



普通物理I PHYS1181.03

彭鹏

Office: 物质学院8号楼301室
Email: pengpeng@shanghaitech.edu.cn

研究方向: 超快光谱、X射线阿秒脉冲产生、阿秒瞬态吸收光谱、
强场激光物理、飞秒激光成丝。

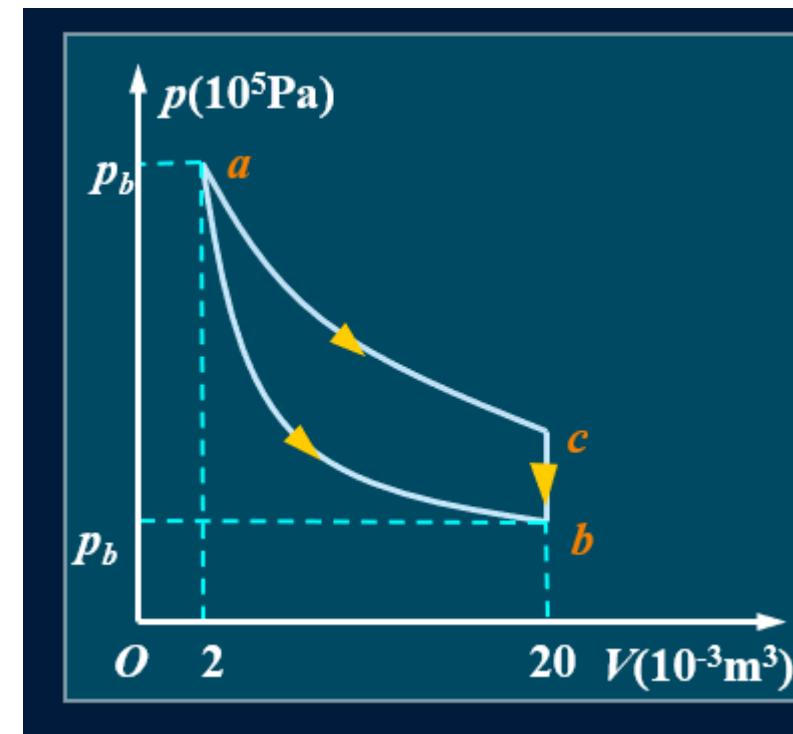
<https://spst.shanghaitech.edu.cn/2021/0115/c2349a59066/page.htm>



例如图所示，1mol氮气处于a态时的温度为300K，体积为 $2.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$ 。

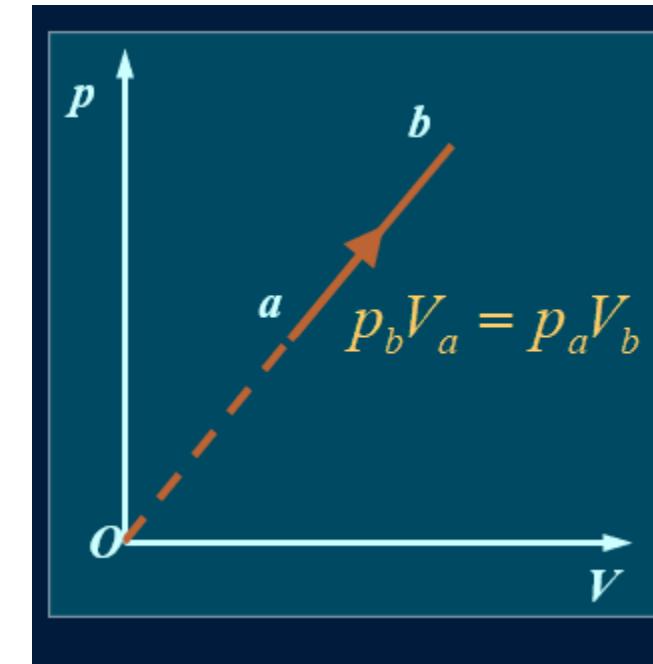
求 氮气在下列过程中作的功：

- (1) 从a态绝热膨胀到b态($V_b = 20.0 \times 10^{-3} \text{m}^3$)；
- (2) 从a态等温膨胀到c态，再由c态等体冷却到b态。



