# 大学物理（一）

任课老师：蔡林
cailin@hust.edu.cn

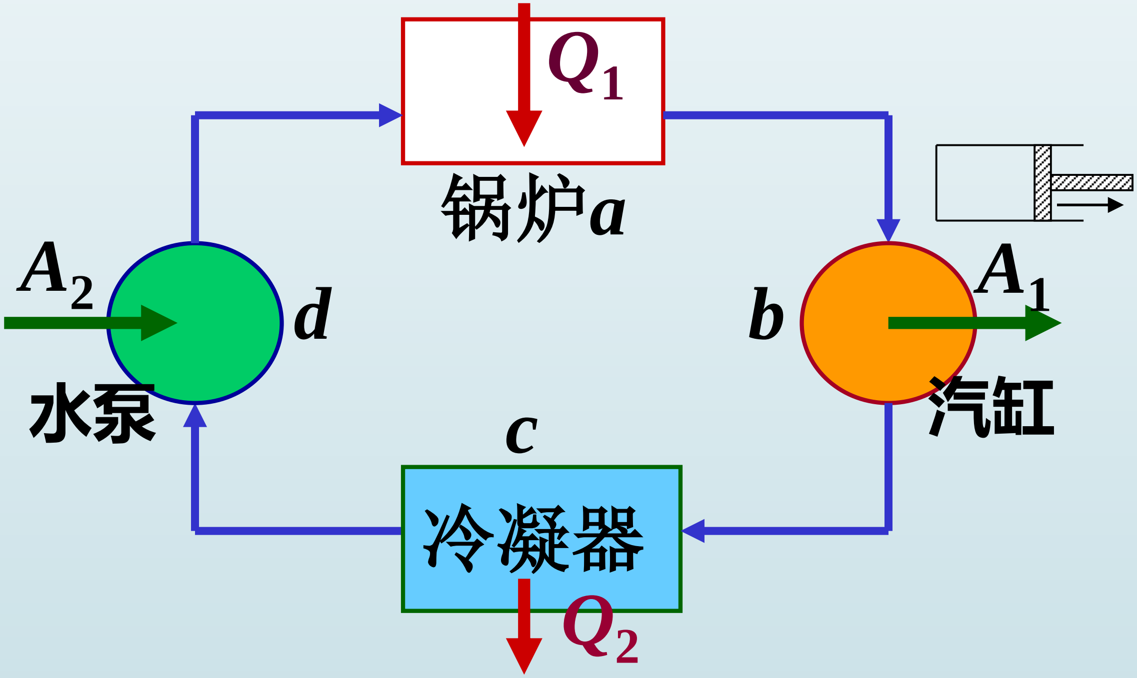
# 五、循环过程 卡诺循环

## 1. 循环过程

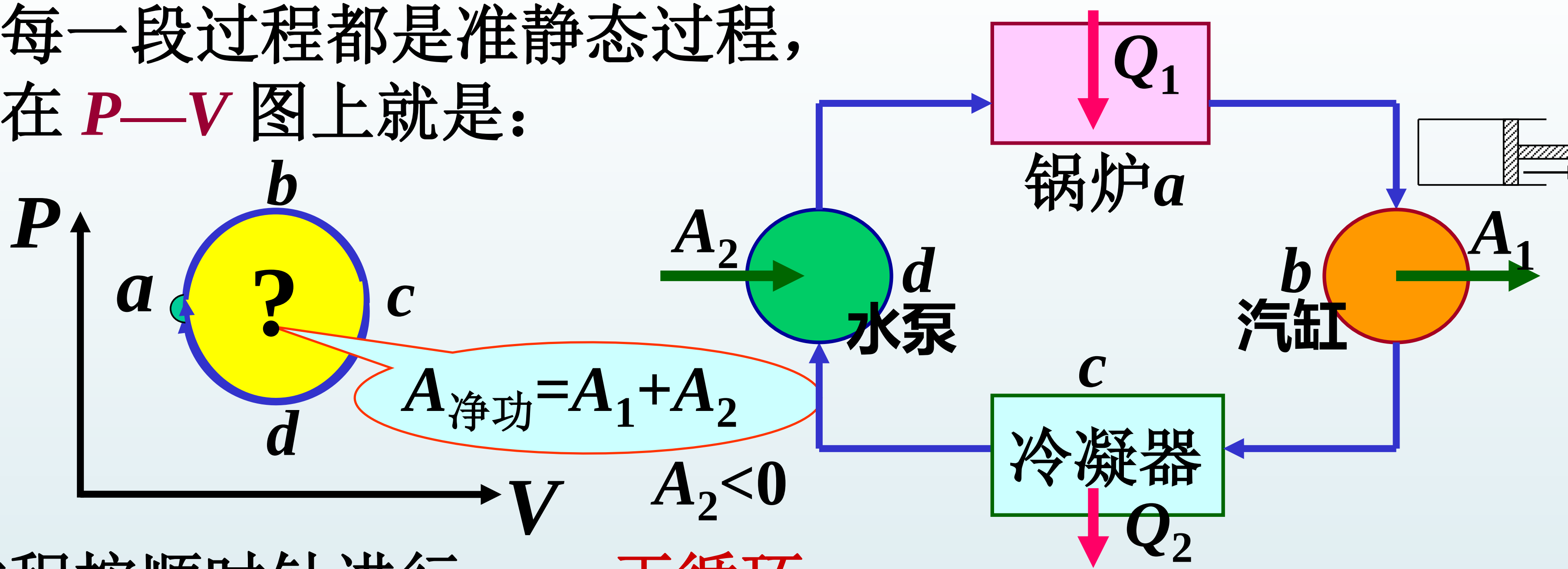
**系统经历一系列变化又回到了初始状态的过程，称为循环过程。**

蒸汽机即为一例。

**这里，系统就是蒸汽机的工作物质（工质）——水**



若每一段过程都是准静态过程，
画在 *P—V* 图上就是：




过程按顺时针进行 ——正循环。

反之，叫逆循环。

蒸汽机进行的循环是正循环。可以获得净功。

**这种利用工质做功把热能转变成机械能的装置叫做热机。**

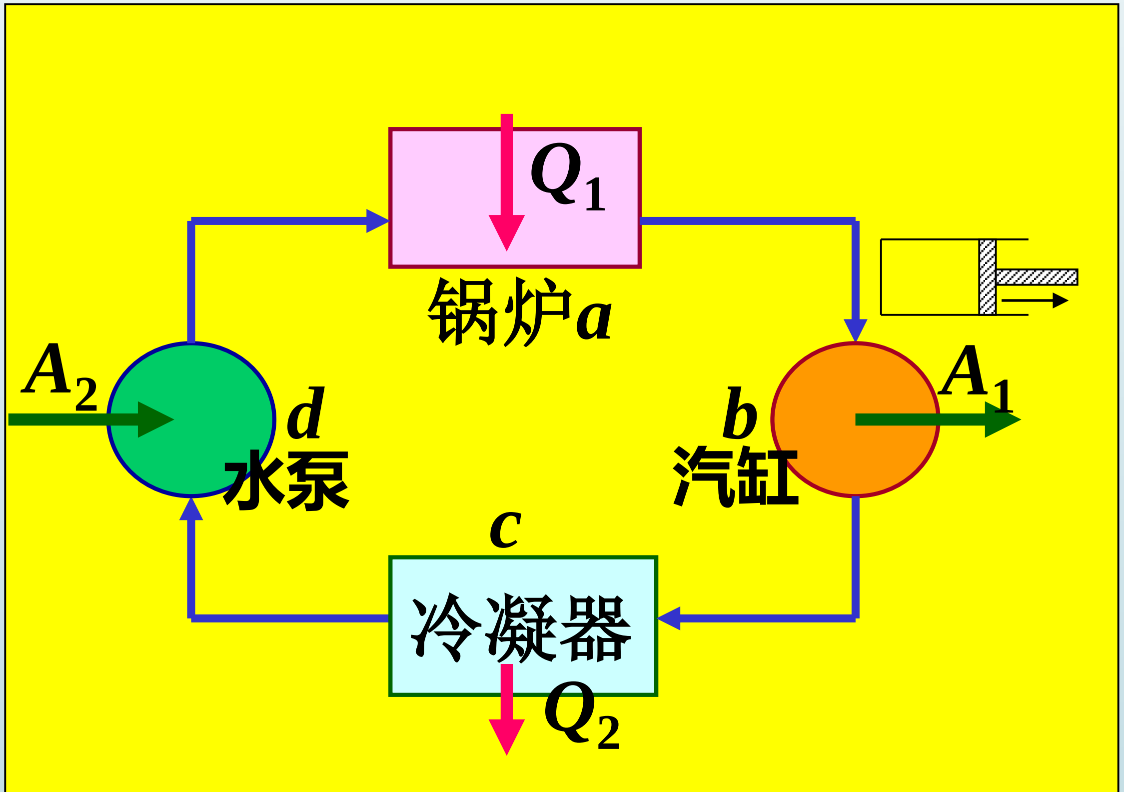
## 2. 热机效率

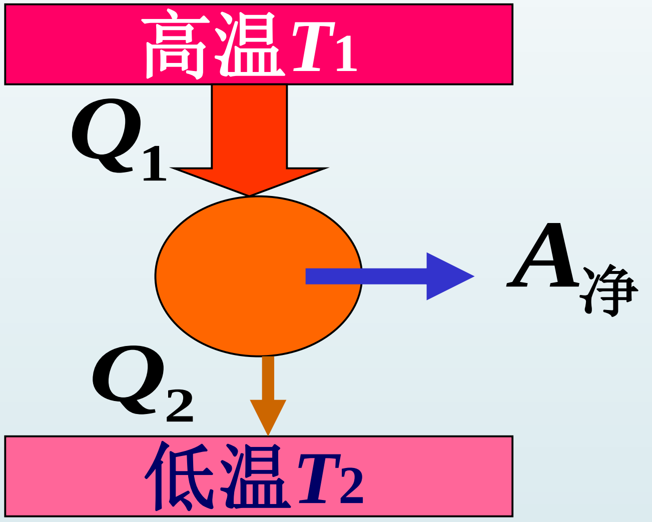
热机: **利用工质做功把热能转变成机械能的装置。**

从高温热源$T_1$吸热$Q_1$,

对外做净功$A_{净}$,

向低温热源$T_2$放热$Q_2$,



$Q = \Delta E + A$

