

开关电源中的平面变压器技术与应用

梁琦, 曾庆轩

北京理工大学宇航科学技术学院, 北京 100081

[摘要] 对开关电源中的平面变压器技术进行了较全面的综述。介绍了平面变压器的结构特点, 分析了平面变压器的优势与不足之处, 总结了平面变压器的分类, 并指出了平面变压器的设计方法, 最后对平面变压器技术进行了展望。

[关键词] 平面变压器; PCB 绕组; 交叉结构

[中图分类号] TM4

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2007)16-0073-06

Technology and Application of Planar Transformer Applied to Switch Mode Power Supply

LIANG Qi, ZENG Qingxuan

School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China

Abstract: An extensive survey of techniques and technologies of planar transformer applied to switch mode power supply is presented in this paper. The structural characteristics of planar transformer are introduced. The survey analyses the advantages and shortages of planar transformer, summarizes its different sorts and indicates the design methods and approaches. In the end, some predictions of future direction are attempted.

Key Words: planar transformer; PCB windings; interleaving structure

CLC Number: TM4

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2007)16-0073-06

0 引言

现代电力电子技术向着高频化、绿色化、集成制造、平面化及高功率密度的方向发展, 对磁性器件的设计和制造提出了新的要求, 如器件的小型化、片式化、高频化、集成化、平面化、模块化、高性能、高效率、低损耗等。这就要求作为电力电子领域关键器件的磁性器件有更大的开拓发展, 在结构、性能和外形尺寸上进行更大的改进和提高^[1]。

平面变压器(planar transformer)因其特殊的平面结构和绕组的紧密耦合, 使高频寄生参数大大降低, 极大地改进了开关电源的工作表现, 近年来在开关电源领域得到了广泛的应用。平面变压器的出现和发展, 使

在具有同等性能指标下磁芯的利用率更高, 变压器尺寸更小, 同时在节能节材方面具有显著的经济效益和社会效益^[2-3]。

本文综述了平面变压器的特性, 对平面变压器的应用、设计方法进行了总结, 并对未来平面变压器的发展进行了展望。

1 平面变压器的结构

平面变压器是一种呈低高度扁平状或超薄型(low profile)的变压器, 采用小尺寸的 E 形、RM 形或环形铁氧体磁芯, 通常由高功率铁氧体材料制成, 在高频下磁芯损耗较低; 其绕组一般由折叠式铜箔、印制电路板

收稿日期: 2007-06-08

作者简介: 梁琦, 北京市海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学宇航科学技术学院, 博士研究生, 研究方向为电源技术;

E-mail: kiki_0827@163.com

曾庆轩(通讯作者), 北京市海淀区中关村南大街 5 号北京理工大学宇航科学技术学院, 教授, 研究方向为电爆炸理论;

E-mail: zengqingxuan@bit.edu.cn

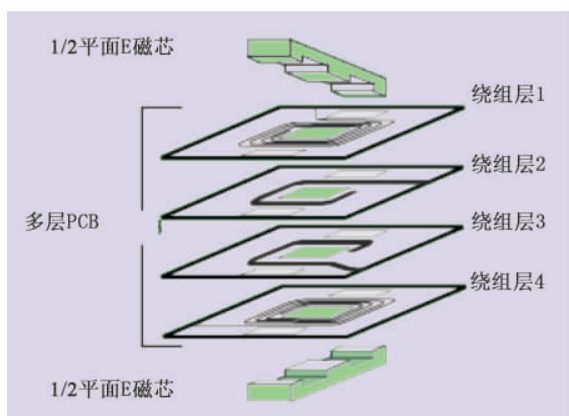


图1 平面变压器典型结构

Fig. 1 Typical structure of planar transformer

上的印制铜线或直接沉积于磁性薄膜上的铜线条构成,高度远小于传统的变压器^[1],是近年来高频变压器的一种新型结构。图1为平面变压器的典型结构^[4]。

平面变压器也可以直接与印制电路板的电路板集成为一体^[4],印制板中间被挖空用于安装磁芯。各印制板之间由绝缘胶布或空白印制板绝缘。磁芯直接将印制板夹在中间,然后通过胶带或金属夹固定,如图2所示^[4]。

平面印制电路板的结构使得生产过程中的变压器绕组相互间具有精确的间距,因此允许用自动组装设备生产,可以大大提高每个器件的重复一致性及可靠性,避免了常规变压器手工绕制带来的不规则性和不稳定性。

