

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.2.431

中图分类号: TM712

文献标志码: A

SiC DC/DC 变换器电磁辐射干扰优化

羊岳彬, 李先允, 王书征
(南京工程学院电力工程学院, 南京 211167)

摘要:碳化硅 SiC (silicon carbide) 开关器件具有更快的开关速度与更高的工作频率, 被广泛应用于 DC/DC 变流器。但是 SiC 器件的高工作频率会产生强烈的电磁辐射干扰, 为了优化 DC/DC 变流器内部结构, 实现更高的功率密度, 提出一种 SiC DC/DC 变换器电磁辐射干扰的优化方法。文中首先分析了变流器的电磁辐射干扰源特性, 根据 DC/DC 电路拓扑结构建立了空间电磁辐射模型, 然后基于电磁辐射模型和模拟退火算法, 对 DC/DC 变换器元件布局进行低电磁辐射优化, 优化后的布局方案减少了 60.2% 的高频导线长度。最后, 进行三维有限元仿真分析进行验证, 所提出方法能优化 SiC DC/DC 变换电路布局, 将敏感电路上产生的电场强度降低两个数量级。

关键词:碳化硅; 电磁辐射; 模拟退火算法; 有限元

Electromagnetic Radiation Interference Optimization of SiC DC/DC Converter

YANG Yuebin, LI Xianyun, WANG Shuzheng

(School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) switching devices are widely applied in DC/DC converters owing to their faster switching speed and higher operating frequency. However, the high working frequency of SiC devices will result in strong electromagnetic radiation interference. To optimize the internal structure of DC/DC converter and achieve a higher power density, an optimization method for the electromagnetic radiation interference of SiC DC/DC converter is proposed. First, the characteristics of the converter's electromagnetic radiation interference source are analyzed, and a space electromagnetic radiation model is established according to the topology of DC/DC circuit. Then, based on the electromagnetic radiation model and simulated annealing algorithm, the low electromagnetic radiation optimization is carried out for the layout of components within the DC/DC converter. The optimized layout scheme reduces the length of high-frequency wire by 60.2%. Finally, the three-dimensional finite element simulation is carried out, and it is verified that the proposed method can optimize the circuit layout of SiC DC/DC converter and reduce the electric field intensity produced on the sensitive circuit by two orders of magnitude.

Keywords: Silicon carbide (SiC); electromagnetic radiation; simulated annealing algorithm; finite element

半导体器件作为电力电子设备的核心, 一直在朝着高频、高功率密度的方向发展^[1]。如今, 硅 Si (silicon) 半导体器件发展得十分成熟, 但由于本身

材料的原因, 发展空间已经比较有限^[2-4]。碳化硅 SiC (silicon carbide) 半导体相比于传统硅基半导体, 具有更高的开关频率和工作温度, 并由于阻断电压高、通态电阻低、开关损耗小的特点被应用于 DC-DC 变换器^[5-7]。

SiC DC-DC 变换器的高功率密度会引起严重的电磁辐射干扰问题, 对变换器的可靠性与安全性产生影响。传统的电磁兼容优化需要搭建样机并以实验数据作为导向, 凭借设计者的经验进行优化。

收稿日期: 2021-05-26; 修回日期: 2021-06-16; 录用日期: 2021-06-22; 网络首发日期: 2021-08-31

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目 (BE2018130); 江苏省研究生科研与实践创新计划资助项目 (SJCX20_0724)

This work is supported by Key R & D projects in Jiangsu Province under the grant BE2018130; Jiangsu postgraduate research and Practice Innovation Program under the grant SJCX20_0724

为了缩短研发周期,需要在设计时就能对 DC/DC 变换器的电磁辐射干扰进行优化。

目前国内外学者对 DC/DC 变换器的电磁辐射干扰进行了研究,文献[8]基于集成电路某一近场平面的扫描数据为基础,通过正则化技术、截断奇异值分解法和最小二乘法建立偶极矩模型等效集成电路的干扰源,从而预测空间远近场的电磁辐射干扰。文献[9-11]以偶极子天线理论建立了 DC/DC 变换器的电磁辐射干扰模型,并研究了屏蔽体对电磁辐射干扰的抑制效果。文献[12-13]给出了 BUCK 变换器与 BOOST 变换器高频回路的电磁辐射干扰模型,并提出接地与添加屏蔽体的优化方法。文献[14]通过 3 维模型仿真的方法计算了 DC/DC 变换器的近场电磁辐射特性,并根据仿真结果,提出优化措施。

