

无线无源声表面波温度传感器的标定

汪永为, 韩宇林, 韩 韬

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要:声表面波温度传感器由于其纯无源、长寿命等特性受到越来越广泛的关注和应用。制作好的声表面波温度传感器需进行精确而有效的标定,以保证传感器的准确性。由于传感器回波频率方差受无线信噪比的影响,用尽可能少的温度点来获得传感器回波频率和测量温度映射关系的方法是很重要的。该文利用蒙特卡洛仿真法,结合回波信号频率统计分布特征,讨论了标定点位置与个数和标定精度之间的关系,实现了传感器满量程测温精度优于1%。此外,还提出“一点校准”法来消除传感器在实际装配后由于位置变化而产生的影响,避免了设计差动结构的传感器。

关键词:声表面波;蒙特卡洛;标定;温度传感器

中图分类号:TN65

文献标识码:A

Calibration of Wireless and Passive SAW Temperature Sensor

WANG Yongwei, HAN Yulin, HAN Tao

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to its passive and long-life characteristic, surface acoustic wave (SAW) temperature sensor has been widely concerned and applied. In order to ensure the accuracy of the SAW temperature sensor, the precise and effective calibration should be implemented. Because wireless signal-to-noise ratio has an impact on the echo frequency variance, it is important to acquire the accurate functional relationship between the resonating frequency and temperature using the minimal temperature point. In this paper, based on frequency statistical characteristics of the echo signal, the relationship between the calibration accuracy and the number and position of temperature point is discussed by using Monte-Carlo simulation; the measurement accuracy of 1% within the full scale of sensor is realized. Otherwise, a “one-point calibration” method is proposed to eliminate the influence of position variation between the sensor reader and the sensor after installation.

Key words: surface acoustic wave; Monte-Carlo; calibration; temperature sensor

0 引言

声表面波(SAW)技术的无线温度传感器因其具有纯无源(传感器不需电源)、耐受恶劣环境(高温、低温和射线辐照)和长寿命等特点而受到普遍关注及得到初步应用^[1-2]。特别是在电力系统复杂环境中,SAW温度传感器的应用前景广。LiNbO₃基片具有高温灵敏度,但在阵列式无线测温系统中,由于考虑到无线带宽和谐振器的品质因数(Q)等因素,仍多采用石英作为基片材料^[3]。此时,SAW传感器的温度-频率特性多为非线性二次曲线。表征

该二次曲线的3个参量并非仅取决于基片材料,与SAW器件的制作工艺参数也密切相关^[4]。

根据SAW无线谐振式传感的原理,回波频率受到无线信噪比的影响。每个温度点对应回波频率按特定分布在真实值附近。为准确得到传感器回波频率和温度间的映射关系,如何在全量程范围内采用尽可能少(多于3点)的温度点获取准确度高的标定曲线是很重要的。本文利用蒙特卡洛仿真法,结合回波信号频率统计分布特征,选取尽可能少的温度点对传感器进行标定,并保证了传感器测温精度

收稿日期:2012-12-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60774052,51475306,11174205,11474203);教育部博士学科点专项科研基金(20120073110021);教育部新世纪优秀人才支持计划基金(12-0357)

作者简介:汪永为(1987-),男,湖北人,硕士,主要从事无线传感技术的研究。韩韬(1973-),男,山东人,教授,博士生导师,主要从事基于微声技术的传感与执行技术、现代检测理论与方法和抗恶劣环境的自动测控仪器的研究。E-mail:than@sjtu.edu.cn。

优于 1%。

此外,采用单谐振器制成的 SAW 无线传感器的谐振频率与传感器和阅读器天线的间距有关^[6],当标定后的传感器装配好后,在实际使用前,还需对传感器进行校准。常用的解决方法是采用差动双谐振器进行补偿。针对电力系统测温系统的特点,本文提出一种“单点校准”法消除单谐振式无线 SAW 温度传感器安装位置的影响。

1 SAW 温度传感器的标定

1.1 一般的标定方法

无线 SAW 温度传感器的标定是通过试验确定传感器的输入量(温度值)与输出量(回波频率)之间的关系。考虑到温度场的缓变性,只进行静态标定。其主要步骤如下:

