

高频电源变压器磁芯的设计原理

摘要: 开关电源正向高频化发展, 作为主变压器使用的软磁铁氧体磁芯, 从材料性能、尺寸形状等均应作相应改进。本文讨论了磁芯设计中应考虑通过功率、性能因子、热阻系数等参数, 并提出了降低材料高频损耗的微观设计方法。

1. 引言

电子信息产业的迅速发展, 对高频开关式电源不断提出新的要求。据报导, 全球开关电源市场规模已超过100亿美元。通信、计算机和消费电子是开关电源的三大主力市场。庞大的开关电源市场主要由AC/DC和DC/DC开关电源两部分组成。据预测, AC/DC开关电源全球销售收入将从1999年的91亿美元增加到2004年的122亿美元, 年平均增长率为5.9%。低功率的AC/DC (0~300W) 将面向增长平衡的消费电子和计算机市场; 大功率的AC/DC电源 (750~1500W) 将面向增长强劲的电信市场。DC/DC电源约占整个开关电源市场的30%, 但计算机与通信技术的快速融合, 带动了DC/DC模块式电源的迅速增长, 预计今后几年, DC/DC电源模块增长速度将超过AC/DC电源, 如有人估计, 中国今后五年, DC/DC电源模块市场年增长将达15%, 增长主要是在电信部门。开关式电源技术发展趋势是高密度、高效率、低噪声, 以及表面贴装化。无论是AC/DC或 DC/DC电源, 除了功率晶体管外, 由软磁铁氧体磁芯制成的主变压器、扼流圈及其它电感器 (如抗噪声滤波器) 是极重要的元件, 其磁性能和尺寸直接关系到电源的转换效率和功率密度等。在变压器设计中, 主要包括绕组设计和磁芯设计。本文拟重点讨论涉及主要变压器磁芯设计中应考虑通过功率、性能因子、热阻等参数, 并对降低磁芯总损耗提出了材料微观设计应考虑的方法。

2. 电源变压器磁芯性能要求及材料分类

为了满足开关电源提高效率和减小尺寸重量的要求, 需要一种高磁通密度和高频低损耗的变压器磁芯。虽然有高性能的非晶态软磁合金竞争, 但从性能价格比考虑, 软磁铁氧体材料仍是最佳的选择; 特别在100kHz到1MHz的高频领域, 新的低损耗的高功率铁氧体材料, 更有其独特的优势。为了最大程度地利用磁芯, 对于较大功率运行条件下的软磁铁氧体材料, 在高温工作范围 (如80~100℃), 应是有以下最主要的磁特性:

(1) 高的饱和磁通密度或高的原振幅磁导率。这样变压器磁芯在规定频率下允许有一个大的磁通偏移, 其结果可减少匝数; 这也有利于铁氧体的高频应用, 因为截止频率正比于饱和磁化。

(2) 在工作频率范围有低的磁芯总损耗。在给定温升条件下, 低的磁芯损耗将允许有高的通过功率。

附带的要求则还有高的居里点, 高的电阻率, 良好的机械强度等。

新发布的“软磁铁氧体材料分类”行业标准 (等同IEC1332-1995), 将高磁通密度应用的功率铁氧体材料分为五类, 见表1。每类铁氧体材料除了对振幅磁导率和功率损耗提出要求外, 还提出了“性能因子”参数 (该参数将在下面进一步叙述)。从PW1~PW5类别, 其适用工作频率是逐步提高的, 如PW1材料, 适用频率为15~100kHz, 主要应用于回扫变压器磁芯; PW2材料, 适用频率为25~200kHz, 主要应用于开关电源变压器磁芯; PW3材料, 适用频率为100~300kHz; PW4材料适用频率为300kHz~1MHz; PW5材料适用频率为1~3MHz。现在国内已能生产相当于PW1~PW3材料, PW4材料只能小量试生产, PW5材料尚有待开发。

3. 变压器可传输功率

众所周知, 变压器的可传输出功率正比于工作频率 f , 最大可允许磁通 B_{max} , (或可允许磁能偏移 ΔB) 和磁路截面积 A_e , 并表示为:

$$P_{th} = C f B_{max} A_e W_d \quad (1)$$

式中, C 乘与开关电源电路工作型式有关的系数 (如推挽式 $C=1$; 正向变换器 $C=0.71$; 反向变换器 $C=0.61$) W_d 乘绕组设计参数 (包含电流密度 S , 占空因子 f_{cu} , 绕组截面积 A_N 等)。

