

高功率密度双驱动控制器开发与验证^{*}

陈登峰, 周诗君, 位超群, 魏璨然
(上海汽车电驱动有限公司, 上海 201806)

摘要: 针对新型混合动力机电耦合总成系统开发了一款高功率密度双驱动控制器。详细阐述了该控制器的结构设计方案, 并对硬件电气原理和软件控制策略进行了介绍, 提出了叠层式七通道的冷却设计方案, 并通过有限元仿真对双驱动控制器的散热效果进行了热仿真研究。最后, 通过制造样机对双驱动电机控制器进行了台架试验, 试验结果表明, 所设计的双驱动电机控制器具有高效的冷却效果和稳定的控制性能。

关键词: 新能源汽车; 双驱动控制器; 高功率密度; 热仿真

中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)10-0085-07

doi: 10.12177/emca.2020.112

Development and Verification of High Power Density Dual-Drive Controller^{*}

CHEN Dengfeng, ZHOU Shijun, WEI Chaoqun, WEI Canran
(Shanghai Edrive Co., Ltd., Shanghai 201806, China)

Abstract: A high power density dual-drive controller is developed to meet the requirements of electromechanical coupling system of novel hybrid electric vehicles. The structure design scheme of the controller is described in detail, and the hardware electrical principle and software control strategy are briefly introduced. The cascaded seven-channel cooling design scheme is proposed, and the heat dissipation effect of dual-drive controller is studied by finite element simulation. Finally, the bench test of the dual-drive motor controller is carried out with a prototype controller. The test results show that the dual-drive motor controller has a high-efficiency cooling effect and stable control performances.

Key words: new-energy vehicle; dual-drive controller; high power density; thermal simulation

0 引言

随着传统化石能源的日趋枯竭和环保压力的不断加剧, 燃油汽车终将被时代淘汰^[1-2]。新能源汽车作为燃油车的替代, 逐渐受到市场的关注, 发展新能源汽车也已逐渐成为各国政府的共识^[3-4]。作为新能源电动汽车的三大核心技术之一, 驱动电机控制系统是电动汽车的核心关键部件, 其未来的发展趋势是高效率、高功率密度和高集成化^[5]。现阶段, 由于电池技术的发展瓶颈, 纯电动汽车的续航里程还未能达到传统燃油车的水平, 无法做到全面普及^[6]。这种情况下, 续航里程

不完全依赖于整车电池容量的混合动力汽车受到市场更多的青睐。目前, 传统混合动力汽车普遍采用 2 套相互独立的驱动电机系统和发电机系统同时工作。这种情况不可避免地导致控制系统体积庞大和质量偏重, 使得整车油耗和电池利用率不够理想, 也不符合新能源汽车动力总成系统小型化、轻量化和集成化的发展方向^[7]。因此, 有必要将混合动力汽车中的驱动电机、驱动电机控制器、发电机控制器和发动机进行深度集成, 然后再与减速器和发动机进行集成, 形成一个新型混合动力机电耦合动力总成系统, 使该系统既可实现驱动和发电的需求, 也可以根据实际工况需求让

收稿日期: 2020-07-14; 收到修改稿日期: 2020-07-24

^{*} 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。

电机处于高效率工作区,提高能量利用率,实现驱动电机系统高效化、集成化^[8]。目前,混合动力汽车机电耦合动力总成系统已经成为各大整车厂研究的重点,国外主机厂如丰田、本田、通用汽车均已经研发出可以应用在乘用车上的量产产品,而国内车企暂时还没有类似批量应用的产品,但是一些整车厂如上汽、奇瑞、吉利、一汽也已经开始布局,并已有相应的样机产品搭载整车进行测试验证^[9]。

这种高度集成的机电耦合电机控制系统的电机控制器封装体积较小,功率密度较高,同时又与2台电机集成,实际工作当中该电机控制器需要较高的热交换率,才能保证整个系统的正常工作,因此该双驱动电机控制器不仅需要集成度高,也需要散热性好^[10]。

