DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.101
文章编号：1000-128X(2023)04-0137-08

# 基于深孔钻相变均温技术的散热器传热优化研究

窦泽春[1]，闫俊材[2]，吴智勇[1]，王　雄[1]，傅航杰[1]，丁　云[1]
（1. 中车株洲电力机车研究所有限公司，湖南 株洲　412001；
2. 金华市轨道交通集团 机电设备部，浙江 金华　321000）

**摘　要：**针对非均匀热流密度、多个热源器件集成的热物理场散热需求，文章应用数值仿真和试验测试的研究方法，基于深孔钻相变均温技术，对一款轨道交通项目用散热器进行传热优化设计研究。首先，对比了深孔钻相变均温散热器在不同安装方向的温升性能，表现为其温升差异较小，不同工况下的温升波动幅度仅为1.6%~3.4%，这表明深孔钻相变均温散热器内部工质的相变传热过程具备良好的抗重力特性；其次，将设计优化的深孔钻相变均温散热器与同尺寸规格的常规铲齿散热器（原始方案）进行性能对比，结果表明：在相同工况条件下，相比于常规铲齿散热器，深孔钻相变均温散热器的温升可降低6.0~14.3 K，降幅达10.9%~13.8%；均温性最大降低26.3 K，最大降幅53.3%，温升控制与均温性均有大幅提升。将深孔钻相变均温散热技术应用于非均匀热流密度、多个热源器件集成的热物理场，其散热优势显著。

**关键词：**深孔钻相变均温散热器；均温性；数值仿真；温升对比
**中图分类号：**TK172　　**文献标识码：**A

# Research on heat transfer optimization of heat sink based on phase change isothermal technology for deep hole drilling machine

**DOU Zechun[1], YAN Juncai[2], WU Zhiyong[1], WANG Xiong[1], FU Hangjie[1], DING Yun[1]**

(1. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China; 2. Mechanical and Electrical Equipment Department, Jinhua Railway Group Company, Jinhua, Zhejiang 321000, China)

**Abstract:** Based on the phase change isothermal technology for deep hole drilling machine, a research methodology involving numerical simulation and experimental testing was applied to optimize the heat transfer design of a heat sink for a rail transit project with non-uniform heat flux density and multiple integrated heat source devices in its thermophysical field. First of all, a comparison was made on the temperature rise performance of heat sinks with phase change isothermal technology for deep hole drilling machine in different installation directions, the fluctuation range under different working conditions is only 1.6%-3.4%, showing a small difference, indicating that the heat transfer process of the working medium inside the heat sinks with phase change isothermal technology for deep hole drilling machine had good anti-gravity characteristics. Secondly, the performance of the newly designed and optimized heat sinks with phase change isothermal technology for deep hole drilling machine was compared with that of the conventional finned heat sink of the same size. The results show that the temperature rise of heat sinks with phase change isothermal technology for deep hole drilling machine can be reduced by 6.0-14.3 K, with a reduction rate of 10.9%-13.8%, compared with conventional finned heat sink under the same working conditions. The maximum reduction in the average temperature is 26.3 K, with a maximum reduction rate of 53.3%, and both the temperature rise control and the average temperature are greatly improved, indicating that the application of phase change isothermal technology for heat dissipation of deep hole drilling machine in thermophysical fields with non-uniform heat flux density and multiple integrated heat

**基金项目：**中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目（K2021J046）
**通信作者：**王　雄（1982—），男，硕士，高级工程师，主要从事大功率变流模块热设计及其研究；E-mail: 50114239@qq.com
**引用格式：**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.
**Citation:** DOU Zechun, YAN Juncai, WU Zhiyong, 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.

source devices can yield significant heat dissipation advantages.

**Keywords:** heat sinks with phase change isothermal technology for deep hole drilling machine; temperature uniformity; numerical simulation; temperature rise comparison

## 0 概述

随着电力电子变流器所用的核心元器件绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT）技术的不断进步，其应用领域（包括轨道交通产业、风光储产业、电动汽车产业等）也在不断迭代升级。变流器朝着大功率输出、高集成度、小型化、高功率密度、减重降本的方向发展，随之带来的是非均匀、高热流密度、多器件集成的散热问题，这给相关热管理工作带来了严峻的挑战。

针对上述问题，研发人员从多个方面对散热技术的应用进行了一系列的探索与研究。基于均温思路，以均温板（Vapor Chamber, VC）、均温热管为核心优化散热结构，利用其超高的导热性和良好的等温性等特性，进行传热强化，是目前解决此类热管理问题的热点技术[1-4]。关于均温板、均温热管这类基于热管传热原理的传热强化技术，内部结构特征主要分为烧结、微槽和复合吸液芯型等[5-11]。另外，应用于电力电子元器件冷却的热管通常属于常温热管，相关研究学者以如何有效降低热管内部芯体孔隙的流动阻力、提高导热性能和等温性能为目标，基于工质的表面张力、潜热，以及与管壳材料间的稳定性、润湿性等因素进行了相关研究[12-15]。本文的研究对象是某轨道交通项目用变流器模块散热器，针对该种散热器进行了创新性传热优化，主要是采用深孔钻孔技术，在常规散热器基板内部构建$x$方向和$y$方向纵横联通的相变腔室，形成一种具备热管强化效应的深孔钻相变均温散热器，通过将其与铲齿翅片散热器（原始方案）进行应用工况的数值仿真和试验对比分析，分析其传热强化的应用优势。