1) 将传感器全量程(测量范围)分成若干标定温度点(可等间距也可非等间距)。由小到大、逐点递增输入标准温度值,记录下与各点输入值相对应的传感器输出频率。

2) 将输入值由大到小、逐点递减,同时记录下与各点输入值相对应的输出值。

3) 对传感器进行正、反行程往复循环多次(一般为 3~10 次)测试,将得到的输入-输出测试数据用表格列出或画成曲线。

4) 对测试数据进行必要处理,根据处理结果可得到传感器校准曲线,进而可确定出传感器的灵敏度、线性度、迟滞和重复性^[6]。

1.2 蒙特卡洛法

当 SAW 谐振器的膜厚、金属化比和基片切向确定后,表征传感器温度-频率特性曲线的 3 个参量基本确定,通过微扰理论等方法可以计算出 SAW 温度传感器理想的温度-频率特性曲线^[9]。由于是无线测量,受到各种噪声和电磁干扰等影响,对每个温度点的测量不可能准确获得传感器的真实频率值,这对确定传感器标定曲线造成很大影响。为确定噪声分布及标定温度点的选择对标定曲线的影响,本文选用蒙特卡洛仿真,以期在保证标定精度的前提下用尽可能少的点进行标定。

蒙特卡洛法,又称为随机抽样法,起源于早期用几率近似概率的数学思想。它利用随机数进行统计试验,以求得的统计特征值(如均值、概率等)作为待解决问题的数值解^[7-8]。基于蒙特卡洛法的温度传

感器标定基本思路是利用概率事件仿真技术产生服从特定分布的随机数来模拟实际传感器频率测量中的随机误差,然后再根据上述温度、频率值来拟合出实际的传感器温度-频率曲线。利用蒙特卡洛仿真拟合出来的曲线和理想特性曲线间的最大误差成为衡量传感器标定方案好坏的重要依据。标定时需要考虑 3 个方面的问题:

1) 回波频率噪声的分布情况。

2) 标定点位置的选取。在所测量的温度范围内如何确定合适的温度点进行标定,对最终的标定精度会有较大的影响。

3) 标定点个数的选取。理论上标定点数越多越好,但标定点过多,增加了标定工作量和成本。

1.3 回波频率分布情况

在采用蒙特卡洛仿真时,随机数的分布情况会直接影响 SAW 传感器的标定精度。所以,获得符合实际情况的回波频率分布情况很有必要。图 1 为实验时阅读器在 2 m 测量范围内对回波频率估计误差的频率直方图,实验数据是阅读器用某一特定频率对 SAW 传感器进行重复查询 3 000 次后得到的回波频率估计值。采用检验法,置信度为 95% 的显著性水平检验,得出回波频率估计误差服从正态分布,故在蒙特卡洛仿真时假设随机数服从高斯分布。

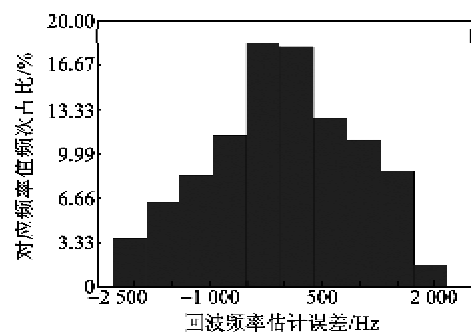


图 1 回波频率分布图

1.4 标定仿真试验

图 2 为利用蒙特卡洛仿真标定示意图。根据阅读器回波频率估计的噪声分布,标定温度点各自对应频率为理想频率值加一个高斯随机数;考虑到石英上 SAW 谐振器理想的温度-频率特性一般是开口向下的二次曲线关系,随着温度的增加,曲线斜率增加,故在标定点横轴位置选取时考虑采用均匀分布和非均匀分布的温度点来进行试验。然后可拟合出传感器的温度-频率特性曲线。

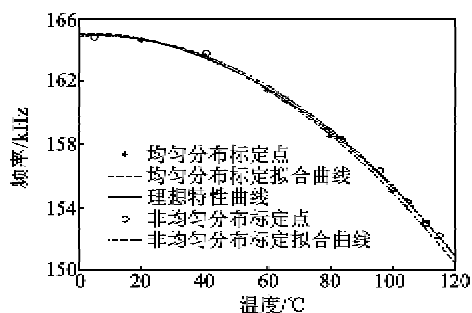


图 2 蒙特卡洛仿真示意图

非均匀分布标定点的选取原则是随着斜率的增加,标定点分布越密集。试验仿真的标定点选取步骤如下:

1) 先根据标定点数 n 和温度范围 ($T_1 \sim T_2$) 来确定一个公比 q , 即 $(T_1 + \Delta t) \times q^{n-1} \leq T_2$ 。

