

SiC 车用电机驱动研究发展与关键技术

宁圃奇^{1,2}, 郑丹¹, 康玉慧¹, 陈永胜^{1,2}, 崔健^{1,2}, 张栋¹, 李晔¹, 范涛¹

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 碳化硅 (SiC) 器件具有低导通压降、可高速开关、可高温工作等优点, 在车用电机驱动方面显示出巨大的技术优势和市场潜力。论述了 SiC MOSFET 器件实现高频、高温性能的难点, 分别综述了模块、测试、电容、EMI 滤波器、系统集成等方面的技术重点和主要研究方向, 介绍了提升电机驱动产品性能的关键。

关键词: 碳化硅; 电机驱动; 电动汽车

中图分类号: TM23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1681-1070 (2022) 03-030101

DOI: 10.16257/j.cnki.1681-1070.2022.0301

中文引用格式: 宁圃奇, 郑丹, 康玉慧, 等. SiC 车用电机驱动研究发展与关键技术[J]. 电子与封装, 2022, 22(3): 030101.

英文引用格式: NING Puqi, ZHENG Dan, KANG Yuhui, et al. Technical paths towards SiC motor controller for electric vehicles[J]. Electronics & Packaging, 2022, 22(3): 030101.

Technical Paths towards SiC Motor Controller for Electric Vehicles

NING Puqi^{1,2}, ZHENG Dan¹, KANG Yuhui¹, CHEN Yongsheng^{1,2}, CUI Jian^{1,2}, ZHANG Dong¹, LI Ye¹, FAN Tao¹

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) devices have the advantages of low on-state voltage, high-speed switching and high-temperature operation, which show great potential in motor drive application of electric vehicles. The difficulties in improving high frequency and high temperature performance of SiC MOSFETs are discussed, and the key technologies and main research topics in power module, test, capacitor, EMI filter, system integration are summarized. The key to improve the performance of motor controllers is introduced.

Keywords: SiC; motor controller; electric vehicle

1 引言

随着环境保护和能源需求的增大, 电动汽车 (Electric Vehicle, EV) 成为保障国家能源安全和转型低碳经济的重要途径, 我国制定了一系列规划, 近年来电动汽车已实现大规模量产, 继续提高产品性能并降低产品价格、增强电动汽车的竞争力是必然发展方

向。电池、电机、电机驱动是新能源汽车的三大核心部件。现有车用电机驱动使用硅基绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 器件, 是电机驱动性能和成本的决定性因素。近年来, 各国不断探索 Si IGBT 芯片特性的改良方法, 获得了巨大的进步。然而经过三十多年的技术开发, Si 器件已接近理论极限, 在短时间内大幅改进其特性非常困难。

碳化硅 (SiC) 器件损耗小、耐高温并能高频运行,

收稿日期: 2021-01-26

E-mail: 宁圃奇 npq@mail.iee.ac.cn; 陈永胜 (通信作者) chen Yongsheng20@mails.ucas.ac.cn

被公认为将推动新能源汽车领域产生重大技术变革。世界各工业强国和大型跨国公司纷纷投入了大量的人力物力,特斯拉等国外车企开发的 SiC 电机驱动已装车运行,显示了巨大的技术优势和市场潜力,对我国新能源车产业开始了新一轮的冲击^[1]。

在电机驱动方面,我国已自主开发了系列化产品,但与国际先进车用电机驱动相比,在功率密度、可靠性及成本控制等方面仍存在一定差距。尤其从系统设计角度,现有方法多以工程人员的经验为主,缺乏理论支撑,难以充分发挥 SiC 器件的优异特性。

目前国内电机驱动设计受制于功率模块的标准化封装,系统集成多停留在几何布局层面。国外机构已开展变频器系统指导下的元件和组件定制化开发,包括多功能母排在内的元件复用正在兴起。近年来在与功率模块关系最紧密的元件中,对于驱动电路、母线电容与母排的研究最多。但对这些元件集成设计的研究中,目标与参数之间的关系较为模糊,约束条件多不清晰,集成过程多基于机械设计人员的经验,难以兼顾电磁特性和散热细节,组件难以进行集成匹配设计,限制了 SiC 器件的性能。

随着多物理场分析工具实用化,各元件的几何关系、机械应力、电气应力和热应力可准确分析、定量计算。目前针对元件个体设计的研究较多,联系最紧密的功率模块、驱动电路、母线电容和集成母排等主要部件的设计方法逐渐明晰。各团队为发挥 SiC 器件高温、高频工作能力和可靠性,已从系统应用角度出发开展了匹配无源器件、母排等组件高密度集成的研究。

本文针对 SiC 金属-氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)在车用电机驱动系统中的应用,首先从器件出发总结了 SiC 芯片设计和模块封装的关键技术和发展趋势,归纳了 SiC 功率模块在测试方法、测试标准中存在的新问题;然后从 SiC MOSFET 的高温、高频、高功率密度特性出发,分别在高性能电容、高性能信号检测、控制和驱动电路、电磁兼容等几个方面梳理了 SiC 器件应用面临的技术挑战和可行的解决方案,并介绍了相关的研究热点和未来的发展方向;最后从系统应用的角度总结了新一代高性能 SiC 车用电机驱动系统的集成设计和优化方法。

2 SiC 功率模块设计与开发

封装是功率器件必要的工艺之一,其作用是隔离

外界环境以保护器件。封装质量不仅直接影响着功率器件本身的电气、机械和热性能,还会影响其成本和可靠性,在很大程度上决定了系统的小型化和多功能化。封装性能的提升可以促进车用电机驱动充分发挥 SiC 器件的特性。

目前大多数 SiC 功率器件仅仅套用传统 Si 器件的封装形式和规格,工作结温一般不超过 175 °C。受布局杂散阻抗和封装材料的限制, SiC 芯片的特性无法充分发挥,设计并开发能满足高温、高频需求的可靠封装是近期的研究热点。

2.1 高温封装材料

除耐高温外,衬底、互连层等封装结构需要选择与 SiC 芯片热膨胀系数(CTE)匹配的材料,它是 SiC 高温封装提高可靠性的关键要素。

传统焊料合金如 Sn63%Pb37%、SAC305 等熔点大部分低于 230 °C,使用温度难以超过 180 °C。高温常规无铅焊料如 Au80Sn20、Au88Ge12 等硬度过大,难以满足 SiC 模块 200 °C 以上的可靠性要求,而高温有铅焊料不符合电动汽车领域的发展需求。纳米金属焊膏烧结技术和瞬时液相扩散焊技术等是目前研究较多的互连材料和技术。

