

第十章 蒸汽动力装置循环

10-1 简单蒸汽动力装置循环（即朗肯循环），蒸汽的初压 $p_1 = 3\text{MPa}$ ，终压 $p_2 = 6\text{kPa}$ ，初温如下所示，试求在各种不同初温时循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 及蒸汽的终干度 x_2 ，并将所求得各值填写入表内，以比较所求得的结果。

提示和答案：由 $h-s$ 图查得： $h_1 = 2996\text{ kJ/kg}$ ， $h_2 = 2005\text{ kJ/kg}$ ， $x_2 = 0.761$ ， $t_2 = 36^\circ\text{C}$ 。取 $h_2' \approx c_w t_2' = 150.7\text{ kJ/kg}$ 、 $v_2' \approx 0.001\text{ m}^3$ 。水泵功 $w_p = v_2'(p_2 - p_1) \approx 3\text{ kJ/kg}$ ，

热效率 $\eta_t = \frac{h_1 - h_2 - w_p}{h_1 - h_2 - w_p} \approx 34.7\%$ ，若略去水泵功， $\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = 34.83\%$ ，

$$d = \frac{1}{h_1 - h_2} = 1.009 \times 10^{-6}\text{ kg/J}。$$

$t_1 / ^\circ\text{C}$	300	500
η_t	0.3476	0.3716
$d / \text{kg/J}$	1.009×10^{-6}	8.15×10^{-7}
x_2	0.761	0.859

10-2 简单蒸汽动力装置循环，蒸汽初温 $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ，终压 $p_2 = 0.006\text{MPa}$ ，初压 p_1 如下表所示，试求在各种不同的初压下循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 及蒸汽终干度 x_2 ，并将所求得的数值填入下表内，以比较所求得的结果。

提示和答案：(1) $p_1 = 3\text{ MPa}$ ， $t_1 = 500^\circ\text{C}$ ， $p_2 = 0.006\text{MPa}$ ，即上题的(2)。(2) 据

$$s_2 = s_1, \quad x_2 = \frac{s_2 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = 0.746, \quad h_2 = h_2' + x_2(h_2'' - h_2') = 1953.0\text{kJ/kg}, \quad \eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = 42.87\%,$$

$$d = \frac{1}{h_1 - h_2} = 6.05 \times 10^{-7}\text{ kg/J}$$

p_1 / MPa	3.0	15.0
η_t	0.3716	0.4287
$d / (\text{kg/J})$	8.15×10^{-7}	6.05×10^{-7}
x_2	0.859	0.742

10-3 某蒸汽动力装置朗肯循环的最高运行压力是 5 MPa，最低压力是 15 kPa，若蒸汽轮机的排汽干度不能低于 0.95，输出功率不小于 7.5 MW，忽略水泵功，试确定锅炉输出蒸汽必须的温度和质量流量。

提示和答案： 由最低压力和蒸汽轮机的排汽干度确定终态蒸汽的熵：

$$h' = 225.9 \text{ kJ/kg}, h'' = 2598.2 \text{ kJ/kg}, s' = 0.755 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}, s'' = 8.007 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)},$$

$$h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 2479.6 \text{ kJ/kg}, s_2 = s' + x_2(s'' - s') = 7.644 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}。再据 s_1 = s_2 及初$$

压——循环的最高运行压力查水蒸气表得： $h_1 = 4032.1 \text{ kJ/kg}$ 、 $t_1 = 756 \text{ }^\circ\text{C}$ 。忽略水泵功

$$w_{\text{net}} = w_{\text{T}} = h_1 - h_2 = 1552.5 \text{ kJ/kg}, q_m = \frac{P}{w_{\text{net}}} = 4.831 \text{ kg/s}。$$

10-4 利用地热水作为热源，R134a 作为工质的朗肯循环（ $T-s$ 图参见图 10-1），R134a 离开锅炉时状态为 85°C 的干饱和蒸气，在汽轮机内膨胀后进入冷凝器时的温度是 40°C ，计算循环热效率。

提示和答案： R134a 作为工质的朗肯循环与以水蒸气为工质朗肯循环的热力学分析是一致的。注意新蒸气为饱和状态。

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = 0.935, \text{ 汽轮机输出功 } w_{\text{T}} = h_1 - h_2 = 18.8 \text{ kJ/kg},$$