2) 根据 q 计算出以下等比点, 即 $t_1 = T_1 + \Delta t$, $t_2 = t_1 \times q, \dots, t_n = t_1 \times q^{n-1}$ 。

3) 反转第 2) 步计算出的等比点, 即 $x_1 = T_2 - t_1$, $x_2 = T_2 - t_2, \dots, x_n = T_2 - t_n$ 。其中 $\Delta t = 5 \sim 10$ °C 为一个偏移量, 目的是使标定点尽量不出现在测温范围的两端, 其原因为

a. 在标定点数有限的情况下, 在两端选取标定点会导致标定精度不高。

b. 在量程范围两端的温度点准确性不高。

图 3 为几组蒙特卡洛仿真试验结果, 反映标定点个数与标定最大误差间关系, 蒙特卡洛仿真次数 (N) 取 1 000 次。标定最大误差是指先根据已知标定点计算出拟合出来的二次函数曲线与实际曲线间

在传感器整个量程范围内的最大偏差, 然后再求出 N 次蒙特卡洛仿真中偏差的最大值。图 3(a)、(b) 为标定点等间距分布, 标定点数越多, 相互间的间距就越小。图 3(c)、(d) 为标定点非等间距分布情况。

传感器实际使用过程中, 随着温度升高, 传感器与天线的阻抗匹配性能变差, 所测回波信号幅度和长度均变差, 造成估计出的回波频率方差增大。图 3(b)、(d) 为回波频率估计方差随着温度增加而变大时, 标定点数与最大标定误差间的关系曲线。在这种情况下, 仿真时假设回波频率方差随温度增加线性增加, 回波信号频率方差 $var = \beta \times det \times (x/T_2)$, 其中 β 为常数, x 为测量温度值。当测频方差恒定时, det 为测频方差; 当测频方差逐渐增大时, det 为测频方差变化基准值。

由图 3 可知, 当测频方差恒定时, 若采用均匀分布标定, 最大误差随标定温度点数量的增加而减小; 若采用非均匀分布标定, 当标定点个数相同时, 最大误差较均匀分布显著减小, 总体上最大误差随着标定点个数增加而减小。当测频方差随温度增加时, 采用非均匀分布标定较均匀分布标定更有优势。当 $det = 400$ Hz, $\beta = 3$ 时, 采用 8 个点进行非均匀标定能将最大误差降低到 1 °C 以下。此外, 还可推断出在同一标定精度要求下, 如果能让传感器和天线在较宽温度范围内适当匹配, 降低传感器随温度升高引起的回波频率估计方差变化, 便可有效减少标定点的数量。

2 标定实验

对 SAW 无线温度传感器进行标定, 是根据试验数据确定传感器的各项性能指标, 实际上就是确定传感器的测量精度。所以在标定 SAW 温度传感器时, 所用测量设备(称为标准设备)的精度通常要比待标定传感器的精度高 1 个数量级(至少要高 1/3 以上)。这样通过标定确定的传感器性能指标才是可靠的, 所确定的精度才是可信的^[6]。

实验时所采用的标定装置是型号为 LP/2XCJ-100A 的恒温箱。该恒温箱的测温范围为 $-20 \sim 150$ °C。考虑恒温箱内温度分布变化, 还用二等标准玻璃水银温度计来对恒温箱内温度进行监测, 该温度计的测温精度为 0.1 °C。该标定系统能满足作为 SAW 温度传感器标准设备的性能要求。图 4 为在恒温箱内同时对 6 个传感器进行标定。经测试, 传感器在全量程内的测温精度在 1 °C 以内。

