

## 复杂电流波形下软磁复合材料磁特性的测试

崔一帆<sup>1</sup>, 杨庆新<sup>2</sup>, 李永建<sup>1</sup>

(1. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学电气工程学院), 天津 300130;  
2. 天津理工大学, 天津 300384)

**摘要:**提出了一种新型三维磁特性测量传感结构,利用霍尔元件测量磁场强度, $B$ 线圈测量磁通密度,减弱了由于磁极头挤压和样品振动对测量精确度而造成的影响。以软磁复合材料 SOMALOY<sup>TM</sup> 700HR 为待测样品分别进行了正弦激励和复杂电流波形下的磁特性实验,对比了三个正交轴向的磁特性差异,并研究了谐波次数、含量以及与基波相差对材料磁滞特性和损耗特性的影响。

**关键词:**磁特性测量;正弦激励;复杂电流波形;磁滞特性;损耗特性

DOI: 10.12067/ATEEE2101048

文章编号: 1003-3076(2021)07-0048-07

中图分类号: TM936

### 1 引言

软磁复合(Soft Magnetic Composite, SMC)材料<sup>[1]</sup>是一种新型的铁基粉末状的软磁材料,它通常是由高纯度的物化铁粉和粘结剂充分混合后放入模具在高温高压环境下压制而成的,具有造价低、利用率高、工作频率范围宽、涡流损耗小等优点<sup>[2]</sup>,且具有较好的各向同性特征,主要用于复杂拓扑结构的电机设计中,如爪极/横向电机<sup>[3]</sup>。

随着电工装备的广泛应用,提高电工装备效率成了当今热点问题,而提高效率的关键在于对铁心材料磁特性的精确模拟<sup>[4]</sup>。在磁特性测量系统中,为使磁性材料测量更加准确,精密的磁特性测量传感器是不可或缺的。最初的爱波斯坦方圈法<sup>[5]</sup>的传感线圈是根据变压器原理,将 $H$ 线圈作为原边, $B$ 线圈作为副边。但由于自身条件限制,方圈内的磁路长度不确定性使得在后期的二维、三维旋转磁特性测量<sup>[6,7]</sup>时不再适用,因此,研究学者提出了独立测量磁场的传感器。传统三维传感器<sup>[8]</sup>是用 $H$ 线圈和 $B$ 线圈分别对磁场强度和磁通密度进行测量的,如图1所示,该结构是将环形 $B$ 线圈嵌入薄片型的环氧树脂基板中心的通孔中,然后将 $H$ 线圈上下两层往返交叉地缠绕在环氧树脂基板上。

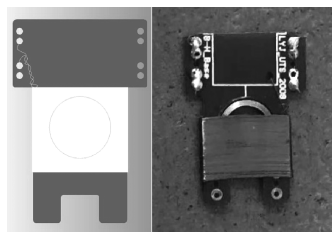


图1 传统三维磁特性测量传感器

Fig.1 Traditional three-dimensional magnetic characteristic measurement sensor

随着高压直流输电和电力电子技术的发展,在电机和变压器运行过程中会产生大量谐波,而谐波会使得磁心中出现饱和以及不稳定现象,导致损耗增加和局部发热<sup>[9]</sup>。在电工装备的设计过程中,通过考虑铁心磁性能的变化可准确地计算出谐波条件下的铁心损耗。因此谐波加载下的磁特性测量对电机和变压器的设计和优化有重要意义<sup>[10]</sup>。

本文提出了一种霍尔<sup>[11,12]</sup>-线圈复合式传感结构,较传统的三维磁特性测量传感器有更强的抗应力和温度干扰能力,提高了测量的准确性。以 SOMALOY<sup>TM</sup> 700HR 为待测样品测量了正弦激励和谐波加载下 SMC 的磁特性,对比  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴向磁特性的差异,分析了软磁复合材料  $z$  轴出现轻微各向异性

收稿日期: 2021-01-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777055)、河北省自然科学基金项目(E2018202284)、河北省省级科技计划资助(20311801D)

作者简介: 崔一帆(1996-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为工程电磁场与磁技术;  
杨庆新(1961-),男,河北籍,教授,博士,研究方向为工程电磁场与磁技术。

