

新能源汽车用电机控制器的设计与测试^{*}

陈登峰^{1,2}, 孙臣玉^{1,2}, 陈雷^{1,2}, 位超群^{1,2}, 李艺晗^{1,2}

(1. 上海汽车电驱动有限公司, 上海 201806;

2. 上海汽车电驱动工程技术研究中心, 上海 201806)

摘要: 针对新能源汽车电机控制器功率密度较低、空间利用率有限的现状, 开发了一款具有高功率密度的新能源汽车控制器。采取结构、硬件的理论设计与试验验证相结合的方式开发控制器。前期通过设计分析、有限元仿真对控制器进行优化, 后期通过试验对控制器的性能进行验证。通过试验结果可知, 该电机控制器的效率较高、功率密度较大, 具有实用意义。

关键词: 新能源汽车; 电机控制器; 高功率密度

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)07-0095-05

doi: 10.12177/emca.2021.053

Design and Test of Motor Controller Used in New Energy Vehicles^{*}

CHEN Dengfeng^{1,2}, SUN Chenyu^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, WEI Chaoqun^{1,2}, LI Yihan^{1,2}

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

2. Shanghai Automobile Electric Drive Engineering Technology Research Center, Shanghai 201806, China)

Abstract: For the current situation of low power density and limited space utilization of domestic new energy vehicle motor controller, a new energy vehicle controller with high power density is developed. The design theory of structure and hardware is combined with experimental verification to develop the controller. In the early stage, the controller is optimized by design analysis and finite element simulation. In the later stage, the performance of the controller is verified by experiments. The experimental results show that the motor controller has high efficiency and high power density, and has practical significance.

Key words: new energy vehicle; motor controller; high power density

0 引言

当前, 中国为了鼓励节能减排, 将新能源汽车作为重点扶持的新兴产业, 发展新能源汽车已经成为保障能源安全和转型低碳经济的重要途径。控制器作为新能源电动汽车的三大核心技术之一, 其未来的发展趋势是高功率密度、高度集成化、轻量化^[1-3]。

电机控制器要想实现高功率密度通常采用电力电子模块集成技术和模块化的设计理念, 将汽车级功率器件 IGBT、IGBT 驱动和控制单元、复合

母排、膜电容器以及低热阻的散热器等关键部件高度集成, 开展大功率、高功率密度驱动电机控制器的产品优化与集成设计^[4-5]。控制器中的功率模块是提升功率密度的关键器件, 随着新能源汽车大功率、小型化发展, 功率模块也呈现高能量小型化的趋势, 更高功率密度的模块需要散热能力更强的散热结构^[6-8]。在整车及控制系统中大多采用水冷方式, 因此高功率密度控制器的散热对控制器的可靠运行至关重要, 而优化散热底板设计, 减小散热底板体积, 降低散热底板重量, 可以达到提高系统功率密度的目的^[9]。

收稿日期: 2021-04-28; 收到修改稿日期: 2021-05-28

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0100700)

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。

本文针对新能源汽车电机控制器高功率密度的要求,使用双面焊接单面散热 IGBT,开发了一款集成度高、功率密度高的电机控制器,重点介绍了该控制器的结构和硬件设计方案,并对控制器的冷却方案进行设计,开展了水道热仿真研究。最终,试制了控制器样机并进行台架性能测试,通过试验验证可以看出,所开发的电机控制器性能优异,体积功率密度可达 23.1 kW/L,满足设计指标要求。

1 结构设计与电气原理

为了实现高功率密度,充分利用控制器内部的体积,同时兼顾装配和制造简捷,本文开发的控制器主要通过研究 IGBT 模块、驱动电路、薄膜电容器、高效散热器的高度封装集成,实现了功率部件的直焊互连集成设计与焊接工艺,为整车高温、高湿、振动等复杂环境条件下电机控制器的可靠性提供保障,同时提升了电机控制器功率密度水平。本文所设计控制器内部结构爆炸图如图 1 所示。

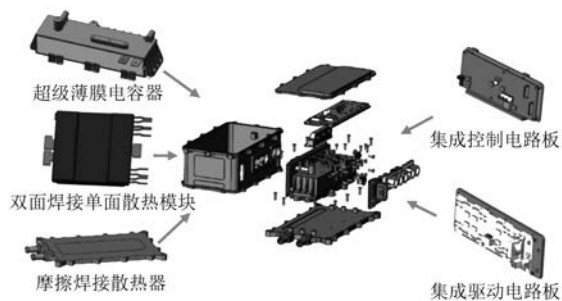


图 1 控制器内部结构爆炸图

图 2 为本文所设计控制器内部模块级集成组件,控制器采用双面焊接单面散热 IGBT 模块,并通过电阻焊工艺将膜电容器端子与 IGBT 模块直流端子、IGBT 模块交流端子与三相铜排的直接键合与集成,避免了螺栓的大量使用,实现了连接的可靠性与空间利用率的提升,使结构布局更加紧凑,功率密度的进一步提升。同时,从图 2 可以看出,水道盖板与水冷板间采用搅拌摩擦焊工艺进行焊接,实现盖板与水冷板间的焊缝处的固相连接,避免了大量使用螺栓,在提高控制器内部空间率的同时也保证了水道密封性,实现了控制器同功率等级的小型化。基于直焊互连工艺技术路

