

## 基于 Peltier 效应的热学过程综合性研究实验装置

罗睿鹏 瞿盟津 陈佳丽 刘 伟 史庆藩

(北京理工大学物理实验中心, 北京 100081)

**摘 要** 当电流通过热电偶电路时, 在一个结放出热量, 在另一个结吸收热量, 这种效应称为 Peltier 效应, 是非平衡态热力学的重要知识点。本文设计制作了一种基于 Peltier 效应的热学过程综合性研究实验装置。利用该装置实验研究了工作电流对半导体制冷片冷热端温差的影响, 其结果与考虑了热传导、焦耳热效应和 Peltier 效应的传热模型相吻合; 实验研究了冷端及保温盒内温度随时间的变化规律; 重要的是利用 Peltier 效应在制冷过程中产生的大量热量同时开展了傅里叶热传导定律的研究。本实验装置相关实验项目应用于大学物理实验课程, 教学效果良好。

**关键词** 半导体制冷; 热电堆; 大学物理实验

## A COMPREHENSIVE EXPERIMENTAL DEVICE BASED ON PELTIER EFFECT FOR THE STUDY OF THERMAL PROCESSES

LUO Ruipeng QV Mengjin CHEN Jiali LIU Wei SHI Qingfan

(Center of Physics Experiments, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract** When the current passes through the thermocouple circuit, heat is released at one junction and absorbed at another junction. This effect is called Peltier effect, which is an important knowledge point of nonequilibrium thermodynamics. In this paper, a comprehensive experimental device for thermal process research based on Peltier effect is designed and manufactured. The effect of working current on the temperature difference between the cold and hot ends of semiconductor refrigeration sheets is experimentally studied by using the device. The result is consistent with the heat transfer model considering heat conduction, Joule heat effect and Peltier effect. The variation of temperature with time in the cold end and insulation box is studied experimentally. Especially, it is important to use the large amount of heat generated by Peltier effect in the refrigeration process to study the Fourier heat conduction law simultaneously. The related experimental items of the experimental device are applied to the college physics experiment course, and the teaching effect is good.

**Key words** semiconductor refrigeration; thermopile; university physics experiments

1834 年, 法国物理学家 Peltier 发现了电流通过两种不同导体的交界处的热效应, 这一效应称为 Peltier 效应, 可用于制冷和制热。由于半导体的 Peltier 效应较金属的 Peltier 效应更强, 以及半导体技术的不断提高, 半导体制冷技术迅速发展

起来。因半导体制冷与传统制冷相比有结构简单、噪声小等优点, 半导体制冷技术在国防、工业、农业、医疗、商业及日常生活等领域获得了广泛应用。Peltier 效应作为热力学流与力理论的一个应用示例, 出现在热力学与统计物理课程的非平衡

收稿日期: 2021-10-10; 修回日期: 2022-03-11

通讯作者: 刘伟, 高级实验师, 从事物理实验教学与研究, liuwe@bit.edu.cn; 史庆藩, 教授, 研究方向为颗粒物理学和大学生创新型拔尖人才培养方法, qfshi123@bit.edu.cn。

引文格式: 罗睿鹏, 瞿盟津, 陈佳丽, 等. 基于 Peltier 效应的热学过程综合性研究实验装置[J]. 物理与工程, 2022, 32(5): 117-120, 126.

Cite this article: LUO R P, QV M J, CHEN J L, et al. A comprehensive experimental device based on Peltier effect for the study of thermal processes[J]. Physics and Engineering, 2022, 32(5): 117-120, 126. (in Chinese)

态热力学部分,但描述较为简单抽象<sup>[1]</sup>。目前,关于 Peltier 效应的实验仪器多为制冷特性的演示<sup>[2-4]</sup>。本文设计制作了基于 Peltier 效应的热学过程综合性研究实验装置,既可以实验研究工作电流对半导体制冷片冷热端温差的影响,又可以实时观测冷端及保温盒内温度随时间的变化规律,更重要的是可以利用 Peltier 效应在制冷过程中产生的大量热量开展傅里叶热传导定律的研究。该装置的相关实验项目作为大学物理实验的课程内容,取得了良好的教学效果。

