



# 普通物理I PHYS1181.03

彭鹏

Office: 物质学院8号楼301室

Email: [pengpeng@shanghaitech.edu.cn](mailto:pengpeng@shanghaitech.edu.cn)

研究方向: 超快光谱、X射线阿秒脉冲产生、阿秒瞬态吸收光谱、  
强场激光物理、飞秒激光成丝。

<https://spst.shanghaitech.edu.cn/2021/0115/c2349a59066/page.htm>

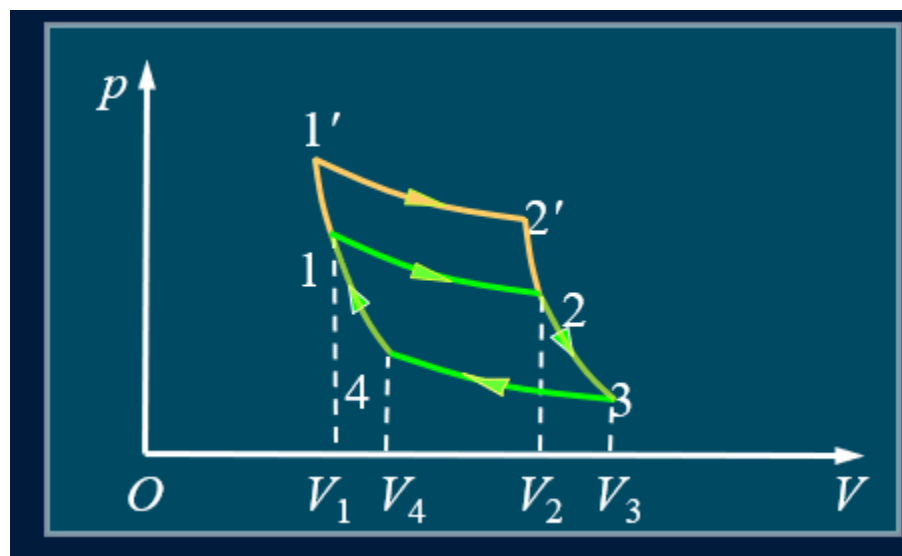




**例** 某理想气体准静态卡诺循环，当高温热源温度为  $T_1=400\text{K}$ ，低温热源温度  $T_2=300\text{K}$ . 对外做净功  $A=8000\text{J}$ . 今维持低温热源温度不变，提高高温热源的溫度，使其对外做净功增至  $A'=10000\text{J}$ ，两次卡诺循环都工作在相同的两绝热线之间.

**求** (1) 第二次循环的效率  $\eta_2$ ;

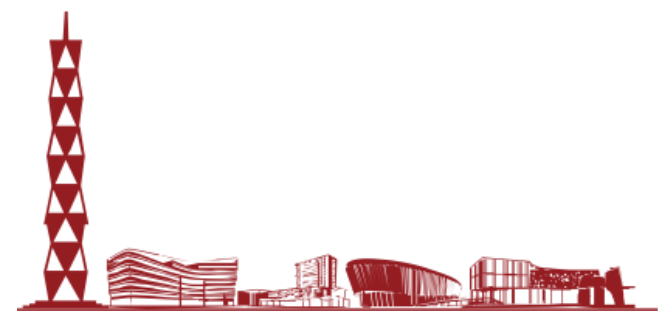
(2) 第二次循环中高温热源的溫度  $T_1'$ .





**例** 用卡诺致冷机使**1.00kg**、**0°C**的水变成**0°C**的冰，（设周围环境的温度为**27°C**，冰的熔解热为  $3.35 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  ).