线,本文研制的控制器样机功率密度达到 23.1 kW/L,峰值功率 125 kW,集成度与性能水平与国外同类量产产品相当。

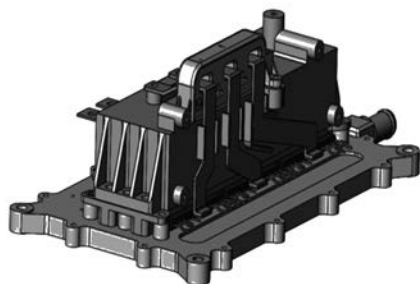


图 2 控制器内部模块级集成组件

电机控制器的原理框图如图 3 所示。电机控制器的控制系统工作在 12 V 电源网络下,通过 CAN 网络与整车通信,控制器功率部分的逆变单元能够将直流电转化为交流电并输入到永磁同步电机,控制器中成熟的底层配置和软件算法以及各采样电路、保护电路相互配合,可以使电机控制器稳定可靠地工作。

2 IGBT 模块和膜电容器

2.1 IGBT 模块

本文所设计控制器采用扁平化的双面焊接单面散热 IGBT 模块实物,如图 4(a)所示,该 IGBT 的电压为 750 V,电流为 800 A,该 IGBT 模块比传统的 IGBT 体积小,模块内部芯片采用双面焊接结构设计,在功率模块热阻上远小于平面型结构,同等条件下大大提升了功率模块的输出容量,提高了功率密度。

图 4(b)所示为 IGBT 模块双面焊接结构,芯片背面焊接于非对称结构 DBC,芯片正面焊接于正面焊接铜片结构,外部功率极以及信号极通过引线框架快速方便引出,减少模块内部铝线键合工艺,降低模块自身杂感,提高 IGBT 模块电气连接可靠性。图 4(c)为双面焊接实物。这种省去了绑定线工艺的新型 IGBT 封装工艺,使结构振动可靠性更高,并且可以大幅度节省控制器内部的空间。

2.2 薄膜电容器

为了减小模块与电容器之间的寄生电感以及改善模块与电容器连接空间,缩短模块与电容器

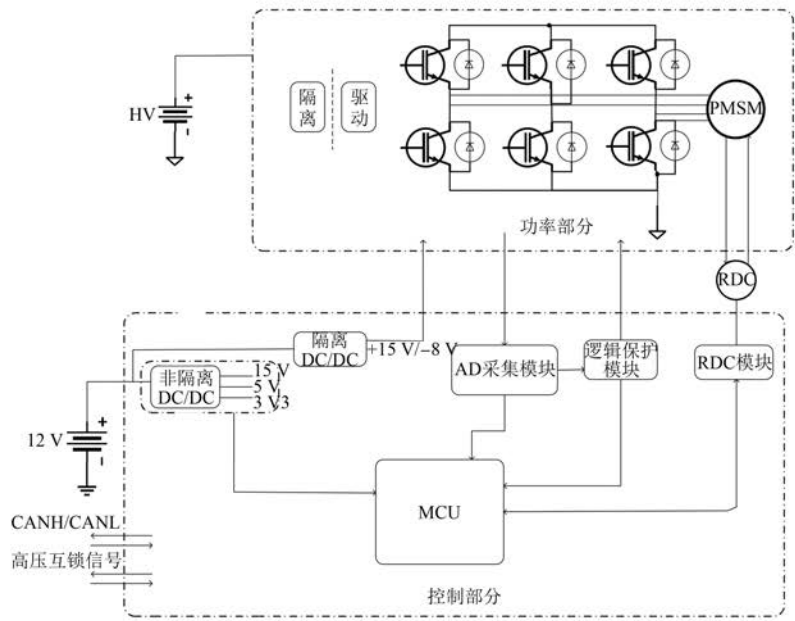


图3 电机控制器原理框图

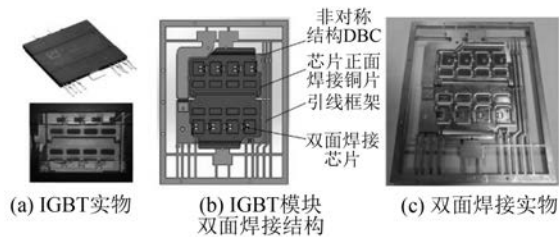


图4 双面焊接单面散热 IGBT 模块

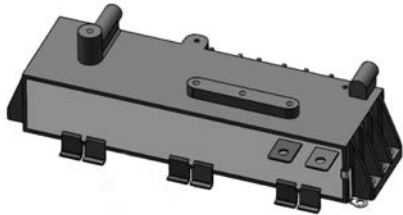


图5 薄膜电容器结构

之间的连接线路,开展了电容器与功率模块的连接技术研究。为了进一步减小电路所需薄膜电容器的额定电压和容量,同时提高电容器的耐电流水平,从而达到减小电容器体积的目的,通过对比研究,最后采用电阻焊工艺的连接方式。图5所示为本文所设计控制器薄膜电容器结构示意图。

