

《工程热力学》期末总结

一、闭口系能量方程的表达式有以下几种形式：

1kg 工质经过有限过程： $q = \Delta u + w$  ( 2-1 )

1kg 工质经过微元过程： $\delta q = du + \delta w$  ( 2-2 )

mkg工质经过有限过程： $Q = \Delta U + W$  ( 2-3 )

mkg 工质经过微元过程： $\delta Q = dU + \delta W$  ( 2-4 )

以上各式，对闭口系各种过程（可逆过程或不可逆过程）及各种工质都适用。  
在应用以上各式时，如果是可逆过程的话，体积功可以表达为：

$\delta w = pdv$  ( 2-5 )  
 $w = \int_1^2 pdv$  ( 2-6 )

$\delta W = pdV$  ( 2-7 )  
 $W = \int_1^2 pdV$  ( 2-8 )

闭口系经历一个循环时，由于  $U$  是状态参数， $\oint dU = 0$ ，所以

$\oint \delta Q = \oint \delta W$  ( 2-9 )

式（2-9）是闭口系统经历循环时的能量方程，即任意一循环的净吸热量与净功量相等。  
二、稳定流动能量方程

$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g \Delta z + w_s$  ( 2-10 )  
 $= \Delta h + w_t$

（适用于稳定流动系的任何工质、任何过程）

$q = \Delta h - \int_1^2 vdp$  ( 2-11 )

（适用于稳定流动系的任何工质、可逆过程）

三、几种功及相互之间的关系（见表一）

表一 几种功及相互之间的关系

名称	含义	说明
体积功（或膨胀功） $w$	系统体积发生变化所完成的功。	当过程可逆时， $w = \int_1^2 pdv$ 。 膨胀功往往对应闭口系所求的功。
轴功 $w_s$	系统通过轴与外界交换的功。	开口系，系统与外界交换的功为轴功 $w_s$ 。  当工质的进出口间的动位能差被忽略时， $w_t = w_s$ ， 所以此时开口系所求的轴功也是技术功。

推 动 功 $W_{\text{push}}$	开口系因工质流动而传递的功。	相当于一假想的活塞把前方的工质推进（或推出）系统所做的功， $W_{\text{push}} = pV$ 。  推动功只有在工质流动时才有，当工质不流动时，虽然也有 $p$ 和 $V$ ，但其乘积并不代表推动功。
流动功 $W_f$	工质流动时，总是从后面获得推动功，而对前面作出推动功，进出质量的推动功之差，称为流动功。	$W_f = p_2 V_2 - p_1 V_1$
技术功 $W_t$	技术上可资利用的功。	$W_t = \frac{1}{2} m \Delta c^2 + mg \Delta z + W_s$  当过程可逆时， $W_t = - \int_1^2 V dp$

#### 四、比热容

##### 1、比热容的种类（见表二）

表二 比热容的种类

名称	质量比热容 $c$	体积比热容 $c'$	摩尔比热容 $M_c$	三者之间的关系
单位	J/ ( kg · K)	J/ ( m <sup>3</sup> · K)	J/ ( kmol · K)	$c' = c \rho_0 = \frac{M_c}{22.4}$ $\rho_0$ — 气体在标准状况下的密度 ( m <sup>3</sup> / kg )。
定压	$c_p$	$c'_p$	$M_{c_p}$	
定容	$c_v$	$c'_v$	$M_{c_v}$	

2、平均比热容：
$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{c \Big|_0^{t_2} - c \Big|_0^{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (2-12)$$

3、利用平均比热容计算热量：
$$q = c \Big|_0^{t_2} - c \Big|_0^{t_1} \quad (2-13)$$

##### 4、理想气体的定值比热容（见表三）

表三 理想气体的定值比热容

气体种类	$c_v$ / [J/(kg · K)]	$c_p$ / [J/(kg · K)]	$k = \frac{c_p}{c_v}$
单原子	$\frac{3}{2} R_g$	$\frac{5}{2} R_g$	1.67
双原子	$\frac{5}{2} R_g$	$\frac{7}{2} R_g$	1.40
多原子	$\frac{7}{2} R_g$	$\frac{9}{2} R_g$	1.29

