

大量程磁致伸缩位移传感器的应力波衰减特性研究*

王博文, 谢新良, 张露予, 李亚芳, 郑文栋

(河北工业大学 电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室 天津 300130)

摘要:为研制大量程磁致伸缩位移传感器,对应力波的能量衰减特性进行研究。提出了衰减系数测试方法,给出了衰减系数的计算表达式及其修正方法。搭建了磁致伸缩位移传感器实验平台,测试了应力波在 Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝中传播的衰减系数,确定了波导丝线径、应力波频率和波导丝所受应力对衰减系数的影响规律。结果表明,线径为 0.6 mm 的 Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝在不受应力作用时,频率 54 kHz 的应力波衰减系数分别为 $0.1548 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.1808 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$;衰减系数随波导丝线径的增大而增大;衰减系数随应力波频率的增大而增大;衰减系数随波导丝所受应力的增大先减小后趋于稳定。在设计大量程磁致伸缩位移传感器时,为减小应力波的衰减,可选择线径为 0.4 mm 的 Fe-Ga 波导丝、应力波频率为 32 kHz、波导丝所受应力 60 MPa。

关键词:磁致伸缩;位移传感器;波导丝;应力波;衰减系数

中图分类号: TP212 TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 470.2010

Analysis of stress wave attenuation property of large-scale magnetostrictive displacement sensor

Wang Bowen, Xie Xinliang, Zhang Luyu, Li Yafang, Zheng Wendong

(Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: To develop large-scale magnetostrictive displacement sensor (MDS), the energy attenuation of stress wave is studied. A novel test method of attenuation coefficient is proposed in this work, in which the expression of attenuation coefficient and its correction method are involved. The experimental platform of MDS is set up to test the attenuation coefficients of the stress wave propagating in Fe-Ga and Fe-Ni waveguides. Moreover, the effects of wire diameter, stress wave frequency and stress on the attenuation coefficient are analyzed and determined. Experimental results show that the stress wave attenuation coefficients of Fe-Ga and Fe-Ni waveguides with 0.6 mm wire diameter are $0.1548 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ and $0.1808 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$, respectively, under 54 kHz and in the absence of stress. The attenuation coefficient increases as the wire diameter and the frequency of stress wave increases. The attenuation coefficient decreases first and then trends towards stability as the stress increases. Therefore, to reduce the attenuation of the stress wave in the production of a large-scale MDS, the diameter of Fe-Ga waveguide wire, stress wave frequency and stress are 0.4 mm, 32 kHz and 60 MPa, respectively.

Keywords: magnetostrictive; displacement sensor; waveguide wire; stress wave; attenuation coefficient

1 引言

与传统的电阻式、电容式和电感式等位移传感器相比,基于磁致伸缩效应的位移传感器具有精度高、量程大和可靠性高等优点,可在并联机器人回零操作、机床位移

控制、石油液位测量等领域广泛应用^[1-3]。研究人员对磁致伸缩位移传感器的设计和理论开展了诸多研究工作。文献[4]基于魏德曼效应和压磁效应建立了螺旋磁场作用下磁致伸缩位移传感器的输出电压模型,发现螺旋磁场与输出电压之间存在线性关系;文献[5]建立了螺旋磁场和拉力共同作用时 Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器的输

出特性,并通过实验验证了拉力使检测信号强度降低;文献[6]对磁致伸缩位移传感器的信号产生机制研究表明,信号的产生来自于磁畴的自由旋转效应和磁源波动效应;文献[7-9]分别对 Fe-Ga 波导丝的魏德曼效应和磁机耦合进行了研究,分析了磁致伸缩位移传感器的检测信号,发现 Fe-Ga 波导丝位移传感器检测信号的幅值比 Fe-Ni 波导丝位移传感器检测信号的幅值明显提高,信噪比也得到改善;文献[10]在传统的磁致伸缩位移测量方法上提出一种利用应力波无阻尼反射的测量方法。

文献[11]提出了大量程磁致伸缩位移传感器的衰减函数,但并没有对衰减函数进行分析和讨论。事实上,大量程磁致伸缩位移传感器中的应力波在波导丝传播时会发生能量衰减,进而使检测信号的幅值降低,所以设计大量程磁致伸缩位移传感器,应考虑应力波的能量衰减问题。然而,有关应力波在 Fe-Ga 波导丝中传播发生的能量衰减研究报道甚少,因而很有必要开展磁致伸缩位移传感器中的应力波能量衰减的研究工作。本文提出一种新的应力波能量衰减系数的测试方法,搭建了磁致伸缩位移传感器实验测试平台,从理论与实验上分析了波导丝材料、线径、应力波频率和波导丝所受拉力对能量衰减的影响。

