

基于进化差分算法的环形电感建模及应用

王永安¹, 赵 阳¹, 蓝雨晨¹, 孙逸群¹, 张 成¹, 刘兴发²

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

(2. 中国电力科学研究院武汉分院电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 基于进化差分算法的环形电感线圈高频模型, 首先建立了环形电感线圈的等效模型, 阐述了其阻抗的计算方法. 然后通过 VNA 设备得到测试线圈的幅频特性曲线, 使用进化差分优化算法对等效模型参数进行优化, 得到最优的模型参数. 再通过仿真对比阻抗拟合曲线与实测曲线, 拟合效果良好, 验证了模型及参数的可靠性. 最后在开关电源辐射 EMI 的仿真中添加电感线圈部分, 验证了其抑制电磁噪声的作用, 为实际的工程整改提供了理论依据.

[关键词] 电感线圈, 高频模型, DE 算法, 噪声抑制

[中图分类号] TM552 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)03-0032-06

Modeling and Application of Ring Inductor Based on Evolutionary Difference Algorithm

Wang Yongan¹, Zhao Yang¹, Lan Yuchen¹, Sun Yiqun¹, Zhang Cheng¹, Liu Xingfa²

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

(2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, Wuhan Branch of China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper studies the high-frequency model of the toroidal inductor coil based on the evolutionary difference algorithm. Firstly, an equivalent model of the toroidal inductor coil is established, and the calculation method of its impedance is described. Then, the amplitude-frequency characteristic curve of the test coil is obtained through the VNA device, and the evolutionary differential optimization The algorithm optimizes the equivalent model parameters to obtain the optimal model parameters, and compares the impedance fitting curve with the measured curve through simulation. The fitting effect is good, and the reliability of the model and parameters is verified. Finally, the inductance coil is added to the simulation of the switching power supply radiated EMI, and its effect of suppressing electromagnetic noise is verified, which provides a theoretical basis for the actual engineering rectification.

Key words: inductor coil, high frequency model, DE algorithm, noise suppression

随着电力电子系统和半导体器件的快速发展, 在系统中出现的电磁兼容问题也更加严重, 强度变得更大, 频率范围也更广^[1-5]. 电磁兼容包括电磁发射和电磁敏感性, 当电子产品不符合电磁兼容性标准时, 可以通过作用于发射器(噪声源)或耦合路径来减轻电磁干扰(electromagnetic interference, EMI). 后一种解决方案是通过在电源线中引入 EMI 滤波器来减少向电网的传导和辐射.

解决传导和辐射 EMI 有很多方法, 其中 EMI 滤波器是性价比较高的手段之一, 合理的 EMI 滤波器能够快速有效地解决问题. EMI 滤波器在有源、无源以及混合滤波器三方面展开了广泛研究. 其中无源滤波器结构最为简单, 体积也相对较小并且研发成本相对较低, 在电力电子产品中得到广泛应用. 这些滤波器主要基于无源组件的使用, 例如电感器和电容器. 故通过试错法设计 EMI 滤波器, 电路仿真方法成为最有效的方法. 它减少了设计的时间和成本, 也简化了优化过程. 在高达 100 MHz 的研究中, 磁性元件在开发等效电路模

收稿日期: 2020-05-18.

基金项目: 江苏省社会发展重点项目(BE2019716)、南京市国际产业技术研发合作项目(201911021)、电网环境保护国家重点实验室开放基金项目.

通讯作者: 赵阳, 博士, 教授, 研究方向: 电磁兼容技术与应用. E-mail: 61076@njnu.edu.cn

型以表示其在较宽频率范围内的行为方面仍然具有挑战性^[6-10]. 在磁性元件之中,环形铁芯电感器(ring core inductor, RCI)广泛用于差模(differential mode, DM)和共模(common mode, CM)滤波操作. 由于其频率特性对于 EMI 滤波器的研究尤为关键,所以需要建立精确的电感器高频(high frequency, HF)模型^[11-12].

1 环形电感线圈建模

1.1 环形电感阻抗建模基本原理

在电磁兼容领域的滤波器工程应用中,差模电感元件普遍由铜质漆包线以线圈形式均匀分布在磁芯周围,而于制作的过程当中会产生电阻影响和线圈的寄生电容. 差模电感的示意图如图 1 所示,电感的寄生电容分为漆包线匝与匝的杂散电容 C_1 以及导线与磁芯间的分布电容 C_2 .

