

热电制冷模块热物性参数理论获取方法及精度分析

王 卓, 申利梅, 胡 灿, 陈焕新

(华中科技大学 制冷及低温工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 获取精确的热电模块的热物性参数值是热电制冷系统性能分析的关键。制冷量是衡量热电制冷性能的参数, 根据厂商数据单以及半导体材料与温度相关的热物性经验公式, 绘制了采用常物性参数法、变物性参数法分析制冷量的性能曲线图, 并提出通过热电臂内热平衡的微分表达式获得不同工况下制冷量的准确值及标准性能曲线图; 通过数值对比分析发现, 常物性参数法在计算热电制冷量时有最大约 6 W 的绝对误差, 但可以通过改善常物性参数获取精度减小计算误差; 而变物性参数法最大绝对误差仅为 1.5 W, 该热物性参数获取方法精度较高, 适用于分析热电制冷性能。

关键词: 热电制冷; 热物性; 数值分析; 制冷量

中图分类号: TB66 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.0617008

Theoretical methods and accuracy analysis for extracting thermophysical parameters of thermoelectric cooling module

Wang Zhuo, Shen Limei, Hu Can, Chen Huanxin

(Department of Refrigeration & Cryogenics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For exact analysis of cooling ability of thermoelectric cooling system, accurate extraction of thermophysical parameters is of vital importance. Cooling capacity is the measure of system's cooling ability. Based on the datasheet of thermoelectric module and empirical formulas evaluating temperature-dependent parameters, performance curves assuming constant and temperature-dependent material properties were plotted respectively. The standard value of cooling capacity and performance curve were obtained with differential equations for energy conservation along the TE element. Through numerical comparison and analysis, it was found that the maximum absolute error of cooling capacity was 6 W for constant parameters estimated from the datasheet and could be minimized by applying a proper set of constant parameters. The maximum absolute error of cooling capacity was 1.5 W for temperature-dependent parameters calculated with empirical formulas. The accuracy of the numerical model assuming temperature-dependent material properties was confirmed and it could be used to accurately evaluate thermoelectric cooling performance.

Key words: thermoelectric cooling; thermophysical property; numerical analysis; cooling capacity

收稿日期: 2015-10-05; 修订日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金(51376068); 华中科技大学青年人才引进培育基金项目

作者简介: 王卓(1992-), 男, 本科生, 主要从事热电制冷方面的研究。Email: zwang9307@hotmail.com

导师简介: 申利梅(1986-), 女, 讲师, 硕士生导师, 博士, 主要从事热电和热管理等方面的研究。Email: ep_shenlimei@hust.edu.cn

0 引言

热电制冷因为绿色环保越来越受关注,尤其在便携、紧凑装置等一些特殊场合得到广泛应用^[1-2]。热电模块作为热电制冷系统的核心部件,其物性参数的获取是研究热电模块制冷能力的必须步骤和突破口;因为实验台搭建和测试相对复杂^[3-5],大多数研究都采用理论方法获取热物性参数。

目前,获取热电模块热电参数的理论方法可归为两类:一是常物性参数法,广泛采用的是利用厂商提供的最大制冷温差、最大工作电流或电压、最大制冷量等数据推算获得热电模块的赛贝克系数 S 、电阻 R 和热导 K 参数,二是变物性参数法,即通过生产厂家提供的热电材料物性参数与温度相关的经验公式进行计算;但它们都不同程度忽略了热电参数的温度特性。Luo^[6]通过厂商提供软件验证了常物性参数分析制冷系数等性能参数的误差,R. Ahiska, K. Ahiska^[7]通过高精度实验验证了变物性参数理论分析制冷量、制冷系数的精度,上述研究多借助器具进行分析,也没有联系热物性参数本身的获取精度问题。

