

華東理工大學

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



第三章 热力学第一定律

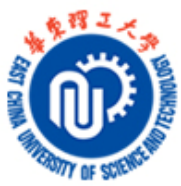


主要内容



- 3.1 **热力学能和总能**
- 3.2 **闭口系统能量方程**
- 3.3 开口系统能量方程
- 3.4 **开口系统稳态稳流能量方程**
- 3.5 稳态稳流能量方程的应用





热力学第一定律实质

□ 热力学第一定律实质

- ✓ 实质：能量守恒与转换定律在热力学过程中的应用。
- ✓ 工程热力学领域的表述：在工程热力学的范围内，主要考虑热能与机械能之间的相互转换与守恒，因此热力学第一定律可表述为：**热可以变为功，功也可以变为热，在相互转变时能的总量是不变的。**
- ✓ 根据热力学第一定律，为了获得机械能，则必须花费热能或其他形式能量，**第一类永动机是不可能实现的。**

热力学第一定律实质

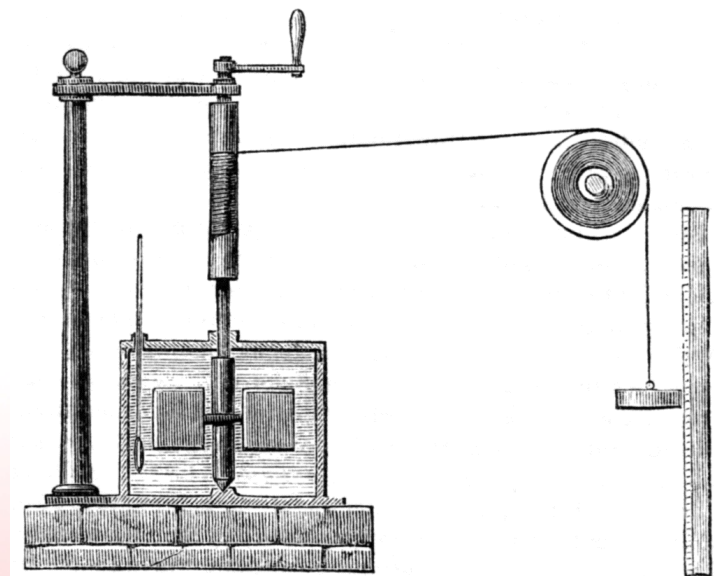
□ 焦耳实验

- ✓ 重物下降，输入功，绝热容器内水温 $T \uparrow$
去掉绝热，水温 $T \downarrow$ ，恢复到原温，放出热量给环境
- ✓ 水温升高可测得热量，重物下降可测得功
- ✓ 热功当量 (Mechanical Equivalent of Heat):

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

- ✓ 工质经历循环:

$$\oint \delta Q = \oint \delta W$$



3.1 热力学能和总能

□ 热力学能(系统内部): 与系统内工质的分子结构及微观运动形式有关

$$\text{热力学能 } U \left\{ \begin{array}{l} \text{内动能} = f(T) \\ \text{内位能} = f(v, T) \\ \text{化学能、原子核能、电磁能} \dots \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{分子移动} \\ \text{分子转动} \\ \text{分子振动} \end{array} \right.$$

- ✓ 气体的热力学能 $u=f(T, v)$ 。
- ✓ 对于理想气体, 因分子间忽略相互作用力, 没有内位能, 故热力学能仅包括分子间动能, 即 $u=f(T)$ 。

