第二章
热力学第一定律

The First Law of Thermodynamics

上章节内容回顾

准平衡过程

平衡状态 → 状态不变化 → 能量不能转换

非平衡状态 → 无法简单描述

热力学引入准平衡（准静态）过程

系统随时接近于平衡态

可逆过程

系统经历某一过程后，如果能使**系统**与**外界同时**恢复到初始状态，而不留下任何痕迹，则此过程为**可逆过程**。

准平衡过程 + 无耗散效应 = 可逆过程

无不平衡势差

耗散效应

通过摩擦使功变 热 的 效 应 (摩 阻， 电 阻，非弹性变形，磁阻等)

热量与容积变化功

能量传递方式	容积变化功	传热量
性质	过程量	过程量
推动力	压力 p	温度 T
标志	$\mathrm{d}V$，$\mathrm{d}v$	$\mathrm{d}S$, $\mathrm{d}s$
公式	$\delta w = p\mathrm{d}v$	$\delta q = T\mathrm{d}s$
条件	准平衡或可逆	可逆

系统对外界作功为正 $w > 0$ $\mathrm{d}v > 0$

系统吸热时为正 $q > 0$ $\mathrm{d}s > 0$

第二章 作业

2-4

2-5

2-7

2-8

2-11

§2-1 热力学第一定律的本质

§2-2 热力系统的储存能

§2-3 闭口系能量方程

§2-4 开口系能量方程

§2-5 稳定流动能量方程

§2-6 稳定流动能量方程应用举例

§2-1 热力学第一定律的本质

本质：能量转换及守恒定律在热过程中的应用

一.能量转换及守恒定律

自然界的一切物质都具有能量；能量可以从一个区域传递到另一个区域，在一定条件下，不同形式的能量可以相互转换；在转换中，能量的总量保持不变。

二.热力学第一定律的表述

（1）当热能与其他形式的能量相互转换时，其总量保持不变

（2）不花费能量就可以产生功的第一类永动机是不可能制成的

（3）**热力学第一定律的表述：**

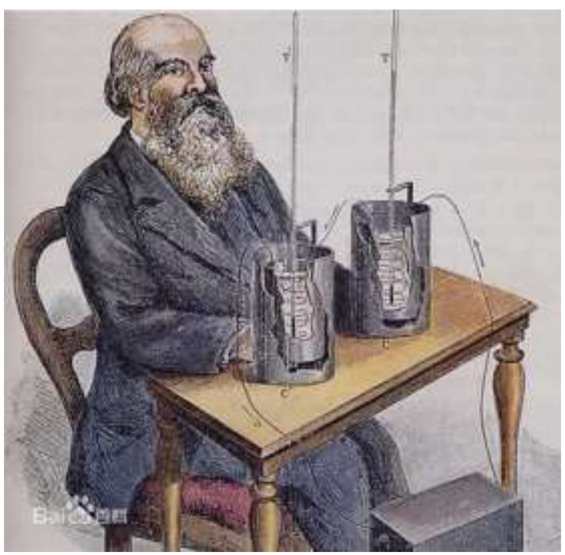
进入系统的能量-离开系统的能量=系统存储能量的变化

热力学第一定律的本质：能量转换与守恒定律

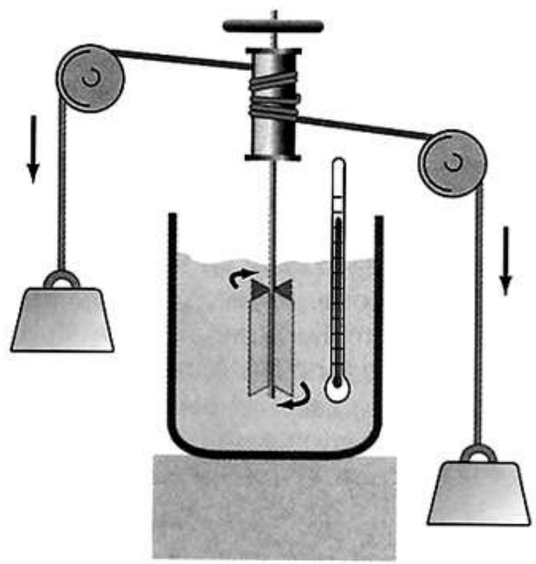
焦耳与热功当量

在19世纪40年代，“**热质说**”风行一时

1840年以后，焦耳先后介绍了四种测定**热功当量**的方法



通电金属丝放在水中加热



叶片和水的摩擦

焦耳: 1卡=4.157J

国际公认精确值

J=4.186 8J/cal

§2-2 热力系统的储存能

热力学第一定律的表述：

进入系统的能量-离开系统的能量＝系统存储能量的变化

一.热力学能（内能*U*）的导出:

热力学第一定律的推论

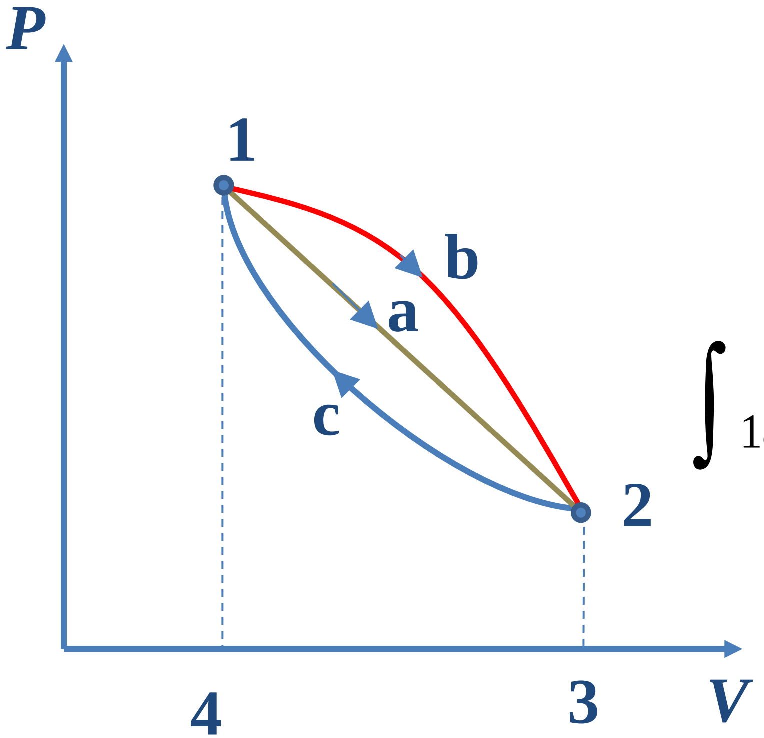
循环的热力学第一定律表达式:

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

对闭口系循环

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

$$\oint (\delta Q - \delta W) = 0$$



对于循环1a2c1

$$\int_{1a2} (\delta Q - \delta W) + \int_{2c1} (\delta Q - \delta W) = 0$$

对于循环1b2c1

$$\int_{1b2} (\delta Q - \delta W) + \int_{2c1} (\delta Q - \delta W) = 0$$

$$\therefore \int_{1a2} (\delta Q - \delta W) = \int_{1b2} (\delta Q - \delta W)$$

$$\int\left(\delta Q-\delta W\right)$$ **与路径无关！**

- **表明它是某个状态积分。**
- **定义 $\mathrm{d}U = \delta Q - \delta W$ 则 <u>U是状态函数</u>。将这个状态函数命名为内能(internal energy) — 新国标称之为热力学能。**
- 由此定义可导得闭口系统经历一热力学**过程**时，热力学第一定律表达式：

$$\delta Q = \mathrm{d}U + \delta W \qquad Q = \Delta U + W$$

特例：

绝功系 $\delta Q = dU$

绝热系 $\delta W = -dU$

二、热力学能U的物理意义

$$dU = \delta Q - \delta W$$

dU 代表某微元过程中系统通过边界交换的微热量与微功量两者之差值，即系统内部能量的变化。

U 代表储存于系统内部的能量——内储存能(内能)

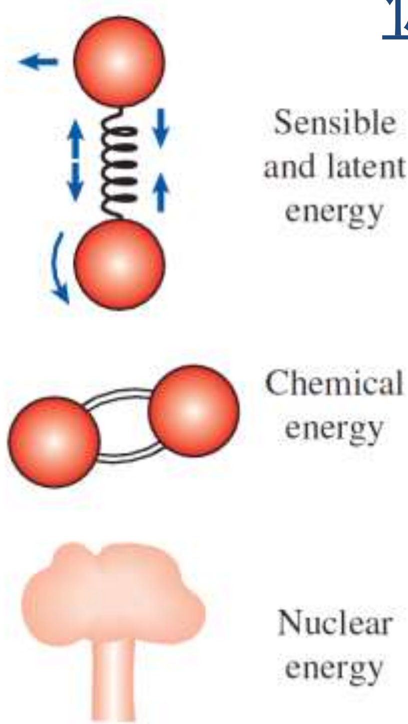
原则上讲，物体的内能应该包括其中所有微观粒子的动能、势能、化学能、电离能和原子核内部的核能等能量的总和

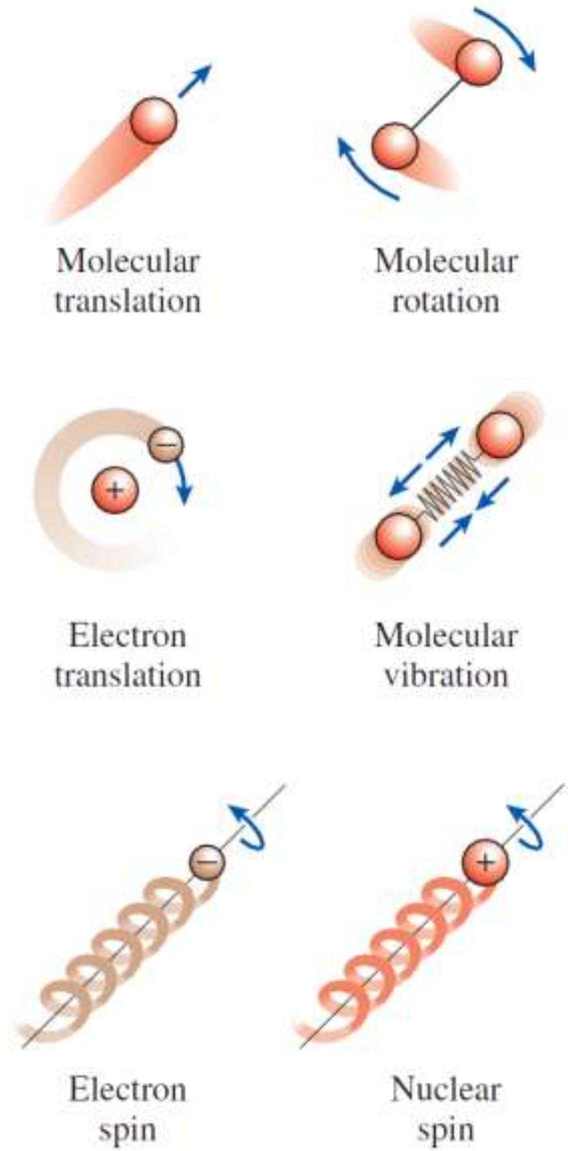
内能
- **分子动能（移动、转动、振动）**
- **分子位能（相互作用）**
- 核能 ($E=mc^2$)
- 化学能

内能

- **分子动能（移动、转动、振动）**
- **分子位能（相互作用）**
- 核能
- 化学能

<u>微观角度</u>





- **内能**是状态量
- U：广延量 [kJ]　u：比参量 [kJ/kg]
- 由对任意热力学过程的第一定律表达式可求得：$\Delta U = Q - W$
- 在热力过程的热力学分析中，内能总以变化量出现，零点可人为约定。

三. 系统总能（total energy of a system）

外部储存能macroscopic forms of energy

宏观动能 kinetic $E_k = mc^2/2$

宏观位能 potential $E_p = mgz$

$$\left.\begin{array}{l} E_k = mc^2/2 \\ E_p = mgz \end{array}\right\} \text{机械能}$$

系统总能

$$E = U + E_k + E_p \qquad e = u + e_k + e_p$$

热力学第一定律的一般表达式

进入系统的能量 - 离开系统的能量 = 系统储存能量的变化

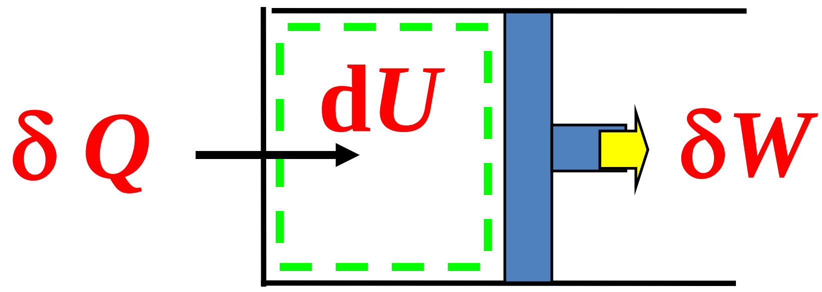
$$Q - W = \Delta E$$

$$\delta Q - \delta W = dE$$

适用条件：初、终态均为平衡态。当宏观动能和宏观位能可忽略不计时：*ΔE=ΔU*

§2-3 闭口系统能量方程

$$\delta Q - \delta W = dU$$



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

$$Q = \Delta U + W$$

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

$$q = \Delta u + w$$

单位工质

适用条件：1）任何工质　2) 任何过程

准静态和可逆闭口系能量方程

简单可压缩系准静态过程

$$\delta w = p\mathrm{d}v$$

$$\delta q = \mathrm{d}u + p\mathrm{d}v$$ 热一律解析式之一

$$q = \Delta u + \int p\mathrm{d}v$$

简单可压缩系可逆过程

$$\delta q = T\mathrm{d}s$$

$$T\mathrm{d}s = \mathrm{d}u + p\mathrm{d}v$$ 可逆过程热力学恒等式

$$\int T\mathrm{d}s = \Delta u + \int p\mathrm{d}v$$

讨论：

(1) 功 W 是广义功——闭口系与外界交换的功量

准静态容积变化功	$p\mathrm{d}v$
拉伸功	$\delta w_{拉伸}= \tau \mathrm{d}l$
表面张力功	$\delta w_{表面张力}= \sigma\, \mathrm{d}A$

$$\delta w = p\mathrm{d}v + \tau \mathrm{d}l + \sigma\, \mathrm{d}A + \ldots\ldots$$