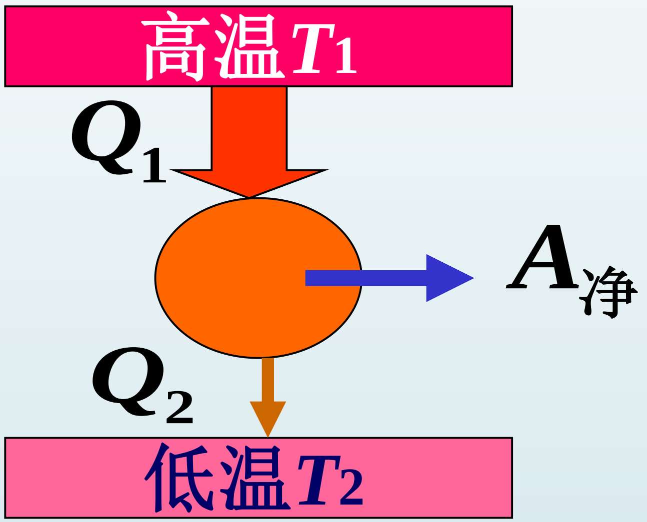
## 2. 热机效率

热机: **利用工质做功把热能转变成机械能的装置。**

从高温热源$T_1$吸热$Q_1$,

对外做净功$A_净$,

向低温热源$T_2$放热$Q_2$,



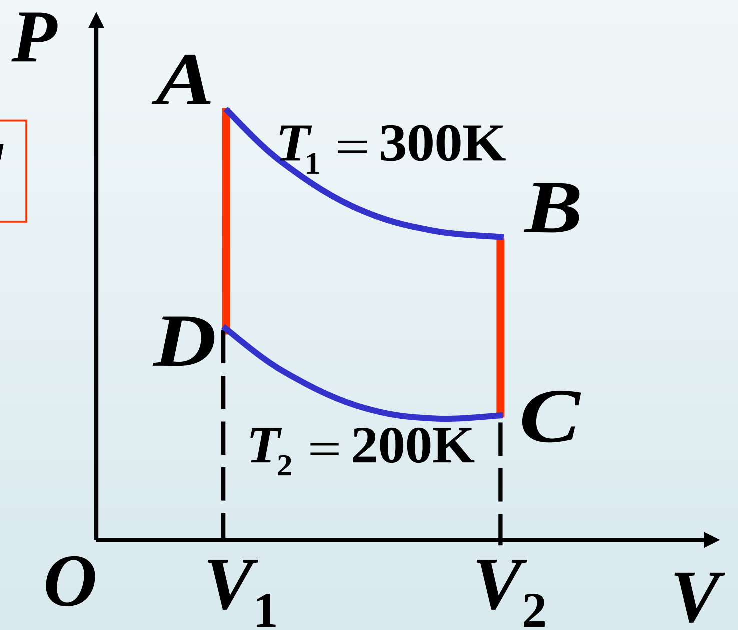

工质回到初态 $\Delta E = 0$

$$A_净 = Q_1 - |Q_2|$$

热机效率:

$$\eta = \frac{A_净}{Q_{总吸}} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

例: 0.32kg的氧气作如图所示的循环$ABCDA$, 设$V_2=2V_1$，$T_1=300\text{K}$, $T_2=200\text{K}$, 求循环效率。已知$AB$、$CD$为等温过程, $BC$、$DA$为等容过程, 氧气的定容摩尔热容的实验值为$C_{V,m}=21.1\ \text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$。




