



第二章
热力学第一定律

2-1 热力学第一定律

1、能量守恒及转换定律：

自然界中物质所具有的能量，既不能创造也不能消灭，而只能从一种能量形式转换为另一种能量形式，转换中能量的总量守恒。

2、热力学第一定律：

能量守恒及转换定律用于**热能和其他能量形式转换关系**时的表述。它说明：**热能作为一种能量形式，可以和其他能量形态相互转换，转换中能量的总量守恒。**

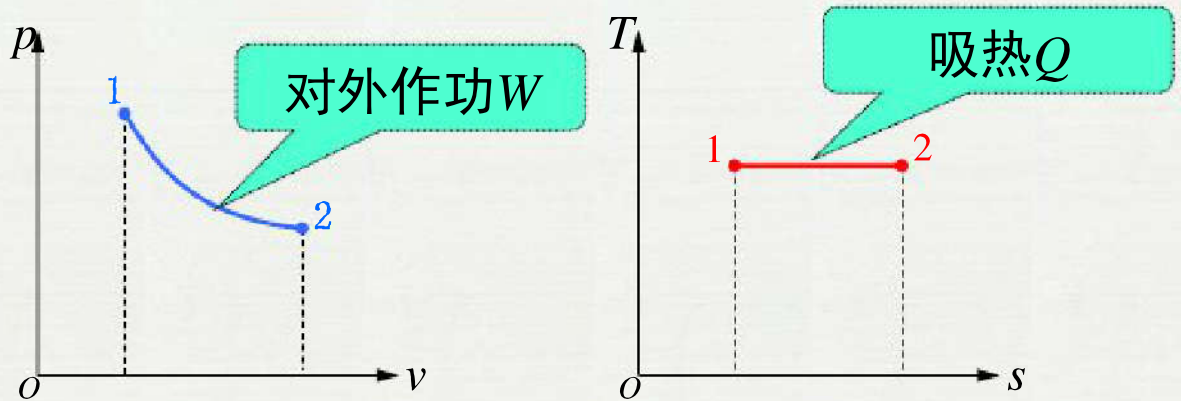
输入系统的能量 - 输出系统的能量 = 系统总能量的变化



输入系统的能量 - 输出系统的能量 = 系统总能量的变化

3、对于经历了热力过程的系统

热力学系统与外界进行功和热量的交换时，必然引起系统总能量的变化。

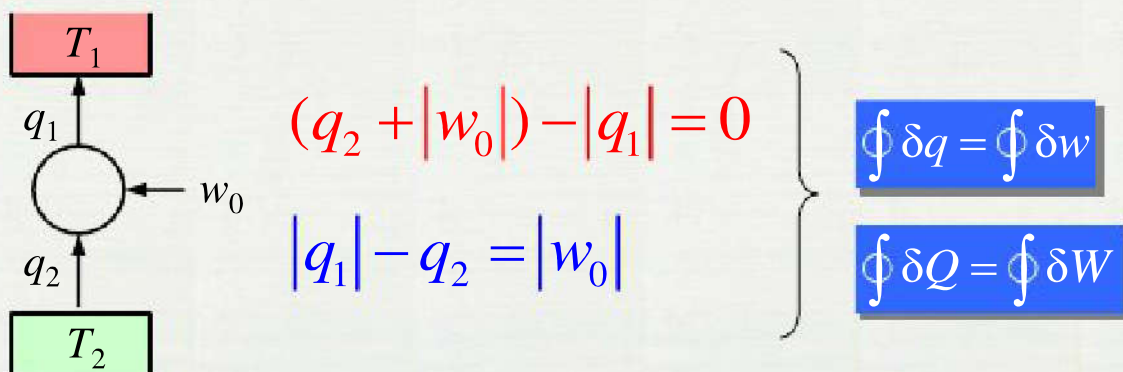
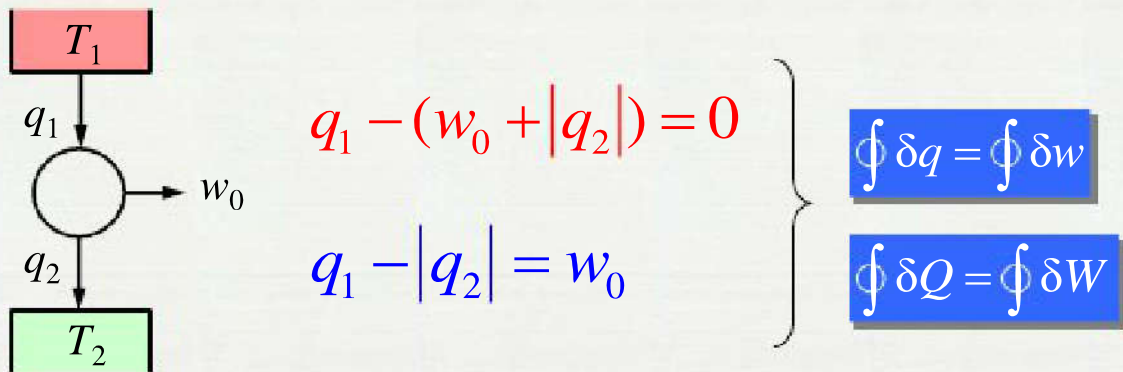


