

电动汽车永磁同步电机控制器水冷散热器的优化设计

唐忠健, 屈凡林, 李海波, 陶浪, 李磊, 阴晓峰*

(西华大学汽车工程研究所, 四川 成都 610039)

摘要: 绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 模块是电机控制器中主要的发热源。为使 IGBT 模块工作在安全温度范围内, 基于正交实验设计某电动汽车用 45 kW 永磁同步电机控制器水冷散热器。首先, 在估算 IGBT 模块热损耗基础上, 初步确定散热器结构, 并通过热仿真确定影响散热器性能的主要因素; 然后, 采用正交实验法对冷却液流速、肋片高度、肋片厚度、肋片间距、扰流柱类型及散热器基板厚度等因素进行优化, 获得散热器的最佳控制和结构参数。仿真结果表明, 设计的散热器能够满足 IGBT 模块的散热需求。

关键词: 电机控制器; 永磁同步电机控制器; 散热器; 水冷散热器; IGBT 模块; 散热器优化

中图分类号: U469.72 文献标志码: A 文章编号: 1673-159X(2022)06-0091-07

doi:10.12198/j.issn.1673-159X.4002

Optimization of Water-cooled Radiator for PMSM Controller of Electric Vehicle

TANG Zhongjian, QU Fanlin, LI Haibo, TAO Lang, LI Lei, YIN Xiaofeng*

(Institute of Automotive Engineering, Xihua University, Chengdu 610039 China)

Abstract: Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) module is the main heat source in the electric motor controller. To make the IGBT module work in a safe temperature range, a water-cooled radiator for a 45kW permanent magnet synchronous motor (PMSM) controller of electric vehicle was designed based on orthogonal experiment. Based on estimating the heat loss of the IGBT module, the radiator structure was determined preliminarily. The main factors affecting the performance of the radiator were clarified via thermal simulation. Then, the factors such as coolant flow rate, fin height, fin thickness, fin spacing, spoiler type and radiator substrate thickness were optimized by orthogonal experiment, and the optimal control and structural parameters of the radiator were obtained. Simulation results show that the designed radiator can meet the heat dissipation requirements of IGBT module.

收稿日期: 2021-04-01

基金项目: 四川省科技计划项目 (2021YFQ0052, 2019YFG0367, 2020008); 西华大学研究生创新基金项目 (YCJJ2020126)。

* 通信作者: 阴晓峰 (1972—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为节能与新能源汽车动力传动系统优化理论与控制技术、智能网联汽车通信与控制技术, 以及汽车嵌入式控制软件设计分析与集成技术。

ORCID: 0000-0003-1152-8890 E-mail: xfyin@139.com

引用格式: 唐忠健, 屈凡林, 李海波, 等. 电动汽车永磁同步电机控制器水冷散热器的优化设计 [J]. 西华大学学报 (自然科学版), 2022, 41(6): 91-97.

TANG Zhongjian, QU Fanlin, LI Haibo, et al. Optimization of Water-cooled Radiator for PMSM Controller of Electric Vehicle [J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2022, 41(6): 91-97.

Keywords: motor controller; permanent magnet synchronous motor controller; radiator; water-cooled radiator; IGBT module; optimization of radiator

绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)模块是电动汽车电机控制器的核心驱动部件。在电机控制器工作过程中,IGBT 模块不断地开启与关闭,产生的导通损耗和开关损耗将导致内部芯片温度升高,若温度过高会严重影响其性能和可靠性,因此需要为 IGBT 模块设计合适的散热器。

散热器的散热方式分为自然对流和强迫对流方式^[1]。自然对流技术较为成熟,结构简单、成本低,但散热效果一般,同时会产生噪声,寿命较短。强迫对流散热能够更快地带走热量,散热效果更好,并且不会产生噪声和振动,但缺点是制造成本较高。考虑到 IGBT 模块是电动汽车电机控制器的核心部件,正常工作时会产生较大温升,因此本文采用强迫对流方式的 IGBT 模块水冷散热器。