2 应力波能量衰减与衰减系数测试方法

2.1 应力波能量衰减

应力波在波导丝中由于扩散、散射和吸收等会产生能量衰减^[12-13],其衰减系数与材料属性、声源频率、材料微观组织结构、所受应力大小和环境温度等密切相关。当应力波沿介质 x 方向传播,应力波的声压强度随传播距离 x 成指数衰减,可以表示为^[13-15]:

$$p(x) = p_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

式中: p_0 为声源处的声压强度, $p(x)$ 为应力波传播距离 x 后的声压强度, α 为衰减系数。由方程(1)可知,当 p_0 一定时,只要确定了衰减系数 α ,就可以确定应力波传播距离 x 后的声压强度。因此,应力波的能量衰减问题就归结为确定衰减系数的问题。

2.2 衰减系数测试分析

由于声源的声压 p_0 较难得到,在测试应力波衰减时常取两个位置处的声压强度值,如图 1 所示。假设波导丝内部性质完全一致,当激励脉冲电流相同时,由文献[4]可知永磁体在波导丝任意位置处产生的应力波声压强度相同设为 p_0 ,则永磁体在不同位置传播到检测线圈位置处时的声压强度可以表示为:

$$\begin{cases} p_{x1} = p_0 e^{-\alpha x_1} \\ p_{x2} = p_0 e^{-\alpha x_2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_1 和 x_2 分别为图 1 中位置 1 和 2 与检测线圈的距离, p_{x1} 和 p_{x2} 分别为应力波传播到检测线圈处的声压强度。当 x_1 和 x_2 已知时,并假设 p_{x1} 和 p_{x2} 与线圈检测电压成正比,由检测电压的比值并结合式(2)可确定衰减系数 α 。然而,实验表明,采用移动永磁体的方法难于操作,测试衰减系数产生的误差较大,这是由于移动永磁体使波导丝材料的磁特性发生了不均匀的变化。

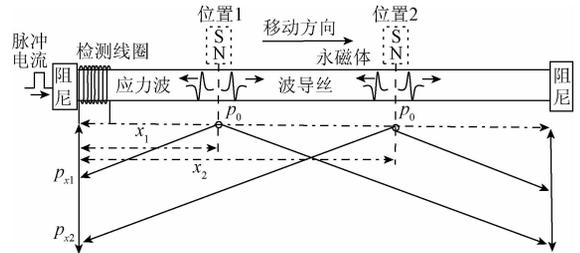


图 1 衰减系数测试方法

Fig. 1 Measurement of attenuation coefficient

针对应力波衰减系数测试时存在误差较大的问题,提出一种新的应力波能量衰减系数测试方法。在图 1 传感器结构基础上,去除波导丝右端的阻尼,当加载脉冲电流,在波导丝内产生的应力波分别向两端传播,其中向左传播的为回波,向右传播的为前进波,如图 2 所示。由文献[9]可知,当激励条件及边界条件一致时,振动产生后向两个不同方向传播的应力波声压强度值相等,此时检测信号将出现两个电压峰值,如图 3 所示。其中第 1 个峰值电压 e_1 是回波传播到检测线圈处产生的电压,第 2 个峰值电压 e_2 是前进波在波导丝右端发生反射后传播到检测线圈处产生的电压。将应力波在反射后与反射前的声压比值定义为反射系数 k ,当应力波的反射系数 k 、永磁体距波导丝右端的距离已知时,由实验可以确定 e_1 和 e_2 ,进而可以确定衰减系数 α 。

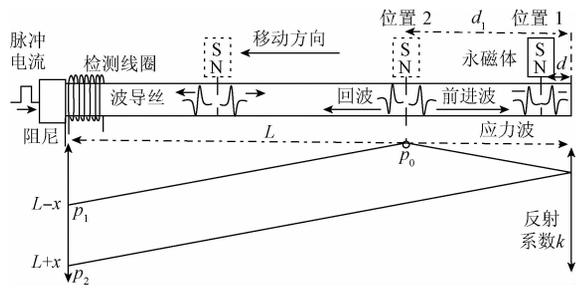


图 2 衰减系数测试方法

Fig. 2 Test method for attenuation coefficient

图 3 所示为采用提出的衰减系数测试方法得到的电

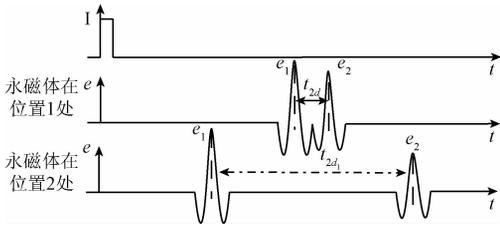


图3 检测电压波形

Fig. 3 Detection voltage waveform

压波形。由于前进波传播的距离远,且经过一次反射,因而 e_2 比 e_1 的幅值小,幅值的降低是由于传播的距离长和反射而引起的。 t_{2d} 和 t_{2d1} 分别为应力波传播距离 $2d$ 和 $2d_1$ 所用的时间。

