

红外笼模拟外热流方法对空间相机温度的影响分析

耿利寅¹, 李国强¹, 潘增富²

(1. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; 2. 航天东方红卫星有限公司, 北京 100094)

摘要: 空间相机的热平衡试验中, 一般采用红外笼—热流计的闭环控制系统来模拟相机进光口处的外热流。为研究该种热流模拟方法对相机温度场的影响, 建立了简化的模型进行分析。分析结果表明, 红外热流模拟对相机温度场的影响体现在相机整体温度水平和光学件温度均匀性两个方面。对于有精密控温要求的空间相机来说, 这一影响产生的误差是必须考虑的。

关键词: 空间相机; 温度; 热平衡试验; 红外笼; 热流计

中图分类号: V416.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379 (2007) 03-0164-04

1 引言

在空间相机的热平衡试验中, 一般采用红外笼—热流计的闭环控制系统来模拟进光口处的外热流。以热流计的温度为控制目标, 调整红外笼上施加的功率, 模拟相机进光口处的到达外热流^[1,2]。

实际热平衡试验中, 用红外笼模拟外热流产生的误差有多方面的原因, 如热流计的漏热、热流计温度测量的误差、红外笼-热流计的标定误差等。关于这方面的问题, 已经有研究者做过深入的分析 and 讨论, 不在本文的考虑范围内。

在理想情况下, 假设消除了上述误差, 红外笼模拟的外热流完全正确, 那么采用该种方式进行试验还会对试验件的温度水平和温度分布产生哪些影响呢? 针对这个问题, 本文建立了简化模型, 并进行了分析。

2 对相机整体温度水平的影响分析

在相机的热平衡试验中, 用红外笼进行热流模拟对相机整体温度水平的影响与两个方面有关: 一方面, 试验中相机镜筒从红外笼净吸收的热量与在轨条件下吸收的外热流不相等; 另一方面, 红外笼的存在遮挡了相机镜筒向热沉的部分散热。红外笼对相机温度水平的影响是以上两方

面综合作用的结果。

2.1 分析和推导

分析如图1所示的简化模型。热流计(节点1)通过一根尼龙线安装在相机镜筒(节点2)进光口端面(虚拟节点2')处, 其敏感面与相机进光口端面平行且朝向外侧。为了专门分析红外笼对试验结果的影响, 此处假定热流计为理想的绝热型热流计, 不考虑其敏感面与背面之间的漏热以及热流计的遮挡等因素引起的误差。

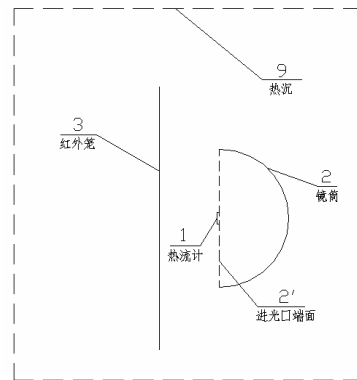


图1 相机进光口外热流模拟示意图

Fig. 1 Sketch of heat flux simulation at the camera window

首先考虑热流计的情况。为了模拟某个到达的热流密度 q , 热流计的平衡温度需控制到 T_1 , 则有 $q = \sigma T_1^4$, 其中 σ 为斯忒藩-玻耳兹曼常数。

收稿日期: 2007-03-27; 修回日期: 2007-05-17

作者简介: 耿利寅(1974-), 男, 硕士学位, 工程师, 现从事航天器及其有效载荷的热设计工作。联系电话: (010)68744175;

E-mail: gengliyiyin@yahoo.com.cn.

