

磁致伸缩位移传感器 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝的磁电特性研究

周新志, 余超, 熊胤琪, 薛莲, 赵光远

(四川大学电子信息学院 成都 610065)

【摘要】磁致伸缩位移传感器(MDS)波导丝的相关特性直接决定了其工程应用的精确性和可靠性。针对目前MDS波导丝的磁电特性鲜有报道,以 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝为例,结合 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 的材料特性,一方面利用有限元仿真软件(ANSYS)建立波导丝的有限元模型对其磁场特性进行了研究;另一方面,通过构建基于数字信号处理(DSP)的电子信息系统对波导丝回波电信号特性进行了分析。最终,从磁电特性的角度为 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝应用于磁致伸缩位移传感器提供了理论依据。

关键词 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$; 回波信号; 磁电特性; 材料特性

中图分类号 TH7

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.04.019

Research on the Magnetic and Electrical Properties of the $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ Line of Magnetostrictive Displacement Sensors

ZHOU Xin-zhi, YU Chao, XIONG Yin-qi, XUE Lian, and ZHAO Guang-yuan

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University Chengdu 610065)

Abstract The accuracy and reliability of magnetostrictive displacement sensors (MDS) are both directly determined by the properties of the magnetostrictive line (ML). The magnetic and electrical properties of the ML, which lack of study in literatures, are researched by taking $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ for example. Besides the material characteristics of $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$, the ML magnetic field characteristics are studied by a 3-D finite element model established by ANSYS, and the echo electrical signal is analyzed by establishing electronic information system based on DSP. The results achieved in this paper will provide a theoretical basis for the ML to be applied to MDS from the point of magnetic and electrical properties.

Key words $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$; flexural wave; magnetoelectricity; material properties

软磁材料进行磁化后,其形状或大小发生变化的现象,即磁致伸缩效应^[1],这是磁致伸缩位移传感器弹性波产生的基础。因此,与其他基于机电或压电原理的传感器不同,只有磁致伸缩位移传感器才能实现非接触测量,这种明显优势使其被广泛应用于航天、石油、化工等工业领域^[2]。

过去,对磁致伸缩位移传感器的研究主要集中在波导丝中弹性波的检测,以及变形振动的分析方面^[3-6]。近年开始有学者对磁致伸缩传感器的动态模型和有限元模型进行研究^[7]。然而,磁致伸缩波导丝的磁电特性研究目前却鲜有报道,因此,本文采用自制的 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝,综合材料学、电磁学以及电子学对其进行研究。

文献[8]指出波导丝的磁滞效应对磁致伸缩传感器具有很大影响。这是由于剩磁会使波导丝被磁化处同样存在磁致伸缩现象,矫顽力与波导丝的滞后

现象密切相关,饱和磁化强度影响着波导丝在磁场下的应变。因此,剩磁、矫顽力、饱和磁化强度等磁滞特性对传感器的精确性具有重要影响。这就要求波导丝必须具有良好的磁滞特性。

文献[3]指出Wiedemann效应是磁致伸缩位移传感器的核心。而波导丝的磁场特性直接决定着Wiedemann效应的效果。由于波导丝的电磁特性很难通过实验精确测出,因此,本文采用有限元仿真软件ANSYS仿真模拟出材料的磁场特性,在电磁学上为其应用于磁致伸缩位移传感器提供理论参考。为了验证波导丝应用于磁致伸缩位移传感器的可行性和效果,本文通过构建基于DSP的电子系统检测回波信号,从电子学上为其提供了实验依据。

1 MDS原理

磁致伸缩位移传感器如图1所示。波导丝在激励

电流作用下产生的环形磁场 Φ_i 和永磁铁产生的稳恒磁场 Φ_m 相交时, 便会瞬间合成一个螺旋形的扭转磁场 Φ , 根据磁致伸缩材料的Wiedemann效应, 波导丝将会产生瞬间形变, 由此形成一个向两端传播的超声波。

