

# 基于 SiC 的电动汽车用纯电驱动单元研究

孙新函

(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201208)

**摘要:** 电动汽车对加速性和续航里程的要求不断提升, 从而对电驱系统功率密度和效率的要求也在不断提升。针对这一需求, 分析了 SiC 半导体材料的优势, 提出一种基于 SiC 的纯电驱动系统方案。分别对 SiC 基和 Si 基电驱动单元进行了台架对比测试, 测试结果表明 SiC 基电驱动单元在不增加零件尺寸的前提下, 可大幅提高输出功率与效率, 进而提升电动汽车的加速性与续航里程。作为一种有效提升电动汽车性能的解决方案, SiC 基电驱动单元将是未来高性能电动汽车的重要发展方向。

**关键词:** 电动汽车; 电驱动单元; 电机控制器; SiC

中图分类号: U469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0082-05

doi: 10.12177/emca.2022.009

## Study on Electric Drive Unit for Electric Vehicle Based on SiC

SUN Xinhuan

(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

**Abstract:** With the increase of acceleration and range requirements of electric vehicles, the requirements on power density and efficiency of electric drive unit also keep increasing. Aiming at this problem, the advantages of SiC materials are analyzed, and a pure-electric solution of electric drive unit based on SiC is given. The comparative bench tests for SiC-based and Si-based electric drive units are carried out separately. The test results show that the SiC-based electric drive unit can greatly improve the output power and efficiency, and significantly improve the acceleration and mileage performance of electric vehicles without increasing the size of drive unit. As an effective solution to improving the performance of electric vehicles, SiC-based electric drive unit will be the development direction of high performance electric vehicles in the future.

**Key words:** electric vehicle; electric drive unit; motor controller; SiC

## 0 引言

《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》明确了汽车技术“低碳化、信息化、智能化”发展方向<sup>[1]</sup>。预计到 2035 年, 节能与新能源汽车销售量占比达到 50%。

随着电动汽车的快速发展与普及, 对加速性能和续航里程的要求不断提升。加速性能主要受限于电驱动单元的功率, 续航里程则主要受限于动力电池的能量密度及电驱动单元效率。在短期内电池能量密度无法进一步突破, 因此, 寻找一种

高功率密度、高效率的电驱动单元来满足整车需求尤为重要<sup>[2]</sup>。

电驱动单元作为电动汽车的核心动力部件之一, 其发展趋势是高集成、高功率、高效率, 即将电机控制器、驱动电机与减速器进行“三合一”集成<sup>[3]</sup>。基于对高功率密度与高效率的需求, 本文开发了一款纯电动汽车用电驱动单元, 对该电驱动单元从功率器件选型到整体系统方案加以阐述。分别进行了 SiC 基和 Si 基电驱动单元的台架测试, 结果表明 SiC 基电驱动单元可显著提升系统输出功率和效率。

收稿日期: 2022-01-30; 收到修改稿日期: 2022-03-27

作者简介: 孙新函(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电动汽车电驱动及电力电子设计与开发。

# 1 SiC 功率器件

## 1.1 SiC 材料特性

宽禁带半导体材料是继以 Si 和 GaAs 为代表的第一代、第二代半导体材料之后,迅速发展起来的第三代新型半导体材料<sup>[4]</sup>。SiC 作为第三代宽禁带半导体典型代表之一,具备高禁带宽度、高击穿场强、高电子饱和漂移速度、高热导率等优势,可有效突破传统 Si 基半导体材料的物理极限。表 1 选取了典型的三代半导体材料并对比了其材料特性。

表 1 半导体材料特性对比

特性指标	锗 Ge	硅 Si	砷化镓 GaAs		磷化铟 InP		碳化硅 4H-SiC		氮化镓 GaN	
禁带宽度/eV	0.66	1.12	1.43		1.3		3.26		3.39	
临界击穿电场/(V·cm <sup>-1</sup> )	0.1	0.3	0.4		0.5		3.0		3.3	
电子迁移率/(cm <sup>2</sup> ·V <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	3 900	1 400	8 500		5 400		950		1 000	
电子饱和漂移速度/(10 <sup>7</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	0.6	1.0	2.0		1.0		2.0		2.5	
热导率/(W·cm <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.58	1.50	0.50		0.70		4.90		1.30	

