

高精度铂薄膜电阻传感器标定系统

苑朝凯, 谷笏华

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190)

摘要 表面热流率是高超声速飞行器设计的重要参数之一, 在进行地面试验之前, 需要对所使用的铂薄膜电阻传感器进行标定, 标定的精度对飞行器的设计有重要的影响。本文详细介绍了所研制的高精度铂薄膜电阻传感器标定系统的标定原理和系统构成, 实验结果表明该系统能够有效的提高铂薄膜电阻传感器的标定精度。

关键词 热流测量 传感器标定 铂薄膜电阻

引言

高超声速飞行器在大气中飞行时其头部会形成强激波, 在激波的作用下, 飞行器周围的空气会在短时间内被加热到几千度, 甚至上万度。在如此高温的流场中, 热传导和热辐射等作用会使得飞行器表面的温度骤然升高, 甚至可能会对飞行器产生致命的损坏。因此, 在高超声速飞行器模型的地面模拟实验中, 其表面瞬态热流率测量是一项重要的工作。目前国内测量瞬态热流率常用的测量方法是在模型表面测量位置上安装薄膜电阻传感器, 来测量来流气体对模型表面的气动传热过程^[1]。在使用薄膜电阻传感器进行测量之前需要对其温度系数进行标定, 标定精度影响最后的测量精度, 从而影响飞行器的设计。传统的标定方式是完全通过手工完成的。将传感器置于可加热的水浴中, 通过水银温度计读取温度值, 当到达指定的标定温度时利用万用表读取铂薄膜电阻传感器的电阻值, 并记录在纸上。得到所有温度点的电阻值后将数据输入计算机进行处理。手工标定方式需要大量的数据记录和输入工作, 费时费力, 劳动强度大。在读取水银传感器温度、数据记录和输入过程中, 人为因素带来的数据误差不可避免, 另外, 由于测量和记录时间较长, 可能带来温度漂移引起的误差, 最终标定精度不可能太高。基于以上原因, 研制了铂薄膜电阻传感器自动标定系统, 设置好标定参数后便可自动完成所有数

据采集、记录和数据处理等工作, 最终生成标定报告, 标定期间不需要标定人员执行任何操作。自动标定系统避免了人为因素的影响, 节省了人力和时间, 标定精度得到进一步的提高^[2]。

1 铂薄膜电阻传感器标定原理

铂薄膜电阻传感器测温的基本原理是当温度增加时, 自由电子的动能增加, 这样改变了自由电子的运动方式, 使之形成定向运动所需要的能量增加, 这反映在电阻上, 阻值就会增加。这种关系一般描述可以描述为^[3]:

$$R_t = R_0[1 + \alpha t] \quad (1)$$

其中 R_t ——温度为 t 时的电阻值

R_0 ——零摄氏度时的电阻值

α ——热电阻的温度系数 ($1/^\circ\text{C}$), 表示单位温度引起的电阻阻值相对变化。

由式 1 可知铂薄膜电阻传感器的阻值与温度呈线性关系, 欲完成对铂薄膜传感器的标定可以通过测量不同温度条件下的电阻值, 利用最小二乘法来拟合温度系数的最佳值及其标准差。在最小二乘法中, 假定自变量误差可以忽略不计, 是为了方便推导回归方程。操作中函数的误差大于自变量的误差即可认为满足假定。实际上两者均是变量, 都有误差, 从而导致 y 、 a 、 b 的标准差如下:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - bx_i - a)^2}{n-2}} \quad (2)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{\overline{x^2}}{n(\overline{x^2} - \overline{x}^2)}} \sigma_y \quad (3)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{1}{n(\overline{x^2} - \overline{x}^2)}} \sigma_y \quad (4)$$

2 标定系统的组成

由标定的基本原理可知, 标定系统必须包括高精度温度调节模块、数据采集模块、数据处理模块、标准测温模块及系统控制模块等, 如图 1 所示。温度调整模块为被标定的铂薄膜电阻传感器提供激励信号, 标定过程中要求温度调整模块能够实现阶梯温度变化, 并且能够长时间保持温度恒定。标准测温模块用于测量铂薄膜电阻传感器周围的实际温度, 采用高精度的测温模块可以减小系统误差和测量过程中的随机误差。数据采集模块用于采集传感器的实际阻值, 要求长时间工作时测量精度高、稳定性好。

