

# 一种热电阻动态特性原位校准方法

江 勇, 张发启

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**研制了一种可在测量中,现场、原位使用的用于热电阻动态特性校准的计算机插板。由传热学原理,论证了热电阻在外部阶跃温度响应与回路电流阶跃方法(LCSR法)温度响应之间的联系,据此,建立了求得响应时间常数的数据处理方法。在滑油和风洞里用LCSR方法和被测介质温度阶跃进行的对比实验表明:该方法求取的时间常数误差小于5%。用该方法分别求得的热电阻和外壳的时间常数,可以进一步确定影响响应速度的主要因素。

**关键词:**热电阻;动态特性;校准

**中图分类号:**V23;TM93 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)04-0076-04

热电阻在航空动力系统试验的温度测量中因其精度高、性能稳定、信号输出幅值大而应用极广。然而,测量温度剧变时,如进气温度畸变、压气机失速或喘振、高温进气试验等因其热惯性较大而出现极大的动态误差,使试验数据分析和温度控制严重失真。为减小和控制这种动态误差,必需先获得热电阻的动态响应特性,然后在测量中进行修正,最后得到较为准确的被测介质的温度动态变化过程。

理论分析计算热电阻的动态特性因建模较困难,往往误差较大。工程上多用实验进行动态校准。常用方法的基本原理是:将热电阻放入温度阶跃变化的环境介质中,记录其阶跃响应,得到动态特性即时间常数 $\tau$ ,然后在实际测量中进行动态修正。但是热电阻的动态特性与被测介质的性质、状态和热电阻的结构有关,模拟被测环境并产生阶跃的温度变化是十分不易的,特别是对于高频响的温度传感器,实现外部环境温度阶跃变化难度高、误差大,并需专门的校准实验室,应用极不方便<sup>[1]</sup>。

本文运用高频响热电偶的回路电流阶跃响应法(Loop Current Step Response)的动态特性校准方法<sup>[2-3]</sup>,对一种热电阻动态特性的原位校准进行了研究。

## 1 建立热电阻阶跃加热响应模型

### 1.1 外部温度阶跃变化热电阻的动态响应

常用热电阻可看成是一个外层为绝缘层、保护套和空气隙体。内层是缠绕在一起的热电阻(有些还有一细石英玻璃柱)的同心圆柱。在外部温度阶跃变化时,可以近似简化为一双层无限长圆柱体的传热问题。

其热传导方程为 $\frac{\alpha}{r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{\partial T(\tau)}{\partial t}$ 。其中: $\alpha = \frac{K}{\rho C_p}$ 为热扩散系数; $K$ 为传热系数; $\rho$ 为密度; $C_p$ 为比热。定义

温度: $\theta_1(\tau) = T_1(\tau) - T_\infty$ ,  $l = 1, 2$ 。对于内环: $\frac{\alpha_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta_1}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta_1(\tau)}{\partial t}$ ,  $0 \leq r \leq a$ ,  $t > 0$ ; 对于外环: $\frac{\alpha_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \theta_2}{\partial r} \right) =$

$\frac{\partial \theta_2(\tau)}{\partial t}$ ,  $\alpha \leq r \leq b$ ,  $t > 0$ 。边界条件 $\theta_1(\tau) =$ 有限值,  $r$ 为0,  $t > 0$ ;  $\theta_1(\tau) = \theta_2(\tau)$ ,  $r = a$ ,  $t > 0$ 。  $K_1 \frac{\partial \theta_1}{\partial r} =$

$K_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r}$ ,  $r = a$ ,  $t > 0$ 。  $K_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial r} + h\theta_2 = 0$ ,  $r = b$ ,  $t > 0$ 。  $h$ 为对流换热系数。初始条件为 $\theta_1(\tau) = f_1(r) - T_\infty = T_1, 0$

收稿日期:2003-11-24

作者简介:江 勇(1956-),男,河北临西人,副教授,博士生,主要从事航空推进系统试验及测试技术研究。

$< r < a, t = 0 \theta_2(r, t) = f_2(r) - T_\infty = T_1, a < r < b, t = 0$ 。根据文献[3]对这一问题的讨论,可得我们关心的内层热电阻温度随时间变化的动态方程。

$$\theta_1(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{\beta_n} \exp(-\beta_n^2 t) \tag{1}$$

