

# 传导性 EMI 噪声的模态分离与噪声抑制问题探讨

赵 阳<sup>1,2</sup>, 李世锦<sup>1</sup>, 孟照娟<sup>1</sup>, 龙云云<sup>1</sup>, 沈雪梅<sup>1</sup>, 陈 昊<sup>2</sup>, See Kye Yak<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学 电气与工程学院, 江苏 南京 210042;  
2. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;  
3. 新加坡南洋理工大学 电气与工程学院, 新加坡 639798)

[摘要] 对传导性电磁干扰(EMI)噪声的模态分离包括基于硬件器件和基于算法的软分离方法及其优缺点进行了分析和比较,同时给出了抑制噪声的功率线滤波器设计方法,并讨论了传导性电磁干扰噪声全智能诊断和处理装置. 给出了部分实验结果,对其中一些方法作了实验对比. 结果表明,基于分相器/混和器的噪声分离网络具有更好的高频特性,且网络插损和噪声模态抑制特性能够满足工程精度要求,但网络制造成本较高.

[关键词] 传导性干扰,噪声分离,智能诊断,噪声抑制,电磁兼容

[中图分类号] TN43, [文献标识码] B, [文章编号] 1672-1292-(2004)04-0001-04

## 1 问题提出

电磁干扰(EMI)噪声发射的测量和抑制一直是电气与电子设备设计和制造过程中值得重视的问题. 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 LISN(line impedance stabilization network, 简称 LISN)<sup>[1]</sup>, 原理如图 1, 其核心是通过电感、电容和标准 50 Ω 阻抗构成的测试网络, 作为获得被测设备 EUT 所产生的传导干扰信号的接受器.

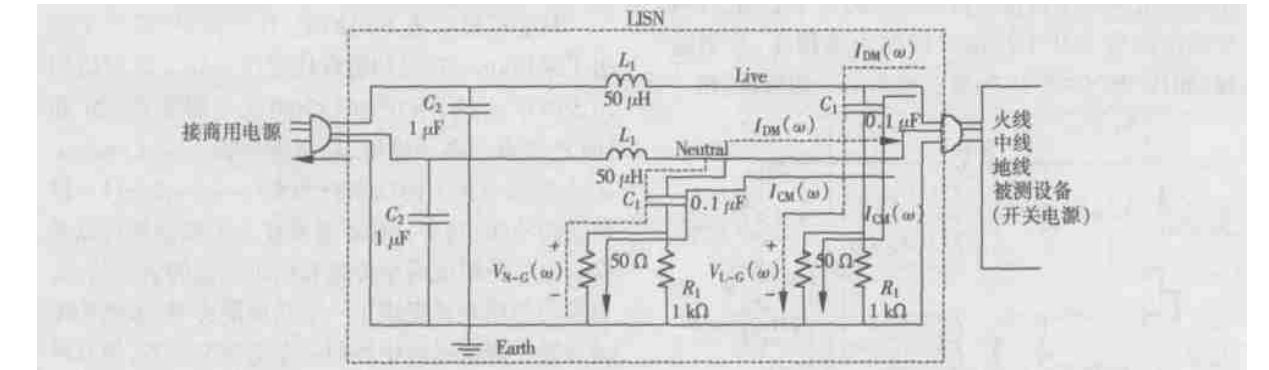


图 1 用于传导性电磁干扰测量设备 LISN 原理

在图 1 中, 测量电阻上的噪声电压分别是

$$\begin{aligned} V_{L-G}(\omega) &= 50[I_{CM}(\omega) + I_{DM}(\omega)] \\ &= V_{CM}(\omega) + V_{DM}(\omega) \end{aligned} \tag{1}$$
$$\begin{aligned} V_{N-G}(\omega) &= 50[I_{CM}(\omega) - I_{DM}(\omega)] \\ &= V_{CM}(\omega) - V_{DM}(\omega) \end{aligned} \tag{2}$$

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功率滤波器(power-line 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.

## 2 基于器件的模态硬分离方法

传导性 EMI 噪声模态信号的硬分离方法目前主要采用射频变压器和 0° 或 180° 混和器两种方法.

