

文章编号: 1673-3193(2024)01-0098-07

# SiC功率模块的液冷散热设计与节能分析

巩飞, 郭鸿浩

(南京邮电大学 自动化学院、人工智能学院, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 为综合评估SiC功率模块的液冷冷板散热效果, 设计了串联、并联与串并联3种冷板流道结构, 从器件温升、系统能效、散热性能3个方面共计10项指标评估了冷板性能, 基于ICEPAK仿真分析了液冷系统流场与温度场的稳态分布特征, 从节能角度给出了液冷散热方案的工程应用选择与优化建议。研究表明, 冷板内部串联流道设计的温升与散热性能指标更优, 但其能效表现系数仅为并联设计的1/5, 散热表现的提升以增加冷板内部压力损失为代价, 降低了其能效表现; 3种流道设计下, 冷却液流量由8.2 L/min提高至24.6 L/min, 冷板的能效表现系数分别由1 275, 6 407, 1 425下降至53.2, 258.3, 60.6, 故提高冷却液流量并非改善散热的首选。实际工程应用中, 在器件的温升允许范围内, 应优先选择冷板内部的并联流道设计与多冷板间并联的散热方案, 以提高散热系统的节能性。

**关键词:** 功率模块; 热设计; 冷板; 液冷; 节能

**中图分类号:** TN305.94

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.01.013

**引用格式:** 巩飞, 郭鸿浩. SiC功率模块的液冷散热设计与节能分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 98-104.

GONG Fei, GUO Honghao. Thermal design and energy saving analysis of liquid cooling for sic power module [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2024, 45(1): 98-104.

## Thermal Design and Energy Saving Analysis of Liquid Cooling for SiC Power Module

GONG Fei, GUO Honghao

(College of Automation & College of Artificial Intelligence, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** In order to comprehensively evaluate the cooling effect of the liquid cooling plate of SiC power module, three kinds of cold plate runner structures in series, parallel and series parallel were designed. The cold plate performance was evaluated from 10 indicators of device temperature rise, system energy efficiency and heat dissipation performance. The steady-state distribution characteristics of the flow field and temperature field of the liquid cooling system were analyzed based on ICEPAK simulation. From the perspective of energy saving, the project application selection and optimization of liquid cooling scheme were given. The results show that the temperature rise and heat dissipation performance indexes of the series runner design are best, but its energy efficiency coefficient of performance is only 1/5 of that of the parallel design. The improvement of heat dissipation performance reduces the energy efficiency at the cost of increasing the pressure loss inside the cold plate. For the three runner designs, the coolant flow rate is increased from 8.2 L/min to 24.6 L/min, and the energy efficiency coefficient of the cold plate are

**收稿日期:** 2023-04-06

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11702148)

**作者简介:** 巩飞(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事电力电子设备设计、多物理场仿真的研究。E-mail: gongfei0099@126.com。

decreased from 1 275, 6 407, and 1 425 to 53.2, 258.3, and 60.6, respectively. Increasing the coolant flow rate is not the first choice to improve heat dissipation. In practical engineering applications, within the allowable range of temperature rise of the device, the parallel runner design and the parallel heat dissipation scheme between multiple cold plates should be preferred, so as to improve the energy saving of the heat dissipation system.

**Key words:** power module; thermal design; cold plate; liquid cooling; energy saving

## 0 引言

SiC MOSFET 与传统的硅基相比具有更高的电子迁移率、更高的开关速度以及更宽的带隙,使其在高温、高频及高功率方面具备更好的应用前景<sup>[1-6]</sup>。然而,随着其芯片尺寸的小型化以及更高电压和电流带来的功率密度的提升,产生了更高的热通量,因而带来了对低成本、轻量化以及更高效的散热解决方案的需求<sup>[7-10]</sup>。

