

## PCB 平面变压器设计

一、介绍.....	2
二、设计参数.....	3
2.1 PCB 平面变压器的结构.....	3
2.2 变压器参数设计公式.....	4
2.3 最大磁感应强度.....	5
2.4 磁芯窗口利用系数 $K_w$ .....	5
2.5 电流密度 $J$ .....	5
2.6 PCB 绕组的空间分布方式.....	6
2.7 平均匝长 $MLT$ .....	8
2.8 PCB 绕组直流电阻与损耗.....	8
2.9 绕组的端接.....	9
2.10 磁芯的安装和固定.....	9
三、设计举例.....	10
3.1 正激变换器.....	10
四、生产工艺.....	13

## 一、介绍

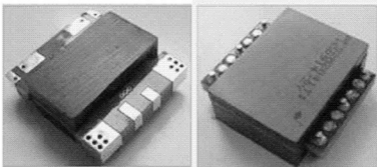
PCB 平面变压器可由独立的标准叠层电路或小型多层 PCB 板组件构成，或者集成到电源多层 PCB 板内。PCB 平面变压器有如下的优点：

- 非常小的外形体积；
- 极好的散热性能；
- 很低的漏感；
- 优越的性能可重复性；

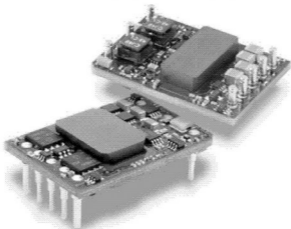
通过对工作状态下的多层 PCB 板型电路的平面 E 型变压器的性能测试显示，与相同的有效体积的传统线绕型变压器相比，平面变压器的热阻大大下降（高达 50%）。这是由于平面磁芯的比表面积有很大提高，更加有利于散热的原因，这就使得平面变压器能够在较高的功率密度下还能保持在可接受的温升范围内。

而 PCB 平面变压器的设计难点在于：

- 寻找薄 PCB 绝缘基材和厚铜箔(大于 70 $\mu\text{m}$ )的 PCB，才能满足绕组的多层(4-12层)低高度(2-3mm)以及大电流要求；
- 大电流时铜箔的发热是否会引起铜箔与绝缘基材的分层；
- 为保证产品的可靠性，多层 PCB 布板时的绝缘距离如何设计等等问题；



多层 PCB 组成的独立两平面变压器

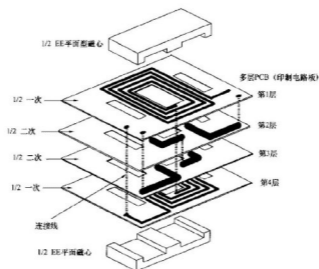


集成到电源多层 PCB 板内平面变压器

## 二、设计参数

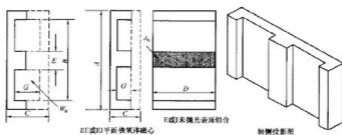
### 2.1 PCB 平面变压器的结构

平面变压器没有漆包线绕组,而是将扁平的连续铜质螺旋线刻蚀在印刷电路板上,然后叠放在磁芯上,其典型的结构如下图:

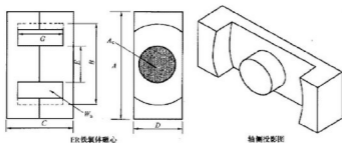


典型 PCB 平面变压器结构图

常见的平面磁芯类型如下:

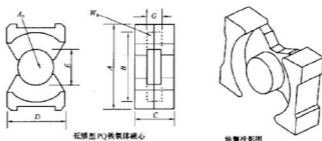


EE 或 EI 型平面磁芯

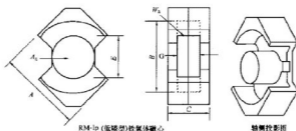


ER 铁氧体磁芯

ER 型平面磁芯



PQ 型平面磁芯



RM 型平面磁芯

## 2.2 变压器参数设计公式

设计平面变压器和设计传统变压器所用的设计公式及所用的选择合适磁芯的准则是一样的，计算所需的磁芯公式如下：

$$AP = W_s A_c = \frac{K_T P_{o\max} \times 10^6}{B_w f K_w J \eta} (\text{cm})^4$$