基于此,本文开发了一款用于混合动力机电耦合总成系统的高功率密度双驱动电机控制器,并详细地阐述了该控制器的结构设计方案,对硬件电气原理和软件控制策略进行了简单介绍,提出叠层式七通道的冷却设计方案,并通过有限元仿真对双驱动控制器的散热效果进行了热仿真研究。最后,制作样机进行台架测试验证,测试结果表明该双驱动电机控制器具有高效的散热效果和稳定的控制性能。

1 双驱动控制器设计与开发

1.1 双驱动控制器结构

高功率密度双驱动控制器额定工作电压 240 V,最高工作电压 420 V,在对 IGBT 模块选型时,充分考虑了系统峰值电压、设计经验裕量、实际产品情况、电机系统最大反电动势以及电机峰值电流等要求,最终选择斯达的 650 V/800 A 双面散热模块(型号:GD800HFT65N3S)。该模块体积小、厚度薄,具有高散热性、高可靠性、高集成化等优点,其结构如图 1(a)所示。

高功率密度双驱动控制器采用 6 个双面散热 IGBT 模块并排布置设计,每个模块均有 2 块层叠式散热水道板夹紧固,实现对模块的双面冷却。高功率密度双驱动控制器的具体结构示意如图 1(b)所示。该控制器零件组成主要包括散热器组件、三相铜排、电流传感器、板簧、二合一驱动控制板、磁环组件、滤波电容、箱体和箱盖等。其中,箱

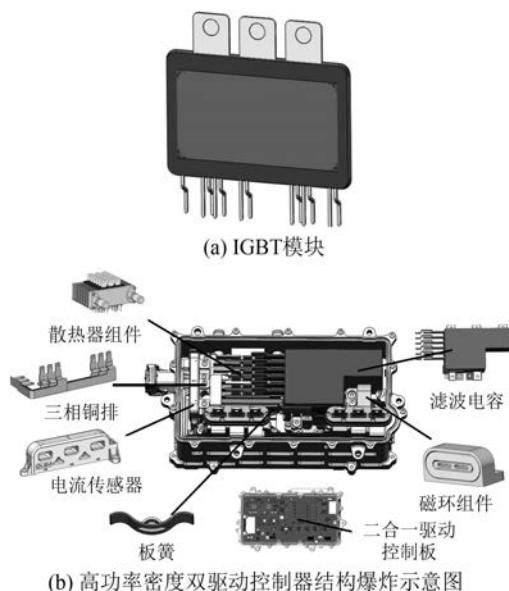


图1 双驱动控制器结构示意图

体分上下 2 个腔体,二合一驱动控制板装配在箱体底部腔体,散热器组件、三相铜排、电流传感器、板簧组件、磁环组件和滤波电容均装配在箱体上部腔体。

1.2 双驱动控制器硬件设计

电机控制器主要作用是控制电机输出转矩转速,并保障电机及功率模块的基本安全和精准操控,最大化提升驱动系统效率。在正常工作中,所设计的控制器分为电驱和发电 2 种状态,控制器在电驱和发电状态可控制电机实现高精度、高效率的转矩输出和能量回收。电驱状态下,电池包高压直流电经过滤波电容滤波,流入功率 IGBT 模块逆变为交流电输入驱动电机,输出机械能。发电状态下,机械能通过电机转化为交流电,经过 IGBT 整流为高压直流电,输入整车电池包进行存储。

双驱动控制器电气原理框图如图 2 所示。高功率密度双驱动控制器的电路板采用集成设计方式,即将 2 个 IGBT 模块的驱动和控制单元做在同一块 PCBA 板上,既节省了安装空间,又使得驱动板和控制板省去了线束连接的风险。该控制器的 PCBA 电路板上面同时集成了电源转换电路、CAN 通信电路、温度检测电路、电压检测电路、电流检测电路、旋变励磁与检测电路、逻辑保护电路、驱动电路等,这些电路组合在一起满足了整个

