文章编号:1005-4642(2025)07-0048-06

单轴环形磁通门磁强计的性能探究

张　聪[a],韩建卫[b],景昱桥[a],符宏军[a],王　拴[b],钟　瑞[b],过　聪[b]
(哈尔滨工业大学(深圳) a. 机器人与先进制造学院;
b. 实验与创新实践教育中心(分析测试中心),广东 深圳 518000)

摘　要:环形磁通门传感器在微弱磁场测量领域应用广泛,其灵敏度的提高具有重要研究意义. 采用锁相放大器替代电路板构建实验装置,结合数值计算与实验,探究了磁芯厚度、激励电压大小及频率对单轴环形磁通门传感器灵敏度的影响. 经参数优化,单轴环形磁通门传感器的灵敏度为 0.551 6 mV/μT,精度为 0.1 μT,采用该传感器实现了对微弱磁场环境的高精度测量.

关键词:单轴环形磁通门;微弱磁场;二次谐波
中图分类号:O441.5　　**文献标识码:**A　　DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.008

微弱磁场测量在物理学、材料科学和生物医学等领域的应用日益广泛[1-3]. 微弱磁场的测量装置主要包括:超导量子干涉仪[4]、光学磁场传感器[5]、核磁共振设备[6]、霍尔传感器[7]、磁阻传感器[8]、光泵磁强计[9]、磁通门传感器[10]等. 磁通门传感器因灵敏度高、分辨率高和反应速度快被广泛关注[11-12],其结构包括单棒形、双棒形和环形等,其中环形结构因抗干扰能力强具有更高的应用价值. 关于环形磁通门原理及结构的研究现较成熟[13-14],但是有关其参量对灵敏度影响的实验探究较少.

本文采用锁相放大器替代传统电路板构建装置,降低了信号识别误差与构建难度,突破了传统理论推导,结合实物测试与数值计算,探究了磁芯厚度、激励电压和激励频率等关键参量对磁通门传感器性能的影响,且实现环境磁场的精确测量.

1　理论分析

磁通门传感器是基于法拉第电磁感应原理与软磁介质的磁饱和性质实现磁场测量的高精度探测仪器[15]. 如图 1 所示,环形磁通门传感器的基本结构包含环形磁芯及缠绕于上的激励线圈、方形骨架及缠绕于上的感应线圈.

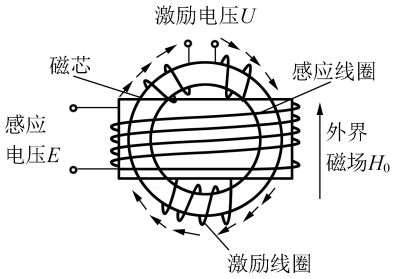


图 1　环型磁通门探头结构示意图

磁通门传感器的磁芯一般采用软磁性材料,包括但不限于铁基非晶、铁镍基非晶、坡莫合金和钴基非晶等[16],本文采用 1J85 坡莫合金(1 代表软磁材料,J 代表精密合金,85 表示镍质量分数约 85%)作为磁芯,其 B-H 关系曲线如图 2 所示,H_s 为坡莫合金饱和磁场强度,可近似认为 $H<H_s$ 时磁导率不变,$H>H_s$ 时磁导率快速衰减为 0. 设此时磁芯激励磁场为 $H_1(t)=H_m\sin(\omega t)$,H_m 为激励磁场幅值,ω 为磁场角频率[17]. 对磁导率进行傅里叶级数展开:

$$\mu(t)=\mu_0+\sum_{n=1}^{\infty}\mu_{2n}\cos(2n\omega t). \tag{1}$$

收稿日期:2024-11-18;修改日期:2025-03-04
基金项目:教育部产学合作协同育人项目(No. 231003117121903,No. 231000532123109);广东省教育科学规划项目(No. 2023GXJK684)
作者简介:张　聪(2004－),男,河北廊坊人,哈尔滨工业大学(深圳)机器人与先进制造学院 2022 级本科生. E-mail:1011861507@qq.com
通信作者:韩建卫(1989－),男,河北邯郸人,哈尔滨工业大学(深圳)实验与创新实践教育中心(分析测试中心)实验师,硕士,研究方向为凝聚态物理. E-mail:hanjianwei@hit.edu.cn

