

传导电磁干扰噪声分离方法研究与新进展

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] 介绍了传导性电磁干扰噪声分离的目的及意义, 回顾了最近几年噪声分离方法的研究进展, 比较了各种噪声分离方法的优缺点, 提出了优良的传导性电磁干扰噪声分离器应满足的设计要求, 最后给出了两个典型器特性的理论仿真和测量结果, 讨论了传导性噪声分离器的研究发展趋势。

[关键词] 传导性噪声, 噪声分离器, 共模噪声 (CM), 差模噪声 (DM), 综述

[中图分类号] TN 43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009)01-0001-07

Research and Development of Conductive EMI Separating Techniques

Zhao Yang Jiang Ningqiu Sun Yan Li Shijin Lu Xiaquan

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

Abstract This paper first introduces the purpose and significance of separation of EMI noise and reviews the recent achievements of the research on noise separator. Then, the strongpoints and shortcomings of these representative noise separators are compared. Furthermore, the design principles of separator are given in paper. The paper also gives the results of simulation and measure on two noise separators. Developmental trends for conductive EMI noise separator are analyzed at last.

Key words conductive EMI noise, noise separator, common mode (CM) noise, differential mode (DM) noise, review

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。EMI 滤波器是抑制传导干扰最为有效的手段, 已经在工业界广泛应用。而由于差模干扰和共模干扰产生的机理不同, EMI 滤波器又分为 CM 滤波器和 DM 滤波器两个部分。因此, 在噪声测量时能提供精确的分离的共模噪声和差模噪声, 对于分别设计具有优良滤波性能的 CM 滤波器和 DM 滤波器会有事半功倍的作用。

按国际标准进行的传导性电磁干扰测量系采用线阻抗稳定器 LISN (line impedance stabilization network), 其只能提供电力线上的同时包含共模和差模叠加的混合干扰信号, 而由于不同模态信号确定不同滤波器性能、拓扑结构与参数选取, 因此这种基于 LISN 的测量对实际干扰抑制及功率线滤波器 (power line filter) 设计帮助不大。传导性电磁干扰共模噪声和差模噪声分离技术的目的是提供精确的噪声分离信号。

本文首先介绍了当前噪声分离方法的研究进展, 提出了基于硬件的噪声分离器的设计原则, 对当前两种典型的噪声分离器的性能作了仿真和实验研究。

1 噪声分离方法的进展综述

独立分量噪声分离技术可分为基于硬件和基于软件两种类型。硬件类型一般以射频变压器 (RF transformer)^[1-3] 或功率分配器 (power splitter) / 功率合成器 (power combiner)^[4] 以及基于自耦变压器和共模扼流圈的噪声分离器^[5-6] 为核心器件来实现分离功能, 而软件类型则借助数值计算方法来提取独立分量^[8]。

1.1 硬件噪声分离器

1.1.1 基于射频变压器的噪声分离器

美国 Paul 首先提出了一种噪声分离器, 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

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基金 (#JH2007-006)、毫米波国家重点实验室开放课题基金 (#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 yang2@njnu.edu.cn

为噪声分离器的核心(如图 1 所示), 但该噪声分离器只能测量单模态信号如 CM 信号, 然而其输出是 $2V_{CM}$ 或 $2V_{DM}$, 而不是严格定义的 V_{CM} 或 V_{DM} . Pau 噪声分离器在输入端接了 $82\ \Omega$ 的电阻, 实现了 $50\ \Omega$ 的输入阻抗, 可以和 LISN 以及测量仪器满足阻抗匹配. 但是 Pau^[1] 噪声分离器因引入机械式开关来选择 CM / DM 的模态输出信号, 从而带来噪声分离器的不平衡性并最终影响噪声分离器的高频 CM /DM 识别性能.

此后新加坡的 See^[2] 又设计出另一种噪声分离器, 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 分离器如图 2 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.

