

# 电磁损耗抑制共模电流方法的研究

张小凯<sup>1</sup>, 郑建平<sup>2</sup>, 王 林<sup>1</sup>, 杨晓霞<sup>1</sup>, 谢国治<sup>1</sup>, 陈将伟<sup>1</sup>

(1. 南京邮电大学电子科学与工程学院, 江苏 南京 210003)

(2. 南京炮兵学院牵引火炮系, 江苏 南京 211132)

**[摘要]** 沿电缆-底盘传导的共模电流是电动汽车产生电磁干扰的重要原因。根据传输线理论, 提出了利用电磁损耗抑制共模电流的新途径。实践中, 采用集总元件的梯形网络, 在电容器和线圈内分别填充电损耗材料和磁损耗材料, 来构建相应的电磁损耗器件。通过求解基于传输矩阵关系式的联立方程组, 探讨电磁损耗对电缆上共模电流影响的特征, 表明利用电磁损耗可有效地抑制较宽频率范围内的共模电流。本文提出的方法也可用于抑制光伏并网、舰船电力系统、印刷电路板等方面存在的共模电流。

**[关键词]** 共模电流, 电磁损耗, 抑制, 集总元件的梯形网络, 传输矩阵

**[中图分类号]** TM134 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)02-0015-05

## Suppressing Common Mode Current by Using Electromagnetic Losses

Zhang Xiaokai<sup>1</sup>, Zheng Jianping<sup>2</sup>, Wang Lin<sup>1</sup>, Yang Xiaoxia<sup>1</sup>, Xie Guozhi<sup>1</sup>, Chen Jiangwei<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(2. Department of Towed Artillery, Nanjing Artillery Academy, Nanjing 211132, China)

**Abstract:** The common mode current conducted through chassis and cables is a major cause for electromagnetic interference in an electric vehicle. Based on the transmission line theory, we suggest a new approach to suppress common mode current by using electromagnetic losses. In practice, the lumped-elements ladder network with the coils filled with magnetic lossy materials and the capacitors filled with electric lossy materials are adopted to construct the corresponding device. The effects of the electromagnetic losses on common mode current existed in chassis and cables are discussed by solving the simultaneous equations of the transfer matrix ones. The results show that the electromagnetic losses can effectively suppress common mode current in a wide frequency range. This method can also be used to suppress the common mode current existed in photovoltaic grid connected inverter, ship power systems, printed circuit boards, and so on.

**Key words:** common mode current, electromagnetic losses, suppression, lumped-elements ladder network, transfer matrix

由于电力电子技术的迅猛发展和大功率集成器件的广泛应用, 电磁环境日益严峻, 系统治理电磁干扰已受到广泛关注<sup>[1]</sup>。共模电流普遍存在于电动汽车、光伏并网、舰船电力系统、印刷电路板等电子电路系统中, 是产生电磁干扰的重要原因<sup>[2-13]</sup>。典型地, 电动汽车的大功率电源变换器在工作过程中会产生宽频电磁噪声和电磁干扰, 其主要以共模电流的形式沿电缆和底盘传播, 影响电气设备和控制系统的正常工作, 产生严重的电磁兼容性问题, 不利于电动汽车的运行及其产业化进程<sup>[2-9]</sup>。

目前, 主要从共模电流的产生和传导两个方面来探讨抑制共模电流的方法。共模电流源于电路中的电压变化 $\frac{dU}{dt}$ , 其传导回路为: 相线、对地的寄生电容、大地。 $\frac{dU}{dt}$ 主要源于电路中的电源变换器和功率开关器件, 通常运用电源变换器主电路拓扑结构和功率开关器件吸收网络参数的优化设计来抑制共模电流的产生<sup>[2,3]</sup>。但此方法在抑制较高频段(大于10 MHz)共模电流时会放大较低频段的共模电流, 仅在较窄频率范围内取得有限的抑制效果。对传导回路中的共模电流, 通常采用接地<sup>[14]</sup>或串联电感<sup>[5,6]</sup>的方法来抑制。接地可以抑制共模电流, 但共模电流一般是高频, 即使稍作接地, 也会因分布电容的存在而产生多点

收稿日期: 2014-10-19.

通讯联系人: 陈将伟, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 电磁场理论、吸波材料、超材料研究. E-mail: jwchen69@sohu.com

接地的效果,进而形成多个地线回路,这将不利于共模电流的抑制. 串联共模电感一般针对某一频率点,并不适用于抑制较宽频带的共模电流,甚至还会在其他频率点造成更大的共模电流<sup>[5,6]</sup>.