特征的原因;研究了谐波次数、含量以及与基波相差对材料磁特性的影响。

## 2 磁特性测试系统

### 2.1 系统结构

如图2所示,三维磁特性测试系统<sup>[13]</sup>主要包括磁特性测试仪器,实现三方向励磁和感应信号输出功能;高性能的功率放大器,可保证对样品充分磁化;多路差分放大电路,可实现对微小信号的放大,减小外界杂散信号的干扰;基于LabVIEW软件驱动的NI模数/数模转换的微控制器,实现激励信号的输出和 $B$ 、 $H$ 矢量信号的采集和处理。

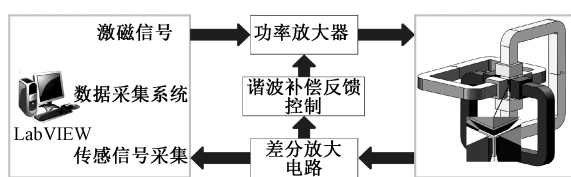


图2 磁特性测试系统结构框图

Fig.2 Diagram of magnetic property testing system

磁特性测试装置是整个测试系统的核心,如图3所示,主要包括三个空间正交的磁轭、三对绕制在磁极上的励磁绕组以及放置在装置中心的信号传感箱。通过对励磁绕组施加电流,可在中心样品上产生一个较大的磁场以保证样品充分磁化,通过传感箱将样品的 $B$ 、 $H$ 矢量信号采集到NI板卡中进行数据分析,得出材料的磁滞特性和损耗特性。

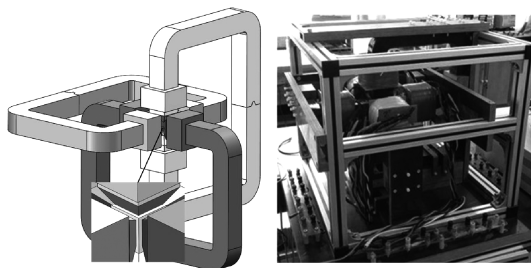


图3 磁特性测试平台

Fig.3 Magnetic characteristics test platform

### 2.2 新型霍尔-线圈复合式传感设计

传统的 $B$ - $H$ 复合线圈在测量磁场时, $H$ 线圈会受到磁极挤压和样品振动的影响,且其不能紧贴于样品表面,造成一定的测量误差。为解决上述问题,提出一种新型霍尔-线圈复合式传感器,结构如图4所示,通过环形 $B$ 线圈测量磁通密度,用双轴霍尔元件测量平行于样品表面的垂直双方向磁场强度,传感中所用的霍尔元件具有应力和温度漂移补偿功

能,减弱了测量过程中由于磁极头挤压和样品振动对测量精确度的影响;由于 $B$ 线圈的窗口面积有效方向与挤压和振动的方向一致且霍尔元件的测量范围被限制在高斯级,因此 $B$ 线圈不需要被替代。

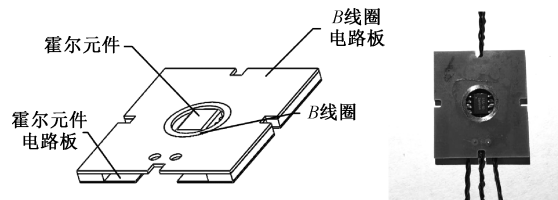


图4 霍尔-线圈复合式传感器

Fig.4 Hall-coil composite sensor

将六组上述霍尔-线圈复合式传感器按照一定的方向构成一个如图5所示的立方体传感箱,在箱体中心放置一个立方体SMC样品,将霍尔-线圈复合式传感器分别紧贴到样品的六个面上,为模拟在样品内部进行磁特性测量,将六片与样品同截面、同材料的匀场保护层放置在传感器外部,与传感器和样品形成一种“三明治”结构。此外,为保证磁特性测量实验的正确实施,在定义传感器的测量方向时,应与 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个方向的激励相对应。在同一组霍尔-线圈复合式传感器中, $B$ 线圈的测量方向与霍尔元件的两个测量方向是两两相互垂直的,三者定义不能沿同一方向,即 $x$ 激励方向上的传感器是用来测量 $B_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ;同理, $y$ 方向传感器测量 $B_y$ 、 $H_x$ 、 $H_z$ , $z$ 方向传感器测量 $B_z$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 。

