

# 磁芯高频功耗及测量值对比分析

茅柳强, 翟丽红, 刘九皋

浙江桐乡市耀润电子有限公司, 桐乡 314504

**摘要:** 介绍了高频功率铁氧体材料的制作要点和性能测量仪表的特点, 公布了18年前, 使用频率高达5M的宽频功率铁氧体材料试环在日本岩崎公司的测量数据及误差分析, 通过对Pc90级材料试环13年前与现在的性能对比数据, 了解几家仪表之间的差别以及各自精确度和测量误差, 同时对材料自然陈老后性能变化趋势作了粗浅探讨。

## 1 引言

近来无线充电市场火热, 对磁芯高频功耗有了更高要求, 比如要求按 Pc50 材料 500kHz、50mT 条件测试, 虽然耀润电子、江粉安磁及横店东磁较早就推出了兼顾高频特性的 YR950 等材料, 但是一直鲜见 500kHz 以上高频功耗测量的介绍文章。本文披露十多年来珍藏的一些实测数据, 即: 将同一磁芯在同一仪表多次测试、相同或不同型号仪表对比测试, 以及多年后相同条件再次测试的数据进行粗浅分析, 试图对相关测试仪表的稳定性、重复性及测量误差作些探讨, 对材自然老化后电磁特性的变化给出评估, 旨在抛砖引玉, 谢谢分享。

## 2 高频低功耗材料制作要点

降低铁氧体材料的各种电磁损耗是目前生产部门的一项艰巨而繁重的任务, 它直接关系到铁氧体磁芯元件的稳定性指标。为保证设备系统稳定、可靠、高效运行, 准确测量软磁铁氧体材料及磁芯性能参数至关重要, 因为它是各种电子变压器、电感器等软磁铁氧体器件设计的依据。

通常频率较低时, 认为磁芯损耗主要由绕组损耗和材料的磁滞、涡流、后效(剩余)损耗等所构成。但当频率较高时, 许多因素如绕组中的涡流、由分布在线匝间的电容和绕组与磁芯间的电容共同反映出来的总分布电容, 绕组绝缘物、线圈骨架、密封及灌注材料以及磁芯介质中的介质损耗等等, 都会强烈地表现出来。

不同频率范围各种损耗所占比例不同, 利用 SY8232 BH 分析仪, 可在一定频率和磁通密度下对其进行分离。低频下, 铁氧体材料以磁滞损耗为主, 其值正比于磁滞回线的面积和频率的乘积, 即与矫顽力  $H_c$  的大小相关, 配方中  $Fe_2O_3$  含量增加, 可使  $H_c$  降低, 因而磁滞损耗也相

应降低。而高频下剩余损耗占主导地位, 这种损耗是由畴壁共振产生的, 通过细化晶粒、减少畴壁、抑制畴壁共振, 从而降低剩余损耗。另外, 配方中  $Fe_2O_3$  含量增加, 或者  $ZnO$  含量减少, 导致初始磁导率下降, 使  $\mu \sim f$  特性的共振频率移向高端, 也可抑制剩余损耗。

涡流损耗与频率的二次方成正比, 通过在晶界形成高电阻层可减小涡流损耗。一般认为涡流损耗与电阻率成反比。在前述增大  $Fe_2O_3$  含量以降低磁滞损耗和剩余损耗的措施中, 涡流损耗也可以随之降低。虽然, 随着  $Fe_2O_3$  含量的增加,  $Fe^{2+}$  的生成量也随之增加,  $Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+}$  之间的电子迁移加剧, 会造成一定温度下电阻率下降, 但是随着  $Fe_2O_3$  含量的增加, 功耗随温度变化  $P_{cv}-T$  曲线的谷点向低温移动, 这个温度点(谷点)的磁心损耗值最小, 因而其直流电阻率会相应最大。

从以上简要分析, 不难看出, 要作到高温谷点、高频损耗值又小的宽温宽频低功耗高  $B_s$  材料何其艰难, 因而准确测量软磁铁氧体材料及磁芯器件的高频功耗值及评估误差则尤为重要。

