

華東理工大學

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



# 第四章 理想气体的热力过程及 气体压缩



# 主要内容

---

- 4.1 热力过程分析及步骤
- 4.2 **四个基本热力过程**
- 4.3 **多变过程的综合分析**
- 4.4 压气机的理论缩轴功
- 4.5 活塞式压气机的余隙影响
- 4.6 多级压缩及中间冷却



# 主要内容

---

## □ 本章要点

- ✓ 研究对象为理想气体的等容、等压、等温、等熵及多变过程；
- ✓ 基础：理想气体状态方程，能量守恒定律；
- ✓ 掌握各热力过程的过程方程、状态参数变化值的计算、功量和热量的计算、在p-v和T-s图上直观表示各热力过程；
- ✓ 掌握压气机的工作原理和论缩轴功计算。

## 4.1 热力过程分析及步骤

### □ 目的

- ✓ 以热力学第一定律为基础，理想气体工质分析可逆的基本过程中能量转换、传递关系，揭示过程中工质状态参数的变化规律及热和功的计算。
- ✓ 工程上实施热力过程的主要目的：完成能量转换；使质达到一定状态。

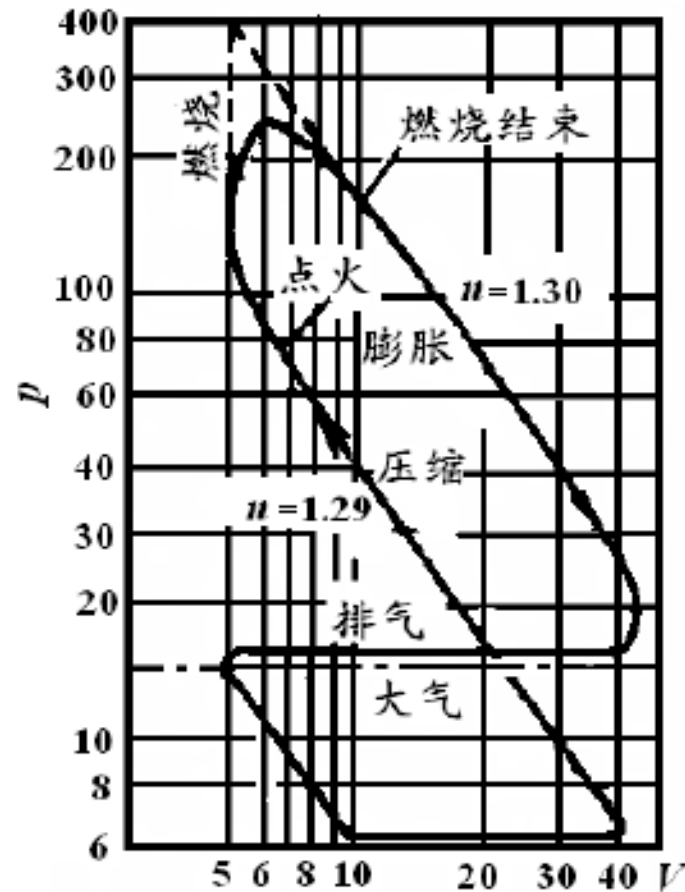
### □ 分析热力过程的一般步骤

- ✓ 依据热力过程特征建立方程式（过程中参数的变化关系）；
- ✓ 确定初、终状态的基本参数；
- ✓ 画出过程的  $p$ - $v$  图及  $T$ - $s$  图，直观分析过程中参数间关系及能量传递规律。
- ✓ 计算过程中热力学能、焓及熵的变化以传递功量和热等。



## 4.2 四个基本的热力过程

### □ 基本热力过程



汽车发动机工作过程中气缸  
内压力和气缸容积的关系

在  $\log p - \log V$  图上有  $\log p = n \log V + c$

$$\Rightarrow p v^n = \text{常数}$$

## 4.2 四个基本的热力过程

### □ 基本热力过程分类

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

多变过程

### 四个基本热力过程：

$$n=0 \quad p=\text{常数}$$

定压过程

燃气轮机燃烧室内燃料加热过程

$$n=1 \quad pv=\text{常数}$$

定温过程

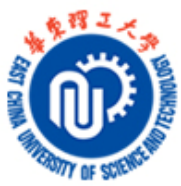
电厂冷凝器内乏气的凝结过程

$$n=k \quad pv^k=\text{常数} \quad \text{定熵（可逆绝热）过程} \quad \text{蒸汽流过汽轮机}$$

$$n=\pm\infty \quad v=\text{常数}$$

定容过程

汽油机气缸内汽油的燃烧过程



## 4.2 四个基本的热力过程

### □ 过程方程式

$n=0$   $p=\text{常数}$

定压过程

$$p_1 = p_2 \quad p_1 = \frac{R T_1}{v_1} \quad p_2 = \frac{R T_2}{v_2} \quad \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$$

$n=1$   $pv=\text{常数}$

定温过程

$$T_1 = T_2 \quad T_1 = \frac{p_1 v_1}{R} \quad T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} \quad p_1 v_1 = p_2 v_2$$

## 4.2 四个基本的热力过程

### □过程方程式

$n=k$      $p v^k = \text{常数}$     定熵（可逆绝热）过程     $\Delta S = 0$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad \text{过程推导}$$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \qquad p_1 v_1^{k-1} = p_2 v_2^{k-1}$$

$$RT_1 v_1^{k-1} = RT_2 v_2^{k-1} \qquad \frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}$$



## 4.2 四个基本的热力过程

□  $pv^k = \text{constant}$  推导

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{du + pdv}{T} = \frac{c_v dT + pdv}{T} = 0$$

$$c_v dT = -pdv$$

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{dh - vdp}{T} = \frac{c_p dT - vdp}{T} = 0$$

$$c_p dT = vdp$$

$$k = \frac{c_p}{c_v} = -\frac{v}{p} \frac{dp}{dv}$$

分离变量, 求解常微分方程

$$k \frac{dv}{v} = -\frac{dp}{p}$$

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

## 4.2 四个基本的热力过程

### □ 过程方程式

$$n = \pm \infty \quad v = \text{常数}$$

定容过程

$$v_1 = v_2$$

$$v_1 = \frac{R T_1}{p_1} \quad v_2 = \frac{R T_2}{p_2} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

$$n = n \quad p v^n = \text{常数}$$

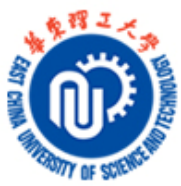
多变过程

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$$

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

$$n = \frac{\ln(p_2 / p_1)}{\ln(v_1 / v_2)}$$

多变指数



## 4.2 四个基本的热力过程

□ 在  $p-v$  图及  $T-s$  图上表示热力过程

斜率

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n \quad \left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n$$

$pv^n = \text{常数}$

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v}$$

$$Tds = \delta q = c_n dT$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n} = \frac{n-1}{c_v(n-k)} T$$

多变过程热量计算过程推导

## 4.2 四个基本的热力过程

□ 在  $p-v$  图及  $T-s$  图上表示热力过程

$$\begin{aligned} q &= \Delta u + w = c_V (T_2 - T_1) + \int_1^2 p dv \\ &= c_V (T_2 - T_1) + \int_1^2 \frac{p_1 v_1^n}{v^n} dv = c_V (T_2 - T_1) + p_1 v_1^n \int_1^2 \frac{dv}{v^n} \quad p_1 v_1^n = p v^n \\ &= c_V (T_2 - T_1) + \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = c_V (T_2 - T_1) + \frac{k-1}{n-1} c_V (T_1 - T_2) \\ &= \frac{n-k}{n-1} c_V (T_2 - T_1) = c_n (T_2 - T_1) \\ c_n &= \frac{n-k}{n-1} c_V \quad \text{多变比热容} \end{aligned}$$

## 4.2 四个基本的热力过程

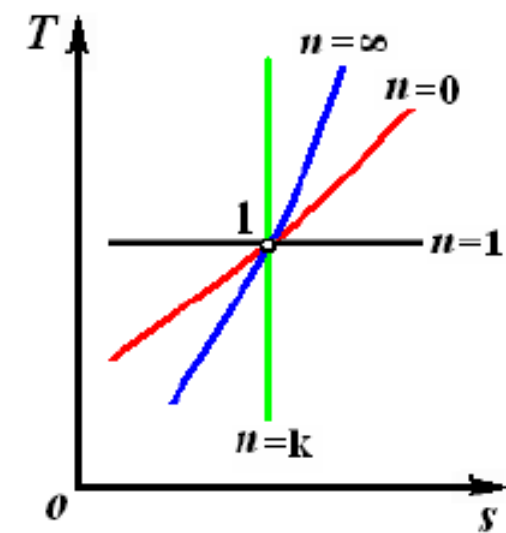
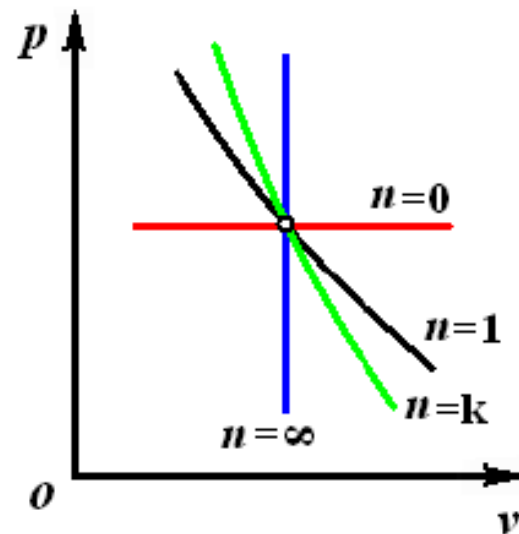
□ 在  $p-v$  图及  $T-s$  图上表示热力过程

定压过程:  $n = 0 \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_p = 0 \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_v = \frac{T}{c_p} \quad (\text{推导})$

定温过程:  $n = 1 \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = -\frac{p}{v} \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_T = 0$

定熵过程:  $n = k \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = -k \frac{p}{v} \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_s = \infty$

定容过程:  $n = \pm\infty \quad \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_v = \pm\infty \quad \left( \frac{\partial T}{\partial s} \right)_v = \frac{T}{c_v} \quad (\text{推导})$



## 4.2 四个基本的热力过程

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n} = \frac{n-1}{c_v(n-k)} T$$

定压过程  $\delta w_t = 0$

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

$$Tds = c_p dT$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_P = \frac{T}{c_p}$$

定容过程  $\delta w = 0$

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

$$Tds = c_v dT$$

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



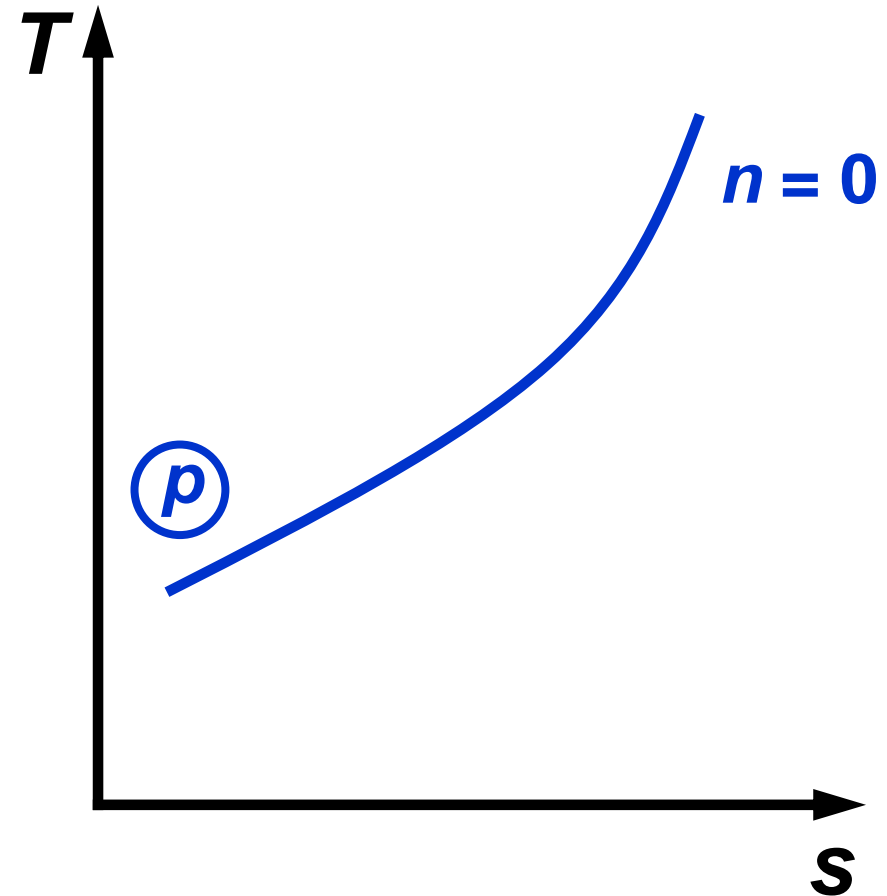
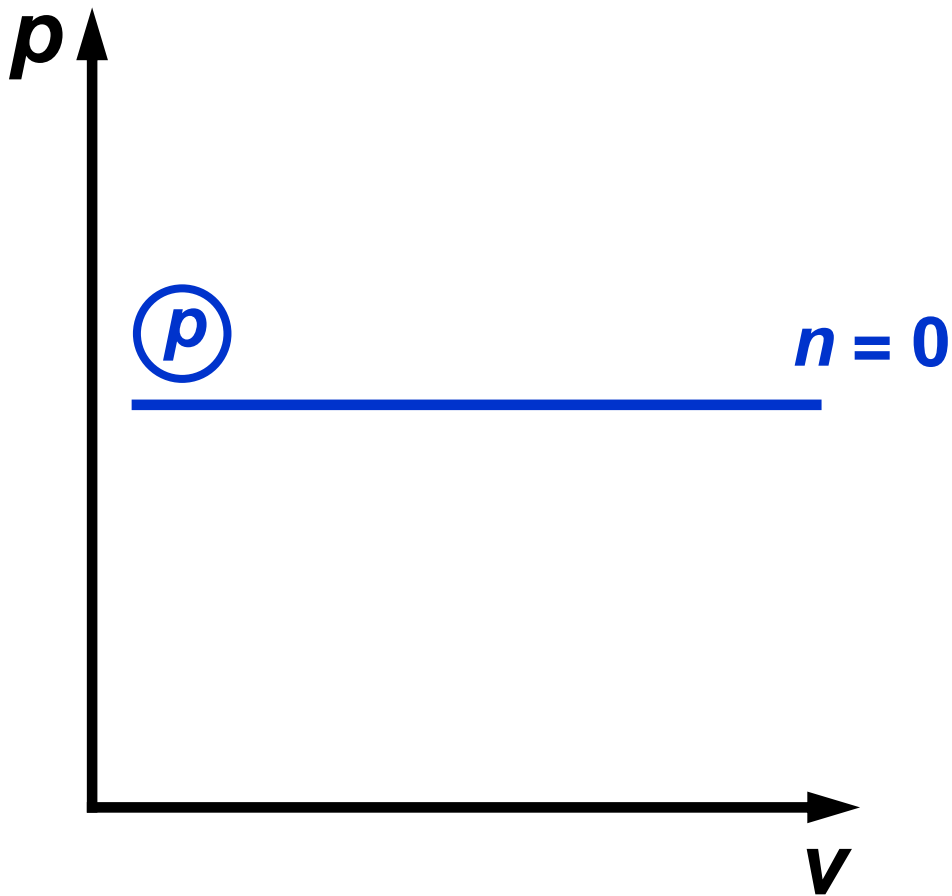