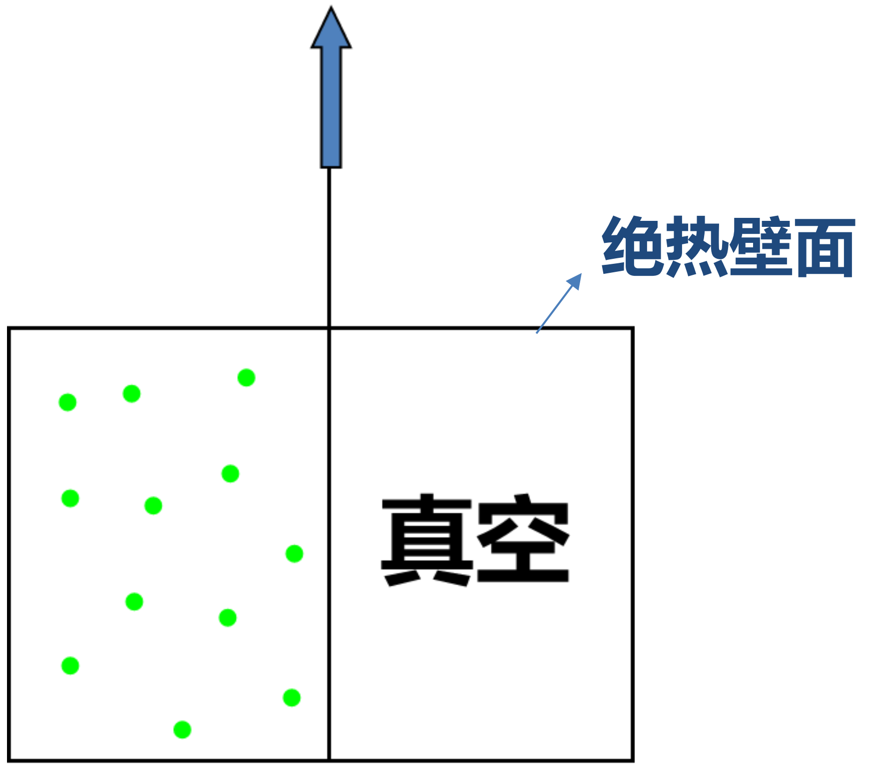
(2)当宏观动能与位能不可忽略（如在地球上研究飞行器）时：

$$\delta q = \mathrm{d}e + \delta w = \mathrm{d}u + \mathrm{d}e_{\mathrm{k}} + \mathrm{d}e_{\mathrm{p}} + \delta w$$

讨论：

1843年Joule（焦耳）

(1) 绝热膨胀



$$\delta Q = \mathrm{d}U + \delta W$$

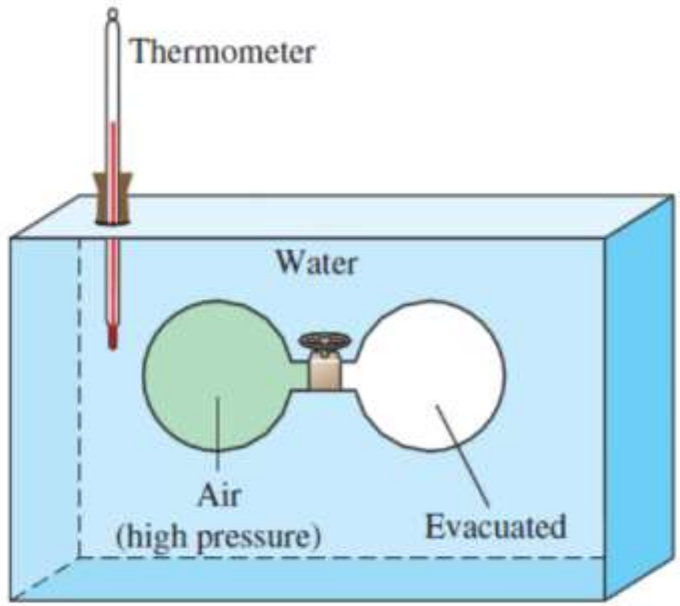
$$\mathrm{d}U = 0 \qquad U = f(T)$$

理想气体的内能只是温度的函数

投票　最多可选1项

设置

1843年，焦耳气体真空膨胀实验



空气近似为理想气体

A 水温下降

B 水温上升

C 水温不变

提交

§2-4 开口系能量方程

能量守恒原则

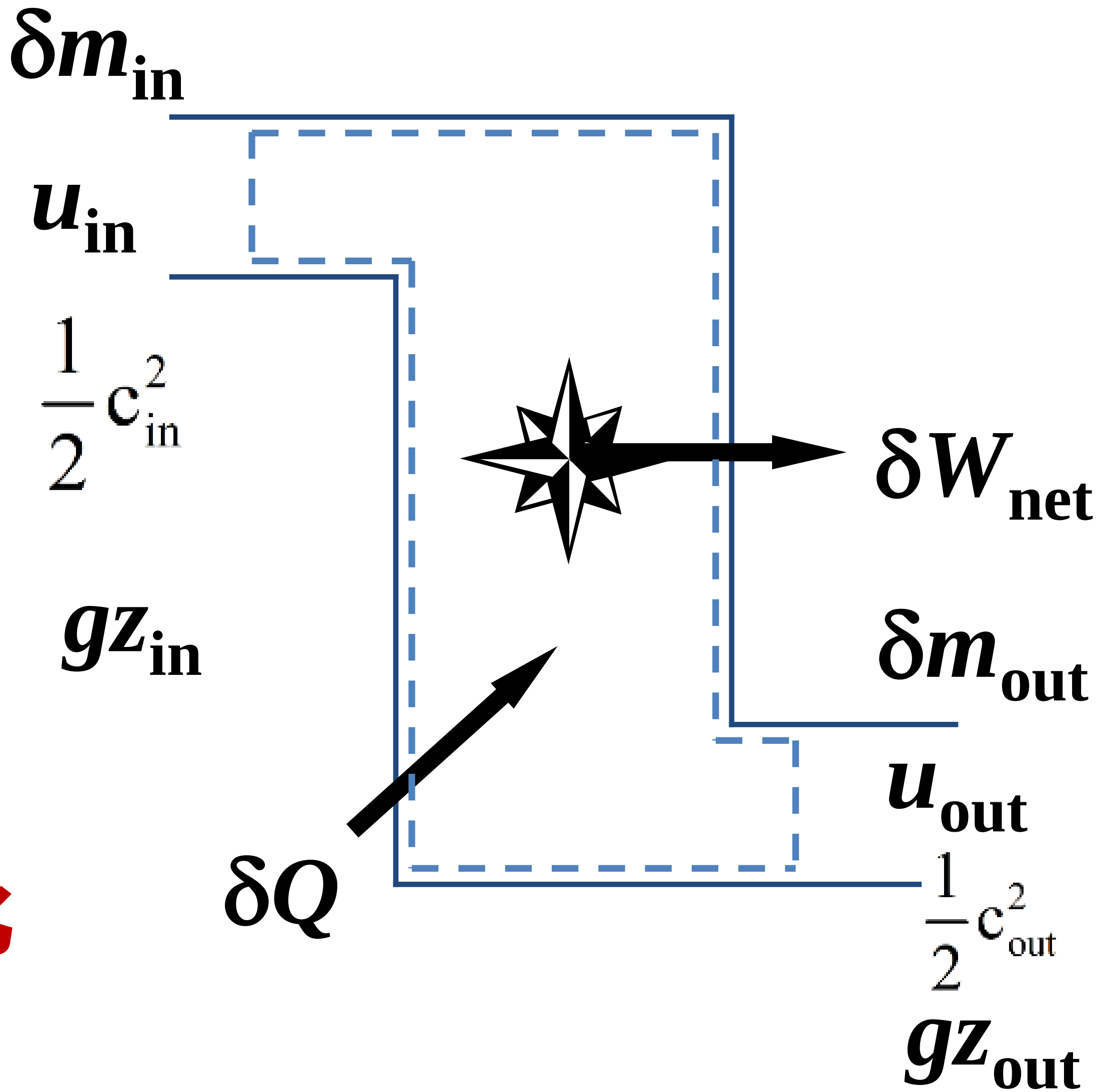
进入系统的能量

-

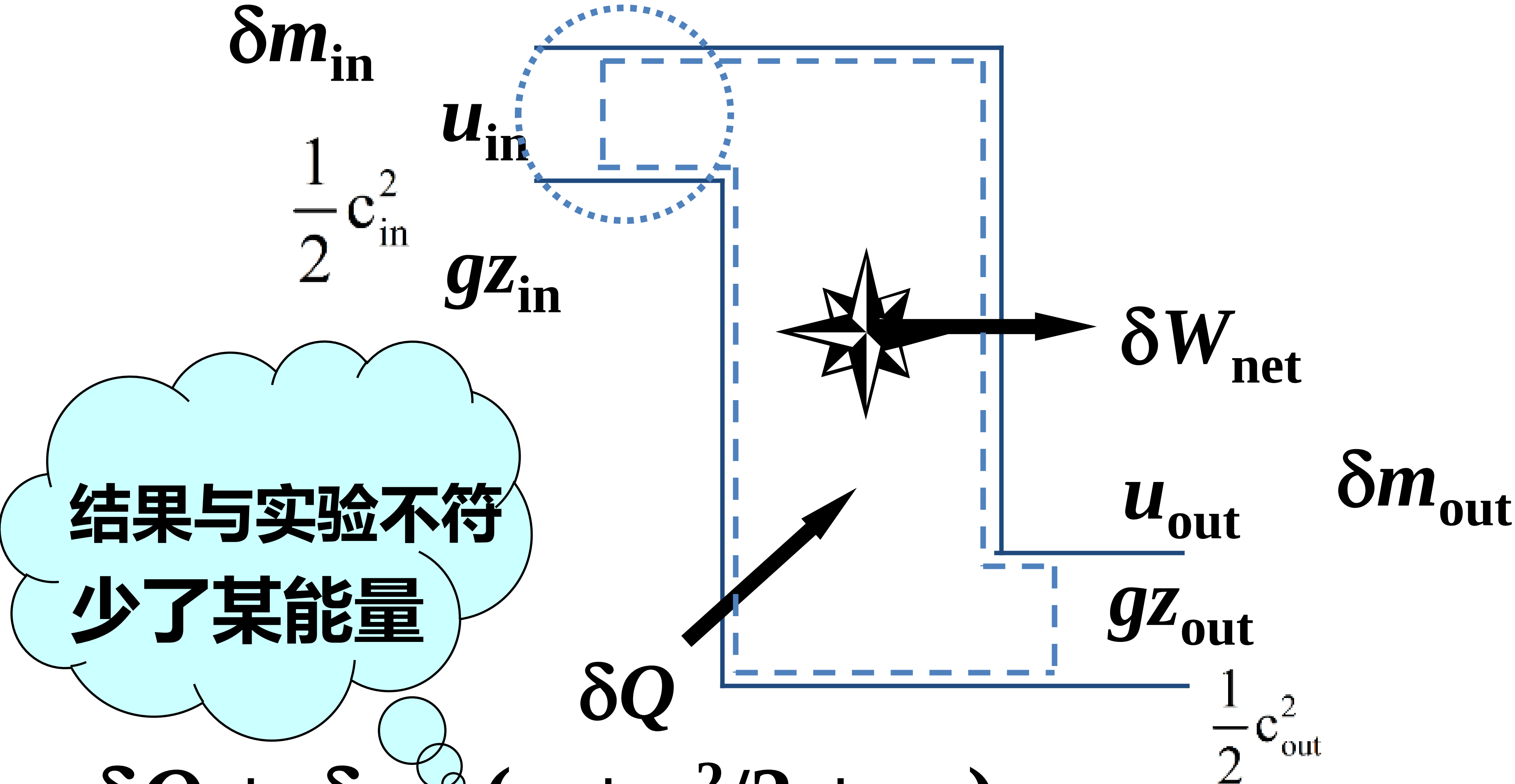
离开系统的能量

=

系统储存能量的变化



一. 开口系能量方程的推导



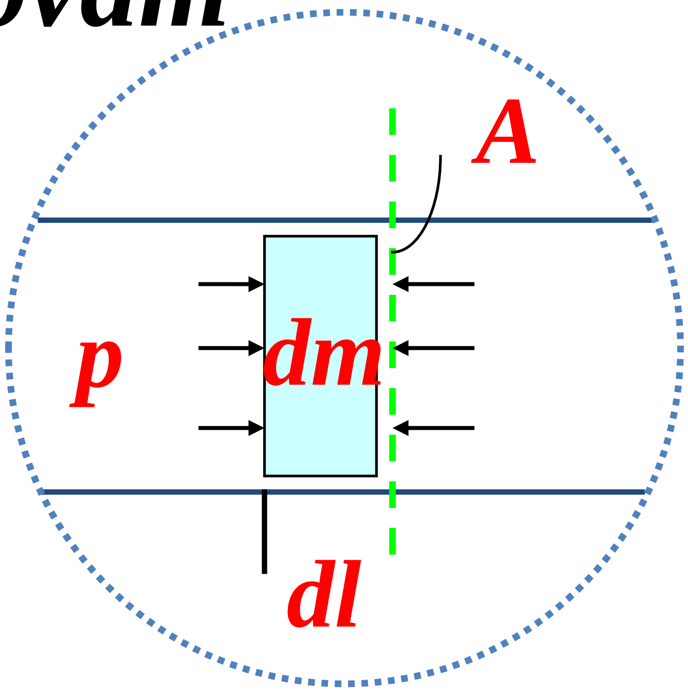
$$\delta Q + \delta m_{in}(u + c^2/2 + gz)_{in} - \delta m_{out}(u + c^2/2 + gz)_{out} - \delta W_{net} = dE_{cv}$$

