

# 微型磁通门传感器的激励仿真设计

支萌辉<sup>1</sup>, 汤亮<sup>2</sup>, 茅胜荣<sup>1</sup>, 赵琳<sup>3</sup>, 季磊<sup>1</sup>, 鞠青云<sup>1</sup>, 乔东海<sup>1,2</sup>

(1. 苏州大学电子信息学院 江苏 苏州 215006; 2. 中国科学院声学研究所 北京 海淀区 100190;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京 朝阳区 100029)

**【摘要】**微型磁通门传感器因具有功耗低、灵敏度高、分辨率高、结构简单和成本低等特点,被广泛应用于地球物理勘探、地磁导航、太空环境监测、医学诊疗等弱磁场测量领域。而对于该传感器,激励效果的好坏直接决定整套系统的性能,因而有必要为激励模块建立准确的仿真模型。基于法拉第电磁感应定律对双铁芯磁芯结构进行数学建模,并给出正弦波激励下电压、磁场量等物理量的波形。依据中国科学院地质与地球物理研究所研制的磁通门磁强计KDM-01的结构参数构建激励模块的仿真模型,得到的仿真结果与测试结果基本一致。并将该模型应用于设计的磁强计中,测试数据与标准磁强计非常近似。两者证明了所建立的数值模型的有效性和准确性。

**关键词** 磁芯; 磁通; 数学模型; 数值模拟

**中图分类号** TP212.1

**文献标志码** A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2017.05.024

## Simulation of the Excitation Module for Micro-Fluxgate Sensor

ZHI Meng-hui<sup>1</sup>, TANG Liang<sup>2</sup>, MAO Sheng-rong<sup>1</sup>, ZHAO Lin<sup>3</sup>, JI Lei<sup>1</sup>, JU Qing-yun<sup>1</sup>, and QIAO Dong-hai<sup>1,2</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Soochow University Suzhou Jiangsu 215006;

2. Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences Haidian Beijing 100190;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences Chaoyang Beijing 100029)

**Abstract** The micro-fluxgate sensor is widely used in the field of weak magnetic field measurement such as geophysical exploration, geomagnetic navigation, space environment monitoring, medical diagnosis and treatment and others because of its characteristics of low power consumption, high sensitivity, high resolution, simple structure and low cost. The excitation module directly determines the performance of the whole system and thus it is of significance to build an accuracy simulation model of the module. The mathematical model of the dual cores is built on the basis of the Faraday's law of electromagnetic induction, and the voltage waveforms and the magnetic value under the sinusoidal excitation are given. According to the structure parameters of the KDM-01 which is a fluxgate sensor designed by Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, a simulation model of the excitation module is built. The obtained simulation results are in good accordance to the test values. Then the model is applied to the designed magnetometer and the test data are similar enough to those of the standard magnetometer. It is proved that the built mathematical model for the excitation module is reasonable and accurate.

**Key words** magnetic cores; magnetic flux; mathematical models; numerical simulation

磁传感器因其优越的性能而被广泛地应用于地磁研究<sup>[1]</sup>、地质勘探<sup>[2]</sup>、空间磁场测量<sup>[3]</sup>、航空航海定位<sup>[4]</sup>、武器侦察<sup>[5]</sup>及材料无损探伤<sup>[6]</sup>等弱磁场<sup>[7]</sup>测量领域。而微型磁通门传感器,更是具有体积小、精度高、可以靠近或放置在被测样品的内部等优势,受到了近年来发展迅速的生物医学<sup>[8]</sup>领域的青睐,其对微型高精度磁传感器有了越来越大的需求。例如,它可通过心跳和头脑的磁场变化提供心脑磁图<sup>[9]</sup>,

从而代替原始电极得到的心脑电图,为医护人员提供更精准的诊疗依据。

磁通门传感器可以简单地看作为一种磁场放大器,它主要基于具有低矫顽力、高磁导率且易于饱和等特点的坡莫合金<sup>[10]</sup>材料的磁滞效应<sup>[11]</sup>工作。作为传感器,它的灵敏度主要与磁芯的几何结构、磁芯材料的磁导率、激励信号在磁芯上建立的磁场强度以及感应信号的匝数有关。

收稿日期: 2015-12-09; 修回日期: 2017-04-01

基金项目: 国家重大科研装备专项(ZDYZ2012-1-01-02); 中国科学院青年创新促进会项目(TANG LIANG)

