

# 第一篇

## 工程热力学

Engineering Thermodynamics

# 本章作业

**1-3**

**1-5**

**1-7**

**1-8**

**1-10**

# 本章需掌握内容

## 基本概念：

- ① 热力系
- ② 平衡状态与状态参数
- ③ 准平衡、可逆过程
- ④ 过程量与状态参数
- ⑤ 容积变化功、热量、熵
- ⑥  $p$ - $V$ 图、 $T$ - $S$ 图

## 计算：

- ① 容积变化功



# 第一章：基本概念



**§1-1 热力系统**

**§1-2 平衡状态及状态参数**

**§1-3 状态方程、坐标图**

**§1-4 准平衡过程和可逆过程**

**§1-5 功量与热量**

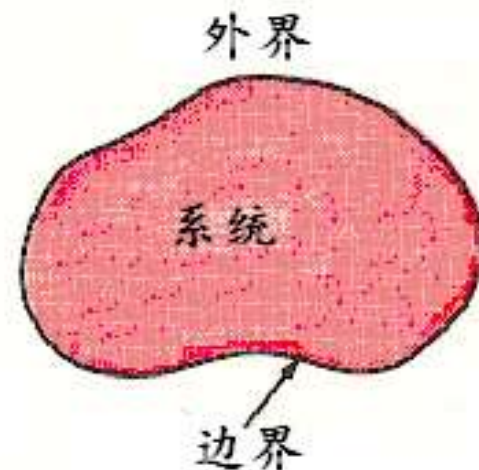
# §1-1 热力系统 Thermodynamic system

## 一、系统、外界与边界

热力系统(简称系统或体系): 根据研究需要, 人为选取的空间内的物质总和。

外界 (surroundings): 系统以外的所有物质

边界(界面boundary): 系统与外界的分界面



**系统与外界的作用都通过边界**

# §1-1 热力系统 Thermodynamic system

## 二、热力系统的选取

### 原则:

- a. 突出所关心的主要问题
- b. 便于分析
- c. 足够大，满足宏观假定

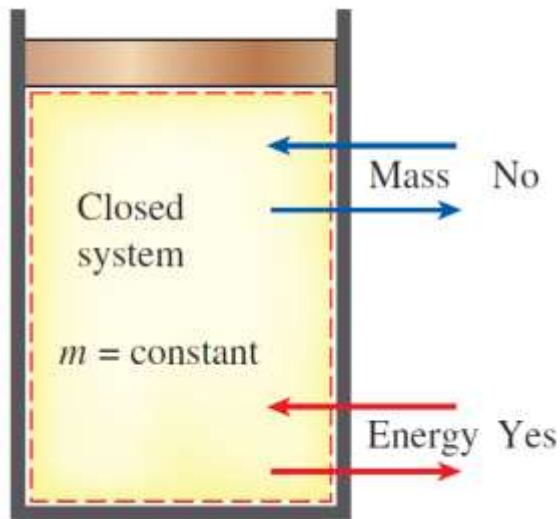
### 方法:

边界可以真实或虚构；固定或运动；也可以是两种及两种以上的组合

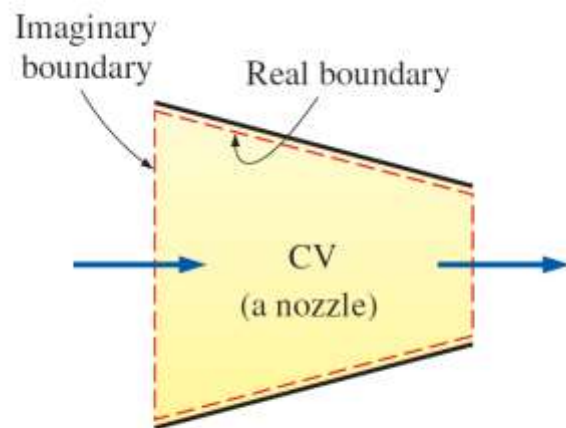
**(1) 真实、固定边界的系统**

**(2) 全部边界固定，但包括假象边界的系统**

**(3) 真实、假象，固定、移动边界的组合**

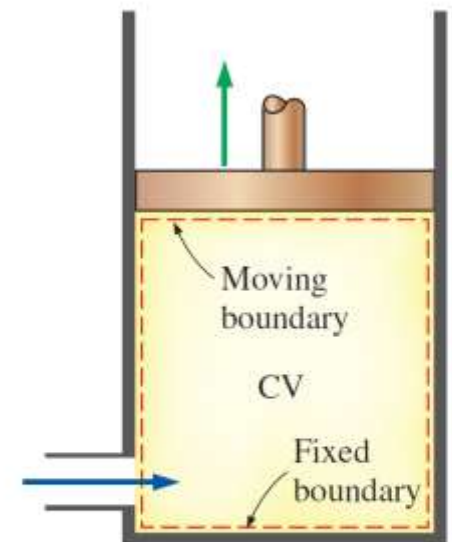


(1)



(a) A control volume (CV) with real and imaginary boundaries

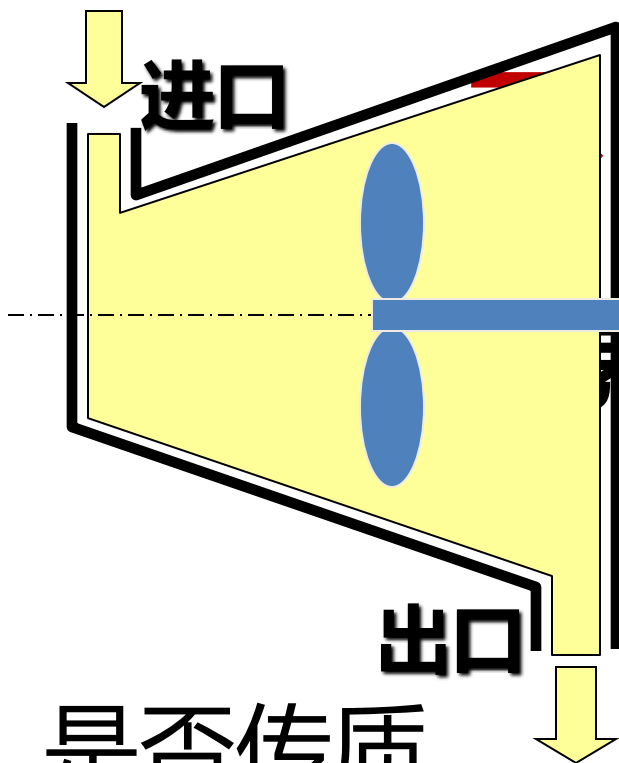
(2)



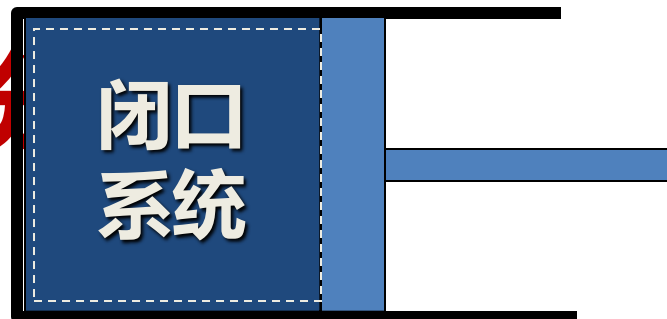
(b) A control volume (CV) with fixed and moving boundaries as well as real and imaginary boundaries

(3)





