

# IGBT功率模块冷却系统应用综述

王维龙, 向立平, 赵光攀

(南华大学 机械工程学院, 湖南 衡阳 421000)

**摘要:** IGBT作为一种功率半导体场控自关断电子器件, 已经成为新能源汽车能源转换、电机驱动以及高压电源开关等装置不可替代的组成部分。电力电子系统呈现出更小尺寸、更高的开关频率和更高的额定电压趋势, 在性能增加的同时如何更好地保证IGBT模块的性能和工作可靠性逐渐成为众多专家学者关注的问题, 本文综述了近年关于IGBT模块的各种散热技术, 从不同角度着重分析了热管散热的现状, 然后针对现有的散热手段做出总结, 旨在为后来学者在突破IGBT模块散热问题提供参考。

**关键词:** IGBT; 散热技术; 热管散热; 强化换热; 功率半导体器件

**中图分类号:** TK121; TN325+.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-128X(2022)06-0130-08

## Application review of IGBT power module cooling system

WANG Weilong, XIANG Liping, ZHAO Guangpan

(College of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421000, China)

**Abstract:** As a kind of power semiconductor field-controlled self-shutdown electronic device, IGBT has become an irreplaceable component in new energy vehicle energy conversion, motor driving and high-voltage power switching units. While the electrical and electronic systems present a trend towards a smaller size, higher switching frequency and higher rated voltage, how to better guarantee the performance and reliability of the IGBT module to keep abreast with the improved performance has gradually become a hot spot of research among experts and scholars. This paper reviewed the various heat dissipation technologies on the IGBT module in recent years, and focused on analyzing the status quo of the heat pipe type heat dissipation from different angles of view, and summarized the existing heat dissipation means, to offer a reference for scholars to further study and make breakthrough in the IGBT module heat dissipation.

**Keywords:** IGBT; heat dissipation technology; heat pipe type heat dissipation; heat transfer enhancement; power semiconductor device

## 0 引言

绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 是由美国北卡罗来纳州立大学 B. Jayant Baliga 教授于 1979—1980 年通过结合双极结晶体管 (BJT) 技术和金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOS-FET) 技术研制出来的<sup>[1]</sup>, 其融合了双极结型晶体三极

管和绝缘栅型场效应管的优点, 具有驱动功率小、开断速度快和输入阻抗高等特征。随着 IGBT 技术不断迭代升级, 其集成度越来越高, 性能越发强悍, 高频开合和传导带来了高热流密度问题。然而, 电力电子器件性能受到温度影响较大, 器件内部热量若没能得到及时疏散, 造成的热量堆积将导致内部温度很快达到芯片工作的理想温度极限。有研究表明, IGBT 的平均结温每提高 5 °C, IGBT 使用寿命相应减少 20%~

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52075528, 11872374); 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ2095, 2020JJ5670); 2022年度省级大学创业实践项目 (S202210555137)

通信作者: 向立平 (1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事强化传热、核热工安全分析等方面的研究;

E-mail: elephantxlp@163.com

25%<sup>[2]</sup>。本文就最近几年不同国家学者对 IGBT 散热技术的研究情况进行分析整理, 分析常规 IGBT 模块热量来源与热传输路径, 总结传统的风冷散热技术、液冷散热技术、热管散热技术以及一些新兴的散热技术手段, 为进一步的研究提供参考。

## 1 IGBT 模块冷却系统结构

IGBT 模块热量主要由导通功耗、开关功耗、断态功耗以及快恢复二极管功耗产生, 通常情况下断态功耗因相对较小可忽略不计。图 1 为常规 IGBT 模块结构示意图<sup>[3]</sup>, 其 IGBT 热传输路径为: IGBT 芯片/二极管→芯片下焊接层→DBC 铜层→DBC 陶瓷层→DBC 铜层→衬底焊接层→基板→导热硅胶→散热器→外部环境。

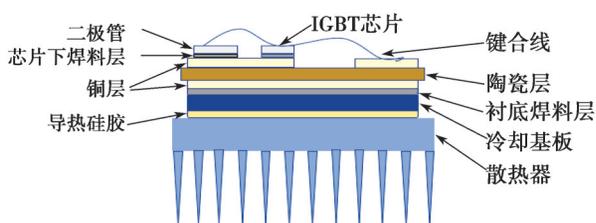


图1 IGBT 模块结构剖面

Fig. 1 Structure section of IGBT module

IGBT 功率模块的传热热阻主要包括热沉自身的热阻、各焊接层热阻、陶瓷层热阻、上下铜层热阻, 以及各层之间的接触热阻。通过了解 IGBT 功率模块的热传输路径和传热热阻的组成, 有利于我们更好地理解 IGBT 模块冷却系统散热性能的优化过程。