因电感器长、宽、高的大小远小于工作范围内的电磁波长,所以用集中参数可以表示电感线圈的示意模型,除引脚寄生电感 L_{lead} 和寄生电容 C_{lead} 之外,仍包含了磁芯等效电阻 R_p 与绕组等效电阻 R_w . 由于电感的无源特性,其值通常大于引线电感 L_{lead} ,因此,在电感器模型中可以忽略 L_{lead} ,如图 2 所示.

但图 2 模型无法表示在超过 100 MHz 的高频中的环形电感阻抗特性,在高频段阻抗的拟合效果较差. 为了克服这种频率限制,本文提出将新的电感阻抗等效拓扑如图 3 所示,并列出其阻抗的数学函数表达式

$$Z = (L * R_1 * R_2 * R_3 * R_4 * s + (C_1 * L * R_2 * R_3 * R_4 + C_2 * L * R_1 * R_3 * R_4 + C_3 * L * R_1 * R_2 * R_4 + C_2 * L * R_2 * R_3 * R_4 + C_3 * L * R_1 * R_3 * R_4 + C_3 * L * R_2 * R_3 * R_4) * s^3). \quad (1)$$

式中, $s = j\omega$.

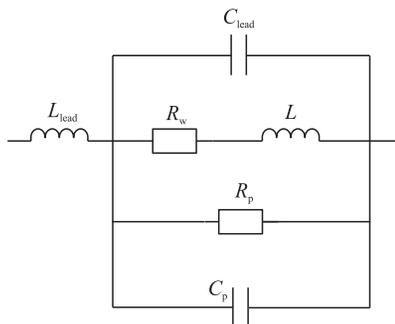


图 2 电感器等效模型图
Fig. 2 Inductor equivalent model

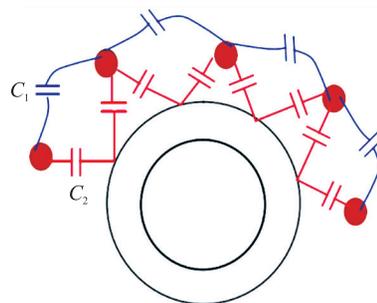


图 1 电感器寄生电容
Fig. 1 Inductor parasitic capacitance

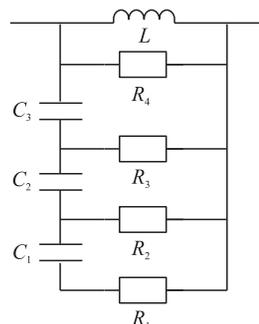


图 3 电感线圈等效电路模型
Fig. 3 Inductor coil equivalent circuit model

1.2 环形电感线圈阻抗提取

本文使用罗德施瓦茨公司的 ZVL 型 VNA 做信号输入及接收的设备,频率测量范围为 9 kHz~3 GHz. 测试之前,首先需要对设备进行校准,完成校准工作后,进行阻抗测量,得到环形电感阻抗幅频特性曲线. 测试设备如图 4 所示.

本文研究的对象是铜质漆包线绕制电感,引出漆包线的两端分别焊在接口处的接地引脚和中心引脚,如图 5 所示. 实测采样点个数设为 5 000 个,测试频率为 9 kHz~1 GHz.

实测采样点个数设为 5 000 个,测试频率为 9 kHz~1 GHz. 测出环形电感在 9 kHz~1 GHz 频率范围内的阻抗曲线如图 6 所示.



