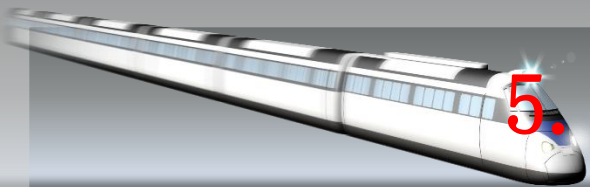




# 第五章热力学基础

热力学第一定律



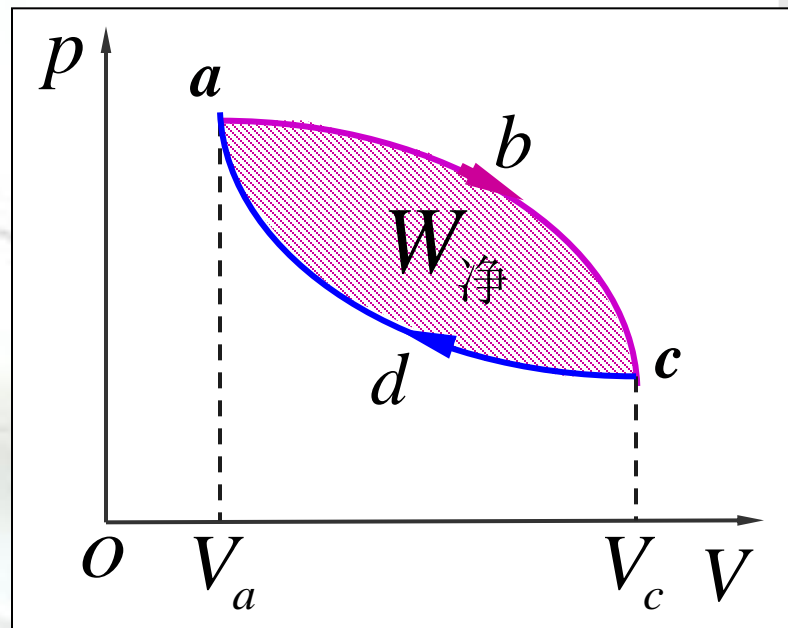


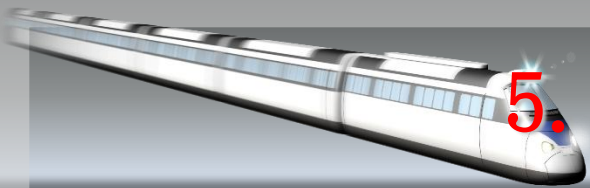
## 5.5 循环过程 卡诺循环

系统从某一状态出发，经过一系列状态变化过程后，又回到原来出发时的状态，这样的过程叫**循环过程**，简称**循环**。

特征： $\Delta E = 0$

在 $p$ - $V$ 图上，如果循环是沿**顺时针**方向进行的，则称为**正循环**（或热机循环）。如果循环是沿**逆时针**方向进行的，则称为**逆循环**（或致冷循环）。





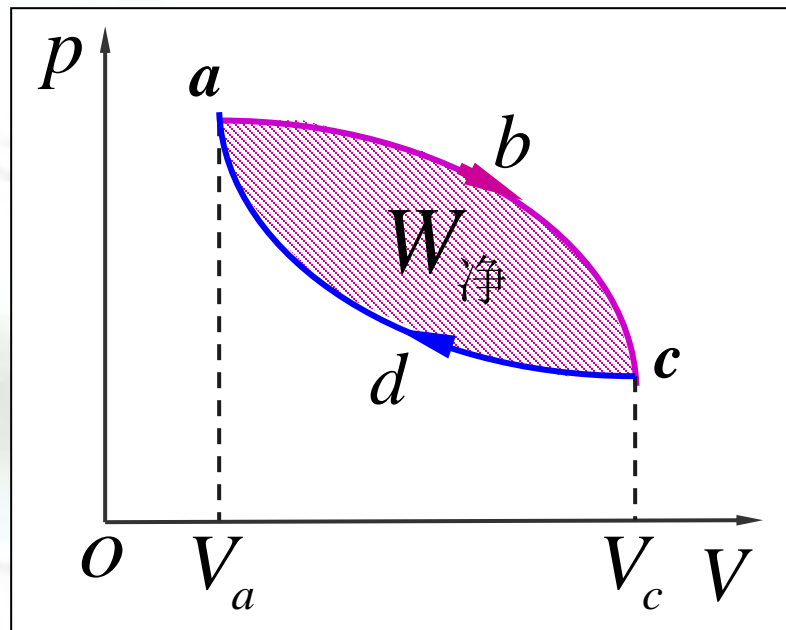
## 5.5 循环过程 卡诺循环

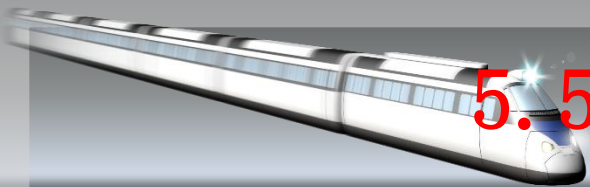
**正循环**指高温 $a$ 处吸热 $Q_1$ ，并经过 $abc$ 膨胀对外做功 $W_1$ ；在低温 $c$ 处外界对系统做功 $W_2$ ，并通过 $cda$ 压缩系统使之复原，系统对外放出多余的热量 $Q_2$ 。系统循环一次所做净功（有用功） $W_{\text{净}}=W_1-W_2$ ，即封闭曲线所围的面积。考虑到 $\Delta E = 0$

