

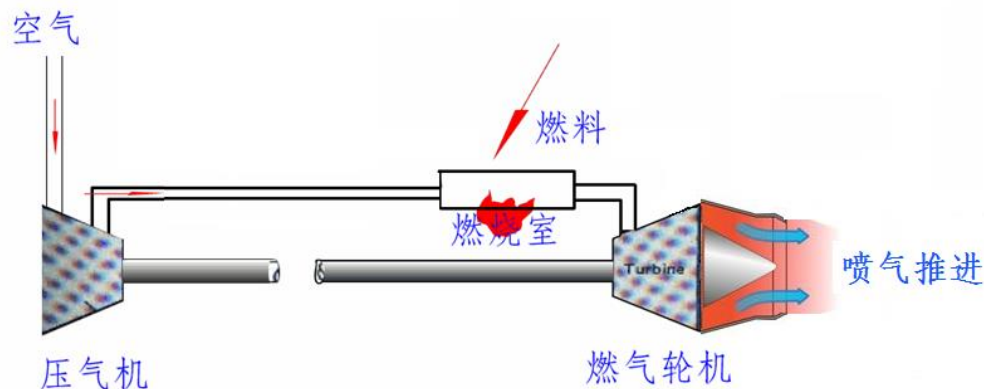
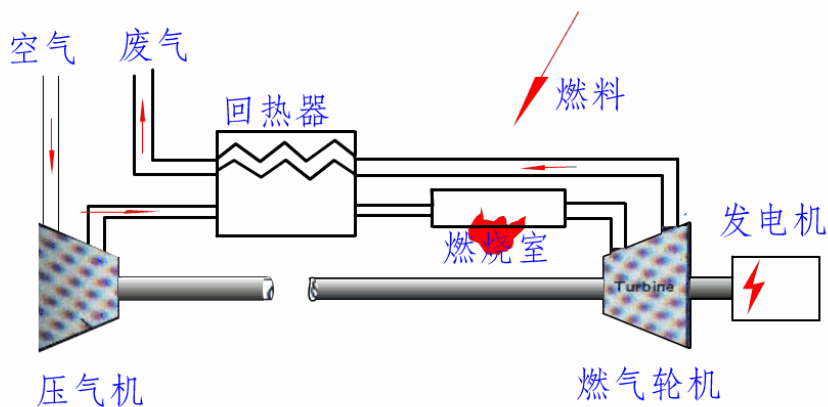
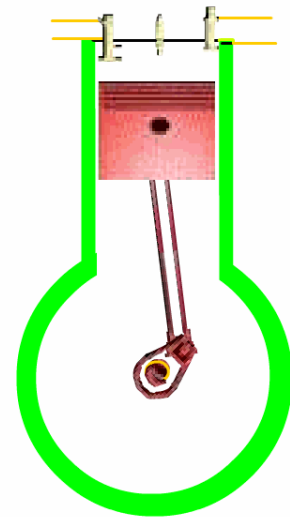
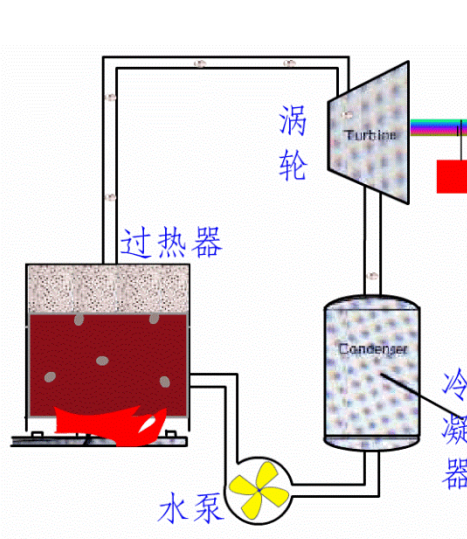
# 工程热力学

武俊梅



## 热能转化为机械能过程的共性——回顾

- 1、有分析对象
- 2、有载能物质——工质
- 3、工质状态要发生变化  
——完成热力过程
- 4、持续转换需要完成热力循环
- 5、关注转换效率和特性  
——要进行分析、计算



# 第一章 基本概念

- ◆ 1-1 热力系统 .....
- ◆ 1-2 工质的热力学状态及其基本状态参数 .....
- ◆ 1-3 平衡状态、状态方程式、坐标图 .....
- ◆ 1-4 工质的状态变化过程 .....
- ◆ 1-5 过程的功和热 .....
- ◆ 1-6 热力循环 .....

