▲第三节 循环过程 卡诺循环

一、循环过程

二、卡诺循环

一、循环过程

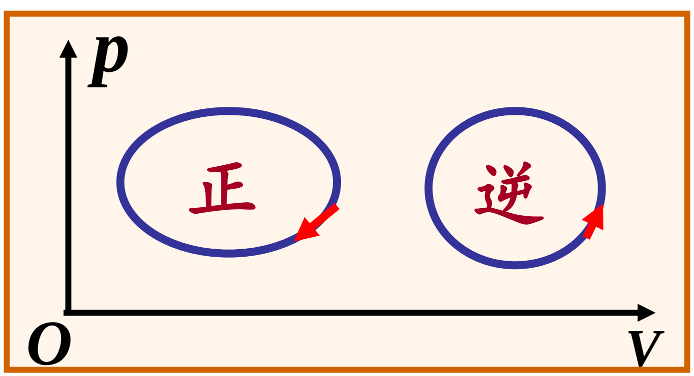
1.定义: 系统经历一系列变化后又回到初始状态的整个过程。

2.共同特征： $\Delta E = 0$

热力学第一定律：$\boxed{Q_{净} = A_{净}}$

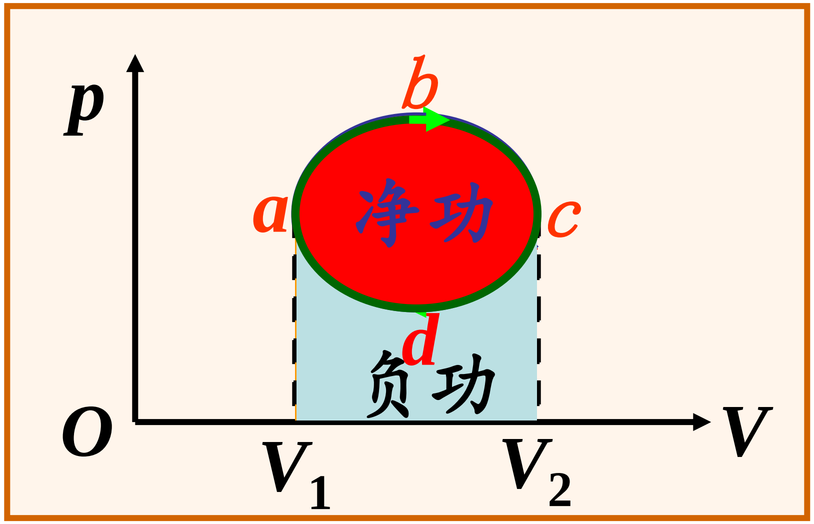
3.循环过程分类： $\sum_{i=1}^{n} Q_i$　$\sum_{i=1}^{n} A_i$

准静态循环过程的过程曲线为相平面中的一条闭合曲线



循环过程
- 正循环：顺时针方向
- 逆循环：逆时针方向

4.正循环和热机



$a \longrightarrow b \longrightarrow c$,系统对外界做正功A_1

$c \longrightarrow d \longrightarrow a$,外界对系统做正功A_2

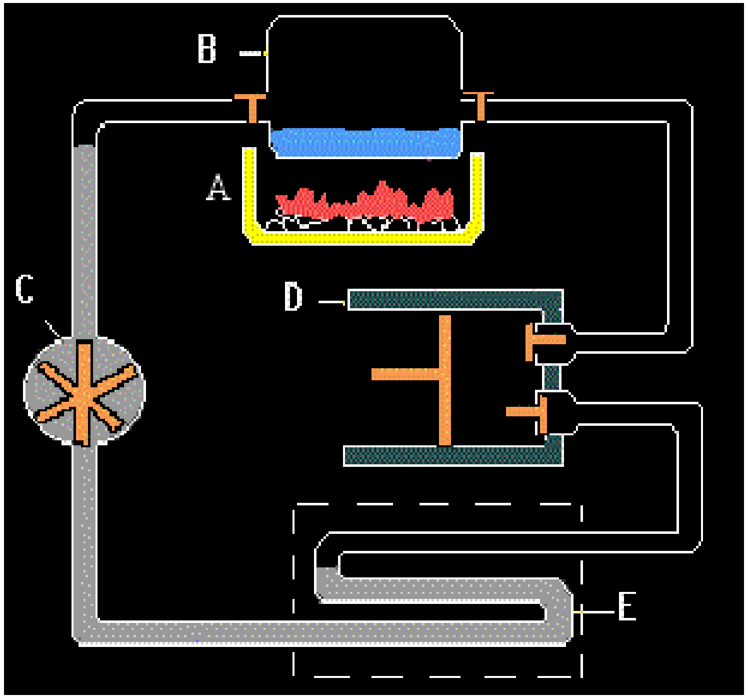
(系统对外界做负功$-A_2$)