2.3 衰减系数测试平台搭建

磁致伸缩位移传感器实验平台如图4所示,其主要由激励模块、检测模块、外壳保护模块等组成。激励模块主要包括信号发生器、放大电路、波导丝、永磁体和电源等部分,利用 TFG6920A 型任意波形信号发生器和互补推挽式放大电路可快速调节脉冲信号的频率、幅值和脉宽。根据前期研究^[4,9,16],激励脉冲电流的频率设定为 200 Hz、高电平 24 V、脉宽 6 μ s;波导丝两端水平拉直,固定在内径为 6 mm 的铁氟龙管内;永磁体是环形钕铁硼,内外径分别为 14 和 20 mm,厚 6 mm,安装在环形铝环内。检测模块主要由检测线圈和示波器等组成,检测线圈为线径 0.06 mm 的漆包铜线绕制而成,其匝数为 600、3 层排列、线圈长 10 mm、内径为 4 mm;采用 DPO3014 型数字示波器采集信号,其最大采样周期为 2.5 GS/s,示波器的通道 1 接在检测线圈两端,采集检测线圈两端的电压信号,通道 2 接在放大电路输出端,采集激励脉冲的幅值,示波器的采样周期设置为 0.04 μ s,采样点数 10 000。外壳保护模块主要由铁氟龙管、不锈钢、支架等组成,其主要用来固定波导丝和减小电磁干扰。

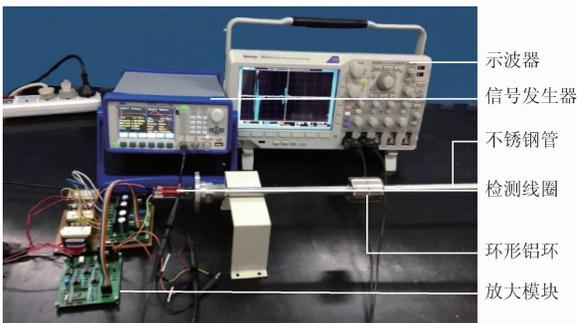


图4 磁致伸缩位移传感器实验平台

Fig. 4 Experimental platform of MDS

利用所建立的实验平台可以测试:1) Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝的衰减系数;2) 不同频率条件下的衰减系数;3) 波导丝在不同应力作用下的衰减系数。

3 实验结果与分析

3.1 衰减系数与反射系数测试

3.1.1 衰减系数测试

根据波的反射定律可知,应力波反射产生的衰减为线性衰减,当永磁体位于图2位置2时可得:

$$\begin{cases} p_1 = p_0 e^{-\alpha(L-d_1)} \\ p_2 = p_0 e^{-\alpha(L+d_1)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_1 为回波传播到检测线圈处的声压, p_2 为前进波在右端发生反射后传播到检测线圈处的声压, L 为波导丝长度, d_1 为永磁体距波导丝右端的距离, k 为反射系数,当 $k=1$ 时表示完全弹性反射,在反射时没有任何能量损失,当 $k=0$ 时表示反射时能量完全被吸收。实验结果表明,当永磁体与波导丝右端的距离 $d > 4$ cm 时(见图2),回波和前进波产生的电压信号彼此完全分开,互不干扰。如果忽略应力波在图2中距离为 $2d$ 的传播衰减,根据 e_2 和 e_1 的峰值比值可计算出反射系数 k 。

由式(3)可以得出:

$$\alpha = \frac{1}{2d_1} \ln \frac{k \cdot p_1}{p_2} \quad (4)$$

由于声压与声波峰值成正比^[12-14],衰减系数 α 可表示为:

$$\alpha = \frac{1}{2d_1} \ln \frac{k \cdot e_1}{e_2} \quad (5)$$

式中衰减系数的单位为 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$, e_1 和 e_2 分别为回波和前进波产生的峰值电压。

3.1.2 反射系数的确定

根据式(5),要测试出衰减系数 α , 首先应确定应力波的反射系数 k 。根据 k 的意义可知,只要永磁体足够靠近波导丝的右端,根据回波和前进波产生的电压峰值可以得到近似的反射系数 k_d (其包含短距离 $2d$ 的传播衰减),当距离 $2d$ 很小时,可忽略应力波的传播衰减,此时有 $k = k_d$ 。

将永磁体放置于图2位置1,永磁体距波导丝右端 4 cm,由回波和前进波产生的电压峰值 e_2 和 e_1 的关系如图5所示。图中表明前进波经过反射后产生的电压信号 e_2 随回波产生的电压信号 e_1 增大而增大,且 e_1 与 e_2 为线性关系。当忽略短距离 $2d$ 产生的传播衰减,根据 e_2 与 e_1 的比值可近似得到反射系数。采用正比例函数对数据进行拟合,得到拟合函数的比例系数为 0.846 6,此时数据点基本落在拟合直线上,得近似反射系数 $k_d = 0.846 6$,这与应力波在反射时产生的线性衰减相吻合。

