



轨道交通牵引级全碳化硅器件 选型及应用研究

陈燕平¹, 李诚瞻², 王忠宝¹, 忻兰苑¹, 翟龙², 李华³

(1. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001;

2. 株洲中车时代半导体有限公司, 湖南 株洲 412001;

3. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 中国中车基于平面栅技术推出了面向轨道交通等领域的3 300 V高压全碳化硅器件。为提升牵引系统性能, 文章从芯片方案选型、关键工艺技术选择和器件封装技术选择, 如低电感设计、高温可靠性与热设计等几方面进行了器件特性研究, 并对器件进行了可靠性评估分析与面向轨道交通的装车应用研究。研究结果表明, 器件达到市场主流产品性能; 与IGBT器件相比具有明显的应用优势, 可显著减小牵引变流器重量与体积, 有效降低系统损耗, 提升系统效率, 降低电机温升与噪声。

关键词: 全碳化硅器件; 轨道交通; 牵引系统; 平面栅; 封装技术

中图分类号: U264.3⁺7; U231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0119-07

0 引言

碳化硅(SiC)器件作为新一代功率半导体器件, 与IGBT相比具有低损耗、高开关频率、高应用结温的特点, 应用于轨道交通牵引系统可带来系统谐波与损耗的降低, 以及体积、重量的减小, 是牵引系统朝着节能、环保方向发展的必然趋势。

三菱电机2015年发布了全球首个3.3 kV/1 500 A全SiC功率模块, 在减小牵引系统体积重量、降低系统损耗方面取得明显成效^[1]。2019年, 三菱电机在ISCRIM(国际碳化硅及相关材料会议)上宣布其3.3 kV/750 A全SiC半桥功率模块将于2020年7月在新干线N700S车型装车, 这成为轨道交通SiC发展的一个重要里程碑^[2]。在这之后, 西门子、中车时代电气等全球主流牵引系统供应商陆续实现了全SiC器件在牵引系统中的装车应用。

前期, 中车时代电气在轨道交通领域装车应用的全SiC器件主要是由三菱电机与英飞凌等半导体供应商

生产的。中车时代电气半导体公司(后简称中车)从2011年开始启动SiC器件研究, 研制出的1 700 V混合SiC器件于2015年在昆明地铁上实现示范应用^[3], 2018年推出了国内首个3 300 V高压全SiC器件^[4], 经过技术迭代与优化, 于2024年实现了在深圳地铁上的装车应用。

1 轨道交通牵引级全SiC器件选型

目前我国轨道交通牵引系统应用的功率器件普遍为Si基IGBT器件, 额定电压等级主要有3种: 1 700 V、3 300 V与6 500 V。作为新一代宽禁带半导体SiC材料, 相比Si材料具有更大的禁带宽度、更高的临界击穿场强、更高的电子饱和漂移速度和更优的热导率, 这些优良的材料特性将MOSFET等单极型器件的耐压水平提高到了6 500 V以上^[5], 使得SiC MOSFET可全面覆盖轨道交通牵引系统中Si基IGBT器件的应用。

轨道交通应用对功率器件有严苛环境与复杂工况适应性的要求, 需要器件耐受高低温、高湿度、强振

基金项目: 系列化中国标准智能市域列车研制及试验

作者简介: 陈燕平, 女, 正高级工程师, 研究方向为功率器件应用及变流技术; E-mail: chenyp@csrzc.com

引用格式: 陈燕平, 李诚瞻, 王忠宝, 等. 轨道交通牵引级全碳化硅器件选型及应用研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 119-125.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.015.

Citation: CHEN Yanping, LI Chengzhan, WANG Zhongbao, et al. Research on the selection and application of traction-grade all-SiC power devices for rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 119-125.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.015.

动与冲击、频繁启停等环境与工况，同时高可靠性与长寿命也是核心需求，器件服役寿命需要达到20年以上，因此，选择高性能高可靠的SiC器件对牵引系统应用至关重要，需深入开展芯片及模块结构选型、关键技术方案选择等研究。

1.1 芯片技术研究

1.1.1 芯片方案选型

1) 电压等级

我国轨道交通牵引系统中，只有极少数DC 750 V供电的城轨牵引系统采用1 700 V功率器件；绝大部分城轨的供电电压为DC 1 500 V，所采用功率器件的额定电压为3 300 V；干线机车与动车的供电电压为AC 25 kV，所采用功率器件的额定电压为3 300 V或6 500 V。

高压器件需要数十至上百微米厚的外延层以承受高电场，但厚外延层的生长面临缺陷控制、掺杂均匀性和成本效率等多重挑战。因此，从市场需求、材料制备与缺陷控制方面考虑，目前轨道交通牵引系统中主要应用的SiC MOSFET器件的额定电压为3 300 V。