# 理想气体 $(p)$ 过程的 $p-v, T-s$ 图

$$Tds = c_p dT - v dp$$

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

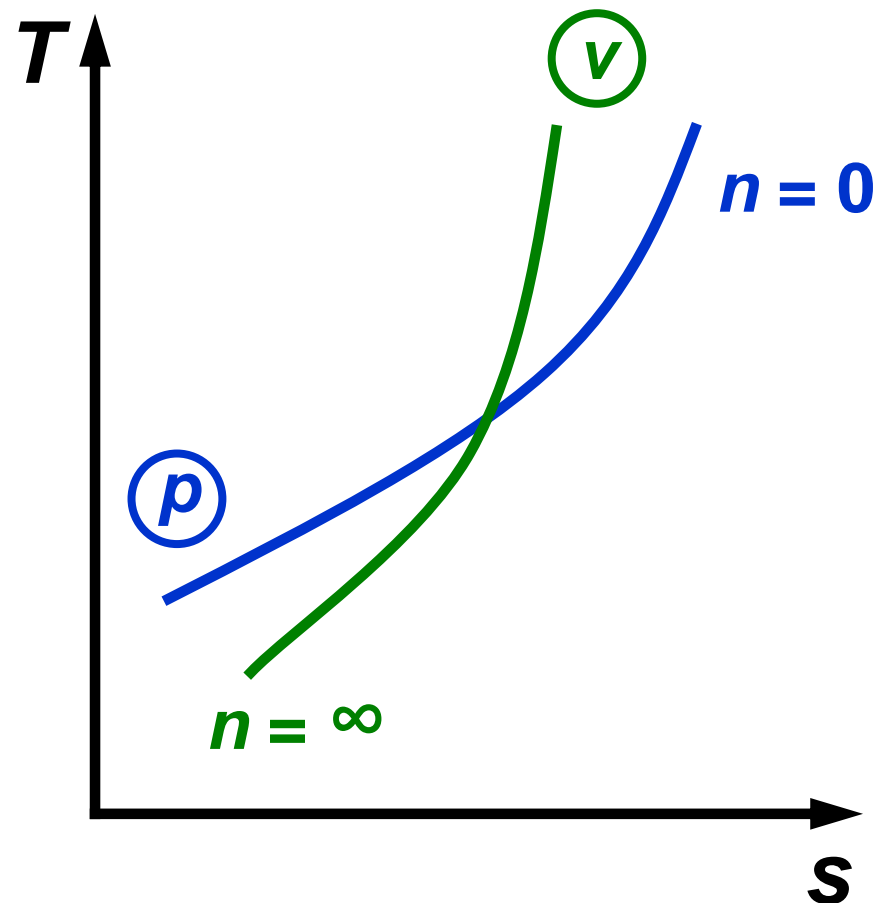
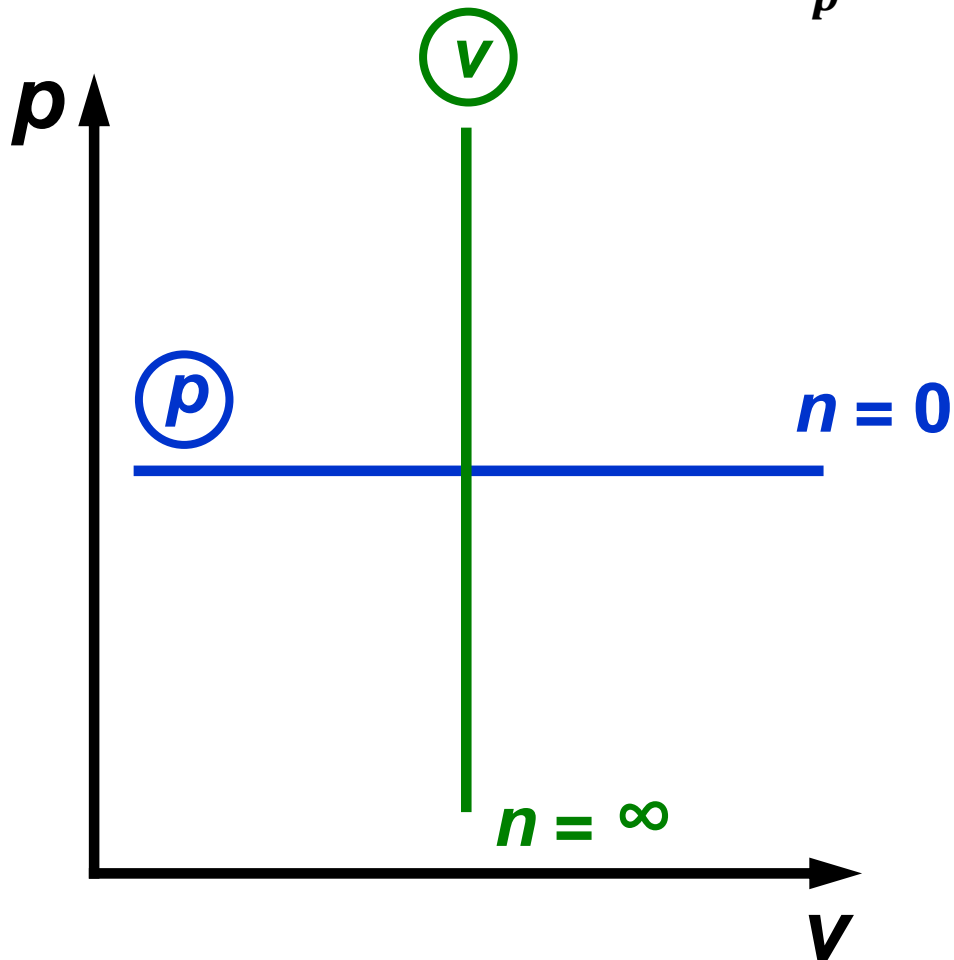
上凸? 下凹?  
 $T \uparrow$ , 斜率  $\uparrow$



# 理想气体 $\odot v$ 过程的 $p-v, T-s$ 图

$$Tds = c_v dT + p dv \quad \left(\frac{dT}{ds}\right)_p = \frac{T}{c_p} \quad \left(\frac{dT}{ds}\right)_v =$$

上凸? 下凹?  
 $T \uparrow$ , 斜率  $\uparrow$



# 理想气体 $(T)$ 过程的 $p-v, T-s$ 图

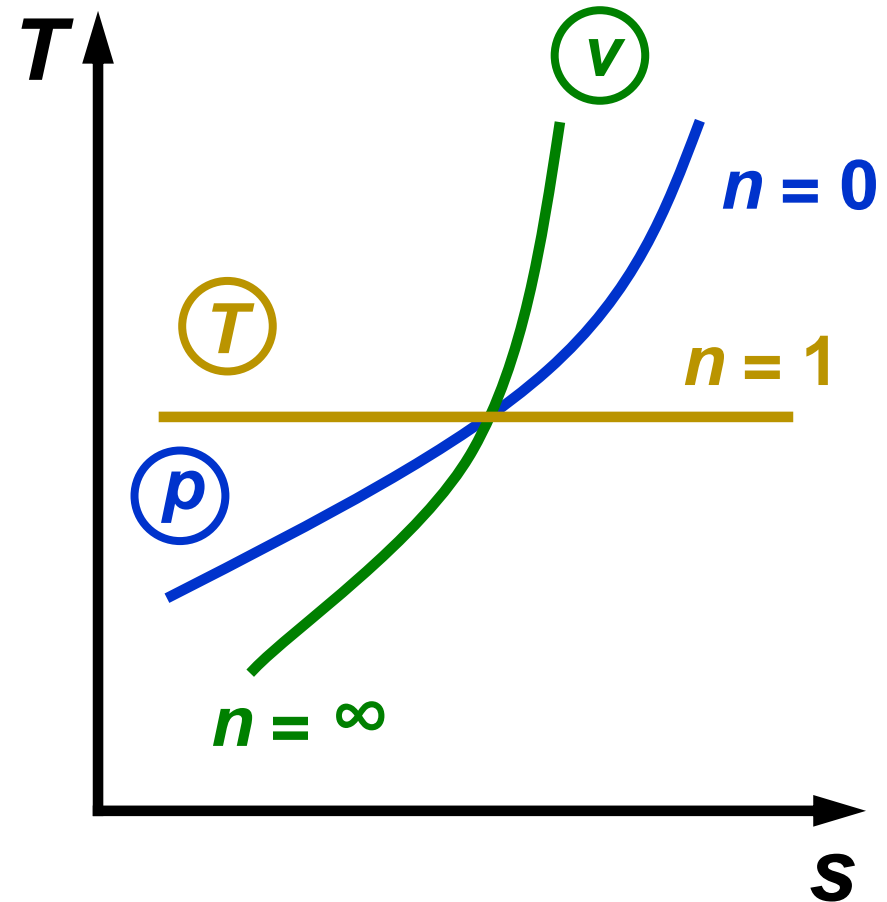
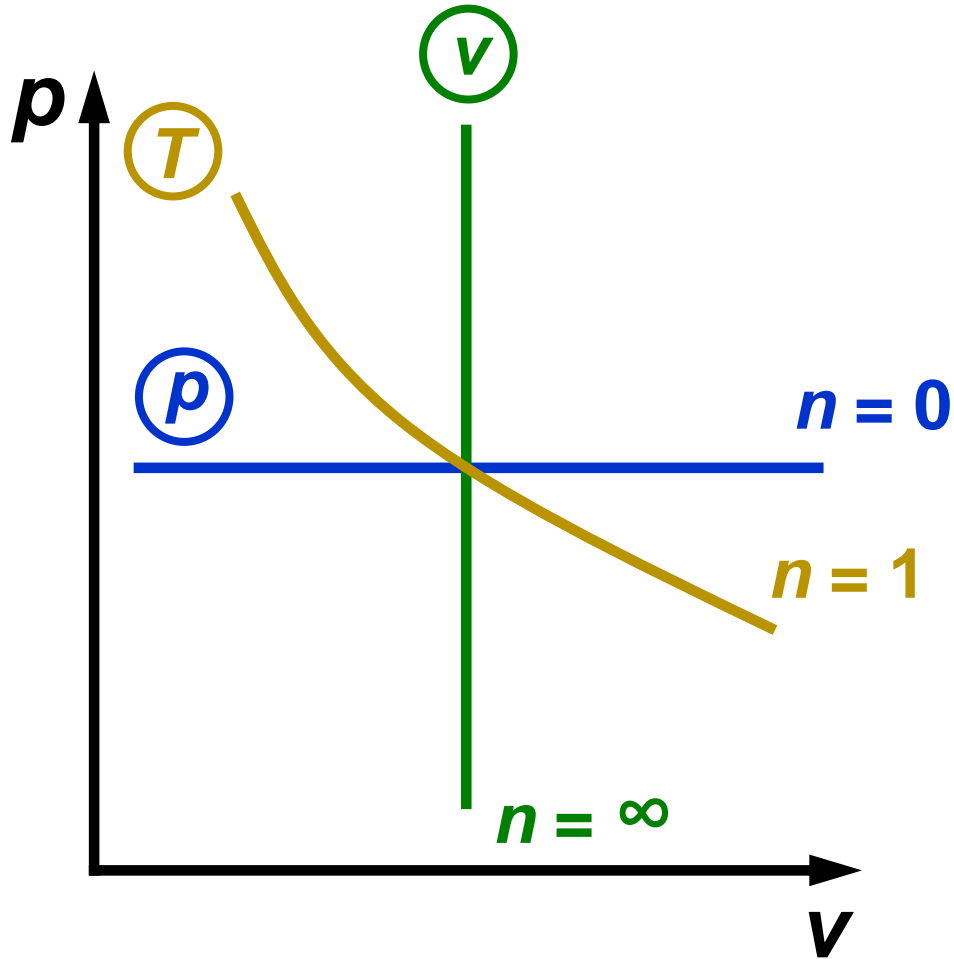
$$\left(\frac{dp}{dv}\right)_T =$$

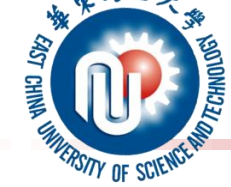
上凸? 下凹?

