

上节课内容回顾

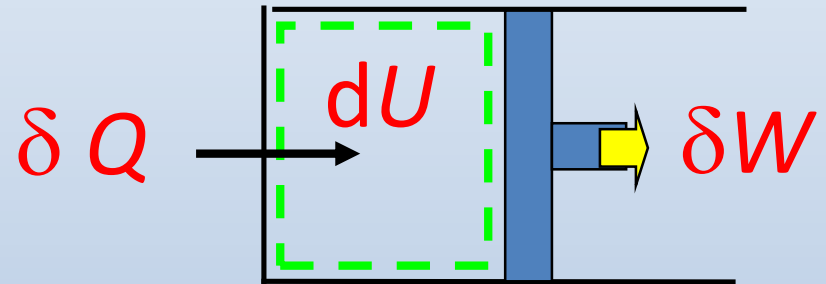
闭口系统能量方程

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

$$Q = \Delta U + W$$

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

$$q = \Delta u + w$$



单位工质

适用条件：1) 任何工质 2) 任何过程

开口系统能量方程

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

任何流动工质

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

任何稳定流动过程

能量方程等价及几种功关系

闭口

$$q = \Delta u + w$$

稳流开口

$$q = \Delta h + w_t$$

等价

容积变化功 w

技术功 w_t

轴功 w_s

推进功 $\Delta(pv)$

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

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

第二章讨论课（计算题）

例3：取系统问题之二

已知： $p_1=35\text{bar}$, $t_1=16^\circ\text{C}$

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

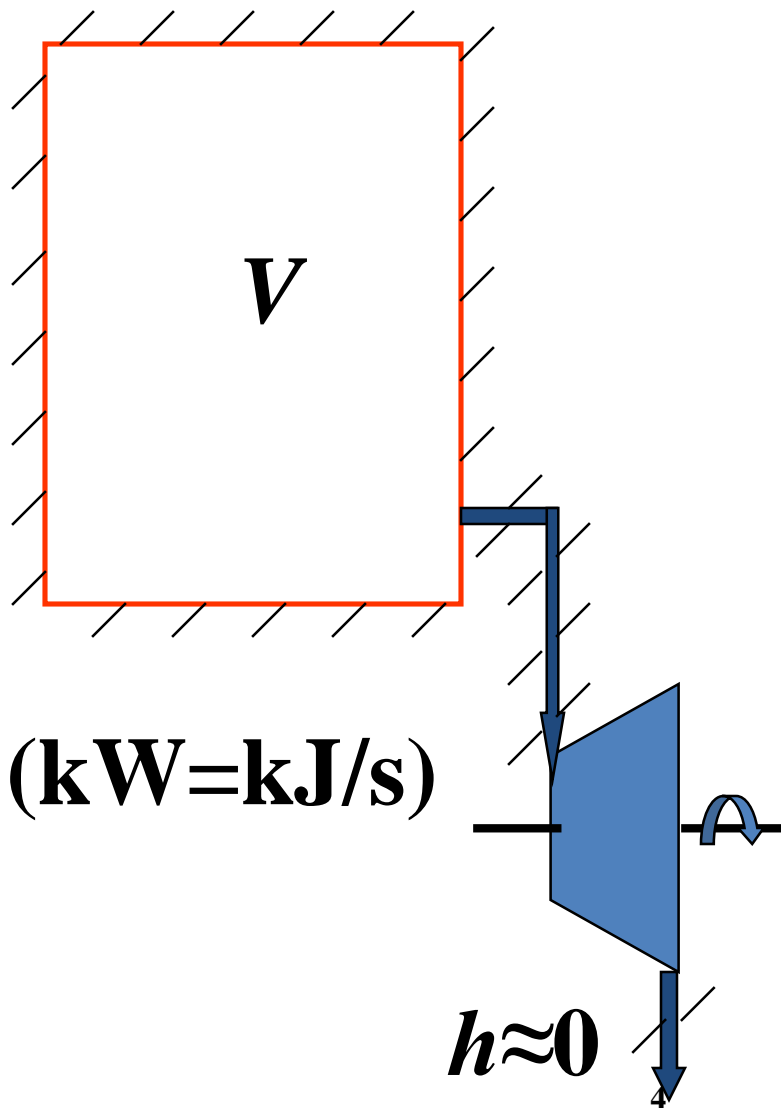
$$c_v = 718 \text{ J / kg.K}$$

$$R_g = 287 \text{ J / kg.K}$$

要求： 输出4kW,持续30s ($\text{kW}=\text{kJ/s}$)

允许： $p_1 \downarrow p_2=3.5\text{bar}$

求： 需要的容积 V



解1：取储气罐为系统（开口）

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

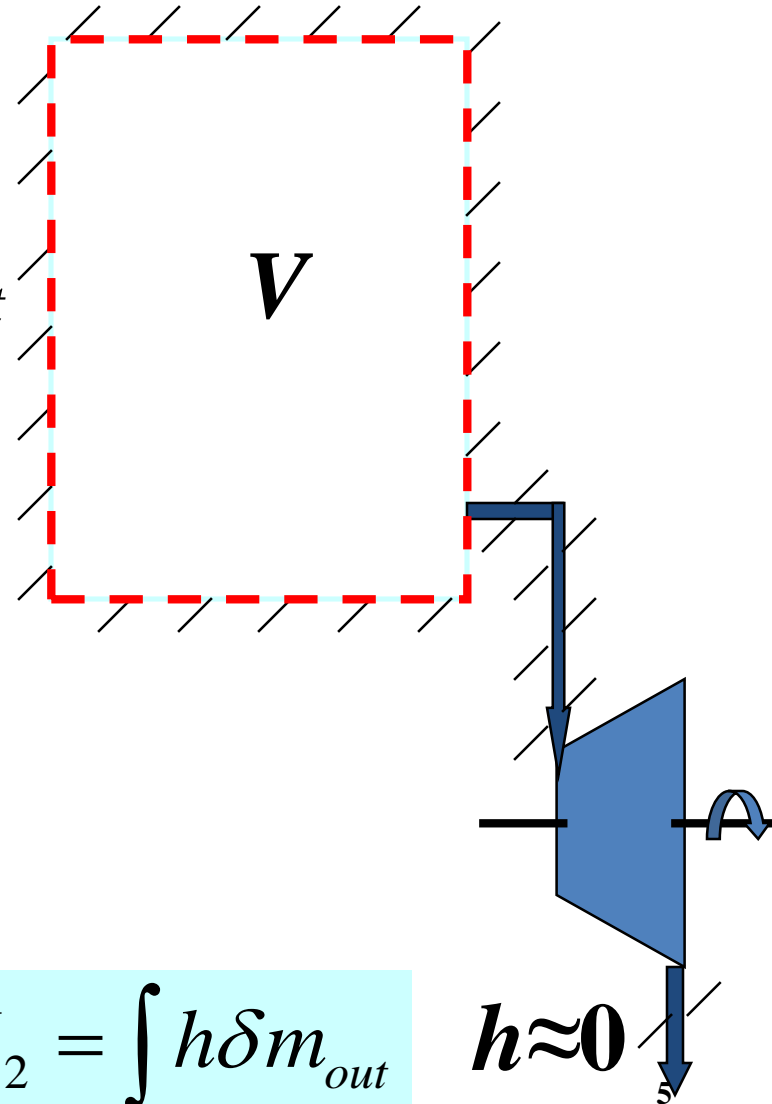
$$+ \left(h + \frac{c^2}{2} + gz \right)_{out} \delta m_{out}$$

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

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

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

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



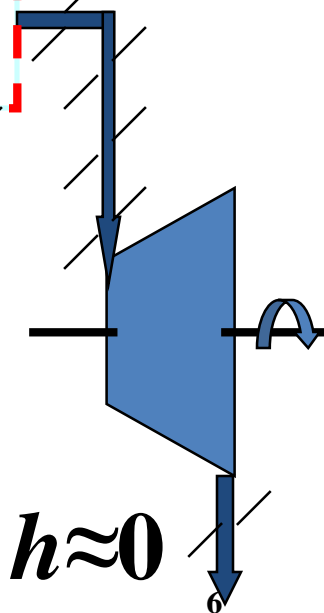
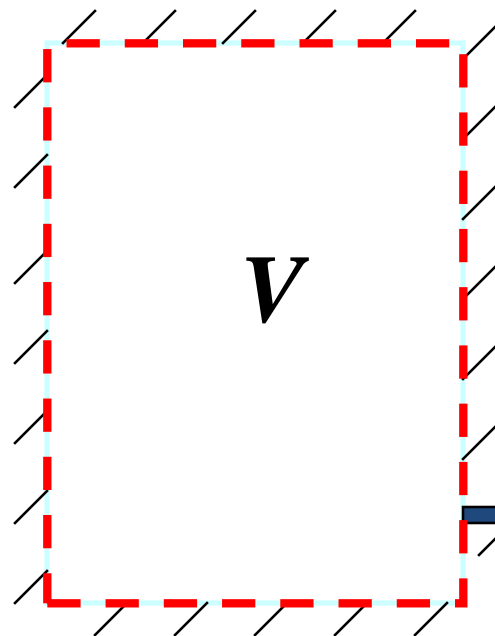
解1：取储气罐为系统（开口）

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

W

$$m_1 u_1 - m_2 u_2 = W$$

$$\frac{p_1 V}{R_g T_1} c_v T_1 - \frac{p_2 V}{R_g T_2} c_v T_2 = W$$



$$V = \frac{W}{(p_1 - p_2) \frac{c_v}{R}} = \frac{4 \times 30 \times 10^3}{(35 - 3.5) \times 10^5 \frac{718}{287}} = 0.0152 m^3$$

用总的能量守恒积分式

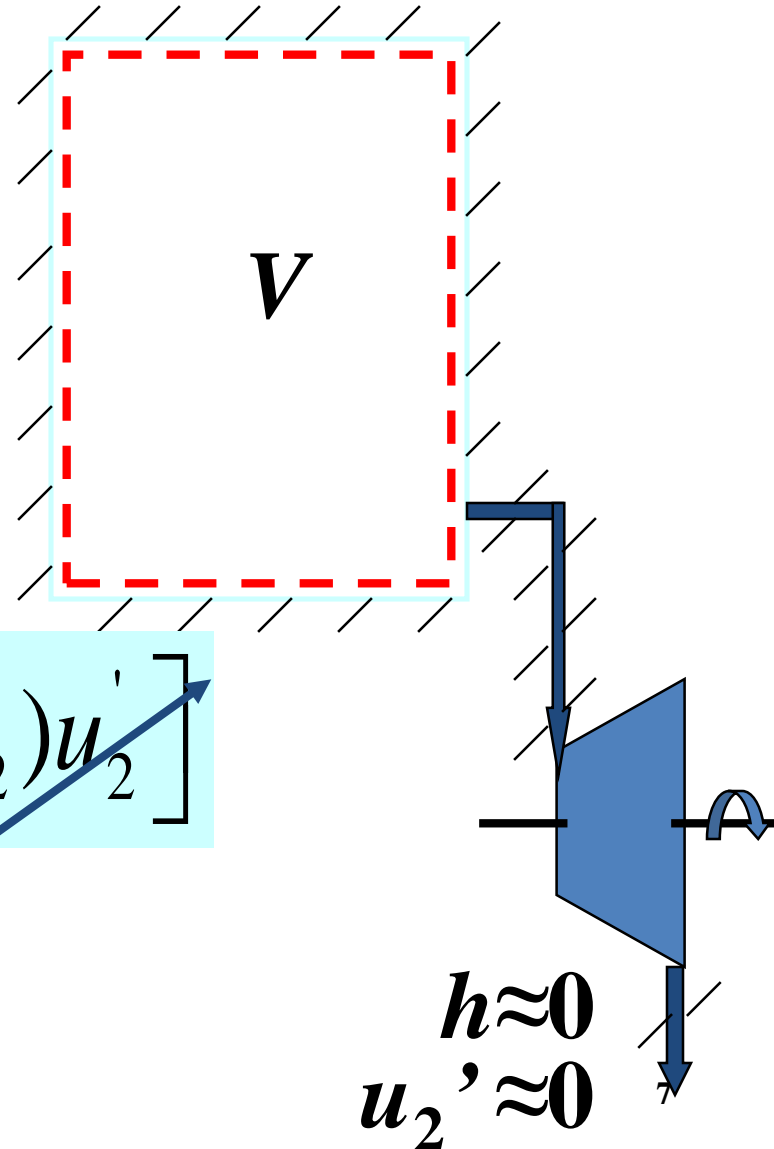
解2：取气体为系统（闭口）

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

$$W = U_1 - U_2$$

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

$$W = m_1 u_1 - m_2 u_2$$



解3：取储气罐和汽机为系统（开口）

进 - 出 = 内能变化

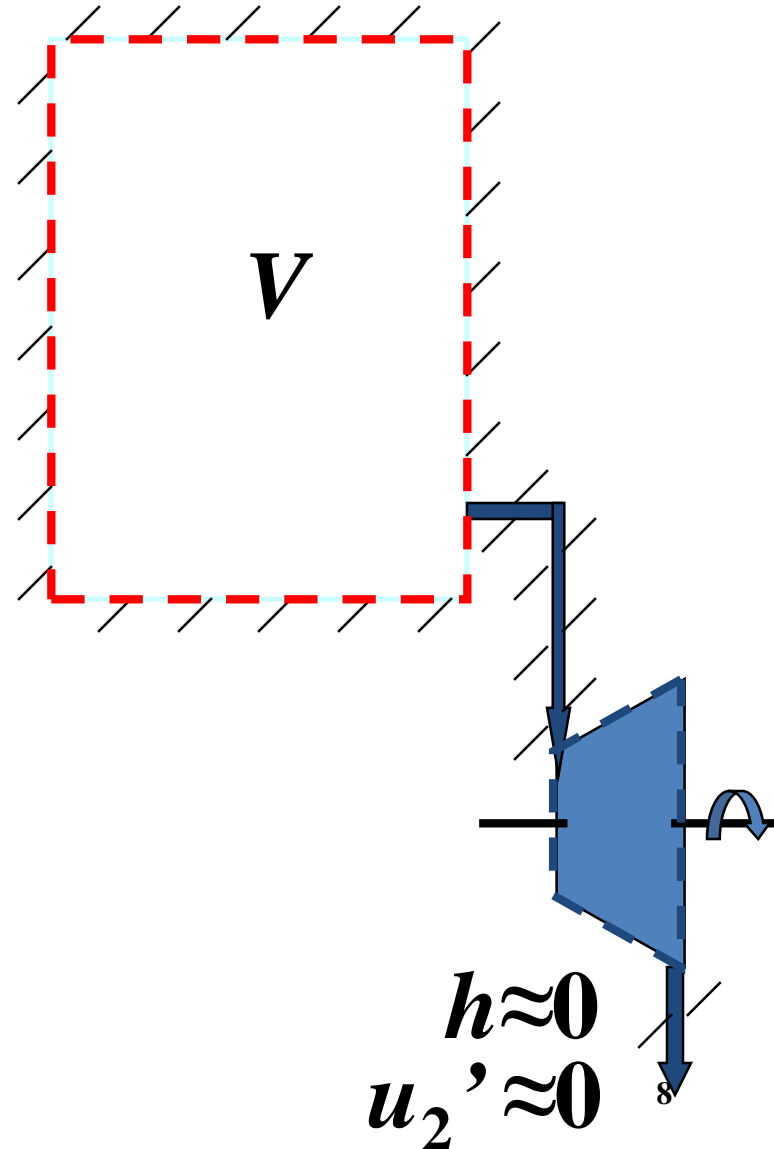
进： $= 0$

出： W

内能变化： $m_2 u_2 - m_1 u_1$

$$0 - W = m_2 u_2 - m_1 u_1$$

$$W = m_1 u_1 - m_2 u_2$$



第三章

理想气体的性质 与热力过程



本章需掌握内容

基本概念：

- ① 理想气体及其状态方程
- ② c_p 、 c_v
- ③ 理想混合气体

知识运用：

- ① 理想气体状态方程
- ② 理想气体状态参数计算 (c , u , h , s)
- ③ 理想气体4+1过程计算

第三章 作业

3-3

3-5

3-7

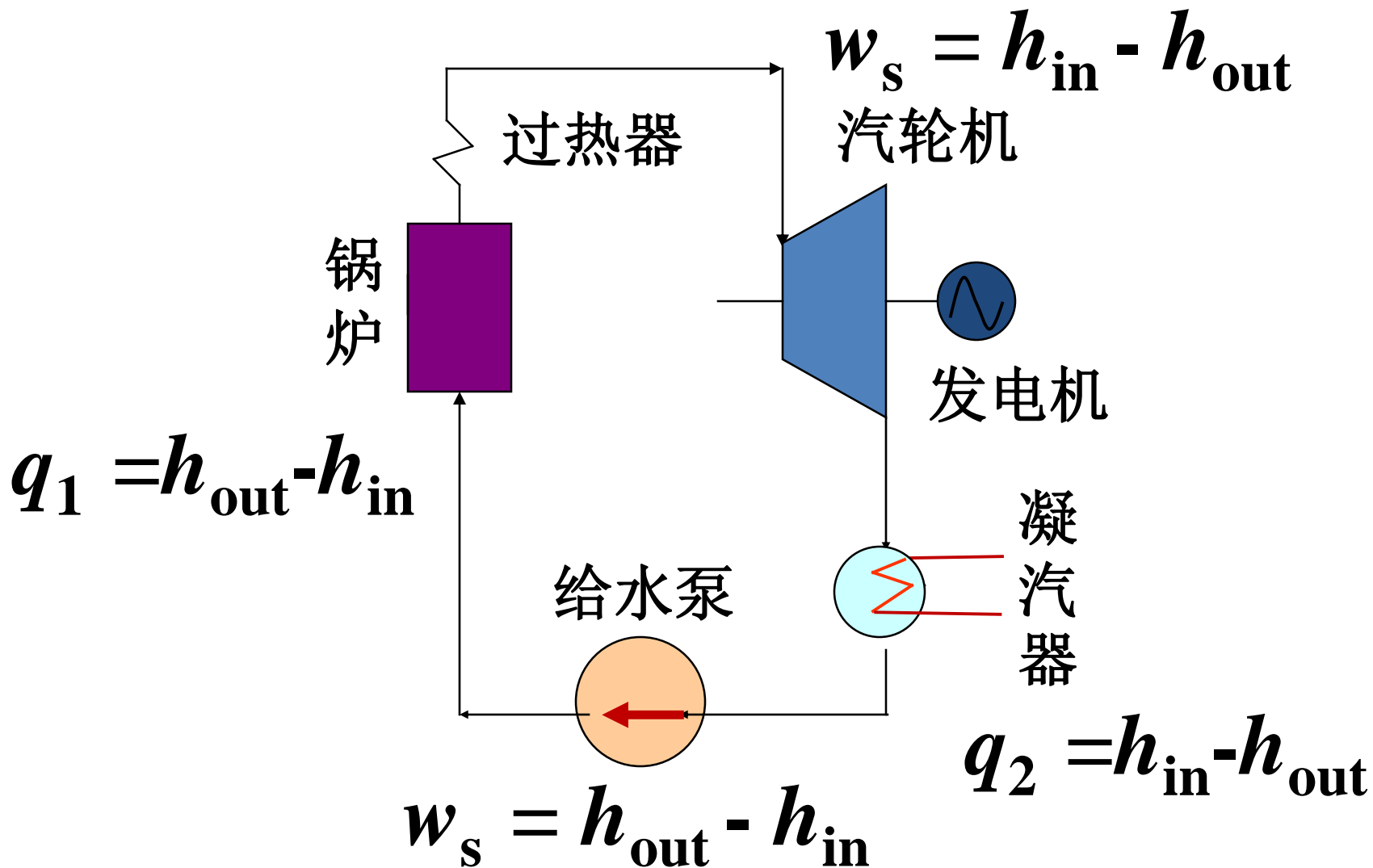
3-15

3-20

3-21

3-25

火力发电装置



工程热力学的两大类工质

1. 理想气体 (ideal gas)

可用简单的式子描述

如汽车发动机和航空发动机以空气为主的
燃气、湿空气等

2. 实际气体 (real gas)

