

热学2 热力学第一定律

基本内容及基本教学要求

- 1.掌握热力学第一定律表述（平衡态 微分形式）
- 2.熟练热一律在理想气体准静态过程中的应用
- 3.会计算自由膨胀过程中的功能关系
- 4.会判断可逆过程和不可逆过程
- 5.知道循环过程的功能关系
会计算热机效率 制冷机的制冷系数
- 6.掌握卡诺循环
记住卡诺热机效率
卡诺制冷机的制冷系数公式

一.基本物理量的计算

1. A 、 Q 、 ΔE 的计算

(1) 直接计算

计算公式

适用对象

适用条件

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV$$

任何系统

准静态过程

$$Q = \nu C \Delta T$$

任何系统

始末态为平衡态
 $C = \text{const.}$

$$\Delta E = \nu C_V \Delta T$$

理想气体

始末态为平衡态
 $C_V = \text{const.}$

(2) 用热力学第一定律计算

$$dQ = dE + dA$$

适用于任何系统和任何过程

(3) 用 $p - V$ 图分析

- 1) 过程曲线与 V 轴所围的面积 = $| A |$
 - 2) 理想气体等温线上 $\Delta E = 0$
 - 3) 绝热线上 $Q = 0$
- } 两条重要的参考线

2. 理想气体的内能

1) 等体过程

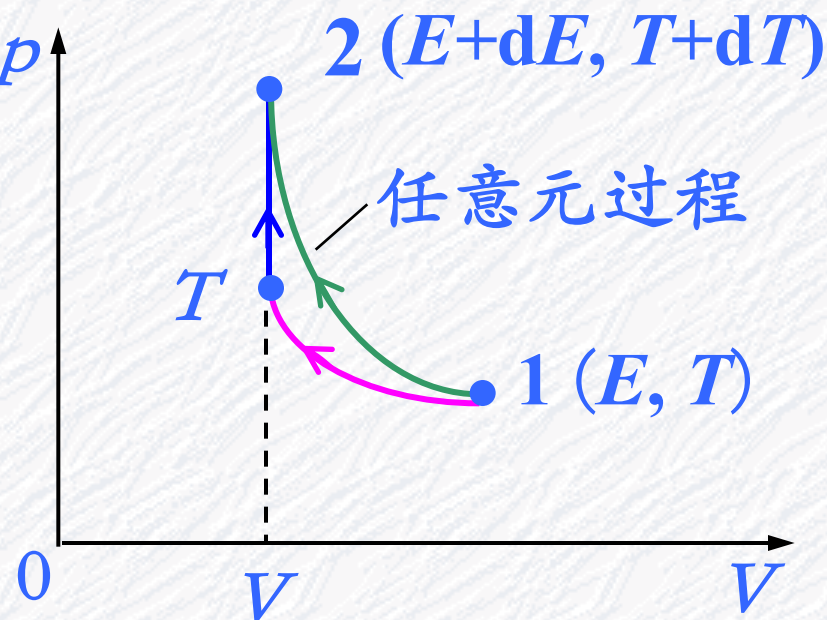
系统做功和吸热： $\bar{d}A_V = 0$, $\bar{d}Q_V = \nu C_{V,m} dT$