### 2.1 基于变压器的分离网络

美国 Paul<sup>[2]</sup> 首先提出了一种分离网络, 即采用一个简单的、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, 如图 2 所示. 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(switch)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

收稿日期: 2004-05-08.  
基金项目: 中国矿业大学博士后研究基金资助项目(苏人博复国[2003]78号)和南京师范大学“211”学科建设经费资助项目(1843202529).  
作者简介: 赵阳(1966-), 博士, 教授, 主要从事电磁兼容的教学与研究. E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

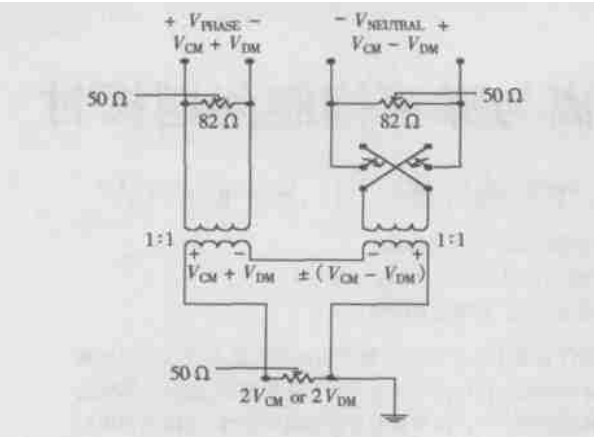


图 2 Paul 分离网络

高频 CM/DM 识别性能. 随后美国 Nave<sup>[3]</sup>在此基础上提出了改进的差模抑制网络(DMRN)使共模干扰信号的输出精度更高,但仍然只能测量 CM 单模态信号. 以后新加坡的 See 又设计出另一种识别网络<sup>[4]</sup>,既可以同时提供具有 CM/DM 抑制能力的信号分离电路,同时也在电路中也避免了采用机械开关所带来的不利影响. See 分离网络如图 3 所示,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 EMI 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

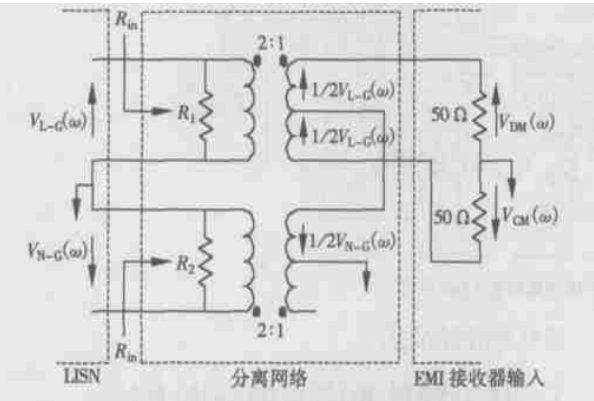
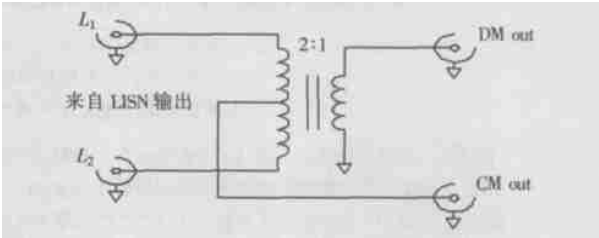


图 3 See 分离网络

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 EMI 接收机上测量得到. 更进一步,法国 Mardiguain<sup>[5]</sup>给出了一种更简单的分离网络如图 4 所示,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.



有效带宽(3 dB): 9 kHz~ 50 MHz  
CM/DM 隔离度: > 60 dB 9 kHz~ 1 MHz

图 4 Mardiguain 分离网络

这些网络由于都采用了变压器作为主要的分离器件,因此在高频条件下因杂散效应会产生较明显的模态信号抑制性能(mode rejection ability)衰退的现象,一般有 10~ 20 dB 的衰减,有的甚至更加严重,因此分离网络性能有待进一步提高.

2.2 基于 0°和 180°混和器的分离网络

与变压器方案不同的是,其后美国 Guo<sup>[6]</sup>又提出了采用 0°/180°混和器取代变压器作分离网络如图 5 所示,分别用 0°和 180°的混和器实现 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~ 30 MHz 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<sup>[6]</sup>.

