

软磁复合材料一维磁特性测量中的波形补偿问题研究

王 朝^{1,2}, 陈 龙³, 汪友华^{1,2}, 武仕朴^{1,2}, 张晓林^{1,2}

- (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, 天津 300130;
2. 河北省电磁场与电器可靠性重点实验室, 河北工业大学, 天津 300130;
3. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:在对软磁复合材料(SMC)进行磁特性测量时,由于其饱和非线性以及测量中干扰谐波的存在,测得的磁通密度波形畸变成非正弦波。针对这种情况,本文采用对激磁电压进行谐波补偿的方法,使得磁通密度的波形最大程度上接近正弦波。谐波补偿过程所需高次谐波分量则通过粒子群算法求得。SMC 的一维磁特性测量实验验证了本文方法得到的磁通密度波形可以更好地满足测量要求,提高测量的精确度。

关键词:软磁复合材料;谐波补偿;粒子群算法;一维磁特性测量

DOI: 10.12067/ATEEE1808031

文章编号: 1003-3076(2020)01-0069-06

中图分类号: TM271

1 引言

随着人类科学技术的提高与发展,大量电磁设备如发电机、变压器、电动机等广泛分布于人类社会的生产生活中,在电子通信、电网运行、国防军事、科学研究等多个领域发挥着巨大作用。在全球工业化的今天,解决能源危机、温室效应已经成为世界各国重视的焦点问题,因此优化电磁设备以提高设备效率,减小能源损耗从而提高能源利用率成为各国科研工作者的研究焦点^[1,2]。

软磁复合材料(Soft Magnetic Composite, SMC)是新型软磁材料的代表,其由绝缘介质包裹在铁磁性粉末颗粒表面后,采用粉末冶金工艺压制为生产科研所需形状形成。软磁复合材料具有高饱和磁通密度、低涡流损耗等优异性能,广泛应用于电工和电子领域^[3-5]。因此对 SMC 进行高频磁特性测量对于优化电磁设备设计、提高效率、降低能耗具有重要意义,并有助于创建软磁复合材料的综合磁特性数据库^[6,7]。

在软磁复合材料一维磁特性测量标准中,通常测得的磁通密度 B 的波形被要求为正弦波^[8]。但在对软磁复合材料进行磁特性测量过程中,无论是

采用爱泼斯坦方圈法还是环形试样法,待测样件会随着激磁电压的逐步增大而逐渐被磁化达到饱和。同时磁性材料的饱和非线性及干扰谐波的存在,使得测得的磁通密度 B 的波形畸变为平顶波而不再是测量标准要求的正弦波^[9,10]。本文针对软磁复合材料一维磁特性测量中磁通密度 B 的波形畸变情况,通过采用对激磁电压 U_0 进行谐波补偿的方式,使磁通密度 B 的波形最大程度上接近测量标准要求的正弦波。谐波补偿过程中所需的高次谐波分量,则需在实验过程中采用粒子群算法求得。

2 一维磁特性测量原理

磁性材料的一维磁特性测量方法一般可以分为三种:爱泼斯坦方圈法、环形样件法和单片测量法^[11]。根据 IEC60404-6 与 GB/T19346-2003 测量标准,本文采用环形样件法对软磁复合材料进行一维磁特性测量。

环形样件法是将待测磁性材料制成截面积为矩形的环形样件,该方法对于软磁材料的交流磁特性测试频率范围为 20Hz~200kHz。环形样件的外径与内径的标准比值范围为 1.25~1.4。为了减小空气气隙对测量造成的误差,保证实验精度,需将初级

收稿日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51377042)、河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2018037)

作者简介: 王 朝(1994-),男,河北籍,硕士研究生,研究方向为电工理论与新技术;

