

电容式加速度计的温度特性分析与补偿设计

肖珊珊^{1,2} 洪利^{1,2} 姚振静² 韩智明² 李亚南²

(1. 中国石油大学(华东) 计算机与通信工程学院, 山东青岛 266580;

2. 防灾科技学院防灾减灾装备开放实验室, 河北廊坊 065201)

摘要: 电容式加速度传感器的弹性元件在不同温度条件下存在不同形变, 导致传感器的零输入响应产生变化, 影响了系统的线性特性。为此, 采用 ANSYS 对加速度计的机械敏感模块进行了温度场的有限元分析, 对极板位移与温度进行数学建模, 进而提出了一种针对实时温度的非线性补偿控制方式。仿真验证结果表明: 该方法能够有效降低温度对系统造成的影响, 对于零漂的输出误差降低 49.93%, 并保证了系统在不同频段工作输出的稳定性, 这也为电容式加速度传感器的性能改进提供了一种思路。

关键词: 电容式加速度计; 温度特性; 非线性补偿控制

中图分类号: TH825

文献标识码: A

文章编号: 1004-1841(2018)11-0151-05

Temperature Characteristics Analysis of Capacitance Accelerometer and Compensation Design

XIAO Shan-shan^{1,2}, HONG Li^{1,2}, YAO Zhen-jing², HAN Zhi-ming², LI Ya-nan²

(1. College of Computer and Communication Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 2. Department of Disaster Prevention Apparatus, Institute of Disaster Prevention, Langfang 065201, China)

Abstract: The elastic element of the capacitance acceleration sensor has different deformation under different temperature conditions, which leads to the change of the zero input response of the sensor and affects the linear of the system. In this paper, ANSYS was used to analyze the temperature field finite element analysis of the mechanical sensitive module of the accelerometer. The displacement and temperature of the plate were modeled by mathematical method, and a nonlinear compensation control method was proposed for real-time temperature. The simulation results show that the method can effectively reduce the influence of temperature on the system, reduce the output error of the zero drift by 49.93%, and ensure the stability of the system output in different frequency bands. This also provides an idea for improving the performance of capacitive acceleration sensor.

Keywords: capacitance accelerometer; temperature characteristics; nonlinear compensation control

0 引言

电容式加速度计由于其动态范围广、灵敏度高、等优点, 被广泛应用于地震检测、工程测振、地质勘探等领域。其加速度计的测量精度主要受到制作工艺、环境温度、疲劳损耗等几方面^[1-2]的影响, 尤其以环境温度的影响尤为突出^[3]。现今对电容式加速度传感器的温度补偿分为软件补偿与硬件补偿。软件补偿需要通过对加速度传感器进行温漂实验获取传感器的温度漂移模型, 得出不同温度下传感器输出的误差, 通过算法^[4-5]对传感器的输出数据进行补偿, 其方法相对简单, 开销小; 然而无法解决加速度传感器由于温度导致的内部机械结构形变严重引起的加速度失

效问题。硬件补偿一般能从根本上减小或抑制传感器机械的形变^[6], 目前常采用改变传感器的结构和材料或者增加恒温电路的方式。

为了减小温度引起的加速度计的机械形变引起的输出失效问题, 本文提出了一种新的电路补偿方式: 采用增加实时温度的非线性补偿反馈控制方式, 对传感器内不同的温度将产生不同的电流, 经过反馈线圈后产生电磁力将自动校正加速度传感器内部机械结构变形引起的差动电容两极板不对等的情况, 从而减小温度引起的加速度传感器机械形变产生的输出误差。

1 工作原理

本文研究的差动电容式加速度计为课题组研制, 其机械结构如图 1 所示。传感器采用双簧片的悬臂梁结构, 一端被固定, 一端固支差动电容作为敏感单位。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金创新团队项目 (ZY20160104); 中国地震局教师科研基金项目 (20140104)
收稿日期: 2017-09-01