从表 1 可以看出 SiC 的禁带宽度是 Si 的 3 倍,击穿电场是 Si 的 10 倍,电子饱和漂移速度是 Si 的 2 倍,热导率是 Si 的 3 倍。车用电力电子功率器件应用 SiC 材料,可以带来更高的器件耐电压、更低的导通电阻、更高的开关频率、更低的结壳热阻,非常契合车用电驱动单元高功率密度和高效率的技术要求<sup>[5]</sup>。

## 1.2 SiC MOSFET

随着技术进步,影响 SiC MOSFET 沟道电阻的技术难题正逐渐被攻克。以 Wolfspeed 公司为代表的水平沟道结构和 Rohm 公司为代表的垂直沟通结构均在减小导通电阻方面做了很多优化工作。图 1 展示了在相同功率等级下全 Si 模块、Si/SiC 混合模块和全 SiC 模块的损耗对比。由图 1 可知,SiC 肖特基势垒二极管(SBD)优异的反向恢复特性减小了功率开关器件的开通电流应力,显著降低了开关损耗。采用混合 SiC 模块代替全 Si 模块,会使总损耗降低 27% 左右。使用全 SiC 模块后,一方面大幅缩短了关断时间,进一步降低

了开关损耗;另一方面,SiC MOSFET 低导通电阻也带来了导通损耗的降低。全 SiC 模块总损耗仅为全 Si 模块的 30%,有助于进一步提高电力电子装置的效率和功率<sup>[6]</sup>。

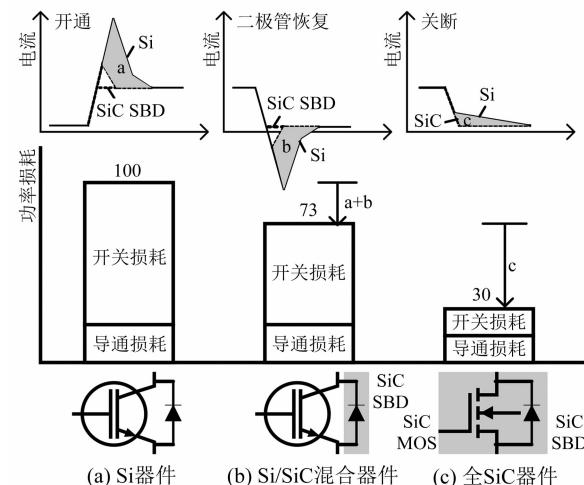


图 1 Si、Si/SiC 混合及全 SiC 器件损耗对比图

SiC MOSFET 可有效降低损耗,但也存在栅极阈值电压小、耐负压能力弱、栅极寄生内阻大的缺点,高频应用存在电磁干扰(EMI)问题,这些都是目前行业面临的技术难点和挑战。此外,SiC 晶锭生长速度慢,衬底技术门槛高,供应商较少,造成了原材料价格高。由于 SiC 材料硬度高,芯片外延、栅氧切割和检测难度大,导致芯片良率较低。高昂的原材料价格和较低的芯片良率也是目前市场无法大规模应用的主要瓶颈。

## 2 SiC 基电驱动单元设计

### 2.1 系统整体方案

本文所述电驱动单元由电机控制器、驱动电机及减速器三部分组成,为“三合一”集成设计。其爆炸示意图如图 2 所示。

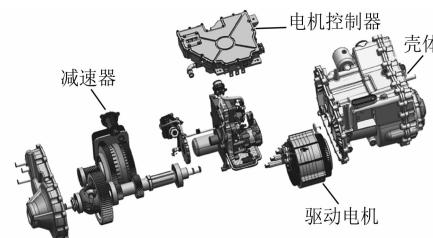


图 2 三合一电驱动单元爆炸示意图

该方案齿轴采用平行轴同轴布置,结构紧凑,

驱动电机绕组采用发卡扁线设计,提升功率密度,电机控制器采用800 V高电压平台设计,同时在相同外包装条件下,兼容SiC基与Si基功率模块。800 V高电压平台的设计不仅能够充分发挥SiC自身材料的耐高压特性,同时也适配超级快充的需求<sup>[7]</sup>。

SiC基电驱动单元主要参数如表2所示。

表2 电驱动单元主要参数

参数名称	参数值
电压平台电压值/V	800
电机类型	永磁同步电机(PMSM)
电机峰值功率/kW	270
电机峰值扭矩/(N·m)	315
电机峰值转速/(r·min <sup>-1</sup> )	16 000
电机冷却方式	油冷
控制器冷却方式	液冷

