

基于 Pspice 仿真的高频直流变换器的 传导 EMI 噪声关键技术研究

刘 勇,赵 阳,张宇环,颜 伟,窦爱玉,郭青龙

(南京师范大学电气与自动化工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 对高频直流变换器的直流传导 EMI 噪声进行了理论与仿真分析,研究了 DC_LISN 的电路结构,根据其理论模型建立了对应的仿真模型及其噪声提取模型;此外,根据不同无源器件的高频模型,建立了 Boost、Buck 变换器的高频电路仿真模型,运用 Pspice 软件对比分析了高频寄生参数的存在对于高频直流变换器的直流传导 EMI 噪声的影响,仿真结果证明了分析方法的有效性.

[关键词] 高频直流变换器,DC_LISN,高频模型,Pspice 仿真,直流传导 EMI

[中图分类号]TM15 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2013)01-0001-06

The Key-Technology Research on Conducted EMI Noise of High Frequency DC-DC Converter Based on Pspice Simulation

Liu Yong,Zhao Yang,Zhang Yuhuan,Yan Wei,Dou Aiyu,Guo Qinglong

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

Abstract:The theoretical and simulation analysis of DC conducted EMI noise of high-frequency DC-DC converter are made in the paper,and the circuit structure of DC_LISN is studied. Based on its theoretical model,the simulation model and noise extraction model are established. Besides, in this paper, the high-frequency models of different passive components are analyzed and proposed,and the high-frequency circuit simulation models of Boost and Buck converter are established. By application of Pspice software,the influence of the existence of high-frequency parasitic parameters on the DC conducted EMI noise is contrastively analyzed. The simulation result proves the effectiveness of analysis methods proposed in this paper.

Key words:high-frequency DC-DC converter,DC_LISN,high-frequency model,Pspice simulation,DC conducted EMI

随着电能变换技术的不断发展以及半控、全控型自关断器件的广泛应用,开关电源之一的高频直流变换器在供电系统的电力电子装置中的作用日益凸显,且其性能指标的好坏直接制约着其应用装置性能指标,高频直流变换器的传导电磁干扰(EMI)噪声便是其众多性能指标中最为重要的性能之一^[1,2]. 伴随着半导体开关器件开关频率的不断提高,开关器件在高频通断期间会产生非常高的脉冲电压、脉冲电流,从而在设备内部产生较强的电磁干扰,其频率可从几 kHz 到高达几十 MHz,在 EMC 标准要求的传导发射频段内很容易导致设备的传导干扰噪声超过标准限值,使得设备无法通过 EMC 标准认证,严重制约研发、生产企业的市场竞争力.

目前,国内、外学者针对开关电源的传导电磁干扰机理研究已经取得了一定的成果. 在噪声源内阻抗提取方面,提出了双电流探头法、电压探头法等,以提取噪声源设备的内阻抗,指导 EMI 滤波器的设计;在噪声模态提取方面,先后提出了 Mardiguian 网络、SEE 网络、Paul 网络、Lo 网络等分离网络,提出差模、共模噪声信号^[3-5];在噪声抑制方面,通常采用解耦电容、X 电容、Y 电容、共模扼流圈、铁氧体磁环等构成的

EMI 滤波器滤除线缆高频(10 kHz ~ 30 MHz)噪声^[6,7]. 然而在高频直流变换器的仿真研究方面,主要采用 Pspice 电力电子仿真软件对其进行功能性验证仿真、瞬态分析、故障分析等,较少涉及传导 EMI 噪声的仿真分析.

鉴于上述原因,本文借助 Pspice 软件针对高频直流变换器进行建模,通过相应模型仿真分析传导 EMI 噪声产生机理以及直流传导 EMI 噪声的提取方法,对比分析了高频直流变换中的无源器件高频寄生参数对于直流传导 EMI 噪声的影响,为后续直流传导 EMI 噪声的抑制提供了一定的理论指导.

