

## 电机控制器 IGBT 模块散热特性与温度均衡控制策略研究

杨述松<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>, 肖康<sup>1</sup>, 李健<sup>1,2</sup>, 杨滨源<sup>2</sup>

1. 重庆青山工业有限责任公司, 重庆 402761

2. 重庆工商大学机械工程学院, 重庆 400067

**摘要:**目的 电机控制器 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 模块温度分布的均衡性对系统可靠性和稳定性有重要影响。但电机控制器结构紧凑, 空间狭小, 使传统的温度均衡性控制方法和策略应用受到了极大的限制。因此, 通过改变散热器的结构布局, 探讨提高热源温度均衡性的控制方法。方法 利用数值仿真方法分别对散热系统的传统结构、I 型结构和 II 型结构进行了热固耦合分析, 对比分析了 3 种结构对 IGBT 热源最高温度、温度差及其温度分布均衡性的影响, 并讨论了在冷却液不同流量条件下, 3 种结构中 IGBT 热源的温度分布特性。结果 研究表明: 冷却液的流量为 2 L/min 时, 相对于传统结构, I 型结构和 II 型结构的最大温度差分别下降 59.52% 和 64.29%, 随着冷却液流量的增大, I 型结构和 II 型结构对热源温差控制优势逐渐减弱, 但仍优于传统结构。结论 通过对比分析, I 型结构中热源温度分布均衡性最好, 传统结构中热源温度分布均衡性最差。冷却液流量的变化, 对传统结构中温度分布均衡性的影响较大。随着冷却液流量的增加, 传统结构热源平均温度最低, II 型结构的平均温度最高, 同时 3 种结构热源的平均温度逐渐降低, 而且不同结构之间的差值逐渐减小。

**关键词:** 新能源汽车; 电机控制器; IGBT; 温度均衡性; 仿真分析

中图分类号: U469.72 文献标识码: A doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0006.001

### Research on Heat Dissipation Characteristics and Temperature Balance Control Strategy of IGBT Module in Motor Controller

YANG Shusong<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, XIAO Kang<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1,2</sup>, YANG Binyuan<sup>2</sup>

1. Chongqing Tsingshan Industrial Co., Ltd., Chongqing 402761, China

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing, 400067, China

**Abstract: Objective** The balance of temperature distribution across the IGBT (insulated gate bipolar transistor) module in a motor controller significantly influences the reliability and stability of the system. However, the compact design and limited space within motor controllers constrain the application of traditional methods and strategies for temperature balance control. In this context, the study investigated control methods to improve the temperature balancing of the heat source by modifying the structural layout of the radiator. **Methods** The thermal-structure coupling analyses of the traditional structure, Type I structure, and Type II structure of the heat dissipation system were conducted using numerical

收稿日期: 2024-03-28 修回日期: 2024-06-12 文章编号: 1672-058X(2025)06-0001-08

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX1451)资助; 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202200813)资助。

作者简介: 杨述松(1989—), 男, 重庆江津人, 硕士研究生, 高级工程师, 从事新能源汽车热管理研究。Email: yangshusong@tsingshan.com.

通信作者: 李健(1987—), 男, 山东莱阳人, 博士, 讲师, 从事机械制造及其自动化研究。Email: lijian2022@ctbu.edu.cn.

引用格式: 杨述松, 张健, 肖康等. 电机控制器 IGBT 模块散热特性与温度均衡控制策略研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2025, 42(6): 1-8.

YANG Shusong, ZHANG Jian, XIAO Kang, et al. Research on heat dissipation characteristics and temperature balance control strategy of IGBT module in motor controller[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(6): 1-8.

simulation methods. The influences of the three structures on the maximum temperature, temperature difference, and temperature distribution uniformity of the IGBT heat sources were compared and analyzed, and the temperature distribution characteristics of the IGBT heat sources within the three structures under different coolant flow conditions were discussed.

**Results** The study indicated that when the coolant flow rate was 2 L/min, the maximum temperature differences for the Type I and Type II structures decreased by 59.52% and 64.29%, respectively, compared with the traditional structure. As the coolant flow rate increased, the advantages of Type I and Type II structures in controlling the temperature difference of the heat source gradually weakened, but they still outperformed the traditional structure.

**Conclusion** Through comparative analysis, the Type I structure exhibits the best uniformity in the temperature distribution of the heat source, while the traditional structure has the poorest uniformity. Changes in the coolant flow rate significantly impact the uniformity of the temperature distribution in the traditional structure. As the coolant flow rate increases, the average temperature of the heat source in the traditional structure is the lowest, and the average temperature in the Type II structure is the highest. Meanwhile, the average temperature of the heat sources in all three structures gradually decreases, and the differences between the structures gradually decrease.