解: $\eta = 1 - \dfrac{|Q_2|}{Q_1}$

$$\boxed{PV = \nu RT}$$

$$Q_{AB} = \underbrace{\Delta E}_{0} + A = \int_A^B P\mathrm{d}V$$

$$= \int_{V_1}^{V_2} \frac{\nu RT_1}{V}\mathrm{d}V = \nu RT_1 \ln 2$$

$$Q_{CD} = \int_{V_2}^{V_1} \frac{\nu RT_2}{V}\mathrm{d}V = -\nu RT_2 \ln 2$$

$$Q_{BC} = \nu C_{V,m}(T_2 - T_1) \quad < 0$$

$$Q_{DA} = \nu C_{V,m}(T_1 - T_2) \quad > 0$$

$$Q_1 = Q_{AB} + Q_{DA}$$

$$Q_2 = Q_{CD} + Q_{BC}$$

可得: $\eta = 15\%$

例：空气标准奥托循环的效率。

（**四冲程内燃机进行的循环过程**）

(1) 绝热压缩$a\rightarrow b$, 气体从

$V_1\rightarrow V_2$。

(2) 等容吸热$b\rightarrow c$ (点火爆燃),

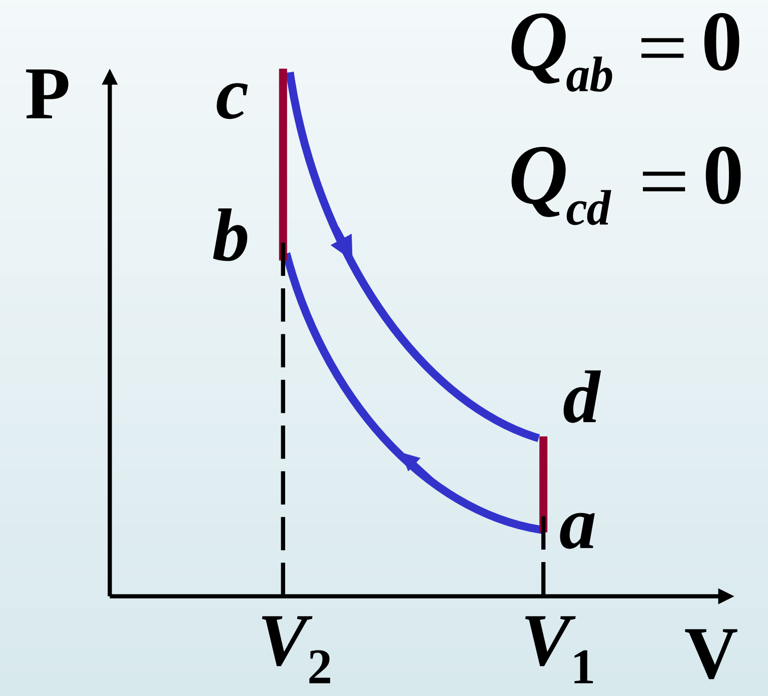
$(V_2, T_2)\rightarrow(V_2, T_3)$。

(3) 绝热膨胀$c\rightarrow d$, 对外做功,

气体从$V_2\rightarrow V_1$ 。

(4) 等容放热$d\rightarrow a$，$T_4\rightarrow T_1$。

求$\eta=?$



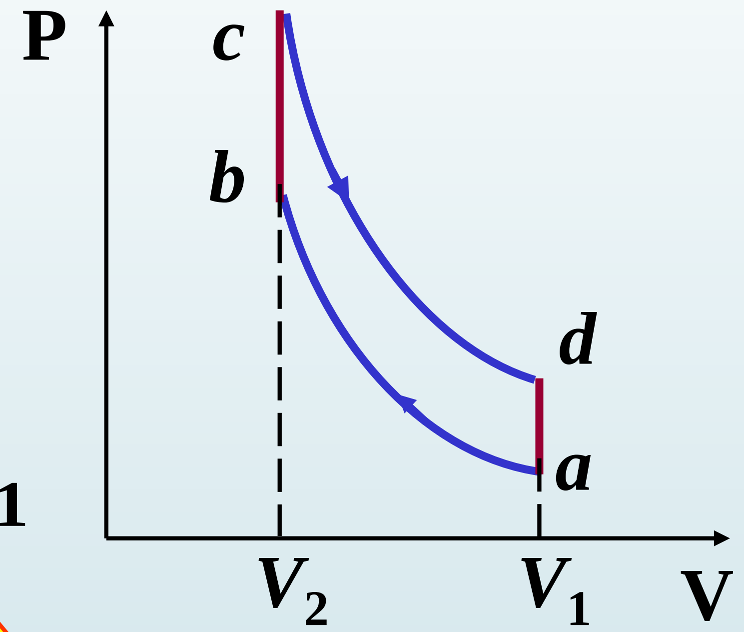

解： $b\rightarrow c$，等容吸热 $Q_1=\nu C_{V,m}\left(T_3-T_2\right)$

$d\rightarrow a$，等容放热 $Q_2=\nu C_{V,m}\left(T_1-T_4\right)$

$$\begin{cases} b\to c, \text{吸热} & Q_1 = \nu C_V (T_3 - T_2) \\ d\to a, \text{放热} & Q_2 = \nu C_V (T_1 - T_4) \end{cases}$$

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

$$\eta_{\text{奥托}} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$




利用$a\to b$，$c\to d$两绝热过程：

$$TV^{\gamma-1} = C''$$

可得：$$\frac{T_3 - T_2}{T_4 - T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = r^{\gamma-1}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}$$

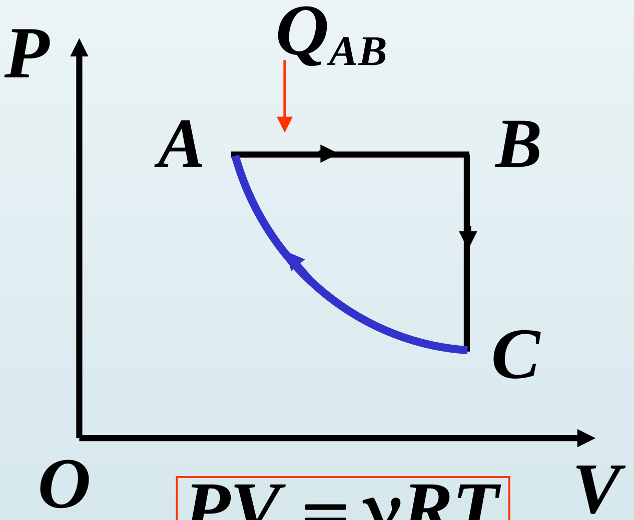
$r = \dfrac{V_1}{V_2}$ 压缩比

$$\boxed{\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}}$$

$r\uparrow, \eta\uparrow$ $\quad r \le 7$ $\qquad$ 若$r=7$ $\gamma=1.4$ $\qquad \eta = 54\%$

# 奥托——内燃机

例：1000mol空气, $C_P$=29.2J/(K·mol)，开始为标准状态$A$, $P_A=1.01\times10^5$Pa, $T_A$=273K, $V_A$=22.4m$^3$, 等压膨胀至状态$B$, 其容积为原来的2倍,然后经如图所示的等容和等温过程回到原态$A$, 完成一次循环。求循环效率。




$PV=\nu RT$

解：（1）等压膨胀过程　$A\rightarrow B$

$$\eta=\frac{A_{净}}{Q_{总吸}}=\frac{Q_1-|Q_2|}{Q_1}$$

$$A_{AB}=P_A(V_B-V_A)=P_AV_A$$

$$=1.01\times10^5\times22.4=2.26\times10^6\text{J}$$

$$Q_{AB}=\nu C_P(T_B-T_A)$$

$$\because \frac{V_B}{V_A}=\frac{T_B}{T_A} \qquad \therefore T_B=\frac{V_B}{V_A}T_A=2\times273=546\text{K}$$

$$\therefore Q_{AB}=\nu C_P(T_B-T_A)=1000\times29.2\times(546-273)$$

$$=7.97\times10^6\text{ J}$$

$$Q=\Delta E+A$$

$$PV=\nu RT$$

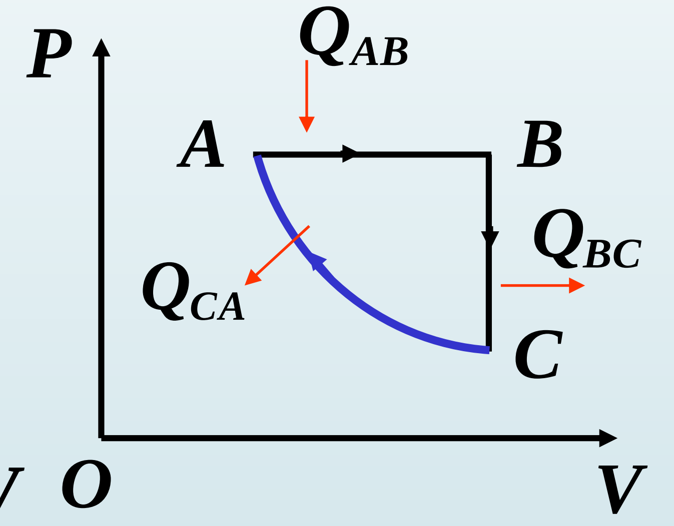
（2）等容降温过程　$B\rightarrow C$

$$Q_{BC}=E_C-E_B=\nu C_V\left(T_C-T_B\right)$$

$$=\nu(C_P-R)\left(T_C-T_B\right)$$

$$=1000\times\left(29.2-8.31\right)\times\left(273-546\right)$$

$$=-5.70\times10^{6}\,\mathrm{J}$$




（3）等温压缩过程　$C\rightarrow A$

$$Q_{CA}=A_{CA}=\int_{V_C}^{V_A}P\mathrm{d}V=\int_{V_C}^{V_A}\frac{\nu RT_A}{V}\mathrm{d}V$$

