例1： 如图示。 已知 AB,DC 为绝热线，AOC 为等温线，

$COA \Rightarrow Q_{放} = 100J$ OAB面积为30焦耳，ODC 面积为70焦耳。

求： 总吸热?

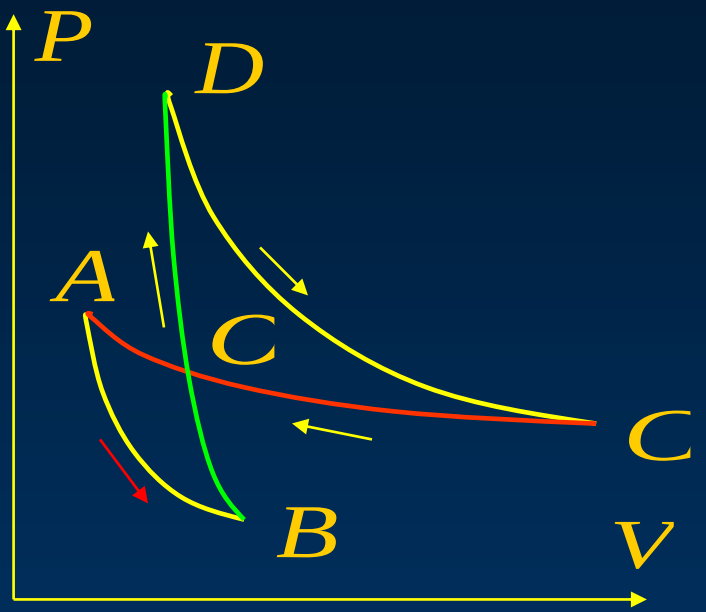
解： 逆循环 $ABOA$ 正循环 $ODCO$

$ABOA:\quad -30 = Q_{1吸} - Q_{1放}$

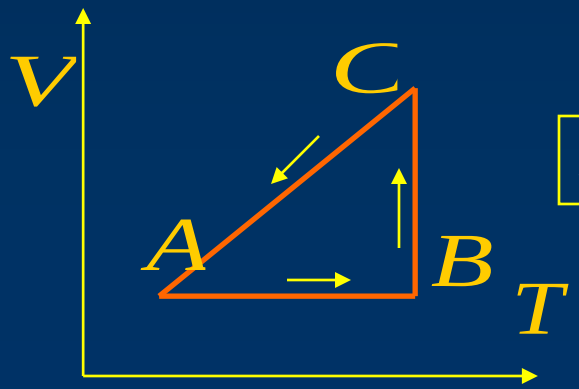
$ODCO:\quad +70 = Q_{2吸} - Q_{2放}$

合并后， $40 = Q_{吸} - Q_{放}$

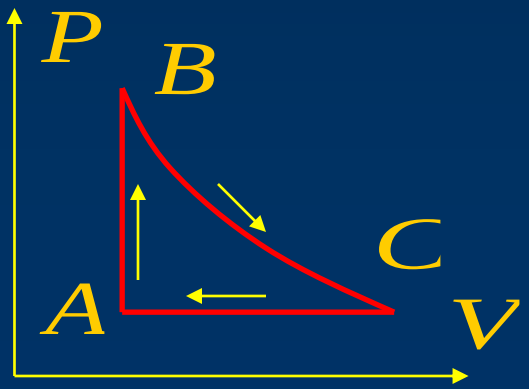
总吸热为：$Q_{吸} = 100 + 40 = 140J$



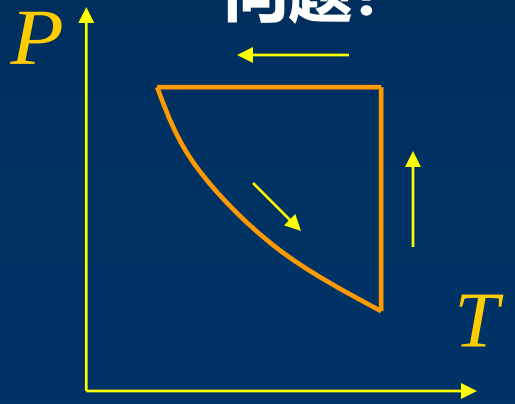
思考： 判别热机和致冷机循环？



还原



问题?