**Keywords:** new energy vehicle; motor controller; IGBT; temperature uniformity; simulation analysis

## 1 引言

电机控制器作为新能源汽车的关键部件,其性能直接影响车辆的运行状态。随着技术的发展,电机控制器结构越来越紧凑,同时电机控制器的功率模块(IGBT)的功率也越来越大<sup>[1-3]</sup>。汽车行驶过程中,如果电机控制器中 IGBT 模块的热量无法及时传递出去,高温和热应力将严重影响控制器的性能和可靠性<sup>[4-7]</sup>。

学者对新能源汽车电机控制器中 IGBT 模块的散热系统进行了大量的研究工作,包括散热系统翅柱形状<sup>[8]</sup>、尺寸布局参数<sup>[9-10]</sup>和流道结构<sup>[11]</sup>对热源温度的影响规律。通过对散热器结构进行研究,提高了散热性能。同时,热源温度分布的均衡性十分重要,热源内部温度分布不均匀,会导致 IGBT 内部热应力的分布欠均匀,硅芯片内部空洞、焊料脱落等情况<sup>[12-14]</sup>,从而导致电机控制器中 IGBT 模块失效。针对此问题,黄泉凯等<sup>[15]</sup>通过改变散热器中不同区域散热翅柱的高度和直径尺寸,对热源温度的均衡特性进行控制。吴智勇等<sup>[16]</sup>针对地铁系统中 IGBT 模块的散热问题,采用了“L 型热管+均温管”方法,改善了散热器的散热性能和均温性能。郑紫璇<sup>[17]</sup>以温度一致性作为多目标优化函数,建立了液冷散热系统交错式进出口设计域流道拓扑优化模型,减小了热源温差。窦泽春等<sup>[18]</sup>将深孔钻相变均温散热技术应用到轨道交通散热器中,极大提高了散热器的散热性能和温度均衡性。王洪清<sup>[19]</sup>提出将 IGBT 基板与均热板封装成一体式均热板液冷散热器,有效解决了普通液冷散热器均温性能差的问题。段会强等<sup>[20]</sup>设计了一款新型热管嵌入式散热模组,实现了对磁悬浮列车牵引变流器中 IGBT 模块温差的有

效控制,提高了温度分布的均匀性。

通过上述分析,目前针对电机控制器 IGBT 模块的散热系统温度均衡性研究,取得了一定的研究成果,有效地改善了 IGBT 模块温度分布的均衡性,但是所采用的技术方法较为复杂。新能源汽车 IGBT 模块位于电机控制器中,其结构紧凑,空间十分狭小。因此,传统的温度均衡性控制方法和策略在新能源汽车 IGBT 模块中的应用受到了极大的限制,技术可行性较差。

虽然新能源汽车电机控制器的结构特点阻碍了传统温度均匀控制技术的应用,却可以尝试通过改变散热器的结构布局,探讨提高热源温度均衡性的控制方法。因此,针对上述问题,本文通过分析导致热源温度不均衡的原因,研究不同结构对热源温度及均衡性分布的影响规律。探讨通过改变散热板结构布局,经济和技术可行的方式改善电机控制器中 IGBT 模块热源温度特性和热源间温度分布均衡性,为提高新能源汽车电机控制器 IGBT 模块散热系统的综合性能提供参考。

## 2 传热分析与系统模型构建

### 2.1 IGBT 模块传热分析

电机控制器 IGBT 模块的散热系统结构如图 1 所示,IGBT 热源安装在散热板上方,散热板背面为散热翅柱。冷却液从入口流入,在密封的冷却液腔体中与翅柱进行热交换,从出口流出,将热量带走。热量通过热传导的方式将热量传递给散热板,散热板的翅柱表面通过热传导和对流换热流的方式将热量传递给冷却液。通过上述过程,将热源产生的热量带走,以保证热源的处于正常范围。

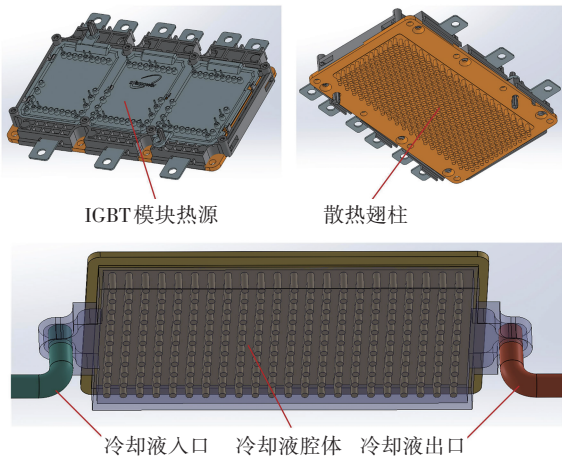


图 1 IGBT 模块散热系统结构

Fig. 1 The structure of heat dissipation system of IGBT module

散热翅柱与冷却液之间的热传导主要是由于翅柱与冷却液之间的温差导致的。由傅里叶定律可知,热传导的数学模型为

$$Q_1 = -\lambda A_1 \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式(1)中, $Q_1$ 表示热传导的热量; $\lambda$ 表示材料的导热系数; $A_1$ 表示有效的导热面积; $dT/dx$ 表示温度在  $x$  方向的变化率。

