

第四章

理想气体的热力过程

4-1 热力过程分析概述

在能量转换装置中，工质通过不同的热力过程实现能量转换。因此，研究各种热力过程的特点，确定过程中工质状态变化的规律及能量转换的规律，是热力分析的重要内容。

工程中，完成热功转换的热力循环都可以被抽象为由**定容**、**定压**、**定温**、**绝热**或**多变过程**构成。

从工质的状态变化过程、能量转换规律和这两者间的关系来说，闭口系统和稳定流动的开口系统的情况完全一样，所不可表现等形式，**质方面**

假设条件：

理想气体

无耗散准静态过程（可逆过程）

_____：
过程中状态参数的变化关系（ p 、 v 、 T 、 s 、 u 、 h ）；
过程中能量转换关系（ q 、 w ）；
过程曲线在 p - v 图及 T - s 图上的表示。

4-2 定容过程

定容过程：比体积保持不变时系统状态发生变化所经历的过程。

1、过程方程 $v = \text{常量}$

2、状态参数的关系 $pv = R_g T \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$

3、比热力学能 u $du = c_{v0} dT \Rightarrow u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{v0} dT = c_{v0} (T_2 - T_1)$

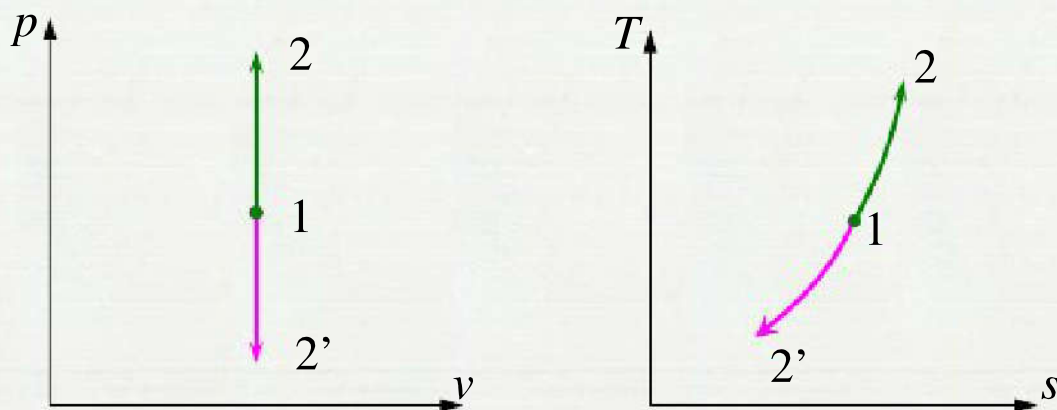
4、比焓 h $dh = c_{p0} dT \Rightarrow h_2 - h_1 = \int_1^2 c_{p0} dT = c_{p0} (T_2 - T_1)$

5、比熵 s $ds = c_{v0} \frac{dT}{T} = c_{v0} \frac{dp}{p} \Rightarrow s_2 - s_1 = c_{v0} \ln \frac{T_2}{T_1} = c_{v0} \ln \frac{p_2}{p_1}$

$$ds = c_{v0} \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$$

$$ds = c_{v0} \frac{dp}{p} + c_{p0} \frac{dv}{v}$$

6、定容过程在状态参数坐标图上的表示：



定容过程曲线在 T - s 图上的斜率？

$$\left. \begin{array}{l} \delta q = du + p dv \\ \delta q = T ds \\ du = c_{V0} dT \end{array} \right\} T ds = c_{V0} dT \Rightarrow \frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_{V0}}$$



7、热量的计算

$$q_{1-2} = u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{V0} dT = c_{V0} (T_2 - T_1)$$