$p \uparrow$ , 斜率  $\uparrow$

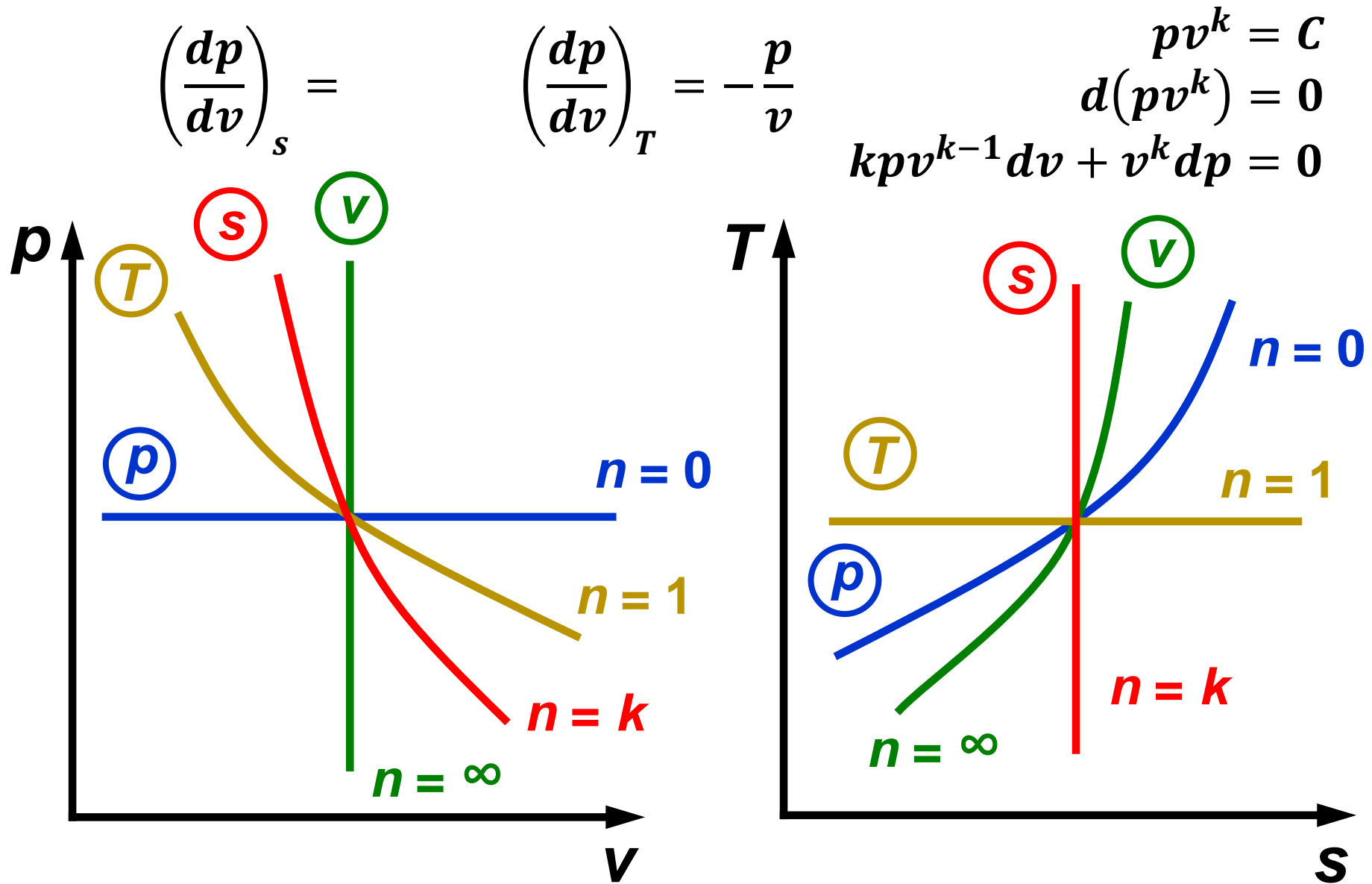
$$pv = C$$

$$pdv + vdp = 0$$

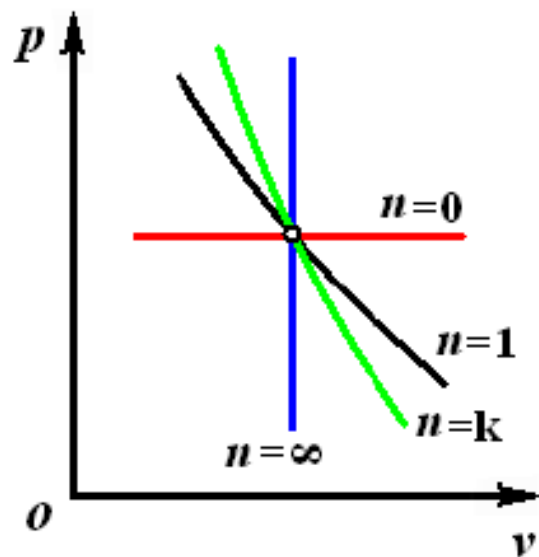




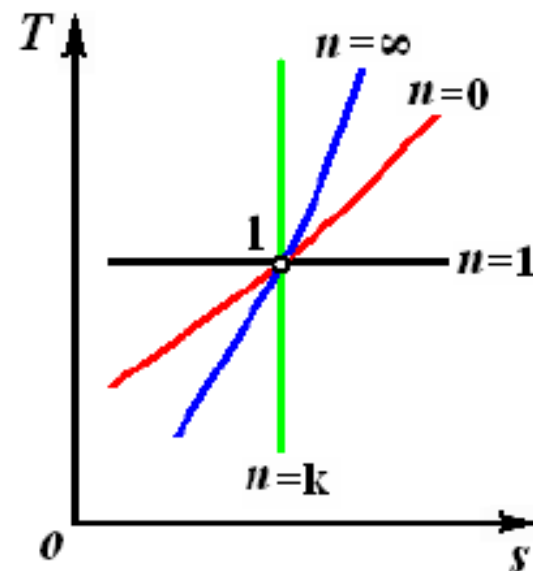
# 理想气体 (s) 过程的 $p-v, T-s$ 图



## 4.2 四个基本的热力过程



顺时针方向, n增大



$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_n = -n \frac{p}{v} \left\{ \begin{array}{ll} (n=0) & 0 \\ (n=1) & -\frac{p}{v} \\ (n=\kappa) & -\kappa \frac{p}{v} \\ n=\pm\infty & \infty \end{array} \right.$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial s}\right)_n = \frac{T}{c_n} \left\{ \begin{array}{ll} \frac{T}{c_p} \\ 0 \\ \infty \\ \frac{T}{c_v} \end{array} \right.$$

## 4.2 四个基本的热力过程

### □ 熵变的计算

$$\delta q = du + \delta w = c_v dT + p dv \qquad ds = \left( \frac{\delta q}{T} \right)_{\text{re}}$$

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + \int_1^2 \frac{p dv}{T} = \int_1^2 \frac{c_v dT}{T} + \int_1^2 \frac{R dv}{v}$$

$$\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$\delta q = dh + \delta w_t = c_p dT - v dp \qquad \Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}$$

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



## 4.2 四个基本的热力过程

	$\Delta u$	$\Delta h$	$\Delta s$
定压过程:	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	$\Delta S = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$
定温过程:	0	0	$\Delta S = R \ln \frac{v_2}{v_1} = R \ln \frac{p_1}{p_2}$
定熵过程:	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	0
定容过程:	$c_v(T_2 - T_1)$	$c_p(T_2 - T_1)$	$\Delta S = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \ln \frac{p_2}{p_1}$

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

## 4.2 四个基本的热力过程

	$w = \int_1^2 p dv$	$w_t = -\int_1^2 v dp$	$q$
定压过程:	$p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$	0	$\Delta h = c_p(T_2 - T_1)$
定温过程:	$RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$q = T \Delta s = w = w_t$ $= RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}$
定熵过程:	$= -\Delta u = \frac{1}{\kappa - 1} R \times (T_1 - T_2) = \frac{1}{\kappa - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $= \frac{RT_1}{\kappa - 1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \right]$	$h_1 - h_2 = \frac{k}{\kappa - 1} R (T_1 - T_2)$ $= \frac{k}{\kappa - 1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = k w$	0
定容过程:	0	$v(p_1 - p_2) = R(T_1 - T_2)$	$\Delta u = c_v(T_2 - T_1)$

推导

推导

## 4.2 四个基本的热力过程

□  $w$ 与 $w_t$ 间关系的推导

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

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

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

$$np dv + v dp = 0$$

$$-v dp = np dv$$

$$w_t = nw$$

## 4.3 多变过程的综合分析

□  $w$ ,  $w_t$ 和 $q$

$$w = \int_1^2 p dv = \dots = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]$$

$$w_t = - \int_1^2 v dp = \dots = \frac{n}{n-1} R (T_1 - T_2) = \frac{nRT_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] = nw$$

## 4.3 多变过程的综合分析

### □ 多变过程热量 $q_n$ 计算

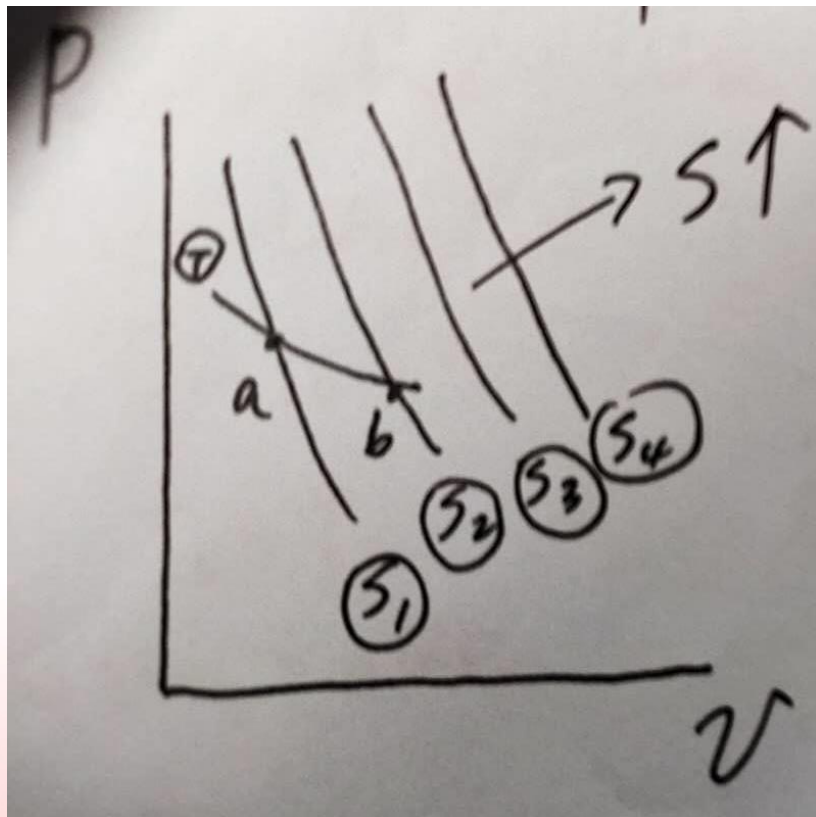
$$q = \left\{ \begin{array}{l} \Delta u + w = c_V (T_2 - T_1) + \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \left( \frac{R}{\kappa-1} - \frac{R}{n-1} \right) (T_2 - T_1) \\ \\ = \frac{n-\kappa}{n-1} c_V (T_2 - T_1) = c_n (T_2 - T_1) \\ \\ \int_1^2 T ds \end{array} \right.$$

注意：恒熵过程与多变过程中  
仅热量的计算方法有所不同。

$$c_n = \frac{n-\kappa}{n-1} c_V \quad \text{多变比热容}$$

## 4.3 多变过程的综合分析

- 在  $p$ - $v$  和  $T$ - $s$  图上确定过程量的变化
- ✓ 在  $p$ - $v$  图上可直观看出  $p$ 、 $v$  的变化，而在  $T$ - $s$  图上如何判断？
- ✓ 在  $T$ - $s$  图上可直观看出  $T$ 、 $s$  的变化，在  $p$ - $v$  图上如何判断？