电磁损耗材料(吸波材料)已成为防辐射抗干扰的常用材料之一<sup>[15]</sup>. 利用电磁损耗材料吸收电子电器设备产生的干扰电磁波,使屏蔽腔体内无电磁波的来回反射. 建造无电磁波反射的空间,可彻底防止电磁波的辐射,消除电磁污染,同时提高设备的抗电磁干扰能力<sup>[1]</sup>. 另外,常用的电磁损耗材料,如 Ni-Zn 系铁氧体,可在  $10^5 \text{ Hz} \sim 10^8 \text{ Hz}$  的频率范围内有较高的损耗,能有效地抑制较宽频率范围内的电磁干扰<sup>[16]</sup>.

本文以低地板燃料电池电动客车中连接变换器输出端与驱动电机的 10 m 长电缆为研究对象<sup>[4-6]</sup>,在传输线模型基础上,提出利用电磁损耗来抑制共模电流的新途径. 数值模拟结果表明采用电磁损耗器件可以有效衰减传导线上的共模电流. 本文可为抑制电动汽车宽频电磁噪声和电磁干扰、整车电缆优化布置等提供可靠的理论基础和可行的技术方案.

## 1 基本原理和数值模拟方法

研究表明,电缆与底盘的分布电感和分布电容是共模电流传导回路的主要环节,该回路的微段电路模型如图 1 所示<sup>[4,5]</sup>,电路满足:

$$-\frac{du(x,t)}{dx} = R_0 i(x,t) + L_0 \frac{di(x,t)}{dt}, \quad (1)$$

$$-\frac{di(x,t)}{dx} = G_0 u(x,t) + C_0 \frac{du(x,t)}{dt}, \quad (2)$$

式中,  $u(x,t)$  和  $i(x,t)$  分别为  $t$  时刻回路中的分布电压和

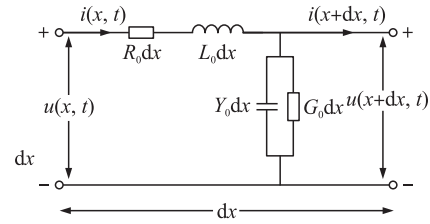


图 1 电缆-底盘回路的微段电路模型

Fig. 1 Micro-segment model of cable and chassis loop

分布电流,  $R_0$ 、 $L_0$ 、 $G_0$ 、 $C_0$  分别为单位长度电阻、电感、电纳和电容. 取  $u(x,t) = \text{Re}[\tilde{U}(x)e^{j\omega t}]$ ,  $i(x,t) = \text{Re}[\tilde{I}(x)e^{j\omega t}]$  (“ $\sim$ ”表示该参量为复数形式,  $U(x)$ 、 $I(x)$  分别为位置  $x$  处电压和电流的相量), 式(1)、式(2)可分别化为

$$\frac{d\tilde{U}(x)}{dx} = -\tilde{Z}_0 \tilde{I}(x), \quad (3)$$

$$\frac{d\tilde{I}(x)}{dx} = -\tilde{Y}_0 \tilde{U}(x), \quad (4)$$

式中, 串联阻抗  $\tilde{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0$ , 并联导纳  $\tilde{Y}_0 = G_0 + j\omega C_0$ . 对(3)和(4)两式再次求导可得电报方程:

$$\frac{d^2 \tilde{U}(x)}{dx^2} - \tilde{Y}_0 \tilde{Z}_0 \tilde{U}(x) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 \tilde{I}(x)}{dx^2} - \tilde{Y}_0 \tilde{Z}_0 \tilde{I}(x) = 0. \quad (6)$$

电报方程(5)和(6)的解为:

$$\tilde{U}(x) = \tilde{U}_+ e^{-\tilde{\gamma}x} + \tilde{U}_- e^{\tilde{\gamma}x}, \quad (7)$$

$$\tilde{I}(x) = \tilde{I}_+ e^{-\tilde{\gamma}x} + \tilde{I}_- e^{\tilde{\gamma}x}, \quad (8)$$