热力学第一定律： $Q_{\text{净}}=W_{\text{净}}$

净功： $Q_{\text{净}}=Q_1-Q_2=W_{\text{净}}$

$W_{\text{净}} > 0$ 表示正循环过程中的能量转换关系是系统将吸收的热量 $Q_1$ 中的一部分转化为有用功 $W_{\text{净}}$ ，另一部分 $Q_2$ 放回给外界。可见，正循环是一种通过工质使热量不断转换为功的循环。

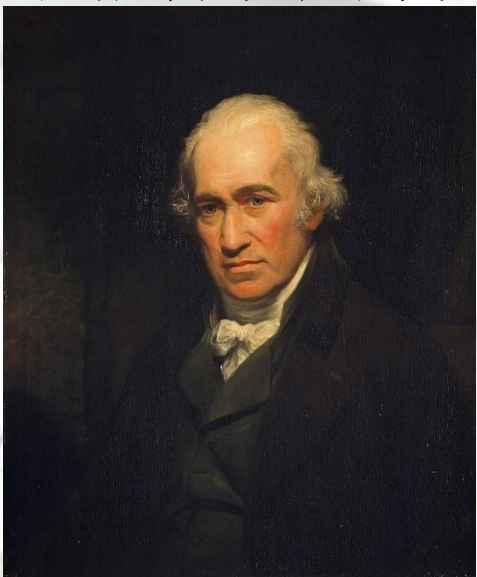




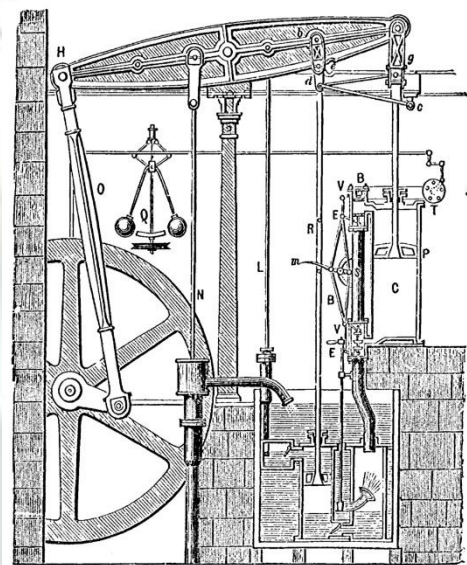
## 5.5.1 热机 热机效率

能完成**正循环**的装置均叫**热机**，或把通过工质使热量不断转换为功的机器叫热机。

1698年萨维利和1705年纽可门先后发明了蒸汽机，但效率极低。1765年瓦特进行了重大改进，大大提高了效率。人们一直在为提高热机的效率而努力，从理论上研究热机效率问题，既指明了提高效率的方向，也推动了热学理论的发展。

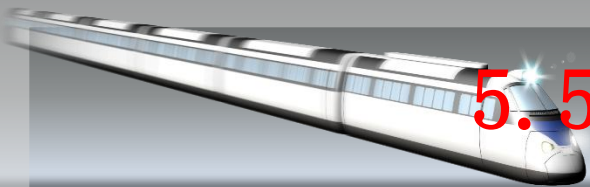


瓦特



布尔顿和瓦特设计的蒸汽机





## 5.5.1 热机 热机效率

各种热机的效率:



液体燃料火箭48%



柴油机37%

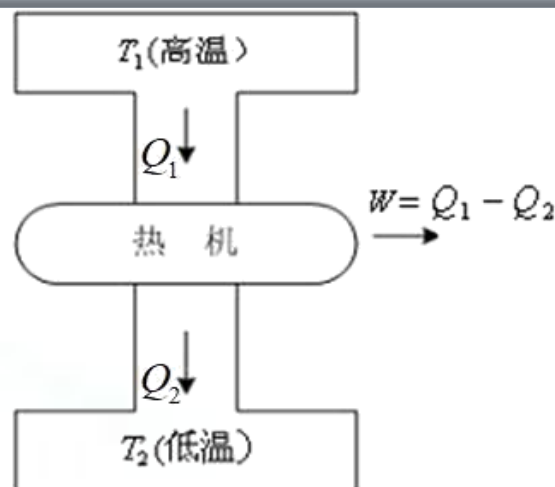
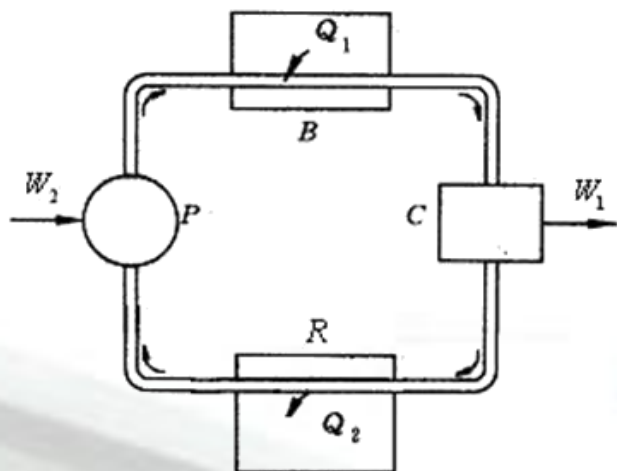


