

doi: 10.7690/bgzdh.2016.09.019

磁致伸缩弹性波机理分析与信号处理

陈晓华¹, 文 静¹, 余 晓²

(1. 重庆大学光电工程学院, 重庆 400044; 2. 四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 为提高磁致伸缩位移传感器性能, 通过分析磁致伸缩弹性波产生机理, 设计了传感器信号处理系统。在该系统中, 基于压电陶瓷的压电效应, 设计了一种差分式压电陶瓷拾音器, 通过合理设计放大、滤波电路, 并使用双磁铁峰值检测法进行温度补偿, 有效提高了信噪比及抑制了温度漂移。分析结果表明: 该信号处理系统能够有效提升传感器性能, 对磁致伸缩位移传感器的研究及应用推广具有积极意义。

关键词: 磁致伸缩; 弹性波; 压电陶瓷; DSP

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Analysis of Magnetostrictive Elastic Wave's Mechanism and Signal Processing

Chen Xiaohua¹, Wen Jing¹, Yu Xiao²

(1. School of Opto-electronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. College of Electronics & Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To improve the magnetostrictive displacement sensor's performance, this study designs a sensor signal processing system, by analyzing the generation mechanism of elastic wave. In this system, a differential piezoelectric ceramic pick-up is designed based on the piezoelectric effect of piezoelectric ceramics. By designing amplifying circuit and filter circuit reasonably, and using double magnet in peak detection to compensate the temperature, signal to noise ratio (SNR) is improved and temperature drift is controlled effectively. The experimental results show that this method of signal processing is effectively improve sensor performance, and is significantly in the research and application of magnetostrictive displacement sensor.

Keywords: magnetostriction; elastic wave; piezoelectric ceramic; DSP

0 引言

作为一种高精度、高灵敏度和高稳定性的非接触式位移测量器件^[1-2], 磁致伸缩位移传感器在有毒、易腐蚀、易燃易爆等恶劣环境中具有广泛的应用^[3]。该传感器利用磁致伸缩材料的魏德曼效应 (Wiedemann Effect), 通过弹性波传播的时延效应实现位移测量。

磁致伸缩位移传感器的研究涉及材料学、力学、电磁学和信号处理等学科和技术领域。磁致伸缩信号的质量、拾取及处理方式都是实现大量程、高精度磁致伸缩位移传感器的关键因素。笔者从扭转弹性波信号角度, 阐述其产生机理, 通过采用压电陶瓷拾音器拾取弹性波信号、双磁铁温度补偿设计及应用 DSP 进行信号处理, 提出完整的信号处理方案, 优化传感器系统。

1 磁致伸缩位移传感器原理

磁致伸缩位移传感器主要由以下 4 部分组成: 脉冲发生模块、探测杆、拾音器以及信号处理电路。传感器整体结构如图 1 所示。在脉冲激励信号 I_p 作用下产生的环形磁场 ϕ_c 和永久磁铁产生的沿波导

丝轴向的稳恒磁场 ϕ_m 相交时, 便会形成一个螺旋形磁场 $\phi^{[4]}$, 根据魏德曼效应^[5], 波导丝在正交处发生瞬间扭转形变, 产生一个向两端传播的扭转弹性波。当弹性波被拾音器捕获后, 可获得弹性波的传输时间 T 。弹性波以一定的速度在波导丝上传播, 速度 v 如下式:

$$v = \sqrt{G/\rho} \quad (1)$$

式中: G 表示磁致伸缩材料的弹性模量; ρ 为波导丝密度。因此, 永久磁铁到拾音器的距离由式 (2) 计算可得^[1], 从而实现位移的测量。

$$L = vT [m] \quad (2)$$

2 磁致伸缩弹性波机理分析

由于磁化状态的改变, 磁致伸缩材料在磁化方向上将发生长度和体积的微小形变。同时, 磁致伸缩材料的形变又改变了材料体内的电磁场分布, 电磁场分布的变化和磁力的改变形成了弹性波的产生和传输。在传感器系统中, 波导丝的长度远大于其半径, 因而永久磁铁的磁场对波导丝的影响集中于其轴向分布, 磁致伸缩材料中的磁畴产生轴向偏转。激励信号 I_p 产生的周向磁场, 使磁畴发生周向偏转。