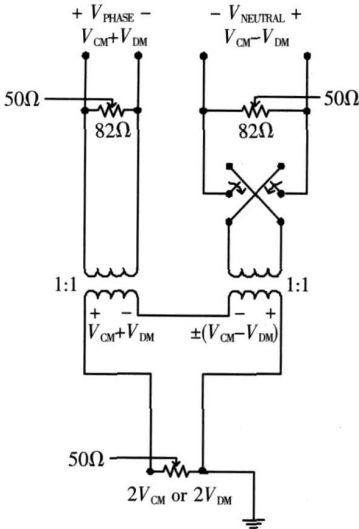


图 1 Paul 噪声分离器
Fig.1 Paul's noise separator

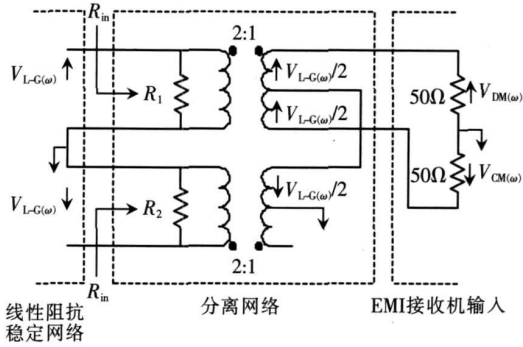


图 2 See 分离网络
Fig.2 See's noise separator

更进一步, 法国 Mardiguian^[3] 给出了一种更简单的噪声分离器(如图 3 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. 虽然 Mardiguian 的噪声分离器元器件数减少了, 但是其并没有考虑 $50\ \Omega$ 输入阻抗的问题, 因此在实际测量中会影响 CM /DM 分离的性能.

这些噪声分离器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衰退的现象, 一般有 $10\sim 20\ \text{dB}$ 的衰减, 有的甚至更加严重, 因此噪声分离器性能有待进一步提高.

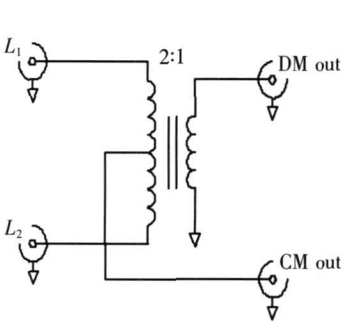


图 3 Mardiguian 噪声分离器
Fig.3 Mardiguain's noise separator

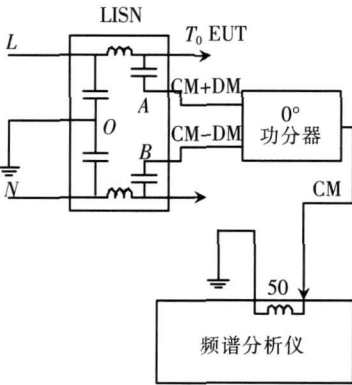


图 4 Guo 分离网络
Fig.4 Guo's noise separator

1. 1. 2 基于功率分配器 / 合成器的噪声分离器

与变压器方案不同的是, 其后美国 Guo^[4] 又提出了采用 $0^\circ/180^\circ$ combiner 取代变压器作噪声分离器(如图 4 所示), 分别用 0° 和 180° 的 combiner 实现 CM 和 DM 的模态分离和输出. 功率混合器 (power com-

biner)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.

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. 1. 3 基于自耦变压器和共模扼流圈的噪声分离器

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 Caponet^[5]和美国 Wang^[6]分别提出了基于自耦变压器和共模扼流圈的噪声分离器 (如图 5 和图 6 所示). 这两个噪声分离器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, 同时 Wang 提出的噪声分离器考虑了 50Ω 输入阻抗的问题, 并且其输入阻抗不随信号阻抗变化而变化, 因此其使干扰噪声信号的分离性能得到很大改善. Caponet 还提出了新的变压器绕制方法, 进一步减小变压器的杂散参数的影响. Wang 提出了基于散射参数的插入损耗及抑制比的测量方法.