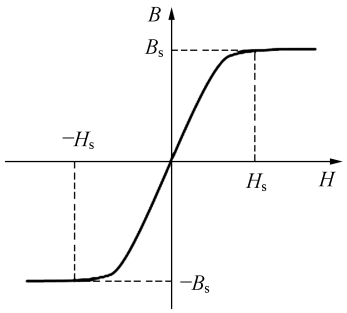


图 2　坡莫合金的磁感应强度和磁场强度的关系曲线

环形磁通门激励线圈可以看作关于环形骨架直径对称的 2 部分分别产生感应电压，假设待测磁场为 H_0，磁芯横截面积为 S，感应线圈匝数为 W_2，其中一半产生的感应电压为

$$u=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\{\mu(t)W_2[H_\mathrm{m}\cos(\omega t)+H_0]S\}. \quad (2)$$

总感应电压为

$$E_n=u+u'=-2W_2S[H_\mathrm{m}\cos(\omega t)+H_0]\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\mu(t), \quad (3)$$

将式(1)代入式(3)，可得输出值为

$$E_n=\frac{4}{\pi}\omega\mu_1W_2S\{-(H_s+H_0)\sin(n\omega t_1)+(H_s-H_0)\sin(n\omega t_2)+\frac{nH_\mathrm{m}}{2(n+1)}\{\sin[(n+1)\omega t_1]-\sin[(n+1)\omega t_2]\}+\frac{nH_\mathrm{m}}{2(n-1)}\{[\sin(n-1)\omega t_1]-\sin(n-1)\omega t_2]\}\}, \quad (4)$$

其中，$n=2,4,6\cdots$，说明 E_n 只含有偶次谐波，μ_1 为磁芯材料的磁导率，1 个周期内磁芯首次饱和时间 t_1 和首次去磁时间 t_2 分别为

$$t_1=\frac{1}{\omega}\arctan\left(\frac{H_0}{H_\mathrm{m}}\right),t_2=\frac{1}{\omega}\left[\pi-\arctan\left(\frac{H_0}{H_\mathrm{m}}\right)\right].$$

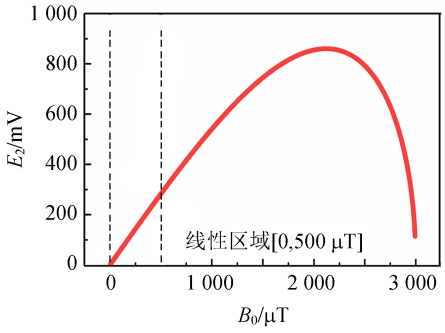
将 $n=2$ 代入式(4)，求出二次谐波的幅值为

$$E_2=-\frac{8}{3\pi}\omega\mu_1W_2SH_\mathrm{m}\cdot\left\{\left[1-\left(\frac{H_s-H_0}{H_\mathrm{m}}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}-\left[1-\left(\frac{H_s+H_0}{H_\mathrm{m}}\right)^2\right]\right\}. \quad (5)$$