## 1 实验原理

半导体制冷也称为温差电制冷,基于 Peltier 效应来达成制冷目的。Peltier 效应是指当两种不同的半导体或者半导体与金属相接触并接通电流时,接触面处除产生焦耳热以外,还要吸热或放热。图 1(a) 是半导体制冷原理示意图,P 型半导体和 N 型半导体两端连接铜片形成通路。在外电场作用下,P 型半导体中的空穴从正极方向流向负极方向,在 *a* 处需要从铜片上吸收能量,空穴势

能提高,才可进入 P 型半导体,因此该点处温度降低形成制冷点;而在 *b* 点处的空穴进入铜片并释放能量,该点温度上升,形成放热点。相反,N 型半导体中的电子从负极流向正极,在 *c* 处电子吸收能量形成制冷点,而在 *d* 处电子释放能量形成放热点。实际使用中,半导体制冷片以多对热电偶串联的形式形成热电堆,能在其制冷面取得较好的制冷效果,同时在放热面会放出大量热。半导体制冷片串联方式如图 1(b) 所示。

## 2 实验系统

实验采用的制冷片的型号是 TEC1-12706,外形尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 3.8\text{mm}$ ,最大温差电流为  $6.0\text{A}$ ,最大温差电压为  $14.7\text{V}$ ,最大制冷功率为  $53.3\text{W}$ ,最大温差为  $67^\circ\text{C}$ 。制冷片的冷端在保温盒内,用导热硅胶将制冷片和风扇粘连,通过对流方式加快热交换速度。保温盒使用亚克力板材料,内表面贴有热反射膜,以减少外界和盒内发生的热交换。制冷片的热端通过导热硅胶和铝排连接,铝排的外形尺寸为  $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 85\text{mm}$ 。在铝排的两侧加有风扇散热器,当制冷片工作时可以加快热端散热速度,以提高制冷效果。

在整个实验过程中,直接测量的物理量主要是温度。实验采用的温度传感器是 PT100 温度传感器,通过 485 通讯可以将温度变量转换成可传送的标准化输出信号,在上位机管理软件上能够获得温度传感器任意时刻的温度数据并进行处理;或者将温度传感器接入无纸记录仪可以实时显示温度曲线。温度的测量位点有四个,分别是制冷片冷端、保温盒内部、铝排的近端和铝排的远端。

整个实验装置的框图和实物图分别如图 2、图 3 所示。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 半导体制冷片的冷热端温差特性研究

半导体制冷片制冷量主要决定于 Peltier 效应吸收的 Peltier 热,但在实际过程中,电偶臂除了会产生焦耳热以外,还由于冷热端温度差会引起热传导,必须综合考虑这些热过程<sup>[5]</sup>。先考察单个电偶臂的情况,在单位时间内,Peltier 效应产