例如图所示的 p - V 图，表示某一理想气体由初态 a 经准静态过程 ab 直线变到状态 b ，已知该理想气体的定体摩尔热容 $C_{V,m} = 3R$

求 该理想气体在 ab 过程中的摩尔热容量 C_{ab} 。





多方过程

理想气体多方过程

$$pV^n = \text{常量}$$

多方过程摩尔热容

$$C_{n,m} = C_{V,m} - \frac{R}{n-1}$$

其中 n 为常数，称为多方指数。

当 $n = 0$ 时， $C_{n,m} = C_{p,m}$ ，过程方程为 $VT^{-1} = \text{常量}$ ，等压过程。

当 $n = 1$ 时， $C_{n,m} = \infty$ ，过程方程为 $pV = \text{常量}$ ，等温过程。

当 $n = \gamma$ 时， $C_{n,m} = 0$ ，过程方程为 $pV^\gamma = \text{常量}$ ，绝热过程。

当 $n = \infty$ 时， $C_{n,m} = C_{V,m}$ ，过程方程为 $pT^{-1} = \text{常量}$ ，等体过程。





理想气体热力学过程有关公式对照表

过程	特征	过程方程	能量转换方式	内能增量 ΔE	对外作功A	吸收热量Q	摩尔热容
等体	$V = \text{常量}$	$\frac{p}{T} = \text{常量}$	$Q = \Delta E$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	0	$\frac{m}{M} C_{V,m} (T_2 - T_1)$	$C_{V,m} = \frac{i}{2} R$
等压	$p = \text{常量}$	$\frac{V}{T} = \text{常量}$	$Q = \Delta E + A$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	$p(V_2 - V_1)$ $\frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$	$\frac{m}{M} C_{P,m} (T_2 - T_1)$	$C_{P,m} = C_{V,m} + R$
等温	$T = \text{常量}$	$pV = \text{常量}$	$Q = A$	0	$\frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\frac{m}{M} RT \ln \frac{p_2}{p_1}$	$\frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$ $\frac{m}{M} RT \ln \frac{p_2}{p_1}$	∞
绝热	$dQ = 0$	$\begin{cases} V^{\gamma-1}T = C_2 \\ p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3 \\ pV^\gamma = C_1 \end{cases}$	$A = -\Delta E$	$\frac{m}{M} \frac{i}{2} R(T_2 - T_1)$	$-\frac{m}{M} \frac{i}{2} C_{V,m} (T_2 - T_1)$	0	0



➤ 总结

(1) 理想气体的内能是温度的单值函数，任何过程只要始末状态确定，内能变化相同，与过程无关。

$$\Delta E = \frac{m}{M_{\text{mol}}} \frac{i}{2} R \Delta T$$

(2) 功和热量是过程量，讲某一状态的功、热量没有意义。

计算功时，由 $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ 出发，根据过程特点找到 p - V 关系积分求解。

计算热量时，由 $Q = \frac{m}{M_{\text{mol}}} C_m \Delta T$ 出发，摩尔热容 C_m 是过程量，等体过程 $C_m = C_{V,m}$ ；等压过程 $C_m = C_{p,m}$ ；绝热过程 $C = 0$ ；等温过程的热量按照 $Q = A$ 计算。



解题思路与方法：

应用热力学第一定律处理实际问题时，注意以下几点：

- (1) 明确准静态过程的始末状态，根据题设条件及过程方程或状态方程，求出始末状态的状态参量 p 、 V 、 T .
- (2) 应用热量、功、内能的定义式和热力学第一定律，求解待求量. 特别注意，功与热量与过程有关，内能与过程无关.
- (3) 理想气体在等值过程及绝热过程中的有关公式经常用到，熟悉这些公式会给计算带来许多方便.