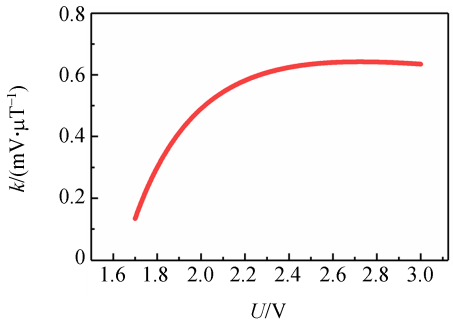
近似认为待测磁场 B_0 在坡莫合金内产生的 H_0 符合 $B_0=\mu_1H_0$. 在频率 $\omega=2.512\times10^4$ rad/s、激励电压 $U=2.20$ V、相对磁导率 $\mu=8\times10^4$、横截面积 $S=0.80$ mm^2、感应线圈匝数 $W_2=140$、饱和磁场强度 $H_s=6.96$ A/m 条件下，使用式(5)计算不同外界磁场下二次谐波输出值，如图 3(a)所示. 在 0～500 μT 磁场范围内，输出的二次谐波的有效值 E_2 与环境磁场大小 B_0 近似呈线性关系，满足 $E_2=kB_0$，即通过 E_2 的测量实现环境磁场 B_0 的测量. 其中，斜率 k 为灵敏度，其理论表达式为

$$k=-\frac{4}{\pi}\omega W_2S\left\{\sin\left[n\arccos\left(\frac{H_s+H_0}{H_\mathrm{m}}\right)\right]+\sin\left[n\arccos\left(\frac{H_s-H_0}{H_\mathrm{m}}\right)\right]\right\}. \quad (6)$$

由式(6)可以看出，角频率 $\omega=2\pi f$(f 为激励电压频率)和磁芯横截面积 $S=bh$(b 为磁芯厚度，h 为磁芯宽度)与灵敏度 k 成正比. 激励磁场 H_m(通过激励电压改变)与灵敏度 k 并不是简单的正比例关系，因此在图 3(a)条件下，对激励电压与灵敏度的关系进行计算并且绘图，结果如图 3(b)所示. 可以看出：灵敏度随激励电压增大先增大后趋于不变.



(a)二次谐波有效值与磁场大小理论关系曲线



(b)灵敏度随激励电压变化的理论曲线

图 3　二次谐波输出值变化及灵敏度理论曲线

2　实验装置

表 1 为核心实验器材及参量. 如图 4(a)所

示，装置分为 3 个模块：激励模块、检测模块和磁场模块.

1)激励模块由信号发生器和功率放大器(用于低频信号功率放大)组成，功率放大器的放大倍数为 2 时即可使磁芯饱和，放大倍数过大易致线圈发热造成温度漂移，降低测量精度；

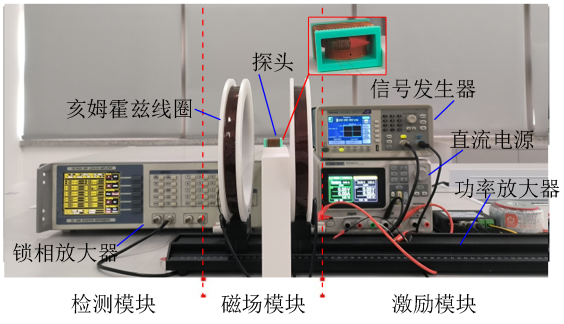
2)检测模块为锁相放大器，用于屏蔽干扰波；

3)磁场模块为亥姆霍兹线圈.

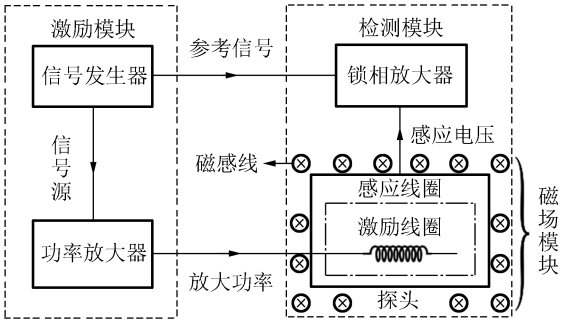
模块之间的连接以及信号的传递回路如图 4(b)所示.