1 直流变换器理论模型分析

直流变换器根据其输入输出电压的变换特点,分为升压变换器(Boost DC/DC 变换器)、降压变换器(Buck DC/DC 变换器)、升降压变换器(Boost-Buck DC/DC 变换器)等. 其中以 Boost 和 Buck 变换器最具代表性,当这两种变换器的半导体开关工作在低频模式时,为了最大限度减少系统的谐波污染,需要在电源入口、出口端加载大电感滤波器,该大电感的存在不仅大大增加了系统的体积、重量,也在一定程度上增大了电能的损耗,降低了变换器的转换效率. 为了克服上述问题,高频直流变换器的概念被提出并应用,但是随着开关通断频率的提高,随之而来的电磁兼容问题便不可忽视,因此本文主要以两种高频变换器的电路模型展开分析研究.

1.1 Boost DC/DC 变换器工作原理分析

Boost DC/DC 变换器电路如图 1(a) 所示,在开关管 T_1 关断时,利用电感线圈 L 在其电流减小时所产生的反电动势 e_L (即 $e_L = -Ldi_L/dt$) 与电源电压 V_s 串联相加送至负载,则负载便可获得高于电源电压 V_s 的直流电压 V_0 ,开关管采用 PWM 控制方式,并假定电路工作在电流连续模式 CCM,则该电路具有两种工作状态,如图 1(b)、(c) 所示.

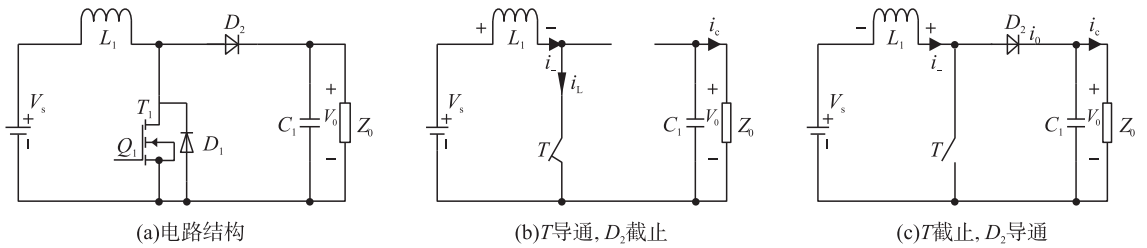


图 1 Boost DC/DC 升压电路及其工作状态

Fig. 1 The circuit structure and working status of Boost DC/DC

T 导通, D_2 截止的工作状态下,电源电压 V_s 加到升压电感 L_1 上,电感电流 i_L 线性增长,即 $Ldi_L/dt = V_s$,在此期间, i_L 的增量 Δi_{L+} 为:

$$\Delta i_{L+} = \frac{V_s}{L} T_{on} = \frac{V_s}{L} D T_s, \quad (1)$$

其中, V_0 为输出电压; V_s 为输入电源电压; T_{on} 为开关管导通时间; D 和 T_s 为 PWM 驱动波形的占空比和周期.

T 截止, D_2 导通的工作状态下,电源电压 V_s 和 i_L 向负载和电容供电, i_L 减小, C 充电,加在 L 上的电压为 $V_s - V_0$,且 i_L 线性减少,即 $Ldi_L/dt = V_s - V_0$. 在 T 截止期间内, i_L 的减量 Δi_{L-} 为:

$$\Delta i_{L-} = \frac{V_0 - V_s}{L} (T_s - T_{on}) = \frac{V_0 - V_s}{L} (1 - D) T_s. \quad (2)$$

从公式(1)、(2)中可以得到, PWM 驱动信号周期越小,则电感电流波动越小,即电流越平稳. 但是驱动信号周期的减小则直接增大了开关器件的开通频率,使得电路中的脉冲电压、电流增多增大,很大程度上加剧了系统对外的传导干扰.

