

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.3.72

中图分类号: TM571

文献标志码: A

EconoDUAL 封装、母线电压 800 V 的 1 200 A IGBT 功率模块设计与开发

回晓双^{1,2,3}, 宁圃奇^{1,2,3}(中国电源学会会员), 范涛^{1,2,3},
郭新华⁴(中国电源学会会员), 傅金源⁵, 黄珂⁵

(1. 中国科学院大学, 北京 100049; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 3. 电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所), 北京 100190; 4. 华侨大学, 厦门 362021; 5. 浙江芯丰科技有限公司, 台州 317700)

摘要: 提高车规级功率模块的功率密度对电动汽车的性能具有重要意义, 而传统功率模块内部采用的二维布局杂散电感大, 限制了开关速度与母线电压, 影响功率密度的提高。为此, 以 EconoDUAL 封装的 IGBT 功率模块为对象, 使用叠层 DBC 的方法进行三维布局设计, 开发出了 1 200 V/1 200 A 的 IGBT 功率模块; 详细介绍了所提功率模块的布局结构, 与传统二维布局方法相比, 杂散电感下降了 58%; 同时, 对功率模块进行电气性能测试, 通过了母线电压 800 V 下脉冲电流为 1 200 A 的双脉冲实验, 证明了模块功率密度的提高。为了在提高功率密度的情况下不影响散热性能, 功率模块底部使用了水冷 PinFin 散热器, 并对其进行了散热仿真和结-水热阻的测试, 结果表明, IGBT 热阻为 0.084 K/W, 二极管热阻为 0.124 K/W, 与同封装下商用 1 200 V/900 A 模块相比并无明显差异, 证明了所提设计方法的正确性及有效性。

关键词: 功率模块; 电动汽车; IGBT 功率模块; 杂散电感; 热阻

Design and Development of 1 200 A IGBT Power Module with EconoDUAL Packaging and 800 V Bus Voltage

HUI Xiaoshuang^{1,2,3}, NING Puqi^{1,2,3}, Member, CPSS, FAN Tao^{1,2,3}, GUO Xinhua⁴, Member, CPSS,
FU Jinyuan⁵, HUANG Ke⁵

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Huaqiao University, Xiamen 362021, China; 5. Zhejiang Xinfeng Technology Co., Ltd, Taizhou 317700, China)

Abstract: Enhancing the power density of vehicle-grade power modules is of significance for the performance of electric vehicles. The two-dimensional layout used in conventional power modules results in large parasitic inductance, which limits the switching speed and bus voltage and further affects the increase in power density. To solve this problem, an IGBT power module with EconoDUAL packaging was taken as the research object, and a three-dimensional layout was designed using the stacked DBC method to develop a 1 200 V/1 200 A IGBT power module. The layout structure of

收稿日期: 2024-01-31; 修回日期: 2024-02-15; 录用日期:
2024-02-19; 网络首发日期: 2024-04-22

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2500600);
中国科学院青年交叉团队资助项目(JCTD-2021-09)

This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2021YFB2500600; CAS Youth Multi-discipline Project under the grant JCTD-2021-09

the proposed power module was introduced in detail. Compared with those obtained using the conventional two-dimensional layout methods, the parasitic inductance decreased by 58%. Additionally, electrical performance tests including a double-pulse test with pulse current of 1 200 A under bus voltage of 800 V were conducted on the power module, thereby verifying the improved power density of the module. To maintain the heat dissipation performance while increasing the power density,

a water-cooled PinFin heatsink was used at the bottom of the power module, and heat dissipation simulation and thermal resistance test were carried out, revealing an IGBT thermal resistance of 0.084 K/W and a diode thermal resistance of 0.124 K/W. These results show no significant difference compared with a commercially available 1200 V/900 A module with the same packaging, confirming the correctness and effectiveness of the proposed design approach.

