

文章编号 1004-924X(2009)09-2145-08

# 空间相机电子设备热控系统的设计

陈立恒, 吴清文, 罗志涛, 董吉洪, 江帆

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**为了解决大功率空间相机电子设备的散热问题,对某空间相机电子设备的热控系统进行了设计。针对需要散热的电子元器件、印制板以及设备机箱采取了加导热片、表面发黑处理、填充导热填料等高可靠性的导热和辐射方式进行散热。然后,以某个器件为例建立了散热通道简化模型,进行了散热效果的估算。最后,根据电子设备的空间环境、结构特点以及采取的热控措施,应用 TMG 软件建立了热分析模型,对其热控系统进行了仿真分析,同时进行了电子元器件的结温计算。结果显示,电子设备印制板的温度为 35.6~45 °C,电子元器件的结温温度为 45.4~88.5 °C,均低于降额热控温度指标,散热效果明显。表明热控系统的设计合理,所采取的热控措施能够满足设计要求。

**关键词:**空间光学;空间相机;电子设备;热控系统;仿真

**中图分类号:**V248.3 **文献标识码:**A

## Design for thermal control system of electronic equipment in space camera

CHEN Li-heng, WU Qing-wen, LUO Zhi-tao, DONG Ji-hong, JIANG Fan

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

**Abstract:** The thermal control system of electronic equipment of a space camera was designed and simulated for resolving the problem of its heat dissipation. The thermal design of electronic components, Printed Circuit Boards (PCBs) and their chassis were researched with the approaches of conduction and radiation. Then, a simplified heat dissipation model was established and the effect of heat dissipation was calculated by taking an electronic component as an example. According to the space environment, structure characteristics and the thermal control method of the electronic equipment, a thermal analysis model was built up by TMG software to simulate the thermal control system and to calculate the die temperatures of the electronic components. The results show that the range of temperature of PCBs is from 35.6 °C to 45.0 °C, the range of temperature of electronic components are from 45.4 °C to 88.5 °C, and all of them are lower than the standard heat control temperature indexes. These data show that the proposed thermal design scheme of the electronic equipment of space camera is feasible and reasonable.

**Key words:** space optics; space camera; electronic equipment; thermal control system; simulation

收稿日期:2008-08-15;修订日期:2008-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

## 1 引言

空间相机主要由电子设备、光学组件、机械设备等组成,其中电子元器件占有较大比重。随着空间相机分辨力的提高和功能的扩展,相机正向着高性能、紧凑化、小型化方向发展,这些都对电子器件及设备的高效冷却和热控制技术提出了更高的要求。高性能的电子器件意味着高功率消耗,而紧凑性则要求众多的电子元件集成在越来越小的区域之内,导致热流密度急剧增加,而且由于空间相机在轨工作时要承受严酷的空间热环境考验,使得电子器件散热更加困难。如果电子器件的散热冷却措施达不到要求,就会导致电子元件局部或整体处于较高的温度下,器件将失效或损坏。不均匀的温度分布还会在电子器件内部产生热应力和热变形,造成电子器件疲劳损坏、机械性断裂或永久变形,极大地影响了电子器件乃至整个系统的工作性能。

进行电子设备热设计的目的就是利用热的传递特性,在充分掌握各种设备热失效参数的前提下,通过优化设计热流通路,降低设备与散热环境之间的热阻,并提供一个温度比较低的散热器,以较少的冷却代价把设备内部有害的热量尽可能释放掉,使设备在其所处环境条件下,保持在可靠性要求所规定的温度范围之内,确保设备可靠、安全地工作。随着电子设备热设计技术的发展,近年来国内逐渐认识到了该项研究对航空、航天以及军事方面的重要性和迫切性<sup>[1-4]</sup>。

