

文章编号:1005-4642(2025)07-0027-08

热电转换与热力学第二定律实验设计与教学实践

薛玉琪, 李 祝, 何振辉

(中山大学 物理与天文学院, 广东 珠海 519082)

摘 要:利用半导体致冷片(TEC)内热电热机热路与固体传热热路并联的模型,构建有限时间热力学的自主学习实验平台,开设多变量相互作用实验.教学实践表明,该实验的教学促进了学生深入理解热电效应和热力学第二定律等知识,并提升了学生的实验动手能力.

关键词:热电效应;热力学第二定律;热机效率;TEC;积木式装置

中图分类号:G642.423;O414.1

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.005

热机的发明不仅推动了第一次工业革命,也催生了热力学第二定律的发现,其核心内容对学生思维认知的重要性,已在热学理论课程中得到充分体现.由于实验室安全性与成本等原因,热力学第二定律实验在大学物理实验中鲜有开设,相比之下,热力学第零定律(温度传感器标定与应用)、热力学第一定律(熔化热与汽化热)均已列入《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(简称《基本要求》)[1].由于热电发电器件在深空探测、绿色能源和余热利用中的广泛应用[2-5],对热电发电器件进行深入研究具有重要意义.本文利用商业半导体致冷片(TEC)和通用货架产品图形处理器(GPU)散热组模,结合通用仪器,设计多层次实验教学的“热电热机”实验.让学生自主搭建热电效应实验装置,在学生学习和体验 Seebeck 效应、Peltier 效应后,设计测量热电转换热机的输出功率和效率的实验方案,优化热机的输出功率;通过与卡诺效率比较分析,开展热力学第二定律探究式实验,并进一步探究有限时间热力学的[6-8]以及 Thomson 效应,为学生搭建多层次的热力学第二定律实验平台,重点探究多物理量的耦合机制.

1 实验原理

1.1 热机

如图 1(a)所示,工作于热源温度 T_h 和热沉温度 T_c 之间的热机,其输出功率为从热源吸热功率与向热沉放热功率之差 $P = \dot{Q}_h - \dot{Q}_c$;其效率 $\eta = P/\dot{Q}_h$,以可逆热机效率为最大,即卡诺效率 $\eta_c = 1 - T_c/T_h$.

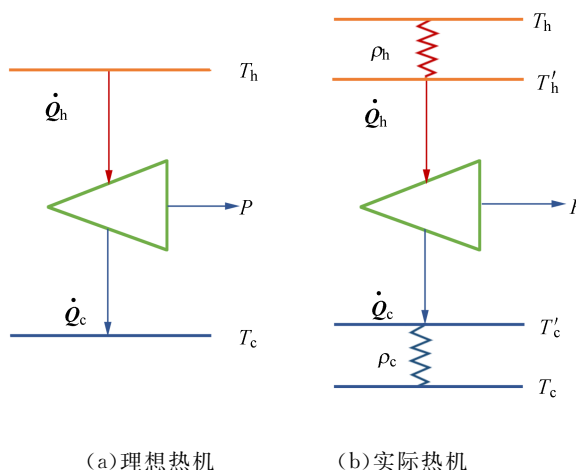


图 1 热机原理图

收稿日期:2024-11-23;**修改日期:**2025-02-20

基金项目:教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2022 年高等学校教学研究项目(No. DWJZW202238zn);2023 年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目(粤教高函[2024]9 号)

作者简介:薛玉琪(1987—),女,吉林松原人,中山大学物理与天文学院助理实验师,硕士,从事热学相关实验的教学与研究. E-mail: xueyuqi5@mail.sysu.edu.cn

通信作者:何振辉(1963—),男,广东顺德人,中山大学物理与天文学院教授,博士,从事物理实验教学和空间科学研究. E-mail: stshzh@mail.sysu.edu.cn

1.2 有限时间热力学

由于热阻的存在,热机实际工作时,热源与热机热端、热沉与热机冷端之间传热时有温差 $\Delta T_h = T_h - T'_h = \rho_h \dot{Q}_h$, $\Delta T_c = T'_c - T_c = \rho_c \dot{Q}_c$. 该温差降低了热机冷热端之间的温差[见图 1(b)], 从而降低了热机的实际效率:

$$\eta = 1 - \frac{T_c}{T_h - (\rho_h + \rho_c) \dot{Q}_h} = 1 - \frac{T_c}{T_h^*}, \quad (1)$$

式中, ρ_h 和 ρ_c 分别为热机热端和冷端的热阻, T_h^* 为等效热端温度, $T_h^* = T_h - (\rho_h + \rho_c) \dot{Q}_h$. 在热机效率定义下获得热机输出功率与效率的关系为

$$P = \frac{\eta}{\rho_h + \rho_c} \left(T_h - \frac{T_c}{1 - \eta} \right). \quad (2)$$

1.3 热电效应

热电效应包含 Seebeck 效应、Peltier 效应和 Thomson 效应,该内容不属于《基本要求》中的内容^[1],仅在早期《电磁学》有介绍^[9]. 然而,基于热电效应的热电偶测温工作原理是实验教学不可或缺的知识点. 由于热电偶的低效以及焦耳热的存在,热电偶只能作为理论的热机模型. 在半导体热电材料长足发展及其普遍应用的背景下,已有专著全面介绍热电效应^[10].

