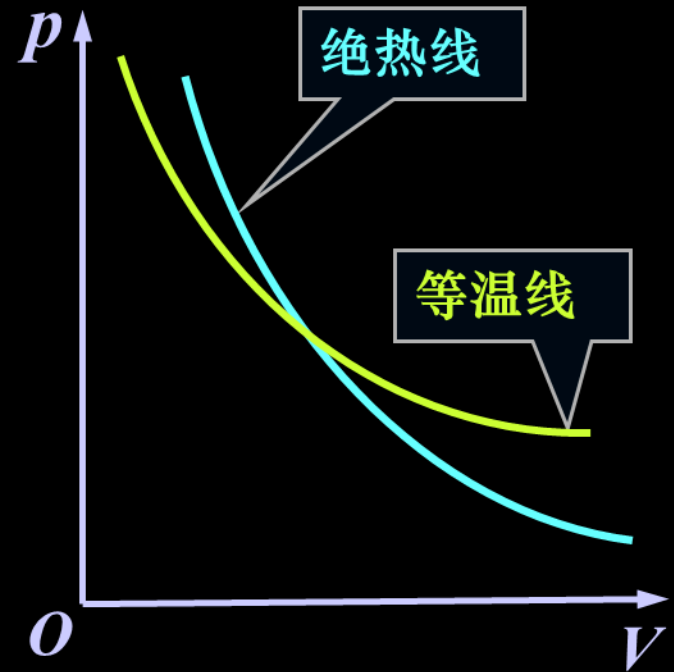
大学物理

张磊（13072919527）
B824，Cyrus Tang Building

绝热过程

$\boxed{pV^{\gamma} = C_1}$ $\boxed{TV^{\gamma-1} = C_2}$ $\boxed{p^{\gamma-1}T^{-\gamma} = C_3}$



绝热过程中功的计算

$$A = -(E_2 - E_1) = -\nu C_V (T_2 - T_1)$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V = \int_{V_1}^{V_2} p_1 V_1^{\gamma} \frac{\mathrm{d}V}{V^{\gamma}} = \frac{1}{1-\gamma}(p_2V_2 - p_1V_1)$$

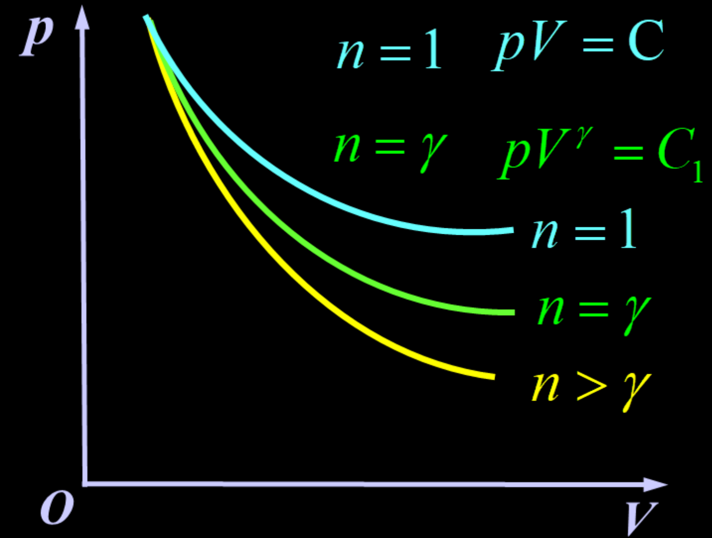
$$= \frac{\nu R}{1-\gamma}(T_2 - T_1)$$

绝热过程中，理想气体不吸收热量，系统减少的内能，等于其对外作功 。

多方过程

- 多方过程方程

$pV^n = C$ （n -多方指数）



功 $A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V=\int_{V_1}^{V_2} p_1V_1^n\frac{\mathrm{d}V}{V^n}=\frac{1}{1-n}(p_2V_2-p_1V_1)$

$$=\frac{\nu R}{1-n}(T_2-T_1)$$

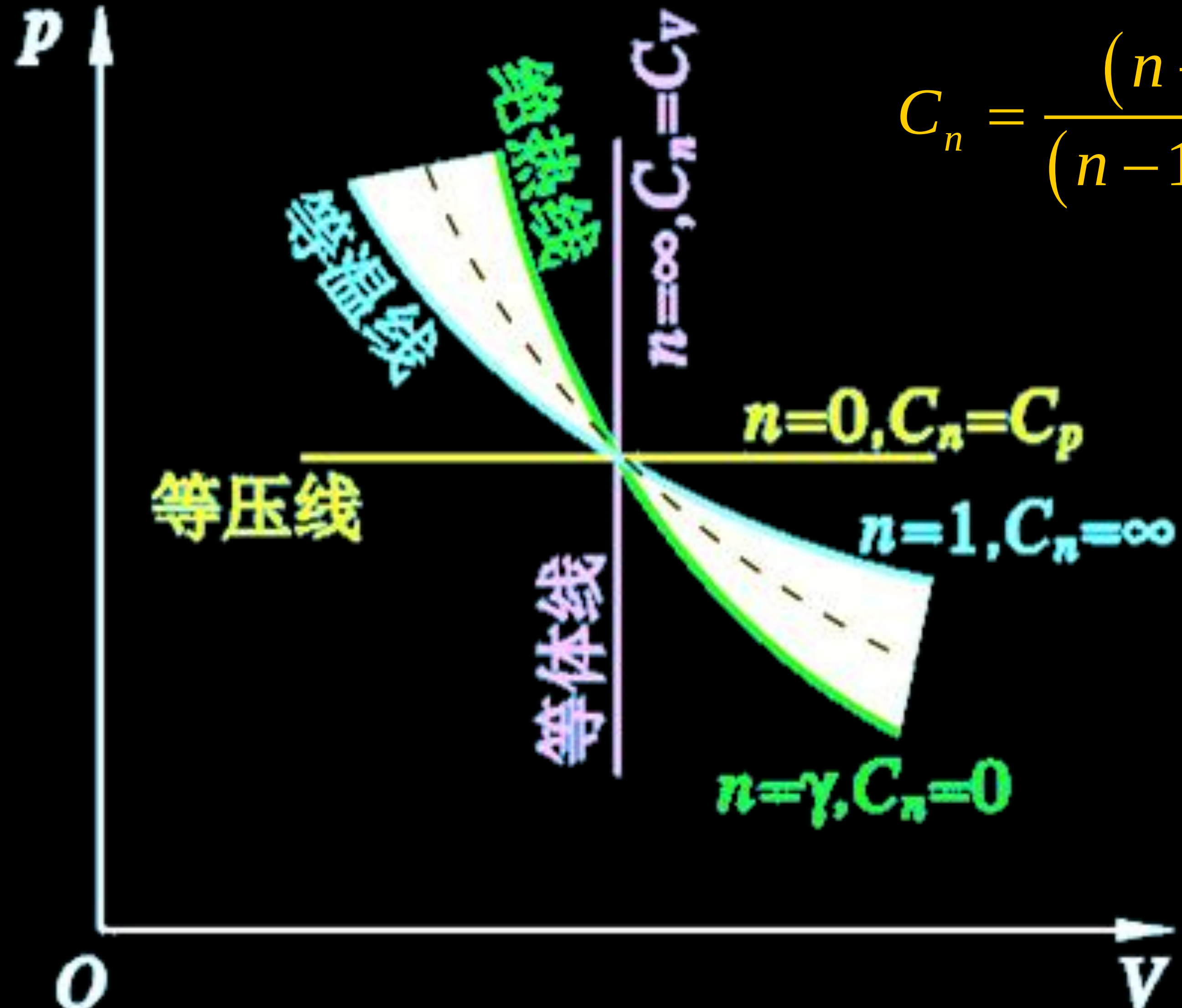
内能增量 $\Delta E=\nu C_V(T_2-T_1)$

热量 $Q_n=\nu C_n(T_2-T_1)=\Delta E+A$

摩尔热容 $C_n=\frac{Q_n}{\Delta T}=\frac{C_V(T_2-T_1)}{T_2-T_1}+\frac{R(T_2-T_1)}{(1-n)(T_2-T_1)}$

$$=C_V+\frac{R}{1-n}=\frac{n-\gamma}{n-1}C_V=\frac{(n-\gamma)R}{(n-1)(\gamma-1)}$$

