

華東理工大學

EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY



第十章 蒸汽动力循环

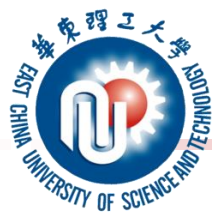


主要内容



- 10.1 蒸汽动力循环-朗肯循环
- 10.2 回热循环与再热循环
- 10.3 热电循环





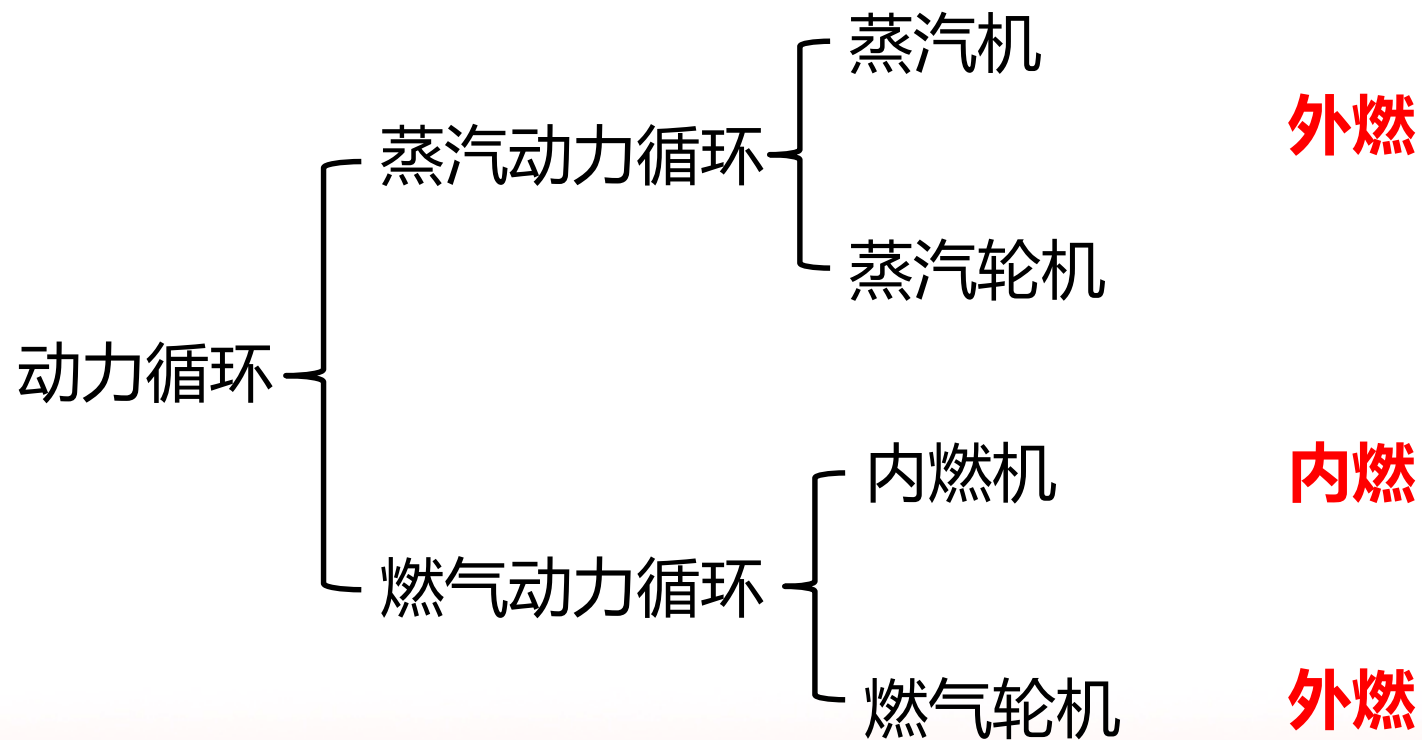
动力循环研究目的和分类

- **动力循环** (Gas Power Cycle): 工质连续不断地将从高温热源取得的热量的一部分转换成对外的净功
- 研究目的: 合理安排循环, **提高热效率**
- 按工质:
 - 气体动力循环**: 内燃机 (Internal Combustion Engine)
空气为主的燃气
按理想气体处理
 - 蒸汽动力循环**: 外燃机 (External Combustion Engine)
水蒸气等实际气体

动力循环分类

□ 基本概念

- ✓ 将热能转化为机械能的设备称为热机;
- ✓ 热机的工作循环称为动力循环。

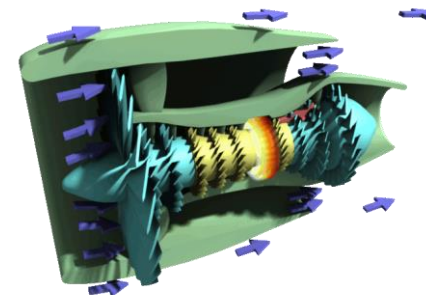
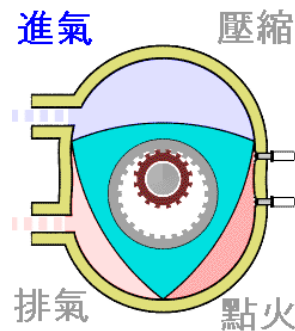


动力循环研究方法

□ 实际动力循环非常复杂：

不可逆，多变指数变化，燃烧等

□ 工程热力学研究方法，先对实际动力循环进行**抽象和理想化**，形成各种理想循环进行**分析**，最后进行**修正**



10.1 郎肯循环 (Rankine Cycle)

