

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412980

磁电耦合式小盲区磁致伸缩位移传感器 设计与输出特性*

高亮^{1,2}, 李明明^{1,2}, 王千^{1,2}, 党文娅^{1,2}, 翁玲^{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:针对液压缸、精密机械等安装空间有限、精度要求高的位移测量场景,本文提出了一种磁电耦合传感构型的高精度小盲区磁致伸缩位移传感器。该传感器的信号检测元件采用 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{PZT-5}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ 磁电复合材料作为核心敏感材料,该复合材料具有纵向磁化-横向极化的工作模式。基于玻尔兹曼统计量、磁电效应和逆磁致伸缩效应建立了磁电耦合式磁致伸缩位移传感器的输出电压模型,并选用直径为0.5 mm的 $\text{Fe}_{46.5}\text{Ni}_{48.5}\text{Cr}_2\text{Ti}_{2.5}\text{Al}_{0.5}$ (后简称Fe-Ni)波导丝搭建了脉冲电流、轴向偏置磁场可调的实验平台,验证了模型的准确性。确定了传感器的最佳激励脉冲电流为23 A和最佳偏置磁场为30 kA/m,此时的输出电压为412 mV。以Fe-Ni为波导丝材料,基于 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{PZT-5}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ 磁电复合材料,设计了磁电耦合式磁致伸缩位移传感器样机,并搭建了位移传感器测量校准平台,测试得到样机具有 ± 0.02 mm的测量精度以及15 mm的盲区距离,与同参数的传统线圈传感式磁致伸缩位移传感器相比精度提高了33%,盲区距离减小了85%。

关键词: 磁致伸缩;磁电复合材料;位移传感器;输出电压模型;小盲区

中图分类号: TH711 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Design and output characteristics of magnetostrictive displacement sensor with magnetoelectric coupling and small blind area

Gao Liang^{1,2}, Li Mingming^{1,2}, Wang Qian^{1,2}, Dang Wenya^{1,2}, Weng Ling^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Interintelligence of Electrical Equipment Hebei University of Technology,

Tianjian 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus

Reliability of Hebei Province Hebei University of Technology, Tianjian 300130, China)

Abstract: A high-precision and small-blind magnetostrictive displacement sensor with a magnetoelectric coupling sensor configuration was proposed for the displacement measurement scenarios where the installation space is limited, such as in electro-hydraulic power system, hydraulic cylinder and precision machinery, and where measurement accuracy is required. The signal detection element of the sensor adopts $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{PZT-5}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ magnetoelectric composite as the core sensitive material, which operates in a longitudinal magnetization-transverse polarization operating mode. An adjustable experimental platform was set up for pulse current and axial bias magnetic field, using a 0.5 mm diameter $\text{Fe}_{46.5}\text{Ni}_{48.5}\text{Cr}_2\text{Ti}_{2.5}\text{Al}_{0.5}$ waveguide to verify the accuracy of the model. The optimal excitation pulse current range of the sensor is 15~30 A and the optimal bias magnetic field range is 15~25 kA/m. Using Fe-Ni as waveguide wire material and $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{PZT-5}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ magnetoelectric composite material, a prototype magnetoelectric coupling magnetostrictive displacement sensor was designed, and the measurement and calibration platform of the displacement sensor was built. The measurement accuracy of the prototype was ± 0.02 mm, and the distance of a small blind area was 15 mm. Compared with the traditional coil-sensing magnetostrictive displacement sensor with the same parameters, the precision is increased by 33%, and the blind zone distance is reduced by 85%.

Keywords: magnetostriction; magnetoelectric composite materials; displacement sensor; output voltage model; small blind area

0 引 言

磁致伸缩位移传感器具有非接触、高精度、高可靠性的优点,因此在工业生产中广泛应用。然而,在液压缸、精密机械等空间有限、精度要求高的位移测量场景中,由于传感器存在一定的测量盲区,其有效测量范围难以满足以上应用需求,限制了传感器在精密位移控制领域的应用。

为提高测量精度,国内外学者在磁致伸缩位移传感器的传感结构上做了大量的设计与研究。传统的磁致伸缩直线位移传感结构为单线圈单波导丝结构^[1-4]。Hristoforou 等^[5]提出了一种双线圈接收结构,其中线圈分别布置在波导丝的两端,并采用缠绕于金属管的磁致伸缩线作为波导,提升了测量灵敏度。Zhang 等^[6]提出了一种差分波导结构的磁致伸缩直线位移传感器。该传感器包含两个相同的波导丝和两个相同的接收线圈,形成差分结构。与传统结构的直线位移传感器相比,该传感器具有更高的信噪比和线性精度。

已有大量学者从偏置磁铁配置、波导丝材料、激励脉冲波形等方面对传感器进行了研究,同时还建立了多种数学模型来分析不同因素对输出电压的影响,以指导提升其输出性能和测量精度。孙英等^[7]建立了波导丝扭转应变的数学模型,为永磁体的参数设计和放置方式以及永磁体与波导丝之间距离的设定提供了指导。Wang 等^[8]建立了非绝热条件下磁致伸缩位移传感器的信号强度模型,指导设计了可在 500℃ 工作的直线位移传感器。王博文等^[9]通过实验优化了磁致伸缩位移传感器的设计参数,采用 Fe-Ga 材料作为波导丝取得了显著的性能提升,表现出比传统 Fe-Ni 波导丝传感器更优越的性能。Zhou 等^[10]分析了磁致伸缩、磁滞特性和磁场特性等要素,通过实验和模拟分析研究了魏德曼效应的本质。张露予等^[11]建立并验证了磁致伸缩直线位移传感器在螺旋磁场作用下的输出电压模型,得到输出电压与螺旋磁场呈线性关系,为优化设计磁致伸缩位移传感器提供了理论基础和指导。孙英等^[12-13]针对双磁环磁致伸缩位移传感器磁环间的测量盲区问题展开研究并建立了输出电压模型,为优化多磁环位移传感器设计提供了理论基础,同时研究了可用于深度检测的磁致伸缩触觉传感器。李媛媛等^[14-15]建立了扭转力对传感器输出电压影响的模型,验证了输出电压随扭转应力增大呈非线性减小的规律,又针对应力波在传播过程中衰减对检测信号幅值的影响,建立了包含传播距离的输出电压模型,确定了输出电压随传播距离呈指数衰减的规律。

