

文章编号:1671-6833(2022)04-0030-05

多制冷片热电模组中制冷片热布局仿真研究

赵华东^{1,2}, 杨号南¹, 孙夏爽¹, 夏高举¹

(1. 郑州大学 机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省智能制造研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:以多制冷片热电制冷模组为研究对象,通过对6组具有相同有效工作面积和理论性能参数,而数量、型号、排布方式不尽相同的热电制冷片进行有限元仿真,探究热电制冷片热布局对热电制冷模组实际工作性能的影响。结果表明,热电制冷片热布局会影响热电制冷模组的实际工作性能。所研究的6组排布中,具有相同排布方式的“单片居中”、“2片居中”、“4片居中”表现出了近乎相同的实际工作性能;而最优排布方式“4片均布”相比“单片居中”,在热源发热功率为30 W和50 W、工作电流为最大电流的条件下,制冷效果分别提升了13.88%和9.17%,制冷效率分别提升了12.24%和12.12%。

关键词:热电制冷;热电制冷模组;热布局;有限元仿真

中图分类号: TB69

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2022.04.008

0 引言

热电制冷是一种新型制冷方式,能通过帕尔贴效应直接将电能转化为热能。在热电制冷片(TEC)两侧添加热交换模块即组成了热电制冷模组,热电制冷模组的出现有利于热电制冷技术的标准化,推动其应用领域的扩展。

此前关于热电制冷模组的研究,主要是针对单片热电制冷片的热电制冷模组,如探究工作电流、散热方式等对热电制冷模组实际工作性能的影响^[1-4]。在实际工作中,经常遇到需要较大制冷量而单片TEC无法满足的情况,这就需要将多片TEC以某种排布方式排列在一起使用,但这方面的研究较少。因此,在多制冷片热电制冷模组日益常见的今天,有必要借鉴以往学者对单芯片、多芯片的扩散热阻和热耦合的相关研究和方法,对多制冷片热电制冷模组进行类似的研究。

前人已经认识到热源排布对整体散热效果的影响,并通过算法或数值模拟进行优化,如针对PCB板电子元器件的热布局研究^[5],以及MCM三维芯片的热布局研究^[6];同时,又由于TEC工作状态对冷热面温度的敏感性^[7],因此推测TEC作为一种特殊的热源,其布局会影响多制冷片热

电制冷模组的实际工作性能。Dizaji等^[8]对比了相同输入功率下,2片、4片和6片TEC的实际工作性能,发现在相同的总输入功率下,6片TEC的COP(性能系数,其值为制冷量与输入功率之比)比2片TEC高100%左右。该研究中,3组TEC具有不同的有效工作面积和理论性能参数,因此有理由推测上述结果是由于TEC数量、有效工作面积和理论性能参数综合作用的结果。

本文以DA(direct to air)型多制冷片热电制冷模组为研究对象,对具有相同有效工作面积和理论性能参数的6组不同排布方式的TEC进行仿真分析,研究TEC数量及布局对热电制冷模组实际工作性能的影响。

1 散热过程分析

图1所示为具有多片TEC的DA型热电制冷模组,由于DA型热电制冷模组一般通过直接接触热源的方式对热源进行冷却,故本文中基板等效为均匀热源。

DA型热电制冷模组的传热过程可分为三部分:①热电制冷片冷端吸热;②热电制冷片内部的热电效应;③热电制冷片热端的散热。

(1)热电制冷片冷端吸热过程。根据能量守

收稿日期:2021-10-25;修订日期:2021-12-18

基金项目:中原科技创新领军人才计划资助项目(214200510014);郑州市协同创新重大专项资助项目(18XTZX12005)

作者简介:赵华东(1978—),男,河南开封人,郑州大学教授,博士,博士生导师,主要从事热电材料、热电制冷模组优化研究,E-mail:82662906@qq.com。

