

高频电抗器介绍及设计思路

High frequency Reactor introduce and design ideas

聂应发

田村（中国）企业管理有限公司（惠州分公司），惠州

摘要：高频电抗器变换器是大功率电子技术领域的关键工艺技术，该技术通过半导体功率装置的转换动作，高效、高速、高精度地进行电力的变换和控制。高频电抗器与半导体元件并列，作为变换器变频器技术的重要电子部件。其作用是在回路中随转换动作而反复蓄积与释放电能，从而调整回路中的电压、电流。因包含电抗器的部件小型化和机器控制性的提高能促进转换高速化，故转变频率的高频化是追求的目标。变换器变频器的转换频率一般取决于机器容量。在数百千伏安以上的大容量机上大致采用数百~数千赫的转换频率；在数十千伏安~数百千伏安的中容量机上大致采用数千赫~数十千赫的转换频率；在数十千伏安以下的小容量机上，则大致采用数十千赫~数百千赫的转换频率。用于变换变频器机中的高频电抗器可分为AC（交流）电抗器和DC（直流）电抗器两大类。无论是使用AC或DC电抗器时，都包含源了电流波形转换的高频成分。因此，高频电抗器用铁芯材料必须具备优良的高频磁特性，特别是为了降低电抗器损失而具备高频低铁损，为实现电抗器的小型化而具备高饱和磁通密度，为降低电抗器噪音而具备低磁致伸缩特性。本文阐述通过高频电抗器使用原理及特性，高频电抗器分类及应用分析，以及高频电抗器设计及材质选择，及发展方向。要开发此高频电抗器需要丰富的理论和实际知识，因此本文拟对以上具体深入地探讨，对于从事高频电抗器开发者，有一定的参考价值。

关键词：高频，电抗器分类，磁性材料比较，设计

1 电抗器的分类

电抗器通常分为电源滤波扼流圈、交流扼流圈、饱和扼流圈三种。

饱和扼流圈常用于稳压和调压电路中，至少有两个绕组，工作绕组接入交流电路，控制绕组接入直流电路。铁芯中没有非磁性气隙，存在交、直流两种磁化，且交流成分很大，磁化曲线是非线性的，电流波形失真。

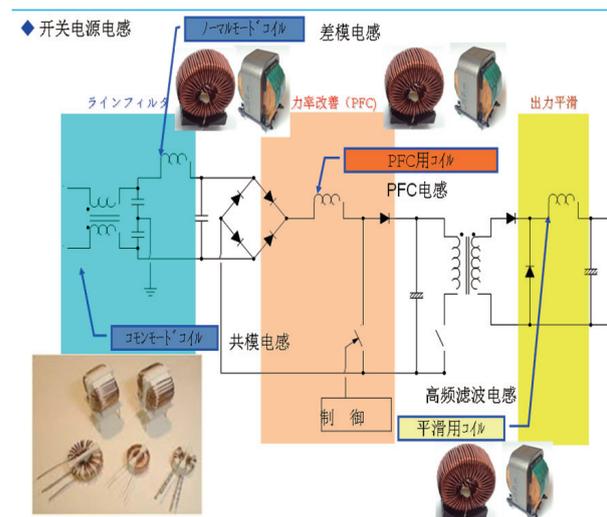
电源滤波扼流圈用于平滑整流后的直流，减小纹波电压。工作电流包括直、交流两部分，以直流为主，磁路中存在交、直流两种磁场，直流磁场为主。随着直流磁化电流的增大，铁芯接近饱和，电感量随之下降。磁路中要引入非磁性气隙，以减小电感随直流磁化电流增大而产生的下降。

交流扼流圈用于交流回路中，作为平衡、镇流、限流和滤波。工作在交流状态，类似单线圈变压器。其电磁过程与变压器的主要区别是：变压器铁芯中磁感应强度取决于外施电压，与实际负载电流无关；而大多数交流扼流圈铁芯中磁感应强度取决于负载电流，与外施电压无关。