定容过程中：系统吸热量=系统热力学能变化

8、功的计算

闭口系统，容积变化功 w_{1-2} ： $w_{1-2} = \int_1^2 p dv = 0$

（稳定流动，忽略工质的流动动能和重力位能的变化）
系统所作的轴功 w_s ：

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

4-3 定压过程

定压过程：压力保持不变时系统状态发生变化所经历的过程。

1、过程方程 $p = \text{常量}$

2、状态参数的关系 $pv = R_g T \Rightarrow \frac{v_1}{T_1} = \frac{v_2}{T_2}$

3、比热力学能 $u \quad du = c_{v0} dT \Rightarrow u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{v0} dT = c_{v0} (T_2 - T_1)$

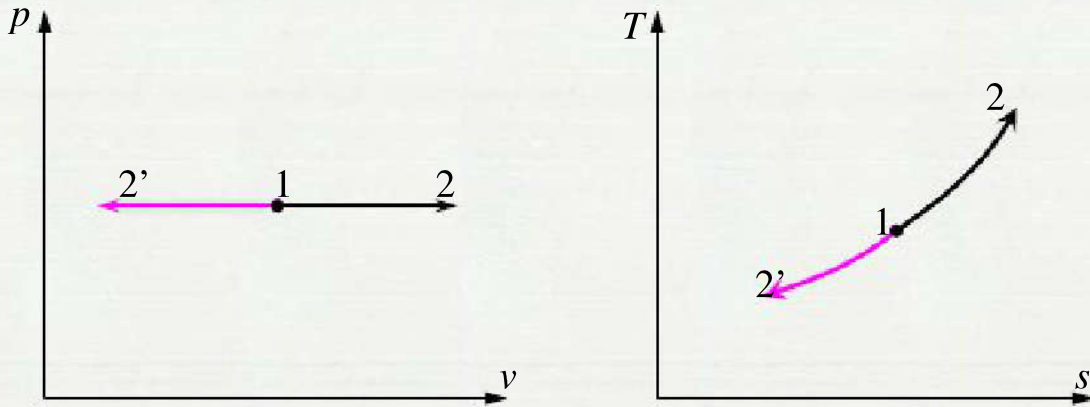
4、比焓 $h \quad dh = c_{p0} dT \Rightarrow h_2 - h_1 = \int_1^2 c_{p0} dT = c_{p0} (T_2 - T_1)$

5、比熵 $s \quad ds = c_{p0} \frac{dT}{T} = c_{p0} \frac{dv}{v} \Rightarrow s_2 - s_1 = c_{p0} \ln \frac{T_2}{T_1} = c_{p0} \ln \frac{v_2}{v_1}$

$$ds = c_{p0} \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}$$

$$ds = c_{v0} \frac{dp}{p} + c_{p0} \frac{dv}{v}$$

6、定压过程在状态参数坐标图上的表示：



定压过程曲线在 T - s 图上的斜率

$$\left. \begin{aligned} \delta q &= dh - v dp \\ \delta q &= T ds \\ dh &= c_{p0} dT \end{aligned} \right\} T ds = c_{p0} dT \Rightarrow \frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_{p0}}$$





