

开关电源的电磁兼容设计

王会立

(北京承力通讯设备厂, 北京 101300)

摘要: 分析了开关电源电磁骚扰的机理, 提出相应的抑制措施。讨论了电磁兼容设计中需要加以注意的问题。

关键词: 开关电源; 电磁兼容; 电磁骚扰; 耦合通道

Electromagnetic Compatibility Design of Switching-mode Power Supply

WANG Hui-li

Abstract: The mechanism of electromagnetic disturbance in switching-mode power supply is analysed, and the suppressing methods are presented. A few key points of EMC design are discussed.

Keywords: Switching mode power supply; Electromagnetic compatibility; EMD; Coupling path

中图分类号: TN912 文献标识码: A 文章编号: 0219-2713(2003)04-0152-04

1 引言

电磁兼容是指在有限的空间、时间和频谱范围内, 各种电气设备共存而不引起性能的下降, 它包括电磁骚扰(EMD)和电磁敏感(EMS)两方面的内容。EMD是指电气产品向外发出噪声, EMS则是指电气产品抵抗外来电磁骚扰的能力。一台具备良好电磁兼容性能的设备, 应该既不受周围电磁环境的影响也不对周围造成电磁骚扰。

开关电源中的功率开关管在高频下的通、断过程产生大幅度的电压和电流跳变, 因而产生强大的电磁骚扰, 但骚扰的频率范围($<30\text{MHz}$)是比较低的。多数小功率开关电源的几何尺寸远小于 30MHz 电磁场对应的波长(空气介质中约为 10m), 开关电源系统研究的电磁骚扰现象属于似稳场的范围, 研究它们的电磁骚扰问题时, 主要考虑的是传导骚扰。

2 电磁骚扰

讨论电磁骚扰一般是从骚扰源的特性, 骚扰的耦合通道特性和受扰体的特性三个方面来进行的。

2.1 开关电源中的主要电磁骚扰源

开关电源中的电磁骚扰源主要有开关器件、二极管和非线性无源元件; 在开关电源中, 印制板布线不当也是引起电磁骚扰的一个主要因素。

2.1.1 开关电路产生的电磁骚扰

对开关电源来说，开关电路产生的电磁骚扰是开关电源的主要骚扰源之一。开关电路是开关电源的核心，主要由开关管和高频变压器组成。它产生的 dv/dt 是具有较大幅度的脉冲，频带较宽且谐波丰富。这种脉冲骚扰产生的主要原因是

1) 开关管负载为高频变压器初级线圈，是感性负载。在开关管导通瞬间，初级线圈产生很大的涌流，并在初级线圈的两端出现较高的浪涌尖峰电压；在开关管断开瞬间，由于初级线圈的漏磁通，致使一部分能量没有从一次线圈传输到二次线圈，储藏在电感中的这部分能量将与集电极电路中的电容、电阻形成带有尖峰的衰减振荡，叠加在关断电压上，形成关断电压尖峰。这种电源电压中断会产生与初级线圈接通时一样的磁化冲击电流瞬变，这个噪声会传导到输入输出端，形成传导骚扰，重者有可能击穿开关管。

2) 脉冲变压器初级线圈，开关管和滤波电容构成的高频开关电流环路可能会产生较大的空间辐射，形成辐射骚扰。如果电容滤波容量不足或高频特性不好，电容上的高频阻抗会使高频电流以差模方式传导到交流电源中形成传导骚扰。

2.1.2 二极管整流电路产生的电磁骚扰

主电路中整流二极管产生的反向恢复电流的 $|di/dt|$ 远比续流二极管反向恢复电流的 $|di/dt|$ 小得多。作为电磁骚扰源来研究，整流二极管反向恢复电流形成的骚扰强度大，频带宽。整流二极管产生的电压跳变远小于电源中的功率开关管导通和关断时产生的电压跳变。因此，不计整流二极管产生的 $|dv/dt|$ 和 $|di/dt|$ 的影响，而把整流电路当成电磁骚扰耦合通道的一部分来研究也是可以的。

2.1.3 dv/dt 与负载大小的关系

功率开关管开通和关断时产生的 dv/dt 是开关电源的主要骚扰源。经理论分析及实验表明，负载加大，关断产生的 $|dv/dt|$ 值加大，而负载变化对开通的 $|dv/dt|$ 影响不大。由于开通和关断时产生的 $|dv/dt|$ 不同，从而对外部产生的骚扰脉冲也是不同的。

