

Influence of Bias Magnetic Field on Property of Fe-Ga Alloy Magnetostrictive Waveguide Sensor*

WENG Ling^{1,2*}, HAO Yongchao^{1,2}, LI Weina^{1,2}, SUN Ying^{1,2},
HUANG Wenmei^{1,2}, WANG Bowen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;
2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Fe-Ga alloy has the advantages of large strain, short response time, high energy density, high magnetic coupling coefficient and simple driving mode. Fe-Ga alloy transducer will generate eddy current losses with high frequency driving current. The larger driving current leads to more obvious skin effect, eddy current losses and inhomogeneous distribution of magnetic field, which will affect the output displacement and power of the transducer. In this paper, the distribution of magnetic field in Fe-Ga rod under different frequencies is analyzed based on Maxwell's equations. The magnetic field distribution in Fe-Ga transducer and relationship between output displacement and frequency are studied based on structural dynamics model of Fe-Ga transducer. The results show that the resonance frequency of the Fe-Ga transducer used in this paper is 700 Hz and the maximum output displacement is 6 μm .

Key words: Fe-Ga alloy; magnetostrictive; guided wave; bias magnetic field; comsol

EEACC: 7230

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.02.007

偏置磁场对 Fe-Ga 合金磁致伸缩导波传感器性能的影响*

翁 玲*, 郝永超^{1,2}, 李薇娜^{1,2}, 孙 英^{1,2}, 黄文美^{1,2}, 王博文^{1,2}

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)天津 300130;
2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室(河北工业大学)天津 300130)

摘 要: 利用 Fe-Ga 合金应变大、驱动简单和磁机耦合系数高的优点制成的 Fe-Ga 合金磁致伸缩导波传感器是一种新型导波检测装置。为提高传感器的换能效率,结合 Fe-Ga 合金材料的非线性本构关系,并且通过实验测量 Fe-Ga 合金材料的静态特性,初步得到了 Fe-Ga 合金材料工作的最佳磁场强度范围。将 Fe-Ga 合金材料的非线性本构关系耦合到导波传感器中,建立了 Fe-Ga 合金磁致伸缩导波传感器激励、传播、接收的模型。通过分析传感器永磁体的提高效应,得出最佳提高距离为 2.5 mm。通过对接收电压及应变的分析,得到了传感器的永磁体剩余磁场强度为 1.0 T。选取非均匀分布的静态偏置磁场大小为 1.0 T,提高距离为 2.5 mm,仿真计算得到接收端的电压峰值为 0.15 V。

关键词: Fe-Ga 合金;磁致伸缩;导波;偏置磁场;comsol

中图分类号: TP212.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2019)02-0195-06

磁致伸缩导波检测技术作为无损检测技术的热点研究方向,具有非接触检测、提高距离大、传播距离远和检测效率高的特点,只需单点激励即可实现长距离检测^[1],被广泛应用于桥梁缆索、工业管道等棒状、管状以及束状构件的在役检测和长期监测^[2]。传统的磁致伸缩导波传感器^[3-4]利用铁磁性待测试件自身的磁致伸缩特性来达到检测目的,但这些材料的本身的应变小,导致传感器的振动位移小,影响了传感器的换能效率。而 Fe-Ga 合金(Gal-

fenol)是继超磁致伸缩材料 Terfenol-D 之后的另一种新型磁致伸缩材料^[5],具有应变大、磁滞小、响应时间短等优点,是新型致动器、传感器、振动发电机等各种超磁致伸缩换能器的优选材料^[6]。

偏置磁场是磁致伸缩导波检测的关键影响因素之一,对于选择导波模式、提高磁声换能效率、消除倍频效应以及改善信噪比具有极其重要的作用^[7]。文献[8]分析了永磁体厚度变化与 EMAT 换能器灵敏度之间的关系,确定了永磁体的最佳厚度并且研究永

项目来源:国家自然科学基金项目(51201055, 51777053);河北省自然科学基金项目(E2017202035);河北省科技计划项目(16211709)

