

# 软磁磁芯高激励条件下的损耗测量技术

## Core Loss Measurement Technology for Soft Magnetic Element under High Exaction

林颖瑞, 王红霞, 孙俊超

安博磁商贸(北京)有限公司, 北京 102209

**摘要:** 本文对软磁材料在高激励条件下的交流损耗测量技术进行了探讨, 尤其是对超大尺寸的低磁导率金属磁粉芯材料的损耗测试, 以及在直流偏置下的磁芯的损耗及BH曲线测试方法进行了介绍。

**关键词:** 软磁磁芯的交流磁性能, 损耗, 磁滞回线, 直流偏置, 损耗测试仪

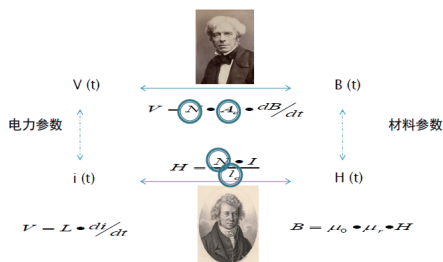
### 0 引言

软磁材料高激励条件下呈现非线性使得测量技术成为材料创新和电感设计的关键技术。了解测量系统的性能和理解测量数据的分析有助于功率电子设计人员对软磁材料和磁芯的认识, 以及帮助材料研发人员兼顾材料运用考量。先进测量系统的首要要求是自动化测试, 排除人为干扰因素; 其次是测量过程要快速, 避免测量过程中产生自热, 间接影响到被测物的温升, 从而产生系统误差; 其三是准确度, 主要体现在同样被测物, 同样测量条件, 同样绕组条件下测量数据的重复性。

随着直流电网发展趋势, 感性元件设计要兼顾直流偏置条件下, 磁性参数的测量成为功率电子设计者越来越关心的题目。材料革新来自于功率电感, 高功率密度, 高效率是推进研发的动力, 大电流意味着低导磁率, 高效率指的是磁性材料及器件的低损耗。而只有直流偏置条件下的励磁电流才是磁芯损耗的根本原因。

综合以上几点对于软磁材料在高激励条件的测量需求, BsT 系统提供了相应的解决方案。

### 1 测量原理和现有国际电工委员会标准



依据国际电工委员会 62044-3, 测试损耗有以下各种方法:

- 1) 共振法
- 2) 乘积法

伏安乘法 (例如市场上常见的以 Clark-Hess 功率仪为基础的系统)

示波器 (时域) 乘积法 (例如 BsT-2, BsT-2 Pro BH Loop Analyzer)

示波器 (频域) 乘积法 (例如 Iwatsu SY-8258)

电桥分析法

矢量分析法

- 3) 反射测量法
- 4) 散热测量法

现将常见的几种软磁材料交流磁性测试设备为例, 从测量绕组绕线方式来对测试精度进行分析和研究。

### 2 测量绕组及方式与测试精度的关系

不同品牌和种类的软磁磁芯损耗测量系统, 具有不同的样品测试绕线的接线方式。

例如以 Clark-Hess 功率仪为基础的系统, 采用的是单线圈绕线法对样品进行测试绕线的接线方式; 而日本 IWATSU 以及安博磁所代表的德国 BsT-X BH 分析仪则采用了单线圈和双线圈绕线法对样品进行测试绕线的接线方式。

本文探讨了测试绕组方式对磁芯损耗精度的影响, 采用何种测试绕组方式取决于磁芯阻抗特性 (等效损耗电阻、

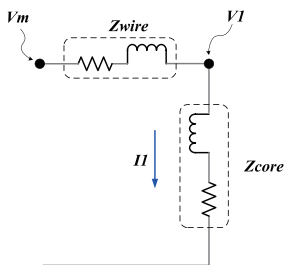
电感)与铜绕线阻抗特性(等效损耗电阻、漏电感),选择不同的绕线接线方式将影响所耗费的准备时间与期望的精度,理解各种接线方式有助于功耗量测工作的进行。

(1) 单线圈绕组测试法:

典型的设备型号:

例如 Clark-Hess 的功率仪为基础的系统,以及德国 BST-1 BH Analyzer

下图为被测元件的单线圈绕组的示意图。



$Z_{core}$  为磁芯本身的阻抗,  $Z_{wire}$  为磁芯上绕组铜线产生的阻抗。测试到的被测元件的损耗由两部分组成:磁芯的损耗(铁损)+绕组产生的损耗(铜损)

当对被测元件磁芯进行磁化时,在激励电流或磁场  $H$  的线性区下,被测元件上的电压为  $V_m$ ,其中磁芯两端的电压  $V_1$  为:

$$V_{1(peak)} = (2\pi f) \times N \times A_c \times B_p$$

其中:  $A_c$  为磁芯的有效截面积参数,  $N$  为单线圈的绕线的匝数,  $f$  为测试频率(Hz),  $B_p$  为测试时的峰值磁通密度(T)。

磁芯损耗的理论值为:

$$P_v = \frac{1}{T} \int V_1(t) * I_1(t) dt \quad (1)$$

当  $Z_{wire}$  远小于  $Z_{core}$ , 则  $V_m = V_1$ , 所实际量测值为:

$$P_v = \frac{1}{T} \int V_m(t) * I_1(t) dt \quad (2)$$

此时采用单线圈绕线进行测试时,测试工作简单并且效率高。对于一般功率铁氧体磁芯、非晶、纳米晶磁芯的测试来说,由于其磁导率高,测试时绕的匝数少,磁芯的阻抗远远大于绕线的阻抗,铜线的损耗往往可以忽略不计。适合于采用单线圈绕线的设备来进行损耗测试。

但是,当  $Z_{wire}$  不是远小于  $Z_{core}$  时,  $V_m > V_1$ , 并且其差异无法忽略不计。

此时以  $V_m$  来调整激励电源时将造成磁芯上的实际测试  $B_p$  小于所设定的测试条件,使得所测试到的功耗  $P_v$  值(铜

损+铁损)偏小,而所测的功耗  $P_v$  因含铜绕线损耗而使所量测功耗  $P_v$  高于实际磁芯功耗值  $P_{cv}$ 。

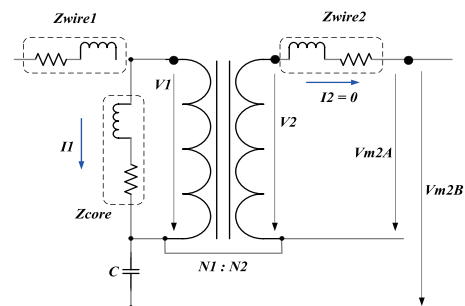
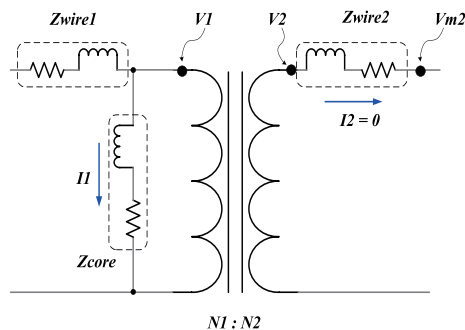
对于一般金属磁粉芯的测试来说,由于其磁导率低,测试时绕的匝数多,绕线的阻抗增大,有时甚至高于磁芯的阻抗,铜线的损耗占了较大的比例,不可以忽略不计。采用单线圈绕线的设备来进行损耗测试,将产生非常大的误差,即使是人工估算由电阻去除铜线的损耗,所产生的不确定性也是非常大的。铜损估算往往以直流电阻为基础,即使考量到涡流和肌肤效应也非常困难有个准确的估算。因此来说,单绕组法的损耗测试接线方法不被推荐。而需要采用双线圈绕组测试法。

(2) 双线圈绕组测试法:

典型的设备型号:

BST-X 系列 BH Analyzer, IWATSU SY- 系列

双线圈绕组绕线的等效电路如下图,被测元件上的阻抗有3个:磁芯的阻抗  $Z_{core}$ , 绕组1的阻抗  $Z_{wire1}$ , 绕组2的阻抗  $Z_{wire2}$



当  $Z_{wire}$  不是远小于  $Z_{core}$  时:

绕组2上的电压  $V_2$  为:  $V_{2(peak)} = (2\pi f) \times N_2 \times A_c \times B_p$

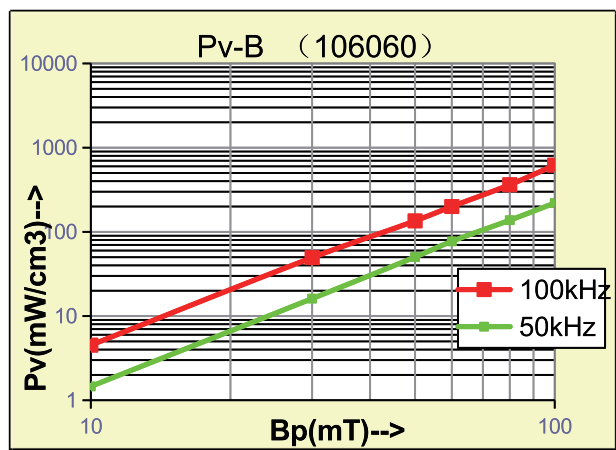
绕组1上的电压  $V_1$  为:  $V_1 = (N_1/N_2) \times V_2 = (N_1/N_2) \times$

$V_{m2}$

实际量测的损耗值为:

$$P_v = \frac{1}{T} \int \left(\frac{N_1}{N_2}\right) V_{m2}(t) * I_1(t) dt \quad (3)$$

该方法在次级绕组边测量得到的励磁电流，不受初级绕组边铜线绕组的影响，可以排除掉铜绕线的损耗，因此适合于绕线匝数多的、低磁导率的磁材测试，尤其是金属磁粉芯的损耗测试。

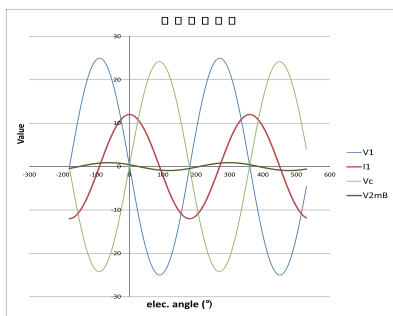


FeSiAl 磁粉芯 (磁导率 60) 的 BsT-2 双绕组法测试损耗曲线

(3) 双绕组线圈 + 一次侧串联电容测试法

当待测物相角接近 90° 时，电压与电流测量时间误差造成的相角偏差将造成较大的功耗误差，以下图为例，原始 V1, I1 相位 89.5°，当选择合适低损耗电容补偿后，以 (4) 取代 (1)，

$$P_v = \frac{1}{T} \int V_m 2B(t) * I_1(t) dt \quad (4)$$



Vm2B, I1 相位可降至 76° 以下，这时相角偏差对功耗的影响将大大缩小。

以此接法可尽量排除相角偏差造成的功耗误差，但除接线较为复杂外，还需选择合适的电容，另外在量测硬件上亦需加一个额外的滤波器频道以便观察 Vm2A 是否达到测试所需的峰值磁通密度。

(4) 三线绕组法 — 外加直流偏置下的损耗测试法：

典型的设备型号：BsT Pro BH Analyzer

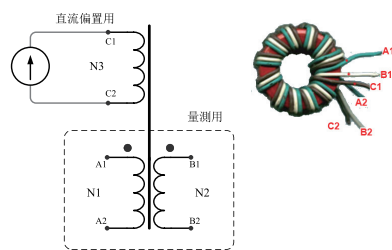
除了常用的双绕组外，再加上了直流偏置绕组线圈

N<sub>3</sub>。

N<sub>3</sub> 用来产生偏置磁场强度 H<sub>dc</sub>，所需的偏置电流 I<sub>dc</sub> 为：

$$I_{dc} = H_{dc} * L_e / N_3$$

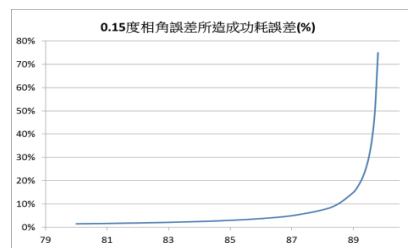
当控制偏置电流达到所需的数值后，即可依原方式测量测功耗、增量导磁率，以及不对称的磁滞回线。这样得到的功耗数值可以用来描述高频纹波在正弦基波条件下软磁材料的功耗。也是损耗图谱 (loss map) 概念中的重要组成部分。