泵耗功 $w_{\text{p}} = h_4 - h_3 \cong v'(p_4 - p_3) = 1.72 \text{ kJ/kg}$ ，（思考：泵耗功占汽轮机输出功比例较大，为什

$$\text{么） } h_4 = h_3 + w_{\text{p}} = 258.2 \text{ kJ/kg}, q_1 = h_1 - h_4 = 169.5 \text{ kJ/kg}, \eta_t = \frac{w_{\text{net}}}{q_1} = \frac{w_{\text{T}} - w_{\text{p}}}{q_1} = 10.0\%。$$

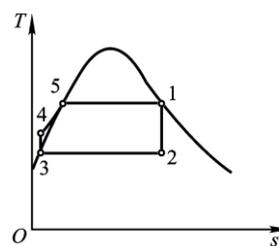


图 10-1

10-5 某项 R134a 为工质的朗肯循环（ $T-s$ 图参见图 10-1）利用当地海水为热源。已知 R134a 的流量为 1 000 kg/s，当地表层海水的温度 25°C ，深层海水的温度为 5°C 。若加热和冷却过程中海水和工质的温差为 5°C ，试计算循环的功率和热效率。

提示和答案： 循环为内可逆的朗肯循环，循环 $T-s$ 图同上题工质（R134a）的最高温度和最低温度分别是 20°C 和 10°C 。 $x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = 0.994$ ，

$$\eta_t = 3.3\%, P = 6474 \text{ kW}。$$

10-6 某发电厂采用的蒸汽动力装置，蒸汽以 $p_1 = 9.0 \text{ MPa}$ 、

$t_1 = 480^\circ\text{C}$ 的初态进入汽轮机。汽轮机的 $\eta_{\text{T}} = 0.88$ ，见图 10-2。

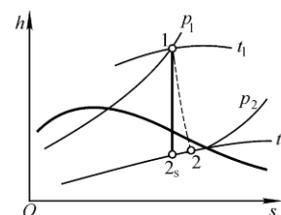


图 10-2

冷凝器的压力与冷却水的温度有关。设夏天冷凝器温度保持 35°C 。假定按朗肯循环工作，求汽轮机理想耗汽率 d_0 与实际耗汽率 d_1 。若冬天冷却水水温降低，使冷凝器的温度保持 15°C ，试比较冬、夏两季因冷凝器温度不同所导致的以下各项的差别：（1）汽轮机做功；（2）加热量；（3）热效率（略去水泵功）。

提示和答案：由 $p_1 = 9.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 480^{\circ}\text{C}$ 、 $s_1 = 6.5894 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、 $h_1 = 3336 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。冷凝器温度不同，意味背压改变。夏天， $t_2 = 35^{\circ}\text{C}$ ， $h_2 = 2016 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，汽轮机的理论技术功 $w_T = h_1 - h_2 = 1320 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，实际技术功 $w'_T = \eta_T w_T = 1161.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，不计水泵功 $w_s = w'_T = 1161.1 \text{ kJ}/\text{kg}$ ， $q_1 = h_1 - h'_2 = 3189.4 \text{ kJ}/\text{kg}$ ，内部热效率 $\eta_i = \frac{w'_T}{q_1} = 36.4\%$ 。实际

耗汽率 $d_1 = \frac{1}{w'_T} = 8.61 \times 10^{-7} \text{ J}/\text{kg}$ 。列表比较

	$w_i/(\text{kJ}/\text{kg})$	$q_1/(\text{kJ}/\text{kg})$	$\eta_i/\%$
夏天	1161.1	3189.4	36.4
冬天	1273.36	3281.05	38.8

10-7 某朗肯循环蒸汽初压 $p_1 = 6 \text{ MPa}$ ，初温 $t_1 = 600^{\circ}\text{C}$ ，冷凝器内维持压力 10 kPa ，蒸汽质量流量是 $80 \text{ kg}/\text{s}$ ，锅炉内传热过程假定在平均温度为 1400 K 的热源和水之间进行；冷凝器内冷却水平均温度为 25°C 。试求：（1）水泵功；（2）锅炉烟气对水的加热率；（3）汽轮机做功；（4）冷凝器内乏汽的放热率；（5）循环热效率；（6）各过程及循环不可逆作功能力损失。已知 $T_0 = 290.15 \text{ K}$ 。

