三、热力学循环（thermodynamic cycle）

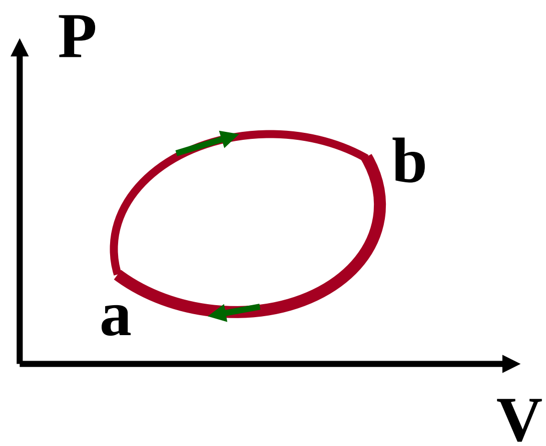
1、循环过程—热力学系统的状态经过一系列不同的过程又回到初始状态。

热机——持续不断地将热转换为功的装置。

工质——在热机中参与热功转换的媒介物质。

特点：

$\Delta E=0$；　$Q_{吸}-|Q_{放}|=Q_{净}=A_{净}$



2、两种循环：

正循环：顺时针方向变化

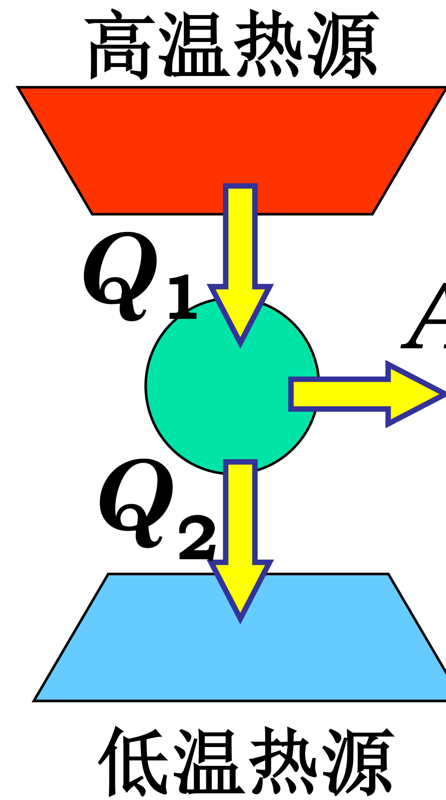
$A_{净}>0$　（蒸汽机、内燃机）

逆循环：反时针方向变化

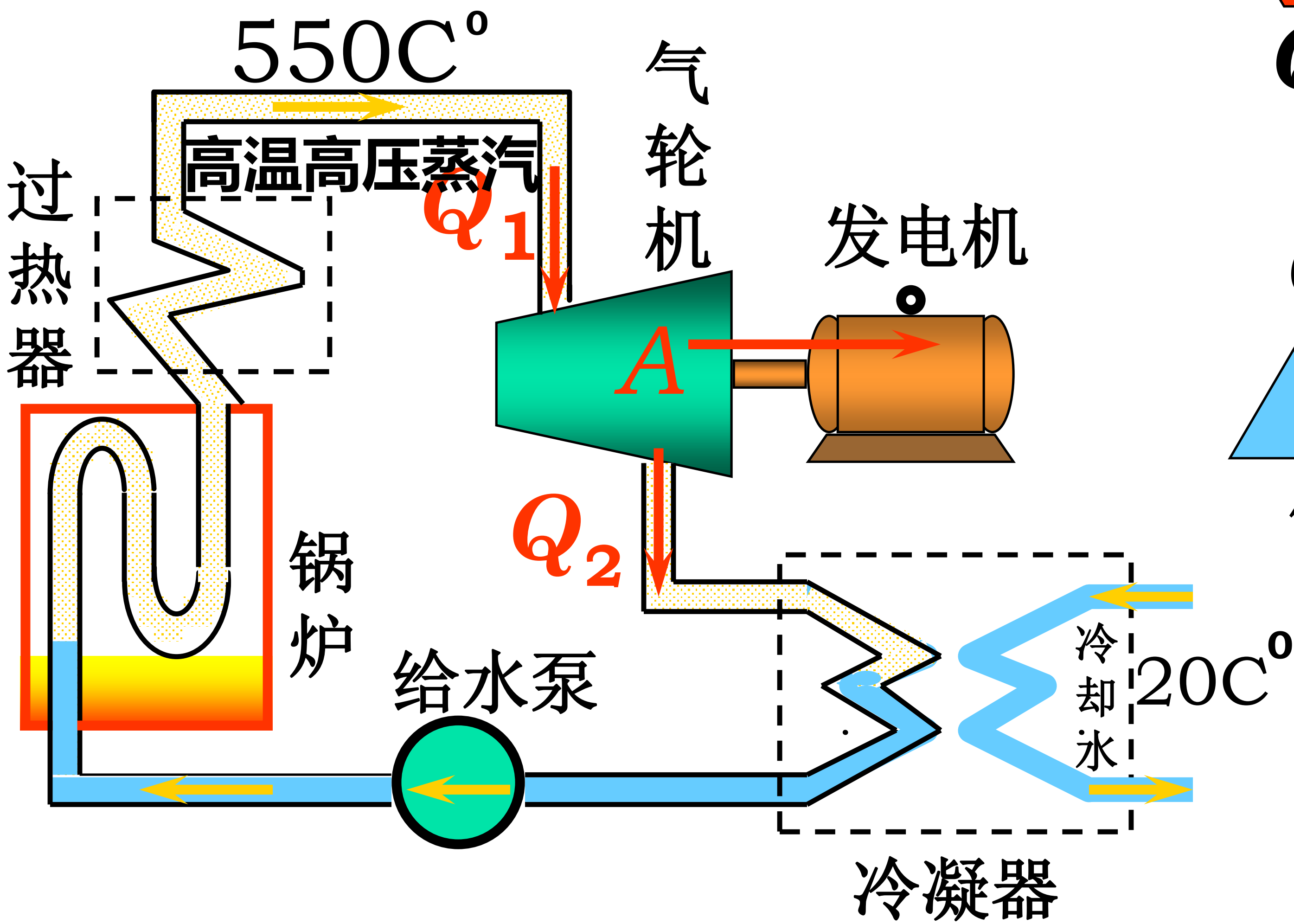