Keywords: Power module; electric vehicle; IGBT; parasitic inductance; thermal resistance

随着人们对清洁能源和可持续发展的重视,电动汽车作为一种环保且高效的交通工具正在迅速发展。功率模块是电动汽车动力系统的关键部件,关系到整车的性能和可靠性^[1]。EconoDUAL封装功率模块是英飞凌(Infineon)公司推出的面向中等功率的应用产品,具有出色的机械强度和高功率循环能力,被广泛应用于电机驱动和电动汽车,其工作母线电压多为600V^[2-3]。

目前,800V高压母线的应用实现了快速充电的优势,因此开发出基于800V母线高功率密度的功率模块成为了电力电子领域的一项关键挑战^[4-6]。为此,许多研究进行了模块布局设计上的优化,其中叠层封装布局对于提高功率密度和并联多个芯片是一种有效、可行的方法^[7-8]。与传统二维布局模块相比,叠层封装布局功率模块的寄生参数可以显著降低。在大多数叠层结构中,其基本思想是使用底部直接键合铜DBC(direct bonding copper)和顶部导电层来分别传导电流。这2个传导路径通常重叠,并且可以显著降低寄生参数,其中顶部导电层通常包括PCB、FPCB和DBC等^[9-10]。随着设计选项的增多,研究者们^[11-13]已经开始探索自动布局设计方法,并在功率模块设计中实现了关键的成本节约。

基于此,本文对EconoDUAL封装的IGBT功率模块进行设计,开发出母线电压800V下电流可达1200A的功率模块,旨在提高功率模块的功率密度。

1 功率模块布局设计

图1为EconoDUAL封装功率模块的电流发展,目前电流最大值为900A,图2为FF900R12ME7_B11模块典型开关波形,可以看到其工作母线电压多为600V。传统二维布局结构如图3所示,此布局方式杂散电感较大,约为15nH。并联了3颗

通流能力为300A的芯片,该芯片尺寸较大,难以对更多芯片进行布局,且受DBC通流能力限制,电流难以提升。

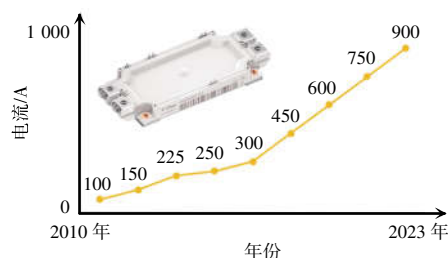


图1 EconoDUAL封装功率模块的电流发展

Fig. 1 Development of current of EconoDUAL packaged power modules

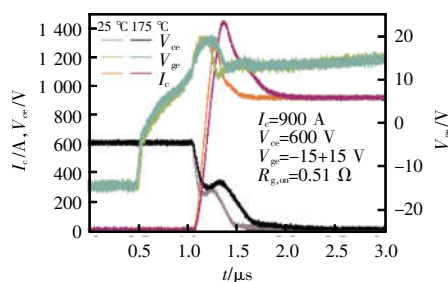


图2 FF900R12ME7_B11模块典型开关曲线^[3]

Fig. 2 Typical switching curves of FF900R12ME7_B11 module^[3]

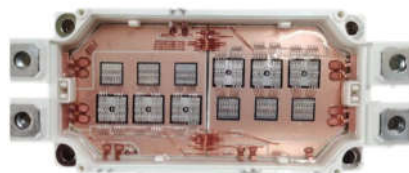


图3 传统二维布局结构

Fig. 3 Conventional two-dimensional layout structure

叠层DBC布局可以利用互感相消的原理降低杂散电感,其侧面结构如图4所示,并且由于多使用了1层DBC,使得相同尺寸下的通流能力有所提高。以自动优化算法为指导进行叠层DBC布局优化设计^[14],使用了6个通流能力为200A的IGBT和二极管,尺寸分别为9.7mm×11.1mm和5.6mm×11.1mm,布局结果如图5所示,其中半桥并联的

6 颗 IGBT 与 6 颗二极管被布局在 DBC 的两侧;底部 DBC 中,上面的芯片为上管,下面的芯片为下管,且上管的 IGBT 芯片与下桥的二极管在同一侧;底部 DBC 的端子为正极端子,而顶部 DBC 上方的 2 个端子为交流端子,顶部 DBC 下方的为负极端子,连接件将上管的发射极与下管的集电极相连。DBC 中间层为 Al_2O_3 ,即此处无铜痕迹进行连接,而图例中的“孔”是指此处无顶部 DBC。