其中，

- $K_T$  : 为与拓扑相关的系数，可称为拓扑系数；
- $P_{o\max}$  : 为变换器的最大输出功率 (W)；
- $B_w$  : 为变压器允许的磁密幅度 (Gauss)；
- $J$  : 为变压器原副边导线的电流密度 (A/mm<sup>2</sup>)；
- $K_w$  : 为变压器的窗口系数；
- $\eta$  : 为变换器的满载效率；
- $f$  : 为变换器的开关频率；

计算所需圈数的公式还是法拉第定律：

$$N = \frac{U * \Delta t}{\Delta B * A_c}$$

其中，

- $U$  : 加在变压器 (电感) 绕组两端的电压；
- $\Delta t$  : 开关导通时间；
- $\Delta B$  : 磁芯允许的磁密幅度；
- $A_c$  : 磁芯有效截面积；

### 2.3 最大磁感应强度

变压器在工作状态下的铁损和铜损会导致器件环境温度的升高。温升必须被限制在最大允许温度范围内,否则会变压器或其它电路造成损害。

要使变压器的损耗最小,那么磁芯的铁损和线圈的铜损应该各占变压器总损耗的一半,我们可以用变压器的最大容许温升值为变量的函数来确定磁芯的最大铁损。其表达式如下:

$$P_{core} = \frac{12 * \Delta T}{\sqrt{V_c}} (mW/cm^3)$$

磁芯的功率损耗是频率  $f$  (Hz)、最大磁感应强度  $B$  (T)、以及温度  $T$  ( $^{\circ}C$ ) 的函数,铁损大致如下的函数关系式:

$$P_{core} = C_m * f^x B_{peak}^y * (ct_0 - ct_1 T + ct_2 T^2)$$

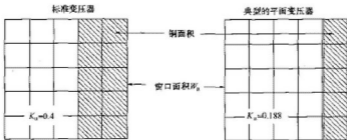
$$P_{core} = C_m * C_T * f^x B_{peak}^y (mW/cm^3)$$

公式中,参数  $C_{m,x,y,ct,ct_1,ct_2}$  是通过功率损耗相关数据的测量间接得到的。这些参数是由材料特性决定的。

注意:最大磁感应强度  $B$  也能通过另一种方法获得,将上面公式里的所有参数输入相关计算机软件程序,可以计算出任意波形下的功率损耗,这样做的好处在于它可以对实际的磁感应强度( $B$ )曲线进行仿真,计算出功率损耗值,这样就可以进行优化选择,针对具体的应用选取最佳的铁氧体磁芯。

### 2.4 磁芯窗口利用系数 $K_w$

在传统的变压器中,窗口利用系数一般为 0.4 左右,这就意味着铜填满窗口面积的 40%,另外 60%的面积是用于骨架或绕线管、层间绝缘和导线绝缘,以及由加工技术水平的限制而多占用的空间。设计采用 PCB 绕制绕组的方法进一步减小了窗口利用系数,两种不同绕制技术的窗口利用系数  $K_w$  的比较如下:



### 2.5 电流密度 $J$

在平面变压器的设计中,一个未知的因数是电流密度  $J$ 。电流密度影响铜损(调整率)以及由铜损引起的内部温升。一般的传统变压器中,用较低的电流密度来设计,经验上使用  $2-4A/mm^2$ ,而平面变压器设计中处理电流密度的方法与传统的方法不同,当设计平面变压器 PCB 绕组时,使用的是与 PCB 板设计相同的方法,即基于温升的铜导线宽度和厚度,一般的平面变压器绕组电流密度  $J$  选择为  $20-50A/mm^2$ 。