扁平磁芯结构使其高度得到有效的降低。另外,由于没有磁芯骨架,进一步节省了变压器的体积。因此,这种平面变压器非常适合对体积、特别是高度有严格要求的应用领域。

印制线呈扁平状,其厚度一般为 $35\ \mu\text{m}$ 。在频率小于 $14\ \text{MHz}$ 时,铜的集肤深度均小于印制线厚度的一半。通常,开关电源频率都远小于此值,集肤效应可以忽略^[5]。因此,印制板平面变压器适用于高频应用。

平面磁芯的散热面积较大,提高了磁芯的散热性能,在一定程度上提高了变压器的功率密度。印制板结构克服了常规变压器绕组的不确定性因素,一致性好,便于批量生产。另外,在不同的印制板之间贴上绝缘胶带后,可以使不同绕组之间的耐压强度得到很大提高,因此可应用于高压领域。该结构还很容易实现一二次绕组的交织以减少漏感。

2 平面变压器的优势与不足

与传统绕线式变压器相比,平面变压器具有如下优点。

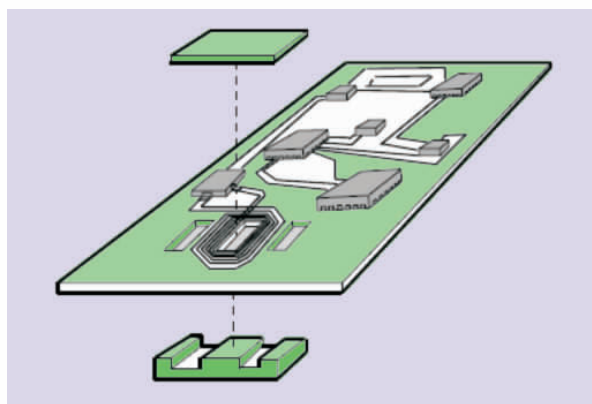


图2 集成于印制电路板上的平面变压器

Fig. 2 Planar transformer integrated on printed circuit board

1) 一致性好。常规变压器由于绕组间隔不规则,以及人工组装的不一致性都会导致器件性能有较大差异。平面变压器的多层制造过程采用机械加工,有利于提高变压器绕组的一致性。

2) 高功率密度。由于平面变压器结构上的优势,提高了其电气特性,使其功率密度比传统变压器的大3倍。

3) 高电压、大电流。在平面变压器中,导线实际是一些平面导体,因而电流密度大,每层绕组的最大电流可达 $200\ \text{A}$,次级升压可达 $20\ \text{kV}$ 以上。

4) 大功率。单个器件的功率可达 $0.5\sim 25\ \text{kW}$ 。

5) 可重现化。绕组的几何形状及其有关寄生特性限定在 PCB 制造公差之内(极小的公差),因此可实现特性重现。

6) 低损耗性。绕组由薄铜层构成,同时整个变压器可制成扁平状,从而降低了集肤效应的损失。

7) 小型化。能量密度高,因而体积大为缩小,厚度远小于常规变压器,适用于表面贴装方式(SMT)组装。

8) 低漏感。漏感一般均小于 0.2% ,因此电磁干扰(EMI)辐射低,基本不受外界电磁干扰的影响^[6]。

9) 工作频率范围宽。频率范围为 $50\ \text{kHz}\sim 2\ \text{MHz}$ 。

10) 工作温度范围宽。工作温度为 $-40^{\circ}\text{C}\sim 130^{\circ}\text{C}$ 。

11) 绝缘性好。平面变压器由导电电路与绝缘片互相重叠构成,从而保证了绕组之间、初-次级及次-次级间可达 $4\ \text{kV}$ 绝缘隔离。

平面变压器的另一个优点是提高了热性能,由于其面积与体积的比值较大,与常规铁心相比,平面铁芯的热阻较小。

当然,平面变压器的特性也不全是优点。平面变压器虽然可以有效地降低高度,但在高频下,层与层之间的分布电容的影响不可忽视。从减少体积的角度考虑,层与层之间的距离越小越好,但同时分布电

容也越大。另外,在大电流的应用领域,即使不考虑集肤效应,其直流损耗也是不可忽略的。要减小直流电阻,只能增加印制线绕组的宽度。这样将占用较多的磁芯窗口面积,因此印制板平面变压器不适用于大电流的应用。