文中基于热电臂内热平衡微分方程,提出了一种简洁有效的热物性参数和热电制冷性能理论分析方法;以不同制冷温差工况下制冷量随工作电流变化的性能图作为参照,通过对比常物性参数和变物性参数数学模型下的制冷性能,分析了其计算热电制冷量的精度,并根据电臂温度分布,分析了热物性参数获取精度。

1 数学模型

1.1 常物性参数法

目前获得常物性参数 S_0 、 R_0 、 K_0 的方法主要有两种,一是厂商提供了一组通用的热电参数值,二是利用厂商数据单间接推算出一组热电参数值 S_0 、 R_0 、 K_0 ;对于后者,厂商所提供的数据单列出了在一定热端温度 T_H 下,当 TEM 冷端处于理想绝热时取得的最大温差值 ΔT_{\max} ,以及此时的工作电流 I_{\max} ,对应的电压 U_{\max} ;则根据参考文献[8]给出的方法有:

$$S_0 = \frac{U_{\max}}{T_H} \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{(T_H - \Delta T_{\max}) U_{\max}}{T_H I_{\max}} \quad (2)$$

$$K_0 = \frac{(T_H - \Delta T_{\max}) U_{\max} I_{\max}}{2 T_H \Delta T_{\max}} \quad (3)$$

为了分析变物性与常物性参数获取方法对热电制冷性能计算精度的影响,文中以制冷量作为校核目标。热电模块工作达到稳态时的制冷量可表示为

$$Q_c = S I T_c - 0.5 I^2 R - K \Delta T \quad (4)$$

公式(1)~(4)结合设定的热端温度 T_H ,在不同制冷温差工况下通过改变工作电流 I 可以获得常物性参数数学模型下的制冷性能曲线图。

1.2 变物性参数法

热电模块的物性参数的经验公式是通过对各温度下热电参数值拟合得到,为了精准讨论获取方法对制冷性能的影响,文中采用三次拟合;即当冷热端温差 $\Delta T = 0 \text{ K}$ 时,热电模块的赛贝克系数、电阻和热导分别为:

$$S(T) = S_1 + S_2 T + S_3 T^2 + S_4 T^3 \quad (5)$$

$$R(T) = R_1 + R_2 T + R_3 T^2 + R_4 T^3 \quad (6)$$

$$K(T) = K_1 + K_2 T + K_3 T^2 + K_4 T^3 \quad (7)$$

式中: S_i 、 R_i 和 K_i ($i=1, 2, 3, 4$), 都是仅与热电材料本身有关的系数,表征了其热物性质随温度的变化规律; T 为热电模块的温度。

当 $\Delta T > 0 \text{ K}$, 其热物性参数值随热电臂温度变化而变化;其中厂商和同行研究者通常采用的简化计算方法是将冷热端面温度平均值作为决定有效热电参数值的特征温度,令

$$T_m = \frac{T_H + T_c}{2} \quad (8)$$

将其代入公式(5)~(7)得到有效热电参数值;同样,根据公式(4)~(8)在设定的热端温度 T_H 下,绘制不同制冷温差工况制冷量随工作电流 I 变化的制冷性能曲线图。对比常物性参数法,变物性参数法的数学模型尽管部分考虑了热电性质随温度变化的特性,但实际工作中热电臂内温度分布是极其复杂的,采用公式(8)得到的平均值作为决定有效热电参数值的特征温度会带来一定误差。

1.3 热平衡法

考虑热电参数温度特性时单个热电臂内热平衡微分方程为^[9]:

$$k(x) A \frac{d^2 T(x)}{dx^2} + A \frac{dk(x)}{dx} + \frac{dT(x)}{dx} + \frac{P \rho(x)}{A} = 0 \quad (9)$$

