DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107436

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*

孙 英[1,2],武泽航[1,2],张耀松[1,2],翁 玲[1,2]

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

摘 要:为提高磁致伸缩位移传感器输出电压幅值,对波导丝的扭转应变进行研究。基于电磁学与理论力学相关理论建立了波导丝扭转应变的数学模型及三维有限元仿真模型,对波导丝扭转应变的影响因素进行分析。并进行实验,得出相对应的传感器输出电压变化情况。结果表明,传感器输出电压与波导丝发生的扭转应变量最大值变化趋势一致,两者均随着永磁体充磁、几何参数、放置角度的增大而增大;随着永磁体与波导丝间距离的增大,呈现出先增大后减小的变化趋势。最终确定永磁体长度 15 mm,宽度 10 mm,高度 5 mm,长度方向充磁 1T 且充磁方向垂直于波导丝放置,且永磁体与波导丝间距离调整为 25.5 mm,此时波导丝扭转应变量达到最大 3.84×10^{-4} mm,传感器输出电压也达到最大 0.109 V。该研究结果对永磁体充磁方向、充磁大小、几何参数、放置方式以及永磁体与波导丝之间距离合理的选择提供了指导。

关键词: 波导丝;有限元;永磁体;扭转应变;输出电压

中图分类号: TP212 TH711 **文献标识码**: A **国家标准学科分类代码**: 470.40

Analysis of the influence of permanent magnet on the torsional strain of waveguide wire of the magnetostrictive displacement sensor

Sun Ying[1,2], Wu Zehang[1,2], Zhang Yaosong[1,2], Weng Ling[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: To enhance the output voltage amplitude of the magnetostrictive displacement sensor, the torsional strain of the waveguide wire is studied. Based on the related theories of electromagnetics and theoretical mechanics, a mathematical model of the torsional strain of the waveguide wire and a three-dimensional finite element simulation model are formulated. The factors that affect the torsional strain of the waveguide wire are analyzed. The corresponding output voltage of the sensor is obtained by experiments. Results show that the output voltage of the sensor is consistent with the change trend of the maximum torsional strain of the waveguide wire. The output voltage of the sensor and the maximum value of the torsional strain of the waveguide wire increase with the increasing of permanent magnet magnetization, permanent magnet geometric parameters, and permanent magnet placement angle. As the distance between the permanent magnet and the waveguide wire increases, it shows a trend of first increasing and then decreasing. Finally, it is determined that the permanent magnet has a length of 15 mm, a width of 10 mm, and a height of 5 mm. The length direction is magnetized 1T and the magnetization direction is perpendicular to the waveguide wire. The distance between the permanent magnet and the waveguide wire is adjusted to 25.5 mm. And the torsional strain of the waveguide wire reaches a maximum of 3.84×10^{-4} mm, and the output voltage of the sensor also reaches a maximum of 0.109 V. Research results provide guidance for reasonable selection of magnetization direction, magnetization size, geometric parameters, placement manner and distance between permanent magnet and waveguide wire.

Keywords: waveguide wire; finite element; permanent magnet; torsional strain; output voltage

收稿日期:2021-01-26 Received Date: 2021-01-26

*基金项目:国家自然科学基金(52077052)、河北省自然科学基金重点项目(E2017202035)资助

0 引　　言

磁致伸缩材料在触觉传感器、力传感器与位移传感器等方面有广泛的应用[1-4],其中磁致伸缩位移传感器具有测量精度高、测量范围大、抗干扰能力强、可靠性高等优点,在精密位移控制与自动化生产等领域有广泛应用[5-6],得到越来越多的科研人员关注。研究人员在输出电压模型构建[7-9]、应力波衰减特性[10-12]、结构设计与优化[13-16]等方面做了很多的研究工作。在某些需要进行位移测量的工作场合中,如伺服气缸活塞位置预置和反馈、铸造锻压机床位置预置和反馈等,传统的使用永磁环提供偏置磁场的磁致伸缩位移传感器无法实现测量需求,因此需要采用滑块式磁致伸缩位移传感器来进行位移测量,由于滑块式磁致伸缩位移传感器中采用矩形永磁体提供偏置磁场,而矩形永磁体不同的充磁情况、几何参数、放置方式及其与波导丝之间的距离会影响到波导丝扭转应变的状态,进而影响到传感器输出电压。

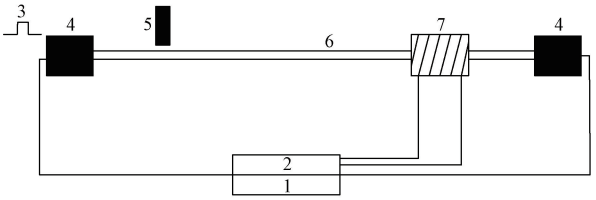
在传感器工作时波导丝的具体状态方面,文献[17]对磁致伸缩位移传感器的磁场进行了研究,分析了传感器的磁场分布。文献[18]从磁致伸缩线质点所受荷载的角度并结合弹性动力学的理论,阐明了磁致伸缩位移传感器中弹性波的产生机理并分析了扭转波的特点。文献[19]运用电磁学和铁磁学相关理论构建了磁致伸缩位移传感器的磁极化强度模型,分析了传感器中扭转式弹性波的产生机理,对激励磁场进行了仿真模拟,通过理论模型对仿真结果的进一步计算得到波导丝所受应力的二维分布特性。以上研究主要针对于扭转波产生的理论分析,但是对于波导丝扭转应变的影响因素鲜有报道,特别是永磁体对波导丝扭转应变的影响,因而有必要开展磁致伸缩位移传感器永磁体对波导丝扭转应变影响的研究工作。

本文首先基于电磁学与理论力学相关理论建立了磁致伸缩位移传感器波导丝发生扭转应变的数学模型,利用 COMSOL Multiphysics 5.5 仿真软件建立了波导丝受到激励脉冲电流与永磁体作用的三维有限元仿真模型,使得波导丝发生的扭转应变清晰直观化,通过建立的模型预测永磁体对波导丝发生扭转应变的影响,可以对永磁体充磁方向、充磁大小、几何参数、放置方式以及永磁体与波导丝之间的距离进行合理的选择,从而使传感器输出电压幅值较大,以便于信号的检测。

1 磁致伸缩位移传感器波导丝应变理论分析

1.1 磁致伸缩位移传感器偏置磁场分析

磁致伸缩位移传感器结构示意图如图 1 所示。其结构主要包括驱动电路、波导丝、永磁体、阻尼装置、检测线圈等。



1. 脉冲驱动电路; 2. 信号处理电路; 3. 脉冲激励电流; 4. 阻尼装置; 5. 永磁体; 6. 波导丝; 7. 检测线圈

图 1　磁致伸缩位移传感器结构

Fig. 1　The structure of the magnetostrictive displacement sensor

由于传感器中波导丝的长度远远大于其直径,具有几何各向异性[20],波导丝轴向上的磁感应强度远远大于其它方向上的磁感应强度。关于永磁体提供的偏置磁场对波导丝的影响,可以只考虑其在波导丝中心轴线上磁场分布的影响。

以永磁体一个顶角为原点建立如图 2 所示坐标系,永磁体沿 z 方向磁化。

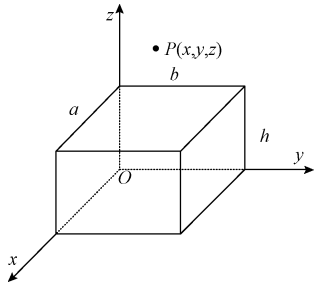


图 2　永磁体结构

Fig. 2　Permanent magnet structure

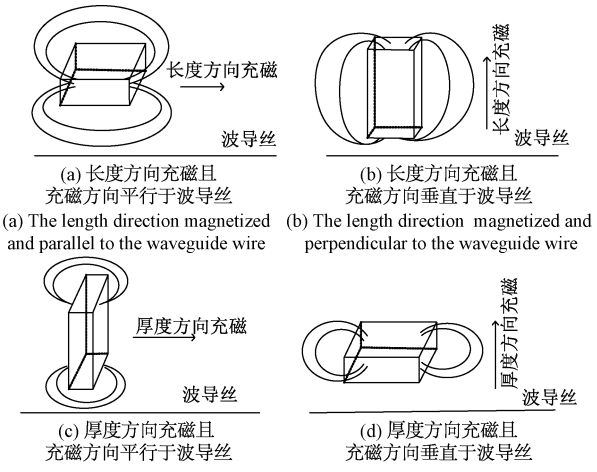
其空间任意一点 $P(x,y,z)$ 的 z 方向与 y 方向的磁场强度可以表示为[21]:

$$\begin{cases} H_z = \dfrac{J_s}{4\pi}[-\Psi(b-y,a-x,z)-\Psi(y,a-x,z)- \\ \qquad \Psi(a-x,b-y,z)-\Psi(x,b-y,z)- \\ \qquad \Psi(b-y,x,z)-\Psi(y,x,z)- \\ \qquad \Psi(a-x,y,z)-\Psi(x,y,z)] \\ H_y = \dfrac{J_s}{8\pi}[-\Gamma(b-y,a-x,z)-\Gamma(b-y,x,z)+ \\ \qquad \Gamma(y,a-x,z)+\Gamma(y,x,z)] \end{cases} \tag{1}$$