$$Q - W = \Delta E \Rightarrow Q = \Delta E + W$$

E : 系统总能量

输入系统的能量 - 输出系统的能量 = 系统总能量的变化

4、对于经历了**热力循环**的系统



2-2 闭口系统能量方程式

一、热力学能 U 和系统总能量 E

1、热力学能 U

(1) 系统内部各种形式能量的总和称为系统的**热力学能（内能）**，符号 U ，单位J。

1kg工质： $u=U/m$ ，称为**比热力学能**，单位J/kg。

(2) 热力学能包括气体**内部动能**和气体**内部位能**。

(3) **热力学能 U 是状态参数**

气体内部动能取决于气体分子热运动（**内部动能是温度 T 的函数**）

气体内部位能取决于气体分子之间的相互作用力（**内部位能和比体积 v 有关**）

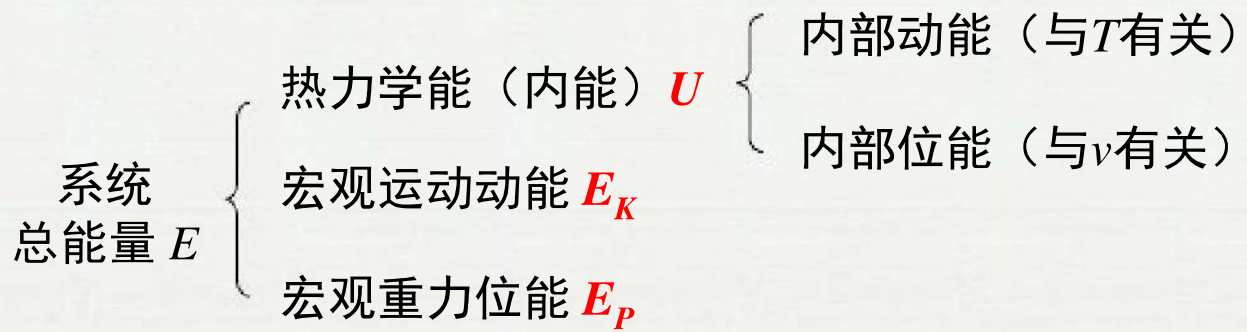
} U 是状态参数

$$u = u_1(v, T)$$

$$u = u_2(p, T)$$

$$u = u_3(p, v)$$

2、系统总能量 E



$$E = E_K + E_P + U$$

$$e = e_K + e_P + u$$

二、闭口系统能量方程

1. 一般情况下，闭口系统不作整体位移，系统 E_K 和 E_P 的变化均为零！

$$\Delta E = \Delta E_K + \Delta E_P + \Delta U \Rightarrow \Delta E = \Delta U$$

