

传导性电磁兼容关键技术研究

赵 阳<sup>1,2</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. 新加坡国立南洋理工大学 电气与电子工程学院, 新加坡 639798)

[摘要] 随着各种电子产品的广泛问世,大量的传导性电磁兼容问题不断出现且尚未得到很好地解决. 针对传导电磁兼容中的一些关键技术进行了系统研究,包括通过对传导 EM I噪声分离技术对比分析,进行了 EM I噪声诊断实验与仿真研究,并提供了噪声抑制与滤波器设计方案;为得到有效的噪声抑制效果,介绍采用双电流探头和希尔伯特变换获取噪声源内阻抗信息;并提出了基于技术与经济一体化的传导电磁兼容决策阐述建模,还给出了 EM I噪声抑制及噪声源内阻抗测定的相关实例,以验证方法的有效性.

[关键词] 传导电磁兼容,电磁干扰噪声诊断与抑制,噪声源建模,决策参数建模

[中图分类号] TN43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2007)04-0001-07

Study of Key Techniques in Conducted EMC

Zhao Yang<sup>1,2</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. College of Infomation and E lectrical Engineering ChinaU niversity ofM iningTechnology, Xu Zhou 221008, China  
2 School of Electrical and Automation Engineering Nanjing Nom alUniversity, Nanjing 210042, China  
3 College ofElectrical and E lectronic Engineering Nanyang Technology University, Singapore 639798 Singapore)

**Abstract** With the devepment and come out of various kinds of electronic products, a lot of problems about conducted EMC have appeared but haven't been perfectly solved yet. This paper makes a systematic study on some key techniques in conducted EMC, including a contrastive analysis of conducted EM I noise separation techniques, conducting a diagnostic experiment and simulation study of EM I noise, providing a design plan of noise suppression and filters. In order to get an effective result of noise suppression, the paper introduces the way of obtaining impedance information of noise source with two probes approach and hilbert transform, suggests a decision making model built based on combination of technic and economy, and illustrates the validity of the method with the examples of EM I noise suppression and measurement of noise source impedance.

**Key words** conducted EMC, EM I noise diagnosis and suppression, noise source modeling, decision parameters modeling

0 引言

电磁干扰 (EM I)噪声发射的测量和抑制一直是电机设计和制造过程中必需考虑的一个重要问题<sup>[1, 2]</sup>. 目前国际上规定的传导性电磁干扰测量设备是线阻抗稳定网络 (line impedance stabilization network, LISN), 其测量得到的是包含共模 (CM)和差模 (DM)的混合噪声信号. 然而, 由于共模和差模噪声源产生机理不同, 其滤波器设计方法也各不相同, 因此必须考虑将这两种模态噪声进行分离. 另一方面, 作为干扰噪声抑制的重要手段之一, 即 EM I滤波器设计目前也缺乏较优化方案. 特别在滤波器与噪声源阻抗匹配

收稿日期: 2007-04-17  
基金项目: 中国博士后科学基金 (2004036147)资助项目、江苏省博士后科学基金 (苏人通 [2004] 300 号)资助项目和南京 师范大学优秀  
青年教师教学科研奖励计划 (宁师人 [2005] 43 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: zhao yang2@ njnu. edu. cn

方面, 由于对噪声源内部 EM I 特性研究尚未深入, 直接给出噪声源内阻抗信息还较困难, 由此将可能直接影响 EM I 滤波器的噪声抑制效果. 除此之外, 在传导性 EM I 噪声处理中, 通常对技术指标是否达标很重视, 然而对相关电磁兼容方案的经济成本却考虑较少, 缺乏能同时体现技术与经济特征的综合设计指导方法.

针对以上问题, 本文对传导电磁兼容若干关键技术进行了研究. 首先对传导性 EM I 的噪声诊断与噪声抑制做了更深入探讨; 其次提出将电流探头与希尔伯特变换法结合进行 EM I 噪声源内阻抗测定方法, 以实现滤波器设计中的阻抗匹配; 此外, 还提出了基于技术与经济一体化架构下的传导电磁干扰噪声处理系统决策参数建模, 将电磁兼容技术参数处理与经济参数有机结合, 提高解决方案的综合性性价比; 最后给出了若干实验结果, 从而验证文中方法的有效性.

