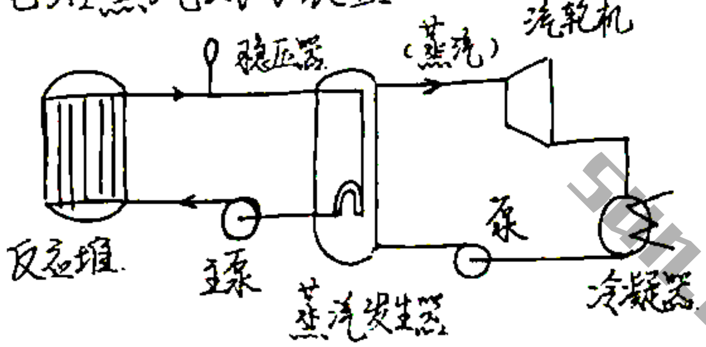
工程热力学：

· 绪论：

①核电站蒸汽动力装置：



② 典型蒸汽动力装置： 工质吸热 —— 膨胀作功 —— 排热 (热能 → 机械能)

· 第一章：基本概念及定义：

1.1 热力系统：

① 研究对象： 热力学系统

② 与系统发生 质能交换：外界

③ 外界与系统分界面(线)：边界 → (边界是人为划分，可以有虚拟边界)

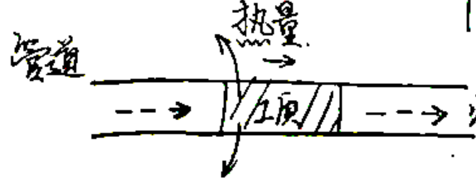
④ 分类 (根据系统与外界的物质、能量交换情况)

- 闭口系统 / 控制质量 (CM) ：与外界有能量交换，无物质交换 ($\frac{dm}{dt}=0$)
- 开口系统 / 控制容积 / 控制体 (CV)：与外界有物质、能量交换 ($\frac{dV}{dt}=0$, $\frac{dm}{dt}$ 可能为0)
- 绝热系(统)：与外界无热量交换
- 孤立系(统)：与外界既无热量，又无物质交换

* i) 外界不一定是环境介质，如压水堆电站的稳压器，环境介质为周围的空气，但外界包括一回路稳压器周围的高压水。

ii) 能量的体现或方式： { (内) 焓 ; (外) 动能、势能

eg.



焓+动能. (其中热量由固定边界传输)

1.2 工质的热力学状态及基本状态参数

① 热力学状态对应的是系统的宏观物理状况；

② 状态参数描述平衡状态 → (理解为系统中 P、V处处相等)

③ 状态参数是大量分子运动的宏观平均结果.

④ 状态参数是热力学系统状态的单值函数，且与物理过程无关；满足 $\oint dx = 0$.

⑤ 五常见状态参数：P. V. T. U. H(焓). S； 物性：ρ. ν(粘性). λ(电导率).

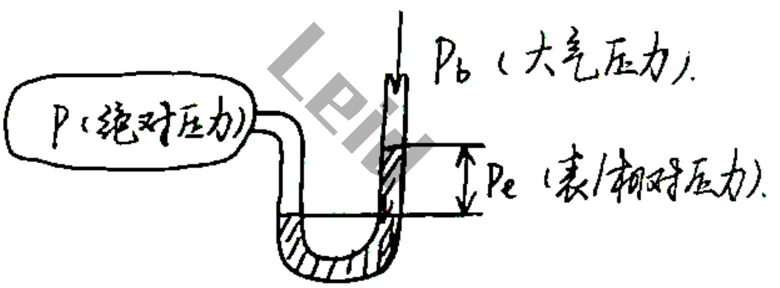
⑥ 广延量： 与系统质量无关 (P.T)

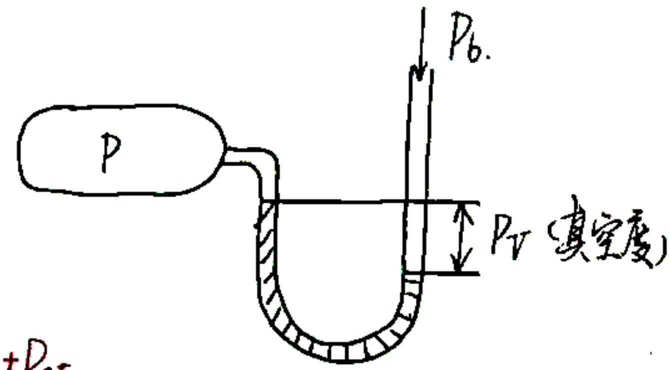
强度量： 与系统质量成正比且有可加性 (V.U.S.H)

→ 引入比容、比焓、比内能等量.

I、温度： 标志物质分子热运动剧烈度 & 度量 $\bar{E}_k$；

II、压力： 分子撞击壁的平均结果；





$$\Rightarrow P_b = P - P_e = P + P_v.$$

(正压： $P > P_b$) (负压： $P < P_b$)

· 等压面满足条件：
- 左右等高
- 中间连通.
- 同种介质

③ 可逆过程：系统(工质)按原路径回到原状态 + 外界不受影响

(准静态过程 + 不影响外界)

(理想情况，但工程中不存在)

1.6 过程功和热量：

① $W_{12} = \int_1^2 p\,dV$ ； $w_{21} = \int_2^1 p\,dV$ ； W_u(有用功) = W(总功) - W_r(摩擦) - W_l(大气功)

(仅适用于已知 $p=p(V)$ 和可逆过程)

② $q_{1\text{-}2} = \int_1^2 T\,dS$

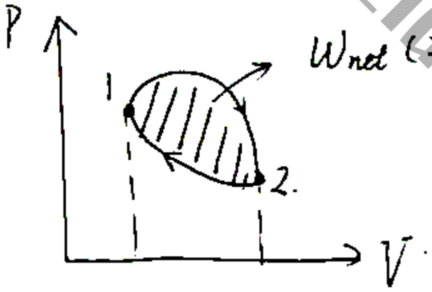
(热量反映为仅由温度差而通过边界传递的能量)

③ 功 $\underset{\text{有条件}}{\overset{\text{无条件}}{\rightleftharpoons}}$ 热

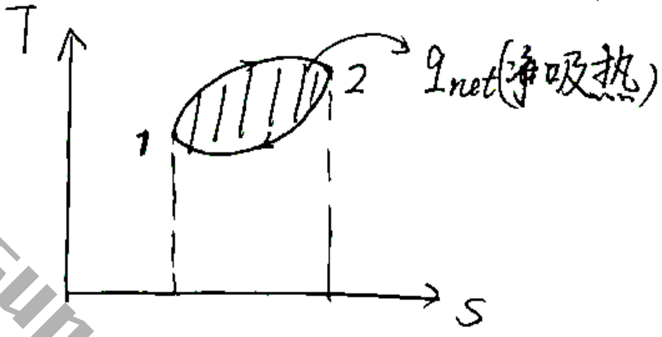
1.7 热力循环：

① 可逆循环：全部是可逆过程的循环；

② 正向循环(二回路循环)：将热能转化为机械能，表现为对外做功。



和



$\Rightarrow w_{net} = q_{net}$

③ 热力装置效率 & 正向循环收益 $\eta_t = \dfrac{w_{net}}{q_1}$

净功

吸热 (相当于T-S中 1→2 的大面积)

(吸热量有多少用来做功)

1.4 平衡状态；状态方程；坐标图：

① 平衡态的定义成分：热平衡+力平衡 同时成立；

② 平衡与均匀的区别：对于气液相系统，不均匀但可达到平衡⇒（平衡≠均匀）

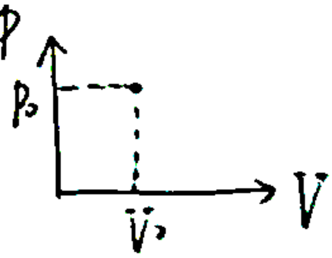
平衡与稳定区别：稳定≠平衡：  力学平衡但有ΔT，不平衡.