2. 微元过程：

$$Q = \Delta E + W \Rightarrow \delta Q = dE + \delta W$$

$$\Rightarrow \delta Q = dU + \delta W$$

$$\delta q = du + \delta w$$

3. 热力过程1-2：

$$Q = \Delta E + W \Rightarrow Q_{1-2} = \Delta E_{1-2} + W_{1-2}$$

$$\Rightarrow Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + W_{1-2}$$

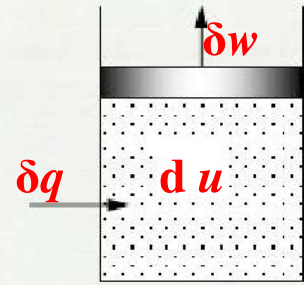
$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + w_{1-2}$$

适用于任何
热力过程！

$$\delta q = du + \delta w$$

$$q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + w_{1-2}$$

4. 物理意义：闭口系统在热力过程中从外界接受的热量，一部分用于增加系统的热力学能，另一部分用于对外界做功。



5. 闭口系统能量方程适用范围

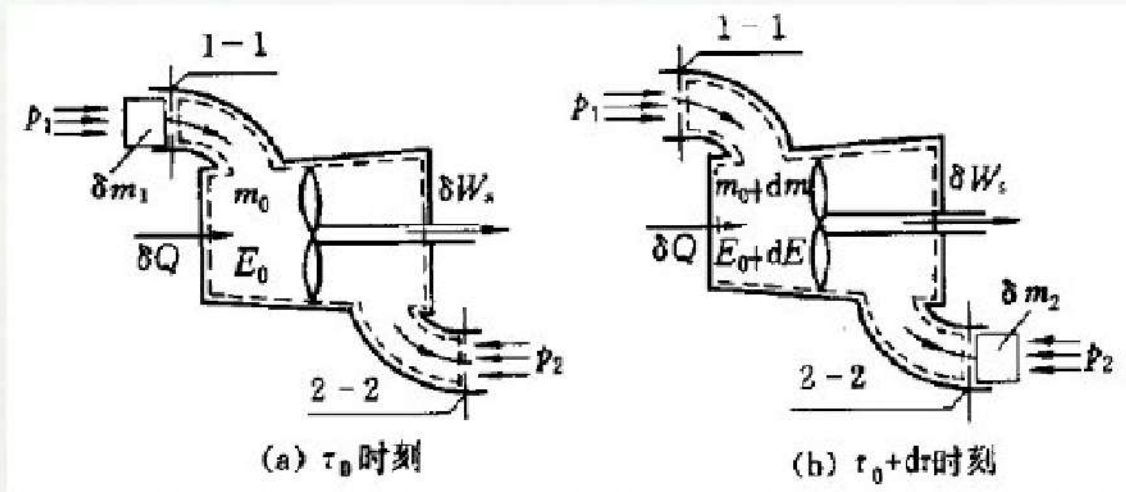
$\delta q = du + \delta w$ 适用于任何过程（可逆&不可逆）

若系统经过的是无耗散准静态过程（可逆过程），则： $\delta w = pdv$

$\delta q = du + pdv$ 仅适用于可逆过程



2-3 开口系统能量方程式



在 $d\tau$ 时间内:

质量为 δm_1 的微元工质流入系统

质量为 δm_2 的微元工质流出系统

系统内工质质量增加

$$dm = \delta m_1 - \delta m_2$$

系统从外界接受热量 δQ

对外输出轴功 δW_s

dm 引起系统的能量变化

.....

