

文章编号 1004-924X(2016)02-0358-07

## 磁致伸缩位移传感器检测信号分析

王博文\*, 张露予, 王 鹏, 李 恒, 史瑞雪, 孙 英, 翁 玲

(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:** 实验研究了磁致伸缩位移传感器的探测电压信号, 以便提高磁致伸缩位移传感器的检测精度。分析和验证了波导丝材料、驱动脉冲电流、检测线圈等参数对磁致伸缩位移传感器输出电压的影响规律。对检测线圈进行了优化设计, 基于实验数据确定了传感器的各项参数值。实验发现磁致伸缩系数大、魏德曼效应显著的 Fe-Ga 材料作为波导丝, 可明显提高电-磁-机械能的转换效率, 获得较大的检测电压信号。研制了新型 Fe-Ga 波导丝磁致伸缩位移传感器样机, 并与 Fe-Ni 波导丝传感器进行了性能对比。结果表明, 与 Fe-Ni 波导丝相比, Fe-Ga 波导丝磁致伸缩位移传感器的检测信号明显增强, 信噪比显著提高, 其检测电压信号幅值比 Fe-Ni 波导丝检测电压信号幅值提高了 40 mV, 相应的传感器精度提高了 2 倍。

**关键词:** 位移传感器; 磁致伸缩; Fe-Ga 材料; 波导丝

**中图分类号:** TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0358

## Analysis of detection signal for magnetostrictive displacement sensor

WANG Bo-wen\*, ZHANG Lu-yu, WANG Peng, LI Heng, SHI Rui-xue, SUN Ying, WENG Ling

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

\* Corresponding author, E-mail: bwwang@hebut.edu.cn

**Abstract:** The detecting voltage signal of a magnetostrictive displacement sensor was experimentally studied to improve its detection accuracy. The effects of waveguide wire materials, driving pulse currents, and detecting coil parameters on the detecting voltage signal were analyzed and confirmed. The detecting coil was designed optimally and the parameters for the magnetostrictive displacement sensor were determined. The research shows since the Fe-Ga waveguide has a larger magnetostrictive coefficient and remarkable Weidmann effect, it improves the electric-magnetic-mechanical conversion efficiency and obtains more detecting voltage signals. Based on the experimental results, a new type of magnetostrictive displacement sensor with the Fe-Ga waveguide wire was fabricated and its performance was compared with that of a magnetostrictive displacement sensor with the Fe-Ni waveguide wire. The research shows that the detecting signal for the magnetostrictive displacement sensor with the Fe-Ga waveguide wire is obviously enhanced and the signal-to-noise ratio is improved significantly

**收稿日期:** 2015-09-10; **修订日期:** 2015-10-25.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (No. 51171057, No. 51201055); 河北省引进留学人员资助项目 (No. CG2013003001); 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (No. ZD2015085); 天津市高等学校科技发展基金资助项目 (No. 20140421); 河北省研究生创新基金资助项目 (No. 220056)

as compared with that with the Fe-Ni waveguide wire. Moreover, the detecting voltage signal amplitude for the magnetostrictive displacement sensor with the Fe-Ga wire increases 40 mV and its detection precision may be 2 times that of the sensor with the Fe-Ni wire.

**Key words:** displacement sensor; magnetostriction; Fe-Ga material; waveguide wire

## 1 引言

位移传感器一直是科研人员积极关注的热点课题<sup>[1-2]</sup>。磁致伸缩位移传感器具有精度高、非接触、可靠性高且适应于恶劣环境等优点,因而被广泛应用于工业控制领域,如轮船的阀门控制、机械自动化数控装置等<sup>[3]</sup>。MTS 系统公司研制量程为 18 m 的大位移直线位移传感器,其精度可达 0.025%/s<sup>[4]</sup>,并且可同时测量多种参数。研究学者从材料、原理、电路等方面对位移传感器进行了诸多研究。夏天<sup>[5]</sup>和李纪恒<sup>[6]</sup>等分别研究了 Fe-Ni 波导丝和 Fe-Ga 波导丝的魏德曼效应,发现 Fe-Ga 波导丝具有比 Fe-Ni 波导丝更好的魏德曼效应,但并没有把两种波导丝应用到器件中的输出电压。周新志<sup>[7]</sup>等对磁致伸缩位移传感器的磁场进行了研究,分析了位移传感器的磁场分布。于希文<sup>[8]</sup>等对检测信号进行了分析与调理,确定了检测信号的信噪比。为提高磁致伸缩位移传感器的输出电压与精度,本文研究了影响磁致伸缩位移传感器检测信号的因素,为研制新型的磁致伸缩位移传感器提供了基本数据与指导。

