

压电变压器结构的便携式磁电耦合交/直流磁强计

周柯^{1,2,3}, 张炜^{1,2,3}, 潘绍明^{1,2,3}, 陈梁远^{1,2,3}, 朱引⁴, 杜泳君⁴,

黄恒⁴, 张淇⁴, 张翠玲⁴, 吴金根⁴

(1. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 530023, 南宁; 2. 广西电力装备智能控制与运维重点实验室, 530023, 南宁; 3. 广西电网设备监测及诊断技术创新中心, 530023, 南宁;
4. 西安交通大学精密微纳制造技术全国重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决磁-机-电耦合效应传感器面临的热积累问题, 以及其对低功耗应用和器件耐用性的挑战, 提出了一种基于磁电耦合压电变压器结构的磁强计。该磁强计结合压电材料和磁致伸缩材料, 采用双模式检测机制: 在无源模式下, 利用磁-机-电耦合效应直接检测交流磁场; 在有源模式下, 基于 Delta-E 效应实现电压驱动的直流磁场检测。通过实验测试和等效电路模拟, 研究了长度纵振共振峰的偏移特性, 以及弹性柔度系数与机械品质因子的磁场响应关系。通过设计一个低噪声电荷放大电路, 将磁电传感器产生的高阻抗电荷信号高效转换为低阻抗电压信号, 在此基础上, 成功研制了一款集成 STM32 单片机与驱动电路的便携式交/直流磁强计样机。实验结果表明, 该磁强计在频率为 100、300 Hz 时, 交流磁场检测限分别为 3.18、0.88 A/m, 直流磁场检测限为 3.58 A/m, 性能显著优于基于霍尔原理的商用高斯计, 其检测限约为 55.7 A/m。该磁强计显著提高了磁场检测的灵敏度和分辨率, 尤其在弱磁检测领域提供了参考。

关键词: 弱磁检测; 磁传感器; 磁-机-电耦合

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202506021 **文章编号:** 0253-987X(2025)06-0209-08

A Portable Magnetometer for AC/DC Magnetic Field Detection Utilizing Piezoelectric Transformer Structure

ZHOU Ke^{1,2,3}, ZHANG Wei^{1,2,3}, PAN Shaoming^{1,2,3}, CHEN Liangyuan^{1,2,3},

ZHU Yin⁴, DU Yongjun⁴, HUANG Heng⁴, ZHANG Qi⁴,

ZHANG Cuiling⁴, WU Jingen⁴

(1. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Intelligent Control and Maintenance of Power Equipment, Nanning 530023, China;

3. Guangxi Power Grid Equipment Monitoring and Diagnosis Technology Innovation Centre, Nanning 530023, China;

4. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the heat accumulation issue in magneto-mechano-electric coupling effect sensors and the corresponding challenges in low-power applications and device durability, this paper proposes a magnetometer which is based on a magnetoelectric coupling piezoelectric transformer structure. The sensor integrates piezoelectric and magnetostrictive materials and utilizes a dual-mode detection mechanism. In passive mode, the MME coupling effect directly detects AC magnetic

收稿日期: 2025-01-07。 作者简介: 周柯(1979—), 男, 高级工程师; 潘绍明(通信作者), 男, 高级工程师。

基金

项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3206800); 广西电网公司科技资助项目(GXKJXM20230186)。

网络出版时间: 2025-02-26

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250225.1831.011>

fields, while in active mode, DC magnetic field detection is achieved via a voltage-driven Delta-E effect. Experimental tests and equivalent circuit simulations were conducted to investigate the resonant peak shift characteristics of the longitudinal vibration mode and the magnetic field response relationship between the elastic compliance coefficient and the mechanical quality factor. A low-noise charge amplifier circuit was designed to efficiently convert the high-impedance charge signal generated by the magnetoelectric sensor into a low-impedance voltage signal. Based on these findings, a portable AC/DC magnetometer prototype was developed, integrating an STM32 microcontroller and the driving circuit. Experimental results showed that the detection limits for AC magnetic fields at 100 Hz and 300 Hz were 3.18 A/m and 0.88 A/m, respectively, while the DC magnetic field detection limit was 3.58 A/m. The performance of this magnetometer has significantly outperformed commercial Gauss meters based on the Hall effect (with a detection limit of approximately 55.7 A/m). Therefore, this magnetometer has substantially improved magnetic field detection sensitivity and resolution, particularly for weak magnetic field detection applications.

