

工程热力学学习题集

一、填空题

1. 能源按使用程度和技术可分为 _____ 能源和 _____ 能源。
2. 孤立系是与外界无任何 _____ 和 _____ 交换的热力系。
3. 单位质量的广延量参数具有 _____ 参数的性质，称为比参数。
4. 测得容器的真空度 $p_v = 48\text{KPa}$ ，大气压力 $p_b = 0.102\text{MPa}$ ，则容器内的绝对压力为 _____。
5. 只有 _____ 过程且过程中无任何 _____ 效应的过程是可逆过程。
6. 饱和水线和饱和蒸汽线将压容图和温熵图分成三个区域，位于三区和二线上的水和水蒸气呈现五种状态：未饱和水、饱和水、湿蒸气、_____和_____。
7. 在湿空气温度一定条件下，露点温度越高说明湿空气中水蒸气分压力越 _____、水蒸气含量越 _____，湿空气越潮湿。（填高、低和多、少）
8. 克劳修斯积分 $\oint \delta Q/T$ _____ 为可逆循环。
9. 熵流是由 _____ 引起的。
10. 多原子理想气体的定值比热容 $c_v =$ _____。
11. 能源按其有无加工、转换可分为 _____ 能源和 _____ 能源。
12. 绝热系是与外界无 _____ 交换的热力系。
13. 状态公理指出，对于简单可压缩系，只要给定 _____ 个相互独立的状态参数就可以确定它的平衡状态。
14. 测得容器的表压力 $p_g = 75\text{KPa}$ ，大气压力 $p_b = 0.098\text{MPa}$ ，则容器内的绝对压力为 _____。
15. 如果系统完成某一热力过程后，再沿原来路径逆向进行时，能使 _____ 都返回原来状态而不留下任何变化，则这一过程称为可逆过程。
16. 卡诺循环是由两个 _____ 和两个 _____ 过程所构成。
17. 相对湿度越 _____，湿空气越干燥，吸收水分的能力越 _____。（填大、小）
18. 克劳修斯积分 $\oint \delta Q/T$ _____ 为不可逆循环。
19. 熵产是由 _____ 引起的。
20. 双原子理想气体的定值比热容 $c_p =$ _____。
21. 基本热力学状态参数有：（ ）（ ）（ ）。
22. 理想气体的热力学能是温度的（ ）函数。
23. 热力平衡的充要条件是：（ ）。
24. 不可逆绝热过程中，由于不可逆因素导致的熵增量，叫做（ ）。
25. 卡诺循环由（ ）热力学过程组成。
26. 熵增原理指出了热力过程进行的（ ）（ ）（ ）。
31. 当热力系与外界既没有能量交换也没有物质交换时，该热力系为 _____。
32. 在国际单位制中温度的单位是 _____。

33. 根据稳定流动能量方程，风机、水泵的能量方程可简化为_____。
34. 同样大小的容器内分别储存了同样温度的氢气和氧气，若二个容器内气体的压力相等，
则二种气体质量的大小为 m_{H_2} _____ m_{O_2} 。
35. 已知理想气体的比热 C 随温度的升高而增大，当 $t_2 > t_1$ 时， $C \int_0^{t_2}$ 与 $C \int_{t_1}^{t_2}$ 的大小关系为_____。
36. 已知混合气体中各组元气体的质量分数 i 和摩尔质量 M ，则各组元气体的摩尔分数 i 为_____。
37. 由热力系与外界发生 _____ 交换而引起的熵变化称为熵流。
38. 设有一卡诺热机工作于 600 和 30 热源之间，则卡诺热机的效率为_____。
39. 在蒸汽动力循环中，汽轮机排汽压力的降低受 _____ 温度的限制。
40. 燃气轮机装置定压加热循环的 _____ 是决定循环热效率的唯一的条件。
41. 与外界既无能量交换也无物质交换的热力系称为 _____ 热力系。
42. 热力系的储存能包括 _____。
43. 已知某双原子气体的气体常数 $R_r = 260 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，则其定值定体质量比热容 $c_v =$ _____ $\text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ 。
44. 已知 1kg 理想气体定压过程初、终态的基本状态参数和其比热容，其热力学能的变化量可求出为 $u =$ _____。
45. 定值比热容为 c_n 的多变过程，初温为 t_1 ，终温为 t_2 ，其熵变量 $s =$ _____。
46. 水蒸汽的临界压力为 _____ MPa。
47. 流体流经管道某处的流速与 _____ 的比值称为该处流体的马赫数。
48. 汽轮机的排汽压力越低，循环热效率越高，但排汽压力的降低受到了 _____ 的限制。
49. 压气机增压比较大时，为了减少滞胀容积、提高容积效率，除了尽可能减小余隙容积外，通常还采取 _____ 的措施。
50. 未饱和湿空气的相对湿度值在 _____ 之间。

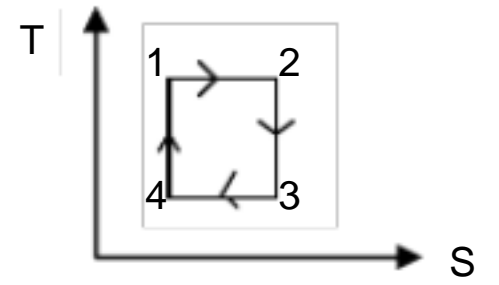
二、单项选择题

- _____ 过程是可逆过程。 ()
A. 可以从终态回复到初态的 B. 没有摩擦的
C. 没有摩擦的准平衡 D. 没有温差的
- 绝对压力 p ，真空 p_v ，环境压力 p_a 间的关系为 ()
A. $p + p_v + p_a = 0$ B. $p + p_a - p_v = 0$ C. $p - p_a - p_v = 0$ D. $p - p_a - p_v = 0$
- 闭口系能量方程为 ()
A. $Q + U + W = 0$ B. $Q + U - W = 0$ C. $Q - U + W = 0$ D. $Q - U - W = 0$
- 气体常量 R_r ()
A. 与气体种类有关，与状态无关 B. 与状态有关，与气体种类无关
C. 与气体种类和状态均有关 D. 与气体种类和状态均无关
- 理想气体的 _____ 是两个相互独立的状态参数。 ()
A. 温度与热力学能 B. 温度与焓 C. 温度与熵 D. 热力学能与焓
- 已知一理想气体可逆过程中 $w_t = w$ ，此过程的特性为 ()
A. 定压 B. 定温 C. 定体 D. 绝热

7. 卡诺循环如图所示，其吸热量 $Q=(\quad)$

A. $RrT_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$ B. $RrT_1 \ln \frac{V_1}{V_2}$

C. $T_1 \cdot S_{34}$ D. $T_1 \cdot S_{21}$



8. 在压力为 p 时，饱和水的熵为 s ；干饱和蒸汽的熵为 s 。当湿蒸汽的干度 $0 < x < 1$ 时，其熵为 s ，则()

