

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2025.1.236

中图分类号: TM571

文献标志码: A

基于格子玻尔兹曼方法的功率模块自动布局优化

回晓双^{1,2,3}, 宁圃奇^{1,2,3}(中国电源学会会员), 崔健^{1,2,3}

(1.中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 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)

摘要: 针对在传统的功率模块自动布局优化算法中, 方案的电气评估效率低、占用大量计算时间的问题, 提出利用格子玻尔兹曼方法 LBM(lattice Boltzmann method)代替传统评估方法, 由于 LBM 不需要进行多个可逆矩阵的求解, 可以更快地进行电气互连合理性判断及电压/电流计算。首先, 在基于遗传算法自动布局设计程序的基础上, 采用 D2Q4 格子类型建立二维布局评估方法; 然后, 通过 ANSYS Q3D 软件仿真验证了布局方案评估结果的准确性; 最后, 在 Python 3.10 环境中进行对比测试, 结果表明 LBM 平均缩短了 75.4%的方案电气评估总时间, 且评估方案中回路数量越多, LBM 的计算优势越大。

关键词: 功率模块; 遗传算法; 格子玻尔兹曼方法; 阻抗评估

Power Module Automatic Layout Optimization Based on Lattice Boltzmann Method

HUI Xiaoshuang^{1,2,3}, NING Puqi^{1,2,3}, Member, CPSS, CUI Jian^{1,2,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the traditional power module automatic layout optimization algorithm, the electrical evaluation is inefficient and takes up a lot of computing time. To solve this problem, lattice Boltzmann method (LBM) is used to replace the traditional evaluation method. Since LBM does not need to solve multiple invertible matrices, it can quickly judge the rationality of electrical interconnection and calculate the voltage/current. With the program of automatic layout design based on the genetic algorithm, an evaluation method of two-dimensional layout is established by using a D2Q4 lattice type, and the accuracy of the evaluation result under the layout scheme is verified by ANSYS Q3D software simulation. A comparative test was conducted in Python 3.10, and results show that LBM reduces the total time of scheme evaluation by 75.4% on average. Moreover, the more the number of loops in the evaluation scheme, the greater the computing advantage of LBM.

Keywords: Power module; genetic algorithm; lattice Boltzmann method (LBM); impedance evaluation

随着电动汽车的发展, 功率模块正在向高频

率、集成化、大功率、高效率 and 高温的应用方向积极发展^[1]。性能和成本的要求促进了硅器件和碳化硅器件的发展, 也推进了功率模块布局优化设计方法的发展^[2-3]。2010 年之前, 自动布局算法可应用性较低, 各大功率模块厂家的布局设计大多依赖人工经验和手动设计方法提出若干布局方案, 再通过有限元软件评估其性能并开展对比分析, 最后经过

收稿日期: 2022-10-10; 修回日期: 2022-12-20; 录用日期: 2023-01-19; 网络首发日期: 2023-03-23

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 R&D Program of China under the grant 2021YFB2500600; CAS Youth Multi-discipline Project under the grant JCTD-2021-09

局部修改来达到使用标准^[4-5]。由于手动设计多基于枚举算法, 因此方案的生成与评估时间较长, 备选数量较少超过 30 个^[6], 其主要缺点是备选方案选择有限, 很难做到全局最优。

近 10 年来, 电动汽车总体性能需求推动了碳化硅功率模块功率等级的增大, 并联芯片数量越来越多^[7]。为了更好地平衡并联芯片的电气和散热特性, 出现了多种模块自动布局设计方法, 并实现了功率模块性能大幅度提升和成本降低^[8]。自动布局算法一般可以分为备选方案自动生成、方案评估和优化算法 3 大主要部分。其中, 备选方案自动生成包括器件放置和布线互连, 方案评估包括电气寄生提取和热分析^[9], 优化算法则包括遗传算法等进化性算法^[10], 该类方法能够有向性地探索大范围布局空间, 降低陷入局部最小陷阱的风险, 能够提供较为全面的优化方案。但随着芯片数量的增加, 种群数量与备选方案呈指数级增长, 若想保持较好的优化性能, 遗传算法的计算时间将大幅增长^[11]。经过调试发现, 程序中寄生参数提取过程耗时最多, 常规电气量计算方法多为矩量法 MoM(method of moments)等^[12-13]。

