材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021072101

热管式半导体热电冷水机参数影响分析与性能优化

孟凡凯*，陈赵军，徐辰欣

（海军工程大学 动力工程学院，武汉 430033）

摘　要： 利用热管具有高效的导热能力，而半导体制冷具有无噪音、环保、制冷迅速等独特的优点，提出了一种基于热管散热的半导体热电冷水机结构。基于有限时间热力学理论，考虑包括汤姆逊效应在内的各种内部效应，建立了详细的计算模型。分析了关键运行参数和设计参数对装置最优电流和最优性能的影响，并给出了协调最大制冷率和最大制冷系数的最优参数区间。优化结果表明：当温差为 20 K、电流为 2.5 A 时，最大制冷率和最大制冷系数分别可达 29.49 W 和 1.47，相比于优化前，分别提升了 55.3％和 47.0％。

关键词： 热管；热电冷水机；有限时间热力学；最优电流；制冷率；制冷系数

中图分类号： TB66　**文章编号：** 1001－5868(2021)05－0704－06

Analysis on Parameters and Performance Optimization of Heat Pipe-Cooled Thermoelectric Water-Chiller

MENG Fankai, CHEN Zhaojun, XU Chenxin

(College of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, CHN)

Abstract: For the high-efficiency thermal conductivity of heat pipes and the unique advantages of thermoelectric cooling, such as noiselessness, environmental protection, and rapid cooling, a new structure of heat pipe-cooled thermoelectric water-chiller is proposed. Based on the finite-time thermodynamics theory and considering various thermoelectric effects including the Thomson effect, a detailed calculation model is established. The influence of key operating parameters and design parameters on the optimal current and optimal performance of the device is analyzed. And the optimal interval of the input current and the optimal interval for coordinating the maximum cooling load and the maximum coefficient of performance (COP) are given. The optimization results show that when the temperature difference is 20 K and the current is 2.5 A, the maximum cooling load and maximum COP are improved by 55.3％ and 47.0％ after optimization, reaching 29.49 W and 1.47, respectively.

Key words: heat pipe; thermoelectric chiller; finite-time thermodynamics; optimal current; cooling load; COP

0　引言

半导体制冷，又称热电制冷，是基于半导体热电材料的 Peltier 效应直接将电能转化为温度梯度的固态主动式环保制冷技术。虽然 1843 年科学家已经发现将电势差直接转换为温度梯度的现象，但是受限于半导体材料的发展，半导体热电装置在 20 世纪 60 年代以后才开始商业化。近年来随着半导体材料制冷性能的提升，半导体制冷越来越广泛应用于家电冰箱、家用空调、电子设备、膜蒸馏技术、医疗设备、人体热防护、军事等领域。

收稿日期：2021－07－21.

基金项目：国家自然科学基金项目(11974429)；国防科技基础加强计划领域基金项目(2101070).

* **通信作者：**孟凡凯

目前关于半导体制冷的研究主要致力于研发高优值系数的半导体热电材料和优化半导体热电装置的结构[1]。在不断提升材料优值系数的同时，从热力学方面优化半导体制冷器结构、热端散热方式、热电单元结构和工作参数具有重要意义[2]。半导体制冷在研究方法上主要分为基于非平衡热力学研究和基于有限时间热力学研究[3]。前者在研究过程中假设热源温度等于热电偶端点温度，不考虑外部换热器的影响，故所得结论具有一定的局限性。近年来许多学者基于有限时间热力学理论对半导体热电制冷装置进行了分析与优化[4-6]，该理论为实际热力系统的优化提供了新的出发点。

常见的半导体制冷器热端散热方式主要是自然空冷、强迫空冷和水冷。空冷方式存在散热效率不高；水冷方式存在水箱易泄露、体积大等缺点，亟需一种散热效率高且体积小的散热方式。近年来热管因高效的导热性、良好的等温性、体积小、安装方便等优点而备受关注[7-8]。热管是一种利用液体工质相变进行热量传递的换热元器件，它可以通过很小的截面面积将大量的热量远距离传输而无需外加功力[9]。已有研究表明，将热管散热器用于热电制冷器热端散热能够提升装置的制冷性能[10]。

本文建立基于热管散热的（简称热管式，下文同）半导体热电冷水机有限时间热力学模型，用数值模拟的方法进行性能分析与优化，所得结果可为实际热管式半导体热电冷水机的优化和应用提供理论参考与指导。

