

# 传导电磁干扰噪声分离网络性能的理论研究

赵 阳, 姜宁秋, 孙 焱, 李世锦, 陆婉泉

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出了传导性电磁干扰噪声分离器网络的基本要求, 介绍了几种主要的基于硬件的分离网络结构. 利用 PSPICE 仿真软件重点对其中 3 种网络的性能进行了研究. 首先对网络的基本性能进行了对比, 进一步利用高频 LCR 仪提取变压器分布参数, 利用 Pspice 软件电路仿真分析原副边分布电容对网络性能的影响, 最后讨论了输入阻抗对网络性能的影响.

[关键词] 电磁干扰, 分离网络, 共模噪声, 差模噪声, 插入损耗, 抑制比

[中图分类号] TN43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)03-0001-05

## Theoretical Research on Capability of Noise Separator for Conducted EMI Noise

Zhao Yang Jiang Ningqiu, Sun Yan, Li Shijin, Lu Xiaoquan

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

**Abstract** The basic requirements of the conducted electromagnetic interference noise separator network are put forward and several major kinds of separator network structure based on hardware are introduced. An investigation on performance of three networks is done by means of simulation software by PSPICE. First, the basic performances of the three networks are compared. Furthermore, the capacitive coupling of transformer is measured by high-frequency LCR, and an investigation on capacitive coupling influence done by PSPICE software circuit simulation. Finally, the influence of input impedance on network performance is discussed.

**Key words** electromagnetic interference, noise separator, common mode noise, differential mode noise, insertion loss, rejection ratio

电力电子装置中, 传导性电磁干扰共模噪声和差模噪声的分离对于噪声诊断及电磁干扰 EMI 滤波器设计具有重要的意义. 一些文献 [1, 2] 中已经提出几种噪声分离网络, 但是几乎没有进行严格的特性分析, 结果导致部分分离网络不能提供精确的噪声分离信号.

图 1 所示是一个单相三线的线阻抗稳定网络, 核心器件由电感和电容组成, 左侧接商用电源, 右侧接

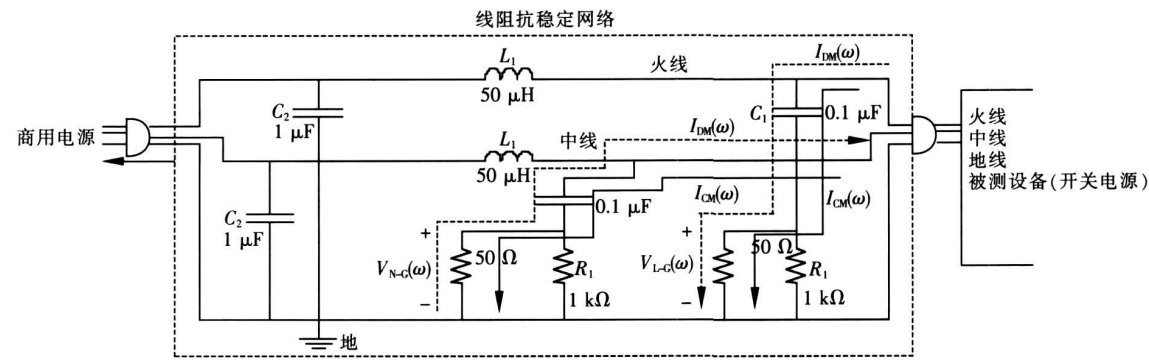


图 1 用于传导性电磁干扰测量设备 LISN 原理  
Fig.1 Principle of conducted EMI measurement equipment LISN

收稿日期: 2008-05-20  
基金项目: 江苏省教育厅科技成果产业化推进项目 (JH2007-006) 和毫米波国家重点实验室开放课题 (K200603) 资助项目.  
通讯联系人: 赵 阳, 博士, 教授, 研究方向: 电磁兼容. E-mail: zhao yang@njjnu.edu.cn

被测设备, 噪声源即被测设备 EUT 为一个典型单相开关电源 ( SMPS), LISN 中的  $50\Omega$  表示测试仪器如频谱分析仪的标准阻抗, 所有噪声分量由  $50\Omega$  电阻上得到. 在线阻抗稳定网络 LISN 的火线端和中线端, 由 EM I 测量接收机得到的噪声电压分别为<sup>[2 3]</sup>:

$$V_{L-G}(\omega) = 50[I_{CM}(\omega) + I_{DM}(\omega)] = V_{CM}(\omega) + V_{DM}(\omega), \tag{1}$$

$$V_{N-G}(\omega) = 50[I_{CM}(\omega) - I_{DM}(\omega)] = V_{CM}(\omega) - V_{DM}(\omega). \tag{2}$$

由 (1), (2) 式发现, LISN 所测量到的实际上是共模 (CM) 和差模 (DM) 信号的混合信号, 而无法直接检测 CM 和 DM 信号的具体分量. 由于 CM 和 DM 模态信号影响不同滤波器的设计方法, 而 DM、CM 分量又是设计功率线滤波器 (powerline filter) 抑制电磁干扰的必要参数, 显然采用常规 LISN 无法满足这种要求, 必须考虑能将 (1), (2) 中模态信号分离的新方法.

