

弹用热流传感器敏感元件的热传导模型研究*

赵亮¹, 彭舒钰², 侯文¹, 邓勇³, 王刚³

(1 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051;

2 中国兵器工业第203研究所, 西安 710065;

3 驻061基地军事代表室, 贵阳 550000)

摘要:为研究导弹燃气发出热流对弹体的影响, 采用热流传感器测量其热流的变化。基于热传导原理热流传感器敏感元件——康铜箔上接收热流并形成温度差, 利用镍铬-康铜热电偶将温度差转换为输出热流信号。考虑了热传导系数为温度的非线性函数这一特点的基础上, 对敏感元件进行导热过程分析, 建立了热传导模型, 编写热传导程序, 得到热流输出信号与被测热流的关系, 通过校准试验测得数据进行对比, 验证模型的正确性。

关键词:热流传感器; 康铜箔; 敏感元件; 热传导系数; 热电偶; 热传导模型

中图分类号: TJ760.32; TP212 文献标志码: A

Heat Transfer Model of Sensitive Element of Heat Flux Sensor for Missiles

ZHAO Liang¹, PENG Shuyu², HOU Wen¹, DENG Yong³, WANG Gang³

(1 Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement

(North University of China), Ministry of Education, Taiyuan 030051, China)

2 No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China;

3 Military Representative Office in 061 Base, Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to study the impact of heat flux on missile body discharging by missile gas, the change of heat flux was measured by heat flux sensor. Using NiCr-Constantan foil thermocouple for temperature difference that formed by receiving the heat flux from sensitive element-Constantan foil based on the theory of heat conduction into heat flux signal. The relationship between heat flux density and output signal of heat flux was worked out with analysis on conduction process and a heat transfer model was developed based on nonlinearity of thermal conductivity relative to temperature that had been considered, program of heat transfer was compiled. Through comparing calculated value with measured value, the accuracy of the model was proved.

Keywords: heat flux sensor; constantan foil; sensitive element; thermal conductivity; thermocouple; heat transfer model

0 引言

导弹在飞行过程中产生的燃气流主要是热辐射和热传导的方式向弹体传递大量的热量, 若不采取有效措施, 可能影响导弹整体的可靠性。弹体热流测量的共同点是表面热流变化快、伴有高压和高速气流, 一次性过程居多, 所以测试技术要求高, 条件苛刻。尽管已经生产不同热流范围和响应时间的热流传感器, 但在弹体热流测量方面仍不能满足现实需要。美国飞行研究中心飞行载荷实验室在热试验中主要采用热电偶进行热结构测试。文献[8]采用了一种类似顺序函数反演的方法, 由测点温度确定表面热流。

在热流测试装置中, 探头是测量最重要环节, 为

了更准确的测量, 就必须把对探头的研究放在主要的方面^[2-5]。文中介绍了一种热流传感器探头的敏感元件——康铜的导热过程, 通过镍铬-康铜热电偶测量敏感元件导热过程的温度差, 建立了热传导模型, 编写热传导程序, 得到热流输出信号与被测热流的关系, 并试验验证模型的正确性。

1 测量原理及指标分析

1.1 测量原理

热流传感器利用镍铬-康铜热电偶测量温度差的原理, 采用 Gardon 计方式测量被测环境的热流。

* 收稿日期: 2012-10-18

作者简介: 赵亮(1987-), 男, 山西长治人, 硕士研究生, 研究方向: 测试计量技术及仪器方面的研究。

当传感器处于有热流量的环境下时,传感器的敏感面涂敷层吸收热量,温度升高,由于传感器涂敷层上的中心位置的升温最大,温度沿着康铜片向圆周形成一个温度梯度,通过测量温度差,从而计算通过传感器表面的热流值。

1.2 弹用热流传感器指标特性分析

导弹飞行过程中,表面热流具有变化快、伴有高压和高速气流等特点,所以测试技术要求高,条件苛刻。为了满足导弹测量任务主要性能要求,主要对热流传感测量范围、精度、工作时间进行分析。