不能用简单的式子描述，真实工质
火力发电的水和水蒸气、制冷空调中制冷
工质等

§3-1 理想气体状态方程

§3-2 (比)热容Specific Heats

§3-3 理想气体的 u 、 h 、 s 和热容

§3-4 理想气体热容、 u 、 h 和 s 的计算

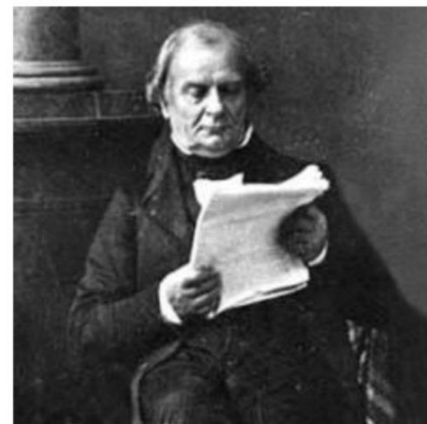
§3-5 理想气体混合物

§3-6 理想气体的热力学过程

§3-7 活塞式压气机的压缩过程分析

§3-1 理想气体状态方程

理想气体定义：
凡遵循**克拉贝龙(Clapeyron)**
方程的气体



四种形式的**克拉贝龙**方程：

$$1 \text{ kg} : p v = R_g T$$

$$m \text{ kg} : p V = m R_g T$$

$$1 \text{ kmol} : p V_m = R T$$

$$n \text{ kmol} : p V = n R T$$

状态方程

注意：

摩尔容和 v

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

波 士 德

理想气体模型

1. 分子之间没有作用力
2. 分子本身不占容积

现实中没有理想气体

但是，当实际气体 p 很小, V 很大, T 不太低时, 即处于远离液态的稀薄状态时, 可视为理想气体。

哪些气体可当作理想气体

当实际气体 p 很小, V 很大, T 不太低时, 即处于远离液态的稀薄状态时, 可视为理想气体

$T > \text{常温}$, $p < 5 \text{ MPa}$
的双原子分子

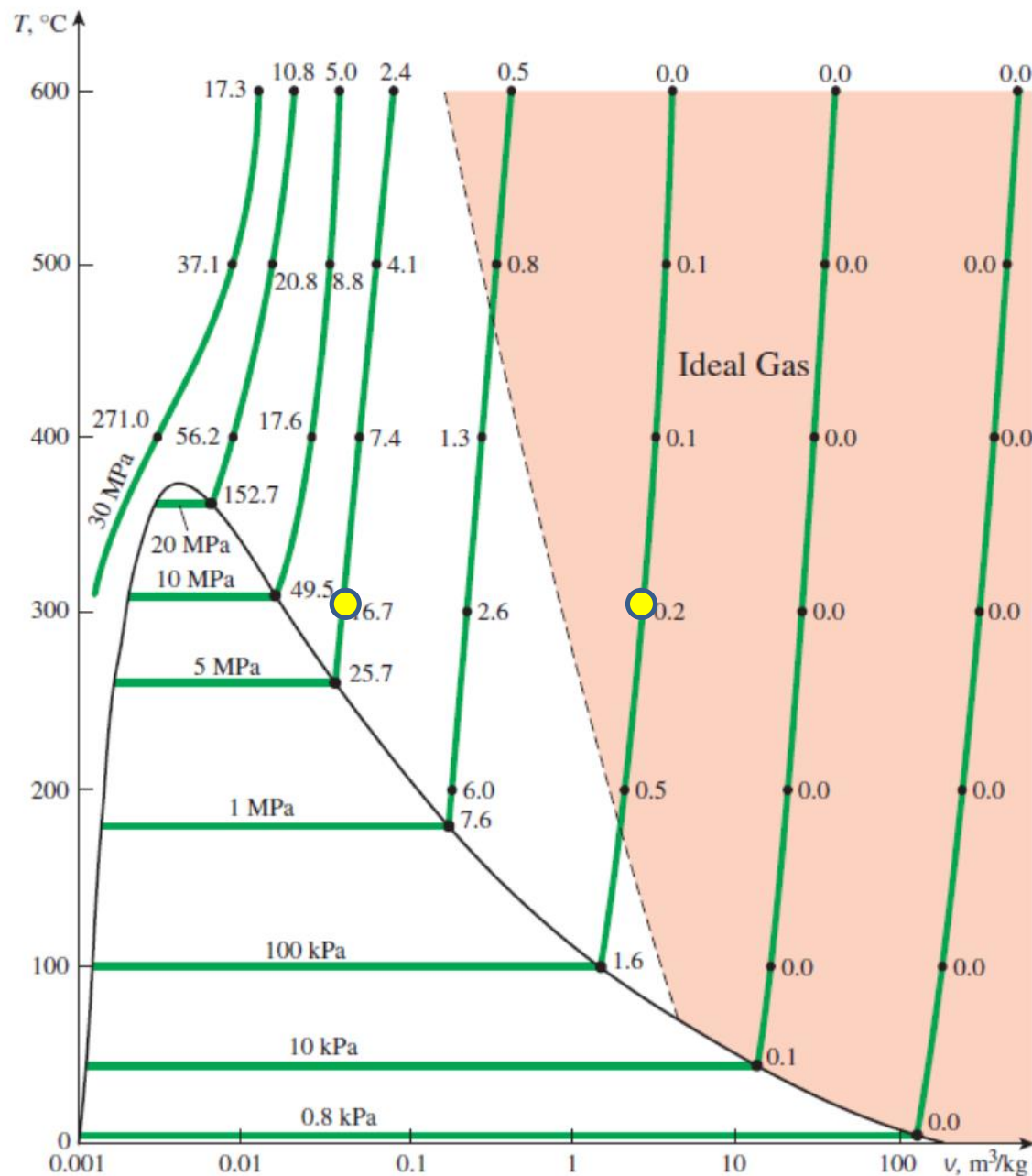


理想气体

O_2 , N_2 , Air, CO, H_2

三原子分子 (H_2O , CO_2) 一般不能当作理想气体
特殊可以, 如空调的湿空气, 高温烟气的 CO_2

总之, 能否作为理想气体, 主要由气体离开液态的程度和工程所允许的误差决定



理想气体状态方程

$$p = \rho R_g T$$

温度°C	压力MPa	密度kg/m ³	
300	0.1	0.3789	<u>0.378</u>
300	5.0	22.053	<u>18.9</u>

FIGURE 3-45
Percentage of error
 $([v_{\text{table}} - v_{\text{ideal}}]/v_{\text{table}}) \times 100$
 involved in assuming steam to be an
 ideal gas, and the region where steam
 can be treated as an ideal gas with less
 than 1 percent error.

§3-2 (比)热容 Specific Heats

计算内能, 焓, 热量都要用到热容

定义: 比热容

$$c = \frac{\delta q}{dT}$$

单位物量的物质升高1K或1°C所需的热量

c : 质量比热容

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$$

c_m : 摩尔比热容

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}^{\circ}\text{C}}$$

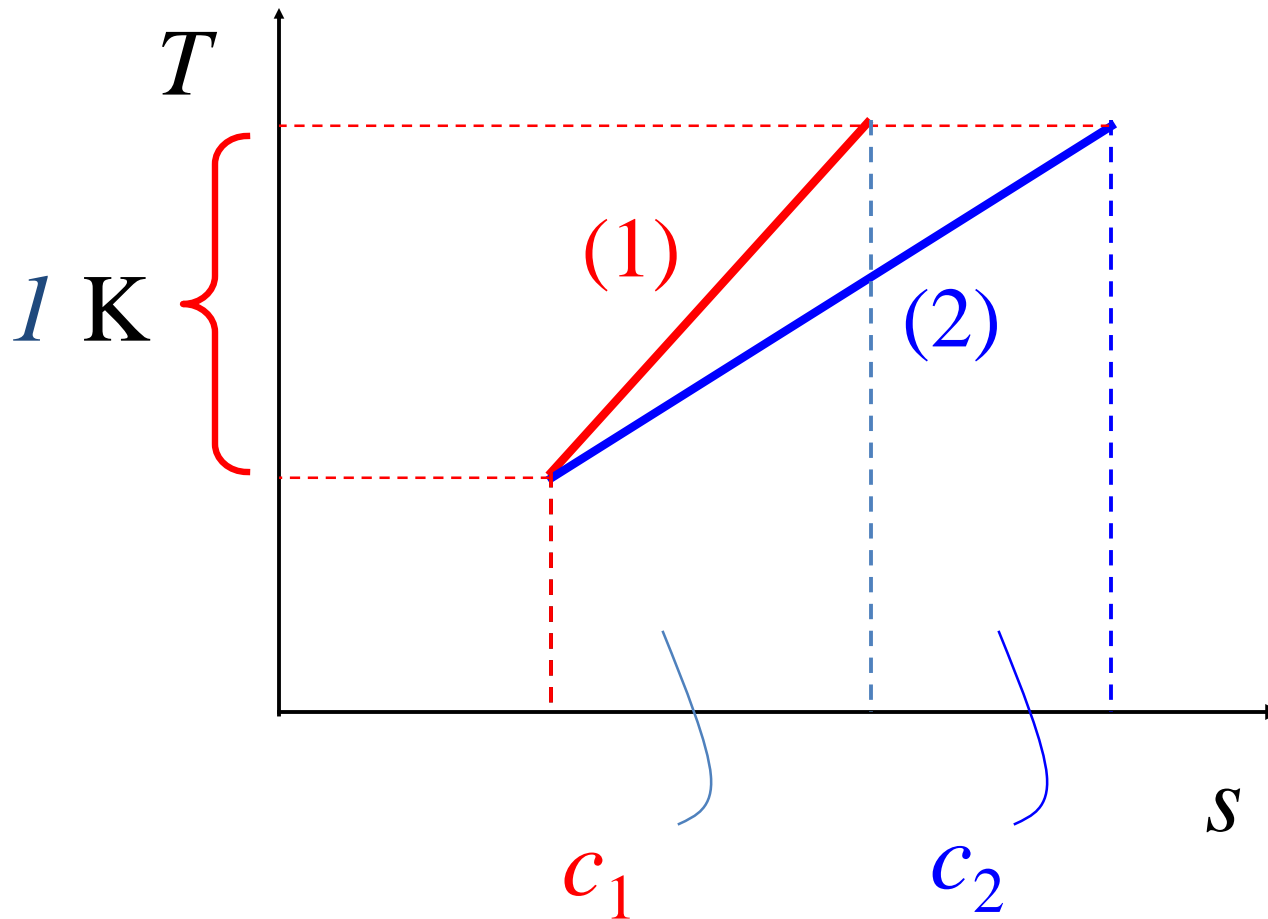
c' : 容积比热容

$$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3 \cdot \text{K}}$$

$$\frac{\text{kJ}}{\text{m}^3^{\circ}\text{C}}$$

比热容是过程量还是状态量？

$$c = \frac{\delta q}{dT}$$



用的最多的某些特定过程的比热容 { 定容比热容
定压比热容

定容比热容 c_v

Specific heat at constant volume

任意准静态过程

$$\delta q = du + p dv = dh - v dp$$

u 是状态量, 设

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

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv$$

$$\therefore \delta q = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT + [p + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T] dv$$

定容

$$\therefore \delta q = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v dT$$



$$c_v = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v$$

定压比热容 c_p

Specific heat at constant pressure

任意准静态过程

$$\delta q = du + p dv = dh - v dp$$

h 是状态量，设

$$h = f(T, p)$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp$$

$$\therefore \delta q = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left[\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T - v\right] dp$$

定压

$$\therefore \delta q = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT$$



$$c_p = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

c_v 和 c_p 的说明

1. c_v 和 c_p , 过程已定, 可当作状态量。
2. 前面的推导没有用到理想气体性质

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

适用于任何气体。

c_v 物理意义: (v) 时1kg工质升高1K内能的增加量

c_p 物理意义: (p) 时1kg工质升高1K焓的增加量

3. h 、 u 、 s 的计算要用 c_v 和 c_p 。

常见工质的比热容

空气:

			c_v	c_p	
• 20.0 (°C)	0.10	(MPa)	0.80	1.02	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
• 500.0 (°C)	0.10	(MPa)	0.71	1.09	

• 水

• 20.0 (°C)	0.10	(MPa)	4.15	4.18	$\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$
• 20.0 (°C)	10.0	(MPa)	4.12	4.15	
• 200.0 (°C)	10.0	(MPa)	3.31	4.44	

§3-3 理想气体的 u 、 h 、 s 和热容

一.理想气体的热力学能

热力学能 = 分子动能 + 分子位能



T



T, v

理想气体无分子间作用力

热力学能只取决于分子动能



$$u = f(T)$$

? 如何求理想气体的热力学能 u

实际气体

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

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T dv = c_v dT + \cancel{\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T} dv$$

理想气体

$$u = f(T)$$

$$du = c_v dT$$

理想气体，任何过程

二. 理想气体的热容

一般工质:

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

理想气体:

$$c_v = \frac{du}{dT}$$

$$c_p = \frac{dh}{dT}$$

$$c_p > c_v ?$$

$$\therefore c_p = \frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{d(pv)}{dT} = c_v + R_g$$

$$c_p - c_v = R_g$$

迈耶公式Mayer's formula

令

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

比热比

$$c_v = \frac{R_g}{k-1}$$

$$c_p = \frac{kR_g}{k-1}$$

三. 理想气体的焓

$$h = u + pv = u + R_g T$$

$$\therefore h = f(T)$$

理想气体 h 只与 T 有关

实际气体

$$h = f(T, p)$$

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p$$

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp = c_p dT + \cancel{\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp}$$

理想气体

$$dh = c_p dT$$

理想气体，任何过程

四. 理想气体的熵

仅可逆适用?

熵的定义:

$$ds = \frac{\delta q_R}{T}$$

可逆过程

$$T ds = \delta q_R = du +$$

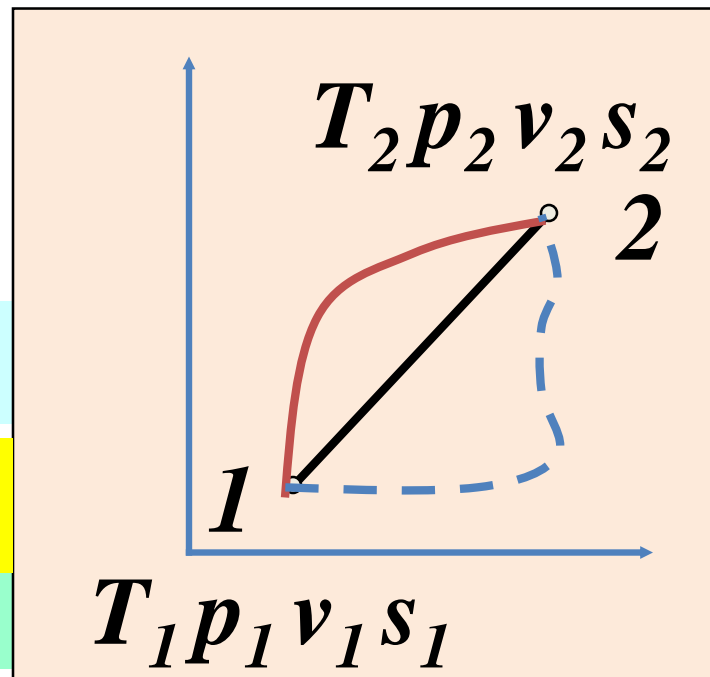
理想气体,任何过程

理想气体

$$pv = R_g T$$

$$c_p - c_v = R_g$$

$$\begin{aligned} ds &= \frac{c_v dT}{T} + R_g \frac{dv}{v} = \frac{c_p dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} \\ &= c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p} \end{aligned}$$



§3-4 理想气体热容、 u 、 h 和 s 的计算

$$du = c_v dT$$

$$dh = c_p dT$$

$$ds = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}$$

h 、 u 、 s 的计算要用 c_v 和 c_p

理想气体热容的计算方法：

$$= \frac{c_v dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$$

$$= \frac{c_p dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}$$

1. 按定比热
2. 按真实比热计算
3. 按平均比热法计算

1. 按定比热计算理想气体热容

分子运动论:

不考虑原子振动能

$$U_m = \frac{i}{2} RT$$

运动自由度

$$C_{v,m} = \frac{dU_m}{dT} = \frac{i}{2} R$$

$$C_{p,m} = \frac{dH_m}{dT} = \frac{d(U_m + RT)}{dT} = \frac{i+2}{2} R$$

单原子

双原子

多原子

$$C_{v,m} [\text{kJ/kmol.K}]$$

$$\frac{3}{2} R$$

$$\frac{5}{2} R$$

$$\frac{7}{2} R$$

$$C_{p,m} [\text{kJ/kmol.K}]$$

$$\frac{5}{2} R$$

$$\frac{7}{2} R$$

$$\frac{9}{2} R$$

k

$$1.67$$

$$1.4$$

$$1.29$$

$$c_{p,R134a} / R = 2.1015 + 0.03252T - 17.457 \times 10^{-6} T^2$$

理想气体

$$u = f(T)$$

$$h = f'(T)$$

$$c_v = \frac{du}{dT} = f(T)$$

$$c_p = \frac{dh}{dT} = f'(T)$$

根据实验结果整理

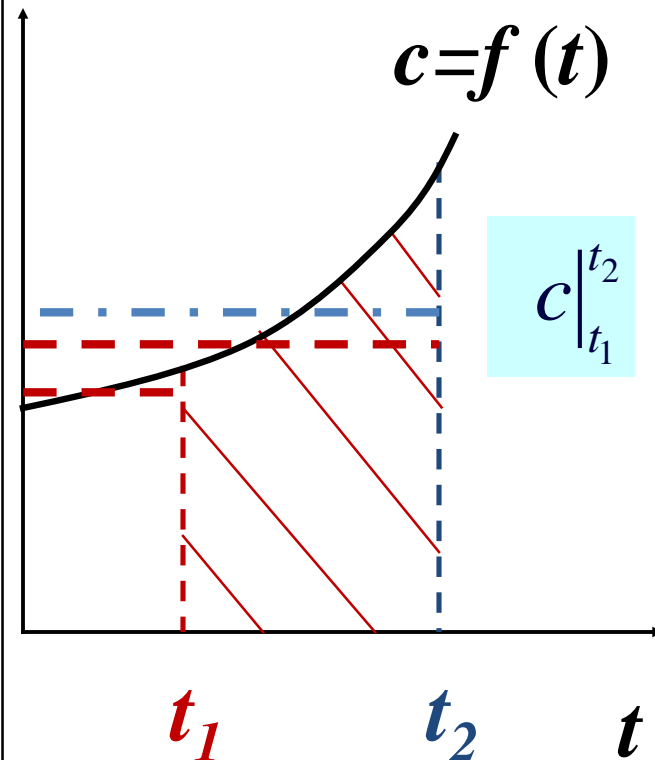
$$c_v = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + \dots$$

$$c_p = b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + \dots$$

3.按平均比热计算理想气体的热容

求O₂在100-500°C平均定压热容

$$c_{p,O_2} \Big|_{100}^{500} = \frac{0.979 \times 500 - 0.923 \times 100}{500 - 100}$$



$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c|_0^{t_2} t_2 - c|_0^{t_1} t_1}{t_2 - t_1}$$

摄氏°C; 附表2, 3

理想气体 Δu 的计算

$$du = c_v dT$$

理想气体, 任何过程

1. $c_v = \text{const}$ $\Delta u = c_v \Delta T = c_v (T_2 - T_1)$

2. c_v 为真实比热

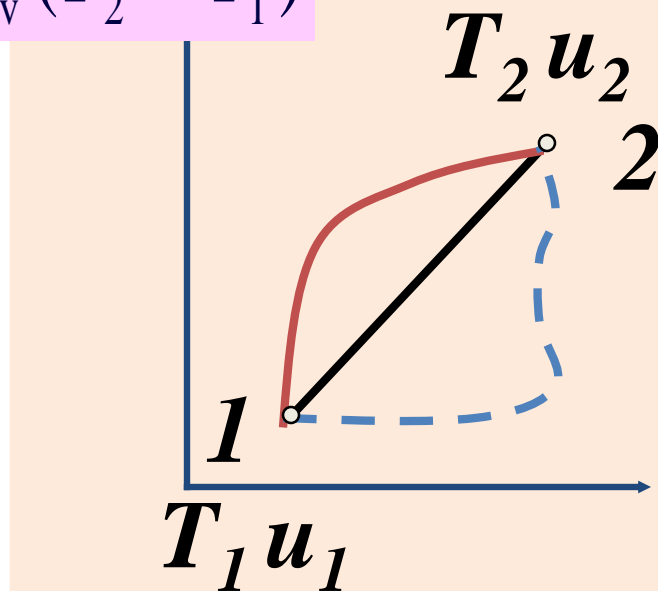
$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_v dT$$

3. c_v 为平均比热

$$\Delta u = c_v \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

4. 若为空气, 直接查 附表

$$\Delta u = u_2 - u_1$$



理想气体 Δh 的计算

$$dh = c_p dT$$

理想气体, 任何过程

1. $c_p = \text{const}$

$$\Delta h = c_p \Delta T$$

2. c_p 为真实比热

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

3. c_p 为平均比热

$$\Delta h = c_p \Big|_{t_1}^{t_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

4. 若为空气, 直接查 附表

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

理想气体 Δs 的计算

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}$$

理想气体, 任何过程

若定比热

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1} + c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$$

Determine the change in the entropy of helium, in kJ/kg·K, as it undergoes a change of state from 100 kPa and 20°C to 600 kPa and 300°C using the equation of state $P(\nu - a) = R_g T$ where $a = 0.01 \text{ m}^3/\text{kg}$, and compare the result to the value obtained by using the ideal gas equation of state.

$$c_p = 5.1926 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} \text{ and } R_g = 2.0769 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$$

- ☒ A -0.239 kJ/kg K
- ☐ B 0.239 kJ/kg K
- ☐ C -10.34 kJ/kg K
- ☐ D 10.34 kJ/kg K

$$ds = \frac{c_p}{T} dT - \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_P dP$$

提交

§ 3-5 理想气体混合物 (自习)

一.混合气体的成分

1.成分的表示方法

质量分数:

$$w_i = m_i / m$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1$$

摩尔分数:

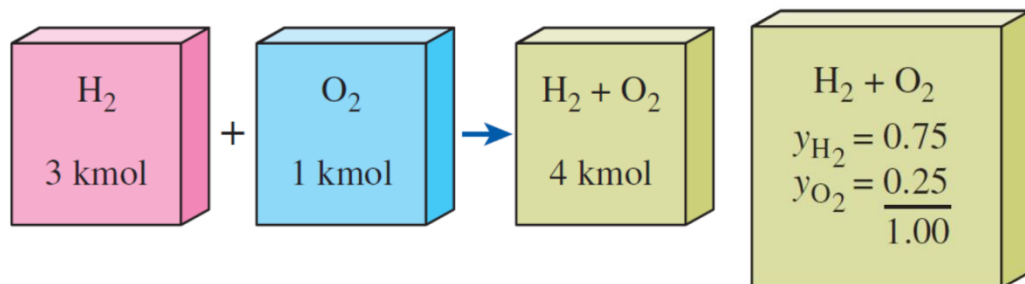
$$x_i = n_i / n$$

$$\sum_{i=1}^k x_i = 1$$

体积分数:

$$\varphi_i = V_i / V$$

$$\sum_{i=1}^k \varphi_i = 1$$



2. 成分的换算

依据: $m_i = n_i M_i$

m : kg; n : mol;
 M : kg/mol

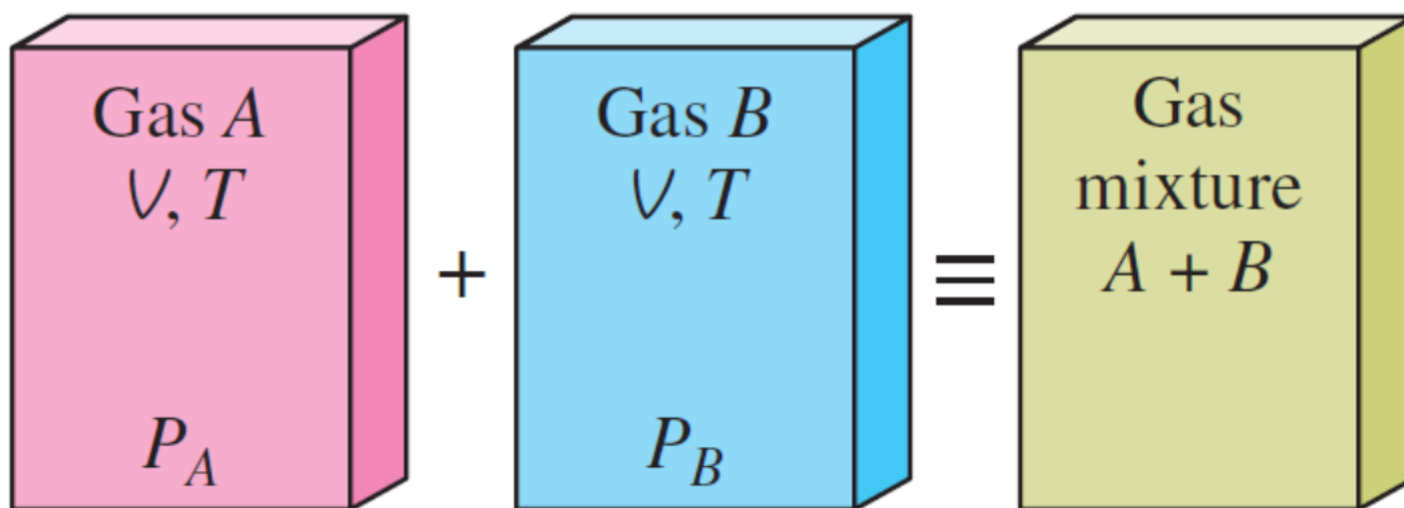
公式: $w_i = \frac{x_i M_i}{\sum_{i=1}^k x_i M_i}$ $x_i = \frac{w_i / M_i}{\sum_{i=1}^k w_i / M_i}$

$$\left. \begin{array}{l} pV_i = n_i RT \\ pV = nRT \end{array} \right\} \begin{array}{l} V_i / V = n_i / n \\ \Rightarrow \varphi_i = x_i \end{array}$$

理想气体混合物的成分表示方法实际上只有两种, w_i 和 x_i 是常用的表示方法

二.理想气体混合物的分压、分体积定律

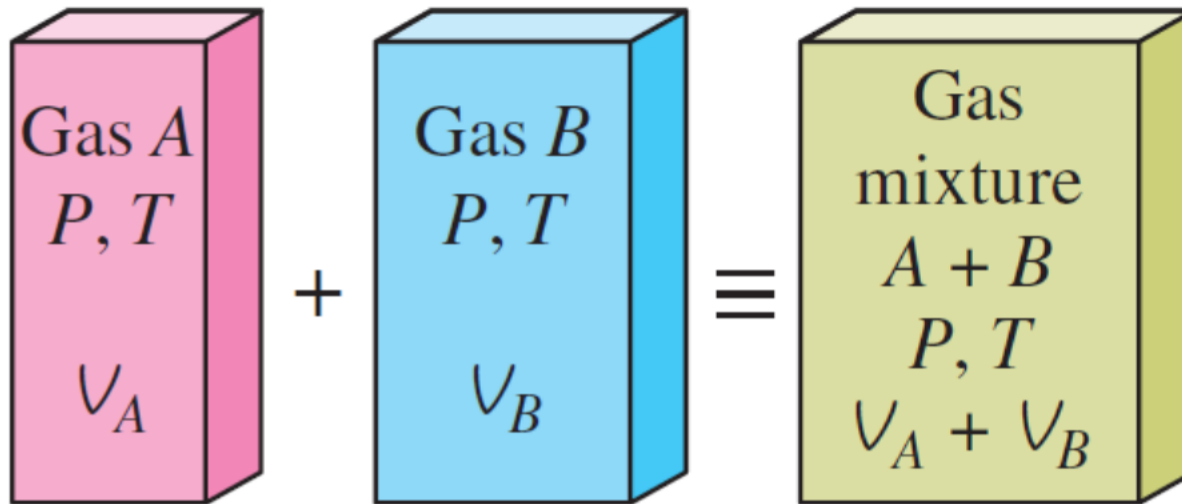
1. Dalton 道尔顿分压定律



$$p_i = x_i p \qquad p = \sum_{i=1}^n p_i$$

混合气体的总压力等于各组份分压力之和

2. Amagat 阿马伽分体积定律



$$V_i = x_i V$$

$$V = \sum_{i=1}^k V_i$$

混合气体的总体积等于各组份分体积之和

三.混合气体的参数计算

1. 总参数： m 、 n 、 p 、 U 、 H 、 S 、 Ex

法则： 总参数具有**加和**性质

通式：
$$Y = \sum_{i=1}^k Y_i$$

Y 可以是任何总参数，但**加和条件**有区别。

$$m = \sum_{i=1}^k m_i \quad n = \sum_{i=1}^k n_i$$

$$U = \sum_{i=1}^k U_i = \sum_{i=1}^k U_i(T, p_i) = \sum_{i=1}^k U_i(T)$$

$$S = \sum_{i=1}^k S_i = \sum_{i=1}^k S_i(T, p_i)$$

2. 比参数：u、h、 c_p 、 c_v 、s、R、 e_x

法则：比参数具有**加权**性质

通式： $y = \sum_{i=1}^k w_i y_i(T, p_i)$

加权条件：

理想混合气体的 c_p 是温度的单值函数么？

$$c_p = \sum_{i=1}^k w_i c_{pi}(T, p_i) = \sum_{i=1}^k w_i c_{pi}(T)$$

$$s = \sum_{i=1}^k w_i s_i(T, p_i)$$

$$R_g = \sum_{i=1}^k w_i R_{gi}$$

比摩尔参数计算方法相同

§ 3-6 理想气体的热力学过程

一.研究目的和方法

目的

提高热力学过程的热功转换效率

热力学过程受外部条件影响

主要研究外部条件对热功转换的影响

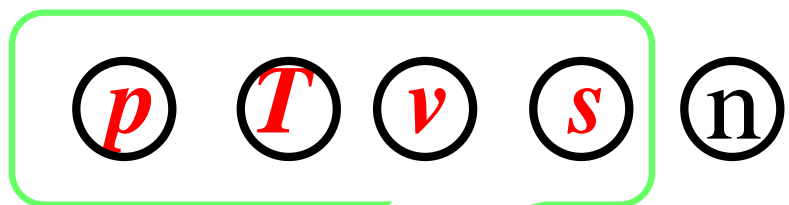
{ 利用外部条件，合理安排**过程**，形成最佳**循环**
对已确定的**过程**，进行**热力计算**

对象

- 1) 参数 (p, T, v, u, h, s) 变化
- 2) 能量转换关系, q, w, w_t

方法

- 1) 抽象分类



基本过程

- 2) 可逆过程 (不可逆再修正)

依据

1) 第一定律

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

稳流开口

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

2) 理想气体

$$pv = R_g T \quad c_p - c_v = R_g \quad k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$dh = c_p dT \quad du = c_v dT$$

3) 过程特性

$$w = \int p dv \quad w_t = - \int v dp$$

$$q = \int T ds$$

步骤

1) 确定**过程方程**-----该过程中参数变化关系

$$p = f(v), T = f(p), T = f(v)$$

2) 根据已知参数及**过程方程求未知参数**

3) 用 **$T - s$** 与 **$p - v$** 图表示

4) 求 Δu , Δh , Δs

5) 计算 **w , w_t , q**

二.理想气体的等熵过程

可逆

$$ds = \frac{\delta q_R}{T}$$

绝热

$$ds = 0$$

$$(s)$$

说明: (1) 不能说**绝热**过程就是**等熵**过程,
必须是**可逆绝热**过程才是**等熵**过程。

(2) 不仅 $\Delta s = 0$, $ds = 0 \longrightarrow s$ 处处相等

理想气体 s 的过程方程

$$ds = 0$$

理想气体

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

当 $k = \text{const}$

$$ds = c_v \frac{dp}{p} + c_p \frac{dv}{v} = 0$$

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0$$

$$\ln p + k \ln v = \text{const}$$

三个条件:

$$pv^k = \text{const}$$

(1)理想气体 (2)等熵过程 (3) k 为常数

理想气体 \textcircled{s} 的过程方程

$$pv^k = \text{const}$$



$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k$$

$$Tv^{k-1} = \text{const}$$



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \text{const}$$



$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

理想气体变比热 \textcircled{s} 过程

$$k = \frac{c_p}{c_v} \neq \text{const}$$

$$pv^k \neq \text{const}$$

若已知 p_1, T_1, T_2 , 求 p_2

~~$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$~~

$$ds = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v} = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p} = c_p \frac{dv}{v} + c_v \frac{dp}{p}$$

$$\Delta s = \int_{T_1}^{T_2} c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$$

理想气体 s $\Delta u, \Delta h, \Delta s$ 的计算

状态参数的变化与过程无关

内能变化

$$\Delta u = \int c_v dT$$

焓变化

$$\Delta h = \int c_p dT$$

熵变化

$$\Delta s = 0$$

理想气体 \textcircled{s} w, w_t, q 的计算

膨胀功 w

$$pv^k = C$$

$$w = \int p dv = \int \frac{C}{v^k} dv = \frac{C}{1-k} v^{1-k} \Big|_1^2 = \frac{1}{1-k} (p_2 v_2 - p_1 v_1)$$

$$= \frac{R_g}{k-1} (T_1 - T_2)$$

$$= c_v (T_1 - T_2)$$

$$= -\Delta u$$

$$q = \Delta u + w$$

技术功 w_t

$$w_t = -\int v dp = -\Delta h = c_p (T_1 - T_2) = kw$$

$$q = \Delta h + w_t$$

热量 q

$$q = 0$$

三. 理想气体热力过程的综合分析

1. 理想气体的多变过程(Polytropic process)

过程方程

$$pv^n = \text{const}$$

n 是常量,
每一过程有一 n 值

(n)

$$n = k$$



(s)

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^n$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

理想气体 n w, w_t, q 的计算

$$c_v = \frac{R_g}{k-1}$$

$$w = \int p dv = \int \frac{c}{v^n} dv = \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2)$$

$$pv^n = \text{const}$$

$$w_t = nw$$

$$v^n dp + p n v^{n-1} dv = 0$$

$$v dp + n p dv = 0$$

$$q = \Delta u + w = c_v (T_2 - T_1) - \frac{R_g}{n-1} (T_2 - T_1)$$

$$= (c_v - \frac{R_g}{n-1}) (T_2 - T_1) = \frac{n-k}{n-1} c_v (T_2 - T_1) = c_n (T_2 - T_1)$$

c_n

多变过程比热容

2. 多变过程与基本过程的关系

$$n$$

$$p$$

$$T$$

$$s$$

$$v$$

$$pv^n = \text{const}$$

$$c_n = \frac{n-k}{n-1} c_v$$

$$c_n = \frac{1 - \frac{k}{n}}{1 - \frac{1}{n}} c_v$$

(1) 当 $n = 0$

$$pv^0 = \text{const} \Rightarrow p = C$$

$$c_n = kc_v = c_p$$

$$p$$

(2) 当 $n = 1$

$$pv^1 = \text{const} \Rightarrow T = C$$

$$c_n = \infty$$

$$T$$

$$pv = RT$$

(3) 当 $n = k$

$$pv^k = \text{const} \Rightarrow s = C$$

$$c_n = 0$$

$$s$$

(4) 当 $n = \infty$

$$pv^n = \text{const} \Rightarrow v = C$$

$$c_n = c_v$$

$$v$$

基本过程是多变过程的特例

3. 理想气体基本过程的计算

基本过程的计算是基础

要求：熟练掌握、灵活使用

参见书上3-2公式汇总

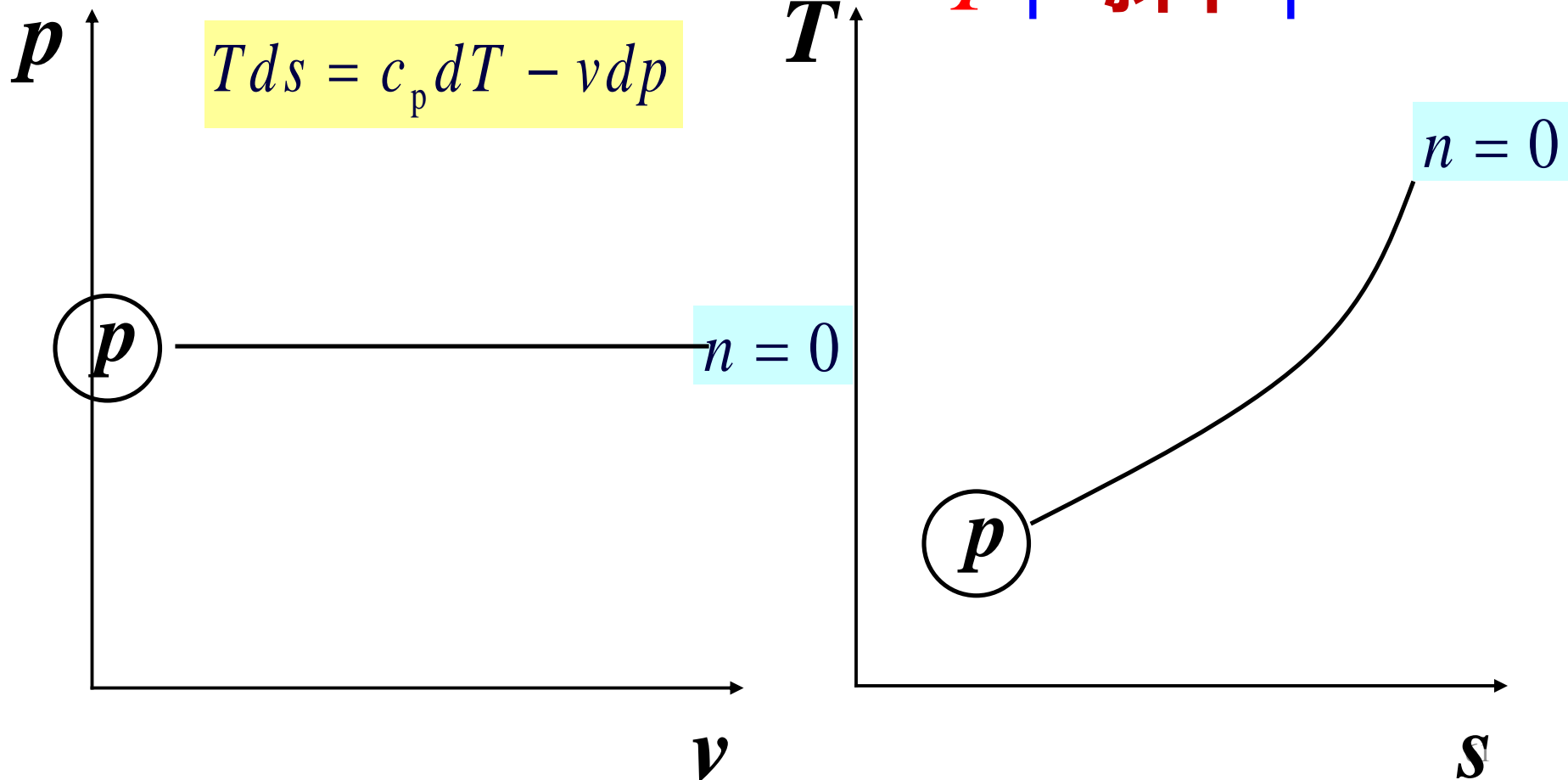
理想气体 p 过程的 $p-v, T-s$ 图

$$\left(\frac{dT}{ds}\right)_p = ? = \frac{T}{c_p}$$

$$Tds = c_p dT - vdp$$

上凸?下凹?

$T \uparrow$ 斜率 \uparrow



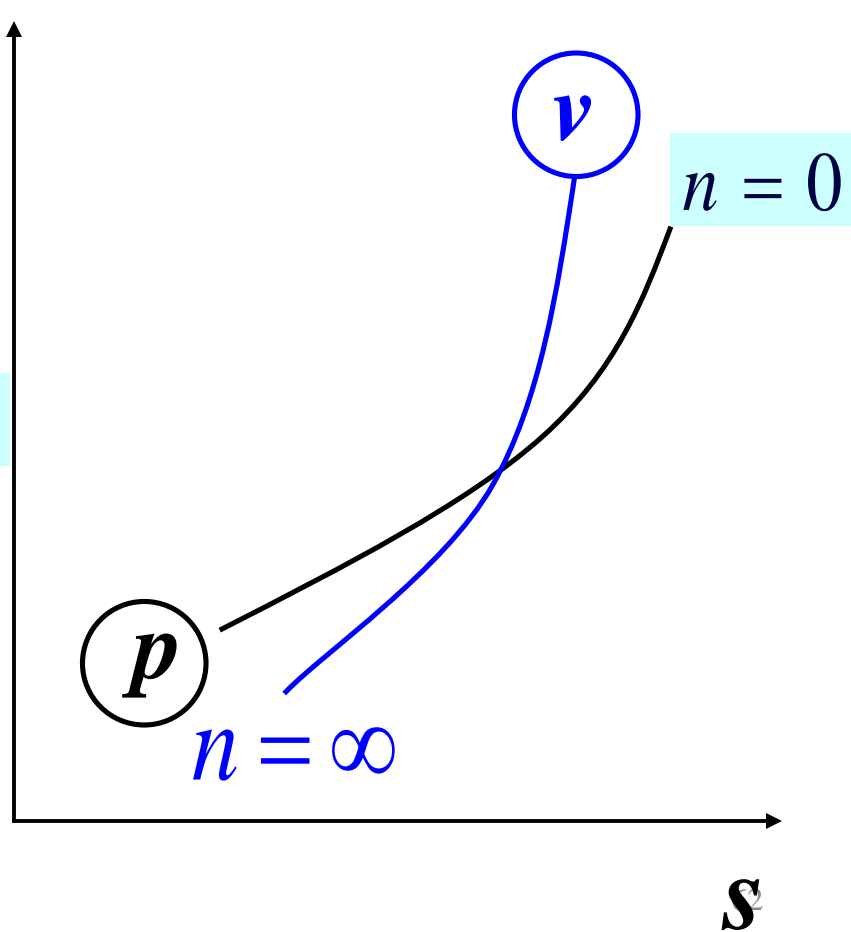
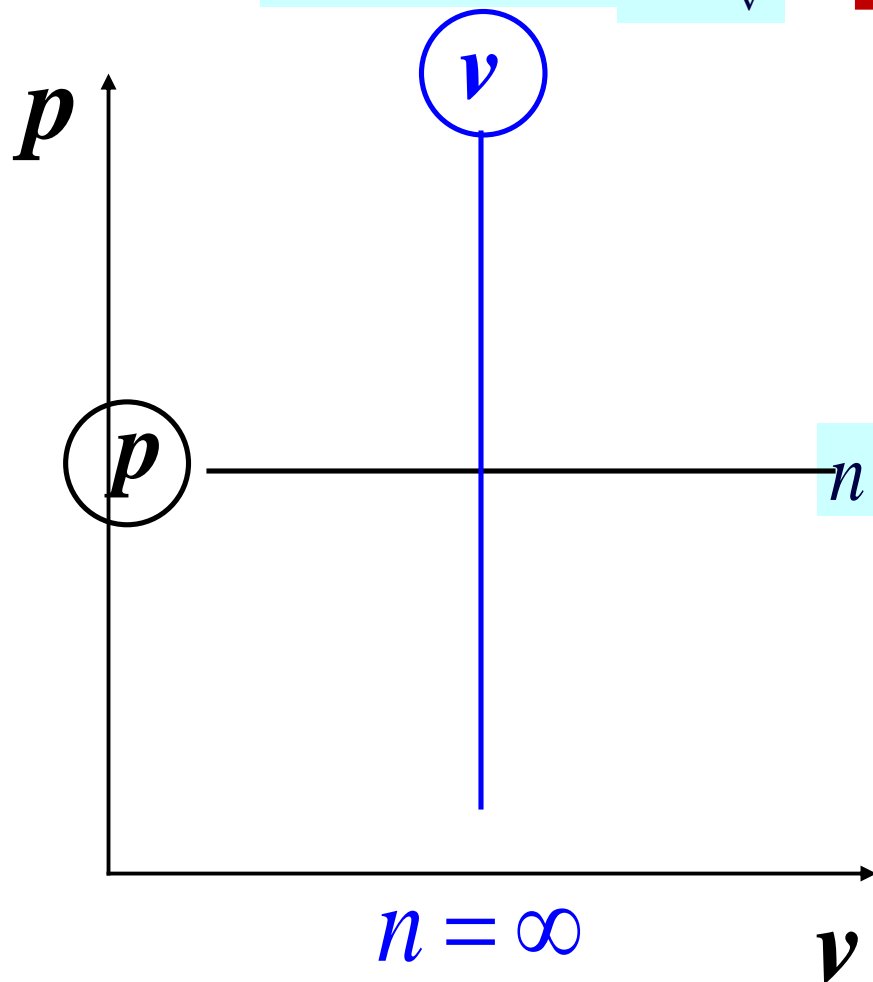
理想气体 v 过程的 $p-v, T-s$ 图