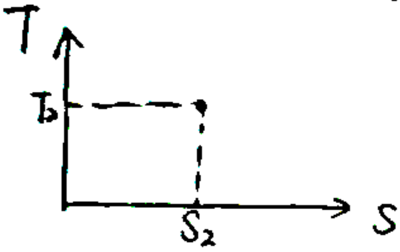
③ 工程中平衡态实例：数值量&场量（P22-23面）

④ 状态方程：是针对p、v、T而言，有 $pv=R_gT$ 或 $pV=nRT$；

（R_g 气体常数与气体种类有关）

⑤ 状态参数坐标图：（本质是利用状态方程，根据知三求二，用二维系即可确定状态）

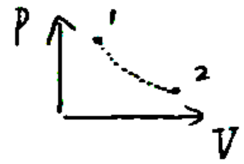




（状态坐标图只描述平衡状态下的状态参数p.V.U.S.H.T）

1.5 工质状态变化过程：

① 理解准静态过程：对于状态图中两个状态点1.2，我们得知的是1经过一些操作可以到2，但是1到2的过程我们难以预知，即不知道1到底沿哪条线走到了2（理论上很多条）我们采取极限思想，假设此过程为气缸一活塞运动，我们慢慢（极慢）地拉动活塞，使工质可以快速回到平衡态（耗时dt，即弛豫时间极小，由此可一直看作平衡状态），那么我们可以得到一系列紧接着的状态点，连接即为1到2的过程曲线（近似但有效）：

 ⇒  ⇒ 这个过程即准静态过程（无限缓慢）.

② 得到准静态过程的条件：
- 破坏平衡态的势（源）ΔT，Δp无限小.
- 过程进行无限缓慢.
- 工质有快速回复平衡的能力（一般气体都可，速度）.

第二章 热力学第一定律

① 热力学能 & 焓

i) 热力学能 U → 角度：物质内分子能量 $\begin{cases} U_k = f(T) \\ U_p = f(T, v) \end{cases}$

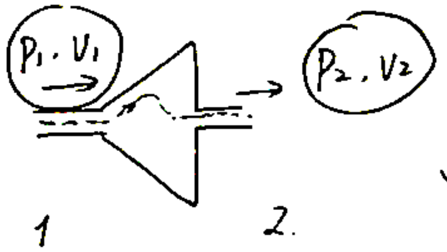
→ $U = U(T, v)$ （~~过程量~~） 状态量：T, v 也是状态量

ii) 总能 E → 热力学能 U（内）

→ 宏观动能、位能（外） ⇒ $E = U + \frac{1}{2}mc^2 + mgz$.

iii) 推动功 $= pA\Delta l = pV = mpv = pv$（1kg 工质）

↳（一个形象的例子是在开口系中，工质流动的动力来源的功由工质传给系统）



↳ 在1口传入时，工质的状态未变，则热力学能 U 未变，表明存在有动力来源（未标在图中），工质此时就起到传递能量的作用.

iv) 流动功 $= p_2V_2 - p_1V_1$ ↳ 表明工质流动时，维持工质流动所需的功. p_1V_1 表示推动工质进入的功. p_2V_2 表示推动工质输出的功.

v) 膨胀功 $= w$. ↳ 工质在入口处和出口处的状态改变，表明此开口系统与工质（或外界）有能量传递，气体膨胀作功可以用于工质流动和传给系统 ⇒ E（系统与外界交换功量）$= w - (p_2V_2 - p_1V_1)$

vi) 焓 $= H = U + pV$ ↳ 运动工质中系统与工质间作用而获得一个总能量. 包含了工质的热力学能和推动能，为状态参数

焓

② 热工定律方程式:

$$Q = W + \Delta U$$

系统吸热　对外作功　内能增量

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

过程量　状态量

循环: $\oint \delta Q = \oint \delta W$.

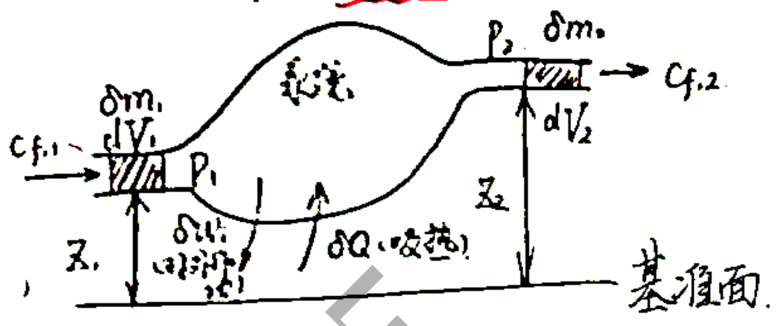
⇒ 可逆过程: $\delta W = pdV \Rightarrow \begin{cases} Q = \Delta U + \int_1^2 pdV \\ \delta Q = dU + pdV \end{cases}$

循环过程: $\oint dU = 0 \Rightarrow \oint \delta Q = \oint \delta W$

$\Rightarrow Q_{net} = W_{net}$

2.2. 开口系统能量方程式 (δm 表明在拉格朗日坐标系下研究/追踪流体团)

①对于热工定律: $Q = W + \Delta U$, 是仅考虑了闭口系的情况, 下面讨论开口系.



分析系统中能量的转换:

- 进入系统: $dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q$
- 离开系统: $dE_2 + p_2 dV_2 + \delta W_i$
- 系统储存能量: dE_{cv}.

⇒ 能量守恒: $E_入 = E_出 + E_存$: $(dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q) - (dE_2 + p_2 dV_2 + \delta W_i) = dE_{cv}$

$\Rightarrow \delta Q = dE_{cv} + (dE_2 + p_2 dV_2) - (dE_1 + p_1 dV_1) + \delta W_i$ ⇐ 由dE_{cv}的含义推出.

考虑到 dE_1(总能) $= dU_1 + dE_{k1} + dE_{p1}$, $dE_2 = dU_2 + dE_{k1} + dE_{p1}$, $h = u + pv$.

并将能量都写成比能量形式: $\delta Q = dE_{cv} + (h_2 + \frac{c_{f,2}^2}{2} + gz_2)\delta m_2 - (h_1 + \frac{c_{f,1}^2}{2} + gz_1)\delta m_1 + \delta W_i$

开口系能量方程的一般表达式.