## 1 传导 EM I 噪声诊断系统研究

### 1.1 传导性 EM I 噪声分离技术对比分析

线性阻抗稳定网络 LISN<sup>[3]</sup> 是用来测量电子器件产生的传导性电磁干扰的标准网络, 它在射频范围内向被测设备提供一个稳定的 50Ω 阻抗, 并将被测设备与电网上的高频干扰隔离开, 然后将干扰电压耦合到接收机上. 原理如图 1 所示. 在单相三线 ( 火线、中线和地线 ) 系统中, 噪声电流共包括两部分: 其中差模电流从火线流出到中线, 共模电流经火线和中线回到地线. 美国 Paul<sup>[4]</sup> 首先提出了一种分离网络, 即采用一个带中心抽头且变比为 1: 1 的射频变压器作为分离网络的核心, 但该网络只能测量单模态信号, 且因引入机械开关可能带来网络不平衡性. 其后新加坡 See<sup>[5]</sup> 又设计出另一种噪声识别网络, 既可以同时提供具有 CM /DM 模态信号分离电路, 也避免了采用机械开关所带来的不利影响. 更进一步, 法国 Mard guain<sup>[6]</sup> 也给出了一种更简单的分离网络, 它仅使用一个变压器就能达到 CM /DM 同时分离输出的特性. 由于这些电路均采用变压器作为核心分离器件, 因此在高频条件下因杂散效应将产生较明显的模态信号抑制性能退化的现象. 与变压器方案不同, 另一种分离网络后由美国 Guo<sup>[7]</sup> 提出, 它采用 0° /180° 功率混合器取代变压器作分离器件, 实现 CM 和 DM 的模态分离和输出. 尽管采用功率混合器可以使干扰模态信号的分离性能得到很大改善, 尤其在高频条件下性能更稳定, 但由于器件的价格较射频变压器高很多倍, 因此受经济成本影响也一定程度限制其推广使用.

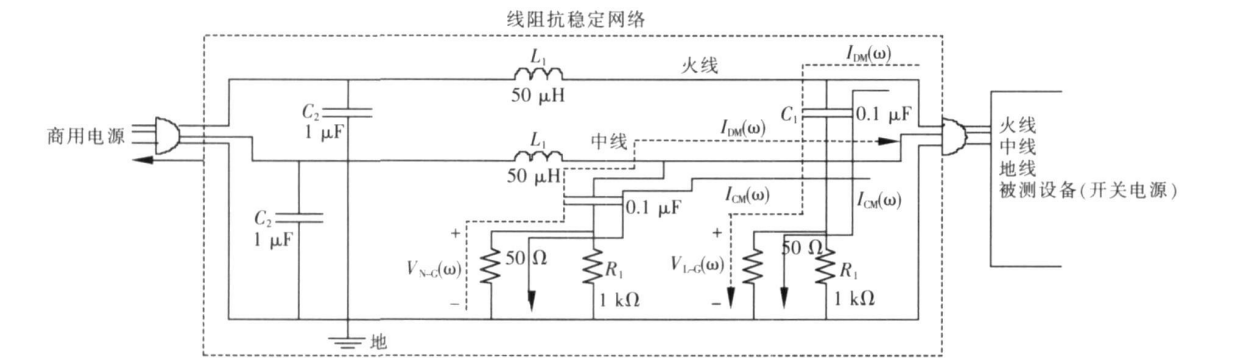


图 1 用于传导性电磁干扰测量设备 LISN 原理  
Fig.1 Principle of conducted EMI measurement equipment LISN

根据图 1, 噪声分离公式如下:

$$V_{CM} = \frac{1}{2} (V_{Phase} + V_{Neutral}), \tag{1}$$

$$V_{DM} = \frac{1}{2} (V_{Phase} - V_{Neutral}), \tag{2}$$

可见, 无论噪声分离网络硬件形式如何, 其原理均为实现火线和相线上噪声电压的矢量加和矢量减功能. 另一方面与硬分离技术相比, 借助数值计算功能来实现模态信号软分离的技术近来亦有报道. Lo<sup>[8]</sup> 提出

将通过单模态硬件分离网络输出的 CM 或 DM 信号再输入到计算机中, 然后根据 LISN 检测到的某相线上混合干扰信号和前置单模分离网络得到的单模信号通过一定计算, 最终得到另一个模态干扰信号. 虽然 Lo 网络实现了软分离, 但事实上由于算法中需要事先得到其中一个单模信号作为输入量, 因此仍需要使用单模硬件分离网络做支撑, 所以该方法只能称为半软分离方法, 且由于噪声采集的非同步性, 也会带来较大的相位计算误差.

