

第七章 气体和蒸汽的流动

习 题

7-1 空气以 $c_f = 180\text{m/s}$ 的流速在风洞中流动，用水银温度计测量空气的温度，温度计上的读数是 70°C ，假定气流通在温度计周围得到完全滞止，求空气的实际温度（即所谓热力学温度）。

提示和答案： $T^* = T_1 + c_f^2 / (2c_p)$ ，注意比热容的单位。 $t_1 = 53.88^\circ\text{C}$

7-2 已测得喷管某一截面空气的压力为 0.5MPa ，温度为 800K ，流速为 600m/s ，若空气按理想气体定比热容计，试求滞止温度和滞止压力。

提示和答案： 绝热滞止可近似为等熵过程。 $T_0 = 979.1\text{K}$ 、 $p_0 = 1.014\text{MPa}$ 。

7-3 喷气发动机前端是起扩压器作用的扩压段，其后为压缩段。若空气流以 900km/h 的速度流入扩压段，流入时温度为 -5°C ，压力为 50kPa 。空气流离开扩压段进入压缩段时速度为 80m/s ，此时流通截面积为入口截面积的 80% ，试确定进入压缩段时气流的压力和温度。

提示和答案： 流动过程中理想气体也满足状态方程，扩压段内过程可近似为等熵过程，且各截面的质量流量相等。 $T_2 = 296.06\text{K}$ 、 $p_2 = 215.7\text{kPa}$ 。

7-4 进出口截面积 $A_2 = 10\text{cm}^2$ 的渐缩喷管空气初参数为 $p_1 = 2 \times 10^6\text{Pa}$ 、 $t_1 = 27^\circ\text{C}$ ，初速度很小可忽略不计。求空气经喷管射出时的速度，流量以及出口截面处空气的状态参数 v_2 、 t_2 。设空气取定值比热容， $c_p = 1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、 $\kappa = 1.4$ ，喷管的背压力 p_b 分别为 1.5MPa 和 1MPa 。

提示和答案： 初速度很小，进口截面的温度和压力即为滞止温度和滞止压力，比较两种喷管的背压力与临界的关系可确定两种情况的出口截面压力，从而求解得背压 $p_b = 1.5\text{MPa}$ 时， $t_2 = 3.32^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.0529\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 218.2\text{m/s}$ 、 $q_m = 4.12\text{kg/s}$ ；背压 $p_b = 1\text{MPa}$ 时， $t_2 = -23.06^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.0680\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 317.2\text{m/s}$ 、 $q_m = 4.66\text{kg/s}$ 。

7-5 空气进入渐缩喷管时的初速为 200m/s ，初压为 1MPa ，初温为 500°C 。求喷管达到最大流量时出口截面的流速、压力和温度。

提示和答案：初态及 A_2 确定的收缩喷管内的流动，出口截面为临界截面，即流速达到音速时，流量最大。 $p_2 = 0.5771\text{MPa}$ 、 $T_2 = 660.7\text{K}$ 、 $c_2 = 515.2\text{m/s}$ 。

7-6 空气流经渐缩喷管。在喷管某一截面处，压力为 0.5MPa ，温度为 540°C ，流速为 200m/s ，截面积为 0.005m^2 。试求：(1) 气流的滞止压力及滞止温度；(2) 该截面处的音速及马赫数；(3) 若喷管出口处的马赫数等于 1，求出口截面积、出口温度、压力及速度。

提示和答案：稳定工况下喷管各截面流量相等，利用已知参数截面上的参数求出滞止参数可解得 $T_0 = 832.9\text{K}$ 、 $p_0 = 0.544\text{MPa}$ ； $c = 571.5\text{m/s}$ 、 $Ma = 0.350$ ； $p_2 = 0.2872\text{MPa}$ 、 $T_2 = 694.0\text{K}$ 、 $c_{f2} = 528.1\text{m/s}$ 、 $v_2 = 0.6935\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $A_2 = 28.1 \times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

7-7 燃气经过燃气轮机中渐缩喷管形的通道绝热膨胀，燃气的初参数为 $p_1 = 0.7\text{MPa}$ 、 $t_1 = 75^\circ\text{C}$ ，燃气在通道出口截面上的压力 $p_2 = 0.5\text{MPa}$ ，经过通道的流量 $q_m = 0.6\text{kg/s}$ ，若通道进口处流速及通道中的磨擦损失均可忽略不计，求燃气外射速度及通道出口截面积。（燃气比热容按变值计算，设燃气的热力性质近似地和空气相同，其热焓可查附表）