式中,  $\tilde{\gamma} = \sqrt{\tilde{Z}_0 \tilde{Y}_0} = \alpha + j\beta$  为传输常数. 为简化, 设传输线的电纳  $G_0$  和电阻  $R_0$  均为零. 当传输线放置于介电常数  $\tilde{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon''$ 、磁导率  $\tilde{\mu} = \mu' - j\mu''$  的介质中时, 单位长度电容和电感分别为关于介电常数和磁导率的函数, 可分别表示为:  $\tilde{C}(\tilde{\epsilon}, C_0) \approx \tilde{\epsilon} C_0 = C' - jC''$  和  $\tilde{L}(\tilde{\mu}, L_0) \approx \tilde{\mu} L_0 = L' - jL''$ . 显然, 当  $\tilde{\epsilon}$  和  $\tilde{\mu}$  有较大的虚部时, 传输常数  $\gamma$  的实部, 即衰减系数  $\alpha$  会有较大值. 由式(8), 共模电流沿传播方向会以指数形式衰减, 达到抑制共模电流的目的. 即为利用电磁损耗抑制共模电流的理论基础.

为定量计算传输线上的共模电流, 将图 1 所示的传输线分割成  $N$  小段, 如图 2 所示. 利用传输矩阵建立起双口网络第  $i$  段左边的入波  $\tilde{b}_i$ 、出波  $\tilde{a}_i$  与第  $i$  段右边的入波

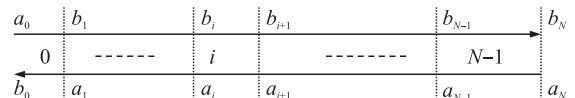


图 2 把图 1 所示的传输线人为地分割成  $N$  小段的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the transmission line shown in Fig. 1 artificially divided into  $N$  segments

$\tilde{a}_{i+1}$ 、出波  $\tilde{b}_{i+1}$  之间的关系<sup>[17]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \tilde{b}_i \\ \tilde{a}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{T}_{11}^i & \tilde{T}_{12}^i \\ \tilde{T}_{21}^i & \tilde{T}_{22}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{b}_{i+1} \\ \tilde{a}_{i+1} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中,  $\begin{bmatrix} \tilde{T}_{11}^i & \tilde{T}_{12}^i \\ \tilde{T}_{21}^i & \tilde{T}_{22}^i \end{bmatrix}$  为第  $i$  段的传输矩阵. 入波  $\tilde{b}_i$ 、出波  $\tilde{a}_i$  与电压  $\tilde{U}_i$ 、电流  $\tilde{I}_i$  之间的关系分别为  $\tilde{a}_i + \tilde{b}_i = \frac{\tilde{U}_i}{\sqrt{\tilde{Z}_{C,i}}}$

和  $\tilde{b}_i - \tilde{a}_i = \tilde{I}_i \sqrt{\tilde{Z}_{C,i}}$ . 其中,  $\tilde{Z}_{C,i}$  为特性阻抗. 计算时取  $\tilde{a}_0 = 1, \tilde{a}_N = 0$ , 联立  $N$  个传输矩阵关系式(9), 建立包含  $2N$  个未知数  $\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{a}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_{N-1}, \tilde{a}_{N-1}, \tilde{b}_N$  的方程组, 求解该方程组, 可得到  $\tilde{b}_0, \tilde{b}_1, \tilde{a}_1, \tilde{b}_2, \dots, \tilde{b}_{N-1}, \tilde{a}_{N-1}, \tilde{b}_N$  的值, 从而得到传输线上各点的电流、电压等.

## 2 数值模拟和讨论

### 2.1 电动汽车电缆上共模电流特性

通常, 电动汽车的驱动系统由电池组-电源变换器-驱动电机构成, 其间用高压电缆连接, 且电缆与车辆底盘是电气绝缘的. 电池组与电源变换器输入端之间的电缆较短, 通常约为 2 m, 而电源变换器输出端与电动汽车驱动电机之间的电缆较长, 大约为 10 m. 研究表明, 电源变换器中功率开关的导通与关闭, 导致电压跳变  $du/dt$ , 其中高频成分在电缆-底盘构成的回路上传导, 形成共模电流<sup>[4-6]</sup>.

黄勇等<sup>[5]</sup>用阻抗分析仪 Agilent4294A 测量了电缆-底盘在不同频率下的阻抗, 经换算得到单位长度电感  $L_0 = 0.2346 \mu\text{H}$ , 单位长度电容  $C_0 = 0.1204 \text{ nF}$ , 且电阻和电导可忽略. 将此电感、电容、电阻和电导参数代入传输矩阵关系式, 求解联列传输矩阵关系式(9)得到的方程组, 可获得共模电流、共模电压沿电缆分布情况. 结果表明, 电缆上共模电流和共模电压呈驻波分布, 当“电缆-底盘”之间的分布参数满足谐振条件时, 会产生共模电流频谱中的峰值. 典型地, 频率 5.0 MHz 和 9.8 MHz 共模电流分布如图 3 所示(坐标原点代表的是电源变换器输出端,  $x$  轴正方向指向驱动电机的输入端, 下同), 与文献[5]中通过实验测量和数值模拟得到的结果一致.