1.2 Buck DC/DC 变换器工作原理分析

Buck DC/DC 变换器的电路如图 2(a) 所示,假定其工作在电流连续模式 CCM,则该电路具有两种工作状态,如图 2(b)、(c) 所示,开关管驱动采用 PWM 控制方式. T 导通时,电源电压 V_s 通过 T 加到二极管 D_1 和输出滤波电感 L_1 、输出滤波电容 C_1 上, D_1 承受反压截止. 由于开关频率取得非常高,滤波器 L_1 、 C_1 值只要选的足够大,则在开关 T 导通期间内,电容 C_1 两端的电压基本保持不变,即 V_0 ,因此电感 L_1 上的电

压为 $V_s - V_0$, 该电压促使滤波电感电流 i_{L1} 线性增加, 即 $L di_L/dt = V_s - V_0$. 在此过程中, i_L 的增量 Δi_{L+} 为:

$$\Delta i_{L+} = \frac{V_0 - V_s}{L} T_{on} = \frac{V_0 - V_s}{L} D T_s. \quad (3)$$

T 截止, D_1 导通时, i_L 通过 D_1 续流, i_L 的减小量 Δi_{L-} 为:

$$\Delta i_{L-} = \frac{V_0}{L} T_{off} = \frac{V_0}{L} (T_s - T_{on}) = \frac{V_0}{L} (1 - D) T_s. \quad (4)$$

与 Boost 升压电路工作原理类似, 从公式(3)、(4)中可以得到, PWM 驱动信号周期越小, 则电感电流波动越小, 即电流越平稳. 同样, 驱动信号周期的减小即直接增大了开关器件的开通频率, 使得电路中的脉冲电压、电流增多增大, 很大程度上加剧了系统对外的传导干扰.

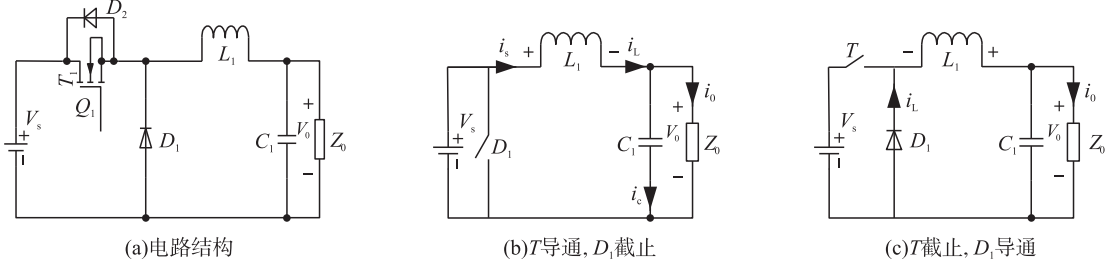


图 2 Buck DC/DC 降压电路及其工作状态

Fig. 2 The circuit structure and working status of Buck DC/DC

2 Pspice 仿真模型建立

Pspice 软件具有强大的电路图绘制功能、电路模拟仿真功能、图形后处理功能和元器件符号制作功能, 以图形方式输入, 自动进行电路检查, 生成图表, 模拟和计算电路. 它的用途非常广泛, 不仅可以用于电路分析和优化设计, 还可用于电子线路、电路和信号与系统等课程的计算机辅助教学. 与印制版设计软件配合使用, 还可实现电子设计自动化. 被公认是通用电路模拟程序中最优秀的软件, 具有广阔的应用前景.

其次, Pspice 能够把仿真与电路原理图的设计紧密地结合在一起, 广泛应用于各种电路分析, 可以满足电力电子电路动态仿真的要求. 其元件模型的特性与实际元件的特性十分相似, 因而它的仿真波形与实验电路的测试结果相近, 对电路设计有重要指导意义.

