

Fe基合金薄带GMI效应与驱动线圈磁芯填充系数的研究

赵梓翔*, 李金贵, 何佳俊, 杨 灿, 苗艳龙, 翟 耀, 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: 2024年2月28日; 录用日期: 2024年5月10日; 发布日期: 2024年5月17日

摘 要

本文研究了以Fe基合金薄带($\text{Fe}_{85.67}\text{Si}_{7.4}\text{B}_{1.7}\text{Cu}_{1.3}\text{Nb}_{3.9}\text{Co}_{0.03}$)作为磁芯的纵向巨磁阻抗效应与其驱动线圈磁芯填充系数之间的数量关系。研究结果表明, Fe基磁芯驱动线圈的磁芯填充系数对纵向巨磁阻抗效应(LDGMI)有着不可忽视的作用。当磁芯填充系数增大时, 磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗效应会变得更加明显。当驱动线圈的截面积增大时, 磁芯驱动线圈的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 会呈现幂函数性减小; 当磁芯填充系数与磁芯驱动线圈的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 之间存在幂函数关系。

关键词

磁性材料, 固化磁芯, 驱动线圈, 截面积, 巨磁阻抗效应, 磁芯填充系数

Study of the GMI Effect on Thin Strips of Fe-Based Alloys and the Core Filling Factor of Drive Coils

Zixiang Zhao*, Jingui Li, Jiajun He, Can Yang, Yanlong Miao, Yao Zhai, Yunzhang Fang#

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

Received: Feb. 28th, 2024; accepted: May 10th, 2024; published: May 17th, 2024

Abstract

In this paper, the quantitative relationship between the longitudinal giant magnetic impedance

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 赵梓翔, 李金贵, 何佳俊, 杨灿, 苗艳龙, 翟耀, 方允樟. Fe基合金薄带GMI效应与驱动线圈磁芯填充系数的研究[J]. 传感器技术与应用, 2024, 12(3): 323-330. DOI: 10.12677/jsta.2024.123035

effect (LDGMI) of a thin strip of Fe-based alloy ($\text{Fe}_{85.67}\text{Si}_{7.4}\text{B}_{1.7}\text{Cu}_{1.3}\text{Nb}_{3.9}\text{C}_{0.03}$) as a magnetic core and the core filling factor of its drive coil is investigated. The results of the study indicated that the core filling factor of the drive coil of Fe-based cores has a non-negligible role in the longitudinal giant magnetic impedance effect (LDGMI). When the core filling factor increases, the longitudinal giant magnetic impedance effect of the core drive coil becomes more pronounced. When the cross-sectional area of the drive coil increases, the maximum impedance ratio $(\Delta Z/Z)_{\max}$ of the core drive coil decreases as a power function; when there is a power function relationship between the core filling factor and the maximum impedance ratio $(\Delta Z/Z)_{\max}$ of the core drive coil.

Keywords

Magnetic Materials, Cured Cores, Drive Coils, Cross Section Area, Giant Magnetic Impedance Effect, Core Filling Factor

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

磁性材料不断深入研究推动了磁传感技术的发展,而其中巨磁阻抗(GMI)效应引起了学者们的关注[1][2][3][4]。尤其是 Fe 基合金薄带在 GMI 效应方面的研究,为开发高性能磁传感器提供了新的可能性[5]。

早在 1988 年, Yoshizawa 等[6]通过非晶晶化法成功制备了 Fe 基纳米晶材料,展示出优异的软磁性能。随后, Mohri 等人[7]在钴基非晶丝中首次观察到横向驱动的巨磁阻抗(TDGMI)效应,为后人的研究打下了坚实的基础。之后杨介信[8]等人在 Fe 基纳米晶材料容易被磁化的方向,也就是薄带的轴线方向来测量磁性材料的巨磁阻抗效应,称作纵向驱动的巨磁阻抗(LDGMI)效应,此种模式下测得的巨磁阻抗效应具有非常高的外加磁场灵敏度,相比横向驱动的巨磁阻抗效应(TDGMI)高出两个数量级。近年来,对于 Fe 基合金薄带在纵向驱动下的 GMI 效应,尤其是驱动线圈几何参数对性能的影响,研究仍然相对有限[9]。因此,本研究旨在通过系统地调整驱动线圈的几何参数,探究截面积对 Fe 基合金薄带纵向驱动 GMI 效应的影响,以期为高性能磁传感器的设计提供实验基础。