分类应用图大致如下：

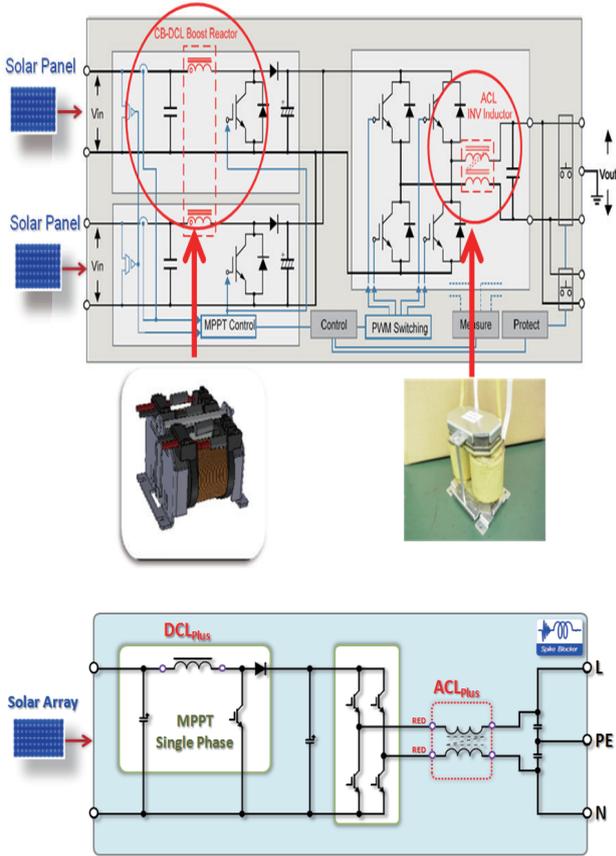
2 高频电抗器分布较广

2.1 开关电源使用如下：

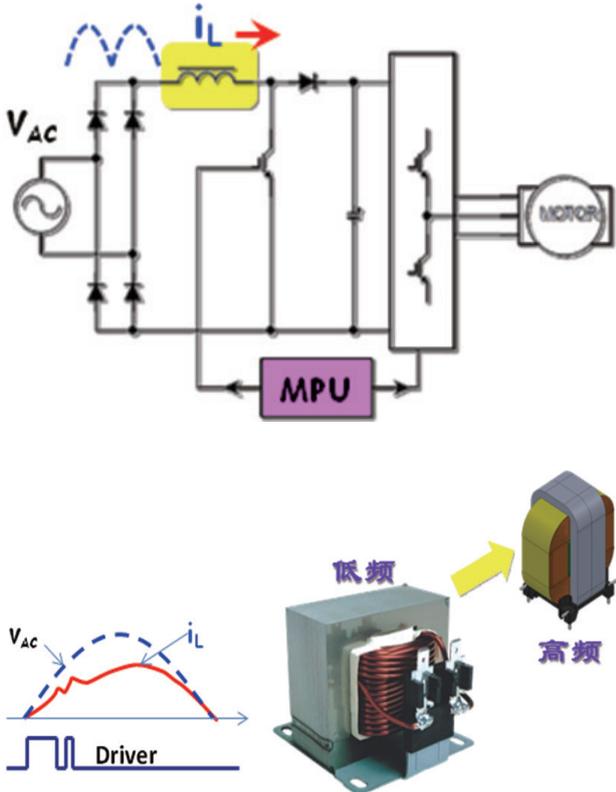


2.2 光伏太阳能所用 ACL,DCL 高频电抗器

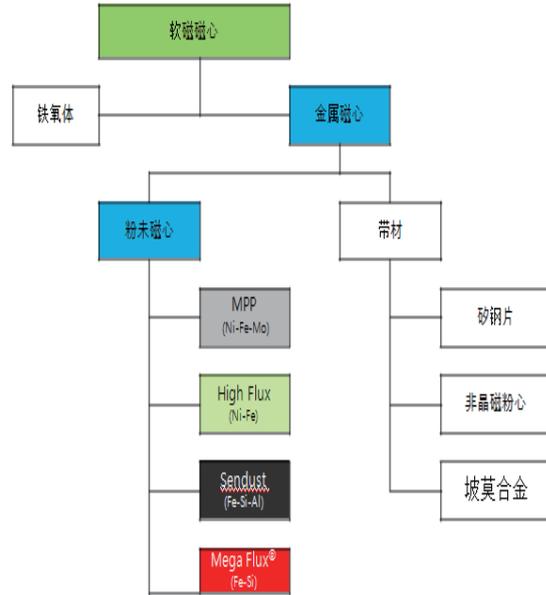
1. CB-DCL Boost Reactor + ACL INV Inductor



2.3 家用空调所用 PFC 高频电抗器



3 高频电抗器核心材料磁性材料分类如下：



主要有：铁硅铝磁粉芯 (Kool Mu, Sendust), MPP(铁镍钼磁粉芯), 高磁通 High Flux(铁镍磁粉芯), 铁硅合金 XFLUX, 非晶磁粉芯 AmoFlux, 锰锌铁氧体, 铁粉芯以及绕带磁芯等。主要应用于各类型扼流圈, 电感器, 滤波器, 变压器, 使用新能源的供电系统(太阳能、风能转换), 电信, 航空航天, 汽车, 军事, 计算机, 医疗等电子系统。电力电子器件的发展方向: 高频、高功率密度、小型、节能, 高频、高功率密度、小型、抗饱和等特点。

目前, 大部分电抗器带有气隙, 其缺点①漏磁增大引起较高辐射干扰②损耗增大, 温升集中③磁致伸缩在气隙处产生新的机械噪声④成本升高, 一致性不好。各种材料优缺点如下：

- a) 硅钢片涡流损耗高噪音大
- b) 铁氧体磁通密度小、体积大、热稳定性、差涡流损耗高、噪音大
- c) 非晶带材涡流损耗高、噪音大
- d) 软磁粉芯磁通密度高、体积小、噪音低、涡流损耗低、抗饱和能力强、频率稳定性好、温度稳定性好、可加工异型器件, 饱和磁致伸缩系数 λ_s ($\times 10^{-6}$) 比较：