2) 芯片结构

SiC MOSFET芯片结构如图1所示，与IGBT相似，主要有平面栅与沟槽栅两种，其中平面栅结构简单、可靠，但在其JFET区域存在夹断效应，会造成导通电阻增大、电流降低、损耗增加^[6-7]；沟槽型MOSFET利用垂直沟道，消除了JFET区域的电流夹断效应，但SiC沟槽的刻蚀及氧化工艺难度较大，且沟槽底部的尖峰电场较高，容易提前击穿^[8]。为确保更高的可靠性，轨道交通应用的SiC MOSFET芯片优选平面栅结构。

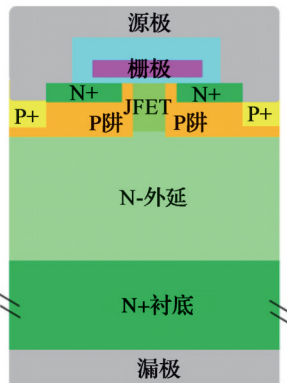


图1 MOSFET芯片结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of MOSFET chip

1.1.2 MOSFET芯片关键技术选择

本文主要围绕降低芯片导通电阻与提高可靠性选择合适的芯片技术。

1) JFET区设计

平面栅SiC MOSFET中的JFET区设计是影响器件导通电阻、耐压能力和可靠性的关键。通过载流子扩展层CSL (carrier spreading layer) 技术与JFET注入技术对JFET区进行优化是降低平面栅MOSFET导通电阻

的常用方法^[9-11]。这两种方法本质上是通过外延材料生长或工艺注入来提高JFET区域的掺杂浓度，以降低JFET电阻。文献[12]对这两种方法的优化效果进行了研究与试验，明确了CSL技术与JFET注入技术均可有效降低平面栅SiC MOSFET的导通电阻，大幅提升芯片的电流承载能力，但JFET注入技术对阈值的影响更小。

2018年，中车基于平面栅技术推出国内首个高压全SiC器件^[4]。在此基础上，采用亚微米短沟道技术与JFET注入技术进行优化，于2020年推出第二代精细平面栅芯片^[4]，如图1所示，芯片的比导通电阻 R_{sp} 为17 $m\Omega \cdot cm^2$ 。

2) 高温栅氧工艺技术

高温栅氧工艺是SiC MOSFET制造的核心环节，其质量直接影响器件的沟道迁移率、阈值电压稳定性和长期可靠性。高温栅氧工艺的核心包括氧化层生长与退火处理，氧化层生长普遍采用高温氧化，通过高温炉管中通入氧气或湿氧化气体，实现SiC表面SiO₂层的生长。退火处理一般采用氮化退火，即在高温（如1 600 °C以上）下通入NO或N₂O，钝化SiC/SiO₂界面缺陷（如碳团簇和悬空键），改善界面态密度（Dit），从而提高沟道迁移率。

SiC在高温下氧化速率显著提高，但过高的温度易导致氧化层致密性下降，形成多孔或疏松结构，降低击穿场强。SiC表面碳原子在高温氧化过程中易析出，形成界面碳团簇，导致界面态密度升高，显著降低沟道迁移率。阈值电压的稳定性主要受界面态密度、栅氧层的质量和电荷陷阱的影响。

为降低界面态密度，提升阈值电压稳定性与可靠性，对比研究了1 300 °C与1 350 °C下的氧化过程，结果表明，1 350 °C氧化温度工艺的沟道迁移率更加稳定，且在沟道迁移率不降低的前提下，阈值电压应力漂移减少75%，因此1 350 °C高温是更合适的芯片栅氧工艺的选择。

1.1.3 SiC二极管芯片选择

SiC二极管的主要类型有3种：肖特基势垒二极管（SBD）、PiN二极管和结势垒肖特基二极管（JBS），分别如图2所示。由于三者基本结构不同，其性能与应用场景也有所差异。SBD二极管是基于金属与半导体接触形成的肖特基势垒，由于是多数载流子器件，其反向恢复时间非常短，适合高频应用，但缺点是反向漏电流较大，尤其在高温下，而且击穿电压相对较低。PiN二极管通过P型和N型半导体之间插入本征层来增加击穿电压，其反向击穿电压高，适合高压应用，但由于是少数载流子器件，反向恢复时间较长，导致开关损耗大，不适合高频应用。JBS二极管结合了SBD与PiN的特点，通过在肖特基接触周围形成P+区域来抑制反向漏电流，同时保留多数载流子导电特性。3种芯片的性能参数对比如表1所示，研究团队根据需求选