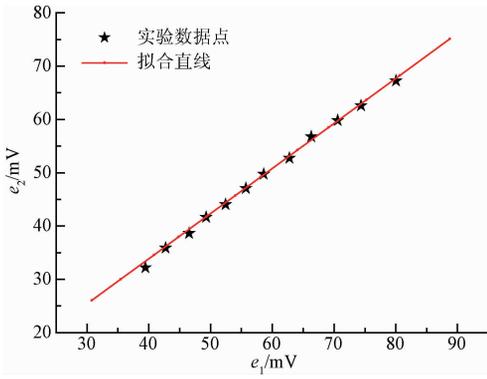


图5 近似反射系数 k_d 的确定

Fig. 5 Determination of approximate reflection coefficient k_d

永磁体距离波导丝右端 d ($d=4$ cm) 时,忽略短距离 $2d$ 上的传播衰减,根据检测信号得到近似反射系数 k_d ($k_d = k \cdot e^{-2\alpha d}$), k_d 包含反射衰减和来回距离 $2d$ 的传播衰减,故反射系数 k 应略大于 k_d 。永磁体距离波导丝右端 d_1 时,利用式(5)计算应力波的衰减系数(此时近似 $k \approx k_d$),然后可利用计算出的衰减系数 α 通过式(6)对 k 进行修正。

$$k = \frac{k_d}{e^{-2\alpha d}} \quad (6)$$

图6是由式(6)利用迭代法对反射系数 k 和衰减系数 α 进行修正。首先将永磁体放在图2位置1处得到近似反射系数 $k_d(k(1))$,输入永磁体在图2位置2处的检测信号峰值 e_1 和 e_2 、距离 d 和 d_1 以及近似反射系数 k_d ,其次根据式(5)计算忽略来回距离 $2d$ 上传播衰减时的衰减系数 α ,然后利用式(6)对反射系数 k 进行修正,再利用修正后的反射系数 k 计算应力波的衰减系数 α ,重复进行直到前后两次计算所得的衰减系数相差小于 0.000 1,则终止程序,输出衰减系数 α 。

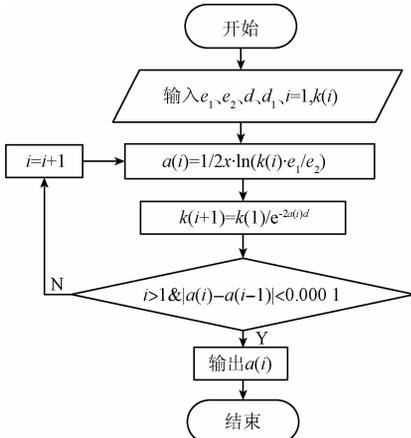


图6 衰减系数修正流程

Fig. 6 Flow chart of attenuation coefficient correction

3.2 Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝的衰减系数

由式(5)可知 $\ln(k \cdot e_1/e_2)$ 与 $2d_1$ 成正比例关系,其比例系数为衰减系数 α ,为减小测试误差,采用多次测试,取多个测试点得到不同距离 $2d_1$ 和峰值电压,再用正比例函数进行拟合,得到拟合直线方程的斜率即为衰减系数,斜率越大表示衰减系数越大。图7所示为波导丝两端无拉力作用、线径为 0.6 mm、应力波频率为 54 kHz 时得到 $\ln(k \cdot e_1/e_2)$ 与 $2d_1$ 的关系曲线,两条直线的斜率分别为 0.154 8 和 0.180 8,故 Fe-Ga 和 Fe-Ni 的衰减系数分别为 $0.154 8 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.180 8 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。两种波导丝的衰减系数不同是由于 Fe-Ga 和 Fe-Ni 内部杂物的不同影响了波导丝内部平均粒径的大小,也影响了材料的微观组织结构,导致 Fe-Ga 与 Fe-Ni 波导丝衰减系数的不同。由 Fe-Ga 波导丝的衰减系数比 Fe-Ni 小,故在研制大量程磁致伸缩位移传感器时应选择衰减系数较小的 Fe-Ga 波导丝。