按照图 5 的布局结果,最终得到 IGBT 功率模块的三维模型如图 6 所示。将模型导入 Ansys Q3D 进行寄生电感抽取,与传统布局对比,在不考虑端子的情况下,内部布局杂感可由 10.16 nH 下降至 5.89 nH。

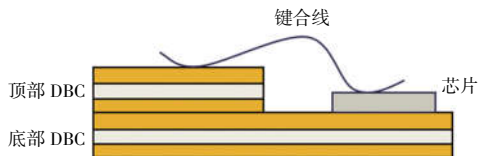


图 4 叠层 DBC 侧面结构

Fig. 4 Side structure of stacked DBC

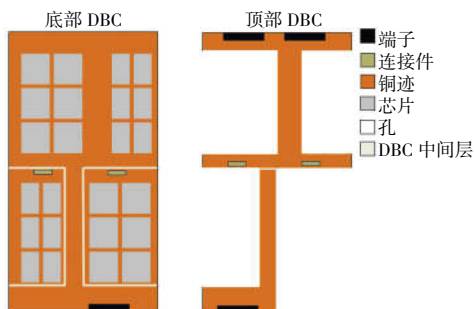


图 5 布局结果示意

Fig. 5 Schematic of layout results

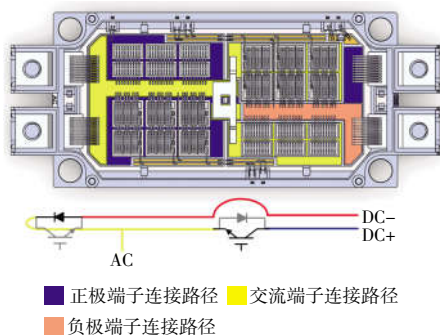


图 6 本文所提 1 200 V/1 200 A 功率模块仿真模型

Fig. 6 Simulation model of 1 200 V/1 200 A power module proposed in this paper

2 电气性能测试

双脉冲实验可以测试功率模块的电气动态性能。图 7 所示电路测量的是功率模块的下管,而功率模块的上管施加负压关断并利用其二极管进行续流,实验中由加热台对功率模块进行加热,由功率模块内部 NTC 温度确定结温,实验参数见表 1,本文所提 IGBT 功率模块实物与管脚示意如图 8 所示。

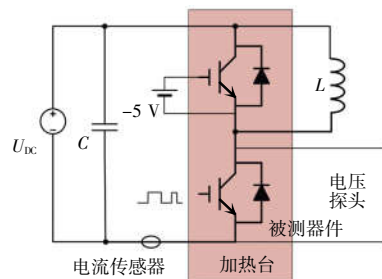


图 7 双脉冲测试电路

Fig. 7 Double-pulse test circuit

表 1 实验参数

Tab. 1 Experimental conditions

参数	数值
驱动电阻/ Ω	10
电感/ μH	50
驱动电压/V	-9~15
脉冲时间/ μs	83+12+12

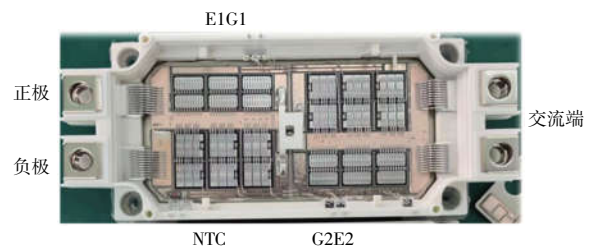


图 8 本文所提 IGBT 功率模块实物

Fig. 8 Specimen of proposed IGBT power module

本文所提 IGBT 功率模块双脉冲测试波形如图 9 所示。可以看出,本文开发的功率模块能够在母线电压 800 V 下,通过脉冲电流为 1 200 A 的高温双脉冲测试,具有良好的电气性能,也证明了该设计方法的有效性。

