文章编号：1672-2892(2011)06-0790-05

温度测试系统中的误差分析与控制方法

葛 萍[1]，方 勇[1]，解本政[1]，周怀平[1,2]

(1.91550部队91分队，辽宁 大连 116023；2.北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：温度测试系统是飞行器飞行试验中关于系统发射环境温度参数等的测试装置之一。本文从热电偶传感器结构设计与材料选择、信号放大与采集及数据处理等几方面出发，分析了某飞行器飞行试验温度测试系统存在的误差因素；结合飞行试验情况，并按照实际应用的标准，给出了有效提高系统测试精确度的相应控制措施。最后通过试验情况的相关对比，验证了文中所述误差控制方法的有效性。

关键词：温度测试；热电偶；误差分析；误差控制

中图分类号：TN601；TP212.11 **文献标识码：**A

Error analysis and control in the temperature measuring system

GE Ping[1], FANG Yong[1], XIE Ben-zheng[1], ZHOU Huai-ping[1,2]

(1.91 Department of Unit 91550, Dalian Liaoning 116023, China;
2.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: One certain temperature test system is a certain type of equipment measuring ambient temperature parameters in the launch of aircraft. Based on the structure design and material selection of thermocouple sensor, signal amplification, signal acquisition and data processing etc, the error factors of a temperature measurement system in a certain aircraft flight test are analyzed in this paper. Combined with the flight test details, and according to the actual application standards, some corresponding control measures to improve the test precision of system are given. At last, compared by testing the relevant circumstances, the validity of those proposed error control methods is verified.

Key words: temperature measurement; thermocouple; error analysis; error control

为检验发射动力系统与飞行器之间的技术协调性，验证发射动力系统各项工作技术指标是否符合理论设计要求，同时为某些技术参数的调整提供分析依据，飞行器发射试验过程中通常要对其发射环境温度参数进行严格的测量考核。

发射环境参数还可检验飞行器结构及飞行器上装载的仪器设备能否适应发射动力系统产生的高温气流对其产生的影响。因此，为准确可靠地获取试验中飞行器发射筒内温度参数的真实值，对温度参数测试系统的测试精确度提出了较高要求。

本文详细阐述了某型温度参数测试系统存在的误差因素，分析了误差产生的原因，并结合实际应用提出了一种合理、有效的误差控制方法。

1 系统组成及其误差源

某型温度测试系统主要由热电偶传感器、信号放大与采集、数据处理3部分组成。各部分在温度测试中均有不同程度的测试误差。

根据各部分的结构及其工作原理可知：热电偶传感器在温度测试中所含误差源最多，如结构设计不合理产生的误差、测试方法不当导致的误差等，并且对测试结果的影响最大；对信号放大部分和数据处理部分来说，随着现代电子科技飞速发展及数据处理方法的日益完善，只要采用现有成熟的电路设计和数据处理方法，就可使其产生的测试误差在温度测试中忽略不计。

收稿日期：2010-11-30；修回日期：2011-01-26

2　热电偶传感器测量误差分析与控制

2.1 传感器结构与材料分析

目前，用于温度测量的传感器有：热膨胀式传感器、热电偶传感器、热电阻传感器和辐射式传感器[1]，不同型式的传感器对工作范围和测试环境的适应要求各不相同。为改善测量传感器的动态响应，根据测量工作环境及测量传感器的安装使用要求，通常在实际测量中采用露头型铠装热电偶测温传感器，适用于 300 ℃~1 600 ℃范围，并具有体积小、热惯性小、构造简单、测量准确、安装简便以及耐高压、耐振动和耐冲击作用良好等特点。传感器材料采用镍铬–镍硅，其具有很强的抗氧化、抗腐蚀能力，性能很稳定。某型铠装热电偶传感器结构示意图见图 1。

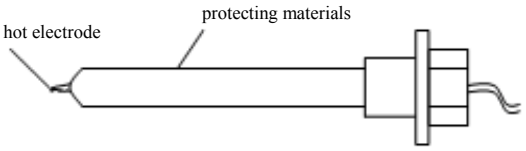

Fig.1 Structure schematic of thermocouple
图 1 热电偶结构示意图

2.2 传感器误差分析

如图 2 所示，热电偶在气体中的热交换达到平衡时，通常由于辐射传热、对流传热、能量转变及传导导热损失等因素[2]，导致热电偶传感器实测气温与真实气温之间产生一定的测试误差。在实际测试中为获得气体的真实温度，常采用误差修正、设备改进处理、冗余技术等方法进行误差控制。