目前,平面变压器已广泛应用在笔记本电脑、数码相机、数字化电视、通信电源、汽车电子等领域。目前,以色列 Payton 公司已能提供功率为 5~25 kW、频率为 50 kHz~2 MHz 的一系列 PM 产品。一个 200 W 的低高度平面变压器仅高 14 mm,比传统的高频产品体积小,重量也轻了许多。由于其寄生电抗极小,即绕组极间的电容和漏感极小,故效率高达 97%,最高工作频率为 2 MHz,漏感小于 0.2%^[7]。在汽车等特殊电气和机械环境里,对变压器设计和工艺提出了更严格的要求,前平面变压器已经在中档轿车中使用。另外,在宽带传输应用方面,平面变压器也显示出良好的发展前景。

3 平面变压器的分类

平面变压器按设计制作工艺的不同,可分为印刷电路(Printed Circuit Board, PCB)型、厚膜型、薄膜型和亚微米型 4 种。

3.1 PCB 型变压器

PCB 型变压器可省略绕组骨架,能够增大散热面积,减小在高频工作时由于集肤效应和邻近效应所引起的涡流损耗,也能增大电流密度,最大电流密度可达 20 A/mm²,且功率大、工艺简单。但使用 PCB 的窗口利用率低,仅为 0.25%~0.3%。美国 Multisource 技术公司和以色列 Payton 公司推出的 PCB 型变压器,其功率高达 20 kW,频率可达 MHz 数量级^[8]。Pulse 工程公司采用 pulse 平面技术,将多层 PCB 夹在磁芯之间,制作出一种 30 W 的薄型高效铁氧体平面变压器,其底部面积小,高度只有 7.4 mm,工作频率为 150~750 kHz,工作温度为-400℃~1300℃。

3.2 薄膜型变压器

薄膜型变压器是一种用磁性薄膜研制的叠层微型变压器,采用薄膜后,高度低于 1 mm,工作频率超过 1 MHz,其体积小、易于集成,但只适用于小功率情况。它们绝大多数采用金属磁性材料,如坡莫合金、铁硅铝和非晶合金。Tsuijimotl 等用带式薄膜(铜厚 35 μm,长 34 mm,宽 3 mm)加以绝缘(厚 100 μm),非晶 CoNbZr 膜(1.8 μm)构成一种能在高频下输出电压可控的薄膜变压器——针孔型变压器,还制成了厚度为 210 μm 的片式变压器。它是采用两层 10 μm 厚的 CoZr 非晶薄膜制作成的,用于 5 V,0.3 A,1 MHz 的开关电源,变压器的效率可达 77.5%^[9]。目前,国外主要采用 PVD、CVD 等沉积技术配合化学蚀刻、激光烧蚀法、光照射低温镀膜

法等成膜技术。

3.3 厚膜型变压器

厚膜型变压器是为了克服薄膜变压器中导体电阻大的缺陷而提出的。Barnwell 等以氧化铝作为基体,采用厚膜工艺,在其上、下表面各印制了初级和次级绕组,用 Philips 公司 3F3 铁氧体制作的平面变压器在 2 MHz、输出功率 75 W 时,效率达 85%^[10]。厚膜工艺制造出的平面变压器效率一般较低,因此寻求更进一步的工艺技术以完善平面变压器制造中的厚膜工艺是实现平面变压器高频集成化的关键。

3.4 亚微米型变压器

亚微米型变压器是利用化学法合成,采用低温(900℃)烧结的 NiCuZn 铁氧体为介质材料,以 Ag 为内电极,用流延和丝网印刷技术的方法制备而成的,其体积小、质量轻、易于集成、工艺简单^[11]。亚微米型平面变压器结构新颖,改变了传统变压器的结构特征,将变压器原边和副边绕组采用丝网印刷技术烧制在铁氧体材料中,外型类似表贴的集成电路器件。由清华大学材料系新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室制备的两种片式亚微米型变压器,外形尺寸分别为 2.1 cm×2.1 cm×1 mm(外形图如图 3 所示)和 8 mm×8 mm×1 mm,设计变压比分别为 6 和 4,工作频率为 1~10 MHz^[11]。



