

一款单管并联电机控制器设计与验证^{*}

陈登峰^{1,2}, 陈雷^{1,2}, 许晨昊^{1,2}, 谢鸣峰^{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: 针对低成本纯电动汽车开发了一款单管并联电机控制器。阐述了该单管并联电机控制器的总体设计方案, 并对该控制器的硬件和软件设计方案进行了介绍, 提出了基于单管 IGBT 并联的电机控制器设计方案, 并对立式水冷散热器进行了热仿真分析, 研究了单管并联电机控制器的散热效果。最后, 对试验样机进行了台架测试。从测试结果可以看出, 所设计单管并联电机控制器具有良好的控制性能。

关键词: 电机控制器; 单管 IGBT 模块; 立式散热器

中图分类号: U 469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)11-0068-07

doi: 10.12177/emca.2020.143

Design and Verification of a Single-Tube Parallel Motor Controller^{*}

CHEN Dengfeng^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}, XU Chenhao^{1,2}, XIE Mingfeng^{1,2}

(1. Shanghai Automotive Edrive Co., Ltd., Shanghai 201806, China;

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

Abstract: A single-tube parallel motor controller for low cost battery electric vehicle is developed. The overall design scheme of single-tube parallel motor controller is described, and the hardware and software design schemes of the controller are introduced. A design scheme of the motor controller based on the single-tube IGBT parallel connection is proposed. The thermal simulation analysis of the vertical water-cooled radiator is carried out, and the heat dissipation effect of the single-tube parallel motor controller is studied. Finally, the bench test of the single-tube parallel motor controller prototype is carried out. The test results show that the designed controller has a good control performance.

Key words: motor controller; single-tube IGBT module; vertical radiator

0 引言

随着电动汽车补贴的逐步减小, 纯电动汽车由于受到电池和电驱动系统成本的制约, 其竞争能力明显弱于燃油汽车, 因此发展低成本的纯电动汽车电驱动系统意义重大^[1]。传统的电驱动系统中通常选择 3 个桥臂封装好的 IGBT 模块, 这种封装模块价格在整个电机控制器成本中占比超过 30%^[2-3]。与传统的纯电动汽车电机控制器驱动模块相比, 通过将多个单管器件串联或并联组成一个完整的驱动装置, 既可以提高控制器输出功

率, 又可以使电机控制器实现降低成本约 15%, 这种方式有着很大的市场推广应用价值^[4-5]。目前, 关于单管并联设计, 国内外相关电驱动企业均在加大投入, 国外的特斯拉、德尔福等已经有量产的成熟产品在应用, 国内的英博尔、阳光电源等也已经开发出了匹配不同车型的相关产品^[6-7]。本文针对纯电动汽车低成本电驱动系统的需求, 开发了一款基于单管模块的单管并联电机控制器, 详细介绍了该控制器的结构、硬件、软件设计方案, 重点分析了单管模块冷却设计方案, 仿真和试验结果表明, 所设计的电机控制器具有突出的散

收稿日期: 2020-07-28; 收到修改稿日期: 2020-09-08

* 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。

热性能和良好的控制性能。

1 结构设计与电气原理

本文设计的基于单管 IGBT 的电机控制器技术指标如下:输入电压范围 280~420 V, 额定电压 330 V, 额定功率 30 kW, 峰值功率 55 kW, 峰值功率持续时间 ≥ 30 s, 冷却方式为液冷, 系统可靠性满足汽车使用要求。通过对分析, 控制器模块选择英飞凌 600 V/120 A 单管 IGBT 模块(型号:AIKQ120N60CT), 该单管 IGBT 模块具有封装可靠性高、低 EMI、低损耗、体积小、可根据功率需求排列等优点。单管 IGBT 模块示意图如图 1 所示。



图 1 单管 IGBT 模块示意图

所设计的单管控制器采用三管并联的方案, 即每 6 个单管 IGBT 为一组, 一共使用 18 个单管 IGBT 模块, 并且同一组单管 IGBT 采用面对面排列, 先通过回流焊工艺焊接在陶瓷板上面, 再分别通过回流焊工艺将陶瓷底板焊接在立式散热器的两面, 形成一个功率组件, 也称作一个半桥臂功率

