

文章编号:1671-251X(2015)05-0018-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.05.005

高爽,崔朗福,程鹏,等.基于AD5933的磁致伸缩材料共振频率检测系统[J].工矿自动化,2015,41(5):18-22.

基于AD5933的磁致伸缩材料共振频率检测系统

高爽^{1,2}, 崔朗福^{1,2}, 程鹏^{1,2}, 郭星^{1,2}, 邓黎明^{1,2}, 桑胜波^{1,2}

(1.太原理工大学 信息工程学院 微纳系统研究中心,山西 太原 030024;

2.太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部和山西省重点实验室,山西 太原 030024)

摘要:根据阻抗测量法设计了一种基于AD5933的磁致伸缩材料共振频率检测系统,详细介绍了该系统硬件电路及软件设计。该系统采用基于AD5933的阻抗测量模块、基于MSP430F169的单片机处理模块、12864液晶显示模块以及供电模块完成了磁致伸缩材料共振频率的数据采集、处理、存储及图谱显示。测试结果表明,该系统具有测量误差小、抗干扰性强、实时性高的特点,检测误差低至7 Hz。

关键词:磁弹性传感器;磁致伸缩材料;共振频率检测;阻抗法;AD5933

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:2015-04-30 08:31

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150430.0831.005.html>

Detection system of resonance frequency for magnetostrictive material based on AD5933

GAO Shuang^{1,2}, CUI Langfu^{1,2}, CHENG Peng^{1,2}, GUO Xing^{1,2},

DENG Liming^{1,2}, SANG Shengbo^{1,2}

(1. Micro-Nano System Research Center, College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of the Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: According to impedance measurement method, a detection system of resonance frequency for magnetostrictive material based on AD5933 was designed. The hardware circuit and software design of the detection system were presented in details. The detection system uses impedance measurement module based on AD5933, microcontroller processing module based on MSP430F169, display module based on LCD 12864 and power supply module to realize data collection, processing, storage of resonance frequency of magnetostrictive material and impedance spectrum display. The test results show that the detection system has characteristics of low measurement error, strong anti-interference and high real-time performance, and average detection error is as low as 7 Hz.

Key words: magnetoelastic sensor; magnetostrictive material; resonance frequency detection; impedance measurement method; AD5933

0 引言

磁致伸缩材料是指具有磁致伸缩效应的特种磁

性材料,通常为铁磁性材料。铁磁体在交变磁场中磁化时,其长度及体积均会发生变化,这个现象称为磁致伸缩或磁致伸缩效应^[1]。目前,磁致伸缩材料

收稿日期:2014-11-17;修回日期:2015-03-10;责任编辑:张强。

项目基金:山西省留学基金项目(2010-030);山西省青年基金项目(2012021013-1);博士后基金项目(2011M500542, 2012T50248)。

作者简介:高爽(1991—),男,山西太原人,硕士研究生,主要研究方向为磁弹性生物传感器,E-mail:tyut_gaoshuang@163.com。通信作者:桑胜波(1979—),男,山东菏泽人,副教授,博士,主要研究方向为微纳机电系统,E-mail:sangshengbo@tyut.edu.cn。

已广泛应用于各类传感器的研究制作,国外研究机构已成功将磁致伸缩材料用于检测压力、温度、湿度以及液体黏度和密度等^[2],该类传感器统称为磁弹性传感器。磁弹性传感器的工作原理是把监测物的变化转换为磁致伸缩材料共振频率的变化,通过检测磁致伸缩材料共振频率信号的前后变化量,达到监测周围环境的目的,因此,其共振频率是磁弹性传感器的关键测量指标。传统的磁致伸缩材料共振频率测量是通过矢量网络分析仪、频谱仪、阻抗分析仪等实验仪器完成,这些实验仪器的价格昂贵、体积庞大、操作复杂,仅能在实验室中使用。国内目前还没有一款能够测量磁致伸缩材料共振频率的专用检测系统,因此,设计一款高度集成化、低成本的磁致伸缩材料共振频率检测系统,以代替传统的矢量网络分析仪等大型实验仪器完成对磁致伸缩材料共振频率的测量是十分必要的。