为了降低计算资源, 大幅降低自动布局所需时间, 本文提出了 1 种应用格子玻尔兹曼方法 LBM (lattice Boltzman method)来实现布局评估。首先, 梳理基于遗传算法的功率模块自动布局流程; 然后, 分析矩量法评估布局方案速度慢的原因; 接着, 详细介绍格子玻尔兹曼方法评估布局方案的流程, 并通过 ANSYS Q3D 验证本文所提布局评估方案的效果; 最后, 对比 2 种方法的计算结果与速度。

1 基于遗传算法的功率模块自动布局优化

遗传算法是根据大自然中的自然随机选择和遗传学机制, 经过编码转换、生成初代种群、适应度评估、DNA 操作(选择、交叉、变异)得到最优解^[14]。由于布局方案的自动生成主要为放置与连线 2 个步骤, 因此基于遗传算法的自动布局优化多分为内、外 2 个循环, 外循环为芯片放置, 内循环为

芯片互连布线。每种芯片放置结果对应 1 组内循环, 并将内循环布线的筛选结果作为该芯片放置结果的适应度参考, 经过迭代筛选, 最终可以得到最大适应度的布局结果。基于遗传算法的功率模块自动布局设计流程如图 1 所示。

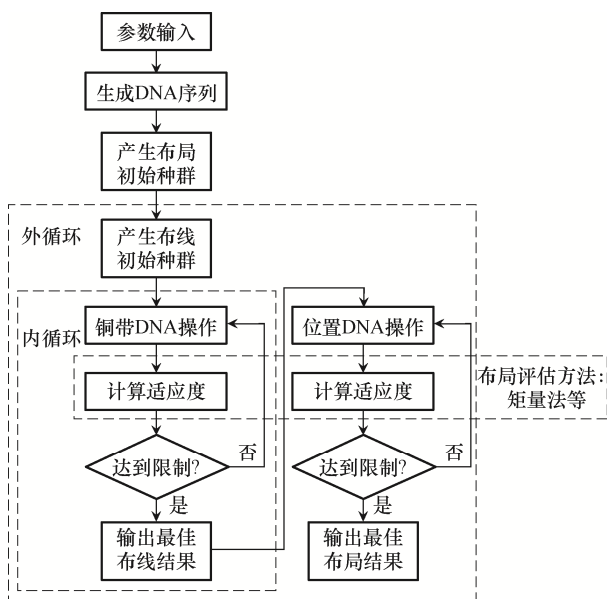


图 1 基于遗传算法的功率模块自动布局设计流程
Fig. 1 Flow chart of power module automatic layout design based on GA

每种布局方案中的芯片放置可以采用不同的 DNA 映射方法, 如 B-Tree、O-Tree、有向闭包图和序列对法等。本文选用序列对 SP(sequence pair)方法^[15], 其中 n 个器件的各种逻辑排列方式均可以用 $2n$ 位的字符来表示。图 2 为 1 个芯片放置 DNA 映射的示意, 其中每个芯片 4 个旋转方向可以由 $2n$ 个字符表示, 芯片间距也可以由某个芯片的规定范围内间距值表示, n 个芯片的空间布局可以由 $10n$ 个字符的 DNA 表示出来。

