机车电传动 2018 年第 3 期 (2018-05-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №3, 2018(May 10, 2018)

文章编号：1000–128X(2018)03–0045–03

1 700 V/1 600 A SiC 混合 IGBT 应用研究

杨　涛[1,2]，唐　威[1]

（1. 中车株洲所电气技术与材料工程研究院，湖南 株洲　412001；
2. 变流技术国家工程研究中心，湖南 株洲　412001）

摘　要：SiC 功率器件具有高频、高效率、耐高温、抗辐射等优势，介绍了目前 SiC 功率器件应用情况，阐述了 SiC-JBS 以及 SiC 混合 IGBT 的特性，分析了应用于 1 700 V 混合 IGBT 的驱动技术，完成了 SiC 混合 IGBT 模块功率试验研究。

关键词：碳化硅器件；结势垒肖特基二极管；SiC 混合 IGBT；驱动技术；功率试验

中图分类号：TN304.2+4；TM464　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.008

Application Research of 1 700 V/1 600 A SiC Hybrid IGBT

YANG Tao[1,2], TANG Wei[1]

(1. CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China;
2. National Engineering Research Center of Converters, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: SiC module has advantages of high frequency, high efficiency, high temperature resistance and antiradiation. The application situation of SiC module was introduced, and the characteristics of SiC-JBS and SiC hybrid IGBT was expatiated. The drive technology of 1 700 V SiC hybrid IGBT was analyzed. Finally, the power test research of SiC hybrid power module was finished.

Keywords: SiC module; junction barrier schottky diode; SiC hybrid IGBT; drive technology; power test

0　引言

SiC 是一种具有优异性能的第三代半导体材料，具有禁带宽度大、本征温度高、热导率高、饱和电子漂移速度高、击穿场强高、损耗低等特点。SiC 器件比目前主流的硅半导体具有更高效率、工作结温和能量密度，可广泛应用于轨道交通、船舶、光伏、风电、电动汽车、混动汽车等领域。

美、日及欧洲国家将 SiC 列入未来能源战略规划，已有三十多家企业成立了专门制造 SiC 器件的工厂，并进行相关的商业和推广活动。Cree 和 Rohm 已推出 SiC 二极管和 SiC-MOSFET，三菱推出了使用 SiC 混合 IGBT 功率模块的铁路车辆用逆变器，2013 年 6 月已向东京地铁批量供货，用于银座线列车。国内株洲中车时代电气股份有限公司（以下简称中车时代电气）对 SiC 器件开展了深入研究，已研制出 1 700 V/1 600 A SiC 混合 IGBT 器件，本文将阐述其应用研究。

收稿日期：2017–12–29；修回日期：2018–03–20

1　SiC 混合 IGBT 器件特性

中车时代电气 1 700 V/1 600 A 单管 SiC 混合 IGBT 器件实物及电路如图 1 所示，SiC 混合 IGBT 内部的 IGBT 是 Si 材料，而其反并的二极管是 SiC 材料。SiC 二极管的主流是 pn 结肖特基势垒 (JBS)，这是目前最成熟的 SiC 两端器件，SiC JBS 导通压降大幅下降，具有高关断电压和低反向电流。其反向恢复时间只有几个纳秒，基本上没有反向恢复电荷，能够大大减小开关损耗。经测试，1 700 V/1 600 A 混合 IGBT 的反向恢复损耗为 19 mJ，而常规 IGBT 的反向恢复损耗为 400 mJ，混合 IGBT 的总开关损耗低于常规 IGBT。SiC 混合模块与 Si-IGBT 模块总的开关能量损耗分别为 2.555 7 J 和 3.420 9 J，可见 SiC 混合模块具有更加优异的性能。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

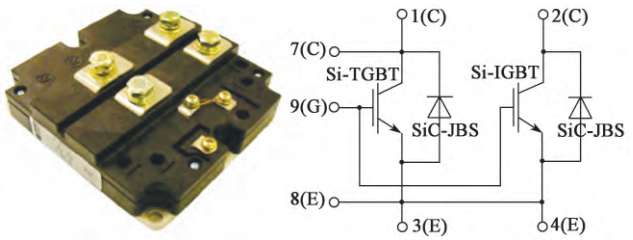

图 1　1 700 V/1 600 A 混合 IGBT 器件实物及电路图

2　SiC 混合 IGBT 驱动技术研究

2.1　驱动原理

SiC 混合 IGBT 的驱动原理如图 2 所示，控制单元通过光纤向驱动板发送 PWM 控制脉冲，经驱动板处理后发送给检测板以实现对 SiC 混合 IGBT 的驱动保护。