表1 功率铁氧体材料分类

类别	$f_{max}^{1)}$ kHz	f kHz	$B^{2)}$ mT	$\mu_a^{3)}$	性能因子 ($B \times f$) mT \times kHz	功耗损耗 ⁴⁾ kW/m ³	$\mu_i^{5)}$
PW1a PW1b	100	15	300	>2500	4500 (300 \times 15)	≤ 300 ≤ 200	2000
PW2a PW2b	200	20	200	>2500	5000 (200 \times 25)	≤ 300 ≤ 150	2000
PW3a PW3b	300	100	100	>3000	10000 (100 \times 100)	≤ 300 ≤ 150	2000
PW4a PW4b	1000	300	50	>2000	1500 (50 \times 300)	≤ 300 ≤ 150	1500
PW5a PW5b	3000	1000	25	>1000	2500 (25 \times 1000)	≤ 300 ≤ 150	800

注: 1) f_{max} 是该类材料适用的最高频率。 2) B 是该类材料适用的磁通密度。
 3) μ_a 100℃的振幅磁导率, B 和 f 见表1。 4) 功率损耗在100℃测量, B 和 f 见表1。
 5) 是25℃初始磁导率。

这里, 我们重点讨论 ($fB_{\max}Ae$) 参数 (暂不讨论绕组设计参数 W_d)。增大磁芯尺寸 (增大 Ae) 可提高变压器通过功率, 但当前开关电源的目标是在给定通过功率下要减小尺寸和重量。假定固定温升, 对一个给定尺寸的磁芯, 通过功率近似正比于频率。图1示出变压器可传输功率 P_{th} 与频率 f 的关系。提高开关频率除了要应用快速晶体管以外, 还受其它电路影响所限制, 如电压和电流的快速改变, 在开关电路中产生扩大的谐波谱线, 造成无线电频率干扰, 电源的辐射。对变压器磁芯来说, 提高工作频率则要求改进高频磁芯损耗。图1中N67材料 (西门子公司) 比N27材料有更低的磁芯损耗, 允许更大的磁通密度偏移 ΔB , 因而变压器可传输更大的功率。磁芯总损耗 P_L 与工作频率 f 及工作磁通 B 的关系由下式表示:

$$P_L = Kf^m B^n V_e (W) \quad (2)$$

这里, n 是steinmetz指数, 对功率铁氧体来说, 典型值是2.5。指数 $m=1 \sim 1.3$, 当磁损耗单纯地由磁滞损耗引起时, $m=1$; 当 $f=10 \sim 100\text{kHz}$ 时, $m=1.3$, 当 $f > 100\text{kHz}$ 时, m 将随频率增高而增长, 见图2, 这个额外损耗是由于涡流损耗或剩余损耗引起的。很明显, 对于高频运行的铁氧体材料, 要努力减小 m 值。

4. 工作磁通密度

变压器工作磁通密度 (可允许磁通密度偏移) 受两方面限制: 首先要受磁芯损耗引起的可允许温升 $\Delta\theta_{Fe}$ 的限制; 另一方面, 也受铁氧体材料饱和磁通密度值的限制。

对单端正向型变换器, 工作磁通密度 $\Delta B = B_m - B_r$; 对推挽式变换器, 工作磁通密度 $\Delta B = 2B_m$ 。

根据公式 (2), 当工作磁通密度提高时, 磁芯损耗将以2.5次方比例上升, 从而造成变压器温升, 因此设计的工作磁通密度首先受磁芯温升值限制, 其关系式为:

$$\Delta B = C_B \sqrt[n]{\frac{\Delta\theta_{Fe}}{V_e R_{th}}} \quad (3)$$

这里, 常数 C_B 与指数 n 是与磁芯材料有关的系数; V_e 为有效体积; R_{th} 为热阻。

当计算出的磁通密度值较高时, ΔB 还受磁芯材料可允许磁通密度偏移 ΔB_{adm} (此值与材料高温下 B_s 值相对应) 所限制。

在这里, 必须注意对不等截面磁芯 (如E型磁芯), 在最小横截面 A_{\min} 处有较高的磁通密度。为避免磁芯饱和, 还必须按下式计算:

$$\Delta B = \Delta B_{adm} \cdot \frac{A_{\min}}{Ae} \quad (4)$$

由等式 (3) (4) 所得到的最小磁感应偏移值, 即为可允许的变压器工作磁通密度值。

5. 材料性能因子

铁氧体磁芯制成的变压器, 其通过功率直接正比于工作频率 f 和最大可允许磁通密度 B_{max} 的乘积 (见公式1)。很明显, 对传输相同功率来说, 高的 (fB_{max}) 乘积允许小的