功率模块的热性能表现直接关系到其工作的可靠性和使用寿命,功率器件的散热方式主要包括空冷、液冷、相变冷却等,其中,液冷散热是应用最广泛、技术最成熟的一种方式<sup>[11-13]</sup>。对于液冷冷板的研究主要集中在流道设计与优化方面。张嘉伟<sup>[14]</sup>、宋全刚等<sup>[15]</sup>分别使用了内部为柱状翅片结构的流道设计和并联的多管流道设计,以热阻和冷板压力损失为设计目标,基于响应面方法的优化设计来寻找最优的结构参数。傅航杰等<sup>[16]</sup>在传统蛇形槽流道基础上,采用水滴扰流翅柱流道方案进行散热强化,并对比分析了两种流道结构下的器件温升与冷板压力损失。何海斌等<sup>[17]</sup>使用矩形翅片的U型水道结构,基于回归分析法,同样以温升与冷板压降为设计目标,给出了翅片的结构优化设计。杨刚等<sup>[18]</sup>设计了一种串并联流道冷板,以冷板压力损失、器件温升、温度分布标准差、换热系数为评价指标,从冷板的流动与换热特性两个方面评价了冷板的散热表现。段会强等<sup>[19]</sup>设计了一款热管嵌入式水冷散热器,同时分析了圆柱翅片与矩形翅片结构的散热作用。

综上所述,对于冷板性能的评价指标多集中于热阻、压力损失以及器件的温升或温度分布方面,而关于冷板的节能效果评价则较少。本文在传统电子器件散热评价指标的基础上,通过计算泵功率重点探讨了不同冷板设计下的能效表现系数,以节能性为评价核心,从节能角度给出了冷板流道的优化建议,并结合工程实际应用给出了多冷板散热系统的选择方案。

## 1 液冷散热系统设计

以某电机控制器的半桥 SiC MOSFET 功率模块为研究对象,其结构示意图与实物图如图 1 所示。功率模块由多层结构构成,芯片部分为 MOSFET 或肖特基二极管(SBD),此处因功率损耗而产生的热量由芯片焊层、绝缘基板、基板焊层、底板、粘接层、水冷板依次传递至冷却液,利用冷却液的流动将热量带走,从而实现散热。该功率模块的芯片为碳化硅;绝缘基板的上下层为铜,中间层为氮化铝;底板为铜;粘接层为导热硅脂;水冷板为铝合金;冷板内部的冷却液为体积分数 25% 的乙二醇水溶液。

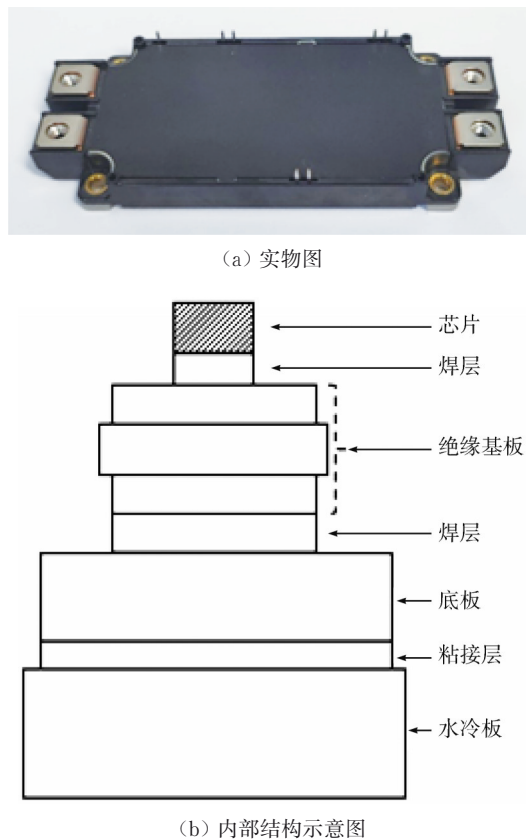


图 1 功率模块实物与内部结构示意图  
Fig. 1 Power module and internal structure diagram

利用器件厂商提供的ROHM Solution Simulator计算出额定工况下(电压800 V, 输出电流100 A, 开关频率60 kHz)单个MOSFET的损耗为51.5 W, 单个SBD的损耗为3.9 W。功率模块中共计16个MOSFET与16个SBD, 因此, 总损耗为886.4 W。实际应用中将6个功率模块并联构成电机控制器的一相, 故单个冷板所承载的功耗为5 318.4 W。设散热系统的工作环境温度 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冷却液在冷板出入口的温差控制在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内, 由式(1)可计算出此温差条件下所需的冷却液流量为 $8.2\text{ L/min}$ 。

$$V_f = \frac{P_d}{\rho c_p (t_{\text{fout}} - t_{\text{fin}})}, \quad (1)$$

式中:  $V_f$ 为体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $P_d$ 为总功耗, W;  $\rho$ 为冷却液密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_p$ 为冷却液比热容,