$$=\nu RT_A\ln\frac{V_A}{V_C}=\nu RT_A\ln\frac{V_A}{V_B}$$

$$=1000\times8.31\times273\,ln\frac{1}{2}=-1.57\times10^{6}\,\mathrm{J}$$

循环过程净功为:

$$A = A_{AB} + A_{CA}$$

$$= 2.26\times10^6 - 1.57\times10^6$$

$$= 0.69\times10^6\,\mathrm{J}$$

循环过程在高温热源吸热为:

$$Q_1 = Q_{AB} = 7.97\times10^6\,\mathrm{J}$$

循环效率:

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{0.69\times10^6}{7.97\times10^6} = 8.7\%$$

或:

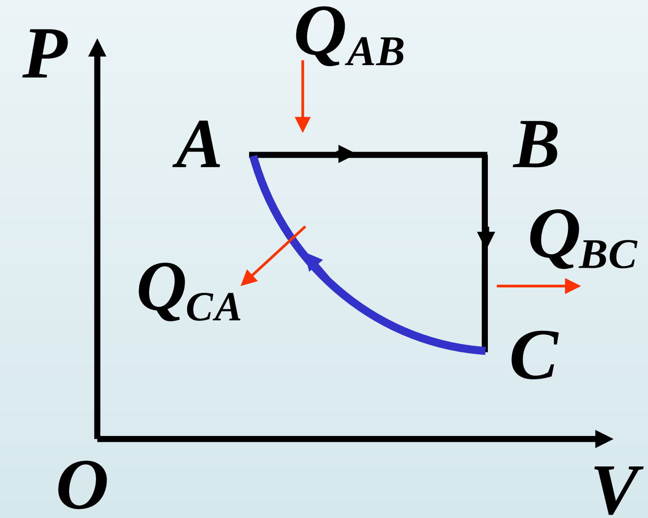
$$\eta = 1 - \frac{\left|Q_{BC}+Q_{CA}\right|}{Q_1} = 8.7\%$$

$$Q_{AB} = 7.97\times10^6\,\mathrm{J}$$

$$Q_{BC} = -5.70\times10^6\,\mathrm{J}$$

$$Q_{CA} = -1.57\times10^6\,\mathrm{J}$$

$$Q_{BC} + Q_{CA} = Q_2$$

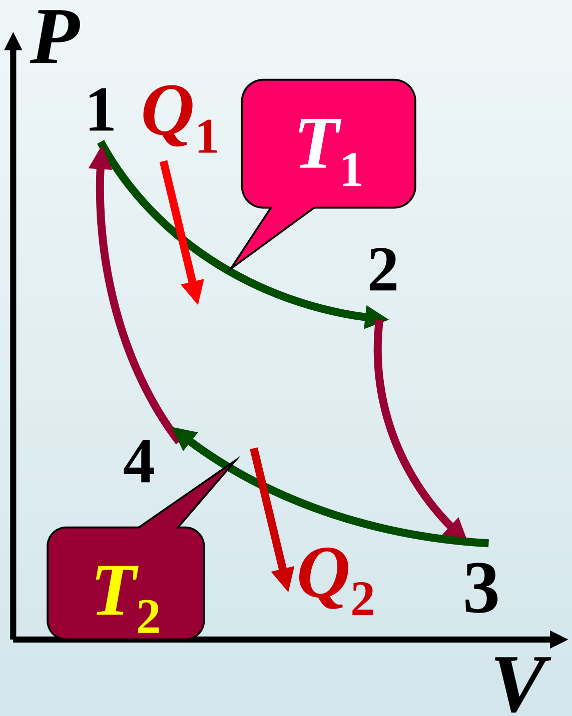


## 4、卡诺循环 ——(1824年提出)

$Q = \Delta E + A$

### 1) 卡诺热机

**由两个等温和两个绝热过程组成的正循环.**




1→2等温：

$$Q_1 = A_{12} = \nu R T_1 \ln\frac{V_2}{V_1} > 0 \quad \text{(吸热)}$$

3→4等温：

$$Q_2 = A_{34} = \nu R T_2 \ln\frac{V_4}{V_3} < 0 \quad \text{(放热)}$$

2→3绝热： $Q = 0$

4→1绝热： $Q = 0$

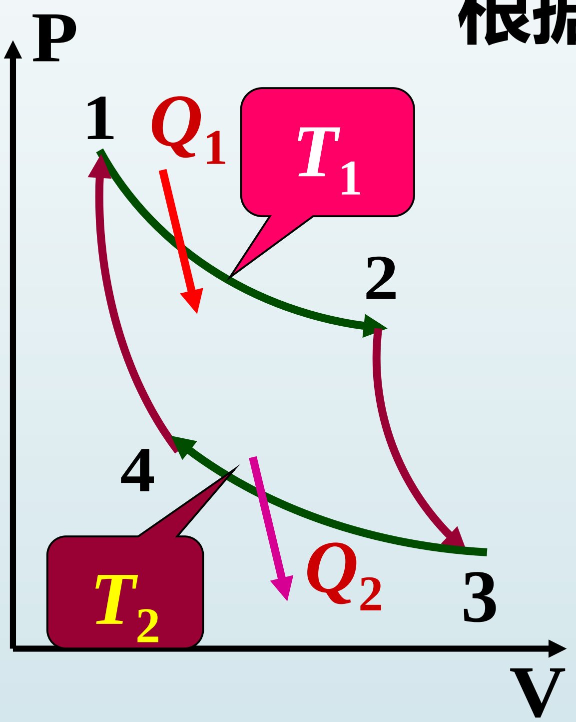
效率： $\eta_C = 1 - \dfrac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \dfrac{\nu R T_2 \ln(V_3 / V_4)}{\nu R T_1 \ln(V_2 / V_1)} = 1 - \dfrac{T_2}{T_1} \cdot \dfrac{\ln(V_3 / V_4)}{\ln(V_2 / V_1)}$

$$\eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1} \cdot \frac{\ln(V_3/V_4)}{\ln(V_2/V_1)}$$

$$PV^{\gamma} = C$$

$$PV = \nu RT$$

**根据绝热过程方程:** $V^{\gamma-1}T = C''$




$$\left.\begin{aligned} V_2^{\gamma-1}T_2 &= V_3^{\gamma-1}T_3 \\ V_1^{\gamma-1}T_1 &= V_4^{\gamma-1}T_4 \\ T_1 = T_2&, T_3 = T_4 \end{aligned}\right\} \rightarrow \frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\therefore \eta_C = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

**物理意义：**

（1）卡诺热机的效率只与$T_1$、$T_2$有关，与工作物质无关。

$$\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$ **为提高效率指明了方向。**

（2）热机至少要在两个热源中间进行循环，从高温热源吸热，然后放一部分热量到低温热源去，因而两个热源的温度差才是热动力的真正源泉（**选工作物质是无关紧要的**）。

**从单一热源吸取热量的热机是不可能的!**

$\eta \overset{?}{=} 100\%$ ⟶ **第二类永动机**

# 为什么发动机的效率达不到100%?



萨迪·卡诺

例：一卡诺热机，当高温热源的温度为127°C,低温热源的温度为27°C时，其每次循环对外做净功8000J.今维持低温热源的温度不变，提高高温热源的温度，使其每次循环对外做净功10000J。若两个卡诺循环工作在相同的两条绝热线之间，求：（1）第二个循环热机的效率$\eta'$; (2)第二个循环高温热源的温度$T'_1$。

解:要求 $\eta', T'$.