$A_{净}=Q_{吸}-|Q_{放}|<0$

（家用冰箱、致冷装置）

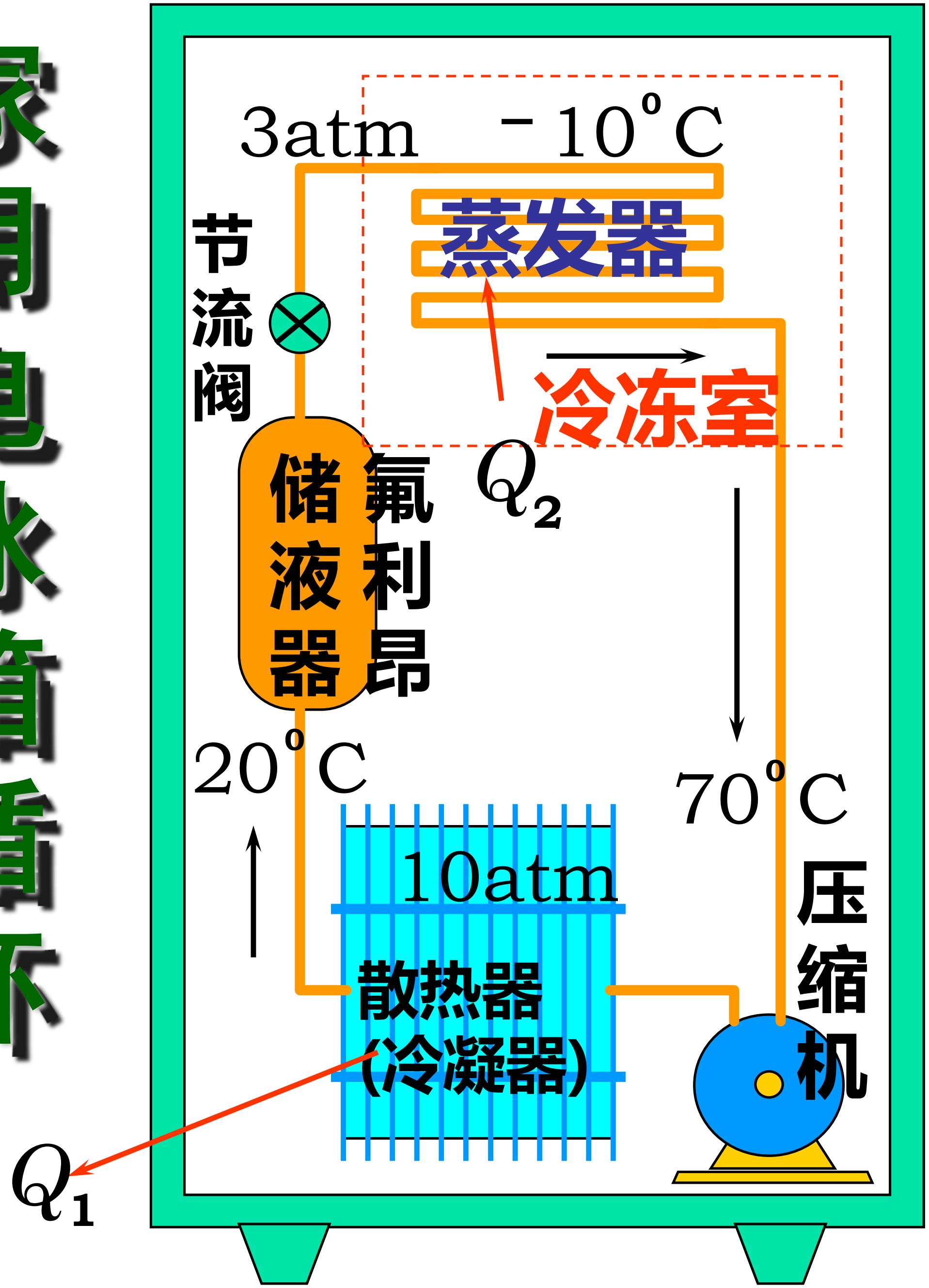
热机工作示意图



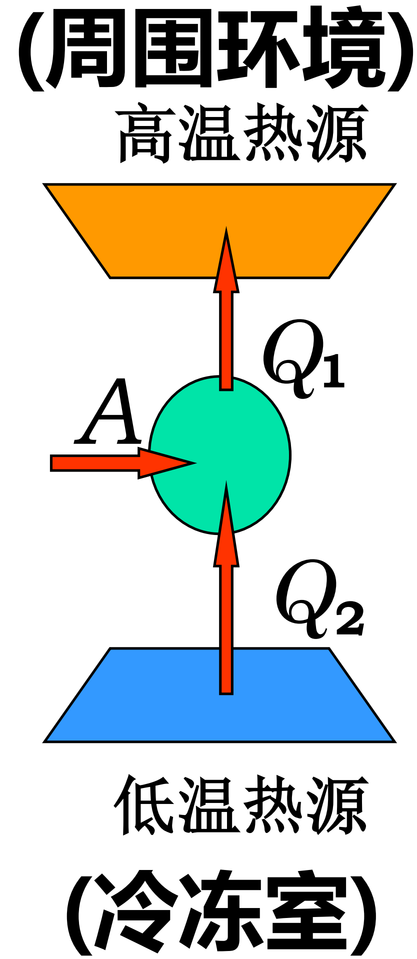
发电厂蒸汽动力循环示意图



家用电冰箱循环



3atm
-10°C
节流阀
蒸发器
冷冻室
储液器
氟利昂
Q_2
20°C
70°C
10atm
散热器
(冷凝器)
压缩机
Q_1



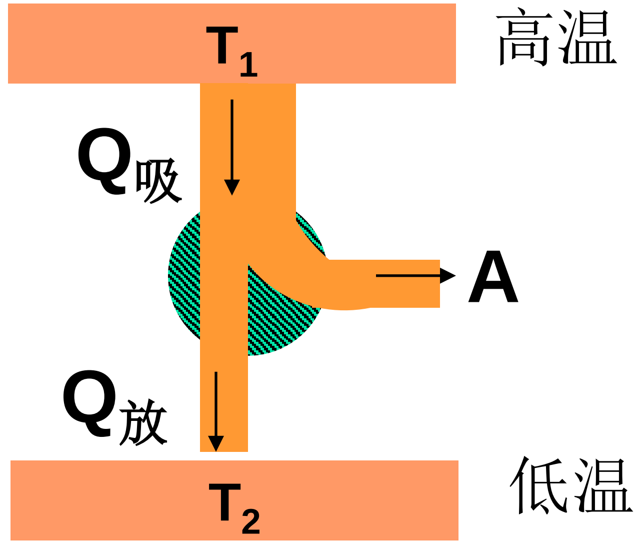
(周围环境)
高温热源
Q_1
A
Q_2
低温热源
(冷冻室)

