

# 基于独立分量测量方法的电磁兼容解决方案

李世锦, 赵 阳, 沈雪梅, 尹海平

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 电磁干扰 (EMI) 噪声发射一直是电磁兼容 (EMC) 学科面临的重要问题, 而 EMI 电磁干扰噪声的测量将直接影响到噪声抑制的结果. 提出了基于独立分量测量方法的 EMI 电磁干扰噪声分析和抑制解决方案, 介绍了独立分量测量方法的原理和 EMI 噪声处理软件平台. 通过对传导噪声进行特征提取和模态分析, 为噪声抑制及电磁兼容综合解决方案提供必要信息. 对开关磁阻电机构成的风机调速系统进行传导电磁兼容测试, 并对试验数据进行了对比和分析, 结果表明该方法能有效分离出 EMI 噪声中的各模态分量.

**[关键词]** 独立分量测量, 噪声诊断, 噪声抑制, 电磁干扰噪声

**[中图分类号]** TN43 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2006)04-0005-06

## EMI Noise Solution Scheme Based on Independent Component Measurement

L I Shijin, ZHAO Yang, SHEN Xuemei, YN Haiping

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

**Abstract:** Electromagnetic interference (EMI) is one of important issues in electromagnetic compatibility (EMC) engineering and how EMI noise measurement is done will directly affects the noise suppression results. In this paper an improved EMI noise solution scheme is proposed that differs on presenting an intellectual and unified idea to make noise independent component measurement in conjunction with noise analysis and noise suppression. The principle of independent component measurement and intellectual noise processing software are studied. Also noise characterization and mode analysis are implemented for noise mitigation and future EMC solution scheme. Moreover, EMC experiment for switched reluctance motor (SRM) drive system is conducted to show the efficiency of new method developed in this paper.

**Key words:** independent component measurement (ICM), noise diagnosis, noise mitigation, electromagnetic interference (EMI) noise

## 0 引言

电磁干扰 (EMI) 噪声发射一直是电磁兼容 (EMC) 学科面临的重要问题, 如何测量传导性电磁干扰噪声将直接影响到噪声抑制的效果. 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), 原理如图 1 所示. 尽管该网络能够有效屏蔽来自外部电网的高频干扰或阻止负载产生的高频干扰通过电源插座传入外部电网, 同时又不影响负载正常工作下所提供的工频电流 (power line frequency, 如国内 50 Hz 电流), 并在射频范围内向被测设备提供一个稳定的 50  $\Omega$  的阻抗, 然后将干扰电压耦合到接收机上. 但被测设备产生的干扰电流包括两种干扰模态: 差模电流从火线流出到中线, 共模电流经过火线和中线到地线. 因此, 火线和中线中的差模信号的幅值相同, 相位相反, 而共模信号是幅值和相位都相同. 在总的传导性电磁干扰信号中, 在设备中共模和差模噪声源具备不同的特性, 滤波器的设计方法也由此各不相同, 必须被分别抑制, 然而线阻抗稳定网络只能测量电源线上总的传

收稿日期: 2006-04-01.

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (教外司留 [2003]406号), 中国博士后基金资助项目 (2004036147), 江苏省博士后基金资助项目 (苏人通 [2004]300号) 和南京师范大学优秀青年教师教学科研奖励计划资助项目 (宁师人 [2005]43号).

作者简介: 李世锦 (1976-), 讲师, 主要从事电磁兼容方面的教学与研究. E-mail: lishijin@njnu.edu.cn

导性电磁干扰,并不能测出其中的共模和差模分量.所以传统的 LISN 显然已不能满足要求.迄今为止,针对上述问题已经形成了几种不同的解决方法<sup>[1,2]</sup>.在这些研究的基础上,本文提出了基于独立分量测量方法的 EMI 电磁干扰噪声分析和抑制解决方案,介绍了独立分量测量方法的原理,并随后给出了系统的设计方法和应用实例.