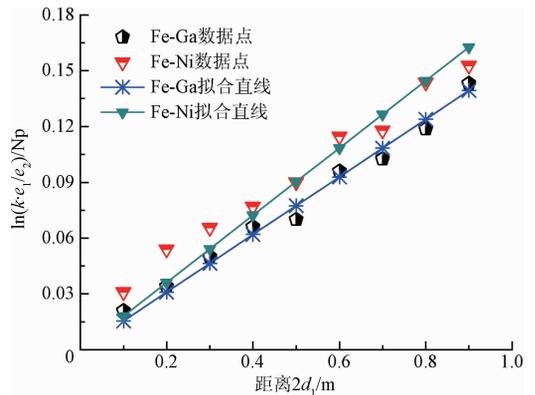


图7 $\ln(k \cdot e_1/e_2)$ 与距离 $2d_1$ 的关系曲线

Fig. 7 $\ln(k \cdot e_1/e_2)$ vs distance $2d_1$

3.3 波导丝尺寸对衰减系数的影响

图8所示为偏置磁场和激励磁场相等且都为 4 kA/m 时,波导丝两端不受任何作用力,应力波频率为 54 kHz 时应力波衰减系数与波导丝线径的关系曲线。由图8可知,衰减系数随着波导丝线径的增大而增大,波导丝线径为 0.4 mm 时应力波衰减系数为 $0.137 5 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。波导丝线径对应应力波衰减的影响是由于激励脉冲信号的频率较高时电流存在趋肤效应,使波导丝表面处产生的魏德曼效应较为显著,所以应力波能量的传播主要集中在波导丝的表面,波导丝线径的变化影响了波导丝的面积,当线径增大时使传播介质的面积增大,继而可能增大应力波扩散和吸收产生的能量衰减,使应力波的衰减系数增大。故在研制大量程磁致伸缩位移传感器时应适当选择线径较小的波导丝。

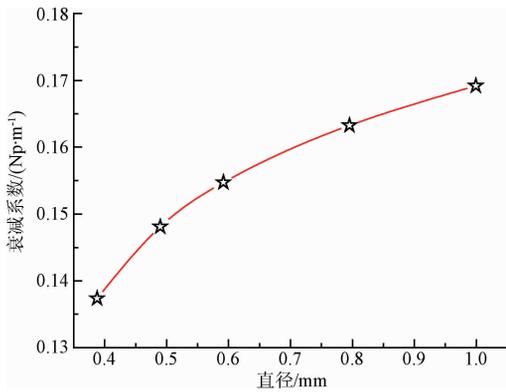


图8 衰减系数与线径的关系

Fig. 8 Relationship between attenuation coefficient and the diameter of waveguide wire

3.4 应力波频率对衰减系数的影响

保持偏置磁场强度不变,采用不同厚度的环形永磁体并调节脉冲电流的脉宽得到频率不同的应力波,利用傅里叶变换得到检测信号的频率信息。图9所示为当线径为0.6 mm的Fe-Ga波导丝,在波导丝两端不受拉力作用下衰减系数随频率变化的关系曲线。当应力波频率为32 kHz时衰减系数为 $0.1107 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。拟合曲线表明,衰减系数随频率的增加单调增大。应力波频率对衰减系数的影响是由于应力波频率增大时导致粒子振动频率也增大,粒子振动频率的增大使应力波在传播过程中造成质点间内摩擦产生的能量损耗增大,继而导致应力波的衰减系数变大。故在研制大量程磁致伸缩位移传感器时为减小应力波在传播过程中产生的能量衰减可适当降低应力波的频率。

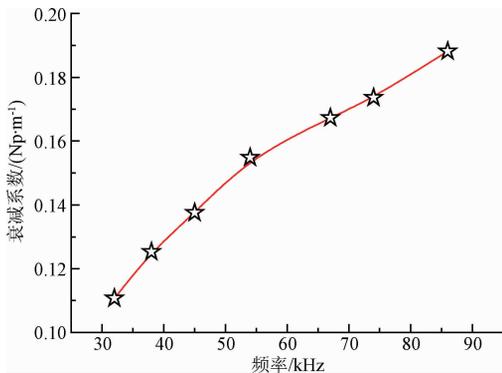


图9 衰减系数与频率的关系

Fig. 9 Relationship between attenuation coefficient and frequency

3.5 波导丝所受应力对衰减系数的影响

当波导丝的线径很小时,不便在波导丝两端施加拉力,故选用0.8 mm线径的Fe-Ga研究拉力与衰减系

数的关系。偏置磁场和激励磁场相等且都为 4 kA/m ,应力波频率为 54 kHz 时衰减系数与波导丝两端所受应力的关系曲线如图10所示,图10表明,随着应力的增大,应力波的衰减系数先逐渐减小后逐渐趋于稳定,当波导丝所受应力为 60 MPa 时,应力波衰减系数趋于稳定,此时为 $0.1241 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。波导丝所受应力对应力波衰减的影响是由于波导丝在应力的作用使各粒子之间排列紧密,使传播介质中的颗粒界面中的悬浮粒子减小,悬浮粒子数量的减小可降低应力波的散射衰减。而当应力增大到一定值后,大部分悬浮粒子已经排列的很紧密,所以应力再增大时对介质中颗粒界面悬浮粒子的影响减小,故此时再增大应力,衰减系数不再一直减小。故在制作大量程磁致伸缩位移传感器时可在波导丝两端施加一定的应力作用。