3、性能指标

热机效率

$$\eta=\frac{A}{Q_{吸}}=1-\frac{\left|Q_{放}\right|}{Q_{吸}}$$

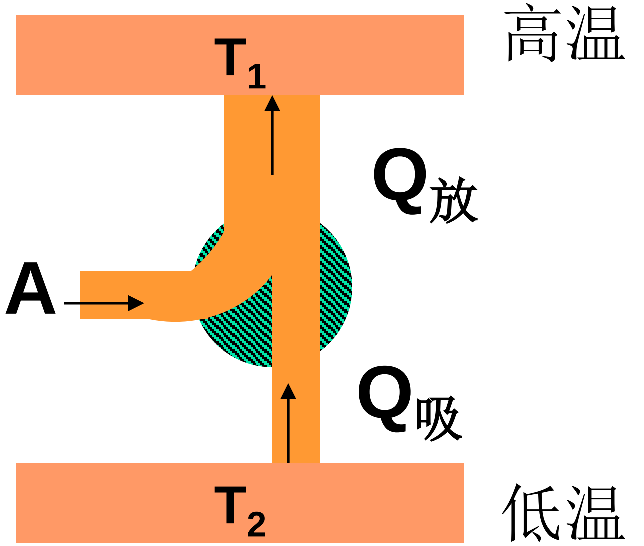
$$Q_{吸}=A+Q_{放}$$



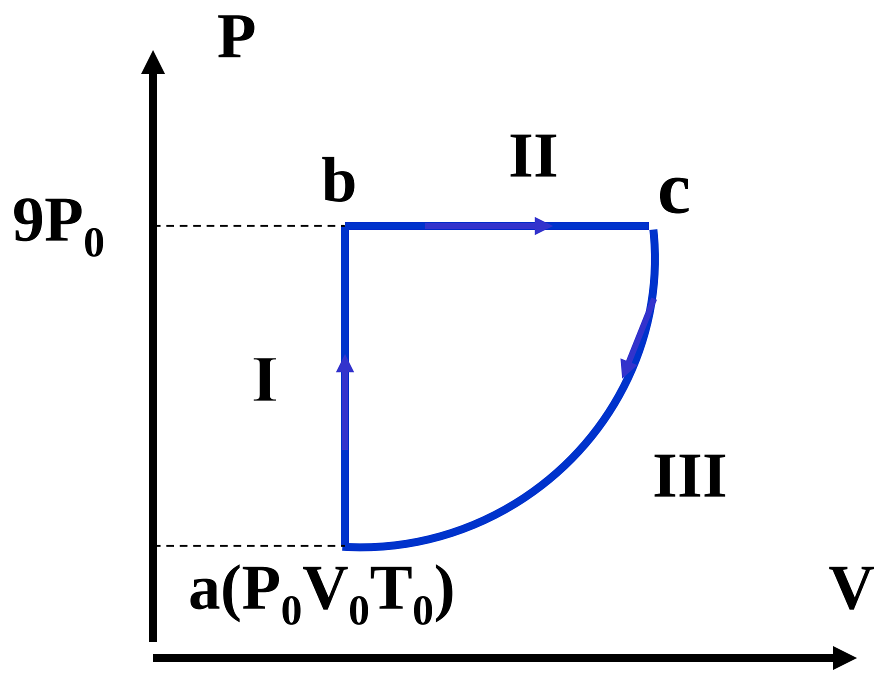
致冷系数

$$\omega=\frac{Q_{吸}}{A}=\frac{Q_{吸}}{\left|Q_{放}\right|-Q_{吸}}$$

$$A+Q_{吸}=Q_{放}$$



例1、1mol单原子分子的理想气体，经历如图所示的可逆循环，联结ac两点的曲线III的方程为 $P=\frac{P_0}{V_0^2}V^2$ ，a点的温度为T_0。



1）试以T_0、R表示I、II、III过程中气体吸收的热量;

2）求此循环的效率;

3) 净功.