Keywords: weak magnetic detection; magnetic sensor; magneto-mechano-electric coupling

随着信息技术的发展,磁传感器的应用越来越广泛。磁场传感器可以将磁信号转换为电信号,在水声、信息通信、航空航天、汽车电子、消费电子、医疗器械、石油化工等领域有着广泛的应用。目前,在磁传感器的发展中,第三代磁场传感器更加强调低功耗和高灵敏度的属性,这在基于磁电耦合效应的新型磁电传感器中尤为突出^[1]。传统的磁电传感器分为直接检测交流磁场的无源模式和检测准静态磁场时电流驱动产生交流激励磁场的有源模式^[2-4]。

对于无源模式的低频弱磁检测,文献[5]将叉指电极(IDT)与压电纤维相结合,开发了一种2-1构型的多推挽模式磁电传感器。由于该结构的静态电容相对较低,因此低频电压噪声水平明显优于并联电容结构的传统磁电传感器。2011年,该团队报道的多推挽模式磁电传感器获得了 $5\text{ pT/Hz}^{1/2}@1\text{ Hz}$ 的低频磁噪声指标,该指标可与商用磁通门相媲美^[6]。然而,由于机械谐振带宽的限制,大多数磁电传感器的无源高灵敏度传感仅限于交流磁场检测。当用于低频弱磁检测时,由于频率偏离磁电传感器本身的谐振频率,磁电传感器的灵敏度不能满足低频应用要求。基于压电变压器结构的磁传感器器件性能表现出色,主要集中在材料复合方式、结构优化及高功率适应性等方面。共烧结变压器采用压电/磁致伸缩/压电结构,提高了磁电耦合性能和频率调控能力^[7]。研究不同几何结构的磁电陀螺仪,通过优化压电/磁致伸缩/压电结构提升了高功率条件下的效率(85%)^[8]。通过等效电路模型分析三层磁电复合材料的热磁机电耦合,为磁电材料设计提

供了理论支持^[9]。因此,为了使磁电传感器适用于低频交流或直流磁场检测,必须施加外场激励。近年来,研究人员开发了两种利用电流驱动产生交流激励磁场的有源工作模式,实现了亚 nT 级准静态磁场传感^[10]。

第1种有源模式是磁场激励、线圈读出方式,可以认为是混合巨磁阻抗(GMI)器件与调制模式磁电传感器以增强低频磁传感的工作模式^[11],而不是磁电传感器单独作为有源工作模式。2021年,上海交通大学的研究人员提出了将驱动线圈和接收线圈分开的双端口磁电传感器,并为压电层施加相应的交流电压,在交流磁场和交流电压的共同作用下,增强了磁电传感器的磁敏感性^[12]。第2种有源模式是磁电传感器的磁场调制模式,其利用了磁致伸缩材料的非线性磁-力耦合效应。这种非线性效应使外加激励磁场 H_{ex} 与待测低频磁场 H_0 产生乘积项,从而使传感器的输出包含和频、差频分量的调幅(AM)信号,经包络检测器解调为低频磁信号^[13-14]。2019年,Chu等^[15]在磁驱动、电读出的传感技术基础上,提出了一种利用磁电传感器和锁相放大器结合的检测方法,最终实现了在100 mHz下的100 pT磁场分辨率,性能比以往报道的结果提高了50%。然而,这两种模式都需要在磁电传感器上缠绕多匝线圈,且长时间的磁激励会导致大量焦耳热在器件周围积聚,从而导致以下问题:热致温度漂移,使传感器校准困难,需要额外的温度补偿电路;热致应力,不仅影响器件的谐振状态,而且加速器件失效;系统的总功耗增大,牺牲了磁-机-电耦合效应的低

功耗优势;引入额外的磁噪声。此外,线圈还会将环境中的磁噪声引入系统,增加了后端信号调理电路的设计难度。在设计磁感测阵列时,线圈串扰也会影响传感器的空间磁场分辨率。

针对上述问题,提出了电压驱动的主动有源模式磁电传感器。该模式基于 Delta-E 效应,即待测磁场引起磁致伸缩材料的杨氏模量或磁机械损耗的变化,等效机械阻抗发生变化,从而引起传感器输出的变化^[16-17]。在这种主动有源模式下,磁场的探测信号可以通过检测阻抗变化或锁相检测输出幅值的方法来表征,从而确定输出信号的变化^[18-19]。基于这种主动有源模式,设计了一种压电变压器结构的磁电传感器,并基于等效电路设计了阻抗匹配的驱动电路。利用 STM32 单片机搭配阻抗匹配的驱动电路,研制了一种可实现交/直流磁场双模检测的便携式磁强计。