以上研究中磁致伸缩位移传感器以检测线圈作为

传感元件,当在波导丝两端加载脉冲电流激励时,基于法拉第效应在检测线圈处产生脉冲信号响应,基于磁致伸缩效应在永磁体处产生扭转波信号。永磁体靠近检测线圈时导致扭转波信号被脉冲信号叠加并淹没,从而产生测量盲区^[16]。边铁鋈等^[17]在检测线圈处增加了多层磁屏蔽装置,减小了永磁体以及周围环境中的静磁场对于检测线圈的影响,提出了一种盲区距离为 45 mm 的小盲区磁致伸缩位移传感器。然而,磁屏蔽装置的尺寸受传感器整体质量和体积的限制,从而影响其静磁屏蔽效果,导致传感器的测量盲区无法进一步降低。Seco 等^[18]提出了一种新型传感器结构,利用波导丝两端固定的压电材料作为接收元件,线圈和永磁体作为定位元件。该传感器通过激发线圈产生扭转波,并通过采集波导丝两端压电材料接收到扭转波的时间来实现位移测量。在 1 m 的测量范围内,该传感器的精度达到了 $\pm 30 \mu\text{m}$ 。

本文拟提出以磁电复合材料为传感元件的直线位移传感器结构,建立磁电耦合位移传感输出电压模型,研究永磁体提供的偏置磁场大小和加载在波导丝上脉冲电流大小对输出电压信号的影响。设计以磁电复合材料为传感元件的直线位移传感器,其次,针对测量盲区问题和测量精度,与传统磁致伸缩位移传感器进行了对比实验,表明了以磁电复合材料为传感元件的直线位移传感器有更小的盲区和更高的精度。

1 材料参数与传感构型

1.1 磁电复合材料制备及输出特性表征

磁电复合材料作为一种磁场传感元件,对快速变化的磁场表现出优异的传感特性^[19-21]。纵向磁化-横向极化(longitudinal magnetization-transverse polarization, L-T)模式磁电复合材料示意图如图 1 所示,根据其磁电耦合模型,磁电复合材料磁检测单元两端产生的输出电压 e 可表示为:

$$e = \alpha_p \cdot B \quad (1)$$

式中: α_p 为磁电电压系数; B 为磁感应强度。

将厚度为 200 μm 的锆钛酸铅陶瓷片(piezoelectric ceramic, PZT)作为电沉积基底,用丙酮和去离子水清洗,然后将其上表面的银电极作为阴极,与作为阳极的铂片平行固定,距离为 3 cm,保持中心对齐。配置电沉积所需的电解液,其成分包括 0.3 mol/L H_3BO_3 (缓冲剂)、0.3 mol/L NaCl (提高电导率)、0.4 mol/L 抗坏血酸(抗氧化剂)、0.4 mol/L 甘氨酸(络合剂)和 0.3 mol/L 柠檬酸钠(络合剂),并将浓度为 0.08 mol/L 的 FeSO_4 和浓度为 0.3 mol/L 的 CoSO_4 作为主盐加入到电解液中,进行搅拌溶解。通过滴加浓度 10% 的 H_2SO_4 溶液将电解液 pH 控制在 2.5,控

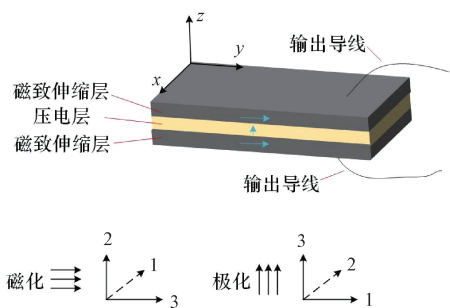


图 1 直角坐标系下 L-T 模式的磁电复合材料示意图

Fig. 1 Schematic diagram of magnetoelectric composite in L-T mode in cartesian coordinate system

制电解液的温度为 50℃。并通过搅拌来促进金属从电解质到电极表面的传质。将电沉积装置放置于恒定磁场环境中,磁场大小为 50 kA/m,方向与待沉积基底表面平行。将电沉积阴阳两极连接恒流电源,设置电流为 0.035 A/cm²,沉积 40 min 后,PZT 的上表面得到厚度为 20 μm 的 Co₇₀Fe₃₀ 磁致伸缩层。以同样的方式在 PZT 下表面沉积 20 μm 厚的 Co₇₀Fe₃₀ 磁致伸缩层即可得到厚度为 240 μm 的 L-T 模式的磁电复合材料,磁电复合材料各层参数如表 1 所示。