$$\left(\frac{dT}{ds}\right)_v = ? = \frac{T}{c_v}$$

$$Tds = c_v dT + p dv$$

$$c_p > c_v$$

上凸?下凹? $T \uparrow$ 斜率 \uparrow



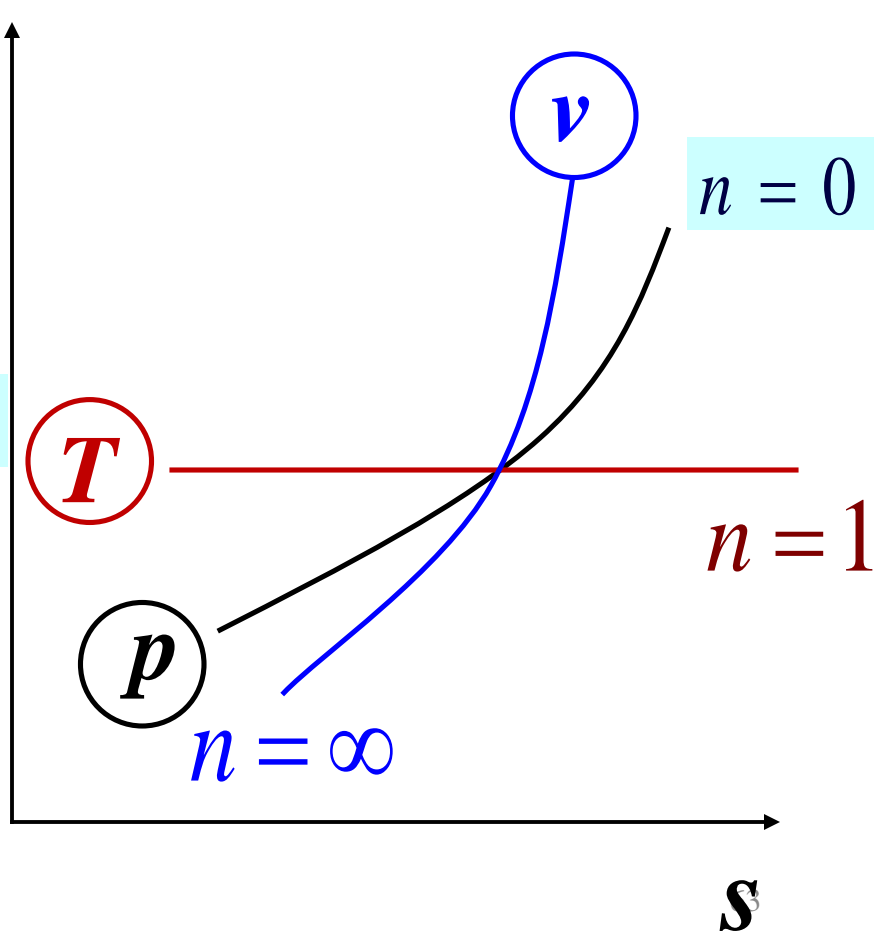
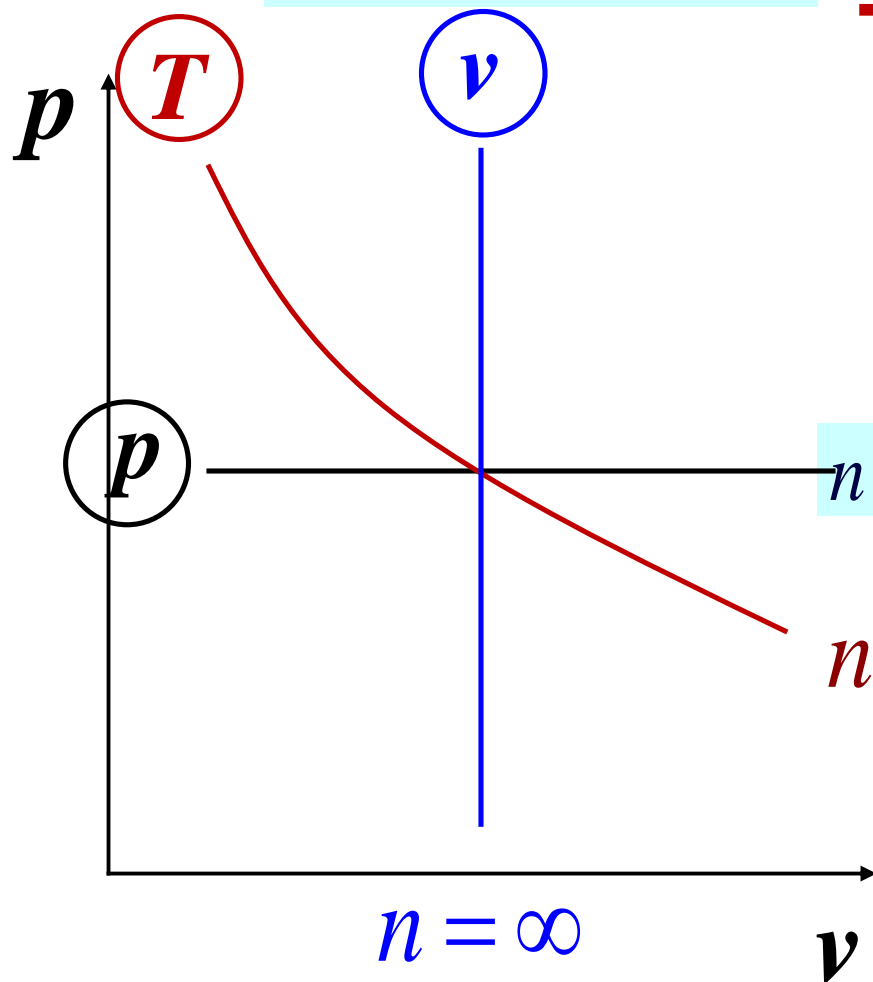
理想气体 T 过程的 $p-v, T-s$ 图

$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_T = ? = -\frac{p}{v}$$

$$pv = C$$

$$pdv + vdp = 0$$

上凸?下凹? $p \uparrow$ 斜率 \uparrow

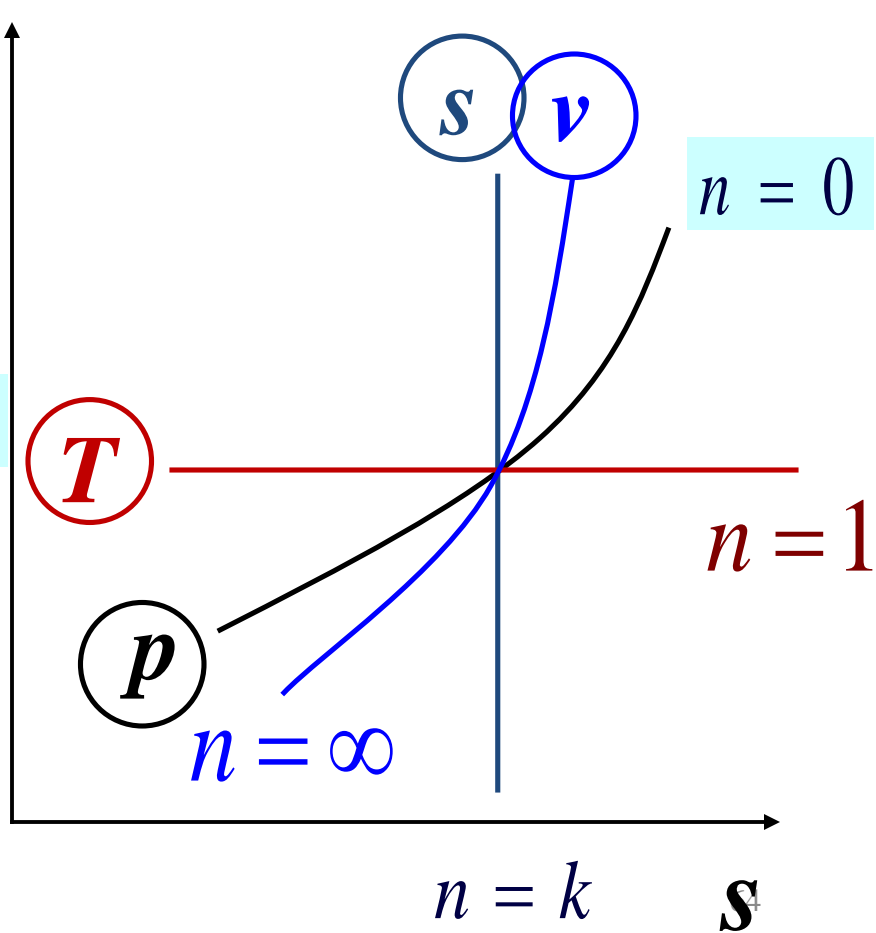
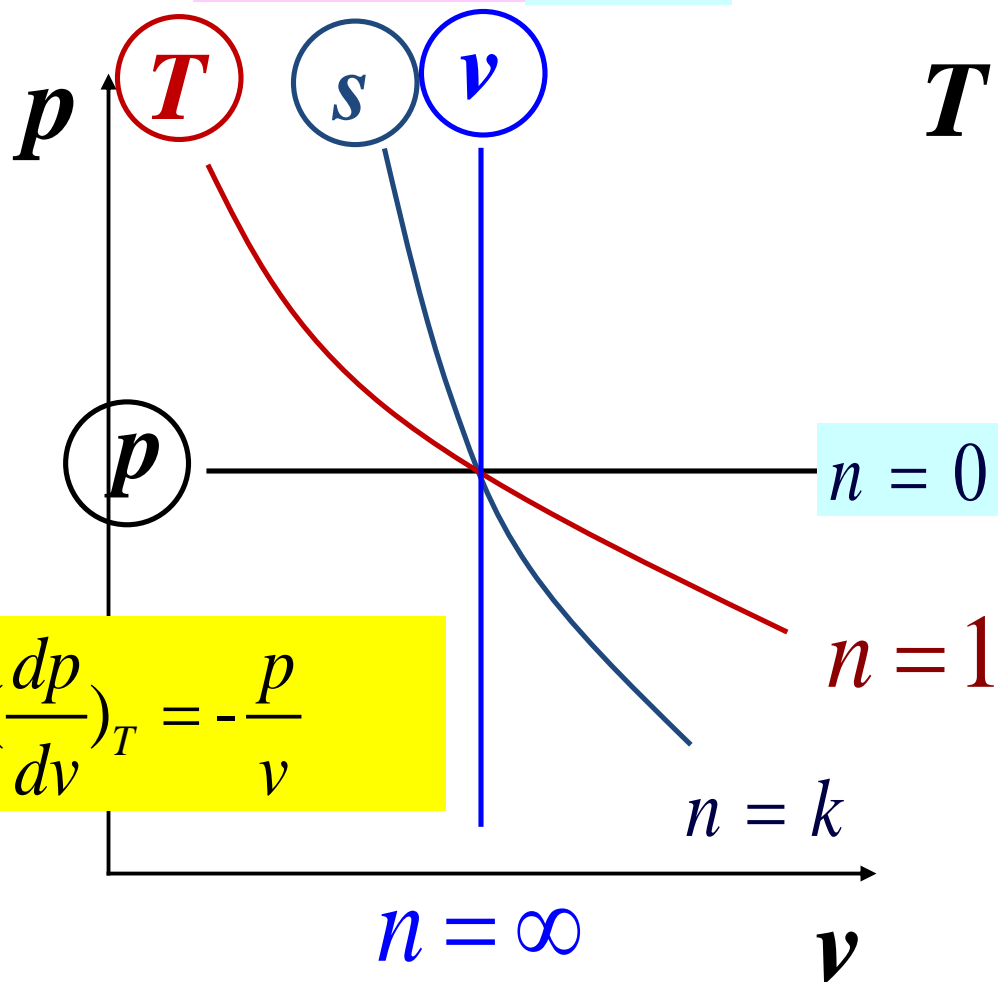


理想气体 s 过程的 $p-v, T-s$ 图

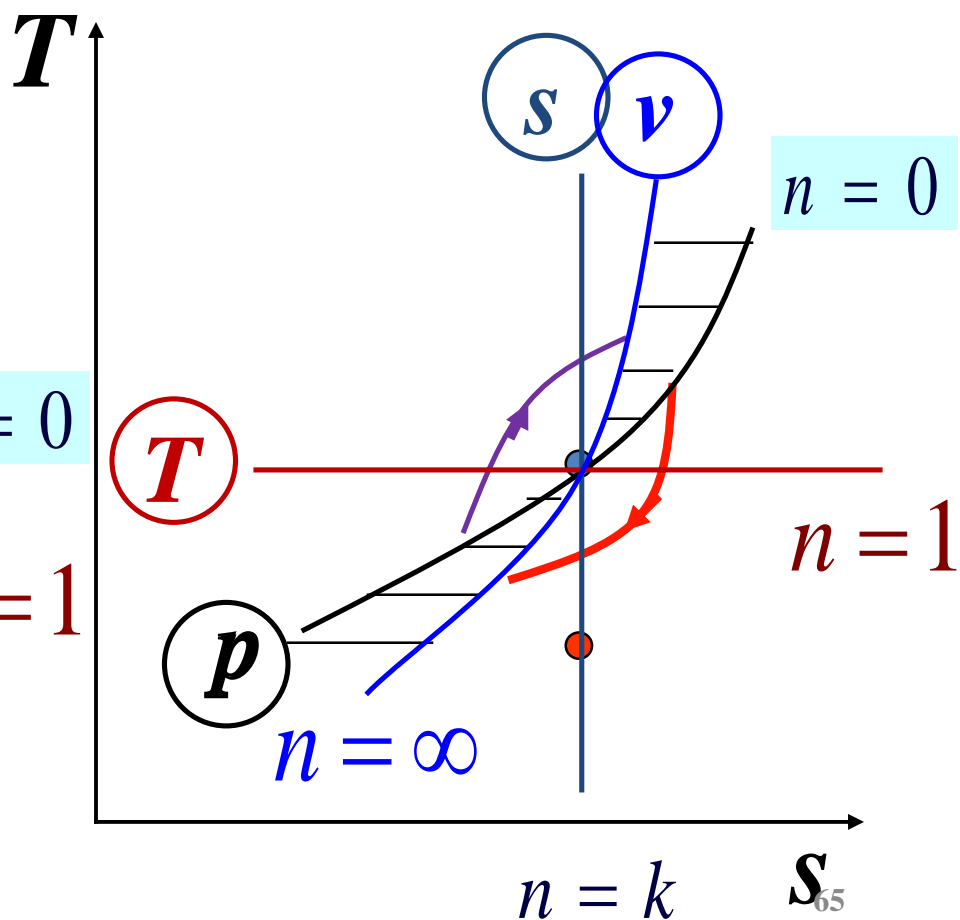
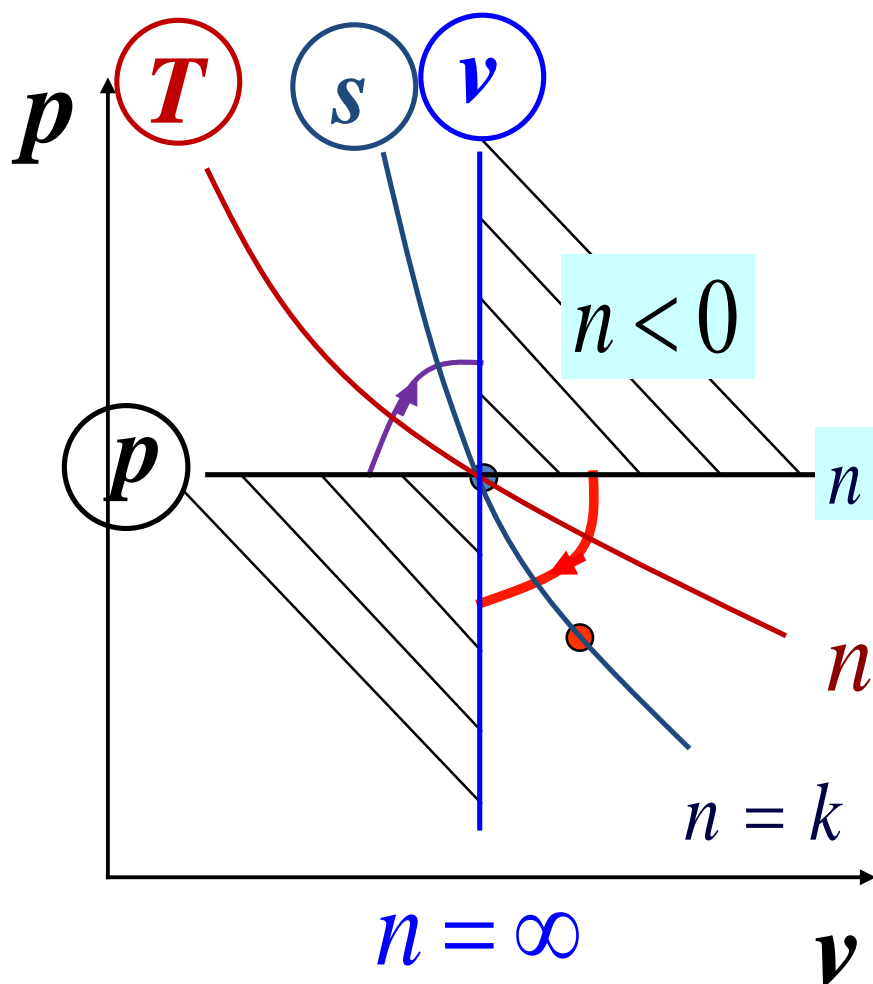
$$\left(\frac{dp}{dv} \right)_s = -\frac{kp}{v}$$