## 2 风冷式散热

风冷可以分为自然对流(空气冷却)和强制冷却。文献[4]以英飞凌 FF450R12KT4 功率模块参数为依据进行了等尺寸建模, 利用热仿真软件分析了小功率 IGBT 模块在 PWM 信号占空为 42.6%, 峰值电流为 10 A 和 25 A, 开关频率分别为 10 kHz 和 12.5 kHz 的不同工况下自然风冷的温度场分布情况, 不同开关频率的最高结温为 116.8 °C, 能够满足 IGBT 模块最高结温 125 °C 的要求; 通过试验对仿真结果进行验证, 发现试验结果与仿真结果基本吻合, 试验中测得最高温度为 118.2 °C, 误差在允许范围之内。

随着 IGBT 功率越来越大, 普通的自然对流冷却显然不能满足高性能高热流密度 IGBT 模块的散热需求。强制风冷的散热量比自然风冷散热量高约 5~12 倍。强制风冷散热系统主要是由电子元器件、散热器和风扇等组成。电子元器件产生的热量由散热器传导, 经过空气对流带出, 当带出的热量等于热源产生的热量时便达到平衡。整理相关文献, 针对强制风冷式散

器散热能力的提高主要是从以下 3 个方面考虑:

①翅片形状优化。通过改变翅片形状结构, 可减少对流环境下流动阻力的影响, 提高散热器散热性能。文献[5]引入了半圆形和等腰三角形形状的翅片结构, 在与常用矩形翅片散热性能的对比分析中可发现, 流动阻力对散热性能有一定影响, 但阻力并非唯一决定性因素, 数值模拟结果表明: 在矩形、半圆形和等腰三角形结构翅片中, 半圆形结构流动阻力最小、等腰三角形次之, 等腰三角形结构翅片具有更高的换热系数, 但半圆形和等腰三角形的翅片结构散热性能均优于矩形结构散热器。

②流道结构优化。通过调整散热器部件的位置、在合适位置加入挡板, 降低风道分压不均匀性, 减少负压区的产生。文献[6]介绍借助 Icepak 热分析软件, 对变频一体机(YJVFT-315S1-4(55/1140))内部风道结构进行优化, 优化前发现在风扇上游和安装支架下部区域存在较大的回流、压力分布不均等突出问题; 通过改变基板纵向尺寸、翅片数量和翅片间距等变量, 避免了主要回流区域的产生, 减少进风口进风量损失, 相对于优化前内部分压更均匀。

③考虑更换散热器材料, 使用比表面积更大的材料。文献[7]研究了泡沫铜翅片散热器, 该型材具有比表面积大、质量密度更低等特点; 通过试验比对, 证实了具有更大比表面积结构的材料更有利于热量向外部环境的扩散, 散热效果更佳。文献[8]研究了填充石蜡、石墨纳米片的直翅片散热器, 发现石墨纳米片可以有效地增强导热, 其中搭载 15% 的石墨纳米片散热器的热导率增加了近 5 倍。

风冷散热技术相对来说成本不高, 但由于强制对流设备的引入会导致噪声的产生, 引发噪声污染问题。即使强制风冷相对空气自然冷却散热能力有所增强, 还是避免不了 IGBT 模块温度分布不均匀问题, 因此风冷散热器在 IGBT 模块上应用有限。

## 3 液冷式散热

常见的水冷散热系统通常包括冷却模块、液冷泵、水箱、“水-空气”热交换器和管路, 如图 2 和图 3 所示。冷却模块负责接收热源产生的热量, 在泵的作用下管路中水能够快速流动, 从而实现冷热液体频繁交替, 吸收大量热量的液体在流经“水-空气”热交换器时将吸收的热量转移到外部环境中, 这样保证了热源温度处于一个相对稳定的环境下。相关文献指出, 液体因具有更大的热容量, 单位时间内可以携带更多的热量, 液体冷却散热能力约为强制风冷散热能力的 6~10 倍<sup>[9]</sup>。

液体冷却散热根据接触方式的不同可分为直接冷却和间接冷却。在直接液体冷却中冷却液与被冷却器件直接接触, 即 IGBT 模块直接浸没在冷却工质中, 从

而减少接触性热阻产生；而在间接冷却中冷却液不与器件直接接触，热量主要是借助液冷板由内部冷却液在内部通道的流动带出，IGBT不直接接触到液体。

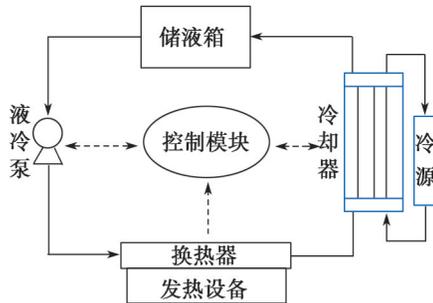


图2 泵驱动液冷系统原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pump driven liquid cooling system

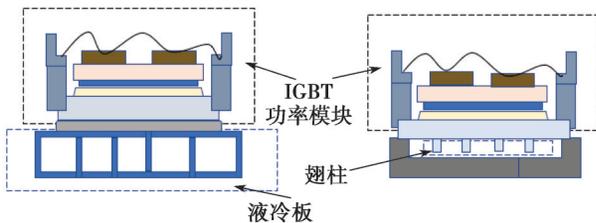


图3 液冷散热器结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of liquid cooling radiator