择了JBS, 满足了器件额定电压3 300 V要求, 同时具备较快的开关速度及较强的抗浪涌能力。

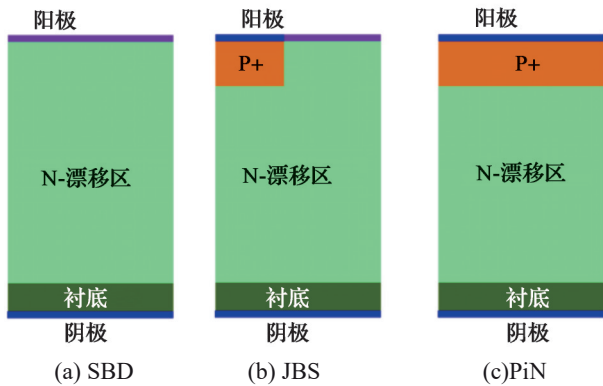


图2 二极管结构图

Fig. 2 Structure diagram of diode

表1 不同类型二极管性能参数对比

Table 1 Comparison of performance parameters across different types of diodes

性能参数	SBD	PiN	JBS
击穿电压	低 <1.7 kV	高 >10.0 kV	中高 1.7~3.3 kV
开关速度	极快 $t_{rr} < 10$ ns	慢 $t_{rr} > 100$ ns	快 $t_{rr} < 20$ ns
导通压降	低 1.2~1.5 V	高 3.0~4.0 V	中低 1.5~1.8 V
漏电流	高 $\mu\text{A} \sim \text{mA}$ 级	极低 nA 级	低 μA 级
抗浪涌能力	弱 2~3 倍额定电流	强 5~10 倍额定电流	中强 3~5 倍额定电流

1.2 封装技术选择

SiC 功率器件的高频、高压、高温特性对封装技术提出了更高要求, 其核心挑战在于如何平衡电气性能、热管理、可靠性与成本的要求。

XHP 封装结构如图 3(c)所示, 具有低电感且方便并联的优点, 其电路拓扑如图 3(d)所示, 由 MOSFET 反并联的外置 JBS 二极管与 MOSFET 体二极管一起续流, 两个 MOSFET 串联组成一个半桥电路。器件内部如图 3(b)所示, 内部包含了 4 个相同的衬板, 每个衬板上布置了 8 颗 SiC MOSFET 和 4 颗 JBS 二极管芯片, 每个单管包含了两个并联衬板。

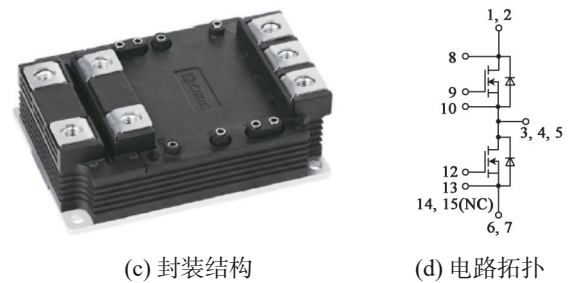
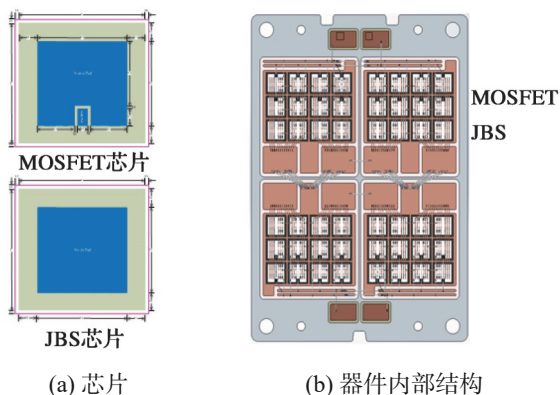


图3 中车 3 300 V 全 SiC 功率器件

Fig. 3 CRRC 3300 V all-SiC power device

1.2.1 低电感结构选择

传统封装的杂散电感大, 影响开关速度和 EMI, SiC 功率器件的高频特性对器件封装提出了低电感要求。如图 4 所示, 器件内部采用了直流正、负排平行叠布的方式, 以减少回路面积, 增大母排宽度, 降低整个回路的电感, 使器件的寄生电感降到 15 nH 以下。