空间用电子设备的功率密度和元器件安装密度高,轨道空间又没有空气对流散热,这些条件决定了空间用电子设备热设计的特点,即在轨条件下,主要通过传导和辐射来散热或者采用热管等特殊散热方式,保证电子器件工作温度保持在预定范围内,使电子部件稳定可靠地工作。本文针对某空间相机电子设备的空间环境和结构特点,对其热控系统进行了详细设计,根据采取的热控措施对热控系统进行了仿真分析,得到了较好的结果。

## 2 热控系统设计

### 2.1 热控措施

本文研究的空间相机电子设备安装在载荷舱

内的仪器安装板上,主要由接口板、控制板以及电源板等组成,元器件的发热功耗较大。为了减少发热器件的热应力集中,防止过热,需要采取一定的散热措施对电子设备进行热设计。本文主要对元器件、印制板和机箱壳体采取的热控措施进行论述。

元器件的种类的不同,其散热面也不一样。对于散热面在底部的元器件,可在其底部安装铝质导热片,两端与机箱壳体连接,导热片与元器件以及边框结合处填充导热填料,用来减小热阻,增强导热效果。同时,为了防止短路,导热片上用于固定元器件的螺钉孔以及用于元器件插针通过的孔要嵌入聚四氟乙烯绝缘垫,且绝缘垫端部突台具有一定的厚度,从而保证在导热片与印制板之间留有一定的间隙,具体连接方式如图 1 所示。导热片短边与机箱壳体直接接触(接触面填充有导热填料),绝大部分热量先传导至导热片,再由导热片传导至机箱壳体,最后由壳体传导至仪器安装板进行散热。对于散热面在顶部的元器件,将导热片用导热填料贴在元器件上表面,两端与机箱壳体导热连接,同时为了减小接触热阻,增强散热效果,在导热片与机箱壳体之间涂有导热胶,具体连接方式如图 2 所示,导热片除了短边与机箱壳体直接接触(接触面填充有导热填料)外,还通过导热填料与元器件上表面紧密连接。绝大部分热量先传导至导热片,再由导热片传导至机箱壳体,最后由壳体传导至仪器安装板进行散热。

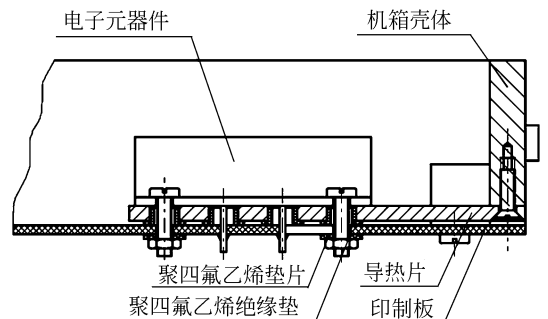


图 1 元器件底面安装导热片安装示意图

Fig. 1 Scheme of radiator installed in the bottom of electronic component for cooling

空间相机电子设备的印制板均采用多层板,且层间有内电层,元器件引线安装采用金属化镀覆孔,以降低引线至印制板的热阻,增强印制板的导热效果。印制板和机箱壳体之间采用搭接式的

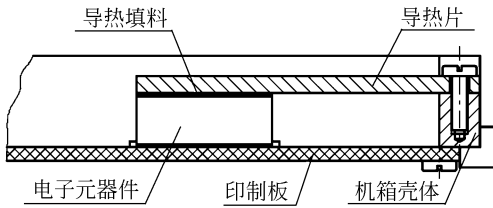


图 2 表面贴导热片导热安装示意图

Fig. 2 Scheme of radiator installed in the top of electronic component for cooling

固定形式,为了增强机箱与印制板的导热耦合,在接触面填充导热填料,相机电子设备箱体表面(除连接底面外)要求进行发黑处理( $\epsilon = 0.85$ ),用于提高设备对非密封舱段的辐射散热能力。同时,为了对电子设备的热量进行热疏导,这里利用了仪器安装板的热容,将设备与仪器安装板之间接口界面采用光滑面接合,结合面处涂抹导热填料,以增强热传导性。