目前,磁致伸缩材料共振频率的测量方法主要有时域测量法、频域测量法和阻抗测量法^[3-6]。时域测量和频域测量法都需采用 2 个线圈:激励线圈和检测线圈,激励线圈对磁致伸缩材料施加正弦脉冲磁场,检测线圈接收磁致伸缩材料在激励磁场下的响应,通过对磁致伸缩材料响应进行分析而得到磁致伸缩材料的共振频率,测量体系和配套算法均相对复杂;而阻抗测量法只需一个线圈就可以完成测量,测量系统更为简易,便于系统的集成和小型化,也更容易实现。本文基于阻抗测量法,设计了一款基于 AD5933 的磁致伸缩材料共振频率检测系统,该检测系统可为磁弹性液体黏度、密度等传感器的开发应用提供良好的检测平台。

1 阻抗法测量原理

使用阻抗法测量磁致伸缩材料的共振频率时,首先将磁致伸缩材料插入线圈中,对线圈施加一恒定电流信号和固定幅值的正弦波扫频信号,产生一恒定偏置磁场和交变磁场以驱动磁致伸缩材料振动,线圈产生的交变磁场会使磁致伸缩材料以 2 倍交变磁场频率振动,偏置磁场不仅可消除磁致伸缩材料的倍频效应,使磁致伸缩材料的振动频率与交变磁场一致,还可以调节磁致伸缩材料的应变特性。通过测量线圈在不同频率点处的阻抗变化达到测量磁致伸缩材料响应的目的。由于磁致伸缩材料的磁导率在其共振频率点处会显著增加,所以线圈阻抗谱会在磁致伸缩材料的共振频率点处出现尖峰,通过检测尖峰所对应的频率点就可以得到该磁致伸缩

材料的共振频率^[7],如图 1 所示。

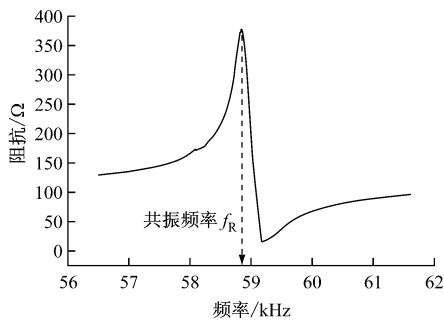


图 1 包含磁致伸缩材料的线圈阻抗谱

2 磁致伸缩材料共振频率检测系统

磁致伸缩材料共振频率检测系统的设计包括 2 个部分:上位机和下位机。下位机的主要功能是采集线圈的阻抗谱数据并进行相应处理,计算得到磁致伸缩材料共振频率的数值并在液晶屏上显示,同时将采集到的线圈阻抗谱原始数据通过 RS232 接口传送到上位机。上位机的功能是对采集到的数据进行相应处理,得到阻抗谱波形以便观察分析。系统框图如图 2 所示。首先,阻抗测量电路测量得到线圈的阻抗谱数据,单片机通过 I²C 通信总线将数据取出,将数据通过 RS232 通信接口传送到上位机,同时计算得出线圈阻抗谱尖峰所对应的频率,即磁致伸缩材料的共振频率,并在液晶屏上显示。上位机接收到线圈的阻抗谱原始数据后,进行相应处理,利用专业绘图与数据分析软件 OriginLab 显示线圈整体的阻抗谱波形。

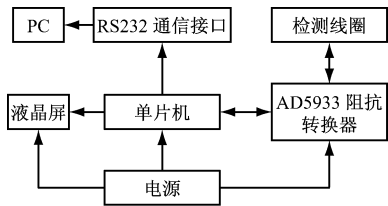


图 2 磁致伸缩材料共振频率检测系统

3 硬件电路设计

磁致伸缩材料共振频率检测系统的硬件电路设计主要包括阻抗测量模块、单片机及外围电路模块以及电源模块。其中,阻抗测量模块是整个检测系统的关键部分,它的设计好坏直接关系到系统的测量精度和抗干扰性能。

