

文章编号: 1008-1542(2005)03-0233-04

# 开关电源的电磁兼容性设计

周万珍, 沙占友, 许云峰

(河北科技大学信息科学与工程学院, 河北石家庄 050054)

**摘要:** 对开关电源的电磁干扰波形进行了分析, 建立造成共模干扰、串模干扰的电路模型, 然后提出了具体解决方案: 利用单级或双级 EMI 滤波器滤除共模干扰和串模干扰, 并介绍了选择 EMI 滤波器中元器件的方法。实验表明: 利用简易的 EMI 滤波器可将电磁干扰衰减 40 dB $\mu$ V; 使用改进后的 EMI 滤波器, 能将电磁干扰衰减 50~70 dB $\mu$ V。

**关键词:** 电磁兼容性; 电磁干扰; 共模; 串模; EMI 滤波器

中图分类号: TN86

文献标识码: A

## EMC design of switching power supply

ZHOU Wan-zhen, SHA Zhan-you, XU Yun-feng

(College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050054, China)

**Abstract:** This paper analyses the EMC wave of the switching power supply and establishes the circuit model that results in common mode interference and series mode interference. Then provides the concrete solution: making use of single or double level EMI filters can filter common mode interference and series mode interference effectively. Finally, it introduces the method to choose the device parameter in the EMI filters. The experiment indicates that it can reduce EMI by 40 dB $\mu$ V by the simple EMI wave filter. However, using the improved EMI wave filter can reduce EMI by 50~70 dB $\mu$ V.

**Key words:** EMC; EMI; common mode; series mode; EMI filter

电磁兼容性是指电子设备或系统的一种特性, 即该电子设备(或系统)在电磁环境中不仅能完成其功能, 而且不影响同一电磁环境中其他电子设备的正常工作, 现已发展成直接服务于电子、计算机、通信、自动控制和军事工程的一门独立的新学科。开关电源工作在高频、高压、大电流的开关状态下, 所产生的电磁干扰分共模干扰、串模干扰 2 种, 并以传导或辐射方式向外部传播。开关电源的电磁兼容性设计就是要把电磁干扰衰减到允许限度之内, 使之不影响电子设备的正常工作。

### 1 电磁干扰的波形分析

反馈式开关电源的简化电路见图 1。图 1 中:  $V_1$  为直流输入电压;  $I_1$  为高频变压器的初级电流; 设 TOPSwitch 漏源极电压为  $V_{DS}$ ; 输出整流管上的电压为  $V_{D2}$ ;  $I_2$  为次级电流;

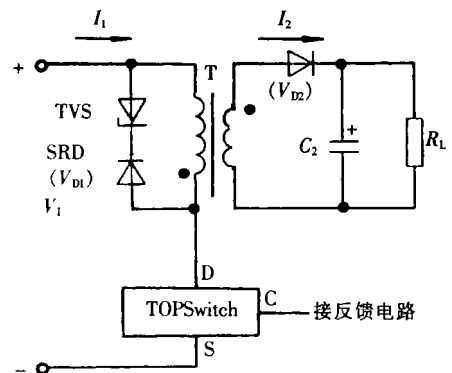


图 1 开关电源简化电路

Fig. 1 Simplified circuit of the switching power supply

收稿日期: 2004-05-19; 修回日期: 2004-09-12; 责任编辑: 李 穆

作者简介: 周万珍(1967-), 男, 河北张家口人, 副教授, 主要从事计算机测控、数据挖掘、人工智能等方面的研究。

$R_L$  为负载。图 2 给出了  $I_1$ ,  $V_{DS}$ ,  $I_2$  和  $V_{D2}$  的电磁干扰波形。下面对图 2 中这 4 种波形加以分析。