7、热量的计算



$$q_{1-2} = h_2 - h_1 = c_{p0}(T_2 - T_1)$$

Σ



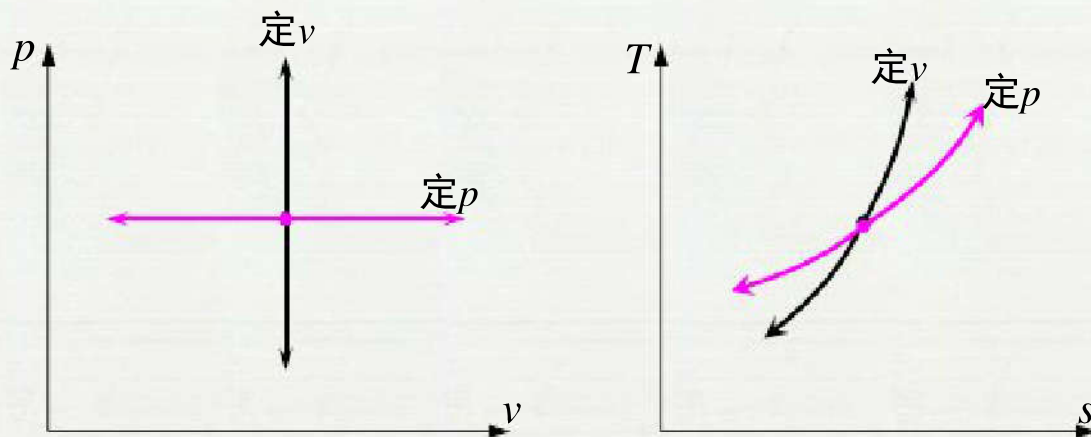
$$q_{1-2} = \int_1^2 c_{v0} dT + p(v_2 - v_1)$$

系统热力学能及对

$(T_2 - T_1)$

功动能和重力位能的变



9、关于定容、定压过程曲线在 $p-v$ 图上的斜率

定容过程: $\frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_{v0}}$

定压过程: $\frac{dT}{ds} = \frac{T}{c_{p0}}$

$c_{p0} > c_{v0}$ 定容过程曲线斜率大!



4-4 定温过程

定温过程：温度保持不变时系统状态发生变化所经历的过程。

1、过程方程： $pv=R_gT=\text{常量}$

2、状态参数的关系 $pv=R_gT \implies p_1v_1=p_2v_2$

3、比热力学能 $du=c_{v0}dT=0$

4、比焓 $dh=c_{p0}dT=0$

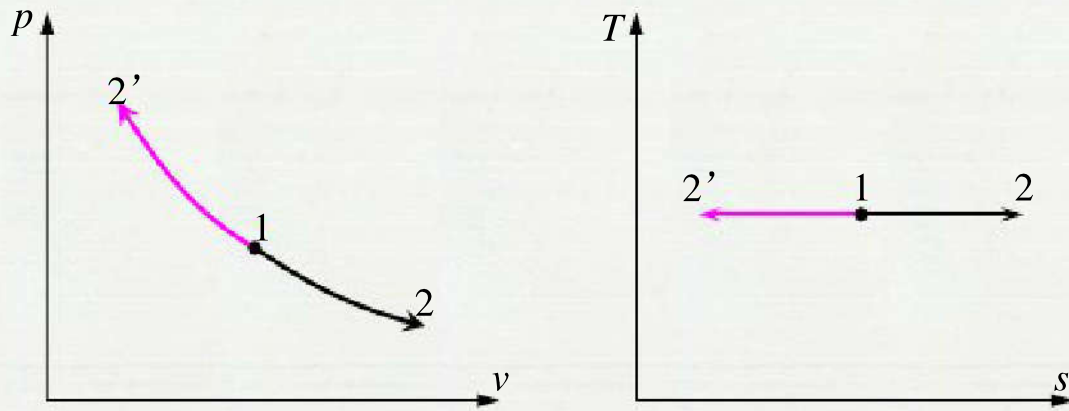
5、比熵 $ds=R_g\frac{dv}{v}=-R_g\frac{dp}{p} \implies s_2-s_1=R_g\ln\frac{v_2}{v_1}=R_g\ln\frac{p_1}{p_2}$

$$ds=c_{v0}\frac{dT}{T}+R_g\frac{dv}{v}$$

$$ds=c_{p0}\frac{dT}{T}-R_g\frac{dp}{p}$$



6、定温过程在状态参数坐标图上的表示：



定温过程曲线在 $p-v$ 图上的斜率？

7、热量计算

$$\delta q = du + \delta w \Rightarrow q_{1-2} = w_{1-2} = \int_1^2 p dv$$

定温过程中：系统吸热量 = 系统所作的容积变化功



8、功的计算

闭口系统，**容积变化功** w_{1-2} ：

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 R_g T_1 \frac{dv}{v} = R_g T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = R_g T_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

