

高频变压器设计中注意的几个问题

Some Problems on HF Transformer Design

王全保

提 要：本文概述了高频变压器设计时应注意的一些问题。设计高频变压器必须与电路相结合；应根据工作频率选择磁芯的材质，根据变压器的电气参数选择适当形状的磁芯，根据允许损耗确定磁感应强度；必须十分注意绕组导线的高频损耗，特别是邻近效应引起的绕组损耗。本文还介绍了国外常用插入损耗来计算变压器的电气参数的方法。

关键词：高频，电路，磁芯，损耗

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2015)06-4-115

随着电子技术的飞速发展，信息传递的高速化和电子设备的小型化已成为当今发展潮流。作为电子变压器发展的方向，高频化、小型化、节能化是电子变压器的发展主流。因此，高频变压器使用日趋广泛。

高频变压器是相对于音频和工频变压器而言的。我们将工作频率在音频以上的变压器统称为高频变压器。应该说，这一定义是不严格的。一般，我们将高频变压器分为两种类型，一种称作为单频或窄频级的高频变压器，其工作频率为单一频率或是一个较窄的频段，如变换器变压器、振荡器变压器等；另一种称作为宽带变压器，它是指工作在一个比较宽或很宽的频率范围内的变压器，如阻抗变换器变压器、通讯变压器等。

高频变压器的主要用途是用于两个放大器之间、负载与馈线或馈线与负载间的阻抗匹配；变压器次级电路和初级电路的隔离；平衡—不平衡电路的变换；倒相和隔离电源部分的直流以及在高频振荡器中获得高的选择性等。

与电源变压器相比，高频变压器设计要复杂一些；所用的材料和磁芯品种也比电源变压器来得多。在设计高频变压器时，以下问题必须加以注意：

1 设计高频变压器必须了解该变压器的所在的工作电路

高频变压器工作在放大电路中，是放大器的组成部分。在分析与设计高频变压器时，必须与放大电路相结合，确

定有关参数。

例如，变压器的次级参数（电压、电流），在电源变压器中，是直接规定次级电压和电流的。而在高频变压器中，则是按阻抗匹配原理，并根据负载阻抗先确定匝数比，再计算电压和电流；或根据输出功率和负载阻抗来计算次级电压和电流。

高频变压器的分析方法与音频变压器一样，采用等效电路进行的。高频变压器的等效电路与音频变压器相同，不同点在于频率提高了。由于频率的提高，一些分布参数，如分布电容必须考虑进去。在具体计算时，也可进行简化成中频段、低频段和高频段，并分别进行计算。

2 采用插入损耗计算变压器有关参数的方法

在以往的变压器计算资料中，国内一般是根据频率响应来确定变压器初级电感和漏感。而在国外一些计算资料中，均采用插入损耗来确定变压器的铜阻、初级电感、漏感。采用插入损耗计算变压器有关参数的方法如下：

2.1 中频段插入损耗和初次级铜阻计算

高频变压器中频段的等效电路见图1。中频段的插入损耗 b_0 可按下式计算

$$b_0 = 20 \lg \left(1 + \frac{r_1 + r'_2}{R_1 + R'_2} \right) \quad (1)$$

式中： b_0 ——中频段插入损耗 (dB)；

R_i ——信号源（晶体管）内阻 ()；

r'_2 ——换算到初级的次级负载电阻() ;

r_1 ——初级铜阻() ;

r'_1 ——换算到初级的次级铜阻()。

为此, 可按中频段的插入损耗 b_0 来确定变压器的初、次级铜阻 r_1 和 r_2 。

高频变压器的初、次级铜阻也可按变压器的效率由下式算得

$$r_1=r'_2=0.5R_a(1-\eta) \quad (2)$$

式中 : R_a ——放大器负载阻抗(), $R_a=R'_2+r'_1r'_2$;

——变压器效率, 对高频变压器而言, 一般取 $=0.9 \sim 0.98$ 。

次级铜阻则按下式计算

$$r_2=r'_2\left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (3)$$

式中 : N_1 ——初级匝数;