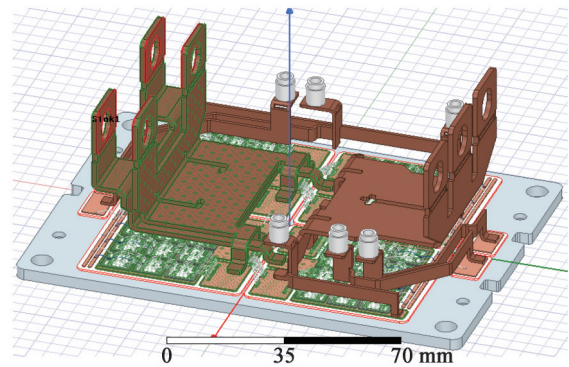


图4 器件内部母排结构

Fig. 4 Structure of internal busbar

1.2.2 高温可靠性技术选择

1) 陶瓷衬板选型

SiC 功率器件的高频、高压及高温特性对陶瓷衬板材料提出了严苛要求, 选型时需要在热管理、机械强度、电绝缘及成本之间取得平衡。陶瓷衬板材料主要包括氮化硅 (Si_3N_4)、氮化铝 (AlN)、碳化硅 (SiC)、氧化铝 (Al_2O_3), 其特性如表 2 所示。其中, SiC 热膨胀系数与 SiC 芯片完美匹配, 但脆性极大, 难以加工成复杂结构, 且成本最高, 主要用于军工及航天; Al_2O_3 工艺成熟, 成本低, 热膨胀系数为 $7.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 该数据与 SiC 差异较大, 且材料热导率低, 散热能力受限;

表2 不同衬板材料的导热率与热膨胀系数

Table 2 Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of different substrate materials

材料	热导率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	热膨胀系数 CTE/ ($10^{-6} \cdot (^\circ\text{C})^{-1}$)	抗弯强度 / MPa	成本
Si_3N_4	80~120	3.9	>800	高
AlN	150~220	4.5	300~400	极高
SiC	120~200	4.2	低 (脆性)	最高
Al_2O_3	24~30	7.2	300~400	低

Si_3N_4 、 AlN 的热膨胀系数与 SiC 芯片高度匹配,都适用于 SiC 功率器件, Si_3N_4 机械强度高,抗弯强度高,生产成本更低,但热导率比 AlN 低。为提升器件的散热性能,研究团队采用了热导率更高的 AlN 陶瓷衬板。

2) 芯片及功率互联焊接技术选择

为获得更高的器件可靠性,芯片到衬板与衬板到基板都采用纳米银烧结,热阻降低30%,功率循环寿命提升3~5倍。母排端子采用超声焊接,有效提升了端子的通流能力与可靠性,温度循环能力提升2倍以上。

1.3 器件性能及可靠性评估

从芯片到模块封装结构的选型、关键技术方案的确认,为轨道交通牵引级 SiC 器件的应用提供了基础的器件保障。基于第二代平面栅MOSFET芯片技术,采用体二极管与外置JBS二极管并联的续流方式,中车于2021年推出第二代全 SiC 功率器件TM750HF33X2,其额定电压 V_{DSS} 为3 300 V,额定电流 I_{D} 为750 A,该方案成为牵引变流应用技术研究的可靠选择。

器件定型后,对其性能参数进行了详细测试,总体表明其性能参数与当前采用的外置二极管的市场主

流产品相当,如三菱的FMF750DC-66A产品。

为保障器件在轨道交通领域稳定可靠应用,对器件开展了包括电、热、机械、湿气环境的各项可靠性试验验证,主要包括HTRB(高温反向偏压)、HTGB(高温栅极偏压)、H3TRB(高温高湿反向偏压)、温度冲击、被动热循环、机械冲击、机械振动、功率循环,研究结果表明,器件通过了各项试验,达到了装车应用条件。

2 器件在牵引系统中的应用研究

为更好评估器件的应用效果,选取深圳地铁1号线增购项目上进行验证。该项目有一列车的牵引系统采用了三菱的全 SiC 功率器件FMF750DC-66A,测试时通过在此车上换装1台中车自主全 SiC 功率器件的牵引逆变器进行对比。