图 2 为本文研制的部分基于射频变压器和  $0^{\circ}/180^{\circ}$  功率混合器等核心器件的 EM I 噪声分离网络, 其性能参数为: 最大插入损耗  $1\sim 5\text{ dB}$ , 最小共模抑制比/差模抑制比 (CMRR/DMRR) 为  $25\sim 40\text{ dB}$ .

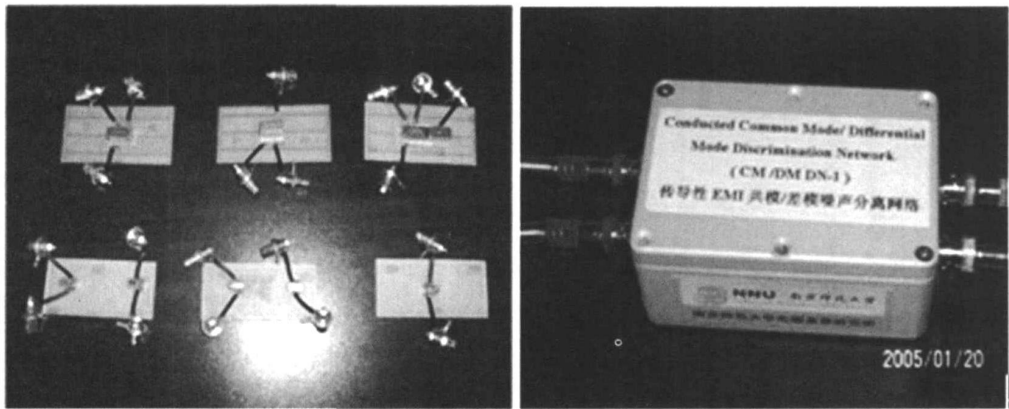


图 2 传导性 EMI 噪声分离网络  
Fig.2 Conducted EMI noise separation network

1.2 EM I 噪声诊断实验

为对比上述分离网络性能, 本文分别进行了实验和仿真研究, 得到了共模插损 (CM IL)、差模插损 (DM IL)、共模抑制比 (CMRR) 和差模抑制比 (DMRR). 实验原理如图 3 所示, 其中人工噪声源由高频信号发生器 (HP 8753C 网络分析仪) 和  $0^{\circ}/180^{\circ}$  分相器 (Mini-Circuit 公司产品) 组成, 用来提供模拟的共模和差模 EM I 噪声, 作为噪声分离网络的输入信号, 而来自分离网络输出端的模态噪声则被输入到 EM I 接收器中 (HP 85047A 散射参数测量仪) 进行噪声观测和诊断.

以差模抑制比 (DMRR) 特性为例发现 (如表 1 所示), 基于功率混合器的 Guo 网络具有最佳差模抑制特性, Pauli 和 Mardiguian 网络性能有较大差距, 而 See 网络性能最低. 其它参数特性实验测量结果同前类似, 同时, 基于 Spice 的电路仿真也可得到相同结论.

