

电动汽车用碳化硅控制器开发与测试^{*}

陈登峰^{1,2}, 梅友忠^{1,2}, 温小伟^{1,2}

(1. 上海汽车电驱动有限公司, 上海 201806;

2. 上海电驱动股份有限公司, 上海 201806)

摘要: 针对纯电动汽车对电机控制器的高功率密度需求设计了一款碳化硅控制器。阐述了该碳化硅控制器的总体电气原理设计方案, 并对其结构、硬件、软件设计方案进行了详细的分析, 提出了基于碳化硅 MOSFET 模块的碳化硅控制器设计方案, 并针对该碳化硅控制器的散热效果进行了仿真研究。最后, 对碳化硅控制器样机进行了台架测试验证, 测试结果表明, 所设计的碳化硅控制器具有良好的控制性能。

关键词: 新能源汽车; 碳化硅控制器; 碳化硅模块; 三明治结构

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)07-0062-06

doi: 10.12177/emca.2020.060

Development and Testing of Silicon Carbide Controller for Electric Vehicles^{*}

CHEN Dengfeng^{1,2}, MEI Youzhong^{1,2}, WEN Xiaowei^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Electric Drive Co., Ltd., Shanghai 201806, China;

2. Shanghai Edrive Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

Abstract: A silicon carbide (SiC) controller for high-power-density requirement of electric vehicles is developed. The overall principle diagram of electrical design is described. The structure, hardware and software schemes of the SiC controller are analyzed in detail. A design scheme of SiC controller based on the SiC MOSFET module is proposed. The thermal simulation of the SiC controller is carried out to study its heat dissipation effect. Finally, the bench test of the SiC controller prototype is carried out. The test results show that the SiC controller has good control performances.

Key words: new energy vehicle; SiC controller; SiC module; sandwich structure

0 引言

随着发展新能源汽车上升为国家战略, 新能源汽车已经越来越普及到生活的各个层面。作为新能源汽车的核心部件之一, 电机控制器的发展趋势是高功率、高效率、高集成度和高工作温度^[1]。传统的硅基 IGBT 工作温度偏低、开关频率较低, 同等体积要求下限制了电机控制器功率密度的进一步提升。碳化硅基 MOSFET 作为依托

于碳化硅材料制作的半导体封装模块, 具有更高的工作温度、更高的开关频率, 可以满足电机控制器同等体积条件下功率密度大幅度提升的要求^[2-4]。本文针对这种高功率密度的要求, 开发了一款电动汽车用碳化硅控制器。重点介绍了该碳化硅控制器的结构、硬件和软件设计方案, 并详细研究了碳化硅 MOSFET 模块的冷却散热方案。温升仿真和台架测试结果表明, 所开发的碳化硅控制器具有良好的电机控制器性能和突出的散热效果。

收稿日期: 2020-05-04; 收到修改稿日期: 2020-05-17

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0104704)

作者简介: 陈登峰(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源汽车驱动电机控制器开发与测试。

1 控制器设计

1.1 控制器结构和电气设计

碳化硅模块的选取需要考虑峰值电压、经验裕量、供应商实际产品情况以及系统最大反电动势要求,经过对比,最终碳化硅控制器选用斯达 900 V/800 A 双面散热碳化硅模块。该模块具有双面冷却、SiC 芯片双面焊接、低损耗、高频、高可靠性、高集成化设计的优点。碳化硅 MOSFET 模块模型如图 1 所示。

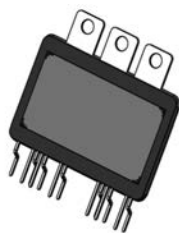


图 1 碳化硅 MOSFET 模块模型

碳化硅控制器采用 3 个碳化硅 MOSFET 模块并排布置,并通过一个三明治结构的双面水冷散热器夹紧固定,可以满足对碳化硅 MOSFET 模块的双面冷却散热。碳化硅控制器结构布置爆炸图如图 2 所示。主要包括上箱盖、薄膜电容、两相插件、三相组件、滤波组件、箱体、PCBA 板、下箱盖、散热器、碳化硅模块。