考虑图1中热流计敏感面的热交换情况, 并利用灰体辐射换热的互换性原理^[1,3], 可以得到:

$$Q_{2吸} = A_3 \varepsilon_3 B_{3-1} \sigma (T_3^4 - T_1^4) = A_1 \varepsilon_1 B_{1-3} \sigma (T_3^4 - T_1^4); \quad (1)$$

$$Q_{1放} = A_1 \varepsilon_1 B_{1-9} \sigma (T_1^4 - T_9^4). \quad (2)$$

以上两式中: A_n 为节点 n 的面积; ε_n 为节点 n 的红外发射率; B_{m-n} 为节点 m 至节点 n 的辐射换热吸收因子; T_n 为节点 n 的温度, K。以下各式中符号物理意义按此类推。

对于理想的绝热型热流计, 其敏感面达到热平衡时, 有 $Q_{1吸} = Q_{1放}$, 因此由(1)、(2)两式可得

$$B_{1-3} (T_3^4 - T_1^4) = B_{1-9} (T_1^4 - T_9^4). \quad (3)$$

考虑到热沉(节点9)温度的4次方相对于其他节点温度的4次方可忽略, 故 $T_9^4 \approx 0$; 并且 $B_{1-1} + B_{1-2} + B_{1-3} + B_{1-9} = 1$, 由于热流计相对热沉(节点9)和红外笼(节点3)的面积很小, $B_{1-1} \approx 0$; 同时, 由于热流计敏感面朝向镜筒(节点2)外侧, 它与节点2之间不存在辐射换热关系, 即 $B_{1-2} = 0$, 由此得到 $B_{1-3} + B_{1-9} = 1$; 所以, (3)式最终可简化为

$$T_3^4 = T_1^4 / B_{1-3}. \quad (4)$$

另外, 考虑图1中相机镜筒从红外笼吸收的热量和向热沉的散热分别为

$$Q_{2吸} = A_2 \varepsilon_2 B_{2-3} \sigma (T_3^4 - T_2^4) = A_2 \varepsilon_2 B_{2-3} \sigma (T_3^4 - T_2^4), \quad (5)$$

将(4)式代入(5)式, 得:

$$Q_{2吸} = A_2 \varepsilon_2 \sigma T_1^4 \frac{B_{2-3}}{B_{1-3}} - A_2 \varepsilon_2 B_{2-3} \sigma T_2^4; \quad (6)$$

$$Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 (1 - B_{2-2} - B_{2-3}). \quad (7)$$

所以, 在试验中由外热流和热沉引起的相机镜筒净热流为:

$$Q_{2吸} - Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma T_1^4 \frac{B_{2-3}}{B_{1-3}} - A_2 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 (1 - B_{2-2}). \quad (8)$$

试验中, 热流计布置在相机进光口端面上。理想情况下, 通过红外笼和热流计标定试验确定的热流计位置合理, 能完全代表相机进光口端面与红外笼、热沉的换热关系, 即热流计温度能完

全反映到达相机进光口端面的热流情况^[4], 满足 $B_{2-3} / B_{1-3} = 1$, 则(8)式可表达为:

$$Q_{2吸} - Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma T_1^4 \frac{B_{2-3}}{B_{2-3}} - A_2 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 (1 - B_{2-2}). \quad (9)$$

式中:

$$\frac{B_{2-3}}{B_{2-3}} = \frac{A_2 B_{3-2}}{A_2 B_{3-2}}; \quad (10)$$

$$B_{3-2} = \frac{\phi_{3-2} \varepsilon_2}{1 - \phi_{2-2} (1 - \varepsilon_2) - (1 - \varepsilon_2) (1 - \varepsilon_3) \phi_{2-3} \phi_{3-2}}; \quad (11)$$

$$B_{3-2'} = \frac{\phi_{3-2'} \varepsilon_{2'}}{1 - (1 - \varepsilon_{2'}) (1 - \varepsilon_3) \phi_{2'-3} \phi_{3-2'}}; \quad (12)$$

$$1 - B_{2-2} = \frac{1 - \phi_{2-2} - (1 - \varepsilon_3) \phi_{2-3} \phi_{3-2}}{1 - \phi_{2-2} (1 - \varepsilon_2) - (1 - \varepsilon_2) (1 - \varepsilon_3) \phi_{2-3} \phi_{3-2}}; \quad (13)$$

(10)~(13)式中 ϕ_{m-n} 为节点 m 对节点 n 的角系数。

2.2 讨论

在轨条件下, 由于没有红外笼, 相机直接与空间背景(或热沉)发生热交换, 其吸收和放出的热量分别为:

$$Q_{2吸} = \frac{A_2 \varepsilon_2 (1 - \phi_{2-2}) \sigma T_1^4}{1 - (1 - \varepsilon_2) \phi_{2-2}}; \quad (14)$$

$$Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 \frac{1 - \phi_{2-2}}{1 - (1 - \varepsilon_2) \phi_{2-2}}. \quad (15)$$