1 磁电传感器的结构与原理

基于压电变压器的原理,提出了压电 P -磁致伸缩 M -压电 P 结构的磁电传感器,压电变压器结构的磁电传感器如图 1 所示,图中 H_1 为外加磁场, $\dot{u}$ 为感应电压, I_p 为回路电流, Z_{mech} 为机械谐振等效阻抗, I_{mech} 为机械谐振等效电流。磁电传感器是由磁致伸缩材料和压电材料耦合而成,因此磁致伸缩材料、压电材料以及固化剂对磁电传感器的性能影响很大^[20]。经过比较,选用的磁致伸缩材料为 Metglas(1K101),压电材料为 PZT-5,固化剂为环氧树脂粘合剂,磁电传感器的尺寸为 20 mm(长)×2.5 mm(宽)×0.6 mm(厚)。

在无源模式下,交流磁场作用在磁致伸缩材料上产生变形,通过磁-机-电耦合传递给压电材料,并由压电效应产生输出电压,故交流磁场由输出电压直接测量。在有源模式中直流磁场测量时,变压器的一个压电元件用于谐振驱动,另一个压电元件用于输出电压。根据机电等效网络法^[21],无源传感模式的等效电路模型如图 1(c)所示。外加磁场使磁致伸缩材料产生机械电流,该机械电流通过磁-机-电耦合效应按比例传递给压电材料,在压电材料上获得输出电压。根据等效电路模型,可得低频时的磁电耦合系数

$$\alpha_{\text{low}} = \frac{V}{H_3} = \frac{\varphi_m \varphi_p^2 l}{C_0 Z_0 \bar{v}}$$

(1)

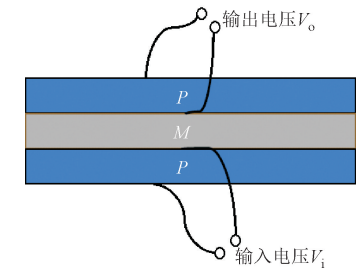
式中: φ_p 、 φ_m 分别为压电元件和磁性元件的转换系

数; l 为器件长度; V 为无源模式下的输出电压; H_3 为各项异性场; C_0 为压电元件的准静态电容; Z_0 为磁电复合材料的固有机械阻抗; $\bar{v}$ 为磁电复合材料的等效声波速度。

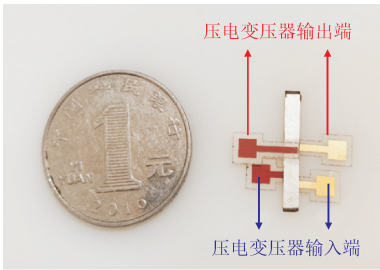
检测直流磁场时,磁电传感器需要从无源模式切换到有源模式。此时,压电元件的激励端施加交流激励电压,使压电元件处于机械谐振状态,该状态的等效电路模型如图 1(d)所示。直流磁场影响磁致伸缩材料的弹性模量,产生等效电路阻抗的变化,从而改变输出电压,由此实现直流磁场的探测。根据等效电路模型,可得谐振频率下的磁电耦合系数

$$\alpha_r = \frac{8Q_m}{\pi^2} \frac{\varphi_m \varphi_p^2 l}{C_0 Z_0 \bar{v}} = \frac{8Q_m}{\pi^2} \alpha_{\text{low}}$$

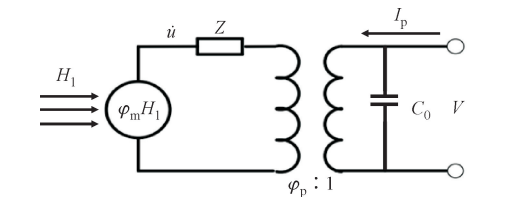
(2)



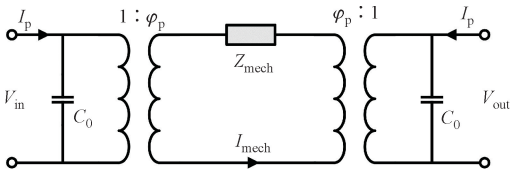
(a)结构示意图



(b)实物图



(c)无源模式的磁电传感器的等效电路模型



(d)压电变压器的等效电路模型

图 1 压电变压器结构的磁电传感器
Fig. 1 Magnetoelectric sensor of piezoelectric transformer structure

式中: Q_m 为机械品质因子。可以看出, 由于机械共振的影响, 谐振频率下的磁电耦合系数是低频磁电耦合系数的 $\frac{8Q_m}{\pi^2}$ 倍。根据图 1(d) 所示的压电变压器的等效电路模型, 有源模式下的输入电压 V_{in} 、输出电压 V_{out} 的关系式为

$$V_{out} = \frac{\varphi_p^2 / j\omega C_0}{j\omega L_m + 1/j\omega C_m + R_m + \varphi_p^2 / j\omega C_0} V_{in} \quad (3)$$