作一条等温线  $ab$

$$\delta q_{ab} = du_{ab} + p dv$$

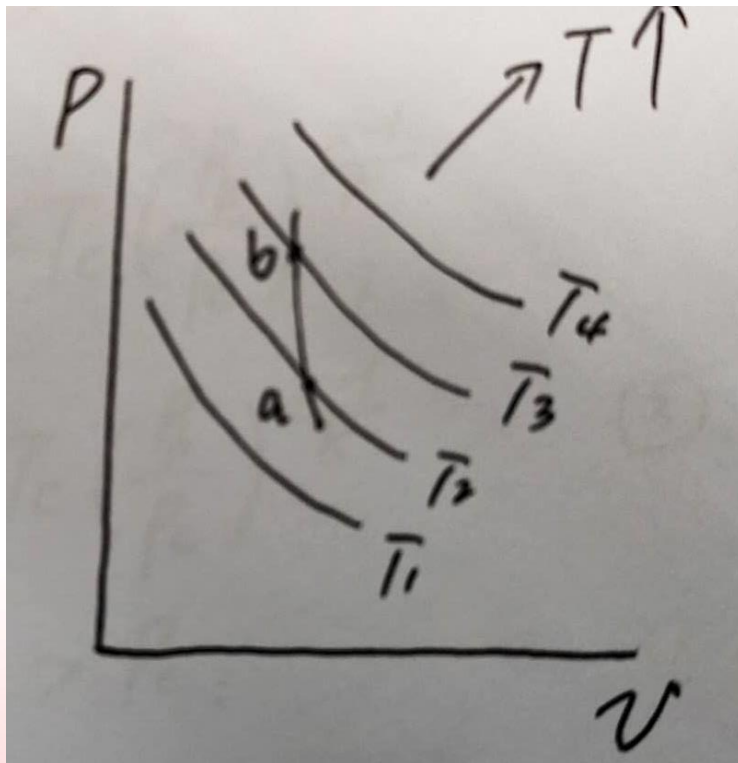
$$\delta q_{ab} = T ds > 0$$

等熵线右上方的熵增加



## 4.3 多变过程的综合分析

- 在  $p$ - $v$  和  $T$ - $s$  图上确定过程量的变化
- ✓ 在  $p$ - $v$  图上可直观看出  $p$ 、 $v$  的变化，而在  $T$ - $s$  图上如何判断？
- ✓ 在  $T$ - $s$  图上可直观看出  $T$ 、 $s$  的变化，能判断过程热量的变化等，在  $p$ - $v$  图上如何判断？



作一条等熵线  $ab$

$$\delta q_{ab} = du_{ab} + p dv$$

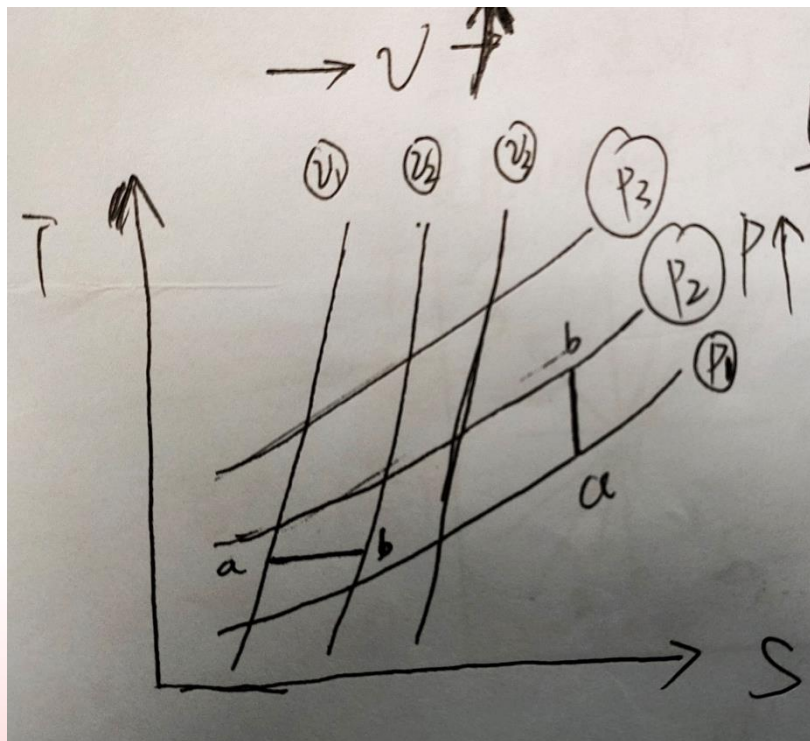
$$\delta q_{ab} = 0 \quad dv < 0$$

$$du_{ab} > 0 \quad u_b > u_a$$

等温线右上方的温度增加

## 4.3 多变过程的综合分析

- 在  $p$ - $v$  和  $T$ - $s$  图上确定过程量的变化
- ✓ 在  $p$ - $v$  图上可直观看出  $p$ 、 $v$  的变化，而在  $T$ - $s$  图上如何判断？
- ✓ 在  $T$ - $s$  图上可直观看出  $T$ 、 $s$  的变化，能判断过程热量的变化等，在  $p$ - $v$  图上如何判断？



作一条等熵线  $ab$  交于两条等压线

$$\delta q_{ab} = dh_{ab} - v dp = 0$$

等压线上方的压力增加

作一条等温线  $ab$  交于两条等容线

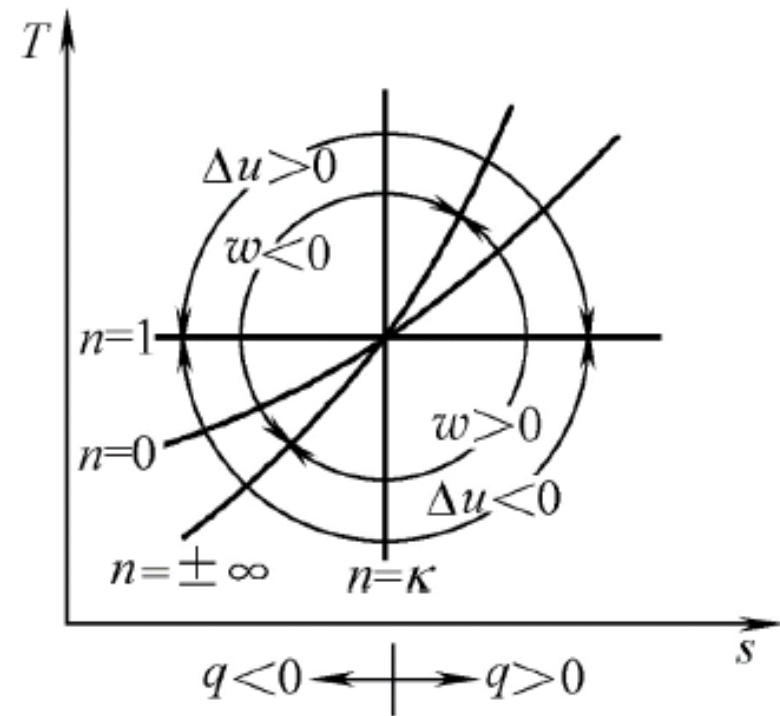
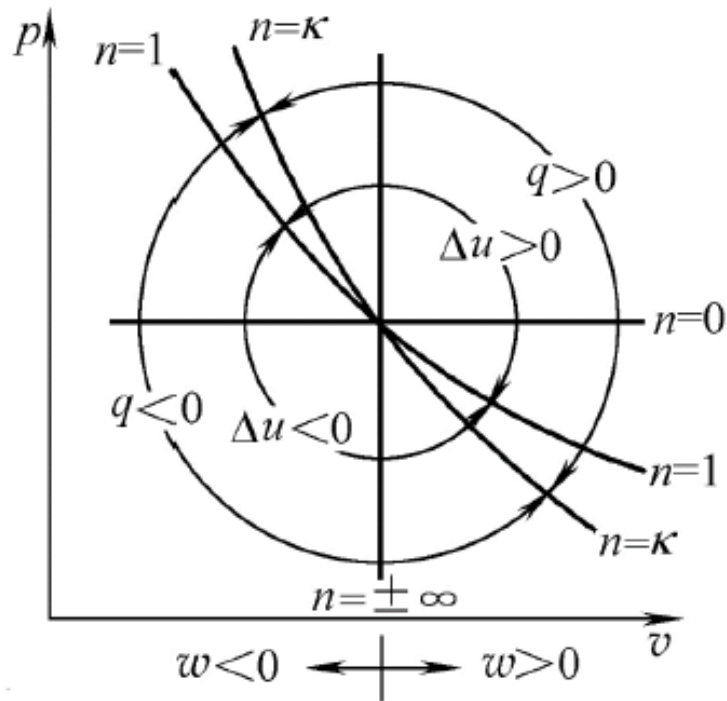
$$\delta q_{ab} = du_{ab} + p dv$$

$$\delta q_{ab} = T ds > 0$$

等容线右方的比容增加

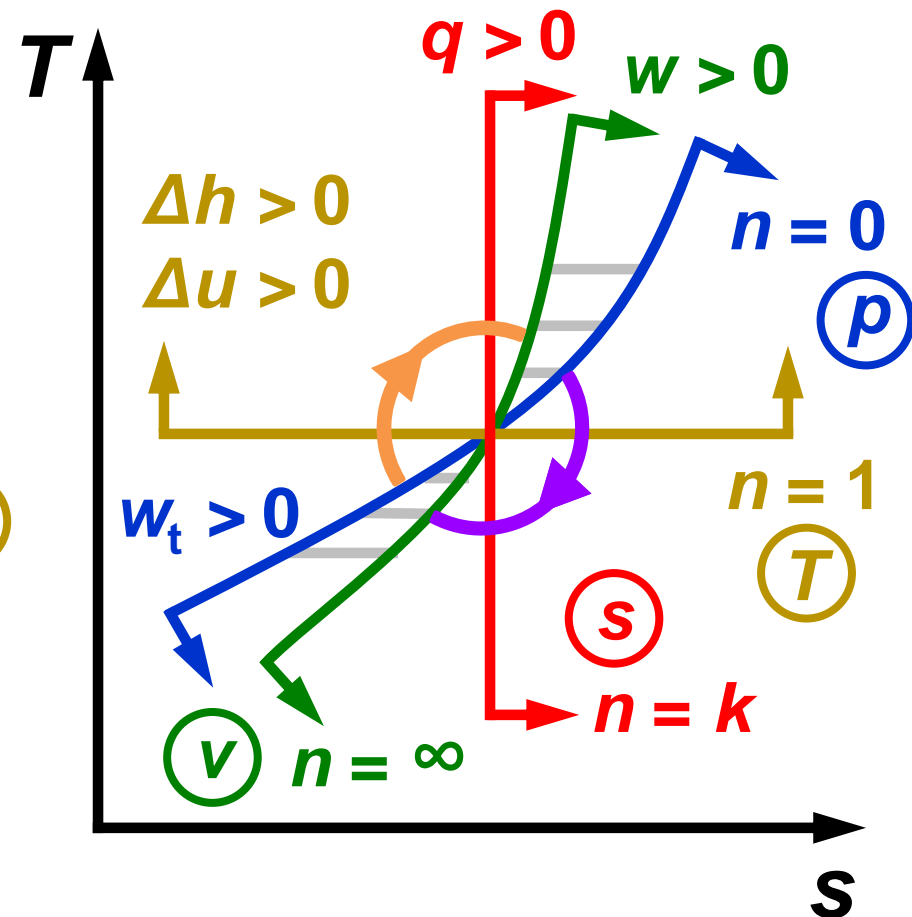
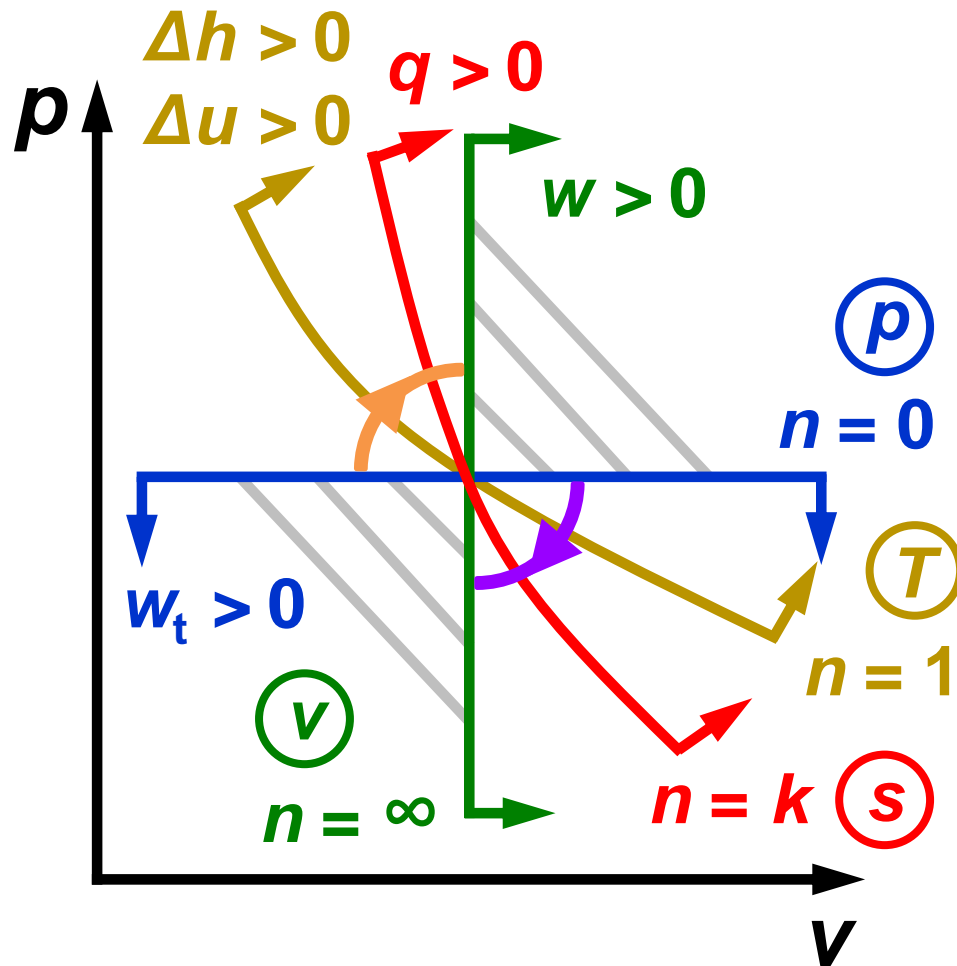
## 4.3 多变过程的综合分析