总的来说,现有的研究主要侧重于电磁辐射干扰的建模与抑制两个部分。在建模过程中,电路导线经常被等效为一条直线,当距离干扰源较近时,会忽略导线宽度带来的影响,造成误差。电磁辐射干扰的抑制研究主要基于添加屏蔽体,缺乏对于电路布局进行优化。针对上述问题,本文对 SiC DC/DC 变换器的电磁辐射干扰进行研究,分析电磁辐射干扰源特性,建立电磁辐射干扰模型,基于模拟退火算法对元器件布局进行优化,最后进行仿真验证。

1 DC/DC 变换器电磁辐射干扰源分析

一种 BUCK 型 SiC DC/DC 变换器的拓扑结构如图 1 所示。 V_i 为输入电源, Q 为 SiC MOSFET, D 为二极管, L 为电感, C 为滤波电容, R 为负载电阻。

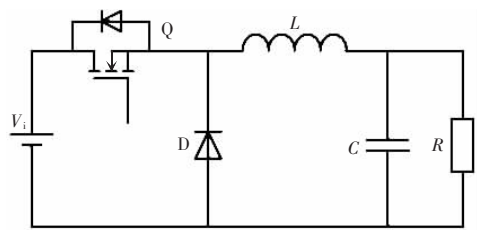


图 1 BUCK 电路

Fig. 1 BUCK circuit

基于 SPICE 模型,建立电路级仿真电路。SPICE 模型可以准确模拟 SiC MOSFET 的静态特性与动态特性,获取接近实测值的电路波形^[15]。SiC MOSFET 选择英飞凌公司的 IPP65R190C7,其余电路参数如表 1 所示。

表 1 电路参数

Tab. 1 Circuit parameters

参数	数值	参数	数值
V_i/V	20	R/Ω	20
L/mH	10	$C/\mu F$	1
f/kHz	100	D	0.6

仿真结果如图 2 所示,图中为 SiC MOSFET 的漏极支路电流。SiC MOSFET 相比于传统 Si 功率器件具有更短的关断时间,所以会在关断过程中产生更高的 dv/dt 和 di/dt 。由于 SiC 功率器件中存在寄生电感与寄生电容,在高 dv/dt 和 di/dt 的激励下,会形成电流尖峰与高频的电流振荡,并流过器件与续流回路,在电路中产生高频谐波,电流频谱如图 3 所示。因此, SiC DC-DC 变换器的导线中存在高频的时变电流,会在周围空间中产生强烈的电磁辐射干扰。

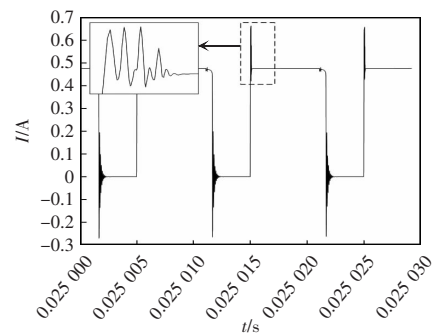


图 2 开关管源极电流

Fig. 2 Triode source current

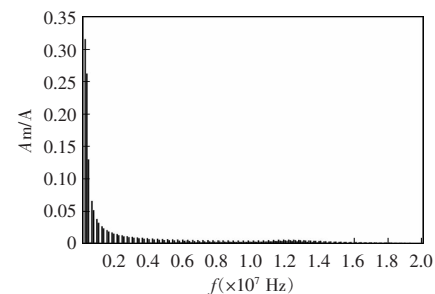


图 3 开关管源极电流频谱

Fig. 3 Spectrum of triode source current

2 电磁辐射模型

DC-DC 电路板采用双面布线模式,选择底层作为接地层,顶层进行电源布线,导线结构如图 4 所示。图 4 中电源线可以拆分为若干矩形导线,编号为 S1~S9。因此,本文首先建立矩形导线的电磁辐射模型,再根据图 4 所示位置关系进行组合,即可以得到 DC-DC 电路的电磁辐射干扰。