系统的功能需求。而且,PCBA 板上部分器件在电路当中可以实现多电路的共用,既节省布板空间,又降低了制造成本,更符合设计需求。

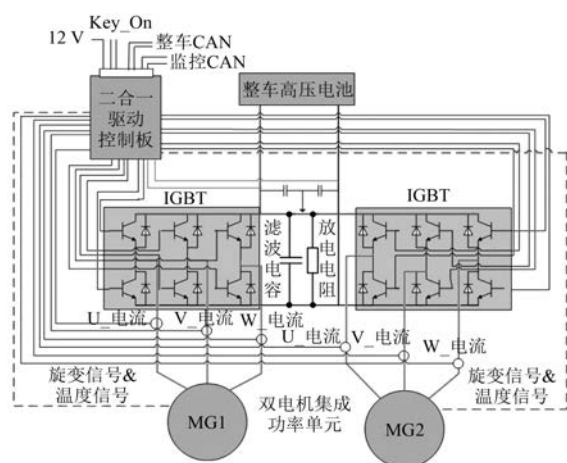


图2 双驱动控制器电气原理图

工作过程中,二合一驱动控制板根据整车CAN信号的输入与控制器通信成功,整车高压电

池首先接通,二合一驱动控制板里面的控制单元控制驱动单元工作,使得 IGBT 门极实现开通和关断,确保输出交流电驱动 MG1 和 MG2 电机运行,同时电机的三相电流传感器将采集到的电流信号反馈给二合一驱动控制板里面的控制单元,同时电机本身的传感器采集到的旋变信号和温度信号也会反馈给二合一驱动控制板里面的控制单元,进而完成对电机本身的闭环控制,实现对电机的精确控制。

1.3 双驱动控制器软件设计

高功率密度双驱动控制器软件开发主要涉及到应用层开发,控制器需要根据 Autosar 软件整体架构进行设计,然后再根据不同的功能和需求,对软件划分功能模块,并进行分块设计。双驱动控制器软件的功能模块设计需要结合驱动电机和发电机的工作模式进行确定。电机控制器的软件工作模式主要有初始化、待机、高压激活、转速控制、扭矩控制、高压放电、系统失效等。高功率密度双驱动控制器工作模式转换示意图,如图3所示。