与风冷散热器相同，合理改变原有结构内部翅柱的形状也可以提高散热器整体散热效果，进而实现冷却系统优化的目的。文献[10]从液冷散热通道出发，分析了圆柱形叉排翅柱、波浪形圆角翅柱、波浪形直角翅柱、矩形叉排翅柱、菱形30°/60°/90°角叉排翅柱、矩形顺排翅柱8种不同翅柱液冷散热模块情况，通过仿真分析得出菱形60°角流动阻力小，泵功损耗下降，散热效果表现最佳。文献[11]则在常规散热针柱基础上分别加工出圆形环和螺旋环散热针柱，理论计算和仿真结果均表明螺旋环针柱的散热效果最好，后两者的散热性能均优于常规型，同时发现液冷散热的散热效果与针柱高度、直径和水流量也有直接关系。文献[12]基于“U”型转弯路径提出一种新型偏置扰流结构，数值模拟结果证实了该结构具有更小的热阻，热源温度较传统偏置式翅片下降了8%~11%，传热性能得到提高。

除了对翅柱进行优化以外，还可以通过改变原散热系统结构本身来进一步减少热阻。文献[13]将IGBT冷却基板同背面带有微通道散热器芯体的均温板焊接到一起，提出了一种新型一体式液冷散热器，通过试验比对分析了分离式、一体式、独立微通道散热器在385 W加热功率、冷却水25℃条件下的传热性能，结果表明独立微通道散热器热源平均温度更低，但一体式散热器热阻最小，均温性好，温差小，更有利于增加IGBT性能稳定性和寿命。

作为多孔介质，泡沫金属具有更大的比表面积，

其结构多孔，流动路径更为弯曲，可以加剧紊流的产生进而起到强化散热的作用。此外，在同一恒定流速下，其结构特有的渗透性使得流体具有更低的压降。文献[14]以材料属性为突破点，引入了散热性能更好的泡沫金属，通过试验和仿真相结合的方式，分析了2种类型的多孔介质在不同空隙密度下散热性能，发现液冷系统中金属泡沫配合针鳍的使用散热性能会更好，具有小的热阻 ( $R_{th} < 0.2 \text{ K/W}$ ) 和更低的压降 (5~15 kPa)，这对降低散热系统的能耗是非常有利的。

## 4 热管相变散热

### 4.1 常规热虹吸管散热

热管按照工作液体回流动力区可分为：有芯热管、两相闭式热虹吸管（又称重力热管，如图4所示）、重力辅助热管、旋转热管、电流体动力热管、磁流体动力热管、渗透热管等<sup>[15]</sup>。

重力热管只需满足加热段位于冷凝段下方，就可以实现内部工质的循环，不需要吸液芯、吸液槽等结构，结构最为简单，应用也最为广泛。早期应用在IGBT模块散热的热管以重力热管居多。根据文献[16-17]的报道，通过搭建风洞试验平台，将重力热管钎焊于基板上，并将冷凝段同翅片相结合，分析了进风温度与进风速度对散热器总换热量、换热系数、热流密度、压力损失的影响；试验测得在进风速度7 m/s下，空气进口温度越低，导热基板平均热流密度越大；而当保持进口温度不变，换热量和迎风速度呈正相关性。不过过大的迎面风速会带来更多的压力损失，从而引发噪声突出问题。

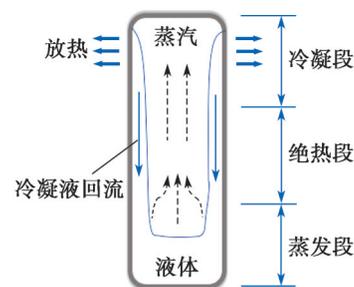


图4 两相闭式热虹吸管工作原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of working principle of two-phase closed thermosyphon

### 4.2 两相闭式热虹吸管优化

早期应用于IGBT模块散热的热管冷却系统是在冷却基板钻取一定尺度的孔洞，然后将重力热管竖直嵌入在基板上，在远离基板的热管表面装配散热翅片，即通过“热管散热器+空气对流”方式实现散热要求。

后来相关研究学者在此基础上，通过减少热管和冷却基板之间的接触热阻，进一步提高散热器整体散热性能。文献[18]从减小热阻出发，提出一种平行流结

构的矩形热管散热器。与传统经典热管散热器不同, 该散热模型是将经典热管散热模型的基板与热管接触部分融合到一起, 同排热管作为一个整体, 共用一个蒸发器, 减少了单个热管与基板接触部分的总热阻, 而且蒸发器的的工作介质可流动面积变大, 冷却基板温度分布更加均匀, 试验证明当该模型用于2个总热负荷为3 500 W的IGBT模块时, IGBT模块的壳温可以被降低到67.8 °C, 较传统热管散热器低8.9%, 同时其热阻降低约22%。文献[19]则考虑将所有热管蒸发器放在一起, 做成1个空心腔, 直接和IGBT模块接触, 试验研究了充液率、风速和加热功率对散热效果的影响。试验表明, 该新型热管散热器在15%充液率下表现最好, 测得热源平均温度比优化前的重力热管散热器低7~13 °C, 最小热阻约为优化前的50%。在上述2个热管散热模型中, 空腔内部用蒸馏水作为热管的工作介质, 不具有导电性, 充分地考虑到介质泄漏可能会带来的问题。散热器原理图见图5~图7。