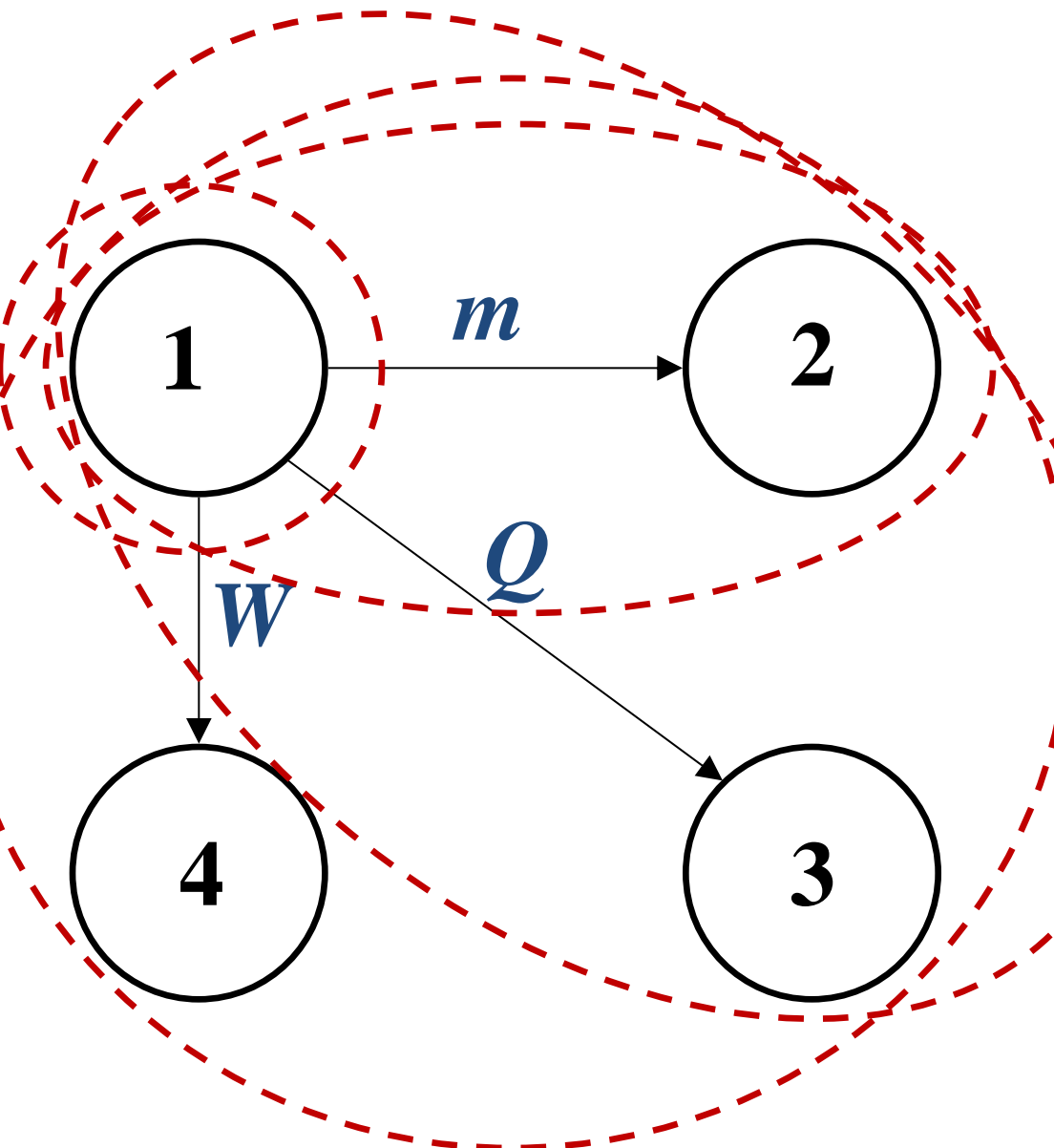
# 热力系统分类



界面关系划分：

	有	无
是否传质	开口系	闭口系
是否传热	非绝热系	绝热系
是否传功	非绝功系	绝功系
是否传热、功、质	非孤立系	孤立系

**结论：系统的选取具有相对性。**



$1 \Rightarrow$  开口系

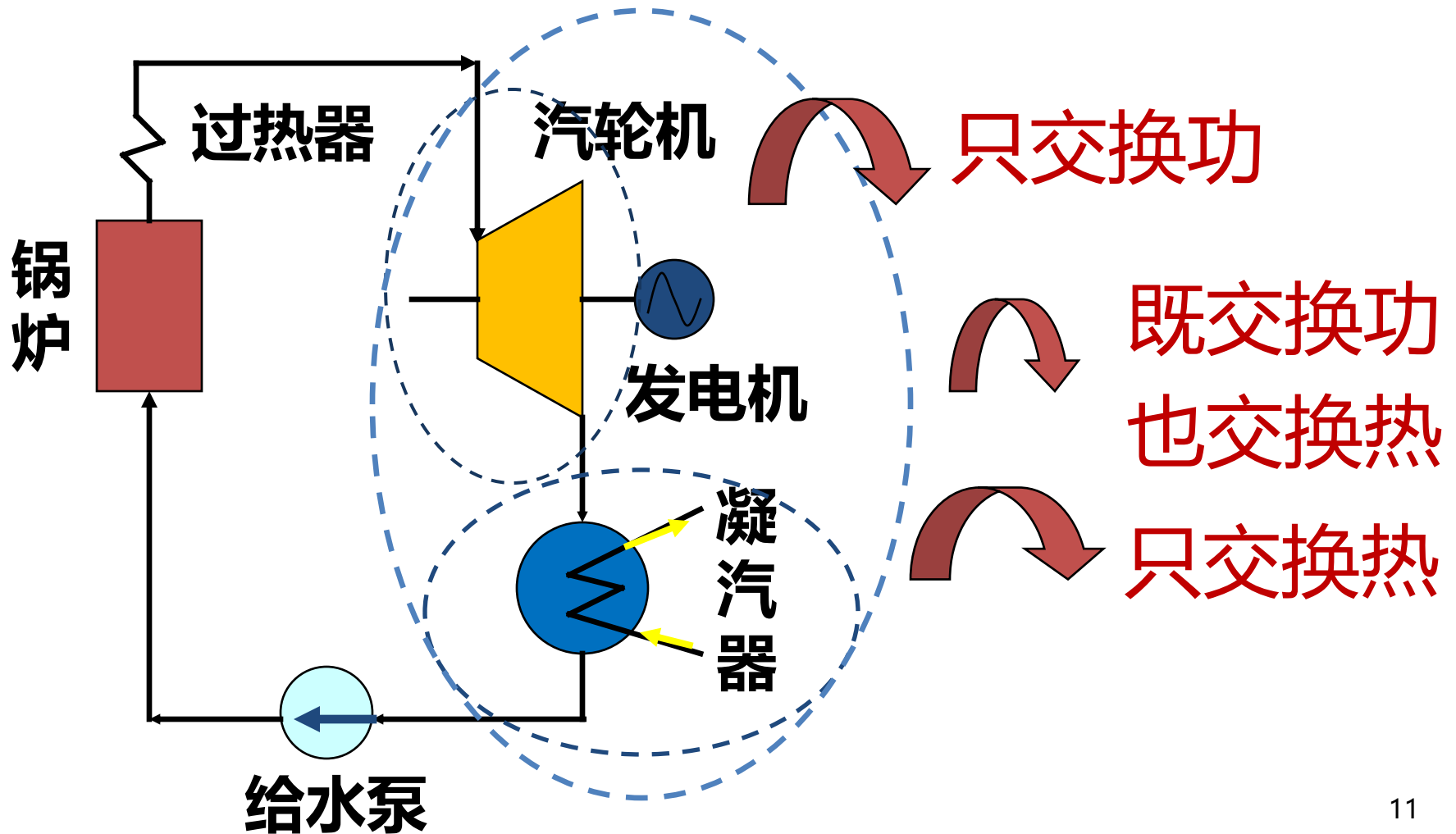
$1+2 \Rightarrow$  闭口系

$1+2+3 \Rightarrow$  绝热闭口系

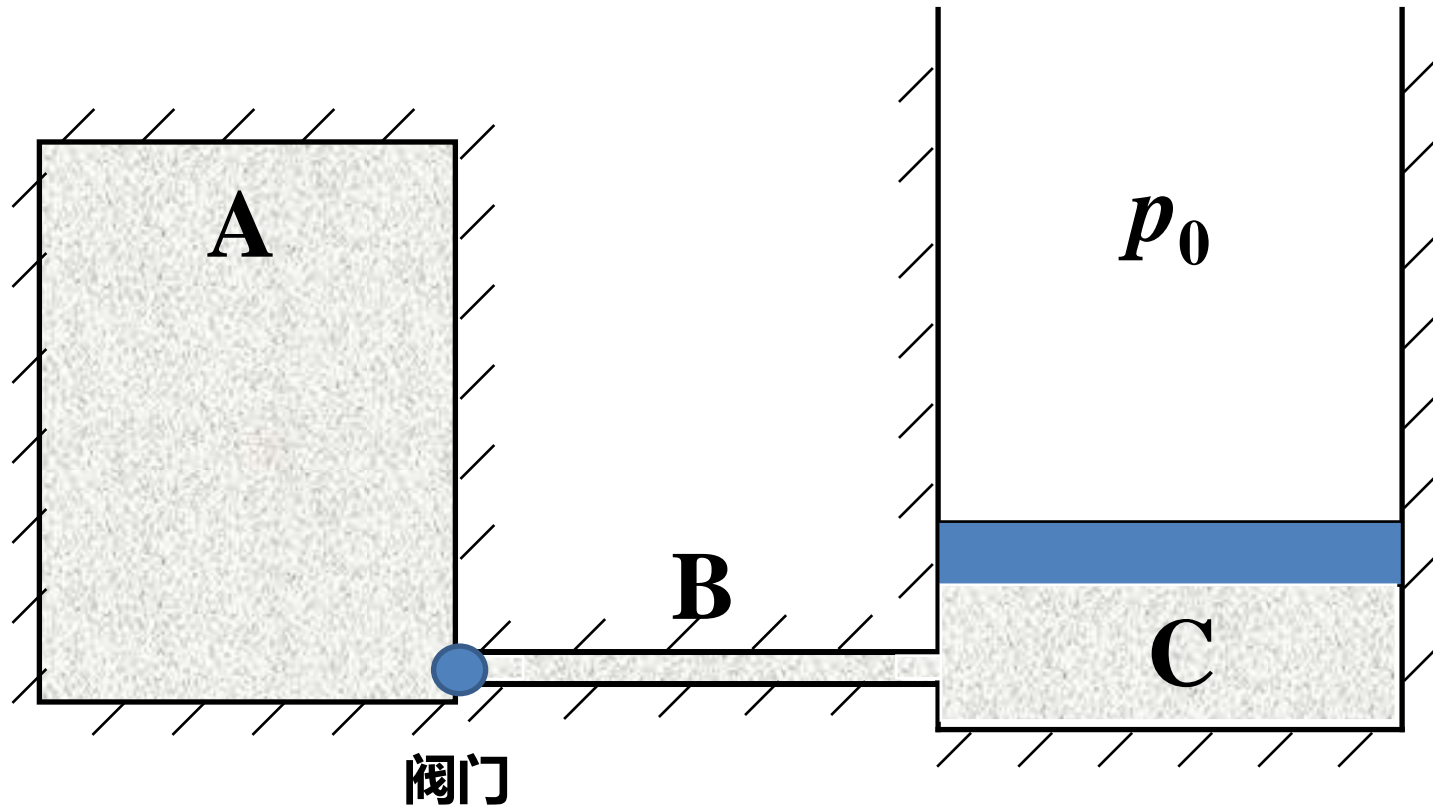
$1+2+3+4 \Rightarrow$  孤立系

**非孤立系 + 相关外界  
= 孤立系**

# 热力系统选取的人为性

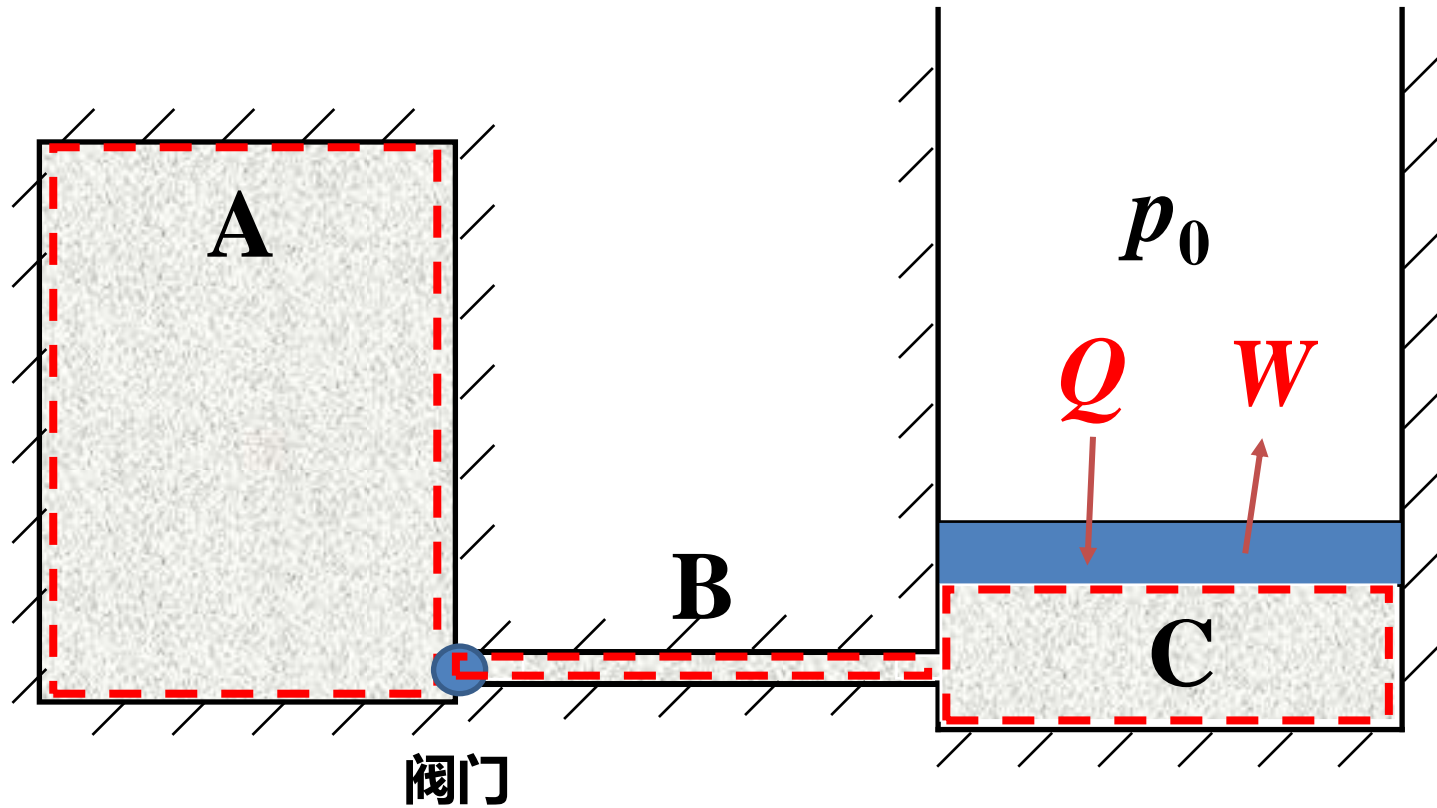


# 选取热力系统，并分析主要热力学参数的变化



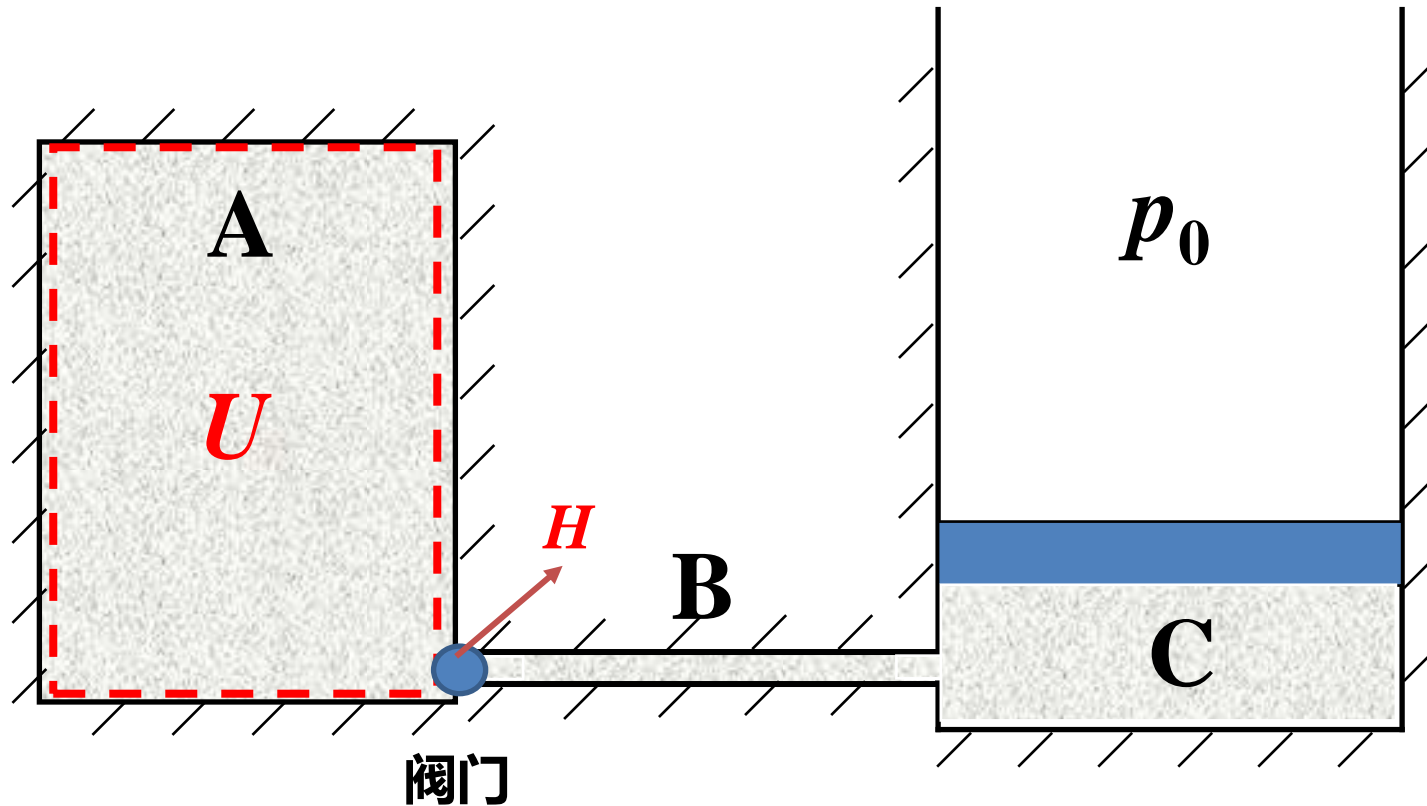
初始时刻，气体全部在A

# 选取热力系统，并分析主要热力学参数的变化

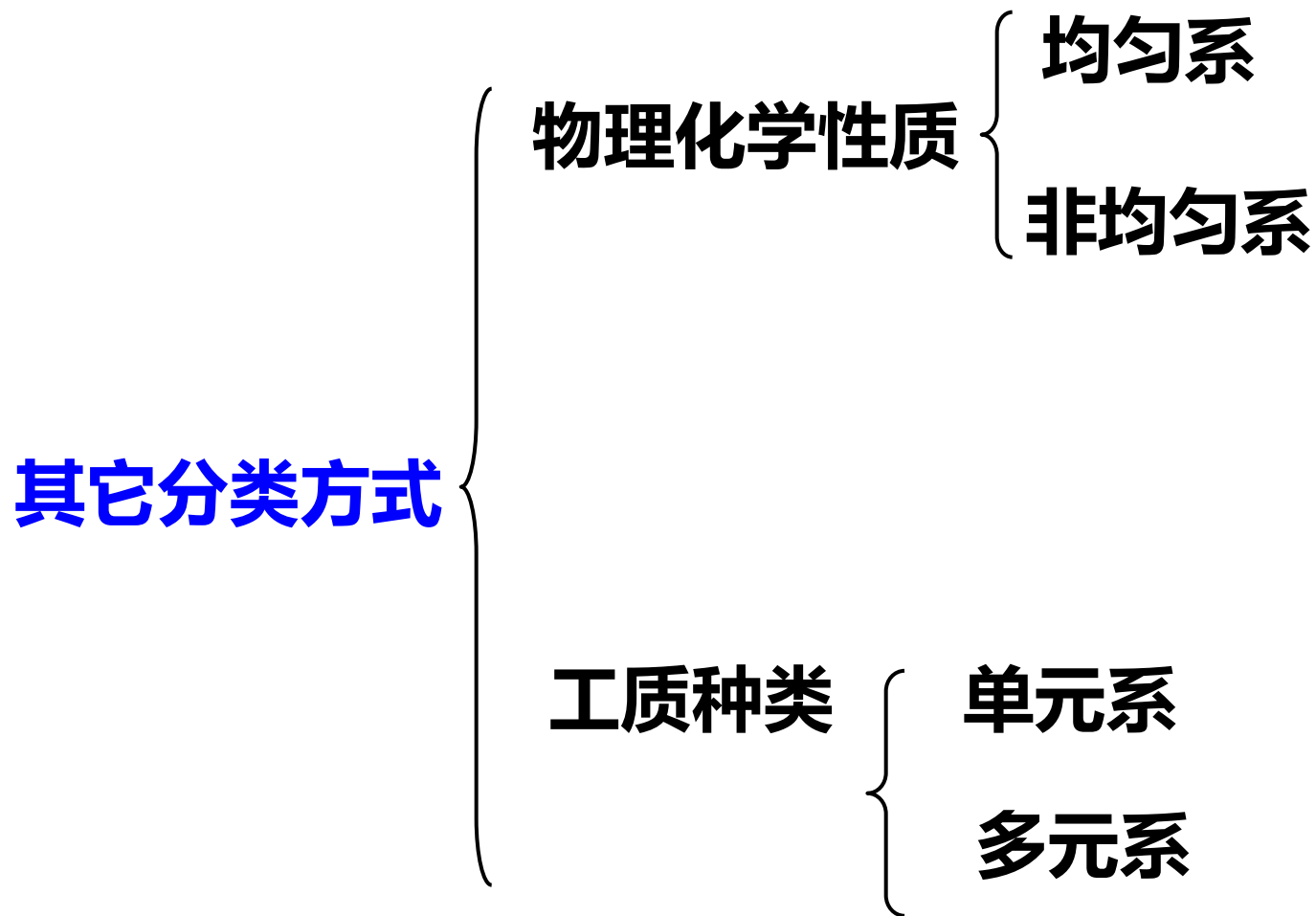


闭口系

# 选取热力系统，并分析主要热力学参数的变化



开口系

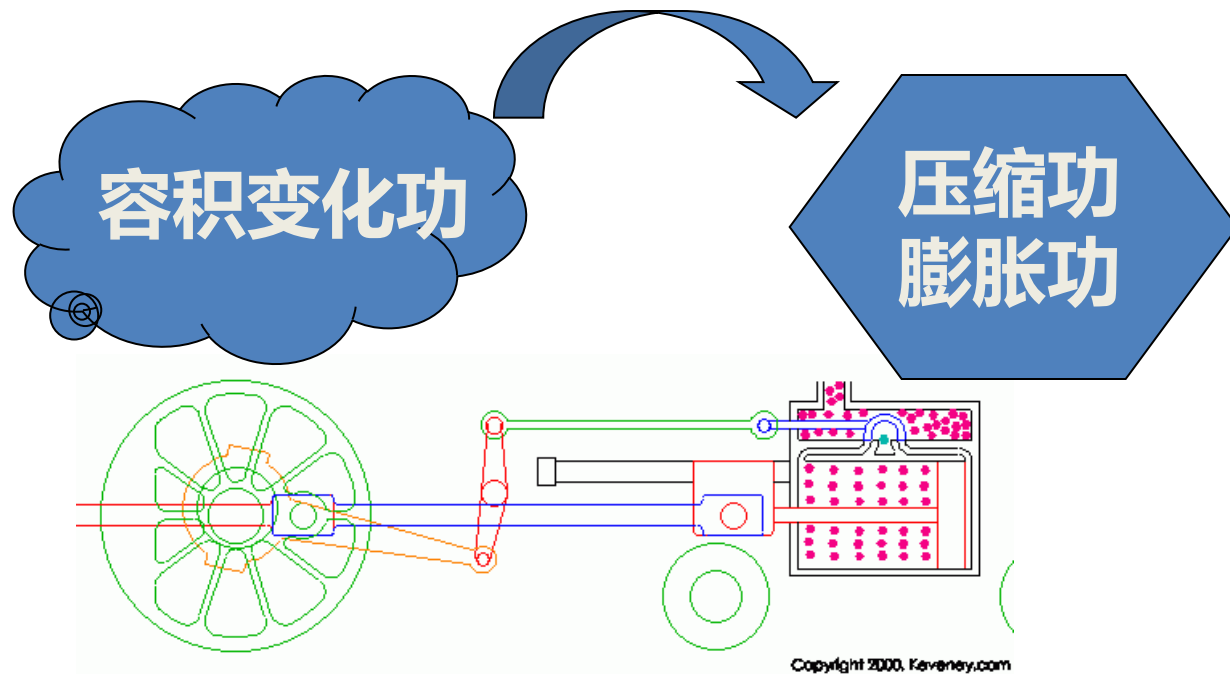


# 简单可压缩系统

## Simple compressible system

最重要的**系统**：由可压缩流体构成

只交换**热量**和**一种**准静态的**容积变化功**





# §1-2 平衡状态及状态参数

## 一、状态参数

**状态：** 某一瞬间热力系所呈现的宏观物理状况

**状态参数：** 描述热力系状态的物理量

**状态参数的特征：**

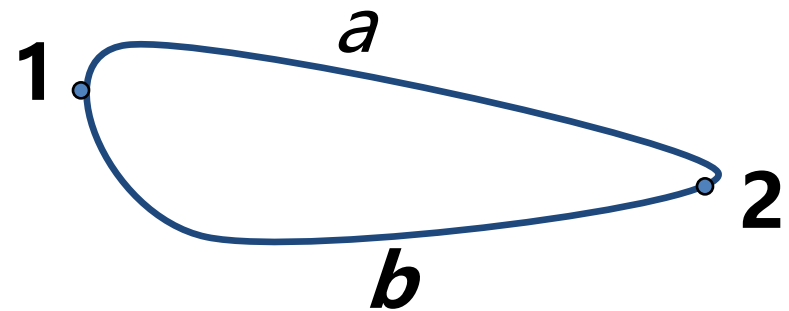
- 1、状态确定，则状态参数也确定，反之亦然
- 2、**状态参数的积分特征：** 状态参数的变化量与路径无关，只与初终态有关
- 3、**状态参数的微分特征：** 全微分

# 状态参数的积分特征

状态参数变化量与路径无关，只与初终态有关

数学上： 点函数、态函数

$$\int_1^2 dz = \int_{1,a}^2 dz = \int_{1,b}^2 dz = z_2 - z_1$$



循环积分等于零  $\oint dz = 0$

# 状态参数的微分特征

设  $z = z(x, y)$

$$dz = \left( \frac{\partial z}{\partial x} \right)_y dx + \left( \frac{\partial z}{\partial y} \right)_x dy$$

$dz$  是全微分

Total  
differentials

存在所有偏导数且  
所有偏导数于此点  
连续