冷轧硅钢：1-3 (取向), 1-5.5 (无取向); 坡莫合金：0-25

软磁铁氧体：14-21; 铁基非晶：27-30; 铁镍基非晶：12; 铁基纳米晶：1-2

钴基非晶：~0; 铁硅铝合金 / 铁硅 (6.5wt.%Si) 合金：

~0-0.1

现进行的复合软磁材料(含分布式气隙),电力电子器件向高频低损、高功率密度、微型化、EMC的方向发展,为软磁粉芯提供了广阔的市场空间。

3.1 磁元件分类及比较:

铁硅铝:Sendust 合金 铁硅:Fe-Si6.5,损耗最低成分;铁镍合金:Fe-Ni50(High-Flux):Bs最高的成分;Fe-Ni-Mo(MPP):Ni81-Fe17-Mo2,磁导率最高的成分;在高功率电感磁芯选择的问题上,磁芯、粉芯、铁硅铝以及铁氧体中的选择和比较是工程师经常探讨的问题。市场上高功率电感的磁芯选择还是挺多的,可供选择的电感材料有:铁硅铝(KoolM μ)、铁粉芯、铁硅(硅钢叠片)、间隙铁氧体、钼坡莫(MPP)和高磁通(HighFlux)等。那么他们究竟有什么特性适合怎么样的应用呢?

3.2 磁芯材料比较:铁硅铝与间隙铁氧体

铁硅铝和间隙铁氧体是两种常用的材质,在软饱和方面,间隙铁氧必须在下降曲线的安全区进行设计。铁硅被设计在受控制的下降曲线范围中,这样就能够提供容错特性,特别是在高功率时候。在磁通量比较方面,假设特定的50%下降设计点,铁硅铝(KoolM μ)的磁通量是间隙铁氧体的2倍以上,这使磁芯的尺寸可缩小35%,设计时可以把磁芯的尺寸缩小30%至35%。软饱和曲线使铁硅设计本身具有容错能力,而间隙铁氧体则没有。铁氧体磁通能力随温度变化,而铁硅保持相对稳定。很多铁氧体供应商或者厂家会给出产品在25℃到100℃不同环境下材质的差异。由于铁硅铝的材质及结果和间隙铁氧体不同,随着温度改变,变化不会很多。在边缘损耗方面,铁硅不会发生边缘损耗,而间隙铁氧有很大的边缘损耗。铁芯的间隙部分随着温度的增加损耗会增加。铁硅铝(KoolM μ)也有间隙,但是这是均匀的分布式间隙,因为这个形式,在高功率的应用上会更好。

对于尺寸和储能,从铁硅铝(KoolM μ)与锰锌铁氧体在LI²值比较中可以看出,当尺寸都是55mm的大小,测试铁硅铝用60 μ ,铁硅铝(KoolM μ)在体积大小相同的情况下,储能大概是锰锌铁氧体的2倍多。而当储能一样的时候,LI²值一样,铁硅铝(KoolM μ)体积缩小了很多,对于设计者来说,这有效缩小了设计尺寸。间隙铁氧体也有很多优点,间隙铁氧体可以有非常高的有效

磁导率 μ_{eff} ,铁氧体可以在500以上而铁硅目前受限于 $\mu_{eff}=125$ 。间隙铁氧体使用在一些低功率的设计时更为合适。

3.3 铁硅铝与铁粉芯

除了承受直流偏置外,开关稳压电感器还有一定交流电,通常在10kHz至300kHz。这种交流电流会产生高频磁场,造成磁芯损耗并导致磁芯变热。这种情况在铁硅铝(KoolM μ)中会减少,因此电感更有效率,温度更低。铁硅铝(KoolM μ)的磁芯损耗低于铁粉芯。关于接近零的磁致伸缩问题,铁硅铝(KoolM μ)非常适用于消除滤波电感中的音频噪音。铁硅铝(KoolM μ)在制造时没有使用有机粘结剂,因此,没有任何热老化问题。所有铁硅铝(KoolM μ)磁芯都能在200℃下连续操作,相对的,铁粉芯有磁致伸缩。

3.4 铁硅铝与硅铁

大型电感器中也会使用特级的硅铁叠片,通常是块状或条状。硅铁的优势在于饱和磁通密度较高。铁硅形状(E、U、I型的磁芯)也可以经过适当的构造应用于大型电感器。虽然硅铁有较高的饱和磁通密度,但铁硅具备更多优点,例如较好的软饱和度、很低的磁芯损耗、温度稳定性和较低的成本。硅铁块具有离散间隙,与铁硅铝(KoolM μ)的分布式间隙不同,因此随着电流增加,饱和出现要快的多。铁硅铝(KoolM μ)可利用饱和和曲线的优点,设计出较小的电感器。

