文章编号:1672-0792(2004)03-0051-04

抑制开关电源传导发射的滤波措施研究

王剑乔[1]，刘建新[1]，张 民[2]，杨大林[2]

(1. 华北电力大学 电气工程学院，河北 保定 071003；2. 国家继电器质量监督检验中心电磁兼容实验室，河南 许昌 461000)

Filter Measures to Suppress Switch Power Supply Conducted EMI Emission

WANG Jian-qiao[1], LIU Jian-xin[1], ZHANG Min[2], YANG Da-lin[2]

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. National Center for Quality Supervision & Testing of Relay and Protective Equipment EMC & Safety Testing Center, Xuchang 461000, China)

Abstract: The paper analyses the reason, the transmitting track and the equivalent circuit of conducted EMI induced by auxiliary switch power supply of measuring relays and protection equipment by circuit model. According to characteristics of EMI signal, the principle, design and structure of the EMI filter using conducted EMI suppression are introduced. The authors measured the value of conducted EMI of power wire respectively using EMI receiver without and with filter. The experiments showed that the good filter could suppress switch power supply conducted EMI.

Key words: conducted emission; common mode interfere; differential mode interfere

摘要：利用电路模型分析了用于保护设备的辅助小功率开关电源传导性电磁干扰产生的原因、传播途径及等效电路，介绍了抑制开关电源传导发射的滤波器设计原则、工作原理和结构。利用德国罗德施瓦茨公司的场强接收机实际测量了未加滤波和加滤波时电源线上的传导发射值，实验证明合理设计滤波器对抑制开关电源传导发射有非常明显的效果。

关键词：传导发射；共模干扰；差模干扰

中图分类号：TM712 **文献标识码**：A

开关电源由于体积小、重量轻、效率高等传统线性电源无可比拟的优点，发展异常迅速，广泛应用于各种电子设备。但这种非线性电源产生的电磁骚扰具有一定的频率范围和幅值，经辐射和传导污染了电磁环境，这不仅干扰整个电网，而且对电源本身及周围电子设备的正常工作构成了威胁。但开关电源骚扰的频率范围一般小于 30 MHz，多数小功率开关电源的几何尺寸远小于空气中 30 MHz 电磁场对应的波长，主要的干扰形式是传导干扰。IEC60255 - 25 规定量度继电器和保护设备的辅助电源的传导发射限值在 150～500 kHz 频率范围内，准峰值不超过 79 dBuV，平均值不超过 66 dBuV；在 500 kHz～30 MHz 频率范围内，准峰值不超过 73 dBuV，平均值不超过 60 dBuV[1]。随着电子设备的 EMC（电磁兼容）越来越受到重视，为了提高产品质量，满足电磁兼容标准，研究如何减小开关电源的传导发射是非常重要的。

收稿日期:2004-03-16;**修订日期**:2004-07-02

1 开关电源电磁干扰产生的原因及等效电路

对于开关电源的传导发射（< 30 MHz），其电磁干扰产生及耦合通道可以用电路网络来描述。开关电源的噪声也可分解为共模噪声和差模噪声。

1.1 典型开关电源共模噪声发射路径

典型开关电源共模噪声发射路径的原理图如图 1 所示[2]。

当开关管处在关断状态时，开关变压器的漏感

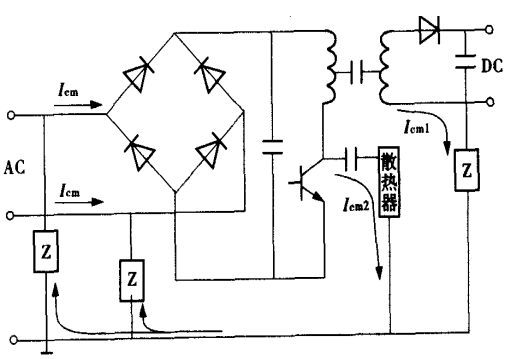


图 1 共模噪声传播途径

Fig. 1 The transmitting track of common mode noise

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在导通时储存的能量，会在开关管集电极与地之间的分布电容进行能量交换，产生衰减振荡，导致开关管集电极与发射极之间的电压迅速上升到 500 V 左右。这个按开关频率工作的脉冲束电流经集电极与地之间的分布电容返回 AC 线。其中分布电容包含两个：开关变压器原副边之间的分布电容和开关管与散热器之间的分布电容。

若开关电源噪声源用诺顿等效电路表示，其等效电路如图 2 所示。图中：C_p 为开关管集电级与地之间的分布电容；R_p 为噪声源的等效内阻；I 为噪声源的短路电流，其中，C_p 的值约为 0.5～3 uF，而 $R_p > 10\ k\Omega$。