四、循环效率

- **热机效率** —— 在热机循环中，工质对外所作的功A 与它吸收的热量Q_1 的比值

$$\eta=\frac{A}{Q_1}=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1}$$

- **致冷系数** —— 一个循环中工质从冷库中吸取的热量Q_2 与外界对工质作所的功A 的比值

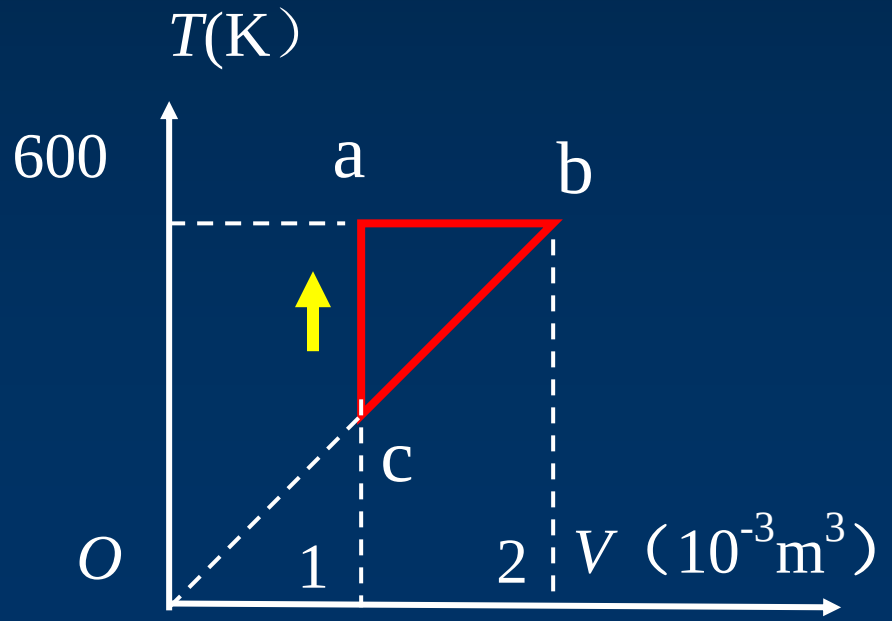
$$w=\frac{Q_2}{A}=\frac{Q_2}{Q_1-Q_2}$$

例2： 1 mol 单原子分子理想气体的循环过程如图示。

求： (1) 作出 p–V 图

(2) 此循环效率

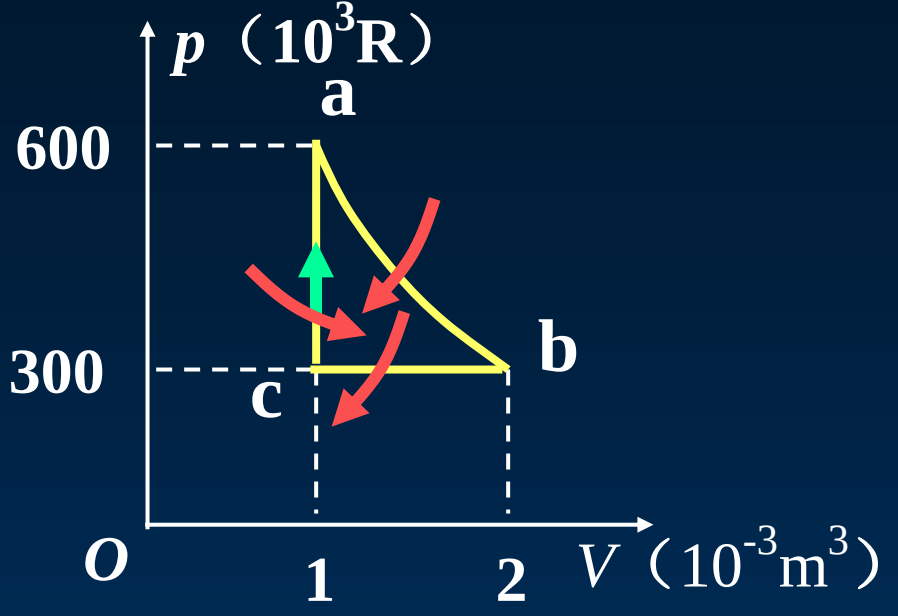
解： (1) 变换成 p–V 图



(2) ab是等温过程，有

$$Q_{ab} = A = RT\ln\frac{V_b}{V_a}$$

$$= 600R\ln 2$$



bc——等压过程，有

$$Q_{bc} = \nu C_p \Delta T = -750R$$

ca——等体过程，有

$$Q_{ca} = \Delta E = \nu C_V (T_a - T_c) = \frac{3}{2}V(p_a - p_c) = 450R$$

循环过程中系统吸热

$$Q_1 = Q_{ab} + Q_{ca} = 600R\ln 2 + 450R = 866R$$

循环过程中系统放热

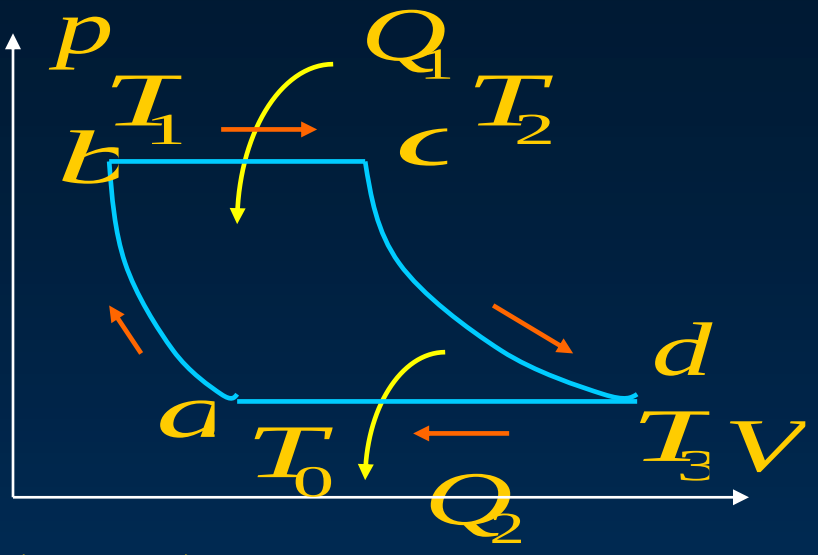
$$Q_2 = |Q_{bc}| = 750R$$

循环效率

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{750R}{866R} = 13.4\%$$

例3： 喷气发动机的循环近似如图所示，求循环效率，已知 $T_1 T_0$

绝热压缩 → 等压吸热 → 绝热膨胀 → 等压放热 → 绝热压缩



解： b →c 等压吸热，有

$$Q_1 = \nu C_P (T_2 - T_1)$$

d →a 等压放热，有

$$Q_2 = \nu C_P (T_0 - T_3)$$

循环效率

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_3 - T_0}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{\left(\frac{T_3}{T_0} - 1\right) T_0}{\left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right) T_1} = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

应用绝热过程方程

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{p_1}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \Rightarrow \frac{T_1}{T_0} = \frac{T_2}{T_3} \Rightarrow \frac{T_3}{T_0} = \frac{T_2}{T_1}$$

例4： 逆向斯特林致冷循环的热力学循环原理如图所示。该循环由四个过程组成，先把工质由初态A（V_1，T_1）等温压缩到B（V_2，T_1）状态，再等体降温到C（V_2，T_2）状态，然后经等温膨胀达到D（V_1，T_2）状态，最后经等体升温回到初状态A，完成一个循环。（两个等容过程的热量是循环内部的回热，可不考虑其吸放热对效率的影响）