2.1 牵引系统工作原理

该地铁列车采用6辆编组,包括4辆动车和2辆拖车,每节动车配置1套牵引系统为4台牵引电机供电,主电路如图5所示。

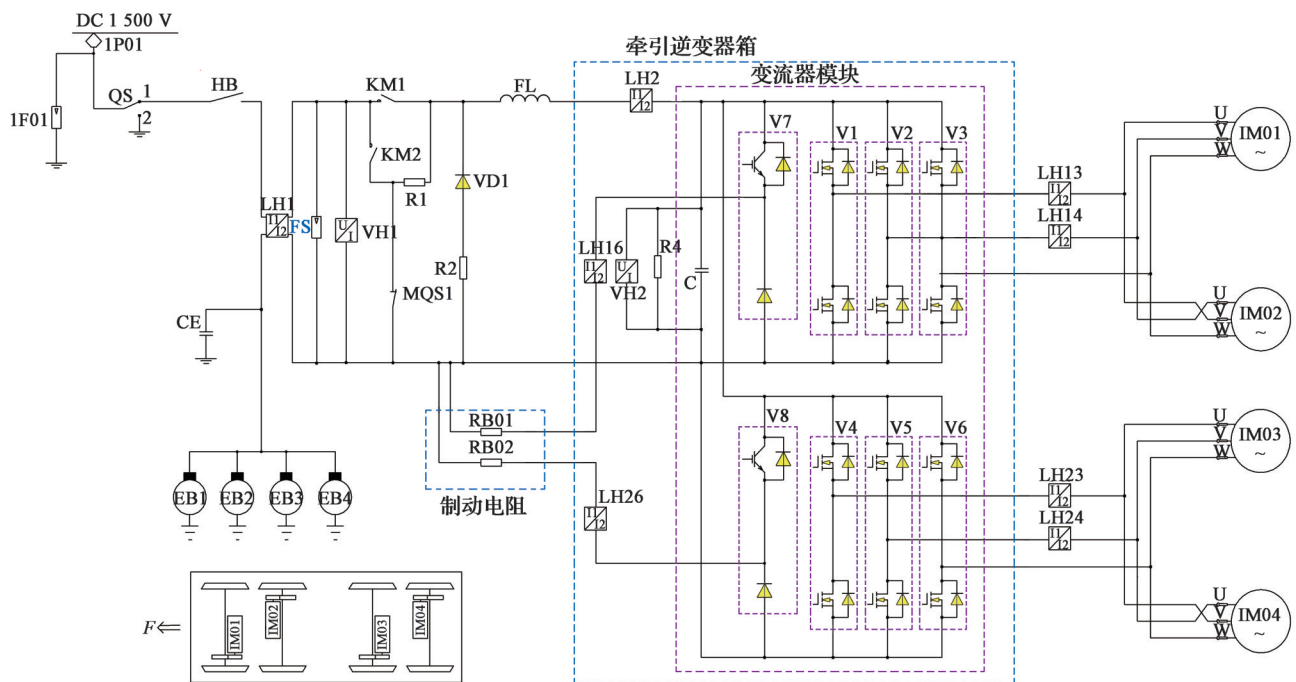


图5 SiC牵引系统主电路图

Fig. 5 Main circuit diagram of SiC traction system

图5中, QS为隔离开关,正常工作时将QS置于1点位,故障维修时将QS切换至2点位,以实现系统主回路接地,保障人身安全。V1~V6为本文研究的 SiC 功率器件,每个功率器件包含1个上管与1个下管,3个功率器件组成1台两电平三相逆变器,驱动2台并联的牵引电机。V7、V8为斩波桥臂管,与外部的制动电阻RB01或RB02组成过压斩波电路,因该电路的工作模式为短时间歇式,因此为节省成本,采用常规IGBT器件,并将其与下桥臂的续流二极管封装为1个器件。

当列车为牵引工况时,供电网提供的DC 1 500 V直流电经受电弓1P01、隔离开关QS、主断路器HB、短接接触器KM1、滤波电抗器FL、支撑电容器C给2个并联的逆变器供电,之后经DC/AC逆变控制输出2路VVVF三相交流电,每路分别驱动2台并联的牵引电机,实施列车走行控制。当列车为制动工况时,牵引电机的工作模式转换为发电机,此时逆变器工作于整流模式,可将牵引电机产生的电能整流反馈给直流电网,当直流电网无法吸收多余的电能时则可通过斩波

电路将多余的能量释放到制动电阻RB01、RB02上。

牵引系统的主要技术参数如表3所示。

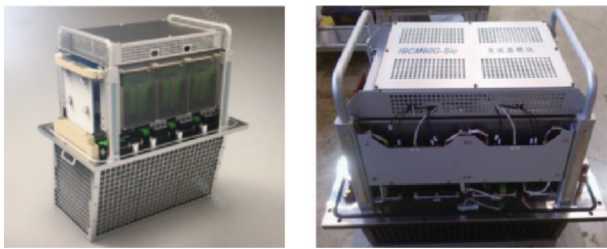
表3 牵引系统的主要技术参数

Table 3 Main technical parameters of the traction system

参数项目	参数值	备注
输入电压/V	DC 1 500	范围为 DC 1 000~1 800
输出电压/V	0~1 400	
输出频率/Hz	0~150	
开关频率/Hz	2 000	
额定输出电流/A	2×265	有效值
牵引最大输出电流/A	2×385	有效值
制动最大输出电流/A	2×535	有效值
逆变器额定效率	≥98.5%	
制动斩波最大电流/A	712	
控制方式	VVVF直接转矩控制	

2.2 SiC变流器模块研制

SiC变流器模块作为牵引系统的核心部件,共集成了6个SiC MOSFET桥臂管V1~V6、2个斩波IGBT桥臂管V7和V8、支撑电容器C,以及低感母排、走行风冷散热器、温度继电器、门极驱动单元、驱动电源、脉冲分配单元等部件,原理如图5所示,具体结构如图6(a)所示。具有同样电路功能,结构上采用2个变流器模块并联的原IGBT模块方案如图6(b)所示。对比可知,采用全SiC器件后变流器模块由2个减少为1个,重量减轻了35%,体积减小了50%。同时,与IGBT器件相比,采用SiC MOSFET可提升系统的开关频率,从而有效降低电机的谐波损耗,实现牵引系统节能降耗与电机中低速段的噪声降低^[13]。原IGBT牵引逆变器开关频率为500 Hz,采用全SiC器件后开关频率提升至2 000 Hz。