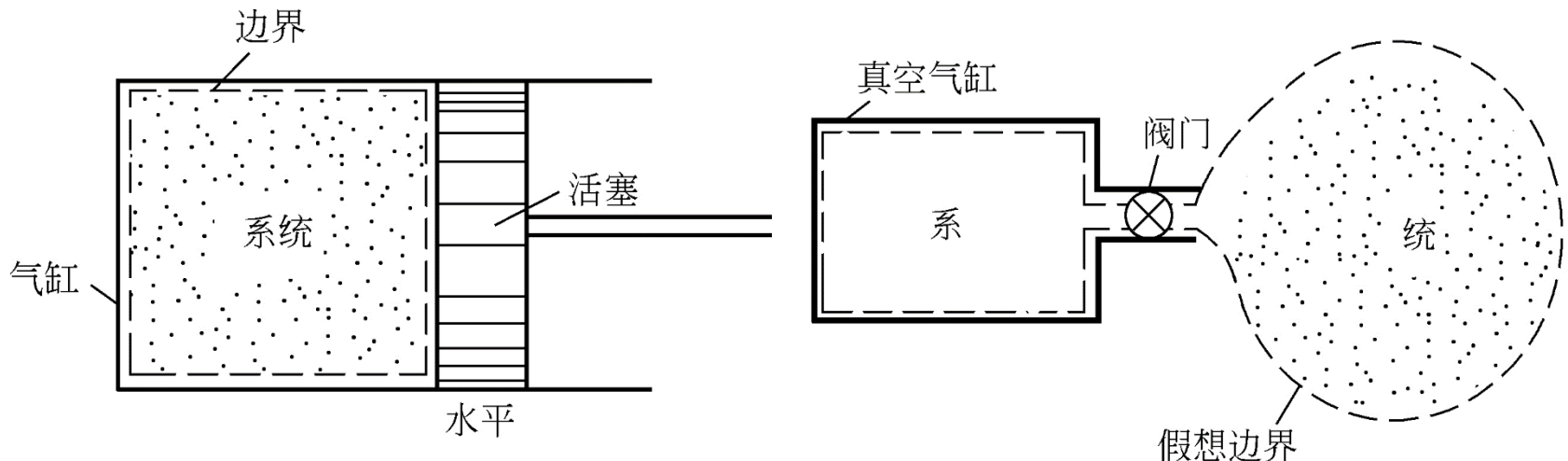


## 1-1 热力系统 (Thermodynamic Systems)

### 一、系统、边界与外界

1. 系统 (Systems)：热力学中人为分隔出来的研究对象。  
是研究一切能量/物质传递或转化的前提。

选取原则：依据研究任务而定，**可大可小，大要有边，小要有界。**



**系统内一定包含有工质，所以工质和系统常混用。**

2. 外界 (Surroundings) : 边界以外与系统相互作用的所有物体的总称, 或称为环境。

3. 边界 (Boundaries) : 分隔系统与外界的分界面

特征: 真假之分

(a) 气缸内壁和活塞内壁是真实的界面

(b) 进口截面和出口截面是假想的界面

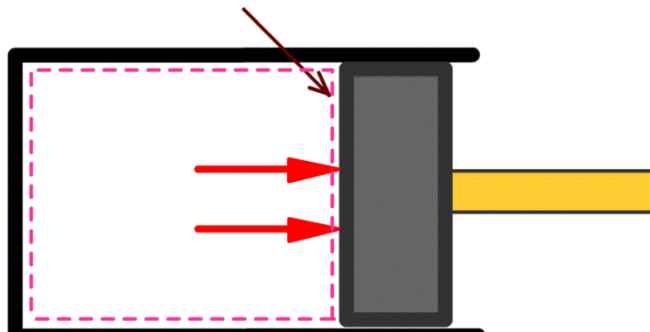
动静之别

当 (a) 活塞移动时界面发生变化

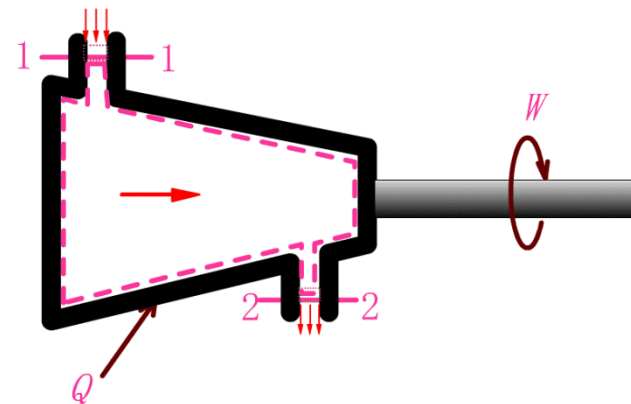
能质可传

热量、功量、质量可以穿过界面

真实的  
运动的  
封闭的



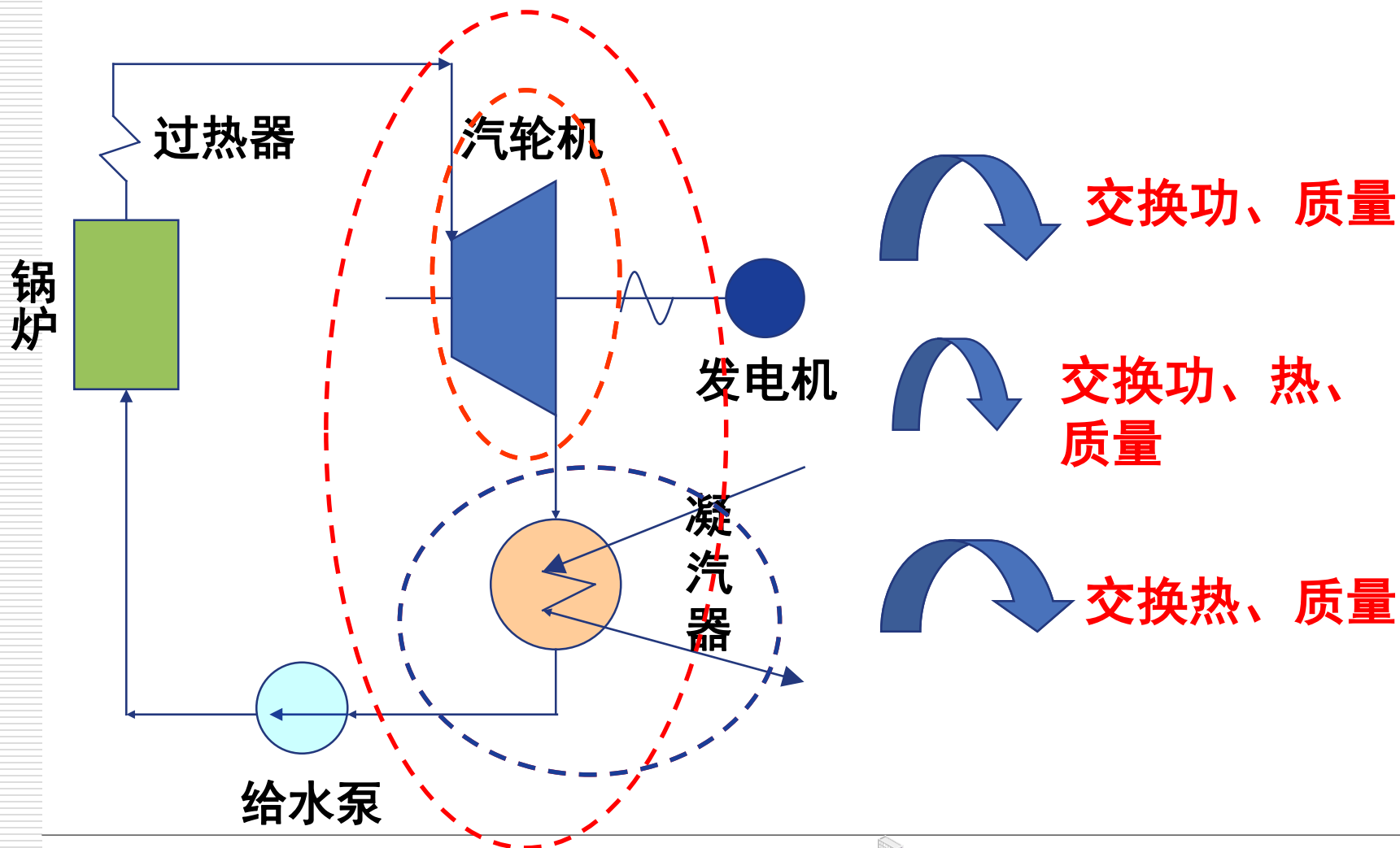
(a)



(b)



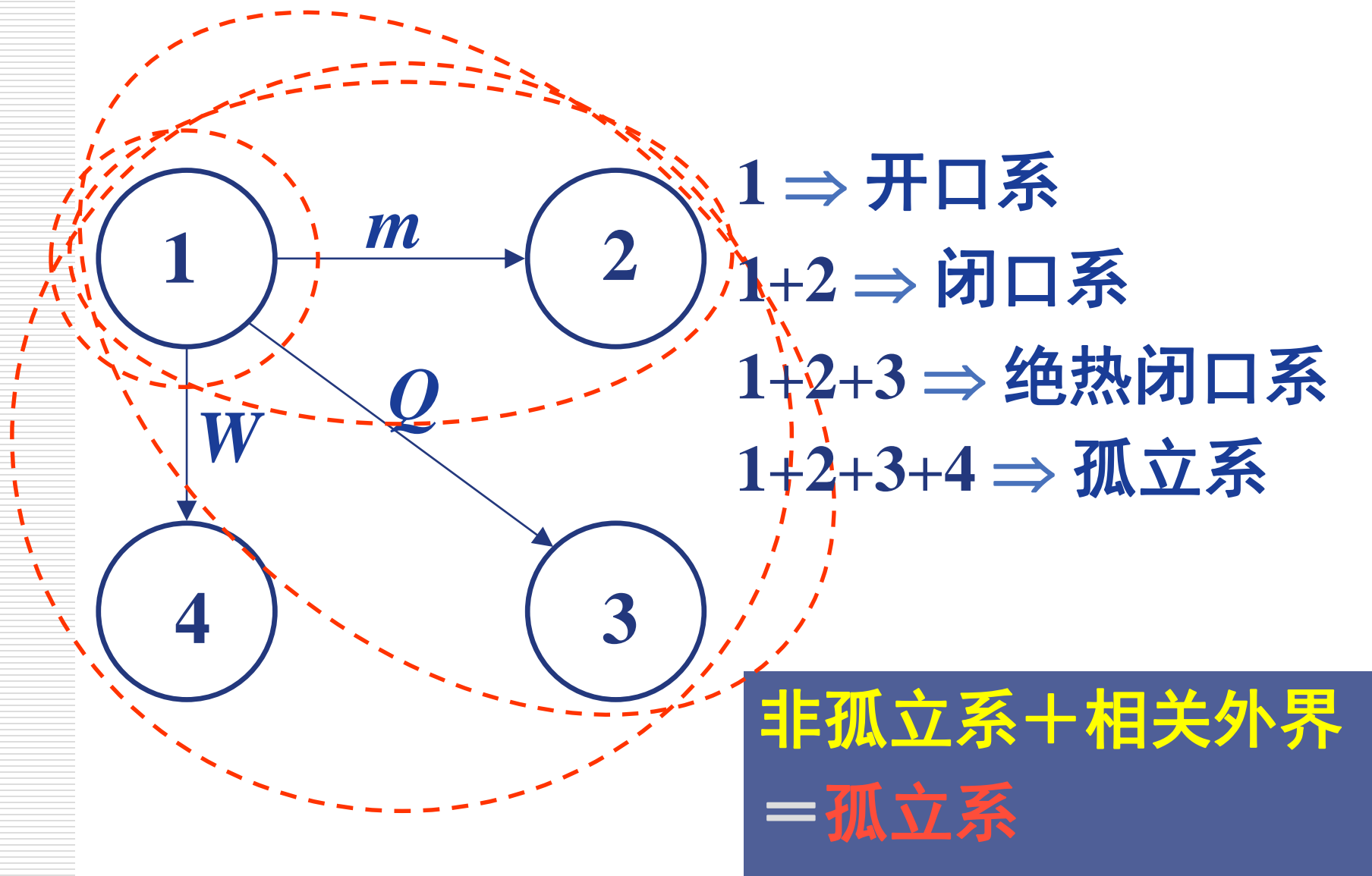
## 系统与外界的相互作用：



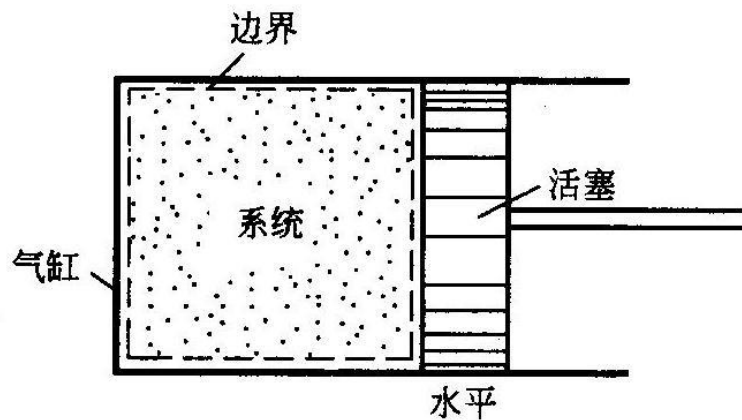
## 二、热力系统分类

按系统与外界关系	有	无
是否传质	开口系统 (控制体积)	闭口系统 (控制质量)
是否传热	非绝热系统	绝热系统
是否传功	非绝功系统	绝功系统
是否传热、功、质	非孤立系统	孤立系统