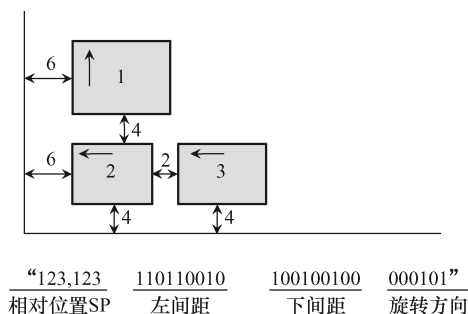


图 2 位置 DNA 示意
Fig. 2 Example of position DNA

当外循环生成芯片放置 DNA 后,内循环根据电路图连接情况应用衬底覆铜层实现芯片之间的连接。模块中各部件(芯片、功率端子、信号端子)端点的互连方法随机产生,可以得到多种互连的结果。互连完成之后,查明空白的阵点数目,作为衬底覆铜层覆盖的阵点基础,并在此基础上用随机散点的方式拓展衬底覆铜互连方案。覆盖过程中,及时判定互连合理性,可大大提高互连布线效率。内循环衬底覆铜层如图 3 所示,由此可以得到由 1 或 0 组成的长度达数百位衬底覆铜层的 DNA。

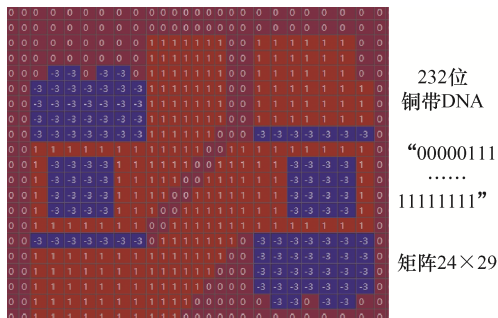


图 3 内循环衬底覆铜层

Fig.3 Copper-clad layer substrate of inner circulation

2 基于矩量法的布局方案评估方法

传统的矩量法评估流程如图 4 所示。首先,对 2 组端点间的衬底覆铜层点阵进行编号并判断

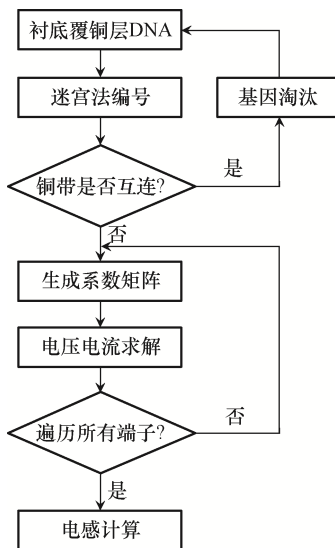
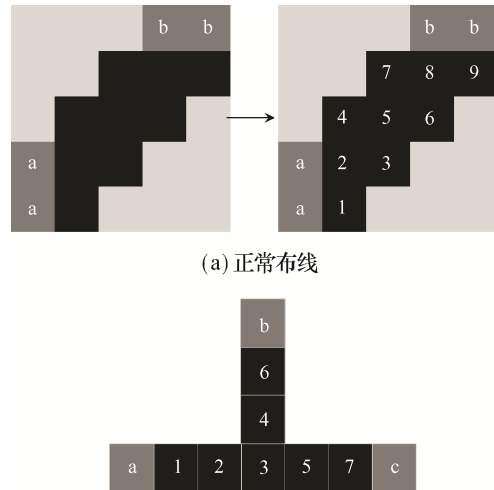


图 4 矩量法评估衬底覆铜层阻抗流程

Fig.4 Flow chart of evaluating copper-clad layer substrate impedance by MoM

是否出现无效互连。对衬底覆铜层点阵编号多选用迷宫算法,主要包括数据准备、扩展过程和回找过程等^[16]。

图 5 为迷宫编号示意,若从起点连接到了错误的端子,则程序判断出现互连,该衬底覆铜层基因淘汰。在正常情况下,将源点处方格电压设为 2 V,汇点处方格电压设为 1 V。



(a) 正常布线

(b) 出现互连的布线

图 5 迷宫算法示意

Fig.5 Schematic of Maze algorithm

首先,根据 KVL 方程可以得到

$$4U_{n(x,y)} = U_{n(x+1,y)} + U_{n(x,y-1)} + U_{n(x-1,y)} + U_{n(x,y+1)} \quad (1)$$

式中: n 为点阵编号; x 、 y 为坐标。

由式(1)可以看出,编号方格电压可以由周围 4 个方格表示,若周围有方格未铺铜,则用其本身电压表示,则每个方格电压的计算公式为

$$\mathbf{a}_{n \times n} \cdot \mathbf{U}_{n \times 1} = \mathbf{b}_{n \times 1} \quad (2)$$