在 IGBT 模块水冷散热器研究方面,众多学者已开展大量工作。在散热器结构、形状方面,文献[2]研究了采用直接液体冷却 IGBT 功率模块的热效应,将微通道冷板直接与基板和有限的热界面材料结合,热仿真结果表明使用微通道冷板进行直接液体冷却可以有效降低 IGBT 功率模块的热阻,同时减小散热器尺寸。文献[3]提出一种叉排针柱多种间隙布置的水冷散热器,采用 ANSYS Icepak 仿真软件进行基于数值模拟的热仿真。结果表明,在相同流速条件下,对比普通叉排针柱散热器,叉排针柱多种间隙布置的水冷散热器散热性能较好。文献[4]针对目前 CRH2 型高速动车机组变流器中所用的大功率 IGBT 模块,设计了 4 种动车组牵引变流器用高效散热器,并进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟,选出最优散热器模型并进行二次优化。仿真结果表明,优化后的散热器能很好地满足散热要求。文献[5]基于数值仿真和试验研究方法,对 IGBT 液冷散热器的性能进行研究和优化设计,并将结果与 HXD1C 机车、HXD2B 机车使用的散热器进行对比,结果表明对称的双面冷却结构能提高 IGBT 安装面的均温性并减少安装空间。文献[6]通过数值仿真以

及热性能试验方法,分析界面气隙对 IGBT 模块结温和壳温的影响,结果表明:在硅脂气隙产生的初期,气隙对 IGBT 结温的影响较小,随着气隙扩大,会使结温明显升高,导致 IGBT 模块寿命降低,甚至使 IGBT 模块迅速损坏。文献[7]提出一种新颖的具有双面冷却(DSC)几何形状的 IGBT 封装,证明了 DSC 几何形状在电气和热性能方面均优于传统的单侧冷却(SSC)几何形状。文献[8]通过比较和分析是否带有泄压槽的 3 个分支的流量分布,发现泄压槽方法可以有效地调节 3 个分支的压力和流量。文献[9]提出了一种在变频器关闭过程中用测得的结温冷却曲线来确定 IGBT 热网络参数的方法,研究了结温曲线的时间常数与热网络参数之间的关系。在热阻估算以及热分析方面,文献[10]以纯电动汽车电机控制器为研究对象,结合传热学基本原理,提出了一种水冷散热器热阻估算方法,并验证了方法的有效性。文献[11]为获得水冷散热器的散热能力,在不同流量下,从理论上对水冷散热器的散热热阻进行推导和计算,利用对称性原理对散热器模型进行简化处理并通过 CFD 进行仿真,仿真结果与理论计算结果高度吻合。文献[12]提出利用 $T-Q$ 特性曲线进行热流体模拟的方法,以预测 IGBT 模块的结温和散热块的气流速率。

上述研究主要集中在散热器结构、形状、热阻估算以及热分析等方面,未考虑对散热器结构参数和控制参数同时进行优化。本文针对某电动汽车用 45 kW 永磁同步电机控制器,在对 IGBT 模块热损耗估算、水冷散热器的结构设计、散热性能影响因素分析的基础上,采用正交实验设计方法对该散热器的结构参数及冷却液最佳流速进行优化,从而降低电机控制器 IGBT 模块的工作温度,提高散热器性能。

1 IGBT 模块热损耗估算

IGBT 模块由 IGBT 芯片与续流二极管两部分组成,IGBT 模块的热损耗也主要由两者产生^[13]。

IGBT 模块工作时,热损耗由 4 部分组成,分别是 IGBT 芯片与续流二极管的导通损耗和开关损耗。

1.1 IGBT 芯片的导通损耗和开关损耗

1)导通损耗。IGBT 模块在正常导通状态下,电流通过时饱和压降产生的损耗,即为导通损耗,可由下式计算:

$$P_{\text{sat-I}} = V_{\text{CE(sat)}} \cdot I_{\text{CP}} \cdot \tau \quad (1)$$

式中: $P_{\text{sat-I}}$ 为 IGBT 的导通损耗, W; $V_{\text{CE(sat)}}$ 为 IGBT 压降, V; I_{CP} 为集电极导通电流, A; τ 为 IGBT 占空比。