1　装置模型与基本关系

热管式半导体热电冷水机装置结构如图 1 所示，装置热端采用热管散热器与风扇组合形式，冷端采用水冷板换热器。

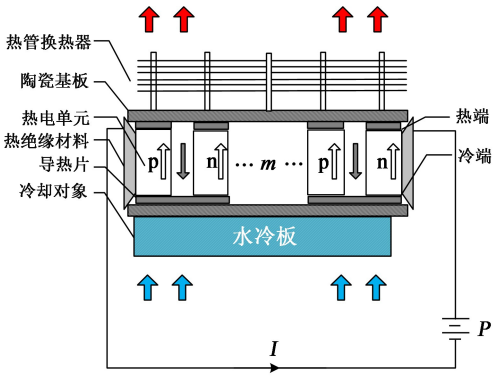


图 1　热管式热电冷水机装置示意图

根据非平衡热力学理论，考虑汤姆逊效应的影响，热电制冷器热端和冷端的热流率分别为

$$Q_{\mathrm{H}}=m[\alpha I T_{\mathrm{h}}-K(T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{c}})+0.5I^{2}R-0.5\mu I(T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{c}})] \tag{1}$$

$$Q_{\mathrm{L}}=m[\alpha I T_{\mathrm{c}}-K(T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{c}})-0.5I^{2}R+0.5\mu I(T_{\mathrm{h}}-T_{\mathrm{c}})] \tag{2}$$

式中，m，α，K，R，μ 和 I 分别为热电单元总对数、总塞贝克系数、总热导、总汤姆逊系数和工作电流，T_{h} 和 T_{c} 分别为热电偶热端和冷端温度。

热端放热率 Q_1 和冷端制冷率 Q_2 可分别表示为

$$Q_1=\frac{T_{\mathrm{h}}-T_1}{R_{\mathrm{h}}} \tag{3}$$

$$Q_2=\frac{T_2-T_{\mathrm{c}}}{R_{\mathrm{c}}} \tag{4}$$

式中，T_1 为高温热源温度，T_2 为低温热源温度，R_{h} 和 R_{c} 分别为热端和冷端的传热热阻。

由能量守恒方程式可得

$$Q_{\mathrm{H}}=Q_1 \tag{5}$$

$$Q_{\mathrm{L}}=Q_2 \tag{6}$$

联立式(1)～(6)，得到热电制冷器热、冷端温度分别为

$$T_{\mathrm{h}}=\frac{2T_1+mR_2T_1(2K+2\alpha I-\mu I)+mR_1[I^{2}R+mI^{2}RR_2(2K+\alpha I)+(2K+\mu I)T_2]}{2+mR_2(2K+2\alpha I-\mu I)+mR_1[2K-2\alpha I+\mu I+2mI^{2}\alpha R_2(\mu-\alpha)]} \tag{7}$$

$$T_{\mathrm{c}}=\frac{2T_2+mR_1T_2(2K-2\alpha I+\mu I)+mR_2[I^{2}R+mI^{2}RR_1(2K-\alpha I)+(2K-\mu I)T_1]}{2+mR_2(2K+2\alpha I-\mu I)+mR_1[2K-2\alpha I+\mu I+2mI^{2}\alpha R_2(\mu-\alpha)]} \tag{8}$$

热电制冷器的输入功率 P 和制冷系数 ε 分别为

$$P=Q_1-Q_2 \tag{9}$$

$$\varepsilon=Q_2/P \tag{10}$$

联立式(3)～(4)和(7)～(10)，在热源温度和换热条件给定的情况下就可对热电制冷器进行计算分析。

2　热管结构与原理

热管沿径向方向依次为管壳、管芯（或称吸液芯）和蒸汽腔。沿轴向方向，根据功能的不同，热管又可分为蒸发段（蒸发器）、绝热段和冷凝段（冷凝器）三部分，结构如图 2 所示。热管工作的主要原理是：蒸发段液态工质受热蒸发变为蒸汽，然后在压力

差的作用下从蒸发段流向冷凝段。由于受到冷却，蒸汽又凝结成液体释放出热量，在多孔材料吸液芯毛细附着力的作用下液体又流回蒸发段，如此循环往复，热量从蒸发段传送至冷凝段。本文采用普通常温铜水热管，即管壳材料为无氧铜，工质为水，吸液芯材料为 200 目的紫铜丝网。