- 多方过程曲线与四种常见基本过程曲线



$$C_n = \frac{(n-\gamma)R}{(n-1)(\gamma-1)}$$

理想气体热力学过程有关公式对照表

过程	特征	过程方程	能量转换方式	内能增量 ΔE	对外作功 A	吸收热量 Q	摩尔热容
等体	$V=$常量	$\frac{p}{T}=$常量	$Q=\Delta E$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	0	$\nu C_{V,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$	$C_{V,m}=\frac{i}{2}R$
等压	$p=$常量	$\frac{V}{T}=$常量	$Q=\Delta E+A$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	$p(V_2-V_1)$ $\nu R(T_2-T_1)$	$\nu C_{p,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$	$C_{p,m}=C_{V,m}+R$
等温	$T=$常量	$pV=$常量	$Q=A$	0	$\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $\nu RT\ln\frac{p_2}{p_1}$	$\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $\nu RT\ln\frac{p_2}{p_1}$	∞
绝热	$\mathrm{d}Q=0$	$pV^{\gamma}=C_1$ $V_{\gamma-1}T=C_2$ $p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=C_3$	$A=-\Delta E$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	$-\nu\frac{i}{2}C_{V,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$	0	0

正循环、逆循环

- 正循环(在p-V图中沿顺时针方向进行)

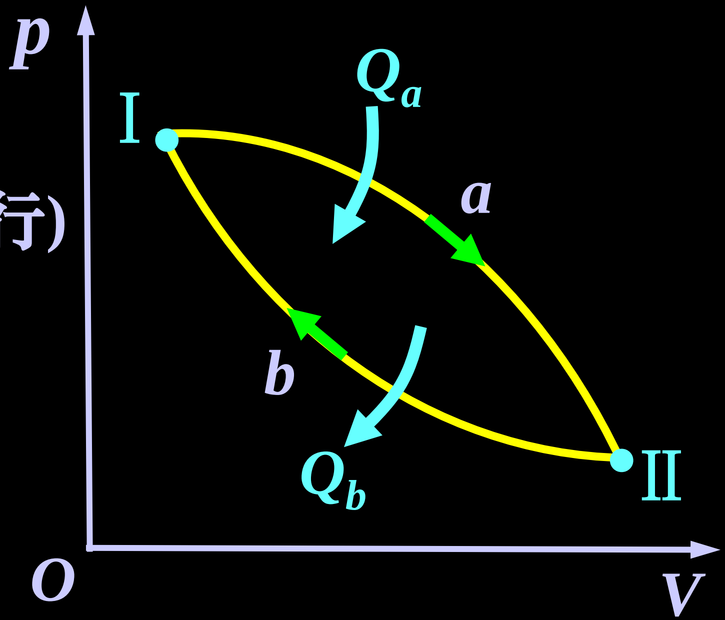
$$A = A_a + A_b > 0$$

（系统对外作功）

根据热力学第一定律，有

$$A = Q_a + Q_b$$

正循环也称为**热机循环**



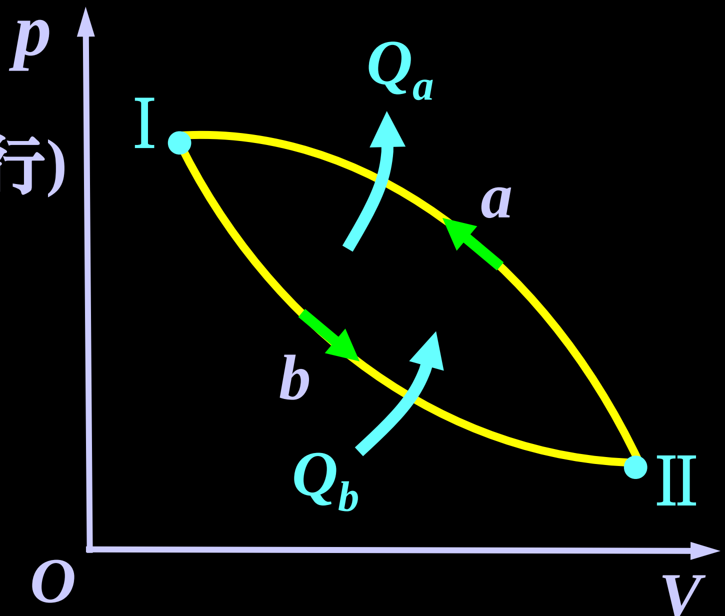
- 逆循环(在p-V图中沿逆时针方向进行)

$$A = A_a + A_b < 0$$

（系统对外作负功）

$$|Q_a| = |A| + Q_b$$

逆循环也称为**致冷循环**



循环效率

- **热机循环**

  一次循环中，工质对外所作的功 A 与它吸收的热量 $Q_{吸}$ 的比值，称为**热机效率**

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

- **制冷循环**

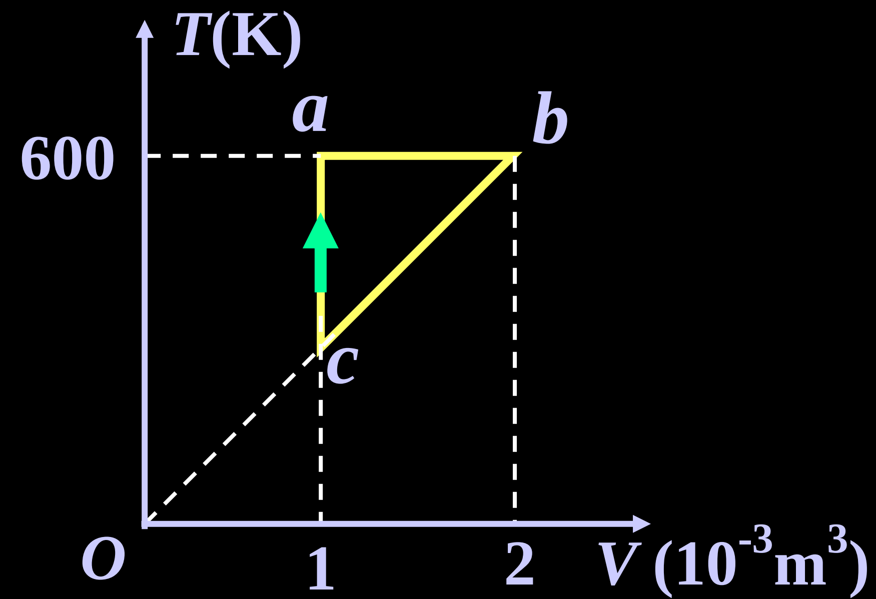
  一次循环中，工质从**冷库**中吸取的热量 $Q_{冷吸}$ 与外界对工质所作功 A 的比值，称为循环的**致冷系数**