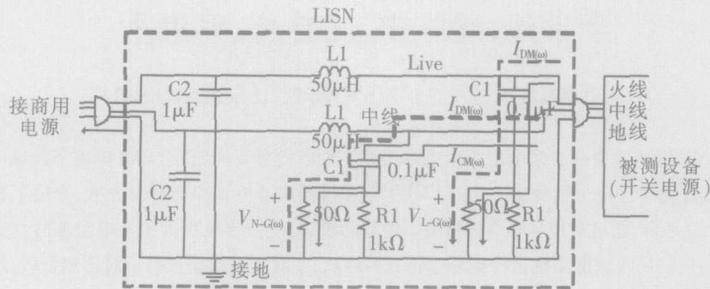


图 1 传导性 EMI 噪声测量中的线阻抗稳定网络

# 1 EM 噪声的独立分量测量方法研究

## 1.1 独立分量测量网络实验研究

如图 1 所示,噪声源即被测设备 EUT 为一个典型单相开关电源(SMPS), LISN 中的 50Ω 表示测试仪器如频谱分析仪的标准阻抗,所有噪声分量由 50Ω 电阻上得到.在线阻抗稳定网络 LISN 的火线端和中线端,由 EM 测量接收机得到的噪声电压应分别为:

$$V_L = V_{CM} + V_{DM} \tag{1}$$

$$V_N = V_{CM} - V_{DM} \tag{2}$$

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.通常,独立分量噪声测量网络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或功率分配器/功率合成器为核心器件来实现网络功能,而软件类型则借助数值计算方法来提取独立分量.

通过作者前期的研究发现<sup>[3]</sup>,就网络性能参数而言,基于硬件的独立分量测量网络无论是插入损耗还是共模或差模抑制比,功率分配器/功率合成器测量网络都优于射频变压器网络,当然,其电路成本也较之昂贵.同时,对于基于软件的独立分量测量网络而言<sup>[4,5]</sup>,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分量测量硬件网络做支撑,所以还只能称为独立分量半软测量技术并非完整的软件测量方法.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.图 2 为实现独立分量测量网络特性研究的实验装置示意图.

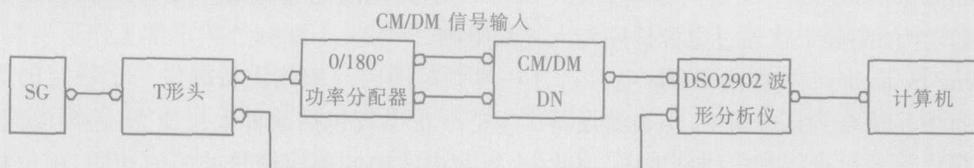


图 2 实验装置示意图

在低频段,使用 SP1641B 型函数信号发生器,它的频率范围为 1 ~ 3 MHz;在高频段,使用 SG-4162AD,它的频率范围为 100 kHz ~ 150 MHz.在网络性能测试中所需的频率范围为 10 kHz ~ 30 MHz. 0/180° 功率分配器用以取得所需的共模或差模输入信号,虚拟仪器 DSO-2902 具有双通道数据采集功能,可用于采集、测试、分析和输出测量数据,以代替频谱分析仪及 TG 扫频源.

在此定义一些参数以对比几种独立分量测量网络的性能:

**差模抑制比:**将差模 DM 信号作为输入信号,测量网络输出端的共模信号 CM.理想情况下这种抑制比应当是无穷大.当然,测量结果通常因为噪声而呈现出不是理想的结果.

**差模插入损耗:**将差模信号作为输入信号 DM,测量网络输出端的差模信号 DM.理想情况下这种抑制比应当是 0.

图 3 为本文研究的分别基于 RF 变压器和分相器/混合器等几种核心器件的传导性 EMI 电磁干扰噪声独立分量测量网络的照片.其参数精度为:最大插入损耗(L):1~5 dB;最小共模抑制比/差模抑制比(CMRR/DMRR):25~40 dB.