表 1 核心实验器材及参量表

名称	参量
可编程直流电源	输出电流 0～0.15 A
可编程电压电源	输出电压 1.7～3.0 V
MTw Awinda 运动跟踪系统	分辨率 0.4 nT
信号发生器	方波频率 1.0～8.0 kHz
功率放大器	放大倍数 2
锁相放大器	灵敏度 500 mV
亥姆霍兹线圈	半径 r=100 mm
感应线圈	匝数 W_2=140
激励线圈	匝数 W_1=250



(a)整体实验装置及各模块组成



(b)各模块之间连接示意图

图 4 实验装置及各模块连接图

3 结果与讨论

在研究参量影响前，首先使用 MTw Awinda 磁强计对亥姆霍兹线圈产生的磁场进行标定，然后进行二次谐波测量的可靠性验证实验.

3.1 验证二次谐波测量

选择 U=2.0 V，f=4.0 kHz，b=0.25 mm 的磁通门传感器进行实验，使用锁相放大器测出不同次数谐波的有效值，如图 5 所示.

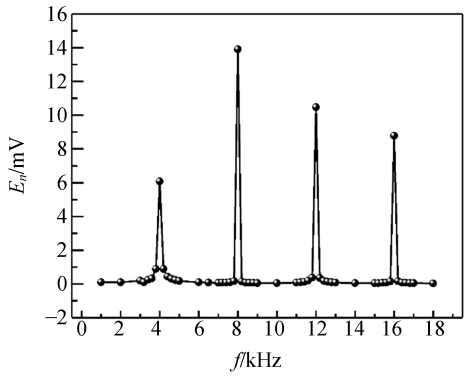
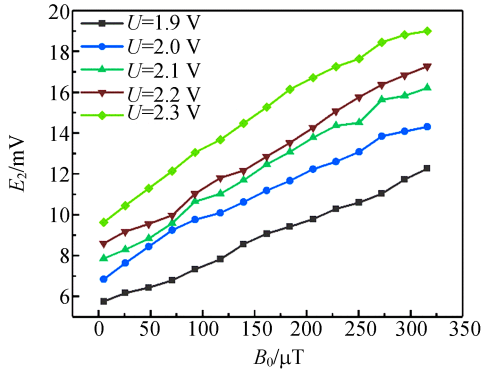


图 5 不同频率谐波的有效值

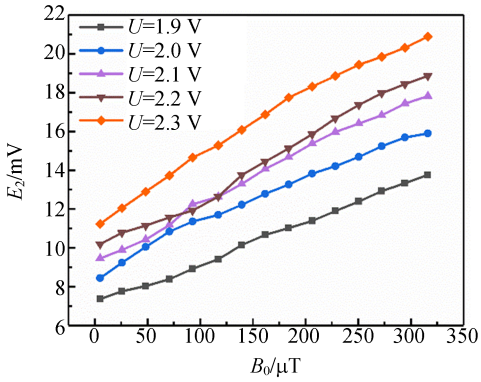
输出量中奇次谐波的有效值不为零，主要是因为磁芯及其上的激励线圈匝数相对于任意直径难以完全对称，所以奇次谐波的有效值不能被完全抑制[18]. 但是此实验条件下二次谐波即频率为 8 kHz 的谐波在所有谐波中幅值最大，因此可以通过二次谐波的有效值求得外界磁场.

3.2 磁芯的横截面积

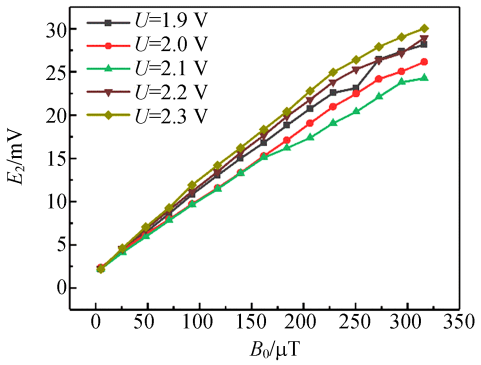
保持磁芯宽度 h 不变，通过改变磁芯厚度即可改变磁芯横截面积 S. 取磁芯厚度不同的 4 个磁通门传感器，在 f=4.0 kHz 条件下的测试结果如图 6 所示.