差动电容底部连通磁钢可以进行电磁力反馈,用来平衡由于振动等造成的差动电容两动极板运动引起的极距不对等。

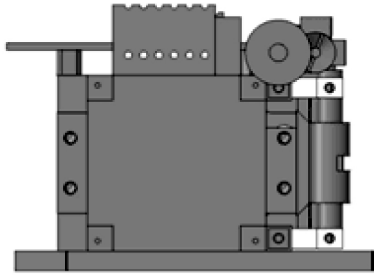


图1 电容式加速度计机械示意图

该加速度传感器主要通过差动电容的极板位移的变化来获取信号的变化,差动电容主要由3块等距离且平行的电容极板组成,中间一块电容板为定极板,两端电容板为动极板。在外界发生振荡的情况下,差动电容两端动极板将相对定极板运动,产生不平衡的状态,经过检测放大电路与解调电路后,成为一个误差直流信号,误差直流信号将激励一个反馈电流,通过反馈线圈从而促使动极板恢复平衡状态,电路图如图2所示。

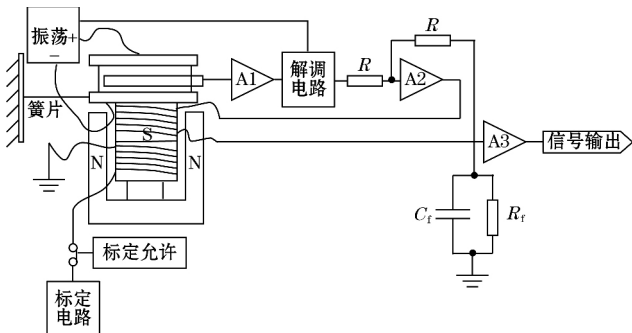


图2 差动电容式静电力反馈加速度传感器系统

其差动电容的输出信号可表示为

$$u_0 = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} u_i \approx \frac{\Delta d}{d_0} u_i \quad (1)$$

式中: u_0 为差动电容极板的载波电压; C_1 、 C_2 分别为两动极板与定极板的变化电容; d_0 为动极板与定极板的初始距离; Δd 为动极板相对定极板的位移变化量。

由式(1)可知,差动电容的动极板位移变化将直接影响传感器的输出。

2 加速度传感器温度特性分析与建模

2.1 加速度传感器温度漂移分析

由上节得知电容极板的位移变化直接影响到传感器的输出电压,弹性元件悬臂梁对差动电容的极板的影响,可通过结合弹性力学知识,对加速度计悬臂

梁模块进行力学特性分析得知。图3为悬臂梁模块静力分析图。

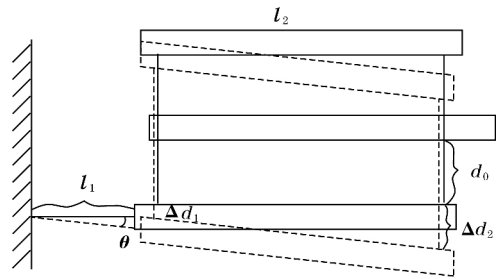


图3 悬臂梁模块静力分析图

当弹性元件簧片发生偏移时其偏转角为 θ ,动极板的平均偏移量为:

$$\Delta d = \frac{\Delta d_1 + \Delta d_2}{2} \quad (2)$$

$$\Rightarrow \Delta d = \frac{\sin\theta(l_1 + \Delta l_1) + \sin\theta(l_1 + l_2 - \Delta l_2)}{2} \quad (3)$$

即:

$$\Delta d \approx h + \frac{l_1 + l_2}{2l_1} \cdot h = \frac{3}{2}h + \frac{l_2 h}{2l_1} \quad (4)$$

式中 h 为簧片垂直方向位移量,其值等于 $l_1 \sin\theta$ 。

由此可看出弹性元件簧片的位移变化将影响着差动电容板极距位移,进而影响加速度计的输出电压。

由于温度的升高,加速度内部不同材料的交界面将产生压缩或拉伸的应力,导致加速度计机械模块中弹性元件发生弯曲,从而引起传感器的输出误差,当弹性元件弯曲严重时,会造成加速度传感器失效^[7]。如能及时校正弹性元件随温度产生的下移将能有效地解决温度引起的加速度传感器失效问题。因此需获取不同温度下的电容极板位移,利用反馈电流校正簧片弯曲引起的极板不平衡。