汽油机25%



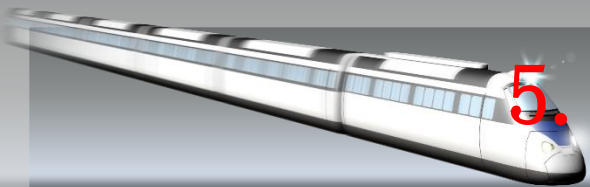
蒸汽机8%

## 5.5.1 热机 热机效率



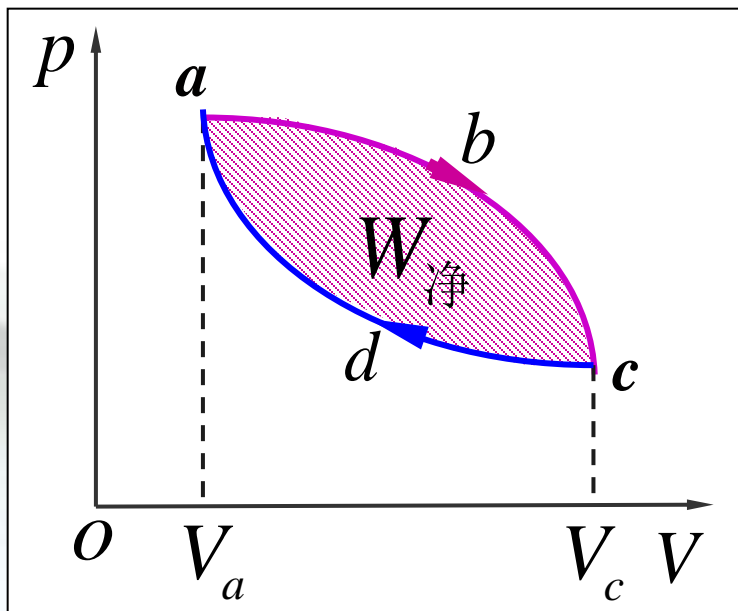
循环由四个过程组成：(1)一定量的水从锅炉 $B$  (高温热源 $T_1$ ) 吸收热量 $Q_1$ ，形成高温高压蒸汽；(2)蒸汽进入气缸 $C$ ，推动活塞对外界做功 $W_1$ ；(3)做功后的蒸汽是温度和压强大为降低的“废气”，进入冷凝器 $R$  (低温热源 $T_2$ )，放出热量 $Q_2$ 凝结成水；(4)然后由泵 $P$ 将冷凝水压回到锅炉，外界做功为 $W_2$ 。

正循环一般特征：一定量的工质在一次循环中从高温热源吸热 $Q_1$ ，对外做净功 $W$ ，又向低温热源放出热量 $Q_2$ 。

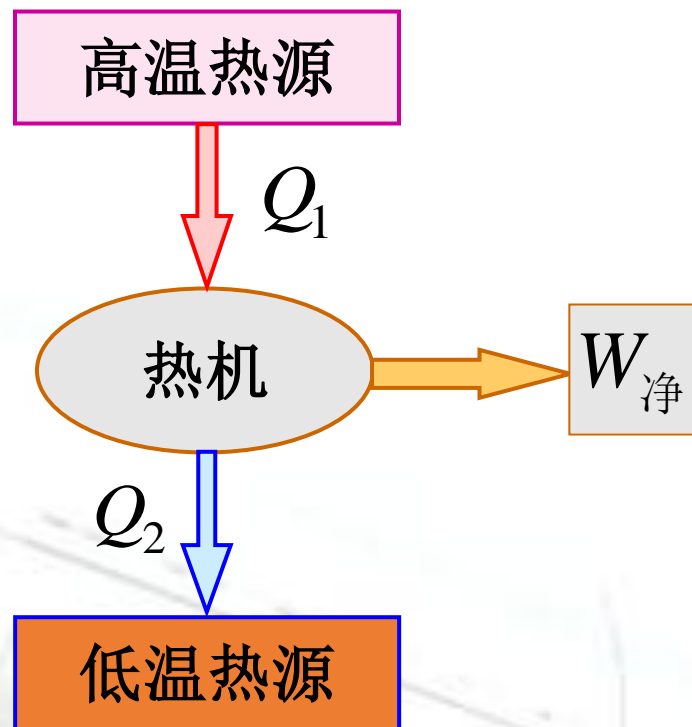


## 5.5.1 热机 热机效率

### 热机的效率

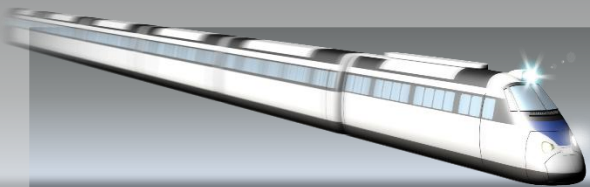


热机（正循环） $W_{\text{净}} > 0$



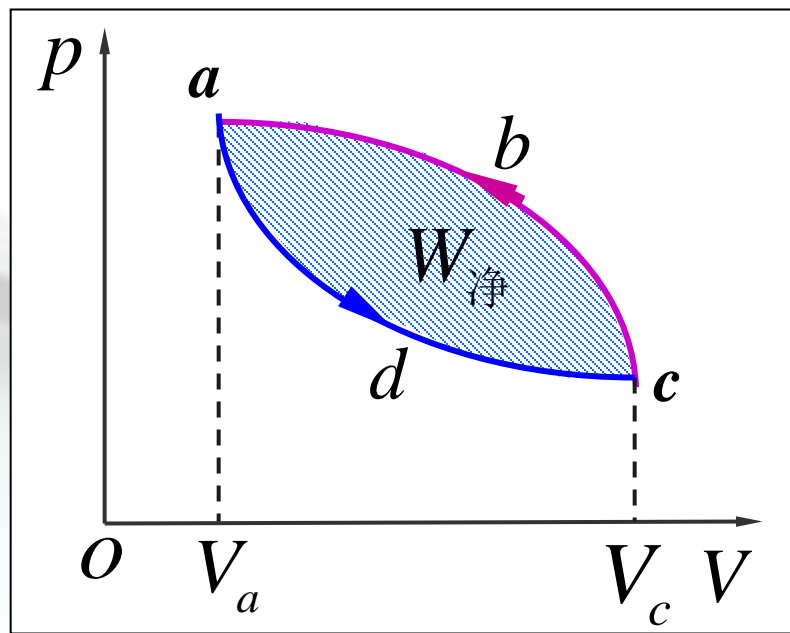
热机效率

$$\eta = \frac{\text{输出功}}{\text{吸收的热量}} = \frac{W_{\text{净}}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