A. $s > s > s$ B. $s > s > s$ C. $s < s < s$ D. $s > s > s$

9. 电厂热力设备中，_____内的热力过程可视为定温过程。

A. 锅炉 B. 汽轮机 C. 凝汽器 D. 水泵

10. 可逆绝热稳定流动过程中，气流焓的变化与压力变化的关系为 ()

A. $dh = -vdp$ B. $dh = vdp$ C. $dh = -pdv$ D. $dh = pdv$

11. 水蒸汽动力循环的下列设备中，有效能损失最大的设备是 ()

A. 锅炉 B. 汽轮机 C. 凝汽器 D. 水泵

12. 活塞式压气机的余隙容积增大使 ()

A. w_c 增大， v_c 减小 B. w_c 不变， v_c 减小
C. w_c 不变， v_c 不变 D. w_c 减小， v_c 减小

13. 已知燃气轮机理想定压加热循环压气机进口空气的温度为 T_1 、 T_2 ；燃烧室出口燃气温度为 T_3 ，则其理想循环热效率为 ()

A. $1 - \frac{T_2}{T_1}$ B. $1 - \frac{T_1}{T_2}$ C. $1 - \frac{T_3}{T_2}$ D. $1 - \frac{T_2}{T_3}$

14. 饱和湿空气的相对湿度 ()

A. $\phi > 1$ B. $\phi = 1$ C. $\phi < 1$ D. $0 < \phi < 1$

15. 湿空气的焓 h 为 ()

A. 1kg 湿空气的焓
B. $1m^3$ 湿空气的焓
C. 1kg 干空气与 1kg 水蒸汽焓之和
D. 1kg 干空气的焓与 1kg 干空气中所含水蒸汽的焓之和

16. 若已知工质的绝对压力 $P=0.18MPa$ ，环境压力 $P_a=0.1MPa$ ，则测得的压差为 ()

A. 真空 $p_v=0.08MPa$ B. 表压力 $p_g=0.08MPa$
C. 真空 $p_v=0.28MPa$ D. 表压力 $p_g=0.28MPa$

17. 简单可压缩热力系的准平衡过程中工质压力降低，则 ()

A. 技术功为正 B. 技术功为负
C. 体积功为正 D. 体积功为负

18. 理想气体可逆定温过程的特点是 ()

A. $q=0$ B. $W_t=W$
C. $W_t > W$ D. $W_t < W$

19. 若从某一初态经可逆与不可逆两条途径到达同一终态，则不可逆途径的熵变 S 必()可逆过程 S 。

A. 大于 B. 等于 C. 小于 D. 大于等于

20. 饱和蒸汽经历绝热节流过程后 ()

A. 变为饱和水 B. 变为湿蒸汽
C. 作功能力减小 D. 温度不变

- 21.绝热节流过程中节流前、后稳定截面处的流体 ()
 A. 焓值增加 B.焓值减少
 C.熵增加 D.熵减少
- 22 空气在渐缩喷管内可逆绝热稳定流动，其滞止压力为 0.8MPa，喷管后的压力为 0.2MPa，若喷管因出口磨损截去一段，则喷管出口空气的参数变化为 ()
 A. 流速不变，流量不变 B.流速降低，流量减小
 C.流速不变，流量增大 D.流速降低，流量不变
- 23.把同样数量的气体由同一初态压缩到相同的终压，经 ()过程气体终温最高。
 A. 绝热压缩 B.定温压缩 C.多变压缩 D.多级压缩

三、判断题

- 1．处于平衡状态的热力系，各处应具有均匀一致的温度和压力。 ()
- 2．稳定流动系统中，维持工质流动的流动功和技术上可资利用的技术功，均是由热能转换所得的工质的体积功转化而来的。 ()
- 3．稳定流动系统进出口工质的状态相同。 ()
- 4．稳定流动系统的能量方程可理解为控制质量系统的能量方程。 ()
- 5．不可能把热量从低温物体传向高温物体。 ()
- 6．在相同温度界线之间变温热源可逆循环的热效率等于卡诺循环的热效率。 ()
- 7．水蒸气在定温过程中 $q = w$ 。 ()
- 8．湿空气的相对湿度越高，吸收水分的能力越强。 ()
- 9．理想气体的比定容热容是比体积的单值函数。 ()
- 10．当气流的 $M < 1$ 时，要使流速增加，则需使用渐扩喷管。 ()
- 11．热力系破坏平衡的速度要比恢复平衡的速度快得多。 ()
- 12．技术功为轴功和流动功之和。 ()
- 13．稳定流动系统与外界交换的功和热量相等且不随时间而变。 ()
- 14．焓是开口系统中流入（或流出）系统工质所携带的取决于热力学状态的总能量。 ()
- 15．不可能从单一热源取热使之完全变为功。 ()
- 16．概括性卡诺循环的热效率小于卡诺循环的热效率。 ()
- 17．对任何温度的气体加压都能使其液化。 ()
- 18．由饱和水定压加热为干饱和蒸汽的过程，温度不变。 ()
- 19．理想气体的比定压热容是温度的单值函数。 ()
- 20．工程上要求气体从 $M < 1$ 加速到 $M > 1$ ，则应采用拉伐尔喷管。 ()

四、简答题

1. 准平衡过程与可逆过程有何共同处？有何区别？有何联系？
2. 理想气体状态方程有哪些常见形式？方程中的常数项与物性是否有关？
3. 干饱和蒸汽与湿饱和蒸汽的状态参数各有何特点？
4. 何谓气流在喷管中的临界状态？何谓临界压力比？理想气体的临界压力比与哪些因素有关？
5. 何谓汽耗率？何谓热耗率？它们与热效率有什么关系？
6. 平衡状态与稳定态有什么联系与区别？

7. 能量方程 $q = u + w$ 和 $q = C_v T + \int_1^2 p dv$ 的适用条件有何不同 ?
8. 夏天, 自行车在被太阳晒得很热的马路上行驶时, 为什么容易引起轮胎爆破 ?
9. 不可逆过程熵的变化如何计算 ?
10. 在工程实际中, 常引用哪些参数来表示因摩擦对喷管流动的影响 ? 它们之间有何关系 ?

