

无芯印刷板变压器电感量的分析与计算

李汝来, 朱义胜

(大连海事大学信息工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要: 变压器是信号与能量转换、电气绝缘的主要器件, 本文介绍一种新型变压器/无芯印刷板(PCB)变压器, 提出改进 PCB 变压器的自感与互感的计算方法. 实验证明理论计算和测试结果是一致的.

关键词: 无芯 PCB 变压器; 螺旋线圈; 胶片式电感

中图分类号: TN41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 09-1562-03

The Calculation of Impedances in Coreless Printed Circuit Board Transformers

LI Ru2lai, ZHU Y2sheng

(Collage of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: Transformers are the main devices in electrical isolation and signal and energy transfer. Based on the analysis of coreless PCB transformers structure, an improved approach to compute the self and mutual impedances in coreless PCB transformers is given. The experiment proved that the proposed approach is coincident with the testing results.

Key words: coreless printed circuit board (PCB) transformers; spiral coils; film inductor

1 引言

变压器主要用于信号与能量转换, 现代信息技术对变压器提出了频带宽、体积小、损耗小、可集成化和自动化生产的要求. 在 20 世纪 80 年代人们以磁材料为基底, 采用薄胶片与厚胶片技术制成胶片式电感, 再将同样的两个胶片式电感对称粘接在一平面电介质的两侧, 放置在磁基上, 制成胶片式平面变压器^[1,2]. 由于磁饱和以及线圈损耗的影响, 胶片式平面变压器的高频性能较差. 而无芯 PCB (Printed Circuit Board) 变压器去掉了磁物质, 克服了磁芯变压器的缺点, 易于元件的集成化和生产的自动化, 通过计算机辅助设计可以控制变压器的参数和进行性能分析.

最近, 无芯 PCB 变压器特性及其应用引起了广泛的关注^[3~7], 无芯 PCB 变压器具有良好的高频特性, 电介质典型击穿电压在 15kV~40kV, 而且几何尺寸远小于磁芯变压器. 它将广泛应用于对尺寸有严格要求的设备. 本文就两种无芯 PCB 变压器的基本结构进行了分析, 提出无芯 PCB 变压器自感和互感的改进的计算方法. 实验证明理论计算和测试结果更为接近.

2 无芯 PCB 变压器的结构

传统的变压器是将主、次级线圈缠绕在磁芯上. 随着科学技术的发展, 要求电子设备具有密度高、体积小、工作频率高的特点. 变压器体积的减小以及工作频率的提高是一个急需

解决的问题, 胶片技术为此提供了重要的技术支持, 进而产生了胶片式变压器. 由于采用磁介质, 限制了变压器工作频率. 无芯 PCB 变压器能够克服以上缺点, 并减小了表面效应对高频特性的影响. 它采用现代印刷电路板技术, 以对称方式将线圈直接印刷在电路板的表面上. 无芯 PCB 变压器主要由三部分组成: 上层主线圈、中间层电介质以及下层次级线圈. 线圈的形状有方形螺旋线圈、圆形螺旋线圈等^[6]. 由于圆形线圈比方形线圈的路径短且叠加区域小, 所以圆形线圈的电阻小, 线圈间的电容量也小. 方形螺旋线圈邻接边的连接部分成 90°角, 存在电流突变, 所以一般选用圆形螺旋线圈. 在线圈模型的中心有小孔, 它用来将一组 U2I 或 U2U 芯线焊接在一起形成回路.

本文以圆形螺旋线圈无芯 PCB 变压器为例, 介绍两种无芯 PCB 变压器的结构, 图 1 是普通无芯 PCB 变压器的剖面图, 图 2 为夹层式无芯 PCB 变压器的剖面图. 无芯 PCB 变压器是将线圈直接印刷在同一电路板的两个面上, 且主、次线圈是对称的; 夹层式无芯 PCB 变压器是利用多层印刷电路板技术, 将主次线圈印刷在电路板的中间层制成的, 表面有两个端口是变压器的输入和输出端口. 这样有利于减小功率器件和电源器件的体积, 提高元件密度.