根据热 I 律： $dE_V = \nu C_{V,m} dT$

2) 任意元过程

dE 只与状态1、2有关，与元过程无关，因此计算 dE 可选择一条方便路径：

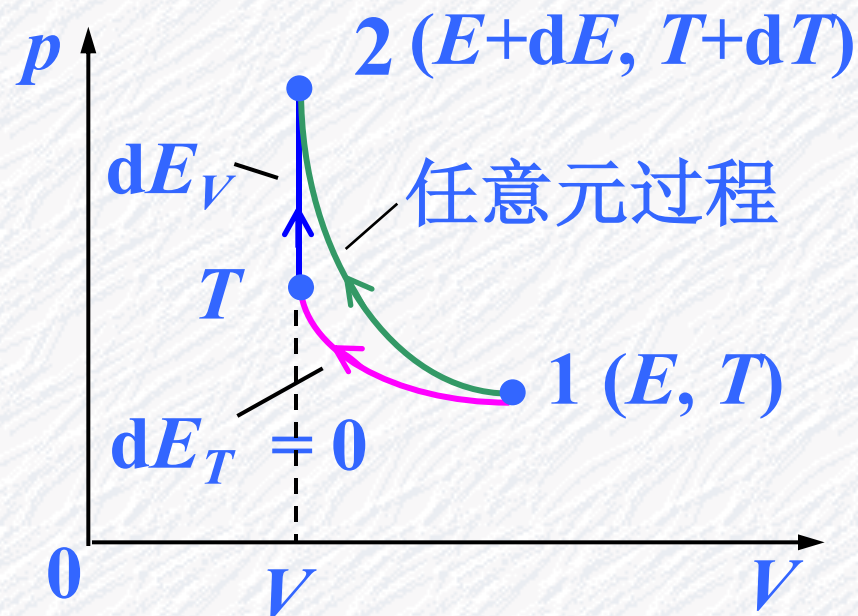
等温 + 等体过程



$$dE = dE_V + dE_T$$

$$= dE_V$$

$$= \nu C_{V,m} dT$$



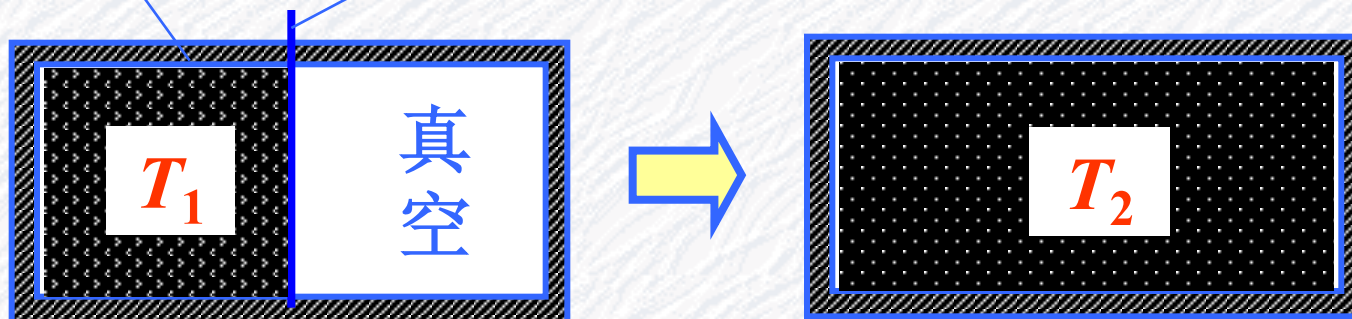
一般情况下可认为 $C_{V,m}$ 与过程、温度无关，

内能是状态函数，所以理想气体内能：

$$\Delta E = \nu C_{V,m} \Delta T$$

3. 绝热自由膨胀过程（功能关系）

刚性绝热壁 隔板



$$\left. \begin{array}{l} \text{器壁绝热: } Q = 0 \\ \text{向真空膨胀: } A = 0 \end{array} \right\} \xrightarrow{\text{热 I 律}} E_1 = E_2$$

$$\text{对理想气体: } T_1 = T_2$$

不是等温过程，不是准静态过程

如果右边不是真空，给出功能之间的关系？

准静态等温膨胀过程：（隔板慢慢向右移动）

$$\Delta E = 0$$

$$\begin{aligned} Q = A &= \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1} \\ &= \nu RT \ln 2 > 0 \end{aligned}$$