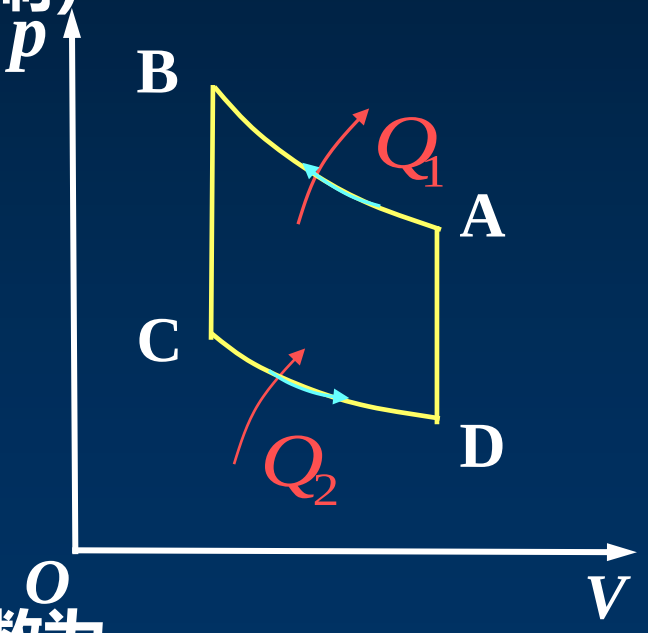
求： 该致冷循环的致冷系数。

解： 在过程CD中，工质从冷库吸取热量为

$$Q_2 = \nu R T_2 \ln \frac{V_1}{V_2}$$

在过程AB中，工质向外界放出热量为

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



整个循环中外界对工质所作的功为

$$A = Q_1 - Q_2$$

致冷系数为

$$w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

五、卡诺循环（Carnot cycle）

$\eta \to 3\% - 10\%$ 为了提高热机效率，卡诺提出一个方案：

热机工作在两个热源之间，并无散热，漏气，摩擦等耗损因素等

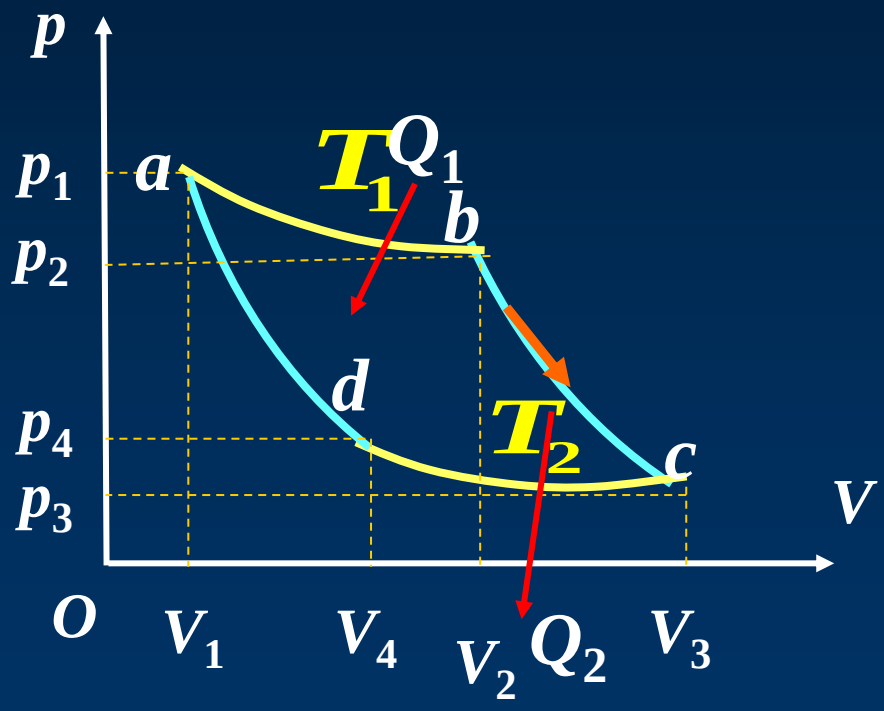
卡诺循环——由两个等温过程和两个绝热过程组成

1 气体从高温热源吸收的热量

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

2 气体向低温热源放出的热量

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



应用绝热过程方程，有

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1} \quad T_2 V_4^{\gamma-1} = T_1 V_1^{\gamma-1} \Longrightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$