式中: \mathbf{a} 为系数矩阵; \mathbf{b} 为汇点与源点设置的电压。

然后,根据 KCL 方程,可以得到每个点的电流向量,其表达式为

$$\dot{\mathbf{I}}_{n(x,y)} = (I_{nx}, I_{ny}) = \left(\frac{U_{n(x+1,y)} - U_{n(x-1,y)}}{2R}, \frac{U_{n(x,y+1)} - U_{n(x,y-1)}}{2R} \right) \quad (3)$$

式中, R 为衬底覆铜层电阻, $R = \rho \frac{L}{S}$, 其中 ρ 为电阻率, L 为导体长度, S 为横截面积。

最后, 根据麦克斯韦方程^[17], 该衬底覆铜层的磁矢量 \mathbf{A} 与电感 L_{ij} 的计算公式分别为

$$\mathbf{A} = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_V \frac{\mathbf{J}}{r} \quad (4)$$

式中: \mathbf{A} 为磁矢量; μ_0 为真空磁导率; \mathbf{J} 为电流密度; V 为积分体积; r 为求解点间距。

$$L_{ij} = \sum_{V_i} A J_j \quad (5)$$

式中, i 和 j 为具有不同源端子的电流路径。

3 基于格子玻尔兹曼方法的布局评估方法

格子玻尔兹曼方法是 1 种介于宏观与微观之间的介观方法^[18], 其将所有粒子的运动视为 1 个整体, 而粒子的整体运动特性则由分布函数表示, 可以看作是有限差分方法的特殊计算类型, 不要求解矩阵, 易于并行计算, 方便应用于各类复杂几何域。格子玻尔兹曼方法评估衬底覆铜层阻抗流程, 如图 6 所示。

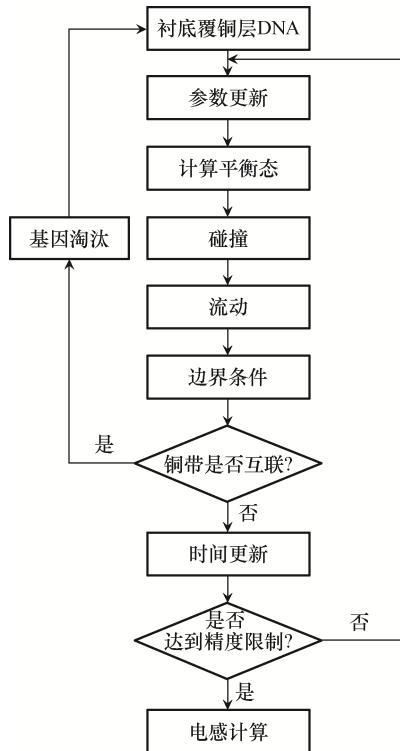


图 6 格子玻尔兹曼方法评估衬底覆铜层阻抗流程

Fig. 6 Flow chart of evaluating copper-clad layer substrate impedance by LBM

格子玻尔兹曼方程可以表示为

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) + \frac{\Delta t}{\tau} [f_i^0(x, t) - f_i(x, t)] \quad (6)$$

式中: x 为格子上的 1 个格点; c_i 为流体粒子的离散速度集合; Δt 为离散时间步长; t 为当前时间步; τ 为松弛时间; f_i 为以速度 c_i 运动的速度分布函数。该方程模型包含 3 个要素: 粒子的离散速度集合、格子结构和演化方程, 其描述了具有离散速度的流体粒子分布函数在 1 个固定格子上的运动过程。

本文采用 LBM 方法中的 D2Q4 模型, 如图 7 所示, 其中 D2 代表二维, Q4 代表 4 个迁移方向, 以此来求解功率模块的衬底覆铜层电参数。

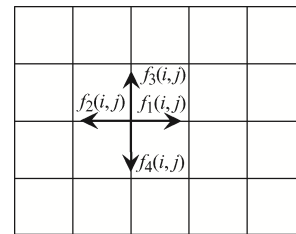


图 7 D2Q4 模型

Fig. 7 Model D2Q4

通常 LBM 包含 2 个过程, 即碰撞和迁移。无外力项时, 碰撞过程和迁移过程的函数可分别表示为

$$f_k(x, y, t + \Delta t) = f_k(x, y, t) \cdot (1 - \omega) + \omega f_k^{eq}(x, y, t) \quad (7)$$

$$f_k(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = f_k(x, y, t + \Delta t) \quad (8)$$

