

面向大功率芯片散热的电动汽车电机控制器结构优化^{*}

唐广笛¹, 张天昊², 章 桐¹

(1. 同济大学 汽车学院, 上海 201804;

2. 湖南大学 机械与运载工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 电动汽车电机控制器集成度较高, 设计空间有限, 并且为了保证可靠性, 许多控制器不能使用风扇对大功率芯片进行降温。因此, 为了降低电动汽车电机控制器内大功率芯片的温度, 需要对电机控制器结构进行优化设计。通过 3 种方案来进行优化: 首先, 通过改变芯片的纵向布置改变芯片周围流场; 然后, 通过改变控制板结构来改变芯片周围的流场; 最后, 通过设置冷端导热结构对芯片进行散热。将几种方法的分析结果对比进而得到可以有效降低大功率芯片温度的最佳控制器结构优化方案, 优化结果为电机控制器散热设计提供了理论指导。

关键词: 电机控制器; 结构优化; 散热系统; 电动汽车; 芯片布置

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)10-0080-05

doi: 10.12177/emca.2020.100

Structural Optimization of Motor Controller in Electric Vehicle Aiming at High-Power Chips Cooling^{*}

TANG Guangdi¹, ZHANG Tianhao², ZHANG Tong¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Due to the compact layout, the design space for motor controller in electric vehicle is limited. Besides, fan cooling is forbidden in some cases to ensure the reliability of the motor controller and the high-power chips. In order to decrease the temperature of high-power chips in motor controller, structural optimizations are carried out. Firstly, layout of the chips is rearranged to change the surrounding flow field. Secondly, structure of the printed circuit board (PCB) is changed to alter the flow field. Finally, the cold end heat conduction structure is used to cool the chips. The optimization measures are verified by simulation. The optimization results can provide theoretical guidance for the heat dissipation design of the motor controller.

Key words: motor controller; structural optimization; cooling system; electric vehicle; chip layout

0 引 言

随着电子器件集成度的增加, 控制器内部电子器件布置的密度也在不断提升, 其散热问题也

变得尤为关键。控制器散热系统的结构合理性将会对控制器的寿命和可靠性产生重要影响^[1]。电机控制器的发热主要是由大功率的电力电子器件的损耗所引起的, 这些功率元件由于开关和传导

收稿日期: 2020-05-05; 收到修改稿日期: 2020-07-13

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0104501)

作者简介: 唐广笛(1979—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为 DC/DC 变流器与电机控制器的开发与控制策略。

张天昊(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电机控制器散热。

损耗而产生热量。根据设备的几何形状,热流量可以达到 $200 \sim 300 \text{ W/cm}^{2[2-3]}$ 。大功率器件自身对温度的要求也比较严格,温度的起伏会直接影响到大功率器件的整个工作过程,从而影响到电机控制器的工作性能。过高的温度会缩短控制器的寿命,甚至直接损坏元件^[4]。

电机控制器作为纯电动汽车的主要动力系统控制部件,要求控制精度高、体积小、工作可靠性高、结构紧凑,因此其内部结构热设计的合理性尤为重要。通常,电机控制器内部 IGBT 产生的热量会由专门设计的散热结构带走,许多学者对此进行过一系列的研究。白保东等^[5]利用以环境温度作为初始条件的循环迭代算法计算出了 IGBT 的功耗,并以此为根据设计了冷却装置;江超等^[6]则通过 CFD 软件对电机控制器中 IGBT 专用的风冷控制器进行了设计;申传等有^[7]使用 ICEPAK 对散热器在自然空气冷却条件下的散热性能进行了数值分析。

大多数学者均是针对电机控制器中 IGBT 的散热进行研究,但是除 IGBT 以外其他大功率芯片的发热往往不被重视。这些芯片发热量与 IGBT 发热量处于同一数量级,但是由于控制器的内部空间、成本等因素而未进行专用的散热设计,这给控制器的工作稳定性带来了较大的隐患。