2.2 敏感模块有限元建模

为获取电容式加速度传感器敏感模块的温度模型,将针对电容式加速度传感器敏感模块在不同温度下的形变,建立一端无自由度的约束,一端自由的加速度敏感结构模块有限元模型^[8]。为提高仿真数据的准确性,将对模型进行六面体的网格划分,并在不同材料的交接面进行局部的网格优化,其网格划分如图4所示。

为获取敏感模块的热变形数据,对模型进行稳态的温度场热分析,分析中设置 20℃ 为初始室温条件,其材料的参数属性如表1所示。

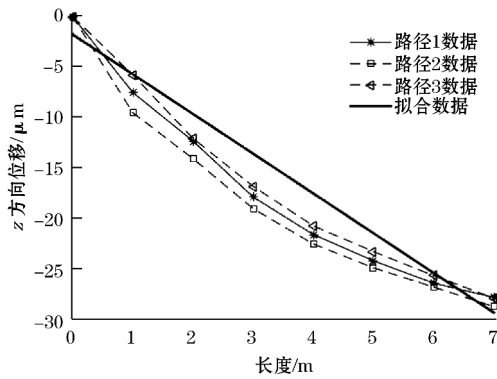
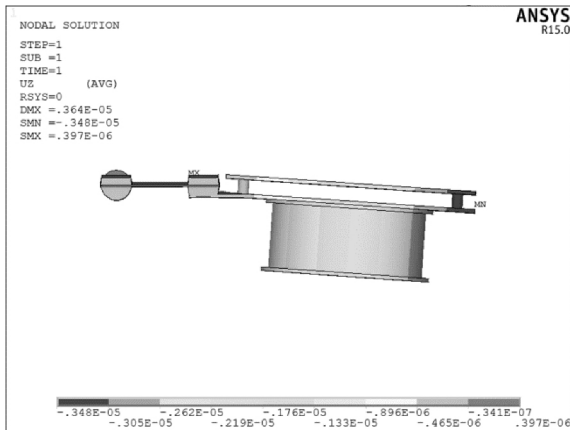


图 4 加速度传感器敏感模块仿真

表 1 20~100 °C 时的材料属性表

材料	弹性模量/GPa	CTE/(10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	泊松比
3J58	181	8.1	0.3
LY-黄铜	109	18	0.324

由于温度是变化的,因此空气的对流系数也是变化的,无法给出精确值,从而采用软件中的对流换热系数模型。对模型施加不同的温度获取不同温度时敏感结构的形变,图 5 为 80 °C 时敏感结构元件垂直方向即 z 方向的位移变化量。

图 5 加速度敏感结构在 80 °C 时 z 方向位移云图

由图 5 可看出,在温度的影响下,传感器敏感模块将总体呈现不平衡的状态,簧片的微小位移变化将使差动电容两动极板发生较大倾斜,从而引起输出非线性。因此为了获取簧片受热变形引起的电容极板位移变化,需提取悬臂梁的位移变化量,为获得相对精确的平均位移变化量,将采用路径取值方式,对温度场仿真结果中的悬臂梁的下表面取多条路径进行线性拟合,如图 6 所示。