—— 吸热并对外做功过程

绝热自由膨胀过程： $\Delta E = A = Q = 0$

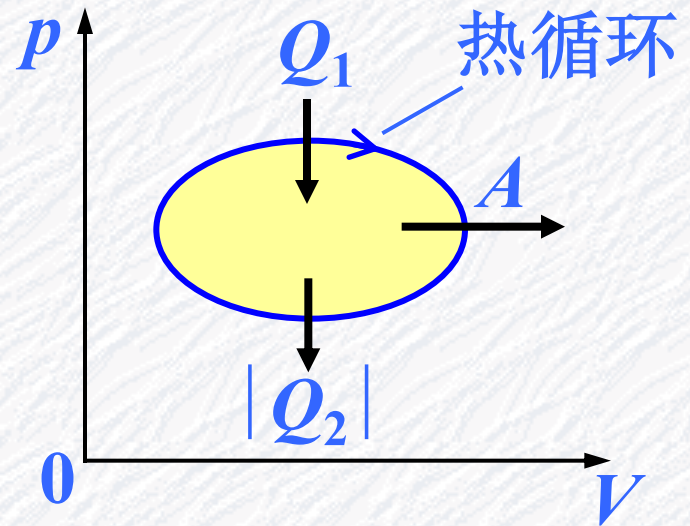
准静态等温膨胀过程 \neq 绝热自由膨胀过程
 \neq 准静态绝热膨胀过程（等熵过程）

4. 热机循环效率、做功与能量之间关系

设在整个过程中：

Q_1 — 吸收的总热量

$|Q_2|$ — 放出的总热量



系统对外界作的净功 A

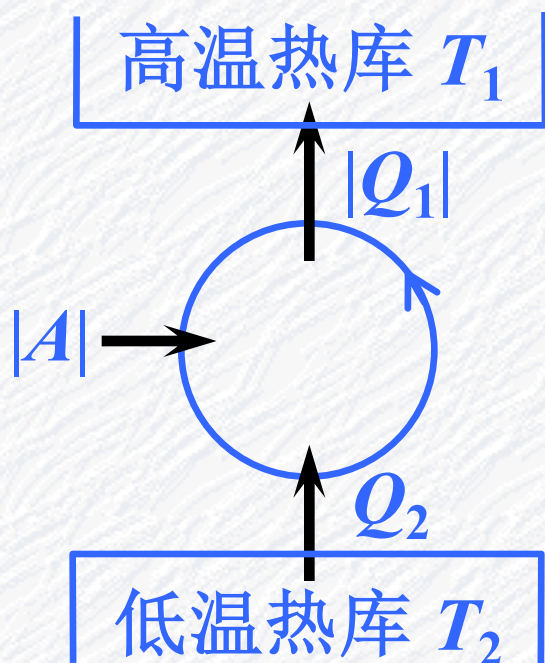
= 系统净吸热 $Q_1 - |Q_2| > 0$

= 循环曲线所围面积

定义热循环效率 $\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$

卡诺热机循环效率

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$



致冷系数

$$w = \frac{Q_2}{|A|}$$

卡诺致冷机

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

二. 讨论题目

1. 仔细审视下列两式

等价?

说说不同?