初级电流  $I_1$  是在 TOPSwitch 漏-源极电压导通时开始形成并沿着斜坡上升, 达到峰值  $I_{1P}$ 。  $I_{1P}$  值由直流输入电压  $V_1$ 、初级电感  $L_P$ 、开关频率  $f$  和占空比  $D$  来决定。该梯形电流波形的基频为开关频率, 谐波为干扰波形。初级串模干扰电流经过初级绕组、TOPSwitch 和  $V_1$  形成回路。当电流环路面积较大时,  $I_1$  还能向外辐射共模干扰。

$V_{DS}$  电压波形的特点是其电压变化率 ( $dV/dt$ ) 很高, 受变压器漏感、TOPSwitch 输出电容和变压器分布电容等分布参数的影响,  $V_{DS}$  在  $f_1 = 3 \sim 12$  MHz 的频率范围内形成振铃。

当 TOPSwitch 关闭时, 次级上就有电流  $I_2$  通过, 并且从峰值  $I_{2P}$  开始, 然后呈线性下降, 下降速率由次级电感  $L_S$  和输出电压  $V_O$  来决定。下降过程中形成的振铃, 在时间上与  $V_{DS}$  相对应, 振铃频率仍为  $f_1$ 。  $V_{D2}$  也具有电压变化率高、上升沿和下降沿陡峭的特点, 其峰值电压由变压器和输出整流管的分布电容所决定。振铃干扰波形的频率变化为  $f_2 = 20 \sim 30$  MHz。

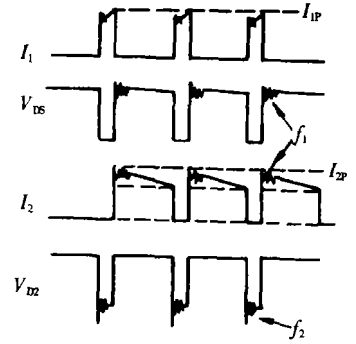


图 2 电磁干扰波形  
Fig. 2 EMI waveforms

## 2 造成电磁干扰的电路模型

### 2.1 共模干扰的电路模型

造成共模干扰的电路模型见图 3。图 3 中:  $C_u$  是与交流电源输入端相并联的耦合电容;  $C_{BD1} \sim C_{BD4}$  是整流桥中 4 只整流管的等效电容;  $C_{IN}$  为输入滤波电容, 其等效串联电感和等效串联电阻分别用  $L_{ES}$ ,  $R_{ES}$  表示;  $C_{W1} \sim C_{W6}$  为高频变压器的分布电容, 其中  $C_{W1}$  和  $C_{W6}$  分别为初级绕组、次级绕组的分布电容, 两者组合起来可产生 400 kHz ~ 2 MHz 的谐波频率;  $C_{W2} \sim C_{W5}$  是初级绕组、次级绕组之间的各种分布电容;  $C_{OSS}$  为 TOPSwitch 的输出电容;  $C_{S1}$  和  $C_{S2}$  依次为漏极、次级对地的分布电容。上述电容会造成 5 个干扰电流:  $I_{CS1}$ ,  $I_{CW1}$ ,  $I_{CW3}$ ,  $I_{COSS}$  和  $I_{CW4}$ , 这 5 个电流相叠加后, 有一部分被抵消掉, 剩下的高频电流即形成共模干扰。