## 1 研究对象说明

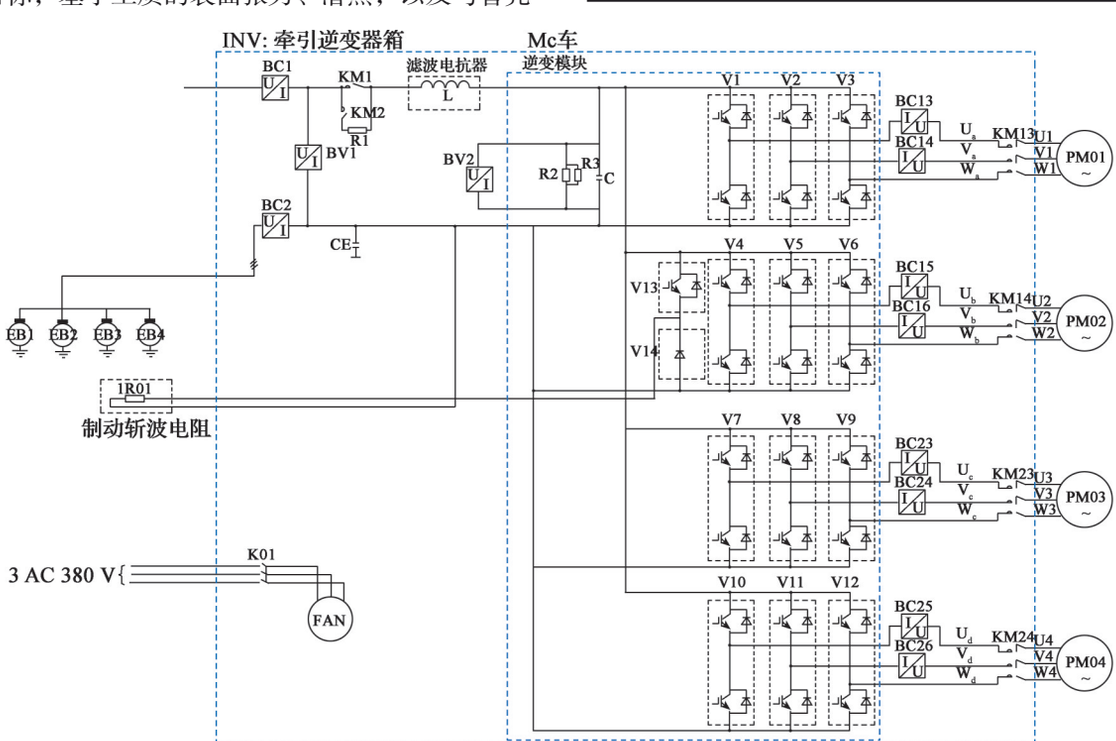
### 1.1 电气拓扑及主电路参数

某轨道交通项目变流器的主电路拓扑如图 1 所示，额定工况的电气参数如表 1 所示。逆变器模块作为变流器的关键核心部件，共有 4 组独立的三相逆变输出，包含 12 个 XHP 封装 IGBT 器件、1 个 IHV 封装 IGBT 器件、

表 1 主要电气参数

Table 1 Main electrical parameters

| 参数名称 | 参数值 | 参数名称 | 参数值 |
|---|---|---|---|
| 输入直流电压/V | 1 500 | 开关频率/Hz | 500 |
| 输出电流/A | 200 | 调制比 | 0.78 |
| 功率因数 | 0.88 | | |




L—牵引变流器滤波电抗器；C—直流滤波电容；R1—充电电阻；R2, R3—固定放电电阻；BV1, BV2—电压传感器；BC1, BC2, BC13~BC16, BC23~BC26—电流传感器；KM1—充电回路短路接触器；KM2—充电接触器；KM13, KM14, KM23, KM24—负载接触器；V1~V13—IGBT 模块；V14—快速恢复二极管。

图 1 牵引变流器电路拓扑

Fig. 1 Traction converter circuit topology

1 个快速恢复二极管、强制风冷散热器、温度继电器、门极驱动单元、驱动电源、脉冲分配单元、支撑电容器、低感母排等部件，主要功能是实现电能变换，电路结构为两电平，可将直流转换为三相交流电，驱动永磁电机工作，当直流回路出现过压时，可通过斩波电路斩波，由制动电阻吸收多余的能量，抑制直流电压过压。