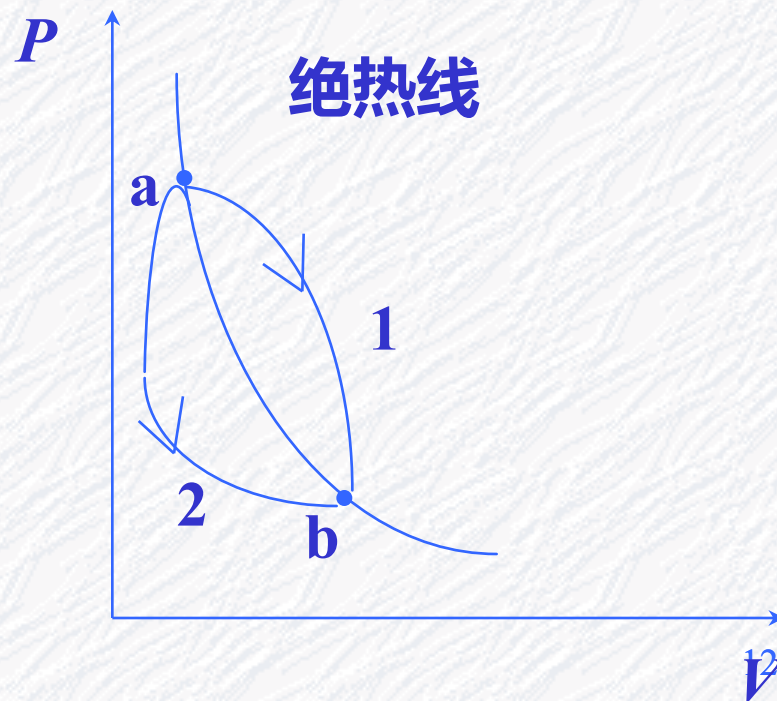
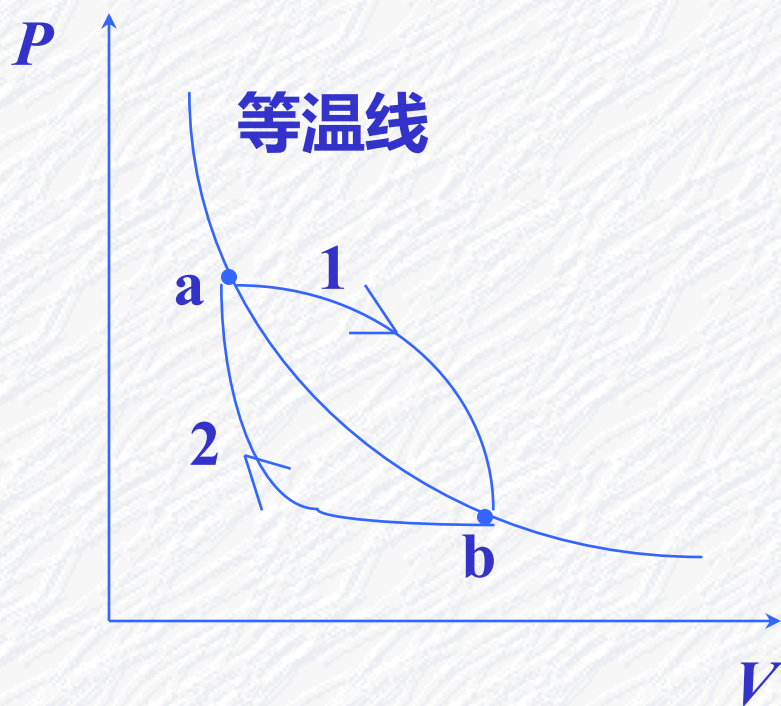
$$\delta Q = dE + \delta A$$