其中,J_s 为永磁体的等效面电流密度;辅助函数 Ψ 与 Γ 的表达式为:

$$\begin{cases} \Psi(\psi_1,\psi_2,\psi_3) = \\ \qquad \operatorname{arctg}\left[\dfrac{\psi_1(\psi_3-z_0)}{\psi_2\sqrt{\psi_1^2+\psi_2^2+(\psi_3-z_0)^2}}\right]\Bigg|_{z_0=0}^{z_0=h} \\ \Gamma(\gamma 1,\gamma 2,\gamma 3) = \\ \qquad \ln\dfrac{\sqrt{\gamma_1^2+\gamma_2^2+(\gamma_3-z_0)^2}-\gamma_2}{\sqrt{\gamma_1^2+\gamma_2^2+(\gamma_3-z_0)^2}+\gamma_2}\Bigg|_{z_0=0}^{z_0=h} \end{cases} \tag{2}$$

采用的永磁体规格为长 15 mm、宽 10 mm、高 5 mm。由于永磁体可以沿长度方向与厚度方向充磁,且充磁方向可以平行于或垂直于波导丝放置,永磁体有 4 种放置情况如图 3 所示。



(a) 长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝
(a) The length direction magnetized and parallel to the waveguide wire
(b) 长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝
(b) The length direction magnetized and perpendicular to the waveguide wire
(c) 厚度方向充磁且充磁方向平行于波导丝
(c) The thickness direction magnetized and parallel to the waveguide wire
(d) 厚度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝
(d) The thickness direction magnetized and perpendicular to the waveguide wire

图 3 永磁体 4 种放置情况

Fig. 3 Four placement situations of the permanent magnet

当永磁体沿长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝,厚度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置时,两者间距离记为 D_1,根据图 2 所建立的坐标系永磁体提供的偏置磁场 $H(z,D_1)$ 与 $H(y,D_1)$ 可以分别表示为:

$$H(z,D_1)=-\frac{J_s}{2\pi}[\Psi(5-D_1,5,z)+\Psi(D_1,5,z)+\Psi(5,5-D_1,z)+\Psi(5,D_1,z)] \tag{3}$$

$$H(y,D_1)=\frac{J_s}{4\pi}[\Gamma(y,5,D_1)-\Gamma(15-y,5,D_1)] \tag{4}$$

当永磁体沿厚度方向充磁且充磁方向平行于波导丝,长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝时,两者间距离记为 D_2,根据图 2 所建立的坐标系永磁体提供的偏置磁场 $H(z,D_2)$ 与 $H(y,D_2)$ 可以分别表示为:

$$H(z,D_2)=\frac{J_s}{2\pi}[\Psi(15-D_2,5,z)+\Psi(D_2,5,z)+\Psi(5,15-D_2,z)+\Psi(5,D_2,z)] \tag{5}$$

$$H(y,D_2)=\frac{J_s}{4\pi}[\Gamma(y,2.5,D_2)-\Gamma(10-y,2.5,D_2)] \tag{6}$$

1.2 波导丝应变模型

波导丝中由脉冲电流产生的激励磁场强度 $H_i(r)$ 可以表示为:

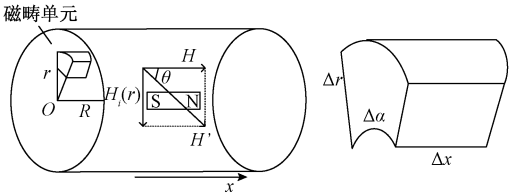
$$H_i(r)=Ir/(2\pi R^2) \tag{7}$$

其中,I 为脉冲电流;r 为波导丝横截面上任意一点与圆心之间的距离;R 为波导丝横截面半径。

根据磁致伸缩位移传感器中磁场之间的关系[7],永磁体提供的偏置磁场 H 与周向激励磁场 $H_i(r)$ 两者合成的螺旋磁场 H' 为:

$$H'=\sqrt{H^2+H_i^2(r)} \tag{8}$$

文献[18]根据所建立的磁畴模型推导出在合成外磁场作用下波导丝受到的扭矩表达式。在此基础上,考虑永磁体充磁情况、放置方式及其与波导丝间距离的影响对波导丝发生的扭转应变进行推导。假设波导丝长度为 L,在波导丝中距轴心 r 处取磁畴单元如图 4 所示进行分析。若将磁畴等效为带电量为 q 的磁荷,单独利用永磁体提供偏置磁场时,波导丝内磁畴将沿轴向偏置磁场方向发生偏转,假设磁畴发生偏转后,在波导丝线体内平行于轴向分布。波导丝受到脉冲电流作用后周向激励磁场 $H_i(r)$ 与偏置磁场 H 合成为螺旋磁场 H',磁畴沿合成的螺旋磁场 H' 方向发生偏转,导致波导丝发生扭转应变。当偏置磁场 H 变化时,合成的螺旋磁场 H' 与轴向之间的夹角 θ 发生变化,导致合成的螺旋磁场对波导丝内磁畴单元的作用效果发生变化,各个磁畴单元的偏转程度发生变化后导致波导丝的扭转应变量发生变化。



(a) 合成磁场对磁畴单元的作用
(a) The effect of synthetic magnetic field on magnetic domain unit
(b) 磁畴单元
(b) Magnetic domain unit

图 4 磁畴单元分析图

Fig. 4 Diagram of magnetic domain unit analysis

其中,θ 为合成磁场 H' 与轴向之间的夹角,也为磁畴单元所受应力 f 与轴向之间的夹角,其表达式为:

$$\theta=\arctan\frac{H_i(r)}{H} \tag{9}$$

依据库仑定律[22],磁畴单元在合成螺旋磁场 H' 方向的受力 f 可以表示为:

$$f=H'q\cos\theta \tag{10}$$

磁畴单元受到的切应力分量 f_τ 可以表示为:

$$f_\tau=\frac{1}{2}H'q\sin2\theta \tag{11}$$

磁畴单元受到的扭矩 T_1 可以表示为:

$$T_1=f_\tau\cdot r=\frac{1}{2}H'qr\sin2\theta \tag{12}$$

磁畴单元的体积 V_1 可以表示为:

$$V_1=\pi[(r+\Delta r)^2-r^2]\frac{\Delta\alpha}{2\pi}\Delta x \tag{13}$$

磁畴单元的带电量 q 为:

$$q = \frac{\varphi_m}{\pi r^2 L} V_1 \tag{14}$$

其中,φ_m 为磁畴磁通量的轴向分量,r 为磁畴单元与波导丝轴心的距离,L 为波导丝的长度。

将式(13)代入式(14),且将高阶项 Δr^2 忽略,则磁畴单元的带电量 q 可以表示为:

$$q = \frac{\varphi_m \Delta r \Delta\alpha \Delta x}{\pi r L} \tag{15}$$

将式(15)代入式(12),当 $\Delta r, \Delta\alpha, \Delta x$ 趋向于零时,则磁畴单元受到的扭矩 T_1 可以表示为:

$$T_1 = \frac{\varphi_m}{2\pi L} H' \sin(2\theta) \Delta r \Delta\alpha \Delta x \tag{16}$$

根据合力矩定理[23],将所有磁畴单元受到的扭矩进行叠加,则长度为 L 的波导丝所受到的扭矩 T_L 可以由下式表示为:

$$T_L = \iiint_V \frac{\varphi_m}{2\pi L} H' \sin(2\theta)\, \mathrm{d}v = \frac{\varphi_m}{2\pi L} \int_0^{2\pi} \mathrm{d}\alpha \int_0^L \mathrm{d}l \int_0^R H' \sin(2\theta)\, \mathrm{d}r = \varphi_m \int_0^R H' \sin(2\theta)\, \mathrm{d}r \tag{17}$$

波导丝受到的扭矩 T_L 以及内部任意一点所受应力 F 如图 5 所示。

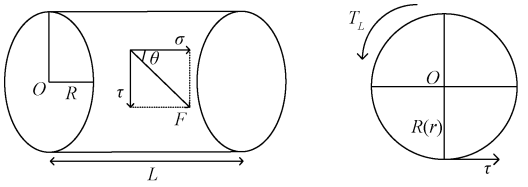


图 5　波导丝所受应力分解与截面切应力

Fig. 5　Stress decomposition and section shear stress of waveguide wire

由图 5 可知,波导丝内任意一点所受应力 F 可以分解为轴向应力 σ 和该点所在截面的切应力 τ,θ 为应力 F 与轴向之间的夹角,$R(r)$ 为波导丝截取横截面上任意一点到圆心之间的距离。