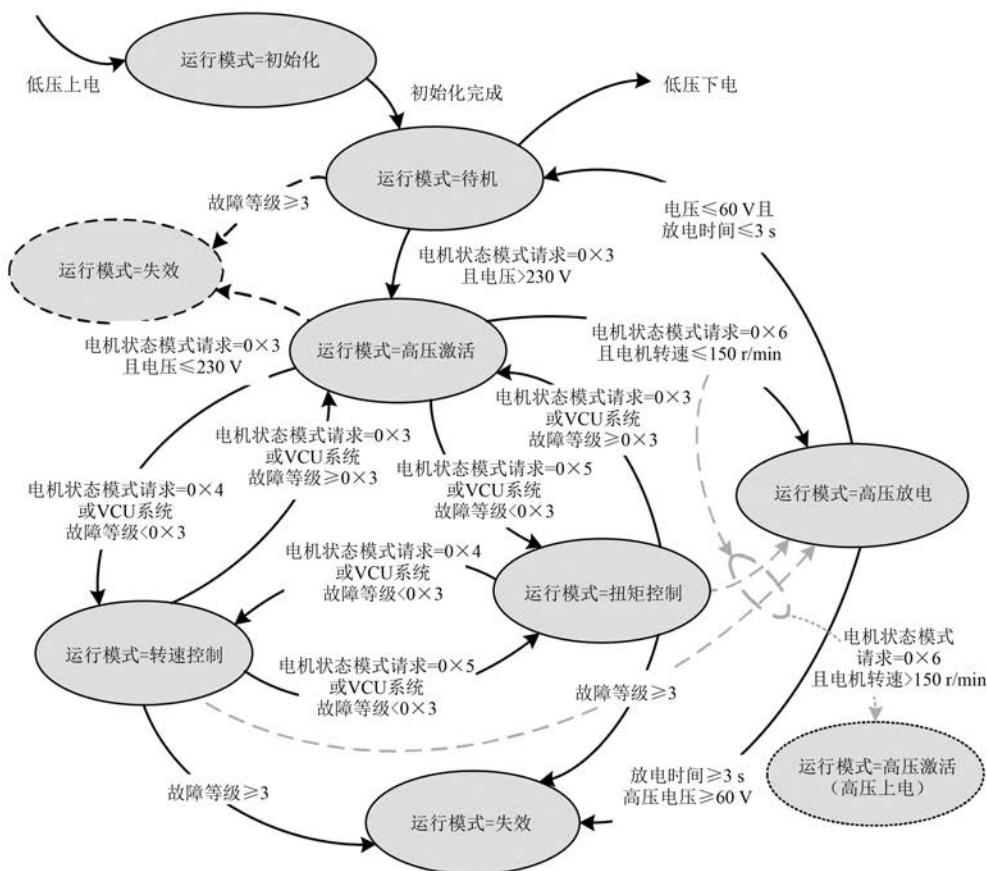


图3 双驱动控制器工作模式转换示意图

控制器各种工作模式的说明如下:

(1) 初始化模式。低压上电后,控制器开始初始化,将所有输出设置成安全状态,复位相关故障,完成 CAN 驱动初始化工作以及传感器校零标定工作等。

(2) 待机模式。初始化结束后,在未收到整车控制单元 VCU 请求高压激活命令前,控制器反馈待机模式,表示低压工作正常。

(3) 高压激活模式。在待机模式下,整车控制单元 VCU 控制电池管理系统 BMS 进行预充电,主继电器吸合后,VCU 向 MCU 发送高压激活信号,此时控制器检测母线电压是否满足最低电压需求。如达到要求,控制器向 VCU 反馈高压激活信号,完成高压上电过程;反之,若此时高压未达到最低工作电压,则控制器反馈欠压故障模式,控制器无法进入正常模式工作。

(4) 转速控制模式。当整车需求指令为转速控制模式时,且整车无严重故障,控制器可进入转速控制模式。当整车有严重故障时,控制器会从转速控制模式自动转换至高压激活模式并关闭 IGBT 使能。另外,当条件满足时,控制器可在转速模式下根据 VCU 请求转换至高压激活、转矩控制器或放电模式。

(5) 转矩控制模式。当整车需求指令为转矩控制模式,且整车无严重故障,控制器可进入转矩控制模式,根据 VCU 请求转矩进行控制,正转矩为驱动模式,负转矩为制动发电模式。当整车有严重故障时,控制器会从转矩控制模式自动转换至高压激活模式并关闭 IGBT 使能。另外,当条件允许时,控制器可在转矩控制模式下根据 VCU 请求转换至高压激活、转速控制或放电模式。

1.4 冷却系统设计与仿真

散热器组件结构如图 4(a)所示。本文采用 7 层水道散热板平行排列布置对 IGBT 进行冷却散热,6 块独立的 IGBT 模块正反两面均涂抹导热硅脂后,叠层贴紧散热板前后表面,然后通过板簧的弹性变形压紧,并保证模块与散热板的充分接触。水道散热板结构如图 4(b)所示。每层散热板由上盖板、下盖板和翅片组成,并通过锡膏焊接,水流从中间流过时候可以同时将上下盖板 2 个侧面的热量带走。模块的高压端子通过激光焊接实现与三相铜排、滤波电容连接。模块的低压端子穿

过箱体的中间隔层与二合一驱动控制板焊接。整个冷却系统的水道模型如图 4(c)所示。工作时冷却液从进水口流入后,并分成 7 层独立并联的水流进入水道散热板,对模块进行双面散热,最终 7 条并联的水流汇集在出水口处流出散热器,完成对整个双驱动控制器的冷却散热。

