

磁性元件主要材料及设计要点

聂应发

田村（中国）企业管理有限公司，惠州 516003

摘要:通过对磁性主要材料磁性材料和线材进行高频成分分析,如何在高频磁性元进行优化设计,达到性价比好产品。

关键词:磁性材料及性能,线材趋肤效应,电子变压器及电感设计

Magnetic element's main materials and key points of design

Nie ying fa

Tamura corporation of china Ltd., Huizhou 516003

Abstract: By means of analyzing for magnetic main materials and wire materials of high frequency ingredient, how to optimize designing for high frequency magnetic element, reach performance-to-price ratio of products.

Keywords: magnetic materials and functions wire materials' conductior skin effect, electronic transformer and inductance, optimal design of electronic transformers

1 引言

大家都知道,磁性元件是各种电源产品心脏元件,是影响其电源成品特性重要元件,对电磁抗干扰EMI也发挥重要作用,如何充分发挥其重要作用,是摆在磁性元件开发者重要课题,本文拟对磁性元件主要材料介绍和设计提供一些有益思路,供广大设计开发和品质管理者提供有益思路和探讨方法等参考使用。

1.1 软磁材料

首先对主要软磁材料介绍一下,对于磁通密度以及磁化强度具有低矫顽力的磁性材料被称为软磁材料。软磁性材料分类非常丰富,按化学成分,大致可分为金属磁性材料和铁氧体磁性材料两大类。按其磁特性和应用又可分为:软磁、磁记录、矩磁、旋磁压磁和磁光等材料。磁性器件是指用磁性材料的磁特性和各种特殊效应制成的转换、传递、存储能量和信息的零部件。磁性材料在工作状态下,将会产生磁电、磁光、磁热、磁吸收、磁化学、磁弹性、磁致伸缩、磁生物等多种物理效应和信息传递及能量转换功能。

铁氧体软磁材料是由尖晶石结构的锰锌系、镍锌系和磁铅石结构的六角晶系平面型铁氧体组成。这种材料起始磁导率高、电阻率高、高频损耗较小,在低频、中频、高频甚至超高频范围应用广泛。由于磁性材料具有转换、传递、处理信息、存储能量、节约能源等功能,因而它在现代高新技术群体中,成为一个不可缺少的成员。用高性能铁氧体软磁材料制作的各类电子变压器、电感器和滤波器,在军事装备,高频通信设备和仪表中起着关键作用;抗电磁干扰软磁磁芯和器件可防止导线、电接头、插孔和电子设备等泄漏和辐射的电磁波,在保证网络安全、电源设备的电磁兼容性方面发挥着不可替代的作用。

1.2 金属磁粉心

金属磁粉心是用金属或合金软磁材料制成的粉末,通过特殊的工艺压制而成的一种具有良好综合性能的复合型软磁材料。它既保留了金属软磁和铁氧体软磁的一些优良特性,同时又最大限度地克服了它们的某些缺陷,使得金属磁粉心磁导率较小但线性度好、饱和磁密较高,工作频率范围较宽,克服了铁氧体软磁一些弱点,气隙基本上均

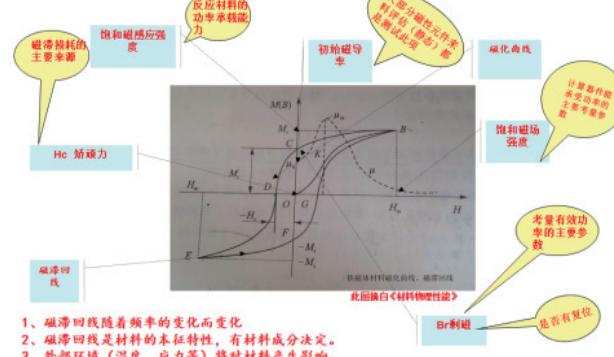
匀分布在磁粉体中，避免集中某处开大气隙，从而降低不必要的损耗。这对于电子产品向高精度、高灵敏度和大容量、小型化方向发展具有极为重要的意义。

1.3 非晶、纳米晶软磁合金材料

在日常生活中人们接触的材料一般有两种：一种是晶态材料，另一种是非晶态材料。材料内部的原子排列遵循一定的规律周期性地排列，被称为晶态材料，一般的金属，其内部原子排列有序，都属于晶态材料。反之，内部原子排列处于无规则长程无序状态，则为非晶态合金。科学家发现，金属在熔化后，内部原子处于活跃状态。一旦金属开始冷却，原子就会随着温度的下降，而慢慢地按照一定的晶态规律有序地排列起来，形成晶体。如果冷却过程很快（例如用每秒高达一百万度的冷却速率），原子还来不及重新排列就被凝固住了，由此就产生了非晶态合金。非晶、纳米晶软磁合金材料是一种具有磁性能、耐蚀性、耐磨性、高硬度、高强度、高电阻率等许多独特优异性能的新型软磁材料。与传统的硅钢片相比，工艺流程较为简单，制作过程中节能，磁性能优良，能降低变压器使用过程中的损耗，同时具有高饱和磁感和很低的高频损耗，且热稳定性好，是大功率开关电源用软磁材料的最佳选择。因此被称为二十一世纪的绿色软磁材料。非晶软磁合金材料已经应用在多种军工装备，如火箭、机载雷达、水雷、坦克等电源中。随着市场经济的发展，非晶软磁合金材料的应用领域逐渐扩展到广大的民用产品。主要包括：互感器铁心、大功率逆变电源变压器和电抗器铁心、各种形式的开关电源变压器和电感铁心、各种传感器铁心等。

1.4 软磁铁氧体曲线

对于软磁铁氧体曲线，必须很好理解一下，对于各个参数进行分析，从而各种参数性能和影响及控制方法，如何充分各参数优点，是各磁芯厂商下功夫的课题，如图示 1。



图示 1

1.5 软磁系列产品

对于软磁系列产品，各种材料有关饱和磁通密度、直流初透磁率、阻抗值、居里温度及磁歪系数所要求标准值进行说明，必须很好理解一下，对于各个参数进行分析，从而各种参数性能和影响及控制方法，更能充分应用其应有功能。如图示 2。