波导丝受到的扭矩 T_L 可以表示为:

$$T_L = R(r)\tau \tag{18}$$

根据剪切胡克定律可知,波导丝截面上任意一点到圆心的距离 $R(r)$ 处的切应力 τ 与切应变 γ 之间的关系可以表示为:

$$\tau = G\gamma \tag{19}$$

其中 G 为波导丝的剪切模量。

联立式(8)、(17)、(18)、(19),永磁体与脉冲电流共同作用时波导丝发生的扭转应变可以表示为:

$$\gamma = \frac{\varphi_m}{GR(r)} \int_0^R \sqrt{H^2 + H_i^2(r)} \sin(2\theta)\, \mathrm{d}r \tag{20}$$

得到当永磁体长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置,厚度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置时,波导丝发生的扭转应变 $\gamma(z, D_1, r)$ 与 $\gamma(y, D_1, r)$ 可以分别表示为:

$$\gamma(z, D_1, r) = \frac{\varphi_m}{GR(r)} \int_0^R \sqrt{H^2(z, D_1) + H_i^2(r)} \sin[2\theta(z, D_1, r)]\, \mathrm{d}r \tag{21}$$

$$\gamma(y, D_1, r) = \frac{\varphi_m}{GR(r)} \int_0^R \sqrt{H^2(y, D_1) + H_i^2(r)} \sin[2\theta(y, D_1, r)]\, \mathrm{d}r \tag{22}$$

当永磁体厚度方向充磁且充磁方向平行于波导丝放置,长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝放置时,波导丝发生的扭转应变 $\gamma(z, D_2, r)$ 与 $\gamma(y, D_2, r)$ 可以分别表示为:

$$\gamma(z, D_2, r) = \frac{\varphi_m}{GR(r)} \int_0^R \sqrt{H^2(z, D_2) + H_i^2(r)} \sin[2\theta(z, D_2, r)]\, \mathrm{d}r \tag{23}$$

$$\gamma(y, D_2, r) = \frac{\varphi_m}{GR(r)} \int_0^R \sqrt{H^2(y, D_2) + H_i^2(r)} \sin[2\theta(y, D_2, r)]\, \mathrm{d}r \tag{24}$$

通过以上推导的永磁体不同充磁方向与不同放置方式下波导丝应变表达式(21)、(22)与(23)、(24)可知,波导丝发生的扭转应变与磁畴磁通量的轴向分量 φ_m、偏置磁场 H、激励磁场 $H_i(r)$、波导丝剪切模量 G、波导丝半径 R 有关,当波导丝材料与几何参数以及激励磁场确定后,扭转应变 γ 与偏置磁场 H 有关。而偏置磁场 H 与永磁体充磁情况、几何尺寸、放置方式以及永磁体与波导丝间的距离有关,所以波导丝的扭转应变主要与永磁体有关。

2　有限元仿真

在仿真软件中采用磁致伸缩的预定义多物理场耦合接口来实现磁问题与结构问题的耦合。永磁体长度为 15 mm,宽度为 10 mm,高度为 5 mm;波导丝线径为 0.5 mm,长度为 550 mm;永磁体采用钕铁硼(NdFeB)材料,材料的各个参数如下所述[20]。

表 1　钕铁硼材料永磁体相关参数

Table 1　Parameters of rubidium iron boron materials

参数	数值
相对磁导率 μ_r	1.03
相对介电常数	1
最大磁能积 $(BH)_{max}$/(kJ·m^{-3})	280
电导率 S/m	7×10^5

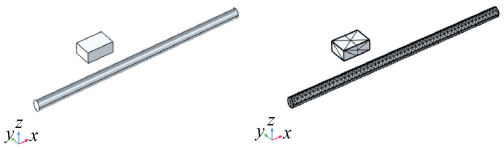
给波导丝施加高电平 4.2 V,低电平 0 V,脉冲宽度 7 μs,频率为 1 kHz 的脉冲信号,研究类型设置为稳态。波导丝采用铁镓(Fe-Ga)材料,材料的各个参数赋值如下所述[24]。

表 2 铁镓材料波导丝相关参数

Table 2 Parameters of ferrogallium waveguide wire

参数	数值
杨氏弹性模量 E/MPa	57
泊松比 ν	0.2
相对磁导率	85
密度 ρ/(g·cm^{-3})	7.6
单位长度角应变引起的磁场变化率 λ/(A·cm^{-1})	0.926 8
电导率/(S·m^{-1})	1.176×10^6
相对介电常数	1

所构建的几何模型与网格剖分结果如图 6 所示,模型构建且网格剖分完毕后进行计算。



(a) 几何模型 (b) 网格剖分结果

(a) Geometric model (b) Meshing results

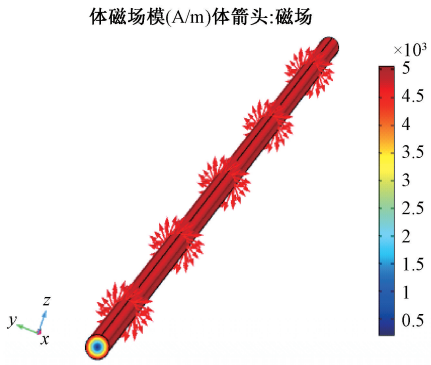
图 6 几何模型与网格剖分结果

Fig. 6 Geometric model and mesh generation results

2.1 永磁体充磁情况对波导丝扭转应变的影响

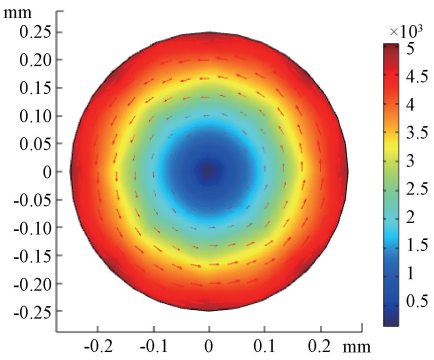
由脉冲电流产生的激励磁场分布如图 7 所示。

由图 7(a)可知,波导丝表面磁场分布大小一致,沿波导丝轴向均匀分布。由于电流的趋肤效应,电流密度主要集中在导体表面,故由图 7(b)可知,磁场强度主要分布在波导丝表面附近,约为 5 000 A/m。



(a) 波导丝磁场分布

(a) Magnetic field distribution of waveguide wire



(b) 截面上磁场分布

(b) Magnetic field distribution on cross section

图 7 周向激励磁场分布

Fig. 7 Circumferential excitation magnetic field distribution

保持周向激励磁场不变,在如图 3(a)中所示的永磁体长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝放置的情况下,保持两者之间的距离为 34 mm 不变,改变永磁体充磁大小分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 T,得到波导丝在螺旋磁场作用下的扭转应变分布如图 8 所示(采用的应变单位为 mm)。

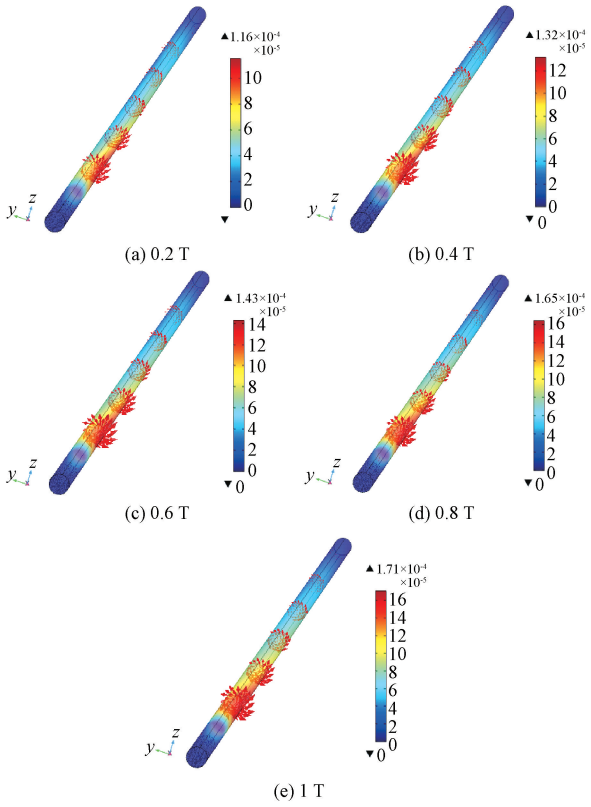


图 8 螺旋磁场作用下波导丝应变分布

Fig. 8 Strain distribution of waveguide wire under the action of spiral magnetic field