收稿日期:2018-06-11

修改日期:2018-11-13

磁体和线圈的间距变化对磁感应强度之间的影响。文献[9]通过采用有限元分析建模研究了一种新的提高磁场强度的永磁体放置结构,提高了超声回波信号的幅值。文献[10]在对构件与空气分界面处磁场分布理论的基础上,结合偏置磁场的作用机理,提出了永磁式磁致伸缩纵向导波传感器的换能效率快速评估方法。文献[11]用实验证明,使用磁致伸缩传感器进行导波检测中,偏置磁场对不同材料试件的影响趋势是一致的,但是在不同的材料和不同激励条件下,偏置磁场的最佳区域略有不同。文献[12]分析了偏置磁场均匀性对传感器输出特性的影响,推导了偏置磁场与检测效率的关系,但是不考虑静态磁场不均匀性将会导致一定的计算误差。文献[13]以接收区域静态磁场不均匀为基础,研究了偏置磁场的提高效应,但是并未考虑偏置磁场对接收电压的影响。

本研究提出以 Fe-Ga 合金为核心部件构建的导波传感器模型可应用于无损检测,其原理为磁致伸缩效应及其逆效应。铁磁体在外磁场激励下产生应变从而激发应力波,当存在缺陷时,其声阻发生变化而引起接收端电压变化,通过测量电压信号即可检测出铁磁体构件中是否存在腐蚀、裂纹、破损等缺陷。本文基于 Fe-Ga 合金材料本身的非线性本构关系,计算得到磁致伸缩导波传感器换能效率的最大值点对应的施加磁场强度值。通过实验测量了 Fe-Ga 合金材料的静态特性,初步找到了 Fe-Ga 合金材料的最佳工作磁场强度范围。将 Fe-Ga 合金材料的非线性特性耦合到传感器模型中,利用 comsol 软件对磁致伸缩导波传感器进行建模仿真,研究了非均匀偏置磁场的提高效应,以及 Fe-Ga 合金材料表面磁场分布、应变分布。分析了非均匀偏置磁场对传感器接收电压的影响,最终确定了能使传感器换能效率较大且输出应变较大的最佳静态偏置磁场的值。

1 偏置磁场的选择

1.1 Fe-Ga 合金材料的非线性本构关系

磁性材料的磁致伸缩特性是磁致伸缩传感器能够正常工作的关键因素。在导波的激励、传播和接收过程中存在着复杂的磁机耦合关系。在之前的研究中,由于磁致伸缩特性的复杂性(非线性、磁滞效应),将材料的非线性磁致伸缩关系假定为线性关系^[14],没有体现出材料真实的非线性磁致伸缩关系,从而本文采用文献[15]提出的非线性磁机本构关系。

Fe-Ga 材料的应变 ε :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_s} + \lambda_0(\sigma) + \frac{\lambda_s - \lambda_0(\sigma)}{M_s^2} M^2 \quad (1)$$

磁场强度 H :

$$H = \frac{1}{\eta} f^{-1} \left[\frac{M}{M_s} \right] - \frac{2[\lambda_s \sigma - \Lambda_0(\sigma)]}{\mu_0 M_s^2} M \quad (2)$$

$$\text{式中: } \lambda_0(\sigma) = \lambda_s \begin{cases} \tanh \left[\frac{\sigma}{\sigma_s} \right] & (\sigma \geq 0) \\ \frac{\tanh \left[\frac{2\sigma}{\sigma_s} \right]}{2} & (\sigma < 0) \end{cases}$$

$$\Lambda_0(\sigma) = \lambda_s \sigma_s \begin{cases} \ln \left[\cosh \left[\frac{\sigma}{\sigma_s} \right] \right] & (\sigma \geq 0) \\ \frac{\ln \left[\cosh \left[\frac{2\sigma}{\sigma_s} \right] \right]}{4} & (\sigma < 0) \end{cases}$$

$$f(x) = \coth(x) - \frac{1}{x}, \eta = \frac{3\chi_m}{M_s}$$

式中: M 为 Fe-Ga 合金材料的磁化强度, M_s 为饱和磁化强度, λ_s 为饱和磁致伸缩应变系数, χ_m 为初始磁化系数, σ 为预应力, σ_s 为饱和预应力, μ_0 为真空磁导率, H 为 Fe-Ga 合金材料的外部磁场。

