



第四章 气体和蒸汽的基本热力过程

4-1 理想气体的可逆多变过程

4-2 定容过程

4-3 定压过程

4-4 定温过程

4-5 绝热过程

4-6 理想气体热力过程综合分析

4-7 水蒸气的基本过程



教学要求：

1. 掌握基本热力过程的特点及过程方程；
2. 掌握理想气体基本热力过程状态参数的计算；
3. 掌握理想气体基本热力过程功量和热量的计算；
4. 掌握蒸汽基本热力过程功量和热量的计算。





西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

理想气体的基本热力过程





一、概述

(一)、实施热力过程的目的

1. 实现预期的能量转换；
2. 获得预期的热力状态。

(二)、研究热力过程的任务

1. 确定工质的状态变化规律；
2. 确定热力过程中能量传递和转换的状况。

(三)、前提条件

1. 工质为理想气体；
2. 可逆过程。

(四)、依据



1. 理想气体状态参数的计算公式

$$\left\{ \begin{array}{l} pv = R_g T \\ c_p - c_V = R_g \\ \Delta u = c_V \Delta T \quad \Delta h = c_p \Delta T \\ \Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = c_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \end{array} \right.$$



2. 热力学第一定律

$$Tds \stackrel{\text{可逆}}{=} cdT = \delta q = du + \delta w \stackrel{\text{可逆}}{=} du + pdv \\ \stackrel{\text{理气}}{=} c_v dT + pdv$$

$$Tds \stackrel{\text{可逆}}{=} cdT = \delta q = dh + \delta w_t \stackrel{\text{可逆}}{=} dh - vdp \\ \stackrel{\text{理气}}{=} c_p dT - vdp$$





(五)、研究步骤

1. 列出过程方程式;
2. 建立基本状态参量的关系式: 过程方程+状态方程
3. 计算 Δu , Δh , Δs 的值: 为 q , w , w_t 的计算打基础。
4. 计算过程中能量的传递和转换量 q , w , w_t : 闭口系功的输出形式对应为 w , 开口系功的输出形式对应为 w_t 。
5. 在 $p-v$, $T-s$ 图上绘出过程曲线: 可清晰地看出各过程状态变化及能量转换状况, 即参数的变化趋势, q , w , w_t 的正负。



计算过程中能量的传递和转换量 q , w , w_t :

计算 q :

$$\left\{ \begin{array}{l} q = \int c dT = \begin{cases} \int c_p dT & \text{定压} \\ \int c_v dT & \text{定容} \end{cases} \\ q \xrightarrow{\text{可逆}} \int T ds \xrightarrow{\text{等温}} T \Delta s \\ q = \Delta u + w = \Delta h + w_t \end{array} \right.$$

计算 w, w_t :

$$\begin{aligned} w &\xrightarrow{\text{可逆}} \int p dv = \begin{cases} p \Delta v & \text{定压} \\ 0 & \text{定容} \end{cases} \\ w_t &\xrightarrow{\text{可逆}} - \int v dp = \begin{cases} -v \Delta p & \text{定容} \\ 0 & \text{定压} \end{cases} \\ w &= q - \Delta u \\ w_t &= q - \Delta h \end{aligned}$$

保持一个状态参数不变的过程称为基本热力过程。

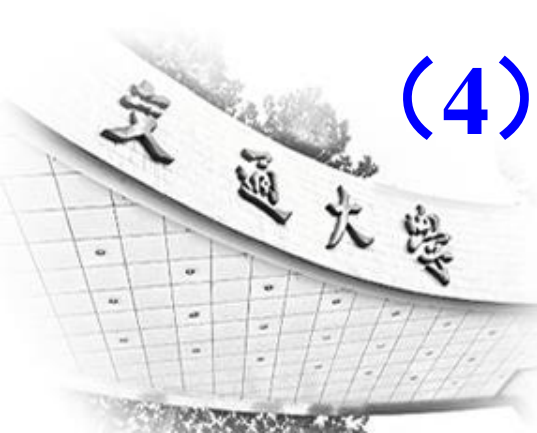
(1) 定容过程

(2) 定压过程

(3) 定温过程

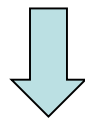
(4) 定熵过程

四个基本热力过程——可逆过程



4-2、定容过程——比体积不变的过程

1、过程方程 $v = \text{定值}$ 或 $dv = 0$ $p v = R_g T$



2、初、终态参数间的关系 $v_1 = v_2$ $\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$

3、初、终态热力学能、比焓、比熵的变化

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

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





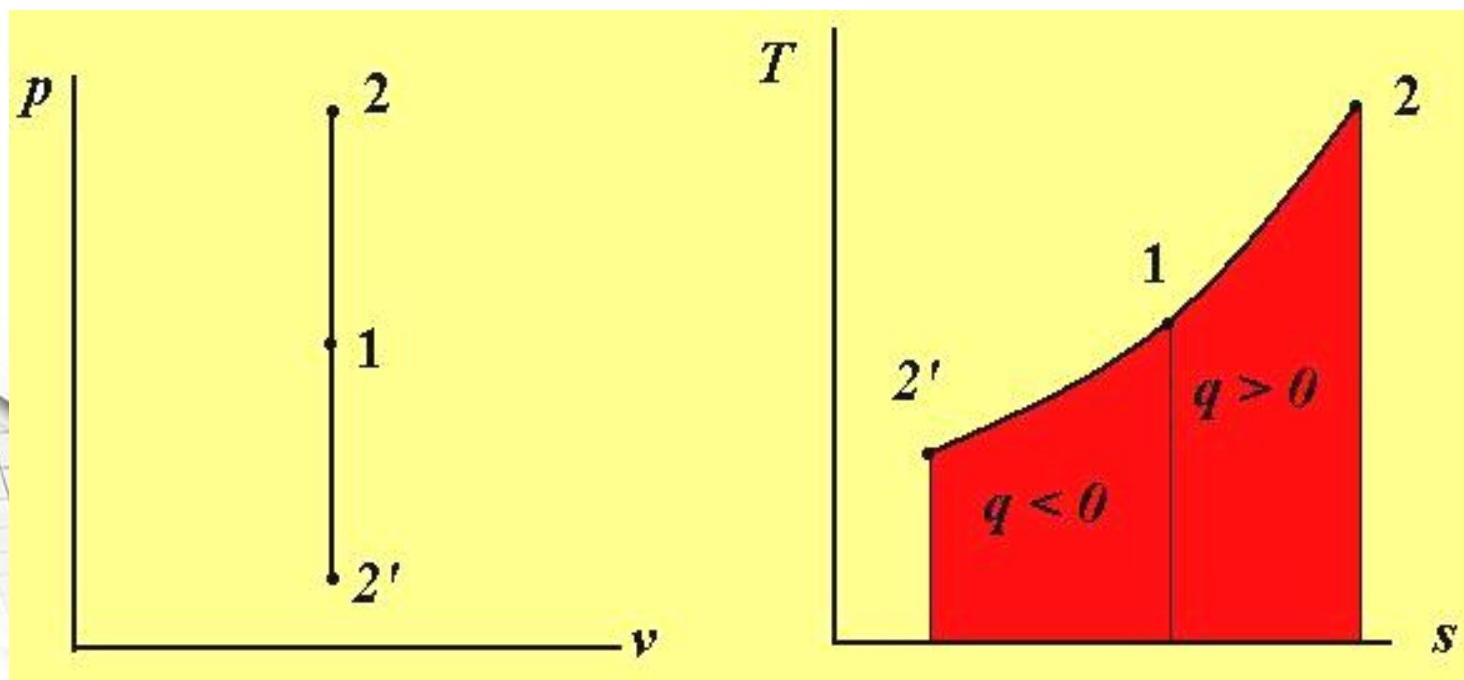
4、膨胀功、技术功和热量

$$w = \int_1^2 p dv = 0$$

$$w_t = -\int_1^2 v dp = -v(p_2 - p_1)$$

$$q_v = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

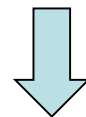
5、在 p - v 、 T - s 图上表示



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

4-3、定压过程——压力保持不变的过程

1. 过程方程 $p = \text{定值}$ 或 $dp = 0$ $p v = R_g T$



2. 初、终态参数间的关系 $p_1 = p_2$ $\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$

3. 初、终态热力学能、比焓、比熵的变化

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p (T_2 - T_1)$$

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





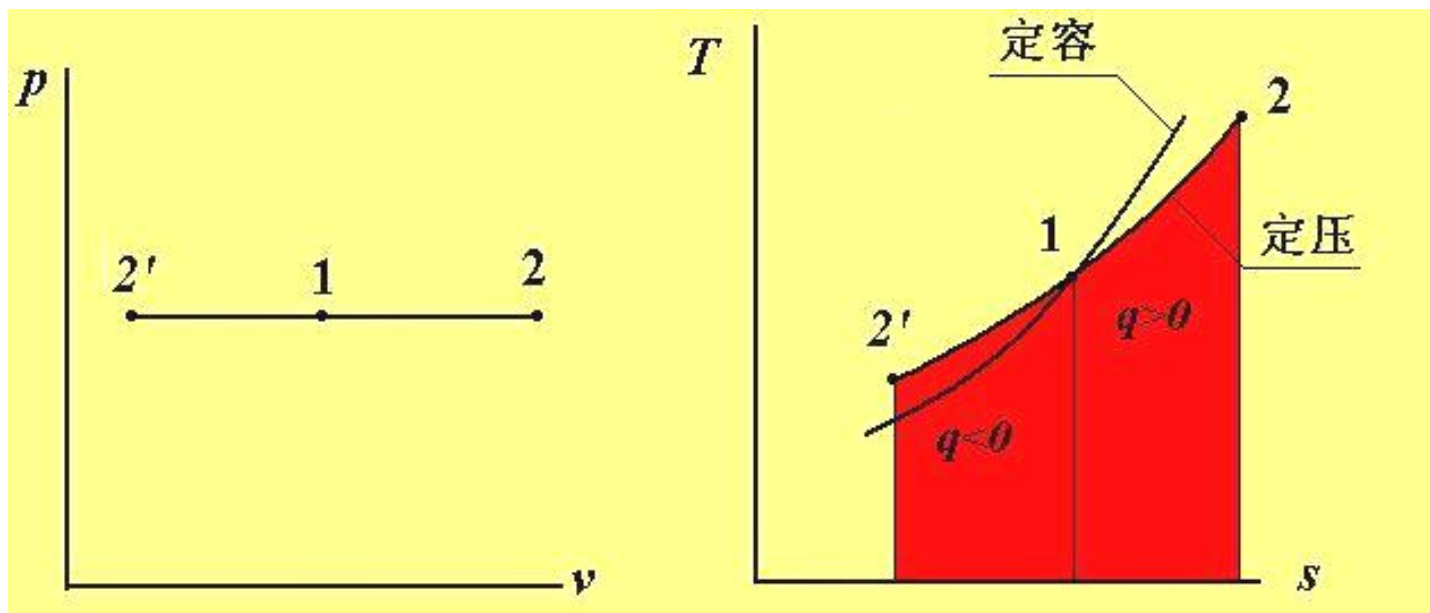
4. 膨胀功、技术功和热量

$$w = \int_1^2 p dv = p(v_2 - v_1)$$

$$w_t = -\int_1^2 v dp = 0$$

$$q_p = \Delta h = c_p(T_2 - T_1)$$

5. 在 p - v 、 T - s 图上表示



$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_p = \frac{T}{c_p}$$
$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_v = \frac{T}{c_v}$$

4-4、定温过程——温度保持不变的过程

1. 过程方程 $T = \text{定值}$ 或 $dT = 0$

$$p v = R_g T \quad \Rightarrow \quad p_1 v_1 = p_2 v_2 \quad p v = \text{常数}$$

2. 初、终态参数间的关系 $T_1 = T_2$ $p_1 v_1 = p_2 v_2$

3. 初、终态热力学能、比焓、比熵的变化

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 0$$

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

$$\Delta s = -R_g \ln \frac{p_2}{p_1} = R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$$





