

基于虚拟仪器技术的磁特性自动测试仪的研制

孙晓华¹, 任稳柱²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 西安高压电器研究所, 陕西 西安 710077)

Automatic Measurement of Magnetism Characteristics Based on Virtual Instrument Technology

SUN Xiao-hua¹, REN Wen-zhu²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710077, China)

摘要: 介绍了一种基于虚拟仪器技术的交流磁特性自动测试仪。该仪器解决了软磁材料交流磁特性的自动测试问题, 对实际工业应用中软磁材料磁性能的快速测试及优选具有重要的意义。详细介绍了仪器的硬件结构及软件设计方法, 最后通过实际测试结果证明该仪器具有良好的测试性能。

关键词: 虚拟仪器技术; 交流磁特性; 自动测试

中图分类号: TM936 **文献标识码:** B

Abstract: Based on virtual instrument technology, one of automatic measuring instrument for AC magnetism characteristics is presented, which solves the automatic measuring problem on the soft-magnetism material AC characteristics. It has significance in the process of quick testing and optimal choice of core used in the field of industry. Then the design method of the hardware and the software of the instrument is detailed in this paper. The field measuring result shows excellent performance of the instrument.

Key words: virtual instrument technology; AC magnetism characteristic; automatic measurement

1 引言

大型电力设备如电机、变压器和电抗器等的制造都离不开软磁铁心, 而铁心材料磁特性的差异会直接影响到设备的电气性能。因此, 在这些设备的设计、制造过程中, 必须首先对磁性材料的特性进行测量。通常情况下是测量磁性材料的交流磁滞回线和磁化曲线, 并由此获得一系列反映材料磁特性的参数, 如: 饱和磁感应强度 B_m , 饱和磁场强度 H_m , 剩磁感应强度 B_r , 矫顽力 H_c , 磁导率 μ 等。通过对参数的比较和分析, 选择出适用于制造相关设备的铁心材料。

传统软磁材料交流磁特性的测量方法常采用示波器法、铁磁仪法和采样法等, 这些方法普遍存在着

测量准确度低、硬件电路复杂、操作过程繁琐等缺点。笔者所介绍的虚拟交流磁特性测试系统, 在保留传统采样法原理的基础上, 充分利用了计算机技术的软硬件资源, 借助 LabWindows/CVI 软件平台, 完成对软磁材料交流磁特性的多参数、多功能、高准确度测试。

2 测试仪的结构和工作原理

2.1 系统结构

虚拟交流磁特性测试仪的系统结构见图 1。图中磁化回路由低频交流放大电源、电压电流变换器和磁化线圈 N_1 组成, 其中低频功率放大电源的信号由计算机控制数据采集卡的 D/A 口输出, 该输出信号经低通滤波器后, 输入到低频交流功率放大电源, 经低频交流功率放大电源放大后的电压信号, 为闭合磁化线圈 N_1 提供磁化电流, 该电流经无感取样电阻转换为电压, 经放大器 2 后进入数据采集卡的 A/D 端; 测试线圈 N_2 感应出的电压信号经放大器 1 后, 同样送入采集卡 A/D 口。计算机系统对上述两路送入 A/D 口的信号进行采集、分析, 最终实现磁特性曲线及相关参数的测试和显示。

2.2 工作原理

低频功率放大电源经电压电流变换器后产生足

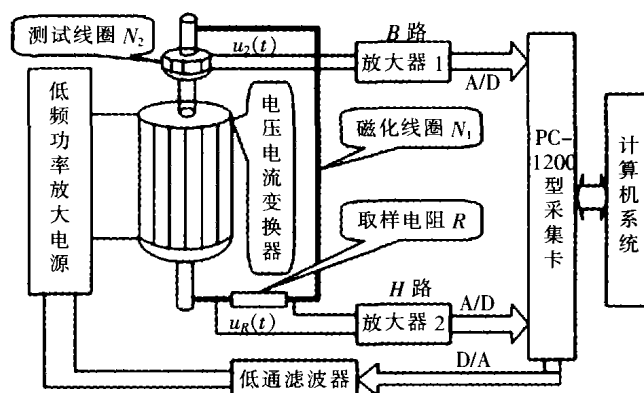


图 1 虚拟交流磁特性测试仪系统结构图

够大的正弦磁化电流 $i_1(t)$, 依据安培环路定律可知, 在磁化线圈 N_1 中产生的磁场强度 $H(t)$ 为:

$$H(t) = N_1 i_1(t) / l$$

式中: l 为测试样品的等效磁路长度。由于在磁化线圈中串入大功率无感取样电阻 R , 因此 R 两端的电压为:

$$u_R(t) = i_1(t) \cdot R = \frac{lR}{N_1} H(t) \quad (1)$$

对于样品测试回路, 测试线圈 N_2 感应到的电动势为 $e_2(t)$, 相应的电压 $u_2(t)$ 为:

$$u_2(t) = -e_2(t) = N_2 S \frac{dB(t)}{dt} \quad (2)$$

式中: S 为样品横截面积。将式(2)两端积分后有:

$$u'_B(t) = \int u_2(t) dt = N_2 S \int dB(t) = N_2 S B(t) \quad (3)$$

由式(1), 式(3)可见, u_R, u'_B 分别与 $H(t), B(t)$ 成正比关系, 因此通过对 u_2, u_R 的采集、分析, 可获得被测材料的磁特性曲线及相关参数。

若放大器 2 的放大倍数为 k_H, n 为采样点序号, 经数据采集后得到:

$$u_H(n) = k_H \cdot u_R(n) = k_H \cdot i_1(n) \cdot R = \frac{k_H l R}{N_1} H(n)$$

同理, $u_2(t)$ 放大后经数据采集, 并经数字积分后得到:

$$u_B(n) = k_B \cdot u'_B(n) = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} u_2(n) = k_B N_2 S \sum_{n=0}^{M-1} [B(n) - B(n-1)]$$

其中: k_B 为放大器 1 的放大倍数; M 为信号在一个周期内的采样点数。由此可得到 $u_H(n) - u_B(n)$ 的关系曲线, 即磁滞回线。此时可计算出一周期内的磁滞损耗 W 为:

$$W = \sum_{n=0}^{M-1} H \cdot \Delta B$$

根据饱和磁滞回线, 可求出样品在饱和时的饱和磁感应强度 B_m , 饱和磁场强度 H_m , 剩磁感应强度 B_r , 矫顽力 H_c , 磁滞损耗 W 及损耗功率 P 等磁性参数。

由磁化线圈中的磁化电压 U_1 和电流 I_1 (有效值), 可求得磁心线圈所消耗的功率 P 为:

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (4)$$

式中: φ_1 为 u_1 和 i_1 之间的相位差。又因 $U_1 = N_1 \cdot U_2 / N_2$, $I_1 = U_R / R$, 所以(4)式改变为:

$$P = \frac{N_1}{N_2 R} U_2 U_R \cos \varphi$$

式中: U_2 是测试线圈两端电压的有效值, U_R 为取样电阻两端电压的有效值, φ 为 U_2 和 U_R 之间的相位差。这里需要指出的是, 由于传输功率的变压器大多都在 B 路正弦的条件下工作, 所以国际上规定在

B 路正弦条件下测量软磁材料的交流参数, 以便数据的统一和比对。因此测试仪在计算所有参数时, 保持 B 路为正弦。

由大到小改变磁化电流的幅度(即改变 D/A 控制输出的磁化信号的幅值), 可获得一族磁滞回线, 求出各个磁滞回线的顶点值, 即可得到交流磁化曲线 $B_m - H_m$ 。由磁化曲线及磁导率定义 $\mu = B_m / H_m$, 可进一步求出磁导率曲线 $\mu - H_m$, 从磁导率曲线上可得到初始磁导率 μ_i 和最大磁导率 μ_m 等参数。