硅钢装配件中所用的环氧树脂中一般不能像铁硅铝(KoolM μ)在200℃操作。铁硅铝(KoolM μ)成本低于同等大小的硅钢。在铁损的部分,铁硅的磁芯损耗远低于硅钢叠片。用20 μ 铁硅铝和硅铁相比较,在10kHz和50kHz的频率情况下,硅铁的磁损更厉害。

3.5 铁硅铝的特点和应用

简单来说,它是由铝-硅-铁组成,它拥有相当高的B_{max}(1.05T),它的磁芯损耗远低于铁粉芯及高磁通,有低磁致伸缩(低噪音),是低成本的储能材料,无热老化,可以用于替代铁粉芯,在高温下性能非常稳定。

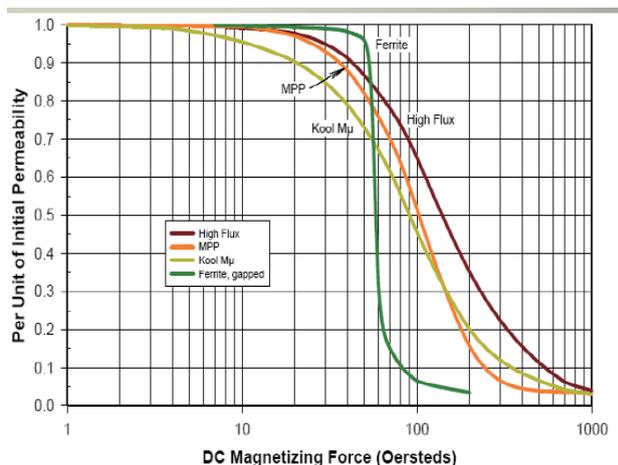
总结一下铁硅铝的特点:适当的成本,优于钼坡莫合金/高磁通以及复合合金;较低的损耗,优于铁粉芯;高饱和度,优于间隙铁氧体;接近零的磁致伸缩,优于铁粉芯;无热老化现象,优于铁粉芯;软饱和,优于间隙铁氧体及

复合合金。

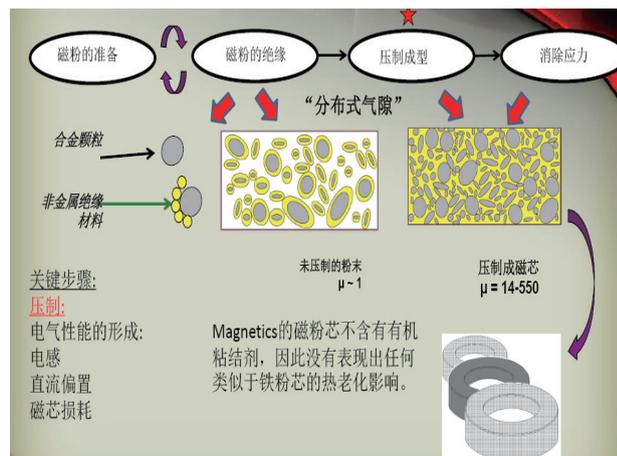
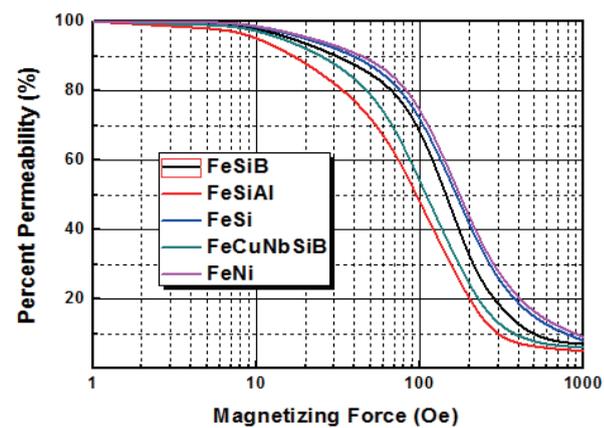
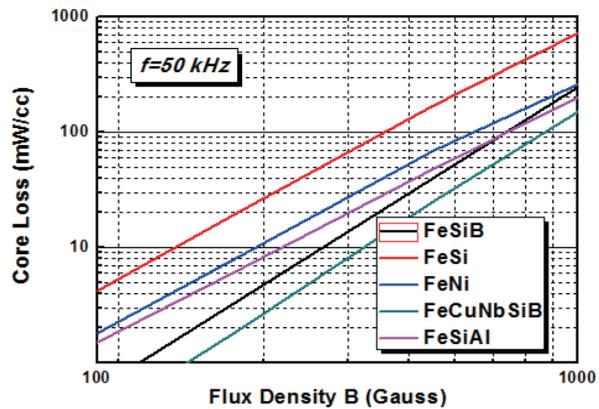
铁硅铝 (Kool M μ) 有六种磁导率 (26 μ 、40 μ 、60 μ 、75 μ 、90 μ 和 125 μ) 和三种形状 Toroids、Ecore、Ucore&Blocks。铁硅铝应用包括功率因数校正扼流圈, 升压/降压稳压器, 直流输出电感器和回归变压器。大型铁硅铝 Kool M μ 应用在高电流 (功率) 电感器、太阳能转换、UPS 不断电系统、混合动力汽车、风能转换和其他高电流应用。平板型的铁硅铝有两种选择, 有传统的方形和圆形。相对方形的, 圆形的有诸多优点, 比如缩小整个电感器因绕制而增加的体积, 在相同的匝数下减少绕线线长的使用, 最小化的 DCR (直流电阻), 降低铜损, 降低使用铜导线的成本和整个电感器的绕制成本。铁硅铝 (Kool M μ) (平板型) 的特点有应用于高电流的设计, 漏磁减少至非常低, 较佳的直流偏置特性、良好的散热效果和温度稳定性、具有储能量的高性能, 可直接安装在 PCB 上。铁硅铝 (Kool M μ) (平板型) 的应用有在 DC/DC 转换器、大电流扼流圈、电脑中的中央处理器。