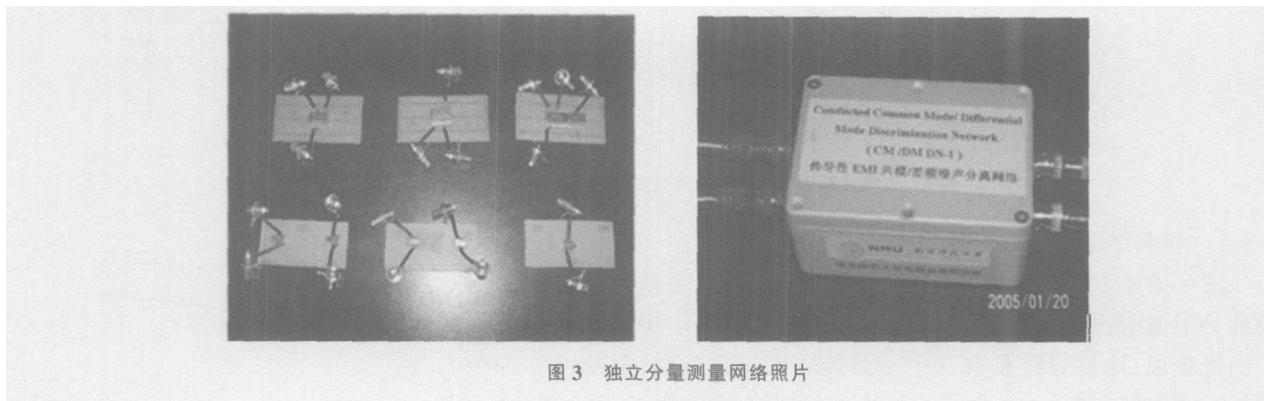


图 3 独立分量测量网络照片

更进一步,由 DMRR 实验结果发现,基于功率混合器的 GUO 网络具有最佳差模抑制特性,PAUL 和 MARDIGUAN 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 几种传导性电磁干扰噪声独立分量测量网络的 DMRR 特性比较 (单位: dB)

$f/\text{MHz}$	SEE 网络	MARDIGUAN 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,各独立分量测量网络的差模抑制特性都有不同程度的退化和衰减,在  $f=1\text{MHz}$  时的低频特性到  $f=10\text{MHz}$  的中频特性,直到  $f=30\text{MHz}$  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  $f=30\text{MHz}$  时也保持了 DMRR 等于 43 dB 的良好特性,而其它网络特性都在 30 dB 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 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.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.

## 1.2 独立分量测量网络理论研究

为对比上述独立分量测量网络性能,本文又进一步采用电路仿真方式对独立分量测量网络的电路特性进行了研究.

以电路仿真进行理论分析,并用 Spice 软件进行仿真. PAUL<sup>[11]</sup>和 GUO<sup>[12]</sup>网络的仿真电路模型如图 4 所示. PAUL 网络和 GUO 网络的差模抑制比结果如图 5 所示.

以图 5 可知,两种网络差模抑制比的理论分析结果和实验结果吻合较好,具有良好一致性.这意味着,当测试条件比较困难时,亦可通过电路仿真方法代替实验进行分离网络的特性研究.

## 1.3 其它参数对独立分量测量网络性能影响的研究

尽管独立分量测量网络的噪声模态提取性能主要由网络核心器件及电路结构决定,但其它诸如印刷电路板连接线缆、器件的插入损耗与平衡度等因素也都是在独立分量测量网络制作中需要考虑的重要问题.