### 1.2　器件损耗计算

IGBT 器件的损耗主要包括通态损耗和开关损耗。根据IGBT损耗计算原理和相应的器件应用场景，使用IGBT厂商提供的损耗计算仿真软件计算该项目变流器IGBT器件的损耗，计算结果如图2所示。

| Switch parameters | | | Cooling Condition | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Fixed Heatsink Tempera | | |
| VCEsat,125°C | 3.14 | V | Theatsink | 100 | °C |
| Eon+Eoff,125°C | 1720 | mWs | | | |
| RthJC | 0.02 | K/W | Simulation Results | | |
| RthCH | 0.024 | K/W | **Maximum Junction Temperature** | | |
| Tvjmax | 150 | °C | Switch | 113.34 | °C |
| Diode Parameters | | | Diode | 106.00 | °C |
| VF,125°C | 2.6 | V | **Switching Losses** | | |
| Erec,125°C | 545 | mWs | Switch | 126.82 | W |
| RthJC | 0.04 | K/W | Diode | 55.85 | W |
| RthCH | 0.028 | K/W | **Conduction Losses** | | |
| Tvjmax | 150 | °C | Switch | 150.71 | W |
| Advanced Parameters | | | Diode | 30.53 | W |
| Type | Standard | | **Total Losses** | | |
| Switch Q1: RGon | 1.2 | Ω | Switch | 277.52 | W |
| Switch Q1: RGoff | 3.6 | Ω | Diode | 86.39 | W |

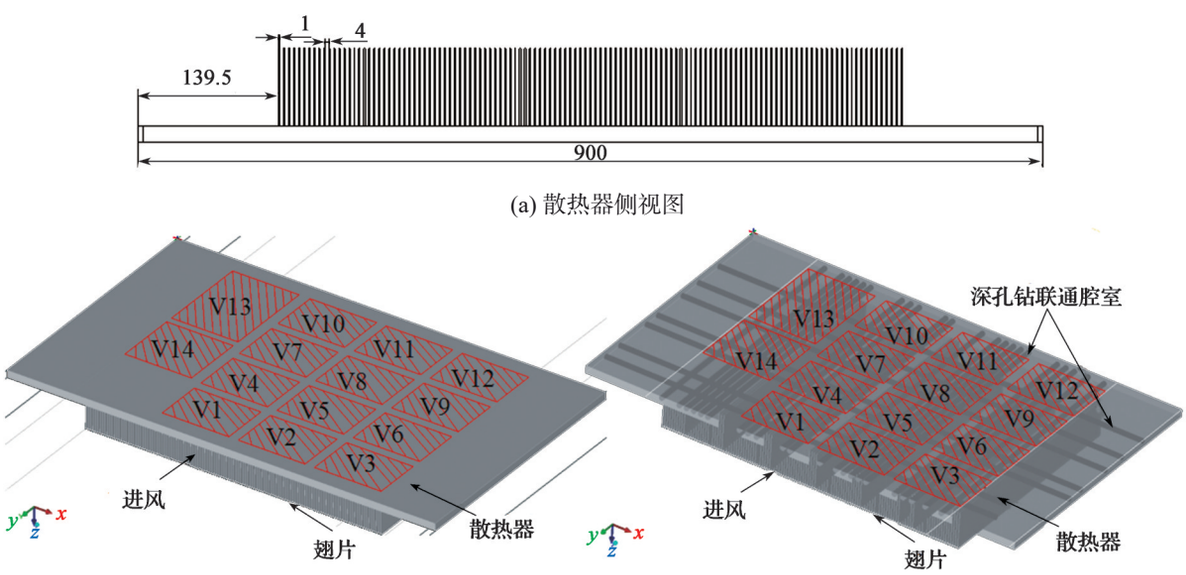
图2　损耗计算结果

Fig. 2　Loss calculation results

由图2可知，在额定工况下IGBT芯片的导通损耗为126.8 W，开关损耗为55.9 W；FWD二极管的导通损耗为150.7 W，反向恢复损耗为30.5 W。因此，对应单管总损耗为363.9 W。由于项目选择的XHP封装器件是双管器件，对应的总损耗为计算值的2倍，即727.8 W，考虑工程应用，为简化计算，对损耗值取整，则单个器件的总损耗为730 W。整个变流器逆变模块包含12个XHP封装IGBT模块，损耗为8 760 W（12×730 W）；1个斩波IGBT模块对应的损耗为750 W；快速恢复二极管模块由于不经常动作，其损耗仅为150 W。

### 1.3　冷却方案

本文的研究对象为某轨道交通项目变流器模块用散热器。该散热器采用强迫风冷，具有结构简单可靠，技术成熟，在各领域应用广泛的优点。如图3所示，按实验室试验的实际风道试验台建立散热器的几何模型，散热器翅片安装缩进的空白位置采用填充块封闭，模拟实际运行的强迫风冷风量和散热状态。其中，图3(b)为常规铲齿散热器；图3(c)为在铲齿散热器基础上，采用深孔钻技术制造的深孔钻相变均温散热器，其基板内部$x$方向和$y$方向有深孔钻联通腔室，内含相变工