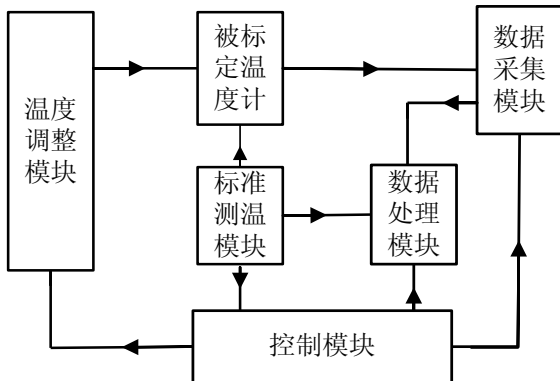


图 1 标定系统原理图

实际标定系统主要由 96 通道数据采集器、RE312 型恒温校验浴槽和标定软件构成。

1) 96 通道数据采集器

96 通道数据采集器, 其主要功能是测量不同温度条件下铂薄膜电阻传感器的阻值。该数据采集器的硬件主要是由恒流源、程控开关电路、程控放大 AD 转换器、Pt100 标准电阻、USB 接口等组成。其工作原理是, 在数据采集过程中, 通过程序控制开关电路的切换, 由恒流源为铂薄膜电阻传感器提供 2mA 基准电流, 通过测量铂薄膜电阻传感器两端的电压, 根据公式 $R=U/I$ 换算出传感器

的电阻值。该采集器同时可以标定 93 个传感器 (另外三个通道用于检测温度), 采集精度可以达到 ± 0.01 欧姆。采集器原理框图和实物图如图 2 所示。

2) RE312 型恒温校验浴槽

为确保测量精度并实现测量过程的全自动化, 订购了德国 LAUDA 公司的 RE312 型恒温校验浴槽。德国 LAUDA 校验浴槽在国际上为计量实验室、标准计量等单位的标准设备, 可在铂电阻、热电偶温度传感器生产过程中, 作校正测量之用。其特点是浴槽温度可通过计算机控制, 控温精度为 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 。该浴槽可实现加热与制冷功能, 温度控制范围为 $-30\sim 200^\circ\text{C}$, 可实现温度的阶梯上升与下降。

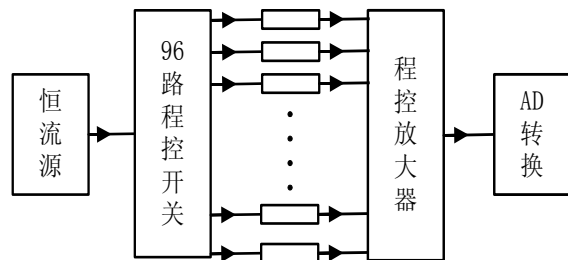


图 2 数据采集器原理框图

3) 系统标定软件

利用 Visual Basic 6.0 语言编写了标定软件, 如图 3 所示, 该软件可以实现对整个标定系统的控制和数据处理工作, 自动化程度很高。主要功能包括, 通过 RS-232 接口建立计算机与恒温浴槽之间的通信, 设定阶梯温度后时刻监视浴槽内的温度是否达到指定温度; 当到达指定温度时通过 USB 接口建立计算机与数据采集器之间的通信, 完成各传感器两端电压的采集。在采集数据时为了进一步减小误差, 对每一个数据点进行了 16 次采集, 取平均值后, 计算出薄膜电阻的电阻值, 利用最小二乘法计算出电阻温度系数 α , 相关性系数 γ , 以及温度系数的标准差 σ_α 。

3 标定流程

1) 连接水浴：将数据线连接至计算机的 RS232 接口的 COM1 端，并设定波特率为 9600，数据格式设定为无校验位、8 位数据位，1 位停止位。

2) 连接数据采集器。

3) 在数据采集器的 94、95、96 通道分别加装标准测温传感器 PT100，用于监测密闭容器内的温度变化。

4) 加装被标定的铂薄膜电阻传感器。每次标定过程最多可以同时标定 93 个铂薄膜电阻传感器，分别连接在数据采集器的 1 至 93 通道上。

5) 将传感器放入水浴内密闭的容器中。

6) 设定标定参数。

7) 在标定过程中不需要进行任何操作。标定结束后会弹出提示对话框，并且水浴和数据采集器进入等待状态。欲查看被标定传感器的计算结果可以点击计算（结果以文本形式显示在表格下方）或画图按钮（结果以图形方式显示）。

