DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.20 **中图分类号**：TM23 **文献标志码**：A

功率模块集成 TEC 温度控制研究

杨嘉俊[1,2,3]，刘同健[4]，宁圃奇[1,2,3](中国电源学会会员)，闫 欣[4]，回晓双[1,2,3]，康玉慧[1,2,3]

(1.中国科学院电工研究所，北京 100190；2.中国科学院大学，北京 100049；3.电力电子与电气驱动重点实验室(中国科学院电工研究所)，北京 100190；4.东北大学信息科学与工程学院，沈阳 110819)

摘要：电动汽车的功率模块是车辆动力系统中的核心部件，高频化、小型化、高功耗和高集成化特性成为其发展的主要趋势，因此功率模块的热管理面临着越来越严峻的挑战。热电制冷器 TEC(thermoelectric cooler)因具有体积小、结构简单、可靠性高、制冷迅速等优点引起了广泛关注。基于此提出了一种基于 TEC 的温度反馈控制策略，采用相变材料 PCM(phase change material)作为 TEC 冷热端的界面层，同时通过仿真和实验研究了从芯片到散热器的横向和纵向传热路径布局设计的原因。与无 TEC 方案相比，集成 TEC 的方案将 SiC 芯片的最高温度从 77.6 ℃降至 60.0 ℃，实现了有效的热管理和温度的反馈控制。本研究为高功率密度 SiC 模块提供了一种有效的热管理方法，具有一定的潜力。

关键词：功率模块；热电制冷器；热管理；温度控制

Research on Power Module Integration of TEC Temperature Control

YANG Jiajun[1,2,3], LIU Tongjian[4], NING Puqi[1,2,3], *Member*, *CPSS*, YAN Xin[4], HUI Xiaoshuang[1,2,3], KANG Yuhui[1,2,3]

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: The power module is a critical component of the powertrain system in electric vehicles, and its development is driven by the trends of high-frequency operation, miniaturization, high power density and high integration, which brings increasingly severe challenges to thermal management. Thermoelectric cooler (TEC) has attracted widespread attention for its compact structure, high reliability and rapid cooling performance. A temperature feedback control strategy based on thermoelectric cooling is proposed, with phase change materials (PCM) adopted as the interface layers at both cold and hot ends of TEC. Combined with simulation and experimental verification, the layout design of transverse and longitudinal heat transfer paths from the chip to the heat sink is investigated. Compared with the non-TEC cooling scheme, the proposed integrated TEC-based thermal management method reduces the maximum temperature of the SiC chip from 77.6 ℃ to 60.0 ℃, achieving effective thermal regulation and precise temperature feedback control. An efficient thermal management solution for high-power-density SiC power modules is provided and its application potential in electric vehicle power systems is exhibited.

Keywords: Power module; thermoelectric cooler (TEC); thermal management; temperature control

收稿日期：2025-11-20；**修回日期**：2026-01-07；**录用日期**：2026-01-26；**网络首发日期**：2026-04-01
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2021YFB2500600)
This work is supported by National Key Research and Development Program of China under the grant 2021YFB2500600

近年来，随着电子工业、半导体技术的迅猛发

展，功率模块高频化、小型化、高功耗和高集成化特性成为其发展的主要趋势[1]。电动汽车总体性能需求推动了碳化硅功率模块功率等级的增大，并联芯片数量越来越多[2]，对功率模块的电热特性要求也越来越高[3]。为了更好地平衡并联芯片的电气和散热特性，Yun 等[4]通过微通道强制水冷来冷却散热器；张嘉伟等[5]提出了车用功率模块的 Pin-Fin 优化设计方法；廖淑华等[6]设计了一种双面水冷的封装结构，分析不同芯片布局间距对芯片温度均匀性的影响，深层原因为电力电子元器件的可靠性与其工作温度有很大联系。在常温条件下，功率器件的温度每上升 10 ℃，其使用寿命会减少 50%；当温度处于 75~85 ℃之间时，功率器件温度每增加 1 ℃，稳定性将会降低 5%[7]。

当前随着半导体技术的不断发展，半导体制冷技术作为一种新兴的温度调节手段[8]应用于多个领域。在消费电子领域[9-10]，用于电子设备的散热、智能手机和可穿戴设备的散热等；在电动汽车领域[11-12]，用于电池热管理、车载激光雷达与空调系统等；在医疗器械领域[13]，用于便携式冷藏与器官运输、精准温控设备等；在家电领域[14]，用于小型冰柜与酒柜、智能空调等。另外，在航空航天和军工领域也有相关的应用[15]，但是缺乏在电力电子方面的应用。而如今发现热电制冷器 TEC(thermoelectric cooler)在电力电子散热方面也有非常好的效果[16]，能快速且精确地控制电力电子器件的基准温度，与其余散热方式相比，其不包含液体及可动部件，具有更高的可靠性，但是 TEC 也会增加额外的损耗[17]，所以本文研究 TEC 在功率模块中的应用。改善 SiC 功率模块的散热设计，实现高效的热管理，已成为当前技术研究的重要方向，对提升器件性能和可靠性具有深远意义[18-19]。