$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $t_{\text{fout}}$ 为冷却液的出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{fin}}$ 为冷却液的入口温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

基于功率模块中的芯片分布情况, 设计了3种水冷板流道结构, 如图2所示。冷板尺寸为 $498\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ , 考虑到功率模块在冷板上的固定, 将冷板的入口与出口流道放置于冷板的两侧位置以避开功率模块的固定螺孔, 图中左侧为入口, 右侧为出口, 出入口的尺寸为 $14\text{ mm}\times 14\text{ mm}$ 。流道的主体由3段平行的流道组成, 流道宽度为26 mm, 高度为5 mm, 为了增加冷却液的对流换热面积, 3段主体流道内增加了5行翅片, 翅片厚度与翅片间距均为2 mm。3段流道经串联(见图2(a))、并联(见图2(b))和串并联(见图2(c))后, 构成了3种流道结构, 图2(d)为内部细节示意图。

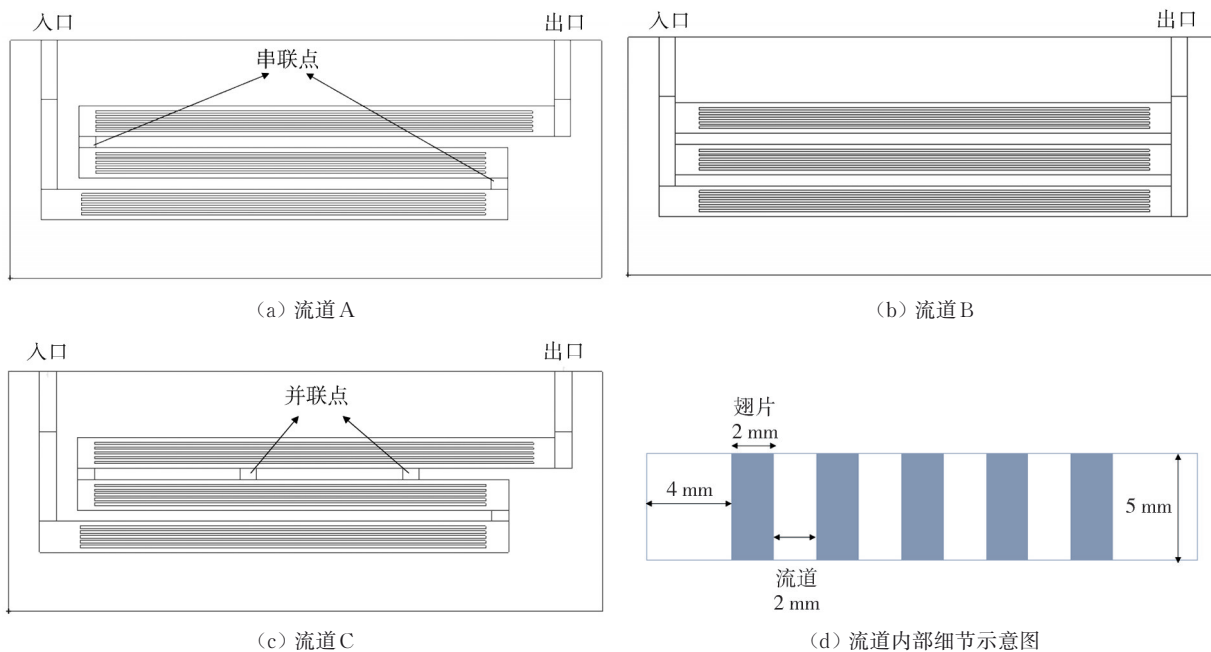


图2 水冷板流道结构图

Fig. 2 Schematic diagram of cooling plate runner structure

## 2 散热表现评价

为评估上述3种冷板结构的散热效果, 从器件温升、系统能效、散热性能三方面共计10项指标来完成统计分析。

### 2.1 器件温升指标分析

分别统计6个功率模块中MOSFET与SBD的最高结温( $t_{\text{jmax}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )与最低结温( $t_{\text{jmin}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), 以评估器件的温升上限; 进一步分析功率模块中的温差( $t_{\text{jmax}} - t_{\text{jmin}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), 用以评估功率模块中的温度分