充要条件:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 z}{\partial y \partial x}$$

可判断是否  
是状态参数

# 热力学常用的六个状态参数：

压力  $p$ 、温度  $T$ 、体积  $V$

热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$

基本状态参数

# 状态参数的分类:

压力  $p$ 、温度  $T$ 、体积  $V$

热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$

基本状态参数

强度量: 与物质的量无关的参数

如  $p$ 、 $T$

广延量: 与物质的量有关的参数——可加性

如  $m$ 、 $V$ 、 $U$ 、 $H$ 、 $S$

比参数:  $v = V/m$  比容     $u = U/m$  比内能

$h = H/m$  比焓     $s = S/m$  比熵

/kg 或 /kmol

具有强度量性质

# 1. 压力 $p$

物理中**压强**, 单位: Pa, N/m<sup>2</sup>

常用单位:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mmHg} = 133.3 \text{ Pa}$$

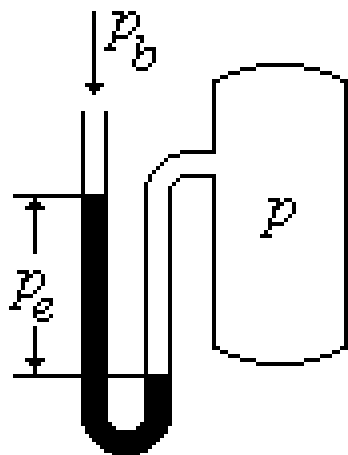
$$1 \text{ at} = 735.6 \text{ mmHg} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

# 压力测量

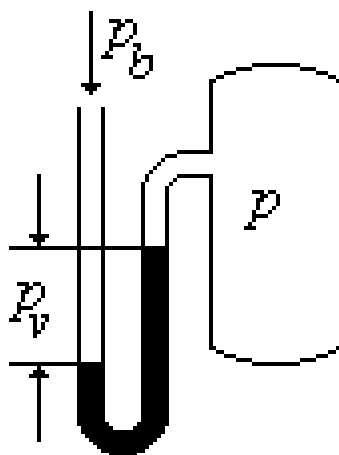
绝对压力与环境压力的相对值

——相对压力

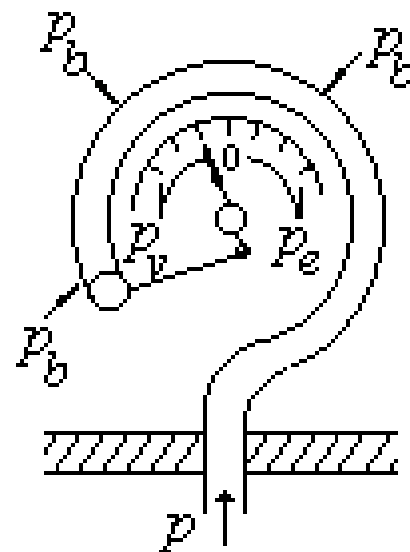
注意：只有绝对压力才是状态参数



(a)



(b)



(c)

U-tube manometer

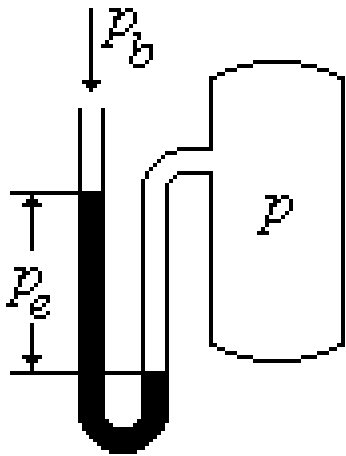
Bourdon Tube

# 绝对压力与相对压力

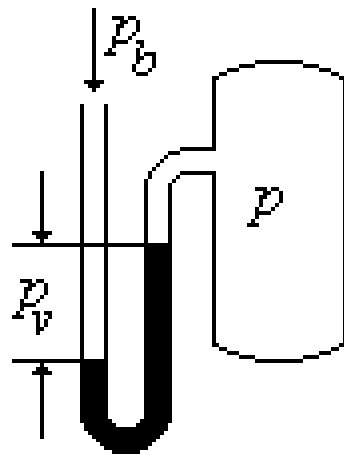
absolute pressure      relative pressure

当  $p > p_b$   $\longrightarrow$  **表压力**  $p_e$   $\longrightarrow$   $p = p_e + p_b$   
**Gage pressure**

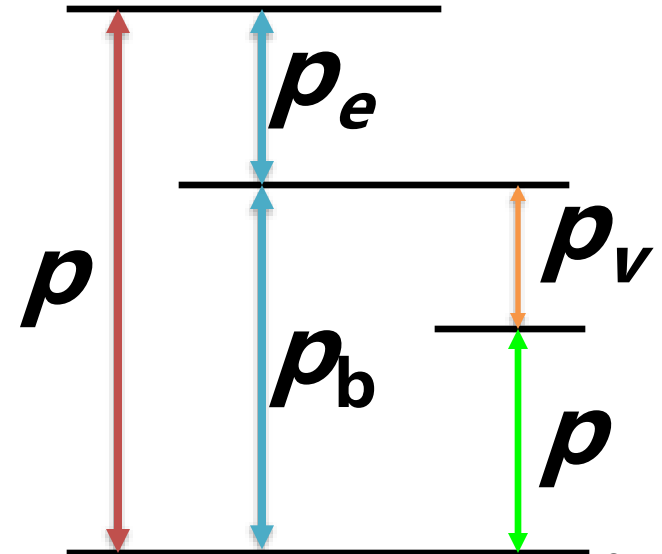
当  $p < p_b$   $\longrightarrow$  真空度  $p_v$   $\longrightarrow$   $p = p_b - p_v$   
 Vacuum pressure



(a)



(b)