收稿日期: 2016-05-28; 修回日期: 2016-07-20

作者简介: 陈晓华(1980—), 女, 四川人, 工学硕士, 工程师, 从事传感器与仪器研究。

波导丝为圆柱形磁致伸缩材料，以永久磁铁的位置为中心原点建立坐标， x 表示波导丝轴向上任意截面 S 的位置坐标，则影响磁致伸缩材料发生轴向偏转和周向偏转的应力如下式^[6]：

$$\varepsilon(x) = (u_m - 1)u_0 H_m^2; \quad (3)$$

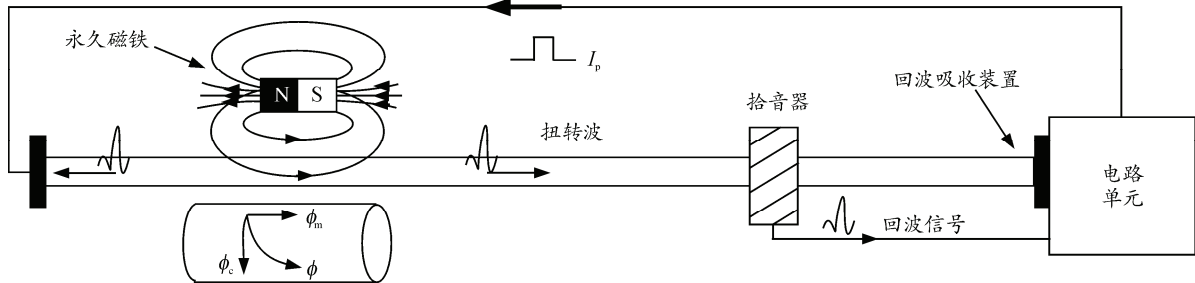


图 1 磁致伸缩位移传感器系统结构

在 ε 的作用下，磁致伸缩材料发生轴向形变，同时在 t 的作用下，磁致伸缩材料发生扭转形变。周向应力 t 越大，磁致伸缩材料扭转越剧烈，扭转角越大，如图 2 所示。轴向应力和周向应力的共同作用产生了扭转弹性波。

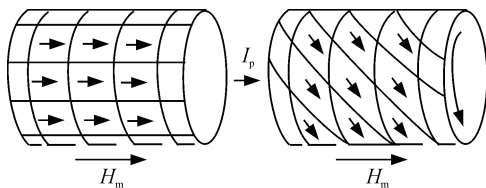


图 2 波导丝应力分布示意图

3 磁致伸缩信号处理及结果分析

3.1 拾音器设计

传感器系统中，电路单元在位移测量中不能直接处理扭转弹性波信号；因此，需要拾音器模块将弹性波转换成电路单元能够处理的电信号。拾音器对弹性波信号进行机电转换，其捕获的回波信号质量将影响到传感器的灵敏度和量程。因而拾音器设计的重点在于提升回波信号的质量，从源头处提高回波信号的信噪比，便于后续电路进行处理。

常用的拾音器为单线圈式拾音器。它利用磁致伸缩材料的维拉利效应 (Villari Effect) 对扭转弹性波信号进行拾取。由维拉利效应可知，磁致伸缩材料在扭转波传输过程中会发生弹性形变，该形变将会导致磁致伸缩材料的磁导率发生改变，进而自身的磁场强度也随之改变。根据法拉第电磁感应定律，单线圈式拾音器可通过变化的磁场输出电压信号。但是，由于单线圈拾音器的信号转换效率较低，回波信号质量不太理想，所以笔者采用一种基于压电

$$t(x) = \{u(r) - 1\}u_0 H_m H_c. \quad (4)$$

式中： ε 表示 dS 面上沿 x 方向的应力； t 表示波导丝在 dS 面上的周向应力； u_0 为真空磁导率； u_m 为波导丝沿 x 方向的相对磁导率； $u(r)$ 表示波导丝周向上的相对磁导率。

