

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006217

非线性磁阻抗传感器检测方法研究^{*}

郭大哲, 文玉梅, 李 平, 王 遥

(上海交通大学电子信息与电气工程学院 上海 200240)

摘 要:为解决磁阻抗效应的偶次非线性问题,提出自平衡式传感信号检测方法。通过交流偏置磁场及检波处理,传感器的输出具有奇次特性,无需直流偏置就能反映磁场方向;再引入 PI 控制器构成闭环检测系统,系统达到稳态时反馈磁场与外磁场抵消,实现自平衡式检测,消除传感器的非线性。使用薄膜电感磁传感器进行实验验证,传感器自平衡检测方法输出呈良好的线性特性,非线性度仅为 0.82%,有效测量范围扩大了一倍。在不同交流偏置下,输出特性仍保持高度一致,各输出间相关系数均在 0.999 9 以上。交流偏置自平衡式检测适用任何非线性磁传感器,消除各种非线性特性得到高线性度的传感输出。

关键词:磁传感器;磁阻抗效应;偶次非线性;交流偏置;自平衡式检测

中图分类号: TP212 TH701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Research on the detection method of the nonlinear magnetic impedance sensor

Guo Dazhe, Wen Yumei, Li Ping, Wang Yao

(School of Electronic Information and Electric Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The magneto-impedance effect has the even-order nonlinearity. To solve this problem, a self-balanced detection method is proposed. By applying AC bias field and using phase sensitive detection, the output of sensor has the feature of odd symmetry. The direction of external field can be detected without DC bias. Then, a proportional-integral (PI) controller is utilized to form a closed-loop detection system. When the system reaches the steady state, the feedback field and the external field are counteracted with each other. And the self-balanced detection will be implemented. In this way, the nonlinearity of the sensor is eliminated. Experiments are implemented on a thin-film-inductive magnetic sensor. Results show that the output of the self-balanced detection method has good linearity, and the nonlinearity is only 0.82%. The measurement range is enlarged double. Even under different AC bias, the output characteristics is consistent and the correlation coefficients are all larger than 0.999 9. The self-balanced detection with AC bias is suitable for all nonlinear magnetic sensors. Different kinds of nonlinear characteristic can be eliminated by the proposed method and the high-linear output can be achieved.

Keywords: magnetic sensor; magneto-impedance effect; even-order nonlinearity; AC bias; self-balanced detection

0 引 言

磁传感器在飞行器^[1-2]、生物医疗^[3-4]、地质勘探^[5]等诸多领域都有着广泛的应用,其中,磁阻抗传感器因其高灵敏度、易于微型化等优点成为了磁传感领域的研究热点。磁阻抗传感器的敏感元件一般以软磁材料的细线、窄带或薄膜制成,由于材料磁导率 μ 随外磁场 H 会

发生改变,传感器的交流阻抗也会随之产生剧烈变化^[6-7],即磁阻抗(magneto impedance, MI)效应。磁材料的极化具有奇次特性,其磁导率对磁场变化具有偶次特性,对磁场方向不敏感,因此敏感元件的输出也具有偶次特性。如果要获得线性的传感输出,首先要将敏感元件的输出转化为奇次特性,以分辨出磁场方向。

为解决 MI 效应的偶次非线性问题,常用的方式可大致分为两种类型。第一种类型是施加直流磁场设置静态

工作点^[8-9],利用工作点附近的近线性区域进行线性测量。文献[8]利用 CoFeBSi 非晶丝作为敏感元件,将一对特性相同的非晶丝分别偏置在 ± 6 Oe 磁场下,搭建了差分结构的传感系统,测量范围为 ± 2 Oe,灵敏度 748 mV/Oe,非线性度为 0.98%。文献[9]利用铁基非晶带作为敏感元件,两路非晶带分别偏置在 ± 500 μ T 处,组成差分结构传感系统,测量范围为 ± 2.5 Oe,灵敏度为 200 mV/Oe,非线性度为 0.48%。但这种方法存在以下两个主要问题:1)在工作点处,传感器的输出不为 0,需要进行零点调整。2)敏感元件的特性会受到温度、压力等的影响^[10-11],造成工作点的漂移。目前多采用差分结构以解决上述问题,但是差分结构要求两路的输出高度对称,对元件要求较高。

第二种类型是使用电流偏置^[12-14],在非晶丝上施加直流偏置电流,或使用脉冲电流激励,产生圆周磁场,由于非晶丝的螺旋磁各向异性,将产生非对称 MI 效应。文献[15]使用直流偏置电流的方法设计了传感器系统,对比了相位检测与幅值检测的性能指标。文献[16-17]使用脉冲激励,分别将两根非晶丝用作检测端与参考端,设计了磁场梯度仪,其分辨率可达 10 pT 级别。文献[18]分析直流偏置电流对噪声的影响,认为直流偏置电流在非晶丝表面形成的圆周磁场会改变其内部有效场,有助于减小内部磁噪声。虽然电流偏置能够解决磁阻抗效应的偶次非线性问题,但是这种方法仅适用于非晶丝或窄带结构的传感器。