# 环境压力与大气压力

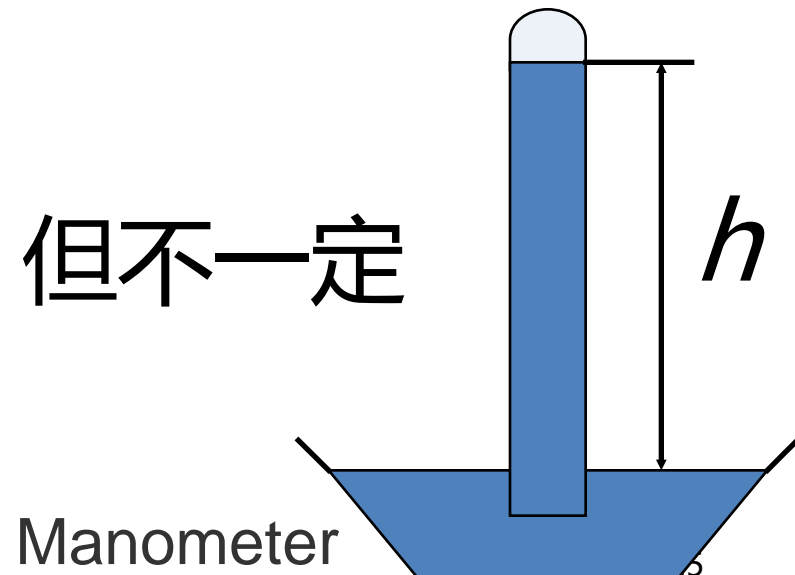
环境压力 Environmental pressure

指压力表所处环境

大气压力 Atmospheric pressure  
barometric

注意：

环境压力一般为大气压，但不一定



## 2. 温度 $T$

### 温度的一般定义

**传统：**冷热程度的度量。感觉，导热，热容量

**微观：**衡量分子平均动能的量度。根据麦克斯韦-玻尔兹曼分布，粒子动能越大，物质温度就越高

$$T \propto 0.5 m w^2$$

1) 同 $T$ ,  $0.5mw^2$  不同

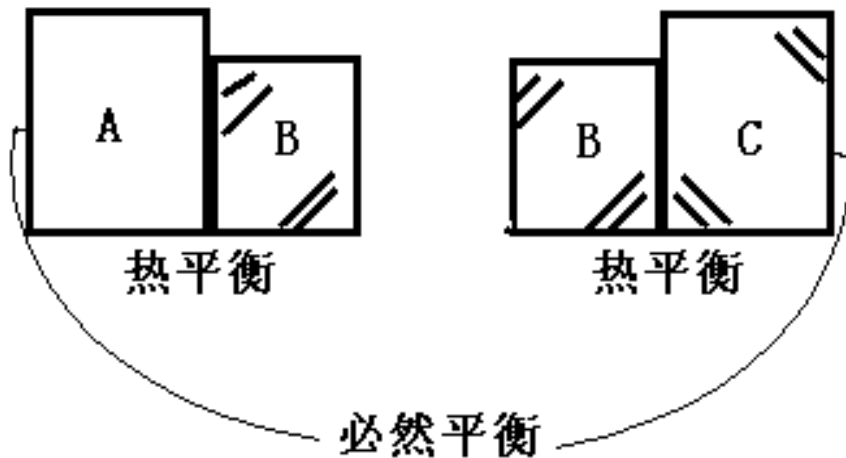
2)  $0.5mw^2 > 0$ ,  $T > 0$

3)  $T=0 \Rightarrow 0.5mw^2=0$ : 分子一切运动停止，零点能

# 温度的热力学定义

热力学第零定律（英国物理学家：R.W. Fowler in 1931）

如果两个系统分别与第三个系统处于  
**热平衡**，则两个系统彼此必然处于**热平衡**。



温度测量的理论基础

**温度计**

## ■ 为什么叫做热力学第零定律

热力学第零定律	1931年	$T$
热力学第一定律	1840~1850年	$E$
热力学第二定律	1854~1855年	$S$
热力学第三定律	1906年	$S$ 基准

## ■ 热力学第零定律的意义

- (1) 有关热平衡的基本公理
- (2) 为科学地给出温度的定义奠定了理论基础
- (3) 为建立温标和测温提供了技术依据

## ■ 温度的热力学定义

处于同一**热平衡**状态的各个热力系，必定有某一宏观特征彼此相同，用于描述此宏观特征的物理量——**温度**。

**温度**是确定一个系统是否与其它系统处于**热平衡**的物理量（**热平衡的判据**）。

# 温标 Temperature scale

在 ITS-90 中，温标分为四个范围。

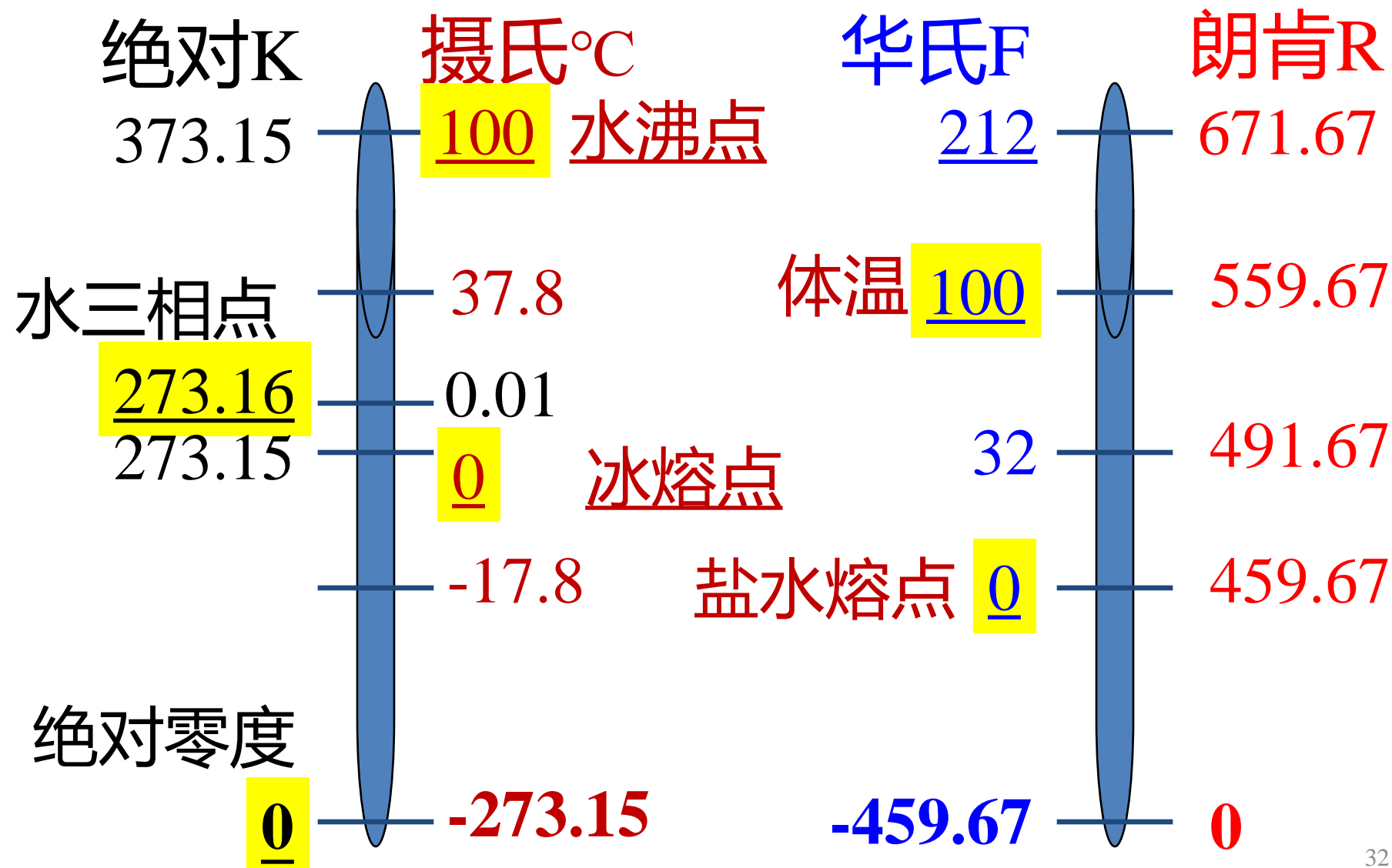
- 在 0.65 到 5 K 的范围内，温度标度是**根据  $^3\text{He}$  和  $^4\text{He}$  的蒸气压-温度关系**定义的
- 在 3 到 24.5561 K（氦的三相点）之间，它是通过正确校准的**氦气温度计**来定义的
- 从 13.8033 K（氢的三相点）到 1234.93 K（银的凝固点），它是通过**铂电阻温度计**在指定一组定义固定点处校准的
- 高于 1234.93 K，它是根据**普朗克辐射定律和合适的定义固定点**（例如金的凝固点 (1337.33 K)）定义的

2018年度国家科学技术进步一等奖：温度单位重大变革关键技术研究，段远源（清华大学）

# 温标 Temperature scale

- **热力学温标（绝对温标） Kelvin scale**  
Britisher, L. Kelvin (William Thomson) , 1824-1907
- **摄氏温标 Celsius scale (Swedish, A. Celsius, 1701-1744)**
- **华氏温标 Fahrenheit scale (Dutch, G. Fahrenheit, 1686-1736)**
- **朗肯温标 Rankine scale (W. Rankine, 1820-1872)**

# ■ 常用温标





## ■ 温标的换算

$$T[K] = t[^{\circ}C] + 273.15$$

$$t[^{\circ}C] = \frac{5}{9} (t[F] - 32)$$

$$t[F] = t[R] - 459.67$$

# 温度测量

温度计

物质 (水银, 铂电阻)  
特性 (体积膨胀, 阻值)

基准点 Reference state  
刻度 Scale

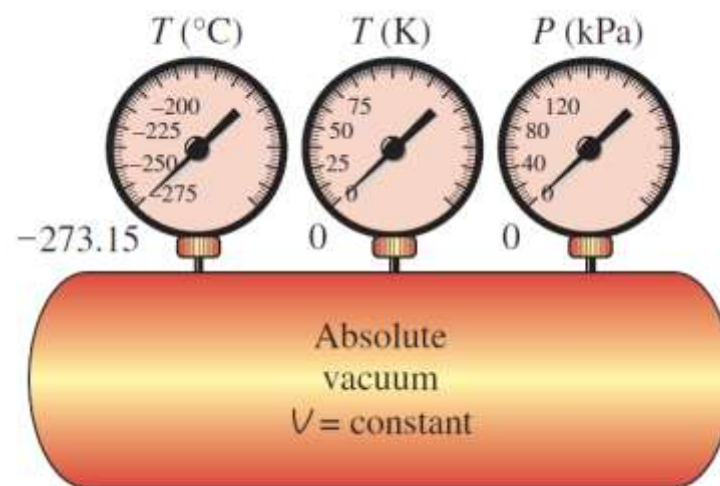
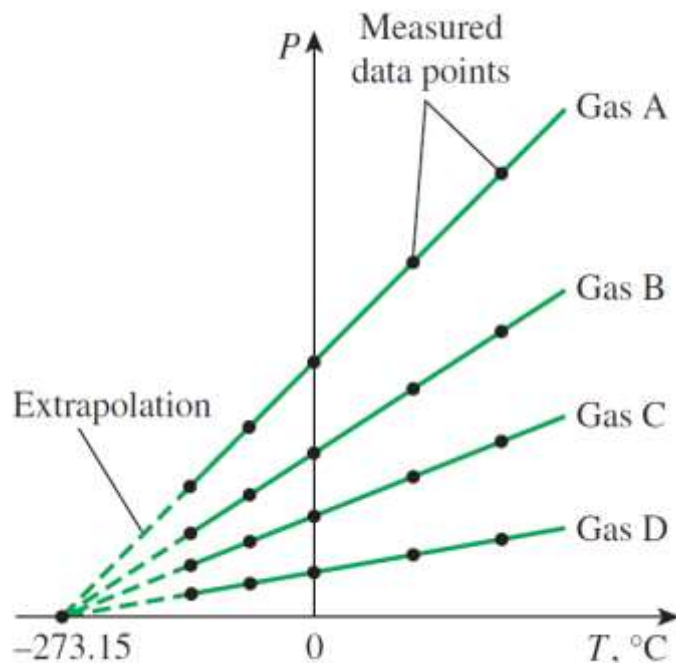
温标 Temperature scale



# 温度测量装置

- **水银温度计 Thermometer, 酒精温度计**
- **热电偶 Thermocouple**
- **热电阻 Resistance temperature detector**
- **辐射温度计 Radiation thermometer**
- **激光全息干涉仪**
- **CARS (相干反斯托克斯喇曼光谱散射法)**
- **声学测温**

# 气体温度计



理想气体的定容过程

$$p = p_0(1 + t/273.15)$$

其中 $p_0$ 是 $0^{\circ}\text{C}$ 时气体的压强

### 3.比体积(容) $v$ (specific volume)

$$v = \frac{V}{m} \quad [\text{m}^3/\text{kg}]$$

物理意义：工质聚集的疏密程度

物理上常用密度 density,  $\rho$   $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$$v = \frac{1}{\rho}$$

# 比体积、密度、比密度

A diagram illustrating the relationship between mass, volume, density, and specific volume. At the top, a white oval contains the values  $V = 12 \text{ m}^3$  and  $m = 3 \text{ kg}$ . A large white arrow points down from this oval to the calculated density  $\rho = 0.25 \text{ kg/m}^3$ . Below the density, the specific volume is calculated as  $v = \frac{1}{\rho} = 4 \text{ m}^3/\text{kg}$ . The entire diagram is set against a black background within a window-like frame.