热电效应器件是典型的多变量系统,热源温度、输出电压、输出电流、负载电阻等变量相互耦合,不能简单使用测量材料电参数或热参数的常规方法测量热电材料的参数;为此,热电偶正好为培养学生分析复杂问题和解决综合问题的能力、以及学习耦合系统提供了实验教学素材.

1.4 热电热机输出功率、效率测量原理

温差热电势是热电偶测温基础,热电偶因其输出功率低不宜作为热机^[10]. 半导体热电器件可以输出较高的电功率,而被应用于温差发电. TEC 器件由多对 P 型和 N 型半导体材料通过电串联和热并联的方式组成,如图 2 所示. P 型和 N 型半导体在热端吸热后,分别激发空穴和电子并获得动能,这些空穴和电子向低温端迁移,且通过低温端的内电极复合、向冷端释放热能;开路时,外电极上的空穴和电子不能复合,在外电极间形成电动势;当外电极接入负载后产生电流(外电极上的空穴和电子通过外接电路复合),实现对外做功. 可见,当 TEC 开路时可检验 Seebeck 效应,并可测量 TEC 器件的 Seebeck 系数 α_0 和固体热导 κ_0 :

$$\epsilon = \alpha_0 (T_h - T_c), \quad (3)$$

式中,开路电压 ϵ 为器件的热电动势. 忽略保温材料、热电偶和 TEC 引线的漏热,则热电热机可利用的热功率为:

$$\dot{Q}_h = \kappa_0 (T_h - T_c). \quad (4)$$

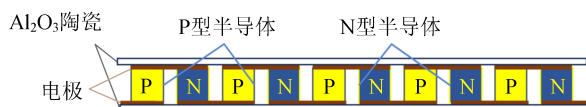


图 2 TEC 内部结构图

用热管散热器模拟低温热源,两热源与 TEC 片之间采用紫铜片过渡,以便安装温度传感器测量冷端和热端的温度. 用保温材料包裹安装好的热机单元,以减少漏热损失,如图 3 所示.

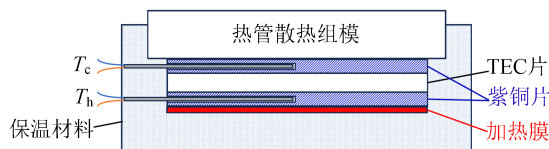


图 3 热电热机结构原理图

当热电热机工作时,设负载电阻为 R ,热电热机输出电流 I 、电压 V ,则功率 $P = VI$. 当电流流过热电材料时,还会产生:

1) 来自器件内部电阻 r 的焦耳热, $I^2 r = I(\epsilon - V)$;

2) Peltier 效应,热端吸热 $\alpha_h T_h' I$ 和冷端放热 $\alpha_c T_c' I$, 其中, $\alpha_h = \alpha_h^P - \alpha_h^N$ 和 $\alpha_c = \alpha_c^P - \alpha_c^N$ 分别为温度为 T_h' 和温度为 T_c' 时多对 P 型和 N 型半导体材料的总 Seebeck 系数;

3) Thomson 效应,热端放热 $\tau T_h' I$ 和冷端吸热 $\tau T_c' I$, 其中 $\tau = \tau^P - \tau^N = T(d\alpha/dT)$ 为 Thomson 系数.

考虑温度变化下 $\alpha_h = \alpha_c + (T_h' - T_c')(d\alpha/dT)$, 则输出功率和输出电压分别为

$$P = (\alpha_h T_h' - \alpha_c T_c') I - \tau (T_h' - T_c') I - I^2 r, \quad (5)$$

$$V = (\alpha_h T_h' - \alpha_c T_c') - \tau (T_h' - T_c') - rI = \alpha' (T_h' - T_c') - rI, \quad (6)$$

式中, $\alpha' = \alpha_c + (d\alpha/dT) T_h' - \tau$, 详细推导见文献[11]. 可见, Peltier 效应和 Thomson 效应共同构成了热电热机的 Seebeck 效应;对比式(3),输出电压 V 小于电动势 ϵ ;对比式(4),TEC 器件的温

差大于其内部材料温差($T_h - T_c > T_h' - T_c'$),可预见器件的 Seebeck 系数小于材料的等效 Seebeck 系数($\alpha_0 < \alpha'$). 热机热效率为

$$\eta_T = \frac{P}{\dot{Q}_h} = \frac{VI}{V_H/I_H}. \quad (7)$$

在热源温度确定后,改变负载电阻 R ,可获得对应温差下的 $P(R)$ 和 $\eta_T(R)$,进而得到该温差下最大输出功率 $P_{\max}$ 和最大热效率 $\eta_{T\max}$. 此时, R 与 TEC(电源)内阻 r 匹配($r=R$)^[11].