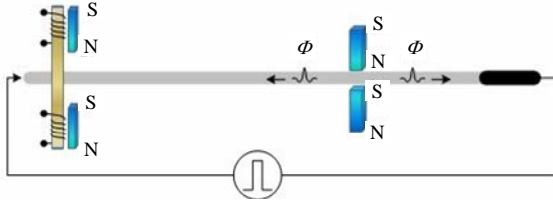


图1 MDS工作原理

当接收线圈检测到超声波时, 其磁通量强度 B 会因为逆磁致伸缩效应而发生相应变化。根据Villari效应, 在检测线圈上能够检测到感应电压:

$$e = -NS \frac{dB}{dt} \tag{1}$$

式中, e 是感应电压; N 为线圈匝数; S 是线圈的截面积; B 为磁感强度。

假设从永磁铁到线圈的传输时间为 t , 超声波的传输速度为 v , 线圈和磁铁之间的距离为:

$$L = vt \tag{2}$$

从而实现位移的测量。

2 波导丝材料特性

室温下, Fe₅₇Ni₄₃波导丝的磁致伸缩性能曲线如图2所示。由图可知, Fe₅₇Ni₄₃合金的饱和磁致伸缩系数为28 ppm, 满足了磁致伸缩传感器对波导丝的磁致伸缩特性要求。

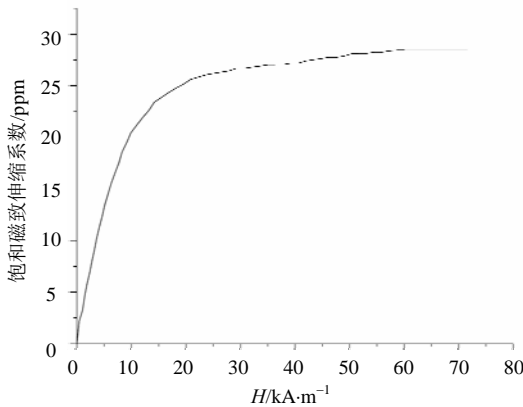


图2 Fe₅₇Ni₄₃波导丝磁致伸缩性能曲线

由于波导丝是铁磁性材料, 因此其存在磁滞非线性特性。目前用于分析磁致伸缩器件磁滞现象的模型主要有Preisach磁滞模型^[9]、Jiles-Atherton磁滞模型^[10]、自由能磁滞模型^[11]和神经网络磁滞模型^[12], 但是没有一种理想的模型可以准确地描述波导丝材料的磁滞非线性特性。因此, 为了准确测试波导丝

的磁滞特性, 本文采用VSM测试波导丝的磁滞特性。

Fe₅₇Ni₄₃波导丝的磁滞回线如图3所示, 相关磁性参数如表1所示。由图表可知, Fe₅₇Ni₄₃的磁滞特性具有磁导率大、矫顽力小, 容易磁化, 也容易退磁, 磁滞损耗小的特点, 这起到抑制信号衰减的作用。此外, Fe₅₇Ni₄₃约1.26 T的超大饱和磁化强度也使其在较低磁场下具有较大应变。

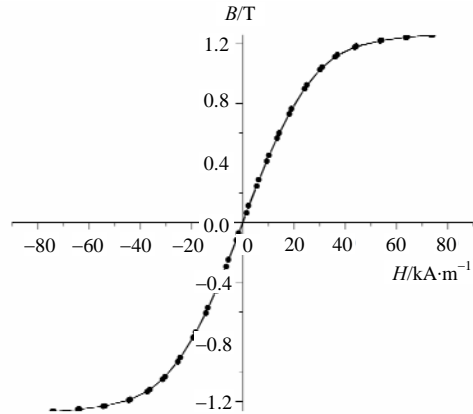


图3 波导丝的磁滞回线

表1 Fe₅₇Ni₄₃波导丝磁参数

属性	值
矫顽力 /kA·m ⁻¹	0.132 1
饱和磁化强度/T	1.256 4
剩余磁化强度/T	0.006 2

3 ANSYS磁场特性分析

3.1 有限元模型

ANSYS对波导丝磁场特性进行数值分析的方法很多, 其中有限元法相关数学模型最为成熟, 应用也最为广泛^[7,13]。其基本思想是根据变分原理, 将波导丝离散为有限数目简单单元的组合体, 实际结构的磁场性能可以通过对离散单元进行分析, 用符合传感器工程精度的近似结果替代对实际波导丝的结构分析, 相关ANSYS模型如图4所示。

