

# 电力电子中的传导性 EM I 噪声源测量与分析

赵 阳<sup>1, 2</sup>, 陈 昊<sup>1</sup>, 尹海平<sup>2</sup>, 李世锦<sup>2</sup>, 姜宁秋<sup>2</sup>, 孙 焱<sup>2</sup>, See Kye Yak<sup>3</sup>

(1 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;

2 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042

3 南洋理工大学 电气与电子工程学院, 新加坡 639 98)

[摘要] 对传导性电磁干扰 (EM I) 噪声源的特性测量与分析作了初步研究, 对噪声源产生机理以及噪声源建模方法进行了对比分析, 分别讨论了谐振法、插入损耗法和双电流探头法等. 此外还采用双电流探头法进行了实际噪声源的内阻抗测定和建模分析, 分析结果与采用阻抗仪测得的结果基本吻合. 研究为传导性 EM I 滤波器设计提供了必要条件.

[关键词] 传导 EM I 噪声源阻抗, 测量

[中图分类号] TN43 [文献标识码] A [文章编号] 16 2-1292(200 ) 02-0001-05

## Measurement and Analysis of EM I Noise Sources of Power Electronic Equipments

Zhao Yang<sup>1, 2</sup>, Chen Hao<sup>1</sup>, Yin Haiping<sup>2</sup>, Li Shijing<sup>2</sup>, Jiang Ningqiu<sup>2</sup>, Sun Yan<sup>2</sup>, See Kye Yak<sup>3</sup>

(1 School of Information and Electrical Engineering China University of Mining Technology, Xuzhou 221008, China

2 School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China

3 College of Electrical and Electronic Engineering Nanyang Technological University, S' 639 98 Singapore)

**Abstract** In this paper, the research about measurement and analysis of conductive EM I noise source has been done. First, the EM I noise generation mechanism of noise source and comparison between various modeling approaches are analyzed. Then, some noise source modeling methods such as resonant method, insertion loss method and two current probe method are discussed respectively. Additionally, the internal impedance measurement and parameter extraction of practical noise source is implemented by using two current probe method. Result is basically agreed with the measurement result by using impedance analyzer. The study in this paper may offer some useful information for conductive EM I filter design.

**Key words** conducted EM I impedance of noise source, measurement

## 0 引言

电力电子设备作为电源与控制设备, 由于进行电能变换时的高效率而在许多行业得到了广泛的应用. 在电力电子设备为人类生产、生活带来巨大便利的同时, 因其开关工作方式, 使电磁兼容性能受到挑战. 一方面, 不良的电磁兼容性能不仅对外造成干扰, 影响其它设备的正常工作, 另一方面, 电力电子设备本身也会受到电磁干扰的影响, 使其可靠性下降. 如何降低电磁干扰, 提高电磁兼容性已成为迫在眉睫的问题. 传统的方法是采用滤波技术, 但是 EM I(电磁干扰)滤波器设计的必要前提是对电力电子设备 EM I噪声源的测量与分析, 本文详细介绍了电力电子设备 EM I噪声源的测量与分析.

## 1 EM I噪声源产生机理

电力电子设备产生的电磁干扰通过传导和辐射耦合到敏感设备. 在电力电子设备中, 传导是电力电子设备干扰传播的重要途径, 也是在电磁兼容技术中应着重考虑的.

收稿日期: 200 -04-20

基金项目: 中国博士后基金 (200403614) 和江苏省博士后资助计划基金 (苏人通 [2004] 300号) 资助项目.