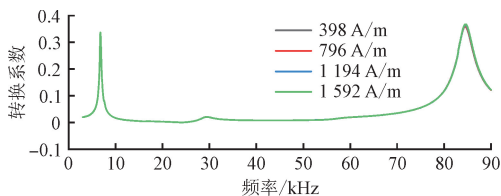
式中: j 为虚部; L_m 为有源模式等效电路的电感值; C_m 为等效电路的电容值; ω 为角频率; R_m 为等效电路的电阻值。根据机械共振作用下阻抗分量的表达式, 式(3)可以简化为

$$V_{out} = \frac{8\varphi_p^2}{\pi\omega_s C_0 Z_0} Q_m V_{in} \quad (4)$$

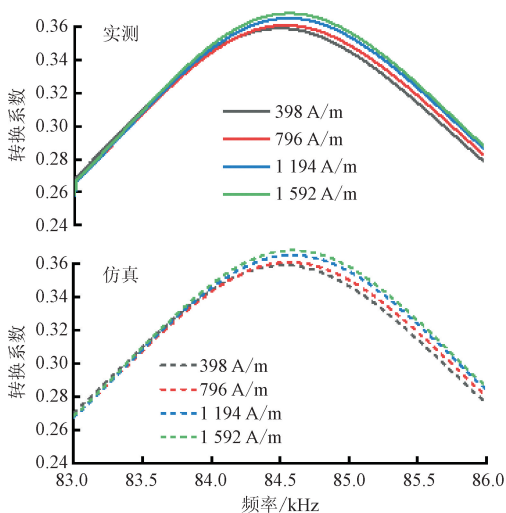
式中: ω_s 为共振角频率。根据直流磁场作用下的磁弹性损失与弹性柔度系数的相关性可知, 直流磁场的数值由 Q_m 、 Z_0 共同决定。通过改变输入电压 V_{in} , 器件可以实现对直流磁场的探测。

2 原理验证实验

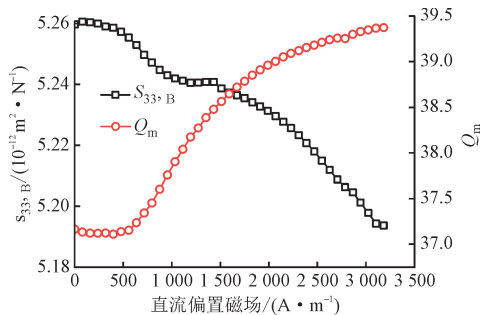
对制备的磁电传感器进行性能测试。首先, 研究了不同直流偏置磁场下的磁电传感器的输出电压/输入电压转换系数的频谱特性, 结果如图 2(a) 所示。该传感器在 6.5 kHz 附近存在弯曲振动共振峰, 在 84.5 kHz 附近存在长度纵振共振峰。通过改变外加直流磁场的幅值, 发现在弯曲振动几乎不存在共振峰的偏移, 而长度纵振存在共振峰的偏移。基于等效电路模型, 对长度纵振共振峰附近的输出电压/输入电压转换系数进行数值模拟, 结果如图 2(b) 所示。实线为实验结果, 虚线为理论结果, 理论值与实测值吻合, 表明长度纵振模可以用于有源模式下的直流磁场探测。此外, 测量直流磁场还需要测量两个必要的参数, 即弹性柔度系数 $S_{33,B}$ 和机械品质因子 Q_m , 结果如图 2(c) 所示。当外加直流磁场的幅值增大时, 磁电传感器的 Q_m 增大, 弹性柔度系数 $S_{33,B}$ 减小, 利用该现象可以完成有源模式下的直流磁场探测^[22]。



(a) 不同直流偏置磁场下压电变压器转换系数的频谱图



(b) 长度纵振模式的谐振峰随直流偏置磁场的变化



(c) 弹性柔度系数 $S_{33,B}$ 和机械品质因子 Q_m 随磁场变化

图 2 传感器的性能测试

Fig. 2 Performance characteristics of the sensor

3 电荷放大器

所提磁电传感器包含 2 个压电层和 1 个磁敏层, 在等效电路上相当于 1 个理想电压源和 1 个准静态阻抗的串联。压电层产生电荷信号, 具有高的输出阻抗。传感器的后端电路要匹配低的输入阻抗, 需要设计具有深度负反馈的低噪声电荷放大电路, 将压电层的电荷信号转换为低阻抗的电压信号^[23]。电荷放大电路的示意图如图 3(a) 所示, 该电路由运放芯片、反馈电容 C_f 和反馈电阻 R_f 组成, 传感器的下限频率由电荷放大电路决定, 下限截止频率的表达式为