图 4 R&S VNA 测试设备
Fig. 4 R&S VNA test equipment

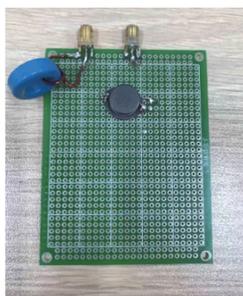


图 5 电感线圈
Fig. 5 Inductance coil

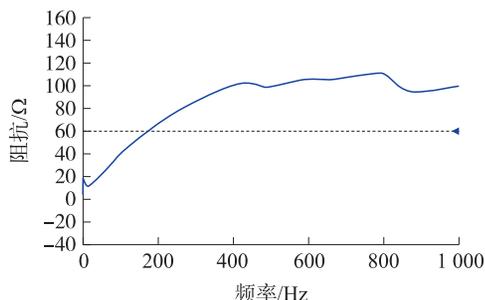


图 6 电感阻抗曲线
Fig. 6 Inductance impedance curve

2 基于 DE 算法估算阻抗 RLC 参数

2.1 DE 算法的优化准则

本文使用进化差分算法(DE 算法)来得到电感线圈等效电路模型中的 R, L, C 参数. DE 是一种并行直接搜索算法,对候选种群执行随机运算. 首先从随机选择的初始种群开始,进行变异、交叉和选择操作,再进行收敛判别得到最优解^[13-14]. DE 算法的流程图如图 7 所示. 使用 DE 算法拟合环形电感高频阻抗的等效参数,即图 3 中的 $R_1, R_2, R_3, R_4, L, C_1, C_2, C_3$. 阻抗 Z 是要优化的参数的原始函数,并用 VNA 测量阻抗 Z_x 为样本,取 9 kHz ~ 1 GHz 中 5 000 个不同频率 f 的数据.

问题可以转化为最小化拟合阻抗和实际阻抗之间的差异,即:

$$\begin{aligned} \min f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_D), \\ x_j^L \leq x_j \leq x_j^U, j=1, 2, 3, \dots, D. \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_D$ 对应于要优化的参数 $R_1, R_2, R_3, R_4, L, C_1, C_2, C_3$. D 是空间尺寸, $D \subset R^n$. x_j^L 和 x_j^U 分别表示是第 j 个分量 x_j 的最大值和最小值.

DE 算法具体步骤如下:

Step 1: 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:

$$x_{j,i}(0) = x_{j,i}^L + \text{rand}(0, 1) \cdot (x_{j,i}^U - x_{j,i}^L). \quad (3)$$

式中, $x_i(0)$ 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.

Step 2: 变异操作

在 DE 算法中,每一代的总体由实际值参数向量构成,总体中两个个体之间作差,得到加权差向量作为中间个体,即差异向量. 然后将差异向量添加到第三个个体以产生突变,即

$$v_i(g+1) = x_{r_1}(g) + F(x_{r_2}(g) - x_{r_3}(g)). \quad (4)$$

式中, F 是诱变因子, $F=0.6$, $x_i(g)$ 是 g 代种群的第 i 个个体.

Step 3: 交叉操作

交叉操作是指通过交换当前总体中个体的某些组成部分和突变个体的相应组成部分来生成交叉总体. g 代种群 $\{x_i(g)\}$ 的交叉运算及其变异总体 $\{v_i(g+1)\}$ 如下:

$$u_i(g+1) = \begin{cases} v_{j,i}(g+1), & \text{if } \text{rand}(0, 1) \leq C_R, \\ x_{j,i}, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

式中, C_R 是交叉概率, $C_R=0.6$, j_{rand} 是 $[1, 2, 3 \dots D]$ 中的随机整数.

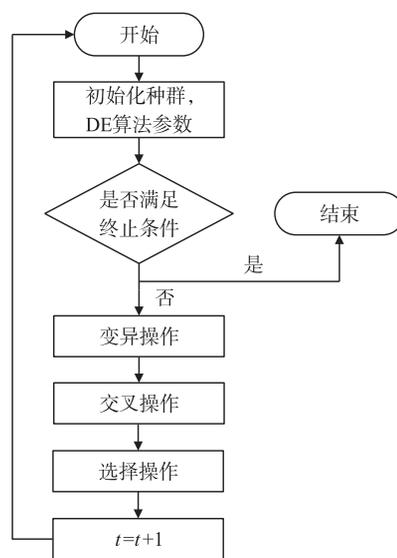


图 7 DE 算法流程图
Fig. 7 DE algorithm flow chart

Step 4:选择操作

从父代个体和试验个体中选择一个作为下一代个体. 当下一代个体的目标函数小于当前个体的目标函数,则下一代个体将替换当前个体.

$$x_i(g+1) = \begin{cases} u_i(g+1), & \text{if } f(u_i(g+1)) \leq f(x_i(g)), \\ x_i(g), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (6)$$

Step 5:收敛判别操作

设 $x(g+1)$ 中的最优个体为 $x_{\text{best}}(g+1)$, 当 DE 算法运行到预定次数或所选的优秀个体小于某个设定值时,则操作结束并输出最优解,预估结果为 $R_1, R_2, R_3, R_4, L, C_1, C_2, C_3$. 如果没有收敛,则按照图 7 中的操作继续进行.