金属焊膏主要采用银、金等材料,通过对微米级或纳米级的金属颗粒烧结实现互连。为防止微纳尺寸颗粒在未烧结时发生团聚现象,需要在其中添加有机成分。这些有机成分在烧结时一部分挥发,另一部分与氧气反应,互连层几乎是纯金属。

当前大多数厂商采用微米级银颗粒实现这一目标,可在 250 °C 左右实现烧结,使用温度可超过 500 °C。所形成互连层中的微孔结构可充分吸收热应力,可靠性大幅提高。但烧结过程中需要施加 15~30 MPa 压力,极易损坏 SiC 芯片。部分厂商采用纳米级银粉颗粒,可实现无压低温烧结过程,许用温度超过 600 °C,满足 SiC 基芯片高温、高可靠性的需求^[2],但需要较复杂的工艺参数优化。

瞬时液相扩散焊技术利用将低熔点金属(如锡等)与两侧高熔点金属(如铜、镍等)形成三明治结构,高温下低熔点金属熔化与高熔点金属发生固液扩散,形成完全界面金属间化合物的焊接互连。这种技术的互连层厚度一般小于 35 μm,提高了封装的散热性能,并能解决互连层界面混合物过多造成的高温可靠性下降问题^[3]。

2.2 封装形式与结构

现有低功率 SiC 器件通常采用传统分立封装形

式,而高功率、大电流器件通常采用模块形式。目前,采用传统引线键合封装的 SiC 模块占市场主流,主要包括芯片、覆铜陶瓷 (DBC) 衬板、金属底板、散热器以及在这些层间起互连作用的焊料等结构,芯片的顶部

采用引线键合连接到 DBC 图案或信号端子上。模块内部还需要填充硅凝胶等封装材料,外加塑料外壳保护,共同提供电气绝缘、防湿、防振、防污染等功能。现有大功率车用 SiC 模块如表 1 所示。

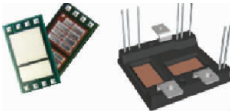
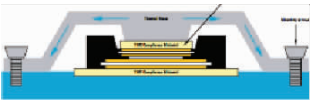

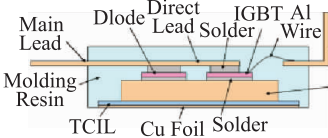

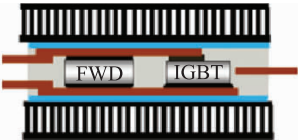

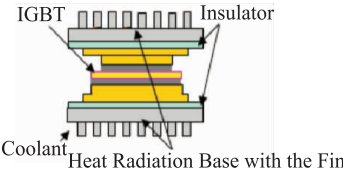
表 1 现有大功率车用 SiC 模块^[4]

	Rohm CAB425M12XM3 1200 V/600 A		Mitsubishi FMF800DX-24A 1200 V/800 A
	CREE CAS325M12HM2 1200 V/425 A		Infineon/CREE / Rohm MD500HTR120P6H MMN500V120X HP drive 1200 V/600 A

新一代车用模块采用平面型封装结构,芯片上下表面通过焊接或烧结的方式互连到铜导片或 DBC 上,可大幅降低键合线带来的杂散阻抗,将寄生电感

控制在 10 nH 以内。另一方面,平面型封装是双面散热的前提,能有效改善键合线导致的高温可靠性问题。最近可用于电动汽车的平面型封装模块如表 2 所示。

表 2 车用的平面型封装模块^[5]

		IR COOLiR2Bridge
		Mitsubishi CT600CJ1A060
		Infineon FF400R07A01E3_S6
		Hitachi DWDSCPM

平面型封装结构、银焊膏烧结、双面散热的充分结合是 SiC 功率模块封装发展的主要趋势。

2.3 SiC 模块散热方法

现有 SiC 芯片损耗较 Si 芯片小,但芯片面积小也会导致热流密度较大。以 Cree 公司 CPM3-1200-0013C 芯片为例,芯片电流可以到 90 A,有效面积为 0.183 cm²,在开关频率为 20 kHz、电流为 90 A 时,芯片的热流密度达到 235 W/cm²,远大于 IGBT 芯片的热流密度。提高 SiC 模块散热性能的研究集中在微通道、热管、半导体制冷、液态金属散热等方面。

微通道换热器的通道直径为 10~1000 μm。这种换热器的扁平管内有数十至数百条细微流道,在扁平管的两端与圆形集管相联^[6]。与常规换热器相比,微通道换热器体积小、换热系数大、换热效率高,对于电动汽车应用,需要进一步研发循环液体的过滤流程以防止微通道阻塞而降低效果。

热管散热器由密封管、吸液芯和蒸汽通道组成。热管运行时,蒸发段吸收功率模块产生的热量使液体沸腾气化向冷却段移动,在冷却段冷凝成液体。冷凝液再依靠吸液芯的毛细作用返回蒸发段。这种冷却方

式具有极高的导热率(是铜的 500~1000 倍),热响应速度快、体积小、重量轻,不需外加电源^[7]。对于电动汽车应用,需要进一步研发冷却段的二次对流散热,并解决功率模块必须倒置的问题。

电半导体制冷器件基于热电偶的逆现象,当两块不同金属连接时接通电流,一端温度降低另一端升高,若用 N 型半导体和 P 型半导体代替金属,温差效应更加明显。现有半导体制冷器是由多对热电元件经并联、串联组合而成,可得到 30~60 °C 的温差,增加级数可进一步增加温差。该方法无噪声、无振动、不需制冷剂、体积小、重量轻^[8],但其耗电量相对较大,对于电动汽车应用需要从系统出发优化设计。

液态金属具有远高于水或乙二醇的热导率(50~700 倍),因此液态金属相对于传统水冷来说可实现更加高效的散热。液态金属需要电磁泵来驱动,其相对于水泵效率高、能耗低、无噪音,冷却用液态金属大多还具有不易蒸发、不易泄漏、安全无毒等优势^[9]。电动汽车应用中需要进一步增强电磁泵的性能,保证其高效稳定运行。