布特性, 同时, 计算功率模块中的器件均温( $t_{\text{ave}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ), 由公式(2)给出温度的标准差, 用于评估温度分布的均匀性。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_{\text{ji}} - t_{\text{ave}})^2}{n}}, \quad (2)$$

式中:  $\sigma$ 为温度标准差,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $n$ 为数量; 下标j表示结。

### 2.2 系统能效指标分析

基于流场计算结果可以给出冷板流道出入口之间的压力损失为 $\Delta p_{\text{total}}$ , 进而可由式(3)计算出

维持冷板入口流量所需的泵功率  $P_{\text{pump}}$ ，该功率仅为冷板入口的泵功率，并非实际使用的水泵功率。由于热设计过程中，对于节能的考虑同样十分重要，因此，将上述泵功率代入式(4)可计算出散热系统的能效表现系数( $C_p$ )。该值越大，表明散热系统在满足散热需求的同时只需更低的水泵功率，其节能效果越好<sup>[3,20]</sup>。

$$P_{\text{pump}} = \Delta p_{\text{total}} V_f, \quad (3)$$

$$C_p = \frac{P_d}{P_{\text{pump}}}. \quad (4)$$

### 2.3 散热性能指标分析

热阻是用于评价散热性能的一项重要参数，式(5)为假设一维、稳态传热条件下的热阻计算方法。

$$R_{\text{th}} = \frac{\Delta t}{P_d} = \frac{l}{kA}, \quad (5)$$

式中： $R_{\text{th}}$ 为热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ； $\Delta t$ 为基于参考温度的温升， $^{\circ}\text{C}$ ； $l$ 为沿传热方向的材料厚度， $\text{m}$ ； $k$ 为导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； $A$ 为导热面积， $\text{m}^2$ 。因此，采用基于温升的计算方法，从冷板表面至冷却液间的热阻为

$$R_{\text{sf}} = \frac{t_{\text{smax}} - t_{\text{fin}}}{P_d}, \quad (6)$$

式中： $R_{\text{sf}}$ 为冷板热阻， $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ； $t_{\text{smax}}$ 为冷板表面温度峰值， $^{\circ}\text{C}$ 。将整块冷板等效为一个换热器，则由式(7)~式(9)可计算出冷板的换热效率为<sup>[20]</sup>

$$Q_{\text{act}} = \rho V_f c_p (t_{\text{fout}} - t_{\text{fin}}) = P_d, \quad (7)$$

$$Q_{\text{max}} = \rho V_f c_p (t_{\text{smax}} - t_{\text{fin}}), \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{act}}}{Q_{\text{max}}}, \quad (9)$$

式中： $Q_{\text{act}}$ 为冷板实际换热功率， $\text{W}$ ； $Q_{\text{max}}$ 为冷板理想条件下的最大换热功率， $\text{W}$ ； $\varepsilon$ 为换热效率。

## 3 数值模拟与仿真分析

采用 ANSYS-ICEPAK 完成液冷散热系统的流固耦合仿真。仿真设置：1) 忽略热辐射与自然对流，仅考虑散热系统内部的热传导与热对流过程；2) 流动与传热由连续性、动量和能量方程描述；3) 采用 FLUENT 求解器和 SIMPLE 算法，流动与湍流选择一阶迎风格式，冷却液为不可压缩流；4) 除芯片外，忽略温度对其它材料物性参数的影响，导热硅脂与冷却液的导热系数分别为  $3 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$  和  $0.505 \text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ ，其余材

料由软件材料库提供；5) 在考虑出入口的冷却液温差为  $10^{\circ}\text{C}$  的情况下，循环流入冷板的冷却液温度为  $45^{\circ}\text{C}$ ，流道内的雷诺数经软件计算为 9 772，因此，需要考虑湍流，湍流模型选择标准的  $k-\varepsilon$  两方程模型，流道入口为流量边界，流道出口为压力出口边界；6) 为提高迭代计算的稳定性，设定动量项的松弛因子为 0.6，残差设置能量项为  $10^{-7}$ ，其余为  $10^{-3}$ ，迭代步数设置为 1 200 步。

