

浅谈金属粉芯在高频电感器技术与应用

聂应发

田村(中国)企业管理有限公司, 惠州 516003

摘要: 通过对金属磁粉芯各种材料及电感设计原理和方法说明介绍, 改变其圈数及负载时磁场强度进行控制, 达到不同负载情况下, 而得到相应电感值, 同时对其损耗及温升计算方法进行详细说明, 以及如何在功率电感进行优化设计, 达到性价比好产品。

关键词: 金属磁粉芯, 功率电感设计, 损耗及温升计算

Discussion on technology and application of metal powder core in high frequency inductor

Nie ying fa

Tamura corporation of china Ltd., Huizhou 516003

Abstract: by introducing the design principles and methods of various materials and inductors of metal magnetic powder core, changing the number of turns and the magnetic field strength when the load is controlled to achieve the corresponding inductance value under different load conditions, meanwhile, the calculation methods of its loss and temperature rise are described in detail, as well as how to optimize the design of power inductors to achieve a cost-effective product.

Keywords: Magnetic powder core, Design power inductor, Calculation of loss and Temperature Rise

1 引言

大家都知道, 金属磁粉芯通常将磁性材料极细的粉末和作为粘结剂的复合物混合在一起, 通过模压、固化一般形成环状的粉末金属磁芯。由于磁粉芯中存在大量非磁物质, 相当于在磁芯中存在许多非磁分布气隙, 在磁化时, 这些分布气隙中要存储相当大的能量, 因此可用这种磁芯作为功率电感。但是能量不存储在磁粉芯中高磁导率的金属合金磁材料部分, 带气隙磁芯特性产生偏斜, 即有效磁导率降低。可以通过改变颗粒尺寸、磁性材料与复合材料比例不同, 获得不同的有效磁导率。按磁芯的磁导率制造和分类, 磁芯有效磁导率范围从 15 到 550。由于磁粉芯是磁粉和粘结物的复合体, 首先这些细小的非磁气隙的分布磁阻引起磁通和磁通在整个磁芯中分布是不均匀的和无序的, 而不是像无气隙理想化的环形合金磁芯内部的磁化—从环的内径向外径有规则地磁化边界移动。其次, 在低

磁通密度时, 磁通趋向集中于最容易通过的路径(低磁阻), 磁粒相互间靠近的部分。当磁通密度增加时, 这些容易经过的路径区域首先饱和。这些首先饱和的磁粒部分的磁导率变 μ_0 , 磁阻加大, 相当于气隙加宽了, 增量磁通增加移动到磁材料尚未饱和的路径。这个过程继续着, 随着磁通的增加, 增量气隙有效宽度增加。增量磁导率(或电感系数)进一步减少, 可看到 B-H 曲线不再像在磁芯达到饱和前有好的线性, 而是缓慢进入饱和。在粉芯金属磁芯中, 这种 μ_e 的非线性特性是不可避免的, 除非限制磁通密度远小于 B_s 。在某些电感器中, 希望电感随直流激励变化而变化, 可以利用 μ_e 的非线性做成非线性电感。磁粉芯根据含磁性材料粉末的不同有五类: 铁粉芯、铁硅铝(Koolmu)、铁硅(Mega flux)、高磁通密度(High fluxs 铁镍磁粉)、铁镍钼莫合金(MPP)。

五种磁芯特点如下:

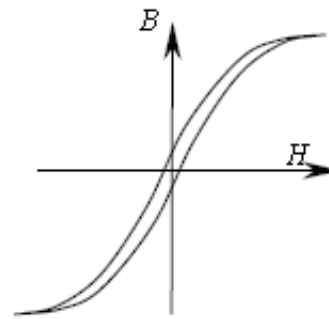
(1) 铁粉芯 a) 成分是极细的铁粉和有机材料粘合; b) 磁导率在 10 ~ 100 之间; c) 低成本; d) 材料很软, 甚至可用小刀在磁芯上切开缺口; e) 磁芯损耗相当高。