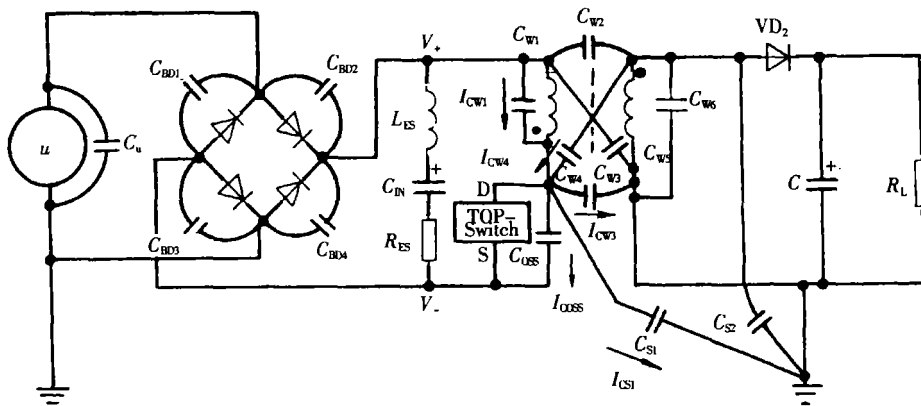


图 3 造成共模干扰的电路模型

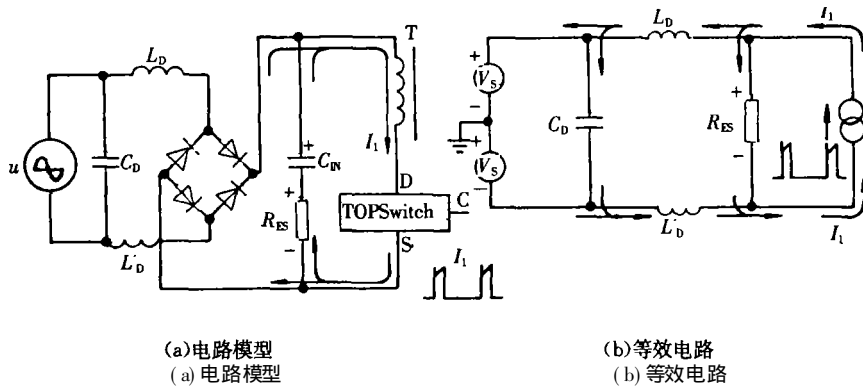
Fig. 3 Circuit model that results in common mode interference

共模干扰可由 EMI 滤波器中的共模扼流圈进行抑制。共模扼流圈的电感量通常取 10 ~ 33 mH。为减小分布电容, 印制版上的相关导线应尽量缩短<sup>[1]</sup>。

### 2.2 串模干扰的电路模型

串模干扰的电路模型见图 4(a), 图 4(b) 为等效电路。图 4(a) 中:  $C_D$  为串模电容;  $L_D$  和  $L'_D$  为 2 个串模扼流圈;  $R_{ES}$  为输入滤波电容  $C_{IN}$  的等效串联电阻。2 条电源线上对地的电压用  $V_S$  表示, 正半周时电压极性见图 4(b)。不难看出, 串模干扰电流的方向是从一条电源线流入开关电源, 再从另一条电源线流出的。由  $C_D$ ,  $L_D$  和  $L'_D$  构成的串模干扰滤波器能对串模干扰起到抑制作用。举例说明, 在 7.5 V, 15 W 开关电源模块中, 实取  $C_D = 0.1 \mu F$ ,  $C_{IN} = 33 \mu F$ ,  $R_{ES} = 0.375 \Omega$ ,  $L_D = L'_D = 74 \mu H$ 。  $L_D$  和  $L'_D$  可以是分立电感, 也可以是从共模干扰扼

流圈上分离出来的等效串联电感。加串模干扰滤波器后,串模干扰的基波电压为 59.3 mV,二次谐波降为 43.0 mV。注意,在测量共模扼流圈一个绕组的等效串模电感时,应将另一绕组短路,并且要将测量值除以 2 才是  $L_D$  (或  $L'_D$ ) 的电感量。



(a) 电路模型 (a) 电路模型 (b) 等效电路 (b) 等效电路

图 4 串模干扰的电路模型

Fig. 4 Circuit model that results in series mode interference

### 3 EMI 滤波器的电路设计

#### 3.1 开关电源常用的 EMI 滤波器电路

为减小体积和降低成本,开关电源一般采用简易式单级 EMI 滤波器,典型电路见图 5(a) - 图 5(d), L 为共模扼流圈。图 5(a) 与图 5(b) 中的电容 C 能滤除串模干扰,区别仅是图 5(a) 将 C 接在输入端,图 5(b) 则接到