散热翅柱与冷却液之间的对流换热过程,可以利用牛顿冷却公式进行表示,数学模型为

$$Q_2 = \alpha A_2 \Delta T \quad (2)$$

式(2)中, $Q_2$ 表示对流换热量; $\alpha$ 表示对流换热系数; $A_2$ 表示有效的对流换热面积; $\Delta T$ 表示散热翅柱与冷却液之间的温差。

### 2.2 CFD 数学模型

冷却液与散热翅柱之间主要包括热传导和热对流,因此在数值计算过程中不考虑热辐射的影响。冷却液流动状态为湍流模型,而且冷却液流速较低,因此视为不可压缩的牛顿流体。

(1) 热传导换热。热传导过程中的导热微分方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \varphi \quad (3)$$

式(3)中, $\rho$ 为冷却液的密度; $c$ 为冷却液的比热容; $T$ 为温度; $\lambda$ 为导热系数; $\varphi$ 表示单位时间内,单位体积内产生或消耗的热能。

(2) 热对流换热。根据质量守恒、动量守恒和能量守恒,分别建立热对流过程的 CFD 数学模型。

质量守恒方程(连续性方程):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_x}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla^2 u_x \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_y}{\partial z} = Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla^2 u_y \quad (6)$$

$$\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_z}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_z}{\partial y} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} = Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 u_z \quad (7)$$

能量守恒方程:

$$\rho \frac{dU}{dt} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q - p \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \varphi \quad (8)$$

式(5)-式(8)中, $\rho$ 表示冷却液的密度; $u_x$ 、 $u_y$ 和  $u_z$ 为冷却液在  $x$ 、 $y$ 和  $z$ 方向上的速度分量; $\nu$ 表示冷却液的粘性系数; $\nu \nabla^2 u_x$ 、 $\nu \nabla^2 u_y$ 和  $\nu \nabla^2 u_z$ 分别表示冷却液在  $x$ 、 $y$ 和  $z$ 方向上的粘性力; $dU/dt$ 表示冷却液流体微元内能的增长速率; $q$ 为单位体积流体产生的热速率; $\varphi$ 为单位体积流体产生的摩擦热。

### 2.3 边界条件与参数设定

根据电机控制器的实际运行情况,IGBT 模块中每个热源的发热功率均为 180 W,控制器环境温度为 105 °C,冷却液为乙二醇溶液,进口条件为体积流量入口, $Q=2$  L/min,初始温度为 50 °C,出口条件为压力出口。IGBT 模块热源材料为硅,散热板材料为铝合金。对电机控制器 IGBT 模块的热源结构进行简化,在 SolidWorks 中进行完成建模,然后利用 Flotherm 软件进行热仿真分析,仿真分析模型如图 2 所示。

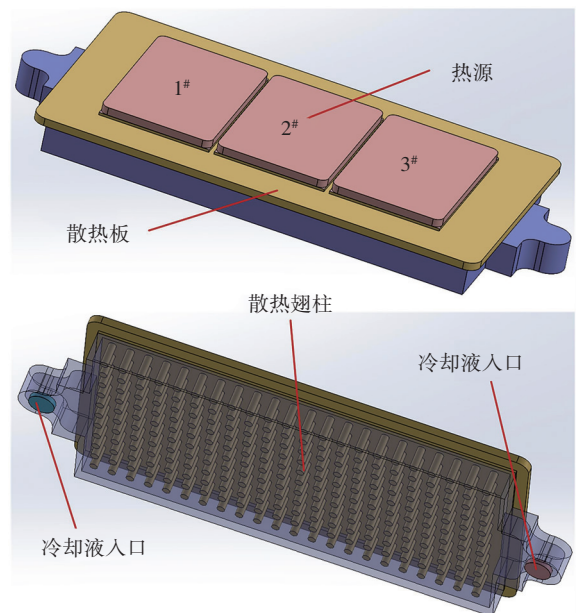


图 2 仿真分析模型

Fig. 2 The simulation analysis model

### 2.4 热源温度分布

图 3 为电机控制器 IGBT 模块热仿真分析结果,分别为热源温度分布图和冷却液温度分布图。从图中可以看到,由于冷却液从左侧流入,右侧流出,因此 IGBT 热源的温度分布不同,1#热源的温度较低,而 2#和 3#热源的温度较高。图 4 为 1#、2#和 3#热源最高温度对比图。