计算域内的网格采用 ICEPAK 提供的六面体占优网格，通过控制并调整 3 个方向的网格最大尺寸，对 3 种不同网格数(1 012 726, 1 196 222, 1 564 758)进行了网格无关性验证，以流道 A 设计下的 MOSFET 器件最高结温为对比参数，3 种网格尺寸下的结温分别为  $110.8^{\circ}\text{C}$ ， $109.9^{\circ}\text{C}$  和  $110.1^{\circ}\text{C}$ ，误差在 1% 以内，因此，后续仿真均采用上述中等数量的网格划分。

针对湍流模型的选择，对比分析了 5 种不同湍流模型的计算结果，冷板采用流道 A 设计，计算获得的 MOSFET 器件最高结温数据见表 1。计算结果表明，不同湍流模型下的结温变化较小，误差在 1% 以内，因此，本文后续的仿真计算均采用常用的标准  $k-\varepsilon$  模型。

表 1 不同湍流模型对比

Tab. 1 Comparison of different turbulent models

湍流模型	$t_{\text{jmax}}/^{\circ}\text{C}$
Standard $k-\varepsilon$	109.9
Spalart-Allmaras	110.0
Enhanced $k-\varepsilon$	109.4
RNG $k-\varepsilon$	109.4
Realizable $k-\varepsilon$	110.5

将功率模块沿流道入口向出口方向依次编号为 1 号至 6 号模块，图 3 为 3 种冷板的功率模块温度云图，图中左侧流道口为入口。计算结果表明，由于 MOSFET 的功耗较高，因此，高温区域主要集中在 MOSFET 芯片所在的位置，其中，流道 A 和 B 的温度峰值均位于 6 号功率模块内，6 个功率模块依次排列呈温度递增的分布趋势，温度峰值分别为  $109.9^{\circ}\text{C}$  与  $115.8^{\circ}\text{C}$ 。流道 C 的整体温度分布规律与前两种不同，其温度峰值位于 1 号功率模块内，温度峰值为  $111.2^{\circ}\text{C}$ ，6 个功率模块的温度峰值依次呈高—低—高—低的交错分布特征，该现象是由冷板中部增加了两列并联支路所造成的。图 4 为 6 个功率模块的铜底板外表

面的平均温度分布曲线,其中,流道A和C的均温分布规律较为接近,1号至5号模块的底板均温变化较小,靠近出口的6号模块均温略高。流道B的温度分布呈单向递增变化,1号模块均温最低,为70.4℃,6号模块均温最高,为79℃。