(2) Mega flux 磁芯 (铁硅) a) 合金组成成分为硅 6.5% 和铁 93.5%; b) 损耗低; c) 材质硬; d) 典型的磁导率为 26, 60, 75, 90, 125 和 160。

(3) Sendust 磁芯 (铁硅铝) - 又名山达斯 a) Sendust 合金组成成分为铝 6%, 硅 9% 和铁 85%; b) 损耗较低; c) 材质硬; d) 典型的磁导率为 26, 60, 75, 90, 125 和 160。

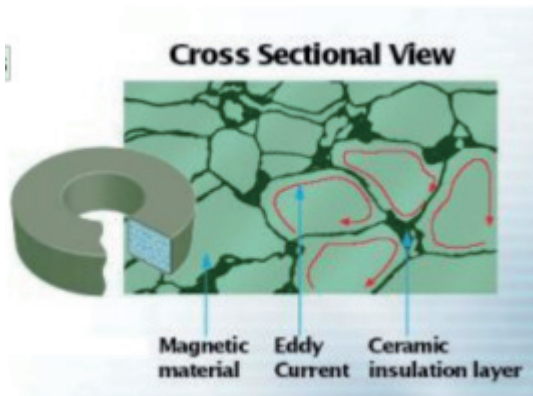
(4) 高磁通密度-铁镍磁粉芯 a) 合金粉末由镍 50% 和铁 50% 组成; b) 因为镍成本高, 所以比铁粉芯和铁铝硅粉芯贵; c) 在所有磁粉芯中, 磁通密度最高; d) 磁芯损耗高于铁铝硅, 而低于铁粉芯; e) 磁导率从 14 到 200。

(5) MPP- 铁镍钼莫合金-粉末 a) 合金粉末成分为钼 2%, 81% 镍和铁 17%; b) 所有磁粉芯中损耗最低; c) 饱和磁通密度最低; d) 因为镍含量高, 价格昂贵; e) 温度稳定性最好; f) 典型的磁导率由 14 到 550。

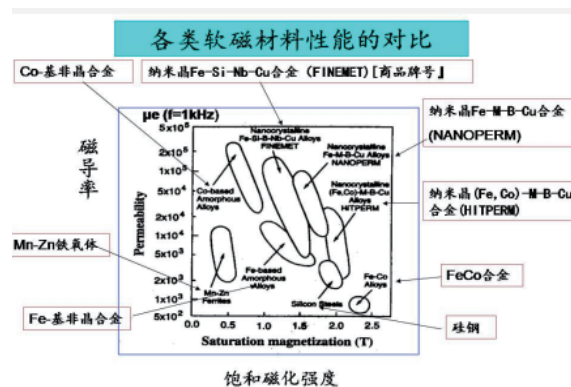


典型的磁粉芯的磁滞回线

在开关电源频率因铁粉芯损耗最大, 铁粉磁芯很少应用, 是磁粉芯中最差的。铁硅铝较好, 坡莫合金最好, 但价格最高。在滤波电感或连续模式反激变压器中 (这里将电感能量存储在磁芯内的非磁区域), 如果 ΔI 或磁通摆幅足够小, 允许损耗低到可接受的情况下可以使用这些复合材料磁芯。铁镍钼莫合金磁粉芯价格较高, 一般用于军工或重要的储能元件。但应当注意到磁粉芯的磁导率随着磁芯的磁场强度变化较大, 如果这种电感量变化对电源系统质量造成影响较大时, 应当慎用。在电源中常用于 EMC 滤波电感。



磁粒之间的易通路径



材料	磁导率	磁通密度 (KG)	磁芯损耗	DC BIAS	相对价格	温度稳定性	居里温度
MPP (铁镍钼)	26-200	7	较低	较好	高	最好	450
高磁通 (铁镍)	26-160	15	低	最好	中等	较好	500
铁硅铝	26-125	10	低	好	低	好	500
铁硅	26-160	16	中等低	最好	低	较好	700
铁粉	10-100	10	高	差	最低	差	770
铁硅 (带 GAP)		20	高	较好	最低	好	740
非晶 (带 GAP)		15	低	较好	中等	好	399
铁氧体 (带 GAP)		3-5	最低	差	最低	差	100-300