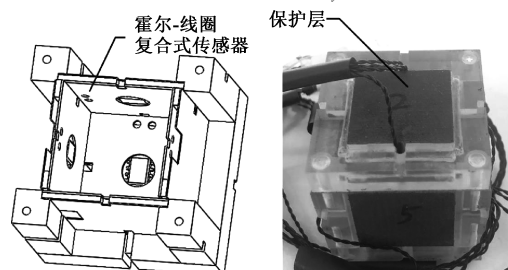


图5 立方体传感箱结构

Fig.5 Structure of cubic sensing box

## 3 实验验证

本文以SOMALOY™ 700HR为待测样品分别进行了正弦激励和谐波加载下的磁特性测量实验,对比 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 三个正交轴向材料磁特性的差异,分析了SMC材料 $z$ 轴显现出的轻微各向异性特征机理,并研究了谐波次数、含量以及与基波相差对材料磁特性的影响。

### 3.1 正弦激励下的磁特性分析

对待测样品施加某单一方向的正弦激励信号进行一维交变磁特性测量实验。在三维磁特性测量装置中,分别沿  $x, y, z$  三个方向对样品进行磁化,通过引入谐波反馈控制补偿算法,使得  $\mathbf{B}$  矢量为标准的正弦信号,测量对应的  $\mathbf{B}, \mathbf{H}$  感应电动势,通过给定的公式计算出  $\mathbf{B}, \mathbf{H}$  值,绘制相应的磁滞回线,改变激励频率重复上述过程,得到不同频率下材料的磁化特性如图6所示。

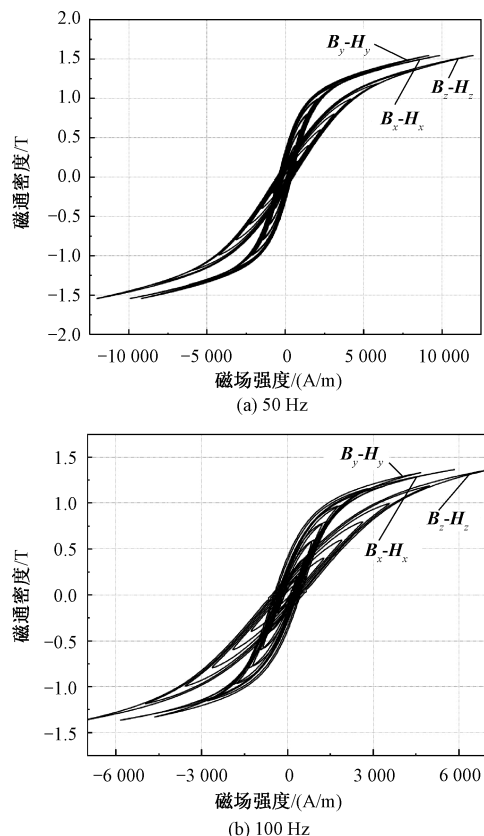


图6  $x, y, z$  三轴向交变磁滞回线

Fig.6  $x, y, z$  alternating hysteresis loop

从图6中可以看出,三个方向的磁滞回线形状基本一致。在  $x$  和  $y$  方向上,磁滞回线大致重合,具有相同的剩磁和矫顽力,而  $z$  轴较  $x, y$  两方向有一定的区别,其表现出磁滞回线形状扁长、剩磁小等特征,出现了轻微的各向异性特征。这种各向异性特征可能是由于材料制作和切割过程导致的,SMC 样品一般是从圆柱形的坯件上切割而成的,在坯件制作过程中,需要对圆柱形轴线方向进行压制,因此会造成样品中铁基绝缘包覆颗粒在压制方向上的半径减小,从而加大了退磁因子而使得样品  $z$  方向表现出更难磁化。

图7为正弦激励下样品的损耗曲线,可以看出在同一激励频率下,三轴向的交变磁心损耗都随着磁通密度增大而呈现出非线性增长。 $x, y$  的损耗大致相同,而  $z$  轴损耗要高于其他两方向,这种现象也会随着磁通密度的增大而变得更加明显,这也说明  $z$  轴向为材料更难磁化的方向,存在一定的各向异性特征。此外,随着频率的增加,三轴向的磁心损耗都将增大,这是因为当频率升高时,材料内部的磁畴运动加剧,使得损耗变大。