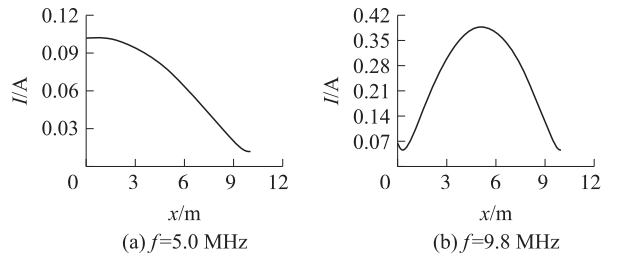


图 3 电动汽车电缆上共模电流分布

Fig. 3 Distribution of common mode current in cables of electric vehicles with frequency

### 2.2 串联共模电感抑制共模电流

串联共模电感是一种抑制共模电流的常用方法<sup>[5,6]</sup>. 假设共模电感线圈单位长度的电感量  $L_0 = 0.5 \mu\text{H}$ , 电容与原电缆一致. 在电源变换器输出端附近或距离输出端 2 m 处, 串接 0.5 m 长的共模电感线圈, 得到共模电流分布如图 4 所示.

比较图 4(a)、4(b)与图 3(a)、4(b), 发现对 5.0 MHz 的共模电流有抑制, 而 9.8 MHz 的共模电流几乎没受到影响. 对比图 4(c)、4(d)和图 3(a)、3(b)可知, 5.0 MHz 的共模电流被放大, 9.8 MHz 的共模电流受到明显的抑制. 可见, 串联共模电感会影响“电缆-底盘”之间的分布参数. 当某些频率的分布参数偏离谐

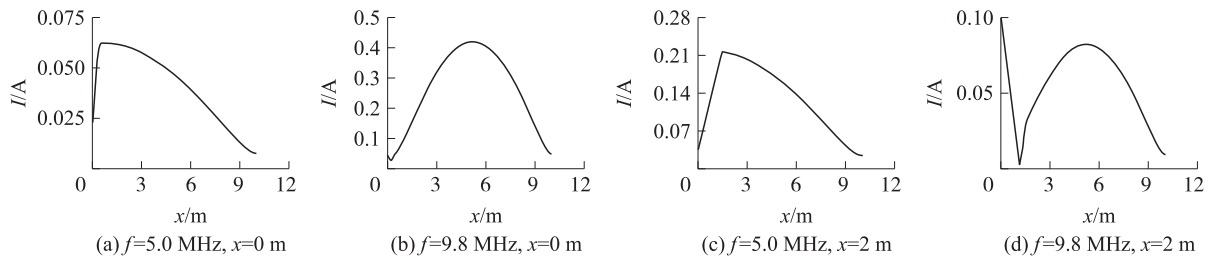


图 4 串联共模电感, 电缆上共模电流分布( $x$  是电源变换器输出端与共模电感之间的距离)

Fig. 4 Distribution of common mode current in cables connected a common mode inductor  
( $x$  is the distance between the power converter output port and common mode inductor)

振条件时,会抑制相应频率的共模电流. 但另外一些频率的分布参数满足或接近谐振条件,反而增强相应频率的共模电流. 可见,串联共模电感仅对较窄频率范围内的共模电流起到抑制作用,抑制效果与串联位置有关,并且抑制效果不理想<sup>[5]</sup>.

### 2.3 利用电磁损耗抑制共模电流

本节采用集总元件的梯形网络形式<sup>[18]</sup>,如图 5 所示. 单元结构的尺寸满足  $p < \lambda/5$  ( $\lambda$  为共模电流的波长),可以利用单位长度的等效电感和等效电容参量来描述该网络的电磁特性<sup>[18]</sup>. 假设所采用的集总元件梯形网络单位长度等效电感和等效电容与前述传输线的电感和电容相同,在电感线圈中填充有损耗的磁性材料、在电容器中填充有损耗的介电材料,将填充了损耗材料的网络称为“电磁损耗器件”.