组件。一个完整的电机控制器内部需装配 3 个这样的半桥臂功率组件, 从而组成一个全桥臂功率模块, 产生的效果和市面上封装好的 IGBT 模块是一样的。立式散热器可以在两面同时对上桥和下桥的单管 IGBT 进行冷却散热。单管并联电机控制器具体结构布置爆炸图如图 2 所示。

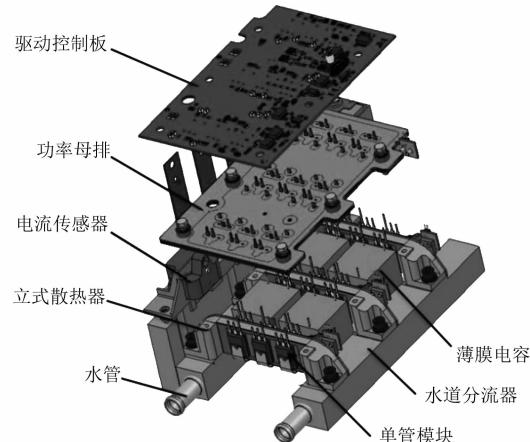


图 2 单管并联控制器结构布置爆炸图

电机控制器主要用于控制驱动电机实现精确的转矩、转速输出, 确保驾驶车辆的正常行驶, 并尽可能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, 再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, 完成整个电流逆变过程^[8]。单管并联电机控制器的电气原理框图如图 3 所示。

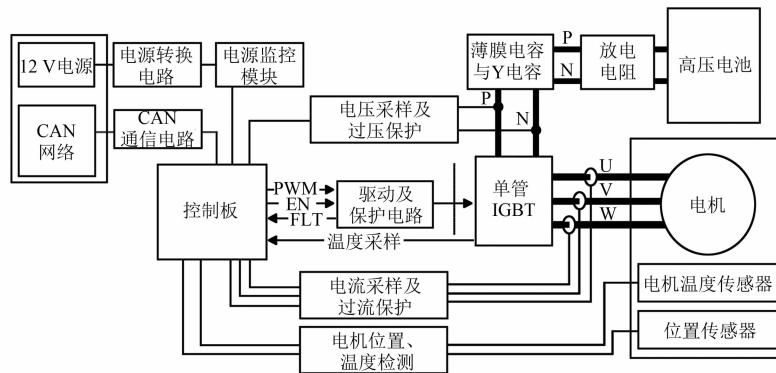


图 3 单管控制器电气设计原理框图

2 硬件设计

所设计单管并联电机控制器采用将控制和驱

动集成布置在一块 PCBA 板上的设计方案。该设计方案通过功率部分回流路径, 省去了传统的屏蔽板, 在保证系统抗扰性的同时也大幅减小了控

制器的体积。功率部分采用 3 个单管 IGBT 模块进行并联,合理设计并联单管 IGBT 模块间的均流和均压,完成整个单管功率组件的散热和固定。单管并联电机控制器硬件电路主要包括电源转换电路、CAN 通信电路、温度采样电路、电压采样电路、电流采样电路、旋变解码电路、驱动电路、逻辑保护电路等。

2.1 电源转换电路

电源转换电路主要为后级各部分电路提供稳定的 15、5、3.3 V 电源以及用来驱动 IGBT 的

隔离电源,并保证控制器在弱电输入为 6~18 V 间能够正常工作。单管并联控制器的电源转换电路框图如图 4 所示。第一级采用宽输入范围的非隔离型升降压变换拓扑,输出 15 V 为旋变励磁电源供电,同时 15 V 通过隔离 DC-DC 变换器为 IGBT 控制器驱动单元供电。DC-DC 降压变换器将 15 V 电压转换为 5 V 电压为传感器、比较器、运放电路、通信电路等供电,之后 5 V 电压再通过 LDO 降压到 3.3 V,为控制芯片提供电源。