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

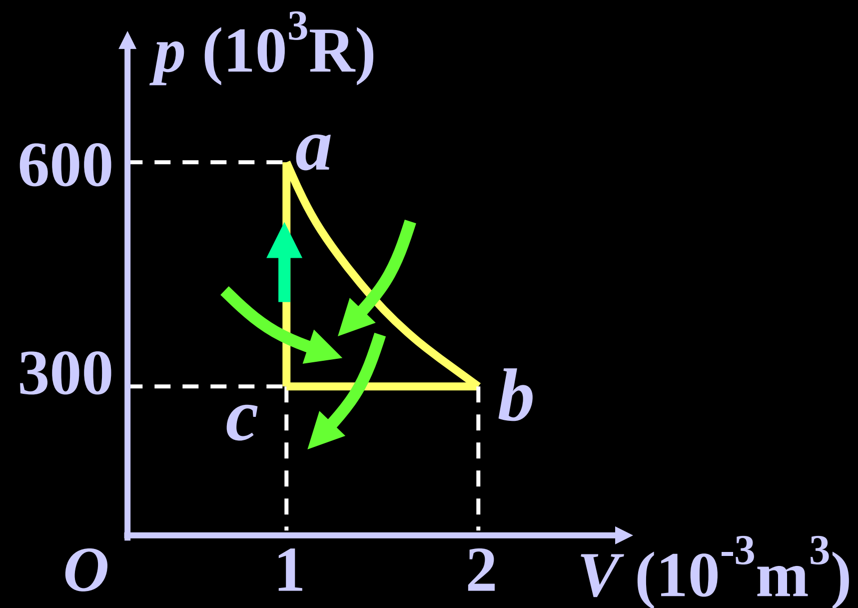
例 1 mol 单原子分子理想气体的循环过程如图所示

求 (1) 作出 p-V 图

(2) 此循环效率



解 (1) p-V 图



(2) a-b是等温过程，有

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

$$= 600R\ln 2$$

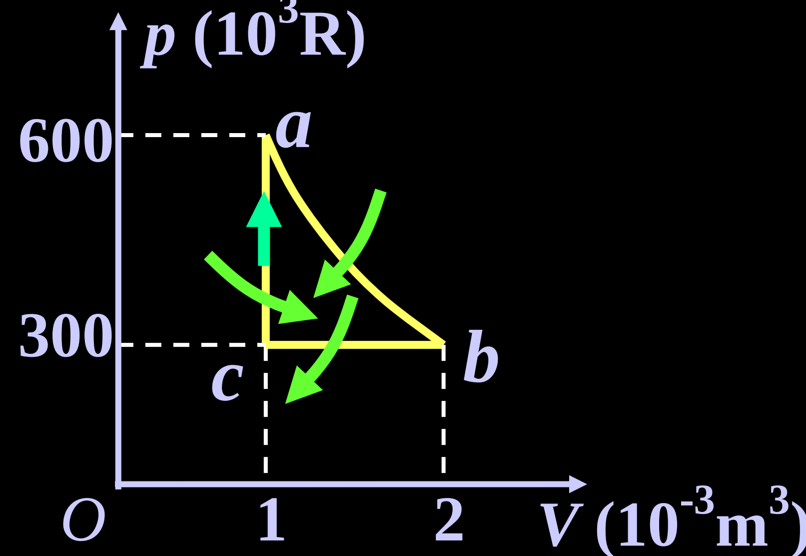
b-c是等压过程，有

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

c-a是等体过程

$$Q_{ca}=\Delta E=\nu C_V(T_a-T_c)$$

$$=\frac{3}{2}V(p_a-p_c)=450R$$



循环过程中系统总吸热大小为

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

循环过程中系统总放热大小为

$$|Q_{放}|=|Q_{bc}|=750R$$

此循环效率

$$\eta=1-\frac{|Q_{放}|}{|Q_{吸}|}=1-\frac{750R}{866R}=13.4\%$$

例 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始状态 A，完成一个循环。

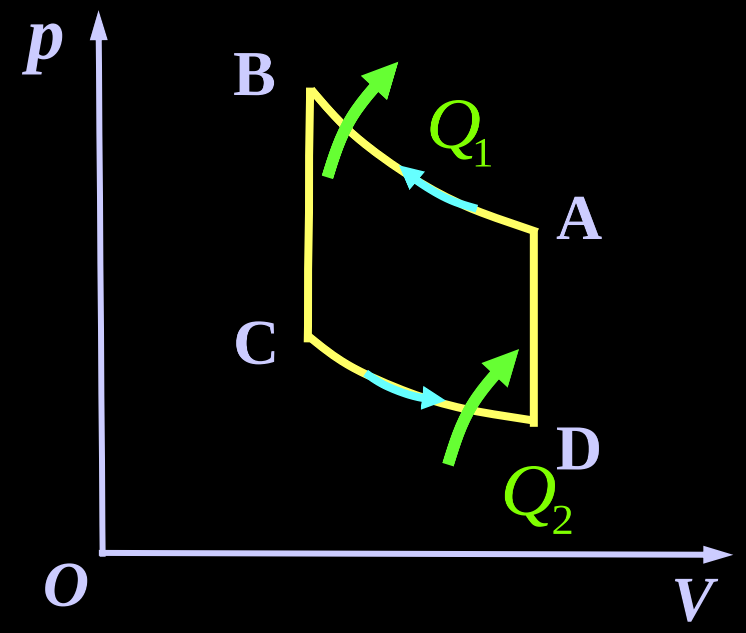
求 该致冷循环的致冷系数

解 在过程CD中，工质从冷库吸取的热量为

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

在过程中AB中，向外界放出的热量大小为

$$\left|Q_{放}\right| = \nu R T_1 \ln\frac{V_1}{V_2}$$



整个循环中外界对工质所作的功为

$$|A| = |Q_{放}| - |Q_{冷吸}|$$

循环的致冷系数为

$$w = \left|\frac{Q_{冷吸}}{A}\right| = \frac{|Q_{冷吸}|}{|Q_{放}| - |Q_{冷吸}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

冷库与外界环境的温差越大，或环境温度一定时，冷库温度越低，w越小，制冷效果越差，所需要的功越大

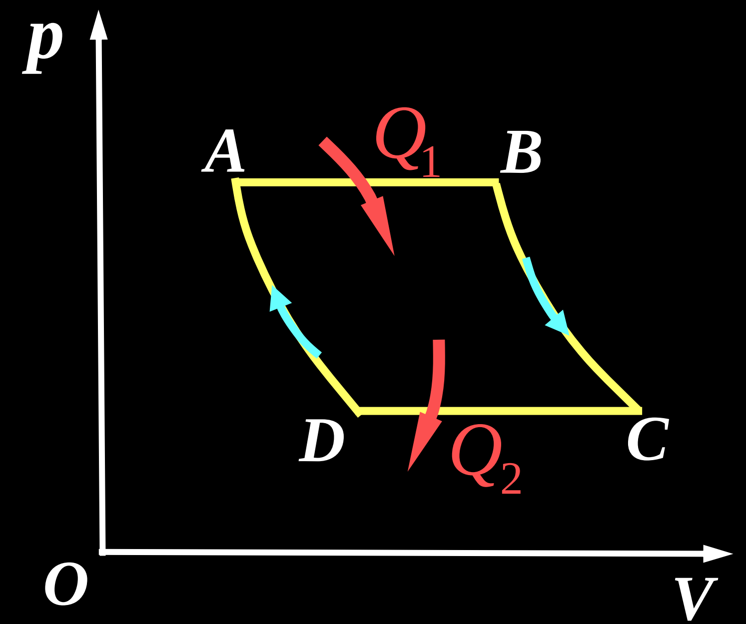
热机效率 $\eta = \left|\frac{A}{Q_{吸}}\right|$

