

适用于开关电源的一种分布结构变压器设计

Design of A Distributed Structure Transformer for Switching Mode Power Supply (SMPS)

薛蕙 编译

摘要：文章利用大家所熟悉的电路拓扑，介绍了一种分布结构的开关电源变压器的设计与性能。这种变压器的磁芯具有热分布均匀，外形尺寸小的特征。文章首先利用磁场强度推导出了漏感的近似计算方程式，然后从多种形式的绕组比较中，研究探讨了具有最低漏感，最佳耦合系数的最佳结构，并用 SPICE 进行了模拟。

关键词：变压器，开关电源 (SMPS)，分布结构，磁芯，漏感

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2014)10-5-127

1 引言

传统变压器的结构是由磁芯和绕组两大主要部分组成的，通过磁芯作成的介质传导磁通，图 1 示出了传统设计的变压器。这种结构的变压器将自中心到外表面之间形成温度梯度，这是因为变压器的磁芯损耗和铜损的部位通常都在其中心位置，故使得其中心的温度要比表面的温度高出许多。另外，对于那些给定了额定输出功率的变压器，如果其工作频率不能提高，那么其体积尺寸就不可能明显地减小。这是因为变压器的窗口体积必须足够大，才能容纳低损耗的绕组。而且，由于绕组是线绕结构，故其杂散电容必定较大，这是限制工作频率提高的重要因素。由此可见，变压器结构方面的这些固有缺陷，给功率变换器的小型化带来许多困难。

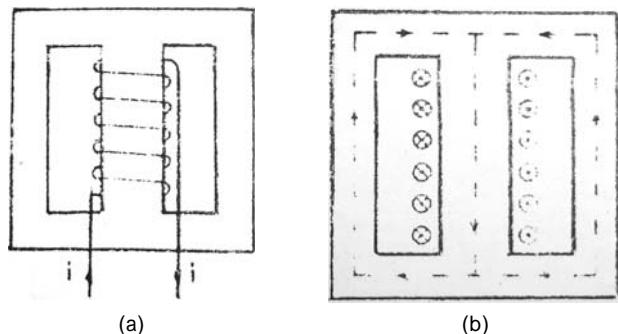


图 1 传统变压器结构示图 (a) 结构示图 (b) 磁通路径图

在本文中，作者提出了一种分布结构的开关型变压器，这种分布结构建立在大家熟悉的电路拓扑上。该变压器的磁芯特征是热分布均匀，外形尺寸减小。在文章中，首先从磁场强度推导出了漏感的近似计算公式，然后把几种绕组结构进行了比较，并从中研究探讨了存在最少漏感和具有最佳耦合系数的最佳变压器结构。文章还讨论了利用电感矩阵和 T 型技术的 SPICE 变压器模型。

为了获得品质优良的电路设计，电子元器件的模型研究为许多科技人员重视。磁芯元件的模型对于开关电源电路的仿真是很重要的，它包括了磁阻模型、电感矩阵模型和 T 型技术模型等等，其中电感矩阵型是利用不同绕组之间的相互关系建立的由一个电感矩阵来表述的模型。这种矩阵的参数由测量获得的变压器物理尺寸确定。这种电感矩阵模型最适合用于电路仿真，但在本文中，选用的是 T 型模型，这除了大多数这个领域的工程技术人员比较重视它外，而且 T 型模型的参数可以从电感矩阵的参数推导得到。