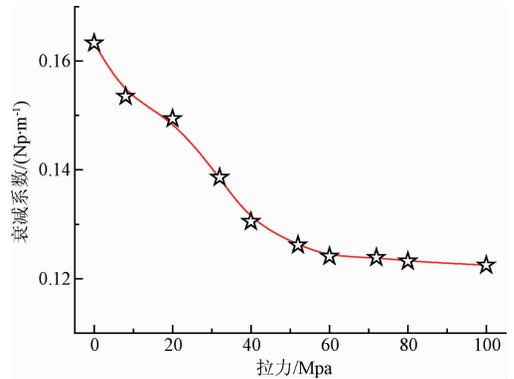


图10 衰减系数与应力的关系

Fig. 10 Relationship between attenuation coefficient and stress

3.6 磁致伸缩位移传感器的量程设计

当偏置磁场为 4 kA/m 、激励磁场为 6 kA/m 、波导丝线径为 0.4 mm 、波导丝两端施加 60 MPa 拉力、应力波频率为 32 kHz 时,Fe-Ga和Fe-Ni输出的最大检测电压分别为 90 和 40 mV ,由实验得到Fe-Ga和Fe-Ni的衰减系数分别为 $0.0985 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 $0.1382 \text{ Np} \cdot \text{m}^{-1}$,根据应力波的数量衰减规律得到电压幅值与传播距离的关系曲线如图11所示。如果检测信号的幅值大于 5 mV 时能有效的将噪声信号与有效信号相区分,则在此激励条件下,由Fe-Ga波导丝制作的磁致伸缩位移传感器的最大量程可达 29 m ,而Fe-Ni的最大量程为 15 m ,故Fe-Ga更适合做大量程的波导丝材料。

4 磁致伸缩位移传感器的样机制作与特性测试

磁致伸缩位移传感器样机如图12所示,其主要包括传感器头部、波导丝、永磁体、测量杆及阻尼装置等。传

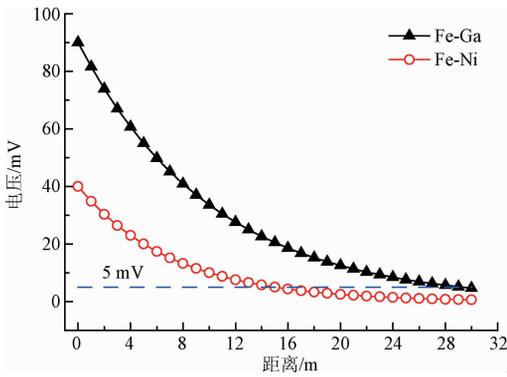


图 11 传感器检测电压与传播距离的关系曲线
Fig. 11 Relationship curve of sensor voltage and propagation distance

传感器头部为正方体结构,内部放置脉冲驱动电路、检测线圈、信号处理电路、位移的换算及显示电路,其分别实现脉冲电流的产生,应力波的检测、信号的滤波及位移显示功能等。Fe-Ga 波导丝作为磁致伸缩位移传感器的核心部件,其主要用来实现应力波信号的产生及传播。波导丝左端通过螺纹孔进入传感器头部,依次穿过检测线圈和阻尼;右端穿过阻尼装置并与返回导线相连,返回导线接回到硬件电路,形成闭合的回路。永磁体在测量杆上移动,其主要提供一个恒定的轴向磁场,与脉冲电流产生的周向磁场共同作用产生应力波信号。测量杆可保护波导丝、屏蔽外界电磁干扰、并充当被测位移与实测位移之间的转换作用。阻尼装置主要是用于减小应力波的反射,提高检测信号的信噪比。

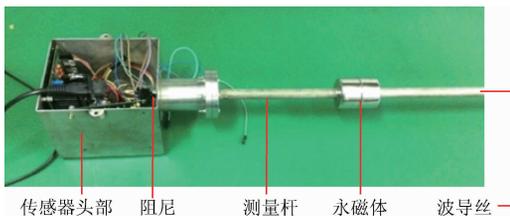


图 12 磁致伸缩位移传感器样机
Fig. 12 The prototype of MDS

磁致伸缩位移传感器的测量精度主要取决于检测信号的峰值电压,只要检测线圈能检测到由永磁体处产生的应力波信号,再根据应力波的传播速度即可得到位移信息。因此,对制作的磁致伸缩位移传感器样机进行了实验研究,测试了磁致伸缩位移传感器的检测电压信号。

当偏置磁场为 4 kA/m,波导丝两端激励脉冲电压为 20 V、脉宽为 6 μ s、频率为 200 Hz,永磁体在位移 516 mm 时检测线圈输出的电压波形如图 13 所示。由图 13 可知,检测信号的峰值电压为 86 mV。与文献[17]测得的检测信号相比,幅值约提高一倍,且检测波形的噪声明显降低,表明 Fe-Ga 波导丝应用到大量程磁致伸缩位移传