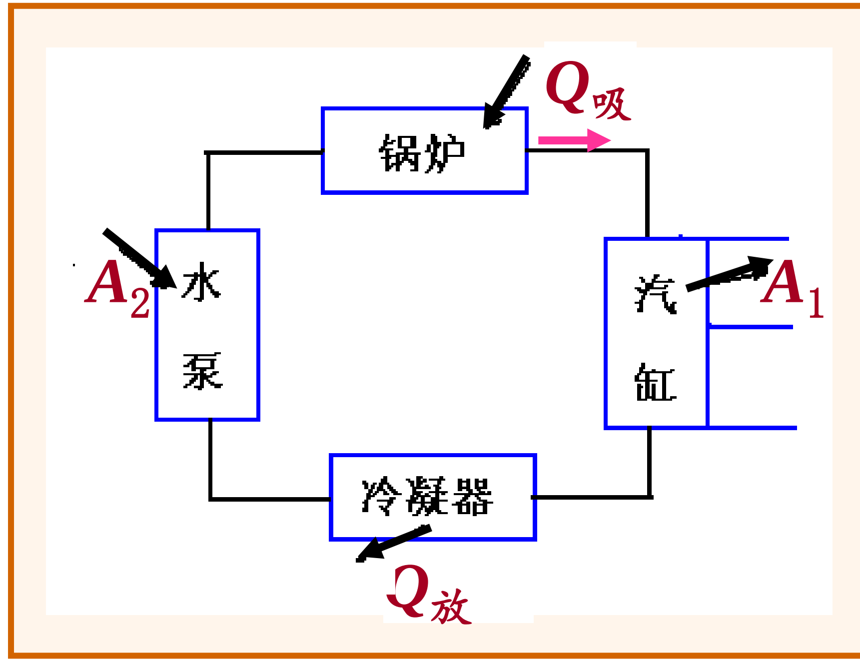
$$Q_{净} = A_{净} = A_1 - A_2 \quad (= S_{封闭曲线}) > 0$$

系统在循环过程中从外界吸热，全部用于对外做功。

热机的循环过程为正循环

实例：蒸汽机的循环





系统在循环过程中,水由高温热源吸热$Q_{吸}$, 向低温热源放热$Q_{放}$，并对外做净功，为：

$$A_{净} = A_1 - A_2 = Q_{吸} - |Q_{放}|$$

推广到一般情况：

热机的能量转换：

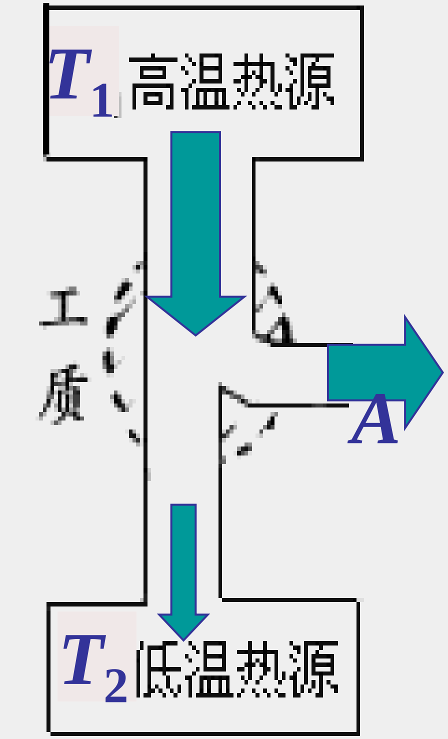
从高温热源吸热$Q_{吸}$
(可能不止一个)

代价

向低温热源放热$Q_{放}$
（可能不止一个）

对外做功$A_{净}=Q_{净}=Q_{吸}-|Q_{放}|$

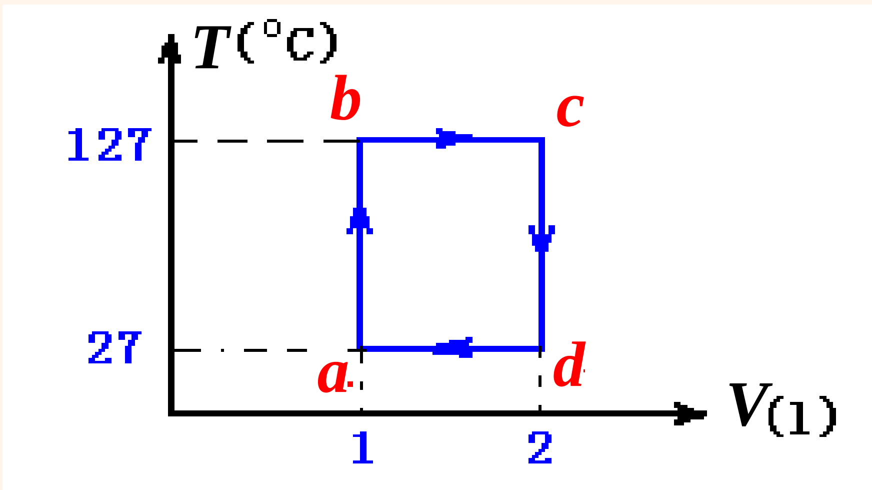
目的



热机能流图

热机效率：$\eta=\dfrac{A_{净}}{Q_{吸}}=\dfrac{Q_{吸}-|Q_{放}|}{Q_{吸}}=1-\dfrac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}$