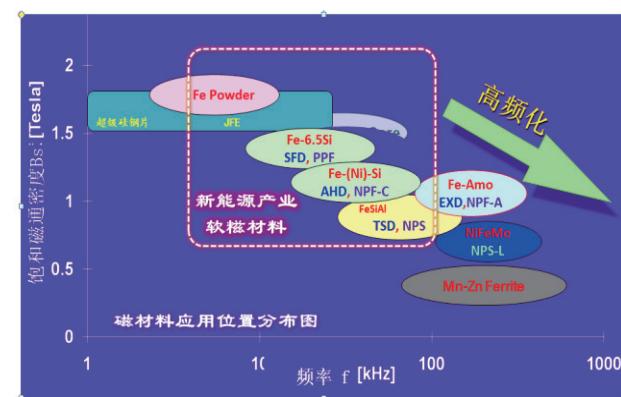
品名 Name	饱和磁密度 BS (T)	直透初透磁率 D.C. initial permeability $\mu_0 DC$	比抵抗 ($\mu\Omega \cdot cm$)	キュリー点 Curie point $T_c (^\circ C)$	磁致伸缩 Magnetostriction $\lambda \times 10^{-4}$
純鐵 Pure iron	2.15	300	11	770	15
3% Si-Fe	2.00	1,000	45	750	~2
6.5% Si-Fe	1.80	3,000	82	690	0.2
PB (50% Ni-Fe)	1.60	2,500~4,500	45	500	20
PC (78% Ni-Fe)	0.70~0.80	10,000~100,000	60	350~400	~0
鉄系アモルファス Fe-base amorphous	1.56	200~8,000	137	415 (550)	27
コバルト系アモルファス Co-base amorphous	0.80~1.00	10,000~1,000,000	140	200~370 (520~550)	~0
鉄系ナノクリスタル Nano-crystal	1.23	20,000~100,000	120	570	0~2.3
センドスト Sendust	1.10	30,000	80	500	~0
Mn-Zn フェライト Mn-Zn ferrite	0.35~0.40	1,500~10,000	10^3	130~250	~0
Ni-Zn フェライト Ni-Zn ferrite	0.20~0.30	20~1,000	10^6	110~350	~0

()は結晶化温度 値はすべて代表値
Show crystallization temperatures. All numerical values are representation value.

图示 2

1.6 软磁系列材料应用参数

当前电源发展迅速，高频、高密度及小型化日益有很大要求，现对软磁系列材料应用中最重要参数磁通密及频率所使用范围进行全面总结。从而在开发设计中所取各种参数性能和影响及控制方法，如图示 3。

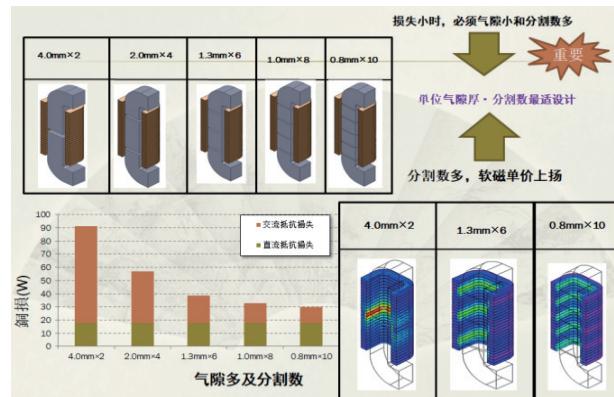


图示 3

1.7 高频电感设计

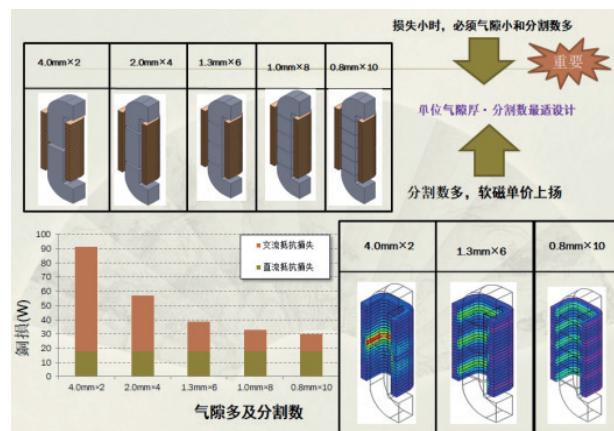
对高频电感设计中，当负载电流越大时，电感量就越大，为了增加负载能力，需要对磁粉芯进行追加气隙，虽然对于金属磁粉芯里面气隙是均匀分布，但是对大电流来说还满足不了其要求，所以必须追加气隙来调整电感量来

增加负载能力，下记如图示 4，气隙越小，损耗越小，反之亦然。



图示 4

对高频电感设计中，当负载电流越大时，电感量就越大，为了增加负载能力，需要对磁粉芯进行追加气隙，下记如图示 5，气隙总和相等话，越小而均匀分布，损耗越小，反之亦然。



图示 5

2 磁性元件

2.1 磁性元件所用线材

磁性元件所用线材，一般可分铜、铝、铜包铝三种，但由于处于高频状态下，所需用圈数较少，进而使用铜线不是特别多，中小电子变压器及电感电流较小，基本上不

使用铝线，因为铝线与铜端子连接相对容易发生氧化而发生接触不良，因此基本使用铜线来生产。这里只介绍铜线，对于漆包铜线常用分类（按绝缘等级）如下：聚酯漆包铜线（PEW）F 级（155℃），聚胺酯漆包铜线（UEW）B 级（130℃），尼龙外被聚胺酯漆包铜线（UEW+NY）（UEW）B 级（130℃），尼龙外被聚酯漆包铜线（PEW+NY）（PEW）F 级（155℃）；聚酯亚胺漆包铜线（EIW）；聚酰胺亚胺酯漆包铜线（AIW）；聚酰亚胺漆包铜线（PIW）；绞合线（PIW）膜包线（PET130℃, PI200℃, NOMEX200℃膜包）；以及各线规国际标准及用途进行说明。如下图图示 6 和图示 7。

