

# 一种过零非对称高灵敏GMI磁敏传感器

何佳俊\*, 李金贵, 金林枫, 杨 灿, 张建强, 方允樟#

浙江师范大学物理与电子信息工程学院, 浙江 金华

收稿日期: 2023年12月11日; 录用日期: 2024年1月5日; 发布日期: 2024年1月12日

## 摘 要

针对 $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$ 非晶合金薄带具有高灵敏GMI效应,但在微弱磁场下表现出不灵敏且线性度低问题提出内偏置解决方案。根据电磁感应,调节电路参数使流过电感线圈的电流改变,导致电感线圈两端的磁场发生相应变化;通过计算非晶薄带GMI特性曲线的高灵敏线性区间,调整偏置电流大小,使零点偏置到线性区间的中心。利用此方法,传感器输出特性呈现出一种过零非对称形式,并在正负微弱磁场下具有更高灵敏度。本文介绍了Fe基合金薄带的巨磁阻抗特性、传感器的电路原理以及调节偏置电流后的测得的实验数据分析。通过实验结果显示传感器输出特性重复性好、基本无磁滞、线性度高,尤其在微弱磁场下灵敏度达 $22.53\text{ mV}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$ 。

## 关键词

内偏置, GMI磁敏传感器, 过零非对称, 高灵敏

# A Zero-Crossing Asymmetric GMI Magnetic Sensor with High Sensitivity

Jiajun He\*, Jingui Li, Linfeng Jin, Can Yang, Jianqiang Zhang, Yunzhang Fang#

School of Physics and Electronic Information Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang

Received: Dec. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 5<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 12<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Aiming at the problem that  $Fe_{73.5}Cu_1Nb_3Si_{13.5}B_9$  amorphous alloy ribbon has high sensitivity GMI effect, but it is insensitive and has low linearity under weak magnetic field, an internal bias solution is proposed. According to electromagnetic induction, the circuit parameters are adjusted to

\*第一作者。

#通讯作者。

change the current flowing through the inductance coil, which leads to the corresponding change of the magnetic field at both ends of the inductance coil; By calculating the highly sensitive linear interval of GMI characteristic curve of amorphous ribbon, the bias current is adjusted to bias the zero point to the center of the linear interval. By using this method, the output characteristics of the sensor show a zero-crossing asymmetry form, and it has higher sensitivity under positive and negative weak magnetic fields. This paper introduces the giant magneto-impedance characteristics of Fe-based alloy ribbon, the circuit principle of the sensor and the analysis of the experimental data measured after adjusting the bias current. The experimental results show that the output characteristics of the sensor have good repeatability, basically no hysteresis and high linearity, especially in weak magnetic field, the sensitivity reaches  $22.53 \text{ mV}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$ .

## Keywords

Internal Bias, GMI Magnetic Sensor, Zero-Crossing Asymmetry, Highly Sensitive

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

磁敏传感器在现代传感技术中发挥着关键作用，特别是在微弱磁场测量方面。本研究聚焦于  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  非晶合金薄带，该材料以其高灵敏的巨磁阻抗(GMI)效应而备受关注[1]。然而在微弱磁场下，该非晶合金薄带不灵敏和线性度低的问题成为限制其应用的关键挑战。

解决这一问题，传统的方式为外加偏置线圈产生偏置磁场[2]，为传感器提供合适的工作区间。但外加偏置线圈需要额外的电路和元件来实现，这可能导致成本的增加，并增加了故障的可能性。此外，外加偏置线圈也可能引入额外的功耗，对于一些对功耗要求较高的应用而言，这可能是不利的。另一个缺点是外加偏置线圈可能会引入磁场的非均匀性，影响传感器的性能和精度，这可能导致测量误差或不稳定性，尤其是在要求高精度的应用中。总体而言，虽然外加偏置线圈可以用于校准和提高磁敏传感器的性能，但在选择时需要权衡其优点和缺点。

为解决这一问题，本研究提出了一种创新的内偏置解决方案，基于电磁感应的原理，通过调节电路参数，改变流过电感线圈的电流，成功实现了对磁场的精准调控，并计算非晶薄带 GMI 特性曲线中的高灵敏线性区间，调整偏置电流的大小，将零点偏置到线性区间的中心，从而获得更为可控和灵敏的磁敏传感器。