图 3 一种亚微米型平面变压器外形图

Fig. 3 Externality of a sub-micron planar transformer

4 平面变压器的设计与仿真

4.1 PCB 绕组的设计

平面式变压器结构的一个主要缺点就是绕组设计过程比较复杂,而且设计的成本也比较高。文献[12]提供了一种标准的设计平面变压器的程序步骤,大大简化了设计过程。该文中提供了一个标准的匝数设计方法,能够用于不同体积和匝比要求的平面变压器设计中。图 4 显示了一个标准匝数设计范例^[12],所采用的是 RM 磁芯。

这里采用的是双面 PCB 板,每一层都是由 1 到多匝的绕组组成,而且所有的层都保持相同的物理特性、相同的形状和相同的外部连接点。在有些多匝的层次

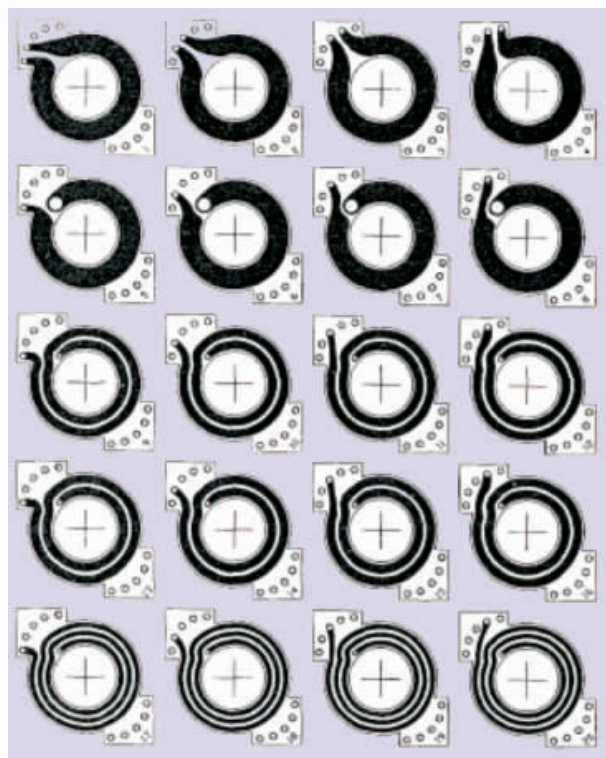


图 4 多层 PCB 绕组设计结构图
Fig. 4 A set of standard PCB multi-layers

中,这些外部连接点是不同匝数间的电气连接点。如果有些层只有一匝,也可以被印制在 PCB 的双面来降低交流阻抗。每匝铜箔厚度的选择,对应于最大开关频率时得到最佳效应,这样可以大大减小集肤效应的影响。PCB 绕组与磁芯相匹配,形成规则的几何形状,极大地减小了装配的难度,提高了工艺精度。

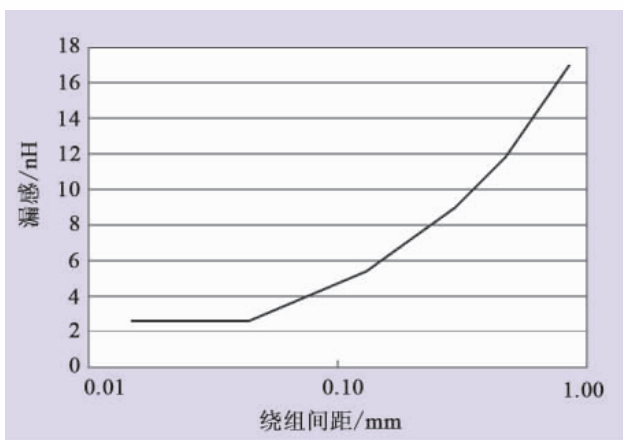


图 5 不同绕组间距下的漏感
Fig. 5 Leakage inductance as a function of layers separation

4.2 绕组间的结构设计

4.2.1 绕组间距选择

平面变压器的漏感值与其绕组间距有关,可以通过调整绕组间的距离改变漏感的大小。图 5、图 6 分别给出了不同绕组间距下漏感和交流阻抗的变化。从图中可以看出,间隙越大,漏感越大,交流阻抗越小,且变化的趋势很明显。因而,从减小漏感的角度出发,在满足电气绝缘需要的情况下,应选用最薄的绝缘体,从而获得最小的漏感值。