2.4 封装设计方法

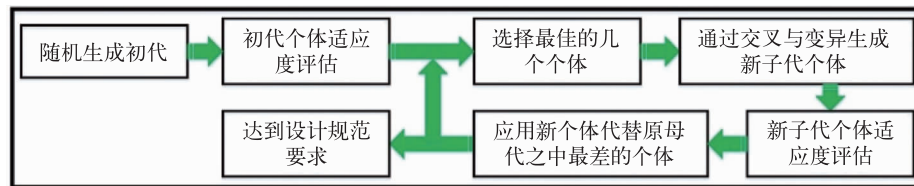


图1 SiC 模块自动布局流程^[17]

自动布局方法,首先要建立高效的模块物理布局和数字模型间的编码方案,使模块布局更加接近实际情况。数字编码包括两个环节,一是芯片的位置,二是封装元素的类型和方向。引线键合型封装和平面型封装有各自不同的封装结构,可利用数字编码表述各种封装元素,图2给出了编码示例。

在布局方案评估方面,文献[12]采用有限元方法计算电气性能,计算时间过长且不稳定,优化中需要手工修改模型。文献[13]在对模块布局的电气参数评估过程中,利用解析公式与边界元相结合的方法估算杂散参数,并保持了很高的准确性。浙江大学陈敏教授在文献[10]中提出了基于续流回路采用续流面积进行评估的方法,大大提高了运算速度。

在热性能评估方面,传统方法为有限元方法,准确性较高但时间过长。文献[19]利用解析公式与有限差分相结合的方法评估温度场,适合芯片数量相对较少的模块。文献[13]采用三维热阻网络的方法估算芯

片与同用于车用电机控制器的 Si IGBT 芯片相比, SiC MOSFET 单芯片电流规格小、高温下载流能力下降的问题十分突出。以 1200 V/600 A 的 HPD 模块为例,三相共需要 36 个芯片,模块复杂度大幅增加,杂散电感将导致器件应力增大、开关震荡和电磁兼容问题,进而影响电机控制器的性能。SiC 高频开关时,电压变换率大于 10^{10} V/s,电流变换率大于 10^9 A/s,常规模块布局难以支撑 50 kHz 以上的开关频率。因此,提升 SiC 模块的布局优化十分重要。

SiC 模块布局的研究在国内刚刚起步,浙江大学对常规硅基模块进行了研究,考虑了续流回路在模块中的作用^[10],西安交通大学对硅基高频模块进行了电器和散热方面的探索^[11]。国外研究起步稍早,研究方向主要包括电气杂散参数影响^[12]、新型封装形式^[13]、温度分布^[14]、长期可靠性^[15]以及布局编码和优化算法^[16]。

目前广泛采用的优化方法多为试凑法或半自动设计法,能对比的布局方案数量有限,效率较低,对于具有新型拓扑和新型封装形式的模块更缺乏系统性的优化方法。为解决这些问题,近期文献已提出若干种模块自动布局方法,流程如图1所示。

片的结温,但准确性相对较低。

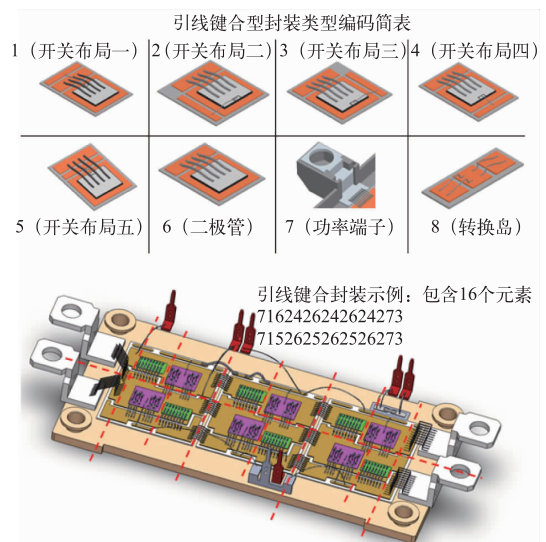


图2 封装元素编码示例^[18]

在优化算法方面,部分学者采用遗传算法^[13],可实现布局空间的充分搜索,突破试凑法的设计局限。文

献[20]尝试采用进化型算法,在交叉变异操作之外增加了个体在代间的进化,可部分解决过早收敛和陷入局部性陷阱的问题。

3 SiC 功率模块测试方法

SiC 芯片高热流密度和应用环境对封装材料的各种性能都会产生较大的影响,在高温和大温度梯度下,封装材料有迅速退化的趋势,模块的互连层形成预缺陷、衬底残留应力加剧和灌封材料挥发,导致模块失效。这些问题的发现依赖于对功率模块的准确测试,它也是系统损耗计算、寿命预测、健康管理的基础。

3.1 电气参数动静态测试方法

SiC 模块动静态测试主要面对的问题有动态特性对寄生参数敏感、带宽及延时对结果准确性影响明显、电磁干扰 (Electro Magnetic Interference, EMI) 及安全保护问题严重。

驱动及测试电路中 PCB 连接线以及器件封装中存在寄生电感和电容,与 Si 器件相比, SiC 器件开关速度更高,较大的电压和电流变化率会通过回路中的杂散电感和电容感应出瞬态的电压和电流,使器件出现较大的电压过冲和电流过冲,更严重的情况下会直接导致器件故障或损坏。开关测试时,常用的高带宽电流监测设备(同轴分流器等)多需要串联在功率回路中,会造成功率回路连接线长,增加寄生电感。因此,要求尽可能地优化驱动及测试回路,从而降低测试回路中的寄生电感和电容。

SiC 器件开关速度高,为准确采集开关波形的上升沿、下降沿,准确测量器件的开通关断等时间参数,需要测试设备有较高的带宽。同时,由于测试通道存在延时,电压通道与电流通道的通道延时不同,导致电压与电流波形之间存在相位延迟, SiC 器件的损耗低,利用采集的电压、电流数据计算开关能量损耗时会产生较大误差。因此,针对 SiC 器件的动态测试有必要对电压和电流通道的延时进行精确校准和补偿,提高损耗计算精度。

SiC 器件高压大电流回路在开通关断过程中产生高次谐波电流/电压(150 kHz 及以上),通过导体传导和空间辐射途径干扰驱动电路及测量电路等弱电电路,容易导致驱动控制失效、测量波形失真、高频震荡等问题,使得器件安全性降低,导致被测器件失效,甚至对设备自身安全造成影响。