3 无芯 PCB 变压器自感和互感的计算

计算磁芯变压器的自感和互感是运用 Maxwell 方程, 我们对无芯 PCB 变压器的自感与互感的计算是在 Hurley 和 Duffy

计算磁基平面螺旋线圈变压器的自感与互感的基础上推导出来的^[8,9], 在推导的过程中, 将螺旋线圈等效成同心的圆环, 并考虑到线圈不同点的电流密度的不同, 先计算出电流与电流密度之间的关系; 再利用互感定律找到电流与电压之间的关系; 最后利用功率与电压、电流以及互感之间的关系, 进而得到无芯变压器的互感与自感的计算公式。

在以下的公式计算中, 对应用的符号作如下的约定: I : 电流; $J(r)$: 电流密度; P : 功率; V : 电压; z : 电介质的厚度; L_0 : 自由空间磁导率; R 基底电导率; $J_i(r)$: 第一类 i 阶 Bessel 函数; a_1, r_1 : 第 i, j 圈的内半径; a_2, r_2 : 第 i, j 圈的外半径; h_1, h_2 : 第 i, j 圈轴线方向线圈的高度; s : 夹层变压器夹层的厚度。

图 2 夹层无芯 PCB 变压器剖面图

为了计算的方便, 将无芯 PCB 变压器的螺旋线圈进行等效, 即把圈数为 n 的螺旋线圈等效成通过微小的连线串联而成的 n 个同心圆。由于在变压器结构中宽高比很大, 线圈内侧边缘路径小于 r_1 外侧边缘路径 r_2 (如图 1 所示), 因此同一线圈的内侧阻抗小于外侧阻抗; 使得内侧的电流密度高于外侧。这样可以设电流密度 $J(r)$ 与半径 r 成反比。

$$J(r) = K/r \quad (1)$$

其中, K 为系数, 它与线圈的厚度和内、外半径有关。而在螺旋线圈中宽度 $r_2 - r_1$ 远远大于高度 h , 因此可设在高度方向电流密度不变化。由此可得流经某一圈总的电流 I 为:

$$I = h \int_{r_1}^{r_2} J(r) dr \quad (2)$$

联立(1)和(2)得到电流密度函数:

$$J(r) = \frac{I}{hr \ln(r_2/r_1)} \quad (3)$$

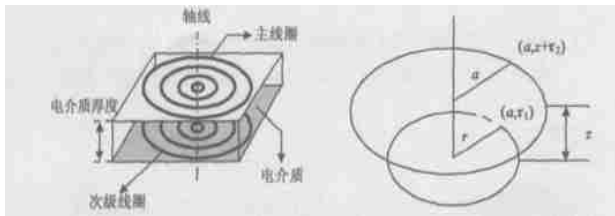


图 3 计算自感与互感的等效图 图 4 同心线圈电感分析图

当流经半径为 a 的线圈 1 截面为 $dadS_2$ 的电流是 $J(a)dadS_2$ 时, 在半径为 r 的线圈 2 的 (r, S_1) 处所产生的感应电压为 (如图 4 所示):

$$dV = j\omega M(a)dadS_2 \quad (4)$$

其中, S_1, S_2 分别为线圈 1 和线圈 2 在轴线方向上的厚度, ω 为角频率, M 为两线圈间的互感。由此可求出线圈 2 中所有点处的电流在线圈 1 (r, S_1) 点引起的感应电压^[9]为:

$$V(r) = j\omega L_0 P \int_{r_1}^{r_2} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{r} \frac{1}{r'} \frac{1}{r''} aJ(a)J_1(kr) \quad (5)$$

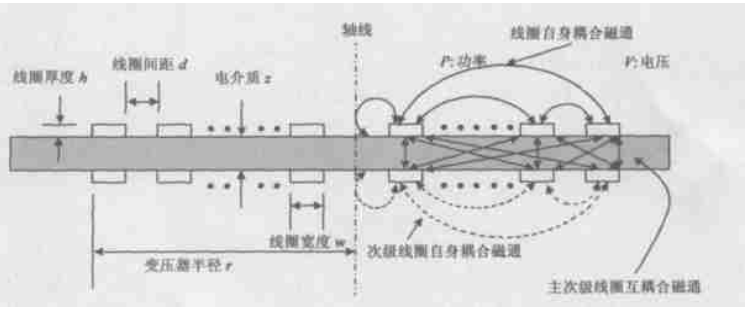


图 1 普通无芯 PCB 变压器剖面图

$$\# J_1(ka) < (k) e^{-k|z|} r_2 - r_1 \int_{r_1}^{r_2} dadS_2 dk \quad (5)$$

同时功率与电压、电流之间有如下关系:

$$dP = V(r)J(r)drdS_1 \quad (6)$$

将公式(3)和(5)代入公式(6)可求出功率函数:

$$P = j\omega L_0 P \frac{I_1 I_2}{h_1 h_2 \ln(r_2/r_1) \ln(a_2/a_1)} Q S(kr_2, kr_1) \# S(ka_2, ka_1) \# Q(kh_1, kh_2) \# <(k) e^{-k|z|} dk \quad (7)$$