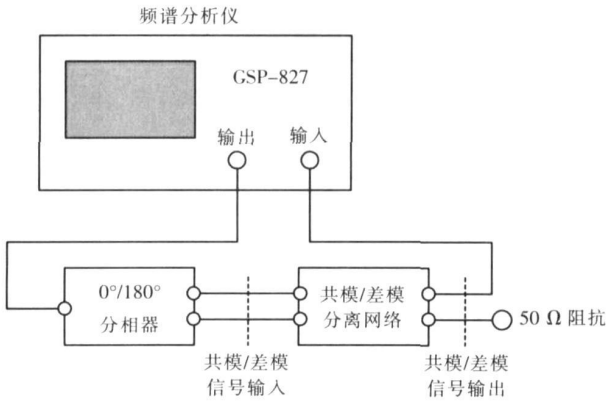


图 3 EMI 噪声分离网络特性测试的原理

Fig.3 Principle of testing EMI noise separation network characters

表 1 几种传导性噪声分离网络 DMRR 特性实验结果

Table 1 Testing results of DMRR characters of several conducted noise separation networks (单位: dB)				
频率/ MHz	See 网络	Paul 网络	Mardiguian 网络	Guo 网络
$f=1$	50	62	65	85
$f=5$	36	47	48	73
$f=10$	30	37	40	62
$f=20$	22	28	30	50
$f=30$	21	25	27	43

从实验曲线可以看出, 随着频率的增加, 插入损耗呈现下降趋势, 但插损变化通常不大, 最佳值小于  $1.5\text{ dB}$ , 最大值可达  $5.2\text{ dB}$ . 另一方面, 电路仿真说明理论和实验结果吻合较好. 因此当测试条件有限时,

亦可通过电路仿真方法代替实验进行噪声分离网络的特性研究.

1.3 EM I噪声诊断实例

该系统由线阻抗稳定网络 LISN、商用开关电源 (AC/DC, 24V 输出, 额定功率 960W)、负载盘 (3 个可串 并联的电阻盘, 最大 500W)、噪声分离网络及频谱分析仪构成.

实验结果如图 4 所示. 由图可知, 在不同频率段共模噪声和差模噪声各自占据主导地位, 总噪声可近似为两种不同噪声模式分量在整个频率段上的叠加. 比较而言, 共模噪声分量在噪声幅值和频率分布上对总噪声构成的影响更大, 该系统传导性电磁干扰噪声主要集中在中低频段. 可以看出, 传导电磁干扰噪声分离网络可以有效地进行噪声诊断, 效果良好, 这将为噪声抑制和电磁兼容解决方案提供有益帮助.

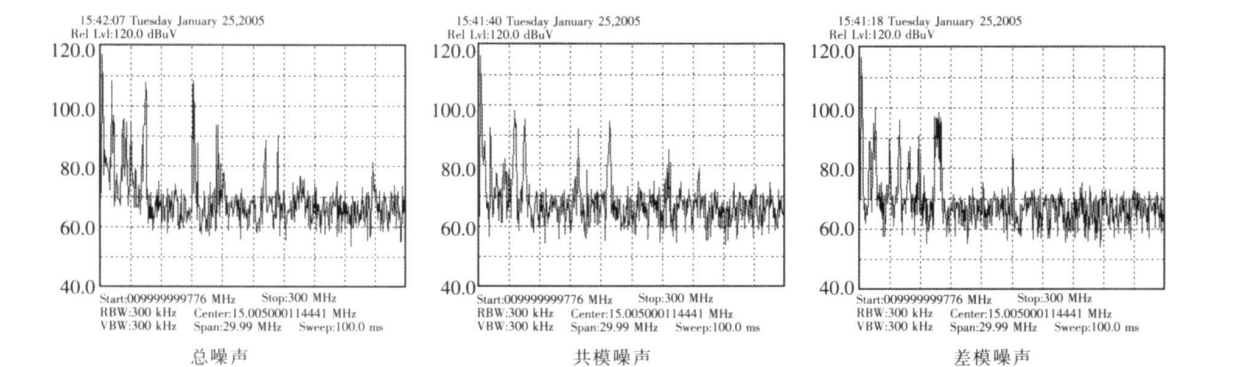


图 4 噪声诊断后总噪声,共模噪声,差模噪声  
Fig.4 Total, CM, DM noise after diagnosis

2 传导 EM I噪声抑制

2.1 噪声抑制与滤波器设计

电力电子装置产生的电磁噪声通过传导耦合产生的噪声电平,可以通过滤波电路使之减小到可以接受的水平,这类滤波电路统称为 EM I滤波器.

EM I滤波器设计过程基本分为 5 个步骤:

(1) 确定共模、差模干扰源阻抗. 干扰源阻抗和电力电子设备的拓扑结构有关, 根据干扰源阻抗测量方法可以获得其阻抗. 为简单起见, 共模干扰源可以认为是开关管与散热器之间的寄生电容, 差模干扰源阻抗主要依据电路拓扑而定.

