

# 传导性 EM I 噪声的智能处理及参数建模研究

沈雪梅, 赵 阳, 李世锦, 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] 针对现阶段大量的传导性电磁干扰问题仍不断出现且尚未得到很好地解决的现象, 对传导性电磁兼容进行了综合技术研究, 提出传导性电磁干扰噪声诊断与抑制一体化的智能处理系统, 将软件设计与硬件设计相结合, 对噪声进行相应的处理, 同时对传导噪声智能处理系统进行参数建模, 给出将技术解决方案与经济成本优化联系在一起的综合数学模型和设计指导方法, 同时给出建模后的测试装置和相关实例, 并对实际测量的数据进行了实验对比, 结果表明该系统能有效解决电源线上的 EM I 噪声的干扰问题。

[关键词] 电磁干扰, 噪声诊断, 噪声抑制, 参数建模

[中图分类号] TN 43 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2006) 04-0011-06

## Intellectual System of Conducted EM I Noise and its Parameter Modeling

SHEN Xuemei, ZHAO Yang, LI Shijin, YIN Haping

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

**Abstract** As most problems of the conducted EM I noise is not solved so perfectly, the paper presents an intellectual system of conducted noise diagnosis and suppression. The system is consisted of software and hardware, aims to dealing with the noise properly. Research on parameter modeling of the intellectual system is done. It presents a mathematical model and design guidance both technically and economically. The paper also gives the test setup and an example. The experimental results show that this intellectual system is efficient in solving electromagnetic noise on the power line.

**Key words** electromagnetic interference (EM I), noise diagnosis, noise suppression, parameter-modeling

## 0 引言

大量的传导性电磁干扰问题在现实中不断出现且尚未得到很好解决, 由于缺乏能将技术解决方案与经济成本优化联系在一起的综合数学模型和设计指导方法, 困扰了那些传导性电磁干扰 (EM I) 噪声问题层出不穷的中小型电力、电器及电子设备制造等企业和广大的低端电力用户. 可以说真正既满足技术先进性又具有经济竞争力的传导噪声解决方案还不多见, 理论上也不成熟.

本文就解决传导性电磁兼容问题进行了综合技术研究, 将传导性 EM I 噪声分析及控制流程的技术过程与经济过程有机结合, 首次在传导性 EM I 方面实现从噪声的监测、诊断分析到噪声的消除与控制、最后实现方案的经济性优化和决断全过程的三位一体化过程.

## 1 传导性电磁干扰噪声智能处理

目前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网络 (LISN), 但其只能提供电力线上的同时包含共模 (CM) 和差模 (DM) 叠加的混合干扰信号<sup>[1]</sup>, 由于不同模态信号确定不同滤波器性能、拓

收稿日期: 2006-04-18

基金项目: 中国博士后基金资助项目 (2004036147)、江苏省博士后计划基金资助项目 (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: 沈雪梅 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事电磁兼容方面的学习与研究. E-mail: gracy\_0127@126.com

通讯联系人: 赵 阳 (1966-), 博士, 教授, 主要从事电磁兼容方面的教学与研究. E-mail: zhaoyang2@njjnu.edu.cn

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电源线滤波器设计帮助不大.为解决上述问题,国外先后有多位专家对 EM I 噪声的分离技术进行了研究.

### 1.1 传导性 EM I 噪声的诊断

美国的 PAUL<sup>[2]</sup>首先提出了一种分离网络,但该网络只能测量单模态信号,而且因引入机械式开关而带来网络的不平衡.新加坡的 SEE<sup>[3]</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,也避免了采用机械开关带来的不利影响.法国的 MARDIGUAN<sup>[4]</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.与变压器方案不同的是,其后美国的 GUO<sup>[5]</sup>又提出了采用 0° /180°分相器 /混合器取代变压器作分离网络,分别用 0°和 180°的混和器实现 CM 和 DM 的模式分离和输出.

基于变压器的分离网络在高频条件下因杂散效应会产生明显的模态信号抑制性能衰退的现象,而基于分相器 /混合器的网络虽然使分离性能在高频条件下得到明显的改善,但其制造成本却成倍增加.表 1、2 是该 4 种网络的实验特性对比.