(a) 散热器侧视图

(b) 常规铲齿散热器　　(c) 深孔钻相变均温散热器

图3　散热器几何模型

Fig. 3　Geometric model of radiator scheme

质，形成具备热管效应的一体结构散热器。

对于常规铲齿散热器，散热器台面上各热源区域的散热能力相同。一方面，本文所涉及的变流模块沿进风方向有4排IGBT器件，根据传热原理和轨道交通风冷散热器的应用经验，冷却风每经过一排IGBT器件，由于热交换，以及所带走热量的多少，冷却风温度有一定的递增，即对应散热器台面温度有一定的递增，IGBT器件排数越多，散热器台面温度分布差异越大。另一方面，散热器安装了14个不同尺寸、不同热损耗的热源模块，其器件属性如表2所示；由表2可知，热源尺寸最大相差近2倍，对应单热源功率密度最大相差达8.5倍，属于典型的多种类热源和非均匀热物理场的散热条件，两者叠加，整个散热器台面的温度分布将差异巨大。从电气应用角度考虑，变流器所有IGBT器件的温升应尽可能保持一致。当IGBT器件工作于均温性差的条件时，对于温度高的器件，其可靠性势必降低，甚至率先失效，从而引起应用出现短板效应，良好的均温性对模块稳定运行起到关键的作用。

表2 结构属性汇总表

Table 2 Summary of structures and properties

| 项目 | 数量 | 尺寸 | 热源功率/W | 单热源功率密度/(W·mm$^{-2}$) |
|---|---|---|---|---|
| 热源1（V1~V12） | 12 | 140 mm×100 mm | 730 | 0.052 |
| 热源2（V13） | 1 | 140 mm×190 mm | 750 | 0.028 |
| 热源3（V14） | 1 | 140 mm×130 mm | 150 | 0.008 |
| 散热器 | 1 | 900 mm×530 mm×92 mm | | |
| 翅片 | 280 | 453 mm×1 mm×76.5 mm | | |

## 2 深孔钻相变均温优化原理分析

深孔钻相变均温散热器的结构如图4所示。其主要特征为：基板采用深孔钻技术，根据热源分布，钻孔形成$x$方向与$y$方向纵横联通的通道腔室；基板内部填充毛细吸液芯材料，在通道腔室内部注入一定量的相变材料，形成具备热管效用的深孔钻联通腔室。该散热器相变传热的工作原理与吸液芯热管基本一致，即当散热器基板上的功率器件模块工作时，热源热量通过导热传递到基板深孔钻联通通道内的相变工质，液态工质吸热相变，转化为气态，再经过冷凝端翅片与强迫风冷空气进行热交换带走热量，此时工质气态转化为液态，往复循环不断将热源产生的热量带走，使功率器件保持在合适的温度，安全稳定运行。

从传热理论角度分析，散热器的热传递过程如上描述，整个过程主要包含散热器本身金属材料的导热和散热器与空气介质对流传热2种传热方式，忽略内部相变复杂的传热过程，传热热阻公式可简化为

$$R=\frac{\delta}{\lambda_s A_1}+\frac{1}{hA_2}$$

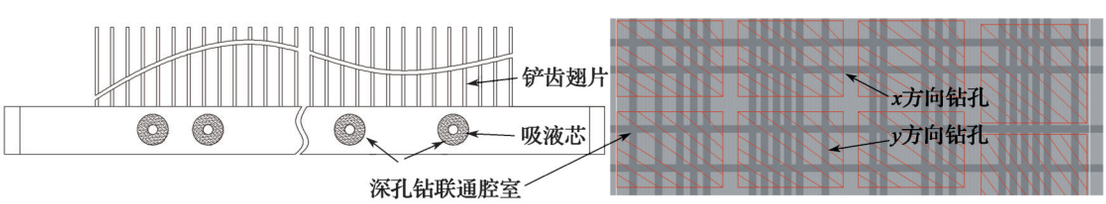
式中：$R$为传热热阻，K/W；$\lambda_s$为散热器导热系数，W/(m·K)；$A_1$为垂直导热路径的横截面积，m$^2$；$\delta$为导热材料厚度，m；$h$为对流换热系数，W/(m$^2$·K)；$A_2$为对流换热有效换热面积，m$^2$。

深孔钻相变均温的散热原理与均温热管相同，区别为其内部直接通过深孔钻技术钻孔，形成具备热管效用的腔体。通过深孔钻技术，一方面，提高了传热系数，有效降低了传热热阻中导热项的热阻；另一方面，基板与热管为一体，相对现有将热管镶嵌安装于散热器基板的方式，减少了一层接触热阻，同时内部纵横联通，可依靠热管效应的高等温性实现$x$方向与$y$方向的均温传热，对散热器的传热效果进一步强化，有效提升散热能力。

