

反激式开关电源变压器的电磁兼容性分析

The EMC Analysis of Flyback SPS Transformer

李椿 供稿

摘要：文章以一款反激式开关电源为例，阐述分析其传导共模干扰的产生与传播机理。同时，根据分析中提出的噪声活跃节点平衡的思想，提出了一种变压器电磁兼容性设计的新方法。

关键词：反激式开关电源，变压器，电磁兼容性(EMC)，设计，分析

中图分类号：TM4 文献标识码：B 文章编号：1606-7517(2016)02-3-121

1 引言

随着功率半导体器件的技术和产品发展，开关电源的高功率体积比和高效率的特性使得它们在现代军事、工业和商业等许多领域的各个级别的仪器设备中得到了广泛应用。并且，随着其时钟频率的不断提高，设备、仪器等的电磁兼容性(EMC)问题越来越引起人们的关注。EMC设计，已成了开关电源开发设计中必不可缺的重要环节。

传导电磁干扰(EMI)噪声的抑制，在产品设计的最初阶段就必须加以考虑，这是产品的重要特性。通常情况下，在电源线上加装滤波器是抑制传导电磁干扰噪声的必要措施和有效结果。但是，仅仅依靠电源输入端的滤波器来抑制干扰往往会导致滤波器中元件的电感量与电容量增加。而电感量的增加将使其体积增加，而电容量的增大则受到漏电流安全标准的限制。电路中其它部分的设计，也必须考虑EMC问题，如果采用恰当而合适的电路设计，也可以完成与电源线滤波器相似的作用。

本文以一款反激式开关电源为例，提出了一种变压器的噪声活跃节点相位干扰绕法来抑制EMI，该设计方法，不仅能减少电源线滤波器的体积，还降低了其成本。这种设计方法与传统的变压器设计方法比较，其对传导电磁干扰的抑制能力更强，也同时适用于其它形式的带变压器拓扑结构的开关电源。

2 反激式开关电源的共模传导干扰分析

电子设备的传导噪声干扰概念是大家所熟悉的，即：

电子设备在与供电电网连接工作时，以噪声电流的形式通过电源线传导到公共电网环境中去的电磁干扰。传导干扰为共模干扰和差模干扰两类：共模干扰电流在零线与相线上的相位相同；差模干扰电流在零线与相线上的相位相反。差模干扰对总体传导干扰的影响较小，而且主要集中在噪声频谱的低频端，比较容易抑制。共模干扰对总体传导干扰的影响较大，且主要处于噪声频谱的中频和高频频段，所以，抑制共模传导干扰是抑制电子设备传导EMC设计中的难点，也是最主要的任务。

反激式开关电源的电路中存在一些电压剧变的节点，它和电路中其它电势相对稳定的节点不同，这些节点的电压包含高强度的高频成分。在这些节点上，电压的变化十分活跃，故称这些节点为噪声活跃节点。

噪声活跃节点是开关电源电路中的共模传导干扰源，它作用于电路中的对地杂散电容时，就会产生共模噪声电流 I_{CM} 。而电路中对EMI影响较大的对地杂散电容有：功率开关管的漏极对地的寄生电容 C_{de} ，变压器的主边绕组对副边绕组的寄生电容 C_{pa} ，变压器的副边回路对地的寄生电容 C_{ac} ，变压器的主、副边绕组对磁芯的寄生电容 C_{pc} 、 C_{ac} 以及变压器磁芯对地的寄生电容 C_{ce} 。这些寄生电容在电路中的分布如图1所示。

图1中的共模电流 I_{CM} 在电路中的耦合途径主要有3条：

- ①从噪声源功率开关管的d极通过 C_{de} 耦合到地；②从噪声源通过 C_{pa} 耦合到变压器次级电路，再通过 C_{ac} 耦合到地；
③从变压器的初、次级线圈通过 C_{pc} 、 C_{ac} 耦合到变压器磁芯，

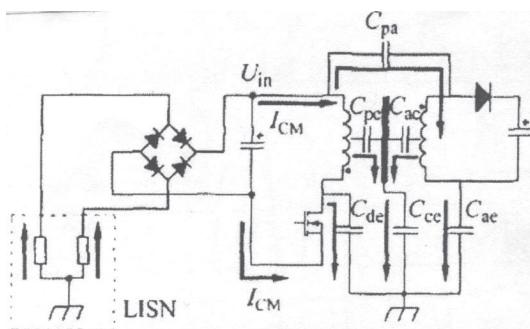


图 1 共模噪声电流在电路中的耦合途径

再通过 C_{ee} 耦合到地。这三种电流是构成共模噪声电流（图 1 中的黑色箭头所示）的主要因素。共模电流通过电源线输入端的地线回流，从而被 LISN 取样测量得到。