提示和答案：据 t_1 查附表得 p_{r1} 及 h_1 ，再由 $p_{r2} = p_{r1} \frac{p_2}{p_1}$ ，查附表得 T_2 及 h_2 ，解得

$$c_{f2} = 435.25\text{m/s}, A_2 = 7.44 \times 10^{-4}\text{m}^2。$$

7-8 有一玩具火箭装满空气，其参数为： $p = 13.8\text{MPa}$ 、 $t = 43.3^\circ\text{C}$ 。空气经缩放喷管排向大气产生推力。已知：喷管喉部截面积为 1mm^2 ，出口上截面压力与喉部压力之比为 $1:10$ ，试求稳定情况下火箭的净推力。（ $p_0 = 0.1\text{MPa}$ ）

提示和答案：据缩放喷管喉部特性及截面积可得 $p_{cr} = 7.2864\text{MPa}$ 、 $T_{cr} = 263.67\text{K}$ 、

$$v_{cr} = 0.0104\text{m}^3/\text{kg}、c_{cr} = 325.49\text{m/s}、q_m = \frac{A_{cr}c_{cr}}{v_{cr}} = 0.0313\text{kg/s}。而 $p_{cr}:p_2 = 10:1$ ，$$

故 $p_2 = 0.72864\text{MPa}$ ，进而求得 $T_2 = 136.57\text{K}$ 、 $v_2 = 0.0538\text{m}^3/\text{kg}$ 、 $c_{f2} = 601.0\text{m/s}$ 、

$$A_2 = \frac{q_m v_2}{c_{f2}} = 2.8 \times 10^{-6}\text{m}^2，稳定情况下火箭的净推力为喷气动量和出口截面两侧作用力差：$$

$$F = q_m c_{f2} + \Delta p A_2 = 20.6\text{N}。$$

7-9 内燃机排出的废气压力为 0.2MPa，温度为 550℃，流速为 110m/s，若将之引入渐缩喷管，试确定当背压为 0.1MPa 时废气通过喷管出口截面的流速并分析若忽略进口流速时引起的误差。

提示和答案：收缩喷管出口截面压力最低是临界压力，当背压为 0.1MPa 时废气通过喷管出口截面的流速 $c_{f2} = 526.87\text{m/s}$ ；若忽略初流速，则 $c'_{f2} = 524.96\text{m/s}$ ；

$$\frac{c_{f2} - c'_{f2}}{c_{f2}} = 0.36\%。$$

7-10 滞止压力为 0.65MPa，滞止温度为 350K 的空气可逆绝热流经收缩喷管，在截面积为 $2.6 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 处气流马赫数为 0.6。若喷管背压力为 0.28MPa，试求喷管出口截面积。

提示和答案：在该截面上， $c_f = \sqrt{c_p(T_0 - T)}$ ，而声速 $c = \sqrt{\kappa R_g T}$ ，所以已知 Ma 即可确定截面上气流温度、流量等参数，进而解得 $A_2 = 2.19 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 。

7-11 空气等熵流经缩放喷管，进口截面上压力和温度分别为 0.58MPa、440K，出口截面压力 $p_2 = 0.14\text{MPa}$ 。已知喷管进口截面积为 $2.6 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ，空气质量流量为 1.5kg/s，试求喷管喉部及出口截面积和出口流速。空气取定值比热容， $c_p = 1005\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

提示和答案：本题须求得进口截面流速后确定是否可用进口截面参数取代滞止参数。
 $A_{cr} = 1.27 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $A_2 = 1.62 \times 10^{-3}\text{m}^2$ 、 $c_{f2} = 557.63\text{m/s}$ 。

7-12 流入绝热喷管的过热氨蒸气压力为 800kPa，温度为 20℃，喷管出口截面上压力为 300kPa，流速达 450m/s。若喷管中质量流量为 0.01kg/s，试求喷管出口截面积。