由图 8 可知,波导丝应变均呈螺旋扭转状态分布。随着永磁体充磁的增大,波导丝最大扭转应变量逐渐增大,当永磁体充磁达到 1T 时,波导丝最大应变量为 1.71×10^{-4} mm。

为研究如图 3 所示的永磁体 4 种放置情况下,永磁体充磁大小对波导丝扭转应变的影响,保持永磁体与波导丝间距离 D_1 与 D_2 均为 34 mm 不变。利用仿真模型改变永磁体充磁大小分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 T。计算得到偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况分别如图 9 与图 10 所示。

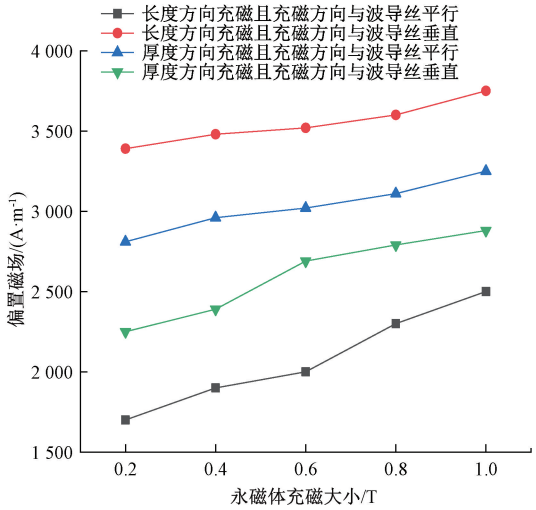


图 9　偏置磁场变化情况

Fig. 9　The variation of bias magnetic field

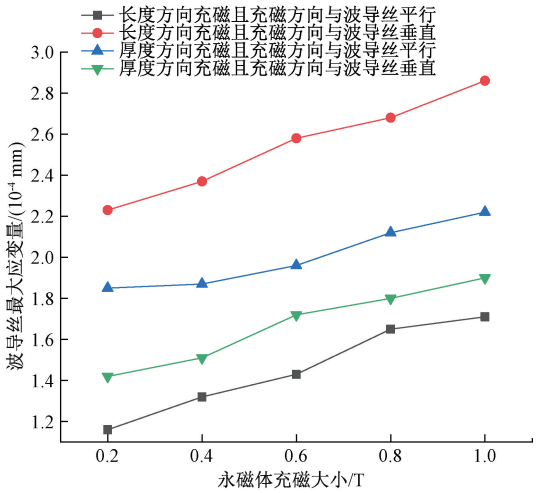


图 10　波导丝最大应变量变化情况

Fig. 10　Maximum strain change of waveguide wire

由图 9 与 10 可知,在永磁体 4 种放置情况下,偏置磁场与波导丝上最大应变量均随着永磁体充磁的增大而增大,当偏置磁场达到最大时波导丝扭转应变量也达到最大。结合波导丝应变表达式(21)、(22)与(23)、(24)分析可知,随着偏置磁场的增大,波导丝扭转应变量会逐渐增大。对比分析磁体的 4 种放置情况,当永磁体充磁大小为 1 T 时,波导丝扭转应变量均达到最大;当永磁体充磁大小相同时,永磁体沿长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直放置的情况下,波导丝发生的应变量较大,在这种情况下当永磁体充磁 1 T 时,波导丝扭转应变量达到最大为 2.86×10^{-4} mm。

2.2　永磁体几何参数对波导丝扭转应变的影响

由表达式(1)可知,永磁体几何参数会直接影响其提供的偏置磁场,根据表达式(21)、(22)、(23)、(24)可知,进而会影响波导丝的扭转应变。为研究永磁体几何参数对波导丝扭转应变的影响,在如图 3 所示 4 种放置情况下,保持永磁体充磁大小 1 T 不变,永磁体与波导丝间距离 34 mm 不变,研究永磁体几何参数对波导丝扭转应变的影响。1)保持永磁体长度为 15 mm,宽度 10 mm 不变,研究永磁体高度变化,分别为 2、3、4、5 mm,得到偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况如图 11、12 所示。2)保持永磁体宽度为 10 mm,高度为 5 mm 不变,研究永磁体长度变化,分别为 11、12、13、14、15 mm,得到偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况如图 13、14 所示。3)保持永磁体长度为 15 mm,高度为 5 mm 不变,研究永磁体宽度变化,分别为 6、7、8、9、10 mm,得到偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况如图 15、16 所示。

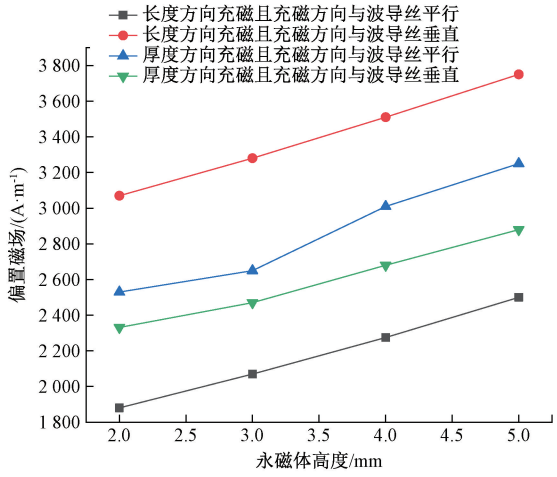


图 11　偏置磁场变化情况

Fig. 11　The variation of bias magnetic field

由图 12、14、16 可以看出,在永磁体 4 种放置情况下,波导丝最大扭转应变量均随着永磁体的高度、长度与宽度的增大而逐渐增大,由图 11、13、15 可以看出,永磁体提供的偏置磁场随着其几何参数的增大而增大,结合波导丝应变表达式(21)、(22)、(23)、(24)可以得知,