作者简介: 赵 阳 (1966-), 教授, 博士, 主要从事电磁兼容方面的教学与研究. E-mail: zhaoyang@njnu.edu.cn

电力电子设备的干扰源主要集中在功率开关器件以及与之相连的散热器和高频变压器上,电力电子设备高功率密度、高电流/电压变化率的特点导致其 EM I问题特别严重。

电力电子设备中功率器件的快速通断产生了较大的  $dv/dt$ 和  $di/dt$ ,一方面在布线电感上产生了很大的尖峰电压  $L di/dt$  叠加在开关管两端,提高了开关管的电压应力;另一方面,由于电路中存在寄生参数,和  $dv/dt$ 、 $di/dt$ 相互作用产生了高频噪声电流,形成了很强的电磁干扰。

电力电子设备电磁干扰源的位置较为清楚,主要集中在功率开关器件、二极管以及与之相连的散热器和高频变压器上。另外印制板布线不当也是引起电磁干扰的一个主要因素。为了散热,功率器件 MOSFET 的漏极、源极和金属外壳之间有一个很薄的绝缘层,金属外壳和散热器紧紧贴在一起,由于安全原因和机械结构的考虑,散热器通常接地,这就使得 MOSFET 的漏极、源极和地之间存在寄生电容。当功率器件快速通断时,共模电流流过开关管对地的寄生电容。

当 MOSFET 关断时,高频变压器的漏感所产生的反电势  $E = -L di/dt$  其值与漏极的电流变化率  $di/dt$  以及漏感量成正比,叠加在开关管两端,形成关断电压尖峰,增大了  $dv/dt$

输出整流二极管对地存在寄生电容,当 MOSFET 通断时,共模电流流过输出整流二极管对地的寄生电容。另外当输出整流二极管截止时,二极管反向恢复电流在变压器漏感和其他分布参数的影响下将产生额外的高频噪声。

根据传导干扰方式的不同,可以把电磁干扰源分为共模(CM)和差模(DM)两种形式。它们产生的内部机理有所不同,共模干扰是指通过相线、对地寄生电容,再由地形成的回路干扰,它主要是由较高的  $dv/dt$ 与寄生电容间的相互作用而产生的高频振荡;差模干扰是指相线之间的干扰,直接通过相线与电源形成回路,它主要是由电力电子设备产生的脉动电流引起的。差模和共模干扰各自的回路,差模干扰电流为  $I_{DM}$ ,共模干扰电流为  $I_{CM}$ ,如图 1所示。

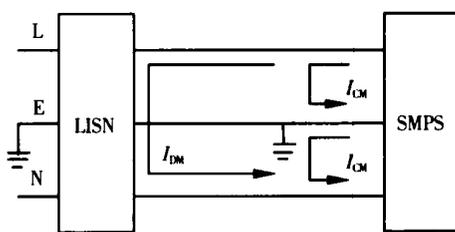


图 1 共模、差模电流的流向

Fig.1 Flow of common-mode and different-mode currents

## 2 传导 EM I噪声源建模分析

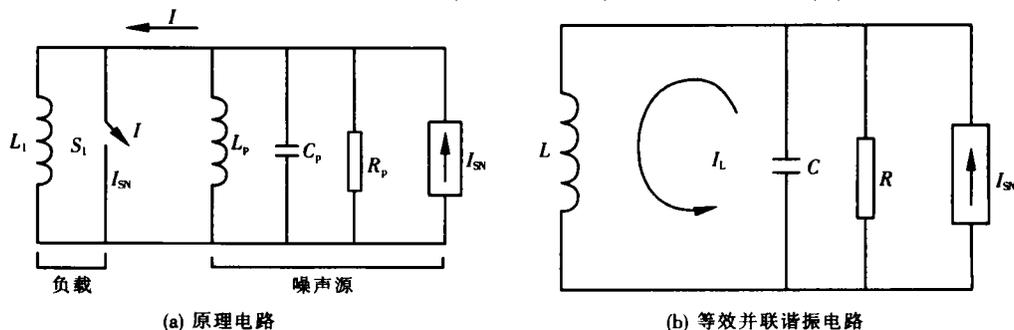
EM I滤波器是抑制电磁干扰的有效措施,但目前国内外进行 EM I滤波器设计时,事先并不知道噪声源的内部干扰源和阻抗,设计时往往忽略了噪声源的内阻抗,进行一种通用的 EM I滤波器设计。由于各噪声源的内阻抗并不相同,而干扰源阻抗和滤波器阻抗之间的匹配关系直接影响到滤波器的滤波效果,因此,准确估计电力电子设备内部阻抗对于电磁干扰的有效抑制有着重要意义。