图 2 碳化硅控制器结构布置爆炸图

碳化硅控制器主要用于控制驱动电机实现精确的转矩、转速输出,确保整车的正常行驶,并较大程度地提升整个系统的效率。整车高压电池输出直流电流,经过薄膜电容器整流,进入模块组件的驱动电路,并通过控制板控制驱动电路将高压电池的直流电流转化为可以直接输入驱动电机的交流电流,从而完成整个逆变过程^[5-8]。碳化硅

控制器的电气设计原理框图如图 3 所示。

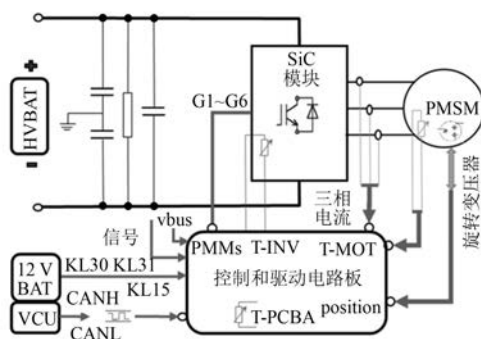


图 3 碳化硅控制器的电气设计原理框图

1.2 控制器硬件设计

碳化硅控制器硬件电路采用最新的二合一电路板设计方案,同时将控制单元和驱动单元集成在同一块 PCBA 板上。板子主要包括弱电供电电路、通信电路、温度采样电路、电压采样电路、电流采样电路、位置检测电路、驱动电路、逻辑保护电路等模块。

1.2.1 弱电供电电路

碳化硅控制器的弱电供电电路框图如图 4 所示。其中,电源模块要确保碳化硅控制器在 6~18 V 可正常工作,第一级采用非隔离的升降压变换拓扑,输出 15 V 为旋变位置传感器的励磁电源供电,15 V 通过隔离变换器为 SiC 控制器驱动单元供电,15 V 经过降压变换得到 5 V 电压为传感器、比较器、运放电路、通信电路等供电。5 V 电压再通过 LDO 降压到 3.3 V 为控制芯片提供电源。

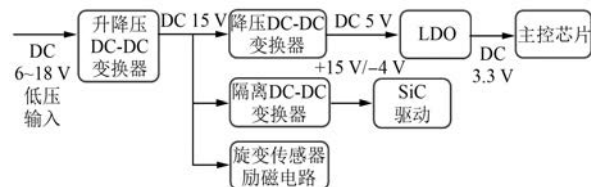


图 4 弱电供电电路框图

1.2.2 通信电路

碳化硅控制器的通信电路框图如图 5 所示。碳化硅控制器设计有带唤醒功能的 CAN 通信电路,CAN 通信芯片采用 TI 公司生产的 TJA1041T 芯片,电路当中包含浪涌吸收的保护电路,用于阻抗匹配的终端电阻网络,同时还设计有共模、差模

电路用于抑制电磁噪声。

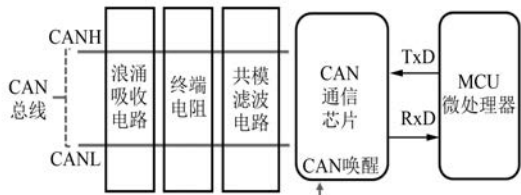


图5 通信电路框图

1.2.3 温度采样电路

碳化硅控制器的温度采样电路框图如图6所示。电机、SiC模块以及PCBA均采用双路温度采样电路。本文所设计碳化硅控制器可实时、精准地监测芯片的温度,为SiC温度监测、保护策略制定提供了良好的前提;电机温度采样同样配置了双路冗余结构,用以提升因电机热电偶或温度采样电路单点失效后的输出可靠性;此外还设计了PCBA电路板的温度监控,可以保证控制及驱动系统的稳定性。