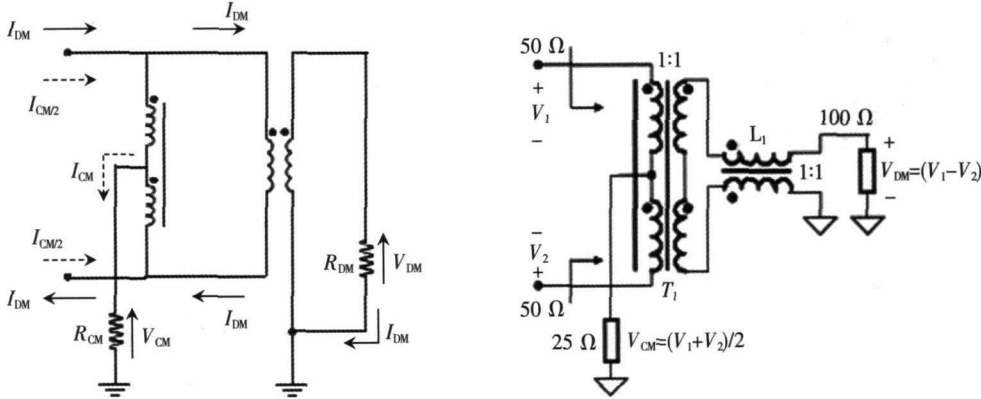


图 5 Caponet 噪声分离器
Fig.5 Caponet's noise separator

1. 2 软件噪声分离方法

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也有所发展. 台湾 Lo^[8]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态信号, 通过组合计算, 最终得到另一个模态干扰信号 (如图 7 所示), 该系统包含了线阻抗稳定网络 (LISN)、分离网络 (Mode Separator)、频谱分析仪 (Spectrum Analyzer)、计算机 (PC) 和被测设备 (EUT) 几个部分.

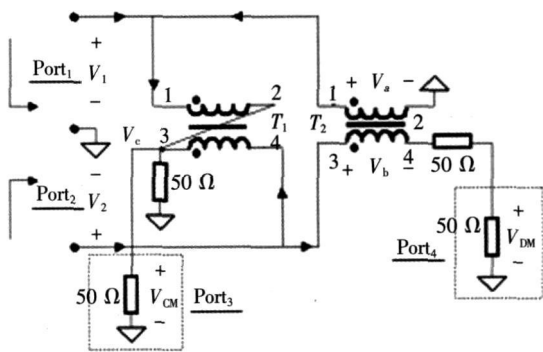
频谱分析仪可以检测来自 LISN 的 L 和 N 线上的总噪声, 通过分离网络检测到 CM 噪声, 并输入到计算机, 由相关计算机软件对 DM 噪声进行计算. 而频谱分析仪反映的仅仅是各噪声的幅值大小, 并未得到有关的相位信息, 所以在方程 (1) (2) 的基础上, 建立了仅包含噪声幅值大小的方程 (3).

$$|V_L|^2 = |V_{CM}|^2 + |V_{DM}|^2 + 2|V_{CM}| \cdot |V_{DM}| \cos\theta \quad (1)$$

$$|V_N|^2 = |V_{CM}|^2 + |V_{DM}|^2 - 2|V_{CM}| \cdot |V_{DM}| \cos\theta \quad (2)$$

θ 是 CM 和 DM 噪声在测量频率范围内对应的各频率点之间的相位角.

$$|V_L|^2 + |V_N|^2 = 2(|V_{CM}|^2 + |V_{DM}|^2). \quad (3)$$



由于 $|V_L|$ 、 $|V_N|$ 和 $|V_{CM}|$ 都可以直接测量获得,剩下的 $|V_{DM}|$ 就可以从式 (3) 计算得到。

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态硬件分离网络做支撑,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,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。

