一种有源共模EMI滤波技术研究

陈立剑， 熊 蕊， 吴 琼
（华中科技大学， 湖北 武汉 430074）

摘 要：实现了一种用于开关电源的有源EMI共模滤波器方案，并在一个半桥电路的基础上应用这种方案，对整机做了EMI传导测试。分析与实验结果也验证了有源滤波器的使用对开关电源的共模传导干扰抑制的有效性。

关键词：有源EMI滤波器；共模抑制；传导干扰

Research of an Active Common-mode EMI Filter

CHEN Li-jian, XIONG Rui, WU Qiong
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: An active common-mode EMI filter for SWPS method is presented. Then the EMI test has been done in a half-bridge circuit with this proposed filter. The result has demonstrated the common-mode conducted EMI is obviously attenuated with the active filter.

Keywords: active EMI filter; common-mode restraint; conduct interfere

中图分类号：TN713+.8 **文献标识码**：B **文章编号**：0219-2713(2007)03-0054-04

0 引言

开关电源中功率开关器件的高速开关动作（从几十kHz到数MHz），形成了EMI骚扰源，在开关电源中主要存在的干扰形式是传导干扰和近场辐射干扰，传导干扰还会注入电网，干扰接入电网的其他设备。为此，国内外也制定了许多标准来限制开关电源的干扰。

在美国和欧洲，传导噪声是按FCC和VDE标准A级和B级限制严格管理的，这两个标准是全世界通用标准。开关电源的产品如果要通过EMC测试标准，往往需要综合采用各种方法，而大部分都需要增加滤波器。传统的滤波器大多采用无源滤波器，无源滤波器常常受到可用的电感、电容的体积制约。因此，很多国外学者对有源的EMI滤波器做了很多研究，来试图找到解决的办法。本文主要是阐述了一种有源EMI滤波器方案，分析了它减小传导共模EMI的原理，并给出了实验波形及结果。最后的实验结果显示，它需要的电感、电容的体积相对较小，对高频干扰提供足够的衰减。

1 传导共模干扰的测量

以一个AC/DC半桥变换器为例，测量装置接法如图1所示，电网供电是经过一个电网阻抗稳定网络（LISN），LISN的测量电压送入分析装置以分析干扰量。LISN包含电阻、电感和电容，相对于50Hz低频信号，50μH电感相当于短路，而0.1μF

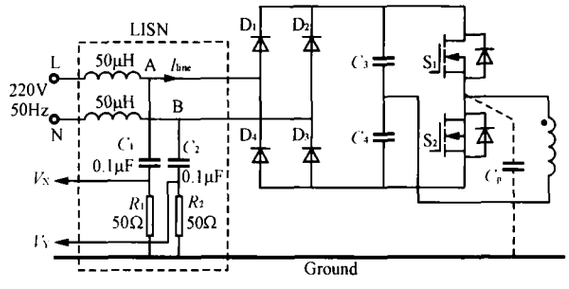


图1 AC/DC半桥变换器传导噪声的测量

收稿日期：2006-06-05

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

电容则相当于开路；而对于 EMI 噪声频率的信号，该电感则呈现高阻抗，而电容则呈现低阻抗，从而是噪声电流流过 50Ω 电阻，可测得的其上电压 V_X、V_Y 值，由传统理论可以分析得出，共模干扰电压 V_{CM} 与 V_X、V_Y 的关系为