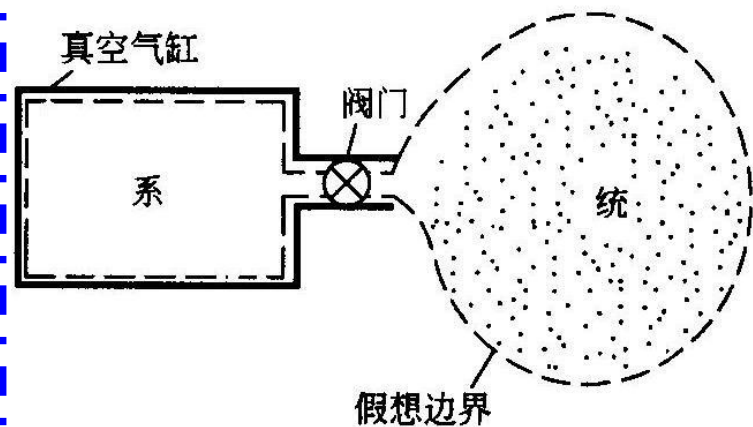




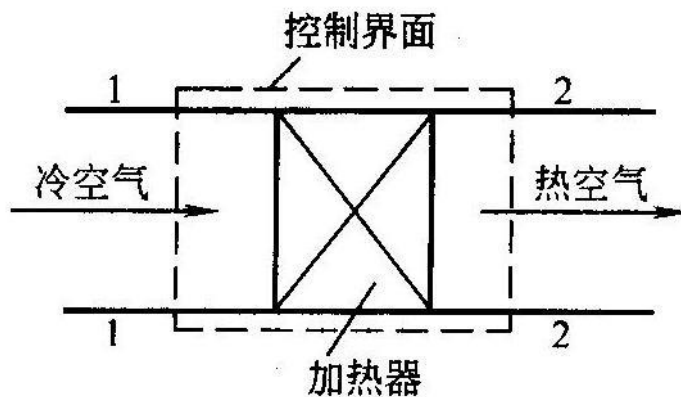




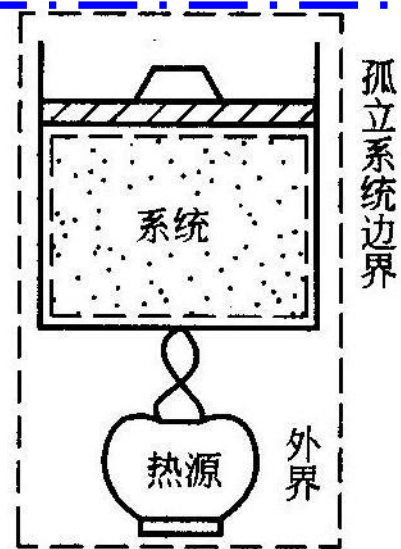
闭口系统



闭口系统



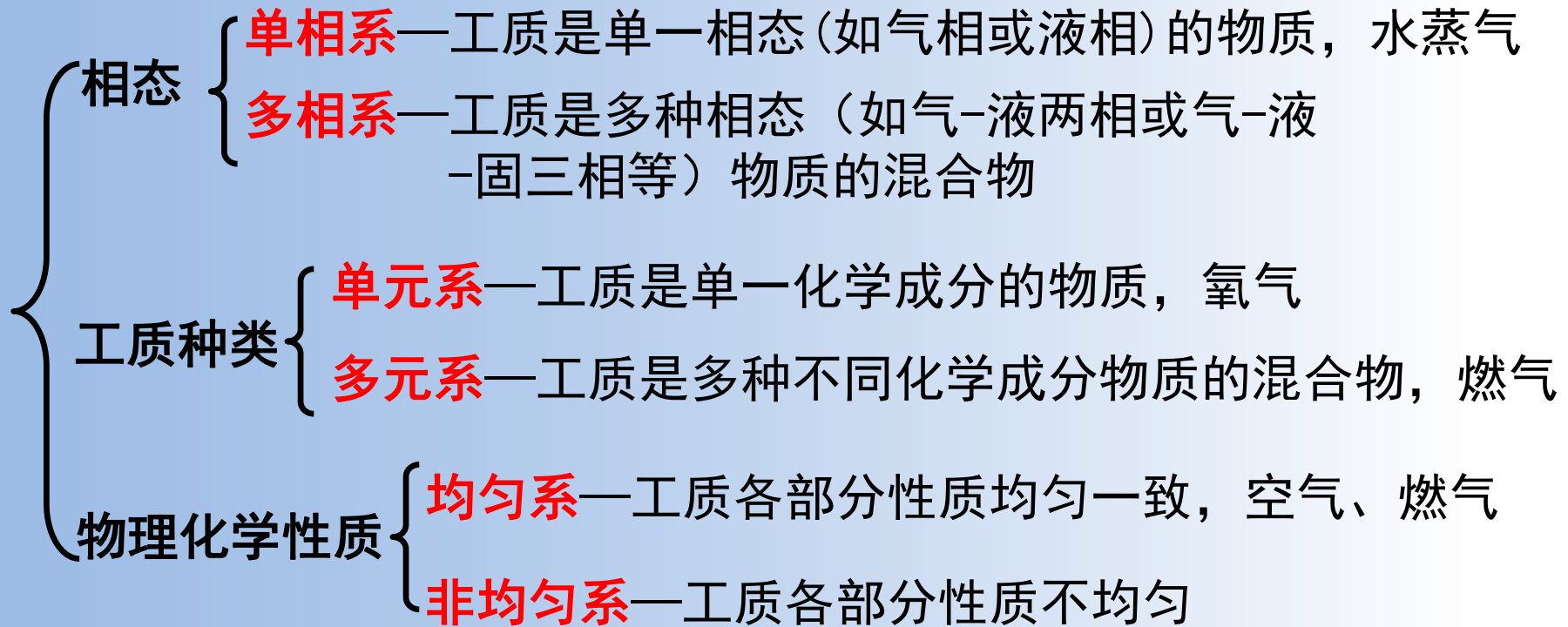
开口系统



孤立系统



## 三、其它分类方式



最重要的系统  $\Rightarrow$  **简单可压缩系统**

- a. 除重力外没有其它场的作用;
- b. 没有化学反应、核反应等;
- c. 与外界只交换热量和容积变化功(工质膨胀或压缩)。

## 1-2 工质的热力状态及其基本状态参数

### 一、状态与状态参数 (Properties)

**状态**——是系统在某瞬间表现出来的宏观物理状况，是工质大量分子微观热运动的宏观表现。

**状态参数**——从不同方面描述系统状态特性的各种物理量。

热力状态变化  $\longleftrightarrow$  状态参数变化  $\longleftrightarrow$  能量交换

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；（点函数）

**基本状态参数**：温度  $T$ 、压力  $p$ 、比体积  $v$ ，容易测量也比较直观。

**导出状态参数**：根据基本状态参数及约束关系间接算得，如**焓**。

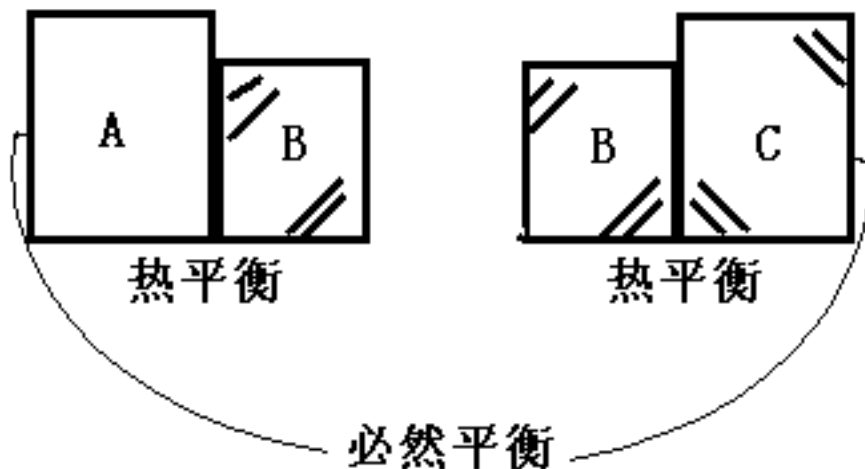


## 二、基本状态参数

### 温度

#### 热力学第零定律 (R.W. Fowler)

如果两个物体分别与第三个物体处于**热平衡**，则它们彼此之间必然处于热平衡。



**温度定义、测量的理论基础！**



## 温度的热力学定义：

处于同一热平衡状态的各个热力系统，必定有某一宏观特征彼此相同，用于描述此宏观特征的状态参数 —— 温度。

微观上，温度标志分子热运动的激烈程度，大小与分子平均移动动能成正比。

热平衡  $\Rightarrow$  温度相等

热不平衡  $\Rightarrow$  热量传递，温差是热量传递的唯一动力

## 温度的测量

温度计/传感器：水银——体积膨胀；铂电阻——阻值；热电偶等。

单位：国际单位制中采用**热力学温标**，也叫开尔文温标或绝对温标，用 $T$ 表示，单位为 K。

摄氏温标为实用温标，用 $t$ 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

换算关系： $t = T - 273.15$

摄氏温标的每 $1^{\circ}\text{C}$ 和开尔文温标的每 $1\text{K}$ 是相等的。



## 压力

宏观上：工质垂直作用于器壁单位面积上的力——压力。

微观上：大量分子撞击固体壁面的平均效果。

常用单位：

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

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

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

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

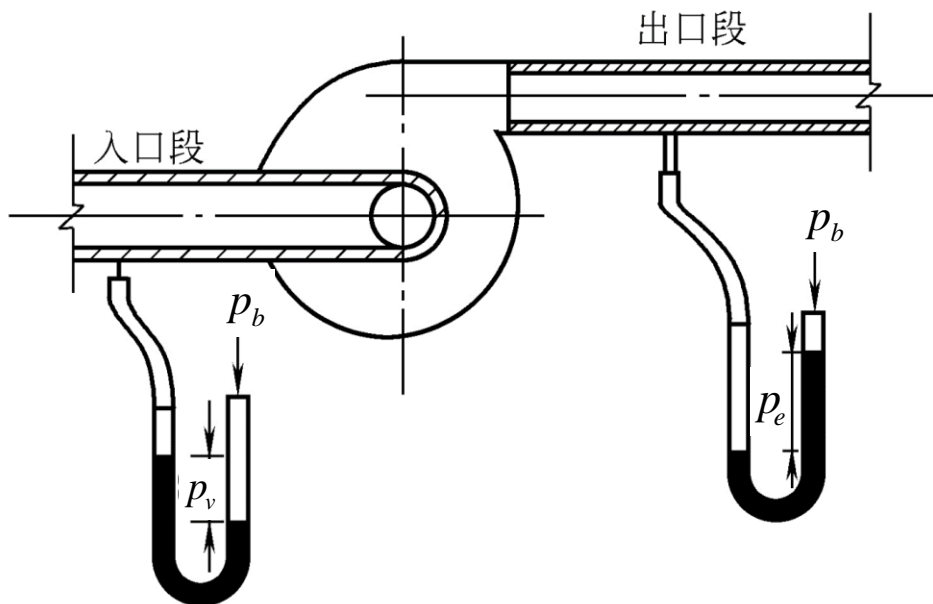
$$1 \text{ at} = 1 \times 10^4 \text{ mmH}_2\text{O} = 735.6 \text{ mmHg} = 9.80665 \times 10^4 \text{ Pa}$$