2 热力学第二定律实验装置

2.1 模块化的实验装置基本配件

热力学第二定律实验装置按模块化思路设计,尽量采用货架产品(见表 1),简单加工一些用于安装热电偶的紫铜片(图 3),让学生组装热机单元,然后按图 4 搭建实验系统. 在拓展阶段,学生可自主设计实验方案,并购买或加工所需的其他零部件.

表 1 热电热机实验装置基本配件

配件、器材	规格	备注
TEC 片	TEC-12706 40 mm×40 mm	
电加热膜	40 mm×40 mm/7.2 Ω	
热电偶	K 型,φ0.3 mm	MS6514 测温仪
PT1000	M222 1/10 B	TCM-207 控温仪
GPU 热管散热器组模	散热风扇额定电压 12VDC	
保温材料	玻璃纤维布外裹 保温棉	

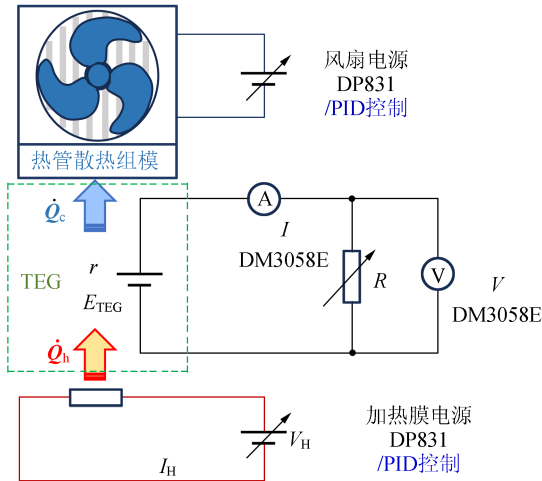


图 4 热电热机测量接线图

实验系统使用通用仪器,包括 1 台直流电源 DP831 为加热膜供电;2 台数字多用表 DM3058E 分别测量加热膜电压和电流以及负载电压和电流;1~2 台 MS6514 测温仪分别测量冷、热端温度和环境温度. 冷端、热端温度可通过 LabVIEW 编程实现 PID 控制,也可以用商用 TCM-207 控温仪控制.

2.2 拓展实验选项

为了简化对实验结果的分析,需要对某些变量实施控制. 例如通过 PID 反馈控制直流电源的输出功率,从而控制散热组模中风扇的转速来维持 TEC 冷端温度不变;控制加热膜电压来维持 TEC 热端温度不变,从而维持冷热端温差不变,使式(5)中的输出功率和热效率仅随负载电阻变化.

3 实验教学实施与结果

3.1 实验目的

- 1)学习、理解热电效应,包括 Seebeck 效应、Peltier 效应与 Thomson 效应;
- 2)通过实验探究热力学第二定律,了解有限时间热力学;
- 3)认识多变量耦合系统的复杂性及变量间的相互影响.

3.2 实验内容

- 1)基础层次:用 TEC 片搭建热电热机,制定实验方案;温度手控.
- 2)进阶层次:对给定热源和半导体热电器件,优化其输出功率和热能利用率,测量热电器件内电阻;学习漏热修正(选做).
- 3)提升层次:温度自动控制,多量耦合分析(多选一).
- 4)拓展层次(第二课堂):了解有限时间热力学,制作教学仪器或制作具备应用能力的热电热机(多选一).

3.3 实验实施

本实验为多选一项目的设计性实验,安排在大二第二学期的基础物理实验课. 初次面向 2021 级物理专业学生开设,先安排 3 周,每周 1 次(4 学时),2~3 人合作完成,共有 9 队 19 名学生选择此实验;综合学生的反馈意见,为提高教学效果,面向 2022 级的设计性实验时间增至 4 周,共有 10 队 20 人选择了此实验.

