

一种应用于开关电源的高频平面变压器的设计

张天弋 林辉

西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072

近年来,随着电力电子技术的发展和成熟,人们逐渐认识到磁性元件不仅是开关电源中的功能元件,同时其体积、重量、损耗在整个电源模块中也占相当大的比例。据统计,磁性元件的重量一般是变换器总重量的30%~40%,体积占总体积的20%~30%,这在模块化设计的高频电源中,磁性元件的体积、重量所占的比例还会更高。因此,要提高开关电源的功率密度、效率和输出品质,关键是提高其中磁性元件的功率密度,降低磁性元件的体积和重量。平面变压器因为其特殊的平面结构和绕组的紧密耦合,使得高频寄生参数得到了很大的降低,极大改进了开关电源的性能。因此,近年来其在开关电源领域得到了广泛的应用。本文详细介绍了一种小功率平面变压器的参数设计和绕组制作的方法,并通过试验验证了该平面变压器的设计满足设计要求。

1 平面变压器在开关电源中的应用

开关电源的发展趋势是效率更高、体积更小、重量更轻,而传统的隔离变压器在效率、体积、重量等方面严重制约了开关电源的进一步发展。同时由于变压器涉及到的主要参数有电压、电流、频率、变比、温度、漏抗、损耗、外形尺寸等,所以一直无法像其它电子元器件那样有现成的变压器可供选用,常常要经过繁琐的计算来

选用磁芯和绕组导线,而且传统变压器绕组的绕制对变压器的性能也有较大影响,加之变压器的许多重要参数不易测量,给使用带来一定的盲目性,很难在频率响应、漏抗、体积和散热等方面达到满意效果。平面变压器技术则在隔离变压器的许多方面实现了重要的突破。

平面变压器与传统的变压器相比主要有以下优点:

- (1)高电流密度。平面变压器的导线实际上是一些平面的导体,因而电流密度大。
- (2)高效率。效率可达98%~99%。
- (3)低漏感。约为初级电感的0.2%。
- (4)热传导好。热通道距离短,温升低,散热面积大,热传导效果好。
- (5)低EMI辐射。良好的磁芯屏蔽可使辐射降到很低。
- (6)体积小。采用了小型磁芯可相应减小体积。
- (7)参数可重复性好。因为绕组结构固定、预先加工好,所以参数稳定。
- (8)工作频率范围宽。频率可从50kHz~2MHz。
- (9)工作温度范围宽。工作温度为-40℃~+130℃
- (10)因有固定的、预先加工好的绕组结构,

摘要:介绍了高频平面变压器的特点和在高功率密度开关电源中的应用,详细的说明了一种高频平面变压器的设计过程,包括参数的计算和绕组的制作。最后通过试验验证了这种平面变压器符合设计性能要求。

关键词:平面变压器; 开关电源; 功率密度; 绕组

参数稳定可重复特性好。

(12)高绝缘性。绕组之间、初-次级及次-次级间具有高绝缘性，初-次级间绝缘隔离可达4kV。

由于平面变压器相比于传统变压器有这么多优点，所以近年来在开关电源领域得到了广泛的应用。

2 平面变压器的设计^[1]

平面变压器设计参数：

最大输出功率 $P_{\text{omax}}=10\text{W}$ ；效率 $\eta>0.95$ ；

工作温度 50°C ，允许变压器总温升 30°C 。

试验DC-DC变换器设计参数：

输入电压 $U_i=24\text{VDC}$ ；输出 $U_o=15\text{VDC}$ ；

工作频率 $f=100\text{kHz}$

平面变压器的设计与传统变压器有很大不同。传统变压器绕组设计主要是选择漆包线的线径，而平面变压器是设计印制线的宽度和间距。可按如下步骤完成印制板平面变压器的设计。

(1) 确定最大输出功率 P_{omax} ：根据设计要求，最大输出功率确定为10W。

(2) 磁通密度 B ：根据查表工作频率100kHz时，饱和磁通密度 $B_s=0.33\text{T}$ 左右，通常选定 B 为 B_s 的1/2到2/3，因此取工作磁密 $B=0.2\text{T}$ 。

