



全SiC MOSFET器件在轨道交通 变流装置中的应用研究

徐绍龙, 胡云卿, 窦泽春, 李 华, 彭 程, 万伟伟
(株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 在全球气候变化与能源结构转型的背景下, 轨道交通系统低碳化发展已成为国家战略核心议题。我国《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》等政策明确要求轨道交通装备向电气化、智能化升级, 而全SiC MOSFET器件凭借其优异性能成为突破能效瓶颈的关键技术。文章系统分析了SiC器件在轨道交通牵引及辅助变流系统中的应用优势与挑战。相较于传统Si IGBT, SiC器件通过导通压降降低、高频及耐高温特性, 显著提升系统能效并实现装置轻量化。国内深圳地铁等项目验证了SiC系统在谐波抑制、动态响应优化及热管理简化方面的综合效益。然而, SiC器件的高温兼容性、驱动设计、电磁干扰及绝缘老化等问题仍需突破。文章可为国家轨道交通绿色发展战略提供技术路径与工程化参考。

关键词: 全SiC MOSFET器件; 变流器; 电磁兼容; 噪声; 轨道交通

中图分类号: U264.3⁺7; TN304.2⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-128X(2025)03-0001-10

0 引言

在全球气候变化与能源结构转型的双重压力下, 绿色低碳已成为现代轨道交通发展的核心命题。我国近年来密集出台的顶层政策文件, 从战略高度明确了轨道交通领域节能减排的技术路径与实施目标。2022年国务院发布的《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[1]明确提出, 到2025年交通运输二氧化碳排放强度需降低5%, 要求轨道交通装备全面向电气化、智能化方向升级。交通运输部配套制定的《绿色交通“十四五”发展规划》^[2]进一步细化技术指标, 强调在5年内轨道交通系统能耗强度需较2020年下降10%。中共中央、国务院印发的《交通强国建设纲要》^[3]更将“绿色高效”列为发展主线, 提出构建全生命周期碳排放管控体系, 要求关键设备能效水平达到国际先进标准。这一系列政策构建起多维度的约束性框架, 凸显出轨道交通动力系统革新与能源利用效率

提升的紧迫性。

国际社会在轨道交通低碳转型领域已形成系统性的技术布局。欧盟通过“可持续与智能交通战略”规划, 将SiC MOSFET器件列为轨道交通电气化重点突破技术, 其中德国西门子研发的Velaro Novo高速列车采用全SiC牵引变流器、辅助变流器, 实现牵引系统能耗降低5%^[4]; 日本《2050年碳中和绿色增长战略》推动新干线列车应用全SiC MOSFET器件, 实现牵引系统变流装置的小型轻量化^[5-6]。国外应用经验表明, 以宽禁带半导体为核心的新型电力电子技术已成为轨道交通能效瓶颈的关键突破口。

在此背景下, SiC功率器件的产业化应用与轨道交通绿色发展战略深度耦合。相较于传统Si材料, SiC材料具备3倍导热率、10倍击穿场强等物理特性优势, 可使变流器开关损耗降低、系统体积大幅减小, 直接对应《交通领域科技创新中长期发展规划纲要(2021—2035年)》^[7]提出的“高效能量转换”与“轻量化集成”技术目标。当前我国轨道交通装备中SiC MOSFET

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4300103)

通信作者: 徐绍龙, 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事牵引变流系统控制技术的研究与开发工作; E-mail: xusl@csrzc.com

引用格式: 徐绍龙, 胡云卿, 窦泽春, 等. 全SiC MOSFET器件在轨道交通变流装置中的应用研究[J]. 机车电传动, 2025(3): 1-10. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.001.

Citation: XU Shaolong, HU Yunqing, DOU Zechun, et al. Research on the application of all-SiC MOSFET devices in converters for rail transit[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 1-10. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.001.

器件渗透率不足5%，核心模块仍以进口为主，这与规划纲要^[7]强调的“关键核心技术自主可控”要求存在显著差距。因此，开展SiC MOSFET器件在轨道交通场景下的应用研究，不仅关乎能源利用效率提升的技术可行性，而且是构建自主产业链的战略需要。

本文基于国家战略需求与国际技术趋势，系统分析SiC MOSFET功率器件在牵引、辅助变流装置等核心系统中应用的关键技术及特性，为推进SiC MOSFET器件在轨道交通牵引变流装备中的工程化提供支撑。

1 SiC器件特性及应用优势

1.1 SiC器件特性

与Si材料相比，SiC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高的热导率，这意味着SiC材料的器件工作温度更高、能承受的阻断电压更大、导通电压更低^[8-9]。SiC材料与Si材料的性能对比如图1所示。用SiC衬底材料来制备单极型器件，可提高器件的耐压至1.2~6.5 kV，覆盖了以Si IGBT为主流的双极型器件的电压范围，从而在同等电压下可以用开关速度更快、损耗更小的单极型器件来替代双极型Si IGBT^[10-11]。

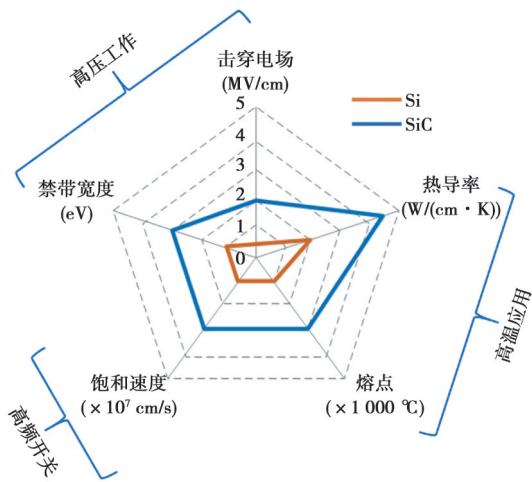


图1 SiC材料与Si材料的性能对比

Fig. 1 Comparison of properties between SiC and Si

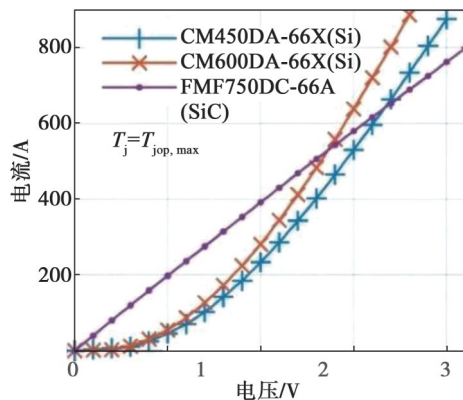
SiC MOSFET作为宽禁带半导体器件，具有高热率、耐高温、高阻断电压，以及抗宇宙射线能力强的特点，能提升器件的功率密度、降低损耗、提高开关频率，从而能减轻系统重量和减小体积、提升能效。