式中: $k=1,2,3,4$; ω 为松弛频率, 在本文中 $\omega=1$ 。

求解衬底覆铜层电感的平衡分布函数可以由式(1)得到, 经过数百步长的迭代, 即可得到每个衬底覆铜层方格的电压。每个端子的给定电压即为 LBM 方法的边界条件, 在迭代过程中根据每个端子格点的电流方向可以判断衬底覆铜层是否出现互连, 同时根据加压迭代的求解结果, 也可判断每个回路是否连通。最后将电压、电流计算结果代入式(5)即可求解出所需电感。

4 算法对比测试

为验证格子法的时间优势,本文在 Python 3.10 的环境下运行程序进行测试。在含有 3 端子、2 芯片的桥臂模块布局中,矩量法和格子法得到的最优布局分别如图8(a)和(b)所示,可以看出:由于计算时间优势,格子法可以得到适应度更高的最优布局,而矩量法的结果仅为局部最优解。

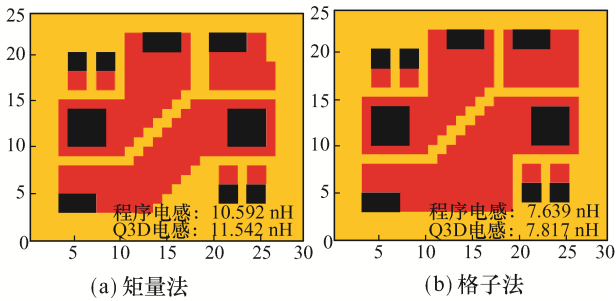


图 8 计算结果验证

Fig. 8 Verification of calculation results

通过 ANSYS Q3D 软件对格子法和矩量法这 2 种算法的布局计算结果进行对比分析,可以验证格子法计算结果的准确性。然后,对出现互连后的判断用时进行对比,即随机引入互连情况多次运行程序进行计算,结果如图 9 所示;2 种算法用时随运行次数的变化对比如图 10 所示。可见,2 种算法均可以正确判断互连情况,但格子法用时较短,且平均节约了 75.4%的时间。

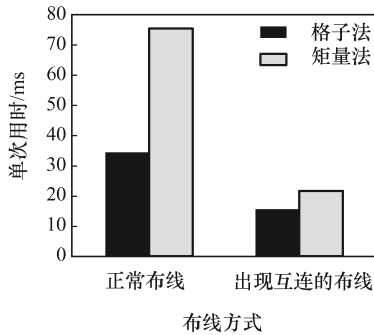


图 9 出现互连情况后判断用时对比

Fig. 9 Comparison of judgment time after interconnection

图 11 为算法测试所用布局。针对图 11 所示的 4 种典型功率模块,将 LBM 方法放入本文第 1 节

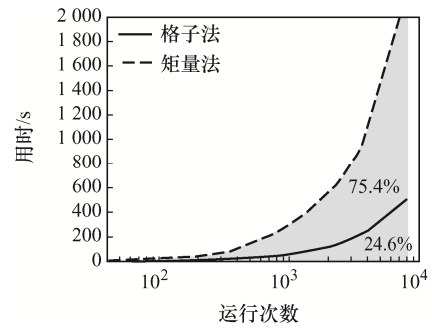


图 10 算法用时随运行次数变化对比

Fig. 10 Comparison of change in time used by algorithm with running times

提到的遗传算法内循环,取不同计算次数所需的时间与传统矩量法的计算时间进行对比。4 种典型功率模块的布局见表 1,2 种算法对 4 种典型功率模块计算用时对比结果见表 2。