推进功（流动功、推动功）的表达式 Flow work

dm质量的工质在外力的推动下克服压力p移动dl，并通过面积A进入系统，则外界所做的功：

$$\delta W_{推} = pA\,dl = pdV = pvdm$$

$$w_{推} = pv = p/\rho$$



注意：

$w_{推}$不是 pdv

$$dV = vdm$$

对推进功的说明

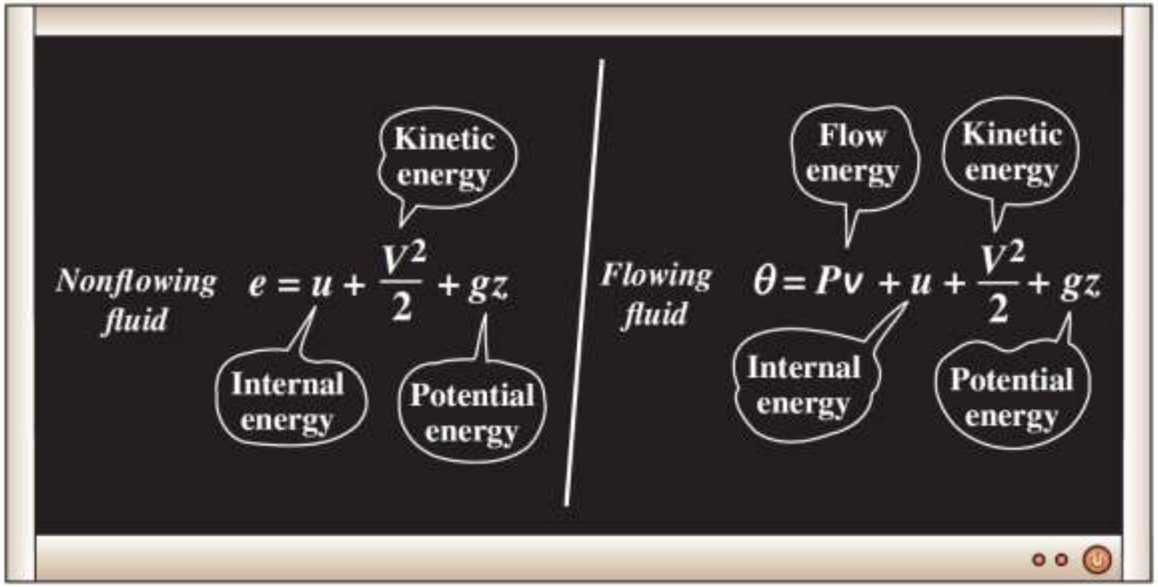
1、与宏观流动有关，**流动停止，推进功不存在**

2、$w_{推} = pv$与所处状态有关，是**状态量**

3、并非工质本身的能量（动能、位能）变化引起，而由**外界（泵与风机）做出**

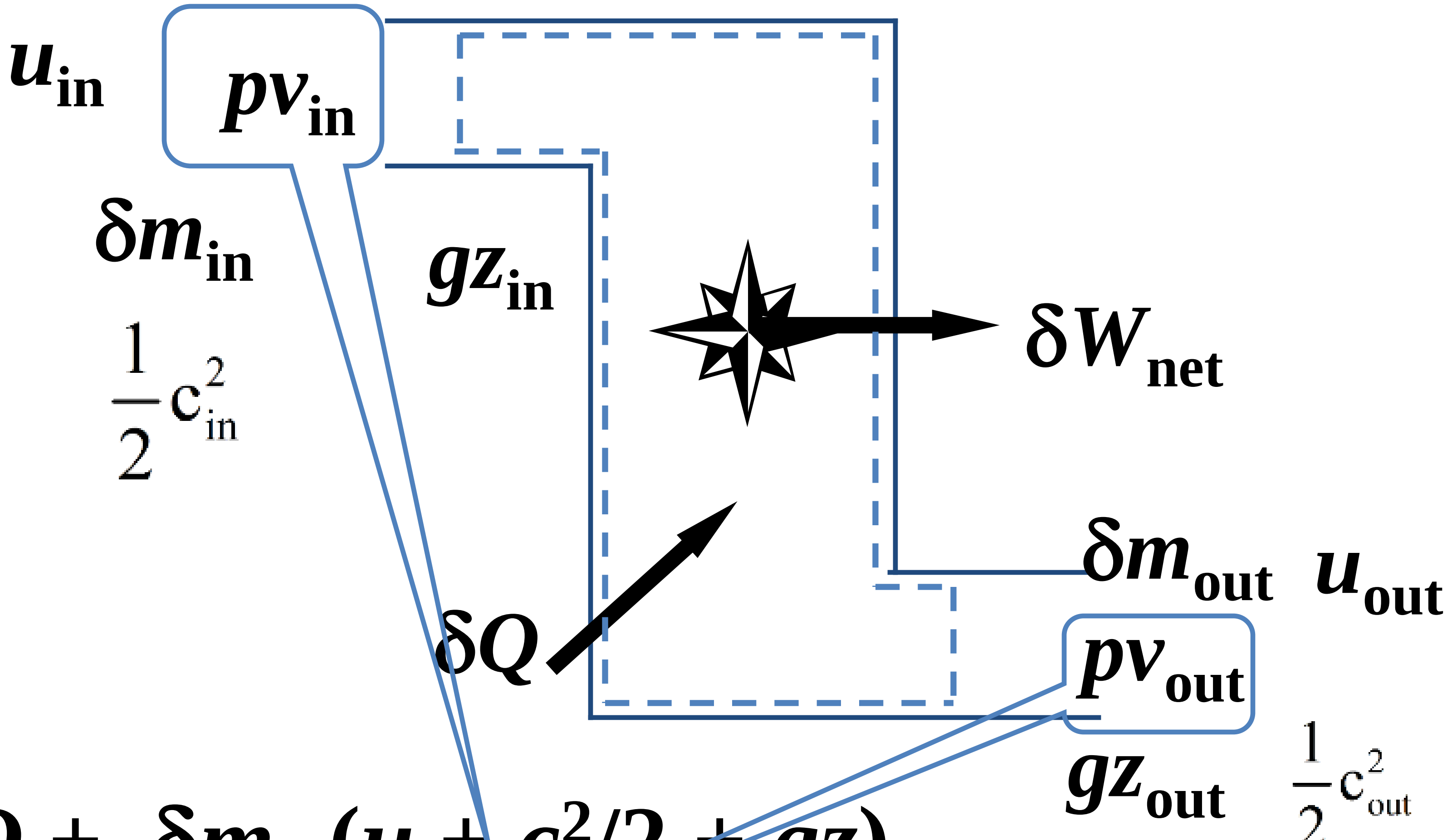
对推进功的说明

4. 对于流动工质，推进功可以看做是一种工质携带的一种**流动能（flow energy）**



可理解为：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所**携带**和所**传递**的一种**能量**

开口系能量方程的推导



$$\delta Q + \delta m_{in}(u + c^2/2 + gz)_{in}$$

$$- \delta m_{out}(u + c^2/2 + gz)_{out} - \delta W_{net} = \mathrm{d}E_{cv}$$

开口系能量方程微分式

$$\delta Q + \delta m_{in}(u + pv + c^2/2 + gz)_{in} - \delta W_{net} - \delta m_{out}(u + pv + c^2/2 + gz)_{out} = dE_{cv}$$

工程上常用流率

$$\dot{Q} = \lim_{\delta\tau\to 0}\left(\frac{\delta Q}{\delta\tau}\right) \qquad \dot{m} = \lim_{\delta\tau\to 0}\left(\frac{\delta m}{\delta\tau}\right) \qquad \dot{W} = \lim_{\delta\tau\to 0}\left(\frac{\delta W}{\delta\tau}\right)$$

$$\dot{Q} = dE_{cv}/\delta\tau + \left(u + pv + c^2/2 + gz\right)_{out}\dot{m}_{out}$$

$$-\left(u + pv + c^2/2 + gz\right)_{in}\dot{m}_{in} + \dot{W}_{net}$$

开口系能量方程微分式

当有多条进出口：

$$
\begin{aligned}
\dot{Q} &= dE_{\text{cv}} / \delta\tau + \dot{W}_{\text{net}} \\
&+ \sum \left(u + pv + c^2/2 + gz \right)_{\text{out}} \dot{m}_{\text{out}} \\
&- \sum \left(u + pv + c^2/2 + gz \right)_{\text{in}} \dot{m}_{\text{in}}
\end{aligned}
$$

流动时，总一起存在

二. 焓Enthalpy

定义：焓 $h = u + pv$

$$\dot{Q} = dE_{cv} / \delta\tau + \dot{W}_{net}$$
$$+\sum\left(h + c^2/2 + gz \right)_{out} \dot{m}_{out}$$
$$-\sum\left(h + c^2/2 + gz \right)_{in} \dot{m}_{in}$$

开口系能量方程

焓Enthalpy的说明

定义：$h = u + pv$ [kJ/kg]

$H = U + pV$ [kJ]

1、焓是状态量 state property

2、H为广延参数 $H=U+pV= m(u+pv)= mh$

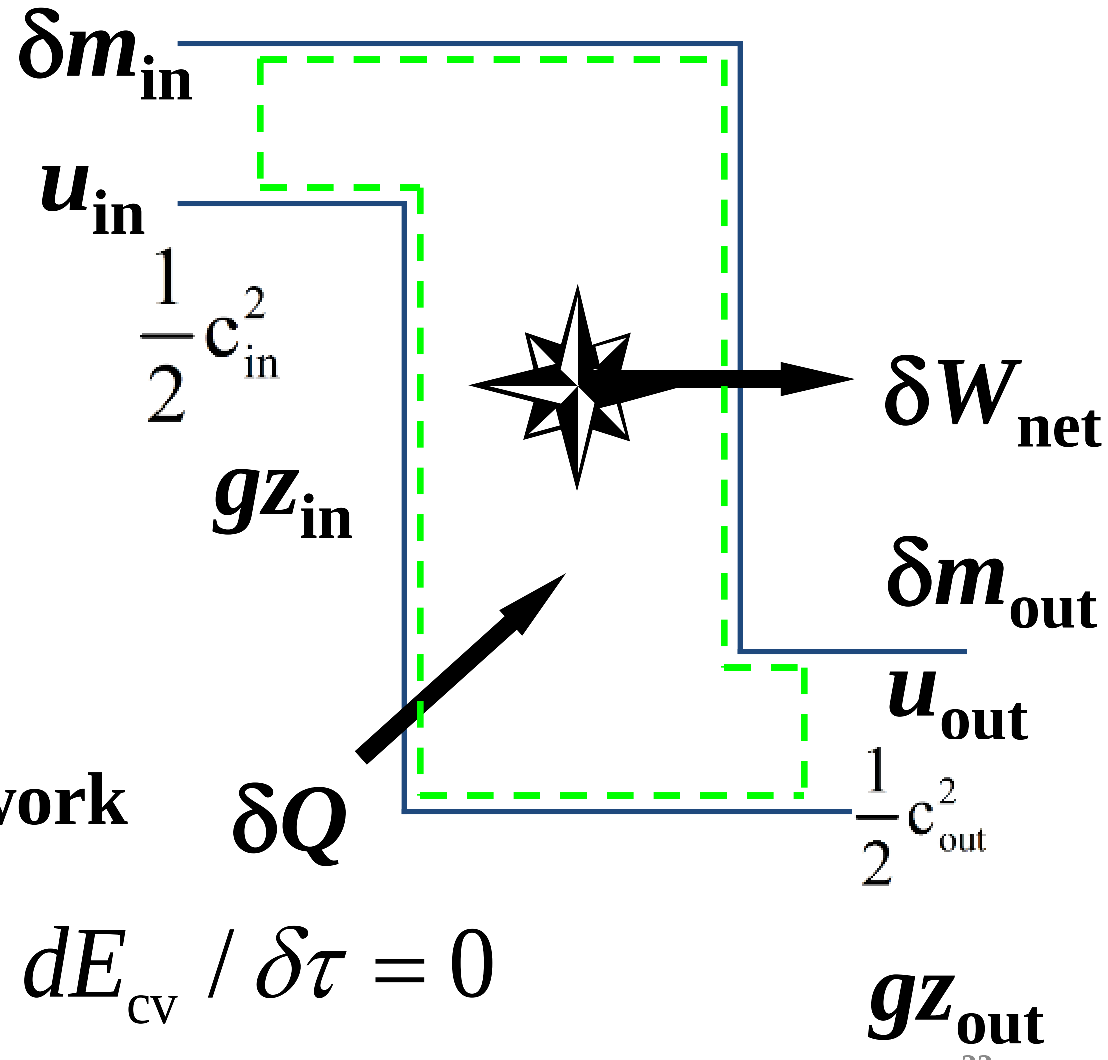
h为比参数

3、对流动工质，焓代表能量(内能+推进功)
对静止工质，焓不代表能量

4、物理意义：开口系中随工质流动而携带的、取决于热力状态的能量。

§ 2-5 稳定流动能量方程

一.稳定流动条件



1、 $\dot{m}_{out} = \dot{m}_{in} = \dot{m}$

2、 $\dot{Q} = \text{const}$

3、 $\dot{W}_{net} = \text{const} = \dot{W}_s$

轴功Shaft work

4、 每截面状态不变 $dE_{cv} / \delta\tau = 0$

二. 稳定流动能量方程的推导

稳定流动条件

$$\dot{m}_{\text{out}} = \dot{m}_{\text{in}} = \dot{m} \qquad \dot{Q} = \text{const}$$

$$\dot{W}_{\text{net}} = \text{const} = \dot{W}_{\text{s}} \qquad dE_{\text{cv}} / \delta\tau = 0$$

$$\dot{Q} = \boxed{\mathbf{0}} + \boxed{\dot{W}_{\text{s}}}$$

$$+\left(h + c^2/2 + gz\right)_{\text{out}} \boxed{\dot{m}}$$

$$-\left(h + c^2/2 + gz\right)_{\text{in}} \boxed{\dot{m}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}\left[\left(h + c^2/2 + gz\right)_{\mathrm{out}} - \left(h + c^2/2 + gz\right)_{\mathrm{in}}\right] + \dot{W}_{\mathrm{s}}$$

$$\dot{Q} = \dot{m}q \qquad \dot{W}_{\mathrm{s}} = \dot{m}w_{\mathrm{s}}$$

1kg工质

$$q = \left(h + c^2/2 + gz\right)_{\mathrm{out}} - \left(h + c^2/2 + gz\right)_{\mathrm{in}} + w_{\mathrm{s}}$$

$$q = \Delta h + \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_{\mathrm{s}}$$

稳定流动能量方程

$$q = \Delta h + \Delta c^2 / 2 + g\Delta z + w_s$$

适用条件： **任何流动工质**

任何稳定流动过程

三. 技术功 Technical work

W_t

$$Q = m\Delta h + m\Delta c^2/2 + mg\Delta z + W_s$$

$$q = \Delta h + \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_s$$

w_t

动能　位能　轴功

机械能

工程技术上可以直接利用

$$Q = \Delta H + W_t \qquad q = \Delta h + w_t$$

单位质量工质的开口与闭口

闭口系(1kg)

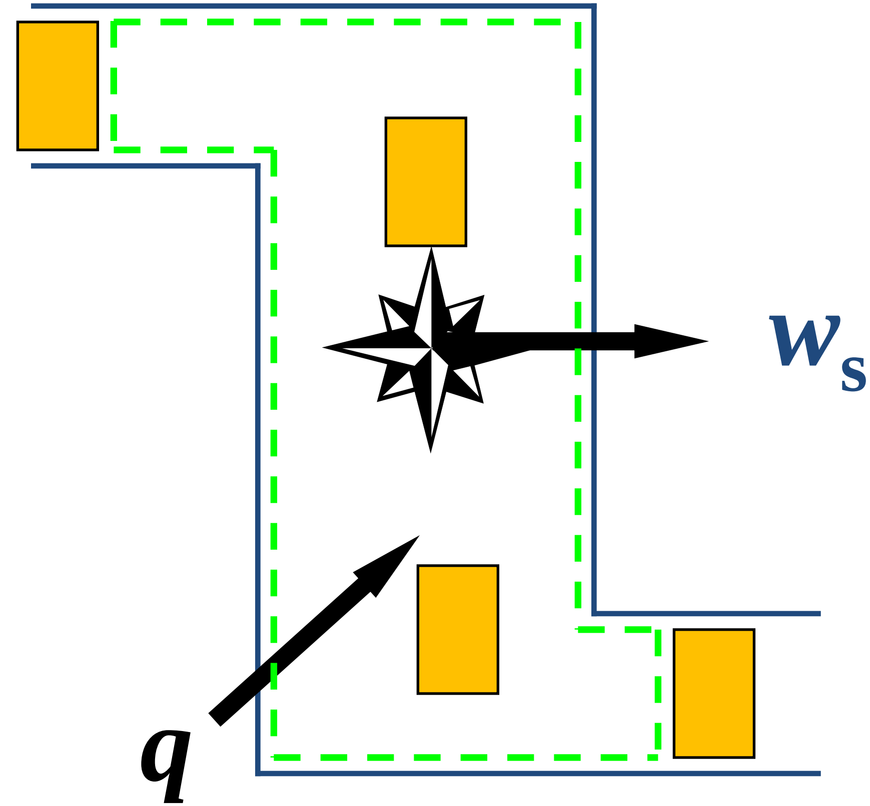
$$q = \Delta u + w$$

容积变化功

等价

技术功

$$q = \Delta h + w_t$$



稳流开口系本身热力状态及流动情况不随时间变化，效果相当于一定质量工质从进口穿过设备流到出口。

稳流开口与闭口的能量方程

闭口 $q=\Delta u+w$

稳流开口 $q=\Delta h+w_{\mathrm{t}}$

等价

容积变化功w

技术功w_{t}

轴功w_{s}

推进功$\Delta(pv)$

几种功的关系?