五、名词解释 (每小题 5 分, 共 25 分)

1. 热力系的储存能
2. 平均质量热容
3. 熵产
4. 稳定流动
5. 湿空气的焓

六、分析题

1. 如图 1, 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, 试分析: u_{ab} 和 u_{ac} 哪个大?
2. 某理想气体经历 4 个过程, 如图 2 所示。指出各过程加热或放热, 膨胀或压缩。

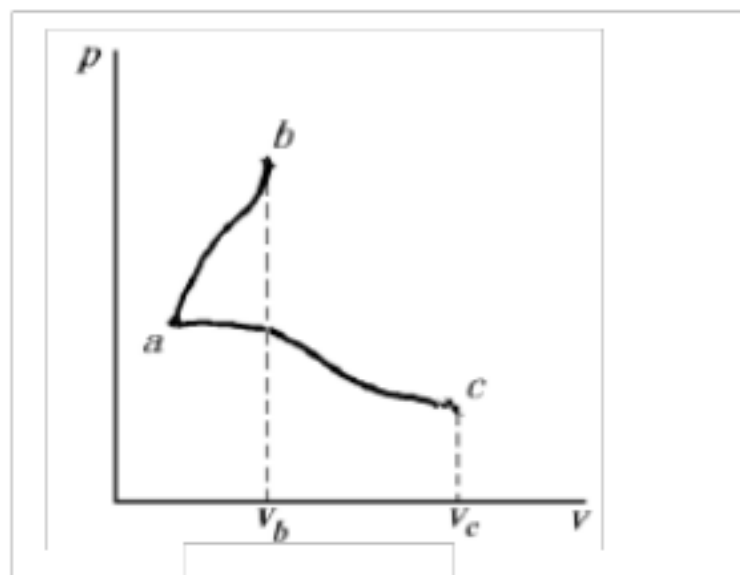


图 1

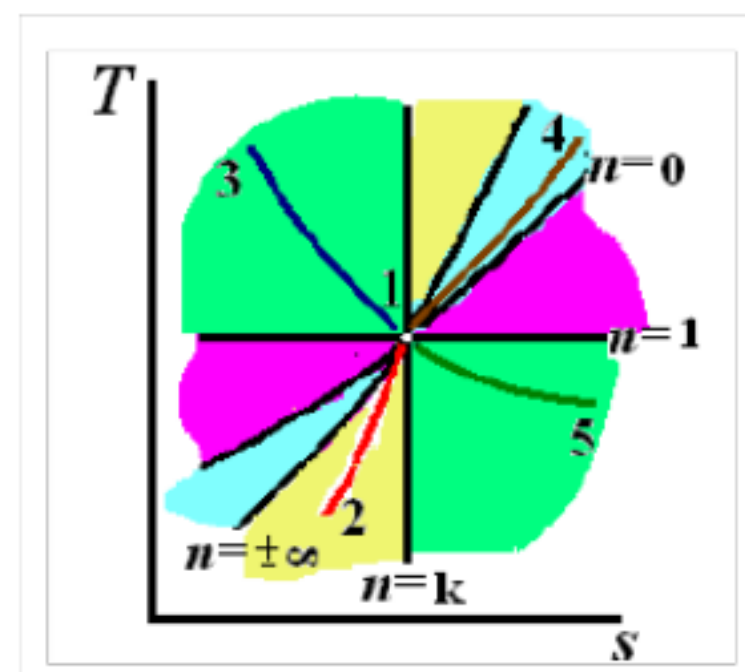


图 2

3. 请分析以下几种说法正确吗? 为什么?
 - (1) 熵增大的过程必为不可逆过程;
 - (2) 熵产 $S_g > 0$ 的过程必为不可逆过程。
4. 某循环在 700K 的热源及 400K 的冷源之间工作, 如图 3 所示。
 - (1) 用克劳修斯积分不等式判别循环是热机循环还是制冷循环, 可逆还是不可逆 ?
 - (2) 用卡诺定理判别循环是热机循环还是制冷循环, 可逆还是不可逆 ?

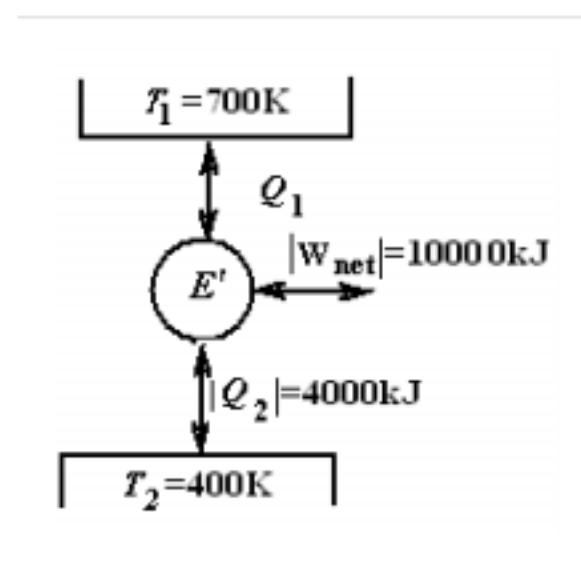


图 3

七、计算题

1. 某蒸汽动力装置，蒸汽流量为 40 t/h，进口处压力表读数为 9.0MPa，进口比焓为 3440 kJ/kg；出口真空表读数为 95.06 KPa，比焓为 2240 kJ/kg，当时当地大气压力为 98.66 KPa，汽轮机对环境放热为 6.3×10^3 kJ/h。试求：

- (1) 汽轮机进出口蒸汽的绝对压力各为多少？
- (2) 单位质量蒸汽经汽轮机对外输出功为多少？
- (3) 汽轮机的功率为多大？
- (4) 若进出口蒸汽流速分别为 60m/s 和 140m/s 时，对汽轮机输出功有多大影响？

2. 将 0.8 kg 温度为 1000 的碳钢放入盛有 6 kg 温度为 18 的水的绝热容器中，最后达到热平衡。试求此过程中不可逆引起的熵产。

碳钢和水的比热容分别为 $c_c = 0.47 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 和 $c_w = 4.187 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

3. 0.5 kmol 某种单原子理想气体，由 25， 2 m^3 可逆绝热膨胀到 1 atm，然后在此状态的温度下定温可逆压缩回到 2 m^3 。

- (1) 画出各过程的 p-v 图及 T-s 图；(5 分)
- (2) 计算整个过程的 Q, W, U, H 及 S。

4. 系统经一热力过程，放热 8 kJ，对外做功 26 kJ。为使其返回原状态，对系统加热 6 kJ，问需对系统做功多少？

5. 一卡诺机工作在 800 和 20 的两热源间，试求：

- (1) 卡诺机的热效率；
- (2) 若卡诺机每分钟从高温热源吸入 1000 kJ 热量，此卡诺机净输出功率为多少 kW？
- (3) 求每分钟向低温热源排出的热量。

6. 1 kg 空气从相同初态 $p_1 = 0.2 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 35$ 经定容过程至终温 $t_2 = 180$ ，试求吸热量、膨胀功、技术功和初终态焓差。(空气的 $c_p = 1.004 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $c_v = 0.717 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $R_g = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。)

8. 封闭气缸中气体初态 $p_1 = 8 \text{ MPa}$, $t_1 = 1300$ ，经过可逆多变膨胀过程变化到终态 $p_2 = 0.4 \text{ MPa}$ ， $t_2 = 400$ 。已知该气体的气体常数 $R_g = 0.287 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，比热容为常数， $c_v = 0.716 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

