

热机循环实验

实验目的：

研究热机的性质，及其将热转换为功的原理。
学习热机效率的测定与计算方法。

实验仪器：

Pasco Capstone 软件，热机装置，大支撑杆，90 公分钢杆，200g 砝码，3 个 10g 砝码与砝码挂钩，850 通用接口，四通道温度传感器，双通道压力传感器，转动运动传感器，两个塑料容器，线。



实验原理:

热机是指各种利用内能做功的机械,其工作原理是通过反复循环将工作物质(通常为气体)吸收的热量转换成对外界输出的功。本实验用到的热机理论基础包括:

一.理想气体状态方程 $PV = nRT$, 其中 P 为气体压强, V 为气体体积, T 为气体的热力学温度, n 为气体摩尔数, R 为气体常数。常温常压下空气可被视为理想气体。

二.热力学第一定律: 封闭系统在某热学过程中内能的增量 $\Delta U = Q - W$, 其中 Q 为系统吸收的热量, W 为系统对外界做的功。

1. 内能 U 为系统的状态函数。系统经整数次工作循环后回到初始状态, $\Delta U = 0$ 。

理想气体的内能只与温度有关。

2. 系统吸收热量 Q 的数值与具体的过程有关:

对于等温过程, 由 $\Delta U = 0$ 可得 $Q = W$ 。

对于等压过程, $Q = nC_p\Delta T$, 其中 C_p 为气体的定压热容量。

空气主要由双原子分子组成, 对于双原子分子 $C_p = \frac{7}{2}R$ 。

若系统吸热, Q 为正值; 若系统放热, Q 为负值。

3. 系统对外界做的功 $W = \int_{V_i}^{V_f} PdV =$ 系统 P - V 图曲线下的面积, 其中 V_i 与 V_f 分别为过程初态与末态的体积。 W 的数值与具体的过程有关:

对于等温过程, $W = \int_{V_i}^{V_f} PdV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV = nRT \ln \frac{V_f}{V_i}$ 。

对于等压过程, $W = \int_{V_i}^{V_f} PdV = P(V_f - V_i)$ 。

若系统膨胀, W 为正值; 若系统压缩, W 为负值。

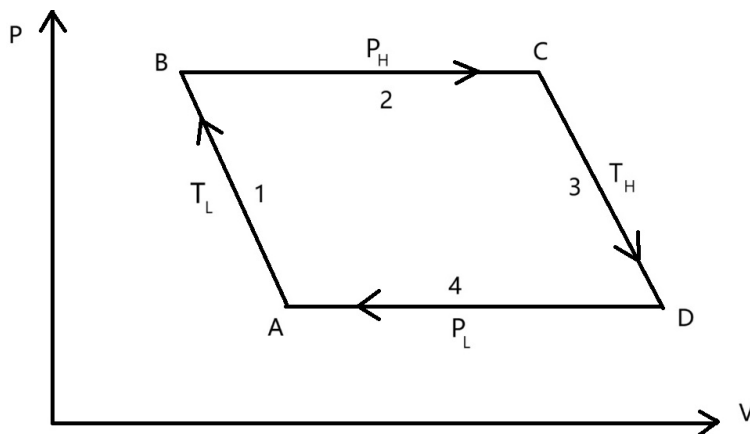
三. 热力学第二定律: 从单一热源吸热, 使之全部转化为功, 而不引起其他变化, 是不可能的。因此, 未转化为功的热量需要向低温热源释放。

定义热机的效率 $e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$, 其中 W_{tot} 为一个工作循环中热机对外界所做的总功, Q_{in}

为一个工作循环中热机吸收的总热量。理论上, 工作在固定温度为 T_H 的高温热源

与固定温度为 T_L 的低温热源之间的热机, 其最大效率 $e_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 。