$$TdS = dE + \delta A$$

**2. 在 $p - V$ 图上能画出来的过程
是否一定是可逆过程？**

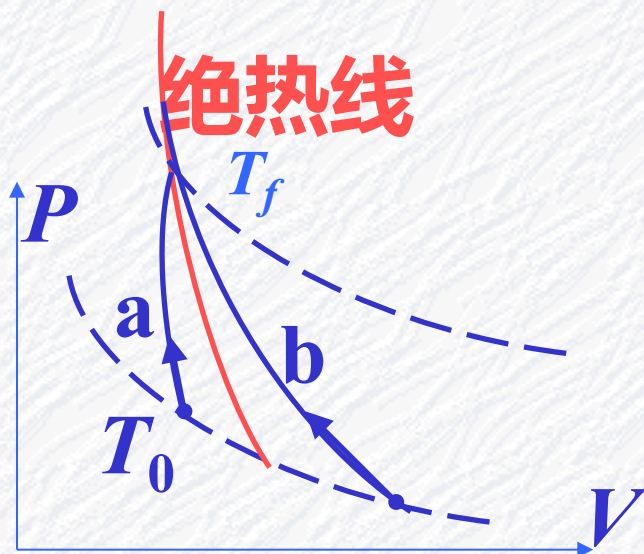
3. 理想气体经历下述过程 讨论 ΔE , ΔT , A 和 Q 的符号

$$Q = \Delta E + A$$



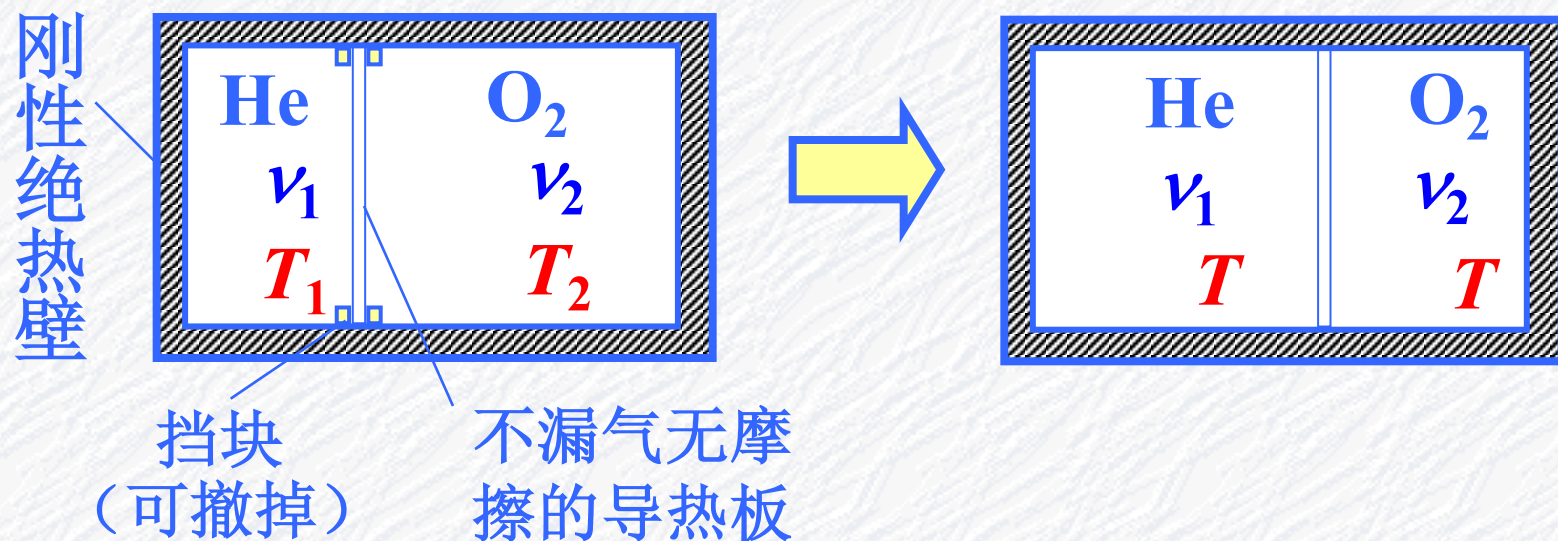
4. 理气分别由同一等温线 T_0 上两状态经历过程
a、b到达相同的末态 (T_f)

判断 \bar{C}_a, \bar{C}_b
的正负



三. 计算题

1. 已知： ν_1 mol、 温度 T_1 的 He 气和
 ν_2 mol、 温度 T_2 的 O_2 气经历如下过程

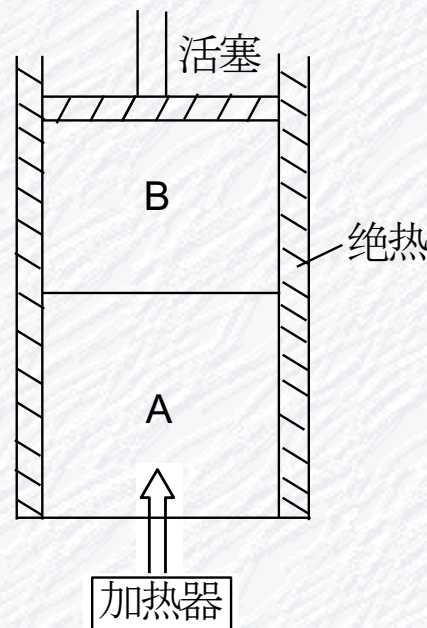


求： 终态的 $T = ?$

2. 右图为一气缸，除底部导热外，其余部分都是绝热的. 其容积被一位置固定的轻导热板隔成相等的两部分A和B，其中各盛有1mol的理想氮气. 今将335J的热量缓慢地由底部传给气体，设活塞上的压强始终保持为1atm.