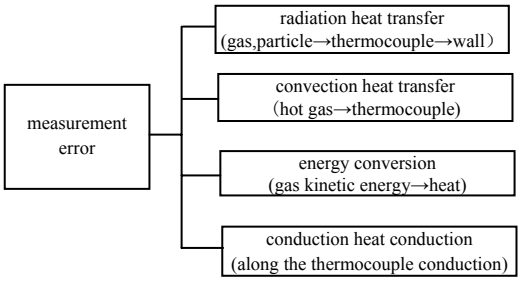

Fig.2 Four factors of the measurement error for thermocouple sensor
图 2 热电偶传感器测量误差的 4 个因素

2.2.1 对流传热误差

热气体以对流方式向热电偶接点的传热量：

$$Q_{\mathrm{c}}=\alpha_{\mathrm{c}}\left(T_{\mathrm{g}}-T_{\mathrm{t}}\right)F \tag{1}$$

则对流传热误差 ΔT_{cl} 为：

$$\Delta T_{\mathrm{cl}}=T_{\mathrm{g}}-T_{\mathrm{t}}=Q_{\mathrm{c}}/\alpha_{\mathrm{c}}F \tag{2}$$

式中：Q_{c} 为对流换热量；T_{g} 为气体温度；T_{t} 为热电偶温度；F 为热电偶接点面积；α_{c} 为对流换热系数。

2.2.2 传导导热误差

传导导热误差是指热电偶根部的温度与实际气温的温差而导致热量不平衡，在热电偶根部与气体之间形成热传递而产生的误差。某型测温系统中，置入发射筒内的热电偶如图 3 所示。

从发射筒筒壁 x~x+dx 的热平衡方程式为[3]：

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}x^2}-\frac{4\alpha_c}{\lambda D}\left(T_{\mathrm{g}}-T_x\right)=0 \tag{3}$$

式中：λ 为热电极导热系数；D 为热电极直径。

求解方程(3)，得导热误差 ΔT_{C}：

$$\Delta T_{\mathrm{C}}=T_{\mathrm{g}}-T_{\mathrm{t}}=\frac{T_{\mathrm{t}}-T_{\mathrm{w}}}{\cosh L\sqrt{4\alpha_{\mathrm{c}}/\lambda D-1}} \tag{4}$$

式中：T_{w} 为发射筒筒壁温度；L 为热电偶长度。

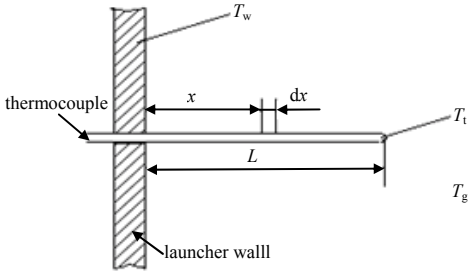

Fig.3 Schematic of the thermocouple in launcher
图 3 插入发射筒内的热电偶示意图

用热电偶温度 T_{t} 与气体温度 T_{A} 之差表示导热误差 ΔT_{C}：

$$\Delta T_{\mathrm{C}}=(T_{\mathrm{t}}-T_{\mathrm{A}})\Big/\left(\sqrt{\frac{4\alpha_{\mathrm{c}}}{\lambda D}}\sinh L\sqrt{\frac{4\alpha_{\mathrm{c}}}{\lambda D}}+\cosh L\sqrt{\frac{4\alpha_{\mathrm{c}}}{\lambda D}}-1\right) \tag{5}$$

2.2.3 辐射传热误差

辐射传热误差是指因热电偶的测量端与发射筒筒壁之间存在较大温差，热电偶以辐射传热方式与发射筒筒壁进行热交换而导致的测量误差。热电偶辐射到温度均一的器壁时，其辐射热可用下式表示：

$$Q_{\mathrm{R}}=\varepsilon_n\sigma\left(T_{\mathrm{t}}^4-T_{\mathrm{S}}^4\right) \tag{6}$$

