

# 数字示波器和宽带功率放大器构成的 磁化曲线 BH 分析仪

## 1 软磁材料的测量

磁性元件变压器和电感在开关电源和其他的电子设备里面大量使用。磁性元件主要由采用软磁材料的磁芯和线圈构成。软磁材料的性能决定了变压器和电感的性能。目前常用的电桥只能测量在小信号下的磁性元件的性能：电感量和 Q 值，不能直接反映磁性元件所用的磁性材料的真实性能。

目前能够测试磁性材料的全面参数的仪器只有磁化曲线 BH 分析仪。

BH 分析仪可以测试软磁材料在磁化过程中磁感强度 B 与磁场强度 H 之间关系的一系列 BH 曲线。通过分析这些曲线，可以得到磁性材料在不同的激励频率下的磁参数  $B_m, H_m, B_r, H_c$ ，初始磁导率  $\mu_a$ ，磁芯损耗  $P_c$ ，如下图 1

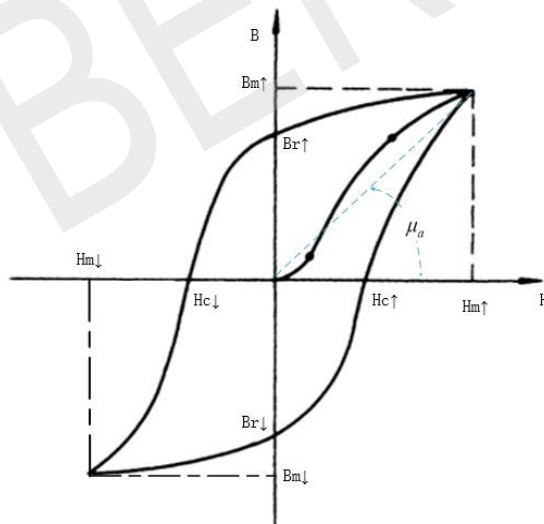


图 1 BH 曲线

BH 分析仪是一种昂贵的精密仪器，价格高达数十万元人民币。一般的企业、大学和研究机构很少拥有 BH 分析仪。仪器的缺乏使得这些单位对磁性元件的研究和教学工作停留在书本上的知识，或者用电桥进行简单的测试。

因此本文介绍的一种低成本的 BH 分析仪具有很大的实用价值。

## 2 数字示波器和宽带功率放大器构成的磁化曲线 BH 分析仪

BH 分析仪是由激励信号源、宽带功率放大器、被测磁性元件的电压和电流信号处理电路、对应的 AD 采样和软件处理模块构成。

由于目前数字示波器的功能和价格已经非常出色,我们不但可以利用它来实现 AD 采样,而且也可以使用数字示波器内部带有的信号源作为激励信号源。这样构成一套 BH 分析仪变得很简单,只要外加一台宽带功率放大器、被测磁性元件的电压和电流信号处理电路和软件处理用 PC 即可。如图 2 所示的框图

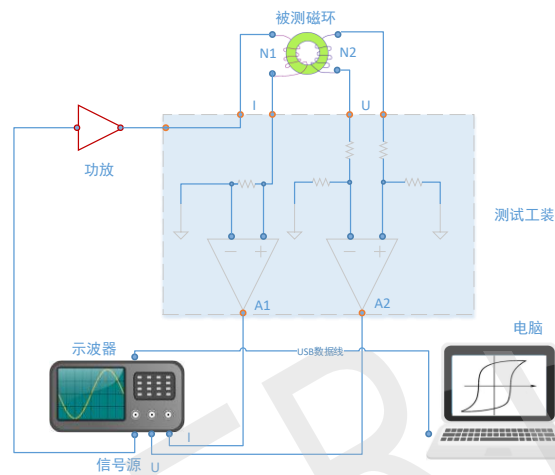


图 2 BH 分析仪框图

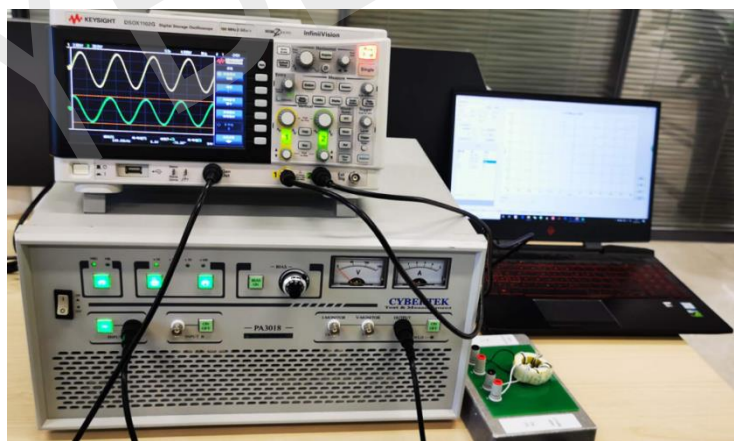


图 3 BH 分析仪实物构成图

图 3 是实物图中,两通道数字示波器我们选择了美国是德 (KEYSIGHT) 公司的 DSOX1102G, 这是一款入门级的示波器, 面板上还有一个输出口可以产生 20M 的正弦波信号, 正好作为激励信号源。

