

利用数字式谐波反馈实现交流磁测量磁通波形正弦

张燕宾¹⁾ 瞿清昌²⁾ 龙毅¹⁾ 常永勤¹⁾ 叶荣昌¹⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 中国计量院, 北京 100013

摘要 在磁通正弦条件下进行软磁合金交流磁性测量可以获得高准确度的测量结果. 利用数字式谐波反馈原理, 通过对磁通波形的分析获得了磁通波形中的谐波含量, 然后在电源输出端补偿与磁通波形中谐波幅值相反、相位相同的谐波, 使磁通波形得到了改善. 通过对硅钢样品在不同磁化程度时的测量, 检验这一方法. 当硅钢样品磁化为 1.87 T 时, 经谐波反馈后次级电压的波形系数也能满足国家标准的要求.

关键词 软磁合金; 磁通正弦; 谐波反馈; 磁性测量

分类号 TP 202+.2

软磁材料的性能决定于材料的各种磁参数, 而其微小的测量误差就有可能使一种材料的标号相差很大, 因此所测磁参数的准确度对于软磁材料意义重大. 磁导率 μ 、饱和磁通密度 B_s 、矫顽力 H_c 、剩磁 B_r 以及铁损 P 等磁学参量都来自于磁滞回线, 因而对磁滞回线的准确测量是准确测量软磁材料各种磁参数的基础. 由于 B 和 H 是非线性的不能同时为正弦波形, 而次级感应电压中含有大量的谐波, 所测得的磁滞回线包含的面积就会比实际面积要大, 从而造成磁参数测量的偏差. 只有降低次级感应电压中的谐波含量使其波形成为正弦波, 测得的磁滞回线与理论的磁滞回线相差才能最小, 所测得的参数才有较高的准确度^[1-2].

现在国内外所有的软磁测量设备都可以在给定磁场峰值条件下测出一个完整的磁滞回线, 所有的磁性参数都定义在磁滞回线上. 但不同仪器、同一仪器不同操作方式或不同操作者都会得到不同的磁滞回线. 这是因为软磁材料磁性能是一个多变量的关系函数, 这些变量包括磁感峰值和激励场频率等, 测绘一个磁滞回线的速率不同, 就是基本(波)频率不同, 其特性就不一样, 在同样的基本频率下, 如果磁通的波形不同, 即谐波含量不同也会严重的畸变测量结果^[3-4].

要实现磁性参数精确性的测量, 首先需要实现磁通波形为正弦波形. 在 1958 年以前, 基本上没有技术手段达到这一目的, 更多的研究工作则是侧重于对偏离磁通正弦条件下测得的结果进行波形修

正. 1958 年, 麦克法兰首次提出以电压负反馈的方式保持方圈次级电压正弦波形的方^[5-6]. 经过 20 多年的努力, 磁通波形不断得到改善, 到 20 世纪 80 年代初, 已能在 $H < 5 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$ 这样不太深的饱和区实现磁通正弦条件了. 1983 年, 我国在保持磁通波形正弦的研究中取得了突破性的进展, 首次在 $H < 100 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的范围内全部实现了磁通波形正弦条件^[7]. 但这种补偿的调节比较困难, 需要专业的实验技巧.

本文寻求以数字式谐波反馈方式来解决这个问题. 用新的磁性测量装置, 真正实现数值积分, 以取代国内外使用多年的用模拟积分器还原磁通模式, 彻底消除模拟积分器的回复漂移引起的系统误差, 使它在原理上成为一个完整的 3G ATE(auto testing equipment), 同时大大缩短了计量溯源路径从而进一步提高测量准确度.

1 数字式谐波反馈原理

利用谐波反馈手段实现磁通正弦, 其原理框图如图 1 所示.