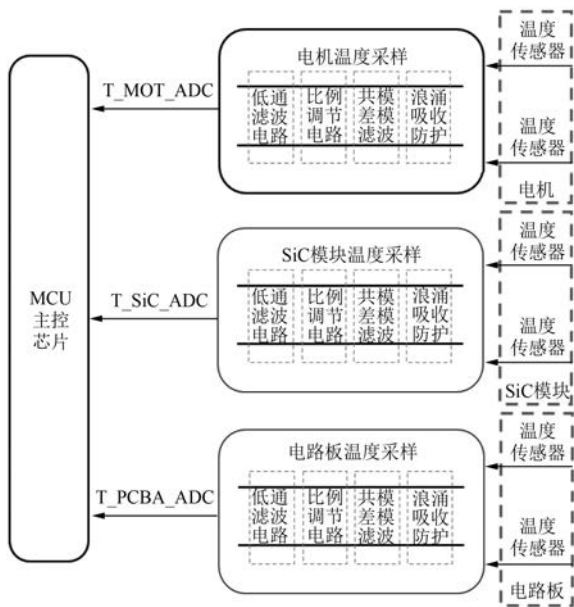


图6 温度采样电路框图

1.2.4 高压采样电路

该系统的高压采样电路框图如图7所示。高压分压后采用线性光耦隔离,经过运放调理电路,再进行低通滤波处理,最后将模拟量信号送至微处理器。该设计电路在200~470V电压范围内采样精度可以保持在误差小于1%。

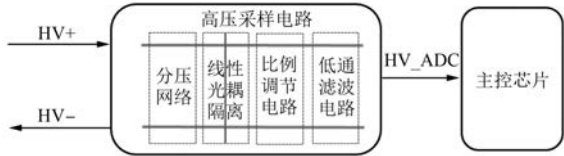


图7 高压采样电路框图

1.2.5 相电流采集电路

碳化硅控制器的相电流采样电路框图如图8所示。该系统采用高精度(±1%)、高线性度(±1%)的霍尔电流传感器,其信号经过共模/差模噪声抑制、低通滤波、比例调节,再经低通滤波,最后将模拟量信号传送至主控芯片,用于相电流的实时采集和监控。采用3路相电流传感器可实现实时冗余比较校验,符合功能安全开发的要求。

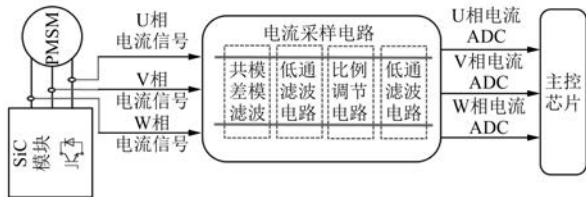


图8 相电流采样电路框图

1.2.6 逻辑处理保护电路

碳化硅控制器的逻辑保护电路框图如图9所示。逻辑保护单元作用主要是对过压、过流、过温以及关键IC芯片故障进行收集处理,然后再通过硬件逻辑直接禁止驱动单元,从而快速使电机控制器系统进入安全状态,同时将逻辑故障结果反馈给主控芯片进行故障存储处理。

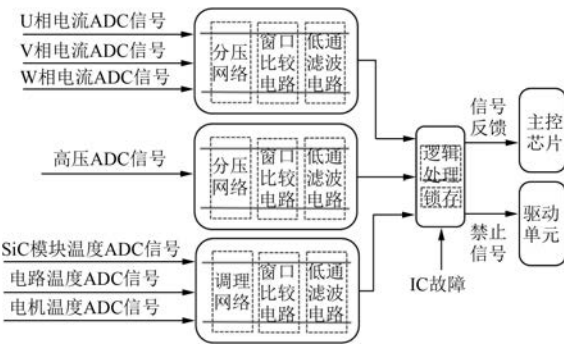


图9 逻辑处理保护电路框图

1.2.7 驱动电路

碳化硅控制器的驱动电路框图如图10所示。

采用安华高的 ACFJ-3439T 作为碳化硅控制器的驱动芯片,该芯片的主要功能包括模块的过流检测、驱动欠压检测、软关断、负压关断等。与传统的硅基模块相比,其开通电阻和关断电阻较小,目前设计为 $1.5\ \Omega$ 以内,使开关速度更快,开关损耗更小。