压力的测量：

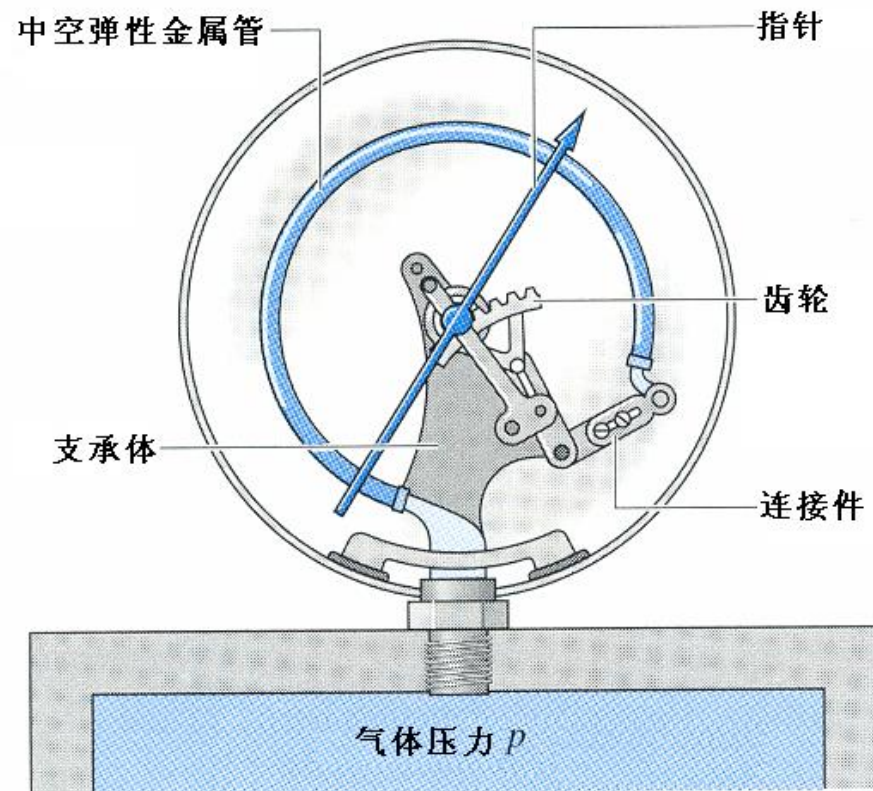
一般是工质绝对压力与环境压力的相对值——相对压力。



## U形管压力计



## 弹簧管压力表



## 其它压力测量方法：

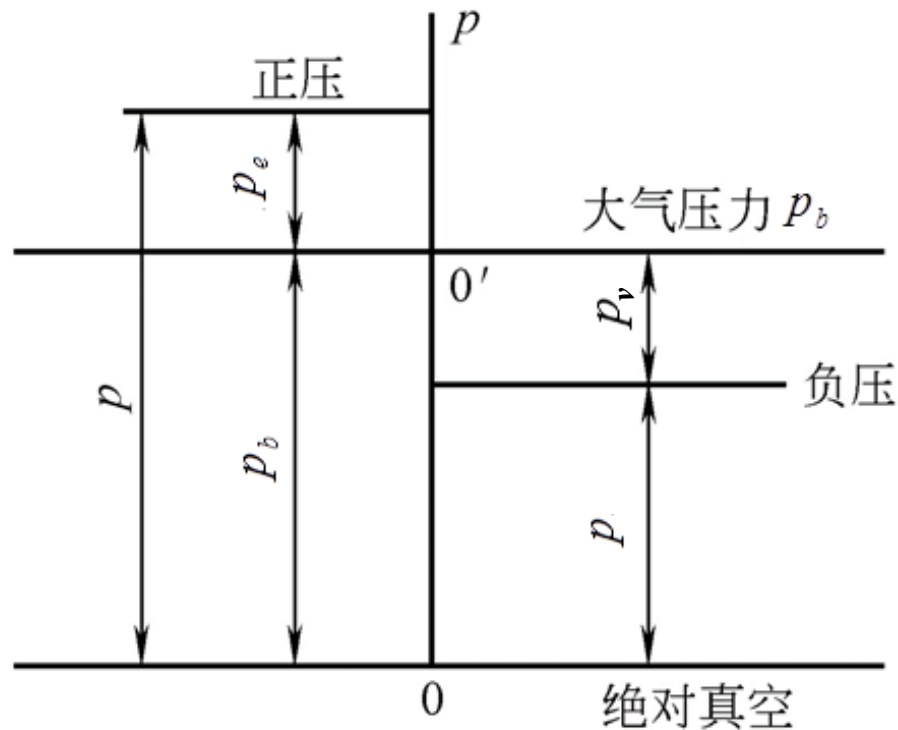
高精度测量：活塞式压力计

工业或一般科研测量：各种压力传感器

## 绝对压力与相对压力

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

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



**注意：1) 只有绝对压力 $p$  才是状态参数！  
2) 热力学相关计算都用绝对压力**



## 比体积

**比体积：** 单位质量的工质所占有的体积。

$$v = \frac{V}{m} \quad \text{【m}^3\text{/kg】}$$

比体积倒数——**密度**——单位体积的工质所具有的质量。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{【kg/m}^3\text{】}$$

比体积与密度不独立。



## 复习

1. 工程热力学在飞行器动力专业知识架构中的重要性
2. 热力学研究对象？
3. 对热力学发展做出重要贡献的人物及贡献（自学）
4. 热能如何利用？举例（袁世豪回答）
5. 动力装置的作用、举例？（徐继来回答）
6. 工质？（薛划时回答）
7. 热力系统、外界、边界定义？（董天力回答）
8. 闭口系统、开口系统、绝热系统、孤立系统？  
（李致远回答前两个，陈若雨回答后两个）
9. 简单可压缩系统
10. 热力状态、状态参数定义？（张希回答）
11. 基本状态参数、导出状态参数定义、举例？（任羿霏回答）



## 三、强度性参数与广延性参数

**强度性参数 (Intensive Properties)**：与物质的量无关的状态参数。如压力  $p$ 、温度  $T$ 。

**广延性参数 (Extensive Properties)**：与系统包含的工质质量成正比—可加性。如质量  $m$ 、容积  $V$ 、热力学能  $U$ 、焓  $H$ 、熵  $S$ 。

**比参数**：广延参数量除以系统质量，成为强度量。如：

$$v = \frac{V}{m}$$

比体积

$$u = \frac{U}{m}$$

比热力学能

$$h = \frac{H}{m}$$

比焓

$$s = \frac{S}{m}$$

比熵

单位：【XXX/kg】。

一般，比参数用小写字母表示，广延参数量用大写字母表示。



## 1-3 平衡状态、状态方程式、坐标图

### 一、平衡状态

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。

只有在**平衡状态**下才有可能用状态参数描述系统状态特性。

系统各部分之间（**不是系统与外界之间**）

没有传热——**热平衡**

**温差** — 热不平衡势

没有宏观相对位移——**力平衡**

**压差** — 力不平衡势

没有化学反应——**化学平衡**

**化学势** — 化学不平衡势

**平衡的本质：不存在不平衡势**

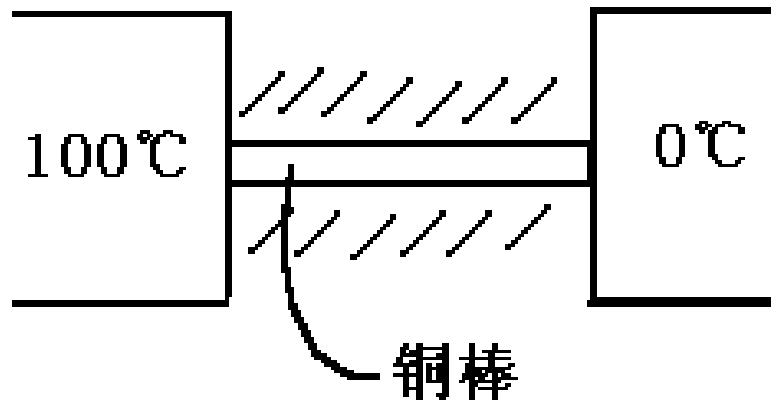


## 热力学的平衡状态

- 宏观性质不随时间变化
- 没有外界作用
- 宏观静态

## 流体力学、传热学的稳态

- 宏观性质不随时间变化
- 定有外界作用
- 宏观动态



稳定但存在不平衡势差

去掉外界影响，则状态变化，最后达到平衡。

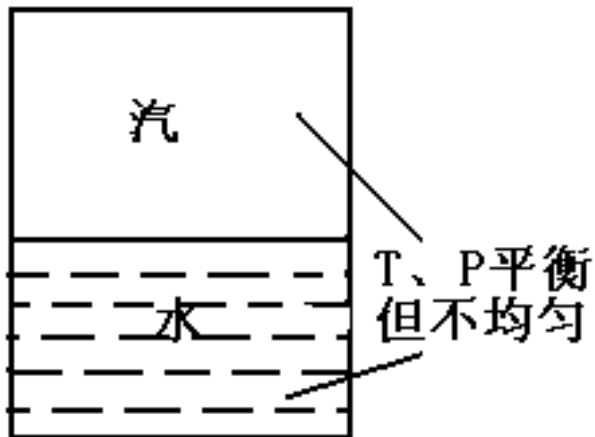
**稳定不一定平衡，但平衡一定稳定**

## 平衡状态

- 强调宏观性质的时间特性
- 各时刻宏观性质一样

## 均匀状态

- 强调宏观性质的空间特性
- 各空间宏观性质一样



平衡：时间上

均匀：空间上

**平衡状态未必是均匀的，均匀并非系统平衡的必要条件。**

工程热力学通常只研究平衡状态。

简单可压缩系统，平衡状态下只有2个独立状态参数。



## 二、状态方程式

纯物质简单可压缩系统，三个基本状态参数之间的函数关系式——状态方程 (Equation of State)， $p$ 、 $v$ 、 $T$ 关系式。

$$T = T(p, v), \quad p = p(T, v), \quad v = v(p, T)$$

隐函数形式： $F(p, v, T) = 0$

理想气体和实际气体的状态方程是不同的。

在第三章 工质的性质 中会学到。



## 理想气体状态方程

$$pv = R_g T, \quad pV = mR_g T, \quad pV = nRT$$

$$R_g = \frac{R}{M}, \quad n = \frac{m}{M}$$

$R$  : 通用气体常数,  $=8.3145 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$

$M$  : 气体的分子量,  $\text{kg/mol}$

$m$  : 质量,  $\text{kg}$

$n$  : 物质的量,  $\text{mol}$

$R_g$  : 气体常数, 与气体种类有关, 空气  $R = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