$$pv^k = C \quad d(pv^k) = 0$$

$$kp v^{k-1} dv + v^k dp = 0$$



理想气体基本过程的 $p-v, T-s$ 图

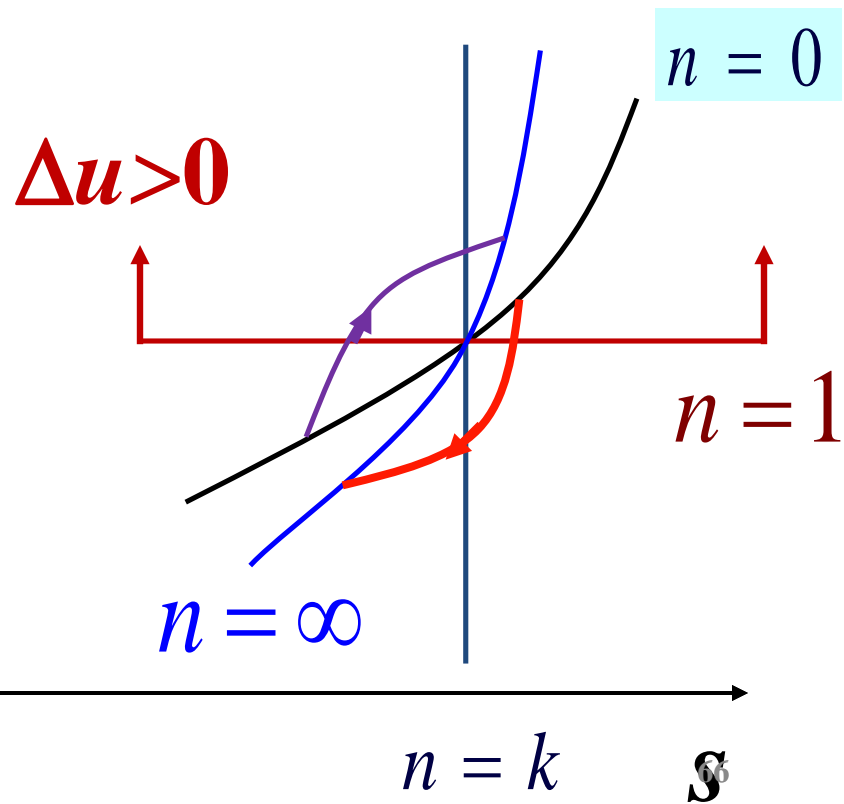
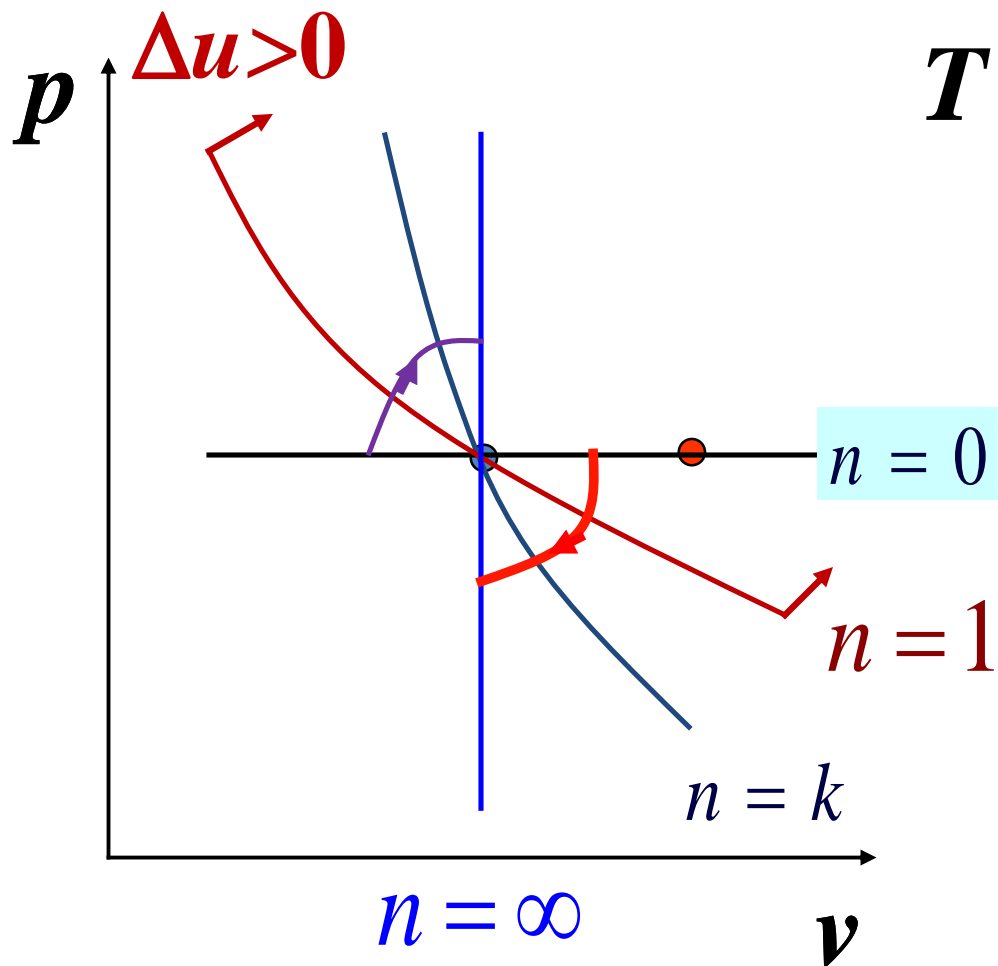


u 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

$$\textcircled{u} = \textcircled{T}$$

$$\uparrow \Delta u = \int c_v \textcircled{dT} \rightarrow \uparrow$$

$$pv = R_g T$$



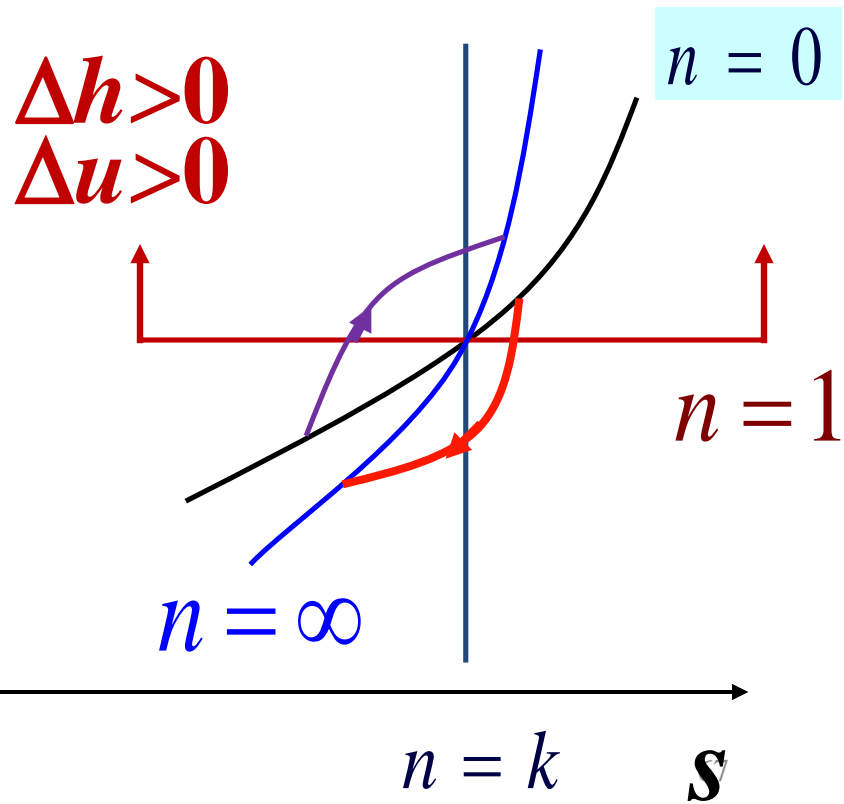
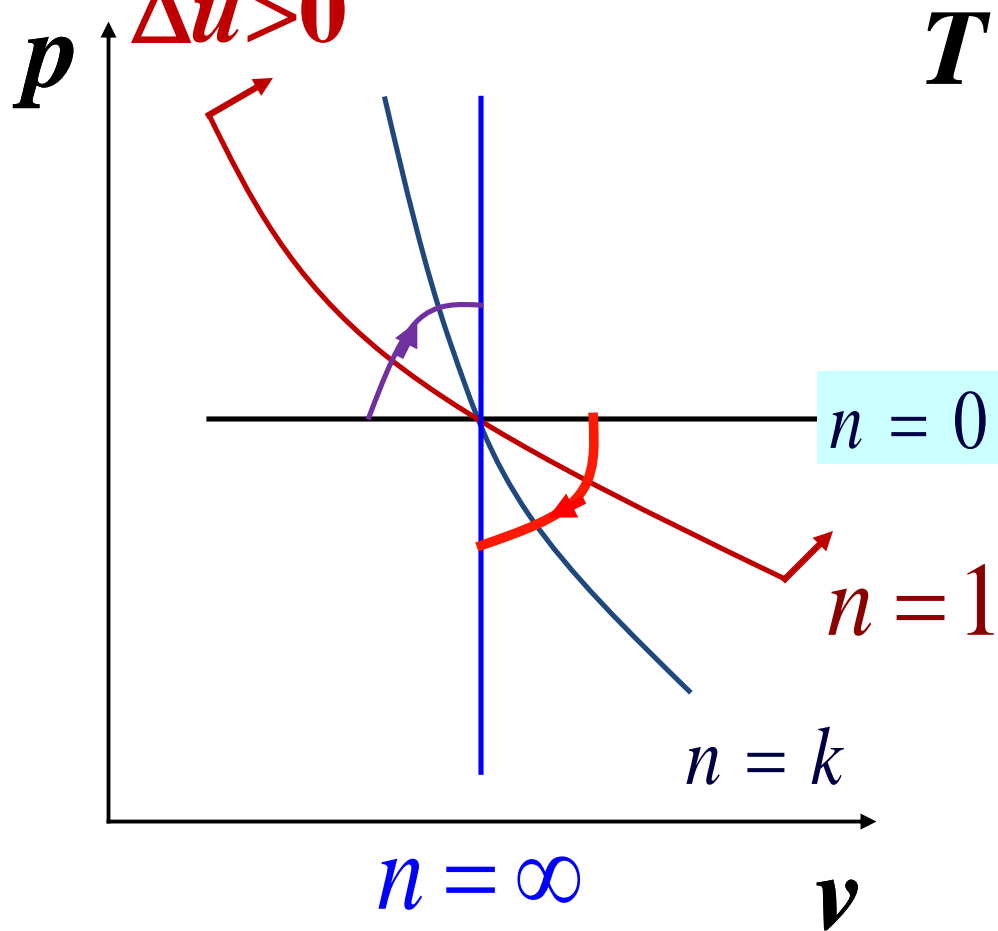
h 在 p - v , T - s 图上的变化趋势

$$\textcircled{h} = \textcircled{T}$$

$$\uparrow \Delta h = \int c_p dT \uparrow$$

$$\Delta h > 0$$

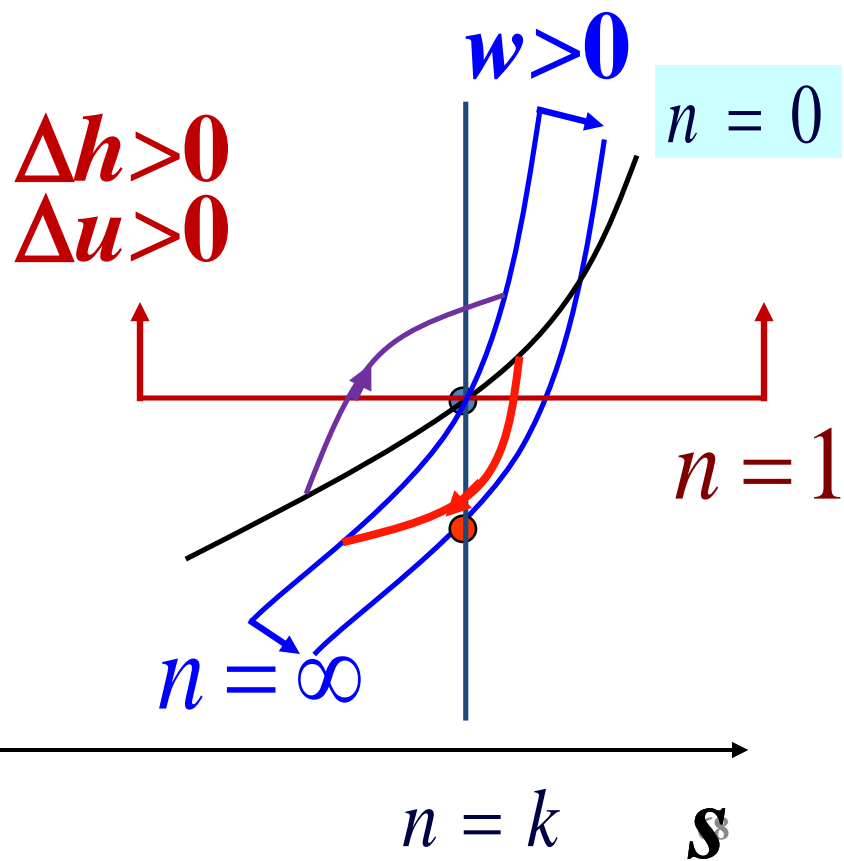
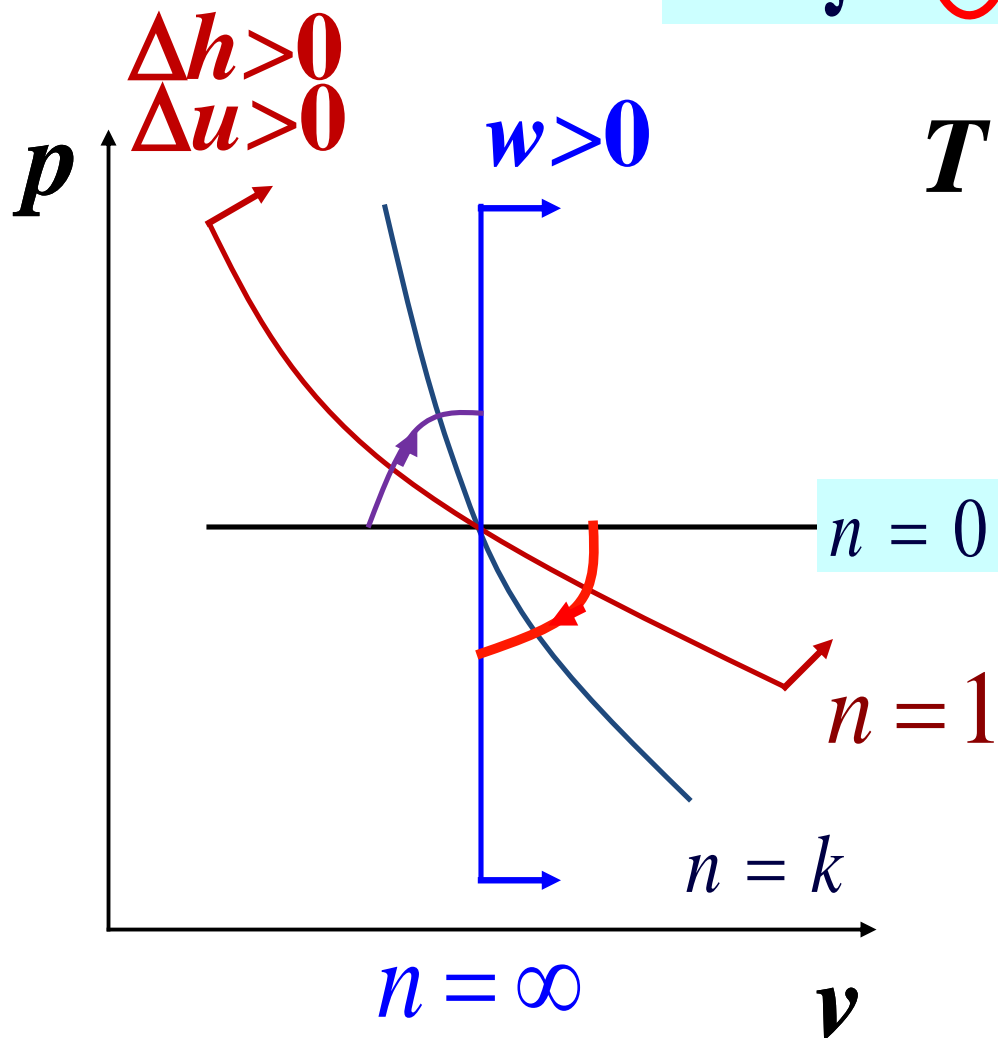
$$\Delta u > 0$$



w 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

$$\uparrow w = \int p dv \rightarrow \uparrow$$

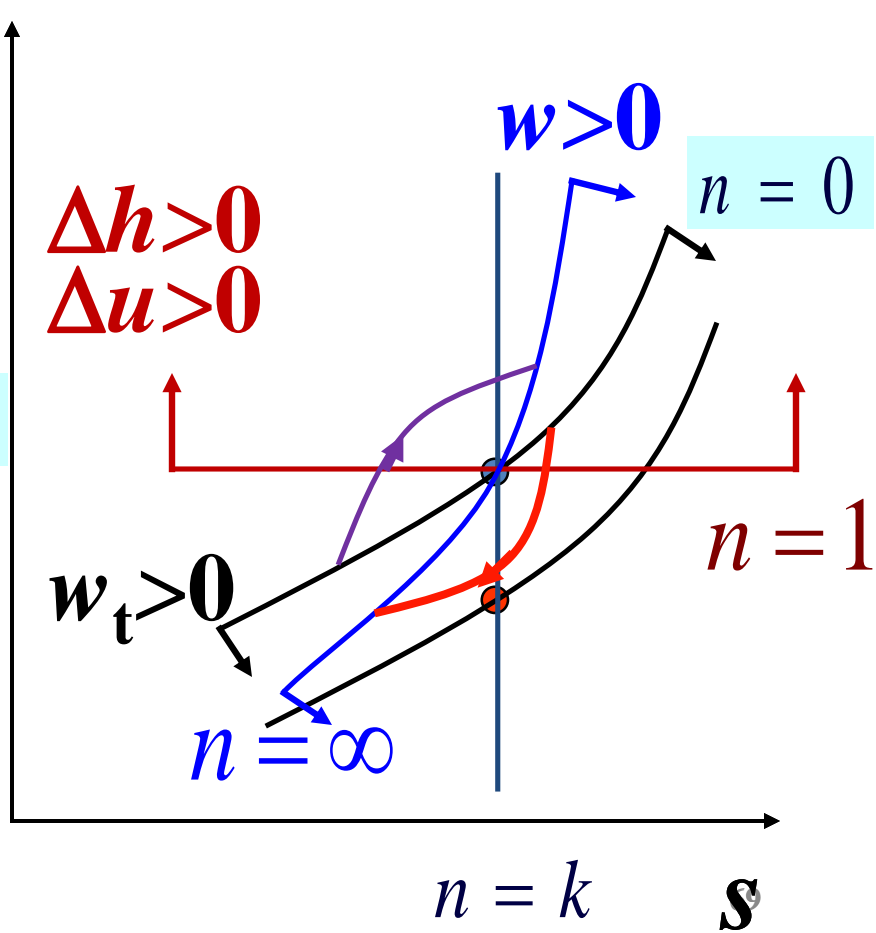
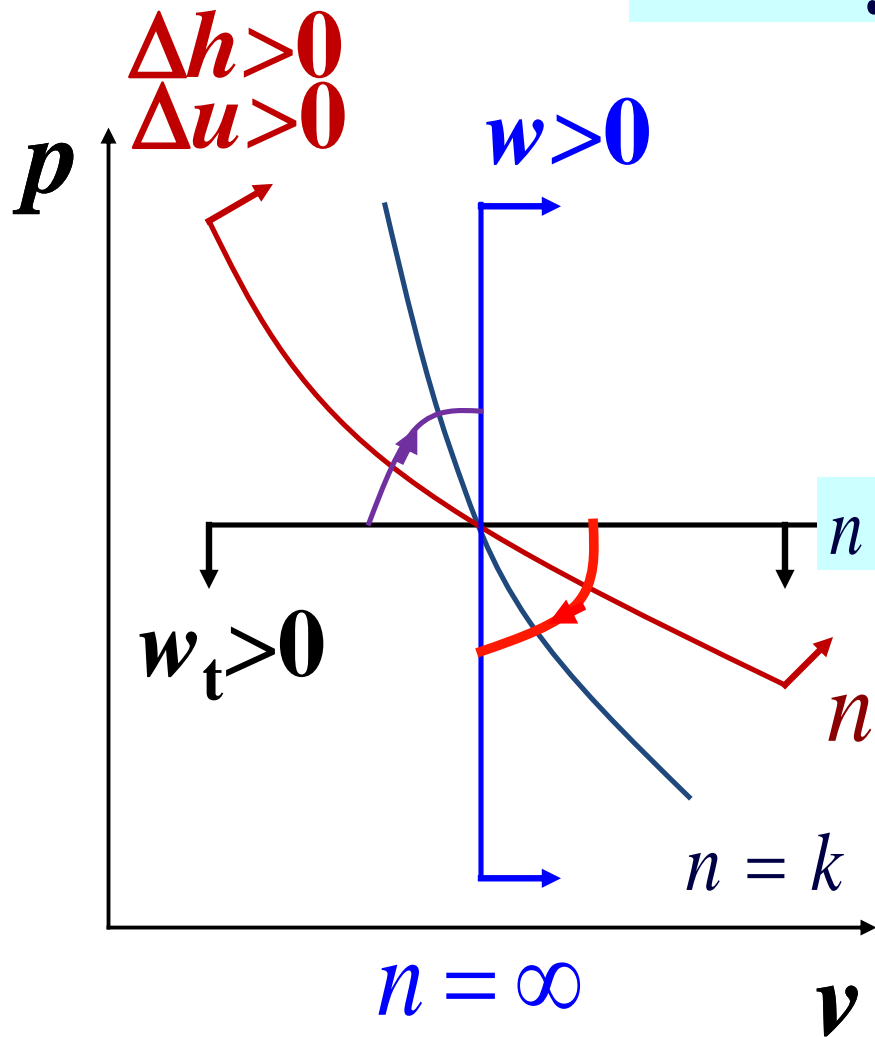
$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$



w_t 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

$$\uparrow w_t = - \int v dp \rightarrow \downarrow$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

