

解决高频开关电源的电磁兼容问题

随着高频开关电源技术的不断完善和日趋成熟，其在铁路信号供电系统中的应用也在迅速增加。与此同时，高频开关电源自身存在的电磁骚扰（EMI）问题如果处理不好，不仅容易对电网造成污染，直接影响其他用电设备的正常工作，而且传入空间也易形成电磁污染，由此产生了高频开关电源的电磁兼容（EMC）问题。

本文重点对铁路信号电源屏使用的 1200W（24V/50A）高频开关电源模块所存在的电磁骚扰超标问题进行分析，并提出改进措施。高频开关电源产生的电磁骚扰可分为传导骚扰和辐射骚扰两大类。传导骚扰通过交流电源传播，频率低于 30MHz；辐射骚扰通过空间传播，频率在 30~1000MHz。

1 高频开关电源的电路结构

高频开关电源的主拓扑电路原理，如图 1 所示。

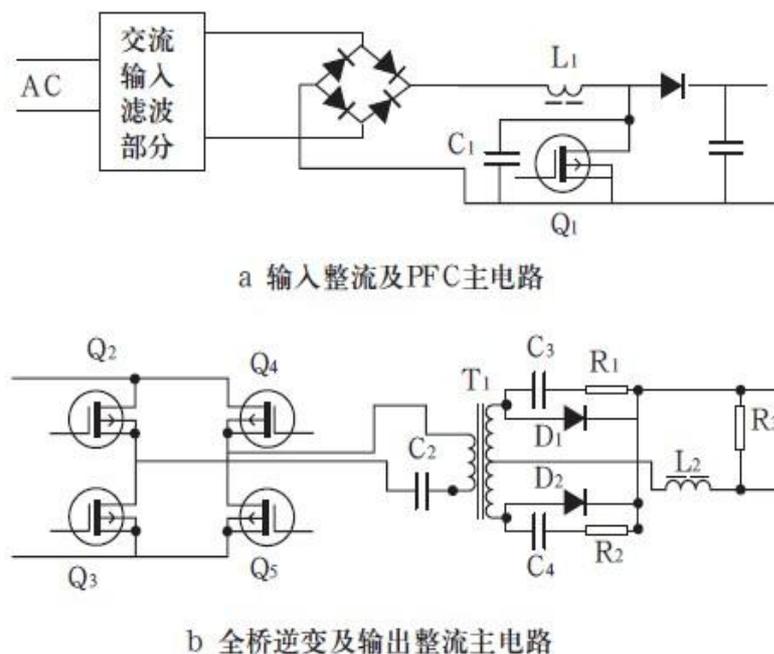


图1 高频开关电源的主拓扑电路原理图

2 高频开关电源电磁骚扰源的分析

在图 1a 电路中的整流器、功率管 Q1，在图 1b 电路中的功率管 Q2~Q5、高频变压器 T1、输出整流二极管 D1~D2 都是高频开关电源工作时产生电磁骚扰的主要骚扰源，具体分析如下。

(1) 整流器整流过程产生的高次谐波会沿着电源线产生传导骚扰和辐射骚扰。

(2) 开关功率管工作在高频导通和截止的状态，为了降低开关损耗，提高电源功率密度和整体效率，开关管的打开和关断的速度越来越快，一般在几微秒，开关管以这样的速度打开和关断，形成了浪涌电压和浪涌电流，会产生高频高压的尖峰谐波，对空间和交流输入线形成电磁骚扰。

(3) 高频变压器 T1 进行功率变换的同时，产生了交变的电磁场，向空间辐射电磁波，形成了辐射骚扰。变压器的分布电感和电容产生振荡，并通过变压器初次级之间的分布电容耦合到交流输入回路，形成传导骚扰。

(4) 在输出电压比较低的情况下，输出整流二极管工作在高频开关状态，也是一种电磁骚扰源。

由于二极管的引线寄生电感、结电容的存在以及反向恢复电流的影响，使之工作在很高的电压和电流变化率下，二极管反向恢复的时间越长，则尖峰电流的影响也越大，骚扰信号就越强，由此产生高频衰减振荡，这是一种差模传导骚扰。

所有产生的这些电磁信号，通过电源线、信号线、接地线等金属导线传输到外部电源形成传导骚扰。通过导线和器件辐射或通过充当天线的互连线辐射的骚扰信号造成辐射骚扰。

3 针对高频开关电源电磁骚扰的电磁兼容设计

(1) 开关电源入口加电源滤波器，抑制开关电源所产生的高次谐波。

(2) 输入输出电源线上加铁氧体磁环，一方面抑制电源线内的高频共模，另一方面减小通过电源线辐射的骚扰能量。

(3) 电源线尽可能靠近地线，以减小差模辐射的环路面积；把输入交流电源线和输出直流电源线分开走线，减小输入输出间的电磁耦合；信号线远离电源线，靠近地线走线，并且走线不要过长，以减小回路的环面积；PCB 板上的线条宽度不能突变，拐角采用圆弧过渡，尽量不采用直角或尖角。