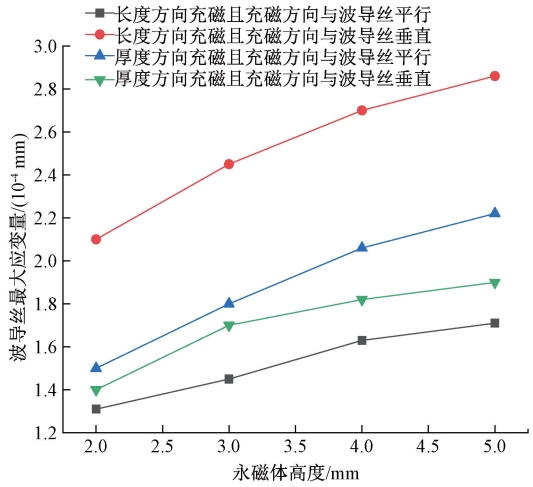


图 12 波导丝最大应变量变化情况

Fig. 12 Maximum strain change of waveguide wire

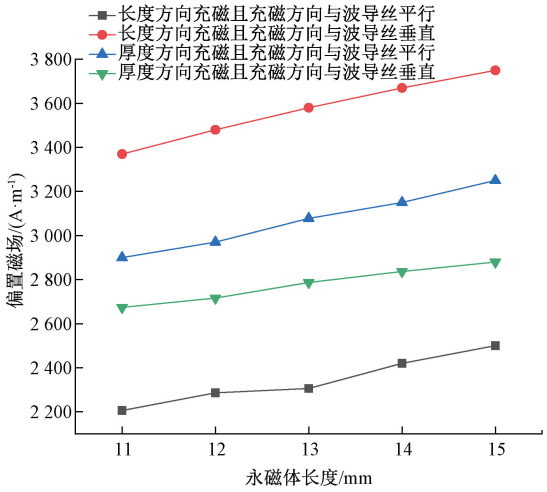


图 13 偏置磁场变化情况

Fig. 13 The variation of bias magnetic field

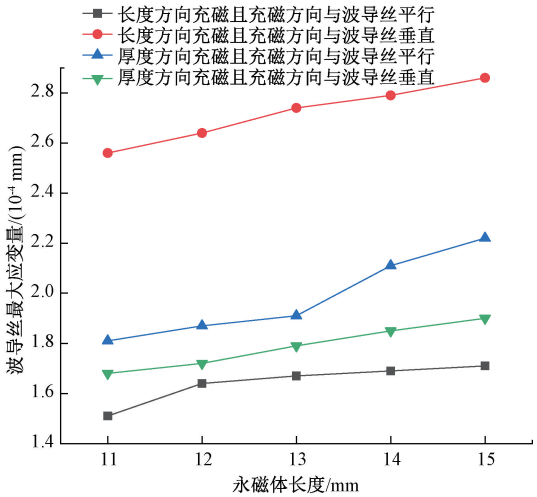


图 14 波导丝最大应变量变化情况

Fig. 14 Maximum strain change of waveguide wire

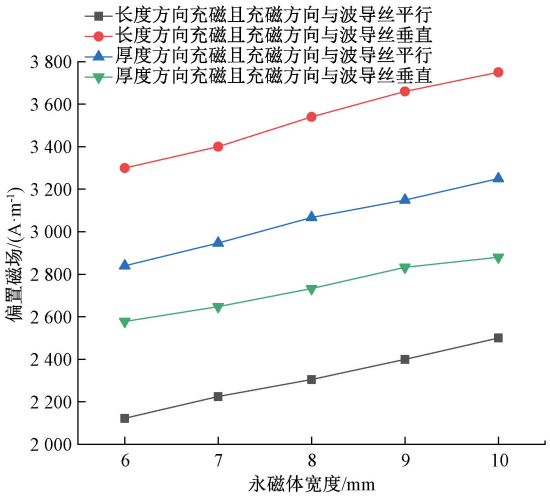


图 15 偏置磁场变化情况

Fig. 15 The variation of bias magnetic field

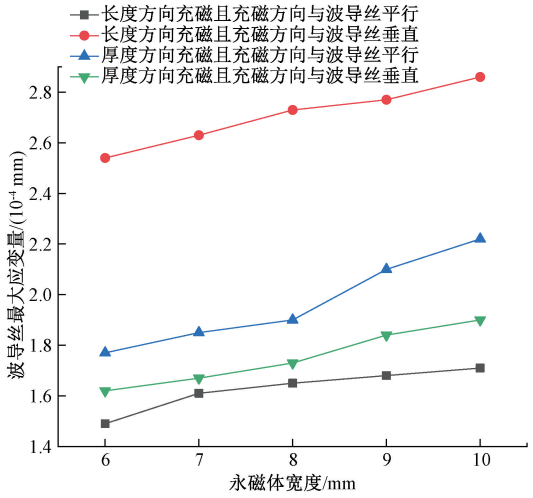


图 16 波导丝最大应变量变化情况

Fig. 16 Maximum strain change of waveguide wire

合成的螺旋磁场对波导丝内磁畴单元的作用逐渐增大，导致波导丝应变量逐渐增大。

对比分析可知，永磁体 4 种放置情况下，在所选参数范围内，当永磁体长度为 15 mm，宽度为 10 mm，高度为 5 mm 时，波导丝应变量均达到最大。随着永磁体几何参数的增大，永磁体长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置的情况下，波导丝扭转应变量较大；相比于永磁体的长度与宽度，永磁体高度变化对波导丝扭转应变的影响更大。

2.3 永磁体放置角度对波导丝扭转应变的影响

永磁体在长度方向充磁与厚度方向充磁两种情况下，分析永磁体放置角度对波导丝扭转应变的影响，采用长 15 mm、宽 10 mm、高 5 mm 的永磁体且将其与波导丝

间距离保持 34 mm 不变。1)在如图 3(a)所示的永磁体长度方向充磁 1T 且充磁方向平行于波导丝放置的情况下,研究永磁体的放置角度分别为 0°、20°、40°、60°、80°、90°时波导丝扭转应变的变化情况,其中 0°对应为图 3(a)的放置情况,90°对应为调整永磁体放置角度后成为图 3(b)的放置情况;2)在如图 3(d)所示的永磁体厚度方向充磁 1 T 且充磁方向垂直于波导丝放置的情况下,研究永磁体的放置角度分别为 0°、20°、40°、60°、80°、90°时波导丝扭转应变的变化情况,其中 0°为图 3(d)的放置情况,90°为调整永磁体放置角度后成为图 3(c)的放置情况。计算得到永磁体在长度方向与厚度方向充磁两种情况下,永磁体不同放置角度所对应的偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况如图 17、18 所示。

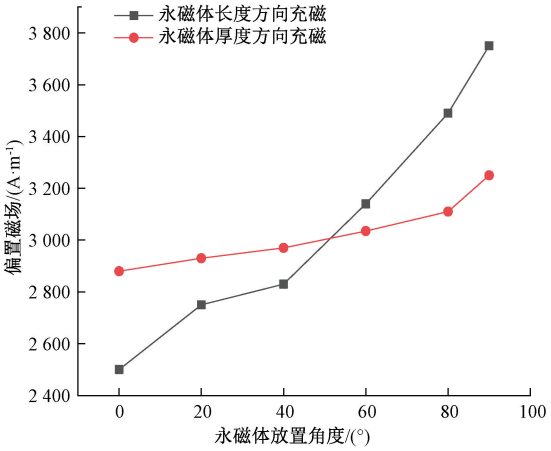


图 17　偏置磁场变化情况

Fig. 17　The variation of bias magnetic field

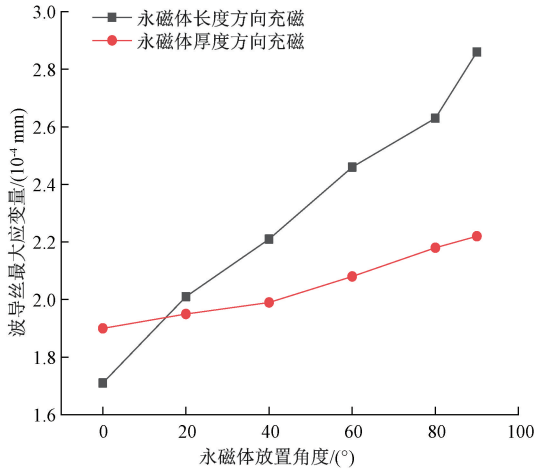


图 18　波导丝最大应变量变化情况

Fig. 18　Maximum strain change of waveguide wire

由图 17 可知,在永磁体长度方向与厚度方向充磁两种情况下,随着永磁体放置角度的增大,偏置磁场逐渐增大,结合波导丝应变表达式(21)、(22)、(23)、(24)分析可知,在图 18 中表现为波导丝最大应变量呈现出逐渐增大的趋势。

对比分析图 18 中永磁体长度方向充磁与厚度方向充磁两种情况可知,在永磁体长度方向充磁的情况下,随着永磁体放置角度的增大,即永磁体放置情况由图 3(a)变为图 3(b),当放置角度增大为 90°也就是图 3(b)的情况时,波导丝应变量达到最大为 2.86×10^{-4} mm。在永磁体厚度方向充磁的情况下,随着永磁体放置角度的增大,即永磁体放置情况由图 3(d)变为图 3(c),当放置角度增大为 90°也就是变为图 3(c)的情况时,波导丝应变量达到最大为 2.22×10^{-4} mm;永磁体长度方向充磁比厚度方向充磁时波导丝最大应变量所受放置角度变化的影响较大,在永磁体放置角度的变化范围相同时,永磁体长度方向充磁对应的波导丝扭转应变量变化范围更大。

2.4　永磁体与波导丝间距离对扭转应变的影响

由波导丝应变表达式(21)、(22)与(23)、(24)可知,永磁体与波导丝间的距离 D_1 和 D_2 会直接影响到偏置磁场进而影响到波导丝发生的扭转应变。为研究永磁体在图 3 四种放置情况下,永磁体与波导丝间的距离对波导丝扭转应变的影响,保持永磁体充磁大小为 1 T 不变,在图 3(d)与图 3(a)中永磁体厚度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直放置,长度方向充磁且充磁方向与波导丝平行放置两种情况下,改变两者之间的距离 D_1 与 D_2 分别为 7.5、10.5、14.5、17.5、21.5 mm;在图 3(b)与图 3(c)中永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝平行放置两种情况下,改变两者之间的距离 D_1 与 D_2 分别为 16.5、20.5、25.5、28.5、32.5 mm。计算得到永磁体 4 种放置情况下永磁体与波导丝间距离不同时,所对应的偏置磁场与波导丝最大扭转应变量变化情况如图 19 与 20 所示。

