

热屏等温型热流计仿真模型分析

高庆华, 郝殿福

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 文章建立了热屏等温型热流计的简化仿真模型, 对此模型进行稳态和瞬态模拟标定, 并与近似理论分析结果进行比较, 验证了仿真模型的正确性。计算了敏感片背面发射率不同时的静态灵敏度和温度瞬态响应特性, 结果表明, 敏感片背面发射率高时, 瞬态响应速度快, 静态灵敏度低; 在选择敏感片背面发射率时, 要综合考虑静态灵敏度和瞬态响应速度。文章建立的热流计仿真模型可以提供热流计分析平台, 为设计和优化热流计提供参考。

关键词: 热量测量; 仿真模型; 标定; 发射率

中图分类号: V416.8; V416.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2007)05-0310-04

1 前言

在航天器热平衡试验中, 当采用红外加热笼或红外灯阵模拟航天器空间外热流时, 必须测量航天器表面吸收的热流密度。当前测量航天器吸收热流密度的热流计主要采用热屏等温型热流计。但是在使用过程中发现, 该型热流计在测量稳态大热流时误差较小, 而在测量稳态低热流时误差较大; 尽管考虑了非稳态项的影响, 但存在瞬态响应较慢的问题。本文从热流计模型仿真入手, 建立热流计的简化模型, 对此模型进行稳态和瞬态标定, 并与近似理论分析结果进行比较, 验证了仿真模型分析的正确性与可行性; 比较并分析了敏感片背面发射率改变时的静态灵敏度和温度响应时间常数, 并得到相关结论。文中建立

的热流计仿真模型可以为热流计的分析提供平台和基础, 为设计和优化热流计提供参考。

2 热流计仿真模型的建立

为进行模拟标定试验, 建立常规热屏等温型热流计模型(如图1所示)。热流计包括3部分: 敏感片、支撑柱(4个)和热屏。各部分材料、尺寸及物性参数见表1。

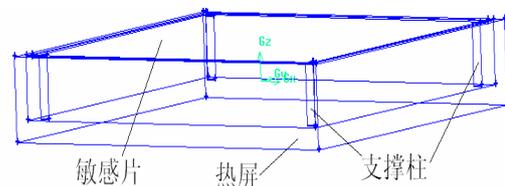


图1 热流计的简化模型

Fig. 1 The simplified model of heat flux sensor

表1 各部分的材料、尺寸及物性参数

Table 1 Material, size and physical parameters of each part

名称	材料	尺寸/mm	密度 ρ / $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	比热 C / $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	导热率 λ / $(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	发射率 ε
敏感片	石英玻璃	40×40×0.2	2100	733	1	0.82(上、侧)
支撑柱	Telfon	$\phi 1.0 \times 5.8$	2130	1060	0.17	1
热屏	Al	43×43×8	2719	871	202.4	1

3 热流计仿真模型的应用

3.1 热流计仿真模型的标定

3.1.1 仿真模型的稳态标定

当热流计在真空低温下使用时, 假设敏感片温度场均匀, 则敏感片有如下热平衡方程^[1]:

$$q_a = F_1 \frac{dT}{d\tau} + F_2(T - T_h) + F_3\sigma(T^4 - T_h^4) + \varepsilon_s\sigma T^4, \quad (1)$$

式中: T 、 T_h 分别为敏感片与热屏的温度, K; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为通过标定数据确定的系数; τ 为时间, s; ε_s 敏感片上表面的发射率; q_a 为敏感片表

收稿日期: 2007-04-25; 修回日期: 2007-06-19

作者简介: 高庆华(1980-), 男, 在读硕士研究生, 专业方向为人机与环境工程。联系电话: (010) 68746142。郝殿福(1967-), 男, 研究员, 硕士学位, 主要从事航天器空间环境模拟试验与研究。联系电话: (010) 68746199。

面的吸收热流密度, W/m^2 。

当式(1)中 $dT/dr=0$ 时, 为稳态标定。

对图 1 建立的热流计模型进行稳态模拟标定。边界条件及简化假设如下: 外热流垂直入射到热流计的上方; 敏感片背面涂黑, 敏感片上表面和侧面发射率均为 0.82; 热屏的底部和侧面保持恒温为 $T_b=323\text{ K}$, 热屏各部分均为黑体表面; OSR 片在空间运行时吸收热流一般不超过 300 W/m^2 , 因此假设吸收热流不大于 300 W/m^2 。