式中: x 为到冷端面的距离,电流方向与温度梯度方向相反; α 、 ρ 和 k 分别为模块对应热电材料的温差

电动势率、电阻率和热导率，即对于总电偶对数为 N 、单个热电臂横截面积 A 与长度 L 之比为 G 的热电模块有：

$$\alpha(T) = \frac{S(T)}{2N} \quad (10)$$

$$\rho(T) = \frac{R(T)G}{2N} \quad (11)$$

$$k(T) = \frac{K(T)}{2NG} \quad (12)$$

根据以上材料热电参数与温度相关特性以及复合函数的求导法则可使公式(12)转化为：

$$k(T(T))A \frac{d^2T(x)}{dx^2} + A \frac{dk(T(x))}{dT(x)} \left(\frac{dT(x)}{dx} \right) + \frac{F\rho(T(x))}{A} = 0 \quad (13)$$

即

$$k(T)AT''(x) + Ak'(T)(T'(x))^2 + \frac{F\rho(T)}{A} = 0 \quad (14)$$

公式(14)结合公式(10)~(12)得到了热电臂内温度 T 关于 x 的分布关系。

文中根据第一类边界条件冷热端温度值，由公式(14)先获得温度 T 和温度变化率 T' 关于 x 的数值解；再通过热电臂冷端边界制冷量的微分表达式：

$$q_c = \alpha_c IT_c - k_c AT' |_{x=0} \quad (15)$$

求得制冷量并绘制性能曲线图。热平衡法的数学模型考虑了热电臂内温度分布对热电模块物性参数和制冷性能的影响。因此，所得结果可视为校核目标的准确值。

2 结果及分析

文中以ferrotec 公司的 T20005/127/060B 型号热电模块为研究对象，表 1 为厂商提供的该型号热电模块性能数据单，则由公式(1)~(3)得到一组常物性热电参数如表 2 所示；表 3 为该型号热电模块不同温度下的热电参数值^[10]，拟合结果见公式(16)~(18)。

表 1 热电模块 T20005/127/060B 数据单

Tab.1 Datasheet of T20005/127/060B TEM

TEM	T20005/127/060B
N	127
L/mm	1.7
A/mm^2	2.45
T_H/K	323.15
$\Delta T_{\text{max}}/\text{K}$	76
I_{max}/A	6
U_{max}/V	17.5
Q_{Cmax}/W	57

表 2 根据数据单估算的常物性热电参数值

Tab.2 Constant module parameters derived from TEM datasheet

$S_0/\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$	R_0/Ω	$K_0/\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$
0.054 1	2.230 8	0.528 4

表 3 不同温度下的热电参数值

Tab.3 Real module parameters at different temperatures

T/K	$S/\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$	R/Ω	$K/\text{W} \cdot \text{K}^{-1}$
233.2	0.044 8	1.688 8	0.516 8
243.2	0.046 3	1.785 6	0.507 3
253.2	0.047 73	1.889 4	0.500 2
263.2	0.049 08	1.999 3	0.496 1
273.2	0.050 34	2.114 2	0.495 6
283.2	0.051 5	2.233 2	0.499 2
293.2	0.052 53	2.355 3	0.507 4
303.2	0.053 43	2.479 6	0.520 4
313.2	0.054 18	2.605	0.538 4
323.2	0.054 77	2.730 7	0.561 7
333.2	0.055 19	2.855 6	0.590 3

热电器件的性能数据一般需要对应于特定的散热器基础温度，大多数性能图表是以散热器热端温度 $T_H=323.15 \text{ K}$ 为标准的。采用三种数学模型获得的制冷性能曲线如图 1 所示。

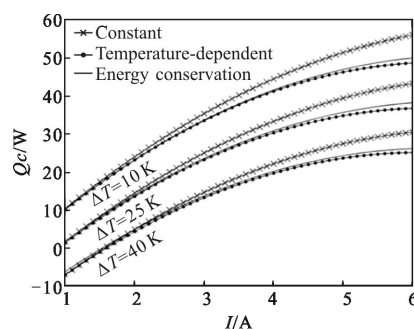


图 1 不同制冷温差工况制冷量随工作电流 I 的变化

Fig.1 Plot of QC versus I under different ΔT

由图 1 可知，对比热平衡法，变物性和常物性方法的误差随电流或温差的增大而增大，且获取热电参数的变物性方法较常物性方法的误差小，尤其是常物性方法的误差随电流增大而显著增大，其在最大工作电流处时误差可达 6 W。其误差主要来源于以下 3 个方面：(1) 由于数据单数据由厂商实验测