8) 保存原始数据和计算结果。

9) 更换被标定的铂薄膜电阻传感器，重复上述 4-9 步骤进行标定，直至结束。

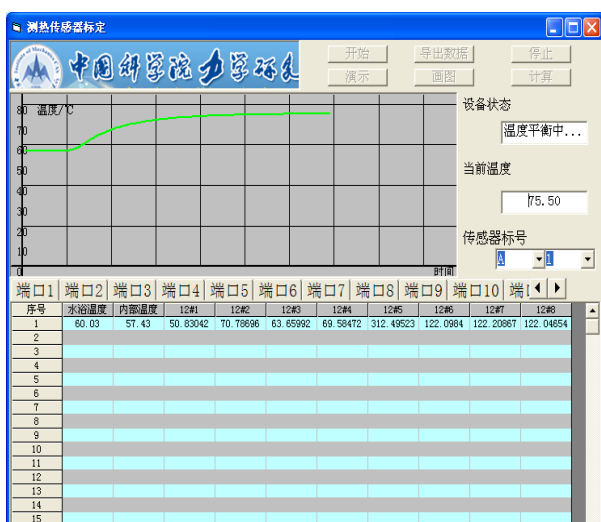


图 3 标定软件主界面图

4 标定系统精度分析

4.1 精度分析

影响系统标定精度的因素有很多，如采集器的采集精度、温度控制精度、传感器引线电阻等。采集器的采集精度和温度控制精度对标定结果可以通过误差传递公式进行计算[4]。

由铂薄膜电阻传感器温度与电阻值的基本关系式(1)可得：

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t} \quad (5)$$

求 α 对 R 和 t 的偏导数，并由误差传递公式可得：

$$\Delta \alpha = \left| \frac{1}{R_0 t} \right| * |\Delta R| + \left| -\frac{R_t - R_0}{R_0 t^2} \right| * |\Delta t|$$

相对误差为：

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \left| \frac{\Delta R}{R - R_0} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right|$$

系统所采用的数据采集器精度为 $\pm 0.01 \Omega$ ，RE312水浴温度的控制精度为 $\Delta T = \pm 0.01^\circ \text{C}$ 。LHD实验室用于飞行器模型热流测量的铂薄膜电阻传感器利用银浆做传感器的引线，由于传感器本身尺寸较小，制作三线制引线在工艺上有一定的困难。二线制引线方式中，传感器的引线电阻不可避免的会影响测量精度，在选用引线时应尽可能的缩短引线长度、增加引线横截面积，并在标定时对给予一定的修正。

4.2 提高系统标定精度所采取的方案

系统的标定精度对最终的测量结果影响很大，在软硬件设计过程中应尽可能的提高标定精度。

1) 系统中同时利用三支铂电阻 PT100 监测密闭容器内铂薄膜电阻传感器周围的温度，经过实际测量当温度不变时 PT100 的电阻的电阻值并不是固定值，而是会出现波动。利用六位半的数字万用表对三支 PT100 在固定温度的水中阻值的波动情况进行了测量，结果如表 1 所示。

为了减小 PT100 阻值波动的影响，在阅读监测温度时进行了多次数据采集，剔除粗大误差求取平均值后再与指定的标定温度对比。

2) 不论测量数据好坏都能求出 a 和 b , 所以我们必须有一种判断测量数据好坏的方法, 用来判断测得的数据是否适合使用最小二乘法进行拟合。

相关系数是衡量一组测量数据 x_i 、 y_i 线性相关程度的参量, 其定义为:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x}\bar{y}}{\sqrt{(\overline{x^2} - \bar{x}^2)(\overline{y^2} - \bar{y}^2)}} \quad (6)$$

r 取值在 $0 < |r| \leq 1$ 中。 $|r|$ 越接近于 1, x 、 y 之间线性越好; r 为正, 直线斜率为正, 称为正相关; r 为负, 直线斜率为负, 称为负相关。 $|r|$ 接近于 0, 则测量数据点分散或 x_i 、 y_i 之间为非线性。当计算得到的 $|r| < r_0$ 时, 测量数据是非线性的, 不能使用最小二乘法进行拟合, 计算所得到的 a 、 b 、 σ_a 、 σ_b 无意义。在进行一元线性回归计算之前应先求出 r 值, 再与 r_0 比较, 若 $|r| > r_0$, 则 x 和 y 具有线性关系, 可求回归直线; 否则反之。 r_0 称为相关系数的起码值, 与测量次数有关, 如表 2 所示。