2.1 直流人工电源网络的仿真模型

直流人工电源网络又称为线阻抗稳定网络 DC_LISN (DC Line Impedance Stabilization Network)^[8], 是电磁兼容标准测试必备的传导电磁干扰噪声测量设备, 其主要作用就是在射频范围内向受试设备端子之间提供一规定阻抗, 并能将试验电路与供电电源上的无用射频信号隔离开来, 进而将骚扰电压耦合到测量接收机上. 常规 0.15 ~ 100 MHz 测试频段的 50 Ω /5 μ H+1 Ω 型 DC_LISN 的硬件电路图如图 3(a) 所示, 其中 $L_1 = 5 \mu$ H, $C_1 = 2 \mu$ F, $C_2 = 0.1 \mu$ F, $R_1 = 1 \Omega$, $R_2 = 1000 \Omega$, $R_3 = 50 \Omega$, $R_4 = 50 \Omega$ (接收机内阻抗). 根据此硬件电路参数建立图 3(b) 的仿真模型.

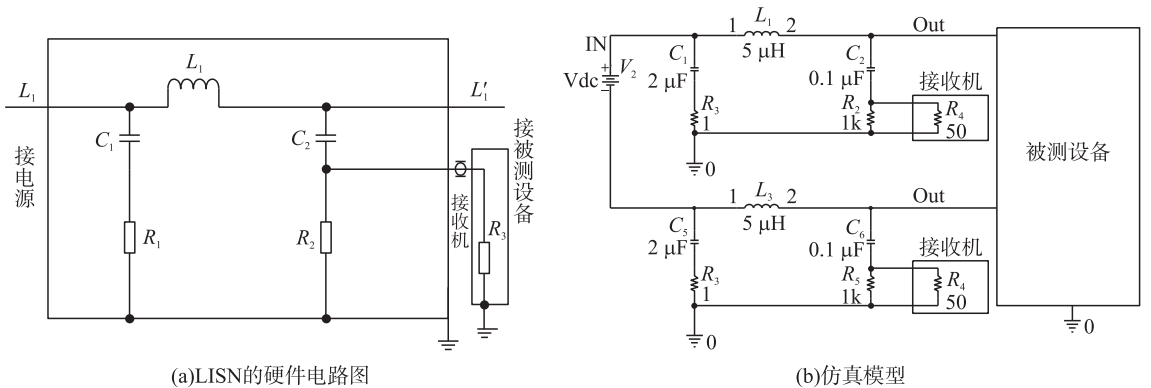


图 3 直流 LISN 的结构图及其仿真模型

Fig. 3 The structure and simulation model of DC_LISN

2.2 直流变换器电路仿真模型的建立

在高频情况下,电容不呈现纯容性阻抗,而是寄生电阻、寄生电感与原电容的串联组合,其高频等效电路模型如图 4 所示,其中 ESR_c 为电容寄生电阻, ESL_c 为电容寄生电感,但高频时,电容的寄生电阻和寄生电感产生的阻抗相比很小,可以忽略不计;同样,电感也不呈现纯感性阻抗,而是寄生电容、寄生电阻与原电感的并联组合,其高频等效电路模型如图 5 所示,其中 ESC_L 为电感的寄生电容, ESR_L 为电感的寄生电阻,但高频时,电感的寄生电阻和寄生电容产生的阻抗相比很小,可以忽略不计. 因此,相比低频工作模式,直流变换器中采用的电感、电容在高频工作模式下呈现的阻抗会发生很大的变换,由于传导干扰噪声测试的频段为 150 kHz ~ 30 MHz 高频段,如果忽略电感、电容的高频寄生参数影响,传导噪声分析的准确度将受到很大的影响.

