

基于热电偶的精密环境温场测量的 关键问题研究

李洪波^{1,2}, 赵维谦¹, 高思田³, 崔建军³, 丁健³

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国航空工业总公司 北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095;
3. 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要: 分析了热电偶温度测量不确定度、温场稳定度测量不确定度和温场均匀度测量不确定度, 为精密环境的温场参数测量和控制提供理论保障. 分析表明, 热电偶测温不确定度与热电偶热电动势、参考端温度传感器的测量不确定度密切相关; 温场均匀度测量不确定度与热电偶热电动势的测量不确定度密切相关; 温场稳定度测量不确定度与热电偶热电动势和温差拟合函数的关系密切, 在一次线性拟合的条件下取决于拟合函数的斜率. 针对测量过程中存在的脉冲噪声和热电偶非线性的干扰, 结合精密环境温度信号变化缓慢的特点, 提出综合运用均值滤波和中值滤波处理热电偶热电动势测量数据去除测量中脉动噪声和热电偶非线性对测量结果的影响.

关键词: 热电偶; 测量不确定度; 温场均匀度; 温场稳定度; 非线性; 滤波

中图分类号: TG84; TH161; TB92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2010)04-0001-05

Research on Some Key of Thermocouple Used to Detect the Temperature of Precision Measurement Environment

LI Hong-bo^{1,2}, ZHAO Wei-qian¹, GAO Si-tian³, CUI Jian-jun³, DING Jian³

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Changchen Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100095, China; 3. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: Uncertainty of temperature measurement by thermocouple is analyzed, at same time, the uncertainty of stability and uniformity of temperature measurement are analyzed as well. The analysis brings forward the theoretical support for the parameters measurement and control of temperature field under precise environment. It shows the uncertainty of temperature measurement is closely related to the measurement uncertainty of both thermocouple EMF and the sensor temperature at reference-side. The measurement uncertainty of the uniformity of temperature is closely related to the uncertainty of EMF of the thermocouple, while the uncertainty of the stability of temperature is closely related to both EMF and the fitting function of temperature difference, which depends on the slope when the fitting function is a linear fitting. Taking the character that temperature change slowly in precise environment into account, the average filter combined with the median filter are used to remove or weaken the pulse noise and non-linear interference of the thermocouple during the EMF measurement.

Key words: thermocouple; uncertainty; uniformity of temperature; stability of temperature; nonlinear; filtering

0 引言

高精度温度计量是精密计量和制造纳米几何尺寸的重要前提^[1-2]. 大范围纳米坐标测量机提出了保障常温下密闭空间内温度具有高稳定性和高均匀度的要求. 迄今为止的文献中仅通过某种算法计算精密测量环境的温度均匀性和稳定性, 而未分析其测量不确定度, 因此无法保证所构建的测量环境符合其设计精确度要求.

响应速度快、不存在自热等优点的热电偶, 较电阻等其他温度传感器更适用于密闭空间内温度的测量, 但常规应用的热电偶个体间差异较大、稳定性差而无法满足精密空间内温场均匀性测量要求^[3-4], 这种差异可通过在实验室中分别标定每支热电偶而得到克服, 因此实验室条件下应用热电偶能够给出较常规应用更高的测量精确度. 我们在温度范围在 18 ~ 22 °C 的条件下使用铜-康铜热电偶测量纳米坐标测量机的工作环境温度, 分析了基于热电偶测温的温度测量不确定度和精密测量环境温场稳定度、均匀度的测量不确定度, 为精密环境的温场参数测量提供了理论保障. 同时, 针对测量过程中存在的脉冲噪声和热电偶非线性的干扰, 结合纳米坐标测量机的工作环境温度信号变化缓慢的特点, 提出综合运用均值滤波和中值滤波处理热电偶热电动势测量数据, 以使更好地测量精密测量环境的温场分布.