例题:1mol双原子分子理想气体如图循环，$\eta=?$



注意:是T-V 图

循环为斯特林循环

$$T_b=T_c=400\,\text{K};\quad T_a=T_d=300\,\text{K}$$

$$\frac{M}{\mu}=1 \quad C_v=\frac{i}{2}R=\frac{5}{2}R$$

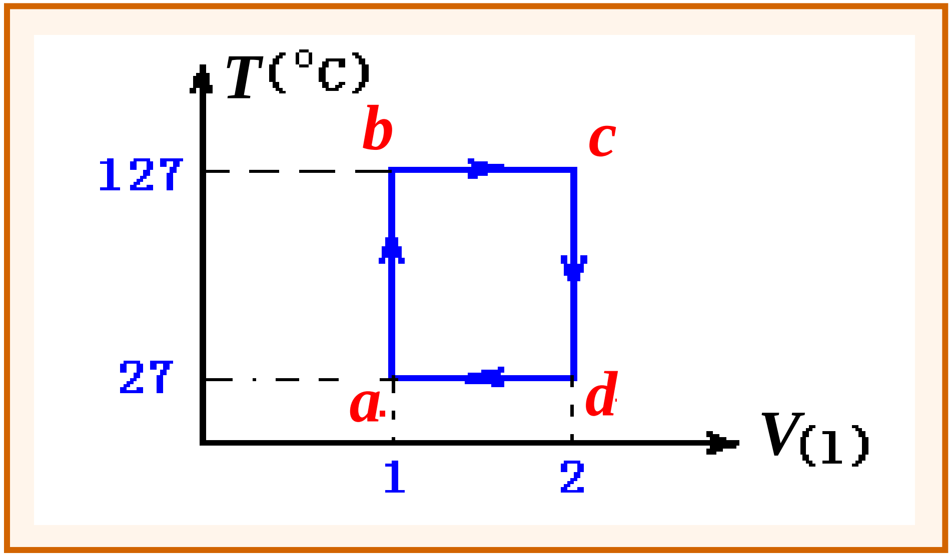
解:

$$Q_{ab}=\frac{M}{\mu}C_V(T_b-T_a)=\frac{5}{2}\times 8.31\times(400-300)=2080$$

$$Q_{bc}=\frac{M}{\mu}RT_b\ln\frac{V_c}{V_b}=8.31\times 400\times \ln 2=2326.8$$

$$Q_{cd}=\frac{M}{\mu}C_V(T_d-T_c)=\frac{5}{2}\times 8.31\times(300-400)=-2080$$

$$Q_{da}=\frac{M}{\mu}RT_d\ln\frac{V_a}{V_d}=8.31\times 300\times \ln\frac{1}{2}=-1745.1$$

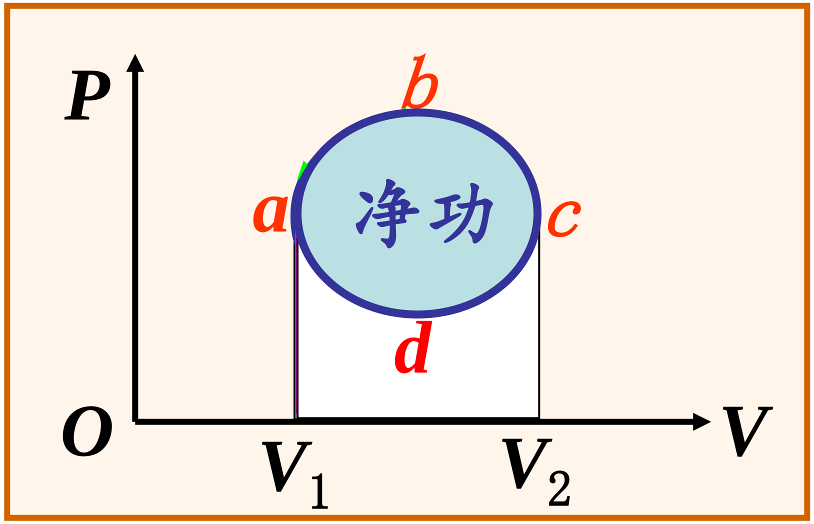


$$\text{总吸热}\,Q_{吸}=Q_{ab}+Q_{bc}=2326.8+2080=4406.8(\mathrm{J})$$

$$\text{总放热}\,Q_{放}=Q_{cd}+Q_{da}=-2080-1745.1=-3825.1(\mathrm{J})$$

$$\eta=1-\frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}=13.2\%$$

5.逆循环及致冷系数



$a \longrightarrow d \longrightarrow c$,系统对外界做正功A_1

$c \longrightarrow b \longrightarrow a$,外界对系统做正功A_2

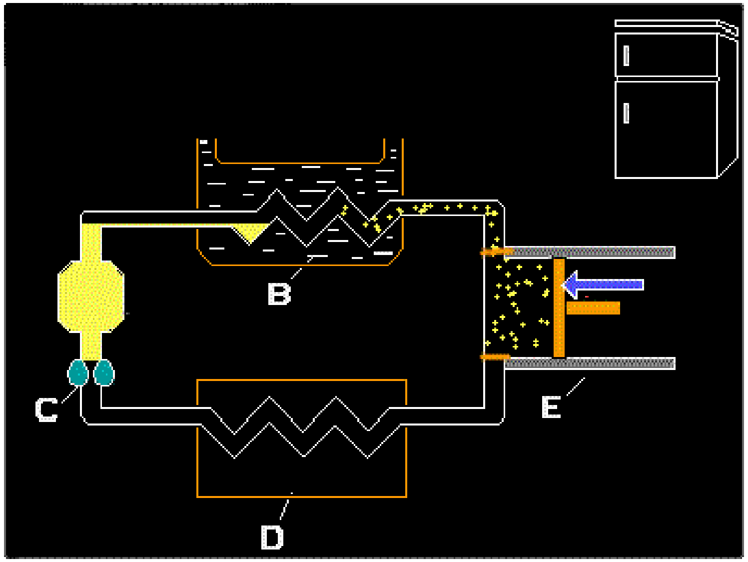
(系统对外界做负功$-A_2$)