部品名	耐热等级	UL 認可	直焊性	特 長
NFW	A(105°C)	—	○	• 焊錫溫度：380~400°C • 替代保險絲的漆包線，適用於電源轉接器(ADAPTOR)。
LWU	B(130°C)	—	○	• 焊錫溫度：320~340°C • 低溫焊接作柔性佳。
LUY	B(130°C)	MW28C	○	• 焊錫溫度：330~350°C • 鋼絲低溫可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
UEW	B(130°C)	MW75C	○	• 焊錫溫度：350~380°C • 適用聚酰亞胺漆包線外層加上尼龍漆膜。
UEY	B(130°C)	MW28C	○	• 焊錫溫度：370~390°C • 適用聚酰亞胺漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
FUEW	B(130°C)	130°C	○	• 焊錫溫度：380~400°C • 耐熱性比UEW高。
SFBW	F(155°C)	MW26C	○	• F級可焊接漆包線。
SFBY	F(155°C)	MW27C	○	• F級可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
PEW	F(155°C)	MW5C	✗	• 一般用途的聚酰亞胺漆包線。
PEY	F(155°C)	MW24C	✗	• 聚酰漆包銅漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
LSFW	F(155°C)	MW79C	○	• 聚酰漆包銅漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
LSFY	F(155°C)	MW80C	○	• 焊錫溫度：320~340°C • F級低溫可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜。
SFFW	F(155°C)	MW79C	○	• 焊錫溫度：330~350°C • F級低溫可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
SFFY	F(155°C)	MW28C MW80C	○	• 焊錫溫度：330~350°C • F級可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜。
SFFHW	H(180°C)	MW82C	○	• 焊錫溫度：380~440°C • H級可焊接漆包線。
SFHY	H(180°C)	MW83C	○	• 焊錫溫度：430~450°C • H級可焊接漆包線外層加上尼龍漆膜，耐熱性佳。
SFEIW	H(180°C)	MW77C	○	• 焊錫溫度：450~460°C • 耐熱性比FFW高。
PEHW	H(180°C)	—	✗	• 舊版絕緣漆，在THEIC-P外層加上Al。
EIW	H(180°C)	MW74C	✗	• 良好的耐熱性及耐磨耗性。 • UL 認可(I-120°C)。
EIAIW	200°C	MW35C MW73C	✗	• 叢層絕緣漆，在EI外層加上Al。
AIW	220°C	MW81C	✗	• 良好的耐熱性及耐磨耗性。
APIW	220°C	—	✗	• 耐熱等級提高到220°。
PIW	240°C	—	✗	• 耐熱性、耐熱性和耐油性均優良。 • 耐熱等級提高到240°C。 • 表面材料為耐熱性最高的繩材。

图示 6

2.2 趋肤效应

在高频情况下, 交变磁场会在导体内部引起涡流, 电流在导体横截面上的分布不再是均匀的, 这时, 电流将主要地集中到导体表面。这种效应称为趋肤效应。为了削弱趋肤效应, 在高频电路中也往往使用多股相互绝缘细导线编织成束来代替同样截面积的粗导线, 这种多股线束称为辫线。此外, 高频变压器工作频率较高, 一般在 15~200kHz。因趋肤效应作用, 变压器的导线粗细就受到一定限制。工作频率的提高, 趋肤效应影响越大。因此, 在设计绕组选择电流密度和线径时必须考虑趋肤效应引起的有效截面的减小。导线通有高频交变电流时, 有效截面的减少可以用穿透深度来表示。穿透深度的意义是: 由于趋肤效应, 交变电流沿导线表面开始能达到的径向深度, 用“ Δ ”表示, 计算公式为:

$$\Delta \text{——穿透深度 (mm);}$$

$$\omega \text{——角频率, } \omega = 2\pi f \text{ (rad/s);}$$

$$\gamma \text{——电导率 (S/m), 当导线为铜线时;}$$

$$\mu \text{——磁导率 (H/m), 铜的相对磁导率}$$

式中即为真空磁导率 H/m。

导体的穿透深度公式可以简化为: $\Delta = K \times 66.1 / \sqrt{f}$ (mm), f 是工作频率 (Hz), K 是常数对铜而言 $K=1$ 。

2.3 铜线的铜阻在高频下的阻值估算

铜的电阻率与趋肤效应深度 δ 影响的导线直径要求:

$$25^\circ\text{C} \text{ 时: } 1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \delta = \frac{66.1}{\sqrt{f}} \text{ (mm);}$$

$$100^\circ\text{C} \text{ 时: } 2.300 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}; \delta = \frac{75}{\sqrt{f}} \text{ (mm);}$$

选取导线的直径应 < 28

导线在高频的电阻值仍有变化, 电阻值的计算:

$$\frac{R_{ac}}{R_{dc}} = \frac{(d / 2\delta)^2}{(d / 2\delta)^2 - (d / 2\delta - 1)^2}$$

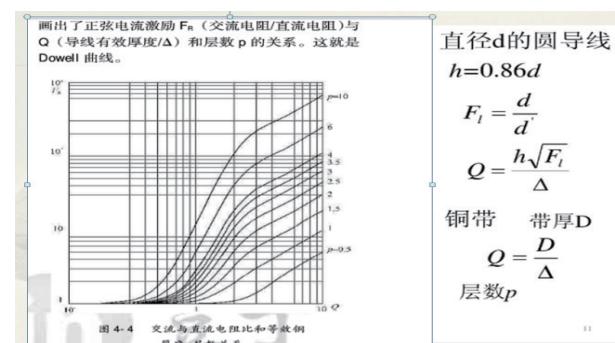
d : 线径 (mm); f : 工作频率 (Hz)