3.1 热力学能和总能

□ 外部储存能

✓ 宏观动能

$$E_k = \frac{1}{2} mc^2$$

✓ 重力位能

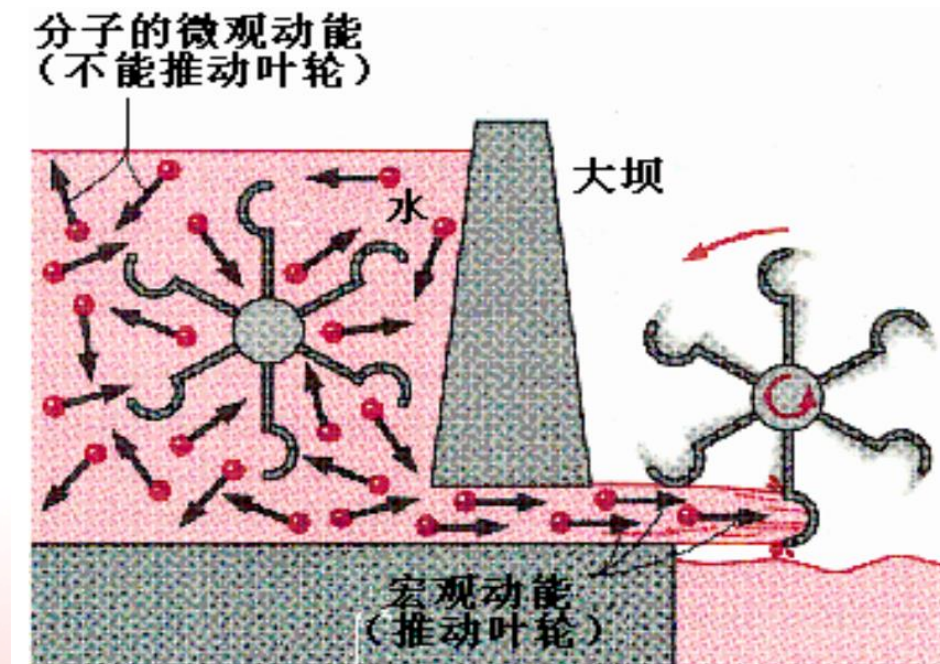
$$E_p = mgz$$

□ 系统的总能

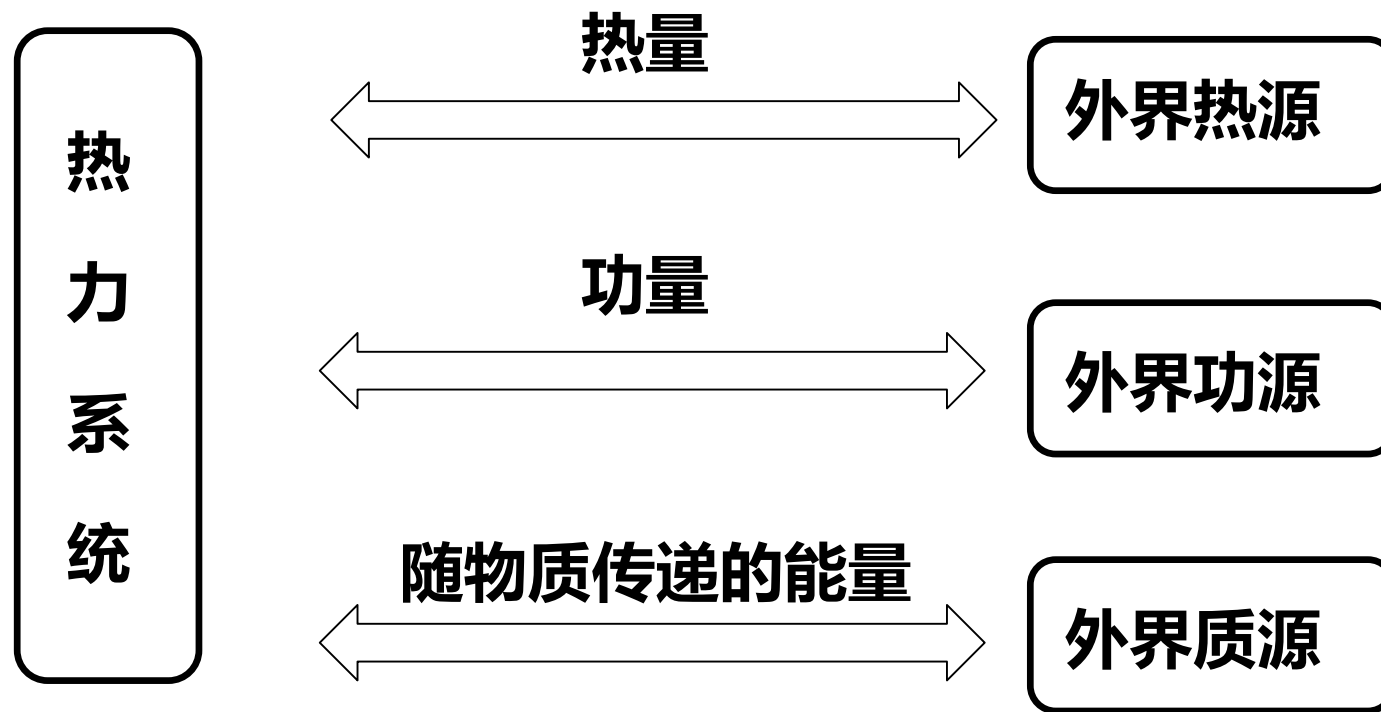
$$E = U + \frac{1}{2} mc^2 + mgz$$

比总能 $e = u + \frac{1}{2} c^2 + gz$

注意：宏观动能与内动能的区别；流体静止时无宏观动能，但内动能依然存在。



3.2 闭口系统能量方程



闭口系统： 没有物质穿过边界的系统；与外界传递的能量只有热量和功量两种形式。

3.2 闭口系统能量方程

- 热力系统变化过程中，任何系统、任何过程均遵循以下原则：

$$\text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \text{系统中储存能量的增加}$$

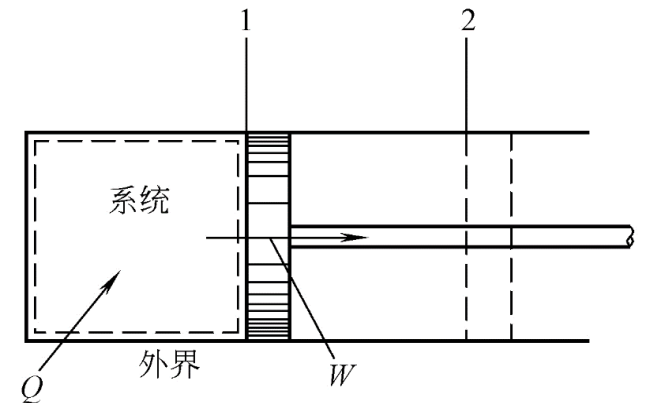
取气缸中的工质为系统，在热力过程中系统从外界热源取得热量 Q ，对外界做膨胀功 W ：

$$Q - W = E_2 - E_1 = \Delta E$$

$$E = U + \cancel{\frac{1}{2}mc^2} + \cancel{mgz} + \cancel{pV} \quad \text{对于闭口系统}$$