⇒ △用 $d\tau$ 除上式 (反映能量随时间变化情况):

$$\Phi = \frac{dE_{cv}}{d\tau} + \sum_j \left(h_j + \frac{c_{f,j}^2}{2} + gz_j\right) q_{m,j} - \sum_i \left(h_i + \frac{c_{f,i}^2}{2} + gz_i\right) q_{m,i} + P_i$$

$\frac{\delta Q}{d\tau}$: 热流量

质量流率

内部功率

② 稳定流动方程组

└ 稳定流动的含义是指各截面参数不随时间发生变化：

$$\begin{cases} \dfrac{dE_{cv}}{d\tau} = 0 \quad (\text{能量}) \\ \sum q_{m,in} = \sum q_{m,out} \quad (\text{质量}) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \Phi = \sum_j \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz\right)_j q_{m,j} - \sum_i \left(h + \frac{c_f^2}{2} + gz\right)_i q_{m,i} + P_i$$

用 $q_m = \frac{\delta m}{d\tau}$ 除上式：$\frac{\Phi}{q_m} = \frac{\frac{\delta Q}{d\tau}}{\frac{\delta m}{d\tau}} = \frac{\delta m Q}{\delta m} = q$ (比热)；$\frac{P_i}{q_m} = \frac{\frac{\delta W_i}{d\tau}}{\frac{\delta m}{d\tau}} = \frac{\delta W_i}{\delta m} = w_i$ (比功)

$\Rightarrow q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta(c_f^2) + g\Delta z + w_i$. $\Rightarrow$ 微分式：$\boxed{\delta q = dh + \frac{1}{2}d(c_f^2) + g\,dz + \delta w_i}$

$\Rightarrow Q = \Delta H + \frac{1}{2}m\Delta c_f^2 + mg\Delta z + W_i$.

Δh.

由 $\Delta h = \Delta u + \Delta(pv) \Rightarrow q - \Delta u = \boxed{\frac{1}{2}\Delta c_f^2 + g\Delta z + \Delta(pv) + w_i}$ → 作功量

$\Rightarrow$ 能量平衡的形式：(吸热 − 内能变化 = 动能差 + 位能差 + 流动功 + 工质对外界作功 系统)

• 技术功 $w_t = w_i + \frac{1}{2}(c_{f2}^2 - c_{f1}^2) + g(z_2 - z_1)$ (机械能所有转化成功的能力，技术上可以利用的功)

来用机械的

由 $q = \Delta u + w \Rightarrow w_t + \Delta(pv) = w \Rightarrow \boxed{w_t = w - (p_2v_2 - p_1v_1)}$

• 在可逆过程假设下，$w = \int_1^2 p\,dv \Rightarrow w_t = \int_1^2 p\,dv - \int_1^2 d(pv) = -\int_1^2 v\,dp$.

$\Rightarrow \delta w_t = -v\,dp$.

$\Rightarrow$ 结论：$dp<0$，即工质压力降低，技术功 δw_t 为正，工质对机器作功

汽轮机作功.

$dp>0$，机器对工质作功：活塞式压气机.

2.2.3 能量方程的应用：

i) 动力机（对外主动输出能量）：忽略散热 q、动能差 $\frac{1}{2}\Delta c_f^2$，位能差 $g\Delta z$：

$w_i = -\Delta h \Rightarrow h_1 - h_2 = w_i = w_t$.（工质对机器作功：工质的焓差部分）

ii) 压气机（被动输入能量）/（耗功）：外界对机组作功 $w_c = -w_i$（耗功/负功）

$w_c = -w_i = (h_2 - h_1) - q$ ：忽略动能差、位能差.

（主要的功加在推动功 P_2V_2 上）

iii) 热交换器：忽略位能差：

$$\begin{cases} \frac{1}{2}(c_{f_2}^2 - c_{f_1}^2) = h_1 - h_2 \\ \text{（工质吸热）} q = h_2 - h_1 \end{cases}$$

iv) 管道设备：设（流动绝热、前后截面动能差、位能差忽略）：

$h_2 = h_1$

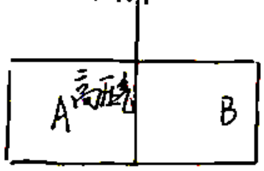
（注意工质在管道中焓不守恒，只在进出口均匀流动截面处相等）

第二章的思考题：P61~62：

① 由热I律 $Q=\Delta U+W$：Q, W 为~~状态~~过程量，ΔU 为状态量；

（Q, W 只有在热力过程中才有体现）　（$\Delta U=U_2-U_1$，为两个状态量之差）

② 隔板



（刚性绝热）

i）抽去隔板，$Q=\Delta U+W$ 中，气体 $Q=0$，$W=0$，因此 $\Delta U=0$

ii）隔板上打一小孔：（比热力学能 u？）
由于不存在外部功源（推动A中气体作功），U_A 会移向 U_B，但比内能 u_A、u_B 均不变，质量的变化引起了内能变化。

③ 热力学第I定律改写成形式：$q=\Delta u+pv$？；$q_2-q_1=(u_2-u_1)+(w_2-w_1)$？

i）不能改成 $q=\Delta u+pv$：根据热I律定义式 $Q=\Delta U+W \Rightarrow q=\Delta u+w$（比形式）
$\Rightarrow$ 必须在可逆条件下：$w=\int p\,dv$，$\boxed{q=\Delta u+\int p\,dv}$；

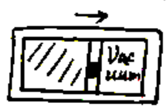
ii）不能改成 $q_2-q_1=(u_2-u_1)+(w_2-w_1)$：
此处 q_2-q_1 以及 w_2-w_1 是以状态量的角度处理 w, q，但 q 和 w 是过程量，在单位1或2没有 q 和 w.

④ 热I律的形式适用范围：

$q=\Delta u+w \Rightarrow$ 闭口系（单位质量）

$q=\Delta u+\int_1^2 p\,dv \Rightarrow$ 闭口系 + 可逆过程.

⑤ 气体流入真空容器，需要推动功？：



无推动功（因为无外部功源）$\Rightarrow$ 气体扩散效果.

管

需要推动功，管外有外部功源在推动气体.

⑥ 稳定流动开口系不同部位工质的比内能、比焓、比熵会改变，整个系统的 ΔU_{cv}、ΔH_{cv}、ΔS_{cv}

原因：稳定流动 $\Rightarrow \frac{\partial X}{\partial t}=0$，不一定有 $\frac{\partial}{\partial x}X(x,t)=0$.

不同部位表示不同 x 处的 dU、dH、u、h、s，因此可能不同.
但整个系统的 ΔH_{cv}、ΔU_{cv}、ΔS_{cv} 不随时间变化而改变 → （能量无蓄积）

⑦ 稳定流动开口系，是否满足：

$$\begin{cases} \delta Q = dU + \delta W & \text{i)} \\ \delta Q = dH + \delta W_t & \text{ii)} \\ \delta Q = dH + \frac{m}{2}d(c_f^2) + mg\,dz + \delta W_i & \text{iii)} \end{cases}$$

i) 式不适用，W 应为技术功，因此 ii) 式适用（P51 推导）

iii) 适用，即一般能量表达式.

第三章 气体和蒸汽

· 理想气体模型解释（P66-67）；

① 理想气体的比热容：$J/(kg\cdot K)$ → 单位质量物质升高 1K 所需热量.

② 可逆过程下的 c_p 和 c_V：

$\delta q = du + p\,dv$；$\delta q = dh - v\,dp$：$c=\frac{\delta q}{dT}$（定义式）. 由于 $u=u(T,v)$：

全微分

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv \Rightarrow c = \frac{du}{dT}+\frac{p\,dv}{dT} = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v + p\right]\frac{dv}{dT}$$

→ 一般式

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{定容：} dv=0：c_V = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v \xrightarrow{\text{理想气体假设 } u=u(T)} \frac{du}{dT} \\ \text{定压：} dp=0：c_p = \left(\frac{dh - v\,dp}{dT}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \xrightarrow[h\text{为}T\text{的单值函数}]{h=u+pv=u+R_gT} \frac{dh}{dT}. \end{cases}$$

理想气体 可逆过程 $\Rightarrow$ $\begin{cases} c_V = \frac{du}{dT} \\ c_p = \frac{dh}{dT}. \end{cases}$ （都是状态量，仅与 T 相关）$\xrightarrow[u,h]{\text{计算理想气体}}$ $\begin{cases} u=\int c_V\,dT = c_V\big|_{T_1}^{T_2}\Delta T \\ h=\int c_p\,dT = c_V\big|_{T_1}^{T_2}\Delta T \end{cases}$

3.3 理想气体的热力学能、焓、熵.（p78）

i) $\Delta u = q_v = \int_{T_1}^{T_2} c_V dT$

ii) $\Delta h = q_p = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT$

＞ 适用于理想气体的任意过程（因为u、h只为T的函数）

iii) $ds = \frac{\delta q_{rev}}{T}$

ds → 比熵变

δq_{rev} → 可逆过程中1kg工质与热源换热量

T → 传热时工质温度.