(a)SiC模块 (b)IGBT模块

图6 变流器模块实物图

Fig. 6 Photo of converter module

2021年,基于三菱的全SiC MOSFET器件(FMF750DC-66A),开展了全SiC器件与IGBT器件牵引系统地面试验、装车试验对比研究,具体如下:

①电机温升:地面研究试验表明,全SiC器件的高频化应用可有效降低输出谐波,电机温升明显改善,堵转温升降低60 K以上;装车运行测试结果表明,电机中低速温升降低40 K以上。

②电机噪声:在地面研究试验中开展了不同开关频率下全速度范围的电机噪声测试。结果表明,与开

关频率500 Hz相比,2 000 Hz开关频率可使电机中低速下的噪声降低5 dB以上,如图7所示。

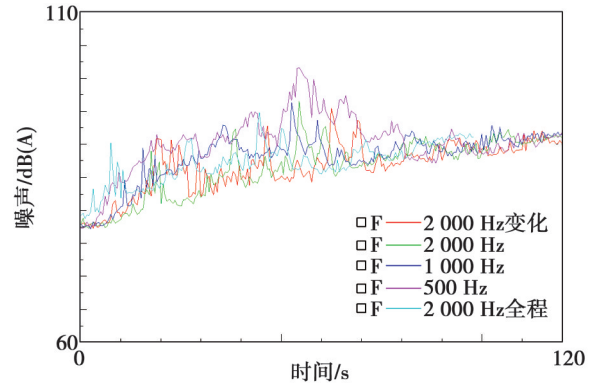


图7 不同开关频率下电机噪声数据对比

Fig. 7 Comparison of motor noise data at different switching frequencies

③牵引系统效率:在装车验证试验中,对采用两种不同器件的牵引系统效率进行了对比测试。结果表明,全SiC牵引系统全速度范围内组合效率(包含牵引电机)提升明显。

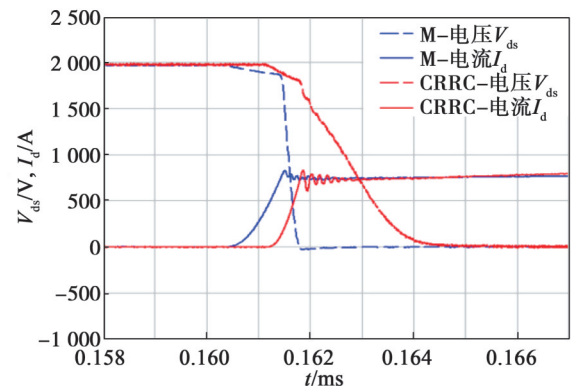
2.3 全SiC MOSFET应用研究

为更好评估器件的应用效果,针对中车与三菱的全SiC MOSFET装置进行了器件应用特性与温升的对比研究。

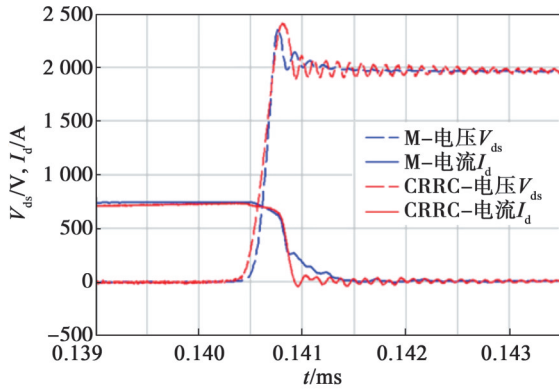
1) 器件应用特性研究

SiC器件具有较快的开关速度,在高速开关过程中容易引起电压及电流振荡,存在较大的电应力。通过对SiC器件参数调整和驱动参数优化,提高了器件在开关过程中的抗干扰能力。对器件开关波形进行了对比测试,结果如图8所示,红色曲线为中车器件(CRRC),蓝色曲线为三菱器件(M),试验电压2 000 V,在斩波电流范围内中车器件未出现明显门极振荡。

器件损耗与管压降对比如图9所示,其中中车器件的开关损耗 E_{tot} 总体高于三菱器件,在150 °C额定电流下高出40%,如图9(a)所示;中车器件的MOS通态压降 V_{DSON} 总体低于三菱器件,在150 °C额定电流下低9%,如图9(b)所示;中车器件的JBS二极管通态压降 V_{SD} 略低于三菱器件,如图9(c)所示。