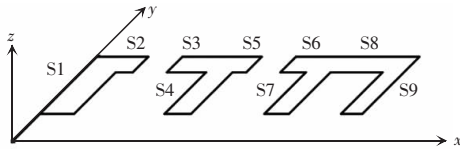


图 4 导线结构

Fig. 4 Wire structure

2.1 矩形导线电磁辐射模型

如图 5 建立三维坐标系,矩形导线长度为 L_1 ,宽度为 L_2 ,坐标原点位于矩形中心点。由于 PCB 上的铺铜导线厚度极薄,且由于趋肤效应,认为矩形导线为没有厚度的平面导线,并带有面电流,面电流密度为 J 。P 为空间中的一点,坐标为 (x, y, z) 。 E_x 、 E_y 、 E_z 分别为 P 点在 x 、 y 、 z 方向上的电场强度。

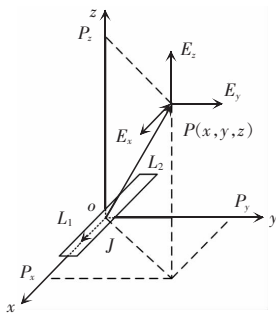


图 5 矩形导线模型

Fig. 5 Rectangular wire model

导线中流动的周期时变电流,可以进行傅里叶分解,分解为各次的正弦分量进行分析后再进行叠加。因此,对于正弦电磁场,满足达朗贝尔方程的复数形式,即

$$\nabla^2 \dot{A} + \beta^2 \dot{A} = -\mu \dot{J} \quad (1)$$

式中: \dot{A} 为正弦电磁场的动态位矢量; $\beta = 2\pi/\lambda$ 为相常数; μ 为磁导率; \dot{J} 为矩形导体内的面电流密

度。解得动态位为

$$\dot{A} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{\dot{J} e^{-j\beta R}}{R} dS' \quad (2)$$

式中, R 为场点到源点之间的距离,即

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} \quad (3)$$

对于 DC/DC 变换器,电磁辐射的最小波长约为 3 m,变换器的内部空间远小于波长,即 $R \ll \lambda$ 。因此,可以认为 $e^{-j\beta R} \approx 1$,则式(2)可写为

$$\dot{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{\dot{J}}{R} dS' \quad (4)$$

根据动态位的定义,可以计算磁场强度与电场强度为

$$\dot{H}(x, y, z) = \frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A}(x, y, z) \quad (5)$$

$$\dot{E}(x, y, z) = -j\omega \dot{A}(x, y, z) + \frac{(\nabla \cdot \dot{A}(x, y, z))}{j\omega\mu\epsilon} \quad (6)$$

式中: \dot{H} 为磁场强度矢量; \dot{E} 为电场强度矢量; ω 为电流角频率; ϵ 为介电常数。

矩形导线上的电流可以通过傅里叶分析分解为各次谐波正弦分量,因此带有时变电流的矩形导线在 P 点处的磁场强度与电场强度为

$$H(x, y, z) = \sum_{k=1}^n H_k(x, y, z) \quad (7)$$

$$E(x, y, z) = \sum_{k=1}^n E_k(x, y, z) \quad (8)$$

式中, H_k 、 E_k 为第 k 次正弦分量引起的磁场强度与电场强度。

2.2 DC-DC 变换器电磁辐射模型

由图 4 可知,DC-DC 变换器由 9 个矩形导体组成,P 点处的电磁辐射干扰由这 9 个矩形导体上的时变电流在该点上引起的电磁辐射叠加得到,如式(9)和式(10)所示,即

$$H_p = \sum_{i=1}^9 H(x-x_i, y-y_i, z-z_i) \quad (9)$$

$$E_p = \sum_{i=1}^9 E(x-x_i, y-y_i, z-z_i) \quad (10)$$

式中, (x, y, z) 为 S_i 号导线中心点坐标。

上述模型通过电磁场理论得到了 DC-DC 变换

器顶层导线上时变电流引起的电磁辐射,但是忽略了 PCB 接地底层带来的影响。不能得到准确的电磁辐射干扰,为了提高模型精度,使用镜像法对上述模型进行改进。如图 6 所示,在接地平面上方 h 距离处存在一个电流时,可以在接地平面下方 h 距离处放置一个方向相反、大小相等的镜像电流,然后去掉接地平面,两种情况下的空间电磁场是等效的。