电动汽车电缆上共模电流的频率范围大致为 1 MHz~30 MHz<sup>[6]</sup>,磁损耗参量  $\mu''$  和电损耗参量  $\varepsilon''$  通常在 10 量级<sup>[16]</sup>. 为简化,填充的磁性材料的磁导率取  $\tilde{\mu} = 10 - j30$ 、介电材料的介电常数取  $\tilde{\varepsilon} = 9 - j10$ ,且不随频率改变而改变.

在电源变换器输出端附近或距离输出端 2 m 处,串接 0.5 m 长的电磁损耗器件,所得共模电流分布如图 6 所示. 比较图 6(a)、6(b)和图 3(a)、3(b),可见将电磁损耗器件串联在电源端附近时,5.0 MHz 和 9.8 MHz 的共模电流都衰减到很小. 与串联共模电感的方法相比,将电路与损耗材料相结合的方法能够同时抑制不同频率的共模电流,即它具有宽频特性,且抑制效果非常好. 对比图 6(c)、6(d)和图 3(a)、3(b)可见,当把这种电磁损耗器件添加在距离电源端 2 m 左右时,后续电路中 5.0 MHz 和 9.8 MHz 共模电流也都被抑制,可见添加的位置对共模电流抑制效果的影响很小.

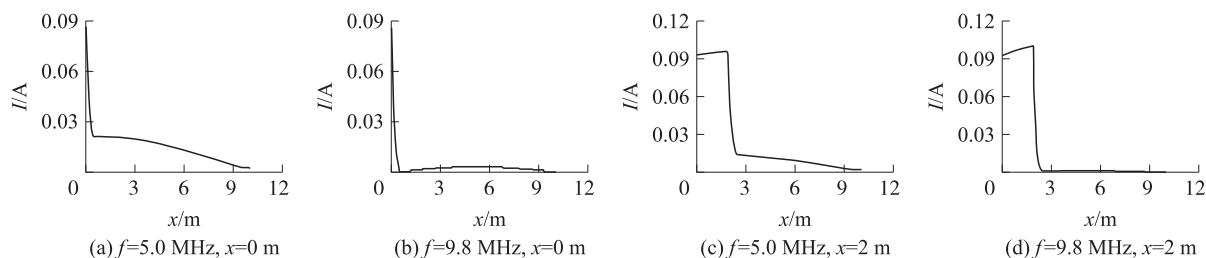


图 6 串联电磁损耗器件,电缆上共模电流分布( $x$  是电源变换器输出端与共模电感之间的距离)

Fig. 6 Distribution of common mode current in cables connected an electromagnetic losses composite device ( $x$  is the distance between the power converter output port and electromagnetic losses composite device)

我们注意到,串联共模电感通过调节“电缆-底盘”之间的分布参数,使其偏离谐振条件,达到抑制共模电流的目的<sup>[4-6]</sup>,但  $dU/dt$  中相应频率的电磁能量仍存在于系统中,可能产生一定的影响. 而串联电磁损耗器件则一方面易于调节其阻抗,使共模电流进入该器件,另一方面通过损耗把相应的电磁能量转变成其他形式的能量,如热能等<sup>[1,15,16]</sup>. 衰减进入到器件中的共模电流,将进入后续电路中的共模电流变小甚至接近于零,因而能取得理想的抑制效果.

### 3 结语

根据传输线理论,提出了利用电磁损耗抑制共模电流的新途径. 通过求解基于传输矩阵关系式的联立方程组,探讨了电磁损耗器件对共模电流影响的特征,表明选择合适的电磁损耗材料,串联电磁损耗器件可显著抑制较宽频率范围内的共模电流,抑制效果与串联位置无关. 研究工作可为抑制电动汽车宽频电磁噪声和电磁干扰、整车电缆优化布置等提供必要的理论基础和可行的技术方案,表明采用电磁损耗材料来调节电路性能的可能性.

#### [参考文献](References)

- [1] 张林昌. 发展我国的电磁兼容事业[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 24-28.