式中：Q_{R} 为辐射热量；ε_n 为相对辐射率(壁面积远大于热电偶面积时，ε_n 接近于热电偶辐射率 ε)；σ 为辐射常数；T_{S} 为器壁温度。

假定气体中无浮游粒子，且气体为透热体，则气体对热电偶的辐射热可忽略。此外，由于气体导热系数较小，

忽略气体对热电偶的导热以及热电偶本身的导热，则由式(1)、式(6)可得辐射传热的温度误差：

$$\Delta T_{\mathrm{R}} = T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{t}} = \frac{\varepsilon_n \sigma}{\alpha_{\mathrm{c}}}\left(T_{\mathrm{t}}^4 - T_{\mathrm{S}}^4\right) \tag{7}$$

2.2.4 能量转换误差

热电偶在测量具有一定速度的气流温度时，气流的动能将会转化为热能，导致测温误差。由于气流遇到热电偶传感器时，气流速度并未完全滞止为零，则热电偶测得的温度 T_{t} 不等于气体的总温 T^*，其与气体静温 T、气体动温 T_{v} 之间满足下列关系：

$$T < T_{\mathrm{t}} < T^* = T + T_v = T + v^2 \big/ 2C_p \tag{8}$$

式中：v 为气流速度；C_p 为气体定压比热。

当 v<3 ma 时，分别采用恢复系数 $\beta = 0.68 \pm 0.07$ (热电偶垂直于气流方向)、$\beta = 0.86 \pm 0.09$ (热电偶平行于气流方向)，再乘以式(8)第 2 项，即得到气流动能与动温 T_{v} 之间的实际转换。

则能量转换误差为：

$$\Delta T_{\mathrm{e}} = T^* - T_{\mathrm{t}} = T + v^2 \big/ 2C_p - T_{\mathrm{t}} \tag{9}$$

2.2.5 动态响应误差

综合前 4 项误差的计算，可得热电偶传感器的测试误差。此外，由于热电偶传感器具有一阶响应特性，则还应考虑测温过程中的动态响应误差 ΔT_{c2}，其算式为：

$$\Delta T_{\mathrm{c2}} = T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{t}} = \left(T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{w}}\right)\mathrm{e}^{-\frac{t_s}{\tau}} \tag{10}$$

当气体温度与筒壁温度不变，即 $T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{w}}$ 恒定时，各瞬态 t_s 时的动态响应误差仅取决于 τ。由不稳定导热的微分方程可得：

$$\frac{\partial T_x}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{C_\rho}\cdot\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{11}$$

式中：a 为热电偶的导温系数；ρ 为热电偶的密度；C 为热电偶的比热。

将式(11)代入式(3)中，当 x=L 时的热电偶温度 T_x=T_{t}

$$\frac{dT_{\mathrm{t}}}{d\tau} = \frac{4\alpha_{\mathrm{c}}}{\beta CD}\left(T_{\mathrm{g}} - T_{\mathrm{t}}\right) \tag{12}$$

由上式可知，α_{c} 愈大，热电偶直径与比热愈小，响应时间愈短。

2.3 传感器误差控制

2.3.1 传递误差修正

对于镍鉻–镍硅热电偶传感器来说，在不同温度范围，其传递误差大小不同，具体数值可查表得知。试验中可根据气体温度范围，按照表中给出的传递误差，对测得值进行修正，以提高测温精确度。

2.3.2 冷端温度补偿

由热电偶工作原理知，只有当冷端温度保持恒定时，才能使热电偶工作端温度与热电动势呈单值函数关系。热电偶的分度就是在此基础上(冷端温度保持为 0 ℃)进行的[1]。在实际测量中，冷端温度为非零的工作环境温度，则须采取补偿或校正措施。常用的冷端温度补偿措施有：热电动势修正法、温度修正法、热电偶补偿法、电桥补偿法、补偿导线法。下文主要介绍前 2 种方法。