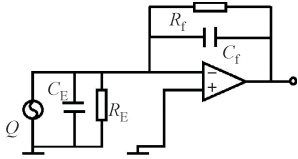
$$f_{HPF} = \frac{1}{2\pi C_f R_f} \quad (5)$$

电荷的增益 G 可近似为

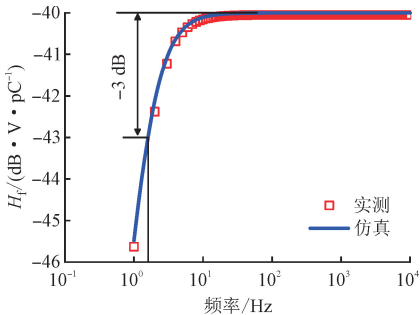
$$G = \frac{1}{C_f} \quad (6)$$

磁电传感器的工作频率设计在 10 Hz 以上。为了提高低频增益, 设置 R_f 为 1 G Ω , C_f 为 100 pf, 结合传感器的等效电路模型, 可以得到电荷放大器的增益

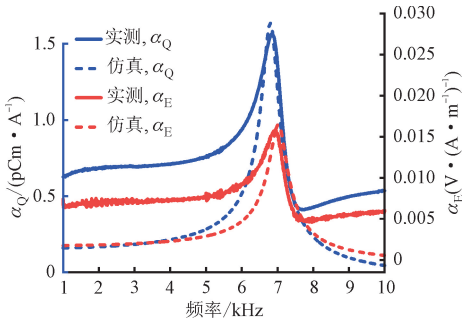
仿真结果,如图 3(b)所示。可以看出,放大电路的-3 dB 截止频率为 1.6 Hz,输入噪声小于 10 nV/Hz^{1/2},基本满足交/直流磁传感应用对低噪声放大电路的要求。同时,对磁电传感器的电荷系数 α_Q (单位为 pC/(A/m)) 和电压系数 α_E (单位为 V/(A/m)) 进行了测量,其频谱特性如图 3(c)所示。实验结果与等效电路模型的仿真结果进行了对比,虚线为仿真值,实线为实验测量值,仿真与测量结果基本一致。最后,对连接电荷放大器的磁电传感器的磁噪声密度进行了测量,磁噪声密度的频谱结果如图 3(d)所示。基于等效电路模型计算了磁噪声密度,理论结果与实验结果变化趋势基本吻合,理论结果在 84.5 kHz 附近有最低值,对应磁电传感器的长度纵振频率。



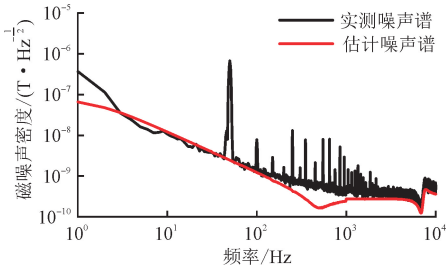
(a) 电荷放大器结构示意图



(b) 电荷放大器的增益频谱



(c) 在交流磁场 $H_{ac}=7.96\text{ A/m}$ 下,传感器的电荷系数 α_Q 和电压系数 α_E 的频谱



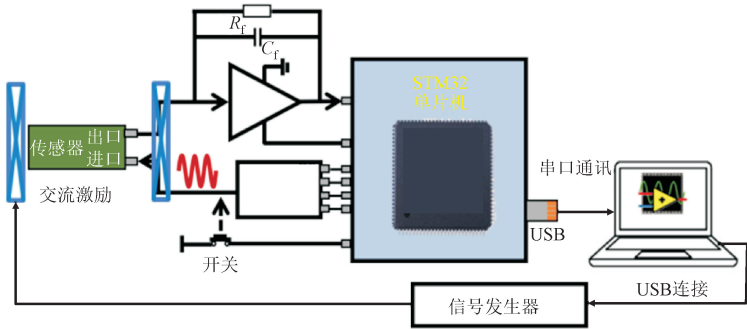
(d) 磁噪声密度的频谱

图 3 电荷放大器电路设计与结果

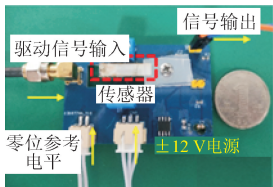
Fig. 3 Design and results of charge amplifier circuit