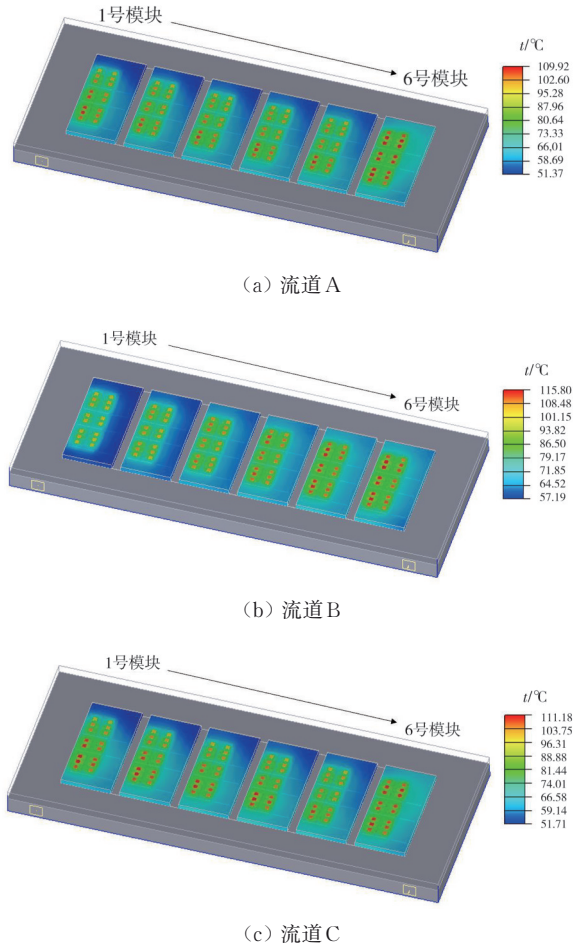


图3 3种冷板的功率模块温度云图

Fig. 3 Temperature distribution in power modules for three kinds of cold plate

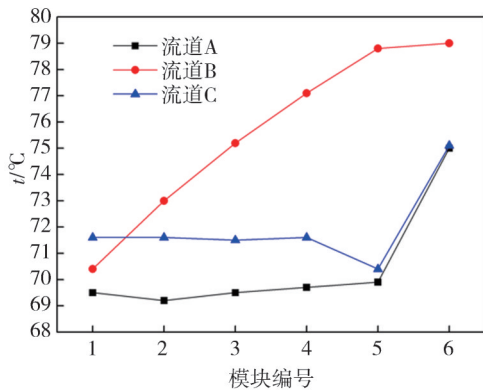


图4 3种冷板功率模块的底板平均温度分布曲线

Fig. 4 Average temperature distribution curves of the power module bottom plate for three kinds of cold plate

表2和表3分别为MOSFET和SBD的温升指标数据。计算结果表明,流道A的温度峰值最低,温差最小,温度的标准差也最小,而流道C的温升指标次之,流道B的各项指标中除MOSFET的器件温差指标略好于流道C外,其余指标均表现最差。流道A与B相比,MOSFET与SBD的结温峰值分别下降了5.1%和5.4%,温度标准差分别下降了11.4%和14.9%,仅从温升指标对比分析,串联流道设计在温升抑制与芯片温度分布的一致性方面表现最好。

表2 MOSFET温升指标对比

Tab. 2 Comparison of MOSFET temperature rise index

流道	$t_{jmax}/^{\circ}C$	$t_{jmin}/^{\circ}C$	$(t_{jmax}-t_{jmin})/^{\circ}C$	$t_{ave}/^{\circ}C$	$\sigma/^{\circ}C$
流道A	109.9	95.0	14.9	103.6	3.35
流道B	115.8	100.2	15.6	108.7	3.78
流道C	111.2	95.5	15.7	105.1	3.67

表3 SBD温升指标对比

Tab. 3 Comparison of SBD temperature rise index

流道	$t_{jmax}/^{\circ}C$	$t_{jmin}/^{\circ}C$	$(t_{jmax}-t_{jmin})/^{\circ}C$	$t_{ave}/^{\circ}C$	$\sigma/^{\circ}C$
流道A	87.5	74.2	13.3	81.4	2.96
流道B	92.5	78.7	13.8	86.7	3.48
流道C	88.3	74.7	13.6	83.1	3.35

表4为冷板的能效与散热性能指标数据。计算结果表明,虽然流道A的冷板热阻最小,换热效率最高,但其压力损失达到30.5 kPa,因而其需要更大的泵功率。进一步分析表明,较好的散热性能指标建立在更大的压力损失基础上,即提高了泵功率而降低了其能效指标,这样散热系统的成本也会随之增加。流道B的能效表现系数为6 407,是流道A的5倍,从节能的角度考虑,采用并联结构的流道设计,能效表现远超另两种流道结构。

表4 冷板能效与散热性能指标对比

Tab. 4 Comparison of energy efficiency and heat dissipation performance

流道	$\Delta p_{total}/kPa$	$P_{pump}/W$	$C_p$	$R_{st}/(^{\circ}C \cdot W^{-1})$	$\epsilon$
流道A	30.5	4.17	1 275	0.005 5	0.339
流道B	6.1	0.83	6 407	0.006 4	0.294
流道C	27.3	3.73	1 425	0.005 8	0.325

## 4 工程应用分析

某实际电机控制器的三相系统共需要18个功率模块,其中6个模块并联控制一相,因此,将相同的3块水冷板进行并联或串联,从而形成该

电机控制器的最终液冷散热方案。如果采用冷板间并联,进出口冷却液温差要求不变,仍为  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,冷却液总流量为3块冷板之和  $24.6\text{ L/min}$ ,并联散热方案的冷板散热效果可使用仿真获得的各项指标数据;如果采用冷板间串联,则单个冷板的进出口温差限定在  $3.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因而计算获得的冷却液流量需求也为  $24.6\text{ L/min}$ ,3块冷板的入口温度分别为  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $48.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和  $51.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。使用上述参数进一步开展多冷板串联方案下的散热性能评价,并与冷板并联方案形成对比。