总体来看,元器件主要通过导热片将热量传递到机箱壳体上,最后传递到热沉以及舱内的环境当中。

### 2.2 散热效果估算

为了对其散热效果进行考察,同时也为了指导电子设备其它部分的热设计工作,本文经过简化建立了散热通道的模型并对模型进行了求解。对于其模型的建立主要进行了以下的假设:(1)忽略了元器件与 PCB 之间的换热;(2)忽略了导热片、元器件与内部构件之间的辐射换热。根据上面的假设建立了如图 3 所示的元器件散热通道的简化模型并根据模型进行了热阻分析,同时以某个器件为例对散热模型进行了求解。

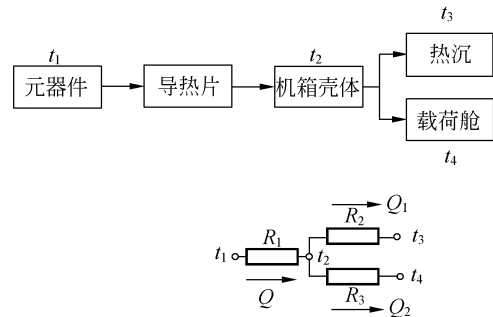


图 3 元器件散热通道的简化模型及热阻分析

Fig. 3 Simplified model and thermal resistance analysis of heat dissipation for electronic component

图中,  $R_1 = R_{\text{contact}_1} + R_{\text{contact}_2} + R_{\text{radiator}}$ , 其中,  $R_{\text{contact}_1}$  为元器件与导热片之间的接触热阻;  $R_{\text{contact}_2}$  为导热片与机箱壳体之间的接触热阻;  $R_{\text{radiator}}$  为导热片的传导热阻。

$R_2$  为机箱壳体的传导热阻,  $R_3$  为机箱表面与载荷舱内部环境之间的辐射热阻,  $t_1$  为器件的表面温度,  $t_2$  为机箱壳体的温度,  $t_3$  为热沉的温度,  $t_4$  为载荷舱内部环境温度。

下面以电子设备内某一元器件为例对模型进行估算。该器件的发热功耗为 1.95 W, 器件表面积为  $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , 导热片的规格为  $41 \text{ mm} \times 53 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ , 与机箱壳体的搭接面积为  $2.1 \text{ m} \times 10^{-4} \text{ m}$ , 导热片与元器件和机箱之间的连接机面均填充导热填料, 其传热系数  $h$  按照  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  计算, 机箱表面发射率  $\epsilon = 0.85$ , 角系数  $f$  近似为 1, 斯忒藩-玻尔兹曼常数  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ , 导热片的材料为纯铝, 其热导率  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 机箱壳体的材料为镁合金, 其热导率  $\lambda = 130 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 热沉温度和舱内环境温度均为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

首先计算  $R_1$ 。这时需要分别计算  $R_{\text{contact}_1}$ 、 $R_{\text{contact}_2}$  和  $R_{\text{radiator}}$ , 根据上述已知条件,  $h_{\text{contact}_1} = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $A_{\text{contact}_1} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,  $h_{\text{contact}_2} = 1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $A_{\text{contact}_2} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , 则:

$$R_{\text{contact}_1} = \frac{1}{A_{\text{contact}_1} \cdot h_{\text{contact}_1}} = \frac{1}{1000 \times 1.6 \times 10^{-3}} = 0.625 (\text{K}/\text{W}),$$

$$R_{\text{contact}_2} = \frac{1}{A_{\text{contact}_2} \cdot h_{\text{contact}_2}} = \frac{1}{1000 \times 2.1 \times 10^{-4}} = 4.7619 (\text{K}/\text{W}),$$

对于导热片,  $h_{\text{radiator}} = \lambda/d = 236/0.053 = 4452.8302 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,  $A_{\text{radiator}} = 1.025 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ , 则:

$$R_{\text{radiator}} = \frac{1}{A_{\text{radiator}} \cdot h_{\text{radiator}}} = \frac{1}{4452.8302 \times 1.025 \times 10^{-4}} = 2.19 (\text{K}/\text{W}),$$