2 噪声分离器设计、分析与实验

2.1 噪声分离器的设计原则

以开关电源 (SMPS)作为典型的 EMI 噪声测试装置 (如图 8 所示),开关电源必须接地,给共模噪声提供对地流通路径。

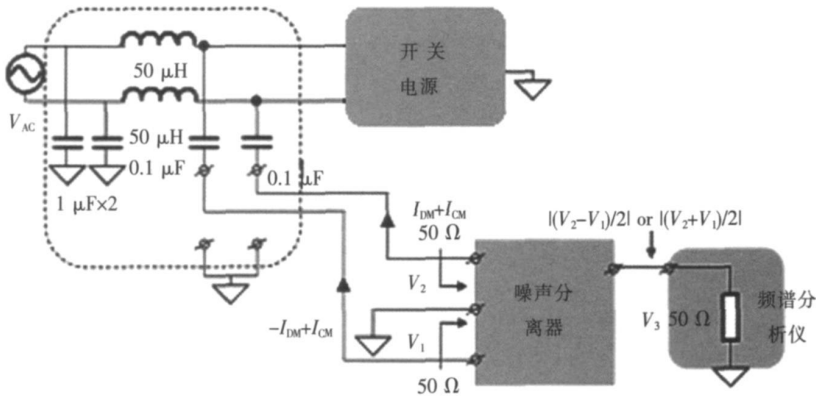


图 8 开关电源的传导性 EMI 噪声测试装置图
Fig.8 Conductive EMI noise test device of SMPS

差模传导 EMI 是在中线和火线之间形成回路,主要是由于高速变化的变换器电流引起.共模传导 EMI 是经过火线和中线到地线,主要是由于高速变化的变换器对地电流引起。

图 8 中噪声电压在任一 50 Ω 终端的压降 V_1 或 V_2 定义为总噪声,两者的矢量和与矢量差分别定义为共模噪声和差模噪声.共模噪声与差模噪声计算公式:

$$|V_{DM}| = \left| \frac{V_2 - V_1}{2} \right| = 50 |i_{DM}|, \tag{4}$$

$$|V_{CM}| = \left| \frac{V_2 + V_1}{2} \right| = 50 |i_{CM}|. \tag{5}$$

为了精确分离共模噪声和差模噪声,噪声分离器必须满足以下设计原则:

(1) 测量输出端共模噪声 $|V_{CM}| = |V_1 + V_2|/2$ 差模噪声 $|V_{DM}| = |V_1 - V_2|/2$

(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. 插入损耗与抑制比的定义如下:

- ① 共模插入损耗 (CM IL): 将共模信号 CM 作为噪声分离器的输入信号 V_{CM-in} , 测量噪声分离器的共模输出信号 V_{CM-out} , 则共模插入损耗的计算式为 $CM\ IL = 20\lg(V_{CM-out}/V_{CM-in})$.
- ② 共模抑制比 (CMRR): 将共模信号 CM 作为噪声分离器的输入信号 V_{CM-in} , 测量噪声分离器的差模输出信号 V_{DM-out} 则共模抑制比的计算式为 $CMRR = 20\lg(V_{DM-out}/V_{CM-in})$.
- ③ 差模插入损耗 (DM IL): 将差模信号 DM 作为噪声分离器的输入信号 V_{DM-in} , 测量噪声分离器的差模输出信号 V_{DM-out} 则差模插入损耗的计算式为 $DM\ IL = 20\lg(V_{DM-out}/V_{DM-in})$.

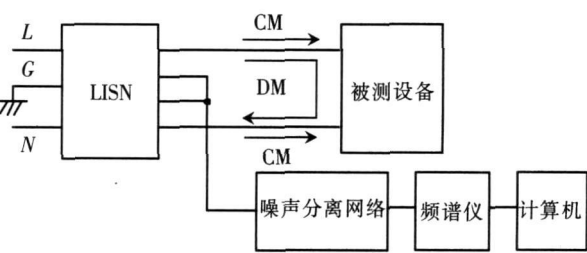


图 7 基于软分离的系统结构示意图
Fig.7 System scheane based on software discrimination

④差模抑制比 (DMRR): 将差模信号 DM 作为噪声分离器的输入信号 V_{DM-in} , 测量噪声分离器的共模输出信号 V_{CM-out} 则差模抑制比的计算式为 $DMRR = 20 \lg(V_{CM-out} / V_{DM-in})$.