针对磁阻抗效应的偶次非线性问题,本文提出了一种新的检测方式。通过使用交流偏置磁场及检波处理,将敏感元件的输出转化为奇次特性,无需零点调整。在此基础上,引入反馈控制环节构成自平衡式闭环检测系统,系统进入稳态时,反馈磁场与待测磁场相互抵消,使得敏感元件始终处于零磁场作用下的平衡状态,反馈量直接反映待测磁场的大小,可扩大测量范围。系统输出只取决于反馈环节的参数,而与传感器的灵敏度无关,能够提高线性度,减小外界因素的影响。

1 开环检测系统

在敏感元件上施加交流偏置磁场后,元件的输出中将包含偏置信号的各次谐波,其中奇次谐波的幅值与外界待测磁场为奇函数关系,使用带通滤波^[19]或相敏检波^[20]的方式进行提取,可将元件的输出奇次特性化。由于相敏检波具有更好的选频能力,可有效提高信噪比,因此本文选择使用相敏检波的方式处理元件的输出信号。

图 1 所示为开环检测系统原理。通过线圈施加交流偏置磁场,将敏感元件两端的电压信号接入后续正交检波、相敏检波及低通滤波等模块进行处理。

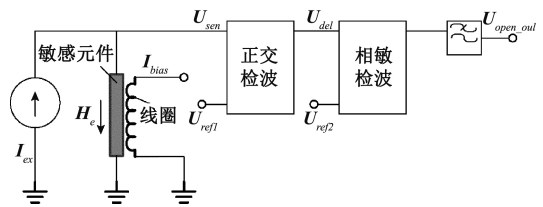


图 1 开环检测系统原理

Fig.1 The block diagram of the open-loop detection system

通过交流激励电流 I_{ex} 驱动敏感元件,在交流偏置磁场作用下,敏感元件的阻抗将周期性变化,从而使得元件的输出信号 U_{sen} 出现对应的包络波形。设 $I_{ex} = I_0 \cos(\omega_0 t)$; 设偏置电流为 $I_{bias} = I_b \cos(\omega_1 t)$, 对应的交流偏置磁场为 $H_{bias} = H_b \cos(\omega_1 t)$, 其中 $\omega_1 \ll \omega_0$; 设敏感元件的阻抗随外磁场变化函数为 $Z = Z(H)$, 对应的阻抗角为 $\varphi = \varphi(H)$ 。在待测磁场 H_e 与偏置磁场 H_{bias} 共同作用下,有 $H = H_e + H_b \cos(\omega_1 t)$ 。则可得输出信号的表达式为:

$$U_{sen} = I_0 |Z(H_e + H_b \cos(\omega_1 t))| \cdot \cos(\omega_0 t + \varphi(H_e + H_b \cos(\omega_1 t))) \quad (1)$$

根据式(1),可设 U_{sen} 的包络波形表达式为: $U_m = I_0 \cdot |Z(H_e + H_b \cos(\omega_1 t))|$, 其中包含有偏置信号的谐波。由于元件阻抗 Z 与外磁场 H_e 为偶次关系,可将 U_m 级数展开如式(2),其中 A_{2i} 为 $|Z(H)|$ 在零点的 $2i$ 阶导数。

$$U_m = I_0 \sum_{i=0}^{\infty} \frac{A_{2i}}{(2i)!} (H_e + H_b \cos(\omega_1 t))^{2i} = I_0 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{2i} (A_{2i} \frac{H_b^k}{k!} \frac{H_e^{2i-k}}{(2i-k)!} \cos^k(\omega_1 t)) \quad (2)$$

将 $\cos^k(\omega_1 t)$ 降幂如式(3)所示:

$$\cos^k(\omega_1 t) = \begin{cases} \frac{1}{2^{k-1}} (\cos(k\omega_1 t) + C_k^1 \cos((k-2)\omega_1 t) + \dots + C_k^{\frac{k-1}{2}} \cos(\omega_1 t)), & k \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2^{k-1}} (\cos(k\omega_1 t) + C_k^1 \cos((k-2)\omega_1 t) + \dots + C_k^{\frac{k}{2}}), & k \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可看出, k 为奇数时, $\cos^k(\omega_1 t)$ 相当于 $\cos(\omega_1 t)$ 的奇次谐波的叠加;反之则是其偶次谐波的叠加,且其中一次与二次谐波的幅值最大。结合式(2)可得, U_m 中奇次谐波与偶次谐波的幅值表达式分别只包含 H_e 的奇次幂与偶次幂,滤除直流分量后一次与二次谐波是谐波的主要成分,即 U_m 可近似表示为如式(4):

$$U_m \approx I_0 (N_1(H_e) \cos(\omega_1 t) + N_2(H_e) \cos(2\omega_1 t)) \quad (4)$$