## 3 高频低功耗材料的测量标准及仪表

随着科学技术创新和技术进步, 新的测量方法标准不断涌现, 原有的测量方法也不断被修改和补充。这就是世界上公认的权威技术标准, 即国际电工委员会发布的 IEC 标准。20 世纪 70 年代制定的 IEC367-1 通用电感器和变压器磁芯测量方法标准于 1982、1984、1992 年被不断补充和修改。所以, IEC 磁性测量技术标准得以长期保持其先进性和实用性, 广为世界各国广泛接受和应用。

此后, 国际电工委员会又废止了 IEC367-1, 更新发布了:

IEC62044-1 软磁磁芯测试方法 第 1 部分总规范

IEC62044-2 软磁磁芯测试方法 第 2 部分低励磁电平下的磁特性

IEC62044-3 软磁磁芯测试方法 第 3 部分高励磁电平下的磁特性

此举促进了软磁测量技术进步和仪器设备的不断完善,其中高励磁电平下的磁特性更规范了高频大功率软磁铁氧体材料功耗的测量。

国际上,软磁测量专用仪器设备的开发生产主要集中在美、德、日本少数几个先进工业化国家。例如,HP4284A LCR 测试仪(美国),Agilent4294A 精密阻抗分析仪(美国、日本),Agilent4291B RF 阻抗/材料分析仪(美国、日本),CH2330 取样数字 V-A-W 表(美国),CH2335 取样数字 V-A-W 表(美国),C-750B-H 测试仪(德国),SY-8232B-H 分析仪(日本)等。这些仪器代表了目前世界上软磁测试仪器技术水平。

日本岩崎通信株式会社的 SY-8232 交流 BH 回线测试仪,使用频率为 10Hz~10MHz。其测量均由计算机控制,自动显示和打印出磁滞回线和 Bs、Br、Hc, B 和 H 测量误差 2%,SY-8216 型 B-H 分析仪,配置的功率源为 50Hz~1MHz、200W。型 B-H 分析仪配置的功率源为 10Hz~10MHz、800W。此外,还推出了 SY-8218、SY-8258 型等。

我国发布的 GB9632-88 通信用电感器和变压器磁芯测量方法,等同采用了 IEC367-1 (82) 标准。1992 年,IEC367-1 标准补充规定了测量功耗的有效值法。按照这些标准方法,制成的多种测量装置(系统)和数字化测试仪表,基本上满足了磁芯生产厂的需求,推动了我国功率铁氧体材料及磁芯生产的发展。

以前,由于磁芯使用频率不高,国内磁性材料厂普遍采用谐振法。按照图 1 电路,装配成测试系统。

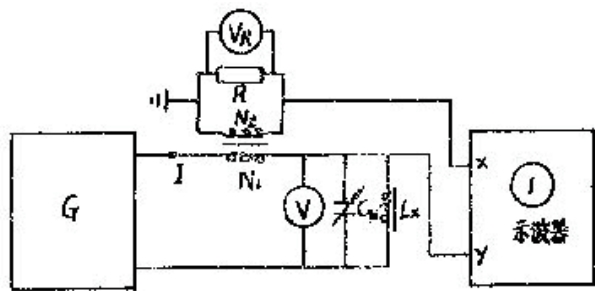


图 1 谐振法测量电路

图 1 中,被测磁芯线圈以与标准可变电容组成并联谐振电路。G 为功率信号源。 $N_1$ 、 $N_2$  及 R 组成电流 I 的测量电路,  $I = \frac{N_2 V_a}{N_1 R}$ 。在测量频率下,调节  $C_N$ , 使李沙育图形开在示波器一三象限成为直线时,发生屏联谐振。这时,电流 I 与电压 V ( $L_x$  上的电压) 同相位,即  $\cos\theta=1$ 。因此,被测磁芯总功耗 P 为:

$$P=VI\cos\theta=VI \quad (1)$$

从上式可以看出,相位角理想值为 90 度是不可能的,因为电压和电流波形同时为标准正弦波是不可能的。这是测量误差来源之一。

后来,GB9632 标准附录 J<sub>1</sub> 推荐了乘积电压表测量电路,如图 2 所示。

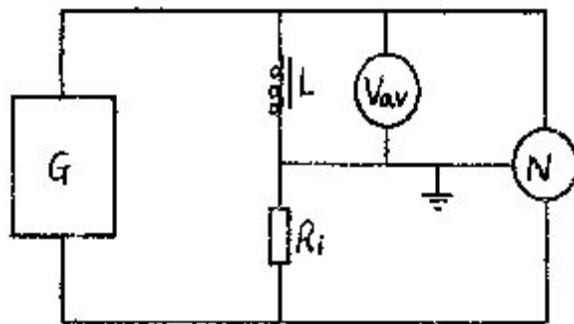


图 2 乘积电压表测量电路

图 2 中,无抗电阻  $R_i$  与磁芯上的线圈 L 串联。 $R_i$  上的电压  $mR(t)$  (用来测量通过 L 的电流  $i(t)$ ) 和 L 上的电压  $\mu L(t)$  分别接到乘积电压表的两个通道。则电压表指示两个电压瞬时值乘积的平均值,即磁芯功耗 P。因此,这种方法称乘积电压表法。

美国 Clazc-Hesse 公司的 CH258 V-A-W 表、CH2330 V-A-W 表、CH2335 V-A-W 表,采用了乘积法的原理,利用数字取样及计算机控制技术,使得电流、电压、功率测试结果自动数字显示。功耗测量不确定度不大于  $\pm 1.2\%$ 。

258 用运算放大器构成一个乘积响应电路,其输出为 V 和 A 乘积的瞬时值,再通过积分电路得到功耗;而 CH2330、CH2335 表与 258 的不同之处是采用了双通道采样技术,然后通过乘法和加法运算得到功耗。这两种方法都没有波形监视,却都按理想正弦波形的公式来计算  $V_{rms}$  值,同样这也是功耗测量误差来源之一。

岩崎通信株式会社的 SY-82 系列 B-H 分析仪采用双通道数字采样法, 借助傅利叶变换将采样获得的时间域数据转换到频率域计算功耗, 提高了测量的准确性, 同时还给出了功耗测量过程中的波形曲线和相应的磁滞回线图形。

时域采样的基本方法是双通道采样, 同时得到电流和电压信号, 经过数学处理, 得到 B 和 H。得到了在一定激励状态、一定温度和一定频率下磁滞回线, 在这一状态下所有磁性参数可以简易直观地表示出来。

信号源将一定频率的正弦波 (或者矩形波、三角波形等) 信号输出给功放, 由功放将信号根据要求把被测磁芯在规定时间内 (通常为 4s) 内调整到一定的激励状态, 同时获得电流和电压采样信号, 经过软件处理, 描绘出磁滞回线。磁滞回线的面积便是磁化一周的功耗。其它的一些物理参数如振幅导磁率、饱和磁通密度等也就可计算出来。所以,

目前岩崎通信株式会社的 SY-82 系列型 B-H 分析仪为多数磁芯生产厂家和用户通用。

在业界还未能对某一测量平台完全认同的情况下, 只有同一样品在同一测量条件下的系统重复性才是检验标准。按此思路, 我们作了如下对比测试试验。

#### 4 高频低功耗材料测试数据汇总

##### 4.1 相同磁芯不同仪表测试数据比较

简单分析 100 度功耗偏差:

(1) 如 B EE42/21/20 磁心, SY-8216 功耗为 343, SY-8232 功耗为 347;

(2) 13 号 EE42/21/20 磁心, CH2330 表功耗为 354, CH2335 功耗为 524;

(3) 1 号 EE42/21/20 磁心, SY-8216 功耗为 451, CH2335 功耗为 528。

表 1 2008 年 10 月 30 日在 NCD 公司 SY-8216BH 表测试数据

编号	磁心型号	测试条件	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )	
1	EE42/21/20	100kHz、200mT, 测试电压由 BH 仪自动计算	738	485	451	
B			623	374	343	
3			709	469	450	
4			EE56/28/21	821	456	391
5			EE65/32/27	847	539	456

表 2 2008 年 11 月 1 日用 CH2335 表测试数据

编号	磁心型号	测试条件	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
1	EE42/21/20	100kHz、200mT, E=104.3V	803	528	528
B			681	428	397
3			777	511	502
13			803	541	524
4	EE56/28/21	100kHz、E=78.6V	942	529	478
5	EE65/32/27	100kHz、E=71.3V	920	561	503