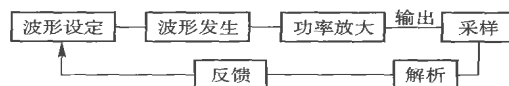


图 1 谐波反馈原理框图

Fig. 1 Principle of digital feedback of harmonic compensation

首先是设定波形, 根据设定的波形由波形发生器输出需要的波形经过功率放大器放大发送出来; 经过 D/A 卡将发送出来的波形采集, 利用傅里叶分析计算出波形所含有的谐波, 将与分析出的谐波幅值相同、相位相反的波加入到输出波形中, 抵消原波

收稿日期: 2005-09-23 修回日期: 2006-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50471094)

作者简介: 张燕宾(1980-), 男, 硕士研究生; 龙毅(1955-), 女, 教授, 博士生导师

形中的谐波,此过程便完成了谐波反馈.同时谐波反馈是通过软件自动控制,对于不同的测试材料可以自动进行修正,提高了测量的自动化程度.

2 实验结果及讨论

取硅钢环形样品作为测试对象进行谐波反馈实验,用以检验效果.首先,使硅钢样品磁化到

1.77 T.如图 2(a)所示,此时磁通波形的谐波含量只有 1.97%,波形失真为 1.112,进行谐波补偿后磁通波形中的谐波含量降低到图 2(b)所示的 0.2%,波形失真为 1.111.图 3(b)所示为波形补偿前后的磁通曲线,可以看出两条曲线没有明显的区别,因为此时硅钢还没有达到深度饱和.

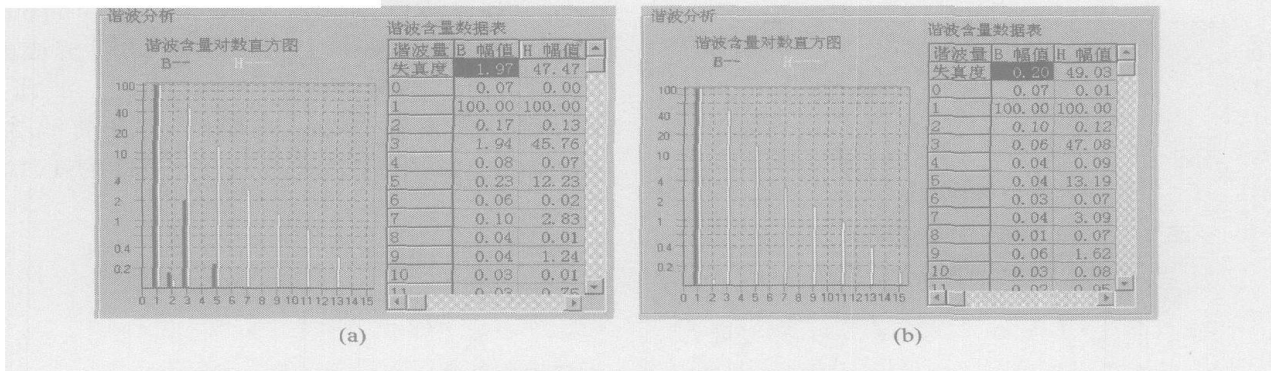


图 2 1.77 T 时谐波反馈前后的磁通波形中谐波含量. (a) 反馈前; (b) 反馈后

Fig.2 Harmonic content in magnetic flux before (a) and after feedback (b) at 1.77 T

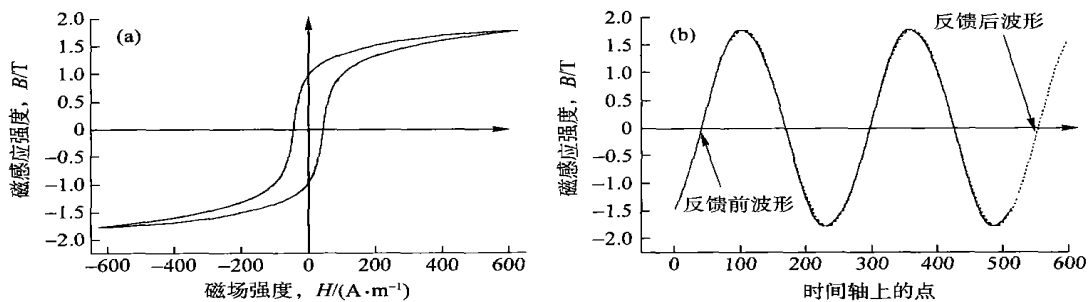


图 3 1.77 T 时硅钢的磁滞回线 (a) 及谐波反馈前后磁通曲线 (b)

Fig.3 Hysteresis loop (a) and magnetic flux before and after feedback at 1.77 T (b)

根据要求,硅钢材料频率为 50 Hz 时比总损耗检定结果的准确度为 1%,当线圈次级电压的波形系数偏离 1.111 的±0.005时,比总损耗值应加以修正,但波形系数不得超过 1.111 的±0.05^[8].硅钢

磁化到 1.77 T 时波形系数没有超出 1.111 的±0.005的范围,谐波补偿能起到优化磁通波形的效果.