求ΔS_{1-2}：$\int_1^2 ds = \int_1^2 \frac{c_p dT - v dp}{T} = \int_1^2 \left(c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}\right) = \left(\int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T}\right) - R_g \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right)$ （公式一）

⇒ 理想气体（因为用到了$pv = R_g T$）的熵为状态参数（$S(T,p)$或$s(T,v)$）.

公式二：$\Delta S_{1-2} = \int_{p_1}^{p_2} c_V \frac{dp}{p} + \int_{v_1}^{v_2} c_p \frac{dv}{v}$ （由$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T}$和$c_p - R_g = c_V$得出）

公式三：$\Delta S_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_V \frac{dT}{T} + R_g \ln\frac{v_2}{v_1}$ （由$\delta q = c_V dT + pv$和$pv = R_g T$得出）.

3-4. 水蒸气的饱和状态和相图.

· 饱和态：$v_{汽化} = v_{液化}$（视作气相与液相相互转化达到动态平衡）

↳（t_s、p_s来描述饱和状态，t_s与p_s须一一对应. $t_s = f(p_s)$）.

· 相图 p85 图 3-8.

3.5 水的汽化过程和临界点：

· 定压汽化原理 p86 5幅图.（加热一缸水的例子）.

⊗见P87.（水定压汽化的p-v图和T-s图，细节记在书的图旁边了）

· 对几个概念作说明：

i) 临界点（水：$p_s = 22.064$ MPa；$T_s = 373.99°C$；$v' = v'' = 0.003106\,m^3/kg$）以上的状态，蒸汽无论怎么加压也不会变回水（$T > T_s$时）。

ii) 干度 $x = \dfrac{m_v}{m_v + m_l}$ → 干饱和蒸汽 / → 湿蒸汽 ⇒ 湿度 $= 1 - x$.

iii) 水在其三相点下（273.16K），热力学能及熵为0.（人为规定，并非真实情况）

iv) 水和水蒸气的状态参数：

加权方法（干+湿）

$$v_x = x v''_{(干)} + (1-x) v'_{(湿)} = v' + x(v'' - v') \approx x v''$$

$$h_x = x h'' + (1-x) h' = h' + x(h'' - h') = h' + x\gamma$$

$$s_x = x s'' + (1-x) s' = s' + x(s'' - s') = s' + x\frac{\gamma}{T_s}$$

⊗v) 查水蒸气表和图：P91-93（根据不同状态（饱和水/干饱和蒸汽；未饱和水/过热蒸汽）找对应p、t下的状态参量）

第5章：气体和蒸汽的基本热力过程

5.1 可逆多变过程：

$pv^n = Const$（可逆——可由p-v图表示；多变：不同n对应不同过程）

理想气体 $pv = R_g T$

$$Tp^{-\frac{n-1}{n}} = Const \quad 或 \quad Tv^{n-1} = Const.$$

→ I. 四个过程：由 $pv^n = const$

$n=0$ $(p=const)$：定压过程.

$n=1$ $(pv=const)$：定温过程.

$n=\gamma=\frac{c_p}{c_v}$：绝热过程.

$n=\infty$ $(\sqrt[n]{p_1}v_1=\sqrt[n]{p_2}v_2$，即 $v_1=v_2)$．定容过程.

*多变指数 n 的求解：

由 $p_1v_1^n=p_2v_2^n$：$\ln p_1+n\ln v_1=\ln p_2+n\ln v_2 \Rightarrow n=\frac{\ln(\frac{p_2}{p_1})}{\ln(\frac{v_1}{v_2})}$.

→ II. 画 p-v 和 T-s 图：（需要求得各处斜率）→ $(\frac{\partial p}{\partial v})_n$ 和 $(\frac{\partial T}{\partial s})_n$.

① $\Rightarrow pv^n=Const$，两边取微分 $\frac{dp}{p}+n\frac{dv}{v}=0$

$\Rightarrow (\frac{\partial p}{\partial v})_n=(\frac{dp}{dv})_n=-n\cdot\frac{p}{v}$. （p-v 的斜率）

$\Rightarrow$ ② 可逆过程中，$ds=\frac{\delta q_{rev}}{T} \Rightarrow \delta q=ds\cdot T=c_nT$，由 $c_n=\frac{n-K}{n-1}c_v$（迈耶公式 + $\gamma=K$ 的定义）.

$\Rightarrow (\frac{\partial T}{\partial s})_n=\frac{T}{c_n}=\frac{(n-1)T}{(n-K)c_v}$. （T-s 的斜率）.

→ III. 求功；技术功；过程热量.

① $w=\int_1^2 p\,dv \xrightarrow{p_1v_1^n=pv^n} p_1v_1^n\int\frac{dv}{v^n}=\frac{1}{n-1}(p_1v_1-p_2v_2)$.

$\Rightarrow$ 变式：由 $pv=R_gT$、$pv^n=Const$，$c_v=\frac{R_g}{K-1}$ 代换，P137 页）

② $w_t=-\int_1^2 v\,dp=-\int_1^2[d(pv)-p\,dv]=(p_1v_1-p_2v_2)+\frac{1}{n-1}(p_1v_1-p_2v_2)$.

$\Rightarrow$ 变式：P137

$\Rightarrow \boxed{w_t=nw}$.

③ $q = \Delta u + w = c_V(T_2-T_1) + \frac{\kappa-1}{n-1}c_V(T_1-T_2) = \frac{n-\kappa}{n-1}c_V(T_2-T_1)$

$\Rightarrow q = c_n(T_2-T_1)$; $c_n = \frac{n-\kappa}{n-1}$ (多变过程比热容)

5.2. 三个过程 ($pv^n = Const$).

定容: $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$;

定压: $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$;

定温: $p_1v_1 = p_2v_2$;

5.3 绝热过程:

① $\delta q = 0 \Rightarrow q = 0$; 在可逆过程下, $\delta q_{rev} = 0$; $ds = \frac{\delta q_{rev}}{T} = 0 \Rightarrow$ 等熵过程. (绝热)

② 过程方程: $pv^\kappa = Const$ (可由 $\delta q = c_V dT + p dv$ 和 $\delta q = c_p dT + (-v dp)$ 推出)

(根据推导条件 P146-147, 此方程适用于比热容为定值、理想气体(求 Δu 和 Δh 时))

$\Rightarrow$ 微分式: $\frac{dp}{p} + \kappa\frac{dv}{v} = 0$. (定熵过程)

③ $\Rightarrow$ 理想气体、定比热、可逆绝热; 初、终态参数关系:

$\left\{\begin{array}{l} p_2v_2^\kappa = p_1v_1^\kappa \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} \\ \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \end{array}\right.$

理想气体 ↓ $pv = R_gT$; 定比热、可逆绝热 ↓ $p_1v_1^\kappa = p_2v_2^\kappa$

④ 定熵过程的p-v图线; (与定温过程对比: 斜率)

可逆多变过程的p-v斜率 $-n\cdot\frac{p}{v} = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n$ $\Rightarrow$ $\left\{\begin{array}{l} 定温: \frac{\partial p}{\partial v} = -\frac{p}{v} \\ 定温: \frac{\partial p}{\partial v} = -\kappa\frac{p}{v}. \end{array}\right.$

由于 $\kappa = \gamma = \frac{c_p}{c_V} > 1$, 则等熵线在p-v上更陡峭:

1 → 2: 绝热 $pv^\kappa = Const$;

1' → 2': 定温 $pv = Const$;

IV. 绝热过程的能量传递、转换：

①由热I定律：$\delta q = \Delta u + w = 0 \Rightarrow w = -\Delta u = u_1 - u_2$.