开口系统（稳定流动，忽略工质的流动动能和重力位能的变化），**系统所作的轴功**为 w_s ：

$$w_s = \int_1^2 (-v dp) = \int_1^2 p dv = w_{1-2}$$

$$d(pv) = p dv + v dp = 0$$

定温过程中：系统轴功 = 容积变化功 = 热量变化



4-5 绝热过程（比热容为定值）

系统和外界间不发生热量交换时，状态变化所经历的过程称为绝热过程。

$$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{0}{T} = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{可逆绝热过程} = \text{定熵过程}$$

1、过程方程：
$$ds = c_{v0} \frac{dp}{p} + c_{p0} \frac{dv}{v} = 0$$

$$\Rightarrow d(\ln p) + \gamma d(\ln v) = 0$$

$$\Rightarrow \ln(pv^\gamma) = \text{常量}$$

$$\Rightarrow pv^\gamma = \text{常量}$$

$$\Rightarrow pv^k = \text{常量}$$

对于理想气体：
 $\gamma = k$
(比热比 = 绝热指数)

2、状态参数的关系

$$pv^k = \text{常量}$$

$$pv^k = (pv)v^{k-1} = (R_g T)v^{k-1} = \text{常量} \Rightarrow T_1 v_1^{k-1} = T_2 v_2^{k-1} = \text{常量}$$

$$pv^k = \frac{p^k}{p^{k-1}} v^k = \frac{(R_g T)^k}{p^{k-1}} = \text{常量} \Rightarrow \frac{T_1}{p_1^{(k-1)/k}} = \frac{T_2}{p_2^{(k-1)/k}} = \text{常量}$$

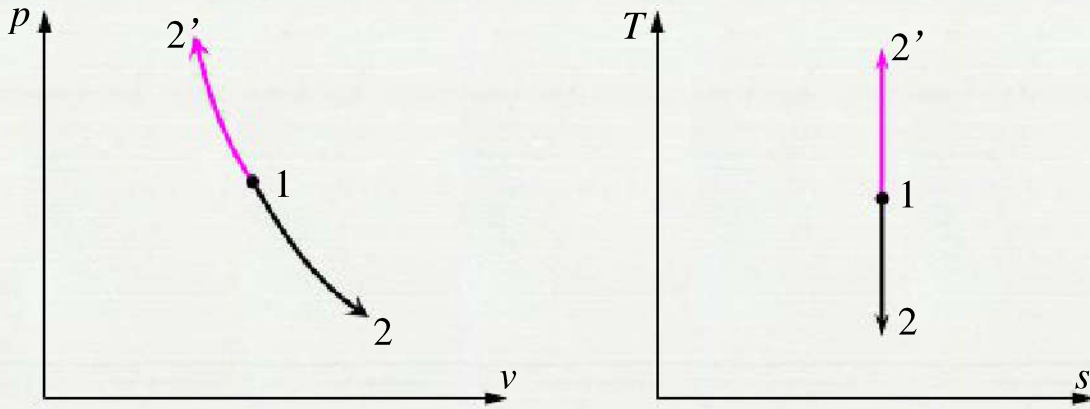
$$3、\text{比热力学能 } u \quad u_2 - u_1 = \int_1^2 c_{v0} dT = c_{v0}(T_2 - T_1)$$

$$4、\text{比焓 } h \quad h_2 - h_1 = \int_1^2 c_{p0} dT = c_{p0}(T_2 - T_1)$$

$$5、\text{比熵 } s \quad ds = 0$$



6、定熵过程在状态参数坐标图上的表示：



定熵过程曲线在 $p-v$ 图上的斜率？

7、热量的计算

$$q_{1-2} = 0$$



8、功的计算

闭口系统，**容积变化功** w_{1-2} ：

$$q_{1-2} = (u_2 - u_1) + w_{1-2} = 0 \quad \Rightarrow \quad w_{1-2} = u_1 - u_2 = \int_1^2 c_{V0} dT$$