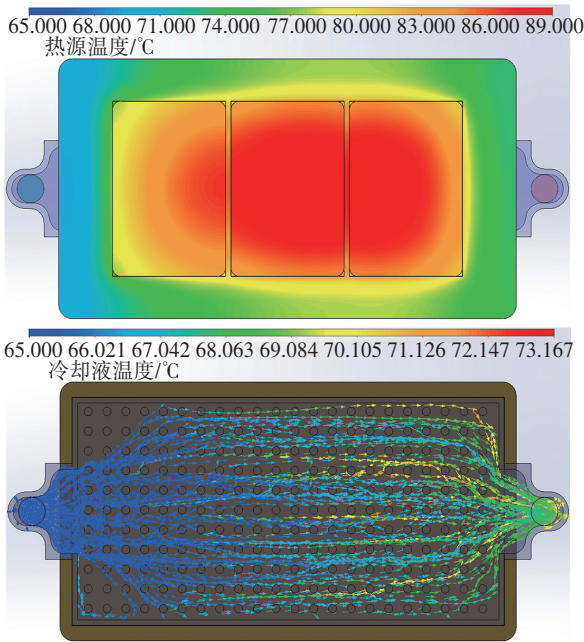


图 3 IGBT 热源和冷却液温度场分布图

Fig. 3 Temperature field distribution diagram of IGBT heat source and coolant

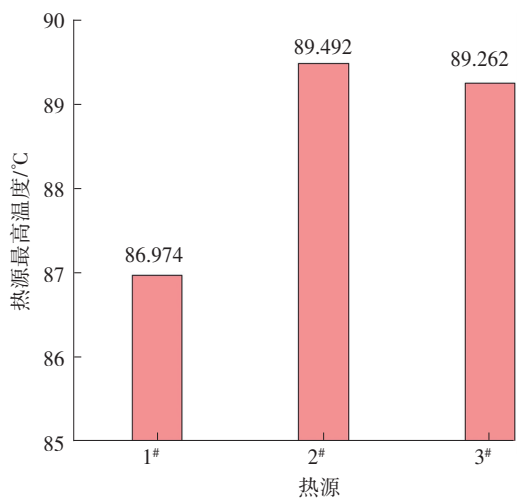


图 4 热源最高温度对比

Fig. 4 Comparison of maximum temperature of heat sources

通过分析图 3 热源最高温度对比可知,2#热源的最高温度比 1#热源的最高温度高接近 3%,而 2#热源与 3#热源的最高温度接近。通过图 3 中冷却液温度场分布可

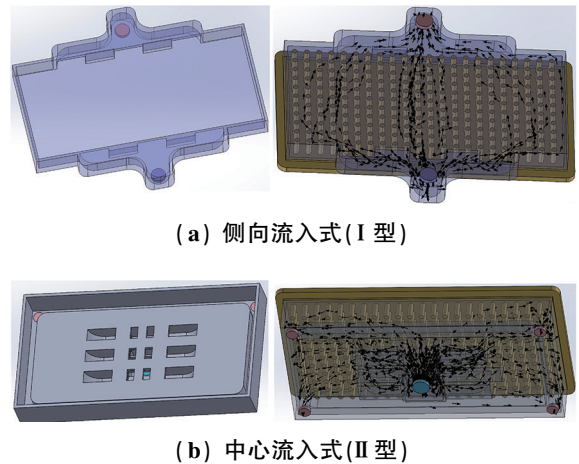
知,冷却液由左侧入口流入,然后通过 1#热源下方的翅柱,并经过热传导与热交换。此时冷却液温度已经升高,翅柱与冷却液的温差明显减小。由热传导和热交换模型可知,随着温差的减小,冷却液的冷却效果减弱。因此,2#和 3#热源的最高温度明显高于 1#热源。

### 3 IGBT 模块热源温度均衡控制策略

#### 3.1 散热板结构改进

为了使 IGBT 模块热源温度分布更加均衡,需要降低 2#和 3#热源的最高温度。通过第 2 节中冷却液温度场的分析可知,2#和 3#热源温度过高是由于冷却液温度上升,导致温差减小,减弱了散热效果。因此,以此为突破口,通过散热板结构进行改进,改变冷却液的流动状态,让冷却液同时流经各个热源,进而改变热源处的散热效率,促进热源温度分布的均衡性。

通过分析散热板的结构,设计了两种改进型的散热板结构,分别为侧向流入式(I型)和中心流入式(II型)两种,如图 5 所示。



(a) 侧向流入式(I型)

(b) 中心流入式(II型)

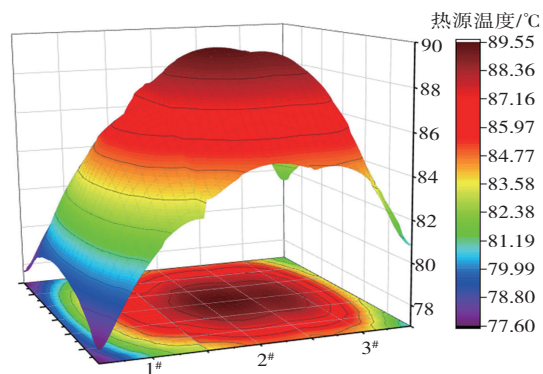
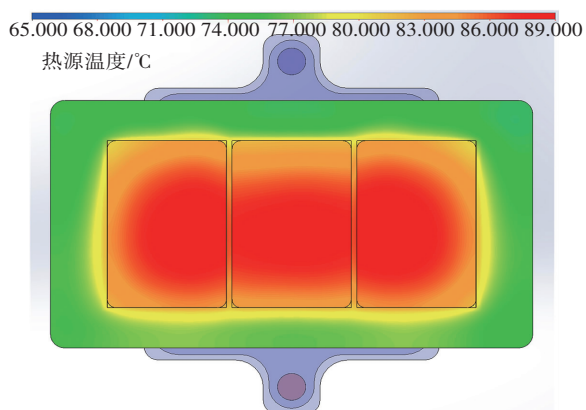
图 5 改进散热板结构