针对 SiC 器件的动态特性测试,仍需解决低感设

计、探头补偿、通道校准、电磁干扰噪声抑制、设备及人身安全防护等关键测试技术,原有 Si 器件的动态测试设备在进行 SiC 动态测试时仍存在较大不足,测试精度不高。

3.2 SiC 可靠性测试方法

功率芯片结温的精准提取与检测是系统损耗计算、寿命预测、健康管理的基础。Si 和 4H-SiC 的材料属性如表 3 所示,与 Si 材料相比, SiC 的 CTE 更高,杨氏模量约为 Si 的 3.5 倍,引起芯片粘接层的塑性应变增加至少 40%。同时,虽然相同额定值的 SiC 芯片与 Si 芯片相比面积更小,但其厚度大约是相同电压等级 Si 芯片的 3 倍^[21]。因此,温度波动引起的封装材料之间的热应力在 SiC 器件中高得多,导致在热机械应力作用下器件的循环寿命大大缩短^[22]。

表 3 Si 和 4H-SiC 的材料属性^[22]

材料属性 (20 °C)	Si	4H-SiC
热导率 $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	160	380
比热容 $/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	700	690
CTE $/(10^{-6} \cdot K^{-1})$	3.0	4.3
杨氏模量 /GPa	162	501(各向异性)

器件的功率循环能力需要通过功率循环试验来进行考核,准确的结温测量是评估功率循环测试结果的基本和必要条件。功率循环测试期间芯片温度通常通过热敏感电参数来进行间接测量。通过事先标定热敏感电参数与温度的关系,即可以通过测量热敏感电参数的方法来反算器件结温。对于 Si IGBT 来说,其小电流下的导通电压 V_{CE} 与温度呈非常好的线性关系,且通过小电流下的导通电压 V_{CE} 反算得到的结温近似等于芯片表面的平均温度,同理,二极管在小电流下的正向压降 V_F 可以用于二极管在功率循环期间的温度检测。然而,对于 SiC-MOS 器件来说,栅氧层 SiC/SiO₂ 界面态存在着俘获/去俘获电子的现象,会导致阈值电压和导通电压发生漂移,使用 V_{th} 及 V_{DSon} 温度敏感电参数 (Temperature Sensitive Electrical Parameter, TSEP) 测量 SiC-MOS 器件的结温存在较大误差。对于 SiC MOSFET 广泛认可的方法是利用体二极管 PN 结的电压 V_{SD} 作为 TSEP 来测量 SiC MOSFET 在功率循环期间的结温,由于任何沟道电流都会改变电压的温度特性,因此,需要通过施加负栅极电压(不大于 -6 V)的方法来完全关闭沟道,保证所有的电流均通过体二极管。

研究表明,最合适的 SiC MOSFET 功率循环测试方法是在高正栅极电压下,在正向 MOSFET 模式下通

入大电流产生功率循环测试期间的大功率损耗,使器件产生温升;同时切断正向大电流后在足够的负栅极电压条件下(不大于 -6 V)应用反向低测量电流测量 SiC MOSFET 体二极管 PN 结的压降来检测功率循环过程中的结温。最简单的办法是给反向体二极管通入大电流来加热器件,然而,由于体二极管在大电流下的电压与温度是负相关的,体二极管的导通损耗会随着温度的升高而降低,这种作用部分补偿并延缓了器件的退化作用,而在 SiC MOSFET 正向加热模式下,损耗随温度增加而增加,加速了器件老化,更符合器件的实际应用状况。文献[23]中的试验结果显示,对于低电压 MOSFET,使用反向体二极管加热方法的功率循环寿命可达使用 MOSFET 正向加热方法的 5 倍。

4 高性能电容需求

直流电容器占到了车用电机驱动控制器总体积的约 35%、总质量的约 25%。当功率模块从 Si IGBT 升级到 SiC MOSFET 时,其体积已大幅缩小,更加凸显了电容器对电机驱动控制器功率密度提升的阻碍^[24]。同时 SiC 器件的开关速度快,使电容纹波电流的高频成分增加,对电容器的高频特性也提出了较高要求。电容器高频工作时,绝缘介质介电系数减小会降低电容量,并使损耗增大。目前,车用电机驱动器主要使用金属化膜电容,它的性能较好,纹波电流吸收能力强。

4.1 电容损耗与高性能散热方法

对电容散热的研究首先考虑电气模型和热损耗计算,尤其要面向高温、高频环境。文献[25]介绍了电容热计算的概念、理论依据和检验方法。文献[26]进行了损耗模型简化。文献[27]主要分析电容等效串联电阻,并指出膜电容的热传导路径和电流路径不同。文献[28]研究了电容温度在交流频率条件下的影响因素。

当前 SiC 控制器中电容器的主要问题是由于纹波电流吸收能力不足,导致电容器的体积偏大。目前关于膜电容主要集中于对电容整体及电容芯子单体进行计算,需要进一步根据电机驱动的性能要求进行设计。文献[29]分析了电容器设计的关键参数,通过电容机理和电路拓扑分析,获得了参数设计需求。

文献[24]提出在母线电容内部采用多芯子并联结构,并设计短路径芯子集成母排,一方面减小寄生电感,另外一方面可将热量快速导出。文献[29]通过铝制壳体 and 集成散热器(见图 3)降低了电容器内部热点的温度。文献[29]对所提出的方案进行了仿真和实验,其

电容器热阻下降了 72.4%,纹波电流提升了 2.2 倍。

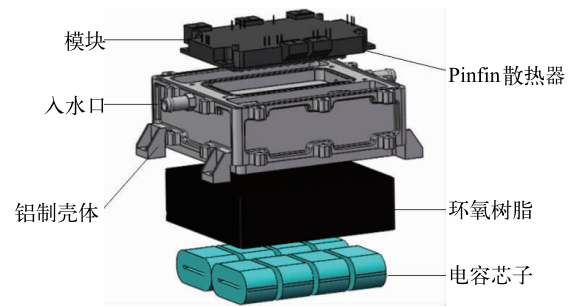


图3 铝制壳体和集成散热器^[30]

4.2 高性能电容材料

目前商业化薄膜电容器中的电介质以双轴向聚丙烯(Biaxially-Oriented Polypropylene, BOPP)为主, BOPP 具有极低的介质损耗(0.02%)和较高的电气强度(720 MV/m)。但是, BOPP 的介电常数较低(2.25), 导致其能量存储密度不高(3 J/cm^3), 已经难以满足日益增长的高温要求^[30]。