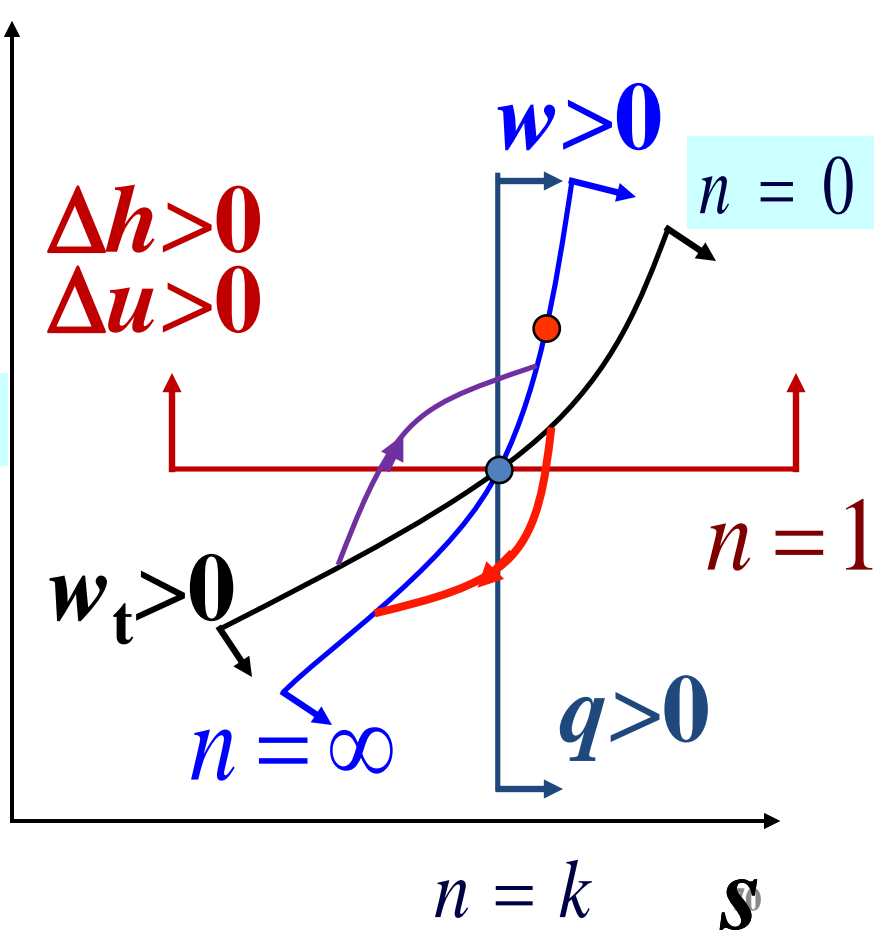
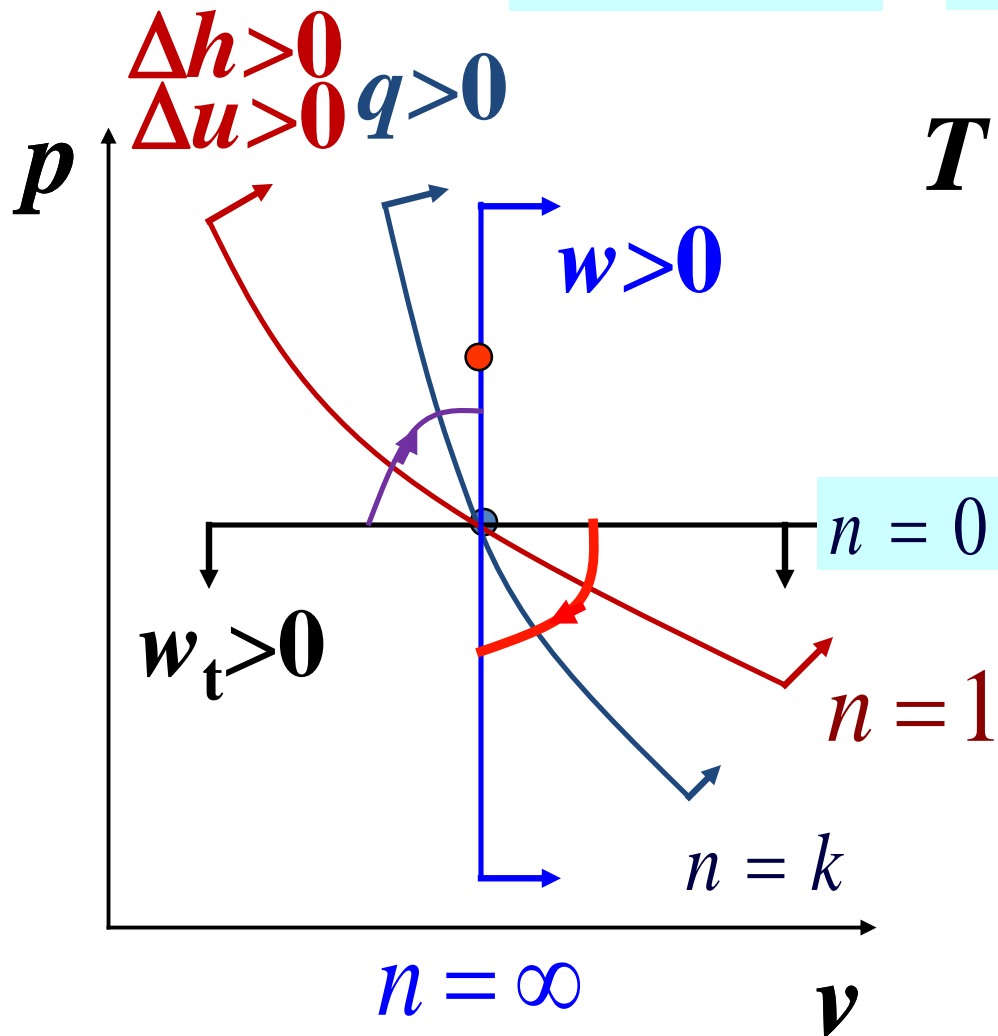


q 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

$$\delta q = Tds$$

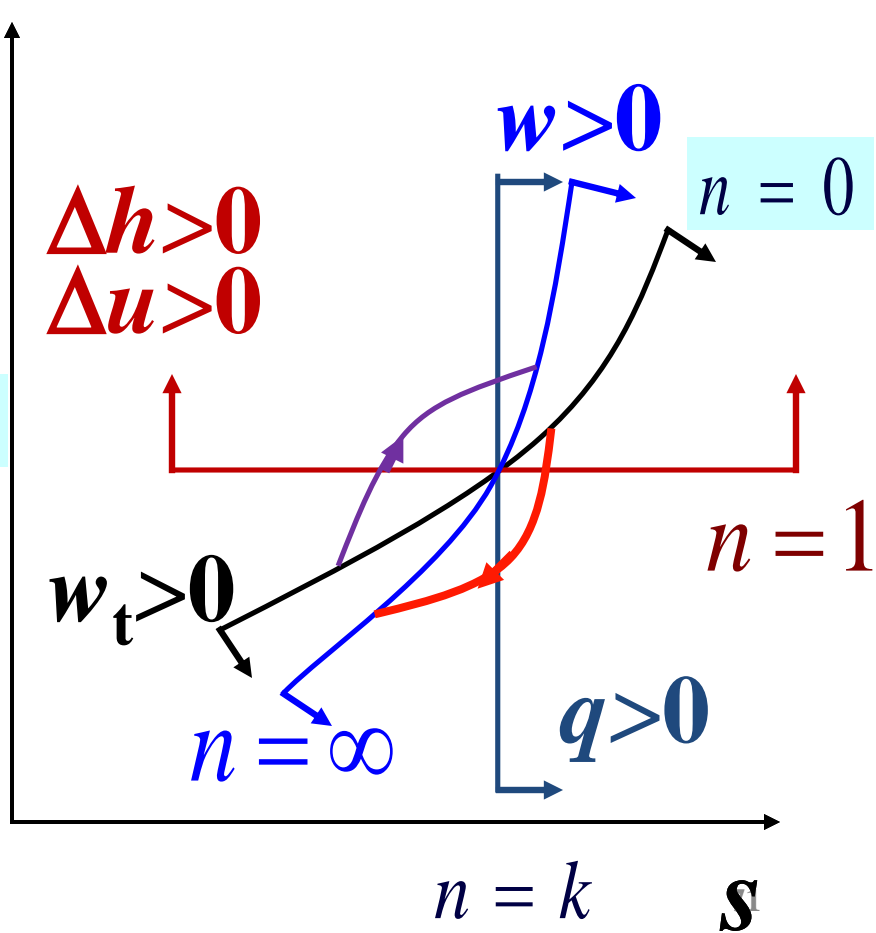
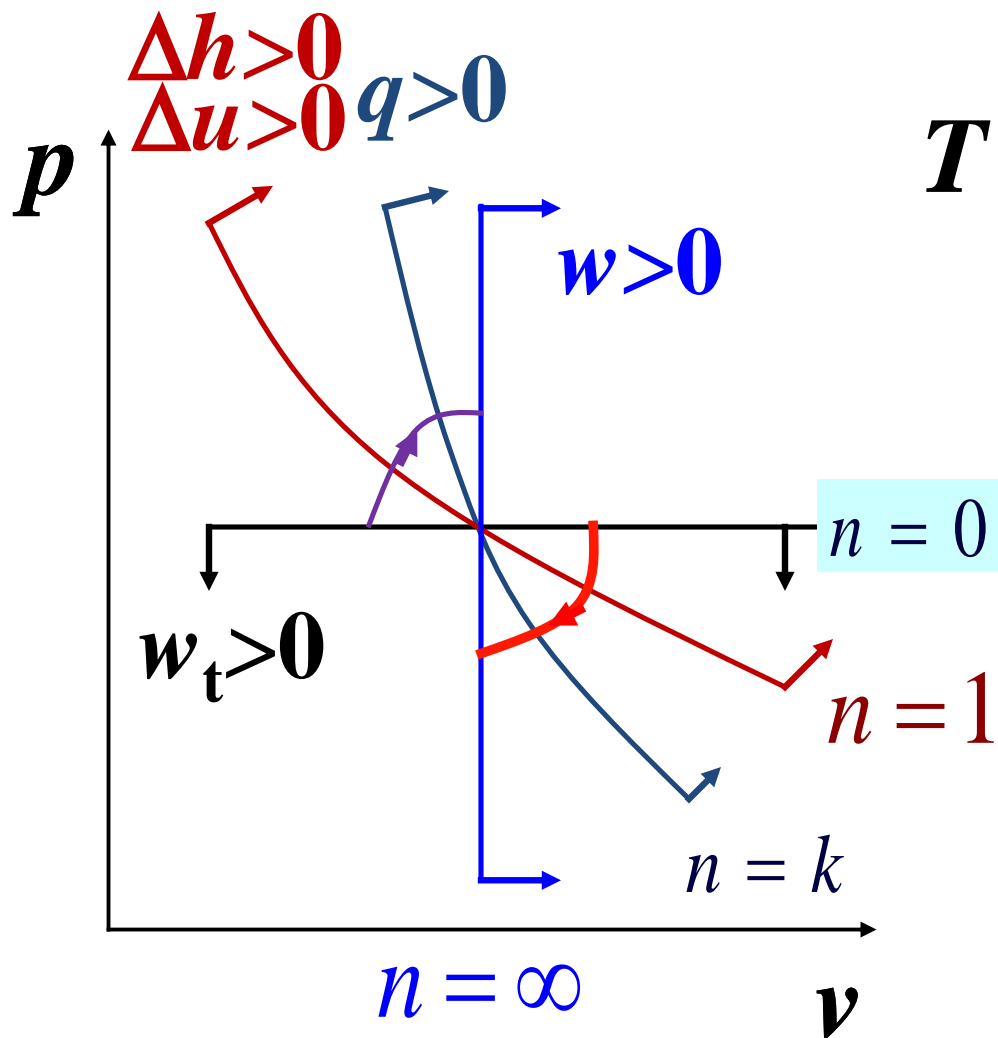
$$q = \Delta u + w$$

$$pv = R_g T$$



u, h, w, w_t, q 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

$u, h \uparrow (T \uparrow) \quad w \uparrow (v \uparrow) \quad w_t \uparrow (p \downarrow) \quad q \uparrow (s \uparrow)$



§3-7 活塞式压气机的压缩过程分析

压气机的作用

生活中：自行车打气。

工业上：锅炉鼓风、出口引风、炼钢、燃气轮机、制冷空调等等

型式结构

活塞式(往复式)

出口当连续流动

离心式, 涡旋

轴流式, 螺杆

连续流动

压力范围

通风机

$$\Delta p < 0.01 \text{MPa}$$

鼓风机

$$0.01 \text{MPa} < \Delta p < 0.3 \text{MPa}$$

压缩机

$$\Delta p > 0.3 \text{MPa}$$

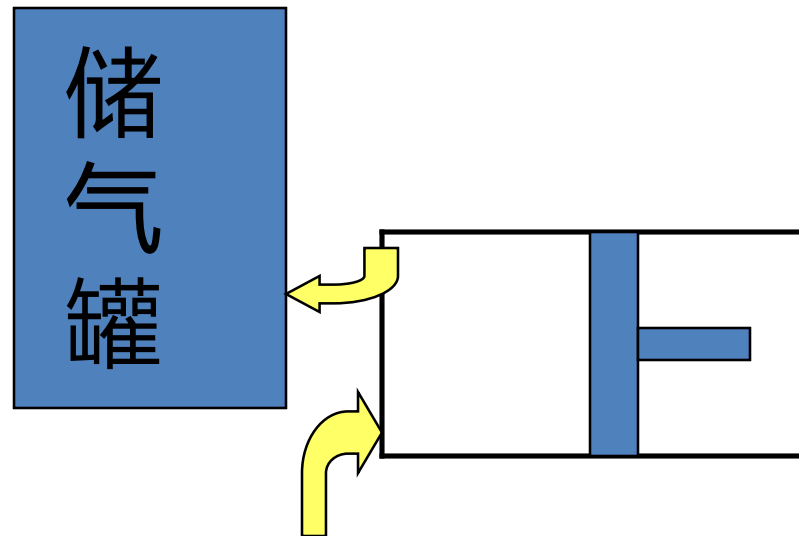
Fanner

Fan

Compressor

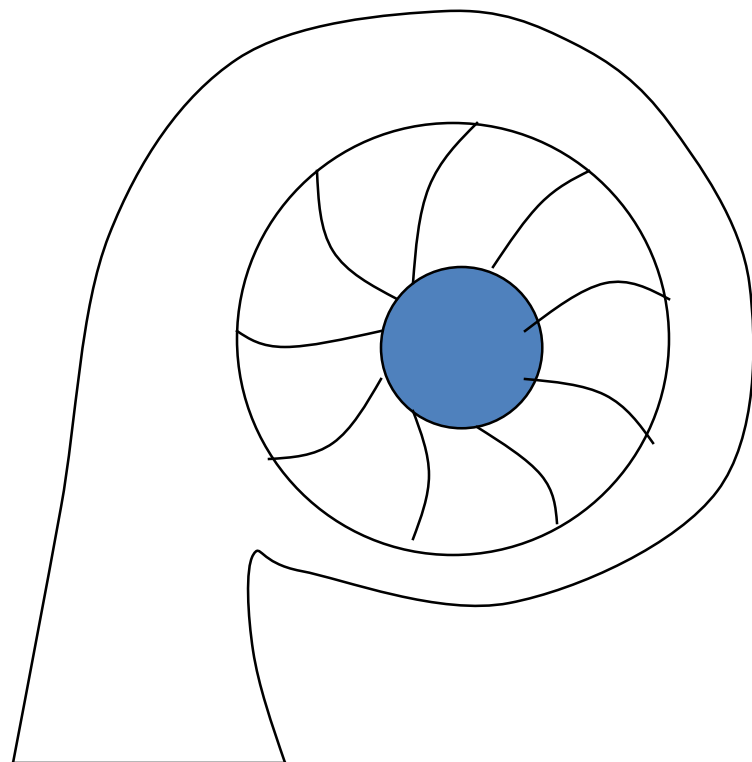
活塞式(piston)压气机的结构

流量小，升压幅度可以很大。
普遍使用在汽车，电冰箱，化工。



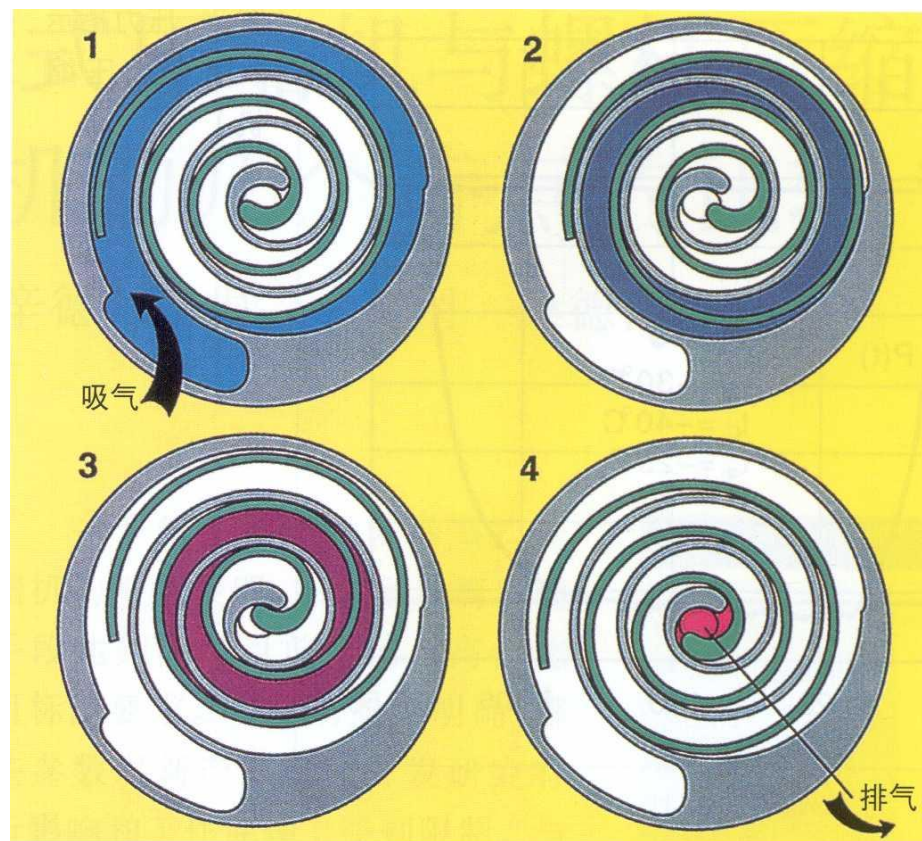
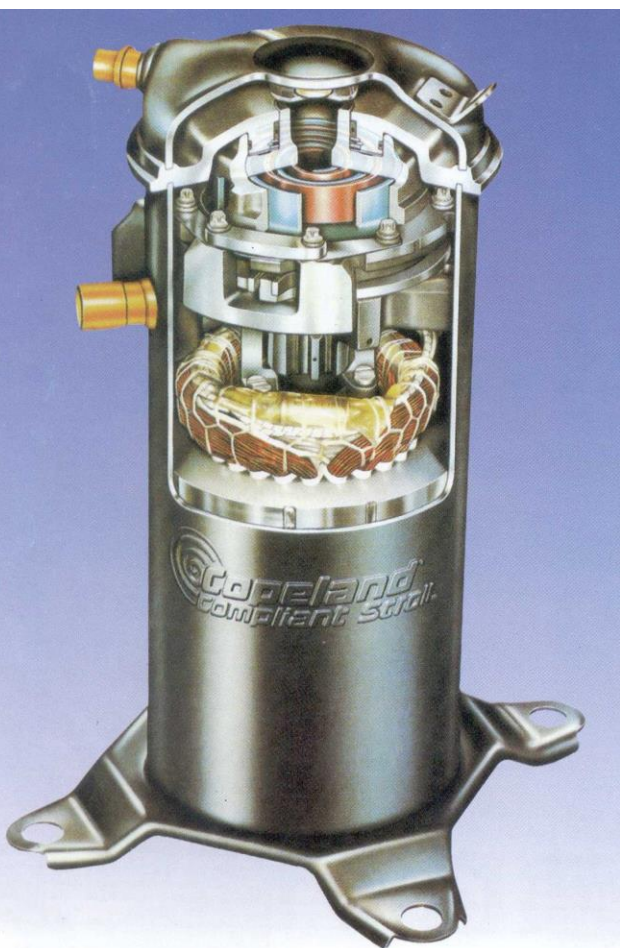
离心式(Centrifugal)风机的结构

