Journal of Applied Acoustics

◇ 汪承灏院士八十生辰学术论文 ◇

宽温度范围SAW应变传感器温度与 应变解耦研究*

李红浪^{1†} 高 星^{1,2} 柯亚兵¹ 程利娜¹ 田亚会¹

(1 中国科学院声学研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 针对宽温度范围应变测量的温度干扰问题,提出并研究了基于双谐振器的声表面波应变传感器。理论 上,结合微扰理论、有限元方法、有效介电常数法分析出双谐振器频率与应变、温度的关系公式,进而推导出应 变与温度关于这两组谐振器频率变化的表达式。实验上,搭建宽温度范围的实验平台,在Y+34°切向的石英 基片上制作该传感器芯片,测得传感器芯片在 30 ℃~180 ℃下的频率响应,将测得的谐振器频率代入表达式 计算得到温度与应变值,与实验中参考温度与应变的值基本吻合。 关键词 声表面波,应变传感器,宽温度范围 中图法分类号: TP212.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2018)01-0016-04 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2018.01.003

Study on temperature and strain decoupling of SAW strain sensor in wide temperature range

LI Honglang¹ GAO Xing^{1,2} KE Yabing¹ CHENG Lina¹ TIAN Yahui¹

Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)
 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In this paper, a surface acoustic wave (SAW) strain sensor based on double resonators is proposed and studied for the temperature interference problem of strain measurement in wide temperature range. In theory, according to perturbation theory, the finite element method and the effective dielectric constant method, the formulas of double resonators' frequencies and strain at different temperatures were analyzed, then the equations of strain and temperature from two resonators' frequencies were deduced. In experiment, an experimental platform with wide temperature range was built, two resonators were fabricated on Y+34° quartz substrate, the frequency response of the resonators were measured at 30 °C~180 °C. The frequencies of the resonators were used to calculate the temperature and strain, which was basically consistent with the referred temperature and strain in the experiment.

Key words Surface acoustic wave, Strain sensor, Wide temperature range

作者简介:李红浪(1976-),男,湖北通城人,博士,研究员,研究方向:微声器件。

²⁰¹⁷⁻¹⁰⁻³⁰ 收稿; 2017-11-28 定稿

^{*}中国科学院重点部署项目 (KFZD-SW-415), 国家重点研发计划 (2016YFB0402705), 声学所青年英才计划 (QYNC201616)

[†]通讯作者 E-mail: lhl@mail.ioa.ac.cn

1 引言

应变传感器广泛应用于建筑、化工、交通等的 工程安全监测和损害预防中。例如,工矿企业的综 合管网,城市燃气、供热、供水管道等,这些设备极 易受到弯曲荷载的影响,由于缺少有效的智能应变 监测及故障诊断手段,机械事故频发,给生产带来了 巨大的经济损失。声表面波(Surface acoustic wave, SAW)应变传感器相比于传统的应变传感器,具有 体积小、精度高、可实现无线无源等特点^[1]。在一 些特殊的工作场合,如许多机械零件和结构可能经 历高低温状态,需要在苛刻的环境下实现对热态工 况下应变的测量,SAW 传感器表现出更高的应用价 值,而 SAW 应变传感器应变与温度的交叉敏感是 现阶段研究的重点与难点。

在国内,2013年吴荣兴等^[2]通过引入材料的高 阶热膨胀系数和高阶热弹性系数,计算出温度变化 对石英晶体的声表面波波速有显著影响,提出温度 变化引起的频率漂移需引起足够的重视。在以后的 研究中必须考虑温度效应的影响,针对不同工作环 境建立相应的温度补偿机制。2015年李夏喜等[3] 研究了基于石英基片的声表面波应变传感器各切 向的灵敏度,但并没有找到合适的切向使得温度的 灵敏度系数为零,温度对传感器的影响并不能通过 切向的选择而完全消除。2014年R. Stoney等^[4]研 究了20 ℃~100 ℃范围内的无线无源声表面波应 变传感器,在基片上制作两个中心频率不同的谐振 器,且由温度引起的频率响应变化相反,通过差分测 量以达到温度与应变解耦的效果,但是随着温度的 升高,效果也越差。2016年A. Maskay等^[5]研究了 高温下的声表面波应变传感器,使用温度传感器作 为参考,通过计算频率的差值进行温度补偿,但此方 法对传感器的制作工艺要求严格,并且在实际测量 中,使用两个独立的传感器使得操作较为复杂。本 文研究了宽温度范围内(30 ℃~180 ℃)的应变传感 器。基于双谐振器的SAW 应变传感器独立芯片,避 免了引入参考片带来的测试上的复杂,采用微扰理 论、有限元方法及有效介电常数法推导出宽温度范 围内的应变关于这两组谐振器频率的解耦公式。实 验上搭建了宽温度范围的测试环境平台,测试SAW 应变传感器的响应特性,将测试数据带入解耦公式, 得到测试的各温度、应变数值,并与参考的温度传 感器及应变片进行了比较分析。