聚偏二氟乙烯(Polyvinylidene Fluoride, PVDF)及其共聚物是一类常见的铁电性聚合物,具有较高的介电常数,是高储能密度薄膜电容器中最具潜力的介电材料之一。但其击穿场强较 BOPP 低,且介电损耗较高,导致放电能量密度的提高并不显著。聚硫脲最高电气强度可达 685 MV/m, 相应的能量密度为 9.3 J/cm^3 。该结果相比于 BOPP 有很大的提升,通过改善加工条件去除杂质和残余溶剂,可以进一步提高电气强度和能量密度。聚脲和聚氨酯聚合物膜电容的介质损耗因数为 0.758%~4.290%,但其分子结构中的脂肪结构含量较高,玻璃化转变温度(T_g)大多低于 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 熔融温度(T_m)和热分解温度(T_d)在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 以上,难以确定其长期使用温度是否能达到 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 。基于 BTDA-HK511 的聚酰亚胺膜电容具有相对较高的介电常数和能量密度,以及可以接受的介质损耗因数,然而其分子结构中的长脂肪链和醚键结构使其失去了聚酰亚胺固有的耐温性优势,其 T_g 仅为 $78\text{ }^\circ\text{C}$, 难以在高温等苛刻环境下应用。

多层聚合物膜可有效降低极性聚合物介质损耗,多层聚合物的电气强度较单个组分有所提高,多层膜技术向 PVDF 等铁电聚合物中引入了高度绝缘的线性介电聚合物如聚碳酸酯、聚砜(Polysulfone, PSF)、聚对苯二甲酸乙二醇酯等,总的电导与绝缘性优良的组分相近,如 PSF/PVDF 30/70 (体积比) 32 层膜在 100 MV/m 条件下的电导为 $6\times 10^{-13}\text{ S/m}$, 与 PSF 的电导($1.5\times 10^{-13}\text{ S/m}$)接近,远低于 PVDF (10^{-11} S/m)。

目前, 聚合物基纳米复合材料的高储能密度需要多方面努力。比如, 合理选择填料及聚合物基体, 并考虑填料与基体两相界面间的相互作用、填料颗粒在聚合物基体中的分散性以及聚合物基体的结晶化程度。

4.3 一体化母排与协同设计

一体化母排在车用电机驱动中起到了连接直流电容单体和 SiC 功率模块的作用。现有研究多利用电磁场仿真分析优化电流路径, 从而达到降低逆变器回路杂散电感、电阻的目的, 为 SiC 变频器高频稳定运行打下基础。SiC 模块功率端子位置将影响母排设计, 也是提高主回路性能和平衡并联芯片的基础。

现有 SiC 产品模块多采用标准 Si 模块封装, 功率端子位置基于产品系列, 较少与母排和电容进行协同设计。现有研究主要有采用有限元方法针对已有 SiC 产品模块进行叠层母排的互连设计, 分析多层叠层母排杂散电感高频段衰减特点, 或分析多相并联模块间的杂散阻抗差别等。很少有研究基于母排互连和约束特点逆向指导模块设计, 文献[31]根据母排需要提出了选择模块的要点, 但未能指导模块布局并确定功率端子位置。文献[32]给出了端子位置排布与母排互连的设计要点, 进行了场路耦合仿真, 未能实现自动协同设计。下一步研究热点是给出明确的排布设计方法。

5 高性能信号检测

车用电机驱动在应用 SiC 器件时, 电压、电流的检测对系统性能也有较大影响。电动汽车运行时功率器件不可避免会发生各种诸如短路、开路等突发性故障, 如果能够及时发现并采取一定的保护措施, 并不会造成器件失效, 电压、电流和结温检测对 SiC 器件的稳定运行尤为重要。

5.1 电压信号检测

电机控制器中直流母线电压决定功率模块的开关应力, 并与母线电容的使用寿命相关, 空间矢量调制过程也与直流母线电压相关。直流母线电压的检测将直接影响功率模块的过压保护和开关信号的矢量调制过程。直流母线电压信号检测方案主要有电阻分压法、线性光耦法、电压霍尔法。

电阻分压法采用电阻网络将直流母线电压进行分压, 并缩放至合适的范围。缩放后的电压输入给运算放大器组成的反馈电路, 最终通过运算放大器的调理和滤波后输入给 DSP。电阻分压法电路原理简单、响应速度快, 但高压电路和低压电路之间存在耦合,

需要外加电路对 DSP 的输入进行保护。

线性光耦法通过线性光耦实现高、低压电路之间的隔离。将直流电压经过分压后接入运算放大器, 通过运算放大电路进行电压偏移后, 得到一个低幅值单极性电压信号。这个单极性电压信号作为线性光耦的输入, 线性光耦的输出通过滤波、调理后, 输入给 ADC 电路。线性光耦法对低压电路具有隔离保护作用, 且响应速度快、测量精度高、价格适中。

电压霍尔法基于霍尔电流传感器, 将霍尔传感器与高阻值电阻串联, 并将整体并联在直流母线电路两端, 霍尔传感器输出电流信号与母线电压线性相关, 这个电流信号经过合适的电阻转换成电压信号后引入 DSP。电压霍尔法对高压电路和低压电路具有隔离作用, 但响应慢、测量精度低、价格高, 一般较少采用。

SiC 器件导通压降检测是近年来的研究热点, 它是检测短路状态、芯片结温和可靠性的重要前提。正常运行中, SiC 器件导通电压一般只有几伏, 而关断时需要承受上千伏的耐压, 同时被测器件和其他器件开关过程中的电压电流变化率高达 10^9 量级, 噪声问题非常严重。常用的两种导通压降监测电路如图 4 所示^[33], 当被测器件 (Device Under Test, DUT) 处于导通状态时, 测量电路处于短路状态, 理想情况下, 导通压降值可以约等于负载电阻 R_L 两端的压降; 当 DUT 处于阻断状态时, 测量电路可以阻断直流电压, 从而在保护测量电路的同时提高测量精度。第一种电路对时序要求较高, 第二种电路通过电压钳位二极管 D1 来阻断直流电压, 但是二极管的压降会随着二极管温度和导通电流值的变化而变化, 从而引入误差。图 5 所示为改进的监测电路。测量电路与驱动电路共用供电电源, D1 用于阻断直流母线电压, 设置 D2 用以补偿阻断二极管 D1 引起的测量误差。信号 MOSFET 用于在被测器件断开状态期间为电流源续流。信号通过低通滤波、幅度调理和隔离运放后传送到处理器的 AD 转换端口, 有效解决了同步、干扰和隔离的问题。