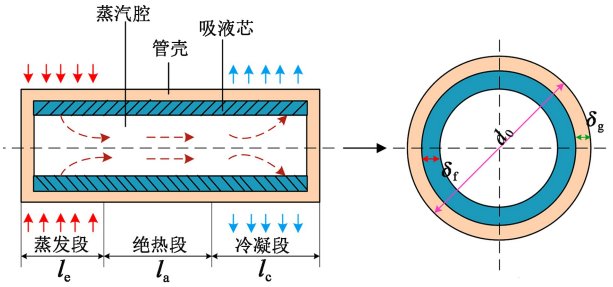


图 2 热管结构示意图

3 热阻分析

冷端和热端热阻均可分为 4 部分：陶瓷基板导热热阻 R_{cp}、接触热阻 R_c、换热器基板热阻 R_{ex} 和换热器对流传热热阻 R_{cv}。装置的一维传热热阻网络如图 3 所示，每一部分热阻具体计算方法如下：

$$R_{cp}=\frac{\delta_{cp}}{A_{cp}\lambda_{cp}} \tag{11}$$

$$R_c=\frac{\delta_c}{A_c\lambda_c} \tag{12}$$

$$R_{ex}=\frac{\delta_{ex}}{A_{ex}\lambda_{ex}} \tag{13}$$

式中，A_{cp}，δ_{cp} 和 λ_{cp} 分别为陶瓷基板面积、厚度和热导率，A_c，δ_c 和 λ_c 分别为接触面积、导热硅脂厚度和热导率，A_{ex}，δ_{ex} 和 λ_{ex} 分别为换热器基板面积、厚度和导热率。

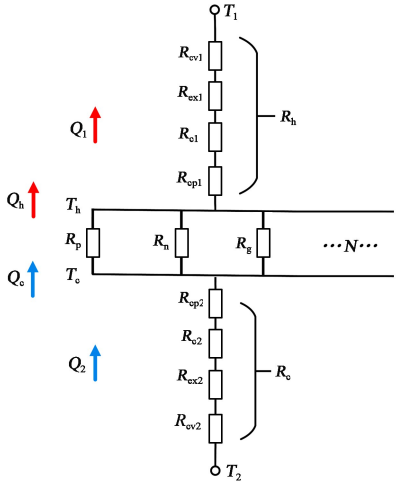


图 3 热电制冷器一维热阻网络

忽略热管的辐射传热热阻与热管蒸发段的对流传热热阻，热管换热器对流传热热阻 R_{cv1} 主要由蒸发段到冷凝段之间的 10 部分热阻组成，热管等效热阻一维网络图如图 4 所示[11]。热管等效热阻为

$$R_{cv1}=\frac{\left[R_1+R_9\sum_2^6 R_n/\left(R_9+\sum_2^6 R_n\right)+R_7\right]R_8}{R_1+R_9\sum_2^6 R_n/\left(R_9+\sum_2^6 R_n\right)+R_7+R_8}+R_{10} \tag{14}$$

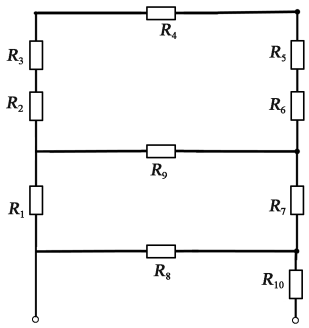


图 4 热管等效传热热阻网络

各部分热阻计算方法如下[11]：

$$R_1=\frac{1}{2\pi\lambda_g l_e}\ln\left(\frac{d_0}{d_0-2\delta_g}\right) \tag{15}$$

$$R_2=\frac{1}{2\pi\lambda_f l_e}\ln\left(\frac{d_0-2\delta_g}{d_0-2\delta_g-2\delta_f}\right) \tag{16}$$

$$R_3=\frac{R_0T_v^2\sqrt{2\pi R_0T_v}}{P_v\gamma^2\pi l_e(d_0-2\delta_g-2\delta_f)} \tag{17}$$

$$R_4=\frac{R_0T_v^2\Delta P_v}{QP_v\gamma} \tag{18}$$

$$R_8=\frac{4l}{\lambda_g\pi[d_0^2-(d_0-2\delta_g)^2]} \tag{19}$$

式中，d_0 和 d_1 分别为热管外径和内径，l_e，l_c 和 l 分别为蒸发段、冷凝段和热管长度，δ_g 和 δ_f 分别为管壁和吸液芯厚度，λ_g 和 λ_f 分别为管壁和吸液芯材料的导热系数，γ，R_0，T_v，P_v，Q 和 ΔP_v 分别为工质汽化潜热、气体常数、蒸汽温度、蒸汽饱和压力、传热量和热管内蒸汽相总压降。