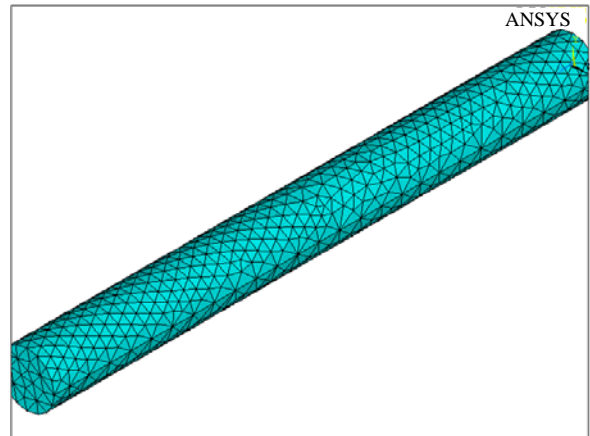


图4 波导丝的有限元模型

3.2 ANSYS分析

激励电流是波导丝产生环形磁场的基础。大量的实验表明,激励信号为脉冲电流时Wiedemann效应最佳,相关参数如表2所示。由于激励过程中上升沿和下降沿的存在,所以,为了实现ANSYS对波导丝磁场特性的仿真,需要采用三维瞬态分析。为此,将整个激励过程设置为 $0\sim 2\ \mu\text{s}$ 、 $2\sim 78\ \mu\text{s}$ 和 $78\sim 80\ \mu\text{s}$ 共3个载荷步,每个载荷步设置20个子步。

表2 激励脉冲电流参数

属性	值
峰值/A	1.5
周期/ms	4
脉宽/ μs	76
上升(下降)沿/ μs	2

波导丝的 $B-H$ 和 u_r-H 曲线如图5所示。它们直接影响着环形磁场的强弱和Wiedemann效应的效果,并对磁致伸缩位移传感器量程的改善起着决定性作用,因此,直接决定了ANSYS仿真的成败。

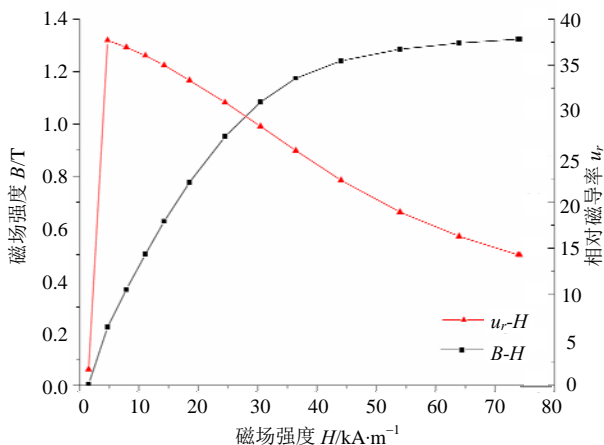


图5 波导丝的 $B-H$ 、 u_r-H 曲线

波导丝的磁场特性可以分某时刻的磁场特性和磁场特性随时间的变化两方面来描述。由于电流的传播速度约为光速,所以,波导丝各截面因同时受到激励而具有相同的磁场特性。因此,本文选取 $z=0$ 处的截面为参考面, $t=40\ \mu\text{s}$ 为参考时刻,($0.225\ 05\ \text{mm}$, $0.446\ 49\ \text{mm}$)为参考点。

波导丝参考面在参考时刻的相关磁场特性如图6所示。由图可知,波导丝在激励脉冲电流信号的作用下,产生环形磁场,其磁场强度沿着半径方向逐步增大。根据磁致伸缩位移传感器原理,波导丝表面由于磁场相交产生的微小形变是弹性波产生的基础,因此,磁场线在波导丝表面处最为密集有利于产生和加强Wiedemann效应。

