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

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

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

$$\Delta U = \int_1^2 \mathrm{d}U = U_2 - U1$$

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

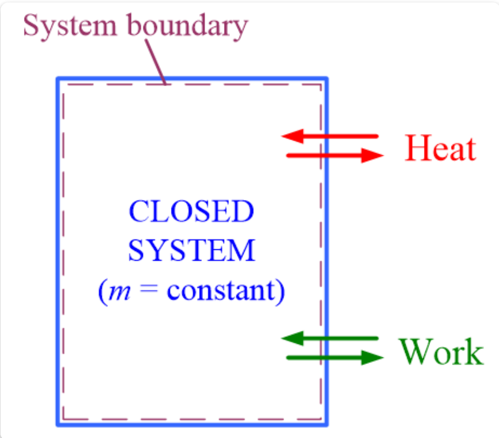
3.热一律的基本能量方程式（闭口系）

> *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：

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

可逆过程：

$$
\begin{aligned}
\delta Q &= \mathrm{d}U + p\,\mathrm{d}V \\
\delta q &= \mathrm{d}u + p\,\mathrm{d}v \\
Q &= \Delta U + \int p\,\mathrm{d}V \\
q &= \Delta u + \int p\,\mathrm{d}v
\end{aligned}
$$

热力循环：

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

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。

$$W_{推} = pAdl = pV, w_{推} = pv$$

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

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:

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

工程上常用流率

$$\Phi = \lim_{\delta\tau \to 0}\left(\frac{\delta Q}{\delta\tau}\right) \quad q_m = \lim_{\delta\tau \to 0}\left(\frac{\delta m}{\delta\tau}\right) \quad P_i = \lim_{\delta\tau \to 0}\left(\frac{\delta W_i}{\delta\tau}\right)$$

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

当有多条进出口：

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

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：

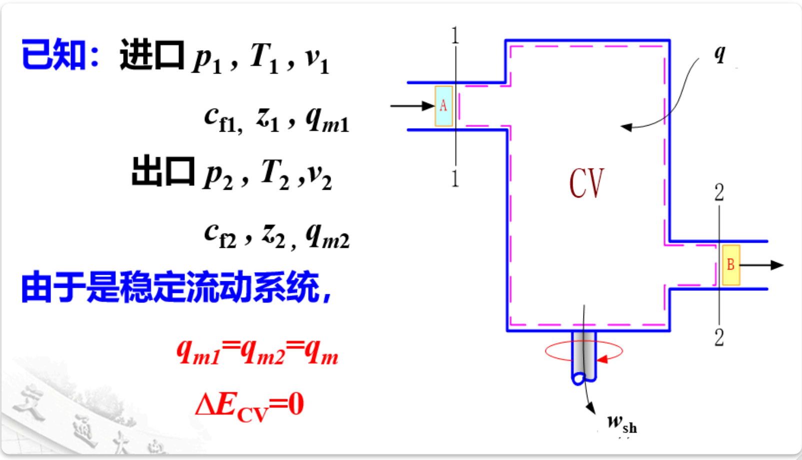
$$\Phi = \frac{\mathrm{d}E_{\text{cv}}}{\delta\tau} + P_i + \sum\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_{\text{out}} q_{m,\text{out}} - \sum\left(h + \frac{c^2}{2} + gz\right)_{\text{in}} q_{m,\text{in}}$$

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



进入系统能量

$$\begin{cases} u_1+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f1}}^2+gz_1+p_1v_1 & \text{（随工质带入）} \\ q & \text{（传热）} \end{cases}$$

离开系统能量

$$\begin{cases} u_2+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f2}}^2+gz_2+p_2v_2 & \text{（随工质带出）} \\ w_{\mathrm{sh}} & \text{（作功）} \end{cases}$$

于是有

$$q+u_1+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f1}}^2+gz_1+p_1v_1=u_2+\frac{1}{2}c_{\mathrm{f2}}^2+gz_2+p_2v_2+w_{\mathrm{sh}}$$

$$q=(u_2+p_2v_2)-(u_1+p_1v_1)+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^2+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$$

$$\boxed{q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^2+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}}$$