在绪论课中,任课教师讲解基本原理、实验目的和要求;课后学生做必要的调研。需要说明的是,考虑到多变量耦合和有限时间动力学相关内容超出《基本要求》,在教学目的上并未要求掌握,因此该内容并未提供给学生;教师期望学生通过自主探究的学习方式,逐步建构对相关知识的理解与认知。

第 1 次实验要求学生熟识仪器和器件,初步搭建实验装置,有选择性地试做;如测量开路输出电压与温差的关系,获得器件等效热电系数 α_0 、等效热导 κ_0 ;也可粗测特定负载下输出功率与器件界面温差的关系——热力学第二定律。

第 2,3 次实验要求学生选择其中 1 项提升或拓展内容进行实验设计并提交方案,教师就学生所提出方案中存在的问题与学生讨论,促进学生进一步完善实验方案;课堂上学生完成基本要求后,继续探究影响热效率的因素、漏热测量、内电阻测量等。

第 3,4 次实验要求学生按讨论后的实验方案开展实验。实验评价分为 4 部分:实验方案、现场操作、实验报告和文案演示。

3.4 实验数据结果分析

3.4.1 热电器件基本参数测量

冷端温度接近室温,虽然器件的平均温度随热源温度的升高而升高,一般要求的测量结果显示 TEC 开路电压与 TEC 冷热面温差呈良好的线性关系,在不探究 Thomson 效应的实验内容时,可不考虑材料随温度变化的影响。线性拟合后斜率为 α_0 列于表 2。通过加热膜电功率与 TEC 冷热面温差的关系(图 5),算得 TEC 总热导 κ_0 ;进而算得漏热热导约为 0.0067 W/K ,占比加热功率不足 2%。

表 2 热电器件基本参数测量参考值

器件	$\alpha_0 / (\text{V} \cdot \text{K}^{-1})$	$\kappa_0 / (\text{W} \cdot \text{K}^{-1})$	r / Ω
TEC(+)	0.0490.001	0.520.01	3.6 ± 0.1
TEC(-)	0.0500.001	0.520.01	3.6 ± 0.1

注:(+)和(-)表示与高温热源接触的器件表面的热端和冷端,冷端为 26.5°C ,环境温度为 22.7°C 。

TEC 安装质量是影响参数测量值的重要因素,若安装不好,将会导致总热导值以及泽贝克斯系数测量值偏低。

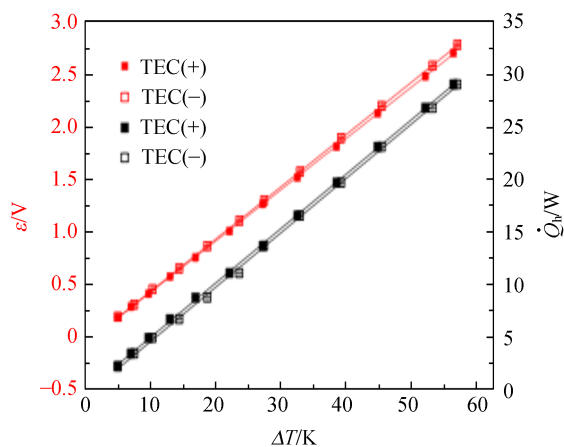


图 5 TEC 的 Seebeck 效应和热源功率与 TEC 冷热面温差关系

3.4.2 温差发电——热力学第二定律探究

分别控制冷端、热端温度,以电源阻抗匹配时输出电功率最大原则测得 4 组恒定冷、热端温度下的 TEC 内阻 $r=3.6 \Omega$ 。以负载电阻 R 相对于 r 的变化为自变量,TEC 器件热效率为因变量作双对数,如图 6 所示。相似地,控制热源功率恒定 (16.6 W 和 28.9 W) 改变 R ,得 $\lg(\eta_T) \sim \lg(R/r)$ 曲线极值热效率 $\eta_{T\max}$ 对应的负载电阻 R 为 4.2Ω 和 4.3Ω ,均大于 TEC 内部电阻。当 $\dot{Q}_h$ 分别为 16.6 W 和 28.9 W 时,测得 TEC 器件输出最大热效率 $\eta_{T\max}$ 分别为 0.83% 和 1.39% ,远低于卡诺效率 η_c 的 7.5% 和 12.2% (表 3);其 $P(\eta)$ 关系也不能用式(2)描述。 $\eta_{T\max} < \eta_c$ 表明 TEC 并非工作在理想的效率区间^[6]。

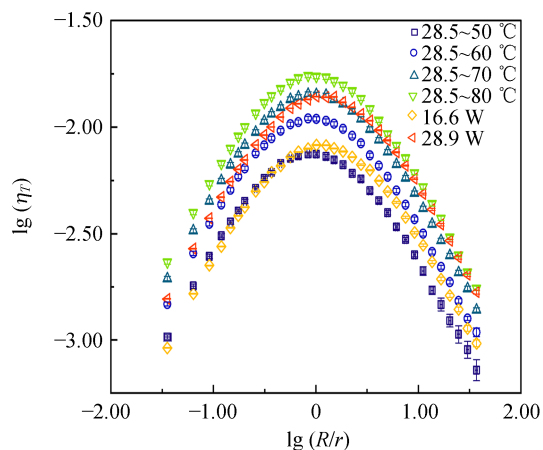


图 6 负载电阻对 TEC 的热效率的影响

表 3 TEC 极值输出时的热效率

P/W	T_c/K	T_h/K	η_c	η'_m	η_{Tmax}
16.6	—	—	7.5%	—	0.83%
28.9	—	—	12.2%	—	1.39%
—	301.5	343.0	12.1%	6.0%	1.42%