为了进一步确认薄膜电容器减少容值体积和改善电感以后的热可靠性,需要进一步对薄膜电容器开展热仿真分析。根据控制器整机运行环境条件,将薄膜电容器底面温度设定为 80 ℃,周围环境温度设定为 85 ℃,使用仿真软件对薄膜电容器进行热仿真。

薄膜电容器热仿真结果如图6所示。仿真结果表明,薄膜电容器的热主要集中在薄膜电容器的灌封面母排侧及上侧母排处,热点区域最高温度为 98.2 ℃,小于芯子薄膜最高耐温 105 ℃,满

足长期耐温使用要求。

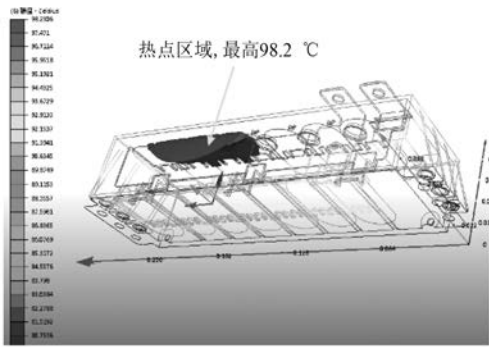


图6 薄膜电容器热仿真结构

3 冷却结构设计仿真

IGBT 模块在运行状态下会产生大量的热损耗,需要用相应的散热结构增加热交换面积,带走模块所产生的热量。本文设计的控制器的功率模

块由 3 个 IGBT 模块水平铺在散热底板上,在 IGBT 与底板之间需涂抹导热硅脂来填充间隙,再用压板压紧模块贴紧散热底板。散热底板背面设计有冷却水道,如图 7(a)所示。冷却液从入口流入控制器的散热水道,水道内部有间隔分布的呈云朵状的散热翅片,冷却液流入时,云朵状的散热翅片可以起到分流增大有效换热面积,降低热阻的作用。冷却液带走 IGBT 的产生热量,最后通过冷却水道的出口流入驱动电机内部,从而达到对整个系统散热的目的。

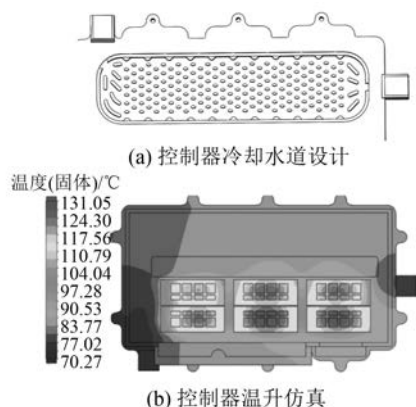


图 7 控制器冷却水道及温升仿真

考虑到过高的温度会缩短 IGBT 的寿命并可能降低整个控制器在使用过程中的可靠性,该款控制器需要对散热系统(水道)进行可靠性的分析,在目前散热分析中,主要通过仿真软件计算 IGBT 在不同工况下的最高温度以及后续样机的验证分析。散热仿真结果如图 7(b)所示,可以看出,模块在峰值工况下芯片的最高温度为 131.05℃,IGBT 模块长期稳定运行的耐温为 150℃,在使用要求范围内。

4 台架试验

为了确保电机控制器能够在整车的不同工况下平稳的运行,同时,使该控制器具有经济适用性,对所设计控制器制作样机,对系统进行系统性能测试,并对控制器效率进行测试,冷却液温度设定为 65℃。