2.2 环形电感阻抗建模分析

通过 VNA 提取环形电感的阻抗信息,取样点的个数为 5 000 个,取样频率从 0 MHz 至 1 000 MHz. 然后通过仿真对比 DE 算法建立环形电感阻抗模型的阻抗与实际测量的阻抗,阻抗的仿真结果如图 8 和图 9 所示.

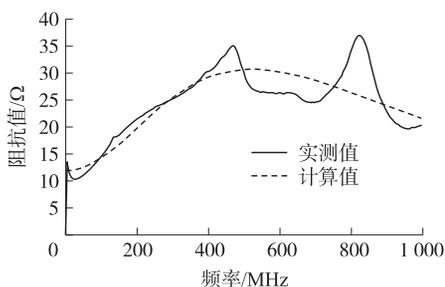


图 8 阻抗实部拟合仿真

Fig. 8 Impedance real part fitting simulation

由上述仿真结果可以发现,DE 算法仿真结果与实测值体现出良好的拟合性,最优化等效参数与实际值存在少量误差. 最终电感线圈的等效 R, C, L 参数如表 1 所示.

3 基于高频电感模型的开关电源 EMI 分析与仿真

搭建的开关电源 Boost PFC 电路进行仿真,得到了线电压源处电流 I 的值,由文献[3]可得共模辐射 EMI 噪声 E_{CM} 的计算方法为:

$$E_{\text{CM}} = 12.6 \times 10^{-7} \frac{f I_{\text{CM}}}{r} \quad (7)$$

式中, f 为信号频率, I_{CM} 为辐射天线中的共模电流, l 为辐射天线长度, r 为测试距离.

差模辐射 EMI 噪声 E_{DM} 的计算方法为:

$$E_{\text{DM}} = 2.632 \times 10^{-14} \frac{f^2 A I_{\text{DM}}}{r} \quad (8)$$

式中, f 为信号频率, I_{DM} 为辐射天线中的差模电流, A 为辐射天线面积, r 为测试距离.

将仿真结果 I 值代入式(7)和式(8)中并在 Matlab 软件中进行分析计算. 根据开关电源的实际大小,此处天线长度 l 为 3 cm,环路面积 A 取 25 cm²,设测试距离 r 为 3 m,共模、差模电场辐射噪声的仿真结果分别如图 10、图 11 所示.

对比分析图 10 和图 11 得出,在开关电源 Boost PFC 电路中的差模电场辐射噪声远小于共模电场辐射噪声,可知共模辐射是开关电源的辐射噪声主要构成,并且辐射噪声随频率增加而减小. 而在实际工程应

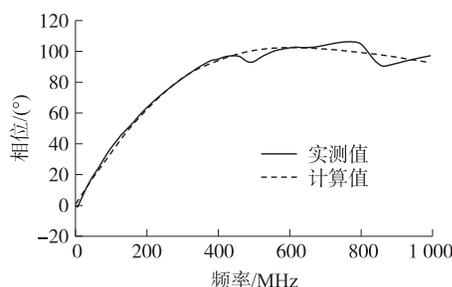


图 9 阻抗虚部拟合仿真

Fig. 9 Simulation of impedance imaginary part fitting

表 1 电感模型参数值

Table 1 Parameter values in the inductance model

元件	参数	数值
电感	L/H	2 869.51
	R_1/Ω	1.224×10^{11}
	R_2/Ω	6.122×10^{10}
	R_3/Ω	3.061×10^{10}
电阻	R_4/Ω	7.220×10^{11}
	C_1/F	1.111×10^{-18}
	C_2/F	2.221×10^{-18}
	C_3/F	4.442×10^{-18}

用所采用的高频器件为非理想,即辐射噪声会比本文的仿真结果更大,所以需对其采取一定的抑制措施.为了抑制开关电源辐射噪声,可在电路电压源的整流电路后串联上文所搭建的高频电感模型作为一个电感滤波器且忽略寄生参数的影响,具体电路如图 12 所示.