式中: $N_1(H_e)$, $N_2(H_e)$ 分别表示一次谐波与二次谐波的幅值。

从式(1)中可看出, U_{sen} 的幅值与相位均与外磁场相

关,使用正交检波的方式可消除相位变化带来的影响。图1中正交检波模块的原理如图2所示,其中参考信号 $U_{ref1} = U_1 \cos(\omega_0 t)$ 。

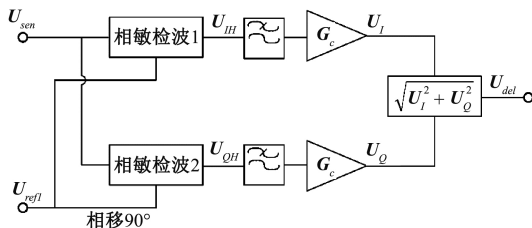


图2 正交检波模块原理

Fig.2 The block diagram of the quadrature detector

图2中 G_c 表示检波过程中的增益。由相敏检波的原理,可得 U_H, U_{QH} 。

$$\begin{cases} U_H = \frac{1}{2} G_c U_0 U_m (\cos(\varphi(H)) + \cos(2\omega_0 t + \varphi(H))) \\ U_{QH} = \frac{1}{2} G_c U_0 U_m (\sin(\varphi(H)) + \sin(2\omega_0 t + \varphi(H))) \end{cases} \quad (5)$$

由于 $\omega_1 \ll \omega_0$, $U_m \cos(2\omega_0 t + \varphi(H))$ 与 $U_m \sin(2\omega_0 t + \varphi(H))$ 的频率近似为 $2\omega_0$, 将低通滤波器的截止频率设置在 ω_1 与 $2\omega_0$ 之间,可得 U_I, U_Q 。

$$\begin{cases} U_I = \frac{1}{2} G_c U_0 U_m \cos(\varphi(H)) \\ U_Q = \frac{1}{2} G_c U_0 U_m \sin(\varphi(H)) \end{cases} \quad (6)$$

从而推导可得 U_{del} 。

$$U_{del} = \sqrt{U_I^2 + U_Q^2} = \frac{1}{2} G_c U_0 N_1(H_e) \cos(\omega_1 t) \quad (7)$$

如图1所示,使用 $U_{ref2} = U_2 \cos(\omega_1 t)$ 作为参考信号,对 U_{del} 再进行相敏检波,并将检波后的输出通过低通滤波滤去交流量,提取其幅值信息,可得开环系统的输出如式(8)所示。

$$U_{open_out} = \frac{1}{4} G_c U_0 U_1 N_1(H_e) \quad (8)$$

开环系统的增益可在检波环节进行调整。由于 $N_1(H_e)$ 中只包含 H_e 的奇次幂,因此 U_{open_out} 随 H_e 的变化为奇次特性。

2 闭环检测系统

为了进一步提高传感器的性能指标,引入PI控制器及V-I转换电路,构成自平衡式闭环检测系统。如图3所示,设 I_f 正方向、 H_e 的正方向均与输出电压 U_{out} 一致,则 $G_{VI} > 0, G_{IH} > 0$; PI控制器的传递函数为

$PI(s) = K_p + K_I \cdot \frac{1}{s}$, 其中: K_p 为比例系数, K_I 为积分系数, $K_p > 0, K_I > 0$ 。

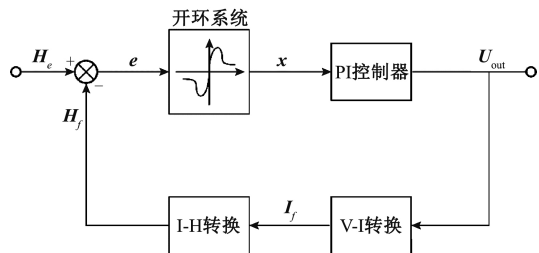


图3 闭环检测系统控制结构

Fig.3 The control construction of the self-balanced closed-loop detection system

设开环系统的传递函数为 $G_{sen}(s)$, 可得闭环系统的传递函数如式(9):

$$\frac{U_{out}(s)}{H_e(s)} = \frac{G_{sen}(s)K_I + G_{sen}(s)K_p s}{G_{sen} G_{VI} G_{IH} K_I + (1 + G_{sen} G_{VI} G_{IH} K_p) s} \quad (9)$$

设 $H_e(s) = \frac{H_{in}}{s}$, 由式(9)可计算得系统在阶跃输入下的

的稳态输出 $u_{out}(\infty)$, 如式(10)所示。

$$u_{out}(\infty) =$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s H_e(s) \frac{G_{sen}(s)K_I + G_{sen}(s)K_p s}{G_{sen}(s)G_{VI}G_{IH}K_I + (1 + G_{sen}G_{VI}G_{IH}K_p)s} = \frac{1}{G_{VI}G_{IH}} H_{in} \quad (10)$$