4. 膨胀功、技术功和热量

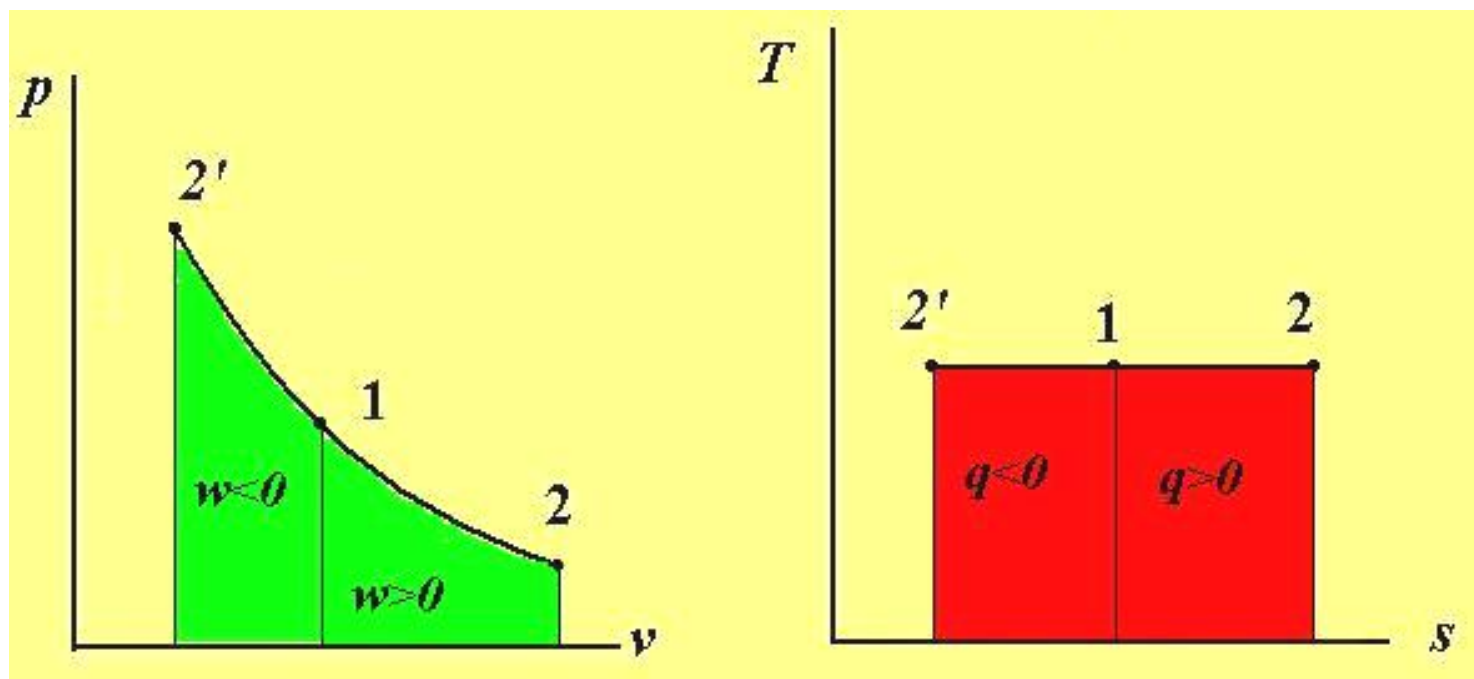
$$w = \int_1^2 p dv = R_g T \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$w_t = -\int_1^2 v dp = -R_g T \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$w = w_t = R_g T \ln \frac{v_2}{v_1} = -R_g T \ln \frac{p_2}{p_1}$$

$$q_T = w = w_t = T(s_2 - s_1)$$

5. 在 p - v 、 T - s 图上表示



4-4、定熵过程——可逆绝热过程（熵保持不变）

1. 过程方程

定熵过程=绝热过程+可逆过程

注意：可逆绝热是定熵过程；不可逆绝热是熵增过程。

$$\delta q = 0, \Rightarrow ds = \left(\frac{\delta q}{T} \right)_{\text{re}} = 0, \quad s = \text{const}$$

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

$$\text{令 } \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\frac{dp}{p} + \gamma \frac{dv}{v} = 0 \quad \ln p + \gamma \ln v = C \quad pv^\gamma = \text{定值}$$



定熵过程方程

$$pv^{\kappa} = \text{定值}$$

理想气体定熵过程的过程指数等于比热比。

2. 初、终态参数间的关系

$$\left. \begin{aligned} p_1 v_1^{\kappa} &= p_2 v_2^{\kappa} \\ \frac{p_1 v_1}{T_1} &= \frac{p_2 v_2}{T_2} \end{aligned} \right\} \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa}, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$



3. 初、终态热学能、比焓、比熵的变化

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

$$\Delta s = 0$$

4. 膨胀功、技术功和热量

$$q = 0$$

$$q = \Delta u + w$$

$$\Rightarrow w = -\Delta u = c_v(T_1 - T_2)$$

$$w = \int_1^2 p dv = \int_1^2 p_1 v_1^\kappa \frac{dv}{v^\kappa} = p_1 v_1^\kappa \int_1^2 \frac{dv}{v^\kappa}$$

$$= \frac{1}{\kappa - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

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

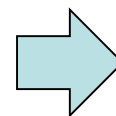
$$= \frac{R_g T_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]$$

$$w_t = -\int_1^2 v dp = \frac{\kappa}{\kappa-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]$$

$$q = \Delta h + w_t$$

$$\Rightarrow w_t = -\Delta h = c_p (T_1 - T_2)$$

$$w = -\Delta u = c_v (T_1 - T_2)$$

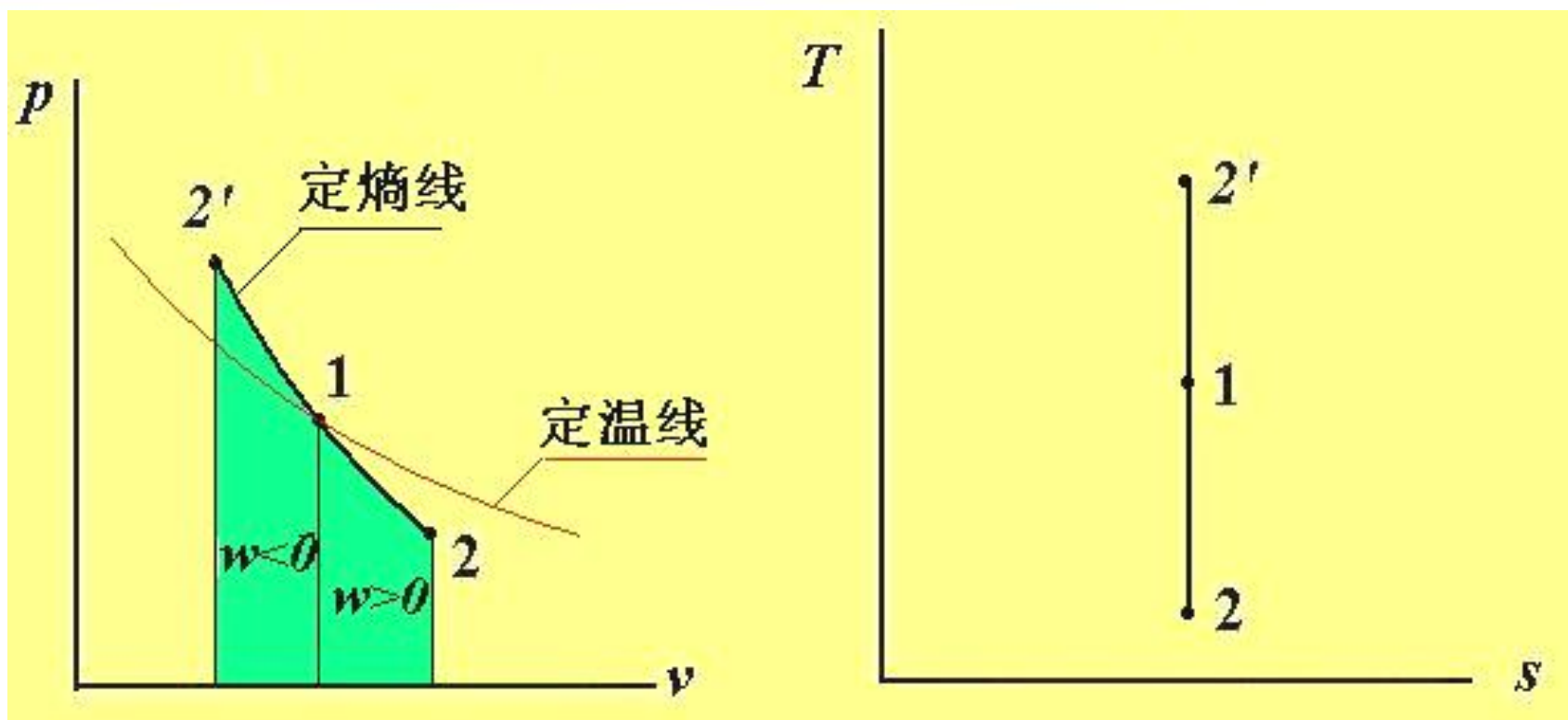


$$w_t = \kappa w$$





5. 在 p - v 、 T - s 图上表示



定熵过程 $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = -\kappa \frac{p}{v}$

定温过程 $\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{p}{v}$

$$\kappa > 1$$

四个基本热力过程



(1) 定容过程 $v = \text{定值}$ 或 $dv = 0$ $\frac{p}{T} = \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

(2) 定压过程 $p = \text{定值}$ 或 $dp = 0$ $\frac{v}{T} = \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$

(3) 定温过程 $T = \text{定值}$ 或 $dT = 0$, $pv = p_1v_1 = p_2v_2$

(4) 定熵过程 $pv^\kappa = \text{定值}$ $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^\kappa$, $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$



4-1、理想气体的多变过程



1. 过程方程

$$pv^n = \text{const} \quad n \text{ 为常数, 称为多变指数}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 0 \rightarrow p = \text{const} \quad , \quad \text{定压过程} \\ n = 1 \rightarrow pv = \text{const} \quad , \quad \text{定温过程} \\ n = \kappa \rightarrow pv^\kappa = \text{const} \quad , \quad \text{定熵过程} \\ n = \infty \rightarrow p^{\frac{1}{n}}v = \text{const} \quad , \quad \text{定容过程} \end{array} \right.$$

2. 状态参数间的关系

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n = \text{const}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}$$





3. 初、终态热学能、比焓、比熵的变化

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1)$$

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

$$\Delta h = h_2 - h_1 = c_p(T_2 - T_1)$$

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

4. 膨胀功、技术功和热量

$$w = \int_1^2 p dv = p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

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

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



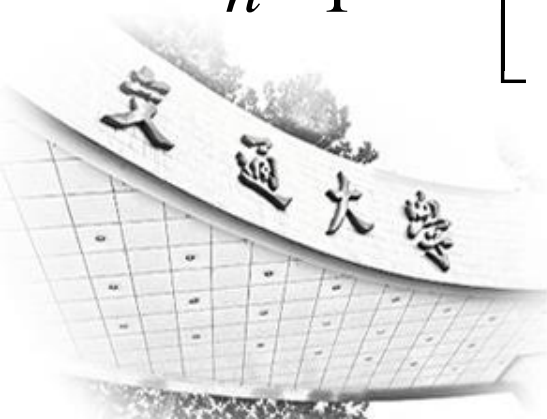
$$w_t = -\int_1^2 v dp = \int_1^2 p dv - \Delta(pv) = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) + (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$= \frac{n}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

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

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

$$w_t = nw$$



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

$$= c_v(T_2 - T_1) + \frac{\kappa - 1}{n - 1} c_v(T_1 - T_2)$$

$$= \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v(T_2 - T_1)$$

$$q = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v(T_2 - T_1) = c_n(T_2 - T_1)$$