但是,绕组间的容性效应也不容忽视,印制电路板上紧密结合的导线间的容性效应十分明显。绝缘材料的选取对容性值也有着非常大的影响。由于从初级到次级的绕组中只有容性回路的绕组传播这种干扰,因而容性效应会引起电磁干扰。所以需要在电容值与漏感之间做出一个平衡的选择。

4.2.2 绕组的交叉布置结构

在布置变压器原、副边绕组时,将原边和副边交替放置,以增加原、副边绕组的耦合,减小漏感,同时使得各层绕组电流平均分布,减少变压器损耗,称为绕组的交叉技术^[15]。

图 7 给出了 3 种应用了交叉技术的不同绕组结构。P 代表初级绕组, S 代表次级绕组, 3 种绕组的叠放方式分别为: (a) SPSP; (b) PSSP 和 (c) SPPS。这 3 种结构都采用的交叉技术, 其中 (a) 结构的初次级绕组都是间隔交叉的, 耦合更加充分, 高频工作条件下表现最优。

图 8 和图 9 分别给出了在 500 kHz 工作频率下, 3 种不同结构绕组的交流阻抗 (Resistance AC, R_{AC}) 关系和漏感值。从图中可以看出, (a) 结构下绕组的交流阻抗和漏感值最小。

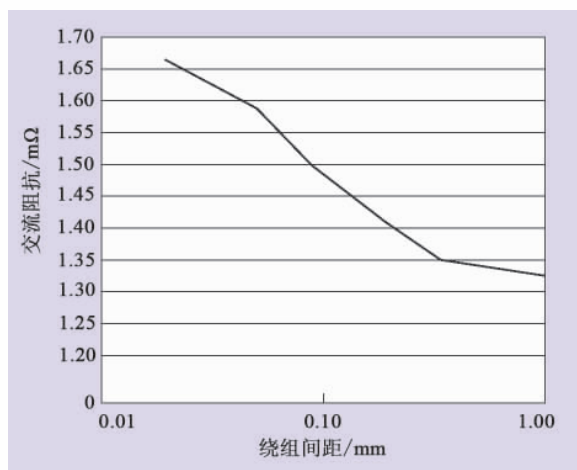


图 6 不同绕组间距下的交流阻抗
Fig. 6 AC resistance as a function of layers separation

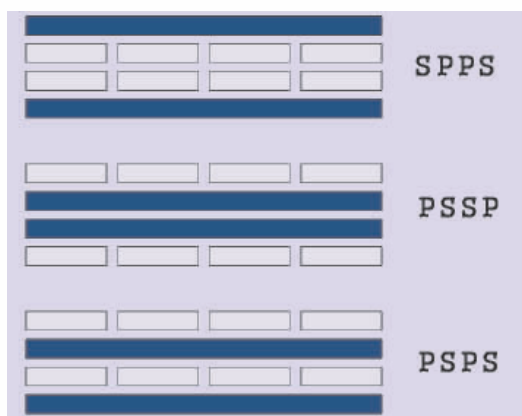


图 7 运用交叉技术的 3 种绕组结构

Fig. 7 Three different layers structures using interleaving technology

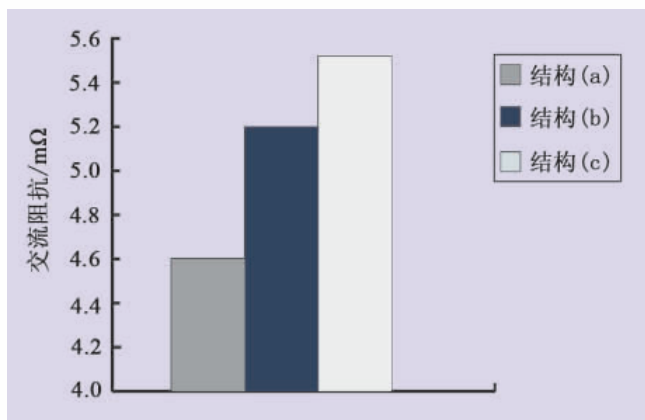


图 8 500 kHz 时 3 种结构的 Rac 比较

Fig. 8 AC resistance (500 kHz)