分析：$Q_I=C_v(T_b-T_a)$

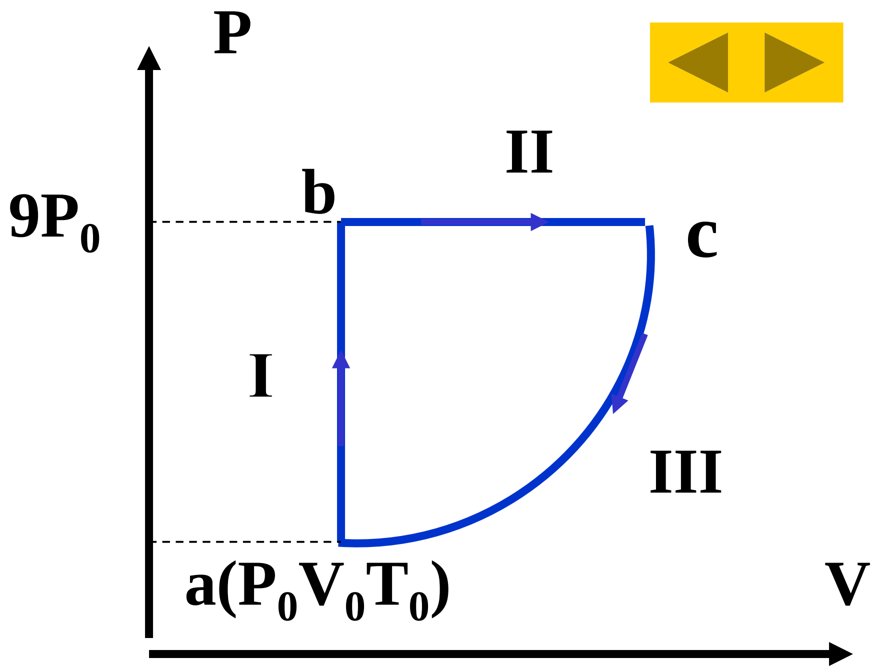
$Q_{II}=C_P(T_c-T_b)$

$Q_{III}=A+C_V(T_a-T_c)$

解： $\dfrac{P_0}{T_0}=\dfrac{9P_0}{T_b}\Rightarrow T_b=9T_0$

$$\frac{P_0}{V_0^2}=\frac{9P_0}{V_c^2}\Rightarrow V_c=3V_0$$

$$\frac{P_0V_0}{T_0}=\frac{9P_03V_0}{T_c}\Rightarrow T_c=27T_0$$



$$Q_{I}=C_v\left(T_b-T_a\right)=\frac{3}{2}R\left(9T_0-T_0\right)=12RT_0$$

$$PV=\frac{m}{M}RT$$

$$Q_{II}=C_p\left(T_c-T_b\right)=\frac{5}{2}R\left(27T_0-9T_0\right)=45RT_0$$

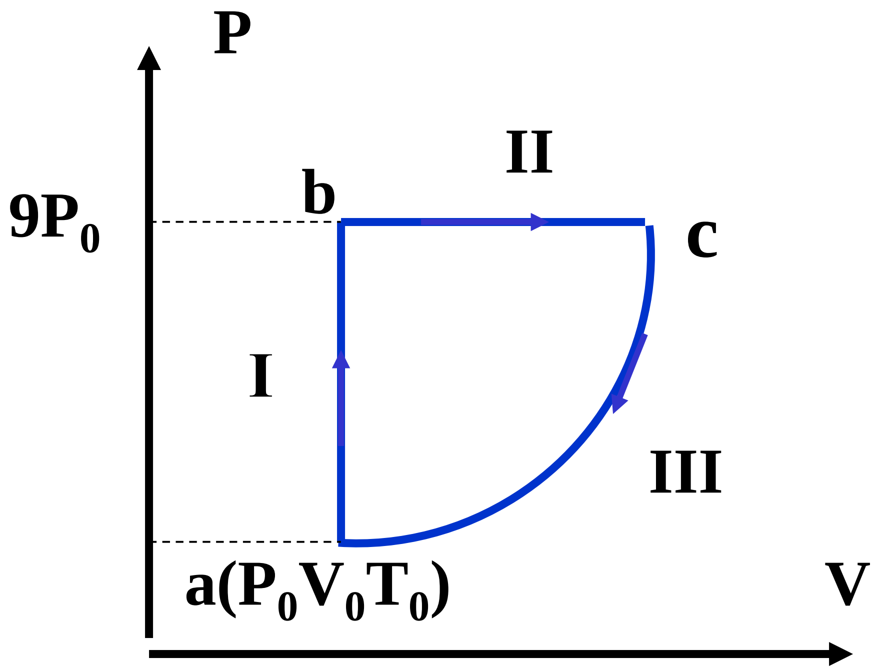
$$\Rightarrow\frac{PV}{T}=\frac{m}{M}R$$

$$Q_{III}=A+\Delta E=\int_{V_c}^{V_a}PdV+C_v\left(T_a-T_c\right)$$

$$=\int_{3V_0}^{V_0}\frac{P_0}{V_0^2}V^2dV+\frac{3}{2}R\left(T_0-27T_0\right)=-47.7RT_0$$

(2) $$\eta = 1 - \frac{|Q_{III}|}{Q_I + Q_{II}}$$

$$= 16.3\%$$



(3) $$A_{净} = Q_{净}$$

$$= Q_I + Q_{II} + Q_{III}$$

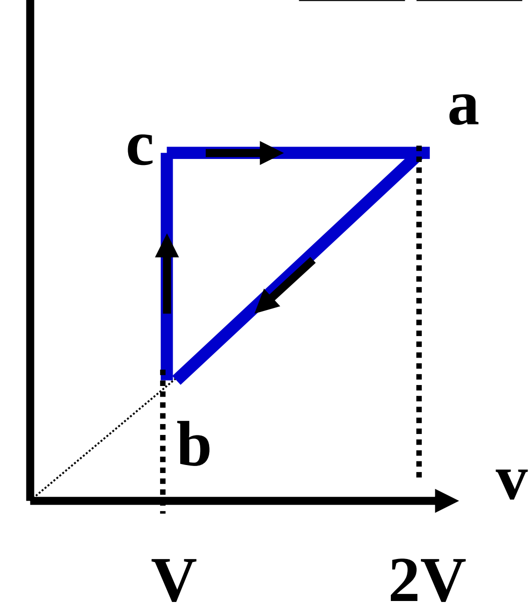
$$= 12RT_0 + 45RT_0 - 47.7RT_0 = 9.3RT_0$$