2)开关损耗。IGBT 控制极收到控制信号时,对电路进行开关操作所产生的能量损耗,即为开关损耗,由电路接通与断开两部分损耗组成,计算公式如下:

$$P_{\text{sw-I}} = f_{\text{PWM}} \cdot (E_{\text{(on)}} + E_{\text{(off)}}) \quad (2)$$

式中: $P_{\text{sw-I}}$ 为 IGBT 的开关损耗, W; f_{PWM} 为 PWM 开关频率, kHz; $E_{\text{(on)}}$ 为 IGBT 导通时损失的能量, mJ; $E_{\text{(off)}}$ 为 IGBT 关断时损失的能量, mJ。

1.2 续流二极管的导通损耗与开关损耗

1)导通损耗。

$$P_{\text{sat-F}} = V_{\text{F(sat)}} \cdot I_{\text{CP}} \cdot \tau_{\text{F}} \quad (3)$$

式中: $P_{\text{sat-F}}$ 为二极管导通损耗, W; $V_{\text{F(sat)}}$ 为续流二极管压降, V; τ_{F} 为二极管占空比。

2)开关损耗。

$$P_{\text{sw-F}} = f_{\text{PWM}} \cdot E_{\text{rec}} \quad (4)$$

式中: E_{rec} 为二极管反向恢复损耗, mJ; $P_{\text{sw-F}}$ 为二极管开关损耗, W。

1.3 IGBT 模块总损耗

本文选用的 IGBT 模块为英飞凌 FF450R12ME4, 每个 IGBT 模块中含有两个 IGBT 芯片和两个续流二极管,故单个 IGBT 模块的总损耗为

$$P_{\text{t}} = 2 (P_{\text{sat-I}} + P_{\text{sw-I}} + P_{\text{sat-F}} + P_{\text{sw-F}}) \quad (5)$$

由于永磁同步电机要求其峰值输出电流为 225.4 A, 考虑到适当的电流裕度, 设定 I_{CP} 为 230 A。IGBT 压降 $V_{\text{CE(sat)}}$ 为 1.42 V, 续流二极管压降 $V_{\text{F(sat)}}$ 为 1.25 V; IGBT 占空比 τ 取 0.8, 二极管占空比 τ_{F} 取 0.2; IGBT 开通时损失的能量 $E_{\text{(on)}}$ 为 17 mJ, 断开时损失的能量 $E_{\text{(off)}}$ 为 33 mJ; f_{PWM} 为 10 kHz, 二极管反向恢复损耗 E_{rec} 为 40 mJ。通过计算可得 IGBT 导通损耗 $P_{\text{sat-I}}$ 为 261.3 W, 开关损耗 $P_{\text{sw-I}}$ 为 500 W; 续流二极管导通损耗 $P_{\text{sat-F}}$ 为 57.5 W, 开关损耗 $P_{\text{sw-F}}$ 为 400 W。因此, IGBT 模块总损耗 P_{t}

为 2437.6 W。

2 散热器结构设计

散热器材料选用 6061 铝合金, 以使其具有足够的强度、抗腐蚀能力和良好的导热性能。

散热器采用平直肋片式, 由基板和固定在基板上的平直肋片组成(如图 1 所示)。为达到更好的散热效果, 在散热器水道内增加扰流柱, 以增加散热器与冷却液的接触面积, 提高散热性能。

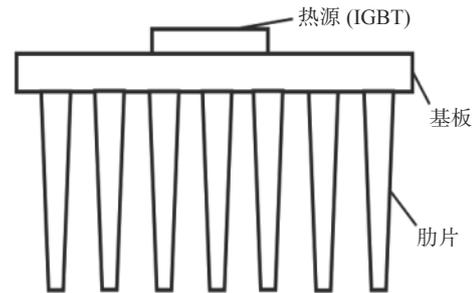


图 1 平直肋片式示意图

根据 IGBT 模块尺寸以及散热器在控制器内部的空间限制, 可确定散热器的大致尺寸以及 IGBT 模块在散热器基板上的布置形式。为了使热量能被冷却液充分带走, 设计时尽可能让 IGBT 模块被下方的水道覆盖。热功耗与基板厚度之间的计算公式^[14]如下:

$$H = 7 \log P_{\text{t}} - 6 \quad (6)$$

式中: H 为包括 IGBT 模块中 PCB 板与焊层以及铝基板的厚度, mm; P_{t} 为 IGBT 模块的热损耗, kW。计算可得 H 为 15.6 mm。实际的基板厚度仅包括铝基板厚度, 去除 PCB 板与焊层厚度后初步确定铝基板实际厚度 H_{t} 为 10 mm。

IGBT 模块尺寸为 152 mm×62 mm×17 mm。散热器模型如图 2 所示, 整体尺寸为 238 mm×272 mm×25 mm。散热器一侧开有 2 个直径为 10 mm 的冷却液进出口, 每块 IGBT 模块下方设置两条水道。散热器与电机控制器集成在一起, 散热器基板与电机控制器壳体共同构成散热器整体。散热器内部冷却液流动示意图如图 3 所示, 冷却液分别从散热器的 2 个开口流入和流出, 以带走热量。在热分析过程中, IGBT 模块仅作为热源, 可将热分析模型简化为由 IGBT 模块、散热器及冷却液进出口 3 部分组成。

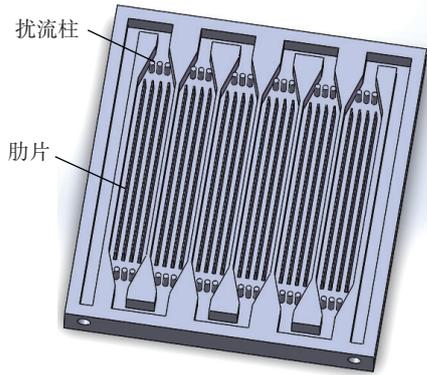


图 2 散热器三维模型

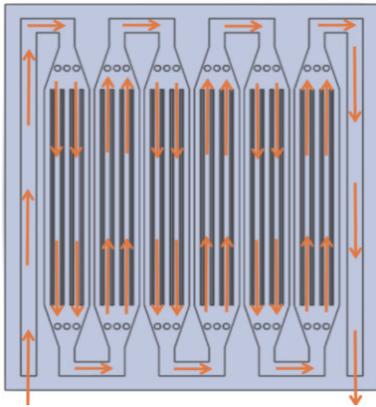


图 3 散热器流动示意图

肋片结构示意图如图 4 所示。参考文献 [15] 与 [16] 中平直肋片散热器的设计方案为取平直肋片角度 3° ，初取肋片间距 4 mm 。表 1 所示为肋片尺寸参考值^[14]。根据初步确定的基板厚度 H_b ，可按表 1 确定肋片高度 h 和肋片厚度 t 的合适范围。

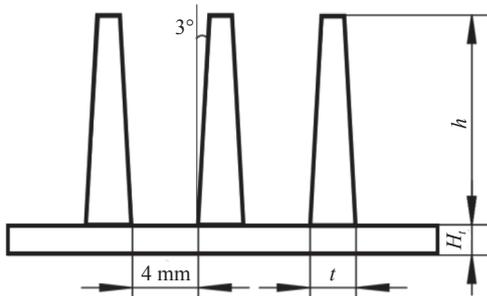


图 4 肋片结构示意图

表 1 平直肋片尺寸参考值

结构参数	参考值				
H_b/mm	2~4	4~6	6~8	8~10	≥ 10
t/mm	1.0	1.5	2.0	2.0	2.5
h/mm	≥ 6	≥ 8	≥ 8	≥ 10	≥ 10

3 散热器热分析

利用 SOLIDWORKS 建立散热器的三维模型(如图 2 所示)并进行热分析。

3.1 散热器仿真条件

散热器模型仿真条件设置如表 2 所示。

表 2 散热器仿真条件

项目	参数
单位系统	SI 标准
分析类型	内流与固体内热传导
默认流体	水
流动特性	层流与湍流
外壁条件	绝热壁面
初始环境温度	$20.05\text{ }^\circ\text{C}$
入口条件	速度入口条件
出口条件	环境压力
热源	表面热源
单个 IGBT 模块热功耗	2437.56 W