表 1 4 种网络的共模抑制比 (CMRR) 实验特性对比 /dB

$f / \text{MHz}$	SEE 网络	PAUL 网络	MARDIGUAN 网络	GUO 网络
1	50	60	62	67
5	37	47	45	48
10	30	37	37	40
20	22	25	29	34
30	21	20	25	29

表 2 4 种网络的共模插入损耗 (CM IL) 实验特性对比 /dB

$f / \text{MHz}$	SEE 网络	PAUL 网络	MARDIGUAN 网络	GUO 网络
1	3	2	0.8	1
5	3.5	2.5	1	1.1
10	4	3.5	1.1	1.2
20	4.5	3.8	1.2	1.2
30	5	4	1.5	1.4

本文提出了一种全新的纯电阻分离网络,由于该网络由纯电阻构成,高频时杂散效应非常小,可以极大地提高网络的分离性能,在噪声的抑制方面预计可以比基于变压器的分离网络提高 15~ 20 dB.图 1 是该纯电阻网络的原理图.

以上纯电阻网络仅分离了 CM 噪声,要得到 DM 噪声还需辅之以软件分离的方法,如图 2 所示.该系统包含了 LISN、分离网络、频谱分析仪、计算机和被测设备 (EUT) 几个部分,图 3 是与之相应的实验装置图.频谱分析仪可以检测到来自 LISN 的火线和中线上的总噪声,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.

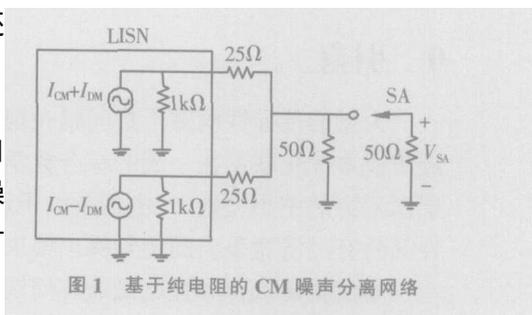


图 1 基于纯电阻的 CM 噪声分离网络

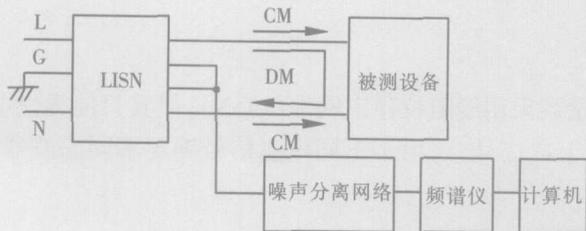


图 2 基于软分离的系统结构示意图



图 3 实验装置图

由于

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

式中,  $V_L$  和  $V_N$  分别是火线 L 和中线 N 端测得的混合噪声信号,  $V_{CM}$  和  $V_{DM}$  分别是 CM 和 DM 噪声信号. 而  $|V_L|$ ,  $|V_N|$  和  $|V_{CM}|$  都可以直接测量获得, 剩下的  $|V_{DM}|$  可从方程 (1) 计算得到.

### 1.2 传导性 EMI 噪声的抑制

在传导性噪声模式有效分离的基础上, 进行 EMI 滤波器设计使之对 EMI 噪声进行有效控制, 满足电磁兼容标准, EMI 滤波器原理如图 4 所示.

在噪声模式有效分离的基础上, 分别读取 CM 和 DM 噪声, 将这两种模式的噪声与电磁兼容标准 (如 FCC) 进行比较, 得出噪声超标的起始和截止频率, 作为滤波器设计的依据; 得到噪声的最大超标量, 并留有一定的安全余量, 作为滤波器阻带的插入损耗.

为更好地逼近滤波器的理想低通衰减特性, 采用基本遗传算法中染色体的编码方法进行 EMI 滤波器的优化设计, 过程简述如下:

第一优化变量: 由于电容具有一定等级, 数值上不能连续变化, 于是确定优化变量为电感值  $L(k)$  ( $k=1, 2, \dots, n$ ). 第二优化变量的边界矩阵: 在这里, 若电感值太大, 一则增加经济成本, 二则体积过大带来制作上的麻烦, 所以将电感值选择在 30 mH 以下. 第三初始群体的产生: 滤波器节数越多则  $M$  值越大, 滤波器节数越少则  $M$  值越小, 一般情况下变量  $M$  随问题复杂度的增大而加大, 调用初始化函数时, 必须给定群体的大小  $M$ . 第四确定目标函数: 使 EMI 低通滤波器的通带插入损耗最低, 阻带插入损耗最高.