由式(10)可知,闭环系统进入稳态时,反馈磁场 $H_f = u_{out}(\infty) \cdot G_{VI}G_{IH} = H_{in}$, 与输入磁场相互抵消,敏感元件处于零磁场作用的平衡状态。系统的输出仅取决于反馈环节,可提高传感器的线性度,且由于系统的输出与传感器灵敏度无关,传感器特性的波动不会影响系统的输出,从而能够降低温度、压力等外部因素的影响。

式(9)~(10)成立的前提条件是闭环系统稳定,但由于其中的开环系统特性与敏感元件的具体特性有关,闭环系统的稳定性需要分情况讨论。

设开环系统输入为 e , 输出为 x , 设 e 与 x 之间关系为: $x = Sen(x)$, 采用交流偏置的情况下, $x = Sen(x)$ 可视为奇函数。

根据图3所示的控制结构,可得到各系统变量之间的关系式如式(11)、(12)所示:

$$\dot{U}_{out} = K_p \dot{x} + K_I x \quad (11)$$

$$e = H_e - G_{VI}G_{IH}U_{out} \quad (12)$$

对式(12)两边求导,并将式(11)代入可得:

$$\dot{e} = -G_{VI}G_{IH}(K_p Sen'(e)\dot{e} + K_I Sen(e)) \quad (13)$$

式中: $Sen'(e)$ 表示 $Sen(e)$ 的导函数。整理后可得:

$$\dot{e} = - \frac{G_{VI}G_{IH}K_I Sen(e)}{1 + G_{VI}G_{IH}K_P Sen'(e)} \quad (14)$$

取假设条件: $e \neq 0$ 时, $e \cdot Sen(e) > 0$, 即开环系统输出电压极性与输入磁场极性相同。

由于 $Sen(e)$ 为奇函数, 且 $e \neq 0$ 时 $e \cdot Sen(e) > 0$, 结合式 (13) 可知, $\dot{e} = 0 \Leftrightarrow e = 0$, 即系统只存在唯一的平衡点 $e = 0$ 。

定义李雅普诺夫函数 $V(e) = e^2$, 可计算其导函数表达式如式 (15) 所示

$$V'(e) = 2e \cdot \dot{e} = - 2e \frac{G_{VI}G_{IH}K_I Sen(e)}{1 + G_{VI}G_{IH}K_P Sen'(e)} \quad (15)$$

若 $Sen'(e) \geq 0$ 恒成立, 则 $V'(e) < 0$ 恒成立。

若 $\exists e$, 使 $Sen'(e) < 0$, 可设:

$(Sen'(e))_{\min} = s_0 < 0$ 。则可通过选取 G_{VI}, G_{IH}, K_P 使得 $0 < G_{VI}G_{IH}K_P < -\frac{1}{s_0}$, 此时 $1 + G_{VI}G_{IH}K_P Sen'(e) > 0$ 恒成立, 从而有 $V'(e) < 0$ 恒成立。

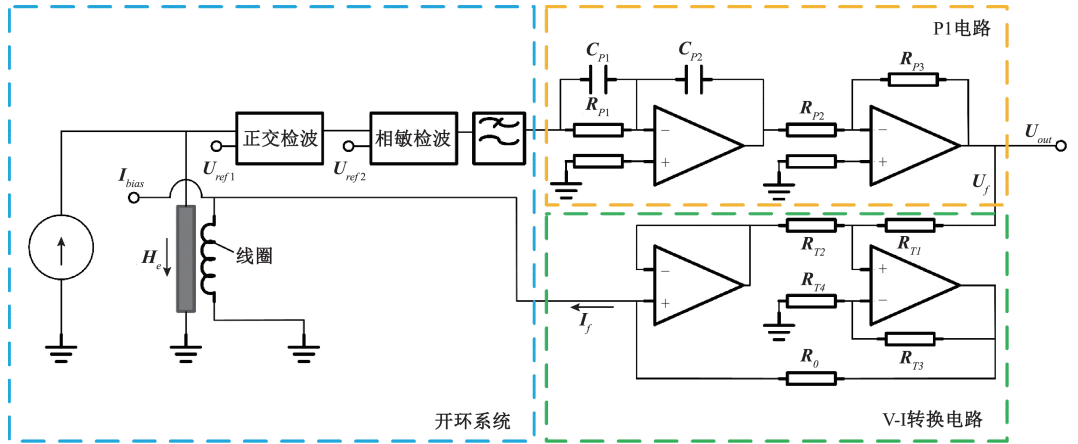


图4 闭环检测系统原理结构

Fig.4 The schematic diagram of the closed-loop detection system

由图4可知,线圈中同时通有反馈电流与偏置电流。PI电路中对应的比例系数、积分系数为: $K_P = \frac{C_{P1}}{C_{P2}}, K_I = \frac{1}{R_{P1}C_{P2}}$ 。V-I转换电路中的输入为PI电路的输出 U_f , 取 $R_{T1} = R_{T2} = R_{T3} = R_{T4}$, 则 U_f 会按比例线性转换为反馈电流 I_f , 电压电流转换系数 $G_{VI} = \frac{1}{R_0}$, 即 $I_f = \frac{1}{R_0} U_f$ 。