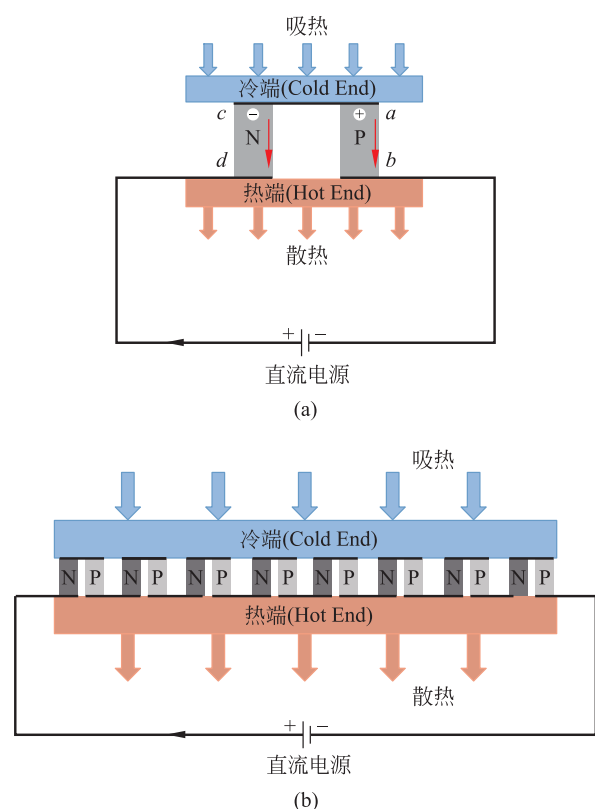


图 1 半导体制冷原理与制冷片串联方式

(a)半导体制冷原理示意图;(b)半导体制冷片串联方式

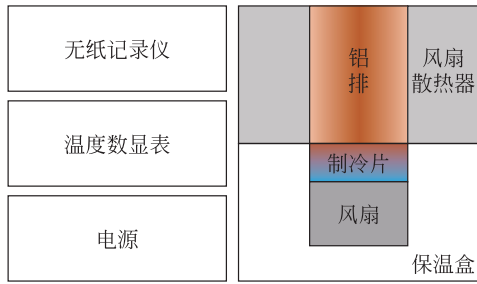


图2 实验装置框图

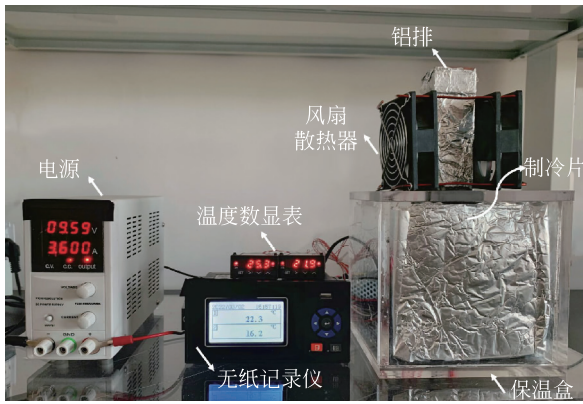


图3 实验装置实物图

生的制冷量为

$$Q_p = (\alpha_p - \alpha_N) T_L I \quad (1)$$

其中,  $\alpha_p$ 、 $\alpha_N$  分别为 P 型、N 型半导体电偶臂的 Seebeck 系数,  $I$  是半导体电偶臂的电流大小,  $T_L$  为冷端温度。单位时间内电偶臂产生的焦耳热为

$$Q_J = I^2 R \quad (2)$$

其中,  $R$  是一个电偶臂的电阻。单位时间从热端传给冷端的传导热量为

$$Q_C = K(T_H - T_L) = K\Delta T \quad (3)$$

其中,  $K$  为导热系数,  $T_H$ 、 $T_L$  分别为热、冷端的温度,  $\Delta T = T_H - T_L$  为冷热端的温差。

联合式(1)(2)(3), 并考虑焦耳热有一半流入冷端, 可以求得制冷片冷端单位时间的致冷量为

$$\begin{aligned} Q_L &= Q_p - \frac{1}{2}Q_J - Q_C \\ &= (\alpha_p - \alpha_N) T_L I - \frac{1}{2}I^2 R - K\Delta T \end{aligned} \quad (4)$$

当制冷量  $Q_L = 0$  时, 制冷片冷端将不再降温, 此时制冷片冷热端的温差为

$$\Delta T = \frac{(\alpha_p - \alpha_N) I T_L - \frac{1}{2}I^2 R}{K} \quad (5)$$

将式(5)对电流求偏导, 可得到最大温差对应的最佳工作电流为

$$I_Q = \frac{(\alpha_p - \alpha_N) T_L}{R} \quad (6)$$

对应的最大温差为

$$\Delta T_{\max} = \frac{(\alpha_p - \alpha_N)^2 T_L^2}{2KR} = \frac{1}{2}ZT_L^2 \quad (7)$$

其中,  $Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_N)^2}{KR}$  称为半导体电偶臂的优质系数, 用来衡量材料的制冷性能。

在实际的制冷片中, 通常将多对电偶串联以获得更好的制冷效果。设串联的电偶数量为  $N$ , 忽略导线电阻和铜片电阻, 则制冷片冷端单位时间的致冷量为

$$\begin{aligned} Q &= NQ_L = N \left( Q_p - \frac{1}{2}Q_J - Q_C \right) \\ &= N \left[ (\alpha_p - \alpha_N) T_L I - \frac{1}{2}I^2 R - K\Delta T \right] \end{aligned} \quad (8)$$