(1) 求A, B两部分温度的改变及吸收的热量
(导热板的吸热、活塞的重量及摩擦均不计) ;

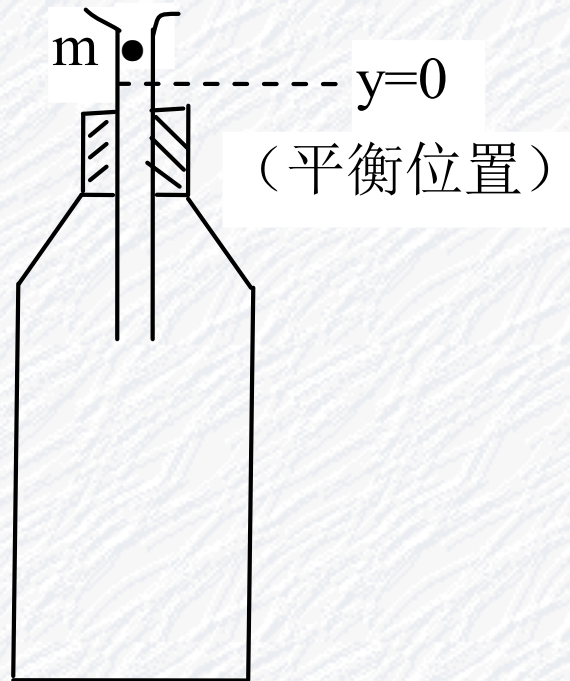
(2) 若将位置固定的导热板换成可自由滑动的绝热隔板，上述温度改变和热量又如何?



3. 如下图，瓶内盛有气体，一横截面为 A 的玻璃管通过瓶塞插入瓶内。玻璃管内放有一质量为 m 的光滑金属小球（象一个活塞）。设小球在平衡位置时，气体的体积为 V ，压强为 $p = p_0 + \frac{mg}{A}$ ，其中 p_0 为大气压强。现将小球稍向下移，然后放手，则小球将以周期 T 在平衡位置附近作简谐振动。假定在小球上下振动的过程中，瓶内气体进行的过程可看作准静态绝热过程，试求：

(1) 使小球作简谐振动的准弹性力 F 与小球相对其平衡位置的位移 y 之间的关系；

(2) 小球作简谐振动的周期 T 。



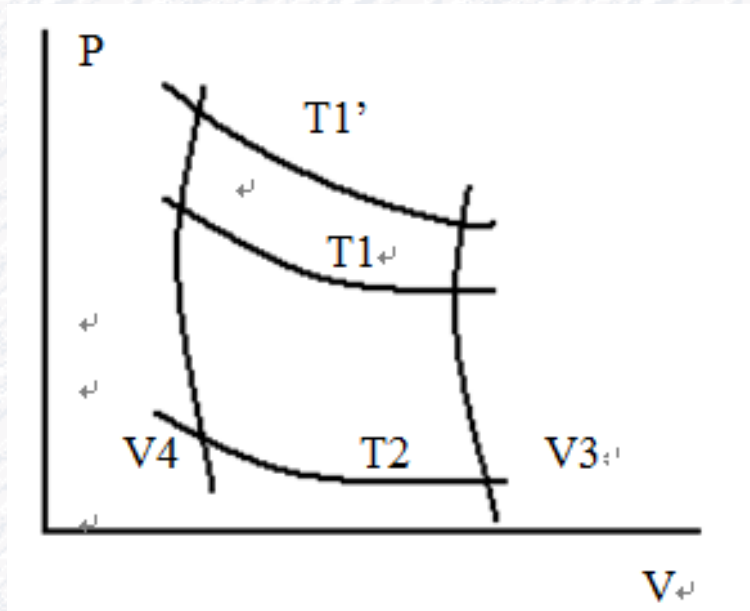
4. 一热机在1000K和300K的两热源之间工作，如果（1）高温热源提高为1100K，（2）低温热源降低为200K。试问，从理论上说，热机效率各可增加多少？为了提高热机效率，哪一种方案为好？

5. 设一动力暖气装置由一个热机和一个致冷机组合而成，即致冷机靠热机做功来运转。热机靠燃料燃烧时放出的热量工作，向暖气系统中的水放热。设热机锅炉的温度为 $t_1 = 210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 度，天然水的温度为 $t_2 = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 度，暖气系统的温度为 $t_3 = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 度，燃料的燃烧热为 5000 kcal/kg

试求燃烧 1.00 kg 燃料，暖气系统所得的热量。假设热机和致冷机的工作循环都是理想卡诺循环。

6. 在高温热源为 127°C ，低温热源为 27°C 之间工作的卡诺热机，对外做净功 8000J . 若维持低温热源温度不变，提高高温热源温度，使其对外做净功 10000J . 假设这两次循环该热机都工作在相同的两条绝热线之间，试求：

- (1) 后一个卡诺循环的效率；
- (2) 后一个卡诺循环的高温热源的溫度.