表 1 固定温度时 PT100 阻值的波动情况 (单位: Ω)

| 序号 | 1# | 2# | 3# |
|------------|----------|----------|----------|
| R_{\max} | 110.4732 | 110.5227 | 110.5006 |
| R_{\min} | 110.4650 | 110.5111 | 110.4884 |
| ΔR | 0.0082 | 0.0116 | 0.0122 |

5 实验结果与讨论

利用所研制的标定系统对购买的 A 级铂电阻进行了标定, 其温度系数标称值 $\alpha = 0.3851\%/^{\circ}\text{C}$, 零摄氏度时电阻标称值 $R_0 = 100\ \Omega$ 。标定结果如表 3 所示, 可知温度系数的相对误差在 1% 以内, 具有较高的标定精度。图 4 为标准 PT100 的标定曲线, 图中红色点代表

正行程的数据点, 绿色点代表反行程的数据点。

实验结果证明该标定系统具有较高的标定精度, 相对于传统的标定方法大大减小了劳动强度, 避免了标定过程中人为误差的影响, 自动化程度高, 具有较高的标定精度。

表 3 标准 PT100 的标定结果

| 标号 | 温度系数/ $\%/^{\circ}\text{C}$ | 零度阻值/ Ω | σ_a/σ (%) |
|----|-----------------------------|----------------|-----------------------|
| 1 | 0.3843 | 99.66 | 0.2177 |
| 2 | 0.3842 | 99.90 | 0.2337 |
| 3 | 0.3873 | 100.14 | 0.5713 |
| 4 | 0.3864 | 99.85 | 0.3376 |
| 5 | 0.3816 | 100.01 | 0.9089 |

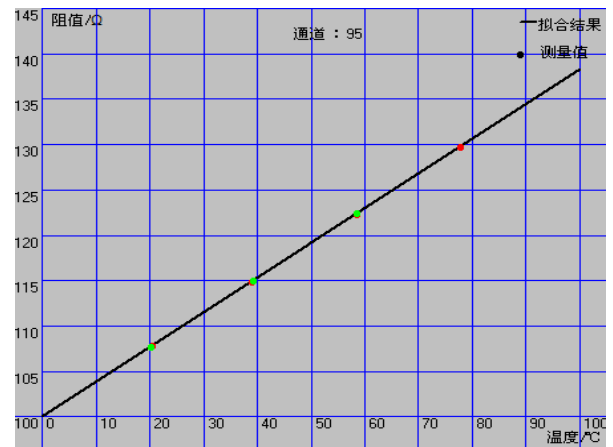


图 4 标准 PT100 的标定曲线

参考文献

- [1] 徐多, 谷笛华, 吴松. 柔性基底瞬态热流率测量传感器的研制及其应用[J]. 科学通报, 2009(4): 414-419
- [2] 徐多, 谷笛华. 薄膜电阻温度计电阻温度系数标定系统[J]. 第七届全国实验流体力学学术会议论文集, 2007
- [3] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004
- [4] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006

表 2 置信度为 99% 时的起码相关系数

| 数据个数 | r_0 | 数据个数 | r_0 | 数据个数 | r_0 |
|------|-------|------|-------|------|-------|
| 3 | 1.000 | 9 | 0.798 | 15 | 0.641 |
| 4 | 0.990 | 10 | 0.765 | 16 | 0.623 |
| 5 | 0.959 | 11 | 0.735 | 17 | 0.606 |
| 6 | 0.917 | 12 | 0.708 | 18 | 0.590 |
| 7 | 0.874 | 13 | 0.648 | 19 | 0.575 |
| 8 | 0.834 | 14 | 0.661 | 20 | 0.561 |

High precision thin film platinum resistance sensor calibration system

YUAN Chaokai GU Jiahua

(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

Abstract Heat transfer rate was one of the most important parameters in hypersonic vehicle design. The platinum film resistors used for measure heat transfer should be calibrated before ground tests. Accuracy of the calibration has great implications to the vehicle's design. In this paper, calibration principle and system structure of the high precision calibration system were discussed in detail, and experimental results show that the system can effectively improve the thin-film platinum resistance sensor calibration accuracy .

Key words heat transfer rate, sensor calibration, platinum film resistor