$$\text{令 } c_n = \frac{n - \kappa}{n - 1} c_v$$

c_n 称为多变过程的比热容





5. 在 $p-v$ 、 $T-s$ 图上表示

多变过程方程式为 $pv^n = \text{常数}$ ， n 取不同值，可得到不同的过程。

当 $n=0$ 时， $p = \text{常数}$ ，则为定压过程

当 $n=1$ 时， $pv = \text{常数}$ ，则为定温过程

当 $n=\kappa$ 时， $pv^\kappa = \text{常数}$ ，则为定熵过程

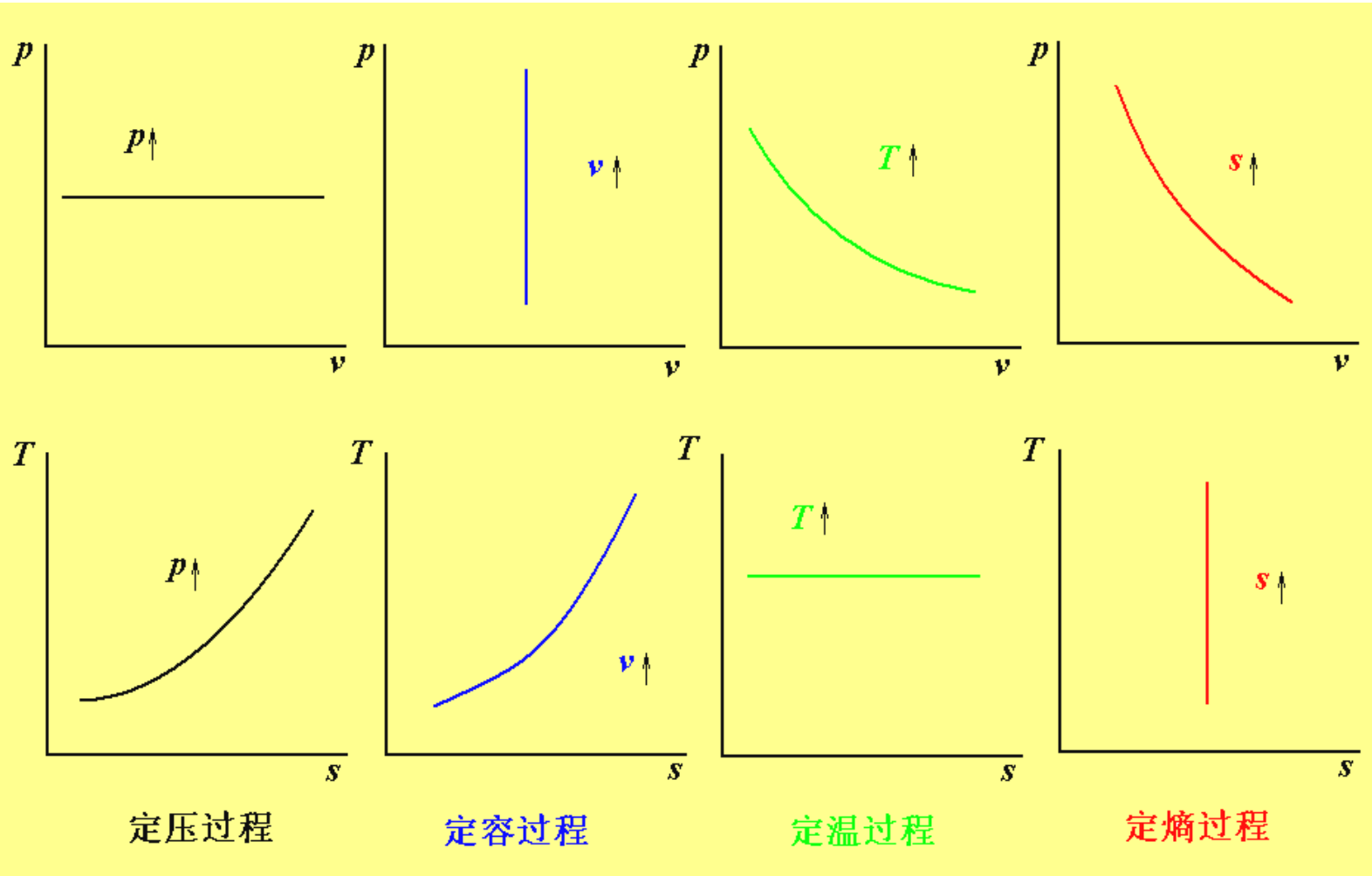
当 $n=\infty$ 时， $v = \text{常数}$ ，则为定容过程

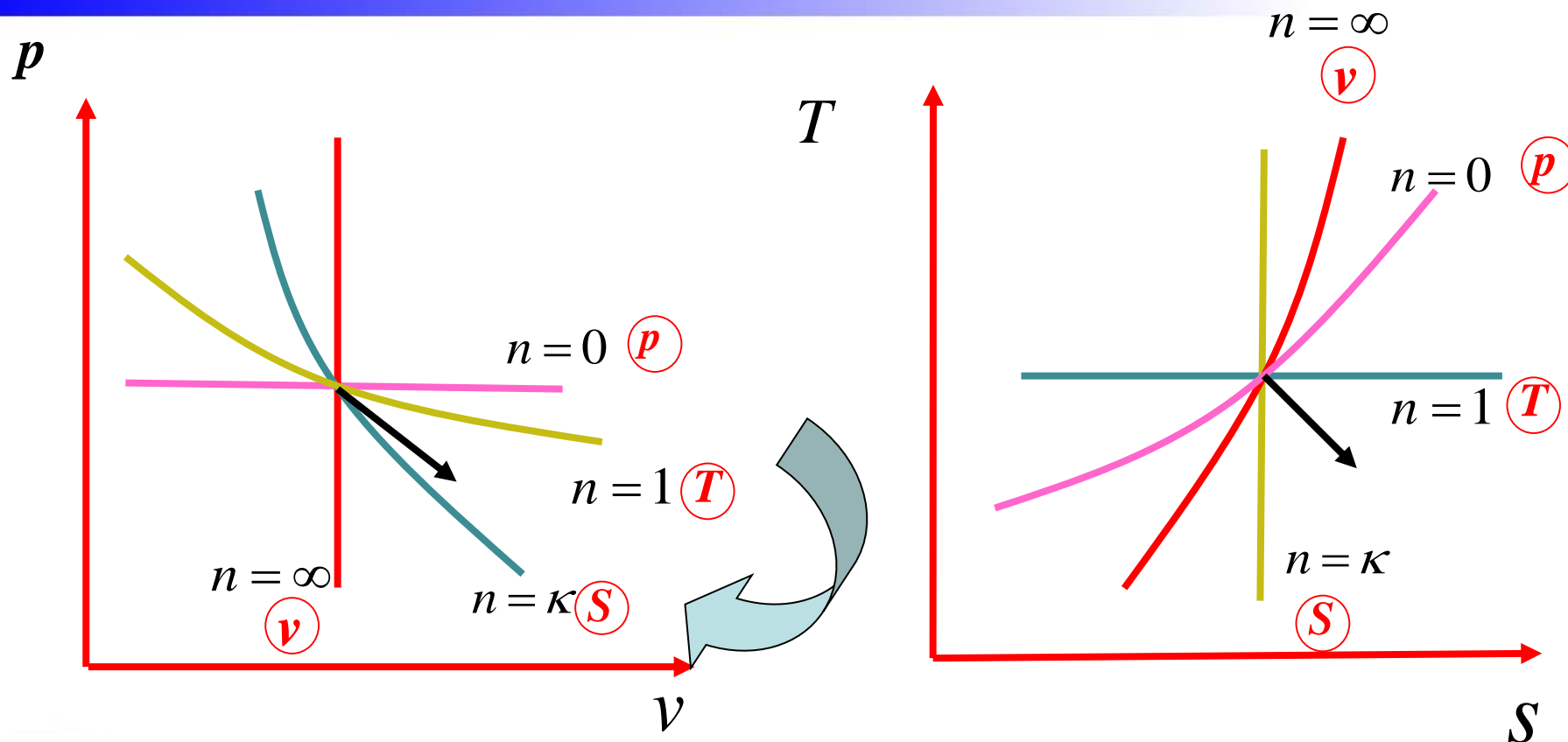
因此，把多变过程表示在 $p-v$ 图上时，要先画出四个基本热力过程，然后再根据 n 值的大小画出相应的多变过程。



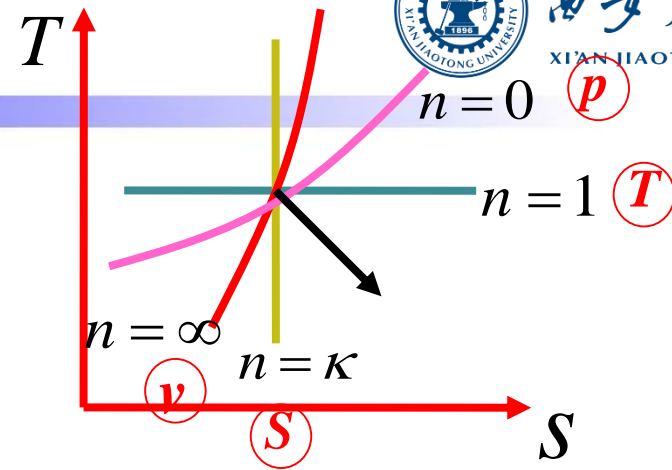
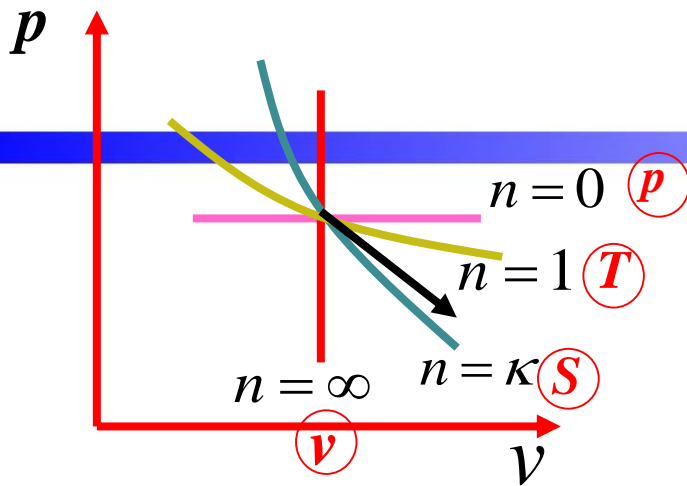
4-6 理想气体热力过程综合分析

一、过程的分布规律、过程特性及能量转换规律





1. 在 p - v 图上分布，沿顺时针方向，从 $n=0$ 水平线到 $n=\infty$ 垂直线，曲线斜率只与 n 有关， n 确定，相对位置就可以确定。



2. 在 p - v 图上定熵线与定温线是斜率为负的曲线，且定熵线比定温线更陡。

在 T - s 图上定压线与定容线是斜率为正的曲线，且定容线比定压线更陡。

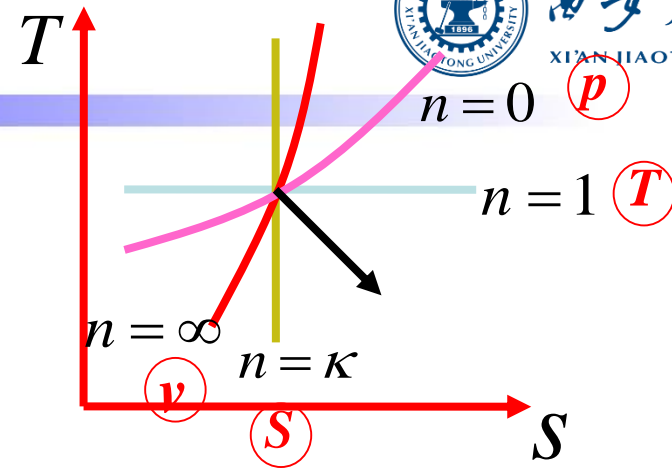
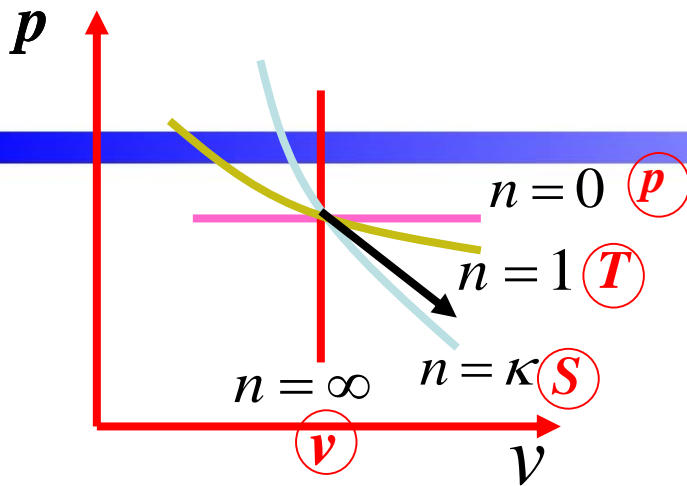
$$d(pv^n) = 0$$

$$\frac{dp}{dv} = -n \frac{p}{v} \quad p, v \text{ 总为正,}$$

$$n \uparrow \Rightarrow \left| \frac{dp}{dv} \right| \uparrow, \text{ 线越陡}$$

$$\delta q = c_n dT = T ds$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_n = \frac{T}{c_n} \left\{ \begin{array}{l} \frac{T}{c_v}, \text{ 定容过程} \\ \frac{T}{c_p}, \text{ 定压过程} \end{array} \right.$$