系统总能量增加了 dE

一、关于开口系统的**质量流量** q_m

根据质量守恒定律：开口系统内增加的质量应等于流入和流出系统的质量之差：

$$dm = \delta m_1 - \delta m_2$$

质量流量：单位时间内流过某截面的质量， $q_m = m/t$ ，单位kg/s。

上式两边同除时间间隔 $d\tau$ ：

$$\frac{dm}{d\tau} = \frac{\delta m_1}{d\tau} - \frac{\delta m_2}{d\tau} \Rightarrow \frac{dm}{d\tau} = q_{m1} - q_{m2}$$

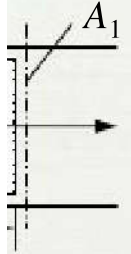
单位时间内开口系统中工质质量增加的数量，等于流入和流出系统的流量之差。

二、系统和外界的能量交换

1、开口系统和外界间所传递的热量为 δQ

2、开口系统和外界所传递的功分为：**轴功 δW_s** 和**推动功**。

(1) **轴功 δW_c** ：**开口系统和外界之间通过进出口边界以外的**



3、工质流入流出带入系统的净能量

若系统进、出口处单位质量工质所具有的总能量为 e_1 和 e_2

微元工质 δm_1 流进系统
 带入能量 $e_1\delta m_1$

微元工质 δm_2 流出系统
 带走能量 $e_2\delta m_2$

工质流入流出
 带入系统的净能量：

$$e_1\delta m_1 - e_2\delta m_2$$

$$e = u + e_K + e_P \quad \Rightarrow \quad e = u + \frac{c_f^2}{2} + gz$$

三、开口系统能量方程

系统总能量增加 dE

- 开口系统和外界间所传递的热量 δQ
- 开口系统和外界间所传递的功
 - 对外输出轴功 δW_s
 - 推动功 $p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1$
- 工质流入、流出带入系统的净能量

$$e_1 \delta m_1 - e_2 \delta m_2 = \left(\frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 + u_1 \right) \delta m_1 - (\dots) \delta m_2$$

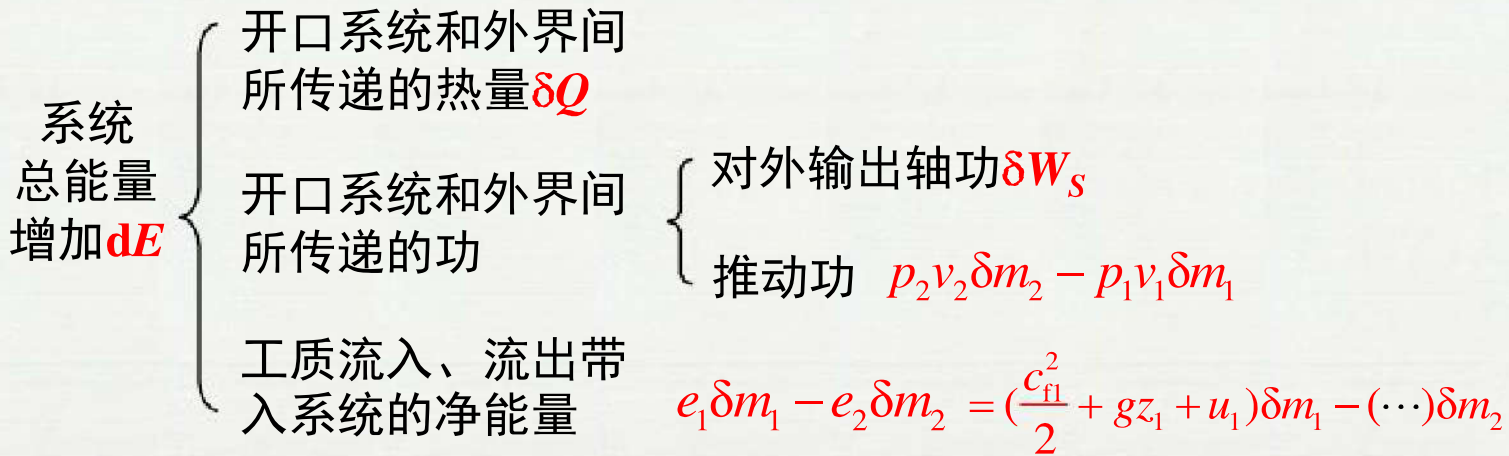
输入系统的能量 - 输出系统的能量 = 系统总能量的变化

$$\delta Q + (e_1 \delta m_1 - e_2 \delta m_2) - \delta W_s - (p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1) = dE$$

$$dE = \delta Q - [\delta W_s + (p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1)] + \left(\frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 + u_1 \right) \delta m_1 - \left(\frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 + u_2 \right) \delta m_2$$