表5为3块冷板串联后的关键能效与散热性能指标数据,图5为3块冷板串联后的MOSFET结温峰值分布曲线。

表5 多冷板串联的关键指标对比

Tab. 5 Comparison of key indexes of multiple cold plates in series

流道	$\Delta p_{\text{total}}/\text{kPa}$	$C_p$	$\epsilon$
流道A	244.5	53.2	0.191
流道B	50.2	258.3	0.160
流道C	213.9	60.6	0.173

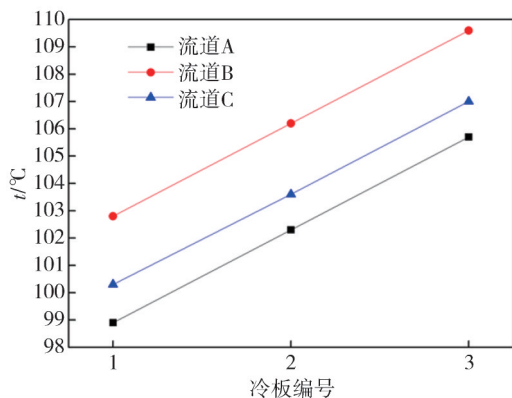


图5 多冷板串联的MOSFET结温峰值分布曲线

Fig. 5 Peak junction temperature distribution curve of MOSFET with multiple cold plates in series

表5和图5的计算结果表明:串联后的每块冷板的压力损失以及计算获得的能效表现系数与换热效率是相同的,冷却液的入口温度仅影响温升指标,与能效及散热性能指标无关。串联冷板按照冷却液流入的先后顺序编号为1号~3号,其器件结温峰值按编号依次升高,3号冷板的MOSFET结温峰值在3种流道结构下分别为  $105.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $109.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和  $107.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,与冷板并联方案相比分别下降了  $3.8\%$ ,  $5.4\%$ 和  $3.8\%$ ,温升指标略有提升,但能效与散热性能出现了大幅下降,与并联时冷却液流量为  $8.2\text{ L/min}$ 相比,3种流道结构下能效表现系数分别由  $1\ 275$ ,  $6\ 407$ ,

$1\ 425$ 下降至  $53.2$ ,  $258.3$ ,  $60.6$ ,  $\epsilon$ 下降约  $43.7\%\sim 46.8\%$ 。

## 5 结论

本文通过对温升、能效与散热性能的多指标评估,综合分析了3种冷板流道结构下的散热效果,并结合工程应用,重点考察了冷板的节能表现,给出了实际应用中的液冷散热系统方案选择与优化建议,在本文计算条件下的主要结论如下:

1)冷板内部串联流道设计的温升抑制与散热性能最佳,但其能效表现较差;并联流道设计可大幅降低冷却液的压力损失,其能效表现系数是串联流道设计的5倍。因此,热设计时,在器件温升的允许范围内,可优先考虑并联流道设计。

2)冷却液的入口温度仅影响冷板的温升指标,与能效、散热性能指标无关,因此,在器件温升的允许范围内,可考虑适当增加冷板进出口的冷却液温差,从而进一步提高液冷散热系统的能效与散热性能。

3)冷却液的流量影响全部的温升、能效、散热性能指标,3种流道设计下,流量由  $8.2\text{ L/min}$ 提高至  $24.6\text{ L/min}$ ,器件结温峰值可下降约  $3.8\%\sim 5.4\%$ ,但冷板的能效表现系数分别由  $1\ 275$ ,  $6\ 407$ ,  $1\ 425$ 下降至  $53.2$ ,  $258.3$ ,  $60.6$ ,从节能与经济性方面考虑,提高流量并非改善散热性能的首选,应寻求在最小流量条件下,通过优化冷板内部结构设计来适当增加换热面积,或使用更高热导率的材料及冷却液的方法。

4)工程应用中的多冷板散热系统,应首选冷板间的并联方案,与串联方案相比,虽然有少量的器件温升提高,但其节能效果更符合实际工业需求。

## 参考文献:

- [1] MANDRUSIAK G, SHE Xu, WADDELL A M, et al. On the transient thermal characteristics of silicon carbide power electronics modules[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9783-9789.
- [2] CHEN M X, WANG H, PAN D H, et al. Thermal characterization of silicon carbide MOSFET module suitable for high-temperature computationally efficient thermal-profile prediction[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(4): 3947-3958.
- [3] ERP R, KAMPITSIS G, MATIOLI E. Efficient