PCB 用铜皮覆盖,铜的厚度以 oz (盎司) 表示,例如 1oz, 2oz, 3oz。以盎司表示的质

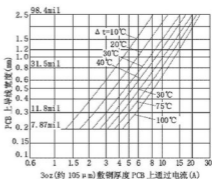
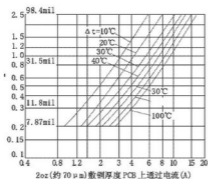
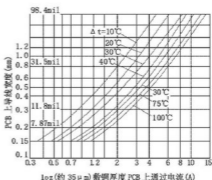
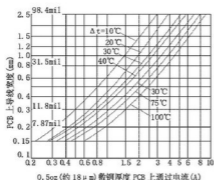
量是指1平方英尺面积上的材料的质量。因此,1oz铜皮就是1平方英尺铜皮的质量是1盎司,即其厚度约为35 $\mu\text{m}$ ,2oz铜皮约为70 $\mu\text{m}$ ,3oz铜皮约为105 $\mu\text{m}$ 。

据PCB供应商介绍,一般PCB不做特殊说明通常采用半盎司即0.5oz(约18 $\mu\text{m}$ )铜箔厚度来做价格约6.8分/cm<sup>2</sup>。1oz(约35 $\mu\text{m}$ )铜箔厚的价格约7.5分/cm<sup>2</sup>,2oz(约70 $\mu\text{m}$ )铜箔厚的价格更贵约8.5分/cm<sup>2</sup>,板上走较大电流时多采用2oz的板。3oz(约105 $\mu\text{m}$ )及以上铜箔厚的如有特殊需要通常需要做。以上价格为FR-4材料双面板成品参考价格。实际的双面板在制作的沉铜过程中进行电镀,电镀后铜箔厚度会增加0.25~0.5oz厚。

通常采用的PCB基材均为FR-4材料,铜箔的附着强度和工作温度较高,由于敷铜板铜箔厚度有限,在需要流过较大电流的条状铜箔中,应考虑铜箔的载流量问题,一般PCB允许温度为260 $^{\circ}\text{C}$ ,但实际使用的PCB温度最高时不可超过150 $^{\circ}\text{C}$ ,因为如果超过此温度就很接近焊锡的熔点(183 $^{\circ}\text{C}$ )了。同时还应考虑到板上元件允许的温度,通常民品级IC只能承受最高70 $^{\circ}\text{C}$ ,工业级IC为85 $^{\circ}\text{C}$ ,军品级IC最高也只能承受125 $^{\circ}\text{C}$ 。因此在装有民品IC的PCB上IC附近的铜箔温度就需控制在较低水平,只有在只装耐温较高的大功率器件(125 $^{\circ}\text{C}$ ~175 $^{\circ}\text{C}$ )的板上才能允许较高的PCB温度,但PCB温度较高时对功率器件散热的影响也是需要考虑的。

## 印制导线温升与导线宽度和负载电流的关系

(PCB设计时铜箔厚度、走线宽度和电流的关系)



## 2.6 PCB绕组的空间分布方式

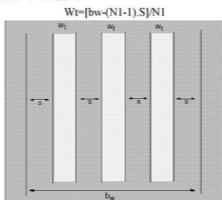
最大磁感应强度确定以后,对具体的电路拓扑结构和变压器类型,就能利用相应的公式计算出初级和次级绕组的匝数。一旦绕组的PCB被做好了,其布线就固定了,绕组将不再变化,所有的寄生参数,包括漏感都将被固定,这在传统的变压器中是不一定的。

在设计时,有一点必须确定,那就是绕组在层上应该怎样分布。导线上电流的流动会导致 PCB 板的温升。通常建议把绕组对称分布于外层以便于热扩散。从磁的角度来看,三明治状夹层式的初级和次级绕组结构是最佳的方式,因为它有利于减小所谓“邻近效应”的影响,然而,实际 PCB 板上允许的绕组高度以及实际要求的线圈匝数往往难以满足最佳设计要求。考虑到成本的原因,建议采用标准厚度的覆铜层。通常 PCB 制造商采用 35 或 70 微米的厚度,厚度的选择在控制电流引起的温升方面扮演着重要的角色。

