

## 第二章 热力学第一定律

### 1.热力学第一定律的实质

def.热力学第一定律：能量既不可能被创造，也不可能被消灭，但可以从一种形态转变为另一种形态，并在能量的转换过程中能量的总量保持不变。

实质：能量守恒与转换定律在热现象中的应用

进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统能量的增量

def.第一类永动机：某物质循环一周回复到初始状态，不吸热而向外放热或作功，这叫“第一类永动机”。这种机器不消耗任何能量，却可以源源不断的对外做功。

“第一类永动机”是不可能的

### 2.热力学能

def.热力学能：物质内部微观粒子具有的能量的总和。是内部储存能，它与系统内的内部粒子的微观运动和粒子的空间位置有关。

注：热力学能是状态参数，与过程无关

$$U = U_k + U_p + U_r + U_e + \dots$$

式中： $U_k$ 为内动能， $U_p$ 为内势能， $U_r$ 是化学能， $U_e$ 是原子能

热力学能 $U$ 是广延量，比热力学能 $u = \frac{U}{m}$ 是强度量

$$\Delta U = \int_1^2 dU = U_2 - U_1$$

总能 = 热力学能（内部）+ 动能和位能（外部）

$$\begin{aligned} E &= U + E_k + E_p \\ &= U + \frac{1}{2}mc_f^2 + mgz \end{aligned}$$

式中： $U$ 是内部储存能， $E_k$ 是宏观动能， $E_p$ 是宏观位能

宏观动能是一种有序能量，内动能是一种无序能量；宏观动能可以直接转换为功输出，因此其品质高于内动能

对于单位质量的工质而言总能 $e$ 为：

$$E = u + \frac{1}{2}c_f^2 + gz$$

热力学第一定律的一般表达式：进入系统的能量 - 流出系统的能量 = 系统能量的增量

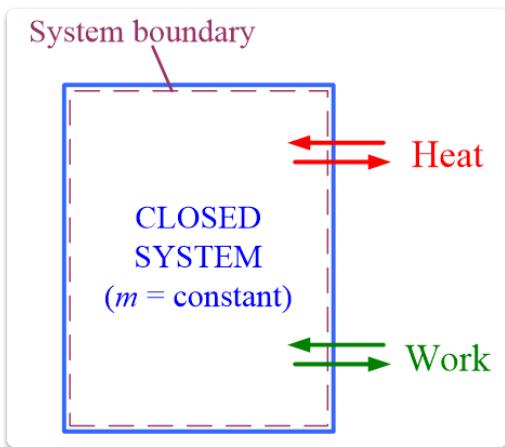
### 3. 热一律的基本能量方程式（闭口系）

闭口系：闭口系统和外界仅有热量和功量的交换，不存在质量交换。

闭口系统通常在热力过程中宏观动能和宏观位能都不发生变化，因此有：

$$\begin{aligned}\delta Q &= dE_{sy} + (e_2\delta m - e_1\delta m_1) + \delta W_{tot} \\ &= dE + \delta W \\ &= dU + \delta W\end{aligned}$$

常用的闭口系能量方程：



适用于任意工质，任意过程：

$$\begin{aligned}\delta Q &= dU + \delta W \\ \delta q &= du + \delta w \\ Q &= \Delta U + W \\ q &= \Delta u + w\end{aligned}$$

可逆过程：

$$\begin{aligned}\delta Q &= dU + p dV \\ \delta q &= du + p dv \\ Q &= \Delta U + \int p dV \\ q &= \Delta u + \int p dv\end{aligned}$$