磁致伸缩传感器 Fe-Ga 合金材料的外部磁场分别是由永磁体提供的静态磁场 H_d 和交变线圈组提供的动态磁场 H_{ac} 两部分构成。由于静态磁场远大于动态磁场,在计算中常常忽略动态磁场,用静态磁场 H_d 来近似代替 Fe-Ga 合金材料的外部磁场 H 。在下述推导中用静态磁场 H_d 代替外部磁场 H 。

Fe-Ga 材料表面预应力为零时,由式(1)和式(2)可知^[16]:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_s}{M_s^2} M^2 \quad (3)$$

$$\frac{M}{M_s} = \coth(\eta H_d) - \frac{1}{\eta H_d} \quad (4)$$

联立式(3)和(4)可得

$$\varepsilon = \lambda_s \left[\coth(\eta H_d) - \frac{1}{\eta H_d} \right]^2 \quad (5)$$

对式(5)求偏导可以得到压磁系数,

$$d_{33} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial H_d} = 2\lambda_s \left[\coth(\eta H_d) - \frac{1}{\eta H_d} \right] \times \left\{ \eta [1 - \coth(\eta H_d)]^2 + \frac{1}{\eta H_d^2} \right\} \quad (6)$$

利用 MATLAB 对式(6)进行求解,可得压磁系数与磁场强度之间的关系如图 1 所示。其中 $\chi_m = 200$, $\lambda_s = 0.0002$, $M_s = 1.5 \times 10^6$ A/m。随着磁场强度的增大,压磁系数的值先增大后减小最后趋于稳定,当磁场强度为 4.8 kA/m 时,压磁系数达到了最大值 1.56×10^{-8} m/A。压磁系数表征了磁致伸缩的换能效率,当

Fe-Ga 合金材料的压磁系数达到最大值时,换能效率达到了最大,此时更多的磁能转化为了机械能。因此在选择偏置磁场时,为保证传感器的能量转换效率,应尽量选择压磁系数最大值对应的磁场强度附近。

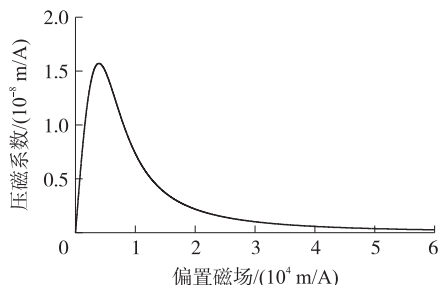


图1 磁场强度和压磁系数的关系

1.2 Fe-Ga 合金材料静态特性测量

测量 Fe-Ga 合金材料的静态特性有助于确定磁致伸缩导波传感器的输入量和为永磁体的选择提供依据。本文搭建了 Fe-Ga 合金磁特性测量系统如图 2 所示。本系统由四个模块组成,施加磁场模块、信号测量模块、信号采集模块、数据处理模块组成。对 Fe-Ga 合金材料进行静态磁特性测量时,首先将压片机输出的压力置为 0,给激励线圈施加 1 A~5 A 的直流电,此时 Fe-Ga 合金材料处于激励线圈提供的有效磁场中,Fe-Ga 合金材料周围的磁场值可以通过材料表面的霍尔元件测量得到,Fe-Ga 合金材料的应变值可以通过粘贴在材料表面的应变片测量得到。数据处理模块将采集到的信号进行处理,得到 Fe-Ga 合金材料的静态磁致伸缩曲线。