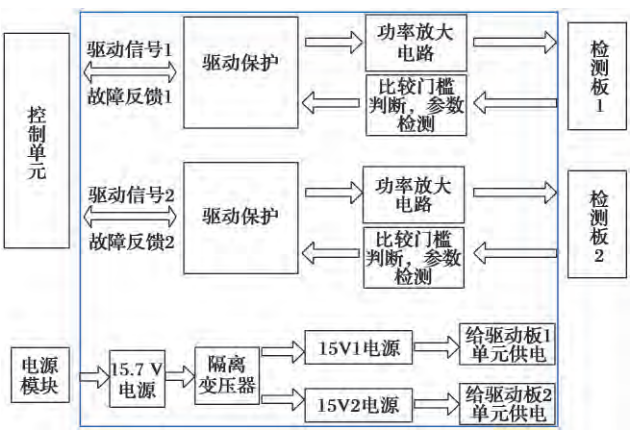

图 2　驱动原理框图

由于 SiC 混合 IGBT 器件应用于高压场合，驱动器与控制单元在电气上必须严格隔离。驱动器将电源模块提供的 15.7 V 电源经过开环隔离型高频 DC/DC 转换为两路 15 V 电源。控制单元与驱动器之间采用光纤进行脉冲传输和故障信息反馈，实现了主电路与控制电路、各个功率器件之间的电气隔离。

PWM 脉冲信号经过驱动器功率放大后传送到 SiC 混合 IGBT 门极，具有足够的驱动功率。当发生过流、短路或欠压故障时，驱动器将保护 SiC 混合 IGBT，并将故障反馈至控制单元。

2.2　隔离电源

驱动器隔离电源采用单端正激电路拓扑，如图 3 所示，为开环控制，隔离变压器的隔离电压等级达到 6 000 V，满足应用要求。

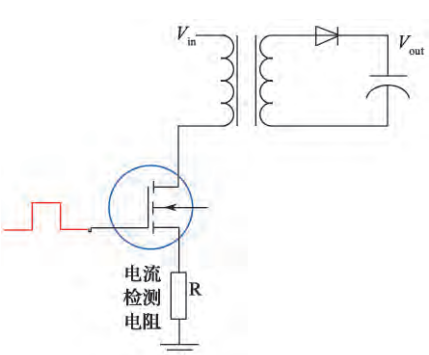

图 3　隔离电源主电路图

针对驱动器开展了高低温试验，带负载工作频率 500 Hz。环境温度降到 –40℃时，驱动器能够正常启动并连续正常运行 5 h；在高温 (85 ℃) 情况下，驱动器连续正常运行 5 h，且顺利通过了高低温循环试验。

2.3　过流与短路保护

中车时代电气 1 700 V/1 600 A 混合 IGBT 双脉冲试验波形如图 4 所示。当负载电流达到额定值的 2 倍时，驱动器能够及时保护使其工作在 RBSOA 安全区内。在完全相同的试验条件下，达到 2 倍额定电流输出能力，混合 IGBT 比常规 IGBT 的保护时间更短。原因是混合 IGBT 反并了 SiC-JBS 二极管，反向恢复速度极快，使混合 IGBT 开通速度更快。

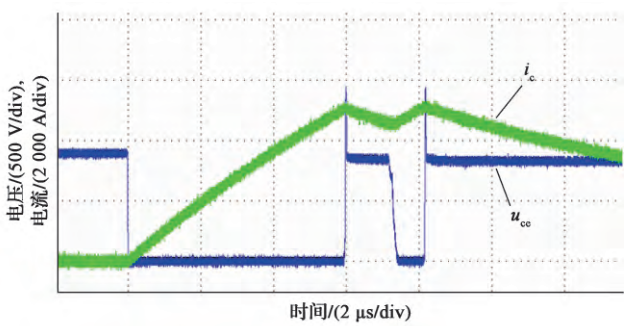

图 4　SiC 混合 IGBT 双脉冲试验波形

当发生短路时，混合 IGBT 电流迅速上升到额定值的 4 倍以上，出现退饱和现象，通态压降 V_{cesat} 上升至母线电压，需在 10 μs 以内关闭混合 IGBT，否则将导致混合 IGBT 器件损坏。桥臂直通为Ⅰ类短路，桥臂相间短路和桥臂对地短路为Ⅱ类短路。Ⅰ类短路比Ⅱ类短路电流变化率 di/dt 大一些，所以Ⅰ类短路采用高电压阈值，Ⅱ类短路采用低电压阈值，保护时间分别设为 8 μs 和 10 μs。

