

# 基于虚拟仪器的纳米晶磁环动态参数测试系统

马淑华<sup>1</sup>, 赵一丁<sup>1</sup>, 汪晋宽<sup>2</sup>

(1 东北大学秦皇岛分校自动化系 秦皇岛 066004;  
2 东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

**摘 要:** 开发了基于虚拟仪器技术,采用大功率脉冲励磁电源、高速数据采集卡的纳米晶磁环动态参数测试系统。由于脉冲励磁与标准正弦波励磁的测试结果存在差异,为得到相当于正弦励磁下的磁滞回线及磁参数,通过 SY-8232 交流 B~H 回线测试仪对测试系统进行标定,利用 LabVIEW 进行数据处理和分析,实现了误差修正。给出了典型频率、磁感应强度下的测试结果,对 B、H 曲线进行了频谱分析。该测试系统操作方便,测试准确,具有较好的重复性,可用于重量为 300 g~3 kg 的纳米晶磁环在频率为 10~100 kHz 条件下的动态参数的在线测试。

**关键词:** 虚拟仪器; 纳米晶磁环; 脉冲励磁; 磁滞回线; 磁参数

**中图分类号:** TP23 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Nanocrystalline core dynamic parameter test system based on virtual instrument

Ma Shuhua<sup>1</sup>, Zhao Yiding<sup>1</sup>, Wang Jinkuan<sup>2</sup>

(1 Dept. of Automation, NorthEast Univ. in Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China;  
2 School of Information Science & Engineering, Northeastern Univ., Shenyang 110004, China)

**Abstract:** A dynamic parameter test system consisting of high-power excitation power supply and high speed data acquisition card was developed based on virtual instrument. Because there is a difference between the test results with pulse excitation and standard sinewave excitation, the test system has been calibrated using the SY-8232 alternative B~H hysteresis curve test instrument in order to obtain the hysteresis curve and magnetic parameters similar to those under sinewave excitation. LabVIEW was used to carry out data processing and analysis, and error correction. The experimental results under typical frequencies and magnetic induction intensity are given and spectrum analysis of the B and H curves is done. Besides being easy to operate, this test system has the advantages of good accuracy and repeatability. It can be applied to the online test of the dynamic parameters of nanocrystalline cores with weight from 300 g to 3 kg, and within the frequency range from 10 kHz to 100 kHz.

**Key words:** virtual instrument; nanocrystalline core; pulse excitation; hysteresis curve; magnetic parameter

## 1 引 言

非晶纳米晶材料具有高磁感应强度、高磁导率、低高频损耗以及优异的温度稳定性,用非晶纳米晶软磁材料制作的磁环、变压器铁芯、互感器、传感器等具有质量轻、体积小、性能高等优点,在电力电子技术、电子技术、通讯技术等领域应用日益广泛<sup>[1-3]</sup>。

实际应用中,大多数磁性器件都工作在动态磁化条

件下,磁性产品的性能主要取决于作为导磁材料的磁环的性能,因此非晶纳米晶磁环动态磁性性能测量至关重要<sup>[4-6]</sup>。另外,非晶纳米晶材料的制备过程中,合金成分、退火温度以及制备工艺对非晶纳米晶材料的性能有较大的影响<sup>[8-9]</sup>。磁滞回线的准确测量是确定磁性材料动态磁参数,检验磁环质量的基础。

通常磁性材料性能检测多采用正弦励磁电源,在正弦磁通下,利用伏安向量法测试各种磁参数<sup>[9-10]</sup>。但随

随着测试频率的增加,被测磁环的阻抗增大,为了测试磁参数,不得不提高测试电压,从而导致高频高压励磁电源的成本升高<sup>[5]</sup>。同时会使正弦励磁电源的功耗增大,体积增大。因此低成本高频励磁电源磁性测试系统的研制受到了国内外诸多研究者的关注。

虚拟仪器技术是目前测控领域中最流行的技术之一。虚拟仪器概念是对传统仪器概念的重大突破,是计算机技术与仪器技术相结合的产物。突破了传统仪器在数据处理、显示、传送、存储等方面的限制。基于虚拟仪器经济、灵活,维护、扩展、升级方便的诸多优点,已成为现场应用和实验室研究装置的主流发展方向。