以日本三菱公司的3 300 V/750 A全SiC MOSFET器件FMF750DC-66A和3 300 V/600 A Si IGBT器件CM600DA-66X为例进行对比，全SiC MOSFET具有以下特点：

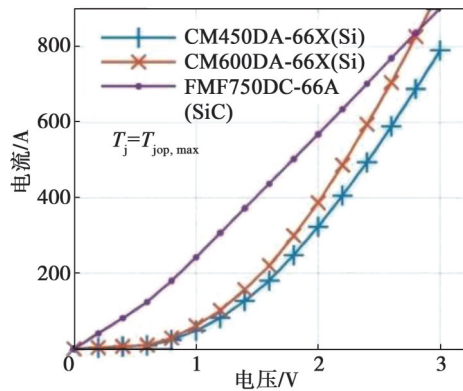
- ① 工作结温：SiC MOSFET器件的工作结温从150℃提升至175℃。
- ② 正向导通压降：SiC MOSFET的V-I特性曲线呈线性关系，而Si IGBT呈指数关系，其小电流下的导通

压降比双极型Si IGBT要低很多[见图2(a)]。

③ 反向导通压降：与Si IGBT模块中的续流二极管相比，如果二极管(SBD)和MOSFET都导通反向电流(同步整流模式)，全SiC MOSFET器件的反向压降也相对小很多[见图2(b)]。



(a) 正向导通特性对比



(b) 反向导通特性对比

图2 全SiC MOSFET模块与Si IGBT模块导通特性对比

Fig. 2 Comparison of on-state characteristics between all-SiC MOSFET and Si IGBT modules

④ 开关损耗：Si模块所基于的Si IGBT和Si FRD均为双极型器件，与之相比，全SiC模块所基于的SiC MOSFET和SiC SBD均为单极型器件，由于全SiC模块大幅减小了拖尾电流和反向恢复电流，因此具有极低的开关损耗，如图3所示。相比传统的Si模块，SiC模

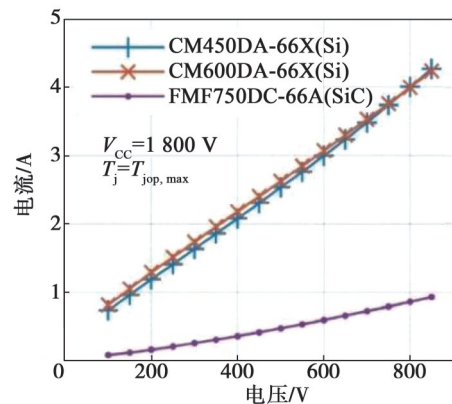


图3 全SiC MOSFET模块与Si IGBT模块的开关损耗对比

Fig. 3 Comparison of switching loss between all-SiC MOSFET and Si IGBT modules

块可以使开关损耗降低80%~90%。且随着结温的变化, SiC器件的开关速度和开关损耗的变化幅度不大, 说明SiC器件更适合高结温的运行工况。

⑤ 短路能力: 由于SiC MOSFET和Si IGBT存在输出特性上的差异, SiC MOSFET具有更高的饱和电流, 因此SiC MOSFET的短路耐受时间远短于Si IGBT的10 μ s。

⑥ 阈值电压: SiC MOSFET器件的阈值电压通常低于4 V, 以2 V左右为主, 而Si IGBT的阈值电压通常在6~7 V, 因此SiC MOSFET相较于Si IGBT更容易开通。

1.2 应用优势

1.2.1 能效提升

SiC MOSFET器件在轨道交通牵引与辅助变流器中应用的最显著优势体现在能效提升。相比传统Si IGBT器件, SiC MOSFET的禁带宽度达3.26 eV, 这使其具有超低导通电阻和近乎理想的开关特性, 这种物理特性在系统运行中转化为直接的节能效益。

SiC MOSFET器件的导通压降显著低于Si IGBT器件。以深圳地铁1号线搭载的全SiC牵引变流器为例, 在额定工况下采用3 300 V/750 A SiC MOSFET模块后, 变流器整体效率提升至98%以上, 比传统Si IGBT牵引系统综合能耗降低10%以上^[12]。

利用SiC MOSFET器件的高频特性可大幅降低系统的谐波, 有利于提升系统能效。采用基于SiC MOSFET器件的轨道车辆一体化变流器系统在额定功率3.25 MVA运行时, 输入电流总谐波畸变率(THD)低于1%, 功率因数大于0.99, 输出电压总谐波畸变率THD低于3.5%, 系统效率大于97.5%, 相比传统牵引传动系统效率提高3%~5%^[13]。

1.2.2 轻量化

SiC MOSFET器件的应用推动了轨道交通牵引辅助变流装置的轻量化, 核心在于SiC MOSFET器件的高频开关、低导通/开关损耗及优异的高温特性。高频开关能力直接减小了装置中体积重量占比最大的无源部件(滤波电感、电容及变压器等)的尺寸、重量; 同时, SiC MOSFET器件的低损耗减少了发热量, 结合其所具有的耐受更高结温的特性, 使得变流器装置对冷却系统的散热需求更小、重量更轻。功率模块本身也因SiC MOSFET器件的高功率密度而更紧凑。