1 热电偶测温原理及模型

根据 Seebeck 效应, 当组成热电偶的材料一定时, 热电偶的热电动势只取决于热电偶测温回路的两个接点温度. 即热电偶检测端温度可表示为

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + \varphi(E_{AB}(T, T_0)) \quad (1)$$

式中: A, B 为组成热电偶两极的两种材料; T_0 为热电偶参考端温度 (°C); E_{AB} 为温差 $\Delta T = T - T_0$ 时的热电偶热电动势 (nV).

根据美国国家标准局 (NBS) 提供的铜-康铜热电偶电压特征数据与温度对应关系——热电动势与测量端和参考端温差近似呈线性^[5], 考虑到实际测温范围为 4 °C 左右, 认为热电偶热电动势与测量端和参考端温差为 1 次函数关系是合理的, 即热电偶测温模型可表征为

$$T = T_0 + \Delta T = T_0 + aE + b \quad (2)$$

式中: $\Delta T = kE + b$, 为温差和热电动势的 1 次最小二

乘拟合关系式; a 为斜率 (°C/nV), b 为截距 (°C).

2 实验系统

实验系统包括机械系统、数据采集系统和软件平台等三部分, 如图 1 所示. 热电偶的测量端和参考端分别置于两个相同结构的保温箱体 (立方体结构, 6 面均采用 200 mm 苯板隔热) 内的杜瓦瓶中, 并在测量中采用两支一等标准铂电阻测量热电偶补偿端和测量端的温度, 使用两个纯铜块分别包裹热电偶参考端和参考端的一级标准铂电阻以及热电偶测量端和测量端的一级标准铂电阻, 使两支一等标准铂电阻尽可能分别与热电偶参考端和测量端温度相同, 然后分别放置于参考端和测量端中盛油的杜瓦瓶中, 将该盛油杜瓦瓶置于箱体中央.

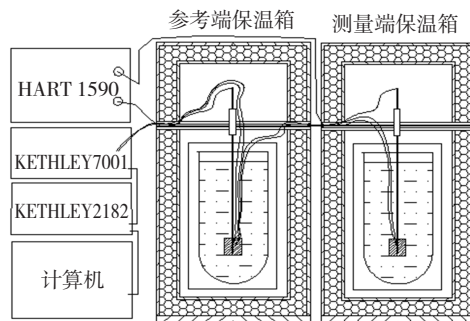


图1 热电偶标定装置示意图

采用 HART 1590 型测温仪分别测量参考端和测量端的一等铂电阻, 获得热电偶参考端和测量端的温度. 测温仪的测量不确定度在 1 °C 内达 1 ppm.

热电偶温差热电动势的采集由 KETHLEY 7001 可编程程控开关、KETHLEY 2182 纳伏计组成, 并由计算机控制. 程控开关的作用是根据计算机指令使待标定的热电偶与纳伏计连接, 由纳伏计测量该热电偶的热电动势. 数据采集系统如图 2 所示. 测量温差为 0 ~ 3 °C 区间内的热电偶热电动势的变化. 根据式 (2) 确定热电动势和温差的关系.

热电偶热电动势、测量端温度和参考端温度的具体测量过程如下:

- 1) $n = N$ (N : 待标定的热电偶总数);
- 2) $i = 1$;
- 3) 选通程控开关的第 i 通道, 读取纳伏计的热电动势测量值 $E(i)$;
- 4) 测温仪读取热电偶测量端温度 $R_t(i)$;
- 5) 测温仪读取热电偶补偿端温度 $R_c(i)$;
- 6) $i = i + 1$;

7) $i > n$? 否,重复步骤 3) ~6); 是,重复 1) ~7)。

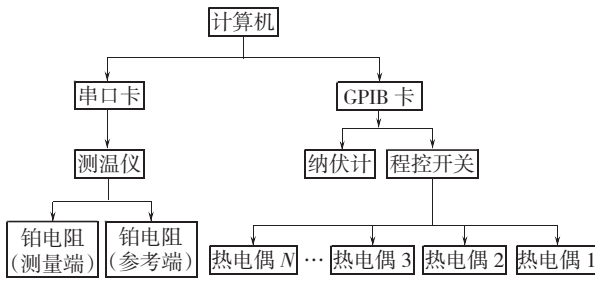


图2 热电偶信号采集示意图

3 温度测量不确定度

热电偶参考端温度测量值在 $18 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间, 标定热电偶测量端和补偿端温差范围 $\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$. 并进行了大范围重复标定, 标定点的数量足以满足实验要求。