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

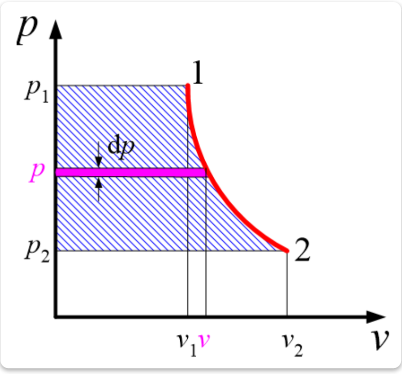
小结：

$$
\begin{cases}
q=\Delta h+\dfrac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{s}} & \text{任意工质，任意过程}\\
q=\Delta h+w_{\mathrm{t}} & \text{任意工质，任意过程}\\
q=\Delta h-\displaystyle\int_{1}^{2}v\,\mathrm{d}p=\int_{1}^{2}T\,\mathrm{d}s & \text{任意工质，可逆过程}
\end{cases}
$$

def.技术功：技术上可资利用的功w_{t}

$$q-\Delta u=w=\Delta(pv)+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}=\Delta(pv)+w_{\mathrm{t}}$$

即技术功$w_{\mathrm{t}}=\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$



$$
\begin{aligned}
w_{\mathrm{t}}&=w-\Delta(pv)=w-\int\mathrm{d}(pv)\\
&\overset{\mathrm{re}}{=}\int p\,\mathrm{d}v-\int\mathrm{d}(pv)\\
&\overset{\mathrm{re}}{=}-\int v\,\mathrm{d}p
\end{aligned}
$$

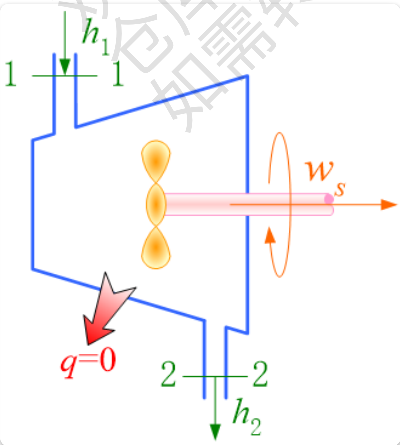
即：$w_{\mathrm{t}}\overset{\mathrm{re}}{=}-\int v\mathrm{d}p$，$\delta w_{\mathrm{t}}\overset{\mathrm{re}}{=}-v\mathrm{d}p$

两种功的区别：$w_{\mathrm{t}}\overset{\mathrm{re}}{=}-\int v\mathrm{d}p$，$w\overset{\mathrm{re}}{=}\int p\mathrm{d}v$