这些减重效应协同作用, 最终使整个变流装置的重量和体积较Si IGBT方案减小, 在提升效率和功率密度的同时, 为车辆整体减重、节省空间、降低能耗和降低维护成本提供了关键支撑。以珠海有轨电车为例, 其搭载的SiC辅助变流系统设备体积减小了50%、重量减轻了56%^[14]; 深圳地铁1号线的全SiC牵引变流器通过采用3 300 V SiC模块, 功率密度提升了70%。

1.2.3 舒适性提升

轨道交通牵引变流器采用SiC MOSFET器件后, 能显著降低牵引电机的运行噪声, 从而大幅提升乘客的乘坐舒适性。这主要源于SiC MOSFET器件优秀的高频开关特性。相较于传统Si IGBT器件, SiC MOSFET器件允许工作的开关频率可提升3~6倍。这种高频化带来了多重降噪效果: 首先, 从变流器到电机的电流波形质量得到极大提升, 电流谐波含量显著减少, 电机内部由低次谐波电流引发的、人耳敏感的电磁力波动被有效抑制; 其次, 更干净的电流波形减少了电机铁芯和绕组中的附加损耗与振动, 进一步削弱了噪声源噪声。其综合效应是牵引电机的整体噪声声压级明显下降、噪声频谱更平滑, 变流装置损耗降低、冷却风机噪声下降, 有效降低了车厢内的噪声, 提升了旅客长时间旅行的舒适感。以某地铁列车为例, 采用SiC MOSFET器件的牵引系统在地面试验中, 其电机中低速噪声较传统Si IGBT系统平均下降了4~5 dB^[15]。

2 国内外轨道交通变流装置应用现状

2.1 牵引变流器

截至目前全球范围内已有多家轨道交通牵引变流装备制造厂商针对基于全SiC MOSFET器件的牵引变流装置开展了研究并实现了装车示范应用。

2020年, 三菱电机公司宣布已在日本中央铁路公司(JR-Central)的N700S新干线列车上完成全SiC电源模块的铁路车辆牵引变流器系统(如图4所示)安装, 据报道, 这是首个安装在高速列车上的全SiC牵引系统, 与现有广泛应用的牵引系统相比, 新逆变器尺寸减小55%, 重量减轻35%^[16]。



图4 三菱电机N700S走行风冷SiC牵引变流器

Fig. 4 Mitsubishi Electric N700S running air-cooled SiC traction converter

2017年, 加拿大Bombardier公司在位于瑞典韦斯特罗斯的工程中心设计制造和测试了配备SiC的Mitrac TC1500牵引变流器原型机。从2017年12月到2018年3月, Bombardier公司将该牵引变流器装载在斯德哥尔摩地铁Green线路的C20型车上进行行驶测试, 结果显示推进系统的能耗减少35%, 噪声排放降低19 dB, 尺寸减小51% (如图5所示), 重量减轻22%^[17]。

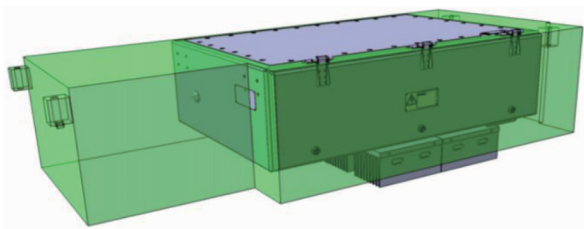


图5 Bombardier SiC牵引变流器体积减小对比示意
(绿色透明为Si IGBT变流器)

Fig. 5 Comparative illustration of volume reduction in Bombardier SiC traction converter (with the green transparent part representing Si IGBT converter)

2020年,株洲中车时代电气股份有限公司研制的城轨SiC牵引变流器在深圳地铁装车应用,相较于原车Si IGBT牵引变流器, SiC牵引变流器体积下降30%、重量下降40%。经线路能耗试验对比,搭载SiC牵引系统的车辆较采用Si IGBT牵引系统的车辆节能10%以上。SiC变流器外形及装车现场情况分别如图6和图7所示。



图6 城轨SiC牵引变流器

Fig. 6 SiC traction converter for urban rail transit



图7 城轨SiC牵引变流器装车现场

Fig. 7 Vehicle-mounted SiC traction converter for urban rail transit

2023年,株洲中车时代电气股份有限公司研制的城际/市域走行风冷SiC牵引变流器在温州S2线装车应用,相较于原来的Si IGBT牵引变流器, SiC牵引变流器冷却系统重量下降34%,效率从97.9%提升至98.7%,噪声下降14 dB。经线路能耗试验对比,采用SiC牵引系统的车辆较采用Si IGBT牵引系统的车辆节能10%以上。变流器外形及装车现场情况分别如图8和图9所示。

2.2 辅助变流器

截至目前全球范围内已有多家轨道交通辅助变流装备制造制造商推出了基于全SiC MOSFET器件的辅助变流装置并批量装车应用。

2018年,西门子完成全SiC辅助变流器样机研制,并于2019年正式推向市场,具体如图10和图11所示。



图8 城际/市域动车走行风冷SiC牵引变流器

Fig. 8 Running air-cooled SiC traction converter for EMUs on intercity/suburban railways



图9 城际/市域动车走行风冷SiC牵引变流器装车现场

Fig. 9 Vehicle-mounted running air-cooled SiC traction converter for EMUs on intercity/suburban railways

与Si IGBT辅助变流器相比,其重量降低32%,效率从93%提升至96%,功率密度提升40%^[18]。该产品已应用于维也纳、伦敦、高雄、慕尼黑、悉尼、曼谷等多个城市的地铁和市域铁路项目,累计批量超过250列。

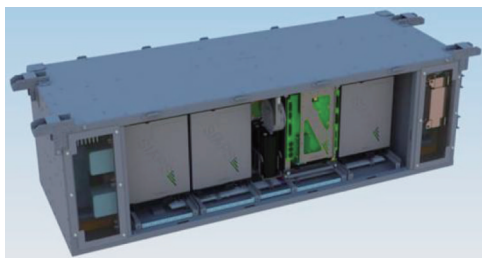


图10 西门子SiC辅助变流器(正面)