由于短路情况下电流很大，需要采用软关断减小关断电压尖峰。如图 5 所示，当母线电压为 DC 780 V，短路电流为 7 750 A 时，采用软关断使关断电压被控制在了 1 420 V 以下，确保了 SiC 混合 IGBT 器件的安全。

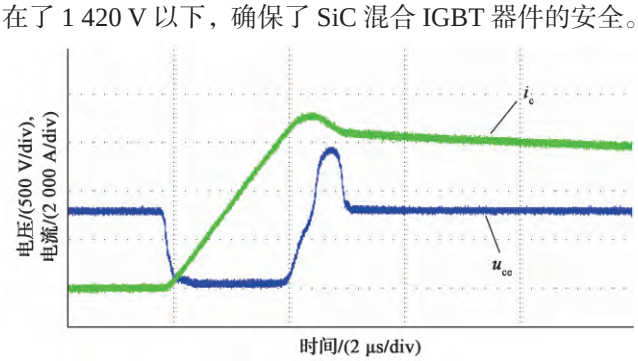

图 5　软关断情况下短路试验波形

3　SiC 混合 IGBT 模块功率试验

目前已研制出 600 kW 的 SiC 混合 IGBT 模块 IBCM60G-SiC，如图 6 所示，功率器件为中车时代电气 1 700 V/1 600 A 单管 SiC 混合 IGBT，冷却方式为重力热管走行风冷散热。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 6　混合 IGBT 模块 IBCM60G-SiC 实物图

在地铁牵引变流器装载混合 IGBT 模块 IBCM60G-SiC，按照图 7 所示电路开展功率考核试验，牵引逆变器主电路如图 8 所示，试验内容如表 1 所示。

SiC 混合 IGBT 模块顺利通过了额定工况、牵引大电流工况以及制动工况试验考核。在直流输入电压 750 V，输出电流有效值为 465 A 的额定工况下变流器持续运行 1 h，逆变器输出波形正常，如图 9 所示。SiC 混合 IGBT 模块温升 15 K，与常规 IGBT 模块比较功耗降低约 20%。

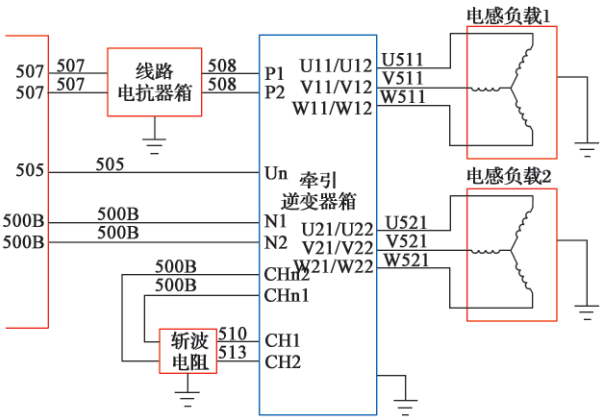

图 7　SiC 混合 IGBT 模块功率试验电路图

表 1　SiC 混合 IGBT 模块 IBCM60G-SiC 功率试验内容

输入电压 /V	输出电流 /A	考核时间
DC 500 ± 50	100 ± 5	2 min
DC 750 ± 50	465 ± 5	2 min
DC 750 ± 50	700 ± 5	2 min
DC 900 ± 50	827 ± 5	10 s
DC 750 ± 50	465 ± 5	60 min