本文将深入介绍 Fe 基合金薄带的巨磁阻抗特性，详细阐述传感器的电路原理，并展示通过调节偏置电流后获得的实验数据。实验结果表明，所提出的内偏置解决方案使传感器输出特性具有良好的重复性、基本无磁滞以及卓越的线性度，尤其在微弱磁场下，其灵敏度达到了令人瞩目的  $22.53 \text{ mV}/(\text{A}\cdot\text{m}^{-1})$ 。在电子罗盘及地磁陀螺仪等领域，具有非常光明的应用前景。

## 2. Fe 基合金薄带的 GMI 特性

### 2.1. GMI 效应简介

巨磁阻抗(GMI)效应是一种在外部磁场作用下导致金属或合金阻抗发生显著变化的现象。目前用巨磁阻抗比来衡量巨磁阻抗效应的大小，其定义为：

$$\Delta Z/Z = \frac{Z(H) - Z(H_{\max})}{Z(H_{\max})} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中： $Z(H)$ 为任意外加磁场的阻抗值， $Z(H_{\max})$ 为最大外加磁场的阻抗值。本文使用纵向驱动[3]方法来实现材料的 GMI 效应。

## 2.2. Fe 基合金薄带 GMI 特性的测试

Fe 基合金薄带通过单辊快淬法[4]制成，尺寸为 20 mm (长度) × 0.49 mm (宽度) × 26 μm (厚度)。将其放入真空腔体中经过 540℃ 自由退火，保温 30 分钟后自然冷却。巨磁阻抗曲线测量装置的示意图如图 1 所示，其型号为 HP42942A。其中提供外加磁场的亥姆霍兹线圈由直径 0.29 mm 的漆包线绕制 650 匝而成。阻抗分析仪的测量频率从 40 Hz 至 2 MHz、调节阻抗分析仪的交流驱动信号到 10 mA，即可测量巨磁阻抗(GMI)。

在测试前，为了消除地磁场的影响，通过指南针将亥姆霍兹线圈放置在与地磁场相互垂直的位置上。测试线圈则置于亥姆霍兹线圈的中央，并与其产生的直流磁场平行。整个测试过程在屏蔽室内进行。实验发现，在驱动频率为 180 kHz 下，Fe 基合金薄带表现出最高的灵敏度。测试结果由图 2 所示。

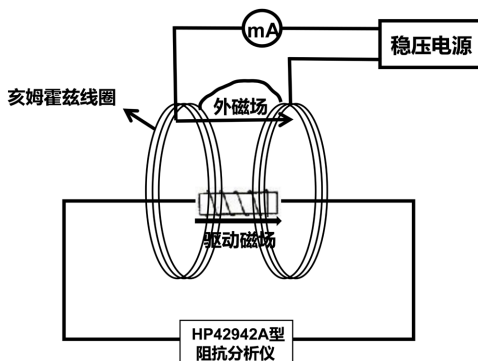


Figure 1. GMI measurement system schematic diagram

图 1. GMI 测量系统示意

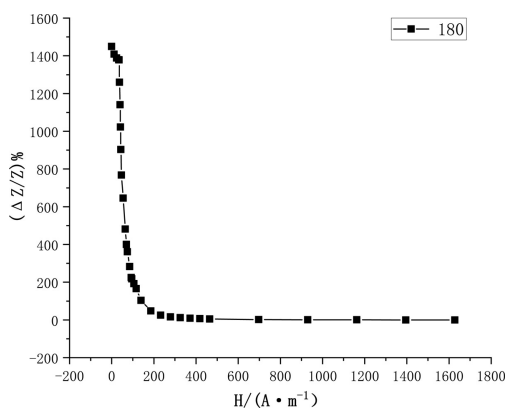


Figure 2. GMI characteristics of FeCuNbSiB alloy thin strip

图 2. FeCuNbSiB 合金薄带的 GMI 特性

由图 2 可知，当无外加磁场时，其巨磁阻抗比最大约为 1448%；当磁场在 0~33.59 A/m 之间变化时，其巨磁阻抗比不灵敏且线性度差；当磁场在 33.59~186.04 A/m 之间变化时，其阻抗比随着磁场的增大呈

现迅速减小且线性度较高,当磁场大于 186.04 A/m 时,巨磁阻抗比基本保持不变。本传感器设计利用磁场在 33.59~186.04 A/m 线性变化特性,且为了检测 33.59 A/m 以下的微弱磁场,本文给出了内磁场偏置的解决办法。