(3) 输入阻抗应保持 50Ω , 并且与信号源内阻无关, 从而与连接设备实现阻抗匹配.

当然, 测量结果通常因为噪声而呈现出的结果不理想. 一些文献^[1-6]中已经提出几种噪声分离器, 但是几乎没有进行严格的特性分析, 结果导致部分分离器不能提供精确的噪声分离信号.

2.2 噪声分离器特性的理论研究

PSPICE 仿真软件具有模拟 - 数字混合仿真功能, 并且具有包括常用的模拟器件、数字器件的模型以及包括精确的传输线, 磁芯模型在内的总数达 3 万个以上的内建模型, 可以实现直流分析、交流分析、参数分析、瞬态分析等基本系统分析.

这里利用 PSPICE 对 Caponet 和 Mardiguian 的噪声分离器特性进行了仿真比较. 首先, 按照图 3 和图 5 的原理图绘制其仿真电路. 仿真时射频变压器均看作理想元件, 仅考虑其杂散电容. 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 9 所示. 由此可见, Caponet 的噪声分离器无论是插入损耗还是抑制比均优于 Mardiguian 的噪声分离器.

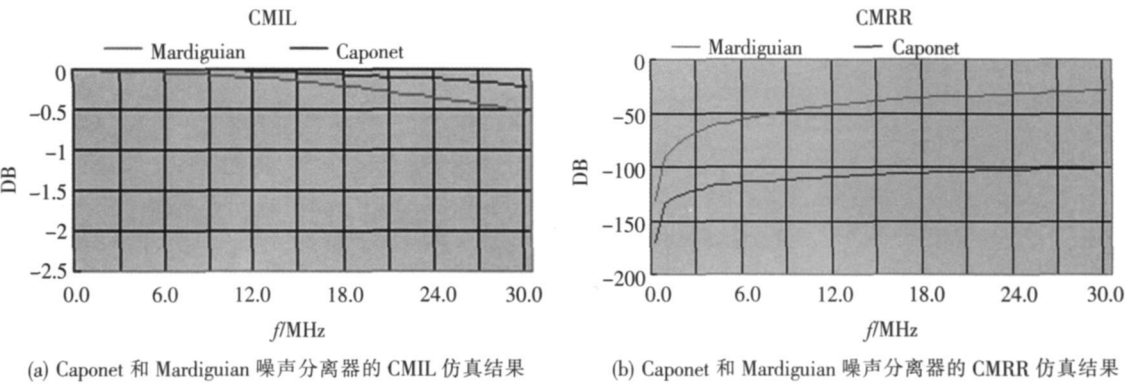


图 9 Caponet 和 Mardiguian 噪声分离器的仿真结果

Fig.9 Simulation results of Caponet's and Mardiguian's noise separator

2.3 噪声分离器特性的实验研究

将 Caponet 和 Mardiguian 分离器分别按图 5、图 3 连接电路, 实验测试装置如图 10 所示.

噪声源选用频谱分析仪 (固纬 GSP-8247 频谱分析仪) 的信号输出端, 经 $0^\circ/180^\circ$ 分相器 (Mini-Circuit 产品) 产生以产生模拟的共模或差模噪声, 作为分离器的输入信号, 在测试共模信号时, 分离器的共模输出端接频谱分析仪的输入端口, 同时差模输出端接与频谱分析仪终端相同的 50Ω 匹配阻抗; 反之, 测量差模信号时, 分离器的差模输出端接频谱分析仪的输入端口, 同时共模输出端接 50Ω 匹配阻抗. 图 11 给出了利用频谱仪测量的照片, 图 12 给出了 Caponet 和 Mardiguian 分离器的实物照片.