5.2 电流信号检测

电流检测的主要方法有同轴分流器法 (Shunt)、霍尔传感器法、芯片集成电流传感器法、磁阻传感器法、IGBT 退饱和方法、PCB 板罗氏线圈法等。电流传感器需要平衡带宽、体积、侵扰性和成本等方面, 才能满足 SiC 器件对系统的要求。

同轴分流器法测量精度高, 但电阻的寄生参数会恶化 SiC MOSFET 的开关特性, 且信号隔离较为困难。霍尔电流传感器虽然在功率变换器中应用最为广

泛,但带宽通常低于 300 kHz,对于突然变化的电流测量较为困难,而且霍尔元件的温漂问题会引入测量误差。文献[34]采用改进的磁阻传感器测量器件开关电流,尽管带宽达到 5 MHz,但仍然难以满足“高带宽”的要求。IGBT 退饱和方法需要一定的消隐时间来避免误检,特别是负载短路故障下的消隐时间高达数微秒,严重影响短路保护的快速性。

PCB 板罗氏线圈法是最近比较热门的研究,具有体积小、带宽高和对系统侵入性低,以及线性度高、重量轻、无磁饱和等优点^[35]。但在实际应用中,存在 PCB 罗氏线圈建模困难、设计困难的问题,也存在积分器与线圈的耦合振荡问题,对于低频信号有较大误差,也会增大驱动板面积,另外受器件开关影响较大,需要进一步改进。

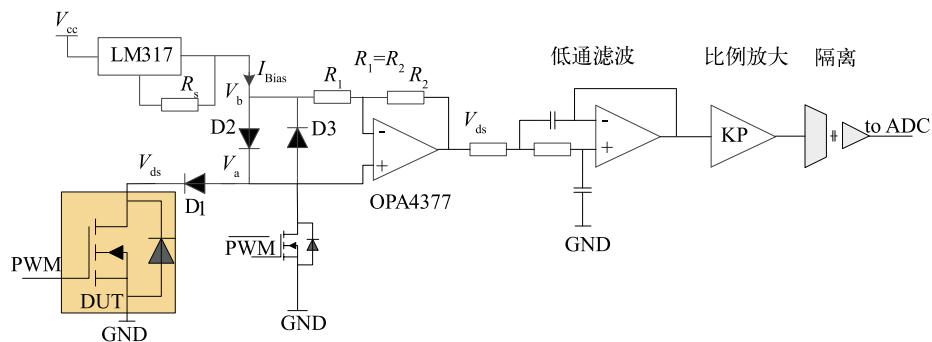


图 5 SiC MOSFET 导通饱和和压降监测电路^[33]

5.3 结温在线监测

现有国产车功率模块的温度监测结果与芯片的实际工作结温有较大差距,保护阈值设定较为困难。为了保证车用电机驱动的可靠运行,现有的设计方法大多采用大裕量、多重冗余的经验化设计准则,不可避免地存在“大马拉小车”现象。如果能够精准提取功率芯片结温,就能够降低现有设计方法浪费的视在容量,降低成本,增加车用电机系统在复杂运行工况下安全运行的能力。

功率芯片封装在模块内部,不易直接接触,难以直接观测,芯片结温测量颇具挑战。目前,结温检测方法主要可归纳为 4 类:物理接触法、光学非接触法、热阻抗模型预测法与热敏感电参数提取法。

物理接触法主要在功率模块内集成热敏电阻或热电偶等测温元件,得到的信息是模块内部基板某处的局部温度,远非功率芯片结温,其误差较大(可达 73%),且响应速度一般在秒级,无法实时反映待测器件的结温动态变化^[35]。

光学非接触法主要使用红外热成像仪、光纤、红外显微镜、辐射线测定仪等。在测量前需要破坏模块封

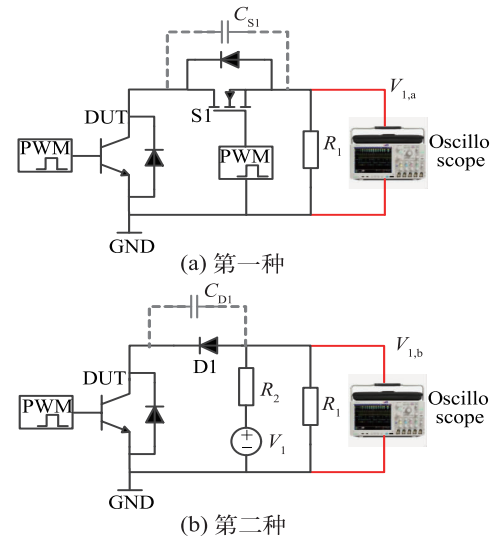


图 4 两种常用导通压降监测电路^[33]

装,除去硅胶表面涂黑以增加辐射系数,来提高准确度。另外,现有商用红外热成像仪的最高采样率仅为 2000 帧,远不能满足实时监测要求。SiC 器件在运行时会发出可见光,浙江大学学者提出采用光敏探头监测结温。然而电机驱动用 SiC 模块内部并联芯片较多,封装内部隔光板的设计、多路探头的排布与外连、平面型模块的狭小空间等都限制了其应用^[36]。

热阻抗模型预测法则结合了待测器件、电路拓扑和散热系统等综合因素,估算损耗反推芯片结温及其变化趋势^[37],该方法被广泛应用于设计时的散热系统评估。然而,实时损耗模型和热阻抗网络模型的精确建模相当困难,预设热阻网络模型会由于老化原因发生较大偏移,都限制了其应用。

热敏感电参数法把待测器件自身作为温度传感部件,建立温度与外部电气变量的映射模型。这种方法响应快、成本低、可用于在线检测,成为最具应用潜力的技术。

热敏感电参数法基本可分为静态法和动态法两类。静态热敏感参数法是指器件处于完全导通或关断状态下的参数,例如小电流导通压降法^[38]、大电流导通

压降法^[39]、驱动电压降差比法^[40]、集电极起始电压法^[40]和短路电流法^[41]等。与之相对的是动态参数法,如集电极信号/功率端子差值法^[42]、阈值电压法^[43]、内置驱动温敏电阻法^[44]等。