陶瓷的拾音器结构^[7]，如图 3 所示。

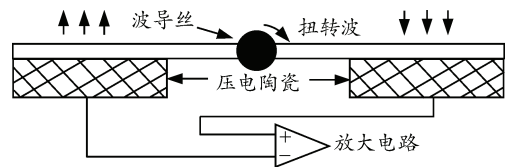
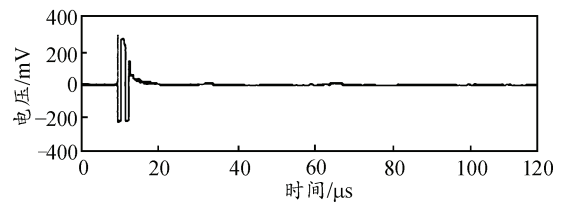
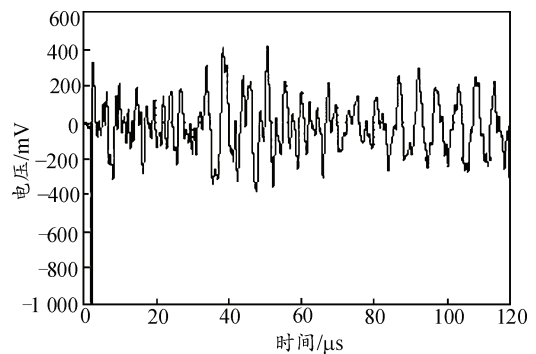


图 3 压电陶瓷拾音器

压电陶瓷拾音器采用特性相同的 2 片压电陶瓷并同极性放置，构成差分输出方式。压电陶瓷具有对振动敏感的特性，可以将微弱的机械波转换为电压信号，并且转换率高；因此，将压电陶瓷应用于拾音器中能够提升回波信号质量，提高灵敏度。单线圈式拾音器和压电陶瓷拾音器感应波形对比如图 4 所示。



(a) 图单线圈拾音器感应波形



(b) 压电陶瓷拾音器感应波形

图 4 感应波形对比

由图 4 可知：压电陶瓷拾音器对扭转弹性波的接收幅度较大，有助于提高传感器量程，但杂波信号较多；因此，需要在后续电路处理中抑制干扰，提高信噪比。

3.2 回波信号放大、滤波处理

由于拾音器获取的电信号比较微弱，且包含较多复杂的噪声，需要将回波信号进行调理后才能输送给 DSP 进行处理。回波信号为交流信号，且频率较高，其中心频率为 19 kHz。经理论分析和实际实验效果，在实验中选用 OPA2354 运算放大器进行信号处理，由于其单位增益带宽达 250 MHz，并具有优于一般运放的低噪声等特点，满足信号处理要求放大指标。回波信号放大电路如图 5 所示。

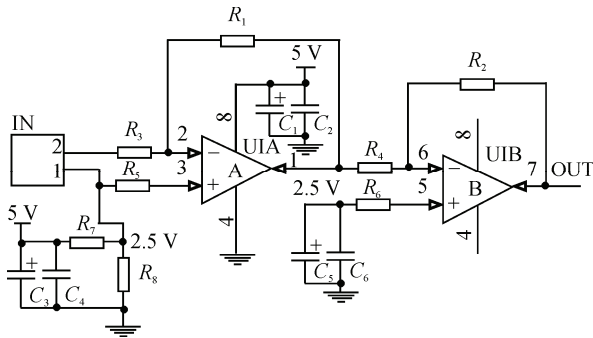
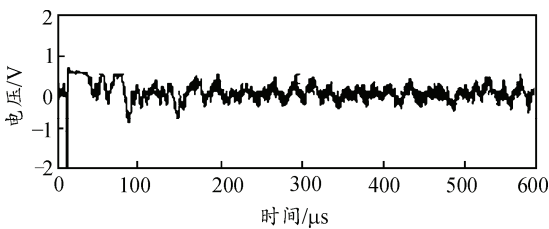


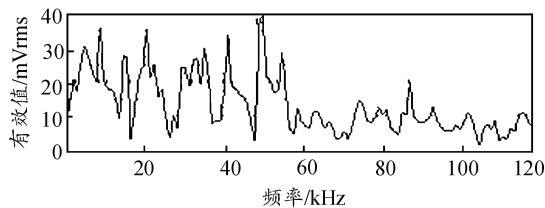
图 5 回波信号放大电路图

运放单元信号及放大信号 FFT 如图 6 所示。由于经过 OPA2354 放大后，杂波和噪声信号也同时得到了放大，对回波信号产生较为严重的干扰，不利于观察和检测，更不利于后期 DSP 进行数字信号的处理和计算。