比密度  $SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$

Specific gravities of some substances at 0°C

Substance	SG
Water	1.0
Blood	1.05
Seawater	1.025
Gasoline	0.7
Ethyl alcohol	0.79
Mercury	13.6
Wood	0.3–0.9
Gold	19.2
Bones	1.7–2.0
Ice	0.92
Air (at 1 atm)	0.0013

## 二、平衡状态

### 1. 平衡状态定义

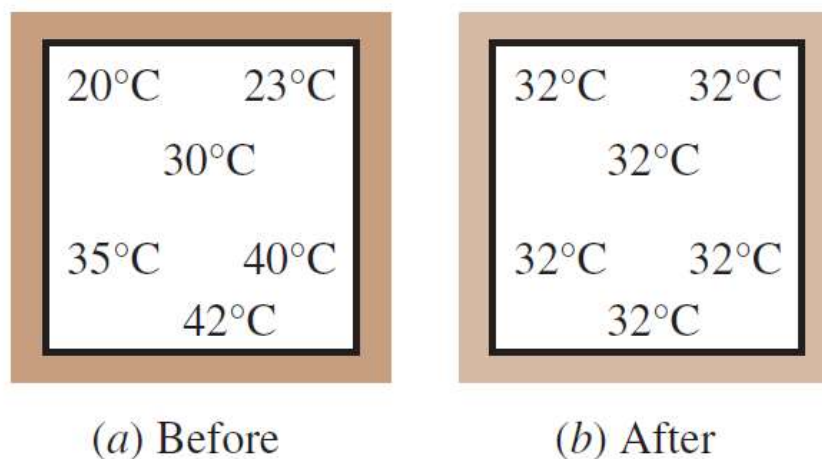
在**不受外界影响**的条件下（重力场除外），如果系统的状态参数不随时间变化，则该系统处于平衡状态。

{ 温差 — 热不平衡势  
压差 — 力不平衡势  
化学反应 — 化学不平衡势

**热力学平衡的条件：  
热平衡、力平衡、  
化学平衡**

**平衡的本质：不存在不平衡势**

# 平衡过程与平衡态

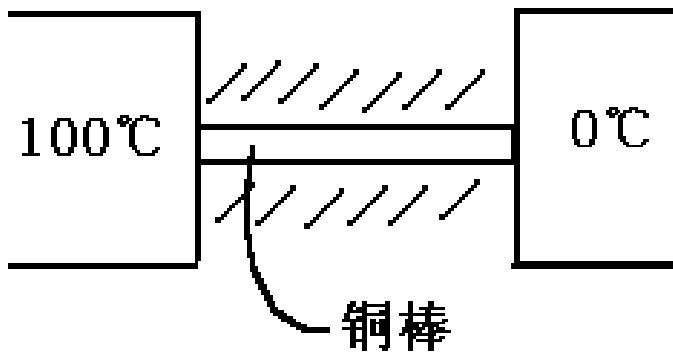
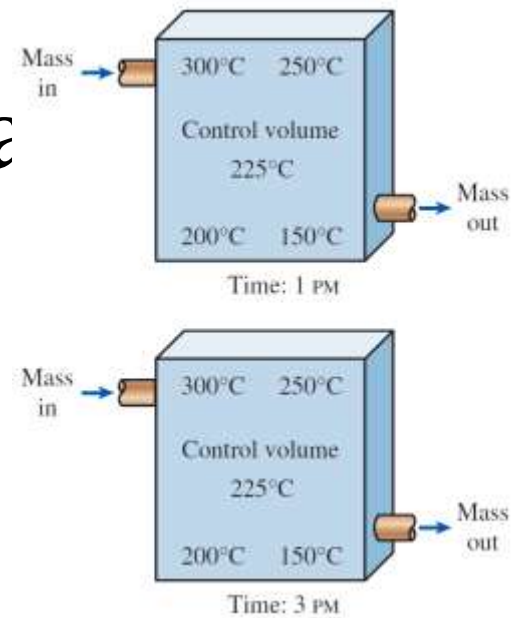


**热力学平衡的条件：热平衡、力平衡、化学平衡**



## 2. 平衡Equilibrium与稳定Steady

稳定：参数不随时间变化



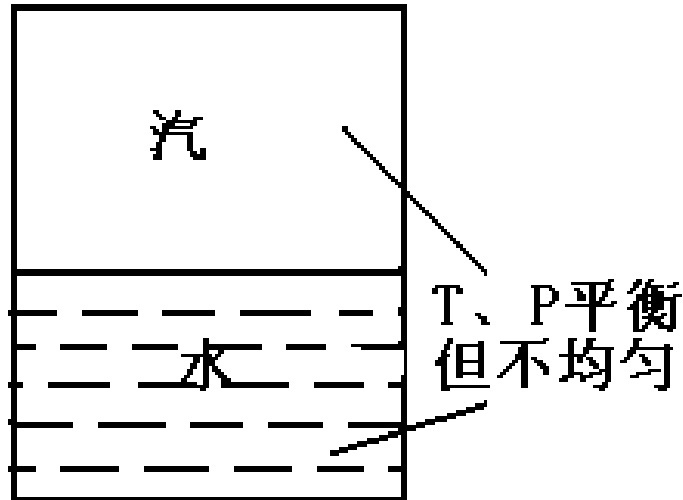
**稳定**但存在**不平衡势差**

**去掉**外界影响，则**状态变化**

**稳定不一定平衡，但平衡一定稳定**

如果选择铜棒、热源和冷源作为系统呢？

### 3.平衡Equilibrium与均匀Even



**平衡：**时间上

**均匀：**空间上

**平衡不一定均匀，单相平衡态则一定是均匀的**

## 4. 平衡态的特点

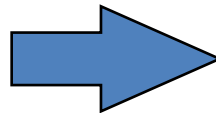
- (1) 平衡是指宏观性质不随时间变化，微观性质随时间的变化是允许的；
- (2) 数学描述不涉及时间变量；
- (3) 系统处于平衡态，才有确定的状态参数。

## 5. 为什么引入平衡概念？

如果**系统平衡**，可用**一组确切**的参数（压力、温度）描述。

平衡状态是**死态**，没有能量交换

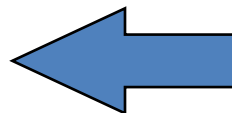
能量交换



状态变化



如何描述

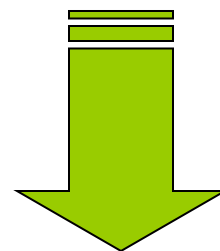


破坏平衡

# §1-3 状态方程、坐标图

**平衡状态**可用**一组**状态参数描述其状态

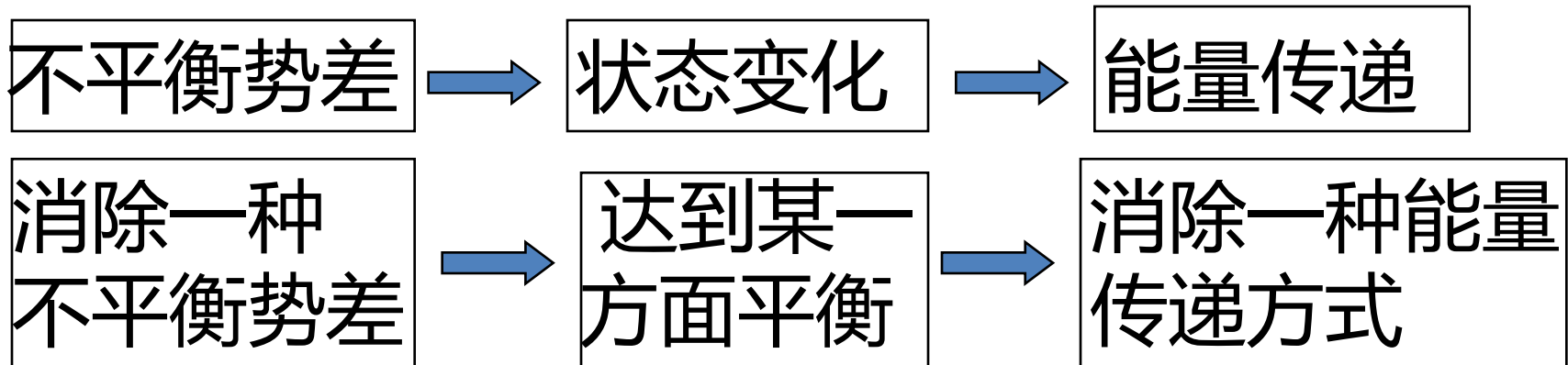
想确切描述某个热力系，是否  
需要所有状态参数？



**状态公理：**对组元一定的闭口系，  
独立状态参数个数  $N=n+1$

# 一、状态公理State postulate

闭口系：



**而不平衡势差彼此独立**

∴ 独立参数数目  $N$  = 不平衡势差数

= 能量转换方式的数目

= 各种功的方式 + 热量 =  $n + 1$

$n$  —— 容积变化功、电功、拉伸功、表面张力功等

# 一、状态公理State postulate

最重要的系统：**简单可压缩系统**

只交换**热量**和**一种**准静态的**容积变化功**



① **热量**

② **容积变化功**

**简单可压缩系统：**  $N = n + 1 = 2$

**绝热简单可压缩系统？**

## 二、状态方程Equation of state

状态方程——基本状态参数  $(p, v, T)$  之间的关系

$$f(p, T, v) = 0$$

$$v = f(p, T)$$

$$p = f(v, T)$$

$$T = f(p, v)$$



# 状态方程的具体形式

状态方程的具体形式取决于工质的性质

## 理想气体的状态方程

$$p\nu = R_g T$$

$$pV = mR_g T$$

$R_g$  气体常数, J/(kg K)

实际工质的状态方程?

# R134a的维里型状态方程

$$\begin{aligned} p_r = & T_r \rho_r / Z_c + (a_1 + a_2 / T_r + a_3 / T_r^2 + a_4 / T_r^4) \rho_r^2 \\ & + (a_5 + a_6 / T_r + a_7 / T_r^2 + a_8 / T_r^4 + a_9 / T_r^5 + a_{10} / T_r^6 + a_{11} / T_r^7) \rho_r^3 \\ & + (a_{12} + a_{13} / T_r + a_{14} / T_r^2 + a_{15} / T_r^3 + a_{16} / T_r^4 + a_{17} / T_r^5) \rho_r^4 \\ & + (a_{18} + a_{19} / T_r + a_{20} / T_r^2 + a_{21} / T_r^3) \rho_r^5 \\ & + (a_{22} + a_{23} / T_r + a_{24} / T_r^2 + a_{25} / T_r^3 + a_{26} / T_r^4) \rho_r^6 \\ & + (a_{27} / T_r + a_{28} / T_r^2 + a_{29} / T_r^3 + a_{30} / T_r^4) \rho_r^7 \\ & + (a_{31} + a_{32} / T_r + a_{33} / T_r^2) \rho_r^8 + (a_{34} + a_{35} / T_r^2 + a_{36} / T_r^3) \rho_r^9 \end{aligned}$$

$$180\text{K} < T < 480\text{K} \quad 0 < p < 70\text{MPa} \quad 0 < \rho < 1600\text{kg/m}^3$$

# P-R方程

1976年Peng和Robinson提出了描述流体状态的2参数方程，即P-R方程

The Peng–Robinson (PR) equation of state was used here because of its wide range of validity and ease of implementation :

$$p = \frac{RT}{(V_m - b)} - \frac{a}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)}$$

where  $R$  is the universal gas constant and  $V_m$  is the specific molar volume ( $\text{m}^3$  per kilomole). The parameters  $a$  and  $b$  are

$$a = a(T_c)\alpha(T)$$

$$b = 0.0778RT_c/p_c$$

$$a(T_c) = 0.45724R^2T_c^2/p_c$$

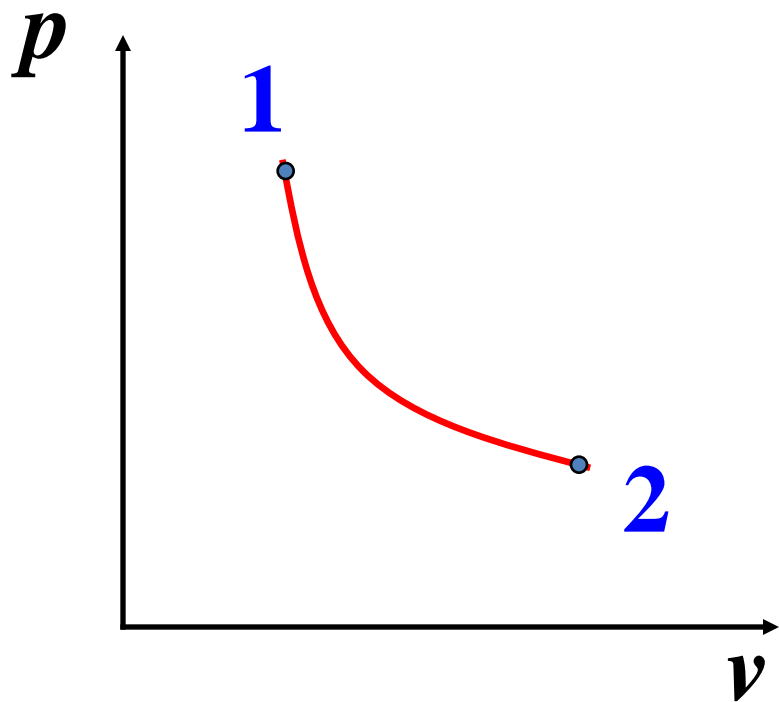
$$\alpha(T) = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

where  $T_c$  is the critical temperature,  $p_c$  is the critical pressure,  $T_r$  is equal to  $T/T_c$ , and  $\omega$  is the acentric factor.