$$V_{CM}=(V_X+V_Y)/2 \qquad (1)$$

2 传导干扰传播途径的分析

共模干扰噪声源主要来自开关器件对地电容，仍以上面的 AC/DC 半桥变换器为例，Meng Jin 等人通过理论实验论证得出了共模噪声回路的一个模型[1]。

实际电路中，由于元器件等的寄生参数的影响，比如电容元件的寄生电感，电感元件的寄生电容以及 PCB 布局、布线的寄生参数，真实的共模噪声回路是很难得出的。其中一个主要寄生参数是 MOSFET 与其连接的散热器之间的电容 C_p，而散热器从安全角度考虑通常都是连接到地的，而且为了导热，MOSFET 与散热器之间的绝缘垫片很薄，这也使得 C_p 尤其大，故认为共模噪声主要途径是由交变电压作用在对地的寄生电容上这个回路中传播的。通过分析不难得知：当 $V_{AB}>V_1+V_2$，整流管 D_1、D_3 是导通的，如图 2 和图 3 所示，当 S_1 开通时，F 点电位被箝位为 V_c。通过 R_1、C_1、D_1、S_1、C_p 和 R_2、C_2、D_3、V_1、C_p 两条回路对 C_p 充电；当 S_2 开通时，F 点被箝位为 V_E，C_p 通过 S_2、D_3、C_2、R_2、C_p 和 S_2、V_1、D_1、R_1、C_p 进行放电；当 $V_{AB}<V_1+V_2$ 时，整流管 D_1、D_3 不可能同时导通，则 C_p 上的电压会随 S_1、S_2 的通断而波动，其充放电电流只会流经 D_1、D_3 的一个，有文献称这样引起的噪声为非固有差模噪声[2]，其会由于 A、B 间接入的 X 电容转化为共模噪声。

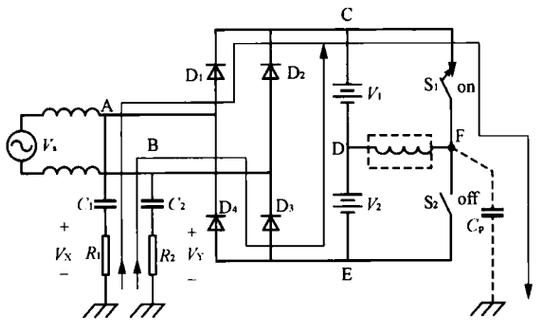


图 2 S_1 开通时的共模干扰路径

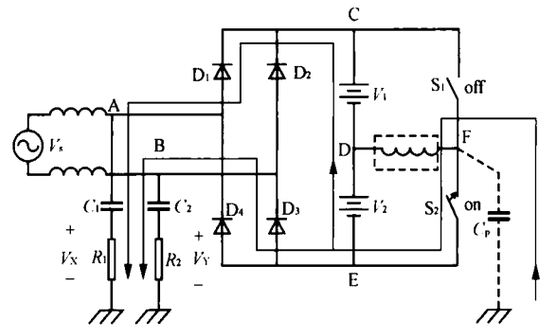


图 3 S_2 开通时的共模干扰路径

3 共模有源滤波器实验设计原理

Shikoski J. 提出了一种有源滤波器的原理拓扑[3]如图 4 所示，V_r 是高频噪声干扰源，通过 Z_{SENSE} 感应噪声电流 i_r，并通过反馈输出补偿电流 Ai_r，以此来抵消非线性负荷所产生的噪声电流，从而达到消除躁声电流的目的。图 5 为实验中的共模有源滤波器的基本原理图，它也是基于以上原理来设计的。一般 LISN 测得的传导干扰包含了共模和差模的 EMI，在实际应用中，差模干扰较易滤除，共模干扰往往成为传导干扰的瓶颈，因此图 5 中的输入滤波器用数个 0.47μF 的 X 电容并联在 L、N 线两端，这样可以基本滤掉差模干扰，在实验中着重共模 EMI 的抑制。电流互感器 L_{CM} 这里的作用是感应共模电流，它将高频噪声信号从电源端分离出来，并在 R_{IN} 两端产生高频的电压加在运放两端。这里 i_g 为被检测到的共模干扰电流，i_n 为开关电源中的共模干扰源，运放的作用是由输出电

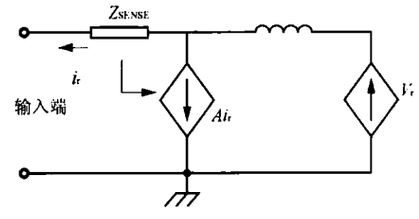


图 4 一种共模滤波器拓扑

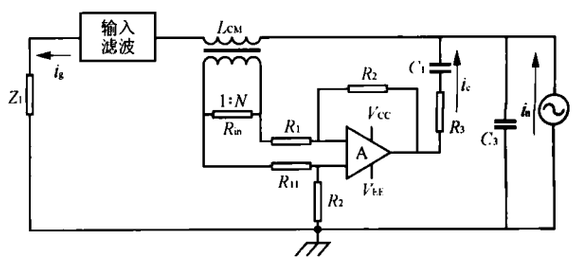


图 5 有源共模滤波器原理电路

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

压通过电容 C_1、电阻 R_3 产生电流 i_c 以补偿 i_n。C_1 将滤波电路与主电路隔离，其作用是对主电路中直流和低频的功率电流呈高阻抗，而对噪声的高频信号呈低阻抗。