汪友华(1964-),男,江西籍,教授,博士,研究方向为电工理论与新技术(通讯作者)。

绕组和次级绕组均匀紧密地缠绕在环形样件上^[12]。

根据环形样件法测试原理设计磁性材料一维磁特性测量系统,该测量系统主要构成部分为待测环形样件、计算机、LabVIEW 数据采集卡、功率放大器、前置放大器和保护电路等。一维磁特性测量系统结构图如图 1 所示。

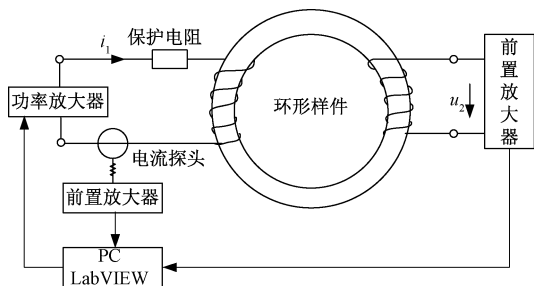


图 1 一维磁特性测量系统结构图

Fig.1 Structure diagram of one-dimensional magnetic measurement system

图 1 中,在对环形样件进行一维磁特性测量时,首先通过 LabVIEW 激磁程序产生激磁电压,随后激磁电压信号经过功率放大器放大后,通过保护电路加在初级绕组上。最后电压传感器测量的次级绕组的空载电压和电流探头测量的初级绕组的电流,分别经过前置放大器与 LabVIEW 数据采集卡相连,通过计算机内的 LabVIEW 程序控制实现给定条件下的磁通密度 B 和磁场强度 H 的自动测量。

经测量环形样件初级绕组的线圈匝数为 48,次级绕组线圈匝数为 16,横截面积为 25mm^2 ,平均磁路长度为 157.1mm 。

环形样件的磁通密度 B 可由式(1)得到:

$$B = -\frac{1}{SN_2} \int_0^t U_2 dt \quad (1)$$

式中, S 为环形样件的横截面积(m^2); N_2 为环形样件次级绕组线圈的匝数; U_2 为环形样件次级绕组两端的空载电压(V)。

环形样件的磁场强度 H 可由式(2)得到:

$$H = \frac{N_1 I}{l} \quad (2)$$

式中, N_1 为初级绕组线圈匝数; I 为流过初级绕组的磁化电流(A); l 为试样平均磁路长度(m)。

在进行一维磁特性测量时,本文将式(1)、式(2)以计算程序框图的形式直接编入计算机内的 LabVIEW 程序中,以便于对不同频率下的磁通密度 B 和磁场强度 H 的波形以及磁滞回线进行实时观测。

3 波形控制策略

为了得到测量标准要求的磁通密度 B 的正弦波,本文采用了采用对激磁电压 U_0 进行谐波补偿的方法。在谐波补偿过程中,针对不同频率和不同磁通密度所需的三、五、七次谐波分量,则需在实验过程中采用粒子群算法求得。

3.1 粒子群算法

粒子群算法作为一种基于迭代的优化工具,可通过多次迭代使得粒子不断搜索粒子个体最优位置和粒子群体最优位置。该算法是一种随机搜索的全局优化算法,并且具有收敛速度快、寻优精度高且易于实现等优点^[13,14]。

粒子群算法的基本原理可描述为:有 n 个粒子存在于 d 维空间中,在求解优化问题时,每个粒子代表一个潜在可行解,粒子的优劣由适应度函数评估。在每次迭代过程中,每个粒子会更新自身历史上的最优位置,同时粒子群的最优位置也会记忆更新,直至迭代终止^[15]。