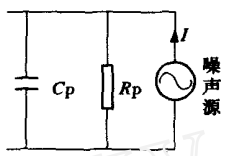


图 2 共模噪声源等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of common noise

1.2 典型开关电源差模噪声发射路径

典型开关电源差模噪声发射路径的原理图如图 3 所示[2]。

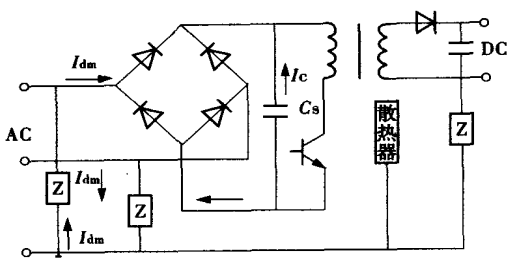


图 3 差模噪声传播途径

Fig. 3 The transmitting track of differential mode noise

第 1 种差模噪声。当开关管由关断切换为导通时，回路电容 C_s 通过开关管放电形成浪涌电流，它在回路阻抗上产生的电压就是差模噪声。

第 2 种差模噪声为工频差模脉动噪声。交流电源经整流电路后是半波脉动电压，经电容滤波后，为含有三角波脉动成分的直流电压，稳定工作后，在电压上升时间，当脉动电压上升到比已充电的电容电压高时就会通过整流二极管给电容充电，在电压下降期间，只有电容向负载的放电电流。结果流过整流二极管的电流不再是正弦波而是二倍工频的脉冲电流。这两种噪声都返回到输入端的交流电网，它不仅污染电网，给其他接入电网的电子设备造成危害，还直接导致电网的功率因数下降。

第 3 种差模噪声为输出传导噪声。这种输出差模噪声是由输出整流二极管由正偏转为反偏时，反向电流与二级管结电容、分布电感产生的尖峰电压。输出噪声电流与二级管的反向恢复时间直接相关，反向恢复时间越长噪声电压越大，所以选用快恢复二级管是减少输出噪声电压的有效措施。

因此，差模噪声源的等效电路如图 4 所示。其中 C_p 约为 500 pF，$R_p > 10\ k\Omega$；L 约为 0.5～1 uH；$R \leq 1\ \Omega$。

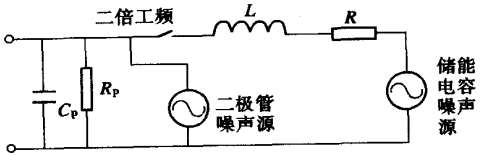


图 4 差模噪声源等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of differential mode noise

2 抑制开关电源传导发射的滤波措施

解决开关电源的电磁兼容性，应考虑：

(1) 减小干扰源产生的干扰信号；

(2) 切断干扰信号的传播途径；

(3) 增强敏感电路的抗干扰能力。

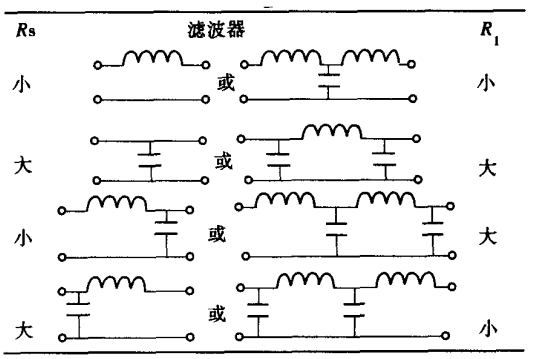
对于开关电源的传导发射，以成本和实施的难易程度为前提，主要从前 2 个方面考虑。目前，从减小干扰信号源方面，主要有频率抖动、软开关启动技术和串联谐振变换技术等[3]；从切断干扰信号传播途径，一是减小散热片与开关管集电极、变压器原副边的分布电容；二是采用滤波技术。另外，屏蔽和电路板布线、元器件的布局也是影响开关电源电磁干扰非常重要的因素。其中，滤波技术是抑制开关电源传导发射的一种简单有效措施。

2.1 滤波器的选择原则

作为一种双端口网络 EMI（电磁干扰）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 EMI 滤波器输入、输出阻抗值的影响。电磁兼容电源滤波器的设计是按照最大不匹配原则来进行，滤波器应遵循的连接规律如表 1 所示，这样无论从输入端或输出端，进入滤波器的电磁噪声均能收到最大的抑制。

表 1 滤波器应遵循的连接规律

Tab. 1 Followed connective rules of the filter



© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.2 开关电源的滤波电路设计

2.2.1 共模滤波电路

开关电源共模噪声源阻抗为高阻抗，所以与之对应的滤波器输出端应为低阻抗大电容 C_y。AC 电网火线或零线对地端为低阻抗，所以与之相对应的滤波器输入端应为高阻抗串联大电感 L_{cm}，如图 5 所示。