由于 BH 分析仪测试磁化曲线时，磁性元件需要用高频大电流进行激励才能达到真实的工作条件，所以对宽带功率放大器的功率带宽和输出电压电流能力要求很高。宽带功率放大器我们选择了知用（CYBERTEK）公司的 PA3018 功率放大器。它的最大输出能力是 260VA，功率带宽高达 1M，非常适合用来推动磁性元件的测试。

被测的磁性元件一般做成一个环形磁芯试样。在磁芯上我们绕两组线圈，分别是原边和付边。两个线圈连接到测试工装的 4 个接线柱上。被测磁性元件的原边电流 I 和付边电压信号 U 使用差分放大后输出到两通道数字示波器。

参考示波器厂家提供的编程手册，编写程序通过 USB 接口从示波器读取波形数据。然后根据数学公式，输入被测磁环的物理参数，转换成 BH 曲线。

工作的时候，只要调整信号源的频率和幅值，就可以控制曲线的 B 和 H 的最大值，并进一步计算磁环的损耗等指标。

### 3 BH 曲线的计算公式

我们设被测磁环的原边匝数 N1, 电流 i1, 付边匝数 N2, 电流 i2

那么  $H = N1 \cdot i1 / L$ ，其中 N1 是输入线圈的匝数；i1 是输入线圈的电流，单位是 A；L 是被测磁环的平均磁路长度，单位是 m；H 的单位是 A/m。

$$B = \varphi / S = \frac{1}{N2 \cdot S} \int U2 dt$$

其中 S 是被测磁环的截面积，单位是  $m^2$ ；N2 是输出线圈的匝数；U2 是输出线圈两端的电压，单位是 V；B 的单位是 T。

$$H_m = \frac{|H_m \uparrow| + |H_m \downarrow|}{2} \quad H_c = \frac{|H_c \uparrow| + |H_c \downarrow|}{2}$$

$$B_m = \frac{|B_m \uparrow| + |B_m \downarrow|}{2} \quad B_r = \frac{|B_r \uparrow| + |B_r \downarrow|}{2}$$

$B_m$  是最大磁通密度，单位是 T； $H_m$  是最大磁场强度，单位是 A/m。

$$\mu_a = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}$$

其中  $\mu_0$  是真空磁导率， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  亨利/米。 $\mu_a$  是初始磁导率。

$$P_c = \frac{N1}{N2} \times \frac{1}{T} \times \int_0^T i1 * U2 dt$$

其中  $P_c$  是磁芯损耗，单位是 W。

$$VA = \frac{N1}{N2} \times i_{1RMS} \times U_{2RMS}$$

其中  $i_{1RMS}$  是  $i1$  的有效值， $U_{2RMS}$  是  $U2$  的有效值，VA 是视在功率，单位是 VA。

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{P_c}{VA}\right)$$

其中  $\theta$  是相位角，单位是度。

## 4 测试结果

为了验证本设计的测试精度，我们采用相同的试样和测试条件，对比本设计和日本 IWATSU SY-8232 型 BH 分析仪的测试结果。

	Bm(mT)	Hm(A/m)	$\theta$ (deg)	Pc(W)	$\mu a$
SY-8232	298.38	99.619	82.045	0.10502	2383.5
本方法	296.292	100.142	82.392	0.1046	2354.2

样品 G17 测试结果对比(10kHz,Hm 目标值 100A/m)

	Bm(mT)	Hm(A/m)	$\theta$ (deg)	Pc(W)	$\mu a$
SY-8232	186.69	99.967	64.952	0.30641	1486.1
本方法	190.302	97.020	64.441	0.3284	1561

样品 grey18 测试结果对比(10kHz,Hm 目标值 100A/m)

	Bm(mT)	Hm(A/m)	$\theta$ (deg)	Pc(W)	$\mu a$
SY-8232	12.964	200.01	89.272	0.0516	51.58
本方法	13.205	200.419	89.126	0.0631	52.4

样品 K27 测试结果对比(100kHz,Hm 目标值 200A/m)

	Bm(mT)	Hm(A/m)	$\theta$ (deg)	Pc(W)	$\mu a$
SY-8232	33.942	300.16	79.215	7.5164	89.984
本方法	34.480	295.942	79.396	7.394	92.7

样品 Y40.9 测试结果对比(100kHz,Hm 目标值 300A/m)

## 5 总结

本方法的优缺点:

- 性价比很高,也能够达到一定测试精度。
- 示波器采样数据是 8 位的。在没有标定的前提下,最终数据的误差大约是 5%以内,对于一般的应用应该足够了。
- 受限于硬件条件,相位精度不够高。当频率比较高的时候(比如超过 200kHz),或者磁环的相位角  $\theta$  接近 90 度的时候,用这种方法计算的损耗误差相对比较大。

CYBERTEK