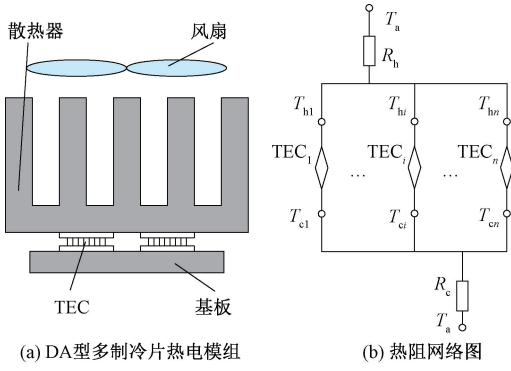


图1 DA型多制冷片热电模组结构简图及其热阻网络图
Figure 1 Schematic of multi-TEC thermoelectric cooling module and the corresponding thermal resistance network

恒定律:

$$P = Q_{c1} + Q_{c2} + \dots + Q_{cn} + Q' \quad (1)$$

式中: P 为热源发热功率; $Q_{c1} \sim Q_{cn}$ 为各热电制冷片冷端吸热量; Q' 为热源不经过热电制冷片散去的热量。

(2) 热电制冷片内部热电效应过程。根据经典热电制冷模块能量转换理论^[9]:

$$Q_c = N \left(\alpha I T_c - \frac{I^2 \rho}{2G} - \lambda G (T_h - T_c) \right); \quad (2)$$

$$Q_h = N \left(\alpha I T_h + \frac{I^2 \rho}{2G} - \lambda G (T_h - T_c) \right). \quad (3)$$

式中: N 为热电臂对数; I 为热电制冷片工作电流; T_c 、 T_h 分别为热电制冷片的冷、热端温度; G 为热电臂几何因子; α 、 ρ 、 λ 分别为热电材料的塞贝克系数、电阻率、热导率。

进行如下转换,令: $R_m = \frac{N\rho}{2G}$, $K_m = NkG$, $S_m = N\alpha$, 则式(1)、(2)转换为

$$Q_c = S_m I T_c - \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T; \quad (4)$$

$$Q_h = S_m I T_h + \frac{1}{2} I^2 R_m - K_m \Delta T. \quad (5)$$

式中: ΔT 为热电制冷片冷热端温差; R_m 、 K_m 、 S_m 可理解为热电制冷片的总电阻、总热导、总塞贝克系数。这3个参数可通过热电制冷片性能参数 I_{\max} 、 V_{\max} 、 ΔT_{\max} 、 $Q_{c\max}$ 、 T_{h0} 计算得到,其中 ΔT_{\max} 为热电制冷片热端温度为 T_{h0} 时,热电制冷片所能达到的冷热端最大温差, I_{\max} 、 V_{\max} 分别为此时热电制冷片的工作电流和工作电压, $Q_{c\max}$ 为在 $I = I_{\max}$ 、 $\Delta T = 0$ 时,热电制冷片冷端吸热量。 R_m 、 K_m 、 S_m 可表示为

$$R_m = \frac{(T_{h0} - \Delta T_{\max}) V_{\max}}{T_{h0} I_{\max}}; \quad (6)$$

$$K_m = \frac{(T_{h0} - \Delta T_{\max}) V_{\max} I_{\max}}{2 T_{h0} T_{\max}}; \quad (7)$$

$$S_m = \frac{\Delta V_{\max}}{T_{h0}}. \quad (8)$$

(3) 热电制冷片热端的散热过程。借鉴多芯片热源的相关研究和方法,使用热阻矩阵^[10]描述多制冷片热电制冷模组的热端散热过程。包含 n 个热源的热源温度可用式(9)计算:

$$RQ + T_a = T. \quad (9)$$

式中: Q 、 T_a 、 T 均为 n 维列向量,分别代表各热源发热功率、环境温度、各热源温度; R 为多热源组件的热阻矩阵,表示为

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & \dots & R_{1l} & \dots & R_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{il} & \dots & R_{il} & \dots & R_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{nl} & \dots & R_{nl} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