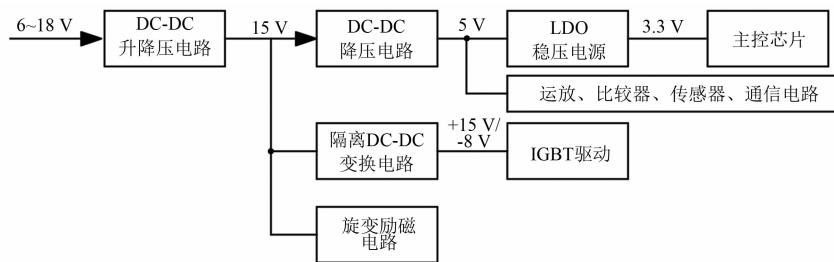


图 4 电源转换电路框图

2.2 CAN 通信电路

单管并联控制器的 CAN 通信电路框图如图 5 所示。该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,其浪涌吸收电路可以吸收整车 CAN 网络中的瞬时脉冲。其中,共模、差模电路用于抑制回路中耦合进来的电磁噪声,此外还有用于阻抗匹配的终端电阻网络。

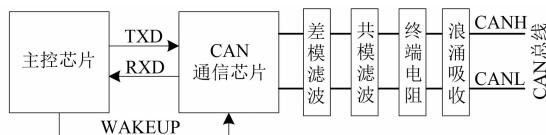


图 5 CAN 通信电路框图

2.3 温度采样电路

单管并联控制器的温度采样电路框图如图 6 所示。控制器可对电机定子绕组进行实时温度检测,温度监控电路可匹配 NTC 或 PTC 进行温度采集,以满足不同需求;单管 IGBT 温度通过用弹簧夹片将 NTC 温度传感器夹住贴紧在 IGBT 外壳上面,这样采集可以独立监控三组半桥单管 IGBT 功率组件散热情况,除可对 IGBT 本体进行热保护外,还可根据温升分布,判断是否存在水流不均、水道堵塞等问题。

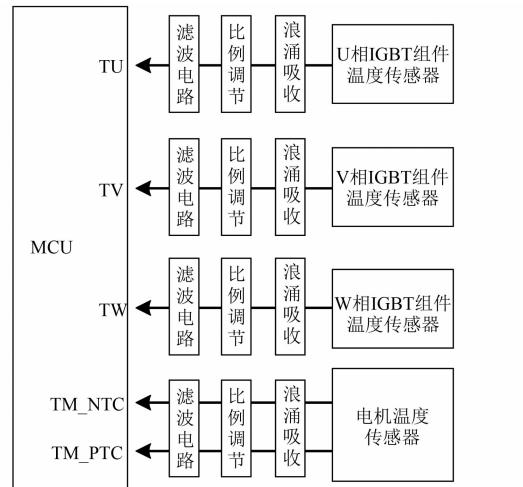


图 6 温度采样电路框图

2.4 高压采样电路

高压采样电路框图如图 7 所示。高压采样电路采用高精度线性光耦隔离,隔离强度高、抗扰能力强,光耦输出的电压信号,经过调理电路,输送给 MCU。电压采集范围为 0~500 V,在最高工作电压条件下,精度也可保证在±1% 以内。

2.5 电流采样电路

该系统中三相电流传感器采用高精度霍尔传感器,整体采样精度可达到±2% 以内。三相电流

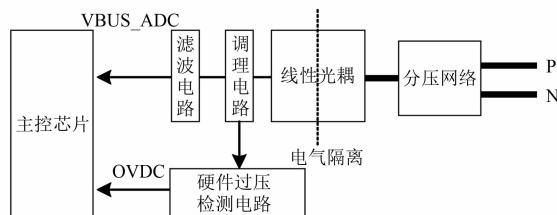


图 7 高压采样电路框图

传感器通过将 U、V、W 三相的电流信号转化为相应电压信号后, 经过滤波、调理电路, 最终发送给 MCU 主控芯片。同时, 电流信号还会被传送到硬件过流保护电路中, 当发生过流时, 产生 PWM_OE 信号, 直接通过硬件电路关断脉宽调制 (PWM) 输出, 进行快速保护。电流采样电路框图如图 8 所示。