$$\Delta E = \Delta U = U_2 - U_1$$

$$\Rightarrow Q = \Delta U + W$$



3.2 闭口系统能量方程

■ 闭口系统能量方程不同形式

$$Q = \Delta U + W \quad \triangleright m \text{ kg 工质经过有限过程}$$

$$\delta Q = dU + \delta W \quad \triangleright m \text{ kg 工质经过微元过程}$$

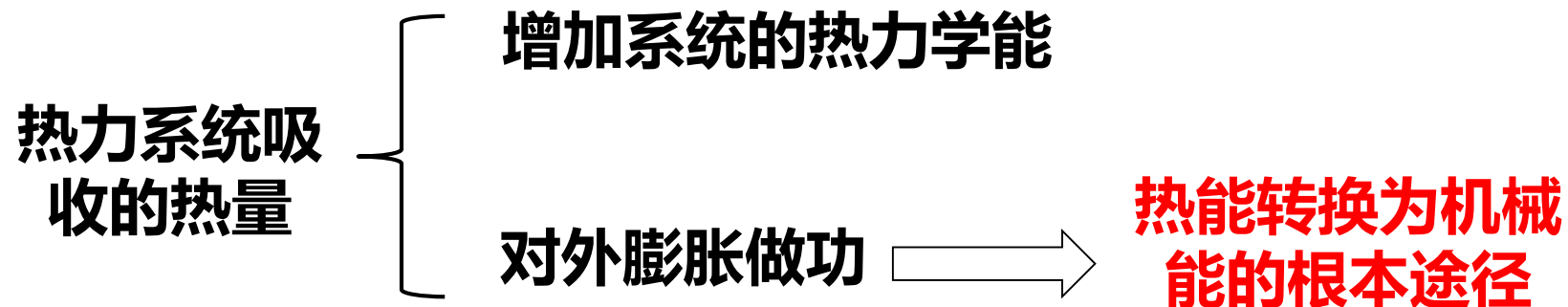
$$q = \Delta u + w \quad \triangleright 1 \text{ kg 工质经过有限过程}$$

$$\delta q = du + \delta w \quad \triangleright 1 \text{ kg 工质经过微元过程}$$

✓ 以上各能量方程式适用于闭口系统各种过程(可逆或不可逆)及各种工质(理想气体、实际气体或液体);

3.2 闭口系统能量方程

- 初终态需处于平衡状态;
- 能量方程式是代数方程式;
- 正负号的规定: 吸热以及系统对外界做功为**正**,
放热以及外界对系统做功为**负**;



- 闭口系统能量方程反映了热功转换的实质, 是热力学第一定律的基本方程式。

3.2 闭口系统能量方程

■ 对于可逆过程而言

$$\delta w = p dv \quad \delta q = T ds$$

$$w = \int_1^2 p dv \quad q = \int_1^2 T ds$$

$$\Rightarrow T ds = du + p dv$$

$$\int_1^2 T ds = \Delta u + \int_1^2 p dv$$

上式适用于闭口系统可逆过程。

3.2 闭口系统能量方程

■ 热力学第一定律在循环过程中的应用

$$q_{12} = u_2 - u_1 + w_{12}$$

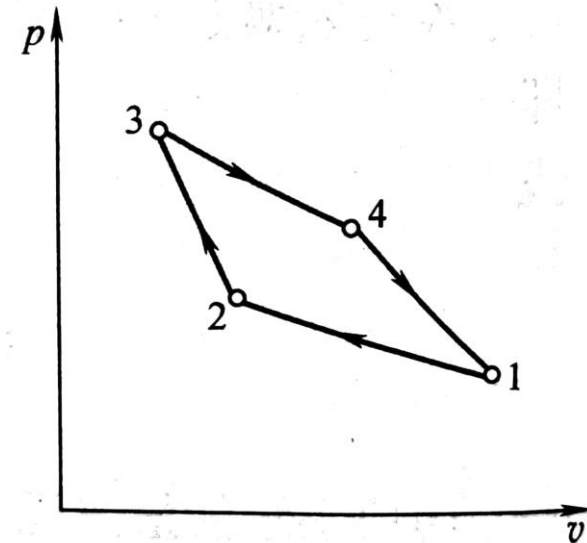
$$q_{23} = u_3 - u_2 + w_{23}$$

$$q_{34} = u_4 - u_3 + w_{34}$$

$$q_{41} = u_1 - u_4 + w_{41}$$

$$q_{12} + q_{23} + q_{34} + q_{41} = w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41}$$

$$\oint \delta q = \oint \delta w$$



- ✓ 循环工作的热力发动机向外界不断地输出机械功必须要消耗一定的热能；
第一类永动机是不可能制造出来的。

3.2 闭口系统能量方程

□ 理想气体热力学能变化计算

$$\left. \begin{array}{l} \text{定容过程 } \delta q_V = du_V \\ c_V = \frac{\delta q_V}{dT} \end{array} \right\} du = c_V dT \quad \Delta u = \int_1^2 c_v dT \text{ 定值/真实/平均定容比热}$$

适用范围： 用于计算理想气体一切过程的热力学能变化；对于实际气体，仅适用于计算定容过程的热力学能变化。

$$\text{热力学第一定律第一解析式} \left\{ \begin{array}{l} \delta q = c_V dT + \delta w \quad \text{理想气体} \\ Tds = du + pdv \quad \text{可逆过程} \\ Tds = c_V dT + pdv \quad \text{理想气体的可逆过程} \end{array} \right.$$

3.2 闭口系统能量方程

例3.1 一闭口系统经历了一个由四个过程组成的循环，试填充表中所缺数据，并判断是正循环？逆循环？

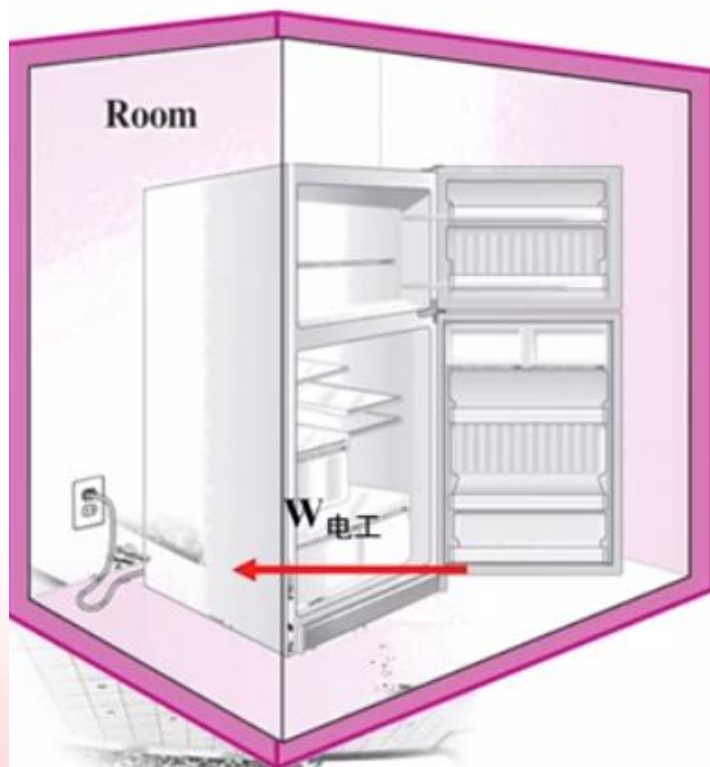
过程	Q(kJ)	W(kJ)	ΔE (kJ)
1-2	1100	0	?
2-3	0	100	?
3-4	-950	0	?
4-1	0	?	?