Fig. 10 Siemens SiC auxiliary converter - front



图11 西门子SiC辅助变流器(背面)

Fig. 11 Siemens SiC auxiliary converter - back

2023年,株洲中车时代电气股份有限公司推出城轨SiC辅助变流器产品平台,实现产品高可维护性、低损耗、高效率、高功率密度的目标,具体如图12和图13所示。相比Si IGBT辅助变流器, SiC辅助变流器的体积和重量降低35%以上,功率密度提升59%,损耗降低30%,效率从94%提升至96%。

2023年至今,该产品已在广州地铁11号和12号线科研车装车考核,运行情况良好;2024年至今,已在深圳地铁5号线和上海地铁3号线实现批量装车,并获

得上海地铁23号线批量订单, 2026年将批量交付。



图 12 城轨 SiC 辅助变流器

Fig. 12 SiC auxiliary converter for urban rail transit



图 13 城轨 SiC 辅助变流器装车现场

Fig. 13 Vehicle-mounted SiC auxiliary converter for urban rail transit

3 SiC变流装置设计关键技术

3.1 驱动技术

随着 SiC MOSFET 器件的应用, 传统 Si IGBT 驱动技术已不再能满足应用需求。在电路架构上, SiC MOSFET 器件驱动与 Si IGBT 器件驱动并无明显差异, 都可以分为高频隔离电源、信号隔离电路、驱动级电路与保护辅助电路4个功能子电路, 但 SiC MOSFET 器件对各个子电路的要求更高。对高频隔离电源来说, SiC MOSFET 器件对门极电压的需求更加多样化, 且对门极电压更加敏感, 需要隔离电源具有更低的负载调整率与更灵活的调压能力; 此外, SiC MOSFET 器件更快的开关速度会在系统中产生更强的共模干扰, 隔离电源需要对结构进行优化, 以实现通过更低的隔离电容来抑制共模噪声。Si IGBT 的开关速度一般在 20 V/ns 以下, 而 SiC MOSFET 器件具备在 50 V/ns 以上开关动作的潜力, 这对信号隔离电路共模暂态抗扰度提出了更高的要求。驱动级电路在不同应用中并无太大差异, 但为进一步提高 SiC MOSFET 器件的开关性能, 分级开关策略也具有潜在的研究价值, 有望实现开关过压与开关损耗的更好平衡。总之, 在 SiC MOSFET 器件应用中, 驱动需要有更低的隔离寄生参数、更灵活的参数配置能力和快速短路保护功能。

3.2 控制技术

SiC 变流装置的控制技术需充分发挥 SiC MOSFET 器件高频化、低损耗特性, 同时兼顾轨道交通全速域

复杂场景运行需求, 控制的核心在于实现调制方式、额定开关频率以及控制算法的多维度协同优化^[19]。

传统 Si IGBT 器件受开关损耗与散热限制, 其最大开关频率一般不超过 500 Hz。因此, 基于 Si IGBT 器件的牵引变流装置通常采用了“异步+同步+方波”的多模式调制方式, 具体如图 14 所示。对采用 SiC MOSFET 器件的牵引变流装置而言, 需充分考虑其高频化特性, 对调制方式进行针对性优化。较为典型的 SiC 牵引变流装置调制方法为高频-低频混合型多模式 PWM 调制方法 (如图 15 所示), 该方法根据电机不同转速区域采用不同调制方式: 在 30% 额定转速以下的低速段, 充分利用 SiC MOSFET 器件的高频特性, 基于系统损耗优化原则对逆变器额定开关频率进行优化设计, 采用高频空间矢量脉宽调制 (SVPWM), 降低电机电流总谐波失真率; 在 30%~50% 额定转速的中高速衔接段, 采取电流谐波最小 PWM (CHMPWM) 优化同步调制, 实现电机电流的谐波抑制; 在 50% 额定转速以上的高速段, 采用优化 3 脉波调制模式代替传统方波调制, 在提升电机电压利用率的同时抑制低次电流谐波, 改善电流品质, 其电机电压利用率达到 97% 以上。

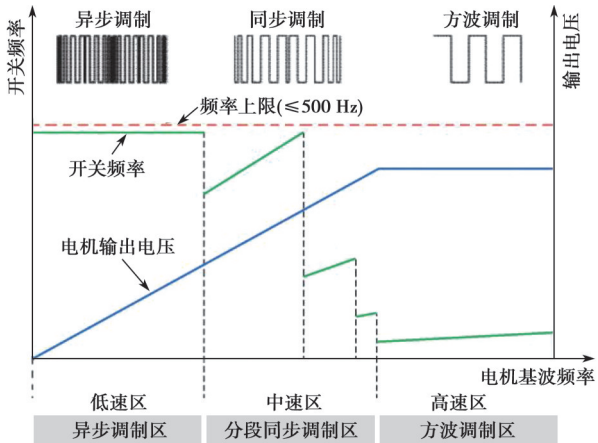


图 14 典型 IGBT 牵引变流装置调制方式

Fig. 14 Modulation method of typical IGBT traction converter

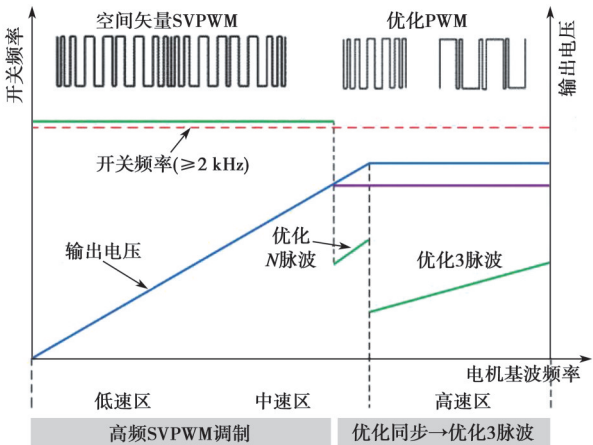


图 15 典型 SiC 牵引变流装置调制方式

Fig. 15 Modulation method of typical SiC traction converter

在额定开关频率优化设计方面，额定频率并非越高越好，虽然电机损耗随频率提高而减小，但是变流器损耗随频率提高而增加。以城轨牵引系统为例，将SiC牵引变流装置的额定开关频率设定在1.5~2.5 kHz内可取得全局较优的效率水平。