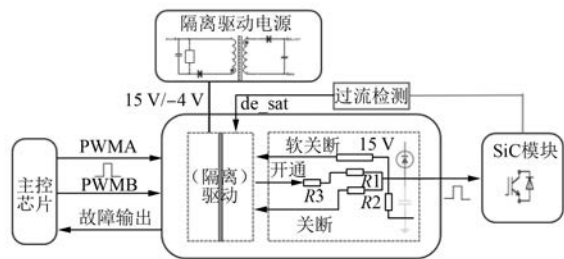


图 10 驱动电路框图

1.3 控制器软件设计

本文碳化硅控制器采用的永磁同步电机(PMSM)控制算法原理框图如图 11 所示。电机控制系统根据转矩需求,结合最大转矩电流比(MTPA)、恒功率弱磁以及最大转矩电压比(MTPV)轨迹中转速和母线电压的关系,进行查表得到合理的 d 、 q 轴电流指令值,再通过电流调节器(一般是 PI 调节器)调节出期望的 d 、 q 轴电压,最后经过坐标变换和空间矢量脉宽调制(SVPWM)后生成相应的调制脉冲,驱动 PMSM 在不同控制模式下稳定输出,提高了整个控制系统的控制精度和动态响应精度。

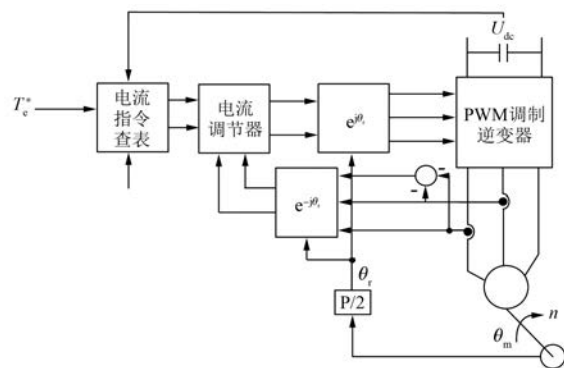


图 11 PMSM 电机控制算法原理框图

本文碳化硅控制器软件架构基于 AUTOSAR 进行分层开发。控制单元的软件架构被抽象分类成 3 大块,分别是应用层(ASW)、运行时环境(RTE)以及基础软件层(BSW),其软件架构示意

图如图 12 所示。其中,ASW 包含若干软件组件(SWC),每个 SWC 由若干个运行实体(RE)组成。RE 中封装了相关控制算法,可由 RTE 事件触发,并通过端口与外界进行信息交互。RTE 通过一系列 RTE 接口函数实现软硬件的解耦。实现了 ASW 的 SWC 之间以及 SWC 和 BSW 之间的数据交换并控制两者之间的相互作用。

BSW 基础软件层则包含底层驱动相关模块,可细分为服务层、ECU 抽象层、复杂驱动层以及微控制器抽象层。高度的分层与模块化设计使软硬件解耦、软件模块的复用度大大提升。



图 12 碳化硅控制器软件架构示意图

1.4 冷却设计与仿真

碳化硅控制器双面冷却散热器结构如图 13 所示。本文碳化硅控制器装配 3 个碳化硅 MOSFET 模块,3 个碳化硅 MOSFET 模块并排布置,并通过一个三明治结构的双面冷却散热器夹紧,双面冷却散热器再通过板簧的弹性变形压紧固定,并保证散热器表面与碳化硅 MOSFET 模块散热面紧密贴合,满足对碳化硅 MOSFET 的双面冷却。薄膜电容器固定在箱体底面,且薄膜电容的正负输出采用端叠层结构设计来减少寄生电感,薄膜电容正负输出端分别与模块的正负输入端激光焊接。双面散热器的冷却水道设计采用并联式结构,将 3 个模块夹在中间,工作时,冷却液从双面散热器的入口流入,然后再进入散热器内部,冷却液分流成为并联的 4 部分,最后再汇集到双面散热器的出口,完成对整个碳化硅 MOSFET 模块的双面冷却。峰值工况输出情况下碳化硅模块瞬时温升最高,故对峰值工况下模块的瞬时温升进行有限元仿真,研究碳化硅 MOSFET 模块内部芯片的温度分布,如图 14、图 15 所示。