制冷系数 $w = \left|\frac{Q_{冷吸}}{A}\right|$

例 一定量的理想气体经历如图所示的循环过程，$A \to B$和$C \to D$是等压过程， $B \to C$ 和$D \to A$是绝热过程。

已知：$T_C = 300K \quad T_B = 400K$

求 此循环的效率。



分析 $Q_{AB} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_B - T_A)$

$$Q_{CD} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_D - T_C)$$

$$\eta = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1} \qquad p^{\gamma-1} T^{-\gamma} = C_3$$

BC绝热过程 $\quad p_B{}^{\gamma-1} T_B{}^{-\gamma} = p_C{}^{\gamma-1} T_C{}^{-\gamma}$

AD绝热过程 $\quad p_A{}^{\gamma-1} T_A{}^{-\gamma} = p_D{}^{\gamma-1} T_D{}^{-\gamma}$

$$\Rightarrow \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

$$\frac{T_B}{T_A - T_B} = \frac{T_C}{T_D - T_C} \Rightarrow \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} = \frac{T_C}{T_B}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \boxed{\frac{T_C - T_D}{T_B - T_A}} = 1 - \frac{T_C}{T_B}$$

解 $Q_{AB} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_B - T_A)$

$Q_{CD} = \nu C_p \Delta T = \nu C_p (T_D - T_C)$

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_C - T_D}{T_B - T_A}$$

BC绝热过程 $p_B{}^{\gamma-1} T_B{}^{-\gamma} = p_C{}^{\gamma-1} T_C{}^{-\gamma}$

AD绝热过程 $p_A{}^{\gamma-1} T_A{}^{-\gamma} = p_D{}^{\gamma-1} T_D{}^{-\gamma}$

$$\left.\begin{aligned} p_B{}^{\gamma-1} T_B{}^{-\gamma} &= p_C{}^{\gamma-1} T_C{}^{-\gamma} \\ p_A{}^{\gamma-1} T_A{}^{-\gamma} &= p_D{}^{\gamma-1} T_D{}^{-\gamma} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \frac{T_B}{T_A} = \frac{T_C}{T_D}$$

$$\frac{T_C - T_D}{T_B - T_A} = \frac{T_C}{T_B}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_B} = 1 - \frac{300}{400} = 25\%$$

整个循环中外界对工质所作的功为

$$|A| = |Q_{放}| - |Q_{冷吸}|$$

循环的致冷系数为

$$w = \left|\frac{Q_{冷吸}}{A}\right| = \frac{|Q_{冷吸}|}{|Q_{放}| - |Q_{冷吸}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

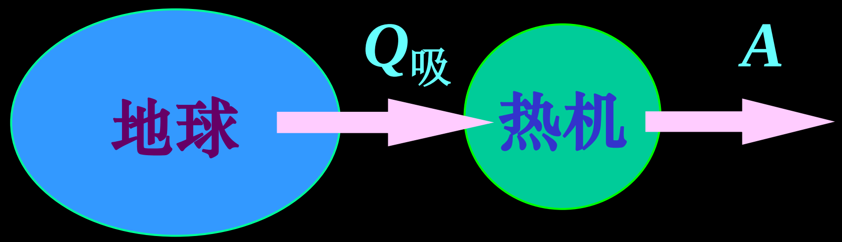
热机效率 $\eta = \left|\frac{A}{Q_{吸}}\right|$

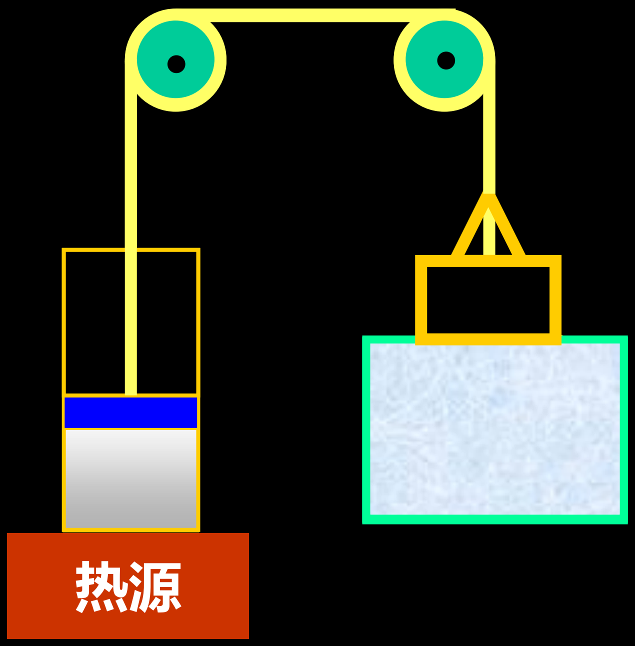
制冷系数 $w = \left|\frac{Q_{冷吸}}{A}\right|$

§11.9 热力学第二定律

一. 热力学第二定律

由热力学第一定律可知，热机效率不可能大于100% 。那么热机效率能否等于100%（$Q_{放}=0$)呢?





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

理想热机（单热源热机）？ 理想制冷机?

1. 热力学第二定律的开尔文表述

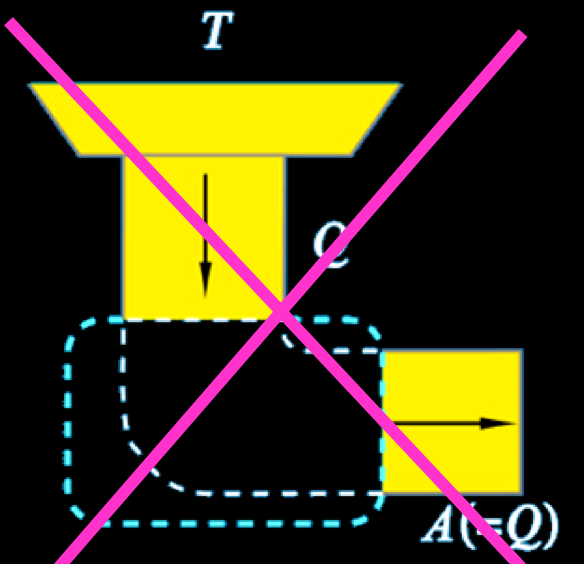
不可能只从**单一热源**吸收热量，使之**完全转化**为功而**不引起其它变化**。