3.2 散热性能影响因素分析

由于冷却液流速、肋片高度、肋片厚度、肋片间距、扰流柱类型和基板厚度均可能对散热性能产生影响,故采用控制变量法分别分析各因素对散热性能的影响。根据经验设置各因素的基准值,冷却液流速取 3 m/s ,肋片高度取 13 mm ,肋片厚度取 2 mm ,肋片间距取 3.8 mm ,扰流柱类型取为圆形,基板厚度取 9 mm 。每次只改变其中一个因素,其他因素保持不变,依次分析每一因素对散热性能的影响。

冷却液流速以 1 m/s 为步长在 $2\sim 5\text{ m/s}$ 范围内变化,其他因素保持不变,分别进行仿真,结果如图 5 所示。由图可知,随着冷却液流速的逐渐增加,IGBT 模块的最高温度逐渐下降,在流速变化范围内温度降幅达到 $25.16\text{ }^\circ\text{C}$ 。

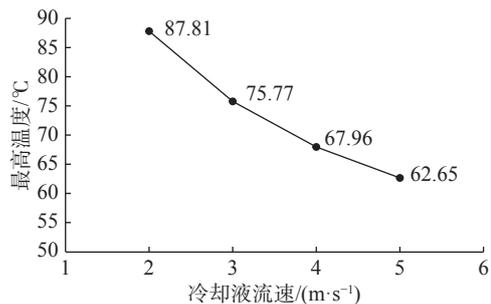


图 5 冷却液流速对最高温度的影响

肋片高度以 1 mm 为步长在 12~15 mm 范围内变化,其他因素保持不变,分别进行仿真,结果如图 6 所示。由图可知,肋片高度与最高温度呈负相关,在肋片高度变化范围内温度变化幅度为 3.16 °C。

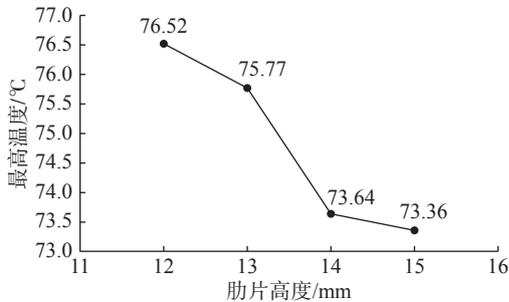


图 6 肋片高度对最高温度的影响

肋片厚度以 0.2 mm 为步长在 1.8~2.4 mm 范围内变化,其他因素保持不变,仿真结果如图 7 所示。由图可知,IGBT 模块的最高温度随着肋片厚度的增加呈现出下降的趋势,降幅为 2.48 °C。

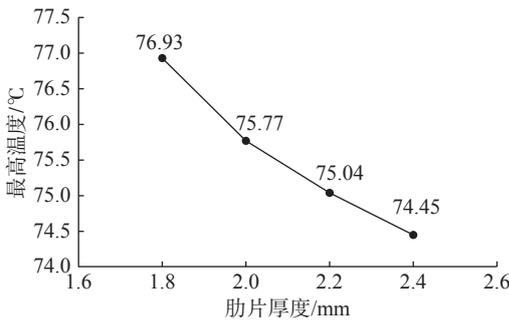


图 7 肋片厚度对最高温度的影响

肋片间距以 0.2 mm 为步长在 3.6~4.2 mm 范围内变化,其他因素保持不变,仿真结果如图 8 所示。由图可知,随着肋片间距的增加,散热器的散热性能降低,IGBT 模块最高温度增幅为 2.1 °C。