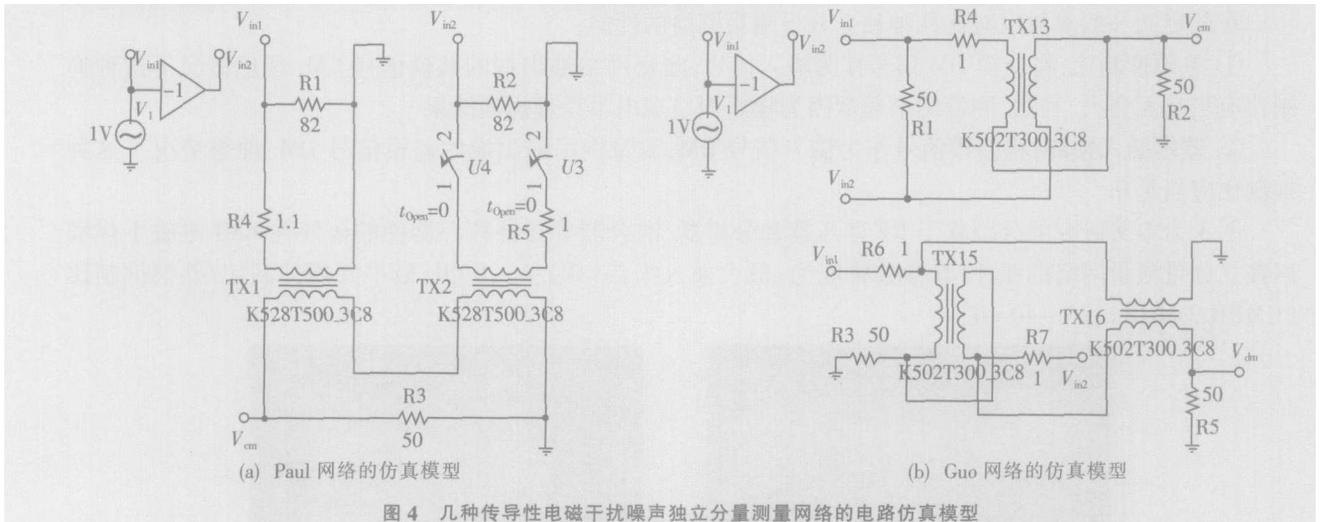


图 4 几种传导性电磁干扰噪声独立分量测量网络的电路仿真模型

1.3.1 印刷电路板连接线缆的影响

图 6 描述了 25 cm 非屏蔽普通导线和 2.5 cm 屏蔽导线两种 PCB 连接线缆的插入损耗特性. 由图可见, 在 5 MHz 以下的低频段, 两种导线具有几乎一致的插入损耗特性, 但随着频率的逐渐升高, 两者之间的性能差异越来越明显, 在 30 MHz 时相差的幅值达到了最大值 14 dB. 这将直接影响独立分量测量网络噪声模态提取性能的优劣, 印刷电路板连接线缆的影响也从而成为设计独立分量测量网络 PCB 布局中的必要考虑因素.

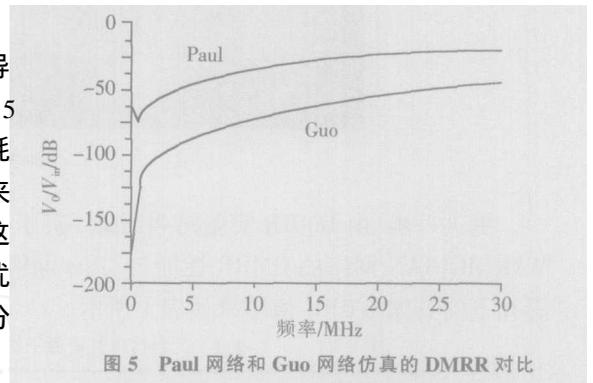


图 5 Paul 网络和 Guo 网络仿真的 DMRR 对比

1.3.2 器件插入损耗的影响

图 7 描述了独立分量测量网络中的核心器件 — 0°/180° 功率分配器的插入损耗特性. 由图可见, 0° 功分器插入损耗的最大值为 1.9 dB, 略高于产品技术规范给定值 1.0 dB. 而 180° 功分器的最大插入损耗值超过技术规范给定值 0.5 dB 约 2 dB. 虽然构成独立分量测量网络的各个器件之间, 最终插入损耗不是简单的线性叠加关系, 但显然, 不同器件之间各异的插入损耗值会对测量网络的独立分量识别能力产生较大影响.