本文将通过对控制器内部结构的合理热设计,在不增加控制器体积和尽可能节约成本的前提下有效降低大功率芯片温度,提高控制器可靠性,延长控制器的寿命^[8]。

1 研究对象与理论模型

1.1 研究对象

电机控制器简化几何模型如图 1 所示。其中,IGBT 设置专门液冷散热系统,经试验测试满足设计要求,为了模拟对其他大功率热源芯片的影响,该设计中 IGBT 采用导热性良好的均匀方形体热源,材料为 Al6063。控制板大功率芯片采用方形均匀体热源,尺寸如表 1 所示。为了模拟封装,在元件外部增加 PPS 材料外罩,元件的发热功率和热力学参数由试验得到;用各向异性材料模拟 PCB 板;箱体材料采用 ADC12。各个材料物性参数详如表 2 所示。各个热源功率如表 3 所示。

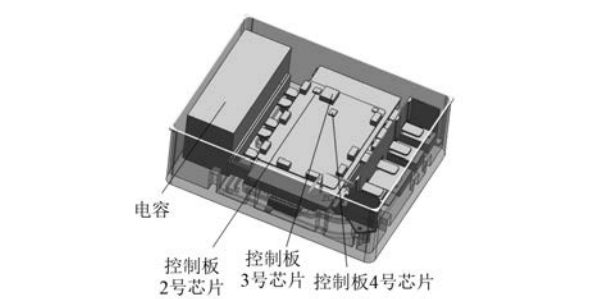


图 1 电机控制器简化几何模型

表 1 大功率芯片尺寸

芯片编号	长/mm	宽/mm	高/mm
2 号芯片	11	10	3
3 号芯片	23	23	10
4 号芯片	12	10	3

表 2 材料物性参数

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	比热容/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	动力黏度/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
Al6063	2 700	900	218	-
adc12	2 700	880	96	-
铝	2 719	871	202.4	-
钢	7 900	600	16.3	-
PPS	1 600	1 200	0.23	-
PA66	1 150	2 200	0.27	-
PCB	2 415	1 136	0.25(轴向)/ 16.5(纵向)	-
50% 乙二醇 水溶液(65℃)	1 063.66	3 358	0.394	0.002 26
环氧灌胶材料	1 750	3 800	0.6	-
底部电阻	2 000	2 000	50	-
环氧灌胶材料	1 750	3 800	0.6	-
空气	-	1 066.602	0.025 8	$1.789 4\times 10^{-5}$

表 3 热源及其发热功率

热源	发热功率/($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)
控制板 2 号芯片	3 030 300
控制板 3 号芯片	415 880
控制板 4 号芯片	3 333 333
正母排	359 570
负母排	336 660
U 母排	232 330
V 母排	228 000
W 母排	231 060
电容	30 500
电容端子	512 600
驱动板变压器	97 250
驱动板光耦	3 281 250
电阻	1 431 350
IGBT	3 869 320

1.2 控制方程及边界条件

假定内部空气为理想气体,流动为三维湍流流动,只考虑热传导和热对流,忽略辐射传热,控制方程由热传导方程和包含了连续性方程、动量方程和附加能量守恒方程的纳维斯托克斯方程^[9-11]:

热传导方程为

$$k_x \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

热对流方程包括:

质量守恒方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

动量守恒方程为

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

能量守恒方程为

$$\rho c_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (6)$$

式中: u 、 v 、 w 分别为流体 x 方向、 y 方向、 z 方向的速度分量; T 、 p 分别为流体的温度和压力; ρ 、 λ 、 c_p 分别为流体的密度、热导率、动态黏度和比热容; k_x 、 k_y 、 k_z 为材料在 x 、 y 、 z 3 个方向上的导热系数。

该系统通过控制器外壳与环境传热,环境温度 为 25 ℃,外壳对流换热系数 h 取 5 W/(m²·K)。

1.3 数值仿真结果

应用有限体积法对该封闭空间进行热-流场稳态仿真,仿真过程中湍流模型选用 $k-\varepsilon$ 模型。采用四面体网格对整个计算区域进行划分,对控制器进行纵向布置优化。