- Zhang Lingchang. Developing electromagnetic compatibility undertaking in our country[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 24-28. (in Chinese)
- [2] Gitau M. Modeling conducted EMI noise generation and propagation in BOOST converter[C]//Proceedings of the 2000 IEEE International Symposium on Industrial-Electronics. Cholula, Puebla Mexico, 2000: 353-358.
- [3] Shoyama M, Okunaga T, Li C, et al. Balanced switching converter to reduce common-mode conducted noise[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(12): 1 095-1 099.
- [4] Mutoh N, Nakanisi M, Kanesaki M, et al. EMI noise control methods suitable for electric vehicle drive systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005, 47(4): 930-937.
- [5] 黄勇, 曾帆, 陈全世, 等. 电动汽车共模电流传导特性的研究[J]. 电工电能新技术, 2007, 26(3): 24-28.  
Huang Yong, Zeng Fan, Chen Quanshi, et al. Characteristics of common-mode conducted current in electric vehicle[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2007, 26(3): 24-28. (in Chinese)
- [6] 黄勇, 陈全世, 陈伏虎. 电动汽车共模电流抑制方法的研究[J]. 高技术通讯, 2008, 18(11): 1 206-1 210.  
Huang Yong, Chen Quanshi, Chen Fuhu. A method for attenuation of common-mode current in electric vehicles[J]. High Technology Communication, 2008, 18(11): 1 206-1 210. (in Chinese)
- [7] 王洪武, 张戟, 杨腾飞. 电动汽车驱动系统 EMC 问题研究现状[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6): 18-22.  
Wang Hongwu, Zhang Ji, Yang Tengfei. Status quo of the EMC research on drive system in electric vehicle[J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34(6): 18-22. (in Chinese)
- [8] 计时鸣, 刘大亮. 电动汽车传导性干扰的电磁兼容性研究[J]. 机电工程, 2012, 29(3): 359-365.  
Ji Shiming, Liu Daliang. Study on conducted EMC of electric vehicle[J]. Journal of Mechanical and Electric Engineering, 2012, 29(3): 359-365. (in Chinese)
- [9] 崔祥飞, 程维明, 杨东. 电动汽车驱动系统 EMC 问题的测试及整改[J]. 电子测量技术, 2013, 36(5): 45-48.  
Cui Xiangfei, Cheng Weiming, Yang Dong. The testing and rectification of EMC problem on drive system in electric vehicle[J]. Electronic Measurement Technology, 2013, 36(5): 45-48. (in Chinese)
- [10] 张兴, 孙龙林, 许颇, 等. 单相非隔离型光伏并网系统中共模电流抑制的研究[J]. 太阳能学报, 2009, 30(9): 1 022-1 026.  
Zhang Xing, Sun Longlin, Xu Po, Zhao Wei, Cao Renxian[J]. Research on common-mode current reduction of nonisolated single-phase grid-connected photovoltaic systems[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2009, 30(9): 1 022-1 026. (in Chinese)
- [11] 范昕. 舰船电力系统电磁兼容性研究现状综述[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(3): 78-82.  
Fan Xin. A review of the research status on the EMC of ship power systems[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2013, 8(3): 78-82. (in Chinese)
- [12] 彭亮, 黄峥嵘, 黄明晖, 等. 印制电路板电磁兼容设计浅析[J]. 电子与封装, 2013, 13(6): 24-28.  
Peng Liang, Huang Zhengrong, Huang Minghui, et al. The research of EMC's design for PCB[J]. Electronics and Packaging, 2013, 13(6): 24-28. (in Chinese)
- [13] 周卫平, 夏立, 侯新国, 等. 电力电子系统电磁干扰的抑制[J]. 中原工学院学报 2003, 14(SI): 141-144.  
Zhou Weiping, Xia Li, Hou Xinguo, et al. EMI Suppression in power electronics system[J]. Journal of Zhongyuan Institution of Technology, 2003, 14(SI): 141-144. (in Chinese)
- [14] 吕林强. 电磁兼容中的接地技术[J]. 煤炭技术, 2009, 28(2): 43-44.  
Lü Linqiang. Test coupled capacitor insulate blemis[J]. Coal Technology, 2009, 28(2): 43-44. (in Chinese)
- [15] 赵灵智, 胡社军, 李伟善, 等. 吸波材料的吸波原理及其研究发展[J]. 现代防御技术, 2007, 35(1): 27-48.  
Zhao Lingzhi, Hu Shejun, Li Weishan, et al. Absorbing mechanism and progress of wave-absorbing materials[J]. Modern Defence Technology, 2007, 35(1): 27-48. (in Chinese)
- [16] 廖绍彬. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
Liao Shaobing. Ferromagnetism[M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京: 电子工业出版社 2001.  
Zhang Keqian, Li Dejie. Electromagnetic Theory for Microwaves and Optoelectronics[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001. (in Chinese)
- [18] Caloz C, Itoh T. Application of the transmission line theory of left-handed(LH) materials to the realization of a microstrip“LH line”[J]. IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002, 2: 412-415.

[责任编辑: 陈 庆]