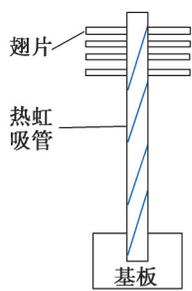


图5 传统热虹吸管散热器  
Fig. 5 Traditional thermosyphon radiator

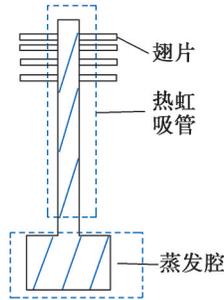


图6 单排连腔热虹吸管散热器  
Fig. 6 Single-row thermosyphon radiator with connected cavities

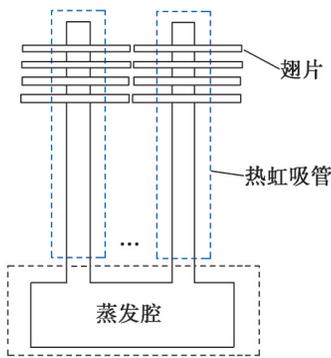


图7 全通腔热虹吸管散热器  
Fig. 7 Thermosyphon radiator with through cavities

文献[20]提出了一种双面冷却的热管散热器, 其蒸发段嵌入在基板内, 冷却段套上散热片, 由于双面冷却使得该散热器比现行的TM36散热器在性能方面提升了32%, 同时风阻降低了35%; 与现行的CRH2动车组所用的散热器相比, 性能不相上下, 但在空间和成本方面节约将近50%, 因此增加热管冷凝段面积的方式

值得借鉴。文献[2]对热管形状做了改变, 提出“L型热管”, 并引入均温管, “L型热管”蒸发段与基板接触面积增加了约40%。通过数值仿真和试验分析, 证实该方案可以满足机车在最恶劣的行车工况对IGBT最低结温要求, 同时温度分布更加均匀, 散热器整体重量较传统形式减轻了16%。

### 4.3 平板热管

文献[21]提出采用多个平板微热管构成平板微热管阵列, 配合翅片的使用, 借助专业热分析软件Icepak对该散热器模型进行温度场模拟, 并取得了不错的效果。文献[22]则设计了一款微槽道平板热管, 先用软件Icepak建模仿真, 然后搭建试验平台进行验证, 试验结果验证了其可行性, 该散热系统可以保证IGBT模块在自然冷却条件下结温约为110 °C, 基板最高温度为70.3 °C, 可以满足其正常工作的要求。

### 4.4 环路热管

文献[23]设计了一款带有毛细芯的环路热管, 其独到之处在于蒸发器的嵌入式工艺处理, 将多组环路热管均匀埋藏在冷却基板内部, 环路热管均匀布置到整块基板内部, 同一层面的热管蒸发器受热均匀, 使得散热器占用IGBT模块的整体尺寸很小。

### 4.5 其他

文献[24]提出了9种不同的埋入式热管散热器, 具体如图8、图9(b)、图9(c)、图10(b)、图10(c)所示。

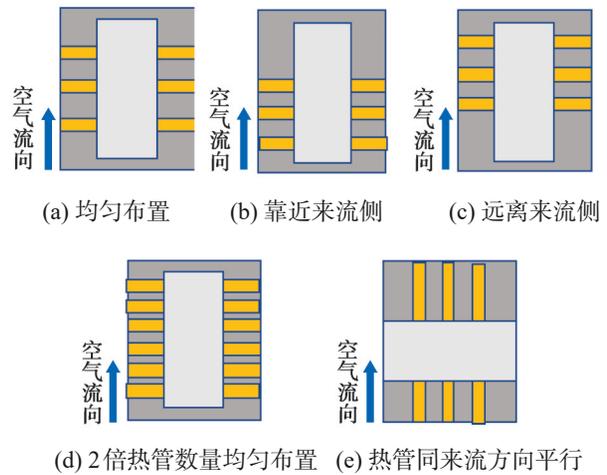


图8 同管径不同分布方式对冷却效果的影响  
Fig. 8 Influence of pipes in same diameter and different distribution modes on cooling effect

对图8的5种方案进行仿真试验, 从仿真数据可知: 方案(e)散热表现最佳, 热点温度较方案(a)下降了0.6 °C; 方案(d)散热表现次之, 热点温度较方案(a)下降约0.5 °C; 而在方案(a)、方案(b)和方案(c)方案中, 方案(a)的散热效果最好。