### 三、坐标图diagram

#### 简单可压缩系统 $N=2$ ，平面坐标图

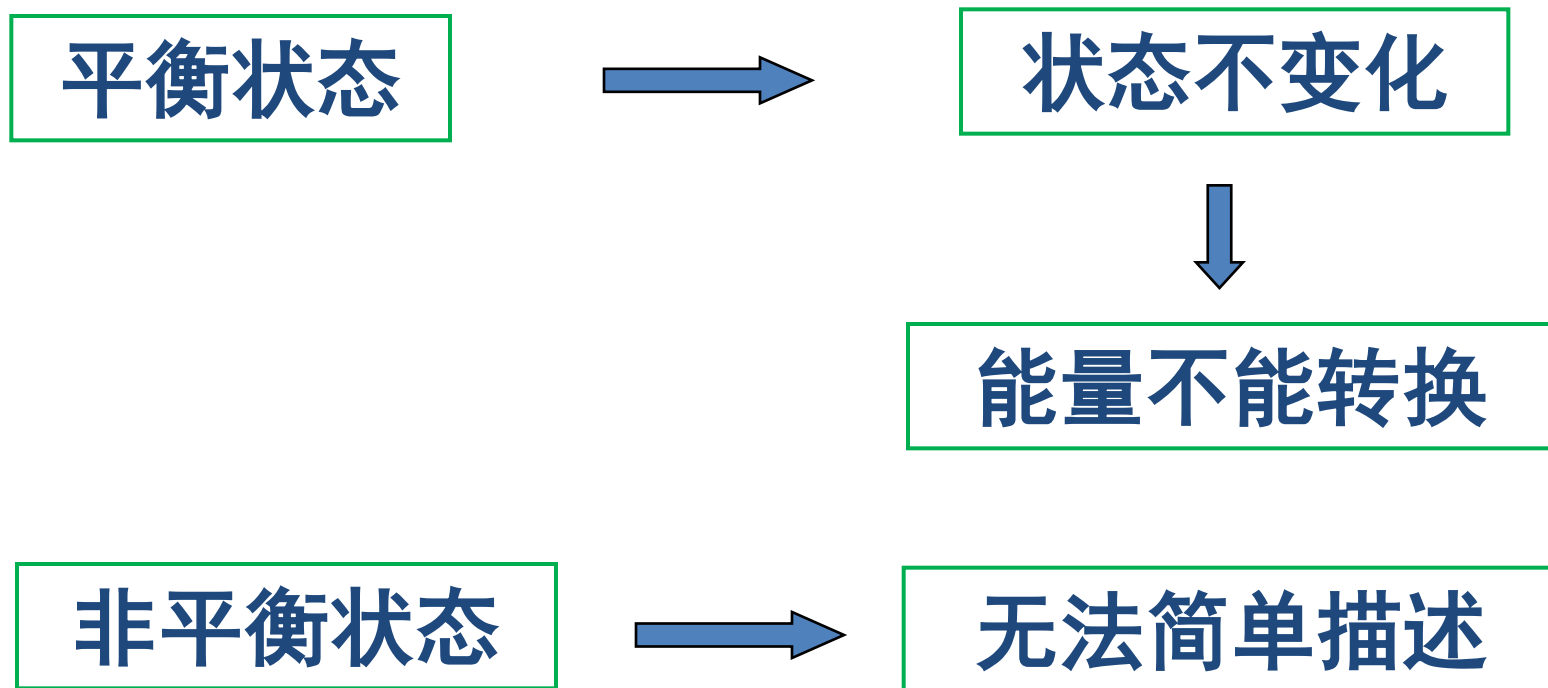


- 1) 系统任何平衡态可表示在坐标图上
- 2) 过程线中任意一点为平衡态
- 3) 不平衡态无法在图上表示

常见 $p-v$ 图和 $T-s$ 图

# § 1-4 准平衡过程和可逆过程

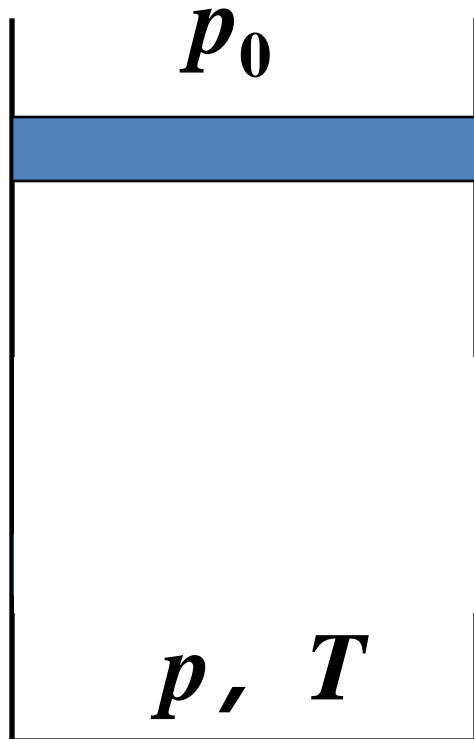
## 一、准平衡过程



热力学引入准平衡（准静态）过程

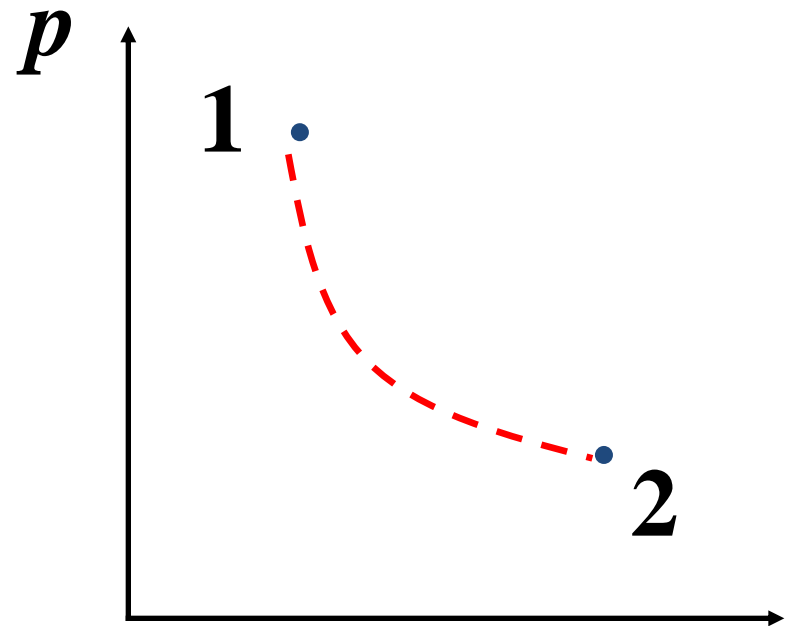
# 一般过程 Process

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + \text{重物} \\ T_1 = T_0 \end{cases}$$



突然去掉重物

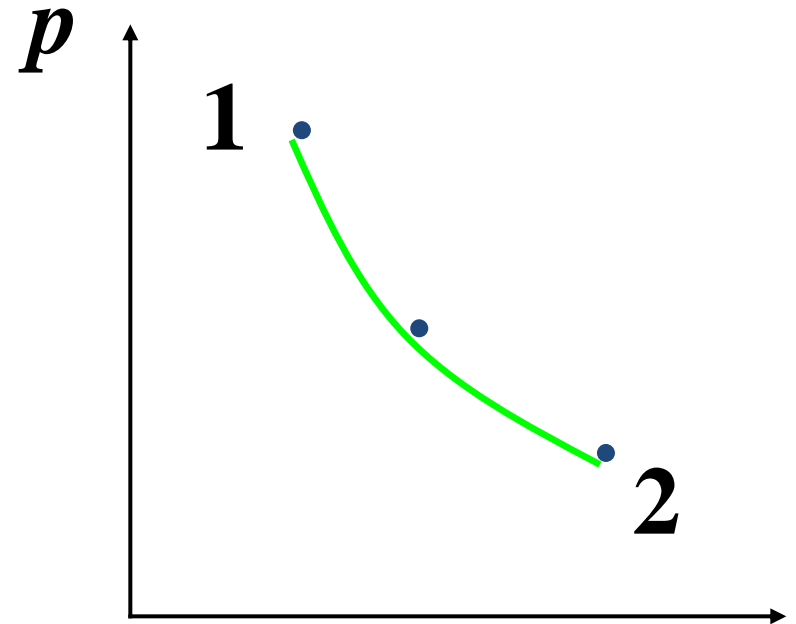
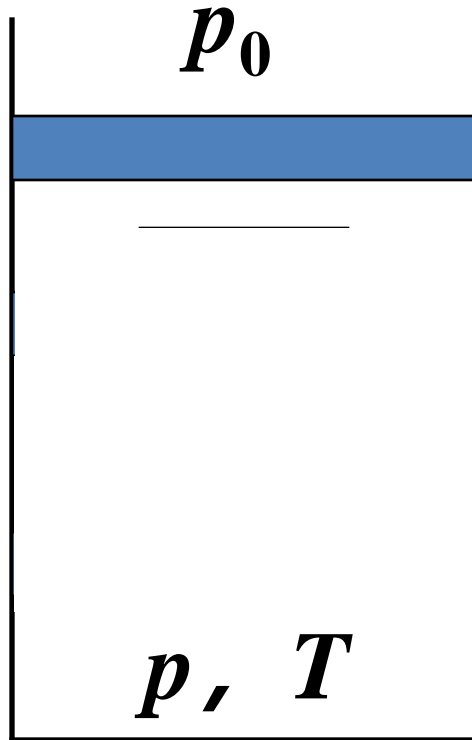
最终  $\begin{cases} p_2 = p_0 \\ T_2 = T_0 \end{cases}$



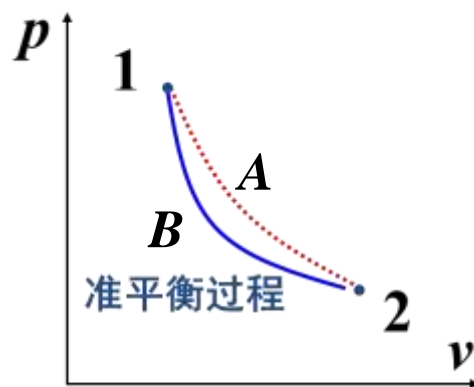
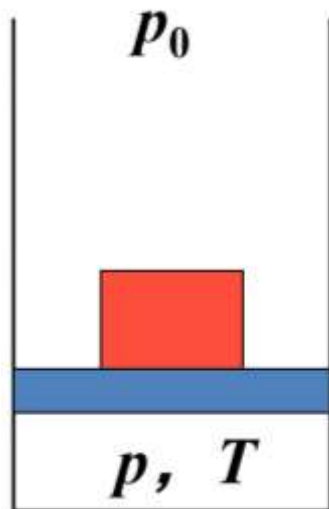
# 准平衡过程 Quasi-equilibrium process

$$\begin{cases} p_1 = p_0 + \text{重物} \\ T_1 = T_0 \end{cases}$$

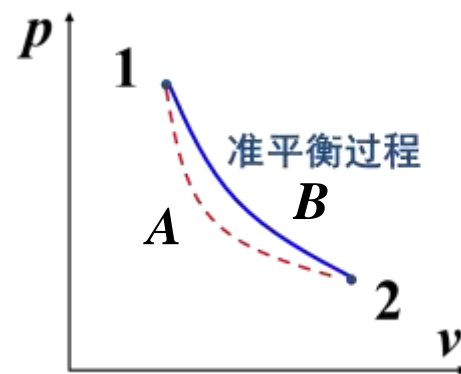
假如重物有无限多层  
每次只去掉无限薄一层  
系统随时接近于平衡态



一个简单可压缩系统，过程A：突然拿走重物；  
过程B：准平衡过程。请问下面哪个图正确。



A



B

提交



# 准平衡有实际意义吗？

既是平衡，又是变化

既可用状态参数描述，又可进行热功转换

**疑问：**理论上**准平衡应无限缓慢**，工程上怎样处理？

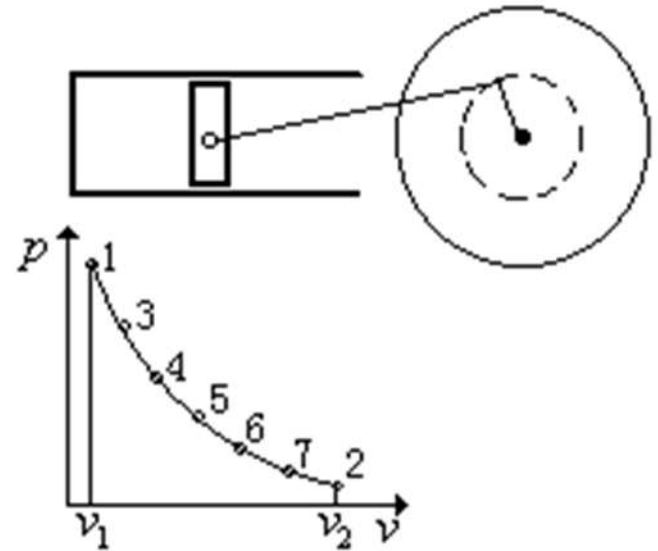
**破坏平衡所需时间**  
**(外部作用时间)**

**>>**

**恢复平衡所需时间**  
**(弛豫时间)**

# 准平衡过程的工程应用

例：活塞式内燃机 2000转/分  
曲柄 2冲程/转，  
0.15米/冲程



活塞运动速度= $2000 \times 2 \times 0.15 / 60 = 10$  m/s

压力波恢复平衡速度（声速） 350 m/s

一般的工程过程都可认为是准平衡过程  
具体工程问题具体分析。 “突然” “缓慢”