卡诺循环的热机效率 $$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

讨论 （1）卡诺循环的热机效率只与高温热源T_1，低温热源T_2有关，它需要两个热源。

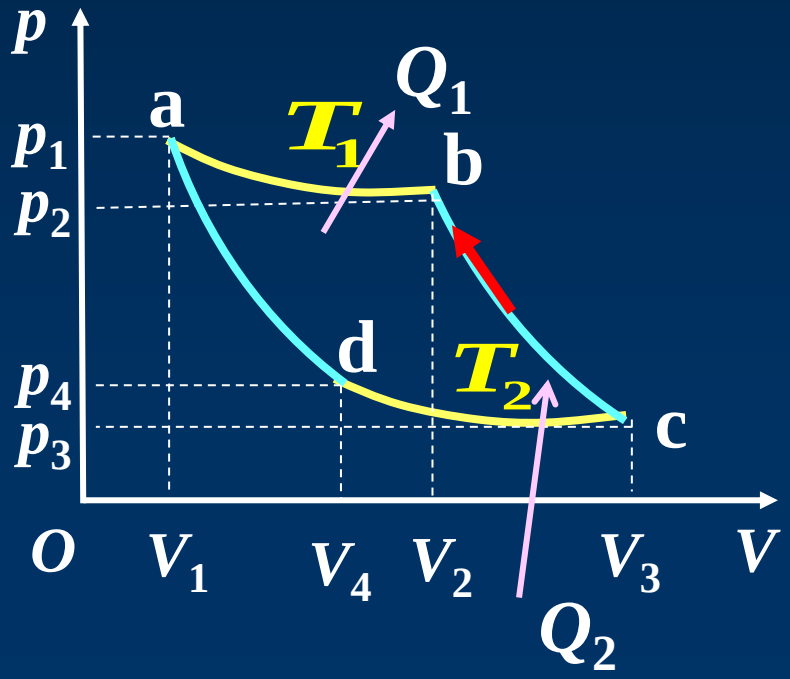
（2） $T_1 \uparrow$和$T_2 \downarrow$，热机效率就可以提高，指出了改善热机效率的根本途径。但实际中通常采用的方法是提高高温热源的温度T_1。

例： 现代热电厂的汽轮机

$$T_1 = 580^0 C \quad T_2 = 30^0 C$$

$$\eta = 1 - \frac{303}{853} = 64.5\%$$

实际的热机效率是26%。



（3）卡诺致冷机的致冷系数

放热过程　　吸热过程

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

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

由*cb*,*ad* 的绝热过程方程，可得卡诺致冷循环的致冷系数

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} \longrightarrow w = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