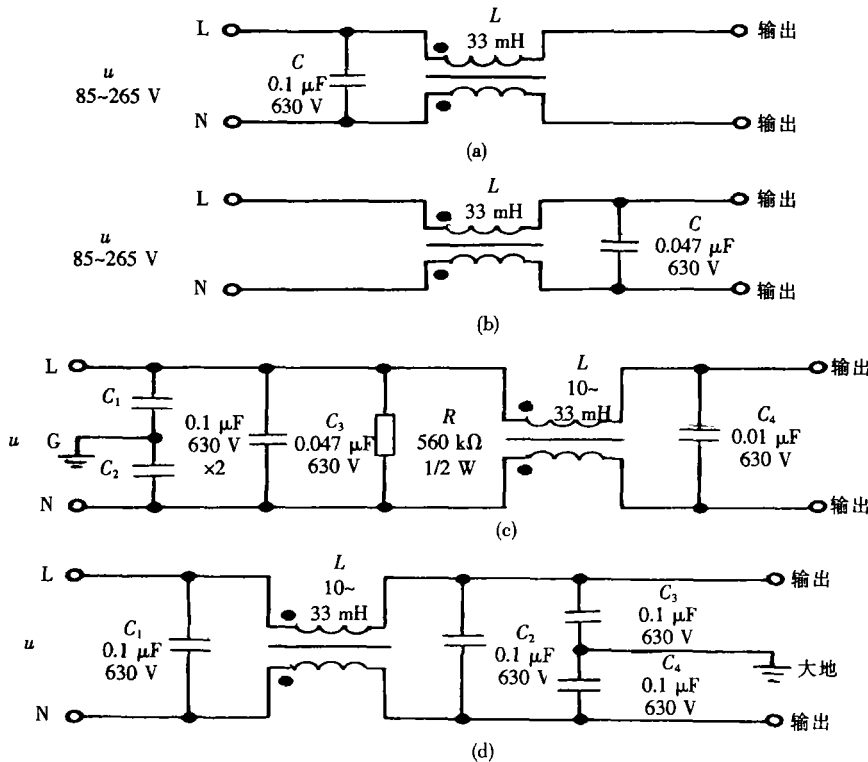


图 5 开关电源常用的 EMI 滤波器电路

Fig. 5 EMI filter circuit commonly used by the switching power supply

输出端。图 5(c) 与图 5(d) 所示电路较复杂,抑制电磁干扰的效果较佳。图 5(c) 中的 L, C<sub>1</sub> 和 C<sub>2</sub> 用来滤除共模干扰, C<sub>3</sub> 和 C<sub>4</sub> 滤除串模干扰, R 为泄放电阻,可将 C<sub>3</sub> 上积累的电荷泄放掉,避免因电荷积累而影响滤波特性,断电后还能使电源的进线端 L, N 不带电,保证用户的安全。图 5(d) 则是把共模干扰滤波电容 C<sub>2</sub> 和 C<sub>4</sub> 接在输出端。

EMI 滤波器能有效抑制开关电源的电磁干扰。图 6 中 a 为不加 EMI 滤波器时开关电源上 0.15~30 MHz 传导噪声的波形(即电磁干扰峰值包络线); b 为加上图 5(c) 所示 EMI 滤波器后的波形, 电磁干扰大约被衰减 40 dB $\mu$ V; c 为加上图 5(d) 中所示 EMI 滤波器后的波形, 能衰减 50~70 dB $\mu$ V。显然, 后一种 EMI 滤波器的效果最佳。

