

文章编号 1004-924X(2019)01-0156-08

磁致伸缩液位传感器双检测线圈 温度补偿与噪声抑制

孙 英^{1,2*}, 郑 岩^{1,2}, 翁 玲^{1,2}, 刘 非^{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:为了校正扭转波速度、补偿温度、抑制脉冲电流噪声以及提高输出信号的信噪比,设计了一种双检测线圈结构应用于磁致伸缩液位传感器。推导了扭转波速度与温度的数学模型,得到了扭转波速度随温度的变化趋势;分析了单检测线圈结构存在温度影响测量结果与脉冲电流幅值大等问题。通过理论分析,最终的实验结果表明,与单检测线圈结构相比,双检测线圈结构能够快速计算扭转波速度,补偿温度对测量结果的影响,将脉冲电流噪声信号幅值降低至原来的 $1/27$,测量误差由原来的 0.18 mm 降低至 0.02 mm 。双检测线圈结构为磁致伸缩液位传感器优化设计提供了理论指导。

关键词:磁致伸缩;液位传感器;双检测线圈;噪声抑制;温度补偿

中图分类号:TP212.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192701.0156

Temperature compensation and noise suppression for magnetostrictive liquid level sensor using double detection coils

SUN Ying^{1,2*}, ZHENG Yan^{1,2}, WENG Ling^{1,2}, LIU Fei^{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)
- * Corresponding author, E-mail: sunying@hebut.edu.cn

Abstract: To correct the torsional wave velocity, compensate for the effect of temperature, suppress the pulse current noise, and improve the signal-to-noise ratio of the output signal, a double detection coil structure was designed for a magnetostrictive liquid level sensor. A mathematical model of the torsional wave velocity and temperature was derived, and the relationship between them obtained. The temperature affected the measurement results and the amplitude of pulse current was seen to be larger; these issues of single coil structures were analyzed. The theoretical analysis and experimental results show that, compared with the single detection coil structure, the double detection coil structure leads to faster calculations of the torsional wave velocity and compensates for the effect of temper-

收稿日期:2018-04-20;修订日期:2018-06-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51777053);河北省自然科学基金重点资助项目(No. E2017202035);河北省科技支撑计划资助项目(No. 16211709)

ature on the measurement results. The amplitude of the pulse current noise signal is reduced to the original 1/27, and the measurement error is reduced from the original 0.18 to 0.02 mm. The double detection coil structure provides theoretical guidance for the optimal design of magnetostrictive liquid level sensors.

Key words: magnetostriction; liquid level sensor; double detection coils; noise suppression; temperature compensation

1 引言

磁致伸缩液位传感器是一种非接触式绝对位置测量的传感器,可以应用于许多恶劣的工业环境中^[1-3]。近年来,国内外学者主要在材料测试、信号分析、结构设计和系统模型等方面对于磁致伸缩液位传感器进行研究^[4-11],旨在提高测量精度,改善传感器性能。对于噪声信号和温度影响的研究是提高测量精度不可或缺的部分。

当脉冲电流激励沿波导丝经过检测线圈位置时,线圈中会产生很大的感应电压,形成脉冲电流噪声。此噪声信号幅值波动大,降低了输出信号的信噪比,极易引起计时器误动作,干扰了电路的正常工作。因此,需要抑制脉冲电流噪声,提高信噪比。为此,有学者在降低噪声方面进行了研究^[12-15]。

上海交通大学的陶若杰等人^[12]提出了一种新型的双丝差动结构设计方案,并通过与传统结构位移传感器对比,论证了双丝差动结构在提高精度和抗干扰能力方面的优势。但两根波导丝上的两个检测线圈相邻较近容易产生互感,对输出信号产生影响;上海交通大学的于希文^[13]、四川大学的冯希辰^[14]等人从硬件电路出发,对检测信号进行滤波、调理,抑制了噪声和干扰信号,提高了传感器信噪比。但对于电路的改进会使电路变得很复杂,调整难度大,很难进一步提高精度;河北工业大学的谢新良等人^[15]提出将脉冲电流输入端位置调整到检测线圈右端的方法来降低脉冲电流噪声对检测线圈输出电压的影响,有效降低了脉冲电流噪声幅值。但波导丝与导线连接处会对波导丝扭转形变产生影响,使输出信号中出现干扰。