根据式(2)获得热电偶测量端温度测量不确定度^[4]为

$$U^2(T) = c_1^2 \cdot u^2(T_0) + c_2^2 \cdot u^2(k) + c_3^2 \cdot u^2(E) + c_4^2 \cdot u^2(b) \quad (3)$$

各灵敏系数 c_1 、 c_2 、 c_3 和 c_4 分别为: $c_1 = \partial T / \partial T_0 = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$; $c_2 = \partial T / \partial k = E\text{ nV}$; $c_3 = \partial T / \partial E = a\text{ }^{\circ}\text{C/nV}$; $c_4 = \partial T / \partial b = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. 即

$$U^2(T) = u^2(T_0) + E^2 \cdot u^2(k) + k^2 \cdot u^2(E) + u^2(b) \quad (4)$$

文[7]给出了热电偶测温不确定度的详细计算方法。 ΔT 为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, E 不大于 $1.7 \times 10^5\text{ nV}$, 取 $E = 1.7 \times 10^5\text{ nV}$. 对其中一只热电偶测量数据拟合后有: $a = -2.5 \times 10^{-5}$ 、 $\sigma_a = 5.2 \times 10^{-9}$ 、 $b = 4.4 \times 10^{-5}$ 、 $\sigma_b = 0.2 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})$, 根据标定系统具体使用的测量仪器和实验结果, 热电偶测量端温度测量不确定度构成如表1所示。

表1 热电偶测温的不确定度构成

来源	符号	类别	灵敏度 系数(c_i)	$U(x_i)$	$ c_i U(x_i)$ $\times 10^{-4}$	分布	
参考端 温度	标准铂电阻	$U_1(T_0)$	B	2.5×10^{-4}	2.5	正态	
	测温仪	$U_2(T_0)$	B	1	1×10^{-4}	1	正态
	接点温差	$U_3(T_0)$	A		5.8×10^{-4}	5.8	均匀
热电 动势	电偶稳定性	$U_1(E)$	A		18	4.5	均匀
	扫描开关	$U_2(E)$	B	a	18	4.5	均匀
	纳伏计	$U_3(E)$	B		70	1.8	均匀
算法	斜率	U_a	A	E	5.2×10^{-9}	8.8	均匀
	截距	U_b	A	1	2×10^{-4}	2	均匀

由式(4)和表1得冷热端温差为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 热电偶

测温标准不确定度为 $2.2 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$. 置信概率为 0.99 时, 取 $k=3$, 则其扩展不确定度表示为

$$U_{99} = 3 \times U(T) = 6.6 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

4 温场均匀度测量不确定度

温场均匀度通常定义为一段时间内, 待测量温场内温度变化的最大值和最小值之差. 对于实际被测系统而言, 通常采用在温场的特征点处采集特征点温度的变化, 并将所有被测特征点在一段时间内的温度变化幅值定义为温场的均匀度. 因此, 设一定时间内温场中的两点 j 、 k 出现最大值和最小值, 其温度分别表示为 T_j 、 T_k , 则温场均匀度表示为

$$T_u = T_j - T_k = (T_0 + aE_j + b) - (T_0 + aE_k + b) = a(E_j - E_k) \quad (5)$$

式中: T_u 表示温场均匀度; E_j 、 E_k 分别表示热电偶 j 、 k 的热电势; 则温场均匀度测量不确定度表示为

$$U^2(T_u) = d_1^2 U^2(a) + d_2^2 U^2(E_j) + d_3^2 U^2(E_k) \quad (6)$$

各灵敏系数 d_1 、 d_2 和 d_3 分别为: $d_1 = \partial T / \partial a = (E_j - E_k)\text{ nV}$; $d_2 = \partial T / \partial E_j = a\text{ }^{\circ}\text{C/nV}$; $d_3 = \partial T / \partial E_k = -a\text{ }^{\circ}\text{C/nV}$. 若温场均匀度为 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即 $\max(E_j - E_k) < 1.7 \times 10^5\text{ nV}$, 则基于热电偶测温地被测系统均匀度测量不确定度及其构成如表2所示. 计算得温场均匀度标准不确定度为 $2.5 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$. 置信概率为 0.99 时, 取 $k=3$, 则其扩展不确定度表示为