2.2 开关电源电磁噪声的耦合通道

描述开关电源和系统传导骚扰的耦合通道有两种方法：

- 1) 将耦合通道分为共模通道和差模通道；
- 2) 采用系统函数来描述骚扰和受扰体之间的耦合通道的特性。

本文采用第一种方法进行论述。

2.2.1 共模和差模骚扰通道

开关电源在由电网供电时，它将从电网取得的电能转换成另一种特性的电能供给负载。同时开关电源又是一噪声源，通过耦合通道对电网、开关电源本身和其它设备产生骚扰，通常多采用共模和差模骚扰加以分析。

“共模骚扰”是指骚扰大小和方向一致，其存在于电源任何一相对大地、或中线对大地间。共模骚扰也称为纵模骚扰、不对称骚扰或接地骚扰。是载流体与大地之间的骚扰。

“差模骚扰”是指大小相等，方向相反，其存在于电源相线与中线及相线与相线之间。差模骚扰也称为常模骚扰、横模骚扰或对称骚扰。是载流体之间的骚扰。

共模骚扰说明骚扰是由辐射或串扰耦合到电路中的，而差模骚扰则说明骚扰源于同一条电源电路的。通常这两种骚扰是同时存在的，由于线路阻抗的不平衡，两种骚扰在传输中还会相互转化，情况十分复杂。共模骚扰主要是由 $|dv/dt|$ 产生的， $|di/dt|$ 也产生一定的共模骚扰。但是，在低压大电流的开关电源中，共模骚扰主要是由 $|dv/dt|$ 产生的还是由 $|di/dt|$ 产生的，需要进一步研究。

在频率不是很高的情况下，开关电源的骚扰源、耦合通道和受扰体实质上构成一多输入多输出的电网络，而将其分解为共模和差模骚扰来研究是对上述复杂网络的一种处理方法，这种处理方法在某种场合还比较合适。但是，将耦合通道分为共模和差模通道具有一定的局限性，虽然能测量出共模分量和差模分量，但共模分量和差模分量是由哪些元器件产生的，的确不易确定。因此有人用系统函数的方法来描述开关电源骚扰的耦合通道，即研究耦合通道的系统函数与各元器件的关系，建立耦合通道的电路模型。许多系统分析的结果，如灵敏度的分析、模态的分析等，都可用来研究开关电源的EMD的调试和预测。但是，用系统函数的方法分析骚扰的耦合通道，还需要做很多工作。

2.2.2 杂散参数影响耦合通道的特性

在传导骚扰频段（小于30MHz）范围内，多数开关电源骚扰的耦合通道是可以用电路网络来描述的。但是，在开关电源中的任何一个实际元器件，如电阻器、电容器、电感器乃至开关管、二极管都包含有杂散参数，且研究的频带愈宽，等值电路的阶次愈高，因此，包括各元器件杂散参数和元器件间的耦合在内的开关电源的等效电路将复杂得多。在高频时，杂散参数对耦合通道的特性影响很大，分布电容的存在成为电磁骚扰的通道。另外，在开关管功率较大时，集电极一般都需加上散热片，散热片与开关管之间的分布电容在高频时不能忽略，它能形成面向空间的辐射骚扰和电源线传导的共模骚扰。

3 电磁骚扰的抑制

对开关电源的EMD的抑制措施，主要是

- 1) 减小骚扰源的骚扰强度；
- 2) 切断骚扰传播途径。

为了达到这个目的，主要从选择合适的开关电源电路拓扑；采用正确的接地、屏蔽、滤波措施；设计合理的元器件布局及印制板布线等几个方面考虑。

3.1 减小开关电源本身的骚扰

减小开关电源本身的骚扰是抑制开关电源骚扰的根本，是使开关电源电磁骚扰低于规定极限值的有效方法。

- 1) 减小功率管通、断过程中产生的骚扰

上面分析表明，开关电源的主要骚扰是来自功率开关管通、断的 dv/dt 。因此减小功率开关管通、断的 dv/dt 是减小开关电源骚扰的重要方面。人们通常认为软开关技术可以减小开关管通、断的 dv/dt 。但是，目前的一些研究结果表明软开关并不像人们预料的那样，可以明显地减小开关电源的骚扰。没有实验结果表明，软开关变换器在EMC性能方面明显地优于硬开关变换器。