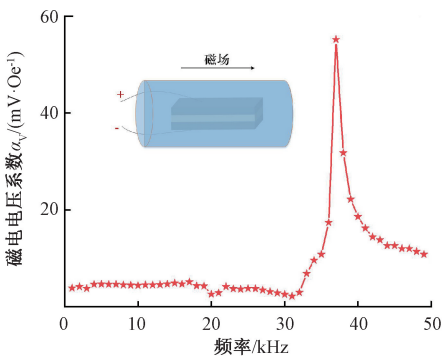
表 1 磁电复合材料参数

Table 1 Parameters of magnetoelectric composite materials		
结构/材料	参数	数值
磁致伸缩层/Co ₇₀ Fe ₃₀	压磁系数 $d_{33,m}/(\text{Wb}\cdot\text{N}^{-1})$	2.39×10^{-9}
	柔顺系数 $s_{33}^H/(\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1})$	3.7×10^{-12}
压电层/PZT-5	压电电压系数 $g_{31,p}/(\text{V}\cdot\text{m}\cdot\text{N}^{-1})$	13×10^{-3}
	柔顺系数 $s_{11}^E/(\text{m}^2\cdot\text{N}^{-1})$	16×10^{-12}
	机电耦合系数 $k_{31,p}$	0.35

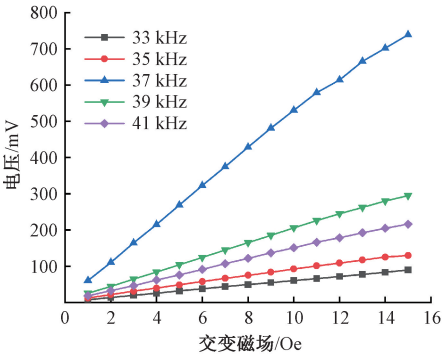
将型号为 HF2LI 的锁相放大器的输出端连接到功率放大器,得到一个幅值、频率可调的正弦交流电压,将其输出给长度为 100 mm,内径为 16 mm,外径为 22 mm,匝数为 200 的螺线管,螺线管内部产生一个交流磁场域,采用型号为 Model 8030 Gauss 的高斯计对螺线管产生的磁场进行大小、频率的校准,即可得到一个大小、频率可调的交流磁场。将制备的磁电复合材料样品放置于螺线管内,用锁相放大器读取其输出电压。测得在频率为 1~50 kHz 磁场下,磁电复合材料样品的磁电电压系数曲线,如图 2(a) 所示,可知磁场频率为 37 kHz 时,达到磁电复合材料样品的谐振点,此时的磁电电压系数最大。

图 2(b) 展示了磁电复合材料样品分别在施加 33、

35、37、39、41 kHz 频率磁场下的输出电压变化曲线。结果表明,在 0~15 Oe 的磁场范围内,磁电复合材料样品的输出电压与施加磁场大小呈现出良好的线性关系,且磁场频率在谐振频率 37 kHz 时,其斜率最大。



(a) 频率范围为 1~50 kHz 磁场下磁电电压系数曲线
(a) The magneto-electric voltage coefficient curve under the magnetic field with a frequency range of 1~50 kHz



(b) 不同频率磁场的磁场有效值-输出电压关系曲线
(b) RMS of magnetic field - output voltage curve of magnetic field with different frequency

图 2 Co₇₀Fe₃₀/PZT-5/Co₇₀Fe₃₀ 磁电复合材料输出特性测量

Fig. 2 Output characteristics measurement of Co₇₀Fe₃₀/PZT-5/Co₇₀Fe₃₀ magnetoelectric composite

1.2 磁致伸缩位移传感器磁电耦合传感构型

当周期性施加脉冲激励电流到磁致伸缩波导丝时,波导丝周围会形成周向圆形磁场。将永磁体靠近波导丝放置,其产生的轴向偏置磁场与脉冲激励电流产生的周向圆形磁场两者相互作用,导致波导中磁域的偏转。根据魏德曼效应,波导丝上会产生 2 个以一定速度向远离永磁体方向的扭转波。波导丝一端装有磁场传感元件作为接收器,波导丝两端连接阻尼器,用于衰减扭转波,以避免其不断反射和产生干扰波。根据维拉里效应,扭转波会引起波导丝的形变,从而使波导丝的磁感应强度 B 发生变化。当扭转波通过磁场接收器下方时,磁感应强度 B 的快速变化会导致接收器输出端的电压变化。根据扭转波从永磁体传播到接收器所需的传播时间可计算得到永磁体的位置。

本文将磁电复合材料代替传统的线圈作为接收器,组成磁电耦合传感构型的磁致伸缩位移传感器,如图3所示。

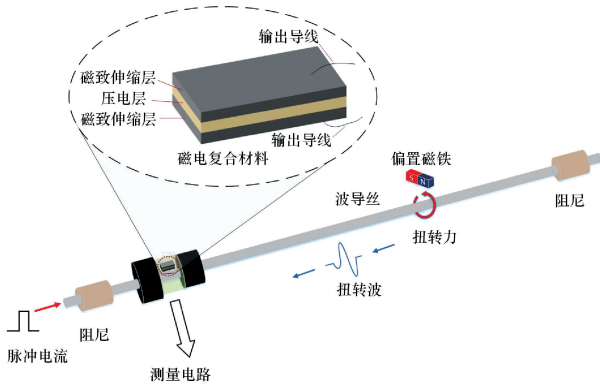


图3 磁致伸缩位移传感器磁电耦合构型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of magnetoelectric coupling configuration of magnetostrictive displacement sensor