由此得到的簧片垂直方向,即 z 方向的位移变化平均值,其位移变化量可表示为

$$h = k_1(T) x + b_1(T) \quad (5)$$

式中: $k_1(T)$ 为曲线斜率; $b_1(T)$ 为曲线截距。

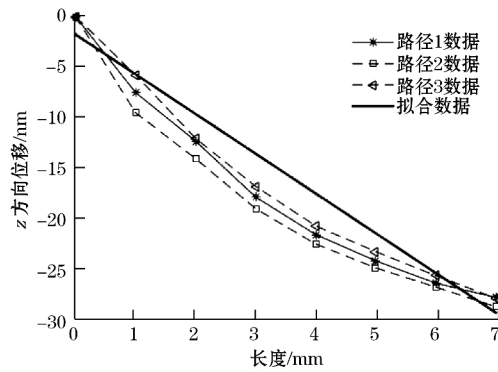


图 6 路径数据线性拟合

不同温度下的斜率与截距不同。

由式(3)与式(4)可得出簧片受热引起的电容板极距位移变化的表达式为

$$\Delta d = \left(\frac{3}{2} + \frac{l_2}{2l_1} \right) \cdot [k_1(T) x + b_1(T)] \quad (6)$$

温度与电容极板位移的关系曲线如图 7 所示。

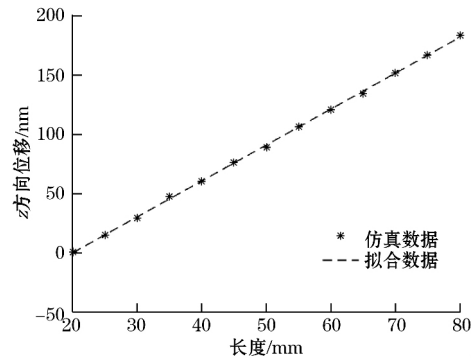


图 7 电容片位移随温度变化曲线图

图 7 中,加速度传感器电容板的极距位移随着温度的变化有着非常好的线性关系,因此为了方便后续分析,将位移曲线进行线性拟合可以得到:

$$\Delta d = k_{tem} \Delta T_x \quad (7)$$

式中: Δd 为电容板极距位移变化量, μm ; ΔT_x 为温度。

由此将获取到加速度计的电容片位移-温度变化的模型。

3 电容式加速度计温漂反馈补偿

3.1 加速度计系统分析

现有的加速度传感器的反馈校正网络一般采用 PD 控制^[9],多由 RC 电路构成,其主要通过反馈校正网络电路产生电流,经感应线圈后产生电磁力用以平衡由于振动造成的差动电容两边极距的不平等状态^[10],其原理如图 8 所示。

然而系统目前的反馈校正将系统近似为线性系统进行设计的,当温度发生变化时,差动电容两动极板处于不平衡、不对称的位置。系统本身就处于非线性的状态,因此将影响系统的稳定性,并导致输出

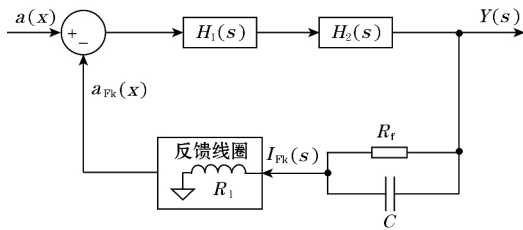


图8 加速度传感器系统框图

误差加大^[11]。

若在系统的反馈网络中新增一个温度补偿用以抵消温度引起的极板不对称造成的系统非线性,可将实际系统变成线性系统从而解决温度对系统稳定性与输出数据的影响。

3.2 反馈补偿设计

在校正网络电路反馈中,当弹性元件倾斜导致电容极板不平衡时,为保持加速度传感器敏感元件保持在平衡位置不变,通常需要反馈电路产生反馈电流。其反馈电路简图如图9所示。

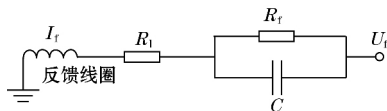


图9 反馈电路简图

其反馈电流的值为

$$I_f = \frac{U_f}{1/(1/R_f + j\omega C) + R_1} \quad (8)$$

$$\Rightarrow I_f = U_f \frac{1 + j\omega C R_f}{R_f + R_1 + j\omega C R_f R_1} \quad (9)$$