由于导弹空间有限,敏感元件尺寸不大于 $\Phi 15\text{mm}$ 。传感器测量范围 $0 \sim 1.2 \text{ MW/m}^2$, 受限于标定设备,理论上传感器的测量范围还可以再大。测量温度点为 0°C 、 50°C 、 100°C 、 150°C 、 200°C , 标定最高温度同样受限于标定设备,敏感元件为康铜,材料为 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$, 理论上线性较好,温度测量上限为 800°C 。测量时间应满足导弹整个飞行过程,最长工作时间为 100s , 加入水冷系统可以增加测量时间。为达到要求主要对传感器最重要元件——敏感元件康铜进行如下分析。

2 模型建立

2.1 敏感元件模型结构

热流传感器探头中敏感元件结构是由一组铬镍丝-康铜-铬镍丝组成,如图 1 所示。将一根铬镍丝一端焊接在康铜箔中心位置,另一端通过绝缘绝热管作为输出信号一极;另一根铬镍丝

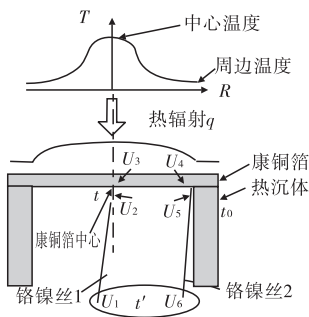


图 1 康铜箔温度分布特性

一端焊接在康铜箔边缘,另一端通过绝缘绝热管作为输出信号另一极,将康铜箔看作热电偶的一极,另一极分别是康铜箔中心处和边缘处铬镍丝,得到热流输出信号 E 。

敏感面是一个薄膜型的康铜圆片,由于薄膜测量端面尺寸较小,所以薄膜热电偶与被测表面之间的对流传热变化也相对较小。热电势是由接触电动势和温差电动势两部分组成。其简化模型结构如图 2 所示。

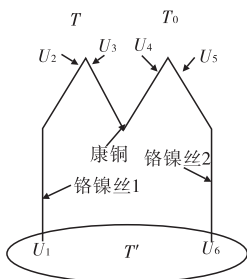


图 2 敏感元件结构模型

温差电动势由铬镍丝 1 和铬镍丝 2 的 $U_1 - U_2$ 、 $U_3 - U_6$ 和康铜箔上的 $U_3 - U_4$ 组成。

接触电动势由铬镍丝 1 与康铜箔中心产生的 $U_2 - U_3$ 和铬镍丝 2 与康铜箔边缘产生的 $U_5 - U_4$ 组成。输出信号 E 为:

$$E = (U_1 - U_2) + (U_2 - U_3) + (U_3 - U_4) + (U_4 - U_5) + (U_5 - U_6) = U_1 - U_6$$

因此两根铬镍丝一端电势差即为输出信号。根据物理知识,温差电动势相对于接触电动势很小,所以 $U_1 - U_2$ 、 $U_5 - U_6$ 、 $U_3 - U_4$ 可忽略,所测 $U_1 - U_6$ 为电势差为:

$$E = (U_2 - U_3) - (U_5 - U_4) = \frac{k}{e} t_c \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_s}\right) - \frac{k}{e} t_0 \cdot \ln\left(\frac{N_c}{N_s}\right) = \frac{k}{e} \ln\left(\frac{N_c}{N_s}\right) (t_c - t_0) \quad (1)$$

其中: t_c 为康铜中心温度; t_0 为康铜边缘温度; N_c 为康铜自由电子数; N_s 为铬镍自由电子数。

由式(1)可知,热流信号与康铜箔中心温度和边缘温度有关,热流信号的极性表明热流的方向,数值正比于热流。如能够得到被测热辐射 q 与康铜箔上 $t_c - t_0$ 的关系,即可完成热流密度的测量。下一节将详细讨论被测热辐射 q 与康铜箔上 $t_c - t_0$ 的关系。