5.能量方程的应用

动力机：

如蒸汽轮机，燃气轮机

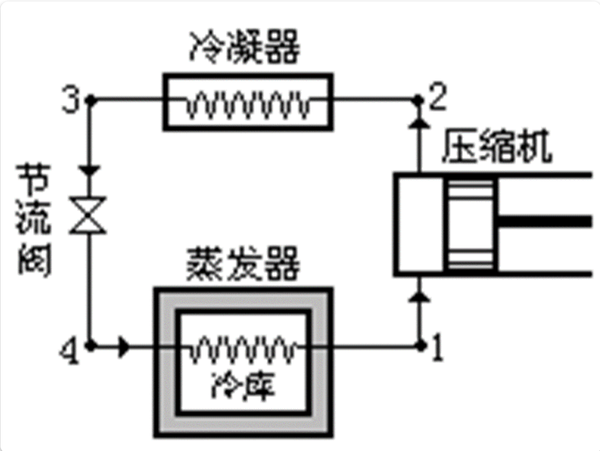


$$q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$$

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

$$h_1-h_2=w_{\mathrm{s}}=w_{\mathrm{t}}$$

压缩机：

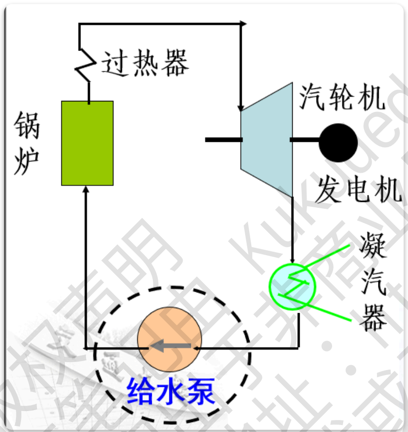


$$q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$$

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

$$h_1-h_2+q=w_{\mathrm{s}}=w_{\mathrm{c}}$$

水泵：

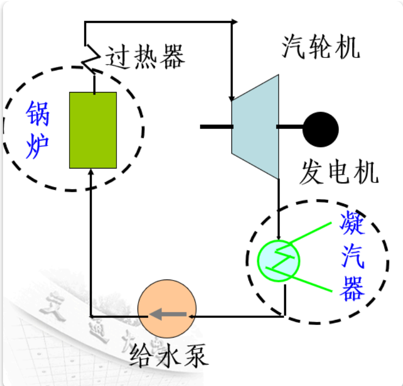


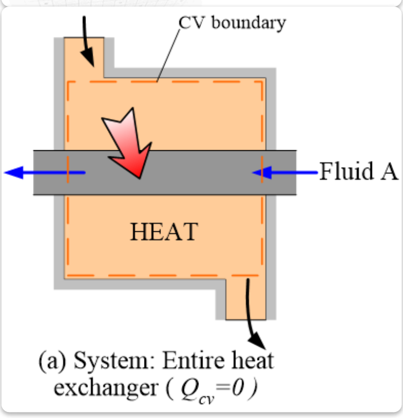
$$q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$$

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

$$h_1-h_2=w_{\mathrm{s}}=w_{\mathrm{p}}$$

换热器：





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

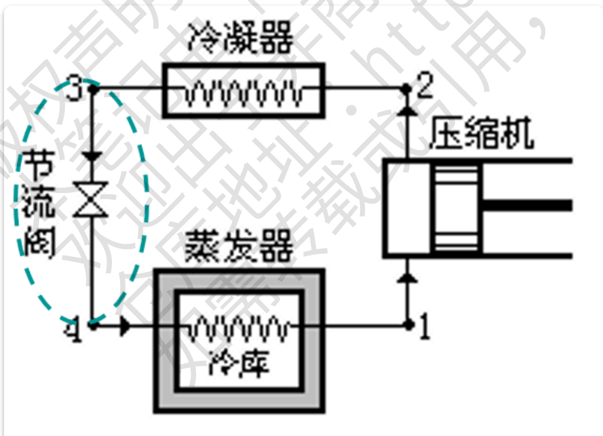
选取整个换热器作为研究对象，稳定流动开口系，其中$q=0,\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}=0,g\Delta z=0,w_{\mathrm{t}}=0$，于是：

$$\Delta h=0$$

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

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

节流阀：



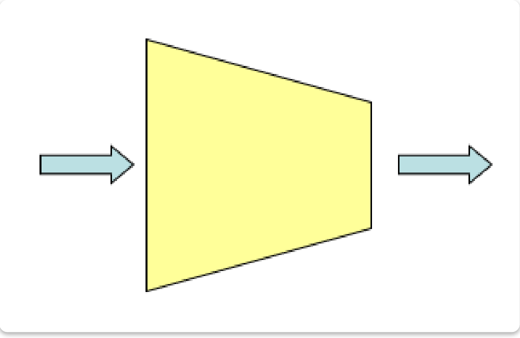
$$q=\Delta h+\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}+g\Delta z+w_{\mathrm{sh}}$$

其中$q=0,\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}=0,g\Delta z=0,w_{\mathrm{t}}=0$，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：



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

其中$q=0,,g\Delta z=0,w_{\mathrm{t}}=0$，于是：

$$\frac{1}{2}\Delta c_{\mathrm{f}}^{2}=-\Delta h=h_1-h_2$$

> *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*