作者简介: 支萌辉(1988-),男,博士生,主要从事磁通门传感器方面的研究。

对于磁强计的设计与研发,英国的Bartington公司推出了三轴数字低噪声磁强计Mag679<sup>[12]</sup>,具有1 kHz的带宽、 $\pm 100\ 000$  nT的测量范围、62.5 pT/bit的分辨率、10 pTrms/ $\sqrt{\text{Hz}}@1\text{Hz}$ 的噪声以及10 mW的功耗水平;美国MEDA公司生产的FVM400<sup>[13]</sup>是一种价格低廉的微型手持设备,具有1 nT的分辨率、 $\pm 100\ 000$  nT的测量范围和 $\pm 0.25\%$ 的精度。另外,瑞士科研人员发现非晶软磁合金的磁性能略优于坡莫合金,并利用集成电路工艺制作线圈和接口电路,使系统性能得到很大改善<sup>[14]</sup>。与之相比,国产的微型磁通门传感器在性能指标上略低于国际,但也取得了很大突破。上海交通大学微纳科学技术研究院设计的MEMS磁通门传感器<sup>[15]</sup>达到了31.07 V/T的灵敏度、 $\pm 75\ 000$  nT的测量范围;哈尔滨理工大学基于CMOS工艺制作的磁通门传感器则达到了30 800 V/T的灵敏度和0.62%的非线性度<sup>[16]</sup>。

为了更好地利用坡莫合金磁芯,本文从法拉第电磁感应定律出发对双铁芯磁芯建模,进一步研究磁芯材料磁导率对应的最佳激励电流和最佳激励频率,最后通过实验验证了所建立数值模型的有效性和准确性。以上的分析和建模为微型磁通门传感器的设计和优化提供了依据。

## 1 磁芯数学模型

磁通门探头采用双铁芯结构,由磁芯、激励线圈、感应线圈和反馈线圈组成。若不考虑磁芯磁导率 $\mu$ 的变化,当激励线圈接上频率为 $f_1$ 的正弦激励电压时,其感应线圈上产生的感应电势 $e$ 为:

$$e = 2\pi \times 10^{-8} f_1 \mu W_2 S H_m \sin 2\pi f_1 t \quad (1)$$

式中, $\mu$ 为磁导率; $W_2$ 为感应线圈匝数; $S$ 为磁芯横截面积; $H_m$ 为激励磁场强度幅值。若综合考虑磁化曲线的非线性、激励磁场的周期性等因素,可得到最终的数学模型为:

$$e(H_0) = -2\pi \times 10^{-8} f_1 W_2 S H_0 (2\mu_{2m} \sin 4\pi f_1 t + 4\mu_{4m} \sin 8\pi f_1 t + 6\mu_{6m} \sin 12\pi f_1 t + \dots) \quad (2)$$

式中, $H_0$ 为环境磁场强度。磁通门传感器利用电磁感应原理实现对磁场的检测,并将地磁信号转化为电信号。对于周期性的激励信号,被测环境磁场将被调制到激励信号的偶次谐波上,且任意偶次谐波都可作为被测磁场的量度,由于二次谐波幅度最大,故通常选取其二次谐波电压值度量被测磁场,且它的幅度与被测的环境磁场成比例关系。

假设激励线圈的单边匝数为 $W_1$ ,等效电阻为 $R$ ,当激励电压为正弦波时,即激励信号的表达式为:

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(2\pi f_1 t) \quad (3)$$

式中, $U$ 为电压有效值; $f_1$ 为激励频率。对应的激励电路满足以下关系:

$$2Ri(t) = u(t) + 2\varepsilon(t) \quad (4)$$

式中, $i(t)$ 为激励电流; $\varepsilon(t)$ 为激励线圈的反电动势,可根据电磁感应定律得到:

$$\begin{aligned} \varepsilon(t) &= -W_1 S \frac{d}{dt} B(t) = \\ &= -W_1 S \frac{d}{dH} B(H) \frac{d}{dt} H(t) = -W_1 S \mu(H) \frac{d}{dt} H(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $S$ 为磁芯横截面积; $\mu(H)$ 为磁芯磁导率。