2.2 敏感元件导热计算

以康铜箔圆心为原点,轴线为 Z 轴,根据傅里叶定律,建立圆柱坐标系导热方程:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial t}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} (\lambda \frac{\partial t}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) + \frac{q}{h} \quad (2)$$

其中: ρ 为康铜箔密度; c 为康铜箔比热容; t 为温度; τ 为时间; λ 为康铜箔的热传导系数; q 为吸收的热流密度; h 为康铜箔厚度。

康铜箔很薄,沿厚度方向温度梯度可以忽略,即 $\frac{\partial t}{\partial z} \approx 0$; 又因为康铜箔是圆形且各个径方向散热相同,即 $\frac{\partial t}{\partial \varphi} = 0$, 仅讨论当传热过程达到稳态时的情形,

即 $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$, 将式(2)整理为:

$$0 = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r \frac{\partial t}{\partial r}) + \frac{q}{h} \quad (3)$$

由式(3)得出,热传导系数 λ 的变化会给热流测量带来误差,热传导系数 λ 是温度 t 的函数,将此函数用幂级数展开为:

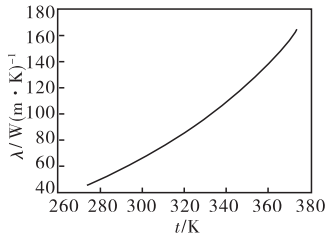
$$\lambda = \sum_{i=0}^n a_i t^i \quad (4)$$

根据文献[6-7]所提供的康铜材料在不同温度下的热传导系数值。不妨取 4 次多项式展开,利用最小二乘法得到:

$$a_0 = 25.15, a_1 = -0.16, a_2 = 6.996 \times 10^{-4},$$

$$a_3 = -3.06 \times 10^{-6}, a_4 = 1.34 \times 10^{-8}$$

在 0 ~ 120℃ 内发现,导热系数曲线比较平展,如图 3 所示,因此取 4 次多项式精度已经足够。



由于在康铜箔上不同位置的温度不同,即温度 t 是位置 r 的函数,上式改写为:

$$\lambda = a_0 + a_1 \cdot t(r) + a_2 \cdot t^2(r) + a_3 \cdot t^3(r) + a_4 \cdot t^4(r) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),并求解上述二阶常微分方程,得如下关系:

$$-30h \cdot a_1 \cdot t^2(r) - 12h \cdot a_4 \cdot t^5(r) - 15h \cdot a_3 \cdot t^4(r) - 20h \cdot a_2 \cdot t^3(r) - 60h \cdot a_0 \cdot t(r) + 60C_1 \cdot h - 60C_2 \cdot h \cdot \ln(r) + 15q \cdot r^2 = 0 \quad (6)$$

其中 C_1, C_2 为积分常数。

C_1, C_2 由圆箔受到热辐射表面温度稳定时的边界条件可以确定。边界条件为:

- 1) 当 $r = 0$ (康铜箔中心处) 时, $\frac{\partial t}{\partial r} = 0$ 。
- 2) 当 $r = r_0$ (康铜箔边缘处) 时, 温度 $t = t_0$ 。

将已确定的 C_1, C_2 代入式(6) 得到:

$$-30h \cdot a_1 \cdot t(r)^2 - 12h \cdot a_4 \cdot t(r)^5 - 15h \cdot a_3 \cdot t(r)^4 - 20h \cdot a_2 \cdot t(r)^3 - 60h \cdot a_0 \cdot t(r) + 30h \cdot a_1 \cdot t(r_0)^2 + 12h \cdot a_4 \cdot t(r_0)^5 + 15h \cdot a_3 \cdot t(r_0)^4 + 20h \cdot a_2 \cdot t(r_0)^3 + 60h \cdot a_0 \cdot t(r_0) + 15q \cdot r_0^2 - 15q \cdot r^2 = 0 \quad (7)$$