3 实验验证

3.1 开环检测系统实验

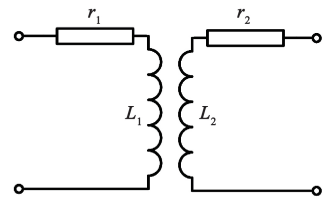
为了验证本文方法的有效性,使用薄膜电感型磁传

感器^[21-23](以下简称薄膜传感器)进行了验证实验。这种传感器是软磁材料薄膜与平面线圈组成三明治结构,薄膜的磁阻抗效应使得线圈的电感值也对外磁场敏感。与传统磁阻抗传感器不同,薄膜传感器的传感过程与集肤效应无关,有效降低了工作频率。实验使用的薄膜传感器的等效电路及封装后实物分别如图5(a)与(b)所示。

综上所述,假设条件 $e \cdot Sen(e) > 0 (e \neq 0)$ 成立时, $V'(e) < 0$ 恒成立。由李雅普诺夫第二方法,可知系统是渐进稳定的,总是能回归到平衡点,此时 $e = 0$, 待测磁场 H_e 与反馈磁场 H_f 相互抵消。

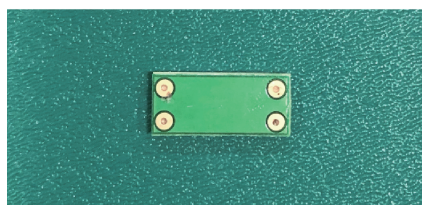
若假设条件 $e \cdot Sen(e) > 0 (e \neq 0)$ 恒成立,则检测系统是大范围渐进稳定的。在其他情况下,由于 $Sen(e)$ 为奇函数,因此在零磁场附近的某一范围内必然有 $e \cdot Sen(e) > 0$ 或 $e \cdot Sen(e) < 0$, 设该范围为 $(-H_m, H_m)$ 。通过式(8)可知,可调整 G_e 改变开环增益,从而改变开环系统的输出极性,因此能够调节参数使得在 $(-H_m, H_m)$ 区间上,假设条件成立,此时检测系统在该区间上渐进稳定,系统测量范围为 $(-H_m, H_m)$ 。

闭环检测系统原理如图4所示。将开环系统的输出电压信号输入PI控制电路,再经过V-I转换电路将PI电路的输出按比例转换为反馈电流输入线圈,生成反馈磁场,构成完整的闭环检测系统。



(a) 传感器等效电路

(a) The equivalent circuit of the sensor



(b) 传感器实物
(b) The photograph of the real sensor

图5 薄膜传感器等效电路及实物

Fig.5 The equivalent circuit and photograph of the thin-film sensor

薄膜传感器可等效为一个变压器, r_1 与 L_1 分别为激励线圈的内阻与电感, r_2 与 L_2 分别为输出线圈的内阻与电感。采用变压器结构能够有效的避免传感器内阻带来的影响, 从而降低其内部噪声, 同时提高传感器的灵敏度^[23]。

薄膜传感器的输出特性曲线如图6所示, 实验中, 设置的激励电流频率为 500 kHz, 峰峰值 25 mA。外磁场由赫姆赫兹线圈与高功率电流源提供, 电磁转化系数为 20 Oe/A, 即 $H_e = 20I$ 。

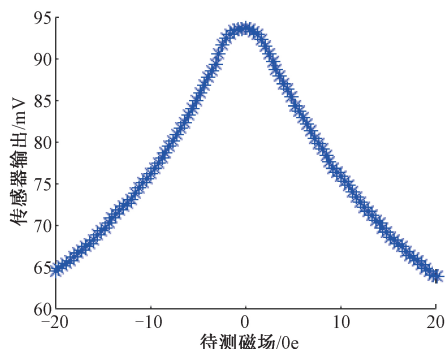


图6 薄膜传感器特性曲线

Fig.6 Characteristic curve of the thin-film sensor

如图6所示, 薄膜传感器输出的峰值出现在零磁场处, 随着磁场的增加, 输出逐渐降低, 反向增加磁场时变化情况相类似, 具有明显的偶次非线性。

为了使得偏置磁场与反馈磁场更有效地作用在传感器上, 将线圈直接在传感器封装上绕制, 经过标定, 线圈电流 I_f 与生成磁场 H_f 间的关系如式(16)所示(I_f 单位为 mA, H_f 单位取 Oe):

$$H_f = G_m I_f \approx 0.151 I_f \quad (16)$$

实验中, 使用瑞士苏黎世仪器公司生产的 MFLI 锁相放大器实现正交解调模块与相敏检波模块。激励信号采用 500 kHz, 峰峰值 25 mA 的电流信号。偏置磁场的频率应远低于激励信号频率, 实验中分别使用幅值为 50 mA、30 mA、20 mA, 频率为 1 kHz 的交流电流提供偏置磁场, 对应的偏置磁场幅值分别为 7.5、4.5、3 Oe。