$$U_{99} = 3 \times U(T) = 7.5 \times 10^{-3}\text{ }^{\circ}\text{C}$$

表2 温场均匀度的不确定度构成

来源	符号	类别	灵敏度系数(c_i)	$U(x_i)$	$ c_i U(x_i)$	分布
热电势	电偶稳定性	$U_1(E)$	A	18	4.5×10^{-4}	均匀
	扫描开关	$U_2(E)$	B	a	4.5×10^{-4}	均匀
	纳伏计	$U_3(E)$	B	70	1.8×10^{-3}	均匀
算法	斜率	U_a	A	$E_j - E_k$	5.2×10^{-9}	8.8×10^{-4} 均匀

5 温场稳定度测量不确定度

温场稳定度通常定义为一段时间内, 温场内某个待测特征点温度变化的最大值和最小值之差. 实际测量过程中, 通常采用一只温度传感器在一段时间内温度测量值的最大最小值之差表示温场稳定度, 设在该段时间内传感器在 t_1 和 t_2 时刻获得最大 $T_{\max}$ 、最小值 $T_{\min}$, 则温场稳定度表示为

$$T_s = T_{\max} - T_{\min} = (T_0 + aE_{\max} + b) - (T_0 + aE_{\min} + b) = a(E_{\max} - E_{\min}) \quad (7)$$

式(5)中 T_s 表示温场稳定度, $E_{\max}$ 、 $E_{\min}$ 分别表示最大、最小温度值 $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 对应的热电偶热电动势, 则温场稳定度测量不确定度表示为

$$U^2(T_s) = e_1 U^2(a) \quad (8)$$

灵敏系数为: $e_1 = \partial T / \partial \alpha = (E_{\max} - E_{\min}) \text{ nV}$. 若温场稳定度为 0.4°C , 即 $\max(E_{\max} - E_{\min}) < 1.7 \times 10^4 \text{ nV}$, 则基于热电偶测温地被测系统稳定度测量不确定度及其构成如表3所示. 计算得温场稳定度标准不确定度为 $8.8 \times 10^{-5}^\circ\text{C}$. 置信概率为 0.99 时, 取 $k=3$, 则其扩展不确定度表示为

$$U_{99} = 3 \times U(T) = 2.6 \times 10^{-4}^\circ\text{C}$$

表3 温场稳定度的不确定度构成

来源	符号	类别	灵敏度 系数(c_i)	$U(x_i)$	$ c_i U(x_i)$	分布
算法	斜率	U_a	A	$E_{\max} - E_{\min}$	5.2×10^{-9}	均匀

从表1~3中可以看出, 热电偶热电动势测量的准确度严重影响热电偶测温不确定度和温场均匀度测量不确定度, 而温场稳定度测量不确定度与热电偶热电动势和温差拟合函数的关系密切, 在一次线性拟合的条件下取决于拟合函数的斜率, 但高精密度测量环境通常具有很好的温度稳定度, 一般小于 0.1°C , 这意味着温场稳定度测量不确定度通常在万分之几摄氏度或更小; 为改善温场温度测量不确定度以及温场均匀度测量不确定度, 采用热电偶作高精密度温度测量时需提高热电偶热电动势的测量准确度. 同时, 也可以看出, 采用上述方法标定的热电偶能够满足精密测量环境所要求的 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ 的温度^[4]测量要求.