例3.2 有一绝热刚性容器，有隔板将它分成A、B两部分，开始时，A中盛有 $T_A=300\text{K}$ ， $P_A=0.1\text{MPa}$ ， $V_A=0.5\text{m}^3$ 的空气；B中盛有 $T_B=350\text{K}$ ， $P_B=0.5\text{MPa}$ ， $V_B=0.2\text{m}^3$ 的空气。求打开隔板后两容器达到平衡时的温度和压力。

3.2 闭口系统能量方程

思考题1：门窗紧闭的房间内有一台电冰箱正在运行，若敞开冰箱的大门就有一股凉气扑面，感到凉爽。于是有人就想通过敞开冰箱大门达到降低室内温度的目的，你认为这种想法可行吗？

方法一：选房间作为研究对象



If we take the entire room-including the air and the refrigerator-as the system

闭口系 $\cancel{Q} = \Delta U + W$

$$\Delta U + W = \Delta U - |W_{\text{电}}| = 0$$

$$\Delta U = U_2 - U_1 = |W_{\text{电工}}| > 0$$

$$T_2 - T_1 > 0, \quad T \uparrow$$

3.2 闭口系统能量方程

方法二：选冰箱作为研究对象



Take the refrigerator as the system

闭口系

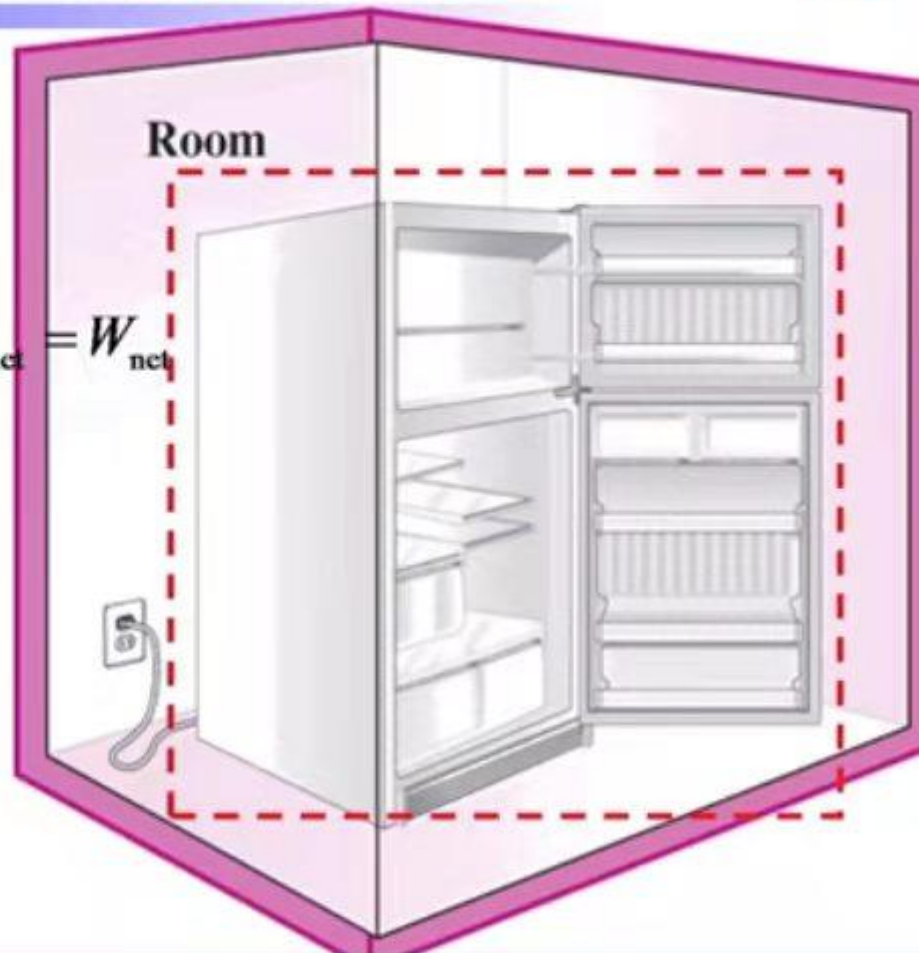
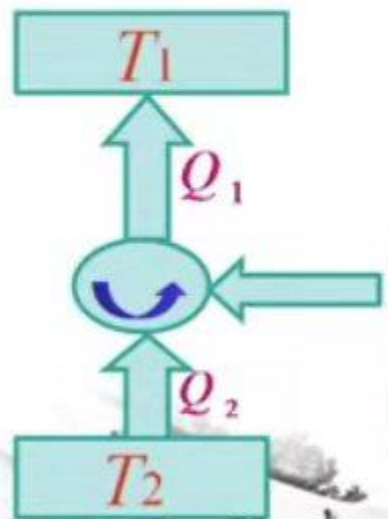
$$\delta Q = dU + \delta W$$