(4) 对芯片和 MOS 开关管安装去耦电容，其位置尽可能地靠近并联在器件的电源和接地管脚。

(5) 由于接地导线存在 Ldi/dt ，PCB 板和机壳间接地采用铜柱连接，对不适合用铜柱连接的采用较粗的导线，并就近接地。

(6) 在开关管以及输出整流二极管两端加 RC 吸收电路，吸收浪涌电压。

4 高频开关电源电磁骚扰测试曲线

在 3m 法电波暗室对试验样机进行测试，其 L、N 线的传导骚扰检测曲线如图 2、3 所示，辐射骚扰的垂直极化扫描曲线如图 4、5 所示。

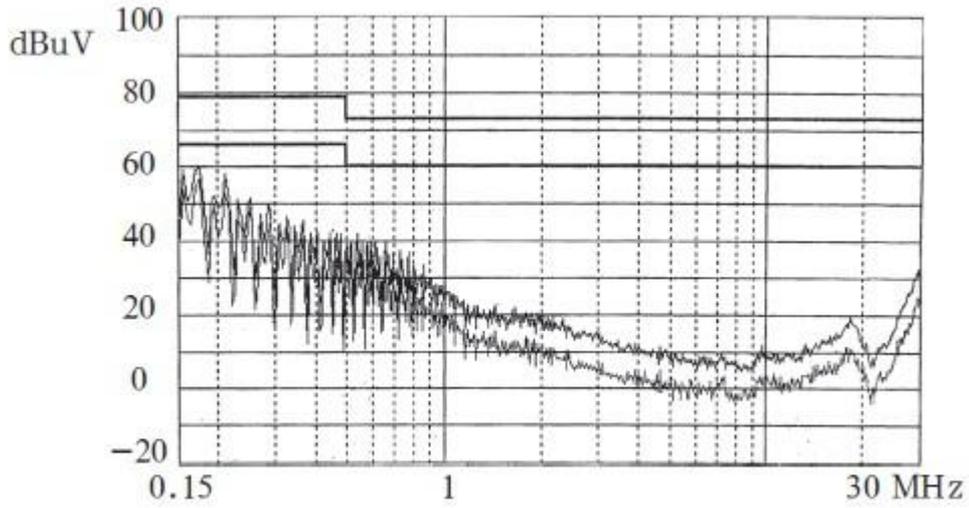


图2 L线的传导骚扰检测曲线图

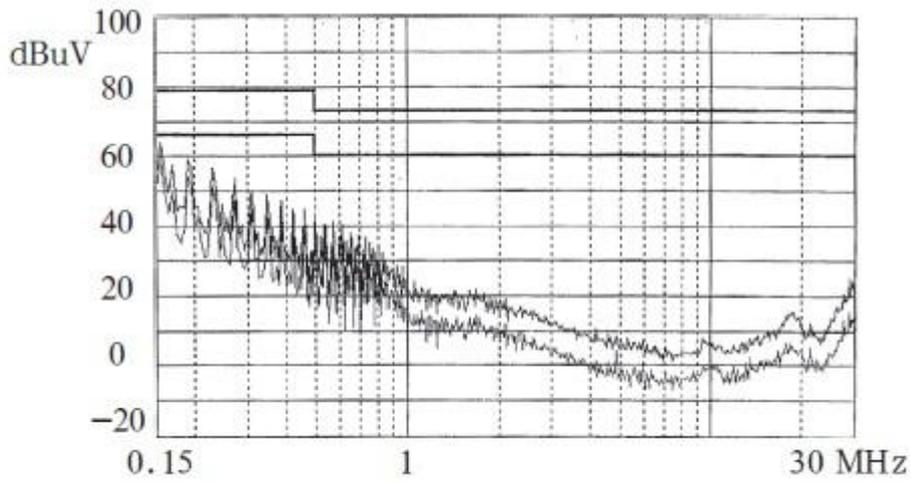


图3 N线的传导骚扰检测曲线图

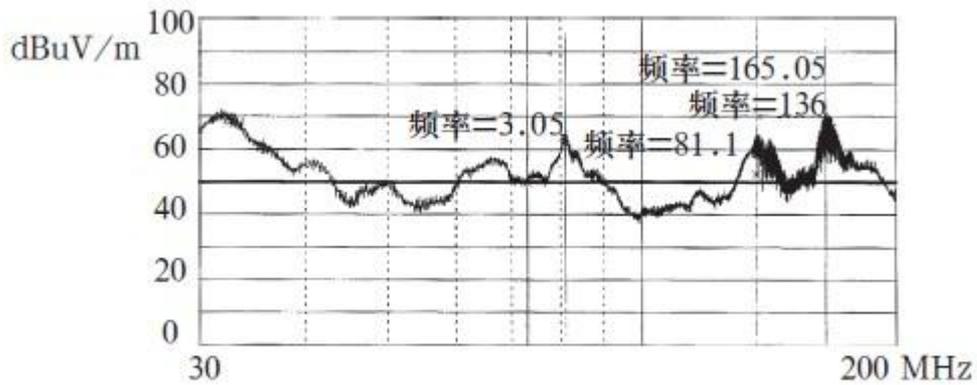


图4 辐射骚扰的垂直极化低频率(30~200 MHz)