3 待测物相角对测试精度的影响分析

(1) 损耗仪精度期望值与待测物相角密切相关

A. 以采用示波器法频域采样的 Iwatsu SY-8218/8219 为例，其相角精度规格标准为：±0.15°，由于这 0.15° 的相角偏差，对应不同待测物相角而产生的功耗偏差如下图所示。

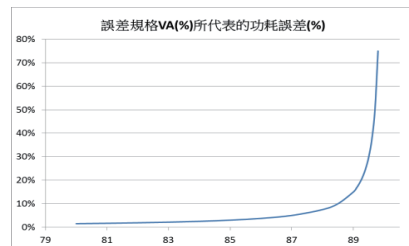


当相角为 80° 时，待测物对应功耗偏差达 1.5%

当相角为 89° 时，待测物对应功耗偏差达 15%

当相角为 89.5° 时，待测物对应功耗偏差达 30%

B. 以采用伏安法的 Clark-Hess 2335A 为例，其功耗精度规格标准为：±0.2%VA + 10 digital，由于这 0.2%VA 的偏差，对应不同待测物相角而产生的功耗偏差如下图：



当相角  $80^\circ$  时，待测物对应功耗偏差 1.13%

当相角  $89^\circ$  时，待测物对应功耗偏差 11.5%

当相角  $89.5^\circ$  时，待测物对应功耗偏差 22.9%

(2) 功耗量测仪的精度重复性也与待测物相角密切相关：

以安博磁 BsT-2 交流损耗测试仪为例，对具有不同相角的磁芯进行损耗测试的结果如下：

A) . 20W 47ohm+/-1% 薄膜功率电阻：相角接近  $0^\circ$ ，单绕组线圈接线法：

	$\mu$ (平均值)	$3\sigma$ (3倍标准差)	$3\sigma/\mu$ (%)
50KHz	6764.02	14.2	0.21%
100KHz	6735.57	13.52	0.20%

B) . 铁氧磁芯 ETD39/20/13-3F3：相角约为  $84^\circ$ ，单绕组线圈接线法：

	$\mu$ (平均值)	$3\sigma$ (3倍标准差)	$3\sigma/\mu$ (%)
100KHz/100mT	1476	13.9	0.94%
200KHz/50mT	633.7	12.1	1.91%

C) . 铁硅合金粉芯 KAH184-060：相角约为  $88.6^\circ$ ，双绕组线圈接线法：

	$\mu$ (平均值)	$3\sigma$ (3倍标准差)	$3\sigma/\mu$ (%)
50KHz/50mT	3655.35	74.12	2.03%
100KHz/25mT	2167.73	55.73	2.57%

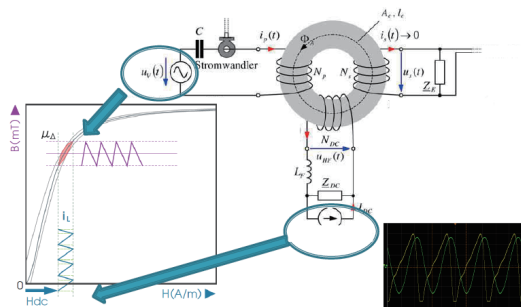
由于测量结果精确度和被测器件有关，尤其是相位角，所以对于测量系统性能的评估，往往是仅限于对于测量结果的重复性的考量。