对第二个循环：$T_2' = T_2$，$Q_2' = Q_2$,

功$A' = 10000$J.

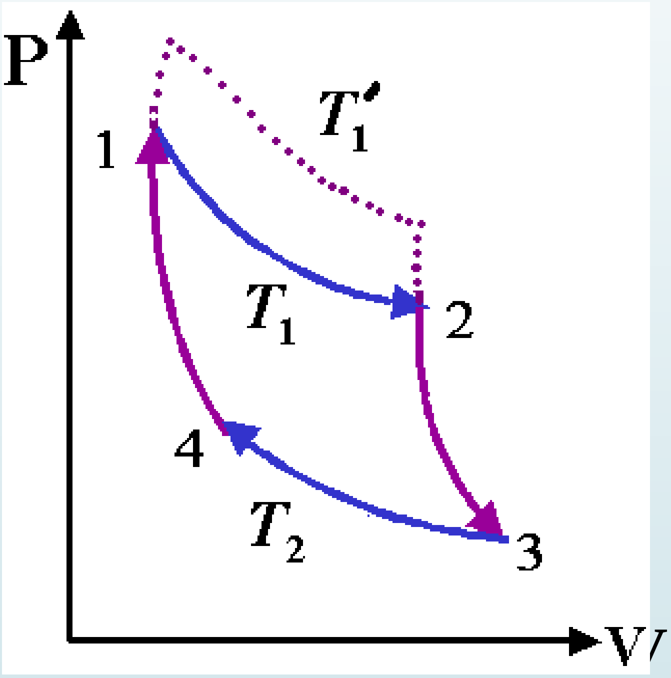
对第一个循环：

$$T_1=127^{\circ}\mathrm{C}, T_2=27^{\circ}\mathrm{C}, A=8000\mathrm{J}$$

$$\eta=1-\frac{T_2}{T_1}=1-\frac{27+273}{127+273}=0.25$$

$$\eta=0.25=\frac{A}{Q_1}=\frac{8000}{Q_1}, \therefore Q_1=32000\mathrm{J}$$

$$Q_2=Q_1-A=24000\mathrm{J}$$

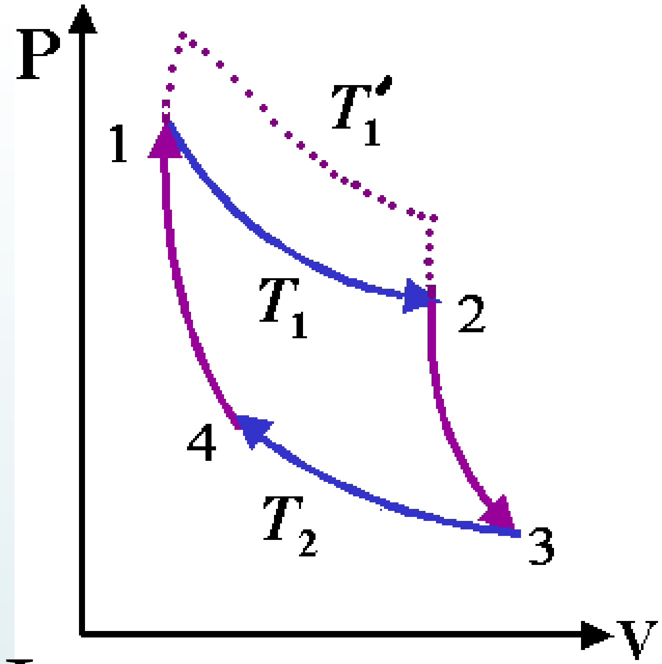



1→2， 3→4等温

2→3， 4→1绝热

对第二个循环：$T_2' = T_2$， $Q_2' = Q_2$，

功$A' = 10000\text{J}$




对第一个循环：

$$T_1 = 127^{\circ}\text{C}, T_2 = 27^{\circ}\text{C}, A = 8000\text{J}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{27+273}{127+273} = 0.25$$

$$\eta = 0.25 = \frac{A}{Q_1} = \frac{8000}{Q_1}, \therefore Q_1 = 32000\text{J}$$

$$Q_2 = Q_1 - A = 24000\text{J}$$

对第二个循环： $Q_1' = A' + Q_2 = 10000 + 24000 = 34000\text{J}$

$$\eta' = A'/Q_1' = 5/17 \approx 29.4\%,$$

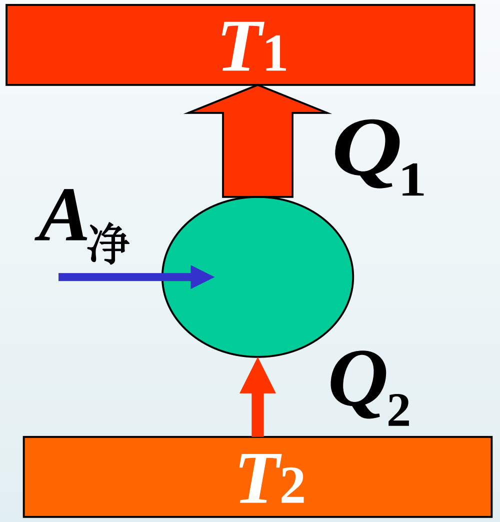
$$\eta' = 1 - T_2'/T_1' = 1 - T_2/T_1' \Rightarrow T_1' = 425\text{K}$$

$Q=\Delta E+A$

## 2)致冷系数、卡诺致冷机

将热机的工作过程反向运转

——**致冷机**




从低温热源$T_2$吸热$Q_2$，

外界做净功$A_{净}$，

向高温热源$T_1$放热$Q_1$。

工质回到初态 $\Delta E=0$ $\quad |A_{净}| = |Q_1|-Q_2$

致冷系数: $w=\dfrac{Q_{2吸}}{|A_{净}|}=\dfrac{Q_2}{|Q_1|-Q_2}$

$w$ 越高越好(**吸取热量$Q_2$ 需要的净功越少致冷的效率越高**)

# 卡诺致冷机：

$$Q_1 = \nu R T_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

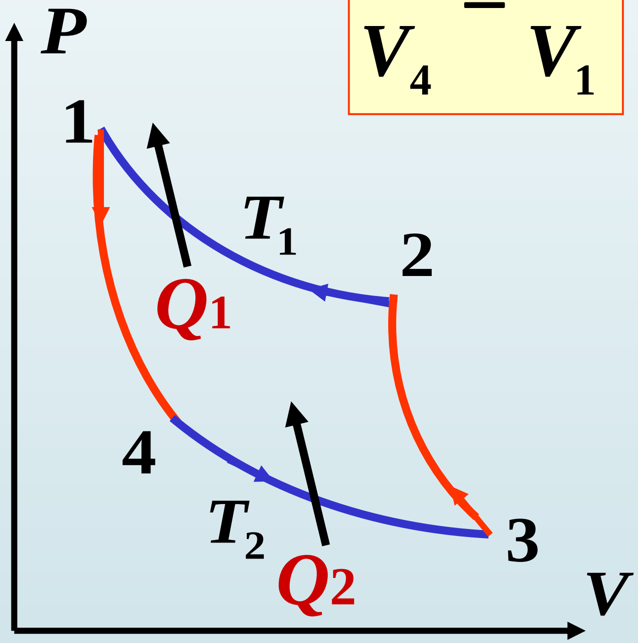
$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1}$$