- (1) 求多变过程的多变指数；
- (2) 求多变过程的膨胀功；

(3) 试判断气体在该过程中各是放热还是吸热的？

9. $m=2.26\text{kg}$ 理想气体的气体常数 $R_r=430\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，比热比 $k=1.35$ 。初温 $T_1=477\text{K}$ ，经可逆定体过程后终温 $T_2=591\text{K}$ 。求 Q 、 U 、 W 、 S 。

10. 设炉膛中火焰的温度恒为 $t_r=1500$ ，汽锅内蒸汽的温度恒为 $t_s=500$ ，环境温度为 $t_0=25$ ，求火焰每传出 1000kJ 热量引起的熵产和作功能力损失。

11. 空气可逆绝热流过一喷管，入口压力 $p_1=0.7\text{MPa}$ ，温度 $t_1=800$ ，出口压力 $p_2=0.15\text{MPa}$ ，此喷管是什么外型的喷管？入口空气流速忽略不计，比热容和比热比取定值，分别为 $c_p=1.004\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ， $k=1.4$ ，求喷管出口空气的温度、流速、马赫数。

12. $m=1.5\text{kg}$ 空气按可逆定温过程由初态 $T_1=328\text{K}$, $p_1=0.25 \times 10^6\text{Pa}$ 变化到终态 $p_2=0.15 \times 10^6\text{Pa}$ ，空气的 $R_r=0.287\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，试求此定温过程的 Q 、 W 、 U 、 H 。

13. 空气在渐缩喷管进口截面上的压力 $p_1=1.5 \times 10^6\text{Pa}$ ，比体积 $v_1=0.065\text{m}^3/\text{kg}$ ， $v_{c1}=0$ ；喷管出口截面上的压力 $p_2=0.8 \times 10^6\text{Pa}$ 出口截面积 $A_2=14\text{cm}^2$ ；设空气的 $R_r=287\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，比热容比 $K=1.4$ 。

试求：(1) 喷管出口截面上的比体积 v_2 ，温度 T_2

(2) 空气流经出口截面时的速度 v_{c2}

14. 某燃气轮机排气 1.20kg/s ，温度为 $T_1=576\text{K}$ ，定压排入温度 $T_0=283\text{K}$ 的环境；设排气的 $C_p=1.021\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。试求每小时燃气轮机的排气热量中的有效能和无效能。

15. 设炉膛中火焰的温度恒为 $t_r=1500$ ，汽锅内蒸汽的温度恒为 $t_s=500$ ，环境温度为 $t_0=25$ ，求火焰每传出 1000kJ 热量引起的熵产和作功能力损失。

16. $m=1.5\text{kg}$ 空气按可逆定温过程由初态 $T_1=328\text{K}$, $p_1=0.25 \times 10^6\text{Pa}$ 变化到终态 $p_2=0.15 \times 10^6\text{Pa}$ ，空气的 $R_r=0.287\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，试求此定温过程的 Q 、 W 、 U 、 H 。

17. 某蒸汽动力装置，蒸汽流量为 40 t/h ，进口处压力表读数为 9.0MPa ，进口比焓为 3440 kJ/kg ；出口真空表读数为 95.06 KPa ，比焓为 2240 kJ/kg ，当时当地大气压力为 98.66 KPa ，汽轮机对环境放热为 $6.3 \times 10^3\text{ kJ/h}$ 。试求：

(1) 汽轮机进出口蒸汽的绝对压力各为多少？

(2) 单位质量蒸汽经汽轮机对外输出功为多少？

(3) 汽轮机的功率为多大？

(4) 若进出口蒸汽流速分别为 60m/s 和 140m/s 时，对汽轮机输出功有多大影响？

工程热力学学习题集答案

一、填空题

1. 常规 新 2. 能量 物质 3. 强度量 4. 54 KPa 5. 准平衡 耗散
6. 干饱和蒸汽 过热蒸汽 7. 高 多 8. 等于零 9. 与外界热交换 10. $\frac{7}{2} R_g$
11. 一次 二次 12. 热量 13. 两 14. 173 KPa 15. 系统和外界 16. 定温 绝热可逆
17. 小 大 18. 小于零 19. 不可逆因素 20. $\frac{7}{2} R_g$ 21. (压力)、(温度)、(体积)。
22. (单值)。23. (系统内部及系统与外界之间各种不平衡的热力势差为零)。
24. (熵产)。
25. (两个可逆定温和两个可逆绝热) 26. (方向)、(限度)、(条件)。31. 孤立系；
32. 开尔文 (K)； 33. $-w_s=h_2-h_1$ 或 $-w_t=h_2-h_1$ 34. 小于 35. $C \left| \begin{matrix} t_2 \\ t_1 \end{matrix} \right| > C \left| \begin{matrix} t_2 \\ 0 \end{matrix} \right|$
36. $\frac{\omega_i / M_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i / M_i}$ 37. 热量 38. 65.29% 39. 环境 40. 增压比 41. 孤立
42. 热力学能、宏观动能、重力位能 43. 650 44. $c_v(T_2-T_1)$ 45. $c_n \ln \frac{T_2}{T_1}$ 46. 22.1247. 当地音速
48. 环境温度 49. 多级压缩、中间冷却 50. 0 与 1 51. (物质) 52. (绝对压力)。
53. $(q=(h_2-h_1)+(C_2^2-C_1^2)/2+g(Z_2-Z_1)+w_s))$ 。 54. (温度) 55. (0.657)kJ/kgK。 56. (定熵线)
57. (逆向循环)。 58. (两个可逆定温过程和两个可逆绝热过程)
59. (预热阶段、汽化阶段、过热阶段)。 60. (增大)

二、单项选择题

- 1.C2.D3.D4.A5.C6.B7.A8.A9.C10.B11.A12.B13.B14.B15.D16.B17.A18.B19.B20.C21.C22.C
23.A

三、判断题

1. 2. 3. × 4. 5. × 6. × 7. × 8. × 9. × 10. ×
11. × 12. × 13. × 14. 15. × 16. × 17. × 18. 19. 20. .
21. (×) 22. () 23. (×) 24. (×) 25. () 26. (×) 27. () 28. ()
29. (×) 30. ()

四、简答题

1. 它们共同处都是在无限小势差作用下，非常缓慢地进行，由无限接近平衡状态的状态组成的过程。
它们的区别在于准平衡过程不排斥摩擦能量损耗现象的存在，可逆过程不会产生任何能量的损耗。