### □ 过程中 $q$ 、 $w$ 和 $\Delta u$ 正负值的判断



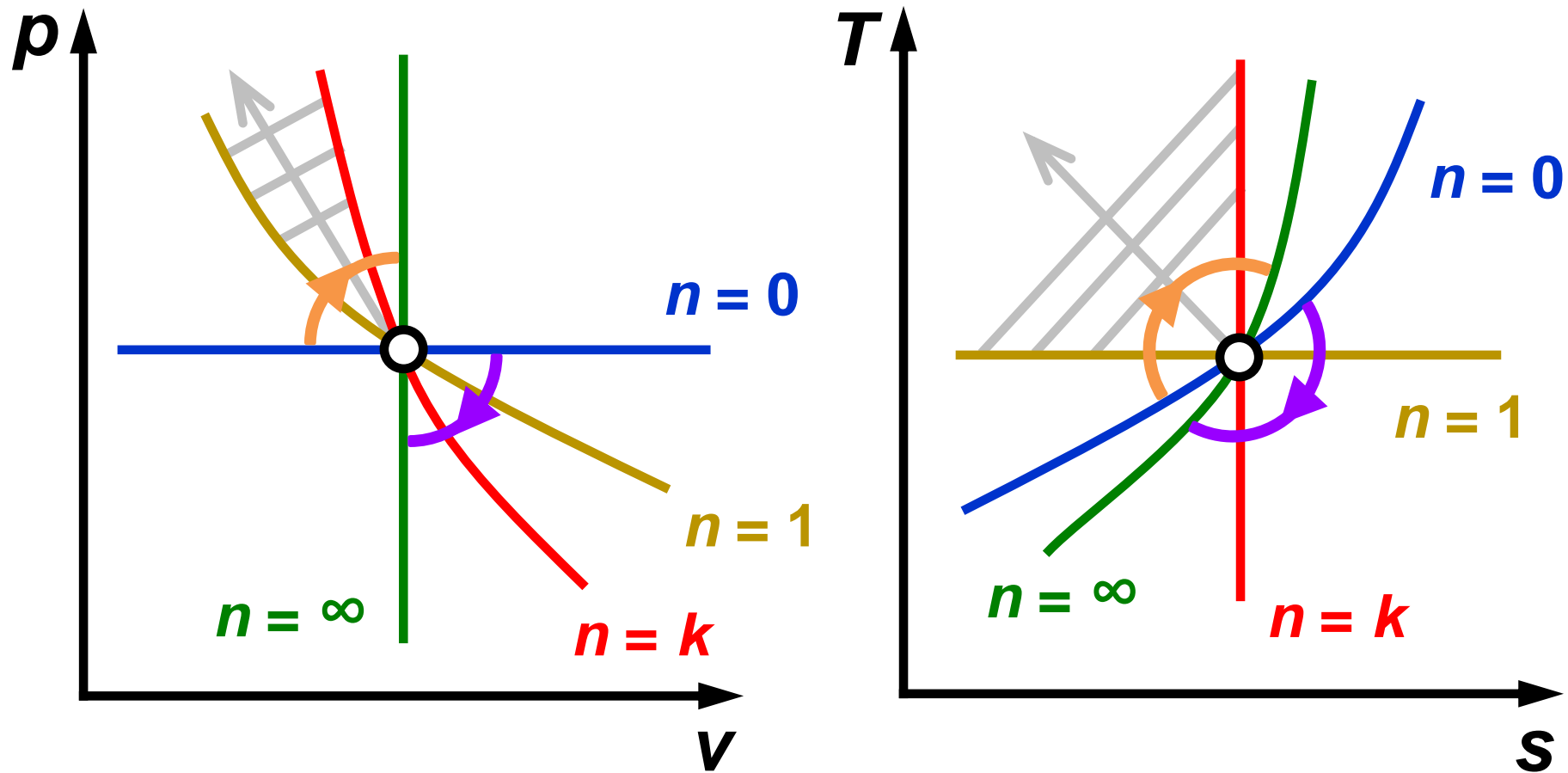
# $u, h, w, w_t, q$ 在 $p-v, T-s$ 图上的变化趋势

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



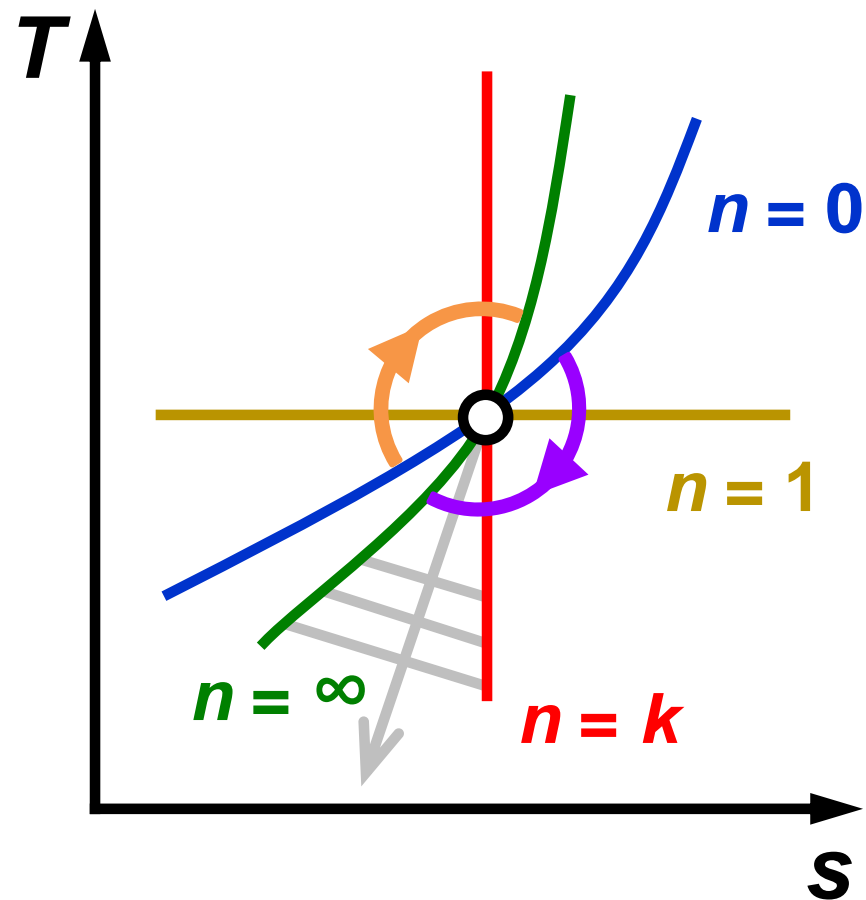
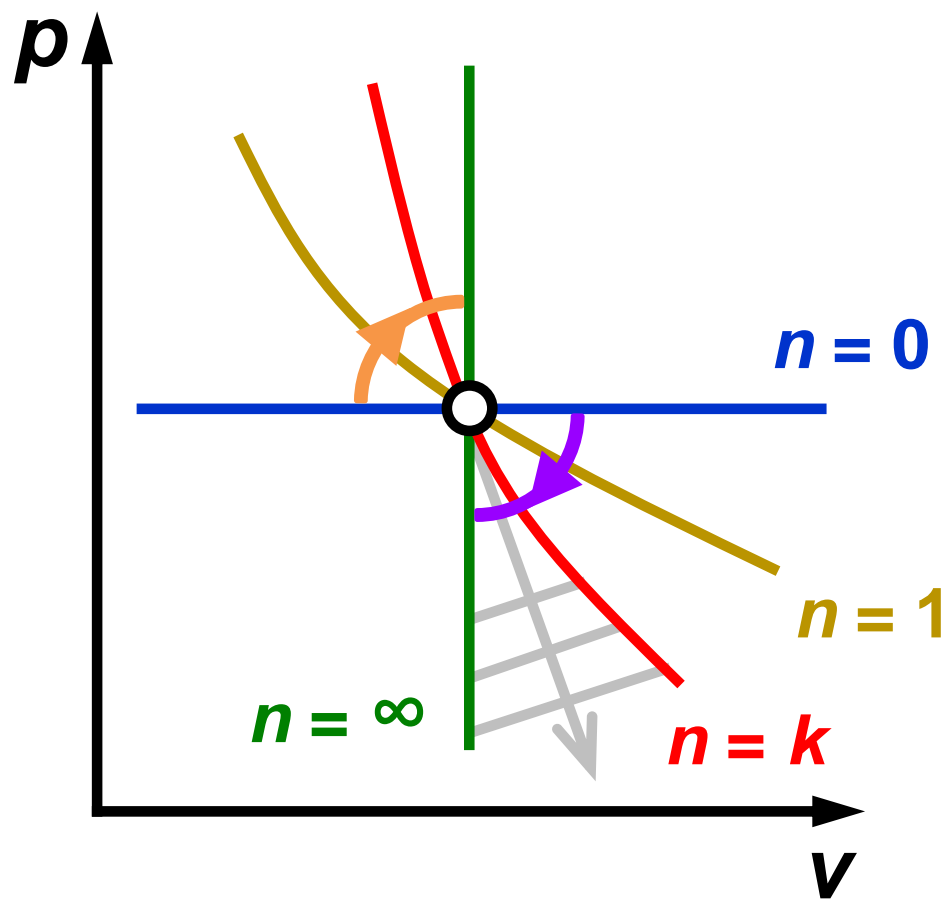
## 4.3 多变过程的综合分析