#### 4 大尺寸低磁导率磁芯的损耗测试解决方案

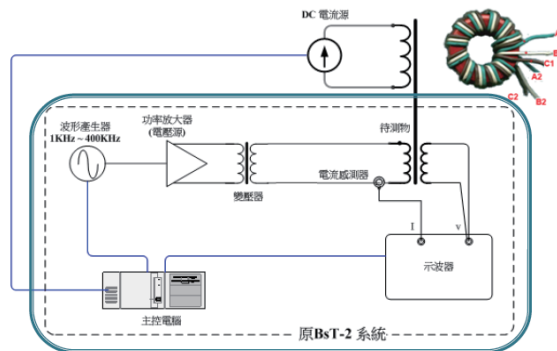
(1) 直流偏置条件下的损耗测量：

三线圈绕组法，典型的设备型号：BsT-Pro BH Analyzer

实际使用中常常遇到尺寸大、磁导率低的磁粉芯的损耗难以测试，并且在有很大的直流偏置下工作，其真实的损耗更加难以测试和估计。因此实际地测试大尺寸磁粉芯的损耗，比用 27mm 小磁环来表征，将更加真实准确。



BsT-Pro 三线圈测量原理图

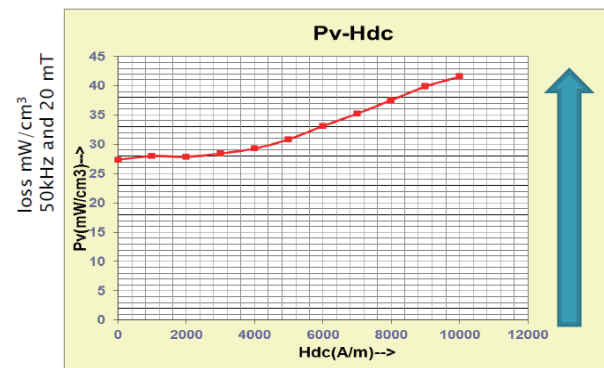


BsT-Pro 三线圈测量电路图

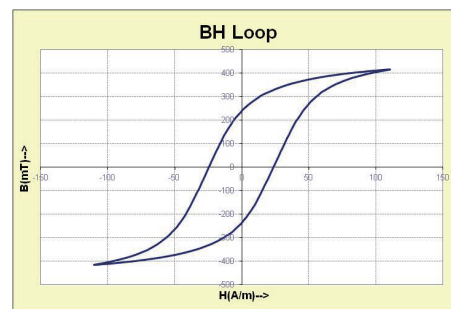
BsT-Pro BH Analyzer 完美地解决了对于这个市场需求的回答。在原先的 BsT2 系统上，通过增加直流电源流过第三绕组，可以定量地把直流偏置的条件增加到测试软件界面。成功地解决了直流偏置条件下大信号的测量任务，在测量功耗同时，还可以实现直流偏置条件下的增量导磁率，以及不对称的磁滞回线的定量精确描述。

BsT-Pro 直流偏置条件下的损耗测量结果：

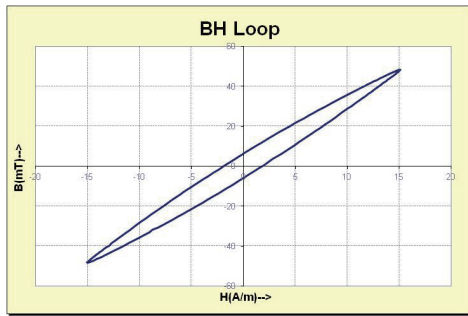
(1) 环形磁粉芯外径 25 导磁率 60 (106060) 直流偏置损耗测量结果：



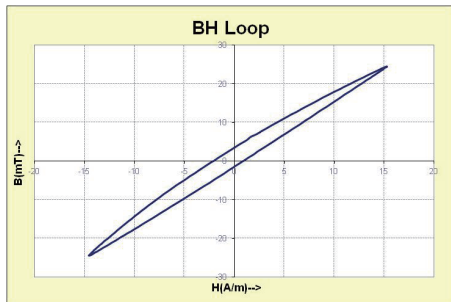
(2) 功率铁氧体的交流磁滞回线随直流偏置电流的变化：



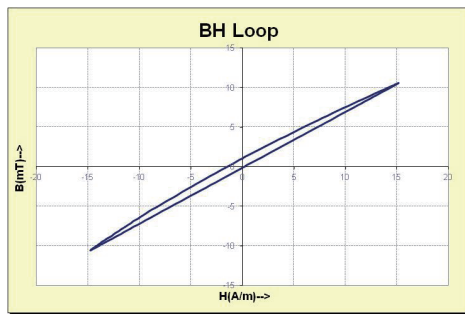
25kHz,  $H_{AC} = 100A/m$ ,  $DC = 0A/m$