表 3 2008 年 11 月 19 日在长沙晶源公司 SY-8232BH 表测试数据

编号	磁心型号	测试条件	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
B	EE42/21/20	100kHz、200mT, 测试电压由 BH 仪自动计算	631	372	347
13			719	450	481

表 4 2008 年 11 月 24 日在风华微硕公司 CH2330 表测试数据

编号	磁心型号	测试条件	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
B	EE42/21/20	100kHz、200mT, 测试电压 102.8V	548	340	323
13			589	372	354

可见, SY-82 系列表之间数据相差较小, CH23 系列表之间数据相差较大, SY-82 系列表与 CH23 系列表之间数据相差更大。

#### 4.2 相同磁芯、相同型号仪表不同厂家测试数据比较

简单分析 100 度功耗偏差：

同为 CH2335 表, 在两个厂家对比测试, 去除两个偏差最大的, 10 对磁心 100 度功耗值偏差 2% 到 5%。

#### 4.3 相同磁环在日本和东磁相同型号 SY-8232BH 测试数据比较

高频低功耗试环比较测试数据

序号	$\mu_a$	PCV $mW/cm^3$ 500kHz, 50mT						
		25°C	40°C	60°C	80°C	100°C	100°C 东磁复测	120°C
东阳 DMR1.2k-1	1491	211.75	154.43	94.20	66.72	81.72	77.07	143.88
DMR1.2k-2	1433	201.45	147.73	87.15	53.66	72.48	81.69	131.95
DMR1.2k3	1463	196.86	142.45	82.28	52.64	72.01	68.40	126.61
DMR1.2k-4	1453	199.35	145.15	83.62	52.63	71.78	68.83	128.01
DMR1.2k-5	1890	108.31	81.42	70.12	96.86	141.42	139.51	198.63
TDKPC50-8	1775	173.15	141.46	112.55	109.40	130.18	127.96	175.01
TDKPC50-9	1812	169.43	137.53	110.85	106.80	124.75	122.62	167.58
TDKPC50-10	1701	177.76	143.48	113.66	110.03	130.96	128.91	175.11

测试日期: 2001.12.11 及 12.12  
测试地点: 日本岩崎公司本部(东磁复测 100°C 数据系东磁研究所)

表 5 2008 年 8 月 5 日在精研 (CH2335 表) 测试数据

编号	磁心型号	测试条件 ()	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
1	EE42 加长	100kHz 100mT E=31.3V	882	441
2			900	
3	EE55	100kHz 100mT E=46.9V	1049	505
4			1126	
5	EE66	100kHz 100mT E=71.3V	942	518
6			934	
7	EE70B	100kHz 100mT E=88.6V	954	549
8			932	

表 6 2008 年 8 月 16 日在中德 (CH2335 表) 测试数据

编号	磁心型号	测试条件 ()	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
1	EE42 加长	100kHz 100mT E=31.3V	841	459
2			821	
3	EE55	100kHz 100mT E=46.9V	940	479
4			1049	
5	EE66	100kHz 100mT E=71.3V	863	503
6			858	
7	EE70B	100kHz 100mT E=88.6V	841	494
8			870	

表 7 2008 年 10 月 24 日在精研 (CH2335 表) 测试数据

编号	磁心型号	测试条件 ()	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
11	EE42	100kHz 200mT E=104.3V	803	528	528
12			681		
15	EE55B	100kHz 100mT E=78.2V	966	532	510
16			966		

表 8 2008 年 10 月 26 日在中德 (CH2335 表) 测试数据

编号	磁心型号	测试条件 ()	Pc25°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc80°C (mW/cm <sup>3</sup> )	Pc100°C (mW/cm <sup>3</sup> )
11	EE42	100kHz 200mT E=104.3V	744	438	510
12			642		
15	EE55B	100kHz 100mT E=78.2V	919	595	548
16			921		

当年对测试数据比较和材料样环的分析

数据分析: 日本岩崎本部 SY-8232 功耗测试仪 100°C 功耗除 2# 环外, 均比东磁 SY-8232 表偏高约 2~6%。而岩崎本部测试过程中, 100°C 功耗值波动较大, 故重点测试达 24 次之多, 以上数据第取自各点多次重复测试平均值。