## 2.2 SiC基电机控制器

### 2.2.1 功率模块选型

功率模块作为电机控制器的最关键器件,直接决定整体系统方案。其器件的选型主要考虑技术参数与封装形式。其中技术参数与母线电压平台、峰值电流输出能力、反电动势等相关;封装形式主要考虑电驱动单元的尺寸要求及冷却需求。经分析并考虑与Si基功率模块的可互换性,选用英飞凌SiC MOSFET FS03MR12A6MA1B<sup>[8]</sup>,该模块集成三相全桥拓扑,耐压值1 200 V,电流输出可达400 A(有效值),自带散热针翅,损耗低,频率高,易于平台化设计。功率模块封装示意图如图3所示。

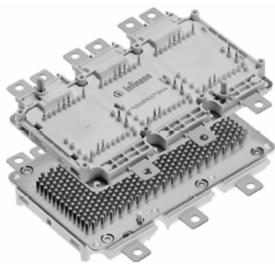


图3 SiC功率模块封装示意图

### 2.2.2 SiC基电机控制器结构设计

电机控制器的结构爆炸图如图4所示,主要包括电路板、SiC功率模块、冷却结构、母线电容、

电流传感器、滤波组件及壳体等。其中控制板与驱动板一体化设计,提高体积利用率并节省接插件和线束,冷却结构可兼容SiC基和Si基功率模块,整体倒扣的方案可充分利用空间,提升电驱动单元的体积利用率<sup>[9]</sup>。

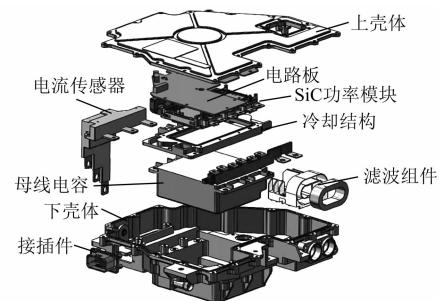


图4 SiC电机控制器结构爆炸图

### 2.2.3 SiC基驱动电路系统设计

SiC MOSFET与Si IGBT应用最显著的差异为其驱动电路不同,SiC MOSFET短路保护响应的要求更快<sup>[10]</sup>,电压平台从400 V提升到800 V也对系统提出了更高的电气间隙和爬电距离要求。本文SiC驱动电路设计系统架构图如图5所示,包括驱动板接口、驱动芯片配置电路、驱动芯片保护电路、驱动电源供电电路以及模拟信号采集电路。

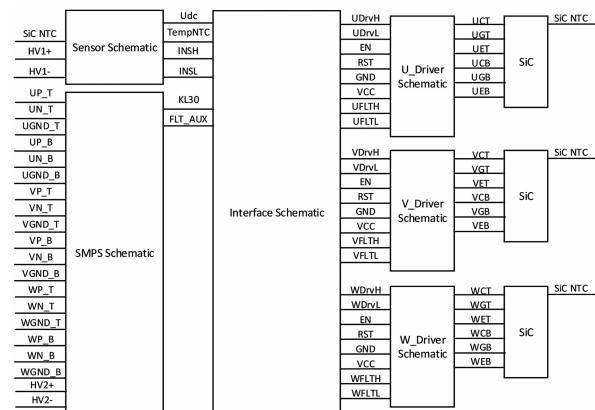


图5 SiC驱动电路系统架构图

驱动板接口部分包含驱动信号输入、故障信号输出、驱动相关数据输入、驱动相关数据输出、使能和复位信号、供电、功率模块温度采样信号输入、母线电压信号输入、绝缘信号输入等。

驱动芯片原边匹配与配置电路主要包含原边驱动信号处理、电信号处理、使能和复位信号处

理、故障信号处理等。驱动芯片副边驱动与保护电路主要包含栅极驱动电路、有源钳位保护电路、门极钳位保护电路、基于退饱和短路保护电路、米勒效应保护电路等。本文设计采用英飞凌 1EDI3031AS 芯片<sup>[11]</sup>。