**注意：1) 各物理量都采用国际单位！**

**2) 压力为绝对压力！**

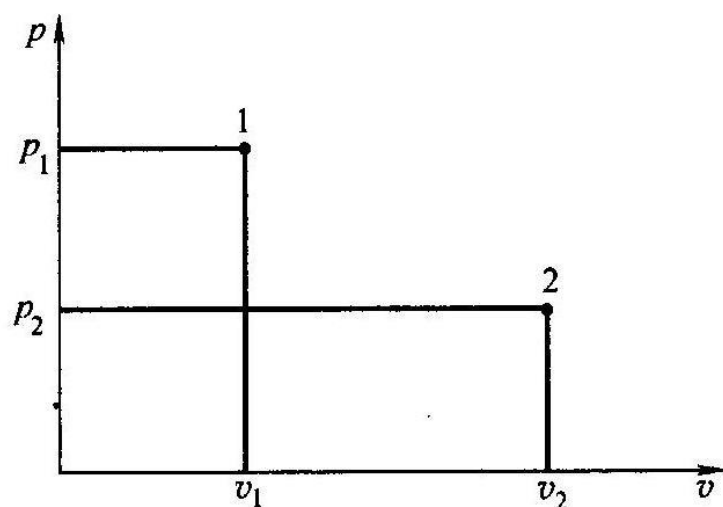
**3) 通用气体常数与气体常数不同！**



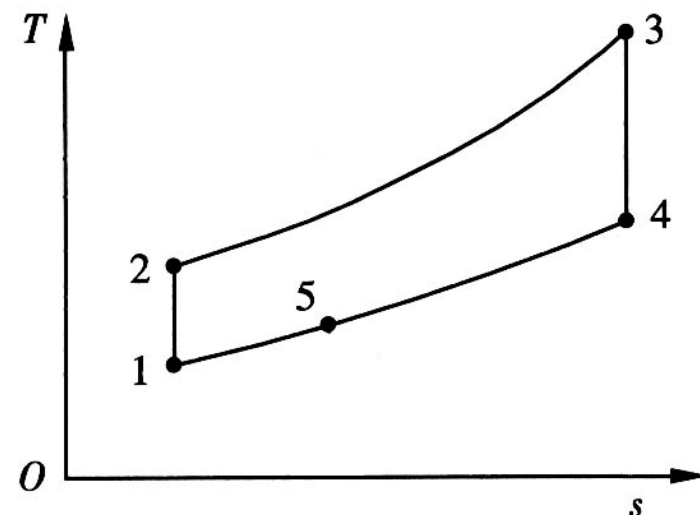


## 三、状态参数坐标图

对于简单可压缩系统，常采用**两个独立状态参数构成的平面坐标系**来描述工质的状态和分析系统的状态变化过程。



$p-v$  图

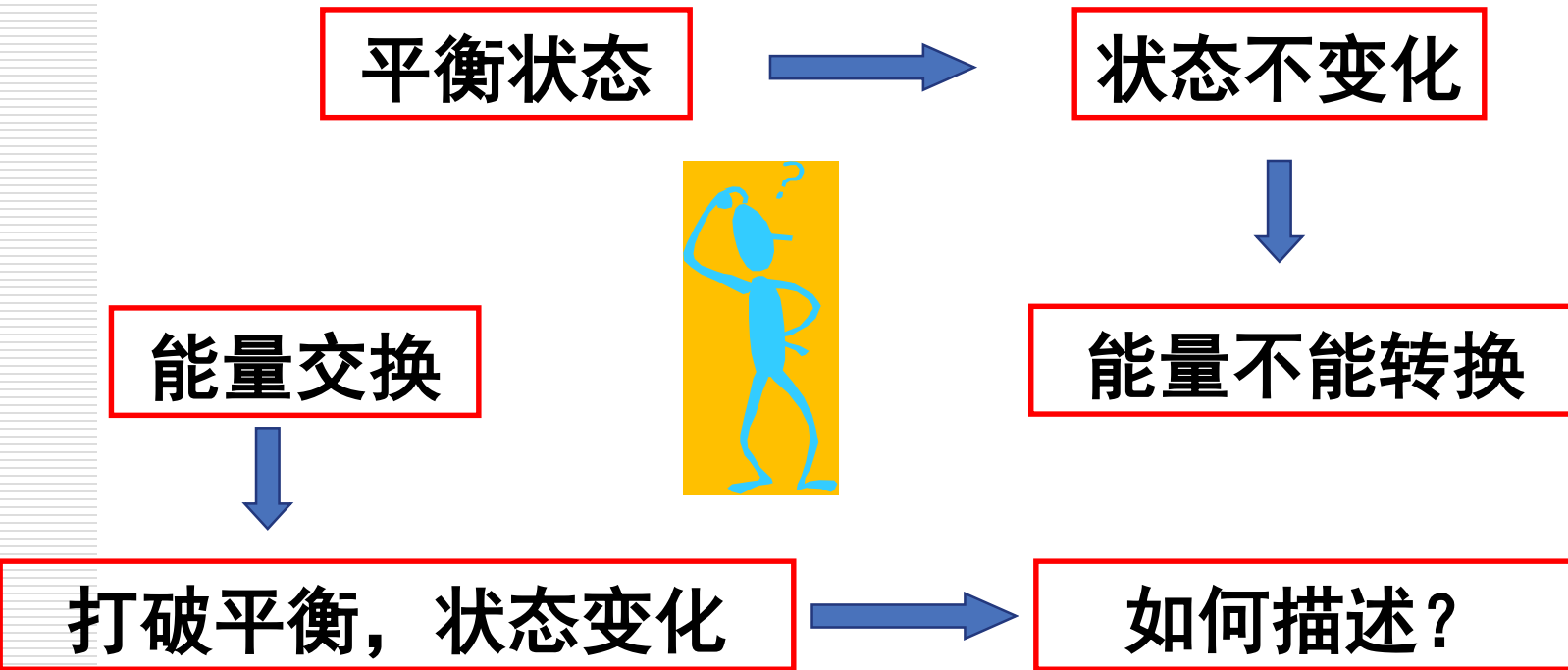


$T-s$  图

$p-t$  图、 $h-s$  图等



## 1-4 准静态过程与可逆过程



**热力工程：**系统在外界因素作用下发生的状态变化过程。

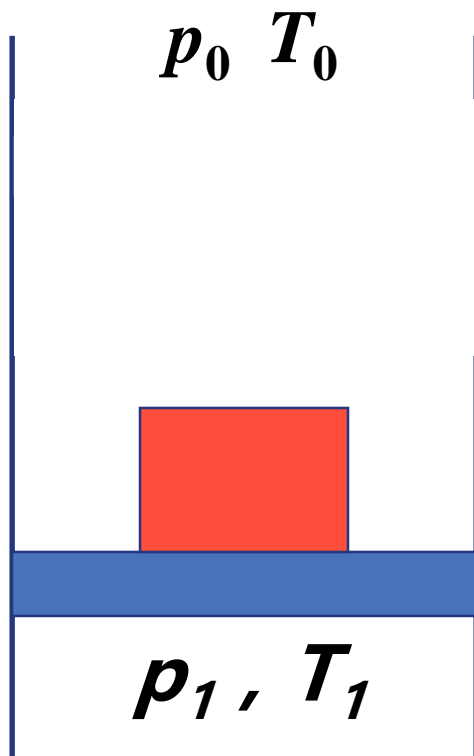
实际热力过程是在有限大的不平衡势差推动下进行的，且工质流动及机械运动都存在摩阻等影响，过程非常复杂。