2 理论分析

首先建立如图1所示的传感器芯片模型,分别 由两个不同切向的谐振器组成,其中谐振器S1的欧 拉角为(0°,124°,-45°),谐振器S2的欧拉角为(0°, 124°,-30°),谐振器S1与谐振器S2具有不同的谐 振频率。



图 1 传感器示意图 Fig. 1 Schematic diagram of sensor

根据微扰理论,建立外界扰动与谐振器频率变 化之间的函数关系式(1)^[6],

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\int_V u_{i,j}^* \widehat{C}_{ijkl} u_{k,l} d_v}{2\rho w_0^2 \int_V u_i^* u_i d_v} = \alpha_{pq} S_{pq}, \qquad (1)$$

其中, Δf 是谐振器的频率变化量, f_0 是无外界扰动 条件下的谐振器的频率。 ρ 是无偏载时石英的密度, ω_0 是SAW角频率, \hat{C}_{ijkl} 是外界扰动作用后的石英 基片的二阶弹性常数变化量, u是SAW 位移, u_i为 i方向上的SAW位移, $u_{i,i}$ 是i方向上的SAW位移 对j方向上的SAW 位移求偏导, $u_{k,l}$ 是k方向上的 SAW 位移对l方向上的SAW 位移求偏导。v是模型 的体积, S_{pq} 是应变张量, α_{pq} 是对应应变张量的应 变系数,这些系数依赖于晶体的材料参数,由此可计 算出不同温度下的材料参数以及应变系数。利用有 限元的方法构建石英基片的三维仿真模型[7],上表 面为自由表面边界条件^[3],设置不同温度下压电基 片的材料参数,并且将传感器与钢板硬链接,钢板的 一端固定,另一端施加载荷使弯曲下压,分析出基片 的应变灵敏度。为提高计算精度,在谐振器与钢板 的接触连接处,设置较密的网格,如图2所示。

采用有效介电常数的方法,理论上分别分析谐振器 S1 与的谐振器 S2 频率特性^[8]。然后经过推导,求出温度 T 和应变 S 关于 Δf_1 和 Δf_2 的解耦方程,如式 (2)~(3) 所示。其中 Δf_1 是谐振器 S1 的频率的

变化量, Δf_2 是谐振器S2的频率变化量,

$$S = r'_{1} * \Delta f_{1} + r'_{2} * \Delta f_{2} + r'_{3} * \Delta f_{1} * \Delta f_{1} + r'_{4} * \Delta f_{2} * \Delta f_{2} + r'_{5} * \Delta f_{1} * \Delta f_{2}, \quad (2)$$
$$T = r_{1} * \Delta f_{1} + r_{2} * \Delta f_{2} + r_{3} * \Delta f_{1} * \Delta f_{1}$$

 $+ r_4 * \Delta f_2 * \Delta f_2 + r_5 * \Delta f_1 * \Delta f_2. \quad (3)$





3 实验分析

采用 MEMS 工艺,制作了上述基于双谐振器的 传感器芯片。为了测试宽温度范围内的 SAW 传感 器的频率响应,对实验台进行优化,搭建环形加热 器,采用温控仪表进行控温,以弹簧钢板为试件,使 用环氧胶水将 SAW 应变传感器粘贴到钢板上,并 将电阻式应变片粘贴到附近区域做应变参考值,将 试件插入加热器内,钢板的一侧固定,另一侧加附 加载荷使产生弯曲变形。随着载荷的增加,钢板上 的应变值在改变,同时 SAW 传感器上的两个谐振 器的频率也在改变。网络分析仪读出谐振器的频率 值,应变仪模块监测应变值。如图3所示。

实验在30 ℃~180 ℃的范围内进行,通过温控 仪表来控制温度,通过调节微动台来改变试件的形

变量,网络分析仪测出两个谐振器频率值,利用最小 二乘法,拟合出解耦公式的系数,如表1所示。

将测量频率代入解耦公式计算出温度、应变的 测量值,分别与温控仪及应变仪参考值对比,如图4 所示。测试结果与实际测试有一定的误差,但基本 吻合。分析误差的原因,在宽温度范围内,虽然应变 片采用温度自补偿的上下表面贴片方式,但在随温 度升高时,仍有热输出的现象。其次,实验测试过程 中,胶粘剂的性能,采集电路引入的阻抗等^[9]都会 影响测试结果。