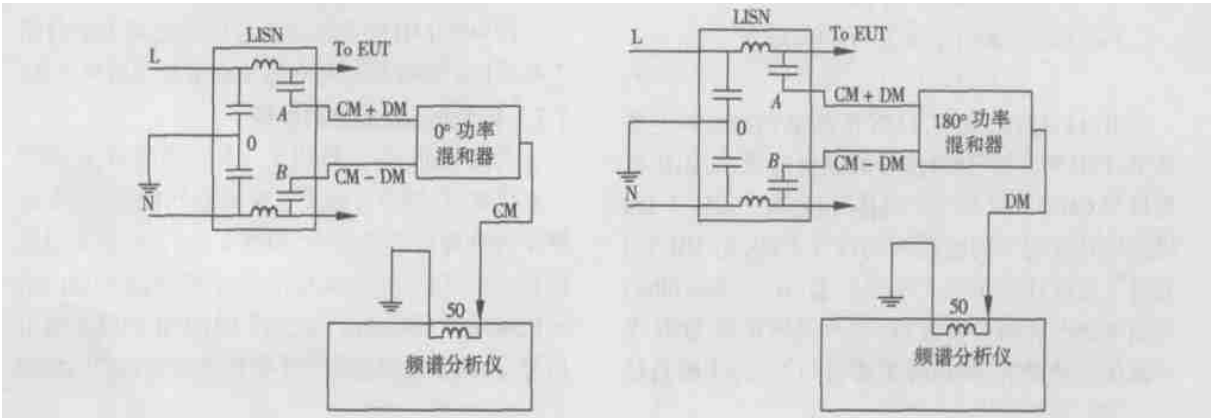


图 5 Guo 分离网络

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.

3 基于算法的模式软分离方法

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. 台湾 Lo<sup>[7]</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 检测到的实际线上干扰信号和前置单模分离网络得到的单模信号通过组合计算, 最终得到另一个模态干扰信号, 系统结构如图 6 所示.

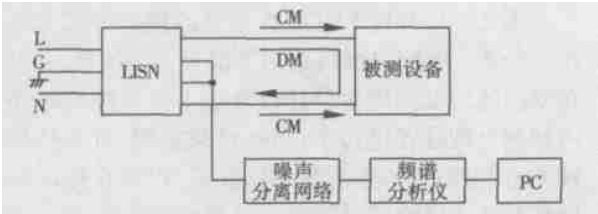


图 6 Lo 分离网络

虽然 Lo 实现了软分离, 但事实上由于算法中需要事先知道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(如图 6), 所以这只能称为半模态软分离技术(semi software-based mode separation network)而并非完整的软分离方法. 此外由于存在检测相位不确定因素<sup>[7]</sup>, 因此还有一定的计算误差. 但总体上 Lo 方法已经使干扰信号分离功能得到加强, 并使后续的传导性 EMI 智能化处理成为可能.

4 初步实验结果分析

为对比上述分离网络性能, 本文分别对 Paul, See, Mardiguian 和 Guo 4 种网络的差模抑制能力特性(differential mode rejection ration, 简称 DMRR) 进行了实验, 实验装置如图 7 所示, 其中人工模拟噪声源(artificial noise source) 采用了 180° splitter 用来产生模拟差模输入信号, 分离网络 CM 输出端接 HP 8753C 网络分析仪, DM 输出端接 50 Ω terminator.

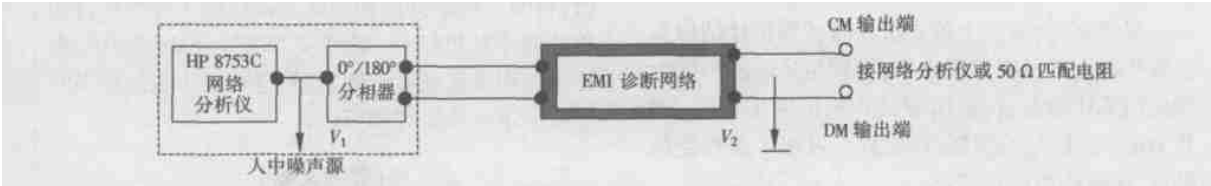


图 7 硬件分离网络的性能测试装置系统

由 DMRR 实验结果发现, 基于功率混合器的 Guo 分离网络具有最佳差模抑制特性, Paul 和 Mardiguian 分离网络的 DMRR 性能与 Guo 网络相比有较大差距, 而 See 网络性能最低. 针对低频、中频和高频下的具体 DMRR 值结果如表 1 所示.