4 磁强计样机的系统与测试

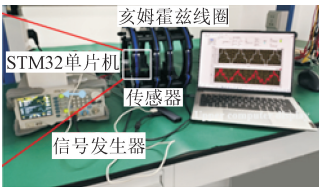
基于所开发的磁电传感器和电荷放大器,设计了一种便携式磁强计样机,该样机的原理图、实物图如图 4(a)、4(b)所示。磁强计样机由 STM32 单片机、12 V 供电模块、电荷放大器模块、磁电传感器构成。为了表征该样机的磁场检测能力,搭建了测试系统,该测试系统的实物图如图 4(c)所示。



(a) 磁强计系统原理图



(b) 磁强计实物图



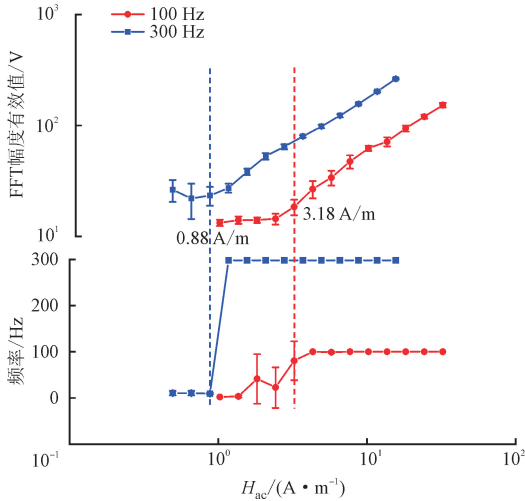
(c) 测试系统图

图 4 磁强计样机系统测试

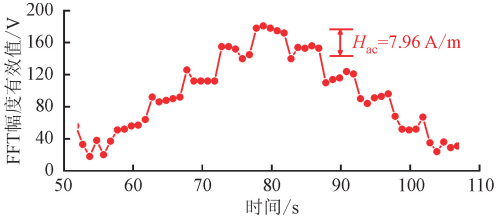
Fig. 4 Magnetometer prototype system test

本测试系统中,待测磁场通过电脑控制信号发生器的输出电压驱动亥姆霍兹线圈产生。上位机与单片机之间建立串行通信,实现传感数据的接收。基于该测试系统,可以得到样机的磁灵敏度、线性度、检出限、磁场分辨率等重要参数。

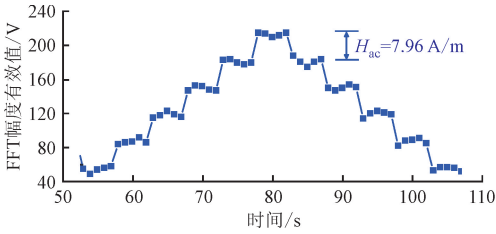
在测量交流磁场时,考虑到快速傅里叶变换(FFT)的频率分辨精度受采样率的限制,本样机的测试频率范围设定在 1 kHz 以内。在此范围内,分别选择 100、300 Hz 的磁场进行测试。磁电传感器的交流磁场检测结果,包括幅度检测结果和频率检测结果,如图 5 所示。100 Hz 交流磁场的检测限为 3.18 A/m, 300 Hz 交流磁场的检测限为 0.88 A/m。可以看出,快速傅里叶变换后的输出幅值随着交流磁场幅值的减小而线性减小,通过线性拟合可以校准不同磁场对应的磁电转换系数。此外,将磁电传感器与 STM32 单片机组合成磁强计样机,设置信号发生器产生幅值阶跃变化的交流磁场,分别对 100、300 Hz 的交流磁场进行阶跃响应测试,测试结果如图 5(b)、5(c)所示。



(a)磁电传感器的交流磁场探测性能



(b)100 Hz 阶跃交流磁场的检测结果



(c)300 Hz 阶跃交流磁场的检测结果

图 5 磁电传感器性能测试

Fig. 5 Magnetoelectric sensor performance test

结果表明,磁强计样机可以分辨 7.96 A/m 的低频交流磁场,优于商用 Lakeshore 425 高斯计(检出限约为 55.7 A/m)。

将磁电传感器的工作模式切换为有源模式,直流磁场的响应曲线如图 6(a)所示,表明直流检测限约为 3.58 A/m。将磁电传感器与 STM32 单片机组合成磁强计样机,设置信号发生器产生幅值阶跃变化的直流磁场,利用样机检测阶跃直流磁场,结果如图 6(b)所示。可以看出,磁强计样机可以分辨 7.96 A/m 的直流磁场,优于商用 Lakeshore 425 高斯计(检出限约为 55.7 A/m)。电压驱动的有源模式,其功耗约为 0.5 mW,显著低于电流驱动的有源模式^[24]。