材料分析: 5# 环系东磁中央研究所 DMR1.2k 1# 配方, 常温功耗低, 25°C 时 108.31mw/cm<sup>3</sup>, 40°C~60°C 为 70~80mw/cm<sup>3</sup>, 但 80°C 以上则扶摇直上, 谷点在 60°C~70°C 间。  
1#~4# 环系 DMR1.2k 2# 配方, 谷点在 80°C 以上, 高温特性好, 虽然 60°C 以上优于 TDK 环及 PC50 标准, 但常温功耗必须向 1# 配方取经, 综合性能才可望超过 PC50 要求。

东磁材料组

2002-01-18

IE-817 #2001-12-11 15:17:18 SY-8232

Temp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
[TEMP]	25	1	Toyo	62.5	24.74	1547	0	1	5	5	0	1	0	#00: 32: 49#											
1	25	500	Bm	50	49.94	5.189	26.7133	2.8495	0.331051	214	331.05	1487.55	0.1039088	84.1692											
2	25	500	Bm	50	49.94	5.133	26.6799	2.9733	0.329434	213	329.43	1489.61	0.1027736	84.189											
3	25	500	Bm	50	49.94	5.202	26.6004	2.903	0.327342	211.6	327.34	1493.86	0.1041664	84.2164											
4	25	500	Bm	50	49.93	5.194	26.6501	2.8489	0.326268	210.9	326.27	1490.99	0.1040196	84.2329											
5	25	500	Bm	50	49.94	5.25	26.6081	2.8272	0.325707	210.6	325.71	1493.42	0.1051317	84.2424											
6	25	500	Bm	50	49.95	5.007	26.6778	2.8308	0.325011	210.1	325.01	1490.03	0.10023	84.2553											
[TEMP]	25	2	Toyo	62.5	25.5	1594	1	5	5	0	1	0	#00: 35: 26#												
1	25	500	Bm	50	49.96	4.592	27.7614	2.6524	0.325895	204.4	325.9	1432.17	9.19E-02	84.6618											
2	25	500	Bm	50	49.97	4.47	27.7146	2.6111	0.323124	202.7	323.12	1434.8	8.94E-02	84.701											
3	25	500	Bm	50	49.95	4.648	27.73	2.5934	0.321088	201.4	321.09	1433.3	9.31E-02	84.7258											
4	25	500	Bm	50	49.96	4.657	27.7366	2.6039	0.319023	200.1	319.02	1433.23	9.32E-02	84.7569											
5	25	500	Bm	50	49.95	4.671	27.6746	2.6001	0.319155	200.2	319.16	1436.33	9.35E-02	84.752											
6	25	500	Bm	50	49.94	4.619	27.7754	2.6331	0.318743	199.9	318.74	1430.82	9.25E-02	84.7541											
[TEMP]	25	3	Toyo	62.5	24.48	1530	1	5	5	0	1	0	#00: 38: 02#												
1	25	500	Bm	50	50	4.767	27.2274	2.5453	0.305078	199.3	305.08	1461.25	9.54E-02	84.695											
2	25	500	Bm	50	49.94	4.795	27.1746	2.5963	0.303868	198.5	303.87	1462.31	9.60E-02	84.7											
3	25	500	Bm	50	49.97	4.669	27.1779	2.6088	0.300315	196.2	300.32	1463.24	9.34E-02	84.7613											
4	25	500	Bm	50	49.94	4.803	27.1828	2.6271	0.302081	197.4	302.08	1461.88	9.62E-02	84.7224											
5	25	500	Bm	50	49.95	4.658	27.1428	2.6675	0.298854	195.3	298.85	1464.58	9.32E-02	84.7804											
6	25	500	Bm	50	50.01	4.467	27.1891	2.5646	0.297466	194.5	297.65	1463.56	8.93E-02	84.8057											

4.4 岩崎本部 SY-8232BH 表测试的原始数据截图 (2001 年)