(3) 磁芯损耗引起的温升和绕组损耗引起的温升。通常绕组的温升占到总温升的一半。因此本设计中绕组的温升为 $30^\circ\text{C}/2=15^\circ\text{C}$ ，通过查表1可以确定对应的电流密度 $J=30\text{A}/\text{mm}^2$ 。

表1 允许温升条件下最小工作电流密度

$\Delta T/^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50
$J/(\text{A}/\text{mm}^2)$	30	50	70	90	100

(4) 磁芯结构常数：

$$S = \frac{k_h \omega_t (1 + \eta)}{k_f B f J H \eta} P_o + \frac{k_h \omega_t}{k_f B f} (U_p \omega_{\text{dp}} + U_s \omega_{\text{ds}}) = 355.5 \text{mm}^4$$

式中， S 为磁芯窗口面积和磁芯有效截面积之积，即磁芯的结构常数； η 为效率； P_o 为总的输出功率； J 为电流密度； H 为绕组厚度。

根据对磁芯形状和尺寸及工作频率的要求，

本文选取PEI-18磁芯，结构如图1所示。该磁芯对应的主要规格参数为 $a=5.0\text{mm}$ ， $b=2.2\text{mm}$ ， $A_e=39.5\text{mm}^2$ ，磁芯材料选取3F3型号。

表2 PEI-18 磁芯参数

Symbol	V_c/mm^3	L_c/mm	A_c/mm^2	M/g	H/mm
PEI-18	830	20.3	39.5	4	8.2

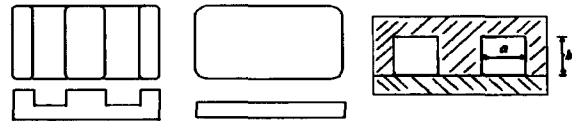


图1 PEI-18型磁芯结构

(5) 计算初级、次级绕组匝数：

初级线圈的匝数：

$$N_p = \frac{U_p}{k_f B A_c f} = \frac{24}{4 \times 0.2 \times 39.5 \times 10^{-6} \times 100 \times 10^3} = 7.6 \approx 8 \text{匝}$$

由初级线圈与次级线圈的关系：

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{U_{\text{in}} \cdot D_{\text{max}}}{U_{\text{out}} + 1}, \text{可计算}$$

$$N_s = \frac{N_p (U_{\text{out}} + 1)}{U_{\text{in}} \cdot D_{\text{max}}} = 6 \text{匝}$$

(6) 一次侧电流 I_p 及线宽 w_{cp} ：

$$I_p = \frac{P_{\text{omax}}}{U_p \eta} = \frac{10}{24 \times 0.95} = 0.438 \text{A} ;$$

$$w_{\text{cp}} = \frac{I_p}{JH} = \frac{0.438}{30 \times 10^{-6} \times 35 \times 10^6} = 0.427 \text{mm}$$

同理，二次侧线宽：

$$w_{\text{cs}} = \frac{I_s}{JH} = \frac{10/15}{30 \times 10^{-6} \times 35 \times 10^6} = 0.635 \text{mm}$$

(7) 印制板设计结果如表3所示。

(8) 由磁芯的结构可知原边一圈印制线的平均长度 $L_p=34\text{mm}$ ，副边一圈印制线的平均长度 $L_s=34\text{mm}$ ，铜的电阻率 $\rho=1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ，由公

$$\text{式 } P_w = \sum_i I_i^2 \frac{\rho L_i N_i}{w_{\text{ci}} H} \text{可计算铜损 } P_w = 0.16 \text{W}。 \text{通}$$

过磁芯手册查得100kHz频率, 磁通密度0.2T时, $P_v=80\text{kW}/\text{m}^3$, $V_e=830\text{mm}^3$ 。所以磁芯损耗 $P_c=P_vV_e=0.066\text{W}$ 。所以总的损耗 $P=P_w+P_c=0.226\text{W}$ 。因此效率 $\eta=(10-0.226)/10=97.7\%$, 满足设计要求。