工作物质从低温热源吸热$Q_2$，
又接受外界所做的功$A_{净} < 0$，
然后向高温热源放出热量 $Q_1$，

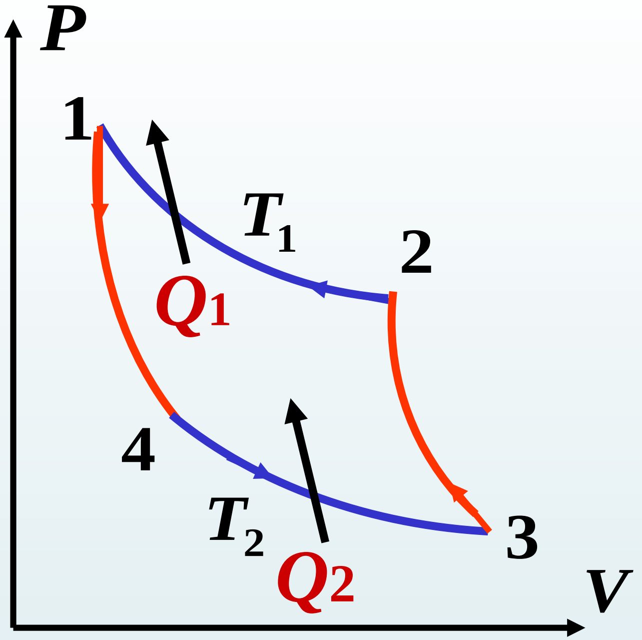
由能量守恒有：

$$Q_2 + |A_{净}| = |Q_1|$$

$$w_C = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$



$$w_C = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$




**物理意义：**

**（1）$T_2$越低，使$T_1$-$T_2$升高，都导致$w_C$下降，说明要得到更低的$T_2$，就要花更大的外力功。**

**（2）低温热源的热量是不会自动地传向高温热源的，要以消耗外力功为代价。**

例: 家用冰箱, 室温 $T_1$= 300 K, 冰箱内 $T_2$=273 K。

$$w = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{273}{300 - 273} = 9$$ 实际要小些。

例：假定室外温度保持为37.0℃,启动空调使室内温 度始终保持在17.0℃。若每天有2.51×10⁸J的热量通过热传导等方式自室外流入室内,则空调一天耗电多少?(设该空调致冷机的致冷系数为同条件下的卡诺致冷机的致冷系数的60%)

解： 卡诺致冷机的致冷系数 $w_C = \dfrac{T_2}{T_1 - T_2}$

$$\therefore w = 0.6 w_C = \frac{0.6 T_2}{T_1 - T_2}$$

又 $w = \dfrac{|Q_2|}{A}$

$$Q_2 = -2.51 \times 10^8\ \mathrm{J}$$

$$\therefore A = \frac{|Q_2|(T_1 - T_2)}{0.6 T_2} = 8.0\ \mathrm{kW \cdot h}$$

**例：** 一台冰箱工作时，其冷冻室的温度为-10℃，室温为15℃。若按理想卡诺致冷循环计算，则此致冷机每消耗$10^3$J的功, 可以从冷冻室中吸出多少热量?

**解：** 致冷系数

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

$$=\frac{273-10}{(273+15)-(273-10)}=\frac{263}{25}=10.5$$

又 $w=\frac{Q_2}{A}$

$$\therefore Q_2=wA=10.5\times10^3\ \text{J}$$

$Q = \Delta E + A$

$\Delta E = \frac{i}{2}\nu R\Delta T$

# 讨论:

1) 一条等温线和两条绝热线能否构成一个循环?

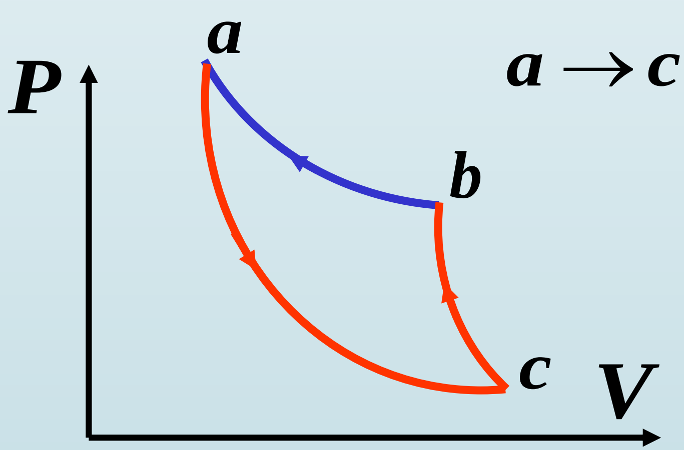
2) $P$-$V$图上一条等温线能否与一条绝热线有两个交点?

3) $P$-$V$图上两条绝热线能否相交?

A. 能

B. 否

解: 1) 否。




$$\left.\begin{array}{l} a \to b:\ \Delta E_{ab} = 0 \\ a \to c \to b:\ \left.\begin{array}{l} Q = \Delta E_{ab} + A \\ Q = 0, A \neq 0 \end{array}\right\} \Delta E_{ab} \neq 0 \end{array}\right\} \text{矛盾}$$

$$Q=\Delta E+A$$

$$\Delta E=\frac{i}{2}\nu R\Delta T$$

**讨论:**

1) 一条等温线和两条绝热线能否构成一个循环?

2) *P*-*V*图上一条等温线能否与一条绝热线有两个交点?

A. 能

B. 否

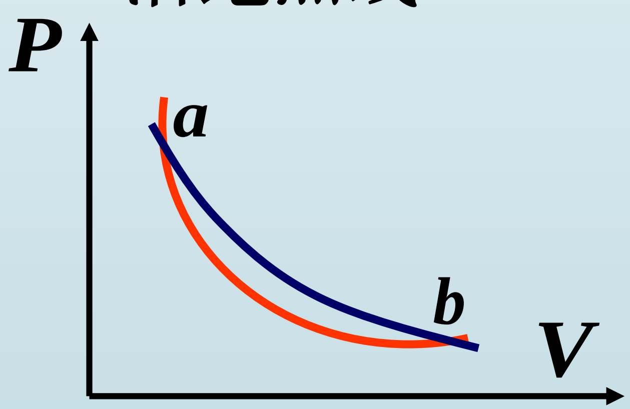
3) *P*-*V*图上两条绝热线能否相交?

解：2) 否。

沿等温线 $a\rightarrow b$： $\Delta E_{ab}=0$

沿绝热线 $a\rightarrow b$： $\left.\begin{array}{l} Q=\Delta E_{ab}+A \\ Q=0, A\neq 0 \end{array}\right\}\ \Delta E_{ab}\neq 0$

矛盾



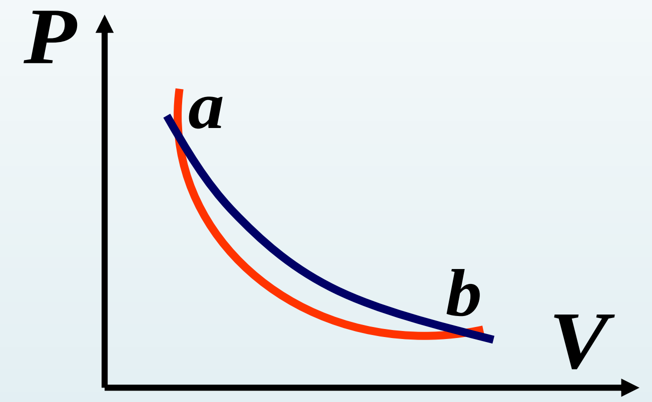

其它分析方法?