式中:当 $i = l$ 时, R_{il} 为热源 i 的自热热阻;当 $i \neq l$ 时, R_{il} 为热源 l 对热源 i 的耦合热阻。 R_{il} 的表达式为

$$R_{il} = \frac{\Delta T_{il,a}}{Q_l} = \frac{T_{il} - T_{ai}}{Q_l}. \quad (11)$$

式中: $\Delta T_{il,a}$ 为热源 l 引起热源 i 相对环境温度的温升; T_{il} 为热源 l 工作时,热源 i 的温度; Q_l 为热源 l 的发热功率。

2 TEC 的等效

设存在两种型号的热电制冷片:TEC-a、TEC-b,其理论性能参数如表1所示。由于2片TEC-a的有效工作面积和理论性能参数与单片TEC-b一致,故推论: n 片相同TEC的实际工作性能等效于有效工作面积、最大制冷量、最大电压为原来 n 倍的单片TEC。又由式(6)~(8),该推论亦可表述为 n 片相同TEC共同使用时等效于 R_m 、 K_m 、 S_m 及有效工作面积为原制冷片 n 倍的单片TEC。

表1 TEC 等效的例证

TEC 类型	尺寸规格	I_{\max}	V_{\max}	$Q_{c\max}$	ΔT_{\max}	T_{h0}
TEC-a	$l \times l \times t$	I_0	V_0	Q_{c0}	ΔT_0	T_h
TEC-b	$2l \times l \times t$	I_0	$2V_0$	$2Q_{c0}$	ΔT_0	T_h
2片 TEC-a	$2l \times l \times t$	I_0	$V_0 + V_0$	$Q_{c0} + Q_{c0}$	ΔT_0	T_h

3 数值仿真模型

数值仿真基于 FloTHERM 平台,仿真模型如图2所示。

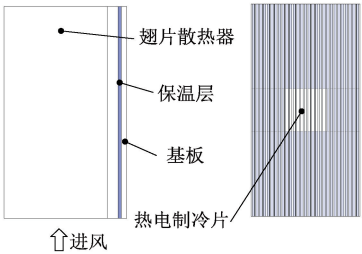


图 2 热电制冷模组的仿真模型图

Figure 2 Simulation model diagram of thermoelectric cooling module

仿真中共使用 3 种 TEC 的 6 种不同排布,制

表 2 3 种热电制冷片及其相关参数

Table 2 List of three TECs with their supplied data

TEC	尺寸规格	I_{\max}/A	V_{\max}/V	Q_{cmax}/W	$\Delta T_{\text{max}}/^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{h0}}/^{\circ}\text{C}$
TEC1	20 mm×20 mm×3.2 mm	5.8	3.7	12.8	77.9	50
TEC2	40 mm×20 mm×3.2 mm	5.8	7.4	25.6	77.9	50
TEC3	40 mm×40 mm×3.2 mm	5.8	14.8	51.2	77.9	50