主要内容：

1. 循环过程
2. 正循环和循环效率
3. 逆循环与致冷系数
4. 卡诺循环

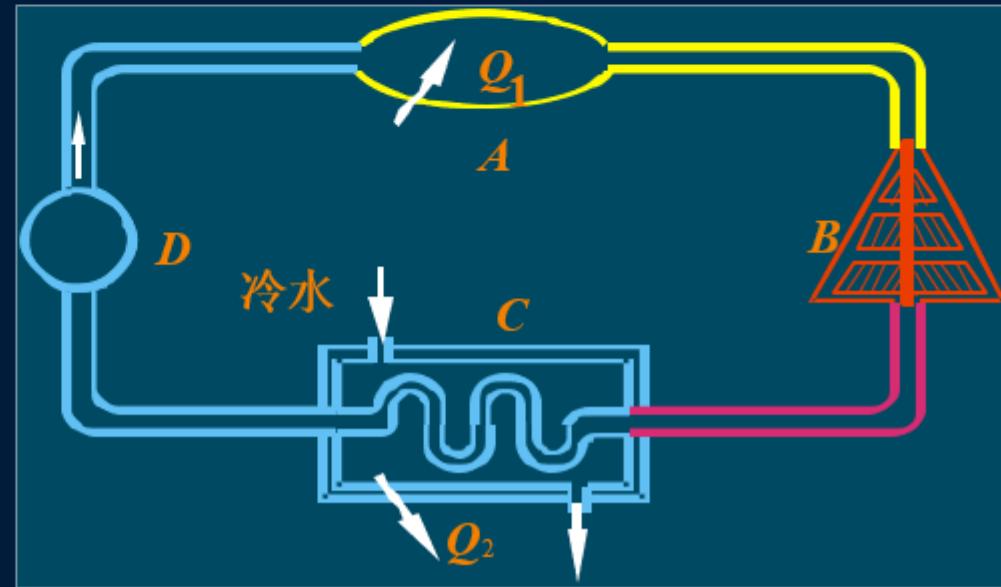


热机：利用热来作功的机器，以蒸汽轮机为例

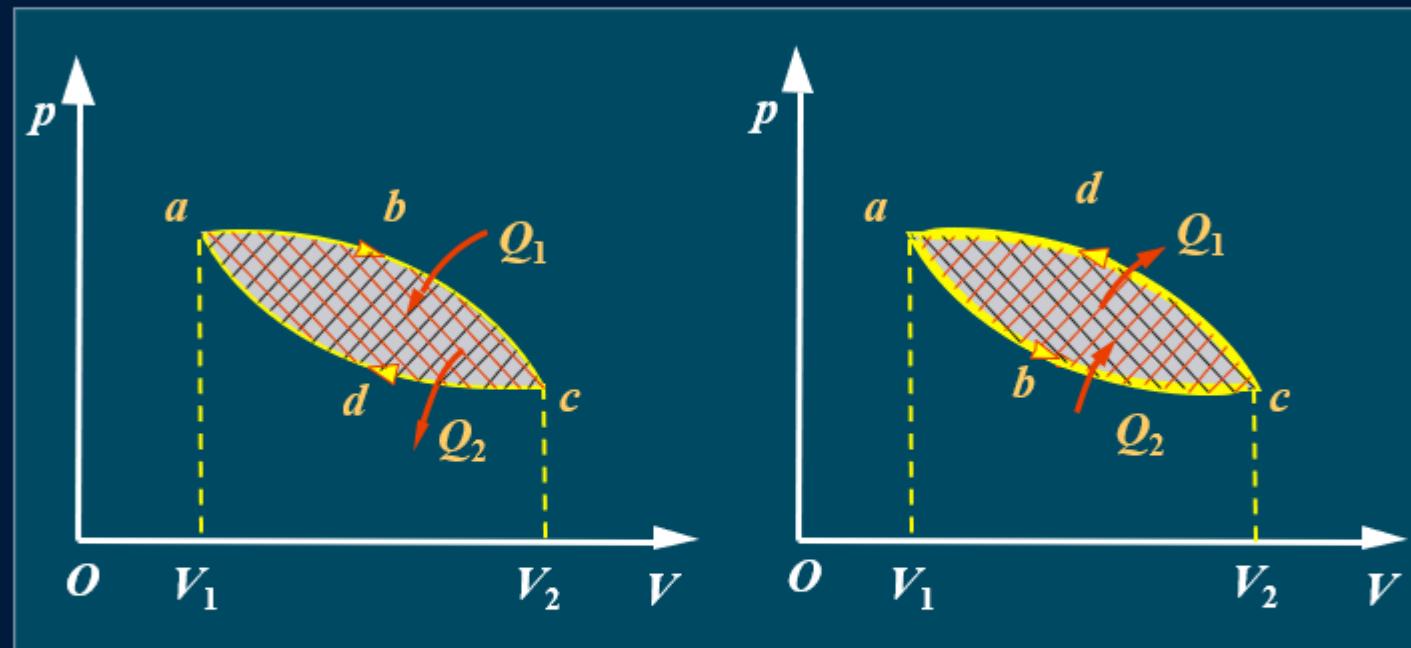


热机工作特征

- (1) 有工作物质
如水(蒸汽机)
- (2) 循环过程



循环过程: 工作物质经历一系列变化过程又回到初始状态的整个过程.



