浅谈三相电抗器设计与工艺应用

Dicuss of 3 Phase reactor design and technology

聂应发

田村（中国）企业管理有限公司，惠州 516003

摘　要：电抗器，英文名称为Reactor，是一种可将电能转换为磁场能量进而存储起来的磁性元件，用于阻碍电流进行变化磁性元件。在科学上电抗器可分为容抗器和感抗器两种，但现实生活中，我们常将容抗器称为电容器，而电抗器则专指电抗器,在电力及电子系统中，电气设备所产生的高次谐波电流将引起系统中电压波形的畸变，是对电网的一大公害，它将严重影响电容器组的正常运行。由此也必须采取加装串联电抗器的办法对高次谐波加以抑制。众所周之，传入电抗器后，对基波来讲不会有大的影响，但对谐波来说却有较大的影响，本文就三相电抗器原理及设计方法及工艺制造进行说明，其特点是防燃防爆是有效的，因此对其绝缘是要求非常严格的，其绝缘等级要求很高的，一般为F级以上的绝缘的电气部品。

关键词：三相电抗器，原理，设计和工艺

1　电抗器原理

电抗器也就是电感器，其根据工作原理的不同可分为自感器和互感器两种；其中自感器是指当通电使得线圈中有电流流过时，在线圈的周围就会产生磁场，该磁场随线圈中电流的变化而变化，磁场的变化又会反过来影响线圈中的电流；而互感器是指当两个线圈相互靠近时，一个线圈产生的磁场将会影响着另一个线圈，两个线圈与产生的两个磁场间相互影响，其影响的程度取决于两个线圈的耦合程度。

2　电抗器分类

电抗器根据不同的分类形式具有多种不同的分类方法。首先，其根据功能的不同可分为限流用电抗器和补偿用电抗器；其根据电路接线方式的不同可以分为串联电抗器和并联电抗器；其根据结构的不同可分为铁心式电抗器和空心式电抗器；其根据冷却介质的不同可分为干式电抗器、油浸式电抗器、水泥电抗器等；其根据用途可分为限流电抗器、消弧线圈、功率因数补偿电抗器、滤波电抗器、平衡电抗器等等。

3　电抗器结构

电抗器主要由骨架（或无骨架）、绕组、磁心或铁心、屏蔽罩等构成。其中，骨架作为线圈支架存在，主要用于在骨架上缠绕线圈，不过一些大型电抗器不需要此结构，可直接将线圈缠绕在铁心上；绕组就是指缠绕好的一组线圈，是完成电抗器功能的核心部分，用于产生磁场；磁心或铁心的存在用于在需要时增强绕组产生的磁场，一般铁心分间隙或分段铁心组成；屏蔽罩用于限制磁场产生范围，以免影响其他电路的运行。

4　电抗器电感量选取原理及方法

电气设备所产生的高次谐波电流将引起系统中电压波形的畸变，是对电网的一大公害，它将严重影响电容器组的正常运行。由此也必须采取加装串联电抗器的办法对高次谐波加以抑制。众所周知，电流传入电抗器后，对基波来讲不会有大的影响，但对谐波来说却有较大的影响。这些非正弦波形可以用数学分析的方法分解成工频的基波和各种倍数频率的谐波。但对电容器来讲，一般不存在偶次倍数的谐波。因此主要考虑 3、5、7、9、11、13 等次谐波的影响。在这些高谐波中以 5 次谐波最显著。如某系统电压波形包括基波和 5 次谐波（其它高次谐波占的比例很小）。基波电压与额定电压相等，而 5 次谐波电压值为额定电压的 26.45%。在这种情况下经过计算可得出电容器组 3.4%，过电流 65.6%，电容器的无功出力过负荷 35%。