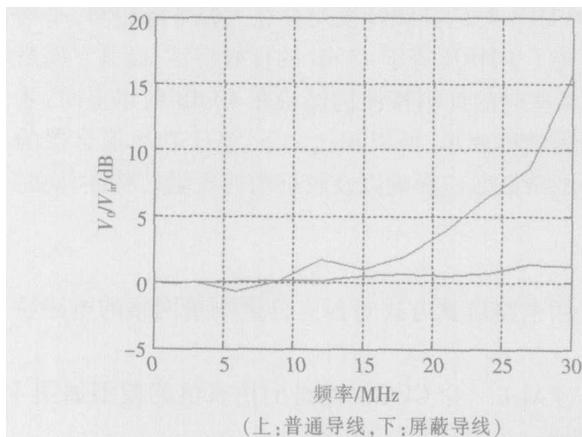


图 6 0.25 m 普通导线和 2.5 cm 屏蔽导线的插损曲线

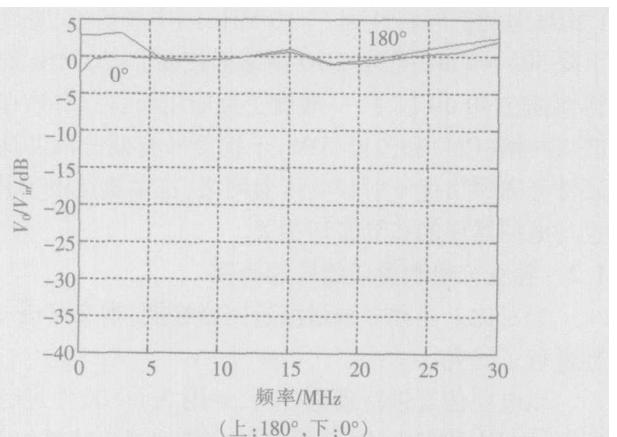


图 7 0°/180° 功率分配器的插入损耗参数的实测

1.3.3 器件平衡度的影响

图 8 给出了频率为 1 MHz 和 30 MHz 时, 0° 功率分配器两个不同输出端的时域和频域波形. 从上面的波形可以看出, 0° 功率分配器的两路波形相位基本保持一致, 最大峰 - 峰值电压误差保持在 0.1 dB 范围内, 频率漂移在 0.2 MHz 范围内. 可见, 0° 功率分配器平衡度比较理想, 对独立分量测量网络的模态识别能力不会造成负面影响.