粒子群算法的数学描述如下:在迭代运行前,要先对粒子群进行初始化。设在第 t 次迭代时,第 i 个粒子的当前速度为 $\mathbf{V}(t) = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id})$,当前位置为 $\mathbf{X}(t) = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$,该粒子目前为止搜索到的最优位置存于矩阵 $\mathbf{P}_i(t) = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{id})$ 中,所有粒子迄今为止搜索到的最优位置存于矩阵 $\mathbf{P}_g(t) = (p_{g1}, p_{g2}, \dots, p_{gd})$ 中。则在下一次迭代中第 i 个粒子的速度和位置按如下方程来更新:

$$\mathbf{V}_i(t+1) = w\mathbf{V}_i(t) + c_1 r_1 [\mathbf{P}_i(t) - \mathbf{X}_i(t)] + c_2 r_2 [\mathbf{P}_g(t) - \mathbf{X}_i(t)] \quad (3)$$

$$\mathbf{X}_i(t+1) = \mathbf{X}_i(t) + \mathbf{V}_i(t+1) \quad (4)$$

式中, $i=1, 2, \dots, n$; w 为惯性权重; c_1, c_2 为学习因子(也称加速因子); r_1, r_2 为在 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数。

3.2 谐波补偿方法

由于在磁通密度 B 波形控制过程中,给定频率和磁通密度波形幅值情况下,要求出此时谐波补偿所需的三、五、七次谐波幅值和相位,故粒子群维度可设为六维。每个粒子的位置 $\mathbf{X}(t) = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)$ 可代表其包含的三、五、七次谐波幅值和相位。为保证波形控制效果,本文采用磁通密度的总谐波畸变率 THD 作为适应度函数。在本文中,总谐波畸变率 THD 作为能够很好反映磁通密度 B 波形谐波含量的参数,其计算公式如式(5)所示:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=3}^{\infty} B_n^2}}{B_1} \quad n \text{ 为奇数} \quad (5)$$

式中, B_1 为磁通密度 B 的基波; B_n 为其高次谐波。

为符合测量要求,本文规定磁通密度波形谐波含量 THD 不能大于 1%。

基于粒子群和波形补偿的软磁复合材料磁特性测量过程如下:

- (1) 给定测量所需的频率和磁通密度幅值 B_m , 输入并调节激磁电压 U_0 , 使得生成的磁通密度波形幅值最大程度上接近 B_m 。
- (2) 输入粒子数 n 、维度 d 、最大迭代次数 N 等粒子群参数,并给定波形补偿所需的三、五、七次谐波幅值范围和相角范围。
- (3) 根据图 2 所示流程图,在给定的范围内寻得波形补偿所需三、五、七次谐波幅值和相角的最优解并导出。
- (4) 在激磁电压 U_0 中添加谐波,得到满足测量要求的磁通密度 B 。记录磁通密度 B 和磁场强度 H 的波形数据。
- (5) 画出各频率下的磁滞回线,并求出软磁复合材料的比损耗,分析其磁特性。

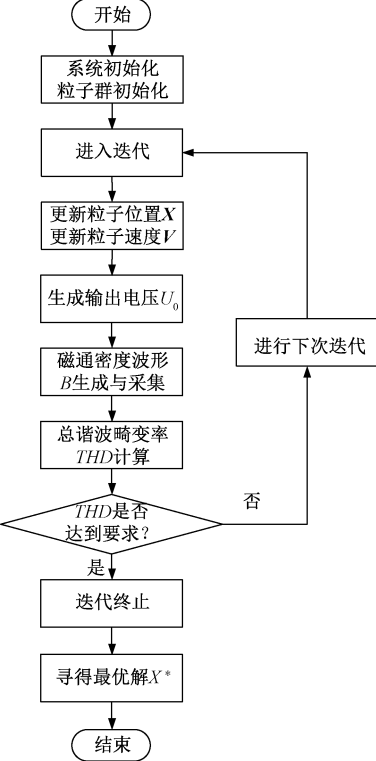


图 2 基于粒子群算法的谐波参数寻优流程图

Fig.2 Flow chart for finding optimal solution of harmonic parameters based on particle swarm optimization