本实验利用两个等温过程，两个等压过程构成如下图的循环。



其热机循环的过程包括：

1. A→B: 等温压缩。在固定温度 T_L 下，压强由 P_L 增加到 P_H 。

$$W_1 = nRT_L \ln \frac{V_B}{V_A} = -P_L V_A \ln \frac{P_H}{P_L} \text{ 为负，表示外界对系统做功。}$$

$$Q_1 = W_1 = -P_L V_A \ln \frac{P_H}{P_L} \text{ 为负，表示系统放热。}$$

2. B→C: 等压膨胀。在固定压强 P_H 下，温度由 T_L 增加到 T_H 。

$$W_2 = P_H (V_C - V_B) \text{ 为正，表示系统对外界做功。}$$

$$Q_2 = nC_P (T_H - T_L) = \frac{7}{2} nR (T_H - T_L) = \frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L) \text{ 为正，表示系统吸热。}$$

3. C→D: 等温膨胀。在固定温度 T_H 下，压强由 P_H 减少到 P_L 。

$$W_3 = nRT_H \ln \frac{V_D}{V_C} = \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L} \text{ 为正，表示系统对外界做功。}$$

$$Q_3 = W_3 = \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L} \text{ 为正，表示系统吸热。}$$

4. D→A: 等压压缩。在固定压强 P_L 下，温度由 T_H 减少到 T_L 。

$$W_4 = P_L (V_A - V_D) \text{ 为负，表示外界对系统做功。}$$

$$Q_4 = nC_P (T_L - T_H) = -Q_2 = -\frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L) \text{ 为负，表示系统放热。}$$

循环总做功 $W_{tot} = W_1 + W_2 + W_3 + W_4$ = 循环在 P - V 图中所围成的面积，循环总吸热

$$Q_{in} = Q_2 + Q_3, \text{ 热机效率 } e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}.$$

实验步骤:

1. 开启 Pasco Capstone 软件, 以及传感器接口匣。
 2. 建立 P - x 坐标图, 纵轴设为压强 P (单位: kPa), 横轴设为位置 x (单位: cm)。
 3. 建立冷水与热水两个温度 (单位: K) 标签。
 4. 开放连接气管, 将活塞提升至 3cm 左右, 关闭连接气管。记录活塞的位置 x_0 。
 5. 点击记录按钮, 顺畅快速地完成下列步骤:
 - A→B: 将 200 克砝码放在与活塞相连的平台上。
 - B→C: 将气罐由冷水移到热水。
 - C→D: 将 200 克砝码移开。
 - D→A: 将气罐由热水移到冷水。
- 在 P - x 坐标图上的平行四边形封闭之后, 点击停止按钮。
- 将以上步骤多练习几次, 直到在 P - x 坐标图上画出比较完美的平行四边形。
- 注意每次开始前删除上一次的数据。
6. 保存最后一次比较完美的实验结果。该结果中应包含低温 T_L , 高温 T_H , 低压 P_L , 高压 P_H , 活塞的四个相对位置 $x_A \equiv 0, x_B, x_C, x_D$ 。

数据分析:

活塞半径 $r = 1.625\text{cm}$, 活塞面积 $A = \pi r^2 = 8.296\text{cm}^2$ 。

气缸以外空气体积 $V_0 = 3.1416 \times 2.1^2 \times 10 + 3.1416 \times 0.25^2 \times 100 = 158\text{cm}^3$, $V_0/A = 19\text{cm}$ 。

1. 计算初始体积 $V_A = x_0 A + V_0$ 。
2. 计算 $W_{tot} = \text{循环在 } P\text{-}V \text{ 图中所围面积} = A \times \text{循环在 } P\text{-}x \text{ 图中所围面积}$ 。
3. 计算 $Q_{in} = Q_2 + Q_3 = \frac{7}{2} \frac{P_L V_A}{T_L} (T_H - T_L) + \frac{P_L V_A}{T_L} T_H \ln \frac{P_H}{P_L}$ 。
4. 计算热机效率 $e = \frac{W_{tot}}{Q_{in}}$ 。将计算所得值与最大效率 $e_{\max} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$ 作比较。