由式 (1), (2) 可得, 独立分量噪声测量技术的原理正是基于以各种不同的电路结构和形式实现火线和中线上噪声电压的相加和相减功能. 其公式描述如下:

$$V_{CM} = (V_L + V_N) / 2 \tag{3}$$

$$V_{DM} = (V_L - V_N) / 2 \tag{4}$$

独立分量测量电路的输入信号是来自线阻抗稳定网络 LISN 中火线和中线端的噪声电压, 而该电路的输出信号则是共模 (CM) 或差模 (DM) 噪声分量.

为了精确分离共模噪声和差模噪声, 噪声分离网络必须满足以下要求:

- (1) 测量输出端共模噪声  $|V_{CM}| = |V_L + V_N| / 2$  差模噪声  $|V_{DM}| = |V_L - V_N| / 2$
- (2) 共模 / 差模插入损耗 (CM IL / DM IL) 越小越好; 共模 / 差模抑制比 (CMRR / DMRR) 越大越好.

对于共模输入信号:

$$CM\ IL = 20\lg\left\{\frac{V_{OC}}{V_{CM}}\right\}, \tag{5}$$

$$DMRR = 20\lg\left\{\frac{V_{OC}}{V_{DM}}\right\}. \tag{6}$$

对于差模输入信号:

$$DM\ IL = 20\lg\left\{\frac{V_{OD}}{V_{DM}}\right\}, \tag{7}$$

$$CMRR = 20\lg\left\{\frac{V_{OD}}{V_{CM}}\right\}, \tag{8}$$

其中,  $V_{OC}$  为共模分离网络的输出;  $V_{OD}$  为差模分离网络的输出.

(3) 输入阻抗应保持  $50\Omega$ , 并且与信号源内阻无关.

## 1 典型噪声分离器分析

### 1.1 基于射频变压器的分离器

美国 Paul<sup>[1]</sup> 首先提出了一种分离网络, 即采用一对简单的、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如 CM 信号. 此外 Paul 网络因引入机械式开关来选择 CM / DM 的模态输出信号, 从而带来网络的不平衡性并最终影响网络的高频 CM / DM 识别性能.

此后新加坡的 See<sup>[4]</sup> 又设计出另一种识别网络, 既可以同时提供具有 CM / DM 抑制能力的信号分离电路, 同时在电路中也避免了采用机械开关所带来的不利影响. 其利用两个宽带射频变压器相连且副边线圈带中心抽头, 两个输出端与 EM I 干扰接收机输入端相连, 分别满足“相线”和“中线”上的混合模态信号的矢量“相加”、“相减”功能, 于是共模和差模传导发射信号彼此分离并可以直接在 EM I 接收机上测得.

更进一步, 法国 Mardigian<sup>[3]</sup> 给出了一种更简单的分离网络, 它仅仅使用一个变压器就能达到 CM / DM 同时分离输出的特性.

### 1.2 基于功率分配器 / 合成器的分离器

与变压器方案不同的是, 其后美国 Guo<sup>[5]</sup> 又提出了采用  $0^\circ / 180^\circ$  combiner 取代变压器作分离网络, 分别用  $0^\circ$  和  $180^\circ$  的 combiner 实现 CM 和 DM 的模态分离和输出. 功率混合器 (power combiner) 在物理结构上

同功率分相器 (power splitter) 一样但逆向使用, 功率分相器通常作为射频器件可以将输入信号分解成两个等幅和指定相位的信号输出, 当反向使用时就变成了一个功率混合器. 虽然功率混合器在制造过程中类似一个宽带变压器, 但其可以在 10~ 30MHz 范围内维持更高的精度. 此外, 功率混合器还可以在测量中提供恰当的输入阻抗以实现阻抗匹配, 减小反射损耗. 但是其输出端共模噪声  $|V_{CM}| = |V_1 + V_2|$  而差模噪声  $|V_{DM}| = |V_1 - V_2|$ , 并不满足前面所提到的分离网络应满足的条件 (1).