另外,磁致伸缩液位传感器的扭转波传播速度受温度的影响。当环境温度变化时,传感器测量误差会因为扭转波速度的改变而增大。为了减小温度对测量结果的影响,国内外学者对于温度

补偿的方法进行了许多研究^[16-17]。

浙江理工大学的李永波等人^[16]总结了温度对晶振频率、回波速度和液体密度的影响,提出了一种双辅助磁性浮子法来进行温度补偿,但减小了有效测量量程;辽宁工程技术大学的毛君等人^[17]提出通过基于最小二乘法的多次拟合方法对其进行温度补偿。确定了四次拟合曲线为最佳拟合曲线,测量精度有明显提高。但曲线拟合需要进行大量实验工作,工作量大。

在对传感器输出信号的研究过程中,在抑制噪声的同时往往会存在抑制能力不足或干扰有效信号等问题。对于温度的补偿研究也应避免干扰输出信号、减小有效量程或增加工作量等问题。为此需要继续对传感器的结构优化进行研究。为了进一步达到温度补偿和噪声抑制的目的,本文设计了一种反向串联的双检测线圈结构。将两个线圈反向串联,可抑制脉冲电流噪声,提高信噪比,同时也可以校正扭转波传播速度,补偿温度对测量结果的影响。

2 温度与噪声对单线圈传感器影响

2.1 单检测线圈传感器工作原理

单线圈磁致伸缩液位传感器的工作原理如图1所示。

脉冲电流经过浮子位置时,电流产生的激励磁场与浮子产生的偏置磁场叠加形成螺旋磁场。

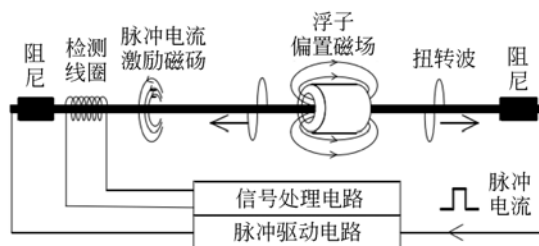


图1 单检测线圈传感器工作原理示意图

Fig. 1 Working principle of single detection coil sensor

根据磁致伸缩效应,波导丝在螺旋磁场的作用下发生扭转变形,扭转波沿波导丝向两端传播。当扭转波传播到检测线圈位置处时,检测线圈感应到波导丝扭转变形引起的磁场变化(磁致伸缩逆效应)产生感应电压。信号处理电路根据扭转波传播时间与传播速度计算得到浮子位置,即液位高度。

2.2 温度对测量结果的影响

单检测线圈时,液位传感器输出的液位高度 L 可表示为:

$$L = vt, \quad (1)$$

扭转波在波导丝中的传播速度 v 可表示为:

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2)$$

其中: t 为从发射激励信号到检测到响应信号的时间间隔; G 为波导丝的剪切模量; ρ 为波导丝的密度。

剪切模量 G 与弹性模量 E 、泊松比 μ 的关系为:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (3)$$

其中弹性模量 E 是应力与应变之比,表征固体材料的抗变形能力。弹性模量 E 随温度的变化关系可简化表示^[18]为:

$$E = E_0(1 - 25\alpha T), \quad (4)$$

其中: E_0 为绝对零度时的弹性模量; α 为线膨胀系数; T 为开氏温度。

将式(4)代入式(3),剪切模量 G 随温度的变化关系变为:

$$G = \frac{E_0(1 - 25\alpha T)}{2(1+\mu)}. \quad (5)$$

物体的密度 ρ 为物体质量 M 与体积 V 的比值。波导丝的质量 M 视为不变量,体积 V 随温度发生热胀冷缩现象。

$$l = l_0(1 + \alpha T), \quad (6)$$

$$r = r_0(1 + \alpha T), \quad (7)$$

其中 l_0 、 r_0 分别为绝对零度时的长度、半径。

波导丝体积 V 可表示为:

$$V = \pi l r^2 = (1 + \alpha T)^3 V_0, \quad (8)$$

其中 V_0 为绝对零度时的体积。

波导丝热胀冷缩后密度 ρ 为:

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{(1 + \alpha T)^3 V_0} = \frac{\rho_0}{(1 + \alpha T)^3}, \quad (9)$$

其中 ρ_0 为绝对零度时的密度。

可见,波导丝的剪切模量 G 和密度 ρ 都与温度有关^[16,19]。

将式(5)、式(9)代入式(2)得到:

$$v = \sqrt{\frac{(1 - 25\alpha T)(1 + \alpha T)^3}{2(1 + \mu)}} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}}. \quad (10)$$

通常扭转变形的波导丝依然在弹性工作范围内,泊松比 μ 视为常数。对式(10)中 $(1 + \alpha T)^3$ 项展开,并略去 α 的高次项,则:

$$v = K \sqrt{1 - 22\alpha T}, \quad (11)$$

其中 $K = \sqrt{\frac{E_0}{2(1 + \mu)\rho_0}}$ 与温度 T 无关,为常数项。

式(11)中的等式右侧的线膨胀系数 α 为一个非常数。大多数金属材料的线膨胀系数 α 随温度 T 的增高而有所增大^[18]。根据式(11)中速度 v 与温度 T 的反比例关系可知,即扭转波传播速度 v 随温度 T 的增加而减小。

可见,当温度变化时,在利用式(1)进行液位高度计算就会产生较大的误差。若想达到高精度测量,需要进行温度补偿,得到更精确的扭转波传播速度。

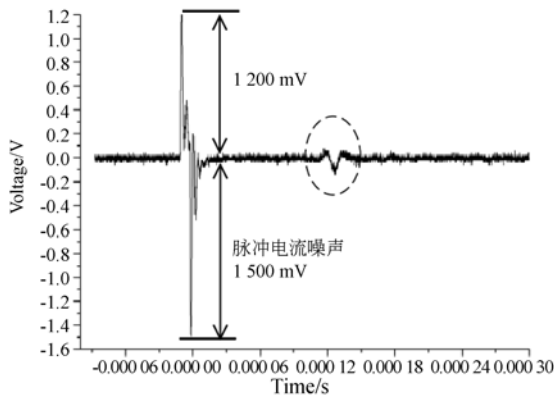
2.3 噪声对输出信号的影响

经过实验测试,可以得到如图 2 所示的单检测线圈的液位传感器输出电压实验波形。其中,图 2(a)为整体波形图,图 2(b)为幅值放大图。

由图 2 可以看出,输出的扭转波信号主要受到脉冲电流噪声、反射波噪声、剩磁与环境噪声等信号的影响。其中,扭转波信号下半部分为传感器有效信号,其幅值在 120 mV 左右。脉冲电流噪声下半部分幅值在 1 500 mV 左右。

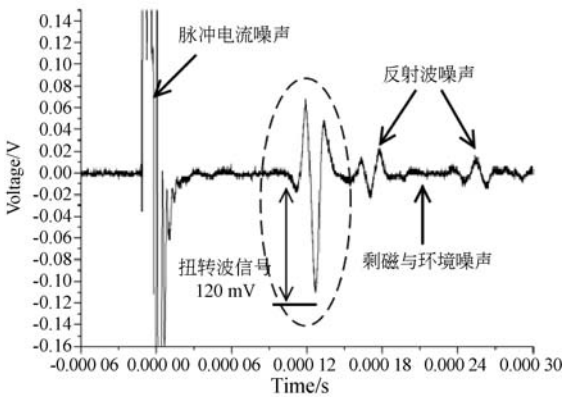
传感器输出信号中,噪声信号明显大于扭转波信号。也就是说,脉冲电流噪声为输出电压信号的主要部分。脉冲电流噪声幅值波动较大,会降低输出信号的信噪比,不利于信号处理电路的正常工作。但是,传统的电路滤波并不能消除在输出信号中占主要部分的脉冲电流噪声。因此,消除脉冲电流噪声需要对传感器结构进行调整。

可见,单检测线圈结构的液位传感器存在测量结果受温度影响和脉冲电流噪声较大等问题,需要对温度进行补偿和抑制脉冲电流噪声。为此,针对单检测线圈液位传感器存在的问题,本文采用了一种将两个检测线圈反向串联的双检测线圈结构。



(a) 脉冲电流噪声波形图

(a) Waveform of pulse current noise



(b) 幅值放大图

(b) Amplifying the amplitude of (a)