2 分布结构变压器的设计

2.1 分布结构简述

分布结构的电感器和变压器分别示于图 2 和图 3。图中的虚线表示环形磁芯的磁通路径。

分布结构由一组 E 型铁芯构成。绕组从铁芯的一个窗

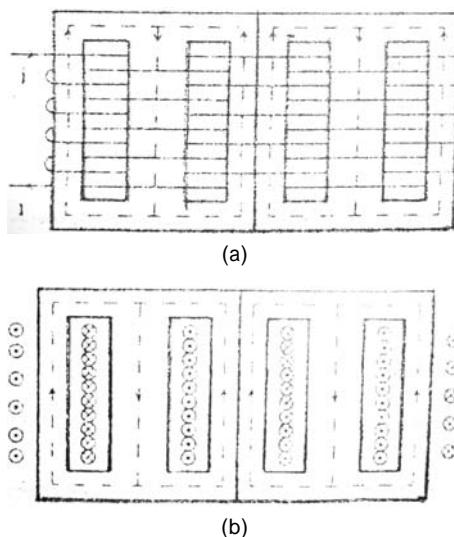


图 2 分布参数构造的电感器 (a) 结构示图 (b) 磁通路径图

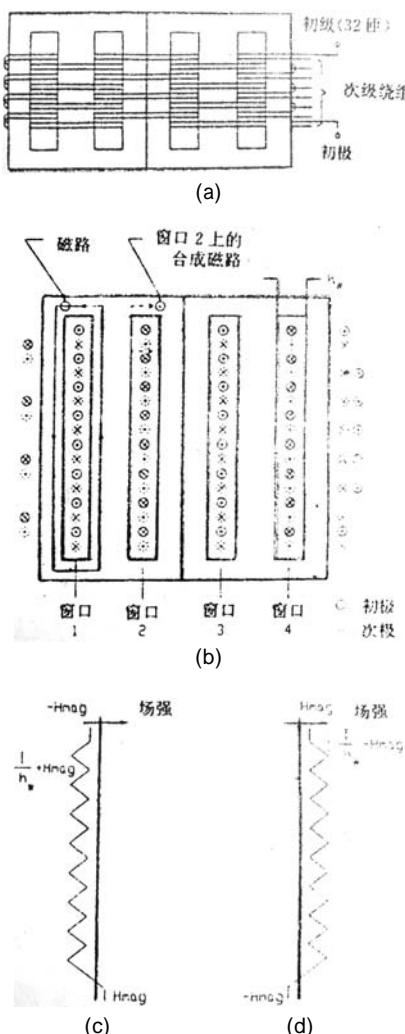


图 3 分布式参数构造的变压器
(a) 结构示图 (b) 磁路和合成磁路
(c) 窗口 1 磁场强度 (d) 窗口 2 磁场强度

口绕向另一个窗口。为了避免电感饱和，可以使用铁粉芯或者有气隙的铁氧体磁芯作为电感器和变压器的磁芯。铁氧体磁芯的气隙可以用一种绝缘物薄膜放置在铁芯结合的部位获得，也可以磨削 E 型铁芯的中柱形成气隙。

2.2 分布式结构的热分布

由以上的结构图可见，变压器传递功率以及其功率损耗都分布在每个铁芯上，因此，分布结构铁芯避免了单一的集中发热点。并且，开放式的分布结构形式构建了变压器的一种良好散热环境。另外，绕组绕置在铁芯的表面上，使其整个结构与传统变压器的结构比较则存在更大的裸露表面积，这就可以形成更好的热对流，使变压器得以更快更好冷却。

变压器的热量传递是通过辐射，对流和传导等方式进行的，故其温升表达式为：

$$T = P_r / h A_s \quad (1)$$

式中， A_s 为变压器裸露的表面积。由此式 (1) 可见，增加变压器的表面积可以相应地降低其温升。

2.3 分布结构漏电感的计算

设计变压器时，应尽量使漏电感达到最小。因为漏电感在耦合电感器和集成磁性元件中会产生不可忽视的影响，例如涉及变压器的效率，电磁干扰 (EMI) 等问题。

为了求得分布结构变压器的漏感，首先要求出通过该结构绕组的漏磁通强度。因为任何形式的电感 L 所产生的能量，通常都储存在它的磁场 H 中，所以，储存在 L 中的能量 E_s 由下计算：

$$E_s = L I^2 / 2 \quad (2)$$

$$E_s = \frac{\mu}{2} \iiint H^2 dv \quad (3)$$

所以，电感 L 与磁场强度的关系式为：

$$L = \frac{\mu}{I^2} \iiint H^2 dv \quad (4)$$

用方程式 (4) 可以求出变压器的电感值和漏感值。在图 3a 所示的变压器结构图中可见，初级绕组与次级绕组隔行交替绕制，可以显著地减少漏电感。

磁场强度可以由麦克斯韦方程求出。图 3c 和图 3d 分别表示窗口 1 和窗口 2 的磁场强度。可以利用图 3b 所示的合成磁路求出漏电感。由于分布结构的变压器结构是由多个 E 型铁芯组成的，因此，总漏感的能量是每个 E 型铁芯窗口漏感能量之和：

$$E_{\text{total}} = E_{w1} + E_{w2} + \dots + E_{wn} \quad (5)$$

由此得出总漏感的计算式为：

$$L_{\text{total}} = \frac{\mu}{I^2} \sum_{V_k=V_1}^{V_n} \iiint H_k^2 dV_k \quad (6)$$