一个可逆过程一定是一个准平衡过程，没有摩擦的准平衡过程就是可逆过程。

2. 1kg 气体： $pV=R_rT$ mkg 气体： $pV=mR_rT$

1kmol 气体： $pV_m=RT$ nkmol 气体： $pV=nRT$

R_r 是气体常数与物性有关， R 是摩尔气体常数与物性无关。

3. 干饱和蒸汽： $x=1, p=p_s, t=t_s$

$v=v_g, h=h_g, s=s_g$

湿饱和蒸汽： $0<x<1, p=p_s, t=t_s$

$v_g < v < v_f, h_g < h < h_f, s_g < s < s_f$

4. 流速为当地音速 ($Ma=1$) 时的状态称为流体的临界状态。

流体临界状态的压力 (临界压力) 与其滞止压力的比值，称为临界压力比。

理想气体的临界压力比只与气体的物性有关 (或比热比 k 有关)

5. 汽耗率是每作 $1\text{kw} \cdot \text{h}$ 功 (每发 1 度电) 的新蒸汽耗量 (汽耗量)。

热耗率是每作 $1\text{kw} \cdot \text{h}$ 功 (每发 1 度电) 的耗热量。

热耗率与热效率是直接关联的，热耗率越高，热效率就越低；

而汽耗率与热效率就没有这种对应关系，汽耗率低不一定热效率高，汽耗率高也不一定热效率低。

6. 平衡态是指热力系的宏观性质不随时间变化的状态。 稳定态是指热力系的状态不随时间而变化的状态。平衡必然稳定，稳定未必平衡。

7. 前者：闭口系、任意工质、任意过程

后者：闭口系、理想气体、可逆过程

8. 轮胎内气体压力为 $P = \frac{MR_r}{V} T$, $\frac{MR_r}{V}$ 为常数，当 T 升高时 P 随之升高，容易引起爆破。

9. 可以选择相同初、终状态间可逆过程熵的变化来计算。

10. 在工程实际中，常引用“速度系数”、“喷管效率”和“能量损失系数”来表示因摩擦对喷管流动的影响。三者之间的关系为： $\eta_v = 1 - \eta_{\text{损}} = 1 - \eta_{\text{喷}} = 1 - \eta_{\text{损}}$

11. 略

12. 热力学第一定律的实质是什么？并写出热力学第一定律的两个基本表达式。答：热力学第一定律的实质是能量转换与守恒原理。热力学第一定律的两个基本表达式为：

$$q = u + w; \quad q = h + w_t$$

13. 热力学第二定律的实质是什么？并写出熵增原理的数学表达式。答：热力学第二定律的实质是能量贬值原理。熵增原理的数学表达式为： $dS_{\text{iso}} \geq 0$ 。

14. 什么是可逆过程？实施可逆过程的条件是什么？ 答：可逆过程为系统与外界能够同时恢复到原态的热力过程。实施可逆过程的条件是推动过程进行的势差为无穷小，而且无功的耗散。

五、名词解释

1. 热力系储存能包括：热力学能、宏观动能和重力位能。

2. 对于 $c - t$ 图上曲边梯形面积，由微积分中值定理知，必然存在 \bar{c} 值使得曲边梯形面积与一矩形面积相等，这个 \bar{c} 值在 $c - t$ 图上就是平均质量热容的概念。

3. 不可逆过程中，不可逆因素引起的熵的变化称为熵产。

4. 所谓稳定流动，是指流体流经管道中任意点的热力状态参数及流速等均不随时间而变化的流动过程。

5.湿空气的焓值等于干空气的焓值与水蒸气的焓值之和。

六、分析题

1、解：（方法一）

过 b、c 分别作等温线，因为 $T_b > T_c$ ，故 $u_b > u_c$

$$\text{即 } \Delta u_{ab} = u_b - u_a > \Delta u_{ac} = u_c - u_a$$

（方法二）考虑过程 b-c

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

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

$$u_b > u_c, \Delta u_{ab} > \Delta u_{ac}$$

2、

解： 因为： $q = \Delta u + w$

1-3： $1 < n_{1-3} < k$ ，且 $T_3 > T_1$ 及 $S_3 < S_1$ 则有： $\Delta u > 0, q < 0$ 所以 $w < 0$

边压缩边放热

1-2： $k < n_{1-2} < \infty$ 且 $T_2 < T_1$ 及 $S_2 < S_1$ ，则 $\Delta u < 0, q < 0$

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

所以有 $w > 0$ 边膨胀边放热

1-4： $0 > n_{1-4} > -\infty$ 且 $T_4 > T_1$ 及 $S_4 > S_1$

$$\Delta u > 0, q > 0 \quad w = \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_4) > 0 \quad \text{边膨胀边吸热}$$

1-5： $1 < n_{1-5} < k$ 且 $T_5 < T_1$ 及 $S_5 > S_1$

$\Delta u < 0, q > 0, w > 0$ 边膨胀边吸热边降温

3、请问一下几种说法正确吗？为什么？

（1）熵增大的过程必为不可逆过程；

答：不正确。熵增大的过程不一定为不可逆过程，因为熵增大包括熵流和熵产两部分，如果熵流大于 0，而熵产为 0 的可逆过程，上仍然是增大的。

（2）熵产 $S_g > 0$ 的过程必为不可逆过程。

答：正确。熵产是由于热力过程中的不可逆因素导致的，因此当熵产 $S_g > 0$ ，则此过程必定为不可逆过程。

4、某循环在 700K 的热源及 400K 的冷源之间工作，如图 3 所示。

（1）用克劳修斯积分不等式判别循环是热机循环还是制冷循环，可逆还是不可逆？

（2）用卡诺定理判别循环是热机循环还是制冷循环，可逆还是不可逆？

解：

$$|W_{\text{net}}| = |Q_1| - |Q_2|$$

$$|Q_1| = |W_{\text{net}}| + |Q_2| = 10000\text{kJ} + 4000\text{kJ} = 14000\text{kJ}$$

方法 1：

设为热机循环

$$\frac{Q}{T_r} = \frac{Q_1}{T_{r1}} - \frac{Q_2}{T_{r2}} = \frac{14000\text{kJ}}{700\text{K}} - \frac{4000\text{kJ}}{400\text{K}} = 10\text{kJ/K} > 0 \quad \text{不可能}$$

设为制冷循环：

$$\frac{Q}{T_r} = -\frac{Q_1}{T_{r1}} + \frac{Q_2}{T_{r2}} = -\frac{14000\text{kJ}}{700\text{K}} + \frac{4000\text{kJ}}{400\text{K}} = -10\text{kJ/K}$$

符合克氏不等式，所以是不可逆制冷循环

方法 2：

设为热机循环

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_h} = 1 - \frac{400\text{K}}{700\text{K}} = 0.4286 \quad \eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = \frac{10000\text{kJ}}{14000\text{kJ}} = 0.7126$$

$$\eta_t > \eta_c \quad \text{不可能}$$

设为制冷循环

$$\varepsilon_c = \frac{T_c}{T_0 - T_c} = \frac{400\text{K}}{700\text{K} - 400\text{K}} = 1.33 \quad \varepsilon = \frac{Q_2}{W_{\text{net}}} = \frac{4000\text{kJ}}{10000\text{kJ}} = 0.4$$

$$\varepsilon < \varepsilon_c \Rightarrow \text{可能但不可逆} \quad , \text{所以是不可逆制冷循环}$$