2. 实验

2.1. 磁芯驱动线圈的制备

利用单辊快淬制备非晶带的技术,我们用锦州同创科技 SP-FJ400 型非晶态制带机床成功制备了宽度为 0.62 mm,厚度为 0.031 mm 的 Fe 基($\text{Fe}_{85.67}\text{Si}_{7.4}\text{B}_{1.7}\text{Cu}_{1.3}\text{Nb}_{3.9}\text{C}_{0.03}$)非晶薄带[10],将薄带在自由伸长状态下以 9°C/min 的升温速率把温度从室温提升到 540°C,然后保持这个状态 30 分钟,接着让其自行降温回到常温,并裁剪为若干份 15 mm 的长度备用,取出 20 根细带放入装有调配好环氧树脂固化剂的烧杯中浸泡后,将烧杯置入干燥箱中抽真空以便排出固化剂中混入的气体完成固化处理后,将取出的磁芯放置于实验室内通风口处自然风干。

将线径为 0.09 的漆包线,制备了内径分别为 3.4 mm、2.5 mm、1.5 mm、1.1 mm、1 mm、0.9 mm、0.8 mm、0.7 mm,匝数为 50 匝的圆形驱动线圈,其截面积分别为 8.709 mm²、4.908 mm²、1.767 mm²、0.95 mm²、0.785 mm²、0.636 mm²、0.502 mm²和 0.384 mm²。同时,为了进一步减小截面积,设计并制备了宽为 0.68 mm,高分别为 0.45 mm、0.33 mm 的长方形驱动线圈,其截面积分别为 0.306 mm²和 0.218 mm²。

同时为方便计算,我们将磁芯横截面积与驱动线圈横截面积的比值定义为磁芯填充系数,其表达式为:

$$\Psi = \frac{S_{mc}}{S_{dc}} \times 100\% \quad (1)$$

其中 S_{mc} 代表磁芯的截面积, S_{dc} 表示驱动线圈的横截面积。

将 Fe 基单根薄带和固化磁芯分别插入具有不同截面积的驱动线圈内,就制成了多个不同磁芯填充系数的磁芯驱动线圈,图 1 为磁芯驱动线圈的制备流程图。

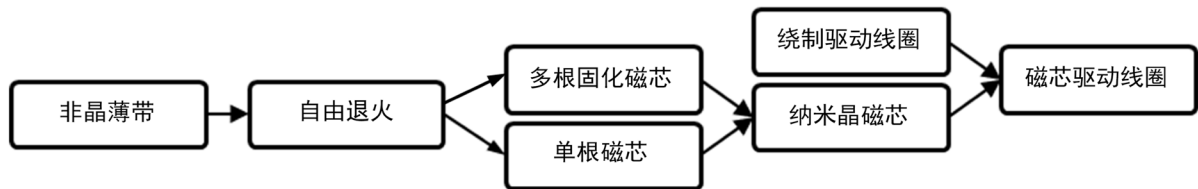


Figure 1. Flowchart of the preparation of the magnetic core driving coil

图 1. 磁芯驱动线圈的制备流程图

2.2. 纵向巨磁阻抗(LDGM)效应测量方法

把磁芯驱动线圈放在直径是 200 mm 的 Helmholtz 线圈的轴线上并保持与轴线平行,同时为了消除地球磁场的干扰,保证 Helmholtz 线圈的主轴方向跟地球磁场垂直。通过改变 Helmholtz 线圈外接直流电源的电流参数,在 Helmholtz 线圈区域内产生不同大小的恒定磁场,磁芯驱动线圈的阻抗值也会随之改变,在这过程中我们使用 HP4294A 精密阻抗分析仪来测量并记录下不同磁芯填充系数磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗值。在整个测量过程中,HP4294A 精密阻抗分析仪向被测量的磁芯驱动线圈提供 10 毫安的交变电流,图 2 展示了纵向驱动巨磁阻抗测量的原理示意图。