宽频 DMR1.2k 材料样环性能要求

DMR1.2K 材料特性  
DMR1.2K Material Characteristics

项目	符号	测试条件	标称值	单位
Item	Symbol	Conditions	Value	Unit
初始磁导率 Initial Permeability	$\mu_i$	25°C; 10kHz; B<0.25mT	1200±25%	—
振幅磁导率 Amplitude Permeability	$\mu_A$	100°C; 25kHz; 200mT	>1700	—
饱和磁通密度 Saturation flux density	Bs	25°C; 50Hz; 1194A/m 100°C; 50Hz; 1194A/m 120°C; 50Hz; 1194A/m	500 420 400	mT
体积功耗 Power Loss	Pcv	100°C; 1MHz; 30mT 100°C; 3MHz; 10mT 100°C; 5.64MHz; 2.5mT	150 260 150	kW/m <sup>3</sup>
矫顽力 Coercive Force	Hc	25°C	≤30	A/m
直流电阻率 Resistivity	$\rho$	25°C; DC	≈10	Ω·m
居里温度 Curie Temperature	Tc	f=10kHz B<0.25mT	>220	°C
密度 Density	d		≈4.7X10 <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>

测试样品: 宽频 DMR1.2k 材料样环性能

IE-817 #2001-12-12 19:31:44# SY-8232

Temp	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
[TEMP]	25	1	Toyo	62.52	24.74	1546.7	1	5	5	0	0	0	#00: 32: 30#												
1	25	500	Bm	50	49.914	4.5529	27.192	2.7351	0.317538	205295	317.54	1460.7	0.0912166	84.4974											
2	25	500	Bm	50	50.031	4.7285	27.15	2.9041	0.319988	206879	319.99	1466.4	9.45E-02	84.4636											
3	25	500	Bm	50	49.966	5.2031	27.146	2.7807	0.317216	205087	317.22	1464.8	0.104132	84.4988											
4	25	500	Bm	50	49.983	5.02	27.133	2.7473	0.317412	205213	317.41	1465.9	0.1004343	84.4957											
5	25	500	Bm	50	50.068	4.8687	27.32	2.692	0.319465	206541	319.47	1458.4	9.72E-02	84.4801											
6	25	500	Bm	50	49.977	4.9055	27.16	2.8153	0.317484	205260	317.48	1464.3	9.82E-02	84.4928											
[TEMP]	25	2	Toyo	62.52	25.5	1594.3	1	5	5	0	0	0	#00: 34: 47#												
1	25	500	Bm	50	49.946	5.0083	27.686	2.8455	0.326356	204707	326.36	1435.6	0.1002733	84.5761											
2	25	500	Bm	50	49.928	5.0711	27.427	2.7089	0.324293	203413	324.29	1448.6	0.1015681	84.6031											
3	25	500	Bm	50	49.915	4.6051	27.423	2.6854	0.322477	202274	322.48	1448.4	9.23E-02	84.6288											
4	25	500	Bm	50	49.988	4.672	27.446	2.6334	0.325093	203915	325.09	1449.4	9.35E-02	84.595											
5	25	500	Bm	50	49.916	4.774	27.529	2.6772	0.323879	203153	323.88	1442.9	9.56E-02	84.6037											
6	25	500	Bm	50	49.928	4.5228	27.59	2.5899	0.322087	202029	322.09	1440.1	9.06E-02	84.6358											
[TEMP]	25	3	Toyo	62.52	24.48	1530.5	1	5	5	0	0	0	#00: 37: 02#												
1	25	500	Bm	50	49.944	4.69	27.117	2.5157	0.304012	198637	304.01	1465.7	9.39E-02	84.6355											
2	25	500	Bm	50	49.934	4.6149	26.956	2.6366	0.303931	198584	303.93	1474.1	9.24E-02	84.63											
3	25	500	Bm	50	49.991	4.6731	27.081	2.6916	0.305806	199809	305.81	1469.9	0.0934788	84.6073											
4	25	500	Bm	50	49.952	4.7959	27.007	2.6535	0.303948	198595	303.95	1471.9	9.60E-02	84.6292											
5	25	500	Bm	50	49.963	4.6315	26.987	2.5641	0.302624	197730	302.62	1473.3	0.0926982	84.6508											
6	25	500	Bm	50	49.945	4.9071	27.019	2.5709	0.298738	195919	298.74	1471.9	9.83E-02	84.7182											

以上是 1~3 号 DMR1.2K 样环重复 6 次测试值, 右是相位补偿角, 在 84.169 度到 84.805 度间, 仅此一项 cos $\theta$  值的偏差即达 12%。

4.5 岩崎本部 SY-8232BH 表重复测试 12 次的原始数据表

DMEGC TEST. 2002.1.15.