## 3 数值模拟结果分析与讨论

### 3.1 数值仿真研究

2种散热方案的物理模型如图3所示。为简化计算，忽略实际孔、器件倒角等对整体散热影响非常小的细节特征，热源设置为面热源，同时对散热器内部腔体工质复杂的相变换热过程进行等效简化，按各向异性介质的实心体处理，设置深孔钻联通腔体在长度方向的导热系数为6 000 W/(m·K)，其他方向的导热系数按铝的导热系数237 W/(m·K)设置。冷却风根据项目需求，最大环境温度设置为45 ℃，额定风速为10 m/s，选用标准$k-\varepsilon$湍流模型进行计算。仿真结果如表3




(a) 侧视图 (b) 元件面正视图（局部示意）

图4 结构原理图

Fig. 4 Structural schematic diagram

所示。

表3　各热源仿真最大温升

Table 3　Maximum temperature rise of each heat source in simulation　K

| 热源编号 | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 铲齿散热器 | 46.9 | 49.3 | 53.3 | 51.3 | 58.6 | 54.5 | 57.2 |
| 深孔钻相变均温散热器 | 48.0 | 51.8 | 51.5 | 49.6 | 55.6 | 51.8 | 52.1 |
| 热源编号 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 |
| 铲齿散热器 | 64.5 | 61.5 | 61.5 | 73.6 | 70.4 | 34.1 | 30.3 |
| 深孔钻相变均温散热器 | 60.6 | 56.5 | 56.1 | 64.5 | 60.3 | 35.6 | 30.9 |

### 3.2　仿真与试验对比验证

试验采用14个与IGBT尺寸相同的发热模块安装在散热器上，尺寸详见表2，模拟IGBT模块发热，功率可调，根据相应的功率属性设置IGBT发热功率；搭建测试风道，将散热器安装在风道对应位置，启动风机，调整并测量风速；入口风温参考夏季室外最高环境温度，设置为45 ℃，开启测试设备记录测点的温升数据，结果表4所示。

表4　试验温升结果汇总

Table 4　Summary of temperature rise result from the experimental　K

| 热源编号 | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 铲齿散热器 | 47.6 | 52.5 | 53.8 | 51.9 | 57.6 | 57.2 | 52.4 |
| 深孔钻相变均温散热器 | 52.5 | 56.9 | 56.1 | 54.2 | 58.7 | 47.7 | 54.5 |
| 热源编号 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 |
| 铲齿散热器 | 59.1 | 63.1 | 56.1 | 68.9 | 64.1 | 37.7 | 27.6 |
| 深孔钻相变均温散热器 | 59.3 | 59.7 | 55.3 | 59.9 | 61.1 | 39.4 | 28.4 |

表5为在额定功率和风速10 m/s工况的条件下，深孔钻相变均温散热器方案各热源位置最高温升测点的实测数据与仿真数据对比。

表5　仿真与试验温升对比验证

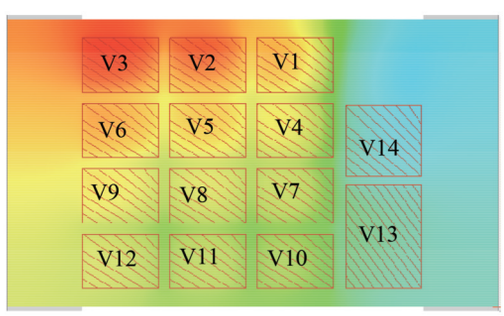
Table 5　Verification by comparing simulated and experimental temperature rise　K

| 热源编号 | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 仿真值 | 48.0 | 51.8 | 51.5 | 49.6 | 55.6 | 51.8 | 52.1 |
| 试验值 | 52.5 | 56.9 | 56.1 | 54.2 | 58.7 | 47.7 | 54.5 |
| 相对误差/% | −8.6 | −9.0 | −8.2 | -8.5 | −5.3 | 8.6 | −4.4 |
| 热源编号 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 |
| 仿真值 | 60.6 | 56.5 | 56.1 | 64.5 | 60.3 | 35.6 | 30.9 |
| 试验值 | 59.3 | 59.7 | 55.3 | 59.9 | 61.1 | 39.4 | 28.4 |
| 相对误差/% | 2.2 | −5.4 | 1.4 | 7.7 | −1.3 | −9.6 | 8.8 |