**问** 需要做多少功？致冷机向周围环境放出了多少热量？





- 例(1)**夏季使用房间空调器使室内保持凉爽，现须将热量从室内以 $2000\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ 的散热功率排至室外.设室温为 $27^\circ\text{C}$ ，室外为 $37^\circ\text{C}$ ，求空调器所需的最小功率.
- (2)**冬天用房间空调器保持室内温暖。设室外温度为 $-3^\circ\text{C}$ ，室温需保持 $27^\circ\text{C}$ ，仍用上面所给的功率，则每秒传入室内的热量是多少？





## 解题思路

计算热机的效率与致冷机的致冷系数是与工程实践相关的问题，处理这类问题的一般思路是：

(1) 根据循环过程作出该循环的  $p$ - $V$  图。

(2) 一般热机的循环效率  $\eta = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$  ；

一般致冷机的致冷系数  $\omega = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$  ；

卡诺热机的循环效率为  $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$  ；

卡诺致冷机的致冷系数为  $\omega = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$  。

(3) 根据题设条件, 计算出循环过程中吸收的热量、放出的热量及做功的数值.

(4) 计算循环效率和致冷系数, 根据实际情况选用 $\eta$ 或 $\omega$ 的不同表达式.

- 如果吸热  $Q_2$  和放热  $Q_2$  容易求出, 选用

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

- 如果吸热  $Q_1$  和对外做功  $A$  容易求出, 就选用

$$\eta = \frac{A}{Q_1}$$

- 如果是卡诺循环可直接利用高温热源和低温热源温度  $T_1$ 、 $T_2$  求出  $\eta$  和  $\omega$ .