制冷片最大温差对应的最佳工作电流仍为式(6), 对应的最大系统温差仍为式(7)。

为探究冷热端温差与工作电流关系, 我们主要测定冷热端温差随工作电流的变化, 以及测量获取最佳工作电流。实验过程中, 冷热端温差的取值以制冷片冷端温度稳定时的温差为准, 此温差由制冷片冷热端的温度传感器数据而得。图4为冷热端温差与工作电流的关系。对实验数据进行二项式拟合, 得到  $\Delta T$  与  $I$  的关系曲线为

$$\Delta T = 16.51I - 2.32I^2 \quad (9)$$

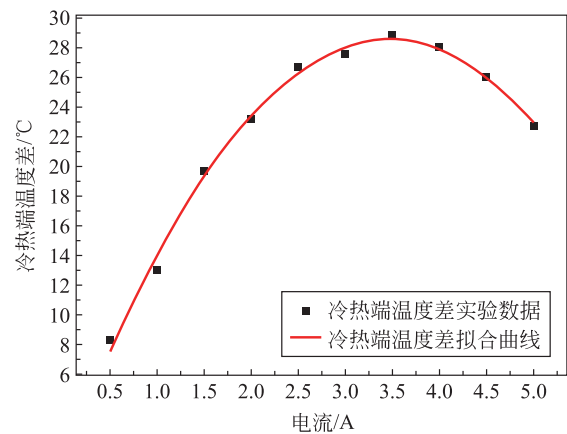


图4 冷热端温差与工作电流的关系

可以看出, 实验结果与理论拟合曲线比较吻合。取对称轴, 可得到最大温差对应的最佳工作电流为  $I_Q = 3.56A$ 。

### 3.2 半导体制冷片的制冷效果研究

半导体制冷片工作时在冷端吸收大量热来实现制冷。为研究冷端的制冷效果,探究了制冷片冷端温度和保温盒内温度的变化情况。制冷片的输入电压为 5V,电流为 3A,环境温度为 21.8℃。在此条件下,制冷片冷端温度和保温盒内的温度随时间变化的曲线如图 5 和图 6 所示。

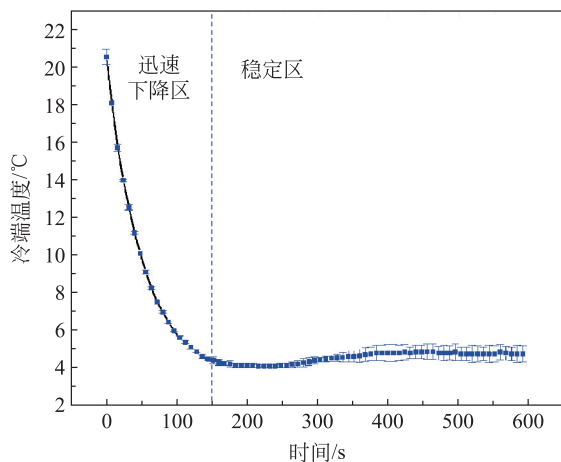


图 5 冷端温度随时间变化的曲线

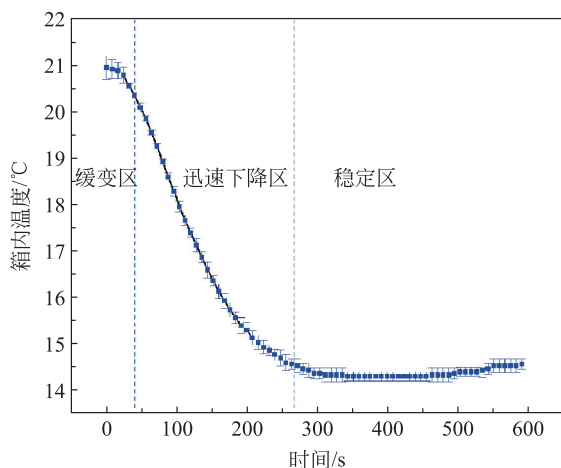


图 6 保温盒内温度随时间变化的曲线

从图 5 可以看出,冷端温度在前 150 秒内处于迅速下降阶段,150 秒至 280 秒温度较为平稳,经过这一小段平稳区后温度有一定回升。这是由于热端的温度在前期受冷端的影响大,在后期散热部分达到饱和状态,热端会传递一部分热量给冷端,导致冷端温度回升。