热力循环：

$$\oint \delta Q = \oint dU + \oint \delta W \Rightarrow Q_{net} = W_{net}$$

初终状态应是平衡态，公式中热量、功量是代数值，单位和量纲要统一

闭口系能量方程也称为热一律的基本表达式

做题步骤：

1. 选取热力系（研究对象）；
2. 列出能量方程， $Q = \Delta Q + W$ ；

3. 根据已知条件对能量方程进行简化；
4. 确定初末状态，计算过程中的热量、功量或热力学能变化量。

## 4. 稳定流动系统能量方程式（开口系）

**开口系统：开口系统与外界有能量、有物质交换。**

def. 推动功：由于工质的进出，外界与系统之间所传递的一种机械功，表现为流动工质进出系统时所携带和所传递的一种能量。

$$W_{\text{推}} = pAdl = pV, w_{\text{推}} = pv$$

对于微元过程： $\delta W_{\text{推}} = pdV = pv\delta m$

不等于 $mpdv$ 因为在这一过程中 $v$ 没有变化

推动功与宏观流动有关，流动停止，推动功不存在

def. 流动功：使工质流入和流出系统所做的推动功的代数和称为流动功，维持工质流动所需的功。

$$W_f = -p_1V_1 + p_2V_2, w_f = \Delta(pv)$$

**一般开口系能量方程：**

$$\delta Q + \delta m_{\text{in}} \left( u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} - \delta m_{\text{out}} \left( u + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} - \delta W_i = dE_{\text{cv}}$$

工程上常用流率

$$\begin{aligned} \Phi &= \lim_{\delta\tau \rightarrow 0} \left( \frac{\delta Q}{\delta\tau} \right) \quad q_m = \lim_{\delta\tau \rightarrow 0} \left( \frac{\delta m}{\delta\tau} \right) \quad P_i = \lim_{\delta\tau \rightarrow 0} \left( \frac{\delta W_i}{\delta\tau} \right) \\ \Phi &= \frac{dE_{\text{cv}}}{\delta\tau} + \left( u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} q_{m,\text{out}} - \left( u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} q_{m,\text{in}} + P_i \end{aligned}$$

当有多条进出口：

$$\Phi = \frac{dE_{\text{cv}}}{\delta\tau} + P_i + \sum \left( u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} q_{m,\text{out}} - \sum \left( u + pv + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} q_{m,\text{in}}$$

def. 焓：开口系中随工质流动而携带的、取决于热力状态的能量。

$$h = u + pv [kJ/kg], H = U + pV [kJ]$$

焓是状态量， $H$ 为广延参数， $h$ 为比参数

对流动工质，焓代表能量(热力学能+推进功)，对静止工质，焓不代表能量

将焓引入上式，可得一般开口系能量方程：

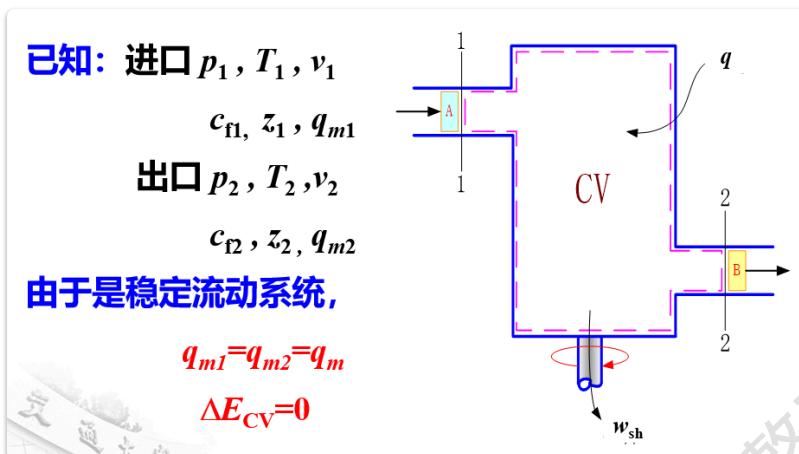
$$\Phi = \frac{dE_{\text{cv}}}{\delta\tau} + P_i + \sum \left( h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{out}} q_{m,\text{out}} - \sum \left( h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{\text{in}} q_{m,\text{in}}$$

## 稳定流动系统的能量方程：

def. 稳定流动系统：系统内各点参数（包括热力参数和流速）不随时间变化的流动。

实现的条件：

- 物质交换不随时间变化； $q_{m1} = q_{m2} = \text{const}$
- 能量交换不随时间变化； $\frac{\partial q}{\partial \tau} = \text{const}$ ,  $\frac{\partial w}{\partial \tau} = \text{const}$ ,  $dE_{sy} = 0$
- 进出口的状态参数不随时间变化。



进入系统能量

$$\left\{ \begin{array}{ll} u_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1 + p_1v_1 & (\text{随工质带入}) \\ q & (\text{传热}) \end{array} \right.$$

离开系统能量

$$\left\{ \begin{array}{ll} u_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2 + p_2v_2 & (\text{随工质带出}) \\ w_{sh} & (\text{作功}) \end{array} \right.$$

