

基于散射参数与差分进化算法的 EMI 噪声源阻抗提取方法

马 浩,裴亚康,赵 阳,张 成,孙逸群,周孟夏

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院,江苏 南京 210023)

[摘要] EMI 滤波器是抑制传导 EMI 噪声的有效手段,而精确的噪声源阻抗提取是滤波器设计的关键。传统的阻抗提取方法散射参数法、双电流探头法,只能提取噪声源阻抗的幅值和相位信息,无法准确描述噪声源的阻抗特性。提出了一种散射参数法与差分进化算法相结合的噪声源阻抗提取方法,该方法可以精确提取噪声源内阻抗的等效电路参数,为其滤波器设计提供重要的参考。该方法首先根据散射参数法获取噪声源阻抗信息,然后利用差分进化算法处理阻抗信息以确定其等效电路参数。再根据提取的内阻抗等效电路参数设计 EMI 滤波器。最后,进行了滤波器设计与传导 EMI 噪声抑制实验。实验结果表明,基于散射参数与差分进化算法设计的滤波器具有较好的传导 EMI 噪声的抑制效果。

[关键词] 噪声源阻抗,散射参数,差分进化算法,EMI 滤波器

[中图分类号] TM934.7 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2021)04-0013-06

EMI Noise Source Impedance Extraction Method Based on SP-DE Algorithm

Ma Hao, Pei Yakang, Zhao Yang, Zhang Cheng, Sun Yiqun, Zhou Mengxia

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: EMI filter is an effective means to suppress conducted EMI noise, and accurate noise source impedance extraction is the key to filter design. Traditional impedance extraction methods, such as the scattering parameter (SP) method, dual current probe method, etc., can only extract the amplitude and phase information of the noise source impedance, and cannot accurately describe the impedance characteristics of the noise source. In view of this, this paper proposes a noise source impedance extraction method combining the SP method and the differential evolution (DE) algorithm. This method can accurately extract the equivalent circuit parameters of the noise source impedance and provide an important reference for its filter design. This method first obtains the noise source impedance information according to the SP method, and then uses the DE algorithm to process the impedance information to determine its equivalent circuit parameters. Finally, the EMI filter is designed according to the extracted internal impedance equivalent circuit parameters. Taking a switching power supply as an example, the filter design and conducted EMI noise suppression experiments are carried out on the basis of the method proposed in this article. The experimental results show that the filter designed on the basis of the SP-DE method has a better suppression effect of conducted EMI noise.

Key words: noise source impedance, scattering parameter, DE algorithm, EMI filter

近年来,随着开关电源高频化和小型化的不断发展,开关电源设备内部产生的传导电磁噪声越来越严重^[1]。采用 EMI 滤波器是抑制传导电磁噪声的有效手段,而噪声源内阻抗的提取是开关电源 EMI 滤波器设计的关键。

传统的噪声源阻抗提取方法主要有:插入损耗(insertion loss, IL)法、电流探头(current probe, CP)法和散射参数(scattering parameter, SP)法。IL 法是通过在负载和 EUT 之间并联或串联一个标准阻抗来计算 EUT 阻抗,然后分别测量有无标准阻抗状态下电路的总插入损耗。但是,在实际应用中,当被测阻抗接近

收稿日期:2021-04-20.

基金项目:江苏省社会发展项目(BE2019716)。

通讯作者:赵阳,博士,教授,研究方向:电磁兼容。E-mail: zhaoyang2@njnu.edu.cn

负载阻抗时,IL 法的精度较低. 此外,在测量差模噪声源阻抗时^[2-3],易受被测电路中耦合电容的影响. 鉴于 IL 法的缺点,采用高频电流探头的 CP 法被提出,它可以计算有无噪声源情况下的测试系统的总阻抗,然后通过简单的减法获得噪声源阻抗. 但是,CP 方法只能提取阻抗幅值,而无法获得其相位^[4-7]. 针对 CP 法存在的缺陷,采用双电流探头和矢量网络分析仪(VNA)测量的 SP 法被提出. 在该方法中,VNA 用于产生和接收高频信号,同时分别获取各测试状态下信号检测端口的信号注入参数、传输参数和反射参数. 最后通过计算获得包括幅值和相位的 EUT 噪声源阻抗信息,但该方法仍无法获得 EUT 噪声源内阻抗的等效 RLC 参数^[8-13].