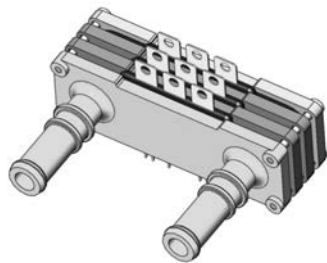


图 13 双面冷却散热器结构

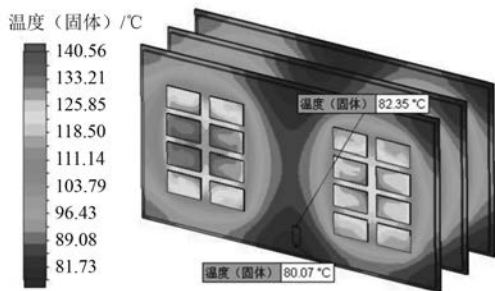


图 14 碳化硅模块的温度分布

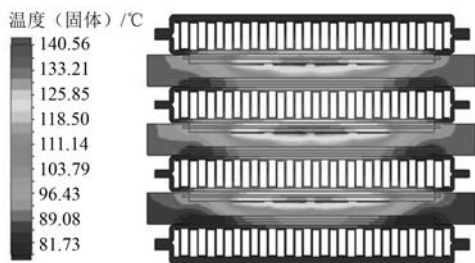


图 15 碳化硅模块的温度剖面图

由图 14~图 15 可以看出,峰值工况下,模块芯片的温度为 140.56℃,目前碳化硅 MOSFET 长期使用耐温为 175℃以上,可以满足电动汽车长期使用要求。

2 电机控制台架测试

对碳化硅控制器进行台架带载测试,采用碳化硅模块型号为 MD800HFC90N3S,测试的负载电机采用 PMSM,峰值功率 120 kW,峰值扭矩 275 N·m,对碳化硅控制系统进行控制器开通关断测试、系统外特性测试、控制器效率对比测试和控制器温升对比测试。

2.1 开通关断测试

对本文碳化硅控制器进行开通关断测试,测试结果如图 16 所示。从图 16(a)可以看出,碳化

硅模块开关速度可以控制在百纳秒级,与传统硅模块微秒级的开关速度相比大幅提升。从图 16(b)可以看出,当控制器相电流 591 A 时,碳化硅模块关断,此时产生的电压尖峰 200 V,加上母线电压 352 V,碳化硅模块的集电极最高电压仅达到约 571 V,而本文所选择碳化硅模块的额定耐压为 900 V,因此该碳化硅控制器在提高碳化硅模块开关速度的情况下还可以有效地将尖峰电压控制在最佳安全区域内。

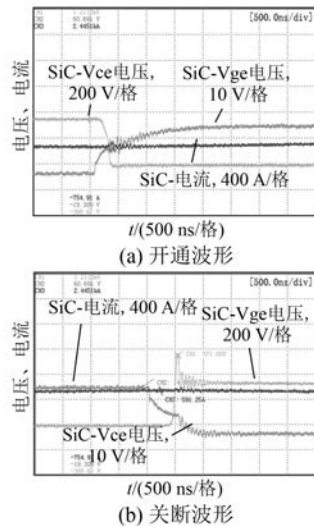


图 16 碳化硅控制器开通关断波形

2.2 系统外特性测试

在 320 V 额定电压下对碳化硅电机控制系统进行带载外特性测试,结果如图 17 所示。从图 17 可以看出,该电机控制系统峰值功率可达 120 kW,峰值扭矩可达 275 N·m,且具有比较稳定的外特性输出。

2.3 硅控制器效率对比测试

碳化硅和硅控制器测试条件如表 1 所示。碳化硅控制器效率如图 18 所示。

表 1 碳化硅和硅控制器测试条件

项目	碳化硅控制器	硅控制器
模块规格	MD800HFC90N3S	GD800HFT65N1S
散热形式	双面散热	单面散热
工作电压/V	320	320
峰值功率/kW	120	120
主要驱动参数	$R_{on} = 1.4 \Omega$, $R_{off} = 1.6 \Omega$	$R_{on} = 13 \Omega$, $R_{off} = 13 \Omega$
开关频率/kHz	20	10