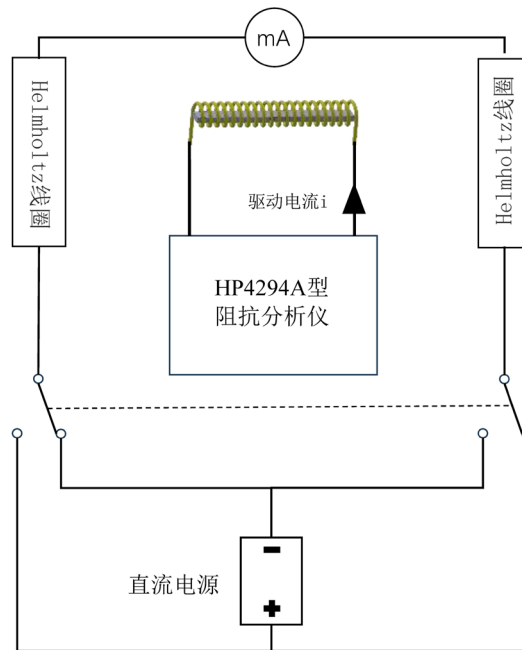


Figure 2. Schematic diagram of giant magnetic impedance measurement with longitudinal drive

图 2. 纵向驱动的巨磁阻抗测量原理图

通过这种测量方式，我们获得了磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗(LDGM)效应，其定义表达式如下：

$$\frac{\Delta Z}{Z} = \frac{Z(H_{ex}) - Z(H_{max})}{Z(H_{max})} \times 100\% \quad (2)$$

其中 $Z(H_{ex})$ 是 Helmholtz 线圈提供的磁场为任意值时的阻抗值， $Z(H_{max})$ 是 Helmholtz 线圈提供的磁场为最大值时的阻抗值。

3. 结果与讨论

3.1. 不同截面积磁芯驱动线圈的巨磁阻抗效应

图 3 表示在不同截面积下，Fe 基磁芯驱动线圈的巨磁阻抗曲线，其中驱动频率为 0.6 MHz。如图所示，磁芯驱动线圈的 LDGM 曲线在 -139.53 A/m 到 139.53 A/m 之间有一个“平台”，表示在该磁场区间磁芯驱动线圈对于磁场的变化不响应，这是退磁场所致。所谓退磁场是指铁磁性材料被外加磁场磁化时，材料内部产生的反向附加磁场，用于抵消外加磁场的作用。退磁场的大小与方向是由磁性材料本身的磁矩分布决定的，即退磁场来源于磁性材料磁矩 M 分布的不均匀性。

线性区域对于外加磁场的变化响应明显，其灵敏程度与最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 的大小有关，而最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 的大小与驱动线圈的截面积大小密切相关。

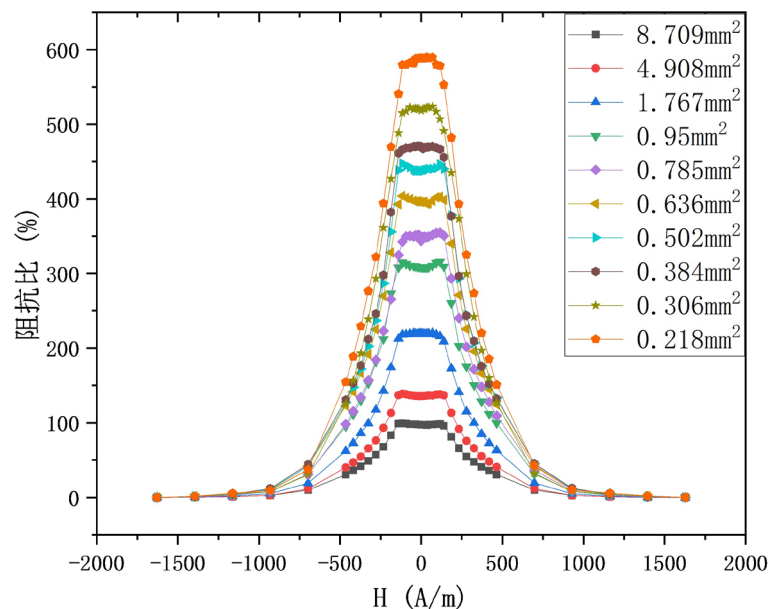


Figure 3. Longitudinal giant magnetic impedance curves of single core drive coils with different cross-sectional areas