1　TEC 的工作原理

根据帕尔贴效应描述，在不同导体构成的电路中通入电流时，除了产生不可逆的焦耳热外，还会在导体的接触点处根据电流的方向发生吸热或放热现象。在现代 TEC 中使用的就是这种效应，常用的热电半导体材料经过适当的掺杂处理，以形成具有不同电子特性的 N 型和 P 型材料。N 型材料通过掺杂获得了额外的电子，而 P 型材料则因为缺少电子而形成了空穴。这些多余的电子和空穴是热能转移的媒介。大多数热电制冷装置由数量相等的 N 型和 P 型元件构成，其中 1 对 N 型和 P 型元件组成 1 个基本的热电单元。TEC 的工作原理如图 1 所示，当电流通过时，TEC 能够根据电流的方向移动热量。这种制冷器的设计使得热量可以根据电流的流向被吸收或释放[20]。

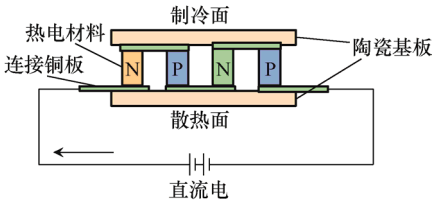


图 1　TEC 的工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of the TEC

TEC 冷端和热端的吸热和放热方程为

$$Q_{\mathrm{c}} = S_{\mathrm{np}} T_{\mathrm{c}} I - \frac{1}{2} I^2 R - K(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) \tag{1}$$

$$Q_{\mathrm{h}} = S_{\mathrm{np}} T_{\mathrm{c}} I + \frac{1}{2} I^2 R - K(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) \tag{2}$$

$$Q_{\mathrm{te}} = Q_{\mathrm{h}} - Q_{\mathrm{c}} = S_{\mathrm{np}} I(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) + I^2 R \tag{3}$$

式中：Q_{c} 和 Q_{h} 分别为 TEC 冷端的吸热量和热端的放热量；Q_{te} 为热电制冷片消耗的电功率；S_{np} 为热电材料的塞贝克系数；T_{h} 和 T_{c} 分别为 TEC 热端和冷端的温度；I 为 TEC 所施加的电流值；R 为 TEC 电阻；K 为 TEC 的总热导率[21]。

TEC 的性能系数 COP(coefficient of performance)为

$$\delta_{\mathrm{COP}} = \frac{Q_{\mathrm{c}}}{P} \tag{4}$$

式中：P 为 TEC 冷却过程中消耗的电功率，P 的计算公式为

$$P = S_{\mathrm{np}} I(T_{\mathrm{h}} - T_{\mathrm{c}}) + I^2 R \tag{5}$$

2 布局设计和热仿真

2.1 纵向 TEC 布局设计

图 2 展示了 2 种以 TEC 为核心的组件布局及其对应的热传递等效电路模型，清晰地呈现了热流在不同结构下的传递路径与热学特性差异。上侧结构中，T_j 为芯片结温，热量依次经过覆铜陶瓷基板 DBC (direct bonded copper)热阻 R_{jdbc}、铜基板热阻 R_{base} 后，冷端吸收热量 Q_{tc}，TEC 自身的热效应 Q_{TEC} 作用于 TEC，经 TEC 热阻 R_{TEC} 产生的热端热量 Q_{th} 通过水冷板热阻 R_{ha} 传递至水冷板。图中，T_a 为环境温度。

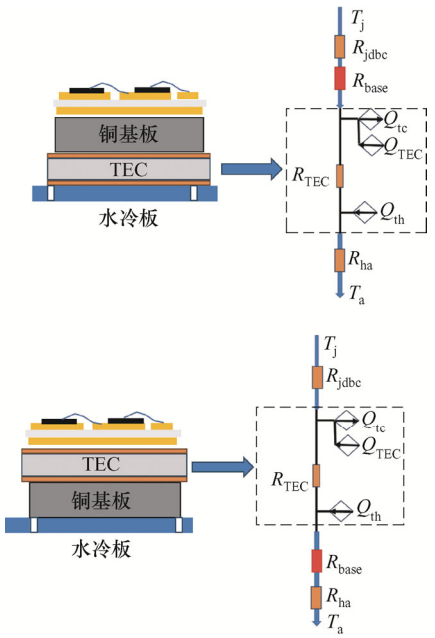


图 2 2 种 TEC 基板装配结构热传递的等效电路对比

Fig. 2 Comparison of the equivalent heat transfer circuits for two TEC substrate assembly structures