- Microchannel cooling of multiple power devices with compact flow distribution for high power-density converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(7): 7235-7245.
- [4] SHI Y D, CHEN Y, PENG C, et al. Competitive failures decoupling and mechanisms analysis of SiC MOSFET module under power cycling stress[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2023, 11(6): 5877-5888.
- [5] XU Wei, HUANG A Q. 15-kV/50-A SiC AC switch based on series connection of 1.7-kV MOSFETs[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, 59(5): 6543-6555.
- [6] HUANG K, CHENG L, QU S, et al. High-sensitivity silicon carbide optical MEMS accelerometer based on wavelength modulation system[J]. *Journal of Measurement Science and Instrumentation*, 2023, 14(1): 116-126.
- [7] 潘政薇,董长城,石春虎,等. IGBT水冷机箱的数值模拟与试验研究[J]. *电力电子技术*, 2020, 54(5): 136-140.
- PAN Zhengwei, DONG Changcheng, SHI Chunhu, et al. Numerical simulation and experimental research on IGBT water-cooling case[J]. *Power Electronics*, 2020, 54(5): 136-140. (in Chinese)
- [8] NAYAK D P, PRAMANICK S K. Implementation of an electro-thermal model for junction temperature estimation in a SiC MOSFET based DC/DC converter[J]. *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, 2023, 8(1): 42-53.
- [9] CHEN W, JIANG J, MEDA A H, et al. A thin and low-inductance 1200 V SiC MOSFET fan-out panel-level packaging with thermal cycling reliability evaluation[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2023, 70(5): 2268-2275.
- [10] 祖冉,李敏,黄妍慧,等. 带负载观测器的永磁同步电机滑模无差拍控制[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(5): 411-417.
- ZU Ran, LI Min, HUANG Yanhui, et al. Sliding model deadbeat control of permanent magnet synchronous motor with load observer[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2022, 43(5): 411-417. (in Chinese)
- [11] 齐文亮,赵亮,王婉人,等. 高热流密度电子设备液冷技术研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(11): 4261-4270.
- QI Wenliang, ZHAO Liang, WANG Wanren, et al. Research progress of high heat flux electronics devices liquid cooling technology[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(11): 4261-4270. (in Chinese)
- [12] 程日炜,兰国峰,严浩铭,等. 激光光幕测速系统温控装置设计[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(4): 370-376.
- CHENG Riwei, LAN Guofeng, YAN Haoming, et al. Design of temperature control device for laser light curtain velocity measurement system[J]. *Journal of North University of China(Natural Science Edition)*, 2022, 43(4): 370-376. (in Chinese)
- [13] GORECKI K, POSOBKIEWICZ K. Cooling systems of power semiconductor devices-a review[J]. *Energies*, 2022, 15: 4566.
- [14] 张嘉伟,曾正,孙鹏,等. 基于响应面的车用功率模块 Pin-Fin 优化设计[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(22): 5836-5850.
- ZHANG Jiawei, ZENG Zheng, SUN Peng, et al. Optimized pin-fin design of power module for electric vehicle application by response surface[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(22): 5836-5850. (in Chinese)
- [15] 宋全刚,王琦,张承,等. 基于 ANSYS 分析的水冷散热器多目标优化[J]. *流体机械*, 2022, 50(4): 65-70.
- SONG Quangang, WANG Qi, ZHANG Cheng, et al. Multi-objective optimization of a water-cooled heat-sink based on ANSYS analysis[J]. *Fluid Machinery*, 2022, 50(4): 65-70. (in Chinese)
- [16] FU H J, WU Z Y, WANG X, et al. Research on heat transfer optimization design of water-cooled radiator for wind power module[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 56(10): 17-20.
- [17] HE H B, HU W T, RUAN X D, et al. Optimization of motor controller's heat dissipation fins based on regression analysis[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(2): 828-834.
- [18] YANG G, CHENG L Z, WEI Q, et al. Numerical investigation on the flow and heat transfer characteristics of a series-parallel channel liquid cold plate[J]. *Journal of CAEIT*, 2021, 16(9): 862-868.
- [19] DUAN H Q, FU B, JIN J D. Design of an Advanced IGBT heat-dissipating module based on water cooling system[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2022, 45(5): 1082-1088.
- [20] GUGGARI S I. Analysis of thermal performance metrics-application to CPU cooling in HPC servers[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2021, 11(2): 222-232.