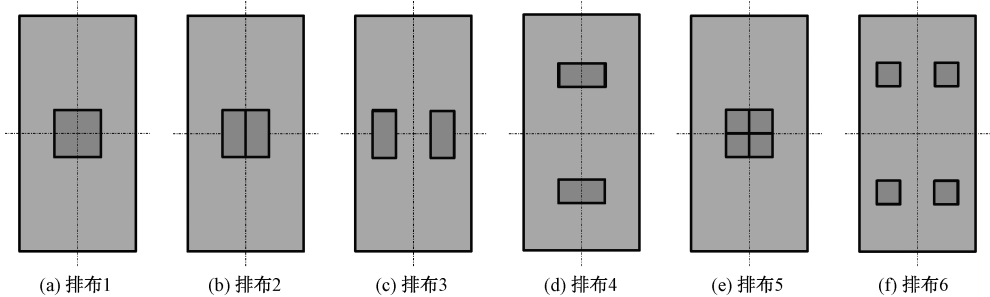


图 3 6 种 TEC 排布方式

Figure 3 Six arrangements of TEC

4 结果与分析

在基板发热功率为 30 W 和 50 W 两种情况下,对上述 6 种排布进行了仿真分析。表 3 为“排布 1”和“排布 6”的仿真结果对比,整体仿真结果如图 4、图 5 所示。其中, I 为 TEC 的工作电流; T_{j} 为基板与制冷片接触面的平均温度,用以表征热电制冷模组的制冷效果; COP 为各组 TEC 总制冷量与总输入功率之比,用以表征热电制冷模组的制冷效率。

(1) 图 4 和图 5 中,相同热源发热功率下的 6 条曲线均未明显完全重合,说明 TEC 采取不同排布方式会导致热电制冷模组表现出不同的实际工作性能,亦即证明了 TEC 布局会影响热电制冷模组实际工作性能。

(2) 图 4 和图 5 中,“30 W,排布 1”、“30 W,排布 2”、“30 W,排布 5”3 条曲线几乎重合;“50 W,排布 1”、“50 W,排布 2”、“50 W,排布 5”3 条曲线几乎重合,说明单片居中、2 片居中、4 片居中 3 种排布方式下,热电制冷模组的实际工作性能近乎相

冷片参数见表 2。6 种排布方式见图 3,其中排布 1 为单片 TEC3 居中排布,排布 2 为 2 片 TEC2 居中排布,排布 3 为 2 片 TEC2 左右均布,排布 4 为 2 片 TEC2 上下均布,排布 5 为 4 片 TEC1 居中排布,排布 6 为 4 片 TEC1 均匀排布。

仿真模型其他设置和基本假设:①环境温度设为 30 ℃,环境压力为 101 kPa;②进风口风量为 170 m³/h,湍流模型使用自动代数模型;③假设各界面完美接触,不考虑接触热阻;④忽略辐射传热。

同。这一现象说明,具有相同有效工作面积和理论性能参数的 TEC,可以表现出相似的实际工作性能。这也间接证明了前述推论,即 n 片相同 TEC 的实际工作性能等效于有效工作面积、最大制冷量、最大电压为原来 n 倍的单片 TEC。

(3) 图 4 中,“排布 6”的曲线始终在其他排布方式的曲线下方;同时,图 5 中,“排布 6”的曲线始终在其他排布方式的曲线上方,这说明 4 片均布的排布方式既能提供更好的制冷效果,又能提高热电制冷模组的制冷效率,亦即该排布优于其他 5 种排布方式。由表 3 可知,相比“排布 1”,“排布 6”在热源发热功率为 30 W 和 50 W,工作电流为最大电流的条件下,制冷效果分别提升了 13.88%和 9.17%,制冷效率分别提升了 12.24%和 12.12%。

(4) 图 4 中,随工作电流 I 的增加,各排布方式制冷效果逐渐拉开差距,“排布 6”制冷效果优势愈发明显;而图 5 中,随工作电流 I 的增加,各排布制冷效率逐渐趋同,“排布 6”的制冷效率优势不再明显。

表 3 排布 1 与排布 6 结果对比

Table 3 Comparison of the results of two arrangements

热源发热 功率 P/W	工作电流 I/A	热源温度 $T_J/^\circ\text{C}$		制冷效果 提升/ $\%$	COP		制冷效率 提升/ $\%$
		排布 1	排布 6		排布 1	排布 6	
30	2.0	40.30	38.90	3.47	3.39	3.73	10.03
	3.0	34.30	32.10	6.41	1.65	1.80	9.09
	4.0	30.30	27.50	9.24	0.99	1.08	9.09
	5.0	28.30	24.90	12.01	0.66	0.73	10.61
	5.8	28.10	24.20	13.88	0.49	0.55	12.24
50	2.0	58.90	57.50	2.38	5.61	6.33	12.83
	3.0	52.30	50.00	4.40	2.40	2.65	10.42
	4.0	47.70	44.80	6.08	1.37	1.51	10.22
	5.0	45.30	41.70	7.95	0.89	0.98	10.11
	5.8	44.70	40.60	9.17	0.66	0.74	12.12