例2、1mol单原子理想气体的循环过程如T-V图所示，其中C点的温度为T_c=600K。试求：

（1）ab、bc、ca各个过程系统吸收的热量；

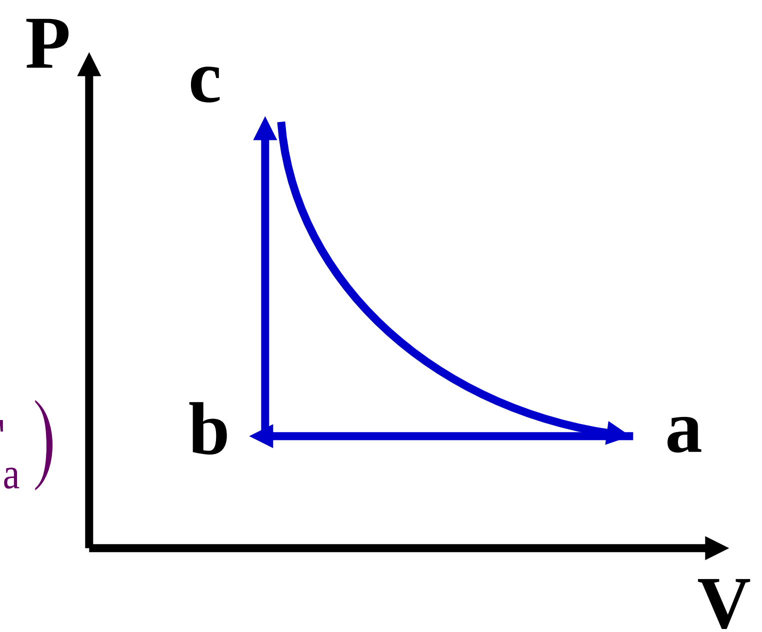
（2）经一循环系统所作的净功；

（3）循环的效率。（Ln2=0.693）



解：$$\frac{T}{V}=k\left(PV=\frac{m}{M}RT\right)$$

$$\frac{V_a}{T_a}=\frac{V_b}{T_b}\Rightarrow T_b=300K$$

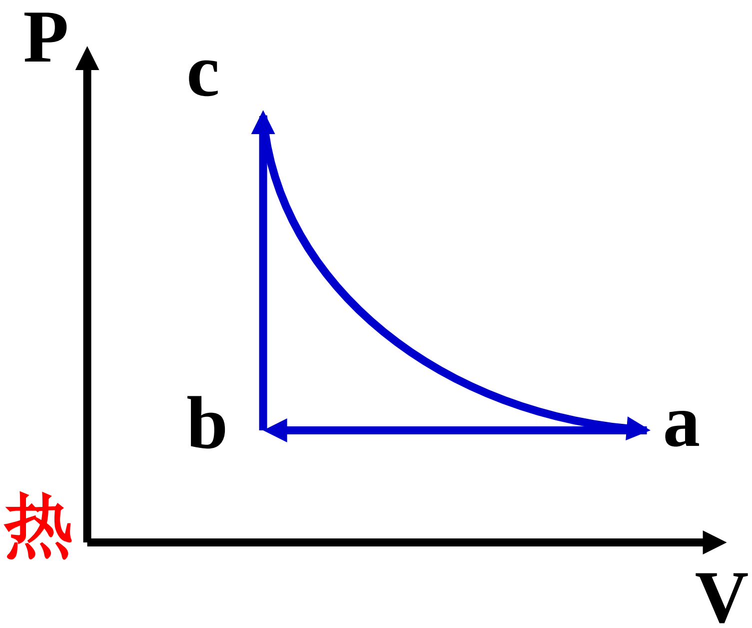


$$Q_{ab}=C_p\left(T_b-T_a\right)=\frac{i+2}{2}R\left(T_b-T_a\right)$$

$$=-6232.5J$$ <0 放热

$$Q_{bc} = C_v(T_c - T_b) = \frac{i}{2}R(T_c - T_b) = 3739.5J$$

>0 吸热



$$Q_{ca} = RT_C \ln\frac{V_a}{V_c} = 3456J$$ >0 吸热

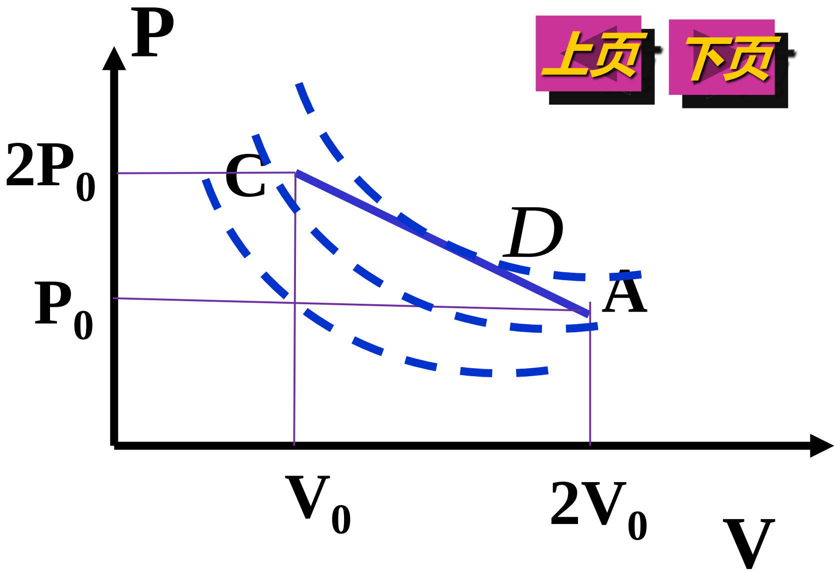
$$A = (Q_{ba} + Q_{ca}) - |Q_{ab}| = 963J$$

$$\eta = \frac{A}{Q_{ba} + Q_{ca}} = 13.4\%$$

上页 下页

习题11　A、C温度相同

$$(PV=RT)\qquad P=-\frac{P_0}{V_0}V+3P_0$$



$$T=\frac{1}{R}\left(-\frac{P_0}{V_0}V^2+3P_0V\right)$$

$$\frac{dT}{dV}=0\Rightarrow V=\frac{3}{2}V_0\Rightarrow T_{\max}$$

$$Q=A+\Delta E$$

$$V_0\sim\frac{3}{2}V_0\Rightarrow T\uparrow\qquad \frac{3}{2}V_0\sim 2V_0\Rightarrow T\downarrow\quad\Rightarrow A>0\quad \Delta E<0$$

