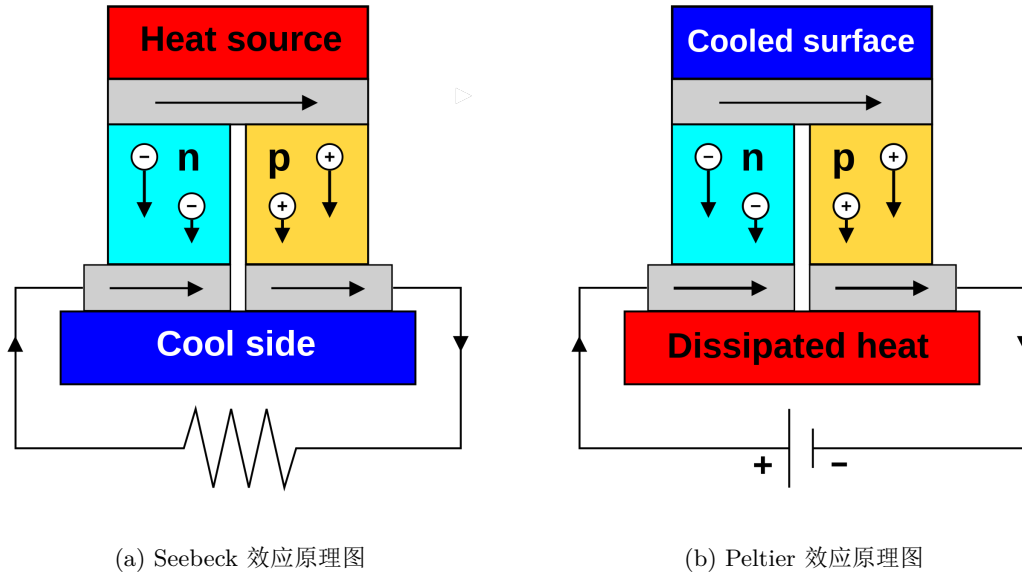


- **量子热机**：现代热机的研究不仅限于宏观尺度，还扩展到了微观和量子尺度。例如，量子热机在近年来引起了广泛关注。研究表明，量子热机在某些条件下可以超越传统的卡诺效率，这主要得益于量子力学效应带来的新特性。尽管如此，量子热机仍需遵循热力学第二定律，只不过其效率上限受制于量子效应。

基本原理与实验方案

3.1 基本原理

(1) 热电效应：



- **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

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

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。P

- **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。

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

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）。

- **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。

(2) 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 $P_{max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R_{in}}$ 。

(3) 热力学建模

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

3.2 实验方案

• 器件内阻的测量与影响

当 TEC 片的冷、热端温差恒定使，可视为其电动势恒定。将热机等效为一个电动势 E 加一个内阻 R_s ，电路图如图 1 所示。所接的外负载是一个滑动变阻器。由电路方程

$$U_L = E - I \cdot R_L$$

可知，只需改变电路的外负载，即可得到 $U_L - I$ 的关系。再对实验数据用该电路方程进行线性拟合，即可得到热机的电动势 E 和内阻 R_s 。

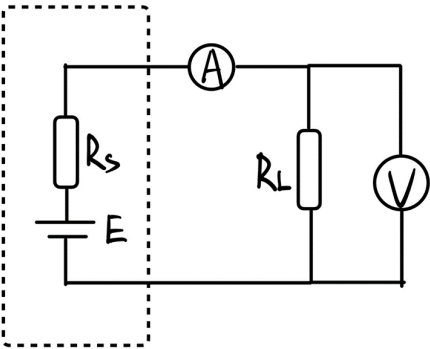


图 1: 热机外负载特性电路图

• Seebeck 效应测量

Seebeck 效应的测量过程如下：

- (1) 实验装置的准备：搭建一个包含热端和冷端的热电材料实验装置。热端通过电加热器加热，冷端通过冷却设备（如风扇或散热器）冷却。
- (2) 温差的建立：通过控制热端和冷端的温度，建立一个稳定的温差。使用 PT100 温度传感器分别测量热端和冷端的温度。
- (3) 电压测量：在温差建立后，使用高精度电压表测量热电材料两端的开路电压。

(4) 数据记录与分析：记录不同温差下的开路电压值，并根据 Seebeck 效应公式

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

计算热电材料的 Seebeck 系数 α 。

- 热机整体规划：详见实验仪器搭建部分。
- 效率优化：

(1) 增大注入系统的能量，减小散热

通过增大热源温度 T_H 来增加注入系统的热量，同时降低冷源温度 T_C 以减少散出的热量，从而提高效率。具体措施包括选择更高温度的燃料或改进燃烧技术，使用更高效的冷却技术或材料，采用高导热性材料减少热损失，优化热机的设计以减少内部摩擦和热损耗，加强系统的隔热性以减少热量流失，提高热交换器的效率，优化操作条件如压力和流速，并定期维护热机设备确保其在最佳状态下运行。