参考面上参考点的磁场特性随时间变化曲线如

图7所示。由图可知,磁场特性随激励电流的变化而变化,最终伴随着激励电流的消失而消失,这有利于DSP等微处理器计算弹性波的传输时间,进而精确实现测量。

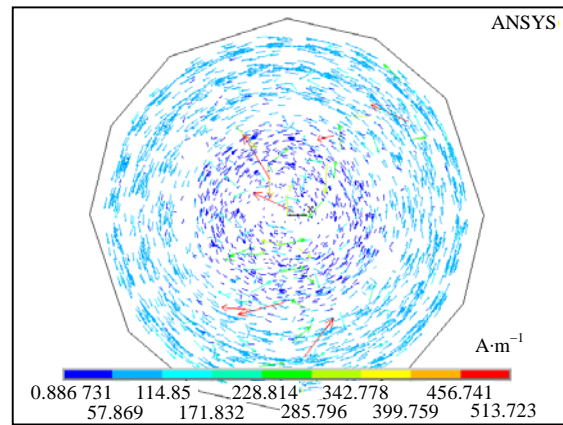


图6 参考时刻波导丝的磁场特性

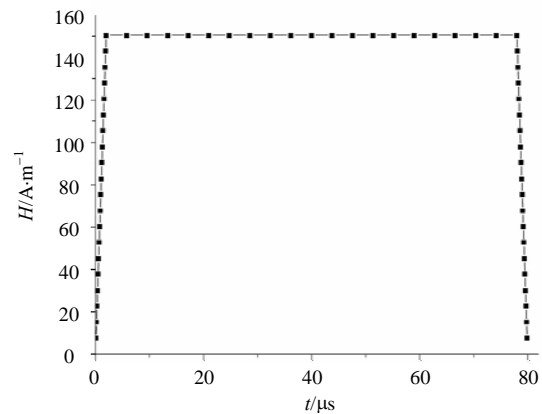


图7 参考点磁场特性变化曲线

4 信号特性测试

信号特性测试是波导丝能否应用于磁致伸缩位移传感器最为关键的一步实验论证,其主要包括电子系统方案和信号测试结果两部分。

磁致伸缩位移传感器信号测试系统如图8所示。由图可知,电子系统主要由DSP微处理器、激励电流电路、波导丝单元、信号放大电路、A/D采样电路以及通信电路等部分组成。

测试系统工作时,DSP微处理器产生一系列周期脉冲信号作用于脉冲电流电路,该脉冲电流电路此时便会产生激励信号作用于波导丝;由于原始回波信号太过微弱,不能直接被DSP所处理,因而,先利用放大电路对其处理放大,然后DSP微处理器对A/D采样后的信号进行FIR数字低通滤波处理,最终将处理后的数据经D/A处理放大后得到回波信号。DSP处理流程如图9所示。