3. w , w_t , q , Δu (Δh) 变化情况的判断

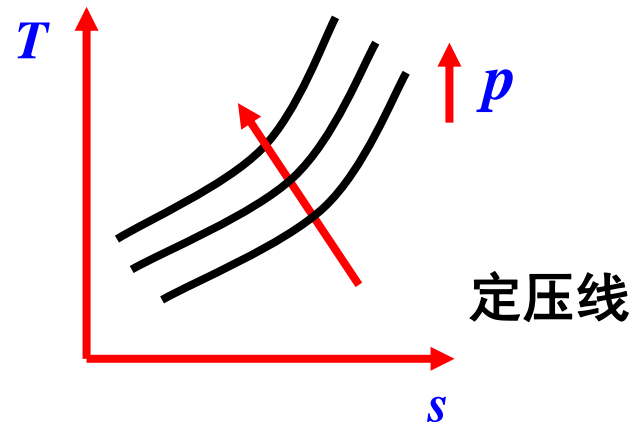
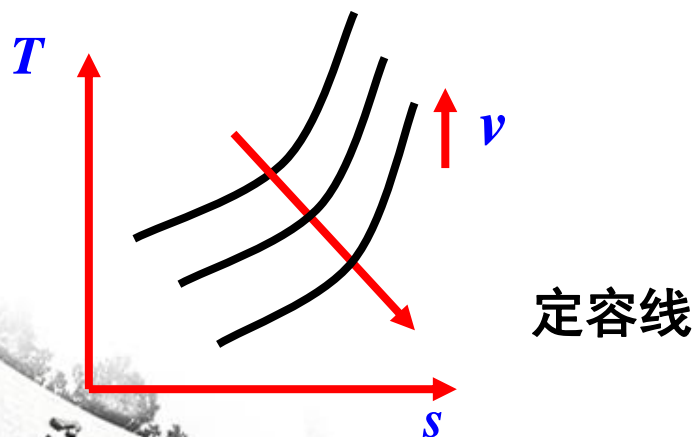
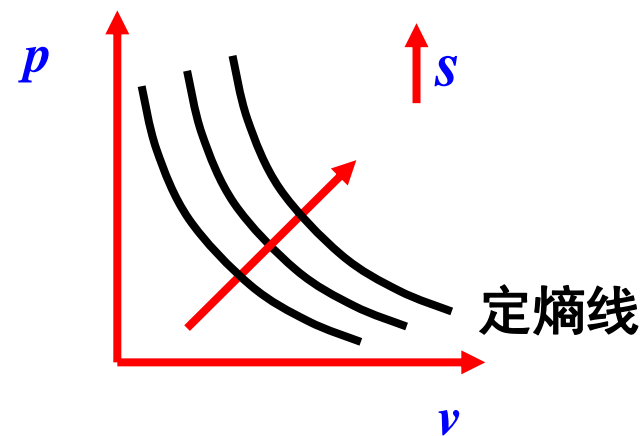
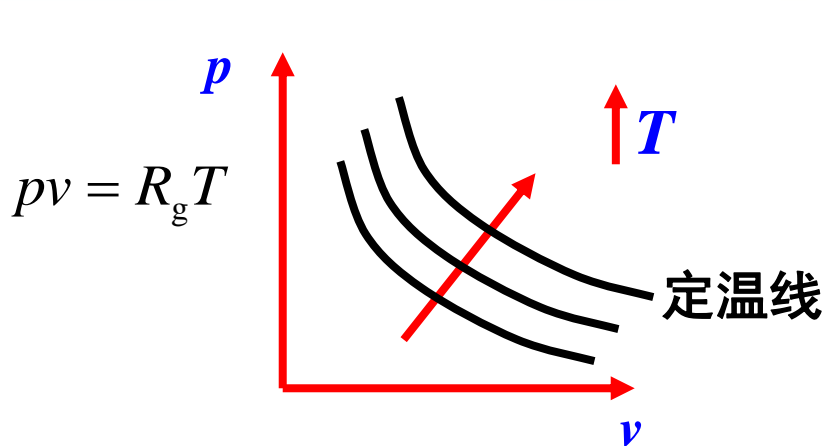
q —— 由等熵线来划分, $ds \gtrless 0$

$\Delta u / \Delta h$ —— 由等温线来划分, $dT \gtrless 0$

w —— 由等容线来划分, $dv \gtrless 0$

w_t —— 由等压线来划分, $dp \gtrless 0$

4. p - v , T - s 图上各种线条的分析



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



二、理想气体可逆过程计算公式表——P125

表4-1 理想气体可逆过程计算公式

	定容过程	定压过程	定温过程	定熵过程	多变过程
多变指数 n	$\pm \infty$	0	1	κ	n
过程方程式	$v = \text{定值}$	$p = \text{定值}$	$pv = \text{定值}$	$pv^\kappa = \text{定值}$	$pv^n = \text{定值}$
初终态 p, v, T 的关系式	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1}$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$p_1 v_1^\kappa = p_2 v_2^\kappa$ $T_1 v_1^{\kappa-1} = T_2 v_2^{\kappa-1}$ $T_1 p_1^{-(\kappa-1)/\kappa} = T_2 p_2^{-(\kappa-1)/\kappa}$	$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ $T_1 v_1^{n-1} = T_2 v_2^{n-1}$ $T_1 p_1^{-(n-1)/n} = T_2 p_2^{-(n-1)/n}$
热力学能变化 Δu	$c_v \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_v = c_v(t) \right.$ $c_v (T_2 - T_1), c_v = \text{定值}$	$c_v \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_v = c_v(t) \right.$ $c_v (T_2 - T_1), c_v = \text{定值}$	0	$c_v \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_v = c_v(t) \right.$ $c_v (T_2 - T_1), c_v = \text{定值}$	$c_v \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_v = c_v(t) \right.$ $c_v (T_2 - T_1), c_v = \text{定值}$
焓变化 Δh	$c_p \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_p = c_p(t) \right.$ $c_p (T_2 - T_1), c_p = \text{定值}$	$c_p \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_p = c_p(t) \right.$ $c_p (T_2 - T_1), c_p = \text{定值}$	0	$c_p \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_p = c_p(t) \right.$ $c_p (T_2 - T_1), c_p = \text{定值}$	$c_p \left \frac{T_2}{T_1} (T_2 - T_1), c_p = c_p(t) \right.$ $c_p (T_2 - T_1), c_p = \text{定值}$
熵变化 Δs	$c_p = c_p(t)$ $c_v = c_v(t)$ $s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$ $c_v \left \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \right.$ $c_v = \text{定值}$ $c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$	$c_p = c_p(t)$ $s_2^0 - s_1^0$ $c_p \left \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} \right.$ $c_p = \text{定值}$ $c_p \ln \frac{T_2}{T_1}; c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$	$\frac{q}{T}$ $R_g \ln \frac{p_1}{p_2}$ $R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$	0	$c_p = c_p(t)$ $s_2^0 - s_1^0 - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$ $c_p \left \frac{T_2}{T_1} \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1} \right.$ $c_p = \text{定值}, c_v = \text{定值}$ $c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$ $c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$ $c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$ $c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$

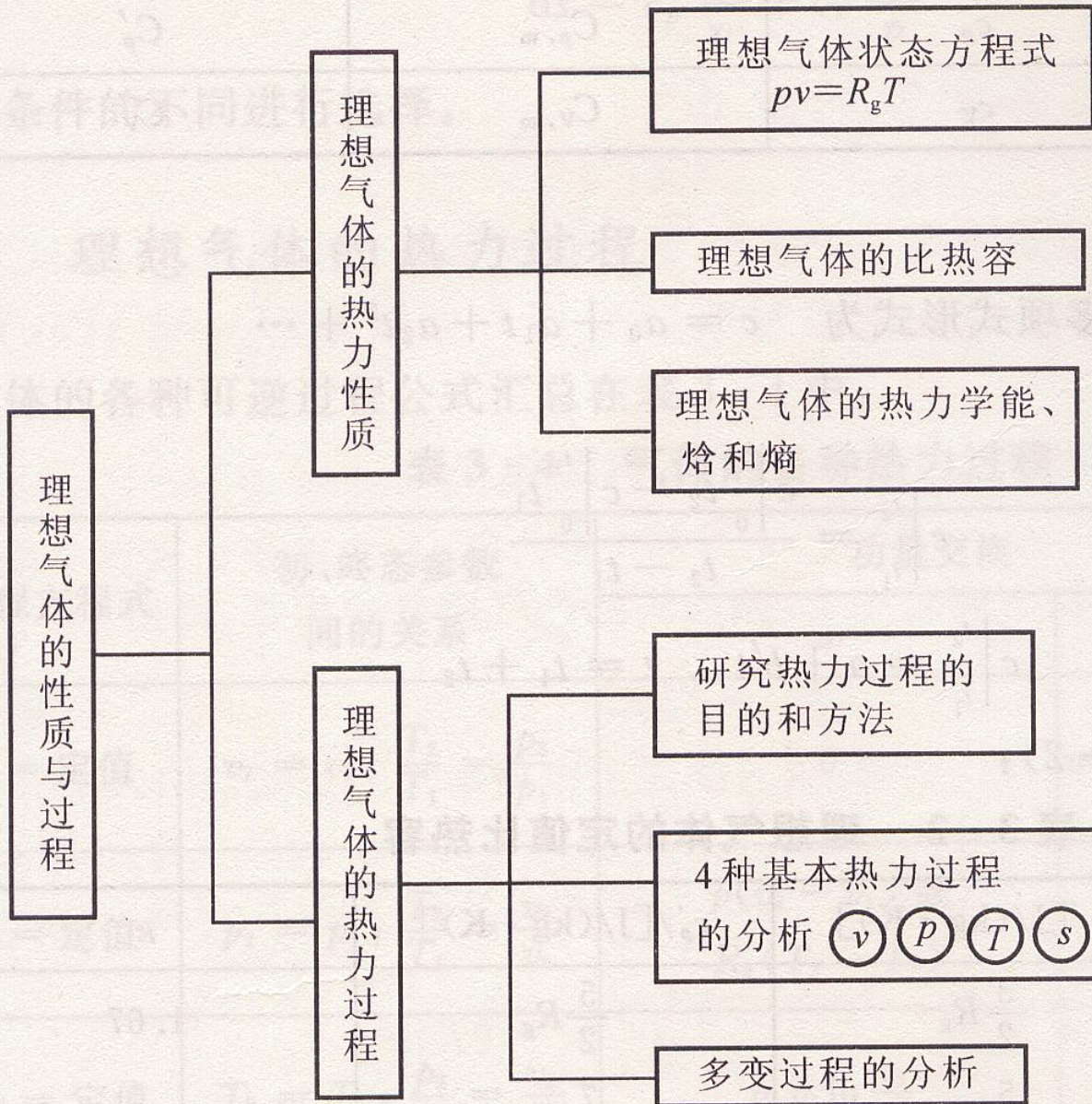


	定容过程	定压过程	定温过程	定熵过程	多变过程
过程功 $w = \int_1^2 p dv$	0	$p(v_2 - v_1)$ $R_g(T_2 - T_1)$	$R_g T \ln \frac{v_2}{v_1}$ $p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$ $p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$	$-\Delta u$ $\frac{1}{\kappa-1} R_g (T_2 - T_1)$ $\frac{1}{\kappa-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $c = \text{定值时:}$ $\frac{1}{\kappa-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]$	$\frac{1}{n-1} R_g (T_2 - T_1)$ $\frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $\frac{1}{n-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$
技术功 $w_t = \int_1^2 v dp$	$v(p_1 - p_2)$	0	$w_t = w = q$	$w_t = \kappa w = -\Delta h$ $\frac{\kappa}{\kappa-1} R_g (T_2 - T_1)$ $\frac{\kappa}{\kappa-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $c = \text{定值时:}$ $\frac{\kappa}{\kappa-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right]$	$\frac{n}{n-1} R_g (T_2 - T_1)$ $\frac{n}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $\frac{n}{n-1} R_g T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$ $w_t = n w$
过程热量 q	Δu	Δh	$R_g T \ln \frac{v_2}{v_1}$ $p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$ $p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$ $T(s_2 - s_1)$	0	$\Delta u + w$ $\frac{n-\kappa}{n-1} c_v (T_2 - T_1)$
过程比热容	c_v	c_p	∞	0	$\frac{n-\kappa}{n-1} c_v$

理想气体小结



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



理想气体的基本热力过程及多变过程

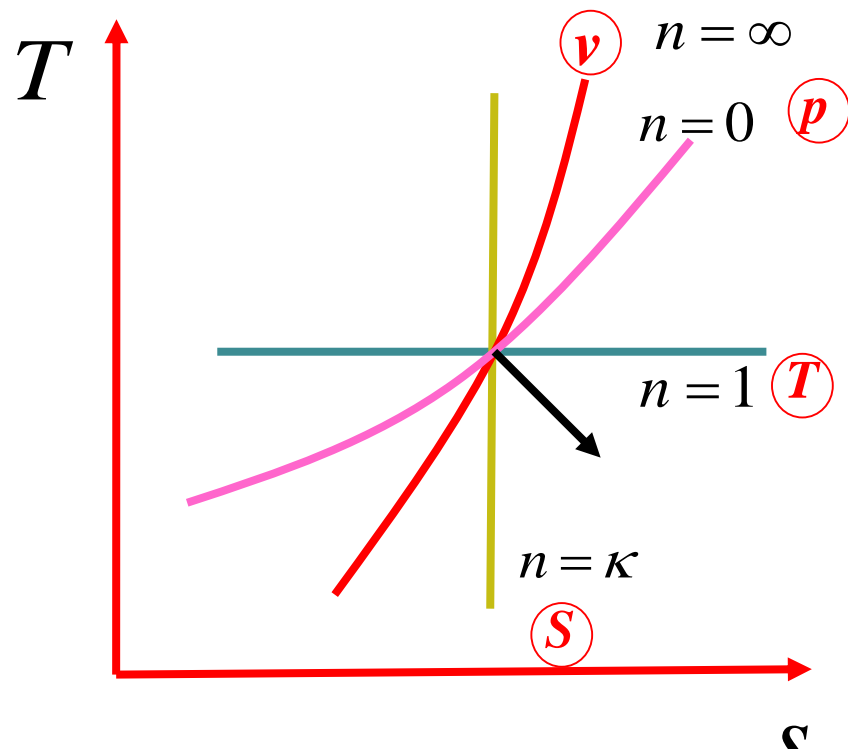
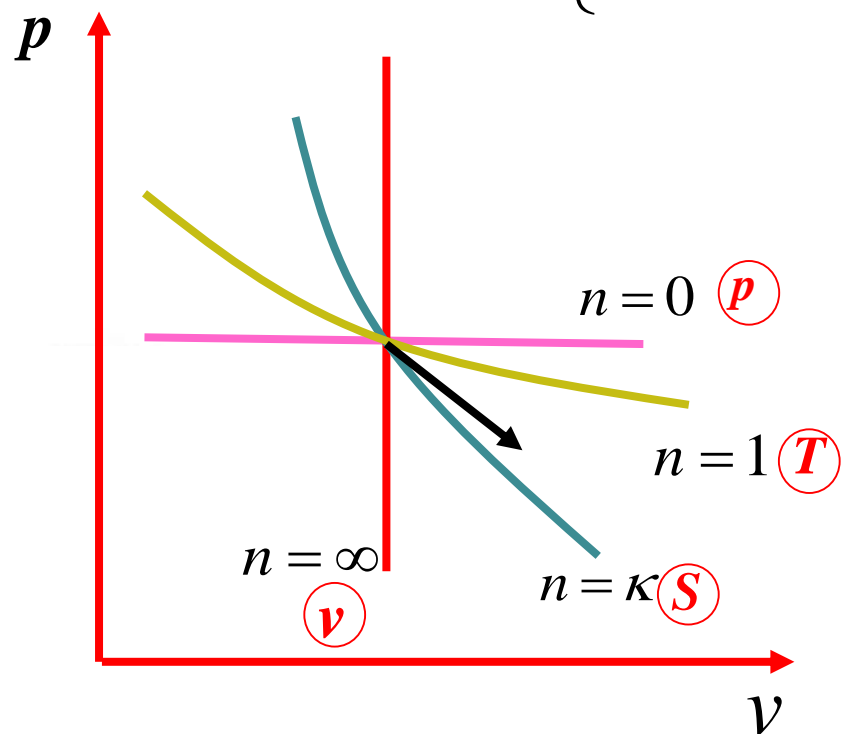