2 传感器输出电压模型与模型验证

2.1 传感器输出电压模型

激励磁场 H_e 沿波导丝周向分布,偏置磁场 H_b 沿轴向分布。合成磁场 H 是由激励磁场 H_e 和偏置磁场 H_b 耦合产生的,可表示为 $H = \sqrt{H_b^2 + H_e^2}$ 。

波导丝在进行磁化的过程中,畴壁的位移与畴磁矩进行一致的转动。畴壁位移又细分为畴壁取代和畴壁弯曲。根据简化的玻尔兹曼统计量^[22-23],磁化强度 M 可表示为:

$$M = M_s f(kH) = M_s \coth(kH) - \frac{1}{kH} \quad (2)$$

式中: k 为松弛因子,可表示为 $k = \frac{3\chi_m}{M_s}$; χ_m 为初始线性区域磁化率; M_s 为饱和磁化强度。

在波导丝上施加的激励脉冲电流具有高频率、窄脉宽的特点,其脉冲宽度通常为微秒级,因此,激励电流在波导丝中的分布几乎遵循趋肤效应。在一定半径处,波导丝圆截面的电流密度可表示为:

$$J(r) = J_e e^{-\frac{r}{\delta}} \quad (3)$$

式中: d 为距波导丝表面的深度; δ 为趋肤深度,可表示为:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_i \sigma_i}} \quad (4)$$

式中: μ_i 为波导丝的磁导率; σ_i 为波导丝的电导率; f 为脉冲电流的频率。

J 为波导丝表面的电流密度,可表示为:

$$J = \frac{I_e}{2\pi \left[R\delta - \delta^2 + \delta^2 \exp\left(-\frac{R}{\delta}\right) \right]} \quad (5)$$

式中: R 为波导丝的半径; I_e 为脉冲电流。

通过波导丝的脉冲激励电流集中在趋肤深度 δ 以内,根据安培环路定理:

$$\int H_e dl = \int J(r) dS \quad (6)$$

可得出距离波导丝表面 $\delta/2$ 处的激励磁场 H_e 为:

$$H_e = \frac{J\delta \left(R - \frac{3}{4}\delta \right)}{2R - \delta} \quad (7)$$

当向波导丝通入激励电流时,永磁体位置处的磁导率 μ 表示为:

$$\mu = \mu_0 (1 + \chi) = \mu_0 + \mu_0 M_s f' \left(k \sqrt{H_b^2 + H_e^2} \right) \quad (8)$$

式中:磁化率 $\chi = dM/dH$; μ_0 为真空磁导率。

对于磁电复合材料的响应分析可采用引入界面耦合系数的长片型磁电复合材料的等效电路模型^[24]。对于工作在 L-T 模式下的长片型 M-P-M 层的磁电复合材料来说,其磁电电压系数为:

$$\alpha_v = \left| \frac{dv_3}{dH_3} \right|_{L-T} = \frac{n(1-n)t_{\text{total}}d_{33,m}g_{31,p}k_c}{ns_{11}^E(1-k_{31}^2) + (1-n)k_c s_{33}^H} \quad (9)$$

式中: n 为磁致伸缩层与磁电复合材料之间的厚度比; t_{total} 为磁电复合材料厚度; $d_{33,m}$ 为磁致伸缩层纵向压电系数; $g_{31,p}$ 为压电电压系数; k_c 为界面耦合系数; s_{11}^E 为压电层沿厚度方向柔顺系数; k_{31} 为机电耦合系数; s_{33}^H 为磁致伸缩层沿长度方向的柔顺系数。

波导丝中应力波产生的磁感应强度 B 与波导丝单位扭转角 $\partial\phi/\partial x$ 的关系式^[25] 为:

$$B = 4\pi\lambda\mu \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (10)$$

式中: μ 为波导丝的绝对磁导率; λ 为角应变引起的磁场变化率。

波导丝上的单位扭转角^[19] 与合成磁场和扭转磁致伸缩^[26-28] 的关系描述表达式为:

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{2(\lambda_l - \lambda_t)L_n}{R} \cdot \frac{H_b H_e}{H_b^2 + H_e^2} \quad (11)$$

式中: L_n 为检测单元长度; λ_t 为横向磁致伸缩; λ_l 为轴向磁致伸缩。

联立式(9)~(11)可得在合成磁场作用下,磁电耦合构型的磁致伸缩位移传感器的输出电压表达式为:

$$e = \frac{8\pi\lambda\mu(\lambda_l - \lambda_t)L_n}{R} \cdot \frac{H_b H_e}{H_b^2 + H_e^2} \cdot \frac{n(1-n)t_{\text{total}}d_{33,m}g_{31,p}k_c}{ns_{11}^E(1-k_{31}^2) + (1-n)k_c s_{33}^H} \quad (12)$$

2.2 传感器输出电压模型验证

搭建脉冲电流 I_e 可调和轴向偏置磁场 H_b 可调实验平台,如图 4 所示。将波导丝穿过套管被两端的阻尼元件夹紧拉直,波导丝材料为 Fe-Ni,其成分如表 2 所示,性能参数如表 3 所示。通过两个铜夹将波导丝的两端连接到自制的斩波电路输出端。采用 AMETEK 公司的 Sorensen XG600-1.4 可编程直流电源为斩波电路提供直流电流。斩波电路将直流电流转换为脉冲电流,可以提供脉宽时间为 9 μ s,脉冲周期为 1 ms,幅值为 0~50 A 的脉冲电流。将磁电复合片作为磁场接收器平行贴近并固定于磁致伸缩波导丝的一端,基于磁电效应来检测扭转波感应出的磁场,输出为电压信号。将磁电复合片输出的电压信号在经过放大处理前直接输入至具有 100 MHz 带宽和 2.5 GS/s 采样率的数字示波器 (Tektronix DPO3014)。采用两块充磁方向为厚度方向的永磁体,将永磁体充磁方向同向放置,固定于单向可调范围为 5~45 mm 的滑台上。永磁体采用 Nd₂Fe₁₄B,尺寸为 15 mm×15 mm×5 mm,剩磁 $B_r=1.2$ T,矫顽力 $H_c=899$ kA/m。通过调节滑台上 2 块磁铁之间的距离,可以连续改变提供给磁致伸缩波导丝的偏置磁场。