- 低温热源温度越低，致冷系数越小。

$$T_2 \to 0 \Rightarrow w \to 0$$

要求 $Q_2 \neq 0$ 时，$A = \infty$ 这是不可能的

绝对零度不可能用有限过程达到的 —— 热力学第三定律

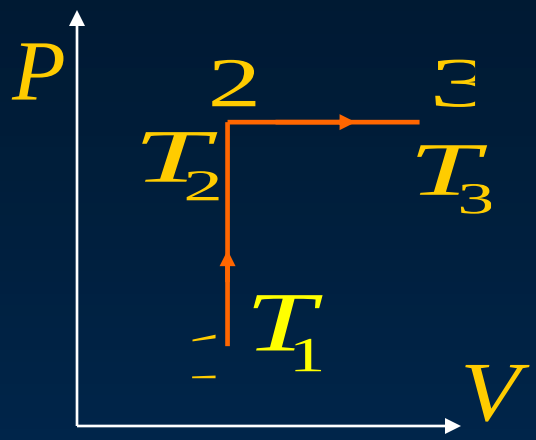
- 当高温热源的温度T_1一定时，理想气体卡诺循环的致冷系数只取决于T_2。

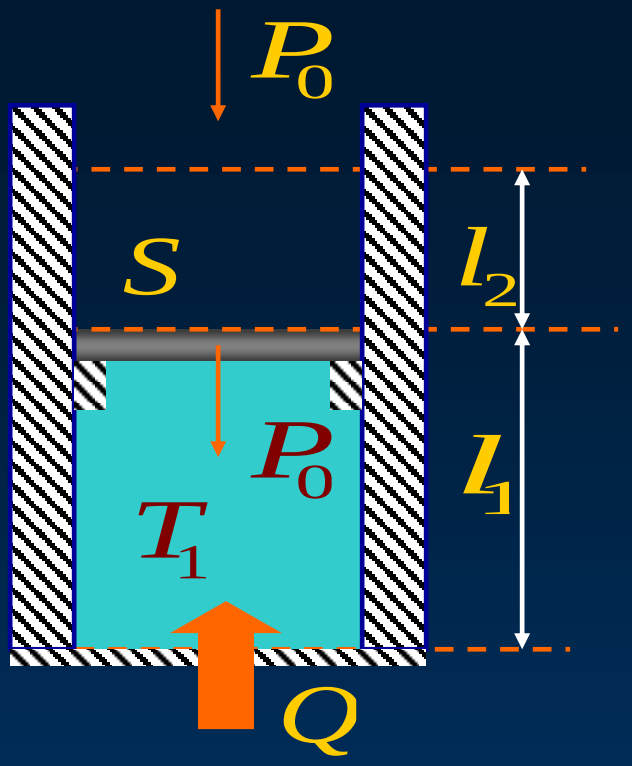
几个值得注意的问题：

1 物理模型的建立

例1： 如图示，1mol单原子理想气体，

求：$Q, \Delta E = ?$





$1 \rightarrow 2$ 等体过程

$$2P_0V_1 = RT_2 \longrightarrow Q_1 = C_V(T_2 - T_1)$$

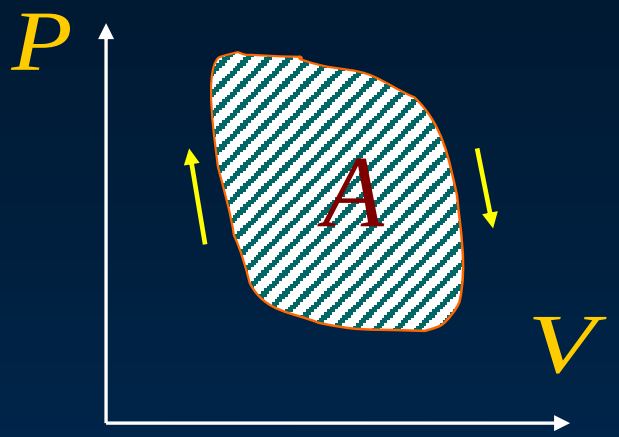
$2 \rightarrow 3$ 等压过程

$$2P_0S(l_1 + l_2) = RT_3 \longrightarrow T_3 \longrightarrow Q_2 = C_P(T_3 - T_2)$$

$$A = 2P_0Sl_2 \longrightarrow \Delta E = Q - A \longleftarrow Q = Q_1 + Q_2$$

2 循环过程中摩尔热容不可能是常数

证明： 采用反证法 $C = const$



在该循环过程中 $\Delta E = 0 \qquad A > 0$

$$Q = \Delta E + A = A > 0$$

对于任一元过程，有

$$dQ = \nu C\,dT$$

在该循环过程中 $Q = \oint \nu C dT$

$$= \nu C \oint dT = 0$$

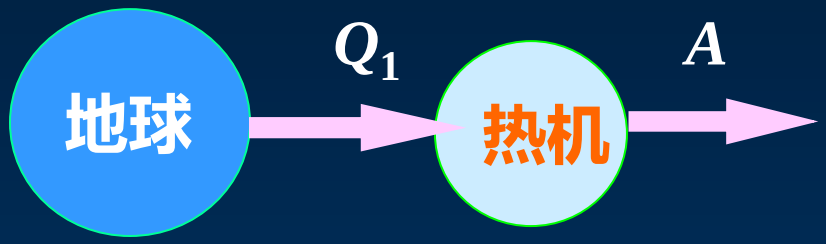
与假设矛盾

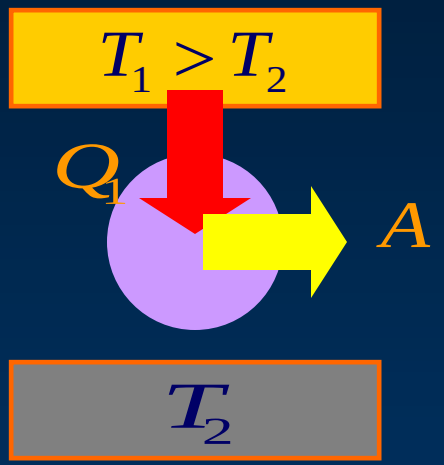
11-7 热力学第二定律

一、热力学第二定律

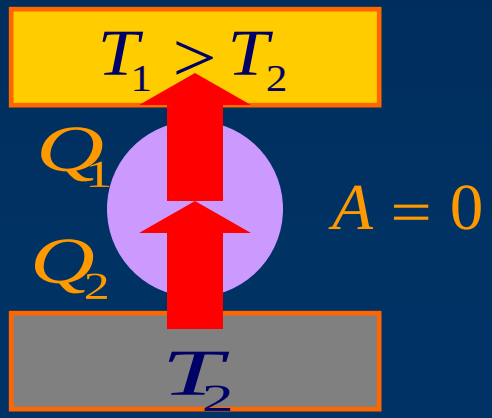
热机效率不可能大于100%。

$\eta = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}$ 那么热机效率能否等于100%（$Q_2 = 0$）呢?