随着器件开关频率的提升，精细控制将带来更多的可能。如为适配上文所述的高频-低频混合型多模式PWM调制方法，可采用牵引电机多模态定子磁链轨迹闭环控制方法：在高频异步调制模式下采用圆形定子磁链控制，在同步PWM调制模式下采用多边形定子磁链轨迹跟踪控制，且在不同模式切换时，通过对定子磁链的特殊处理，实现电机电流的平滑过渡。此外，在SiC MOSFET器件高频特性加持下，可进一步释放模型预测控制MPC的控制潜力：提高预测精度与控制带宽，增强谐波抑制能力，优化损耗平衡与鲁棒性，简化复杂工况约束处理。

当前，SiC变流装置的控制技术仍存在难题，比如在宽速域运行中，谐波抑制与损耗平衡存在矛盾，低速高频化虽然降低了电机损耗，但是会使变流器开关损耗增加；高频开关还会带来较强的电磁干扰，影响系统兼容性；在极端工况下，控制精度也会受到影响。未来，该领域的研究可围绕智能化调制策略、多物理场协同控制以及模块化控制架构等方向开展，以进一步提升SiC变流装置在轨道交通中的应用性能。

3.3 低感设计技术

在高压SiC MOSFET器件功率模块换流回路中，低感设计是保障系统高效稳定运行的核心需求。SiC MOSFET器件具有极高的开关速度，其开关应力是Si IGBT器件的数倍至10倍，回路中若存在较高杂散电感，会在开关瞬间产生较大的电压尖峰，可能超出器件耐压极限从而导致器件击穿失效。同时，高电感会加剧开关损耗，降低功率模块效率，还可能引发电磁干扰，影响周边设备正常工作。此外，快速开关产生的振荡会增加器件应力，缩短器件使用寿命。因此，通过低感设计抑制电压尖峰、降低损耗和应力，是充分发挥SiC MOSFET器件高频、高效优势的前提。

换流回路中低感母排需通过结构优化最大限度降低杂散电感，其关键在于实现电流路径的紧密耦合与对称布局。采用叠层结构将正、负母排平行靠近布置，利用磁场相互抵消减少回路电感，并通过铜排宽度与厚度的合理匹配，在实现满足载流能力的同时缩短电流路径。母排与器件的连接需采用短距、多触点方式，减少搭接处的寄生电感。此外，需考虑母排的散热性能，避免因高频集肤效应导致局部过热，同时通过绝缘材料选型，平衡绝缘强度与电感控制，确保在高压环境下的可靠性。

除低感母排外，支撑电容同样是换流回路低感设

计中不容忽视的关键部件，支撑电容选型需兼顾低等效串联电感（ESL）和高纹波电流承受能力。选型时优先选择多芯子并联的薄膜电容或电解电容，通过芯子间的电流分流降低ESL，同时提升高频纹波处理能力。电容与母排的连接应采用短引线或直接焊接，减少引出端电感，同时在布局上需紧贴开关器件，缩短换流回路路径。

3.4 热管理技术

SiC MOSFET器件因半导体材料迭代更新，其损耗与器件热阻与传统Si基器件相比具有明显差异，导致热管理技术方案也随之变化。

静态损耗方面，当前轨道交通所适用的SiC开关器件均使用了MOSFET结构，器件开通阈值电压很低，但随着电流增大，器件正向导通压降会迅速上升，因此，在较低电流利用率下，SiC MOSFET器件导通损耗优于Si IGBT器件，而随着电流利用率的增大，SiC MOSFET器件可能超过Si IGBT器件。动态损耗方面，使用MOSFET作为开关器件的新一代SiC器件，动态损耗相较传统的Si IGBT器件具有数量级降低的优势，成为SiC MOSFET器件支持更高频应用的基础。

在器件热阻方面，因SiC芯片较Si基芯片能够承载更大的电流密度，相同电流规格的器件所需要的芯片数量更少、面积更小，因而器件封装功率密度也能得到提升。SiC MOSFET器件封装的单位面积通流能力比传统Si IGBT器件提升了40%~100%，相同功率等级器件，SiC MOSFET器件具有更高的热阻。相同功率能力的SiC MOSFET器件与Si IGBT器件典型工况下的特性参数对比如表1所示。由表1数据对比可知，在相同工况与控制条件下，SiC MOSFET器件损耗、热密度、结-壳温升均显著优于传统Si IGBT器件。在SiC MOSFET器件频率提升后，其总损耗仍有一定优势，但器件热流密度与结壳温升均高于传统Si IGBT器件。在热管理方面，SiC MOSFET器件呈现高效率（低热量）、高热流、高热阻、高许用结温的特性。走行风冷、小型化液冷可作为轨道交通领域SiC变流器的优选冷却方式。

表1 相同工况与控制条件下，SiC MOSFET器件与Si IGBT器件的损耗、基板热流密度和结-壳温升对比

Table 1 Comparison of loss, substrate heat flux density, and junction-to-case temperature rise between SiC MOSFET and Si IGBT devices under identical operating conditions and control conditions

器件与开关频率	器件损耗/W	基板热流密度/(W·cm ⁻²)	结-壳温升/K
Si@500 Hz	1 479.0	5.5	11.2
SiC@500 Hz	554.6	4.1	8.8
SiC@1 000 Hz	756.3	5.4	12.0