由上可知，高次谐波严重影响电容器组的正常运行，

因此必须采取相应的措施以降低谐波分量，抑制母线电压的畸变，减小谐波过电流。

计算式：$I_n = \frac{En}{n \times XB} + (nXL - \frac{XC}{n})$

起主要作用的是 3、5、7、11 等次谐波。在式中，若使 $(nXL - \frac{XC}{n}) = 0$

则当 n=3 时，XL=0.11×C

则当 n=5 时，XL=0.04×C

则当 n=5 时，XL=0.02×C

从上式可以看出，当 nXL-XC/n>0 即电容器组回路呈感性时，可使谐波电流减小，因此抑制谐波电流的电抗值应满足 nXL-XC/n>0 的条件，又考虑到电抗值应有一定余量，工程上常取可靠系数为 1.5，因此串联电抗器的电抗值应按下式选取：

XL=a×C

如限制 5 次谐波电流，则应取：

XL=1.5(0.04×C)=0.06×C

则：XL/XC=0.06

式中 0.06 为限制 5 次谐波电流时，电抗器工频额定电抗 XL 与电容器工频额定容抗 XC 的比值，称为电抗率，用字母 K 表示。即：K=XL/XC 在 5 次谐波时，由式可知，电抗率 K=6% 时，才能补偿支路的 5 次以上谐波电抗呈感性，才能有效地抑制高次谐波，并将合闸涌流限制在 5 倍额定电流左右。额定电抗率 XL=0.1% ～ 1%×C—不考虑谐波影响，仅需抑制合闸涌流 XL=4.5% ～ 6%×C—限制 5 次以上高次谐波的影响，XL=12% ～ 13%×C—限制 3 次以上高次谐波的影响。额定频率：用于 50Hz 和 60Hz 电力系统中。