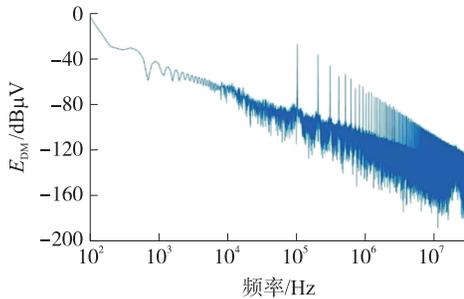


图 10 差模电场辐射 EMI 噪声图

Fig. 10 Differential mode electric field radiated EMI noise diagram

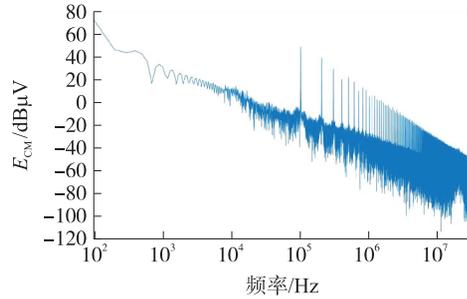


图 11 共模电场辐射 EMI 噪声图

Fig. 11 Common mode electric field radiated EMI noise diagram

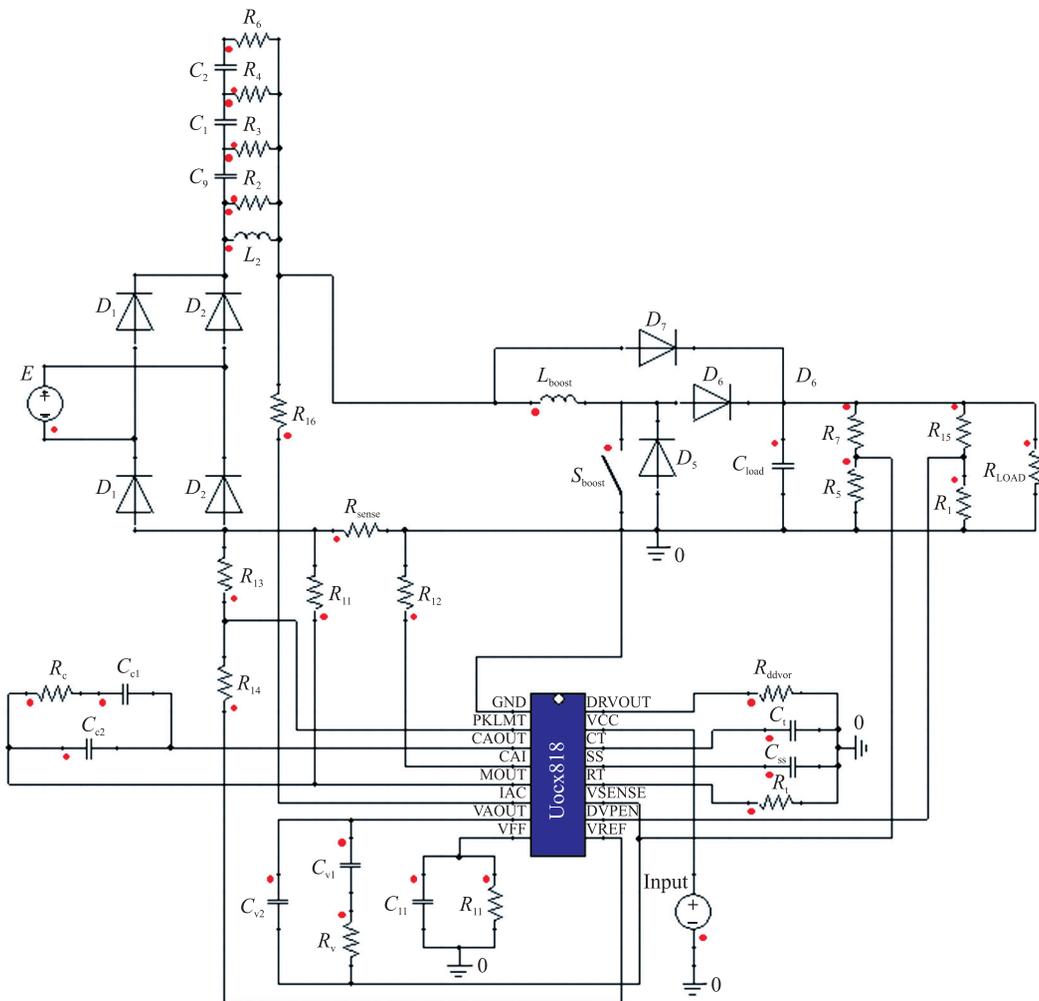


图 12 整改后电路仿真图

Fig. 12 Circuit simulation diagram after rectification

将此次仿真电流 I 数据继续代入 Matlab 软件中计算可得,开关电源 Boost PFC 电路辐射噪声经过电感器抑制后的差模和共模辐射噪声如下图所示.