循环过程特征: $\Delta E = 0$

循环的分类: 正循环(顺时针) -- 热机

逆循环(逆时针) -- 致冷机



正循环和循环效率

设工质从高温热源吸热 Q_1 , 向低温热源放热 Q_2 , 对外作功 A .

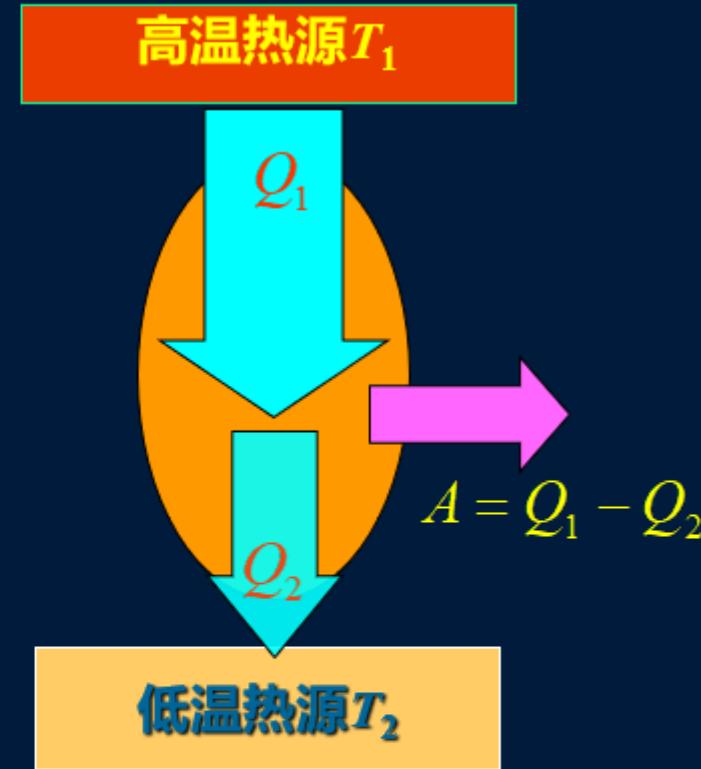
能量转换关系

净吸热: $Q_1 - |Q_2|$

对外作功: A

内能增加: $\Delta E = 0$

(净功 A 为循环过程曲线所包围的面积)



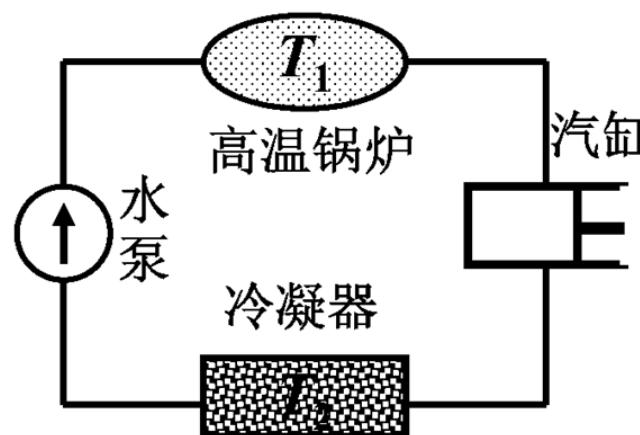
热机效率: 一次循环过程中, 工质对外作的净功 A 与它从高温热源吸收的热量 Q_1 的比值.

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

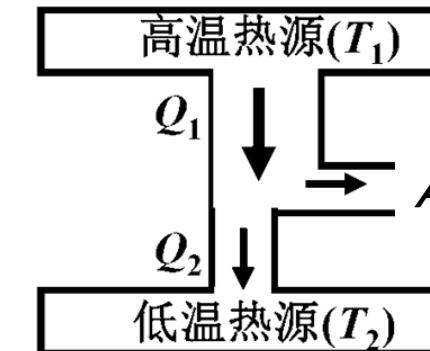
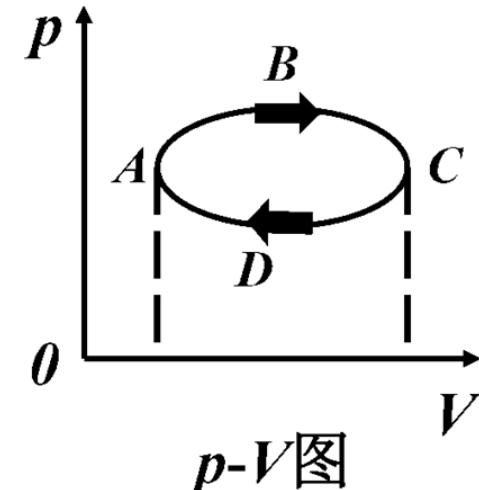