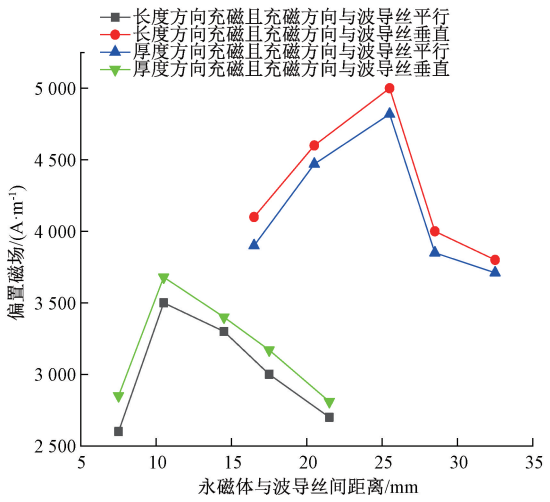


图 19　偏置磁场变化情况

Fig. 19　The variation of bias magnetic field

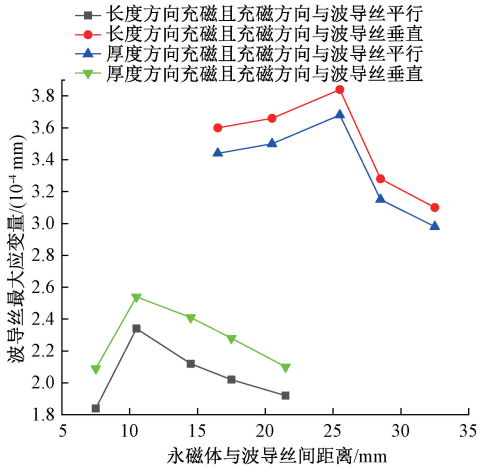


图 20 波导丝最大应变量变化情况

Fig. 20 Maximum strai change of waveguide wire

由图 20 可知,在永磁体 4 种放置情况下,随着永磁体与波导丝间距离的增大,波导丝最大应变量均呈现出先增大后减小的变化趋势。根据偏置磁场表达式(3)、(4)、(5)、(6)并结合所构建的三维有限元仿真模型计算得到永磁体不同放置方式下,偏置磁场随永磁体与波导丝间距离增大的变化情况如图 19 所示,随着永磁体与波导丝间距离的增大,偏置磁场呈现出先增大后减小的变化趋势,由图 4 可以得知,由于激励磁场 $H_i(r)$ 保持不变,激励磁场 $H_i(r)$ 与偏置磁场 H 两者合成的螺旋磁场 H' 与轴向之间的夹角 θ 发生变化,偏置磁场 H 与激励磁场 $H_i(r)$ 合成后先增大后减小,再结合波导丝应变表达式(21)、(22)与(23)、(24)分析可知,由于波导丝与永磁体的材料、几何参数等条件保持不变,导致合成的螺旋磁场对波导丝内各个磁畴单元的作用先增大后减小,各个磁畴单元的偏转程度先增大后减小,所以随着永磁体与波导丝间距离的增大,会导致波导丝的最大扭转应变量呈现出先增大后减小的变化趋势。

对比分析永磁体的 4 种放置情况,在永磁体与波导丝间距离相同时,永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝平行,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直放置两种情况下,波导丝扭转应变量相近;永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝平行放置两种情况下,波导丝扭转应变量相近;四种放置情况中,永磁体沿长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置的情况下波导丝发生的扭转应变量较大,在这种情况下当两者之间的距离 D_1 为 25.5 mm 时,偏置磁场达到最大为 5 000 A/m,此时波导丝扭转应变量达到最大为 3.84×10^{-4} mm。

3 实验结果与分析

磁致伸缩位移传感器的输出电压取决于螺旋磁场作用导致的波导丝的扭转应变[25],根据以上研究,为分析波导丝扭转应变对传感器输出电压的影响,利用课题组搭建的实验平台如图 21 所示,采用与仿真模型中相同的参数对图 3 中永磁体长度与厚度方向充磁时的不同放置方式、不同几何参数以及永磁体与波导丝间不同距离与输出电压的关系进行测试,实验中采用 TFG6 920 A 型信号发生器施加激励脉冲信号,采用 DPO3014 型四通道示波器采集信号。

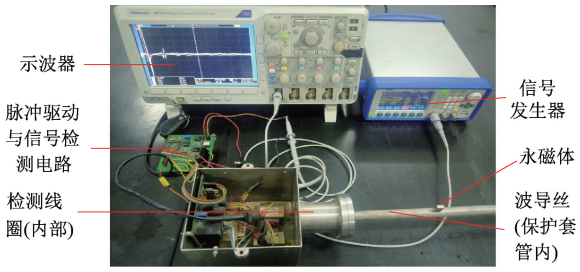


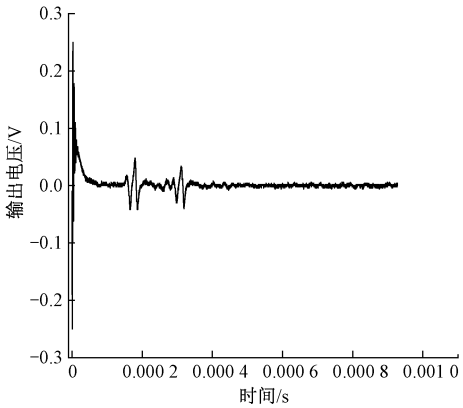
图 21 实验平台

Fig. 21 Experiment platform

3.1 永磁体充磁情况对传感器输出电压的影响

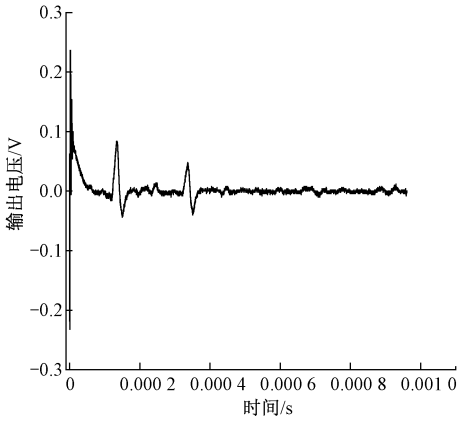
在永磁体沿长度方向充磁 1 T 的情况下,如图 3(a)与图 3(b)所示的充磁方向平行和垂直于波导丝放置时,保持其与波导丝之间的距离为 34 mm 不变,得到传感器输出电压如图 22 所示。

由图 22 可知,在永磁体长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝放置时传感器输出电压峰值为 0.048 V,长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置时输出电压峰值为 0.083 V。



(a) 永磁体充磁方向平行于波导丝放置

(a) The permanent magnet direction magnetized and parallel to the waveguide wire



(b) 永磁体充磁方向垂直于波导丝放置
(b) The permanent magnet direction magnetized and perpendicular to the waveguide wire

图 22　传感器输出电压

Fig. 22　The output voltage of the sensor

为研究图 3 所示永磁体 4 种放置情况下随着永磁体充磁的增大而引起的波导丝扭转应变的变化对传感器输出电压的影响,保持永磁体与波导丝之间的距离均为 34 mm 不变,改变永磁体充磁大小分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 T,得到传感器输出电压变化情况如图 23 所示。

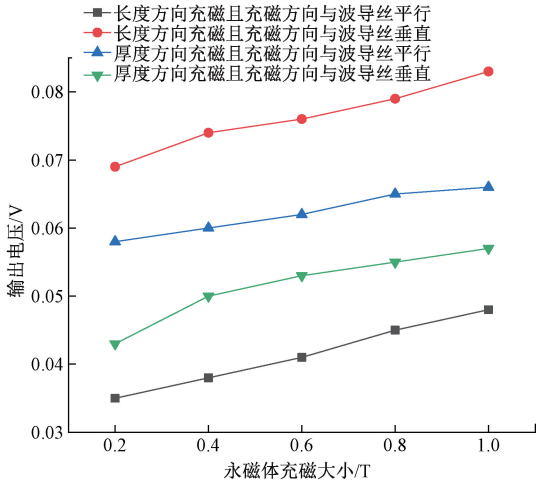


图 23　传感器输出电压变化情况

Fig. 23　The output voltage change of the sensor

由图 23 可知,在永磁体 4 种放置情况下,传感器输出电压均随着永磁体充磁的增大而增大,与图 10 对比分析可知,与波导丝最大应变量变化趋势相一致,波导丝应变量越大,所对应的传感器输出电压越大;对比分析 4 种情况可知,在永磁体沿长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直的情况下传感器输出电压较大,在这种情况下当永磁体充磁达到 1 T 时,波导丝扭转应变量达到最大为 2.86×10^{-4} mm,此时传感器输出电压达到最大为 0.083 V。

3.2　永磁体几何尺寸对输出电压的影响

为研究永磁体几何参数变化引起波导丝扭转应变的变化对传感器输出电压的影响,如图 3 所示永磁体 4 种放置情况下,保持其充磁大小为 1 T 不变,永磁体与波导丝间距离 34 mm 不变。1)保持永磁体长度为 15 mm,宽度 10 mm 不变,研究永磁体高度变化,分别为 2、3、4、5 mm,得到传感器输出电压变化情况如图 24 所示。2)保持永磁体宽度为 10 mm,高度为 5 mm 不变,研究永磁体长度变化,分别为 11、12、13、14、15 mm,得到传感器输出电压变化情况如图 25 所示。3)保持永磁体长度为 15 mm,高度为 5 mm 不变,研究永磁体宽度变化,分别为 6、7、8、9、10 mm,得到传感器输出电压变化情况如图 26 所示。