说明

(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(理想热机)不可能制成**

(2) 热力学第二定律的开尔文表述实际上表明了

$$\eta = \frac{A}{Q_{吸}} < 1$$



理想热机

2. 热力学第二定律的克劳修斯表述

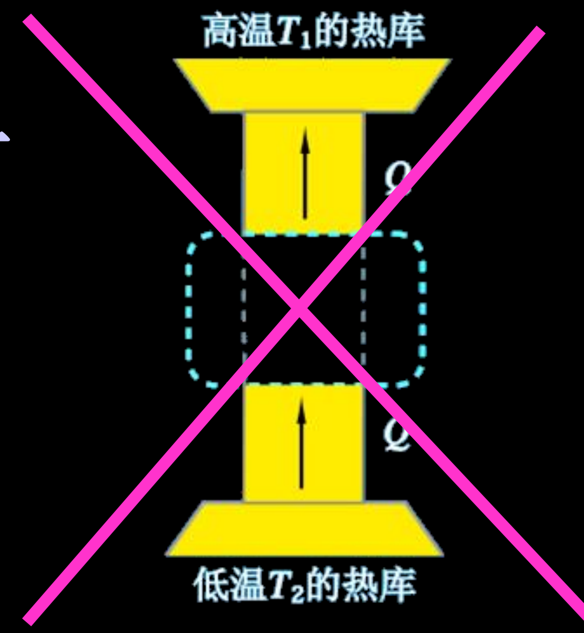
热量不能**自动**地从**低温**物体传向**高温**物体

说明

(1) 热力学第二定律克劳修斯表述的另一叙述形式：**理想制冷机不可能制成**

(2) 热力学第二定律的克劳修斯表述实际上表明了

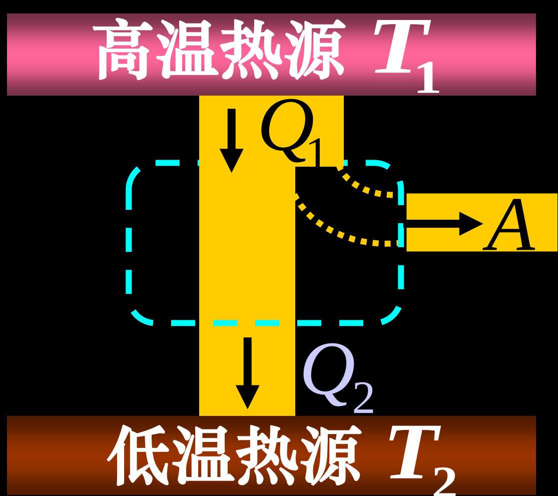
$$w = \frac{|Q_{冷吸}|}{|A|} \not\to \infty$$