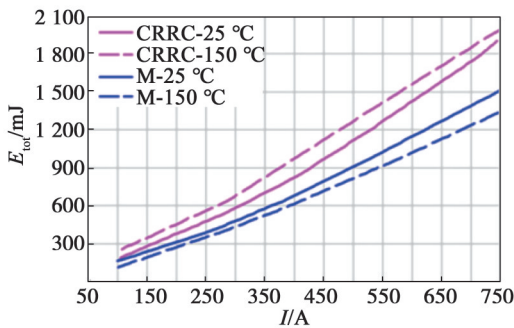
(a) CRRC器件与M器件开通波形对比(150 °C)



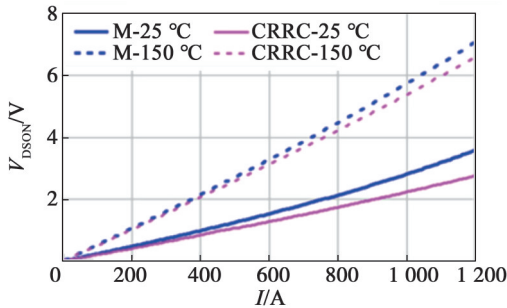
(b) CRRC 器件与 M 器件关断波形对比(150 °C)

图8 器件开关过程对比

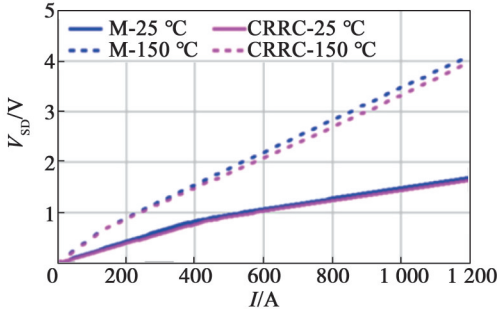
Fig. 8 Comparison of device switching process



(a) 动态总损耗对比



(b) MOS 通态压降对比



(c) 二极管通态压降对比

图9 器件损耗与管压降对比

Fig. 9 Comparison of device power loss and forward voltage drop

2) 变流器模块温升计算及试验

本列车牵引系统最恶劣的工况为最大制动工况,在该典型工况下计算器件的结温以验证其是否符合应用要求。首先确定结温的计算条件:直流电压为DC 1 800 V,额定输出电流为535 A rms,交流频率为35 Hz,开关频率为2 000 Hz,调制比为0.9,负载功率因数为

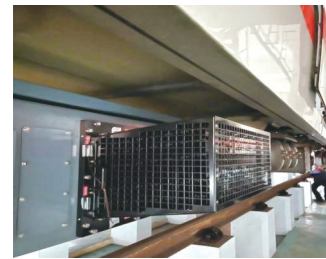
-0.86,台面温度为90 °C。分别计算得出三菱器件与中车器件的损耗与温升如表4所示。由表4可知,中车器件开关损耗略高,导通损耗略低,器件总损耗略高,为1 131 W;三菱器件总损耗为1 091 W;因中车器件采用热导率更高的AlN陶瓷衬板(三菱器件采用Si₃N₄陶瓷衬板),热阻更低,因此结温比三菱器件更低。

表4 器件损耗及温升对比

Table 4 Comparison of device loss and temperature rise

器件厂家	MOS 开关损耗/W	MOS 通态损耗/W	SBD 反向恢复损耗/W	SBD 导通损耗/W	器件总损耗/W	MOS 最高结温/°C	SBD 最大结温/°C
三菱	567	120	12	392	1 091	144.5	147.8
中车	657	111	2	361	1 131	140.4	138.5

中车全SiC器件装车后开展了变流器模块台面温度测试,将测试情况与相同工况下原IGBT变流器模块的温升进行了对比,实物如图10所示。虽然全SiC器件的开关频率更高,为2 000 Hz,IGBT器件的开关频率为500 Hz,但多种工况下的测试数据显示,全SiC器件的散热器台面温升更小,平均温升约小4 K。



(a) 中车全SiC变流器



(b) 原IGBT变流器

图10 装车散热器台面温升测试

Fig. 10 Surface temperature rise testing of vehicle-mounted heat sink

3 结论

中车基于第二代平面栅技术推出的3 300 V 高压SiC MOSFET芯片,封装采用了国际主流的XHP结构,为降低热阻与提升器件可靠性,采用了热导率更高的AlN陶瓷衬板与纳米银烧结技术,实现器件额定电流750 A,达到市场主流产品性能。

与常规IGBT器件相比,采用全SiC功率器件的牵引系统具有明显的应用优势:变流器模块的重量减轻35%,体积减小50%;系统开关频率由原来的500 Hz

提升到2 000 Hz, 且有效降低了器件损耗, 使散热器台面温度更低; 由于开关频率提升, 变流器输出谐波减小, 电机损耗、温升与噪声得到明显改善, 系统全速度范围内组合效率提升明显。