得, 测量误差会使依据该数据推导出的热电参数值较真实值有所偏差;(2) 对常物性方法由于厂商数据单提供的是最大工作电流下取得最大制冷温差时的数据, 所以即使测量足够准确, 根据该数据单获取的常物性热电参数值也较日常制冷工况下的热电参数值有较大偏差, 这是因为热电材料的热物性随温度变化明显, 从表 3 可以看出当温度由 273.2 K 升高到 323.2 K 时, 赛贝克系数 S 增加了约 8.8%, 电阻 R 增加了约 29.2%, 热导 K 增加了约 13.3%。(3) 热电材料的热物性的非线性分布, 这是因为热电臂的温度分布是非线性的, 如图 2 所示, 在大的电流工况范围内, 模块内部温度分布变化显著。

$$S = 2.405 \times 10^{-2} T - 9.849 \times 10^{-5} T + 1.355 \times 10^{-6} T - 2.279 \times 10^{-9} T \quad (16)$$

$$R = 3.737 T - 3.565 \times 10^{-3} T + 1.529 \times 10^{-4} T - 1.616 \times 10^{-7} T \quad (17)$$

$$K = 0.691 T - 2.958 \times 10^{-3} T - 3.011 \times 10^{-5} T + 6.101 \times 10^{-8} T \quad (18)$$

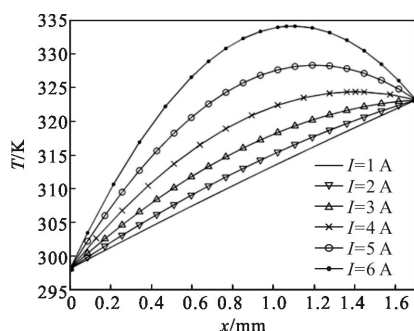
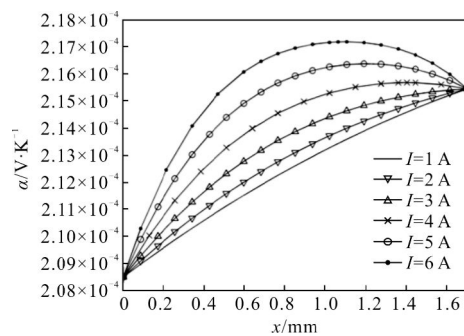


图 2 $\Delta T=25$ K 时不同电流工况下热电臂内温度分布

Fig.2 Temperature distribution along the TE element under different I at $\Delta T=25$ K

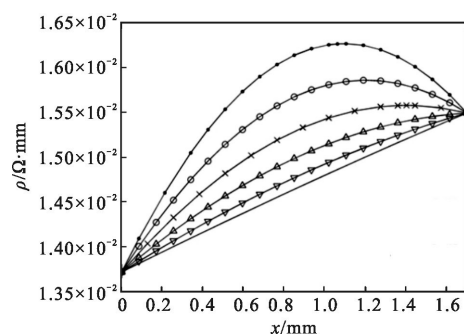
因此, 通过分析热物性参数随电流变化, 可准确对比获取热物性参数方法的精度, 如图 3(a)~(c)所示。图 3(a)~(c)表明热物性参数 α 、 ρ 和 k 在不同输入电流下随热电臂的变化, 其与图 2 中的温度分布正相关, 即在小电流工况下(1~3 A)均可看作线性分布, 而在大电流工况下(4~6 A)均成非线性分布。同时说明通过热平衡方法获得的热物性参数是准确的。