滤波电抗器：用于两个方面：一是用于减小整流电路中直流电流上纹波的幅值；二是和电容器构成对某种频率能发生共振的电路，用以消除电力电路某次谐波的电压或电流。

输出电抗器的特点：

（1）适用于无功补偿和谐波的治理；

（2）输出电抗器主要作用是补偿长线分布电容的影响，抑制输出谐波电流；

（3）有效地保护变频器和改善功率因数，能阻止来自电网的干扰，减少整流单元产生的谐波电流对电网的污染。

5 电抗器主要参数

额定工作电压：380V/690V/1140V 50Hz/60Hz

电抗率 2%，4%，6% 等

电感量（通电抗率来计算出来）

额定工作电流：3A 至 1600A 或更大

工作环境温度：40℃

抗电强度：铁芯 - 绕组 3000VAC/50Hz/ 漏感电流 2 ～ 5mA/10s 无飞弧击穿（工厂测试）

绝缘电阻：1000VDC 绝缘阻值≥ 100MΩ

电抗器噪音：小于 40 ～ 80dB（与电抗器水平距离点 1 米测试）

防护等级：IP00

绝缘等级：F 级以上

6 举例说明：电抗器设计方法

（1）电磁设计计逢的基本步骤：

1.1) 电流、功率计算

1.2) 根据电抗率来计算电感

1.3) 铁心截面积估算和圈数计算（通过预取磁通密度来估算）

1.4) 铁心尺寸及线圈绝缘距离计算

1.5) 气隙计算

1.6) 绕组损耗数据计算

1.7) 铁心损耗数据计算

1.8) 温升计算

1.9) 重量的计算

额定电压：即电抗器正常运行时的电压，一般与变频器的额定电压相同，主要有 380/400、660/690、1140/1200 三个电压等用 U 表示，单位 V。

额定电流：即电抗器正常运行时的电流，一般由变频器的电流大小所决定，具体可参考变频器使用手册用 I 表示，单位 A。

额定电感：即电抗器正常运行时的电感值，用 L 表示。

电抗率：电抗器相电压与之串联的电容器的相电压的比值，即 UL/UC 这里电抗器相电压对变频器相电压的比值，用 K 表示。

（2）主要材料：

2.1) 硅钢片：各种冷轧硅钢（厚度为 0.5mm 或 0.35mm）

2.2) 线圈导线：圆铜线、圆铝线及铜、铝箔

2.3) 绝缘材料：用 F、H 级以上绝缘材料

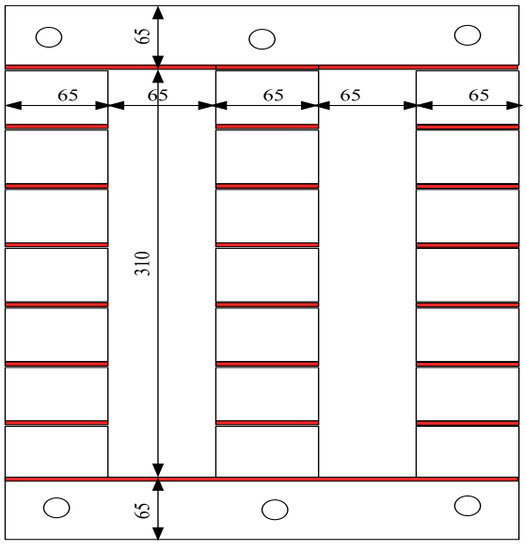
2.4) 线圈绝缘漆：用 F、H 级以上绝

（3）电抗器主要结构的确定：

铁心结构：

铁心柱的夹紧：通过铁心穿孔用上下螺杆和槽钢夹紧

铁轭用通过铁心穿孔用螺杆和槽钢夹紧（如下图所示）



铁心采用长方形所用宽度完全一致，且铁轭的级数与铁心柱级数完全一致性，节省材料和工数。

例：500kW，480V 输入电抗器

一般电抗器电抗率为 2%

三相线电压 480V，功率为 500KW 电抗器设计如下：

1) 三相变频器额定线电流 = 相电流 = $\frac{500}{0.48}$ =1040A

2) 相电压降 UL= $\frac{480\times0.02}{1.732}$ =5.54V

3）电感计算 L = $\frac{V}{2\times3.14\times f\times I}$ = $\frac{5.54}{1040\times2\times3.14\times50}$ =0.017mH 取 1.2 倍 L=20uH

4) 计算 LI^2=L×I×I=0.02/1000×10402=21.6H·A^2

5）容量 VA=2×3.14×50×21.6×3=20247VA

6）铁心截面积 S

$$S=\sqrt{(2\times0.95\times100/(2.22\times50\times2\times0.95\times1.2\times3.2\times0.3))}\times\sqrt{20347/3}\times0.8=59.8cm^2$$

8）假定 Bm=1T 时。

圈数 $n=\frac{2\times\Pi\times f\times L\times I\times10^8}{10^6\times Bm\times4.44\times f\times S}$

$=\frac{2\times3.14\times50\times20\times1040\times10^8}{10000\times10^6\times4.44\times50\times52.5}$ =5.6T

约 6T

9）将上述圈数取整后，反算此时所需交流电压值

$V=\frac{2\times3.14\times50\times I\times L}{1000}$

$=\frac{2\times3.14\times50\times1040\times0.02}{1000}$ =6.53V

10）将圈数取整，反算此时磁通密度

$Bm=\frac{6.53\times100000}{4.44\times50\times52.5\times6}$ =0.934T

11）间隙厚度

$GAP=\frac{1.77\times N\times I\times10}{Bm}=\frac{1.77\times6\times1040\times10}{9340}$

=11.8mm

约 12mm

12）温升经验公式：

计算 ΔT=700×(铜损 + 铁损)/(铁芯散热面 + 线圈散热面)+600× 铁损 / 铁芯散热面 =109.4K（注明：铜损 =677W；铁损 =203W；铁芯散热面 =2700cm^2；线圈散热面 =7650cm^2