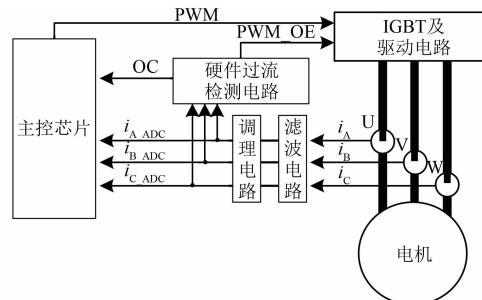


图 8 电流采样电路框图

2.6 逻辑处理保护电路

逻辑处理保护电路的主要作用是将硬件过流、过压、驱动故障或其他芯片产生的故障进行收集锁存, 并通过硬件方式, 直接关断驱动单元的输出, 同时把故障发送给 MCU 主控芯片进行故障判断或存储。与通过软件逻辑进行保护相比, 使用硬件电路进行的保护更为快速、可靠。逻辑处理保护电路框图如图 9 所示。

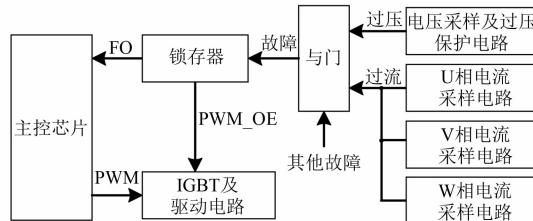


图 9 逻辑处理保护电路框图

2.7 驱动电路

单管控制器驱动电路主要由隔离驱动电源、

隔离驱动 IC 以及相关外围器件组成。其中, 驱动隔离电源采用推挽式 DC-DC 隔离电源, 电源驱动功率大、效率高、EMI 效果好; 隔离驱动 IC 则采用了安华高推出的大电流隔离驱动光耦 ACFJ-3439T, 该芯片驱动电流最大可达 17 A, 可直接驱动 IGBT, 无需额外增加缓冲推挽管; 此外, 该驱动芯片还提供了一次侧、二次侧欠压检测, 退饱和检测, 有源钳位、软关断、门极状态监控等保护功能, 性价比较高。驱动电路框图如图 10 所示。

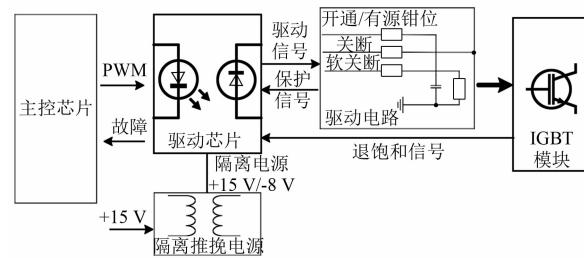


图 10 驱动电路框图

3 软件设计

永磁同步电机 (PMSM) 磁场定向矢量控制技术的核心是在转子磁场旋转 dq 坐标系中, 针对电机定子电流的励磁电流 i_d 和转矩电流 i_q 分别进行独立控制。其中, d 轴电流 i_d 既可以用来产生磁阻转矩, 从而提升电机的输出转矩, 还可以在基速以上的弱磁区域内进行磁场削弱, 达到升速的目的。

图 11 给出了 PMSM 矢量控制系统的结构框图。控制系统根据转矩需求, 结合最大转矩电流比 (MTPA) 控制、弱磁控制、转速控制以及电压控制的关系, 进行查表得到合理的 dq 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 dq 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, 最终实现控制驱动电机按要求输出相应的转矩和转速。

4 冷却结构设计与仿真

单管并联电机控制器冷却系统结构设计如图 11 所示。单管电机控制器装配有 3 个平行排列的半桥功率组件, 如图 12(a) 所示; 3 个半桥功率组件形成一个完整的全桥功率组件, 如图 12(b) 所示。一个半桥功率组件包括有铝基板通过钎焊

工艺焊接成型的立式散热器,还有起到绝缘作用的陶瓷板,陶瓷板分别焊接在立式散热器前后两面,每个陶瓷板上面还焊接有3个单管IGBT模块。实际应用过程中需要并排装配3个半桥功率组件,通过一个进水器和一个出水器分别将立式散热器的进出水口连接在一起,形成一个完整的冷却通道。工作的时候,冷却液从入水口进入到进水器,从进水器分别流入3个半桥功率组件的立式散热器进水口,然后并行流过散热器内部,将单管IGBT模块产生的热量带走,并从3个半桥功率组件的立式散热器出水口流出,进入出水器。最后从出水口流出,完成对整体单管并联电机控制器冷却散热。