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, 尤其在高频条件下更是如此, 但其制造成本却增加不少, 功率混合器通常价格昂贵, 所以影响其推广使用.

1.3 基于自耦变压器和共模扼流圈的分离器

自耦变压器是以定向电流传递方式实现能量传输的. 一个好的自耦变压器设计, 它的杂散阻抗和电路的源阻抗、负载阻抗相比是可以忽略的.

近年意大利 Caponetti<sup>[6]</sup> 和美国 Wang<sup>[2]</sup> 分别提出了基于自耦变压器和共模扼流圈的噪声分离网络. 这两个网络都用到了共模扼流圈来抑制共模噪声从而获得较好的共模抑制比. 此外, 由于自耦变压器的杂散参数的影响要小于普通的射频变压器, 因此其使干扰模态信号的分离性能得到很大改善.

2 分离网络性能理论研究

2.1 理想分离网络性能仿真

利用 PSpice 对图 2 图 3 图 4 的理想网络 (不考虑变压器分布电容的影响) 进行仿真比较. 这里主要观察其共模插入损耗和共模抑制比, 所以对电路进行了交流分析. 仿真结果如图 5 所示. 由图可见, Guo 的网络因使用的是变压器等效电路来仿真的, 故其性能可能不如实际功率混合器组成的网络性能. Wang 网络性能要优于 See 的网络.

2.2 考虑分布参数影响的分离网络性能仿真

大部分分离网络硬件都是基于射频变压器实现的, 要求其带宽满足传导 EMI 的频率范围 (10K ~ 30MHz). 事实上, 由于寄生参数的影响, 在高频段网络特性受到严重影响

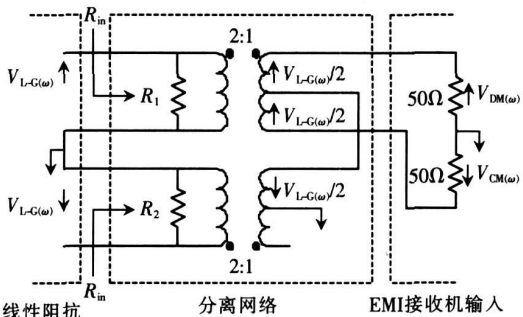


图 2 See 分离网络  
Fig.2 See's noise separator

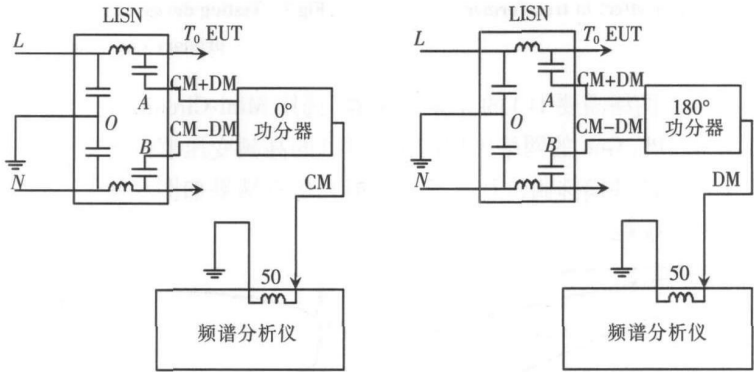


图 3 Guo 分离网络  
Fig.3 Guo's noise separator

响, 与理想结果存在很大差距. 因此, 如何提高器件性能以及改进网络结构减少分布参数的影响仍然是一个值得研究的方向.

在各种无源器件中, 电阻器、电感器和电容器的高频等效寄生参数可用高频阻抗分析仪测得. 对变压器的高频建模, 目前许多电路仿真器的模型库中尚未考虑到集肤、邻近效应以及非线性和磁滞问题. 特别是变压器的许多寄生参数, 例如: 漏感、匝间分布电容、原边副边之间的分布电容等, 都必须加以考虑, 如图 6 所示.

对这些绕组特性参数,通常采用数值计算或实验测量的方法来得到.本文介绍用高频阻抗分析仪测量模型中分布电容的方法.如图 7 所示,变压器原副边分布电容的提取,将变压器原边短接,副边短接,同时原副边也接在一起,将高频 LCR 仪的两端子分别接 1, 2 两端,设定不同频率段,选择合适的档位,这时测出的电容值  $C_{12}$  为近似精确的原副边寄生电容,排除了匝间电感电容的影响.