13）铁心必须采分段间隙，目的降低铁心及铜线损耗，从而降低温升。

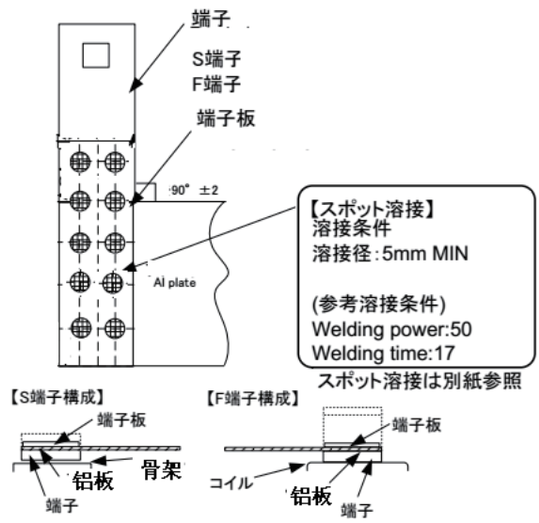
14）绝缘材料及紧固件必须符合绝缘等级要求。

7 电抗器制造工艺

1）卷线:分切铝箔有时毛刺较多，必须先除去和平整。先将起始 S 头焊接铝箔进行绝缘包扎绝缘处理后进行卷，卷至一半时进行只在引出线头留有 10 ～ 12mm 气道，气道使用环氧玻布作撑条，再下记铝箔点焊。

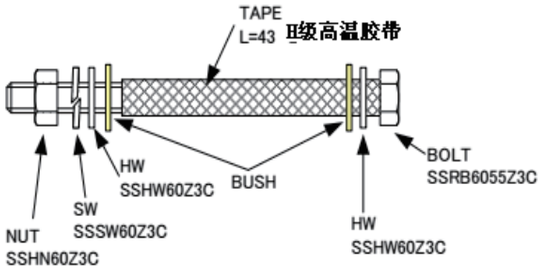
线包牢固性。进行卷线，同时引出线为了增加爬电距离而将绝缘胶纸加长处理。最后粘性玻璃丝带进行包扎增加牢固性。

下记螺丝紧固示意图。



螺丝组立和固定方式重要

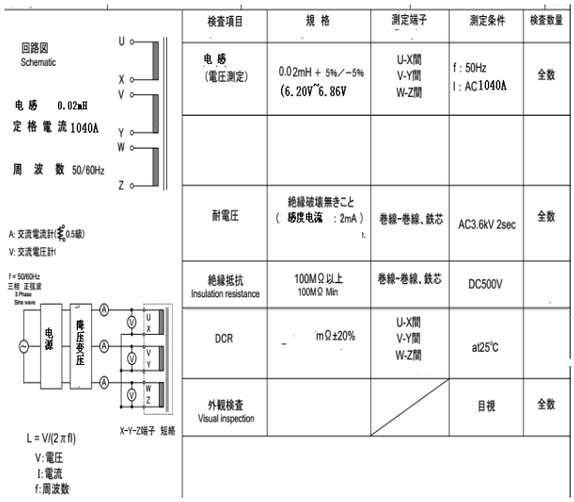
設定値 ： 2~3N·m
Set point



2）组立：先将 3 个中轴铁心分段绝缘片进行加胶水固化处理，(正常平分 12mm 间隙处理)。

再将下铁轭组立后，将 3 个铁夹固定件和中轴铁心组立后，上、下铁轭同时将绝缘片(兼作间隙)加胶水绝缘处理。然后将上夹件固定，同时进行中间检查（耐压和负载电感绝缘电阻等性能测试）定电流，测电压，如若电压不合时，对间隙进行调整处理。

下记含浸前中间检查，最终出货检查外观及贴付标签检查。



検査項目	規格	測定端子	測定条件	検査数量
电感（電圧測定）	0.02mH + 5%/−5%（6.20V~6.86V）	U-X間 V-Y間 W-Z間	f：50Hz I：AC1040A	全数
耐電圧	絶縁破壊無きこと（感度电流 ：2mA）	卷線-卷線、鉄芯	AC3.6kV 2sec	全数
絶縁抵抗 Insulation resistance	100MΩ以上 100MΩ Min	卷線-卷線、鉄芯	DC500V	
DCR	mΩ±20%	U-X間 V-Y間 W-Z間	at25℃	
外観検査 Visual inspection			目視	全数