升压幅度小，结构简单。

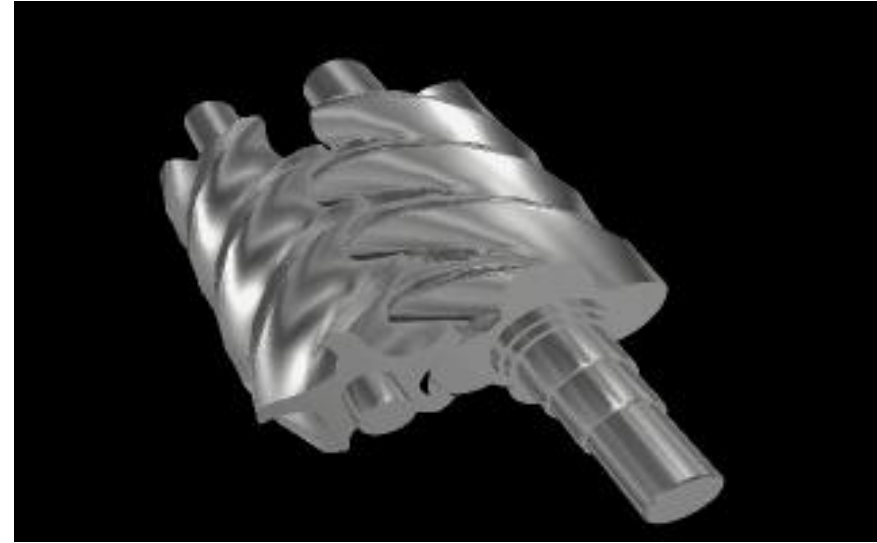
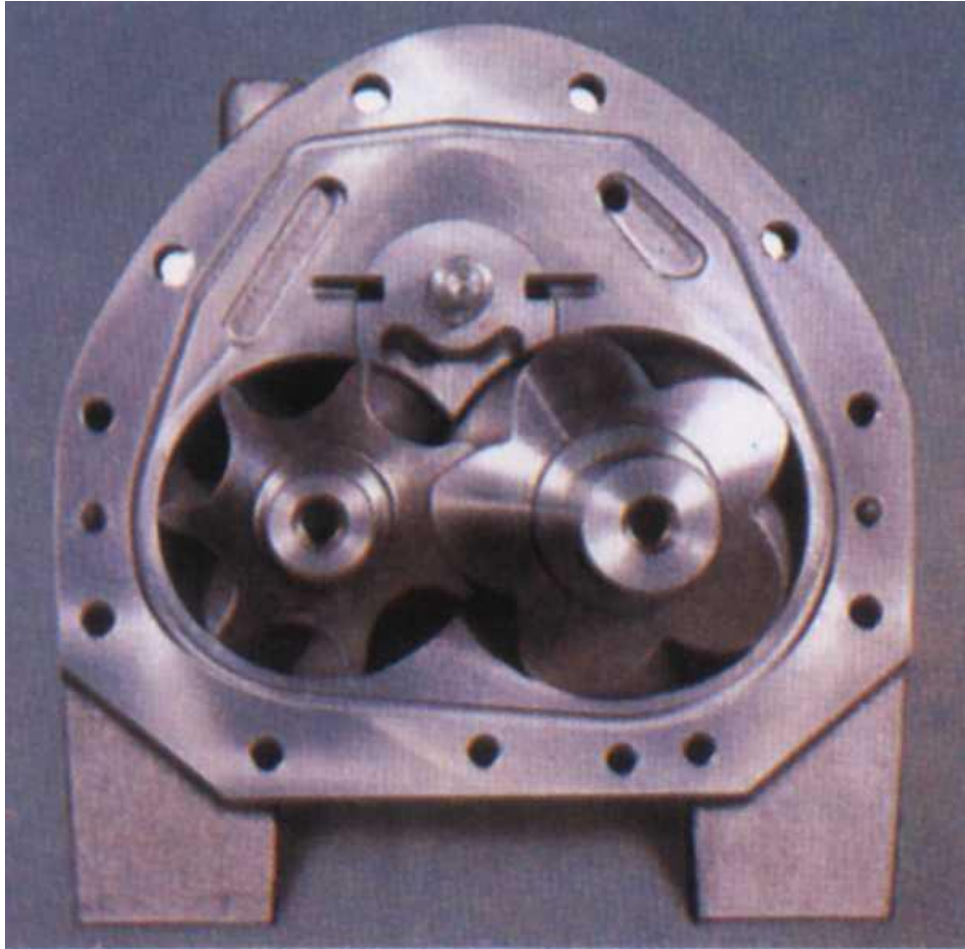


涡旋式(Scroll)压缩机的结

小型设备，性能可靠，不怕

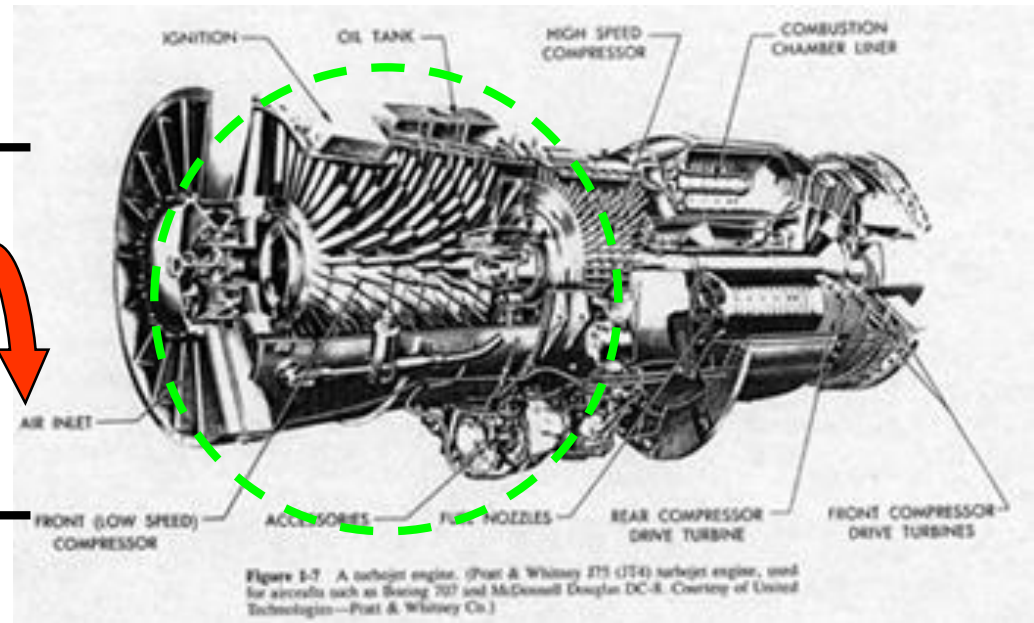
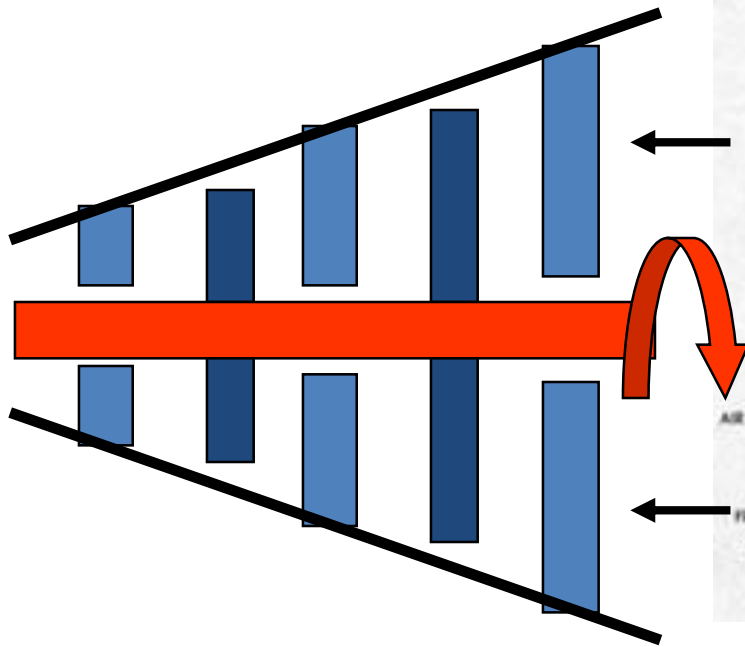


螺杆(Screw)压缩机



轴流式压气机的结构

流量大，结构复杂。
普遍使用在航空，轮船，化工。



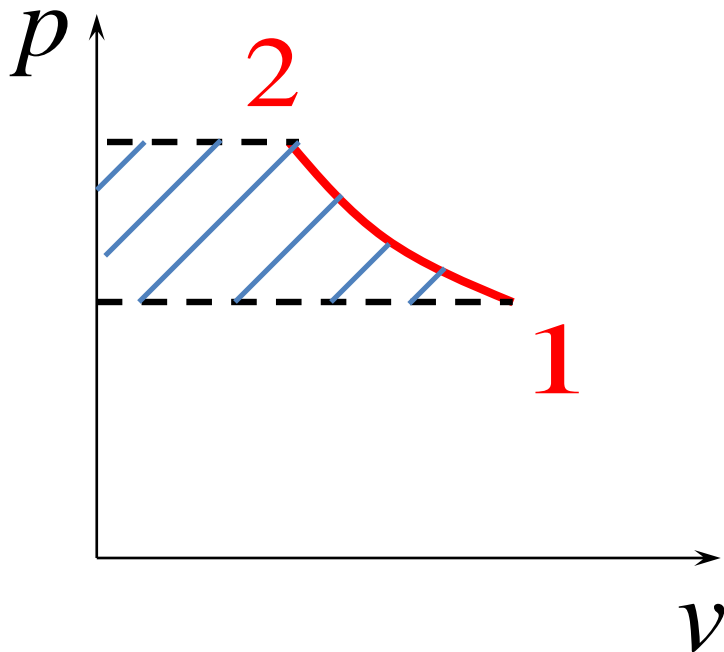
占透平输出功的2/3

活塞式压气机的压气过程

目的：研究耗功，越少越好

Minimizing work input

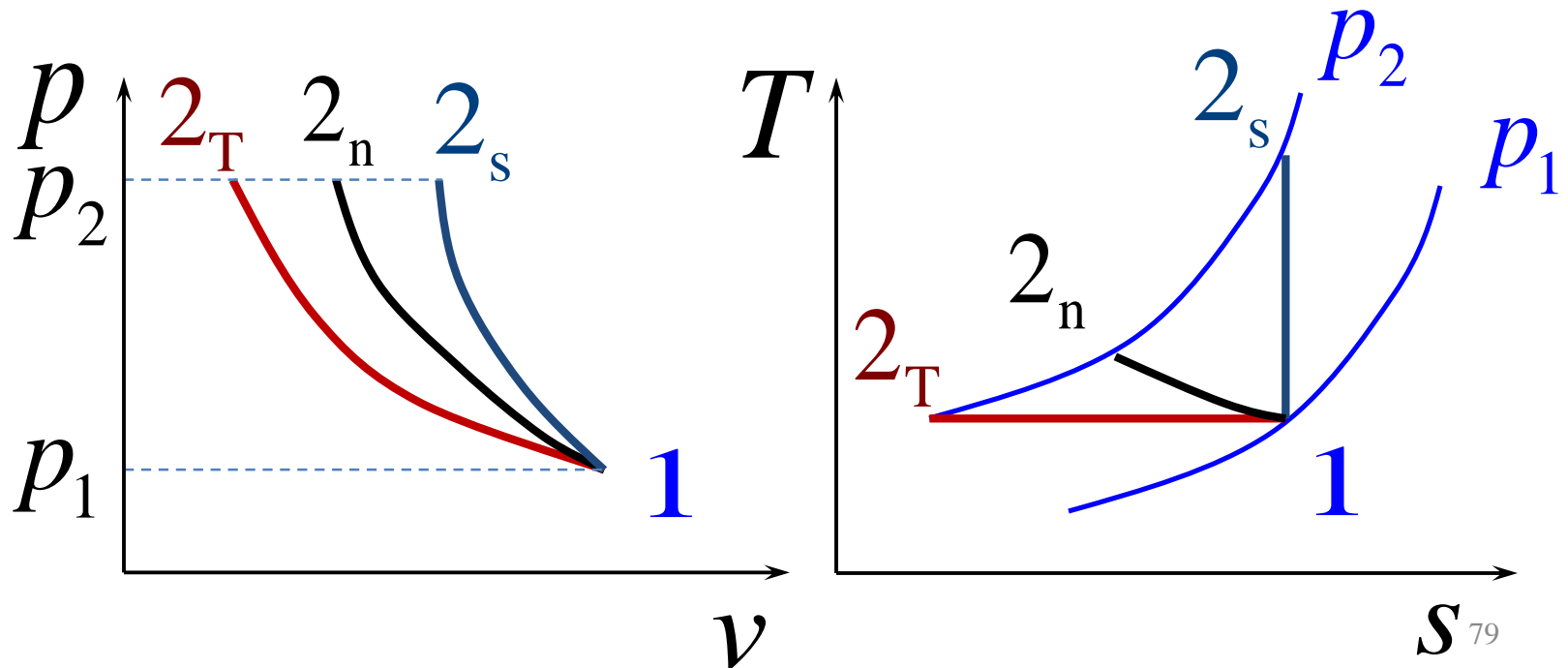
指什么功？ \longrightarrow 技术功 w_t



理论压气功(可逆过程)

可能的压气过程

- (1). 特别快，来不及换热。 \textcircled{s} $n = k$
- (2). 特别慢，热全散走。 \textcircled{T} $n = 1$
- (3). 实际压气过程是 \textcircled{n} $1 < n < k$

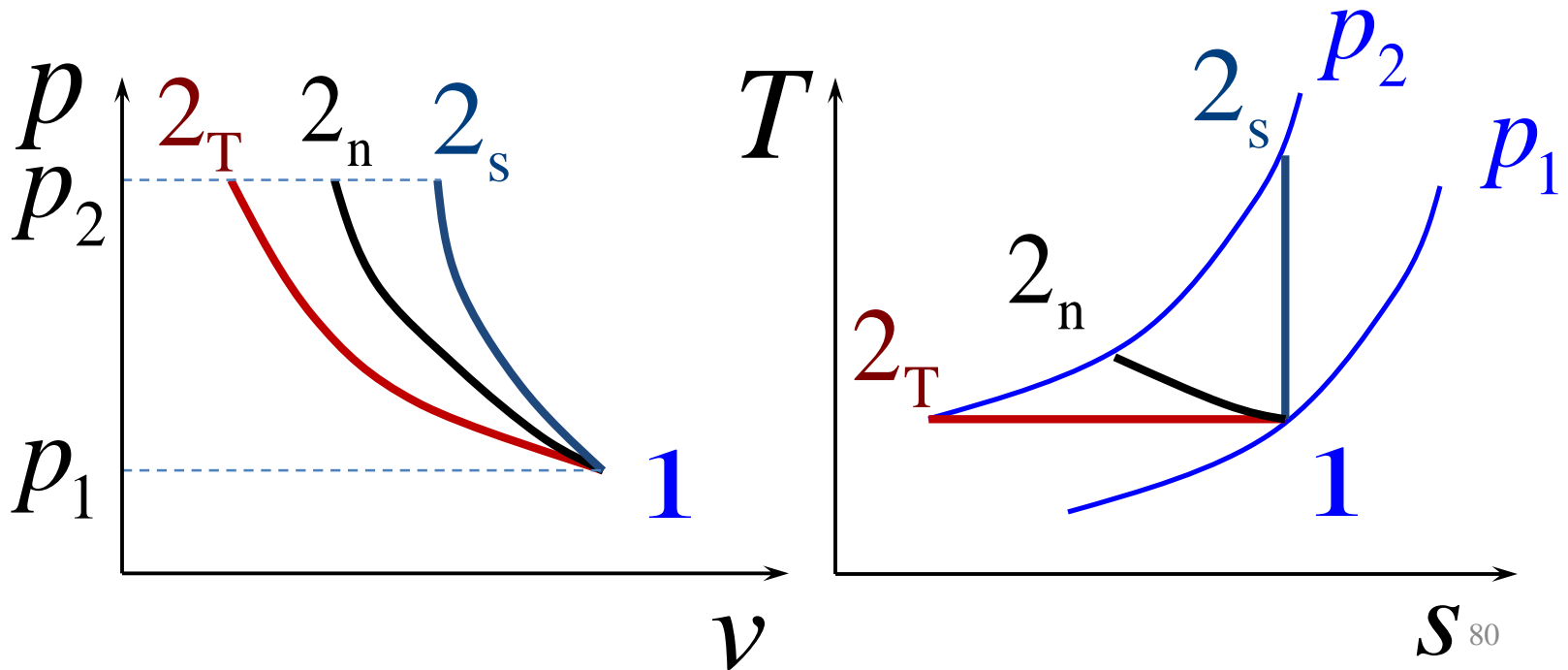


三种压气过程的参数关系

$$|w_{tT}| < |w_{tn}| < |w_{ts}|$$

$$v_{2T} < v_{2n} < v_{2s}$$

$$T_1 = T_{2T} < T_{2n} < T_{2s}$$



三种压气过程功的计算

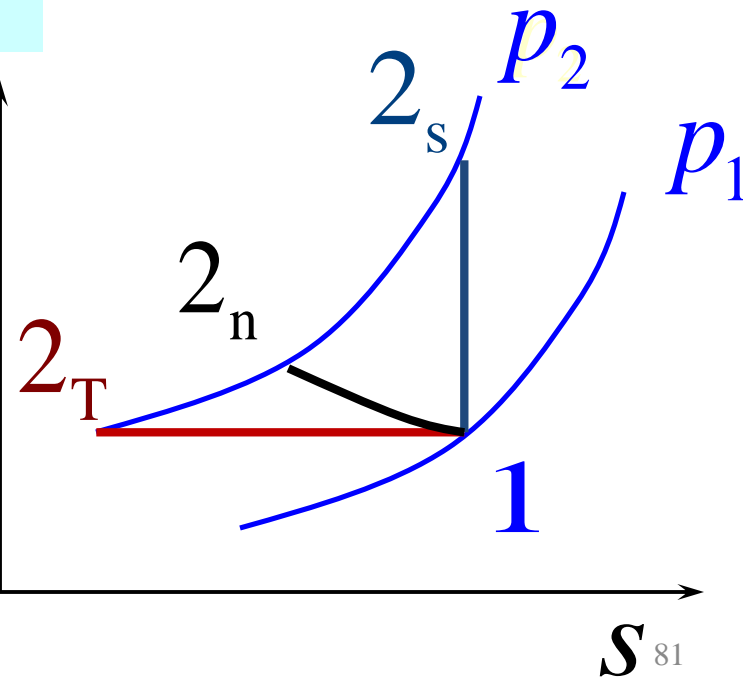
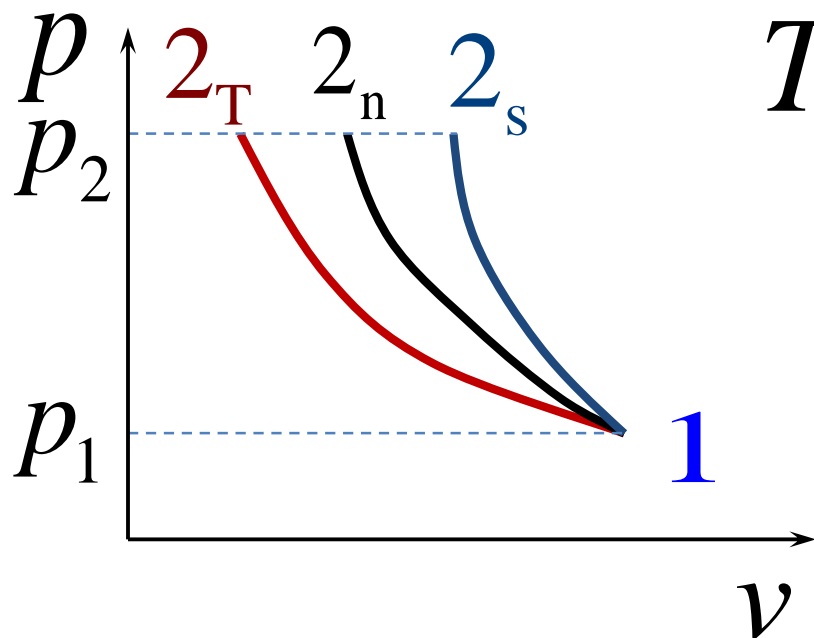
$$w_{\text{tn}} = \frac{n}{n-1} RgT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$w_{\text{tT}} = RgT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$w_{\text{ts}} = \frac{k}{k-1} RgT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