3 虚拟面板和数据处理软件的设计

3.1 虚拟面板设计

虚拟面板的设计区域可分 3 部分: ①参数输入区: 可输入测试仪工作频率、低通滤波器的截止频率、待测样品的内外径及厚度、激磁电流饱和值、磁化线圈匝数和测试线圈匝数等参数。②操作控制区: 可通过“测试曲线选择”选择测试功能, 用“激磁信号调节”旋钮可连续变化磁化电流的强度, “数据保存”按钮可以将测试结果存入数据文件。③结果显示区: 可显示所测试的磁特性曲线和相关的磁参数, 其中, 通过移动显示窗口上的红十字光标, 可方便地读出曲线上各点的坐标值。

3.2 数据处理软件的设计

(1) 在该测试仪中, 由于采集后的 B 路为正弦, H 路为非正弦, 因此为了保证两路波形不畸变失真, 同时又减小噪声信号对波形的影响, 为此在软件处理上先对采集数据进行正负幅度对称和平滑处理, 再利用过零法获取信号在一个整周期内的采样点数。在此基础上, 采用线性插值法对信号进行整周期重构, 从而获得一个采样点在一个整周期内均匀分布的信号。这是为了消除在下一步做 FFT 处理时出现的频谱泄漏现象。

(2) 在测试样品磁化所消耗的功率 P 的计算中, U_2, U_R 和 φ 计算的准确度尤为重要。在有限区间 $(t, t+T)$ 内绝对可积的任一周期函数 $x(t)$, 它的傅里叶级数展开式为^[1]:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin \omega t + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \omega t = \frac{a_0}{2} +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega t + b_n \sin \omega t) = x_0 + \sum_{n=0}^{\infty} x_n \sin(\omega t + \varphi_n)$$

其中: n 为各次谐波分量。则各次谐波幅值和初相位分别为:

$$a_n = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(k) \cos\left(\frac{2\pi n}{M} k\right);$$

$$b_n = \frac{2}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(k) \sin\left(\frac{2\pi n}{M} k\right);$$

$$x_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}; \quad \varphi_n = \arctan \frac{a_n}{b_n}$$

由整周期内的重构信号,通过上述公式编程计算,求出 U_2 和 U_R 真有效值、两路信号的相位差 φ 。

(3) 对于剩磁 B_r 和矫顽力 H_c 的准确计算,该测试仪采用线性插值法^[2]。首先在磁滞回线上找出 $H=0$ 处相邻的两点: (H_i, B_i) 和 (H_{i-1}, B_{i-1}) , 且 $H_i \cdot H_{i-1} < 0$, 则可计算出剩磁:

$$B_r = B_i - H_i \cdot \frac{B_i - B_{i-1}}{H_i - H_{i-1}}$$

同样,在 $B=0$ 处,找出相邻的两点: (H_j, B_j) 和 (H_{j-1}, B_{j-1}) , 且 $B_j \cdot B_{j-1} < 0$, 同理也可计算出矫顽力:

$$H_c = H_j - B_j \cdot \frac{H_j - H_{j-1}}{B_j - B_{j-1}}$$

4 测试实例和误差分析

4.1 测试实例

该测试仪在 50 Hz 下对给定环形样品进行测试。

表 1 测量结果与出厂值的比对

测量次数	B_m/T	B_r/T	$H_m/A \cdot m^{-1}$	$H_c/A \cdot m^{-1}$	$\mu_r/(\times 10^{-3} H \cdot m^{-1})$	$\mu_m/(\times 10^{-3} H \cdot m^{-1})$	W/W	P/W
1	1.159	0.883	372.3	106.5	2.22	10.73	692.2	852.4
2	1.155	0.876	371.5	106.9	2.36	10.69	685.2	850.9
3	1.154	0.881	371.4	107.1	2.15	10.70	699.7	853.2
4	1.158	0.873	372.1	106.8	2.28	10.68	682.6	852.2
5	1.154	0.879	371.8	107.2	2.41	10.69	692.3	854.8
6	1.160	0.875	372.0	107.0	2.29	10.71	690.5	853.0
6 次平均值	1.157	0.878	371.8	106.9	2.28	10.70	690.4	852.8
给定值	1.178	0.895	365.6	105.2	2.34	10.92	680.5	842.3
相对误差/%	-1.78	-1.90	1.69	1.62	-2.56	-2.01	1.40	1.20