图 6 为运放单元信号及放大信号 FFT 的波形图。



(a) 运放单元放大波形



(b) 放大信号 FFT

图 6 运放单元输出信号及信号 FFT

由图 6 可见，在上半部分回波信号放大后的波形中掺杂了较多干扰信号，回波信号的频率为 19 kHz 左右。下半部分为该波形的 FFT，可以观察到 FFT 中杂波信号的频率分量较为集中地分布在中、低频段。为了获得良好的回波信号波形，需要设计一个衰减小、噪声低、滤波效果好的滤波器。

笔者采用通用型有源滤波器 MAX275 进行有源滤波电路设计。为了获得阻带内的最大衰减，提高 Q 值，通过级联芯片内部的 2 个二阶滤波器实现四阶带通滤波器设计^[8]。图 7 为四阶带通滤波器电路原理图，图 8 为滤波放大后的信号图。

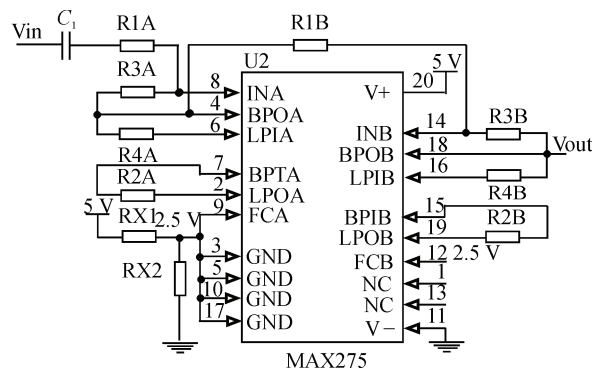


图 7 四阶带通滤波器电路原理

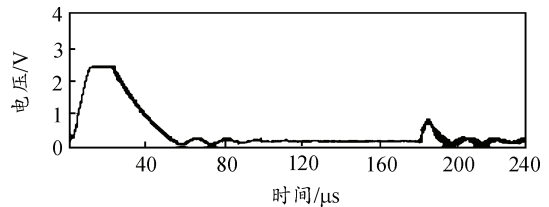


图 8 MAX275 带通滤波器滤波放大效果

由图 8 可知，回波信号经过四阶带通滤波器处理后，有效地提高了信号的信噪比(13.9 dB)。同时，杂波信号和噪声信号得到了有效的抑制，在一定程度上减弱了剩磁现象对回波信号产生的干扰^[8]，信号波形更加平滑整洁，从而有利于后期 DSP 的采集和处理。

3.3 DSP 信号处理

传统磁致伸缩位移传感系统通常采用硬件比较器法进行位移测量，即利用回波信号输入电压比较器获得 0 V/5 V 的 TTL 电平，通过分析处理 TTL 电平信号得到位移数据。该方法获得的信号清晰，数据计算简单，但由于回波信号的峰值点与 TTL 电平的上升沿通常不重合^[9]；因此，该方法存在一定的测量误差。本实验中，笔者采用基于 DSP 的双磁铁

峰值检测算法,充分发挥 DSP 高速数据处理的特点,实现信号采样、数字滤波、数据处理等功能,减少硬件数量、降低模块间干扰的同时,缩短 A/D 转换时间,因而能够提升传感器的稳定性和测量精度。由于波导丝材料的弹性模量 G 随着温度的升高而减小,进而弹性扭转波的传播速度也相应降低,若按式 (2) 进行位移计算,将产生较大误差;因此,在实验中利用双磁铁实现时差比例位移测量,进行温度补偿,减小温度变化带来的测量误差。采用双磁铁温度补偿设计的信号波形如图 9 所示。该方法原理为:记脉冲信号 I_P 产生时信号采样计数点为 n_1 ,在传感器前端固定一磁铁,其距拾音器精确位置为 L_C ,产生回波信号 1;峰值点计数值为 n_2 ,回波信号 2 由测量出的活动磁铁产生;峰值点计数值为 n_3 ,则活动磁环位置 L 为