下侧结构则调整了 TEC 与铜基板的位置，热流经 R_{jdbc} 后，通过热传递到冷端，冷端吸收热量 Q_{tc}，Q_{TEC} 作用于 R_{TEC}，后续 Q_{th} 经 R_{base} 传递至 R_{ha}。2 种结构通过等效电路直观反映了 TEC、铜基板等组件布局变化对热流传递路径、各热阻及热流作用关系的影响，由于当 R_{base} 位于 TEC 下方时，流过 R_{base} 的热量是芯片热量加上 $Q_{th}-Q_{tc}$，其中 $(Q_{th}-Q_{tc})>0$，热端侧的等效热阻增加，由此可知，TEC 位于铜基板下方散热优于 TEC 位于铜基板上方。

定量分析来看，在纵向上，导热路径为“冷端陶瓷→电极→P/N 臂→电极→热端陶瓷”的连续导热路径，其中 Bi_2Te_3 基热电材料导热系数为 1.5 W/(m·K)，铜电极的导热系数为 450.0 W/(m·K)，氧化铝的导热系数为 33.0 W/(m·K)；从横向来看，横向的热电臂为离散排布，间距为 0.2 mm，间隙之间为空气，空气的导热系数仅为 0.026 W/(m·K)，远低于最小的热电臂导热系数，其横向传热为“热电臂→空气→热电臂”，相对于纵向热阻来说大很多。所以 TEC 的横向导热能力远小于其纵向导热能力。

2.2 横向 TEC 布局设计

图 3 为左、中、右简化的散热路径概念图，与常规导热材料不同，TEC 的横向导热能力远小于其纵向导热能力。其中，$R_{TEC} \ll R_{L1}$、R_{L2}，从电路可以看出 R_{L1}、R_{L2} 对结温的影响很大。一旦降低横向热阻，就可以降低功率芯片的结温。也就是说，在电源模块中，芯片应该分散在 DBC 上。

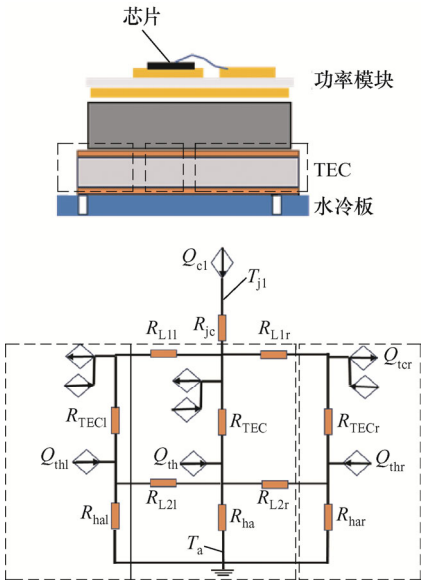


图 3 左、中、右简化的散热路径概念图

Fig. 3 Conceptual diagrams of simplified heat dissipation pathways—left, center and right

TEC 本身的横向散热能力差，图 4 是横向布局示意图，将集中布置的芯片进行分散排布。

2.3 COMSOL 热仿真分析

图 5(a)为基于水冷散热器的 SiC 功率模块芯片

集中排布的散热仿真图及其实验测试图，此时模块的最高温度为 66.3 ℃。芯片的集中排布导致局部区域热量集中，使得结-壳热阻升高，进而限制了散热效率，尤其是在高频工况下，散热性能受到较大影响。为了改善这一问题，本研究对横向散热路径进行了改变，如图 5(b)所示。在同等功率输入的情况下，改变后的模块最高温度降低至 48.0 ℃，较芯片集中排布时降低了 18.3 ℃，改变后的芯片排列方式显著改善了热量分布的均匀性，有效减少了局部高温区域，从而大幅提升了散热效能。

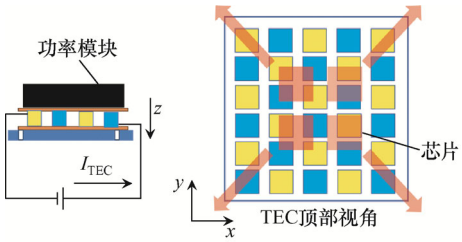
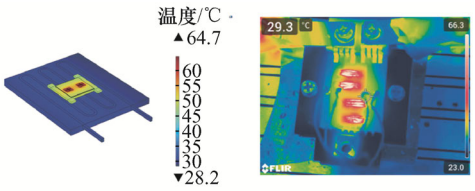
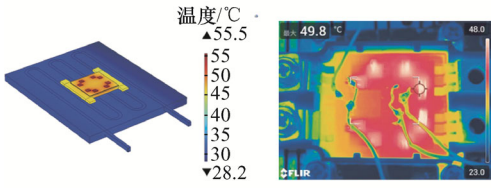


图 4　芯片横向布局示意

Fig. 4 Schematic of chip horizontal layout



(a) 横向散热路径改变前

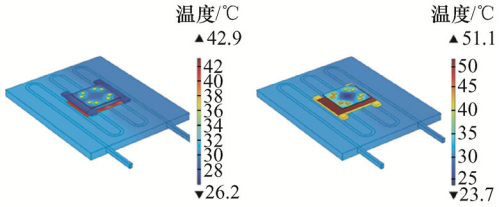


(b) 横向散热路径改变后

图 5　横向仿真实验结果对比

Fig. 5 Comparative results of horizontal optimization simulation experiments

图 6(a)为铜基板位于 TEC 上方的仿真温度分布，图 6(b)为铜基板位于 TEC 下方的仿真温度分布。在改变横向散热路径的基础上，为验证上述方案是否正确，可将 TEC 分别放置于铜基板的上方和下方，可以发现，TEC 位于铜基板下方的散热优于 TEC 位于铜基板上方。因此第 2.1 节的方案合理，也符合其布局分析结果。