四. 几种功的关系

$$w_{\mathrm{t}} = \Delta c^2/2 + g\Delta z + w_{\mathrm{s}}$$

$$q = \Delta h + w_{\mathrm{t}} = \Delta u + \Delta(pv) + w_{\mathrm{t}}$$

$$q = \Delta u + w$$

$$w = \Delta(pv) + w_{\mathrm{t}}$$

对功的小结

1. 闭口系，系统与外界交换的功为**容积变化功** w

2. 开口系，系统与外界交换的功为**轴功** w_s

3. 一般情况下忽略动、位能的变化

$$w_s \approx w_t$$

五. 准静态下的技术功

$$w = \Delta(pv) + w_{\mathrm{t}} \qquad \delta w = \mathrm{d}(pv) + \delta w_{\mathrm{t}}$$

准静态 $$p\mathrm{d}v = \mathrm{d}(pv) + \delta w_{\mathrm{t}}$$

$$\delta w_{\mathrm{t}} = p\mathrm{d}v - \mathrm{d}(pv) = p\mathrm{d}v - \left(\mathrm{p}\mathrm{d}v + \mathrm{v}\mathrm{d}p\right) = -\mathrm{v}\mathrm{d}p$$

$$\delta w_{\mathrm{t}} = -\mathrm{v}\mathrm{d}p \qquad w_{\mathrm{t}} = -\int \mathrm{v}\mathrm{d}p$$

准静态
$$\begin{cases} \delta q = \mathrm{d}u + p\mathrm{d}v & \text{第一定律解析式之一} \\ \delta q = \mathrm{d}h - v\mathrm{d}p & \text{第一定律解析式之二} \end{cases}$$