讨论:

2) $P$-$V$图上一条等温线能否与一条绝热线有两个交点?

A. 能

B. 否




解: 2)

等温 $PV = C_1$

绝热 $PV^{\gamma} = C_2$

$$\therefore \frac{C_1}{V} V^{\gamma} = C_2 \qquad V^{\gamma-1} = C_3$$

故, 一条等温线与一条绝热线有且仅有一个交点。

（即由两个方程只能得到一对P、V的解）

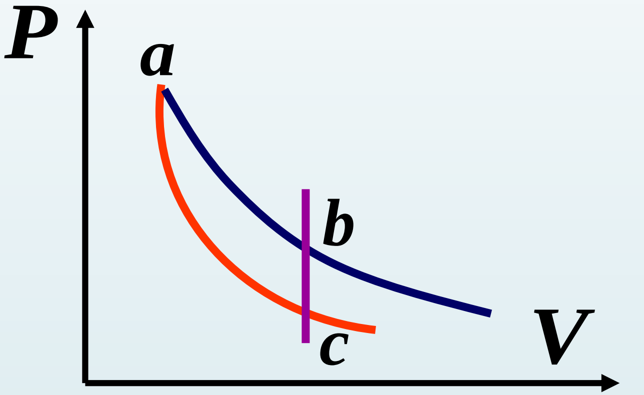
讨论:

3) $P$-$V$图上两条绝热线能否相交?

A. 能
B. 否

亦可利用与1)类似的方法。

解: 3)




$$\left.\begin{array}{l} P_b > P_c \\ V_b = V_c \\ PV = \nu RT \end{array}\right\} \begin{array}{l} T_b > T_c \\ \boxed{E_b > E_c} \end{array}$$

$$a \to b: Q_{ab} = 0 = \Delta E_{ab} + A_{ab}$$

$$E_b = E_a - A_{ab}$$

$$a \to c: Q_{ac} = 0 = \Delta E_{ac} + A_{ac}$$

$$E_c = E_a - A_{ac} \qquad A_{ab} > A_{ac} \quad \therefore \boxed{E_b < E_c}$$

矛盾。

讨论:

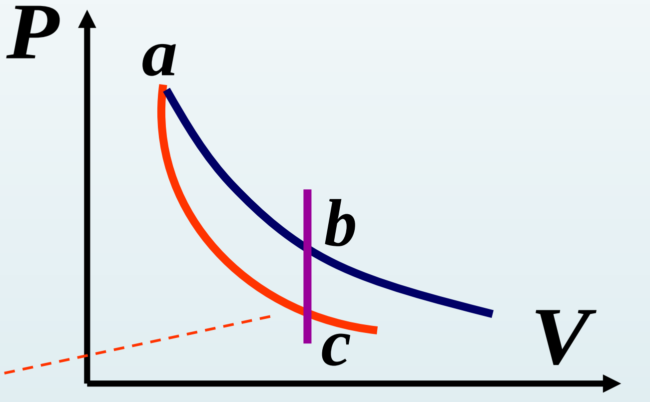
3) $P$-$V$图上两条绝热线能否相交?

解: 3) 否.

$\because PV^{\gamma}=C \quad \therefore P_aV_a^{\gamma}=C$

$P_bV_b^{\gamma}=C$

$P_cV_c^{\gamma}=C$



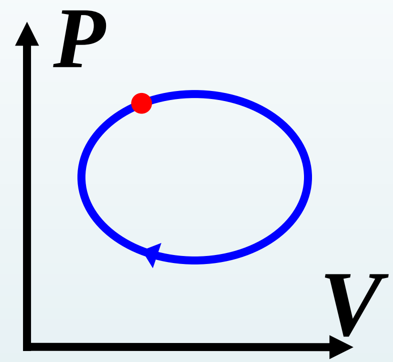

$$\left.\begin{array}{l}\therefore P_bV_b^{\gamma}=P_cV_c^{\gamma} \\ V_b=V_c\end{array}\right\} \begin{array}{l}P_b\neq P_c \\ \therefore P_b=P_c\end{array}$$