思考题：

1. 若经过一次循环之后，系统不能回到 A 点，试分析其原因并提出改善方法。
2. 若冷水与热水的温差变小，将对实验结果有何影响？

比热容比测量实验

实验目的：

学习用拉其哈德法测定空气比热容比的方法。

实验仪器：

Pasco Capstone 软件，热机装置，大支撑杆，90 公分钢杆，850 通用接口，双通道压力传感器，气管封闭阀。



实验原理:

按照拉其哈德法, 在绝热的情况下, 活塞运动使得圆桶内的气体被压缩。此时活塞会振荡着回到平衡位置, 比热容比 γ 可以通过活塞振荡的周期来间接测量。

如果质量为 m , 面积为 A 的活塞在平衡位置以下 x 处, 那么会有一回复力 $F = -kx$ 使活塞回到平衡位置, 其中 k 为空气弹簧常数。在回到平衡位置后, 活塞会在平衡位置附近振动一小段时间, 其振动周期为 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 。

假设活塞的振动时间很短, 则振动过程可认为是绝热的。因此, 系统中空气的压强 P 与体积 V 满足 $PV^\gamma = \text{常数}$, 其中 γ 为空气的比热容比。空气主要由双原子分子构成, 故理论上, $\gamma = \frac{7}{5} = 1.4$ 。

两边微分 $PV^\gamma = \text{常数}$, 并由 $dV = xA$ 可得 $dP = -\frac{\gamma Px A}{V}$ 。再结合 $F = -kx = AdP$ 可得 $k = \frac{\gamma A^2 P}{V}$ 。最后再结合 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$ 可得 $V = \frac{\gamma A^2 P T^2}{4\pi^2 m}$ 。

从几何方面考虑, 系统中空气的体积 $V = A(h + h_0)$, 其中 h 从气缸最下方零刻线开始量起的活塞高度, h_0 是零刻线以下的未知等效高度。结合以上两个体积 V 的公式可得 $h = \left(\frac{\gamma AP}{4\pi^2 m}\right)T^2 - h_0$, 可见 h 与 T^2 是线性关系。因此, 若我们测得了 $h - T^2$ 图的斜率 K , 则空气的比热容比 $\gamma = \frac{4\pi^2 m}{AP} K$ 。

实验步骤:

1. 按实验仪器图将所用仪器安装好。
2. 开启 Pasco Capstone 软件, 以及传感器接口匣。
3. 建立 $P-t$ 坐标图, 纵轴设为压强 P (单位: kPa), 横轴设为时间 t (单位: ms)。
4. 在连接气管的三通处去掉气罐部分, 将活塞提升至 1cm, 用封闭阀封闭连接气管。
5. 点击记录按钮, 用手下压与活塞相连的平台后放手。得到 $P-t$ 坐标图上的震荡曲线后, 点击停止按钮。利用 $P-t$ 坐标图上的震荡曲线求出活塞振动的周期 T 。
6. 将活塞提升至 2, 3, 4, 5cm 处时, 重复步骤 5, 得到这些高度处活塞振动的周期 T 。

数据分析:

活塞半径 $r = 1.625\text{cm}$ ，活塞面积 $A = \pi r^2 = 8.296\text{cm}^2$ ，活塞质量 $m = 48.5\text{g}$ ，

大气压强 $P = 101.3\text{kPa}$ ， $\frac{AP}{4\pi^2 m} = 43.89\text{m/s}^2 = 4.389 \times 10^{-3}\text{cm/ms}^2$ 。

1. 建立三列表格，将活塞高度 $h = 1, 2, 3, 4, 5\text{cm}$ ，这些高度对应的活塞振动周期 T ，以及周期的平方 T^2 分别填入表格的三列。

2. 将第一列 h 作纵轴，第三列 T^2 作横轴建立坐标图。将数据进行线性拟合，并计算拟合直线的斜率 K 。

3. 计算 $\gamma = \frac{4\pi^2 m}{AP} K$ ，其中 P 近似为大气压强。

思考题:

1. 用本实验的方法测量氮气的比热容比，所得的 $h-T^2$ 图斜率是否会比本实验中的 $h-T^2$ 图斜率更大，为什么？