$$L = \frac{n_3 - n_1}{n_2 - n_1} L_C \quad (5)$$

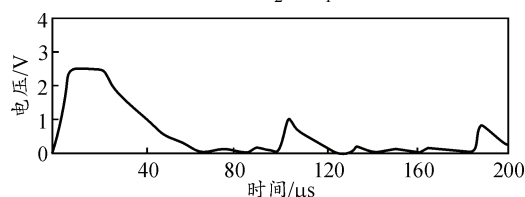


图 9 采用温度补偿的磁致伸缩信号

将式 (5) 变形可得:

$$L = (n_3 - n_1) T \frac{L_C}{(n_2 - n_1) T} = (n_3 - n_1) T v_0 \quad (6)$$

式中: T 为信号采样周期; v_0 为弹性扭转波实际传输速度。因此距离 L 的结果为实际速度与传输时间的乘积,温度变化引起的扭转波速度变化不会影响位移测量值。

为验证基于 DSP 的双磁铁峰值检测法的合理性和可靠性,实验中分别对硬件比较器法、峰值检测法和双磁铁峰值检测法在不同温度下进行了位移测量。首先标定了 2 个精确位移值 350.00 mm 和 691.00 mm,保持测量位置不变,调整测量方法和环境温度。得到测量结果,如表 1 所示。

表 1 不同测量方法及测量环境的实验结果 mm

测量方法	精确位移	温度/°C		
		0	20	80
硬件比较器法	350	346.16	346.24	346.46
	691	685.08	685.17	685.29
峰值检测法	350	349.89	349.96	350.13
	691	690.96	691.05	691.15
双磁铁峰值检测法	350	349.99	350.04	350.06
	691	690.98	691.05	691.09

由实验结果可知,硬件比较器法由于回波信号峰值点与 TTL 信号上升沿不重合,导致误差较大,同时也受到温度改变带来的误差影响。当温度发生变化时,传统峰值检测法得到的数据漂移较大,而双磁铁峰值检测法测量数据距实际值偏差较小,测量结果更稳定。

4 结论

磁致伸缩位移传感器是一个以磁致伸缩信号的产生、拾取、处理为核心的复杂测距系统。笔者从磁致伸缩弹性波信号角度分析了其应力分布及产生机理,并设计了信号处理方法。实验结果表明:差分式压电陶瓷拾音器机电转换效率更高,有助于提高传感器量程;回波信号放大后,应用 MAX275 设计的四阶带通滤波器有效抑制了杂波和噪声干扰,便于后期数据处理;而采用基于 DSP 的双磁铁峰值检测法,提升了数据处理速度,实现了温度补偿,从而具有更高的测量精度。

参考文献:

- [1] Seco F, Martin J M, Jimenez A R. Improving the Accuracy of Magnetostrictive Linear Position Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(3): 722-728.
- [2] Affanni A, Guerra A, Dallagiovdonna L, et al. Design and Characterization of Magnetostrictive Linear Displacement Sensors[C]//Proceedings of the 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, CoMo, Italy, 2004: 206-209.
- [3] Calkins F T, Flatau A B, Dapino M J. Overview of magnetostrictive sensor technology[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2007, 18(10): 1057-1066.
- [4] Yao S X, Li B L. A study on the precision improvement of the magnetostrictive linear position sensor[C]//2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science, 2010: 276-279.
- [5] Zhou X Z, Yu C, Tang Z Y, et al. Widemann Effect in Fe83Ga17 Alloys for Magnetostrictive Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2014, 14(1): 249-257.
- [6] 王峥,常晓明,脑若弘之. 长线磁致伸缩位移传感器的磁极化强度模型[J]. *传感技术学报*, 2010, 23(8): 1075-1078.
- [7] 余晓,周新志,代前国. 基于压电陶瓷的磁致伸缩位移传感器建模分析[J]. *仪表技术与传感器*, 2016(1): 9-12.
- [8] 柴婷婷,柴晓杰. 基于 DSP 的磁致伸缩液位传感器[J]. *仪表技术与传感器*, 2008(7): 8-10.
- [9] 李永波,胡旭东,曾宗云. 温度对磁致伸缩液位传感器测量精度的影响[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2007(6): 11-13.