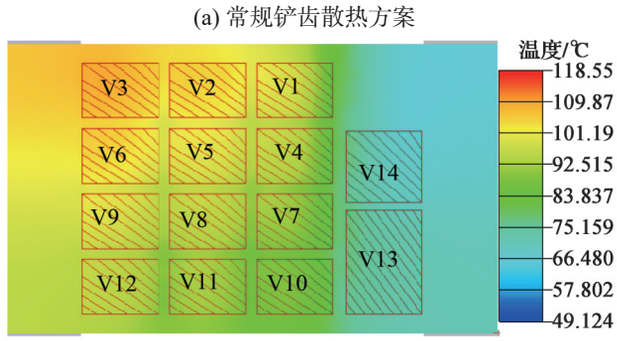
由表5可知，深孔钻相变均温散热器方案各测点的最大温升的相对误差为−9.6%；同理，常规铲齿散热器方案各测点的最大温升的相对误差为9.8%，误差均小于10%，在工程精度允许范围内。这表明仿真温升结果的有效性与各热源温升差异的均温性得到验证。误差的主要来源：①数值仿真是在理想的条件下进行的，模型进行了一定的简化处理；②试验中测试的数据存在一定的误差。

### 3.3　仿真性能分析

按额定风速10 m/s的工况仿真，图5为2种散热器台面温度分布云图。从图5可以看出，在整体上，深孔钻相变均温散热器方案的台面温度分布色差较小，这表明该方案的温度分布一致性良好，并且台面温度更低，消除了在进风方向由于明显的温度梯度差异而导致的局部热区。从表3可知，常规铲齿散热方案的热源最大温升为73.6 K，各热源温升差异为43.3 K，而深孔钻相变均温散热方案的热源最大温升为64.5 K，各热源温升差异为31.8 K。两者最大温升相差9.1 K，各热源温升相差11.5 K。这说明深孔钻相变均温散热方案带来了良好的均温特性，其内部联通相变腔体，可有效将不同热流密度热源热量在整个散热器台面扩散，达到有效降低热阻的目的，强化了散热器传热效果。




(a) 常规铲齿散热方案




(b) 深孔钻相变均温散热方案

图5　散热器台面温度分布

Fig. 5　Heat sink surface temperature distribution

## 4　试验结果分析与讨论

通过上述的分析可知，验证了数值仿真的有效性和可靠性，并定性分析了深孔钻相变均温散热器具有

良好的散热性能和均温性。试验测试补充了 4 m/s、6 m/s、8 m/s、12 m/s 等几种不同风速工况的试验数据，通过对比试验性能结果，充分分析 2 种方案的差异。

### 4.1 安装方向对比

由上文分析可知，深孔钻相变均温散热方案具备毛细虹吸热管相同的特征，即高导热性、高等温性和抗重力性。考虑在实际应用过程中，散热器的安装方式根据不同的应用场景，空间布局会有所差异。因此，对深孔钻相变均温散热基于安装方向进行试验测试分析，对比 2 种最常见的安装方式，即“水平翅片朝上”安装和“水平翅片朝下”安装。试验测试的结果如图 6 所示。

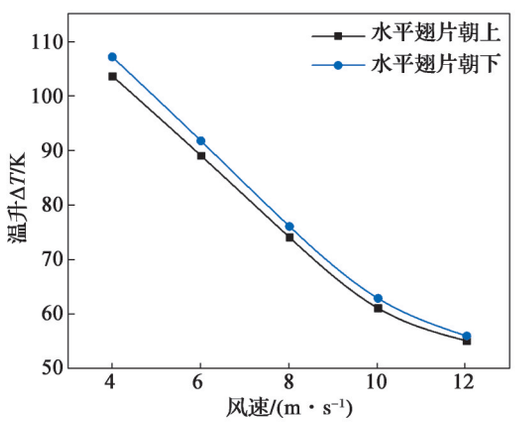



图 6 不同安装方向温升对比

Fig. 6 Comparison of temperature rise in different installation directions

由图 6 可知，对于相同的风速，“水平翅片朝上”的温升相对于“水平翅片朝下”的温升降低 0.9~3.5 K，降幅为 1.6%~3.4%，温升差异较小。产生这一差异的主要原因为：①当水平翅片朝上安装时，其下方为热源蒸发端，上方为翅片冷凝端，相变工质的传热循环为顺重力循环；②当水平翅片朝下安装时，相变工质的传热循环为逆重力循环，毛细芯的毛细力不能绝对克服重力作用影响。因此，试验结果反映出“水平翅片朝上”的安装方式略优于“水平翅片朝下”的安装方式。这说明深孔钻相变均温散热器具备较好的抗重力特性，当“水平翅片朝下”安装时，相变工质逆重力工作循环也能较好起到均温强化散热器的效果，但在安装条件允许的情况下，优先推荐“水平翅片朝上”顺重力安装。