根据以上分析,把提取出的  $C_{12}$ , 用软件 PSPICE 进行电路仿真(只考虑变压器原副边  $C_{12}$  影响), 分别建立分离网络高频等效模型. See 网络需要 1: 2 的高频变压器, 选用 Mini-Circuits 公司的 RF 变压器 T1- 2T- X65 提取分布参

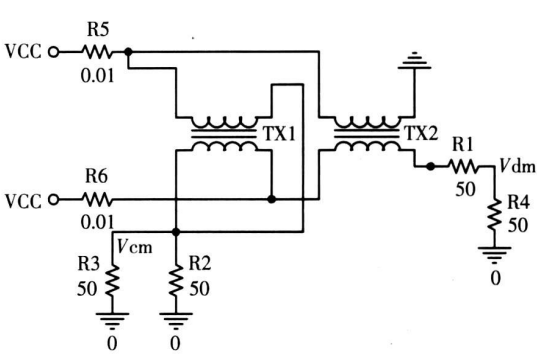


图 4 Wang 分离网络  
Fig.4 Wang' noise separator

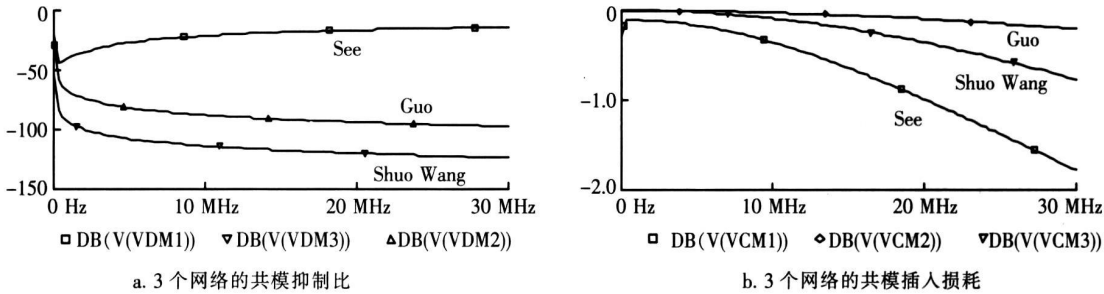


图 5 3 个理想网络的共模抑制比和共模插入损耗  
Fig.5 CMDR and CMIL of the three ideal networks

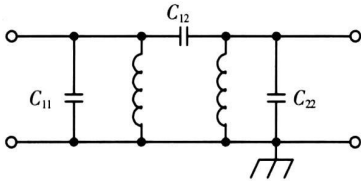


图 6 变压器的电容效应模型  
Fig.6 Model of capacitance effect in transformer

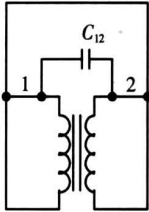


图 7 原副边分布电容测试装置  
Fig.7 Testing device of distributed capacitance on primary and secondary side

数近似取 7PF. ShuoW ang 网络需要 1: 1 的高频变压器, 选用 Mini-Circuits 公司的 RF 变压器 T1- 1T- X65 提取分布参数近似取 5PF. Guo 的网络因用的是含 1: 1 的高频变压器的等效电路进行仿真的, 所以其分布参数也取 5PF. 3 个网络的共模抑制比和共模插入损耗仿真结果如图 8 所示. 此结果应更接近实际网络的共模抑制比和共模插入损耗.

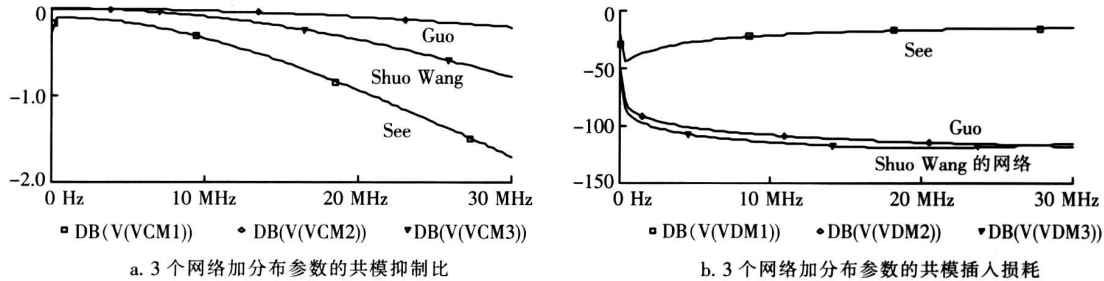


图 8 3 个理想网络加分布参数的共模抑制比和共模插入损耗  
Fig.8 CMRR and CMIL of the three ideal networks with distributed parameter

2 3 分离网络输入阻抗的仿真

在前面提到分离网络的一个重要条件是输入阻抗应为  $50\Omega$ , 满足该条件可以保证与外部设备的阻抗匹配, 从而准确地获取噪声电压. 现有的分离网络输入阻抗的大小可以通过对电路理论分析来得到. 然而, 这些电路都是采用变压器来实现的, 理论计算比较复杂. 这里输入阻抗通过仿真的方法也可以得到. 仿真方法如图 9 所示.