驱动电源供电电路主要是将原边 12 V 供电转换为副边驱动电源, 驱动电源选择 +15 V 和 -4 V, 供 SiC 模块开关同时预留高压取电备份电源。

### 2.3 驱动电机设计

本文以 270 kW 永磁同步电机(PMSM)进行电磁方案分析<sup>[12]</sup>。极槽配合方案为 8 极 72 槽, 定子槽内 6 层绕组, 硅钢片厚度为 0.25 mm, 以降低电机铁损、提升效率<sup>[13]</sup>。转子结构采用“双 V”结构, 并考虑凸极比来提升磁阻转矩输出<sup>[14]</sup>, 同时转子进行辅助槽设计来降低转矩波动。驱动电机结构爆炸图及电磁方案设计分别如图 6 和图 7 所示。

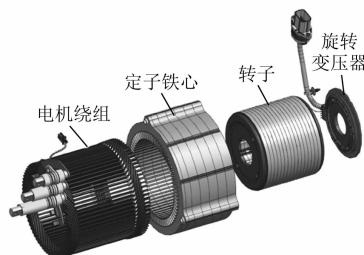


图 6 驱动电机结构爆炸图

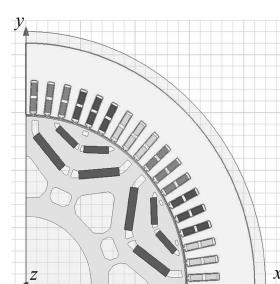


图 7 驱动电机电磁方案

考虑到电压平台升级到 800 V, 设计中采用高耐压漆包线及绝缘纸, 结合 SiC MOSFET 产生的过冲电压, 利用局部放电起始电压(PDIV)作为电机绝缘系统的校核参数, 选用常温下漆包线和绝缘纸  $\text{PDIV} \geq 1500 \text{ V}$  的设计来保证电机整体方案的耐压性能。

### 3 电驱动单元台架测试

根据所设计的电驱动单元进行台架测试, 驱动电机的峰值功率为 270 kW, 峰值扭矩为 315 N·m。搭载的台架实物图如图 8 所示。减速器作为机械传动机构其效率基本为稳定值, 因此本文台架测试重点关注电机控制器及驱动电机二合一(即驱动电机系统)的结果, 暂不考虑减速器的影响。后文中的外特性及效率测试均为驱动电机系统的测试。

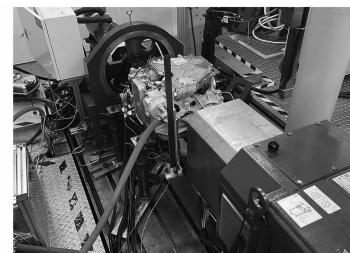


图 8 电驱动单元台架实物图

#### 3.1 外特性测试

为验证所设计系统的峰值扭矩和峰值功率输出能力, 分别在 500、600、700、800 V 下进行台架外特性测试, 其中台架设置电机控制器为液冷, 驱动电机为油冷, 试验时给定电机控制器的冷却水温为 65 °C, 水流量为 10 L/min, 驱动电机的冷却回油温度为 85 °C。图 9 给出了 Si 基和 SiC 基驱动电机系统的外特性曲线。

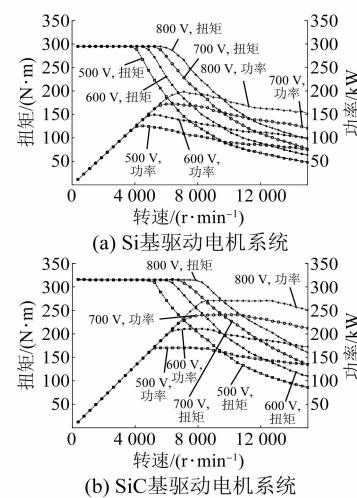


图 9 Si 基和 SiC 基驱动电机系统的峰值外特性曲线

从测试结果可知, SiC 基驱动电机系统的峰值输出功率比 Si 基驱动电机系统的峰值输出功

率最大可提升 70%。

### 3.2 驱动电机系统效率测试

为验证所设计电驱系统的效率,在 800 V 下进行台架效率测试,测试边界条件与上述外特性测试条件保持一致。图 10 为 Si 基和 SiC 基驱动电机系统效率,其中 Si 基系统峰值效率达 95.8%,SiC 基系统峰值效率达 96.8%。