三、开口系统能量方程



根据热力学第一定律，开口系统中总能量的增加来源于两部分：一部分是**系统由外界接受的热量**与**系统对外做功**两者之差的净能量；另一部分是**流入和流出系统的工质所带入系统的净能量**。

$$dE = \delta Q - [\delta W_s + (p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1)] + (e_1 \delta m_1 - e_2 \delta m_2)$$

$$dE = \delta Q - [\delta W_s + (p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1)] + (\frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 + u_1) \delta m_1 - (\frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 + u_2) \delta m_2$$



$$dE = \delta Q - [\delta W_s + (p_2 v_2 \delta m_2 - p_1 v_1 \delta m_1)] + \left(\frac{c_{f1}^2}{2} + gz_1 + u_1\right) \delta m_1 - \left(\frac{c_{f2}^2}{2} + gz_2 + u_2\right) \delta m_2$$

$$\Rightarrow \delta Q = dE + \delta m_2 \left[\left(u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2\right) + p_2 v_2 \right] - \delta m_1 \left[\left(u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1\right) + p_1 v_1 \right] + \delta W_s \quad (2-6)$$

按单位时间计的能量转换关系式：

$$\Rightarrow \dot{Q} = \frac{dE}{d\tau} + q_{m2} \left[\left(u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2\right) + p_2 v_2 \right] - q_{m1} \left[\left(u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1\right) + p_1 v_1 \right] + \dot{W}_s \quad (2-6a)$$

$\dot{Q} = \delta Q / d\tau$ 指单位时间中系统的吸热量

$\dot{W}_s = \delta W_s / d\tau$ 指系统所作轴功的功率 P

$q_m = \delta m / d\tau$ 指进口（出口）质量流量

2-4 稳定状态稳定流动能量方程

一、稳定流动能量方程

一般情况下，能量转换装置都是在稳定条件下工作的。

稳定流动过程：如果系统和外界间传递的热量和功量保持稳定不变，且在系统内各处及进口、出口截面处，工质的热力学状态和流速、流量均保持不变。那么这种过程称为稳定状态稳定流动过程，简称~。

1、系统内所包含的工质质量保持不变：

$$\frac{dm}{d\tau} = q_{m1} - q_{m2} = 0 \quad \Rightarrow \quad q_{m1} = q_{m2} = q_m = \text{Const}$$

2、系统内各处的总能量保持不变：

$$\frac{dE}{d\tau} = 0$$

工质始终以一定的流量经过进、出口截面

一、稳定流动能量方程

$$q_{m1} = q_{m2} = q_m \quad \frac{dE}{d\tau} = 0$$

$$\dot{Q} = \frac{dE}{d\tau} + q_{m2} \left[(u_2 + \frac{1}{2} c_{f2}^2 + gz_2) + p_2 v_2 \right] - q_{m1} \left[(u_1 + \frac{1}{2} c_{f1}^2 + gz_1) + p_1 v_1 \right] + \dot{W}_s$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = q_m \left[(u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) / 2 + g(z_2 - z_1) \right] + \dot{W}_s$$

对于1kg工质，上式两边同除 q_m 。考虑到 $\dot{Q}/q_m = q$ 、 $\dot{W}_s/q_m = w_s$ 。

$$\Rightarrow q = (u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2) / 2 + g(z_2 - z_1) + w_s \quad (2-8a)$$