➤ 说明

- 正循环的膨胀过程中，系统从外界吸热， Q_1 包括整个循环过程中吸收的热量($Q_1>0$).
- 正循环的压缩过程中，系统向外界放热， Q_2 包括整个循环过程中放出的热量($Q_2<0$ 注意取绝对值).



简单蒸汽机示意图



能流图

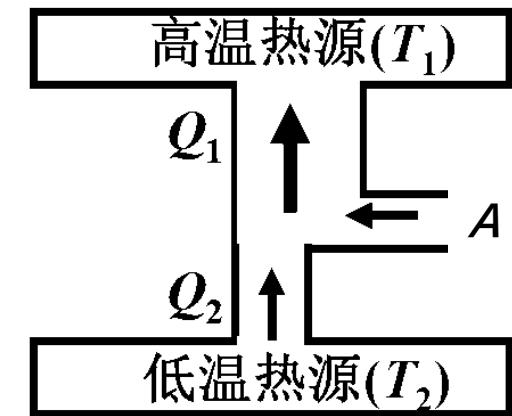
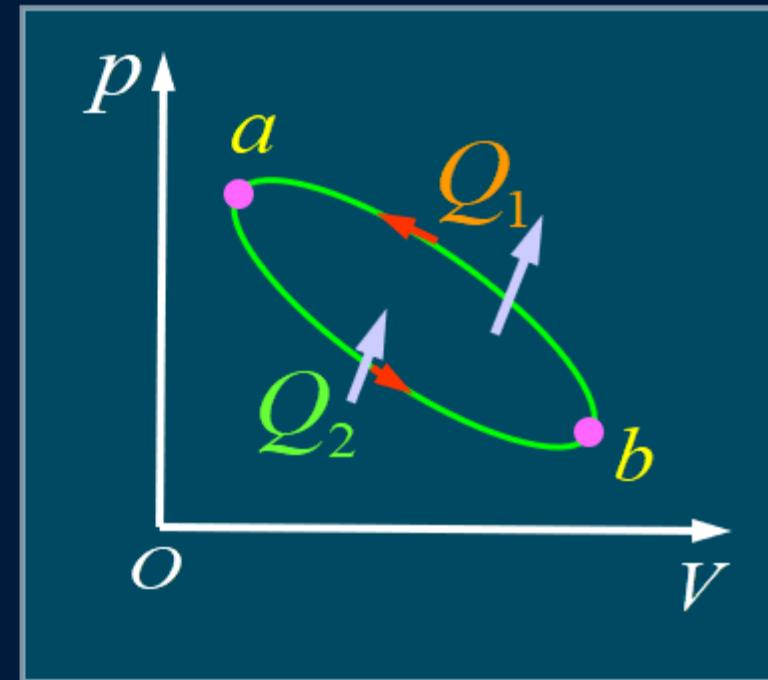
逆循环与致冷系数

逆循环过程中，工质从低温热源吸收热量 Q_2 ($Q_2 > 0$)，循环过程中 $Q_2 - |Q_1| = -|A|$ ，并向高温热源放出热量 Q_1 ($Q_1 < 0$)，外界必须对工质作功.