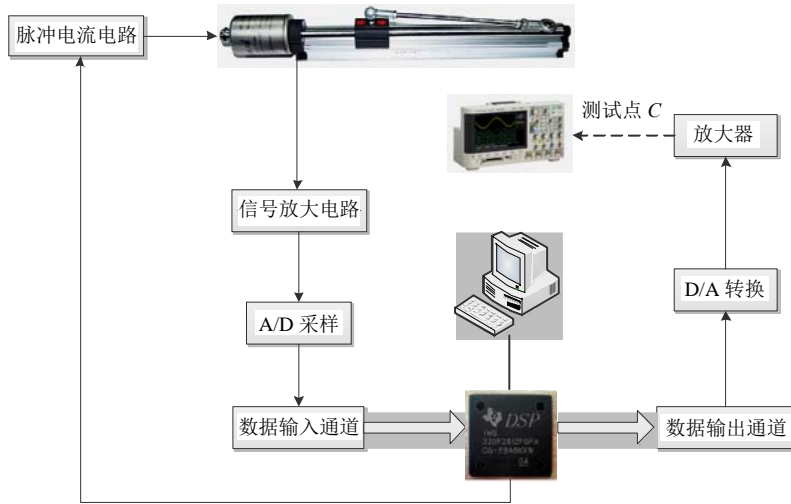


图8 磁致伸缩位移传感器信号测试框图

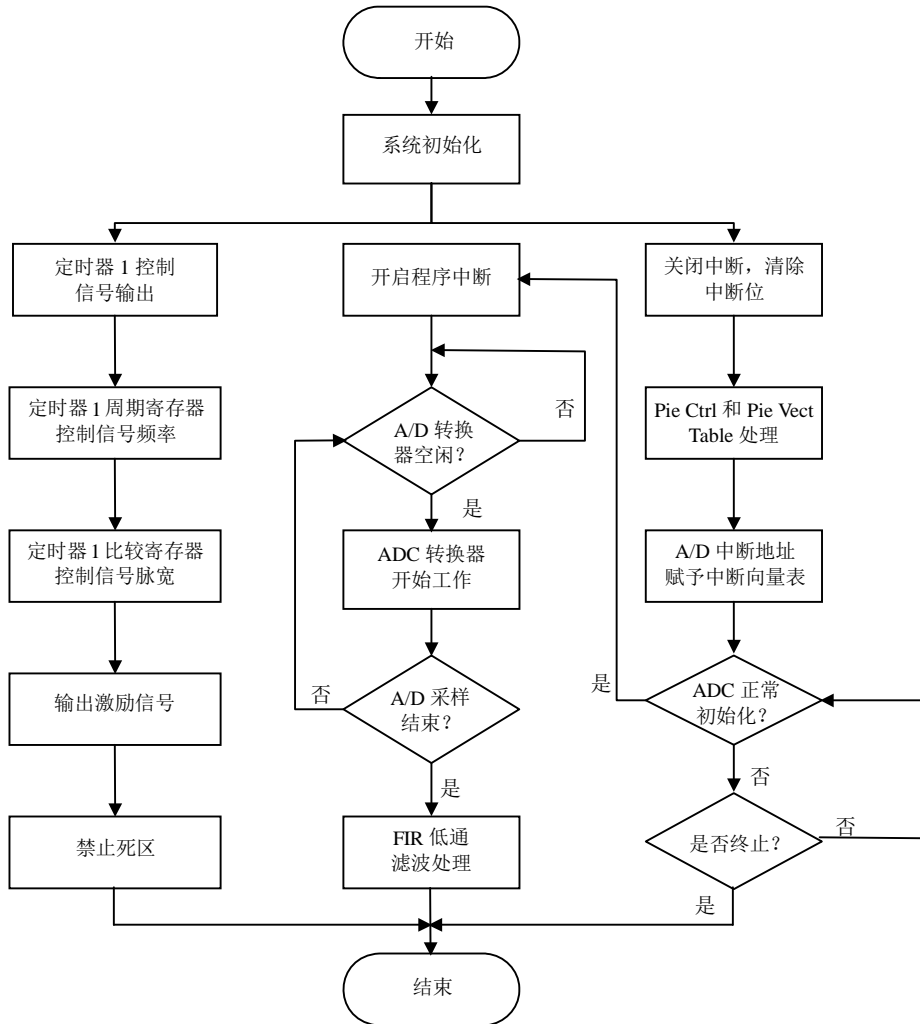


图9 DSP处理流程图

测试3 m长的波导丝前、中、末端时, 回波信号如图10所示。由图可知, 回波信号强, 长距离传输衰减减小。这一方面从电子学上论证了 $Fe_{57}Ni_{43}$ 波导丝