设计滤波器时只有当滤波器与噪声源的内阻抗相匹配才能获得比较好的噪声滤波特性. 这里用双电流探测法<sup>[6]</sup>对负载的内阻抗进行测试. 该研究方法采用两个电流探头, 可以分别得到开关电源在 EMC 规定范围的各项频率点的 CM、DM 阻抗, 并且具有较好的精度.

如图 5 所示, 双电流探头法测试的实验装置包括了一个注入式电流探头、一个检测式电流探头、一个信号发生器和一个频谱分析仪. 要测量的未知阻抗以  $bb'$  端的阻抗  $Z_X$  来表示, 两电流探头和耦合电容以及未知阻抗组成了一条回路.

根据等效电路分析, 最终可以分别通过 3 种状态, 即短路、标准电阻负载和开关电源正常工作 3 种负载状态下的电流探头测量值, 得到最后的噪声源内阻抗, 可表示为

$$Z_{in} = \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_S=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_S=SMPs}} - \frac{R_{std} \cdot V_P \Big|_{Z_S=R_{std}}}{V_P \Big|_{Z_S=0}} \quad (2)$$

式中,  $V_P$  为电流探头线圈上的感应电压值.

### 1.3 传导噪声智能处理系统的实现

图 6 是传导性 EMI 噪声智能处理系统的硬件测试示意图: 主测量装置线阻抗稳定网络 (LSN) 一端接商用电源, 另一端接被测设备 (EUT). 在主测量装置的信号输出端获取被测设备的 EMI 噪声后, 输入到

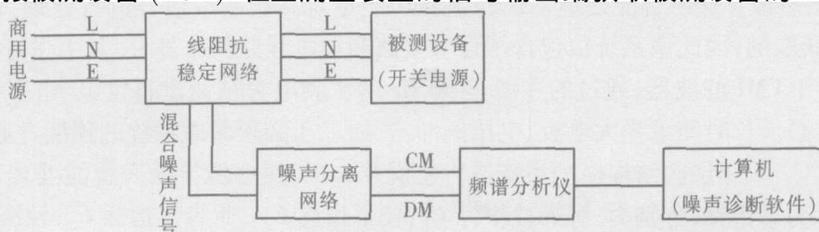


图 6 传导性 EMI 智能测试系统示意图

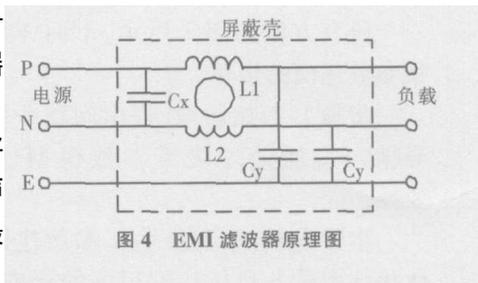


图 4 EMI 滤波器原理图

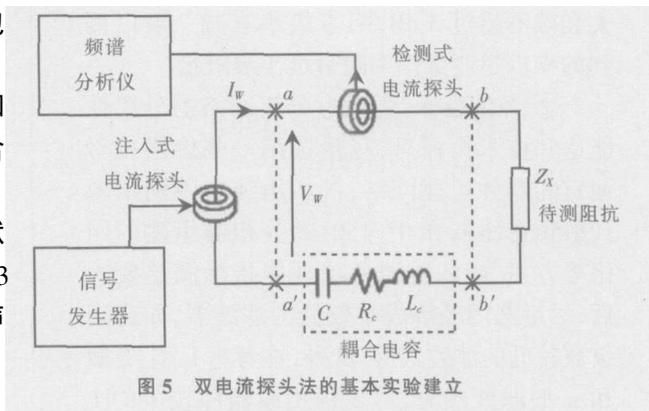


图 5 双电流探头法的基本实验建立

CM /DM 分离网络进行模态分离. 分离网络的输出信号即研究所需的独立的 CM、DM 信号输入至频谱分析仪, 而后由诊断软件对从频谱仪传送到计算机上的信号进行处理. 该智能装置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了有益的诊断信息.