3 隔离变压器的 EMC 设计

3.1 传统变压器的 EMC 设计

共模噪声的耦合除了通过场效应管 d 极对地这条途径外，开关管 d 极的噪声电压通过变压器的寄生电容将噪声电流耦合到变压器副边绕组所在的回路，再通过次级回路对地的寄生电容耦合到地也是共模电流产生的途径。因此，设法减小从变压器主边绕组传递到副边绕组间的共模电流，这将是一种有效的 EMC 设计方法。传统变压器 EMC 的设计方法是在主、副边两个绕组之间添加隔离层，如图 2 所示。图 2 中，金属隔离层直接连接地线的设计会增大共模噪声电流，使 EMC 性能降低。隔离层应该是电路中电位稳定的节点，比如将图 2 中的隔离层连接到电路前级的负极就是一个很好的接法。这样的连接能把原来流向大地的共模电流有效分流，从而大大降低电源线的传导噪声发射水平。

3.2 节点相位平衡法

在电路中，噪声电压活跃的节点并不是单一的。以本设计所用电路为例进行分析可见：除了功率开关管的 d 极以外，变压器前级绕组的另一端电压 U_{in} 也是一个噪声电

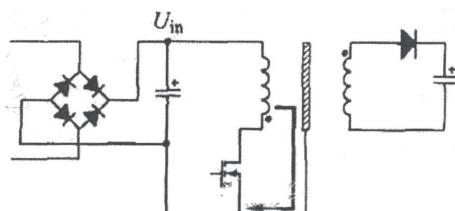


图 2 变压器隔离层对噪声电流的影响

压活跃的节点，而且该节点电压的变化方向与场效应管 d 极电压变化情况相反。所以，变压器次级绕组的两端是相位相反的噪音电压活跃节点。图 3 所示的是采用节点相位平衡法之后，变压器骨架上的线圈分布情况。图中显示，变压器骨架的最内层是前级绕组线圈的一半，与功率开关管的 d 极相连；中间层的线圈是次级绕组；最外层是前级绕组的另一半，与节点 U_{in} 相连接。由于噪声电流主要通过前后级线圈层之间的寄生电容耦合，如果把前、后级线圈方向相反的噪声活跃节点成对地绕在内外层相对应位置上，就能使大部分的噪声电流相互抵消，从而大大降低了最终耦合到次级的噪声电流强度。

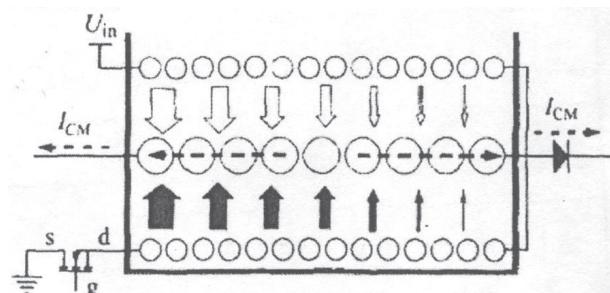


图 3 噪声电流在变压器内部的耦合情况

本文讨论的电路中还存在前级电路和次级电路的辅助电路，它们也是由绕在变压器骨架上的独立线圈提供能量的。这两级辅助线圈的存在，给噪声电流的传播提供了额外的途径。该辅助线圈是为了控制电路的供电而设计的，尽管控制电路本身的功率很小，但它们的存在却增大了电路对地的寄生电容，从而分担了一部分把共模噪声电流从活跃节点耦合到地的工作。然而，把这些绕组夹在前级线圈和次级线圈的中间，那将增大前后级绕组间的距离，从而使它们之间的层间寄生电容减小了，这样，噪声电流就会相应减小。因此，变压器线圈绕制的最终方法应该如图 4 所示：即从内层到外层的线圈依次是：前级绕组的一半、辅助绕组的一半、后级绕组、辅助绕组的另一半以及前级绕组的另一半。