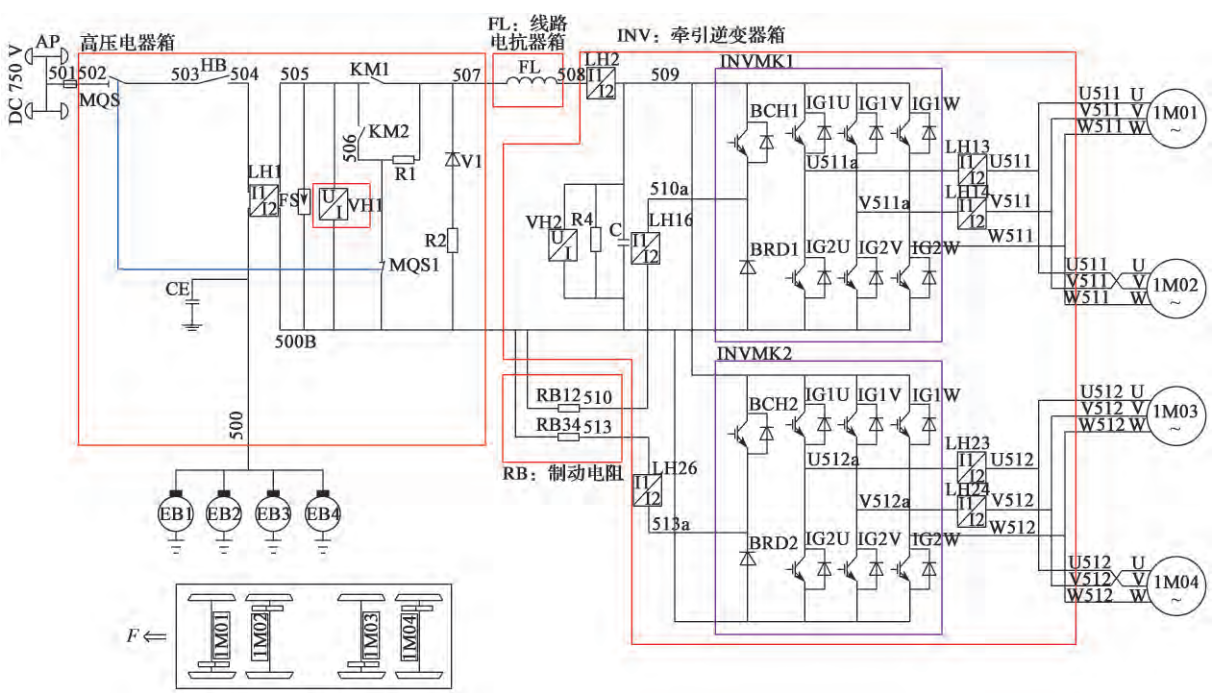

图 8　牵引逆变器电路图

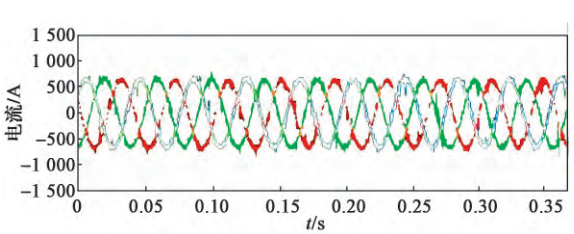

图 9　额定功率考核试验电流波形

4　结语

由于 SiC 器件具有高效节能及高功率密度等优势，在轨道交通领域具有巨大优势和应用前景。目前适合采用 SiC 混合 IGBT 实现牵引系统节能降耗，其专用驱动器能够实现灵活可靠的驱动保护，SiC 混合 IGBT 已在城轨地铁领域率先应用，将逐步推广到机车、动车组等领域。

参考文献：

[1] 郑昌伟，常桂钦，李诚瞻 . 1 700 V/1 600 A 高性能 SiC 混合 IGBT 功率模块的研制 [J]. 大功率变流技术，2015（5）：43–48.

[2] 邵云，史晶晶，李诚瞻，等 . 高性能碳化硅混合功率模块研制 [J]. 大功率变流技术，2013（2）：5–12.

（下转第 107 页）

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增加；随着障碍物数量的增加，计算球面的算法速度在急剧增加，而计算球体的算法速度几乎不变。

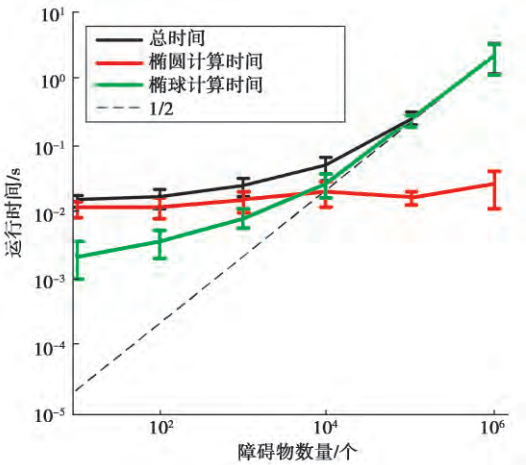

图 6　算法运行时间与障碍物数量的关系图

3　试验结果与分析

现场作业实际使用情况与 IRIS 算法避障比较，如图 7 所示。IRIS 算法虽然能有效实现无人机在静态环境下的避障，但是最终获得的路径会遇到障碍，无人机存在潜在的飞行安全风险。图 8 是采用了 IRIS-APF 避障算法，有效改善此问题，既保证无人机在障碍物之外的绿色散点飞行，又保证这些绿色散点形成的路径避开了障碍物。