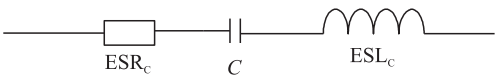


图 4 电容的高频等效电路

Fig. 4 The high-frequency equivalent circuit of capacitance

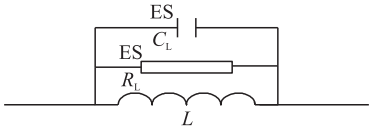


图 5 电感的高频等效电路

Fig. 5 The high-frequency equivalent circuit of inductance

高频工作模式下,MOSFET 在开关过程中的漏源电压和电流有很高的变化率(dv_{DS}/dt 、 di_{DS}/dt),造成开关管开关准方波波形的畸变. 高频时,数值很大的 v_{DS}/t 与 MOSFET 管散热片和地之间寄生电容 C_m 一起,形成了开关电源共模传导 EMI 最典型的干扰源.

根据电路元件以及 MOSFET 的高频等效特性及其模型,建立了如图 6 所示的直流变换器的高频仿真模型,其中(a)为 Boost 升压变换器的仿真模型(40 V/74 V), (b)为 Buck 降压变换器的仿真模型(80/50). 为了定性分析直流侧传导噪声,所以假定高频寄生参数 C_m 为 1 nF, ESC_L 为 1 μ H, ESL_c 为 1 nF.

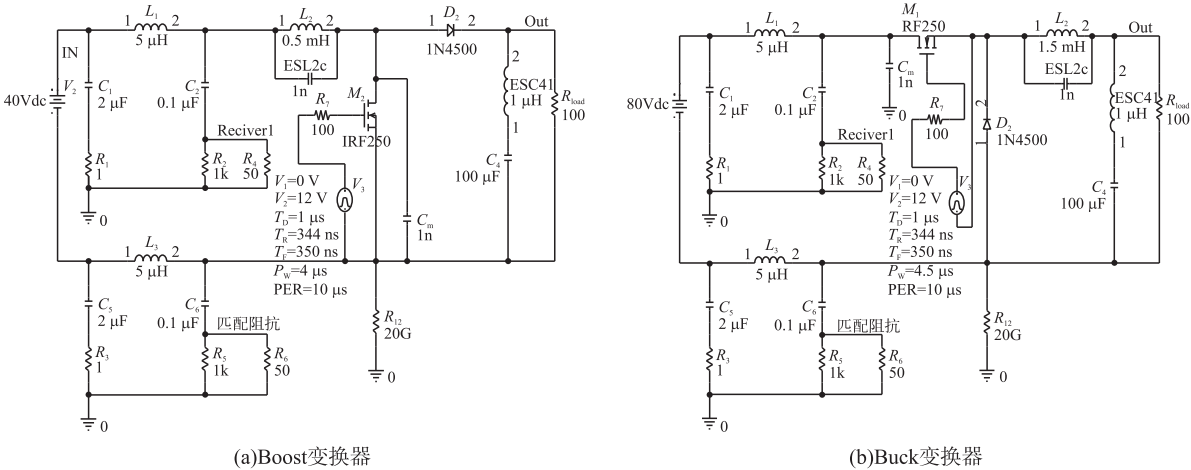


图 6 直流变换器的高频仿真模型

Fig. 6 The high-frequency simulation model of DC converter

直流变换器仿真的成功与否,很大程度上取决于驱动波形的选择和确定,本仿真驱动波形采用 Pspice 的 SOURSE 库中的 VPULSE 脉冲产生的方波,具体参数设置如下: V_1 , 低电平, -12 V; V_2 , 高电平, +12 V; TD: 第一个脉冲相对于 0 时刻的延迟时间, 1 s; TR: 脉冲上升时间, 为方波, 故为 0 s; TF: 脉冲下降时间, 为方波, 故为 0 s; PW: 脉冲宽度, 为上升到 V_2 后到下降前的宽度, 即高电平宽度, 4.5 μ s; PER: 脉冲周期, 10 μ s. 在建立 Boost 和 Buck 变换器仿真模型时, 特别注意驱动电压施加的方式, 不是直接脉冲波输出给 MOSFET 的 G 极, 而是应该加在其 G、S 之间.