3.1 阻抗测量模块设计

阻抗测量模块主要是由 AD5933 高精度阻抗转换器和模拟前端放大电路组成,线圈的两端分别连接引脚 VIN 和 VOUT。阻抗测量电路如图 3

所示。

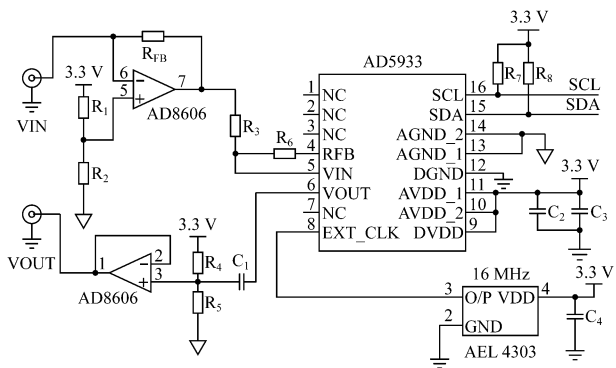


图 3 阻抗测量电路

AD5933 是一款高精度阻抗转换器,片上集成频率发生器与模数转换器(ADC)。AD5933 片上集成频率发生器可向线圈输出频率最高达 100 kHz 的交流激励信号,线圈响应信号通过片上低通滤波器滤波,再由片上 ADC 进行采样并转换为数字信号,频率分辨率小于 0.1 Hz,精度可达到 0.5%。采样后数据由片上 DSP 进行离散傅里叶变换(DFT)处理,转换为对应于每个频率点的 DFT 的实部和虚部数据。模拟前端放大电路主要由运算放大器 AD8606 构成,用于降低信号源的输出阻抗和提高阻抗测量范围,阻抗测量范围可达 100 Ω~10 MΩ。AD5933 芯片通过 SCL 和 SDA 2 条 I²C 总线与单

片机进行通信,实现了对芯片的控制命令和线圈阻抗谱数据的有效传输。在检测系统中,线圈的阻抗较小,因此,该模块采用的是 AD5933 芯片和模拟前端放大电路配合所组成的小阻抗测量电路。

在 AD5933 芯片的应用过程中,为获取精确阻抗测量数值,在修改芯片寄存器数据后,需对测量电路进行重新校准,获取新的增益因子,通过增益因子与实部、虚部寄存器数值的配合运算,得出所对应频率点的阻抗。此外,考虑到测量的精度,AD5933 的印刷电路板应具有单独的模拟部分和数字部分,各部分应有自己的板面积;为减小噪声干扰,AD5933 的电源应使用 10 μF 和 0.1 μF 的电容;时钟和其他快速切换数字信号应通过数字地屏蔽起来,使之不受印刷电路板上其他器件的影响。

3.2 单片机及外围电路模块设计

单片机及外围电路模块主要由 16 位超低功耗、处理能力强、运算速度快、片内资源丰富的单片机 MSP430F169 的最小系统组成,外围电路包括时钟电路、手动复位电路、I²C 接口电路、RS232 接口电路以及液晶接口电路^[8],如图 4 所示。该模块主要实现测量循环和控制、系统复位、数据读取和发送、数据处理以及液晶显示等功能,采用了 12864 液晶显示屏磁致伸缩材料共振频率。单片机的 P4.0—P4.7, P2.0—P2.2 和 P6.2—P6.3 为控制引脚。

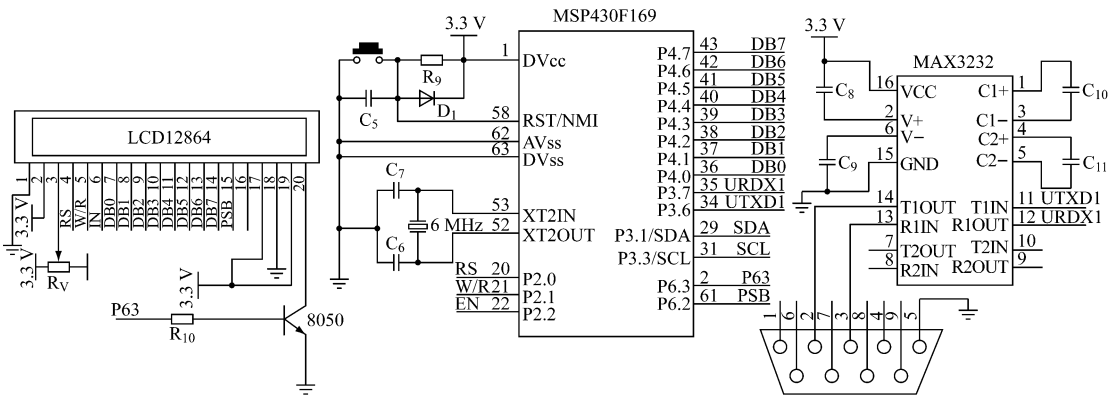


图 4 单片机及外围电路

3.3 电源模块设计

该检测系统中,AD5933、单片机 MSP430F169 和 12864 液晶屏需要 3.3 V 的工作电压,而系统采用 9 V 电池作为供电电源,因此,需采用高精度稳压器 ADP3303 芯片将 9 V 电池电压转换为 AD5933、单片机等所需的 3.3 V 工作电压。