表3 印制板设计结果

层	匝数	宽/mm	间距/mm
N_p	8	0.427	0.2
N_s	6	0.635	0.2

3 平面变压器绕组的制作

能提供低的漏磁通和低的涡流损耗的最简单结构是两层初级绕组之间夹一层次级绕组的绕法(又称三明治绕法)。从低成本和易接受性能考虑, 此种绕法的方式通常也是设计的出发点。平面变压器中的PCB印制电路板结构类似于铜箔绕组, 也可以使损耗降低。选择初级、次级铜箔厚度的原则是: 没有绕绕的整个绕组(即印制板敷铜)的厚度不会超过趋肤深度的两倍。

所有本文设计的平面变压器的绕组结构示意图如图2所示。

原边和副边绕组采用交叉缠绕。原边的一到四匝在板子的第一层, 五到八匝在板子的第三层, 通过通孔1(位于一层到三层之间)连接; 副边的前三匝在板子的第二层, 后三匝在板子的第四层, 它们通过通孔2(位于二层到四层之间)连

接。这样交叉排列(P-S-P-S结构)可以增加其原副边耦合程度, 降低漏感和交流电阻。

4 结论

平面变压器装配完成后, 开关电源模块的体积大约为 $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$ 。经试验测试, 其漏电感为 $3.2\ \mu\text{H}$, 为初级线圈的0.2%, 初级和次级间的分布电容量仅为 320pF 。由平面变压器制成的整流模块能在 $+50\text{C}$ 以下满功率输出, $+80\text{C}$ 可正常输出满功率的50%, 平面变压器效率可达到95%。该试验证明, 文中采用的平面变压器设计方案是可行的, 并达到了预期效果。应用该平面变压器制作的开关电源模块已用于实验室的辅助电源中。

参考文献

- [1] W.Chen, Y.Y.Yan, Y.Q.Hu. Model and design of PCB parallel winding for planar transformer. IEEE Transactions on Magnetics. 2003, 39 (5) : pp3202-3204

作者简介

张天弋(1977—), 男, 西北工业大学, 硕士, 研究方向为电力电子。

林辉(1957—), 男, 西北工业大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子、计算机仿真、测控技术等。

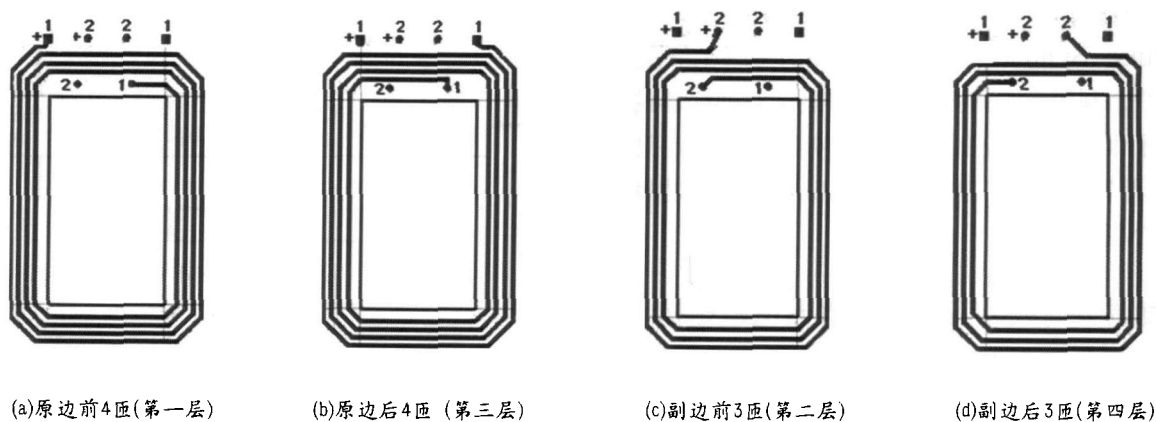


图2 平面变压器的绕组结构示意图