本文采用大功率脉冲电源作为励磁信号,功率开关器件 MOSFET 工作在开关状态,可显著降低励磁电源的体积和功耗,减小成本。结合虚拟仪器技术,利用 LabV IEW 软件平台强大的数据处理功能完成信号同步触发和数据采集功能,准确测量磁滞回线及其相应的磁参数,使系统具有更强的抗干扰性、准确的测试指标和较高的性价比。

## 2 磁参数测量原理

磁性材料的动态磁参数主要包括矫顽力  $H_c$ 、剩磁  $B_r$ 、最大磁感应强度  $B_m$ 、磁导率  $\mu$ 、铁损  $P_c$  等。通常情况下这些参数可以通过动态磁滞回线得到。

软磁性能参数测试方法有伏安向量法和计算机采样伏安法 2 种<sup>[10]</sup>。图 1 为采用计算机采样伏安法的测试系统示意图。在待测试样上绕上匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$  的线圈,原边接励磁信号,并串联无感取样电阻  $R$  测量原边电流,副边开路。

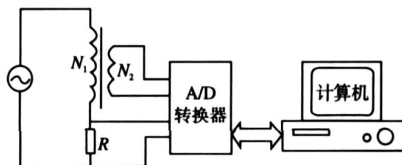


图 1 测试系统示意图

Fig 1 schematics of the test system

根据安培环路定理和磁感应定理,磁场强度  $H$ 、磁感应强度  $B$ 、磁导率  $\mu$  可分别表示为:

$$H = \frac{N_1 \cdot i_R}{l} = \frac{N_1 \cdot u_R}{l \cdot R} \quad (1)$$

$$B = \frac{u_2 \, dt}{N_2 A} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3)$$

式中:  $l$  为等效磁路长度,  $A$  为磁环的横截面积,  $u_2$  为副边感应电压,  $u_R$ 、 $i_R$  为取样电阻的电压和电流,  $N_1$  为励磁线

圈匝数,  $N_2$  为副边线圈匝数。  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 。

由式 (1) 和 (2) 可知,磁场强度  $H$  正比于  $u_R$ ,磁感应强度  $B$  正比于  $u_2$  的积分。因此同时测量  $u_R$  和  $u_2$  在一个磁化周期内的数据,即可得到一条磁滞回线。由小到大增加励磁信号的幅值,可得到任意磁场强度下的若干条磁滞回线,根据磁滞回线可得到各种磁性指标。

铁损可以通过式 (4) 计算得到:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u_i i \, dt = \frac{\Delta I}{T} \int_0^T H \, dB = \frac{\Delta I}{T} \int_{i=0}^i H(i) [B(i) - B(i-1)] \, J \quad (4)$$

实际中一般应用单位质量损耗  $P_c$  进行磁环比较,即:

$$P_c = \frac{P}{m} \quad (5)$$

式中:  $m$  为磁环质量。

## 3 测试系统设计

图 2 为实际测试系统,图 3 是测试系统的结构图。系统由工控机、LPC2104 单片机、大功率脉冲励磁电源模块、信号采集模块 4 部分组成。

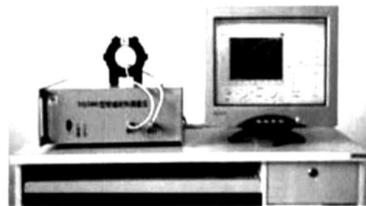


图 2 测试系统

Fig. 2 Picture of the test system

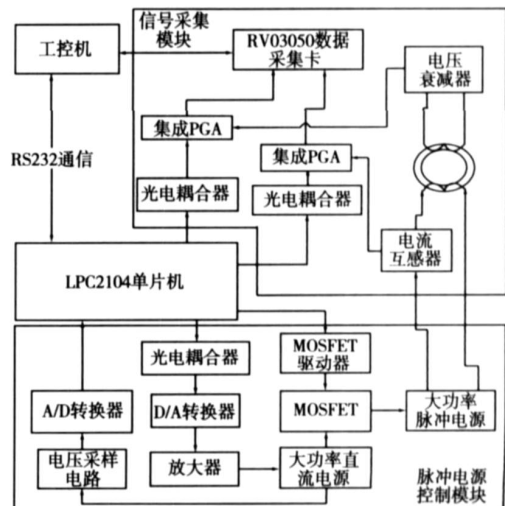


图 3 系统结构图

Fig. 3 Configuration of the system

工控机内安装 LabV IEW 6. 0 软件平台实现虚拟仪器

的测试、开发功能,主要包括数据采集、分析、处理,磁滞回线绘制、参数计算、打印等功能。

LPC2104 单片机带有一个支持实时仿真和跟踪的 ARM7TDM I-S 32 位 CPU,内嵌 128 KB 的高速 Flash 存储器。LPC2104 单片机主要用于控制脉冲电源的幅值、频率,为防止干扰影响,利用高速光耦 6N137 隔离 LPC2104 与控制电路。信号采集模块完成信号的调理和采集功能。工控机与 LPC2104 通过串口进行通信,以控制脉冲电源输出。只有测试状态脉冲电源才有输出。

大功率脉冲励磁电源模块用于产生频率、幅值可变的脉冲励磁电压。脉冲电源的输出电压为 0 ~ 100 V 可调,最大电流 10 A,最大输出功率 1 kW。脉冲电源控制电路利用 R2110 实现,通过调整可得到 0 ~ 100 V 之间任意幅值、10 ~ 100 kHz 的脉冲输出。由于 R2110 不具备脉冲调宽功能,故其驱动前级须采用可产生 PWM 波形的器件。R2110 的控制信号取自 LPC2104 单片机。

LPC2104 可实现 6 个单边沿控制或 3 个双边沿控制 PWM 输出,或两种类型的混合输出。通过设置 PWMPCR、PWMTCR 等 7 个匹配寄存器,可产生需要的各种 PWM 控制波形。系统使用两路双边沿 PWM 输出,控制波形如图 4 所示,其中  $t_1$ 、 $t_2$  的设置取决于系统中 MOSFET 的关断和导通时间。为了保证波形对称,每路波形按  $t_1$ 、 $t_2$  的一半时间单独控制上升和下降沿的位置。由图 4 可以看出,通过对  $t_1$ 、 $t_2$  的设置保证系统有足够的时间间隔关断 MOSFET,从而避免设计中 MOSFET 上下直通造成的直流侧短路,即逆变“连通”现象。

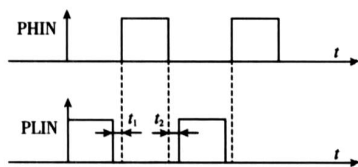


图 4 R2110 的控制波形图

Fig. 4 Control waveform of R2110

信号采集模块主要包括光电耦合器、电流互感器、电压衰减器、集成 PGA 以及 RVO3050 双通道数据采集卡,主要功能是完成信号隔离,励磁电流、感应电压信号的调理和采集功能。RVO3050 数据采集卡的采样率为 50 Ms/s,存储量 64 KB 通道,可同步采集电压和电流数据,满足系统的采样要求。

#### 4 测试系统软件平台设计

测试系统软件采用 NI 公司的 LabVIEW 6.0 开发。软件由仪器面板、励磁电源控制、数据采集、数据处理等模块组成。软件流程如图 5 所示。

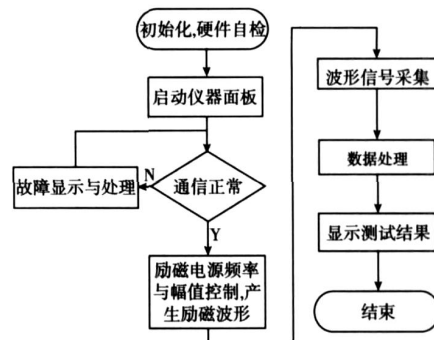


图 5 软件流程图

Fig 5 Flowchart of the software

仪器面板设计主要包括 2 个方面:一是测试面板虚拟化,以显示器上的图标代替实际的操作面板,如测试界面上的开关、按钮、文本框、图像显示等;二是测试系统功能软件化,更多的硬件功能由软件完成,如虚拟监视器、示波器等。仪器面板的主要功能包括测试操作的各种开关、按钮,磁环参数输入,磁滞回线的图形显示和测试结果的数值显示。采用 LabVIEW 的分页控件设计,将各功能编制成子 VI 模块库以备调用。