有文献系统地研究了PWM反激式变换器、准谐振零电流变频开关正激变换器、多谐振零电压变频开关反激式变换器、多谐振零电压变频开关正激变换器、电压箝位多谐振零电压定频开关反激式变换器以及半桥式零电压变频串联谐振变换器的EMD特性，讨论了缓冲电路、箝位电路、变频与定频控制对骚扰水平的影响。实验结果表明，具有电压箝位的零电压定频开关变换器的EMD电平最低。

因此，采用软开关电源技术，结合合理的元器件布置及合理的印制电路板布线，对开关电源的EMD水平有一定的改善。

2) 开关频率调制技术

将频率不变的调制改变为随机调制，变频调制等。频率固定不变的调制脉冲产生的骚扰在低频段主要是调制频率的谐波骚扰，低频段的骚扰主要集中在各谐波点上。由F. Lin提出的开关频率调制方法^[3]，其基本思想是通过调制开关频率 f_c 的方法，把集中在开关频率 f_c 及其谐波 $2f_c$ ， $3f_c$ ……上的能量分散到它们周围的频带上，由此降低各个频点上的EMD幅值，以达到低于EMD标准规定的限值。这种开关调频PWM的方法虽然不能降低总的骚扰能量，但它把能量分散到频点的基带上，以达到各个频点都不超过EMD规定的限值。

3.2 接地

“接地”有设备内部的信号接地和设备接大地，两者概念不同，目的也不同。“地”的经典定义是“作为电路或系统基准的等电位点或平面”。

3.2.1 设备的信号接地

设备的信号接地，可能是以设备中的一点或一块金属来作为信号的接地参考点，它为设备中的所有信号提供了一个公共参考电位。

在这里介绍浮地和混合接地，另外，还有单点接地和多点接地。

1) 浮地

采用浮地的目的是将电路或设备与公共接地系统，或可能引起环流的公共导线隔离开来。浮地还可以使不同电位间的电路配合变得容易。实现电路或设备浮地的方法有变压器隔离和光电隔离。浮地的最大优点是抗骚扰性能好。

浮地的缺点是由于设备不与公共地相连，容易在两者间造成静电积累，当电荷积累到一定程度后，在设备地与公共地之间的电位差可能引起剧烈的静电放电，而成为破坏性很强的骚扰源。

一个折衷方案是在浮地与公共地之间跨接一个阻值很大的泄放电阻，用以释放所积累的电荷。注意控制泄放电阻的阻抗，太低的电阻会影响设备泄漏电流的合格性。

2) 混合接地

混合接地使接地系统在低频和高频时呈现不同的特性，这在宽带敏感电路中是必要的。电容对低频和直流有较高的阻抗，因此能够避免两模块之间的地环路形成。当将直流地和射频地分开时，将每个子系统的直流地通过 $10\sim 100\text{nF}$ 的电容器接到射频地上，这两种地应在一点有低阻抗连接起来，连接点应选在最高翻转速度 (di/dt) 信号存在的点。

3.2.2 设备接大地

在工程实践中，除认真考虑设备内部的信号接地外，通常还将设备的信号地，机壳与大地连在一起，以大地作为设备的接地参考点。设备接大地的目的是

- 1) 保证设备操作人员人身的安全。
- 2) 泄放机箱上所积累的电荷，避免电荷积累使机箱电位升高，造成电路工作的不稳定。
- 3) 避免设备在外界电磁环境的作用下使设备对大地的电位发生变化，造成设备工作的不稳定。

由此可见，设备接大地除了是对人员安全、设备安全的考虑外，也是抑制骚扰发生的重要手段。

3.3 屏蔽

抑制开关电源产生的骚扰辐射的有效方法是屏蔽，即用电导率良好的材料对电场屏蔽，用磁导率高的材料对磁场屏蔽。为了防止脉冲变压器的磁场泄露，可利用闭合环形成磁屏蔽，另外，还要对整个开关电源进行电场屏蔽。屏蔽应考虑散热和通风问题，屏蔽外壳上的通风孔最好为圆形多孔，在满足通风的条件下，孔的数量可以多，每个孔的尺寸要尽可能小。接缝处要焊接，以保证电磁的连续性，如果采用螺钉固定，注意螺钉间距要短。屏蔽外壳的引入、引出线处要采取滤波措施，否则，这些会成为骚扰发射天线，严重降低屏蔽外壳的屏蔽效果。若用电场屏蔽，屏蔽外壳一定要接地，否则，将起不到屏蔽效果；若用磁场屏蔽，屏蔽外壳则不需接地。对非嵌入的外置式开关电源的外壳一定要进行电场屏蔽，否则，很难通过辐射骚扰测试。