所以,  $R_1 = R_{\text{contact}_1} + R_{\text{contact}_2} + R_{\text{radiator}} = 0.625 + 4.7619 + 2.191 = 7.5779 (\text{K}/\text{W})$ 。

然后计算  $R_2$  和  $R_3$ 。根据实际情况, 可取  $h_2 = \lambda/d = 130/0.096 = 1354.1667 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,

$A_2 = 2.46 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $h_3 = f \cdot \epsilon \cdot \sigma = 0.85 \times 5.67 \times 10^{-8} = 4.8195 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ,  $A_3 = 0.2123 \text{ m}^2$ , 则:

$$R_2 = \frac{1}{A_2 \cdot h_2} = \frac{1}{1354.1667 \times 2.46 \times 10^{-4}} = 3.0019 (\text{K}/\text{W}),$$

$$R_3 = \frac{1}{A_3 \cdot h_3} = \frac{1}{4.8195 \times 10^{-8} \times 0.2123} = 9.7735 \times 10^7 (\text{K}^4/\text{W}),$$

则由公式  $\Delta t = Q \cdot R$  可得  $\Delta t_2 = Q_1 \cdot R_2$ ,  $\Delta t_3 = Q_2 \cdot R_3$ , 其中  $Q$  为电子元器件热功耗,  $\Delta t_2 = t_2 - T_3$ ,  $\Delta t_3 = t_2^4 - t_4^4$ 。由已知  $t_3 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_4 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 则:

$$t_2 - 30 = Q_1 \cdot 3.0019, \quad (1)$$

$$(t_2 + 273)^4 - (30 + 273)^4 = Q_2 \cdot 9.7735 \times 10^7, \quad (2)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 = 1.95 (\text{W}), \quad (3)$$

联立(1)、(2)和(3)式可得:

$$\begin{cases} t_2 - 30 = Q_1 \cdot 3.0019 \\ (t_2 + 273)^4 - (30 + 273)^4 = Q_2 \cdot 9.7735 \times 10^7 \\ Q = Q_1 + Q_2 = 1.95 \end{cases}$$

$$\text{解得} \begin{cases} Q_1 = 0.4392 \\ Q_2 = 1.5108 \\ T_2 = 31.3183 \end{cases}$$

由公式  $\Delta t = Q \cdot R$  可得  $\Delta t_1 = Q \cdot R_1$ , 即  $t_1 - t_2 = Q \cdot R_1$ , 将  $t_1$ 、 $Q$  和  $R_1$  的值带入可得  $t_1 - 31.3183 = 1.95 \times 7.5779$ , 所以  $t_1 = 46.09 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

如果不采取散热措施, 则元器件工作时产生的热量由印制板传导至机箱壳体进行散热, 而印制板用的绝缘材料的导热系数非常小, 只能依靠内电层进行散热, 而内电层厚度一般为  $35 \mu\text{m}$ , 材料为铜, 假设铜层的面积与导热片的面积相同, 则元器件到机箱壳体这一环节的热阻  $R_1$  约为  $98 \text{ K}/\text{W}$ , 根据  $t_1 - t_2 = Q \cdot R_1$  可得元器件的温度  $t_1$  为  $222.4 \text{ }^\circ\text{C}$ , 由此可以看出, 采取散热措施后, 散热效果明显。由于在模型的建立和求解的过程中采取了一定的假设和近似, 所以根据模型求得的结果应该大于实际的结果。