## 2 磁致伸缩位移传感器的结构和原理

磁致伸缩式位移传感器如图 1 所示,传感器主要包括传感器头部、硬件电路系统、波导丝(磁致伸缩材料)、探测杆、活动磁铁和前后阻尼器等,其中硬件电路系统和检测线圈放置在传感器头部。

当位移传感器工作时,传感器头部中的硬件电路产生驱动脉冲电流并沿波导丝传播,该驱动脉冲电流可产生环形磁场,当环形磁场传播到活动磁铁位置时,与磁铁产生的轴向偏置磁场叠加,形成一个螺旋磁场。基于魏德曼效应,波导丝瞬间形变并产生扭转波,扭转波以一定的速度向波导丝两端传播。当传感器头部的检测线圈感应到扭转波信号时,该时刻与产生驱动脉冲电流时刻的时间间隔乘以扭转波波速即为活动磁铁的当前

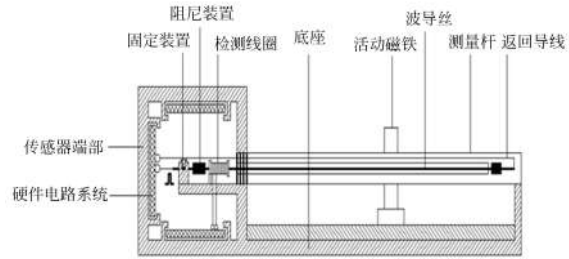


图1 磁致伸缩位移传感器结构

Fig. 1 Structure of magnetostrictive displacement sensor

位置<sup>[9]</sup>。传感器尾部装有吸收多余扭转波的阻尼装置,可减少反射波对检测信号的干扰。

扭转波传播到检测线圈时,在磁致伸缩逆效应作用下扭转波信号导致波导丝内部磁通发生改变,根据法拉第电磁感应定律,检测电压为:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = -NS \frac{dB}{dt}, \quad (1)$$

式中:  $N$  为探测线圈匝数,  $S$  为单匝线圈面积,  $\phi$  为磁通量,  $B$  为磁感应强度,  $t$  为时间。其中,磁感应强度  $B$  是与脉冲电流产生的周向磁场和磁铁产生的轴向磁场有关。根据磁场和材料力学的相关理论,式(1)可表示为<sup>[10]</sup>:

$$e = \frac{4\pi\lambda\mu_r NSR\phi_m \sqrt{2(1+\nu)} (H_i(R)^2 + H_m^2)}{I_a L \sqrt{E\rho}} \sin \left[ 2 \left( \arctan \frac{H_i(R)}{H_m} \right) \right]. \quad (2)$$

式中:  $\lambda$  为与磁致角应变引起的磁场变化率;  $\mu_r$  为磁致伸缩材料的相对磁导率,  $N$  为检测线圈的匝数,  $S$  为线圈的截面积,  $R$  为波导丝的半径,  $\Phi_m$  为轴向磁通量,  $\nu$  为泊松比,  $H_i(R)$  为波导丝表面处的激励磁场,  $H_m$  轴向磁场,  $I_a$  为截面的极惯性矩,  $E$  为杨氏模量,  $\rho$  为波导丝的密度。式(2)表明磁致伸缩位移传感器的输出电压由磁致伸缩波导丝的角应变引起的磁场变化率、相对磁导率、波导丝半径、长度、杨氏模量、泊松比、密度、极惯性矩,检测线圈匝数、横截面积,磁通量轴向分量,偏置磁场和激励磁场等参数决定。可见,影响磁致