R_5，R_6 和 R_7 分别与 R_3，R_2 和 R_1 表达式相同，计算时只需将 l_e 换成 l_c 即可。R_9 和 R_8 表达式相同，计算时只需将 λ_g 换成 λ_f 即可。

$$R_{10}=\frac{1}{A_{eff1}h_1\beta\eta_f} \tag{20}$$

式中，h_1，β 和 η_f 分别为管外放热系数、肋化系数和肋效率。

有效散热面积 A_{eff1} 计算公式为

$$A_{\mathrm{eff1}}=2N\left[L_{\mathrm{f1}}H_1-n\pi\left(\frac{d_0}{2}\right)^2\right] \tag{21}$$

式中，N，L_{f1}，H_1 分别为肋片数、肋长、肋高，n 为热管根数。

有效换热系数计算中采用如下经验方程[12]：

$$\mathrm{Nuf}=0.134\mathrm{Re}^{0.681}\mathrm{Pr}^{0.33}\left(\frac{d_{\mathrm{s}}}{H_1}\right)^{0.2}\left(\frac{d_{\mathrm{s}}}{\delta_1}\right)^{0.1134} \tag{22}$$

$$\mathrm{Nuf}=\frac{h_1 d_0}{k_{\mathrm{f}}} \tag{23}$$

$$h_{\mathrm{eff1}}=\frac{A_1+\eta_{\mathrm{f}}A_2}{A}\cdot h_1 \tag{24}$$

式中，Nuf，Re，Pr，δ_1，d_{s} 和 k_{f} 分别为努塞尔数、雷诺数、普朗特数、肋厚、肋片间距和肋片导热系数，A_1，A_2 和 A 分别为无肋部分面积、肋片表面积和裸管表面积。

水冷板对流换热热阻 R_{cv2} 计算方法如下：

$$R_{\mathrm{cv2}}=\frac{1}{A_{\mathrm{eff2}}h_{\mathrm{eff2}}} \tag{25}$$

$$h_{\mathrm{eff2}}=0.023\frac{\lambda_{\mathrm{w}}}{d_2}\mathrm{Re}_{\mathrm{f}}^{0.8}\mathrm{Pr}_{\mathrm{f}}^{0.4} \tag{26}$$

$$\mathrm{Re}_{\mathrm{f}}=\frac{ud_2}{\nu_{\mathrm{f}}} \tag{27}$$

式中，d_2，u，λ_{w} 和 ν_{f} 分别为管道直径、流体流速、水导热系数和运动粘度。

4　影响参数分析

假设 n 型和 p 型材料具有相同的物性参数和几何尺寸，采用热电材料碲化铋（Bi_2Te_3），计算中，取热电单元数 $m=127$ 对，热电单元长度 $A=1.96\ \mathrm{mm}^2$，热电单元长度 $L=2$ mm，高低温热源温度分别为 $T_1=300$ K，$T_2=280$ K。

4.1　输入电流的影响

图 5 给出了制冷率 Q_2 和制冷系数 ε 与电流 I 和制冷温差 ΔT 的关系。由图可知，当装置定电流工作时，随着 ΔT 的增大，Q_2 和 ε 均减小。在 ΔT 一定时，随着电流 I 的增大，Q_2 和 ε 均先增大后减小，分别存在最佳的工作电流对应最大制冷率 $Q_{2,\max}$ 和最大制冷系数 $\varepsilon_{\max}$。这为优化装置电流提供了理论依据。

图 6 给出了当温差为 20 K 时，热管式和水冷式热电冷水机制冷性能对比。其中水冷式热端与冷端采用完全相同的水冷板换热器。由图可知，在相同工况下热管式制冷器制冷性能略低于水冷式。热管式最大制冷率和最大制冷系数分别为 29.45 W 和 1.47，水冷式最大制冷率和最大制冷系数分别为 31.53 W 和 1.52，分别只提升了 7.06% 和 3.40%。一方面水冷式相比于热管式制冷性能有所提升，但制冷效率提升不明显，另一方面水冷式制冷器需要安装水箱及管路，空间体积大且水箱容易泄露，水泵工作时噪音大，而热管体积小、布置方便，特别适用于潜艇等密闭狭小空间。综上，热管式较水冷式是更佳的散热方式。