□ 水蒸气动力循环系统，最简单的蒸汽动力理想循环。

□ 四个主要装置：锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵

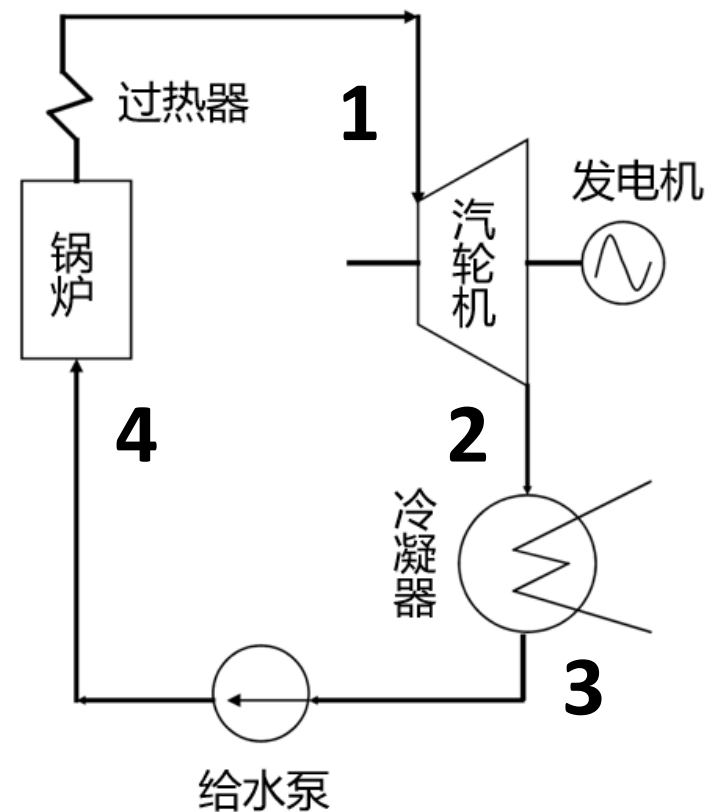
□ 理想化：

□ $1 \rightarrow 2$ ，汽轮机， (s) 膨胀

□ $2 \rightarrow 3$ ，凝汽器， (p) 放热

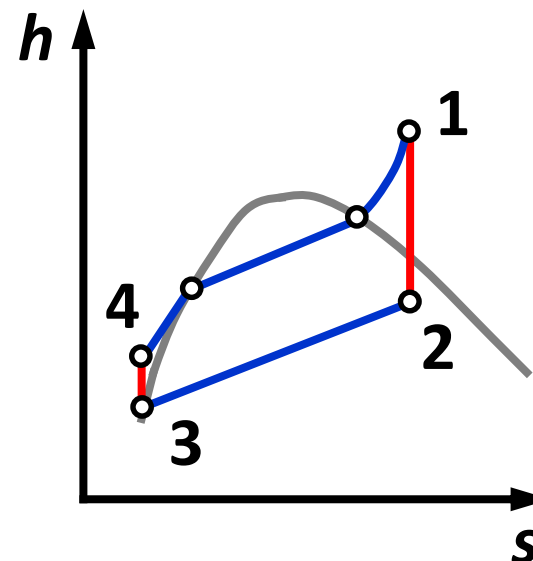
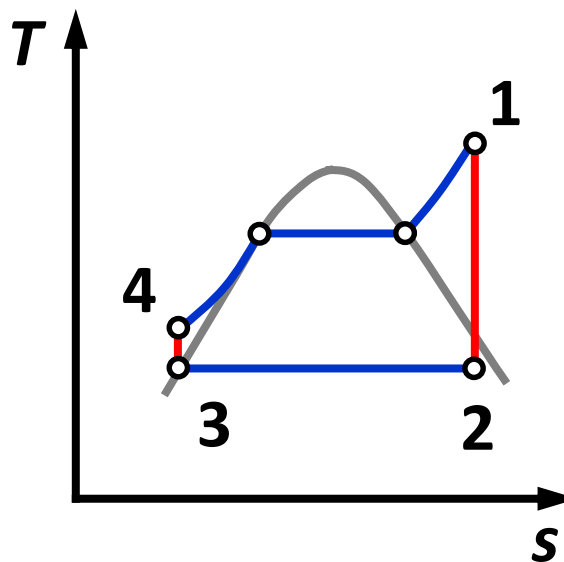
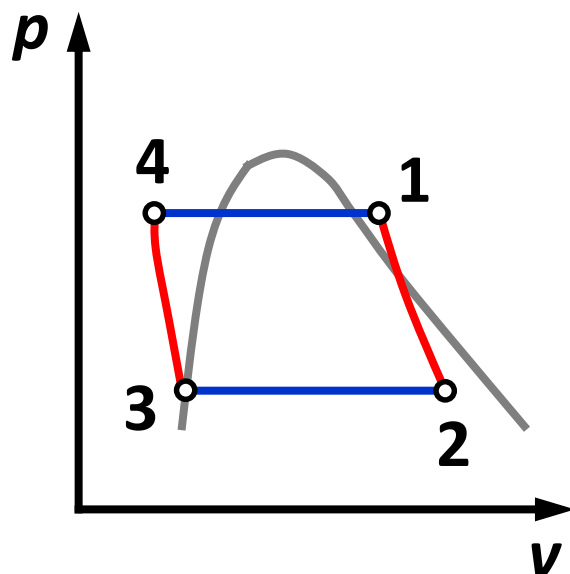
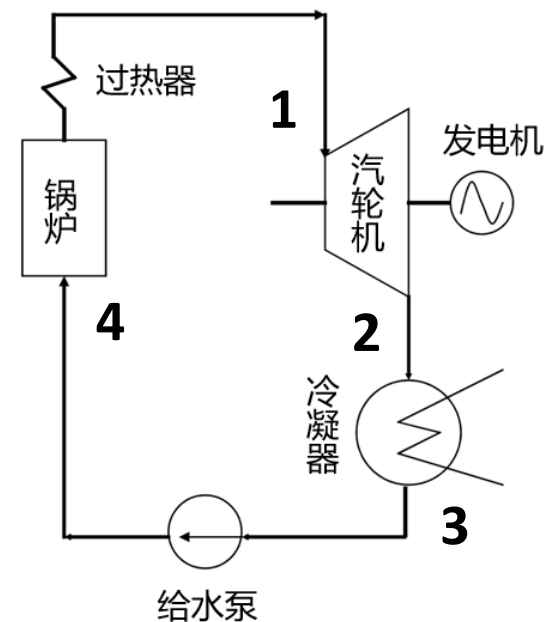
□ $3 \rightarrow 4$ ，给水泵， (s) 压缩

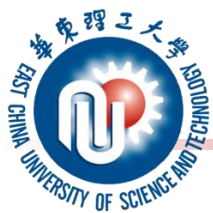
□ $4 \rightarrow 1$ ，锅炉， (p) 吸热



朗肯循环的 $p-v$ / $T-s$ / $h-s$ 图

- $1 \rightarrow 2$, 汽轮机, (s) 膨胀
- $2 \rightarrow 3$, 凝汽器, (p) 放热
- $3 \rightarrow 4$, 给水泵, (s) 压缩
- $4 \rightarrow 1$, 锅炉, (p) 吸热





10.1.2 郎肯循环功、热、热效率的计算

□ 汽轮机做功:

$$w_{s,1-2} = h_1 - h_2$$

□ 凝汽器中的定压放热量:

$$q_2 = h_2 - h_3$$

□ 水泵绝热压缩耗功:

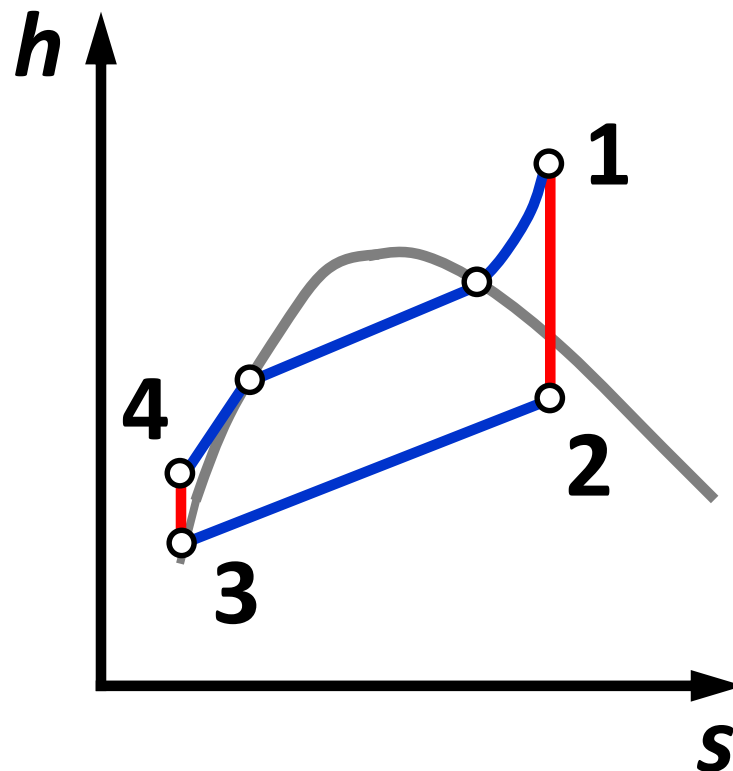
$$w_{s,3-4} = h_4 - h_3 \approx 0$$

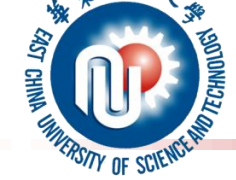
□ 锅炉中的定压吸热量:

$$q_1 = h_1 - h_4$$

□ 朗肯循环热效率:

$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{w_{s,1-2} - w_{s,3-4}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$