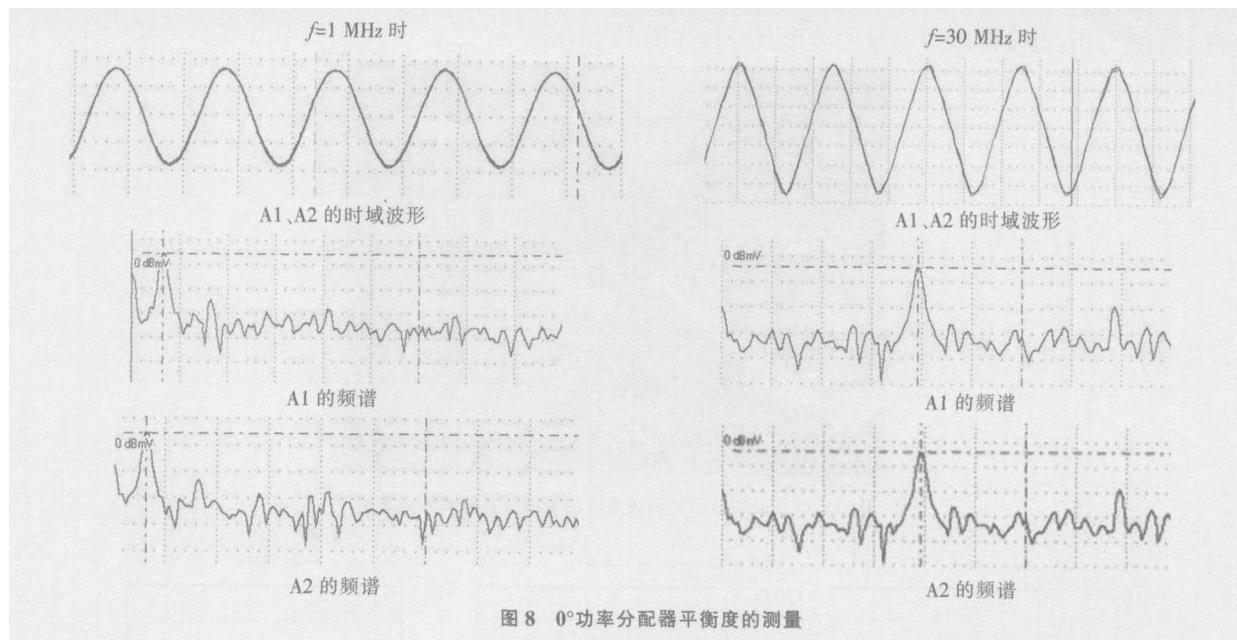


图8 0°功率分配器平衡度的测量

通常,在独立分量测量网络设计的初期阶段,应充分考虑到上述器件因素对网络性能的影响,并尽量进行补偿,将误差减至最小,以最大程度的提升测量网络的独立分量识别能力。

## 2 基于独立分量测量的电磁兼容解决方案

传导性电磁干扰(EMI)噪声解决方案可设计分为3个部分,如图9所示。第一部分为基于独立分量测量网络的噪声诊断模块,其主要功能为噪声模态提取,即共模(CM)、差模(DM)分量特征分析。第二部分为基于EMI滤波器设计的噪声抑制模块,即根据独立分量测量网络所得到的噪声分量模态提取结果,针对具体噪声源的不同特性,确定滤波器的类型、结构、网络电器元件等参数,并最终设计制作EMI滤波器实现系统的噪声抑制。第三部分为系统软件设计模块,软件界面如图10所示。

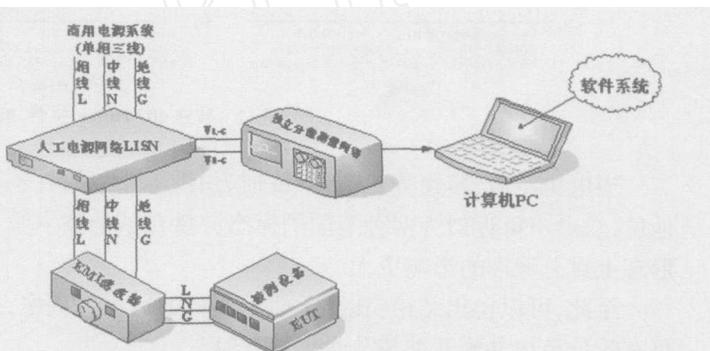


图9 基于独立分量测量方法的EMI噪声解决方案示意图

作为实例,本文以开关磁阻电机调速系统作为被测设备(噪声源)进行了实际传导电磁干扰(EMI)噪声测量。系统参数为:电机相数为单相;容量为250W;结构为AC-DC-AC;类型为开关磁阻电机调速系统。

以此系统产生传导性EMI噪声,并作为自动测试系统的检测对象。该系统由可调速开关磁阻电机,线阻抗稳定网络LISN,噪声分离网络DN及GSP-827频谱分析仪及电脑测试软件构成。在测试中改变了多组开关磁阻电机的转速及转矩等参数,同时以频谱分析仪对EMI噪声的各种形态进行采集分析。现场测试装置如图11所示。以频谱分析仪对EMI噪声的各种形态进行了采集分析,其实际噪声分量的波