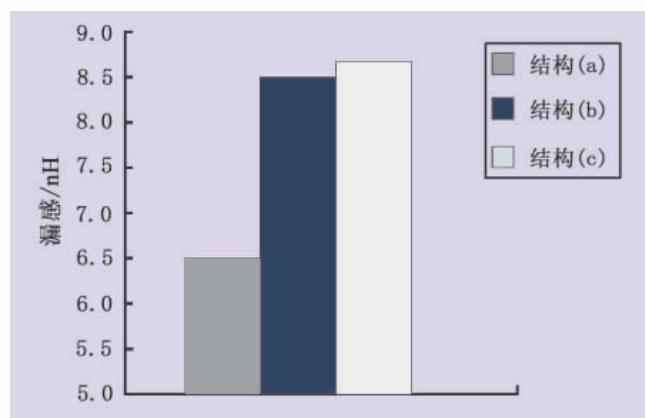


图 9 500 kHz 时 3 种结构的漏感比较

Fig. 9 Leakage inductance (500 kHz)

将交叉技术应用于绕组结构中的优势是十分显著的,但是仍有一些问题需要考虑。例如,变压器中产生出

较多的端子,初次级电路的隔离变得更加困难。而且,设计要求初次级之间 EMI 屏蔽,将会要求额外数量的屏蔽物。

5 平面变压器的发展趋势

目前,平面变压器主要应用于 DC-DC 变换器模块^[16]及类似产品中。各种机械加工技术的蓬勃发展不断地降低了变换器的加工成本,但平面变压器的标准化并不是轻而易举的事,这是因为变压器的拓扑结构很多,而且绕组制作技术及这些设备的相关费用仍然相当昂贵。如何降低平面绕组的加工成本依然是一个难题,并且平面变压器的磁芯结构也有待进一步的优化。

文献[17]中讨论了未来开关电源发展的主要技术要求,指出微处理器和便携式电子设备中的 DC-DC 变换器需要有更小的体积、更高的能量,并能稳定工作在更高的工作频率下。高能量密度的获得需要更程度的元件集成,需要应用平面变压器及集成磁性元件技术和新的芯片封装形式,以突破 DC-DC 变换器的应用瓶颈,拓宽应用范围。

对于平面变压器在脉冲功率源等大电压小电流场合的应用,国外的相关报道较少,据介绍,俄罗斯自动化研究所已研制出了可输出数万伏脉冲叠片式高压脉冲变压器^[18],国内该领域的研究处于起步状态,还仅限于实验室研究阶段^[19]。但是平面变压器在高压应用时表现出良好的性能使得其在高压领域的应用研究也成为平面变压器技术发展的重要方向之一。同时,平面变压器也由于其高能、小体积、高稳定性等特殊优势,越来越多地应用于武器系统以及航空航天等特殊领域^[20],并表现出良好的应用前景。

磁集成技术的应用已成功地将变换器的输出电感和平面变压器在结构上集成为一体^[21]。如何进一步将变压器、电感和电容等电磁元件集成到一起,使之成为一个高度集成的能量处理模块还在研究当中^[22]。今后的研究热点是如何在一块半导体芯片上集成多种高质量的有源和无源器件,包括电感和变压器等,以显著减少外部元件的数量,优化系统性能^[23]。

6 结论

平面变压器越来越显示出其巨大的优越性,已成为人们研究的热点,并逐步成为变压器技术发展的主流与目标。平面式结构减小了变压器器件的损耗、体积和重量,提高了开关电源的效率和功率密度,极大地改善了开关电源的性能。今后随着技术的发展和成熟,平面变压器将在开关电源行业得到越来越广泛的应用,真正实现开关电源的“短、小、轻、薄”。

参考文献 (References)