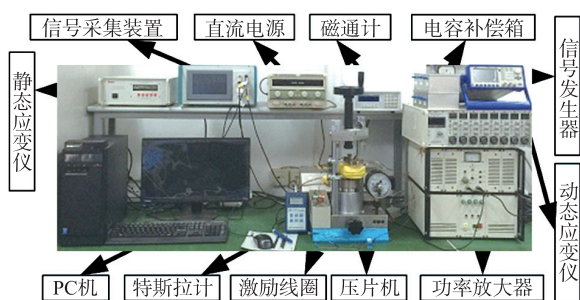


图2 实验平台

利用 MATLAB 对式(5)进行求解,可得 Fe-Ga 合金材料的磁致伸缩曲线。Fe-Ga 合金材料的静态磁致伸缩曲线实验结果与仿真结果的对比如图 3 所示。随着施加磁场强度的增大,Fe-Ga 合金材料的应变值先增大后趋于稳定。当 Fe-Ga 合金材料的饱和磁致伸缩量为 200×10^{-6} 时,所对应的磁场强度为 20 kA/m。结合最佳偏置磁场选择的理论分析和实验结果的分析,并考虑到 Fe-Ga 合金材料表面磁场分布不均,为使材料的应变达到最大且保证传感器的换能效率,最佳偏置磁场应该使 Fe-Ga 合金材料

表面磁场强度值达到 5 kA/m~20 kA/m,应变值在 $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ 左右。

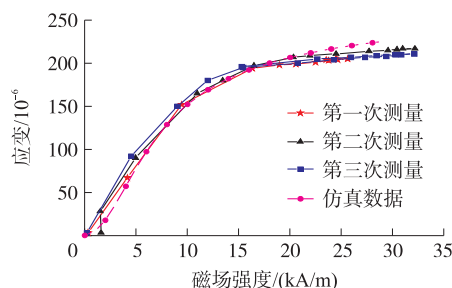


图3 实验结果与仿真结果对比

2 导波传感器的建模

2.1 传感器的工作原理

本文采用文献[17]中的 Fe-Ga 合金磁致伸缩导波传感的结构参数。传感器结构如图 4 所示,主要由圆柱状钕铁硼永磁体、线圈组、Fe-Ga 合金材料和待测铝板组成。将线圈置于 Fe-Ga 合金材料周向的上方,永磁体置于 Fe-Ga 合金材料的正上方。永磁体提供恒定的偏置磁场,偏置磁场用于消除倍频作用,还可以增加 Fe-Ga 合金材料的最大磁致伸缩变形^[14],线圈提供高频交变磁场。外侧矩形为静态磁场方向,内侧矩形为动态磁场方向。永磁体在 Fe-Ga 合金材料产生沿径向辐射的静磁场分量,线圈组在 Fe-Ga 合金材料表面也产生沿径向分布的动磁场分量,即永磁体和线圈在 Fe-Ga 合金材料表面的磁场分布方向一致。导波的产生过程:Fe-Ga 合金材料基于磁致伸缩效应(焦耳效应)在静磁场与交流磁场的共同作用下产生应变,应变以应力波的形式耦合到铝板中进行传播。导波的接收过程:当应力波传到接收传感器时,Fe-Ga 合金材料基于磁致伸缩逆效应(维拉里效应)周围的磁感应强度发生变化,线圈根据法拉第电磁感应定律感应出电压。

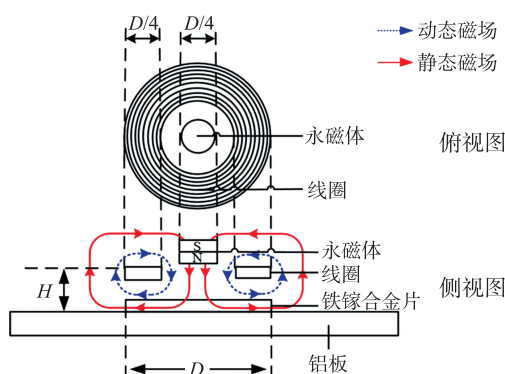


图4 传感器的结构

2.2 传感器仿真模型的建立

磁致伸缩导波传感器仿真模型如图 5 所示。传感器包含激励端和接收端,且两端采用相同的结构。模

型包含三个计算区域,分别是磁场计算区域、力学计算区域和声学计算区域,其中激励端磁场和接收端磁场分开计算。本文利用 comsol 软件的 AC/DC 模块、固体力学模块和声学模块对以上区域进行求解。首先计算激励端中的磁场分布,包含永磁体、线圈、Fe-Ga 合金材料、铝板及空气域的静态磁场和动态磁场。接下来分析 Fe-Ga 合金材料的应变和应力分布。然后通过将力学场与声学场进行耦合从而求解得到导波在铝板中的传播。最后通过计算接收端中的 Fe-Ga 合金材料的应力和应变,根据磁致伸缩逆效应和法拉第电磁感应定律,求解得到线圈中的感应电动势。