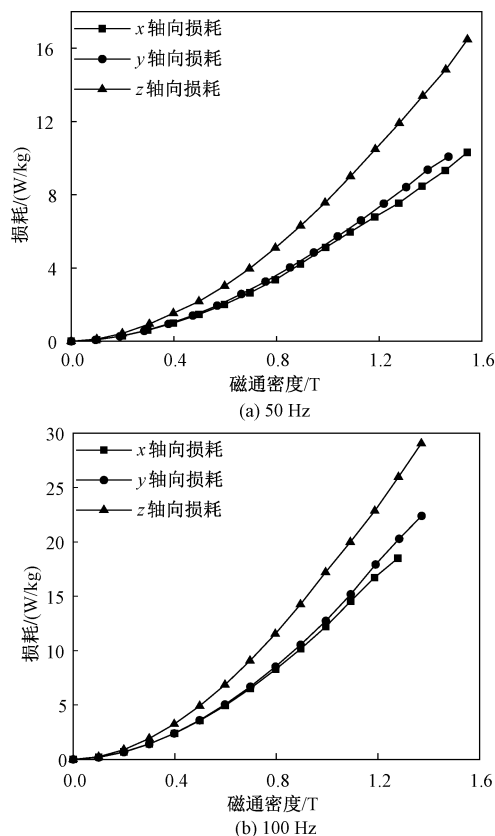


图7  $x, y, z$  三轴向磁心损耗

Fig.7  $x, y, z$  core loss

### 3.2 谐波加载下软磁复合材料的磁特性分析

在实际工况中由于某些电气元件存在非线性特征,即使通入标准的三相正弦电流,旋转电机和电力变压器等电工设备中的磁场也不会再是标准的正弦波形,而是叠加不同次序谐波的复杂波形,这将会影响电工装备的性能,造成铁心损耗加剧。为分析电工装备中磁场的各次谐波含量,对 SMC 电机的磁场进行了傅里叶分解,结果如图8所示。可以看出,电机中奇次谐波含量要大于偶次谐波含量,且随着谐波次数增大其含量将不断减小,这也表明了奇次谐波是影响电机性能的关键。



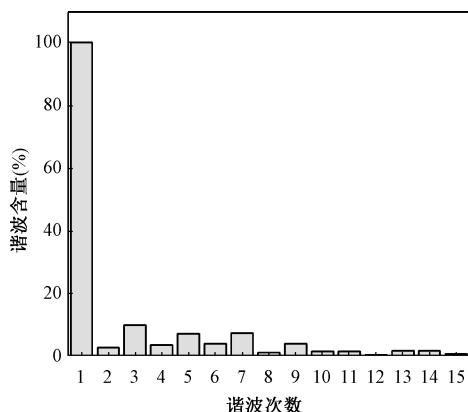


图8 SMC电机中各次谐波含量

Fig.8 SMC motor harmonic content

为进一步分析谐波对电工装备性能的影响,对SMC材料进行了复杂波形(基波叠加各次谐波)激励下的磁特性模拟与测量,并分析了相应的损耗特征。本节主要从谐波次数、含量以及与谐波相角三个方面研究谐波对软磁复合材料磁特性的影响。考虑到电工装备在实际工况下主要受到奇次谐波的影响以及实验所用的功率放大器性能的限制,此次实验仅考虑基波单独叠加三次谐波和五次谐波后对材料磁特性的影响,其波形可表示为:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 \sin(\omega t) + \mathbf{B}_i \sin(\omega_i t + \theta_i) \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{B}_1$  为基波幅值;  $\omega$  为基波角频率;  $i$  为谐波次数;  $\mathbf{B}_i$  为谐波幅值;  $\omega_i$  为谐波角频率;  $\theta_i$  为谐波与基波的相差角度。通过对式(1)中  $\omega_i$ 、 $\theta_i$  等变量的控制实现不同谐波状态下的磁特性测量。

### 3.2.1 谐波次数对材料磁特性的影响

实验中设定谐波含量和谐波相角不变,通过调节 LabVIEW 程序中的谐波次数控件,对样品分别进行三次谐波和五次谐波激励。取基波频率为 30 Hz,幅值为 0.2 T,谐波含量为 50%,谐波相角为 180°,不同次数下材料的磁特性如图 9 所示。