西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

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

n 为常数，称为多变指数

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 0 \rightarrow p = \text{const} \quad , \quad \text{定压过程} \\ n = 1 \rightarrow pv = \text{const} \quad , \quad \text{定温过程} \\ n = \kappa \rightarrow pv^\kappa = \text{const} \quad , \quad \text{定熵过程} \\ n = \infty \rightarrow p^{\frac{1}{n}}v = \text{const} \quad , \quad \text{定容过程} \end{array} \right.$$





1. **基本状态参数** (p, T, v) : 过程方程+理想气体状态方程
2. **热力学能、焓、熵**: 理想气体计算公式

$$\Delta u = c_V \Delta T \quad \Delta h = c_p \Delta T$$

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

3. **热量、功量** (体积变化功、技术功) :

$$q = \int c dT \quad q = \Delta u + w = \Delta h + w_t \quad q \stackrel{\text{可逆}}{=} \int T ds$$

比热容定义式

第一定律能量方程式

可逆过程热量计算公式

任意过程 (可逆或不可逆)

可逆过程



可逆过程功量的计算式

$$\left. \begin{aligned} w & \overset{\text{可逆}}{=} \int p dv \\ w_t & \overset{\text{可逆}}{=} - \int v dp \end{aligned} \right\} + \text{过程方程} \rightarrow \text{功量的计算公式}$$

热力学第一定律

$$w = q - \Delta u$$

更简便

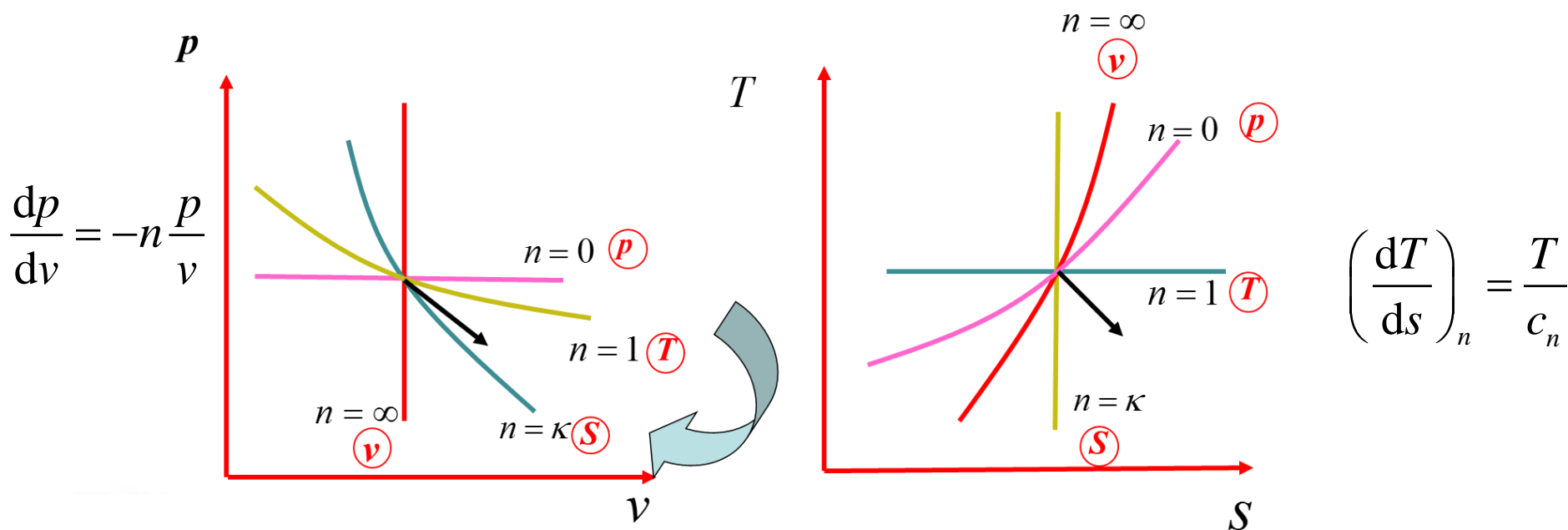
$$w_t = q - \Delta h$$



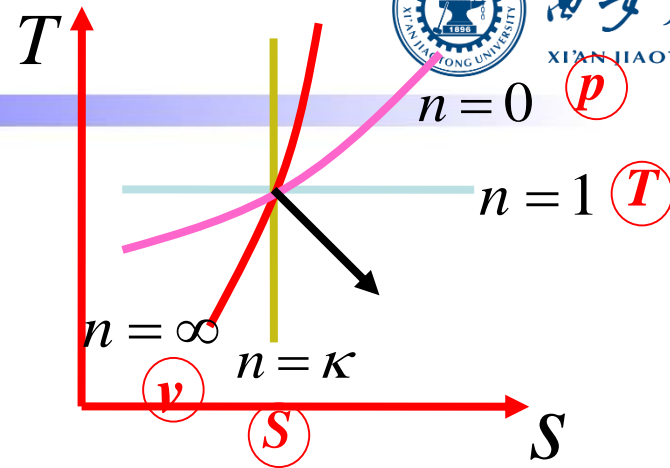
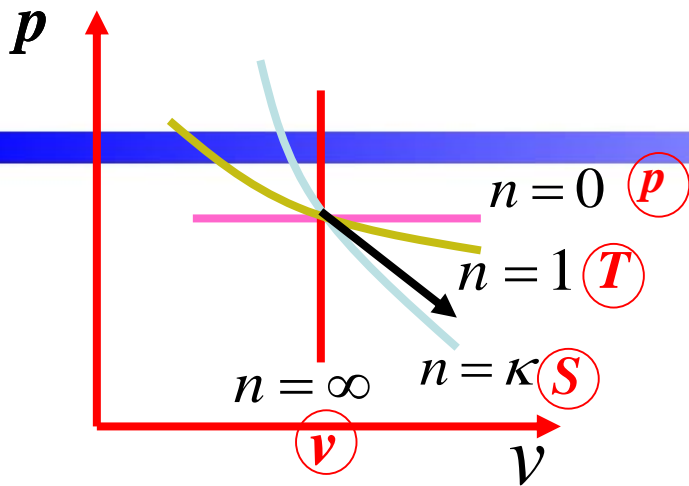
4. 热力过程在坐标图上的表示



- 1) 在 p - v 图上分布，沿顺时针方向，从 $n=0$ 水平线到 $n=\infty$ 垂直线，曲线斜率只与 n 有关， n 确定，相对位置就可以确定。



- 2) 在 p - v 图上定熵线与定温线是斜率为负的曲线，且定熵线比定温线更陡；在 T - s 图上定压线与定容线是斜率为正的曲线，且定容线比定压线更陡。



3) w , w_t , q , Δu (Δh) 变化情况的判断

q —— 由等熵线来划分, $ds \gtrless 0$

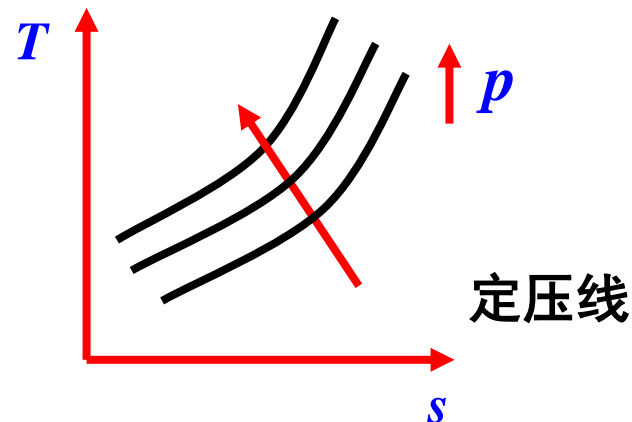
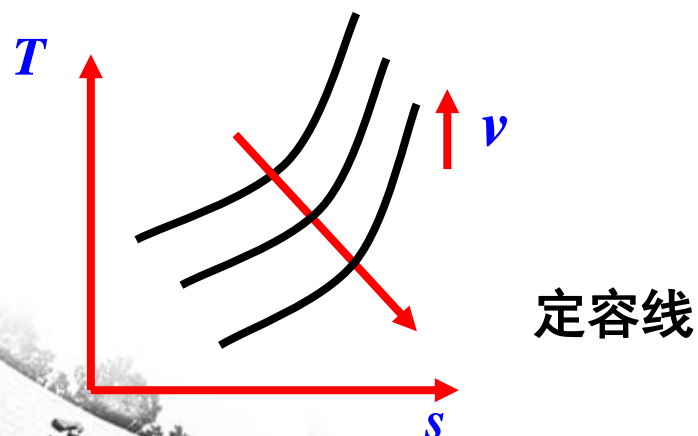
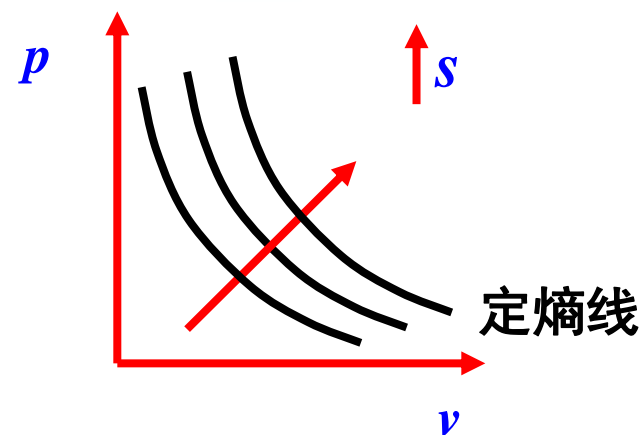
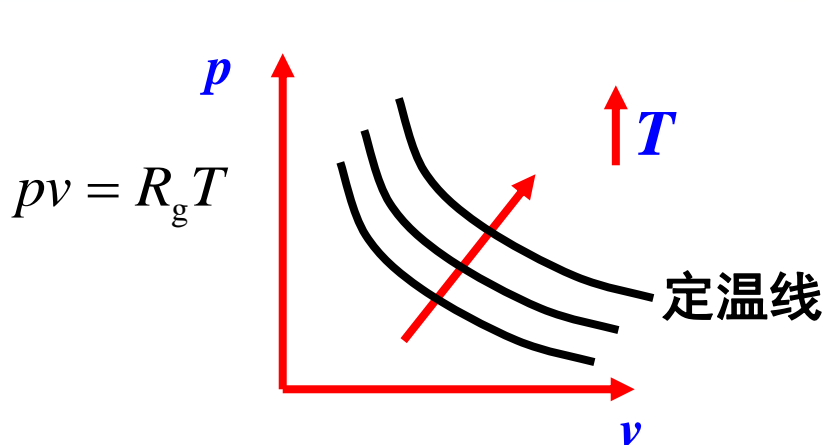
$\Delta u / \Delta h$ —— 由等温线来划分, $dT \gtrless 0$

w —— 由等容线来划分, $dv \gtrless 0$

w_t —— 由等压线来划分, $dp \gtrless 0$



4) p - v , T - s 图上各种线条的分析



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

例1: 如图, 某种理想气体有两任意过程 $a-b$ 和 $a-c$, 已知 b, c 在同一可逆绝热线上, 试问: Δu_{ab} 和 Δu_{ac} 哪个大?