各软磁磁芯特性比较图 1

设计最佳优化是相等磁芯截面积情况下, 有较多的卷线窗口面积, 更小的磁路长 (和更小卷线长 (所使用电线重量小))

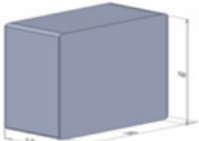
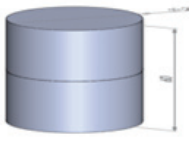
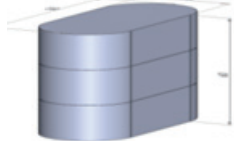
注: 在磁芯截面积相等前提下, 卷线面积及平均卷线长为最小为最佳, 所以选用椭圆形较好

下记常用软磁材料在各主要特性的优缺点比较图, 各种优势仅供参考选择。

2 电感设计

电感是一种磁芯中具有单个绕组的磁性元件, 主要流

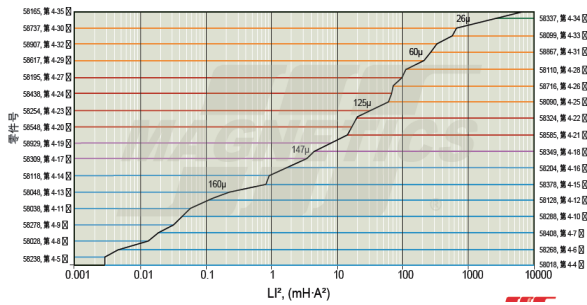
过具有较小交流纹波的直流电流, 交流纹波的幅值与直流电流相比较小, 对功率电感来说, 环形结构是最为常见的磁性形状, 对于功率电感设计来说, 必须知道两个参数: 直流偏置所需要的电感和直流电流的值, 设计电感所需储能, 厂商提供的数据是 $E=L \times I^2$, 其中 L 是电感值而 I 是流经电感的直流电流, 在磁芯选择图中确定 E 值, 该图由厂商提供, 跟随 E 值的坐标找到与第一个磁芯尺寸样交处。根据磁芯厂商提供的 AL 值计算匝数。根据磁芯厂商的磁芯数据手册计算磁场强度。从磁导率和直流偏置关系曲线确定初始磁导率的百分数。根据初始磁导率值, 计算实际所需匝数。

块状磁芯类型	 Block Cores	 Cylinder Cores	 Ellipse Cores
磁芯截面积 (cm ²)	4.5	4.5	4.5
尺寸	30mm × 15mm	∅24mm	33mm × 15mm
每匝平均卷线长 cm/T	9	7.53	8.31
参考方案	易安装	较小窗口面积	比块状圆柱磁芯窗口面积大, 比块状磁芯平均卷线长短 8%

材料	透磁率 (μ)	Bs (kG)	Core loss	DC Bias	相对价格	温升稳定性	居里温度 (°C)
MPP	26-200	7	较低	较好	高	最好	450
High Flux	26-160	15	低	最好	中等	较好	500
Sendust	26-125	10	低	好	低	好	500
Mega Flux	26-175	16	中等	最好	低	较好	700
Iron	10-125	10	高	不好	最低	不好	770
Fe-Si 卷材 (gap)	-	20	高	较好	最低	好	740
Amorphous 非晶 (gap)	-	15	高	较好	中等	好	399
Ferrite 铁氧体 (gap)	-	3-5	低	不好	最低	不好	100-300