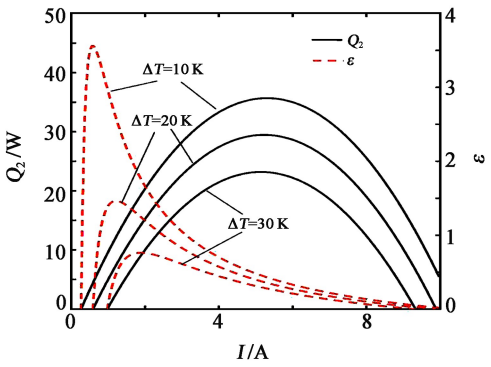


图 5　制冷率和制冷系数与电流和制冷温差的关系

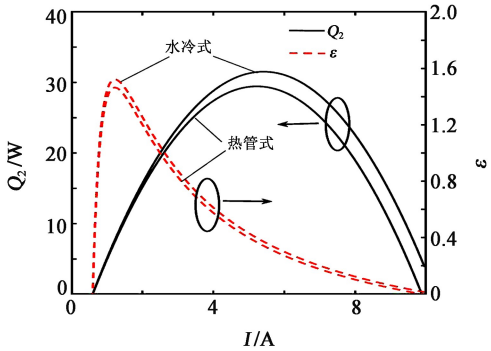


图 6　热管式与水冷式热电冷水机性能对比

4.2　热管结构参数的影响

管芯毛细结构作为热管的核心，其结构和尺寸直接决定热管的散热性能。图 7 和 8 分别给出了 $I=2.5$ A 时制冷率和制冷系数与管芯厚度和冷凝段长度的关系。由图可知，随着管芯厚度的增大，制冷率和制冷系数均减小。这是因为当热管外径和管壳厚度一定时，管芯厚度增大会导致蒸汽腔体积变小，导热流体流动受阻，传热恶化，使得热量不能及时有效地从蒸发段传向冷凝段，所以管芯厚度不宜超过 1 mm。随着冷凝段长度的增大，制冷率和制冷系数均增大。这是因为当热管总长度一定时，冷凝段长度增加能够增大散热面积，使热量很快地从热管冷凝段散发到空气中。但是随着冷凝段增大到

一定值，继续增大冷凝段长度，制冷率和制冷系数的增幅很小。所以从协调经济性和制冷性能综合考虑，本算例中冷凝段长度不宜超过 100 mm。

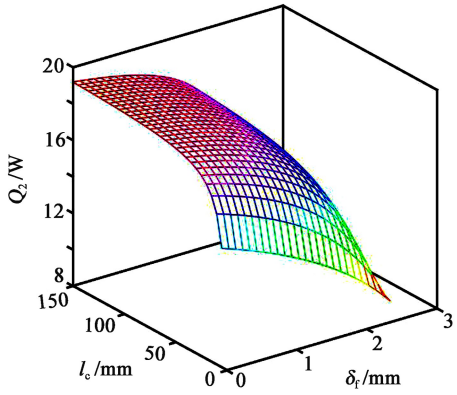


图 7 制冷率与管芯厚度和冷凝段长度的关系

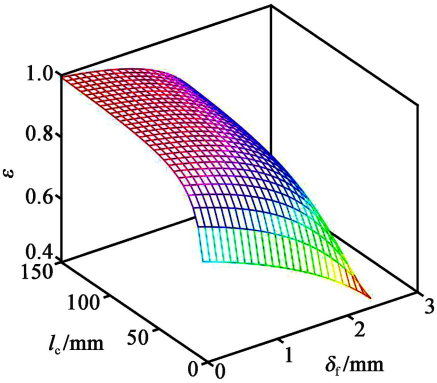


图 8 制冷系数与管芯厚度和冷凝段长度的关系

5 性能优化

5.1 热电单元几何参数对最优性能的影响

图 9 和 10 分别给出了热电单元横截面积对最优电流区间和优化前后制冷性能的影响，优化前 Q_2 和 ε 为 $I=2.5$ A 时的计算结果(下同)。图中 I^Q，I^ε，$Q_{2,\max}$ 和 $\varepsilon_{\max}$ 分别表示最大制冷率对应的最优