3.5 电磁兼容技术

SiC MOSFET器件凭借高开关速度、低导通损耗与

高温耐受性, 显著提升了牵引系统的功率密度和效率, 但快速开关特性带来了严峻的电磁干扰 (EMI) 挑战。

SiC MOSFET 器件与 Si IGBT 器件 du/dt 对比如表 2 所示, Si IGBT 和 SiC MOSFET 三相变流器共模电压源频谱对比如图 16 所示。由图 16 可知, 相较于某地铁 Si IGBT 牵引变流器, 基于 SiC MOSFET 器件的变流器在低频段 (10~3 MHz) 的共模电压恶化了 5 dB 左右; 在高频段 (>3 MHz) 的共模电压恶化了 20 dB 左右。共模电压增大将引起寄生电容耦合电流的显著增大, 这会导致共模噪声电流的明显增大; 高频分量 (>3 MHz) 增加会增强通过母排和器件的辐射, 这将对敏感电路产生干扰。

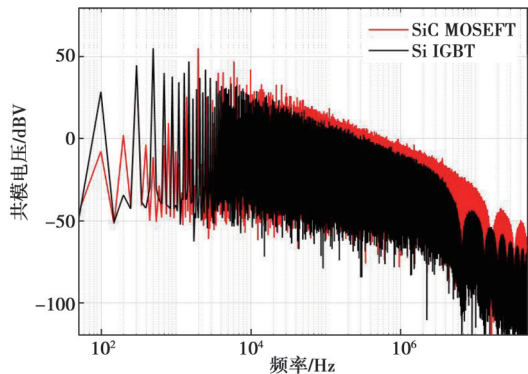


图 16 Si IGBT 和 SiC MOSFET 三相变流器共模电压源频谱对比

Fig. 16 Comparison of common-mode voltage source spectra between Si IGBT and SiC MOSFET three-phase converters

表 2 SiC MOSFET 器件与 Si IGBT 器件 du/dt 对比
Table 2 Comparison of du/dt between SiC MOSFET and Si IGBT devices

器件	中间电压/V	典型 $du/dt/(kV \cdot \mu s^{-1})$	开关频率/Hz
Si IGBT	1 500	4	500
SiC MOSFET	1 500	10	2 000

为优化 SiC 变流器 EMC 性能, 可采用的 EMC 设计技术包括高频振铃抑制技术、强弱电隔离设计技术、滤波匹配优化技术等。

3.5.1 高频振铃抑制技术

SiC MOSFET 器件在开关过程中, 其结电容、器件寄生电感及负载阻抗会形成谐振回路, 这将导致功率器件上存在高频振铃 (典型频率为 20~100 MHz)。振铃叠加在开关波形上会产生高频谐波, 导致波形恶化。高频振铃通过电源线耦合, 还会导致 150 kHz~30.0 MHz 频段传导发射超标。通过最小化功率回路面积、叠层母排设计、针对振铃频率设计局部吸收网络等措施可以有效抑制振铃。

3.5.2 强弱电隔离设计技术

主电路高 di/dt 回路产生的磁场容易耦合至驱动信号线, 引发误开通/关断; 功率器件高 du/dt 也可能通过

传导路径耦合至驱动电源, 进而干扰与其相连的控制电路, 因此需针对性地设计传导和辐射隔离方案。传导路径的隔离方法有: 采用集成隔离功能的 SiC MOSFET 器件专用驱动 IC、加强驱动电源的 EMI 滤波; 辐射路径的隔离方法有: 设计屏蔽腔体使强弱电的电路分区布置、敏感信号线使用屏蔽双绞电缆等, 优化控制电路的电磁环境。

3.5.3 滤波匹配优化技术

SiC MOSFET 器件的应用使高频干扰进一步增强, 需重点关注高频段的滤波性能。高频段 EMI 滤波器内部寄生参数复杂, 电容和电感之间的耦合参数、输入输出回路之间的耦合参数 (如图 17 所示) 都限制了滤波器的高频性能。通过对滤波器内部的耦合参数进行优化和控制, 可以显著提升滤波器的高频性能。

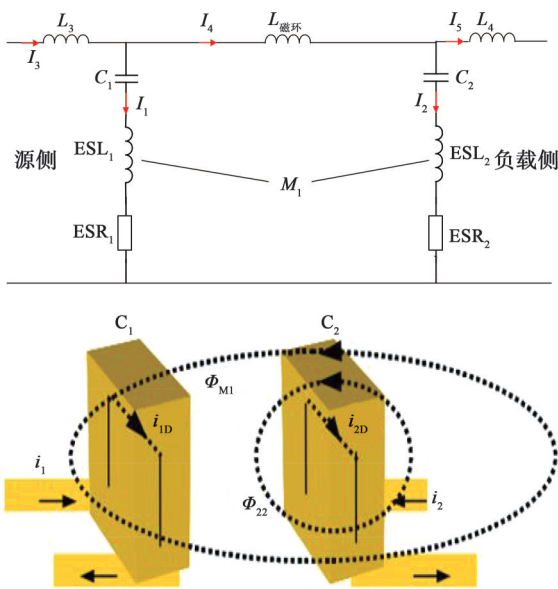


图 17 EMI 滤波器内部电容支路之间互感耦合模型

Fig. 17 Model of mutual inductance coupling between internal capacitance branches of EMI filter

SiC MOSFET 器件的 EMC 问题是制约其高可靠应用的关键。通过使用 EMC 设计技术可系统性提升 EMC 性能, 未来需突破高频噪声建模、多目标协同设计和标准适配等瓶颈, 推动 SiC MOSFET 器件在轨道交通领域的规模化应用。

4 SiC MOSFET 器件应用挑战

虽然 SiC MOSFET 器件对于系统能效提升具有显著优势, 但是在实际中仍存在诸多挑战。

4.1 高性能驱动器

SiC MOSFET 器件虽然可以提高功率密度, 但同时也增大了热流密度, 在短路工况下更加脆弱, 这对保护电路的响应速度提出了更高要求, 但是 SiC MOSFET 器