经过以上条件进行测试可以看出，本文提出的 IRIS-APF 算法能够有效地弥补 IRIS 算法在路径规划上的不足，且运行效果良好，能够按预定策略自主避障，

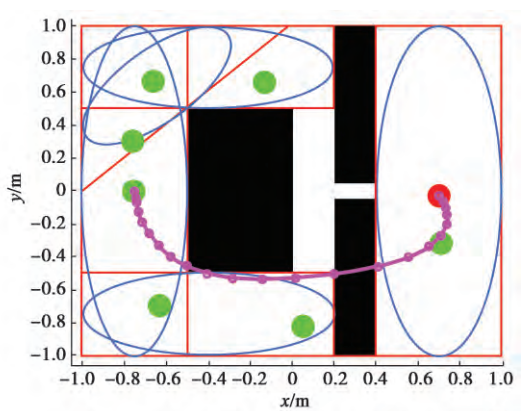

图 7　IRIS 算法避障效果

不但保证了无人机安全可靠地飞机，而且还可以有意识地向目标前进，避障成功率和巡检作业效率大幅度提高。

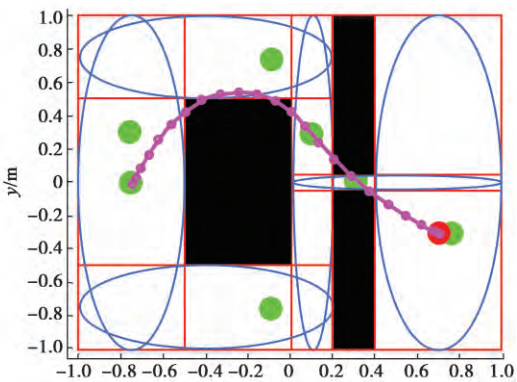

图 8　IRIS-APT 算法避障效果

4　结语

本文研究了无人机在飞行过程中的避障问题，提出了一种基于 IRIS 算法和 APT 结合的无人机避障方案，实现了无人机自主避障。采用 IRIS 算法计算无人机工作区域内的安全区域，并通过 APF 在该区域内获取下一个前进位置，以确保无人机朝着目标点规划路径前进。本文不仅实现了无人机的避障计划，同时提高了算法的速度和精度以适应无人机实时性高的要求。

参考文献：

［1］霍凤财，任伟建，刘东辉. 基于改进的人工势场法的路径规划方法研究［J］. 自动化技术与应用，2016，35(3)：63–67.
［2］陈显龙，陈晓龙，赵成. 无人机在路桥病害检测中的设计与实现［J］. 测绘通报，2016(4)：79–82.
［3］苏奎峰，吕强 . TMS320X281XDSP 原理及 C 程序开发［M］. 北京：中国航空航天大学出版社，2008.
［4］彭程. 共轴八旋翼无人飞行器姿态与航迹跟踪控制研究［D］. 长春：吉林大学，2015.
［5］郭芳. 复杂环境下四悬翼无人机定位研究［D］. 天津：天津大学，2012.
［6］Michael N, Mellinger D, Lindsey Q, et al.The grasp multiple micro-uav testbed［J］. IEEE, Robotics & Automation Magazine, 2010,17(3)：51–65.

作者简介：马占川（1969—），男，工程师，研究方向为工务机械车。

（上接第 47 页）

［3］唐威，忻力，魏海山，等 . SiC 混合 IGBT 器件应用研究［J］. 大功率变流技术，2015（2）：40–43.
［4］殷丽，王传敏 . 超低导通电阻 RON 的 SiC 沟槽器件［J］. 电力电子，2012(5)：49–52.
［5］WANG Li, HU Xiaobu, XU Xiangang, et al. Synthesis of High Purity SiC Powder for High-resistivity SiC Single Crystals Growth［J］.Journal of Materials Science & Technology, 2007(1)：118–122.

作者简介：杨　涛（1985–），男，工程师，从事大功率 IGBT 的应用研究及配套门极驱动器开发工作。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net