图 3. 不同截面积的单根磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗曲线

如图 4 所示，当截面积 S_{dc} 为 0.218 mm^2 、 0.306 mm^2 、 0.385 mm^2 、 0.503 mm^2 、 0.637 mm^2 、 0.786 mm^2 、 0.950 mm^2 、 1.767 mm^2 、 4.909 mm^2 、 8.709 mm^2 时， $(\Delta Z/Z)_{max}$ 为 588.59% 、 518.337% 、 470.381% 、 437.460% 、 395.759% 、 343.490% 、 308.422% 、 219.786% 、 135.739% 、 97.44% 。根据拟合曲线 Fe 基单根磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗效应曲线的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{max}$ 与驱动线圈截面积 S_{dc} 是幂函数的关系。

3.2. 不同截面积固化磁芯驱动线圈的巨磁阻抗效应

为进一步扩大磁芯填充系数并且不引入额外应力影响实验，我们将多根磁芯固化后放入驱动线圈中，

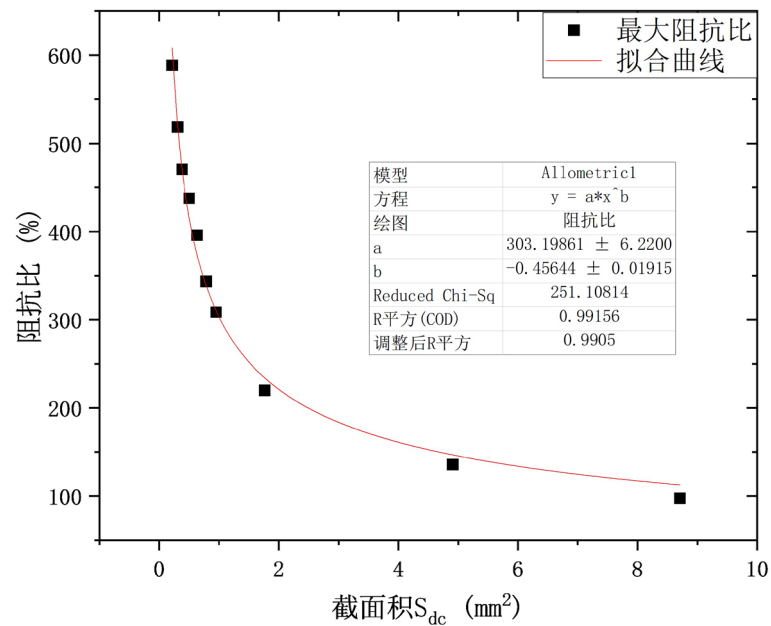


Figure 4. Maximum giant magnetic impedance ratio vs. drive coil cross section area (single core)

图 4. 最大巨磁阻抗比与驱动线圈截面积的关系(根磁芯)

图 5 为固化后不同截面积磁芯驱动线圈的纵向驱动巨磁阻抗曲线，驱动频率为 0.6 MHz。如图所示，磁芯驱动线圈的纵向驱动巨磁阻抗曲线在 -4092.89 A/m 到 4092.89 A/m 之间有更宽的“平台”，表示在该磁场区间磁芯驱动线圈对于磁场的变化不响应，这是固化产生的应力与退磁场的共同作用所致。退磁场产生的原因上文已作出解释，下面主要解释应力作用。