为了求出总漏感，可以将全部次级绕组短路，这样，铁芯的磁化磁场强度接近于零。从计算出经过每个窗口的磁场强度之和，推算出总漏感量 L_{total} ：

$$L_{\text{total}} = \frac{\mu_0 n N_1^2 b M L T}{3 h_w} \quad (7)$$

式中， N_1 为每个窗口的初级匝数， $M L T$ 为每匝的平均长度， h_w 为窗口的高度， b 为绕组的宽度。

2.4 分布结构的其它特性

图 4 所示为分布结构变压器的剖面图。变压器的外形高度等于铁芯与绕组高度之和。如果增加铁芯数量，则可降低变压器的高度。

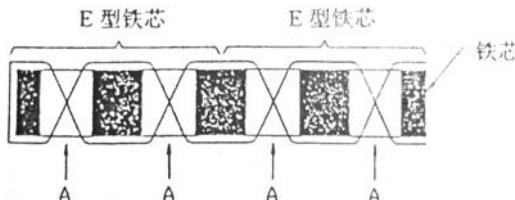


图 4 分布结构变压器的剖视图

由于分布结构变压器选用了 E 型铁芯，这可以使得每个窗口绕组的匝数有一定灵活性，比较容易得到任何比率的匝数比，这是因为变压器所需的铁芯数量与所需的匝数是相关联的。

绕组匝数按法拉第定律得出的计算式为：

$$V_p = N_p \frac{d\phi}{dt} = N_p A e \frac{dB}{dt} \quad (8)$$

交叉绕制的绕组如图 4 中箭头 A 所示，其导线以正交方式相互跨越，但这些导线形成的磁场并不互相干扰，除了磁场通过铁芯耦合外，在正交的绕组之间不产生耦合。在工作频率时，这种绕组的杂散电容可被减小到可以忽略不计的程度。

3 分布结构变压器模型

以下方程式 (9) 是上面介绍的诸多变压器模型中的电感矩阵模型，它描述了变压器各个绕组之间的关系。电感矩阵的参数则由方程式 (10) 确定。

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ L_{31} & L_{32} & \dots & L_{3n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{m1} & L_{m2} & \dots & L_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d_i_1}{dt} \\ \frac{d_i_2}{dt} \\ \frac{d_i_3}{dt} \\ \vdots \\ \frac{d_i_m}{dt} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$V_i = I_{ij} \frac{d_{ij}}{dt} \quad (10)$$

图 5 示出了测量变压器矩阵参数的方法。获得矩阵参数后，再转换成 T 型参数。方程式 (11) 至方程式 (13)，是表述二个绕组变压器的电感矩阵参数与 T 型参数的关系式：

$$L_{11} = L_{11} - L_{12} \frac{N_p}{N_s} \quad (11)$$

$$L_{12} = L_{22} - L_{12} \frac{N_p}{N_s} \quad (12)$$

$$L_{13} = L_{12} \frac{N_p}{N_s} \quad (13)$$

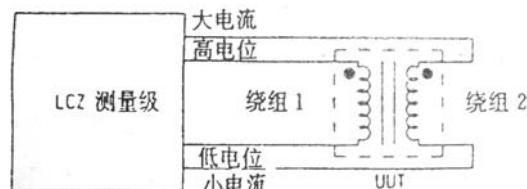


图 5 耦合电感的测量方法示意图

以上式中的 L_{11} 、 L_{12} 、 L_{13} 为图 6 中所示的 T 型参数； L_{11} 、 L_{12} 、 L_{22} 则为图 7 中所示的电感矩阵参数。如果采用 T 型变压器模型，则需要理想变压器。这种 SPICE 理想变压器可以用一些受控源获得。图 8 所示为一种理想变压器的 SPICE 模型。其匝数比为 N_p/N_s 。把理想变压器的 SPICE 模型的 T 型参数和寄生参数分量累加起来，列于下表 1。

表 1

	SUBCKT	TRF	11	12	13	14		
L	11	15	11	15	L_{11}			
L	15	12	15	12	L_m			
C	15	12	15	12	C_m			
C	11	13	11	13	C_{ps}			
V	16	17	16	17	L			
L	17	13	17	13	L_{12}			
E	16	14	16		14	15	12	N_p/N_s
F	15	12	15		12	V_{16}	17	N_p/N_s
	ENDS		TRF					

图 9 所示为变压器的仿真输入阻抗图，其绕组的排列方式如图 11 所示；图 10 是采用 HP4194A 阻抗分析仪测得的阻抗图。从图 9 和图 10 可以看到，仿真的结果与实际测量所得数值非常接近。