七、计算题

1. 解：

$$(1) \quad p_1 = 9000 + 98.66 = 9098.66\text{kPa} \quad p_2 = 98.66 \quad 95.06 \text{ kPa}$$

(2) 取汽轮机汽缸内壁和蒸汽进、出口为系统，则系统为稳定流动系统，能量方程为

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g\Delta z + w_{\text{sh}}$$

$$q = 6.3 \times 10^3 / 40000 = 0.1575\text{kJ/kg}$$

进、出口的动能差和位能差忽略不计，则

$$w_{\text{sh}} = q - \Delta h = -0.1575 - (2240 - 3440) \approx 1200 \text{ (kJ/kg)}$$

(3) 汽轮机功率

$$P = q_m w_{\text{sh}} = \frac{40 \times 10^3}{3600} \times 1200 = 1.33 \times 10^4 \text{ (kW)}$$

$$(4) \quad \Delta w_{\text{sh}} = \frac{1}{2} \Delta c^2 = \frac{1}{2} \times (140^2 - 60^2) \times 10^{-3} = 8\text{kJ/kg}$$

$$\varepsilon_k = \frac{|\Delta w_{\text{sh}}|}{|w_{\text{sh}}|} = \frac{8}{1200} = 0.67\%$$

$$2. \text{ 解: } \quad Q_c = m_c c_c (t_c - t_m) \quad Q_w = m_w c_w (t_m - t_w)$$

$$\because Q_c = Q_w \quad m_c c_c (t_c - t_m) = m_w c_w (t_m - t_w)$$

代入数据解得： $t_m = 32.48$

$$\Delta S_w = \int_{T_w}^{T_m} \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_w}^{T_m} \frac{m_w c_w dT}{T} = m_w c_w \ln \frac{T_m}{T_w} = 6 \times 4.187 \times \ln \frac{32.48 + 273}{18 + 273} = 1.23 \text{ kJ / K}$$

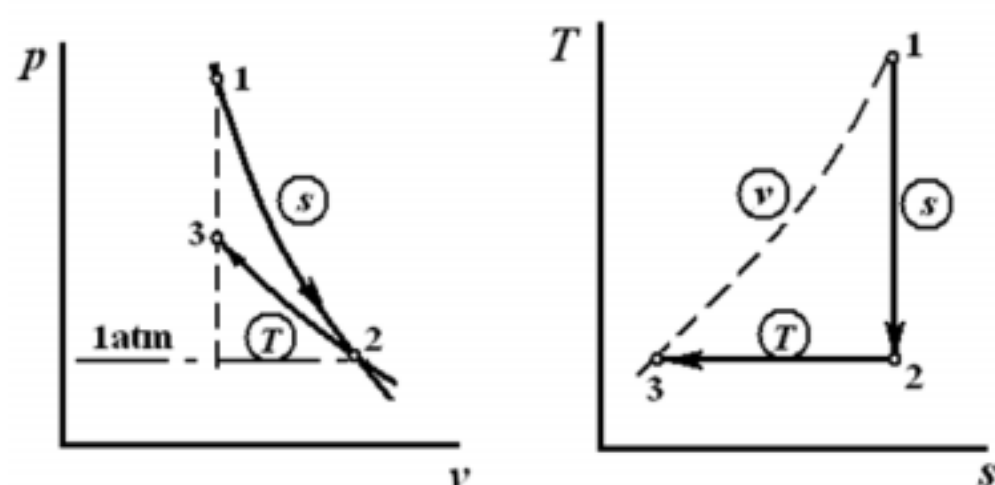
$$\Delta S_c = \int_{T_c}^{T_m} \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_c}^{T_m} \frac{m_c c_c dT}{T} = m_c c_c \ln \frac{T_m}{T_c} = 0.8 \times 0.47 \times \ln \frac{32.48 + 273}{1000 + 273} = -0.54 \text{ kJ / K}$$

$$\Delta S_g = \Delta S_w + \Delta S_c = 1.23 - 0.54 = 0.69 \text{ kJ / K}$$

3、

解：

(1) 画出各过程的 $p-v$ 图及 $T-s$ 图



(2) 先求各状态参数

$$p_1 = \frac{nRT_1}{V_1} = \frac{500 \text{ mol} \times 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \times (273 + 25) \text{ K}}{2 \text{ m}^3} \\ = 6.19393 \times 10^5 \text{ Pa} = 6.11 \text{ atm}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} = 298 \text{ K} \times \left(\frac{1 \text{ MPa}}{6.11 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1.67-1}{1.67}} = 144.26 \text{ K}$$

$$V_2 = V_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{\kappa}} = 2 \text{ m}^3 \times \left(\frac{6.11 \text{ MPa}}{1 \text{ MPa}} \right)^{\frac{1}{1.67}} = 5.906 \text{ m}^3$$

$$T_3 = T_2 = 144.26 \text{ K} \quad V_3 = V_1 = 2 \text{ m}^3$$

$$p_3 = \frac{500 \text{ mol} \times 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \times 144.26 \text{ K}}{2 \text{ m}^3} = 299855 \text{ Pa}$$

等温过程：热量 = 膨胀功 = 技术功

$$\begin{aligned}
 Q &= Q_{1-2} + Q_{2-3} = Q_{2-3} = W_{T2-3} = nRT \ln \frac{V_3}{V_2} \\
 &= 500 \text{ mol} \times 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \times 144.26 \text{ K} \times \ln \frac{2 \text{ m}^3}{5.906 \text{ m}^3} \\
 &= -649.4 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

所以，放热

$$\begin{aligned}
 W &= W_{1-2} + W_{2-3} = (U_1 - U_2) + W_{T2-3} \\
 &= nC_{Vm} (T_1 - T_2) + nRT \ln \frac{V_3}{V_2} \\
 &= 500 \text{ mol} \times 3 \times 4.1868 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \times (298 - 144.26) \text{ K} + (-649.4) \text{ kJ} \\
 &= 316.12 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta U_{1-3} &= Q_{1-3} - W_{1-3} \\
 &= -649.4 \text{ kJ} - 316.62 \text{ kJ} = -965.52 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta H_{1-3} &= nC_{pm} (T_3 - T_1) = \Delta U + \Delta(pV) \\
 &= -965.52 \text{ kJ} + (299.855 - 619.393) \text{ kPa} \times 2 \text{ m}^3 \\
 &= 1604.6 \text{ kJ}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta S_{1-3} &= n \left[C_{Vm} \ln \frac{T_3}{T_1} + R \ln \frac{V_3}{V_1} \right] \\
 &= 500 \text{ mol} \times 3 \times 4.1868 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)} \times \ln \frac{144.26 \text{ K}}{298 \text{ K}} \\
 &= -4.56 \text{ kJ/K}
 \end{aligned}$$