稳定流动过程中，系统接受的热量，一部分用于对外输出轴功及推动功，另一部分则用于使流过系统的工质增加热力学能、宏观动能及重力位能。

二、关于焓

1、定义

开口系统的热力学分析中经常遇到 $u+pv$ 这个量，所以令 $h=u+pv$ 。

h 为1kg工质的焓，称为比焓，单位：J/kg或kJ/kg。

H 为 m kg工质的焓，称为焓，单位：J或kJ。

$$h = u + pv$$

$$H = mh = m(u + pv) = U + pV$$

因为 u 、 p 、 v 都是状态参数，所以 $u+pv$ 也应该是状态参数，即 h 是状态参数。

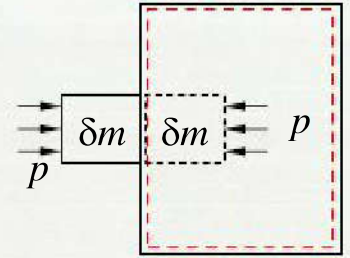


二、关于焓

2、焓的物理意义：

焓 h 是随工质流动跨越边界而转移的能量。

热力学能 u 是工质内部储存能量的唯一形式。



当有微元工质 δm 进入开口系统时，带入系统的能量包括：微元工质的热力学能 $u\delta m$ 和外界所作的推动功 $pv\delta m$ 。系统总能量变化为 dE_0 。按照热力学第一定律，该开口系统的能量关系为：

$$dE_0 = u\delta m + pv\delta m = h\delta m$$

微元工质带入系统的焓，转换为系统工质的热力学能而存贮于系统。反之，微元工质离开系统也将带走焓，而且所带走的焓正是系统工质的热力学能所转换的。



三、一些方程的继续推算。

1、稳定流动能量方程：

$$q = (u_2 - u_1) + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s \quad (2-8a)$$

$$q = (h_2 - h_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s \quad (2-8b)$$

2、热力学第一定律能量方程的另一主要形式。

$$\delta q = du + p dv \quad (2-4b)$$

$$\delta q = d(h - pv) + p dv = dh - d(pv) + p dv = dh - v dp$$

$$\delta q = dh - v dp \quad (2-9)$$

2-5 轴功

一、轴功

根据稳定流动能量方程，可以得到轴功与其他形式能量之间的关系式为：

$$q = (h_2 - h_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s$$

$$\Rightarrow w_s = [q - (u_2 - u_1)] - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 - g(z_2 - z_1)$$

若工质变化过程可看作是无耗散准静态过程，则有：

$$q - (u_2 - u_1) = w = \int_1^2 p dv, \text{ 代入上式:}$$

$$w_s = \int_1^2 p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 - g(z_2 - z_1)$$

轴功的物理意义：稳定流动过程中开口系统所作的轴功，是工质受热得到的相当于**容积变化功的机械能**，在扣除了**推动工质流动的净推动功**以及**增加的流动动能、重力位能**之后，通过边界输出的功。

二、技术功

1、技术功：工程上直接可以利用的机械能，记作 w_t $\left\{ \begin{array}{l} w_s \\ g(z_2 - z_1) \\ (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 \end{array} \right.$

$$w_t = (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s$$

$$w_s = \int_1^2 p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) - (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 - g(z_2 - z_1)$$

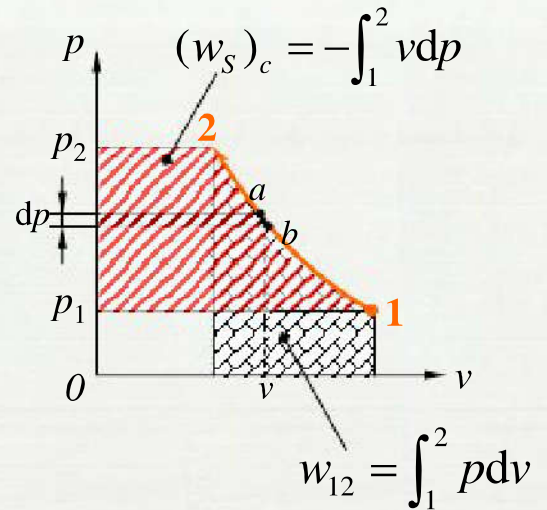
$$\Rightarrow w_t = \int_1^2 p dv - (p_2 v_2 - p_1 v_1) = - \int_1^2 v dp$$