3.4.3 多物理量耦合系统

对固定热源热功率 $V_H I_H$, 控制 TEC 冷端温度 T_c , 测量 TEC 的输出电流 I 和热端温度 T_h 随负载电阻 R 的变化, 发现随着 R 的降低, I 上升而 TEC 的 T_h 下降, 如图 7 所示. 以上现象可通过 TEC 中的热电耦合过程解释: 当热电电机对外输出时, 由于焦耳热和 Peltier 效应的作用相当于将热端的热量直接带到冷端, 等效于提升了 TEC 的热导, 导致器件冷热端温差下降, 从而使热机的电动势随之降低. 若仍以为电动势没变, 而把输出电压的降低折算到 TEC 的内部电阻的增加, 即按阻抗匹配原则所测得的内部电阻比实际值大.

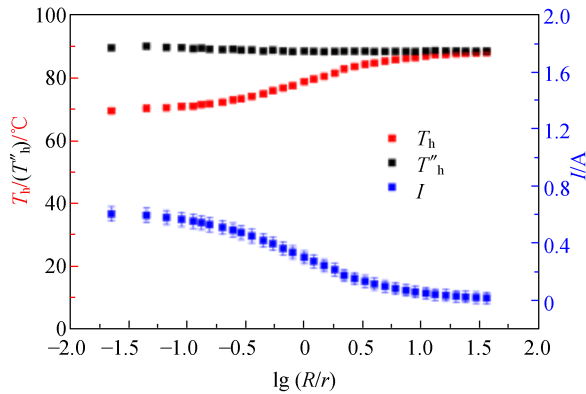


图 7 恒定加热功率下 TEC 热电电机输出电流对热端温度的影响

流向 TEC 热端的总热流 $\dot{Q}_{hR}$ 可分解为 2 条并联支路:

1) 固体导热热流支路, 其功率等于开路状态下的热源热流率 ($\dot{Q}_{ho} = \dot{Q}_A$), 该支路热流不参与发电;

2) 珀耳帖热流 $\dot{Q}_{Ph}$, 该支路真正用于热电转换.

能量守恒要求 $\dot{Q}_{Ph} - \dot{Q}_{Pc} = P + I(\epsilon - V)$. 若假设焦耳热在器件内均匀产生, 则一半流向热端 (与 $\dot{Q}_{Ph}$ 反向), 一半流向冷端 (与 $\dot{Q}_{Pc}$ 同向), 则有

$$\begin{cases} \dot{Q}_{Ph} = \dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho} + I(\epsilon - V)/2, \\ \dot{Q}_{Pc} = \dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho} - P - I(\epsilon - V)/2. \end{cases} \quad (8)$$

对接入负载回路增加热功率 $\dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho}$, 可提升其热端温度至 TEC 器件开路时相同的温度, 提幅为

$$\Delta T_{JP} = (T_h - T_c)(\dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho})/\dot{Q}_{hR}, \quad (9)$$

式中, $T_h - T_c$ 为开路时热功率 $\dot{Q}_{ho}$ 对应的温差. 图 7 中的 $T''_h = T_h + \Delta T_{JP}$ 能清晰地显示出热电材料中的多物理量耦合现象.

从 $\dot{Q}_{Ph} = [\alpha_c + (d\alpha/dT)T_h' - \tau]IT_h' = \alpha_c IT_h'$ 可算出 α_c , 再从 $\dot{Q}_{Pc} = (\alpha_c - \tau)IT_c'$ 算出 τ , 进而算出 $d\alpha/dT$, 具体表达式为

$$\begin{cases} \alpha_c = \frac{\dot{Q}_{Ph}}{IT_h'}, \\ \frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{IT_c'} \left(\frac{\dot{Q}_{Ph}}{T_h'} - \frac{\dot{Q}_{Pc}}{T_c'} \right). \end{cases} \quad (10)$$