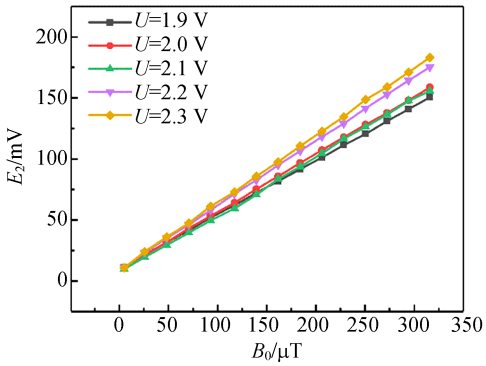
(a)b_1=1.00 mm



(b)b_2=0.75 mm



(c)b_3=0.50 mm



(d)b_4=0.25 mm

图 6　不同厚度合金条磁芯时输出值随磁场变化

由图 6(a)和图 6(b)可看出，当 b_1=1.00 mm 和 b_2=0.75 mm 时，曲线线性度较差. 对图 6(c)和图 6(d)进行线性拟合，求灵敏度 k(表 2)，发现厚度 b_4=0.25 mm 时其线性区域更大，即适用范围更广且灵敏度更高. 这主要是因为交变电流集中在导体表面，使得磁通在磁芯表面附近集中[16]. 而随着磁芯厚度增加，磁芯外表面和内部的磁通密度差值增大，磁通分布更加不均匀，误差反而越大.

表 2　b_3=0.25 mm 与 b_4=0.50 mm 线性区域的灵敏度

U/V	k/(mV·μT^{-1})	
	b_3=0.25 mm	b_4=0.50 mm
1.9	0.444 4	0.075 1
2.0	0.473 9	0.081 9
2.1	0.477 2	0.091 1
2.2	0.515 6	0.096 1
2.3	0.551 6	0.109 9

3.3　激励电压的大小

在 b=0.25 mm 和 f=4.0 kHz 的条件下，改变激励电压值进行实验，结果如图 7 所示.

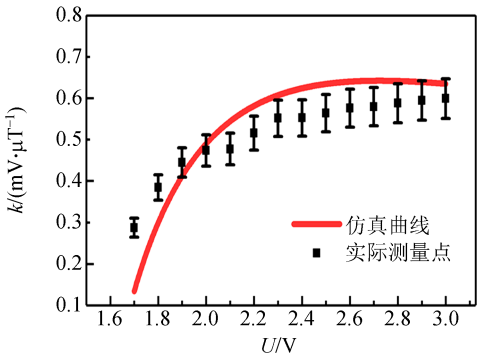


图 7　激励电压与灵敏度的理论及测量值

实际测量与公式计算结果趋势基本一致，即灵敏度随激励电压增大先增加后趋于稳定. 但与理论曲线存在一定偏差，这是因为计算时并未考虑温度漂移误差[19-20]. 当激励电压较小时，磁芯未饱和，无法实现有效测量；随激励电压增加，磁芯饱和时间占比增加，灵敏度提升；当激励电压增大到一定程度，饱和时间占比接近极限，灵敏度增长放缓；同时，涡流损耗和趋肤效应增强，导致温度漂移，影响传感器性能. 因此，最佳激励电压需要综合考虑磁芯饱和时间占比和温漂影响，对于本装置最佳激励电压为 2.3 V.

3.4　激励电压的频率

在 b=0.25 mm，U=2.3 V 时，改变激励频率进行实验，如图 8 所示，随着激励频率的增加，磁通门传感器的灵敏度呈现先增加后减少. 这主要是因为磁滞效应，当激励频率不断增加时，磁芯面临更短的磁周期，导致磁芯在磁化过程中无法完全磁化或退磁现象加剧，从而影响传感器的灵敏度和性能. 此外，随激励频率的增加，磁芯中的涡流和磁滞现象也会增强，产生额外的功耗，降低器件的使用寿命[21].