□ 压缩、升温、放热的过程，终态在哪个区域？



## 4.3 多变过程的综合分析

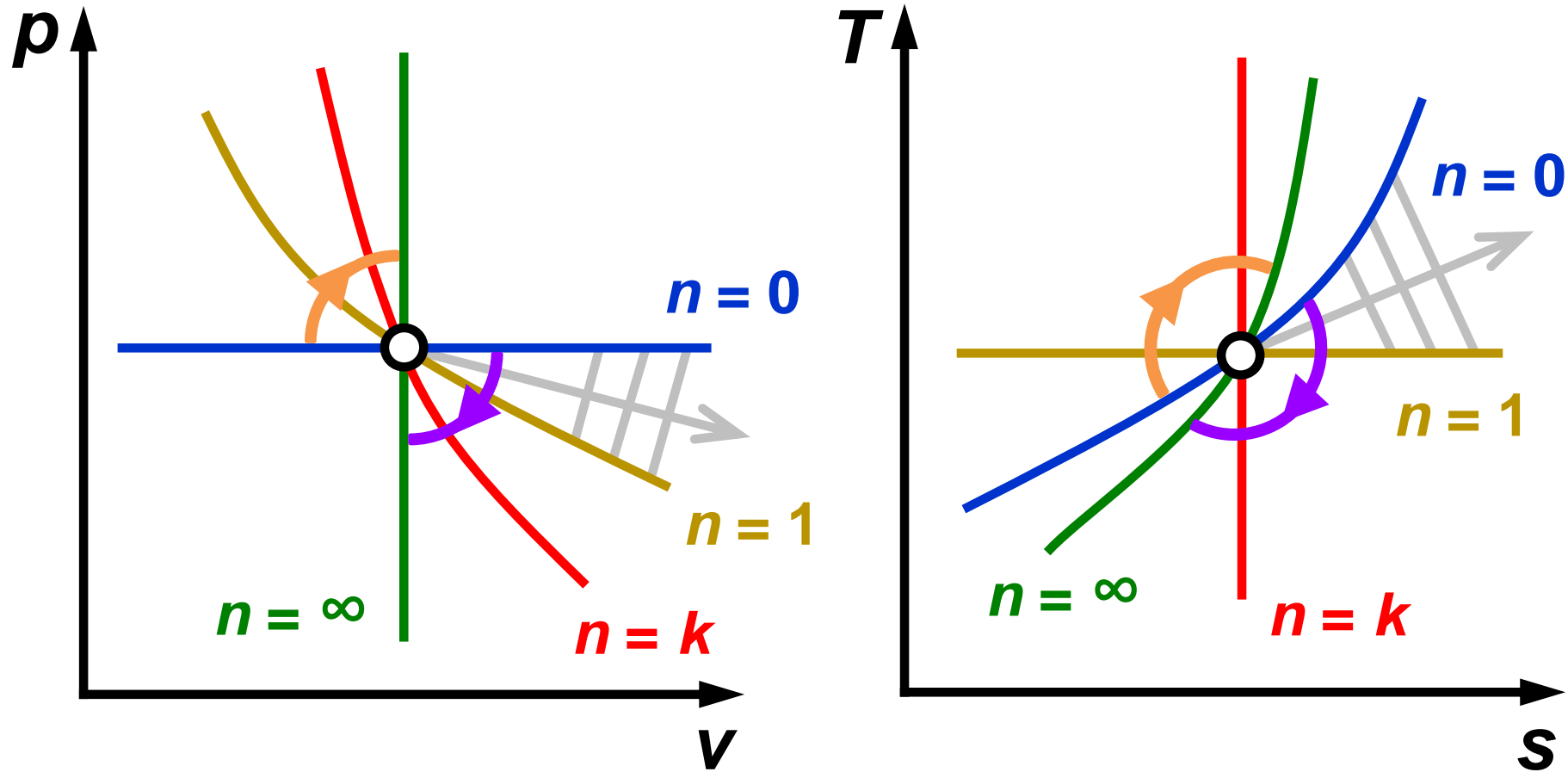
□ 膨胀、降温、放热的过程，终态在哪个区域？





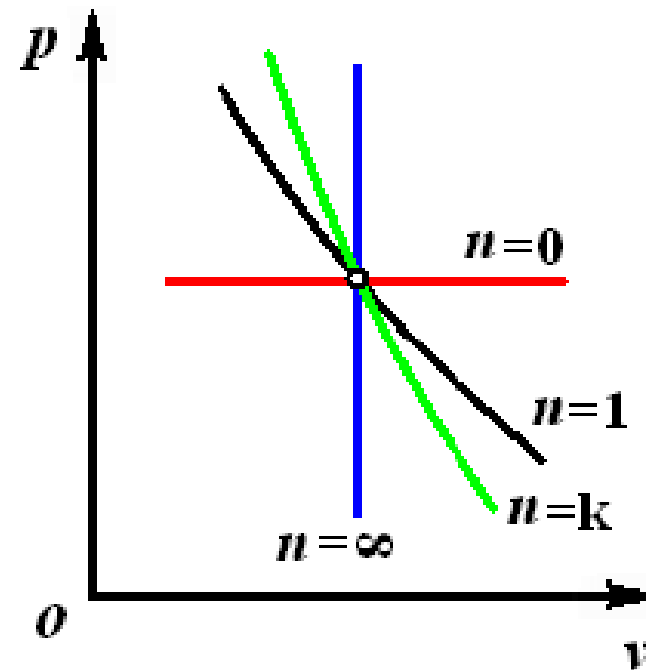
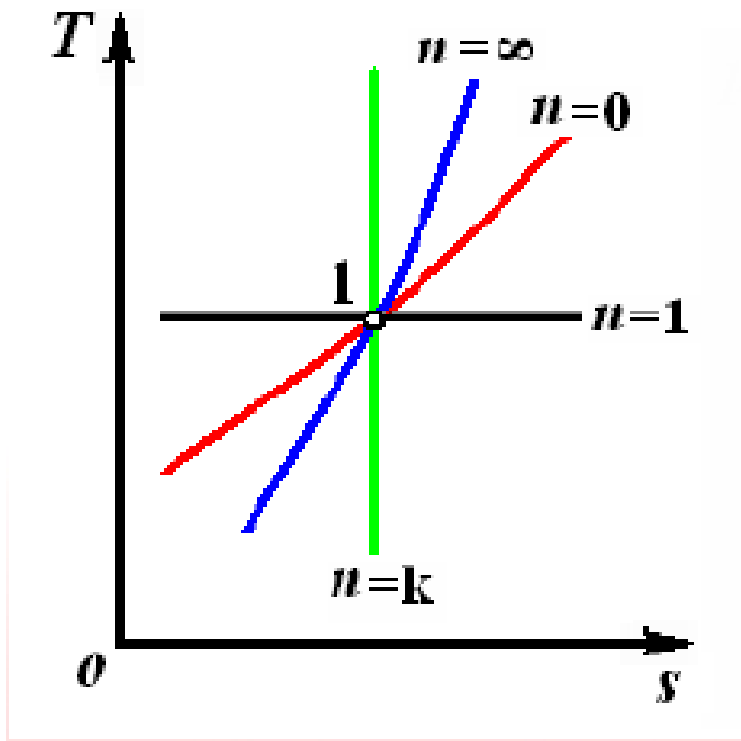
## 4.3 多变过程的综合分析

□ 膨胀、升温、吸热的过程，终态在哪个区域？



## 4.3 多变过程的综合分析

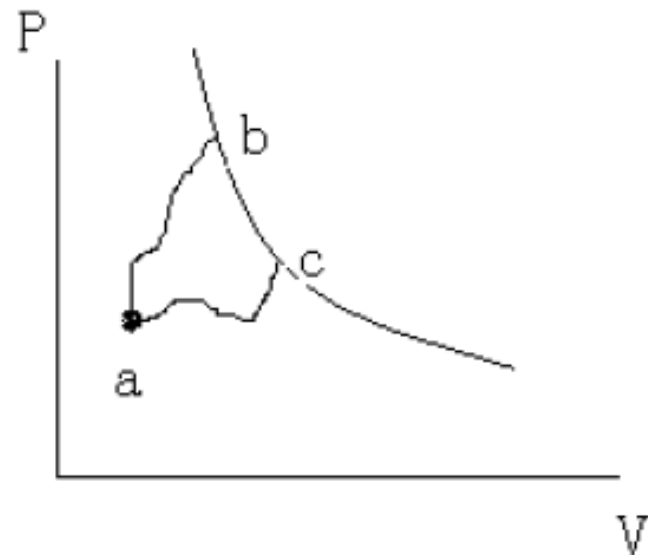
□ 某理想气体在T-S图上有四个过程，如下图，试在P-V图上画出这四个过程，并对每一过程说明是加热还是放热，是膨胀还是压缩过程？



## 4.3 多变过程的综合分析

### 例题

如图所示：b点和c点在一条等熵线上，判断  $\Delta u_{ab}$ 、 $\Delta u_{ac}$  哪个大？



$$q_{bc} = \Delta u_{bc} + w_{bc} = 0$$

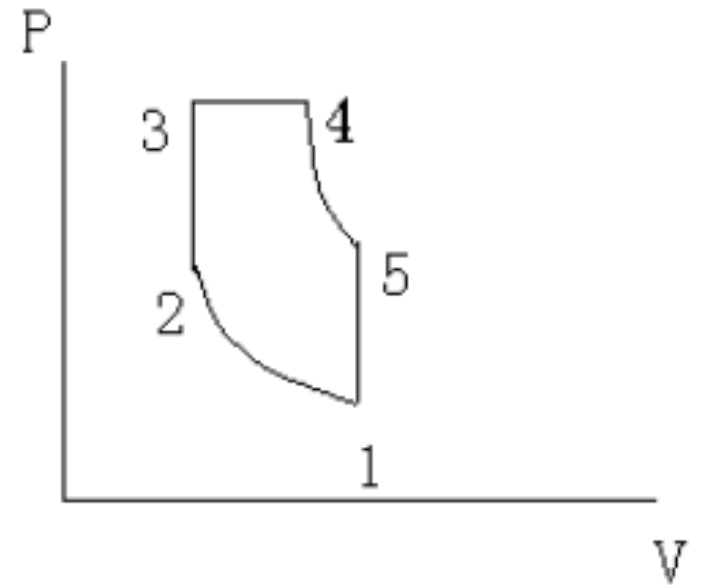
$$\Delta u_{bc} = -w_{bc} < 0 \quad T_b > T_c$$

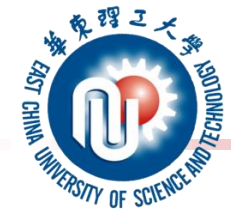
$$\frac{T_c}{T_b} = \left( \frac{v_b}{v_c} \right)^{k-1}$$

分别过b点和c点作两条等温线

## 4.3 多变过程的综合分析

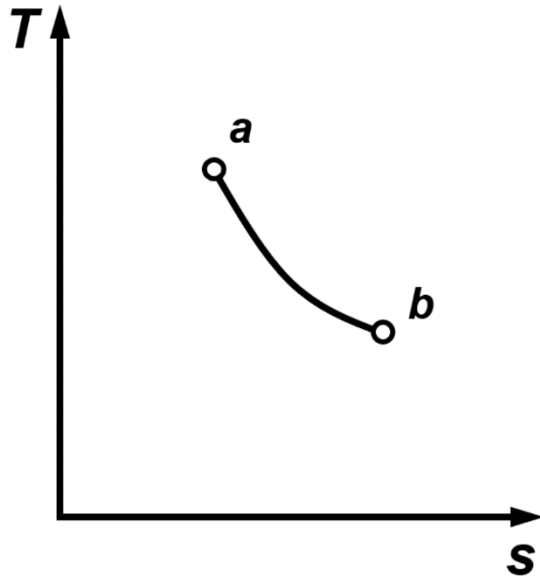
**例4.2** 将 $p$ - $v$ 图表示的循环画在 $T$ - $s$ 图上, 图中2-3, 5-1为定容过程, 1-2和4-5为定熵过程, 3-4为定压过程(作定性分析)。

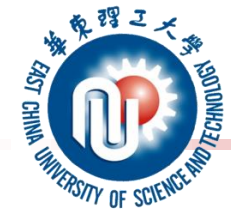




## 4.3 多变过程的综合分析

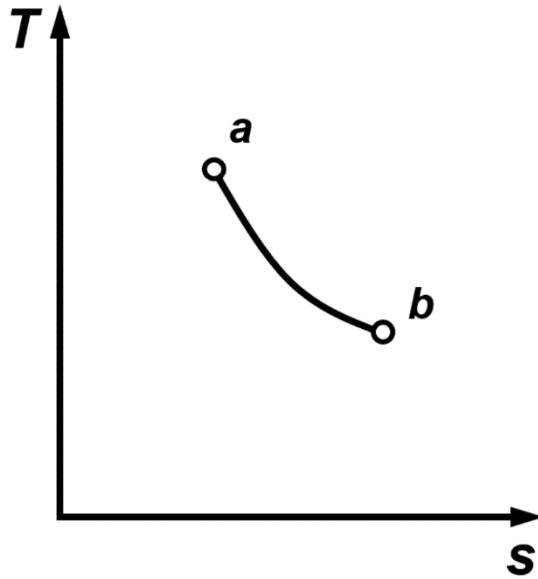
- 若一理想气体发生如下方T-s图所示的可逆过程 $a \rightarrow b$ ，请在该图中画出这一过程对应的焓变或**热力学能变化**？若在 $a \rightarrow b$ 经过的是不可逆过程又如何？





## 4.3 多变过程的综合分析

- 若一理想气体发生如下方T-s图所示的可逆过程 $a \rightarrow b$ ，请在该图中画出这一过程对应的膨胀功或**技术功**？



## 4.3 多变过程的综合分析

**例4.3** 有1kg 空气，初始状态为  $P_1=0.5\text{MPa}$ ,  $t_1=150^\circ\text{C}$ , 进行下列过程：

- (1) 可逆绝热膨胀到  $P_2=0.1\text{MPa}$ ;
- (2) 不可逆绝热膨胀到  $P_2=0.1\text{MPa}$ ,  $T_2=300\text{K}$ ;
- (3) 可逆等温膨胀到  $P_2=0.1\text{MPa}$ ;
- (4) 可逆多变膨胀到  $P_2=0.1\text{MPa}$  , 多变指数  $n=2$ ;

试求出上述各过程中的膨胀功及熵变化，并将各过程的相对位置画在同一  $p-v$  图和  $T-s$  图上。

**例4.4** 封闭气缸中  $P_1=8\text{MPa}$ ,  $t_1=1300^\circ\text{C}$ , 可逆多变膨胀过程  $P_2=0.4\text{MPa}$ ,  $t_2=400^\circ\text{C}$ ,  $R=0.287\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ , 比热  $c_v=0.716\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ , 求  $q$ 。

教材上的例题4-1、4-2和4-3



## 4.3 多变过程的综合分析

**例4.5** 0.5kmol 某种单原子理想气体，由 25°C，2m<sup>3</sup>可逆绝热膨胀到1atm，然后在此状态的温度下定可逆压缩回到 2m<sup>3</sup>。1) 画出各过程的  $p$ - $v$ 图及  $T$ - $s$ 图；  
2) 计算整个过程的  $Q$ ， $W$ ， $\Delta U$ ， $\Delta H$ 及 $\Delta S$