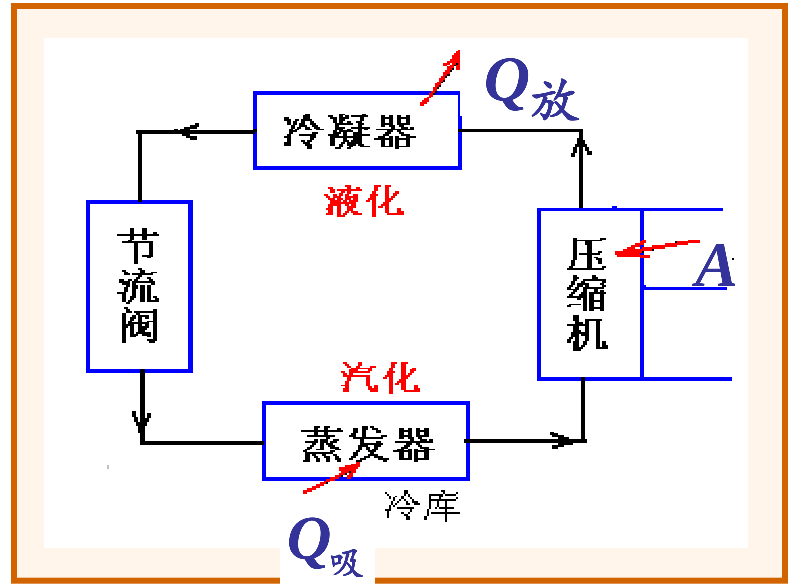
$$Q_{净} = \quad A_{净} = A_1 - A_2 (= -S_{封闭曲线}) < 0$$

系统在循环过程中外界对系统做功，系统向外界放热。

致冷机的循环过程为逆循环

实例：电冰箱





系统在循环过程中，外界对冰箱工作物质做功A，工作物质从低温热源（冷库）中吸热$Q_{吸}$，向高温热源（冷凝器）放热$Q_{放}$，且：

$$Q_{净}=Q_{吸}-\left|Q_{放}\right|=A_{净}=-A \quad \therefore \left|Q_{放}\right|=Q_{吸}+A$$

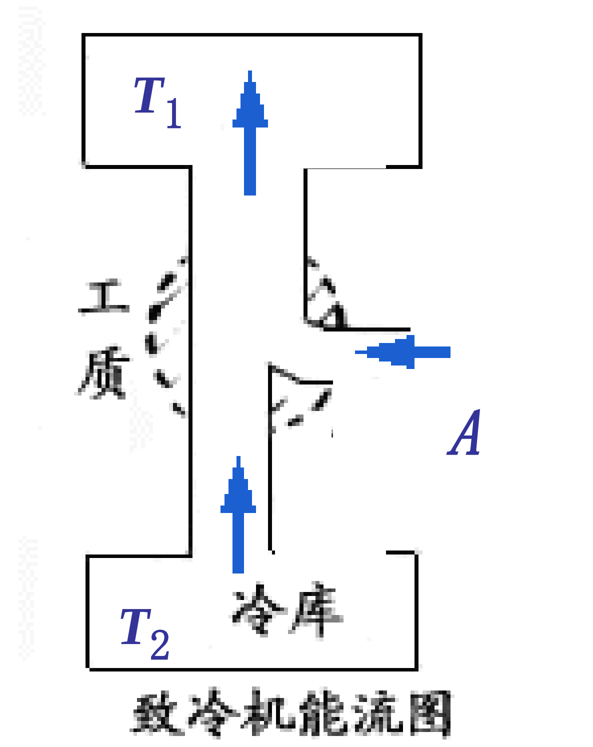
注意：这里的$Q_{吸}$仅是循环过程中系统从冷库吸收的热量，它衡量致冷的效力。