6 测温过程的数据处理技术

文^[5]在低温热电偶标定过程中发现热电偶测温存在非线性现象, 并采用分形方法分析了由于这种非线性引入的热电偶测温误差, 其分析表明这种非线性存在一定的随机性, 且各传感器间测量存在弱相关, 但没有给出改善这种非线性的方法. 在采用本文给出的系统标定热电偶的过程中, 我们也发现了这种非线性现象, 同时还发现热电偶热电动势采集过程中存在脉冲噪声, 如图3所示, 测量过程中在温差为 $1 \sim 1.5^\circ\text{C}$ 和 $3 \sim 3.5^\circ\text{C}$ 之间两次出现脉冲噪声; 选取温差为 $3.1 \sim 3.2^\circ\text{C}$ 之间的测量数据曲线观察测量存在非线性现象.

为减弱测量中随机噪声和脉冲噪声的干扰, 考

虑对测量过程采取滤波运算. 一般信号测量过程中同时含有多种噪声, 因此应考虑如何滤波才能达到最佳效果. 假如综合使用不同的滤波方法, 则先使用的滤波运算可能会对其他性质的噪声产生影响, 导致其他滤波方法效果变差. 目前还没有一种方法对所有信号的处理效果均为最佳, 某一种单一滤波算法只能较好地对含有一种或几种噪声类型的信号进行处理. 抑制噪声并能够在处理中保留信号真实的变化趋势是相互制约的.

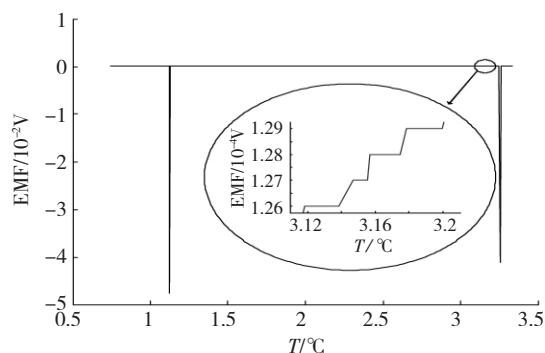


图3 热电偶热电动势信号受到随机噪声和脉冲噪声的污染

工程实际中一般通过简单的算法或简单算法的组合来达到信号处理的目的, 如均值滤波和中值滤波^[6]就是工程实际中经常使用的滤波算法. 均值滤波方法能够有效地滤除随机噪声中的高斯噪声, 但对与信号有关的噪声和脉冲噪声抑制效果较差. 同时, 均值滤波存在钝化信号变化趋势的作用, 且滤波窗口越大, 信号变化趋势的钝化越严重. 均值滤波算法如下式:

$$g(t) = \frac{1}{M} \sum_{i \in S} y(t) \quad (9)$$

式中: $y(t)$ 为原始信号在 t 时刻的测量值; S 为 t 时刻的时间邻域; M 为邻域 S 的信号测量个数; $g(t)$ 为均值滤波后最终信号.

中值滤波能较有效地抑制测量信号脉冲噪声的干扰, 且不改变信号频谱, 对随机噪声的抑制能力不如均值滤波. 中值滤波是一个有奇数点的滑动窗口, 将窗口中心点的值用窗口内各点的中值代替, 可以用下式表示:

$$y(t) = \text{Med}\{f(t)\} \quad (10)$$

式中: A 为滤波窗口; Med 为取中值运算; $\{f(t)\}$ 为 A 中所有测量信号的集合序列.

由于待处理的信号中既包含有脉冲噪声又包含有随机噪声, 因此综合运用中值滤波和均值滤波算法, 改进式(10)的中值滤波方法, 使中值滤波输出为一个序列, 将该输出序列作均值滤波处理得到该

测量时刻的信号测量值. 具体算法如下:

1) 读取5个温度测量值, 获得测量序列 $\{f(t)\} = \{f(t_{i-2}), f(t_{i-1}), f(t_i), f(t_{i+1}), f(t_{i+2})\}$.

2) 取式(10)中 $A=5$, 计算序列 $\{f(t)\}$ 的最大值和最小值, 去掉最大值和最小值得到式(10)的输出序列 $\{y(t)\} = \{y(t_1), y(t_2), y(t_3)\}$.

3) 取式(9)中 $M=3$, 计算信号 $g(t)$ 的值.

依次对所有测量值处理, 最终输出即为经中值滤波器和均值滤波器的信号输出值.