(2) 输入功率恒定，增大温差

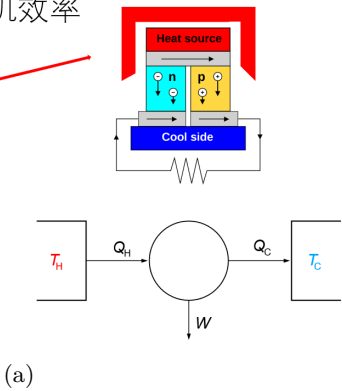
在输入功率保持不变的情况下，通过增加热源温度 T_H 和降低冷源温度 T_C 来增大温差，从而提高效率。具体措施包括采用高温材料、改进燃烧技术或使用高效能燃料如天然气或氢气，改进冷却系统使用更高效的冷却液或低温冷却剂，优化热交换系统提高热交换器效率，使用高导热材料和改进换热器设计，改进系统绝热性采用先进隔热材料和技术，采用多级加热和冷却技术逐步提高热源温度和降低冷源温度，以及使用精确的温度控制系统确保热源和冷源温度始终在最佳范围内。

实验过程——优化热机效率

效率 = 有用功/注入系统中的能量

$$\eta = \frac{|Q_{hot}| - |Q_{cold}|}{|Q_{hot}|}$$

想法一：增大注入系统的能量，减小散热



实验过程——优化热机效率

效率 = 有用功/注入系统中的能量

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_{hot}|}$$

$$V_{oc} = \alpha \Delta T$$
$$P_{out} = \frac{(\alpha \Delta T)^2 \cdot R_L}{(R_L + R_{in})^2}$$

想法二：输入功率恒定，增大温差

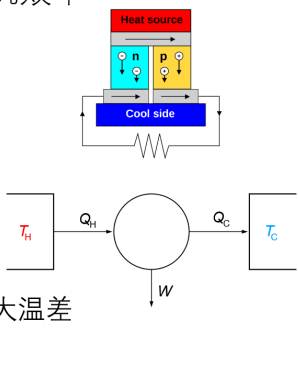


图 2

- 热电堆的集成：

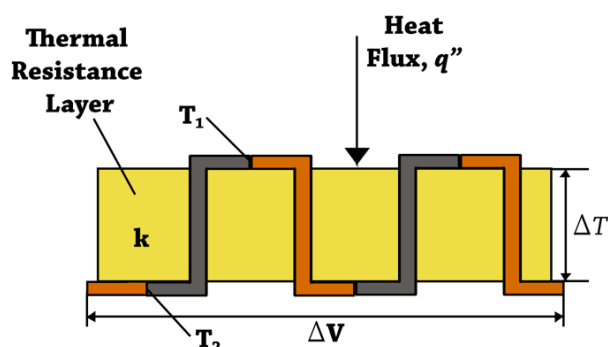
3.3 测量方程

- 测温：本实验测温使用 PT100 测温电阻，通过测量其电阻值得到温度，电阻与温度的关系为：

$$t = \frac{R_t(\Omega) - 100}{0.385} (^{\circ}\text{C})$$

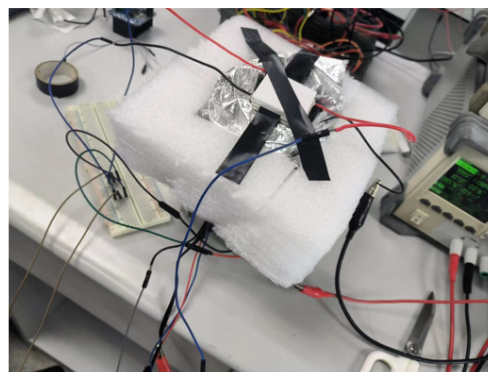
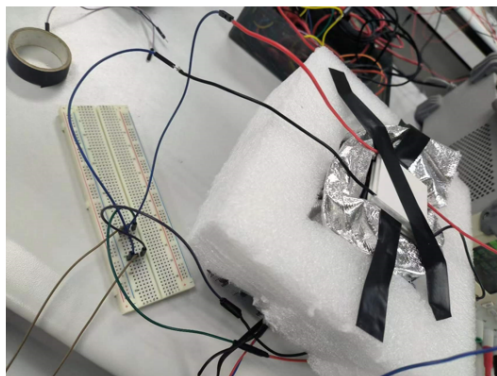
热电堆的集成

两个顶部热电偶结的温度为 T_1 ，而两个底部的热电偶结的温度为 T_2 。热电堆的输出电压 ΔV 与热电偶连接层和热电偶结对数量的温差 ΔT 或 $T_1 - T_2$ 成正比。热电堆电压输出也与通过热阻层的热通量 q 成正比。



将第二块TEC片贴于加热电阻的上表面，构成第二个热机，实现两个热电堆的叠加，既起到了余热利用的作用，又起到了热电堆的集成。

第二个“热机”制冷，由于缺少第二个风扇，采用Peltier效应加一块制冷片，然后热机主体再用保温材料封好。但是散热还是有之前的问题没有解决，所以整体的效率还是上不去