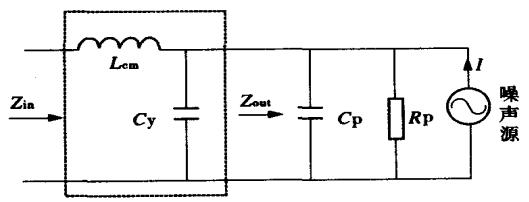


图 5 共模滤波电路

Fig. 5 The filter circuit of common mode

2.2.2 差模滤波电路

在开关电源的差模噪声等效电路中，试验证明不同噪声分量具有不同的源阻抗，开关电源的输入端呈现了差模噪声的双重特性。工频脉冲噪声源为高阻抗且呈宽频特性，而储能电容上的开关频率谐波呈低阻抗。因此，差模噪声的滤波电路如图 6 所示。

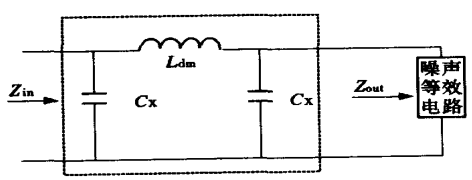


图 6 差模滤波电路

Fig. 6 The filter circuit of differential mode

2.2.3 完整的开关电源滤波电路

根据开关电源的共模和差模等效电路，得到完整的开关电源滤波电路，如图 7 所示。

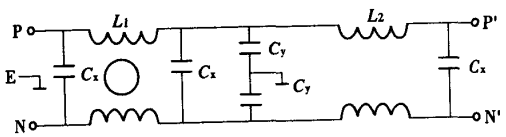


图 7 完整的滤波电路

Fig. 7 The whole filter circuit

图中：L_1，L_2 和 C_y 构成对地对称的 T 型滤波电路，抑制共模噪声，而 L_1，L_2 和 3 个并联的旁路电容 C_x 构成抑制差模噪声的滤波电路。

在设计中应注意：

(1) 因差模电感中要流过电源火线或零线中的全部工作电流，很容易饱和（尤其是应用于开关电源时，滤波电感会受到电流浪涌的影响，它工作的峰值电流比额定电流要大 1 倍左右），致使滤波器的插入损耗降低，因此，选用磁材是最重要的。目前国内生产的软磁材料主要有铁粉芯（IRON）、铁镍 50（HF）、钼坡莫合金（MPP）、铁硅铝（MS）、非晶、超微晶、硅钢等。其中 MPP 可提供最大的 Q 值和最低的磁芯损耗、对温度和交流磁通变化最稳定，是制作差模电感的最佳材料，但价格昂贵；HF 具有 15 000 Gs 的饱和磁通密度，其磁芯损耗比铁粉芯低，应用大电流场合可有效减小电感尺寸；MS 能量储存容量比 MPP 高，直流偏磁性能和损耗比铁粉芯好，铁粉芯的饱和磁通超过 10 000 Gs，直流偏磁性能较好、价格低，特别是设计得当可供选择的规格多，目前应用最普遍[4]。

(2) 共模电感的线圈匝间分布电容对插入损耗的影响。频率较高时，干扰会通过线圈的匝间分布电容通过，致使插入损耗减小，要减小其分布电容，就要从线圈的结构入手，尽量采用单层密绕，需要绕第 2 层时，应尽量减少其匝数，一般第 2 层的匝数 ≤第 1 层匝数的 1/2；对于多层绕组采用分段绕可以减小分布电容。

(3) 认真选用电容器。C_x 电容接在单相电源线的 L 和 N 之间，它上面除加有电源额定电压外，还叠加 EMI 干扰信号的峰值电压，而 C_y 电容器接在电源供电线 L 和 N 与金属外壳之间，它除负荷峰值电压外，还要求电容器的电气和机械性能好，以避免出现击穿。

(4) 可在滤波器中添加铁氧体线圈，以滤除高频骚扰信号，提高滤波器的抑制效果。

3 试验结果

用电源阻抗稳定网络法对某电子有限公司的开关电源进行试验，被测件放在距离地面 80～90 cm 的试验台上，试验台面为非导电平面，被测件与人工电源阻抗稳定网络的距离不超过 80 cm。测量示意图如图 8 所示。

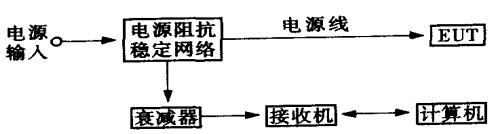


图 8 开关电源传导发射测量示意图

Fig. 8 The diagram for switch power supply conducted EMI measuring

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 9 (a)、图 9 (b) 分别为未加滤波和加滤波，用德国罗德施瓦茨公司的场强接收机测得的电源线上的传导发射值。从图中可以看出滤波器对抑制开关电源的传导发射有明显的效果，合理地选用滤波器件并安装便可达到最好效果。