### 3 电子元器件温度预示

决定电子元器件温度的因素主要是器件本身

的热功耗、器件周边环境温度以及器件内部到周围环境的传热热阻。

热功耗是电子元器件的功耗变成热能的部分。电子元器件的热环境如图 4 所示, 器件周边环境温度主要有热传导、对流和辐射边界条件, 热传导边界条件主要是指电子元器件所安装的印制板温度以及印制板所安装的机箱壳体的温度; 对流边界条件主要指器件周围空气温度; 辐射边界条件主要指器件表面辐射对象, 如对应机箱箱壁温度、发射率  $\epsilon$ 、器件与箱壁相对位置以及周围发热器件热状态等。器件内部到周围环境的传热热阻是指器件内部发热热量向外传递过程中所遇到的阻力, 一般来说, 由结点向外传递热量过程中所遇到的热阻包括: (1) 结到壳之间的热阻  $R_{\text{JC}}$ , (2) 壳到印制板之间的热阻  $R_{\text{CB}}$ , (3) 结到环境之间的热阻  $R_{\text{JA}}$ 。其中  $R_{\text{JC}}$  表示的是特定的通过传导方式进行热传递的散热通路的热阻, 它取决于器件的封装材料和特定的封装设计, 而  $R_{\text{JA}}$  则表示的是通过传导、对流、辐射等方式进行传递的散热通路的热阻,  $R_{\text{JC}}$  表示的仅仅是散热通路到封装表面的热阻, 因此,  $R_{\text{JC}}$  总是  $< R_{\text{JA}}$ 。

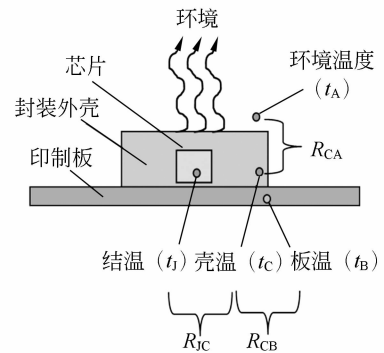


图 4 电子元器件热环境示意图

Fig. 4 Scheme of thermal ambient for electronic component

电子元器件温度预示:

$$t_J = t_C + QR_{\text{JC}}, \quad (4)$$

$$t_C = t_A + QR_{\text{CA}}, \quad (5)$$

式中,  $R_{\text{JA}} = R_{\text{JC}} + (R_{\text{CB}}R_{\text{CA}})/(R_{\text{CB}} + R_{\text{CA}})$ 。

其中,  $t_J$  为元器件结温;  $t_C$  为元器件壳温;  $t_A$  为环境温度;  $R_{\text{JC}}$  为结到壳之间的热阻;  $R_{\text{CB}}$  为壳到线路板之间的热阻;  $R_{\text{JA}}$  为结到环境之间的热阻;  $R_{\text{CA}}$  为壳到环境之间的热阻。

在实际的分析计算中,通常得到的是电子元器件的壳温,而一般元器件的温度设计指标为结温,因此需要根据元器件制造商提供的结壳热阻并通过式(4)进行计算得到器件工作时的结温,据此来判断计算的结果是否满足实际要求。

## 4 热控系统仿真分析

电子设备热分析,又称为热模拟,是利用数学的手段获得其温度分布的方法,它可以使电子设备设计人员和可靠性设计人员在设计阶段就能发现产品的热缺陷,从而改变其设计。热分析必须在进行印制板布线之前的初步设计就同步进行,而且要贯穿于整个设计的全过程,以便及时发现设计上的缺陷并及时修改,这样可以缩短研制周期,提高设计质量<sup>[5-10]</sup>。空间相机电子设备安装在舱内的仪器板上,舱内环境按照 30 ℃ 计算,根据热设计中采取的热控措施,利用 I-DEAS/TMG 有限元软件对其热控系统进行了仿真分析。

### 4.1 热分析模型的建立

综合考虑设备的热量传递方式和结构设计特点,建立了有限元模型。在建模的过程中主要考虑了以下几点:

- (1) 设备壳体为薄壳结构,采用 Shell 单元划分网格;
- (2) 印制板和散热板均为薄板结构,划分为 Shell 单元;
- (3) 元器件均采用 Solid 单元进行模拟,单元尺寸按照封装尺寸计算;
- (4) 将环境温度设置为 30 ℃,将电子设备与仪器板的安装界面视为热沉,定义温度边界为 30 ℃;
- (5) 每块印制板上的热载荷分别按照元器件清单所提供的数据加载到相应的部位;
- (6) 接口板上两个 DC/DC 模块互为备份,所以,热分析中可以只对其中一个加载热流密度,来评估 DC/DC 工作时的平衡温度;
- (7) 忽略元器件管脚与周围环境的辐射传热;
- (8) 忽略印制板与壳体之间通过接插件的导热;
- (9) 忽略印制板之间通过接插件的导热。

模型中一共建立 23 个耦合,划分了 1 695 个

单元,热模型如图 5 所示。

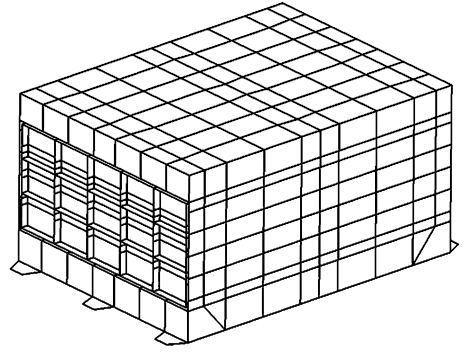


图 5 空间相机电子设备热分析模型

Fig. 5 Thermal model of electronic equipment of space camera

根据热设计采用的热控措施所得到的主要分析计算参量见表 1。

表 1 主要材料计算参数

Tab. 1 Main parameters of materials for electronic equipment

材料名称	应用部位	发射率 $\epsilon_h$	导热率 $\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
铝合金	机箱壳体	0.85	159
铁-镍-钴合金	元器件 ( $D_1 D_2 D_3 D_4 D_8$ )	0.1	20
陶瓷	元器件 ( $D_5 D_6 D_7$ )	0.5	18
环氧玻璃布	印制板	0.5	14

### 4.2 仿真结果

根据建立的相机电子设备热分析模型,对热控系统进行了仿真分析。经稳态计算所得到的摄像机关键部件的温度数据见表 2 和表 3,元器件及印制板的温度分布云图如图 6~图 7 所示,其中表 1 为印制板的温度分布数据,表 3 为根据热分析中的元器件壳体最高温度和元器件壳温温差计算公式(4)计算得到元器件的最高结温。

表 2 电子设备印制板温度分布数据

Tab. 2 Temperatures of PCBs of electronic equipment

印制板序号	印制板名称	温度分布(℃)
1	电源板	35.6~39.1
2	控制板	38.0~44.7
3	接口板	37.4~45.0

表 3 电子设备元器件工作状态下的壳温、结温列表

Tab. 3 Case temperatures and die temperatures of electronic components

元器件名称	最高壳温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	最高结温 ( $^{\circ}\text{C}$ )	结温降额热控 指标( $^{\circ}\text{C}$ )
$D_1$ (2.5 W)	45.6	52.4	100
$D_2$ (2.0 W)	45.1	50.5	100
$D_3$ (3.64 W)	41.1	50.9	100
$D_4$ (5.85 W)	44.4	60.2	100
$D_5$ (1.95 W)	45.5	47.7	105
$D_6$ (1.16 W)	45.3	53.2	105
$D_7$ (1.0 W)	43.4	45.4	105
$D_8$ (12.6 W)	64.5	88.5	105

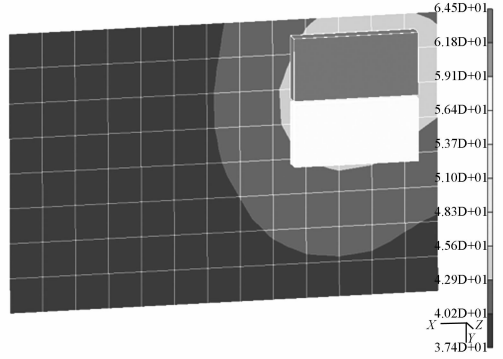


图 8 接口板大功率元器件温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution of components on interface PCB