基于图 8 的热机模型, 用式 (8) 重新定义 TEC 材料热效率 ($\eta' = P/\dot{Q}_{Ph}$), 其应该等于卡诺效率 $\eta_c' = 1 - T_c'/T_h'$. 用 $\Delta T_c = \rho_c(\dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho} - P)$, $\Delta T_h = \rho_h(\dot{Q}_{hR} - \dot{Q}_{ho})$ 分别计算 T_c' 和 T_h' . 表 2 和图 5 表明 TEC 两面对称, $\rho_h = \rho_c$, 对 η' 与 η_c' 的符合程度寻优, 得 $\rho_h = 1.6 \text{ K/W}$; 代入式 (2) 得 P_{cal} , 作 $P_{exp}(\eta')$ 和 $P_{cal}(\eta')$ 图 (图 9), 图中极大值 P_{max} 对应的效率 $\eta'_m = 6.0\%$ (表 3). 可见, TEC 器件热效率低的主要原因是固体热导高, 该特征由材料内禀性质所决定. 通过式 (10) 可得 28.8°C 下: $\alpha_c = (0.055 \pm 0.003) \text{ V/K}$, $d\alpha/dT = 0.0052 - 1.6 \times 10^{-5} T$, T 的单位为 K.

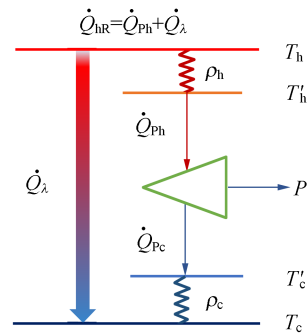


图 8 热电电机热路与固体传热热路并联等效原理图

综上, 本实验提供了多物理量耦合的复杂系统, 为学生实验设计、结果分析等能力训练提供了实验对象. 但部分实验比较复杂, 对测量精度的要求高, 探究有限时间热力学需借助并联热路分离出对热机无贡献的固体传热部分的物理图像, 学生不易理解, 为此, 不建议在第 1, 2 层次的教学采用. 鉴于实验温度范围内, Thomson 效应比

Seebeck 效应弱 1~2 个数量级,但不影响学生对基本物理图像的理解。

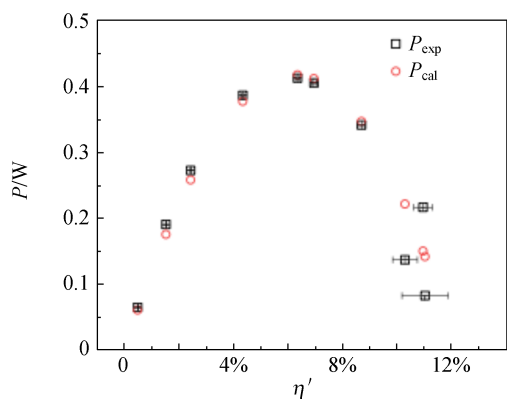


图 9 TEC 材料热效率与输出功率(冷、热端温度分别控制在 28.5 °C 和 70 °C)

3.4.4 误差分析

本实验测量量为电压、电流和温度. 使用 5 位半的数字多用表(DM3058E), TEC 热机的测量电压和电流的精度参照仪器说明书^[12], 则输出功率($\delta P/P$)测量精度优于 0.25%. 对于热源热功率, 影响的主要因素来自漏热及其修正精度, 而漏热占比主要取决于隔热材料及其安装, 扣除漏热后, $\delta \dot{Q}_h/\dot{Q}_h = 0.18\%$, 否则会产生约 1.5% 的系统误差. P 和 $\dot{Q}_h$ 测量独立, 则热效率的相对误差为

$$\frac{\delta \eta_T}{\eta_T} = \sqrt{\left(\frac{\delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\delta \dot{Q}_h}{\dot{Q}_h}\right)^2}, \quad (11)$$

理想情况下, $\delta \eta_T/\eta_T$ 优于 0.3%, 实际由于实验时长的限制, 往往在测量 $\dot{Q}_h$ 时实验系统尚未达到热稳定, 在凭经验的主观判断达到热稳定的情况, $\delta_s \dot{Q}_h/\dot{Q}_h$ 可超过 5%. 若要探究有限时间热力学和 Thomson 效应, 测量负载回路和开路时的时长应尽量长且一致, 其他如环境温度、初始温度等条件也应尽量一致, 因未达到热稳定的系统误差可在 $\delta_s(\dot{Q}_{hr} - \dot{Q}_{ho})$ 抵消大部分. 可将 η' 的相对误差简化为

$$\frac{\delta \eta'}{\eta'} \approx \sqrt{2} \frac{\dot{Q}_h}{\dot{Q}_{ph}} \frac{\delta \dot{Q}_h}{\dot{Q}_h}, \quad (12)$$

可见, 受 $\dot{Q}_h/\dot{Q}_{ph}$ 影响, 在小输出电流(对应峰值输出功率后更大的 η') 时 $\delta \eta'/\eta'$ 越来越大. 图 9 中的数据测量时长为单点 30~60 min, 同时需要辅以 PID 控温, 但测量条件未能保证完全一致.