应力定义为单位面积所承受作用力的大小，固化后的磁芯必然因为固化剂的凝固而受到作用力，进

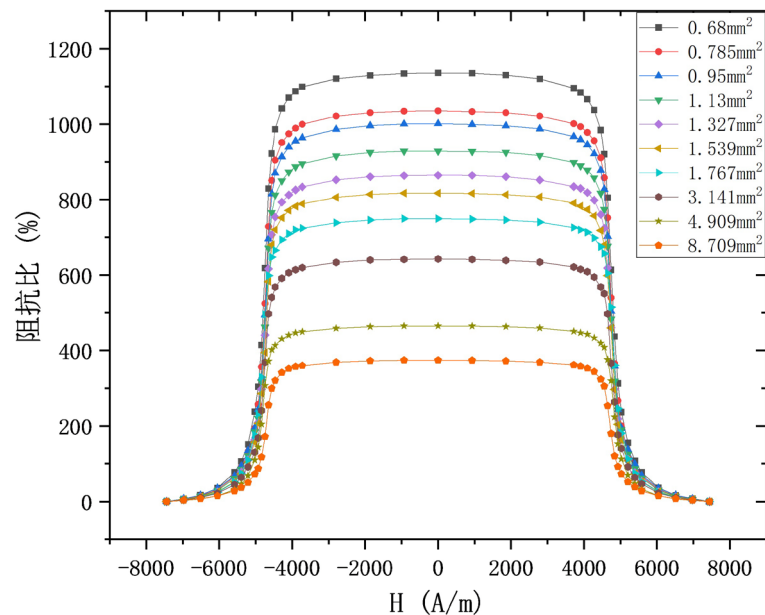


Figure 5. Longitudinal giant magnetic impedance curves of cured core drive coils with different cross-sectional areas

图 5. 不同截面积固化磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗曲线

而磁芯在应力的作用下感生磁各向异性, 在本实验中磁各向异性表现为抵消外加磁场的作用, 因此加上材料本身的退磁场, 磁场不响应区间的“平台”将会更宽。

同样的, 线性区域对于外加磁场的变化响应明显, 其灵敏程度与最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 的大小有关, 而最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 的大小与驱动线圈的截面积大小密切相关。

如图 6 所示, 当截面积 S_{dc} 为 0.68 mm^2 、 0.785 mm^2 、 0.950 mm^2 、 1.131 mm^2 、 1.327 mm^2 、 1.539 mm^2 、 1.767 mm^2 、 3.141 mm^2 、 4.908 mm^2 、 8.709 mm^2 时, $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 为 1121.298%、1023.491%、988.768%、913.399%、840.865%、808.002%、730.165%、632.529%、455.249%、374.026%。根据拟合曲线, Fe 基固化磁芯纵向巨磁阻抗效应曲线的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 与驱动线圈截面积 S_{dc} 依然是幂函数的关系。

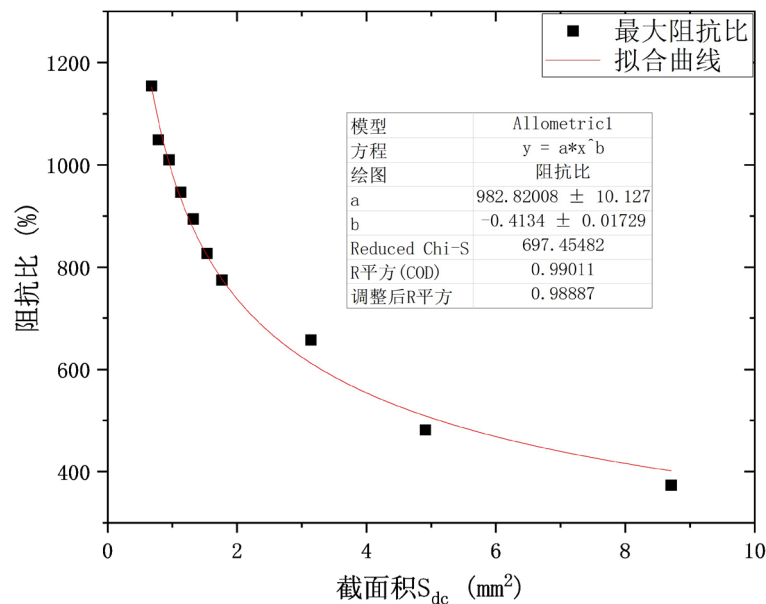


Figure 6. Maximum giant magnetic impedance ratio vs. drive coil cross section area (cured cores)

图 6. 最大巨磁阻抗比与驱动线圈截面积的关系(固化磁芯)