输入阻抗为  $Z_{in} = \frac{V_1}{I_1}$ . 上述 3 个网络的输出阻抗仿真结果如图 10 所示, 由此结果可见, Wang 和 Guo 的分离网络输入阻抗接近  $50\Omega$ , 而 See 的分离网络输入阻抗则在  $100\sim 110\Omega$  左右, 并不满足输入阻抗应为  $50\Omega$  的条件, 因此其抑制比和插入损耗这两个性能都要比 Shuo Wang 和 Guo 的分离网络差.

3 结论

本文基于 PSPICE 对 3 类典型分离网络进行了 3 个方面的仿真. 根据上述的仿真结果可见一个优良的分离网络应满足 3 个条件: 即测量输出端共模噪声应为  $|V_{CM}| = |V_1 + V_2|/2$  而差模噪声为  $|V_{DM}| = |V_1 - V_2|/2$  良好的插入损耗 (CM IL/DM IL) 和抑制比 (CMRR/DMRR) 性能; 输入阻抗应保持  $50\Omega$ . 这对于今后设计高性能低成本分离网络有着积极的意义.

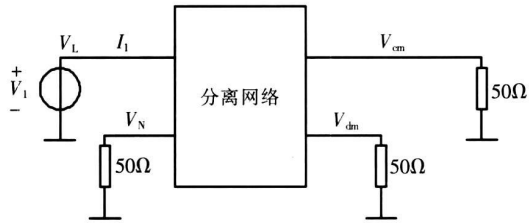


图 9 分离网络输入阻抗的仿真电路框图  
Fig.9 Simulation circuit block diagram of input impedance of noise separator

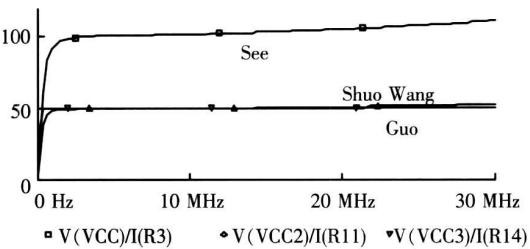


图 10 3 个网络的输入阻抗仿真结果  
Fig.10 Input impedance simulation results of the three networks

[参考文献] (References)

[1] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission [J]. IEEE Trans EM C, 1988, 30(4): 553-560

[2] Chiad M, Profumo F, Ferraris L, et al. Common and differential mode noise separation: comparison of two different approaches [C] // Conf Rec IEEE PESC' 01 Vancouver (Canada), 2001: 1383-1388

[3] Marliquin M, Rainbourg J. An alternative method for characterizing EMI filter [C] // Proc of IEEE on EMC, 1999, 2: 882-886

[4] See K Y. Network for conducted EMI diagnosis [J]. Electronic Letters, 1999, 35(17): 1446-1447

[5] Ting Guo, Chen D Y, Lee F C. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EMI noise [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(3): 480-488

[6] Lo Y K, Huang Jen Chiu, Tzsu-Herng Song. A software-based CM and DM measurement system for conducted EMI [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 253-255

[7] Shuo Wang, Fried C Lee, Willem gerhardus odendaal. characterization, evaluation and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2005, 20(4): 974-982

[8] 赵阳, 李世锦, 孟照娟, 等. 传导性 EMI 噪声的模态分离与噪声抑制问题探讨 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2004, 4(4): 1-4  
Zhao Yang, Li Shijin, Meng Zhaojuan. Technique of conducted EMI noise separation and noise suppression [J]. Nanjing Normal University Engineering and Technology Edition, 2004, 4(4): 1-4. (in Chinese)

[9] 沈雪梅, 赵阳, 李世锦, 等. 传导性电磁干扰噪声分离网络识别特性的实验与仿真研究 [J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(3): 16-19  
Shen Xuemei, Zhao Yang, Li Shijin. Experiment and simulation investigation on performance of discrimination networks for conductive electromagnetic noise [J]. Journal of Nanjing Normal University Engineering and Technology Edition, 2005, 5(3): 16-19. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]