而反馈电压与电容片的位移关系可表示为

$$U_f = G_1 U_0 = \frac{U_i}{d_0} G_1 \cdot \Delta d \quad (10)$$

式中: U_i 为电容动极板的初始电压; U_0 为电容静极板的电压; Δd 为电容片的位移变化; G_1 为电子放大部分的总放大倍数。

联立式(9)与式(10),可获取反馈电流与电容片的位移关系为

$$I_f = \frac{U_i G_1}{d_0} \cdot \frac{1 + j\omega C R_f}{R_f + R_1 + j\omega C R_f R_1} \cdot \Delta d \quad (11)$$

结合式(11)与上文中 ANSYS 仿真中最后获得的电容极板的位移与温度的变化量,可得出不同温度的反馈电流为

$$I_f = \frac{U_i G_1 (1 + j\omega C R_f)}{d_0 (R_f + R_1 + j\omega C R_f R_1)} K_{tem} \Delta T_x \quad (12)$$

而式中初始电压、反馈电阻、反馈电容与初始极距都为已知。由此可在系统中引入此温度调节模块,

如图10所示。

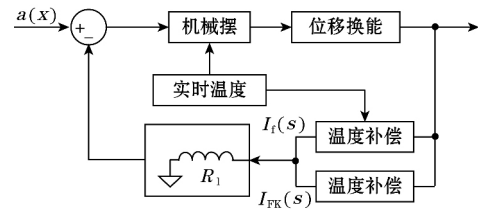


图10 温度补偿设计

4 系统仿真

4.1 Simulink 系统仿真

使用 Matlab 中的 Simulink 模块对电容式加速度传感器进行系统仿真,仿真结构图如图11所示,仿真图中的系统 I 为未进行温度反馈补偿的电容式加速度传感器系统,系统 II 为进行温度反馈补偿的电容式加速度系统。其系统仿真中所使用的参数如表2所示。

表2 加速度传感器系统仿真参数表

参数	取值	参数	取值
阻尼比 ξ	0.7	反馈电阻 R_f	1 500 Ω
悬臂梁固有频率 ω_0	93 N/m	反馈电容 C	1×10^{-6} F
电磁力转换常数 E	400	线圈内阻 R_1	2 000 Ω
初始电容板极距	1 mm	电子部分放大 G_1	2 000

4.2 系统仿真验证

4.2.1 零漂验证

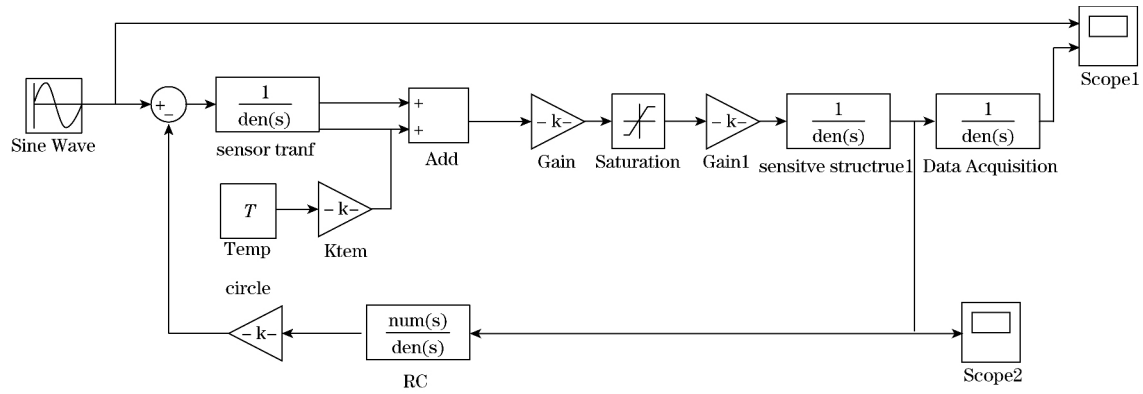
设输入加速度为0时,其系统 I 与系统 II 的输出结果如图12所示。

从系统 I 的输出数据可以看出,在无加速度信号的输入下,系统 I 的输出电压随着温度的升高而不断加大,在温度到达 80 $^{\circ}\text{C}$ 时输出电压比室温条件 20 $^{\circ}\text{C}$ 时升高了 151.1 mV。经温度补偿后的系统 II 在 20~40 $^{\circ}\text{C}$ 的温度区间,基本消除了其由于加速度计敏感结构形变引起的零点漂移,而温度在 80 $^{\circ}\text{C}$ 时输出电压仅为 75.65 mV,相对系统 I 的输出误差减少 49.93%。