N_2 ——次级匝数。

假定 $R_i=R'_2=R_a$, $r_1=r'_2$, 则中频段的插入损耗 b_0 为

$$b_0=20\lg\left(1+\frac{r_1}{R_a}\right) \quad (4)$$

按上述假定时, 不同效率 η 时的 r_1 、 r_2 及插入损耗值 b_0 。见表 1。

2.2 低频段插入损耗计算

由低频段等效电路(图 2)可见, 低频段的插入损耗 b_L 可按下式计算

$$b_L=20\lg\left[1+\frac{r_1+r'_2}{R_i+R'_2}\right]+10\lg\left[\left(\frac{R_e}{2\pi f_L L_1}\right)^2+1\right] \quad (5)$$

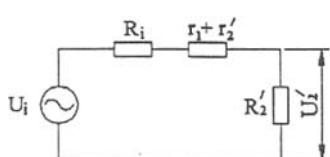


图1 中频段等效电路

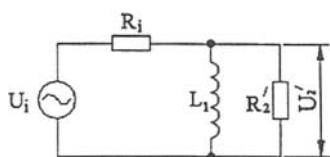


图2 低频段等效电路

式中 : R_e ——初、次级回路的并联电阻();

L_1 ——初级电感(H);

f_L ——最低工作频率(Hz)。

初、次级回路的并联电阻 R_e 按下式计算

$$R_e=\frac{R_p R'_s}{R_p+R'_s} \quad (6)$$

式中 : R_p ——初级回路电阻(), $R_p=R_i+r_1$;

R'_s ——换算到初级的次级回路电阻(), $R'_s=R'_2+r'_2$;

当变压器效率 在 0.95 以上、阻抗匹配的条件下, 公式(7-14)可简化为

$$R_e=\frac{R_p R'_s}{R_p+R'_s} \approx 0.5R'_2 \quad (7)$$

此时, 低频段的插入损耗 b_L 可近似按下式计算

$$b_L=10\lg\left[\left(\frac{R'_2}{\pi f_L L_1}\right)^2+1\right] \quad (8)$$

当允许的低频段插入损耗为 3dB 时,

$$\frac{R'_2}{\pi f_L L_1}=1$$

则高频变压器初级电感为

$$L_1 \geq \frac{R'_2}{\pi f_L L_1} \quad (9)$$

式中 : f_L ——高频变压器的最低工作频率(kHz);

L_1 ——高频变压器初级电感(mH)。

当允许的低频段插入损耗为 1dB 时,

$$\frac{R'_2}{\pi f_L L_1}=0.5$$

则高频变压器初级电感为

$$L_1 \geq \frac{2R'_2}{\pi f_L} \quad (10)$$

为此, 可按允许的低频插入损耗值确定变压器的初级电感量。

2.3 高频段插入损耗计算

由高频等效电路(图 3)可见, 高频段的插入损耗 b_H 可按下式计算

$$b_H=20\lg\left(1+\frac{r_1+r'_2}{R_i+R'_2}\right)+10\lg\left[1+\left(\frac{2\pi f_H L_s}{R_p+R'_s}\right)^2\right] \quad (11)$$

式中 : L_s ——变压器漏感(mH);

f_H ——最高工作频率(kHz)。

表1 不同效率 η 时的 $r_1 \sim r'_2$ 及插入损耗值 b_0

η	0.9	0.91	0.92	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98
$r_1 = r'_2$	$0.05R_a$	$0.045R_a$	$0.04R_a$	$0.035R_a$	$0.03R_a$	$0.025R_a$	$0.02R_a$	$0.015R_a$	$0.01R_a$
b_0/dB	0.242	0.382	0.341	0.299	0.257	0.214	0.172	0.129	0.086