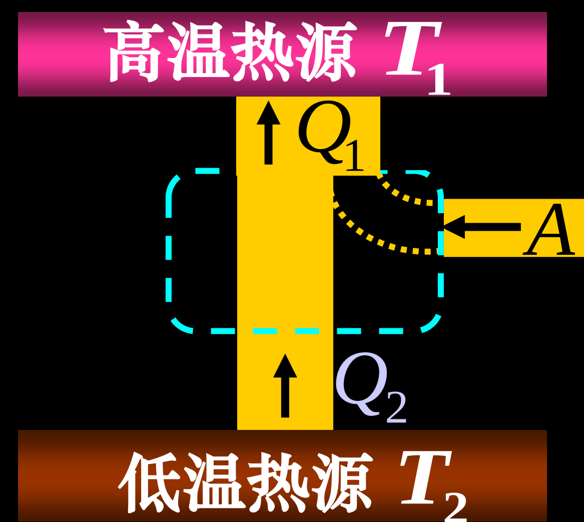
理想致冷机

3. 热机、制冷机的能流图示方法

热机的能流图



致冷机的能流图

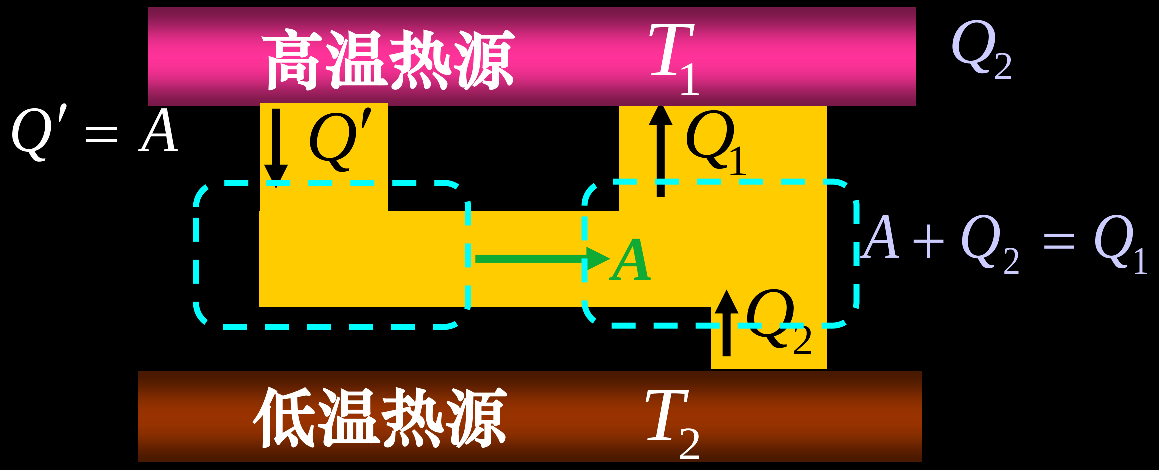


4. 热力学第二定律的两种表述等价

(1) 假设开尔文表述不成立

⇓

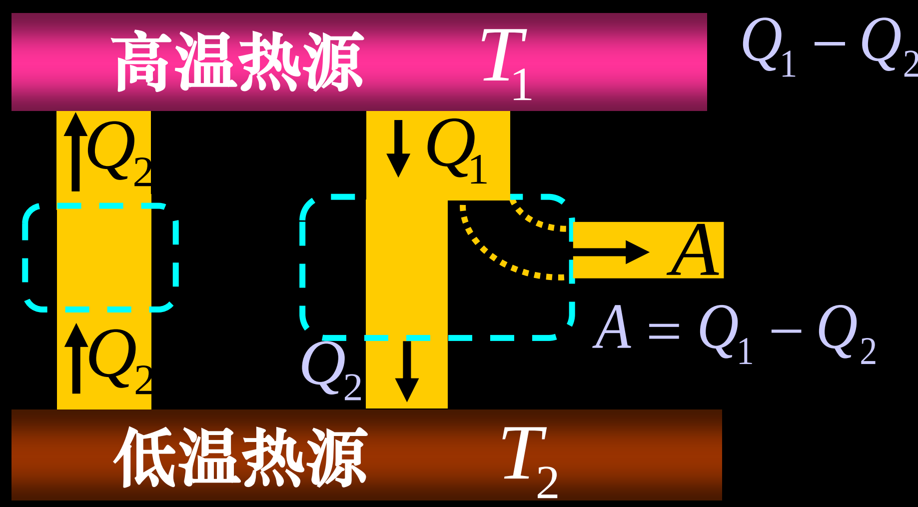
克劳修斯表述不成立



(2) 假设克劳修斯表述不成立

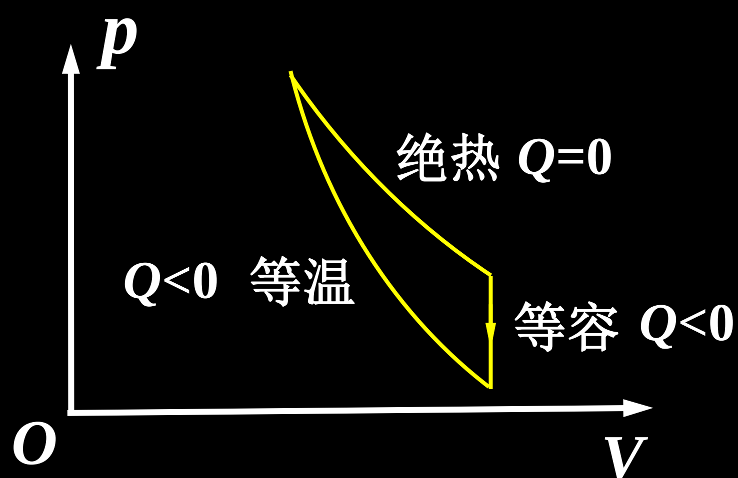
⇓

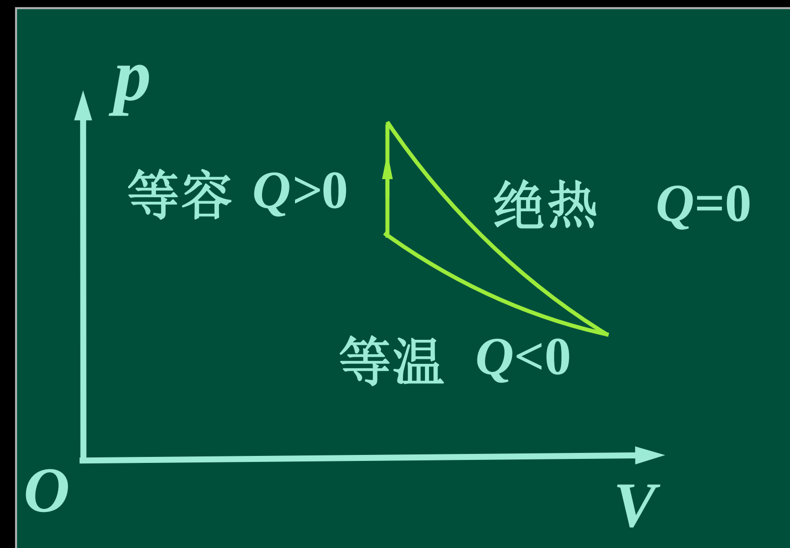
开尔文表述不成立

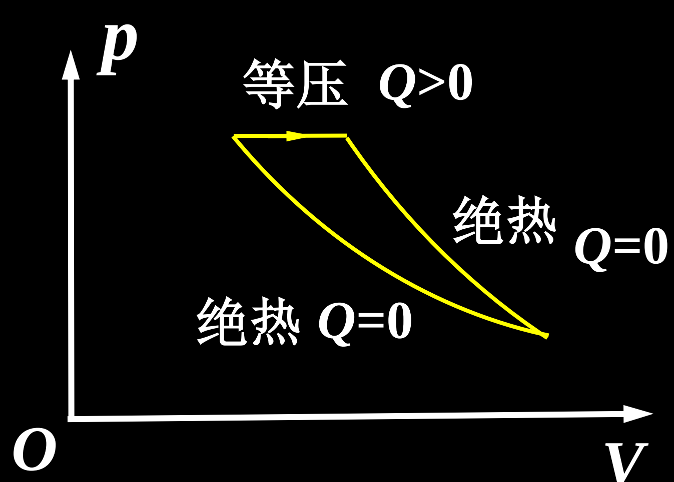


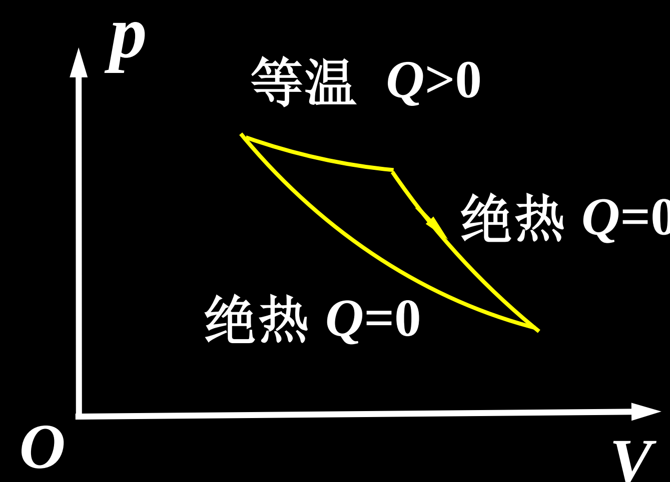
例 下列图示表示某人设想的理想气体的四个循环过程。其中一个是可能实现的循环过程。

解







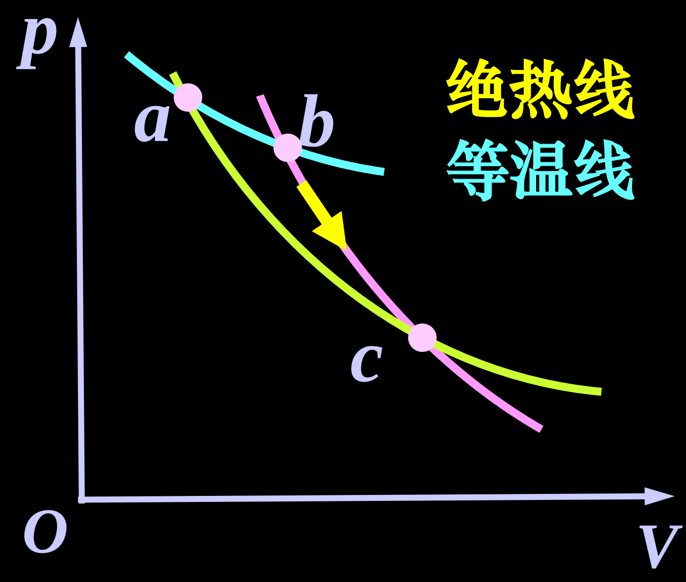


例 用热力学第二定律证明：在 p–V 图上任意两条绝热线不可能相交

证 反证法

设两绝热线相交于 c 点

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，$abca$构成一循环过程。



在此循环过程该中

$$Q_{ab} = A$$

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

§11.10 可逆与不可逆过程

一. 概念

可逆过程　对系统经历的某过程，若过程的**每一步**都可沿**相反**的方向进行，同时**不引起**外界的**任何变化**

(可逆过程中，系统和外界都能恢复到原来的状态)