在标定时, 要逐步改变外热流 q_a 的大小, 因此需要提供均匀的外热流, 而在现有模型中没法提供这种均匀热流。为此, 在做这个热流计的模拟验证时, 在敏感片上面加一盖子(见图 2)。盖子距离敏感片 1 mm, 相对敏感片的尺寸很小, 假设盖子为等温黑体, 可以认为盖子顶端提供了均匀热流。模拟时, 通过调节盖子温度的大小来调节敏感片吸收外热流。等温盖子的温度、盖子提供的敏感片吸收外热流大小及模拟得到的敏感片温度的关系见表 2。得到吸收热流为 5 W/m^2 时敏感片的温度分布如图 3 所示。

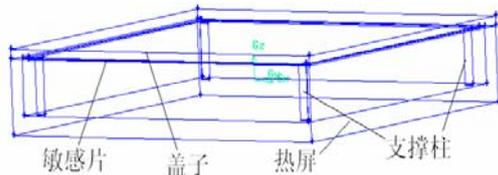


图 2 热流计标定模型

Fig.2 The calibration model of the heat flux sensor

表 2 模拟的外热流及其对应温度

Table 2 Simulated heat flux and the corresponding temperature

吸收热流 $/(W \cdot m^{-2})$	对应盖子温度 $/K$	敏感片中心温度 $/K$
5	101.83	278.67
10	121.10	279.23
25	152.28	280.88
50	181.09	283.56
75	200.41	286.19
100	215.35	288.74
125	227.71	291.22
150	238.33	293.64
175	247.69	296.01
200	256.10	298.31
225	263.75	300.57
250	270.79	302.77
275	277.32	304.93
300	283.42	307.05

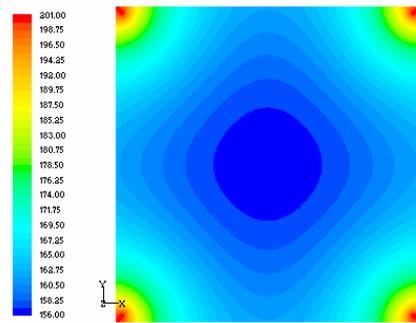


图 3 吸收热流为 5 W/m^2 时敏感片温度场分布
Fig.3 The sensor's temperature field distribution when absorbed heat flux $q=5\text{ W/m}^2$

对表 2 的稳态模拟试验结果进行标定, 得到敏感片吸收热流 q 与敏感片中心温度 T 的关系为 $q=10.278 \times 10^{-8} T^4 + 0.044738827 T - 627.2793348$ 。(2)

稳态标定曲线如图 4 所示。

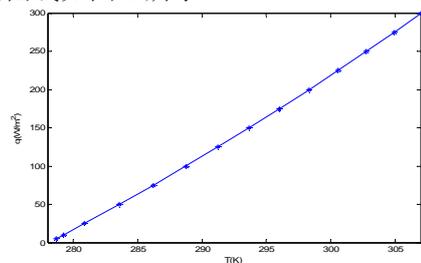


图 4 稳态标定曲线

Fig.4 Steady calibration curve

3.1.2 仿真模型的瞬态标定

瞬态模拟标定时, 分别加入不同的吸收外热流, 逐步改变外加热流的大小, 在每个所加热流密度值下的测量要求延续到敏感片达到热稳定为止。根据敏感片温度变化情况, 改变各个时刻的热流密度为: 0~250 s, 5 W/m^2 ; 250~430 s, 50 W/m^2 ; 430~610 s, 100 W/m^2 ; 610~840 s, 150 W/m^2 ; 840~1050 s, 200 W/m^2 ; 1050~1269.2 s, 250 W/m^2 ; 1269.2~1500 s, 300 W/m^2 。得到模拟的敏感片温度变化情况如图 5 所示。