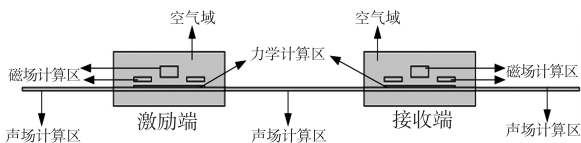


图 5 仿真模型

铝板的尺寸为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,电导率为 $3.774 \times 10^7\text{ S/m}$,密度为 2700 kg/m^3 ,激励端和接收端相距 100 mm ,杨氏模量为 70 GPa ,泊松比为 0.33 ,相对磁导率为 1 。Fe-Ga 材料尺寸为 $\phi 25.4\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$,电导率为 $7 \times 10^6\text{ S/m}$,密度为 7870 kg/m^3 ,杨氏模量为 60 GPa ,泊松比为 0.45 ,饱和磁化强度为 $1.5 \times 10^6\text{ A/m}$,饱和磁致伸缩为 2×10^{-4} ,初始磁化率为 200 。激励端传感器和接收端传感器相距为 100 mm 。激励端传感器和接收端传感器中线圈组的匝数均为 112 匝,电导率为 $6 \times 10^7\text{ S/m}$ 。激励端传感器加载频率为 100 kHz ,最大幅值为 1 A 的窄频信号如图 6 所示。

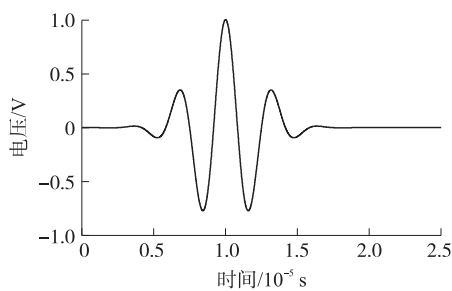


图 6 激励信号

3 偏置磁场对传感器性能的影响

3.1 提离距离对接收电压的影响

提离距离即永磁体的下表面到 Fe-Ga 合金材料表面的距离。提离距离的大小直接影响着 Fe-Ga 合金材料表面的磁场分布,从而影响到接收端电压的幅值。提离距离与接收端的电压峰值之间的关系如图 7 所示,当永磁体的剩余磁通密度为 0.5 T 时,随着提离距离的增大,接收端的电压峰值逐渐减小最

后趋于稳定。当初始提离距离为 1.54 mm 时,电压峰值达到了最大值为 0.11 V ;当提离距离大于 7 mm 时,提离距离对接收电压的影响逐渐减小,电压值趋于稳定并保持在 0.0028 V 。由图 7 可知,提离距离越小,接收端电压的幅值越大。考虑实际工程中,线圈和永磁体需要固定在 Fe-Ga 合金材料表面,但永磁体不可能无限接近于 Fe-Ga 合金材料表面,即永磁体和 Fe-Ga 合金材料表面需留有一定空隙,所以最终选择提离距离为 2.5 mm 。

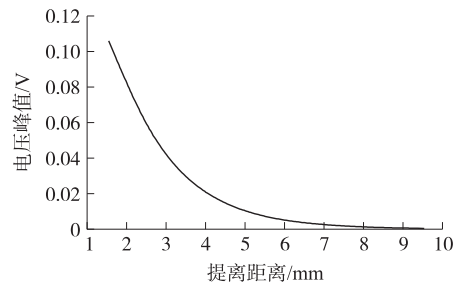
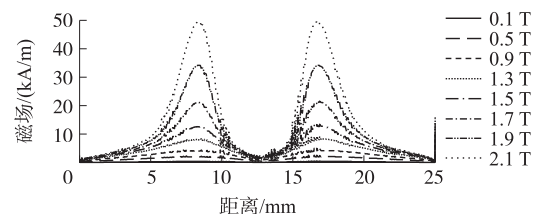