为了解决和克服传统方法的缺点,本文提出了一种 SP 法与 DE 算法相结合的噪声源阻抗提取方法. 首先对噪声源进行建模,利用 SP 法获得阻抗,然后建立阻抗的等效参数函数来处理其幅频特性. 最后,利用 DE 算法进行全局最优求解,得到噪声源的阻抗信息,包括振幅、相位等参数和等效 RLC 参数.

1 基于 SP 法的噪声源阻抗建模

1.1 噪声源阻抗定义

由欧姆定律,阻抗 \dot{Z} 的定义如下:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = |Z| \angle \varphi_Z. \quad (1)$$

式中, \dot{U} 和 \dot{I} 分别为端口向量电压和向量电流. 一般而言,噪声源阻抗 Z 与电阻、电容、电感有关,分别用 R 、 L 、 C 表示,

$$\dot{Z} = R + j\omega L = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (2)$$

由于 $\omega = 2\pi f$, Z 的幅值和相位可以改写为:

$$\begin{cases} Z_X = \sqrt{R^2 + 4\pi^2 L^2 \cdot f^2 + \frac{1}{4\pi^2 C^2} \cdot f^{-2} - \frac{2L}{C}}, \\ \varphi = \arctan\left(\frac{2\pi L}{R} \cdot f - \frac{1}{2\pi RC} \cdot f^{-1}\right). \end{cases} \quad (3)$$

1.2 噪声源阻抗模型

散射参数是射频矢量参数,由两个复数的比值定义,包含信号的幅值和相位信息. 散射参数可以描述网络端口特性,评价反射信号和传输信号的特性.

如图 1 所示,射频信号从端口 1 输入并在端口 2 被接收. 测试系统由 DC/AC 电源 V_s 供电,其中 Z_s 是电源阻抗, Z_X 是 EUT 的阻抗, Z_w 是连接电路线路的等效串联电阻和电感阻抗.

根据散射参数法, $V_{p1} = (1 + S_{11}) \cdot V_1$, $V_{p2} = S_{21} \cdot V_1$. 用 Z_X 表示的测量阻抗可以描述为:

$$Z_X = K \cdot \frac{1 + S_{11}}{S_{21}} - Z_{\text{setup}}. \quad (4)$$

K 和 Z_{setup} 分别表示测量回路的比率常数和阻抗. 如图 1 所示,需要进行三次测量,得到三组散射参数.

第 1 次测量时将 Z_X 短路,其中反射系数和透射系数分别为 $S_{11}^{(0)}$ 和 $S_{21}^{(0)}$. 根据式(4)和测量结果,可以推导出:

$$\begin{cases} 0 = K \cdot \frac{1 + S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}} - Z_{\text{setup}}, \\ R_{\text{STD}} = K \cdot \frac{1 + S_{11}^{(1)}}{S_{21}^{(1)}} - Z_{\text{setup}}. \end{cases} \quad (5)$$

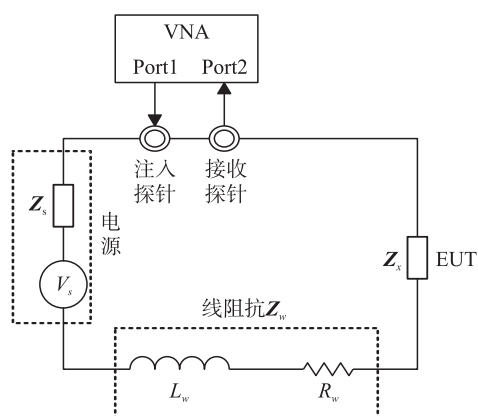


图 1 EMI 噪声源阻抗提取原理

Fig. 1 EMI noise source impedance extraction principle

第 2 次测量时用标准电阻替代 Z_X , 其中反射系数和透射系数分别为 $S_{11}^{(1)}$ 和 $S_{21}^{(1)}$. 根据式(4)和(5), 测量回路的比率常数 K 和阻抗 Z_{setup} 可以表示为:

$$\begin{cases} K = \frac{R_{\text{STD}}}{\left(\frac{1+S_{11}^{(1)}}{S_{21}^{(1)}} - \frac{1+S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}} \right)}, \\ Z_{\text{setup}} = R_{\text{STD}} \cdot \frac{\frac{1+S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}}}{\left(\frac{1+S_{11}^{(1)}}{S_{21}^{(1)}} - \frac{1+S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}} \right)}. \end{cases} \quad (6)$$

第 3 次测量时连接 Z_X , 其中反射系数和透射系数分别为 S_{11} 和 S_{21} . 根据式(4)和(6), 可以直接求得噪声源阻抗 Z_X :

$$Z_X = R_{\text{STD}} \cdot \frac{\left(\frac{1+S_{11}}{S_{21}} - \frac{1+S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}} \right)}{\left(\frac{1+S_{11}^{(1)}}{S_{21}^{(1)}} - \frac{1+S_{11}^{(0)}}{S_{21}^{(0)}} \right)}. \quad (7)$$

2 基于 SP-DE 算法的噪声源阻抗等效 RLC 参数提取方法

根据式(7)可以获得 EUT 的噪声源阻抗 Z_X , 但只能获得 Z_X 的幅值和相位. 为了提高 SP 法的精度, 提出了一种基于 SP-DE 算法的噪声源阻抗提取方法, 确定噪声源阻抗的等效 RLC 参数, 以改进 EMI 滤波器的设计.

2.1 DE 算法原理

DE 算法是一种并行直接搜索算法, 它从随机选取的初始种群开始对候选种群进行随机操作, 其主要操作过程包括选择、交叉和变异. DE 算法的流程图如图 2 所示.

2.2 DE 算法的实现步骤

本文利用 DE 算法提取噪声源阻抗的等效参数, 具体实现步骤如下:

第 1 步, 提出噪声源的等效电路拓扑, 获得其阻抗 Z 的表达式. 噪声源的等效电路拓扑可以根据器件的相关原理和功能进行设计, 再通过 DE 算法建模, 然后根据获得的模型的仿真与测量对比进行验证和再优化.

第 2 步, 提取噪声源阻抗信息. 基于 DE 算法的等效电路建模, 需要根据相应噪声源的阻抗信息求解由其等效电路模型所推导出的关于阻抗 Z 的表达式以获取其最优的等效模型 RLC 参数.

第 3 步, 最优参数问题转化. 将由噪声源的等效电路拓扑获得的阻抗 Z 的表达式转化为其阻抗幅值 Z_X 的表达式, 然后将 Z_X 作为待优化 RLC 参数的原始函数, 测量获得的阻抗数据 Z_m 为样本. 设等效电路模型阻抗幅值 Z_X 的表达式为:

$$\begin{aligned} Z_X &= \varphi(f; x_1, x_2, x_3, \dots, x_D), \\ \text{s.t. } x_j^L &\leq x_j \leq x_j^U \quad j=1, 2, 3, \dots, D. \end{aligned} \quad (8)$$

式中, D 是空间尺寸, $D \subset R^n$, x_j^L 和 x_j^U 分别表示第 j 个分量 x_j 的最大值和最小值. f 为自变量, Z_X 为因变量, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_D$ 为待定参数, 本文中即为阻抗等效模型的 RLC 参数. 将 DE 算法应用于噪声源等效阻抗的 RLC 参数提取, 其优化准则函数可由系统模型残差最小平方和建立, 设