4. 解：根据能量方程有

$$Q_1 = \Delta U_1 + W_1 \quad Q_2 = \Delta U_2 + W_2$$

$$\because \Delta U_1 = -\Delta U_2 \quad \therefore Q_1 - W_1 = W_2 - Q_2 \quad W_2 = Q_1 + Q_2 - W_1$$

$$W_2 = Q_1 + Q_2 - W_1 = -8 + 6 - 26 = -28 \text{ (kJ)}$$

$$5. \text{ 解：} \quad (1) \quad \eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{20 + 273}{800 + 273} = 72.7\%$$

$$(2) \quad P_0 = \frac{W_0}{60} = \frac{\eta_c Q_H}{60} = \frac{0.727 \times 1000}{60} = 12.12 \text{ (kW)}$$

$$(3) \quad Q_L = Q_H (1 - \eta_c) = 1000 \times (1 - 0.727) = 273 \text{ kJ}$$

$$6. \text{ 解} \quad v_2 = v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{0.287 \times 10^3 \times (35 + 273)}{0.2 \times 10^6} = 0.442 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0.2 \times \frac{(180 + 273)}{(35 + 273)} = 0.294 \text{ MPa}$$

$$q = c_v (t_2 - t_1) = 0.717 \times (180 - 35) = 103.97 \text{ kJ / kg}$$

$$w = 0$$

$$w_t = v_1 (p_1 - p_2) = 0.442 \times (0.2 - 0.294) \times 10^6 \times 10^{-3} = -41.5 \text{ kJ / kg}$$

$$\Delta h = c_p (t_2 - t_1) = 1.004 \times (180 - 35) = 145.6 \text{ kJ / kg}$$

7. 解：

缸内气体为热力系 - 闭口系。突然取走 90kg 负载，气体失去平衡，振荡后最终建立新的平衡。虽不计摩擦，但由于非准静态，故过程不可逆。但可以应用第一定律解析式。由于缸壁充分导热，所以缸内的气体在热力变化过程中的温度是不变的。

首先计算状态 1 和状态 2 的基本参数，

$$P_1 = P_b + \frac{F_1}{A} = 771 \times 133.32 + \frac{205}{100} \times 98100 = 0.3039 \text{ MPa}$$

$$V_1 = A \times h = 100 \times 10 \times 10^{-6} = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$T_2 = T_1$$

$$V_2 = A \times (h + \Delta h) = (h + \Delta h) \times 100 \times 10^{-6} = (10 + \Delta h) \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$P_2 = P_b + \frac{F_2}{A} = 771 \times 133.32 + \frac{205 - 90}{100} \times 98100 = 0.2156 \text{ MPa}$$

(1) 求活塞上升的高度：

$$\text{过程中质量不变，且等于} \quad m_1 = \frac{P_1 V_1}{R_g T_1} = m_2 = \frac{P_2 V_2}{R_g T_2}$$

$$V_2 = \frac{P_1}{P_2} V_1 = \frac{0.3039}{0.2156} \times 10^{-3} = (10 + \Delta h) \times 10^{-4}$$

$$\Delta h = 4.1 \text{ cm}$$

(2) 气体在过程中作的功

根据热力学第一定律， $Q = \Delta U + W$ ，以及 $\Delta U = U_1 - U_2 = m_2 u_2 - m_1 u_1$

由于 $m_2 = m_1$ ， $\{u\}_{\text{kJ / kg}} = \{T\}_k$ 且 $T_1 = T_2$ ， $\Delta u = 0$

由于不计摩擦气体所做的功， W 分为两部分：

W_1 位克服大气所做的功； W_2 位活塞位能的增加量

$$\text{则 } W_2 = \Delta E_p = mgh = (205 - 90) \times 9.81 \times 4.1 \times 10^{-2} = 46.25 \text{ J}$$

$$W_1 = P_b A \times \Delta h = 771 \times 133.32 \times 100 \times 10^{-4} \times 4.1 \times 10^{-2} = 42.14 \text{ J}$$

$$\Rightarrow W = W_1 + W_2 = 46.25 + 42.14 = 88.4 \text{ J}$$

$$\text{或者，} W = p_2 A \Delta H = 0.2156 \times 10^6 \text{ Pa} \times 100 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \times 4.1 \times 10^{-2} \text{ m} = 88.4 \text{ J}$$

8. 解：

(1) 1 到 2 是可逆多变过程，对初，终态用理想气体状态方程式有

$$v_1 = \frac{R_g T_1}{p_1} = \frac{287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times (1300 + 273) \text{ K}}{8 \times 10^6 \text{ Pa}} = 0.05643 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

$$v_2 = \frac{R_g T_2}{p_2} = \frac{287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} \times (400 + 273) \text{ K}}{0.4 \times 10^6 \text{ Pa}} = 0.48288 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

所以多变指数

$$n = \frac{\ln(p_1 / p_2)}{\ln(v_2 / v_1)} = \frac{\ln(8 \times 10^6 \text{ Pa} / 0.4 \times 10^6 \text{ MPa})}{\ln(0.48288 \text{ m}^3 / \text{kg} / 0.05643 \text{ m}^3 / \text{kg})} = 1.395$$

(2) 多变过程的膨胀功

$$w = \frac{R_g}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}}{1.395 - 1} (1573 - 673) \text{ K} = 653.92 \text{ kJ/kg}$$

(3) 多变过程的热量

$$\begin{aligned} q &= \Delta u + w = c_v (T_2 - T_1) + w \\ &= 0.716 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \times (673 - 1573) \text{ K} + 653.92 \text{ kJ/kg} \\ &= 9.52 \text{ kJ/kg} > 0 \end{aligned}$$

故该可逆多变膨胀过程是吸热过程

$$9. c_v = \frac{1}{k-1} R_r = \frac{430}{1.35-1} = 1229 \text{ J/(kg} \cdot \text{k)}$$

$$W=0$$

$$U = mc_v (T_2 - T_1) = 2.26 \times 1.229 \times (591 - 477) = 317 \text{ kJ}$$

$$Q = U = 317 \text{ kJ}$$

$$S = mc_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 2.26 \times 1.229 \times \ln \frac{591}{477} = 0.595 \text{ kJ/K}$$

$$\begin{aligned} 10. S_g &= \frac{1000}{500 + 273} - \frac{1000}{1500 + 273} \\ &= 0.73 \text{ kJ/K} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{x1} &= T_0 \cdot S_g \\ &= (273 + 25) \times 0.73 \\ &= 217.5 \text{ kJ} \end{aligned}$$

$$11. \frac{p_2}{p_1} = \frac{0.15}{0.7} = 0.214 < 0.528 \text{ 为缩放型喷管。}$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 1073 \times \left(\frac{0.15}{0.7} \right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} = 691 \text{ K}$$