图 2 单线圈传感器输出电压实验波形图

Fig. 2 Experimental waveform of output voltage by single coil sensor

3 双检测线圈结构设计

在单线圈液位传感器的基础上,在传感器右端增加了一个 2 号检测线圈,如图 3 所示。检测线圈 1 和 2 进行反向串联,其输出信号送往信号处理电路。传感器左端为首端,即容器顶部;传感器右端为末端,即容器底部。

3.1 消除温度的影响

在双检测线圈情况下,从电流脉冲产生开始计时,扭转波向左传播到 1 号检测线圈时间为 t_1 ,向右传播到 2 号检测线圈时间为 t_2 ,则满足关系:

$$l = v(t_1 + t_2). \quad (12)$$

扭转波在波导丝中的传播速度如式(13)所示:

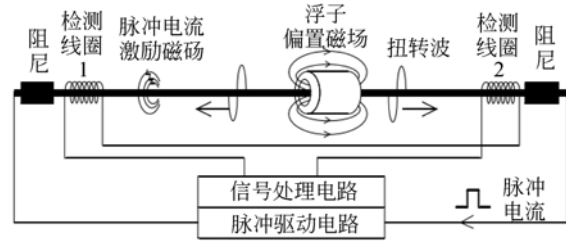


图 3 双检测线圈传感器结构示意图

Fig. 3 Framework of sensor with double detection coils

$$v = \frac{l}{t_1 + t_2}. \quad (13)$$

在一定温度下,扭转波传播速度 v 保持不变。无论浮子在什么位置, t_1 和 t_2 之和为一个定值。当波导丝长度 l 确定时,根据式(13)能够快速求解出此时扭转波的传播速度 v 。

液位高度 L 可表示为:

$$L = v t_2 = l \frac{t_2}{t_1 + t_2}, \quad (14)$$

或

$$\frac{L}{l} = \frac{t_2}{t_1 + t_2}. \quad (15)$$

式(14)与式(1)对比可以看出,液位高度 L 的求解中消除了速度项 v ,不需要在后续计算中对扭转波速度做温度补偿,避免了温度对测量结果的影响。

由式(15)可以看出,液位高度 L 与波导丝长度 l 的比值等于扭转波传播到 2 号检测线圈的时间 t_2 与扭转波传播总时间 $t_1 + t_2$ 的比值。也就是说,当浮子位置保持不变时,时间 t_2 与总时间 $t_1 + t_2$ 的比值不会受温度影响,其比值保持不变。

3.2 降低脉冲电流噪声

图 4 为 1、2 号检测线圈分别输出的脉冲电流噪声波形。由图 4 可以看出,由于电流在波导丝中的传播速度非常快,当电流经过两个检测线圈位置时,可以看作在两个线圈中同时产生感应电压。如果 1、2 号检测线圈结构完全相同,在 1、2 号检测线圈中产生的脉冲电流噪声也相同。将两个线圈反向串联,可将脉冲电流噪声信号抵消。

但是,由于人工制作,线圈参数差异较大,两个检测线圈形成的感应电压波形在波动频率与幅值方面都存在较大差距,这将导致噪声信号无法完全抵消。

为了消除脉冲电流噪声,需要采用两个规格

相同的线圈,以使两个检测线圈输出的脉冲电流噪声电压波形更为接近。

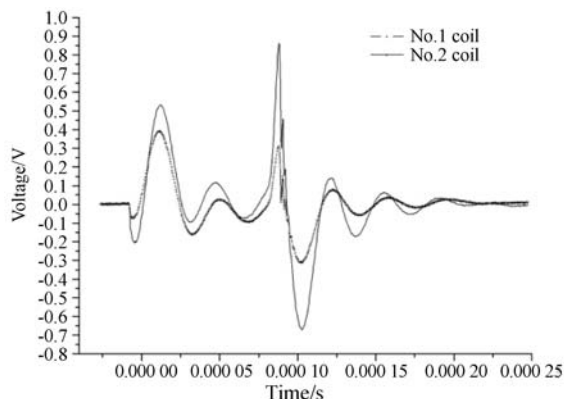


图 4 检测线圈输出的脉冲电流噪声波形

Fig. 4 Waveform of pulse current noise by detection coil

4 实验结果与分析

为了验证双检测线圈结构的可行性,本文采用课题组搭建的磁致伸缩液位传感器实验测试平台^[5]进行了一系列实验验证。本次实验中采用直径 0.5 mm、长度 600 mm 的 Fe-Ga 磁致伸缩材料作为波导丝,TFG6920A 型信号发生器作为脉冲电源输出,DPO3014 型四通道示波器作为检测信号的采集显示装置。