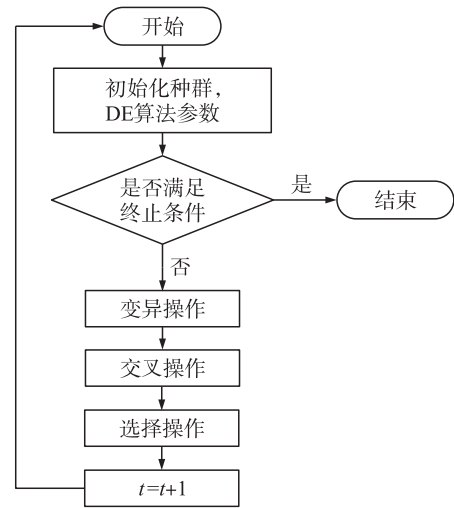


图 2 DE 算法流程图

Fig. 2 DE algorithm flow chart

$$\min Q = \sum_{i=1}^N |\varphi(f_i) - \varphi(f_i)'|^2. \quad (9)$$

式中, $\varphi(f)$ 为测量获得的阻抗幅值, $\varphi(f)'$ 是噪声源阻抗等效电路的阻抗幅值计算值. 当变量 Q 为最小值时, 对应的 RLC 参数即为最优参数.

第 4 步, 初始化参数. 对于初始种群 $\{x_i(0) | x_{j,i}^L \leq x_{j,i}(0) \leq x_{j,i}^U, i=1, 2, 3, \dots, N_p; j=1, 2, 3, \dots, D\}$ 随机产生:

$$x_{i,j}(0) = x_{j,i}^L + \text{rand}(0, 1) \cdot (x_{j,i}^U - x_{j,i}^L). \quad (10)$$

式中, N_p 为种群大小, $x_i(0)$ 指总体中第 0 代的第 i 个个体, $x_{j,i}(0)$ 指第 0 代的第 i 个个体的第 j 个基因. $\text{rand}(0, 1)$ 表示 0 到 1 之间的随机分布数.

第 5 步, 变异操作. DE 以实际值参数向量作为每一代的种群, 以种群中两个个体的加权差值作为中间个体, 即差向量. 然后将差向量加到第 3 个个体上, 产生突变, 如下所示:

$$v_i(g+1) = x_{r_1}(g) + F(x_{r_2}(g) - x_{r_3}(g)). \quad (11)$$

式中, F 是诱变因子, $x_i(g)$ 是 g 代种群的第 i 个个体.

第 6 步, 交叉操作. 交叉操作是指按照一定的规则将当前种群中个体的某些组成部分与突变个体的相应组成部分进行交换, 从而产生交叉种群. g 代种群 $\{x_i(g)\}$ 及其变异量 $\{v_i(g+1)\}$ 的交叉运算如下:

$$u_i(g+1) = \begin{cases} v_{j,i}(g+1), & \text{if } \text{rand}(0, 1) \leq C_R, \\ x_{j,i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

式中, $v_{j,i}(g+1)$ 为变异量 $v_i(g+1)$ 的第 j 个基因, j_{rand} 是 $[1, 2, 3, \dots, D]$ 中的随机整数, C_R 是交叉概率.

第 7 步, 操作选择. 如果下一代个体的目标函数小于当前个体的目标函数, 则下一代个体将取代当前个体.

$$u_i(g+1) = \begin{cases} u_i(g+1), & \text{if } f(u_i(g+1)) \leq f(x_i(g)), \\ x_i(g), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (13)$$

第 8 步, 收敛判别操作. 设 $x(g+1)$ 中的最优个体为 $x_{\text{best}}(g+1)$, 当 DE 运行到预定次数或目标函数值 Q 达到设定的精度时, 操作即可结束, 预估结果为 RLC 参数的最优值. 如果没有收敛, 则返回第二步, 再次进行变异、交叉和选择.