$$c_2 = \sqrt{2c_p (T_1 - T_2)} = \sqrt{2 \times 1004 \times (1073 - 691)} = 876 \text{ m/s}$$

$$M_2 = \frac{c_2}{a_2} = \frac{876}{\sqrt{1.4 \times 287 \times 691}} = 1.66$$

$$12. Q = mR_r T \ln \frac{P_1}{P_2} = 1.5 \times 0.287 \times 328 \times \ln \frac{0.25 \times 10^6}{0.15 \times 10^6} = 72.1 \text{ KJ}$$

$$W = mR_r T \ln \frac{P_1}{P_2} = Q = 72.1 \text{ KJ}$$

$$U = mC_v(T_2 - T_1) = 0$$

$$H = mC_p(T_2 - T_1) = 0$$

$$13. (1) P^\circ = P_1 = 1.5 \times 10^6 \text{ Pa}, V^\circ = V_1 = 0.065 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\text{则 } T^\circ = \frac{P^\circ V^\circ}{R_r} = \frac{1.5 \times 10^6 \times 0.065}{287} = 339.7 \text{ K}$$

$$V_2 = V^\circ \left(\frac{P^\circ}{P_2} \right)^{\frac{1}{K}} = 0.065 \times \left(\frac{1.5 \times 10^6}{0.8 \times 10^6} \right)^{1.4} = 0.102 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_2 = \frac{P_2 V_2}{R_r} = \frac{0.8 \times 10^6 \times 0.102}{287} = 284.3 \text{ K}$$

$$(2) V_{c2} = \sqrt{\frac{2K}{K-1} R_r (T^\circ - T_2)} = \sqrt{\frac{2 \times 1.4}{1.4-1} \times 287 \times (339.7 - 284.3)} = 333.6 \text{ m/s}$$

14. 每小时排气的放热量 Q_p :

$$Q_p = mC_p(T_0 - T_1) = 3600 \times 1.2 \times 1.021 \times (-576 + 283) = -1292341 \text{ KJ/h}$$

此热量中的有效能 Q_a :

$$Q_a = m \int_{T_1}^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ = mC_p \int_{T_1}^{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT = mC_p \left[(T_0 - T_1) - T_0 \ln \frac{T_0}{T} \right]$$

$$= 3600 \times 1.2 \times 1.021 \times \left[(283 - 576) - 283 \ln \frac{283}{576} \right] = -405345.2 \text{ KJ/h}$$

此热量中的无效能 Q_u :

$$Q_u = Q_p - Q_a = -1292341 - (-405345.2) = -886995.8 \text{ KJ/h}$$

$$15. S_g = \frac{1000}{500 + 273} - \frac{1000}{1500 + 273} = 0.73 \text{ kJ/K}$$

$$E_{x1} = T_0 \cdot S_g$$

$$= (273 + 25) \times 0.73$$

$$= 217.5 \text{ kJ}$$

$$16. Q = mR_r T \ln \frac{P_1}{P_2} = 1.5 \times 0.287 \times 328 \times \ln \frac{0.25 \times 10^6}{0.15 \times 10^6} = 72.1 \text{ KJ}$$

$$W = mR_r T \ln \frac{P_1}{P_2} = Q = 72.1 \text{ KJ}$$

$$U = mC_v(T_2 - T_1) = 0$$

$$H = mC_p(T_2 - T_1) = 0$$

17. 解：

$$(1) \quad p_1 = 9000 + 98.66 = 9098.66 \text{ kPa} \quad p_2 = 98.66 - 95 = 3.66 \text{ kPa}$$

(2) 取汽轮机汽缸内壁和蒸汽进、出口为系统，则系统为稳定流动系统，能量方程为

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta c^2 + g\Delta z + w_{sh}$$

$$q = 6.3 \times 10^3 / 40000 = 0.1575 \text{ kJ/kg}$$

进、出口的动能差和位能差忽略不计，则

$$w_{sh} = q - \Delta h = -0.1575 - (2240 - 3440) \approx 1200 \text{ (kJ/kg)}$$

(3) 汽轮机功率

$$P = q_m w_{sh} = \frac{40 \times 10^3}{3600} \times 1200 = 1.33 \times 10^4 \text{ (kW)}$$

$$(4) \quad \Delta w_{sh} = \frac{1}{2} \Delta c^2 = \frac{1}{2} \times (140^2 - 60^2) \times 10^{-3} = 8 \text{ kJ/kg}$$

$$\varepsilon_k = \frac{|\Delta w_{sh}|}{|w_{sh}|} = \frac{8}{1200} = 0.67\%$$

18.

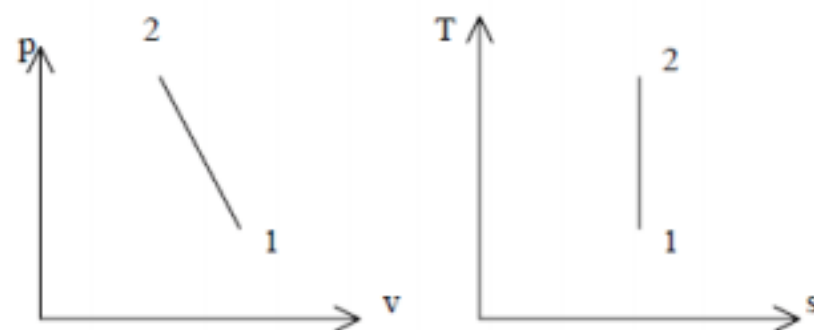
$$\begin{aligned} \text{解: } \Delta u &= \int c_v dT = a(T_2 - T_1) + \frac{b(T_2^2 - T_1^2)}{2} \\ \Delta h &= \int c_p dT = (a + R_g)(T_2 - T_1) + \frac{b(T_2^2 - T_1^2)}{2} \\ \Delta s &= \int \frac{c_v}{T} dT + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} = a \ln \frac{T_2}{T_1} + b(T_2 - T_1) + R_g \ln \frac{v_2}{v_1} \end{aligned}$$

19.

$$\begin{aligned} \text{解: } \Delta u &= q - w = -100.1 \text{ kJ/kg} \quad C_v = \Delta u / \Delta T = 0.741 \text{ kJ/kgK} \\ c_p &= k c_v = 1.038 \text{ kJ/kgK} \end{aligned}$$

20.

解：1



$$2 \quad T_2 = T_1 \times (P_2/P_1)^{(k-1)/k} = 300 \times 60^{0.4/1.4} = 966 \text{ K}$$

$$3 \quad c_v = R_g / (k-1) = 287/0.4 = 717.5 \text{ J/kgK} \quad c_p = k R_g / (k-1) = 1004.5 \text{ J/kgK}$$

$$4 \quad W = -m\Delta u = m c_v (T_1 - T_2) = 1433565 \text{ J/K} \quad w_t = k w = 2006991 \text{ J/K}$$