矛盾。

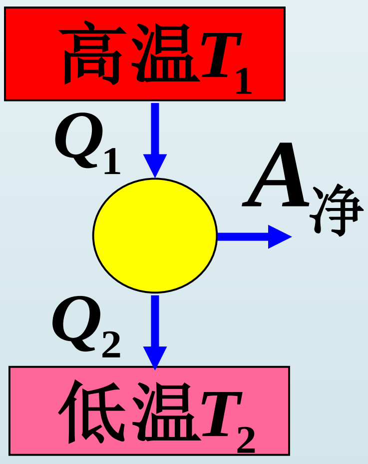
类似:绝热线与等容线不可能有两个交点。

## ●循环过程和热机效率

热机效率：$\eta=\dfrac{A_{净}}{Q_{总吸}}=\dfrac{Q_1-|Q_2|}{Q_1}=1-\dfrac{|Q_2|}{Q_1}<1$




致冷系数：$w=\dfrac{Q_{2吸}}{|A_{净}|}=\dfrac{Q_2}{|Q_1|-Q_2}$




卡诺热机的效率：$\eta_C=1-\dfrac{T_2}{T_1}$

卡诺致冷机的致冷系数：$w_C=\dfrac{T_2}{T_1-T_2}$

**以上运用了热力学第一定律 $Q=\Delta E+A$**

**满足热力学第一定律的热力学过程都能实现吗？ 否！**

# 六、热力学第二定律

## 1. 自然宏观过程的方向

### 1)　功热转换

例：摩擦生热。

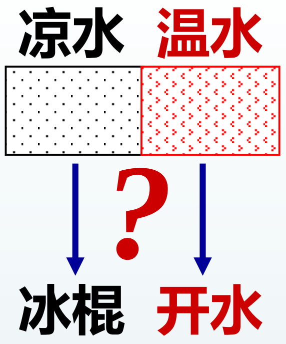
功→热的过程自动发生；

热→功的过程不能自动发生。

功可以自动转换成热；但热不能自动转换为功。

**因此，自然界里功热转换过程具有方向性。**

## 2) 热传导




两物体达到热平衡的过程：

是热从高温物体 $\xrightarrow{\text{自动地}}$ 低温物体

**因此，自然界里热传导过程具有方向性。**

## 3) 气体的自由膨胀

显然气体的自由膨胀过程也具有方向性。

**总之：**

**一切与热现象有关的实际宏观过程都具有方向性。**

## 2. 热力学第二定律的表述

### 1) 定律的两种表述

Clausius

*a*) 克劳修斯表述

**热量不能自动地从低温物体传向高温物体。**

*b*) 开尔文表述

Kelvin

**不可能制成一种循环动作的热机，只从单一热源吸取热量，使之完全变为有用的功而不产生其它任何变化。**

等价说法：**第二类永动机是不可能制成的！**

**第二类永动机：效率为100%** $\left(\eta=1-\frac{|Q_2|}{Q_1}\right)$

**无数实验证明：** 效率为100%的循环动作的热机是不可能制成的。(**它并不违反热力学第一定律**)

克劳修斯表述：

**热量不能自动地从低温物体传向高温物体。**

开尔文表述：

**不可能制成一种循环动作的热机，只从单一热源吸取热量,使之完全变为有用的功而不产生其它任何变化。**

**注意：**

（1）注意“自动地”这一表述。热量自动地由低温物体传到高温物体，不违反热力学第一定律，但违背了热力学第二定律。

（2）若不是“循环动作”的热机，只从单一热源吸热，使之完全变为有用的功而不放热，是可以实现的。

**比如：理想气体在等温膨胀过程中吸收的热量全部转换为功。**

$$\boxed{Q = \Delta E + A}$$

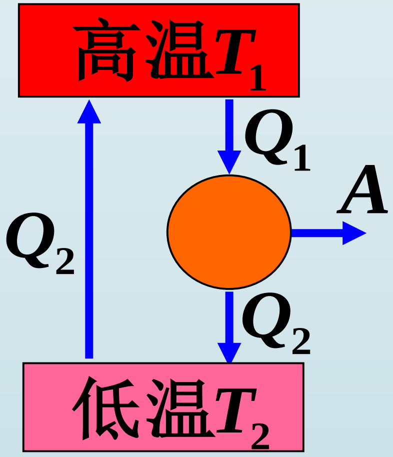
克劳修斯表述：

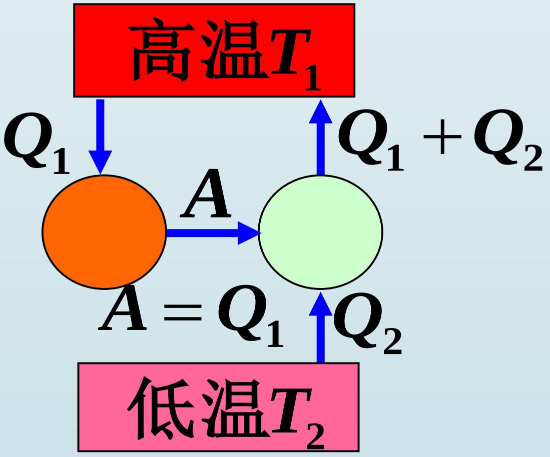
**热量不能自动地从低温物体传向高温物体。**

开尔文表述：

**不可能制成一种循环动作的热机，只从单一热源吸取热量,使之完全变为有用的功而不产生其它任何变化。**

**（3）克劳修斯表述与开尔文表述是等价的。**



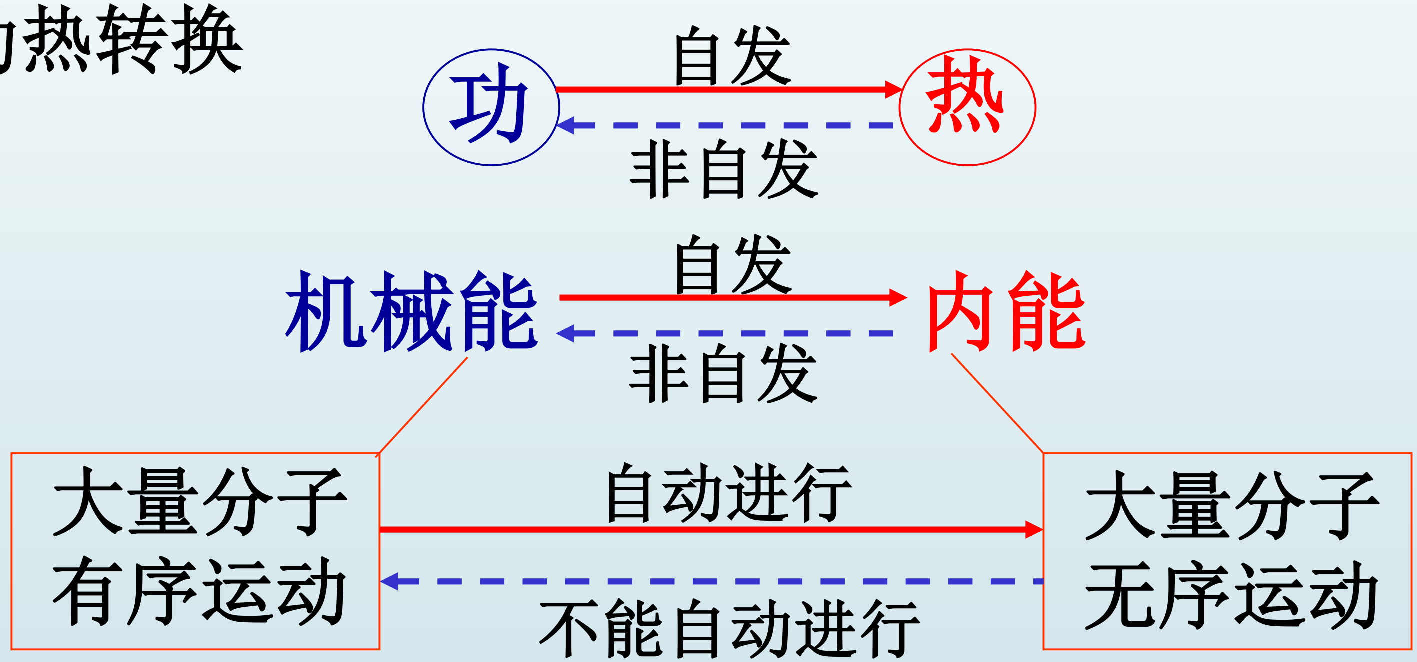

克氏表述成立则开氏表述成立；开氏表述成立则克氏表述亦成立。

克氏表述不成立则开氏表述也不成立；开氏表述不成立则克氏表述也不成立。

2) 热力学第二定律的微观解释

**从微观上看，任何热力学过程总包含大量分子的无序运动状态的变化。热力学第二定律阐明了变化的规律。**

*a*. 功热转换




**结论：功热转换的自发过程总是使大量分子的运动从有序状态向无序状态转化。**

## *b*. 热传导

高温 $\xrightarrow[\text{自动地}]{\text{传热}Q}$ 低温

反之： 高温 $\xleftarrow[\text{非自动}]{\text{传热}Q}$ 低温

有序 $\xrightarrow{\text{自动地}}$ 无序

有序 $\xleftarrow[\text{非自动}]{}$ 无序

初态： 两系统 *T*不同

**两系统可区分**

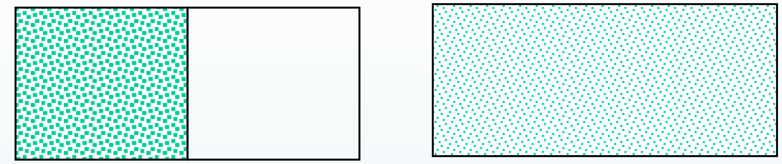
末态： 两系统 *T*相同

**两系统变得不可区分**

} **热传导使系统的无序性增大**

**结论：热传导的自然过程总是沿着使大量分子的运动向更加无序的方向进行。**

$c$. 气体的自由膨胀



**使系统的无序性增加。**

热力学第二定律的微观解释：

**一切自然宏观过程总是沿着使系统的无序性增大的方向进行。**

注意：该定律涉及大量分子运动的无序性的变化，是统计规律，只适用于包含大量分子的系统。

热力学第一定律指出：**任何过程能量必须守恒。**

热力学第二定律指出：**能量守恒的过程并非都能实现。**

（**热力学第二定律反映了自然界实际宏观过程的方向性**）

**物理量?**

**那么，热力学第二定律是否有定量的表述**?