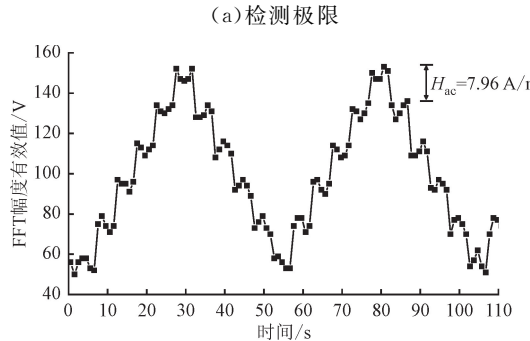
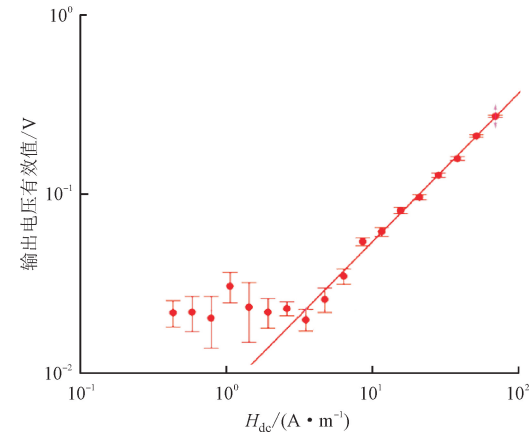
表 1 对比不同传感器性能指标

Table 1 Comparison of the performance of different sensors

类型	传感原理	交流磁场检测限	直流磁场检测限	功耗	工作模式
Lakeshore 425	霍尔效应	约 70 μT	约 70 μT	mW 级	无源
GMI 传感器	巨磁阻抗 (GMI)	10 pT/Hz ^{1/2} @ 1 Hz	0.1 nT	mW 级	有源
磁通门磁强计	磁通门	1 pT 级	1 pT 级	W 级	有源
磁电耦合传感器 ^[7]	压电/磁致伸缩/压电		100 nT		无源/有源
PMP 磁电传感器	压电/磁致伸缩/压电	1 μT (300 Hz)	<4.5 μT	0.5 mW	无源/有源

磁电传感器在功耗、检测限、集成度等方面均优于传统霍尔传感器,同时避免了磁通门磁强计的高功耗、GMI 传感器的复杂驱动电路等问题。其低至 0.88 A/m (交流)和小于 3.58 A/m (直流)的检测

限,比霍尔传感器提高了一个数量级,并接近更高端的弱磁传感器。电压驱动模式避免了传统电流驱动模式的热积累问题,使其更适用于低功耗应用,如便携式磁场测量、航天电子、医疗成像等领域。



(b)阶跃直流磁场的检测结果

图 6 直流磁场测试结果

Fig. 6 Test results for DC magnetic field

5 结 论

结合压电材料和磁致伸缩材料耦合特性,提出了一种基于压电变压器结构的磁-机-电耦合传感技术。所设计的磁电传感器工作在无源交流传感、有源直流传感两种模式:无源模式下,利用磁-机-电耦合效应直接检测交流磁场;有源模式下,基于 Delta-E 效应实现电压驱动的直流磁场检测。通过对磁电传感器在不同直流偏置磁场下的性能测试,发现其长度纵振共振峰存在偏移现象,且基于等效电路模型的数值模拟结果与实验结果吻合,表明该传感器可通过弹性柔度系数和机械品质因子的变化实现有源模式下的直流磁场探测。

通过设计一个低噪声电荷放大电路,将磁电传感器产生的高阻抗电荷信号转换为低阻抗电压信号,实现了低噪声、高增益的磁电传感信号处理。实验结果表明:磁电传感器的交流磁场检测限低至 0.88 A/m (300 Hz),3.18 A/m (100 Hz);有源模式下,磁电传感器的直流磁场检测极限在 3.58 A/m 以下。将磁电传感器与 STM32 单片机相结合,开发了便携式交/直流磁强计样机,优于霍尔原理的

Lakeshore 425 商用高斯计(检测限约为 55.7 A/m)。所提电压驱动磁-机电耦合传感器具有功耗低、集 AC/DC 磁场探测功能于一体的优点,对于开发低功耗磁电传感器,提高磁电传感器的实用性提供了参考。

参考文献:

[1] DONG Cunzheng, LIANG Xianfeng, GAO Jingya, et al. Thin film magnetoelectric sensors toward biomagnetism: materials, devices, and applications [J]. Advanced Electronic Materials, 2022, 8(6): 2200013.

[2] VIEHLAND D, WUTTIG M, MCCORD J, et al. Magnetoelectric magnetic field sensors [J]. MRS Bulletin, 2018, 43(11): 834-840.