对图9所示的3种不同热管直径的散热器进行仿

真,从仿真结果可知:当热管的分布位置一致时,改变热管的直径尺寸,其散热效果随管径直径的增大而提高。

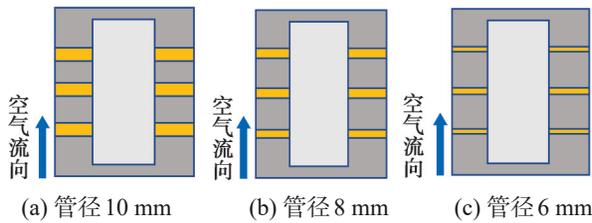


图9 相同分布不同管径对冷却效果的影响

Fig. 9 Influence of pipes in different diameters and same distribution mode on cooling effect

图9中3种不同热管直径的散热器仿真试验均是在图10中的“基板埋入式”结构的散热器中进行的,而图10中“U”型和“O”型嵌入式模型增加了翅片中下部分的热流密度,翅片潜能充分发挥,“O”型表现出更好的均温性,散热表现也最好,该热管散热器性能优于传统热管散热器,能降低散热器底板温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

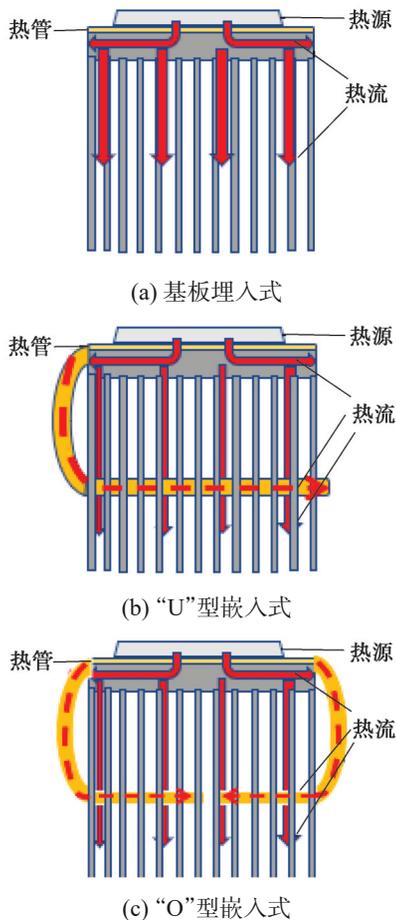


图10 嵌入式结构改进

Fig. 10 Improvements in embedded structure

#### 4.6 热管应用总结

热虹吸管因其结构最为简单,不需要额外制作液芯,仅仅借重力就能很好地运行,也正因为重力,热虹吸管蒸发段位置受到了限制,热管的尺寸在纵向

层面相对于平板热管和环路热管都要大得多,占用空间也相对较大。此外,仅仅依靠重力运行,远没有带有微槽道的平板热管所能承受的临界热通量高。平板热管和环路热管适用于均温性要求高且热流密度更大的工作场景,重力热管更多用于成本要求低、热流密度不大、温度均匀性要求不苛刻的情况。

目前,热管的散热能力是介于风冷和液冷之间,热管散热器具有较高的导热系数,结构简单不需要人工参与,占用空间相对较小,无噪声且安全可靠,因此继续提高热管散热器的散热性能,并将其推广到IGBT模块上有其必然性。上述热管性能改进可以简单概括为3个方面:①借鉴双面冷却技术,扩大冷却面积;②从最小热阻原理出发,减少接触热阻;③改善热管结构。

除此之外,还可以考虑改变热管冷凝段的传热方式,采用比热容更大的液体对流取代空气对流,因为更大的比热容意味着单位时间传递的热量远大于采用空气对流。文献[25]通过建立热管散热模型,考虑将热管冷却段外接,利用恒温水带走热量。由于热管不是竖直放置,不能借助重力实现液体循环,特设计了带有梯形沟槽的毛细热管来替代重力热管。恒温水槽外放避免了在使用高电压时漏水、电击造成的危害。

## 5 新兴散热手段

目前针对IGBT模块的热管理,各种不同的散热手段层出不穷,除了空气冷却、液体冷却和热管相变冷却外,两相强制对流冷却技术(如喷雾冷却、射流冷却等)也得到了发展,以水为冷却液的射流冲击传热系数提高到 $250\sim 1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ [26]。Bhunja和Chen[27]等人配备等比例的水和乙二醇溶液,采用射流冲击的方式对逆变器底座进行冷却,试验表明当器件温度比环境温度高 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其散热密度比针翅冷板强制对流液冷增加1.8倍,基板温度控制在 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,能够满足逆变器散热需求。文献[28]研究了不同冷却溶液在相关材料的改性表面的喷雾冷却效果,发现HFC134a相对HFO-1234yf传热性能更优异;当电镀微孔作为传热表面时,相比于HFO-1234yf,HFC134a可降低 $370\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的热流密度。文献[29]将喷雾冷却技术应用在高热流密度Si-IGBT上,采用多微喷嘴设计,研究了喷嘴比、冷却剂流量和热流密度与散热性能之间的关系,最终得到在热流密度 $250\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、喷嘴比0.45和冷却剂流量为 $0.57\ \text{L}/\text{min}$ 时散热效果最佳。文献[30]对比了以R134a作为冷却介质的两相冷板和以水为冷却介质的单相冷板,发现两相冷却在低能耗和小质量流量条件下表现出良好的散热性能,与单相冷板相比具有更高的热转换效率,提高了系统的可靠性。