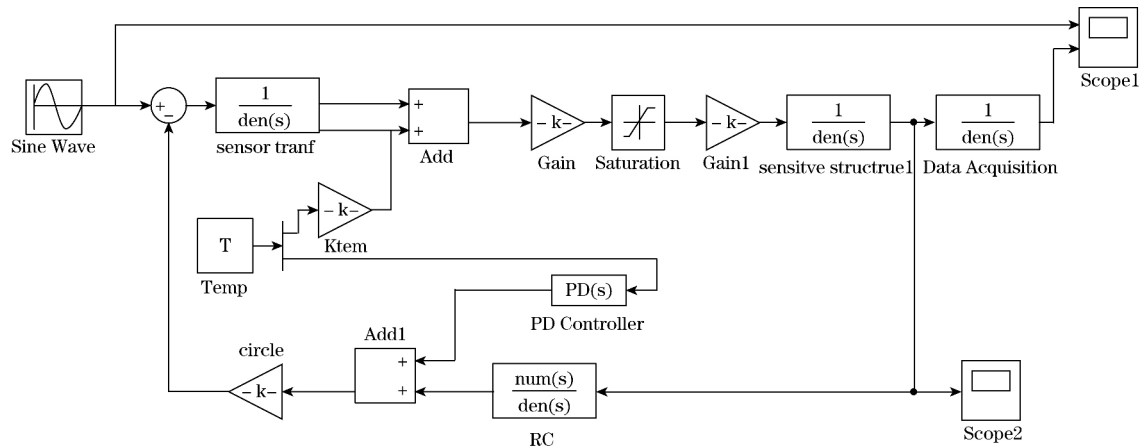
4.2.2 不同频率的信号的系统稳定性验证

分别输入振幅相同,频率分别为 10、50、90 Hz 的信号,其系统 I 与系统 II 的输出如图13所示。由图12可得,系统 I 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的输出电压与 80 $^{\circ}\text{C}$ 的输出电压相差: 10 Hz 为 121.9 mV, 50 Hz 为 121.2 mV, 90 Hz 为 122.5 mV。系统 II 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 的输出电压与 80 $^{\circ}\text{C}$ 的输出电压相差: 10 Hz 为 32.3 mV, 50 Hz 为 31.6 mV, 90 Hz 为 31.1 mV。

由此可知,经过温度补偿后的系统 II 其平均输出的误差相对系统 I 大幅度减小,且系统在增加补偿控



(a) 系统 I



(b) 系统 II

图 11 加速度系统 simulink 仿真

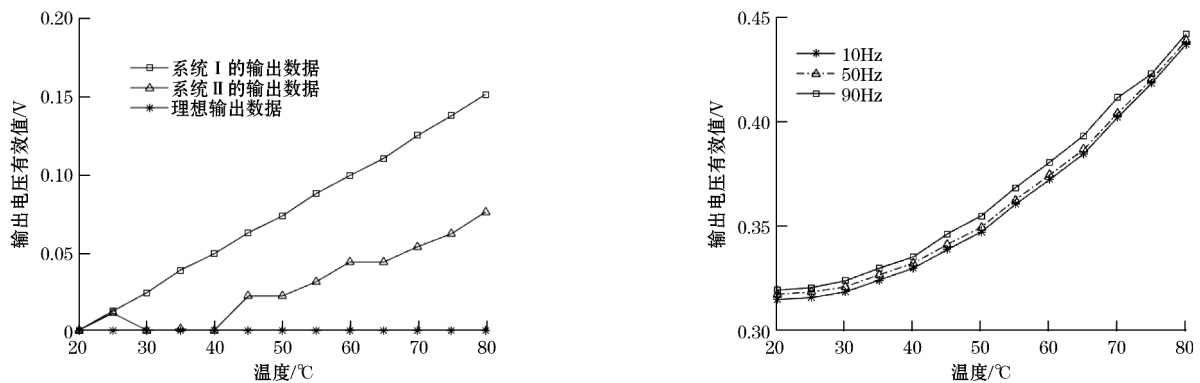
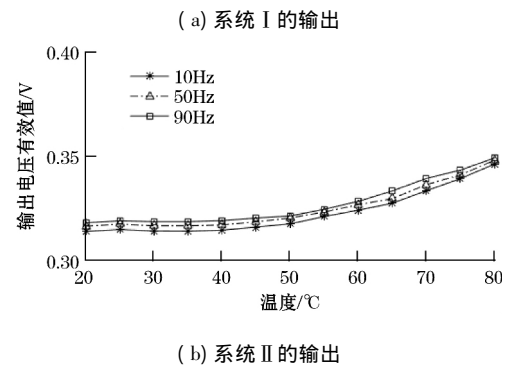