宏观热力学引入**准平衡过程（准静态过程）**和**可逆过程**。

## 一般过程

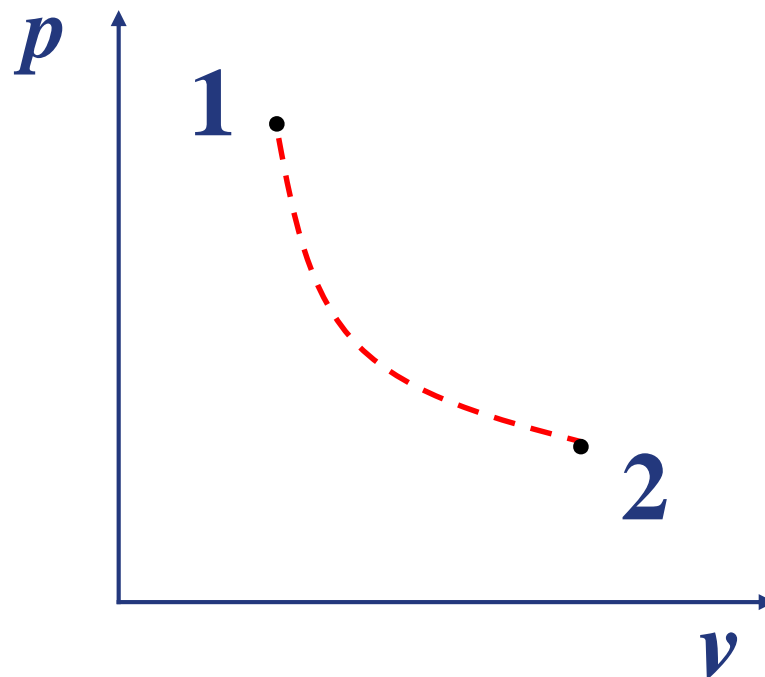
假设活塞很轻，与气缸之间没有摩擦力

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



突然去掉重物

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



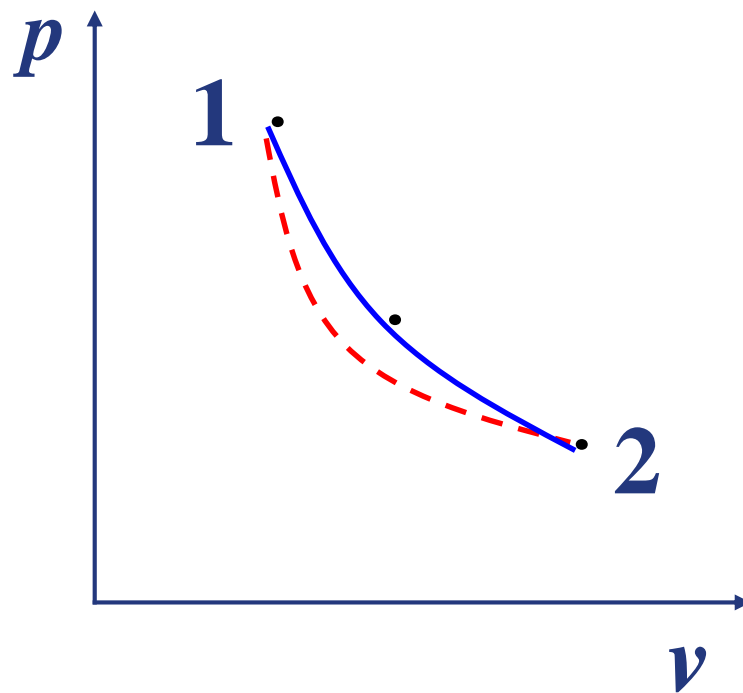
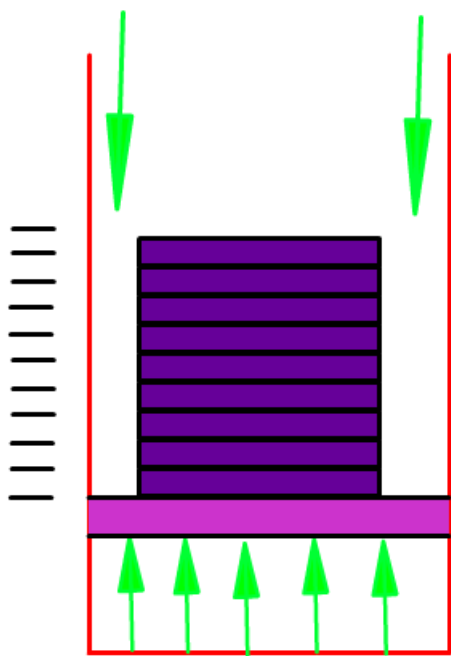
## 准静态过程

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

假如重物有无限多层，每次只去掉无限薄一层。

过程每一步的不平衡势差都很小。

系统内部随时接近于平衡态——准平衡。



## 准静态过程有实际意义：

解决了平衡和变化的矛盾；

既可实现**热功转换**，又可以用**状态参数的变化**来描述。

## 准静态过程的条件：

破坏平衡所需时间  
(外部作用时间)

>>

系统恢复平衡所需时间  
(弛豫时间)



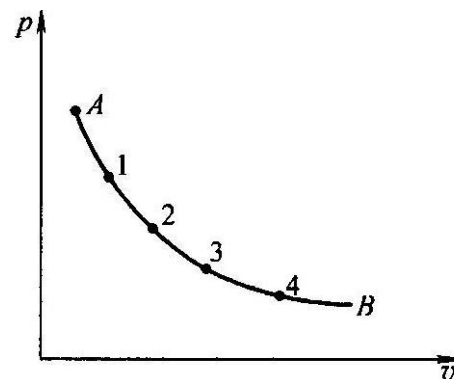
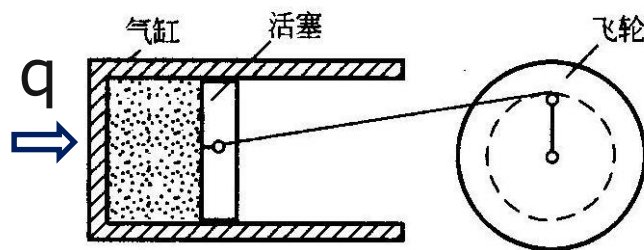
**准静态过程：**过程进行得非常缓慢，平衡被破坏后，有足够时间恢复新平衡，过程可以用一系列非常接近平衡态的状态组成。

实际过程通常情况下都可以近似当作准静态过程处理。因为工质分子运动速度很大。



## 可逆过程

当系统进行正、反两个过程后，系统与外界均能完全回复到初始状态。



## 可逆过程实现条件：

准静态过程 + 无耗散效应 = 可逆过程

过程没有势差，传热无温差，作膨胀功无压力差

过程没有耗散效应，机械运动没有摩擦，流体运动没有粘性耗散。

不可逆根源 { 不平衡势差  
耗散效应 不可消除。

1. 可逆过程是一个理想的过程，是最优过程；
2. 可逆过程必然是准静态过程，准静态过程则未必是可逆过程。



## 引入可逆过程的意义：

- 可逆过程是最优过程，是实际过程设计的指导；
- 可逆过程与外界交换的功与热完全可用系统内工质的状态参数表达，易定量分析。
- 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，对系统性能加以分析，然后考虑不可逆因素加以**修正**。