Fig. 5 The improved heat dissipation plate structure

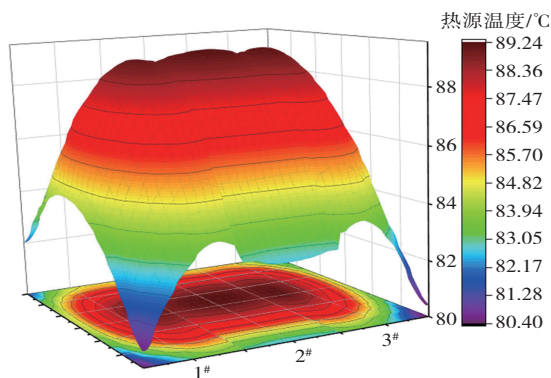
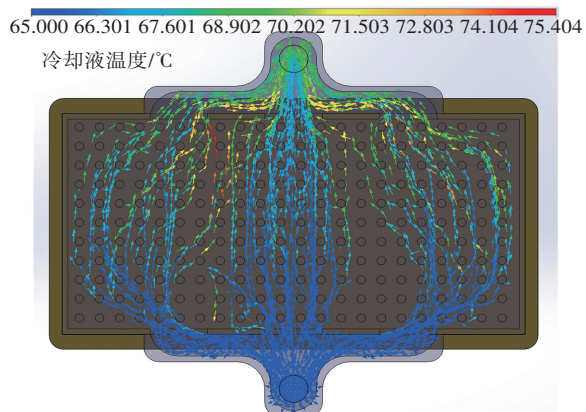
#### 3.2 数值仿真分析

建立侧向流入式(I型)和中心流入式(II型)两种改进结构的仿真分析模型,边界条件与参数设置与传统结构相同,冷却液流量同样为 2 L/min。得到 IGBT 热源和冷却液温度场分布,如图 6 所示。

从图 6 中改进结构的热源温度云图可以看出,对于侧向流入式的 I 型结构,3 个热源的高温区域分布较为均匀,高温区域主要集中在热源中部区域,从冷却液流场结构可以看出,冷却液分三部分分别流经 3 个热源,对热源的散热较为均匀。对于中心流入式的 II 型结构,3 个热源的温度分布同样较为均匀。

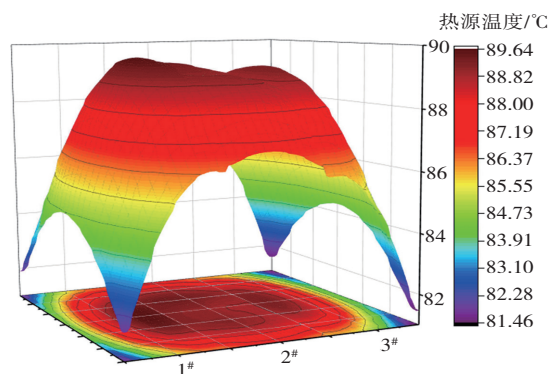
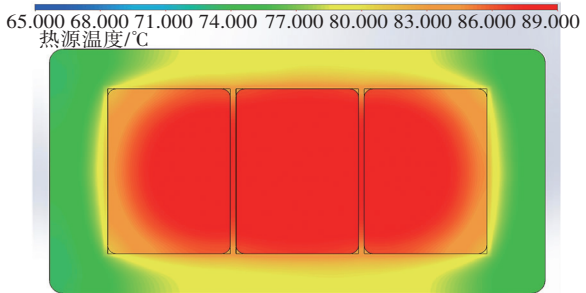


(a) 传统结果

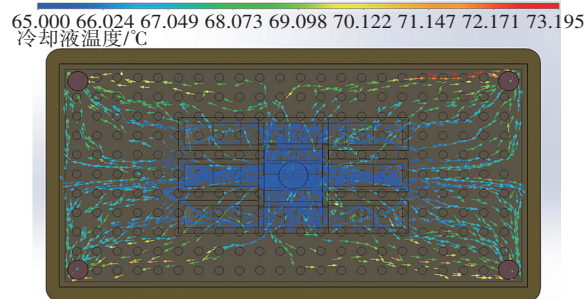


(b) I 型结构

(a) I 型结构热源和冷却液温度分析



(c) II 型结构



(b) II 型结构热源和冷却液温度分析

图 6 改进结构热源和冷却液温度场分布图

Fig. 6 Temperature field distribution diagram of heat source and coolant in the improved structure

为了进一步对比和分析两种改进结构和传统结构的热源温度分布情况,分别对 3 种情况下热源的温度分布进行详细分析,热源温度分布情况如图 7 所示,热源最高温度对比情况如图 8 所示。