综上所述, 在磁芯的选择上, 要着重注意四个问题: 第一, 选择合适的磁芯材料, 铁硅铝 (KoolM μ)、钕坡莫合金、高磁通、铁硅合金或铁氧体; 第二, 选择合适的磁芯尺寸, 包括形状和大小; 第三, 选择时要注意绕制上的考量, 比如电流密度、绕线的长短和匝数; 第四, 选择时要兼顾性能和成本。

粉芯基本性能对比:



常规物性检测内容包括: 电感分级、直流偏置、损耗、拉断强度、表面耐压等。

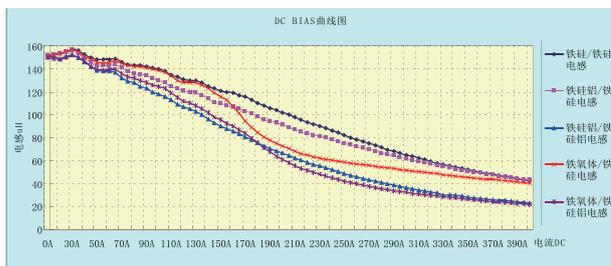


4 高频电抗器今后发展趋势:

4.1 磁性材料混合使用:

磁组合电感, 推荐铁氧体/铁硅组合: DC BIAS 良好。具有更低的铁芯损耗。具有更低的成本。

铁氧体/铁硅组合缺点: 需关注产品的过载能力。



4.2 扁线立绕、磁性材料分段分布间隙：

4.2.1 扁线立绕其优点如下：

L&Q 值频率特性好，谐振频率高。绕线只一层，寄生电容仅 17.6pF (传统工艺为 150pF)，具有较好的 EMI 效果。散热面积比传统工艺大，同等条件下温度可降 20℃。

保持同样温升时，可以使用更小的导体，降低成本。

扁线立绕式磁环电感缺点：电流情况下可能因震动造成的噪音。

4.2.2 分布式气隙电感的优势：

Q 值更高。ACR 值更小，效率高。DC BIAS 高分布式气隙电感的缺点：工艺相对更复杂一点。

4.3 不同地区对使用电抗器系统的效率要求：

$$\eta_{\text{总}} = 0.03 \cdot \eta_{5\%} + 0.06 \cdot \eta_{10\%} + 0.13 \cdot \eta_{20\%} + 0.10 \cdot \eta_{30\%} + 0.48 \cdot \eta_{50\%} + 0.20 \cdot \eta_{100\%}$$

欧洲效率：

% of Max. Power	5%	10%	20%	30%	50%	100%
Weight	0.03	0.06	0.13	0.10	0.48	0.20

加州效率：

% of Max. Power	10%	20%	30%	50%	75%	100%
Weighted	0.04	0.05	0.12	0.21	0.53	0.05

中国效率（一类地区）：

% of Max. Power	5%	10%	20%	30%	50%	75%	100%
Weighted	0.01	0.02	0.04	0.12	0.3	0.43	0.08

5 电感设计步骤

a) 拓扑决定电路参数 b) 工作频率决定磁芯 c) 最大磁

密和 d) 最大磁通摆幅 e) 粗选磁芯形状和尺寸 f) 决定损耗限制 g) 计算匝数 h) 计算气隙长度 i) 计算导体尺寸和线圈电阻 j) 计算线圈损耗，总损耗和温升

5.1 根据拓扑决定电路设计参数

a、电感量 L 由纹波决定；b、满载直流感应电流的平均值决定磁芯的直流工作点；c、最大纹波电流的要求就是电感量的要求；d、最大峰值短路限制电流 I_{SP} ，限制了最大磁密；f、最大允许损耗和温升就是损耗计算，主要是直流损耗，交流损耗较小。