将硅钢样品进一步磁化到 1.82 T,如图 4(a)所

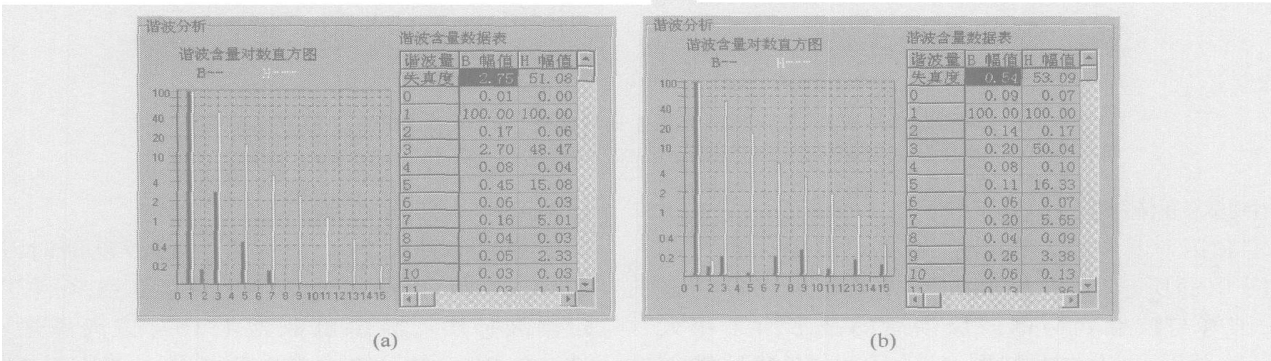


图 4 1.82 T 时谐波反馈前后的磁通波形中谐波含量. (a) 谐波反馈前; (b) 谐波反馈后

Fig.4 Harmonic content in magnetic flux before (a) and after feedback (b) at 1.82 T

示,此时磁通波形的谐波含量为 2.75%,波形失真已经比较严重,为 1.125;进行谐波反馈后磁通波形中的谐波含量降低到如图 4(b)所示的 0.54%,波形失真为 1.111. 图 5 为在 1.82 T 时硅钢样品的磁滞

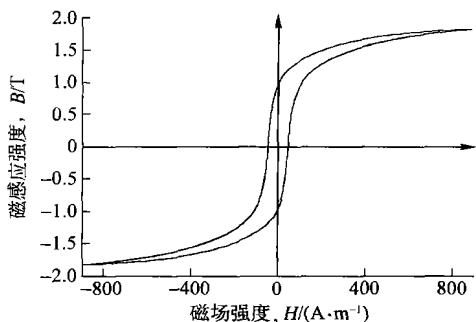


图 5 1.82 T 时硅钢的磁滞回线

Fig.5 Hysteresis loop at 1.82 T

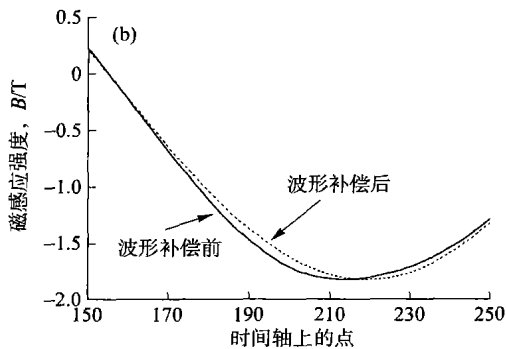
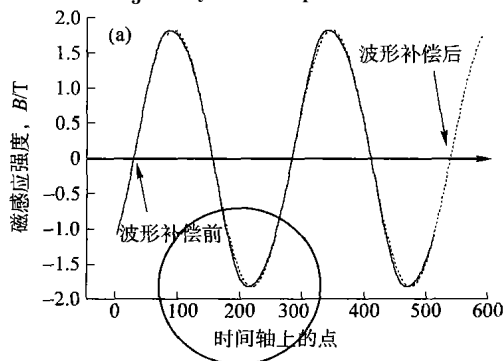