还有诸如两相浸没冷却技术、3D复合相变散热技

术, 在高热流电子设备应用上均表现出巨大的潜力。文献[31]探讨了以 Novec 649 为制冷剂在 36 °C、41 °C、和 46 °C 的饱和温度下, 两相浸没式冷却所能使用的临界热通量, 该试验得到的临界热通量范围为 12.1~14.6 W/cm<sup>2</sup>, 虽然在数值上远低于试验前预期值 30 W/cm<sup>2</sup>, 但为后面的研究提供了参考和借鉴。文献[32]将热管蒸发腔和焊接在冷凝段的空腔翅片等效为各向异性的导热实体, 并针对 IGBT 进行了 3D 复合相变散热器研究, 文章仿真再现了风速为 5 m/s 时基板热源温度分布图, 试验和仿真结果均表明 3D 复合相变散热器具有很好的均温性 (热源之间温差最大 1.5 K)。试验中采用双面冷却热管散热器作为对比, 对两者的温升、压降等数据进行详细分析, 得到了 3D 复合相变散热器比双面冷却温升下降了 2.6~3.8 K, 压降减少约 130~334 Pa, 同时 3D 复合相变散热器具有更小的热阻。在走行风风速 7 m/s 下的 3D 复合相变散热器几乎可以达到水冷系统在给定 62.5 °C 的入口温度时的散热效果。

此外, 还有一种泵驱动两相冷却技术, 同样借助相变原理, 也拥有蒸发器、冷凝器、工质和连接管路, 不同点在于该冷却系统借助泵提供更大循环驱动力。相比热管工作时需要先克服摩擦力、表面张力、重力等影响才能够实现热量、质量的交换, 泵驱动两相冷却减少了热端与冷端的换热发生时间, 散热能力进一步得到提升。文献[33]详细介绍了泵驱动两相冷却系统的工作原理和系统设计流程, 搭建的泵驱动两相冷却系统试验台可以满足至少 312 W/cm<sup>2</sup> 的热流密度散热需求, 温差小于 1 K, 均温性得到验证。文献[34]介绍采用泵驱动相变冷却技术对机车 (HXD1C) 进行传热特性研究, 在以 R245fa 作为冷却工质, 在冷板散热量为 13 200 W 情况下, 发现质量流量过大, 其散热效果与单相流散热相差不大, 而质量流量过小, 则易引起局部烧干, 传热恶化, 最佳质量流量范围为 0.14~0.19 kg/s; 两相泵驱动冷却技术在试验中呈现出良好的均温性, 温度均匀性可以很好地进行控制, 温差在 2.2 K 以下。

国内也出现了多种散热方式组合的形式, 如“平板热管+喷雾冷却”“热电制冷+平板热管”等方式。针对中压 IGBT 模块散热, 文献[35]提出了以热电制冷为主, 搭配微型平板热管使用的主动式散热器, 热电制冷器安装在微型平板热管和冷却基板之间, 热电制冷器提供第一层散热路径, 微型平板热管提供第二层散热路径, 成功克服了热电制冷器在小电流下工作时不能提供足够的制冷量而导致的冷端温度高于热端的问题, 该方案比径向热通道散热器具有更高的制冷系数和更大的散热量。

新兴的散热技术在一定程度上推进了电力电子设备性能的发展, 但其仍存在要解决的问题, 如喷雾冷却易堵塞、热电制冷运行成本高等。

## 6 结语

用于维持 IGBT 功率模块正常工作温度的各种冷却技术, 既有主动式冷却, 又涉及到被动式冷却。通常, 通过优化散热器传统结构、选用新型导热材料都可以提高整体散热性能, 若考虑进一步地提升散热效果, 减小接触热阻是一种很好的选择。此外, 还可以通过增大散热面积, 引入冷却性能更好的石墨烯薄膜<sup>[36-37]</sup>, 多种冷却技术相互补充的方式增加最大热负荷的承载能力。

目前, 国内外针对 IGBT 功率模块的冷却研究多集中在结构的优化, 很少有文献深入地分析其内部的原理, 如通道内工质的流型、气泡的产生和坍塌与散热器性能都存在着一定的联系。建议可以考虑结合其内部原理, 从观察到的物理现象去挖掘散热器所能承载最大的热负荷, 在结构优化过程中凭借着对内部工作原理的理解找到更有利于提高散热性能的物理模型。