材料	组成成份	Bs (kG)	Core loss	磁导率	磁芯形状	居里温度 (°C)	发展方向
Fe-Si	Fe-6.5%Si	16	高	26-160	块状 EE,UU, 柱形, 椭圆	700	高 BS 低价格
High Flux	Fe-50%Ni	15	低	26-160		500	高 BS 低价格
Sendust	Fe-9%Si-6%AL	10	低	26-160		500	低损低价格
非晶 Amorphous	Fe-10%Si-5%B	15.6	中等	通过气隙调整	UU	399	高磁通密度
Ferrite	Fe-Mn	5	较低	通过气隙调整	EE,UU,PQ	250	低损低价格

High Flux 环型



磁芯能量与磁芯尺寸关系 (图示 1)

2.1 示例 1: 金属粉芯在高频感计算方法及应用

输入电压 $V_i=22\sim 38V$, 输出电压为 $V_0=70V$, 输出功率 $P_0=300W$, 开关频率为 $100kHz$, 效率 $\eta \geq 0.9$ 。

通过上述参数, 我们可以求得以下参数:

最大占空比 $Duty \Delta T_{ON} = T_{ON(MAX)} / T = 1 - V_{IN(MIN)} / V_0 = 1 - 22 / 70 = 0.686$; 满载时输入电流平均值为 $I_{AV} = P_0 / (\eta \times V_{IN(MIN)}) = 300 / (0.9 \times 22) = 15.1A$ 升压电感所需电感量为 $L = V_{IN(MIN)} \times T_{ON(MAX)} / \Delta I$ 由于纹波电流为最大电流 20% 左右, 所以可得 $\Delta I = 0.2 I_{AV} = 0.2 \times 15A = 3A$ 。因此可得电感 $L = 22 \times 0.686 / (100 \times 10^3 \times 3) = 50\mu H$ 。

因此可得 $f=100kHz$ 负载时 $L=50\mu H @15A$, 最好空载状态, 空载时 $L=60\mu H @0A$, 温升尽可能低, 体积尽可能小, 采用金属粉芯来设计, 我们选 High flux (铁镍) 粉芯 CH270060。

1) 在 $0A$ 的 L 值计算公式, 我们考虑下降率为 83%, 预选为 28 圈。

由 $L=AL \times N^2 / 1000$, 从电感系数一览表 CH270060 的 AL 值是 75; $U_i=60$ 。

所以 $L(@0A) = 75 \times 28^2 / 1000 = 58.8(\mu H)$

2) 用其中一个方法也可得 $\%U_i = 1 / (a + b \times H^c) = 1 / (0.01 + 5.42 \times 10^{-8} \times 83.1^{2.326}) = 86\%$ 稍有差异。

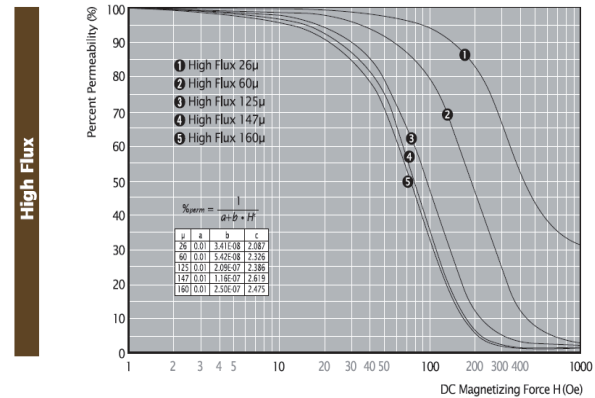
$58.8(\mu H) \times 86\% = 50.5(\mu H)$

3) 用曲线方法, 也可求得, 用安培法计算磁化力 (H) 而算出磁导率减小比率, $H = 0.4 \times \pi \times N \times I / L$ 。

$H = 0.4 \times 3.14 \times 28 \times 15 / 6.35 = 83.120e$ 从下图示 2

所示可以得出:

从磁化力 (DC Bias) 是 $83.10e$, 从上图曲线的起始磁导率为 82% 左右, 所以 $L(@15A) = 60 \times 0.82 = 49.2(\mu H)$ 负载 $15A$ 规格值 $L = 50 + / - 15\%$ 。