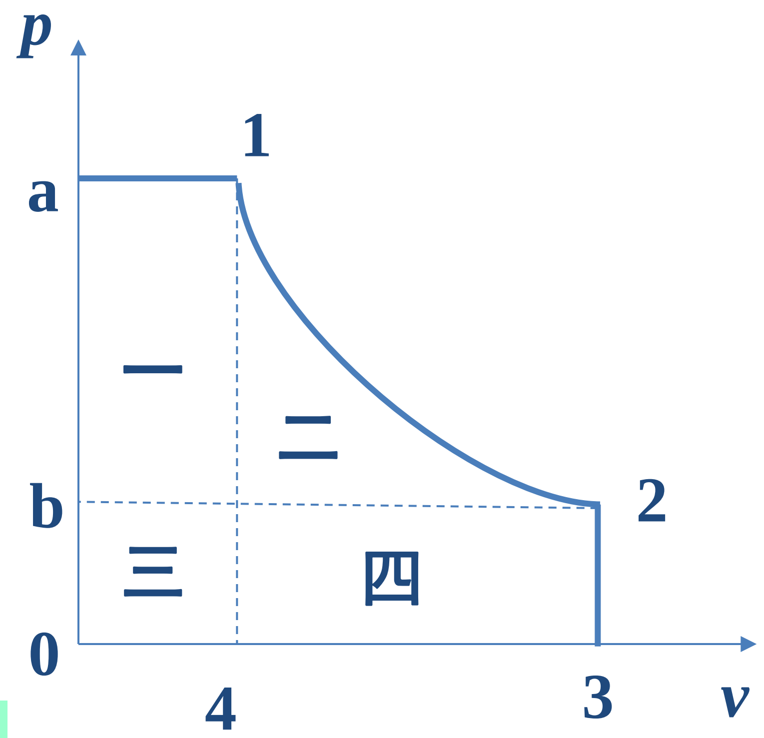
技术功在示功图上的表示

$$w_{\mathrm{t}} = w - \Delta(pv)$$

$$w_{\mathrm{t}} = w + p_1 v_1 - p_2 v_2$$

$$-\int v\mathrm{d}p = \int \mathrm{p}\mathrm{d}v + p_1 v_1 - p_2 v_2$$

12ba1	12341	140a1	230b2
一+二	二+四	一+三	三+四



§2-6 稳定流动能量方程应用举例

$$q = \Delta h + \Delta c^2 / 2 + g\Delta z + w_s$$

热力学问题经常可忽略动、位能变化

例： $c_1 = 1\ \text{m/s}$　　$c_2 = 30\ \text{m/s}$

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

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

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

1bar（*0.1MPa*）下, 20 ^{o}C水的 $h_1 = 84\ \text{kJ/kg}$

100 ^{o}C水蒸气的 $h_2 = 2676\ \text{kJ/kg}$

$$q = \Delta h + w_s$$

例1：透平(Turbine)机械

火力发电

核电

蒸汽轮机
Steam turbine

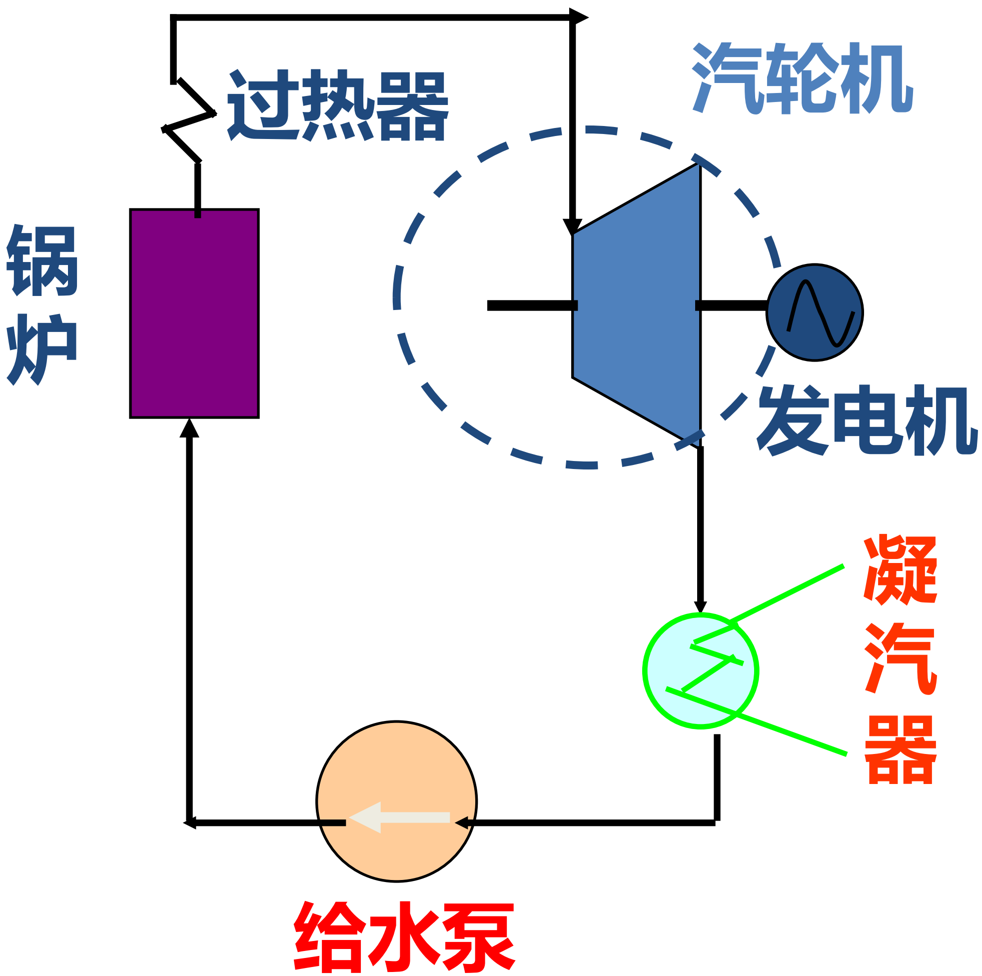
飞机发动机

轮船发动机

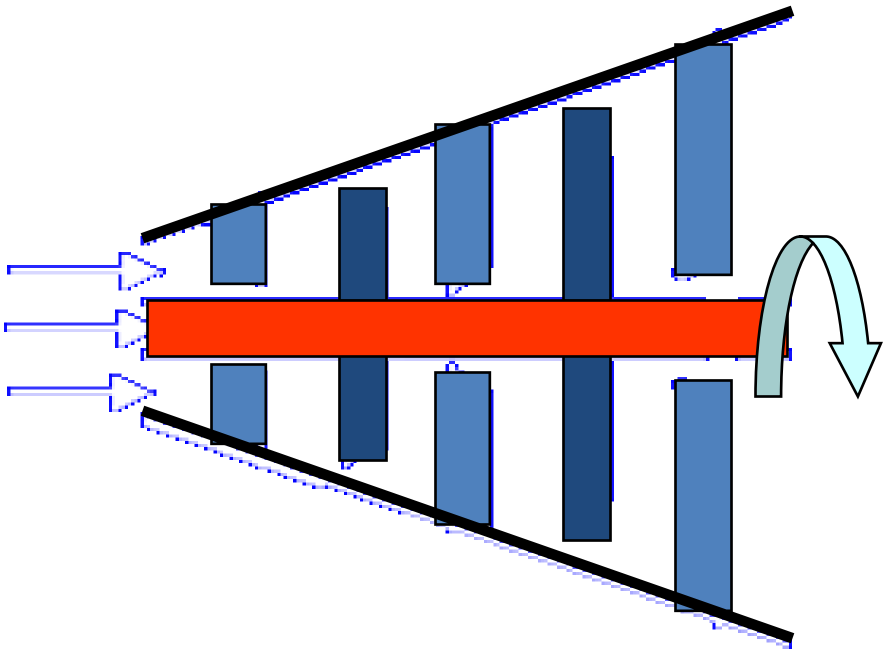
移动电站

燃气机

火力发电装置Steam Power



透平(Turbine)机械



$$q = \Delta h + w_s$$

保温层

$$q \approx 0$$

$$w_s = -\Delta h$$

$$= h_1 - h_2 > 0$$

输出的轴功是靠焓降转变的

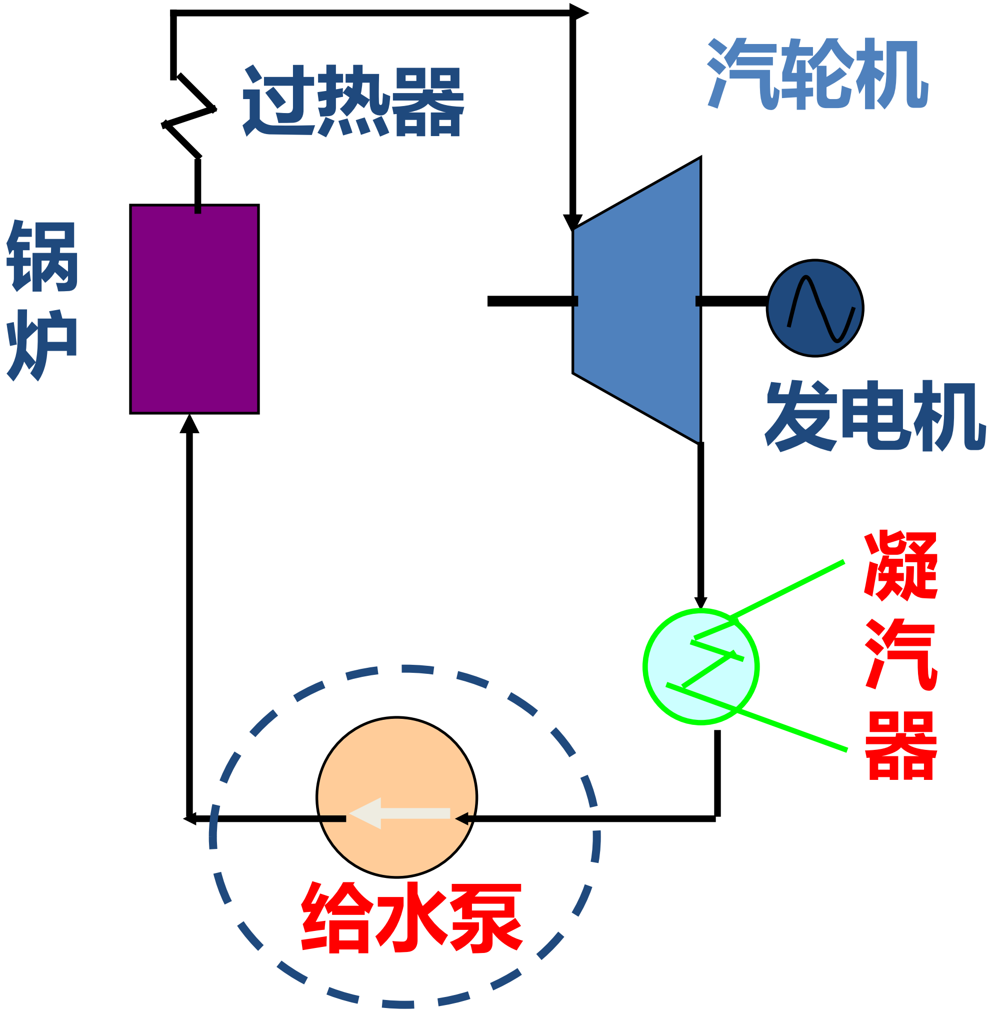
例2：压缩机械 Compressor

火力发电
核电
水泵

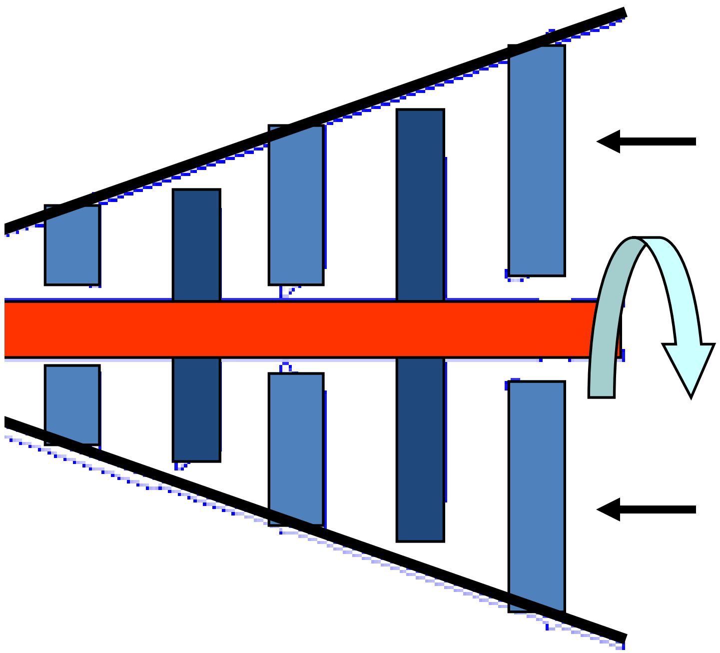
飞机发动机
轮船发动机
移动电站
压气机

制冷
空调
压缩机

火力发电装置Steam power



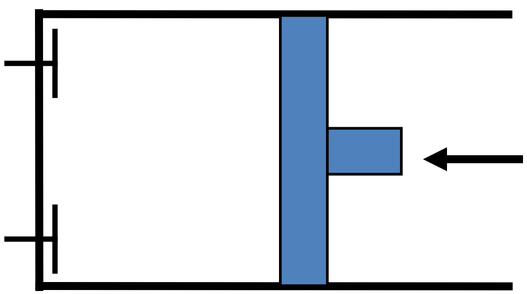
压缩机械



$$q = \Delta h + w_s$$

保温层

$$q \approx 0$$



$$w_s = -\Delta h$$

$$= h_1 - h_2 < 0$$

输入的轴功转变为焓升

例3：换热设备Heat Exchangers

火力发电：　锅炉、凝汽器

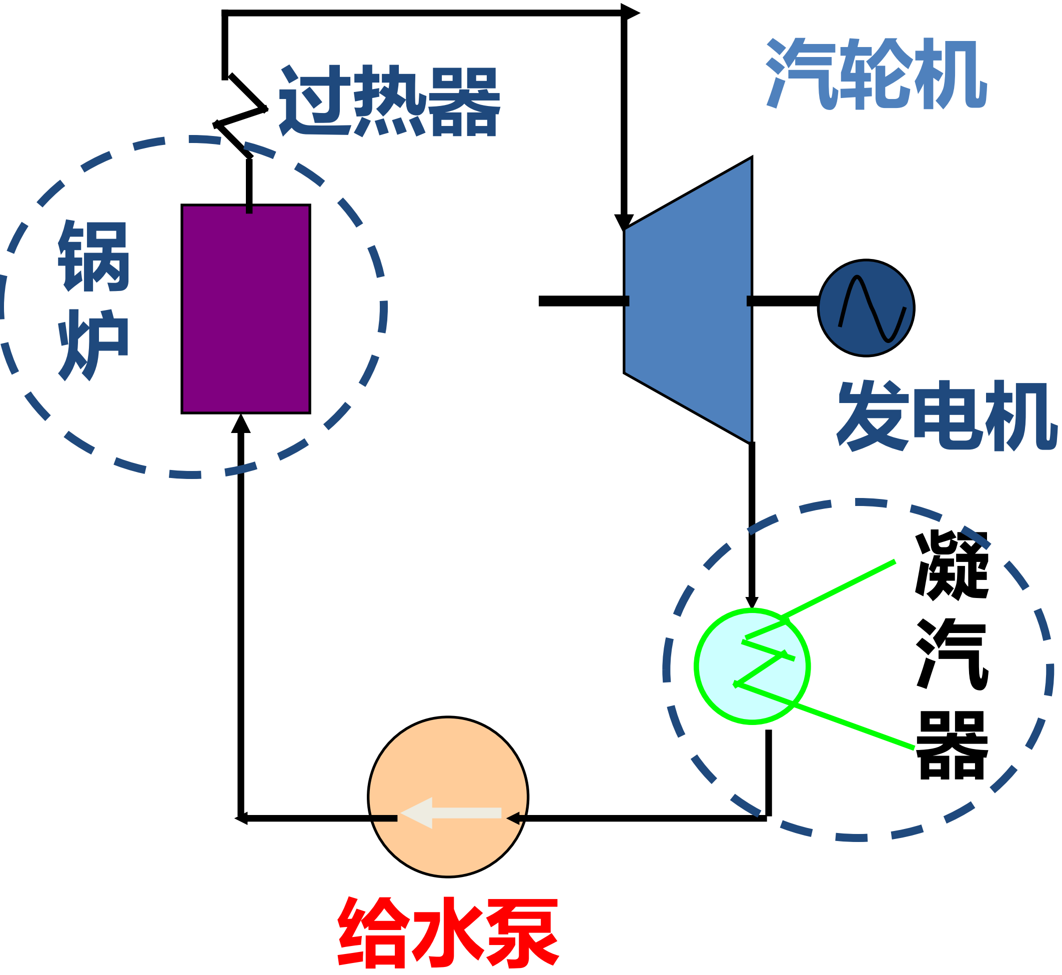
核电：　热交换器、凝汽器

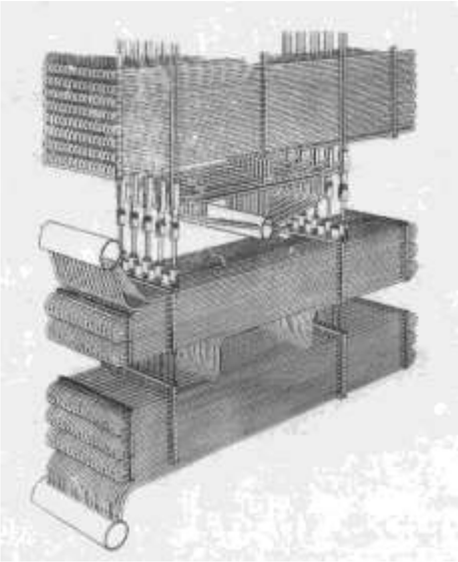
制冷

空调

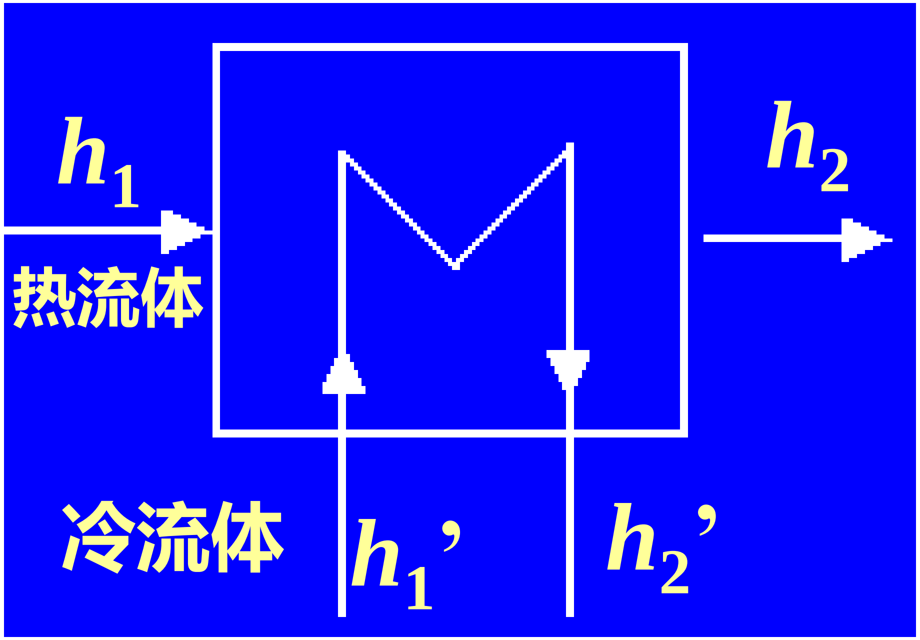
蒸发器、冷凝器

火力发电装置





换热设备



$$q = \Delta h + w_s$$

没有作功部件

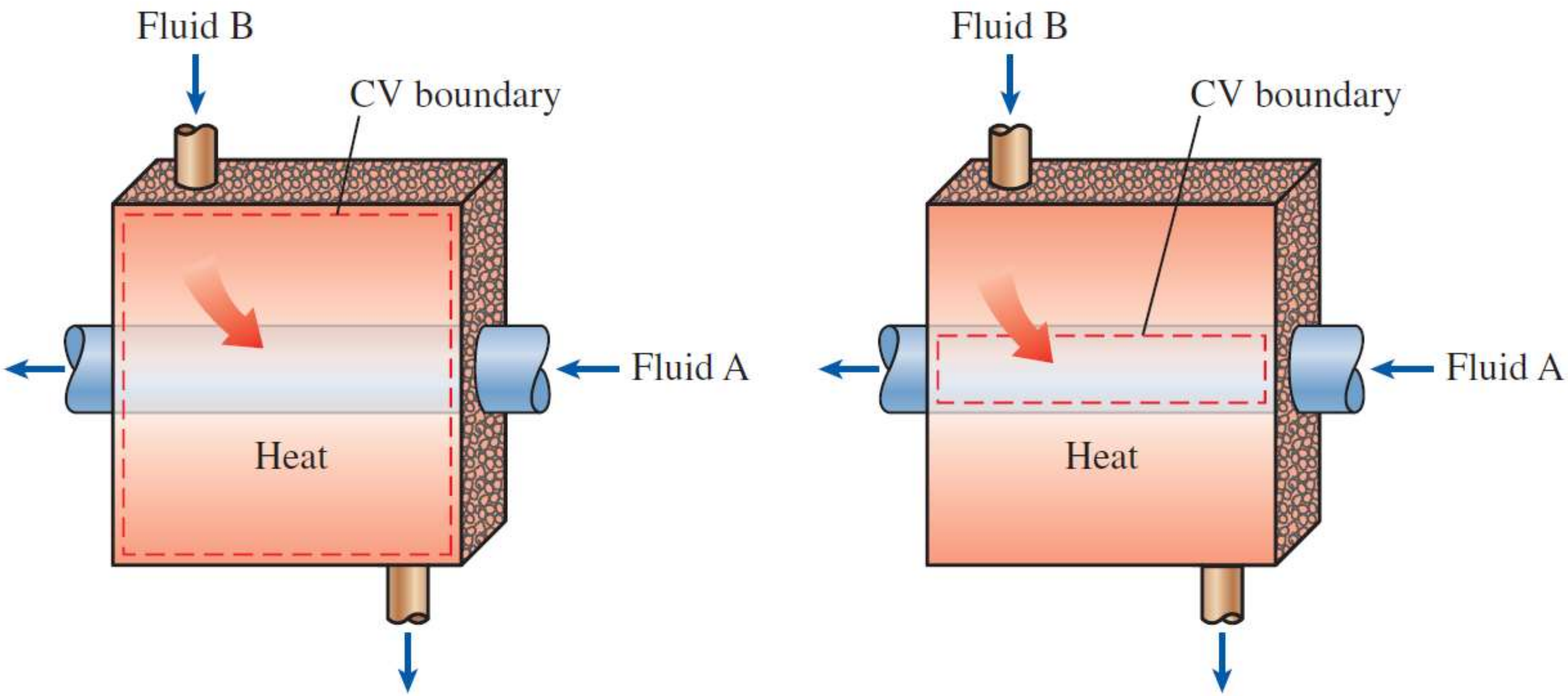
$$w_s = 0$$

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

焓变

热流体放热量： $q = \Delta h = h_2 - h_1 < 0$

冷流体吸热量： $q' = \Delta h = h_2' - h_1' > 0$



(a) System: Entire heat exchanger ($Q_{CV} = 0$)

(b) System: Fluid A ($Q_{CV} \neq 0$)