3 基于 Pspice 仿真模型的传导噪声提取与分析

首先,按照 CSIPR 标准规定,在传导测试频段的 150 kHz ~ 30 MHz 范围内,接收机的频段宽度应为 9 kHz,因此需要使得 Pspice 中的 FFT 算法处理器处理相应频段要求带宽的仿真结果,即设置时间步长、最

大时间步长、起始时间、结束时间. 其次,需要按照采样定理确定采样频率,有效保证仿真结果的精度. 完成相关设置后,分别运行不同模型的仿真.

根据前述直流 LISN 的分析,接收机内阻抗两端的电压即为其提取的直流侧的传导 EMI 噪声电压信号,故本文选取 LISN 仿真模型中的 R_4 (即仿真模型中的 Receiver1)上的电压信号为直流变换器仿真模型的直流侧传导 EMI 噪声信号.

Boost、Buck 的仿真结果如图 7、图 8 所示,其中图 7、图 8(a)为未考虑高频寄生参数时的直流侧噪声信号提取结果,图 7、图 8(b)为考虑高频寄生参数时的直流侧噪声信号提取结果,根据测试结果,明显发现考虑变换器真实工作时存在的寄生参数导致变换器的直流侧噪声明显加剧,故后续针对该变换器的工程设计应考虑高频寄生参数的影响,以设计相应的抑制方案.

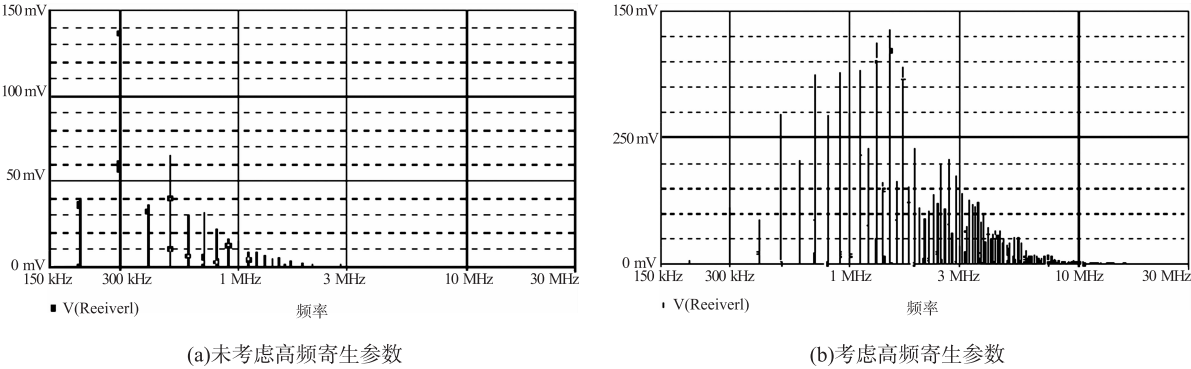


图 7 Bosst 直流侧传导噪声仿真结果

Fig.7 The simulation results of conducted EMI noise in DC side of Boost converter