磁场强度与磁导率变化量关系 (图示 2)

4) 导线尺寸选择 $J=10\sim 12A/mm^2$ 现取 11.3 $S = I_{AV} / J = 15 / 11.3 = 1.33mm^2$ 可取线径 $\phi 1.3$ 查表可得 $13.6k\Omega/kM$ 。

5) 直流电阻及铜耗计算。

$R_{dc} = 4.1 / 100 \times 28 \times 13.6 = 15.6m\Omega$, $P_{cu} = I_{AV}^2 \times R = 15 \times 15 \times 15.6 / 1000 = 3.510W$ 。

重量 $G = 6.9898 \times 4.1 / 100 \times 28 \times 1.3^2 = 13.56g$

6) 磁芯的磁场强度变化量 $\Delta B_{DC} = \Delta I \times L_{DC} \times 100 / (2 \times N \times S_A) = 411(Gauss)$

$\Delta B_{AC} = \Delta I \times L_{DC} \times 100 / (N \times S_A) = 822(Gauss)$

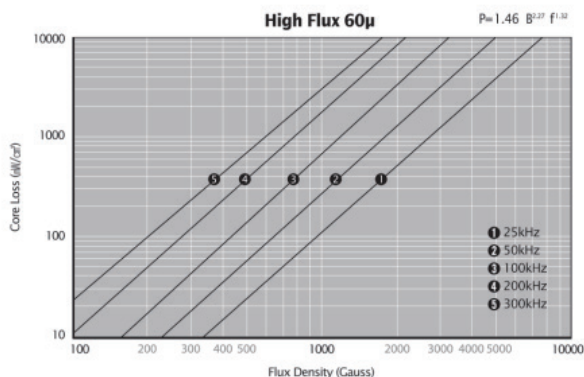
7) $P_{Lac} = 1.46 \times B^{2.27} f^{1.32} = 1.46 \times (411/1000)^{2.27} (100)^{1.32} / 10^9 = 84mW/cm^3$

$P_{Ldc} = 1.46 \times B^{2.27} f^{1.32} = 1.46 \times (822/1000)^{2.27} (100)^{1.32} / 10^9 = 408.4mW/cm^3$

8) $P_{CORE} = (P_{Lac} + P_{Ldc}) \times V_e = (84 + 408.4) \times 4.15 = 2.03W$
 $P_{total} = P_{cu} + P_{CORE} = 3.51 + 2.03 = 5.54W$

9) 温升计算可得 $\Delta T = (5.54 \times 1000 / 33.8)^{0.833} = 70K$ 由于交直流磁芯稍有差异, 实测温升为 $60K$ 。

外径	内径	厚度	截面积	磁路长度	体积	平均匝长	表面积	窗口面积
OD/mm	ID/mm	HT/mm	Ae/cm ²	le/cm	Ve/cm ³	lT/cm	Sa/cm ²	Wa/cm ²
26.92	14.7	11.2	0.654	6.35	4.150	4.1	33.8	1.69



磁通密度与磁芯损耗变化量关系 (图示 3)

2.2 示例 2: 采用非晶磁芯和金属磁粉芯差异设计方法

首先说明一下铁硅粉芯与非晶带状铁芯主要参数比较图

Composition (组成成分)	Fe - 6.5%Si	Fe -10% Si-5% B
Raw Material Shape & Size (粉芯形状及尺寸)	Below 160μm size Powder	25μm Thickness Sheet
Density (密度)	7.0 g/cc	7.18 g/cc
Bmax (最大磁通密度)	16,000 Gauss 高斯	15,600 Gauss 高斯
Available Perm. (可能透磁率)	26, 40, 60, 75, 90, 125, 160, 200μ	Depend on the Gap Size 通过气隙来调整
Gap Type (间隙类型)	Distributed Air gap 磁芯内部分布气 隙	Gap Bulk Air Gap 磁芯接合处分布气 隙
Post Shape (通用形状)	Ellipse	Rectangle
Cost 价格	70	100