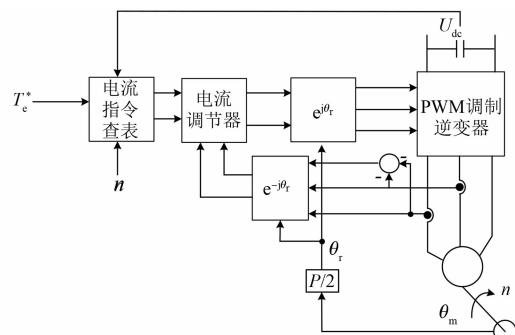


图 11 PMSM 矢量控制系统结构框图

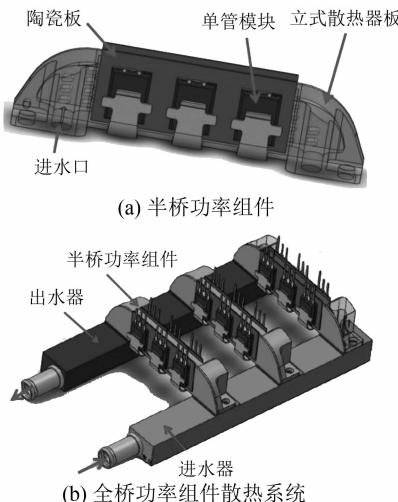


图 12 单管控制器散热系统结构设计

峰值工况下,半桥功率组件的单管IGBT模块会产生很高的瞬时温升,这样芯片温度过高会对模块的正常工作产生影响,严重的可以导致芯片烧坏,因此需要对单管并联控制器峰值工况下

的单管IGBT模块温升进行有限元仿真,研究单管IGBT模块内部芯片的温度分布。峰值工况下的单管IGBT模块温升如图13所示。由图13可以看出,模块在峰值工况下芯片的最高温度为132.36℃,满足汽车级模块芯片结温长期使用不超过150℃要求。

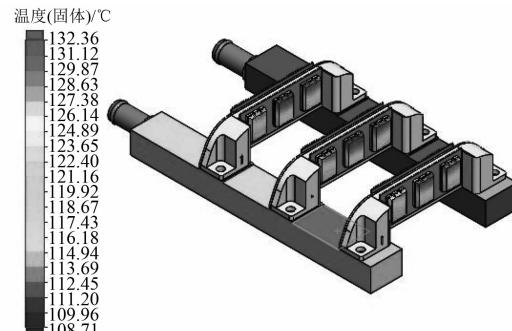


图 13 峰值工况下的单管 IGBT 模块温升

5 台架试验

对单管并联电机控制器样机进行带载测试,采用单管模块的额定电压为600V,单管额定电流为120A,半桥功率组件额定电流可达到360A,模块芯片结温175℃,负载电机选择PMSM,电机峰值功率55kW,峰值转矩150N·m。分别对单管并联电机控制器进行双脉冲试验、开通关断测试、系统效率对比测试、控制器效率对比测试以及单管控制器温升测试。

5.1 双脉冲测试

双脉冲测试主要是评估逆变器强电回路的寄生电感在IGBT关断时,所产生的感应电压尖峰叠加在IGBT集电极后,电压是否满足使用要求。若设计不合理,最终会造成IGBT过压失效。其中,脉冲1时间14μs,续流时间5μs;脉冲2时间19μs,驱动信号通过测试专用的双脉冲程序给定。

双脉冲测试波形如图14所示。从图14可以看出,关断时刻IGBT最大电流367A时,IGBT关断,产生的电压尖峰64V,再加上母线电压330V,集电极最高电压达到394V。即使在420V最高电压情况下,可预测尖峰电压最高约为485V。而单管IGBT的额定电压为600V,因此本文控制器所设计的电路回路、驱动电路等