同时, 我们也作了一些改善方案, 采取优化方案, 面积等同, 周长等同, 两者权重五五开, 面积等同浪费, 周长等同, 各取 50%, 效果不错, 1.0 化成 0.5, 面积等

同四股, 周长等同两股, 取三股。关于单股线化为绞合线, 最有效计算方法: 1.0 化为 0.5 时一股采用三股; 1.0 化为 0.66 时一股采用两股; 4.0 化为 0.125 的股数: 4.0 变 2.0 变 1.0 变 0.5 变 0.25 变 0.125, 股数为 $3^*3^*3^*3=81$, 4.0 化为 0.16 的股数 $=3^*3^*3^*2=54$ 。

2.4 临近效应

对于在高频情况下, 交变磁场会在导体内部引起涡流, 电流在导体横截面上的分布不再是均匀的, 还存在有临近效应, 这交流损耗与直流损耗比较时, 对于绝缘漆包线厚度及所绕层数具有一定关系。这就是所谓的 Dowell 曲线, 下记图示 7 可以简单计算交流损耗值。



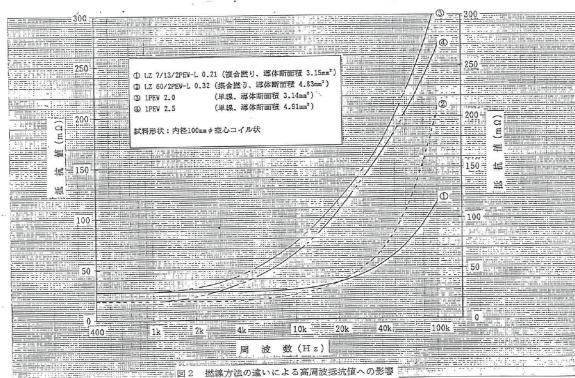
图示 7

2.5 损耗

下记表示所示 FR 控制在 1.5 左右是比较理想的, 所以如何更好控制, 确实是开发一大难题。图 8 是所示, 可以明显看出来, 其随着频率升高后电阻逐渐升高, 如 LITZ 线比较粗单线的电阻值明显减小很多, 所以高频电感及变压器所用铜箔或 LITZ 线明显增加, 就是这个原因。

线圈	圈数	层数	Q	FR(交流损耗 / 直流损耗)
1.8PEW(1×1)	10	1	5.7	5.7
0.47PEW(4×4)	10	4	1.38	8
0.18PEW(1×100)	10	10	0.57	1.9
0.125×20(扁线)	10	10	0.5	1.7
0.1×20(扁线)	10	10	0.4	1.3
0.1×20(上下两层)	10	5	5	1.2
0.18×50×2(上下两层)	10	5	7	1.6

f(kHz)	1	3	5	7	10	13	15	18	20	23
Δ(mm)	2.089	1.206	0.9346	0.7899	0.6608	0.5796	0.5396	0.4926	0.4673	0.2336
f(kHz)	25	30	35	40	45	50	60	70	80	100
Δ(mm)	0.4180	0.3815	0.3532	0.3304	0.3115	0.2955	0.2697	0.2497	0.2336	0.2098



图示 8

3 电子变压器技术

3.1 高频电子变压器技术

电子变压器在电源技术中的作用，电源技术对电子变压器的要求，电子变压器采用新软磁材料和新磁芯结构对电源技术发展的影响。电子变压器的使用条件，包括两方面内容：可靠性和电磁兼容性。以前只注意可靠性，现在由于环境保护意识增强，必须注意电磁兼容性。

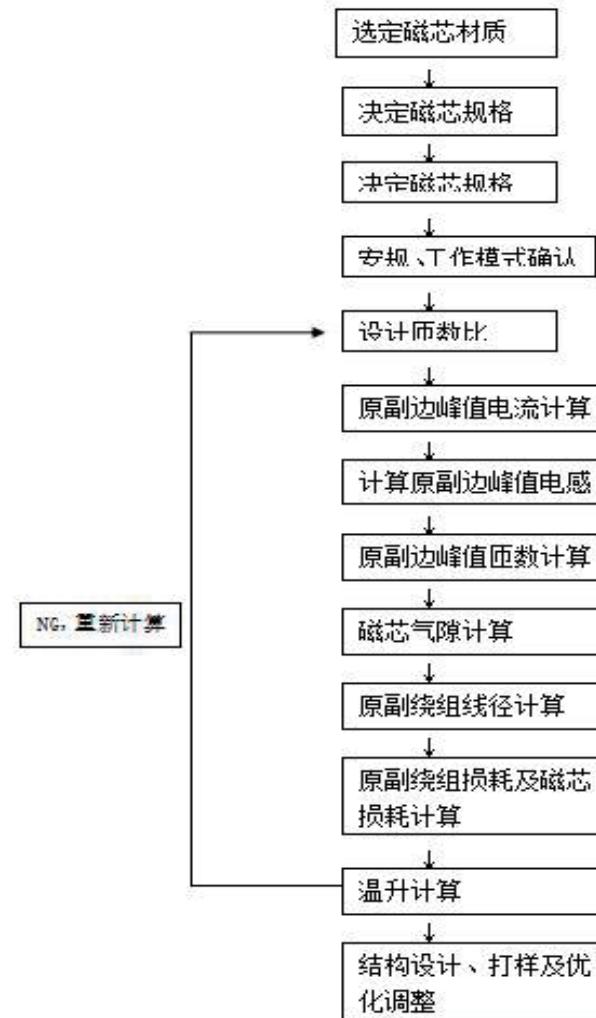
可靠性是指在具体的使用条件下，电子变压器能正常工作到使用寿命为止。一般使用条件中对电子变压器影响最大的是环境温度。决定电子变压器受温度影响强度的参数是软磁材料的居里点。软磁材料居里点高，受温度影响小；软磁材料居里点低，对温度变化比较敏感，受温度影响大。例如锰锌铁氧体的居里点只有 215°C 比较低，磁通密度、磁导率和损耗都随温度发生变化，除正常温度 25°C 而外，还要给出 60°C 、 80°C 、 100°C 时的各种参数数据。因此，锰锌铁氧体磁芯的工作温度一般限制在 100°C 以下，也就是环境温度为 40°C 时，温升必须低于 60°C 才可满足磁芯特性及安规要求。