致冷系数：

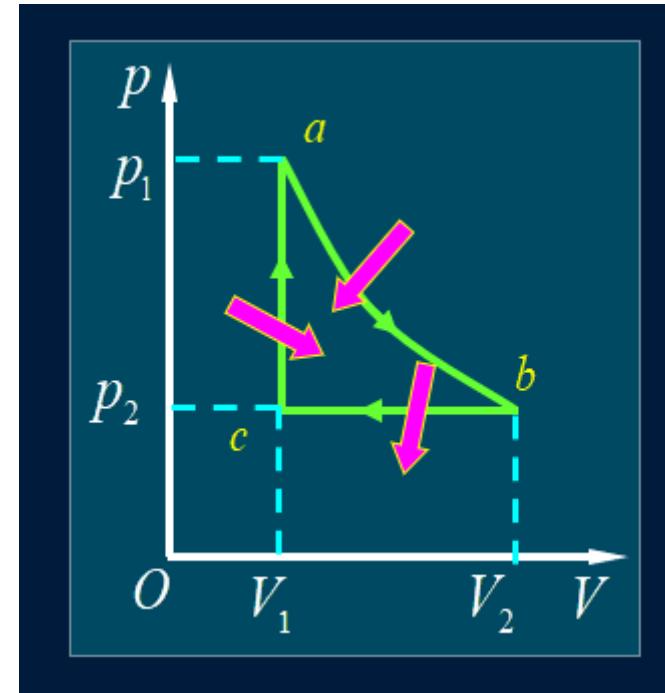
$$\omega = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$$

从低温热源吸收的热量 Q_2 与外界作的功 A 之比.



能流图

例 1mol氧气作如图循环, ab 为等温过程, bc 为等压过程,
 ca 为等体过程。试计算循环效率。





例 广东大亚湾核电站总装机容量为 180×10^7 W, 效率为30%.

求 当发电机组全部投入运行时, 每秒钟热机从核锅炉中吸取的热量; 若用 10°C 的海水冷却冷凝器, 而排水温度为 20°C , 问每秒钟需要多少吨海水?

已知海水的比热为 $c = 4.18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$



卡诺循环

卡诺热机：理想热机，循环过程为卡诺循环。

卡诺循环：由两个等温过程和两个绝热过程组成。

等温膨胀过程：

$$a(p_1, V_1, T_1) \rightarrow b(p_2, V_2, T_1)$$

绝热膨胀过程：

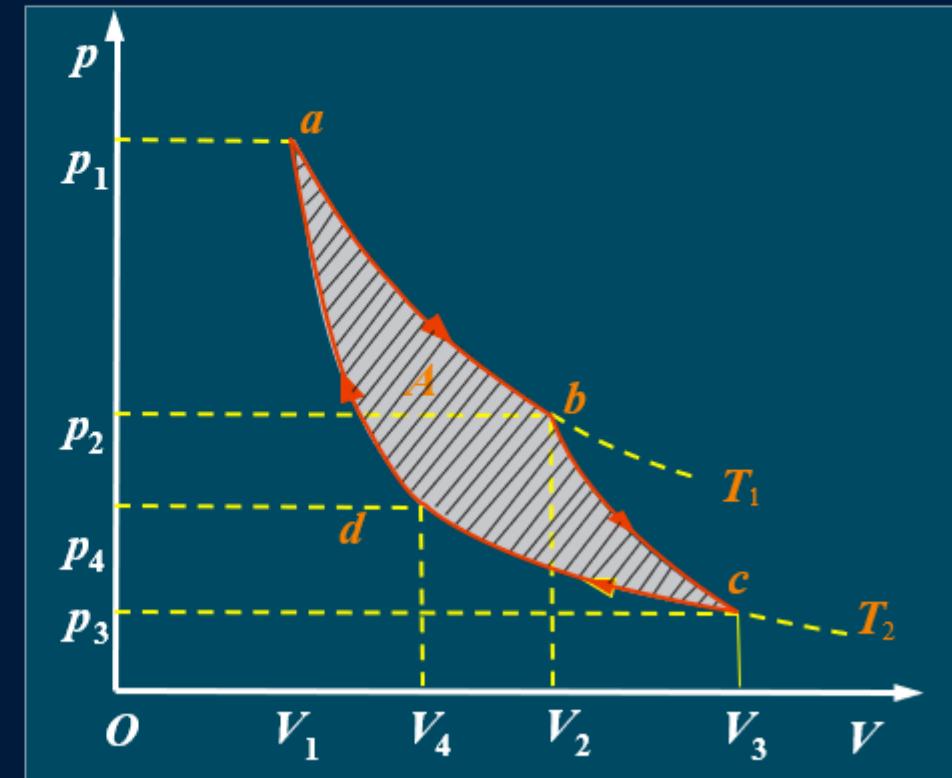
$$b(p_2, V_2, T_1) \rightarrow c(p_3, V_3, T_2)$$