## 主要内容：

1. 可逆过程与不可逆过程
2. 热力学第二定律
3. 热力学第二定律的统计意义





# 可逆过程和不可逆过程

## 1. 自发过程的方向性

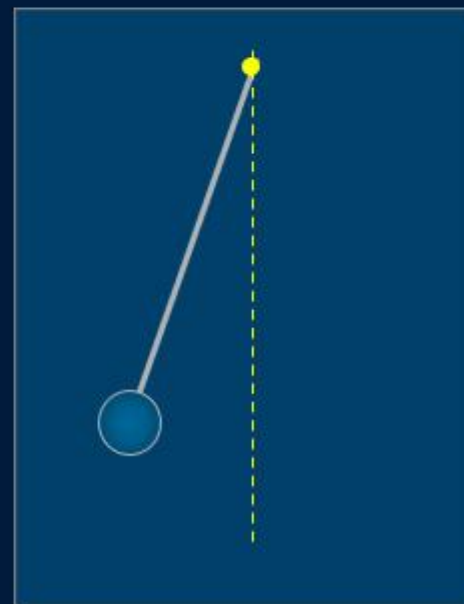
### (1) 热传导的方向性

热量自发地只能从高温热源传到低温热源，而不可能自发地从低温热源传到高温热源。



### (2) 功热转换的方向性

功可以自动地转变为热，热不能自动地转变为功。

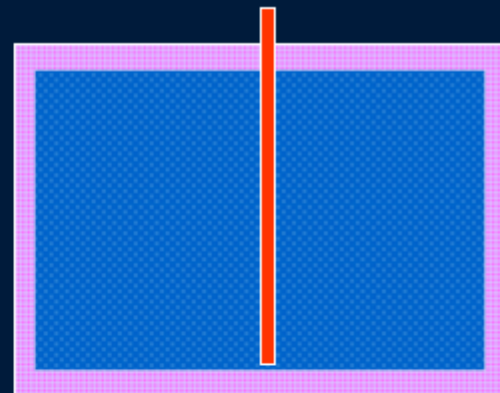




### (3) 气体自由膨胀的方向

气体自由膨胀可以自发发生，但不会自发压缩。

自然界与热现象有关的所有宏观自发过程都具有方向性。



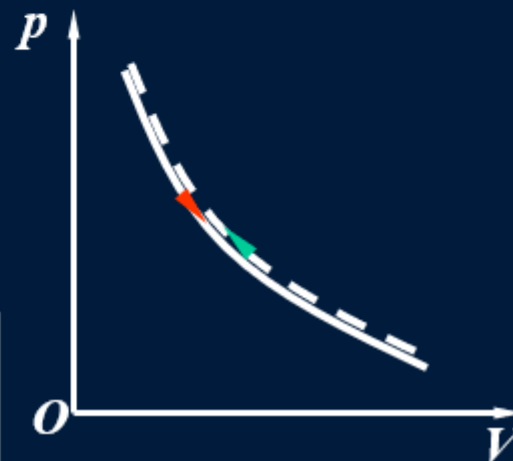
## 2. 可逆过程和不可逆过程

**可逆过程：**一个热力学过程的每一步都可沿相反方向进行，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：**过程发生后，无论如何系统和外界都不能同时恢复到原来的状态。

自然界中自发的热力学过程都是不可逆的，比如燃烧、扩散、生命过程等都不是可逆过程。



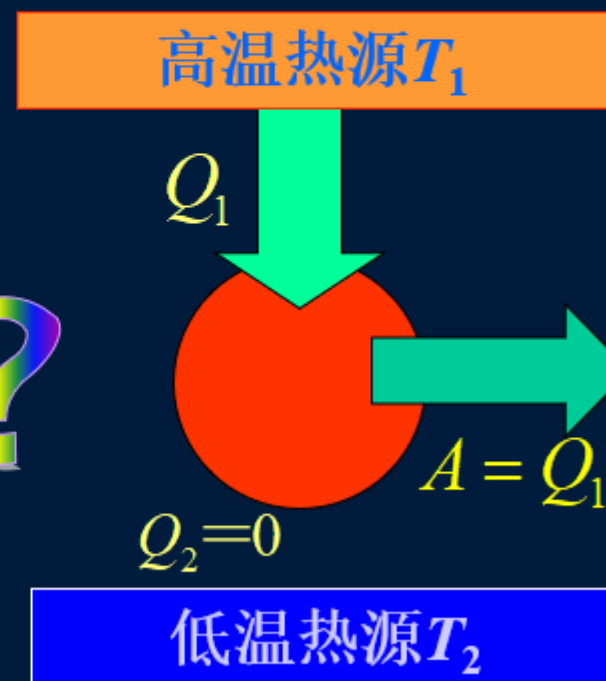
# 热力学第二定律

问题的提出:能否制造效率等于100%的热机?

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

当 $|Q_2|=0$ 时,  $A=Q_1, \eta=100\%$

工作物质从单一热源吸收  
热量而对外做功.

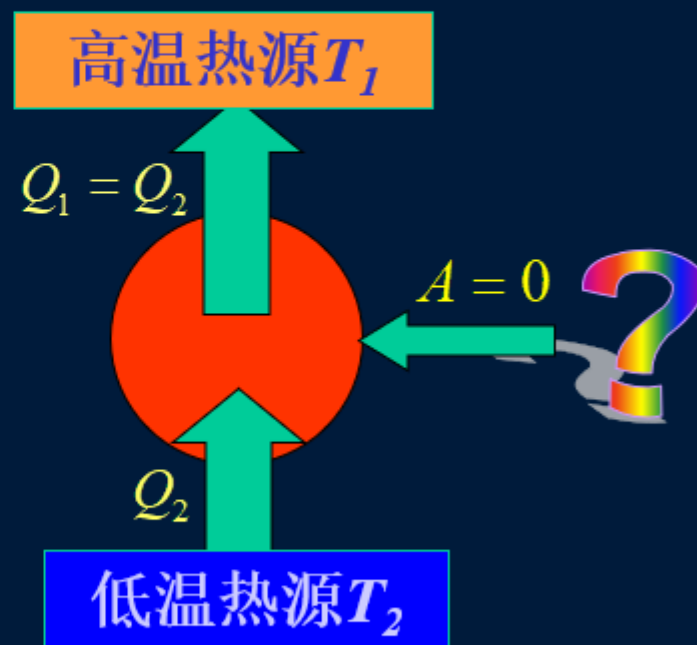


**对于致冷机:**能否制造不需要外界做功,致冷系数达到无限大的致冷机?

$$\omega = \frac{Q_2}{|A|} = \frac{Q_2}{|Q_1| - Q_2}$$

当 $|Q_2|=Q_1$ 时,  $|A|=0$ ,  $\omega=\infty$

热量可以自动地从低温物体  
传向高温物体.