以上研究的是高频电感对开关电源 Boost PFC 电路的辐射抑制结果,故在电源输入端整流电路后加入电感器,将图 10 和图 13、图 11 和图 14 分别进行对比可见,在频率 10^4 Hz ~ 10^7 Hz 频段,噪声有明显的削弱,证明了噪声抑制效果良好.

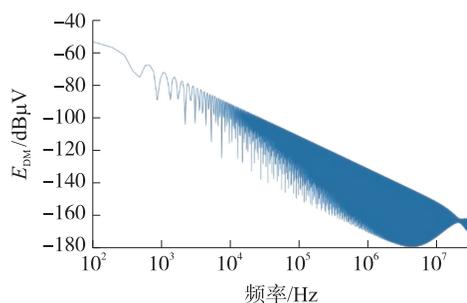


图 13 差模辐射 EMI 噪声图(抑制后)

Fig. 13 Differential mode radiated EMI noise figure after suppression

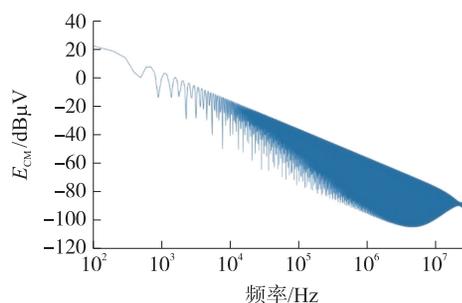


图 14 共模辐射 EMI 噪声图(抑制后)

Fig. 14 Common-mode radiated EMI noise figure after suppression

4 结论

本文研究的是环形电感线圈高频模型,使用进化差分算法对测试线圈的幅频特性曲线进行拟合,结果表明在 200MHz 以内拟合效果较好,验证了模型和参数的正确性. 并通过开关电源辐射 EMI 仿真实验中添加电感线圈部分,验证了其在 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ Hz 频段抑制传导电磁噪声效果良好.

[参考文献] (References)

- [1] 颜伟,赵阳,王恩荣,等. 复杂电子系统辐射 EMI 噪声机理分析与抑制[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):173-180.
- [2] YAN W, YU J, TANG Q, et al. Analysis and mitigation on conducted electromagnetic interference of semi-active control strategy for magneto-rheological damper[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2016 50(2):247-254.
- [3] 颜伟. 复杂电子系统电磁干扰噪声机理建模与抑制方法研究[D]. 南京:南京师范大学,2014.
- [4] 陈恒林. EMI 滤波器高频建模—寄生效应研究[D]. 杭州:浙江大学,2007.
- [5] 丁斌,杨宁,王志萍. 电感线圈分布电容和谐振频率的仿真与测量[J]. 变压器,2010,47(9):41-43.
- [6] LIU Y, SEE K Y, TSENG K J. Conducted EMI prediction of the PFC converter including nonlinear behavior of boost inductor[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(6):1107-1114.
- [7] XING L, FENG F, SUN J. Behavioral modeling methods for motor drive system EMI design optimization[J]. Energy Conversion Congress and Exposition, 2010:947-954.
- [8] KOTNY J L, MARGUERON X, IDIR N. High-frequency model of the coupled inductors used in EMI filters[J]. IEEE Transaction Power Electronics, 2012, 27(6):2805-2812.
- [9] SHUO W, LEE F C, ODENDAAL W G. Characterization and parasitic extraction of EMI filters using scattering parameters[J]. IEEE Transaction Power Electronics, 2005, 20(2):502-510.
- [10] 和军平,陈为,姜建国. 电源线 EMI 滤波器内部杂散电磁耦合及其作用[J]. 电工技术学报,2006,21(10):12-16.
- [11] TAN W, CUELLAR C, MARGUERON X, et al. A high frequency equivalent circuit and parameter extraction procedure for common mode choke in the EMI filter[J]. IEEE Transaction Power Electronics, 2013, 28(3):1157-1166.
- [12] DALESSANDRO L, ODENDAAL W G H, KOLAR J W. HF characterization and nonlinear modeling of a gapped toroidal magnetic structure[J]. IEEE Transaction Power Electronics, 2006, 21(5):1167-1175.
- [13] 郝跃,贾新章. 器件模型参数优化提取的混合算法[J]. 半导体学报,1989,10(3):168-172.
- [14] 李庆良,雷虎民,邵雷,等. 一种基于差分进化算法的多模型建模方法[J]. 控制与决策,2010,25(12):1866-1869, 1874.

[责任编辑:陈 庆]