电磁兼容性是指电子变压器既不产生对外界的电磁干扰，又能承受外界的电磁干扰。电磁干扰包括可听见的音频噪声和听不见的高频噪声。电子变压器产生电磁干扰的主要原因是磁芯的磁致伸缩。磁致伸缩系数大的软磁材料，产生的电磁干扰大。铁基非晶合金的磁致伸缩系数通常为最大 $(27\sim30)\times10^{-6}$ ，必须采取减少噪声抑制干扰的措施。高磁导 Ni50 坡莫合金的磁致伸缩系数为 25×10^{-6} ，锰锌铁氧体的磁致伸缩系数为 21×10^{-6} 。以上这 3 种软磁材料属于容

易产生电磁干扰的材料，在应用中要注意。 3% 取向硅钢的磁致伸缩系数为 $(1\sim3)\times10^{-6}$ ，微晶纳米晶合金的磁致伸缩系数为 $(0.5\sim2)\times10^{-6}$ 。这 2 种软磁材料属于比较容易产生电磁干扰的材料。 6.5% 硅钢的磁致伸缩系数为 0.1×10^{-6} ，高磁导 Ni80 坡莫合金的磁致伸缩系数为 $(0.1\sim0.5)\times10^{-6}$ ，钴基非晶合金的磁致伸缩系数为 0.1×10^{-6} 以下。这 3 种软磁材料属于不太容易产生电磁干扰的材料。由磁致伸缩产生的电磁干扰的频率一般与电子变压器的工作频率相同。如果有低于或高于工作频率的电磁干扰，那是由其他原因产生的。

对于高频变压器设计对于各设计开发者都有自己一套流程和方案，本文介绍一种方法，仅大家参考使用，如下图示 9。

变压器设计流程



图示 9

3.2 开关电源常见波形的参数

首先必须熟悉 AP 计算来缘, AP 法是选择磁材关键一步, 其单位是 cm^4 ; A_w 为磁心可绕导线的窗口面积 (cm^2) , A_e 为磁心有效截面积 (cm^2), $A_e \approx S_j = CD$, S_j 为磁心几何尺寸的截面积, C 为舌宽, D 为磁心厚度。

$$A_e \cdot A_w = \frac{U_p I_p + U_s I_s}{4k_w k_f f_s \Delta B j A e} \times 10^4 \times A_e \times 10^4 \text{ cm}^4 \quad (11)$$

根据计算出的 AP 值, 开关电源 6 种常见波形的参数见表 1。因方波和梯形波的平均值为零, 故改用电压均绝对值来代替占空比 $D=t/T$, 而且对平均绝对值、波形因数及波峰因数等数据进行说明。

表1 开关电源6种常见波形的参数

名称	波形图	电压有效值 U_{RMS}	电压平均值 \bar{U}	电压均绝对值 $ \bar{U} $	波形因数 k_r	波峰因数 k_p
正弦波	(a)	$0.707U_p$ $(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot U_p)$	0	$0.637U_p$ $(\frac{2}{\pi} \cdot U_p)$	1.111	1.414
半波整流波	(b)	$0.5U_p$	$0.318U_p$ $(\frac{1}{\pi} \cdot U_p)$	$0.318U_p$ $(\frac{1}{\pi} \cdot U_p)$	1.571	2
全波整流波	(c)	$0.707U_p$ $(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot U_p)$	$0.637U_p$ $(\frac{2}{\pi} \cdot U_p)$	$0.637U_p$ $(\frac{2}{\pi} \cdot U_p)$	1.111	1.414
方波	(d)	U_p	0	U_p	1	1
矩形波	(e)	$\sqrt{\frac{t}{T}} \cdot U_p$	$\frac{t}{T} \cdot U_p$	$\frac{t}{T} \cdot U_p$	$\sqrt{\frac{T}{t}}$	$\sqrt{\frac{T}{t}}$
锯齿波	(g)	$0.577U_p$ $(\frac{\sqrt{3}}{3} \cdot U_p)$	0	$0.5U_p$	1.155	1.732

图示 10

其中 KRP 为脉动系数, 它等于一次侧脉动电流 I_R 与峰值电流 I_P 的比值; 在连续电流模式时 $KRP < 1$; 不连续电流模式时 $KRP = 1$ 。Z 为损耗分配系数, 它表示二次侧的损耗与总功耗的比值, 在极端情况下, $Z=0$ 表示全部损耗发生在一次侧, 此时负载开路; $Z=1$ 或 0 表示全部损耗发生在二次侧, 此时负载短路。一般情况下取 $Z=0.5$, 因此 $BAC=0.5BMKRP$ 。将 $k_f = 1.115D$ 和 $BAC=0.5BMKRP$ 一并代入式 (11) 中, 整理后得到

$$AP = A_w A_e = \frac{0.433(1+\eta)P_o}{\eta K_w D J B_M K_{RP} f} \times 10^4 (\text{cm}^4) \quad (14)$$

这就是 AP 法选择磁心的实用公式。式 (14) 是按照单极性变压器的绕组电流及输出功率推导出来的, 适用于单端正激式或反激式高频变压器的设计。式中 AP 的单位为 cm^4 , P_o 的单位为 W。电流密度一般取 $J=200\sim600\text{A}/\text{cm}^2$ (即 $2\sim6\text{A}/\text{mm}^2$)。窗口面积的利用系数一般取 $K_w=0.3\sim0.4$ 如高频变压器有多个绕组, 就应计算全部绕组的匝数与对应电流的乘积之和

$$AP = A_w A_e = \frac{0.433(1+\eta)P_o}{\eta K_w D J B_M f} \times 10^4 (\text{cm}^4) \quad (15)$$