伸缩位移传感器输出电压的因素可分为与波导丝材料相关的参数和与磁场、检测线圈相关的参数。因此,主要来讨论波导丝的材料特性、驱动脉冲电流、检测线圈参数对检测电压的影响。

### 3 磁致伸缩位移传感器的实验方法

实验测试系统如图 2 所示。将直径为 0.5 mm,长度为 1 m 的磁致伸缩波导丝固定在内径为 6 mm,外径为 8 mm 的铁氟龙塑料管内(使波导丝保持垂直,无任何弯折),底端穿过橡胶棒紧固(以减少有效信号被塑料管壁吸收),再套入内径为 9 mm,外径为 14 mm,壁厚为 2.5 mm 的 316L 不锈钢探杆内。实验中使用的电源为稳压电源和可调电源,稳压电源为后续的信号调理电路提供稳定的工作电压,可调电源用于控制激励脉冲的电压幅值,电压调节为 0~32 V。采用 TFG6920A 型信号发生器产生激励脉冲电流,脉冲频率设定为 1 200 Hz,宽度为 7  $\mu$ s,高电平为 15 V。检测线圈穿过波导丝,固定在探杆的首端,用于信号的拾取,信号显示采用 DPO3014 型的四通道示波器,同时显示输入激励信号和输出感应电压信号。

利用搭建的实验平台,研究了波导丝材料特性、驱动脉冲电流参数、检测线圈参数等对磁致伸缩位移传感器输出电压的影响。

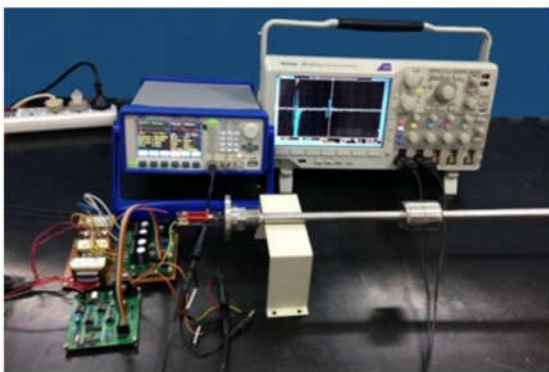


图 2 磁致伸缩位移传感器实验平台

Fig. 2 Experimental platform of magnetostrictive displacement sensor

## 4 实验结果与分析

### 4.1 波导丝材料对检测电压的影响

波导丝是磁致伸缩位移传感器电-磁-机械能

转换的核心部件。波导丝材料的魏德曼效应以及磁致伸缩系数对检测电压的大小有着重要影响,目前位移传感器的波导丝主要为 Fe-Ni 波导丝。最近发现 Fe-Ga 波导丝具有显著的魏德曼效应。表 1 所示为铁镍波导丝和铁镓波导丝的魏德曼扭转性能对比<sup>[6]</sup>。从表 1 可以看出,与 Fe-Ni 波导丝相比,Fe-Ga 波导丝具有较好的魏德曼效应和较高的饱和磁致伸缩系数。

表 1 Fe-Ga 与 Fe-Ni 波导丝性能

波导丝特性	魏德曼扭转 ( $\theta/L$ )/(s · cm <sup>-1</sup> )	饱和磁致伸缩 系数/ppm
Fe-Ni 合金波 导丝(0.5 mm)	141	26
Fe-Ga 合金波 导丝(0.5 mm)	245	160

选用直径为 0.5 mm 的 Fe-Ga 和 Fe-Ni 波导丝,在磁场、检测线圈等相同的条件下,对两种波导丝制作的位移传感器的检测电压特性进行了研究,测得的激励脉冲电流与检测电压的关系如图 3 所示。结果表明 Fe-Ga 波导丝的检测电压显著高于 Fe-Ni 波导丝的检测电压,检测电压最大值大约为 Fe-Ni 波导丝的检测电压的 3 倍。因此,选用 Fe-Ga 合金作为磁致伸缩位移传感器的波导丝,能够在较小的磁场下获得设定的输出电压值。