现有大型种为光伏逆电源, 电流和电感如下: 1) 负载电流 I=60A, 负载电感 L=400μH min, 频率 =20kHz; 2) 安装磁环寸法长=60mm max, 宽=40mm max, 高=110mm max; 3) 总重=2.0kg max; 4) DCR=38mΩ max; 5) Core Loss=40W max; 6) Total Loss=100W max。

下记上图为金属粉芯铁硅矩形
下边为 C 型非晶铁芯



左边铁硅两柱尺寸: 60mm×35mm×18.5mm 重
量: 469g×2pcs=938g

中间铁硅六个柱尺寸: 35mm×20mm×20mm 重
量: 92g×6pcs=552g

总重量: 534g+552g=1086g

采用金属铁硅粉芯 μ 值为 60, 截面积 S=6.5cm²,
磁芯内部分布气隙。

磁路长为 le=22.04cm, 平均卷线长 L=9.7cm

$A L = 0.4 \times \pi \times \mu \times S \times 10 /$
 $le=0.4 \times 3.14 \times 60 \times 6.5 \times 10 / 22.04=223$

窗口面积 12cm², 线径为 6.5×1.5 扁线立绕结构,
电流密度为 6.1A/cm²;

当圈数为 60T 时, L(0)=60×60×223=803(μH)

$H=0.4 \times \pi \times N \times I / le$

H 为磁场强度, N 为圈数, I 为负载电流 A, le 为平
均磁路长 (cm)

50A 时 磁 场 强 度 $H=0.4 \times \pi \times N \times I / le$
 $=0.4 \times 3.14 \times 60 \times 50 / 22.04=171$ (Oe)

L(50A)=803×58%=466 (μH) (查下图 4, DC-
BAIS 可得)

60A 时 磁 场 强 度 $H=0.4 \times \pi \times N \times I / le$
 $=0.4 \times 3.14 \times 60 \times 60 / 22.04=205$ (Oe)

L(60A)=803×49%=395 (μH) (查下图 4, DC-

BAIS 可得)

$$70A : H = 0.4 \times \pi \times N \times I / l_e = 0.4 \times 3.14 \times 60 \times 70 / 22.04 = 239 \text{ (Oe)}$$

L(70A)=803×40%=321 (μH) (查下图 4, DC-BAIS 可得)

上图右边非晶两柱尺寸 单个 C 型非晶: 52mm×40mm×51mm 重量: 469g

总尺寸: 52mm×40mm×102mm 总重量: 469g×2pcs=938g

非晶铁芯 u 值为 72, 截面积 6.4cm², 磁芯中间各分布气隙 2mm×2=4mm; 磁路长 l_e=25.4cm; 平均卷线长 L=12.8cm。

$$AL = 0.4 \times \pi \times \mu \times S \times 10 / l_e = 0.4 \times 3.14 \times 72 \times 6.4 \times 10 / 25.4 = 228$$

窗口面积 10.56cm², 线径为 6.5×1.5, 扁线立绕结构, 电流密度为 6.1 A/mm²。

当圈数为 52T, 时, L(0)=52×52×228=617μH

H=0.4×π×N×I×10/l_e(H 为磁场强度, N 为圈数, I 为负载电流 A, l_e 为平均磁路长 (cm))

$$50A : H = 0.4 \times \pi \times N \times I / l_e = 0.4 \times 3.14 \times 52 \times 50 / 25.4 = 128$$

L(50A)=617×77%=475 (μH) (查下图 4, DC-BAIS 可得)