### 3.2 元器件选择

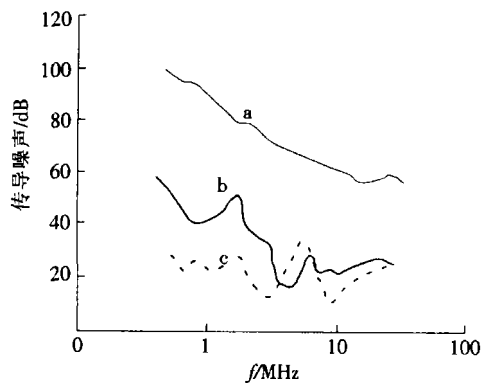
滤波电容应选自谐振频率很高的陶瓷电容器。电容器的耐压值应足够高, 通常选 630 V。输出端滤波电容上还加有尖峰电压, 其耐压值可选 1 000 V。扼流圈分共模、串模 2 种, 通常采用共模扼流圈, 它实际由共模电感、串模泄漏电感 2 部分构成, 因此它对串模干扰也有一定的抑制作用, 其优点是能同时起到共模扼流圈、串模扼流圈 2 种作用, 而成本并未增加。共模扼流圈的线径要能承受可能发生的浪涌电流。串模扼流圈仅适用于 5 W 以下的低功率开关电源, 它是由 2 个分立的铁氧体磁环线圈或螺线管线圈构成的。为了避免 EMI 滤波器向外部发射电磁干扰, EMI 滤波器应采用金属屏蔽壳封装。

## 4 结 语

随着高效率、节能型开关电源的广泛应用, EMI 滤波器因其可抑制电网噪声、提高电子设备的抗干扰能力及提高系统的可靠性, 被广泛应用于智能化温度测控系统、电子测量仪器、计算机机房设备、开关电源等领域。

### 参考文献:

[1] 沙占友. 实用数字化测量技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.



a—不加 EMI 滤波器; b—加图 5(c) 中的 EMI 滤波器;  
c—加图 5(d) 中的 EMI 滤波器

图 6 加 EMI 滤波前、后干扰波形的比较  
Fig. 6 Comparison of waveforms before and after adding EMI

### (上接第 229 页)

- [3] THEVENOT F. Boron carbide—A comprehensive review[J]. J Eur Ceram Soc, 1990, 6(4): 205-225.
- [4] EMIN D. Structure and single phase regime of boron carbide[J]. Phys Rev B, 1988, 38(9): 6 041-6 054.
- [5] WITH G De. High temperature fracture of boron carbide: experiments and simple theoretical models[J]. J Mater Sci, 1984, 19(2): 457-466.
- [6] GOGOTSIJ G A, GROUSHEVSKY Y L, OSTROVOJ D Y. Mechanical behaviour of hot-pressed boron carbide in various atmosphere[J]. J Mater Sci Lett, 1988, 7(8): 814-816.
- [7] KUZENKOVA M A, KISLYI P S, GRABEHUK B L. The structure and properties of sintered boron carbide[J]. J Less-Common Met, 1979, 67(1): 17-23.
- [8] WEAVER G Q. Sintered high density boron carbide[P]. US: No. 4320204, 1982.
- [9] ZHANG Guo-jun, TATSUKI O. In situ reaction synthesis of silicon carbide-boronnitride composites[J]. J Am Ceram Soc, 2001, 84(7): 75-79.
- [10] 俞 剑, 张国定. 降低 SiCp/Al 气孔率的研究[J]. 材料工程, 1995, (11): 29-32.
- [11] CHEN I W, WANG X H. Sintering dense nanocrystalline ceramics without final-stage grain growth[J]. Nature, 2000, 84(7): 75-79.
- [12] H YUKJAE L, SPERYER R F. Pressureless sintering of boron carbide[J]. J Am Ceram Soc, 2003, 86(9): 68-73.
- [13] 蒋国新, 王声宏. 碳化硼的低温热压[J]. 粉末冶金技术, 1995, 13(2): 108-111.
- [14] CHEN Pei-lin, CHEN I W. Sintering of fine oxide powders: sintering mechanics[J]. J Am Ceram Soc, 1997, 80(3): 637-645.
- [15] 陆佩文. 硅酸盐物理化学[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1996.