1) 热电动势修正法

若热电偶的冷端温度为一非零恒定值 T_n，此时热电偶的热电动势为 $E_{AB}(T,T_n)$，由图 4 所示的热电偶特性曲线可知，

$$E_{AB}\left(T,T_0\right) = E_{AB}\left(T,T_n\right) + E_{AB}\left(T_n,T_0\right) \tag{13}$$

式中：$E_{AB}\left(T,T_n\right)$为实测值；$E_{AB}\left(T_n,T_0\right)$为修正值，即冷端为 0 ℃，工作端温度为 T_n时的输出电动势，此修正值可由分度表查出。

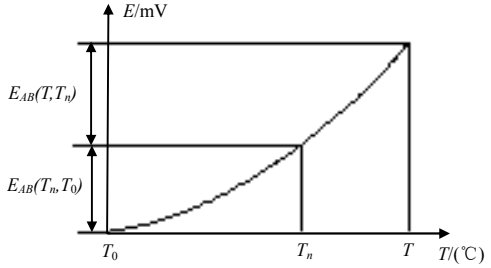

Fig.4 Characteristic curve of the thermocouple
图 4 热电偶特性曲线

2) 温度修正法

假定已得到热电偶在冷端温度为 0 ℃的条件下的标校值 T_{z}，

则当冷端温度为 T_n 时，有：

$$T_g = T_z + KT_n \tag{14}$$

式中 K 为热电偶修正系数，与热电偶种类和被测温度范围有关，实用时可查相关热电偶 K 值表得知[2]。

2.3.3 设备改进处理

由式(2)可知，测量端与气流之间的温差 ΔT_{c1} 与测量端的表面积 F 及对流换热系数 α_c 呈反比。在焊接热电偶两热电极接点时，焊点应焊成光滑球状且不宜太小，使其与接点充分接触以形成最大接触面，增加对流换热面积，且将传感器放置在气流速度最大处，以增加 α_c。

由式(4)、式(5)可知，ΔT_C 与热电偶插入长度、热电极导热系数及热电极直径有关。故在选取热电极材料时，采用导热系数最小的镍铬–镍硅；而在设计热电偶时，在保证强度的前提下，取热电极直径 0.6 mm、置入筒内深度 80 mm，这样既可避免筒内壁附近温度梯度的影响，又可使热电偶热惯性较小，从而提高动态响应速度。采取以上控制措施后，经式(4)或式(5)计算可知，由导热产生的误差几乎为零，可以忽略不计。

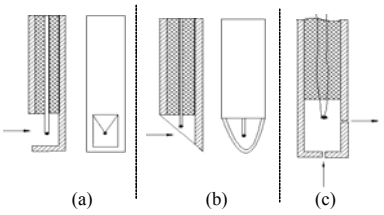

Fig.5 Three types of thermocouples with a stop cover
图 5 3 类带有制止罩的热电偶

由式(7)可知，要减小测量误差，可首先设法增大 α_c，即增加气体流速，或减小热电偶直径；其次为减小辐射散热，可减小热电偶的黑度；再次可提高器壁温度 T_S。

由式(8)可知，传感器如果处于高速气流中，直接测试气流温度将会产生较大误差。故测量高速气流温度时，常采用带有滞止罩的热电偶使气流尽量滞止，以减小测试误差。图 5 为 3 类带有滞止罩的热电偶，图 5(c)中的滞止罩上开有小孔，作用是增强气流对热电偶的对流换热，用以减小热电偶的导热与辐射热损失。

3　信号放大和采集误差分析

在电子技术飞速发展、高度先进的当今，信号放大与数据采集部分在系统中的工作精确度已相当高[3-4]。工程应用中，由它们产生的误差相对传感器带来的误差来说，完全可以忽略。某测温系统采用第 4 代斩波自稳零运放 ICL7650，其输入失调电压低，温漂小，精确度高，稳定性好。采集部分的采样频率 5 kHz，采样精确度 12 位，以上技术指标远远满足使用要求。故由该部分产生的测温误差，在精确度分析中可完全忽略不计。