3）含浸和干燥处理。有真空含浸及空气含浸，有的需要 2 次以上含浸，对于防水电抗器来说。

4）完成品检查：电感量测试（空载及负载情况下）、直流电阻、耐压和绝缘电阻等性能测试和贴付标签以及外观检查。必要时进行振动及噪声测试。

5）新产品必须进行温升和型式可靠性试验测试，特别使用新材料情况下。

8 电抗器规格书（常用 H 级要求）

对于规格书制作，也有很多讲究地方，给客户与实际生产数据要大些，留有余量。

（1）电气性能：

1.1) 电路图：

1.2) 输入电流和频率：AC1040A 50Hz

1.3) 耐压：

测试电压	类型测试		量产测试 (100% Unit testing)
作用	电压测试	时间	3 秒
线包 / 铁心	3000Vac	1min	感度电流≤ 5mA

1.4) 效率≥一般为 98.8%

1.5) 产品说明：

1.6) 绝缘电阻：

在初次级绕组之间以及绕组与铁芯之间，输入 DC500V 绝缘阻抗不得小于 100MΩ。

1.7) 温升测试：

额定功率下温升最高 115℃（ΔT）

负载条件：AC300A 50Hz；

绕组的温度应用电阻法进行测试；铁芯温度直接用温度计测试。

1.8) 高温测试：

将产品放在 100±3℃的环境中 8 个小时，取出后在 10 分钟内能通过 1.3 测试，并在输入 DC500V 绝缘阻抗不得小于 10MΩ。

1.9) 潮湿处理：

产品放在环境温度为 20 ～ 30℃之间任何一个温度值上，相对湿度为 91 ～ 95% 的条件下 48 小时，擦去变压器的水滴，10 分钟内进行测试，通过 1.3 测试，输入 DC500V 绝缘阻抗不得小于 5MΩ。

1.10) 高、低温循环测试

将产品放在 -25±3℃中 60 分然后常温 25±3℃中 60 分最后 100±3℃中 60 分的环境中 8 个小时，取出后在 10 分钟内能通过 1.3 测试，并在输入 DC500V 绝缘阻抗不得小于 10MΩ。