3.3. 磁芯填充系数对最大阻抗比的影响

图 7 为 Fe 基单根磁芯驱动线圈纵向驱动最大巨磁阻抗比与磁芯填充系数 Ψ 的关系, 在驱动频率为 0.6 MHz 时, 磁芯填充系数 Ψ 分别为 0.225%、0.407%、1.158%、2.153%、2.606%、3.217%、4.071%、5.31%、6.688% 和 9.406% 时的最大巨磁阻抗比分别为 97.43%、135.73%、219.78%、308.42%、343.49%、395.75%、437.46%、470.38%、518.33% 和 588.59%。对数据进行拟合, 发现 Fe 基单根磁芯纵向巨磁阻抗效应的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 随着磁芯填充系数 Ψ 的增大呈幂函数关系增大, 关系式为(3):

$$(\Delta Z/Z)_{\max} = 219.34\Psi^{0.455} \quad (3)$$

图 8 为 Fe 基固化磁芯驱动线圈纵向巨磁阻抗效应的最大巨磁阻抗比与磁芯填充系数 Ψ 的关系, 在驱动频率为 0.6 MHz, 磁芯填充系数 Ψ 分别为 5.103%、9.055%、14.148%、25.153%、28.875%、33.488%、39.302%、46.773%、56.595% 和 65.367% 时的最大巨磁阻抗比分别为 374.026%、455.249%、632.529%、730.165%、808.002%、840.865%、913.399%、988.768%、1023.491% 和 1121.298%。数据拟合后发现, Fe 基固化磁芯纵向巨磁阻抗效应的最大阻抗比 $(\Delta Z/Z)_{\max}$ 随着磁芯填充系数 Ψ 增大呈幂函数增大, 其关系表达式为(4):

$$(\Delta Z/Z)_{\max} = 204.76\Psi^{0.414} \quad (4)$$

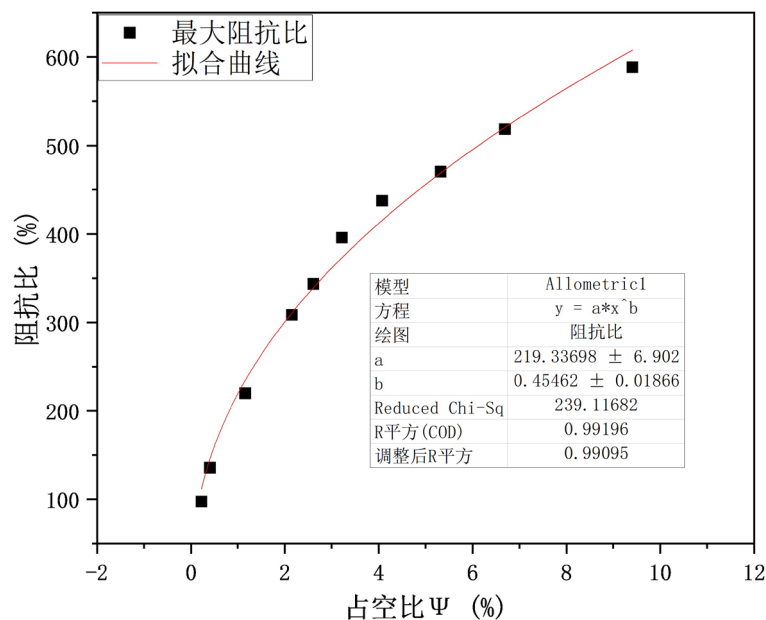


Figure 7. Maximum impedance ratio versus core filling factor for longitudinal giant magnetic impedance effect in Fe-based single cores