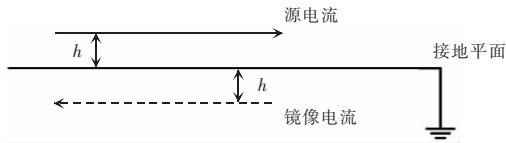


图 6 镜像法

Fig. 6 Mirror image method

因此,在电磁辐射模型中引入镜像电流,如式(11)和式(12),可以量化 PCB 底层接地对周围空间内的电磁辐射所带来的影响,即

$$\mathbf{H}_{\text{total}} = \mathbf{H}_{\text{source}} + \mathbf{H}_{\text{image}} \quad (11)$$

$$\mathbf{E}_{\text{total}} = \mathbf{E}_{\text{source}} + \mathbf{E}_{\text{image}} \quad (12)$$

3 DC-DC 变换器电磁辐射优化

DC-DC 变换器中导线上带有的高频时变电流会在空间中产生电磁辐射干扰,除了时变电流的特性之外,电磁辐射干扰还与导线的走向与布局有很大联系,通过改变元器件的位置,调整导线的布局走向可以达到优化电磁辐射干扰的效果。本文采取模拟退火算法对 DC-DC 变换器的元器件布局进行优化,降低 DC-DC 变换器的电磁辐射干扰。模拟退火算法是根据物理中固体退火过程与组合优化问题之间的相似性所提出的一种概率型演算法,可以在一个较大的搜索空间中找到全局的最优解。模拟退火算法包括:评价电磁辐射的目标函数,新布局方案的产生机制,以及新方案的接受准则。

3.1 目标函数

为了降低电磁辐射对空间中敏感电路产生的影响,本文采取在 DC-DC 变换器附近的敏感电路处均匀选择 n 个点,根据前文所述模型计算该 n 个点位处的电场强度平均值,作为布局优化的目标函

数,即

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\mathbf{E}_i| \quad (13)$$

3.2 新方案的产生机制

布局方案的解为 6 个元件的横坐标与纵坐标。假设当前解为 $(x_1, x_2, \dots, x_{12})$, 在当前的布局方案上增加一个扰动量,作为新的布局方案。首先随机产生一组满足标准正态分布的随机数 $(y_1, y_2, \dots, y_{12})$ 。根据式(14)计算权重 z , 即

$$z_i = \frac{y_i}{\sqrt{\sum_{k=1}^{12} y_k^2}} \quad (14)$$

则新解为

$$x = x_i + z_i T \quad (15)$$

式中, T 为当前的退火温度, 模拟退火算法需要在温度由高到低的过程中寻找每个温度下的最优解。随着温度逐渐降低, 在旧方案上增加的扰动量会逐渐减小, 最优方案解也会更精确。

当产生的新解不满足不等式约束 $v_i < x < w_i$ 时, 新解由式(16)给出, 即

$$\begin{cases} x = rv_i + (1-r)(x_i + z_i T) \\ x < v_i \\ x = rw_i + (1-r)(x_i + z_i T) \\ x > w_i \end{cases} \quad (16)$$

3.3 新方案的接受准则

模拟退火算法采用 Metropolis 接受准则来判断是否接受新方案。Metropolis 接受准则为

$$P = \begin{cases} 1 & F_{\text{new}} < F_0 \\ \exp\left(-\frac{F_{\text{new}} - F_0}{T}\right) & F_{\text{new}} > F_0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_0 为旧方案下的平均电场强度; F_{new} 为新方案下的平均电场强度。当新方案的平均电场强度小于旧方案时, 接受这个新方案; 当新方案的平均电场强度高于旧方案时, 则根据式(17)中给出的概率模型, 判断是否接受新的方案。为了排除局部极值的干扰而找到全局的最小值, 当退火温度较高时, 会很容易接受平均电场强度较高的方案。随着退火温度的逐渐降低, 高电场强度的方案被接受的可能性就越小。

4 优化结果与验证

4.1 优化结果分析

编写优化程序对 DC-DC 变换器的初始布局进行电磁辐射干扰优化,初始布局如表 2 所示。

表 2 初始布局与优化布局

Tab. 2 Initial and optimized layouts

元件	初始布局/mm	优化后布局/mm
电源	(30.9,30.8)	(1.0,14.2)
开关管	(46.8,38.5)	(3.6,19.8)
二极管	(50.3,15.7)	(6.8,12.6)
电感	(56.9,78.2)	(13.2,46.1)
电容	(79.1,46.0)	(35.4,17.5)
电阻	(97.7,43.0)	(99.4,34.0)