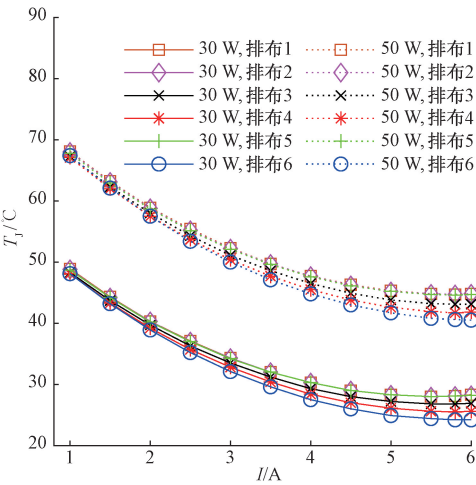


图 4 热源温度与 TEC 工作电流关系图

Figure 4 Variation of T_J and working current

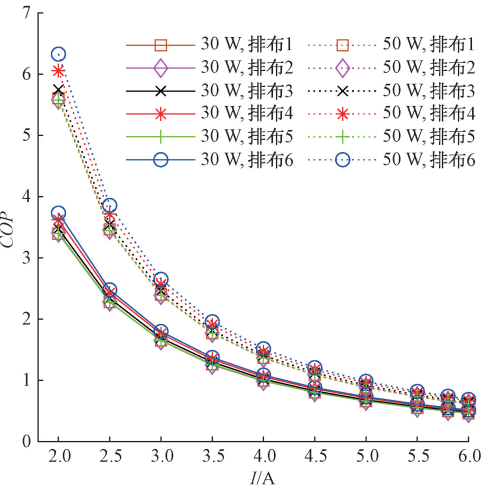


图 5 COP 与工作电流关系图

Figure 5 Variation of COP and working current

以上现象可以解释为由于多个热源之间复杂的热耦合作用,热源的热布局会影响系统的温度分布,一般认为,热源相距越远其间的热耦合作用越弱。“排布 6”中,4 片 TEC 分布较其他排布方

式稀疏,故该排布方式下 TEC 间的耦合热阻较小,因此热电制冷模组表现出更优的实际工作性能。但是制冷效果的提升是以输入功率的增加为代价的,由表 3 可知,尽管随着电流的增大,制冷效果得到更明显的提升,但制冷效率的提升却保持了相对稳定。

5 结论

通过对具有相同有效工作面积和理论性能参数的 6 组不同 TEC 排布方式的多制冷片热电制冷模组进行仿真分析,得出以下结论。

(1) TEC 的布局影响热电制冷模组的实际工作性能,可以通过对 TEC 的热布局进行优化,得到更优的热电制冷模组温度分布,进而提高热电制冷模组的实际工作性能。

(2) 具有相同有效工作面积和理论性能参数的 TEC 组可以表现出相同的实际工作性能,与 TEC 的型号、数量无关。 n 片相同 TEC 的实际工作性能等效于有效工作面积、最大制冷量、最大电压为原来 n 倍的单片 TEC,亦即有效工作面积、 R_m 、 K_m 、 S_m 为原来的 n 倍。

(3) 在所研究的 6 种排布方式中,4 片均布的排布方式优于其他 5 种排布方式,且随工作电流的增加,该排布方式的制冷效果优势愈发明显,但制冷效率则渐渐与其他 5 种趋同。相较于“单片居中”,“4 片均布”排布方式在热源发热功率为 30 W 和 50 W、工作电流为最大电流的条件下,制冷效果分别提升了 13.88% 和 9.17%,制冷效率分别提升了 12.24% 和 12.12%。

参考文献:

[1] 刘冠宇,王红梅,黄荣森,等. 热电制冷器的结构

优化研究[J]. 制冷技术, 2021, 41(1): 55-61.