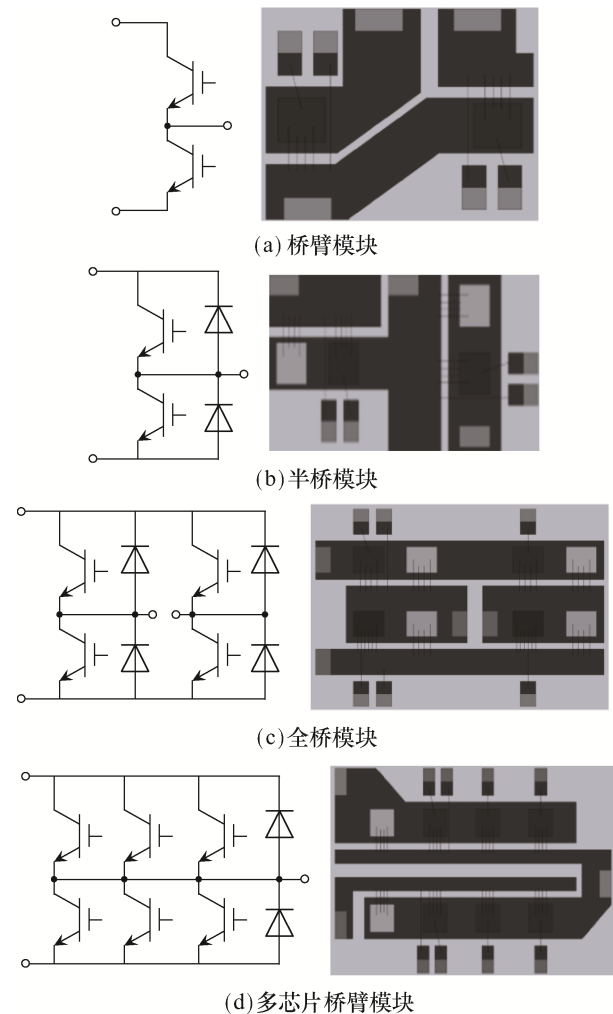


图 11 算法测试所用布局

Fig. 11 Layouts used for algorithm testing

表 1 4 种典型功率模块的布局

Tab. 1 Layout of four typical power modules

功率模块	需评估回路数	位置 DNA	相对位置 SP	旋转方向	衬底面积/mm ²
桥臂模块	1	'31024130...000000'	'31024,13042'	'1010100100'	696
半桥模块	2	'034156234...000000'	'0341562,3401265'	'10011000001111'	1 092
全桥模块	4	'01458296371011...000000'	'01458296371011,10549287361110'	'101010101000010001000100'	2 070
多芯片 桥臂模块	4	'206103748591021...000000'	'206103748591,021067384915'	'1010100101010100000000'	1 980

表 2 2 种算法对 4 种典型功率模块计算用时对比

Tab. 2 Comparison of time consumption of two algorithms on four typical power modules

功率模块	矩量法		格子法		Q3D 电感/nH
	电感/nH	平均用时/(s · 次 ⁻¹)	电感/nH	平均用时/(s · 次 ⁻¹)	
桥臂模块	10.593 0	0.064 0	12.095 0	0.260 9	11.542
半桥模块	9.319 0	0.171 0	10.701 0	0.746 1	9.707
全桥模块	22.778 2	0.789 3	24.823 9	2.406 1	23.235
多芯片 桥臂模块	8.652 9	0.812 2	9.800 3	2.433 8	9.404

图 12 为不同功率模块采用 2 种不同算法计算 1 000 次用时的对比, 可以看出, 随着所需评估回路的增多, LBM 的计算优势越来越明显。

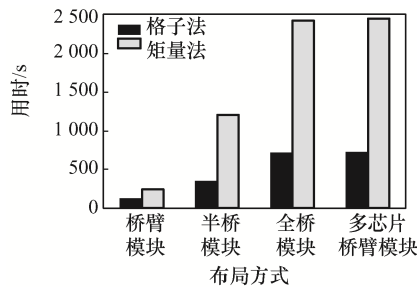


图 12 不同布局计算 1 000 次用时对比

Fig. 12 Comparison of time consumption for 1 000 times of calculation with different layouts