推广到一般情况：

能量转换：

从低温热源吸热 $Q_{吸}$（目的）
外界对系统做功 A（代价）
向高温热源放热 $|Q_{放}| = Q_{吸} + A$

致冷系数：$w = \dfrac{Q_{吸}}{A} = \dfrac{Q_{吸}}{|Q_{放}| - Q_{吸}}$

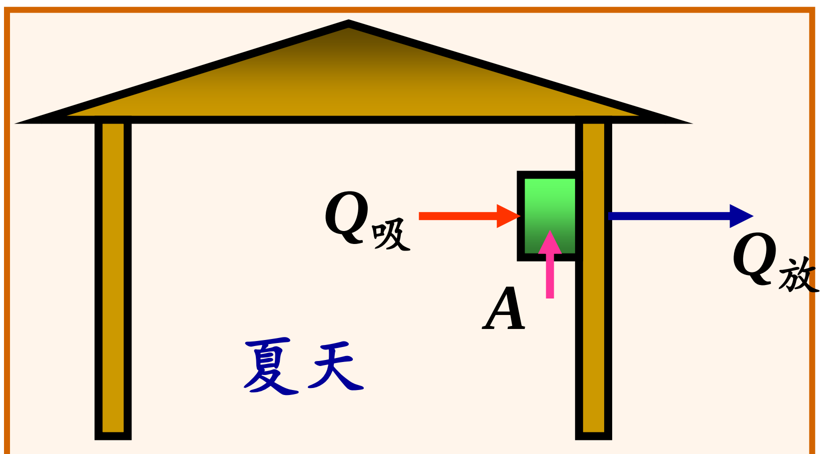


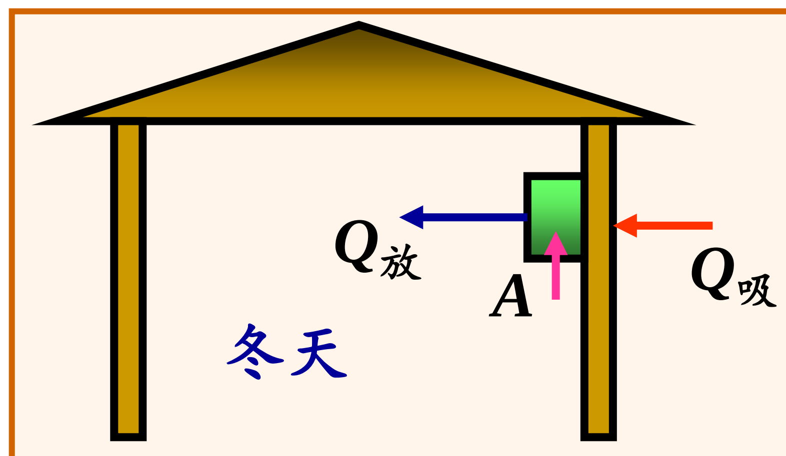
致冷机能流图

注意：若致冷机中有几个低温热源，$Q_{吸}$为从温度最低的低温热源中吸收的热量。

介绍：空调机的循环

季节	低温热源	高温热源	效果	作用
夏天	房间($Q_{吸}$)	大气($Q_{放}$)	室内降温（对房间致冷）	冷泵（A）
冬天	大气($Q_{吸}$)	房间($Q_{放}$)	室内升温（对大气致冷）	热泵（A）





注意：热泵与热机的区别

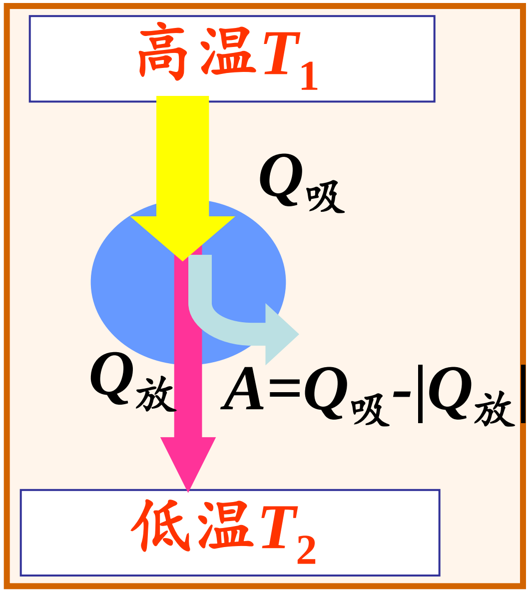
二、卡诺循环

1.定义： 工作物质只与两个恒温热源交换能量的准静态循环。

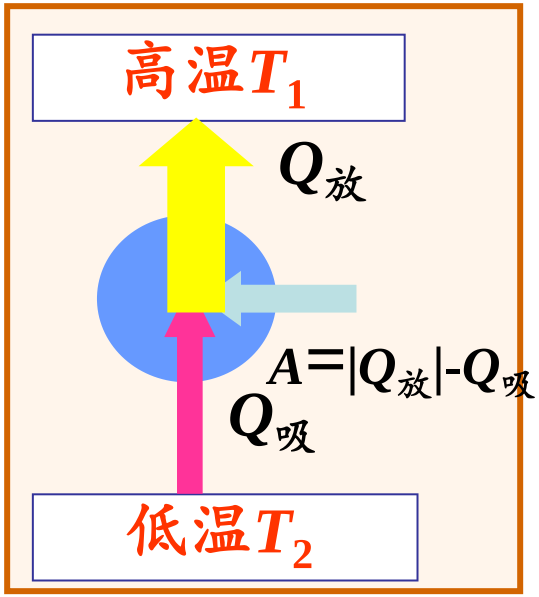
2.特点:

(1)只需要两个热源。

卡诺循环过程:

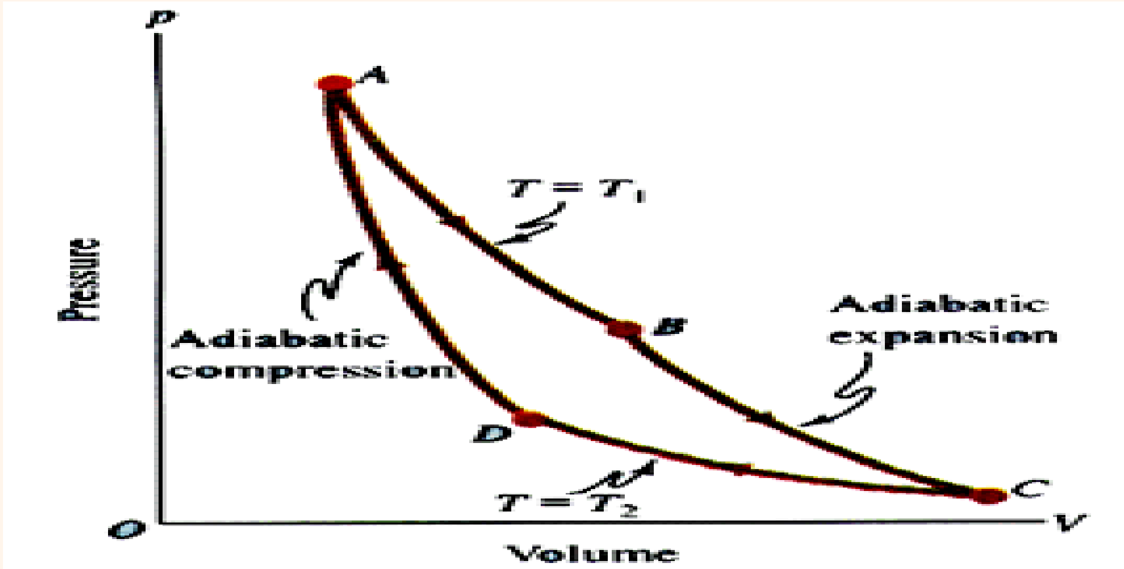


正循环



逆循环

例：卡诺正循环*P-V*图：



$A \to B$ 等温膨胀：内能不变，从T_1吸热。

$B \to C$ 绝热膨胀：对外作功，内能降低。

$C \to D$ 等温压缩：内能不变，向T_2放热。

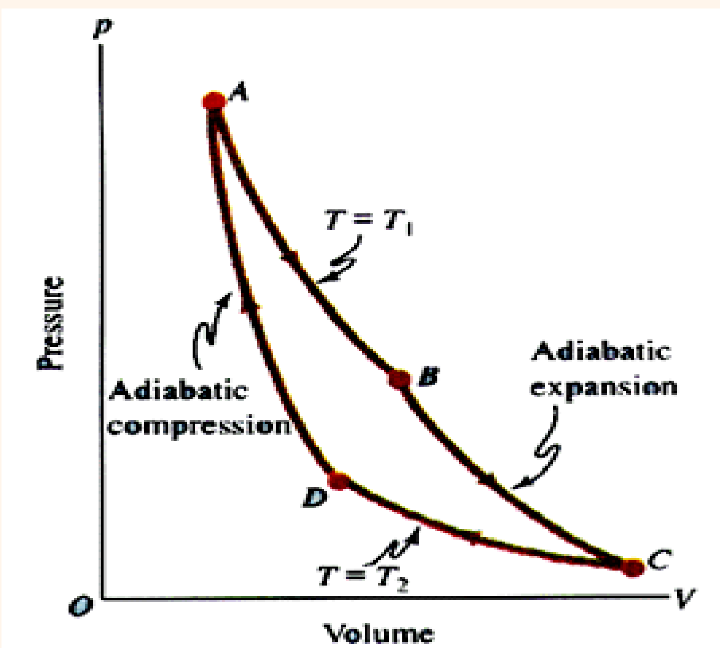
$D \to A$ 绝热压缩：外界作功，内能升高。

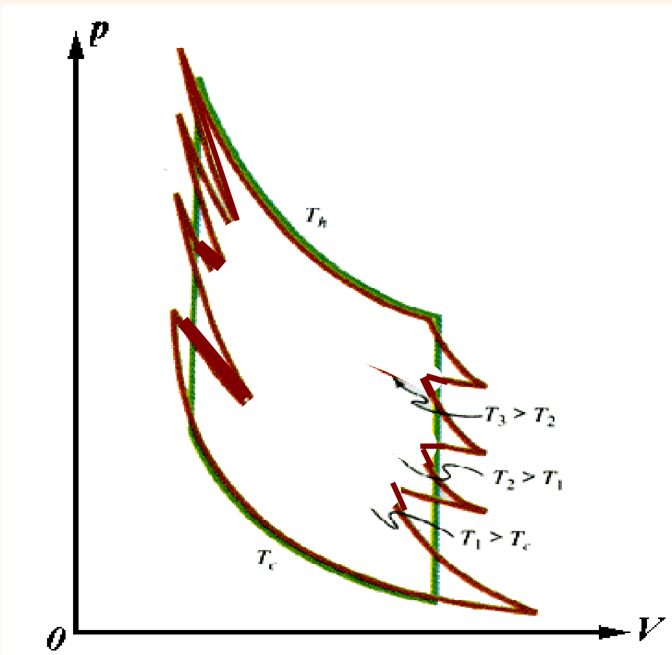
卡诺循环：

①两个等温过程：系统与两个恒温热源交换能量

②两个绝热过程：系统不与其它热源交换能量

(2)可以组成任何一种循环。





思考：P_{270} 19.1(4): S_{BC}, S_{DA}之间的关系？

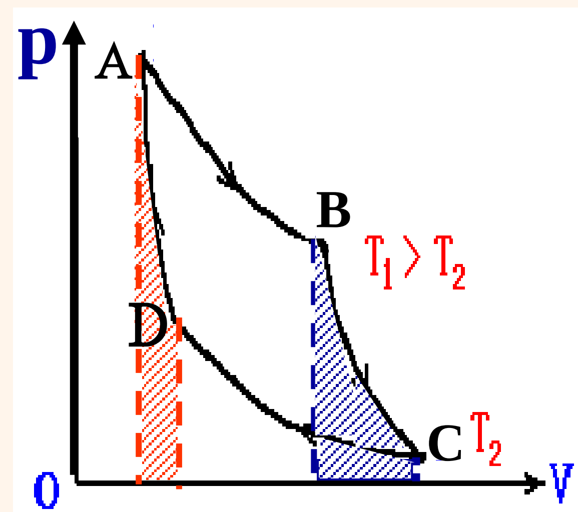
$$\because T_A = T_B = T_1 \quad T_C = T_D = T_2$$

$$\therefore \Delta E_{BC} = \frac{M}{\mu} C_V (T_C - T_B) = \frac{M}{\mu} C_V (T_2 - T_1) \qquad \Delta E_{DA} = \frac{M}{\mu} C_V (T_A - T_D) = \frac{M}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

$$\text{又}: Q_{BC} = Q_{DA} = 0$$

$$\therefore A_{BC} = -\Delta E_{BC} = \frac{M}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$