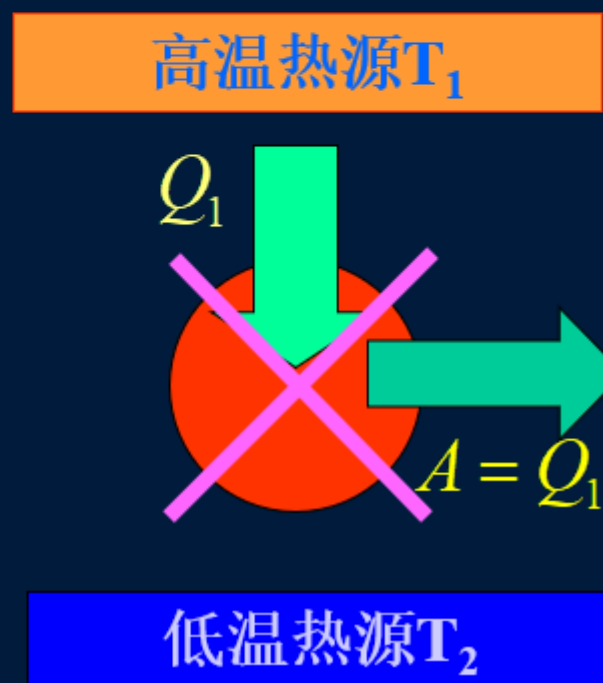
**实践证明:**自然界中符合热力学第一定律的过程不一定都能实现, 自然界中自然宏观过程是有方向性的.

## 1. 热力学第二定律的开尔文说法

不可能从单一热源吸取热量, 使之完全变为有用功而不产生其他影响。开尔文说法反映了功热转换的不可逆性.

- **第二类永动机:**

从单一热源吸热并将其全部用来作功, 而不放出热量给其它物体的机器( $\eta = 100\%$ ).