因此, 由于外热流和热沉引起的相机净热流为

$$Q_{2吸} - Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{1 - \phi_{2-2}}{1 - (1 - \varepsilon_2) \phi_{2-2}}. \quad (16)$$

试验中, 红外笼一般采用高发射率表面。当 ε_3 接近于1时, 将式(10)~(13)简化代入式(9), 并考虑到 $A_{2'} = A_2 (1 - \phi_{2-2})$, 得到相机镜筒的净热流为

$$Q_{2吸} - Q_{2放} = A_2 \varepsilon_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \frac{1 - \phi_{2-2}}{1 - (1 - \varepsilon_2) \phi_{2-2}}. \quad (17)$$

对比发现式(16)和(17)完全相同, 说明只要 ε_3 足够高, 试验中采用红外笼-热流计系统在相机进光口处模拟外热流的方法能够准确模拟相机整体在轨道条件下的热环境, 试验中相机整体的温度水平是合理准确的。

2.3 红外笼发射率 ϵ_3 产生的误差估算

以上分析已经说明, 在红外笼红外发射率 ϵ_3 接近 1 时, 采用红外笼模拟相机进光口处外热流的方法是合理可行的。但实际上 ϵ_3 不可能达到 1, 由此产生的误差可通过一个简化的模型进行估算。

仍以图 1 模型为例, 假设相机镜筒是一个半径为 r 的半球面; 红外笼是半径为 $(r+100\text{ mm})$ 的圆, 正对相机, 并与相机进光口端面相距 100 mm。为减小分析误差, 计算中采用解析方法求 ϕ_{2-2} 、 ϕ_{3-2} 等各面之间角系数。

分析式(8), 区分其中的常量变量, 并以“资源一号”运行轨道对地面夏至到达外热流 (334.62 W/m^2) 为例进行计算。可将式(8)改写为

$$Q_{2吸} - Q_{2放} = A_2 \epsilon_2 (P \cdot 334.62 - R \sigma T_2^4), \quad (18)$$

式中: $P = B_{2-3} / B_{1-3}$, $R = 1 - B_{2-2}$ 。根据式(10)~(13), 当 ϵ_3 取某一定值时, P 、 R 均为常数。

根据不同的 ϵ_3 取值, 计算式(18), 即可比较 ϵ_3 对相机净热流的影响。图 2 为不同 ϵ_3 取值时计算的结果。

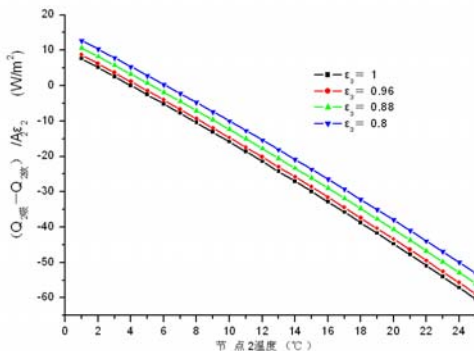


图 2 不同 ϵ_3 取值时节点 2 的净热流
Fig. 2 Net heat flux at node 2 under different values of ϵ_3

图 2 的结果说明: 采用红外笼模拟相机进光口处外热流时, 由于 ϵ_3 不可能达到 1, 引起被加热节点实际净热流大于在轨情形。如不考虑主动控温等其他因素, 试验中被加热节点温度将高于轨道模型中的计算温度。假设某相机镜筒内表面面积 2 m^2 , 发黑处理后的 $\epsilon_2 = 0.85$, 并取 $\epsilon_3 = 0.88$ 时, 试验中将镜筒控温到 $12\text{ }^\circ\text{C}$ 所需的主动加热功率将比在轨真实情况少 6 W 左右。