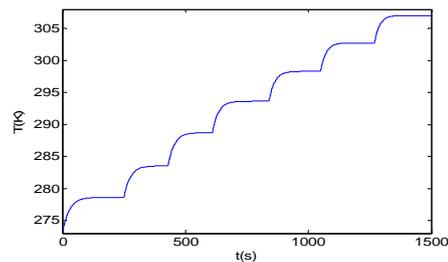


图 5 瞬态标定时敏感片温度变化情况

Fig.5 The sensor's temperature variation in transient calibration

对瞬态标定结果进行处理。参考多元线性方程的参数估计^[2], 令

$$Y = q_a - \varepsilon_s \sigma T^4, \quad X_1 = \frac{dT}{d\tau}, \quad (3)$$

$$X_2 = T - T_h, \quad X_3 = \sigma(T^4 - T_h^4),$$

那么

$$Y = F_1 X_1 + F_2 X_2 + F_3 X_3. \quad (4)$$

对模拟标定过程得到的数据进行处理, 得到 F_1 、 F_2 和 F_3 :

$$F_1 = 231.134731, \quad F_2 = 0.00416993,$$

$$F_3 = 0.998588.$$

得到标定表达式为

$$q_a = 231.134731 \frac{dT}{d\tau} + 0.00416993(T - T_h) + 0.998588 \times \sigma(T^4 - T_h^4) + 0.82 \times \sigma T^4. \quad (5)$$

3.1.3 仿真模型的标定验证

对于 OSR 片热屏等温型热流计的敏感片来说, 其传热方式见图 6。

根据能量守恒, 有

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4, \quad (6)$$

式中: Φ 为敏感片上表面吸收的外热流, W; Φ_0 为敏感片内能变化量, W; Φ_1 为敏感片下表面(除支柱外)通过辐射向热屏传递的热流, W; Φ_2 为敏感片侧面向热屏传递的热流, W; Φ_3 为敏感片通过支柱向热屏的热流, W; Φ_4 为敏感片上表面向外辐射的热流, W。

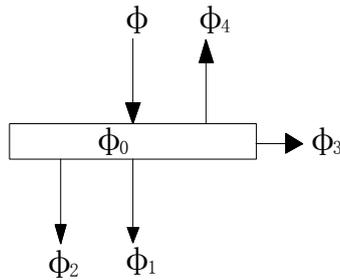


图 6 敏感片传热示意图
Fig.6 Heat transfer of sensor

假设敏感片温度场一致, 则有

$$q_a A = \rho c V \frac{dT}{dt} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_h^4)(A - 4A_0) + \varepsilon_{si} \sigma (T^4 - T_h^4) \cdot 4A_1 + \frac{\lambda_1}{\delta} \cdot 4A_0 (T - T_h) + \varepsilon_s \sigma T^4 \cdot A, \quad (7)$$

式中: q_a 为上表面吸收的热流密度, W/m²; A 、 A_0 、 A_1 分别为敏感片表面积、支柱的截面积和敏感片的侧面积, m²; ε 为敏感片底面发射率; ρ 为敏感片的密度, kg/m³; c 为敏感片比热容, J/(kg·K); ε_{si} 为敏感片上表面和侧面发射率; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ W/(m²·K⁴), 为斯忒藩—玻耳兹曼常量; T 、 T_h 分别为敏感片和热屏的温度, K; λ_1 为支柱的热导率, W/(m·K); δ 为支撑柱长度, m。

得到稳态标定结果为

$$q = 10.378 \times 10^{-8} T^4 + 0.05755073 T - 642.1215239. \quad (8)$$

与式(2)相比较, 结果如图 7 所示。

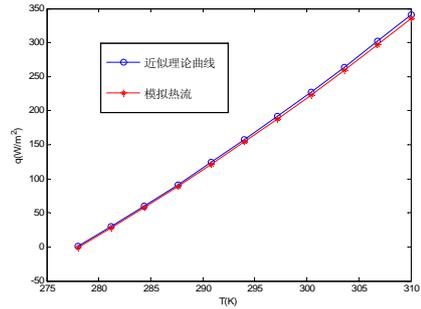


图 7 模拟标定与近似理论标定的比较
Fig.7 Comparison between simulation and theoretical calibration

瞬态标定结果

$$q_a = 230.895 \frac{dT}{d\tau} + 0.05755073(T - T_h) + 1.0103365 \times \sigma(T^4 - T_h^4) + 0.82 \sigma T^4 \quad (9)$$

