

基于热电效应的热机设计与热力学第二定律 验证实验

设计性实验“热力学第二定律”开题报告

戴鹏辉 & 杨舒云

May 16, 2024

Outline

1. 回顾实验要求

2. 实验原理概述

3. 实验方案

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

Outline

1. 回顾实验要求

2. 实验原理概述

3. 实验方案

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

回顾实验要求 I

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

目的

设计并实现输出功率在 1 瓦以上的“热机”，以探究和验证热力学第二定律。

回顾实验要 II

要求

1. 学习和理解热电效应：

- ▶ 包括 Seebeck 效应、Peltier 效应和 Thomson 效应。
- ▶ 设计实验方案，包含原理和物理模型。

2. 制作热机：

- ▶ 展示热力学第二定律的“热机”。
- ▶ 电或机械输出功率不低于 1 瓦。

3. 测量与分析：

- ▶ 测量装置的最大输出功率和输出效率。
- ▶ 讨论实际结果与 Carnot 循环的差异。
- ▶ 探讨进一步提高效率的方法。
- ▶ 分析测量精度和不确定度。

4. 确保安全性：

- ▶ 确保装置表面（可触摸到的部分）温度不高于 50°C 。

基于热电效应的热机设计与热力学第二定律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

回顾实验要求 III

熟悉基本实验装置，搭建与操作

- **开路输出电压与温差的关系：**
 - ▶ Seebeck 效应，器件的等效热电系数 α 和等效热导 λ (热阻 ρ)。
- **特定负载下输出功率与温差的关系：**
 - ▶ 验证热力学第二定律。
- **热源功率和单片热电堆输出效率的优化：**
 - ▶ 在给定热源功率下，优化室温条件下单片热电堆的输出效率。
- **固定冷、热源温度下的测量：**
 - ▶ 测量在不同负载下的热电机输出功率与输出效率的关系。
 - ▶ 分析器件内阻 r 。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

Outline

1. 回顾实验要求

2. 实验原理概述

3. 实验方案

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

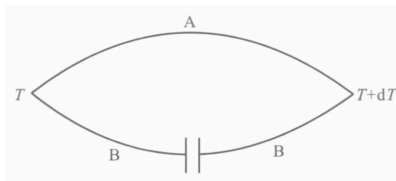
实验原理概述

实验方案

实验原理概述：三种热电效应 I

Seebeck 效应

当两种不同的导体或半导体连接成回路，并且两个接头的温度不同，就会在回路中产生**电动势**。



Key Point 2.1:

$$dV = \epsilon_{AB} dT$$

其中， ϵ_{AB} 是温差电动势系数（又称**Seebeck 系数**，记为 α ）。符号约定为如果在高温段电动势驱使电流由金属 A 流向金属 B 为正。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

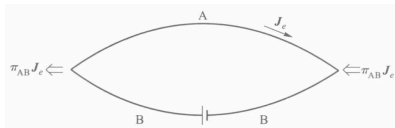
实验原理概述

实验方案

实验原理概述：三种热电效应 II

Peltier 效应

当电流通过两种不同材料组成的电路时，一个接头会吸热，另一个接头会放热。这个效应对于**调控热机的温度**非常重要，尤其是在确保装置表面温度不超过 50°C 的安全要求下。



Key Point 2.2:

$$\mathbf{J}_{q\pi} = \pi_{AB} \mathbf{J}_e$$

其中， $\mathbf{J}_{q\pi}$ 是 Peltier 热流密度， \mathbf{J}_e 是从 A 到 B 的电流密度， π_{AB} 是两种金属的 Peltier 系数（与温度有关）。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：三种热电效应 III

Thomson 效应

在均质导体中，如果存在温度梯度，当电流通过时，会伴随着吸热或放热的现象。这对于完整的热电模型和效率分析很关键。 $\dot{Q} = \mu I \cdot \nabla T$ ， μ 为 Thomson 系数。