理想气体 $\Longrightarrow$ 定比容热容 $w = C_V(T_1-T_2) \overset{(迈耶公式)}{=} \frac{R_g}{K-1}(T_1-T_2) \overset{(理想气体)}{=} \frac{1}{K-1}(p_1v_1-p_2v_2)$ （变式见P149）

② 由热I定律：$q = \Delta h + w_t$ 得，$w_t = -\Delta h = h_1 - h_2$； $\Leftrightarrow$ 稳定流动开口系 $w_t = -\Delta h = h_1 - h_2$（见P53）

$\Rightarrow$ 变式P149-150 $\Rightarrow$ ☆ $w_t = \frac{K}{K-1}(p_1v_1-p_2v_2) \Rightarrow$ $w_t = Kw$ $\rightarrow$ 等温：$w = w_t$.

☆5.4 理想气体热力过程综合分析：P155-156. 几种过程的p-v、T-s图：

① · w的正负以定容线（p-v: $n=\pm\infty$）为界（右为正）

· q、ΔS的正负以定熵线为界（T-S: $n=K$）（右为正）

· Δu、Δh的正负以定温（T-S: $n=1$）为界（上为正）

② 理想气体可逆过程计算公式. P158面.

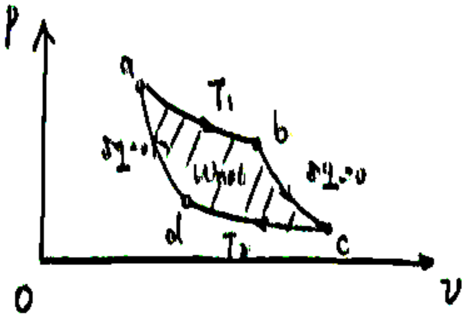
第6章 热力学第二定律

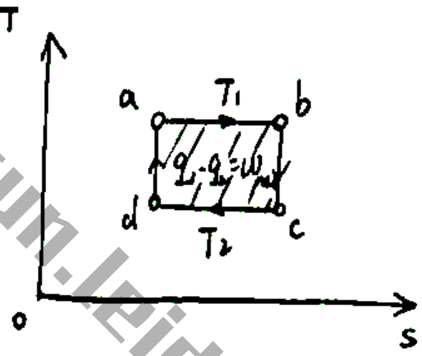
① 能量转换实质（方向性）：$\boxed{能质}$差异
- 无限可转换：机械能、电能.
- 部分可转换：热能（$T \neq T_0$）.
- 不可转换：环境介质热力学能.

② 热II律2种表述（克劳修斯/开尔文）：P175-176面.

6.2. 卡诺循环以及多热源可逆循环分析：

① 卡诺循环：2个可逆定温 + 2个可逆绝热：





循环热效率 $\eta_c = \frac{w_{net}}{q_1} = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{|T_2\Delta S_{dc}|}{|T_1\Delta S_{ab}|} = 1-\frac{T_2}{T_1}$

热机从高温热源吸热 q_1，
做功 w_{net}，传热给低温热源 q_2.

卡诺循环效率仅与温差有关.

② 概括性卡诺循环：（卡诺中2个绝热过程换成2个多变指数n相同的过程：P178）

$\Rightarrow$ 热效率 $\eta_t = 1-\frac{q_2}{q_1} = 1-\frac{T_2\Delta S_{ab}}{T_1\Delta S_{ab}} = 1-\frac{T_2}{T_1} = \eta_c$.

③ 多热源可逆循环：P180图.

主要掌握图中热量q的变化过程，并将多个复杂过程利用积分中值定理找到 $\bar{T}$.

热效率 $\eta_t = 1-\frac{q_2'}{q_1'} = 1-\frac{\bar{T}_2\,ds}{\bar{T}_1\,ds} = 1-\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1} < \eta_c$ （$\bar{T}_1<T_1$，$\bar{T}_2>T_1$）.

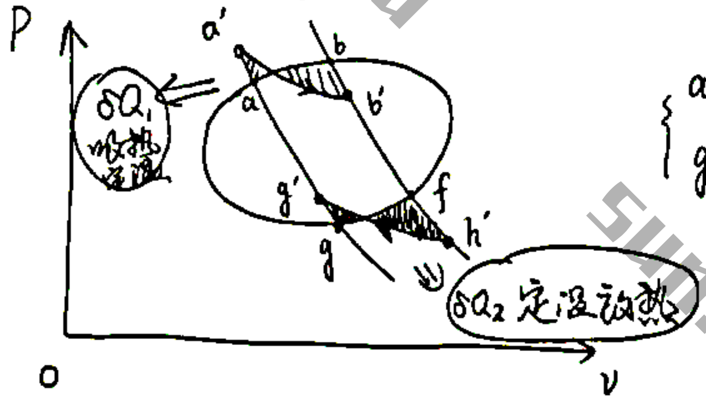
④ 卡诺定理（P181-182页 两条）

6.4 熵；热II律数学表达式：

（卡诺：2绝热+2定温）

① 熵：

思路：分析一个可逆过程（任意工质），用可逆绝热线若干来把它分割成微元循环。



$\left\{\begin{array}{l} a'-b'\text{：等温} \\ g'-h'\text{：等温} \end{array}\right.$ $\left\{\begin{array}{l} a'-g'\text{：绝热} \\ h'-b'\text{：绝热} \end{array}\right.$

$\Rightarrow$ 热效率 $1-\dfrac{\delta Q_2}{\delta Q_1}=1-\dfrac{T_{r2}}{T_{r1}}$ $\begin{array}{l}\text{（冷源）}\\ \text{（热源）}\end{array}$

$\Rightarrow \dfrac{-\delta Q_2}{T_{r2}}=\dfrac{\delta Q_1}{T_{r1}}$ （"-"表示放热量）

（当分割得足够密（绝热线间距→0）

所有小循环都看作微元卡诺循环。

把所有微元 $\dfrac{\delta Q_i}{T_{ri}}$ 求和即 $\oint\dfrac{\delta Q_{rev}}{T}=0$

$\oint\dfrac{\delta Q_{rev}}{T}$ 即克劳修斯积分）

$\Rightarrow \dfrac{\delta Q_1}{T_{r1}}+\dfrac{\delta Q_2}{T_{r2}}=0$

* 由 $\oint\dfrac{\delta Q_{rev}}{T}=0$ 联想到状态量特性 $\Longrightarrow$ $\dfrac{\delta Q_{rev}}{T}=dS$（熵的定义式）

$\boxed{\dfrac{\delta q_{rev}}{T}=ds}$ （要求可逆过程）

② 热II律：思路同熵，只是分析的循环不是可逆过程（P188图）。

$1-\dfrac{\delta Q_2}{\delta Q_1}<1-\dfrac{T_{r2}}{T_{r1}}$（卡诺定理）

$\Downarrow$

$\oint\dfrac{\delta Q}{T}<0$ （克劳修斯不等式）

$\Rightarrow$ 数学表达式：

$$\left\{\begin{array}{l} S_2-S_1\geq\int_1^2\dfrac{\delta Q}{T_r} \\ ds\geq\dfrac{\delta q}{T_r} \\ \oint\dfrac{\delta Q}{T_r}\leq 0 \end{array}\right.$$

（所有等号仅在可逆取得。不等号时为不可逆过程）

6.5 熵方程：

* 熵的变化（热II律） $dS \ge \frac{\delta Q}{T_r}$
- 与外界热量交换.
- 与外界交换物质（广延量 $S=ms$.）
- 不可逆过程（自由膨胀的熵增）.