提示和答案：因膨胀及压缩均按等熵过程计算，故不可逆损失表现在烟气向水放热及乏汽向冷却水放热的过程中。查 $h-s$ 图及饱和水和饱和水蒸汽表，得：
 $h_1 = 3657 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $s_1 = 7.161 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $h_2 = 2276 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $s_2 = s_1 = 7.161 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 、
 $h'_2 = 191.76 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $s'_2 = 0.6490 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； $v'_2 = 0.0010103 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、
 $s_4 = s'_2 = 0.6490 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。 $w_p \approx v'_2(p_4 - p_2) = 6.05 \times 10^3 \text{ J}$ 、 $P_p = q_m w_p = 484.1 \text{ kW}$ ，
 $q_1 = h_1 - (h'_2 + w_p) = 3459.19 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $q_{Q_1} = q_m q_1 = 2.767 \times 10^5 \text{ kW}$ ， $w_T = h_1 - h_2 = 1381 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、

$$P_T = q_m w_T = 1.105 \times 10^5 \text{ kW}, q_{Q_2} = q_m q_2 = q_m (h_2 - h_2') = 1.667 \times 10^5 \text{ kW}, \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 39.75\%。$$

以水和水蒸气为系统，锅炉内传热过程熵流 $s_{f1} = \frac{q_1}{T_{\text{gas}}} = 2.471 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，熵产

$$s_{g1} = \Delta s_{41} - s_{f1} = (s_1 - s_4) - s_{f1} = 4.041 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}), \dot{I}_B = q_m T_0 s_{g1} = 9.38 \times 10^4 \text{ kW}。冷凝器内传$$

$$\text{热过程 } s_{f2} = \frac{q_2}{T_{\text{cool}}} = -6.9906 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}), s_{g2} = \Delta s_{22'} - s_{f2} = 0.4786 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}),$$

$$\dot{I}_C = q_m T_0 s_{g2} = 1.11 \times 10^4 \text{ kW}, \text{循环不可逆损失 } \dot{I} = \dot{I}_B + \dot{I}_C = 10.49 \times 10^4 \text{ kW}。$$

10-8 某抽汽回热循环采用间壁式回热器，见图 10-3。该循环最高压力 5 MPa，锅炉输出蒸汽温度为 650°C，抽汽压力 1 MPa，冷凝器工作温度 45°C，送入锅炉的给水温度为 200°C。求：循环抽汽量和水泵 A、B 的耗功。

提示和答案： 新蒸汽： $h_8 = 3782.6 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、

$s_8 = 7.388 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，等熵膨胀，由 s_8 及抽汽压力 1 MPa，得

抽汽焓 $h_3 = 3213.0 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。抽汽在回热器内凝结为 1MPa 饱和

液， $h_4 = 762.8 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $v_4 = 0.0011 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、 $t_s = 179.9^\circ\text{C} + 0.5^\circ\text{C}$ ，

冷凝水 $p_1 = 9.6 \text{ kPa}$ 、 $h_1 = 188.4 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、 $v_1 = 0.0010 \text{ m}^3/\text{kg}$ 。进入锅炉给水 $h_7 = 853.8 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

$w_{p,A} = v_1(p_2 - p_1) = 4.99 \text{ kJ}/\text{kg}$ ， $w_{p,B} = v_4(p_7 - p_4) = 4.4 \text{ kJ}/\text{kg}$ 、取图示虚线为控制体积，列

$$\text{能量方程解得，} \alpha = \frac{h_7 - h_1 - w_{p,A} - w_{p,B}}{h_3 - h_1} = 0.217，$$

10-9 设两个蒸汽再热动力装置循环，蒸汽的初参数都为 $p_1 = 12.0 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ，终压都为 $p_2 = 4 \text{ kPa}$ ，第一个再热循环再热时压力为 2.4 MPa，另一个再热时的压力为 0.5 MPa，

两个循环再热后蒸汽的温度都为 400°C（图 10-4）。试确定这两个再热循环的热效率和蒸汽膨胀终态的干度，将所得的热效率、终态干度和朗肯循环作比较，说明再热压力的选择对循环热效率和终态干度的影响。

提示和答案： 由 p_1 、 t_1 及再热压力 p_b ，查得相关数据，注

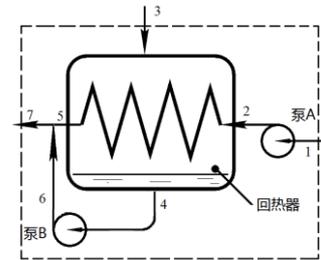


图 10-3

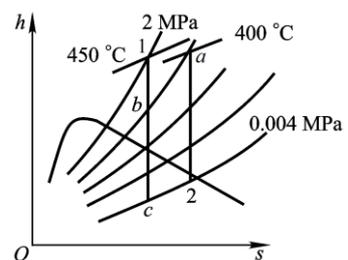


图 10-4

意再热循环的加热量及功的计算。再热压力 $p_b = 2.4\text{MPa}$ 时 $x_c = \frac{s_c - s'_c}{s''_c - s'_c} = 0.730$,

$$\eta_t = \frac{(h_1 - h_b) + (h_a - h_2)}{(h_1 - h'_2) + (h_a - h_b)} = 43.25\% , \quad y_2 = 1 - x_2 = 1 - 0.82 = 0.18$$