$$dQ=PdV+C_VdT=0\qquad (PdV+VdP=RdT)$$

$$PdV=\left(-\frac{P_0}{V_0}V+3P_0\right)dV$$

$$C_VdT=\frac{5}{2}RdT=\frac{5}{2}\left(-\frac{P_0}{V_0}2V+3P_0\right)dV$$

$$\Bigg\}\quad V_D=\frac{7}{4}V_0$$

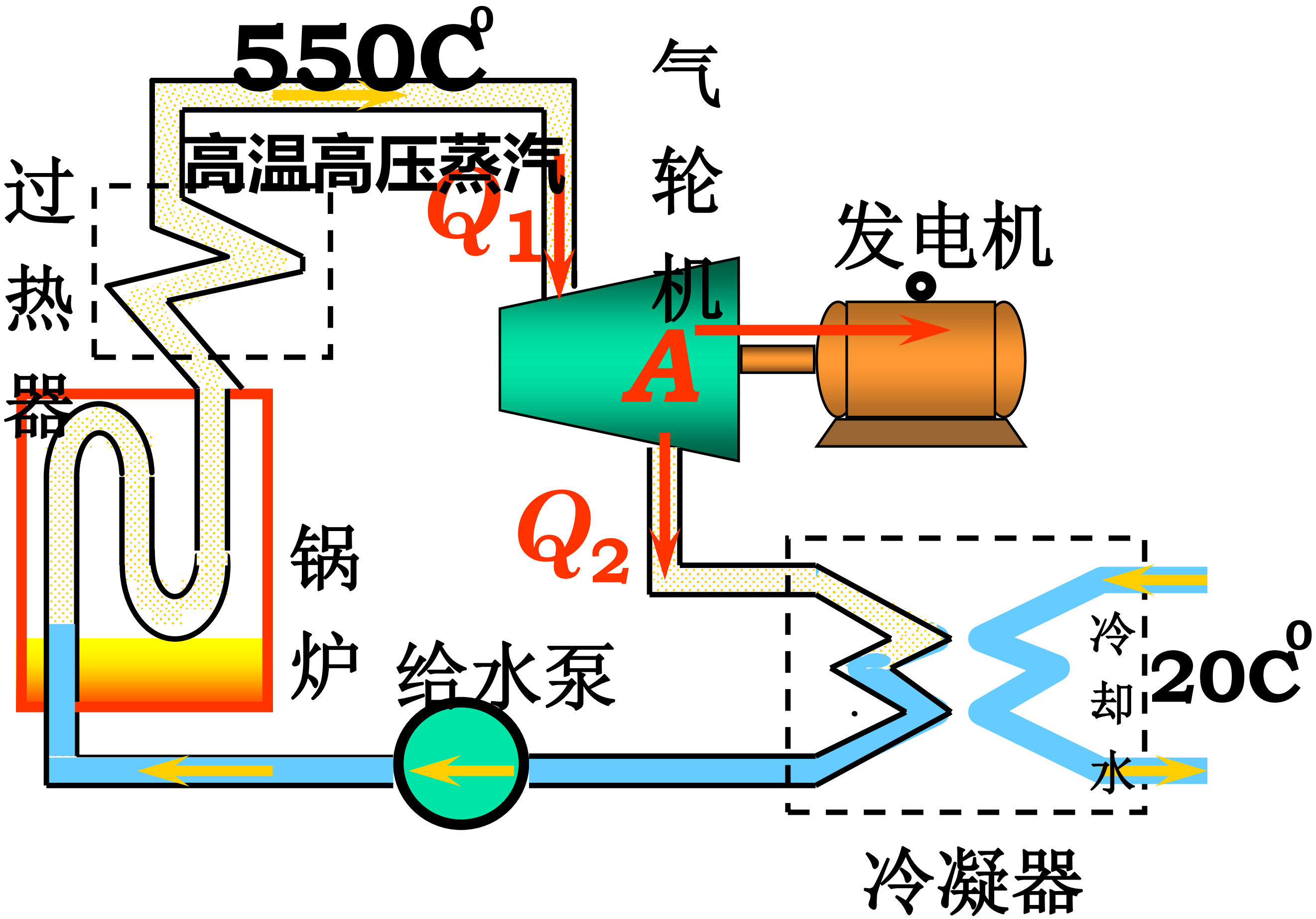
$$Q_{吸} = Q_{BC} + Q_{CD}$$

$$= C_V(T_C - T_B) + C_V(T_D - T_C) + A_{CD}$$

$$= \frac{67}{16} P_0 V_0$$

$$\eta = \frac{A_{净}}{Q_{吸}} = \frac{1}{2} P_0 V_0 \Big/ \frac{67}{16} P_0 V_0 = 11.9\%$$

热机发展简介： 1698年萨维利和1705年纽可门先后发明了蒸汽机，当时蒸汽机的效率极低．1765年瓦特进行了重大改进，提高效率 3~4倍.