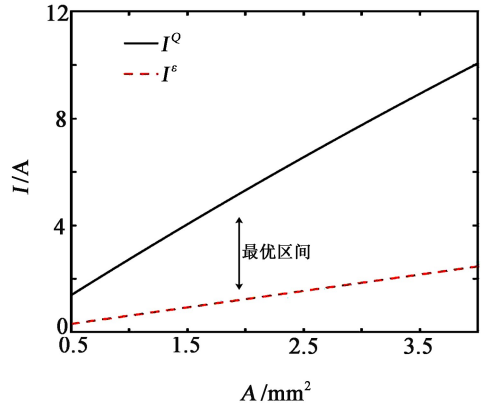


图 9 单元横截面积对最优电流区间的影响

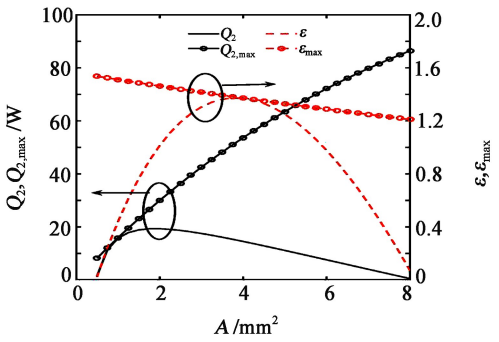


图 10 单元横截面积对优化前后制冷性能的影响

电流、最大制冷系数对应的最优电流、最大制冷率和最大制冷系数。实线和虚线分别表示与最大制冷率和最大制冷系数相对应的最优变量，两线之间的部分表示协调制冷率和制冷系数的最优电流区间(下同)。由图可知，随着横截面积增大，I^Q 和 I^ε 均增大，最优区间范围也增大；且优化前的 Q_2 先增大后减小，存在最大值，而优化后 $Q_{2,\max}$ 单调增大；优化前的 ε 先增大后减小，但与 Q_2 达到最大值时的位置不同，优化后 $\varepsilon_{\max}$ 单调减小。

图 11 和 12 分别给出了热电单元长度对最优电流区间和优化前后制冷性能的影响。由图可知，随着单元长度的增大，I^Q 和 I^ε 均减小，最优区间范围也减小。随单元长度的增大，优化前的 Q_2 先增大

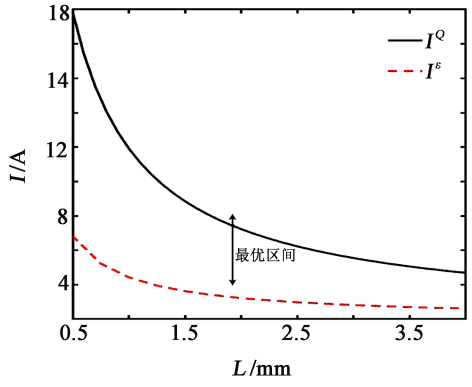


图 11 单元长度对最优电流区间的影响

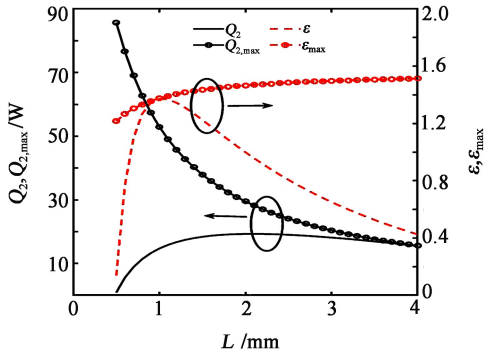


图 12 单元长度对优化前后制冷性能的影响

后减小，存在最大值，而优化后 $Q_{2,\max}$ 单调减小；优化前的 ε 先增大后减小，但与 Q_2 达到最大值时的位置不同，优化后 $\varepsilon_{\max}$ 单调增大。

5.2　制冷温差对最优性能的影响

图 13 和 14 分别给出了制冷温差对最优电流区间和优化前后制冷性能的影响。由图可知，随着制冷温差的增大，I^Q 单调减小，而 I^ε 单调增大，最优电流区间范围也减小。优化前后制冷率和制冷系数均随着制冷温差的增大而减小。当制冷温差 $\Delta T=20$ K 时，优化前的制冷率和制冷系数分别为 19.27 W 和 1.00，优化后的制冷率和制冷系数分别达到 29.93 W 和 1.47，分别提高了 55.3%和 47.0%。