再热压力 $p_b = 0.5\text{ MPa}$ 及朗肯循环见下表。

	$\eta_t / \%$	y_2
无再热 (朗肯循环)	42.55	0.27
再热压力 2.4 MPa	43.25	0.18
再热压力 0.5 MPa	40.02	0.084

再热压力高, 可提高循环效率, 但提高干度的作用不显著, 再热压较低, 提高干度作用较大, 但可能引起循环热效率下降。

10-10 具有两次抽汽加热给水的蒸汽动力装置回热循环。其循环示意图如图 10-5 所示。

已知: 第一次抽汽压力 $p_{0_1} = 0.3\text{MPa}$; 第二次抽汽压力

$p_{0_2} = 0.12\text{MP}$, 蒸汽初压 $p_1 = 3.0\text{MPa}$, 初温 $t_1 = 450^\circ\text{C}$ 。

冷凝器中压力 $p_2 = 0.005\text{MPa}$ 。试求: (1) 抽汽量 α_1 、 α_2 ;

(2) 循环热率 η_t ; (3) 耗汽率 d ; (4) 平均吸热温度; (5)

与朗肯循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 和平均吸热温度作比较、

并说明耗汽率为什么反而增大?

提示和答案: 由已知压力、温度等查得相应数据, 分析两个回热器与外界的质能交换情

况, 列能量平衡方程式 $\alpha_1(h_{0_1} - h'_{0_1}) = (1 - \alpha_1)(h'_{0_1} - h'_{0_2})$, $\alpha_2 = (h_{0_2} - h'_{0_2}) = (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_{0_2} - h_2)$,

$$\text{求得 } \alpha_1 = \frac{h'_{0_1} - h'_{0_2}}{h_{0_1} - h'_{0_2}} = 0.0525, \quad \alpha_2 = \frac{(1 - \alpha_1)(h'_{0_2} - h_2)}{h_{0_2} - h_2} = 0.1159; \quad q_1 = h_1 - h'_{0_1} = 2782.4 \text{ kJ/kg},$$

$$q_2 = (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_2 - h'_2) = 1680.9 \text{ kJ/kg}, \quad \eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 39.6\%; \quad d = \frac{1}{w_{\text{net}}} = 9.08 \times 10^{-7} \text{ kg/J};$$

注意平均温度为积分平均 $\bar{T}_1 = \frac{q_1}{\Delta s} = 514.3 \text{ K}$ 。对应的朗肯循环 $\eta'_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2} = 37.0\%$,

$$d' = \frac{1}{h_1 - h_2} = 8.44 \times 10^{-7} \text{ J/kg}, \quad \bar{T}'_1 = \frac{h_1 - h'_2}{s_1 - s'_2} = 485.4 \text{ K}。$$

采用抽汽回热后, 热效率较简单朗肯循环有所提高, 而耗汽率有所增大, 这是因为抽汽使每千克新蒸汽作出的功减小, 故 d 增大,

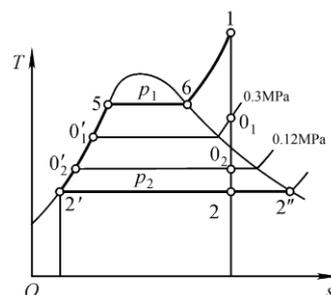


图 10-5

但由于回热，吸热量减少，平均吸热温度升高，放热温度不变，故 η_t 提高。

10-11 某蒸汽循环进入汽轮机的蒸汽温度 400°C 、压力 3MPa ，绝热膨胀到 0.8MPa 后，抽出部分蒸汽进入回热器，其余蒸汽在再热器中加热到 400°C 后进入低压汽轮机继续膨胀到 10kPa 排向冷凝器（图10-6），忽略水泵功，求循环热效率。