除应用于轨道交通领域外, 本文研究的全SiC器件还可推广应用于电网、工业变频等其他领域。

参考文献:

- [1] HAMADA K, HINO S, MIURA N, et al. 3.3 kV/1 500 A power modules for the world's first all-SiC traction inverter [J]. Japanese journal of applied physics, 2015, 54(4S): 04DP07.
- [2] SOLTAU N, WIESNER E, HATORI K, et al. 3.3 kV full SiC MOSFETs-towards high-performance traction inverters [EB/OL]. (2018-01-13) [2024-04-26]. https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/powerdevices/papers/bp_2018_01_p22-25.pdf.
- [3] LIU Guoyou, WU Yibo, LI Kongjing, et al. Development of high power SiC devices for rail traction power systems[J]. Journal of crystal growth, 2019, 507: 442-452.
- [4] 李诚瞻, 周才能, 秦光远, 等. 轨道交通碳化硅器件研究进展[J]. 电子与封装, 2022, 22(6): 13-26.
LI Chengzhan, ZHOU Caineng, QIN Guangyuan, et al. Recent advances in SiC devices for railway traction[J]. Electronics and packaging, 2022, 22(6): 13-26.
- [5] 刘可安, 李诚瞻, 李彦涌, 等. SiC器件技术特点及其在轨道交通中的应用[J]. 大功率变流技术, 2016(5): 13-17.
LIU Kean, LI Chengzhan, LI Yanyong, et al. Characteristics of SiC device and its application in railway traction[J]. High power converter technology, 2016(5): 13-17.
- [6] NAKANO Y, MUKAI T, NAKAMURA R, et al. 4H-SiC trench metal oxide semiconductor field effect transistors with low on-resistance[J]. Japanese journal of applied physics, 2009, 48(2S): 04C100.
- [7] WANG Ying, TIAN Kai, HAO Yue, et al. 4H-SiC step trench gate power metal-oxide-semiconductor field-effect transistor [J]. IEEE electron device letters, 2016, 37(5): 633-635.
- [8] SONG Qingwen, YANG Shuai, TANG Guannan, et al. 4H-SiC trench MOSFET with L-shaped gate[J]. IEEE electron device letters, 2016, 37(4): 463-466.
- [9] KITAI H, YAMAGUCHI T, HOZUMI Y, et al. A superior 15 kV SiC MOSFET with current spreading layer for high-frequency applications[J]. Japanese journal of applied physics, 2019, 58(SB): SBB16.
- [10] ZHANG Q J, WANG Gangyao, DOAN H, et al. Latest results on 1 200 V 4H-SiC CIMOSFETs with Rsp, on of 3.9 mΩ·cm² at 150 °C[C]/2015 IEEE 27th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Hong Kong: IEEE, 2015: 89-92.
- [11] AMPATH M, MORISETTE D T, COOPER J A. Comparison of single-and double-trench UMOSFETs in 4H-SiC[J]. Materials science forum, 2018, 924: 752-755.
- [12] 韩忠霖, 白云, 陈宏, 等. 平面栅SiC MOSFET设计研究[J]. 电源学报, 2020, 18(4): 4-9.
HAN Zhonglin, BAI Yun, CHEN Hong, et al. Investigation on design of SiC planar gate MOSFET[J]. Journal of power supply, 2020, 18(4): 4-9.
- [13] 杨涛, 窦泽春, 朱武, 等. 基于SiC MOSFET的牵引逆变器在轨道交通中的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 28-33.
YANG Tao, DOU Zechun, ZHU Wu, et al. Application research on SiC MOSFET inverter in rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2020(1): 28-33.

Research on the selection and application of traction-grade all-SiC power devices for rail transit

CHEN Yanping¹, LI Chengzhan², WANG Zhongbao¹, XIN Lanyuan¹, ZHAI Long², LI Hua³

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

3. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: CRRC Corporation Limited (CRRC) has released a 3300 V high-voltage all-silicon carbide (SiC) power device product based on planar gate technology, targeting applications in rail transit and other fields. This paper provides a detailed introduction to the selection of chip types, key processes and technologies, as well as device packaging techniques, such as low inductance design, high temperature reliability, and thermal design. It also presents reliability evaluations and research focused on on-board applications for rail transit. The research results demonstrate that the launched product aligns with mainstream products on the market in performance, and exhibit obvious advantages over IGBT devices in applications. The product can significantly reduce the weight and volume of traction converters, effectively lower system losses, improve system efficiency, and decrease motor temperature rise and noise.

Keywords: all-silicon carbide devices; rail transit; traction system; planar gate; packaging technology