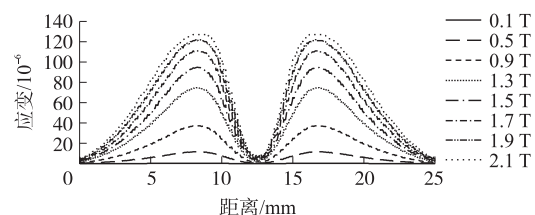
图 7 提离距离对接收电压的影响

3.2 偏置磁场对应变和接收电压的影响

永磁体提供的静态偏置磁场在导波的激励、传播和接收过程起着非常关键的作用。为研究静态偏置磁场大小对传感器的影响,以下讨论中保持永磁体提离距离不变 ($H = 2.5\text{ mm}$)。在导波激励过程中,永磁体在 Fe-Ga 合金材料表面引起的磁场分布和应变如图 8 所示,横坐标为 Fe-Ga 合金材料沿直径方向的坐标参量,纵坐标分别为 Fe-Ga 合金材料的磁场强度和应变。随着永磁体提供的剩余磁通密度的增加,Fe-Ga 合金材料的磁场强度和应变值逐渐增大。在永磁体提供的剩磁为 1.7 T 时,Fe-Ga 合金材料表面最大磁场强度达到了 21 kA/m ,应变值达到了 110×10^{-6} 。但在实际应用中,永磁体主要由铁氧体、铝镍钴合金或者是稀土磁铁(钕铁硼及钕钴)构成,而稀土材料构成的永磁体产生的磁场



(a) 磁场强度



(b) 应变

图 8 Fe-Ga 材料表面磁场和应变

最大,但一般也不能超过 1.4T,能够提供最大稳定值一般在 1.0 T 左右,所以在选择永磁体时,本文选择剩余磁通密度为 1.0T。Fe-Ga 合金材料表面最大磁场强度达到了 8 kA/m,应变值达到了 40×10^{-6} 。

在导波接收过程,静态偏置磁场大小对接收端的电压幅值和应变有着直接的影响。本文选取接收端中心点处的应变作为观测点。接收端的应变和电压如图 9 所示。由图 9(a)所示,接收端中心点处的应变值随着静态磁场的增大而逐渐增大,在静态磁场为 2.1 T 时,应变达到了 9.5×10^{-6} 。由图 9(b)所示,当施加剩余磁通密度为 1.0T 时,仿真模型计算得到,在时间为 10×10^{-5} s ~ 20×10^{-5} s 时,传感器接收到的电压波为首次抵达波,此时电压幅值达到 0.16 V,其他电压波为首次抵达波的反射波(带侧板两侧的反射波)。由图 9(c)所示,随着永磁体剩余磁通密度的增加,接收端的电压幅值也在增加。在剩余磁通密度为 1.7 T 时,接收端的电压峰值达到了 0.33 V。当剩余磁通密度逐渐增加到 2.0 T 时,电压幅值变化很小,保持在 0.34 V 左右。当剩余磁通密度大于 2.0 T 后,接收端

的电压幅值有所下降。本文选择剩余磁通密度为 1.0 T 时,接收端的电压峰值达到了 0.15 V。

上述理论分析了偏置磁场对 Fe-Ga 合金磁致伸缩导波传感器性能的影响,由于磁滞模型的复杂性,本研究暂未考虑材料的磁滞特性对传感器性能的影响。在之后的研究中,会将磁滞模型添加到传感器的仿真模型中,并搭建导波检测实验平台对理论结果进行验证。

4 结论

本文以 Fe-Ga 合金材料本身的非线性特点为出发点,首先研究了偏置磁场对 Fe-Ga 合金材料的影响,初步得到了 Fe-Ga 合金材料处于最佳工作点时,材料表面的磁场强度为 5 kA/m ~ 20 kA/m,磁致伸缩应变为 100×10^{-6} 左右,此时的换能效率最大。将 Fe-Ga 合金材料的非线性特性耦合到传感器模型中,计算分析了提高距离与接收端电压之间的关系,得出传感器的最佳提高距离为 2.5 mm。通过计算分析偏置磁场对激励端的磁场和接收电压的影响,得到了最佳偏置磁场为 1.0 T。最后选取非均匀分布的静态偏置磁场大小为 1.0 T,提高距离为 2.5 mm,仿真计算得到传感器接收端的电压峰值可达到 0.15 V。