于是有

$$\begin{aligned} q + u_1 + \frac{1}{2}c_{f1}^2 + gz_1 + p_1v_1 &= u_2 + \frac{1}{2}c_{f2}^2 + gz_2 + p_2v_2 + w_{sh} \\ q = (u_2 + p_2v_2) - (u_1 + p_1v_1) + \frac{1}{2}\Delta c_f^2 + g\Delta z + w_{sh} \\ q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c_f^2 + g\Delta z + w_{sh} \end{aligned}$$

式中： $w_{sh}$ 为轴功

| 框中即为最常用的稳定流动系统能量方程

该公式适用于任何工质、任何过程（可逆or不可逆），只要进出口处是平衡态即可，但单位一定要统一

式中 $q$ 、 $w_{sh}$ 是代数值，要注意正负

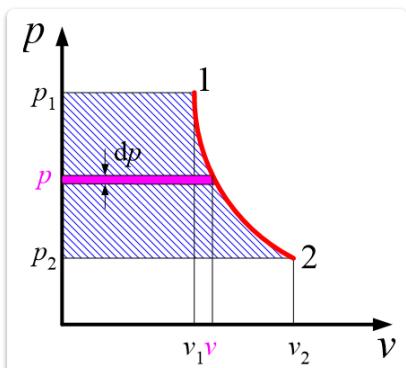
小结：

$$\begin{cases} q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_s & \text{任意工质, 任意过程} \\ q = \Delta h + w_t & \text{任意工质, 任意过程} \\ q = \Delta h - \int_1^2 v dp = \int_1^2 T ds & \text{任意工质, 可逆过程} \end{cases}$$

def. 技术功：技术上可资利用的功  $w_t$

$$q - \Delta u = w = \Delta(pv) + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh} = \Delta(pv) + w_t$$

即技术功  $w_t = \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$



$$\begin{aligned} w_t &= w - \Delta(pv) = w - \int d(pv) \\ &\stackrel{\text{re}}{=} \int p dv - \int d(pv) \\ &\stackrel{\text{re}}{=} - \int v dp \end{aligned}$$

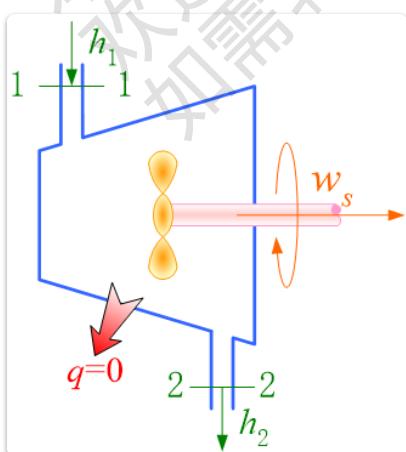
即： $w_t \stackrel{\text{re}}{=} - \int v dp$ ,  $\delta w_t \stackrel{\text{re}}{=} - v dp$

两种功的区别： $w_t \stackrel{\text{re}}{=} - \int v dp$ ,  $w \stackrel{\text{re}}{=} \int p dv$

## 5. 能量方程的应用

动力机：

如蒸汽轮机，燃气轮机

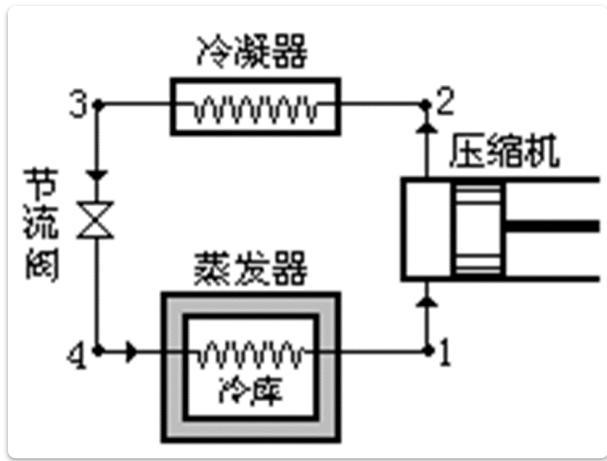


$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

其中  $q = 0, \frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0$ , 于是:

$$h_1 - h_2 = w_s = w_t$$

### 压缩机:

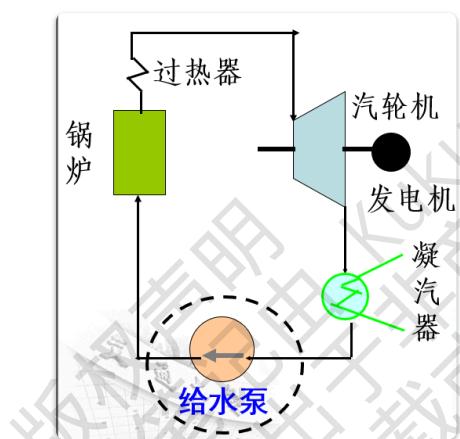


$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

其中  $\frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0$ , 于是:

$$h_1 - h_2 + q = w_s = w_c$$

### 水泵:

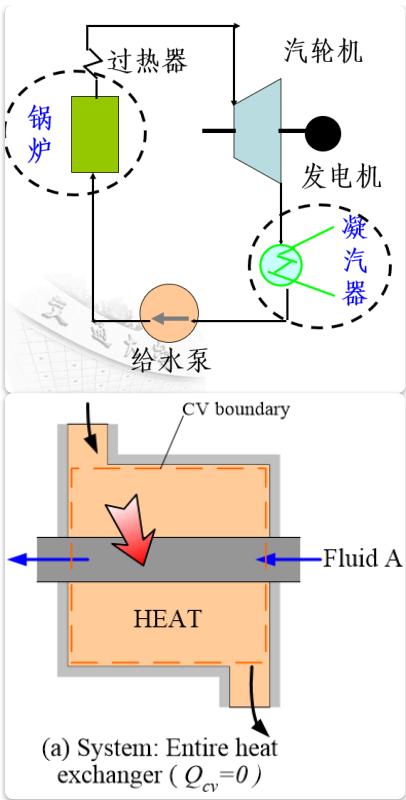


$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

其中  $q = 0, \frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0$ , 于是:

$$h_1 - h_2 = w_s = w_p$$

### 换热器:



$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

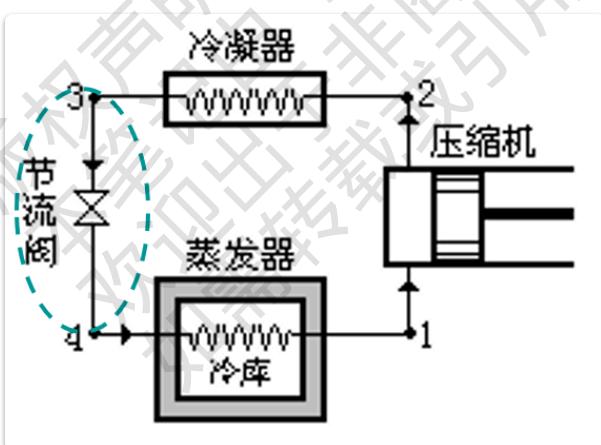
选取整个换热器作为研究对象，稳定流动开口系，其中  $q = 0, \frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0, w_t = 0$ ，于是：

$$\Delta h = 0$$

选择其中的一种流体作为研究对象，稳定流动开口系，其中  $\frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0, w_t = 0$ ，于是：

$$h_2 - h_1 = \Delta h = q$$

### 节流阀：



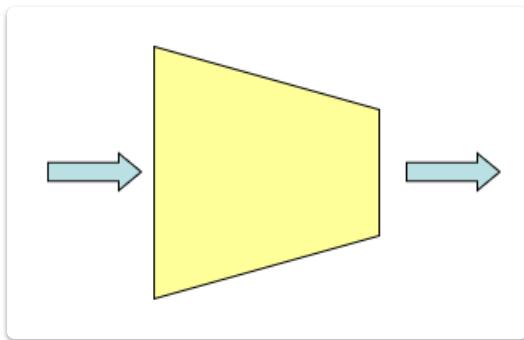
$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

其中  $q = 0, \frac{1}{2} \Delta c_f^2 = 0, g \Delta z = 0, w_t = 0$ ，于是：

$$\Delta h = 0$$

节流过程并不是等焓过程，只是节流前后的焓相等，节流过程本身是一个状态剧烈变化的非平衡过程

### 管道、喷管、扩压管：



$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c_f^2 + g \Delta z + w_{sh}$$

其中 $q = 0$ ,  $g \Delta z = 0$ ,  $w_t = 0$ , 于是:

$$\frac{1}{2} \Delta c_f^2 = -\Delta h = h_1 - h_2$$

| 热一定律公式多且杂，要理清每种公式的应用场景和可用过程