3 实验验证及分析

为验证该方法的有效性, 本节将一款 LISN 作为受试设备, 采用 SP-DE 法对其进行内阻抗建模并与 GB/T6113.102—2008 标准中的理论值进行比较.

以一款 LISN(型号: ROHDE&SCHWARZ ESH3-Z5 9 kHz~30 MHz) 作为噪声源, 首先用 SP 法提取其阻抗信息. SP 法实施时采用设备如下: 电流探头(型号: ZN23101 0.01 MHz~60 MHz), 分别用作注入探头和检测探头、VNA(型号: ROHDE&SCHWARZ ZNC3 网络分析仪 9 kHz~3 GHz) 用于注入和接收电压信号. 然后用 DE 算法对提取的阻抗信息进行处理以获取噪声源阻抗的等效 RLC 参数. 具体流程如图 3 所示.

被测 LISN 的实物如图 4(a) 所示, 根据其内阻抗测得曲线设其等效电路拓扑如图 4(b) 所示.

由图 4(b) 的等效拓扑模型, 可得出 LISN 内阻抗等效电路的阻抗表达式如下:

$$Z_{\text{LISN}} = \frac{j\omega LR}{-\omega^2 RCL + j\omega L + R}. \quad (14)$$

式中, Z_{LISN} 为 LISN 的内阻抗, R, L, C 为 LISN 内阻抗等效模型中对应的电阻、电容、电感等效参数, $\omega = 2\pi f$, f 为频率.

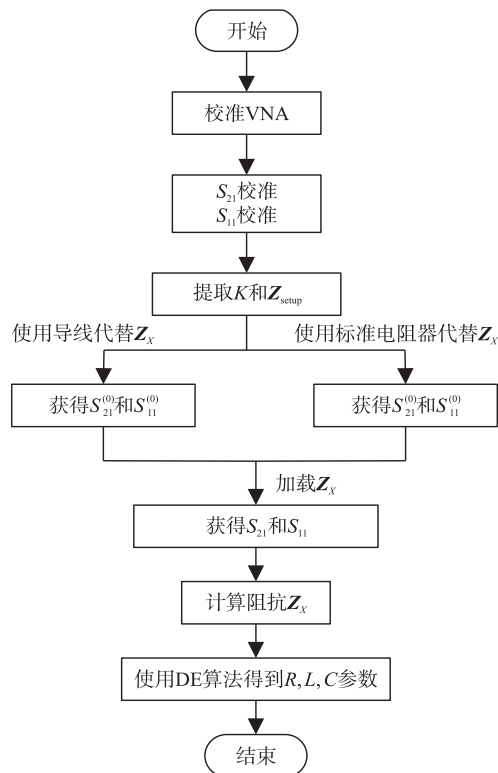


图 3 SP-DE 法实现流程

Fig. 3 Implementation process of SP-DE method



图 4 LISN 及其等效电路
Fig. 4 LISN and its equivalent circuit

LISN 的内阻抗提取实验布置如图 5 所示. 实测采样点个数为 301 个,测试频率为 9 kHz~30 MHz. 然后通过 DE 算法处理测得阻抗数据,寻找 LISN 内阻抗等效电路模型的最优 RLC 参数.

基于 SP-DE 法的该 LISN 内阻抗的等效 R 、 L 、 C 参数如表 1 所示,其内阻抗等效模型精度与实际测量值对比如图 6 所示.

表 1 LISN 内阻抗等效模型参数值

Table 1 Parameter values of LISN internal impedance equivalent model

参数	数值
R/Ω	49.97
L/pF	0.77
$C/\mu\text{H}$	35.100 8

由图 6 可知,LISN 内阻抗等效电路模型虽与标准值仍存在一定的误差,但误差很小,阻抗实部、虚部以及阻抗幅值的误差均在 $3\ \Omega$ 以内,在 9 kHz~30 MHz 频段内与实际测量值基本吻合,因此本文提出的 SP-DE 法可以较为准确的实现被测设备的内阻抗建模.