数据采集模块主要实现 LabVIEW 软件与 RVO3050 双通道数据采集卡的数据接口功能。LabVIEW 软件是美国 NI 公司推出的基于 G 语言的优秀的图形化编程平台,利用其中的 DAQ 模块可以很方便地实现与其配套的 ATE 系列数据采集卡的接口。但 ATE 系列数据采集卡价格昂贵,而对于一般的数据采集卡如 RVO3050, LabVIEW 并不兼容,不能直接调用内置的 DAQ 模块<sup>[11]</sup>。为了在该编程环境下应用 RVO3050 数据采集卡,利用 LabVIEW 提供的调用库函数 (CLF) 调用 RVO3050 的动态链接库 (DLL 文件),实现软件对硬件接口的访问并获取 RVO3050 采集的数字信号。

数据处理模块完成采集数据的分析、误差修正、磁滞回线的绘制以及参数计算等功能。

励磁电源控制模块的主要功能包括串口通信和磁感应强度  $B$  的计算。利用串口控件编写子 VI 实现与 LPC2104 单片机的通信,完成仪器面板向大功率脉冲励磁电源发出控制指令,产生符合测试的频率和幅值条件的脉冲励磁信号。同时根据数据采集卡采集的励磁电流信号和感应电压信号,计算磁感应强度  $B$ 。如果计算值与设定值不一致,则改变励磁信号幅值,控制励磁电源产生新的励磁信号,从而改变磁感应强度,使之逐步逼近磁感应强度的设定值,并得到该磁感应强度的磁滞回线。

图 6 为测试系统主界面。测试时首先将航空插头穿过被测试样,并与测量仪相连,一般情况只绕 1 匝即可,也可以多缠绕几匝。主界面的“控制参数”中修改原边、副边线圈的匝数,铁芯截面积、长度、填充系数 (用于计算

实际的磁路长度)、重量等参数,再根据要求设定磁感应强度和频率的数值,然后点击“测试”按钮开始自动测量,测试完成自动显示磁滞回线和测试结果。

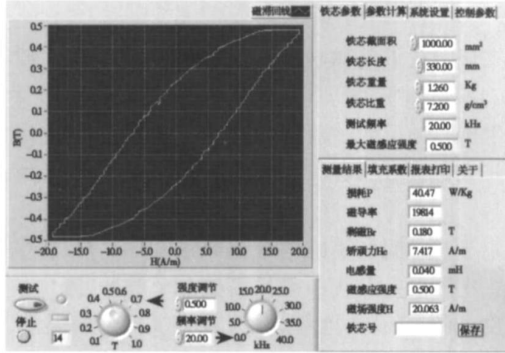


图 6 程序主界面

Fig 6 The main window

### 5 系统标定及性能指标

由于测试系统采用脉冲励磁电源,其结果与正弦励磁会存在一定差异。为了评定系统的性能指标,对系统进行了标定。采用日本岩崎通信有限公司生产的 SY-8232交流 B - H 回线测试仪标定测试系统。SY-8232采用正弦励磁电源产生正弦磁通,价格昂贵,主要用于实验室测量和标定。

在相同测试条件下将本系统的测试结果与 SY-8232 交流 B - H 回线测试仪的测试结果进行比对,脉冲励磁方法得到的铁损偏大于正弦波励磁结果,与理论计算结果<sup>[12]</sup>吻合。将多个试样的测试结果与 SY-8232 测试结果进行比较,对系统进行标定,表 1 为在同样测试环境下同一试样 SY-8232 和本测试系统的测试结果比较,测试误差满足磁环生产厂家的测试要求。

表 1 B = 0.5 T, f = 20 kHz 条件下的测试结果

Table 1 Measurement result @ B = 0.5 T & f = 20 kHz

	Hm/(A · m <sup>-1</sup> )	Br/T	Hc/(A · m <sup>-1</sup> )	Pc/(W · kg <sup>-1</sup> )
本系统	13.600	0.3430	7.4200	22.800
SY-8232	13.445	0.3387	7.3026	22.065
绝对误差	0.155	0.0043	0.1174	0.735
相对误差 (%)	1.1	1.24	1.61	3.3