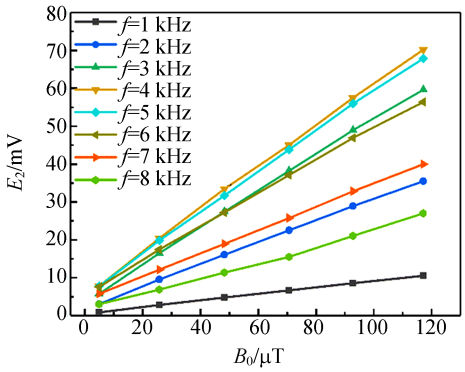
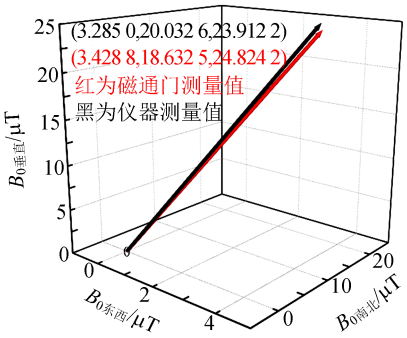


图 8 不同激励频率下输出值随磁场变化



(b)磁通门与磁强计环境磁场测量对比

图 9 性能对比及环境磁场测量结果

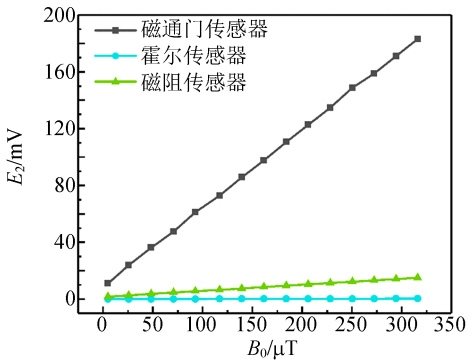
4 性能探究

在 $b=0.25$ mm，$U=2.3$ V，$f=4.0$ kHz 条件下，本装置最佳测量范围为 0～500 μT，灵敏度为 0.551 6 mV/μT，精度为 0.1 μT，分辨率为 0.001 μT. 与霍尔传感器和磁阻传感器(关键参量见表 3)进行灵敏度对比，结果见图 9(a)，磁通门的灵敏度远远大于霍尔元件和磁阻传感器.

使用磁通门和 MTw Awinda 磁强计分别测量环境磁场，如图 9(b)所示. 磁通门测量模长为 31.367 μT，磁强计测量模长为 31.228 μT(即总磁场大小)，两向量夹角为 3.06°(方向误差)，绝对误差为 0.139 μT，相对误差为 0.45%，合成标准不确定度为 0.064 μT.

表 3 霍尔传感器、磁阻传感器及磁通门传感器的关键参量

类型	工作区域/μT	分辨率/μT	型号	价格/元
霍尔传感器	1～10 000	50	HW-108A	130
磁阻传感器	0.1～1 000	0.01	HMC1022	230
磁通门传感器	0～500	0.001		100



(a)磁通门与其他传感器的灵敏度对比

5 结束语

本研究以优化单轴环形磁通门传感器性能为目标，分析了磁通门传感器的工作原理并建立了数学模型，通过数值计算和实验探究各参量对传感器灵敏度的影响，实现了对微弱环境磁场的高精度测量. 未来可通过改进和优化探头制作工艺、选用更加合适的软磁材料以减少磁滞效应等方法进一步提高磁通门传感器的灵敏度，扩展其适用范围.

参考文献：

[1] 郭泽虹，郑荣荣，杨舒佩，等. 基于微弱磁场测量的钢丝绳无损探伤[J]. 物理实验，2022，42(7)：34-39.

[2] 牛法富，赵继飞，孟军华，等. 利用核磁共振测量乙醇汽油溶液浓度[J]. 物理实验，2011，31(11)：37-39.

[3] 吴高米，崔敏，王闯，等. 利用霍尔元件测量金属丝的弹性模量[J]. 物理实验，2014，34(6)：40-43.