与模拟标定式(5)很接近。

3.2 敏感片背面不同发射率的影响分析

3.2.1 静态灵敏度

下面考虑敏感片背面发射率 ε 改变时, 敏感片灵敏度的变化情况。根据定义: 传感器的灵敏度为其输出的变化量与引起该变化量的输入变化量之比, 则热流计的静态灵敏度为

$$S = \frac{\Delta T}{\Delta q}. \quad (10)$$

改变 ε 时, 会得到不同灵敏度, 如图 8 所示。当敏感片底面发射率 ε 从 1 降低到 0.013 时, 灵敏度提高显著, 尤其是在低热流段。在吸收热流为 10 W/m^2 时, 灵敏度从 $0.1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ 提高到了 $1 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, 提高 10 倍左右; 当 $\varepsilon > 0.4$ 时, 灵敏度基本稳定在 $0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{k/W}$ 以下, 此时改变 ε 对灵敏度影响不大。

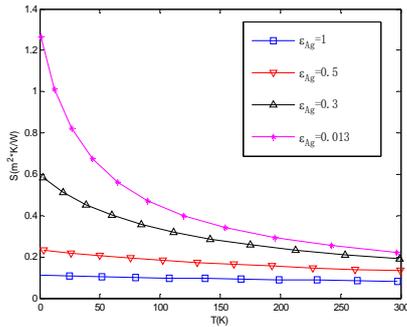


图 8 不同 ε 下的灵敏度比较
Fig.8 Comparison of sensitivity under different values of ε

3.2.2 瞬态阶跃响应特性

主要对热流计阶跃响应时间常数进行分析。参考非稳态传热和传感器的时间常数定义方法, 定义热流计的时间常数为: 过余温度达到初始过余温度的 36.8% 所经历的时间。

$$\frac{T(\tau) - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = 36.8\%, \quad (11)$$

式中: τ 为时间常数, s; T_0 、 T_{∞} 分别为敏感片的初始温度和平衡温度, K。

由于热流计在航天器热试验中的特殊边界条件, 从传感器角度来说, 热流计为一阶非线性系统, 其时间常数与敏感片背面发射率 ε 、面积热容 $\rho c \delta$ 、吸收热流密度 q 、热屏温度 T_h 和初始温度 T_0 有关。对于 OSR 片作为敏感片来说, ρc 、 δ 很难改变, 且 q 是外部变量, 可控的仅为 ε 、 T_h 和 T_0 。固定 $q=5 \text{ W/m}^2$, $T_h=323 \text{ K}$, 作出热流计时间常数与 ε 和 T_0 的关系见图 9。

从图 9 中可以看出: ε 和 T_0 降低时, 时间常数变大; ε 和 T_0 升高时, 时间常数变小。

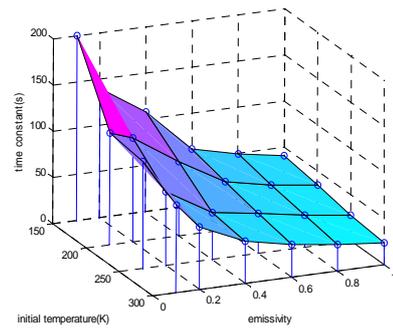


图 9 阶跃响应时间常数比较
Fig.9 Time constant comparison for step response

3.2.3 敏感片背面发射率的选择

当敏感片背面为高发射率涂层时, 热流计有很好的瞬态响应速度, 但静态灵敏度低; 当敏感片背面为低发射率涂层时, 热流计的静态灵敏度高, 但瞬态响应速度低。因此, 选择敏感片背面发射率时, 要综合考虑热流计的瞬态响应速度和静态灵敏度。

4 结论

(1) 本文建立了热屏等温型热流计的仿真模型, 对此模型进行了稳态和瞬态模拟标定, 并与近似理论分析结果进行比较, 验证了仿真模型的正确性与可行性, 为热流计的进一步分析建立了模型基础。

(2) 对敏感片背面发射率改变时的静态灵敏度和温度瞬态响应时间常数进行了比较分析, 背面发射率高时, 静态灵敏度低; 背面发射率低时, 瞬态响应速度快。在选择敏感片背面发射率时, 要综合考虑热流计瞬态响应速度和静态灵敏度;

(3) 建立的热流计仿真模型可以为热流计的分析提供平台和基础, 为设计和优化热流计提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境试验技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 263-265[Huang Bencheng, Ma Youli. Space environment test technology of spacecraft[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 263-265]
- [2] 刘扬, 张华丽. 测量数据处理及误差理论[M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 179-181[Liu yang, Zhang huali. Measure data management and errors theory[M]. Beijing: The Atom Energy Press, 1997:179-181]