### 4.2 温升对比

将“水平翅片朝上”安装的深孔钻相变均温散热器与常规铲齿散热器进行温升性能对比。其中，2 个散热器的结构尺寸一致，即风速相同，冷却条件一致。图 7 为 2 种散热方案温升对比曲线。由图 7 可知，在相同风速条件下，相比于常规铲齿散热器，深孔钻相变均温散热器的温升降低 6.0~14.3 K，降幅为 10.9%~13.8%，这说明传热强化有明显提升。产生这一差异的主要原因为：①由于深孔钻相变均温散热器内部相变传热的高等温性和高导热性，沿进风方向，可以均衡由冷却风温经过 4 排器件热交换出现温度梯度而导致的温度分布不均的差异；②通过散热器的等温导热特性，可以将不同器件间、差异高达 8.5 倍的热源功率密度的热量扩散延伸至超过器件接触面的其他散热器区域，从而增大传热面积，有效地强化散热效果。这 2 方面的强化效果正向叠加，均有利于达到强化散热器传热性能的目的。

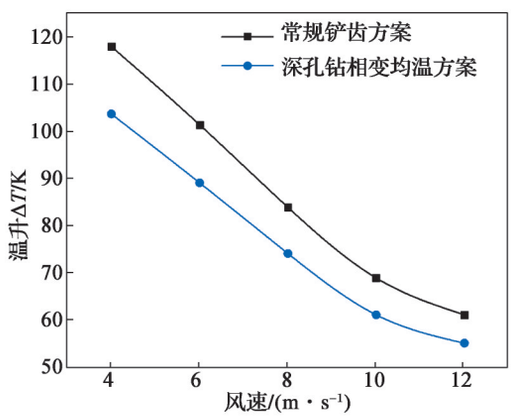



图 7 不同散热方案温升对比

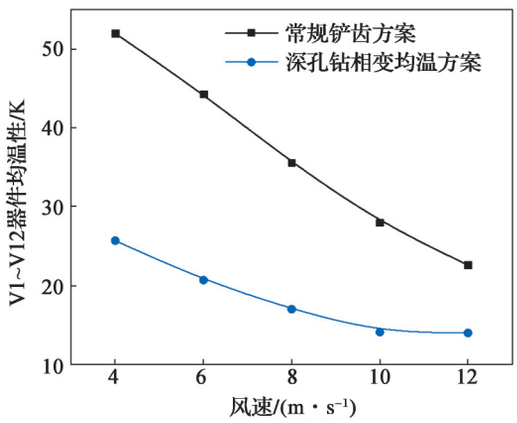
Fig. 7 Comparison of temperature rise of different heat dissipation schemes

### 4.3 均温性对比

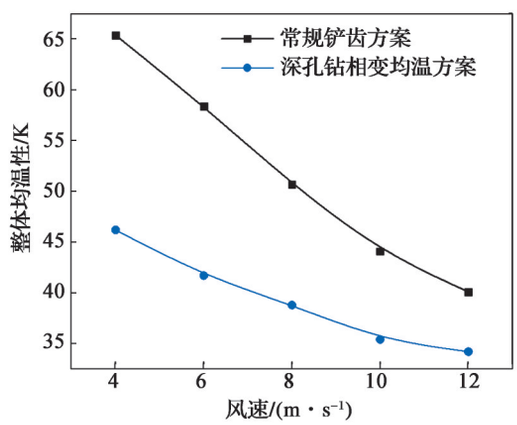
对于电子元器件的热管理评估，均温性是评价散热器性能十分重要的指标。从电气应用角度考虑，变流器模块的所有 IGBT 器件温升应满足良好的一致性要求，否则，当 IGBT 器件处于均温性差的状态时，对于温度高的器件，其可靠性势必降低，甚至率先失效，从而引起应用出现短板效应，良好的均温性对模块稳定运行起到关键的作用。

图 8 为常规铲齿方案与深孔钻相变均温方案散热器的均温性对比图，这里的均温性指散热器上各器件下方所有试验测点的最大温升与最小温升的差值。其中，图 8(a) 为 4 排外形尺寸为 140 mm×100 mm 的器件（V1~V12）的均温性对比，主要反映在进风方向上各排器件的温度分布差异；图 8(b)为所有器件（V1~V14）的均温性对比，主要体现由于功率密度差异和在进风方向上各排器件的空间分布差异，两者叠加所产生的温度分布差异。由图 8 可知，在同样的风速条件下，相比于常规铲齿散热方案，深孔钻相变均温散热器上外形尺寸 140 mm×100 mm 器件的均温性降低了 8.6~26.3 K，降幅为 38.1%~53.3%；整体均温性降低 5.9~19.2 K，降幅为 14.7%~29.4%，降幅均非常显著。这 2 项对比结果说明，深孔钻相变均温散热方案可有效降低散热器在多排热源器件、高热流密度梯度的非均匀、多器件

热物理场的散热温度分布差异，对于提升功率变流模块的运行可靠性和寿命有显著优势。




(a)140 mm×100 mm尺寸器件




(b) 散热器整体

图8　均温性对比

Fig. 8　Comparison of temperature uniformity

## 5　结论

通过对某轨道交通项目应用的某款变流器功率模块散热器进行传热强化方案对比分析，可以得出以下几点结论：

①在相同工况下，深孔钻相变均温散热器“水平翅片朝上”安装相对于“水平翅片朝下”安装，其温升可降低0.9~3.5 K，降幅为1.6%~3.4%，温升差异较小，这表明深孔钻相变均温散热器具备较好的抗重力特性，在安装条件允许时，推荐采取“水平翅片朝上”安装方式。