然调整了等效磁路长度的计算式,但仍然存在样品中的磁场不太均匀的问题。此时根据安培环路定律可推导出测量磁感应强度时产生的相对误差 $\frac{(D_o + D_i)}{2(D_o - D_i)} \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right) - 1 = 1.83\%$ ^[5]。这是测量结果误差的主要来源。

(2) 取样电阻的数值误差对测量结果的影响。该测试仪用 6 只并联的水泥电阻作为取样电阻。为获得其准确的等效电阻值,采用 0.02 级 QJ36 直流双臂电桥,在多次等准确度测量条件下,消除热电势的影响并剔除粗大误差后,获得测量列的算术平均值 $\bar{R} = 24.218 \text{ m}\Omega$, 并以该值作为采样电阻的真实值参与计算。因此可以认为,取样电阻的误差对测量结果影响很小。

(3) 磁化线圈和测试线圈的绕制与匝数的选取^[4]—要保证样品充分磁化,二是要保证 B 路波形为正弦。为此在设计中,采集 B 路波形,并计算其失真度,当其值大于 1%,利用软件编程在 D/A 口产生带有高次谐波的信号,以调整 B 路波形的失真度,最终保证测试数据的统一和比对。

试。其中磁化线圈匝数 $N_1 = 1$, 测试线圈匝数 $N_2 = 120$ 。样品的外径 $D_o = 40 \text{ mm}$, 内径 $D_i = 25 \text{ mm}$, 环高 $h = 10 \text{ mm}$, 可见样品的尺寸参数不满足 $(D_o - D_i)/(D_o + D_i) \leq 1/9$ 的要求^[3]。为了减小误差,用 $D_h = (D_o - D_i)/\ln(D_o + D_i)$ 来代替平均直径 $\bar{D} = (D_o - D_i)/2$ ^[3], 确定样品等效磁路长度 $l = \pi D_h = 100.26 \text{ mm}$ 。取样电阻采用 6 只并联的 $0.15 \Omega, 20 \text{ W}$ 四端大功率无感水泥电阻,可得其等效电阻值为 $\bar{R} = 24.218 \text{ m}\Omega$ 。

以测量样品磁滞回线顶点数据 B_m, H_m 为例,按照“帮助”面板中给出的测量步骤,对样品进行 6 次连续测量,取其平均值作为最终测量结果。将测量结果与该样品的出厂值进行比对,测试结果见表 1。可见,各饱和磁参数的测量误差均在 3% 以内,其准确度高于传统的示波器法(5%~10%)和铁磁仪法(3%~5%)^[4]。

4.2 讨论

在实际测试中,引起测量结果误差的因素很多。对该测试仪来说,主要有以下几个方面。

(1) 由于样品尺寸的要求,在实际测试样品中虽

(4) 在软件处理上充分利用虚拟仪器强大的数据处理能力,采用相应的算法,提高了测量结果的准确度,实现了传统方法无法解决的问题。

5 结论

所设计的虚拟交流磁特性测试仪充分利用了计算机的软硬件资源,其测试结果的准确度和自动化程度等都优于传统的测试仪。

参考文献:

- [1] 刘君华. 现代检测技术与测试系统设计 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999.
- [2] 刘玳珩. 基于 8098 单片机的磁参数测量仪研究[J]. 磁性材料及器件, 1998, 29(6): 14-17.
- [3] 唐统一. 近代电磁测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1992.
- [4] 梅文余. 动态磁性测量[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.
- [5] 杨振坤. 软磁铁心磁性性能的自动测试[J]. 电测与仪表, 2001, 38(5): 19-21, 43.

作者简介: 孙晓华(1965-), 女, 四川人, 工程师, 主要从事测控技术与仪器、智能仪器设计、电磁测量等研究工作。