设计一个磁粉芯电感，用于 BUCK 变换器输出滤波电感。

输出功率 $P_o=250W$ 输入电压范围 $V_{in}=90\sim 270V$ 输出电压 $400V_{out}$

开关频率 f 为 100KHz. 电感器纹波电流 ΔI 为 20% I_{peak}

使用材料：磁芯材料铁硅铝 KoolMu 要求为转化效率 95% 以上

$$a) P_{in}=P_o/95\%=263w$$

$$I_{pk}=\sqrt{2} \frac{P_{in}}{V_{in(min)}} = \frac{263}{90} * 1.414 = 4.12A$$

$$\Delta I=0.2I_{pk}=0.824A$$

注意：在其他结构中 $I_{max}=I_{peak}+\Delta I/2=4.6A$

$$b) D_{MAX} = \frac{V_0 - \sqrt{2}V_{in(min)}}{V_0} = \frac{400 - 90\sqrt{2}}{400} = 0.683$$

$$c) L = \frac{\sqrt{2} V_{in(min)} D_{max}}{\Delta f} = 1.05mH \quad I_{max}=4.12A \quad f=100kHz$$

$$\Delta I=20\%I_{pk}=0.824A$$

$$d) \text{求 } R_{ac}=R_{dc} \text{ 时的趋肤深度 } \Delta = \sqrt{\frac{6.62}{f}} = \sqrt{\frac{6.62}{100000}} = 0.0209cm$$

导线直径 $OD=0.0418cm$; $I_{rms}=4.12/2=2.91A$; 5 股 26 号线

$$e) \text{磁芯初选 } L^2=4.12^2 \times 1.05=17.8mH \cdot A^2$$

f) 确定绕线圈数 假定没有直流偏置效应 (DC Bias)

$$N = \sqrt{\frac{L(mH)10^6}{AL}} = \sqrt{\frac{1.05 \times 10^6}{81 \times 92\%}} = 118.7$$

直流偏置效应 DC bias

$$H = \frac{NI}{le(cm)} \quad NI=4.12 \times 119/9.84=49.8A \cdot T/cm$$

g) 计算带载绕线圈数

$$L \sim N^2; H \sim N, \mu_{eff} \sim H^{1-x} \Rightarrow \mu_{eff} \sim N^{1-x} \quad 119/66\%=180T$$

试算为 170T 时 $H = \frac{NI}{le(cm)} = \frac{4.12 \times 170}{9.84} = 71.7$

$\mu_{eff} = 51\%$ $L = N^2 \times \frac{A_{eff}}{10^6} = \frac{170 \times 170 \times 81 \times 51\%}{10^6} = 1.17mH >$

1.05mH

考虑最坏情况

h) 验证可行性 绕得下吗? 取: 5 股 26 号线 170 圈 绕线面积 = $1.6 \times 0.001 \times 5 \times 170 = 1.36cm^2$

绕组因子: $\frac{136}{427} = 32\% < 40\%$

i) 损耗 磁芯损耗 (Core Loss) $P = PL \times Ae \times le$
 $PL = a \times (\Delta B/2)^b \times f^c$

$B = \left[\frac{a+bH+cH^2}{1+dH+eH^2} \right]^x$; $\Delta B = B_{max} - B_{min}$

$H = NI/le$ 注意区别前面提到的 $H = I/2\pi r$ $H_{max} \sim I_{max}$;

$H_{min} \sim I_{min}$

考虑最坏情况, 相比于纹波电流, 载波峰值看做直流 $I_{max} = I_{Peak} \Rightarrow H_{max} = 71.7 A \cdot T/cm \Rightarrow B_{max} = 0.47T$

$I_{min} = I_{Peak} - \Delta I \sim H_{min} = 57.4 A \cdot T/cm \Rightarrow B_{min} = 0.40T$

$\Delta B = 0.07T$ $PL = 87mW/cc$ $P_c = PL \times Ae \times le = 0.87w$

j) 铜线损耗 DC Copper Loss

$RDC = MTL \times N \times \rho = 57mm \times 170 \times 0.1345 \Omega/m \div 5 = 0.26 \Omega$

$P_w = I_{rms}^2 R = 2.912 \times 0.26 = 2.2w$

总损耗

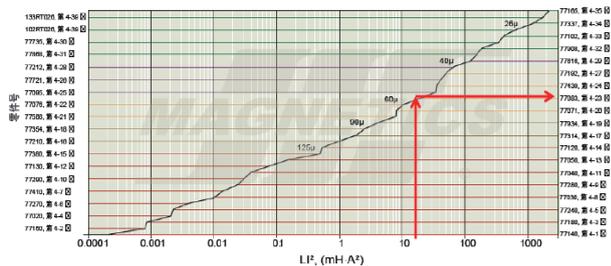
$P_{total} = P_c + P_w = 2.2 + 0.87 = 3.07w$