闭口系 ⇒ $$\boxed{dS = \frac{\delta Q}{T_r} + \delta S_g = \underbrace{\delta S_{f,Q}}_{\text{(传热引起) 热熵流}} + \underbrace{\delta S_g}_{\text{(不可逆因素) 熵产}}}$$

熵产（不可逆>0, 可逆=0）.

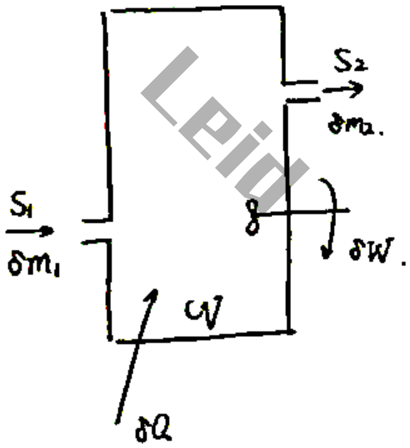
开口系 ⇒ (考虑物质迁移,引入质熵流)

$$dS_{cv} = \sum_i s_i m_i - \sum_j s_j m_j + \sum_l \frac{\delta Q_l}{T_{r,l}} + \delta S_g$$

或 $$dS_{cv} = \underbrace{\delta S_{f,m}}_{\text{质熵流}} + \underbrace{\delta S_{f,Q}}_{\text{热熵流}} + \underbrace{\delta S_g}_{\text{熵产}}$$

（平衡方程, 熵不守恒）

对于稳态流动开口系, $dS_{cv}=0$（系统内熵不蓄集）：

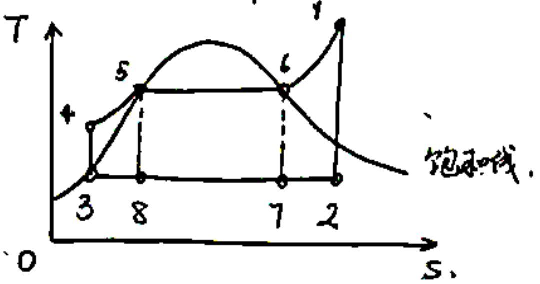


⇒ $$\boxed{\delta m_2 s_2 - \delta m_1 s_1 = \delta S_{f,Q} + \delta S_g}$$

总: $\boxed{\text{流入} = \text{流出}}$

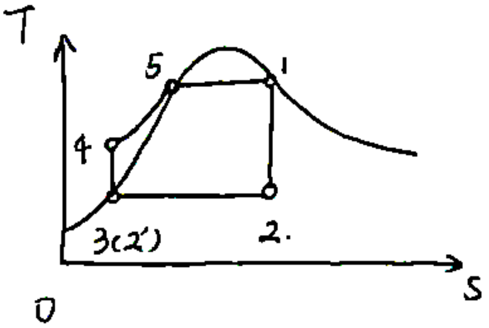
第十章 蒸汽动力装置循环：

① 朗肯循环：（T-s 图表示）：　　（6-7-8-5-6 为卡诺循环）



（一般火电厂锅炉）

4→5：过冷水定压加热至饱和水；
5→6：饱和水加热至饱和汽；（压水堆一般至此状态）
6→1：进一步加热过热蒸汽（可以出更多功）
1→2：蒸汽推动汽轮机作功（可逆绝热膨胀）
2→3：蒸汽作功后经凝汽器冷凝（定温定压放热）
3→4：冷凝水由主泵打回锅炉（蒸汽发生器）



（压水堆二回路循环）

核电厂 vs 火电厂：

i) 核电厂同循环次数下出功更小（T-S 面积更小）
ii) 核电厂效率更低（由 $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 估计，温差决定 η 大小）
iii) 核电厂蒸汽膨胀后干度更低（对汽轮机要求更高）
iv) 核电厂循环冷凝时放热较小（需要更大冷源以换热）

② 朗肯循环热效率：

汽轮机功（焓差：P33页）　$w_T = h_1 - h_2$

乏汽冷凝放热（=汽化潜热=气液焓差）　$q_2 = h_2 - h_3$

水泵耗功　$w_p = h_4 - h_3$

蒸汽吸热（from 炉）　$q_1 = h_1 - h_4$　（由 $q = \Delta h + w_t$，$dp = 0$，$w_t = 0$，$q = \Delta h$）

循环净功　$w_{net} = w_T - w_p = (h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)$

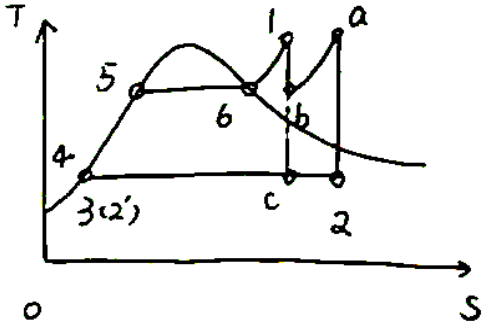
循环净吸热　$q_{net} = q_1 - q_2 = (h_1 - h_4) - (h_2 - h_3)$

$$\Rightarrow \eta_t = \frac{w_{net}}{q_{net}\ (q_1)} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \xrightarrow[\text{3(2')与4近似重叠}]{\text{忽略水泵功}} \boxed{\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_4}}$$

$$\boxed{= \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}}$$

③ 蒸汽参数对循环热效率的影响：P326页-327页：t_1、p_1、p_2、摩阻

④ 再热循环：　b→a为新增的再热器加热过程。



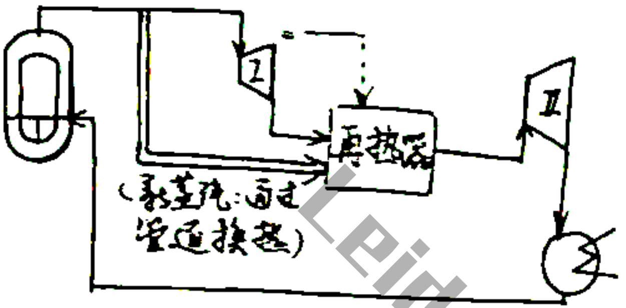
效果：减少膨胀后蒸汽湿度（$x_2 > x_c$）；

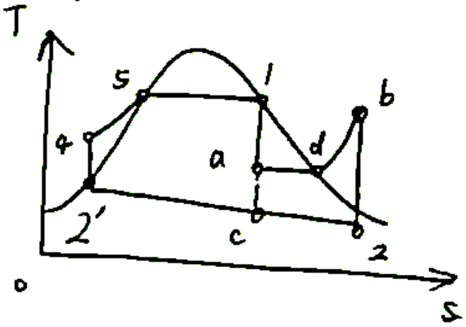
循环效率 $\eta_t = \dfrac{(h_1-h_b)+(h_a-h_2)}{(h_1-h_{2'})+(h_a-h_b)}$