- [1] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
YANG Yugang. Modern power electronics magnetic technology[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [2] HULJAK R, THOTTUVELIL V, MARSH A, *et al.* Where are power supplies headed[C]//IEEE APEC, 2000: 10–17.
- [3] QUINN C, RINNE K, O'DONNELL T, *et al.* A review of planar magnetic techniques and technologies [C]//IEEE APEC, 2001: 1175–1183.
- [4] Ferroxcube Components Inc. Design of planar power transformer[R]. Application Note. Document No 9398 083 39011, 2001.
- [5] DAI N, LOTFI A W, SKUTT C, *et al.* A comparative study of high frequency low profile planar transformer technologies[C]//IEEE APEC, 1994, 1(2): 226–232.
- [6] 蔡宣三. 高频开关变换器中的磁元件 (II) 电感与变压器[J]. 电源世界, 2002(3): 21–25.
CAI Xuansan. Magnetic components in high frequency switch mode power transistor (II) Inductor and transformer[J]. The World of Power Supply, 2002(3): 21–25.
- [7] 魏晨, 谢运祥, 宋静娴. 浅谈开关电源中的平面变压器[J]. 通信电源技术, 2006, 23(5): 55–61.
WEI Chen, XIE Yunxiang, SONG Jingxian. Planar transformer applied to switching mode power supply[J]. Telecom Power Technologies, 2006, 23(5): 55–61.
- [8] 张冠生, 余素胜, 陈为. 电力电子技术中的磁元件[J]. 电工技术学报, 1999(7): 33–38.
ZHANG Guangsheng, YU Susheng, CHEN Wei. Magnetic components applied to power electronics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1997(7): 33–38.
- [9] 姚中, 张湘虹, 虞维扬. 磁性器件的新发展——片式电感、片式变压器[J]. 电子变压器技术, 1998(4): 60–64.
YAO Zhong, ZHANG Xianghong, YU Weiyang. New progress of magnetic components: Planar inductor, planar transformer[J]. Electric Transformer Technology, 1998 (4): 60–64.
- [10] Barnwell P. Planar transformers for high frequency power supplies using thick film technology [C]//ISHM' 92 Proceedings, 1992: 789–794.
- [11] 屈卫国. 片式电感、微型变压器及相关材料研究 [D]. 北京: 清华大学, 2003.
QU Weiguo. The study of planar inductor, micro-transformers and related materials[D]. Beijing: Tsinghua University, 2003.
- [12] GARCIA O, COBOS J A, PRIETO R, *et al.* A standard design method for high frequency PCB transformer[C]//IEEE Intel EC Record, 1995(14): 335–339.
- [13] 李茜, 郭玉英, 魏东梅. 平面变压器的绕组设计与分析[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2004(41): 346–348.
LI Qian, GUO Yuying, WEI Dongmei. Design and analysis on planar transformer windings[J]. Journal of Sichuan University (Natural Science Edition), 2004(41): 346–348.
- [14] CHEN Wei, YAN Yipeng, HU Yuequan, *et al.* Model and design of PCB parallel windings for planar transformer [C]//IEEE Transactions, 2003(39): 3202–3204.
- [15] PRIETO R, GARCIA O, ASENSI R, *et al.* Optimizing the performance of planar transformer [C]//IEEE 0–7803–3044–71, 1996.
- [16] EN60950, European Standard. Safety of information technology equipment including electrical business equipment[S]. 2006.
- [17] HULJAK R J, THOTTUVELIL V J, MARSH A J, *et al.* Where are power supplies headed[C]//IEEE APEC, 2000: 10–17.
- [18] FOO C F, GONG X H, Determination of winding losses of high frequency planar type transformer using finite element method [J]. IEE Power Electronics and Variable Speed Drives, 1996: 477–482.
- [19] 李茜. 小型高压平面脉冲变压器[D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2002.
LI Qian. Miniature high voltage pulse planar transformer[D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2002.
- [20] 万成安, 时娇键. 卫星电源中平面变压器的设计[C]//中国宇航学会空间能源学术年会, 成都, 2002.
WAN Chengan, SHI Jiaojian. Design of planar transformer in satellite power supply[C]. China Society of Astronautics Annual Conference of Space Energy Technology, Chengdu, 2002.
- [21] 陈乾宏, 阮新波, 严仰光. 开关电源中磁集成技术及其应用[J]. 电工技术学报, 2004, 3(19): 1–8.
CHEN Qihong, RUAN Zinbo, YAN Yangguang. The application of the magnetic integration techniques in switching mode power supply [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 3(19): 1–8.
- [22] STRYDON J T, FERREIRA J A, VAN WYK J D, *et al.* Power electronic subassembly with increased functionality based on planar sub-components[C]//IEEE PESC, 2000, 3 (6): 1273–1278.
- [23] TDICKSON T, La CROIX M A, BORET S, *et al.* Si-based inductors and transformers for 30–100 GHz applications [C]//IEEE MTT –S International Microwave Symposium Digest, 2004, 1(6): 205–208.

(责任编辑 朱宇)