表 1 几种分离网络 DMRR 特性比较/ dB

$f$ / MHz	See 网络	Mardiguian 网络	Paul 网络	Guo 网络
1	50	62	65	85
5	36	47	48	73
10	30	37	40	62
20	22	28	30	50
30	21	25	27	43

由表 1 看出, 随着频率提高, 各分离网络的差模抑制特性都有不同程度的退化和衰减, 在  $f = 1$  MHz 时的低频特性到  $f = 10$  MHz 的中频特性, 直到  $f = 30$  MHz 时的高频特性均存在大幅下降趋势, 平均下降 30~ 40 dB. 另外 Guo 网络即使在  $f = 30$  MHz 时也保持了 DMRR 等于 43 dB 的良好特性, 而其它网络特性都在 30dB 以下. 一般就工程应用而言只有当在最高频率时的抑制特性仍保持在 40 dB 时

以上时, 才能将共模(CM)和差模(DM)干扰信号有效分离并达到工程精度要求. 同样, 对 4 种网络的共模抑制性能(common mode rejection ration, 简称 CMRR) 实验也能得到上述类似结论. 所以相比之下, 基于功率混合器的硬件分离网络优于射频变压器网络, 这主要是由于其较小的杂散效应影响以及较好的匹配阻抗特性, 同时也与电路器件的布局密切相关.

5 噪声抑制方法

在对传导性 EMI 信号进行模态分离测量的同时, 相对应的噪声抑制技术也已取得较大进展, 主要体现在功率线滤波器(power-line filter) 的计算机辅助设计方面. 一般说来, 根据 Nave 提出的标准滤波器拓扑结构<sup>[3]</sup>, 可将滤波器分成 CM 和 DM 两部分, 如图 8 所示. 采用二阶滤波器结构, 共模滤波器由  $L_{CM}$  和  $C_{CM}$  组成, 差模滤波器由  $L_{DM}$  和  $C_{DM}$  组成, 则固有频率为

$$f_{r,CM} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{CM} \cdot C_{CM}}}$$

$$= \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_C + 2L_D) \cdot 2C_Y}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_C \cdot 2C_Y}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_{r,DM} &= \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{DM} \cdot C_{DM}}} \\ &= \frac{1}{2\pi \sqrt{(2L_D + L_{leak}) \cdot C_{DM}}} \\ &\approx \frac{1}{2\pi \sqrt{2L_D \cdot C_{DM}}} \end{aligned} \quad (4)$$

台湾 Su<sup>[8]</sup> 提出, (3)、(4) 式可以根据各自的谐振频率、已知的常用器件固定参数和滤波器 40 dB 斜率的频率衰减特性, 通过方程解得其中的变量参数。

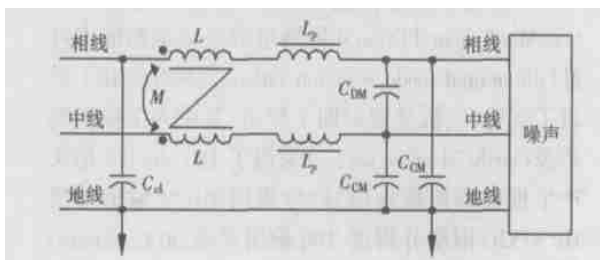


图8 功率线滤波器的一般拓扑结构

尽管如此, 实际上该方法在滤波器拓扑结构和参数优化上并没有体现出来, 特别是从经济角度上看如何采用最节省、最简便结构来同时对 CM 和 DM 干扰信号的抑制, 并使整个过程实现智能化处理, 还有待进一步研究。

## 6 讨论

由于现阶段针对传导性 EMI 的模式干扰信号分离及其抑制技术还不完善, 很多问题尚未彻底解决, 尤其是面向广大中小型企业和用户的智能化处理技术和综合解决方案还未完全实现, 因此本文设想提出基于硬/软分离和自动噪声抑制的总体 EMI 解决方案。新方法将噪声测量和噪声抑制有机结合在一起成为一个综合智能处理装置, 并同时兼顾硬分离结构简单、能同时提供幅度和相位信息的优点和软分离适用频率范围宽、分析功能强大的优势, 此外还针对功率线滤波器设计, 形成标准化、简约化、经济化和易实现, 使之能同时对低频共模和高频差模信号实施有效滤除功能。

上述智能处理装置的研究预计将主要包括如下关键问题: (1) 干扰模式信号硬分离在高频情况下如何消除或减弱器件杂散效应影响, 从而提高网络高频分离特性。(2) 如何实现全软件分离方法, 即避免采用前置硬分离网络而直接采用高速虚拟仪器进行信号的采集和计算。软件算法包括各输入信号量因测量不同步引起的相位误差补偿、矢量运

算、频谱展开与分析以及对应参数的提取等。(3) 最佳功率线滤波器设计。研究既能同时适合 CM 和 DM 噪声滤波、又能使用较少电路元器件并易于在系统中电路自动实现的滤波器拓扑结构; 确定器件参数值的计算方式。可考虑设计模式的归一化处理, 以电容、电阻器件为主。(4) 滤波器硬件结构实现。即如何根据提取出来的模式分离信号和滤波器设计出的元件参数值, 在智能装置中自动实现电路连接。可考虑采用微机控制内部器件连接方式, 元器件参数变化以并联连接方式实现。