例4：绝热节流Throttling Valves

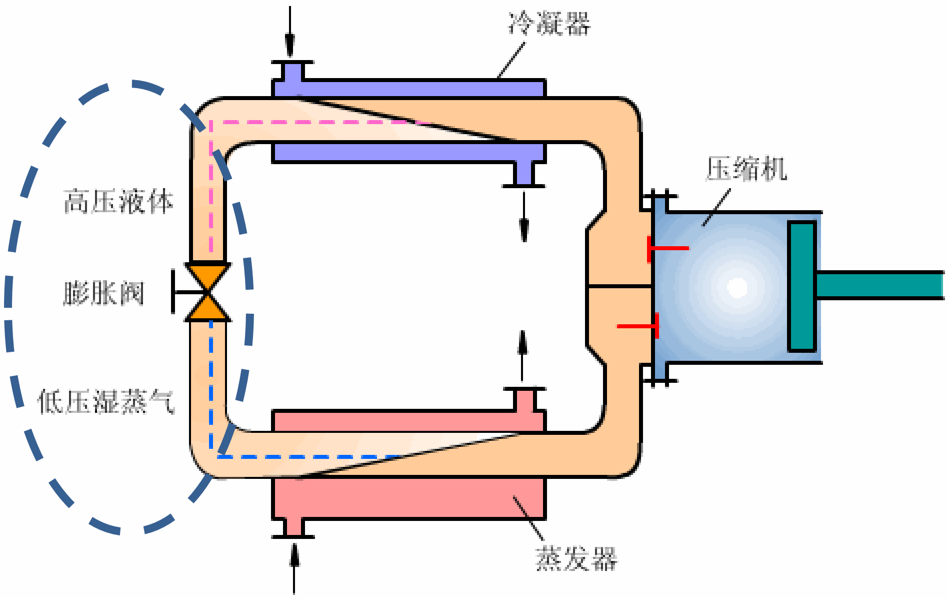
管道阀门

制冷

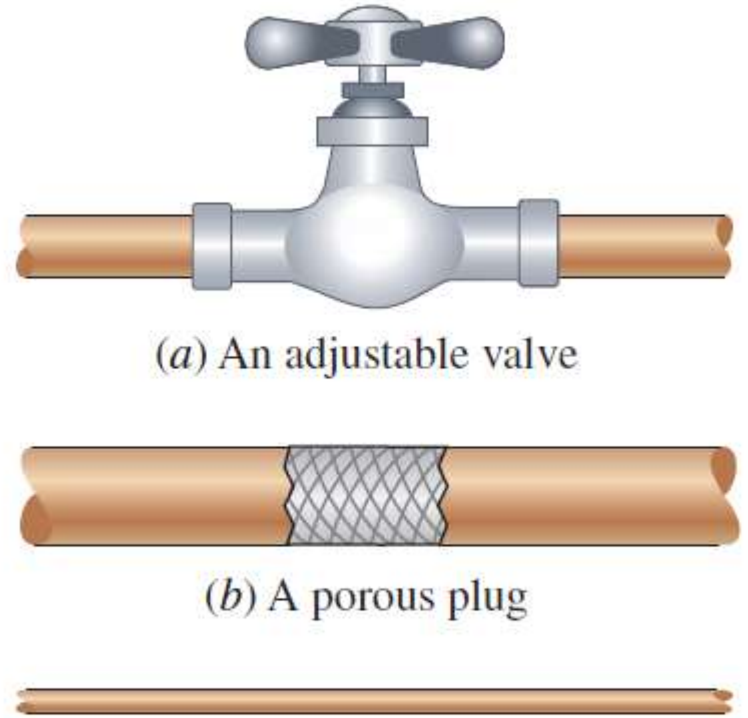
空调

膨胀阀、毛细管

制冷空调装置



蒸气压缩式制冷系统

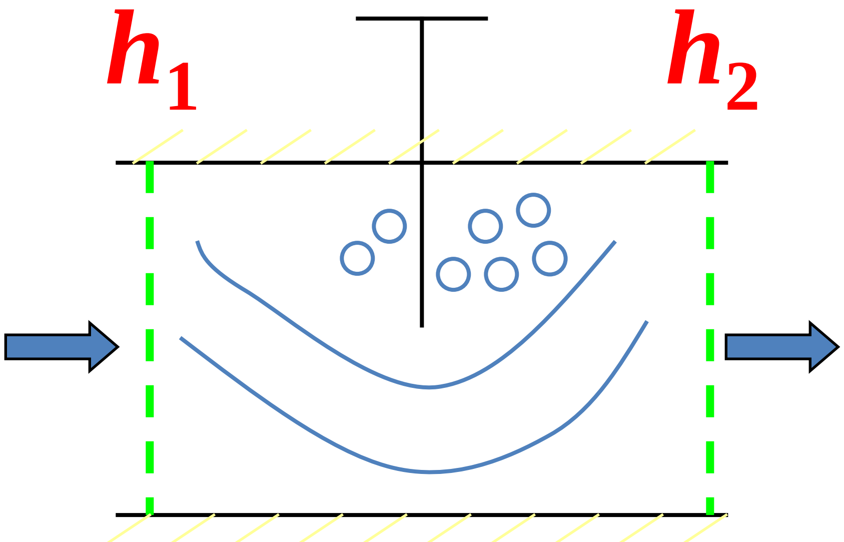


(*a*) An adjustable valve

(*b*) A porous plug

(*c*) A capillary tube

绝热节流



$$q = \Delta h + w_s$$

没有作功部件

$$w_s = 0$$

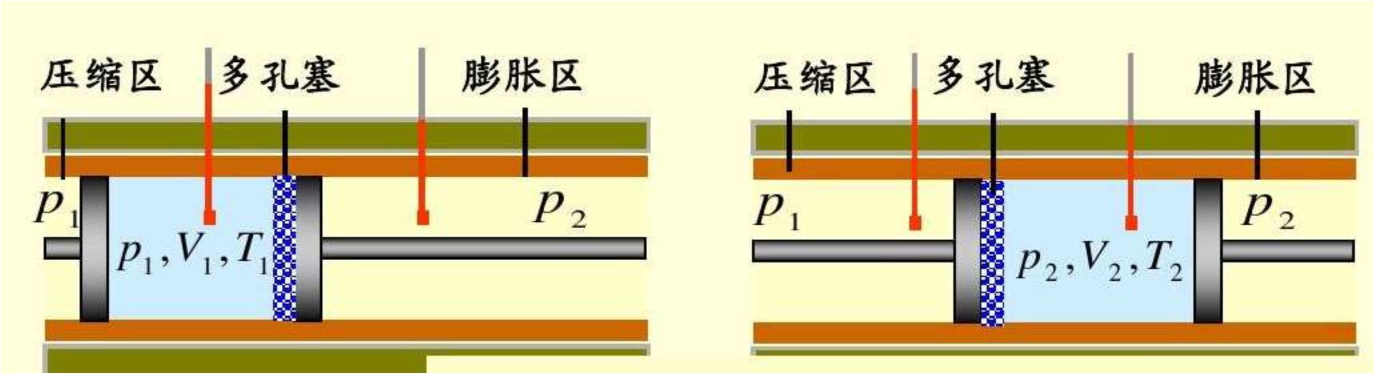
绝热 $q = 0$

$$\Delta h = 0 \qquad h_1 = h_2$$

绝热节流过程，前后h不变，但h不是处处相等

绝热节流

焦尔-汤姆逊（Joule-Thomson）实验



$W_{左} = p_1V_1$； $W_{右} = p_2V_2$

$Q=0$

$\Delta U = U_2 - U_1$

$W = W_{右} - W_{左} = p_2V_2 - p_1V_1$

$\Delta U + W = 0$

$U_2 - U_1 + p_2V_2 - p_1V_1 = 0$

$H_2 = H_1$

绝热节流过程，前后*h*不变　　**如果p1=p2?**

5、喷管和扩压管

Nozzles and Diffusers

火力发电

核电

蒸汽轮机静叶

飞机发动机

轮船发动机

移动电站

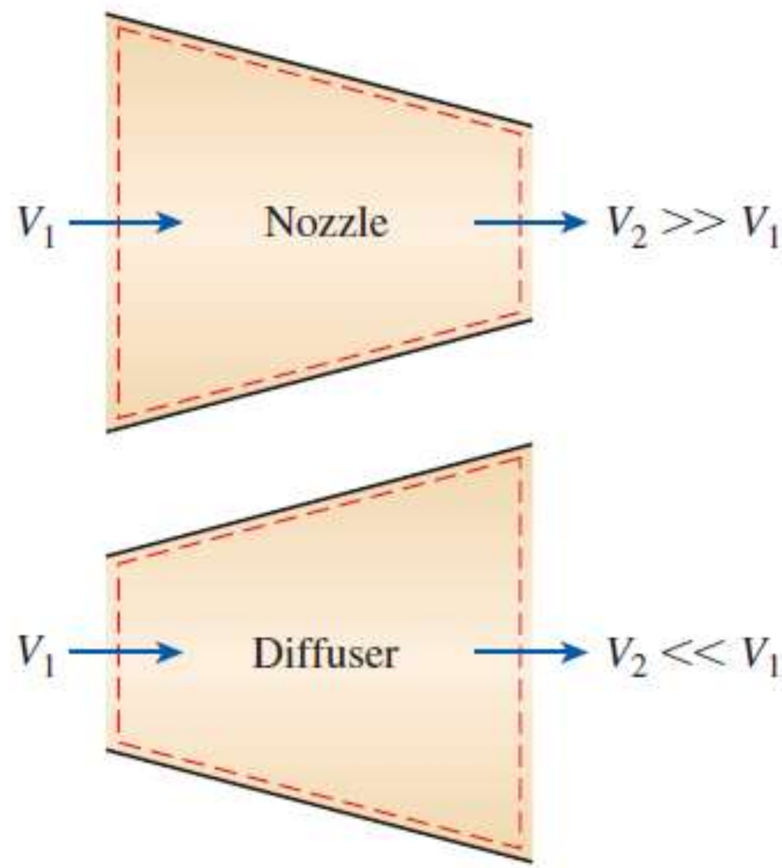
压气机静叶

火箭发动机

航空发动机

喷管

喷管与扩压管

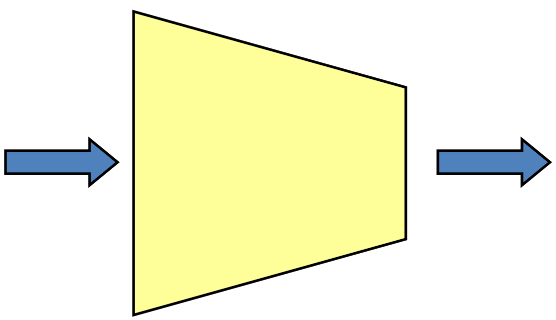


喷管的截面积减小（亚声速流动）/增大（超声速）
扩压管相反

喷管目的： 压力降低，速度提高

扩压管目的： 速度降低，压力升高

动能参与转换，不能忽略



$$q = \Delta h + \Delta c^2 / 2 + g\Delta z + w_s$$

$w_s = 0$　　$q = 0$　　$g\Delta z = 0$

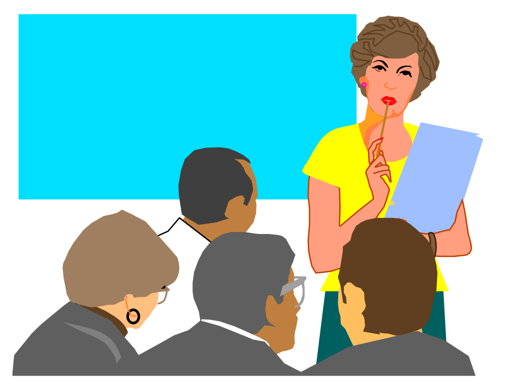
$$\Delta c^2 / 2 = -\Delta h$$

动能与焓变相互转换

第二章　小 结

基本概念：

- 热力学第一定律的表述
- 热力学能含义
- 闭口系能量方程
- 开口系能量方程
- 稳定流动能量方程



第二章 讨论课

第二章 讨论课（思考题）

- 工质膨胀是否一定对外作功?

做功定义：对象和部件　　自由膨胀过程

- 定容过程是否一定不作功?

开口系，技术功

$$w_t = -\int v\,\mathrm{d}p$$

水轮机
电磁

- 定温过程是否一定不传热?

相变过程（冰融化，水汽化）

等温膨胀做功

第二章 讨论课（思考题）

- 气体体积减小时一定消耗外功

气体被冷却，$PV=mRgT$

气体被压缩时一定消耗外功

第二章讨论课（思考题）

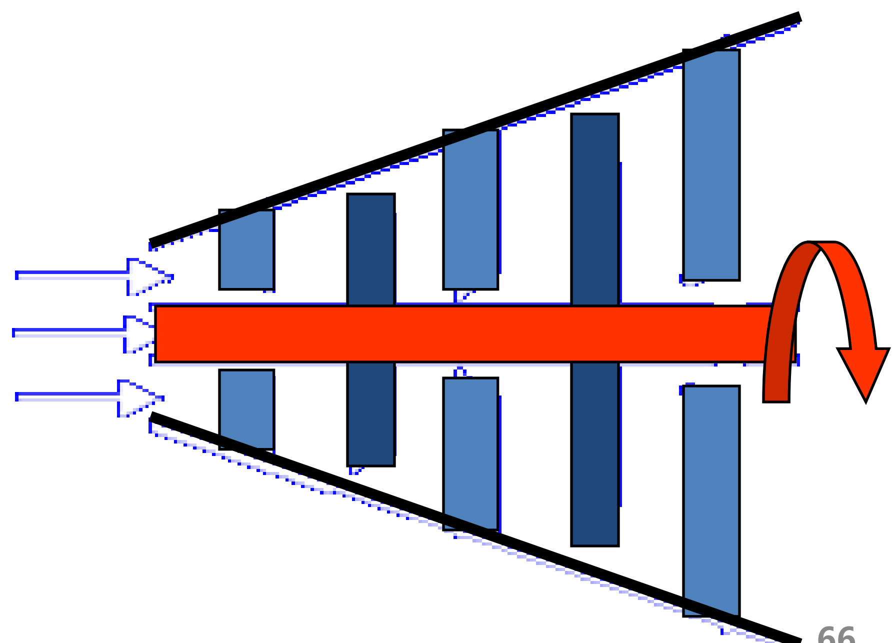
- **对工质加热，其温度反而降低，这种情况不可能** ╳

$$Q = \Delta U + W$$

> 0　　< 0　　> 0

- **气体边膨胀边放热是可能的**

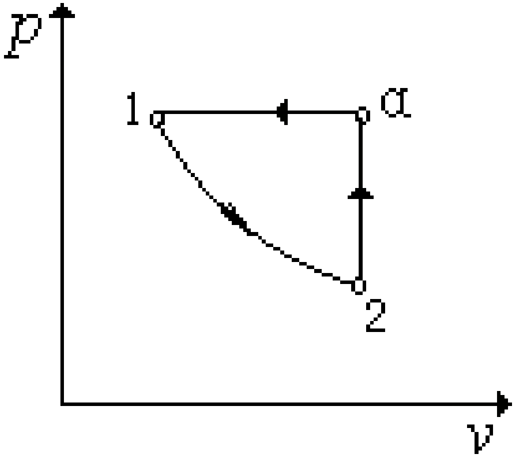
$$Q = \Delta H + W_t$$



$$\oint \Delta U = 0$$

二章讨论课（计算

$$\oint \Delta H = 0$$



$$W_{12} < W_{1a2} \qquad \Delta U_{12} = \Delta U_{1a2}$$

$$Q_{12} = \Delta U_{12} + W_{12} \qquad Q_{1a2} = \Delta U_{1a2} + W_{1a2}$$

$$Q_{12} < Q_{1a2}$$

$$W_{t12} < W_{t1a2} \qquad \Delta H_{12} = \Delta H_{1a2}$$

$$Q_{12} = \Delta H_{12} + W_{t12} \qquad Q_{1a2} = \Delta H_{1a2} + W_{t1a2}$$

循环

$$\oint W = \oint W_t = \oint Q$$

第二章讨论课（计算题）

例2：

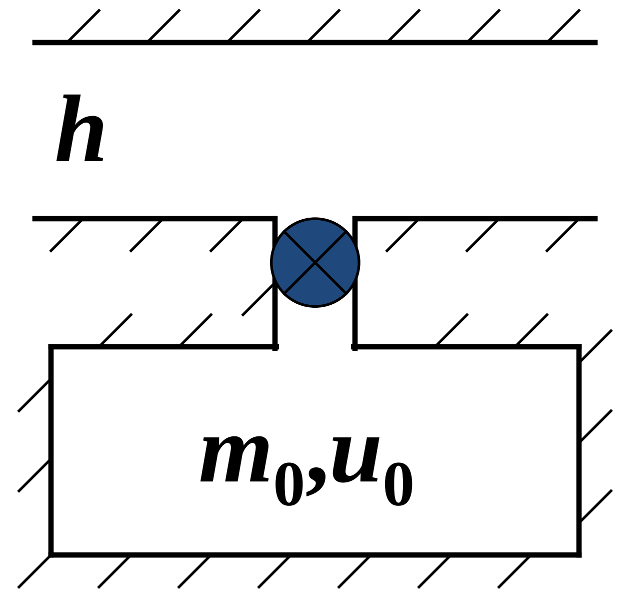
储气罐原有气体m_0,u_0

输气管状态不变，h

经τ时间充气，关阀

储气罐中气体m

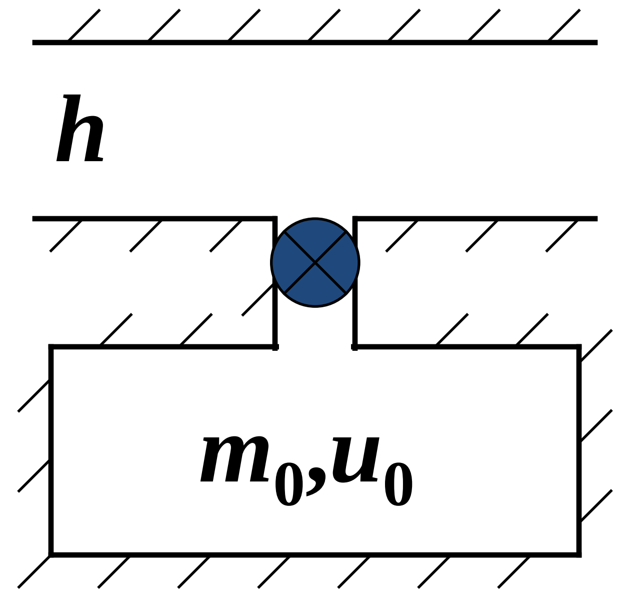
求：储气罐中气体内能u'