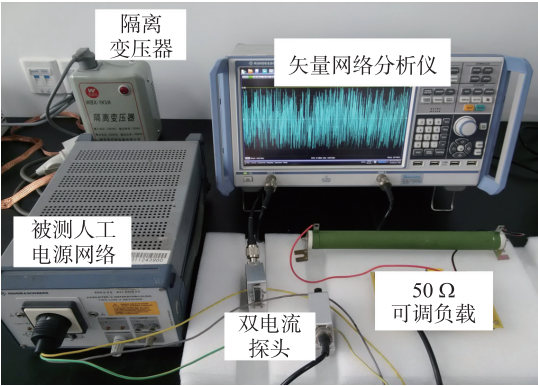


图 5 LISN 阻抗提取实验布置
Fig. 5 LISN impedance extraction experiment layout

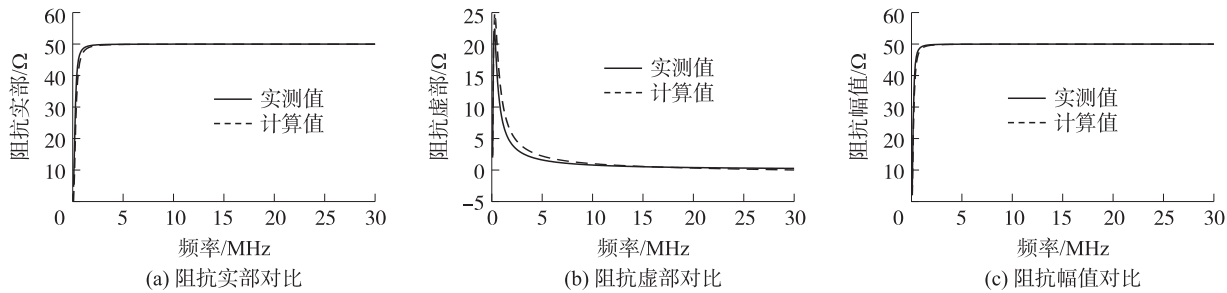


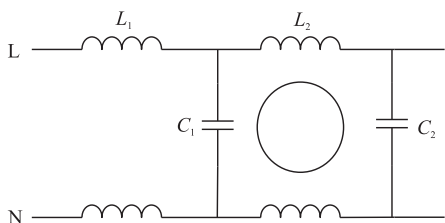
图 6 基于 SP-DE 法的 LISN 内阻抗模型与测量值对比
Fig. 6 Comparison of internal impedance model and measured value of LISN based on SP-DE method

4 基于 SP-DE 法的滤波器设计与应用

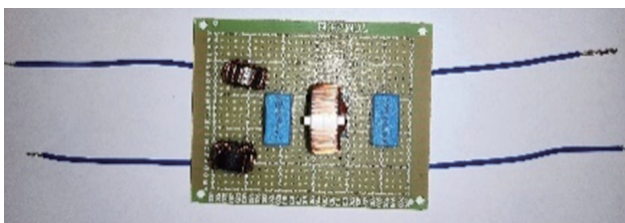
为了验证该方法的实用性,此次采用开关电源作为 EUT 进行传导 EMI 噪声抑制实验. 用 SP-DE 法提取开关电源的内阻抗,并根据阻抗数据设计滤波器以抑制传导 EMI 噪声.

4.1 滤波器设计

采用 SP-DE 法设计滤波器:以 SP 法提取的 Z_x 为基础,利用 DE 算法对 Z_x 进行拟合优化,得到开关电源内阻抗的等效 RLC 参数,然后根据这些参数设计滤波器. 开关电源 EMI 滤波器拓扑如图 7(a)所示,实物如图 7(b)所示.