## 2 传导噪声一体化解决方案的参数建模

研究方法如图 7 所示, 下面详细阐述决策参数建模的步骤:

**步骤 1 起始阶段.** 提出问题并认识对传导噪声智能处理决策参数模型研究的重要性.

**步骤 2 构造问题.** 为了参数建模目标具体化且衡量各目标达到程度的标准, 首先需要清晰定义问题的边界及环境, 主要包括技术指标、经济指标和其它辅助指标.

### 技术指标:

**模态分离网络:** 必须能将共模与差模噪声有效分离, 在 10 kHz ~ 30 MHz 内 CM /DM 的插入损耗小于 3 dB, 模态抑制比大于 30 dB.

**EMI 滤波器:** 由于传导 EMC 的频段定义在 10 kHz ~ 30 MHz 因此滤波器为低通滤波器, 0~ 10 kHz 通带, 10 kHz 以上阻带; 通带最大衰减不超过 3 dB, 阻带最小衰减一般以测到的噪声超调量作为阻带最小衰减量.

**经济指标:** 当噪声分离网络的分离性能达到技术指标后, 尽量选用一些价格相对便宜的器件组建网络, 例如用纯电阻网络取代射频变压器和 0° /180° 的分相器组建的网络等方案. 当滤波器各项性能指标满足要求后, 尽量选用经济成本较低的滤波器, 如选用级数较低的滤波器等. 此外, 在考虑 L 型和  $\pi$  型滤波器时, 尽量选用原器件较少的 L 型滤波器. 若可以取代电感 L, 则尽量选用 RC 滤波和有源滤波.

**可靠性:** 传导性噪声经过抑制与 FCC 标准相比时必须留有一定的安全阈值, 一般考虑 5~ 10 dB $\mu$ V 左右, 以保证系统稳定可靠.

**兼容性:** 原电源系统经过传导性噪声抑制后必须还能正常稳定工作, 且同时满足 FCC 的电磁兼容标准, 所以要求噪声智能处理系统具有一定兼容性.

**预期寿命:** 虽然传导噪声智能处理系统的主要功能是对高频噪声信号进行处理, 但该高频信号是通过电源电路进行获取的, 因此该系统由包含了强电线路和弱电线路两个部分. 其中强电线路包括了线阻抗稳定网络 (LISN) 和 EMI 滤波器, 通过的主要是 50 Hz 的工频电为被测设备供电. 由于系统主要应用于大功率用电系统中, 必须长时间承受大电流、电压的冲击, 所以还必须考虑系统的预期寿命.

**步骤 3 构造模型.** 采用层次结构模型系统进行建模及分析, 建立传导噪声智能处理系统的四级评价指标体系. 一级指标为总指标, 分别为: 可靠性指标  $C_1$ , 技术指标  $C_2$ , 兼容性指标  $C_3$ , 经济指标  $C_4$ , 系统寿命  $C_5$ . 二级指标为总指标的细化, 分别为: 分离网络技术指标  $D_1$ , 滤波器技术指标  $D_2$ , 系统技术指标  $D_3$ , 分