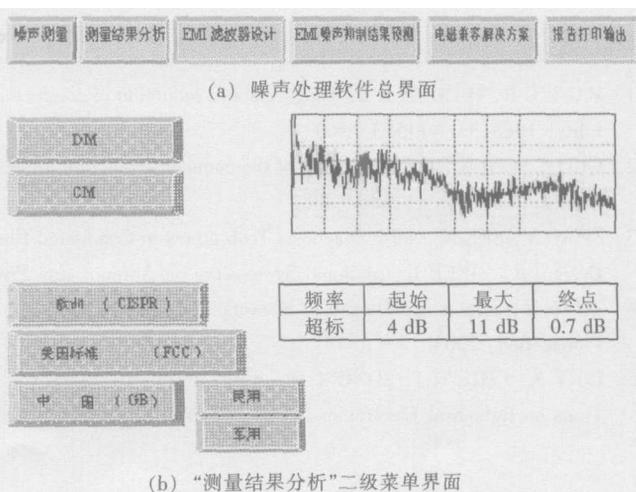


图10 基于独立分量测量方法的EMI噪声电磁干扰解决方案中的软件平台

形及分析如图 12 所示.



图 11 以开关磁阻电机调速系统为被测设备的实验装置图

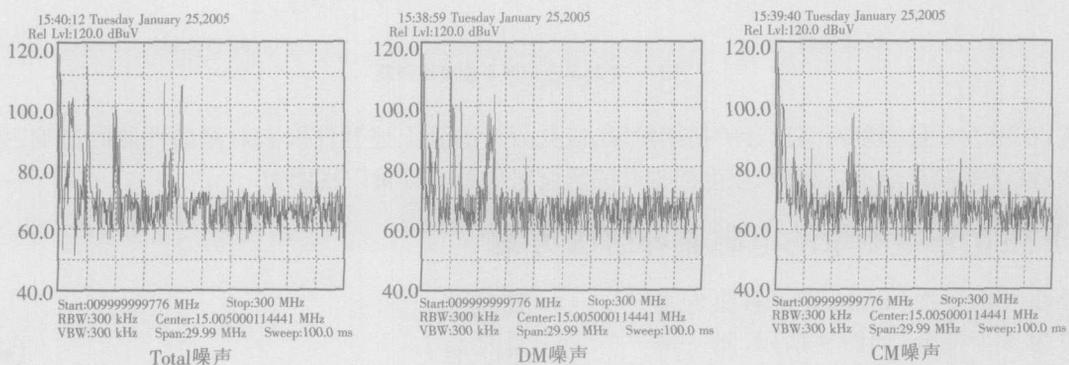


图 12 转速 407 r/min, 空载, 输入电压 75 V 时的噪声特征

当电机空载, 转速为 407 r/min 时, 由图 12 可见, 在不同的频率段, 共模 CM 和差模 DM 分别占据主导地位, 总噪声可近似为两种不同的模态分量在整个频率段上的叠加. 比较而言差模 DM 分量在噪声幅值和形态上对总噪声的影响更大.

至此, 可以得出结论: 在开关磁阻电机的运行过程中, 基于独立分量测量的传导性电磁干扰解决方案可有效分离出共模及差模分量, 效果良好.

[参考文献] (References)

- [1] PAUL C R, HARD N K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1988, 33 (4): 553- 560.
- [2] GUO T, CHEN D Y. Separation of the common-mode and differential-mode conducted EM I noise[J]. IEEE Trans Power Electronics, 1996, 11 (3): 480- 488.
- [3] ZHAO Y, SEE K Y. Noise Diagnosis Techniques in Conducted Electromagnetic Interference Measurement: Methods Analysis and Design[R]. IEEE International Symposium on Antenna and Propagation, 2004.
- [4] ZHAO Y, SEE K Y. Diagnosis Network Performance for Conducted EM I Measurement[R]. IEEE Int Sym on Antenna and Propagation, 2003.
- [5] 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.

[责任编辑: 严海琳]