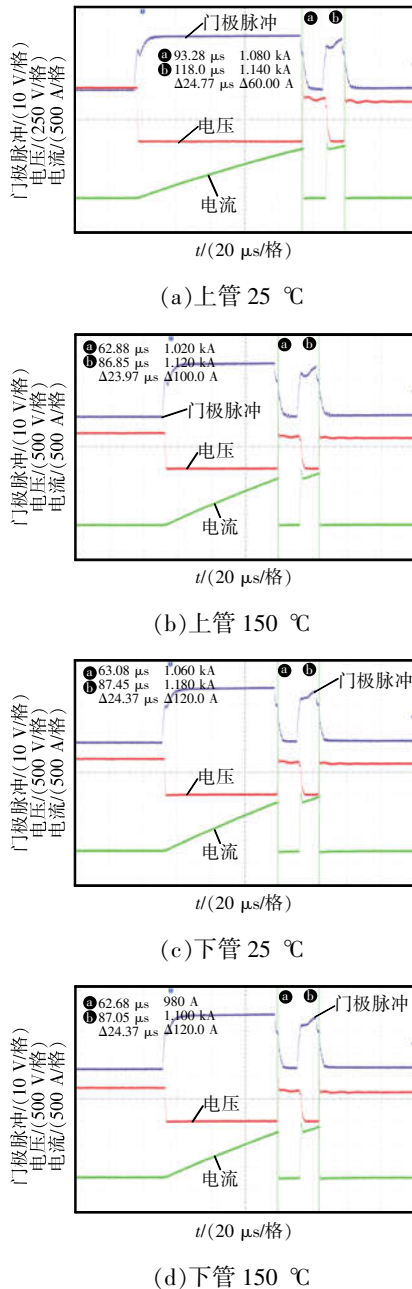


图 9 本文所提 IGBT 功率模块双脉冲测试波形

Fig. 9 Waveforms of proposed IGBT power module in double-pulse test

3 水冷散热仿真与测试

为了提高功率模块的热性能,在功率模块底部焊接了 PinFin 散热器进行水冷散热,较传统的水冷结构,PinFin 散热器可以降低约 40%的热阻,从而提高功率模块的功率密度和可靠性。使用计算流体力学 CFD(computational fluid dynamics)软件对

强迫对流散热过程进行电-热-流耦合的多物理场仿真,电气参数需要输入损耗值。其中,IGBT 损耗可表示为

$$P_T = P_{Tcond} + P_{Tsw} = V_{CEsat} I_C + R_{CE} I_C^2 + (E_{on} + E_{off}) f_{sw} \quad (1)$$

式中: P_T 为 IGBT 损耗; P_{Tcond} 为 IGBT 导通损耗; P_{Tsw} 为 IGBT 开关损耗; V_{CEsat} 为饱和管压降; I_C 为 IGBT 集电极电流; R_{CE} 为 IGBT 导通电阻; E_{on} 为 IGBT 开通损耗; E_{off} 为 IGBT 关断损耗; f_{sw} 为开关频率。

二极管损耗可表示为

$$P_D = P_{Dcond} + P_{Dsw} = V_F I_F + R_F I_F^2 + E_{rec} f_{sw} \quad (2)$$

式中: P_D 为二极管损耗; P_{Dcond} 为二极管导通损耗; P_{Dsw} 为二极管开关损耗; V_F 为二极管正向电压; I_F 为二极管正向电流; R_F 为二极管导通电阻; E_{rec} 为二极管反向恢复损耗。

仿真后的 IGBT 功率模块温度分布如图 10 所示,初始水流量为 8 L/min,出口边界条件设为静压,水流方向为由左至右。可以看出,本文开发的 1 200 V/1 200 A IGBT 功率模块工作的最高结温约为 150 °C。

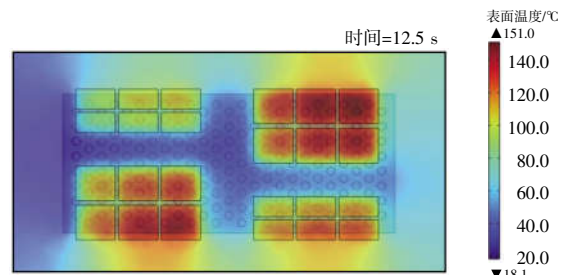


图 10 仿真后的 IGBT 功率模块温度分布

Fig. 10 Temperature distribution of simulated IGBT power module

在进行仿真实验的同时,对功率模块实物进行了热阻测试。图 11 为 IGBT 热阻测试电路,在测试半桥门极输入正电压使 IGBT 导通,先通入小电流记录为 V_{CE} 进行温度的标定,再闭合 S_1 通入大电流进行加热,一段时间后断开 S_1 测量出模块的降温曲线,最后进行数据处理与拟合。当测量二极管热阻时,需要将 2 个电流源反向,且在测试半桥门极输入负电压使 IGBT 关断。