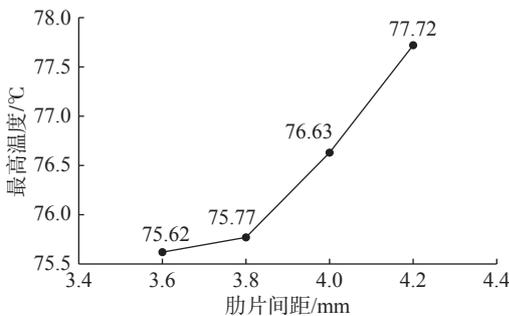


图 8 肋片间距对最高温度的影响

在扰流柱横截面面积相等的情况下,选取菱形、圆形、椭圆形、正方形 4 种不同截面形状,其他

因素保持不变,仿真结果如图 9 所示。由图可知,不同类型的扰流柱对散热器性能存在一定的影响。

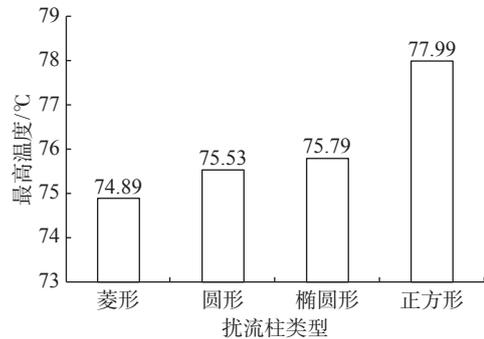


图 9 扰流柱类型对最高温度的影响

基板厚度以 1 mm 为步长在 9~12 mm 范围内变化,其他因素保持不变,仿真结果如图 10 所示。由图可知,随着基板厚度的逐渐增加,IGBT 模块最高温度也随之增加,在基板厚度变化范围内增幅为 1.9 °C。

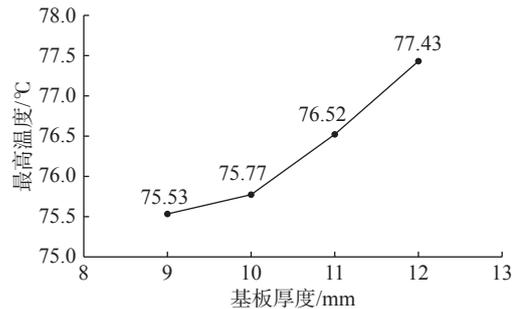


图 10 基板厚度对最高温度的影响

由以上仿真分析可知,冷却液流速、肋片高度、肋片厚度、肋片间距、扰流柱形状、基板厚度均会影响散热性能,因此需要对这些因素进行优化,以获得最佳的散热效果。

4 散热器参数优化

采用正交实验法,对冷却液流速、扰流柱类型、肋片高度、肋片厚度、肋片间距以及基板厚度 6 个因素进行优化。因素水平表如表 3 所示,表中因素 A、B、C、D、E、F 分别对应流速(m/s)、肋片高度(mm)、肋片厚度(mm)、肋片间距(mm)、扰流柱类型、基板厚度(mm)。由于正方形扰流柱相比于其他 3 种形状扰流柱,会使 IGBT 最高温度大幅上升,因此扰流柱类型优化中不考虑正方形。由影响因素分析可以看出,冷却液流速对温度影响很大,因此冷却液流速设置 6 个水平,其余参数均设

置 3 个水平, 流速以 1 m/s 为步长, 变化范围为 1~6 m/s^[12], 其他数据以参考值为基准浮动^[14]。

表 3 因素水平表

水平	因素					
	A	B	C	D	E	F
1	1	13	2.0	3.8	圆形	9
2	2	14	2.2	4.0	椭圆形	10
3	3	15	2.4	4.2	菱形	11
4	4					
5	5					
6	6					

采用 Minitab 统计软件生成混合型正交实验表, 如表 4 所示。水平 A1 到 A6 代表不同流速; B1、B2、B3 表示不同肋片高度; C1、C2、C3 表示不同肋片厚度; D1、D2、D3 表示不同肋片间距; E1、E2、E3 表示不同扰流柱类型; F1、F2、F3 表示不同基板厚度。表 4 中各水平的具体值可从表 3 获得。