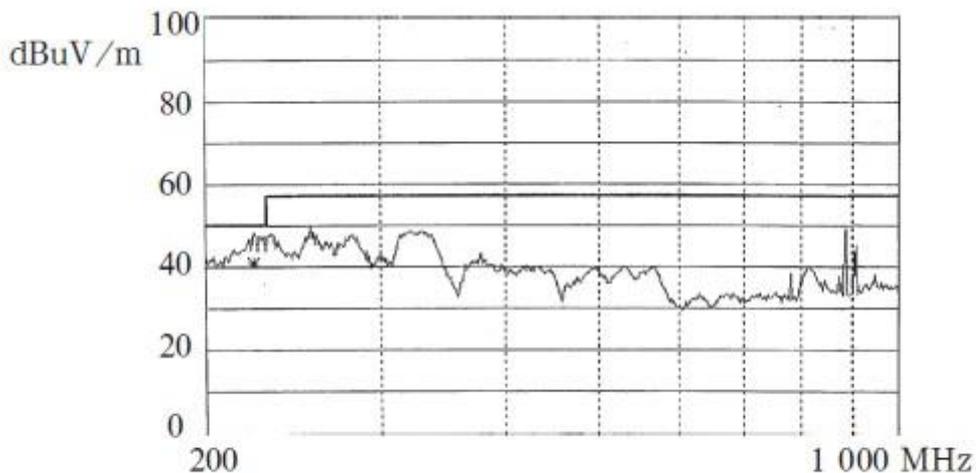


图5 辐射骚扰的垂直极化高频率(200~1 000 MHz)

根据铁路客运专线标准规定, 传导骚扰限值和辐射骚扰限值如表 1、2 所示。

表1 A级电源端子传导骚扰限值

频率范围 (MHz)	限值 dB (μV)	
	准峰值	平均值
0.15 ~ 0.50	79	66
0.5 ~ 30	73	60

表2 A级在10 m测量距离处的辐射骚扰限值

频率范围 (MHz)	准峰值限值 dB(μV/m)
30 ~ 230	40
230 ~ 1 600	47

本开关电源一次通过了传导骚扰的测试, 测试波形如图 2、3 所示。辐射骚扰高频段 230~1000MHz 也测试合格, 如图 5 所示。只是在 30~200MHz 频段范围内的垂直极化指标超标, 最大超标 20dB, 如图 4 所示。

由测试结果可以看出，通过电磁兼容设计在传导骚扰抑制方面取得了良好效果，在高频段辐射骚扰的设计也达到了预期效果，下面还需对在 30~200MHz 频段范围内的辐射骚扰进行改进设计。

5 高频开关电源辐射骚扰的改进设计

由图 4 可以看出，本开关电源存在辐射骚扰超标的现象，为了抑制电磁骚扰而使用铁氧体元件，价格便宜，效果明显。铁氧体元件等效电路是电感 L 和电阻 R 组成的串联电路，L 和 R 都是频率的函数。低频时，R 很小，L 起主要作用，电磁骚扰被反射而受到抑制；高频时，R 增大，电磁骚扰被吸收并转换成热能，使高频骚扰大大衰减。不同的铁氧体抑制元件，有不同的最佳抑制频率范围。总之，选择和安装铁氧体元件可参照如下几条：

- (1) 铁氧体的体积越大，抑制效果越好；
- (2) 在体积一定时，长而细的形状比短而粗的抑制效果好；
- (3) 内径越小抑制效果也越好；
- (4) 横截面越大，越不易饱和；
- (5) 磁导率越高，抑制的频率就越低；
- (6) 铁氧体抑制元件应当安装在靠近骚扰源的地方；
- (7) 在输入、输出导线上安装时，应尽量靠近屏蔽壳的进、出口处。

根据上面对高频开关电源骚扰源和铁氧体元件的分析，决定在靠近骚扰源的地方套磁珠与磁环。图 1a 中电容 C1 的接地端套铁氧体磁珠（ $\phi 3.5 \times \phi 1.3 \times 3.5$ ），图 1b 中整流二极管 D1 和 D2 使用肖特基