4 实验检测

改变变压器线圈绕制的方法，对开关电源的传导 EMC 性能可以得到有效的提高，将从以下实验中得到验证。

4.1 实验方法

实验按电压法进行，其频段范围为 0.15~30MHz；频谱

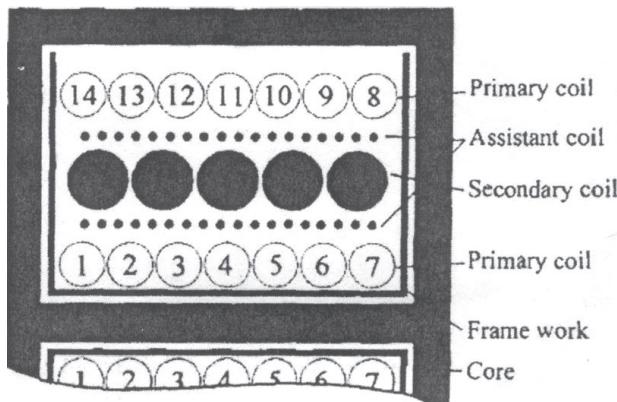


图 4 变压器改进绕制的结构细节

分析仪的检波方式为准峰值检波；测量带宽为 9kHz；频谱横轴（频率）取对数形式；噪声信号的单位为 dB μ V。

4.2 实验检测结果

图 5 所示为变压器设计改进前后的实验样品所检测出的传导噪声频谱对比。

图 5 中的上下两条平行折线分别为国际无线电干扰特别委员会 (CISPR) 颁布的 CISPR22 标准中 b 级所要求的准峰值检波限值和平均值检波限值。而曲线为开关电源的传导噪声频谱。从实验样品检测的结果可以看出：与传统方法相比较，本设计的方法具有更出色的对共模噪声电流的抑制能力，尤其在中频 1~5MHz 的频段。在较低的频段，电源线上的传导干扰主要是差模电流引起的；在中高频段，共模电流起主要作用。本设计提出的方法，对共模电流的抑制较强，实验结果与理论分析相符。在 10MHz 以上频段，主要由电路中的其它寄生参数决定 EMC 的性能，与变压器的关系不大。

5 小结

开关电源电路中的噪声活跃节点是电路中的共模噪声

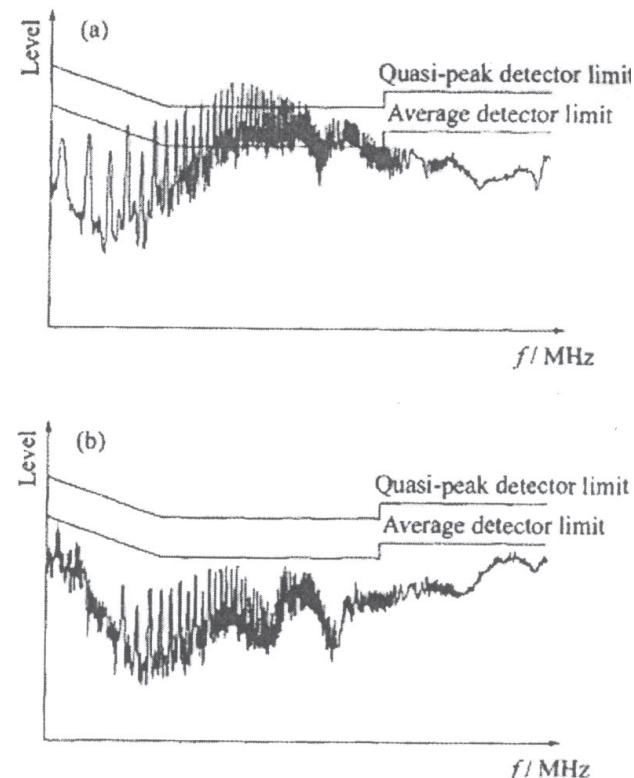


图 5 变压器设计改进前后的噪声频谱

源。要降低开关电源的传导干扰水平，就要在设计上减小共模电流强度，增大噪声源的对地阻抗。在传统的隔离式 EMC 设计中，隔离层连接到电路中电位稳定的节点上（如变压器前级的负极），将比直接连接到地线对 EMI 干扰的抑制更有效。

开关电源电路中的噪声活跃节点通常都是成对存在的，这些成对节点之间的相位相反，利用这个特点，使用活跃节点相位平衡绕制线圈的办法对 EMI 的抑制效果高于传统的隔离式设计。由于本设计不需要添加隔离金属层，故可以有效减小变压器的体积并降低其成本。

（参考资料略）