## 参考文献:

- [1] IYERE S F, OMATAHUNDE B E, YEBOAH J K. A review of socio-economic benefits of insulated gate bipolar transistor[J]. *Advances in Electrical and Telecommunication Engineering*, 2019, 2(1): 7-15.
- [2] 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 Zhiyong, 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.
- [3] FALCK J, ANDRESEN M, LISERRE M. Active thermal control of IGBT power electronic converters[C]//IEEE. IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Yokohama: IEEE, 2015: 1-6.
- [4] 杨湘木. 自然风冷条件下的小功率 IGBT 建模与仿真[J]. *肇庆学院学报*, 2013, 34(2): 33-36.  
YANG Xiangmu. Modeling and simulation of low-power IGBT under the condition of natural air cooling[J]. *Journal of Zhaoqing University*, 2013, 34(2): 33-36.
- [5] 沈丽萍, 江健, 方亚坤, 等. 基于风冷的 IGBT 散热方案设计 & 优化[J]. *低温与超导*, 2018, 46(8): 95-98.  
SHEN Liping, JIANG Jian, FANG Yakun, et al. Design and optimization of IGBT heat dissipation scheme based on air cooling[J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2018, 46(8): 95-98.
- [6] 安郁熙, 李克鹏, 王者胜, 等. 基于 Icepak 的风冷变频一体机散热优化设计[J]. *煤矿机械*, 2021, 42(8): 214-217.  
AN Yuxi, LI Kepeng, WANG Zhesheng, et al. Heat dissipation optimization design of air-cooled variable-frequency

- all-in-one motor based on Icepak[J]. *Coal Mine Machinery*, 2021, 42(8): 214-217.
- [7] 黄正根. 泡沫铜翅片散热器的散热性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.  
HUANG Zhenggen. Research on heat dissipation performance of foam copper fin radiator[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [8] CHANG T C, LEE S, FUH Y K, et al. PCM based heat sinks of paraffin/nanoplatelet graphite composite for thermal management of IGBT[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 112: 1129-1136.
- [9] 夏侯国伟, 王当, 刘业鹏. IGBT 功率模块冷却技术的综述[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(1): 63-67.  
XIAHOU Guowei, WANG Dang, LIU Yepeng. Summary of IGBT power module cooling technology[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 42(1): 63-67.
- [10] 谢波, 陈清. IGBT 液冷模块优化数值模拟研究[J]. 宁夏工程技术, 2018, 17(4): 317-323.  
XIE Bo, CHEN Qing. Numerical simulation study of liquid cooled IGBT module's uniform design and optimization method[J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2018, 17(4): 317-323.
- [11] 林鑫, 应保胜, 聂金泉, 等. 基于水冷的 IGBT 模块散热结构设计及优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(6): 73-79.  
LIN Xin, YING Baosheng, NIE Jinquan, et al. Design and optimization of heat dissipation structure of water-cooled IGBT module[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2021, 35(6): 73-79.
- [12] YAHYAEE A, BAHMAN A S, BLAABJERG F. A modification of offset strip fin heatsink with high-performance cooling for IGBT modules[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(3): 1112.
- [13] 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 Hongqing. Design and performance research of integrated soaking plate liquid cooling radiator for high power IGBT heat dissipation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [14] LEE J, KI S, SEO D, et al. Liquid cooling module incorporating a metal foam and fin hybrid structure for high power insulated gate bipolar transistors (IGBTs)[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 173: 115230.
- [15] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[J]. 能源研究与利用, 2000(5): 41.  
ZHUANG Jun, ZHANG Hong. Heat pipe technology and its engineering application[J]. *Energy Research & Utilization*, 2000(5): 41.
- [16] 罗爱华, 金鹰, 岳良, 等. 牵引整流器热管式空气冷却器散热性能实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(5): 90-94.  
LUO Aihua, JIN Ying, YUE Liang, et al. Experimental study on heat pipe cooler of electric locomotive traction converters[J]. *Journal of Refrigeration*, 2013, 34(5): 90-94.
- [17] 施玉洁, 岳良, 金苏敏, 等. 牵引变流器用板翅式热管散热器性能实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5): 114-118.  
SHI Yujie, YUE Liang, JIN Sumin, et al. Experimental study on plate-fin heat pipe radiator of locomotive traction converter[J]. *Journal of Refrigeration*, 2014, 35(5): 114-118.
- [18] LU Jiazheng, SHEN Limei, HUANG Qingjun, et al. Investigation of a rectangular heat pipe radiator with parallel heat flow structure for cooling high-power IGBT modules[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 135: 83-93.
- [19] GUOWEI Xiahou, MA Rui, ZHANG Junjie, et al. Thermal performance of an array condenser flat heat pipe for IGBT heat dissipation[J]. *Microelectronics Reliability*, 2020, 104: 113546.
- [20] 王雄, 吴智勇, 宋郭蒙, 等. 磁浮列车牵引变流器双面冷却热管散热器的性能研究[J]. 机车电传动, 2020(6): 70-74.  
WANG Xiong, WU Zhiyong, SONG Guomeng, et al. Research on heat dissipation performance of double-sided cooling heat pipe radiator of maglev train[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2020(6): 70-74.
- [21] 邓育锋, 战乃岩, 陈昕, 等. 基于平板微热管阵列的牵引变流器散热器的性能模拟[J]. 建材与装饰, 2018(17): 203.  
DENG Yufeng, ZHAN Naiyan, CHEN Xin, et al. Performance simulation of traction converter radiator based on flat micro heat pipe array[J]. *Construction Materials & Decoration*, 2018(17): 203.
- [22] 母福生, 王海军, 江乐新, 等. 用于地铁变流器的平板微热管散热器数值模拟与实验研究[J]. 制冷学报, 2019, 40(5): 102-108.  
MU Fusheng, WANG Haijun, JIANG Lexin, et al. Numerical simulation and experimental study of flat microheat pipe radiator for metro converter[J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(5): 102-108.
- [23] 周丽铭, 刘涵毅, 柏立战. 基于环路热管的动车组牵引变流器冷却系统方案设计与模拟分析[J]. 铁道机车车辆, 2019, 39(4): 26-30.  
ZHOU Liming, LIU Hanyi, BAI Lizhan. Cooling system design and simulation analysis for traction converter of CRH train based on loop heat pipe[J]. *Railway Locomotive & Car*, 2019, 39(4): 26-30.
- [24] WANG Binyu, WANG Laili, YANG Fengtao, et al. Air-cooling system optimization for IGBT modules in MMC using embedded O-shaped heat pipes[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 3992-4003.
- [25] DRISS A, MAALEJ S, ZAGHDOUDI M C. Electro-thermal modeling of power IGBT module cooled by a heat pipe cooling system[J]. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 2021, 86(1): 105-122.