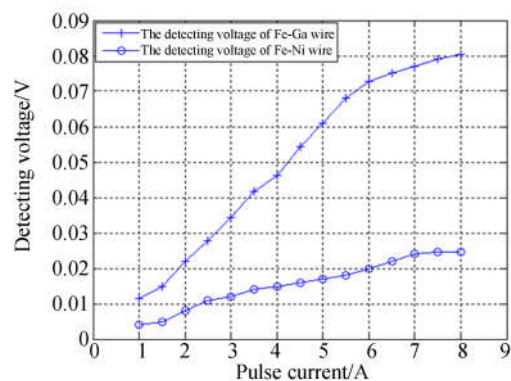


图 3 Fe-Ga 与 Fe-Ni 波导丝位移传感器的激励脉冲电流与检测电压的关系

Fig. 3 Driving pulse current dependence of detecting voltage for the displacement sensor with Fe-Ga and Fe-Ni wires

### 4.2 激励磁场对检测电压信号的影响

由式(2)可知,激励磁场  $H_i(r)$ 对磁致伸缩位移传感器检测电压信号有重要影响,磁致伸缩位移传感器的激励磁场  $H_i(r)$ 是由激励脉冲电流产生的。因此,激励磁场对检测电压信号的影响可以归于脉冲电流的频率、幅值和宽度对检测电压信号的影响。

#### 4.2.1 激励脉冲电流幅值对检测电压信号的影响

驱动脉冲电流为频率可调的周期信号,通过调节脉冲电流的频率可以控制电流作用在波导丝上的时间间隔。脉冲的频率较低时,传感器的频响较低,灵敏度较差。如果频率过高,检测信号的谐波含量过高,可能出现 2 个测量周期检测信号的重叠现象。因此,脉冲电流的频率应该满足:

$$\frac{1}{f} > \frac{L}{v}, \quad (3)$$

其中:  $f$  为脉冲电流的频率,  $L$  为位移传感器的量程,  $v$  为波导丝内弹性波的传播速度。考虑实验平台量程为 1 m,测得弹性波在波导丝内的传播速度约为 2 650 m/s,可设定电流脉冲的频率为 1.2 kHz。

图 4 所示为磁致伸缩位移传感器脉冲电流幅值与检测电压的关系,波导丝为 Fe-Ga 波导丝,激励脉冲电流频率为 1.2 kHz,脉冲电流宽度为 5  $\mu$ s。由图 4 可见,脉冲电流幅值小于 6 A 时,检测电压随着脉冲电流幅值的增大而增大。当脉冲电流幅值继续增大时,检测电压的幅值缓慢增加。表明随着脉冲电流幅值的增大,波导丝中的磁场达到饱和<sup>[10]</sup>。因此波导丝中的脉冲电流幅值应设为 6 A 左右。

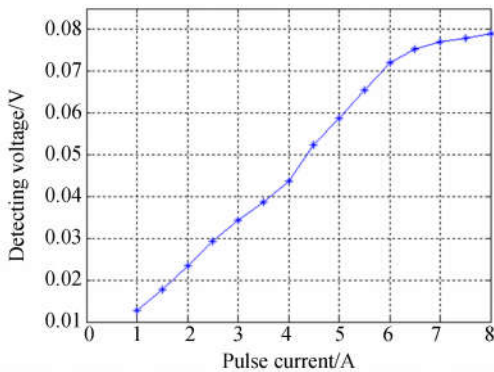


图 4 位移传感器的激励脉冲电流与检测电压的关系  
Fig. 4 Driving pulse current dependence of detecting voltage for the displacement sensor with Fe-Ga wire