经标定后的系统精度、重复性指标如表 2 所示。

表 2 测试系统的性能指标

Table 2 Performance specifications of the test system (%)

	μ	Bm	Br	Hc	Pc
精度	3	1	1.5	2	5
重复性	±2	±0.5	±1	±1	±2

### 6 系统测试结果

#### 6.1 20 kHz 测试结果与频谱分析

试样参数:截面积 750 mm<sup>2</sup>,铁芯磁路长度 298.3 mm,重量 1.12 kg,在频率为 20 kHz,磁感应强度为 0.5 T 时试样的磁参数结果如图 7 ~ 10 所示。

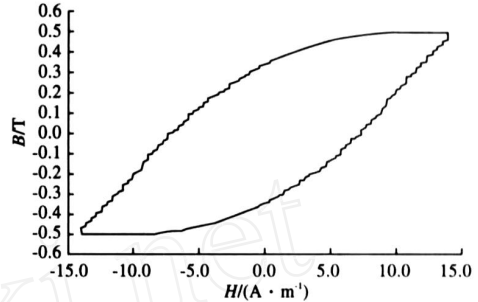


图 7 试样的磁滞回线

Fig. 7 Hysteresis curve of a sample core

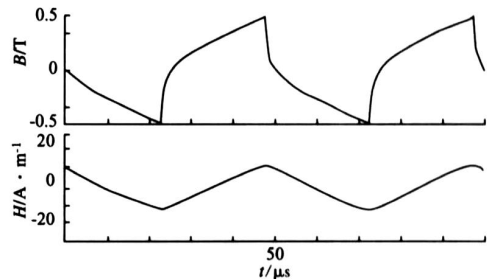


图 8 B, H 曲线

Fig. 8 Curve of B vs. H

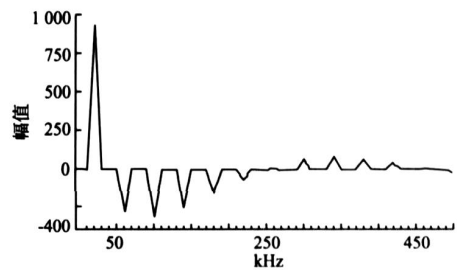


图 9 磁感应强度 B 的 FFT

Fig. 9 FFT of B

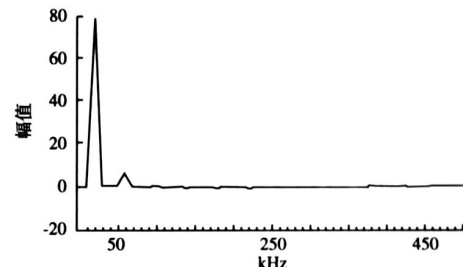


图 10 磁场强度 H 的 FFT

Fig. 10 FFT of H

图 7 为测量得到的磁滞回线。图 8 为根据励磁电流和感应电压得到的被测试样的磁场强度  $H$  和磁感应强度  $B$  的波形。从图 8 可见,在脉冲励磁条件下,铁芯的实测磁感应强度波形既不是方波,也不是正弦波;铁芯的励磁电流和磁场强度波形近似三角波。用 LabVIEW 的 Real FFT 对曲线进行快速傅里叶变换,得到图 9 和图 10 的频谱图。从图 9 可以看出,磁感应强度曲线频谱中谐波成分较多,其中幅值最大的为基波分量,其次为幅值较小的 3 次、5 次和 7 次谐波。其谐波成分与方波的 FFT 很接近。可见,虽然时域上波形发生了明显的畸变,但频谱分析表明其频率成分接近方波。从图 10 的磁场强度的 FFT 看出,磁场强度中只包含 1 次谐波,频率成分单一,接近于正弦波。

## 6.2 其他测试结果

试样参数:截面积  $750 \text{ mm}^2$ ,铁芯磁路长度  $298.3 \text{ mm}$ ,重量  $1.26 \text{ kg}$ 。