式中: $C_n$ 为常数,当热电阻长度  $L$  与直径  $D$  比值  $> 5$  时可近似认为其内部温度是均匀的。已知  $\beta_1 < \beta_2 < \dots < \beta_n, n = 1, 2, \dots, \infty$ , 当  $\beta$  值逐渐增大时,  $\beta^2$  增加更快, 故在式(1)中取前两项已能获得较满意的结果。则有:

$$\theta_1(t) = \frac{C_1}{\beta_1} \exp(-\beta_1^2 t) + \frac{C_2}{\beta_2} \exp(-\beta_2^2 t) \tag{2}$$

式中:  $-\beta_i^2 = 1/\tau_{wi}, \tau_{wi}$  就是热电阻响应时间常数。

### 1.2 加热电流阶跃变化热电阻的动态响应

加热电流阶跃变化与外部阶跃温升加热在热传导方程的边界条件和方程形式均不同。当  $t > 0$  时,热电阻模型内、外层分别以  $g_1(r), g_2(r)$  [ $W/m_2$ ] 的速率产生热量,经  $r = b$  的外边界面对流方式散发到温度为  $T_\infty$  的气流中去。其热传导方程为

$$\alpha_1 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right] + \frac{\alpha_1}{K_1} g_1(r) = \frac{\partial T_1(r)}{\partial t} \quad 0 < r < a, t > 0 \tag{3}$$

$$\alpha_2 \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right] + \frac{\alpha_2}{K_2} g_2(r) = \frac{\partial T_2(r)}{\partial t} \quad a < r < b, t > 0 \tag{4}$$

初始条件:  $T_1(r, t) = T_\infty, t = 0, 0 \leq r < a; T_2(r, t) = T_\infty, t = 0, a \leq r < b$ 。边界条件:  $T_1(r, t) = T_2(r, t), r = a, t > 0$ 。

$$K_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} = K_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r}, r = a, t > 0; K_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} + hT_2(r, t) = 0, r = b, t > 0。$$

因外层是热电阻的绝缘层与外壳的组合,没有电流通过,故  $g_2(r) = 0$ ,内层的热传导方程式为

$$\theta_1(t) = C_0 + [C_1/\beta_1 - C_0/\beta_1^2 t] \exp(-\beta_1^2 t) + \exp[C_1/\beta_1 - C_0/\beta_2^2 t] \exp(-\beta_2^2 t) \tag{5}$$

显然,式(5)与式(2)不同。表明热电阻以两种不同的温度变化时具有不同的响应过程。但其本身的传热特性并未改变,时间常数相同。通过变换,可由式(5)得到式(2)。证明用电流阶跃加热法是可以获得热电阻在外部温度阶跃变化时的时间常数的。

### 1.3 半实验方法建立物理模型

式(2)可写成:  $y(t) = P_1 + P_2 \exp(P_3 t) + P_4 \exp(P_5 t)$ 。此为一非线性模型,  $y(t)$  为热电阻随温度而变化的输出值。在经试验后得到大量样点,用高斯—牛顿法先进行方程的“线性化”,再逐次逼近,求得方程的解,然后使用麦夸脱修正方案控制迭代的稳定性,并充分注意“发散”与效率的变化,得到可用的保证精度的响应方程。

## 2 实验

为检验方法求得的热电阻的动态响应和外部温度阶跃得到的动态响应的一致性,分别在两种不同的介质中使用同一只用于测量滑油温度的  $Pt_{100}$  热电阻(带不锈钢外套)进行了试验。

### 2.1 滑油温度动态测温试验

先将温度传感器置于  $0^\circ\text{C}$  的恒温室中保温,然后迅速插入  $20^\circ\text{C}$  的装有八号滑油的带有搅拌的恒温槽中,得到了所测温度阶跃变化。然后用 LCSR 方法进行对比实验,得到了十分相似的响应曲线(图 2)。图中可以看出,在两种不同的加热方法下,采用 LCSR 方法获得的数据经过处理,得到与所测介质温度阶跃基本一致的响应曲线。表 1 列出了在外部温度阶跃与采用 LCSR 方法的条件下,温升达到 0.707% 和 0.95% 时的时间常数及其相对误差。获得的时间常数相对误差小于 10%。温度响应误差约为  $0.53^\circ\text{C}$ 。

表 1 两种方法得到的时间常数

	LCSR 方法时间常数/s	外部温度阶跃时间常数/s	相对误差 (%)	温升相对误差/ $^\circ\text{C}$
$\tau_{0.707}$	0.886 7	0.956 4	7.29	0.52
$\tau_{0.95}$	1.911 7	2.115 5	9.612	0.53