其中:

$$S(kx, ky) = \frac{J_0(kx) - J_0(ky)}{k} \quad (8)$$

当 $z > (h_1 + h_2)/2$ 时,

$$Q(kx, ky) = \frac{2}{k^2} \left[\cosh k \frac{x+y}{2} - \cosh k \frac{x-y}{2} \right] \quad (9)$$

当 $z = 0, x = y = h_1 = h_2 = h$ 时,

$$Q(kx, ky) = \frac{2}{k} \left(h + \frac{e^{-kh} - 1}{k} \right) \quad (10)$$

当磁基底为无限厚时,

$$<(k) = \frac{L_r - G/k}{L_r + G/k} \quad (11)$$

当磁基底为有限厚 t 时,

$$<(k) = \frac{1 - e^{-2Gt}}{1 - <(k)^2 e^{-2Gt}} \quad (12)$$

$$G = \sqrt{k^2 + j\omega L_0 L_r R} \quad (13)$$

而功率与互感有下列关系:

$$P = v_2 i_2 = j\omega M_{12} I_1 I_2 \quad (14)$$

从而导出两个线圈之间的互感公式:

$$M_{12} = \frac{L_0 P}{h_1 h_2 \ln(r_2/r_1) \ln(a_2/a_1)} Q S(kr_2, kr_1) \# S(ka_2, ka_1) \# Q(kh_1, kh_2) \# <(k) e^{-k|z|} dk \quad (15)$$

对于无芯 PCB 变压器来说, 由于去除了磁基, $<(k) \rightarrow 1$, 所以无芯 PCB 变压器的互感公式为:

$$M_{ij} = \frac{L_0 P}{h_1 h_2 \ln(r_2/r_1) \ln(a_2/a_1)} Q S(kr_2, kr_1) \# S(ka_2, ka_1) \# Q(kh_1, kh_2) \# e^{-k|z|} dk \quad (16)$$

当下标 $i = j$ 时, 计算的是自感。在计算主线圈或次级线圈的自感时, 由于在同一平面上, 所以 $z = 0$, 在计算自感时, 函数 Q 采用表达式(10)。对于夹层无芯 PCB 变压器, 根据其主、次线圈上下都有电介质的特点, 我们可运用如下公式^[9]求取线圈的自感和互感:

$$M_{ij} = \frac{L_0 P}{h_1 h_2 \ln(r_2/r_1) \ln(a_2/a_1)} Q \int_0^1 S(kr_2, kr_1) \# S(ka_2, ka_1) \# [f(k) + g(k)] \# Q(kh_1, kh_2) dk \quad (17)$$

其中:

$$f(k) = \frac{e^{-k(d_1+d_2)} + e^{-k(d_{c1}+d_2)}}{1 - e^{-2ks}} \quad (18)$$

$$g(k) = \frac{e^{-2ks} \cosh[k(d_2-d_1)]}{1 - e^{-2ks}} \quad (19)$$

$$d_{c1} = s - d_1, d_{c2} = s - d_2 \quad (20)$$

通过式(16)或(17)我们可以得到主、次线圈的总自感:

$$L_p = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} M_{ij} \quad (21)$$

$$L_s = \sum_{j=1}^{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} M_{ij} \quad (22)$$

从而得到总互感为:

$$M_{ps} = \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{i=1}^{N_s} M_{ij} \quad (23)$$