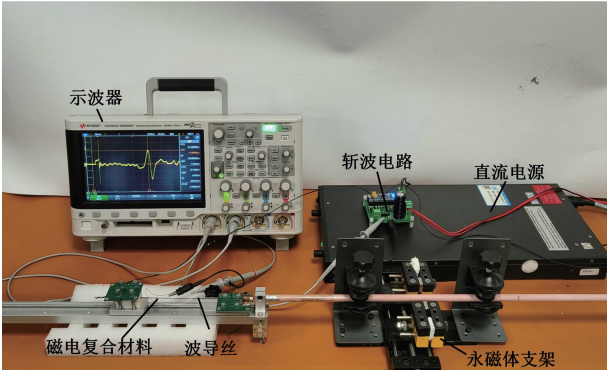


图 4 磁致伸缩位移传感器实验平台
Fig. 4 Experimental platform of magnetostrictive displacement sensor

表 2 Fe-Ni 波导丝成分

Table 2 Fe-Ni waveguide wire composition					
成分	Fe	Ni	Cr	Ti	Al
占比/%	46.5	48.5	2	2.5	0.5

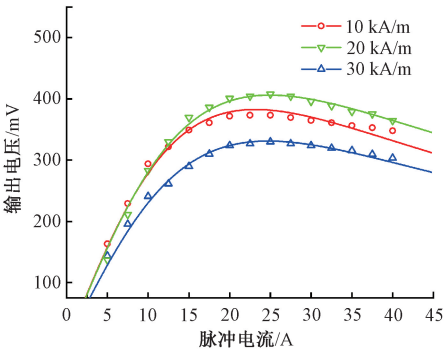
在偏置磁场 H_b 分别为 10、20、30 kA/m 时,在 5~40 A 范围内调节脉冲电流 I_e ,测得当脉冲电流 I_e 发生改变时,磁电复合片产生不同的信号强度,如图 5(a) 所示;在脉冲电流 I_e 分别为 10、15、20、25 A 时,在 5~35 kA/m 范围内调节波导丝偏置磁场 H_b ,测得在偏置磁场 H_b 发生改变时,磁电复合片输出不同信号强度,如图 5(b) 所示。

表 3 Fe-Ni 波导丝参数

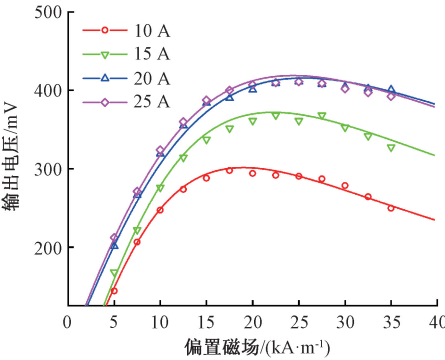
Table 3 Fe-Ni wire waveguide parameters		
参数	单位	数值
λ_s	10^{-6}	7.89
M_s	kA/m	851.29
χ_m	/	10.89
ρ	g/cm^3	7.76
E_0	GPa	72
ν	/	0.2
α	$^{\circ}\text{C}$	16.3×10^{-6}
μ	H/m	1.886×10^{-5}
L	c_1/c	0.12

可得根据模型表达式 (12) 计算得到的结果 (曲线) 与实验测得的结果 (符号) 基本一致。

结果表明,考虑到输出信号的强度和稳定性,最佳脉冲电流 I_e 为 23 A,最佳偏置磁场 H_b 为 30 kA/m,此时的输出电压为 412 mV。为传感器的设计提供了指导。



(a) 不同脉冲电流 I_e 下传感器的输出电压曲线
(a) Output voltage curve of the sensor under different pulse currents I_e



(b) 不同偏置磁场 H_b 下传感器的输出电压曲线
(b) Output voltage curve of the sensor under different bias magnetic fields H_b

图 5 不同偏置磁场 H_b 和脉冲电流 I_e 下实测的 (点图) 和计算的 (线图) 输出电压
Fig. 5 Measured (dot plot) and calculated (line plot) output voltages with different biased magnetic fields H_b and pulsed currents I_e

3 传感器样机设计及性能测试

3.1 传感器样机设计

该传感器样机的电路解决方案框图如图 6 所示。单片机(microcontroller unit, MCU)与时间数字转换器(time-to-digital converter, TDC)进行通信,来控制推挽驱动器周期性地发出激励脉冲施加在波导丝上,每一次发出激励脉冲作为一次位移测量的起始事件。激励脉冲和永磁体共同作用在波导丝上时产生的合成磁场使磁致伸缩波导丝上产生 1 个扭转波,扭转波向着磁电复合材料方向以一定速度进行传播,在磁电复合材料捕获扭转波后输出电压信号,经过放大器放大后与参考电压 V_{ref} 进行比较输出脉冲信号来触发 TDC,作为一次位移测量的完成事件。TDC 对 2 次事件的时间差进行测量即可得到扭转波的飞行时间(time of flight, TOF)。MCU 将测量得到的 TOF 计算得出位移量,通过 0~10 V 模拟量电压信号对位移量进行输出。其中,参考电压 V_{ref} 由 MCU 启动时运行扫描算法得到;磁电复合材料参数见表 1 所示;传感器样机其余测试条件如表 4 所示。