虽然 MS6514 测温仪的分辨率优于 0.1 K, 但所测温度是否反映 TEC 冷面或热面温度, 也取决于安装者的操作水平和温度稳定判据. 最后, TEC 的安装还影响到热源与 TEC 之间的热阻, 按有限时间热力学, 该热阻会影响到热电热机的热效率和输出功率. 亲自操作装配给学生带来了良好的学习体验, 但非专业规范操作也为误差的定量评价设置了障碍. 作为估算, 设实际温度测量精度为 0.2 K.

采用式(3)对多个测点作线性拟合 $\Delta \epsilon_i = \alpha \Delta T_i + \epsilon_0$, 截距不为 0 可能与接触电势有关, 则斜率 α 的拟合误差为^[13]

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{N}{\Delta'(N-2)} \sum_{i=1}^N [\Delta \epsilon_i - (\alpha \Delta T_i + \epsilon_0)]^2}, \quad (13)$$

式中, N 为样本量(总测点数), $\Delta T_i = T_{hi} - T_{ci}$ 为第 i 个测点温差, $\Delta' = N \sum (\Delta T_i)^2 - (\sum \Delta T_i)^2$.

同理, 用式(4)拟合得 κ_0 的误差, 可参照式(13)将 ϵ 替换为 $\dot{Q}_h$ 计算.

3.5 教学效果

3.5.1 学生评价

知识点掌握情况、能力培养、体验等问卷统计结果如表 4 和图 10 所示. 学生对热力学第二定律的理解和热电效应原理的掌握明显加深; 收获主要集中在: 初步掌握了如何设计实验方案且亲手完成了实验装置搭建(95.2%), 对多层次教学的认同(如图 11 所示, 高达 90.5%); 尽管学生普遍感受到实验的复杂性和意外性, 对于包含超纲内容的设计性、探究性实验, 且时间相对有限的实验而言是正常的; 且有约 1/3 的学生反馈实验结果达到预期, 这对教学改革探索而言, 是个正面的肯定.

表 4 2022 级本科生实验学习收获反馈

收获	比例
初步掌握如何设计实验方案.	95.2%
初步了解如何优化实验方案.	76.2%
亲自动手装配实验装置, 手脑协调能力得到提高.	85.7%
初步掌握多变量系统数据处理与分析.	52.4%
提升团队合作能力.	81.0%
熟悉学术报告撰写.	81.0%

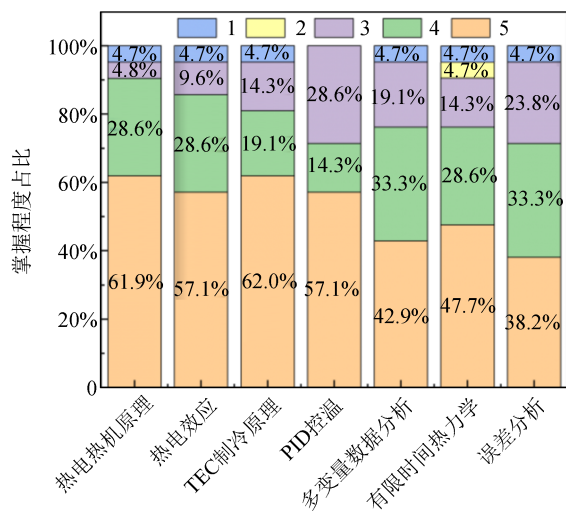


图 10 2022 级学生对学习内容的掌握程度反馈
(数字 1 至 5 表示上升)

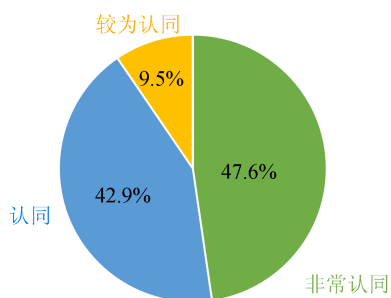


图 11 学生对多层次教学的认同情况

3.5.2 教师评价

2 个年级共 19 组学生中绝大部分学生完成了热电器件的 Seebeck 系数、热导、内部电阻以及热机输出功率、效率及其随负载电阻变化等实验内容;只有其中 5 组选做了漏热修正,13 组测量了内电阻但只有 5 组的方法正确,只有 1 组讨论热电多物理量耦合;有 8 组做了文献调研、有 10 组提出了自己的实验或测量方案,17 组做了误差分析;除 2 组因实验装置安装问题外,其他实验组的测量结果都在合理范围,已达到教学目的。

在教学设计中,将超出《基本要求》的多物理量耦合与有限时间热力学内容,以及自动控温等相关内容,作为探究性实验的可选项供学生自主选择。然而,从实验报告的反馈情况来看,相较于其他可选内容,通过探究性实验学习新知识点的效果并不理想。