#### 4.2.2 激励脉冲电流的宽度对检测电压信号的影响

对检测电压的波形分析可知,检测电压波形是由脉冲电流的上升沿和下降沿分别激励产生的。图 5 所示为脉冲电流宽度为 30  $\mu$ s 时检测电压的波形。图 5 可知,检测电压的波形分为脉冲电压的上升沿对应的检测波形和脉冲电压下降沿对应的检测波形。两部分检测电压的相位相反,其峰峰值相距 30  $\mu$ s,与脉冲的宽度相同。

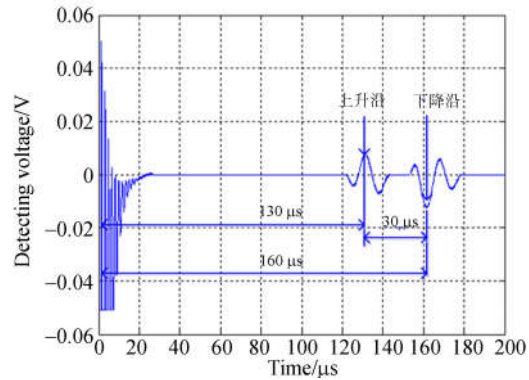


图 5 脉冲电流的上升沿和下降沿对应的检测电压  
Fig. 5 Detecting voltage of pulse current's rising and falling edge

研究脉冲电流宽度对检测电压的影响时,选取 Fe-Ga 波导丝直径为 0.5 mm,激励脉冲电流的值为 6 A,频率为 1.2 kHz。位移传感器脉冲电流宽度与检测电压的关系如图 6 所示。从图中可以看出,当脉宽在 1~6  $\mu$ s 时,检测电压幅值随着脉宽的增大而增大,当继续增加脉宽的宽度时,检测电压的幅值会随着脉宽的增加而降低,当脉宽大于 15  $\mu$ s 时,检测电压的幅值会趋于稳定。由图 6 中可知,脉冲宽度在 6  $\mu$ s 时,检测电压的幅值最大。

### 4.3 检测线圈参数对检测电压信号的影响

检测线圈是磁致伸缩位移传感器进行信号检测的关键部件,可等效为二阶欠阻尼电路系统,如图 7 所示。该系统为闭环二阶系统,其传递函数为<sup>[11]</sup>:

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = \frac{1/LC}{s^2 + \left(\frac{R}{L}\right)s + 1/LC} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}, \quad (4)$$

其中:  $\omega_n = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  为二阶系统的固有频率,衰减系

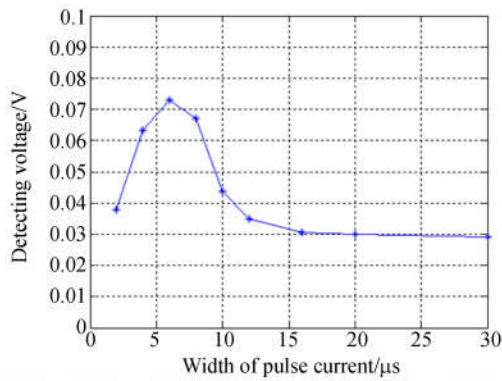


图 6 位移传感器的脉冲宽度与检测电压的关系  
Fig. 6 Pulse width dependence of detecting voltage for the displacement sensor with Fe-Ga wire

数为  $\alpha = \frac{R}{2L}$ ,  $\xi = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$  为二阶系统的阻尼比。阻尼比和衰减系数越大,系统越灵敏,越易趋于稳定。 $\xi$  应在 0.6~0.8 之间,  $\omega_n$  大于脉冲电流频率的 5 倍<sup>[12]</sup>。由式(4)可知,系统的阻尼比、衰减系数和检测线圈参数相关。阻尼比和衰减系数与线圈的电阻成正比,与电感成反比,因此,线径较小时,检测线圈的衰减系数与阻尼比都较高。且线径增大会导致线圈的谐振频率降低,电容两端电压变化的周期时间变大,线圈的响应速度变慢,因此在线径的选择上,尽可能选择线径较小的漆包线来缠绕线圈。