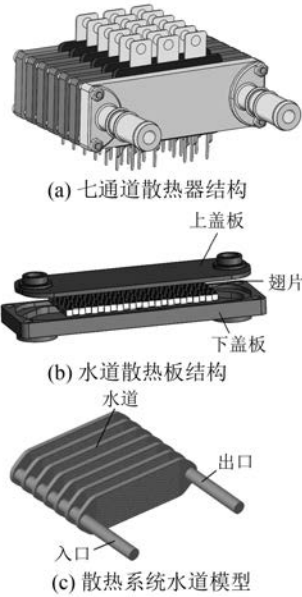


图 4 散热器组件结构

实际工作时,在峰值工况下双驱动控制器模块芯片的瞬时温升最高,此时芯片最容易因为温度过高而发生损坏。因此,有必要研究峰值工况下 IGBT 模块的热分布。使用 AVSYS 软件对本文所设计双驱动控制器进行有限元热仿真分析,边界条件及载荷分布情况如表 1、表 2 所示。

表 1 边界条件

边界条件	边界值
流量/(L·min ⁻¹)	8
入口水温/℃	65
环境温度/℃	80

表 2 模块损耗计算数据

工况	IGBT 损耗	DIODE 损耗
电机 1 峰值	1 884.0	471.0
电机 2 峰值	2 188.8	547.2

热仿真结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,6 个 IGBT 模块当中最高温度为 131 ℃,而模块长期

使用温度为 150 ℃, 满足长期使用要求。

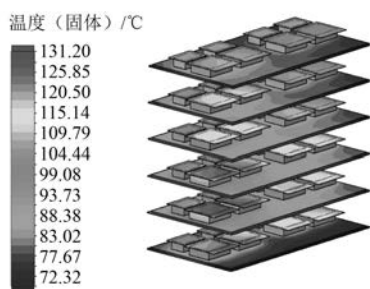


图5 峰值工况下模块温度分布仿真

2 台架测试与验证

对所设计高功率密度双驱动电机控制器制造样机, 并进行台架带载测试, 测试负载电机均为永磁同步电机, 其中 MG1 作为发电机, 峰值功率为 40 kW、峰值扭矩为 100 N·m; MG2 作为驱动电机, 峰值功率为 80 kW、峰值扭矩为 220 N·m。对双驱动电机控制器分别进行双脉冲测试、系统外特性测试、控制器效率测试和控制器温升测试。

2.1 控制器双脉冲测试

对所选 IGBT 模块进行双脉冲测试, 测试结果如图 6 所示。

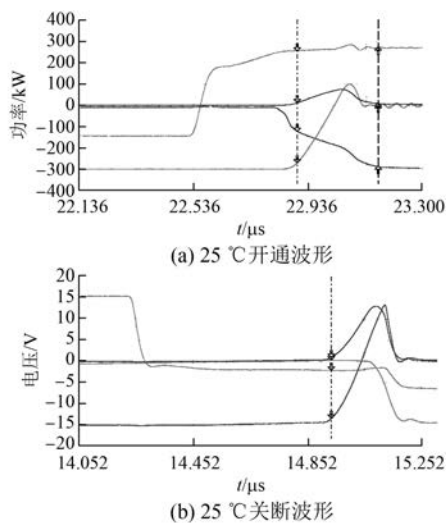


图6 控制器开通关断波形

该模块开关速度可控制在千纳秒以内, 开关速度响应迅速。从图 6(a) 可知, 开通瞬间, 栅极给出 15 V 的开通信号, 0.2 μs 后发射极导通电流开始迅速爬升, 经 0.18 μs 二极管反向恢复电流达到尖峰 198 A, 不足 0.1 μs 后反向恢复电流消

失, 回到母线电流 600 A, 整个过程中模块的电流峰值为 798 A, 小于模块标称电流 800 A。从图 6(b) 可知, 当控制器相电流为 600 A 时, 模块关断, 在 0.6 μs 后集电极电压开始爬升, 由于系统杂感的存在, 在 0.2 μs 内迅速爬升至高峰值, 此时产生的电压尖峰为 267 V, 不足 0.1 μs 后电压跌落到母线额定电压为 300 V, 整个过程中模块集电极承受最高电压 567 V, 小于模块标称耐压 650 V。因此, 该模块可以实现尖峰电压和尖峰电流下的安全可靠工作。