表 4 正交实验表

方案	因素					
	A	B	C	D	E	F
1	A1	B1	C1	D1	E1	F1
2	A1	B2	C2	D2	E2	F2
3	A1	B3	C3	D3	E3	F3
4	A2	B1	C1	D2	E2	F3
5	A2	B2	C2	D3	E3	F1
6	A2	B3	C3	D1	E1	F2
7	A3	B1	C2	D1	E3	F2
8	A3	B2	C3	D2	E1	F3
9	A3	B3	C1	D3	E2	F1
10	A4	B1	C3	D3	E2	F2
11	A4	B2	C1	D1	E3	F3
12	A4	B3	C2	D2	E1	F1
13	A5	B1	C2	D3	E1	F3
14	A5	B2	C3	D1	E2	F1
15	A5	B3	C1	D2	E3	F2
16	A6	B1	C3	D2	E3	F1
17	A6	B2	C1	D3	E1	F2
18	A6	B3	C2	D1	E2	F3

针对表 4 确定的每一种方案, 分别进行热仿真, 可得到 IGBT 模块最高温度与散热器流体压

降。IGBT 模块最高温度越低, 流体压降越小, 则散热器综合性能越好。对二者分别进行归一化, 按权重各取 0.5 进行加权求和作为综合性能指标。各方案仿真及计算结果如表 5 所示。

表 5 指标归一化及综合性能指标

方案	最高温度/℃	归一化值(最高温度)	流体压降/Pa	归一化值(流体压降)	综合性能指标
1	109.55	1	6584.49	0.00754	0.50377
2	106.86	0.94909	4969.29	0	0.474545
3	102.82	0.87263	6318.22	0.0063	0.439465
4	90.07	0.63134	18421.14	0.06283	0.347085
5	85.03	0.53596	23567.04	0.08687	0.311415
6	85.66	0.54788	25231.12	0.09464	0.32126
7	74.61	0.33876	51607.9	0.21784	0.2783
8	73.04	0.30905	55710.79	0.237	0.54605
9	73.79	0.32324	40393.21	0.16546	0.24435
10	64.3	0.14364	80599.13	0.35325	0.248445
11	65.79	0.17184	91078.12	0.40219	0.287015
12	64.99	0.1567	97818.33	0.43367	0.295185
13	62.63	0.11204	153037.39	0.69159	0.80363
14	59.64	0.05545	112564.92	0.50255	0.279
15	60.83	0.07797	142164.55	0.6408	0.359385
16	56.71	0	203549.88	0.92752	0.46376
17	58.3	0.03009	219067.94	1	0.515045
18	59.01	0.04353	160896.29	0.7283	0.385915

从表 5 可以看出: 方案 9 的综合性能指标最小, 为 0.24435; 方案 10 的综合性能指标与方案 9 很接近, 但其流体压降接近方案 9 的 2 倍, 故选择方案 9 为最佳方案, 即冷却液流速 3 m/s, 肋片高度 15 mm, 肋片厚度 2 mm, 肋片间距 4.2 mm, 基板厚度 9 mm, 扰流柱选用椭圆形。

图 11 为优化前散热器 IGBT 模块最高温度与流体压降分布云图。该方案散热器的结构及形状参数取基准值, IGBT 模块最高温度为 102.76 ℃。最佳方案对应 IGBT 模块最高温度与流体压降分布云图如图 12 所示, IGBT 模块最高温度为 73.79 ℃, 远低于 IGBT 模块中 PN 节的最高耐温 150 ℃^[17]。优化后最高温度下降 28.97 ℃, 可确保 IGBT 模块的使用寿命。