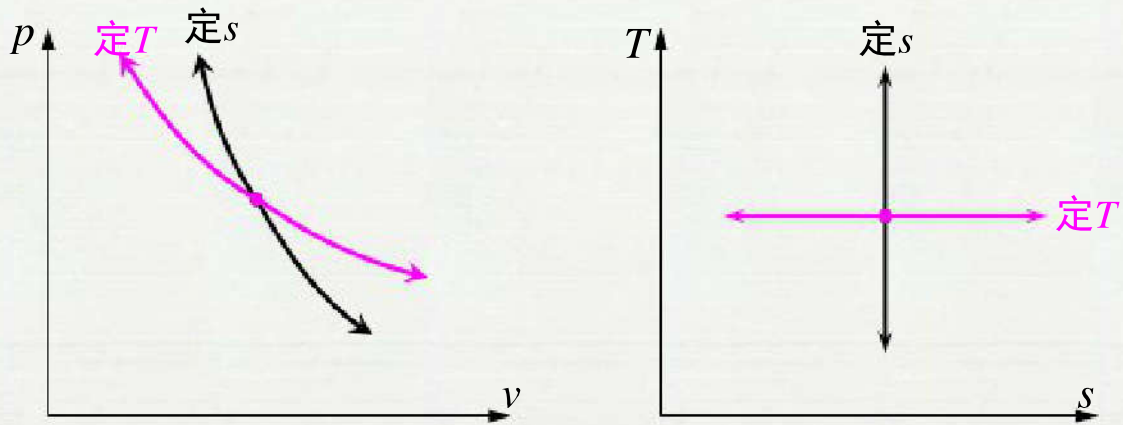
$$= c_{V0}(T_1 - T_2) = \frac{R_g}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{1}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]$$

开口系统（稳定流动，忽略工质的流动动能和重力位能的变化），**系统所作的轴功** w_s ：

$$w_s = h_1 - h_2 = \int_2^1 c_{p0} dT = -\Delta h \quad \leftarrow \text{根据稳定流动能量方程}$$

$$w_s = \int_1^2 (-v dp) = k \int_1^2 p dv = k w_{1-2}$$

$$pv^k = \text{常量} \quad \Rightarrow \quad k p dv + v dp = 0$$

9、关于定温、定熵过程曲线在 $p-v$ 图上的斜率

$$pv^n = \text{常量} \Rightarrow npdv + vdp = 0 \Rightarrow \frac{dp}{dv} = -n \frac{p}{v}$$

定温过程: $n=1$

定熵过程: $n=k$

$k > 1$, 定熵过程曲线斜率大!



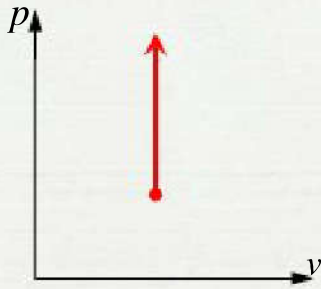
四个典型热力过程曲线方向的判断

$$Tds = c_{v0}dT + pdv$$

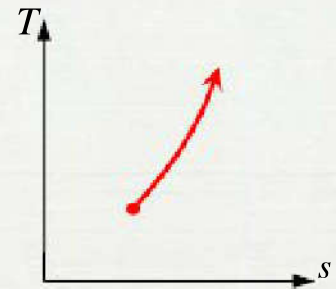
$$Tds = c_{p0}dT - vdp$$

$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T}$$

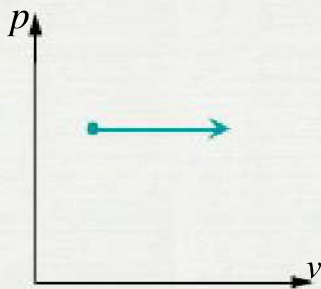
(1) 定容过程



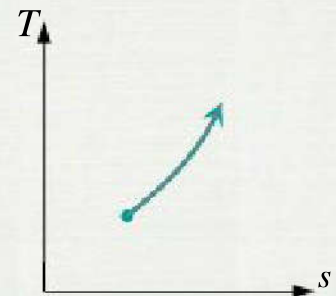
$$\begin{aligned} dv &= 0 \\ dp &> 0 \end{aligned} \Rightarrow dT > 0$$