二极管，其阳极套铁氧体磁珠（ $\phi 3.5 \times \phi 1.3 \times 3.5$ ），直流输出线缆用铁氧体磁环（ $\phi 13.5 \times \phi 7.5 \times 7$ ）绕两圈且靠近出口处。经过处理后重新测试，其扫描曲线如图 6 所示。由此可见，大部分频段的辐射骚扰已被抑制到标准要求以下，但在频率 81、138、165kHz 附近处仍然超标。

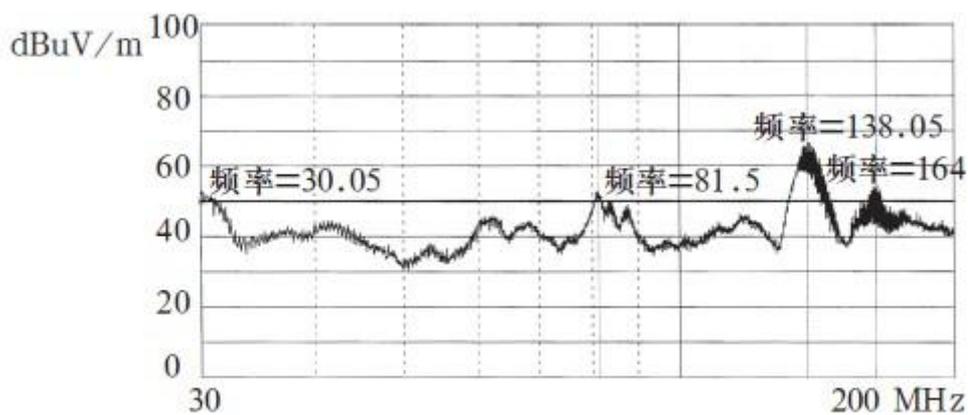


图6 辐射骚扰的垂直极化(30~200 MHz)

根据对开关电源电磁骚扰源的分析可知，在图 1b 电路中高频变压器 T1 也是一个骚扰源。为了阻止高频变压器产生的骚扰信号以辐射方式发射，把变压器的外壳用屏蔽材料铜箔环绕一圈构成一回路加以屏蔽，以切断变压器通过空间耦合形成的辐射骚扰传播途径。并且为了减少因变压器一次侧开通时电流瞬间突变产生的 di / dt 骚扰，在变压器 T1 的一次侧串进 1 个电感，以减小器件的开通损耗，降低辐射骚扰信号。经过整改后，辐射骚扰大大下降，再次对本电源辐射骚扰进行测试，完全达到了标准要求，其测试结果如图 7 所示。

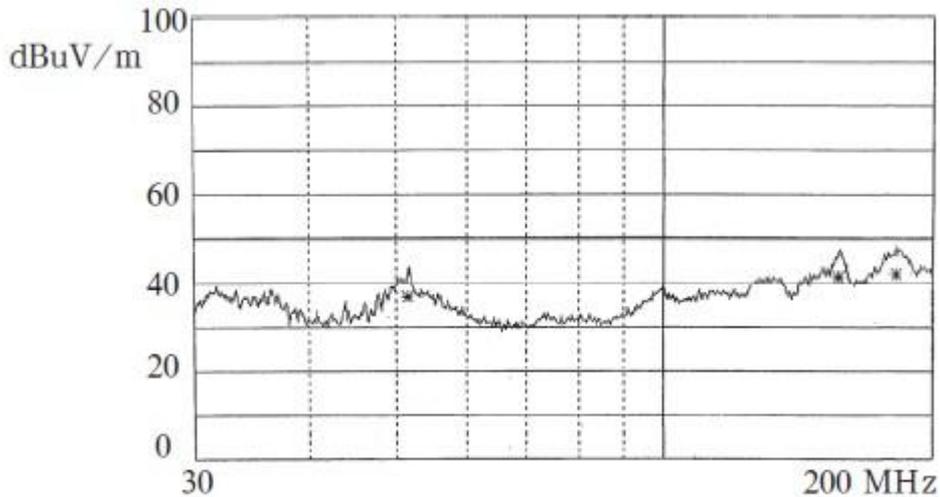


图7 整改后辐射骚扰的垂直极化(30~200 MHz)

6 结语

随着高频开关电源等电子产品电磁兼容重要性的凸现,我们应该在产品初期阶段,同时进行电磁兼容设计,此时结构和电路方案尚未定型,可选用的方法较多。如果等到生产阶段再去解决,不但给技术和工艺上带来很大难度,而且会造成人力、财力和时间的极大浪费。所以,要走出设计修改法的误区,正确运用系统设计法。

与 EMI 相关的因素多且复杂,仅做到上述的几点措施是远远不够的,还有接地技术、PCB 布局走线等都很重要。电磁兼容的设计任重而道远,我们要不断进行研究探索,使我国的电子产品电磁兼容水平与国际同步。