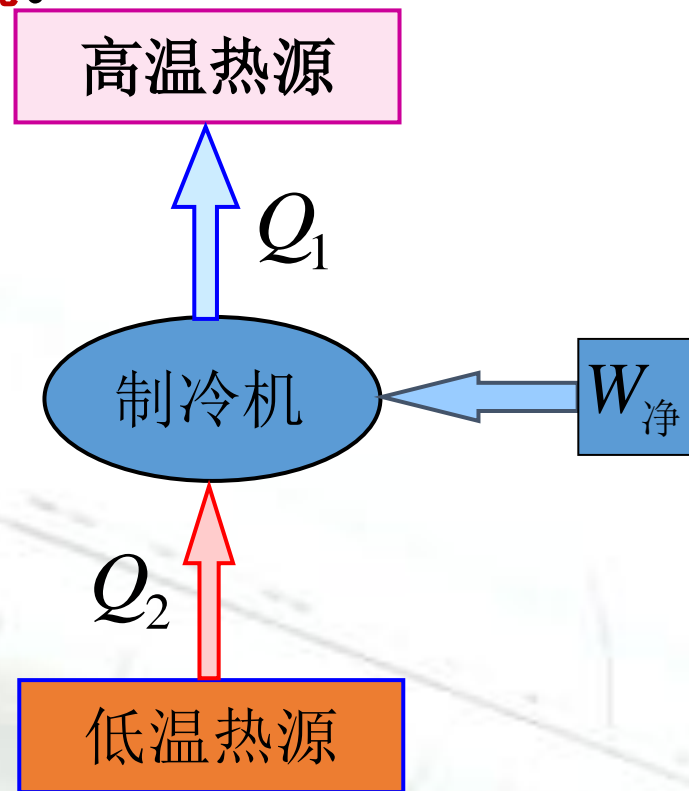


## 5.5.2 致冷系数

工作物质作**逆循环**的机器，称为**致冷机**。

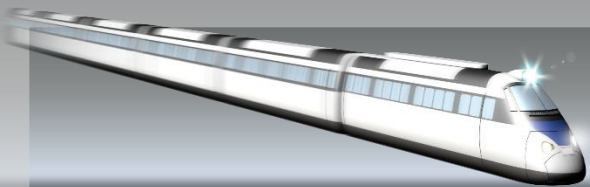


制冷机（**逆循环**） $W_{\text{净}} < 0$



**致冷系数**  $\omega = \frac{\text{从低温处吸收的热量}}{\text{外界对工质做净功大小}} = \frac{Q_2}{|W_{\text{净}}|} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$



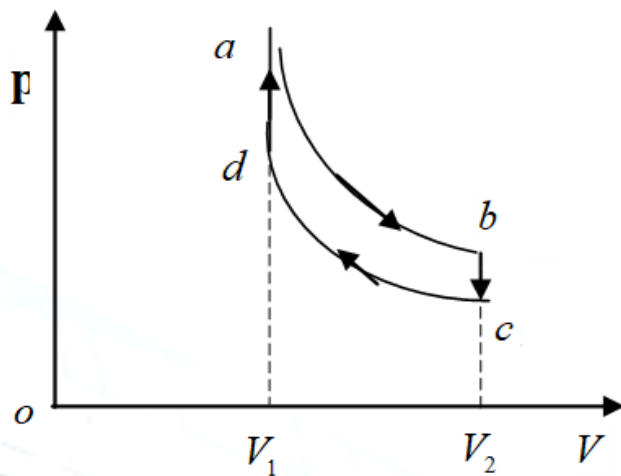


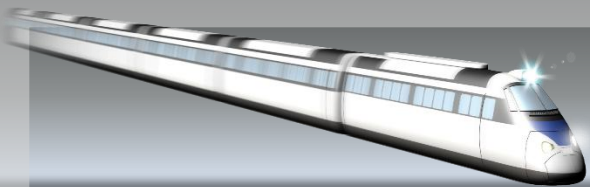
**例** 0.32kg的理想气体氧气作如图所示的 $abcd$ 循环， $ab$ 和 $cd$ 为等温过程， $bc$ 和 $da$ 为等体过程。设 $V_2=2V_1$ ， $T_1=300\text{K}$ ， $T_2=200\text{K}$ ， $C_{Vm}=20.8\text{J/mol/K}$ ，求循环效率。

**解：**系统的摩尔数为 $\nu = \frac{M}{M_{\text{mol}}} = 10\text{mol}$

因为 $W_{bc}=0$ ， $W_{da}=0$ ，循环过程中仅有 $ab$ 、 $cd$ 两个过程气体做功，所以循环过程中，气体做净功

$$\begin{aligned} W &= W_{ab} + W_{cd} \\ &= \nu RT_1 \ln(V_2 / V_1) + \nu RT_2 \ln(V_1 / V_2) \\ &= 5.76 \times 10^3 \text{ J} \end{aligned}$$