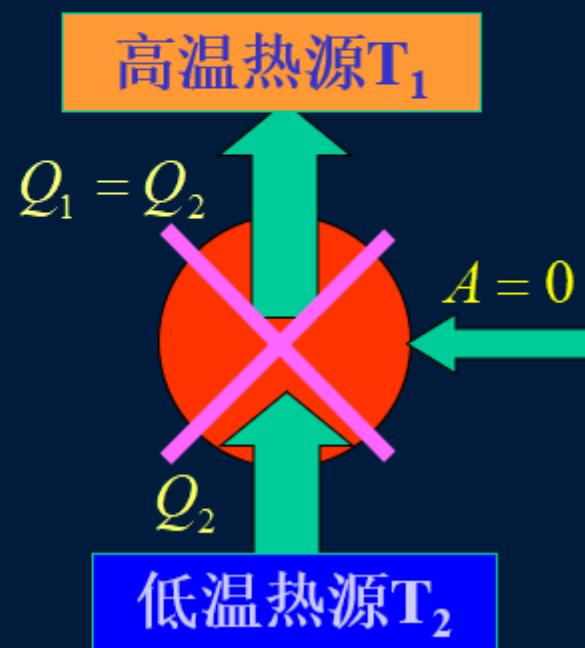


## 2. 热力学第二定律的克劳修斯说法

不可能使热量自动地从低温物体传向高温物体，而不产生其他影响。克劳修斯说法反映了热传导过程的不可逆性。

- 高效致冷机：

不需要花费外界做功的能量，就可以自动给系统降温的致冷系数等于无穷大的致冷机。



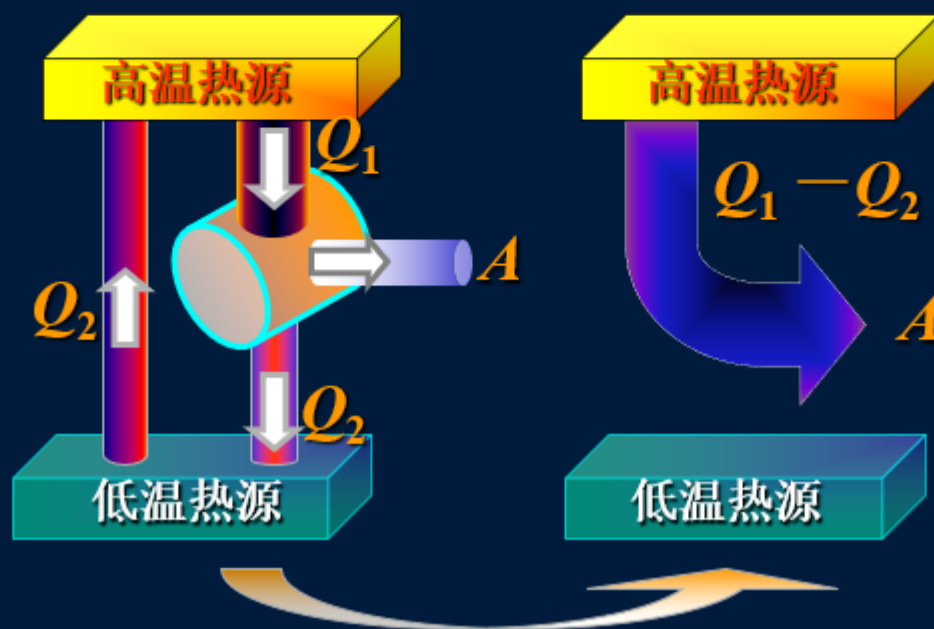
### 3. 劳修斯说法和开尔文说法是等价的

两种表述不同，但是它们是完全等价

- 如果克劳修斯说法不成立，则开尔文说法也不成立
- 如果开尔文说法不成立，则克劳修斯说法也不成立

证明（反证法）

设克劳修斯说法不成立，热量可从低温物体自动地传向高温物体，则可构造如下效率100%的热机，即开尔文说法也不成立。

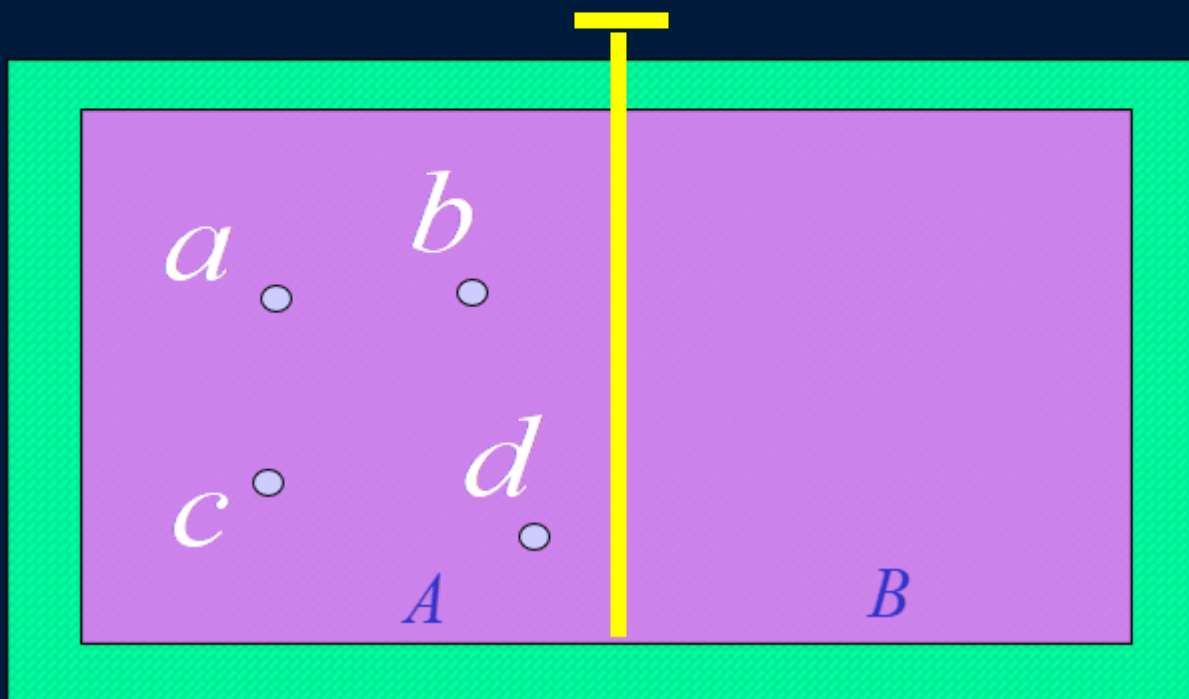




## 热力学第二定律的统计意义

热力学第二定律的实质上指出了自然界中一切与热现象有关的实际客观过程都是不可逆的.

以气体的自由膨胀为例认识热力学第二定律的统计意义







## 四个气体分子处于容器两侧不同状态的分布方式

宏观态 分子数目的分布 方式	微观态 (系统内分子位置的配置组合)	一种宏观状态对应的微 观状态数	概率												
左4 右0	<table><tr><td>ab</td><td></td></tr><tr><td>cd</td><td></td></tr></table>	ab		cd		1	1/16								
ab															
cd															
左3 右1	<table><tr><td>abc</td><td>d</td><td>dbc</td><td>a</td><td>dca</td><td>b</td><td>dab</td><td>c</td></tr></table>	abc	d	dbc	a	dca	b	dab	c	4	4/16				
abc	d	dbc	a	dca	b	dab	c								
左2 右2	<table><tr><td>ab</td><td>cd</td><td>bc</td><td>da</td><td>cd</td><td>ab</td></tr><tr><td>ad</td><td>bc</td><td>db</td><td>ac</td><td>ac</td><td>bd</td></tr></table>	ab	cd	bc	da	cd	ab	ad	bc	db	ac	ac	bd	6	6/16
ab	cd	bc	da	cd	ab										
ad	bc	db	ac	ac	bd										
左1 右3	<table><tr><td>d</td><td>abc</td><td>a</td><td>bcd</td><td>b</td><td>acd</td><td>c</td><td>abd</td></tr></table>	d	abc	a	bcd	b	acd	c	abd	4	4/16				
d	abc	a	bcd	b	acd	c	abd								
左0 右4	<table><tr><td></td><td>ab</td></tr><tr><td></td><td>cd</td></tr></table>		ab		cd	1	1/16								
	ab														
	cd														