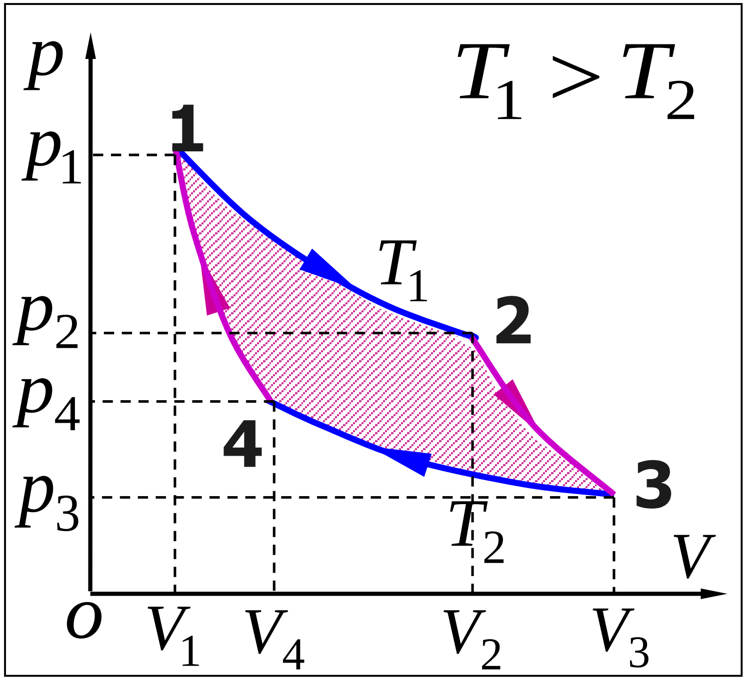
$$\eta = \frac{A}{Q_{吸}}$$

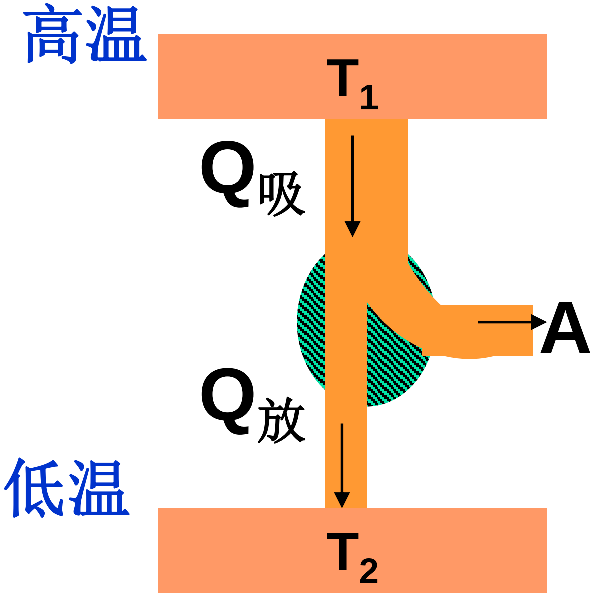
$$A \cancel{=} Q_{吸}$$

4、卡诺循环（Carnot cycle）

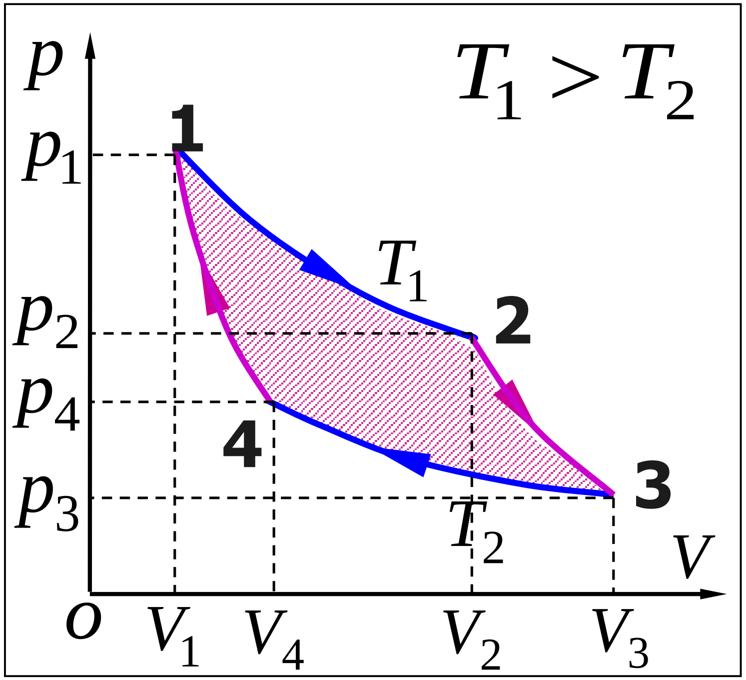
1824 年法国的年青工程师卡诺提出一个工作在两热源之间的理想循环—卡诺循环. 给出了热机效率的理论极限值; 他还提出了著名的卡诺定理.

卡诺循环：两个绝热过程；两个等温过程





1→2：T_1等温膨胀(吸热)



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

2→3：绝热膨胀　**Q=0**

3→4：T_2等温压缩(放热)

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

4→1：绝热压缩　**Q=0**

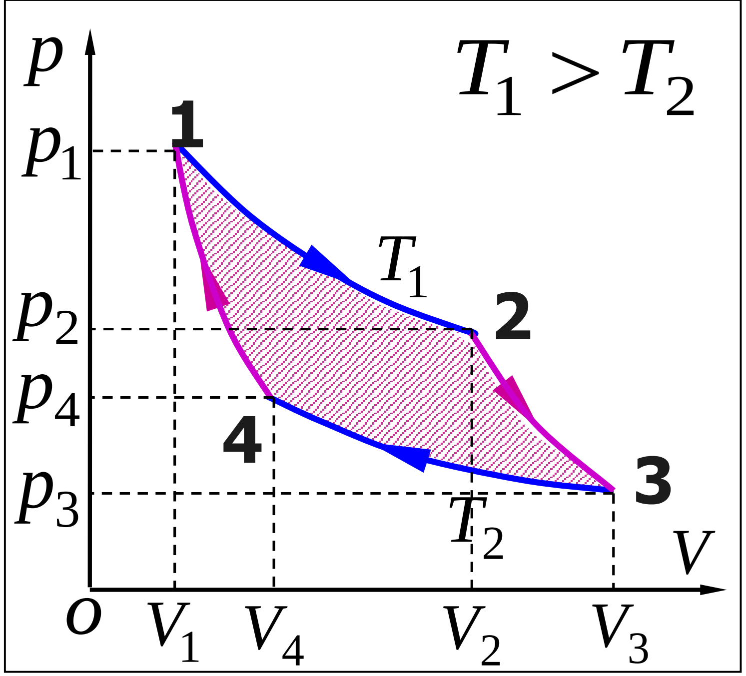
效率：

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{\left| T_2 \ln \frac{V_4}{V_3} \right|}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}}$$

$$V_4^{\gamma-1} T_4 = V_1^{\gamma-1} T_1$$

$$V_3^{\gamma-1} T_3 = V_2^{\gamma-1} T_2$$



考虑到 $T_1=T_2$ $T_3=T_4$

绝热方程	$pV^{\gamma} = c'$ $V^{\gamma-1}T = c$ $p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = c''$