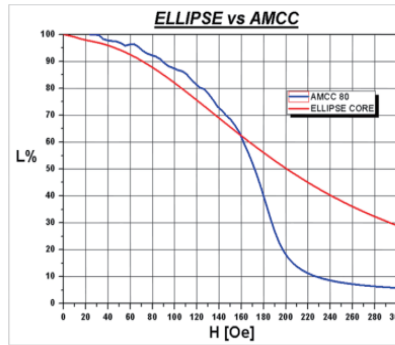
$$60A : H = 0.4 \times \pi \times N \times I / l_e = 0.4 \times 3.14 \times 52 \times 60 / 25.4 = 154 \text{ (Oe)}$$

L(60A)=617×64%=395 (μH) (查下图 4, DC-BAIS 可得)

$$70A : H = 0.4 \times \pi \times N \times I / l_e = 0.4 \times 3.14 \times 52 \times 70 / 25.4 = 180 \text{ (Oe)}$$

L(70A)=617×40%=247 (μH) (查下图 4, DC-BAIS 可得)

DCB Characteristics



铁硅金属粉芯与非晶 C 型铁心的 DC-BIAS 曲线图比较 (图示 4)

3 当前发展趋势

在太阳能发电系统中, 利用太阳能电池发电的直流电

	铁硅材电感 (60A@0.4mH)		非晶带材 C 型铁心用电感	
fs	18kHz		18kHz	
ΔI(20%)	12	=60×20%	12	=60×20%
截面积 (cm ²)	6.52	=	6.4	
圈数 (T)	60		52	
体积数 cm ³	143.7		163	
电流 (A)	60		60	
R 直流电阻 (mΩ)	12.74	R=0.02135×L×N/SA 0.02135×97×60/(6.5×1.5)	14.2	R=0.02135×L×N/SA 0.02135×125×52/(6.5×1.5)
ΔB 磁通密度 (T)	1.212	ΔB=L×ΔI×100/(N×A) 0.395×12×100/(60×6.52)	1.43	ΔB=L×ΔI×100/(N×A) 0.396×12×100/(52×6.4)
P _L (mW/cm ³)	228.2	P _L =5.92×B ^{2.16} f ^{1.12} 5.92×1.212 ^{2.16} ×18 ^{1.12}	191	P _L =2.04×B ^{2.11} f ^{1.31} 2.04×1.43 ^{2.11} ×18 ^{1.31}
P _{CORE} 磁芯损耗 (W)	32.8	P _{CORE} =V3×P _L /1000 143.7×228.2/1000	31	P _{CORE} =V3×P _L /1000 163×191/1000
P _{CU} 铜损 (W)	45.9	P _{CU} =I ² ×R/1000 60×60×12.74/1000	51.2	P _{CU} =I ² ×R/1000 60×60×14.2/1000
总耗 (W)	78.7		82.3	

用功率调节器将电力转换为交流的商用电力作为一般家用电源使用。促进新能源的利用作为各国政策的推动力,太阳能发电系统的市场在世界范围内急速扩大。功率调节器为直流电将加压的转换器和直流转换为交流的逆变器由升压电路和逆变器平滑用电感器构成。大电流电抗器饱和磁通密度高,铁损的小磁芯材料是必要的。现在基本上是动作频率为 15 ~ 20kHz 左右相对较低,饱和磁通密度较高的金属磁芯经常被使用。图 3 中金属磁性材料和铁氧体 (PE90) 的磁芯损耗的频率特性比较。PE90 材料必须在额定电流为 10A 的电感中使用的大型磁芯上。是实现低损耗高饱和磁通量密度的材料。工作频率为 16kHz 时,PE90 材料的磁芯损耗约为硅钢板的 1/14,铁硅铝约 1/3。在逆变器平滑用电感的磁芯材料中使用 PE90 的情况下,将铁损和铜损合计的全部损失比硅钢板的损失约 33%,铁硅铝减少约 30% 的结果。