# 准平衡过程的容积变化功

以汽缸中  $m$  kg 工质为系统

初始:  $p \times A = p_{\text{外}} \times A + f$

如果  $p_{\text{外}}$  微小  $\downarrow$

可视为准平衡过程

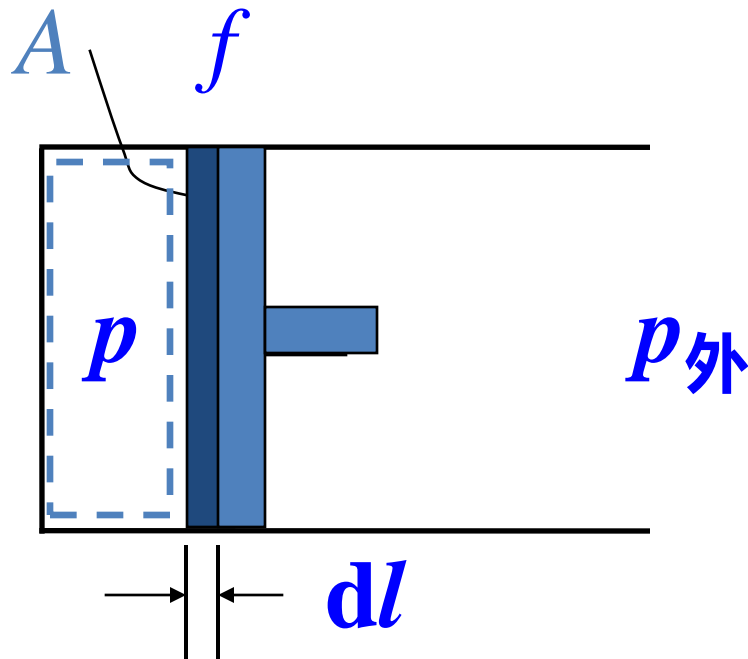
$dl$  很小, 近似认为  $p$  不变

$m$  kg 工质发生容积变化  
对外界作的功

$$\delta W = p \times A \times dl = p dV$$

1 kg 工质

$$\delta w = p dv$$



# 准平衡过程的容积变化功

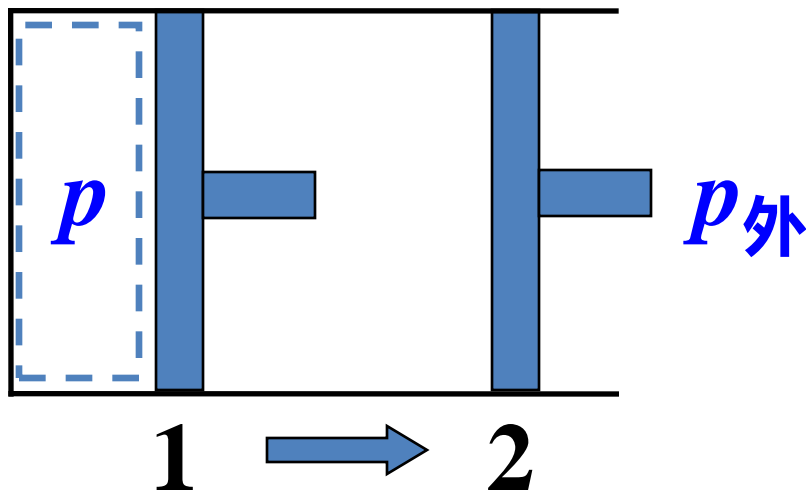
$m$ kg工质:  $\delta W = p dV$

$$W = \int_1^2 p dV$$

1kg工质:  $\delta w = p dv$

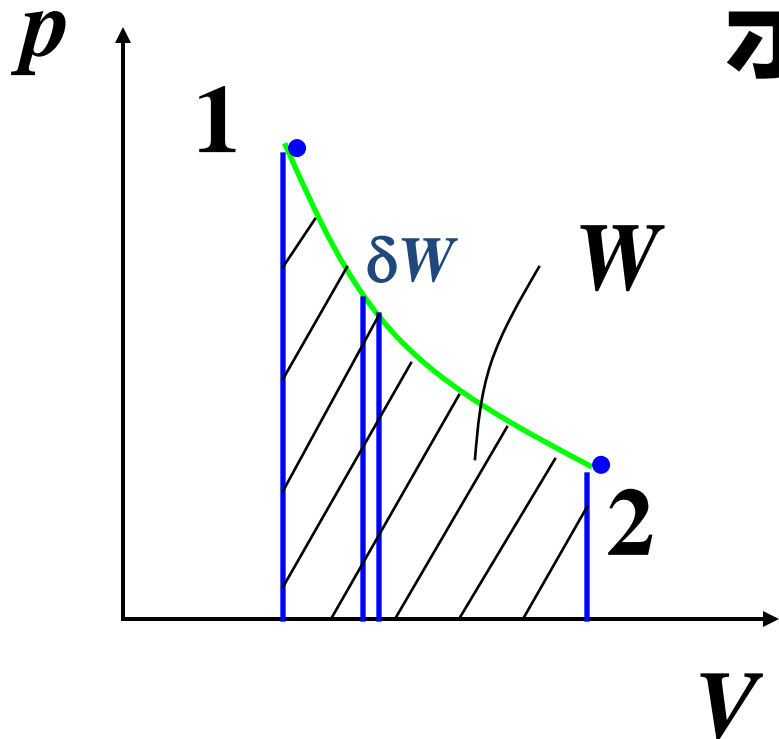
$$w = \int_1^2 p dv$$

疑问：上述公式是否适用于等压过程？



注意：  
上式仅适用于  
准平衡过程

# 示功图



**$m$  kg工质:**

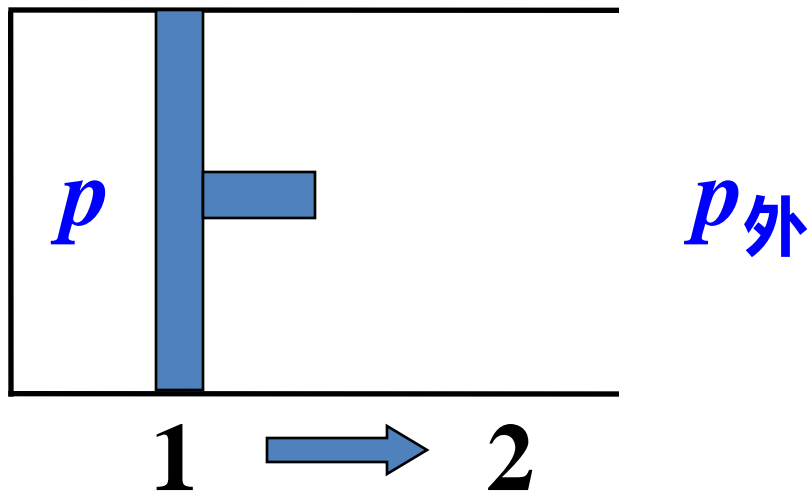
$$\delta W = p dV$$

$$W = \int_1^2 p dV$$

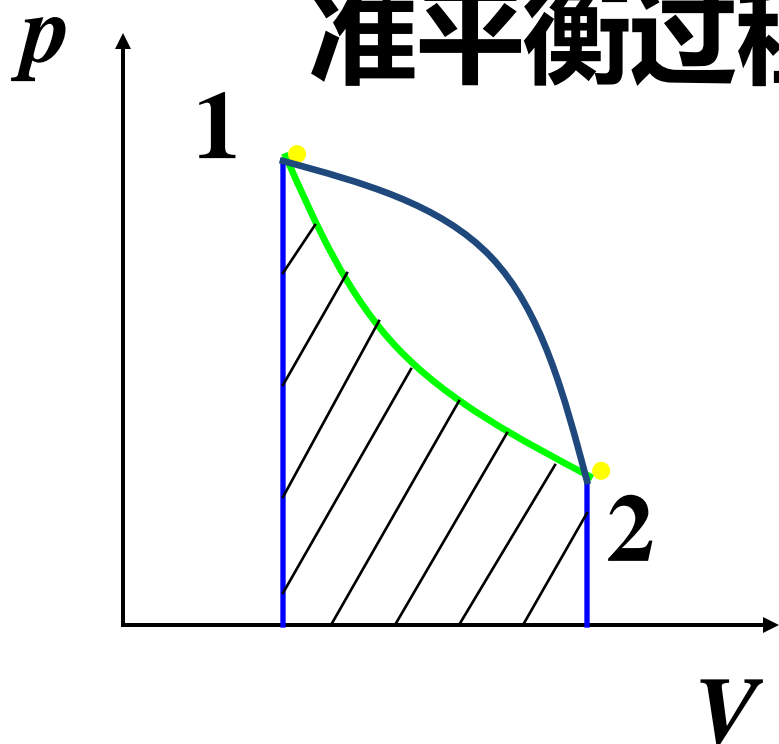
**1 kg工质:**

$$\delta w = p dv$$

$$w = \int_1^2 p dv$$



# 准平衡过程容积变化功的说明



1) 单位为  $[\text{kJ}]$  或  $[\text{kJ/kg}]$

2)  $p$ - $V$  图上用**面积**表示

3) 功的大小与路径有关,  
**过程量** Path function

4) 统一规定:  $dV > 0$ , 膨胀 对外做功 (**正**)  
 $dV < 0$ , 压缩 外内做功 (**负**)

5) 适于**准静态下**的**任何**工质 (一般为流体)

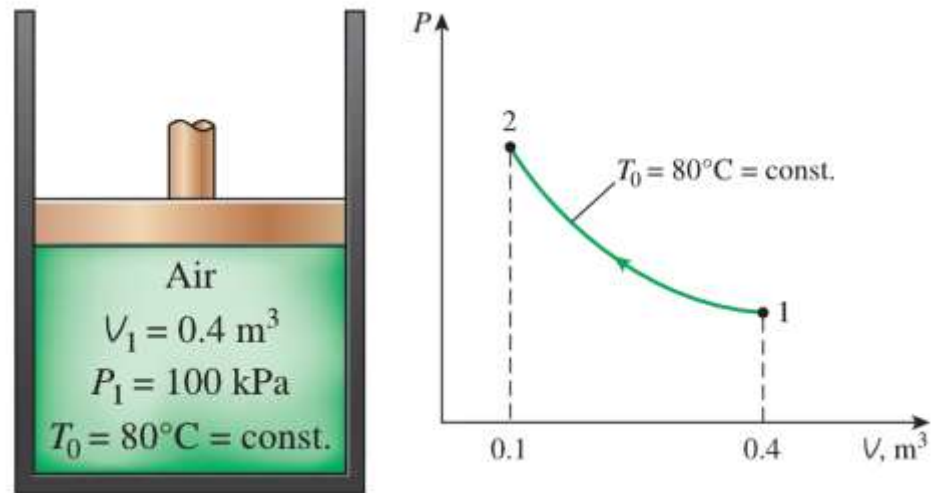
6) 外力无限制, 功的表达式只是系统内部参数

7) 有无 $f$ , 只影响系统功与外界功的大小差别

A piston–cylinder device initially contains  $0.4 \text{ m}^3$  of air at  $100 \text{ kPa}$  and  $80^\circ\text{C}$ . The air is now compressed to  $0.1 \text{ m}^3$  in such a way that the temperature inside the cylinder remains constant. Determine the work done during this process.

- A -45.5 kJ
- B -55.5 kJ
- C -56.6 kJ
- D -66.6 kJ

$$pV = mR_g T$$

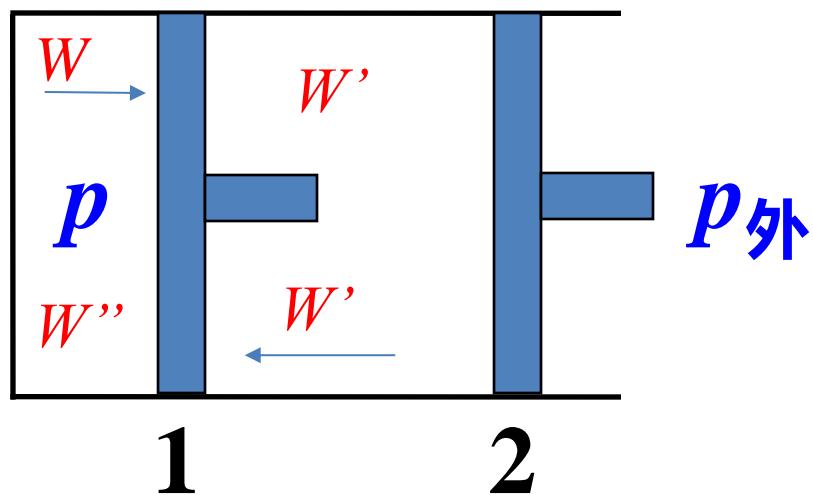


# 摩擦损失Friction Loss的影响

若有 $f$ 存在，就存在损失

系统对外做功，外界得到的功 $W' < W$

若外界将得到的功 $W'$ 再返还给系统，系统得到的功 $W'' < W'$



则外界、活塞、系统不能同时恢复原态。

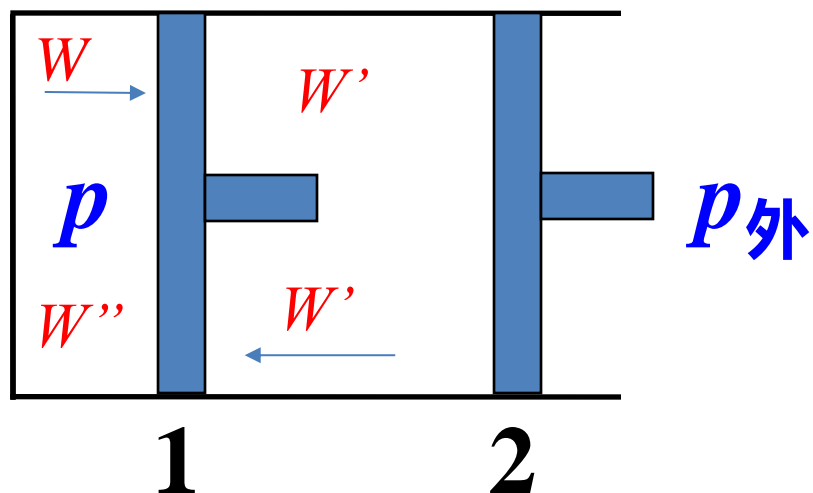


# 摩擦损失Friction Loss的影响

若  $f = 0$

系统对外做功  $W$ ，外界得到的功  $W' = W$

若外界将得到的功  $W'$  再返还给系统  
则**外界、活塞、系统**同时恢复原态。



## 二、可逆过程 reversible process

### 1. 定义：

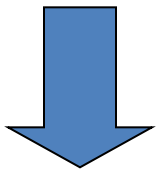
系统经历某一过程后，如果能使**系统与外界同时**恢复到初始状态，而不留下任何痕迹，则此过程为**可逆过程**。