针对造成常物性获取方法的误差, 能够通过有关措施减小。即可将 $\Delta T=25$ K, $I=3$ A 时依据 T 关于 x 的分布算得的有效热电参数值当作测得的一组常物性参数值, 通过修正后常物性参数法以及数据单常物性参数法、变物性参数法、热平衡法获得的制冷量随制冷温差的变化, 如图 4 所示。



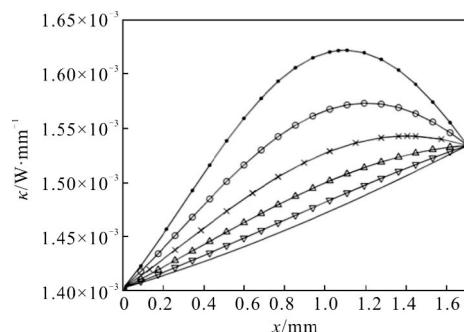
(a) 温差电动势率 α

(a) Coefficient of seebeck α



(b) 电阻率 ρ

(b) Coefficient of resistivity ρ



(c) 热导率 k

(c) Coefficient of thermal conductivity k

图 3 $\Delta T=25$ K 时不同电流工况下热电臂内热电参数值分布

Fig.3 Distributions of thermophysical values along the TE element under different I at $\Delta T=25$ K

图 4 表明采用变物性参数法计算制冷性能时的最大误差随制冷温差增大变化不明显, 最大误差在最大电流处取得约为 1.5 W; 且对比图 1 可知, 常物性参数误差较大是因为数据单中的数据均是在最大温差工况下获得的。由图 4 可知, 修正后的常物性参数法虽然不如变物性参数法的精度高, 但也有了较大的提高, 其最大误差仅为原方法的 1/5~1/2。这表明常物性参数法尽管忽略了材料热电参数与温度有关的

特性,但其用于分析热电制冷性能时可以达到较高的精度;而当厂商提供不同工况下的多组性能数据单时,合理地选择一组能够有效提高分析精度。

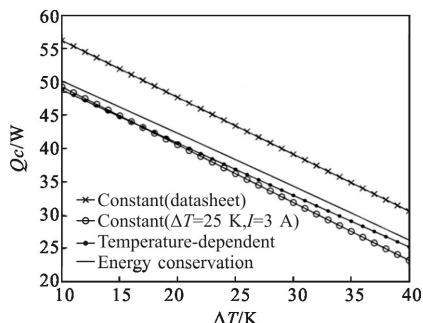


图 4 $I=6\text{ A}$ 时制冷量随制冷温差的变化
Fig.4 Plot of Q_C versus ΔT at $I=6\text{ A}$

表 4 为根据 T 关于 x 的数值解所求得的有效热电参数值 $S_{\text{eff},1}, R_{\text{eff},1}, K_{\text{eff},1}$ 和变物性参数法 (忽略实际温度分布规律)求得的有效热电参数值 $S_{\text{eff},2}, R_{\text{eff},2}, K_{\text{eff},2}$ 。变物性参数获取方法的结果仅仅和冷热端温度平均值有关,因此当冷热端温度确定时它们为定值;随着电流增大,与常物性参数法一样,变物性参数法获取物性参数的精度也随之变化。从表 4 中的误差分析结果可以看出,该方法在获取热电参数塞贝克系数 S 、电阻 R 和热导 K 时的最大误差分别为 1.35%、6.43% 和 6.31%,其最大误差在可接受范围内,其它制冷温差工况类似;说明应用变物性参数法获取热电参数精度较高,也符合图 1 中变物性参数法和热平衡法性能图基本吻合的直观结果。

表 4 $\Delta T=25\text{ K}$ 时不同电流工况下有效热电参数值及误差

Tab.4 Effective module parameters and errors under different I at $\Delta T=25\text{ K}$