最小

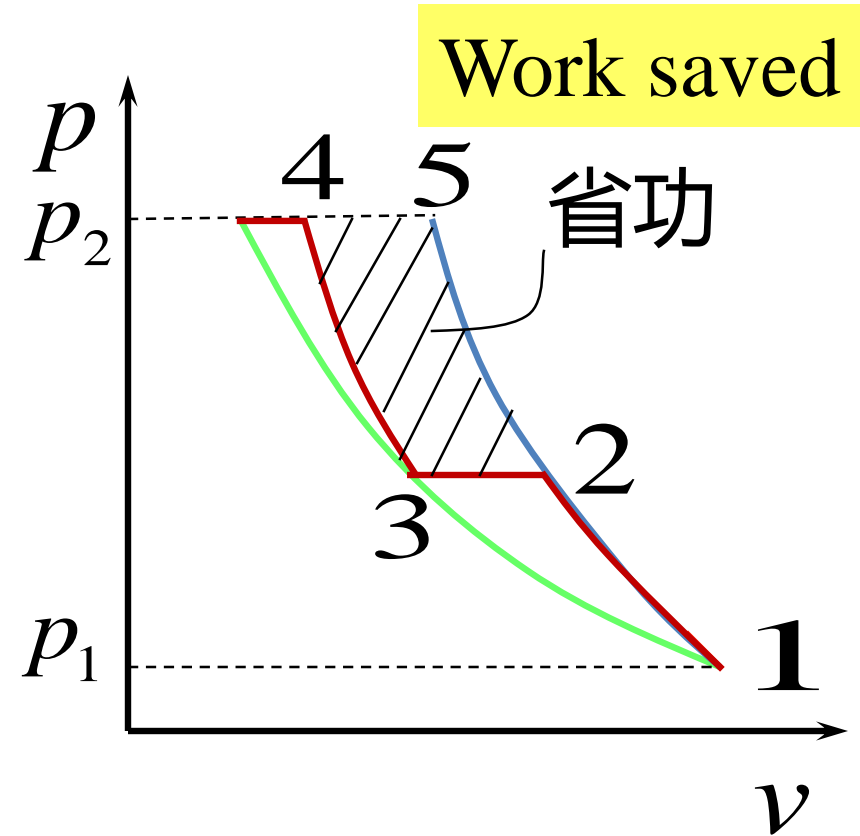
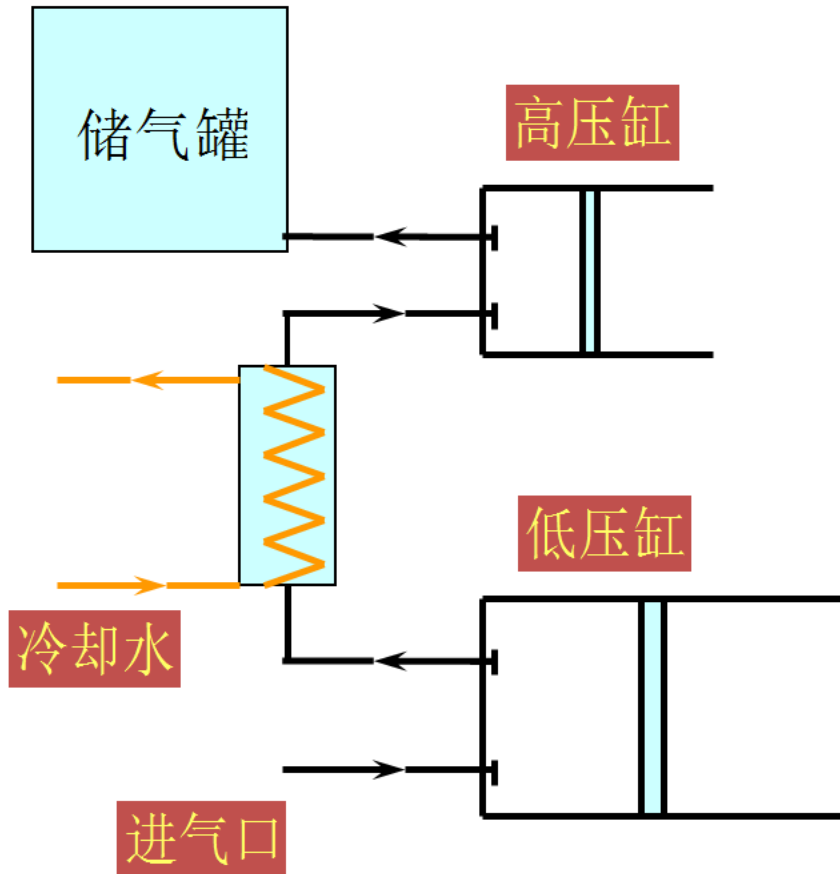
重要启示



定温压缩耗功最小，定熵压缩耗功最多，应该使压气过程尽量接近于定温过程，但太缓慢，不好实现。

措施：分级压缩，中间冷却

两级压缩中间冷却

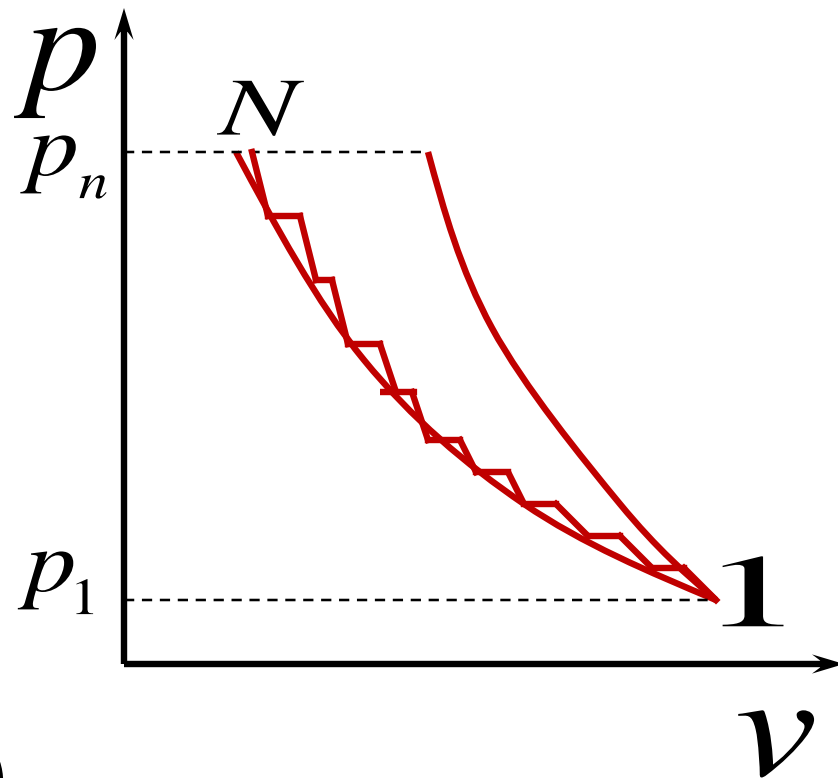
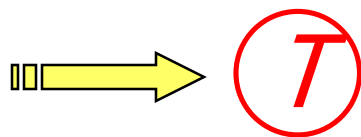


最佳增压比 $\frac{p_2}{p_1}$
推导过程自学

分级压缩的级数

分级 { 省功
降低出口温

多级压缩达到
无穷多级



- (1) 不可能实现
- (2) 结构复杂(成本高)

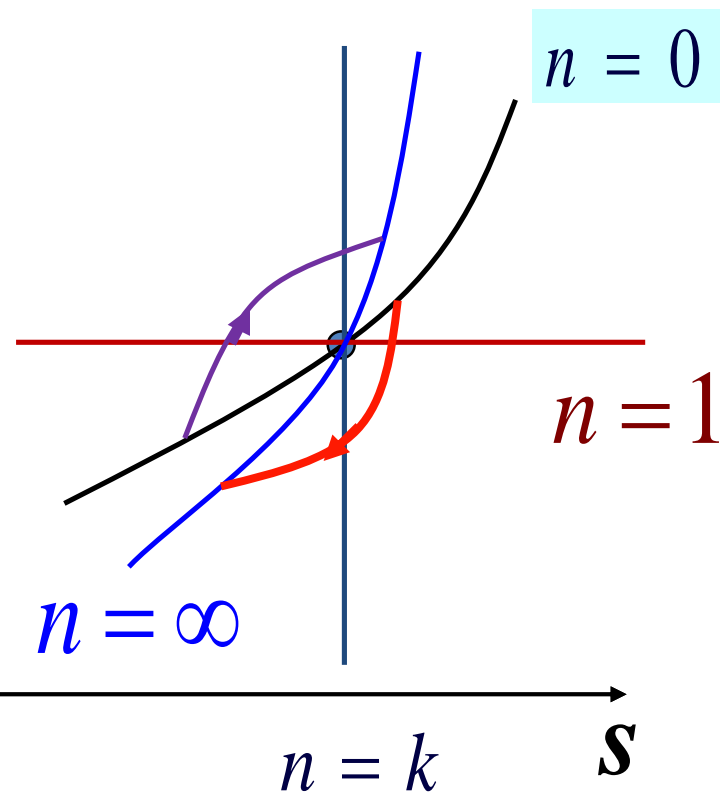
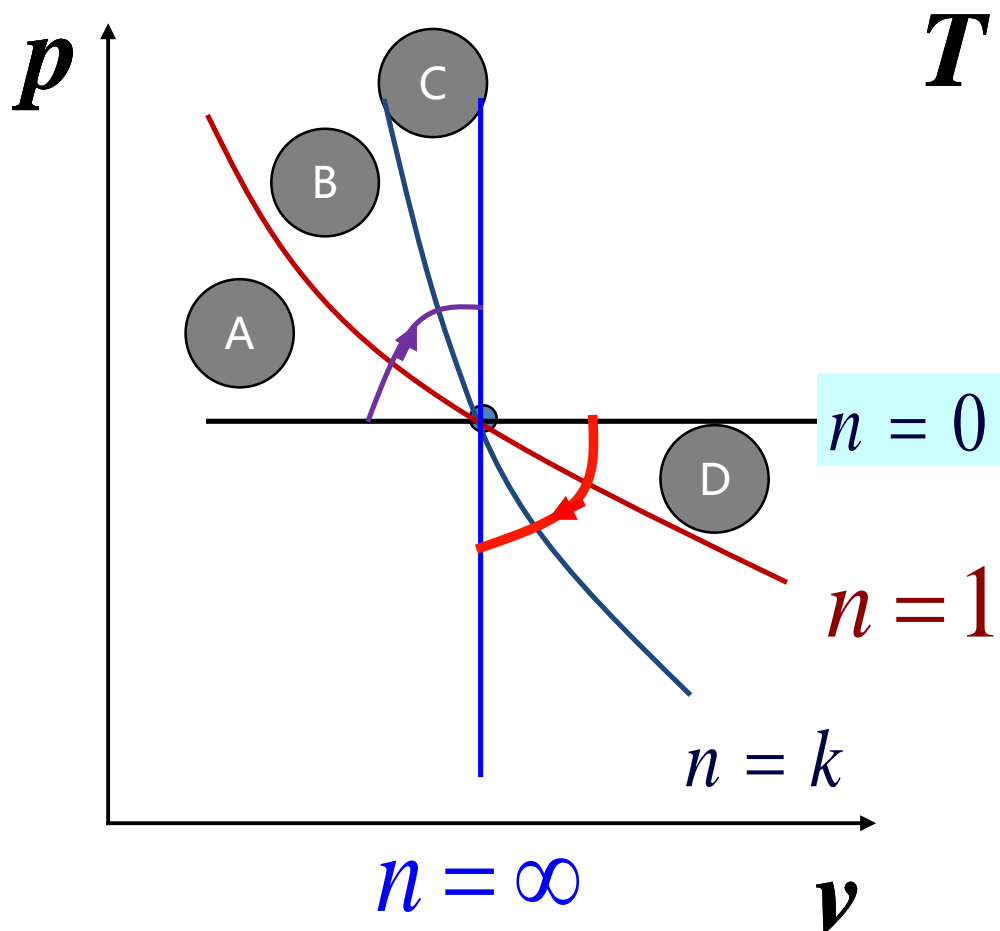
一般采用 2 ~ 4 级压缩

第三章小结

- 理想气体及其状态方程
- 理想气体比热的特点, c_p 、 c_v , 热力学能、焓、熵的计算
- 理想气体经历各种可逆过程的特性, 参数变化, 功、热的计算
- 理想混合气体及其参数的计算
- 过程及其在 p - v 图, T - s 图上的表示
- 压气 (缩) 机的工作过程

第三章 讨论课

习课1：压缩、升温、放热的过程，终态在哪个区域？



提交

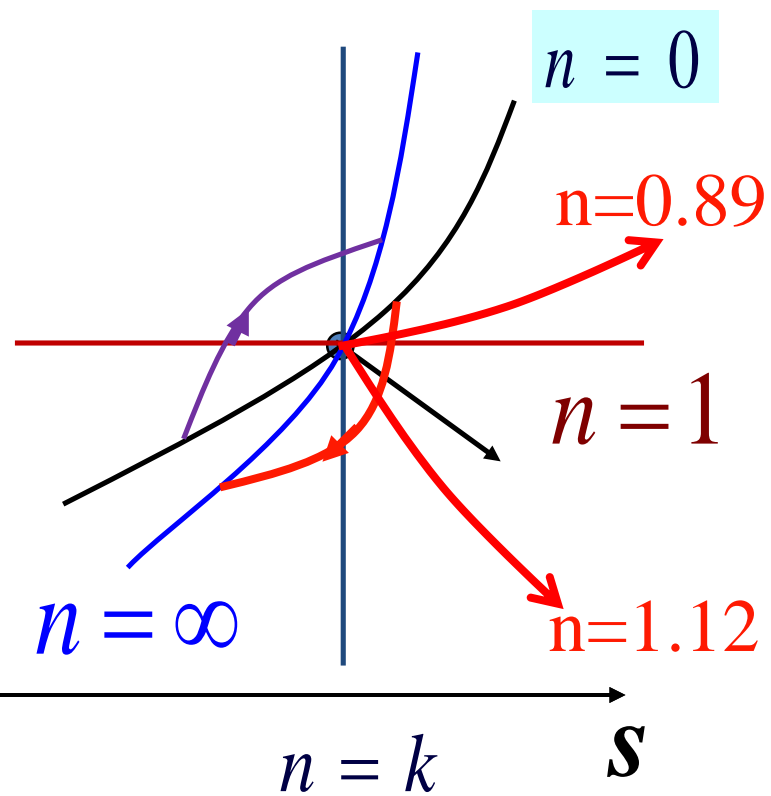
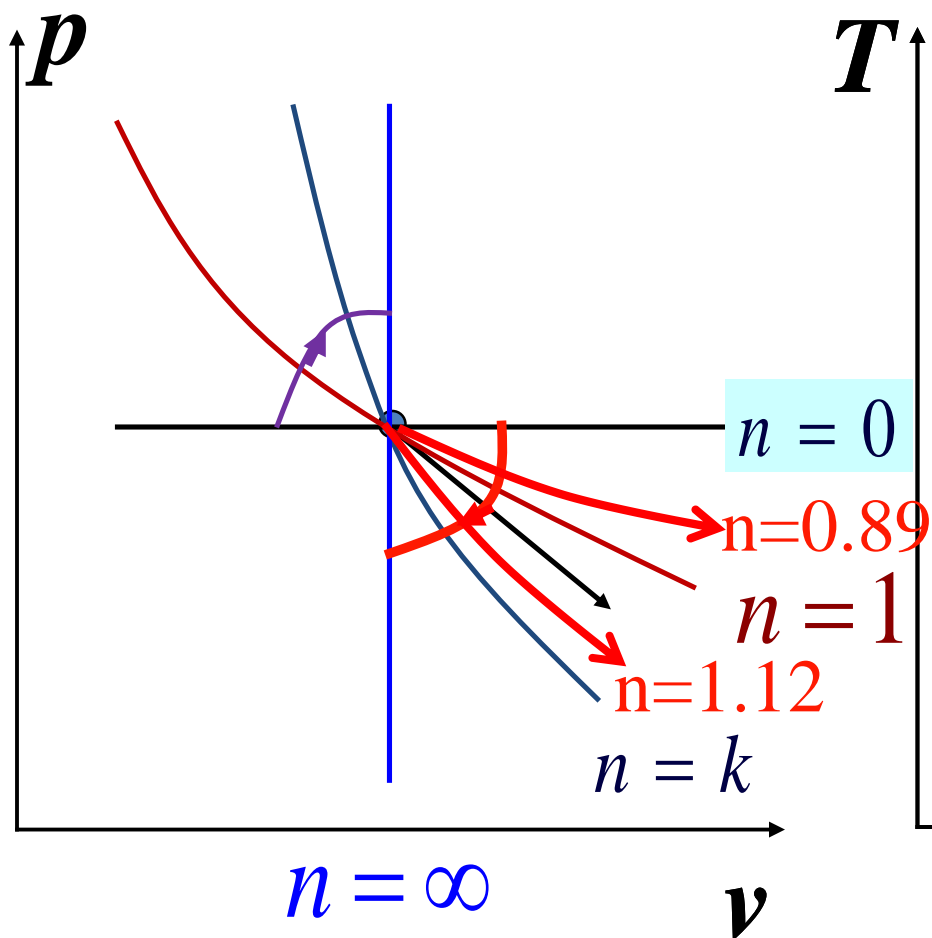
习题2 1kg空气分两种情况进行热力过程：(1) $w=300\text{kJ/kg}$, $q_1=380\text{kJ/kg}$; (2) $w=300\text{ kJ/kg}$, $q_2=210\text{kJ/kg}$ 。求：(1) $\Delta u_1, \Delta u_2$; (2) n_1, n_2 (已知空气 $c_v=0.717\text{kJ/kg.K}$); (3) 将过程画在p-v、T-s图上。

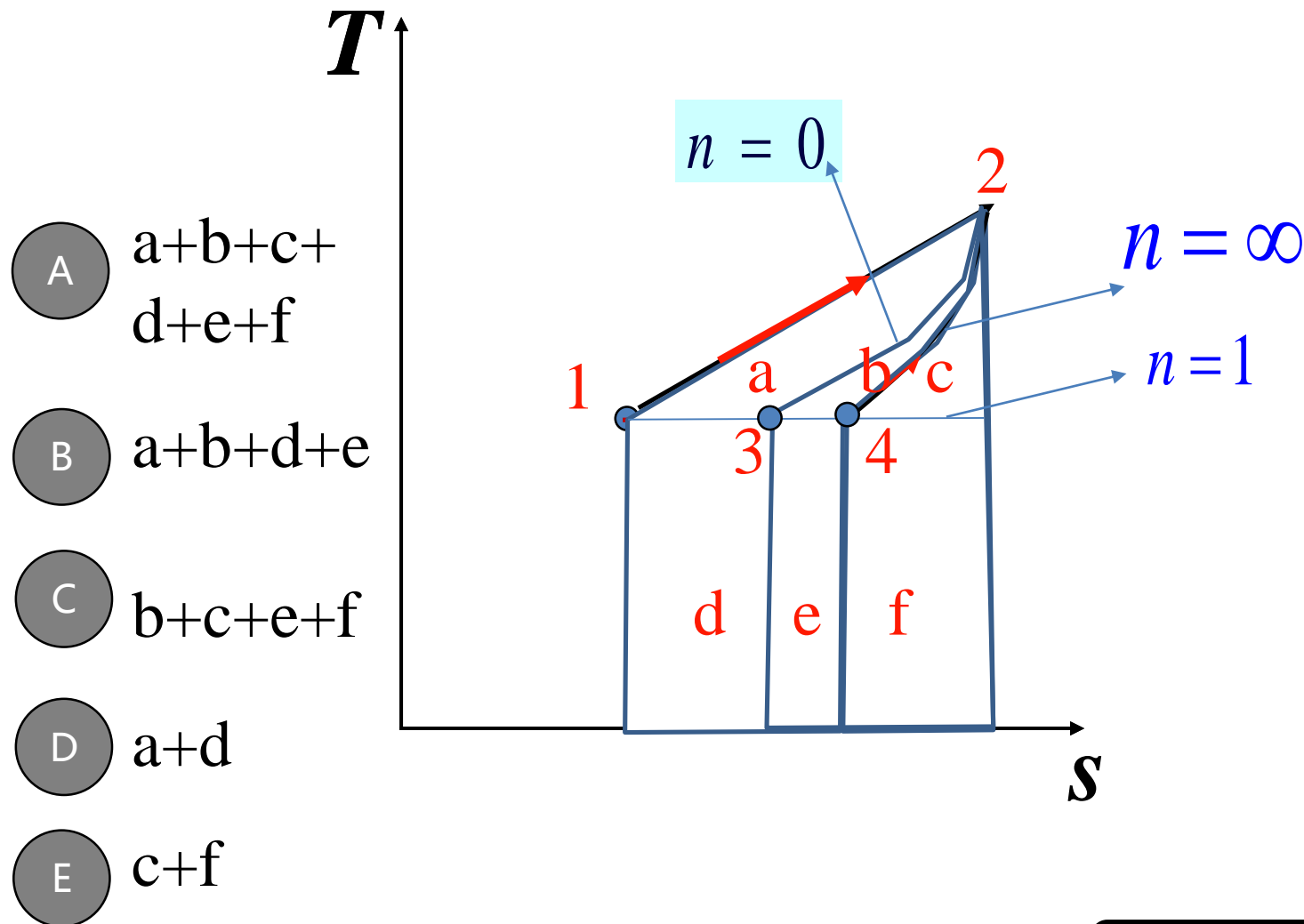
解：

$$(1) \Delta u_1 = q_1 - w = 80\text{kJ/kg} \quad \Delta u_2 = q_2 - w = -90\text{kJ/kg}$$

$$(2) w = \frac{1}{1-n} R_g \Delta T \rightarrow n = 1 - \frac{R_g \Delta T}{w} = 1 - \frac{R_g \Delta u}{w c_v}$$

$$\text{代入数据得： } n_1 = 0.89 \quad n_2 = 1.12$$



习课3：多变过程的 w_t 如何在 T - S 图上表示？

提交

本章需掌握内容

基本概念：

- ① 理想气体及其状态方程
- ② c_p 、 c_v
- ③ 理想混合气体

知识运用：

- ① 理想气体状态方程
- ② 理想气体状态参数计算 (c , u , h , s)
- ③ 理想气体4+1过程计算