经上述方法处理后的信号如图4所示. 可见, 经处理后的信号去除了脉冲噪声的干扰, 同时, 信号的非线性得到了一定程度的抑制.

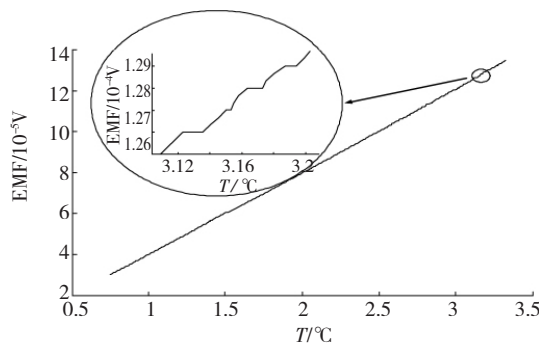


图4 经中值滤波和平均滤波后的热电偶热电动势与温差间的关系

7 结 论

1) 分析了基于热电偶测温的温度测量不确定度、温场稳定度测量不确定度和温场均匀度测量不确定度, 为精密环境温场参数的测量和控制提供理论保障. 分析表明, 热电偶测温不确定度与热电偶热电动势、参考端温度传感器的测量不确定度密切相关; 温场均匀度测量不确定度与热电偶热电动势的测量不确定度密切相关; 温场稳定度测量不确定度与热电偶热电动势和温差拟合函数的关系密切, 在一次线性拟合的条件下取决于拟合函数的斜率.

2) 采用热电偶作窄温区温度测量, 置信概率为0.99时, 温区为4℃时, 其温度测量不确定度可达 $6.6 \times 10^{-3} \text{℃}$; 均匀度为4℃时, 其温场均匀度测量不确定度可达 $7.5 \times 10^{-3} \text{℃}$; 稳定度为0.4℃时, 其温场稳定度测量不确定度可达 $0.26 \times 10^{-3} \text{℃}$. 分析表明, 采用比对法标定的热电偶温度测量指标能够满足精密测量环境要求的 $\pm 0.01 \text{℃}$ 温度测量要求.

3) 针对测量过程中存在的脉冲噪声和热电偶非线性的干扰, 结合精密环境温度信号变化缓慢的特点, 提出综合运用均值滤波和中值滤波处理热电偶热电动势测量数据, 很好地去除了测量中脉动噪声的干扰, 同时也减小了热电偶非线性对测量结果的影响.

参 考 文 献:

- [1] 李洪波, 高见田, 崔建军, 等. 微米、纳米尺度测量环境的温度测量和控制技术 [J]. 计量学报, 2009, 30(5A): 32-37.
- [2] AHMAD S, HAL A, THEODORE Z, et al. Addressing the Environmental Challenges of the NIST Advanced Measurement Laboratory [C] // Buildings for Nanoscale Research and Beyond, Proc. SPIE, San Diego, CA, USA, 2005, 5933(5933N): 1-13.
- [3] 王佐民, 吴开宇. 同种材料组成热电偶产生热电动势的分析 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 9(5): 7-8.
- [4] 彭长青, 王寒栋, 李 鸣, 等. 基于虚拟仪器的热电偶温度传感器的标定 [J]. 深圳职业技术学院学报, 2008, 7(1): 7-11.
- [5] NIST. http://srdata.nist.gov/its90/type_t/tcoefficients_inverse.html/ [EB/OL]. [2009-10-20]. NIST.
- [6] 全国计量标准、计量检定组. 测量不确定度评定与表示实例 [M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.
- [7] 张旭东, 刘香斌, 党爱华, 等. 基于热电偶的温度测量系统的不确定度 [J]. 计量学报, 2006, 27(1): 157-159.
- [8] 张 鹏, 伍宇焯, 许煜雄, 等. 低温热电偶的标定及标定过程中的非线性现象的研究 [J]. 低温物理学报, 2003, 25(1): 51-56.
- [9] 何 斌, 马天予, 王运坚, 等. Visual C++ 数字图像处理 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

(编辑: 付长缨)