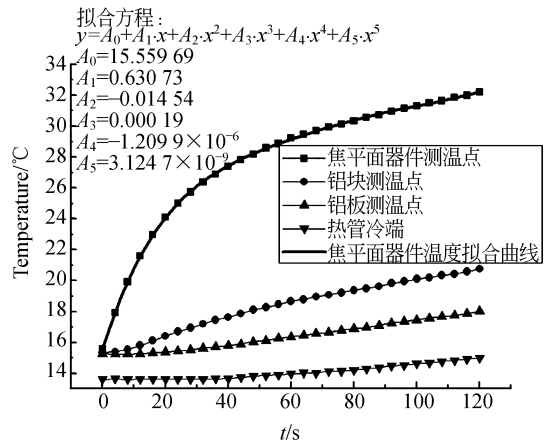


图 4 瞬态实验升温曲线

Fig. 4 Temperature-up curves of transient test

通过焦平面器件的实验数据和实验曲线,能够分析得出,实验的升温趋势和特点与计算基本一致,实验测得的散热通道各结构件的升温情况的绝对值与计算略有区别。

实验中,焦平面器件的温度水平在开始阶段同样是快速上升,能够说明大部分热量用来提升焦平面器件的内能。随着时间增长,焦平面器件升温趋于缓慢,散热通道各部分温差趋于稳定,大部分热量通过散热通道导出。

对实验数据曲线及计算值分析可以得出:

(1)实验中各接触环节的接触热阻的实际值与计算值可能存在偏差。但由于接触热阻的重复性不是很好,虽然能重复实验测出大概的值,但其值难以精确控制。所以,实验数据与计算值会有小的偏差;

(2)实验是在实验室环境下进行,虽然对试验件进行了包裹以减小对流影响,但与计算中绝对的真空环境仍然会有差别;

(3)实验中冷源温度是受散热量影响的,随散热量增大,冷源温度会略有升高。而计算中冷源温度不会升高。所以,实验中随着冷源温度缓慢上升,焦平面器件的升温比计算值略快一些。

通过实验结果和计算值进行对比可以得出,焦平面器件的热计算与实验基本一致。实验采用电加热片模拟焦平面器件功率有效。焦平面器件的温度通过导热铝块、铝板储存和汇集热量,再由热管导热到冷源的热控措施能够控制热控指标范围内,散热通道合理有效,热设计能够满足要求。

## 4 大功率焦平面器件热控制分析

通过计算和实验分析得到,大功率焦平面器件热控制的难点在于如何控制好焦平面器件热容小带来的瞬态急剧升温,以及复杂焦面组件结构下如何合理地做好热控结构设计。

首先,大功率焦平面器件的热控设计,要考虑

尽量增大与焦平面器件连接的散热结构件的热容。可以采用增大导热铝块的质量、更换大热容材料、采用相变材料等几种方式增大热容,缓解焦平面器件开始工作的瞬态急剧升温。其次,要尽量增大散热通道的热通量,减小从焦平面器件到冷源的热阻。在相同导热散热量的情况下,从焦平面器件到冷源的温差尽可能小。如增大散热通道的接触换热面的面积来减小接触热阻;增加导热铝块的截面积,或采用热管等方式减小散热通道热阻等。

增大散热通道焦平面端热容和减小散热通道热阻一般都会影响到结构设计。如增加铝块质量、增大铝块截面积等会使焦平面组件的质量增加,使用相变材料,热管等会使结构形式变得复杂,这是因为焦平面器件往往空间都比较狭小,结构复杂,线缆较多,甚至有些焦平面器件在工作时需要移动或转动。所以,一些增大热容或减小热阻方式的使用十分困难甚至不可实现。因此,要对结构形式、电子学散热需求以及热设计的形式进行综合考虑,既要保证焦平面器件的热控指标,又要容易安装和拆卸,使结构设计和热设计都较为合理。

## 5 结 论

焦平面器件在空间光学遥感器中起着重要的作用,其热控效果直接关系到空间光学遥感器的成像质量。本文着重对大功率焦平面器件的热控制进行了研究,说明了大功率焦平面器件热控制的特点、难点以及应该考虑和注意的问题。并以实例介绍了大功率焦平面器件的热设计过程。数据表明,对于 50 W 的大功率焦平面器件连续工作 2 min 的热设计能够控制器件温度在 35 ℃ 以下,满足了任务指标要求,热设计合理可行,对越来越多的大功率焦平面热控制设计有一定参考和借鉴作用。

## 参考文献:

- [1] 李积慧,韩双丽,王家骥,等.空间相机的热分析与热控制技术[J].光学精密工程,1999,7(6):36-41.  
LI J H, HAN SH L, WANG J Q, et al.. Thermal analysis and thermal control techniques of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(6): 36-41. (in Chinese)
- [2] 赵育良,许兆林,李开端.航空 CCD 电光侦查系统的发展现状与展望[J].光电子技术,2001,21(4):290-293.

- ZHAO Y L, XU ZH L, LI K D. Development and outlook of aerial CCD recon system[J]. *Opto Electronic Technology*, 2001, 21(4): 290-293. (in Chinese)
- [3] 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 K M, WU Q W, GUO J, *et al.*. Thermal design of CCD focal plane assembly of space optical remote-sensor[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(3): 401-407. (in Chinese)
- [4] 吴清文, 卢泽生, 卢锸, 等. 空间光学遥感器热分析[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2): 205-208.  
WU Q W, LU Z SH, LU E, *et al.*. Thermal analysis for a space optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(2): 205-208. (in Chinese)
- [5] 闵桂荣, 郭舜. 航天器热控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
MIN G R, GUO SH. *Spacecraft Thermal Control*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [6] 陈恩涛, 卢锸. 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)
- [7] 李国强, 贾宏. CCD 组件的热分析和热试验[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(3): 15-18.  
LI G Q, JIA H. Thermal analysis and thermal balance test of CCD assembly[J]. *Space Craft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(3): 15-18. (in Chinese)

作者简介: 罗志涛(1980—), 男, 吉林人, 主要从事空间光学遥感器热控设计方面的研究。E-mail: zhi-tao@tom.com

## ●下期预告

# 压电双晶片的有限元分析及实验

李龙土, 邬军飞, 褚祥诚, 季 叶

(清华大学 材料科学与工程系 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京 100084)

压电双晶片是一种用来产生弯曲变形的压电陶瓷驱动器件。本文采用有限元分析方法, 研究了压电双晶片悬臂梁的位移形变特征。研究了金属弹性层、压电陶瓷片的材料属性及几何尺寸对双晶片偏转位移的影响; 计算了双晶片的弹性模量、厚度以及加载电压对位移形变所产生弯应力的关系; 通过位移测试、弯应力测试等相关实验对有限元分析进行了验证, 当加载电压为 60 V(120 V<sub>pp</sub>)时, 双晶片的偏转位移和弯应力分别为 166 μm 和 34.7 mN, 实验结果证明本文所建的有限元模型是合理有效的。此外, 测试了压电双晶片的振动特性, 测得其谐振频率为 310 Hz, 在该频率下加载 20 V<sub>pp</sub> 电压, 其端部位移输出即可达 1.7 mm。有限元分析结果及实验验证为压电双晶片结构的优化设计提供了依据。