热阻测试实验环境如图 12 所示,其中电流源提供加热电流与测量电流,门极电压控制被测模块

的开通与关断,热阻检测仪用来获得 V_{CE} 变化数据,循环水泵用来控制水温。热阻测试测量结果如图 13 所示,其中 IGBT 热阻为 0.084 K/W,二极管

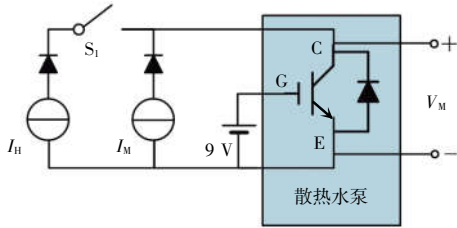


图 11 热阻测试电路

Fig. 11 Thermal resistance test circuit

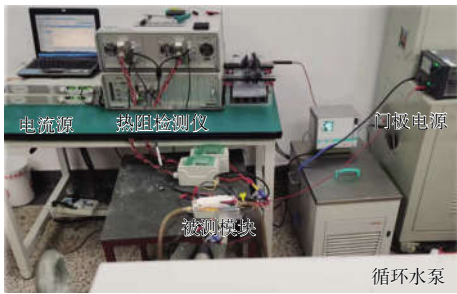
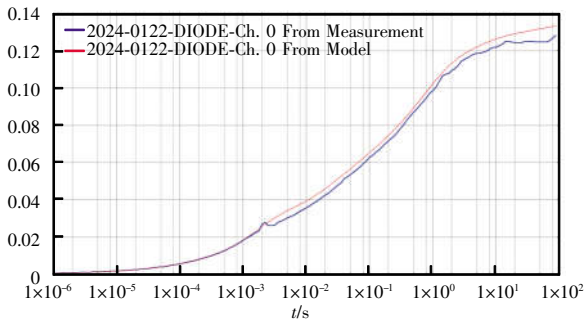
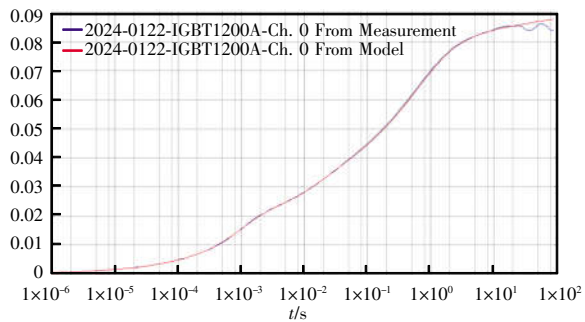


图 12 热阻测试实验环境

Fig. 12 Experimental environment for thermal resistance test



(a)二极管瞬态热阻曲线



(b)IGBT 瞬态热阻曲线

图 13 热阻测试实验结果

Fig. 13 Experimental results of thermal resistance test

热阻为 0.124 K/W,可见本文所提功率模块与同封装下商用 1 200 V/900 A 功率模块相比,热阻并无明显差异,热性能符合功率模块设计要求。

4 结论

本文对 EconoDUAL 封装的 IGBT 功率模块进行了优化布局设计,开发的模块使用叠层 DBC 三维布局方式并联 6 颗通流能力为 200 A 的 IGBT 与二极管芯片,通过散热仿真实验与电阻测试实验可以得到以下结论。

(1)本文所提功率模块能够在母线电压 800 V 下,通过脉冲电流为 1 200 A 的高温双脉冲测试,具有良好的电气性能。

(2)功率模块的热阻与同封装下商用 1 200 V/900 A 模块相比并无明显差异,热性能符合功率模块设计要求。

参考文献:

- [1] Liu Zifa, Liu Yunyang, Wang Xinyue, et al. Operation schedule optimization of energy storage and electric vehicles in a distribution network with renewable energy sources [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022, 42(5): 1813-1826.
- [2] Vogel K, Baurichter J, Lenze O, et al. New, best-in-class 900-A 1 200-V EconoDUAL with IGBT 7: Highest power density and performance [C]// PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg, Germany, 2019: 1-8.
- [3] Vogel K, Baurichter J, Weiss V, et al. Retrofit of a superstar: New EconoDUAL(TM) 3 black series combines new features with well-known advantages [C]// PCIM Europe digital days 2021 International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Online, 2021: 1-7.
- [4] 尹志豪, 余典儒, 朱家峰, 等. IGBT 功率模块封装失效机理及监测方法综述[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(8): 51-70.
- Yin Zhihao, Yu Dianru, Zhu Jiafeng, et al. Review of IG-

- BT power module packaging failure mechanism and monitoring methods [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41(8): 51-70 (in Chinese).
- [5] 王贵峰, 王建飞. 基于单桥臂独立模型预测电流控制的新型十五开关三电平双输出逆变器研究[J/OL]. *电源学报*, 2023: 1-12. (2023-11-30)[2024-01-31]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231130.0856.002.html>.
Wang Guifeng, Wang Jianfei. Novel fifteen-switch three-level dual-output inverter based on single-leg independent model predictive current control [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2023: 1-12. (2023-11-30)[2024-01-31]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20231130.0856.002.html> (in Chinese).
- [6] Tran H N, Le T T, Jeong H, et al. High power density DC-DC converter for 800 V fuel cell electric vehicles [C]// 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition Asia (ECCE-Asia). Singapore, 2021: 2224-2228.
- [7] Wang Ruxi, Chen Zheng, Boroyevich D, et al. A novel hybrid packaging structure for high-temperature SiC power modules [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013, 49(4): 1609-1618.
- [8] Xie Yue, Li Yuxiong, Huang Zhizhao, et al. Using ultra-low parasitic hybrid packaging method to reduce high frequency EMI noise for SiC power module [C]// 2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). Albuquerque, NM, USA, 2017: 201-207.
- [9] Chen Cai, Huang Zhizhao, Chen Lichuan, et al. Flexible PCB-based 3-D integrated SiC half-bridge power module with three-sided cooling using ultralow inductive hybrid packaging structure [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5579-5593.
- [10] Morya A K, Gardner M C, Anvari B, et al. Wide bandgap devices in AC electric drives: Opportunities and challenges [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(1): 3-20.
- [11] Broughton J, Smet V, Tummala R R, et al. Review of thermal packaging technologies for automotive power electronics for traction purposes [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2018, 140(4): 040801.
- [12] Shook B W, Nizam A, Gong Zihao, et al. Multi-objective layout optimization for multi-chip power modules considering electrical parasitics and thermal performance [C]// 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Salt Lake City, UT, USA, 2013: 1-4.
- [13] 郝柏森. 多芯片 SiC 模块自动化低感布局设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
Hao Baisen. A study of automatic layout design for multi-chip SiC module with low parasitic inductance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2018 (in Chinese).
- [14] Ning Puqi, Li Huakang, Huang Yunhao, et al. Review of power module automatic layout optimization methods in electric vehicle applications [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2020, 6(3): 8-24.



回晓双

作者简介:

回晓双(1999-),男,博士研究生。研究方向:高功率密度电机驱动系统优化设计。E-mail: hui00@mail.iee.ac.cn。

宁圃奇(1982-),男,中国电源学会会员,通信作者,博士,研究员。研究方向:半导体器件特性建模及模块封装技术研究。E-mail: npq@mail.iee.ac.cn。

范涛(1981-),男,博士,研究员。研究方向:高功率密度电机及控制系统。E-mail: fantao@mail.iee.ac.cn。

郭新华(1977-),男,中国电源学会会员,博士,教授。研究方向:电力电子器件(IGBT、SiC)的设计及其模块封装技术。E-mail: guoxinhua@hqu.edu.cn。

傅金源(1993-),男,硕士,初级工程师。研究方向:功率半导体器件设计与封装。E-mail: jinyuan_fu@semiharv.com。

黄珂(1988-),男,硕士,中级工程师。研究方向:功率模块封装技术。E-mail: Ke_Huang@semiharv.com。