符合设计要求。

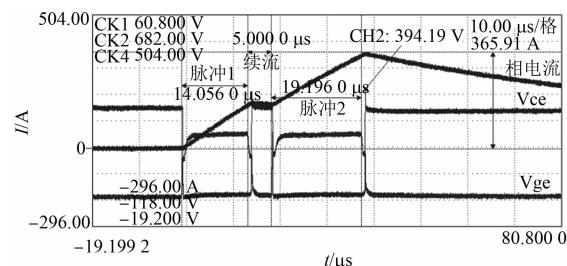


图 14 双脉冲测试波形

5.2 开通关断测试

对单管并联控制器的开通关断进行测试, 测试结果如图 15 所示。从图 15 可以看出, IGBT 的开通时间约为 804 ns, 关断时间约为 880 ns, 远小于模块设计许用最大开通关断时间, 因此开通关断速度符合设计要求。

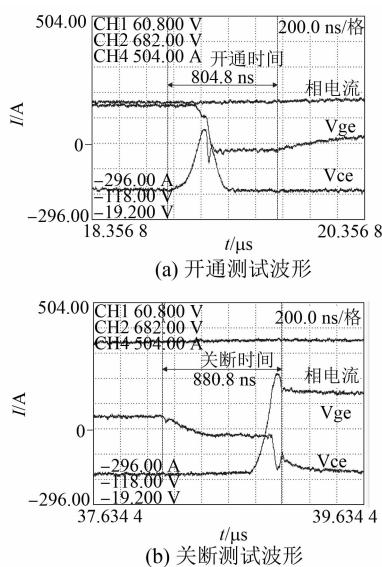


图 15 单管并联控制器开通关断波形

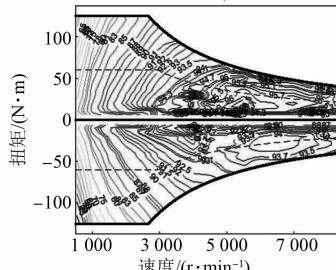
5.3 系统效率对比测试

为了更好地说明采用单管并联设计方案相对传统封装 IGBT 模块的优势, 选择一台与本文单管并联控制器同等峰值功率(55 kW)输出的控制器, 该控制器设计选用英飞凌 HP1 模块(型号 FS400R07A1E3)。2 台控制器分别拖动同一台驱动电机, 选用冷却液入水口温度统一设定为 65 °C。

在 330 V 电压下分别对单管并联控制器和 HP1(400 A)模块控制器的系统效率进行对比测

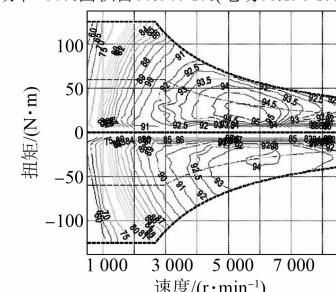
试。系统效率测试结果如图 16 所示。

系统效率>80%面积占85.204 9%(电动88%, 发电82.409 8%)



(a) 单管并联控制器系统效率

系统效率>80%面积占80.640 1%(电动86.198 1%, 发电75.082%)



(b) HP1(400A)模块控制器系统效率

图 16 系统效率对比测试

通过软件计算 2 种控制器的系统效率高效区占比, 从图 16(a)可以看出, 单管并联控制器系统效率大于 80% 的面积占比为 85.2% , 其中电动工况下系统效率大于 80% 的面积占比 88% , 发电工况下系统效率大于 80% 的面积占比 82.41% ; 从图 16(b)中可以看出, HP1(400 A)模块控制器系统效率大于 80% 的面积占比为 80.6% , 其中电动工况下系统效率大于 80% 的面积占比 86.2% , 发电工况下系统效率大于 80% 的面积占比 75.08% 。

由此可见, 选用单管 IGBT 模块设计电机控制器, 电机控制系统效率高于 HP1 封装模块控制系统效率, 说明单管并联系统的损耗更小, 系统效率较高。

5.4 控制器效率对比测试

在 330 V 电压下分别对单管并联电机控制器和 HP1(400 A)封装模块控制器的控制器效率进行对比测试, 控制器选用冷却液入水口温度统一设定为 65 °C , 选用驱动电机的峰值功率 55 kW , 峰值扭矩 150 N·m。