(a) 铜基板在TEC上方　　(b) 铜基板在TEC下方

图 6　铜基板在 TEC 上、下方的仿真结果对比

Fig. 6 Comparative simulation results of the copper substrate positioned above and below the TEC

3　功率模块集成 TEC 温度反馈控制

3.1　温度反馈控制模型搭建

锥形传热模型是应用最早且应用最广泛的热传导模型[22]，其基本思想是从热源出发，热量向底层传递的路径为锥形，如图 7 所示。

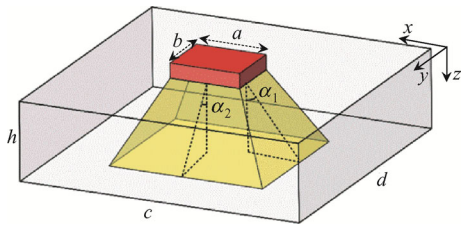


图 7　锥形传热模型示意

Fig. 7 Schematic diagram of conical heat transfer model

假设热源为矩形，长和宽分别为 a 和 b，忽略热源的厚度，则传热路径的热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 分别为[23]

$$R_{th}=\frac{1}{h_k}\int_0^h\frac{\mathrm{d}z}{(a+2z\tan\alpha_1)(b+2z\tan\alpha_2)} \tag{6}$$

$$C_{th}=\rho c_v\int_0^h(a+2z\tan\alpha_1)(b+2z\tan\alpha_2)\mathrm{d}z \tag{7}$$

式中：h_k 为导热材料的导热系数；α_1 和 α_2 分别为长度方向和宽度方向的传热角度；ρ 为导热材料的密度；c_v 为导热材料单位体积热容；h 为导热材料的厚度。

表 1 为 SiC 功率模块中各层器件的材料、尺寸和根据式(6)和式(7)计算的热阻、热容值。

表 1 各层材料尺寸和热阻、热容值

Tab. 1 Dimensions, thermal resistance, and thermal capacity values of each material layer

模块各层	材料	尺寸/mm×mm×mm	热阻/(K/W)	热容/(J/K)
芯片	SiC	5.70×5.20×0.18	0.010 2	0.034 8
芯片焊料	$Pb_{92.5}Sn_5Ag_{2.5}$	5.70×5.20×0.09	0.032 4	0.030 8
DBC上层	Cu	46.00×43.00×0.30	0.005 8	0.130 4
DBC中间层	AI_2O_3	47.00×44.00×0.38	0.078 6	0.159 6
DBC下层	Cu	46.00×43.00×0.30	0.004 7	0.160 0
DBC焊料	$SnSb_5$	46.00×43.00×0.10	0.022 0	0.027 2
散热板	Cu	62.00×47.00×3.00	0.016 3	3.127 0

表 2 为热阻与热容的计算值和实际测试值对比，通过对比可见，计算值与实际测试值大致相似，可为后续相关热性能分析及模型仿真等工作提供参考依据。

表 2 热阻、热容的计算值和实际测试值对比

Tab. 2 Comparison of calculated and actual test values of thermal resistance and thermal capacity

参数	计算值	实际测试值
热阻/(K/W)	0.170	0.180
热容/(J/K)	3.67	3.92

3.2 仿真平台搭建

图 8 为 SiC 功率模块集成半导体 TEC 的温度特性分析仿真模型，其中 Cauer 热网络模型的参数见表 1，TEC 模型依据式(1)~式(3)搭建。单片机基于 TEC 冷端温度实现电流反馈调节：当冷端温度高于 32 ℃时，以 0.11 A 的步长增大 TEC 工作电流；当冷端温度低于 28 ℃时，以 0.11 A 的步长减小 TEC 工作电流。由多次实验得出，当 TEC 冷端温度维持在 28~32 ℃时，可确保芯片在当前输入功率下维持最优电性能。在仿真过程中，功率模块的功率按“每上升 10 W 保持 10 s，随后继续上升 10 W”的规律逐步增加，直至功率达到 140 W；之后，功率以每 10 s 下降 10 W 的速率逐渐降低。