→ 两级汽轮机作功

→ 两级加热（锅炉加热+回热加热）

核动力回热循环（用新蒸汽加热：形式）

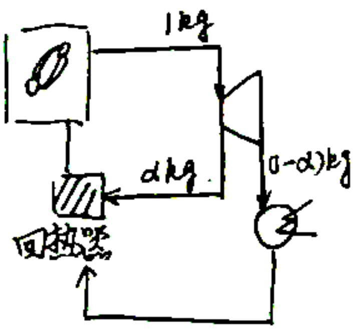


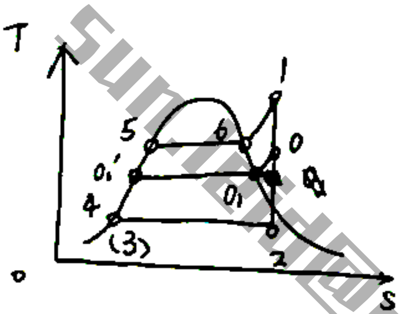


（2-2'为水平等温等压之冷凝）

a-d-b为再热段。

⑤ 回热循环（与再热循环相比，多了抽汽过程——发生质量变化）





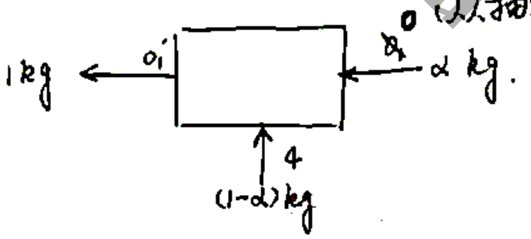
$0 \to 0_1 \to 0_1'$ 抽汽回热，最终与冷凝水汇于$0_1'$。
注意0要先到达0_1饱和态才可放热。

混合式：汽水混合进入锅炉

间壁式：汽水通过管道分离换热。

对回热循环的效率分析:

i) 确定抽汽量 α (在回热器中确定):



热平衡方程 ($q_{放}=q_{吸}$) $(1-\alpha)(h_4-h_{01}') = \alpha(h_0-h_{01}')$

或

黑箱模型 ($q_{入}=q_{出}$) $(1-\alpha)h_4+\alpha h_0 = h_{01}'$.

$$\Rightarrow \alpha = \frac{h_{01}'-h_4}{h_0-h_4}.$$

ii) 计算效率 η (w_{net}, q_1):

$w_{net} = (h_1-h_{01}) + (1-\alpha)(h_{01}-h_2)$ = (抽汽前汽机功 + 抽汽后汽机功)

$q_1 = h_1 - h_{01}'$ = (从 $0_1'$ 到 1, 锅炉中吸热)

$$\Rightarrow \eta_{回R} = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{(1-\alpha)(h_1-h_2)+\alpha(h_1-h_{01})}{(1-\alpha)(h_1-h_2')+\alpha(h_1-h_{01})} > \frac{(1-\alpha)(h_1-h_2)}{(1-\alpha)(h_1-h_2')} = \frac{h_1-h_2}{h_1-h_2'} = \eta_t.$$

即回热循环效率高于一般朗肯循环效率.

第7章 蒸汽与流体的流动

$\Rightarrow$ 研究方法
- 一维
- 速度均布化
- 可逆绝热 (忽略损失及管道传热)

7.1 稳定流动:

① 连续性方程: $\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\vec{u}) = 0$

$\Rightarrow$ 对管道 (入口流量=出口流量): $\frac{Ac_f}{v} = q_m \equiv C$ 或 $Ac_f = q_v \equiv C$.

微分式: $\frac{dA}{A} + \frac{dc_f}{c_f} - \frac{dv}{v} = 0$ / $\frac{dA}{A} + \frac{dc_f}{c_f} + \frac{d\rho}{\rho} = 0$

② 稳定流动能量式:

$$q = \Delta h + \frac{1}{2}\Delta c_f^2 + g\Delta z + w_i \xrightarrow[q=0,\ w=0]{\text{忽略位能变化 } g\Delta z} h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2} = h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} = \boxed{h+\frac{c_f^2}{2} \equiv C}.$$

(一般能量关系)

微分式: $\boxed{dh + c_f dc_f = 0}$

内部能量　外部能量.

滞止：c_f 实降为 0：$\underbrace{h+\frac{c_f^2}{2}=h_0=h_{max}}$ $\Rightarrow$ h_0（滞止焓/总焓）

（由于能量守恒，滞止时消失的动能 $\frac{c_f^2}{2}$ 转化为焓）

③ 过程方程：

等熵方程：$pv^{\kappa}\equiv C \Rightarrow \boxed{\frac{dp}{p}+\kappa\frac{dv}{v}=0}$

④ 声速方程：（介质中声波传播视作等熵过程）

Laplace：$c=\sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s}=\sqrt{-v^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s}$.

$p=p(v,s)$，s 不变 $\longrightarrow$ $\frac{\partial p}{\partial v}=\frac{dp}{dv}=-\kappa\frac{p}{v}$

$\boxed{c=\sqrt{\kappa p v}}$（声速一般表达式，不区分工质）

* 马赫 $Ma=\frac{c_f}{c}$ c_f → 流体速度，c → 当地声速 $\Rightarrow \begin{cases} Ma=1 & \text{音速} \\ Ma>1 & \text{超音速} \\ Ma<1 & \text{亚音速} \end{cases}$

7.2 改变流速：

① 力学条件（$dp \sim dc_f$）：最根本条件

$\boxed{\frac{dp}{p}=-\kappa\cdot Ma^2\cdot\frac{dc_f}{c_f}}$ $\Rightarrow$
- $c_f\uparrow, p\downarrow$：喷管
- $c_f\downarrow, p\uparrow$：扩压管（如汽轮机出口）

② 几何条件（$dA \sim dc_f$）：在压力条件基础上，增大收益和效率.

$\boxed{\frac{dA}{A}=(Ma^2-1)\frac{dc_f}{c_f}}$ $\Rightarrow$
- $A\downarrow, c_f\uparrow, p\downarrow$：渐缩喷管（亚声速）
- $A\uparrow, c_f\uparrow, p\downarrow$：渐扩喷管（超声速）
- A 先↓后↑：$c_f\uparrow$ 拉瓦尔喷管（亚—超声速）.

7.3 喷管的计算：渐缩喷管

① 计算流速：

能量守恒 $h_1+\frac{c_{f1}^2}{2}=h_0 \Rightarrow \boxed{c_{f1}=\sqrt{2(h_0-h_1)}}$ (m/s) （h的单位应为J/kg）

② 状态参数对 c_f 的影响：（理想气体；定比热容；可逆条件下：）

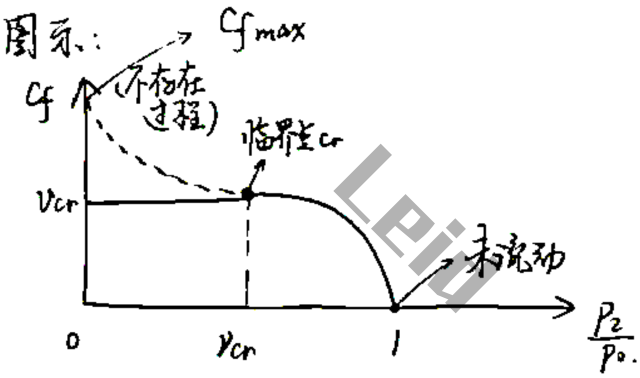
$$c_{f2}=\sqrt{2(h_0-h)} \xlongequal{h=c_pT} \sqrt{2c_p(T_0-T_2)} \xlongequal{c_p=\frac{k}{k-1}R_g} \sqrt{2\frac{kR_g}{k-1}(T_0-T_2)}$$

$$\xlongequal[pv=R_gT]{\text{可逆绝热 } p_0v_0^k=p_2v_2^k} \sqrt{\frac{2kR_gT_0}{k-1}\left(1-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}=\sqrt{\frac{2kv_0p_0}{k-1}\left(1-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right)}$$