磁芯体积；反之，相同磁芯尺寸的变压器，采用高（ fB_{max} ）乘积的铁氧体材料，可传输更大的功率。我们将此乘积称为“性能因子”，这是与铁氧体材料有关的参数，良好的高频功率铁氧体显示出高的（ fB_{max} ）值。图3示出德国西门子公司几种铁氧体材料性能因子（PF）与频率关系，功率损耗密度定为 $300\text{mW}/\text{cm}^3$ （ 100°C ），用来度量可能的通过功率。可以看到，经改进过的H49i材料在 900kHz 时达到最大的（ fB_{max} ）乘积为 $37000\text{H}_2\text{T}$ ，比原来生产的H49材料有更高的值，而N59材料则可使用到 $f=1\text{MHz}$ 以上频率。

改进“性能因子”可从降低材料高频损耗着手，已发现性能因子最大值的频率与材料晶粒尺寸 d 、交流电阻率 ρ 有关，考虑到涡流损耗与 d^2/ρ 之间的关系，两者结果是相一致的，见图4。

6. 热阻

为了得到最佳的功率传输，变压器温升通常分割为二个相等的部分：磁芯损耗引起的温升 $\Delta\theta_{\text{Fe}}$ 和铜损引起的温升 $\Delta\theta_{\text{Cu}}$ 。关于磁芯总损耗与温升的关系如图5所示。对相同尺寸的磁芯（RM14磁芯），采用不同的铁氧体材料（热阻系数不同），其温升值是不同的，其中N67材料有比其它材料更低的热阻。于是，磁芯温升与磁芯总损耗的关系可用下式表示：

$$\Delta\theta_{\text{Fe}} = R_{\text{th}} \cdot R_{\text{Fe}} \quad (5)$$

式中， R_{th} 即为热阻，定义为每瓦特总消散时规定热点处的温升（ k/W ）。铁氧体材料的热传导系数，磁芯尺寸及开关对热阻有影响，并可用下述经验公式来表示：

$$R_{\text{th}} = \frac{1}{S} \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{1}{\lambda} \right) \quad (6)$$

式中， S ：磁芯表面积； d ：磁芯尺寸； α ：表面热传导系数； λ ：磁芯内部热传导系数。

由上式可见，对电源变压器用的铁氧体材料，必须具有低的功率损耗和高的热传导系数。实际测量表明，图5所示的N67材料显示高的热导性。从微观结构考虑，高的烧结密度，均匀的晶粒结构，以及晶界里有足够的Ca浓度，将是有高的热导性。从磁芯尺寸形状考虑，较大磁芯尺寸给出低的热阻，其中ETD磁芯具有优良的热阻特性，见图6；另外无中心孔的RM磁芯（RM14A）显示出比有中心孔磁芯（RM14B）更低的热阻。

对高频电源变压器磁芯，磁芯设计时应尽量增加暴露表面，如扩大背部和外翼，或制成宽而薄的形状（如低矮形RM磁芯，PQ型磁芯等），均可降低热阻提高通过功率。

7. 磁芯总损耗

软磁铁氧体磁芯总损耗通常细分为三种类型：磁滞损耗 P_h 、涡流损耗 P_e 和剩余损耗 P_r 。每种损耗贡献的频率范围是不同的，磁滞损耗正比于直流磁滞回线的面积，并与频率成线性关系，即

$$P_h = f \oint B dH \quad (7)$$

这里， $\oint B dH$ 等于最大磁通 B 下测得的直流磁滞回线的等值能。对于工作在频率 100kHz 以下的功率铁氧体磁芯，降低磁滞损耗是最重要的。为获得低损耗，要选择铁氧

体成分具有最小矫顽力 H_c 和最小各向异性常数 K , 理想情况是各向异性补偿点 (即 $K \approx 0$) 位于变压器工作温度 (约 $80 \sim 100^\circ\text{C}$)。另外, 此成分应有低的磁致伸缩常数 λ , 工艺上要避免内外应力和夹杂物。采用大而均匀晶粒是有利的, 因为 $H_c \propto D^{-1}$ (D 是晶粒尺寸)。