图 6 1.82 T 时硅钢谐波反馈前后的磁通曲线 (a) 及局部放大曲线 (b)

Fig.6 Magnetic flux wave before and after feedback at 1.82 T (a) and magnified wave (b)

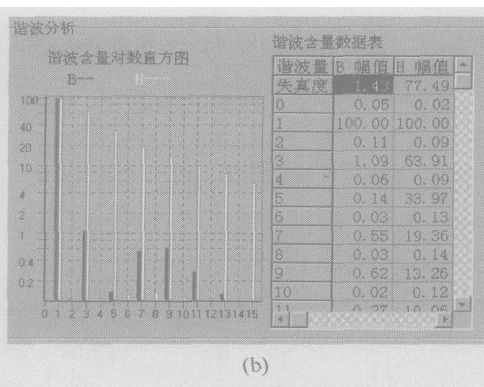
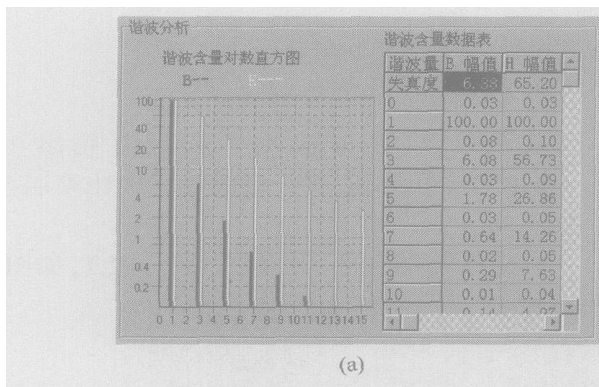


图 7 1.87 T 时谐波反馈前后的磁通波形中谐波含量. (a) 波形反馈前; (b) 波形反馈后

Fig.7 The content of harmonic in magnetic flux before (a) and after feedback (b) at 1.87 T

由图 8 的磁滞回线可以看出,样品已经进入了深度饱和区. 谐波补偿前后的磁通波形变化更为明显如图 9(a)所示,谐波反馈前的磁通波形已经明显失真,波峰与波谷处与谐波反馈后的波形有了很大的差别. 将其局部放大如图 9(b)所示,谐波反馈前的磁通波形已经明显偏离了正弦波,谐波反馈后磁

通波形获得极大改善. 谐波反馈前后的区别已经可以从图 6(a)上观察到,波峰和波谷处有明显的差别,局部放大曲线如图 6(b)所示.

当硅钢磁化到 1.82 T 不加谐波反馈时,波形系数为 1.125 超出 1.111 ± 0.005 的要求,但经过谐波反馈后波形系数为 1.111,确保了磁通正弦条件. 显示出谐波反馈有效改善磁通波形的效果.

为了验证谐波反馈在深度饱和时的效果,将硅钢样品进一步磁化到 1.87 T. 此时磁通波形的谐波含量为 6.38%,如图 7(a)所示,波形失真达到 1.184;谐波补偿后,磁通波形的谐波含量降低到 1.43%,如图 7(b)所示,波形失真为 1.102.

通波形获得极大改善.

当硅钢磁化到 1.87 T 不加谐波反馈时,波形系数为 1.184,已经完全不满足磁通正弦条件了,但经过谐波补偿后波形系数为 1.102,偏离磁通正弦条件 0.8%,引起的比总损耗测量误差小于 1%.