则无芯 PCB 变压器的泄漏电感为:

$$L_{lk1} = L_p - M_{ps} \quad (25)$$

$$L_{lk2} = L_s - M_{ps} \quad (26)$$

我们采用厚度为 11.5mm 的普通印刷电路板制成的不同圈数、不同参数的无芯 PCB 变压器的自感与互感进行了计算;并采用 HP 4192A 阻抗分析仪在 10MHz 频段上,当无芯 PCB 变压器在次级开路状态下可测得其自感(如图 5 所示);在无芯 PCB 变压器次级短路状态下可测得其互感(如图 6 所示)。



图 5 无芯 PCB 变压器自感测试电路图

图 6 无芯 PCB 变压器互感测试电路图

表 1 理论计算和测试结果记录

参数 \ 圈数	4	5	6	10
线圈宽度(mm)	1.059	1.059	0.882	0.706
线圈厚度(Lm)	35	35	35	35
线圈间距(mm)	0.375	0.375	0.53	0.432
理论计算 L_{lk1} (nH)	105.91	189.0	308.9	983.07
实验测量 L_{lk1} (nH)	109.34	203.51	325.5	1002.0
L_{lk1} 误差	3.24%	7.68%	5.37%	1.93%
理论计算 L_{lk2} (nH)	105.91	189.0	308.9	983.07
实验测量 L_{lk2} (nH)	109.34	203.51	325.5	1002.0
L_{lk2} 误差	3.24%	7.68%	5.37%	1.93%
理论计算 L_m (nH)	58.954	115.95	199.02	697.52
实验测量 L_m (nH)	82.15	127.82	206.9	713.34
L_m 误差	39.34%	10.24%	3.96%	2.27%

理论计算和测试结果记录如表 1 所示。通过对数据的对比,可以看出本文提出的改进算法是可靠的。存在的误差是由于测量误差和分布参数引入的。

4 结论

本文介绍了无芯 PCB 变压器的基本结构,根据 Maxwell 方程,在计算有基底平面变压器的自感与互感公式的基础上导出了无芯 PCB 变压器的自感与互感的计算公式,该公式能够准确的计算出无芯 PCB 变压器的自感与互感,进而可进一步分析无芯 PCB 变压器的高频特性、电压增益以及输入阻抗特性。

参考文献:

- [1] Marinova I, Midorikawa Y, Hayano S, and Saito Y. Thin film transformer and its analysis by integral equation method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(4): 2432- 2437.
- [2] Rodriguez Robert, M Dishman John, T Dickens Fred, W Whelan. Edward modeling of two dimensional spiral inductors[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, 1980, CHM23(4): 535- 541.
- [3] Tang S C, Hui S Y R, Chung H. Coreless printed circuit board(PCB) transformers with multiple secondary windings for complementary gate drive circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 431- 437.
- [4] Hui S Y R, Tang S C, Chung H. Some electromagnetic aspects of coreless PCB transformers[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(4): 805- 809.
- [5] Hui S Y R, Tang S C, Chung H. Coreless printed circuit board(PCB) transformers fundamental characteristics and application potential[J]. IEEE Circuits and System, 2000, 11(3): 3- 15.
- [6] Hui S Y R, Tang S C, Chung H. Coreless PCB based transformers for power MOSFET/IGBT gate drive circuits[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 422- 430.
- [7] Hui S Y R, Tang S C, Chung H. Optimal operation of coreless PCB transformer isolated gate drive circuits with wide switching frequency range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1999, 14(3): 506- 514.
- [8] Hurley W G, Duffy M C. Calculation of self and mutual impedances in planar magnetic structure[J]. IEEE Trans Magn, 1995, 31: 2416- 2422.
- [9] Hurley W G, Duffy M. Calculation of self and mutual impedances in planar sandwich inductors[J]. IEEE Trans Magn, 1997, 33: 2282- 2290.

作者简介:



李汝来 男, 1974 年 10 月生于辽宁省盖州市, 1997 年毕业于辽宁工学院, 获工学学士学位, 1999 年考入大连海事大学电路与系统专业攻读硕士学位, 现在大连海事大学在读博士研究生, 研究方向包括通信与信息系统、微波电路等。

朱义胜 男, 1945 年生于辽宁大连, 1970 年毕业于清华大学, 大连海事大学教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 从事电路与系统领域的教学和科研, 著作有 5 Computer-Aided Design of Communication Networks, World Scientific Pub., 2000. 1995 年获国家教委科技进步二等奖, 1999 年获美国伊利诺伊州立大学 John and Grace Nuvem 国际杰出学术成就奖。