Toyo-sample 500kHz/50mT

[Sample:1]

Set temp.	Meas. Temp.	Le	Ae	Ve	We	N1	N2
100	100	62.52	24.74	1546.74	20	5	5

Trials	Bm[mT]	Hm[A/m]	$\mu_a$	$\theta$ [deg]	Pcv[Kw/m <sup>3</sup> ]
1	50.0515	25.3694	1569.99	87.7237	79.3958
2	49.9236	25.3168	1569.23	87.8044	76.3251
3	49.9479	25.39	1565.47	87.7952	76.7916
4	49.9724	25.3473	1568.88	87.7948	76.8924
5	49.9554	25.3804	1566.3	87.7809	77.3129
6	49.9386	25.3666	1567.24	87.8124	76.2315
7	49.9493	25.4486	1561.91	87.7607	78.238
8	49.9859	25.5108			

1000kHz50mT N1= 5 匝 N2=1 匝, 重复 12 次测试值, 测试值偏差 3.2%。

Toyo-sample 2000kHz/20mT

[Sample:1]

Set temp.	Meas. Temp.	Le	Ae	Ve	We	N1	N2
100	100	62.52	24.74	1546.74	20	5	1

Trial	Bm[mT]	Hm[A/m]	$\mu$	$\theta$ [deg]	Pcv[Kw/m <sup>3</sup> ]
1	19.9925	8.79425	1809.08	68.6727	407.984
2	19.9685	8.82873	1799.86	68.7301	405.925
3	20.0171	8.88901	1792	68.7853	406.33
4	19.9988	8.97288	1773.63	68.7673	406.996
5	19.9875	8.8588	1795.46	68.5312	409.969
6	19.994	8.85102	1797.61	68.769	405.89
7	19.9939	8.81853	1804.23	68.7886	404.944
8	20.0065	8.83122	1802.77	68.7138	407.185
9	20.0134	8.90893	1787.66	68.6205	408.955
10	20.0181	8.97293	1775.33	68.6573	408.646
11	20.0005	8.84239	1799.95	68.7212	406.434
12	19.9776	8.87688	1790.89	68.7581	405.545
Max.	20.0181	8.97293	1809.08	68.7886	409.969
Min.	19.9685	8.79425	1773.63	68.5312	404.944
Ave.	19.99818	8.867849	1794.576	68.71953	406.989

2000kHz、20mT N1= 5 匝 N2=1 匝重复 12 次测试值, 测试值偏差 1.2%。

#### 4.6 高叠加 Pc90 材料样环高频功耗对比测试数据表

(1) 2006 年 9 月 Pc90 样环对比测试数据

九所、晶源风华均为 SY-8232BH 表, 精研为 CH2330 和菲力普 BH 表 Bs : 25°C, mT, 194A/m ; Pc100°C, mW/cm<sup>3</sup>, 100kHz 200mT

样环编号	磁环尺寸	九所		晶源		风华		精研	
		Pc	Bs	Pc	Bs	Pc	Bs	Pc	Bs
24	24.98,	350	504	514	447	14.99,	327	286	321
	7.42								
	7.42								
25	25.06,	356	505	500	449	15.04,	332	304	336
	7.48								
	7.48								
26	25.10,	344	509	506	451	15.06,	335	305	334
	7.49								
	7.49								

(2) 2018 年 7 月上表中 Pc90 样环 100kHz 功耗对比测试数据

测试条件 : Pc100°C, mW/cm<sup>3</sup>, 100kHz 200mT

样环编号与尺寸	新康达公司	中德电子	天通公司	联丰公司	耀润电子
24-24.98, 1.99, 7.42	SY8218	SY8218	SY8218	SY8258	SY8232
	389	306	310	319	340

接上表

25-25.06, 15.04, 7.48	396	364	324	332	356
26-25.10, 15.06, 7.49	387	334	320	332	351

(3) 2018 年 7 月上表中 Pc90 样环 500kHz 功耗对比测试数据

测试条件 : Pc100°C, mW/cm<sup>3</sup>, 500kHz 50mT

样环编号	磁环尺寸	新康达公司 SY8218	天通公司 SY8218	联丰公司 SY8258
24	24.98,	244	238	246
	14.99,			
	7.42			
25	25.06,	243	238	245
	15.04,			
	7.48			
26	25.10,	242	232	245
	15.06,			
	7.49			