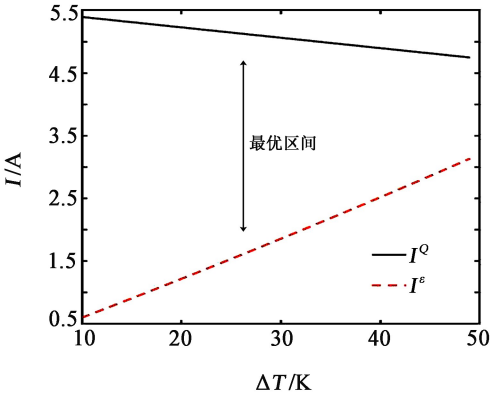


图 13　制冷温差对最优电流区间的影响

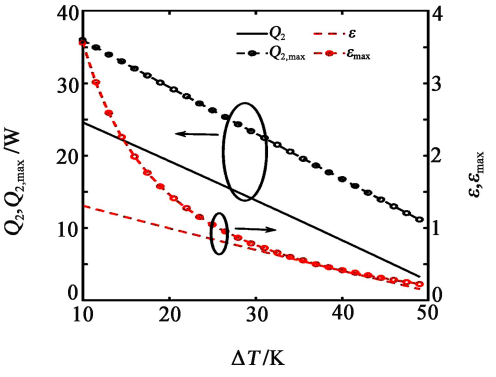


图 14　制冷温差对优化前后制冷性能的影响

6　结论

基于有限时间热力学理论，建立了一种热管式半导体热电冷水机热力学模型。分析了关键参数对最优电流和最优性能的影响，给出了最优参数区间。主要结论有：

(1)虽然水冷式制冷性能优于热管式，但性能提升不大，综合经济性等因素，热管式是更佳的散热方式。

(2)适当增大冷凝段长度能够提升热电制冷器的综合制冷性能，但从经济性和制冷能力综合考虑，冷凝段长度不宜超过 100 mm；管芯厚度增大，制冷性能迅速恶化，故为了保证较高的制冷能力管芯厚度不易超过 1 mm。

(3)通过优化电流，装置制冷率和制冷系数有较大提升。当 $\Delta T=20$ K，$I=2.5$ A 时，优化后的制冷率和制冷系数分别达到 29.93 W 和 1.47，较优化前分别提高了 55.3%和 47.0%。

参考文献：

[1] Li D, Gong Y, Chen Y, et al. Recent progress of two-dimensional thermoelectric materials[J]. Nano-Micro Lett., 2020, 12(3): 81-120.

[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 Lei, Gao Ming, Zhang Tao, et al. Thermoelectric cooling application and optimization: A review[J]. J. of Refrigeration, 2019, 40(6): 1-12.

[3] 陈林根，孟凡凯，戈延林，等. 半导体热电装置的热力学研究进展[J]. 机械工程学报，2013，49(24)：144-154.
Chen Lingen, Meng Fankai, Ge Yanlin, et al. Progress in thermodynamic studies for semiconductor thermoelectric devices [J]. J. of Mechanical Engineering, 2013, 49(24): 144-154.

[4] Meng F, Chen L, Sun F. Performance optimization for two-stage thermoelectric refrigerator system driven by two-stage thermoelectric generator[J]. Cryogenics, 2009, 49(2): 57-65.

[5] Chen L G, Meng F K, Xie Z H, et al. Thermodynamic modeling and analysis of an air-cooled small space thermoelectric cooler[J]. The European Physical J. Plus, 2020, 135(4): 603-610.

[6] 江　帆，孟凡凯，陈林根，等. 变温热源小型热电冷水机结构设计与性能分析[J]. 工程热物理学报，2020，41(7)：1573-1578.
Jiang Fan, Meng Fankai, Chen Lingen, et al. Structural design and performance analysis of a small thermoelectric chiller with variable temperature heat reservoirs [J]. J. of Engineering Thermophysics, 2020, 41(7): 1573-1578.

[7] 虞承浩，汪　锋. 加固笔记本电脑热设计分析及优化[J]. 计算机工程，2008，34(1)：75-76.
Yu Chenghao, Wang Feng. Analysis and optimization of rugged laptop computer's thermal design[J]. Computer Engin., 2008, 34(1): 75-76.

[8] 黄鸟林，罗武生，朱志军，等. 双源式热管空调系统传热性能实验研究与应用[J]. 传感器与微系统，2019，38(3)：157-160.
Huang Niaolin, Luo Wusheng, Zhu Zhijun, et al. Experimental study on heat transfer performance of dual-source heat pipe air conditioning system and application [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2019, 38(3): 157-160.

(下转第 715 页)

105(13)：2-5.

[7] 陈继超，刘正堂，冯丽萍，等. MoS_2 电子结构、振动和介电性质的第一性原理计算[J]. 稀有金属材料与工程，2015，44(1)：118-121.
Chen J C，Liu Z T，Feng L P，et al. First-principles study of electronic structure，vibrational and dielectric properties of MoS_2[J]. Rare Metal Materials and Engineering，2015，44(1)：118-121.

[8] 吴木生，徐　波，刘　刚，等. 应变对单层二硫化钼能带影响的第一性原理研究[J]. 物理学报，2012，61(22)：227102-1-227102-5.
Wu M S，Xu B，Liu G，et al. The effect of strain on band structure of single-layer MoS_2：an abinitio study[J]. Acta Physica Sinica，2012，61(22)：227102-1-227102-5.