不可逆过程　如对于某一过程，用任何方法都不能使**系统**和**外界**恢复到**原来状态**

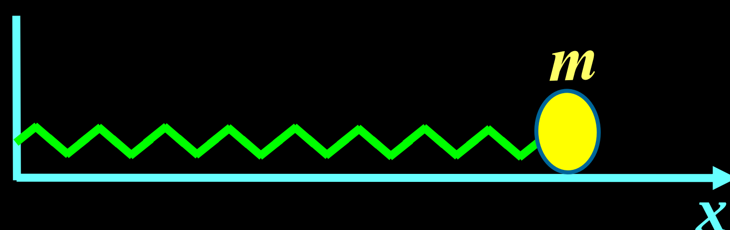
自发过程　自然界中不受外界影响而能够自动发生的过程

二. 不可逆过程

1. 不可逆过程的实例

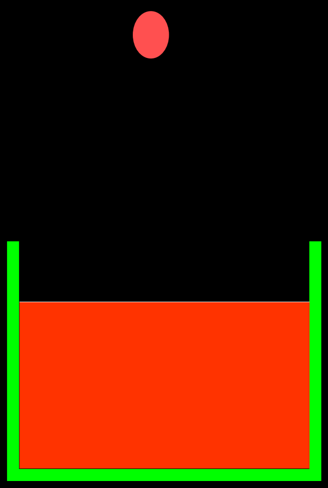
力学（无摩擦时）　过程可逆

（有摩擦时）　不可逆

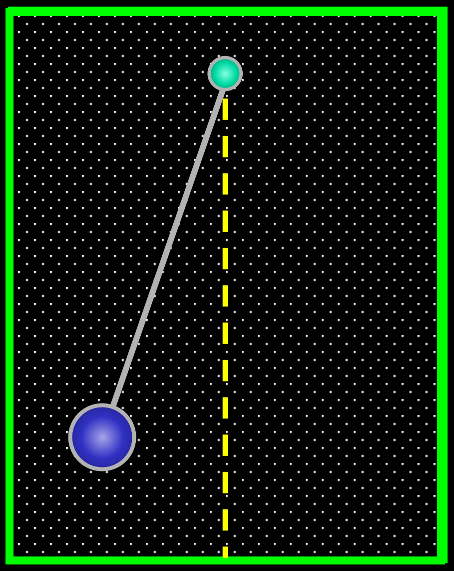


- 功向热转化的过程是不可逆的

- 热量从高温自动传向低温物体的过程是不可逆的



墨水在水中的扩散



（有气体）不可逆

- 自由膨胀的过程是不可逆的

- 一切自发过程都是单方向进行的不可逆过程。

一切与热现象有关的过程都是不可逆过程
一切实际过程都是不可逆过程

2. 过程不可逆的因素

不平衡和耗散等因素的存在，是导致过程不可逆的原因。

无摩擦的准静态过程是可逆过程（理想过程）

三. 热力学第二定律的实质，就是揭示了自然界的一切自发过程都是单方向进行的不可逆过程。

说明

(1) 热力学第二定律既然是涉及大量分子的运动的无序性变化的规律，因而它是一条统计规律。

(2) 热力学第二定律只适用于大量分子的集体，而不适用于只有少量分子的系统。

§11.11 卡诺循环 卡诺定理

一. 卡诺循环

卡诺循环是由两个等温过程和两个绝热过程组成

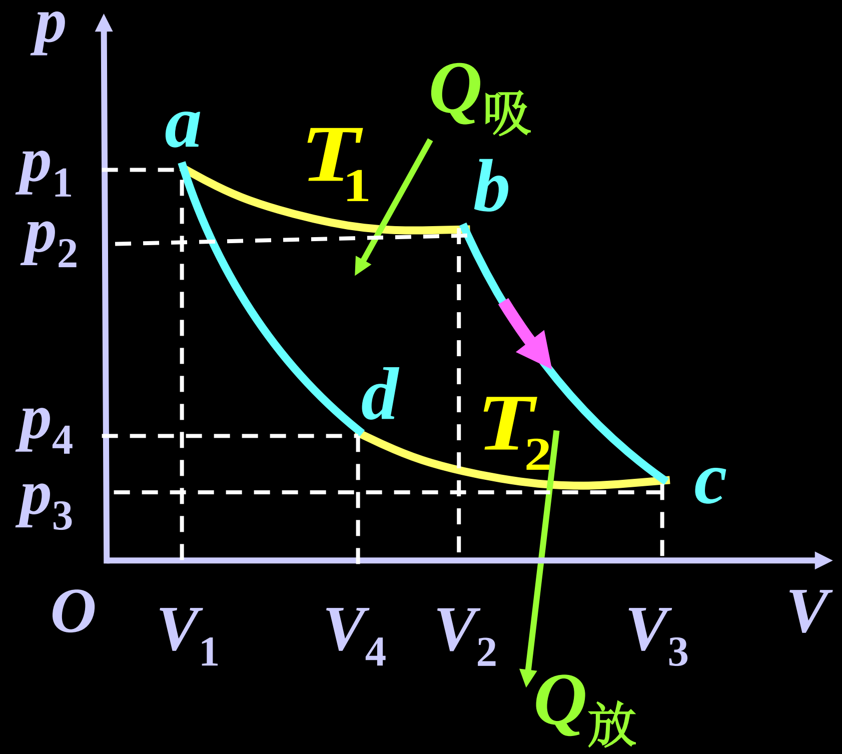
1. 理想气体卡诺热机的效率

理想气体从高温热源吸收的热量大小为

$$\left|Q_{吸}\right| = A_{ab} = \nu RT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

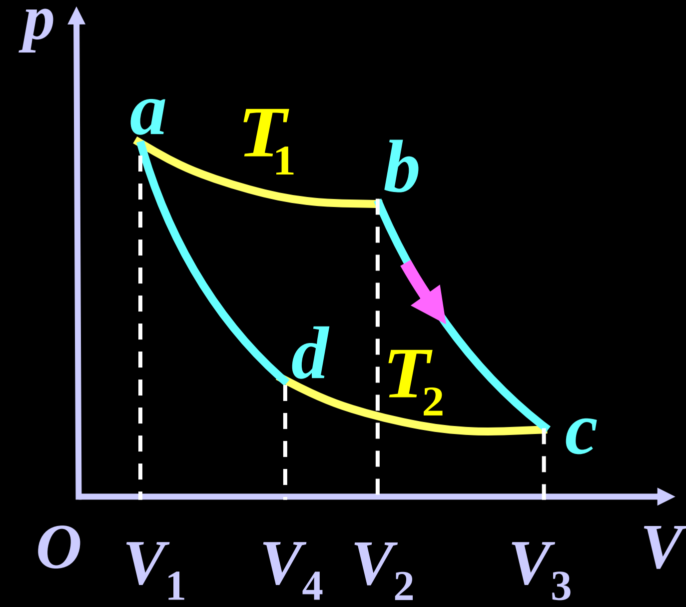
理想气体向低温热源放出的热量大小为

$$\left|Q_{放}\right| = \left|A_{cd}\right| = \nu RT_2 \ln \frac{V_3}{V_4}$$



对bc、 da应用绝热过程方程，则有

$$\left.\begin{aligned} T_1V_2^{\gamma-1} &= T_2V_3^{\gamma-1} \\ T_2V_4^{\gamma-1} &= T_1V_1^{\gamma-1} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$$



卡诺循环热机的效率为

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

讨论

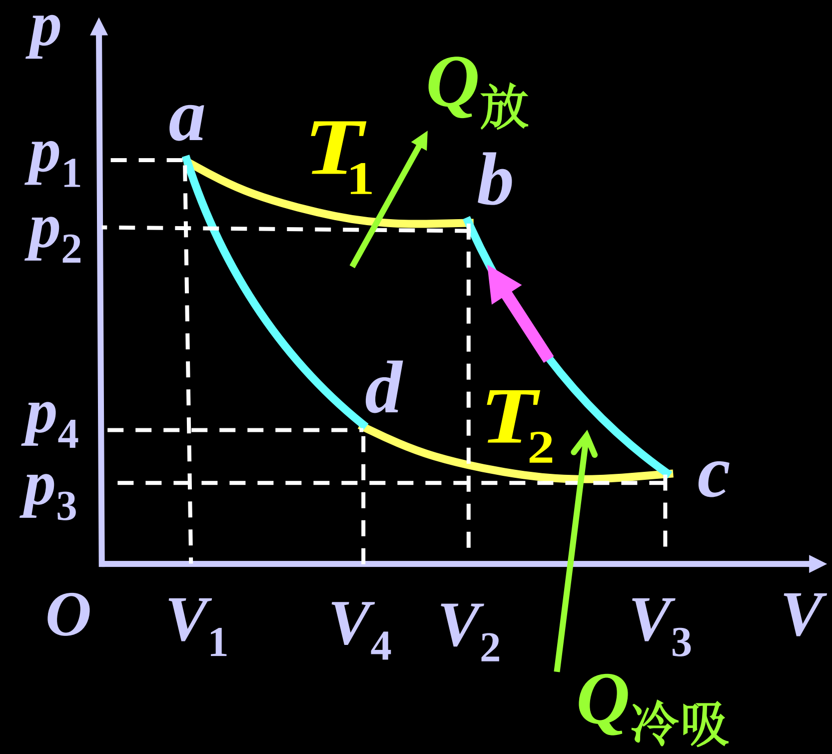
(1) 理想气体可逆卡诺循环热机效率只与 T_1，T_2 有关，温差越大，效率越高。提高热机高温热源的温度 T_1 ，降低低温热源的温度 T_2 都可以提高热机的效率。但实际中通常采用的方法是提高热机高温热源的温度 T_1 。