从图 9 中可看出,无论是注入三次谐波还是五次谐波,材料所体现出的磁特性与正弦激励下有一定的区别。在基波叠加三次谐波后,在原有的主磁滞回环中会出现一对关于原点对称的小磁滞回环,而五次谐波叠加下则会出现两对小磁滞回环,且其分别关于原点对称。这是由于当叠加谐波后,  $\mathbf{B}$  矢量波形不再是标准的正弦波形,会在某些时刻出现磁通翻转现象,此时在主磁滞回线上会有逆向变化,因此在内部形成小环。如图 9(a) 所示,在三次谐波叠加下,  $\mathbf{B}$  矢量波形会出现两次磁通翻转现象,这与磁滞回线中两个小环恰好相对应。实际中,小环的

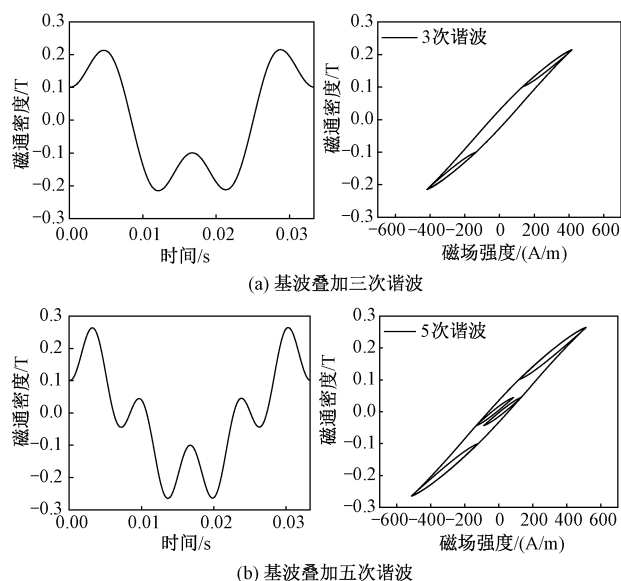


图9 不同谐波次数激励下材料的磁特性

Fig.9 Magnetic properties of materials under excitation of different harmonic orders

形成除了与磁通翻转有关,也与谐波含量和谐波相角有一定的关系,当谐波含量较小或在某一个相差下时,没有达到可形成磁通翻转的临界值,此时主磁滞回线上虽有逆向变化的趋势,但并不能形成完整的小环。

### 3.2.2 谐波含量对材料磁特性的影响

实验中设定谐波次数和谐波相角不变,通过改变 LabVIEW 程序中谐波含量控件来对材料进行不同谐波含量下的磁特性测量实验。取谐波次数为三次,基波频率 30 Hz,幅值为 0.2 T,相角 180°,不同谐波含量激励下材料的磁特性如图 10 所示。

从图 10 中可看出,当谐波含量变化时,主磁滞回线中小环也有所变化。当谐波含量逐渐从 0% 增加到 100% 时,小环的面积也将逐渐增大,这是由谐波含量增加使得磁通翻转位置处  $\mathbf{B}$  矢量波形峰值变大而导致的,此时材料的磁心损耗也将随之变大。

### 3.2.3 谐波相角对材料磁特性的影响

实验中设定谐波的次数和含量恒定,通过改变谐波与基波的相差来对比材料磁特性差异。取谐波次数为三次,基波频率 30 Hz,幅值 0.2 T,谐波含量 50%,不同谐波相角下材料的磁特性如图 11 所示。

在谐波相角为 0° 时,主磁滞回环中两个小环位于整个环的中心位置,且所围面积最小。随着谐波与基波相差的增大,两小环逐渐向主磁滞回环的两个尖端移动,当相差为 180° 时,两环恰好移动到尖端位置处,当相差进一步增大时,两小环又逐渐从主