[9] Perdew J P，Burke K，Ernzerhof M. Generalized gradient approximation made simple[J]. Phys. Rev. Lett.，1996，77(18)：3865-3868.

[10] Xue X X，Feng Y X，Chen K Q，et al. The vertical growth of MoS_2 layers at the initial stage of CVD from first-principles[J]. The J. of Chemical Physics，2018，148(13)：134704.

[11] Andrada E A，Sliva E，Rocca G C，et al. Spin-split subbands and magneto oscillations in Ⅲ-Ⅴ asymmetric heterostructures[J]. Phys. Rev. B，1994，50：8523.

[12] Junren S，Ping Z，Di X，et al. Proper definition of spin current in spin-orbit coupled systems[J]. Phys. Rev. Lett.，2006，96：076604.

[13] 危　阳，马新国，祝　林，等. 二硫化钼/石墨烯异质结的界面结合作用及其对带边电位影响的理论研究[J]. 物理学报，2017，66(8)：087101-1-087101-10.
Wei Y，Ma X G，Zhu L，et al. Interfacial cohesive interaction and band modulation of two-dimensional MoS_2/graphene heterostructure[J]. Acta Physica Sinica，2017，66(8)：087101-1-087101-10.

[14] 方容川. 固体光谱学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2001：14-15.
Fang R C. Solid State Spectroscopy[M]. Hefei：University of Science and Technology of China Press，2001：14-15.

[15] Hao L Z，Liu Y J，Gao W，et al. High hydrogen sensitivity of vertically standing layered MoS_2/Si heterojunctions[J]. J. of Alloys and Compounds，2016，682：29-34.

[16] Song I，Park C，Choi C H. Synthesis and properties of molybdenum disulfide：from bulk to atomic layers[J]. RSC Advances，2015，5：7495-7514.

[17] 翟英娇，李金华，楚学影，等. 纳米结构二硫化钼的制备及其应用[J]. 无机材料学报，2015，30(9)：897-905.
Zhai Y J，Li J H，Chu X Y，et al. Preparation and application of molybdenum disulfide nanostructures[J]. J. of Inorganic Materials，2015，30(9)：897-905.

[18] 田　野，何　俣，尚　静，等. 水热法合成 MoS_2 层状材料及其结构表征[J]. 化学学报，2004，62(18)：1807-1810.
Tian Y，He Y，Shang J，et al. Hydrothermal synthesis and characterization of laminar MoS_2[J]. Acta Chimica Sinica，2004，62(18)：1807-1810.

[19] Eda G，Yamaguchi H，Voiry D，et al. Photoluminescence from chemically exfoliated MoS_2[J]. Nano Lett.，2011，11：5111-5116.

[20] Dhakal K P，Duong D L，Lee J，et al. Confocal absorption spectral imaging of MoS_2：Optical transitions depending on the atomic thickness of intrinsic and chemically doped MoS_2[J]. Nanoscale，2014，6(21)：13028-13035.

作者简介：

王培羽(1996－)，男，山东省人，硕士生，主要研究方向为光电薄膜材料与成像器件；

王　新(1978－)，男，辽宁锦州人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为光电薄膜材料与成像器件。

(上接第 709 页)

[9] 魏智康，侯　燕，段彦军，等. 两种微型热管传热性能对比研究[J]. 半导体光电，2020，41(6)：860-864.
Wei Zhikang，Hou Yan，Duan Yanjun，et al. Comparative study on the heat transfer performance of two types of micro heat pipes[J]. 2020，41(6)：860-864.

[10] 刘　勇，潘洪涛，赵树弥，等. 用于微流控 PCR 的 TEC 温控系统结构优化设计[J]. 传感器与微系统，2013，32(9)：85-88.
Liu Yong，Pan Hongtao，Zhao Shumi，et al. Optimization design of structure of TEC temperature control system for microfluidic PCR [J]. Transducer and Microsystem Technologies，2013，32(9)：85-88.

[11] 王健石. 电子散热器技术手册[M]. 北京：中国电力出版社，2011.
Wang Jianshi. Technical Manual of Electronic Radiator[M]. Beijing：China Electric Power Press，2011.

[12] 邬佑靖，戴健行. 热管传热模型热阻的计算[J]. 节能技术，1983(2)：49-55.
Wu Youjing，Dai Jianxing. Calculation of thermal resistance of heat transfer model of heat pipe[J]. Energy Conservation Technol.，1983(2)：49-55.

作者简介：

孟凡凯(1982－)，男，山东济宁人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事热电制冷技术研究。