图7所示为开环系统输出随外磁场变化的测量结果。图例表示偏置磁场的幅值。开环系统的输出特性呈典型的奇次特性。在零磁场附近存在单调变化区间, 区间长度取决于偏置磁场的幅值, 区间上开环系统输出特性近似为线性, 可直接用于磁场的测量。偏置磁场幅值为 7.5、4.5、3 Oe 时, 可取区间 $(-6 \text{ Oe}, 6 \text{ Oe})$ 、 $(-3 \text{ Oe}, 3 \text{ Oe})$ 、 $(-2 \text{ Oe}, 2 \text{ Oe})$ 为线性工作区间, 非线性度分别为 6.6%、5.6%、3.2%。

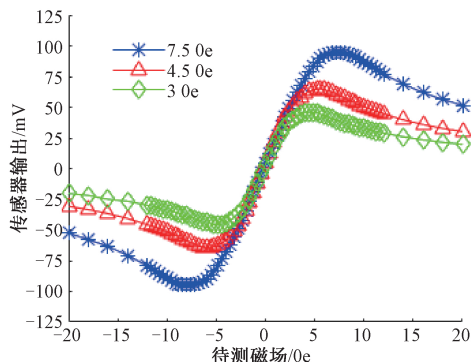


图7 开环系统输出特性曲线

Fig.7 The output characteristic curve of the closed-loop system

在待测磁场增大至超出单调区间时, 开环系统输出逐渐降低, 但极性未发生改变, 始终满足假设条件 $e \cdot \text{Sen}(e) > 0 (e \neq 0)$, 由前文分析可知, 引入反馈环节构成自平衡式闭环检测系统后, 系统将是大范围渐进稳定的, 理论上对于任意大小的外磁场输入, 系统都能回归到平衡状态, 但受到实际元件的限制, 系统的测量范围必然是有限的, 主要取决于反馈环节的最大输出电流。

3.2 闭环检测系统实验

如图8所示, 开环系统输出特性曲线存在拐点, 磁场大小超过拐点时 $\text{Sen}'(e) < 0$, 由前文的分析, 各环节设定的元件参数需要使得 $1 + G_{VI} G_m K_p (\text{Sen}'(e))_{\min} > 0$ 恒成立, 才能够使得闭环系统是渐进稳定的, 因此 G_{VI} 、 G_m 与 K_p 的选取需要满足条件:

$$G_{VI} G_m K_p < \frac{-1}{(\text{Sen}'(e))_{\min}} \quad (17)$$

图8所示为输出特性曲线对应的导数曲线, 即 $\text{Sen}'(e)$ 。由于测量数据为离散点, 导数值通过差分的方式计算得到。

传感器输出特性导数的最小值为 -5.12, 因此电路参数应满足 $0 < G_{VI} G_m K_p < 0.195$ 。理论上, 只要选取的参数满足式(16), 均能使得闭环系统渐进稳定, 达到自平衡式检测的效果。实际所取得参数为: $G_m = 0.15$; 取 $R_0 = 30 \Omega$, 则 $G_{VI} = \frac{1}{30}$; 取 $C_{p1} = 10 \mu\text{F}$, $C_{p2} = 4.7 \mu\text{F}$, 则 $K_p = -2.13$; 取 $R_{p1} = 3 \text{ k}\Omega$, 则 $K_f = 70.9$ 。由式(10)可