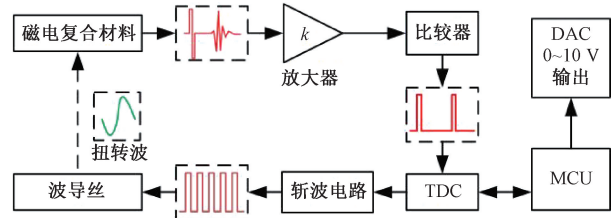


图 6 电路解决方案
Fig. 6 Block diagram of circuit solution

表 4 直线位移传感器对比测试条件

Table 4 Comparison test conditions of linear displacement sensors

元件	特性	参数/单位	材料,数值
波导丝	材料	/	Fe-Ni
	长度	L/mm	200
	直径	d/mm	0.5
激励脉冲	电流	I_e/A	23
	脉冲宽度	$T_p/\mu\text{s}$	9
	脉冲间隔	T_w/ms	1
偏置磁铁	材料	/	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
	尺寸	mm	15×15×5

选用线圈传感元件作为对比,制作直线位移传感器,选用的线圈其内径为 3 mm、外径为 6 mm、厚度为 5 mm、

匝数为 600 匝,线直径为 0.1 mm;其余测试条件保持不变,如表 4 所示。

3.2 传感器测量盲区区分

将制备好的两个传感器样机进行分别测试。将偏置磁铁沿着传感器的波导丝上移动,位移不断减小,记录在不同位移处的输出电压波形,如图 7 所示。由图可知,随着偏置磁铁位移不断减小,2 种传感器都逐渐进入测量盲区。对于线圈传感的直线位移传感器,在偏置磁铁距离感应元件 100 mm 时进入测量盲区,测量盲区时间为 35 μs 。相比于线圈传感的直线位移传感器,基于磁电复合材料传感的直线位移传感器有更小的测量盲区,在偏置磁铁距离感应元件 15 mm 时即将进入测量盲区,盲区时间为 5 μs ,盲区距离减小了 85%。结果表明,以磁电复合材料为传感元件的磁致伸缩直线位移传感器有更小的测量盲区。

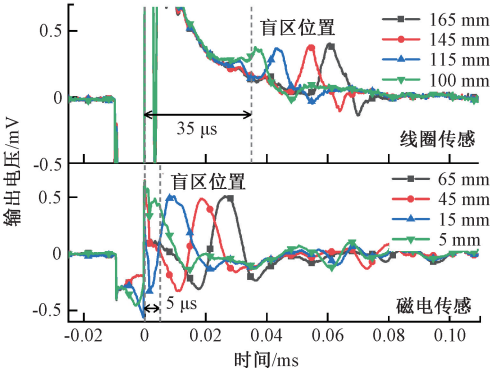


图 7 磁电复合传感与线圈传感输出电压波形对比
Fig. 7 Comparison of output voltage waveform between magnetoelectric composite sensing and coil sensing

在施加不同幅值的激励脉冲电流下,进行了实验以测量 2 种传感器的测量盲区变化,测量结果如图 8 所示。研究表明,对于以线圈为传感元件的直线位移传感器,激励脉冲电流的幅值大小对其测量盲区有显著影响,随着激励脉冲电流幅值的增大,测量盲区迅速扩大;而对于以磁电复合材料为传感元件的直线位

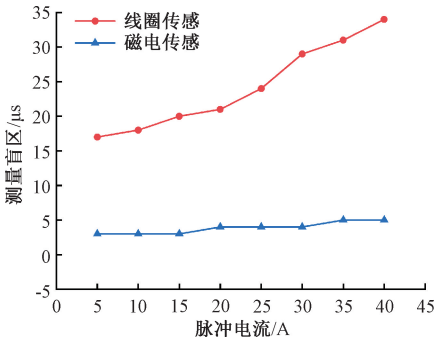


图 8 不同脉冲电流下的测量盲区
Fig. 8 Measurement blind spot with different pulse current

移传感器,激励脉冲电流的幅值大小对其测量盲区影响较小,随着激励脉冲电流的增大,测量盲区仅呈现微小增大的趋势。

3.3 传感器测量精度分析

为了评估直线位移传感器的精度,建立了直线位移传感器测距标定校准平台,如图 9 所示。在该平台上,将直线位移传感器固定在一个稳固的工作台上,在该工作台则配备了一个带有滑台的轨道。将偏置磁铁固定在滑台上,仅允许其沿传感器测量方向进行移动,并确保与波导丝之间的垂直距离保持不变,利用分辨率达到 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的光栅尺来测量偏置磁铁的位置。