解: (方法一) 从热力学能变化量的计算公式出发 (T_b 和 T_c)

$$\Delta u = c_v \Delta T$$

$$\Delta u_{ab} = c_v \Delta T_{ab}$$

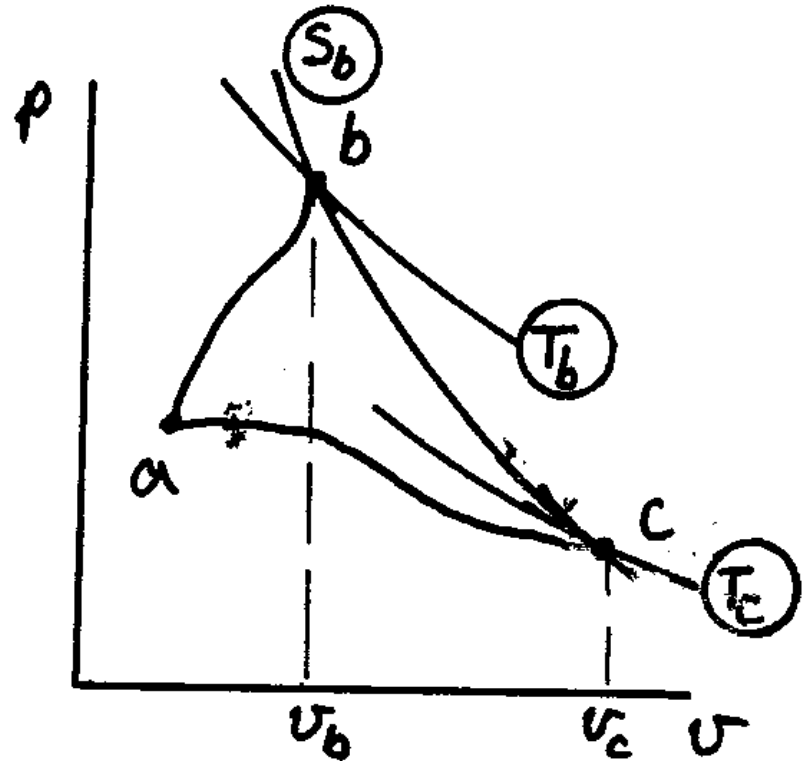
$$\Delta u_{ac} = c_v \Delta T_{ac}$$

$$\Delta T_{ab} \text{ --- ? --- } \Delta T_{ac}$$

过 b, c 分别作等温线, 可得

$$T_b > T_c$$

$$\Delta u_{ab} > \Delta u_{ac}$$



例1: 如图, 某种理想气体有两任意过程 $a-b$ 和 $a-c$, 已知 b, c 在同一可逆绝热线上, 试问: Δu_{ab} 和 Δu_{ac} 哪个大?

(方法二) 从能量方程出发 (u_b 和 u_c 的关系)

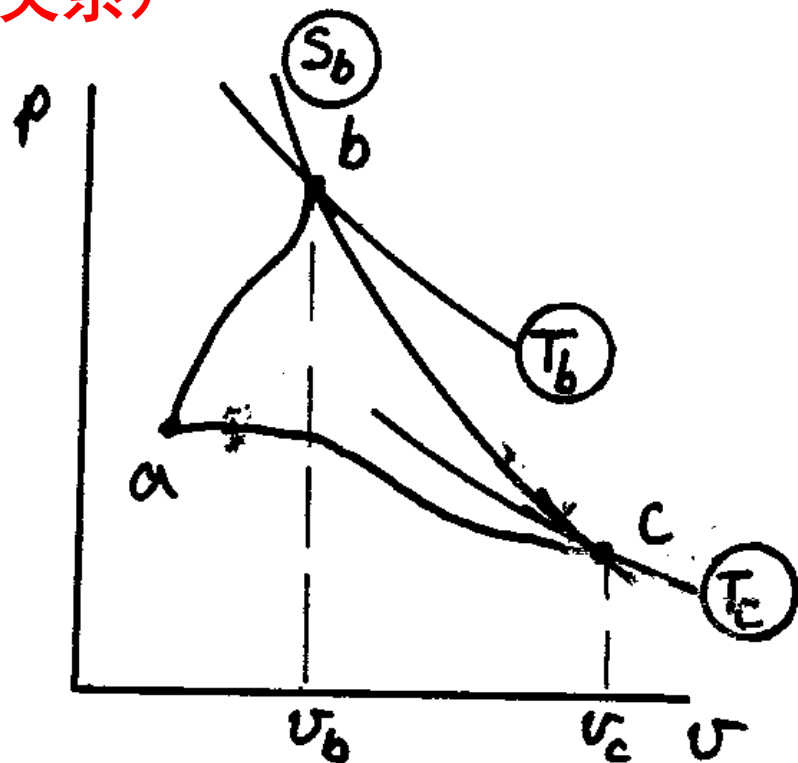
$$q = \Delta u + w$$

过 b 和 c 做定熵线, 考虑 bc 过程:

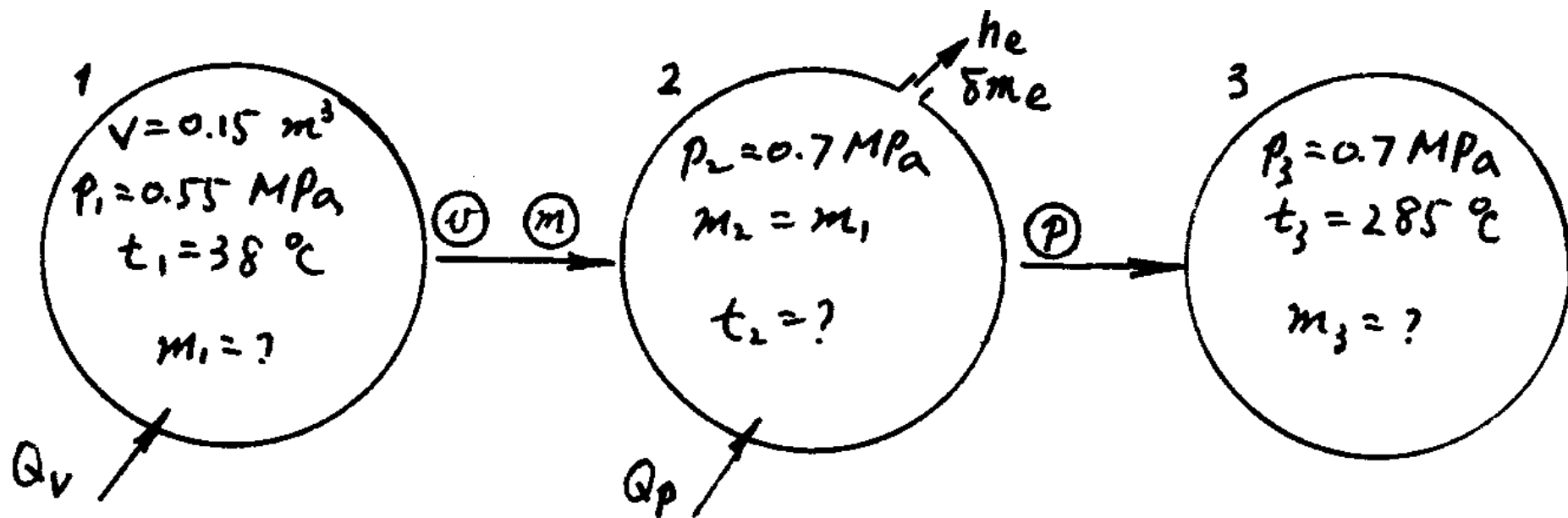
$$q = \Delta u + w = u_c - u_b + w$$

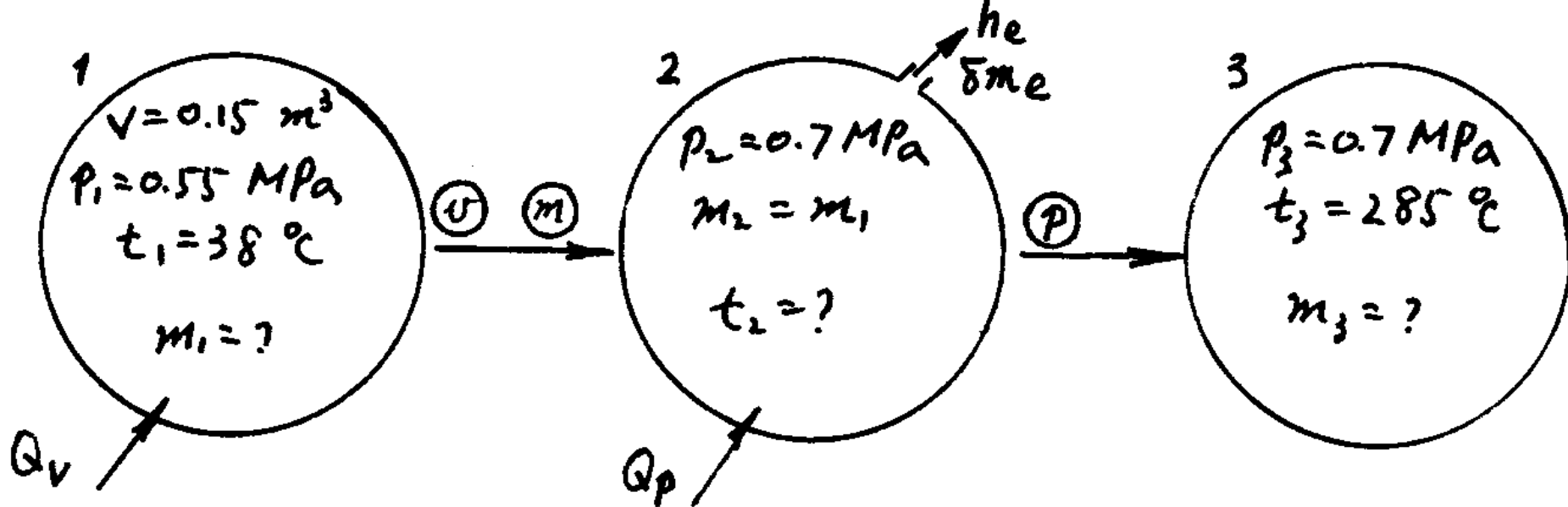
$$\because q = 0 \quad v_c > v_b \quad \therefore w > 0$$

$$\therefore u_c - u_b < 0 \quad \text{即} \Delta u_{ab} > \Delta u_{ac}$$



例2： 一容积为 0.15m^3 的储气罐内有氧气，初态压力 $p_1=0.55\text{MPa}$ ，温度 $t_1=38$ ，罐上装有压力控制阀，压力超过 0.7MPa 时，阀门打开，维持罐内压力为 0.7MPa 。对罐内氧气加热，问：当罐中氧气温度为 285°C 时，对罐内共加入多少热量？ $R_g=260\text{ J}/(\text{kg K})$ ； $c_v=657\text{ J}/(\text{kg K})$ ； $c_p=917\text{ J}/(\text{kg K})$





解：氧气

$$m_1 = \frac{p_1 V}{R_g T_1} = \frac{0.55 \times 10^6 \times 0.15}{260 \times (273 + 38)} = 1.020 \text{ kg}$$

$$m_3 = \frac{p_3 V}{R_g T_3} = \frac{0.7 \times 10^6 \times 0.15}{260 \times (273 + 285)} = 0.274 \text{ kg}$$

Q_V : 因1到2为定容过程，由过程方程可得：

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{0.7}{0.55} \times 311 = 395.82 \text{ K}$$



$$\begin{aligned} Q_V &= m_1 c_V (T_2 - T_1) \\ &= 1.02 \times 0.657 \times (395.85 - 311) = 56.84 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Q_p : 2到3过程中气体压力不变, 但质量改变

$$\therefore \delta Q_p = m c_p dT$$

$$Q_p = \int_{T_2}^{T_3} m c_p dT = \int_{T_2}^{T_3} \frac{p_3 V}{R_g T} c_p dT = \frac{c_p p_3 V}{R_g} \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$\therefore Q_p = \frac{0.917 \times 0.7 \times 10^6 \times 0.15}{0.26} \ln \frac{285 + 273}{395.82} = 127.17 \text{ kJ}$$

$$\therefore Q = Q_V + Q_p = 56.84 + 127.17 = 184.01 \text{ kJ}$$

例3：初压力为0.1MPa，初温为27℃的1kg氮气，在 $n=1.25$ 的压缩过程中被压缩至原来体积的1/5，若取比热容为定值，试求压缩后的压力、温度、压缩过程所耗压缩功及与外界交换的热量。