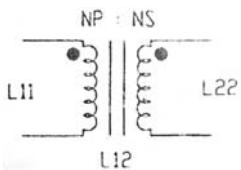


图 6 电感矩阵参数

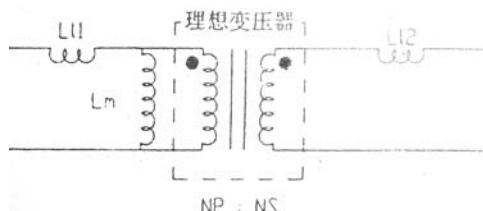


图 7 T型结构参数

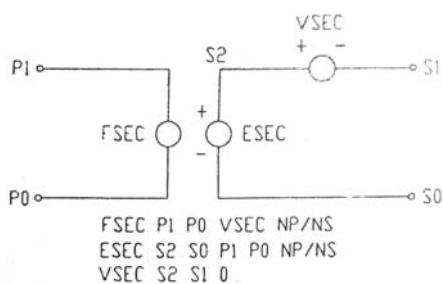


图 8 理想变压器的 SPICE 的仿真模型

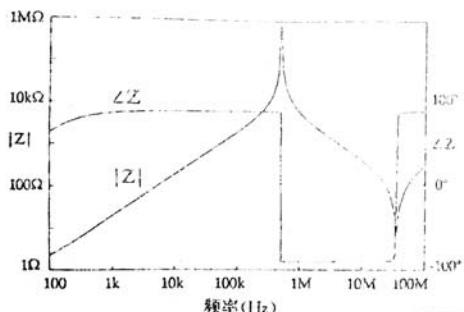


图 9 SPICE 仿真变压器 T 的阻抗 Z

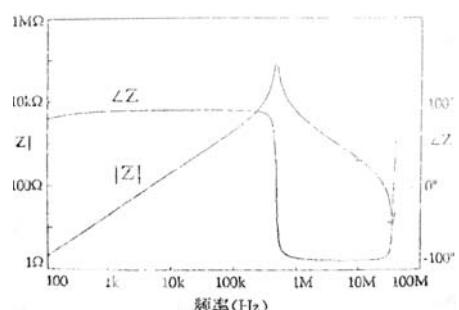
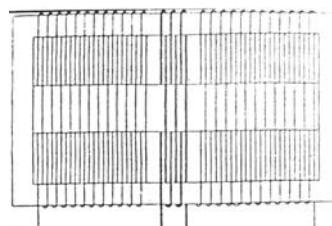
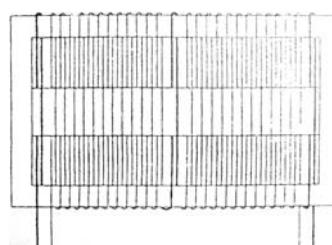


图 10 测得的感应器 C 的阻抗 Z

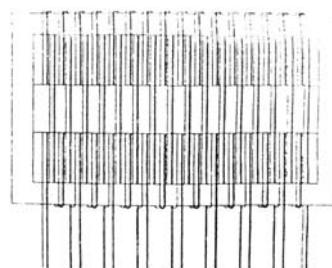
电感矩阵参数取决于变压器绕组的排列形式。图 11 所示为三种不同的绕组排列，它们都有相同的匝数比 (8:1)，并且都是绕置于相同的 EE6162E6 铁芯上。图 11(a) 所示的



(a)



(b)



(c)

图 11 三种绕组排列示图

绕组排列表示其次级绕组在变压器的中间部位，初级绕组则是先分成两半再串接起来。第二个绕组的排列如图 11(b) 所示，与第一个绕组排列有类似之处，即其初级绕组也分成两半，但次级绕组又分出第三部分，然后再串接起来。按这两种绕组排列的次级绕组设置在变压器的中间和两端。图 11(c) 表示第三个绕组的排列，其初级和次级绕组按双线并绕而且均匀地分布在在整个铁芯窗口，所有分开的次级绕组按同相位并联的方式连接起来。表 2 所列数据是测试的结果，表述了图 11(c) 所表示的绕组排列之最小漏感值为 $1.43 \mu H$ ，而最高的耦合系数达到了 0.986。

表 2 不同结构变压器的测量结果

	图11(a)结构	图11b结构	图11c结构
L_{11}	2.650mH	2.652mH	2.658
L_{12}	$288.491 \mu H$	$309.683 \mu H$	$326.960 \mu H$
L_{22}	$39.940 \mu H$	$40.624 \mu H$	$41.332 \mu H$
耦合系数	0.887	0.943	0.986
漏感	$33.194 \mu H$	$12.860 \mu H$	$1.432 \mu H$