近年来,应对大电流的 IGBT (绝缘双极晶体管) 低损失化和高速化急速化的进步,可以将连接的开关频率提高到 30 ~ 50kHz 被认为是可能的。随着高频化的发展,变得必要由于磁通量密度变小,可以实现小型化,损失较小可以最大限度地发挥铁氧体的优点。电抗器图 4 示给出了数据的结构示例。将卷线的 2 根圆柱形铁心板用状芯夹着。圆柱芯与板状芯之间的加气隙垫来调整电感。成形和加工比较容易,成形状自由度高的铁氧体可以进行最佳的形状设计。手机、便携音频、DSC 等手机在机器上使用的功率型电感器有小型低背、高效率 and 需要优异的直流叠加特性。直接绕到磁芯上的结构,所以体积电阻率高的 NiZn 型铁氧体被使用。磁心材料要求高饱和磁通量密度,低损耗。但是,机械强度也很重要。TDK 的功率电感用 High Bs 系列的材料特性如表 1 所示。饱和磁通密度和初磁导率和磁芯损耗有着折衷关系,但是高 Bs 低损耗材料的开发仍在继续。为了实现电感的进一步小型低分化,磁芯的小型低背,薄肉化和尺寸精度的提高是必须的。从材料、颗粒

到成型、烧制的综合工艺技术的开发,在粉末成形过程中对应已有 1005 个产品的也被生产。

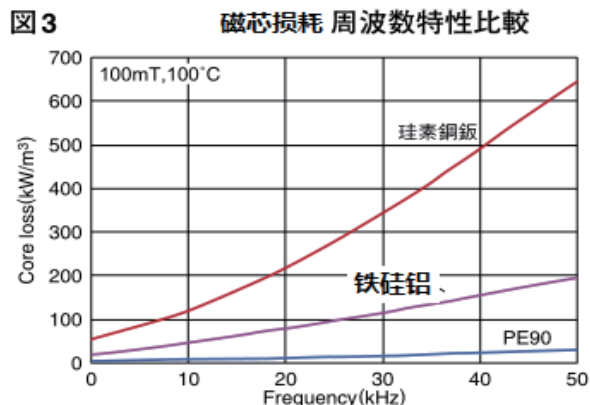
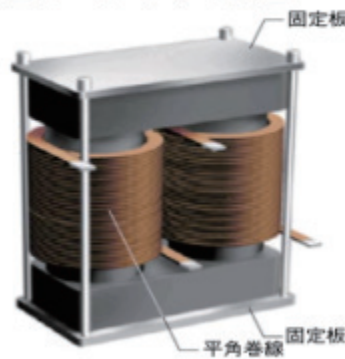


图 4 リアクタの構造



4 结论

通过对于共模电感选材和制造工艺说明,以及共模电感设计一些方法,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。

表 1 功率电抗器用 High Bs 系列 材料特性

材質		L7H	L13H	L14H	L2H	L9H
適応周波数		0.05 ~ 1MHz	0.05 ~ 1.5MHz	0.05 ~ 3MHz	0.05 ~ 2MHz	0.05 ~ 3MHz
初透磁率	μ	800±25%	500±25%	300±25%	400±25%	200±25%
相对損失係数	$\tan \delta/\mu$ [$\times 10^{-6}$]	<12(0.05MHz) <80(1MHz)	<55(0.05MHz) <65(1MHz)	<160(0.1MHz) <90(2MHz)	<15(0.05MHz) <65(2MHz)	<35(0.05MHz) <65(3MHz)
相对温度係数 (μ)	$\alpha_{\mu ir}$ [$\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	7 ~ 15	15 ~ 25	25 ~ 40	15~35	20 ~ 30
キュリー温度	T_c [$^{\circ}\text{C}$]	>180	>250	>250	>250	>300
飽和磁束密度	B_s [mT]	390(4kA/m)	460(4kA/m)	480(4kA/m)	430(4kA/m)	500(12kA/m)
体積抵抗率	ρ_v [$\Omega \cdot \text{m}$]	10^5	10^5	10^5	10^5	10^5
かさ密度	db [Mg/m³]	5.1	5.2	5.2	5.1	5.2