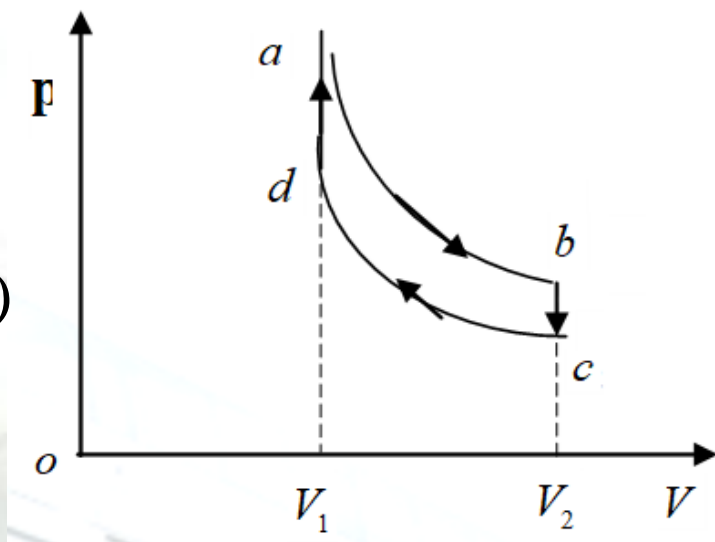


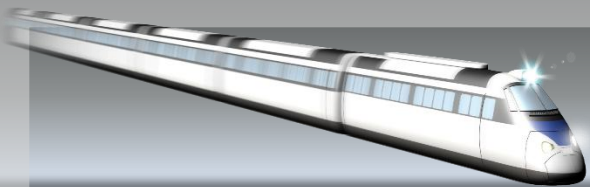
气体仅在 $ab$ 和 $da$ 过程中吸收热量。因为 $ab$ 为等温过程 $\Delta E_{ab} = 0$ ，所以该过程吸收热量为 $Q_{ab} = W_{ab}$ ； $da$ 为等体过程 $W_{da} = 0$ ，所以该过程吸收热量为 $Q_{da} = \Delta E_{da}$ 。两过程吸收的总热量为

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{ab} + Q_{da} \\ &= W_{ab} + \Delta E_{da} \\ &= \nu RT_1 \ln(V_2 / V_1) + \nu C_{V,m} (T_1 - T_2) \\ &= 3.80 \times 10^4 (J) \end{aligned}$$

该循环效率为

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{5.76 \times 10^3}{3.80 \times 10^4} = 15.1\%$$

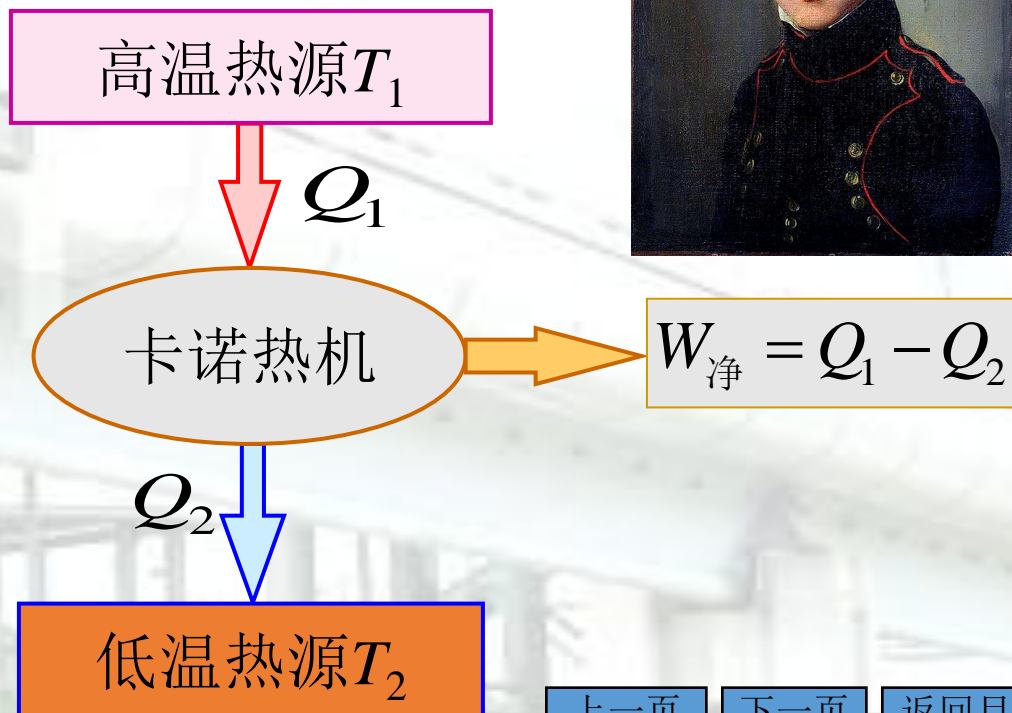
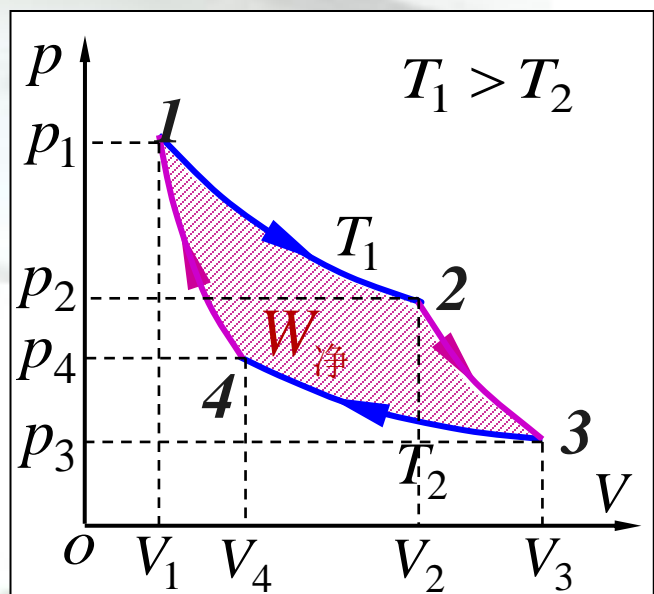