## 7 结论

本文对传导性 EMI 干扰信号的模式分离方法作了分析、阐述和比较, 给出了部分实验结果, 并对功率线滤波器的优化设计以及整个传导性 EMI 噪声智能处理装置进行了讨论。结果表明, 针对传导性 EMI 测量的模式分离十分重要, 它将直接影响随后的功率滤波器设计以及噪声抑制特性。另一方面, 将噪声模式分离和滤波器设计两个环节作自动化处理并有机结合, 最终实现整个 EMI 噪声的全智能处理装置是可行的, 当然这当中还包括很多问题有待进一步研究和解决。

### [参考文献]

- [1] Zhao Y, See K Y. Performance study of CM/DM discrimination network for conducted EMI diagnosis[J]. Chinese J of Electronics, 2003, 12(4): 536 - 538.
- [2] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission[J]. IEEE Trans EMC, 1988, 30(4): 553 - 560.
- [3] Nave M J. Power line filter design for switched mode power supply[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [4] See K Y. Network for conducted EMI diagnosis[J]. Electronic Letter, 1999, 35(17): 1446 - 1447.
- [4] Mardigian M, Rainboug J. An alternative, complementary method for characterizing EMI filter[C]. Proc of IEEE on EMC, 1999. 882 - 886.
- [6] Guo T, Chen D Y. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EMI noise[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1996, 11(3): 480 - 488.
- [7] Lo Y K, Chiu H J, Song T H. A software-based CM and DM measurement system for conducted EMI[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 977 - 978.
- [8] Su H L, Lin K H. Computer-aided design of power line filters design with a low cost common and differential-mode noise diagnosis circuit[C]. Proc of IEEE on EMC, 2001. 511 - 516.

(下转第8页)

[ 9] Ho M.T. Synthesis of  $H_{\infty}$  PID controllers: A parametric approach[ J] . Automatica, 2003, 39: 1069 - 1075.

[ 10] Guo Zhi. A survey of satisfying control and estimation[ A] . Proceedings of the 14th IFAC World Congress[ C] . 1999. 443 - 447.

## Fast Calculation of all Stabilizing PI Controllers for Second-Order Time-Delay Systems

LIU Yan<sup>1, 2</sup>, LI Yinya<sup>2</sup>, SHENG Andong<sup>2</sup>

( 1. Department of Physics, Yancheng Teachers College, Yancheng 224002, China;

2. Department of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** PID control is the most common control method used in automatic control. Aiming at the second-order time-delay systems of industrial process control, a method for the fast calculation of all stable PI controllers via plotting stability boundary locus in  $k_p-k_i$  is presented. Moreover, the necessary conditions are proposed for the existence of a PI controller to simultaneously stabilize the second-order time-delay systems that are open-loop unstable. Furthermore, the set of PI controllers satisfied with the performance specifications requirements of a controller design is easily to work out via searching on the stabilizing region. An example is given to show the effectiveness of the method presented and the paper provides a simple and effective method for controllers design.

**Key words:** time-delay system, stabilization, PI control

[ 责任编辑: 严海琳]

( 上接第 4 页)

## Technique of Conducted EMI Noise Separation and Noise Suppression

ZHAO Yang<sup>1, 2</sup>, LI Shijin<sup>1</sup>, MENG Zhaojuan<sup>1</sup>, LONG Yunyun<sup>1</sup>, SHEN Xuemei<sup>1</sup>,  
CHEN Hao<sup>2</sup>, SEE Kye Yak<sup>3</sup>

( 1. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

3. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technology University, Singapore 639798, Singapore)

**Abstract:** The exploration of the conducted EMI noise separation including hardware-based separation and software-based separation have been described and compared, with advantages and disadvantages discussed. The experimental results are given to show the efficiency of the separation networks. Moreover, computer-aided design for power-line filter and discussion on implementation of intelligent equipment of noise measurement and suppression are also introduced. Results show that the discrimination network based on splitter/ combiner has better HF performance with low insertion loss and good rejection capability, however, it is more expensive.

**Key words:** conducted electromagnetic interference( EMI), noise separation, intellectual diagnosis, noise suppression, electromagnetic compatibility (EMC)

[ 责任编辑: 严海琳]