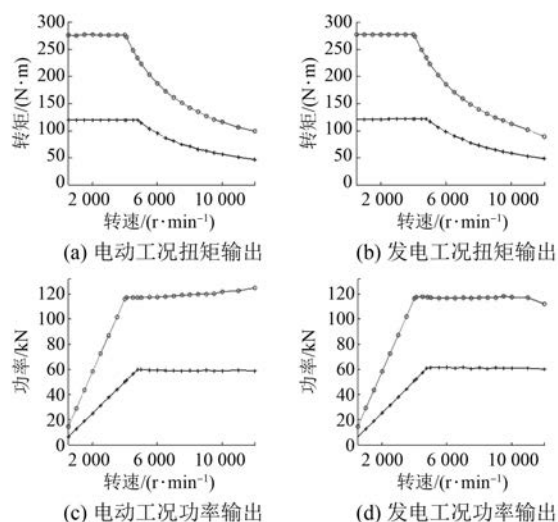


图 17 SiC 电机控制系统外特性测试

从图 18(a) 可以看出,碳化硅控制器最高效率达到 98.7%,计算碳化硅控制器效率大于 85% 高效区面积的占比达到 94.19%;从图 18(b) 可以看出,硅控制器最高效率达到 98%,计算硅控制器效率大于 85% 高效区面积的占比达到 89.7%。可以看出,碳化硅控制器的效率有比较明显的提升,比硅控制器高效区面积扩大了约 5%。

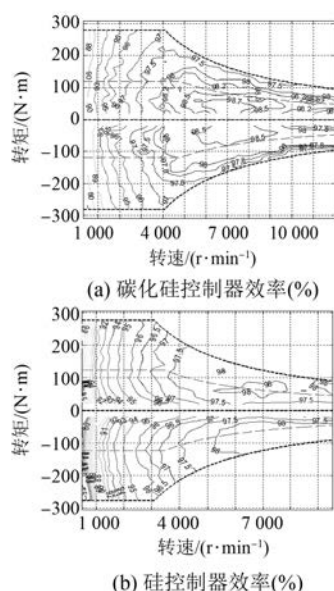


图 18 碳化硅控制器和硅控制器效率对比

2.4 控制器温升对比测试

为了更好地对比碳化硅和硅控制器的温升性能,保持两者开关频率统一为 10 kHz,冷却液入

水口温度统一为 65 °C,对碳化硅控制器和硅控制器进行峰值温升对比测试,对比测试曲线如图 19 所示。

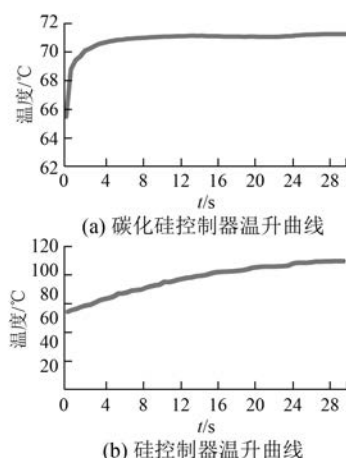


图 19 碳化硅和硅控制器温升对比测试

从图 19 持续 30 s 的峰值工况温升测试结果来看,碳化硅控制器峰值温度最高为 71.3 °C,控制器温度上升 8 K;而硅控制器的峰值温度最高为 108 °C,控制器温度上升 42.65 K。可见,本文所设计碳化硅控制器在同样的带载和频率条件下,30 s 峰值温升比常规的硅控制器有明显的下降。

3 结 语

本文开发了一款电动汽车用的碳化硅控制器,为高密度电机控制器的驱动控制提供了一种很好的解决方案。首先,阐述了碳化硅控制器的结构设计方案和电气原理;然后,对电机控制器的硬件设计和软件设计进行了详细介绍,提出了并联式三明治冷却水道的结构设计方案,并通过热仿真得出所开发的碳化硅控制器具有较好的冷却效果;最后,对所开发碳化硅控制器进行了带载和对比测试,结果表明该碳化硅控制器效率比硅控制器有较明显的提升,并且具有良好的控制性能。

【参考文献】

- [1] 张栋,范涛,温旭辉,等. 电动汽车用高功率密度碳化硅电机控制器研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5624.
- [2] 曹琳. 碳化硅超结肖特基势垒二极管的研究[D]. 西安:西安理工大学, 2009.

(下转第 92 页)