目前噪声源阻抗测量主要有以下几种方法。

### 2.1 谐振法

谐振法通过加入电感器并使之与设备传导干扰的等效内阻抗发生谐振,从谐振频率和品质因数推知电磁干扰的等效阻抗。该方法的使用频率段窄( $\leq 1\text{MHz}$ )且实施起来很繁琐。具体原理如下:

若开关电源噪声源用诺顿等效电路表示,则(谐振测量的)原理电路如图 2(a)所示。



$L_p$ 表示变压器的分布电感; $C_p$ 表示开关管集电极与地之间的分布电容; $R_p$ 表示噪声源的等效内阻; $I_{SN}$ 表示噪声源的短路电流

图 2 谐振法测量原理图

Fig.2 Scheme of resonant method

为了测量开关电源噪声源等效电路的参数, 在其前端并入开关  $S_1$  和可调负载电感  $L_1$ , 如图 2(a) 所示. 如果将频谱分析仪的宽频电流探头插入源和负载之间, 则当  $S_1$  关闭时, 电流探头可测得噪声源流经  $S_1$  的短路电流  $I_{SN}$ , 当  $S_1$  打开, 调整  $L_1$  使整个回路谐振时, 电流探头可以测得流过  $L$  的谐振电流  $I_L$ , 注意这里  $L$  是  $L_1$  和  $L_P$  的等效电感, 并等效为图 2(b) 所示的并联谐振电路, 其  $Q$  值为:

$$Q = \frac{|I_L|}{|I_{SN}|} \quad (1)$$

式中,  $Q$  是谐振回路的品质因素. 又因为

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} \quad (2)$$

式中,  $\omega_0$  为谐振角频率;  $L$ 、 $C$  为回路的等效电感和等效电容;  $R$  为回路等效电阻.

若已知  $\omega_0$ 、 $L$ 、 $Q$  值,  $R$  值便可以算得, 由此可进一步推论: 若调整可调电感  $L_1$  可实现整个回路谐振, 则可确定噪声源为电容性负载, 其值可由式 (2) 算得; 若噪声源为电感性负载, 图 2(a) 中的负载应改为开关  $S_1$  和可调电容  $C_1$ , 同样调整  $C_1$  使整个回路谐振时, 便可由式 (2) 算得噪声源的等效电感值, 以上便是用谐振法实测噪声源等效参数的基本原理.

### 2.2 插入损耗法

插入损耗法通过并入一个已知的电感, 由插入损耗曲线得出设备传导干扰等效内阻抗的幅频特性曲线.

如图 3 所示, 如果在  $Z_s$  和  $R_{load}$  之间加上滤波器 (图中  $Z_{series}$  或  $Z_{shunt}$ ), 通过  $R_{load}$  的噪声电压将会减小. 这种变化定义为插入损耗:

$$A = 20 \log \frac{V_{\text{负载 (不含滤波)}}}{V_{\text{负载 (含滤波)}}} \quad (3)$$

从测得的插入损耗和滤波器阻抗, 可直接计算噪声源阻抗的幅值  $|Z_s|$

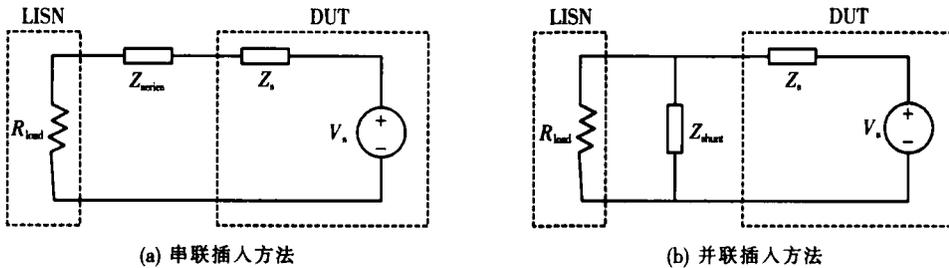


图 3 插入损耗方法

Fig.3 Insertion loss method

该方法具有较好的理论基础, 但同样存在阻抗相位测量精度低、未能提取出有效等效电磁干扰源的信息、适用频段窄的缺点.

### 2.3 改进的插入损耗法

该模型参数估计法在 LISN 和设备之间引入已知阻抗特性的滤波元件 (串联或者并联), 通过考查 LISN 端口干扰电压和电流的变化关系计算出等效噪声源和内阻抗. 以差模噪声源和内阻抗的估计方法为例:

首先将设备以浮地方式消除共模干扰的影响, 由图 4 所示, 当并联上阻抗  $Z_{shunt}$  后, 在 LISN 侧等效噪声负载变为  $Z_{D1} = Z_{shunt} // Z_N$ .

选取一个阻抗  $Z_{shunt1}$ , 满足关系式  $|Z_{shunt1}| \gg |Z_N|$ , 可得:

$$Z_{D1} = Z_{shunt1} // Z_N \approx Z_N, \quad (4)$$

$$V_{DM1} = Z_{D1} I_{DM1} = \frac{Z_{D1} V_{SDM}}{Z_{SDM} + Z_{D1}} \approx \frac{Z_N V_{SDM}}{Z_{SDM} + Z_N} \approx V_{SDM}. \quad (5)$$

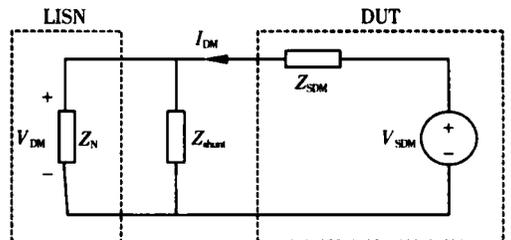


图 4 利用并联插入阻抗方法估计差模模型

Fig.4 Different-mode model estimation using paralleling inserted impedance

选取另外一个阻抗  $Z_{shun2}$  满足关系式  $|Z_{shun2}| \ll |Z_{SDM}|$  那么可得

$$Z_{D2} = Z_{shun2} / Z_N \approx Z_{shun2}, \tag{6}$$

$$I_{DM2} = \frac{V_{SDM}}{Z_{SDM} + Z_{D2}} \approx \frac{V_{SDM}}{Z_{SDM} + Z_{shun2}} \approx \frac{V_{SDM}}{Z_{SDM}}, \tag{7}$$

则有:

$$Z_{SDM} \approx \frac{V_{SDM}}{I_{DM2}}. \tag{8}$$

将式(5)代入式(8)得

$$Z_{SDM} \approx \frac{V_{DM1}}{I_{DM2}}. \tag{9}$$

这里, 差模噪声源  $V_{SDM}$  可由直接测试的差模噪声电压  $V_{DM1}$  获得, 差模内阻抗  $Z_{SDM}$  的数值则由  $V_{DM1}$  除以  $I_{DM2}$  得到. 但该方法忽略了相位信息.

### 2.4 双电流探头法

该测定方法采用两个电流探头, 一个作为注入式探头, 另一个作为检测式探头, 通过仔细地校准和测试, 可以分别得到开关电源在 EMC 规定范围的各项频率点的 CM、DM 阻抗, 并且具有较好的精度.