②在相同冷却条件下，相比于常规铲齿散热方案，深孔钻相变均温散热方案的温升降低6.0~14.3 K，降幅达10.9%~13.8%，强化效果显著。

③在相同工况下，深孔钻相变均温散热方案相对常规铲齿散热方案，均温性最大降低26.3 K，最大降幅53.3%，降幅非常显著，这说明其应用于非均匀热流密度、多器件热物理场散热优势显著。

## 参考文献：

[1] 许浩, 吴彩秀, 吴智勇, 等. 非均匀热物理场强迫风冷传热优化设计研究[J]. 机车电传动, 2022(1): 98-102.
XU Hao, WU Caixiu, WU Zhiyong, et al. Research on optimal design of forced air-cooling heat transfer in inhomogeneous thermal field[J]. Electric drive for locomotives, 2022 (1): 98-102.

[2] 赵亮, 田洋, 杨龙. 均热板散热性能实验研究[J]. 机械工程师, 2016(2): 23-25.
ZHAO Liang, TIAN Feng, YANG Long. Experimental research on heat dissipation performance of vapor chamber [J]. Mechanical engineer, 2016(2): 23-25.

[3] HASSAN H, HARMAND S. Parametric study of the effect of the vapor chamber characteristics on its performance[J]. Journal of heat transfer, 2013, 135(11): 111008.

[4] 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.

[5] WANG Mengyan, CUI Wenzhi, HOU Yuepan. Thermal spreading resistance of grooved vapor chamber heat spreader[J]. Applied thermal engineering, 2019, 153: 361-368.

[6] 李浩, 刘金伟, 施骏业, 等. 应用于电池热管理的均温板的温度特性研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(4): 59-67.
LI Hao, LIU Jinwei, SHI Junye, et al. Temperature characteristics of vapor chamber applied in battery thermal management[J]. Journal of refrigeration, 2020, 41(4): 59-67.

[7] 莫冬传, 罗佳利, 汪亚桥, 等. 梯度结构多孔表面强化沸腾及其在相变器件中的应用[J]. 科学通报, 2020, 65(17): 1638-1652.
MO Dongchuan, LUO Jiali, WANG Yaqiao, et al. Porous surfaces with structural gradient: enhancing boiling heat transfer and its application in phase-change devices[J]. Chinese science bulletin, 2020, 65(17): 1638-1652.

[8] CHEN Gong, FAN Dongqiang, ZHANG Shiwei, et al. Wicking capability evaluation of multilayer composite micromesh wicks for ultrathin two-phase heat transfer devices [J]. Renewable energy, 2021, 163: 921-929.

[9] 何艳丽, 李京龙, 孙福, 等. 扩散焊吸液芯结构对热管传热性能的影响[J]. 化工学报, 2014, 65(4): 1229-1235.
HE Yanli, LI Jinglong, SUN Fu, et al. Effect of diffusion bonded wick structure on thermal performance of heat pipe [J]. CIESC journal, 2014, 65(4): 1229-1235.

[10] WANG Dongdong, WANG Jinxin, DING Shilei, et al. Study on evaporation heat transfer performance of composite porous wicks with spherical-dendritic powders based on orthogonal experiment[J]. International journal of heat and mass transfer, 2020, 156: 119794.

[11] NIU Junyi, XIE Ning, GAO Xuenong, et al. Capillary performance analysis of copper powder-fiber composite wick for ultra-thin heat pipe[J]. Heat and mass transfer, 2021, 57 (6): 949-960.

[12] 马旭, 宋印东, 徐静雅, 等. 石墨烯纳米流体沸腾传热研究进展[J]. 热能动力工程, 2020, 35(10): 1-9.
MA Xu, SONG Yindong, XU Jingya, et al. Research progress of boiling heat transfer of graphene nanofluids[J]. Journal of engineering for thermal energy and power, 2020, 35 (10): 1-9.

[13] PATANKAR G, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Working-fluid selection for minimized thermal resistance in ultra-thin vapor chambers[J]. International journal of heat and mass transfer, 2017, 106: 648-654.

[14] SAVINO R, CECERE A, DI PAOLA R. Surface tension-driven flow in wickless heat pipes with self-rewetting fluids [J]. International journal of heat and fluid flow, 2009, 30(2): 380-388.

[15] 万晓琪, 崔晓钰, 谢荣建. 均温板散热技术研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(2): 554-568.
WAN Xiaoqi, CUI Xiaoyu, XIE Rongjian. Research progress of vapor chamber heat dissipation technology[J]. Chemical industry and engineering progress, 2022, 41(2): 554-568.

收稿日期：2023-03-31