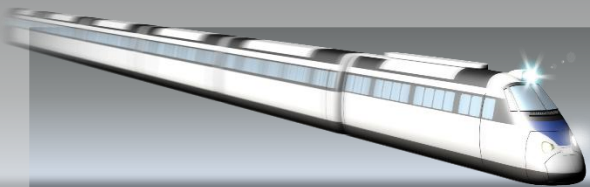


## 5.5.3 卡诺循环

1824年法国的青年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。

卡诺循环 { 两个准静态**等温**过程  
两个准静态**绝热**过程 } 组成





## 5.5.3 卡诺循环

理想气体卡诺循环热机效率的计算

**A — B 等温膨胀吸热**

$$Q_1 = \frac{M}{M_{mol}} RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

**B — C 绝热膨胀**

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

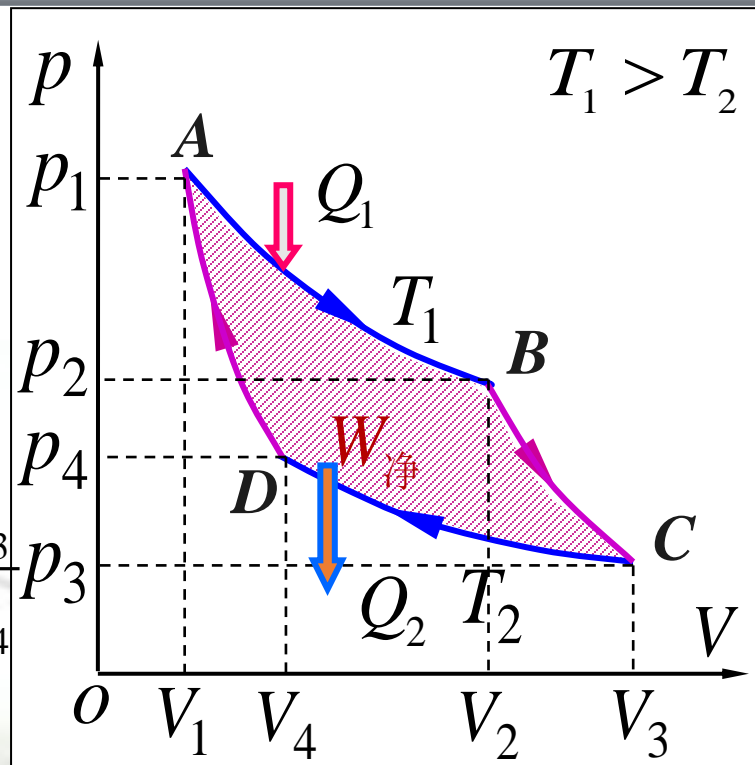
**C — D 等温压缩放热**

$$Q_2 = \frac{M}{M_{mol}} RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$

**D — A 绝热压缩**

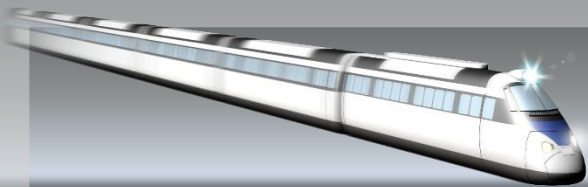
$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_4^{\gamma-1}$$

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



$$\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2 \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_1 \ln \frac{V_2}{V_1}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