4.1 双检测线圈测量结果分析

上述分析表明,双检测线圈结构可以补偿温度的影响,矫正扭转波的传播速度。在波导丝长度已知的前提下,扭转波传播速度可根据 t_1 和 t_2 之和求解。表 1~表 3 分别为在 100 °C、50 °C、20 °C 条件下, t_1 、 t_2 随浮子位置的变化情况。

表 1 100 °C 时 t_1 、 t_2 随浮子位置变化情况

Tab. 1 Change of t_1 and t_2 with float position at 100 °C

浮子位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
$t_1/\mu\text{s}$	194.95	160.62	135.52	85.64	44.60
$t_2/\mu\text{s}$	33.06	67.41	92.48	142.37	183.40
$t_1 + t_2/\mu\text{s}$	228.01	228.03	228.00	228.01	228.00
$t_2/(t_1 + t_2)/\%$	14.50	29.56	40.56	62.44	80.43

表 2 50 °C 时 t_1 、 t_2 随浮子位置变化情况

Tab. 2 Change of t_1 and t_2 with float position at 50 °C

浮子位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
$t_1/\mu\text{s}$	193.25	159.22	134.36	84.88	45.20
$t_2/\mu\text{s}$	32.77	66.79	91.66	141.14	181.80
$t_1 + t_2/\mu\text{s}$	226.02	226.01	226.02	226.02	226.00
$t_2/(t_1 + t_2)/\%$	14.50	29.55	40.55	62.45	80.44

表 3 20 °C 时 t_1 、 t_2 随浮子位置变化情况

Tab. 3 Change of t_1 and t_2 with float position at 20 °C

浮子位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
$t_1/\mu\text{s}$	191.44	157.73	133.10	84.08	43.83
$t_2/\mu\text{s}$	32.47	66.17	90.80	139.82	180.09
$t_1 + t_2/\mu\text{s}$	223.91	223.90	223.90	223.90	223.92
$t_2/(t_1 + t_2)/\%$	14.50	29.55	40.55	62.45	80.43

由实验数据表明,在温度恒定的情况下, t_1 、 t_2 时间之和基本保持不变,与浮子位置无关。当浮子位置不变时,时间 t_2 与 $t_1 + t_2$ 的比值基本保持不变,不受温度的影响。由式(15)可知,时间 t_2 与 $t_1 + t_2$ 的比值不变,则浮子位置的计算值保持不变。在 100 °C、50 °C、20 °C 时, t_1 、 t_2 时间之和分别为 228.01 μs 、226.02 μs 和 223.90 μs 。根据式(13)可快速计算得到扭转波在 100 °C、50 °C、20 °C 时的传播速度分别为 2 631.46 m/s、2 654.63 m/s 和 2 679.77 m/s。这个计算结果与在式(11)中得到的结论相符合,即扭转波速度随着温度的升高而降低。

根据实验数据分析可得,双检测线圈能够快速计算扭转波传播速度。与单检测线圈结构相比,双检测线圈结构能够补偿温度,避免温度对测量结果的影响。

4.2 单、双检测线圈输出波形对比

理论上,当两个检测线圈具有相同电特性参数时会使脉冲电流噪声降到最低。为此,对多个线圈进行参数值测量,选取参数最为接近的两个检测线圈进行实验。表 4 为两检测线圈的相关电参数值。

表 4 两检测线圈的相关电参数值

Tab. 4 Correlation electrical parameters of two detection coils

电参数	电阻/ Ω	电感/mH	电容/pF
1 号线圈	80.01	4.98	50.87
2 号线圈	76.12	4.12	59.79

表 5 单、双检测线圈输出波形对比

Tab. 5 Comparison of output waveforms of single and double detection coils (mV)