件更快的开关速度使得保护电路更加容易误动作,因此保护电路的响应速度与稳定性之间的矛盾制约了SiC MOSFET器件应用可靠性的进一步提升;除短路保护以外,故障编码反馈、故障存储、器件状态监测等辅助功能的重要程度也在逐渐显现。

此外,同等功率条件下,SiC MOSFET器件体积相较于Si IGBT器件显著缩小,但其对驱动电路的功能需求则更加多样,这导致驱动电路的小型化挑战逐渐凸显。

4.2 电磁干扰

SiC MOSFET器件因其快速的开关特性及高频开关操作,导致共模干扰电流的峰值和频谱范围显著增大,与传统Si IGBT相比其电磁干扰问题更为突出。通过降低系统杂散电感、动力电缆屏蔽层双端接地、增加吸收滤波回路、金属柜体屏蔽等方法可对干扰进行抑制,但是解决EMC问题需要额外增加措施,一定程度上抵消了应用SiC MOSFET器件的体积重量优势。

4.3 高效散热

SiC MOSFET器件因其具有高效率、高开关频率、高能量密度、高许用结温的特点,其热管理呈现低热量、高热流密度的特点。一方面,相同功率的系统,使用SiC MOSFET器件的总发热量将显著低于Si IGBT器件,系统损耗的降低为自然冷却、走行风冷、紧凑型液冷系统提供了更好的实施空间,但更精密的冷却方式对热设计精度提出了更高的要求,需要从传统的稳态热设计进阶至暂态热设计,才能更充分发挥SiC MOSFET器件优势;另一方面,SiC MOSFET器件因其高功率密度,其芯片热流密度高于传统Si IGBT器件,因此这对功率器件散热路径的传热效率提出了更高要求,低热阻封装、高效热界面材料、高性能散热器在SiC MOSFET器件应用中需求更加迫切。

此外,与SiC MOSFET器件适配的高频磁性元件同样面临热管理方面的技术挑战,高性能磁性元件的小型化伴随着单位体积损耗密度的显著增加,局部过热风险突出,这对高效散热设计提出了更高要求。

4.4 高性能磁件

SiC MOSFET器件推动了变流器高频化,虽能实现磁性元件小型化,但对电感、变压器等磁性元件提出了前所未有的严苛要求。其核心挑战在于:①磁芯损耗剧增:高频磁化导致磁滞损耗呈指数级上升,同时涡流损耗加剧,对磁芯材料的低损耗特性和高绝缘性提出极高要求。②绕组损耗设计复杂化:高频下趋肤效应和邻近效应显著恶化,导致导体等效电阻增大、电流分布不均,大幅增加交流电阻损耗,这给导线选型、绕组结构设计造成了巨大压力。③寄生参数影响

放大:绕组层间、匝间分布电容与漏感在高频下易形成谐振回路,引发电压振荡、振铃、EMI超标和电压尖峰大的风险,导致设计中必须采用三明治绕组等特殊结构来优化。④制造工艺精密化:对绕组布局精度极度敏感,需采用PCB绕组或高精度绕线工艺;微小的结构偏差会明显改变磁性元件参数,因此需要通过极其严格的工艺控制来完成。由此可知,高性能磁性元件需在材料、设计和制造工艺上实现全方位的突破。

5 结束语

近年来,SiC MOSFET器件凭借其高耐压、低损耗与高频特性,在轨道交通牵引变流领域展现出能效提升、轻量化与舒适性提升的优势,成为推动行业绿色低碳转型的核心驱动力。国内外实践表明,采用SiC MOSFET器件的牵引变流系统已在能耗、设备体积重量、电磁噪声与运行效率等关键性能方面得到显著优化,然而,其规模化成熟应用还需突破材料技术、工艺技术以及系统应用技术等多重瓶颈。在“双碳”目标与交通强国战略驱动下,基于SiC MOSFET器件的应用技术将重塑轨道交通能源利用范式。通过多学科交叉创新与全产业链协同,未来牵引变流系统有望在能效、可靠性及智能化多维度实现全面跃升,为构建绿色、高效、自主可控的现代轨道交通体系提供重要支撑。

参考文献:

- [1] 国务院. 国务院关于印发“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知[EB/OL]. (2022-01-19)[2025-04-25]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.
The State Council. Notice of the state council on issuing the development plan for modern comprehensive transportation system during the 14th five year plan period[EB/OL]. (2022-01-19)[2025-04-25]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220119_3637245.html.
- [2] 交通运输部. 交通运输部关于印发《绿色交通“十四五”发展规划》的通知[EB/OL]. (2021-10-29)[2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm.
Ministry of Transport. Notice of the ministry of transport on issuing the "14th five year plan for the development of green transportation"[EB/OL]. (2021-10-29) [2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/21/content_5669662.htm.
- [3] 中共中央, 国务院. 中共中央 国务院印发《交通强国建设纲要》[EB/OL]. (2019-09-19)[2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
Central Committee of the Communist Party of China, The