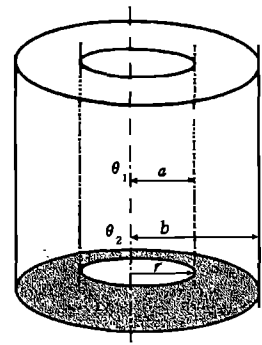


图 1 热电阻换热模型

### 2.2 风洞试验

对同一只垂直插入一连续式吸气风洞的热电阻以不同的  $\lambda$  数吹风,气流进口总压为大气压,总温为  $6^\circ\text{C}$ 。先将已在大气温度中热平衡的温度传感器自导向孔内,利用一改装的电磁阀通电后的移动芯体将其快速推入气流中,采集、计算,得到热电阻动态响应时间常数  $\tau_{0.707}$ 。然后用一热电阻动校卡输出电流对热电阻进行加热。热平衡后切断电流,并开始采集热电阻的变化信号,同样处理后得到  $\tau_{0.707}$ 。图3示出了两种方法在气流  $\lambda$  数为 0.2016 时,经过归一化处理后的热电阻响应曲线。可以看出,由于热平衡方式的不同,采用 LCSR 法的响应时间略长,且两种方式都在响应初始阶段较慢,反映出因传热通过外壳而造成的热惯性在初始阶段时使温度传感器延迟响应的现象。图4示出了采用两种方法得到的响应时间常数随气流  $\lambda$  数变化的曲线。可见,当  $\lambda$  数增大时,传感器与气流的热交换增强,时间常数变小。两种方法之间存在约 0.2 ~ 0.3 s 的误差。为进一步揭示时间常数的物理意义,根据方程(2),可以将时间响应常数分解为外壳和传感器本身的两个时间常数。以便进一步分析和估计影响频响的主要因素。图5示出采用 LCSR 方法试验,  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  分别为热电阻和外壳的时间常数。计算得到的分解后的两个时间常数随气流  $\lambda$  数变化的曲线。其中  $\tau_2$  约为  $\tau_1$  的 6 ~ 7 倍,表明外壳的热惯性是影响传感器频响的主要因素。