1.11) 结构：

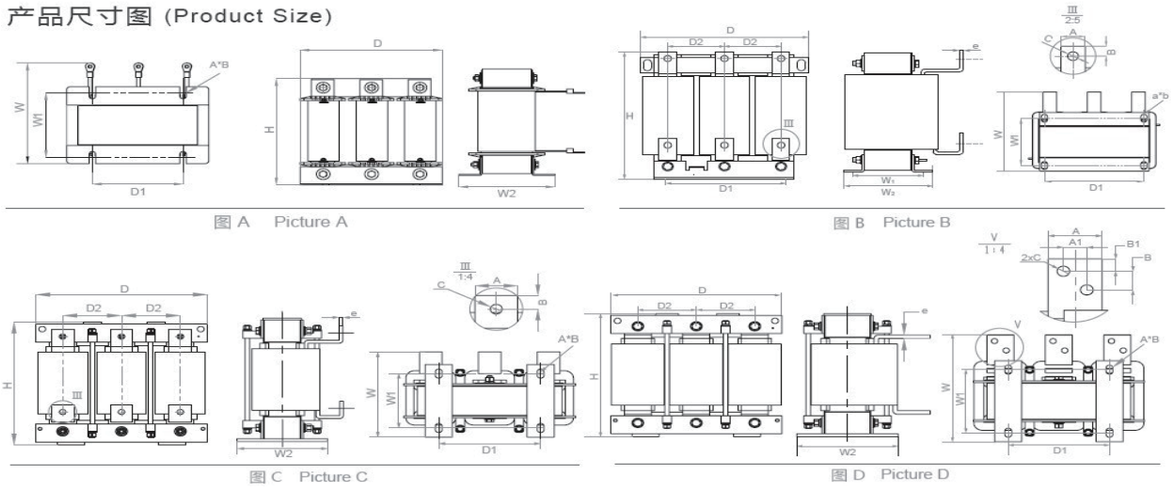
1.11.1) 变压器电击防护分类

1.11.2) 热保护

1.11.3) 引出端子规格及尺寸和包装防护说明。

9 常用电抗器外形图和尺寸，仅供参考

产品尺寸图 (Product Size)



电抗器型号 Reactor Type	图号 Picture NO.	功率 Power (KW)	额定电流 Rated Current (A)	电感量 (mH)	压降 Rated Current (A)	绝缘等级 Insulation Class	外形尺寸 Dimension(±5mm)													
							D	D1	D2	W	W1	W2	H	e	A*B	A	A1	B	B1	C
OCL-0015-EISA-E1M7	A	15	15	1.7	2%	F	195	120	/	140	72	92	165	/	8.5*20	/	/	/	/	/
OCL-0025-EISA-E1M0		22	25	1.05	2%	F	195	120	/	160	92	112	165	/	8.5*20	/	/	/	/	/
OCL-0035-EISA-EM73		37	35	0.73	2%	F	195	120	/	175	102	122	150	/	8.5*20	/	/	/	/	/
OCL-0055-EISA-EM46		45	55	0.465	2%	F	195	120	/	185	112	132	195	/	8.5*20	/	/	/	/	/
OCL-0070-EISA-EM36	B	55	70	0.365	2%	F	250	182	81	190	103	129	195	5	11*18	25	/	12.5	/	11
OCL-0090-EISA-EM28		75	90	0.285	2%	F	290	214	95	200	107	133	250	5	11*18	25	/	12.5	/	11
OCL-0125-EISA-EM20		90	125	0.2	2%	F	290	214	95	210	122	148	250	5	11*18	25	/	12.5	/	11
OCL-0160-EISA-EM16		110/132	160	0.16	2%	F	290	214	95	220	132	158	250	5	11*18	25	/	12.5	/	11
OCL-0200-EISA-EM12		160	200	0.125	2%	F	320	243	106.5	210	124	154	280	5	12*20	30	/	12.5	/	11
OCL-0250-EISA-EM10		220	250	0.105	2%	F	320	243	106.5	230	139	169	280	6	12*20	40	/	20	/	14
OCL-0300-EISA-E85U		250	300	0.085	2%	F	320	243	106.5	235	149	179	280	6	12*20	40	/	20	/	14
OCL-0400-EISA-E65U		315/355	400	0.065	2%	F	320	243	106.5	260	174	204	280	6	12*20	40	/	20	/	14
OCL-0500-EISA-E50U		450	500	0.06	2%	F	395	225	130	295	175	225	350	8	15*25	50	/	20	/	14
OCL-0650-EISA-E40U	C	500/560	650	0.04	2%	F	395	225	130	320	200	250	350	8	15*25	50	/	20	/	14
OCL-0800-EISA-E32U		630/750	800	0.032	2%	F	480	275	160	325	175	225	430	10	15*25	50	/	20	/	14
OCL-0950-EISA-E27U	D	800	950	0.027	2%	F	480	275	160	325	175	225	470	10	15*25	60	26	26	17	14
OCL-1200-EISA-E21U		900/1000	1200	0.021	2%	F	480	275	160	350	200	250	470	10	15*25	60	26	26	17	14

备注/Note: (1)：Picture A、B公差(Tolerance) D:max D1:±1 D2:±5 W:max W1:±2 W2:±2 H:max, 其余未注公差(others)±0.5mm.
Picture C、D公差(Tolerance) D:max D1:±2 D2:±5 W:max W1:±1 W2:±1 H:max, 其余未注公差(others)±0.5mm.