提示和答案：蒸气（如水蒸气、氨蒸气等）在喷管内流动膨胀其参数变化只能采用据第一定律、第二定律直接导出的公式，不能采用经简化仅理想气体适用的公式。同时还要注意判定蒸气的状态。本题查氨热力性质表，得 h_1 和 v_2 ，据能量方程，求得 h_2 ，发现 $h' < h_2 < h''$ ，判定出口截面上氨为湿饱和蒸气，计算 x_2 和 v_2 后，求得 $A_2 = 8.58 \times 10^{-6}\text{m}^2$ 。

7-13 压力 $p_1 = 2\text{MPa}$ ，温度 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ 的蒸汽，经收缩喷管射入压力为 $p_b = 0.1\text{MPa}$ 的空间中，若喷管出口截面积 $A_2 = 200\text{mm}^2$ ，试确定：(1) 喷管出口截面上蒸汽的温度、比体积、焓；(2) 蒸汽射出速度；(3) 蒸汽的质量流量。

提示和答案：据临界压力与背压关系确定出口截面上的压力，再如上题解得 $h_2 = 3275\text{kJ/kg}$ 、 $t_2 = 406^\circ\text{C}$ 、 $v_2 = 0.245\text{m}^3/\text{kg}$ ； $c_{f2} = 621.3\text{m/s}$ ； $q_m = 0.51\text{kg/s}$ 。

7-14 压力 $p_1=2\text{MPa}$, 温度 $t_1=500^\circ\text{C}$ 的蒸汽, 经拉伐尔喷管流入压力为 $p_b=0.1\text{MPa}$ 的大空间中, 若喷管出口截面积 $A_2=200\text{mm}^2$, 试求: 临界速度、出口速度、喷管质量流量及喉部截面积。

提示和答案: 同上题。 $c_{cr}=621.3\text{m/s}$ 、 $c_{f2}=1237.7\text{m/s}$ 、 $q_m=0.1383\text{kg/s}$ 、 $A_{cr}=0.545\times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

7-15 压力 $p_1=0.3\text{MPa}$, 温度 $t_1=24^\circ\text{C}$ 的空气, 经喷管射入压力为 0.157MPa 的空间中, 应用何种喷管? 若空气质量流量为 $q_m=4\text{kg/s}$, 则喷管最小截面积应为多少?

提示和答案: 据背压与临界压力的关系及几何条件确定喷管形状, 应采用收缩喷管。气流出口截面为临界截面, $A_2=57.43\times 10^{-4}\text{m}^2$ 。

7-16 初态为 3.5MPa 和 450°C 的水蒸气以初速 100m/s 进入喷管, 在喷管中绝热膨胀到 2.5MPa , 已知流经喷管的质量流量为 10kg/min 。(1) 忽略磨擦损失, 试确定喷管的型式和尺寸; (2) 若存在磨擦损失, 且已知速度系数 $\varphi=0.94$, 确定上述喷管实际流量。

提示和答案: 初速较高, 应考虑滞止; 利用速度系数修正出口速度, 同时应对比体积进行修正。(1) 收缩喷管, $A_2=0.424\times 10^{-4}\text{m}^2$; (2) $q'_m=9.24\text{kg/min}$ 。

7-17 压力为 0.1MPa , 温度 27°C 的空气流经扩压管, 压力升高到 0.18MPa , 试问空气进入扩压管时的初速至少有多大?

提示和答案: 空气流经扩压管同样服从能量守恒和绝热变化的规律 $c_{f1}\geq 332.0\text{m/s}$ 。

7-18 试证明理想气体的绝热节流微分效应 μ_J 恒等于零。

提示和答案: 对理想气体状态方程求导, 得 $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$, 代入 $\mu_J=\frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-v}{c_p}$ 即证。

7-19 1.2MPa 、 20°C 的氦气经节流阀后压力降至 100kPa , 为了使节流前后速度相等, 求节流阀前后的管径比。

提示和答案: 氦气可作理想气体, 节流前后 $h_1=h_2$ 、 $T_1=T_2$, 据质量守恒求得 $D_2/D_1=3.464$ 。

7-20 通过测量节流前后蒸汽的压力及节流后蒸汽的温度可推得节流前蒸汽的干度。现

有压力 $p_1=2\text{MPa}$ 的湿蒸汽被引入节流式干度计, 蒸汽被节流到 $p_2=0.1\text{MPa}$, 测得 $t_2=130^\circ\text{C}$, 试确定蒸汽最初的干度 x_1 。