其中：  $R_g = \frac{R_0}{M} = \frac{8314}{M} \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$

M —气体的摩尔质量，如空气的摩尔质量为 28.96kg/kmol。

空气的  $R_g = \frac{R_0}{M} = \frac{8314 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}}{28.96 \text{ kg / kmol}} = 287 \text{ [J/(kg} \cdot \text{K)]}$ ，最好记住空气的气体常数。

引入比热容比 k 后，结合梅耶公式，又可得：

$c_p = \frac{k}{k-1} R_g \quad (2-14) \qquad c_v = \frac{1}{k-1} R_g \quad (2-15)$

五、理想气体的热力学能、焓、熵（见表四）

表四 理想气体的热力学能、焓、熵

类型	热力学能	焓	熵
微元变化	$du = c_v dT$	$dh = c_p dT$	$ds = c_v \frac{dT}{T} + R_g \frac{dv}{v}$ $ds = c_p \frac{dT}{T} - R_g \frac{dp}{p}$
有限变化 ( 真实比热容 )	$\Delta u = \int_1^2 c_v dT$	$\Delta h = \int_1^2 c_p dT$	$\Delta s = \int_1^2 c_v \frac{dT}{T} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = \int_1^2 c_p \frac{dT}{T} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$
有限变化 ( 定值比热容 )	$\Delta u = c_v \Delta T$	$\Delta h = c_p \Delta T$	$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$ $\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$

（焓的定义：  $h = u + pv \text{ kJ/kg}$ ，焓是状态参数）

六、气体主要热力过程的基本计算公式（见表五）

表五 气体主要热力过程的基本计算公式

过程	定容过程	定压过程	定温过程	定熵过程	多变过程
过程指数		0	1	k	n
过程方程	$v = \text{常数}$	$p = \text{常数}$	$pv = \text{常数}$	$pv^k = \text{常数}$	$pv^n = \text{常数}$
P、v、T 的关系	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1}$	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{v_2}{v_1}$	$p_1 v_1 = p_2 v_2$	$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$ $= \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$	$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n$ $\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{n-1}$ $= \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$
$\Delta u$ 、 $\Delta h$ 、 $\Delta s$ 的计算式	$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$ $\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$ $\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$ $\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$ $\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta u = 0$ $\Delta h = 0$ $\Delta s = R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$ $= R_g \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$ $\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$ $\Delta s = 0$	$\Delta u = c_v (T_2 - T_1)$ $\Delta h = c_p (T_2 - T_1)$ $\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R_g \ln \frac{v_2}{v_1}$ $= c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R_g \ln \frac{p_2}{p_1}$
膨胀功 $w = \int_1^2 p dv$	$w = 0$	$w = p(v_2 - v_1)$ $= R_g (T_2 - T_1)$	$w = R_g T \ln \frac{v_2}{v_1}$ $= R_g T \ln \frac{p_1}{p_2}$	$w = -\Delta u$ $= \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $= \frac{R_g}{k-1} (T_1 - T_2)$	$w = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$ $= \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2)$ $= \frac{R_g T_1}{n-1} \left[ 1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$
技术功 $w_t = - \int_1^2 v dp$	$w_t = v(p_2 - p_1)$	$w_t = 0$	$w_t = - \int_1^2 v dp$ 忽略动能、位能的变化时： $w_t = w$	$w_t = kw$ $w_t = h_1 - h_2$	$w_t = nw$ ( $n \neq 1$ )
热量 $q = \int_1^2 c dT$ $= \int_1^2 T ds$	$q = \Delta u$ $= c_v (T_2 - T_1)$	$q = \Delta h$ $= c_p (T_2 - T_1)$	$q = T \Delta s$ $= w$	$q = 0$	$q = \frac{n-k}{n-1} c_v (T_2 - T_1)$ ( $n \neq 1$ )
比热容	$c_v$	$c_p$		0	$c_n = \frac{n-k}{n-1} c_v$