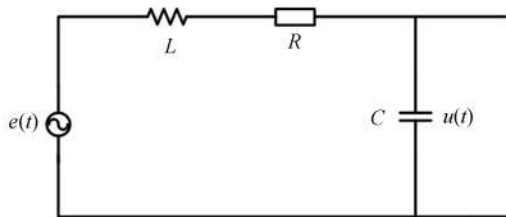


图 7 检测线圈的等效电路  
Fig. 7 Equivalent circuit of detecting coil

分别取线径为 0.06 和 0.1 mm 的漆包线制作检测线圈,线圈匝数均为 600,长度为 1 cm,内径为 3 mm。实验得到 Fe-Ga 位移传感器激励电压与检测电压的关系如图 8 所示。线径为 0.06 mm 线圈的检测电压高于线径为 0.15 mm 的检测电压,实验结果验证了理论分析的正确性。

图 9 所示为不同线圈匝数条件下 Fe-Ga 位移传感器激励电压与检测电压的关系。实验所用线

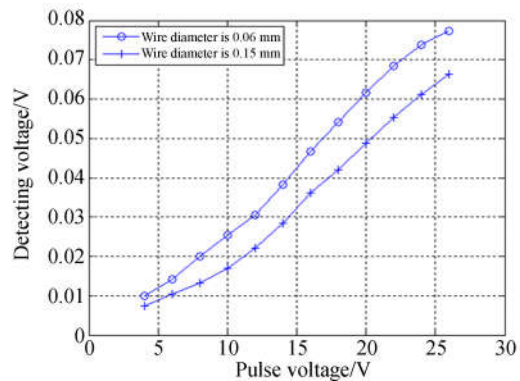


图 8 不同检测线圈线径条件下位移传感器激励电压与检测电压的关系  
Fig. 8 Driving voltage dependence of detecting voltage for the displacement sensor at the different wire diameter of detecting coil

圈线径为 0.06 mm,长度为 1 cm,内径为 3 mm,匝数分别为 200、400、600 和 800 匝。随着匝数的增加,检测电压也相应的增加。线圈匝数从 200 增加到 800 时,检测电压明显增大。

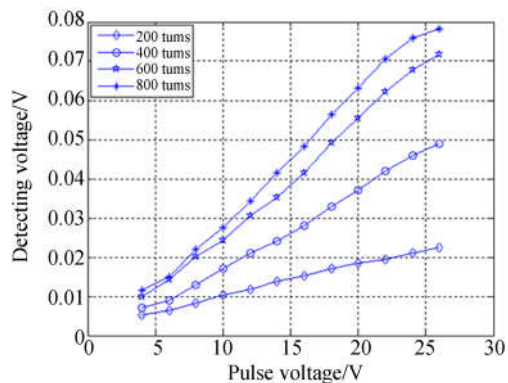


图 9 不同检测线圈匝数条件下位移传感器激励电压与检测电压的关系  
Fig. 9 Driving voltage dependence of detecting voltage for displacement sensor at different turns of detecting coil

#### 4.4 检测信号的数字分析

图 10 所示分别为实验测得的 Fe-Ni 和 Fe-Ga 波导丝位移传感器的检测电压波形,Fe-Ga 波导丝传感器检测电压波形中杂波含量较少,检测电压幅值比 Fe-Ni 波导丝提高了约 40 mV。