控制器各部分温度及内部空气流动情况如图 2 所示。

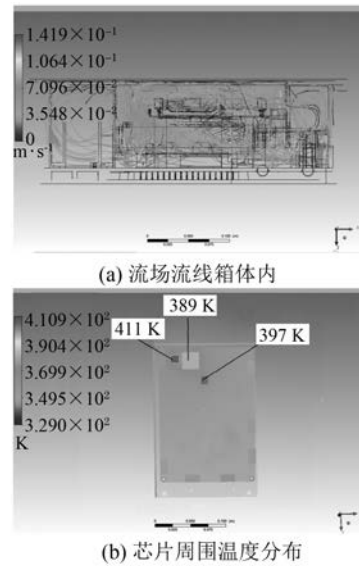


图 2 箱体内部流场流线和芯片周围温度分布

通过仿真结果发现控制板 2、3、4 号热源芯片的温度过高,为了降低其温度,通过改变控制器内部纵向布置,控制板支撑的结构以及设置冷端导热几种方法对其进行优化。

2 优化方案及讨论

2.1 改变控制器内部纵向布置

该方案尝试改变控制板支撑与控制板间的纵向距离从而改变控制板附近的空气流场,进而影响控制板芯片温度。控制板位置调整前后如图 3 所示。

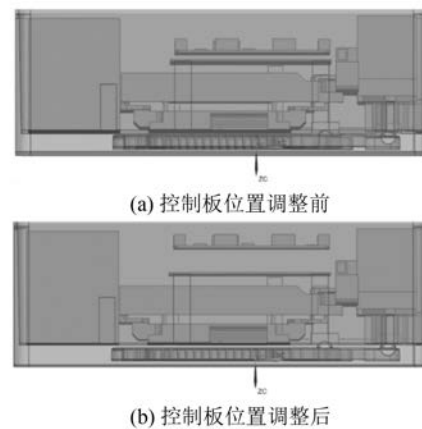


图 3 控制板位置调整前后

调整控制板位置后箱体内流场流线和芯片周围温度分布如图 4 所示。

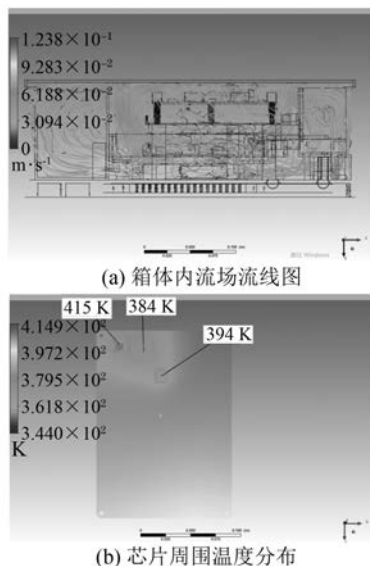


图 4 调整控制板位置后箱体内流场流线和芯片周围温度分布

通过仿真结果发现,3、4 号芯片温度略有下降,2 号芯片温度略有升高。通过观察对比流场可以发现:

(1) 改变纵向布置后原有控制板附近的涡流消失。

(2) 由于 2 号芯片体积小,流场被其他芯片阻挡,空气流动条件恶化,故温度略有升高。

(3) 3 号芯片体积较大,4 号芯片未被阻挡,因此该 2 个芯片直接参与全局流动,流动条件优于原方案,故温度略有下降。

(4) 因为控制器内空气流动速度较低,所以整体影响不大。

2.2 改变控制板支撑结构

探究该方案对芯片温度影响过程中,为了节省计算时间,进一步简化模型,并通过在控制板支撑处打孔来改变其结构,再观察使用该方案前后温度数据的对比得出改变控制板支撑结构对整体流场及芯片温度的影响。打孔位置如图 5 所示。

打孔前后仿真结果如图 6 所示。

通过对比芯片温度可知,打孔后热源芯片温度均有一定程度的降低,观察流场的流线图可知,在支撑板上打孔可改变控制器内的整体流场,由于控制器内空气属于自然对流,打孔后有一部分