图 7 热源温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution map of heat source

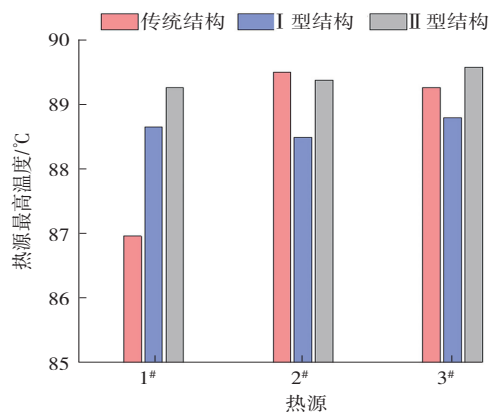


图 8 热源最高温度对比图

Fig. 8 The comparison of maximum temperature of heat source

通过对比分析,由图 7 可以得到 I 型结构的温度分布均衡性最好,优于 II 型结构和传统结构。从图 8 中热源最高温度对比可以看出,传统结构最大温差为 2.52 °C,而 I 型结构和 II 型结构的最大温度差分别为 1.02 °C 和 0.96 °C,分别下降 59.52 % 和 64.29 %。说明, I 型结构和 II 型结构的温度均匀控制效果均较好。同时, II 型结构不仅温差下降幅度较大,而且热源的最高温度均低于 I 型结构,说明 II 型结构的综合散热性能最优。

从 I 型结构和 II 型结构的冷却液流动情况进行分析,如图 6 所示,与 I 型结构的冷却液流场相比,流动较为复杂,虽然对热源散热有促进作用,但是沿程压力损失较大,因此相对于 I 型结构,综合散热效果较弱。

### 3.3 冷却液流量对温度均衡性的影响

冷却液的流量特性对热源温度的分布特性也有重要的影响。因此,为了进一步分析不同冷却液流量对热源温度的影响规律,分别对冷却液流量  $Q$  为 1 L/min、2 L/min、4 L/min、6 L/min 和 8 L/min 时,对传统结构、I 型结构和 II 型结构中 IGBT 模块热源的温度分布情况进行仿真和对比分析。3 种结构的热源最高温度随冷却液流量的变化情况如图 9 所示。

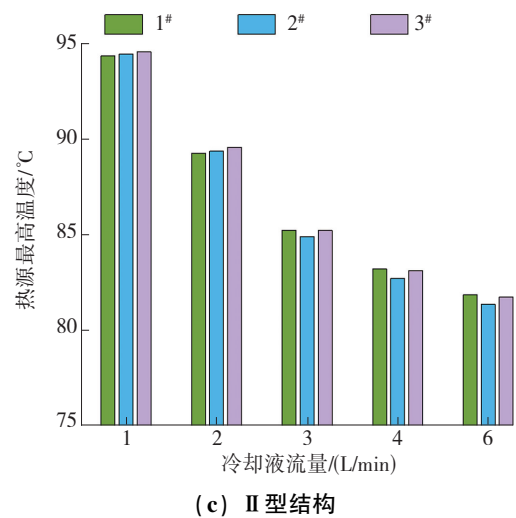
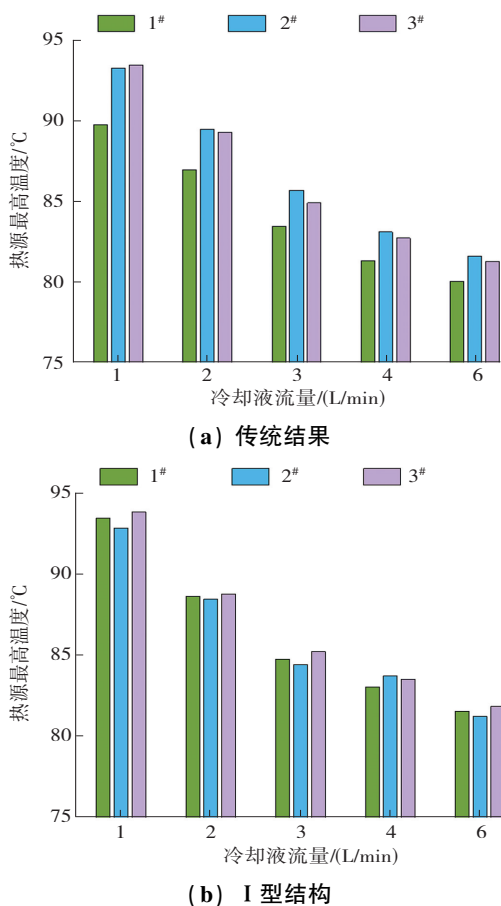


图 9 热源最高温度随冷却液流量变化

Fig. 9 The maximum temperature of the heat source varying with the flow rate of the coolant

从图 9 中 3 种结构热源最高温度随冷却液流量的变化可以看出,随着冷却液流量的增加,热源的最高温度逐渐降低。从图 9(a) 得到,随着冷却液流量的增加,传统结构热源之间最高温度的差值逐渐减小。从图 9(b) 和图 9(c) 中得到,随着冷却液流量的增加, I 型结构和 II 型结构中热源最高温度逐渐降低,但是热源之间最高温度的差值无明显变化。