## 4.4 压气机的理论压缩轴功

### □ 压气机的分类

#### ✓ 按照工作原理分类

活塞式、叶轮(离心式、轴流回转容积)、引射式压缩器

活塞式：间歇性工作、压头高流量小

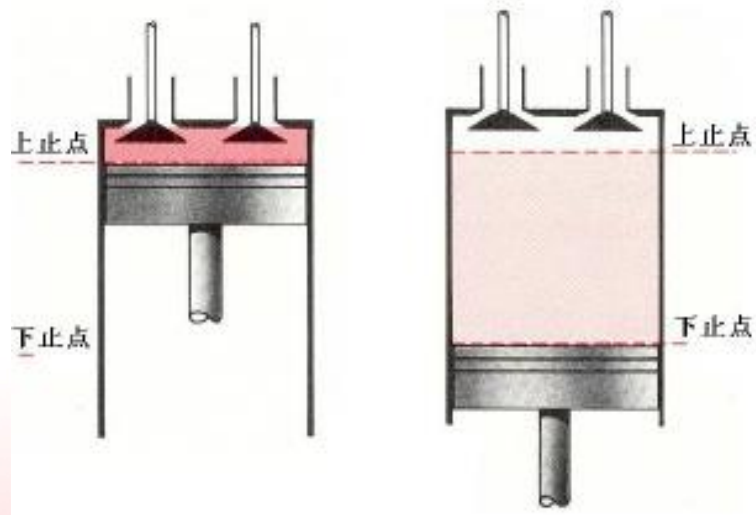
叶轮式特点：连续性工作、压头小流量大且稳定

#### ✓ 按照气体压头分类

通风机 ( $<115\text{kPa}$ )

鼓风机 ( $115 - 350\text{kPa}$ )

压气机 ( $>350\text{kPa}$ )



## 4.4 压气机的理论压缩轴功

### □ 单级活塞式压气机工作原理

#### ✓ 工作过程

吸气过程4-1：传输推动功 $p_1 v_1$

压缩过程1-2：消耗外功

排气过程2-3：传输推动功 $p_2 v_2$

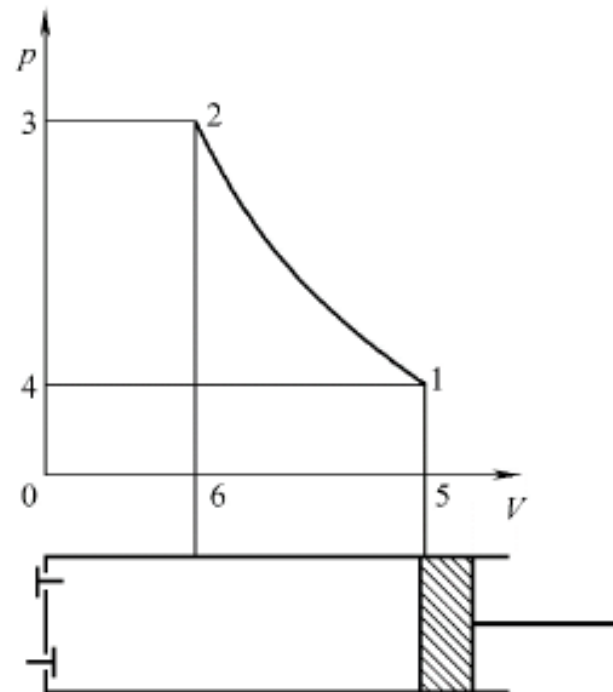
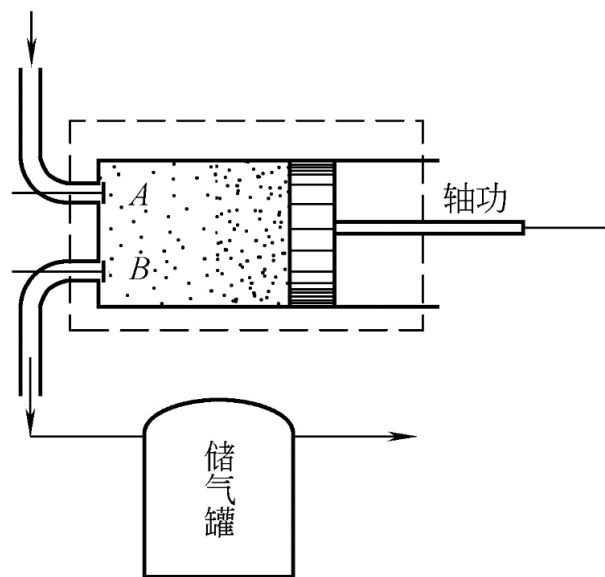
#### ✓ 理论压气过程的条件(假设)

不存在余隙；

压缩过程是可逆的；

气体流过进、排气阀时没有阻力损失

✓ 升压比  $\beta = \frac{P_2}{P_1}$



## 4.4 压气机的理论压缩轴功

### □ 单级活塞式压气机理论压气轴功的计算

轴功等于热力过程的压缩功(膨胀功的负值)和进气、排气所耗流动功代数和。

$$\begin{aligned} W_C &= \int_1^2 p dV + p_1 V_1 - p_2 V_2 = \int_1^2 p dV - (p_2 V_2 - p_1 V_1) = \int_1^2 p dV - \int_1^2 d(pV) \\ &= \int_1^2 p dV - \left( \int_1^2 p dV + \int_1^2 V dp \right) = - \int_1^2 V dp \end{aligned}$$

$$W_C = - \int_1^2 V dp$$

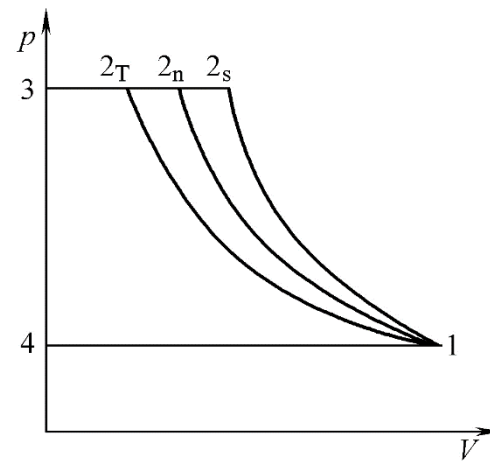
取决于过程的初、终态和压缩过程的性质。

## 4.4 压气机的理论压缩轴功

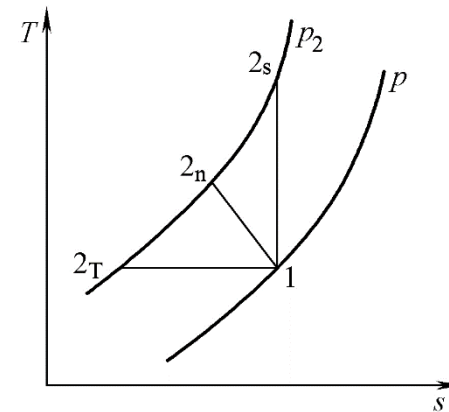
✓ 定温压缩

$$W_{C.T} = - \int_1^2 V dp = -p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1} = mRT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

消耗的轴功全部转化为热能向外界放出。



(a)



(b)

## 4.4 压气机的理论压缩轴功

### ✓ 定熵压缩

$$\begin{aligned} W_{C.S} &= - \int_1^2 V dp = \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \\ &= \frac{k}{k-1} m R (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

消耗的轴功全部用于增加气体的焓，使气体的温度升高。

### ✓ 多变压缩( $1 < n < k$ )

$$\begin{aligned} W_{C.n} &= - \int_1^2 V dp = \frac{n}{n-1} p_1 v_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \\ &= \frac{n}{n-1} m R (T_1 - T_2) \end{aligned}$$

消耗的轴功部分用于增加气体的焓，部分对外放热。

## 4.4 压气机的理论压缩轴功

✓ 三种压缩过程比较

$$W_{C.s} > W_{C.n} > W_{C.T}$$

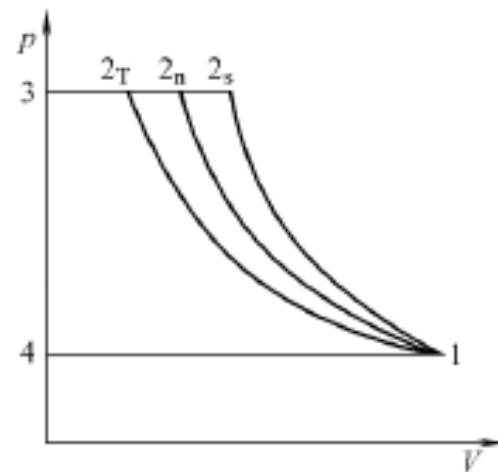
$$T_{2s} > T_{2n} > T_{2T}$$

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

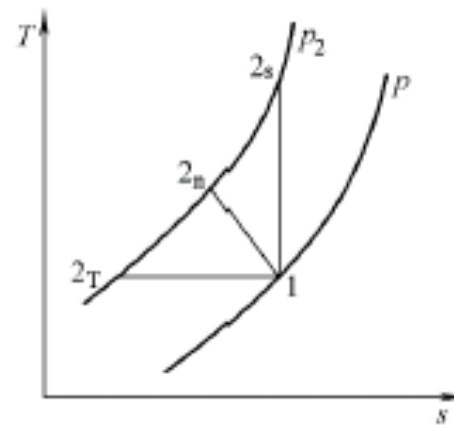
**改善压气机的工作性能主要是采用有效冷却措施，降低多变指数 $n$ 值，尽量接近于定温压缩。**

✓ 通常为多变压缩,  $1 < n < k$

$$n \uparrow \begin{cases} W_{Cn} \\ T_{2n} \\ v_{2n} \end{cases} \quad \uparrow$$



(a)



(b)