AC Copper Loss? 集肤效应和临近效应可能导致损耗非常大

AWG 导线规格	电阻 Ω/m (x.10 ⁻³ Ω/ft)	导线外径 O.D. (cm) 双涂层	导线截面积		电流容量, 安培 (显示为 Ampos/cm ²)				
			sq. cm ² (x0.0001)	200	400	500	600	800	
6	.00130	.421	139.2	26.6	53.2	66.5	79.8	106	
7	.00163	.378	111.0	21.1	42.2	52.8	63.3	84.4	
8	.00206	.336	88.7	16.7	33.5	41.8	50.2	66.9	
9	.00260	.299	70.2	13.3	26.5	33.2	39.8	53.1	
10	.00328	.267	56.0	10.5	21.0	26.3	31.6	42.1	
11	.00414	.239	44.5	8.34	16.7	20.8	25.0	33.3	
12	.00521	.213	35.8	6.62	13.2	16.5	19.8	26.5	
13	.00656	.1902	28.4	5.25	10.5	13.1	15.8	21.0	
14	.00828	.1715	23.1	4.16	8.33	10.4	12.5	16.7	
15	.01044	.1529	18.4	3.30	6.61	8.26	9.91	13.2	
16	.01319	.1389	14.72	2.62	5.23	6.54	7.85	10.5	
17	.01659	.1224	11.77	2.08	4.16	5.20	6.24	8.32	
18	.02095	.1095	9.42	1.65	3.29	4.11	4.94	6.58	
19	.02640	.098	7.54	1.31	2.61	3.27	3.92	5.22	
20	.03323	.0879	6.07	1.04	2.08	2.59	3.11	4.15	
21	.04190	.0785	4.84	0.823	1.65	2.06	2.47	3.29	
22	.05315	.0701	3.86	0.649	1.30	1.62	1.95	2.59	
23	.06683	.0632	3.14	0.518	1.04	1.29	1.55	2.07	
24	.08422	.0566	2.52	0.409	0.819	1.0236	1.23	1.64	
25	.10630	.0505	2.02	0.325	0.649	0.812	0.974	1.30	
26	.13458	.0452	1.60	0.256	0.512	0.641	0.769	1.02	
27	.16873	.0409	1.31	0.204	0.409	0.511	0.613	0.817	
28	.0214	.0366	1.05	0.161	0.322	0.402	0.493	0.644	
29	0.266	.033	.855	0.129	0.259	0.324	0.388	0.518	

磁芯选型图

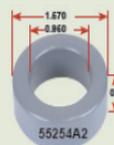
Kool Mμ® 环型和跑道型



39.9 mm 外径

磁芯尺寸 外径(最大) 内径(最小) 高度(最大)

涂层前 (标称)	39.90 mm/1.570 in	24.1 mm/0.950 in	14.5 mm/0.570 in
涂层后 (限定)	40.77 mm/1.605 in	23.3 mm/0.918 in	15.4 mm/0.605 in



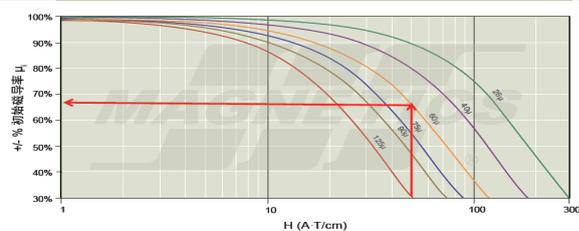
磁导率 (μ)	A _L 8%	零件号			
		MPP	High Flux	Kool Mμ®	XF _{low} ®
14	19	55257	55257	-	-
28	35	55256	55256	77256	-
40	54	-	-	77260	-
60	81	55083	55083	77083	78083
75	101	-	-	77259	-
90	121	-	-	77258	-
125	168	55254	55254	77254	-
147	198	55253	55253	-	-
190	215	55252	55252	-	-
173	233	55248	-	-	-
200	280	55251	-	-	-
300	403	55249	-	-	-
550	740	55250	-	-	-

物理特性	
窗口面积	427 mm ²
截面积	107 mm ²
路径长度	98.4 mm
体积	10,800 mm ³
重量 - MPP	92 g
重量 - High Flux	87 g
重量 - Kool Mμ®	65 g
重量 - XF _{low} ®	78 g
面积乘积	45,800 mm ⁴
绕组线圈尺寸	
最大外径 (70%)	58.4 mm
最大高度 (70%)	35.2 mm

绕组线长度 (每匝) - 请参考磁芯数据手册	
绕组因子	线长度 (mm)
0%	48.2
20%	54.3
25%	55.8
30%	57.0
35%	58.8
40%	60.2
45%	62.1
50%	63.7
60%	67.3
70%	71.5
表面积	
未绕线磁芯	4,840 mm ²
40% 绕组因子	7,160 mm ²

磁导率 - 直流偏置曲线

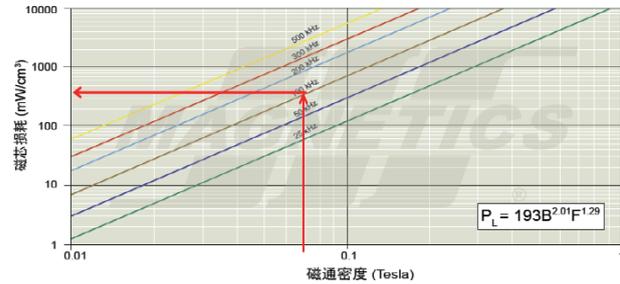
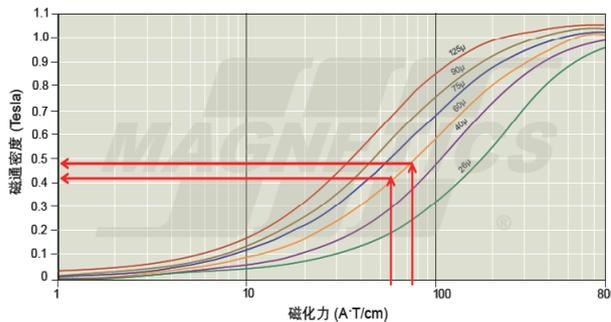
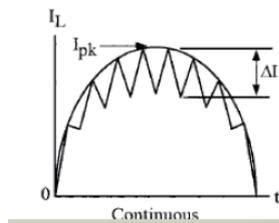
Kool Mμ®