根据安培环路定理可知,磁场强度 $H(t)$ 和激励电流 $i(t)$ 的关系为:

$$i(t) = \frac{L_1 H(t)}{W_1} \quad (6)$$

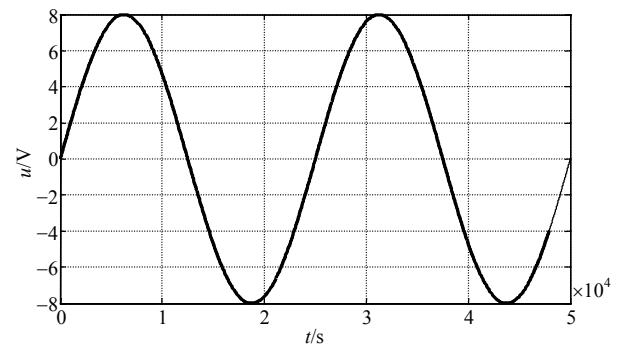
式中, $L_1$ 为磁路等效长度。合并式(3)~式(6)可以得到激励环路的数学模型,即激励磁场和激励电压的微分方程为:

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{\mu(t)}{2W_1 S \mu(H)} - \frac{RL_1 H(t)}{W_1^2 S \mu(H)} \quad (7)$$

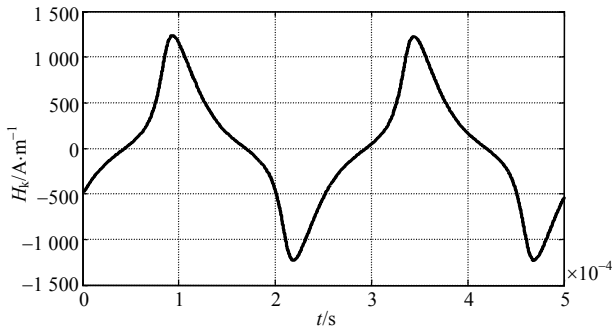
## 2 双铁芯磁通门模型仿真

### 2.1 模型仿真波形

根据数学模型,使用Euler法解微分方程。设磁芯相对磁导率 $\mu_r = 30\ 000$ ,饱和磁感应强度 $B_s = 0.757$ ,磁路等效长度 $L_1 = 40$  mm,横截面宽度 $W = 2$  mm,厚度 $d = 0.1$  mm,激励线圈单边匝数 $W_1 = 975$ ,电阻 $R = 56 \Omega$ ,正弦波峰值电压为8 V,频率为4 kHz,通过Matlab仿真得到如图1所示的激励电压波形和激励磁场强度。对应的激励电流的最大值为0.050 8 A,激励磁场强度最大值为1 238.6 A/m。



a. 激励电压波形



b. 激励磁场强度

图1 激励信号波形

根据软磁材料的磁化特性, 可以近似认为B-H曲线满足以下关系:

$$B(H) = a \cdot \arctan(bH) \quad (8)$$

式中,  $a$ 、 $b$ 为特定系数。假设感应线圈匝数为 $W_2$ , 激励磁场强度为 $H_k$ , 被测环境磁场为 $H_d$ , 则左右磁芯上的磁场强度 $H_L$ 、 $H_R$ 分别为:

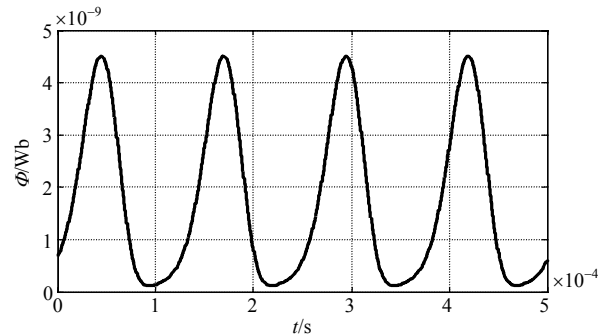
$$\begin{cases} H_L = H_d + H_k \\ H_R = H_d - H_k \end{cases} \quad (9)$$

代入式(8)可得到左右磁芯的磁感应强度 $B_L$ 、 $B_R$ , 则穿过公共感应线圈的磁通量为:

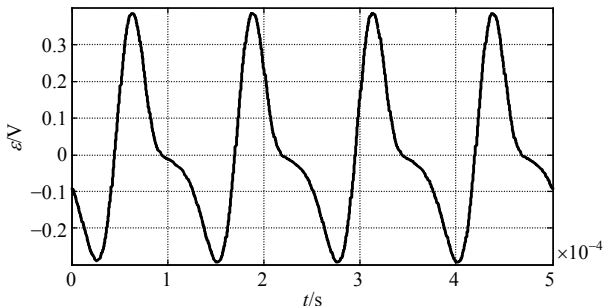
$$\Phi = (B_L + B_R)S \quad (10)$$

当 $W_2=2\ 275$ ,  $H_d=5\text{ A/m}$ 时, 得到如图2a所示的磁通量波形图。根据磁通量 $\Phi$ 与电压 $\varepsilon$ 的关系, 有:

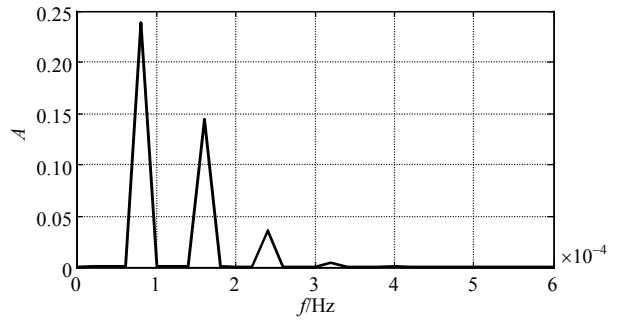
$$\varepsilon = -W_2 \frac{d}{dt} \Phi(t) \quad (11)$$



a. 磁通量



b. 感应电压波形

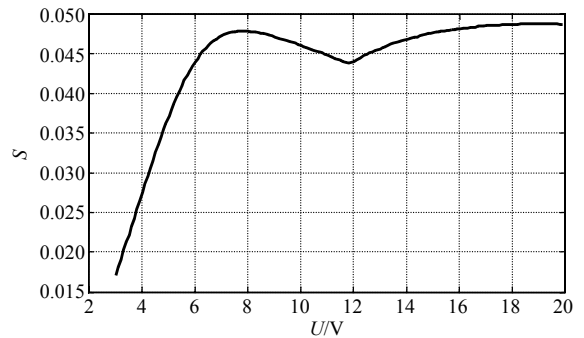


c. 感应电压频谱

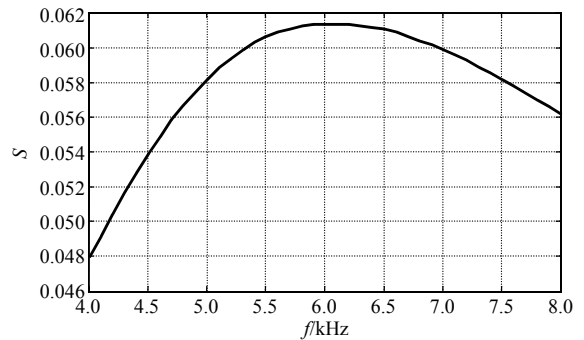
图2 感应信号波形

采用五阶中心差商算法进行数值微分运算, 得到如图2b所示的感应电压波形。从图中可看出, 感应信号频率是激励信号频率的两倍。对感应信号进行FFT变换, 得到如图2c所示的频谱。可清楚地看到, 感应信号输出只有偶次谐波分量, 且二次谐波(8 kHz)的幅度远大于其他谐波分量, 因此二次谐波的空载灵敏度 $S$ 是最好的。

### 2.2 模型工作效率优化



a. 灵敏度和激励电压关系



b. 灵敏度和激励频率关系

图3 灵敏度变化曲线

将不同的激励电压代入数值模型, 计算二次谐波的空载灵敏度, 得到如图3a所示的空载灵敏度和电压的关系。从图中可以发现, 在激励电压8 V附近最佳灵敏度达到最佳。由于实际调试中感应电压输出必然带有负载, 故实际生产中测量的曲线会比该曲线有所下降, 但灵敏度的变化趋势是一致的, 且

最佳灵敏度的位置应当也一致。改变激励频率，求解相应的二次谐波灵敏度，得到如图3b所示的关系曲线。图中，在6 kHz附近的感应电压二次谐波灵敏度达到峰值，这种趋势与实际所测基本符合。