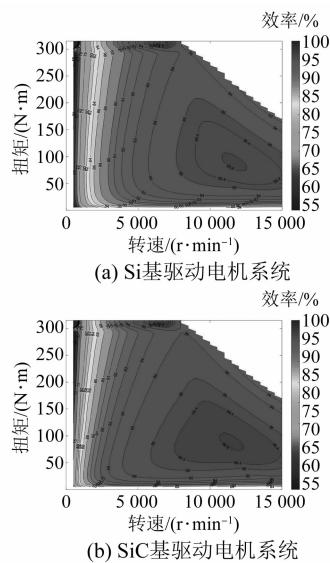


图 10 Si 基和 SiC 基驱动电机系统效率 MAP

### 3.3 SiC 基与 Si 基驱动电机系统效率测试对比

为验证 SiC 与 Si 对测试的差异影响,本文在保持驱动电机和减速器设计不变的情况下,单独更换 SiC 电机控制器与 Si 电机控制器,分别进行台架效率测试。图 11 为两者效率差值的 MAP。从图 11 可知,SiC 基驱动电机系统效率高于 Si 基驱动电机系统,平均效率可提升 2%~3%。

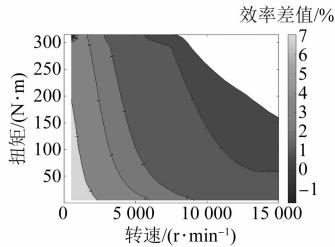


图 11 SiC 基与 Si 基驱动电机系统效率差值 MAP

## 4 结语

本文通过分析 SiC 的材料特性的优势,开发了一种基于 SiC 的车用纯电驱动单元,分别从整体方案、电机控制器方案、驱动电机方案阐述了各

子系统设计,最终进行了台架对比测试。测试结果表明 SiC 基电驱动单元效率比 Si 基电驱动单元效率平均可提升 2%~3%,且在尺寸不变的情况下,SiC 基电驱动单元的输出功率可大幅提升。SiC 基电驱动单元是未来高性能电动汽车的重要应用和发展方向。

## 【参考文献】

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图 2.0 [M]. 北京:机械工业出版社,2020.
- [2] 李全,暴杰,赵慧超,等. 车用电驱动系统技术发展趋势及其技术要求 [J]. 汽车实用技术,2021,46(23): 188.
- [3] 陈雷,魏粲然,陈登峰,等. 电动汽车用三合一电驱动系统设计与验证 [J]. 微特电机,2021,49(3): 30.
- [4] 张波,邓小川,陈万军,等. 宽禁带半导体器件技术 [J]. 电子科技大学学报,2009,38(5): 618.
- [5] 王学梅. 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用 [J]. 中国电机工程学报,2014,34(3): 371.
- [6] 涂宇,李彦涌,胡家喜,等. SiC 功率器件应用现状及发展趋势 [J]. 大功率变流技术,2016(5): 1.
- [7] 吴鹏飞,刘宏骏,郝烨. 电动汽车大功率充电发展现状及趋势研究 [J]. 汽车实用技术,2020(1): 26.
- [8] Infineon Inc. SiC MOSFET FS03MR12A6MA1B [EB/OL]. [2021-06-25]. <https://www.infineon.com/cms/cn/product/power/mosfet/silicon-carbide/modules/fs03mr12a6ma1b/>.
- [9] MISTRY J, WANG Y, AZER P, et al. Design of a compact thermal management system for a high-power silicon carbide traction inverter [J/OL]. SAE Technical Paper, 2021-01-0218. doi:10.4271/2021-01-0218.
- [10] WANG Y, MISTRY J, AZER P, et al. Integrated busbar design for stray inductance and volume reduction in a high-power SiC traction inverter [J/OL]. 2021-01-0777. doi:10.4271/2021-01-0777.
- [11] Infineon, Inc. SiC MOSFET driver 1EDI3031AS [EB/OL]. [2021-03-29]. <https://www.infineon.com/cms/cn/product/power/gate-driver-ics/1edi3031as/>.
- [12] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计 [M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [13] 莫会成,闵琳,于志刚,等. 电机用硅钢片铁耗研究 [J]. 微电机,2008,41(11): 5.
- [14] 付兴贺,江政龙,陈锐. 电励磁凸极同步电机磁阻转矩及其利用率提升方法研究 [J]. 微特电机,2021,49(11): 1.