参考文献:

- [1] 王悦民,康宜华,武新军. 磁致伸缩效应及其在无损检测中的应用研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2005,33(1):75-77.
- [2] Kim Y G, Moon H S, Park K J, et al. Generating and Detecting Torsional Guided Waves Using Magnetostrictive Sensors of Crossed Coils[J]. Ndt & E International,2011,44(2):145-151.
- [3] Lee J K, Kim H W, Kim Y Y. Omnidirectional Lamb Waves by Axisymmetrically-Configured Magnetostrictive Patch Transducer[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics Frequency Control,2013,60(9):1928-34.
- [4] 刘增华,樊军伟,何存富,等. 基于全向型 S₀ 模态磁致伸缩传感器的无参考缺陷成像方法研究[J]. 机械工程学报,2015,10:8-16.
- [5] Clark A E, Marilyn W F, Restorff J B, et al. Magnetostrictive Properties of Fe-Ga Alloys under Compressive Stress[J]. Materials Transactions,2002,43(5):881-886.
- [6] 孙英,靳辉,郑奕,等. 磁致伸缩液位传感器检测信号影响因素分析及实验研究[J]. 传感技术学报,2015,28(11):1607-1613.
- [7] Song X, Jin Z, Yu H. Influences of Magnetic Circuit Structure of Magnetostrictive Guided Wave Transducer on the Homogeneity of Bias Magnetic Field[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics,2010,33(1):581-588.
- [8] 黄凤英,周正干. 静态偏置磁场对电磁超声换能器灵敏度的影响[J]. 机械工程学报,2011,47(10):1-7.
- [9] Dutton B, Boonsang S, Dewhurst R J. A New Magnetic

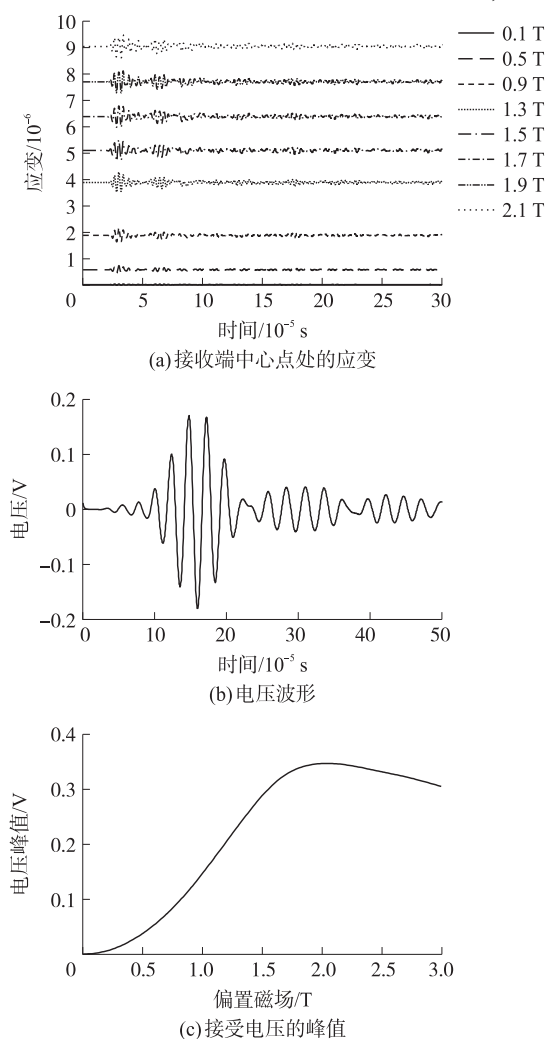
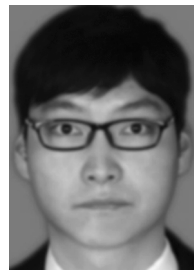