感器是可行的^[18]。图 13 中的检测电压是应力波传播 516 mm 后产生的,根据式(1)声压强度衰减规律(衰减系数为 0.098 5 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$)及声压与声波峰值成正比^[12-14]可得,检测线圈与永磁体之间的位移为 0 时,输出电压的峰值为 90.4 mV。根据图 11 中检测电压与传播距离的关系,在此激励条件下研制的 Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器的最大量程可达 29 m。

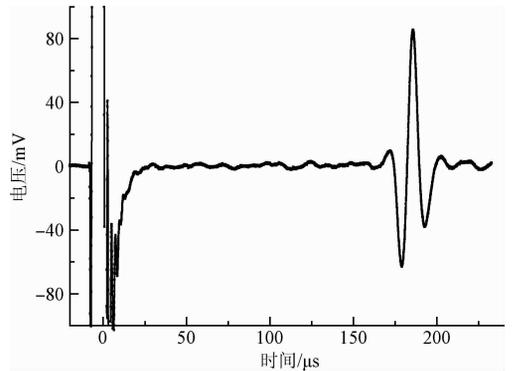


图 13 磁致伸缩位移传感器检测电压波形
Fig. 13 Detecting voltage waveform of MDS

大量程的磁致伸缩位移传感器在钢轨位移在线监测、机器人、超精密仪器等领域具有广泛的应用^[19-23]。特别是可应用在战机、空中加油机燃油测量、飞机、导弹和航天器的姿态控制、六自由度飞行模拟器系统等军事领域^[24]。因此,研制的大量程 Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器具有重要的实际应用价值。

5 结 论

对磁致伸缩位移传感器的应力波衰减特性进行了分析,并分别研究了波导丝材料、尺寸、应力波频率和波导丝所受拉力与衰减系数的关系,通过实验研究可得到如下结论。

1) 提出了衰减系数测试方法,确定了衰减系数的表达式及其修正方法。搭建实验平台,对应力波的衰减系数进行测试,得到频率 54 kHz 的应力波在线径为 0.6 mm 的 Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝中传播的衰减系数分别为 0.154 8 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 和 0.180 8 $\text{Np} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

2) 研究了 Fe-Ga 波导丝的线径、应力波频率和波导丝所受应力与衰减系数的关系,得到衰减系数随波导丝线径的增大而增大;衰减系数随频率的增大而增大;衰减系数随波导丝所受应力的增大先减小后趋于稳定。

3) 为研制大量程磁致伸缩位移传感器,应综合考虑波导丝材料、线径、应力波频率和应力的作用。为减小应力波的衰减可选择线径为 0.4 mm 的 Fe-Ga 波导丝、应力波频率 32 kHz、波导丝受 60 MPa 应力。

参考文献

- [1] 窦玉超,姚建涛,侯雨雷,等. 65米射电望远镜副面调整系统姿态精度监测与回零策略[J]. 机器人, 2012, 34(4):399-405.
DOU Y CH, YAO J T, HOU Y L, et al. Orientation precision monitoring and homing strategy of the subreflector adjusting system for 65 meters telescope [J]. Robot, 2012, 34(4):399-405.
- [2] 史红梅,余祖俊,朱力强,等. 高速铁路无缝钢轨纵向位移在线监测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4):811-817.
SHI H M, YU Z J, ZHU L Q, et al. Study on the monitoring method of longitudinal displacement for the high-speed continuous welded rail [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4): 811-817.
- [3] REININGER T, WELKER F, ZEPPELIN M V. Sensors in position control applications for industrial automation[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 129(1):270-274.
- [4] 张露予,王博文,翁玲,等. 螺旋磁场作用下磁致伸缩位移传感器的输出电压模型及实验[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12):21-26.
ZHANG L Y, WANG B W, WENG L, et al. The output voltage model of magnetostrictive displacement sensor in helical magnetic field and its experimental study [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 21-26.
- [5] ZHANG L, WANG B, YIN X W, et al. The output characteristics of galfenol magnetostrictive displacement sensor under the helical magnetic field and stress [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7):1-4.
- [6] DENG C, KANG Y, GE T, et al. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor[J]. Measurement, 2014, 47(1):591-597.
- [7] LI J H, GAO X X, ZHU J, et al. Wiedemann effect of Fe-Ga based magnetostrictive wires[J]. Chinese Physics B, 2012, 21(8):476-481.
- [8] WUN-FOGLE M, RESTORFF J B, CLARK A E. Magnetomechanical coupling in stress-annealed Fe-Ga (galfenol) alloys[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10):3120-3122.
- [9] 王博文,张露予,王鹏,等. 磁致伸缩位移传感器检测信号分析[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2):358-364.
WANG B W, ZHANG L Y, WANG P, et al. Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(2): 358-364.
- [10] FERRARI P, FLAMMINI A, MARIOLI D, et al. Introducing a new measurement method for magnetostrictive linear displacement transducers [C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008:1766-1770.
- [11] 代前国,周新志. 大位移磁致伸缩传感器的弹性波建模与分析[J]. 传感技术学报, 2013, 26(2):195-199.
DAI Q G, ZHOU X ZH. Modeling and analysis of elastic wave of large-range magnetostrictive displacement sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuator, 2013, 26(2):195-199.
- [12] 孙贵青,杨德森,时胜国. 基于矢量水听器的声压和质点振速的空间相关系数[J]. 声学学报, 2003, 28(6):509-513.
SUN G Q, YANG D S, SHI SH G. Spatial correlation coefficients of acoustic pressure and particle velocity based on vector hydrophone[J]. Acta Acustica, 2003, 28(6):509-513.
- [13] SARPÜN I H, KILICKAYA M S. Mean grain size determination in marbles by ultrasonic first backwall echo height measurements[J]. NDT & E International, 2006, 39(1):82-86.
- [14] 刘小荣,贺西平,张宏普,等. 金属材料的超声衰减特征及辨识的新方法[J]. 科学通报, 2016(8):844-854.
LIU X R, HE X P, ZHANG H P, et al. Ultrasonic attenuation characteristics and a new method of identification of metal materials [J]. Chinese Science Bulletin, 2016(8):844-854.
- [15] LI X, SONG Y, LIU F, et al. Evaluation of mean grain size using the multi-scale ultrasonic attenuation coefficient[J]. NDT & E International, 2015, 72(6):25-32.
- [16] ZHANG L, WANG B, SUN Y, et al. Analysis of output characteristic model of magnetostrictive displacement sensor under a helical magnetic field and stress [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(4):1-4.
- [17] HRISTOFOROU E, DIMITROPOULOS P D, PETROU J. A new position sensor based on the MDL technique[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 132(1):112-121.
- [18] 周新志,余超,熊胤琪,等. 新型 Fe83Ga17 波导丝在磁致伸缩位移传感器中的应用[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(5):64-69.
ZHOU X ZH, YU CH, XIONG Y Q, et al. Application of Fe83Ga17 line to magnetostrictive displacement sensors [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(5):64-69.