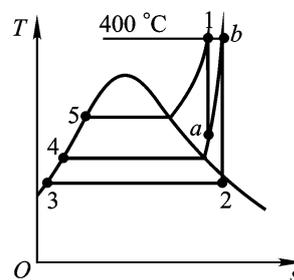


图10-6

提示和答案：本题循环与单纯回热循环差异在于抽出部分蒸汽后的蒸汽进行了再热，循环加热量及净功的计算与单纯的再热循环和抽汽回热循环均稍有不同。

$$x_2 = \frac{s_2 - s'}{s'' - s'} = 0.923, \quad h_2 = h' + x_2(h'' - h') = 2399.5 \text{ kJ/kg}, \quad \alpha = \frac{h_4 - h_3}{h_a - h_3} = 0.1962. \quad \text{汽轮机输出功}$$

$$w_T = h - h_a + (\alpha h_b - h) = (\quad), \quad \text{从锅炉吸热}$$

$$q_1 = h_1 - h_4 + (1 - \alpha)(h_b - h_a) = 2812.6 \text{ kJ/kg}, \quad \text{放热量 } q_2 = (1 - \alpha)(h_2 - h_3) = 1774.6 \text{ kJ/kg},$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 0.369.$$

10-12 某压水堆二回路循环采用一次抽汽加热给水，循环抽象简化为图10-7所示，若新蒸汽的 $p = 6.69\text{MPa}$ 、 $t = 282.2^\circ\text{C}$ ，抽气压力 $p_{0_1} = 0.782\text{MPa}$ ，凝汽器维持 0.009MPa ，忽略水泵功，试求：（1）抽汽量 α ；（2）循环热率；（3）耗汽率 d ；（4）与朗肯循环的热效率 η_t 、耗汽率 d 比较，并说明耗汽率为什么反而增大？

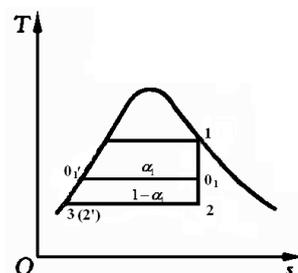


图10-7

提示和答案：压水堆二回路循环新蒸汽通常为饱和蒸汽，循环

热力学分析与新蒸汽为过热蒸汽循环相同。查水和水蒸气热力性质表， $h_1 = 2772.5 \text{ kJ/kg}$ ，

$s_1 = 5.830 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ ；假定膨胀过程为等熵过程，由 $s_{0_1} = s_1$ ，及抽汽压力查得饱和参数并计

算得 $x_2 = 0.6$ ， $h_2 = 1808.7 \text{ kJ/kg}$ 。由热平衡方程式 $\alpha(h_{0_1} - h'_{0_1}) = (1 - \alpha)(h'_{0_1} - h'_2)$ ，

$$\alpha = \frac{h'_{0_1} - h'_2}{h_{0_1} - h'_2} = 0.248. \quad q_1 = h_1 - h'_{0_1} = 2055.5 \text{ kJ/kg}, \quad q_2 = (1 - \alpha)(h_2 - h'_2) = 1237.3 \text{ kJ/kg},$$

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 39.8\%, \quad d = \frac{1}{w_{\text{net}}} = 1.22 \times 10^{-6} \text{ kg/J}; \quad \text{相应朗肯循环 } \eta'_t = 36.9\%$$

$d' = 1.04 \times 10^{-6} \text{ J/kg}$ 。压水堆二回路采用抽汽回热循环后，因为抽汽虽使 1 kg 新蒸汽作出的功减小，耗汽率增大，但由于回热，吸热量减少，平均吸热温度升高，而放热温度不变，故 η_t 提高，因此，尽管压水堆二回路循环采用饱和蒸汽且压力低于通常燃烧矿物燃料的蒸汽电厂，但仍采用多级抽汽回热。

10-13 题 10-7 循环改成再热循环，从高压汽轮机排出的蒸汽压力为 0.5MPa，加热到 500 °C 后再进入低压汽轮机，若所有其它条件均不变，假定循环总加热量也不变（即题 10-7 中锅炉内加热量）。试求：（1）在低压汽轮机末端蒸汽的干度；（2）锅炉及再热器内单位质量工质的加热量；（3）高压汽轮机和低压汽轮机产生的总功率；（4）循环热效率；（5）各过程和循环不可逆作功能力损失。