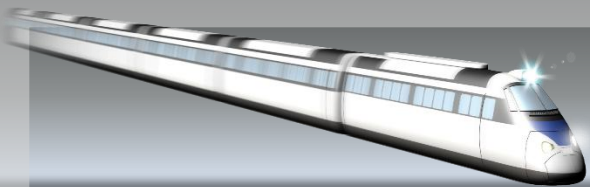




## 5.5.3 卡诺循环

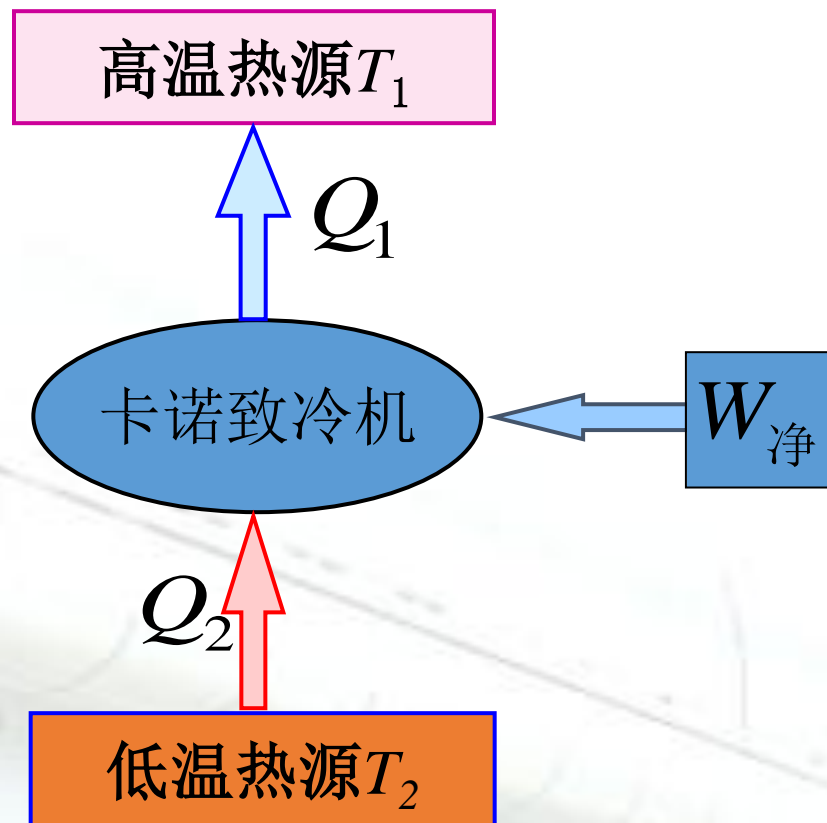
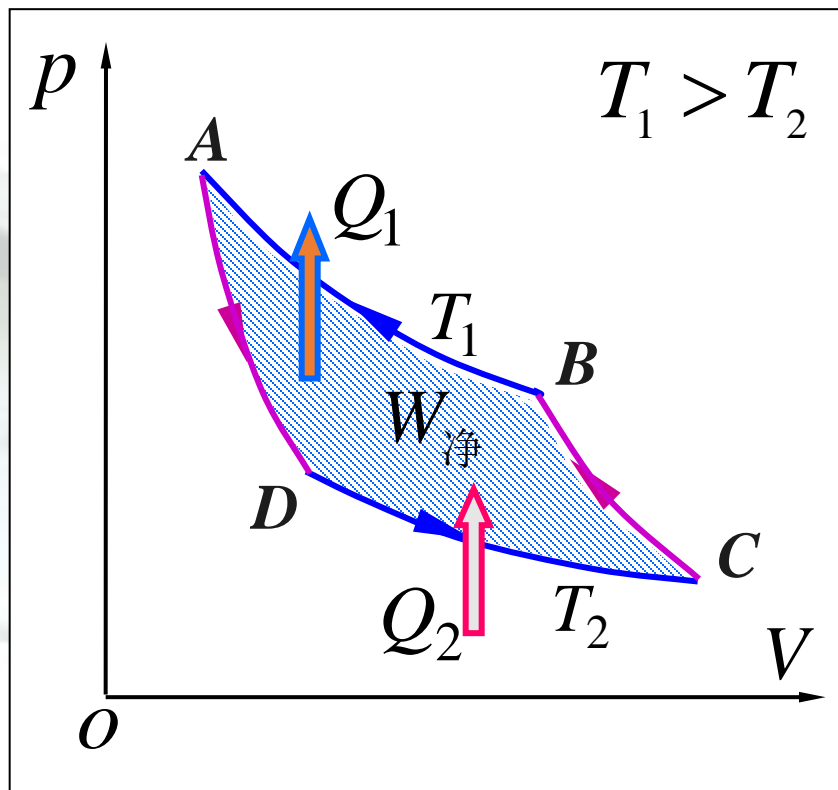
$$\eta_{\text{卡}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

1. 用于 $T_1 = \infty$ 和 $T_2 = 0$ 都不可能达到，所以卡诺热机的效率不可能达到1
2. 卡诺热机的效率只与高、低温热源的温度有关，而与工质性质无关。提高效率的途径是提高高温热源的温度或降低低温热源的温度。而通常后一种办法是不经济的。
3.  $\eta = \frac{W_{\text{净}}}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ 适用于一切热机，而 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 仅适用于卡诺热机
4. 完成一次卡诺循环必须有温度一定的高温 and 低温两个热源
5. 可以证明：在相同高温热源和低温热源之间工作的一切热机中，卡诺热机的效率最高。