进一步分析可知, 对于不连续电流模式 ($KRP=1$), 式 (14) 可简化为。

$$AP = A_w A_e = \frac{0.62(1+\eta)P_o}{\eta K_w D J B_M f} \times 10^4 (\text{cm}^4)$$

对于单端正激式高频变压器而言, 最大占空 $D_{\text{max}} < 0.5$ 。如选择实际占空比 $D=0.4$, 电源效率 $\eta=80\%$ 。

$$AP = A_w A_e = \frac{152P_o}{B_M K_{RP} f}$$

窗口面积利用系数 $K_w=0.4$, $J=400\text{A}/\text{cm}^2$, 则式 (14) 可简化为上式都是根据不同电路结构和指定参数简化而来的, 当实际参数改变时, 计算结果会有误差。更为准确的方法是采用式 (14) 计算。

3.3 求值

对初级尖波电流、初级圈数、开路电感求值, 可由能量守恒, 得到 $1/2 \cdot (I_{p1} + I_p) \cdot D_{\text{Max}} \cdot V_{\text{inDCMin}} = P_{\text{out}}/\eta$ 令 $K = I_{p1}/I_p$, 则 $I_{p1} = K \cdot I_p$

当 $K=0$, 则 $I_{p1}=0$, 此时工作在临界或断续模式; 当 $0 < K < 1$, 此时工作在连续模式 K 值的选取最好是当输入电压为 230V, 电路工作在临界模式, 即 $K=0$, 此时的效率是最高的; 那么, 当输入电压为 90V 时, 电路工作在连续模式, $K \approx 0.25$ 左右。变换器的初级绕组电流, 初级电感量, 初级匝数由以下公式可以求出

$$\begin{aligned} I_p &= \frac{2 \times P_o}{(1+K) \times \eta \times V_{\text{min}} \times D_{\text{max}}} \\ N_p &= \frac{B_w \times L_g}{0.4 \times \pi \times I_p} \\ I_p &= \frac{V_{\text{min}} \times T_{\text{on}}}{(1-K) \times I_p} \end{aligned}$$

为了避免磁芯饱和, 应该在磁回路中加入一个适当的气隙, 气隙一般大于 0.01cm, 功率大, 则气隙要大。由

以上可得磁芯参数：根据求得的 A_e 值选择合适的磁芯，一般尽量选择窗口长宽之比比较大的磁芯，这样磁芯的窗口有效使用系数较高，同时可以减小漏感。

有了磁芯需再校正原边的匝数。根据下式：

$$A_e = \frac{L_g \times L_p \times 10^8}{0.4 \times \pi \times N_p^2}$$

再根据原、副边的匝比关系可以求出副边的匝数。有时求的匝数不是整数，将副边的匝数取整后再修改原边匝数 L_g 为气隙长度，单位为 cm

$$N_p = \frac{L_p \times I_p \times 10^8}{B_w \times A_e}$$

N_p 为原边匝数， A_e 为磁芯的截面积，单位 cm^2 ； L_p 为原边电感量，单位为 H(亨利) B_w 为工作磁通密度，单位为高斯 (B_w 一般选 0.7Bs 以下的值，Bs 是磁芯最大磁通密度，在磁芯的手册中 Bs 的单位是 mT 毫特斯拉， $1\text{mT}=10\text{GS}$ 高斯)

初级绕组电流有效值 I_{prms} :

$$I_{prms} = I_p \sqrt{\frac{D_{max}}{3} (1+K+K^2)}$$

次级绕组电流有效值 I_{srms} :

$$I_{srms} = \frac{I_{prms} \times V_{min} \times D_{max}}{V_s \times (1-D_{max})}$$

铜线线径按如下公式计算：

$$d = 2 \times \sqrt{\frac{I_{rms}}{J \times \pi}}$$

同时考虑到趋肤效果影响，必须选用 LITZ 线，避免交流损耗偏大。

$$\delta = \frac{75}{\sqrt{f}}$$

同时计算出原、副边直流电阻及交流电阻，进行计算出原、副边损耗。同时依据磁密和频率曲线计算出磁芯损耗，最后计算出温升是否满足要求。

$$\Delta T = \frac{23.5(P_{core} + P_{cu})}{\sqrt{AP}}$$

以上是考虑成本因数的一个合适选择，当磁芯截面积比较大时，气隙长度可按下限选择；截面积小，要选大一点，否则，磁芯易饱和。铜线电流密度按如下选取：(绝缘等级 CALL B)5W 以下：取 7.0A~9.0A/ mm^2 ；5W~24W：取 6.0A~8.0A/ mm^2 ；24W~50W：取 5.0A~7.0A/ mm^2 ；50W 以上：取 4.0A~6.0A/ mm^2 甚至更小（在变压器加有散热片时可选大一点，绕组在

线槽最里面，要选小一点，在线槽最外面，可选大一点，如要求变压器温升小，则电流密度要选小一点）。次级导线截面积计算也可以按输出直流每 1 安培需要的导线截面积 $0.125\text{mm}^2(0.4\text{mm})$ 、 $0.16\text{mm}^2(0.45\text{mm})$ 、 $0.196\text{mm}^2(0.5\text{mm})$ 、 $0.238\text{mm}^2(0.55\text{mm})$ 来计算，功率大输出电流大取大值，否则取小值，如输出 12V/5A，取 $0.238\text{mm}^2(0.55\text{mm})$ 来计算，导线总截面积 1.19mm^2 ，相当于 2 根 0.85mm 导线截面积。以上只作为参考，实际设计时要根据骨架规格，温升要求适当调整。气隙长度按如下选取：5W 以下：取 $0.01\sim0.02\text{cm}$ ；5W~24W：取 $0.02\sim0.04\text{cm}$ ；24W~50W：取 $0.03\sim0.05\text{cm}$ ；50W 以上：取 0.03cm 以上。因此设计变压器需要许多经验知识来进行的。