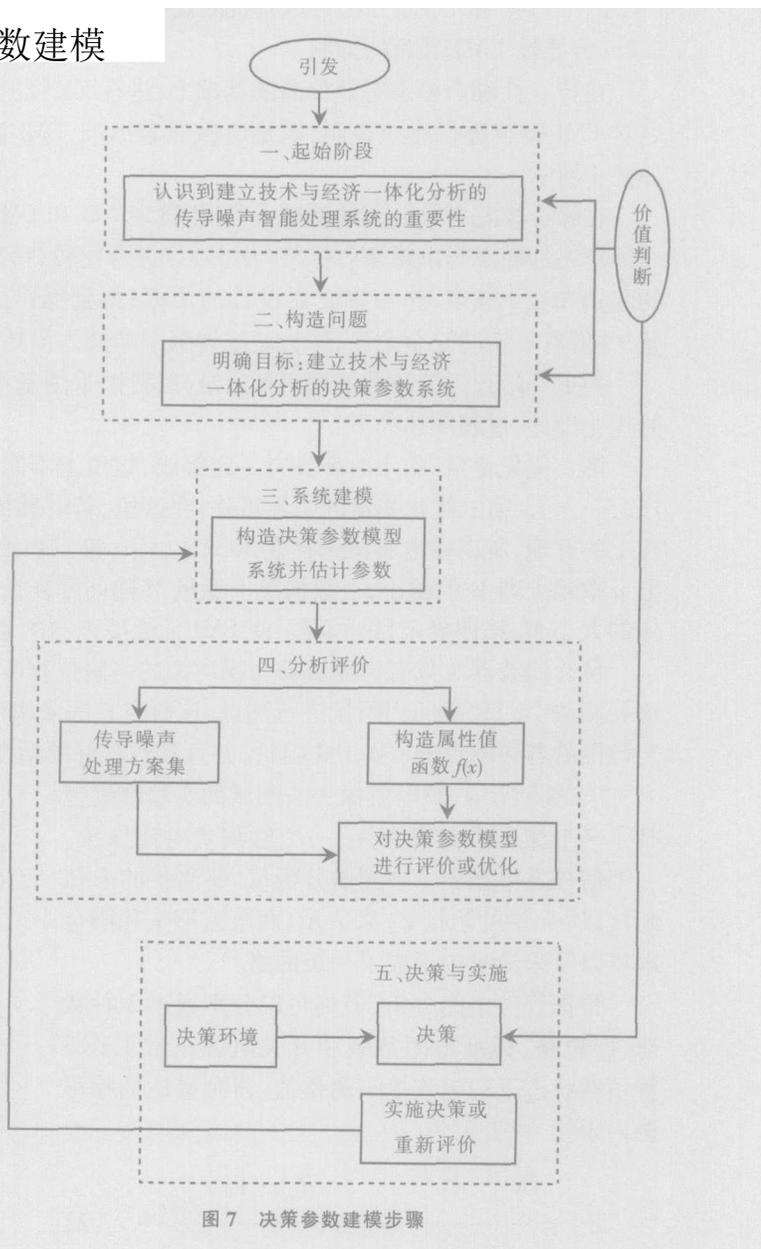


图 7 决策参数建模步骤

离网络经济指标  $D_4$ , 滤波器经济指标  $D_5$ ; 三级指标为设计指标: 分离网络设计  $M_1$ , 滤波器设计  $M_2$ . 四级指标为各网络及滤波器的具体指标: PAUL 的网络  $E_1$ , SEE 的网络  $E_2$ , MARDIGU IAN 的网络  $E_3$ , GUO 的网络  $E_4$ , 纯电阻网络  $E_5$ , L 型滤波器  $F_1$ , T 型滤波器  $F_2$ ,  $\pi$  型滤波器  $F_3$ , RC 滤波器  $F_4$ , 有源滤波器  $F_5$ .

而后确定各指标在综合指标评价体系中的权重系数. 把指标的重要性做成对比较, 设有  $n$  个指标, 则需比较  $C_n^2 = n(n-1)/2$  次. 把第  $i$  个指标对第  $j$  个指标的重要性记为  $a_{ij}$ , 并认为这就是属性  $i$  的权  $w_i$  和属性  $j$  的权  $w_j$  之比的近似值,  $a_{ij} \approx w_i/w_j$ ,  $n$  对指标成对比较的结果为矩阵  $A$ :

$$A = [a_{ij}]_{n \times n} \approx [w_i/w_j]_{n \times n} \quad (3)$$

步骤 4 分析评价. 设传导性噪声智能处理系统的综合指标  $F$ , 下级各指标在  $F$  中的权重分别为  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 5$ ),  $C_i$  为确定的各指标, 则