I/A	$S_{\text{eff},1}/\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$	$S_{\text{eff},2}/\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$	η_S	$R_{\text{eff},1}/\Omega$	$R_{\text{eff},2}/\Omega$	η_R	$K_{\text{eff},1}/\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$	$K_{\text{eff},2}/\text{W}\cdot\text{K}^{-1}$	η_K
1	0.053 94		0.04%	2.578 0		-0.17%	0.535 5		-0.41%
2	0.054 02		-0.10%	2.592 2		-0.71%	0.537 7		-0.83%
3	0.054 15		-0.33%	2.615 8		-1.61%	0.541 7		-1.55%
4	0.054 31	0.053 97	-0.62%	2.648 8	2.5738	-2.83%	0.547 6	0.5333	-2.61%
5	0.054 49		-0.96%	2.691 1		-4.36%	0.555 9		-4.08%
6	0.054 71		-1.35%	2.750 8		-6.43%	0.569 2		-6.31%

Note:1-integrated averaged parameters with temperature distribution.2-temperature dependent parameters with Eqs.(5)-(8).

3 结论

综上所述,可以得出以下结论:

(1) 根据电臂热平衡微分方程式(14)和制冷量微分表达式(15)可以绘制标准的热电器件性能曲线图。其不但考虑热电臂实际温度分布对计算制冷量的影响,而且符合绘制热电制冷性能图的边界条件设置习惯。

(2) 基于 T20007/127/060B 型号模块和厂商提供的数据单,利用常物性获取方法计算制冷量时的误差随电流增大而迅速增大,最大可达 6 W;但通过

合理地获取一组常物性参数值可以使分析制冷性能的精度提高很多。

(3) 针对同一型号模块,基于经验公式取冷热端温度平均值为特征温度的热物性参数获取方法计算制冷量的最大误差约为 1.5 W;虽然该热电参数获取方法忽略了热电臂温度实际分布规律,但用于获取热电参数值和分析热电器件制冷性能时仍较为可靠。

参考文献:

[1] Li Jiangan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, et al. High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749. (in Chinese)

- 李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [2] Jiang Shichen, Hu Bingting, Fu Xin, et al. Experiment on thermoelectric coolers' performance using for heat dissipation of satellite CCDs[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 123-128. (in Chinese)
- 江世臣, 胡炳亭, 付鑫, 等. 某星载 CCD 器件散热用热电制冷器的性能试验 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(1): 123-128.
- [3] Dai Weihang, Dai Yanjun, Zhang Peng, et al. Measurement for the characteristic parameters and selection of thermoelectric cooling modules [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2004, 38(10):1669-1672. (in Chinese)
- 戴维涵, 代彦军, 张鹏, 等. 半导体制冷元件特性参数测量及选用[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(10): 1669-1672.
- [4] Hejtmánek J, Kní06ek K, švejda V, et al. Test system for thermoelectric modules and Materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(10):3726-3732.
- [5] Mahajan S B. A test setup for characterizing high-temperature thermoelectric modules [D]. Rochester; Rochester Institute of Technology, 2013.
- [6] Luo Z. A simple method to estimate the physical characteristics of a thermoelectric cooler from vendor datasheets[J]. *Electronics Cooling*, 2008, 14(3): 22-27.
- [7] Ahiska R, Ahiska K. New method for investigation of parameters of real thermoelectric modules [J]. *Energy Conversion & Management*, 2010, 51(2): 338-345.
- [8] Authors U. Analysis of thermoelectric coolers by a spice-compatible equivalent-circuit model [J]. *IEEE Power Electronics Letters*, 2005, 3(2): 63-66.
- [9] McCarty R. A comparison between numerical and simplified thermoelectric cooler models [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(9): 1842-1847.
- [10] Ferrotec (CN) Corporation. Thermoelectric Technology Guide [EB/OL]. <http://www.ferrotec.com.cn/technology/index?id=004003>, 2015-03-10.