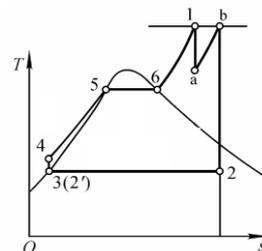


图 10-8

提示和答案：由于再热，循环每 1 kg 蒸汽吸热量增加，但总加热量未变，所以蒸汽流量减少。由题 10-7 并查 $h-s$ 图 $h_a = 2906 \text{ kJ/kg}$ 、 $h_b = 3485 \text{ kJ/kg}$ 、 $s_b = 8.082 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $h_2 = 2563 \text{ kJ/kg}$ 、 $x_2 = 0.991$ 。再热器内 1 kg 蒸汽吸热量 $q_R = h_b - h_a = 579 \text{ kJ/kg}$ ，锅炉内 1 kg 工质吸热量即题 10-7 中 q_1 ， $q_B = 3459.19 \text{ kJ/kg}$ ，工质循环吸热量 $q_1 = q_B + q_R = 4038.19 \text{ kJ/kg}$ ，蒸汽流量 $q_m = \frac{q_{Q1}}{q_1} = 68.53 \text{ kg/s}$ 。高压汽轮机

$P_{T,H} = q_m(h_1 - h_a) = 5.15 \times 10^4 \text{ kW}$ ，低压汽轮机 $P_{T,L} = q_m(h_b - h_2) = 6.32 \times 10^4 \text{ kW}$ ，汽轮机总功率 $P_T = P_{T,H} + P_{T,L} = 1.147 \times 10^5 \text{ kW}$ ； $\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 41.28\%$ ；锅炉及再热器内

$s_{g,1} = (s_b - s_4) - \frac{q_{Q1}/q_m}{T_{\text{gas}}} = 4.549 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $\dot{I}_B = q_m T_0 s_{g,1} = 9.045 \times 10^4 \text{ kW}$ ，冷凝器内

$s_{g,2} = (s_2 - s_2) - \frac{q_2}{T_C} = 0.5202 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ ， $\dot{I}_C = q_m T_0 s_{g,2} = 1.034 \times 10^4 \text{ kW}$ ，循环不可逆作功能力

损失 $\dot{I} = \dot{I}_B + \dot{I}_C = 1.01 \times 10^5 \text{ kW}$ 。

10-14 题 10-7 循环改成一级抽汽回热循环（图 10-9），抽汽压力为 0.5MPa，若其它条件均不变，假定锅炉总加热量不变。试求：（1）锅炉内水的质量流量；（2）两台水泵总耗功；（3）汽轮机做功；（4）冷凝器内放热

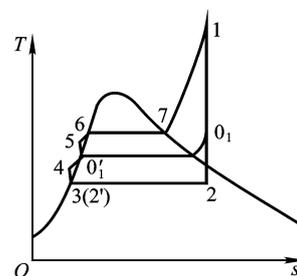


图 10-9

量；(5) 循环热效率；(6) 各过程及循环不可逆作功能力损失。

提示和答案：同样是总加热量未变，但抽汽回热后 1 kg 蒸汽吸热量减少，所以循

环蒸汽流量增加。 $\alpha = \frac{h_{0_i} - h_4}{h_{0_i} - h_4} = 0.165$, $h_5 \approx h_{0_i} + v_{0_i}(p_5 - p_{0_i}) = 646.36 \text{ kJ/kg}$,

$$q_m = \frac{q_{Q_1}}{h_1 - h_5} = 91.9 \text{ kg/s} ; P_{p,L} = (1 - \alpha)q_m(h_4 - h_i) = 38.36 \text{ kW} , P_{p,H} = q_m(h_5 - h_{0_i}) = 552.32 \text{ kW} ,$$

$$P_p = P_{p,L} + P_{p,H} = 590.7 \text{ kW} ; P_T = q_m w_T = q_m[(h_1 - h_{0_i}) + (1 - \alpha)(h_{0_i} - h_2)] = 1.174 \times 10^5 \text{ kW} ;$$

$$q_{Q_c} = (1 - \alpha)q_m(h_2 - h_{2'}) = 1.595 \times 10^5 \text{ kW} ; \eta_t = \frac{P_{\text{net}}}{q_{Q_1}} = 42.2 \% ; \text{ 锅炉内不等温传热}$$

$$s_{g,1} = \Delta s_{5-1} - \frac{q_{Q_1}}{q_m T_{\text{gas}}} = 3.149 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} , \dot{I}_B = q_m T_0 s_{g,1} = 8.40 \times 10^4 \text{ kW} , \text{ 回热器内每产生 } 1 \text{ kg } 0'_1$$

$$\text{饱和水 } s_{g,2} = s_{0'_1} - [\alpha s_{0_1} + (1 - \alpha)s_{2'}] + s_{t,2} = 0.1375 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} , \dot{I}_R = q_m T_0 s_{g,2} = 0.367 \times 10^4 \text{ kW} ,$$