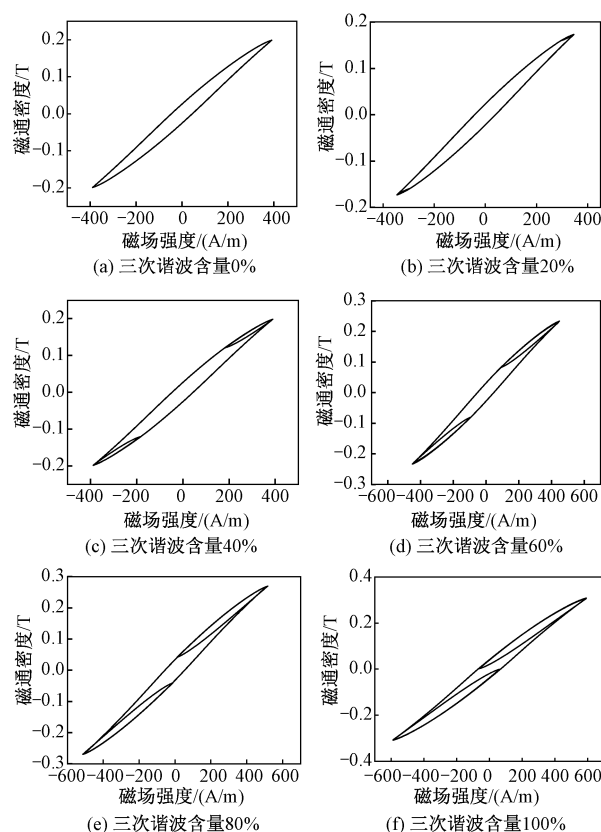


图10 不同谐波含量激励下材料的磁特性

Fig.10 Magnetic properties of materials under excitation of different harmonic content

磁滞回环尖端移向中心位置处,即当谐波与基波相差在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时,两个小环将围绕主磁滞回环旋转一周后回到原始位置处,在旋转过程中两小环时刻关于原点对称。这是由于当谐波与基波进行叠加时,叠加后的波形磁通翻转的位置会随着相差的变化而变化,因此会对小环的位置产生一定的影响。此外,随着谐波与基波相差的增加,小环的面积呈现出先增大后减小的趋势,在 $180^\circ$ 时小环的面积达到最大值,这会对样品的磁心损耗有一定的影响,详细分析将在下文中呈现。

### 3.2.4 谐波加载下软磁复合材料的损耗特性分析

为进一步定量分析不同谐波状态下材料的磁特性,分别计算了不同情况下的磁心损耗并绘制成三维曲面图。图12中从上到下分别为 $z$ 轴向施加五次谐波、 $z$ 轴向施加三次谐波、 $x$ 轴向施加五次谐波和 $x$ 轴向施加三次谐波所对应的损耗。可以看出,当施加激励轴向、谐波次数、谐波含量以及谐波相角改变时都会对磁心损耗有一定的影响,为更加直观地分析独立变量下材料的损耗特性,分别绘制了单一变量下材料的损耗曲线,如图13所示。

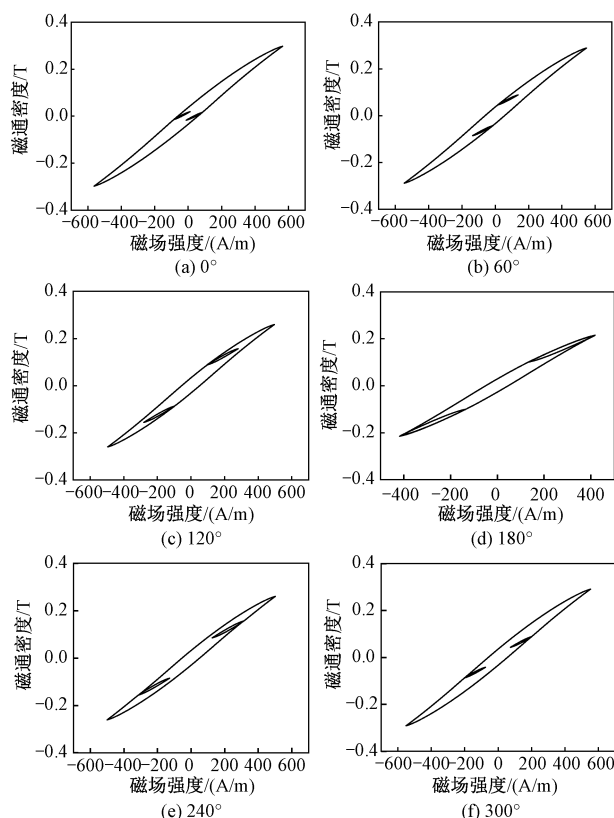


图11 不同谐波相差激励下材料的磁特性

Fig.11 Magnetic properties of materials under different harmonic phase difference excitation