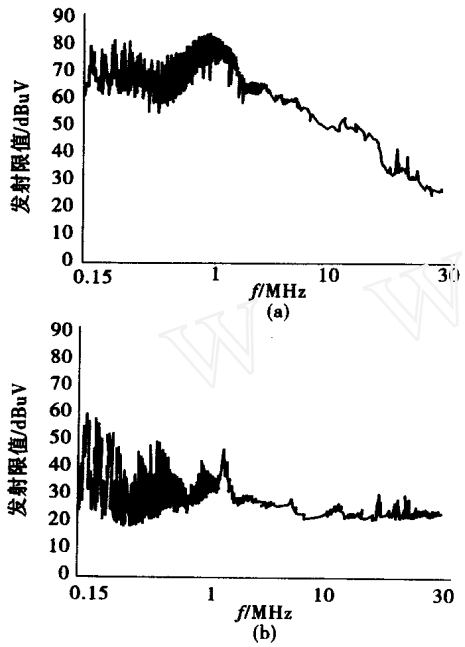


图 9 未加滤波和加滤波测得的开关电源传导发射值

Fig. 9 The switch power supply conducted EMI value without a filter and with a filter

4 结 论

滤波器是抑制开关电源传导发射非常有效的措施。在实际应用中，由于滤波器的电感和电容元件都受其分布参数的影响，频率越高，所受影响越大；另外，滤波器的电感器件在重载和满载时，产生磁饱和现象，致使电感量下降，导致插入损耗降低，尤以差模电感最容易饱和。因此，合理设计和正确地安装滤波器可提高其滤波效果。

参考文献：

[1] 全国无线电干扰标准化技术委员会，全国电磁兼容标准化联合工作组，中国实验室国家认可委员会．电磁兼容标准实施指南［M］；信息技术设备的无线电骚扰［M］．北京：中国标准出版社，1999.

[2] 陈坚．电力电子学 - 电力电子变换和控制技术［M］．北京：高等教育出版社，2002.

[3] 钱照明，袁义生．开关电源 EMC 设计研究现状及发展［J］．电子产品世界，2003，(4)：51 - 53.

[4] 叶晓慧，胡文超，鲁远曙．开关电源的电磁干扰与抑制［J］．海军工程学院学报，1999，(2)：102 - 105.

作者简介：王剑乔（1979 - ），女，河北石家庄人，华北电力大学硕士生，研究方向为电磁场理论及其应用；刘建新（1962 - ），男，河北沧州人，华北电力大学教授，博士生导师，主要从事电磁场理论及应用、信息分析与处理技术的研究。

(上接 50 页)

令

$$K_a = \frac{2}{T}\int_0^T A_0 e^{-at}\cos(n\omega t)\,dt$$

$$K_b = \frac{2}{T}\int_0^T A_0 e^{-at}\sin(n\omega t)\,dt$$

后推一个采样值数据窗 $\Delta T = T/N$

$$U'_{Rn} = u_n(n)\cos(\phi + n\omega\Delta T) + K_a \times e^{-\omega\Delta T}$$

$$U'_{In} = u_n(n)\sin(\phi + n\omega\Delta T) + K_b \times e^{-\omega\Delta T}$$

联立这几个表达式，解此方程组，即可得出 n 次谐波的特征谐波分量，如果未知数多于方程组，再后推一个数据窗 ΔT 即可。

3 结束语

多路同步数据采集卡已经调试通过，并成功地应用于厂站的二次设备中。利用 FPGA 配合 TMS320C6202 DSP 实现的实时信号处理能力和高速高性能的 PCI 总线通信方式，完全满足当代电力系统领域高端的故障信息处理的需要，在综合自动化系统中有广阔的应用前景[5]。

参考文献：

[1] 张志刚，王宪杰．多通道高速数据采集故障录波装置［J］．电测与仪表，2002，39 (3)：17 - 20.

[2] 王哲，焦彦军，张新国，等．高性能故障录波器的方案设计［J］．电力自动化设备，2003，23 (3)：40 - 42.

[3] 骆健，丁网林，王汉林，等．一种新型故障录波系统的实现［J］．电网技术，2003，27 (3)：78 - 82.

[4] 蔡舒平，张保会，薛岩．一种新型故障录波装置的构成原理及设计［J］．电气传动自动化，2003，25 (3)：40 - 45.

[5] 张伟，韩一明，吴新玲．基于 FPGA 的高速数据采集系统的设计［J］．电力科学与工程，2002，(3)：46 - 49.

作者简介：余丹（1980 - ），女，湖北咸宁人，武汉大学硕士生，主要研究方向为电力系统运行与控制。

© 1994-2006 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net