式中: $t(r), r$ 是变量, $t(r_0)$ 为热沉温度, 是一个已知量。 q 是被测量, 且不随时间和康铜箔上位置的变化而变化。当 $r = 0$ 时, 得到康铜箔中心温度 t_c , 因此根据式(7) 和式(1) 得到热流输出信号与被测热流的关系并编写热传导程序。

3 模型验证

采用黑体炉对热流传感器敏感元件进行校准, 实际测试曲线如图 4 所示。利用程序得理论计算值, 设敏感元件康铜尺寸与实际相同, 为厚度 $h = 0.03\text{mm}$, 半径 $r_0 = 5.75\text{mm}$, 边缘温度 $t(r_0) = 20^\circ\text{C}$ (常温)。热流垂直射入康铜箔圆面, 以 0.5 MW/m^2 为步长, 范围

为 $0.1 \sim 1.1 \text{ MW/m}^2$, 达到稳态后, 计算得到热流输出信号与被测热流曲线。

利用程序计算热流为 $q = 0.1 \text{ MW/m}^2$

时, 康铜半径上任一点温度, 设康铜箔半径步长为 $r = 0.1\text{cm}$ 直到半径 $r = r_0$ 为止。曲线表示离康铜箔中心越近温度越高, 定性分析与实际相符, 如图 5 所示。

热流与康铜箔表面温度的计算结果与实际值基本吻合, 最大误差为 10%。计算结果表明反算模型能够准确求解被测热流和相关温度值, 满足某型号导弹热流传感器的设计指标要求。

4 结论

文中通过对热流传感器敏感元件理论分析, 考虑了康铜箔热传导系数为温度的非线性函数这一特点, 建立敏感元件模型, 验证模型的正确性, 得到热流输出信号与被测热流的关系, 为弹用热流传感器的设计提供参考。敏感元件越薄、边长越长、与被测物粘贴越紧密, 则测量误差越小, 对测量越有利, 但应有一个最优值, 在这方面将做进一步研究。同时从理论上深入对弹用热流传感器的特性进行了研究, 有利于日后各种弹用热流传感器的设计实验及仿真。

参考文献:

- [1] 高政民, 张克军, 董敬文. 导弹燃气流瞬态温度测量系统设计[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(5): 559-561.
- [2] 陈道龙. 热电偶测温的现状和发展趋势[J]. 国外计量, 1976(3): 12-17.
- [3] 廖亚非, 张青文, 何容盛. 热流计的发展、国际领先技术与改进方向研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2005, 27(2): 84-87.
- [4] 任玲, 黄凤良. 薄膜热电偶动态特性标定技术研究现状[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(10): 4-6.
- [5] 张伟, 张正平, 李海波, 等. 高超声速飞行器结构热试验技术进展[J]. 强度与环境学报, 2011, 38(1): 1-8.
- [6] 陶文栓. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.

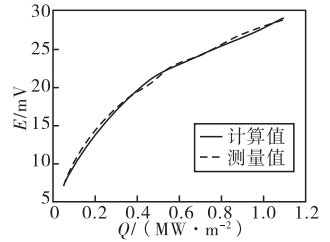


图 4 热流与热流输出信号关系

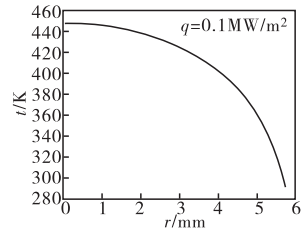


图 5 标定热流下康铜箔半径与温度关系

定性。

图 5、图 6 仿真结果表明,文中算法的单位时间内簇首集 $GH = \{gh_i | i = 1, 2, \dots, n_{gh}\}$ 的平均更新次数最少,且 LBF 最大,说明文中提出的算法的网络管理分簇结构稳定,负载均衡度高。就稳定性而言,最高节点度算法稳定性最差。原因在于,最高节点度算法簇首数较小,簇更新的频率较快,而文中算法是基于移动性和网络的负载均衡性来设计的,分簇结构稳定,网络运行效率高。