四.选做题

1.

摩尔单原子理想气体从某初态经历热容量为 $C=2R(1+0.01T)$ 的准静态过程，到达温度为初态温度 2 倍、体积为初态体积 $\sqrt{2}$ 倍的终态。试求内能增量 ΔE 及系统对外所作的功 W 。

分析 设初态温度为 T_0 。显然， $\Delta E = C_V(2T_0 - T_0) = C_V T_0$

$Q = \int_{T_0}^{2T_0} C dT = \int_{T_0}^{2T_0} 2R(1+0.01T) dT$ 。因此，计算 ΔE 、 Q 、 W 的关键在于求出 T_0 。

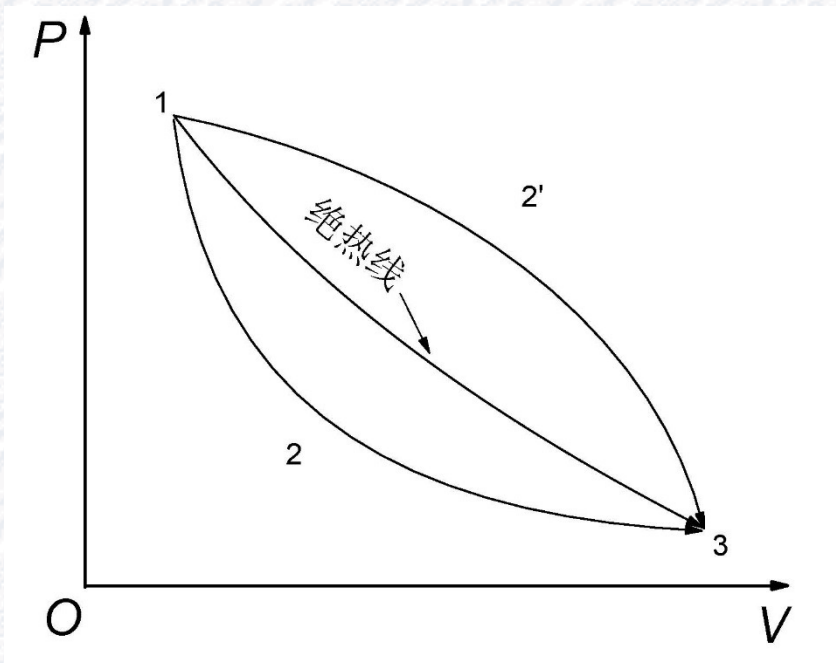
通常的过程方程直接表为 p 、 V 、 T 中任意两个量变化时所遵循的一个关系。本题的过程方程稍有不同，表为热容量 C 随温度的变化。由 C 的定义， $dQ = C dT$ ，再利用热力学第一定律 $dQ = C_V dT + p dV$ 和状态方程 $pV = \nu RT$ ，即可将上述过程方程改写成 T 、 V 之间的变化关系。由此，利用已知的初、终态的关系， T_0 可求，问题迎刃而解。

2. 过程如右图所示，讨论理想气体在下列过程中 ΔE , ΔT , W , Q 的正负.

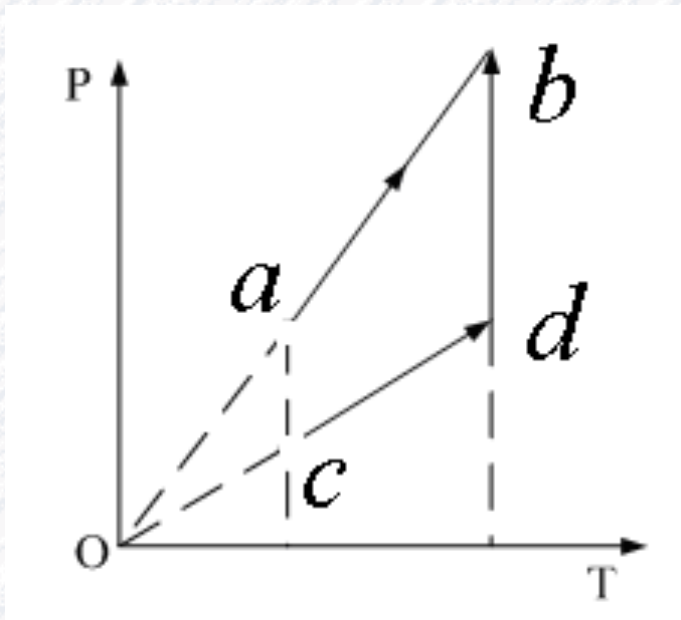
(1) $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ 过程;