3.4 规律

推而广之，可总结出下述规律：

第一：在输出功率相同的条件下，全桥和半桥式变换器所需高频变压器的体积最小，单端正激式变压器的体积最大；

第二：在输出功率相同的条件下，连续电流模式的 AP 值要大于不连续电流模式，这表明连续电流模式所需高频变压器的体积较大，而不连续电流模式所需高频变压器体积较小；

第三：上述公式均未考虑磁心损耗、磁心材料存在的差异，磁心损耗随开关频率及环境温度升高而增大等因素，因此仅供选择磁心时参考。变压器体积取决于许多参数，例如磁芯损耗、铜损、冷却效率、绝缘、磁芯几何尺寸和最大输出功率。铜损耗却随磁通度和磁芯体积的减小而增加。当工作频率为或接近 100kHz 时，最大效率出大磁芯损耗 40~45%，铜损耗 55~60% 的时候。

因此变压器设计的第一步是确定磁芯和线绕尺寸是关键，当对实际应用中的变压器进行测试时，可通过一些细微的改动实现总体性的改善，例如，对于一个给定变压器，如果磁芯的功率损耗远小铜损（原、副边一起），则应减小匝数。这一措施需增加磁通密度，从而实现对总体损耗的优化（磁芯损耗加铜损）。原、副边绕组面积应与其损耗成正比，如果存在多个副边绕组，则绕组面积应与铜损成正比。

4 电感设计

4.1 参数

电感是一种磁芯中具有单个绕组的磁性元件，电感中主要流过具有较小交流纹波的直流电流。交流纹波的幅值与直流电流相比较小，对于功率电感来说，环形结构是最为常见的磁芯形状。对于功率电感设计来说，必须知道两个参数：直流偏置所需的电感和直流电流的值，以下过程确定如何选择磁芯尺寸和所需的匝数，可基于磁性厂商选择图。

1) 计算电感所需储能，厂商可提供数据是 $L^2 I^2$ ，这可计算 $E = L^2 I^2$ 。

2) 根据磁芯选择图中确定 E 值，该图由厂商提供，跟随 E 值的坐标找到与第一个磁芯尺寸相交处，这里坐标线通过磁导率部分从而可得至可使用的最小磁芯，如下图示 11。

3) 根据磁芯厂商提供的 AL 值计算匝数。

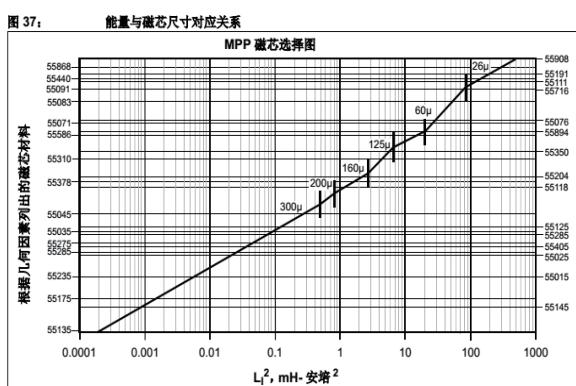
4) 根据厂商提供的磁芯数据手册计算磁场强度（单位为奥斯特）。

5) 从磁导率和直流偏置关系曲线确定初始磁导率的百分数。

6) 根据初始磁导率值，计算实际所需匝数。

7) 所对应负载电流和电流密度，求出相应线径并计算交流和直流损耗值。

8) 最后根据损耗铁损 PFe 和铜损 Pcu，温升的估算公式（自然冷）： $\Delta T = [(P_{Fe} + P_{Cu}) / Aw]^{0.833}$ ； ΔT ：温升（℃）； P_{Cu} ：铜损（mW）； Aw ：绕组表面积（cm²）。



图示 11

4.2 电感器性能因素

电感量在电流下的跌落 --- 跌落越大，纹波电流越大，正弦波形就越畸变，磁芯损耗也就越大；磁材 --- 磁材的自身单位损耗越大，器件的温升就越高；磁芯损耗分析，在同等粉芯材料下，颗粒越小，磁材的有效磁导率就越低，涡流损耗也就越低；工作频率越高，粉芯磁材的损耗也就高；dB 越大，损耗就越大；不同粉芯材料，在不同频率下的相同条件下的损耗是有很大差异。

4.3 举例如下

影响 PFC PFC 电感器设计例 --- 铁氧体方案，模块工作最小输入电压；输出电压与电流；PFC 工作频率；模块效率；纹波电流，模块在低压 175V 时需要输出 53.5V@55A，取模块效率为 90% 则 175V 输入时 PFC 电感的最大电流有效值为，其中纹波电流为 20%。

$$I_{rms} = \frac{V_{out} I_{out}}{V_{in} \eta} = \frac{53.5 \times 55}{175 \times 90\%} = 18.7A$$

$$\Delta I = I_{pk} \times 20\% = 26.4 \times 20\% = 5.82A$$

最大电感量和最大电流如下

$$L = \frac{V_i D}{f \Delta I} = \frac{175\sqrt{2} \times 0.4}{100 \times 10^3 \times 5.82} = 170\mu H$$

$$I_{pk} = \sqrt{2} I_{rms} = \sqrt{2} \times 18.7 = 26.4A$$

最大占空比和峰值电流如下

$$D = \frac{V_{PFC} - \sqrt{2} V_{inMin}}{V_{PFC}} = \frac{415 - 175\sqrt{2}}{415} = 0.40$$