5 结束语

在功率模块自动布局优化过程中, 本文所提基于格子玻尔兹曼方法的评估方法, 避免了大量的矩阵求解运算, 可以有效提高布局评估效率。通过不同拓扑结构功率模块的布局优化对比可知, 相对于传统的矩量法, 本文方法可以节省 75.4% 的计算时间, 并且随着所需评估回路的增多, 时间优势越来越明显。该方法对推动功率模块自动布局优化方法的应用具有一定意义。

参考文献:

- [1] Tian Qi, Bai K. Widen the zero-voltage-switching range and secure grid power quality for an EV charger using variable-switching-frequency single-dual-phase-shift control [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(1): 11-19.
- [2] Xia Xiangyang, Zhao Xinxin, Zeng Heqing, et al. A novel design of hybrid energy storage system for electric vehicles [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(1): 45-51.
- [3] 王东萃, 崔宇航, 于雷. SiC MOSFET 在电动汽车领域的应用[J]. 上海汽车, 2021(8): 36-39.
Wang Dongcui, Cui Yuhang, Yu Lei. Application of SiC MOSFET in electric vehicle field [J]. Shanghai Auto, 2021 (8): 36-39. (in Chinese)
- [4] Ning Puqi, Wang Fei, Ngo K D T. Automatic layout design for power module [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 481-487.
- [5] Hingora N, Liu Xiangyu, McPherson B, et al. Concerning layout synthesis for power electronic multi-chip modules [C]// 2010 IEEE 12th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL). Boulder, CO, USA, 2010: 1-5.
- [6] Ulutas B H, Islier A A. A clonal selection algorithm for

- dynamic facility layout problems [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2009, 28(4): 123-131.
- [7] 郝柏森, 梅云辉, 李欣, 等. 一种基于多阶段遗传算法的功率模块自动化布局方法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2019, 52(6): 601-607.
- Hao Baisen, Mei Yunhui, Li Xin, et al. An automated layout design method based on multistage genetic algorithm [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2019, 52(6): 601-607. (in Chinese)
- [8] Hermanns K, Peng Yarui, Mantooth A. The increasing role of design automation in power electronics: Gathering what is needed [J]. *IEEE Power Electronics Magazine*, 2020, 7(1): 46-50.
- [9] 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.
- [10] Tawhid M A, Ali A F. A hybrid social spider optimization and genetic algorithm for minimizing molecular potential energy function [J]. *Soft Computing*, 2017, 21(21): 6499-6514.
- [11] 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)
- [12] Mouawad B, Hussein A, Castellazzi A. A 3.3 kV SiC MOSFET half-bridge power module [C]// CIPS 2018; 10th International Conference on Integrated Power Electronics Systems. Stuttgart, Germany, 2018: 1-6.
- [13] 朱俊杰, 原景鑫, 聂子玲, 等. 基于全碳化硅功率组件的叠层母排优化设计研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6383-6394.
- Zhu Junjie, Yuan Jingxin, Nie Ziling, et al. Optimum design of planer busbar based on all-silicon carbide power module [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6383-6394. (in Chinese)
- [14] Sherwani N A. *Algorithms for VLSI Physical Design Automation* [M]. Boston, MA: Springer US, 1993.
- [15] Cohoon J, Kairo J, Lienig J. *Evolutionary Algorithms for the Physical Design of VLSI Circuits* [M]// Ghosh A, Tsutsui S, eds. *Natural Computing Series*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003: 683-711.
- [16] 徐宁, 洪先龙. 超大规模集成电路物理设计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [17] 马海武. *电磁场理论*[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
- [18] 郭照立, 郑楚光. *格子 Boltzmann 方法的原理及应用* [M]. 北京: 科学出版社, 2009.



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的集成优化。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。E-mail: npq@mail.iee.ac.cn。

崔健(1995—), 男, 硕士研究生。
研究方向: 电动汽车用电机驱动控制器优化。E-mail: cuijian@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑: 李凤)