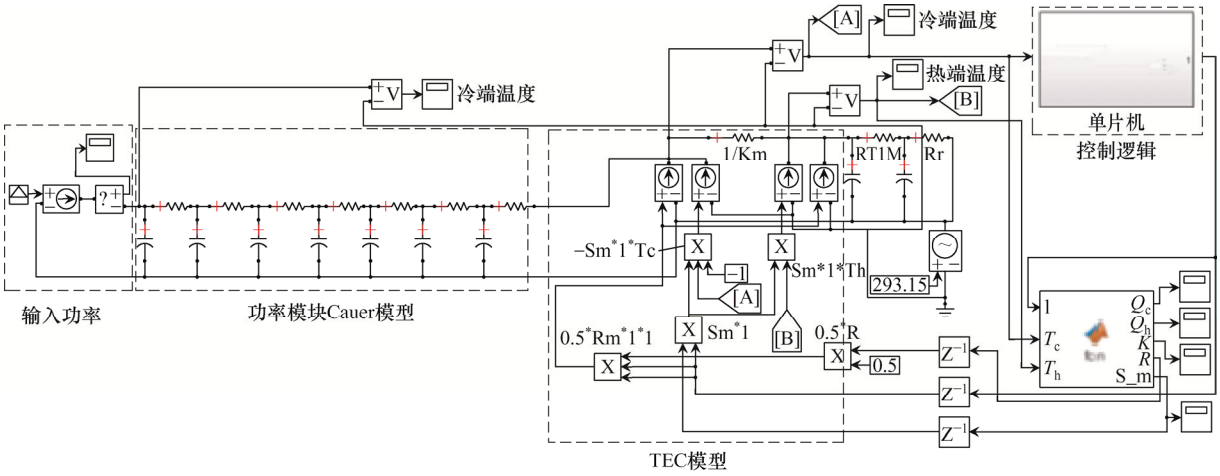


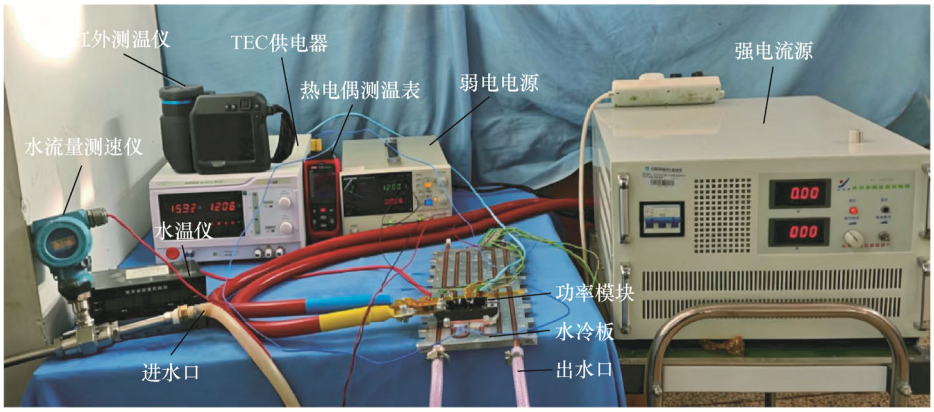
图 8 SiC 功率模块集成 TEC 温度特性分析仿真模型

Fig. 8 Simulation model for temperature characteristic analysis of SiC power module integrated with TEC

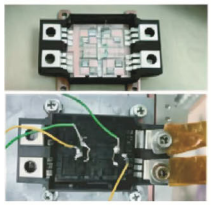
3.3 实验平台搭建

本实验，搭建了如图 9(a)所示的功率模块制冷控温测试平台。使用的功率模块如图 9(b)所示，实验主要测试功率模块的温度负反馈效果，实验使用的 TEC 如图 9(c)所示，TEC 热端散热使用的是常见的 U 形水冷板，如图 9(d)所示，实验反馈给 TEC 供电的是图 9(e)所示的 DC-DC 模块和 Arduino 开发板。讨论 TEC 实际反馈电路测试效果和仿真效果对比，实验使用的相变片为霍尼韦尔 PTM950 相变片，导热系数为 8.5 W/(m·K)，厚度为 0.20 mm，相变温度为 45 ℃。设置在温度大于 32 ℃时每秒输入给 TEC 的电压增加 0.02 V，在温度低于 28 ℃时每秒输入给

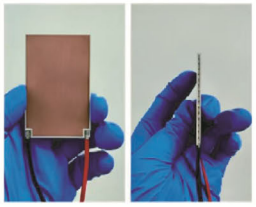
TEC 的电压减少 0.02 V。受到实验条件限制且为了测试方便，实际的测试是控制电压输入，而在仿真中采用电流步进是因为电流是决定 TEC 热电转换过程的核心控制变量，在仿真中计算方便，经过换算两者输入是一样的。本文的实验是在冷板散热功率上限卡死的情况下进行的。