$$F = \sum_{i=1}^5 w_i C_i \quad (4)$$

其中, 技术指标  $C_2$  的下层各指标在  $C_2$  中所占权重分别为  $w_{2j}$  ( $j = 1, 2, 3$ ), 经济指标  $C_4$  的下层各指标在  $C_4$  中所占权重分别为  $w_{4k}$  ( $k = 1, 2$ ); 在分离网络和滤波器设计中, 各有 5 种方案, 假定每种分离网络的设计方案技术指标权重为  $\alpha_m$ , 经济指标权重为  $\beta_m$ , ( $m = 1, 2, \dots, 5$ ); 每种滤波器设计方案技术指标权重为  $\lambda_n$ , 经济指标权重为  $\mu_n$ , ( $n = 1, 2, \dots, 5$ ), 可得

$$F_{m,n} = \sum_{i=1}^5 w_i C_i = w_1 C_1 + w_2 (w_{21} \alpha_m E_m + w_{22} \lambda_n F_n + w_{23} D_3) + w_3 C_3 + w_4 (w_{41} \beta_m E_m + w_{42} \mu_n F_n) + w_5 C_5 \quad (m, n = 1, 2, \dots, 5) \quad (5)$$

根据上式可求得  $\max F_{m,n}$ , 也就是所求的最优传导性噪声智能处理方案.

步骤 5 实施阶段. 根据上述评价结果付诸实施, 完成传导性噪声的智能处理.

### 3 试验分析

根据实验所测得的噪声情况以及决策建模的结果, 并结合现有技术条件, 传导噪声智能处理系统如下: 选用 GUO 的网络作为噪声分离网络, 并选用 L 型滤波器, 用开关电源作为负载, 如图 8 搭建完成传导性噪声的智能处理系统.

如图 9 所示, 经过决策参数建模, 选用合适的噪声分离网络和滤波器设计后, 可以显著地将噪声信号进行诊断和抑制. 从图 9 中总噪声、CM 和 DM 噪声的对比可见, CM 和 DM 噪声已得到明显的分离, 总噪声中 CM 噪声占主导地位. 从各噪声加与不加滤波器的对比可见, 系统加入滤波器后对噪声进行了显著的抑制. 不加滤波器时, 总噪声在 2.5 MHz 的频率点为 90 dBuV, CM 噪声在 3 MHz 的频率点为 92 dBuV, DM 噪声保持在 80 dBuV 左右; 加入滤波器后, 总噪声在 2.5 MHz 的频率点下降至 70 dBuV 以下, CM 噪声在 3 MHz 的频率点下降至 70 dBuV 以下, DM 噪声下降至 70 dBuV 左右, 各噪声都得到了显著的抑制. 值得提出的是, 由于滤波器各组成元件性能的影响, 使得滤波器在高频时未能很好地发挥滤波作用, 只能在 10 kHz ~ 6 MHz 的范围对噪声进行有效抑制, 如何提高滤波器的高频滤波性能仍是一个值得研究的重要问题.



图 8 传导噪声智能处理系统

### 4 结论

本文对传导性 EM I 干扰信号的模态分离方法作了分析、阐述和比较, 并对 EM I 滤波器的设计以及整个传导性 EM I 噪声智能处理装置进行了讨论. 同时给出了传导噪声一体化处理的决策参数建模过程, 将技术参数与经济参数融合在一起, 给出了部分实验结果. 结果表明, 根据数学模型建立的噪声综合智能处理系统能有效地对传导性噪声进行诊断和抑制.