例：弹性小球与刚性地面的碰撞；无摩擦的单摆

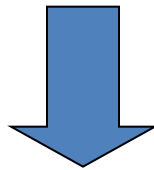
可逆过程只是指可能性，并不是指必须要回到初态的过程。

## 2. 可逆过程的实现

$$\text{准平衡过程} + \text{无耗散效应} = \text{可逆过程}$$



无不平衡势差



耗散效应

不可逆根源

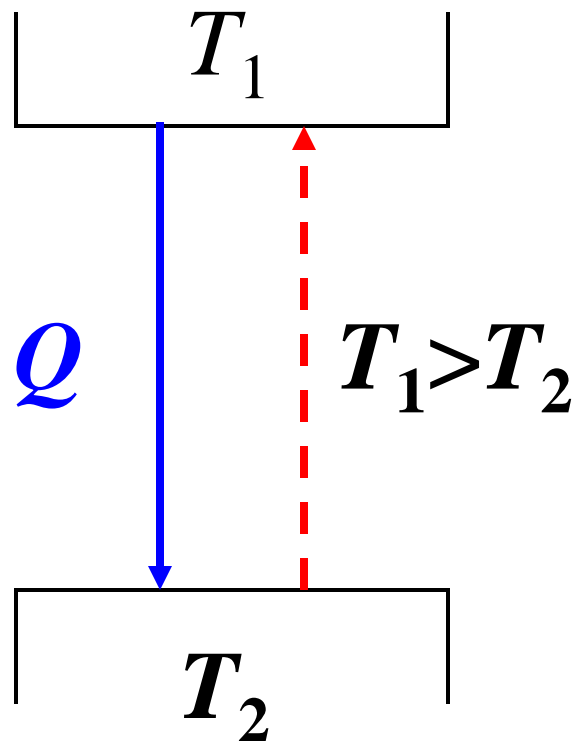
不平衡势差

耗散效应

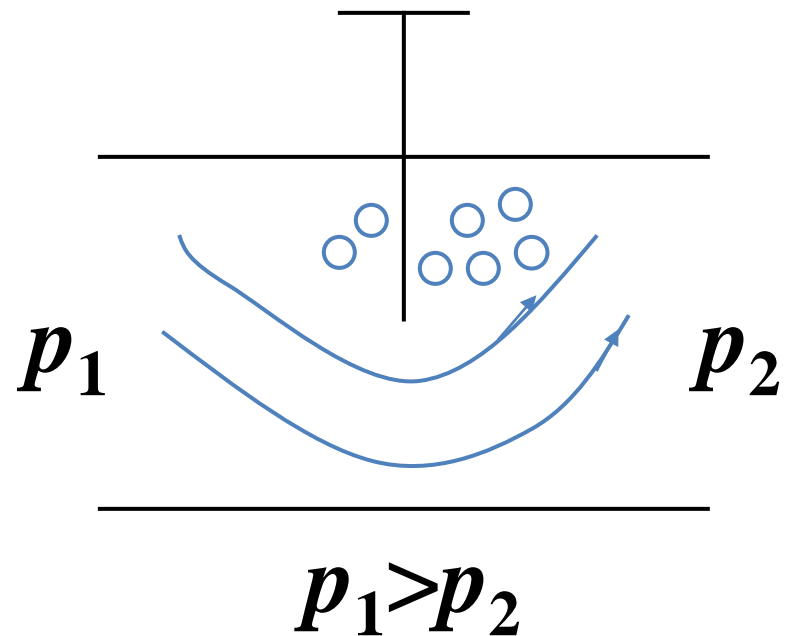
通过摩擦使功  
变热的效应  
(摩阻, 电阻,  
非弹性变形,  
磁阻等)

### 3.常见的不可逆过程

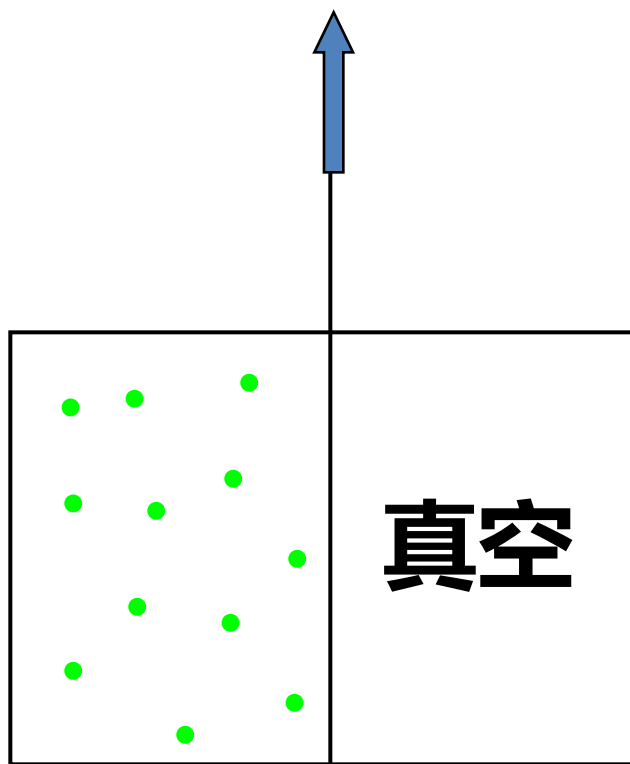
不等温传热  
Heat transfer



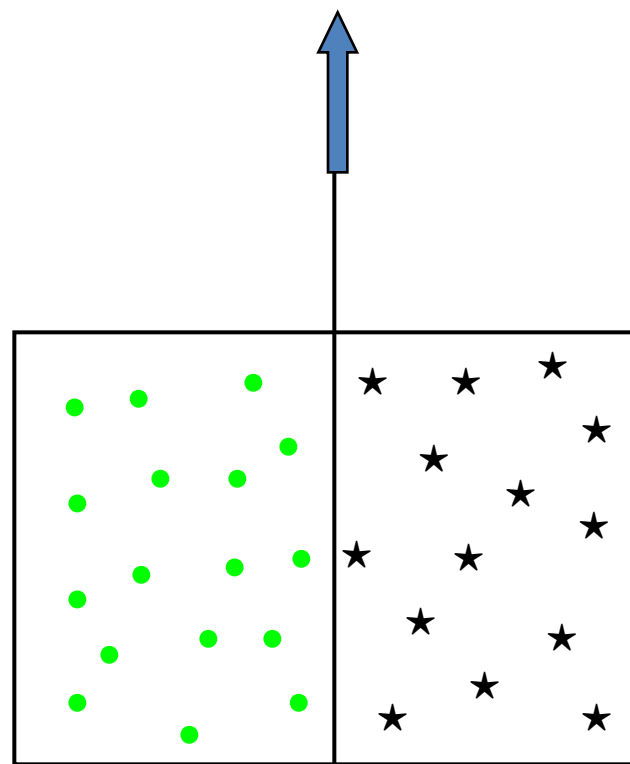
节流过程  
(阀门) Throttler



# 自由膨胀 Unrestrained expansion



# 混合过程 Mixing process



自发恢复到初始状态

# 讨论

1. 准静态过程只要求由一系列平衡态组成，并不关心反向进行时对外界的影响，因而不排斥耗散。**可逆过程不允许有耗散。**
2. 不可逆因素分类：内部不可逆，耗散；外部不可逆，内外间势差（温差、压差）。至少有一种不可逆因素的过程即为不可逆过程。

## 4. 引入可逆过程的意义

- ◆ 准平衡过程是实际过程的**理想化**过程，但并非**最优**过程，可逆过程是**最优**过程。
- ◆ 可逆过程的功与热**完全**可用**系统内**工质的**状态参数**表达，可不考虑系统与外界复杂关系，易分析。
- ◆ 实际过程不是可逆过程，但为了研究方便，先按**理想**情况（**可逆过程**）处理，用系统参数加以分析，然后考虑不可逆因素**修正**。

# §1-5 功量与热量

## 一、功量

1. 功的力学定义:

**力** × 在力方向上的**位移**

$$\delta w = F dx \quad w = \int F dx$$



## 2. 功的热力学定义

□ 当热力系与外界发生能量传递时，如果对外界的**唯一效果可归结为取起重物**，此即为热力系对外作功。

□ 功是系统与外界相互作用的一种方式，在**力**的推动下，通过**有序**运动方式传递的能量。

# 热力学最常见的功——容积变化功

$$\delta w = p dv$$

$$w = \int p dv$$

说明： a. 适用**准静态过程、可逆过程**。

b. 体积功是**过程量**。

c. 系统对外界做功为正  $w > 0$

外界对系统做功为负  $w < 0$

其他准静态功：

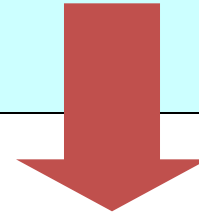
拉伸功，表面张力功，电功等。

## 二、热量与熵

热量定义：**热量**是热力系与外界相互作用的另一种方式，在**温差**的推动下，以微观**无序**运动方式传递的**能量**。

# 热量如何表达？

**热量是否可以用类似于功的式子表示？**



**引入“熵”**



# 热量与容积变化功

能量传递方式

容积变化功

传热量

性质

过程量

过程量

推动力

压力  $p$

温度  $T$

标志

$dV$ ,  $dv$

$dS$ ,  $ds$

公式

$$\delta w = p dv$$

$$\delta q = T ds$$

$$w = \int p dv$$

$$q = \int T ds$$

条件

准平衡或可逆

可逆

# 熵 (Entropy) 的定义

## 熵的简单引入

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad \text{广延量 [kJ/K]}$$

$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} \quad \text{比参数 [kJ/kg.K]}$$

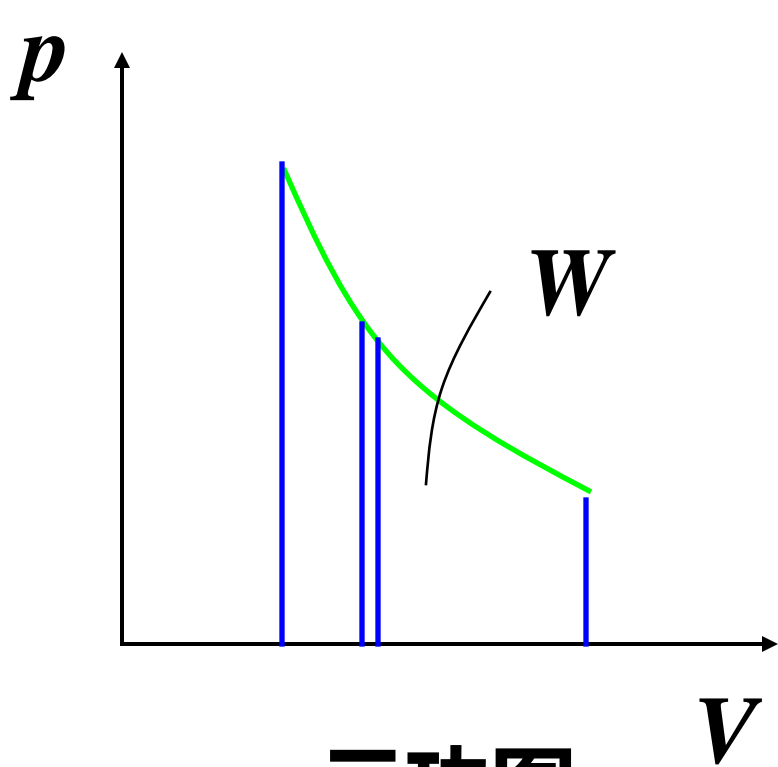
ds: 可逆过程  $\delta q_{rev}$  除以传热时的  $T$  所得的商

《人物志·刘仙洲》：清华大学刘仙洲  
教授创造“熵” (1934年)

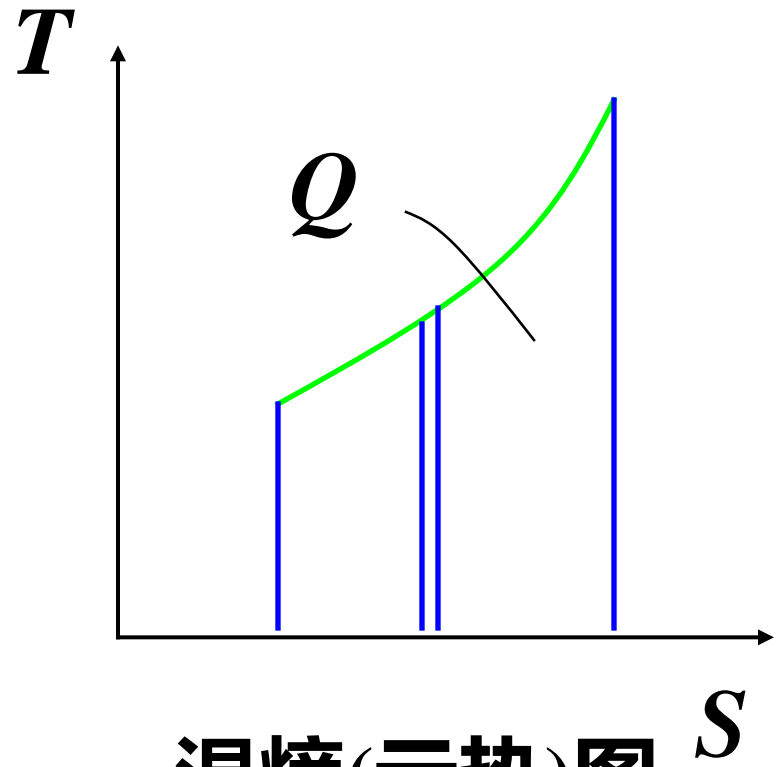
# 熵的说明

- 1、熵是状态参数
- 2、熵的物理意义：熵体现了可逆过程传热的大小与方向
- 3、符号规定  
系统**吸热**时为**正**  $Q > 0$        $dS > 0$   
系统**放热**时为**负**  $Q < 0$        $dS < 0$
- 4、用途：判断热量方向  
计算可逆过程的传热量

# 示功图与示热图



$$w = \int p dv$$



$$q = \int T ds$$



# 第一章 小结

① 热力系——平衡状态与状态参数——  
准平衡——可逆

② 过程量 ( $Q$ 、 $W$ ) 与状态参数

③ 容积变化功、热量、熵

④  $p$ - $V$ 图、 $T$ - $S$ 图