如图 5 所示, 双电流探头法测试的实验装置包括了一个注入式电流探头、一个检测式电流探头、一个信号发生器和一个频谱分析仪. 要测量的未知阻抗以  $bb'$  端的阻抗  $Z_X$  来表示. 信号发生器输出一正弦波信号  $V_w$  注入到注入式电流探头, 于是电路中就会产生  $I_w$  的电流, 频谱分析仪可以检测到  $I_w$  对检测式电流探头的作用结果. 通过信号发生器不同频率点输出的调节, 就可以在检测式电流探头端获取不同频率点的值.

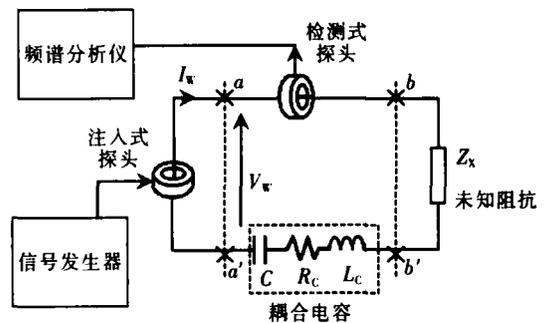


图 5 双电流探头法实验

Fig.5 Experiment of two current probe method

电流探头法原理如图 6 所示, 其中,  $aa'$  端的注入式电流探头可以用等效的电压源  $V_{M1}$  和电压源内阻抗  $Z_{M1}$  代替,  $Z_{M2}$  是由于检测式电流探头而存在的互感,  $Z_C$  为耦合电容阻抗. 令  $Z_{in} = Z_{M1} + Z_{M2} + Z_C$ , 则未知阻抗  $Z_X$  可以用下式表示:

$$Z_X = \frac{V_{M1}}{I_w} - Z_{in}. \tag{10}$$

假定信号发生器输出保持不变, 通过选取 3 种电路状态, 即短路、标准电阻和开关电源实际负载状况下的电流测量值, 其中要求已知的高精度标准电阻满足  $R_{std} \gg |Z_{in}|$ , 则最后可得噪声源内阻抗为:

$$Z_S = \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_S=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_S=SMPs}} - \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_S=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_S=0}}. \tag{11}$$

式中,  $V_P$  为电流探头线圈上的感应电压值.

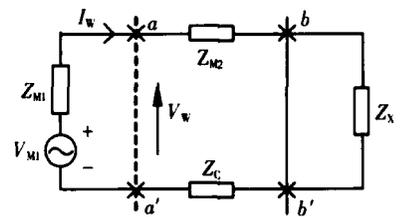


图 6 双电流探头法等效原理图

Fig.6 Equivalent circuit of two current probe method

### 3 测量实验结果

本文基于电流探头法对 EM I 噪声源内阻抗进行了验证. 实验装置如图 7 所示, 其中两个  $1\mu F$  的电容分别接在 L-E 线和 N-E 线之间, 为使该电路的  $Z_{in}$  可重复进行测量并尽量保持恒定, 该两电容必须固定在印刷电路板上, 同时注入式和检测式电流探头在电路板上也必须有其固定位置. PCB 与测试设备间的连线必须尽可能的短, 以减小导线布局引起的寄生效应. 这种位置固定的测试, 其优点是一旦电路校准后, 测得的  $Z_{in}$  不但适用于 CM 测试, 同样也适用于 DM 测试, 可大大提高测试的速度.

验证实验如下. 取已知阻抗的电路元件作为被测试件进行测试. 将信号发生器输出信号输入到注入式电流探头, 有一导线穿过两个电流探头与待测阻抗构成回路, 检测式电流探头通过耦合将感应到的信号输

入至放大器进行放大, 而后送入频谱仪进行检测. 测试结果如图 8 所示. 图中虚线由高频阻抗仪 (电子部 41 所生产的 AV2 82 型) 测量结果, 实线是通过双电流探头法测量和分析后得到的结果, 发现阻抗仪测得结果与实验测得结果吻合较好. 这说明电流探头法测试精度较高, 可以用于噪声源内阻抗测量.