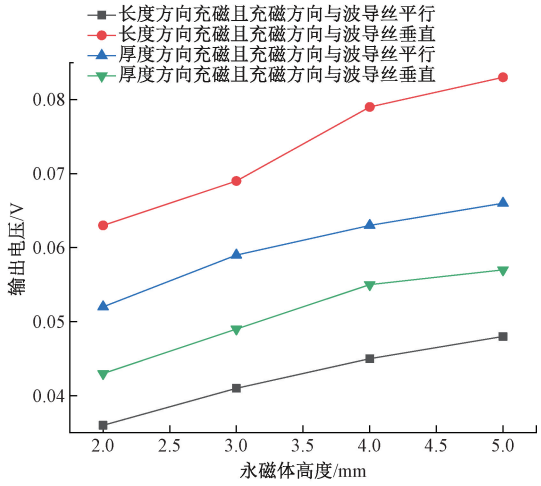


图 24　传感器输出电压随永磁体长度变化

Fig. 24　The output voltage of the sensor change with the height of the permanent magnet

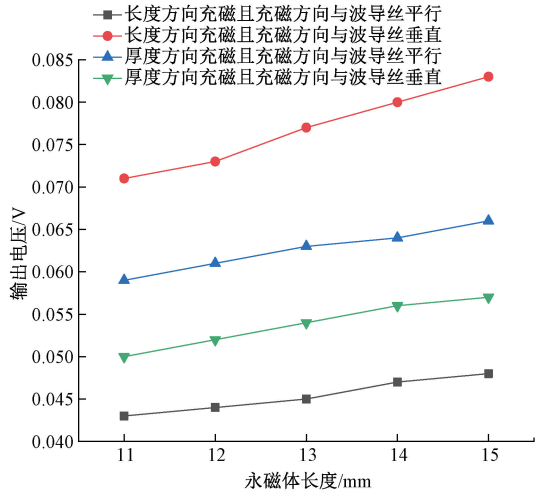


图 25　传感器输出电压随永磁体高度变化

Fig. 25　The output voltage of the sensor change with the length of the permanent magnet

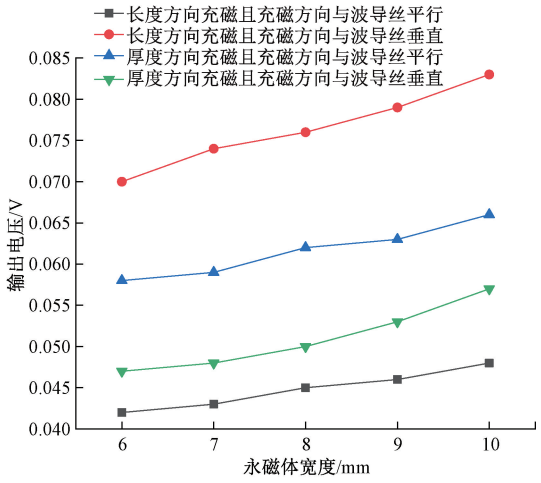


图 26 传感输器出电压随宽度变化

Fig. 26 The output voltage of the sensor change with the width of the permanent magnet

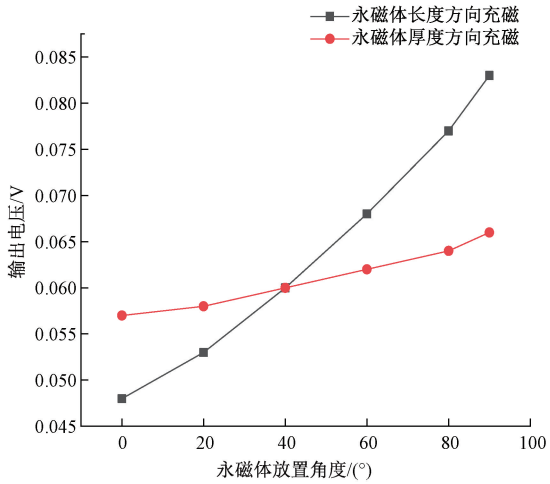


图 27 传感器输出电压变化情况

Fig. 27 The output voltage change of the sensor

由图 24、25 与 26 可知,传感器输出电压均随着永磁体高度、长度与宽度的增大而逐渐增大。相比于永磁体的长度与宽度,永磁体高度变化对传感器输出电压的影响较大,与所对应的图 12、14 与 16 中波导丝扭转应变量变化趋势一致。在永磁体长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置的情况下,当永磁体长度 15 mm,宽度 10 mm,高度 5 mm 时,波导丝应变量达到最大 2.86×10^{-4} mm,此时传感器输出电压也达到最大 0.083 V。

3.3 永磁体放置角度对输出电压的影响

为研究永磁体长度方向与厚度方向充磁两种情况下,永磁体放置角度变化时引起波导丝扭转应变的变化对传感器输出电压的影响,采用长 15 mm、宽 10 mm、高 5 mm 充磁大小为 1 T 的永磁体,将其与波导丝间距离保持 34 mm 不变。1)在如图 3(a)中永磁体长度方向充磁且充磁方向平行于波导丝放置时,研究永磁体的放置角度分别为 0°、20°、40°、60°、80°、90°;2)图 3(d)中厚度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置时,研究永磁体的放置角度分别为 0°、20°、40°、60°、80°、90°。得到传感器输出电压变化情况如图 27 所示。

由图 27 可知,在永磁体长度方向充磁与厚度方向充磁两种情况下,传感器输出电压均随着永磁体放置角度的增大而增大,与图 18 对比分析可知,与波导丝最大应变量变化趋势相同。在永磁体长度方向充磁的情况下,随着永磁体放置角度的增大,永磁体放置情况由图 3(a)变为图 3(b),当放置角度增大为 90°即图 3(b)的情况时,波导丝应变量达到最大,此时输出电压也达到最大为 0.083 V;在永磁体厚度方向充磁的情况下,随着永磁体放置角度的增大,永磁体放置情况由图 3(d)变为图 3(c),当放置角度增大为 90°即成为图 3(c)的情况时,波导丝应变量达到最大,此时输出电压也达到最大 0.066 V。对比分析长度与厚度两种充磁方向的情况可知,永磁体长度方向充磁比厚度方向充磁时传感器输出电压所受放置角度变化的影响较大。

3.4 永磁体与波导丝间距离对输出电压的影响

为研究如图 3 所示的永磁体 4 种放置情况下,永磁体与波导丝两者间的距离变化时引起波导丝扭转应变的变化对传感器输出电压的影响,选择长度 15 mm,宽度 10 mm,高度 5 mm 的永磁体且充磁大小为 1 T 不变,在图 3(d)与图 3(a)中永磁体厚度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直,长度方向充磁且充磁方向与波导丝平行两种情况下,改变两者之间的距离 D_1 与 D_2 分别为 7.5、10.5、14.5、17.5、21.5 mm;图 3(b)与图 3(c)中永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝平行两种情况下,改变两者之间的距离 D_1 与 D_2 分别为 16.5、20.5、25.5、28.5、32.5 mm,得到永磁体不同放置方式下,永磁体与波导丝间不同距离所对应的传感器输出电压变化情况如图 28 所示。

由图 28 可知,随着永磁体与波导丝之间距离的增大,传感器输出电压均呈现出先增大后减小的变化趋势,与图 20 对比分析可知,与波导丝最大应变量变化趋势相同。对比分析永磁体的 4 种放置情况,在永磁体与波导丝间距离相同时,永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝平行,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直放置两种情况下的输出电压相近;永磁体长度方向充磁且充磁方向与波导丝垂直,厚度方向充磁且充磁方向与波导丝平行放置两种情况下的输出电压相近;4 种放置情况中,在永磁体长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝的情况下传感器输出电压较大,当两者间距离 D_1 为

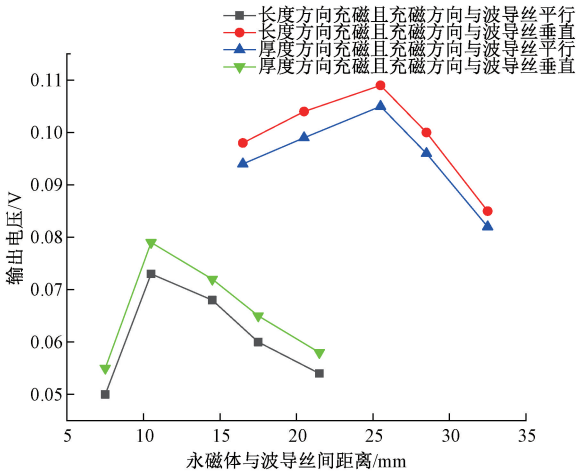


图 28　传感器输出电压变化情况

Fig. 28　The output voltage change of the sensor

25. 5 mm 时,波导丝应变量达到最大,此时对应的传感器输出电压达到最大为 0. 109 V。故为使传感器输出电压信号幅值较高从而有利于信号的检测,应当选择长度 15 mm、宽度 10 mm、高度 5 mm 的永磁体沿长度方向充磁 1T 且充磁方向垂直于波导丝放置,且将两者之间的距离选择为 25. 5 mm 较为合适。