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

卡诺循环的效率 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

1 ）卡诺热机效率 $\eta = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$

只与T_1和T_2有关, 与物质种类、膨胀的体积无关

2 ）理论指导作用 提高$\eta \begin{cases} T_1 \uparrow \\ T_2 \downarrow \end{cases}$

提高高温热源的温度现实些

3) 系统在循环中所吸收的热量，仍有部分释放于低温热源，热机效率 $\eta \neq 1 < 1$ ，说明低温热源温度$T_2 \neq 0$

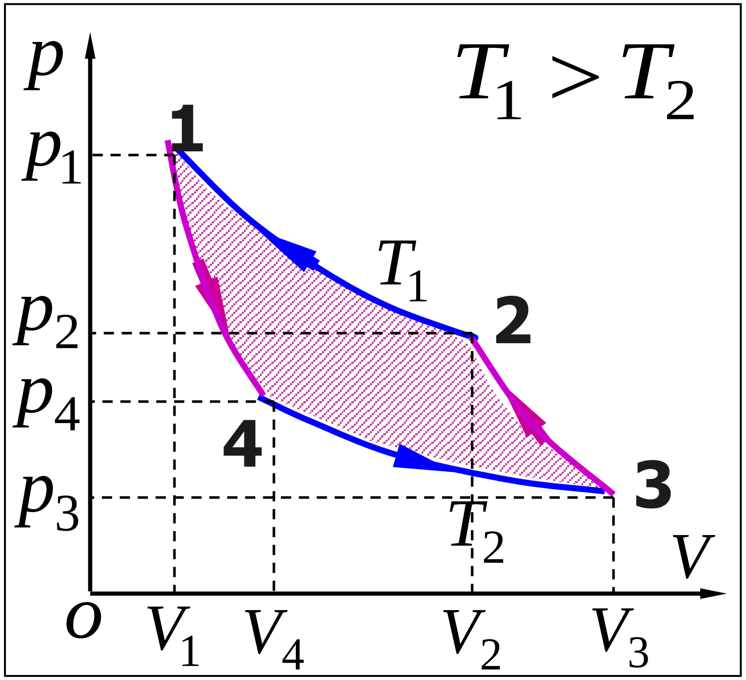
- 热机循环不向低温热源放热是不可能的
- 热机循环至少需要两个热源

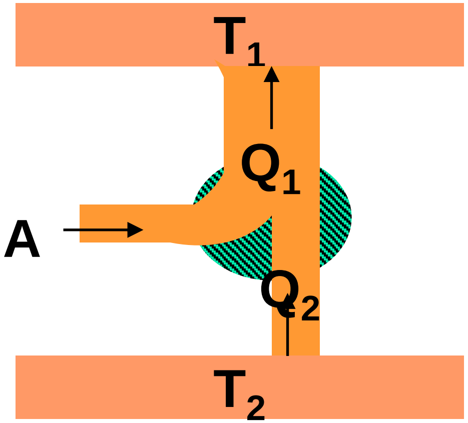
卡诺制冷循环的制冷系数

$$\omega = \frac{Q_{吸}}{A} = \frac{Q_{吸}}{\left|Q_{放}\right| - Q_{吸}}$$

$$= \frac{\nu R T_2 \ln \dfrac{V_3}{V_4}}{\nu R T_1 \ln \dfrac{V_2}{V_1} - \nu R T_2 \ln \dfrac{V_3}{V_4}}$$

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





例4、书P290 7-16

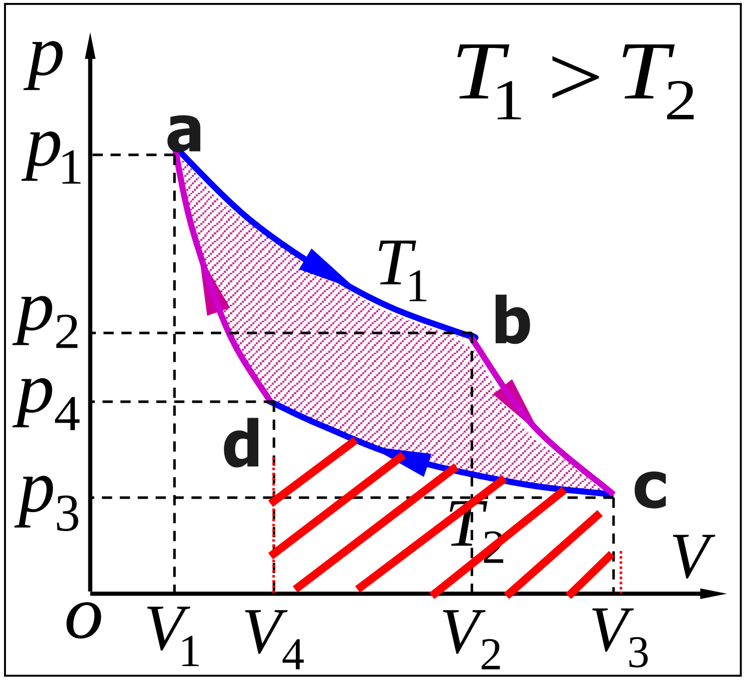
$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_0}{3T_0}$$

$$= \frac{2}{3} = 66.7\%$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{|Q_{放}|}{Q_{吸}}$$

$$\Rightarrow \frac{|\mathbf{Q}_{放}|}{\mathbf{Q}_{吸}} = \frac{\mathbf{T}_{低}}{\mathbf{T}_{高}} = \frac{T_0}{3T_0}$$

$$\Rightarrow \mathbf{Q}_{吸} = 3|\mathbf{Q}_{放}| = 3A_1$$



面积A_1是循环的放热

$$\mathbf{A}_{净} = \mathbf{Q}_{吸} - |\mathbf{Q}_{放}|$$

$$= 2|\mathbf{Q}_{放}| = 2A_1$$

上页 下页

例5、一台电冰箱放在室温为 $20^\circ C$ 的房间里，冰箱储藏柜中的温度维持在$5^\circ C$ 。 现每天有 $2.0\times10^7 J$ 的热量自房间传入冰箱内， 若要维持冰箱内温度不变，外界每天需作多少功？ 其功率为多少？ （ 设在 $5^\circ C$ 至 $20^\circ C$ 运转的致冷机 (冰箱) 的致冷系数是卡诺致冷机致冷系数的 55%）．

解： $$\omega=\omega_{卡}\times55\%=\frac{T_2}{T_1-T_2}\times\frac{55}{100}=10.2$$

致冷机致冷系数 $$\omega=\frac{Q_2}{A}$$

房间传入冰箱的热量 $Q'=2.0\times10^7 J$ ，热平衡时$Q'=Q_2$

$$A=\frac{Q_2}{\omega}=\frac{2\times10^7}{10.2}=1.96\times10^6 J$$