### 3. 磁敏传感器的电路设计及内偏置原理

#### 3.1. 磁敏传感器的电路设计

磁敏传感器的电路由 Colpittz 振荡电路和二极管峰值检波电路构成,其原理图见图 3。

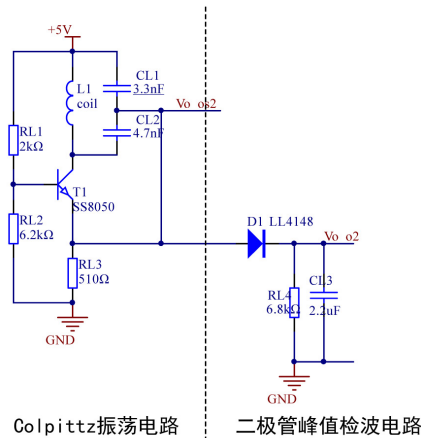


Figure 3. Magnetic sensor circuit

图 3. 磁敏传感器电路

##### (1) Colpitts 振荡电路

本传感器的信号发生电路采用 Colpitts 振荡电路[5],具有结构简单、较好的频率稳定性、频率可调性和较高的振荡效率等优点。在电路激励时,由于电容和电感的相互作用,实现自我激励的振荡。考虑到驱动频率在 180 KHz 下,Fe 基合金薄带在此频率下表现更加灵敏,通过 Colpitts 振荡电路的频率可调性,将输出交变信号的频率调整至 180 KHz。通过调节电路的静态工作点,确保产生无失真的正弦波信号。这种设计确保了传感器在工作时能够提供稳定、灵敏且无失真的信号输出。

##### (2) 电感线圈的制作

电感线圈为自制线圈,由线径为 0.07 mm 的漆包线绕制而成,漆包线绕制在内径为 1.19 mm、长度为 2 cm 的空心玻璃管上,线圈内径为 1.19 mm、长度为 2 cm、缠绕匝数为 300 匝,线圈内置 Fe 基合金薄带,其示意图如图 4 所示。

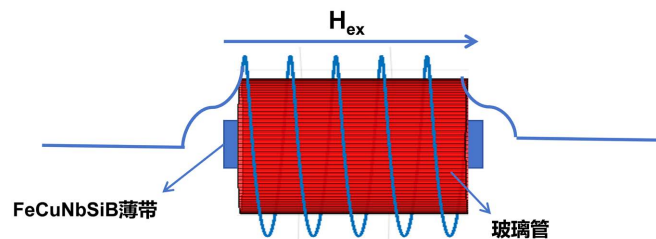


Figure 4. Schematic diagram of inductance coil

图 4. 电感线圈示意图

Fe 基合金薄带放置在真空玻璃管内,  $H_{ex}$  为沿 Fe 基合金薄带方向并穿过改薄带的磁场强度。

### (3) 二极管峰值检波电路

二极管峰值检波电路由检波二极管、电容及电阻构成, 当输入交流信号通过二极管时, 二极管仅允许正半周的信号通过, 负半周被截断。电容对通过的正半周信号进行充电, 跟踪信号的峰值。电阻的存在调节了电容充放电的速度, 影响了电路对信号变化的响应时间。这样, 电路的输出将近似为输入信号的峰值, 因为电容充电时保留了最大振幅, 最后输出直流电压信号。

## 3.2. 内偏置原理

根据 Fe 基合金薄带的 GMI 特性, 其在弱磁场下巨磁阻抗比呈现出不灵敏区域, 因此需要在电感线圈上施加偏置电流, 即通过调节电路参数使流过电感线圈的电流改变, 导致电感线圈两端的磁场发生相应变化; 通过计算非晶薄带 GMI 特性曲线的高灵敏线性区间, 调整偏置电流大小, 使零点偏置到线性区间的中心。如图 5 偏置电路图所示, 通过调节 RL1 的电阻, 使 NPN 三极管基极电压  $U_B$  改变, 因  $I_E = I_B + I_C$ , 电感 L 上的  $I_C$  发生改变, 即由电磁感应[6], 作用在薄带轴向上的磁场发生改变。从而使输出零点偏移。