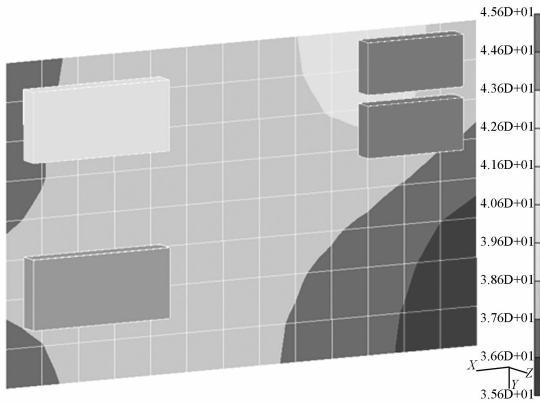


图 6 电源板上大功率元器件温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of components on power PCB

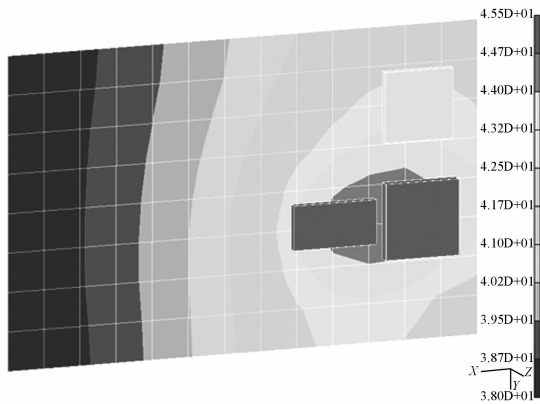


图 7 控制板大功率元器件温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution of components on control PCB

从仿真分析计算的结果可以看出：

(1) 空间相机电子设备安装在舱内的仪器板

上, 所以将仪器板视为热沉, 印制板的温度为  $35.6 \sim 45.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 各印制板上元器件的壳温为  $41.1 \sim 64.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 经过计算得到的结温为  $45.4 \sim 88.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 印制板上的元器件的温度随着各自的热功耗的不同而不同, 最高壳温的元器件为接口板上的  $D_8$ , 温度值为  $64.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最高结温为  $88.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 相应的接口板的温度值也最高, 为  $45 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 总体来看, 采取热控措施后, 相机电子设备各元器件的工作温度均低于降额热控温度指标。

### 5 结 论

电子设备热控系统设计的基本任务是在热源至热沉之间提供一条低热阻的通路, 保证热量顺利传递出去, 以满足设备可靠性要求。本文根据电子设备的空间环境和结构特点, 采用传导和辐射这样具有可靠性高, 结构、工艺简单, 成本低等特点的散热技术对其热控系统进行了设计。针对需要散热的电子元器件、印制板以及机箱采取了加导热片、表面发黑处理、涂导热填料等散热措施进行了设计, 同时以某个器件为例, 对散热效果进行了估算。估算结果表明, 采取散热措施后, 该器件温度为  $46.09 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 而未采取散热措施时, 该器件温度高达  $222.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 散热效果明显。根据设备的空间环境和采取的热控措施, 对整个热控系统进行了仿真分析, 仿真结果表明, 电子设备的印制板的温度为  $35.6 \sim 45.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 电子元器件的结温为

45.4~88.5℃,均低于降额热控温度指标,该电子设备热控系统的设计合理,能够满足设计要求,

所得结论可以为空间相机电子设备的结构设计和电子学设计提供依据。

### 参考文献:

- [1] 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)
- [2] 陈长征,赵贵军,张星祥,等. 空间光学镜头可适应边界温度的 CAE 计算方法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(5):668-673.  
CHEN CH ZH, ZHAO G J, ZHANG X X, *et al.*. A calculating method for temperature tolerance of space telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(5):668-673. (in Chinese)
- [3] 黄冬梅,童水光,蔡巧言. 空间环境下某电子产品的热设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(5):48-50.  
HUANG D M, TONG SH G, CAI Q Y. Thermal design of electronic product under space environment [J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2005(5):48-50. (in Chinese)
- [4] HARVEST J, FLESCHER S A, WEINTSTEIN R D. Modeling of the thermal effects of heat generating devices in close proximity on vertically oriented printed circuit boards for thermal management applications [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 46:253-261.