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

$$|Q_2| - |Q_1| = -|W_{\text{电工}}|$$

$$|Q_1| - |Q_2| = |W_{\text{电工}}| > 0$$

$$T_2 - T_1 > 0, \quad T \uparrow$$



3.2 闭口系统能量方程

思考题2： 既然敞开冰箱大门不能降温，为什么在门窗紧闭的房间内安装空调器后却能使得温度降低呢？

□ 以房间为系统：闭口系

□ 闭口系能量方程：

$$Q = \Delta U + W$$

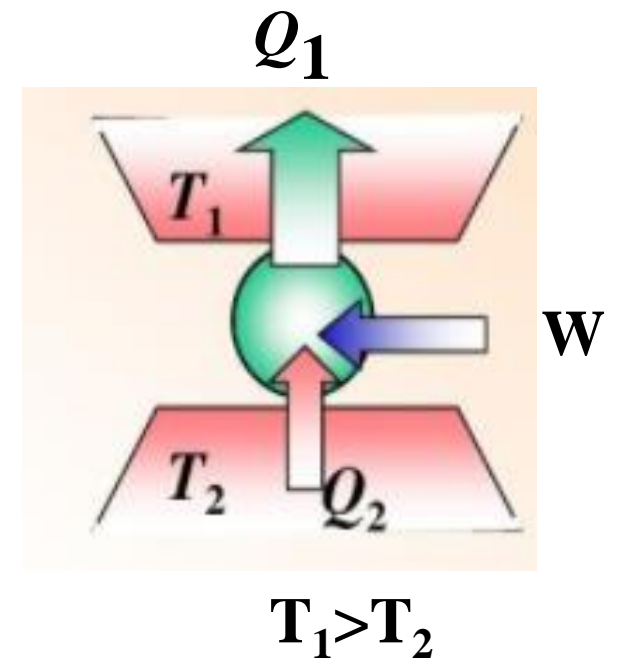
$$W < 0 \text{ (对内做功)}$$

$$Q < 0 \text{ (对外散热)}$$

$$\Delta U = Q - W$$

如果 $|Q| > |W|$

温度 $T \downarrow$



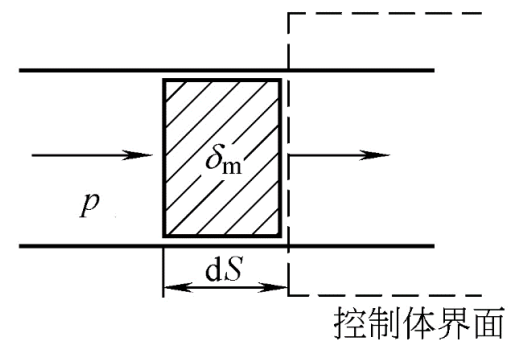
3.3 开口系统能量方程

□ 流动功 w_f (推动功)

流动功是流动过程中后面流体推开前面流体流动而传递的机械功，它是维持流体正常流动所必须传递的能量。

$$\delta w_f = F dx = p f ds = p \delta V = p v dm$$

$$W_f = \int_m p v \delta m = p v m = p V$$



移动单位质量工质进、出控制体的净流动功 $w_f = w_{f,\text{入}} + w_{f,\text{出}} = p_2 v_2 - p_1 v_1$

- ✓ 流动功取决于进出口界面工质的热力状态，与热力过程无关。
- ✓ 气体流入真空容器过程；

3.3 开口系统能量方程

□ 随流动工质传递的能量

✓ 工质本身具有的总能

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz$$

比总能 $e = u + \frac{1}{2}c^2 + gz$

✓ 流动工质传递的总能量

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz + pV$$

$$e = u + \frac{1}{2}c^2 + gz + pv$$

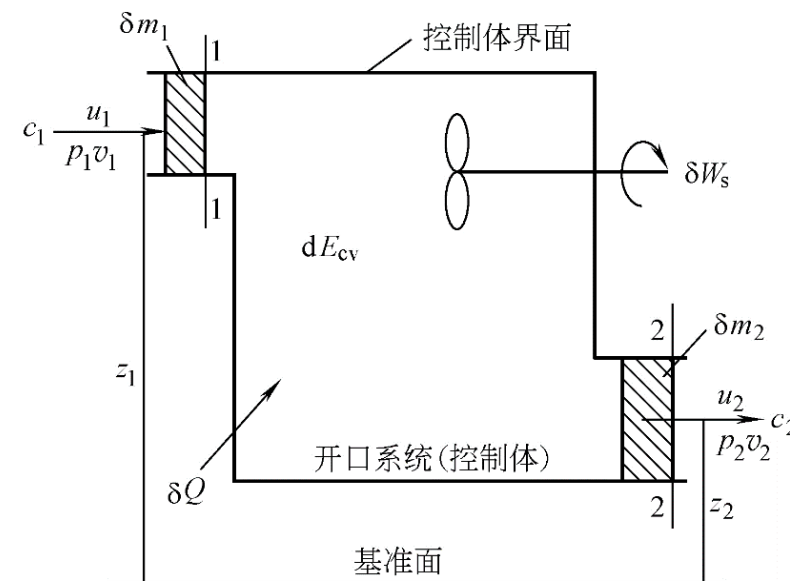
3.3 开口系统能量方程

□ 开口系统能量方程

- ✓ 稳态稳流过程(系统内的质量和能量不随时间变化, 各点参数保持一致)
- ✓ 不稳定流动过程
- ✓ 不稳定流动过程能量方程

$$\delta Q = \left(u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} c_2^2 + g z_2 \right) \delta m_2 - \left(u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} c_1^2 + g z_1 \right) \delta m_1 + \delta W_s + dE_{cv}$$

适用范围：不稳定流动和稳定流动，可逆和不可逆过程都适用，对于闭口系统也适用。



3.3 开口系统能量方程

□ 焓及其物理意义

流动工质传递的总能量中取决于工质的热力状态的那部分能量。

$$E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz + pV \qquad H = U + pV$$