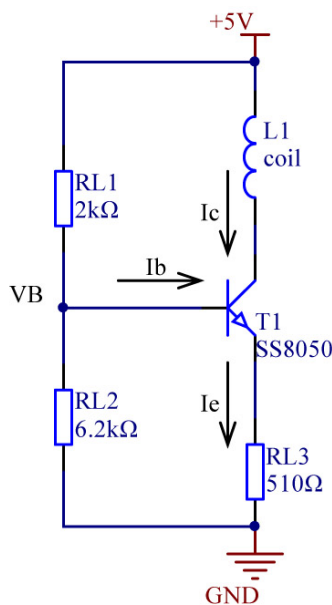


Figure 5. Bias circuit diagram  
图 5. 偏置电路图

## 4. 实验结果

静态特性与动态特性为传感器的基本特性, 本文只对静态特性进行分析。而静态特性描述了其在稳态条件下的性能, 主要包括灵敏度、线性度、重复性和迟滞性等[7]。

在实验中, 通过直流电源和亥姆霍兹线圈产生磁场, 且需要确保磁敏传感器的电感线圈与亥姆霍兹线圈垂直并置于中央。通过调节通过亥姆霍兹线圈的电流, 使外加磁场在 0 到 350 mA 之间(其产生的磁场在 0 到 1627.85 A/m 之间)从正到负, 再从负到正变化, 传感器的输出电压信号通过 UT804 台式万用表测得。此过程旨在获取传感器的静态特性, 多次进行这一操作, 从小到大再从大到小改变亥姆霍兹线圈的外加磁场, 并进行多组重复测量, 最终结果见图 6 和图 7。

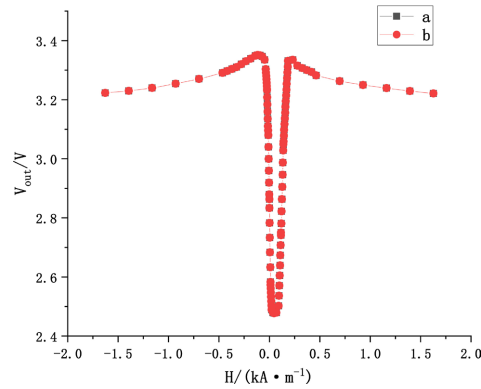


Figure 6. Repetitive data analysis

图 6. 重复性数据分析

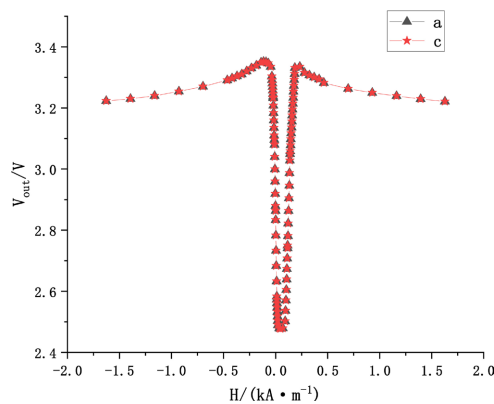


Figure 7. Hysteresis data analysis

图 7. 迟滞性数据分析

图 6 为重复性实验，其中 a、b 两条曲线在相同条件下，由外加磁场 $-1627.85 \text{ A/m}$  至  $1627.85 \text{ A/m}$  变化的输出曲线。根据两组曲线可以看出，输出基本重叠，通过计算得出重复性实验的最大偏差为 0.45%，具有良好的输出稳定性。图 7 为迟滞性数据测量结果，曲线 a 由外加磁场 $-1627.85 \text{ A/m}$  至  $1627.85 \text{ A/m}$  变化的输出曲线，曲线 c 由外加磁场  $1627.85 \text{ A/m}$  至 $-1627.85 \text{ A/m}$  变化的输出曲线，通过计算得出迟滞性数据最大偏差为 0.38%，传感器几乎无磁滞。