(a) 开关电源EMI滤波器拓扑



(b) 开关电源EMI滤波器实物

图 7 开关电源 EMI 滤波器拓扑及实物

Fig. 7 Switching power supply EMI filter topology and physical

4.2 抑制分析

本次测试基于标准 EN55022,测试设备包括:人工电源网络 (AMN, Model: ROHDE &SCHWARZ ENV216 TWO-LINE V-NETWORK 9 kHz~30 MHz) 和 EMI 接收机 (Model: ROHDE&SCHWARZ ESL EMI TEST RECEIVER 9 kHz ~ 3 GHz). 测试布局如图 8 所示,开关电源的输入为 $220\pm 20\%$ VAC,输出为 12 V/3 A,负载为 $800\ \Omega$ 纯阻性负载.

该开关电源传导 EMI 初始测试结果如图 9(a) 所示,实线为传导 EMI 峰值测试结果,虚线为传导 EMI 平均值测试结果. 测试频段为 150 kHz 至 30 MHz,带宽为 9 kHz. 该滤波器在 1 MHz 频率下的特性为:差模电感 $L_1 = 1.33\text{ mH}$,共模电感 $L_2 = 31.08\text{ mH}$,电容 C_1 、 C_2 均为 $0.58\ \mu\text{F}$,其抑制效果如图 9(b) 所示,该滤波器总体上抑制效果良好,尤其是在 10 MHz 以下的频段有比较明显的抑制效果,噪声抑制最大处接近 $35\text{ dB}\mu\text{V}$.

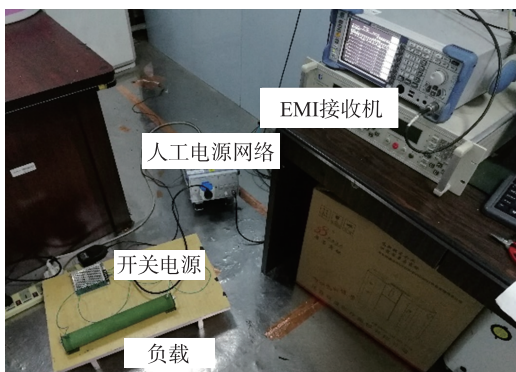
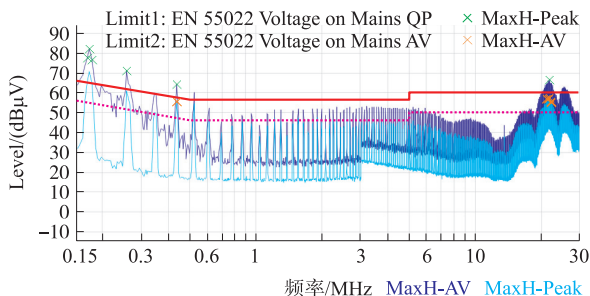
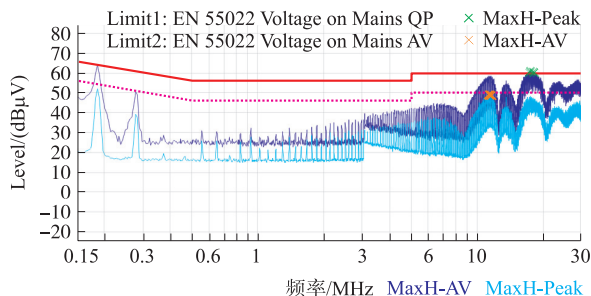


图 8 传导 EMI 测试布局

Fig. 8 Conducted EMI test layout



(a) 开关电源传导EMI初始测量结果



(b) 抑制后传导EMI测试结果

图 9 抑制前后对比

Fig. 9 Comparison before and after suppression

5 结论

针对传统内阻抗建模方法存在的缺陷,本文提出了一种基于 SP-DE 法的噪声源内阻抗建模方法. 首先基于 SP 法推导了噪声源内阻抗的一般表达式,它涵盖了所有频点的阻抗特征,为进一步分析噪声源阻抗奠定了基础. 然后采用 DE 算法处理 SP 法提取的噪声源内阻抗信息,以获得噪声源内阻抗等效 RLC 参数,实现对噪声源内阻抗的建模,该算法控制变量简单,通用性强. 最后基于本文提出的方法进行了滤波器设计与传导 EMI 噪声抑制实验. 实验结果表明,基于 SP-DE 法设计的滤波器具有较好的传导 EMI 噪声的抑制效果,验证了该方法实现的内阻抗建模具有良好的精确度.