忽略动、位能变化，管路、储气罐、阀门均绝热

典型问题：充气问题与取系统

四种可取系统



1）取储气罐为系统

开口系

2）取最终罐中气体为系统

闭口系

3）取将进入储气罐的气体为系统

闭口系

4）取储气罐原有气体为系统

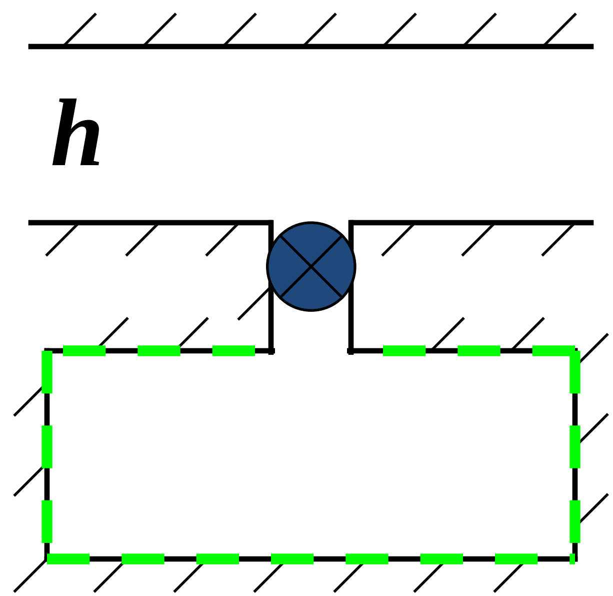
闭口系

1)取储气罐为系统(开口系)

$$\cancel{\delta Q} = \mathrm{d}U_{\mathrm{cv}} + \cancel{\delta W_{\mathrm{net}}}$$

$$+\left(h + \cancel{c^2/2} + \cancel{gz}\right)_{\mathrm{out}} \cancel{\delta m_{\mathrm{out}}}$$

$$-\left(h + \cancel{c^2/2} + \cancel{gz}\right)_{\mathrm{in}} \delta m_{\mathrm{in}}$$



忽略动位能变化

绝热

无作功部件

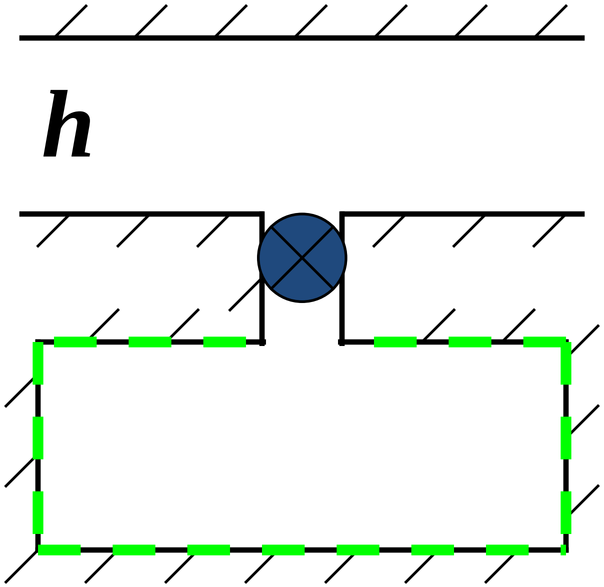
无离开气体

$$dU_{cv} - h\delta m_{in} = 0$$

$$dU_{cv} = h\delta m_{in}$$

1)取储气罐为系统(开口系)

$$dU_{cv} = h\delta m_{in}$$



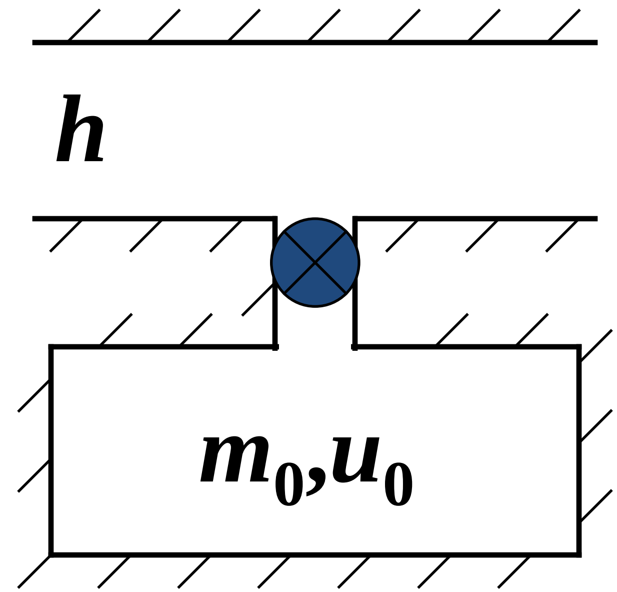
经τ时间充气，积分概念

$$\int_{m_0u_0}^{mu'} dU_{cv} = \int_{m_0}^{m} h\delta m_{in}$$

h是常数 $mu' - m_0u_0 = h(m - m_0)$

$$u' = \frac{h(m - m_0) + m_0u_0}{m}$$

四种可取系统 2）



1）取储气罐为系统

开口系

2）取最终罐中气体为系统

闭口系

3）取将进入储气罐的气体为系统

闭口系

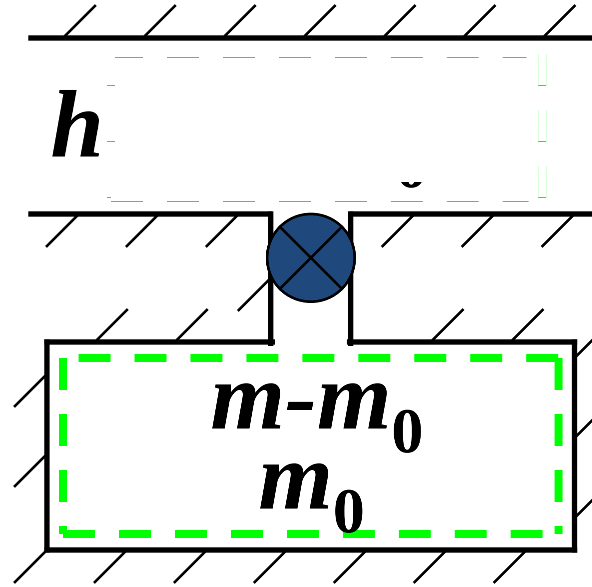
4）取储气罐原有气体为系统

闭口系

2）取最终罐中气体为系统（闭口系）

$$\cancel{Q} = \Delta U + W$$

绝热



$$W = -(m - m_0)pv$$

$$\Delta U = mu' - \left[m_0 u_0 + (m - m_0)u\right]$$

$$mu' - \left[m_0 u_0 + (m - m_0)u\right] - (m - m_0)pv = 0$$

$$mu' - m_0 u_0 - (m - m_0)h = 0$$

$$u' = \frac{h(m - m_0) + m_0 u_0}{m}$$

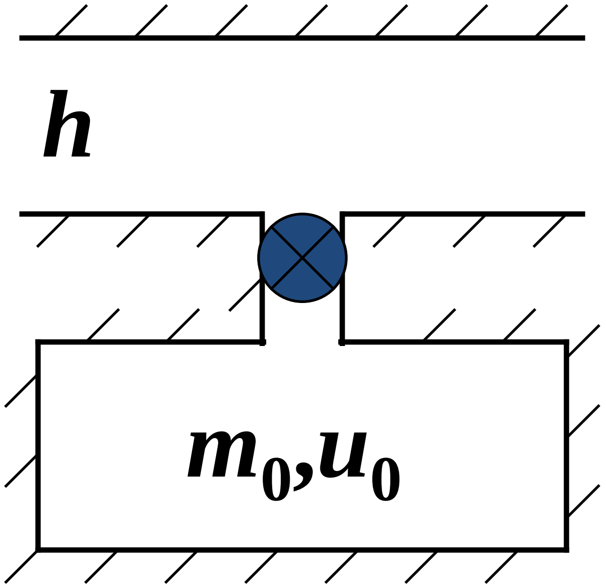
四种可取系统 3)

1）取储气罐为系统

开口系

2）取最终罐中气体为系统

闭口系



3）取将进入储气罐的气体为系统

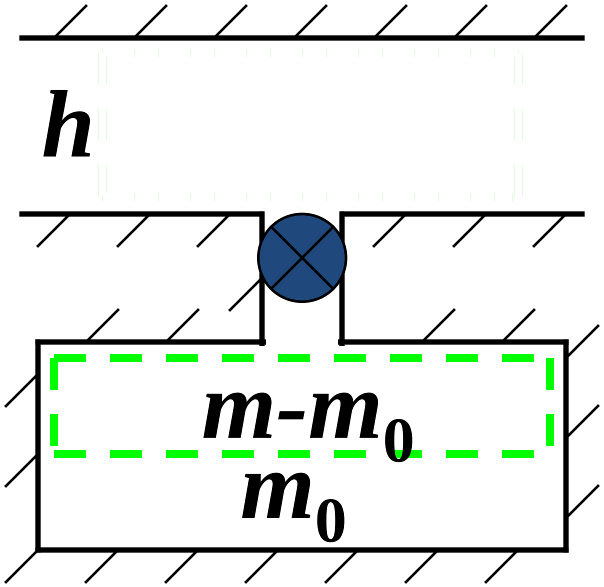
闭口系

4）取储气罐原有气体为系统

闭口系

3）取将进入储气罐的气体为系统(闭口系)

$$Q = \Delta U + W$$



m_0与$m-m_0$有温差传热Q_1

$$\Delta U = (m - m_0)u' - (m - m_0)u$$

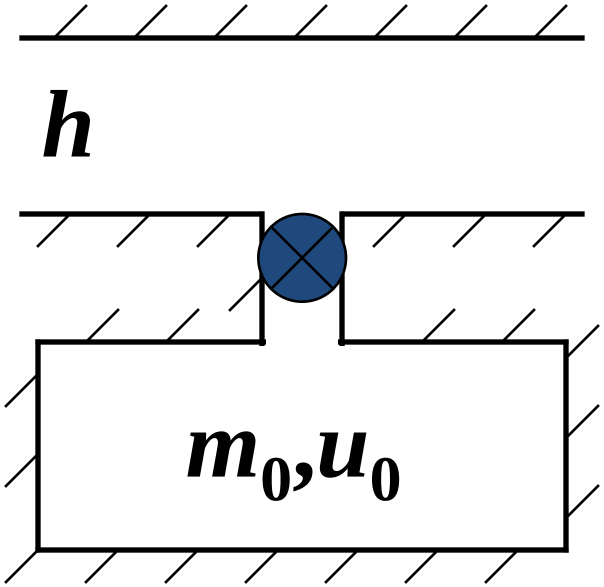
$m-m_0$对m_0作功W_1

$$W = -(m - m_0)pv + W_1$$

$$Q_1 = (m - m_0)u' - (m - m_0)u - (m - m_0)pv + W_1$$

? $$Q_1 = (m - m_0)u' - (m - m_0)h + W_1$$?

四种可取系统 4)



1）取储气罐为系统

开口系

2）取最终罐中气体为系统

闭口系

3）取将进入储气罐的气体为系统

闭口系

4）取储气罐原有气体为系统

闭口系

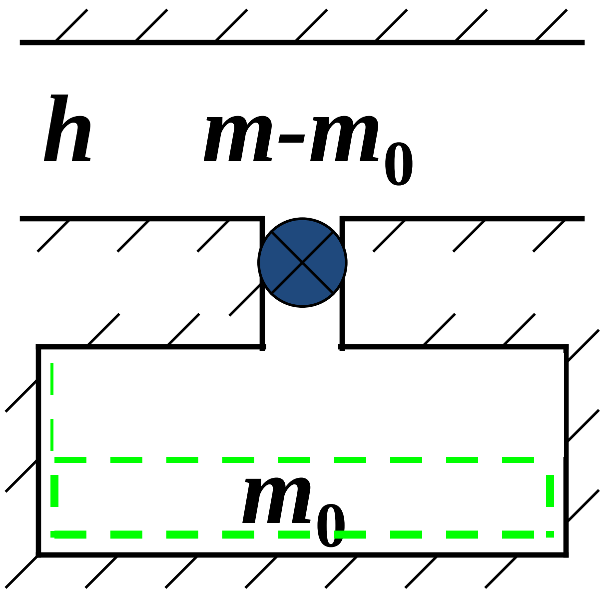
4）取储气罐原有气体为系统(闭口系)

$$Q = \Delta U + W$$

m$_0$与***m-m***$_0$有温差传热***Q***$_1$'

$$\Delta U = m_0 u' - m_0 u_0$$

m$_0$对***m-m***$_0$作功***W***$_1$'



$$Q_1^{'} = m_0 u' - m_0 u_0 + W_1^{'}$$

?

$$Q_1 = -Q_1^{'}$$

$$W_1 = -W_1^{'}$$

?

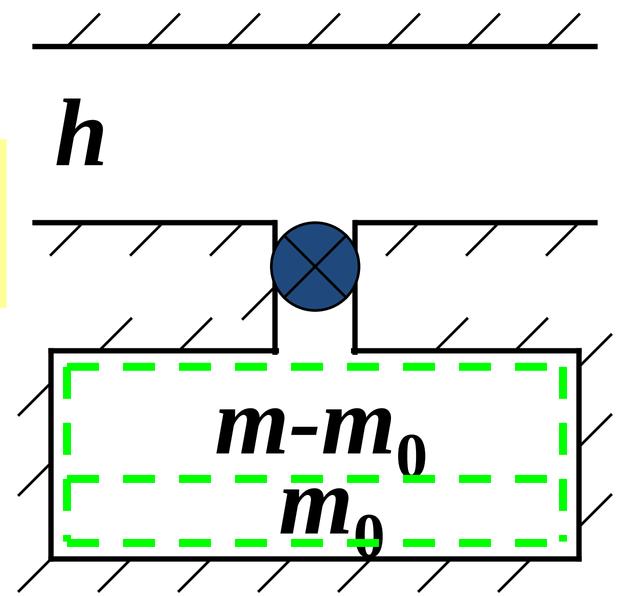
$$Q_1 = (m - m_0)u' - (m - m_0)h + W_1$$

4）取储气罐原有气体为系统(闭口系)

$$Q_1' = m_0 u' - m_0 u_0 + W_1'$$

$$Q_1 = (m - m_0)u' - (m - m_0)h + W_1$$

$$Q_1 = -Q_1' \qquad W_1 = -W_1'$$



$$Q_1 - W_1 = -(Q_1' - W_1')$$

$$(m - m_0)u' - (m - m_0)h = -(m_0 u' - m_0 u_0)$$

$$mu' = m_0 u_0 + (m - m_0)h \qquad u' = \frac{h(m - m_0) + m_0 u_0}{m}$$

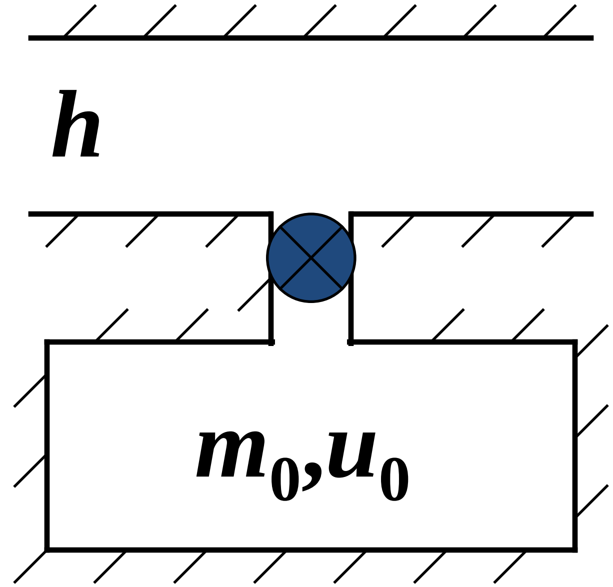
四种可取系统

1）取储气罐为系统

开口系

2）取最终罐中气体为系统

闭口系



3）取将进入储气罐的气体为系统

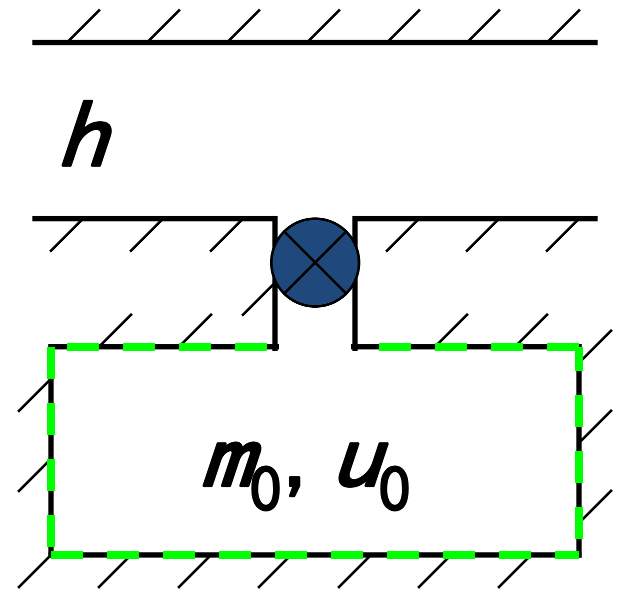
闭口系

4）取储气罐原有气体为系统

闭口系

利用热一律的文字表达式

取储气罐为系统(开口系)