控制器效率对比测试结果如图 17 所示。通过软件计算 2 种控制器的控制器效率高效区占比, 从图 17(a)可以看出, 单管并联控制器效率大

于80%的面积占比为97.59%，其中电动工况下系统效率大于80%的面积占比99.95%，发电工况下系统效率大于80%的面积占比95.22%；从图17(b)可以看出，HP1(400 A)模块控制器效率大于80%的面积占比为95.9%，其中电动工况下系统效率大于80%的面积占比99.57%，发电工况下系统效率大于80%的面积占比92.24%。

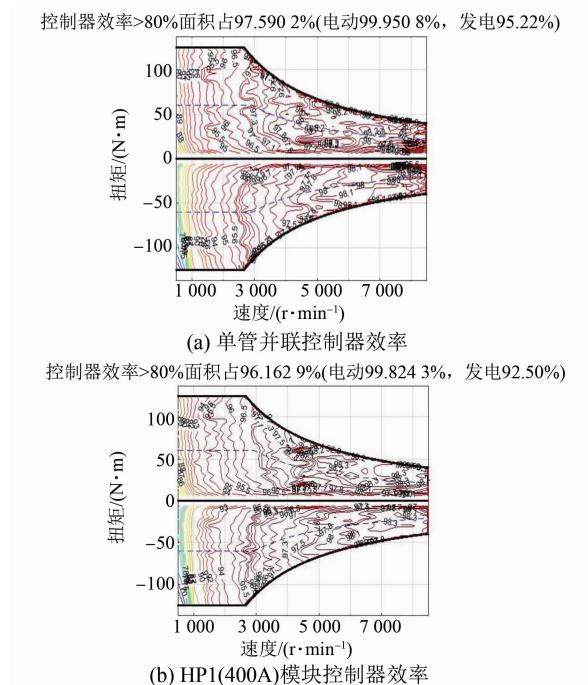


图17 控制器效率对比测试

由此可见，单管并联控制器效率更高，说明采用单管IGBT模块控制器整体损耗比HP1(400 A)模块控制器更低。

5.5 单管控制器最高温度测试

本文设计所选的单管IGBT模块内部没有集成温度传感器，设计过程中选择温度传感器通过弹簧夹片夹紧在单管IGBT模块壳体表面上，通过检测单管IGBT模块壳温来推测芯片温度，进而方便对单管IGBT模块进行过温保护控制。

模块通过电流越大，模块芯片的温升越高，对整个控制器的正常使用的散热要求越高。为了研究三管并联情况下单管控制器的电流输出能力，对单管控制器进行模块300~350 A电流下的最大温升测试。测试的时候分别采用2种方式进行对比：(1)通过温度采样电路采集温度传感器反馈的单管IGBT模块温度，该温度只是单管IGBT

的壳体温度；(2)通过热成像仪实时探测单管IGBT模块内部芯片最热点温度，该温度则是单管IGBT内部芯片的真实温度。2种方式温度测试最高温度数据如表1所示。

表1 单管控制器模块温度

电流/A	300	310	320	330	340	350
传感器检测 最高温度/℃	100.9	102.7	104.9	106.9	109.4	111.1
热成像仪测 最高温度/℃	106.4	109.3	111.1	116.0	120.0	121.9

从表1可以看出，单管控制器在350 A电流输出状态下，热成像仪测出的单管IGBT模块最高温度为121.9 ℃，温度传感器测出的单管IGBT壳体温度111.1 ℃，可见，壳温与芯片温度相差10.8 ℃。

通过表1求差对比可知，单管模块壳体温度和模块芯片温度约相差10 ℃，因此可以根据传感器检测到的壳体温度来推测单管模块芯片温度，进而对单管控制器进行温度保护，以确保单管IGBT模块不出现过温损坏，对于单管IGBT器件的设计选用具有很重要的工程应用价值。