(2) $1 \rightarrow 2' \rightarrow 3$ 过程;

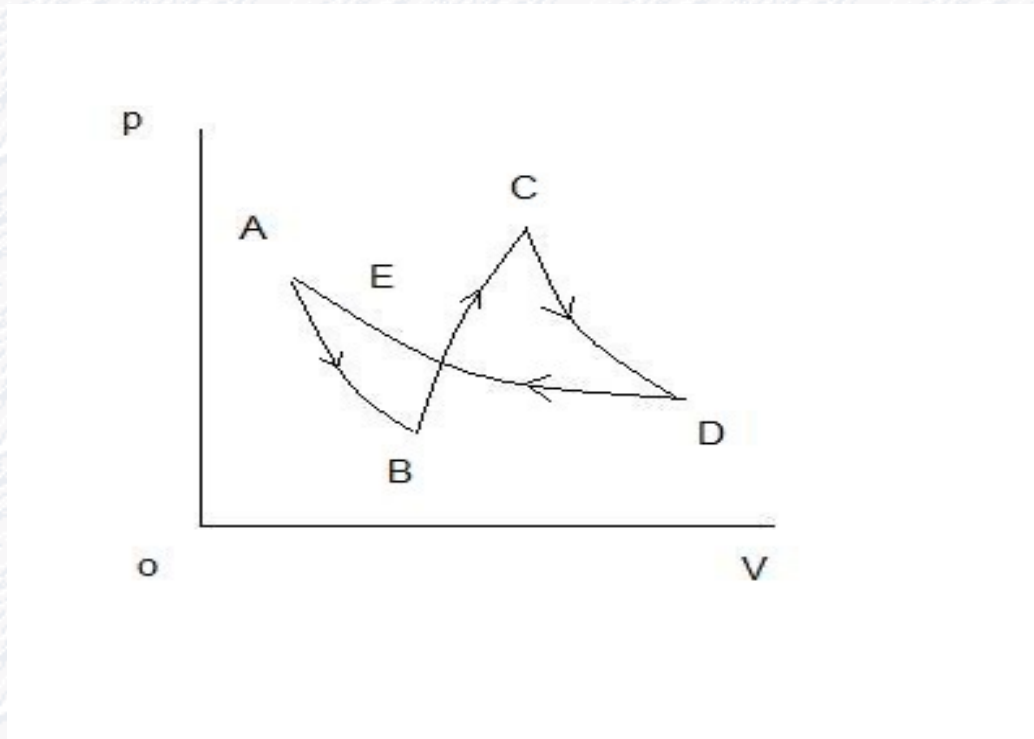
(3) 比较上述两过程吸、放热的绝对值的大小



3. 一定量的理想气体分别由初态 a 经过 ab 过程，和由初态 c 经 cd 过程到达同一终态 b ，如下图所示，试比较这两个过程中气体与外界传递热量 Q_1 、 Q_2 的大小。



4. 如右图, 由绝热过程 AB, CD , 等温过程 DEA 和任意过程 BEC 组成一循环过程 $ABCDEA$, 已知图中 $ECDE$ 所包围的面积为 70J , $EABE$ 所包围的面积为 30J , DEA 过程中系统放热 100J , 求整个循环过程 $ABCDEA$ 中系统对外做功和 BEC 过程中系统从外界吸热各为何?



5. 环境温度 T_0 , 现一物体热容量 C , 温度 T . 利用物体与环境的温差设计一热机, 使热机效率最高, 求最大输出功.