**热力学概率：**任一宏观状态所对应的微观状态数，用 $\Omega$ 表示。

**热力学概率  $\Omega$  是系统内大量分子运动的无序性的量度**

**1mol**的气体分子自由膨胀后再自动的回缩到A室的概率为：

$$\frac{1}{2^N} = \frac{1}{2^{6 \times 10^{23}}} = 10^{-2 \times 10^{23}}$$

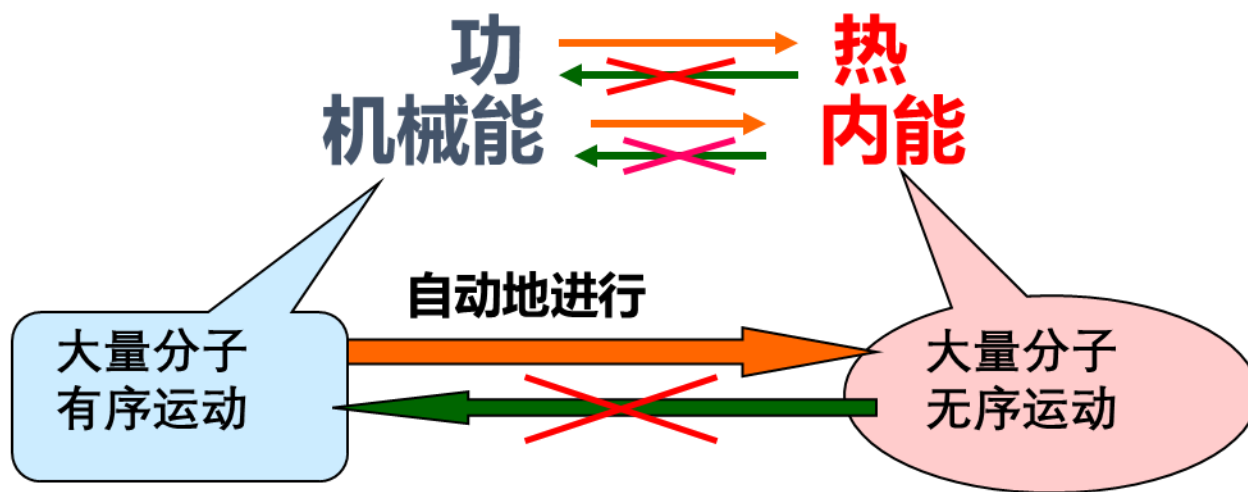
**这个概率极其微小，说明自发的压缩是不可能发生的。**

### ➤ 结论

- (1) 孤立系统平衡态对应于热力学概率最大的状态。
- (2) 不可逆过程实际上是由一个热力学概率小的状态向热力学概率大的状态转变的过程。
- (3) 自发宏观过程总是沿着系统热力学概率增大的方向进行。这就是热力学第二定律的统计意义。

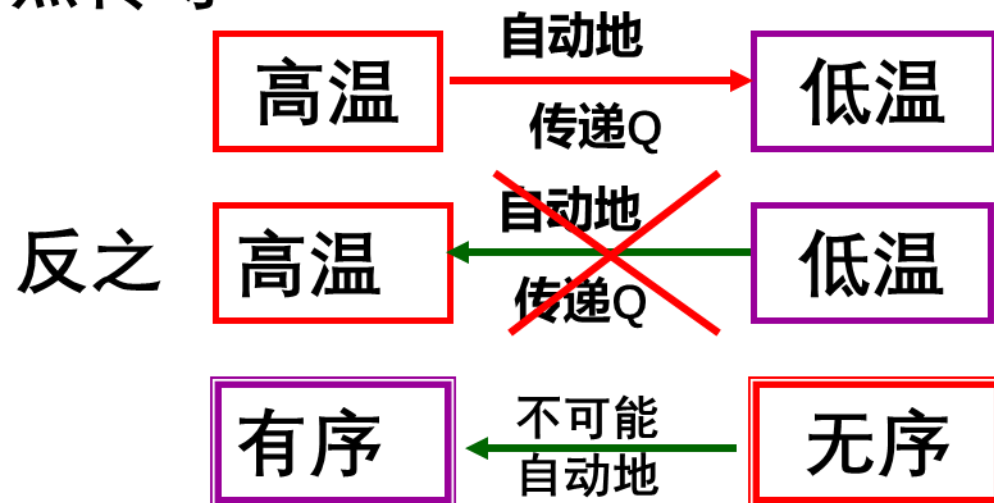
从微观上看，任何热力学过程总包含大量分子的无序运动状态的变化。热力学第二定律给出了变化的规律。