- [5] FLEISCHER A S, WEINSTEIN R D, KHOBRAGADE S A. Forced convective cooling of electro-optical components maintained at different temperatures on a vertically oriented printed circuit board [J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technology*, 2004, 27(2):296-304.
- [6] WEISS J, LANGHORST F. Thermal analysis of electronic packaging [J]. *Australian Electronics Engineering*, 1988, 21(8):62-64.
- [7] DUMERCY L, GLISES R, LOUAHLIA-GUALOUS H, *et al.*. Thermal management of a PEMFC stack by 3D nodal modeling [J]. *Journal of Power Sources*. 2006, 156: 78-84.
- [8] 李志敏,林越伟,黄俊,等. PCB 走线检测的预处理算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2):272-276.  
LI ZH M, LIN Y W, HUANG J, *et al.*. Preprocess algorithm of PCB line detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2):272-276. (in Chinese)
- [9] VELLVEHI M, JORDA X, GODIGNON P, *et al.*. Coupled electro-thermal simulation of a DC/DC converter [J]. *Microelectronics Reliability*, 2007, 47:2114-2121.
- [10] 宋洪涛,宾鸿赞. 热仿真技术在电子设备结构设计中的应用[J]. 应用科技, 2001, 28(8):4-6.  
SONG H T, BIN H Z. Application of thermal simulation in the structural design of electronic system [J]. *Applied and Science Technology*, 2001, 28(8):4-6. (in Chinese)

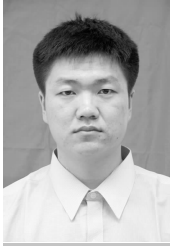
### 作者简介:



陈立恒(1979—),男,吉林农安人,博士,助理研究员,2002年,2005年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,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



吴清文(1968—),男,四川简阳人,博士,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得硕士、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制技术的研究。E-mail: wuqw@ciomp.ac.cn



罗志涛(1980—),男,吉林省吉林市人,硕士研究生,研究实习员,2003年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事空间光学遥感器热控设计的研究。E-mail: zhi-tao@tom.com



江帆(1983—),男,湖北仙桃人,硕士,研究实习员,2004年,2007年分别于中国科技大学分别获得学士和硕士学位,主要从事空间光学遥感器热控制技术方面的研究。E-mail: gholethe@126.com



董吉洪(1972—),男,吉林长春人,研究员,主要从事光学精密机械、光学遥感技术等方面的研究。E-mail: dongjihong2002@sohu.com

## ● 下期预告

# 喇曼放大器中噪声的性能影响

袁建国,张本,叶文伟

(重庆邮电大学 光纤通信技术重点实验室,重庆 400065)

对拉曼放大器(RA)的 ASE 噪声、等效自发辐射因子、等效噪声系数以及 RA 中 ASE 噪声、瑞利噪声、光纤长度和开关增益分别对光接收机信噪比的影响进行了理论分析,并对双重瑞利背向散射噪声进行了理论计算,且进行了相关数值仿真。计算与仿真结果表明:在同一信号输入条件下,RA 相对掺铒光纤放大器(EDFA)能提高光接收机的信噪比;RA 的等效自发辐射因子小于 1 且其随开关增益的增加而减小,因而优于 EDFA;RA 的瑞利噪声可以忽略的条件为 RA 的增益小于 15 dB;并且还得到对优化设计 RA 具有重要参考价值的一些其它结论。