备注：表中比热容为定值比热容

## 七、压气机工作原理及轴功的计算

### 1、压气机的工作原理

2、基本计算公式：
$$w_c = w_t = w_s = - \int_1^2 v dp$$

T: 
$$w_{s,T} = - \int_1^2 v dp = - p_1 v_1 \ln \frac{p_2}{p_1}$$

S: 
$$w_{s,s} = \frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2)$$

n: 
$$w_{s,n} = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2)$$

3、压气机升压比  $p_2 / p_1$ ，压缩终温会升高，容积效率  $\lambda_v$  下降。

4、采用多级压缩的优点是：降低排气温度，节省功的消耗。

5、当压气机采用两级压缩时，升压比  $\beta = \sqrt{\frac{p_3}{p_1}}$ ，最有力的级间压力： $p_2 = \sqrt{p_1 p_3}$ ，

多级（Z级）压缩时： $\beta = \sqrt[Z]{\frac{p_z}{p_1}}$ 。

## 八、热力学第二定律：

1、热力学第二定律的实质、表述：克劳修斯说法、开尔文 - 浦朗克说法。

2、热力学第二定律的数学表达式，会利用这些表达式判断过程或循环是否能够实现。

克劳修斯积分不等式：

$$\oint \frac{\delta q}{T} \leq 0$$

等号对可逆循环而言，不等号对不可逆循环成立。

$$\Delta s \geq \int \frac{\delta q}{T}$$

等号对可逆过程而言，不等号对不可逆过程成立。

$$\Delta s_{iso} \geq 0$$

熵增原理：孤立系统的熵只能增加（不可逆过程）或保持不变（可逆过程），而绝不能减少。

任何实际过程都是不可逆过程，只能沿着使孤立系统熵增加的方向进行。

注意：

克劳修斯积分不等式适用于循环，即针对工质，所以热量、功的正和负都以工质作为对象考虑。

熵增原理表达式适用于孤立系统，热量的方向以构成孤立系统的有关物体为对象，它们吸热为正，放热为负。

3、卡诺循环及卡诺定理是重点。

## 九、水蒸气

- 1、基本概念：三相点、临界点、饱和状态、 $p_s$ ， $t_s$ ，湿蒸汽、干饱和蒸汽等。
- 2、水蒸气的定压发生过程：三个阶段。
- 3、水蒸气的  $p-v$  图与  $T-s$  图特点：一点、两线、三区、五态的含义。
- 4、会查水蒸气表，会查  $h-s$  图。
- 5、水蒸气的四个基本热力过程  $p$ 、 $T$ 、 $v$ 、 $S$  在  $h-s$  图上的表示和热量及功量的计算。

## 十、湿空气

- 1、定义， $p = p_a + p_v$
- 2、饱和空气、未饱和空气、绝对湿度、相对湿度、含湿量、焓、干球温度、湿球温度、露点温度的含义，湿空气的分子量和气体常数的计算；湿空气的比体积等。
- 3、重点掌握以下计算公式：

$$\rho_v = \frac{m_v}{V} = \frac{p_v}{R_v T} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\rho_s = \frac{p_s}{R_v T} \quad (\text{kg/m}^3)$$

$$\varphi = \frac{\rho_v}{\rho_s} = \frac{p_v}{p_s}$$

相对湿度  $\varphi$  反映了湿空气中水蒸气含量接近饱和的程度。在某温度  $t$  下， $\varphi$  值小，表示空气干燥，具有较大的吸湿能力； $\varphi$  值大，表示空气潮湿，吸湿能力小。