郎肯循环与卡诺循环比较

□ 对比同温限1-2-3-4': $q_2 \rightarrow$

$q_{1\text{卡诺}} > q_{1\text{朗肯}} \rightarrow \eta_{\text{卡诺}} > \eta_{\text{朗肯}}$

等温吸热4'-1难实现

□ 对比5-6-7-8: $\overline{T_2} \rightarrow$

$\eta_{\text{卡诺}} < \eta_{\text{朗肯}}$ (一般情况);

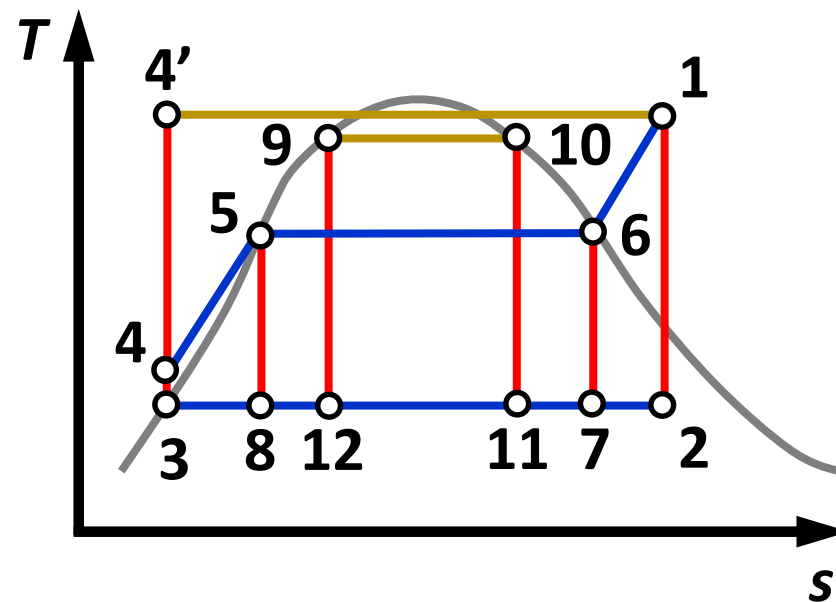
$w_{\text{net卡诺}} < w_{\text{net朗肯}}$

□ 对比9-10-11-12: $\overline{T_1} \uparrow$

11点干度 x 太小, 不利于汽机强度

12-9两相区难压缩

$w_{\text{net卡诺}}$ 小



10.1 蒸汽动力基本循环-朗肯循环

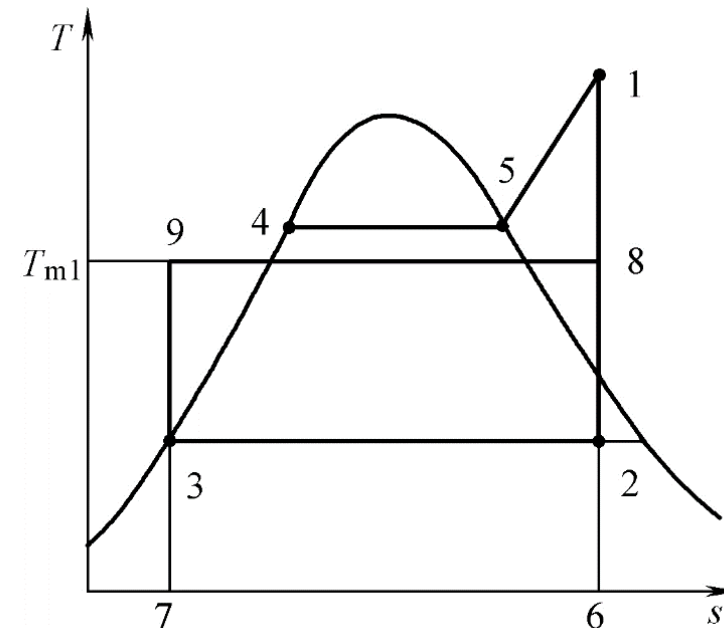
□ 提高朗肯循环热效率的基本途径

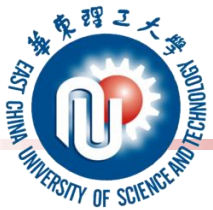
$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

$$q_1 = \int_1^3 T ds = T_{m1}(s_6 - s_7)$$

$$T_{m1} = \frac{\int_1^3 T ds}{(s_6 - s_7)}$$

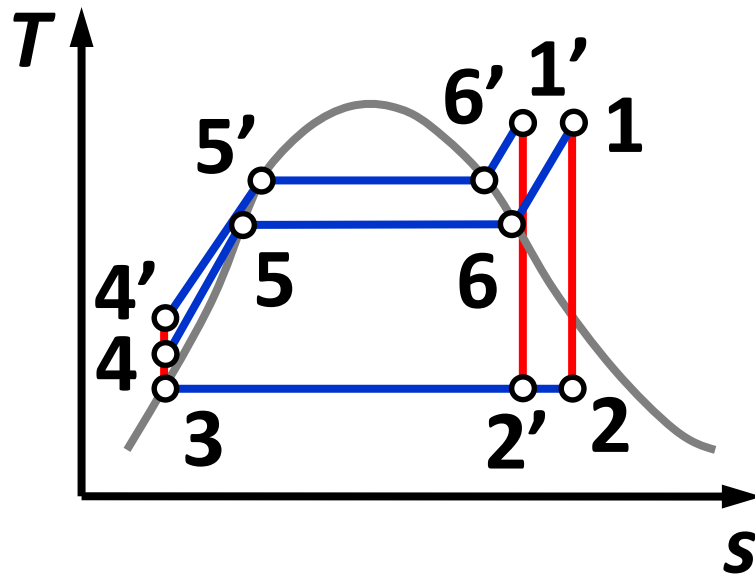
等效卡诺循环 $\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_{m1}}$

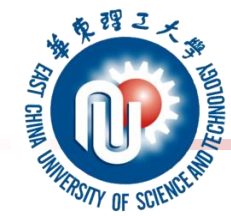




10.1.3 如何提高朗肯循环的热效率

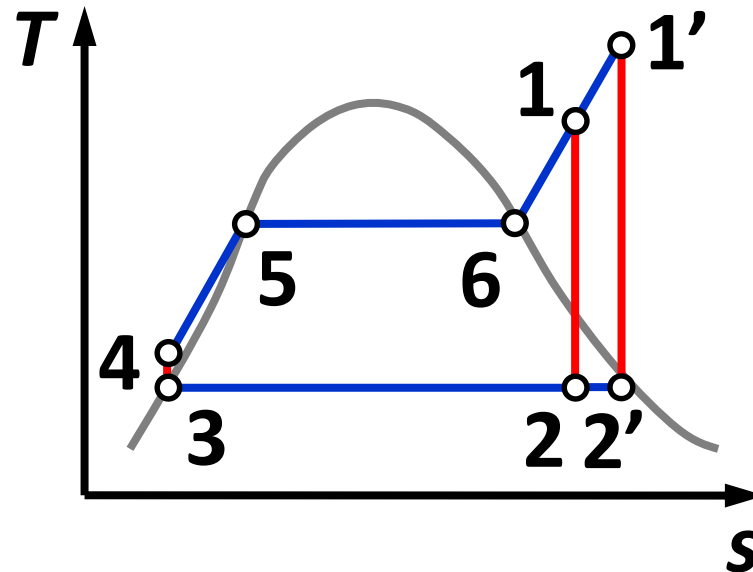
- 热效率: $\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \rightarrow$ 影响热效率的参数: p_1, t_1, p_2
- 提升蒸汽初压: $t_1, p_2 \rightarrow, p_1 \uparrow$
- 优点: $\overline{T}_1 \uparrow, \eta_t \uparrow; v_{2'} \downarrow$, 汽轮机出口尺寸小
- 缺点: $p_1 \uparrow$ 对汽轮机机械强度要求高
- $x_{2'} \downarrow$, 不利于汽轮机安全, 一般出口 $x > 0.85-0.88$