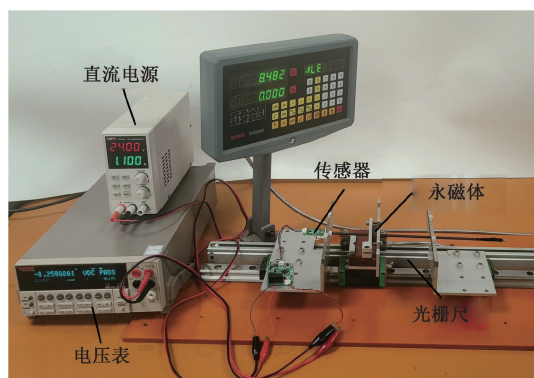


图 9 直线位移传感器测距校准平台

Fig. 9 Linear displacement sensor distance calibration platform

分别将线圈传感的直线位移传感器和磁电复合材料传感的直线位移传感器固定于测距标定校准平台,通过光栅尺对传感器在零点和满量程处标定后,在 $0\sim 200\text{ mm}$ 范围内调整偏置磁铁的位置,每次调整 10 mm ,测得两种直线位移传感器在 $0\sim 200\text{ mm}$ 上的非线性误差曲线,如图 10 所示。实验结果表明,磁电复合材料传感的直线位移传感器可以将精度提高到 $\pm 0.02\text{ mm}$,相比精度为 $\pm 0.03\text{ mm}$ 的线圈传感直线位移传感器,精度提高了 33%。

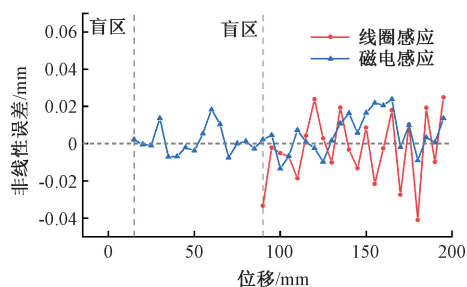


图 10 直线位移传感器在 $0\sim 200\text{ mm}$ 上的非线性误差曲线

Fig. 10 Measurement error curve of linear displacement sensor at $0\sim 200\text{ mm}$

4 结 论

本文中提出了一种磁电耦合传感构型的磁致伸缩直线位移传感器。制备了 $\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}/\text{PZT-5}/\text{Co}_{70}\text{Fe}_{30}$ 磁电复合材料并对其输出特性进行了表征。基于玻尔兹曼统计量、磁电效应和逆磁致伸缩效应,建立了磁电耦合传感构型磁致伸缩直线位移传感器的信号强度模型。搭建了脉冲电流 I_e 、轴向偏置磁场 H_b 可调实验装置。通过模型计算和实验测量,得到了传感器的最佳的激励脉冲电流和偏置磁场输入参数。

制备了量程为 200 mm 的磁电耦合传感构型直线位移传感器。通过与传统线圈传感的磁致伸缩传感器输出电压波形对比,说明了磁电耦合传感构型的磁致伸缩位移传感器有更小的盲区范围和更高的测量精度,且盲区大小几乎不受激励脉冲电流大小的影响。这种新型传感构型的磁致伸缩直线位移传感器可用到安装空间受限、测量精度要求高的位移测量场景。

参考文献

- [1] 郑文轩,唐志峰,杨昌群,等. 基于 Preisach 模型的磁致伸缩位移传感器迟滞补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(5): 79-89.
ZHENG W X, TANG ZH F, YANG CH Q, et al. A hysteresis compensation method of magnetostrictive displacement sensor based on the Preisach model[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(5): 79-89.
- [2] 刘亚南,李明明,李海毅,等. 大量程柔性磁致伸缩位移传感器的输出特性[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(9): 100-103.
LIU Y N, LI M M, LI H Y, et al. Output characteristics of wide-range and flexible magnetostrictive displacement sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(9): 100-103.
- [3] 肖墨,吴钦木. 考虑趋肤效应的磁致伸缩位移传感器的输出特性[J/OL]. 电子科技, 1-6[2024-09-27].
XIAO M, WU Q M. Output characteristics of magnetostrictive displacement sensor considering skin effect[J/OL]. Electronic Science and Technology, 1-6 [2024-09-27].
- [4] 孙英,张耀松,陈铮,等. 磁致伸缩位移传感器反射波电压特性与阻尼参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 412-419.
SUN Y, ZHANG Y S, CHEN ZH, et al. Voltage characteristics of reflected wave of magnetostrictive displacement sensor and damping parameter selection[J]. Transactions of the Chinese Society for