电参数	脉冲电流噪声	扭转波
单线圈结构	2 700	120
双线圈结构	100	120

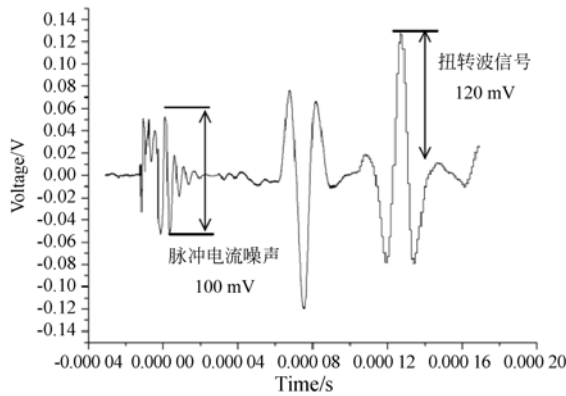


图 5 双检测线圈结构输出信号波形图

Fig. 5 Waveform of output signal by double detection coils

图 5 为双检测线圈结构输出的电压波形。分析图 2、图 5 可知,单检测线圈结构脉冲电流引起的噪声信号峰峰值为 2 700 mV,扭转波信号为 120 mV。双检测线圈脉冲电流噪声峰峰值降低为 100 mV,扭转波信号幅值依然为 120 mV。脉冲电流噪声降低到单检测线圈结构的 1/27,如表 5 所示。

可见,双检测线圈结构有效减小了脉冲电流噪声信号幅值,提高了输出信号的信噪比。

4.3 单、双检测线圈测量误差对比

在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下,对浮子在不同位置处输出情况进行了多次实验,并对采集到的相关实验数据做平均值处理。实验前应用于计算的 20 $^{\circ}\text{C}$ 时扭转波传播速度为 2 679.00 m/s。表 6 所示为单线

圈结构传感器浮子在不同位置处输出情况和相应的液位高度计算值。利用表 3 中双线圈结构实验数据计算双线圈结构测量误差,比较单、双线圈输出误差情况,如表 7 所示。可知,单线圈结构最大测量误差为 0.18 mm,双线圈结构最大测量误差为 0.02 mm。双检测线圈结构测量误差明显降低。

表 6 单线圈结构浮子位置变化情况

Tab. 6 Position change of float with single coil structure

浮子位置	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
$t/\mu\text{s}$	32.46	66.16	90.80	139.80	180.07
$L=vt$	86.96	177.24	243.25	374.52	482.41

表 7 单、双线圈测量误差对比

Tab. 7 Comparison of measuring errors between single and double coils

浮子位置 /mm	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	位置 5
实际距离	87.00	177.30	243.30	374.70	482.55
单线圈	86.96	177.24	243.25	374.52	482.41
? $L_{\text{单}}$	0.04	0.06	0.05	0.18	0.14
双线圈	87.01	177.32	243.32	374.69	482.56
? $L_{\text{双}}$	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01

5 结 论

通过推导扭转波速度与温度的数学模型,得到了扭转波速度随温度的变化趋势;通过分析传感器的输出电压波形,得到输出波形中脉冲电流噪声占主要部分。针对单检测线圈磁致伸缩液位传感器存在的问题,在其基础上设计了一种双检测线圈结构。

为验证双线圈传感器的可行性,进行了实验测试。实验结果表明,采用双检测线圈结构可快速计算扭转波传播速度,补偿了温度对测量误差的影响。同时,脉冲电流噪声信号由原来的 2 700 mV 降低至 100 mV,噪声信号降低到了原来的 1/27;扭转波信号幅值保持在 120 mV 不变;最大测量误差由 0.18 mm 降低至 0.02 mm。

综上所述,磁致伸缩液位传感器双检测线圈结构存在以下优点:

(1) 双检测线圈结构传感器实现了对于扭转波速度的快速计算, 补偿了温度的影响。

(2) 双检测线圈结构有效减小了脉冲电流噪

声干扰, 提高了信噪比。

(3) 双检测线圈结构有效减小了测量误差, 提高了测量精度。

参考文献:

- [1] 孙英, 靳辉, 郑奕, 等. 磁致伸缩液位传感器检测信号影响因素分析及实验研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(11): 1607-1613.
SUN Y, JIN H, ZHENG Y, *et al.*. Detective signal influence factor analysis and experimental research of magnetostrictive liquid level sensor[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2015, 28(11): 1607-1613. (in Chinese)
- [2] 周新志, 余超, 熊胤琪, 等. 新型 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ 波导线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 $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$ line to magnetostrictive displacement sensors[J]. *Journal of Chongqing University*, 2013, 36(5): 64-69. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 王博文, 谢新良, 周露露, 等. Fe-Ga 磁特性测试装置改进与动态磁致伸缩实验[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2396-2404.
WANG B W, XIE X L, ZHOU L L, *et al.*. Improvement of testing device for Fe-Ga magnetic properties and dynamic magnetostrictive experiment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2396-2404. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] DENG CH, KANG Y H, LI E L, *et al.*. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor[J]. *Measurement*, 2014, 47(7): 591-597.
- [7] 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 Sensor and Actuators*, 2013, 26(2): 195-199. (in Chinese)
- [8] 孙英, 边天元, 王硕, 等. 偏置磁场对磁致伸缩液位传感器检测电压的影响[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2783-2791.
SUN Y, BIAN T Y, WANG SH, *et al.*. Influence of bias magnetic field on detection voltage of magnetostrictive liquid level sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(11): 2783-2791. (in Chinese)
- [9] ZHANG L Y, WANG B W, 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.
- [10] HUANG L. A new model of the signal generation mechanism on magnetostrictive position sensor[J]. *Measurement*, 2014, 47(1): 591-597.
- [11] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(2): 358-364. (in Chinese)
- [12] 陶若杰, 赵辉, 刘伟文, 等. 双丝差动型磁致伸缩位移传感器结构设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(6): 799-802.
TAO R J, ZHAO H, LIU W W, *et al.*. Designment of bi-waveguide differential magnetostrictive displacement sensor[J]. *Chinese Journal of Sensor and Actuators*, 2010, 23(6): 799-802. (in Chinese)
- [13] 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 Da Lian Jiaotong U-*

- niversity, 2013, 34(3): 56-60. (in Chinese)
- [14] 冯希辰,周新志,余超. 磁致伸缩位移传感器回波信号滤波器设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(6): 104-107.
FENG X CH, ZHOU X ZH, YU CH. Filters design for echo signal of magnetostrictive displacement sensors[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(6): 104-107. (in Chinese)
- [15] 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 Sensor and Actuators*, 2017, 30(1): 109-114. (in Chinese)
- [16] 李永波,胡旭东,曾宗云. 温度对磁致伸缩液位传感器测量精度的影响[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(6): 11-13.
LI Y B, HU X D, ZENG Z Y. The temperature effect on the measuring accuracy of a magnetostrictive liquid lever sensor[J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2007(6): 11-13. (in Chinese)
- [17] 毛君,谢春雪,孟洋,等. 磁致伸缩液位传感器温度补偿方法研究[J]. 控制工程, 2015, 22(5): 921-926.
MAO J, XIE C X, MENU Y, *et al.*. Study on magnetostrictive liquid level sensor temperature compensation method[J]. *Control Engineering of china*, 2015, 22(5): 921-926. (in Chinese)
- [18] 徐志东,范子亮. 金属材料的弹性模量随温度变化规律的唯象解释[J]. 西南交通大学学报, 1993(2): 87-92.
XU ZH D, FAN Z L. A phenomenological explanation of the variation of elastic modulus with temperature for metallic materials [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 1993(2): 87-92. (in Chinese)
- [19] 刘彤,刘敏珊. 金属材料弹性常数与温度关系的理论解析[J]. 机械工程材料, 2014, 38(3): 85-89, 95.
LIU T, LIU M SH. Theoretical analysis of the relationship between elastic constants of metals and temperatures[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2014, 38(3): 85-89, 95. (in Chinese)

作者简介:



孙英(1970—),女,河北唐山人,博士,副教授,研究生导师,1994年、2001年、2008年于河北工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事磁器件设计、建模及控制等研究。E-mail: sunying@hebut.edu.cn



郑岩(1991—),男,河北保定人,硕士研究生,2014年于河北工业大学获得学士学位,主要从事磁材料与器件等研究。E-mail: 1522440119@qq.com