(4) 2018 年 7 月上表中 Pc90 样环饱和磁通密度 Bs 对比测试数据

测试条件 : Bs : 25°C, 100°C, mT, 194A/m

样环编号	磁环尺寸	新康达公司 SY8218	中德公司 SY8218	耀润公司 SY8232
24	24.98, 14.99, 7.42	Bs25°C	Bs25°C	Bs25°C
		Bs100°C	Bs100°C	Bs100°C
		539	556	554
25	25.06, 15.04, 7.48	446	455	450
		542	558	542
		447	467	438
26	25.10, 15.06, 7.49	533	550	549
		443	453	444

(5) 2006年9月和2018年7月上表中Pc90样环初始磁导率 $\mu_i$ 对比测试数据

样环编号	磁环尺寸	精研公司 HP4284 2006年9月测 $\mu_i$ 25°C	新康达公司 HP4284 2018年7月测 $\mu_i$ 25°C
24	24.98, 14.99, 7.42	2376	2287
25	25.06, 15.04, 7.48	2245	2303
26	25.10, 15.06, 7.49	2266	2296

### 5 Pc90样环自然陈老13年后数据分析

初始磁导率 $\mu_i$  24号变化最大, 减落 $DA=2376-2287/2376=3.7\%$ ; 功耗值25号环变化最大, 从表1和表2对比看, 在同一台SY8232表上其变化仅为 $356-332=24$ , 变化率为 $24/332=7.2\%$ 。

以上两项性能指标变化对电源器件影响尚不足为虑, 而通讯滤波器对时效要求较高, 则应用堪忧。

从表2和表3各公司SY82系列表之间功耗数据对比看: 100kHz时, 最大偏离为24号环,  $389-306=83$ , 相对误差为 $83/306=27\%$ , 厂家间偏差较大; 500kHz时, 测试值最大偏离为26号环,  $242-232=10$ , 相对误差为 $10/232=4.3\%$ , 但是有两家表在500kHz, 50mT测试偏离太大, 高频测量已不足为据, 故没有录入。

因此, 各公司还需对相应测试频率与标样校准, 生

产厂家间, 以及与客户间应不时沟通, 特别是500kHz、1MHz、3MHz等高频测量数据应重点关注其偏差。

### 6 结语

降低铁氧体材料的各种电磁损耗直接关系到铁氧体磁芯元件的稳定性指标, 准确测量软磁铁氧体材料及磁芯性能参数及评估误差, 是各种电子变压器、电感器等软磁铁氧体器件设计的依据。

比较了相同磁芯不同仪表测试数据和相同型号仪表不同厂家测试数据, 结果表明: SY-82系列表之间数据相差较小, CH23系列表之间数据相差较大, SY-82系列表与CH23系列表之间数据相差更大。

岩崎本部SY-8232BH表对5只样环100kHz重复测试6次的测试数据表明: 相位补偿角在84.169度到84.805度间, 仅此一项 $\cos\theta$ 值的偏差即达12%; 重复测试12次的测试数据表明: 500kHz、1MHz、2MHz分别重复12次测试值偏差达4.5%, 加上前述系统误差估算, 其功耗测试值偏差可达15%上下。

随着无线充电等应用技术向高频化发展, 对软磁铁氧体性能要求进一步提高, 其测量仪表的准确、稳定, 同一型号的重复性、一致性, 特别是仪表系统误差, 必需及时核查、计量、评判, 做到心中有数, 否则各执一词, 于事无补。

参考文献 (略)

上接165页

[9] Dimitrakakis G S, Tatakis E C. High-Frequency Copper Losses in Magnetic Components With Layered Windings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(8):3187-3199.  
[10] 胡细保, 郗亮, 谭智勇, 等. 高频高压大功率变压器优化设计方法研究[J]. 电气工程学报, 2016, 11(6):40-47.

### 作者简介

杨海军, 硕士, 现就职台达电子企业管理(上海)有限公司, 担任资深课长, 主要负责磁性元件设计部2课。研究领域包括高功率磁元件设计技术、电力电子磁集成技术等。在国内外刊物和会议上发表论文8篇, 申请专利12项。