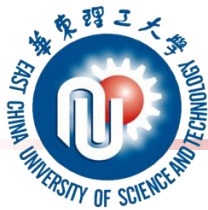




如何提高朗肯循环的热效率

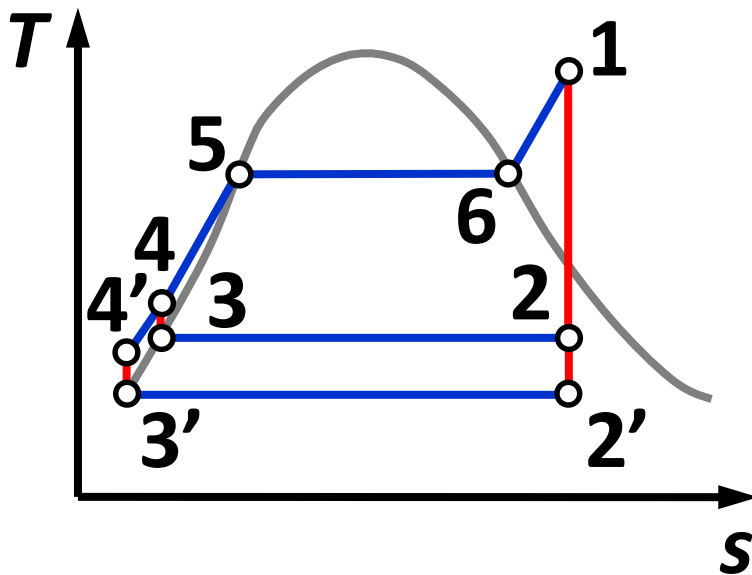
- 热效率: $\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \rightarrow$ 影响热效率的参数: p_1, t_1, p_2
- 提升蒸汽初温: $p_1, p_2 \rightarrow, t_1 \uparrow$
- 优点: $\overline{T}_1 \uparrow, \eta_t \uparrow; x_{2'} \uparrow$, 有利于汽轮机安全
- 缺点: 对耐热及强度要求高, 初温一般在650 °C左右
- $v_{2'} \uparrow$, 汽机出口尺寸大





如何提高朗肯循环的热效率

- 热效率: $\eta_t \approx \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3} \rightarrow$ 影响热效率的参数: p_1, t_1, p_2
- 降低乏汽压力: $p_1, t_1 \rightarrow, p_2 \downarrow$
- 优点: $\overline{T}_2 \downarrow, \eta_t \uparrow$
- 缺点: 受环境温度限制, p_2 一般为0.0035-0.005 MPa, 相应的饱和温度约为27-33 °C (冬天热效率高)



实际蒸汽动力循环分析

□ 非理想因素:

蒸汽管道摩擦降压, 散热 ($1'' \rightarrow 1'$)

汽机汽门节流 ($1' \rightarrow 1$)

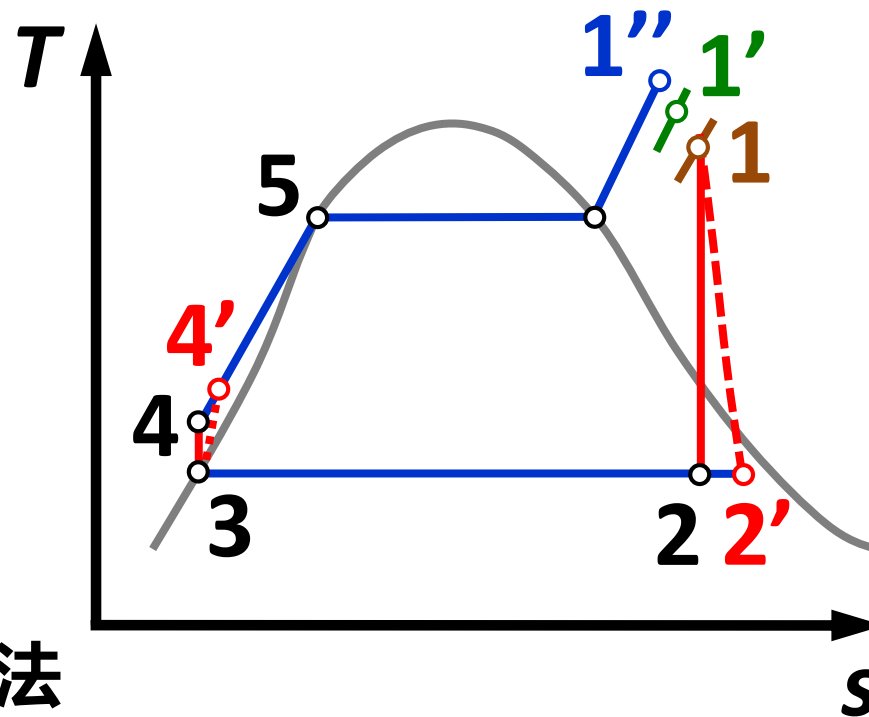
汽机不可逆 ($1 \rightarrow 2'$)

给水泵不可逆 ($3 \rightarrow 4'$)

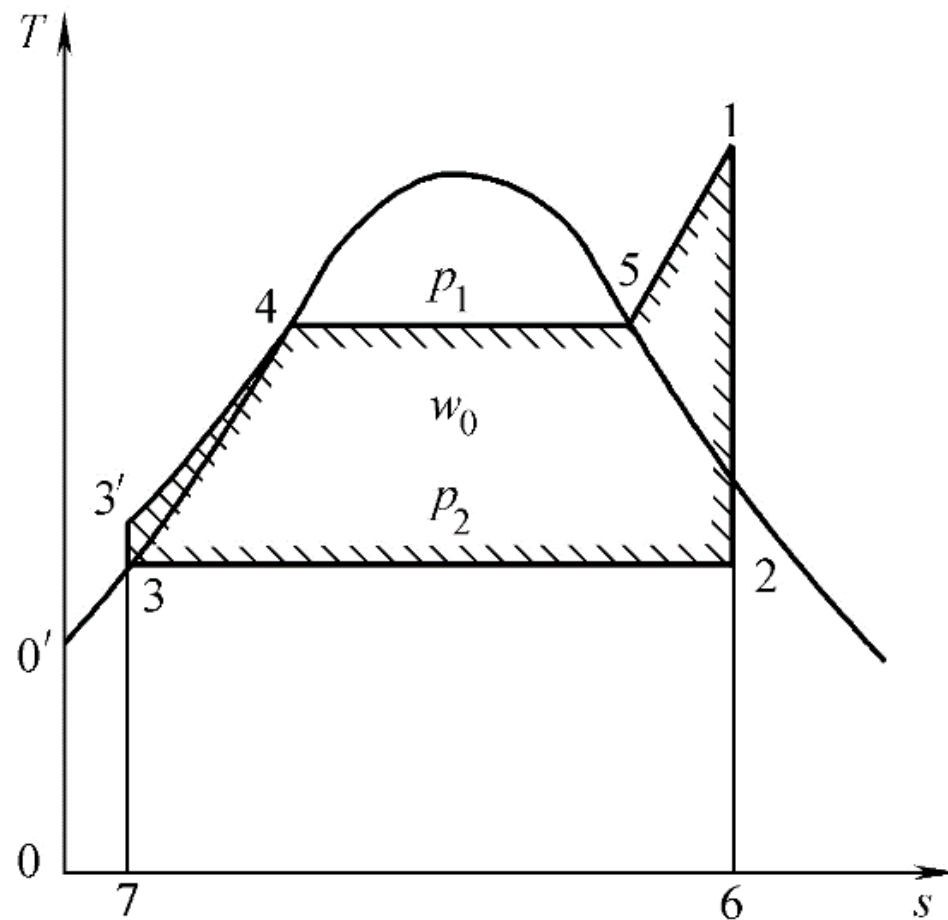
□ 实际循环分析方法:

热一律: 热效率分析法

热二律: 熵分析法 / Ex 分析法

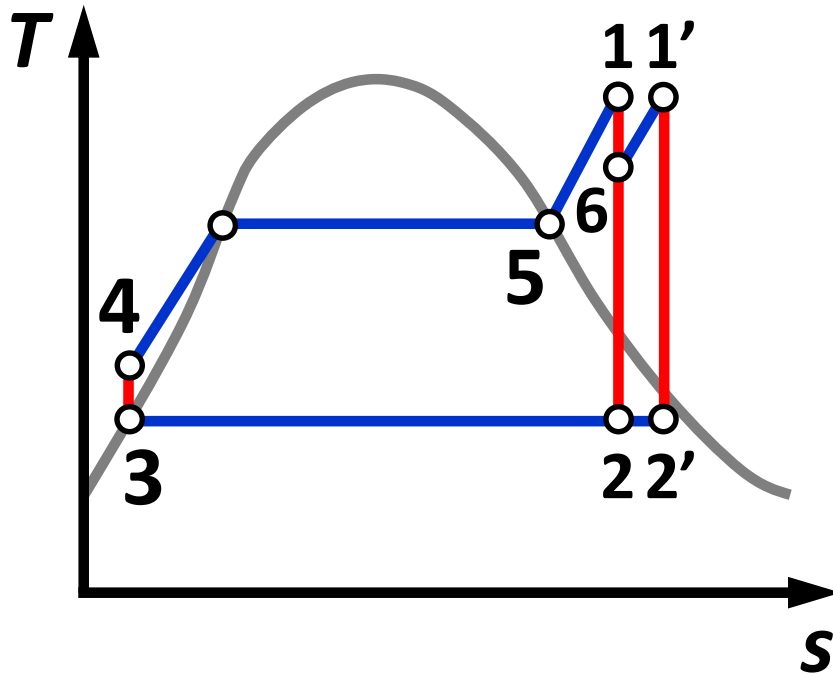
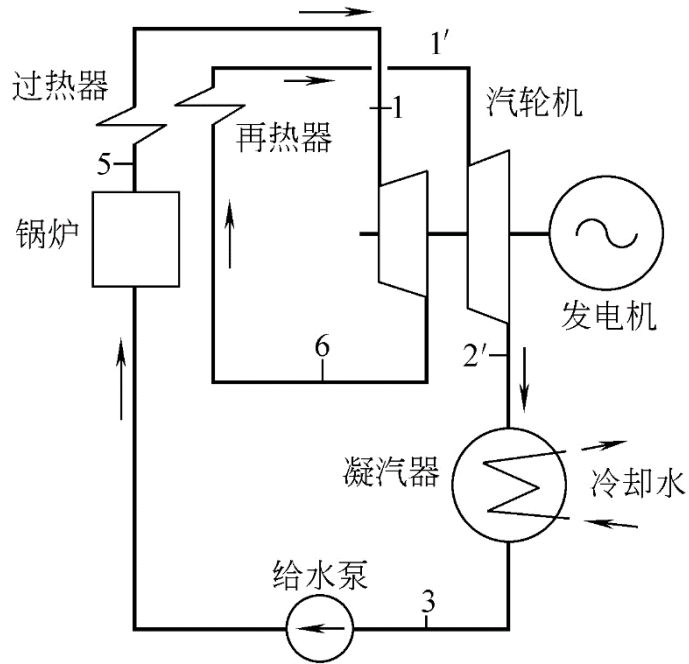


实际蒸汽动力循环分析



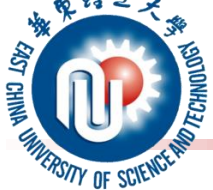
能量损失很大，但熵损失不大

10.2.1 蒸汽再热循环 (Reheat)



提高蒸汽压力而不提高蒸汽温度将引起乏汽干度的下降。

- **吸热量:** $q_1 = (h_1 - h_4) + (h_{1'} - h_6)$
- **放热量:** $q_2 = h_{2'} - h_3$
- **净功 (忽略净功):** $w_{net} = (h_1 - h_6) + (h_{1'} - h_{2'})$
- **热效率:** $\eta_{t,RH} = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{(h_1 - h_6) + (h_{1'} - h_{2'})}{(h_1 - h_4) + (h_{1'} - h_6)}$



蒸汽再热循环效率的说明

□ 再热循环**不一定**提高热效率

□ **与再热压力有关：**

$$p_6 = p_{1'} \approx (0.2-0.3) p_1$$

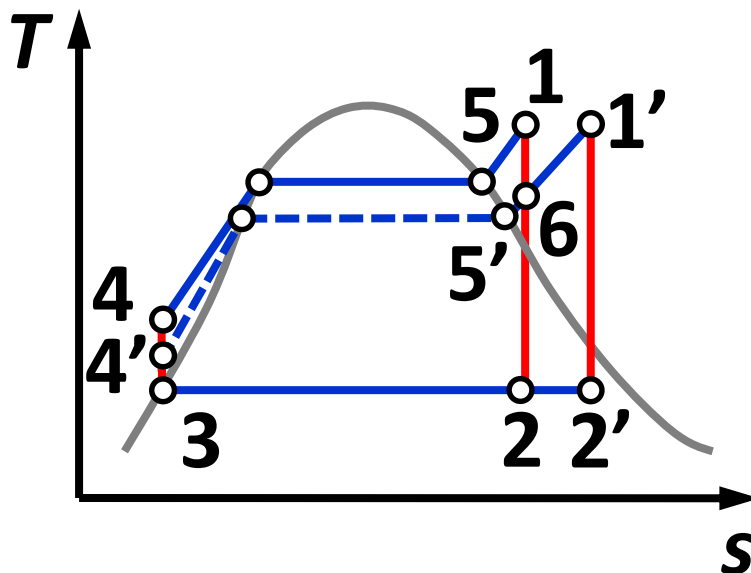
□ x_2 **增大**给**提高初压**创造了条件

□ 一次压力合适的再热可使循环效率提高2-3.5%

□ $p_1 < 10 \text{ MPa}$ ：一般不采用再热

$p_1 > 13.5 \text{ MPa}$ ：一次再热 (我国常见10-30万千瓦机组)