(2) 定压过程



$$\begin{aligned} dp &= 0 \\ dv &> 0 \end{aligned} \Rightarrow dT > 0$$



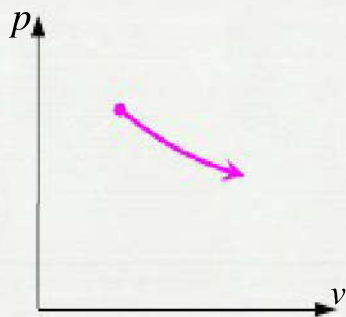


$$Tds = c_{v0}dT + pdv$$

$$Tds = c_{p0}dT - vdp$$

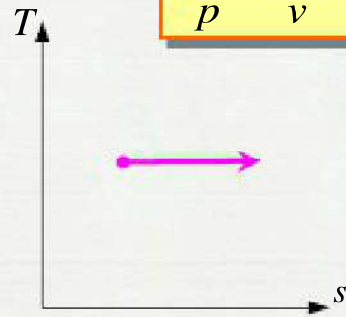
$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} = \frac{dT}{T}$$

(3) 定温过程

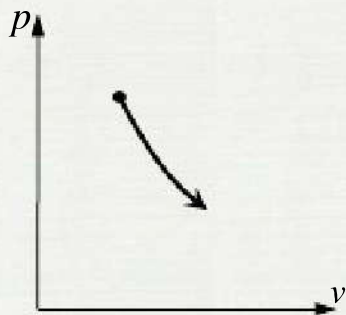


$$dT = 0$$

$$dv > 0 \Rightarrow ds > 0$$

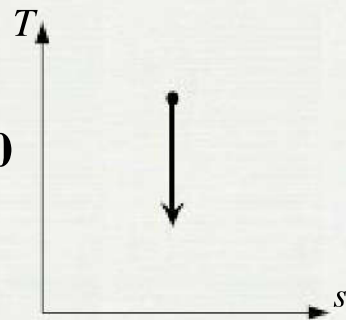


(4) 定熵过程



$$ds = 0$$

$$dv > 0 \Rightarrow dT < 0$$



4-6 多变过程

1、过程方程：

各种热力过程的**过程方程式**通常都可以表示为下述形式：

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

n 称为**多变指数**，显然 n 取不同数值时，状态参数的变化过程不同，过程的性质也不同，所以**上式代表了无穷多个性质不同的过程**，这类过程统称为**多变过程**。

四种典型过程均为多变过程的某种特例：

$$n = 0 \quad \text{定压过程} \quad pv^0 = \text{常量} = p$$

$$n = 1 \quad \text{定温过程} \quad pv^1 = \text{常量} = R_g T$$

$$n = k \quad \text{定熵过程} \quad pv^k = \text{常量}$$

$$n = \infty \quad \text{定容过程} \quad p^{1/n} v = p^0 v = v = \text{常量}$$



2、状态参数之间的关系

$$pv^n = \text{常量}$$



———— ————



———— / ———— /

—— ———— ———— ———— ————



———— ———— ———— ———— ————



6、功的计算

闭口系统，**容积变化功** w_{1-2} ：

作业1-17

$$w_{1-2} = \int_1^2 p dv = \int_1^2 p_1 v_1^n \frac{dv}{v^n} = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} \right]$$