6 结语

本文开发了一款用于低成本纯电动汽车的单管并联电机控制器，为纯电动汽车的低成本驱动控制提供了一种高效的解决方案。介绍了单管并联电机控制器的结构设计方案和电气原理，又对单管并联电机控制器的硬件和软件设计进行了详细的分析，提出了并联式散热结构设计方案，通过热仿真研究温度测试得出本文所设计的单管并联电机控制器具有较好的散热效果。最后，对所设计单管并联电机控制器进行了台架带载对比测试，试验结果表明该单管并联电机控制器具有良好的控制输出性能。

【参考文献】

- [1] 张军,肖倩,孟庆阔.新能源汽车驱动电机发展现状及趋势分析[J].汽车工业研究,2018(6): 43.
- [2] 王宝归,周飞,童亦斌.基于IGBT并联技术的250 kW光伏并网逆变器[J].大功率变流技术,2009,19(4): 26. (下转第116页)

- [3] 齐磊, 杨亚永, 孙孝峰, 等. 一种电流型高增益双向 DC-DC 变换器 [J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3797.
- [4] 宋成江, 陈凯龙, 孙孝峰, 等. 一种新型高变换比双向 DC-DC 变换器 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(10): 2988.
- [5] WANG F, WANG Y, ZHANG F, et al. A novel high-conversion-ratio bidirectional three-phase DC-DC converter [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2764.
- [6] YANG P, SHANG Z, LIU C, et al. A three-state dual-inductance bi-directional converter and its control for pulse-loaded three-port converter [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 6(2): 291.
- [7] LI R, SHI F. Control and optimization of residential photovoltaic power generation system with high efficiency isolated bidirectional DC-DC converter [J]. IEEE Access, 2019, 7: 116107.
- [8] KAFLE Y R, HASAN S U, TOWN G E. Quasi-Z-source based bidirectional DC-DC converter and its control strategy [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 5(1): 1.
- [9] 胡斌, 杨中平, 黄先进, 等. 用于超级电容储能系统的三电平双向直流变换器及其控制 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 83.
- [10] 武伟, 谢少军, 张墨, 等. 基于 MMC 双向 DC-DC 变换器的超级电容储能系统控制策略分析与设计 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4568.
- [11] 张勋, 王广柱, 商秀娟, 等. 双向全桥 DC-DC 变换器回流功率优化的双重移相控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 1090.

(上接第 74 页)

- [3] 肖雅伟, 唐云宇, 刘秦维, 等. 并联 IGBT 模块静态均流方法研究 [J]. 电源学报, 2015, 13(2): 64.
- [4] 潘月军, 王磊. 微混 BSG 冷却系统仿真设计研究 [J]. 上海汽车, 2014(8): 2.
- [5] 文辉清, 张旭辉, 刘钧, 等. 电动汽车逆变驱动系统精确仿真平台的研究 [J]. 电力电子技术, 2008, 42(10): 5.
- [6] 张舟云, 徐国卿, 沈祥林. 牵引逆变器散热系统的分析与设计 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 775.

- [7] 肖雅伟, 唐云宇, 刘秦维, 等. 并联 IGBT 模块静态均流方法研究 [J]. 电源学报, 2015, 13(2): 64.
- [8] 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.

(上接第 108 页)

- [7] 胡亮灯, 孙驰, 赵治华, 等. 高电压宽范围输入低电压输出的 DC-DC 辅助电源设计 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 103.
- [8] 佟德元. DC-DC 开关电源容性负载能力设计分析 [J]. 电子世界, 2014(16): 352.
- [9] 吕剑峰. 两级 DC/DC 模块电源效率优化和环路特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [10] 佟强, 张东来, 徐国殿. 分布式电源系统中变换器的输出阻抗与稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 57.
- [11] 李龙文. 最新全能数控电源 IC-ADP1043A [J]. 电子元器件应用, 2011, 13(5): 7.

- [12] 佟强. 数字 DC/DC 变换器动态性能和系统稳定性提高方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [13] 欧应阳, 王志强. 基于 ADP1043 的数字电源设计 [J]. 通信电源技术, 2009, 26(5): 5.
- [14] 石健将, 章江铭, 龙江涛, 等. 高频变压器一次侧串联 LLC+输出端并联 Buck 级联直流变换器 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 93.
- [15] 李明飞. 宽输入电压范围多路输出小功率开关电源研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 17-21.