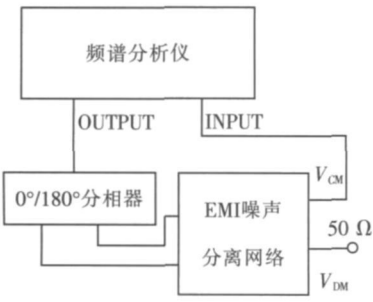


图 10 EMI 噪声分离器特性测试装置

Fig.10 Charaterization testing device of EMI noise separator

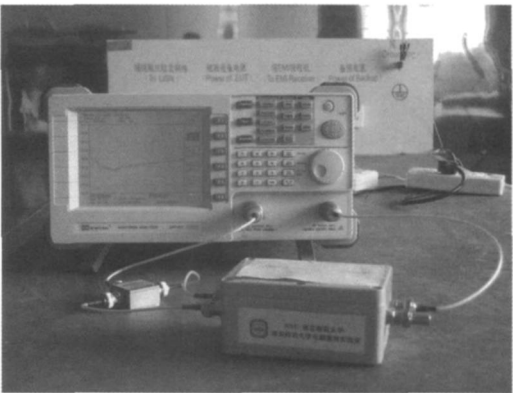


图 11 噪声分离器特性测试

Fig.11 Charaterization testing of noise separator

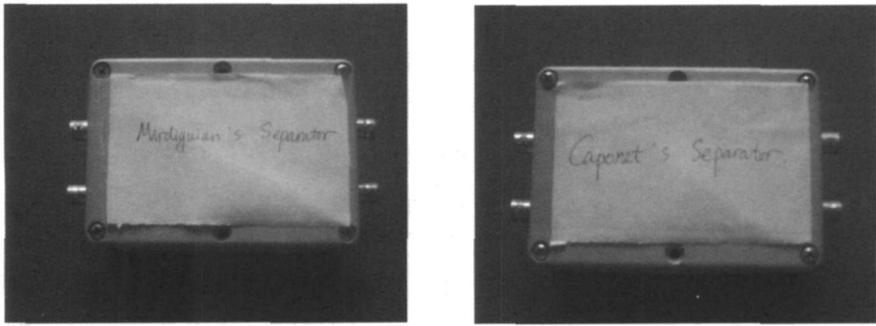


图 12 Mardiguian 和 Caponet 噪声分离器
Fig.12 Mardiguian's and Caponet's noise separator

这里通过上述装置分别测量了 Caponet和 Mardiguian共模插入损耗和共模抑制比, 分别如图 13和图 14所示. 虽然实验和仿真的结果在数值上有一定差距, 但两者性能曲线的趋势保持一致. 仿真得出的抑制比之所以较实验得出的结果好些, 是因为仿真忽略了外部效应 (包括外部的电磁场、导线的分布参数等) 对分离器性能的影响. 所以, 实验与仿真的结果是保持一致的.

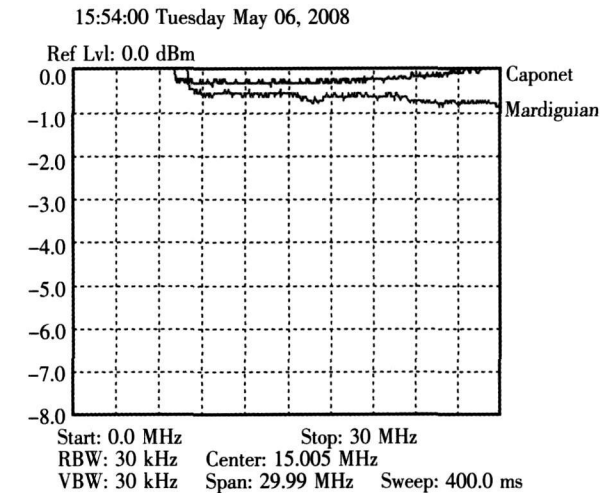


图 13 Caponet 和 Mardiguian 噪声分离器共模插入损耗测量值
Fig.13 CMIL testing results of Caponet's and Mardiguian's noise separator