• 输入功率：

加热电阻丝直接使用直流稳压电源供电，通过读取电源上的电压和电流值，可以得到输入功率 $P_{in} = U \cdot I$

• 输出功率：

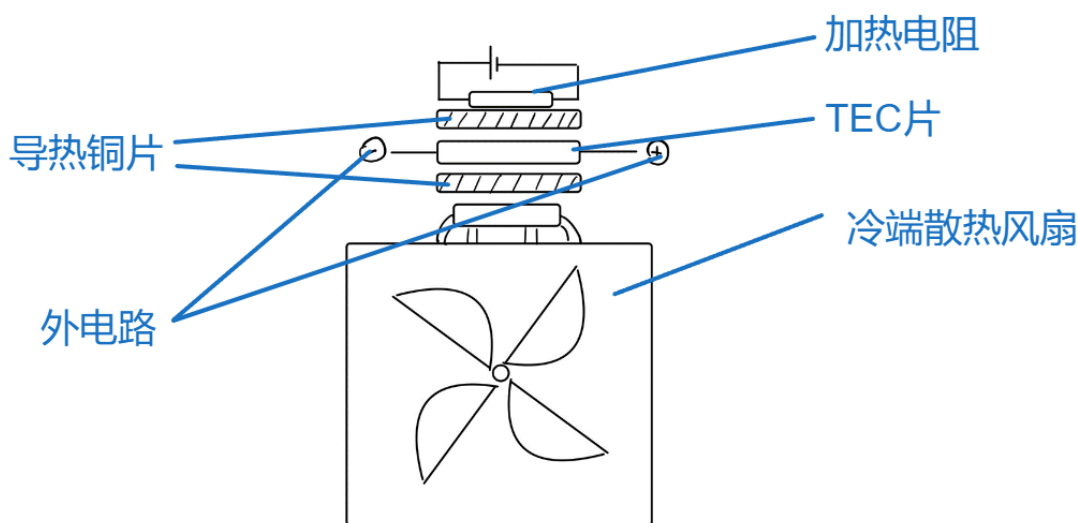
- 当热电发电装置连接到负载时，负载电压 $U_L = \frac{\alpha \Delta T \cdot R_L}{R_L + R_s}$ ，而输出功率是负载上消耗的功率 $P_{out} = \frac{(\alpha \Delta T)^2 \cdot R_L}{(R_L + R_s)^2}$ 。
- 当负载电阻等于内阻时，热电发电装置输出的功率达到最大 $P_{max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R_s}$ 。

• 热机效率：

效率可通过热机对外做功 W 和吸热 Q 之比计算。

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{U_L \cdot I_{out} \cdot t}{U_{in} \cdot I_{in} \cdot t} = \frac{U_L \cdot I_{out}}{U_{in} \cdot I_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

实验装置搭建



(a) 热机示意图

- 热机设计：如图 3a 所示，我们搭建了一个基于热电效应的热机实验装置。该装置包括热电模块（TEC 片）、加热电阻、冷却系统、导热铜片、外电路和散热风扇。我们通过串联若干热电模块来增加输出电压，并根据所需的输出功率和单个热电模块的性能，计算所需的模块数量。如果需要增加输出电流，则可以将热电模块并联。

实验装置的热源部分是通过将加热电阻固定在热电模块的一侧来实现的，确保热端能够获得足够高的温度。热电模块的另一侧安装了冷却系统，包括冷端散热风扇，以保持冷端的温度尽可能低，从而增加热电模块的温差。

在电气连接方面，我们将电压表和电流表分别并联和串联到热电模块或模块组合的输出端，以便测量输出电压和电流。同时，将负载连接到热电模块的输出端，初始使用一个较高的电阻值作为基准。在测量过程中，我们逐步调整负载电阻，测量不同负载条件下的输出功率，找到输出功率最大时的负载电阻值，并记录最优负载条件下的输出电压、电流和功率。

为了确保实验的安全性和数据的准确性，我们在热端和冷端分别安装了温度传感器，实时监控温度，确保热端温度在安全范围内，且冷端不会过热。此外，使用绝缘材料和防护措施，确保操作者不会直接接触到高温部分。通过上述装置和实验步骤，我们可以研究热电效应，测量 Seebeck 系数、内阻及其他相关参数，从而优化热机的性能。

• 实验仪器：

编号	仪器用具名称	数量	主要参数（型号，测量范围，测量精度等）
1	TEC 片	>1	Seebeck-TEC1-12703
2	风扇	1	—
3	加热电阻	1	—
4	导热硅脂	大量	—
5	直流稳压电源	1	—
6	my-DAQ 元件	>1	—
7	导线	大量	—
8	铜片	>2	—
9	绝热材料	大量	—
10	软件控制平台	>1	—
11	PT100 测温电阻	>1	—
12	其它	待定	—

表 1: 实验所用仪器