若热机效率能达到100%, 则仅使地球上的海水冷却1℃, 所获得的功相当于10^{14}t 煤燃烧后放出的热量。

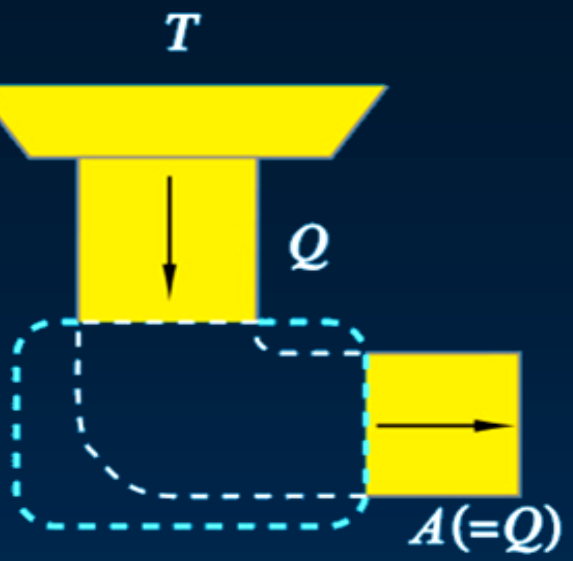


想法一 单热源热机(第二类永动机)