3 对光学镜头温度均匀性的影响

为分析这一问题, 用 Nevada 和 SINDA/G 软件建立一个简单的相机模型, 如图 3 所示。相机镜筒为矩形, 进光口朝向 +Z 向, 且正对地; 镜筒侧面安装一个矩形光学镜头, 该镜头在模型中划分为 8 个节点, 分别为 1#~8# (图 3)。模型分两种情况: 一种为空间模型, 计算轨道外热流; 另一种为试验模型, 采用在红外笼上施加一定功率的方法模拟外热流。为了突出外热流或红外笼的影响, 模型中不考虑其他方面的因素, 即不考虑导热和相机的主动控温。外热流按照“资源一号”卫星夏至的轨道参数进行计算, 红外笼-热流计的设置满足卫星热平衡试验方法的相关要求^[2]。通过对比两种情况下光学镜头 Z 方向的温度差, 即可看出红外笼对其温度均匀性的影响。

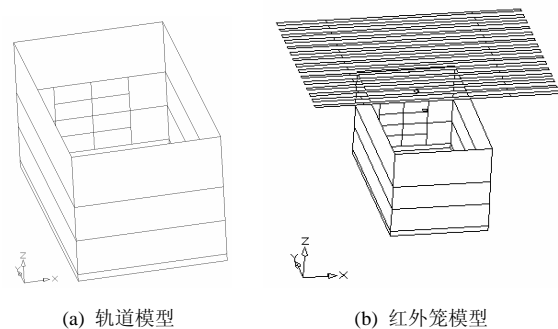


图 3 相机两种模型示意图
Fig. 3 Two models for calculating temperature of camera lens

模型中, 相机镜筒内表面红外发射率也取 0.88, 红外笼表面的红外发射率也取 0.88, 计算了光学玻璃表面的发射率取值 0.8 和 0.1 两种情况, 计算结果见表 1。

表 1 轨道模型和红外笼模型计算的光学玻璃温度均匀性对比

Table 1 Comparison of temperature uniformity of optic lens between orbit model and IR array model

对比项		温度/ $^\circ\text{C}$					
		光学件平均温度	T_1	T_2	T_7	T_8	Z 向最大温差
光学玻璃 ($\epsilon_h=0.8$)	空间模型	-1.52	-4.37	-4.24	1.07	0.42	5.44
	试验模型	-1.36	-1.80	-2.10	-0.95	-0.85	1.25
光学玻璃 ($\epsilon_h=0.1$)	空间模型	2.25	0.07	0.31	4.17	3.74	4.10
	试验模型	2.45	1.87	1.96	2.93	2.87	1.06

表 1 结果表明: 在上述条件下, 采用红外笼

模拟相机进光口的外热流,对相机光学镜头的温度均匀性有明显的影响:试验模型中的镜头Z向温度梯度仅为 $1.06\sim 1.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,远小于空间模型中的 $4.10\sim 5.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。需要说明的是,如果考虑到相机结构和光学件自身导热以及相机热设计中通常采用的主动控温等因素,实际上红外笼对相机镜头温度均匀性的影响并不像表1列出的那样明显;但由于相机光学镜头一般对温度均匀性的要求很高,试验中这个影响往往是不可忽略的。

4 结论

采用红外笼模拟相机进光口的到达外热流,与在轨状态比较在两个方面产生误差:一方面,相机镜筒实际的热量收支与在轨时会有一定的偏差,如不考虑其他影响因素,相机镜筒的试验温度会稍高于在轨温度,对于有主动控温设计的相机镜筒,试验测出的主动加热功率会稍低于实际

在轨需要;另一方面,红外笼对相机光学镜头的温度均匀性有一定影响。对于有精密温度要求的空间相机热设计和热试验,这些误差是必须考虑的。

参考文献 (References)

- [1] 闵桂荣,郭舜. 航天器热控制[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 1998[Min Guirong, Guo Shun. Thermal controlling for spacecraft[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 1998]
- [2] GJB 1033A—2005, 航天器热平衡试验方法[S][GJB 1033A—2005, Method of thermal balance test for spacecraft[S]]
- [3] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 1998[Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat transfer[M]. 3rd edition. Beijing: Advanced Education Press, 1998]
- [4] Q/W 773—1997, 红外辐射热流计通用规范[S][Q/W 773—1997, Universal standard for IR radiometer[S]]