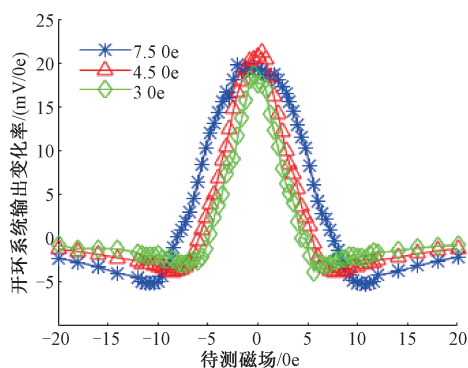


图8 开环系统输出的导数曲线

Fig.8 The derivative curves of the output curves of open-loop system

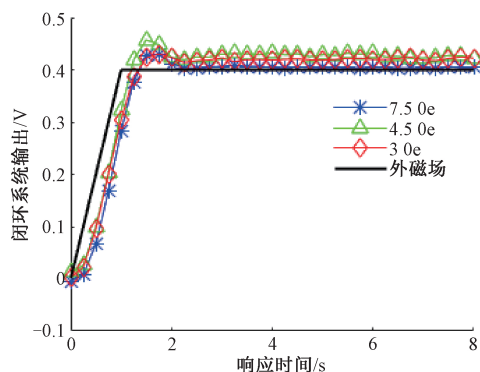


图10 闭环系统动态响应曲线

Fig.10 The dynamic response curve of the closed-loop system

知,系统理论上的灵敏度应为 200 mV/Oe。

V-I 转换电路最大输出电流为 ± 70 mA,对应的磁场变化范围约为 ± 10.5 Oe,因此将测试范围设置为 ± 10 Oe,图 9 所示为闭环检测系统的输出特性曲线。可以看出,在 ± 10 Oe 范围内,闭环检测系统的输出特性曲线为过零点直线。其线性测量范围并不局限于开环系统的线性工作区间,得到了至少近一倍的扩大。即使在不同偏置磁场作用下,闭环系统的输出曲线依然有高度的一致性,曲线间相关系数均在 0.999 9 以上。利用最小二乘拟合法可得到系统输出曲线的拟合方程为 $U_{out} = 0.207 3H_e + 0.057 59$,非线性度为 0.82%,比开环检测系统有了很大的改善。

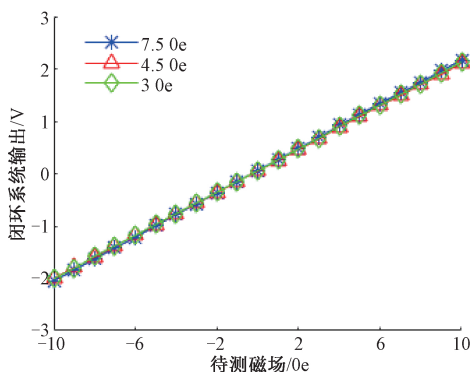


图9 闭环系统输出特性曲线

Fig.9 The output characteristic curve of the closed-loop system

由于实验中用以提供外磁场的高功率电流源的电流变化速度为 0.1 A/s,因此采用斜坡输入的方式测试闭环系统的动态性能。图 10 所示为在斜坡输入下系统的动态响应曲线。将外磁场变化曲线折算为对应的电压值放入图中,与系统实际响应曲线作对比。

由于 PI 电路属于 I 型系统,在斜坡输入下,系统响应与输入之间始终存在一定误差。输入停止变化之后,

系统出现超调,再逐步进入稳态,时间在 1 s 左右。由于系统进入稳态的时间较长,当输入磁场变化频率较高时,会丢失对外磁场的跟踪,因此目前系统只适用于准静态磁场的检测。

4 结 论

本文提出了一种新的方法以解决磁阻抗效应的偶次非线性问题,为磁阻抗传感器的研究提供了新的思路。施加交流偏置磁场代替常用的直流偏置磁场,通过检波提取偏置信号的一次谐波,将敏感元件的输出奇次化,不再需要进行零点调整。在此基础上,引入 PI 控制器及 V-I 转换电路构成自平衡式闭环检测系统,进一步提高性能。使用薄膜传感器进行了实验验证,开环系统的输出特性呈奇次特性,且零磁场附近存在线性区间,区间的长度取决于交流偏置磁场幅值,可直接用作磁场的检测;闭环系统的输出呈良好的线性特性,非线性度仅为 0.82%,测量范围也得到了至少一倍的扩大,在偏置磁场不同的情况下,系统输出特性仍保持高度一致。在闭环系统的动态性能测试中,系统稳定时间在 1 s 左右,目前更适合准静态磁场的测量。交流偏置自平衡式检测方法能够有效解决磁阻抗效应的偶次非线性问题,这种方法也同样适用于其他非线性磁传感器。

参考文献

- [1] 石岗,李希胜,王哲,等. 磁传感器输出姿态信息修正方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 47-53.
SHI G, LI X SH, WANG ZH, et al. Research on correcting output attitude information of magnetic sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 47-53.
- [2] 石岗,李希胜,李雪峰,等. 航向测量系统中三轴磁传感器标定的等效两步法[J]. 仪器仪表学报, 2017,