综合以上实验数据确定 Fe-Ga 磁致伸缩位移传感器参数为:波导丝直径 0.5 mm,长度 1 m;驱动脉冲电流频率 1.2 kHz,脉宽 7,脉冲电压幅

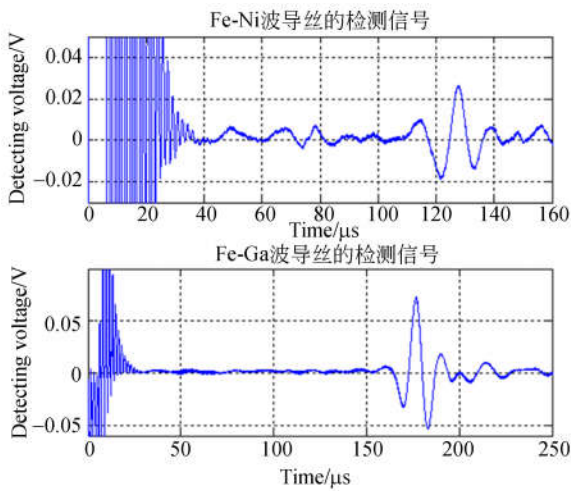


图 10 磁致伸缩位移传感器的检测电压波形

Fig. 10 Detecting voltage waveform of magnetostrictive displacement sensor

值 24 V;检测线圈匝数 800 匝,线径 0.06 mm,长度 1 cm,内径 1 mm。

#### 4.5 磁致伸缩位移传感器的精度分析

检测信号经过滤波电路处理之后被送往信号处理电路,检测信号与计时比较电路的阈值进行比较,从而得到计时的终点。较大的检测信号幅值可以设置较高的阈值电压。

将检测电压波形等效为三角波,检测电压的阈值图解如图 11 所示,设  $U = k_1 t$  为 Fe-Ni 波导丝位移传感器的检测电压阈值电压, $U = k_2 t$  为 Fe-Ga 波导丝位移传感器的检测电压阈值电压, $U_1$  与  $U_2$  均与各自的检测信号的峰值相距  $\Delta U$ 。

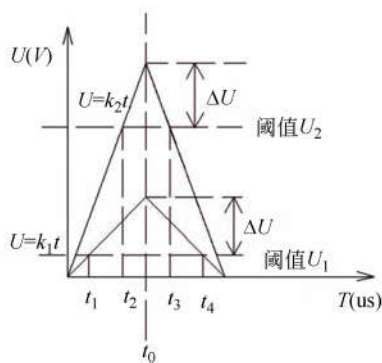


图 11 检测电压阈值图解

Fig. 11 Diagram analysis of detecting voltage

由图 11 可得:

$$\begin{cases} U_1 + \Delta U = k_1 t_0 \\ U_2 + \Delta U = k_2 t_0 \\ U_1 = k_1 t_1 \\ U_2 = k_2 t_2 \end{cases}, \quad (5)$$

由式(5)可知:

$$t_1 = t_0 - \frac{\Delta U}{k_1}; t_2 = t_0 - \frac{\Delta U}{k_2}, \quad (6)$$

则 Fe-Ni 波导丝检测信号的时间误差为:

$$\Delta t_1 = t_0 - t_1 = \frac{\Delta U}{k_2}, \quad (7)$$

Fe-Ga 波导丝检测信号的时间误差为:

$$\Delta t_2 = t_0 - t_2 = \frac{\Delta U}{k_2}. \quad (8)$$

两种传感器的脉冲前沿的时间差为:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta U}{k_1} - \frac{\Delta U}{k_2}. \quad (9)$$

位移传感器的精度可以提高了倍数为:

$$\beta = \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{k_2}{k_1}. \quad (10)$$

因此,若以阈值电压比较所成的脉冲电压前沿为计时终止时刻,传感器的时间误差可以减少  $\Delta t$ ,Fe-Ga 波导丝位移传感器的精度可比 Fe-Ni 波导丝的提高  $\frac{k_2}{k_1}$  倍,由图 10 与图 11 可以得出 Fe-Ga 波导丝磁致伸缩位移传感器的精度约提高 2 倍。

## 5 结 论

本文研究了波导丝材料、驱动脉冲参数和检测线圈参数对传感器检测电压的影响。对检测线圈进行了优化设计,确定了磁致伸缩位移传感器的各项参数。发现磁致伸缩系数大、魏德曼效应显著的 Fe-Ga 材料作为波导丝,可明显提高电磁-机械能的转换效率,获得了较大的检测电压信号,信噪比显著提高,检测电压信号的幅值比 Fe-Ni 波导丝提高了 40 mV,位移传感器精度可提高 2 倍以上。本研究可为新型磁致伸缩位移传感器的优化设计提供指导与基础数据。