国际安规 IEC60950 中,对环氧树脂(FR2 或 FR4)类 PCB 型变压器初级与次级之间的主要绝缘厚度要求为 400 微米。如果主要绝缘厚度的值未要求,那么绕组层间保证 200 微米的绝缘距离是足够的,而且在顶层和底层的大约 10 微米厚的阻焊层也应该考虑在内。

绕组的导线宽度取决于电流强度和最大允许电流密度的值。绕组匝间间隔是由产品生产能力和成本决定的。通常的规则是对于 35 微米厚的覆铜,导线宽度和间隔必须大于 150 微米,而对于 70 微米厚的覆铜,则必须大于 200 微米。

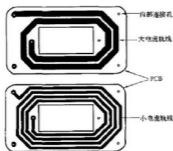
依靠 PCB 板制造商的生产能力,生产出更小尺寸的 PCB 板也是可能的,不过这可能意味着实际成本的增加。如下图,每层导线的匝数和匝间间隔分别用  $N_i$  和  $s$  表示。对于实际绕组宽度为  $bw$ ,导线宽度由以下公式算出:



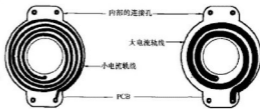
为了满足主体绝缘要求,可能有不同的位置结构实现方案,磁芯被看作是原边初级绕组的一部分,与副边次级绕组的分离距离必须至少为 400 微米。因此,靠近内层和磁芯外腿的次级绕组与磁芯的爬电安全距离必须至少为 400 微米。这样,由于 800 微米必须从绕组宽度中扣除,导线的宽度就能够通过下面公式计算得到。

$$W_t = [bw - 0.8 \cdot (N_i - 1) \cdot S] / N_i$$

注意:在公式中所有的尺寸均为毫米。



EE 型磁芯 PCB 绕组



ER 型磁芯 PCB 绕组

## 2.7 平均匝长 MLT

为了计算绕组的直流电阻，需要平均匝长 MLT，当绕组电阻知道以后，就可以计算出在额定负载下绕组的压降，绕组平均匝长有关的绕组尺寸与匝长的计算如下所示：

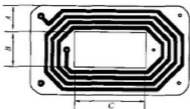


图 20-16 与矩形绕组平均匝长 (MLT) 有关的尺寸

$$MLT = 2B + 2C + 2.82A \quad (\text{mm})$$



图 20-17 与圆形绕组平均匝长 (MLT) 有关的尺寸

$$MLT = \frac{\pi(OD + ID)}{2} \quad (\text{mm})$$

## 2.8 PCB 绕组直流电阻与损耗

PCB 绕组直流电阻可由以下公式确定

$$R_{DC} = \frac{\rho l}{s} = \frac{\rho * N * MLT}{s}$$

其中，

$\rho$  : 为导体的电阻率，铜的电阻率约为  $1.75 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$  (20℃时)；

$N$  : 为绕组的匝数；

$s$  : 为绕组走线的截面积；

PCB 绕组上的压降为：

$$V = IR$$

PCB 绕组上的损耗为：

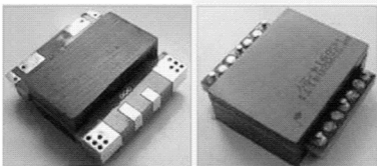
$$P_w = I^2 R$$



## 2.9 绕组的端接

如果对于终端的接法没有足够的考虑，那么平面变压器到外部的连接效果可能会很差，由于平面变压器使用的工作频率比较高，所以必须考虑趋肤效应（交流电阻）的影响，由于趋肤效应，平面变压器的外部引线必须尽可能的短，对于大电流而言，端接产生的影响会很大，低质量的连接会使得产品接触电阻大，导致发热严重，甚至于烧坏产品。