4　数据处理误差分析

将试验中的直接温度测量值(连续变化的电压信号)精确地转换成实际应用中所需的温度值，一般有 2 种数学处理方法：高次方程法和直线插值法。

4.1 高次方程法

根据热电偶的热电效应特性可知，镍铬–镍硅热电偶在测量范围为 0 ℃~1 372 ℃内，产生的热电动势值 E(单位 μV)与其所测温度 T(单位℃)之间的 E–T 多项式为[5]：

$$E = \sum_{i=0}^{8} b_i T^i + 125\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{T-127}{65}\right)^2\right] \tag{15}$$

式中 $b_i(i=0,1,\cdots,8)$ 可根据标校数据计算得出，进而确定式中的 E–T 二次项，并以此求得气体温度。该数据处理方法既可消除系统中的系统误差，又符合热电偶的热电特性关系式，具有较高处理精确度。

4.2 直线插值法[6]

首先，确定测得值 E_i 在标校值中的区间(E_n,E_{n+1})，然后根据直线插值法求得 T_i：

$$T_i = T_n + \frac{T_{n+1}-T_n}{E_{n+1}-E_n}\left(E_i - E_n\right) \tag{16}$$

该数据处理方法具有一定的误差，但在工程应用中，完全满足使用要求。

5 测试数据对比分析

结合历次飞行试验测试数据，按照上述误差分析及控制方法，列举相应测试数据比对如表 1 所示。

从表中数据及历次试验数据分析可知，采用上述改进方法之后，某型飞行器发射试验温度参数测试系统具备较高的测试精确度(从修正前的 93.43%提高到修正后的 98.32%左右)，很好地满足了试验精确度要求。该系统已经过多次试验任务检验，具有较好的测试效果。

6 结论

本文对某型温度测试系统采用的铠装热电偶测温传感器从对流传热误差、导热误差、辐射误差、气流流速产生的误差、热电偶的传递误差及冷端温度补偿等几方面详细分析了误差现象、产生原因及误差控制方法，并对信号放大误差、采集误差及数据处理误差进行了误差分析和控制方法研究。在温度测试系统中，将这些误差控制方法充分考虑并应用到环境温度实测上，试验结果证明这些方法发挥了重要的作用，取得了很好的效果，使环境温度测量精确度得到了有效提高。

参考文献：

[1] 王广志,吴颖,黄志光. 数字式温度传感器与分布式温度测量系统[J]. 传感技术学报, 2001,14(1):26-32. (WANG Guang zhi,WU Ying,HUANG Zhiguang. Digital temperature sensor with distributed temperature measurement system[J]. Journal of Sensors and Actuators, 2001,14(1):26-32.)

[2] 杨晓玲,伍永顺. 高准确度温度测量系统信号调理[J]. 传感器技术, 2003,22(6):47-51. (YANG Xiaoling,WU Yongshun. Signal processing of high accuracy temperature measurement system[J]. Journal of Transducer Technology, 2003,22(6):47-51.)

[3] 马骏,苏冬云. 温度数据采集测试系统设计[J]. 机电工程技术, 2005,34(10):17-19. (MA Jun,SU Dongyun. Temperature data collection test system[J]. Electrical Engineering Technology, 2005,34(10):17-19.)

[4] 赵友权,范世福,李昀. 常低温辐射温度测量的理论研究[J]. 光电工程, 2001,28(5):46-49. (ZHAO Youquan,FAN Shifu, LI Yun. Theoretical Study on Radiation Temperature Measurement in Constant and Low Temperature Field[J]. Opto-electronic Engineering, 2001,28(5):46-49.)

[5] 吴正毅. 测试技术与测试信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2001. (WU Zhengyi. Test technology and test signal processing[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2001.)

[6] 严锦生,夏元复. 非电量电测技术(上册)[M]. 北京:原子能出版社, 1997. (YAN Jinsheng,XIA Yuanfu. Non-power Electrical Measuring Technology(Volume I)[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 1997.)

作者简介：

葛 萍(1976-)，女，山东蓬莱人，工程师，主要研究方向为飞行器测控、传感信息处理.email:hippyberry20@163.com.

方 勇(1980-)，男，江西赣州人，工程师，主要研究方向为飞行器测控、传感信息处理.

解本政(1977-)，男，山东即墨人，工程师，主要研究方向为飞行器测控、传感信息处理.

周怀平(1983-)，男，江西九江人，在读硕士研究生，主要研究方向为导弹测试与控制.