3.3 波形控制效果

根据一维磁特性测量原理及图 2 所示谐波参数寻优流程在计算机中使用 LabVIEW 软件编程,然后结合图 1 一维磁测量系统结构的外部设备,对软磁复合材料环形样件进行磁性测量。当频率为 1kHz 时,经过对固定点磁通密度 B 波形中所含三、五、七次谐波的监测,得出谐波补偿前后三、五、七谐波含量的对比图,如图 3 所示,谐波补偿前后 THD 值如表 1 所示。

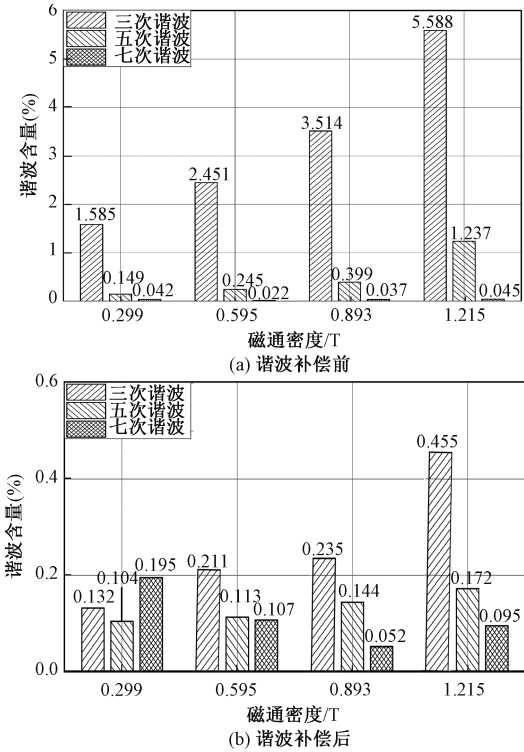


图 3 谐波补偿前后磁通密度谐波含量对比图

Fig.3 Comparison of harmonic content of magnetic flux density without and with harmonic compensation

表 1 谐波补偿前后磁通密度总谐波畸变率

Tab.1 THD of magnetic flux density without and with waveform compensation

磁通密度幅值/T	THD(%)	
	谐波补偿前	谐波补偿后
0.299	1.602	0.257
0.595	2.463	0.262
0.893	3.537	0.279
1.215	5.724	0.496

图 3(a)中,在对激磁电压 U_0 谐波补偿前,随着磁通密度幅值的增大,磁通密度谐波含量不断增多,此时磁通密度波形总谐波畸变率 THD 不能满足测量要求。图 3(b)中,谐波补偿后谐波含量大大减

少, THD 也降低到能够满足测量要求。但在波形控制过程中, 粒子群算法采用的适应度函数为总谐波畸变率 THD , 并非各高次谐波含量。因此当 THD 满足测量要求时, 三次谐波和五次谐波含量大大降低, 相对于谐波补偿前七次谐波反而可能会出现略有增高的现象。不过由于七次谐波含量总体较低, 故对谐波补偿后磁通密度波形的影响效果不大。

采用本文所述方法对磁通密度波形进行控制所用时间与粒子群优化的迭代次数有关。当磁通密度幅值升高时, 磁通密度波形的 THD 也相应增高, 迭代次数也会增多, 每次迭代时间为 10.2s。当频率为 1kHz, 磁通密度幅值为 1.215T 时, 粒子群优化的迭代次数为 7。总谐波畸变率 THD 随时间变化趋势如图 4 所示。

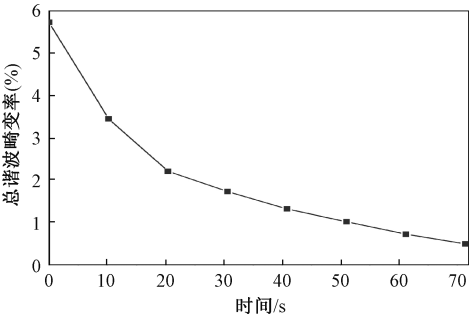


图 4 1kHz 时总谐波畸变率随时间变化趋势
Fig.4 Trend of THD over time at 1kHz

相比于其他的控制方式, 本文控制方法的先进性有三点:

(1) 波形控制效果更好。由于本文采用了粒子群算法, 计算强度较大, 因此相较于其他方式控制的精度更高。

(2) 系统稳定性更高。在一次控制过程中, 系统最终输出的最优解有且仅有一个, 扰动对系统产生的影响可忽略不计。

(3) 系统参数整定更加方便。相对于其他控制方式必须要给出准确的参数, 本文方法在人为规定好粒子数、维度和最大迭代次数后, 仅需根据经验给出补偿所需的三、五、七次谐波含量和相角的大致范围即可。

图 5 为当频率为 1kHz, 磁通密度幅值 B_m 为 1.215T 时, 谐波补偿前后磁通密度波形对比图。由图 5 可知, 在谐波补偿前, 由于谐波含量较高, 谐波畸变率较大, 磁通密度波形畸变严重。在对激励电压 U_0 进行谐波补偿后, 磁通密度波形畸变情况基本消失, 其波形接近正弦波。

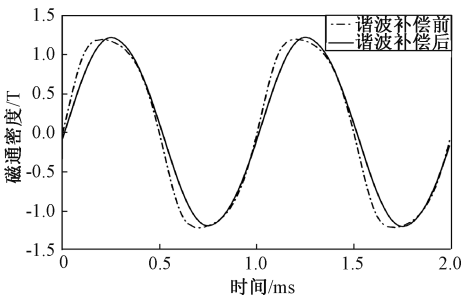


图 5 谐波补偿前后磁通密度波形对比图
Fig.5 Comparison of magnetic flux density waveforms without and with harmonic compensation

图 6 为当频率为 1kHz, 磁通密度幅值为 1.215T 时, 谐波补偿前后 SMC 磁滞回线的对比情况。由图 6 可知, 由于谐波补偿前磁通密度波形中存在大量的高次谐波, 使得磁滞回线发生了严重畸变, 磁滞回线面积相对较大。

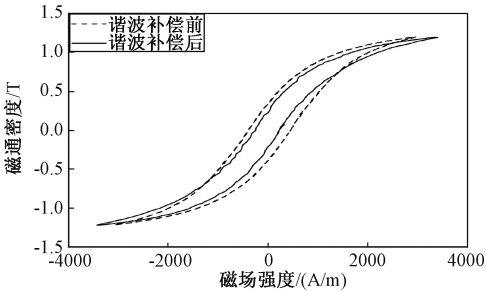
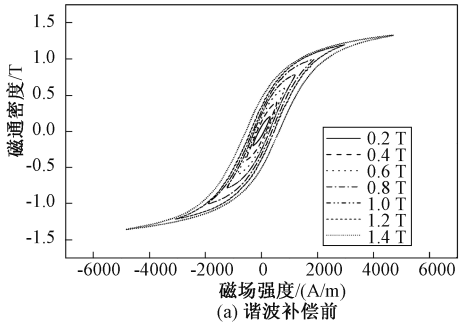


图 6 1kHz 时谐波补偿前后 SMC 的磁滞回线对比图
Fig.6 Comparison of hysteresis loops of SMC without and with harmonic compensation at 1kHz

图 7 为频率 1kHz 时, 在各磁通密度幅值下谐波补偿前后 SMC 磁滞回线对比情况。由图 7(a)、图 7(b) 两图对比可知, 在各磁通密度幅值下, 波形补偿前的磁滞回线面积均相对较大, 磁滞回线畸变严重。利用所测得的磁通密度 B 和磁场强度 H , 结合式(6) 进行计算求得各频率软磁复合材料损耗情况:

$$P_s = \frac{1}{T\rho} \int_0^T \left(H \frac{dB}{dt} \right) dt \tag{6}$$

式中, ρ 为软磁复合材料的密度; T 为磁化周期。



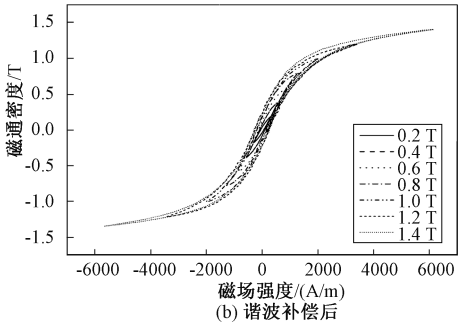


图 7 不同磁通密度幅值下谐波补偿前后 SMC 的磁滞回线

Fig.7 Hysteresis loops of SMC without and with harmonic compensation under different B_m

图 8 为频率为 1kHz、2kHz、5kHz、8kHz 时,谐波补偿前后软磁复合材料比损耗的对比图。

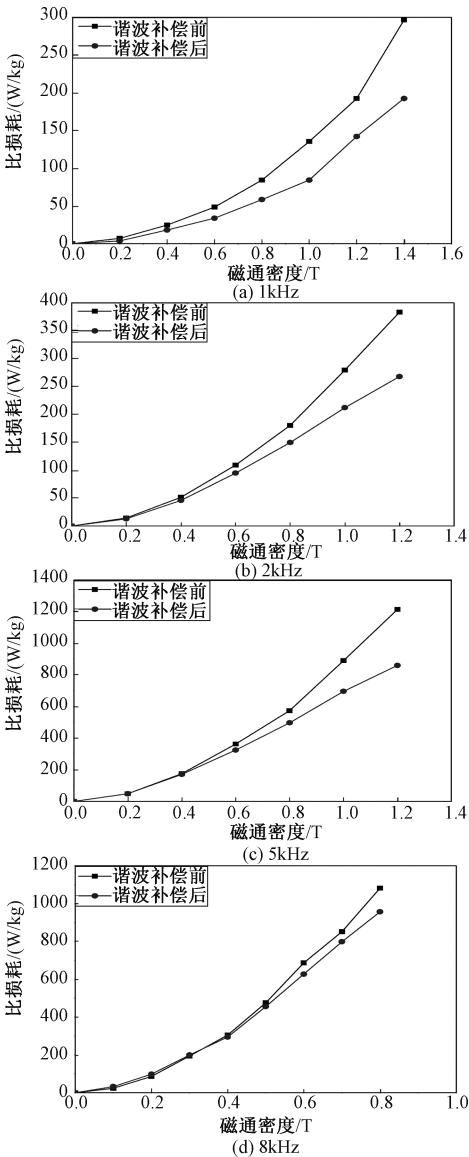


图 8 谐波补偿前后 SMC 的比损耗对比图

Fig.8 Comparison of core loss of SMC without and with harmonic compensation

由图 8 可知,由于在谐波补偿前磁通密度波形谐波含量较高,因此求得的比损耗相对较高。并且在同一个频率内随着磁通密度幅值的增大,磁通密度波形谐波含量增高,这种现象也就更加明显。在谐波补偿后由于谐波含量大大减少,所求比损耗的精确度相对于谐波补偿前也会提高。

4 结论

本文针对磁性材料磁特性测量过程中随着激磁电压的上升磁通密度波形发生畸变的情况,提出了一种磁通密度波形控制策略,即采用对激磁电压进行谐波补偿的方式,使得磁通密度的波形接近测量标准要求的正弦波,并通过粒子群算法获得谐波补偿所需的三、五、七次谐波分量。软磁复合材料一维磁特性测量中使用本文方法,验证了其可行性。该方法可在磁性材料二维、三维磁特性测量中进行推广研究。

参考文献 (References):

[1] Zhang C G, Li Y J, Li J S, et al. Measurement of three-dimensional magnetic properties with feedback control and harmonic compensation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (3): 2176-2485.