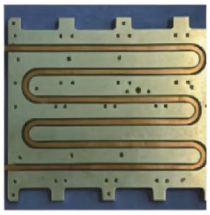
(a) 制冷控温测试平台



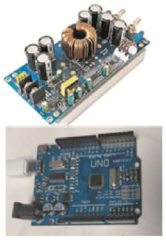
(b) 功率模块



(c) TEC



(d) U形水冷板



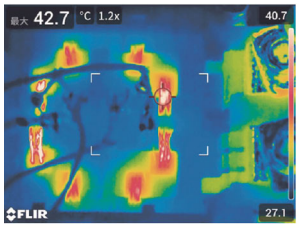
(e) DC-DC模块和Arduino开发板

图 9　功率模块制冷温控测试平台实物图

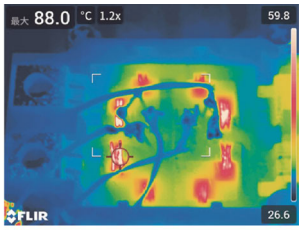
Fig. 9 Physical photograph of power module cooling and temperature control testing platform

4　实验数据和结果分析

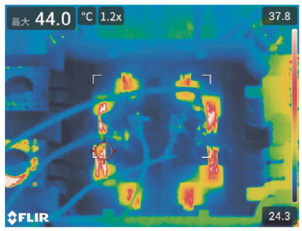
图 10 为功率模块的不同发热功率下的红外测温图，图 10(a)为功率模块发热功率上升到 61.6 W 时的温度分布图，为 40.7 ℃；图 10(b)为功率模块发热功率上升到 141.6 W 时的温度分布图，为 59.8 ℃；图 10(c)为功率模块发热功率下降到 61.6 W 时的温度分布图，为 37.8 ℃。由于降低时温度下限小于上升时的温度上限，所以下降到 61.6 W 时的功率模块温度分布要低于上升到 61.6 W 时的温度分布。



(a) 功率上升到61.6 W



(b) 功率上升到141.6 W



(c) 功率下降到61.6 W

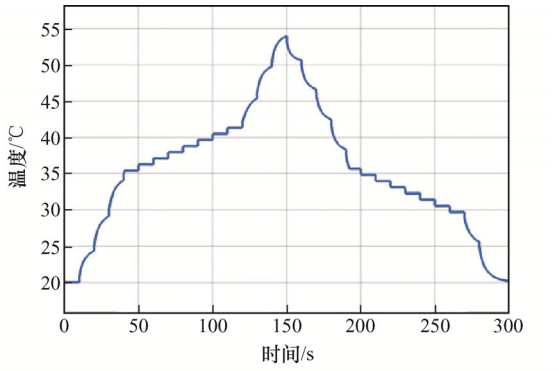
图 10　SiC 功率模块热成像与温度特性分析

Fig. 10 Thermal imaging temperature distribution map of SiC power modules

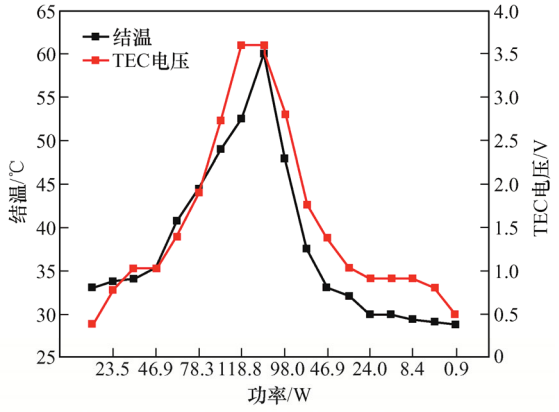
图 11(a)为基于实际测试平台搭建的 Simulink 仿真平台的结温分布曲线，呈现了仿真过程中结温的变化曲线；图 11(b)为实际实验测试中结温与 TEC 供电电压随功率模块发热功率变化的分布曲线，横坐标为离散测试工况序列，标注了各工况对应的实际功率值；图 11(c)为单片机根据实际温度变化调整输出电压的分布曲线，曲线基于单片机 1 060 个数据点

绘制；图 11(d)为在有、无 TEC 2 种情况下的结温对比曲线，主要对比为在冷板散热功率上限卡死的情况下，考虑 TEC 散热是否优于其水冷板的情况，实验数据已明确，在一定功率范围内，TEC 通过主动制冷实现的降温效果优于水冷板散热。

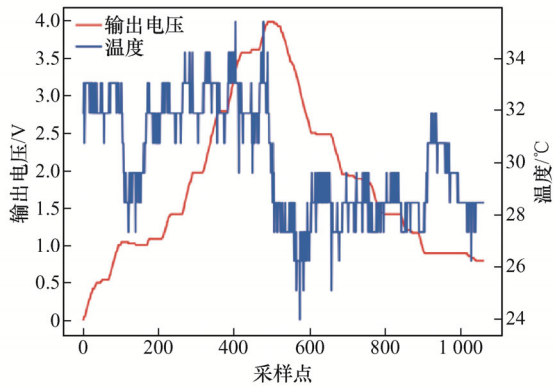
图 12 为 Simulink 仿真 TEC 冷端与热端功率及 COP 值随时间的变化曲线，图 12(a)为 TEC 冷端功率随时间变化的曲线，图 12(b)为 TEC 热端功率随时间变化的曲线，图 12(c)为 TEC 的 COP 随时间变化的曲线。