关于涡流损耗 P_e 可用下式表示:
$$P_e = C_e f^2 B^2 / \rho \quad (8)$$

这里, C_e 是尺寸常数, ρ 是在测量频率 f 时的电阻率。

随着开关电源小型化和工作频率的提高, 由于 $P_e \propto f^2$, 因而降低涡流损耗对高频电源变压器更为重要。随着频率提高, 涡流损耗在总损耗中所占比例逐步增大, 当工作频率达 $200 \sim 500\text{kHz}$ 时, 涡流损耗常常已占支配地位。从图7所示R2KB1材料磁芯总损耗 (包括磁滞和涡流损耗) 与频率关系实测曲线, 可得到证明。减小涡流损耗主要是提高多晶铁氧体的电阻率。从材料微观结构考虑, 应用均匀的小晶粒, 以及同电阻的晶界和晶粒; 因为小晶粒具有最大晶界表面而增大电阻率, 而附加 $\text{CaO} + \text{SiO}_2$, 或者 Nb_2O_5 、 ZrO_2 和 Ta_2O_5 匀对增高电阻率有益。

最近发现, 当电源变压器磁芯工作达MHz频段时, 剩余损耗已占支配地位, 采用细晶粒铁氧体已成功地缩小了此损耗的贡献。对MnZn铁氧体来说, 在MHz频率出现铁磁谐振, 形成了铁氧体的损耗。最近有人提出, 当铁氧体的磁导率 μ_i 随晶粒尺寸减小而降低时, Snoek定律仍是有效的, 也就是说, 细晶粒材料显示出高的谐振频率, 因此可用于更高频率。另外, 对晶粒尺寸减小到纳米级的铁氧体材料研究表明, 在此频段还应考虑晶粒内畴壁损耗。

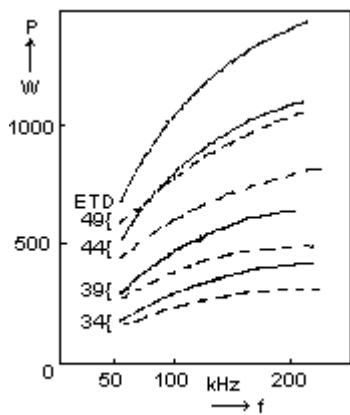


图1 ETD磁性可传输功率 P_{th} 与频率关系 (Siemens)-N67.....N27

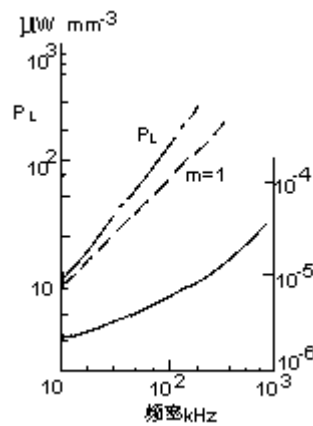


图2 磁损与频率关系

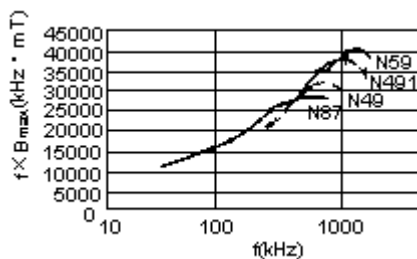


图3 材料性能因子与频率关系 (Siemens) (100° C, 功耗300mW/cm³)

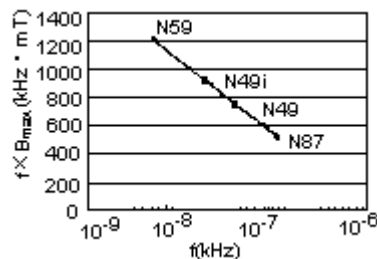


图4 性能因子最大值频率与 d^2/ρ 之间关系

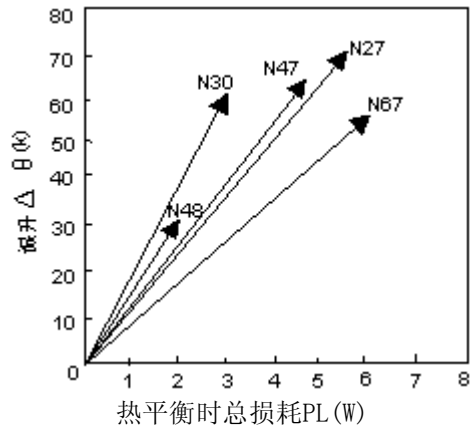


图5 不同铁氧体材料的RM14磁芯温升与功率损耗关系 (Siemens) (环境温度23° C)

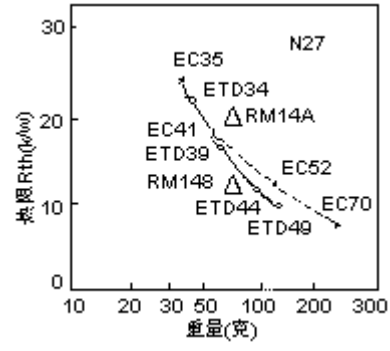


图6 不同磁芯形状、尺寸、重量与变压器热阻关系