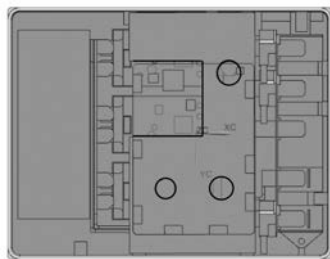


图 5 控制板支撑结构更改位置示意图

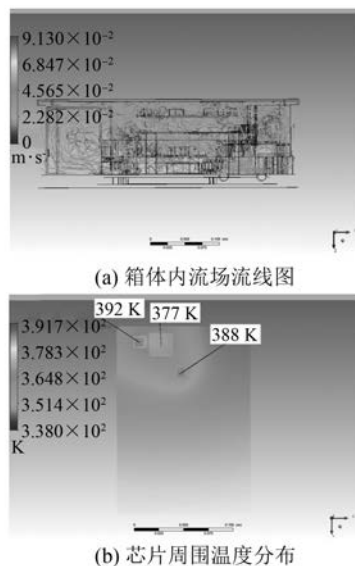


图 6 控制板支撑打孔后箱体内流场流线和芯片周围温度分布

位于下层温度较低的流动空气会直接对高温区进行冷却,从而降低芯片温度,从结果上看这种方案有一定的借鉴意义。

2.3 设置冷端导热

因为控制器箱体与水道属于一体结构,可在一定程度上避免在热传导过程中由于温差减小造成的导热速率减缓,所以可将箱体设置为冷端。该方案通过铝结构将热源芯片和箱体连接,将箱体作为冷端进行热传导,仿真结果如图 7 所示。

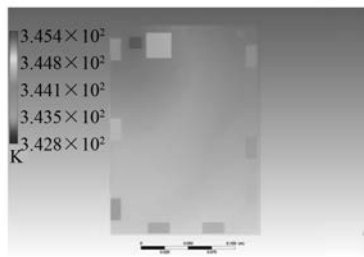


图 7 设置冷端导热后控制板热源芯片的温度

通过对比可知,设置冷端后热源芯片温度大幅下降,3个芯片的最高温度均不超过360 K。使用铝结构连接热源芯片,芯片的热量会直接传导到箱体,再通过箱体散发出去,降低了散热过程中的热阻,提高了散热效率。

3 结 语

本文尝试通过改变控制器内部纵向布置、控制板支撑的结构以及设置冷端导热3种方法降低控制板热源芯片温度,并进行数值仿真对各方案优化结果进行验证,验证结果显示设置冷端可有效降低目标芯片温度,在控制板支撑上打孔可在一定程度上降低目标芯片温度,改变纵向布置对目标芯片温度基本没有影响,同时也通过各个方案的流线图对比得知控制器内的空气流速较低,通过改变内部流场增强冷却效果并不显著。该研究可为电机控制器内部结构的合理热设计提供一定的理论指导。

【参 考 文 献】

- [1] BAR-COHEN A, IYENGAR M. Design and optimization of air-cooled heat sinks for sustainable development[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, (25)4: 584.
- [2] MULLER N, FRECHETTE L G. Optimization and design guidelines for high flux micro-channel heat sinks for liquid and gaseous single-phase flow[C]//

The Eighth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2002.

- [3] CHAN C C, CHAU K T. An overview of power electronics in electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44(1): 3.
- [4] 申传有. 纯电动汽车电机控制器散热器的设计与优化[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2014.
- [5] 白保东, 陈德志, 王鑫博. 逆变器 IGBT 损耗计算及冷却装置设计[J]. 电工技术学报, 2013, 28(8): 97.
- [6] 江超, 唐志国, 李荟卿, 等. 电机控制器 IGBT 用风冷散热器设计[J]. 汽车工程学报, 2015, 5(3): 179.
- [7] 申传有, 黄恺, 李兴全, 等. 基于 ICEPAK 的电机控制器散热器的热分析[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2014, 34(2): 99.
- [8] 刘婷. 电动汽车电机控制器散热器轻量化研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [9] ANSYS, Inc. ANSYS Icepak 12.1 User's Guide[M]. Release 12.1, 2009.
- [10] LEE T Y T L, CHAMBERS B, MAHALINGAM M. Application of CFD technology to electronic thermal management[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part B, 1994, 18(3): 511.
- [11] BATCHELOR G K. An Introduction to Fluid Dynamics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1967.

(上接第73页)

- [7] 赵海森, 顾德军. 采用铸铝转子和铸铜转子时鼠笼式异步电机的损耗特性对比[J]. 陕西电力, 2011, 39(2): 5.
- [8] 黄坚, 杨旭, 冯俊锋, 等. 铸铜转子超高效率电动机的研制[J]. 电机技术, 2012(5): 1.
- [9] ASHWIN D, ASHOK S, DIXIT M, et al. Design optimization of 15 kW, 2-pole induction motor to achieve IE4 efficiency level with copper die-casting

[C]//2015 International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 2015.

- [10] 黄国治, 傅丰礼. 中小旋转电机设计手册[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [11] 黄坚, 郭中醒. 实用电机设计计算手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.