连接方式也可能导致成本的上升，如下图所示的两种不同的端接方式：

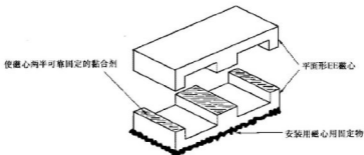


使用 PCB 焊盘作为引出线

使用外部连接端子作为引出线

## 2.10 磁芯的安装和固定

磁芯的固定和安装应该是坚固而温度稳定的。使磁芯两半安全可靠合在一起的最可行的方法之一是使用环氧树脂粘合剂。当磁芯的两部分被环氧树脂粘合剂适当粘合的时候，粘合剂应该对其电性能很少或者没有影响。这就是说，环氧树脂粘合剂很少或者没有在啮合表面处附加气隙。而实际上，使用任何环氧树脂粘合剂来固定磁芯，都会附加有一定的气隙，因为环氧树脂是由颗粒存在的，因此在使用平面磁芯的场合，磁芯的两个端面是不能直接使用环氧树脂粘合剂来固定，只能从磁芯端面的两侧来粘接，这就降低了粘接的牢固性和可靠性。同时还要仔细考虑磁芯与安装表面之间的热应力问题。构成磁芯的铁氧体是一种易碎的物质，平面磁芯的截面薄、外形低，不能像传统磁芯那样缓冲那么大的应变，因此，在平面变压器装配以后，在 PCB 与磁芯之间应该保证一个小的间隙以保证在整个温度变化中有最小的应力。



### 三、设计举例

#### 3.1 正激变换器

##### 输入参数

输入电压 $V_{inmax}$ (V)	36	电流密度 $J$ ( $A/mm^2$ )	12	输出电压 $V_{o1}$ (V)	5
输入电压 $V_{inor}$ (V)	24	最大磁通密度 $B_m$ (T)	0.1	输出电流 $I_{o1}$ (A)	10
输入电压 $V_{imin}$ (V)	18	磁芯窗口使用系数 $K$	0.25	输出电压 $V_{o2}$ (V)	
工作频率 $f_o$ (Hz)	300000	辅助电源电压 $V_{aux}$ (V)	12	输出电流 $I_{o2}$ (A)	
工作占空比 $D_{max}$	0.6	驱动电源电压 $V_{dri}$ (V)	9-18	输出电流纹波系数 $k$	
电源效率 $\eta$	92%				

##### 1、计算输出功率

$$P_o = V_o * I_o = 5 * 10 = 50W$$

##### 2、计算磁芯大小

$$AP = A_w A_E = \frac{P_o \sqrt{D}}{JK B_m f_o \eta} = \frac{50 * \sqrt{0.6}}{12000000 * 0.25 * 0.1 * 300000 * 0.92} = 467.75 * 10^{-12} m^4$$

$AP$ : 值为  $m^4$ ;  $A_E$ :磁芯截面积( $m^2$ );  $A_w$ :磁芯窗口面积( $m^2$ );  $P_o$ : 输出总功率 (W);

$J$ : 平均电流密度( $A/m^2$ );  $K$ : 绕制窗口面积占用系数;  $B_m$ : 设计的磁通密度(T);  $f_o$ :

工作频率(Hz);

选择磁芯:

磁芯形状大小	ERI18/6.5	磁芯截面积 $A_e$ ( $mm^2$ )	30.11	磁芯窗口宽度 (mm)	4.7
磁芯材质	TPW33	磁芯体积 $V_e$ ( $mm^3$ )	632.4	磁芯窗口高度 $G$ (mm)	3.5
磁芯厂家	TDG	磁芯开窗宽度 (mm)	15.6	磁芯窗口面积 $A_w$ ( $mm^2$ )	16.45
电感因素 $AL$ ( $nH/N^2$ )	2700	磁芯中柱直径 (mm)	6.2	$AP$ ( $mm^4$ )	495.3