图 6 的结果表明,保温盒内的温度在前 30 秒几乎无变化,在 30 秒至 260 秒的时间段迅速下降后趋于稳定值。盒内温度刚开始下降缓慢的原因是冷端和盒内空气热交换速度较慢,下一阶段盒

内温度的迅速下降是跟随冷端温度的急剧下降导致,但由于对流和热传导的滞后性,盒内的温度变化也存在一定滞后,最后温度场达到均匀分布,盒内空气温度也稳定下来。

### 3.3 傅里叶热传导定律的实验研究

半导体制冷片工作时在热端放出大量热,可以利用这一热源研究傅里叶热传导定律。与制冷片热端直接相连的是匀质铝排,在铝排四周包裹一层隔热膜,使用体积较小的贴片式温度传感器放在铝排上下两个测量点上。制冷片热端产生的热量通过铝排向外传导,这一热传导过程可以用傅里叶热传导定律描述。

傅里叶定律指出热通量密度  $q$  正比于热导率  $\kappa$  乘以负的温度梯度  $\nabla T$ ,即

$$q = -\kappa \nabla T \quad (10)$$

对于通常的介质表面  $S$ ,可将热通量密度  $q$  在表面区域进行积分,得到通过表面  $S$  的热传导功率  $P$

$$P = \frac{\partial Q}{\partial t} = -\kappa \int_S \nabla T \cdot d\mathbf{A} \quad (11)$$

由于铝排已用隔热膜包裹,只考虑在一个方向有热传导,且温度场是稳恒分布的,热传导功率可表示为

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{-\kappa S (T_1 - T_2)}{h} \quad (12)$$

其中, $S$  为横截面积, $T_1$ 、 $T_2$  分别是热稳定时测量点的温度, $h$  为测量点间距。取数值  $\kappa = 237 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $S = 4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $h = 0.065 \text{ m}$ 。多次重复实验得到  $T_1 = 308.05 \text{ K}$ ,  $T_2 = 306.25 \text{ K}$ 。计算得热端传热功率为

$$P = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = 2.63 \text{ W} \quad (13)$$

## 4 结语

本文考察制冷片的综合热效应,在固定输入电压为 5V 时,通过测量不同工作电流下的冷热端温差并拟合,得到了最佳工作电流。在半导体制冷片工作时,其冷端温度和保温盒内温度经过快速下降达到稳定态,且存在一定滞后关系。最后,建立傅里叶传热方程计算出了热端的传热功率。综合来看,本实验装置具有独创性,是一套可以用于大学物理实验教学的综合研究实验装置,填补了当前物理实验教学的这部分空白。

(下转第 126 页)