对于传统结构,2# 和 3# 热源温度高于 1# 热源,是由于冷却液流经 1# 热源下方时吸收了热量,导致冷却液温度升高,在流经 2# 和 3# 热源下方时,冷却液与翅柱温差减小,影响了热传导和热对流的效果。随着冷却液流量的增大,流速逐渐增大,冷却液流经 1# 热源时间较短,吸收热量较小,因此温度较低,在流经 2# 和 3# 热源下方时,冷却液与翅柱之间温差依然较大,因此散热效果有所改善。

对于 I 型结构和 II 型结构,冷却液分别流经 1#、2# 和 3# 热源,增加冷却液的流量,同步增强各个热源下方的散热效果,因此,各个热源最高温度的差值无明显变化。

图 10 为 3 种结构热源的最低温度随着冷却液流量的变化情况。从图中可以看出,随着冷却液流量的增加,3 种结构下热源最低温度的平均值逐渐降低。但是,通过对比 3 种结构,传统结构下热源最低温度的平均值最低,然后是 I 型结构, II 型结构中热源最低温度的平均值最高。随着冷却液流量的增加, I 型结构和 II 型结构中热源最低温度的平均值的差值逐渐减小。

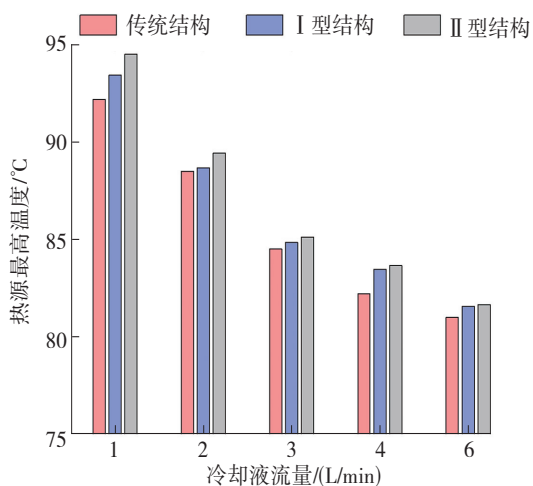


图 10 热源平均温度随冷却液流量变化

Fig. 10 The average temperature of the heat source varying with the flow rate of the coolant

对于传统结构,冷却液从液冷板左侧进入,然后从右侧流出,所有冷却液都参与1#、2#和3#热源的散热过程。而I型结构和II型结构中,冷却液被分开,分别对3个热源进行散热降温。因此,传统结构的整体效果优于I型结构和II型结构,而对于热源温度均衡性的控制,I型结构和II型结构效果明显较好。

#### 4 结论与展望

新能源汽车电机控制器中IGBT模块热源的温度及其分布的均衡性会影响其工作的可靠性、寿命和稳定性。通过数值仿真的方法研究了3种不同的散热板结构对热源温度及其分布的均衡性的影响,分析了冷却液流量变化对IGBT模块热源的最高温度和温度分布均衡性的影响规律,并从冷却液流场的角度进行了分析说明,得出以下结论:

(1) 通过对比分析3种散热板结构下热源的温度分布情况,当冷却液流量较低时,I型结构(侧向流入式)中热源温度分布均衡性最好,传统结构中热源温度分布均衡性最差。

(2) 随着冷却液流量的增加,对传统结构中热源温度分布均衡性的影响最大,而对I型结构(侧向流入式)和II型结构(中心流入式)中热源温度分布均衡性的影响较小。

(3) 对比3种不同散热板结构中热源的平均温度,传统结构的平均温度最低,I型结构次之,II型结构最高。随着冷却液流量的增加,3种散热板结构中热源的平均温度均逐渐降低,而且不同结构之间的差值逐渐减小。

实验还表明当冷却液流量较小时,传统结构中热源最高温度平均值较低,在最高温度控制方面占有优势。此时,I型结构和II型结构在热源温度分布均衡性控制方面占有优势,而且I型结构明显优于II型结构。当冷却液流量较大时,传统结构中热源最高温度控制方面无明显优势,同时I型结构和II型结构对热源温度分布均衡性的控制效果也减弱。