## 问题：

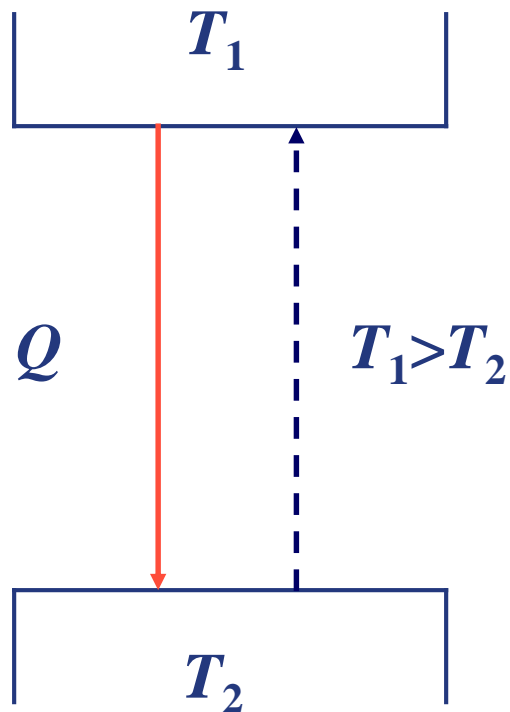
1. 准静态过程定义？
2. 可逆过程定义及实现条件？



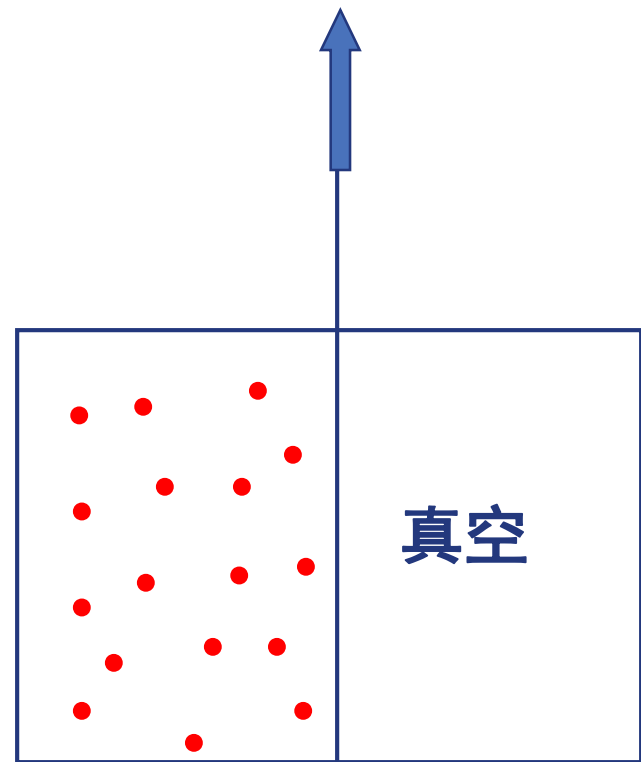


## 典型的不可逆过程

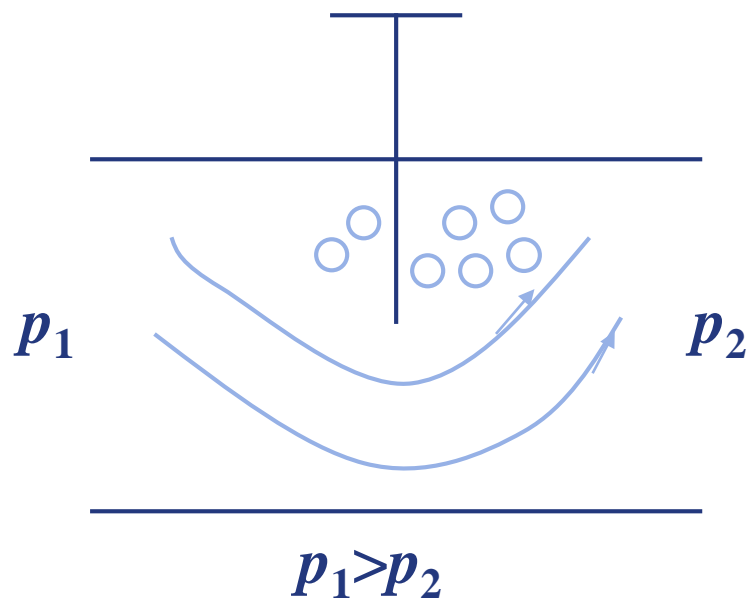
不等温传热



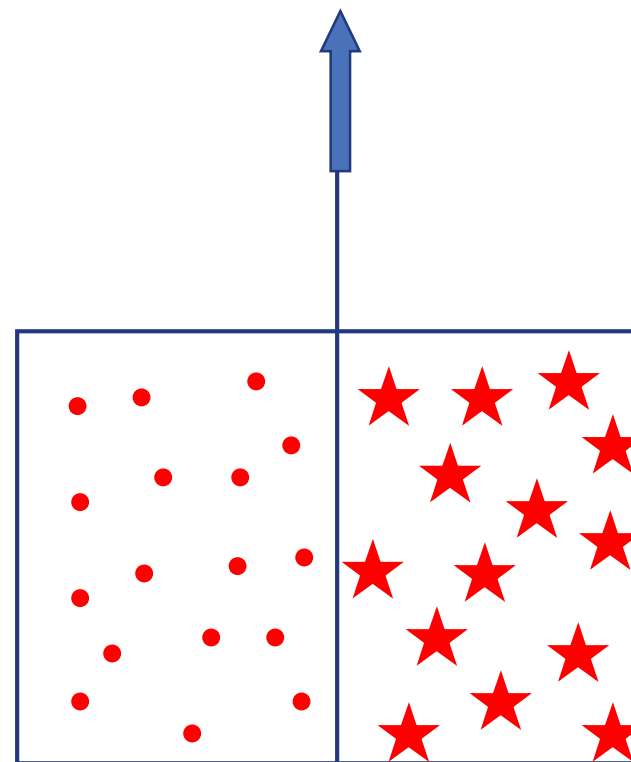
自由膨胀



## 节流过程 (阀门)



## 混合过程



## 1-5 过程功和热量



状态参数及其特征

功和热量是不是状态参数？

## 一、功的热力学定义

系统与外界在边界上发生的一种能量交换，其唯一的效果可以表现为举起一个重物（机械能），用以和传递的热量做对比。**规定：**系统对外做功为正，外界对系统做功为负。

计算式以及单位与力学中的完全一致。

微元过程： $\delta W = F \cdot dx$  J 或 kJ。

功率：单位时间所做的功，W 或 kW。



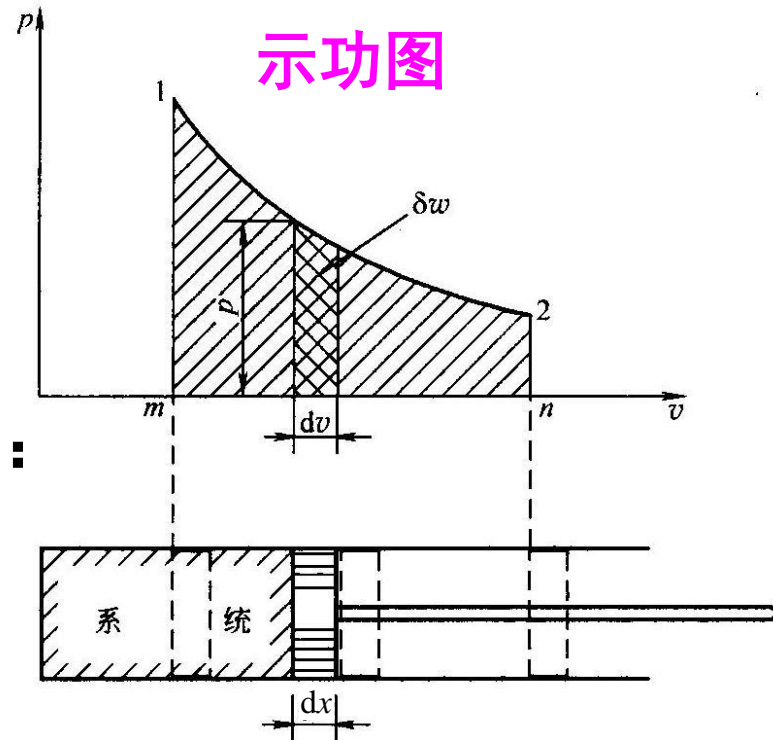
## 二、可逆过程的功

$$\delta W = F \cdot dx = pA \cdot dx = p \cdot dV$$

$$W_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dV$$

1kg工质，可逆膨胀过程1-2所作的功为：

$$w_{rev} = \frac{W_{1-2}}{m} = \int_1^2 p \cdot dv$$



**体积功**——由于系统体积发生变化而通过界面向外界传递的机械功。推动力是强度性参数压力，位移量变为体积变化。

在p-v图上体积功可以用面积来表示， p-v图称为示功图。

**可见：功与过程特性相关，是过程量而不是状态量。**



**膨胀功**——1-2，体积增大，为**正**；

**压缩功**——2-1，体积减小，为**负**。

$$w_{1-2} = \int_1^2 p \cdot dv$$

与系统体积变化有关，与体积形状无关。统称体积变化功。  
简单可压缩系统，只考虑体积变化功。

## 三、过程热量的定义

热力系与外界之间因为存在温差而在**边界**上传递的**一种能量交换**。

**规定：**系统吸收外界热量为正，系统对外界放热负。J 或 kJ。

## 四、可逆过程的热量

热量传递中作为推动力的强度性参数是**温度**，而作为广义位移的广延性参数的变化是**熵的增量**。



热量与功量都是与过程有关的量，必然具有某些共性。

可逆时功量

$$\delta W = p dV$$

$V$ ，状态量，做功的标志

$p$ ，强度量，做功的推动力  
 $T$ ，强度量，传热的推动力

可逆时热量

$$\delta Q = T dS \quad \text{即}$$

$$ds = \frac{\delta q_{re}}{T}$$

熵：  $S = m \cdot s$

$S$ ，状态量，传热的标志

1kg工质，可逆过程1-2与外界交换的热量为：



$$q_{1-2} = \frac{Q_{1-2}}{m} = \frac{1}{m} \int_1^2 T \cdot dS = \int_1^2 T \cdot ds$$



传热量与过程特性相关，也是过程量，而不是状态量。

T-s图也称示热图

系统熵的定义式：

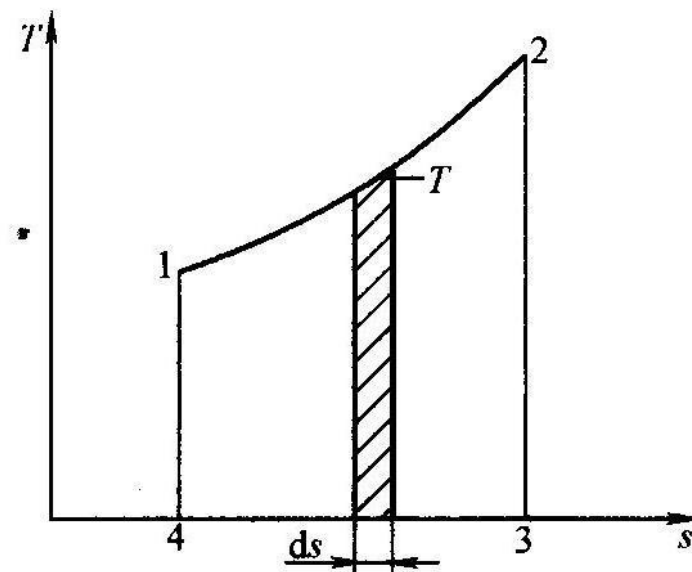
$$ds = \frac{\delta q_{rev}}{T}$$

ds: 微元可逆过程熵变等于 该工程的热量 $\delta q_{rev}$ 除以传热时的 $T$ 所得的商。

熵是状态参数。

用来：1) 判断过程进行的方向；

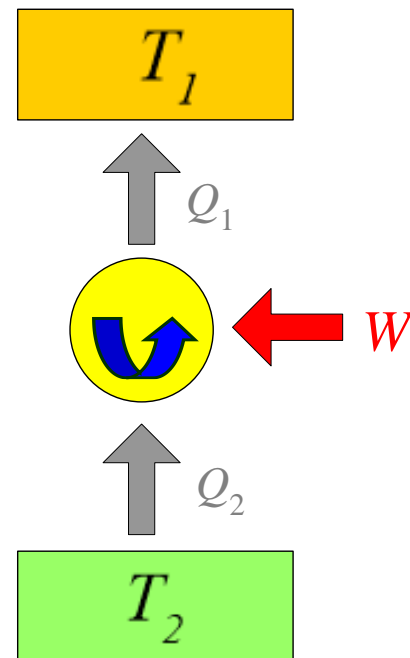
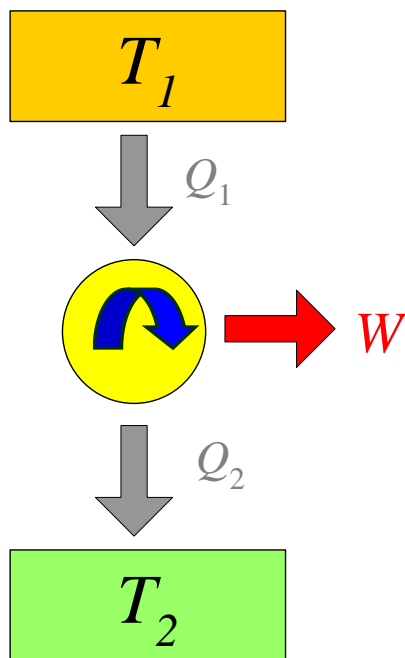
2) 计算可逆过程的传热量。  $q_{1-2} = \int_1^2 T \cdot ds$



## 1-6 热力循环

要实现热、功连续转换，必须构成**循环**。

**定义：**工质从某一初态出发，经历一系列状态变化，最后又回复到初始状态的全部热力过程总合，是**封闭的**。



**正循环**——热能转化为机械能  
(动力装置)

**逆循环**——消耗机械能，将热量传递  
(制冷、供热)



## 一、正循环——循环路线沿顺时针方向

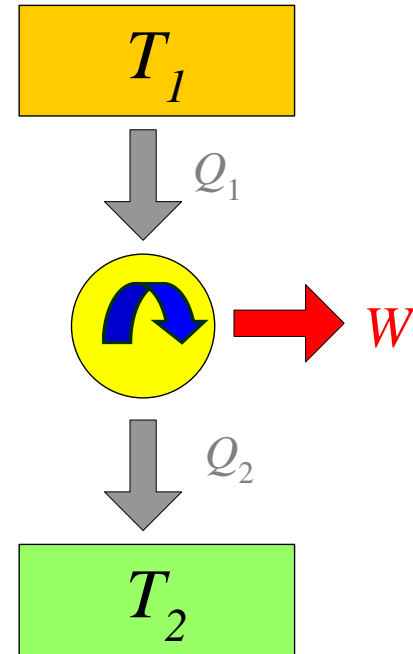
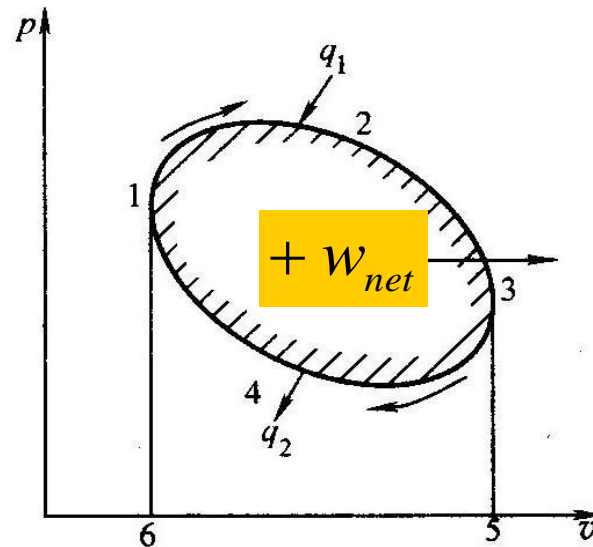
过程1-2-3：从外界热源吸热 $q_1$ ，对外膨胀做功  
 过程3-4-1：向外界冷源放热 $q_2$ ，压缩消耗功