4.1 系统性能测试

控制系统外特性如图 8 所示,根据测试图可知,在峰值功率 125 kW,峰值扭矩 300 N·m 的工

况下,控制系统的输出平稳,没有较大的波动。

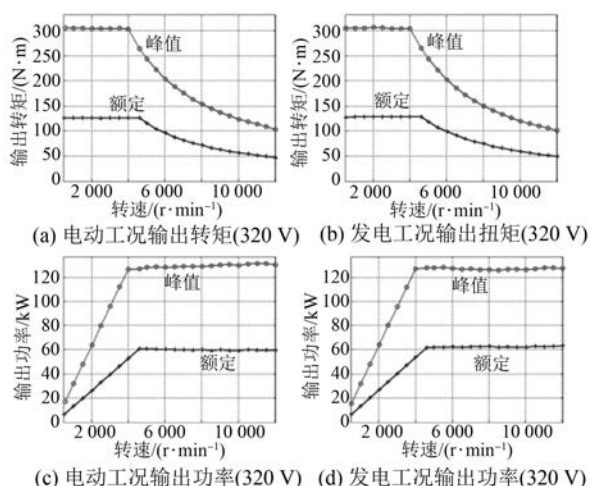


图 8 控制系统外特性测试

对本文所设计的电机控制器效率 MAP 与系统效率 MAP 测试,测试结果如图 9 所示。由图 9 可知,电动工况下,控制器最高效率为 97.82%,系统最高效率为 94.69%;发电工况下,控制器最高效率为 98.23%,系统最高效率为 94.83%;控制器效率大于 90% 的高效区面积占 84.66%,系统效率大于 80% 的高效区面积占 83.56%。

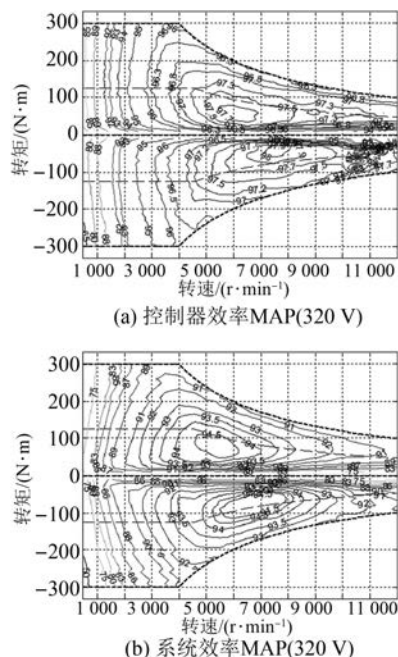


图 9 控制器效率 MAP 与系统效率 MAP 测试

4.2 温升测试

在功率密度得到提高的同时,IGBT 产生的热

量也迅速增加,因此要着重关注 IGBT 本身的温升效果。对控制器进行温升测试,试验结果如图 10 所示,在峰值工况下模块内部温度传感器的最高温度为 95 ℃,由此反推 IGBT 芯片的最高温度不会超过 120 ℃,低于 IGBT 芯片结温 150 ℃,可长期运行。

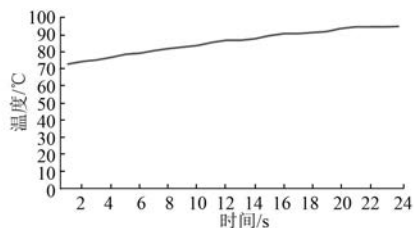


图 10 电机控制器 IGBT 实测温度

5 结 语

本文通过结构、硬件的理论设计、有限元仿真、试验验证相结合的方式开发了一款控制器,该电机控制器高效区($\eta > 90$)占 84.86%,系统高效区($\eta > 80$)占 83.56%,可以稳定地输出峰值功率 125 kW,峰值转矩 300 N·m。本文所设计电机控制器功率密度可达 23.1 kW/L,为新能源汽车电机控制器提供了一种有效的设计方案。

【参 考 文 献】

- [1] 朱军. 新能源汽车动力系统控制原理及应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2013.
- [2] 卢文轩,严星,陈平,等. 纯电动汽车电驱系统集成化前沿趋势[J]. 汽车工程师,2019(10):16.
- [3] 刘均,钟玉林,张瑾,等. 电动汽车用高功率密度电机控制器研发[J]. 电力电子技术,2011(12):14.
- [4] 张舟云,贡俊. 新能源汽车电机技术与应用[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012.
- [5] 范涛,温旭辉,宁圃奇,等. 新能源汽车用全 SiC 电机驱动控制器研究进展[J]. 中国基础科学,2019,21(增刊1):29.
- [6] 袁登科,徐延东,李秀涛. 永磁同步电动机变频调速系统及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2019.
- [7] 刘超. 电动汽车驱动逆变器的设计[D]. 杭州:浙江大学,2017.
- [8] 黄其,薛利昆,罗玲,等. 电动汽车整车控制器设计及测试[J]. 自动化与仪表,2019,34(3):14.
- [9] 余军,马雅青,赵振龙,等. 电动汽车用水冷散热器的设计及仿真[J]. 大功率变流技术,2015(3):51.

《电机与控制应用》网站已完成百度官网认证

本刊网站已完成百度官网认证。使用百度搜索“电机与控制应用”,显示的搜索结果中,本刊官方网站有“官方”标志。

百度官网认证将有助于本刊作者和读者快速识别网站,防止山寨网站、钓鱼虚假网站侵害本刊作者和读者的权益。

扫码访问本刊网站