（表明已知滞止参数 T_0, p_0, v_0 和出口截面参数 p_2 可求 c_{f2}）

（已知入口截面参数 p_1, v_1, T_1，可推出 p_0, v_0, T_0：理想气体状态方程+过程方程）

图示：



i) $\frac{p_2}{p_0}=1$，$c_{f2}=0$，气体不流动。（$p_2=p_{max}$，说明 $\Delta p=0$，无推动力，无能量变化）

ii) $p_2=p_{cr}$，$\frac{p_2}{p_0}=\nu_{cr}$，$\nu_{cr}=c_{f2}$（临界值为上限）

iii) $p_2=0$，$c_{f\max}=\sqrt{\frac{2kR_gT_0}{k-1}}$（实际不可能）

☆ 临界比压 $\boxed{\frac{p_{cr}}{p_0}=\nu_{cr}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}}$（由 $c_{f,cr}=\sqrt{\frac{2kp_0v_0}{k-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}=\sqrt{kp_{cr}v_{cr}}$；$v_{cr}=v_0\left(\frac{p_0}{p_{cr}}\right)^{\frac{1}{k}}$ 推出）

③ 背压对渐缩喷管影响：

i) $p_1=p_b$，$c_{f2}=0$（无压差，根本上无法加速）

ii) $p_b>p_{cr}$；$c_{f2}<c$ / $Ma_2<1$；$p_2=p_b$（背压高，Δp 偏小，加速效果不佳，到不了临界）

iii) $p_b=p_{cr}$；$c_{f2}=c$ / $Ma_2=1$；$p_2=p_b=p_{cr}$（理想情况，Δp 被完美使用，恰好到临界）

iv) $p_b<p_{cr}$；$c_{f2}=c$ / $Ma_2=1$；$p_2=p_{cr}$（Δp 过大，发生口外膨胀；多余功浪费）

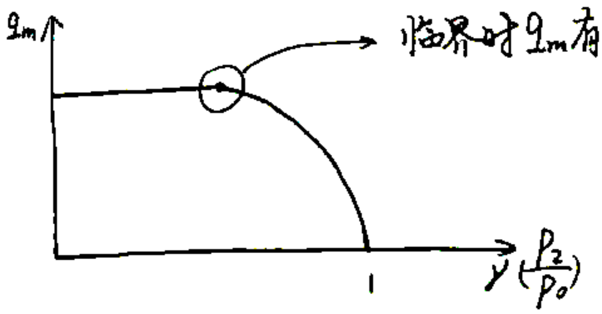
④ 计算流量 q_m:

i) 一般方法: $q_m=\frac{Ac_f}{v}$，由流速计算公式: $c_{f2}=\sqrt{\frac{2\kappa p_0v_0}{\kappa-1}\left[1-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right]}$.

A取出口截面面积 A_2（一般计算喷管时 A_2 已知）；过程方程 $p_0v_0^\kappa=p_2v_2^\kappa$.

$$\Rightarrow q_m=A_2\sqrt{2\frac{\kappa}{\kappa-1}\frac{p_0}{v_0}\left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{2}{\kappa}}-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{\kappa+1}{\kappa}}\right]}\xrightarrow{A_2,\,p_0,\,v_0\text{不变}}\boxed{q_m\sim\nu=\frac{p_2}{p_0}}$$

（由此公式可知，q_m 仅与压比 ν 有关:）



7.5 摩阻下喷管内绝热流动:

① 气流出口速度下降性能: 速度系数 $\boxed{\varphi=\frac{c_{f2}}{c_{fs}}}$ 实际流速. 理想流速.

② 出口动能减少性能: 能量损失系数 $\boxed{\zeta=\frac{c_{fs}^2-c_{f2}^2}{c_{fs}^2}=1-\varphi^2}$

③ 喷管效率 $\boxed{\eta_N=\varphi^2}$.

④ 喷管焓值 h_2 比理想值 h_{2s} 大（由于摩擦产热被流体吸收），而根据 $h_0=h_2+\frac{c_{f2}^2}{2}$，可知出口流速降低: $c_{f2}<c_{f2s}$ → （即减小的动能转化为焓）

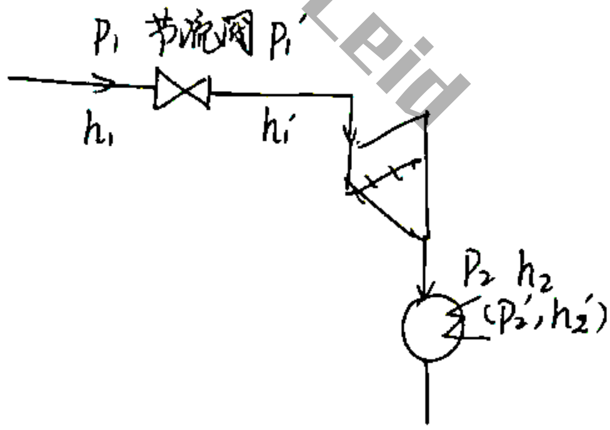
$$\left(\frac{1}{2}(c_{fs}^2-c_{f2}^2)=h_2-h_{2s}\right)$$

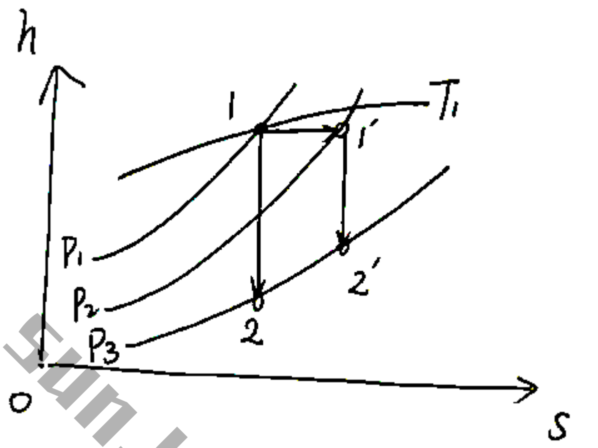
7.6 绝热节流

P247页4条结论:

- $p_2<p_1$ （节流导致压降）
- $s_2>s_1$ （节流强烈不可逆性导致熵增）
- $h_1=h_2$ （但节流过程中不是等焓过程）
- T_2 与 T_1 关系一般不确定（但理想气体 $T_1=T_2$，因为 $h=c_pT$，$h_1=h_2$）

☆ 水蒸气的绝热节流过程（以二回路为例）





1 → 1′：节流（等焓态：$h_1=h_1'$）

1 → 2：汽机作功
(1′)　(2′)

⇒ 结论：
- $T_1 > T_1'$
- $h_1 = h_1'$
- $w_{节流前} > w_{节流后}$（汽机出功少）

第十二章 混合气体：（内容较少）

混合气体 $\xrightarrow[(等效)]{折合成}$ 折合气体

① 道尔顿压力定律（V, T不变）：$p_iV = n_iRT \Rightarrow \boxed{p_{总} = \sum p_i}$　两边累加

② 分容积定律（p, T不变）：$\boxed{V = \sum V_i}$

③ 亨利定律：$D_{(溶解度)} = k\boxed{\frac{p_i}{\sum p_i}}$（第i种气体占总混合气的压比）