[4] RYU C，SAMSON E C，BOSHIER M G. Quantum interference of currents in an atomtronic SQUID [J]. Nature Communications，2020，11(1)：3338.

[5] BRUIJN S S，WOLF S A，GOLDFARB R B，et al. Optics and sensors based on magneto-optical effects [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials，1999，200(1/3)：115-130.

[6] KREIS R，BOESCH C，BOSS A，et al. In vivo magnetic resonance spectroscopy in clinical diagnosis：From cancer to neurodegenerative diseases [J]. European Journal of Clinical Investigation，2019，49(7)：55-65.

[7] MARIA-ALEXANDRA P，SALLESE J M，KAY-

AL M. Hall effect sensors design, integration and behavior analysis [J]. Sensors, 2013,2(1):85-97.
[8] ENNEN I, KAPPE D, REMPEL T, et al. Giant magnetoresistance: Basic concepts, microstructure, magnetic interactions and applications [J]. Sensors, 2016,16(6):904.
[9] SHENG Y, LEDBETTER M P. Optically pumped magnetometers: A compact and sensitive tool for measuring weak magnetic fields [J]. Sensors, 2020,20(7):2027.
[10] 何森. 相移型磁通门实验仪[J]. 物理实验,2023,43(6):15-21.
[11] 潘奥霖,杜爱民. 磁通门传感器的研究进展[J/OL]. 地球物理学进展,https://link.cnki.net/urlid/11.2982.P.20241205.1509.091.
[12] 陈正想,胡光兰,吕冰,等. 磁通门传感器研究现状及其在海洋领域的应用[J]. 数字海洋与水下攻防,2021,4(1):37-45.
[13] 葛翰林,张一鸣,张晨浩,等. 高温磁通门传感器设计与实现[J]. 仪表技术与传感器,2023(11):23-28.
[14] 杨波,卜雄洙,王新征,等. 高斯噪声和弱正弦信号驱动的时间差型磁通门传感器[J]. 物理学报,2014,63(20):151-156.
[15] 毛振珑. 磁场测量 [M]. 北京:原子能出版社,1985:1-10.
[16] ROVATI L, CATTINI S. Zero-field readout electronics for planar fluxgate sensors without compensation coil [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011,59(1):571-578.
[17] 张学孚,陆怡良. 磁通门技术[M]. 北京:国防工业出版社,1995:30-62.
[18] 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.
[19] 刘浩,李予国,丁学振,等. 三轴磁通门传感器温漂误差分析及其校正方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(5):107-113.
[20] PRIMDAHL F. Temperature compensation of fluxgate magnetometers [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1970,MAG6(4):819-822.
[21] GARCÍA A, MORÓN C. Biaxial magnetometer sensor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002,38(5):3312-3314.

Research on the performance of uni-axial ring-shaped fluxgate magnetometer

ZHANG Cong[a], HAN Jianwei[b], JING Yuqiao[a], FU Hongjun[a],
WANG Shuan[b], ZHONG Rui[b], GUO Cong[b]
(a. Robotics and Advanced Manufacturing Academy;
b. Education Center of Experiments and Innovations (Analysis and Testing Center),
Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518000, China)

Abstract: The ring-shaped fluxgate sensors are widely used in weak magnetic field measurements, and improving their sensitivity is of research significance. An experimental setup was constructed using a lock-in amplifier instead of a circuit board, combining numerical calculations with experiments, the impacts of core thickness, excitation voltage magnitude, and frequency on the sensitivity of uni-axial ring-shaped fluxgate were researched. After parameter optimization, the sensitivity of the uni-axial ring-shaped fluxgate sensor could reach 0.551 6 mV/μT with an accuracy of 0.1 μT, thus this sensor enabled high-precision measurement of a weak magnetic field environment.

Key words: uni-axial ring-shaped fluxgate; weak magnetic field; second harmonic

[编辑:任德香]