冷凝器内传热过程与题 10-7 同, $\dot{I}_C = q_m T_0 S_{g,3} = 1.066 \times 10^4 \text{ kW}$, 总作功能力损失

$$\dot{I} = \dot{I}_B + \dot{I}_R + \dot{I}_C = 9.83 \times 10^4 \text{ kW} .$$

校核:

$$\text{锅炉烟气放热量的热量 } E_{x,Q_1} = \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) q_{Q_1} = 2.194 \times 10^5 \text{ kW} ;$$

$$\text{冷凝器中冷却水吸热量的热量 } E_{x,Q_2} = \left(1 - \frac{T_0}{T_2}\right) q_{Q_2} = 0.043 \times 10^5 \text{ kW} ;$$

$$\text{循环输出净功 } \dot{E}_{x,w} = P_{\text{net}} = P_T - P_p = 1.168 \times 10^5 \text{ kW}$$

$$\dot{I} = \dot{E}_{x,Q_1} - \dot{E}_{x,Q_2} - \dot{E}_{x,w} = 0.983 \times 10^5 \text{ kW}$$

10-15 某热电厂(或称热电站)以背压式汽轮机乏汽供热(图 10-10)。其新汽参数为 3MPa、400°C, 背压为 0.12MPa。乏汽被送入用热系统, 作加热蒸汽用。放出热量后凝结为同一压力的饱和水, 再经水泵返回锅炉。设用热系统中热量消费为 $1.06 \times 10^7 \text{ kJ/h}$, 问理论上此背压式汽轮机的电功率输出为多少 (kW) ?

提示和答案：通过系统消费热量的数量确定水蒸气的流

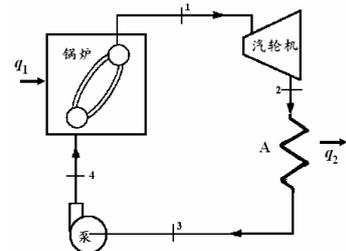


图 10-10

量。由已知条件查得有关参数。1 kg 蒸汽凝结放出热量 $q_2 = h_2 - h_2' = 2100.63 \text{ kJ/kg}$ ，蒸汽

$$\text{流量 } q_m = \frac{q_{02}}{q_2} = 5046.1 \text{ kg/h}, \quad w_{\text{net}} = h_1 - h_2 = 692 \text{ kJ/kg}, \quad P = \frac{q_m w_{\text{net}}}{3600} = 970 \text{ kW}。$$

10-16 某台蒸汽轮机由两台中压锅炉供给新蒸汽，这两台锅炉每小时的蒸汽生产量相同，新蒸汽参数 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ \text{C}$ ，设备示意图如图 10-11a 所示。后来因所需要的动力增大，同时为了提高动力设备的热效率，将原设备加以改装。将其中一台中压锅炉拆走，同时原址安装一台同容量（即每小时蒸汽生产量相同）的高压锅炉。并在汽轮机前增设了一台背压式的高压汽轮机（前置汽轮机）。高压锅炉所生产的蒸汽参数为 $p_0 = 18.0 \text{ MPa}$ 、 $t_0 = 550^\circ \text{C}$ 。高压锅炉的新蒸汽进入高压汽轮机工作。高压汽轮机的排汽背压 $p_b = 3.0 \text{ MPa}$ ，排汽进入炉内再热。再热后蒸汽参数与另一台中压锅炉的新蒸汽参数相同（ $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ \text{C}$ ），蒸汽与另一台中压锅炉的新蒸汽会合进入原来的中压汽轮机工作，改装后设备示意图如图 10-11b 所示。求改装前动力装置的理想热效率。以及改装后动力装置理想效率，改装后理想热效率比改装前增大百分之几？