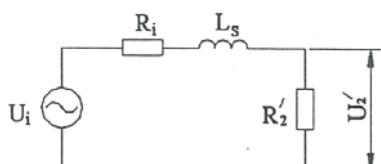


图3 高频段等效电路

当变压器效率 在 0.95 以上、阻抗匹配的条件下。

$$R_p = R'_s = R'_2$$

此时，高频段的插入损耗 b_H 可近似按下式计算

$$b_H = 10 \lg [1 + (\frac{\pi f_H L_s}{R'_2})^2] \quad (12)$$

当允许的高频段插入损耗为 3dB 时

$$\frac{\pi f_H L_s}{R'_2} = 1$$

则高频变压器的漏感 L_s 为

$$L_s = \frac{R'_2}{\pi f_H} \quad (13)$$

当允许的高频段插入损耗为 1dB 时

$$\frac{\pi f_H L_s}{R'_2} = 0.5$$

则高频变压器的漏感 L_s 为

$$L_s = \frac{0.5 R'_2}{\pi f_H} \quad (14)$$

3 高频变压器的磁芯选择

用作高频变压器的磁性材料主要有非晶、超微晶合金材料与软磁铁氧体材料两大类。其中以软磁铁氧体最为常用。由于软磁铁氧体材料的电阻率高，高频损耗小，易于大批量生产，产品的一致性好，成本低，是目前高频变压器中使用量最大的一种磁性材料。软磁铁氧体材料主要分为 Mn-Zn 铁氧体和 Ni-Zn 铁氧体两大类。Mn-Zn 铁氧体用于工作频率在 0.5 ~ 1MHz 以下的高频变压器中，Ni-Zn 铁氧体用于工作频率在 1MHz 以上的高频变压器中。Mn-Zn 和 Ni-Zn 铁氧体材料的品种很多，材料特性也各不相同，分别用于各种不同要求的高频变压器和电感器中。主要包括以下几个方面：

功率变压器，用于传输功率，变换电压和隔离等。要求材料有高的饱和磁感应强度和低功率损耗。

信号传输变压器，用于不失真的传输交流或脉冲信号，阻抗匹配，隔离等。要求材料有高磁导率。

电信领域的滤波器、电感，要求有良好的温度性和

高 Q 值，材料的损耗小，在规定的温度范围内有很低的温度系数、对时间有很好的稳定性。

干扰抑制器，抑制不需要的高频干扰信号，通过有用的高频信号。要求在覆盖的频率范围内有高阻抗（高磁导率）。

延迟脉冲电路的电感，用于脉冲的延迟。要求材料有高的磁导率。

储能、平滑电路电感。要求材料有高的饱和磁感应强度值。

调谐回路电感，有一定的通频带。要求材料有适当的损耗和较好的温度稳定性。

铁氧体磁芯由模压烧结而成，种类很多，主要有 E 形、罐形、U 形和环形等。高频变压器常用的磁芯为 E 形磁芯（包括其派生品种）和罐形磁芯（包括其派生品种）两大类。

E 形磁芯主要有 EE 型、EI 型两种，截面均为方形。其派生品种为 ER 和 ETD 型，其截面为圆形。EE 和 EI 型主要用于工作频率偏低的普通变压器，圆截面的 ER 和 ETD 型磁芯，因其线圈的平均匝长短，故其使用频率可高于 EE 和 EI 型磁芯，并以 ETD 型磁芯应用最广。此外，低矮型 E 形磁芯在平面变压器中的应用十分广泛，如低矮型 EI 型磁芯、EFD 型、EQ 型等。

罐形磁芯同 E 形磁芯一样，属壳式结构。罐形磁芯的优点是屏蔽性能好，漏磁和分布电容小，电感易于调节，适用于高频变压器和电感器。RM 型磁芯是在罐形磁芯基础上发展起来的，其引线槽切口大，特别适用于多绕组或大电流变压器。罐形磁芯和 RM 型磁芯的中心柱分为有孔与无孔的两种，有孔的磁芯一般用作电感线圈或调谐变压器，其电感可以调节；无孔的磁芯截面积大，一般用作功率变压器或宽带变压器。为满足平面变压器的需要，低矮型无中心孔的 RM 磁芯已有生产。在罐形磁芯基础上派生出来的磁芯有 EP 型和 PQ 型磁芯。它兼有罐形磁芯的优点，又可作为功率变压器磁芯来使用。

高频变压器的磁芯选择需注意以下几点：

3.1 应根据工作频率选择磁芯材料

高频变压器的工作频率范围很大，需按工作频率范围选择合适的铁氧体磁芯材料。例如，工作频率在 100kHz 时，可选用 Mn-Zn 铁氧体材料；工作频率在 1MHz 以上时，可选用 Ni-Zn 铁氧体材料。