LIU G Y, WANG H M, HUANG R S, et al. Research on structural optimization of thermoelectric cooler[J]. Chinese journal of refrigeration technology, 2021, 41(1): 55-61.

[2] 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 L, GAO M, ZHANG T, et al. Thermoelectric cooling application and optimization: a review [J]. Journal of refrigeration, 2019, 40(6): 1-12.

[3] ZHU K, DENG B, ZHANG P X, et al. System efficiency and power: the bridge between the device and system of a thermoelectric power generator[J]. Energy & environmental science, 2020, 13(10): 3514-3526.

[4] HAO J H, QIU H C, REN J X, et al. Multi-parameters analysis and optimization of a typical thermoelectric cooler based on the dimensional analysis and experimental validation [J]. Energy, 2020, 205: 118043.

[5] 李跟宝, 王扬, 汪熙, 等. 多芯片 PCB 板热布局优化试验研究及数值模拟[J]. 电子器件, 2017, 40(4): 800-805.

LI G B, WANG Y, WANG X, et al. Experiment study and numerical simulation on thermal layout optimization of a multi-chip printed wiring board (PCB) [J]. Chinese journal of electron devices, 2017, 40(4): 800-805.

[6] XU Q, YANG Z Q, FU B, et al. Design and optimization of a stationary electrode in a vertically-driven MEMS inertial switch for extending contact duration [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2017, 17(3): 527.

[7] 许国良, 段洋, 黄晓明, 等. 非均匀温度分布对热电制冷芯片热端性能的影响[J]. 制冷学报, 2018, 39(6): 54-60.

XU G L, DUAN Y, HUANG X M, et al. Influence of non-uniform temperature distribution on the performance of hot end of a thermoelectric cooler chip [J]. Journal of refrigeration, 2018, 39(6): 54-60.

[8] DIZAJI H S, JAFARMADAR S, KHALILARYA S. Novel experiments on COP improvement of thermoelectric air coolers[J]. Energy conversion and management, 2019, 187: 328-338.

[9] 胡浩茫, 葛天舒, 代彦军, 等. 热电制冷技术最新进展: 从材料到应用[J]. 制冷技术, 2016, 36(5): 42-52.

HU H M, GE T S, DAI Y J, et al. Up to date development of thermoelectric refrigeration technology: from material to application[J]. Chinese journal of refrigeration technology, 2016, 36(5): 42-52.

[10] CHENG J, HE X Q. Research on thermal coupling effect of multi-heating sources in MCM [C]//2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT). Piscataway:IEEE, 2016: 1469-1475.

Simulation of Thermal Layout of Multi-TEC Thermoelectric Cooling Module

ZHAO Huadong^{1,2}, YANG Haonan¹, SUN Xiashuang¹, XIA Gaoju¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Intelligent Manufacturing Research Institute, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The influence of thermal layout of thermoelectric coolers on the actual performance of thermoelectric cooling module was investigated by finite element simulation of six groups of thermoelectric coolers with the same dimensions and theoretical performance parameters, but different quantity, type and arrangement. The results showed that the thermal layout of thermoelectric coolers could affect the actual performance of thermoelectric cooling module. In the six groups studied, “center single piece”, “center double pieces” and “center four pieces” with the same arrangement showed nearly the same actual performance. In the optimal arrangement mode “uniform distribution four pieces” condition, compared with the previous three, when the heat source heating power was 30 W and 50 W and the working current was the maximum current I_{max} , the refrigeration effect increased by 13.88% and 9.17%, respectively, and the refrigeration efficiency increased by 12.24% and 12.12%, respectively.

Keywords: thermoelectric refrigeration; thermoelectric cooling module; thermal layout; FEM simulation