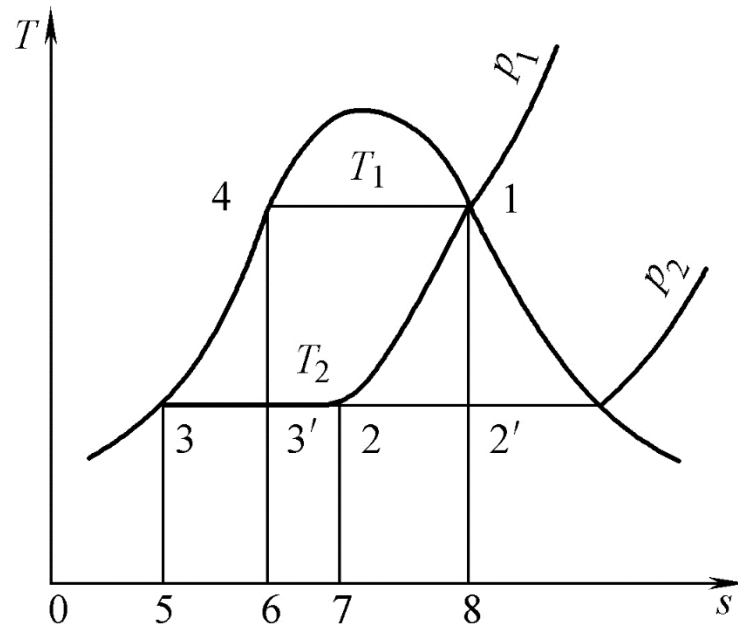
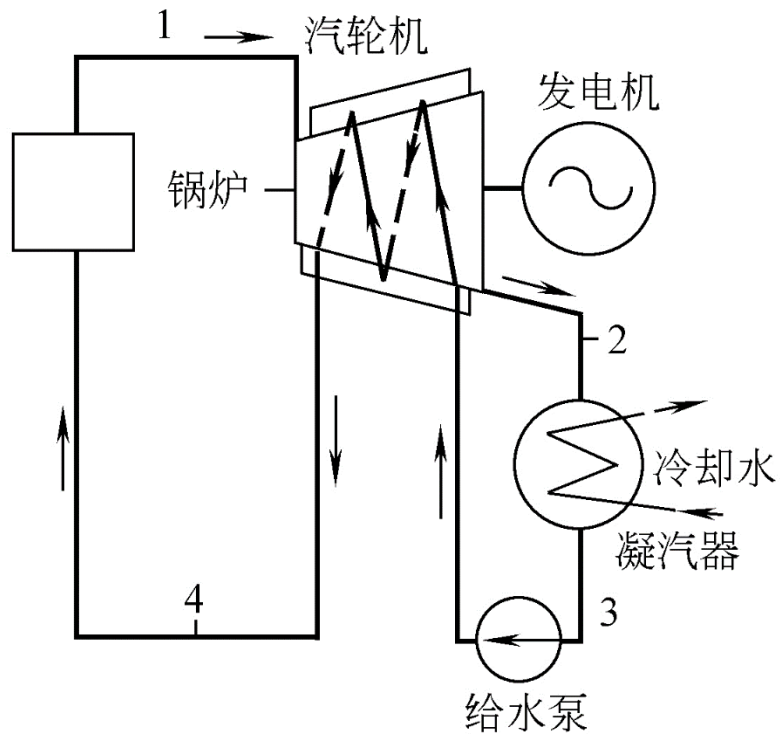
$p_1 > 25 \text{ MPa}$ ($t_1 > 600^\circ\text{C}$)：二次再热 (超临界机组)



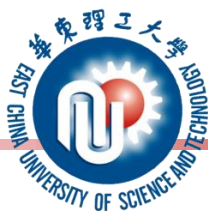
10.2.2 蒸汽回热循环 (Regenerative)

□ 极限回热循环 (忽略轴功、初态为饱和蒸汽)

□ 概括性卡诺循环: $q_{3 \rightarrow 4} = q_{1 \rightarrow 2}$

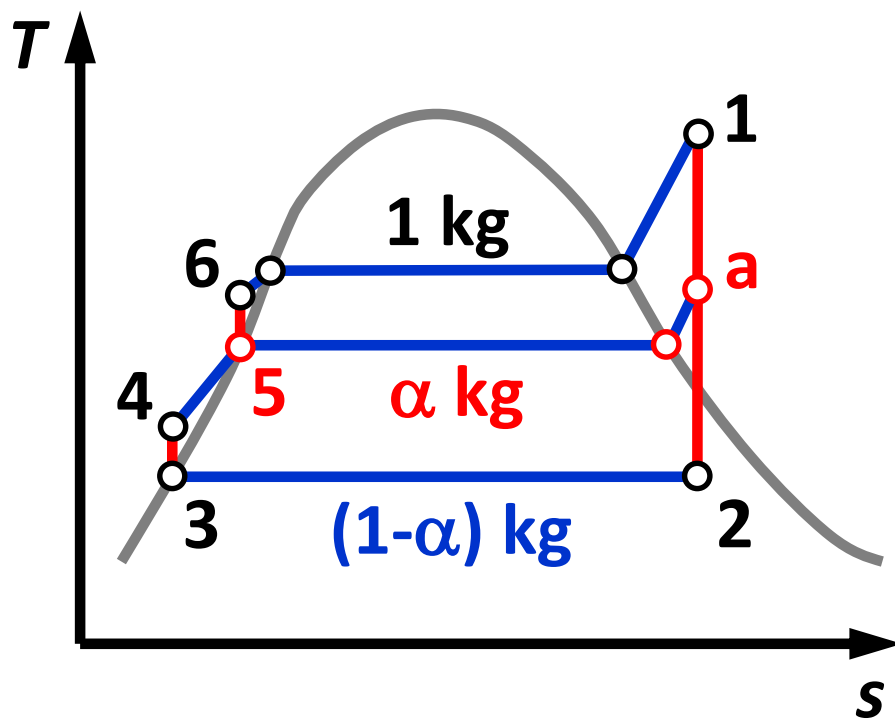


朗肯循环热效率不高的主要原因是平均吸热温度不高。

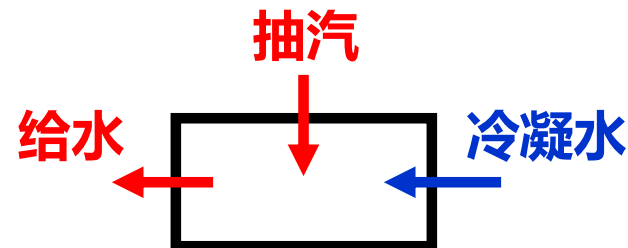
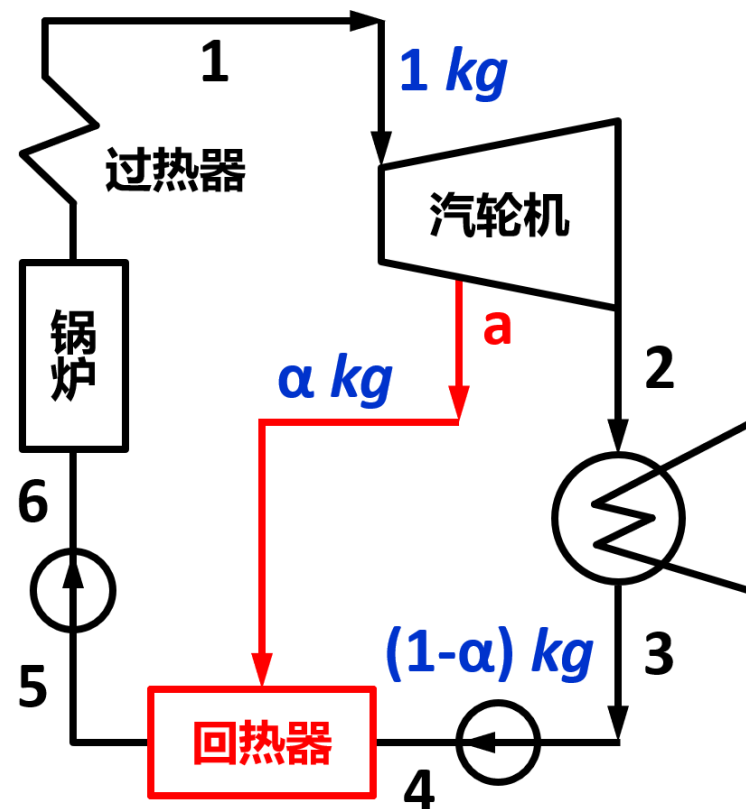


10.2.2 蒸汽回热循环 (Regenerative)