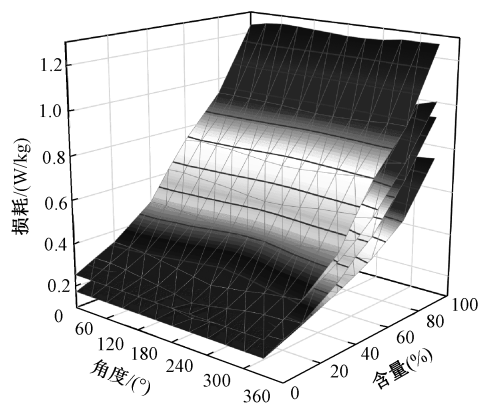


图12 谐波激励下的损耗特性

Fig.12 Loss characteristics under harmonic excitation

如图13(a)所示,将基波与谐波的相差设定为 $0^\circ$ ,对 $x$ 方向施加谐波激励,对比不同谐波次数和含量对材料损耗特性的影响。可以看出,在叠加三次谐波或五次谐波后,材料的磁心损耗都会随着谐波含量的变大而增加,这是由于在叠加谐波后,磁通翻转处的 $B$ 矢量峰值随含量的增加而变大,从而增大了材料的磁心损耗。此外,在各个谐波含量下叠加

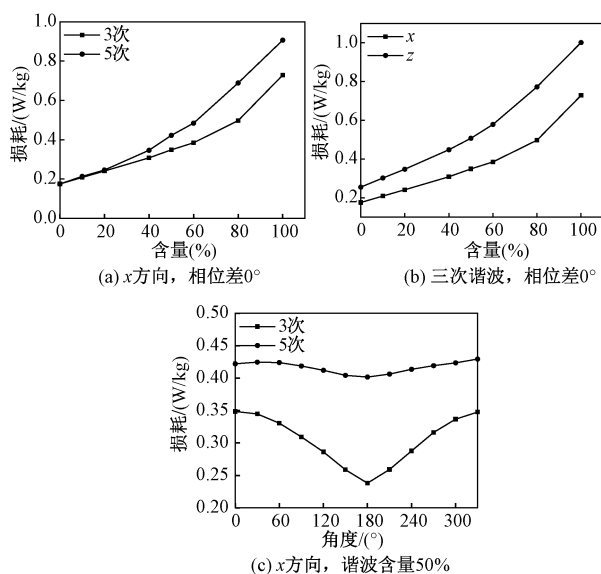


图13 单变量谐波激励下损耗特性曲线

Fig.13 Loss characteristic curve under single variable harmonic excitation

五次谐波产生的磁心损耗都要大于叠加三次谐波,且随着谐波含量增加,二者的损耗差也将逐渐增大,这可能是由于五次谐波加载下所产生的磁通翻转次数要多于三次谐波加载,因此导致了损耗的增加。

图13(b)为在不同轴向施加谐波激励下材料的损耗特性曲线,由于 $x$ 和 $y$ 两方向磁特性大致相同,所以只对比了 $x$ 方向和 $z$ 方向的损耗特性。当固定谐波次数和谐波相角后,可以看出无论是 $x$ 轴向还是 $z$ 轴向,磁心损耗都将随着谐波含量的增加而变大,而整体上看 $z$ 轴向的损耗在任意谐波含量下都要大于 $x$ 轴向,且随着含量的增加,二者的损耗差值也将不断增大,体现了软磁复合材料轻微的各向异性特征,这与正弦激励下实验所得出的结论相一致。

图13(c)为不同谐波相角差下的损耗特性曲线,随着基波与谐波相差的增大,样品的损耗呈现出先减小后增大的趋势,最低点出现在相差为 $180^\circ$ 的情况下,此时基波与谐波叠加后的波形为平顶波且幅值最小,因此损耗最小。对比不同谐波次数下材料损耗特性受相位差的影响,叠加五次谐波后所受到相位差影响要远小于叠加三次谐波,这是由于在五次谐波加载下,相差为 $180^\circ$ 时磁通翻转处 $B$ 矢量幅值的变化程度要小于三次谐波,因此不同谐波相角下的磁心损耗相差不大。

#### 4 结论

本文提出了一种新型霍尔-线圈复合式传感结

构,其通过元件自身的动态偏移特性消除了由温度变化、外界应力等因素而造成的电压偏移,提高了测量的精确性,为精确模拟材料的磁滞特性和损耗特性奠定基础。

测量了正弦激励下三轴向材料的磁特性,对比分析了软磁复合材料样品实验中所显现出的轻微各向异性特征;研究了不同谐波次数、含量以及谐波相差激励下软磁复合材料的磁滞特性,并计算了相应的损耗,指出了谐波激励下软磁复合材料的损耗特点和变化趋势。