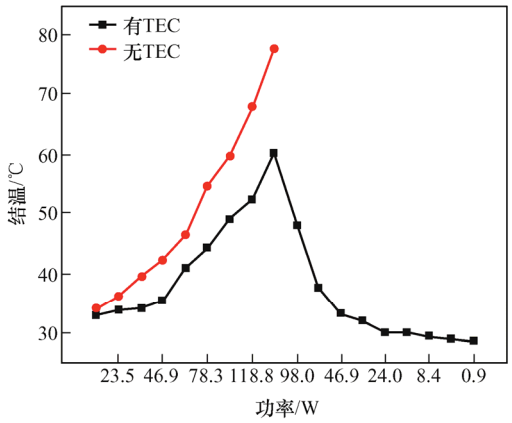
(a) 结温分布曲线



(b) 结温与TEC供电电压的分布曲线



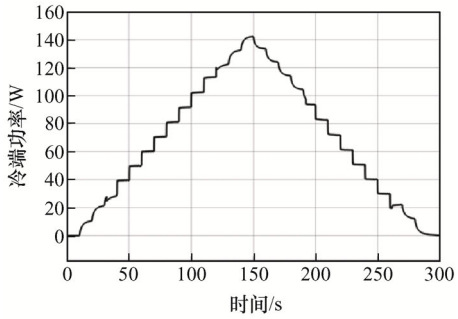
(c) 温度与输出电压分布曲线



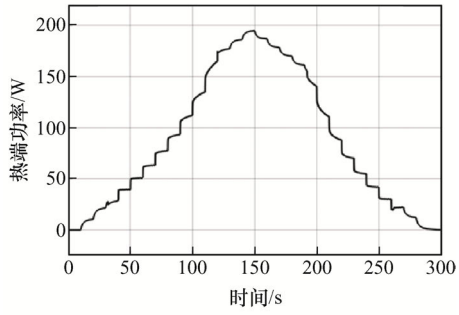
(d) 有、无TEC的结温曲线

图 11 温度控制曲线

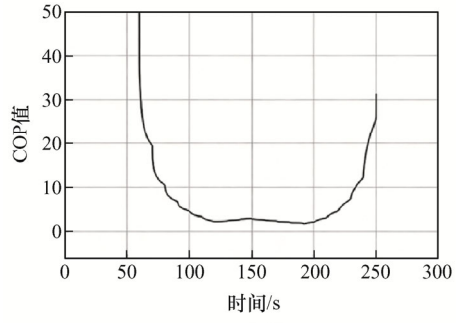
Fig. 11 Temperature control profile



(a) 冷端功率曲线



(b) 热端功率曲线



(c) COP曲线

图 12 TEC 冷端与热端功率及 COP 值随时间变化曲线

Fig. 12 The curves of the power at the cold and hot ends of TEC and COP values varying with time

从图 11 和图 12 可以看出，随着功率模块输入功率的增加，结温整体呈上升趋势，TEC 电压也随之增大，这是因为输入功率提升使模块产热增多。为维持温度稳定，TEC 需提高电压以增强制冷能力。当输入功率达到峰值 141.6 W 时，结温升至最高值 59.8 ℃，TEC 电压也达到峰值 3.61 V，若继续增大 TEC 输入，则会出现温度倒灌的情况；而当功率降低时，结温下降，TEC 输入电压也同步减小，体现了反馈控制系统中，TEC 可根据功率模块热负荷(由输入功率反映)自适应调节电压，实现对结温的有效控制，验证了该反馈控制策略的可行性与动态调节能力。同时，通过图 11(d)可以看出在 TEC 主动制冷的作用下，模块的结温有明显的改善，能显著提升功率模块的热管理性能。

5　结语

本研究为功率模块的温度控制提供了一种新的工程应用方案，并为 TEC 的优化设计和应用提供了参考。通过选择合适的 TEC 安装方式，可以显著提高功率模块的散热效果，TEC 的温度反馈控制也提升了系统的热管理效能和可靠性。与传统散热方式相比，TEC 具有主动制冷能力，可提升散热效能。

参考文献：

[1] Tian Qi, Bai K. Widen the zero-voltage-switching range and secure grid power quality for an EV charger using variable-switching-frequency single-dual-phase-shift control [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2018, 4(1): 11-19.

[2] 李东润, 宁圃奇, 康玉慧, 等. 采用大芯片的高功率密度 SiC 功率模块设计[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 93-99.
Li Dongrun, Ning Puqi, Kang Yuhui, et al. Design of high power density SiC power module with large chips [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 93-99. (in Chinese)

[3] 马荣耀, 唐开锋, 潘效飞, 等. 车用碳化硅功率模块的电热性能优化与评估[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 78-86.
Ma Rongyao, Tang Kaifeng, Pan Xiaofei, et al. Electro-thermal performance optimization and evaluation of automotive SiC power module [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 78-86. (in Chinese)

[4] Yun Chansu, Malberti P, Ciappa M, et al. Thermal component model for electrothermal analysis of IGBT module systems [J]. IEEE Transactions on Advanced Packaging, 2001, 24(3): 401-406.