想法二 不消耗外界功的致冷机

1. 热力学第二定律的开尔文表述

不可能只从单一热源吸收热量，使之完全转化为功而不引起其它变化。



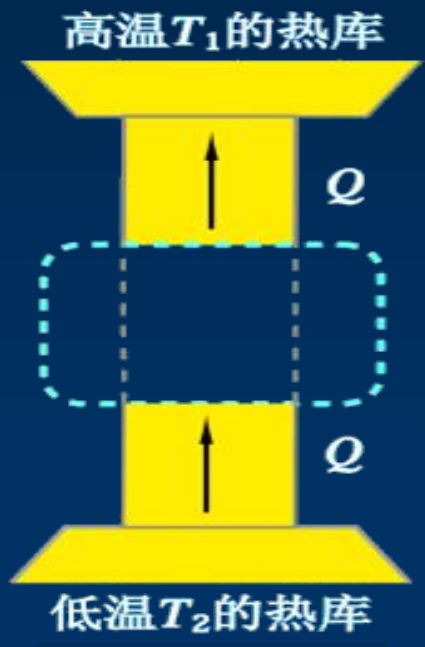
(1) 热力学第二定律开尔文表述的另一叙述形式：第二类永动机不可能

(2) 开尔文表述实际上表明了

$$\eta=\frac{A}{Q_1}=1-\frac{Q_2}{Q_1}<1$$

2. 热力学第二定律的克劳修斯表述

不可能把热量从低温物体传到高温物体而不引起其它变化。



(1) 热力学第二定律克劳修斯表述的另一 叙述形式: 理想制冷机不可能

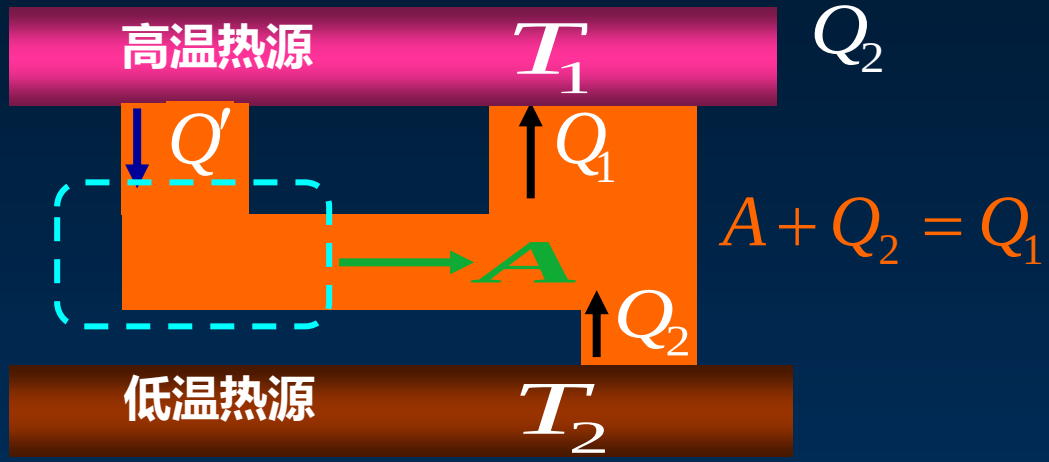
(2) 热力学第二定律的克劳修斯表述实际上表明了

$$w=\frac{Q_2}{A}\not\to\infty$$

3. 两种表述的等价性

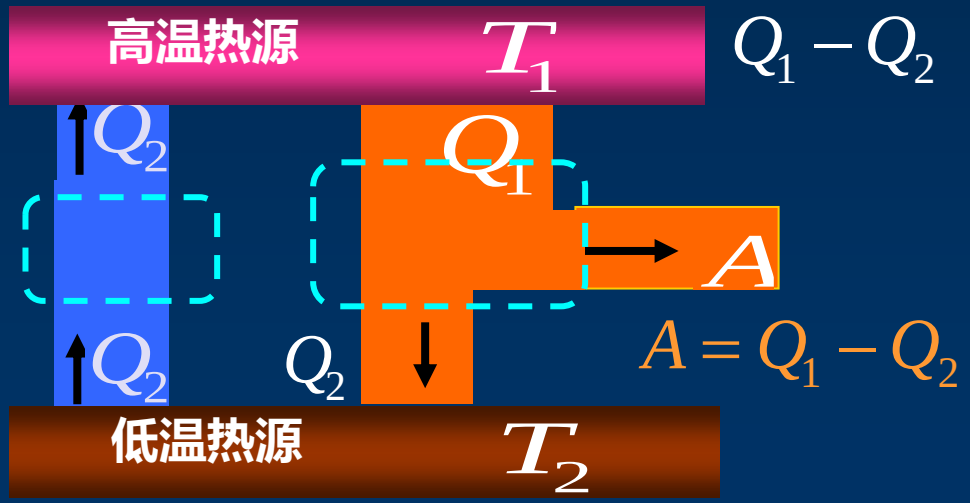
(1) 假设开尔文表述不成立

$Q'=A$



克劳修斯表述也不成立

(2) 假设克劳修斯表述不成立



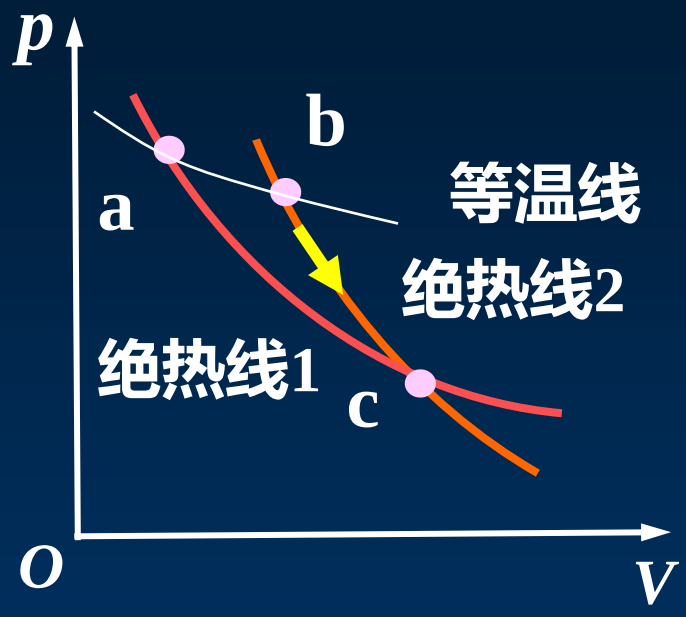
开尔文表述也不成立

例： 证明在p–V 图上任意两条绝热线不可能相交

证： 反证法

1 设两绝热线相交于c 点；

2 在两绝热线上寻找温度相同的两点a、b。在ab间作一条等温线；



3 abca构成一循环过程。

在此循环过程中：

$$Q_{ab} = A$$

构成了从单一热源吸收热量的热机。这违背热力学第二定律的开尔文表述。因此，任意两条绝热线不可能相交。

在 p–V 图上一条等温线与一条绝热线可能有两个交点吗?