等温压缩过程：

$$c(p_3, V_3, T_2) \rightarrow d(p_4, V_4, T_2)$$

绝热压缩过程：

$$d(p_4, V_4, T_2) \rightarrow a(p_1, V_1, T_1)$$



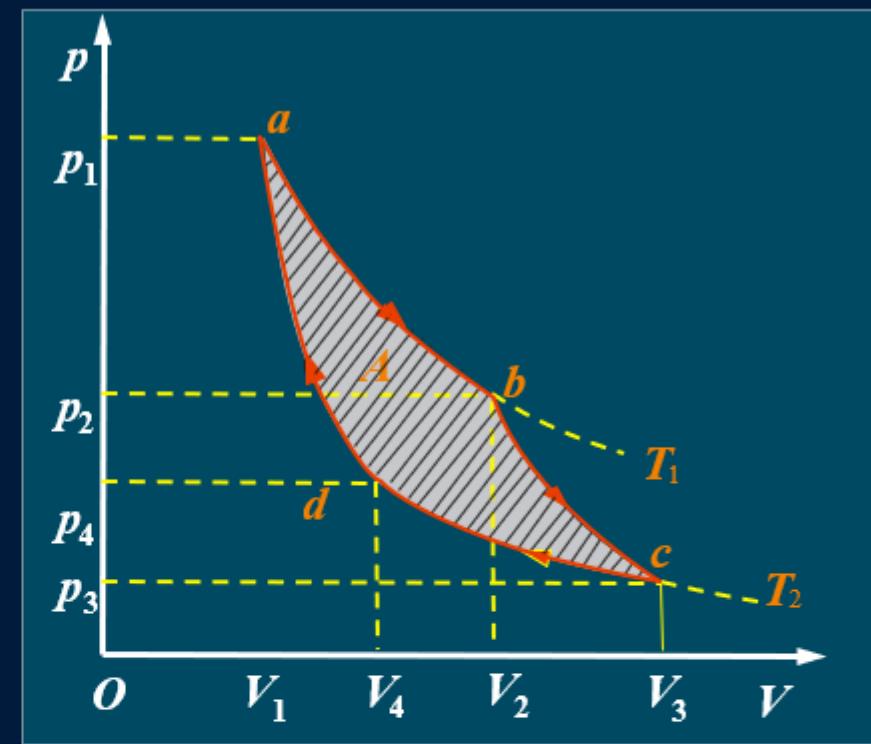
卡诺循环的热机效率

$$Q_1 = Q_{ab} = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$|Q_2| = |Q_{cd}| = \frac{m}{M_{\text{mol}}} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

由绝热过程方程有

$$\left. \begin{aligned} V_2^{\gamma-1} T_1 &= V_3^{\gamma-1} T_2 \\ V_1^{\gamma-1} T_1 &= V_4^{\gamma-1} T_2 \end{aligned} \right\} \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\frac{m}{M} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{\frac{m}{M} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

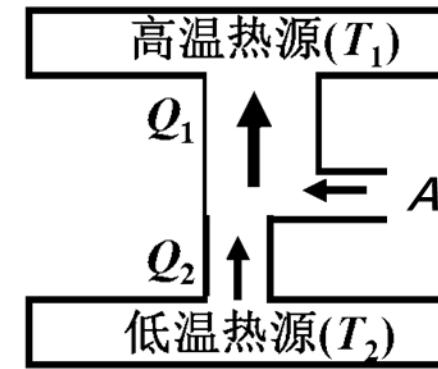
卡诺热机的效率仅与高低温热源温度比值有关.



逆循环（制冷循环）与制冷系数

制冷机的工作效率用制冷系数表示：

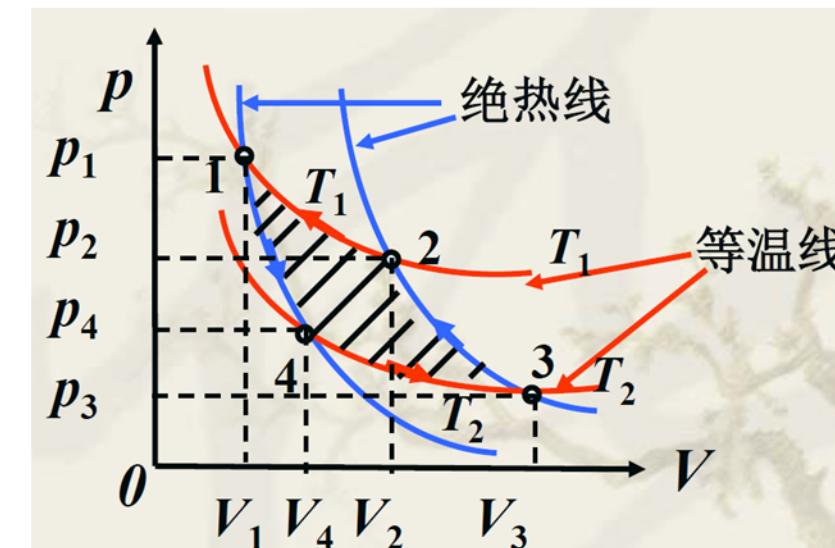
$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$