图 7. Fe 基单根磁芯纵向巨磁阻抗效应的最大阻抗比与磁芯填充系数的关系

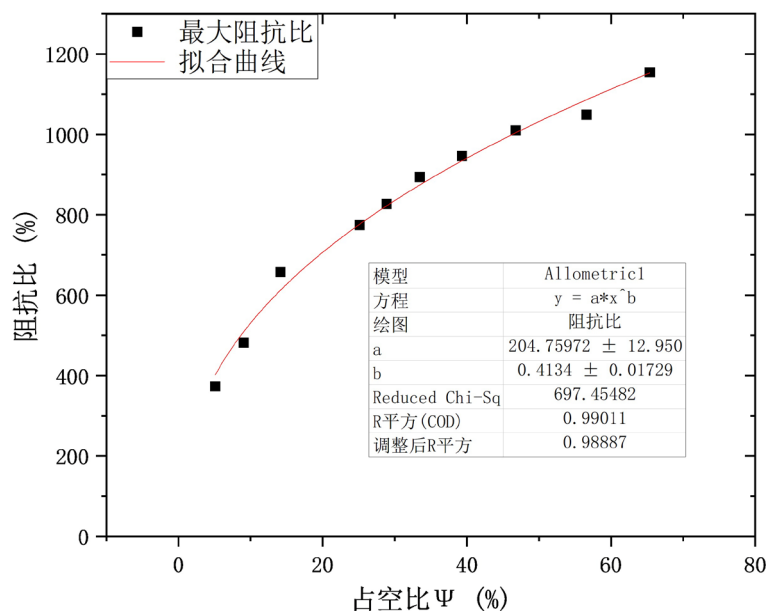


Figure 8. Maximum giant magnetic impedance ratio versus core fill factor for longitudinal giant magnetic impedance effect in Fe-based cured cores

图 8. Fe 基固化磁芯纵向巨磁阻抗效应的最大巨磁阻抗比与磁芯填充系数的关系

4. 结论

本研究通过调整驱动线圈的截面积来改变磁芯驱动线圈的磁芯填充系数,在此基础上研究 Fe 基磁芯驱动线圈的纵向巨磁阻抗效应。根据实验数据,我们得到以下结论:

- 1) Fe 基磁芯纵向驱动的最大阻抗比与驱动线圈截面积之间呈现幂函数关系。

2) 当驱动频率为 0.6 MHz 时, Fe 基单根磁芯纵向驱动的最大阻抗比与驱动线圈的磁芯填充系数的关系为: $(\Delta Z/Z)_{\max} = 219.34\Psi^{0.455}$ 。

3) 当驱动频率为 0.6 MHz 时, Fe 基固化磁芯纵向驱动的最大阻抗比与驱动线圈的磁芯填充系数的关系为: $(\Delta Z/Z)_{\max} = 204.76\Psi^{0.414}$ 。

参考文献

- [1] Mohri, K., Kohzawa, T., Kawashima, K., *et al.* (1992) Magneto-Induced Effect in Amorphous Wires. *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**, 3150-3152. <https://doi.org/10.1109/20.179741>
- [2] Lenz, J.E. (1990) A Review of Magnetic Sensors. *Proceedings of the IEEE*, **78**, 973-989. <https://doi.org/10.1109/5.56910>
- [3] Meydan, T. (1994) Application of Amorphous Materials to Sensors. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **133**, 525-532. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(94\)90613-0](https://doi.org/10.1016/0304-8853(94)90613-0)
- [4] Panina, L.V. and Mohri, K. (1994) Magneto-Impedance Effect in Amorphous Wires. *Applied Physics Letters*, **65**, 1189-1191. <https://doi.org/10.1063/1.112104>
- [5] Panina, L., Mohri, K., Bushida, K., *et al.* (1994) Giant-Magneto-Impedance and Magneto Inductive Effects in Amorphous Alloys. *Journal of Applied Physics*, **76**, 6198-6203. <https://doi.org/10.1063/1.358310>
- [6] Yoshizawa, Y., Oguma, S. and Yamauchi, K. (1988) New Fe-Based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *Journal of Applied Physics*, **64**, 6044-6046. <https://doi.org/10.1063/1.342149>
- [7] Mohri, K., Kohsawa, T., Kawashima, K., *et al.* (1992) Magneto-Inductive Effect (MI effect) in Amorphous Wires. *IEEE Transactions on Magnetics*, **28**, 3150-3152. <https://doi.org/10.1109/20.179741>
- [8] 杨介信, 杨燮龙, 陈国, 等. 一种新型的纵向驱动巨磁阻抗效应[J]. 科学通报, 1998, 43(10): 1051-1053.
- [9] 王丽梅, 王卓, 陆轩昂, 范晓珍, 叶慧群, 郑金菊, 方允樟. Fe 基合金薄带 GMI 效应与驱动线圈直径关系的研究[J]. 传感器技术与应用, 2021, 9(2): 35-40.
- [10] 徐晓瞳. 新型铁基非晶-纳米晶合金软磁性能与宽带材制备技术研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2015.