(2)：以上型号为我司标准品，其它规格可以根据客户要求定制。Can be customized.

(3)：H级产品可以根据客户要求定制。Class H Can be customized.

(4)：此款产品引出排为铝排。The leading-out terminals of this product are Aluminum terminals.

10 结束语

大电流三相电抗器在大型机械设备及电力应用相当广泛，随着电源业高频化趋势，中、小电流型低频电抗器正向高频转化，可以肯定它会在较大领域内取代低频电抗器，其体积缩小和效率也会大大提高，但是大电流电抗器仍是无法取代，随着技术性能进一步提高，工艺进一步改进，设备和治具通用性、它将大大提高效率，进而提高性价比，一定会在电源领域中有更广阔的应用前景。

上接144页

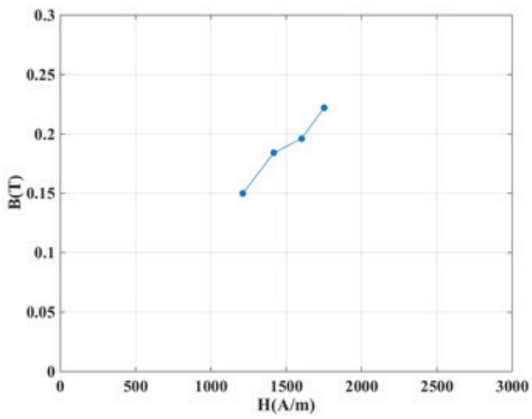


图 5 NPF184090 直流磁化曲线

4 结论

本文采用了理论与实验相结合的方法分析了金属磁粉芯直流测量法的测量原理和测量误差，主要结论如下：

1）直流测量法能够准确的测量金属磁粉芯的幅值磁导率和增量磁导率，相比于传统交流激励的方法，直流测量法更精确地反映了磁粉芯的直流励磁特性。

2）直流测量法的主要测量误差来自于 LR 放电回路中的绕组损耗等效电阻 R_{copper} 和磁芯损耗等效电阻 R_{core}，本文详细分析了 R_{copper} 和 R_{core} 对采样电压和电流的影响，其中 R_{core} 的数量级较大，对计算磁感应强度和磁场强度的影响较小。

3）数字示波器的采样精度会给磁感应强度的计算精度带来误差。因此在满足精度要求的前提下，电感与回路电阻的放电时间 τ 不能太短也不能太长，主要取决于示波器的存储深度、采样率和带宽。

参考文献

[1] 国家质量技术监督局.GB16847-1997 保护用电流互感器暂态特性技术要求[S] , 1997.

[2] 唐坚. 金属软磁磁粉芯研究[D]. 沈阳：东北大学，2012.

[3] 李俊楠. 铁硅铝/铁硅金属磁粉芯制备及磁特性研究[D].武汉：华中科技大学，2016.

[4] 刘 涛，刘 鑫，梁仕斌，王俊凯，姚陈果. 基于极性变化直流电压源的铁磁元件铁心剩磁通测量方法[J]. 电 工 技 术 学 报，2017，32(13)：137-144.

[5] 来磊. 保护用电流互感器励磁特性的直流法测量[J]. 高电压技术，2008, 34(7): 1528-1530.

[6] 李庆扬 王能超 易大义. 数 值 分 析[M]. 北京：清华大学出版社，2001.

[7] 韩毅博,刘毅,刘思维,等. 环形磁芯脉冲磁化特性测量分析[J]. 中国电机工程学报，2015，35(16)：4239-4246.

[8] 王茂松，田文革，杜建嵩，陈奎. 测定保护用电流互感器铁心励磁特性的直流法[J]. 变压器，2005,17（6）：770-774.

作者简介

张宇超(1993)，男，工学硕士，主要从事电力电子高频磁技术方面的研究工作，zyc32877@163.com。