- Agricultural Machinery, 2021, 52(5):412-419.
- [5] HRISTOFOROU E, NIARCHOS D, CHIRIAC H, et al. A coily magnetostrictive delay line arrangement for sensing applications [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2001, 91(1/2):91-94.
- [6] ZHANG Y J, LIU W W, ZHANG H B, et al. Design and analysis of a differential waveguide structure to improve magnetostrictive linear position sensors [J]. Sensors, 2011, 11(5):5508-5519.
- [7] 孙英,武泽航,张耀松,等. 永磁体对磁致伸缩位移传感器波导丝扭转应变的影响分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):10-23.
- SUN Y, WU Z H, ZHANG Y S, et al. Analysis of the influence of permanent magnet on the torsional strain of waveguide wire of the magnetostrictive displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4):10-23.
- [8] WANG Q, LI M M, NIU X D, et al. Model and design of high-temperature ultrasonic sensors for detecting position and temperature based on iron-based magnetostrictive wires[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23):26868-26877.
- [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] ZHOU X ZH, YU CH, TANG ZH Y. Wiedemann effect in $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ alloys for magnetostrictive sensors[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 14(1):249-257.
- [11] 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 fields and its experimental study [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12):21-26.
- [12] 孙英,任雷浩,陈铮,等. 磁致伸缩位移传感器双磁环间测量盲区的影响分析[J]. 传感技术学报, 2020, 33(2):194-199.
- SUN Y, REN L H, CHEN ZH, et al. Analysis of the influence of the measurement blind area between two magnetic rings of magnetostrictive displacement sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Act, 2020, 33(2):194-199.
- [13] 孙英,郭腾蛟,李笑. 深度与形貌检测的仿生磁致伸缩触觉传感器设计及实验测试[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2):214-223.
- SUN Y, GUO T J, LI X. Design and experimental test of the bionic magnetostrictive tactile sensor for depth and shape detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2):214-223.
- [14] 李媛媛,王博文,黄文美,等. 扭转力作用下 Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器的输出特性[J]. 电工技术学报, 2019, 34(21):4409-4418.
- LI Y Y, WANG B W, HUANG W M, et al. Output characteristics of Fe-Ga magnetostrictive displacement sensor under torsional stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(21):4409-4418.
- [15] 李媛媛,王博文,黄文美. 考虑应力波衰减特性的磁致伸缩位移传感器的输出特性与实验[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(7):34-41.
- LI Y Y, WANG B W, HUANG W M. Output characteristics and experiments of magnetostrictive displacement sensor considering the attenuation characteristic of stress wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(7):34-41.
- [16] 陈铮. Fe-Ga 材料磁致伸缩位移传感器输出特性影响因素研究[D]. 河北工业大学, 2020.
- CHEN ZH. Investigation of the influence factor of output characteristics of Fe-Ga magnetostrictive displacement sensor[D]. Hebei University of Technology, 2020.
- [17] 边铁鋐,李明明,王鑫玉,等. 磁致伸缩位移传感器测量盲区失效机理与磁屏蔽优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17):5300-5310.
- BIAN T Z, LI M M, WANG X Y, et al. Failure mechanism of measurement blindness in magnetostrictive displacement sensors and optimization of magnetic shielding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17):5300-5310.
- [18] SECO F, MARTIN J M, JIMENEZ A R, et al. Improving the accuracy of magnetostrictive linear position sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(3):722-729.
- [19] 孙斌,倪爽,朱青,等. 低耦合电磁式电导率测量系统的传感器优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(2):131-138.
- SUN B, NI SH, ZHU Q, et al. Sensor optimization design of low coupling electromagnetic conductivity measurement system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(2):131-138.
- [20] 李跃,肖小兵,蔡永翔,等. FeGa/PZT 圆柱体磁电复合材料在 $8/20\ \mu\text{s}$ 雷电激励下磁电响应仿真分析[J]. 功

- 能材料, 2022, 53(10):10111-10115.
- LI Y, XIAO X B, CAI Y X, et al. Simulation analysis of magnetoelectric response of FeGa/PZT cylindrical magnetoelectric composite under 8/20 μ s lightning current [J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(10): 10111-10115.
- [21] 肖小兵, 李跃, 蔡永翔, 等. 瞬态电流激励下复合材料 Terfenol-D/PZT/Terfenol-D 磁电响应研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2022(5): 240-244.
- XIAO X B, LI Y, CAI Y X, et al. Magnetoelectric response of composite Terfenol-D/PZT/ Terfenol-D under transient current excitation [J]. Automation & Instrumentation, 2022 (5): 240-244.
- [22] ZHENG X J, LIU X E. A nonlinear constitutive model for Terfenol-D rods [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 053901.
- [23] LEE E W. Magnetostriction and magnetomechanical effects [J]. Reports on Progress in Physics, 1955, 18(1): 184-229.
- [24] 楼国锋, 于歆杰, 卢诗华. 引入界面耦合系数的长片型磁电层状复合材料的等效电路模型[J]. 物理学报, 2018, 67(2): 253-264.
- LOU G F, YU X J, LU SH H. Equivalent circuit model for plate-type magnetoelectric laminate composite considering an interface coupling factor[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(2): 253-264.
- [25] 谢新良, 王博文, 周露露, 等. 磁致伸缩位移传感器波导丝扭转超声波衰减特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 689-696.
- XIE X L, WANG B W, ZHOU L L, et al. Research on torsional ultrasonic ttenuation characteristics of the magnetostrictive displacement sensor waveguide [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 689-696.
- [26] 李海毅, 李明明, 刘亚南, 等. 宽温域磁致伸缩位移传感器输出电压模型及特性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5343-5353.
- LI H Y, LI M M, LIU Y N, et al. Output voltage model and characteristic analysis of magnetostrictive displacement sensor for wide operating temperature [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5343-5353.
- [27] 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): 087501.
- [28] WANG B W, LI Y Y, XIE X L, et al. The output voltage model and experiment of magnetostrictive displacement sensor basedon Weidemann effect[J]. Aip Advances, 2018, 8(5): 056611.

作者简介



高亮, 2018 年于重庆科技大学获得学士学位, 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及智能器件。

E-mail: 2514536533@qq.com

Gao Liang received his B.Sc. degree in 2018 from Chongqing University of Science & Technology. Now he is a M.Sc. graduate student in Hebei University of Technology. His main research interests include novel magnetic materials and intelligent devices.



李明明 (通信作者), 2005 年于山东大学获得学士学位, 2013 年于北京科技大学获得硕士学位, 2018 年于北京科技大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 主要研究方向为新型磁性材料及智能器件。

E-mail: limm@hebut.edu.cn

Li Mingming (Corresponding author) received his B.Sc. degree in 2005 from Shandong University, received his M.Sc. degree in 2013 from University of Science and Technology Beijing, and received his Ph.D. degree in 2018 from University of Science and Technology Beijing. Now he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interests include novel magnetic materials and intelligent devices.