[3] GAO Junqi, JIANG Zekun, ZHANG Shuangjie, et al. Review of magnetoelectric sensors [J]. Actuators, 2021, 10(6): 109.

[4] BICHURIN M, PETROV R, SOKOLOV O, et al. Magnetoelectric magnetic field sensors; a review [J]. Sensors, 2021, 21(18): 6232.

[5] DONG Shuxiang, ZHAI Junyi, LI Jiefang, et al. Near-ideal magnetoelectricity in high-permeability magnetostrictive/piezofiber laminates with a (2-1) connectivity [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89 (25): 252904.

[6] WANG Yaojin, GRAY D, BERRY D, et al. An extremely low equivalent magnetic noise magnetoelectric sensor [J]. Advanced Materials, 2011, 23(35): 4111-4114.

[7] ZHOU Yuan, YAN Yongke, PRIYA S. Co-fired magnetoelectric transformer [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(23): 232906.

[8] LEUNG C M, ZHUANG Xin, GAO Min, et al. Enhanced stability of magnetoelectric gyrators under high power conditions [J]. Applied Physics Letters, 2017, 111(18): 182901.

[9] ZHOU Haomiao, LI Menghan, LIU Hui, et al. Equivalent circuit model of converse magnetoelectric effect for the tri-layer magnetoelectric laminates with thermal and stress loadings [J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127137.

[10] KHADE V, WUPPULLURI M. A comparative study on rigid and flexible magnetoelectric composites: review [J]. Journal of Advanced Dielectrics, 2024, 14 (2): 2340001.

[11] WANG Yaojin, LI Jiefang, VIEHLAND D. Magnetoelectrics for magnetic sensor applications: status, challenges and perspectives [J]. Materials Today, 2014,

- 17(6): 269-275.
- [12] WANG Yao, XIAO Ning, XIAO Rui, et al. Enhanced dc magnetic field sensitivity for coupled ac magnetic field and stress driven soft magnetic laminate heterostructure [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(24): 14756-14763.
- [13] SUN Xuan, WU Jingen, LIANG Xianfeng, et al. Effects of amplitude and frequency of the modulation field on the sensitivity for low-frequency magnetic field in magnetoelectric sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(12): 12695-12701.
- [14] SUN Changxing, YANG Wenrong, ZHANG Yumeng. A symmetrical quartz-based magnetoelectric sensor for pico-tesla magnetic field detection [J]. *Symmetry*, 2022, 14(10): 2130.
- [15] CHU Zhaoqiang, YU Zhonghui, POURHOSSEINI-ASL M J, et al. Enhanced low-frequency magnetic field sensitivity in magnetoelectric composite with amplitude modulation method [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(13): 132901.
- [16] BIAN Leixiang, WEN Yumei, LI Ping, et al. Magnetostrictive stress induced frequency shift in resonator for magnetic field sensor [J]. *Sensors and Actuators: A Physical*, 2016, 247: 453-458.
- [17] CHEN Cong, BAI Libing, ZHANG Jie, et al. Resonant magnetometer for ultralow magnetic field detection by integrating magnetoelastic membrane on film bulk acoustic resonator [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2022, 69(4): 1452-1460.
- [18] HUI Yu, NAN Tianxiang, SUN Nian, et al. High resolution magnetometer based on a high frequency magnetoelectric MEMS-CMOS oscillator [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(1): 134-143.
- [19] NAN Tianxiang, HUI Yu, RINALDI M, et al. Self-biased 215 MHz magnetoelectric NEMS resonator for ultra-sensitive DC magnetic field detection [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 1985.
- [20] XU Shaoyi, PENG Qiang, XING Fangfang, et al. A low-cost current sensor based on semi-cylindrical magnetostrictive composite [J]. *Electronics*, 2020, 9(11): 1833.
- [21] 王春雷, 李吉超, 赵明磊. 压电铁电物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [22] 卞雷祥, 文玉梅, 李平. 磁致伸缩材料磁弹性内耗的场依赖特性及其用于磁场传感研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(2): 883-892.
- BIAN Leixiang, WEN Yumei, LI Ping. The field dependence of magnetoelastic damping in magnetostrictive material and its application in the magnetic field sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(2): 883-892.
- [23] SINDLER Y, LINEYKIN S. Static, dynamic, and signal-to-noise analysis of a solid-state magnetoelectric (Me) sensor with a spice-based circuit simulator [J]. *Sensors*, 2022, 22(15): 5514.
- [24] WU Jingen, HU Zhongqiang, CHENG Miaomiao, et al. Highly sensitive magneto-mechano-electric magnetic field sensor based on torque effect [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(2): 1409-1416.

(编辑 赵炜 陶晴)