经分析,主要是有限的实验时间与学生发散性思维之间的矛盾所导致。在未得到充分指引或非强制要求的情况下,学生往往会依据自身的兴趣点和习惯性思维,自主选择提升和拓展部分的实验内容,且进入非教师预期的实验方向。具体而言,指引不充分主要体现在以下 2 个方面:

1)技术和经验层面:学生对于热稳定的判断标准存在差异,这直接影响到读数时机的选择,进而影响到测量结果的准确性和可比较性;而测量的精确度,是学生能否顺利进入有限时间热力学实验探究的关键因素。在教学实践中,实验时长与测量精确度之间的平衡难以达成。这一现象也与学生问卷调查中的反馈相契合,即其中 66.7% 的学生表示实验结果未能达到自己的预期。此外,首次参加设计性实验的本科生往往对实验结果抱有较高的期望。

2)知识和能力层面。学生在从文献中提炼如图 8 所示的固体传热不参与热机工作的物理图像方面存在困难,进而无法有效开展物理建模,也无法从实验数据处理中获取有限时间热力学的具体知识。

4 结束语

本文通过引入低成本的 TEC 片和散热组件,引导学生自主设计实验方案并动手搭建实验装置,顺利开展了面向 2 个年级的“热电热机”设计性实验教学。综合课堂互动表现、实验报告、文案演示以及问卷调查等多维度反馈,可以认为学生已初步实现了对热力学第二定律、热电效应等多个知识点的深入理解,并在设计实验、搭建实验装置以及分析和解决实际问题等能力方面达到了教学目标。在未来教学中,计划在有限的教学时间内,进一步加强有关多物理量耦合分析、TEC 器件内固体传热对热机无贡献的物理图像以及控温稳定性要求等方面的指导和课堂引导。同时,适当降低实验报告中对实验结果精确度的要求,以更好地平衡教学目标与学生的实际能力水平,从而优化教学效果。

参考文献:

- [1] 教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会. 理工科类大学物理实验课程教学基本要求(2023 年版) [M]. 北京:高等教育出版社,2023:29-30.

- [2] 彭磊,侯旭峰,阎勇,等. 嫦娥四号着陆器同位素温差电池设计与验证[J]. 电池技术, 2020, 44(4): 607-612.
- [3] 宗毓东,李鸿冰,丁其军,等. 热电发电器件的研究与应用进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(11): 885-895.
- [4] 胡济珠,周俊,李云云. 基于有机/无机复合材料的航天环境下高效热电转换技术研究[J]. 空天防御, 2020, 3(2): 72-76.
- [5] LU Y Y, HAN X Y, CHEN X, et al. Maximizing energy output of a vapor chamber-based high concentrated PV-thermoelectric generator hybrid system [J]. Energy, 2023, 282(12): 128882.
- [6] 陈金灿, 热阻对卡诺循环性能的影响[J]. 大学物理, 1990, 9(6): 1-3.
- [7] 詹士昌. 热电热机内可逆卡诺循环特性的实验研究[J]. 科技通报, 2000, 16(1): 27-30.
- [8] 翟若迅,马宇翰,董辉,等. 理想气体有限时间热力学实验平台的搭建与有限时间热力学的前沿研究[J]. 物理实验, 2024, 44(6): 1-10.
- [9] 梁灿彬,秦光戎,梁竹健. 电磁学[M]. 北京: 人民教育出版社, 1981: 254-260.
- [10] GOLDSMID H J. Springer series in materials science; Introduction to thermoelectricity [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [11] CHEN J C, YAN Z J, WU L Q. The influence of Thomson effect on the maximum power output and maximum efficiency of a thermoelectric generator [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(11): 8823-8828.
- [12] DM3058E 台式万用表手册[Z].
- [13] TAYLOR J R. 误差分析导论: 物理测量中的不确定度[M]. 王中宇, 译. 北京: 高等教育出版社, 2005: 171-177.

Experiment teaching design and practice for thermoelectric conversion and the second law of thermodynamics

XUE Yuqi, LI Zhu, HE Zhenhui

(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)

Abstract: Experimental projects and teaching instruments related to the second law of thermodynamics are relatively scarce in current university physics laboratories. This paper utilized a model combining the thermal circuit of a thermoelectric heat engine within a semiconductor thermoelectric cooler (TEC) in parallel with a solid heat conduction path to construct a finite-time thermodynamics experimental platform for self-directed learning. This platform facilitated the implementation of multivariable interaction experiments. Teaching practice demonstrated that the application of this experiment promotes students' deeper understanding of concepts such as thermoelectric effects and the second law of thermodynamics, while simultaneously enhancing their experimental skills.

Key words: thermoelectric effect; second law of thermodynamics; thermal engine efficiency; thermoelectric cooler; building-block setup

[编辑:郭 伟]