- [26] BHUNIA A, CHEN C L. On the scalability of liquid micro-jet array impingement cooling for large area systems[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(6): 064501.
- [27] BHUNIA A, CHEN C L. Jet impingement cooling of an inverter module in the harsh environment of a hybrid vehicle [C]//ASME. *Proceedings of the ASME Summer Heat Transfer Conference, HT 2005*. San Francisco: ASME, 2005: 561-567.
- [28] BOSTANCI H, ALTALIDI S S, NASRAZADANI S. Two-phase spray cooling with HFC-134a and HFO-1234yf on practical enhanced surfaces[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 131: 150-158.
- [29] POURFATTAH F, SABZPOOSHANI M. Thermal management of a power electronic module employing a novel multi-micro nozzle liquid-based cooling system: a numerical study [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 147: 118928.
- [30] ARANZABAL I, MARTINEZ D A I, GARATE J I, et al. Two-phase liquid cooling for electric vehicle IGBT power module thermal management[C]//IEEE. *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*. Cadiz: IEEE, 2017: 495-500.
- [31] T'JOLLYN I, NONNEMAN J, PAEPE M D. Heat transfer and critical heat flux for two-phase immersion cooling of an inverter power module[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 2116: 012007.
- [32] 王雄, 吴智勇, 窦泽春, 等. 3D复合相变散热器在轨道交通中的热管理应用研究[J]. *机车电传动*, 2021(5): 106-110. WANG Xiong, WU Zhiyong, DOU Zechun, et al. Research on thermal management application of 3D composite phase change radiator in rail transit[J]. *Electric Drive for Locomotives*, 2021(5): 106-110.
- [33] 冯亚利, 黄胜利, 高长松, 等. 泵驱两相冷却系统设计及性能验证[J]. *电子机械工程*, 2021, 37(5): 22-26. FENG Yali, HUANG Shengli, GAO Changsong, et al. Design and performance verification of pump-driven two-phase cooling system[J]. *Electro-Mechanical Engineering*, 2021, 37(5): 22-26.
- [34] WU Hui, ZHANG Gang, FENG Zhaozan, et al. Research on pumped two-phase single-sided cold plate of IGBT for rail transit applications[J]. *Transportation Safety and Environment*, 2021, 3(3): 1-11.
- [35] 陈柏超, 李田月, 田翠华. 中压IGBT模块用热电制冷集成微型平板热管散热器的研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(6): 524-532. CHEN Baichao, LI Tianyue, TIAN Cuihua. Integrated micro flat heat pipe heat sink for thermoelectric cooler of medium voltage IGBT module[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(6): 524-532.
- [36] 张兴丽, 王晓杰, 杨明. 石墨烯表面构筑微通道的传热性能研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2022, 28(2): 142-147. ZHANG Xingli, WANG Xiaojie, YANG Ming. Construction of microchannel heat transfer performance of the graphene surface[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2022, 28(2): 142-147.
- [37] ZHAO Hao, BAO Jie, XU Yuan, et al. Optimal design of heat dissipation structure of IGBT modules based on graphene[C]//IEEE. *2019 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC)*. Shanghai: IEEE, 2019.