- [J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3): 69-70, 75.  
ZHANG F Y, SUI H G, LING C C. Michelson interferometry for measuring refractive index of liquid[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(3): 69-70, 75. (in Chinese)
- [4] 母柏松, 马孟祺, 陈云琳. 利用迈克耳孙干涉仪测量透明体的折射率[J]. 物理与工程, 2015, 25(4): 51-53, 59.  
MU B S, MA M Q, CHEN Y L. Refractive index of transparency measured by Michelson interferometer[J]. Physics and Engineering, 2015, 25(4): 51-53, 59. (in Chinese)
- [5] 林春丹, 杨冠, 焦梦瑶, 等. 基于迈克耳孙干涉仪及劈尖测量透明液体折射率[J]. 物理实验, 2016, 36(8): 13-15.  
LIN C D, YANG G, JIAO M Y, et al. Measurement of transparent liquid refractive index based on Michelson interferometer and glass wedge[J]. Physics Experimentation, 2016, 36(8): 13-15. (in Chinese)
- [6] 李丽荣, 罗龙, 刘艳丽. 牛顿环装置的改进并测量液体折射率及现象讨论[J]. 实验技术与管理, 2015, 34(10): 97-99, 104.  
LI L R, LUO L, LIU Y L. Using improved Newton ring device to measure liquid refractive index and discussing its phenomena[J]. Experimental Technology and Management, 2015, 34(10): 97-99, 104. (in Chinese)
- [7] 陈代兵, 张佳伟, 李金玉. 利用劈尖的等厚干涉测量液体的折射率[J]. 大学物理实验, 2016, 29(5): 41-43.  
CHEN D B, ZHANG J W, LI Y J. Use wedge of equal thickness interference measuring the refractive index of the liquid[J]. Physical Experiment of College, 2016, 29(5): 41-43. (in Chinese)
- [8] 李雅倩, 付现斌, 周坤. CCD 分段测量的光学位移测量系统[J]. 光学精密工程, 2011, 19(9): 2036-2042.  
LI Y Q, FU X B, ZHOU K. Optical displacement measuring system by CCD segmental measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(9): 2036-2042. (in Chinese)
- [9] 辛督强, 朱民, 解延雷. 测量液体折射率的几种方法[J]. 大学物理, 2007, 26(1): 34-37.  
XIN D Q, ZHU M, XIE Y L. Several measuring methods of the refractive index of liquid[J]. College Physics, 2007, 26(1): 34-37. (in Chinese)
- [10] 陆静珠, 陈朴深. 利用衍射光栅测定液体和固体的折射率[J]. 湖州师专学报, 1991(5): 40-42.  
LU J Z, CHEN P S. The determination of the refractive index of solid and liquid with diffraction grating[J]. Journal of Huzhou University, 1991(5): 40-42. (in Chinese)
- [11] 张静, 满小溪. 容器壁厚度对光栅衍射法测量液体折射率的影响[J]. 物理实验, 2015, 35(4): 34-36.  
ZHANG J, MAN X X. Influence of container thickness on the refractive index of solution in the method of grating diffraction[J]. Physics Experimentation, 2015, 35(4): 34-36. (in Chinese)
- [12] 骆敏, 郑凯璐, 余观夏. 基于光栅衍射的液体折射率测量实验[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(7): 83-85.  
LUO M, ZHENG K L, YU G X. Experimental study of liquid refractive index measurement based on grating diffraction[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(7): 83-85. (in Chinese)
- [13] DURAN-RAMIREZ V M, MARTINEZ-RIOS A, GUERERO-VIRAMONTES J A, et al. Measurement of the refractive index by using a rectangular cell with a fs-laser engraved diffraction grating inner wall[J]. Optics Express, 2014, 22(24): 29899-29906.
- [14] CALIXTO S, PIAZZA V, GONZALEZ S, et al. Liquid refractive index measured through a refractometer based on diffraction gratings[J]. Optics Express, 2019, 27(24): 34705-34720.
- [15] GOODMAN J W. Introduction to Fourier Optics[M]. 2nd Edition, New York: McGraw-Hill, 1996.

(上接第 120 页)

### 参 考 文 献

- [1] 林宗涵. 热力学与统计物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2018.
- [2] 张哲皇, 李学金. 珀尔贴效应演示仪的研制[J]. 大学物理实验, 1999(4): 45-48.  
ZHANG Z H, LI X J. The development of Peltier effect demonstrator[J]. Physical Experiment of College, 1999(4): 45-48. (in Chinese)
- [3] 华净, 秦松, 孙伟鹏, 等. 半导体制冷演示实验[J]. 物理实验, 2002(5): 47-48.  
HUA Z, QIN S, SUN W P, et al. Demonstration experiment for semiconductor refrigeration[J]. Physics Experimentation, 2002(5): 47-48. (in Chinese)
- [4] 尚剑锋, 史湘伟, 刘雪林, 等. 太阳能供电半导体制冷与温差发电演示仪[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(5): 52-55.  
SHANG J F, SHI X W, LIU X L, et al. Demonstration instrument for solar-powered semiconductor refrigeration and thermoelectric power generation[J]. Experimental Technology and Management, 2013, 30(5): 52-55. (in Chinese)
- [5] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [6] 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(10): 1669-1672.  
DAI W H, DAI Y J, ZHANG P, et al. Measurement for the characteristic parameters and selection of thermoelectric cooling modules[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004(10): 1669-1672. (in Chinese)