$$I_{pk} = I_{pk} + \frac{\Delta I}{2} = 26.4 + \frac{26.4 * 20\%}{2} = 29.04A$$

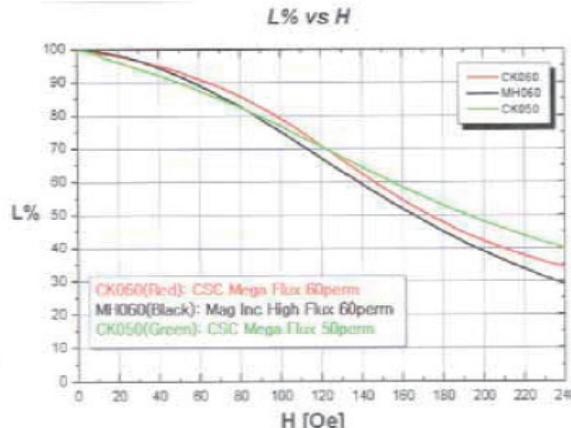
4.4 电感器设计例——磁芯方案

若采用磁磁为铁氧体来设计，磁芯选取两副 EE42/21/15 磁心并用，磁性材料为 PC40，单副磁芯数据 $Ae=176mm^2$, $Le=98.8mm$, $Ve=17300mm^3$, $Acp=183mm^2$, $Acw=275mm^2$, $Al=4460+/-25\%nH$, Weight=97.5g 100°C 时最大磁密不小于 390mT，实际取 $B_{max}=300mT$ ，铜损按 2W~5W 设计，甚至更低。

$$N = \frac{LI}{B_{max} A_e} = \frac{170 \times 10^{-6} \times 29.04}{0.30 \times 2 \times 176 \times 10^{-6}} = 47Ts$$

4.5 电感器设计例二——粉芯类方案

采用 FeSi46.7mm 直径的磁芯, 磁芯数据 $A_1=135\text{nH}$, $A_e=1.990\text{cm}^2$, $I_e=10.74\text{cm}$ 磁场强度按 150Oe 设计, 电感量剩余 65% 来计算, 根据下图示 12 来选取磁场强度、圈数、电感及相对应磁密。



图示 12

$$H = \frac{0.4\pi NI}{l_e}$$

$$L = N^2 A l = 49^2 \times 135 = 324.13\mu\text{H}$$

$$N = \frac{Hl_e}{0.4\pi I} = \frac{150 \times 10.74}{0.4\pi \times 26.4} = 48.6 \approx 49\text{Ts}$$

$$dB = \frac{LdI}{NAe} = \frac{210.63 \times 5.82}{49 \times 1.990} = 0.1257T$$

上接161页

器的设计不具备高电压的高空电磁脉冲滤波器, 以至于无法在危险的瞬态环境中保护敏感电子设备, 也无法被用来吸收那些潜在的与具有破坏性的过冲电压的。

由于, 即使高空电磁脉冲滤波器中可配备必要的压敏电阻瞬态抑制器, 而且所有线路都分别可进行滤波。但当今的制造商们都为其各等级的高空电磁脉冲滤波器配备了 GDT(气体放电管), 以替代压敏电阻的使用。但 GDT 设备是无法针对任何渗透进入的电磁脉冲噪声形成保护。换句话说, GDT 设备并不适用于对电子系统进行电磁脉冲的防护, 因此这种滤波器是绝对不适合用在高空电磁脉冲的防护解决方案中的。

$$L = 324.13\mu\text{H} \times 65\% = 210.63\mu\text{H}$$

4.6 温升

同时对安规要求的温升进行补充说明一下, 绝缘等级要求下, 对温升可作出一定要求, 在国际化生产中, 满足各国要求是很有必要选择。

	UL5085	UL1411	UL60850-1 UL6500	UL1310	IEC60850-1	IEC60065	IEC60335-1	PSE (别表第8)
A 檄(105°C) 热电偶法	65	65	65	65	65	-	65	60
A 檄(105°C) 电阻法	75	75	75	75	75	-	75	70
E 檄(120°C) 热电偶法	-	80	80	-	80	75 * 3	80	75
E 檄(120°C) 抵抗法	-	90	90	-	90	85 * 3	90	85
B 檄(130°C) 热电偶法	85	85	85	85	85	-	85	85
B 檄(130°C) 电阻法	95	95	95	95	95	-	95	95
F 檄(155°C) 热电偶法	110	105	105	-	105	110 * 4	105	110
F 檄(155°C) 电阻法	115	115	115	-	115	120 * 4	115	120
H 檄(180°C) 热电偶法	115	125	130	125	-	130	-	130
H 檄(180°C) 抵抗法	135	135	140	135	-	140	-	140
備考	室溫:40°C 室溫:25°C K1:圍繞周度X有指定場合, 从表中(X-25)值必須除去, 上昇值Limit(K)將定要減去X-25。 K2:熱帶條件場合, 表中值必須加上10上升值Limit(K)須減去10。 *3:UEV電線使用 *4:DHW電線使用	室溫:25°C * K K2 *1 室溫:25°C * 1 K2 室溫:95°C *2 室溫:25°C * 1 K2 室溫:30°C						

5 结论

通过对于磁性元件磁材和线材说明, 以及电子变压器及电感设计一些方法, 进而说明对于专业设计磁性元件, 还需具备对材料特性熟悉及应用。同时还需借鉴同时有益新产品和新工艺, 多参加一些同行技术研讨会和材料技术学习会。只有在实践不断积累和总结, 在理论更加丰富结合起来, 一定能达到很好的设计水平。

5 结论

由上综合的分析, 可知为了有效防护设备免受高空电磁脉冲的干扰与影响, 采用了正确的瞬态电压抑制器而不是高频滤波器, 这非常重要。这意味着, 尽管能够防护电力和电子设备免受高空电磁脉冲干扰的方法很多, 但没有必要使用昂贵的、专门的滤波器作为基本的保护手段。作为其替代方法, 能够防止高压脉冲的简单器件(例如: 压敏电阻器或者瞬态电压抑制器)就能很好的实现这种功能。此外, 将压敏电阻器或者瞬态电压抑制器与其他已知的保护手段和方法结合起来, 能使保护设备免受高空电磁脉冲干扰影响的装置变得更加简单, 更加廉价。