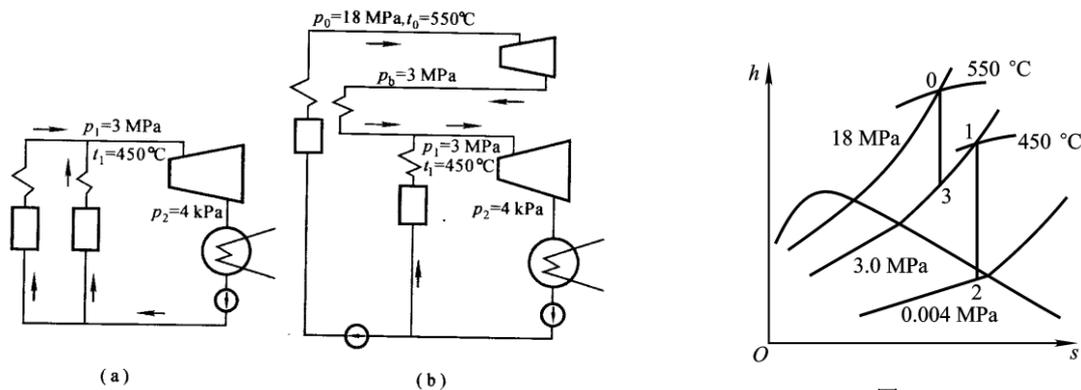


图 10-11

图 10-12

提示和答案：改装前：据 $p_1 = 3.0 \text{ MPa}$ 、 $t_1 = 450^\circ \text{C}$ ， $p_2 = 0.004 \text{ MPa}$ 。由水蒸气热力学性质表中查出 $h_2' = 121.30 \text{ kJ/kg}$ ；由 $h-s$ 图查得 $h_1 = 3345 \text{ kJ/kg}$ ， $h_2 = 2131 \text{ kJ/kg}$ 。

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'} = 37.7\% \quad \text{改装后：一台中压锅炉，参数同上，另一台高压锅炉，生产蒸汽量同中}$$

压锅炉，按新蒸汽参数由 $h-s$ 图上查得： $h_0 = 3418 \text{ kJ/kg}$ ， $h_3 = 2928 \text{ kJ/kg}$ 。

若以再热循环和中压锅炉朗肯循环各 1 kg 蒸汽考虑，全装置所作的功=再热循环功+朗肯

循环功, $W_{\text{net}} = m_1(h_0 - h_3) + (m_1 + m_2)(h_1 - h_2) = 2\,918 \text{ kJ}$ 。全装置所吸热量=再热循环吸热量+

朗肯循环吸热量 $Q_1 = (h_0 - h_{2'}) + (h_1 - h_3) + (h_1 - h_{2'}) = 6\,937.4 \text{ kJ}$ 。 $\eta_t = \frac{W_{\text{net}}}{Q_1} = 42.1\%$ ，理想效

率由 37.1% 增大到 42.1%，改装后功率增大百分比 20.2%。

10-17 已知锅炉内烟气最高温度 $T_{\text{max}} = 1\,700 \text{ K}$ ，锅炉效率 $\eta_B = 0.90$ ；燃料（煤）的热值 $Q = -29\,300 \text{ kJ/kg}$ 。为简化计算，假定燃料在锅炉内完全燃烧，取环境温度 $T_0 = 298 \text{ K}$ 、环境压力 $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ 。据计算 1kg 燃料燃烧放出热量，能产生质量为 8.061kg 蒸汽，锅炉中燃烧接近定压，设烟气近似按空气计算。试求生产 1 kg 蒸汽，烟气提供的 值。

提示和答案： 由于温差较大，虽烟气近似按空气计算，但比热容取温度的函数。从空气的热力性质表中查得： $T_{0g} = T_0 = 298 \text{ K}$ 时， $s_0^0 = 6.700 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $h_{0g} = 300.28 \text{ kJ/kg}$ ；

$T_{1g} = T_{\text{max}} = 1\,700 \text{ K}$ 时， $s_1^0 = 8.602 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 、 $h_{1g} = 1\,881.17 \text{ kJ/kg}$ 。熵差

$s_{1g} - s_{0g} = s_1^0 - s_0^0 - R_{g,g} \ln \frac{p_{1g}}{p_{0g}} = s_1^0 - s_0^0 = 1.9018 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$ 。1kg 燃料燃烧后加热的烟气量为

$m_g = \frac{|Q_p|}{h_{1g} - h_{0g}} = 18.534 \text{ kg}$ ，烟气吸热平均温度 $\bar{T} = \frac{Q}{m_g \Delta T_g} = 831.3 \text{ K}$ ，1kg 燃料燃烧产生烟气

的热量 $E_{x,Q} = m_g \left(1 - \frac{T_0}{\bar{T}}\right) Q = 1\,879.6 \text{ kJ}$ ，生产 1 kg 蒸汽，烟气提供的 值

$e_{x,Q,g} = \frac{E_{x,Q,g}}{m_v} = 2331.8 \text{ kJ/kg}$ 。