进 － 出 ＝ 内能变化

进： $(m-m_0)h$

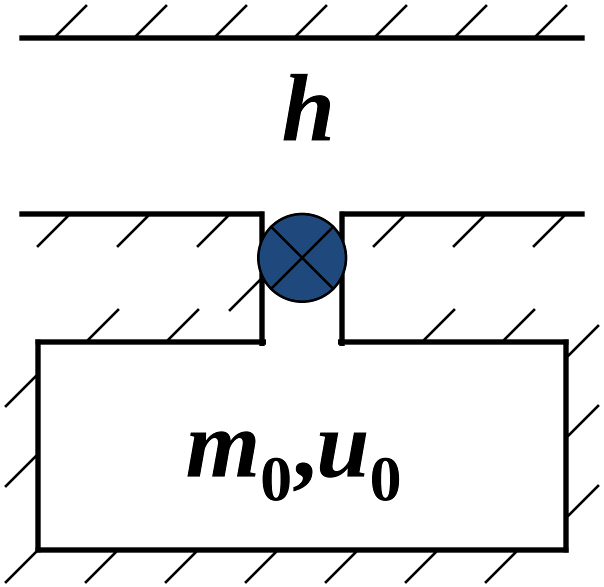
出： $=0$

内能变化： $(mu'-m_0u_0)$

$$u'=\frac{h(m-m_0)+m_0u_0}{m}$$

结果说明

1）取系统不同，
考虑的角度不同



开口系反映为质量携带焓

闭口系反映作功

2）若$m_0=0$， $u'=h$

$$u'=\frac{h(m-m_0)+m_0u_0}{m}$$

第二章讨论课（计算题）

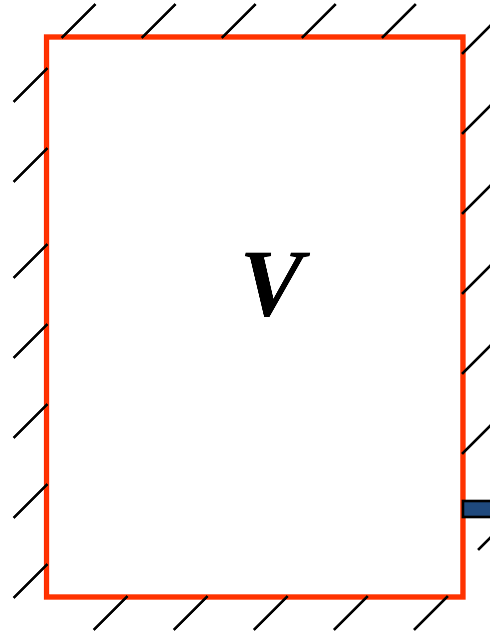
例3：取系统问题之二

已知：p_1=35bar, t_1 =16℃

$$u = c_v T \quad h = c_p T$$

$$c_v = 718 J / kg.K$$

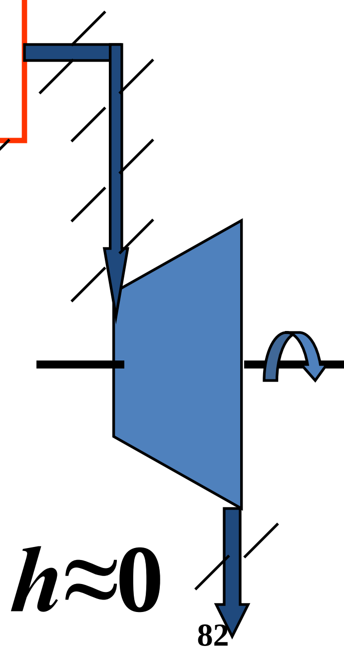
$$R_g = 287 J / kg.K$$



要求：输出4kW,持续30s (kW=kJ/s)

允许：$p_1 \downarrow$ p_2=3.5bar

求：需要的容积V

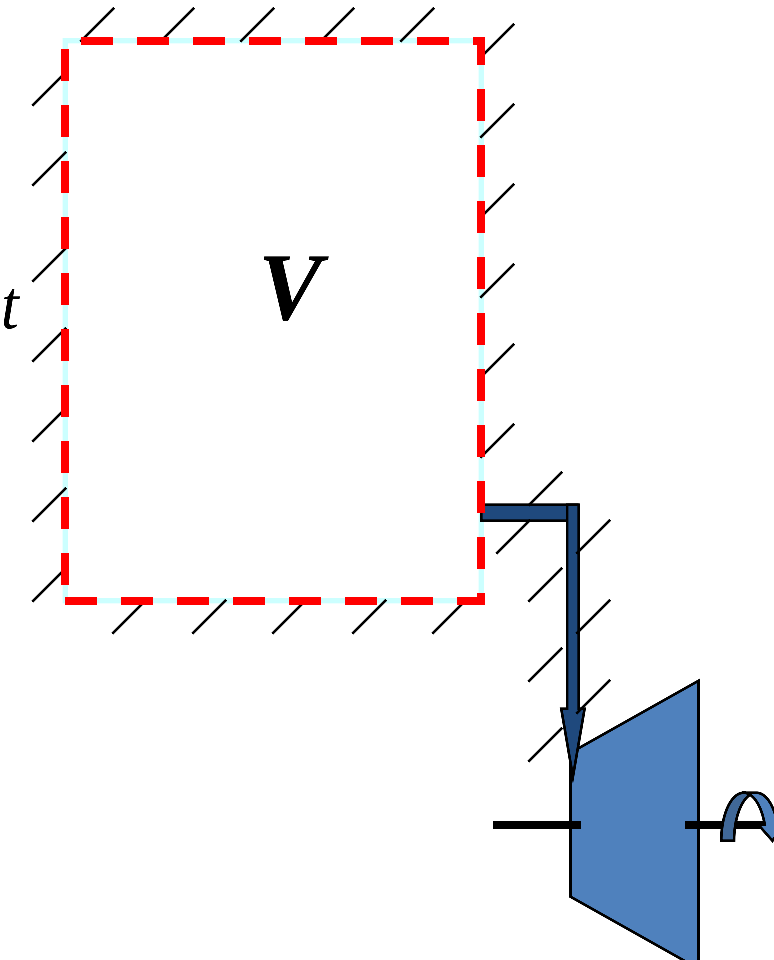


解1：取储气罐为系统（开口）

$$\cancel{\delta Q} = dU_{cv} + \cancel{\delta W_{net}}$$

$$+\left(h+\cancel{c^2/2}+\cancel{gz}\right)_{out}\ \delta m_{out}$$

$$-\left(h+\cancel{c^2/2}+\cancel{gz}\right)_{in}\ \cancel{\delta m_{in}}$$



$$\boxed{dU_{cv} + h\delta m_{out} = 0}$$

$$\boxed{U_2 - U_1 = -\int h\delta m_{out}}$$

$$\boxed{U_1 - U_2 = \int h\delta m_{out}}$$

$h \approx 0$

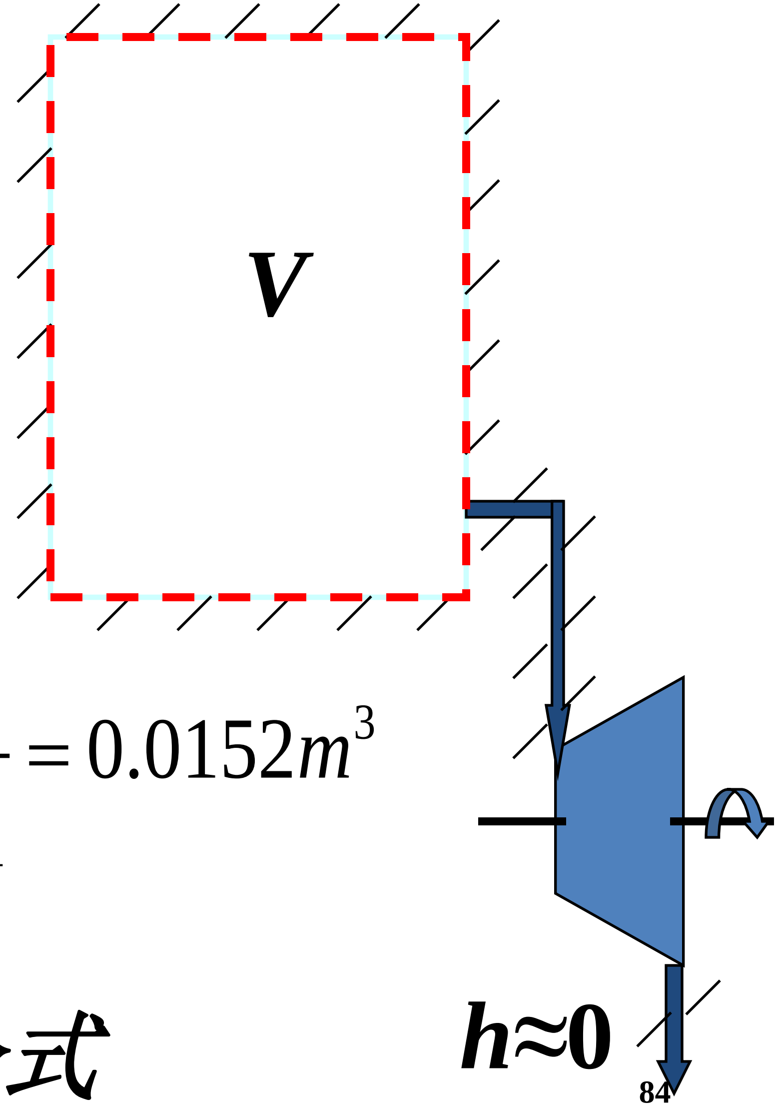
解1：取储气罐为系统（开口）

$$U_1 - U_2 = \underbrace{\int h\delta m_{out}}_{W}$$

$$m_1u_1 - m_2u_2 = W$$

$$\frac{p_1V}{R_g\cancel{T_1}}c_v\cancel{T_1} - \frac{p_2V}{R_g\cancel{T_2}}c_v\cancel{T_2} = W$$

$$V = \frac{W}{(p_1 - p_2)\frac{c_v}{R}} = \frac{4\times30\times10^3}{(35-3.5)\times10^5\,\frac{718}{287}} = 0.0152m^3$$



用总的能量守恒积分式

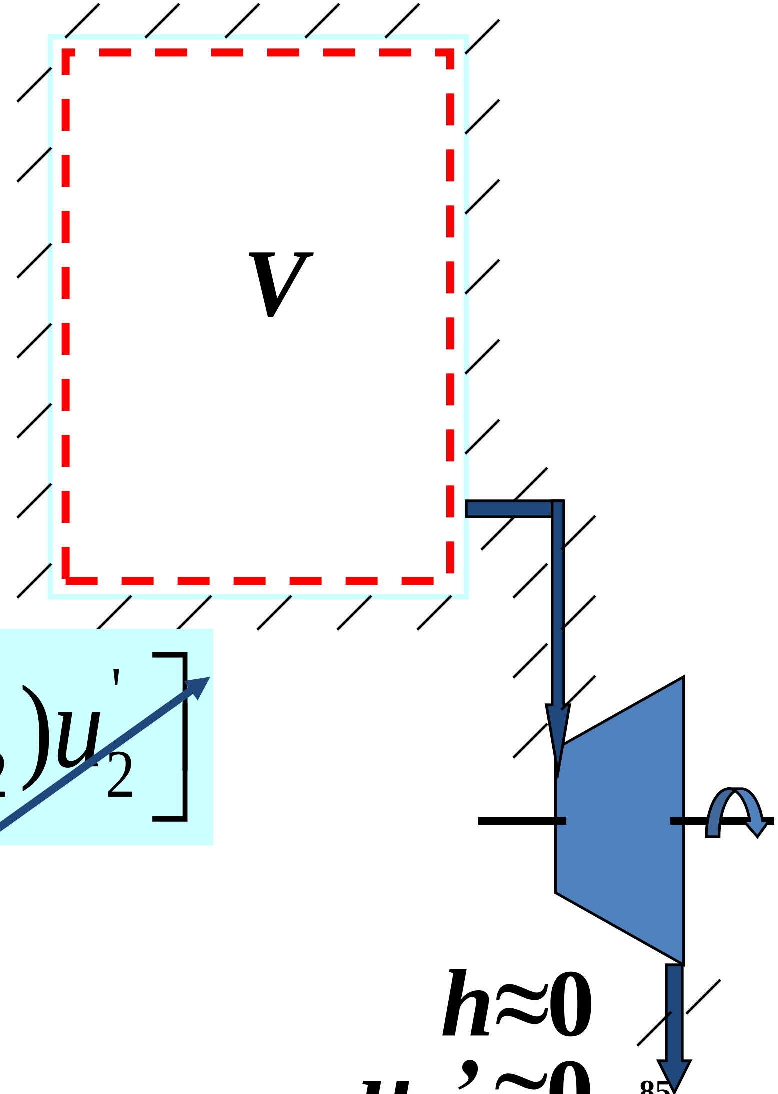
解2：取气体为系统（闭口）

$$\cancel{Q} = \Delta U + W$$

$$W = U_1 - U_2$$

$$W = m_1 u_1 - \left[m_2 u_2 + \cancel{(m_1 - m_2) u_2'} \right]$$

$$W = m_1 u_1 - m_2 u_2$$



$h \approx 0$

$u_2' \approx 0$

解3：取储气罐和汽机为系统（开口）

进 － 出 ＝ 内能变化

进：$=0$

出：W

内能变化：$m_2u_2 - m_1u_1$

$$0 - W = m_2u_2 - m_1u_1$$

$$W = m_1u_1 - m_2u_2$$