开口系统（稳定流动，忽略工质的流动动能和重力位能的变化），则多变过程中**系统所作的轴功**为 w_s ：

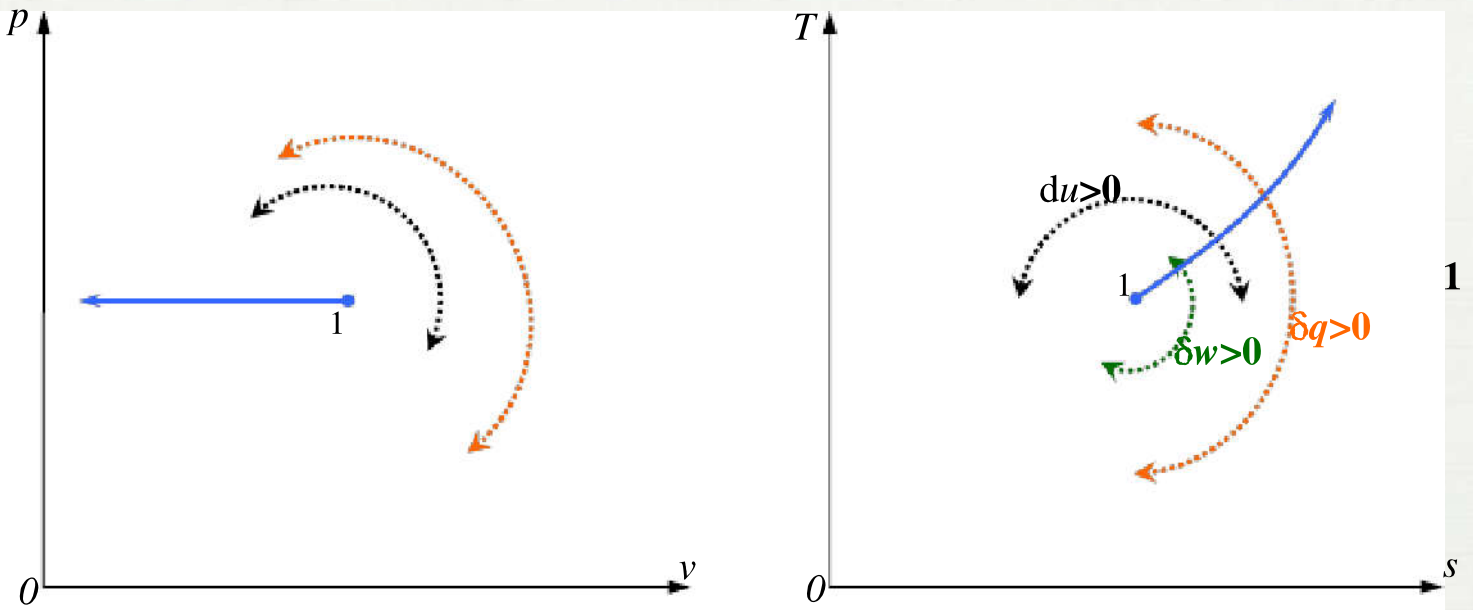
$$w_s = \int_1^2 (-v dp) = n \int_1^2 p dv = n w_{1-2} = \frac{n R_g}{n-1} (T_1 - T_2)$$

7、热量计算

$$\begin{aligned} q_{1-2} &= u_2 - u_1 + \int_1^2 p dv = c_{v0} (T_2 - T_1) + \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2) = c_{v0} \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1) \\ &= c_n (T_2 - T_1) \end{aligned}$$



8、多变过程在状态参数坐标图上的表示：



$$\delta w = p dv$$

$$du = c_{v0} dT$$

$$\delta q = T ds$$

$$dh = c_{p0} dT$$

9、实际多变过程中多变指数 n 的求取

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

$$\Rightarrow \ln p_1 + n \ln v_1 = \ln p_2 + n \ln v_2$$

$$\Rightarrow n = \frac{\ln p_1 - \ln p_2}{\ln v_2 - \ln v_1}$$