**思考：自行车轮胎压力通常应维持在0.25 MPa左右，用手动打气筒向轮胎充气时用湿毛巾包在打气筒外壁，会有什么后果？**

## 4.5 活塞式压气机的余隙影响

### □ 余隙对排气量的影响

✓ 为何存在余隙

- 进、排气阀安装;
- 公差配合需要;
- 热胀冷缩的需要

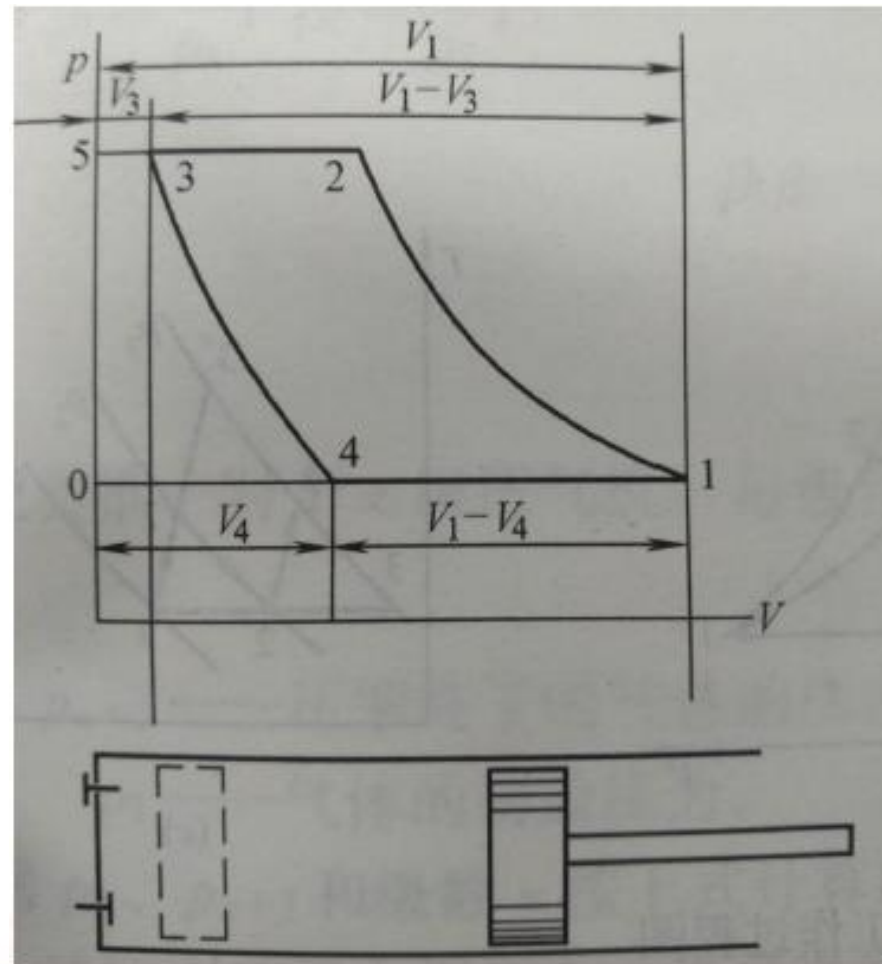
✓ 相关名词

余隙容积  $V_3$

$$\text{余隙百分比 } c = \frac{V_3}{V_1 - V_3} \times 100\%$$

$$\text{活塞排量} = V_1 - V_3$$

$$\text{有效吸气量} = V_1 - V_4$$





## 4.5 活塞式压气机的余隙影响

✓ 工作过程

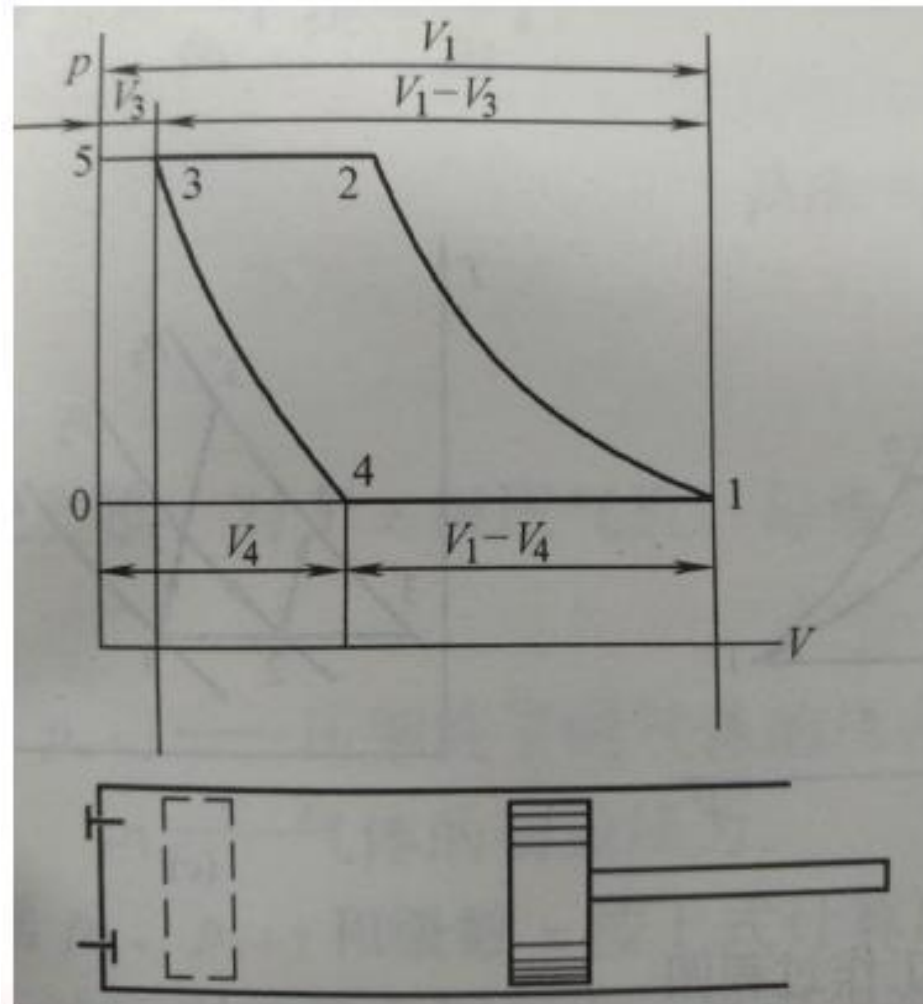
1-2 质量 $m_1$ 气体压缩:  $p_1 \rightarrow p_2$

2-3  $m_1 \frac{V_2 - V_3}{V_2}$  气体排向储气罐

3-4  $m_1 \frac{V_3}{V_2}$  气体膨胀:  $p_2 \rightarrow p_1$

4-1  $m_1 \frac{V_1 - V_4}{V_1}$  气体吸入气缸

生产量(每周期):  $m_{\text{生产量}} = m_1 \frac{V_1 - V_4}{V_1}$





✓ 容积效率

$$= 1 - c \left[ (\beta)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

## 讨论：

**a)  $V_3$  确定时,  $\beta \uparrow \quad \eta_V \downarrow \quad m_{\text{生产量}} \downarrow$**

**b) 升压比 $\beta$ 确定时,  $V_3 \uparrow \quad \eta_V \downarrow \quad m_{\text{生产量}} \downarrow$**



## 4.5 活塞式压气机的余隙影响

### □ 余隙对理论压缩轴功的影响

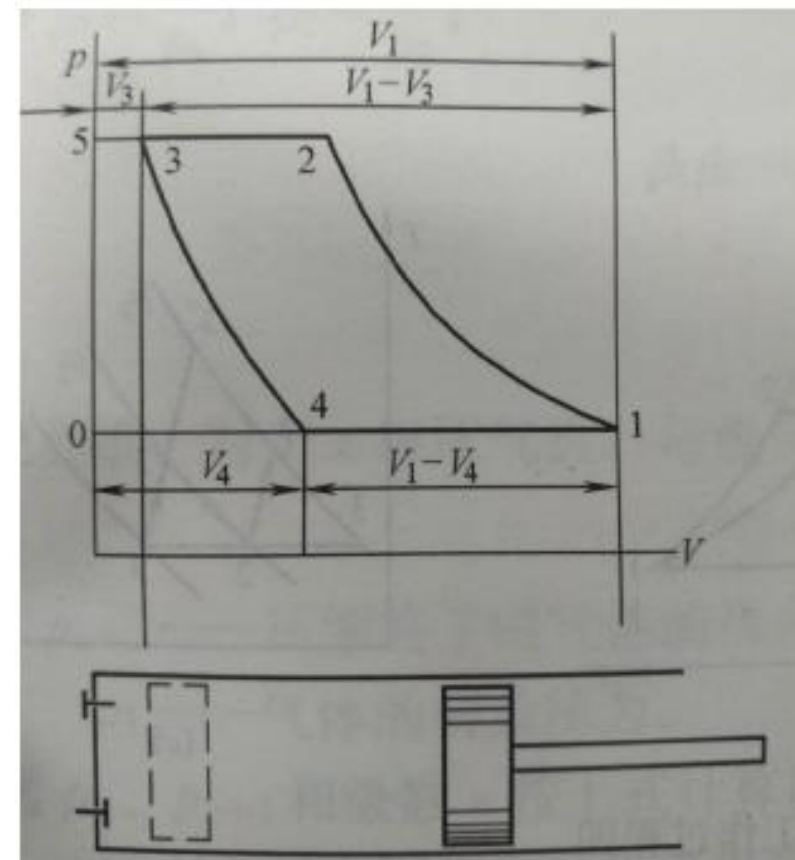
$$W_C = \text{面积}12341 = \text{面积}12501 - \text{面积}43504 = W_{1-2} - W_{3-4}$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) - \frac{n}{n-1} p_4 V_4 \left( 1 - \left( \frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 (V_1 - V_4) \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)$$

$$= \frac{n}{n-1} p_1 V \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right) = m_{\text{生产量}} \frac{n}{n-1} R T_1 \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)$$

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



**即余隙对单位产气量的理论耗功无影响**



## 4.5 活塞式压气机的余隙影响

### □ 余隙对理论压缩轴功的影响

归纳：

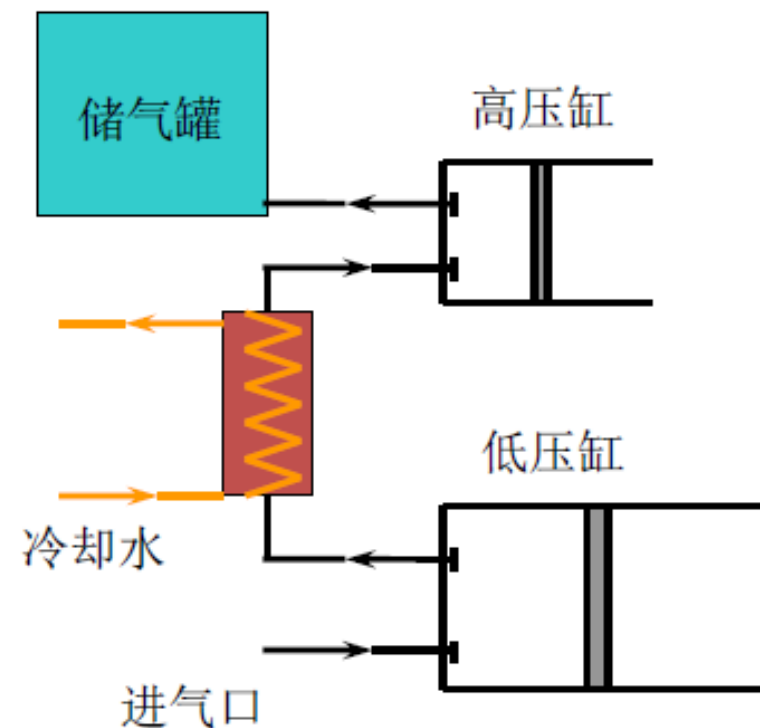
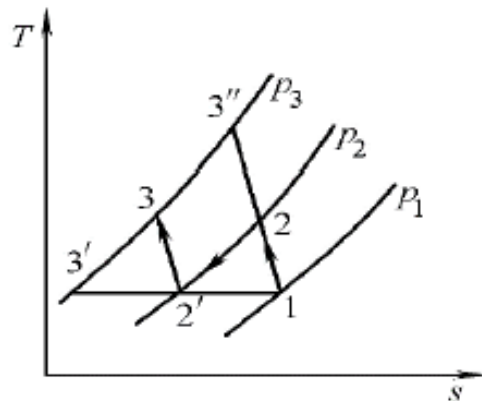
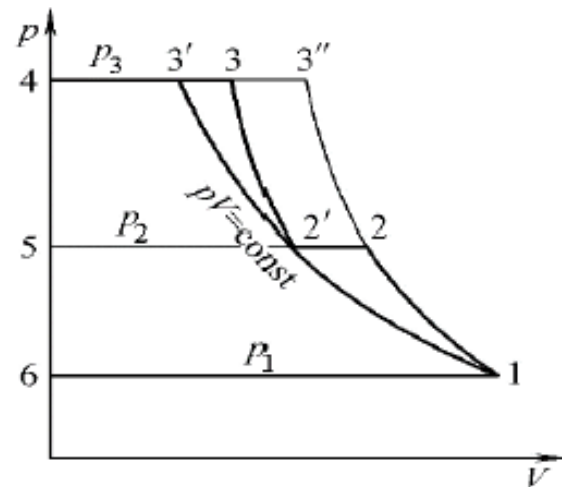
- 余隙存在使
- 1) **每周期生产量下降**
  - 2) **每周期理论耗功减少，  
但单位产气量的理论耗功不变**

## 4.6 多级压缩及中间冷却

### □ 多级活塞式压气机的工作过程

工程上需要高压气体，但压缩过程中随 $P$ 升高 $T$ 升高；此外，压缩终温过高会导致 $\eta_V$ 下降。

$$T_2 = T_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}$$



**目的：节省功的消耗；降低排气温度**

## 4.6 多级压缩及中间冷却

### □ 级间压力的确定

#### ✓ 理论耗功分析

每生产1 kg压缩气体:  $w_s = w_{s,l} + w_{s,h}$

$$\begin{aligned} &= \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \\ &+ \frac{n}{n-1} p_2 V_2 \left[ 1 - \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \\ &= \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[ 2 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - \left( \frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] \end{aligned}$$

当两级的升压比相同时, 两级压缩所需的总轴功为最小。

## 4.6 多级压缩及中间冷却

### □ 级间压力的确定

#### ✓ 理论耗功分析

$$\text{令 } \frac{dW_s}{dP_2} = 0 \quad \text{得 } P_2 = \sqrt{P_1 P_3}$$

$$\text{即 } \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_3}{P_2}$$

当两级的升压比相同时，两级压缩所需的总轴功为最小。

## 4.6 多级压缩及中间冷却

### □ 级间压力的确定

**推广：**若为 $Z$ 级,则 $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_Z = \sqrt[Z]{\frac{P_{Z+1}}{P_1}}$  时  $w_s = w_{s,min}$

有利之处：

**a.各级所耗轴功相等**  $w_{s,i} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left( 1 - \beta_i^{\frac{n-1}{n}} \right)$

有利于压气机曲轴平衡(总耗功 $w_s = Z w_{s,i}$ )

**b.各级气缸终温相同**  $T = T_1 \beta_i^{\frac{n-1}{n}}$  每个气缸的温度条件相同。

**c.各级气缸散热相同**  $q_i = \frac{n-k}{n-1} c_V \Delta T$

各中间冷却器散热相等  $q_{中,i} = c_P \Delta T$

**d.对提高整机容积效率 $\eta_v$ 有利** 采取冷却措施，力求接近定温压缩。



## 4.6 多级压缩及中间冷却

### □ 压气机的效率

#### ✓ 定温效率

$$\eta_{C,T} = \frac{W_{S,T}}{W'_S}$$

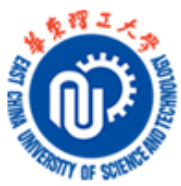
可逆与不可逆之比

#### ✓ 绝热压缩效率

$$\eta_{C,S} = \frac{W_{S,S}}{W'_{S,S}}$$

可逆与不可逆之比





## 4.6 多级压缩及中间冷却

**例4.6** 空气，三级压缩从  $0.1\text{MPa}$ ， $20^\circ\text{C}$  压缩到  $12.5\text{MPa}$ ，假定进入每级气缸时空气温度相等，各级多变指数  $n=1.3$ ， $m=120\text{kg/h}$ 。

求：①  $\beta_1$ ， $\beta_2$ ， $\beta_3$ ；

②各级排气温度及压气机最小功率；

③假如单级压缩，则出口气体温度及功率。



□思考题 全部

□习题 4-1、4-7、4-9、4-10、4-13、4-15