4 系统软件设计

系统的软件设计包括用 C 语言编写的下位机

程序设计和上位机数据处理程序设计^[9]。

下位机程序主要实现线圈阻抗谱数据的采集和处理,并将处理得到的磁致伸缩材料共振频率的测量结果显示在液晶屏上,程序流程如图 5 所示。阻抗转换芯片 AD5933 和单片机 MSP430F169 之间采用 I²C 通信。电路通电后,MSP430F169 进行初始化并启动串口 1 和 I²C 总线模块,I²C 总线模块应答后初始化 AD5933 并进行参数设置,然后控制 AD5933 开始数据采集。MSP430F169 通过轮询

AD5933 状态寄存器检查数据采集是否完成,当发现数据采集完成后,MSP430F169 通过 I²C 总线读取相应的结果,并将结果显示在液晶屏上,最后通过串口 1 上传数据至上位机。

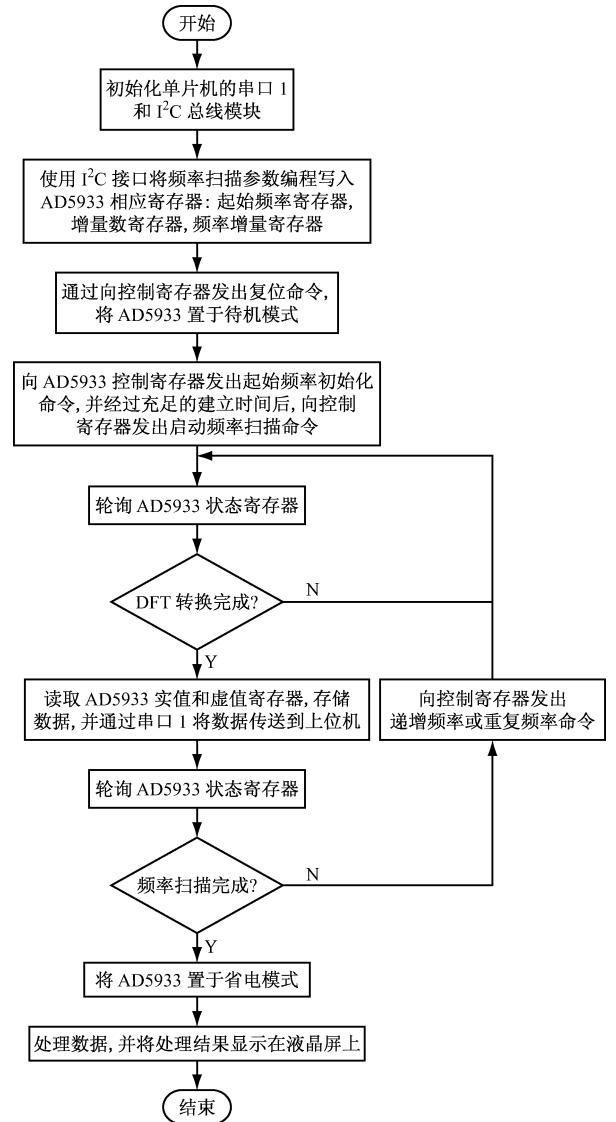


图 5 下位机程序流程

上位机利用 C 语言编写的数据处理程序对下位机传来的线圈阻抗谱原始数据进行相应处理,计算得出线圈各频率点的阻抗值,利用专业绘图与数据分析软件 OriginLab 实现绘图和数据保存。

5 系统测试

根据硬件和软件设计,加工制作了系统检测电路板并进行了调试。为了验证该系统的可用性以及计算测量误差,选取一个尺寸为 37.5 mm×6 mm×28 μm 的 Metglas 2826MB 磁致伸缩材料^[10]进行测试,如图 6 所示。测试时对 AD5933 芯片的各寄存器的参数配置如下:起始频率为 56 500 Hz,频率增量为 10 Hz,增量数为 511,VIN 与 VOUT 两端输

出激励峰峰值电压为 383 mV。下位机输出的线圈阻抗谱原始数据可通过 RS232 接口上传到上位机,并经过上位机相应程序处理,利用专业绘图与数据分析软件 OriginLab 得到线圈的阻抗谱图,选取了其中 5 次测量结果,如图 7 所示。该尺寸的磁致伸缩材料共振频率的测量数据见表 1。