物理意义：

- ✓ 焓是热力学广延参数；
- ✓ 焓作为一个热力学状态参数，**对所有系统都存在，并非仅存在于流动系统**；
- ✓ 对于开口系统，焓($u+Pv$)代表着伴随工质流动而迁移的与工质热力学状态直接有关的那一部分能量；
- ✓ 对于闭口系统，焓($u+Pv$)只是一个复合状态参数，不是工质拥有的能量，无明确的物理意义。

$$\delta Q = \left(h_2 + \frac{1}{2}c_2 + gz_2 \right) \delta m_2 - \left(h_1 + \frac{1}{2}c_1 + gz_1 \right) \delta m_1 + \delta W_s + dE_{cv}$$



3.3 开口系统能量方程

例3.3 教材P47 稍加分析

例3.4 有一可自由伸缩、不计张力的容器内装有 $P_1=0.8\text{MPa}$, $t_1=27^\circ\text{C}$ 的空气, $V_1=8\text{m}^3$ 。由于泄漏, 袋内气体压力降到 $P_2=0.75\text{MPa}$, 温度不变, 称重后空气少了 10kg , 求过程中通过容器的换热量。已知大气压力 $P_0=0.1\text{MPa}$, 温度 $t_0=27^\circ\text{C}$ 。

解：如何选取热力系统？

3.4 开口系统稳态稳流能量方程

□ 稳态稳流能量方程表达式 (**P48, 稳态稳流概念**)

$$\delta m_1 = \delta m_2 = \dots = \delta m$$

$$dE_{cV} = 0$$

$$\delta Q = \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] \delta m + \delta W_s$$

$$Q = \left[(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) \right] m + W_s$$

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

开口系统稳态稳流能量方程的表达式, **适用于稳态稳流各种热力过程。**

3.4 开口系统稳态稳流能量方程

□ 技术功 w_t

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

热力过程中可被直接利用来做功的能量，统称为技术功。

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

引入技术功后，稳态稳流能量方程式可写成：

$$q = \Delta h + w_t$$

$$\delta q = dh + \delta w_t$$

$$w_t = q - \Delta h = (\Delta u + w) - (\Delta u + p_2 v_2 - p_1 v_1) = w + p_1 v_1 - p_2 v_2$$

- ✓ 技术功等于膨胀功与流动功的**代数和**；
- ✓ 技术功也是**过程量**，其值取决于初、终状态及过程特性。

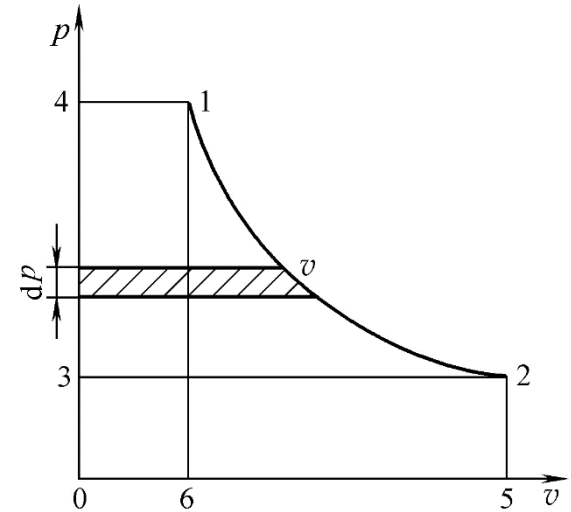
3.4 开口系统稳态稳流能量方程

□ 技术功 w_t

对于稳态稳流的**可逆过程**，技术功为：

$$\begin{aligned}\delta w_t &= \delta q - dh = (du + pdv) - d(u + pv) \\ &= du + pdv - du - pdv - vdp = -vdp\end{aligned}$$

不考虑工质动能和位能的变化 $w_t = w_s = w + p_1 v_1 - p_2 v_2$



可逆过程 $\delta q = dh + \delta w_t = dh - vdp = d(u + pv) - vdp$

$$= du + pdv + vdp - vdp = du + pdv$$

$$= du + \delta w$$

热力学第一定律的两个解析式可相互推导。

3.4 开口系统稳态稳流能量方程

□ 理想气体焓变计算

$$dh = c_p dT$$

$$\Delta h = \int_1^2 c_p dT \quad \text{注意定压比热容的合理选取}$$

适用范围：用于计算理想气体一切过程焓变的计算；对于实际气体，仅适用于计算定压过程焓的计算。

热力学第一定律第二解析式	{	$\delta q = c_p dT + \delta w_t$	理想气体
		$Tds = dh - vdp$	可逆过程
		$Tds = c_p dT - vdp$	理想气体的可逆过程

$$\delta q = dh + \delta w_t$$

3.4 开口系统稳态稳流能量方程

□ 工程热力学为什么常忽略动、位能变化

□ $q = \Delta h + e_k + e_p + w_s$

□ $c_1 = 1 \text{ m/s} \rightarrow c_2 = 30 \text{ m/s}$

$$e_k = (c_2^2 - c_1^2) / 2 = 0.449 \text{ kJ/kg}$$

□ $z_1 = 0 \text{ m} \rightarrow z_2 = 30 \text{ m}$

$$e_p = g \times (z_2 - z_1) = 0.3 \text{ kJ/kg}$$

□ 1bar下, 0 °C水的 $h_1 = 84 \text{ kJ/kg}$

100 °C水蒸气的 $h_2 = 2676 \text{ kJ/kg}$

□ $q = \Delta h + w_s$

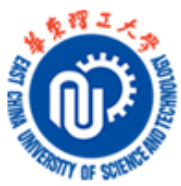
3.4 开口系统稳态稳流能量方程

例3.5 1kg空气从0.1MPa, 100°C变化到0.5MPa、1000 °C, 求 Δu 和 Δh
(设为理想气体)

- ①用定比热
- ②用平均比热

例3.6 某气体在压气机中被压缩。压缩前气体的参数是 $p_1=100\text{kPa}$, $v_1=0.845\text{m}^3/\text{kg}$, 压缩后的参数是 $p_2=800\text{kPa}$, $v_2=0.175\text{m}^3/\text{kg}$ 。设在压缩过程中每千克气体的热力学能增加150kJ, 同时向外界放出热量50kJ, 压气机每分钟生产压缩气体10kg。试求:

- (1) 压缩过程中对每千克气体所做的压缩功;
- (2) 每生产1kg压缩气体所需的轴功;
- (3) 带动此压气机要用多大功率的电动机;
- (4) 压缩前、后气体焓的变化。



3.5 稳态稳流能量方程的应用

□ 动力机(第十章)

利用工质在机器中膨胀获得机械功的设备。

$$q = (h_2 - h_1) + \frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) + g(z_2 - z_1) + w_s$$

$$g(z_2 - z_1) \approx 0$$

$$\frac{1}{2}(c_2^2 - c_1^2) \approx 0$$

$$q \approx 0$$

于是得 $W_s = h_1 - h_2$

3.5 稳态稳流能量方程的应用

□ 压气机(第四章)

消耗轴功使气体压缩以升高其压力的设备。

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

$$g \Delta z \approx 0$$

$$\frac{1}{2} \Delta c^2 \approx 0$$

$$q \approx 0$$

于是得 $-W_s = h_2 - h_1$

3.5 稳态稳流能量方程的应用

□ 热交换器

锅炉、蒸发器和冷凝器等各种热交换器在正常运行时的热量计算问题。

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

$$w_s = 0$$

$$g \Delta z = 0$$

$$\frac{1}{2} \Delta c^2 = 0$$

于是得 $q = h_2 - h_1$

3.5 稳态稳流能量方程的应用

□ 喷管(第九章)

喷管是一种使气流加速的设备。

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

$$w_s = 0$$

$$g \Delta z = 0$$

$$q = 0$$

于是得 $\frac{1}{2} (c_2^2 - c_1^2) = h_2 - h_1$

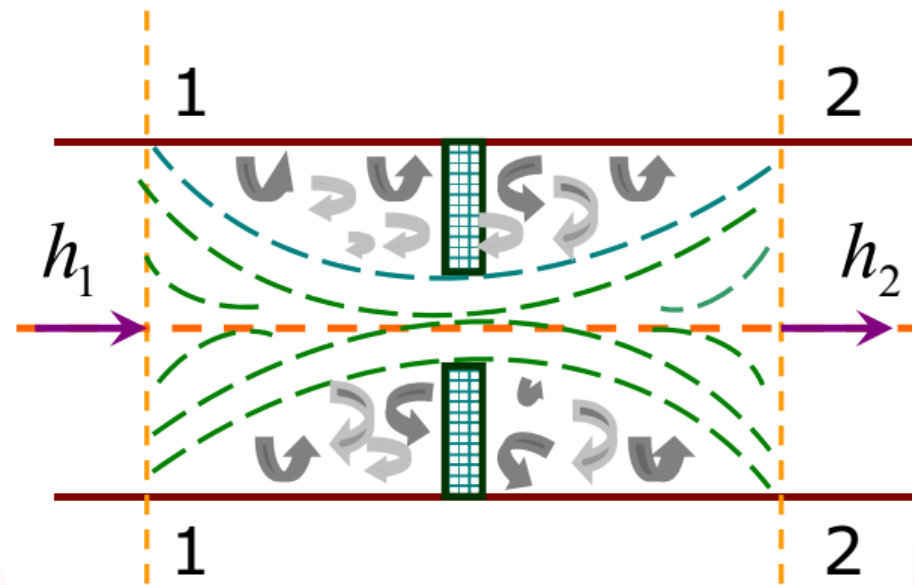
3.5 稳态稳流能量方程的应用

□ 流体的混合

$$m_1 h_1 + m_2 h_2 = (m_1 + m_2) h_3$$

□ 绝热节流

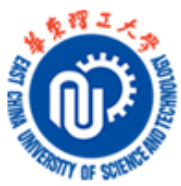
$$h_1 = h_2$$



3.5 稳态稳流能量方程的应用

例3.7 有一流体以 $c_1=3\text{m/s}$ 的速度通过 7.62cm 直径的管路进入动力机，进口处的焓为 2558.6kJ/kg ，热力学能为 2326kJ/kg ，压力为 689.48kPa ，而在动力机出口处的焓为 1395.6kJ/kg 。如果忽略流体动能和重力位能的变化，求动力机所发出的功率。设过程为绝热过程。

例3.8 空气的流量可以用一个装在空气管道中的电加热器来测量，如图3-12所示。在电加热器前后的空气温度可用两支温度计量出。若所用电加热器的散热率 $Q=750\text{W}$ ，通电后电加热器前后的空气温度分别为 $t_1=15^\circ\text{C}$ ， $t_2=18.1^\circ\text{C}$ 。假定电加热器后面的空气压力 $p=116\text{kPa}$ ，管道直径 $d=0.09\text{m}$ 。试求：每小时空气的质量流量及空气加热器后面的流速。空气的定压比热容 $c_p=1.01\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。



3.5 稳态稳流能量方程的应用

例3.9 供暖用风机连同加热器,把温度为 $t_1=0^\circ\text{C}$ 的冷空气加热到温度为 $t_3=250^\circ\text{C}$,然后送入建筑物的风道内,送风量为 0.56kg/s ,风机轴上的输入功率为 1kW ,设整个装置与外界绝热。试计算:

- (1) 风机出口处空气温度 t_2 ;
- (2) 空气在加热器中的吸热量;
- (3) 若加热器中有阻力,空气通过它时产生不可逆的摩擦扰动并带来压力降落,以上计算结果是否正确?