在未来的研究中,将继续分析和研究不同翅柱结构对热源温度分布及均衡性的影响,以对新能源汽车电机控制器IGBT模块热源散热系统的设计和开发过程提供进一步的指导。

#### 参考文献(References):

- [1] CHAI L, XIA G D, WANG H S. Laminar flow and heat transfer characteristics of interrupted microchannel heat sink with ribs in the transverse microchambers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 110: 1-11.
- [2] DONG F, FENG Y, WANG Z, et al. Effects on thermal performance enhancement of pin-fin structures for insulated gate bipolar transistor (IGBT) cooling in high voltage heater system[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 146: 106106.
- [3] PAN M, HU M, WANG H. Study of the performance of an integrated liquid cooling heat sink for high-power IGBTs[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 190: 116827.
- [4] MANOJ SIVA V, PATTAMATTA A, DAS S K. Effect of flow maldistribution on the thermal performance of parallel microchannel cooling systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73: 424-428.
- [5] WANG Y, JONES S, DAI A, et al. Reliability enhancement by integrated liquid cooling in power IGBT modules for hybrid and electric vehicles[J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(9-10): 1911-1915.
- [6] 翟鑫梦, 李月锋, 李抒智, 等. IGBT功率模块热管理研究[J]. 应用技术学报, 2020, 20(3): 211-219.  
ZHAI Xin-meng, LI Yue-feng, LI Shu-zhi, et al. Research of thermal management of IGBT power modules[J]. Journal of Technology, 2020, 20(3): 211-219.
- [7] 赖晨光, 吕宝, 陈祎, 等. 基于Star-ccm+的某水冷电机控制器热仿真及分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(8): 8-13.  
LAI Chen-guang, LYU Bao, CHEN Yi, et al. Thermal

- simulation and analysis of a water-cooled motor controller based on Star-ccm+[J]. *Journal of Chongqing University of Technology(Natural Science)*, 2018, 32(8): 8–13.
- [8] 刘桓龙, 郑忠, 伍理勋, 等. 基于热流固耦合的车用电机控制器散热特性[J]. *机床与液压*, 2019, 47(13): 152–156, 178.  
LIU Huan-long, ZHENG Zhong, WU Lixun, et al. Heat dissipation characteristics of motor controller of electric vehicles based on Heat-fluid-solid coupling[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2019, 47(13): 152–156, 178.
- [9] 何海斌, 胡文涛, 阮晓东, 等. 基于回归分析法的电机控制器散热翅片优化[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(2): 828–834.  
HE Hai-bin, HU Wen-tao, RUAN Xiao-dong, et al. Optimization of motor controller's heat dissipation fins based on regression analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 828–834.
- [10] 应保胜, 刘冬冬, 吴华伟, 等. 基于 Icepak 的多种间隙下 IGBT 散热器仿真与研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(2): 132–137.  
YING Bao-sheng, LIU Dong-dong, WU Hua-wei, et al. Simulation and research of IGBT radiator under multiple gaps based on icepak[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(2): 132–137.
- [11] 唐琳, 赖晨光, 谭礼斌. 电机及控制器冷却流道散热性能分析及结构优化[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2023, 37(2): 104–112.  
TANG Lin, LAI Chen-guang, TAN Li-bin. Heat dissipation performance analysis and structure optimization of cooling channels for motors and controllers[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(2): 104–112.
- [12] LEET Y. Design optimization of an integrated liquid-cooled IGBT power module using CFD technique[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2000, 23(1): 55–60.
- [13] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. *Microelectronics Reliability*, 2002, 42(4–5): 653–667.
- [14] CHEN Y, LI B, WANG X, et al. Investigation of heat transfer and thermal stresses of novel thermal management system integrated with vapour chamber for IGBT power module [J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, 10: 73–81.
- [15] 黄泉凯, 张正兴, 胥巧丽. 电机控制器串联式水道仿真及优化[J]. *汽车电器*, 2020(1): 20–21.  
HUANG Xiao-kai, ZHANG Zheng-xing, XU Qiao-li. Simulation and optimization for tandem channel of motor controller[J]. *Auto Electric Parts*, 2020(1): 20–21.
- [16] 吴智勇, 王雄, 黄南, 等. 基于均温技术的走行风冷热管散热器性能优化研究[J]. *机车电传动*, 2021(1): 126–132.  
WU Zhi-yong, WANG Xiong, HUANG Nan, et al. Research on performance optimization of running air-cooled heat pipe radiator based on temperature equalization technology [J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2021(1): 126–132.
- [17] 郑紫璇. 新型交错式进出口换热器拓扑优化研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.  
ZHENG Zi-xuan. Study a new staggered multi-inlet and multi-outlet heat sink designed by topology optimization[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [18] 窦泽春, 闫俊材, 吴智勇, 等. 基于深孔钻相变均温技术的散热器传热优化研究[J]. *机车电传动*, 2023(4): 137–144.  
DOU Ze-chun, YAN Jun-cai, WU Zhi-yong, et al. Research on heat transfer optimization of heat sink based on phase change isothermal technology for deep hole drilling machine[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2023(4): 137–144.
- [19] 王洪清. 面向大功率 IGBT 散热的一体式均热板液冷散热器设计与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.  
WANG Hong-qing. Design and performance research of integrated liquid cooling heat sink with vapor chamber for high-power IGBT[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [20] 段会强, 付波, 金积德. 一种基于水冷系统的先进 IGBT 散热模块设计[J]. *电子器件*, 2022, 45(5): 1082–1088.  
DUAN Hui-qiang, FU Bo, JIN Jide. Design of an advanced IGBT heat-dissipating module based on water cooling system[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(5): 1082–1088.

责任编辑:陈 芳