(2) 确定负载阻抗. 滤波器设计时, 传导 EM I测试负载阻抗为 LISN 阻抗, 对于差模而言其阻抗为 100 Ω, 共模为 25 Ω.

(3) 分别确定差模干扰、共模干扰需要的衰减量. 衰减量由下述式 (3)、式 (4)确定, 式中  $A_{DM}$ 、 $A_{CM}$  分别为差模、共模干扰的衰减量,  $N_{DM}$ 、 $N_{CM}$  分别为测量的差模、共模干扰,  $L_{in it}$  为标准限值. 由于传导干扰测试最终结果是差模、共模干扰之和, 因此所需的衰减量应加上 6 dB 安全阈值.

$$A_{DM} \text{ (dB)} = N_{DM} \text{ (dB)} - L_{in it} \text{ (dB)} + 6 \text{ (dB)}, \tag{3}$$

$$A_{CM} \text{ (dB)} = N_{CM} \text{ (dB)} - L_{in it} \text{ (dB)} + 6 \text{ (dB)}. \tag{4}$$

(4) 分别确定差模、共模滤波器的转折频率及元件参数. 在所需衰减量的第一个峰值点做一条斜率为  $20n \text{ dB/10倍频程}$  的直线 ( $n$  为滤波器阶数), 要保证所有频率下的衰减量都在直线下方. 直线与频率轴交点即为转折频率, 根据转折频率进而确定滤波器元件参数.

(5) 实验验证. 如果滤波器达到干扰抑致要求, 则设计过程结束. 如果低频段不能满足要求, 则重新设计滤波器参数. 如果滤波器高频段不能满足要求, 则要考虑滤波器寄生参数以及近场耦合的影响.

2.2 噪声诊断与抑制智能系统研究

图 5 是噪声诊断与抑制智能系统结构图, 在主测量装置的输出端获取被测设备 (EUT) 的 EM I噪声

后, 输入到共模 / 差模噪声分离网络进行噪声模式分离, 而后由诊断软件对从频谱分析仪传送到计算机上的信号进行分析和处理. 该智能系统不仅可利用硬件提供独立的共模及差模分量, 同时也利用软件为滤波器设计提供有益的诊断信息. 智能系统软件主要功能如下: EM I噪声模式与总噪声测量、依据 FCC 或 CIS-PR 的测量结果分析、EM I滤波器设计、EM I噪声抑制结果预测、电磁兼容测试报告等.

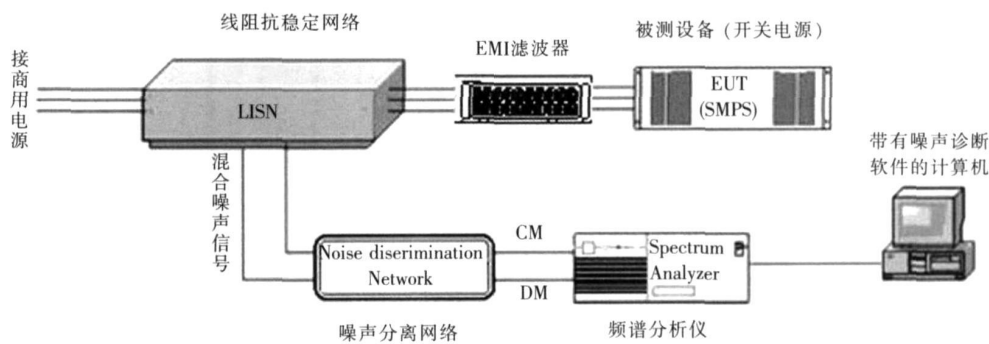


图 5 传导性 EMI 智能测试系统示意图  
Fig.5 Schematic diagram of conducted EMI intellectual test system

3 EM I噪声源内阻抗测定与建模

EM I滤波器是抑制电磁干扰的主要措施, 其噪声抑制能力通常用插入损耗 ( Insertion Loss)来衡量, 即未接入滤波器时从噪声源传输到负载的功率  $P_1$  和接入滤波器后噪声源传输到负载的功率  $P_2$  之比, 用 dB 表示. 由于干扰源内阻抗  $R_s$  和负载阻抗  $R_L$  以及滤波器本身阻抗之间的匹配关系直接影响到滤波器的滤波效果, 因此能否准确估计噪声源内部阻抗  $R_s$  对于电磁干扰有效抑制具有重要意义. 需要指出, 上述噪声源内阻抗实际同时包括共模和差模两种不同性质阻抗的测定.