$\varphi=0$  时，为干空气；

$\varphi=1$  时，为饱和空气；

$0 < \varphi < 1$  时，为未饱和空气。



$$d = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\rho_v}{\rho_a}$$

$$d = 622 \frac{p_v}{B - p_v} \quad (\text{g/kg(a)})$$

$$d = 622 \frac{\varphi p_s}{B - \varphi p_s} \quad (\text{g/kg(a)})$$

$$v = \frac{R_a \cdot T}{p} (1 + 0.001606d) \quad (\text{m}^3/\text{kg(a)})$$

$$\rho = \frac{1 + 0.001d}{v}$$

$$h = 1.01t + 0.001d(2501 + 1.85t) \quad (\text{kJ/kg(a)})$$

4、掌握湿空气焓 - 湿图的结构及其应用。已知某状态点，会在焓 - 湿图上表示这个状态点，并会查出此状态点的其余参数，确定此状态点所对应的湿球温度、露点温度（参看教材 p151: 例 8-3）。

4、会用湿空气焓 - 湿图表示湿空气的基本热力过程：加热、等湿冷却、去湿冷却、绝热加湿（等焓过程）、定温加湿、湿空气的混合。会计算过程中吸收或放出的热量、加湿量、去湿量、混合后的状态点的位置等。

十一、气体和蒸汽的流动：

1、基本方程：

$$\begin{cases} \dot{m} = \frac{cf}{v} = \text{常数} \\ \frac{dc}{c} + \frac{df}{f} - \frac{dv}{v} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} dh + d \frac{c^2}{2} = 0 \\ h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2} = \text{常数} \end{cases}$$

$$\begin{cases} pv^k = \text{常数} \end{cases}$$

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

2、理想气体定熵流动： $a = \sqrt{kRT}$

$$3、M = \frac{c}{a}$$

$M > 1$  超音速流动

$M = 1$  临界音速流动

$M < 1$  亚音速流动

4、喷管的作用：降压增速。

5、喷管的计算

(1) 滞止参数

$$h_0 = h_1 + \frac{c_1^2}{2} = h_2 + \frac{c_2^2}{2}$$

$$T_0 = T_1 + \frac{c_1^2}{2c_p}$$

$$p_0 = p_1 \left( \frac{T_0}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, v_0 = v_1 \left( \frac{T_1}{T_0} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

(2) 喷管出口流速： $c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2c_p(T_1 - T_2)}$  [注意：h 的单位是 J/(kg.K)]

(3) 临界压力比： $\beta = \frac{p_c}{p_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

特别是：对双原子气体，如空气： $\beta = 0.528$ ，记住这个数据。

(4) 临界温度： $T_c = \frac{2T_1}{k+1}$

(5) 临界流速： $c_c = \sqrt{kRT_c}$

(6) 喷管出口压力  $p_2$  要根据背压  $p_b$  确定。

为使气流充分膨胀，对渐缩喷管：



$$\begin{cases} p_b > p_c & p_2 = p_b \\ p_b \leq p_c & p_2 = p_c \end{cases}$$

(7) 最大流量

$$\dot{m}_{\max} = \frac{f_{\min} C_c}{v_c}$$

(8) 喷管形式的选择：

$$p_b \geq p_c, \quad \text{渐缩喷管}$$

$$p_b < p_c, \quad \text{渐缩渐扩喷管}$$

## 十二、动力循环

1、蒸汽动力基本循环—朗肯循环是重点，应切实掌握。

(1) 会画其流程图及 T-s 图。

(2) 会能量分析及热效率的计算。

(3) 提高朗肯循环热效率的基本途径。

2、掌握抽汽回热循环、再热循环的工作原理。

3、掌握背压式、调解抽汽式热电循环的工作原理。

4、理解内燃机循环的工作原理及相应的三种理论循环。

5、掌握燃气轮机循环的工作原理及分析计算是重点，应切实掌握。

## 十三、制冷循环

1、空气压缩制冷循环的组成，工作原理及 p-v 图、T-s 图。

2、蒸汽压缩制冷循环的组成，工作原理，T-s 图。

3、什么是 lg p-h 图，图中有哪些线族？蒸汽压缩式制冷循环如何在 lg p-h 图上表示，

并利用 lg p-h 图进行能量分析及制冷系数的计算。

4、热泵的工作原理及供热系数的计算。