4 实验结果小结

使用本实验产品的电路是一种正激变换器，如图 12 所示。图中，开关型变压器 T 和输出储能电感 L 具有分布结构。变换器的技术参数为：

输入：电压有效值 230V

输出：直流 12V, 8A

频率：100kHz

电感值： $L=55 \mu H$

所用铁芯：EEL16, 2E6

匝数比 T : 8:1, EEL25, 42E6 铁芯，结构图见图 11(c)。

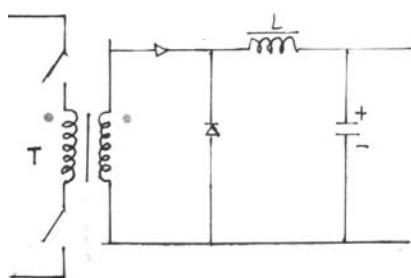


图 12 正激变换器等效电路图

检测可知，变压器表面的热分布是均匀的。变压器和扼流圈的外形高度分别是 12mm 和 6mm，这样的高度在常规变压器设计中是难以做到的，理论上的外形高度是受其所需要的铁芯面积 A 限制的。如果使用的铁芯数量不受限制，则外形高度可以进一步降低到 4mm。该变压器的互感量为 3.2mH，漏感值为 $6 \mu H$ ，是互感量的 0.19%。该变压器的耦合系数达到 0.95，而杂散电容值却在 PF 量级范围。图 10 和图 13 所示为变压器和扼流圈的频率特性。扼流圈的频率响应可以扩展到 2.8MHz 左右。

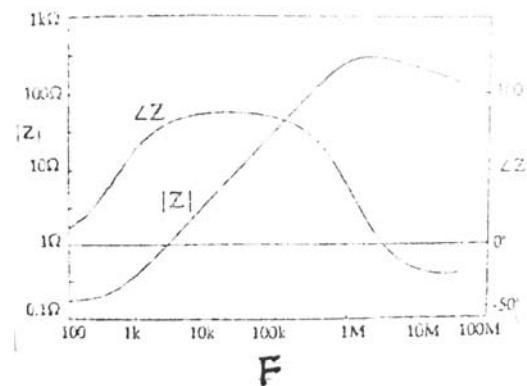


图 13 测得的电感值 L 和阻抗值 Z

5 分布结构开关型变压器的高频应用

本案提出的铁芯分布结构变压器具有热分布均匀和体积减小等固有优点。同时，利用不同的绕组结构，可以获得最低漏感和最佳耦合系数。分布结构变压器也可在高频段使用，尤其是体积小，这是高频使用所要求的。但是在高频使用时，由于趋肤效应和铁芯损耗都会增加，这就必须在其结构设计时折衷地考虑相关参数。现有办法之一是将绕组敷设在某种基板上，并且要用分布结构如图 14 所示。这种结构，改善了绕组的交流阻抗特性；在制造方面，初次级绕组间的绝缘很容易达到要求，整体装配也相当方便；这种结构布置能够控制杂散电容和耦合系数，这种控制对于高频谐振变换器是非常重要的。

附：文中字符说明

Ae—磁芯的有效截面积

As—变压器的裸露表面积

B—磁通密度

B—绕组宽度

T—变压器温升

ES—储能

Etotal—总储能

Ewn—变压器的第 n 个窗口中的储能

H—磁场强度

Hmag—磁化磁场强度

Hn—变压器第 n 个窗口中的磁场强度

h—热传递系数

Im—通过 m 绕组的电流

Lii—绕组 i 的自感耦合电感

Np—初级绕组匝数

Ns—次级绕组匝数

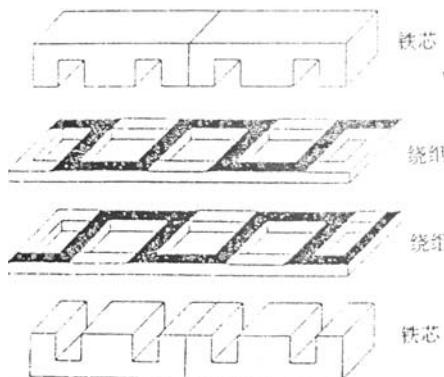


图 14 应用于高频的变压器结构示图

n—窗口数

t—时间

V_m —绕组 m 两端的电压

V_n —第 n 个窗口的容积

μ_0 —自由空间磁导率

I—电流

L—电感

L_{ij} —绕组 i 和绕组 j 之间的电感

MLT—每匝绕组的平均长度

PI—变压器功耗

V_p —初级电压

V—容积

μ —磁导率

—磁通

(参考资料略)