##### 3、计算原边匝数

$$N_p = \frac{V_{pri(min)} * D_{max} * T}{\Delta B * A_e} = \frac{18 * 0.6 * 3.3 * 10^{-6}}{2 * 0.1 * 30.11 * 10^{-6}} = 5.92 \quad \text{取 } N_p = 6 \text{ Ts}$$

##### 4、计算原、副边匝比

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{pri(min)} * \eta * D_{max}}{V_o} = \frac{18 * 0.92 * 0.6}{5} = 1.99 \quad \text{取 } n = 2$$

##### 5、计算副边匝数

$$N_s = \frac{N_p}{n} = \frac{6}{2} = 3 \text{ Ts}$$

##### 6、辅助电源绕组计算

$$\text{辅助电源绕组电压 } V_{aux} = \frac{V_{in} D_{max} \eta}{n}$$

$$N_s = \frac{N_p V_{aux}}{V_{in} D_{max} \eta} = \frac{6 * 12}{18 * 0.6 * 0.86} = 7.75 \quad \text{取 } N_s = 8 \text{ Ts}$$

辅助电源绕组电压

$$V_{aux} = \frac{V_{in} D_{max} \eta N_s}{N_p} = \frac{18 * 0.6 * 0.86 * 8}{6} = 12.38V$$

#### 7、同步整流MOSFET驱动绕组计算

驱动绕组电压  $V_{drive} = V_{in}/n$

$$n = V_{in}/V_{drive} = 18/8 = 2.25$$

$$N_{drive} = N_p/n = 6/2.25 = 2.67 \quad \text{取 } N_{aux} = 3T_s$$

最小的驱动脉冲电压为:  $V_{drive} = 18/2 = 9V$

最大的驱动脉冲电压为:  $V_{drive} = 36/2 = 18V$

#### 8、验算 $D_{max}$

$$D_{max} = \frac{nV_o}{\eta V_{pri(min)}} = \frac{2 * 5}{0.92 * 18} = 0.604$$

$$D_{min} = \frac{nV_o}{\eta V_{pri(max)}} = \frac{2 * 5}{0.92 * 36} = 0.302$$

#### 9、验算 $\Delta B$

$$\Delta B = \frac{V_{pri(min)} * D_{max} * T}{N_p * A_e} = \frac{18 * 0.604 * 3.3 * 10^{-6}}{6 * 30.11 * 10^{-6}} = 0.199T \quad B_m = \Delta B/2 = 100mT$$

#### 10、计算原边绕组的有效值电流

$$I_{Prms} = \frac{P_o}{\eta * V_{Di(min)} * \sqrt{D_{max}}} = \frac{50}{0.92 * 18 * \sqrt{0.604}} = 3.88A$$

#### 11、计算副边绕组的有效值电流

$$I_{Srms} = \sqrt{D_{max}} * I_o = \sqrt{0.604} * 10 = 7.77A$$

#### 12、计算原、副边的绕组直流电阻 (铜电阻率 $\rho$ : $1.85 * 10^{-8} \Omega * m$ , $80^{\circ}C$ )

绕组	使用层数	走线宽度 (mm)	走线间距 (mm)	走线到板边距 (mm)	每层圈数	铜箔厚度 (OZ)
Np1	4	0.9	0.25	0.6	3	4
Np2	2	0.3	0.30	0.8	4	4
Ns1	6	3.2	0.25	0.4	1	4
Ns2		0.2	0.25	0.4	1.5	4

变压器绕组采用 3 块 4 层 PCB 叠加而成, 结构

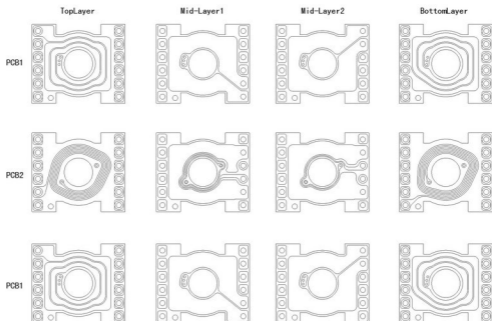
$N_{p1} + N_{s1} + N_{s1} + N_{p1} + N_{p2} + N_{s2} + N_{s2} + N_{p2} + N_{p1} + N_{s1} + N_{s1} + N_{p1}$  如下图示:

1、原边绕组使用 4 层, 每层 3 圈, 先用 2 层串联为 6 圈, 然后再并联, 走线铜厚 4OZ, 走线宽度 0.9mm, 走线间距 0.25mm;

2、辅助绕组使用 2 层, 每层 4 圈, 用 2 层串联为 8 圈, 走线铜厚 4OZ, 走线宽度 0.3mm, 走线间距 0.3mm;

3、副边绕组使用 6 层, 每层 1 圈, 先用 3 层串联为 3 圈, 然后再并联, 走线铜厚 4OZ, 走线宽度 3.2mm, 走线间距 0.25mm;

4、驱动绕组使用 2 层, 每层 1.5 圈, 先用 1 层走线 2 圈, 然后再串联, 走线铜厚 4OZ, 走线宽度 0.2mm, 走线间距 0.25mm;



$$\text{原边的直流电阻: } R_{PDC} = \rho l / s = \frac{6 * 1.85 * 10^{-8} * 3.14 * 10.8 * 10^{-3}}{2 * 0.14 * 0.9 * 10^{-6}} = 6 * 5 / 2 = 15m\Omega$$

$$\text{原边的铜损为: } P_{cu1} = I_{rms}^2 R_{PDC} = 3.88 * 3.88 * 15 = 0.226W$$

$$\text{副边的直流电阻: } R_{SDC} = \rho l / s = \frac{3 * 1.85 * 10^{-8} * 3.14 * 10.8 * 10^{-3}}{2 * 0.14 * 3.0 * 10^{-6}} = 2.24m\Omega;$$

$$\text{副边的铜损为 } P_{cu2} = I_{rms}^2 R_{SDC} = 7.77 * 7.77 * 2.24 = 0.135W$$

$$\text{辅助绕组直流电阻: } R_{aux} = \rho l / s = \frac{8 * 1.85 * 10^{-8} * 3.14 * 10.8 * 10^{-3}}{0.035 * 0.3 * 10^{-6}} = 8 * 60 = 480m\Omega$$

$$\text{驱动绕组直流电阻: } R_{drv} = \rho l / s = \frac{3 * 1.85 * 10^{-8} * 3.14 * 10.8 * 10^{-3}}{0.035 * 0.2 * 10^{-6}} = 269m\Omega$$

### 13、磁芯损耗

查表可得 80°C, 300KHZ, 100mT, TDG 磁芯 TPW33 的磁芯损耗约为 380KW/M<sup>3</sup>

$$P_{fc} = 380 * 10^3 * 632.4 * 10^{-9} = 0.24W$$

### 14、变压器总损耗

$$P_{\Sigma} = P_{cu1} + P_{cu2} + P_{fc} = 0.226 + 0.135 + 0.24 = 0.601W$$

### 15、计算原边电感

$$L_P = A_L N_P^2 = 2.7 * 36 = 97.2\mu H \pm 25\%$$

16、计算磁芯的表面积

$$A_T = 41.3\sqrt{AP} = 41.3 * \sqrt{495.3} * 10^{-2} = 9.19CM^2$$

17、计算温升

$$\Delta T = \frac{(P_{cu} + P_{cv})}{A_T} K_t \quad K_t \text{取值: } 25^\circ\text{C, } K_t=850; 50^\circ\text{C, } K_t=710$$

$$\Delta T_{25} = \frac{0.601}{9.19} * 850 = 55.6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{50} = \frac{0.601}{9.19} * 710 = 46.4^\circ\text{C}$$

#### 四、生产工艺



平面变压器生产流  
程及工艺E1.pdf