- 38(2):402-407.
- SHI G, LI X SH, LI X F, et al. Equivalent two-step algorithm for the calibration of three-axis magnetic sensor in heading measurement system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2):402-407.
- [3] ADACHI Y, OYAMA D, TERAZONO Y, et al. Calibration of room temperature magnetic sensor array for biomagnetic measurement [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2019, 55(7):1-6.
- [4] REERMANN J, DURDAUT P, SALZER S, et al. Evaluation of magnetoelectric sensor systems for cardiological applications[J]. Measurement, 2018, 116: 230-238.
- [5] 张宇, 王三胜, 李华. 磁性目标定位误差分析及修正[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1719-1724.
- ZHANG N, WANG S SH, LI H. Magnetic target location error analysis and correction[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1719-1724.
- [6] PANINA L V, MOHRI K. Magneto-impedance effect in amorphous wires [J]. Applied Physics Letters, 1994, 65(9): 1189-1191.
- [7] BEACH R S, BERKOWITZ A E. Giant magnetic field dependent impedance of amorphous FeCoSiB wire [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(26): 3652-3654.
- [8] 聂新华, 潘仲明, 张文娜, 等. 基于正交锁定差分放大器的巨磁阻抗 (GMI) 磁传感器[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(2): 181-185.
- NIE X H, PAN ZH M, ZHANG W N, et al. Giant magnetoimpedance (GMI) magnetic sensor based On orthogonal lock-in differential amplifier [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(2): 181-185.
- [9] YU G, BU X, YANG B, et al. Differential-type GMI magnetic sensor based on longitudinal excitation [J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(10): 2273-2278.
- [10] NABIAS J, ASFOUR A, YONNET J P. Temperature dependence of giant magneto impedance in amorphous microwires for sensor application [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2017, 53(4): 1-5.
- [11] NABIAS J, ASFOUR A, YONNET J P. The impact of bending stress on the performance of giant magneto-impedance (GMI) magnetic sensors [J]. Sensors, 2017, 17(3): 640-650.
- [12] MAKHNOVSKIY D P, PANINA L V, MAPPS D J. Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: Helical and circumferential [J]. Physical Review B, 2001, 63(14): 144424-144441.
- [13] KANNO T, MOHRI K, YAGI T, et al. Amorphous wire MI micro sensor using C-MOS IC multivibrator [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1997, 33(5): 3358-3360.
- [14] CAI C M, MOHRI K, HONKURA Y, et al. Improved pulse carrier MI effect by flash anneal of amorphous wires and FM wireless CMOS IC torque sensor [J]. IEEE Transactions On Magnetism, 2001, 37(4): 2038-2041.
- [15] SILVA E C, GUSMAO L A P, BARBOSA C R H, et al. High sensitivity giant magneto impedance (GMI) magnetic transducer: Magnitude versus phase sensing [J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(3): 35204-35212.
- [16] UCHIYAMA T, MOHRI K, HONKURA Y, et al. Recent advances of pico-tesla resolution magneto-impedance sensor based on amorphous wire CMOS-IC MI sensor [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2012, 48(11): 3833-3839.
- [17] TAKIYA T, UCHIYAMA T. Development of active shielding-type MI gradiometer and application for Magnetocardiography [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 2017, 53(11): 1-4.
- [18] DING L, SAEZ S, DOLABDJAN C, et al. Intrinsic giant magnetoimpedance noise reduction by DC bias [J]. Sensor Letters, 2007, 5(1): 176-179.
- [19] 许伟, 徐科军, 汪春畅, 等. 基于恒定磁场的数字式电磁涡街流量计 [J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(3): 163-169.
- XU W, XU K J, WANG CH CH, et al. Digital electromagnetic vortex flowmeter based on constant magnetic field [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(3): 163-169.
- [20] 王言章, 纪诚, 李吉生, 等. 同源偶次谐波磁通门磁梯度仪设计 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(1): 85-91.
- WANG Y ZH, JI CH, LI J SH, et al. Design of

homologous even harmonic fluxgate magnetic gradiometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(1):85-91.

- [21] WANG Y, WEN Y M, SONG F P, et al. Enhanced inductance in laminated multilayer magnetic planar inductor for sensitive magnetic field detection [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(18):182403.
- [22] WEN Y M, SONG F P, LI P, et al, Analysis on variable inductances of planar coils sandwiched by soft magnetic layers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11):1-6.
- [23] SONG F P, WEN Y M, LI P, et al, Enhanced field sensitivity by strong mutual coupling and magneto induction in amorphous film/planar coil multilayers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2):1-5.

作者简介



郭大哲, 2015 年于上海交通大学获得学士学位, 现为上海交通大学硕士研究生, 主要研究方向为磁传感器及其检测电路。

E-mail: gdzhesh@yeah.net

Guo Dazhe received his B. Sc. degree from

Shanghai Jiao Tong University in 2015. He is currently a M. Sc. candidate at Shanghai Jiao Tong University. His main research interests include the magnetic sensor and the detection circuit.



文玉梅, 1984 于北京航空航天大学电子工程系获得学士学位, 1987 年于航天部第一研究院研究生院毕业获硕士学位, 1997 年于重庆大学获得博士学位。现为上海交通大学电子信息与电气工程学院教授, 博士生导师。主要研究方向为信息获取与处理、传感器技术、测控仪器、能量采集。

E-mail: yumei.wen@sjtu.edu.cn

Wen Yumei received her B. Sc. degree in electrical engineering from Beijing Aeronautic and Astronautic University in 1984, received her M. Sc. degree in electrical engineering from the China Academy of Launch Vehicle Technology in 1987, and received her Ph. D. degree from Chongqing University in 1997. Now she is a professor in the Department of Instrumentation Science and Engineering at Shanghai Jiao Tong University. Her main research interests include sensors and instrumentation, signal processing, and energy-harvesting.