的材料特性; 另一方面也验证了波导丝Wiedemann效应的效果。此外, 整个波形中, 杂波信号相当微弱, 表明了FIR数字滤波处理方案的可行性和有效性。

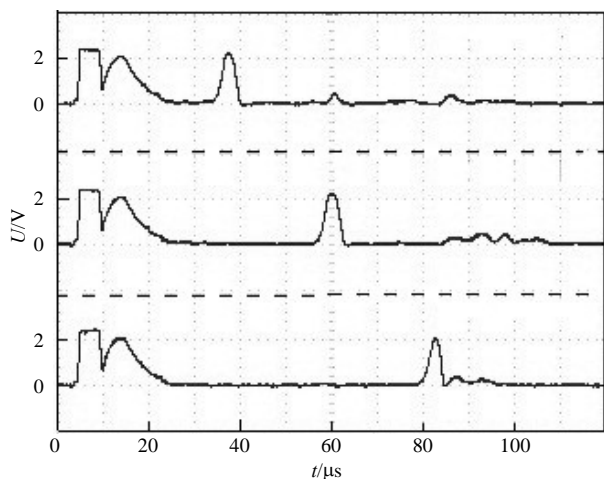


图10 回波信号

5 结论

1) $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝磁导率大、矫顽力小,容易磁化,磁滞损耗小的磁滞特性,为减弱回波信号在长距离传输中的衰减创造了条件。

2) 通过对 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝磁场特性的分析,结果表明,靠近表面处的磁场最强,这有利于通过加强Wiedemann效应的效果来达到增强回波信号的目的。

3) 利用DSP对回波信号进行FIR处理,简化了硬件电路,抑制了杂波信号,减小了外界温漂等因素对信号的干扰。

因此,对 $\text{Fe}_{57}\text{Ni}_{43}$ 波导丝材料特性和磁场特性的研究为其应用于磁致伸缩传感器,进一步提高国产MDS量程提供了理论依据;而基于DSP的电子设计方案则为提高国产MDS的精度和稳定性提供了新思路。

参 考 文 献

[1] LI Jian-wei, XU Min-qiang. Modified jiles-atherton-sablik model for asymmetry in magnetomechanical effect under tensile and compressive stress[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(6): 1-4.

- [2] CALKINS F T, FLATAU A B, DAPINO M J. Overview of magnetostrictive sensor technology[J]. J Intelligent Material Systems and Structures, 2007, 18(10): 1057-1066.
- [3] KIM W, KIM Y Y. Design of a bias magnetic system of a magnetostrictive sensor for flexural wave measurement[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 40(5): 3331-3338.
- [4] CHO S H, KIM Y, KIM Y Y. The optimal design and experimental verification of the bias magnet configuration of a magnetostrictive sensor for flexural wave measurement [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2003(107): 225-232.
- [5] WUN H K, TELLER C M. Magnetostrictive generation and detection of longitudinal, torsional, and flexural waves in a steel rod[J]. J Acoust SoC Amer, 1994, 3(2): 1202-1204.
- [6] LEE H, KIM Y. Wave selection using a magnetomechanical sensor in a solid cylinder[J]. J Acoust SoC Amer, 2002, 112(3): 953-960.
- [7] NICOLAS G, XAVIER M, FRÉDÉRIC B, et al. Finite element modeling of magnetoelastic sensors[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 834-837.
- [8] PRIETO J L, AROCA C, SAÑCHEZ M C, et al. Magnetization processes and optimal performance of magnetostrictive piezoelectric sensors[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(9): 7099-7105.
- [9] RUDERMAN M, BERTRAM T. Identification of soft magnetic B-H characteristics using discrete dynamic preisach model and single measured hysteresis loop[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(4): 1281-1284.
- [10] LI Wei, KIM H, JANG S M, et al. Hysteresis modeling for electrical steel sheets using improved vector Jiles-Atherton hysteresis model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3821-3824.
- [11] SMITH R C, DAPINO M J, SEELECKE S. Free energy mode for hysteresis in magnetostrictive transducers[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(1): 458-466.
- [12] VECCHIO P D, SALVINI A. Neural network and fourier descriptor macromodeling dynamic hysteresis[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1246-1249.
- [13] LI Xiao-lei, JIN Jian-ming. A comparative study of three finite element-based explicit numerical schemes for solving maxwell's equations[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(3): 1450-1457.

编辑 张俊