2.2 系统外特性测试

在 240 V 额定电压下, 对高功率密度双驱动电机控制器进行外特性测试, 结果如图 7 所示。

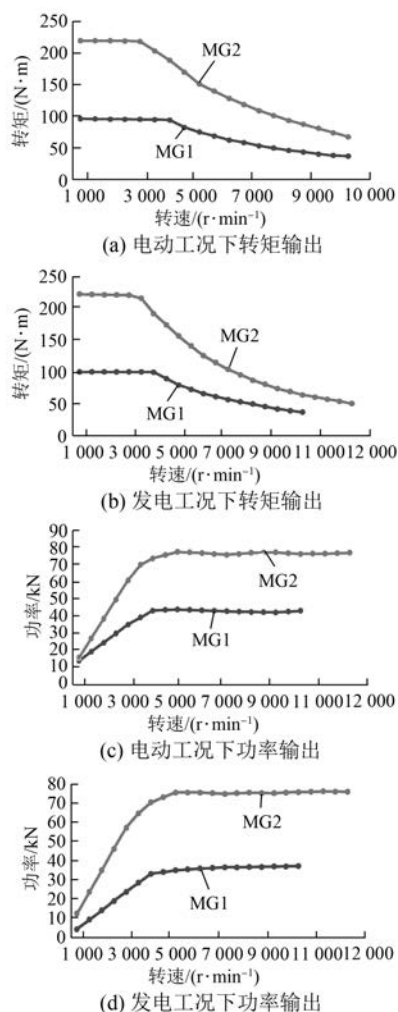


图7 系统外特性测试曲线

从图 7 可以看出, MG1 发电机在电动状态和发电状态均可以输出峰值扭矩 100 N·m, 其中电

动状态峰值功率输出 42 kW,发电状态峰值功率输出 37 kW;MG2 驱动电机在电动状态和发电状态均可以输出峰值扭矩 220 N·m,其中电动状态峰值功率输出 78 kW,发电状态峰值功率输出 76 kW。

2.3 双驱动控制器效率测试

对双驱动控制器进行效率测试,其效率 MAP 如图 8 所示。MG1 发电机控制器电动状态下最高效率为 97.71%,发电状态下最高效率为 97.07%,通过软件计算其控制器效率大于 85% 的高效区面积占比为 77.4%。MG2 电动状态下最高效率为 97.95%,发电状态下最高效率为 98.12%,通过软件计算其控制器效率大于 85% 高效区面积占比为 89.53%。

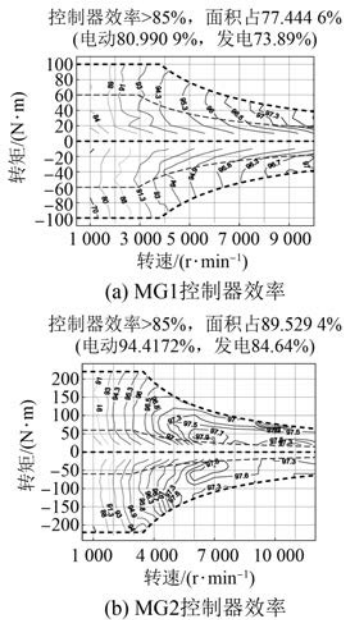


图 8 双驱动控制器 MAP 图

2.4 双驱动控制器温升测试

为了进一步验证 IGBT 模块在峰值工况下的实际温升情况,对双驱动电机控制器进行温升测试,将双驱动电机控制器入口冷却液温度设置为 65 ℃,流速设定 8 L/min,母线电压 240 V,开关频率 10 kHz。6 个模块当中只采集 MG1 和 MG2 电机控制器中温升最高的 2 个模块,模块温度测试数据和曲线如表 3 和图 9 所示。其中, MG1 在 80 N·m, 4 750 r/min, MG2 在 220 N·m, 3 500 r/min 峰值工况下运行。