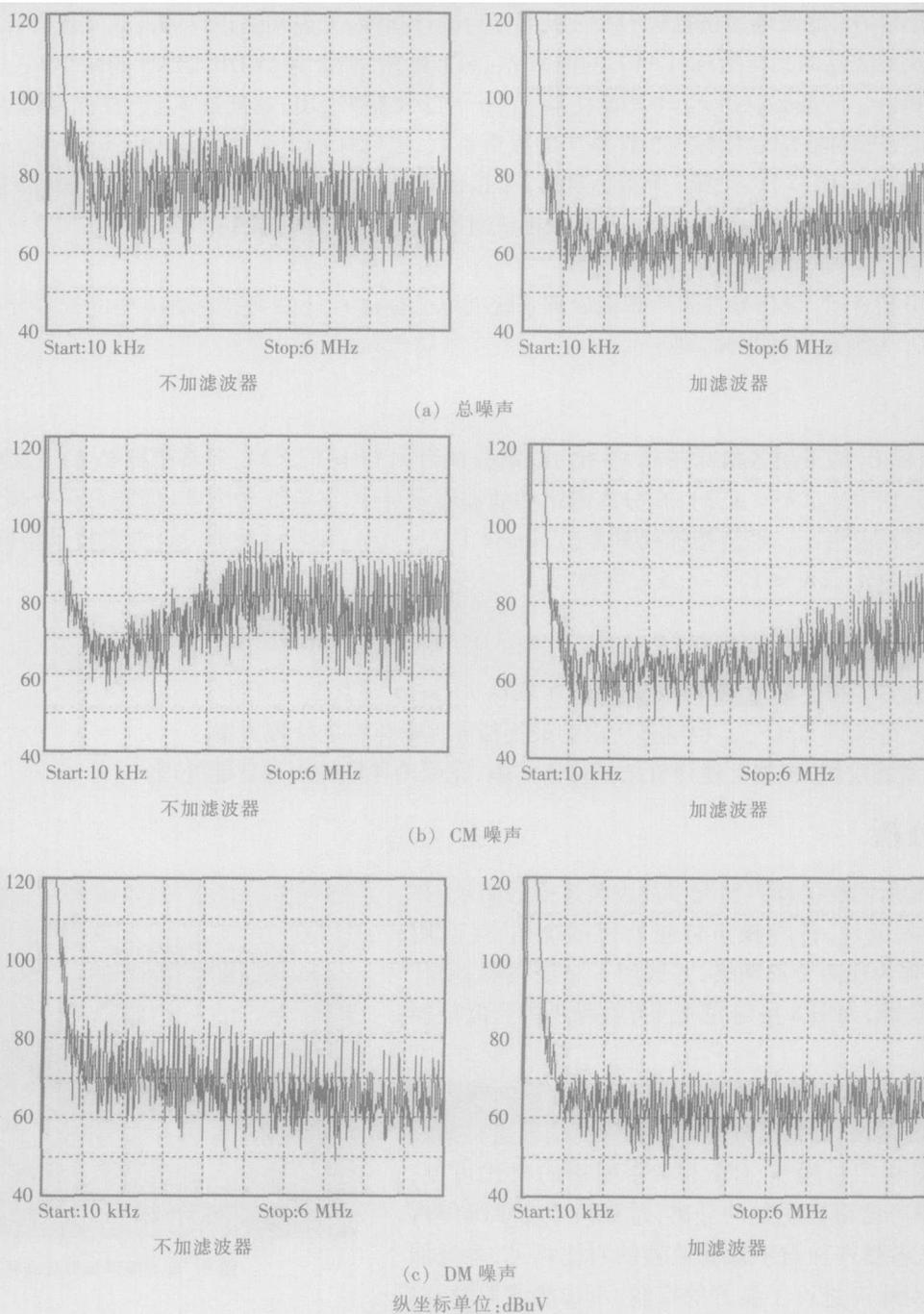


图 9 传导噪声的智能处理结果

[参考文献] (References)

[1] 赵阳, 李世锦, 孟照娟, 等. 传导性 EM 噪声的模态分离与噪声抑制技术探讨 [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 EMI noise separation and noise suppression [J]. Journal of Nanjing Normal University: ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 2004, 4(4): 1-4 (in Chinese)

[2] PAUL C R, HARDIN K B. Diagnosis and reduction of conducted noise emission [J]. IEEE Trans EMC, 1988, 30(4): 553-560

[3] SEE K Y. Network for conducted EMI diagnosis [J]. Electronics Letters, 1999, 35(17): 1446-1447.

[4] MARDIGUIAN M, RAMBOURG J. An alternative method for characterizing EMI filter [J]. Proc of IEEE on EMC, 1999(2): 882-886

[5] GUO TING, 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] SEE K Y, YANG L. Measurement of noise source impedance of SMPS using two current probes [J]. Electronics Letters, 2000, 36(21): 1774-1776

[责任编辑: 严海琳]