图 12 系统 I 与系统 II 零点输出

制后并未影响到系统的幅频特性,在不同频率的信号输入下输出仍保持稳定。

5 结论

本文以差动电容式加速度传感器为模型,基于 ANSYS 有限元温度场分析法建立了电容式加速度计敏感模块的温度模型,采用 simulink 对加速度系统进行仿真,在仿真系统中通过引入实时温度的非线性补偿模块,对加速度计的温度漂移进行了有效补偿,仿真数据表明引入的实时温度的非线性控制模块能有



(a) 系统 I 的输出

(b) 系统 II 的输出

图 13 系统 I 与系统 II 不同频率与温度下的输出
效减小温度对系统的影响,减小零漂 (下转第 162 页)

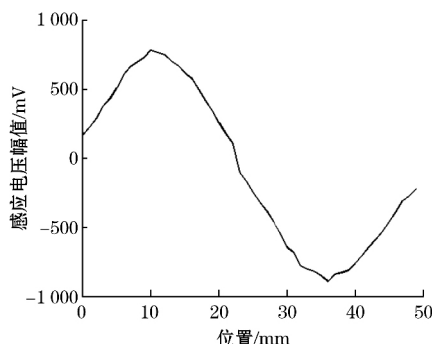


图 11 峰峰值随位移变化实测图

由图 11 可以看出,随着 LC 谐振器的移动感应信号电压峰峰值在 0~896 mV 之间不断变化,并且其变化规律呈正弦分布,由此可以看出将 LC 谐振器安装在距离耦合线圈平面 8 mm 轴线上是合理可行的。同时,该实验结果与仿真结果完全相符,验证了通过 LC 谐振器与收发线圈技术实现位移测量的可行性。

4 结论

本文建立基于 LC 谐振器和收发线圈技术测量位移的敏感元件模型,参考毕奥-萨伐尔定律推导出发送线圈附近空间点磁场分布表达式,同时根据法拉第电磁感应定律计算出接收线圈中感应电信号的表达式。在此基础之上使用 Ansoft Maxwell 电磁场仿真软件对 LC 谐振器与收发线圈电磁场效应进行仿真分析,并优化 LC 谐振器与收发线圈之间的距离。最终,通过实验对上述研究进行验证,研究结果表明:

(1) 在距离收发线圈平面 2~9 mm 的轴线上的磁场强度逐渐变小,但距离较近时,磁场会出现一段饱和区,直到距离达到 8 mm 时饱和区消失,并且此时磁场强度幅值为 400 mGs,满足感应要求,因此将 LC 谐振器与收发线圈之间的距离确定为 8~9 mm。

(2) 在无 LC 谐振器作用时,接收线圈中的感应电动势接近于 0,可忽略不计。

(3) 在有 LC 谐振器作用时,接收线圈中产生同频的感应信号,当 LC 谐振器沿着收发线圈平面移动时,接收线圈中的感应信号电压在 0~896 mV 之间不断变化,且变化规律呈正弦分布。