4　实验设计

4.1　运算放大器的选择

在理想情况下，通过补偿 i_g=0，这需要 i_c=-i_n，在实际中往往由于运放的反馈网络不可能是无穷大，而且从稳定性考虑，高频情况下对环路增益折中选择。另外需选用频带较宽，响应速度快，对输入电压中的共模电压有较高的抑制并且能输出较大电流（电流幅值约 20 mA/120 dBμV[4]）的运放，这里选择运放为 TI 公司的 THS 系列中如 THS4001 或者 Fairchild 公司的 FHP3130、FHP3230、FHP3430 等。

4.2　电流互感器的设计

这里电流互感器采用环形磁芯结构，选取原副边匝比为 1:N，其中原边为一匝电源进线，这里需要电流互感器有一阶高频特性，其低频可等效为如图 6 所示，可以知道其下限频率为

$$f_L=Rl/(2\pi N^2\mu_0\mu_r A_e) \quad (2)$$

式中：A_e 为磁芯的有效截面积；

l 为有效磁路长度；

μ_r 为相对磁导率。

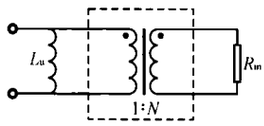


图 6　电流互感器低频等效电路

故要改善下限截止频率，可以增加副边绕组，增加磁芯有效截面积等来实现。

对于上限截止频率，提高电流互感器高频特性，只有尽量减小互感器的寄生参数的影响，如为了消除原、副边绕组间寄生电容对电流互感器高频特性的影响，对原边电流进线可采用屏蔽设置。

4.3　C_1 的选择

C_1 起到的是隔离直流偏置电源与主电路回路的作用，这里选择 Y1 型电容。

5　实验及结果分析

实验以一个半桥变换电路作为被测对象，实验环境为全屏蔽实验室。实验所用仪器为一台 LISN 和一台 SCR3501 型电磁兼容测量分析仪。被测物距地面高度为 0.8 m，距检测装置 LISN 水平距离 0.8 m，所有装置的外壳均可靠接大地。测得被测对象的传导 EMI 频谱如图 7、图 8、图 9 所示，均采用峰值检测频谱图中的两条准线，上面一条为欧盟传导标准 EN55022B，下面一条线为与之相

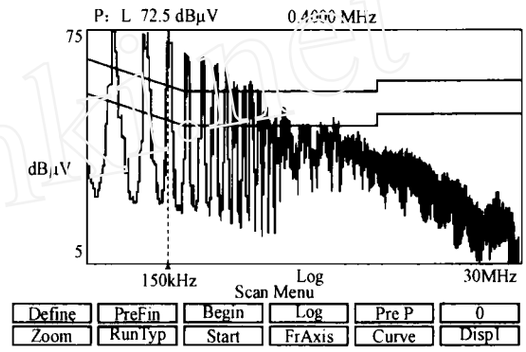


图 7　无滤波措施的共模噪声测量(峰值检测)

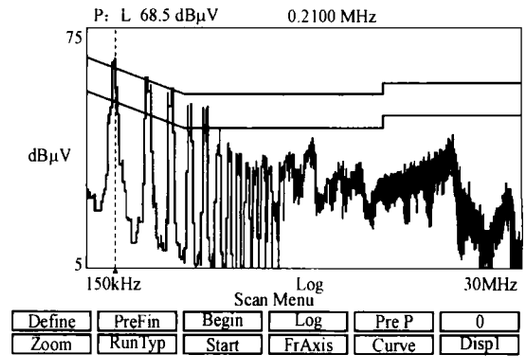


图 8　有源 EMI 滤波条件下共模噪声测量(峰值检测)