#### 参考文献 (References):

- [1] 杨庆新, 李永建 (Yang Qingxin, Li Yongjian). 先进电工磁性材料特性与应用发展研究综述 (Characteristics and developments of advanced magnetic materials in electrical engineering: A review) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (20): 1-29.
- [2] Li W, Liu J, Li J. Simulation research on the electrical characteristics of soft magnetic composite materials core [J]. Materials Science and Technology, 2016, 24 (4): 92-96.
- [3] 李永建, 杨庆新, 安金龙, 等 (Li Yongjian, Yang Qingxin, An Jinlong, et al.). 软磁复合材料的三维磁特性检测实验研究 (Three dimensional magnetic properties measurement of soft magnetic composite materials) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (9): 160-165.
- [4] 耿鑫 (Geng Xin). 三维磁特性装置中传感结构的优化设计及在动态磁测量的应用 (The optimization and design of sensing of the test device of three-dimensional magnetic properties and application in dynamic magnetic measurement) [D]. 天津: 河北工业大学 (Tianjin: Hebei University of Technology), 2017.
- [5] 王朝, 陈龙, 汪友华, 等 (Wang Chao, Chen Long, Wang Youhua, et al.). 软磁复合材料一维磁特性测量中的波形补偿问题研究 (Research on waveform compensation in measurement of one-dimensional magnetic properties of soft magnetic composites) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (1): 69-74.
- [6] Li Y, Geng X, Zhang C. Improved 3-D magnetic properties measurement of silicon steel laminations based on a novel sensing structure [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53 (11): 1-4.
- [7] Yang Q, Li Y, Zhao Z, et al. Design of a 3-D rotational

- magnetic properties measurement structure for soft magnetic materials [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 1-4.
- [8] 耿鑫, 李永建, 王利祥 (Geng Xin, Li Yongjian, Wang Lixiang). 三维磁特性测试系统中激磁与传感结构的校准与补偿 (Calibration and compensation of exciting and sensing structure in 3-D magnetic properties testing system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (4): 77-82.
- [9] Bertotti G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24 (1): 621-630.
- [10] 赵志刚, 马习纹, 姬俊安, 等 (Zhao Zhigang, Ma Xiwen, Ji Junan, et al.). 谐波激励条件下铁心动态 Energetic 建模与验证 (Dynamic energetic modeling and verification of core under harmonic excitation) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2020, 35 (20): 4241-4250.
- [11] 渠珊珊, 何志伟 (Qu Shanshan, He Zhiwei). 基于霍尔效应的磁场测量方法的研究 [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement and Instrumentation), 2013, 50 (10): 98-101.
- [12] 刘兆琦 (Liu Zhaoqi). 多功能霍尔传感器及其数学模型 (A multipurpose Hall transducer and its mathematical model) [J]. 仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument), 1987, (3): 233-239.
- [13] 薛刚, 李永建, 曹磊, 等 (Xue Gang, Li Yongjian, Cao Lei, et al.). 磁性材料三维磁特性传感信号检测技术中关键问题的研究与分析 (Research and analysis on several key issues of sensor signal detection of three-dimensional (3D) magnetic properties) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (5): 19-22.

## Test of magnetic properties of soft magnetic composite materials under complex current waveforms

CUI Yi-fan<sup>1</sup>, YANG Qing-xin<sup>2</sup>, LI Yong-jian<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment(School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology), Tianjin 300130, China; 2. Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** In this paper, a new type of magnetic property measurement sensor structure is proposed. The Hall element is used to measure the magnetic field strength,  $B$ -coil is used to measure the magnetic flux density and then the influence of the extrusion of the magnetic pole and the vibration of the sample to the measurement accuracy can be reduced. The magnetic properties of soft magnetic composite material SOMALOY™ 700HR samples are tested under sinusoidal excitation and complex current waveform loading, and the differences of magnetic properties in three axial directions are compared. The effects of harmonic frequency, harmonic content and the difference with fundamental wave on the hysteresis and loss characteristics of materials are studied.

**Key words:** magnetic property measurement; sinusoidal excitation; complex current waveform; hysteresis characteristics; loss characteristics