图 11 为该试样在  $20 \text{ kHz}$  不同  $B$  下的磁滞回线,从图中可以看出,相同频率下  $B$  越大,损耗越大。图 12 为该试样在  $0.5 \text{ T}$ ,不同频率下的磁滞回线,从里至外频率依次为  $10 \text{ kHz}$ ,  $16 \text{ kHz}$ ,  $22 \text{ kHz}$ ,  $26 \text{ kHz}$ 。从图中可以看出,相同  $T$  下随频率的增加损耗增加。

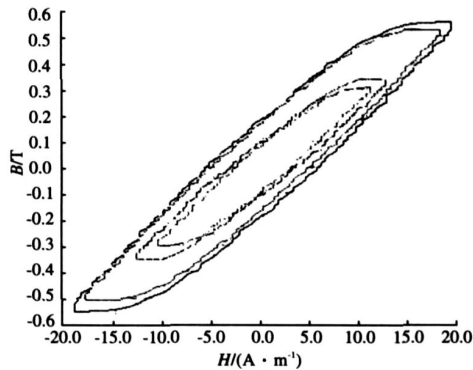


图 11  $20 \text{ kHz}$  下不同  $B$  的磁滞回线

Fig. 11 Hysteresis curves for different  $B$  under  $20 \text{ kHz}$

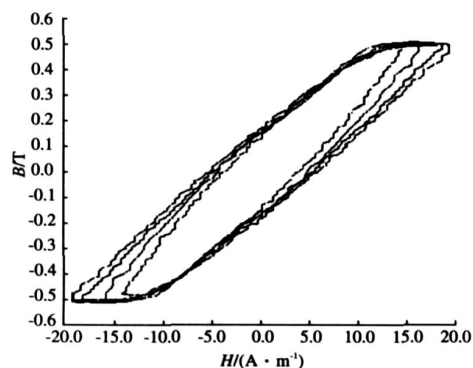


图 12  $0.5 \text{ T}$  下不同频率的磁滞回线

Fig. 12 Hysteresis curves for different frequencies under  $0.5 \text{ T}$

## 6.3 保证测试精度的措施

数据采集卡的准确度、采样频率以及测试条件直接影响测试精度。为保证测试精度,实际中采取了以下措施:

系统每次上电都要利用软件对 RVO3050 的 GND 电平,OFFSET 电平进行自动校准,以保证 RVO3050 采集数据的准确。为了保证励磁电流与感应电压信号的无相位差同步采集,利用 RVO3050 的外部触发功能同时触发两路信号。

由于长时间加励磁信号会导致磁环发热,影响测试指标。实际测量过程一般只需要几个脉冲,既加快了测试速度,同时又有效地降低了功率开关器件的温升,提高了测试系统的可靠性,保证系统可长时间连续在线工作。

由于副边感应电压中含有大量谐波(如图 9 所示),但 21 次以上谐波的能量已经很小,按照奈奎斯特定理,若要对其进行无失真采样,其采样频率必须大于 42 倍的基频,系统的最高工作频率为  $100 \text{ kHz}$ ,则采样频率必须大于  $4.2 \text{ MHz}$ ,实际采样频率为  $5 \text{ MHz}$ 。

环境温度、杂散电磁场也会对测量造成不良影响,测量时应保持温度恒定,周围不允许被测磁环以外的磁性物质及电磁场存在。测试中,试样既不能受外加应力作用,也不能受到敲击或振动,否则会增加测试误差。

## 7 结 论

研究开发了基于虚拟仪器技术的采用脉冲励磁的纳米晶磁环参数动态测试系统。采用脉冲励磁使系统具有功耗低、体积小、成本低等特点,具有较高的性价比。通过定标和对测试结果的分析,表明该测试系统能够满足磁环生产厂家对磁环测试精度和快速性的要求,可用于非晶纳米晶磁环特性的研究和在线检测。

## 参考文献

- [1] 毕耀宗. 纳米晶材料在逆变焊机上的应用 [J]. 电焊机, 2002, 32(10): 8-11.  
BI Y Z Application of nanocrystalline on inverter welder [J]. Electric Welding Machine, 2002, 32(10): 8-11.
- [2] HERZERA G Round table discussion: Present and future applications of nanocrystalline magnetic materials [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2005, 294: 252-266.
- [3] PETZOLD J. Advantages of soft magnetic nanocrystalline materials for modern electronic application [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 242-245: 84-89.
- [4] 张志高,王立新,侯瑞芬,等. 动态磁性能测试仪的研