等式右侧**负号**：压力升高技术功为负，外界对系统作技术功。

2、技术功在 p - v 图上的表示

$$\delta w_t = -v dp$$

$$w_{t,1-2} = -\int_1^2 v dp$$



3、当进出口流速相近、高度差不大时：

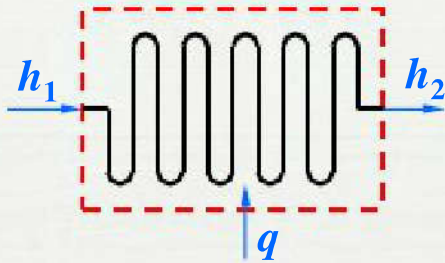
$$w_t = (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s$$

$$\Rightarrow w_t = w_s = -\int_1^2 v dp$$

2-6 稳定流动能量方程式应用举例

$$q = (h_2 - h_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s$$

一、加热器或冷却器

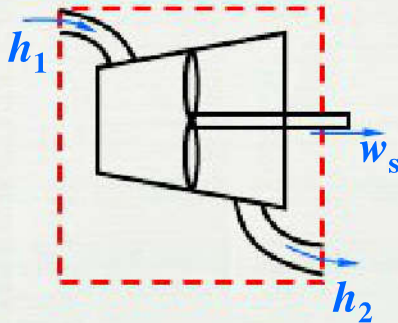


主要任务是传递热量，如锅炉、燃烧室、太阳能集热器、热水器等

特点： $w_s=0$ $c_{f2} \approx c_{f1}$ $z_2 \approx z_1$

因此： $q = h_2 - h_1$

二、涡轮机或压气机



特点： $q=0$ $c_{f2} \approx c_{f1}$ $z_2 \approx z_1$

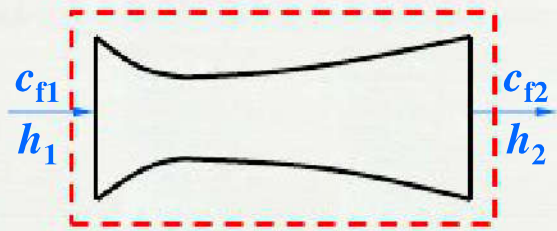
因此： $w_s = h_1 - h_2$

涡轮机：工质膨胀，依靠工质的焓降而输出轴功；

压气机：消耗轴功而压缩工质使工质的焓增加。

$$q = (h_2 - h_1) + (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2 + g(z_2 - z_1) + w_s$$

三、喷管



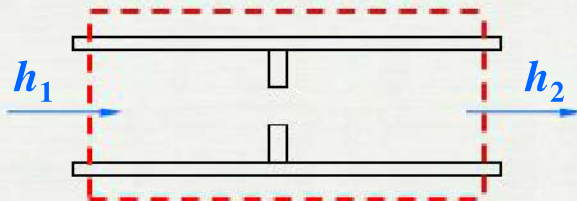
特点: $w_s = 0$ $q = 0$ $z_2 \approx z_1$

因此: $h_1 - h_2 = (c_{f2}^2 - c_{f1}^2)/2$

喷管中工质降压膨胀, 依靠工质的焓降而使工质的流动动能增大。

四、绝热节流

工质流过管道中截面突然缩小的部分, 而发生压力降低的现象称为~



特点: $w_s = 0$ $q = 0$ $z_2 \approx z_1$ $c_{f2} = c_{f1}$

因此: $h_1 = h_2$