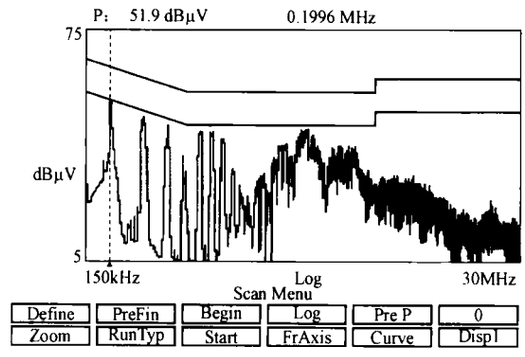


图 9　增加了无源环节的有源滤波条件下共模噪声测量(峰值检测)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

差10 dB表示裕量。图7为无任何EMI滤波措施时装置的频谱，噪声电流直接经分布电容流回交流电源侧，因此超标严重；图8为增加了有源滤波装置后共模噪声测量频谱，在全频段范围内均有大幅衰减，在较低频段(150 kHz~2 MHz)抑制略有不足，图8中标示在210 kHz这个点上仍然超出规定标准(该点处约64 dB)约3.5 dB。图9为有源与无源滤波电路相结合后所测得的噪声频谱，在有源滤波的基础上还增加了一个小的共模电感并增加了两个Y电容，此时150 kHz~1 MHz上的噪声明显衰减，全频带范围内噪声值均在下面一条准线以下，因此至少还有10 dB裕量。

6 结语

本文阐述了共模传导噪声的产生及其流动的回路以及测量的原理，并以此对有源滤波器的进行了分析与设计，在此基础上设计了实验电路，通过实验证明了该方案的可行性。可以得出以下结论。

(1)这种有源EMI滤波器能够对EMI的共模干扰起到类似无源元件构成的滤波器的滤波作用，通过实验证明，滤波器工作性能是稳定的，配合少量无源元件可以达到EMI检测合格标准。

(2)与传统的EMI滤波器相比较，该有源滤波器易于集成，这也是一种趋势，现在已经有用于DC/DC方面的集成有源EMI滤波器的成品，如PICOR公司的QPI-3，采用封装为1.0″×1.0″×0.2″SIP，能有效减少滤波器的体积和高度，且在很大程度上不依赖设计者的经验，这种利于集成和以实用为主导的技术思想也是开关电源EMI抑制手段的一种新思路。

参考文献

[1] Meng Jin, Ma Weiming, Zhang Lei, *et al*. Identification of Essential Coupling Path Models for Conducted EMI Prediction in Switching Power Converters [A]. *IEEE Industry Applications Conference (39th IAS Annual Meetings)*[C]. 2004,1832-1839.

[2] Qu Song, Chen Dan. Mixed-mode EMI Noise and its Implications to Filter Design in Offline Switching Power Supplies [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002,17(4):502-507.

[3] Shikoski J, Achkoski P., Itechkoska U. Active Filters for the Improvement of Electric Power Quality [A]. *IEEE 10th Mediterranean Electrotechnical Conference* [C]. 2000, 3:928-929.

[4] Dumas Jeff, Lanoue Bob, Tahhan Bishara. Active Analog Power Filters Provide Solutions for EMC & EMI [A]. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*[C]. 2004,2:675-680.

作者简介

陈立剑(1982-)，男，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。

熊　蕊(1956-)，女，教授，研究方向为电力电子装置及电磁兼容性研究。

吴　琼(1982-)，女，硕士研究生，研究方向为电力电子与电力传动。

(上接P50)

$N'=\sqrt{\frac{180}{366}}\times41=28.7$，取29匝。

调整后(匝数为29匝)实际测量出气隙为17 mm，感值为180 μH。

8 结语

磁芯元件的设计很复杂，要直接得到唯一的答案是很困难的，因为要涉及到很多因素，设计时应该根据理论分析和实践来逐步完善设计，最终得到一个符合工作要求的电感。

参考文献

[1] 赵修科. 实用电源技术手册磁性元件分册[M]. 辽宁科技技术出版社，2002.

[2] 刘振来，曹丰文，邓焰，何湘宁. 多路输出开关电源中变压器及电感设计[J]. 电气应用，2005,24(6):83-86.

作者简介

杨　帆，男，硕士研究生，研究方向为功率电子变换技术及航空电源。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net