[2] Chen L, Wang Y H, Ben T, et al. Waveform conditioning problems of nanocrystalline alloys under one/two-dimensional high-frequency magnetization [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28 (3): 0602005.

[3] 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 in electrical engineering: A review) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (20): 1-29.

[4] 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.

[5] Alatawneh N, Pillay P. Design of a novel test fixture to measure rotational core losses in machine laminations [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (5): 1467-1477.

[6] 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, 80.
- [7] 赵小军, 崔灿, 李琳, 等 (Zhao Xiaojun, Cui Can, Li Lin, et al.). 基于定点谐波平衡法的铁心损耗与损耗特性分析 (Analysis of the hysteresis and loss characteristics in the laminated core by fixed-point harmonic-balanced method) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (7): 10-18.
- [8] GB/T3658-2008, 软磁材料交流磁性能环形试样的测量方法 (Methods of measurement of A. C. magnetic properties of magnetically soft materials) [S].
- [9] Guo Y G, Zhu J G, Zhong J J, et al. Core losses in claw pole permanent magnet machines with soft magnetic composite stators [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, 39 (5): 3199-3201.
- [10] Barriere O D, Ragusa C, Appino C, et al. Prediction of energy losses in soft magnetic materials under arbitrary induction waveforms and DC bias [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 64 (3): 2522-2529.
- [11] Li Y J, Liu Y F, Liu F G, et al. Magnetic anisotropic properties measurement and analysis of the soft magnetic composite materials [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (5): 7000304.
- [12] 张艳丽, 李强, 王洋洋, 等 (Zhang Yanli, Li Qiang, Wang Yangyang, et al.). 谐波磁场下硅钢片磁致伸缩特性分析 (Analysis on magnetostrictive properties of silicon steel sheet under harmonic magnetic field) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (14): 545-550.
- [13] 刘波 (Liu Bo). 粒子群优化算法及其工程应用 (Particle swarm optimization algorithm and its engineering application) [M]. 北京: 电子工业出版社 (Beijing: Publishing House of Electronics Industry), 2010.
- [14] 周金环, 车延博, 舒展, 等 (Zhou Jinhuan, Che Yanbo, Shu Zhan, et al.). 基于混沌变异粒子群算法的 PSS 与 SVC 阻尼控制器协调优化设计 (Coordinated optimization design between PSS and damping controller of SVC based on CMPSO algorithm) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 58-64.
- [15] 李爱国, 覃征, 鲍复民, 等 (Li Aiguo, Qin Zheng, Bao Fumin, et al.). 粒子群优化算法 (Particle swarm optimization algorithms) [J]. 计算机工程与应用 (Computer Engineering and Applications), 2002, 38 (21): 1-3, 17.

Research on waveform compensation in measurement of one-dimensional magnetic properties of soft magnetic composites

WANG Zhao^{1,2}, CHEN Long³, WANG You-hua^{1,2}, WU Shi-pu^{1,2}, ZHANG Xiao-lin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability of Hebei Province, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 3. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: When the magnetic properties of the soft magnetic composite (SMC) are measured, the measured magnetic flux density B is distorted into a non-sinusoidal wave due to its saturation nonlinearity and the presence of interfering harmonics in the measurement. For this case, the method of harmonic compensation of the excitation voltage E is adopted in this paper, so that the waveform of the magnetic flux density B is a sine wave. In this case, the method of harmonic compensation of the excitation voltage E is adopted in this paper, so that the waveform of the magnetic flux density B is close to the sine wave to the greatest extent. The higher harmonic components required for the harmonic compensation process are obtained by the particle swarm optimization algorithm (PSO). The magnetic flux density waveform obtained by this method in the SMC magnetic characteristic measurement can better meet the measurement requirements, and the measurement accuracy is greatly improved, which is verified in the SMC one-dimensional magnetic characteristic measurement experiment.

Key words: SMC; harmonic compensation; PSO; one-dimensional magnetic property measurement