- 究 [J]. 现代测量与实验室管理, 2004 (3): 18-20.  
ZHANG ZH G, WANG L X, HOU R F, et al Measurement meter of magnetic materials dynamic characteristics [J]. Advanced Measurement and Laboratory Management, 2004 (3): 18-20.
- [ 5 ] TELL N IB. New method to characterize magnetic hysteresis in soft ferrites up to high frequencies [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55 (1): 311-315.
- [ 6 ] 尚雷. 大尺寸纳米晶磁环的动态磁性测量 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19 (2): 297-300.  
SHANG L. Measurement of dynamic characteristics of large dimension nanocrystalline core [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19 (2): 297-300.
- [ 7 ] HE K Y. Studies of crystallization and soft magnetic properties of Fe<sub>73</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> alloy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2007, 316: 34-39.
- [ 8 ] 蒋达国, 姚爱民, 朱正吼. Fe<sub>73</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 非晶纳米晶带材软磁性能和压磁性能研究 [J]. 金属功能材料, 2007, 14 (1): 12-15.  
JIANG D G, YAO A IM, ZHU ZH H. The study on soft magnetic properties and magnetoelastic properties of Fe<sub>73</sub>Nb<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> nanocrystal ribbons [J]. Metallic Functional Materials, 2007, 14 (1): 12-15.
- [ 9 ] 张燕宾, 瞿清昌, 龙毅, 等. 利用数字式谐波反馈实现交流磁测量磁通波形正弦 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29 (1): 82-85.  
ZHANG Y B, QU Q CH, LONG Y, et al Achieving the sinusoidal waveform of magnetic flux in AC magnetic measurement by digital feedback of harmonic compensation [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29 (1): 82-85.
- [ 10 ] GB / T 19346-2003. 非晶纳米软磁合金交流性能测试方法 [S]. 2004.  
GB / T 19346-2003. Measuring method of magnetic properties at alternative current for amorphous and nanocrystalline soft magnetic alloys, 2004.
- [ 11 ] 王永晔, 张颖, 程璇, 等. 基于 LabVIEW 的电滞回线测试系统的开发 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27 (5): 501-504.

WANG Y Y, ZHANG Y, CHENG X, et al Development of hysteresis measuring system based on LabVIEW [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27 (5): 501-504.

- [ 12 ] SHEN W, WANG F, BOROVYCH D, et al Loss characterization and calculation of nanocrystalline cores for high-frequency magnetics applications [C]. Anaheim, CA, USA: Applied Power Electronics Conference, APEC 2007-Twenty Second Annual IEEE, 2007: 90-96.

### 作者简介



马淑华, 1989年和 1998年于北京化工大学和燕山大学获得学士和硕士学位, 现为东北大学秦皇岛分校副教授, 主要研究方向为智能化网络测控技术, 嵌入式控制系统。地址: 东北大学秦皇岛分校自动化工程系, 066004

电话: 0335-8052421; E-mail: mashuhua@vip.163.com

**Ma Shuhua** received BSc and MSc from Beijing Chemical University and Yanshan University in 1989 and 1998 respectively. Now she is an associate professor in Northeastern University in Qinhuangdao. Her research directions are intelligent network control and embedded control system.

Address: Department of Automation, Northeastern University in Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China

Tel: +86-335-8052421; E-mail: mashuhua@vip.163.com



赵一丁, 1982年和 1990年于西安交通大学获学士和硕士学位, 现为东北大学秦皇岛分校副教授, 主要研究方向为智能化网络测控技术, 复杂过程控制。

地址: 东北大学秦皇岛分校自动化工程系, 066004

电话: 0335-8052421; E-mail: zhaoyiding@vip.163.com

**Zhao Yiding** received BSc and MSc from Xi'an Jiaotong University in 1982 and 1990, respectively. Now he is an associate professor in Northeastern University in Qinhuangdao. His research directions are intelligent network control and complex control system.

Address: Department of Automation, Northeastern University in Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, Hebei, China

Tel: +86-335-8052421; E-mail: zhaoyiding@vip.163.com