□ 抽汽回热循环



□ 由于 T - s 图上各点质量不同，面积不再直接代表热和功



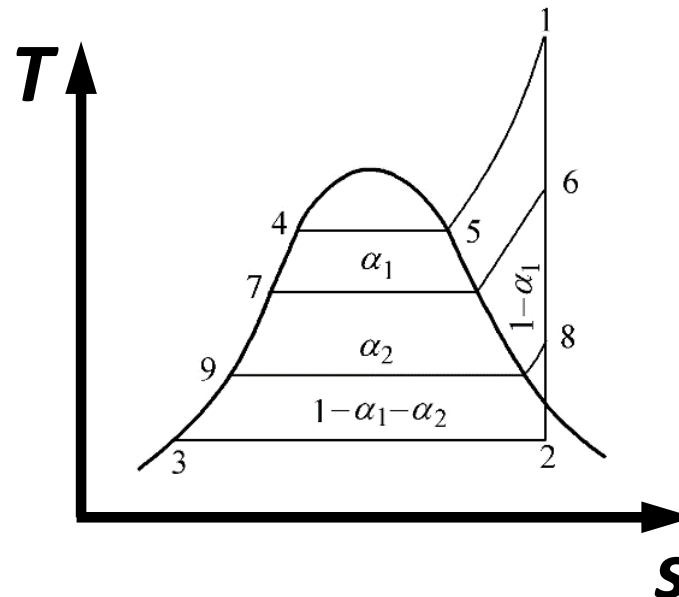
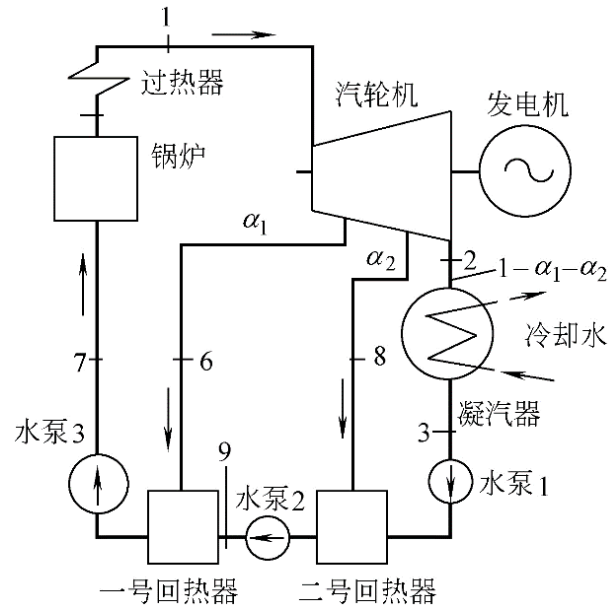
10.2.2 蒸汽回热循环 (Regenerative)

□ 如图所示，试推导蒸汽二级回热循环的抽汽率和效率？

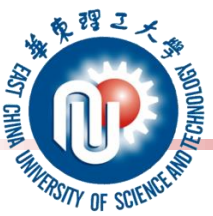
$$\alpha_2 h_8 + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) h_3 = (1 - \alpha_1) h_9 \quad \text{是 } h_3 \text{ 不是 } h_2$$

$$\alpha_1 h_6 + (1 - \alpha_1) h_9 = h_7$$

$$\square \quad \eta_t = \frac{w_0}{q_1} = \frac{(h_1 - h_6) + (1 - \alpha_1)(h_6 - h_8) + (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_8 - h_2)}{h_1 - h_7}$$



回热抽汽率的计算，
应以恰好将凝结水
加热到抽汽压力下
的饱和温度为原则。

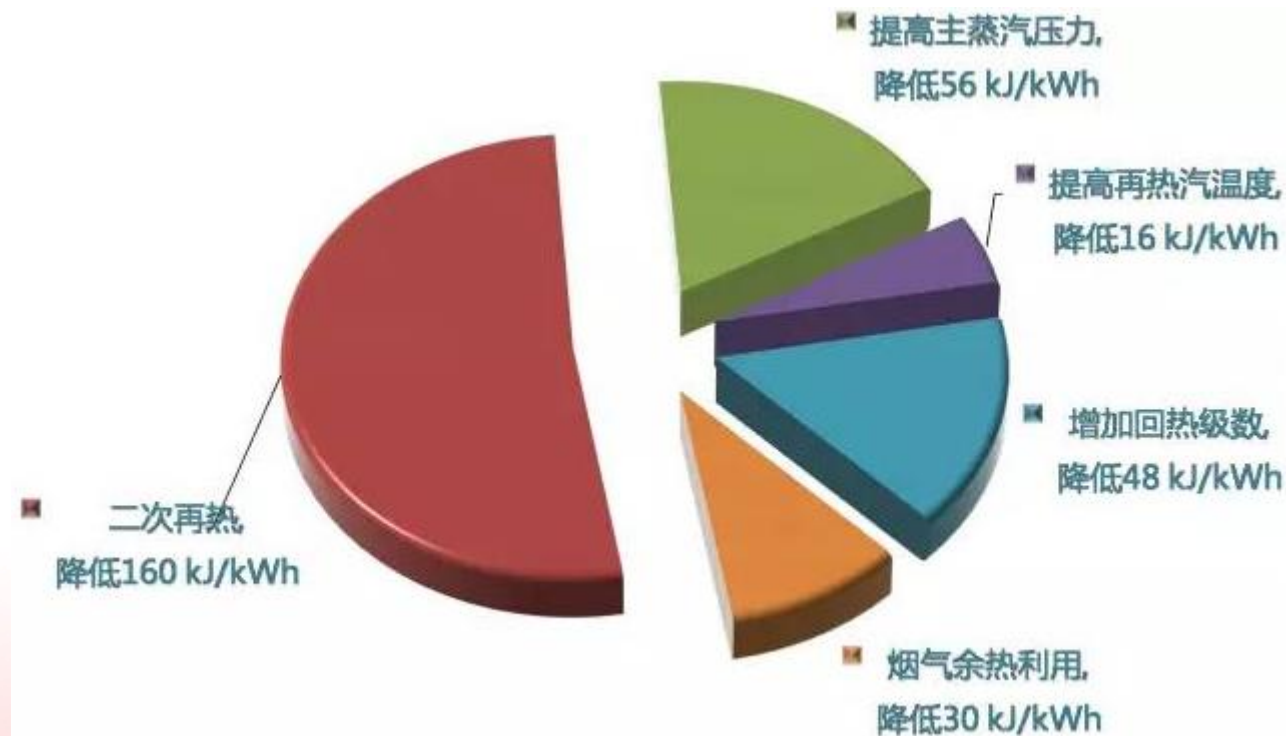


10.2.2 蒸汽回热循环 (Regenerative)

- 为什么抽汽回热可以提高循环效率? (证明: $\eta_{t,RG} > \eta_t$)
- 物理意义: $\alpha \text{ kg}$ 工质100%利用, $(1 - \alpha) \text{ kg}$ 效率未变
- 优点: 提高热效率
减小汽轮机低压缸尺寸, 末级叶片变短
减小凝汽器尺寸, 减小锅炉受热面
- 缺点: 单位蒸汽做功量减少, 汽耗率增加
增加设备复杂性
回热器投资
- 小型火力发电厂回热级数一般为1~3级
中大型火力发电厂一般为4~8级

10.2.2 蒸汽回热循环 (Regenerative)