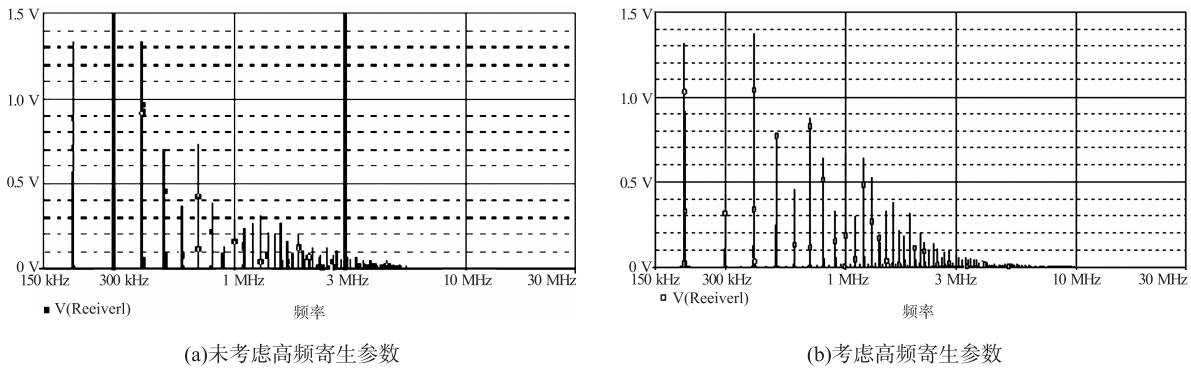


图 8 Buck 直流侧传导噪声仿真结果

Fig.8 The simulation results of conducted EMI noise in DC side of Buck converter

4 结语

本文首先分析了高频直流变换器的工作原理,得出了高频 Boost 升压、Buck 降压变换器的理论模型. 同时,利用 Pspice 电路仿真软件在噪声分析上的优势,根据直流人工电源网络的电路结构建立了相应的电路模型及其噪声提取方法,并具体分析了不同无源器件的高频特性,提出了电阻、电容、电感、场效应管的高频模型,运用无源器件的高频模型建立了高频直流变换器的高频仿真模型,采用 Pspice 仿真对比分析了未考虑高频寄生参数和考虑寄生参数下的 Boost、Buck 高频模型的直流传导干扰噪声,仿真结果表明高频寄生参数对于变换器的直流传导干扰噪声影响非常明显,本文理论与仿真研究为高频直流变换的直流干扰噪声分析与抑制提供了理论依据.

[参考文献](References)

[1] 孟进,马伟明,张磊,等. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型[J]. 中国电机工程学报,2008,28(15):141-146.

- Meng Jin, Ma Weiming, Zhang Lei, et al. High frequency model of conducted EMI for PWM variable-speed drive systems[J]. Process of CSEE, 2008, 28(15):141-146. (in Chinese)
- [2] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. 可再生能源系统电磁兼容关键技术研究[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2010, 10(3):1-6.
Zhao Yang, Dong Yinghua, Lu Xiaoquan, et al. Technology of EMC research in renewable energy systems[J]. Journal of Nanjing Normal University:Engineering and Technology Edition,2010,10(3):1-6. (in Chinese)
- [3] Nave M J. A novel differential mode rejection network for conducted emissions diagnostics[C]//Electromagnetic Compatibility. IEEE 1989 National Symposium on, Denver, 1989:223-227.
- [4] See K Y. Network for conducted EMI diagnosis[J]. Electronics Letters, 1999, 35(17):1446-1447.
- [5] Mardiguian M, Raimbourg J. An alternate, complementary method for characterizing EMI filters [C]//Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on, Seattle, 1999:882-886.
- [6] 刘勇,赵阳,肖家旺,等. 新型传导 EMI 滤波器的设计研究[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2011,11(4):12-15.
Liu Yong, Zhao Yang, Xiao Jiawang, et al. The research on the design of the new conducted EMI filter[J]. Journal of Nanjing Normal University:Engineering and Technology Edition,2011,11(4):12-15. (in Chinese)
- [7] 赵阳,董颖华,陆婉泉,等. 大功率开关磁阻电机 EMI 噪声综合分析 with 处理[J]. 中国电机工程学报,2011,31(21): 135-141.
Zhao Yang, Dong Yinghua, Lu Xiaoquan, et al. EMI noise analysis and process for large-power switched reluctance motor[J]. Process of CSEE, 2011 31(21):135-141. (in Chinese)
- [8] 全国无线电干扰标准化技术委员会. GB/T6113. 102—2008, 无线电骚扰和抗扰度测量设备和测量方法规范[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
Committee for Standardization in China. GB/T6113. 102—2008, Radio disturbance and immunity measurement apparatus and methods[S]. Beijing:Standards Press of China, 2008. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]