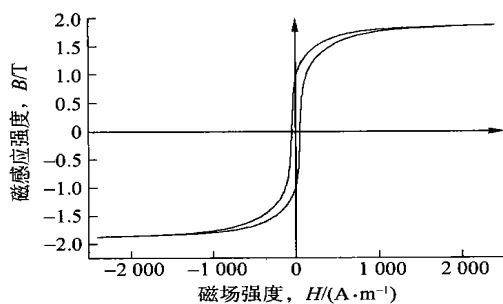


图 8 1.87 T 时硅钢的磁滞回线

Fig. 8 Hysteresis of a sample at 1.87 T

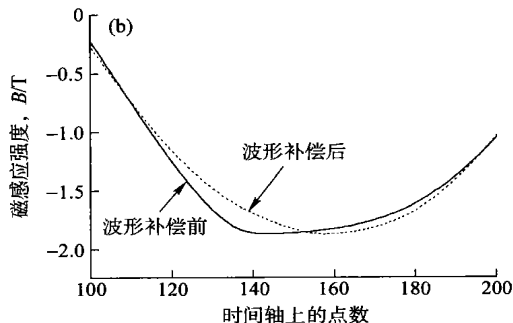
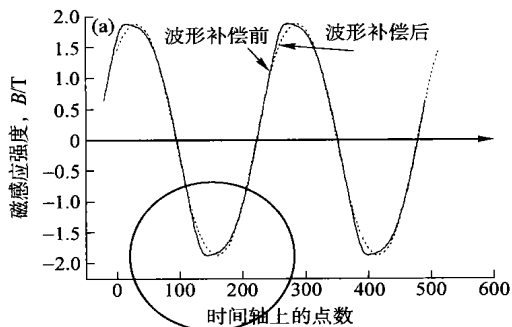


图 9 1.87 T 时硅钢谐波反馈前后磁通曲线 (a) 和局部放大图 (b)

Fig. 9 Magnetic flux wave before and after feedback at 1.87 T (a) and magnified wave (b)

合金的所有交流磁性参数都应在磁通正弦条件下进行检定, 本实验所提出的谐波反馈的方法对于实现这一条件有明显的效果。

参考文献

- [1] 周世昌. 磁性测量. 北京: 电子工业出版社, 1987
- [2] 北京大学物理系. 铁磁学. 北京: 科学出版社, 1976
- [3] Yoshizawa Y, Yamauchi K. Fe-base soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure. *Mater Trans JIM*. 1990, 31(4): 307
- [4] 刘亚丕, 何时金. 软磁材料的发展趋势. *磁性材料与器材*, 2003, 34(3): 26

3 结论

利用数字式谐波反馈原理对样品三次磁化后的磁通波形进行谐波反馈补偿, 能够有效降低磁通波形中的谐波含量, 效果显著. 虽然当硅钢进入深度饱和和区时谐波反馈后磁通波形中的谐波含量只能降低到 1% 左右, 但这对于磁性材料交流磁性测量而言已经是很好的结果. 当饱和程度进一步增加时, 高次谐波含量大大增加, 补偿效果是有限的, 而此时的磁感应强度值已经超出了标准规定的范围. 软磁

2003, 34(3): 26

- [5] McFarlane J, Harris M J. The control of flux waveform in iron testing the application of feedback amplifier techniques. *IEEE Trans Magn*. 1958, 18: 2254
- [6] Lyke R F. Modern magnetic testing equipment for electrical steels. *IEEE Trans Magn*. 1982, 18(6): 1466
- [7] Qu Q C. Precise magnetic properties measurements on electrical sheet steels under deep saturation. *IEEE Trans Magn*. 1984, 20(5): 1717
- [8] GB/T 3658 软磁合金交流磁性能测量方法. 北京: 中国标准出版社, 1983

Achieving the sinusoidal waveform of magnetic flux in AC magnetic measurement by digital feedback of harmonic compensation

ZHANG Yanbin¹⁾, QU Qingchang²⁾, LONG Yi¹⁾, CHANG Yongqin¹⁾, YE Rongchang¹⁾

1) Materials Science and Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Electromagnetic Division, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China

ABSTRACT Sinusoidal waveform of magnetic flux is needed to obtain high-exactitude AC properties measurement results of soft magnets. A new mode to achieve the condition by digital feedback of harmonic compensation was introduced, the waveform of magnetic flux was analyzed, and the harmonic content in the wave was obtained. The waveform with the same altitude and opposite phase to the harmonic was supplied to the waveform-framing unit, and then the harmonic in output wave was counteracted. Measurement results of electrical steels showed that, after feedback, even at a peak value of induction up to 1.87 T, the form factor fulfilled the condition.

KEY WORDS soft magnetic alloys; sinusoidal waveform of magnetic flux; harmonic feedback; magnetic measurement