25kHz,  $H_{AC}=15A/m$ ,  $H_{DC}=0A/m$

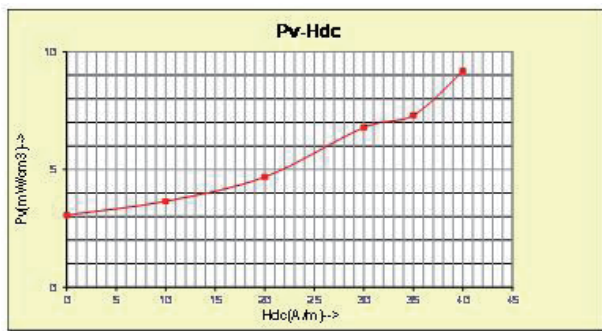


25kHz,  $H_{AC}=15A/m$ ,  $H_{DC}=40A/m$



25kHz,  $H_{AC}=15A/m$ ,  $H_{DC}=80A/m$

铁氧体磁芯的损耗随着直流偏置递增时的变化情况为：在室温 25kHz, 20mT

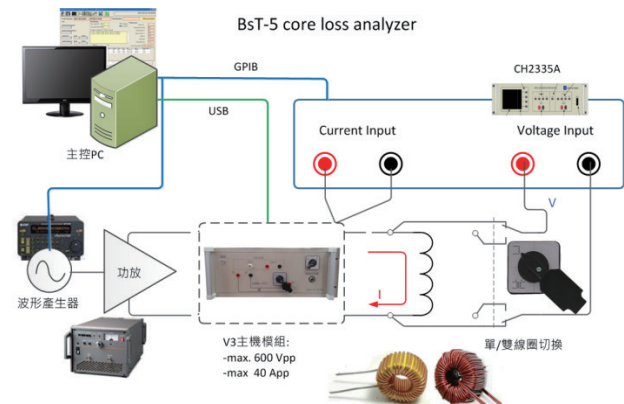


(2) 超大磁芯的伏安法功耗自动测量平台：BsT-5 / 6/7 损耗测试系统

安博磁成功地将现在铁氧体、磁粉芯行业中常用的手

动测试模式的伏安乘法损耗测试系统进行了升级改造，配上自动测试主机、电脑及 BsT 测量操作软件，配置了双绕组的样品测试夹具，组合成为了自动化的测量平台。直接把电压和电流积分得出功耗数值显示于电脑屏幕，自动测量平台输入给软件界面。这是隶属于 IEC62044/3 伏安乘法法的测试方法。通过合理驱动被测电感，完善了测量系统功能，并提升了激励能量，能够测试具有更大有效截面积的、低导磁率的合金磁粉芯，以及超大体积的铁氧体磁芯。目前磁粉芯测试范围可以达到 521026（磁导率 26 的磁芯）测到 50kHz, 50mT；400026 可测到 50kHz, 100mT。

成功地将伏安乘法提升到了不含绕线损耗的、精确的、快速的、自动化的损耗测试平台，损耗测试结果与日本岩崎的数据具有可对照性。成为世界上唯一可选的能够全自动精密测试超大磁粉芯的损耗测试设备。从而从根本上摆脱了以前需要根据样环损耗密度和体积来进行推算，来作为大功率电感设计的被动局面。在软磁材料生产企业已经投资了的测试设备的基础上，可以对原有测试设备进行升级换代和改造，从而达到符合市场和运用的要求。



BsT-5 损耗测试系统的构成

典型的设备型号有：

适合于合金磁粉芯产业的 BsT-5 损耗测试系统：

由美国的 CH2335A、日本的 NF 信号发生器及功放，配合安博磁的德国 BsT 测试主机和测试软件，以及电脑和数据库组成。

适合于铁氧体磁芯产业的 BsT-6 损耗测试系统：

由美国的 CH2335、德国的 DrHubert 功放、国产的 Rigol 信号发生器，配合安博磁的德国 BsT 测试主机和测试软件，以及电脑和数据库组成。

下转151页