3.4 滤波

电源滤波器安装在电源线与电子设备之间，用于抑制电源线引出的传导骚扰，又可以降低从电网引入的传导骚扰。对提高设备的可靠性有重要的作用。

开关电源产生的电磁骚扰以传导骚扰为主，而传导骚扰又分差模骚扰和共模干扰两种。通常共模骚扰要比差模骚扰产生更大的辐射型EMD。目前抑制传导EMD最有效的方法是利用无源滤波技术。

作为一种双端口网络EMD滤波器，它对骚扰的抑制性能不仅取决于滤波器本身的拓扑，而且在很大程度上也受EMD滤波器输入、输出阻抗值的影响。由于EMD滤波器阻抗和负载阻抗的可变动性以及它们可能直接与电网相连的特点，电源EMD滤波器的输入、输出阻抗不但不匹配而且常常是未知的。这就造成了EMD滤波器设计不能完全应用成熟的通信用滤波器设计方法和理论。这是电源滤波器设计面临的主要问题。

3.5 元器件布局及印制电路板布线

开关电源的辐射骚扰与电流通路中的电流大小，通路的环路面积，以及电流频率的平方等三者的乘积成正比，即辐射骚扰 $E \propto I \cdot A \cdot f^2$ 。运用这一关系的前提是通路尺寸远小于频率的波长。

上述关系式表明减小通路面积是减小辐射骚扰的关键，这是说开关电源的元器件要彼此紧密排列。在初级电路中，要求输入端电容、晶体管和变压器彼此靠近，且布线紧凑；在次级电路中，要求二极管、变压器和输出端电容彼此贴近。

在印制板上，将正负载流导线分别布在印制板的两面，并设法使两个载流导体彼此间保持平行，因为平行紧靠的正负载导体所产生的外部磁场是趋向于相互抵消的。

布线间的电磁耦合是通过电场和磁场进行的，因此在布线时，应注意对电场与磁场耦合的抑制。对电场的抑制方法有

- 1) 尽量增大线间距离，使电容耦合为最小；
- 2) 采用静电屏蔽，屏蔽层要接地；
- 3) 降低敏感线路的输入阻抗。

对磁场的抑制方法有

- 1) 减小骚扰源和敏感电路的环路面积；
- 2) 增大线间距离，使耦合骚扰源与敏感电路间的互感尽可能地小；
- 3) 最好使骚扰源与敏感电路呈直角布线，以便大大降低线路间耦合。

4 结语

开关电源电磁兼容设计的目的是使产品在一定的电磁环境下正常工作，也就是说，电源产品应满足标准规定的抗扰度极限值要求，在受到一定的电磁骚扰时，无性能的下降或故障；同时，电源产品满足标准规定的电磁极限值要求，对电磁环境不构成污染源，而实现电磁兼容。

参考文献

- [1] Umran S. Inan, Aziz S. Inan. Engineering Electromagnetic [M]. Addison Wesley, 1999.
- [2] Haroran Zhang, Annette von Jouanne. Suppressing Common-Mode Conducted EMI Generated by PWM Drive Systems Using a Dual-Bridge Inverter [C]. *Proc. of IEEE APEC* 1998:1017-1020.
- [3] F. Lin and D. Y. Chen. Reduction of Power Supply EMI Emission by Switching Frequency Modulation [C]. *Proc. of IEEE PESC* 1993:127-133.
- [4] 姜建国. 开关电源中的电磁干扰问题 [J]. 电源世界, 2002(11):59-65.
- [5] 钱照明. 开关电源的EMC设计 [J]. 电源世界, 2002(3):46-50.
- [6] 朱文立. 开关电源的电磁骚扰抑制技术 [J]. 电子质量, 2002(9):91-93.

- [7] 康希荣. 通信开关电源的电磁兼容性[J]. 电源技术应用, 2002(4):3—6.
- [8] 白同云. 电磁兼容设计[M]. 北京:北京邮电大学出版社. 2001.
- [9] 钱振宇. 产品的电磁兼容性设计[J]. 电源技术应用, 2001(1)(2)(3)(连载).
- [10] 张占松, 蔡宣三编著. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 1998.

作者简介

王会立(1976—), 男, 从事电力电子及开关电源产品的开发、测试工作。正在攻读电力电子与电力传动专业的研究生课程。负责制定了直流—直流开关电源及交流—直流开关电源的企业标准。发表学术论文数篇。

收稿日期: 2002—12—30