表 3 峰值工况下模块温升

时间/s	MG1 温度/℃	MG2 温度/℃
0	51	47
0.5	80	83
1.0	81	83
⋮	⋮	⋮
30.0	81	84

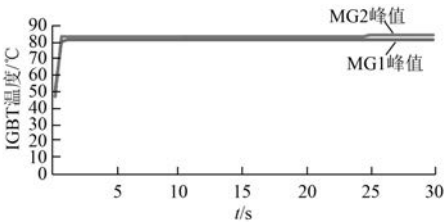


图 9 峰值工况下模块测试温度

从表 3 可知,该模块峰值工况下,在 0.5 ~ 1.0 s 内温升快速飙升,并趋于恒定,这说明模块与散热器的热交换达到了平衡。从图 9 可以看出, MG2 控制器模块在持续 30 s 峰值工况下的模块最高温度为 84 ℃, MG1 控制器模块在持续 30 s 峰值工况下的模块最高温度为 81 ℃,而 MG2 的温度相对 MG1 高了 3 ℃,但均远低于模块长期使用最高耐温 150 ℃。由此可知,所开发双驱动控制器散热效率高,具有较好的散热性能。

3 结 语

本文针对新型混合动力机电耦合动力总成系统的需求开发了一款高功率密度双驱动控制器。详细阐述了该控制器的结构设计方案,并对硬件电气原理和软件控制策略进行了简单的介绍,提出了叠层式七通道的冷却系统设计方案,并通过有限元仿真对双驱动控制器的散热效果进行了热仿真研究。最后,通过制造样机对双驱动控制器进行了台架试验,试验结果表明,所设计的双驱动控制器具有高效的冷却效果和稳定的控制性能。

本文所设计的层叠式双面散热器具有高效的散热效果,尤其对高功率密度电机控制器的冷却散热具有更明显的有益效果,具有重要的工程应用价值。

【参考文献】

[1] 包显奇. 双电机插电式混合动力汽车整车控制器

- 开发[D]. 长沙:湖南大学, 2019.
- [2] 王永广. 主流双电机混合动力系统对比分析[J]. 中国汽车, 2019(4): 30.
- [3] 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, 2013.
- [4] 丁杰, 张平. 电动汽车变流器用 IGBT 水冷散热器热仿真分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(2): 525.
- [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] 陈俊, 王莹, 魏俊天, 等. 一款基于双面水冷 IGBT 的双电机控制器开发与验证[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(10): 99.
- [7] 宋振斌, 李军伟, 孙宾宾, 等. 双轴双电机驱动电动汽车整车控制器开发[J]. 现代电子技术, 2020, 43(1): 140.
- [8] 阚辉玉, 李军伟, 姜世腾, 等. 双电机双轴驱动电动汽车整车控制器硬件在环测试研究[J]. 中国农机化学报, 2019(9): 108.
- [9] 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: 96-99.
- [10] 余军, 马雅青, 赵振龙, 等. 电动汽车用水冷散热器设计及仿真[J]. 大功率变流技术, 2015(3): 51.

◎广告◎

四川宜宾力源电机有限公司

为了适应公司技术持续创新、经济规模不断扩大的迫切需要,诚聘电机行业人才!

1、电机设计工程师 3 人

任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 5 年以上。

2、电机工艺工程师 3 人

任职要求:工业电机制造行业工程技术岗位 3 年以上。

3、生产、质量管理工程师 2 人

任职要求:工业电机制造行业生产、质量管理岗位 3 年以上(有 6 σ 管理经验者优先)。

4、销售工程师(销售经理)2 人

任职要求:工业电机销售岗位 3 年以上,具有国际贸易经验、熟练英语口语交流能力者优先,可带团队加入。

待遇:

- 1、具有市场竞争力的薪资待遇,具体面议;
- 2、五险一金,双休;
- 3、公司安排小区环境住房;

4、协助子女入学;

5、解决配偶就业;

6、省外人才春节假期多休五天;

7、就业 5 年且有突出贡献的人员,公司额外予以丰厚奖励。

公司地址:四川省宜宾市叙州区盐坪坝工业园 1 号

电话:0831-2400330

网址:www.yblydj.cn

邮箱:yblydj@126.com

扫码关注公众号