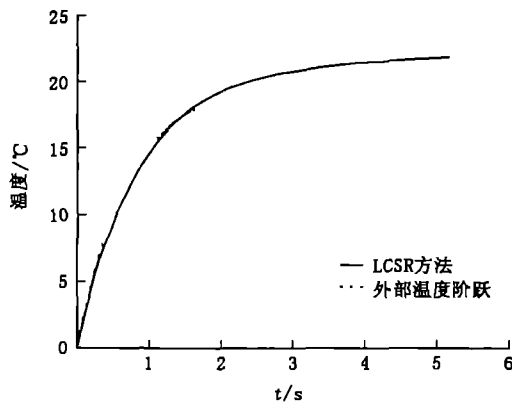


图2 热电阻温度阶跃响应

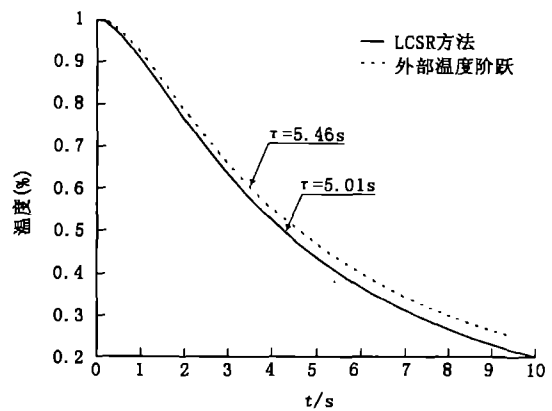


图3  $\lambda = 0.2016$  的归一化后的传感器温度响应

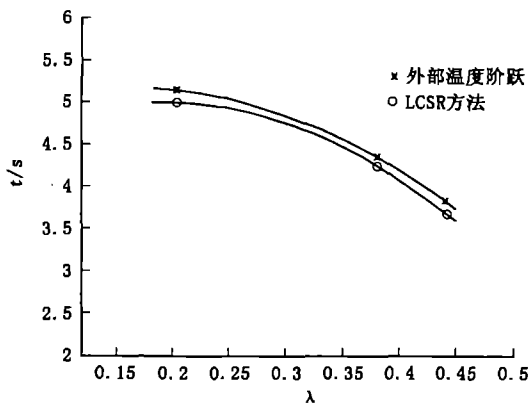


图4  $\tau$  随气流  $\lambda$  数的变化

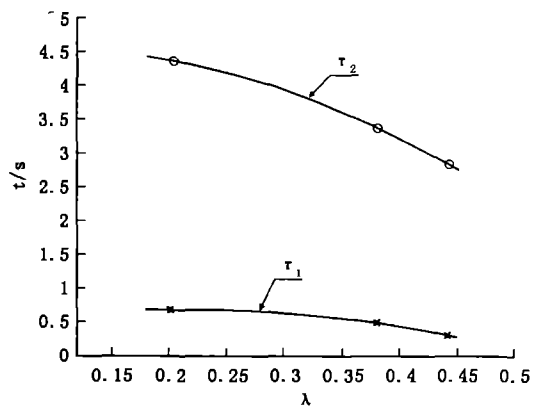


图5  $\tau_1$ 、 $\tau_2$  随气流  $\lambda$  数的变化

### 3 结束语

研究应用 LCSR 法求取热电阻时间常数的方法中,推出了传热方程。进行了两种实验介质的试验验证,求取的时间常数无论在何种情况下与实际温度阶跃变化的误差小于 5%。

数据处理方法可以分解时间常数,分析影响响应速度的主要因素,为进一步改进频响特性提供了方向。

系统集成于一块计算机插板,易于现场使用,尤其对原位动校十分有益。计算处理方法较常用的线性动校方法精度大为提高。特别是不需模拟测量环境便可动校,使得校准变得非常容易。

该方法还需在多种环境中,进一步实验和完善。所存在的误差机理还需进一步探索。误差修正方法还

未建立。

#### 参考文献:

- [1] Petit C, Gajan P, Lecordier J C, et al. Frequency Response of Fine Wire Thermocouple [J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1982, 15: 760 - 764.
- [2] Kerlin T W, Shepard R L, Hashemian H M, et al. Response of Installed Temperature Sensors [J]. Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry, 1982, 5: 1357 - 1366.
- [3] 江 勇. 一种高频响裸丝式热电偶的动校方法 [A]. 中国航空学会第十届燃烧与传质学术讨论会(论文集) [C]. 北京: 中国航空学会, 1996.

(编辑: 姚树峰)

## A Method of Thermo Resistors' Dynamical Characteristics Local calibration

JIANG Yong, ZHANG Fa - qi

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** A conventional local calibration device used in computer is developed for calibrating thermo resistors' dynamical characteristics. The relationship between the temperature response of the surrounding temperature step changes and that of the loop current step heating is proved. Then, a data processing method is found in obtaining the response time constant. In lubrication oil and wind tunnel the LCSR and the surrounding temperature step changes are tested and compared. The result shows that the error of the time constant obtained by using this method is less than 5%. And the time constants of thermo resistor and its shell obtained respectively can be further used to determine the main factors affecting the response speed.

**Key words:** thermo resistor; dynamical characteristics; calibration

(上接第 75 页)

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Peng - Gang, Dave Irvine - Holiday Faraday Effect Optical Current Sensor [J]. IEEE Trans, 1996, 11(5): 871 - 874.
- [2] Benshun Yi, Chu B C B, Chiang K S. New Design of Optical Current Sensor for Sensitivity Improvement [J]. IEEE Trans, 1999, 14(9): 1149 - 1153.
- [3] Trevor W Macdougall, Dale R, Lutz, et al. Wandmacher Development of Fiber Optical Current Sensor for Power System [J]. IEEE Trans, 1991, 6(2): 529 - 536.
- [4] 龙霓东, 龙亚东. 光电信息材料 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 55 - 58.
- [5] 靳 伟, 廖延彪, 张志鹏, 等. 导波光学传感器: 原理与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

(编辑: 门向生)

## Analysis of the Error of Polarizing Modulation Optical Transducer

MENG Wen, LI Yun - xia, ZHAO Shang - hong

(The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

**Abstract:** Analysis and calculation are given to a type of polarizing modulation glass ring optical current transducer. Some factors affecting the measurement are discussed. The calculation and experimentation show that the processing error of glass ring plane and the assembly error of optical element have a direct effect on the sensibility and the measuring precision of the detector (optical current transducer).

**Key words:** Optical current Transducer; Faraday effect; total reflection; birefringence