3.1 插入损耗法测定噪声源内阻抗

该方法通过并入一个已知的电感, 由“插入损耗”曲线得出变换器传导干扰等效内阻抗的幅频特性曲线.

如图 6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:

$$A = 20 \lg \frac{V_{load\ without\ filter}}{V_{load\ with\ filter}} \tag{5}$$

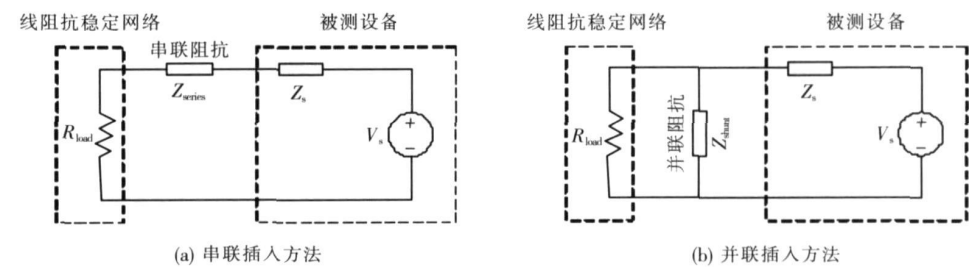


图 6 通过插入损耗方法得到  $|Z_s|$   
Fig.6  $|Z_s|$  after insertion method

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  $|Z_s|$ . 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.

3.2 双电流探头法

该方法采用两个电流探头 (泰克公司 CE01 注入式和 CE02 有效频率 10 kHz~ 100MHz), 实验装置如图 7( a) 所示, 其包括注入式探头、检测式探头、射频信号源和频谱仪. 待测未知阻抗位  $Z_x$  于  $bb'$  端. 两电流探头和耦合电容以及未知阻抗构成测试回路. 以开关电源为例其 CM、DM 内阻抗测试方案如图 7( b)、( c) 所示. 通过输入不同频率点信号 ( 10 kHz~ 30MHz ), 由频谱仪测得检测电流探头.