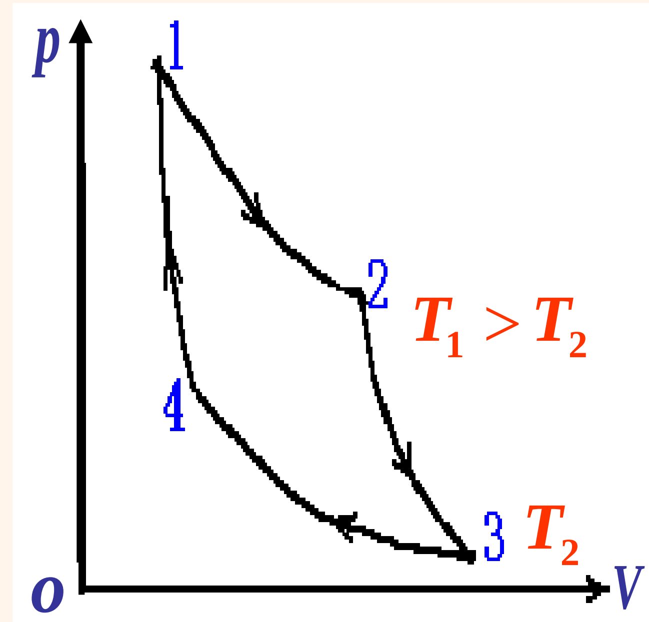
$$A_{DA} = -\Delta E_{DA} = -\frac{M}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$$



$$\therefore A_{BC} = \left| A_{DA} \right| \qquad \therefore S_{BC} = S_{DA}$$

3.理想气体的卡诺循环

(1)卡诺热机(正循环)效率



等温过程：

$$1 \to 2 \qquad Q_{吸} = \frac{M}{\mu} R T_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$3 \to 4 \qquad Q_{放} = \left|\frac{M}{\mu} R T_2 \ln\frac{V_4}{V_3}\right| = \frac{M}{\mu} R T_2 \ln\frac{V_3}{V_4}$$

绝热过程：

$$2 \to 3 \qquad T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$4 \to 1 \qquad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

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

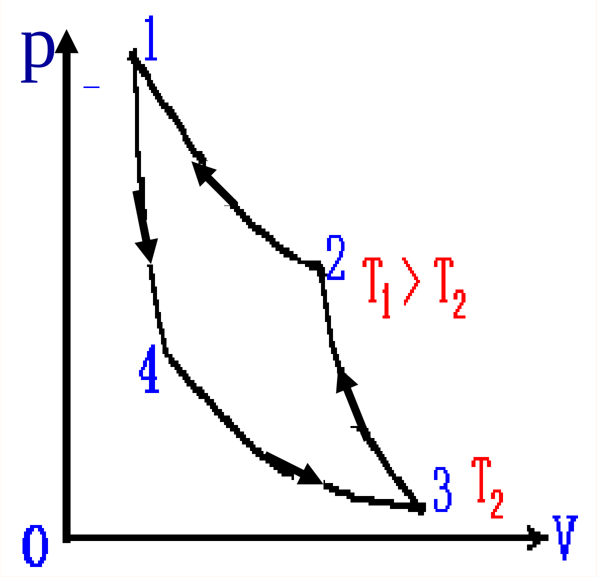
$$\eta = \frac{Q_{吸} - |Q_{放}|}{Q_{吸}} = \frac{\frac{M}{\mu}RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1} - \frac{M}{\mu}RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}}{\frac{M}{\mu}RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}}$$

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

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

- η 仅由 T_1, T_2 决定
- $T_1 \neq \infty \quad T_2 \neq 0 \quad \eta < 1$
- 提高η途径，升高T_1，降低T_2

(2)卡诺致冷机(逆循环)致冷系数



等温过程:

$$2\rightarrow 1 \qquad |Q_{放}| = \frac{M}{\mu} RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$4\rightarrow 3 \qquad Q_{吸} = \frac{M}{\mu} RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}$$

绝热过程:

$$3\rightarrow 2 \qquad T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

$$1\rightarrow 4 \qquad T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

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

$$w=\frac{Q_{吸}}{A}=\frac{Q_{吸}}{|Q_{放}|-Q_{吸}}=\frac{\frac{M}{\mu}RT_2\ln\frac{V_3}{V_4}}{\frac{M}{\mu}RT_1\ln\frac{V_2}{V_1}-\frac{M}{\mu}RT_2\ln\frac{V_3}{V_4}}$$

$$\boxed{w=\frac{T_2}{T_1-T_2}}$$

$T_2\downarrow, w\downarrow$， $A=\frac{Q_2}{w}\uparrow$要从温度越低的低温热源中吸热就要消耗更多的功。

注意：

$$\eta = \frac{A_{净}}{Q_{吸}} = 1 - \frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}$$

$$w = \frac{Q_{吸}}{A} = \frac{Q_{吸}}{|Q_{放}| - Q_{吸}}$$

对一切循环适用

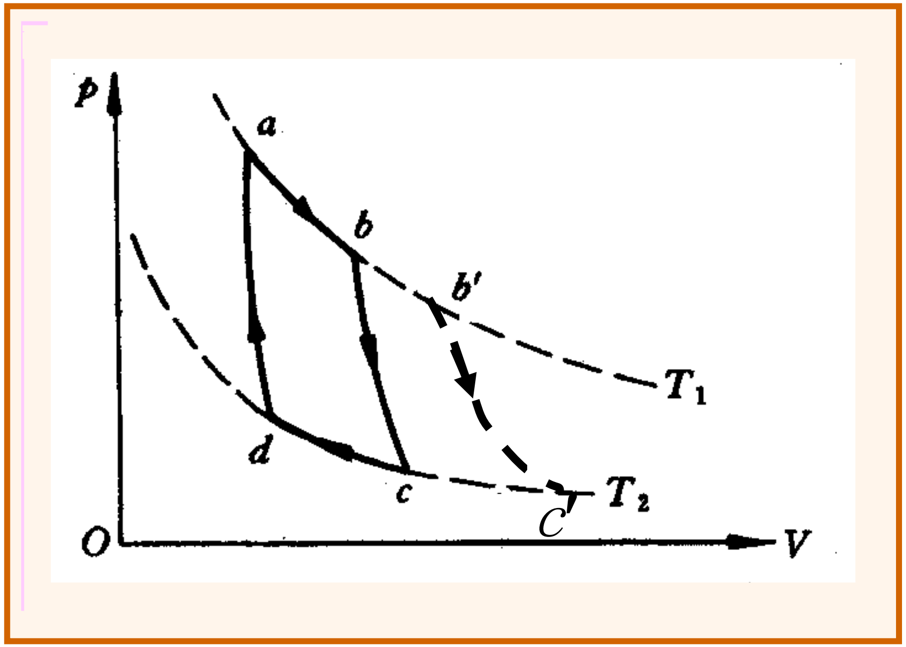
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