第三章 小结

□ 热力学第一定律表达式和适用条件:

$q = \Delta u + w \rightarrow$ 闭口系统, 任意过程、任意工质

$q = \Delta u + \int p dv \rightarrow$ 可逆过程

$q = \Delta h + \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_s \rightarrow$ 任意稳流过程、任意工质

$q = \Delta h + w_s \quad / \quad q = \Delta h + w_t \rightarrow$ 忽略动、位能变化

$q = \Delta h - \int v dp$

□ 可逆过程中热力学微分关系:

闭口系统: $\delta q = du + p dv$

稳流开口系统: $\delta q = dh - v dp$

后续很多式子基于此两式



第三章 小结

□ 气体吸热后一定膨胀，热力学能一定增加；

□ 符号的选用：

状态参数是点函数 (point function) \rightarrow 可以全微分 $\rightarrow d$

过程量是路径函数 (path function) \rightarrow 不能全微分 $\rightarrow \delta$ (微小量)

第三章 小结

□ 热力学能 u 与焓 h :

$U, H \rightarrow$ 广延参数; $u, h \rightarrow$ 比参数;

U : 系统本身具有的内部能量;

H : 不是系统本身具有的能量, 开口系中随工质流动而携带的, 取决于状态参数的能量。

□ 闭口系统的工质是否有焓值?

□ 请写出理想气体发生定容过程和定压过程的焓变和热力学能变化的表达式;

$$\left. \begin{array}{l} \delta q_v = du_v \\ c_v = \frac{\delta q_v}{dT} \end{array} \right\} du = c_v dT$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta q_p = dh_p \\ c_p = \frac{\delta q_p}{dT} \end{array} \right\} dh = c_p dT$$

第三章 小结

□ 四种功的关系

膨胀功：系统工质容积变化而传递的机械功；

流动功：维持流体流动所必需的功；

轴功：以轴的形式对外输出的功；

技术功：从技术的角度能够被回收的功；

$$w_t = \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

忽略动能与位能，技术功与轴功： $w_t = w_s$

$$w_t = w + p_1 v_1 - p_2 v_2 = w - w_f$$

技术功等于膨胀功与流动功的代数和。

第三章 小结

□ 四种功的关系

$$\square \quad w_t = \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_s$$

$$\square \quad q = \Delta u + w$$

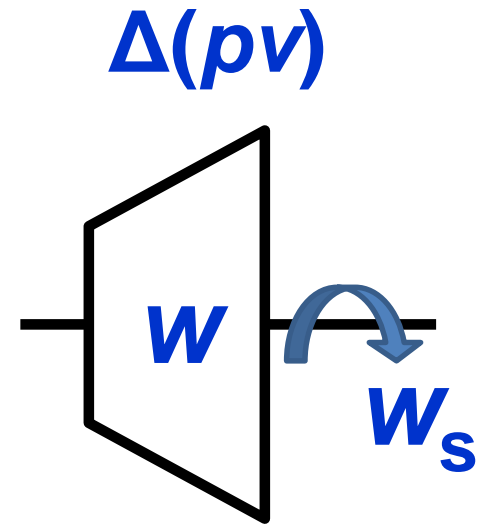
$$q = \Delta h + w_t = \Delta u + \Delta(pv) + w_t$$

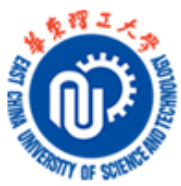
$$\square \quad w = \Delta(pv) + w_t$$

$$= \Delta(pv) + \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_s$$

□ **w是做功的根源**

一般情况下忽略动、位能的变化: $w_s \approx w_t$





第三章 小结

□ 深刻理解闭口系统能量方程式与闭口系统能量方程式的关系；
热力学第一定律的各种能量方程在形式上虽有不同，但由热变功的实质都是一致的，只是不同场合不同应用而已。

□ 开口系统内是否存在膨胀功？

$$q = \Delta u + w$$

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$$

$$w_t = w + p_1 v_1 - p_2 v_2 = w - \Delta(pv) = w - w_f$$

□ 热力学第一定律能否写出如下形式？

$$q_2 - q_1 = (u_2 - u_1) + (w_2 - w_1)$$

第三章 小结

□ $\delta q = du + \delta w$

功(δw)是广义功：闭口系与外界交换的**功量**

□ $\delta w = \delta w_{\text{容积变化}} + \delta w_{\text{拉伸}} + \delta w_{\text{表面张力}} + \dots$

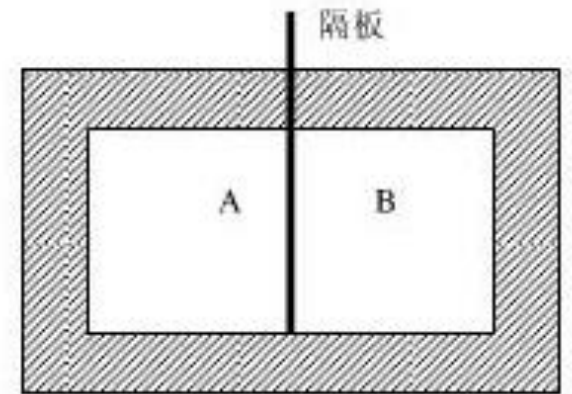
准静态容积变化功： $\delta w_{\text{容积变化}} = p dv$

拉伸功： $\delta w_{\text{拉伸}} = -\tau d\ell$

表面张力功： $\delta w_{\text{表面张力}} = -\delta dA$

第三章 小结

刚性绝热容器中间用绝热隔板分为两部分，A中存有高压空气，B中保持真空，如图所示。若将隔板抽去，分析容器中空气的热力学能将如何变化？若在隔板上有一小孔，气体泄漏入B中，分析A、B两部分压力相同时，A、B两部分气体热力学能如何变化？



$$\delta Q = \left(h_2 + \frac{1}{2} c_2 + g z_2 \right) \delta m_2 - \left(h_1 + \frac{1}{2} c_1 + g z_1 \right) \delta m_1 + \delta W_s + dE_{cv}$$



□思考题 全部

□习题 3-5、3-8、3-10 (3-10勘误, 把温度为 $t_1=0^{\circ}\text{C}$ 的冷空气加热到温度为 $t_3=250^{\circ}\text{C}$) 、3-13、3-17、3-18



第三章 小结