[参考文献] (References)

- [1] 路宏敏. 工程电磁兼容[M]. 西安:西安电子科技大学,2003:5-6.
- [2] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 2版. 北京:高等教育出版社,2006:183-210.

(下转第 39 页)

- [14] ARDIC O,ANNEMA J A,MOLIN E,et al. The media influence on public opinion about a Dutch road pricing policy proposal [C]//93th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC,USA;TRB,2014.
- [15] CAO D L,WANG S R,LIN D Z. Chinese microblog users' sentiment-based traffic condition analysis[J]. Soft Computing, 2018,22(21):7005-7014.
- [16] LU H,SHI K Z,ZHU Y F,et al. Sensing urban transportation events from multi-channel social signals with the Word2vec fusion model[J]. Sensors,2018,18(12):4093.
- [17] 何梦娇,吴戈,梁华,等. 基于多源文本挖掘的城市交通舆情分析——以苏州为例[J]. 交通信息与安全,2018,36(3):105-111.
- [18] ALI F,KWAK D,KHAN P,et al. Transportation sentiment analysis using word embedding and ontology-based topic modeling[J]. Knowledge-Based Systems,2019,174:27-42.
- [19] 冒婷婷,孙新红,汤育春,等. 基于情感挖掘的基础设施社会韧性评价研究[J]. 广西城镇建设,2021(2):27-32.
- [20] 滕靖,刘韶杰,龚越,等. 交通事件网络舆情分析方法[J]. 交通信息与安全,2019,37(6):139-148.

[责任编辑:严海琳]

(上接第18页)

- [3] WANG S,LEE F C,ODENDAAL W G. Improving the performance of boost PFC EMI filters[C]//Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Miami Beach,USA,2003:368-374.
- [4] WANG S,ODENDAAL W G,LEE F C. Extraction of parasitic parameters of EMI filters using scattering parameters[C]//IEEE Industry Applications Conference. Seattle,USA,2004:2672-2678.
- [5] WANG S,LEE FC,ODENDAAL W G. Using scattering parameters to characterize EMI filters[C]//35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen,Germany,2004:297-303.
- [6] WANG S,LEE F C,ODENDAAL W G. Characterization,evaluation,and design of noise separator for conducted EMI noise diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(4):974-982.
- [7] WANG S,LEE F C,ODENDAL W G. Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2005,20(2):502-510.
- [8] WANG S,LEE F C,WYK J D V. A study of integration of parasitic cancellation techniques for EMI filter design with discrete components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(6):3094-3102.
- [9] CHEN Y,ZHOU M,GENG L. Transmission impedance extraction method applied in magneto-rheological damper[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2017,56(2):1-11.
- [10] HASHMI U,CHOUDHARY R,PRIOLKAR J G. Online Thevenin equivalent parameter estimation using nonlinear and linear recursive least square algorithm[C]//IEEE International Conference on Electrical,Computer and Communication Technologies. Coimbatore,India,2015:1-6.
- [11] MAES H,ZIVANOVIC M. Estimating respiratory impedance at breathing frequencies using regularized least squares on forced oscillation technique measurements[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2017,66(3):1-13.
- [12] BOUAICHA A,ALLAGUI H,MAMI A. Parameters identification of the complex impedance model of the PEM fuel cell using Matlab/Simulink[C]//International Conference on Green Energy Conversion Systems. Hammamet,Tunisia,2017:1-6.
- [13] LAHMAR M,LIAO Y. Accurate methods for estimating transmission line parameters using synchronized and unsynchronized data[C]//International Energy and Sustainability Conference. Farmingdale,USA,2017:1-5.

[责任编辑:陈 庆]