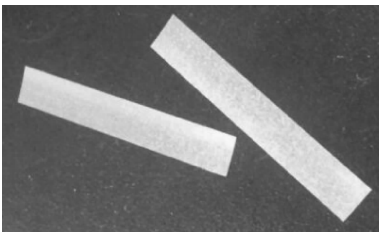


图 6 Metglas 2826MB 磁致伸缩材料

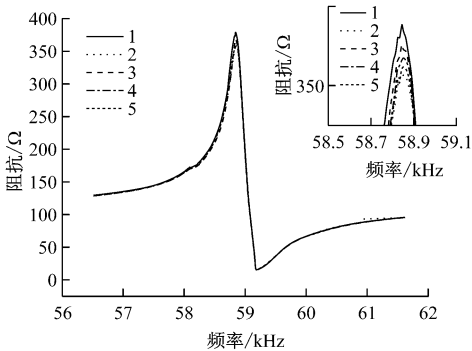


图 7 线圈阻抗谱测量结果

表 1 尺寸为 37.5 mm×6 mm×28 μm 的磁致伸缩材料共振频率测量数据

序号	共振频率/Hz	序号	共振频率/Hz
1	58 840	11	58 850
2	58 850	12	58 850
3	58 840	13	58 860
4	58 850	14	58 840
5	58 840	15	58 860
6	58 830	16	58 840
7	58 840	17	58 850
8	58 850	18	58 840
9	58 860	19	58 840
10	58 850	20	58 840

从图 7 和表 1 可看出,对同一尺寸的 Metglas 2826MB 磁致伸缩材料进行多次测量,所得共振频率的测量结果数据重复性较好,表明该检测系统的抗干扰性强,测量误差小。根据式(1)可计算出尺寸为 37.5 mm×6 mm×28 μm 的 Metglas 2826MB 磁致伸缩材料共振频率的平均误差 a 为 7 Hz。

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|$$

(1)

式中: n 为测量值个数; X_i 为第 i 个测量值; $\bar{X}$ 为 X_i

的算术平均值。

6 结语

基于 AD5933 的磁致伸缩材料共振频率检测系统可完成对磁致伸缩材料共振频率数据的采集、处理、存储及图谱显示,同时实现了传感器与接口电路的集成化,使其体积、功耗和成本大大降低,为磁弹性传感器的开发应用提供了一种低成本、简单可靠的磁弹性传感器共振频率测量解决方案。测试结果表明,该检测系统测量误差小,抗干扰能力强,实时性好,平均误差低至 7 Hz,有广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 王博文,曹淑瑛,黄文美. 磁致伸缩材料与器件[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:1-2

[2] CRAIG A G, SOMNATH C R, SANJU R, *et al.* Theory, instrumentation and applications of magnetoelastic resonance sensors: a review [J]. Sensors,2011,11(3):2809-2844.

[3] ZENG K F, KEAT G O, CASEY M, *et al.* Time domain characterization of oscillating sensors: application of frequency counting to resonance frequency determination [J]. Review of Scientific Instruments,2002,73(12):4375-4380.

[4] ZENG K F, MAGGIE P, KEAT G O, *et al.* Frequency-domain characterization of magnetoelastic

sensors: a microcontroller-based instrument for spectrum analysis using a threshold-crossing counting technique[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005,121(1):66-71

[5] ZENG K F, KEAT G O. Impedance analysis technique for frequency domain characterization of magnetoelastic sensor element by measuring steady-state vibration of element while undergoing constant sine-wave exacitation: United States Patent, US7912661 B2[P]. 2011-03-22.

[6] SHEN W, LESLIE C M, VALERY A P, *et al.* A pulse system for spectrum analysis of magnetoelastic biosensors [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(16):1635021-1635023.

[7] ZENG K F, KEAT G O, YANG X P, *et al.* Board level integrated microsystem design and associated technique for impedance analysis of resonator sensors [J]. Sensor Letters,2006,4(4):388-397.

[8] 沈建华,杨艳琴,翟骁曙. MSP430 系列 16 位超低功耗单片机原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004:231-256.

[9] 谭浩强. C 程序设计[M]. 4 版. 北京:清华大学出版社,2010:35-208.

[10] Metglas 公司. Metglas 2826MB Material safety data sheet[EB/OL]. (2011-04-20)[2014-10-09]. [http://www. metglas. com/assets/pdf/msds/msds2826mb. pdf](http://www.metglas.com/assets/pdf/msds/msds2826mb.pdf).