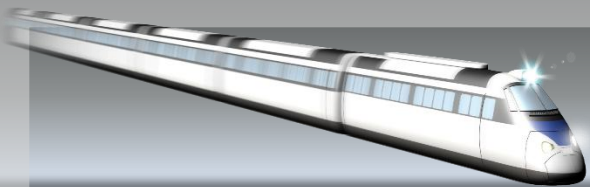
## 5.5.3 卡诺循环

卡诺致冷机（卡诺逆循环）



卡诺致冷机致冷系数  $\omega_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$

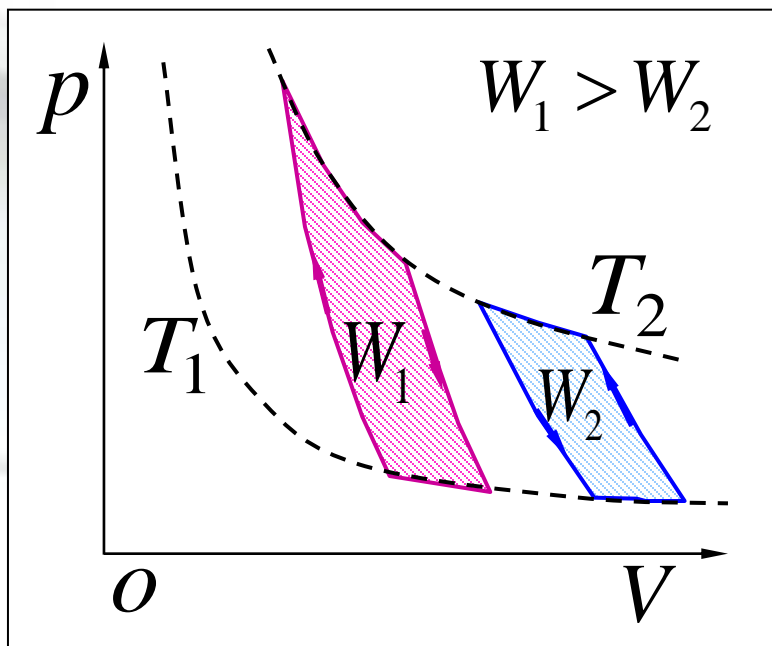
$$W_{\text{净}} = Q_1 - Q_2$$



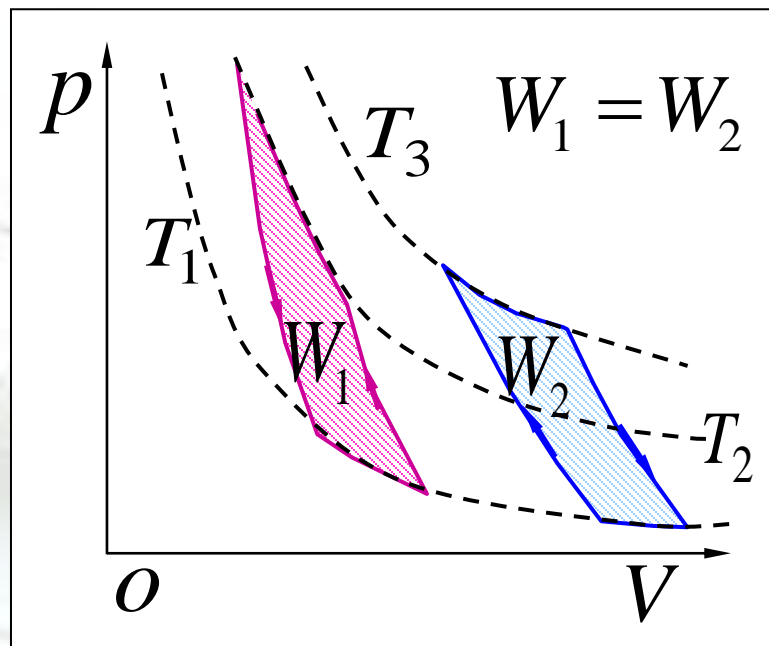
## 5.5.3 卡诺循环

### 讨 论

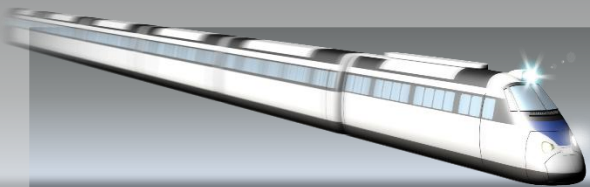
图中两卡诺循环 $\eta_1 = \eta_2$ 吗？



$$\eta_1 = \eta_2$$



$$\eta_1 < \eta_2$$



**例** 理想气体卡诺热机，当热源温度为 $100^{\circ}\text{C}$ ，冷却器温度为 $0^{\circ}\text{C}$ 时，作净功为 $8000\text{J}$ ，今若维持冷却器温度不变，提高热源的  
温度，使净功增为 $1.60 \times 10^4\text{J}$ ，并设这两个卡诺循环工作于  
相同的两条绝热线之间，求（1）热源的  
温度变为多少？（2）  
效率增大到多少？

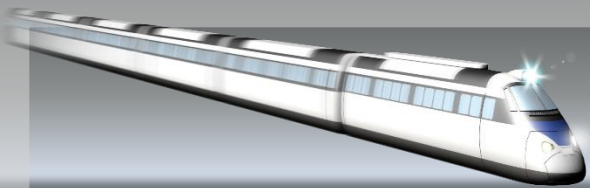
**解：**（1）卡诺热机的效率

$$\eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{W + Q_2} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

解得

$$Q_2 = \frac{WT_2}{T_1 - T_2}$$





### 5.5.3 卡诺循环

设高温热源温度由 $T_1$ 增加到 $T_1'$ ，净功增加为 $W'$ 时，同样应有

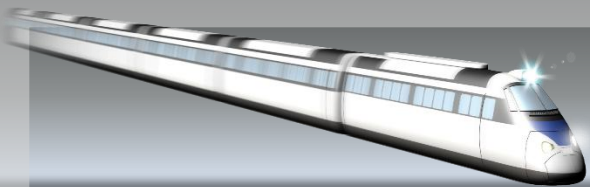
$$Q_2' = \frac{W'T_2}{T_1' - T_2}$$

由于这两个循环工作在同样的两条绝热线之间且 $T_2$ 不变， $Q_2 = Q_2'$

$$\frac{WT_2}{T_1 - T_2} = \frac{W'T_2}{T_1' - T_2}$$

$$T_1' = \frac{W'}{W}(T_1 - T_2) + T_2 = 473K$$

$$(2) \eta_c' = 1 - \frac{T_2}{T_1'} = 42\%$$



## 5.5.3 卡诺循环

**例** 一卡诺致冷机从温度为 $-10^{\circ}\text{C}$ 的冷库中吸取热量，释放到温度 $27^{\circ}\text{C}$ 的室外空气中，若致冷机耗费的功率是 $1.5\text{kW}$ ，求(1)每分钟从冷库中吸收的热量；(2)每分钟向室外空气中释放的热量。

**解** (1)  $T_1=300\text{K}$ ,  $T_2=263\text{K}$ 根据卡诺致冷系数有

$$\omega_c = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{263}{37} = 7.1$$

每分钟做功为 $|W_{\text{净}}| = 1.5 \times 10^3 \times 60 \text{ J}$

所以，从冷库中吸收的热量为

$$Q_2 = \omega_c |W_{\text{净}}| = 7.1 \times 9 \times 10^4 = 6.39 \times 10^5 \text{ J}$$

(2) 每分钟向温度为 $27^{\circ}\text{C}$ 的物体放出的热量为

$$Q_1 = |W_{\text{净}}| + Q_2 = 1.5 \times 10^3 \times 60 + 6.39 \times 10^5 = 7.29 \times 10^5 \text{ J}$$