能流图

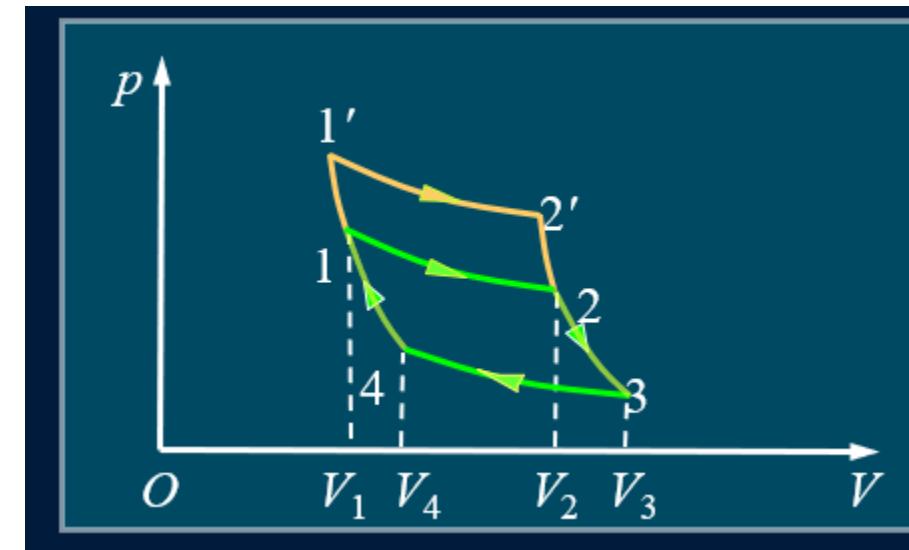
可逆卡诺制冷机的制冷系数

$$\eta = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



例 某理想气体准静态卡诺循环，当高温热源温度为 $T_1=400\text{K}$ ，低温热源温度 $T_2=300\text{K}$ 。对外做净功 $A=8000\text{J}$ 。今维持低温热源温度不变，提高高温热源的温度，使其对外做净功增至 $A'=10000\text{J}$ ，两次卡诺循环都工作在相同的两绝热线之间。

- 求 (1)第二次循环的效率 η_2 ；
(2)第二次循环中高温热源的温度 T_1' 。



例 用卡诺致冷机使1.00kg、0°C的水变成0°C的冰，(设周围环境的温度为27°C，冰的熔解热为 $3.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

问 需要做多少功?致冷机向周围环境放出了多少热量?





例(1)夏季使用房间空调器使室内保持凉爽，现须将热量从室内以 $2000\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ 的散热功率排至室外.设室温为 27°C ，室外为 37°C ，求空调器所需的最小功率.

(2)冬天用房间空调器保持室内温暖。设室外温度为 -3°C ，室温需保持 27°C ，仍用上面所给的功率，则每秒传入室内的热量是多少？



计算热机的效率与致冷机的致冷系数是与工程实践相关的问题，处理这类问题的一般思路是：

(1) 根据循环过程作出该循环的 p - V 图.

(2) 一般热机的循环效率 $\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$;

一般致冷机的致冷系数 $\omega = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$;

卡诺热机的循环效率为 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$;

卡诺致冷机的致冷系数为 $\omega = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$.





(3) 根据题设条件，计算出循环过程中吸收的热量、放出的热量及作功的数值。

(4) 计算循环效率和致冷系数，根据实际情况选用 η 或 ω 的不同表达式。

- 如果吸热 Q_1 和放热 Q_2 容易求出，选用

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

- 如果吸热 Q_1 和对外作功 A 容易求出，就选用

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

- 如果是卡诺循环可直接利用高温热源和低温热源温度 T_1 、 T_2 求出 η 和 ω 。