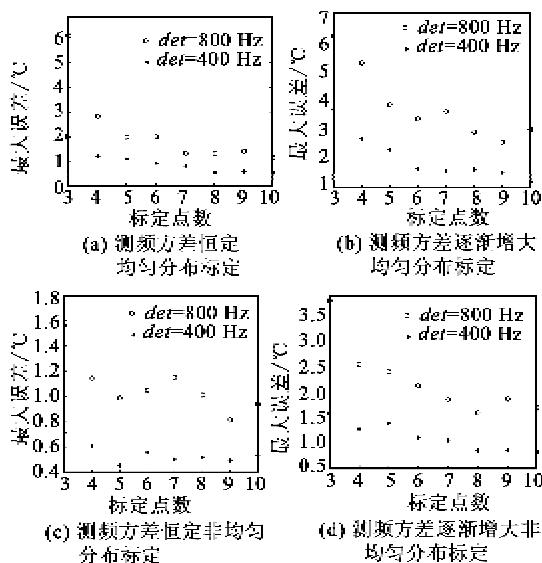


图 3 标定点数与标定误差间的关系



图4 传感器标定实验

3 传感器安装后的校准

当采用上述方法完成对传感器的标定工作后,可得到测量温度和传感器回波信号频率的一组映射关系。但对于单谐振器制成的无线温度传感器,文献报道及我们的实验均证明传感器谐振频率与传感器和阅读器的间距有关^[5]。为此,实验室标定好的传感器在测量现场装配好后,需对标定好的传感器再次进行有效地校准。此时已无法实现多温度点的标定。

对于现场装配好后传感器与阅读器的间距可保持恒定的测温系统而言,测量一个温度点(见图5中A点)对传感器进行校准,此时若传感器显示温度为 T_1 (见图5中B点),则存在温度偏差 $\Delta T = T_1 - T_0$,设校准前温度频率关系曲线为 $f = a \times t^2 + b \times t + c$,则实际的温度频率关系应为 $f = a \times (t + \Delta T)^2 + b \times (t + \Delta T) + c$ (其中, f 为回波频率值, t 为传感器测量温度, a, b, c 为表征传感器温度-频率特性曲线的3个系数)。从图5可看到,校准后的曲线是对校准前曲线沿平行于温度轴方向的一个平移。由于传感器的中心频率会随着作用距离的增加而下降^[5],而温度增加时传感器谐振频率也是下降的,故当传感器实际测量比标定的作用距离增加时,实际测量所得温度值会偏高,在校准时,应将温度-频率曲线向温度减小的方向即向左平移,平移的距离为传感器当前显示值和实际测量值之差,即为 ΔT 。

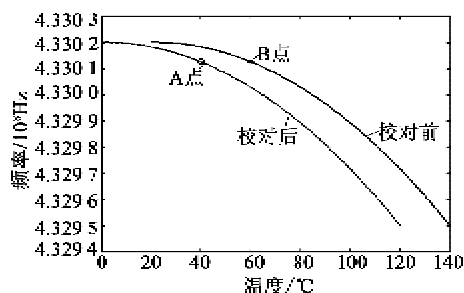


图5 对安装后的传感器校准示意图

采用这种“一点校准”法消除传感器在实际装配后由于位置变化而产生的影响,降低了差动结构传感器设计的难度。但该方法并不适用于使用过程中传感器与阅读器的间距不恒定的情况。

4 结束语

本文应用蒙特卡洛法对SAW传感器标定进行了仿真试验分析,初步得出标定点位置和个数对标定结果的影响关系,有利于降低传感器标定时的工作量。本文还提出“一点校准”法来消除传感器在实际装配后由于位置变化而产生的影响,因而避免了设计差动结构的传感器。

参考文献:

- [1] STEVENS D S, et al. Applications of wireless temperature measurement using SAW resonators[C]//Japan; Fourth International Symposium on Acoustic Wave Devices for Future Mobile Communication Systems, 2010.
- [2] POHL A. A review of wireless SAW sensors[J]. IEEE Trans. Ultrason Ferr Freq Control, 2000, 47(2): 317-332.
- [3] HENRY-BRIOT E, et al. Influence of metal thickness on phase velocity and thermal sensitivity of SAW devices[J]. IEEE Trans Ultrason Ferr Freq Contr, 2001, 48(2): 538-546.
- [4] KALININ V, BOWN G, LEIGH A. Contactless torque and temperature sensor based on SAW resonators [C]// S. I.; Proc IEEE Ultrason Symp, 2006: 1490-1493.
- [5] BUFF W, et al. A differential measurement SAW device for passive remotes sensing[C]//S. I.; IEEE Ultrason Symp, 1996, 1: 343-346.
- [6] 唐文彦. 传感器[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [7] 方再根. 计算机模拟和蒙特卡洛方法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988.
- [8] 戴景明, 杨茂华, 褚载祥. 基于波长函数的辐射温度计一点标定法及其精度的理论估计与实验验证[J]. 计量学报, 1999, 20(1): 53-58.
DAI Jingmin, YANG Maohua, CHU Zaixiang. One point calibration technique of pyrometer on the basis of wavelength function measurement and error checks [J]. Acta Metrologica Sinica, 1999, 20(1): 53-58.