热电模型参数

- 等效热导表示材料传导热量的能力，单位通常为瓦每米每开尔文 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)。等效热导越大，材料的热传导能力越强。 $\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T \cdot t}$ 。其中， λ 是等效热导 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)， Q 是通过材料的热量 (J)， A 是材料的横截面积 (m^2)， ΔT 是材料两端的温差 (K)， t 是热量传导所需的时间 (s)。通过 Fourier 热传导定律，也可以表示为 (其中 L 是材料的长度 (m))： $Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot t$ 。
- 热阻表示材料对热流阻碍的能力，单位通常为开尔文每瓦 (K/W)。热阻越大，材料的热流阻碍能力越强。 $R_{\text{th}} = \frac{\Delta T}{Q}$ 。其中， R_{th} 是热阻 (K/W)， ΔT 是材料两端的温差 (K)， Q 是通过材料的热量 (W)。
- 等效热导和热阻是互为倒数的关系： $R_{\text{th}} = \frac{L}{\lambda \cdot A}$ ， $\lambda = \frac{L}{R_{\text{th}} \cdot A}$ 。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：输出电路部分

Seebeck 效应电源的外输出特性

- 开路电压是指没有外部负载连接时，热电发电装置两端的电压。根据 Seebeck 效应，开路电压与温差成正比， $V_{oc} = \alpha \Delta T$ 。
- 当热电发电装置连接到负载时，输出电压会由于内阻的存在而下降。负载电压 $V_L = \frac{\alpha \Delta T \cdot R_L}{R_L + R_{in}}$ ，而输出功率是负载上消耗的功率 $P_{out} = \frac{(\alpha \Delta T)^2 \cdot R_L}{(R_L + R_{in})^2}$ 。
- 当负载电阻等于内阻时，热电发电装置输出的功率达到最大 $P_{max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R_{in}}$ 。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：电加热器（电热贴）

电加热器（电热贴）的工作原理

电加热器（电热贴）通过电能转化为热能来实现加热，其工作原理基于焦耳定律 $Q = I^2 R t$ 。

加热功率的测量

使用电压表并联连接在电加热器两端，读取电压值；使用电流表串联连接在电路中，读取电流值；根据测得的电压和电流，使用公式 $P = VI$ 计算加热功率。

或者采用使用欧姆表测量电加热器的电阻，使用测得的电阻和电流计算 $P = I^2 R$ 。

对于电流电压随时间变化的情况，计算一段时间的总热功可以利用积分来实现。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：PID 控温 I

控温算法

控温算法	优点	缺点
PID 控制	简单、易实现	性能有限，难以处理复杂系统
模糊控制	不需要精确模型，适应性强	规则设计复杂，性能依赖于规则质量
模型预测控制	最优性能，多变量处理	计算量大，依赖系统模型
自适应控制	参数自调整，适应性强	实现复杂，收敛性问题
神经网络控制	非线性处理能力强	训练复杂，数据需求大
最优控制	理论性能优	实现复杂，计算量大

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：PID 控温 II

先考虑采用最经典的 PID 控温

- PID (Proportional-Integral-Derivative) 控制是一种用于温度控制的经典算法，通过对误差的比例、积分和微分进行计算和调整，精确控制加热器的输出，从而实现温度的稳定控制。PID 控制器通常由三个部分组成：比例 (P)，积分 (I)，和微分 (D)。
- PID 控温的控制量 $u(t)$ 可以表示为：

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

- 比例控制 $P_{\text{out}} = K_p e(t)$ 直接与当前误差成比例，调整系统响应速度；积分控制 $I_{\text{out}} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$ 对误差进行积分，消除稳态误差，增强系统的长期精度；微分控制 $D_{\text{out}} = K_d \frac{de(t)}{dt}$ 对误差进行微分，预测误差变化趋势，减小超调和振荡。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验原理概述：PID 控温 III

离散形式的 PID 控制算法

在实际应用中，PID 控制通常以离散形式实现。离散 PID 控制算法如下：

Key Point 2.3:

$$u[k] = u[k-1] + K_p(e[k] - e[k-1]) + K_i e[k] + K_d \left(\frac{e[k] - e[k-1]}{T} \right)$$

其中：

- $u[k]$ 是第 k 次采样时的控制输出；
- $e[k]$ 是第 k 次采样时的误差；
- T 是采样周期。

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

Outline

1. 回顾实验要求

2. 实验原理概述

3. 实验方案

基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验方案：总体规划

基于热电效应
的热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验方案：搭建热机

基于热电效应
的热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验方案：温度控制

基于热电效应
的热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验方案：测量热机效率

基于热电效应
的热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

实验方案：优化

基于热电效应
的热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案

Thanks!

戴鹏辉 & 杨舒云



基于热电效应的
热机设计与
热力学第二定
律验证实验

戴鹏辉 & 杨舒云

回顾实验要求

实验原理概述

实验方案