### 3 实验与分析

#### 3.1 激励电路

在实际测试中，需将FPGA输出的方波转换为类正弦波后对磁芯进行激励，转换电路采用4阶LC谐振回路<sup>[17]</sup>，如图4所示。其中， $U_0$ 为方波激励电压，其频率为 $f_1$ ， $C_1$ 为隔直电容， $L_1$ 、 $C_2$ 为谐振电感和电容。磁通门传感器的探头由软磁磁芯、激励线圈、感应线圈和反馈线圈组成，故探头可以看作电感器件。由于磁通门传感器是利用磁芯磁化时在饱和区的非线性特性来测量磁场的装置，所以只有 $U_0$ 达到足够的幅值，才能使磁芯在饱和与非饱和两种状态下切换，从而获得较强的磁通门信号。

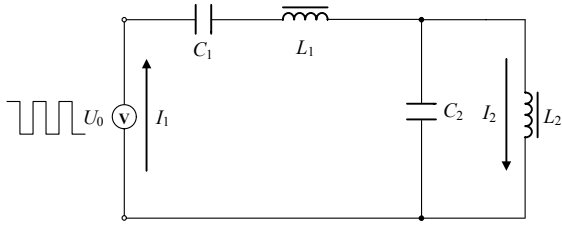


图4 激励电路实验图

#### 3.2 实验结果

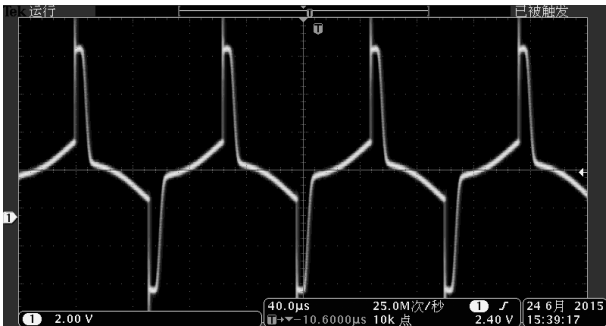
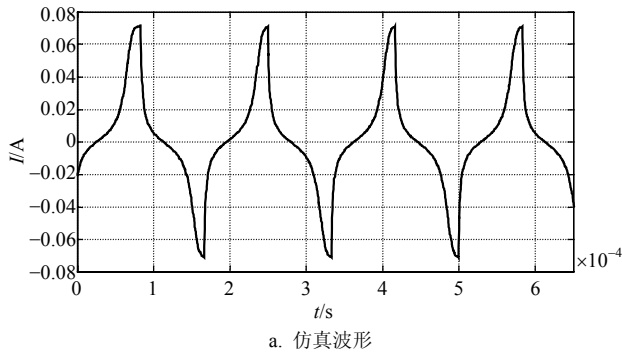


图5 磁通门探头激励电流波形

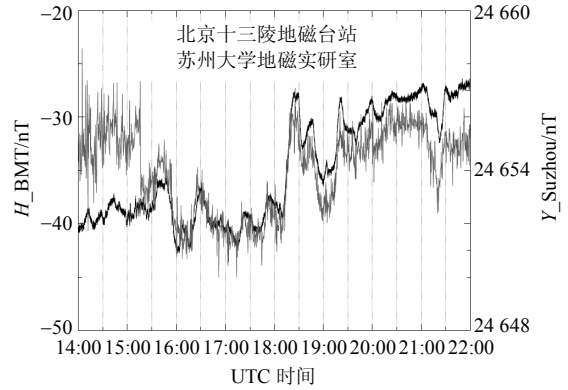


图6 磁通门传感器测试曲线对比图

依据KDM-01的结构参数构建激励的仿真模型，得到如图5a所示的电流仿真波形，与如图5b所示的KDM-01实际测试电流波形基本一致，即证明了数值模型的有效性。

为了验证磁传感器数值模型和激励模块测量磁场的准确性，将待测磁传感器与北京十三陵的世界标准磁传感器测试曲线进行对比(以Y轴为例)，得到如图6所示的曲线。可以非常清楚地看到，测试曲线(UTC时间16:00~22:00)走势完全相同。进一步测试可知，该系统的精度达到了0.2 nT(领先于1 nT的国内平均水平)，且三轴的线性测量范围均达到了±65 000 nT，即使用该模型得到的磁传感器系统能够较高精度的测量磁场，进一步证明了数值模型的准确性。