以上电气热敏感参数法都有各自的优势和缺点,可以从灵敏度、精准度、对控制策略的影响、硬件侵入性等角度进行评估。

(1) 灵敏度和精确度:在采样电路中,测量参数变化率大且测量分辨率越大的方法可以获得更高的灵敏度和监测精度。电极信号/功率端子差值法等需要通过时间估算结温,对于快速开关的工况灵敏度很低(小于 $1\text{ ns}/^{\circ}\text{C}$)。小电流导通压降、门极阈值电压等方法的测量参数变化率在 $2\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 左右,而大电流压降可以达到 $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 控制策略影响:以短路电流作测试参数需要额外设计短路测试环节,阈值电压法需要添加开关瞬间的测量脉冲。

(3) 硬件侵入性:小电流导通压降法需要额外注入小电流,驱动电压降差比法需要在正常控制之外改变驱动电压,内置驱动温敏电阻法需要在驱动电路中增加高频交流电源,这些附加电路可能会造成电机驱动系统不稳定。

6 系统集成设计

6.1 系统集成设计方法

系统设计开发阶段,通过仿真计算给出电机驱动功率、效率等量化指标,可指导系统性能均衡设计,在提高装置功率密度的同时增加系统整体的安全裕量。

目前国内电机驱动设计受制于功率模块的标准化封装,系统集成多停留在几何布局层面。国外机构已开展变频器系统指导下的元件和组件定制化开发,包括多功能母排在内的元件复用正在兴起。近年来在与功率模块关系最紧密的元件中,对于驱动电路、母线电容与母排的研究最多。但对这些元件集成设计的研究中,目标与参数之间的关系较为模糊^[45],约束条件多不清晰,集成过程多基于机械设计人员的经验,难以兼顾电磁特性和散热细节,组件难以进行集成匹配设计,限制了 SiC 器件优越性能的充分发挥。

在车用电机驱动控制器系统热设计方法中,有学者结合电路计算及温度场仿真,获得损耗以及其在空间的分布。有学者研究两相流等高效散热技术,优化热传导、热对流路径,降低控制器内各热源与热沉之

间的等效热阻,从而降低热源温度。也有学者研究隔热技术在车用电机驱动控制器中的应用,降低热敏感部件与热源间的热耦合,实现控制器内各部件高温工作性能互相匹配。

6.2 系统集成优化方法

随着电机驱动系统的发展,以元件个体最优为目标的优化设计逐渐转变为多个元件最优的组合设计。随着多物理场分析工具的实用化,各元件的几何关系、机械应力、电气应力和热应力可以并行分析、定量计算。目前针对元件个体设计的研究较多,而元件间的协同和互扰机理难以厘清,尤其是联系最紧密的功率模块、驱动电路、母线电容和叠层母排这4个主要部件的协同设计方法不明晰,系统集成冗余空间过大。

尽管文献报道了各种叠层母排降低杂散阻抗、提高传导换热的设计^[46],但缺乏具体的多元件集成方法。文献[47]通过有限元法和电路简化法,提出了电机驱动中的元件集成准则,文献[48]提出了散热和机械结构的设计指导意见。平面型 SiC 模块需要上、下两面散热,对于叠层母排和驱动板的排布有更强的约束^[44],功率端子和信号端子位置的确定和相关设计亟需协同。集成设计需要考虑多个元件旋转、拼接、匹配等排布问题,难以直接套用已有的模块优化算法^[48]。在设计过程中需要采用三维映射模型,与模块优化使用的二维模型相比,计算量成几何级数上升,因此需要更加成熟的优化算法。文献[49]对电机驱动系统进行了自动集成优化的研究,建立了物理布局映射模型,但是对于元件数量有限制,也未能考虑元器件互连细节。对于叠层母排和相关元件的集成,需要进一步考虑元件间的互连和约束,改进优化算法提高效率,解决不收敛、局部最优陷阱等问题。

7 结论

由于 SiC 材料特性与 Si 差异较大,在器件开发和系统应用方面需要特别的设计和 optimization 方法。本文以车用电机驱动为主要应用,从芯片设计、封装、驱动、母线电容匹配、EMI、系统集成等方面分别论述了当前现状和研究热点,对多种关键参数和约束条件进行了较为详细的介绍,对 SiC 器件在车用电机驱动应用中充分发挥高频、高温特性具有一定的指导意义。

参考文献:

[1] 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.
- [2] KHAZALA R, THOLLIN B, MENDIZABAL L, et al. Characterization of nanosilver dry films for high-temperature applications[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2015, 15(2): 149-155.
- [3] FAIZ M K, YAMAMOTO T, YOSHIDA M. Low temperature and low pressure fluxless Cu-Cu bonding by Ag-based transient liquid phase sintering for high temperature application[C]// 2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), 2017: 195-198.
- [4] KANG Y, NING P, YUAN T. Design and development of high voltage and high current SiC MOSFET modules[C]// PCIM Europe digital days 2020. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2020: 1-6.
- [5] NING P, LI L, WEN X, et al. Top die surface reprocessing for planar package with double sided cooling[C]// 2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2018: 2780-2785.
- [6] BYUN H W, KIM N H. Two-phase refrigerant distribution in a two row/four pass parallel flow minichannel heat exchanger[J]. Experimental Thermal & Fluid Science: International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics, 2016, 77: 10-27.
- [7] 施玉洁. 高速动车牵引变流器用板翅式热管散热器传热性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2014.
- [8] 云振新. 半导体致冷器件及其应用[J]. 半导体技术, 1990 (6): 38-45.
- [9] DENG Z S, LIU J. Capacity evaluation of a MEMS based micro cooling device using liquid metal as coolant[C]// IEEE International Conference on Nano/micro Engineered & Molecular Systems, 2007: 1311-1315.
- [10] ZHU N, CHEN M, XU D H. A simple method to evaluate substrate layout for power modules[C]// International Conference on Integrated Power Systems, 2014: 1-6.
- [11] CHEN Q, YANG X, WANG Z, et al. Analysis and suppression of inductive interference in an active integrated power electronics module[C]// 2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 2007: 169-1625.
- [12] VANWYK J D, LEE F C, LIANG Z, et al. Integrating active, passive and EMI-filter functions in power electronics systems: a case study of some technologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (3): 523-536.
- [13] NING P, WANG F, NGO K. Automatic layout design for power module[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 481-487.
- [14] PANG Y F. Integrated thermal design and optimization study for active integrated power electronic modules (IPEMs)[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2002.
- [15] CARA D, CATALIOTTI A, MARSALA G, et al. Measurements methodology for the reliability evaluation of intelligent power modules[C]// Instrumentation & Measurement Technology Conference, IEEE, 2014: 665-669.
- [16] SHOOK B W, NIZAM A, GONG Z, et al. Multi-objective layout optimization for multi-chip power modules considering electrical parasitics and thermal performance [C]// Control & Modeling for Power Electronics: IEEE, 2013: 1-4.
- [17] 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.
- [18] NING P, WEN X, MEI Y, et al. A fast universal power module layout method[C]// 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2015: 4132-4137.
- [19] IWATA Y, HAYASHI S, SATOH R, et al. An efficient thermal design method based on boundary condition modeling[J]. IEEE Transactions on Components & Packaging Technologies, 2006, 29(3): 594-603.
- [20] 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): 47-53.
- [21] KAMINSKI N, RUGEN S, HOFFMANN F. Gaining confidence-a review of silicon carbide's reliability status[C]// 2019 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), 2019: 1-7.
- [22] HU B, GONZALEZ J O, RAN L, et al. Failure and reliability analysis of a SiC power module based on stress comparison to a Si device[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2017, 17(4): 727-737.
- [23] HEROLD C, SUN J, SEIDEL P, et al. Power cycling methods for SiC MOSFETs[C]// 2017 29th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's (ISPSD), 2017: 367-370.
- [24] HEROLD C, FRANKE J, BHOJANI R, et al. Requirements in power cycling for precise lifetime estimation[J]. Microelectronics Reliability, 2016, 58(3): 82-89.
- [25] WEN H, XIAO W, WEN X, et al. Analysis and evaluation of DC-link capacitors for high-power-density electric vehicle drive systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(7): 2950-2964.
- [26] 陈温良. 金属化电力电容器的热计算问题[J]. 电力电容器学会, 2003(S1): 53-57.
- [27] 华征, 王召盟, 徐梦蕾, 等. 高压全膜电容器三维温度场数值计算分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38 (2): 94-99.

- [28] 尹婷, 严飞, 李浩原, 等. 金属化安全膜电容器 ESR 计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(3): 41-44.
- [29] LU X, PENG F Z. Minimizing DC capacitor current ripple and DC capacitance requirement of the HEV converter/inverter systems[C]// 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 1191-1198.
- [30] 李晔, 范涛, 李琦, 等. 车用 SiC 电机驱动控制器用金属化膜电容研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1801-1807.
- [31] CHOI U M, BLAABJERG F, JRGENSEN S. Power cycling test methods for reliability assessment of power device modules in respect to temperature stress[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 3(3): 2531-2551.
- [32] 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): 6383-6393.
- [33] CAO H, NING P, CHAI X, et al. Online monitoring of IGBT junction temperature based on V_{ce} measurement[J]. Journal of Power Electronics, 2020, 21(2): 451-463.
- [34] GELAGAEV R, JACQMAER P, DRIESEN J. A fast voltage clamp circuit for the accurate measurement of the dynamic on-resistance of power transistors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 62(2): 1241-1250.
- [35] 项鹏飞, 郝瑞祥, 郝一, 等. 基于 PCB 罗氏线圈的 SiC MOSFET 简化短路保护电路研究[EB/OL]. [2021-12-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20211028.1449.014.html>.
- [36] LUO H, MAO J, LI C, et al. Online junction temperature and current simultaneous extraction for SiC MOSFETs with electroluminescence effect[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 21-25.
- [37] LI C, LU Z, WU H, et al. Junction temperature measurement based on electroluminescence effect in body diode of SiC power MOSFET[C]// 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2019: 338-343.
- [38] CCOA J A B, STRAUSS B, MITIC G, et al. Investigation of temperature sensitive electrical parameters for power semiconductors (IGBT) in real-time applications [C]// International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, PCIM Europe, 2014: 1-9.
- [39] KHATIR Z, DUPONT L, IBRAHIM A. Investigations on junction temperature estimation based on junction voltage measurements[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(9-11): 1506-1510.
- [40] KIM Y S, SUL S K. On-line estimation of IGBT junction temperature using on-state voltage drop [C]// 1998 IEEE Industry Applications Conference. IEEE, 1998: 853-859.
- [41] DUPONT L, AVENAS Y. Evaluation of thermo-sensitive electrical parameters based on the forward voltage for on-line chip temperature measurements of IGBT devices [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014: 4028-4035.
- [42] XU Z, XU F, WANG F. Junction temperature measurement of IGBTs using short-circuit current as a temperature-sensitive electrical parameter for converter prototype evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3419-3429.
- [43] LUO H, CHEN Y, SUN P, et al. Junction temperature extraction approach with turn-off delay time for high-voltage high-power IGBT modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5122-5132.
- [44] VEMULAPATI U R, BIANDA E, TORRESIN D, et al. A method to extract the accurate junction temperature of an IGCT during conduction using gate-cathode voltage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 5900-5905.
- [45] ZHANG Y, LI Q, JIANG D. A motor CM impedance based transformerless active EMI filter for DC side common-mode EMI suppression in motor drive system[C]// IEEE Transactions on Power Electronics, 2020: 1.
- [46] DI PIAZZA M D, RAGUSA A, VITALE G. An optimized feedback common mode active filter for vehicular induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3153-3162.
- [47] LI M, SHEN M, XING L, et al. Current feedback based hybrid common-mode EMI filter for grid-tied inverter application[C]// 2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012: 1394-1398.
- [48] GOSWAMI R, WANG S. Investigation of multiple feedback active filter configurations for differential mode (DM) electromagnetic interference (EMI) noise in AC/DC converter applications[C]// IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017: 7018-7023.
- [49] CAO H, NING P, WEN X, et al. A genetic algorithm based motor controller system automatic layout method[C]// International Conference on Power Electronics and ECCE Asia.



作者简介:

宁圃奇 (1982—), 男, 天津人, 博士, 研究员, 主要研究方向为电力电子封装、高功率密度变频器。