$(\mu/\mu_i) = a + b * H + c * H^2 + d * H^3 + e * H^4 = 66\%$

物理特性	
窗口面积	427 mm ²
截面积	107 mm ²
路径长度	98.4 mm
体积	10,600 mm ³
重量 - MPP	92 g
重量 - High Flux	87 g
重量 - Kool Mμ®	65 g
重量 - XF _{LUX} ®	78 g
面积乘积	45,800 mm ⁴

AWG 导线规格	电阻 Ω/m (x.305=Q/ D)	导线外径 O.D. (cm) 及涂层	导线截面积 sq. cm ² (x0.0001)	电流容量, 安培 (单位为 Amms/cm ²)				
				200	400	600	800	1000
6	.00130	.421	139.2	26.6	53.2	66.5	79.8	106
7	.00163	.376	111.0	21.1	42.2	52.8	63.3	84.4
8	.00206	.336	88.7	16.7	33.5	41.8	50.2	66.9
9	.00260	.299	70.2	13.3	26.5	33.2	39.8	53.1
10	.00328	.267	56.0	10.5	21.0	26.3	31.6	42.1
11	.00414	.238	44.5	8.34	16.7	20.8	25.0	33.3
12	.00521	.213	35.6	6.62	13.2	16.5	19.8	26.5
13	.00656	.1902	28.4	5.25	10.5	13.1	15.8	21.0
14	.00828	.1715	23.1	4.16	8.33	10.4	12.5	16.7
15	.01044	.1529	18.4	3.30	6.61	8.26	9.91	13.2
16	.01319	.1369	14.72	2.62	5.23	6.54	7.85	10.5
17	.01658	.1224	11.77	2.08	4.16	5.20	6.24	8.32
18	.02095	.1095	9.42	1.65	3.29	4.11	4.94	6.58
19	.02640	.098	7.54	1.31	2.61	3.27	3.92	5.22
20	.03323	.0879	6.07	1.04	2.08	2.59	3.11	4.15
21	.04190	.0785	4.84	0.823	1.65	2.06	2.47	3.29
22	.05315	.0701	3.86	0.649	1.30	1.62	1.95	2.59
23	.06663	.0632	3.14	0.518	1.04	1.29	1.55	2.07
24	.08422	.0566	2.52	0.409	0.819	1.0236	1.23	1.64
25	.10620	.0505	2.00	0.325	0.649	0.812	0.974	1.30
26	.13458	.0452	1.60	0.256	0.512	0.641	0.769	1.02
27	.16973	.0409	1.31	0.204	0.409	0.511	0.613	0.813
28	.0.214	.0366	1.05	0.161	0.322	0.402	0.483	0.644
29	.0.266	.033	.855	0.129	0.259	0.324	0.388	0.518



温升计 $A_s=71.8\text{cm}^2$ 预定温升 :

$$\Delta T = \left[\frac{P}{A_s} \right]^{0.833} = \left[\frac{3.07 \times 1000}{71.8} \right]^{0.833} = 23^\circ\text{C}$$

由于环境温度为 20°C , 线圈电阻温度为 43°C , 如果环境温度为 40°C , 则线圈温度为 63°C , 需要重新计算铜线的直流电阻。铜的电阻温度系数为 $=0.39\%/^\circ\text{C}$

$$1.0039^{43} = 1.18 \quad \text{线圈电阻损耗 : } P_w = 1.18 \times 2.2 = 2.6\text{W}$$

重新计算温升

$$\Delta T = \left[\frac{P}{A_s} \right]^{0.833} = \left[\frac{3.47 \times 1000}{71.6} \right]^{0.833} = 25.3^\circ\text{C}$$

6 结语 :

电感计算后的产品貌似简单, 但涉及的理论知识很多: 主要有电路理论、磁芯结构尺寸、绝缘等级、温升等。其中导线的电阻、磁芯的参数会随环境温度而变化, 温度及温升与电感所处的环境、工作状态密切相关, 互相制约着, 使得计算十分复杂。即使是计算好的电感永远是个近似值。高频电抗器以其优良的性能和有竞争力的性能价格比, 可以肯定它会在较大领域内取代传统低频电抗器, 随着高频电感器技术性能进一步提高, 它将会在电源及电力电子领域中有更广阔的应用前景。