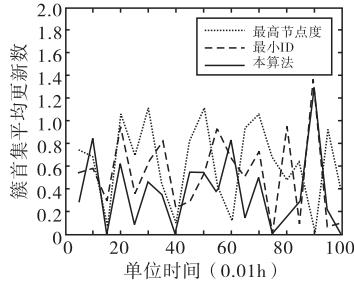


图 5 仿真过程中簇首集的平均更新次数

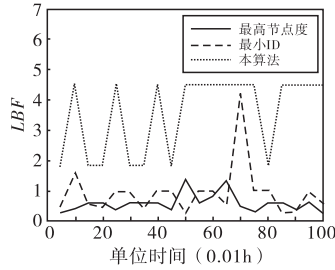


图 6 仿真过程中网络的负载均衡因子 LBF 变化曲线

6 结论

反舰导弹由于采用了红外成像/人在回路等技术,使导弹具备精确打击近岸海上目标的能力。同时,反舰导弹采用的协同攻击战术将综合提高弹群突防、电子对抗、搜捕目标的能力,从而进一步提高作战效能,减少导弹发射量。无论实现“人在回路”还是完成协同攻击,良好的信息交互能力——数据链安全、高效地运行是前提。因此对反舰导弹协同攻击近岸目标中数据链组网的研究具有重要的意义。文中通过对数据链特性的分析,设计了数据链组网的方案,为反舰导弹协同攻击提供了技术支持。

参考文献:

[1] 江言林,刘铁军,陈雪侬. 用于攻击近岸目标的反舰导弹技术发展 [J]. 飞航导弹,2009(9): 20 - 22.

[2] 林涛,刘永才,关成启,等. 飞航导弹协同作战使用方法探讨 [J]. 战术导弹技术,2005(2): 8 - 12.

[3] 郭光,王峰,李晓. 舰空导弹协同使用样式探讨 [J]. 飞航导弹,2008(9): 25 - 28.

[4] 肖增博,雷虎民,夏训辉. 多导弹协同作战关键技术与展望 [J]. 飞航导弹,2008(6): 24 - 26.

[5] 唐江,谢晓方,孙涛,等. 智能反舰导弹协同攻击策略研究 [J]. 飞航导弹,2011(11): 57 - 61.

[6] Ephremides A, Wieselthier J E, Baker D J. A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling [J]. Proceedings of IEEE, 1987, 75 (1): 56 - 73.

[7] 胡光明,蒋杰,龚正虎. 移动自组网络分簇算法综述 [J]. 计算机工程与科学,2005, 27(1): 48 - 50.

[8] Parekh A K. Selecting routers in MANET wireless networks [C]// Proceedings of the SBT/IEEE International Telecommunications Symposium,1994.

[9] 郑少仁,王海涛,赵志峰,等. Ad Hoc 网络技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社,2005.

[10] Basagni S, Turgut D, Das S K. Mobility-adaptive protocols for managing large Ad Hoc networks [C]// Proceedings of IEEE ICC, 2001:1539 - 1543.

[11] MASNAK CHATTERIEE, SAJAL K DAS, DAMLA TURGUT. WCA: A weighted clustering algorithm for mobile Ad Hoc networks [J]. Journal of Clustering Computing IEEE (S1386 - 7857), 2002, 5(2):193 - 204.

[12] 吴迪,刘英学,冯永新,等. Ad Hoc 网络中一种基于权值的分簇算法 [J]. 小型微型计算机系统,2006, 27 (2): 202 - 206.

[13] 王钢,单琦,贾世楼,等. Ad Hoc 网络按需加权分簇算法及其性能分析 [J]. 南京理工大学学报,2006, 30 (5): 599 - 602.

(上接第 27 页)

[7] Oh S H, Lee S H. Bulk-micromachined circular foil type micro hear-flux sensor [J]. Sensors and Actuators; Physical 2006,132(2):581 - 586.

[8] HOWARD F G. Single-thermocouple method for determining heat flux to a thermally thick wall, NASA-TND-4737 [R]. 1977.