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

只对卡诺循环适用

练习1： P_{270} 19.1(3)

一卡诺机进行如图两个循环，下列表述正确的是：



（1） $\eta_1 = \eta_2 \quad A_1 = A_2$

（2） $\eta_1 > \eta_2 \quad A_1 < A_2$

（3） $\eta_1 < \eta_2 \quad A_1 < A_2$

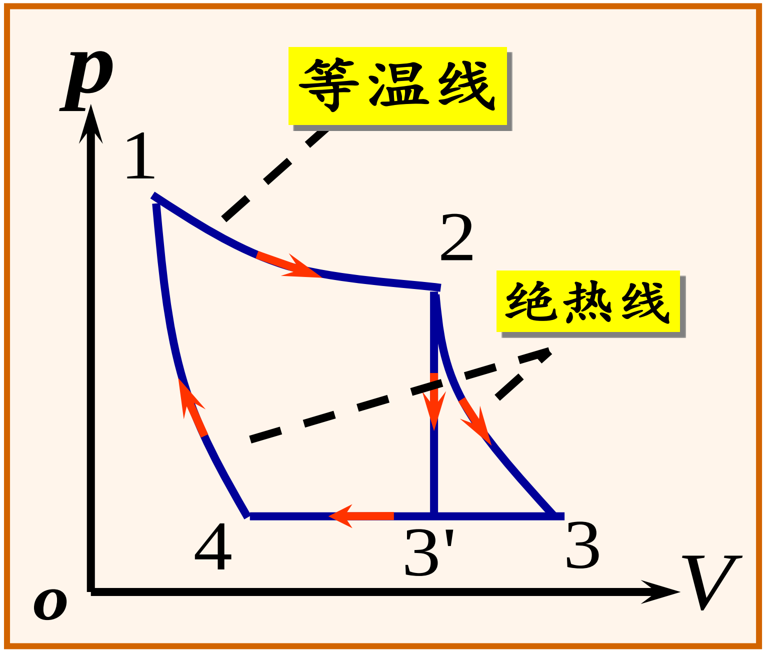
（4） $\eta_1 = \eta_2 \quad A_1 < A_2$

练习2. 两个循环过程：

过程1:1—2 等温、2—3 绝热
3—4 等压、4—1 绝热

过程2: 1—2 等温、2—3′等体
3′—4等压、4—1 绝热

比较哪个过程热机效率高。



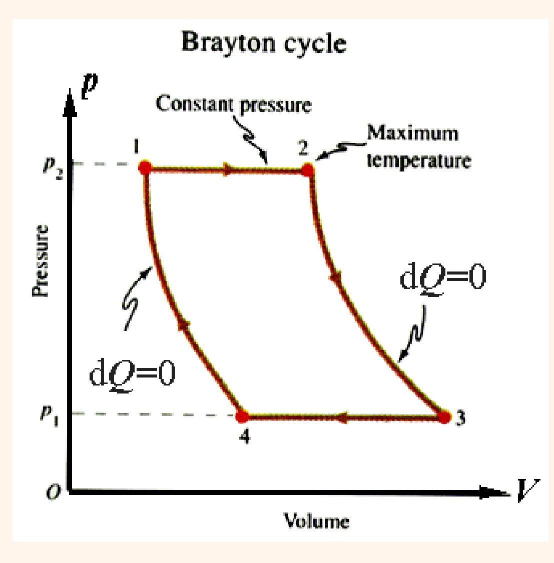
解答：两个过程吸热（1—2）是一样的

循环过程作功不同($A_1 > A_2$)

$$\therefore \quad \eta_1 > \eta_2$$

例题(P_{272}19.13):一定量的理想气体经历如图所示循环,已知 T_2=400K, T_3=300K,求此循环的循环效率。

为燃气涡轮机的循环



$$1\rightarrow 2\ \ \mathrm{d}p=0 \qquad Q_{吸}=\frac{M}{\mu}C_p(T_2-T_1)$$

$$3\rightarrow 4\ \ \mathrm{d}p=0 \qquad Q_{放}=\frac{M}{\mu}C_p(T_4-T_3)$$

$$\therefore |Q_{放}|=\frac{M}{\mu}C_p(T_3-T_4)$$

$$2\rightarrow 3\ \ \mathrm{d}Q=0 \qquad T_2^{-\gamma}p_2^{\gamma-1}=T_3^{-\gamma}p_3^{\gamma-1}$$

$$4\rightarrow 1\ \ \mathrm{d}Q=0 \qquad T_1^{-\gamma}p_1^{\gamma-1}=T_4^{-\gamma}p_4^{\gamma-1}$$

$$\therefore \frac{T_1}{T_2}=\frac{T_4}{T_3}$$

$$\eta=1-\frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}=1-\frac{T_3-T_4}{T_2-T_1}=1-\frac{T_3(1-\frac{T_4}{T_3})}{T_2(1-\frac{T_1}{T_2})}=1-\frac{T_3}{T_2}=1-\frac{300}{400}=25\%$$

已知压强也可求效率。