净功 $w_{net}$ :

$$w_{net} = \oint \delta w$$

净热量 $q_{net}$ :

$$q_{net} = q_1 - q_2$$



完成一个循环，工质回到初态，净热量等于净功：

$$w_{net} = q_1 - q_2$$



正向循环的经济性指标——**循环热效率 (thermal efficiency)**  $\eta_t$ ：  
产出投入比，即循环净功与吸入热量之比。

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1}$$

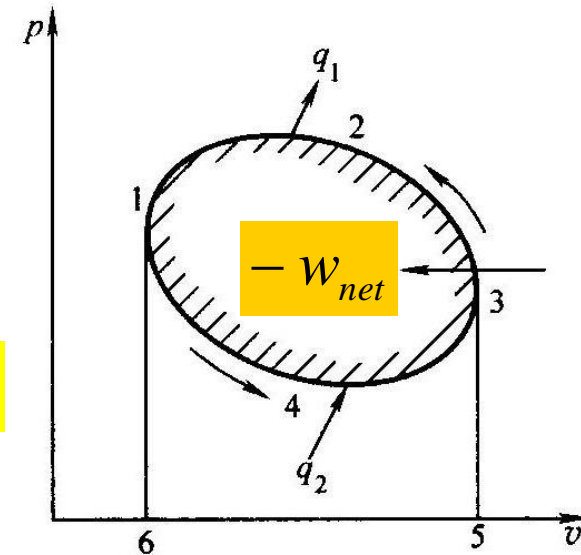
热效率越高，循环越经济；  
循环热效率总是小于1。

## 二、逆循环——循环路线沿逆时针方向

工程上逆循环有两种用途：

**制冷循环：**以获得制冷量为目的（冰箱、夏季空调）

**热泵循环：**以获得供热量为目的（热泵）



制冷循环的经济指标采用：

制冷系数：

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w_{net}}$$

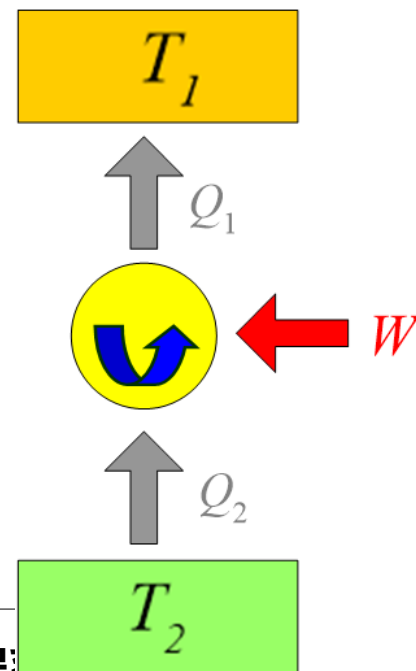
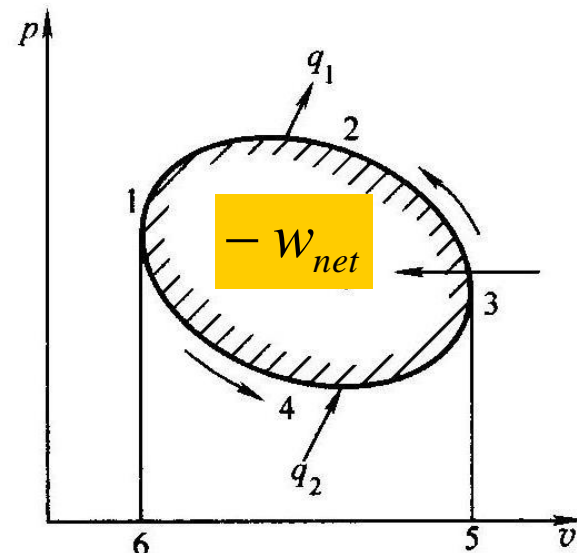
制冷系数可大于、等于或小于1。

热泵循环的经济指标采用：

供热系数：

$$\varepsilon' = \frac{q_1}{w_{net}} = \frac{w_{net} + q_2}{w_{net}} = 1 + \varepsilon$$

供热系数总是大于1。



**可逆循环：**由可逆过程组成的循环。

**不可逆循环：**部分或全部由不可逆过程组成的循环。

循环热效率、制冷系数、供热系数定义适用于**可逆与不可逆循环**。

## 作 业：

P36-37, 1-8

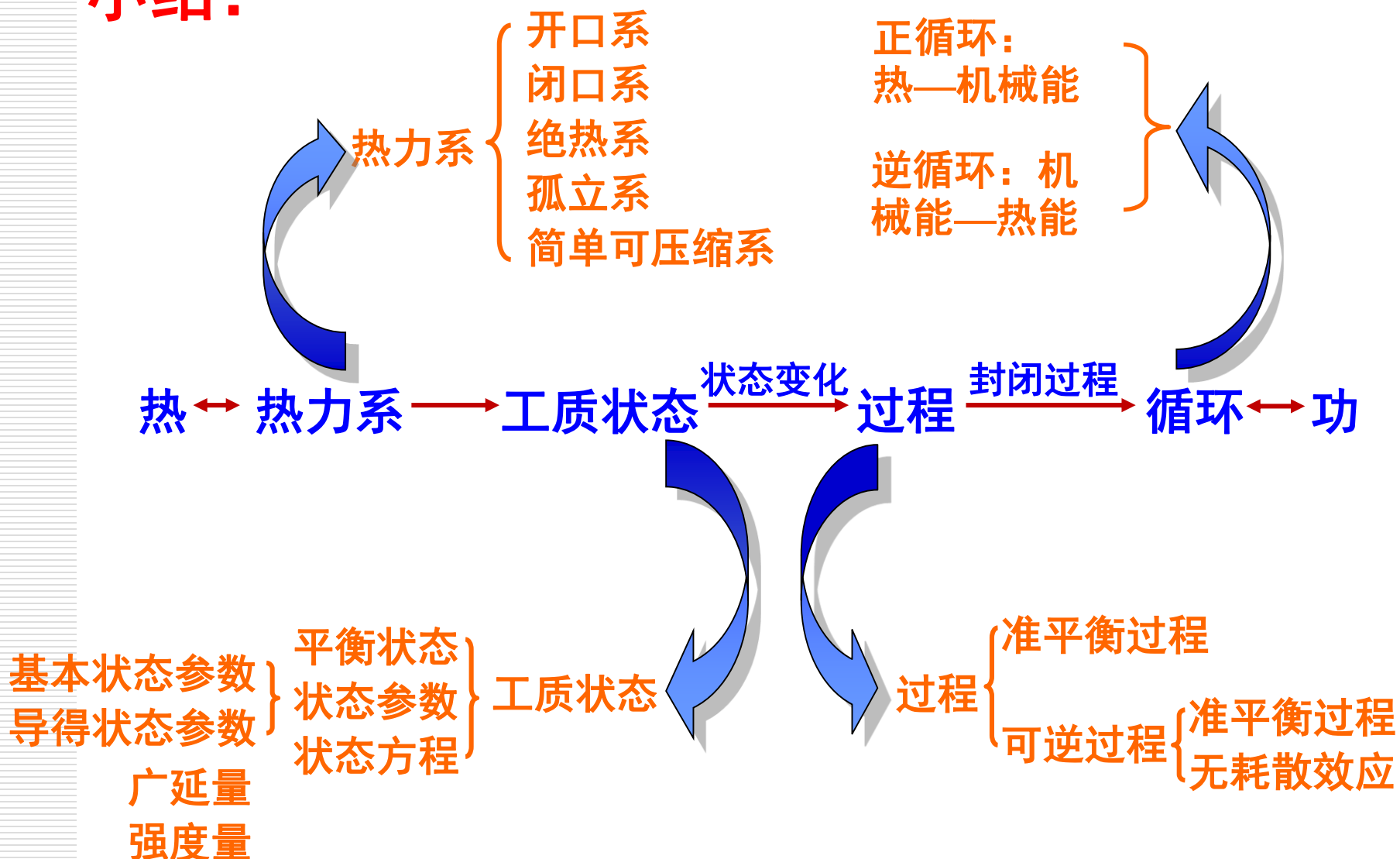
1-9

1-13

1-17



## 小结:



## 可逆过程热量与功量

能量传递方式	容积变化功 ( $w$ )	传热量 ( $q$ )
性质	过程量	过程量
推动力	压力 $p$	温度 $T$
标志	$dV$ , $dv$	$dS$ , $ds$
计算公式	$\delta w = p dv$ $w = \int p dv$	$\delta q = T ds$ $q = \int T ds$
图示方法	$p$ - $v$ 图	$T$ - $s$ 图



## 作 业:

### 计算题

P36-37,      1-8  
                 1-9  
                 1-13  
                 1-17

### 简答题

在本章每一小节的基本概念中任意挑选2个加以简答。