图9 接收端的应变和电压

- Configuration for a Small in-Plane Electromagnetic Acoustic Transducer Applied to Laser-Ultrasound Measurements: Modelling and Validation[J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2006, 125(2):249-259.
- [10] 孙永,徐江,周金海,等. 磁致伸缩导波传感器换能效率估计方法[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(7):1705-1713.
- [11] Lee H, Kim Y Y. Wave Selection Using a Magnetomechanical Sensor in a Solid Cylinder[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, 112(1):953-60.
- [12] 龙盛蓉,钟毓宁,刘莹,等. 偏置磁场均匀性对磁致伸缩导波传感器输出特性的影响[J]. *石油学报*, 2014(2):390-394.
- [13] 孙鹏飞,武新军,从明. 磁致伸缩纵向导波管道检测数值建模与分析[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(6):1250-1256.
- [14] Zhou H M, Zhou Y H, Zheng X J, et al. A General 3-D Nonlinear Magnetostrictive Constitutive Model for Soft Ferromagnetic Materials[J]. *Journal of Magnetism & Magnetic Materials*, 2009, 321(4):281-290.
- [15] Zheng X J, Liu X E. A Nonlinear Constitutive Model for Terfenol-D Rods[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(5):61.
- [16] 阳昌海,文玉梅,李平,等. 偏置磁场对磁致伸缩/弹性/压电层合材料磁电效应的影响[J]. *物理学报*, 2008, 57(11):7292-7297.
- [17] Yoo B, Na S M, Flatau A B, et al. Directional Magnetostrictive Patch Transducer Based on Galfenol's Anisotropic Magnetostriction Feature[J]. *Smart Materials & Structures*, 2014, 23(9):095035.



翁玲(1978-),女,河南信阳人,副教授,博士生导师,2008年在河北工业大学获博士学位,主要从事磁性材料与器件的研究, llweng@hebut.edu.cn;



郝永超(1993-),男,河北石家庄人,硕士研究生,研究方向为磁性材料与器件, 931209296@qq.com。

(上接第 194 页)

- [7] Ayazi F, Najafi K. A HARSS Polysilicon Vibrating Ring Gyroscope [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(2):169-179.
- [8] 王子丹. 圆柱壳体振动陀螺谐振子的非均匀性及微变形分析[D]. 长沙:国防科技大学, 2016.
- [9] 常艳艳,孙涛,李增强. 金刚石刀具几何参数对已加工表面残余应力的影响[J]. *工具技术*, 2015, 9:33-37.
- [10] 马世冷,董长双. 微铣削高温合金 GH4169 表面残余应力分析与预测优化[J]. *工具技术*, 2018, 4:79-82.
- [11] Erdinc Tatar, Tamal Mukherjee, Gary K Fedder. Stress Effects and Compensation of Bias Drift in a MEMS Vibratory-Rate Gyroscope [J]. *Microelectromechanical Systems*, 2017, 3(26):569-579.
- [12] Simon B R, Sharma G, Zotov S A, et al. Intrinsic Stress of Eutectic Au/Sn Die Attachment and Effect on Mode-Matched MEMS Gyroscopes[J]. *International Symposium on Inertial Sensors and Systems*, 2014:1-4.
- [13] Matthew Webber, Reinhardt Willig, Henry Raczkowski, et al. Modeling of Rate Error in Interferometric Fiber-Optic Gyroscopes due to Stress Induced by Moisture Diffusion [J]. *Journal of Lightwave Technology* 2012, 14(30):2356-2362.
- [14] Qiu A P, Su Y, Wang S R, et al. Effect of Residual Stresses on a Micromachined Z-Axis Vibrating Rate Gyroscope [J]. *Key Engineering Materials Vols*, 2005, 295-296:101-106.
- [15] Xiang Xi, Yulie Wu, Xiaomei Wu, et al. Modeling and Analysis of the Stress Effects for Trimmed Cupped Resonator Under Varying Temperature [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 189:429-440.
- [16] 袁发荣,伍尚礼. 残余应力测试与计算. 长沙:湖南大学出版社, 1987.



曲洛振(1994-)男,山东乐陵人,在读研究生,主要研究方向为圆柱壳体振动陀螺表面残余应力的分析, Luozhenqu@163.com;



吴宇列(1972-)男,研究员,研究生导师,主要研究领域为高性能惯性器件, ylwu@nudt.edu.cn。