	常规超超临界 1000MW	泰州公司二期 1000MW二次再热
发电效率	45.82 %	47.71 %
发电煤耗	270 g/kWh	257.79 g/kWh



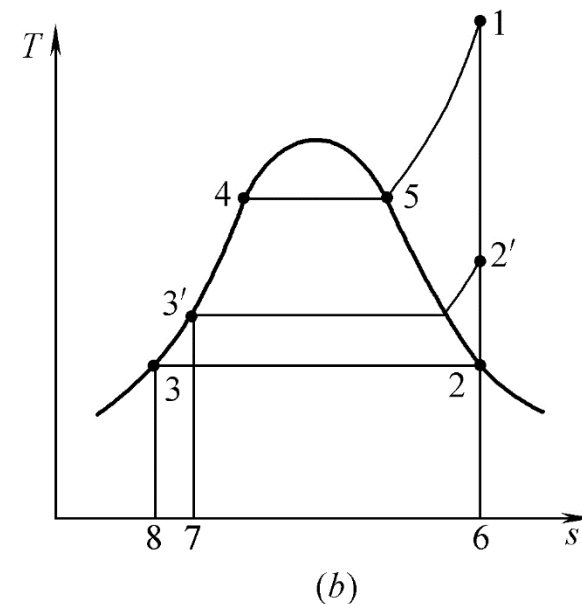
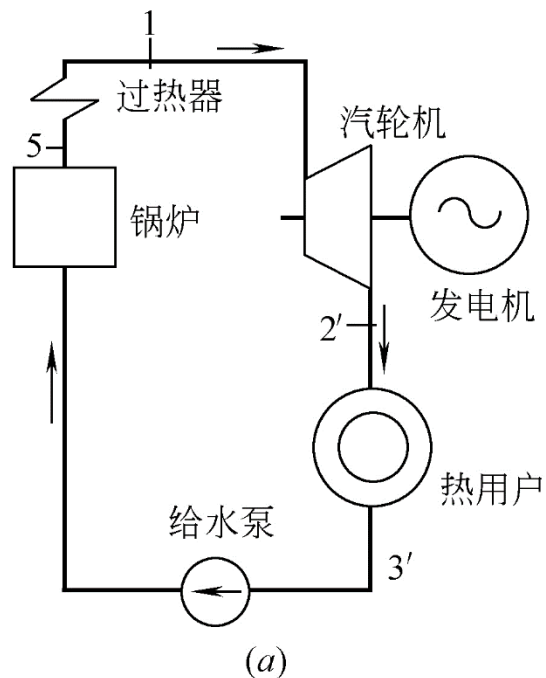
10.3 热电循环

□ 背压式热电循环

- ✓ 排汽压力高于大气压力的汽轮机称为背压式汽轮机。
- ✓ 热能利用率(未考虑热和电的品位不同)

$$K = \frac{w_0 + q_2}{q_1} = \frac{q_1}{q_1} = 1 \quad (\text{实际} 0.65-0.70)$$

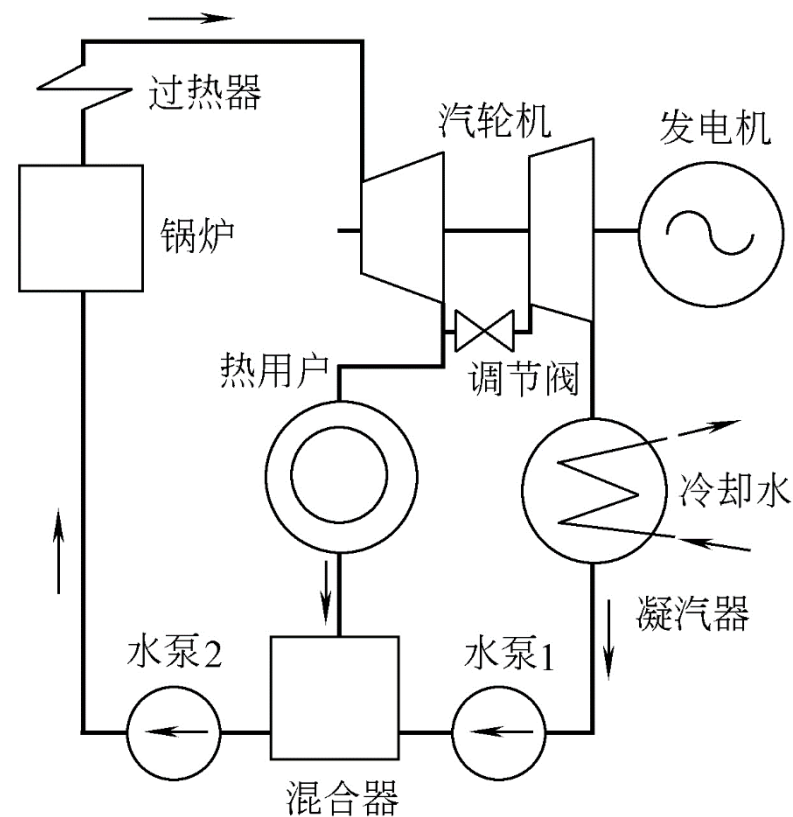
热电联产是发展方向，经济环保。



10.3 热电循环

□ 调节抽汽式热电循环

介于背压式热电循环及朗肯循环之间。



蒸汽动力循环

某中压参数的汽轮机进气参数为： $p_1 = 3.8 \text{ MPa}$ ， $t_1 = 450^\circ\text{C}$ ， 蒸汽在汽轮机中可逆绝热膨胀到 $p_2 = 5 \text{ kPa}$ 后排入冷凝器。求：（1）可逆绝热膨胀时蒸汽的终态参数及汽轮机所做的功；（2）若蒸汽在汽轮机中为不可逆绝热膨胀，引起的熵产为 $0.25 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ， 则汽轮机做的功将为多少？ **[**]**

$$\rightarrow p_1 = 3.8 \text{ MPa} \rightarrow t_s = 247.37^\circ\text{C} < t_1 = 450^\circ\text{C} \rightarrow \text{过热蒸汽}$$

$$\rightarrow t_1 = 450^\circ\text{C} \rightarrow h_{3\text{MPa}} = 3343.0 \text{ kJ/kg}, s_{3\text{MPa}} = 7.0817 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$h_{4\text{MPa}} = 3329.2 \text{ kJ/kg}, s_{4\text{MPa}} = 6.9347 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\text{插值得： } p_1 = 3.8 \text{ MPa 时， } h_1 = 3331.96 \text{ kJ/kg}, s_1 = 6.9641 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\rightarrow p_2 = 5 \text{ kPa} \text{ 【湿蒸汽】 } \rightarrow h'_2 = 137.72 \text{ kJ/kg}, h''_2 = 2560.55 \text{ kJ/kg}$$

$$s'_2 = 0.4761 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}, s''_2 = 8.3930 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$\rightarrow s_2 = s_1 = 6.9641 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \rightarrow x = \frac{s_2 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{6.9641 - 0.4761}{8.3930 - 0.4761} = 81.95\%$$

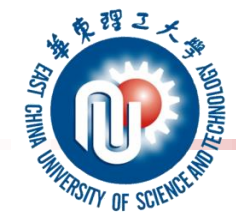
$$h_2 = h'_2 + x(h''_2 - h'_2) = 137.72 + 81.95\% \times (2560.55 - 137.72) = 2123.23 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 3331.96 - 2123.23 = 1208.73 \text{ kJ/kg}$$

$$\rightarrow s_{2'} = s_2 + s_g = 6.9641 + 0.25 = 7.2141 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \rightarrow x' = \frac{s_{2'} - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{7.2141 - 0.4761}{8.3930 - 0.4761} = 85.11\%$$

$$h_{2'} = h'_2 + x'(h''_2 - h'_2) = 137.72 + 85.11\% \times (2560.55 - 137.72) = 2199.79 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h' = h_1 - h_{2'} = 3331.96 - 2199.79 = 1132.17 \text{ kJ/kg}$$



蒸汽动力循环小结

- 熟悉郎肯循环图示与计算
- 郎肯循环与卡诺循环
- 蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响
- 再热、回热原理及计算



□思考题 全部

□习题 9、10