## 参考文献:

- [1] 付敏,彭东林,朱革,等. 光强正交调制型位移传感器的数学模型与误差分析[J]. 光学精密工程, 2015,23(3):784-793.  
FU M, PENG D L, ZHU G, *et al.*. Mathematical model and error analysis of light intensity orthogonal modulation type displacement sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015,23(3):784-793. (in Chinese)
- [2] 崔玉国,郑军辉,马剑强,等. 压电自感知微夹钳[J]. 光学精密工程, 2015,23(7):1996-2004.  
CUI Y G, ZHENG J H, MA J Q, *et al.*. Self-sensing piezoelectric microgripper [J]. *Opt. precision Eng.*, 2015,23(7):1996-2004. (in Chinese)
- [3] 鲍芳,李继容,王春茹. 磁致伸缩器件及其应用研究[J]. 传感器技术, 2001, 20(8):1-3.  
BAO F, LI J R, WANG C R. Research on magnetostrictive devices and its applications [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2001, 20(8):1-3. (in Chinese)
- [4] Jesse Russell,李宝钺. 磁致伸缩位移传感器的技术与创新[J]. 传感器世界, 1997, (11):15-23.  
JESSE R, LI B K. Magnetostrictive displacement sensor technology and innovation [J]. *Sensor World*, 1997, (11):15-23. (in Chinese)
- [5] 夏天,高学绪,李纪恒,等. 铁镍合金丝魏德曼效应测量与磁畴结构[J]. 磁性材料及器件, 2008, (4): 21-25.  
XIA T, GAO X X, LI J H, *et al.*. Testing of wiedemann effect and magnetic domain of Fe-Ni alloy wires [J]. *Magnetic Materials and Devices*, 2008, (4):21-25. (in Chinese)
- [6] LI J H, GAO X X, ZHU J, *et al.*. Wiedemann effect of Fe-Ga based magnetostrictive wires [J]. *Chin. Phys. B*, 2012, 21(8):480-485.
- [7] 余超,周新志. Fe83Ga17 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.  
YU CH, ZHOU X ZH. Research on excitation signal of Fe83Ga17 magnetostrictive displacement sensor based on ANSYS and DSP [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2012,(8):4-6. (in Chinese)
- [8] 于希文,赵辉,刘伟文,等. 磁致伸缩位移传感器感应信号的分析调理 [J]. 大连交通大学学报, 2013, 34(3):56-60.  
YU X W, ZHAO H, LIU W W, *et al.*. The analysis of the magnetostrictive displacement sensor induction signal [J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2013, 34(3):56-60. (in Chinese)
- [9] DENG C, KANG Y H, LI E L, *et al.*. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor [J]. *Measurement*, 2014, 47: 591-597.
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] 何云峰,王昌明,孔德仁. 线圈靶动态特性分析与补偿[J]. 传感器技术, 2005,24(1):9-11.  
HE Y F, WANG C M, KONG D R. Dynamic characteristic analysis and compensation of inductive coil [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(1):9-11. (in Chinese)
- [12] 张岚,卜雄洙,赵文. 磁致位移传感器检测线圈和驱动脉冲优化设计[J]. 自动化仪表, 2011, 32(5): 59-62.  
ZHANG L, BU X ZH, ZHAO W. Optimal design of detecting coil and energizing pulse in magnetostrictive displacement sensor [J]. *Process Automation Instrumentation*, 2011, 32(5): 59-62. (in Chinese)

## 作者简介:



王博文(1956-)男,辽宁沈阳人,教授,博士生导师,1995年在中国科学院金属研究所获博士学位,1997年在东北大学完成博士后研究工作,主要从事磁性材料与器件的研究。E-mail: bw-wang@hebut.edu.cn



张露予(1989-)女,河北廊坊人,博士研究生,2011年于河北工业大学获得学士学位,研究方向为新型磁性材料与器件。E-mail: zhangluyu2011@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)