提示和答案: 节流过程, $h_1 = h_2$, 得 $x_1 = 0.967$ 。

7-21 750kPa、25℃的 R134a 经节流阀后压力降至 165kPa, 求节流后 R134a 的温度和为了使节流前后速度相等, 节流阀前后的管径比。

提示和答案: 据节流过程 $h_1 = h_2$, 确定节流后氨蒸气状态, 由质量守恒求得 $D_2 / D_1 = 6.28$ 。

7-22 压力 $p_1=2\text{MPa}$, 温度 $t_1=400^\circ\text{C}$ 的蒸汽, 经节流阀后, 压力降为 $p_1'=1.6\text{MPa}$, 再经喷管射入压力为 $p_b=1.2\text{MPa}$ 的大容器中, 若喷管出口截面积 $A_2=200\text{mm}^2$ 。求: (1)节流过程熵增; (2)应采用何种喷管? 其出口截面上的流速及喷管质量流量是多少?

提示和答案: 据节流过程 $h_1 = h_1'$, 由 h_2 、 p_1' 确定节流后状态, 即喷管进口截面状态。

$s'-s=0.1\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 采用收缩喷管, $c_{f2}=414.7\text{m/s}$ 、 $q_m=0.35\text{kg/s}$ 。

7-23 压力为 6.0MPa, 温度为 490℃的蒸汽, 经节流后压力为 2.5MPa, 然后定熵膨胀到 0.04MPa。求 (1) 绝热节流后蒸汽温度及节流过程蒸汽的熵增; (2) 若节流前后膨胀到相同的终压力, 求由于节流而造成的技术功减少量和作功能力的损失。(T₀=300K)

提示和答案: 节流而造成的技术功减少是焓差, 由于节流后膨胀比节流前膨胀到相同的压力的温度高, 故减少的技术功并不完全是作功能力损失。 $\Delta s = 0.395\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $t_2 = 471^\circ\text{C}$; $\Delta w_t = 140\text{kJ/kg}$ 、 $I = 118.5\text{kJ/kg}$ 。

7-24 1kg温度 $T_1=330.15\text{K}$ 、压力 $p_1=7.1\text{MPa}$ 的空气, 经绝热节流压力降至 0.1MPa。(1) 计算节流引起的熵增量。(2) 上述空气不经节流而是在气轮机内作可逆绝热膨胀到 0.1MPa, 气轮机能输出多少功? (3) 上述功是否即为空气绝热节流的作功能力损失, 为什么? 取环境大气 $T_0=300.15\text{K}$ 、 $p_0=0.1\text{MPa}$ 。

提示和答案: 理想气体节流前后温度不变, 但可逆绝热膨胀后温度降低, 任何与环境有温差的物系均有作功能力。 $\Delta s_{12} = 1.223\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $w_t = 233.400\text{kJ/kg}$ 、 $T_2 = 97.68\text{K}$ 、 $I = 367.08\text{kJ/kg}$ 。

7-25 用管子输送压力为 1MPa, 温度为 300℃的水蒸气, 若管中容许的最大流速为 100m/s, 水蒸气的质量流量为 12000kg/h 时管子直径最小要多大?

提示和答案: $q_m v \leq \frac{\pi}{4} D^2 c_f$, $D \geq 0.105\text{m}$ 。

7-26 两输送管送来两种蒸汽进行绝热混合, 一管的蒸汽流量为 $q_{m1} = 60\text{kg/s}$, 状态 $p_1 = 0.5\text{MPa}$, $x=0.95$; 另一管的蒸汽流量为 $q_{m2} = 20\text{kg/s}$, 其状态为 $p_2=8\text{MPa}$ 、 $t_2=500^\circ\text{C}$ 。如经混合后蒸汽压力为 0.8MPa , 求混合后蒸汽的状态。

提示和答案: 混合前后能量守恒, 列出混合过程能量方程解出 h_3 , 即可和压力确定其他

参数。 $h_3 = 2831.64\text{kJ/kg}$ 、 $t_3 = 196.7^\circ\text{C}$ 、 $v_3 = 0.2586\text{m}^3/\text{kg}$ 。