### 4 结束语

磁通门探头的激励部分是微型磁通门传感器系统的重中之重。本文利用MATLAB对双铁芯磁芯结构进行数值建模，并在此基础上对感应线圈的输出电压波形及频谱、电压灵敏度与激励源电压和频率的关系进行仿真分析与优化。最后进行实际测试，得到磁通门激励电流的测试结果与仿真结果一致，且利用基于该模型设计的磁通门传感器的实际地磁场测试曲线与标准磁强计的测试曲线一致，从两个方面实验验证了本文建立数值模型的有效性和准确性，为探头的调试工作提供一定依据，可以很好地用于指导生产实践、提高生产效率。

#### 参 考 文 献

[1] 冯彦, 孙涵, 毛飞. 地磁测量仪器发展综述[J]. 地震地磁观测与研究, 2009, 30(1): 103-110.  
FENG Yan, SUN Han, MAO Fei. The summary of development on geomagnetic measurement instruments[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2009, 30(1): 103-110.

- [2] 范晓勇. 磁通门地磁经纬仪的研制[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2011.  
FAN Xiao-yong. Research on the magnetic fluxgate theodolite[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2011.
- [3] STEVEN T, MICHAEL J H, STUART A C H, et al. Calibration of a novel three-axis fluxgate gradiometer for space application[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(1): 4001704.
- [4] VCELAK J, RIPKA P, ZIKMUND A. Precise magnetic sensors for navigation and prospection[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2015, 28(3): 1077-1080.
- [5] BILLINGS S. Field measurements of induced and remanent moments of unexploded ordnance and shrapnel[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(3): 815-827.
- [6] IZGI T, GOKTEPE M, BAYRI N, et al. Crack detection using fluxgate magnetic field sensor[J]. Acta Physica Polonica A, 2014, 125(2): 211-213.
- [7] 杨理践, 涂传宾, 高松巍. 基于磁通门传感器的弱磁场检测方法[J]. 仪表技术与传感器, 2014(9): 84-87.  
YANG Li-jian, TU Chuan-bin, GAO Song-wei. Detection method of weak magnetic field based on fluxgate sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(9): 84-87.
- [8] LEI Jian, LEI Chong, WANG Tao, et al. Investigation of targeted biomolecules in a micro-fluxgate-based bio-sensing system[J]. Biomedical Microdevices, 2014, 16(2): 237-243.
- [9] 张晓强. 基于MEMS工艺的微型磁通门传感器研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.  
ZHANG Xiao-qiang. The research on micro-fluxgate sensor based on MEMS process[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [10] MAICAS M, RANCHAL R, AROCA C, et al. Magnetic properties of permalloy multilayers with alternating perpendicular anisotropies[J]. The European Physical Journal, 2008, 62(3): 267-270.
- [11] USPENSKAYA L S, EGOROV S V. Hysteresis phenomena in permalloy-niobium bilayer films[J]. Physica B, 2014, 435(1): 160-162.
- [12] Bartington Instruments. Mag678 and Mag679 low power single axis magnetic field sensors[EB/OL]. [2015-10-30] <http://www.bartington.com/Literaturepdf/Datasheets/Mag678-Mag679%20DS2617.pdf>.
- [13] 赖正喜. 基于磁通门传感器的高精度弱磁场便携检测系统[D]. 太原: 中北大学, 2015.  
LAI Zheng-xi. High-accuracy weak magnetic portable detection system based on magnetometer[D]. Taiyuan: North University of China, 2015.
- [14] KAWAHITO S, SASAKI Y, SATO H, et al. A fluxgate magnetic sensor with micro-solenoids and electroplated permalloy cores[J]. Sensors & Actuators A Physical, 1994, 43(1-3): 128-134.
- [15] 杨晓虎, 周勇, 雷冲. MEMS薄膜磁通门传感器的制作与特性[J]. 磁性材料及器件, 2012, 1(1): 41-44.  
YANG Xiao-hu, ZHOU Yong, LEI Chong. Preparation and characteristics of thin film fluxgate based on MEMS[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2012, 1(1): 41-44.
- [16] 董长春, 陈伟平, 任明远, 等. 磁通门CMOS接口电路设计[J]. 纳米技术与精密工程, 2013, 2(2): 146-151.  
DONG Chang-chun, CHEN Wei-ping, REN Ming-yuan, et al. Design of fluxgate CMOS interface circuit[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2013, 2(2): 156-165.
- [17] TANG S C, DUFFY M C, RIPKA P, et al. Excitation circuit for fluxgate sensor using saturable inductor[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 113(2): 156-165.

编辑 税红