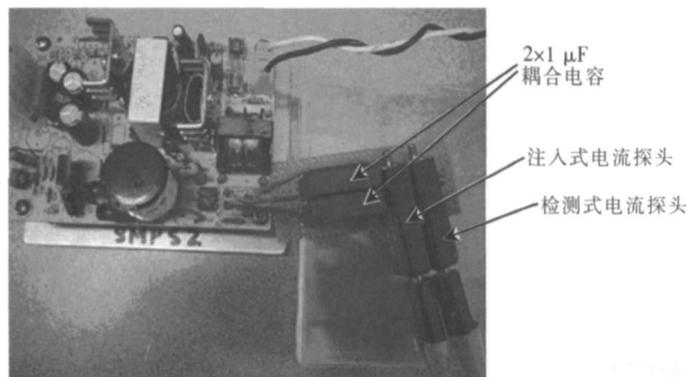


图 7 双电流探头法实验

Fig.7 Experiment setup of two current probe method

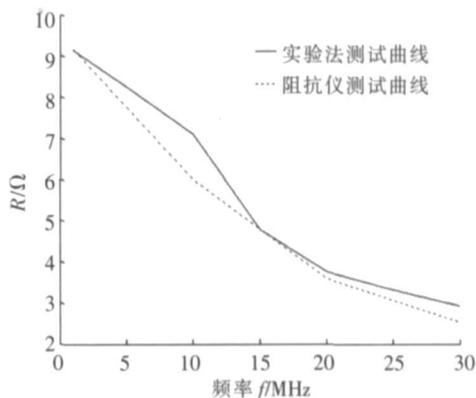


图 8 测试与阻抗分析间的结果比较

Fig.8 Results comparison between measurement and impedance analyzer

## 4 结论

电力电子设备由于电磁兼容性能差而影响了其广泛应用, 因此提高 EMC 性能, 降低电磁干扰就显得十分重要, 而其中 EM I 传导噪声滤波是有效方法之一, 特别是 EM I 噪声源的测定与分析是设计 EM I 滤波器的前提条件. 本文详细分析了电力电子设备中传导电磁干扰噪声产生的机理, 然后分析讨论了几种主要 EM I 噪声源建模和测量方法, 同时采用双电流探头法进行了验证实验并实际测量了噪声源内阻抗, 结果较满意. 通过本文开展的噪声源建模研究, 能准确地反映装置内传导干扰特性, 有利于帮助设计人员认清传导干扰的性质, 指导 EM I 滤波器的设计, 从而降低装置对外传导干扰发射, 达到 EMC 国际标准.

### [参考文献] (References)

- [1] Lon M Schneider Noise source equivalent circuit model for off-line converters and its use in input filter design[C] // Proc IEEE EMC Symp 1983 16 - 15.
- [2] Kye Yak See, Deng Junhong Measurement of noise source impedance of SMPS using a two probes approach[J]. IEEE Trans on Power Electronics 2004, 19(3): 862- 868.
- [3] Zhang D, Chen D, Nave M J et al Measurement of noise source impedance of off-line converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics 2000 15(5): 820- 825.
- [4] 孟进, 马伟明, 张磊, 等. 设备传导电磁干扰集中等效模型参数估计方法 [J]. 电工技术学报, 2005, 20(6): 25- 29. Meng Jin, Ma Weiming, Zhang Lei et al Parameter estimation method of equivalent model for conducted EM I problem [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(6): 25- 29. (in Chinese)
- [5] 和军平, 姜建国, 陈斌. 电力电子设备传导电磁干扰特性测量的新方法 [J]. 电力电子技术, 2001, 35(8): 32- 35. He Junping, Jiang Jianguo, Cheng Bin. New measurement method of conducted EM I performance for power electronic equipment [J]. Power Electronics 2001, 35(8): 32- 35 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]