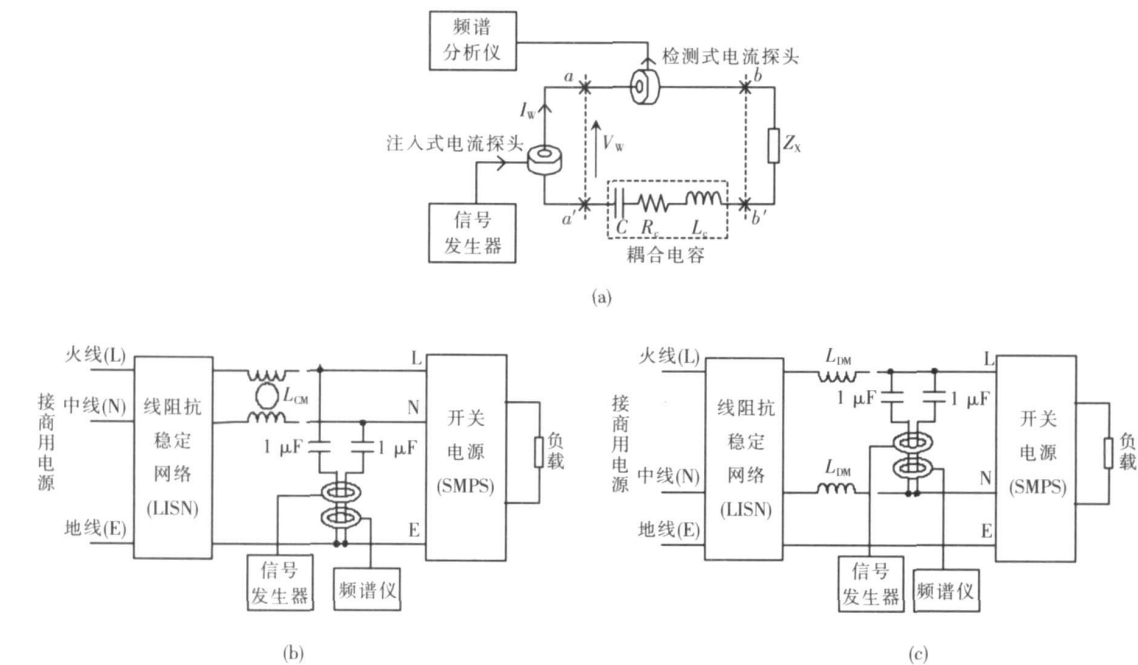


图 7 噪声源内阻抗的电流探头测量及 CM、DM 测量原理  
Fig.7 Two current probes measurement of noise source impedance and CM、DM measure principle

由等效电路分析得知, 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, 最后可得噪声源内阻抗为:

$$Z_s = \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_s=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_s=SMPS}} - \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_s=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_s=0}}, \tag{6}$$

其中,  $V_P$  为电流探头线圈上的感应电压值. 由式 (6) 得到的幅频特性, 再根据连续波的 Hilbert 变换原理<sup>[9]</sup>:

$$\angle Z_s(\omega) = \frac{2}{\pi} \int \frac{|Z_s(\xi)| - |Z_s(\omega)|}{(\xi + \omega)(\xi - \omega)} d\xi, \tag{7}$$

即可同时得到噪声源内阻的幅频和相频特性, 最终分别得到噪声源的内共模阻抗和内差模阻抗, 从而可以大大提高 EMI 滤波器的噪声抑制效果. 需要指出, 直接采用单电流探头用于噪声源内阻估计的研究也已取得进展, 有关内容将在后文发表.

3.3 噪声源内阻抗测定实例

测定方法如前所述, 将在测量电路处于接已知阻抗、短路和开关电源正常工作 3 种状况下进行测试, 分别测定开关电源 (噪声源) 的内部共模阻抗和内部差模阻抗. 首先选两个已知阻值的电阻作为被测阻抗进行原理性测试, 发现用电流探头法测量与用阻抗分析仪测得的结果基本一致, 误差小于 5%, 说明本文采用电流探头法的测试精度较高, 可以用于噪声源内阻抗测量. 实际内阻抗测试结果发现, 噪声源共模内阻抗随着频率增高而减小, 呈容性负载; 另一方面, 差模内阻抗随着频率增高而增大, 呈感性负载. 至此, 在

得到噪声源的共模/差模内阻抗后,进行相应的EMI噪声滤波器设计,就可以大大改善滤波器的滤波特性,并可节约经济成本.

## 4 结论

本文对传导性电磁兼容若干关键技术进行了研究,包括噪声诊断、抑制、噪声源内阻抗测定等内容.结果表明,本研究可以进一步改善传导EMI噪声诊断与抑制效果,对提高EMC解决方案的综合效果有积极意义.

### [参考文献] (References)

- [1] Chen Haq, Su Tao. Control of the switched reluctance motor drive at four quadrants based on intel 87C196KC single chip microprocessor[J]. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B, 2005(Supplement): 306–311.
- [2] Chen Haq, Zan Xiaoshu. Control of the double switched reluctance variable speed wind power generators parallel system [J]. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems Series B, 2005(Supplement): 301–305.
- [3] Zhao Yang, See Kye Yak. Performance study of CM/DM discrimination network for conducted EMI diagnosis[J]. Chinese Journal of Electronics, 2003, 12(4): 205–208.
- [4] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 33(4): 195–203.
- [5] See K Y. Network for conducted EMI diagnosis[J]. Electronic Letters, 1999, 35(17): 1446–1447.
- [6] Maréguan M, Rainbourg J. An alternative, complementary method for characterizing EMI filter[J]. IEEE International Symposium on EMC, 1999(2): 882–886.
- [7] Guo T, Chen D Y. Separation of the common mode and differential mode conducted EMI noise[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 259–263.
- [8] Lo Y K. A software-based CM and DM measurement system for conducted EMI[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 253–255.
- [9] Frédéric M Tesche. On the use of Hilbert transform for processing measured CW data [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1992, 34(3): 310–314.

[责任编辑:刘 健]