## (1) 热功转换



**结论：**热功转换的自动过程总是使大量分子的运动从有序状态向无序状态转化。

## (2) 热传导



初态：两系统T不同、 $\varepsilon_t^-$ 不同

两系统可区分

末态：两系统T相同、 $\varepsilon_t^-$ 相同

两系统变得不可区分

热传导使系统的无序性增大

**结论：**热传导的自然过程总是沿着使大量分子的运动向**更加无序的方向**进行。

## (3) 气体的自由膨胀



热力学第二定律的微观解释：

**一切自然过程总是沿着使系统的无序性增大的方向进行。**

**注意：**该定律是涉及大量分子运动的无序性变化规律，是统计规律，只适用于包含大量分子的系统。

热力学第一定律说明：**任何过程必须能量守恒**

热力学第二定律则说明：

**并非所有的能量守恒过程都能实现**

**（热力学第二定律反映了自然界实际过程的方向性）**

**那么，热力学第二定律是否有定量的描述？**



## 主要内容：

1. 玻耳兹曼熵公式
2. 熵增加原理
3. 克劳修斯熵公式





## 玻耳兹曼熵公式

玻耳兹曼定义态函数熵： $S = k \ln \Omega$  (玻耳兹曼公式)

系统的熵 $S$ 是系统的可能微观状态数的量度.

系统的熵 $S$ 是系统分子热运动无序程度的量度.

系统的熵 $S$ 是系统的状态函数.

## 熵增加原理

孤立系统从状态1变化到状态2，熵增量为

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln \frac{\Omega_2}{\Omega_1} > 0$$

(孤立系统中的一切自发宏观过程只能由热力学概率小的状态向热力学概率大的状态进行) .

当系统达到平衡态时，系统的熵具有最大值.

对于孤立系统中的可逆过程，系统的熵不会变化  $dS = 0$

因而，对于孤立系统的任意过程，熵永不减少.

即  $dS \geq 0$  (熵增加原理)





## 克劳修斯熵

克劳修斯从系统宏观角度定义了熵.

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

积分可得

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

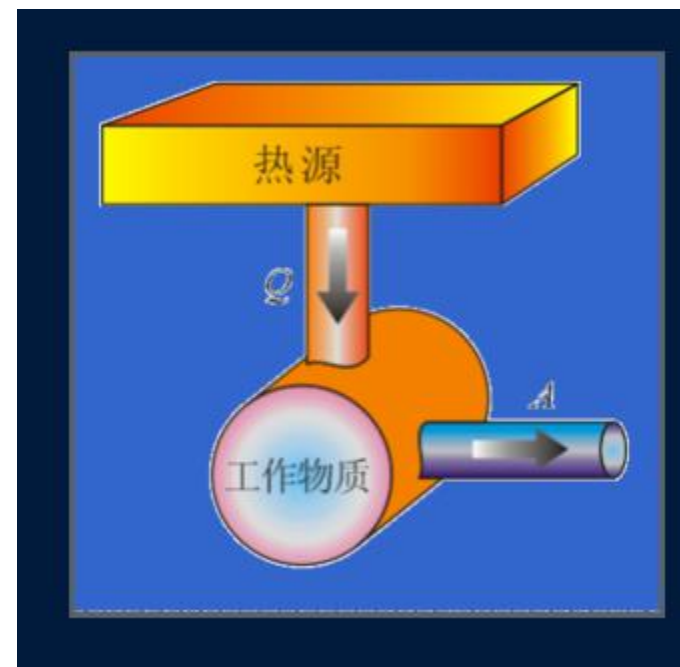
用克劳修斯熵公式计算系统的熵变时要注意两点:

- (1) 由于熵是态函数,  $\Delta S$  只与初态和末态有关, 与过程无关, 当系统由状态1变化到状态2时, 都可以任意设想一个可逆过程连接初态1和末态2, 并用下式进行计算.

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$$

- (2) 系统总熵变等于各组成部分熵变之总和.

## 例 试用熵增原理证明单热源热机不可能存在.





例 把质量 $m$ 为1kg, 温度为 $20^{\circ}\text{C}$ 的水放到 $100^{\circ}\text{C}$ 的炉子上加热,  
最后达到 $100^{\circ}\text{C}$ , 水的比热为 $c = 4.18 \times 10^3 \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

求 水和炉子的熵变 $\Delta S_{\text{水}} = ?$ ,  $\Delta S_{\text{炉}} = ?$