4　结　　论

本文建立了磁致伸缩位移传感器波导丝受螺旋磁场作用而发生扭转应变的数学模型与三维有限元仿真模型,计算结果表明波导丝发生的应变呈螺旋扭转状态分布。

永磁体与波导丝间距离不变时,在永磁体长度方向充磁与厚度方向充磁对应的 4 种放置方式下,波导丝最大扭转应变量与传感器输出电压两者的变化趋势相同,均随着永磁体充磁的增大而增大;随着永磁体高度、长度与宽度的增大而增大,其中受永磁体高度变化的影响较大;随着永磁体放置角度的增大而增大,其中永磁体沿长度方向充磁的情况受放置角度变化的影响较大。4 种放置方式下,在所选参数范围内,当永磁体长度为 15 mm、宽度为 10 mm、高度为 5 mm 且充磁大小为 1 T 时,长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置的情况下波导丝发生的扭转应变量最大,此时波导丝扭转应变量达到最大为 2.86×10^{-4}mm,传感器输出电压也达到最大为 0. 083 V。

保持永磁体长度为 15 mm、宽度为 10 mm、高度为 5 mm 且充磁大小为 1 T 不变,在 4 种放置情况下,随着永磁体与波导丝间距离的增大,波导丝最大扭转应变量与传感器输出电压均呈现出先增大后减小的变化趋势。4 种放置情况下永磁体长度方向充磁且充磁方向垂直于波导丝放置时波导丝发生的扭转应变量较大,在这种情况下当两者之间距离为 25. 5 mm 时波导丝扭转应变量达到最大值为 3.84×10^{-4}mm,此时传感器输出电压达到最大为 0. 109 V。由于传感器输出电压信号幅值越大越有利于信号的检测,故选择永磁体长度方向充磁 1T 且充磁方向垂直于波导丝放置,且将两者间距离调整为 25. 5 mm 较为合适。

综上,基于电磁学与理论力学相关理论建立了波导丝受螺旋磁场作用发生扭转应变的数学模型与三维有限元仿真模型,可以使波导丝的扭转应变清晰直观化;在对传感器中永磁体充磁情况、永磁体几何参数、永磁体放置方式以及永磁体与波导丝之间距离的选择上,应该尽可能使波导丝发生的应变量最大,此时对应的传感器输出电压幅值较高,从而有利于信号的检测。

参考文献

[1] 王亮, 王博文, 翁玲, 等. 磁致伸缩触觉传感器阵列及其在机械手抓取物体中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 91-98.
WANG L, WANG B W, WENG L, et al. Magnetostrictive tactile sensor array and its application in grasping objects by manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(8): 91-98.

[2] 翁玲, 高绍阳, 王博文, 等. 用于检测压力与刚度的柔性磁致伸缩触觉传感器阵列[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 110-120.
WENG L, GAO SH Y, WANG B W, et al. Flexible magnetostrictive tactile sensor array for pressure and stiffness detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9): 110-120.

[3] 周山, 刘利平, 高建宇, 等. 三维力传感器静态解耦方法的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 181-187.
ZHOU SH, LIU L P, GAO J Y, et al. Research on static decoupling algorithm for 3-axis wrist force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(8): 181-187.

[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/OL]. 农业机械学报: 1-9[2021-03-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210315.1703.013.html.
SUN Y, ZHANG Y S, CHEN ZH, et al. Voltage characteristics of reflected wave of magnetostrictive displacement sensor and damping parameter selection[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinerey: 1-9[2021-03-27]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20210315.1703.013.html.

[5] 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.

[6] 周翟和, 汪丽群, 沈超, 等. 基于 CPLD 的磁致伸缩高精度时间测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 103-108.
ZHOU ZH H, WANG L Q, SHEN CH, et al. Design of magnetostrictive high-precision time measurement system based on CPLD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(1): 103-108.

[7] 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.

[8] WANG B, LI Y, XIE X, et al. The output voltage model and experiment of magnetostrictive displacement sensor based on Weidemann effect[J]. AIP Advances, 2018, 8(5): 056611.

[9] 张露予. 螺旋磁场与应力作用下磁致伸缩位移传感器的输出特性研究[D]. 天津:河北工业大学, 2016.
ZHANG L Y. Investigation of the output characteristic for magnetostrictive displacement sensor under helical magnetic field and stress[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2016.

[10] 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 attenuation characteristics of the magnetostrictive displacement sensor waveguide [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 689-696.

[11] 王博文, 谢新良, 张露予, 等. 大量程磁致伸缩位移传感器的应力波衰减特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 813-820.
WANG B W, XIE X L, ZHANG L Y, et al. Analysis of stress wave attenuation property of large-scale magnetostrictive displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 813-820.

[12] 李媛媛, 王博文, 黄文美, 等. 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, et al. 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.

[13] 谢新良. 新型磁致伸缩位移传感器结构设计与应力波衰减特性研究[D]. 天津:河北工业大学, 2017.
XIE X L. Structural design of magnetostrictive displacement sensor and analysis of stress wave attenuation property [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.

[14] 王鹏. Fe-Ga 材料磁致伸缩位移传感器的设计与制作[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
WANG P. Design and manufacture of Fe-Ga magnetostrictive displacement sensor [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[15] 李海全. 基于 IEEE 802.15.4 与 Zigbee 无线接口磁致伸缩位移传感器研制[D]. 广州:华南理工大学, 2017.
LI H Q. Development of magnetostrictive position sensor based on IEEE 802.15.4 and Zigbee[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.

[16] 汪丽群. 基于 CPLD 与单片机的磁致伸缩位移传感器系统设计与实现[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
WANG L Q. Design and realization of magnetostrictive displacement sensor based on CPLD and SCM [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[17] 余超, 周新志, 熊胤琪. $Fe_{83}Ga_{17}$ 磁致伸缩位移传感器激励信号的 ANSYS 分析及 DSP 实现[J]. 仪表技术与传感器, 2012(8): 4-6+80.
YU CH, ZHOU X ZH, XIONG Y Q. Research on excitation signal of $Fe_{83}Ga_{17}$ magnetostrictive displacement sensor based on ANSYS and DSP [J]. Instrument Technique and Sensor, 2012(8): 4-6+80.

[18] 姚世选. 磁致伸缩直线位移传感器的机理研究与应用[D]. 太原:太原理工大学, 2007.
YAO SH X. Study and application of the mechanism of the magnetostrictive linear position sensor[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2007.

[19] 王峥, 常晓明, 脇若弘之. 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.

WANG Z, CHANG X M, HIROYUKIW A. Magnetic pole intensity model of magnetostrictive position sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(8): 1075-1078.

[20] 赵华宁. 铁基材料的磁致伸缩液位传感器磁场分析与实验[D]. 天津:河北工业大学, 2015.
ZHAO H N. Experiment and magnetic field analysis for magnetostrictive liquid level sensor based on ferrous metal material[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2015.

[21] 刘宏娟. 矩形永磁体三维磁场空间分布研究[D]. 北京:北京工业大学, 2006.
LIU H J. Research of the three-dimensional magnetic field distribution around a rectangular permanent magnet[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006.

[22] 张三慧. 大学物理学: 电磁学[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.
ZHANG S H. College Physics: Electromagnetism[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.

[23] 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1997.
Theoretical Mechanics Teaching and Research Section Harbin Institute of Technology. Theoretical Mechanics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.

[24] ZHANG L Y, WANG B W, SUN Y, et al. Analysis of output characteristic model of magnetostrive displacement sensor under a helical magnetic field and stress[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016: 1-4.

[25] 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.

作者简介

孙英(通信作者),分别于 1994、2001、2008 年于河北工业大学获得学士、硕士和博士学位,现为河北工业大学教授,硕士生导师,主要研究方向为新型磁性材料与器件。
E-mail: sunying@ hebut. edu. cn

Sun Ying (Corresponding author) received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Hebei University of Technology in 1994, 2001 and 2008, respectively. She is currently a professor at Hebei University of Technology. Her main research interest is intelligent materials and devices.

武泽航,2019 年于河北北方学院获得学士学位,现为河北工业大学硕士研究生,研究方向为磁致伸缩位移传感器及其应用。
E- mail: 2935348769@ qq. com

Wu Zehang received his B. Sc. Degree from Hebei North University in 2019. He is currently a master student at Hebei University of Technology. His research interests include magnetostrictive displacement sensor and its application.