若从相同的初态出发分别经定温和定熵过程压缩至相同体积，试进行相同的计算，并将此三过程画在同一 p - v 图和 T - s 图上。

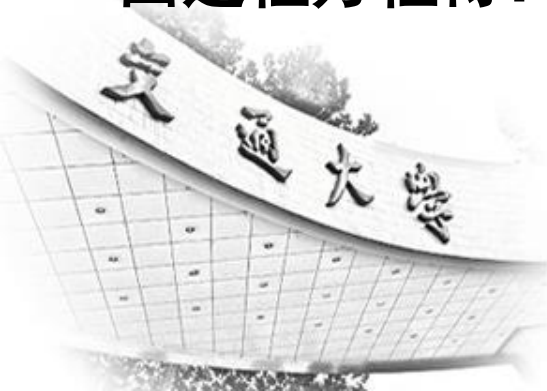
解（1）多变过程

由已知得： $R_g=0.297 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ， $c_v=0.742 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ； $v_1/v_2=5$

由过程方程得：

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n = 0.1 \times 5^{1.25} \text{ MPa} = 0.748 \text{ MPa}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = (27 + 273) \times 5^{0.25} \text{ K} = 448.6 \text{ K}$$





单位质量工质耗功：

$$w = \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{0.297}{1.25-1} (300 - 448.6) \text{ kJ/kg} = -176.5 \text{ kJ/kg}$$

单位质量气体与外界交换的热量：

$$\begin{aligned} q &= \Delta u + w = c_v \Delta T + w \\ &= 0.742 \times (448.6 - 300) \text{ kJ/kg} - 176.5 \text{ kJ/kg} \\ &= -66.24 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$





解（2）定温过程

由已知得： $R_g=0.297 \text{ kJ}/(\text{kgK})$ ， $c_v=0.742\text{kJ}/(\text{kgK})$ ； $v_1/v_2=5$

由过程方程得：
$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = 0.1 \times 5 \text{ MPa} = 0.5 \text{ MPa}$$

$$T_2 = T_1 = (27 + 273) = 300 \text{ K}$$

耗功：

$$w = R_g T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 0.297 \times 300 \times \ln \frac{1}{5} \text{ kJ/kg} = -143.4 \text{ kJ/kg}$$

与外界交换的热量：

$$q = w = -143.4 \text{ kJ/kg}$$





解（3）定熵过程

由已知得： $R_g=0.297 \text{ kJ}/(\text{kgK})$, $c_v=0.742\text{kJ}/(\text{kgK})$ ； $v_1/v_2=5$

由过程方程得：
$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa} = 0.1 \times 5^{1.4} \text{ MPa} = 0.952 \text{ MPa}$$

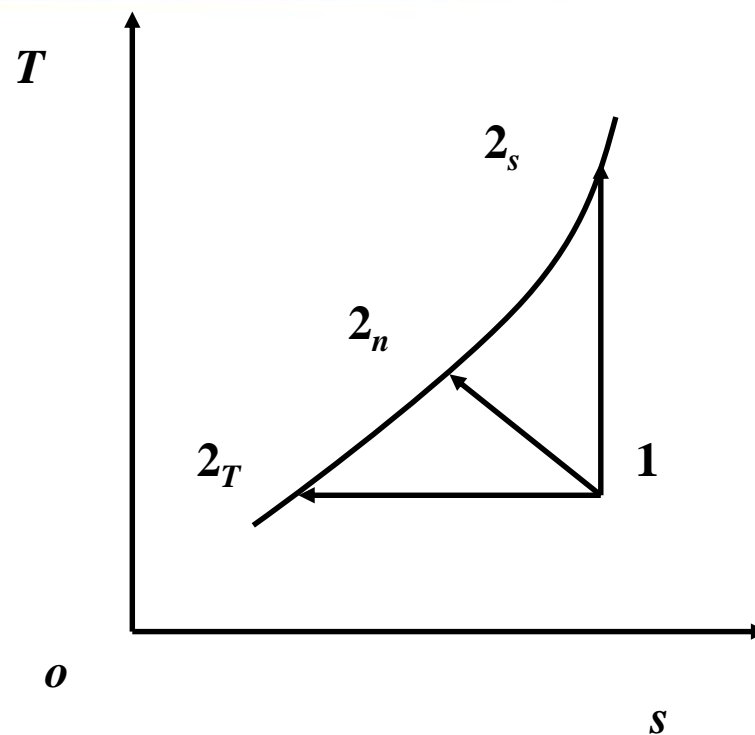
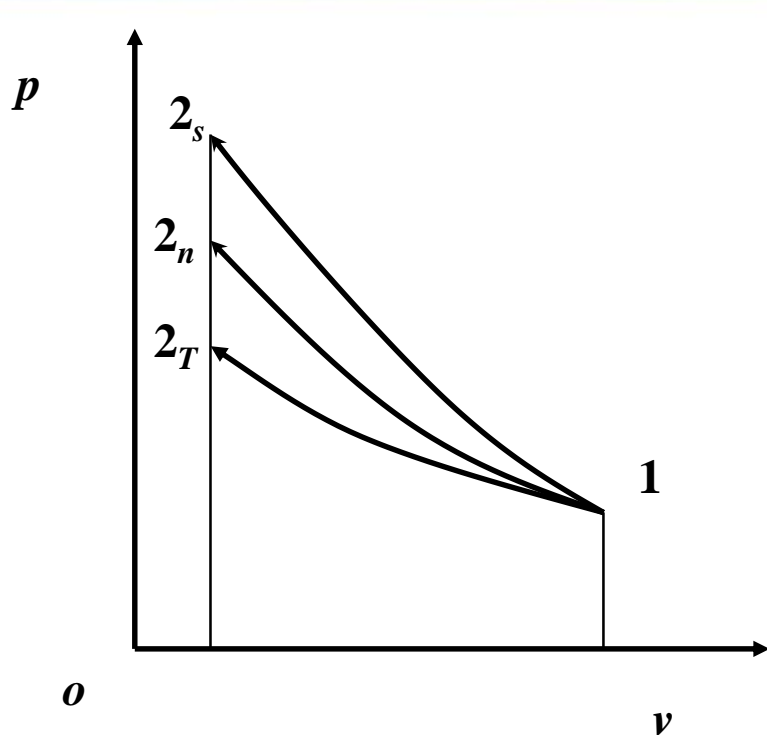
$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{\kappa-1} = (27 + 273) \times 5^{0.4} = 571.1 \text{ K}$$

耗功及与外界交换的热量：

$$w = \frac{R_g}{\kappa - 1} (T_1 - T_2) = \frac{0.297}{1.4 - 1} \times (300 - 571.1) \text{ kJ/kg} = -201.3 \text{ kJ/kg}$$

$$q=0$$





哪种压缩过程最省功？



例4 空气在膨胀透平中由 $p_1 = 0.6\text{MPa}$, $T_1 = 900\text{K}$ 绝热膨胀到 $p_2 = 0.1\text{MPa}$ ，工质的质量流量为 $q_m = 5\text{kg/s}$ 。设比热容为定值。试求：

- (1) 膨胀终了时，空气的温度及膨胀透平的功率；
- (2) 过程中热力学能和焓的变化量；
- (3) 将单位质量的透平输出功表示在 p - v 图和 T - s 图上；
- (4) 若透平的效率为 $\eta_T = 0.90$ ，则终态温度和膨胀透平的功率又为多少？



解：（1）空气在透平中经过的是可逆绝热过程，即定熵过程。

■ 所求的功是轴功，在动、位能差忽略不计时，即为技术功。

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 900 \text{ K} \left(\frac{0.1 \text{ MPa}}{0.6 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 539.1 \text{ K}$$

$$\begin{aligned} w_t &= \frac{\kappa R_g T_1}{\kappa - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(\kappa-1)/\kappa} \right] \\ &= \frac{1.4 \times 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times 900 \text{ K}}{1.4 - 1} \left[1 - \left(\frac{0.1 \text{ MPa}}{0.6 \text{ MPa}} \right)^{(1.4-1)/1.4} \right] \\ &= 362.5 \times 10^3 \text{ J/kg} = 362.5 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

或 $w_t = -\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$



透平输出的功率

$$P = q_m w_t = 5 \text{ kg/s} \times 362.5 \text{ kJ/kg} = 1812.5 \text{ kW}$$

(2) 过程中热力学能和焓的变化量

$$\begin{aligned} \Delta \dot{U} &= q_m c_V (T_2 - T_1) = 5 \text{ kg/s} \times \frac{5}{2} \times 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times (539.1 \text{ K} - 900 \text{ K}) \\ &= -1294.7 \times 10^3 \text{ W} = -1294.7 \text{ kW} \end{aligned}$$

$$\Delta \dot{H} = q_m c_p (T_2 - T_1) = \kappa \Delta \dot{U} = -1812.5 \text{ kW}$$



(3) 比技术功 w_t 在 $p-v$ 和 $T-s$ 图上的表示。

在 $T-s$ 图上的表示：因 $T-s$ 图上表示热量比较容易，如果能够将其等效成某过程的热量，则表示就没有困难了。

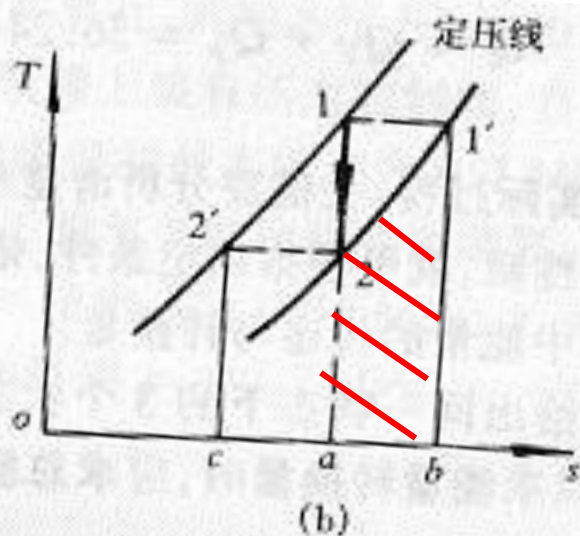
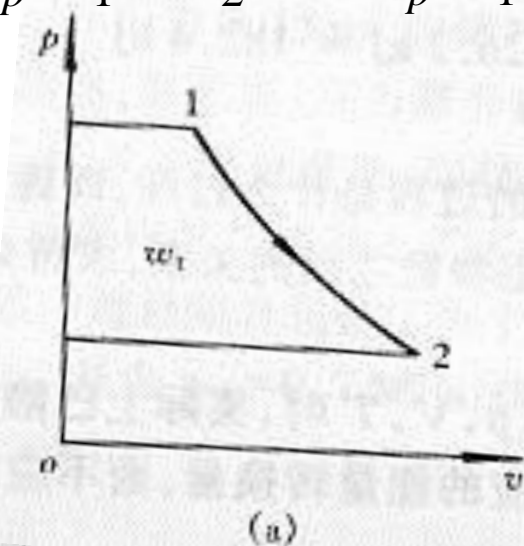
因理想气体的焓仅是温度的函数，则

$$w_t = -\Delta h = h_1 - h_2 = c_p (T_1 - T_2)$$

和定压过程的热量计算类似，
在1-2间构造**定压过程**

过2点做定压线，过1点做等温线，相交与1'点。

$$w_t = c_p (T_1 - T_2) = c_p (T_{1'} - T_2) = q_{p,1'-2} = S_{1'2ab1'}$$





(4) 因 $\eta_T = 0.90$ ，说明此过程是不可逆的绝热过程，透平实际输出的功率为

$$P' = P\eta_T = 1812.5 \text{ kW} \times 0.90 = 1631.3 \text{ kW}$$

由热力学第一定律得 $\Delta \dot{H} + P' = 0$

$$q_m c_p (T_{2'} - T_1) + P' = 0$$

$$T_{2'} = -\frac{P'}{q_m c_p} + T_1 = -\frac{P'}{q_m \times \frac{7}{2} R_g} + T_1$$

$$= -\frac{1631.3 \times 10^3 \text{ W}}{5 \text{ kg/s} \times \frac{7}{2} \times 287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}} + 900 \text{ K} = 575.2 \text{ K}$$

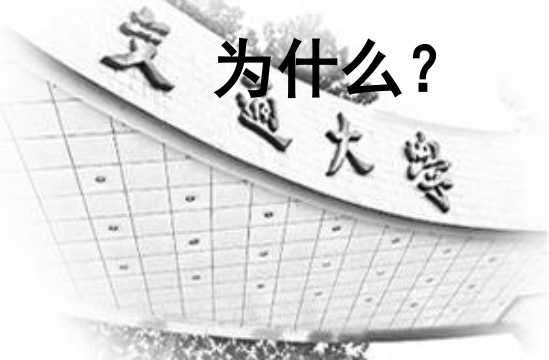
讨论:



(1) 功在 p - v 图上的表示很容易理解，但在 T - s 图上的表示较难理解。本题的技术功在 T - s 图上的表示，为什么？

(2) 理想气体无论什么过程，热力学能和焓的变化计算式恒为 $\Delta U = mc_V \Delta T$ ， $\Delta H = mc_p \Delta T$ 不会随过程变。

(3) 第4问的终态温度，能否根据 $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\kappa-1)/\kappa}$ 求得？为什么？



因为定熵过程参数间的关系式



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

适用条件是:

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

理想气体、可逆绝热过程，且比热容为定值。

而本题的第4问不是可逆过程，因此终态温度的求解不能用上述公式，只能根据能量方程式推得。

(4) 实际过程总是不可逆的，对不可逆过程的处理，热力学中总是将过程简化成为可逆过程求解，然后借助经验系数进行修正。膨胀透平效率的定义为

$$\eta_T = w_{t,\text{Real}} / w_{t,\text{Rev}}$$

(5) 空气的气体常数

$$R_g = \frac{R}{M} = \frac{8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})}{28.9 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}} = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

因空气是常用工质，建议记住其值。

例5 试在 T - s 图上把理想气体两状态 (T_1 和 T_2) 间的热力学能及焓的变化量表示出来。

解：热力学能和焓很难在 T - s 图上表示，但如果能够转换成热量的形式比较容易在 T - s 图上表示。

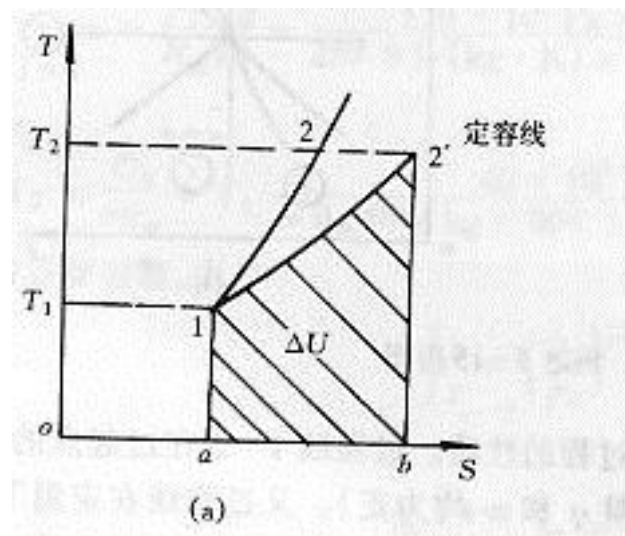
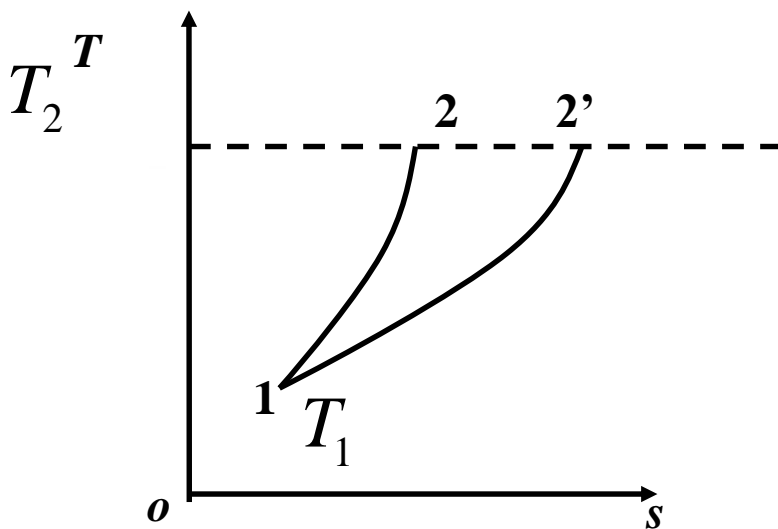
热力学能变化 $\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$

过1点做定容线，过2点做等温线，相交与2'点。

和定容过程的热量计算类似，
在1-2间构造**定容过程**

$$\Delta u = c_v(T_2 - T_1) = c_v(T_{2'} - T_1) = q_{v,1 \rightarrow 2'}$$

$$= \int_1^{2'} T ds = S_{12'ba1}$$



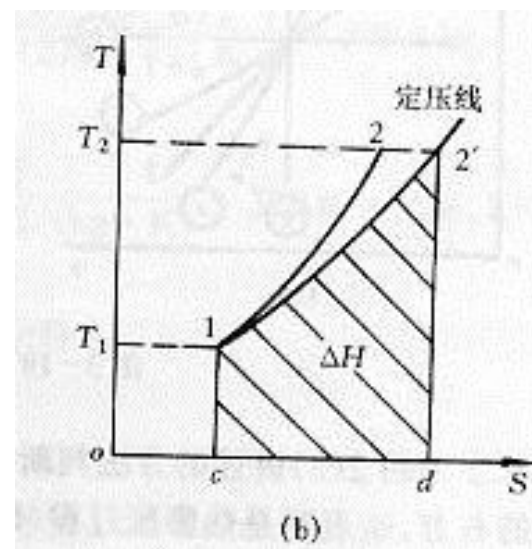
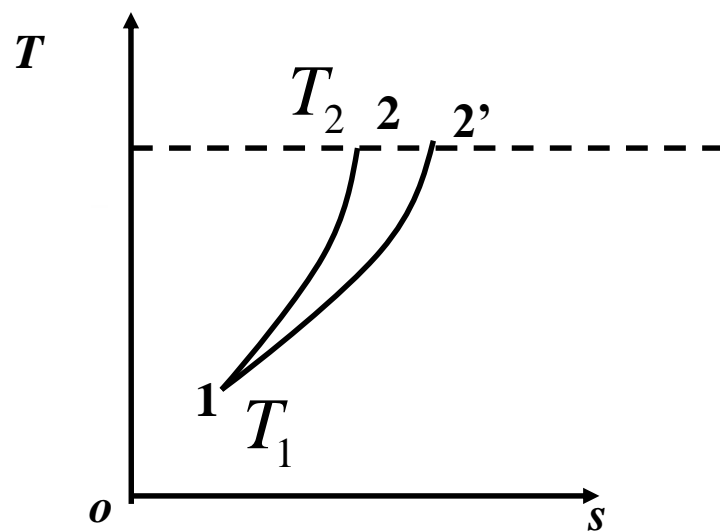


$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$$

和定压过程的热量计算类似，
在1-2间构造**定压过程**

过1点做定压线，过2点做等温线，相交与2'点。

$$\Delta h = c_p (T_2 - T_1) = c_p (T_{2'} - T_1) = q_{p,1 \rightarrow 2'} = \int_1^{2'} T \, ds = S_{12'dc1}$$



讨论:



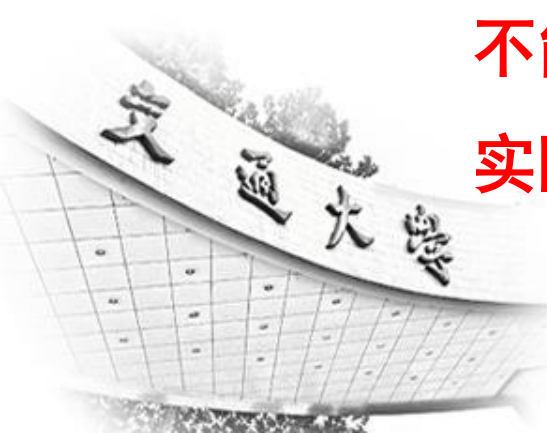
西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

上述方法中是过1点，并分别作定容线和定压线，也可过2点分别作定容线和定压线，在这种情况下，如何作线，如何表示 $\Delta U, \Delta H$ ，请同学自己完成。

如果是实际气体还能不能这样表示？？？

不能。

实际气体热力学能和焓都不再是温度的单值函数。



4-7、水蒸气基本热力过程



一、理论依据

1、基本方程——热力学第一定律的能量方程

$$q = \Delta u + w$$

$$q = \Delta h + w_t$$

$$q_v = u_2 - u_1$$

$$q_p = h_2 - h_1$$

2、可逆过程功和热量的计算公式

$$w = \int_1^2 p dv$$

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

$$q = \int_1^2 T ds$$

注意：下面这些理想气体特有的性质和表达式不能用

$$pv = R_g T$$

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

$$\Delta u = c_v \Delta T, \Delta h = c_p \Delta T$$

$$c_p - c_v = R_g$$

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

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

二、分析步骤



1. 由已知初、末状态的状态参数，通过查图、**查表**的方法，确定其他未知的状态参数（六个常见状态参数）。
2. 根据查图或查表得到的初、末状态具体参数值，直接相减获得热力过程的热力学能、焓、熵的变化量。
3. 根据可逆过程膨胀功、技术功、热量的计算公式及热力学第一定律能量方程式，计算过程中的功量和热量交换。

三、四个基本热力过程中功量和热量的计算

1. 定容过程

$$w = \int_1^2 p dv = 0$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp = - v \Delta p$$

$$q = \Delta u = \Delta h - \Delta(pv)$$

2. 定压过程

$$w = \int_1^2 p dv = p \Delta v$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp = 0$$

$$q = \Delta h$$



3、定温过程

$$q = \int_1^2 T ds = T(s_2 - s_1)$$

$$w = q - \Delta u$$

$$w_t = q - \Delta h$$

4、定熵过程

$$q = \int_1^2 T ds = 0$$

$$w = -(u_2 - u_1)$$

$$w_t = -(h_2 - h_1)$$

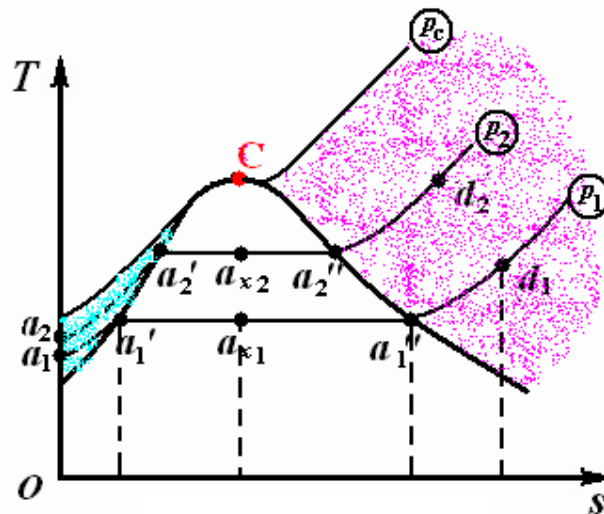
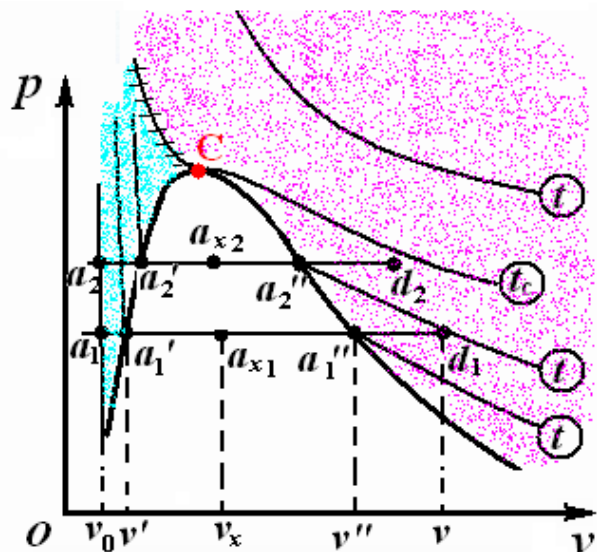


水蒸气小结



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

一、水定压加热汽化过程



五态

未饱和水态
饱和水态
湿蒸汽态
饱和蒸汽态
过热蒸汽态

一点
临界点
Critical
point

$$\begin{cases} p_{cr} = 22.064 \text{ MPa} \\ t_{cr} = 373.99^\circ \text{C} \\ v_{cr} = 0.003106 \text{ m}^3/\text{kg} \end{cases}$$

两线

上界限线
下界限线

三区

过冷水区
湿蒸汽区
过热蒸汽区

二、水和水蒸气的热力性质表



- 1.分类 { 饱和水和饱和蒸汽表
未饱和水和过热蒸汽表

2.饱和水和饱和蒸汽表——查饱和水、饱和蒸汽，计算湿蒸汽三个状态的状态参数

- { 查饱和状态参数，饱和水(')，饱和蒸汽(')，需要压力或温度一个变量。
计算湿蒸汽的参数，需要压力和干度两个变量（关键是干度的确定）。

3.未饱和水和过热蒸汽表——查未饱和水和过热蒸汽两个状态的状态参数

需要压力和温度两个独立变量。

三、水蒸气基本热力过程



基本方程

$$q = \Delta u + w$$

$$q = \Delta h + w_t$$

$$q_v = u_2 - u_1$$

$$q_p = h_2 - h_1$$

可逆过程

$$w = \int_1^2 p dv$$

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

$$q = \int_1^2 T ds$$

1、定容过程 $w = \int_1^2 p dv = 0$ $w_t = -\int_1^2 v dp = -v \Delta p$ $q = \Delta u = \Delta h - \Delta(pv)$

2、定压过程 $w = \int_1^2 p dv = p \Delta v$ $w_t = 0$ $q = \Delta h$

3、定温过程 $q = \int_1^2 T ds = T(s_2 - s_1)$ $w = q - \Delta u$ $w_t = q - \Delta h$

4、定熵过程 $q = \int_1^2 T ds = 0$ $w = -(u_2 - u_1)$ $w_t = -(h_2 - h_1)$



作业

4-3、4-16、4-17、4-27