(2) 可逆卡诺循环热机的效率与工作物质无关

2. 卡诺致冷机的致冷系数

$$|Q_{放}| = \nu RT_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$$

$$|Q_{冷吸}| = \nu RT_2 \ln\frac{V_3}{V_4}$$



由 bc、da 绝热过程方程，有

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

卡诺致冷循环的致冷系数为

$$w = \frac{|Q_{冷吸}|}{|A|} = \frac{|Q_{冷吸}|}{|Q_{放}| - |Q_{冷吸}|} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

说明

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。T_2越低，则致冷系数越小。

二. 卡诺定理

1. 在温度分别为T_1 与T_2的两个给定热源之间工作的**一切可逆热机**，其**效率相同**，都等于理想气体可逆卡诺热机的效率，即

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

2. 在相同的高、低温热源之间工作的**一切不可逆热机**，其效率都**不可能大于**可逆热机的效率。

说明

(1) 要尽可能地减少热机循环的不可逆性（如减少摩擦、漏气、散热等耗散因素）以提高热机效率。

(2) 卡诺定理给出了热机效率的**极限**。

例 下列各说法中正确的说法是:

(1) 其他热机的效率都小于卡诺热机的效率。

(2) 热机的效率都可表示为 $\eta = 1 - \dfrac{Q_2}{Q_1}$ 式中 Q_2 表示热机循环中工作物向外放出的热量(绝对值)，Q_1 表示从各热源吸收的热量(绝对值)。

(3) 热机的效率都可表示为 $\eta = 1 - \dfrac{T_2}{T_1}$ 式中 T_2 为低温热源温度，T_1 为高温热源温度。

(4) 其他热机在每一循环中对外作的净功一定小于卡诺热机在每一循环中对外作的净功。

例 关于热功转换和热量传递过程，下列叙述正确的是:

(1) 功可以完全变为热量，而热量不能完全变为功；

(2) 一切热机的效率都只能小于1；

(3) 热量不能从低温物体向高温物体传递；

(4) 热量从高温物体向低温物体传递是不可逆的。

例 地球上的人要在月球上居住，首要问题就是保持他们的起居室处于一个舒适的温度。现考虑用卡诺循环机来作温度调节，设月球白昼温度为 $100^0\mathrm{C}$，而夜间温度为 $-100^0\mathrm{C}$，起居室温度要保持在 $20^0\mathrm{C}$，通过起居室墙壁导热的速率为每度温差 0.5kW

求 白昼和夜间给卡诺机所供的功率

解 在白昼欲保持室内温度低，卡诺机工作于致冷机状态，从室内吸取热量 $Q_{吸}$，放入室外热量 $Q_{放}$

则 $$w = \frac{Q_{吸}}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \qquad A = \frac{Q_{吸}}{w} = Q_{吸}\frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

每秒钟从室内取走的热量为通过起居室墙壁导进的热量，即

$$Q_{吸} = C(T_2 - T_1)$$

$$A=\frac{Q_{吸}}{w}=Q_{吸}\frac{T_1-T_2}{T_2}=C\frac{\left(T_1-T_2\right)^2}{T_2}=10.9\times10^3\,\mathrm{W}$$

在黑夜欲保持室内温度高，卡诺机工作于致冷机状态，从室外吸取热量 $Q_{吸}$，放入室内热量 $Q_{放}$

$$w=\frac{Q_{吸}}{A}=\frac{T_1}{T_2-T_1}\longrightarrow Q_{吸}=A\frac{T_1}{T_2-T_1}$$

每秒钟放入室内的热量为通过起居室墙壁导出的热量，即

$$Q_{放}=Q_{吸}+A=C(T_2-T_1)$$

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

解得 $$A=\frac{C(T_2-T_1)^2}{T_2}=24.6\times10^3\ \mathrm{W}$$

说明

此种用可逆循环原理制作的空调装置既可加热，又可降温，这即是所谓的冷暖双制空调。

本章小结

1. 功、热量、内能

(1) 准静态过程的功 $A=\int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V$

(2) 热量、内能 $Q=\nu\int_{T_1}^{T_2} C_x \mathrm{d}T$

(3) 内能变化 $E_2-E_1=\nu C_V(T_2-T_1)$

功和热量是过程量，内能是状态量.

2. 热力学第一定律

$$Q=E_2-E_1+A$$

$$\mathrm{d}Q=\mathrm{d}E+\mathrm{d}A$$

3. 摩尔热容

$$C_x = \frac{1}{\nu} \lim_{\Delta T \to 0} \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

定体摩尔热容 $C_V = \frac{i}{2} R$

定压摩尔热容 $C_{p,} = \frac{i+2}{2} R$

迈耶公式 $C_p = C_V + R$

比热容比 $\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$

4. 循环过程

热机效率 $\eta=\frac{A}{Q_1}=1-\frac{|Q_2|}{Q_1}$,卡诺热机效率 $\eta=1-\frac{T_2}{T_1}$.

致冷系数 $\omega=\frac{Q_2}{|A|}=\frac{Q_2}{|Q_1|-Q_2}$,卡诺致冷系数 $\omega=\frac{T_2}{T_1-T_2}$.

5. 热力学第二定律

开尔文表述: 不可能从单一热源吸取热量，使它完全变为有用功而不引起其他变化，即功热转化是不可逆的.

克劳修斯表述: 不可能使热量从低温物体传向高温物体而不引起其他变化，即热传递过程是不可逆的.

热力学第二定律的统计意义： 自发宏观过程总是沿着系统热力学概率增大的方向进行，或者说自发宏观过程是沿着热运动更无序的方向进行的.

理想气体热力学过程有关公式对照表

过程	特征	过程方程	能量转换方式	内能增量 ΔE	对外作功 A	吸收热量 Q	摩尔热容
等体	$V=$常量	$\frac{p}{T}=$常量	$Q=\Delta E$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	**0**	$\nu C_{V,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$	$C_{V,m}=\frac{i}{2}R$
等压	$p=$常量	$\frac{V}{T}=$常量	$Q=\Delta E+A$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	$p(V_2-V_1)$ $\nu R(T_2-T_1)$	$\nu C_{p,\mathrm{m}}(T_2-T_1)$	$C_{p,m}=C_{V,m}+R$
等温	$T=$常量	$pV=$常量	$Q=A$	**0**	$\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $\nu RT\ln\frac{p_2}{p_1}$	$\nu RT\ln\frac{V_2}{V_1}$ $\nu RT\ln\frac{p_2}{p_1}$	∞
绝热	$\mathrm{d}Q=0$	$pV^{\gamma}=C_1$ $V_{\gamma-1}T=C_2$ $p^{\gamma-1}T^{-\gamma}=C_3$	$A=-\Delta E$	$\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	$-\nu\frac{i}{2}R(T_2-T_1)$	**0**	**0**