Fig. 3 High temperature testing platform

表1 实验计算解耦公式的系数

Table 1 The coefficients of decoupling formulas calculated by the experiment

系数	$r_1/(^{\circ}\mathrm{C}\cdot\mathrm{Hz}^{-1})$	$r_2/(^{\circ}\mathrm{C}\cdot\mathrm{Hz}^{-1})$	$r_3/(^{\circ}\mathrm{C}\cdot\mathrm{Hz}^{-2})$	$r_4/(^{\circ}\mathrm{C}\cdot\mathrm{Hz}^{-2})$	$r_5/(^{\circ}\!\mathrm{C}\!\cdot\!\mathrm{Hz}^{-2})$
数值	0	-4×10^{-5}	2.48×10^{-10}	2.46×10^{-10}	-4.9×10^{-10}
系数	$r_1'/(\mu\epsilon\cdot\mathrm{Hz}^{-1})$	$r_2'/(\mu\epsilon{\cdot}{\rm Hz}^{-1})$	$r_3'/(\mu\epsilon\cdot\mathrm{Hz}^{-2})$	$r_4'/(\mu\epsilon\cdot { m Hz}^{-2})$	$r_5'/(\mu\epsilon\cdot\mathrm{Hz}^{-2})$
数值	0	3.48×10^{-4}	2.48×10^{-10}	2.46×10^{-10}	-4.95×10^{-10}





Fig. 4 Comparison between SAW sensor and referred values

4 结论

本文提出基于双谐振器的SAW应变传感器, 理论上结合微扰理论与有限元方法,研究了宽温度 范围内 (30 ℃~180 ℃)的SAW应变传感器温度应 变的交叉响应,推导出应变与温度的解耦表达式,并 搭建宽温度测试平台,进行了实验验证。以(0 ℃, 124 ℃,0 ℃)切向的石英基片上两组谐振器为例, 计算出不同温度下应变与谐振器频率变化的关系 公式,实验上测试这一器件在30 ℃~180 ℃的条件 下的频率响应,并对解耦公式的系数进行校准,经 过多次测量,通过参考仪器测量的温度与应变值与 基于解耦方法的SAW应变传感器测量结果的比较, 验证了在宽温度范围内此解耦方法的可行性。

参考文献

- 赵一宇. 高灵敏度声表面波压力传感器研究 [D]. 北京: 中国 科学院声学研究所, 2015.
- [2] 吴荣兴, 袁丽莉. 温度效应对声表面波传播的影响 [J]. 压电与 声光, 2013, 35(1): 10–12, 15.

Wu Rongxing, Yuan Lili. Effects of temperature effects on surface acoustic wave propagation[J]. Piezoelectric and Acoustooptic, 2013, 35(1): 10–12, 15. [3] 李夏喜, 郭霄鹏, 白永强, 等. 基于石英基片的应变灵敏度分析 [J]. 压电与声光, 2015, 37(5): 896-898.
 Li Xiaxi, Guo Xiaopeng, Bai Yongqiang, et al. Analysis

of strain sensitivity based on quartz substrate[J]. Piezoelectric and Acoustooptics, 2015, 37(5): 896–898.

- [4] Stoney R, Dermot, Geraghty D, et al. Characterization of differentially measured strain using passive wireless surface acoustic wave (SAW) strain sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(3): 722–728.
- [5] Maskay A, da Cunha M P. High temperature static strain microwave acoustic sensor[C]. IEEE International Ultrasonics Symposium, 2016.
- [6] Hempel J, Finke D, Steiert M, et al. SAW strain sensorshigh precision strain sensitivity investigation on chiplevel[C]. Joint UFFC, EFTF and PFM Symposium, 2013.
- [7] 黎璇, 王文, 黄杨青, 等. 声表面波梁式加速度传感器的优化 设计 [J]. 应用声学, 2016, 35(4): 343-350.
 Li Xuan, Wang Wen, Huang Yangqing, et al. Optimization design of saw beam acceleration sensor[J]. Journal of Applied Acoustics, 2016, 35(4): 343-350.
- [8] 周卫. 1 GHz 声表面横波谐振器的研究及应用 [J]. 应用声学, 2000, 19(1): 46-48.
 Zhou Wei. Study and application of 1 GHz acoustic surface transverse wave resonator[J]. Journal of Applied Acoustics, 2000, 19(1): 46-48.
- [9] Belknap E. Mechanical characterization of SAW-based sensors for wireless high temperature strain measurements[D]. USA: The Ohio State University, 2011.