设置初始温度为 100, 温度下降速度为 95%, 温度下降次数为 100 次,将元器件布局范围限制在 10×10 cm 的范围内,优化过程如图 7 所示,在第 76 次迭代后找到了最优解。

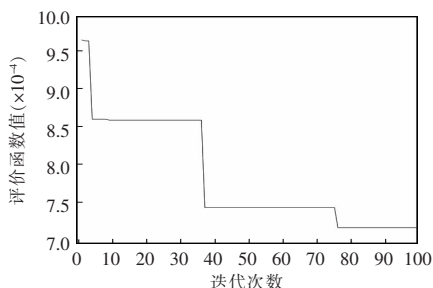


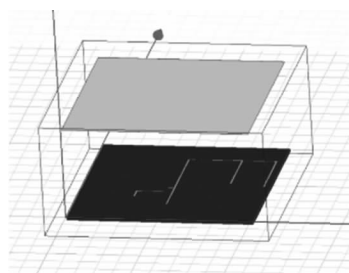
图 7 优化过程

Fig. 7 Optimization process

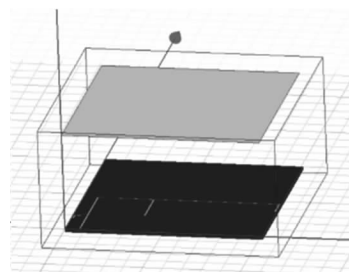
优化结果如表 2 所示。从表中可以看出,优化后的布局方案使高频导线的长度从 26.1 mm 减小到 10.4 mm,减少了 60.2%,并使得电路导线分散布置,与实际情况符合。

4.2 优化效果仿真验证

为验证优化结果是否准确,如图 8 所示在 solid-works 软件中绘制优化前后的 DC/DC 变换器三维模型,并导入 maxwell 仿真平台。电路板尺寸为 100×100 mm 的矩形,厚度为 1.6 mm。导线设置为铜材料,电路板介质设置为 FR4 环氧树脂,电路板底层铺一层铜作为接地层,并在电路板上方 50 mm 处设置一层铜片作为敏感电路。



(a)优化前

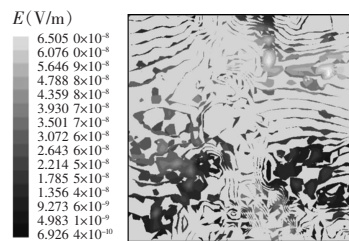


(b)优化后

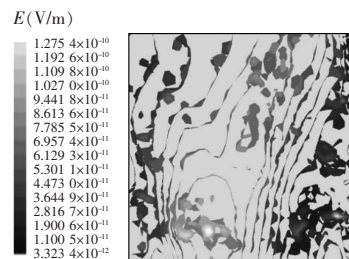
图 8 三维仿真模型

Fig. 8 Three-dimensional simulation model

在模型中添加电流激励后,划分网格进行仿真分析,选择仿真停止时间为 1.25 μs,结果如图 9 所示,为敏感电路上电场强度分布。优化前敏感电路上产生的电场强度最大值为 6.5×10⁻⁸ V/m,经过布局优化后产生的电场强度最大值降为 1.3×10⁻¹⁰ V/m,降低了两个数量级,验证了优化方案的有效性。



(a)优化前



(b)优化后

图 9 仿真结果

Fig. 9 Simulation result

5 结语

文中分析了 SiC DC/DC 变换器的电磁辐射干扰源,为电路中带有高频时变电流的导线。根据电磁场理论建立了 DC/DC 变换器周围的空间电磁辐射干扰模型,并基于模拟退火算法提出一种电磁辐射干扰的优化算法,并编写相应的优化程序,得到了优化后的 DC/DC 变换器元器件布局方案,优化后的布局方案减少了 60.2% 的高频导线长度,经过仿真验证,优化后的布局方案可以使敏感电路上产生的电场强度减少两个数量级。从优化结果中可以获得布局原则:在尽量减少高频导线尺寸的前提下,将电路导线分散布置。最后,用有限元软件建立仿真模型进行验证,验证了优化策略的有效性。

参考文献:

- [1] 盛况,郭清,张军明,等. 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 1-7.
Sheng Kuang, Guo Qing, Zhang Junming, et al. Development and prospect of SiC power devices in power grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 1-7 (in Chinese).
- [2] 李先允,卢乙,倪喜军,等. 一种改进 SiC MOSFET 开关性能的有源驱动电路[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 5760-5770.
Li Xianyun, Lu Yi, Ni Xijun, et al. An active gate driver for improving switching performance of SiC MOSFET [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 5760-5770 (in Chinese).
- [3] 张栋,范涛,温旭辉,等. 电动汽车用高功率密度碳化硅电机控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5624-5634, 5890.
Zhang Dong, Fan Tao, Wen Xuhui, et al. Research on high power density SiC motor drive controller [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5624-5634, 5890 (in Chinese).
- [4] 郑帅,杜雄,张军,等. 采用降温曲线的 SiC MOSFET 模块热参数的测量[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1759-1768.
Zheng Shuai, Du Xiong, Zhang Jun, et al. Measurement of thermal parameters of SiC MOSFET modules with cooling curves [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 1759-1768 (in Chinese).
- [5] He Ning, Chen Min, Wu Junxiong, et al. 20-kW zero-voltage-switching SiC-MOSFET grid inverter with 300 kHz switching frequency [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5175-5190.
- [6] Zhang Lei, Yuan Xibo, Wu Xiaojie, et al. Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT Modules [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1181-1196.
- [7] Marzoughi A, Burgos R, Boroyevich D. Characterization and performance evaluation of the state-of-the-art 3.3 kV 30A full-SiC MOSFETs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(1): 575-583.
- [8] Yu Zhenwei, Mix J A, Sajuyigbe S, et al. An improved dipole-moment model based on near-field scanning for characterizing near-field coupling and far-field radiation from an IC [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(1): 97-108.
- [9] 沈周. 半桥 LLC 谐振式 Boost 开关电源辐射电磁干扰分析与抑制研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2019.
Shen Zhou. EMI analysis and study on suppression of half bridge LLC resonant boost switching power supply [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2019 (in Chinese).
- [10] Shen Zhou, Zhao Yang, Yan Wei, et al. Suppression of EMI radiation noise by inductor current recoil on boost PFC [J]. The Journal of Engineering, 2019(16): 1991-1997.
- [11] 李昕. EV 充电器中 DC/DC 变换器 EMI 研究与抑制[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
Li Xin. EMI Research and Suppression of DC/DC Converter in EV Charger [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020 (in Chinese).
- [12] 苏利捷,黄保栋,次仁罗布. 混联式 PHEV 中 DC/DC 变换器辐射电磁干扰分析与抑制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(7): 35-42.
Su Lijie, Huang Baodong, Ci Renluobu. Analysis and suppression on radiated EMI of DC /DC converter in parallel-series PHEV [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 35-42 (in Chinese).
- [13] 白峰,牛忠霞,周东方. 开关电源辐射发射的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(8): 1841-1844, 1848.
Bai Feng, Niu Zhongxia, Zhou Dongfang. Modeling and

simulation of radiated emissions in switched mode power supply [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(8): 1841-1844, 1848 (in Chinese).

[14] 崔旭升, 李建雄, 陈治通, 等. 开关电源电磁辐射干扰的建模与仿真[J]. 电源技术, 2014, 38(5): 969-972.

Cui Xusheng, Li Jianxiong, Chen Zhitong, et al. Modeling and simulation of electromagnetic radiation interference in switched mode power supply [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(5): 969-972 (in Chinese).

[15] 周郁明, 蒋保国, 刘航志, 等. 包含 SiC/SiO₂ 界面电荷的 SiC MOSFET 的 SPICE 模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5604-5612, 5888.

Zhou Yuming, Jiang Baoguo, Liu Hangzhi, et al. SPICE

model of SiC MOSFET including the trapped charge at SiC/SiO₂ interface [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5604-5612, 5888 (in Chinese).



羊岳彬

作者简介:

羊岳彬(1996-),男,硕士研究生。研究方向:电力电子电磁兼容。E-mail:yangyuebin1124@163.com。

李先允(1964-),男,通信作者,博士,教授。研究方向:电力电子。E-mail:alixy6412@aliyun.com。

王书征(1983-),男,博士,副教授。研究方向:电力系统控制。E-mail:wsz310@126.com。



来源:黑龙江省公益广告研究基地