3.2 应根据变压器的种类选择铁氧体磁芯的品种

各种不同种类或用途的高频变压器所选用的铁氧体材料的品种也不同。例如，高频功率变压器应选用饱和磁感应强度高、损耗低的铁氧体材料，如国产的R2KD、JP3、JP4，进口的PC40、PC44、N41、N49、3C91、3C92等等。

表2为Philips公司所列磁芯在 $f=100\text{kHz}$ 时输出功率的估算值，其材料品种为3C91~3C94，可供高频功率变压器选择磁芯时的参考。

3.3 应根据变压器的电气参数选择适当形状的磁芯

不同形状的铁氧体磁芯制成的变压器的电气参数也不同，为了获得良好的电气参数，必须按所要求的电气参数来选择合适形状的磁芯。例如，要求漏感小、品质因数高的变压器可采用罐形磁芯或PQ型磁芯；要求损耗小、温升低的变压器可选用ETD型磁芯等。

3.4 功率变压器的磁感应强度应根据允许损耗来确定

高频功率变压器的温升有一定的限制，在一般情况下，为使效率最高，变压器铜损应与磁芯损耗相等。为此，在一定的温升下，高频变压器的磁芯损耗也就确定了，其磁感应强度则由允许的磁芯损耗，在工作频率下，由磁芯的损耗曲线查得。

4 应十分注意线圈在高频下的损耗

由于集肤效应和邻近效应的作用，高频变压器线圈的

交流电阻比直流电阻要增大很多，它将影响高频变压器的损耗和温升。为此，需尽可能的减小集肤效应和邻近效应的影响，并计算在高频下交流电阻。

集肤效应是指在高频下电流流过导线时，由于涡流作用，电流趋于导线表面流动的一种物理现象。集肤效应减小了导线的有效截面积，增大了有效电阻，增加了导线的损耗。通常用集肤深度来表示集肤效应的影响，为减小这种影响，高频变压器线圈的导线直径应小于两倍的集肤深度，当电流大时可采用双线、多根绞线或铜箔。不同频率下铜导线的集肤深度见表3。

邻近效应是指在多层线圈中，由于电流通过相邻两层导线所产生的磁场的相互作用，使得电流在两层导线接近的一边流动。邻近效应进一步减小了导线的截面积，增大了有效电阻，比集肤效应的影响更为严重，特别在层数很多时。

我们在设计高频变压器时，多数情况下是按集肤效应选择导线的直径，容易忽略邻近效应的影响。实际上，在多层绕组中，邻近效应比集肤效应的影响更为严重。

为了减小邻近效应的影响，可进一步减小导线的直径，减少绕组的层数，同时还可以采用初、次级交叉绕制以减小相邻间的磁场所产生的邻近效应的影响。这是一种较为有效的方法。

(转载自内部资料)

表2 铁氧体磁芯在 $f=100\text{kHz}$ 时输出功率 P_2

输出功率 P_2/W	磁 芯 型 号
<5	RM4、P11/7、EFL3
5~10	RM5、P14/8
10~20	RM6、E20、P18/11、EFDI5
20~50	RM8、P22/13、RM10、ETD29、E25、EFD20
50~100	ETD29、ETD34、EC35、EC41、RM12、P30/19、EFD25
100~200	ETD34、ETD39、ETD44、EC41、EC52、RM14、P36/22、E30、E42
200~500	ETD44、ETD49、E55、EC52、E42、P42/29
<500	E65、EC70

表3 圈铜导线在+20 的穿透深度

f/kHz	1	3	5	7	10	15	18
Δ/mm	2.089	1.206	0.9436	0.7899	0.6608	0.5396	0.4926
f/kHz	20	23	25	30	35	40	50
Δ/mm	0.4673	0.4538	0.4180	0.3815	0.3532	0.3304	0.2955
f/kHz	60	80	100	120	150	180	200
Δ/mm	0.2697	0.2336	0.2089	0.1908	0.1707	0.1558	0.1478