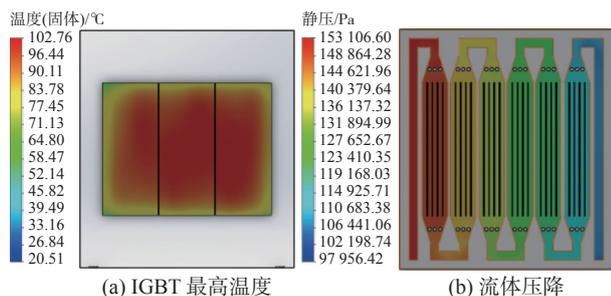


图 11 优化前温度与压降分布云图

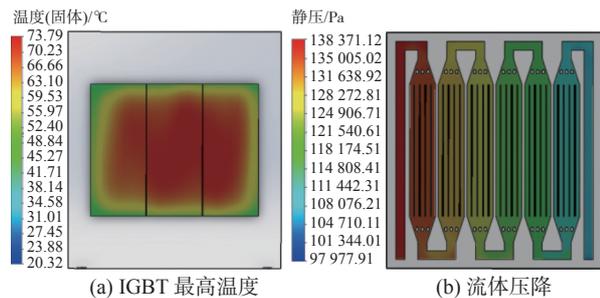


图 12 最佳方案温度与压降分布云图

5 结论

本文以降低某电动汽车 45 kW 永磁同步电机控制器 IGBT 模块工作温度为目标进行散热器优化设计。首先对 IGBT 模块热损耗进行估算,然后设计内流道带有平直肋片与扰流柱的水冷散热器,通过热仿真分析影响散热性能的主要因素,采用正交实验法设计对冷却液流速和结构参数进行优化的仿真实验方案,通过对各方案仿真结果的对比分析,确定了冷却液流速和结构参数的最佳方案。该方案能在确保流体压降适当的前提下,降低 IGBT 模块的最高温度,满足电机控制器的散热需求。

参 考 文 献

- [1] 汪洪, 杜平安, 夏汉良. 基于热交换系数法的散热器等效建模方法研究[J]. *工程设计学报*, 2010, 17(3): 201 – 206.
- [2] LIU C K, CHAO Y L, YANG S J, et al. Direct liquid cooling for IGBT power module[C]// 9th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT). [S. l.]: IMPACT, 2014: 41 – 44.
- [3] 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.

[4] 高峰, 张毅, 潘晓燕. 动车组 IGBT 模块高效散热器设计[J]. *制冷学报*, 2020(4): 1 – 9.

[5] 宋郭蒙, 王雄, 王幸智, 等. 基于高效扰流技术的 IGBT 双面冷却散热器性能优化研究[J]. *机车电传动*, 2020(1): 22 – 27.

[6] 杨闵盛, 宋郭蒙, 王雄. IGBT 模块与散热器接触界面气隙对散热的影响研究[J]. *机车电传动*, 2020(1): 18 – 21.

[7] ZHONG Y L, MENG J L, NING P Q, et al. Design & analysis of a novel IGBT package with double-sided cooling[C]//IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). [S. l.]: IEEE, 2014: 1 – 6.

[8] 丁杰, 唐玉兔. 翅柱式 IGBT 水冷散热器的数值模拟[J]. *机床与液压*, 2014, 42(16): 63 – 66.

[9] DU X, LI T F, ZHANG J, et al. Thermal network parameter identification of IGBT module based on the cooling curve of junction temperature[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S. l.]: IEEE, 2016: 2992 – 2997.

[10] 王淑旺, 路玲, 赖剑斌. 电动汽车电机控制器 IGBT 结温计算方法与验证[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(3): 370 – 375.

[11] 毛志云, 李申, 宋全刚, 等. 板式水冷散热器的传热性能分析[J]. *机床与液压*, 2020, 48(1): 74 – 78.

[12] HAN C W, JEONG S B, OH M D. Thermo-fluid simulation for the thermal design of the IGBT module in the power conversion system[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016: 59.

[13] 王月宏. 纯电动汽车电机控制器散热器热优化研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2015.

[14] 程翔, 史雪辉. 基于 Flotherm 的散热器的优化设计[C]//2008 年电子机械与微波结构工艺学术会议论文集. 南昌: 中国电子学会, 2008.

[15] 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.

[16] 刘瑞. 板翅式、叉排式散热器综合性能分析及实验研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2006.

[17] 张晏铭, 周维维, 刘洪纪, 等. 一种 IGBT 散热器动态响应性能优化数值算法[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(11): 3017 – 3026.

(编校: 夏书林)