- [19] 杭柏林, 王毅, 段振亚. 位移信号测量轮胎不平衡质量数学模型的建立[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10):61-64.
HANG B L, WANG Y, DUAN ZH Y. Mechanical model of displacement signal measuring tire unbalanced mass [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(10):61-64.
- [20] 谢新良, 张露予, 王博文, 等. Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器驱动电流位置调整与回波速度校正[J]. 传感技术学报, 2017, 30(1):109-114.
XIE X L, ZHANG L Y, WANG B W, et al. Adjustment of drive current position and correction of echo wave speed of the Fe-Ga magnetostrictive displacement sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuator, 2017, 30(1):109-114.
- [21] 贾丹平, 武威. 基于超磁致伸缩材料的光纤光栅电流传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12):1806-1812.
JIA D P, WU W. Fiber bragg grating current sensor based on giant magnetostrictive material [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12):1806-1812.
- [22] 李玉霞, 张斌, 杨晓霞. 基于 LabVIEW 的大望远镜直线位移传感器测量系统[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(3):80-84.
LI Y X, ZHANG B, YANG X X. Position transducer measuring system of large telescope based on LabVIEW [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(3):80-84.
- [23] 杨姝. 车轮不均匀磨损激光位移测量仪的设计与测试[J]. 中国测试, 2015, 41(5):79-82.
YANG SH. Design and test of wheel uneven-wear

measuring instruments based on laser displacement sensors [J]. China Measurement & Test, 2015, 41(5):79-82.

- [24] 李春楠, 卢云, 兰中文, 等. 磁致伸缩位移传感器的研究进展[J]. 实验科学与技术, 2008, 6(1):10-12.
LI CH N, LU Y, LAN ZH W, et al. Progress in research of magnetostrictive position sensor [J]. Experiment Science and Technology, 2008, 6(1):10-12.

作者简介



王博文(通讯作者), 分别在 1982 年和 1985 年于沈阳工业大学获得学士学位和硕士学位, 1995 年于中国科学院金属研究所获得博士学位, 现为河北工业大学教授、博士生导师, 主要研究方向为新型磁性材料与器件。

E-mail: bwwang@hebut.edu.cn

Wang Bowen (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Shenyang University of Technology in 1982 and 1985, respectively, and received his Ph. D. degree in 1995 from Institute of metal research, Chinese Academy of Sciences. Now he is a professor and doctoral supervisor in Hebei university of Technology. His main research interests include new magnetic materials and devices.



谢新良, 2015 年于防灾科技学院获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为新型磁性材料与器件。

E-mail: xiexinliang1993@163.com

Xie Xinliang received his B. Sc. degree in 2015 from Institute of Disaster Prevention Science and Technology. Now he is a master candidate in Hebei University of Technology. His main research interests include New Magnetic Materials and Devices.