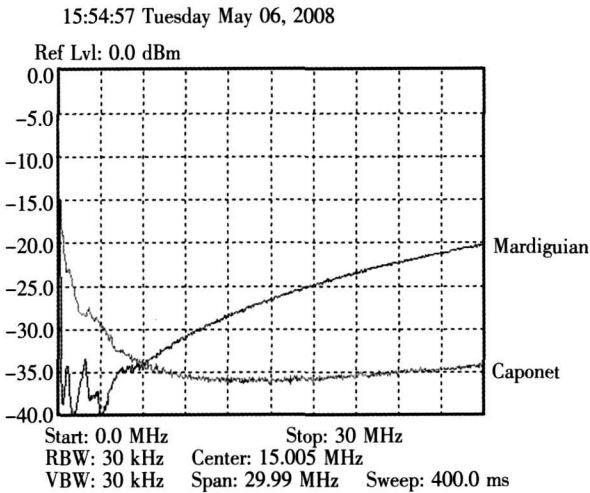


图 14 Caponet 和 Mardiguian 噪声分离器共模抑制比测量值
Fig.14 CMRR testing results of Caponet's and Mardiguian's noise separator

3 结 论

本文对基于硬件和软件的传导性噪声分离技术作了阐述、分析和比较, 提出了噪声分离技术的 3 个设计要求, 并对 Caponet和 Mardiguian的噪声分离器性能进行了仿真比较和实验比较, 对其共模插入损耗和共模抑制比特性的差异作了讨论. 结果表明以射频变压器作为主要分离器件构建的传导性噪声分离器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衰退的现象, 一般有 10~ 20 dB的衰减. 采用 0° 和 180°分相器 /混合器 (splitter/comb iner)取代变压器作噪声分离器, 使干扰模态信号的分离性能得到改善, 特别在高频条件下尤为明显, 但其制造成本却成倍增加. 而基于自耦变压器和共模扼流圈的噪声分离器其共模 /差模插入损耗 (CM IL /DM IL)和共模 /差模抑制比 (CMRR /DMRR)要优于基于普通射频变压器的噪声分离器, 其成本又低于基于分相器 /混合器 (splitter/comb iner)的噪声分离器.

同时基于变压器的噪声分离器, 其杂散参数是影响分离性能的主要因素, 改变变压器绕制方法, 可以减小变压器的杂散参数的影响. 因此改变变压器的绕制方法来改善噪声分离器性能是噪声分离技术的研究热点之一.

此外, 本文中是基于频谱分析仪进行插入损耗和抑制比的测量, 其缺点是部分散射信号被忽略了, 因此测量结果会有偏差. 目前基于散射参数的插入损耗及抑制比的测量方法也是噪声分离技术的研究方向之一.

因此, 设计具有优良分离性能、较低制造成本的噪声分离器是噪声分离技术的研究发展趋势.

[参考文献] (References)

- [1] Paul C R, Hardin K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission[J]. IEEE Trans EMC, 1988, 30(4): 553-560
- [2] See K Y. Network for conducted EM I diagnosis[J]. Electronic Letters, 1999, 35(17): 1446-1447
- [3] Madigan M, Raimbourg J. An alternative method for characterizing EM I filter[C] // Proc of IEEE on EMC, 1999: 882-886
- [4] Ting Guo, Chen D Y, Lee F C. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EM I noise[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(3): 480-488
- [5] Chiu H J, Song T H. A software-based CM and DM measurement system for conducted EM I[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 253-255
- [6] Caponet M, Profumo F, Ferraris L, et al. Common and differential mode noise separation: comparison of two different approaches[J]. Proc IEEE Power Electronics Specialist Conf Vancouver BC Canada, 2001, (17/21): 1383-1388
- [7] Shuo Wang, Fred C Lee, Willem Gerhardus Odendaal. characterization, evaluation, and design of noise separator for conducted EM I noise diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(4): 974-982
- [8] Lo Y K, Chiu H J, Song T H, et al. A software-based CM and DM measurement system for conducted EM I[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 253-255
- [9] 赵阳, 李世锦, 孟照娟, 等. 传导性 EM 噪声的模式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, et al. Technique of conducted EM I noise separation and noise suppression[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2004, 4(4): 1-4. (in Chinese)
- [10] 高攸纲. 电磁兼容总论[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2001.
Gao Yougang. Introduction to Electromagnetic Compatibility[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2001. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]