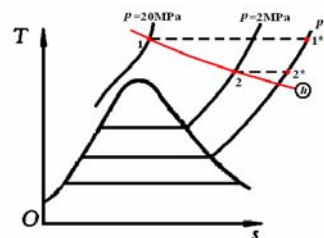
7-27* 在绝热稳态过程中 20MPa , -20°C 的氮被节流降压到 2MPa , 确定节流后氮的温度。

提示和答案: 查有关资料, 氮 $p_{\text{cr}} = 3.39\text{MPa}$, $T_{\text{cr}} = 126\text{K}$, 所以 $p_{r1} = \frac{p_1}{p_{\text{cr}}} = 5.9$ 、

$$T_{r1} = \frac{T_1}{T_{\text{cr}}} = 1.61, \quad p_{r2} = \frac{p_2}{p_{\text{cr}}} = 0.59。 \text{查通用焓图得}$$

$$\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{\text{cr}}} \right)_1 = 1.79$$

$$(H_m^* - H_m)_1 = 1.79 RT_{\text{cr}} = 1875.3\text{J/mol}$$



题 7-27 附图

采用试差法, 假设 $T_2 = 140\text{K}$, 则 $T_{r2} = \frac{T_2}{T_{\text{cr}}} = \frac{140\text{K}}{126\text{K}} = 1.11$, $\left(\frac{H_m^* - H_m}{RT_{\text{cr}}} \right)_2 = 0.57$

$$(H_m^* - H_m)_2 = 0.57 RT_{\text{cr}} = 597.1\text{J/mol}$$

据绝热节流特征 $H_{m1} = H_{m2}$

$$\begin{aligned} H_{m2} - H_{m1} &= (H_{m1}^* - H_{m1}) + (H_{m2}^* - H_{m1}^*) - (H_{m2}^* - H_{m2}) \\ &= (H_{m1}^* - H_{m1}) - (H_{m2}^* - H_{m2}) + C_{pm}(T_2 - T_1) \\ &= -555.1\text{J/mol} \end{aligned}$$

误差较大, 故再设 $T_2 = 145\text{K}$, 重复上述过程, 如下表所示:

T_2 / K	T_{r2}	$(H_m^* - H_m)_2 / RT_{\text{cr}}$	$(H_m^* - H_m)_2 / \text{J/mol}$	$H_{m2} - H_{m1} / \text{J/mol}$
140	1.11	0.57	597.1	-555.1
145	1.15	0.54	565.7	-378.2
150	1.19	0.49	513.3	-180.0
152	1.21	0.48	502.9	-111.7
155	1.23	0.47	492.4	-13.9

$T_2 = 155\text{K}$ 时 $H_{m1} \cong H_{m2}$, 所以取 $T_2 = 155\text{K}$ 。

7-28* 1.5 MPa、150 °C 的水经节流阀绝热节流压力降至 200 kPa，进入节流阀的速度是 5 m/s，节流阀前后的管径相等，求节流后工质的状态和速度。

提示和答案：查水蒸气热力性质表：150 °C、1.5 MPa 时 $h = 632.9 \text{ kJ/kg}$ 、 $v = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$ ；200 kPa 时 $h'' = 2706.5 \text{ kJ/kg}$ 、 $h' = 504.7 \text{ kJ/kg}$ ； $v'' = 0.8865 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $v' = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。取节流阀为控制体积，列绝热节流前后能量方程和质量守恒方程：

$$h_1 + \frac{c_{f1}^2}{2} = h_2 + \frac{c_{f2}^2}{2}, \quad q_m = \frac{A_1 c_{f1}}{v_1} = \frac{A_2 c_{f2}}{v_2}。其中：h_2 = h' + x_2(h'' - h'), \quad v_2 = v' + x_2(v'' - v')。$$

解得： $h_2 = 614.79 \text{ kJ/kg}$ ， $x_2 = 0.050$ 。所以 $v_2 = v' + x_2(v'' - v') = 0.0454 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，

$$c_{f2} = c_{f1} \frac{A_1 v_2}{A_2 v_1} = c_{f1} \frac{v_2}{v_1} = 206.4 \text{ m/s}。$$

通常，节流前后工质流速接近相等，所以由能量方程得出节流前后焓相等，但本题节流前后工质有液态水改变为湿蒸汽，比体积极大地增大，导致节流后流速远大于节流前，必须考虑动能变化，所以与绝热节流“特征” $h_1 = h_2$ 有“矛盾”。