参考文献:

- [1] 吕学年,姚毅,闫玲.位移传感器的发展及研究[J].计量与测试技术,2009,36(9):42-44.
- [2] 崔玉江,王伟,杨明,等.伺服反馈位移传感器的现状及发展趋势[J].宇航计测技术,2012,32(4):65-68.
- [3] 一个新时代电感谐振电路技术开创了位置检测的新时代输水调度集中监控系统应用[J].国内外机电一体化技术,2011(4):45-46.
- [4] 丁莹,董全林,刘会森,等.电磁感应位移传感器耦合天线的设计研究[J].自动化仪表,2016,37(4):21-26.
- [5] JONES R P, DOYLE R A, HOWARD M A, et al. SENSING APPARATUS AND METHOD: US 2007/0139040A1 [P]. 2007-04-21.
- [6] 康中尉,罗飞路.矩形激励线圈的磁场分析[J].传感器世界,2003(2):5-9.
- [7] 周立友.法拉第电磁感应定律应用实例剖析[J].潍坊学院学报,2006,6(2):92-93.
- [8] 徐汉斌,贾安礼,赵吴广.电感式角度传感器电磁耦合敏感元件的研究[J].机电工程,2016,33(8):1028-1032.

作者简介:田旭峰(1993—),硕士研究生,主要从事电磁感应式位移传感器、智能阀门定位器、惯性导航与制导的研究。E-mail: 781018630@qq.com

董全林(1964—),教授,博士生导师,主要从事超显微仪器技术、智能阀门定位器、惯性导航与制导的研究。E-mail: dongquanlin@buaa.edu.cn

(上接第 156 页)的输出误差在 49.93%。且保证了系统不同频带下工作的稳定性。由此为下一步电容式加速度传感器仿真模型的完善与温漂补偿改进方案提供了一定的理论依据,从而可以缩短系统设计的时间。

参考文献:

- [1] LAKDAWALA H, FEDDER G K. Temperature control of CMOS micromachined sensors [C]. Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems: IEEE, 2002: 324-327.
- [2] KO H H, CHO D D. Highly programmable temperature compensated readout circuit for capacitive microaccelerometer [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2010, 158(1): 72-83.
- [3] 李童杰,刘云峰,董景新,等.微加速度计温度特性及敏感元件自恒温方案[J].清华大学学报(自然科学版),2010,50(7):1013-1017.
- [4] 刘子骥,杨留方.基于 BP 人工神经网络的气体传感器温度补偿[J].仪表技术与传感器,2017(4):10-12.
- [5] 徐哲,刘云峰,董景新.基于相关向量机的 MEMS 加速度计零偏温漂补偿[J].北京航空航天大学学报,2013,39

(11): 1558-1562.

- [6] 杜永苹,何小映.浅谈传感器的温度补偿技术[J].电子设计工程,2009,17(6):63-64.
- [7] 秦丽,于丽霞,石云波,等.高量程 MEMS 加速度计的热应力仿真与可靠性评估[J].中国惯性技术学报,2015,23(4):555-560.
- [8] 游侠飞,吴昌聚,郑阳明,等.基于有限元法的加速度计热应力分析[J].传感技术学报,2012,25(2):193-197.
- [9] 石云波,王玲,刘俊.基于 simulink 的隧道式微加速度计的仿真与测试[J].系统仿真学报,2009,21(6):1508-1510.
- [10] 薛兵,林湛,张妍,等.宽频带地震计反馈模型分析及应用实例[J].地震地磁观测与研究,2013,34(z1):246-253.
- [11] 范达,刘云峰,董景新,等.电容式加速度计系统的非线性分析及线性化控制[J].中国惯性技术学报,2012(6):734-738.

作者简介:肖珊珊(1989—),硕士研究生,从事电容式加速度传感器研究。E-mail: 381415728@qq.com

洪利(1967—),教授,博士,从事智能仪器与网络研究。E-mail: Hongli2050@qq.com