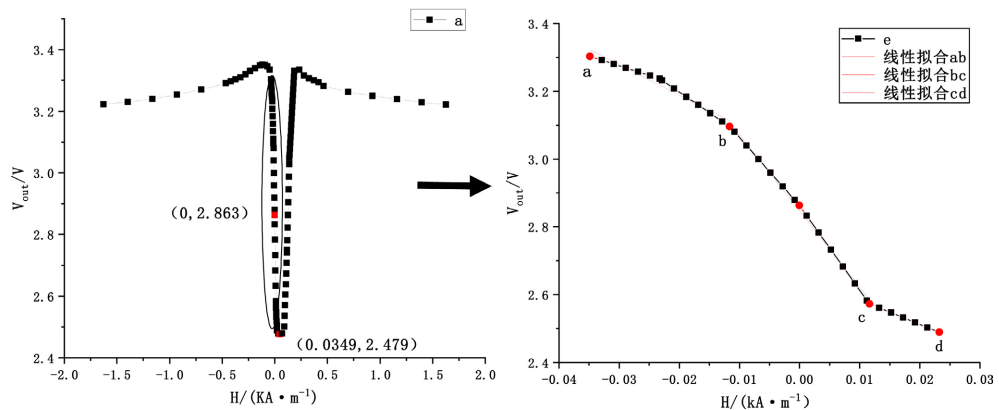


Figure 8. bias magnetic field analysis

图 8. 偏置磁场分析

如图 8 偏置磁场分析所示, 曲线 e 为图 a 线性区磁场 $-34.88 \text{ A/m} \sim 23.25 \text{ A/m}$ 放大所得。对图 e 进行分析, 分成 ab 段、bc 段和 cd 段, ab 段为磁场 $-34.88 \text{ A/m} \sim -11.63 \text{ A/m}$ , 通过线性拟合其灵敏度为  $9 \text{ mV}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 、线性度为  $98.144\%$ ; bc 段为磁场 $-11.63 \text{ A/m} \sim 11.63 \text{ A/m}$ , 通过线性拟合其灵敏度为  $22.53 \text{ mV}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ , 线性度为  $99.834\%$ ; cd 段为磁场  $11.63 \text{ A/m} \sim 23.26 \text{ A/m}$ , 通过线性拟合其灵敏度为  $7.22 \text{ mV}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ , 线性度为  $99.99\%$ 。对比三段磁场可知, bc 段灵敏度最高, 即通过调节偏置电流, 使偏置磁场大小为  $34.9 \text{ A/m}$ , 0 磁场对应的输出为  $2.479$  在 bc 段的中心位置。

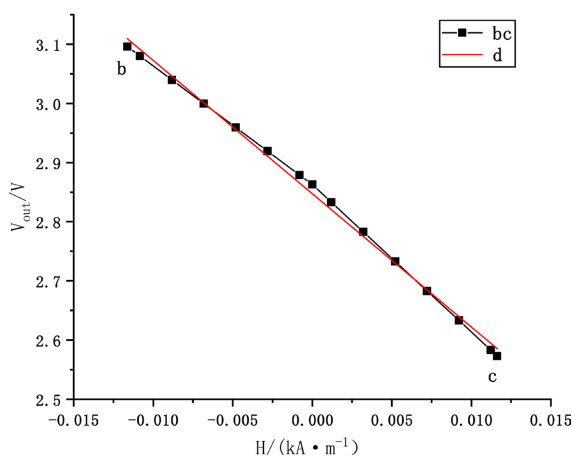


Figure 9. Sensitivity and linearity analysis  
图 9. 灵敏度及线性度分析

对图 8 中 e 曲线的变化情况做出分析, 传感器在 $-14641.2 \text{ nT} \sim 14641.2 \text{ nT}$ 之间, 即 bc 段表现出最高的灵敏度。如图 9 所示, 图中曲线 d 为对曲线 bc 所示的磁场范围进行线性拟合的数据, 由拟合数据计算可知其线性度最大偏差为  $0.166\%$ , 灵敏度为  $22.53 \text{ mV}/(\text{A} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

## 5. 结论

根据实验结果, 用  $\text{Fe}_{73.5}\text{Cu}_1\text{Nb}_3\text{Si}_{13.5}\text{B}_9$  薄带为磁敏元件制作的磁敏传感器输出稳定性好、基本无磁滞、线性度好且灵敏度高优点, 尤其通过调节内偏置, 传感器输出特性呈现一种过零非对称的形式, 使得传感器在微弱磁场有着极高的灵敏度。其在微磁场检测、地磁陀螺仪等领域具有极高的应用前景。

## 项目基金

甘肃省科技计划(21JR7RE175)。

## 参考文献

- [1] Ding, J., Xu, H., Shi, Z., Li, X. and Zhang, T. (2021) Effect of Primary  $\alpha$ -Fe on Soft Magnetic Properties of FeCuNb-SiB Amorphous/Nanocrystalline Alloy. *Journal of Non-Crystalline Solids*, **571**, Article ID: 121079. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2021.121079>
- [2] 史瑞. 基于 GMM 磁性理论的力传感器设计及其精度保障策略研究[D]: [博士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [3] 范晓珍, 方允樟, 何兴伟, 孙怀君, 斯剑霄. 纵向驱动巨磁阻抗效应的研究进展[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2014(2): 135-141.
- [4] 盛洪超, 靳朝相, 顾小燕. 单辊快淬法制备高性能各向异性 Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B/ $\alpha$ -Fe 纳米复相永磁材料[J]. 中国稀土学报, 2015, 33(1): 48-52.

- [5] 张中华, 周健博, 付景超. Colpitts 混沌电路的线性反馈控制及自适应反馈控制[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(2): 94-98.
- [6] 常颖. 探究电磁感应定律及其简单应用[J]. 电子制作, 2018(24): 78-79.
- [7] 金林枫, 郑金菊, 蔡晶. 基于 Fe 基非晶薄带的宽线性 GMI 传感器[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2011, 34(2): 158-161.