- State Council. Central Committee of the Communist Party of China and the State Council have issued the "outline for building a strong transportation country"[EB/OL]. (2019-09-19)[2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/2019-09/19/content_5431432.htm.
- [4] 张波, 高翔, 黄金, 等. 国外新型高速动车组技术现状与发展趋势[J]. 中国铁路, 2023(1): 42-50.
ZHANG Bo, GAO Xiang, HUANG Jin, et al. Status quo and development trend of world's new technologies of high speed EMU[J]. Chinese railways, 2023(1): 42-50.
- [5] 郭楷模. 日本《绿色增长战略》提出2050碳中和发展路线图[EB/OL]. (2020-12-25)[2025-04-14]. http://www.casid.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2021/202102/202103/t20210322_5981073.html.
GUO K M. Japan's "Green Growth Strategy" proposes a 2050 carbon neutral development roadmap[EB/OL]. (2020-12-25) [2022-04-14]. http://www.casid.cn/zkcg/ydkb/kjqykb/2021/202102/202103/t20210322_5981073.html.
- [6] 小林学志, 彭惠民. 利用碳化硅(SiC)元件实现新干线车辆主电路系统小型轻量化[J]. 国外铁道机车与动车, 2016(4): 32-36.
XIAOLIN Xuezhi, PENG Huimin. Realizing size and weight reduction of the Shinkansen main circuit system using silicon carbide(SiC) devices[J]. Foreign railway locomotive and motor car, 2016(4): 32-36.
- [7] 交通运输部, 科学技术部. 交通运输部 科学技术部关于印发《交通领域科技创新中长期发展规划纲要(2021—2035年)》的通知[EB/OL]. (2022-01-24)[2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/06/content_5683595.htm.
Ministry of Transport, Ministry of Science and Technology. Notice of the ministry of transport and the ministry of science and technology on issuing the outline of the medium - and long term development plan for technological innovation in the transportation field (2021—2035) [EB/OL]. (2022-01-24) [2025-04-25]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-04/06/content_5683595.htm.
- [8] 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.
- [9] 李华, 万伟伟, 唐雄辉, 等. SiC器件在城轨车辆牵引系统上的应用研究[J]. 机车电传动, 2020(5): 45-48.
LI Hua, WAN Weiwei, TANG Xionghui, et al. Application of SiC devices in traction system of urban rail vehicles[J]. Electric drive for locomotives, 2020(5): 45-48.
- [10] 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.
- [11] 盛况, 郭清, 于坤山, 等. 中低压碳化硅材料、器件及其在电动汽车充电设备中的应用示范[J]. 浙江大学学报(理学版), 2016, 43(6): 631-634.
SHENG Kuang, GUO Qing, YU Kunshan, et al. Medium and low voltage SiC materials, power devices and demonstration in electric vehicle charging equipment[J]. Journal of Zhejiang university(science edition), 2016, 43(6): 631-634.
- [12] 湖南日报. 国内首台全碳化硅牵引逆变器通过载客运营“大考”[EB/OL]. (2023-06-04)[2025-04-15]. https://so.html5.qq.com/page/real/search_news?docid=70000021_88060b9fb5552052&faker=1.
Hunan Daily. The first domestic all silicon carbide traction inverter has completed a major test for passenger operation [EB/OL]. (2023-06-04) [2025-04-15]. https://so.html5.qq.com/page/real/search_news?docid=70000021_88060b9fb5552052&faker=1.
- [13] 曲建真, 张志强, 类延霄, 等. 基于碳化硅的轨道车辆一体化变流器系统[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(28): 28-31.
QU Jianzhen, ZHANG Zhiqiang, LEI Yanxiao, et al. Integrated converter system of rail vehicle based on silicon carbide[J]. Technology innovation and application, 2023, 13(28): 28-31.
- [14] 轨道交通网. 『中车大连』永磁电机有轨电车即将投入商运 搭载碳化硅(SiC)辅助供电系统[EB/OL]. (2023-07-10)[2025-04-15]. <http://www.rail-transit.com/xinwen/show.php?itemid=12367>.
Rail Transit Network. CRRC Dalian permanent magnet motor tram is about to be put into commercial operation, equipped with silicon carbide (SiC) auxiliary power supply system[EB/OL]. (2023-07-10) [2025-04-15]. <http://www.rail-transit.com/xinwen/show.php?itemid=12367>.
- [15] 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.
- [16] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi electric installs railcar traction system with all-SiC power modules on Shinkansen bullet trains[EB/OL]. (2015-06-25) [2018-10-12]. <https://www.mitsubishielectric.com/news/2015/pdf/0625.pdf>.
- [17] LINDAHL M, VELANDER E, JOHANSSON M H, et al. Silicon carbide MOSFET traction inverter operated in the Stockholm metro system demonstrating customer values [C]//IEEE. 2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). Chicago: IEEE, 2018: 1-6.
- [18] 西门子交通中国. 西门子新一代X型地铁列车, 助力维也纳开启现代化地铁城市新篇章[EB/OL]. (2020-07-20)[2025-04-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/Fo_AKxsgas-Bf45YU4jQZDg.

- Siemens Mobility China. Siemens's new generation X-type subway train helps Vienna open a new chapter[EB/OL]. (2020-07-20) [2025-04-15]. https://mp.weixin.qq.com/s/Fo_AKxsgasBf45YU4jQZDg.
- [19] 胡亮, 付翔宇, 吕永灿, 等. 一种 SiC 牵引逆变器高频-低频混合型多模式 PWM 调制方法[J]. 控制与信息技术, 2022 (3): 39-45.
- HU Liang, FU Xiangyu, LYU Yongcan, et al. A frequency hybrid multi-mode PWM modulation method for SiC traction inverter[J]. Control and information technology, 2022 (3): 39-45.

Research on the application of all-SiC MOSFET devices in converters for rail transit

XU Shaolong, HU Yunqing, DOU Zechun, LI Hua, PENG Cheng, WAN Weiwei

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

Abstract: In the context of global climate change and energy structure transformation, the low-carbon development of rail transit systems has become a core issue within China's national strategies. Policies such as China's *Development Plan for a Modern Comprehensive Transportation System During 14th Five-Year Plan Period* explicitly call for the upgrading of rail transit equipment towards electrification and intelligence. All-SiC MOSFET devices, with their excellent performance, have been recognized as critical to breaking through the energy efficiency bottleneck. This paper systematically analyzes the advantages and challenges of applying SiC devices in rail transit traction and auxiliary converter systems. Compared to traditional Si IGBTs, SiC devices significantly improve system energy efficiency and enable lightweight designs due to their reduced on-state voltage drop, as well as high-frequency and high-temperature resistance properties. The comprehensive benefits of SiC systems have been verified in metro systems across China, such as the Shenzhen Metro, particularly in harmonic suppression, dynamic response optimization, and thermal management simplification. However, issues such as high-temperature compatibility, drive design, electromagnetic interference, and insulation aging of SiC devices still need to be addressed. The research outcomes provide technical pathways and engineering references for the green development strategy of rail transit in China.

Keywords: all-SiC MOSFET device; converter; electromagnetic compatibility; noise; rail transit