[5] 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)

[6] 廖淑华, 周锦源, 李敏, 等. 双面散热 SiC 功率模块温度均匀性和开关特性评估[J]. 电源学报, 2024, 22(3): 100-110.
Liao Shuhua, Zhou Jinyuan, Li Min, et al. Evaluation of temperature uniformity and switching characteristics of double-sided cooling SiC power module [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(3): 100-110. (in Chinese)

[7] Guo Qiang, Zhao Mei, Wang Hongfang. SMT solder joint's semi-experimental fatigue model [J]. Mechanics Research Communications, 2005, 32(3): 351-358.

[8] 吴雷, 高明, 张涛, 等. 热电制冷的应用与优化综述[J]. 制冷学报, 2019, 40(6): 1-12.
Wu Lei, Gao Ming, Zhang Tao, et al. Thermoelectric cooling application and optimization: A review [J]. Journal of Refrigeration, 2019, 40(6): 1-12. (in Chinese)

[9] Cai Yang, Wang Yu, Liu Di, et al. Thermoelectric cooling technology applied in the field of electronic devices: Updated review on the parametric investigations and model developments [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 148: 238-255.

[10] Gao Yangfan, Zhu Sijing, Gao Jie, et al. Wearable thermoelectric cooler encapsulated with low thermal conductivity filler and honeycomb structure for high cooling effect [J]. Materials Today Physics, 2024, 46: 101491.

[11] Wang Ruochen, Zhang Hui, Chen Jie, et al. Modeling and

model predictive control of a battery thermal management system based on thermoelectric cooling for electric vehicles [J]. Energy Technology, 2024, 12(5): 2301205.

[12] Arora S. Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies [J]. Journal of Power Sources, 2018, 400: 621-640.

[13] Hu H M, Ge T S, Dai Y J, et al. Experimental investigation on two-stage thermoelectric cooling system adopted in isoelectric focusing [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 53: 1-12.

[14] Venkatasubramanian R, Siivola E, Colpitts T, et al. Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit [J]. Nature, 2001, 413(6856): 597-602.

[15] Salah W A, Abuhelwa M. Review of thermoelectric cooling devices recent applications. 2020.

[16] Ding Lijian, Song Ruya, Zhao Shuang, et al. Active Peltier effect heat sink for power semiconductor device thermal stability enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(9): 11507-11520.

[17] Li Cong, Jiao Da, Jia Jizhou, et al. Thermoelectric cooling for power electronics circuits: Modeling and active temperature control [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3995-4005.

[18] 尹辉斌, 高学农. 电子器件散热技术现状及进展[J]. 广东化工, 2013, 40(4): 67-68.
Yin Huibin, Gao Xuenong. Status and progress of electronic cooling technologies [J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(4): 67-68. (in Chinese)

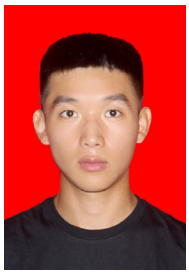
[19] Ma Ke, Liserre M, Blaabjerg F, et al. Thermal loading and lifetime estimation for power device considering mission profiles in wind power converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 590-602.

[20] 乔迁, 贾江磊, 谢兰强, 等. 热电制冷器散热的有限元仿真分析方法[J]. 机电工程技术, 2024, 53(9): 149-152, 200.
Qiao Qian, Jia Jianglei, Xie Lanqiang, et al. Finite element simulation and analysis method for heat dissipation of thermoelectric cooler [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(9): 149-152, 200. (in Chinese)

[21] Zhang H Y, Mui Y C, Tarin M. Analysis of thermoelectric cooler performance for high power electronic packages [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30 (6-7): 561-568.

[22] Zhu Nan, Chen Min, Zhang Xingyao, et al. Substrate layout evaluation for T-type three-level IGBT modules [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, PA, USA, 2014: 4677-4684.

[23] Augustin A, Hauck T. A new approach to boundary condition independent compact dynamic thermal models [C]// Twenty-Third Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. San Jose, CA, USA, 2007: 228-232.



杨嘉俊

作者简介：

杨嘉俊(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：车用功率模块散热。E-mail：yangjiajun@mail.iee.ac.cn。

刘同健(1997—)，男，博士研究生。研究方向：热电器件制备，功率模块散热。E-mail：2290065@stu.neu.edu.cn。

宁圃奇(1982—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，研究员。研究方向：功率模块封装。E-mail：npq@mail.iee.ac.cn。

闫欣(1978—)，男，博士，研究员。研究方向：碳基电子器件，光纤传感器件。E-mail：yanxin@ise.neu.edu.cn。

回晓双(1999—)，男，博士研究生。研究方向：高功率密度电机驱动系统优化设计。E-mail：hui00@mail.iee.ac.cn。

康玉慧(1993—)，女，硕士，研究员。研究方向：半导体器件特性建模及模块封装技术。E-mail：kangyuhui@mail.iee.ac.cn。

(责任编辑：孙美菊)