

工程热力学

武俊梅



前言

蒸汽动力循环：使用蒸汽作为工质的动力循环。

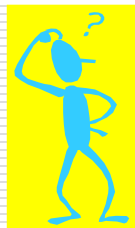
蒸汽机（早期、往复、泰坦尼克号）、**汽轮机（现代、旋转）**

- ❑ 蒸汽是历史上最早广泛使用的工质，18世纪后期蒸汽动力装置的使用，催生英国工业革命和欧洲文明，促使资本主义诞生。
- ❑ 蒸汽动力装置可利用各种燃料。
- ❑ 蒸汽是无污染、价廉、易得的工质。
- ❑ 目前世界约75%电力、国内78%电力来自火电厂，而核电、太阳能发电二回路也是采用蒸汽动力循环。

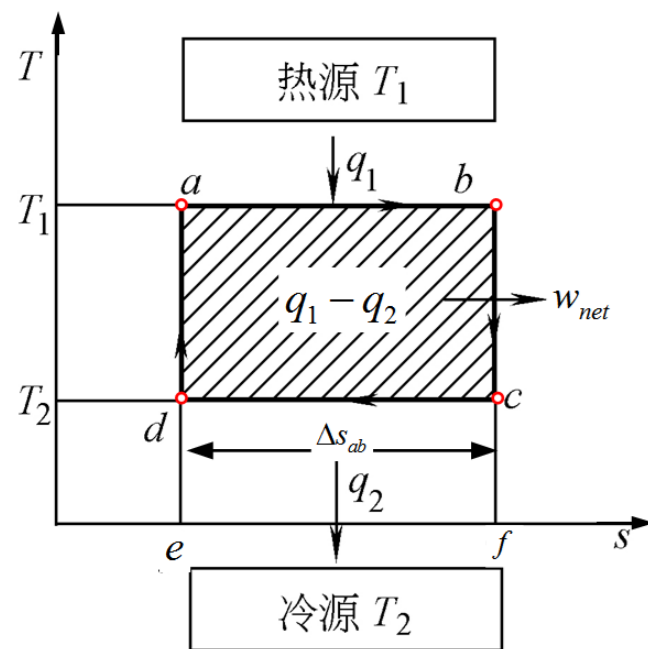
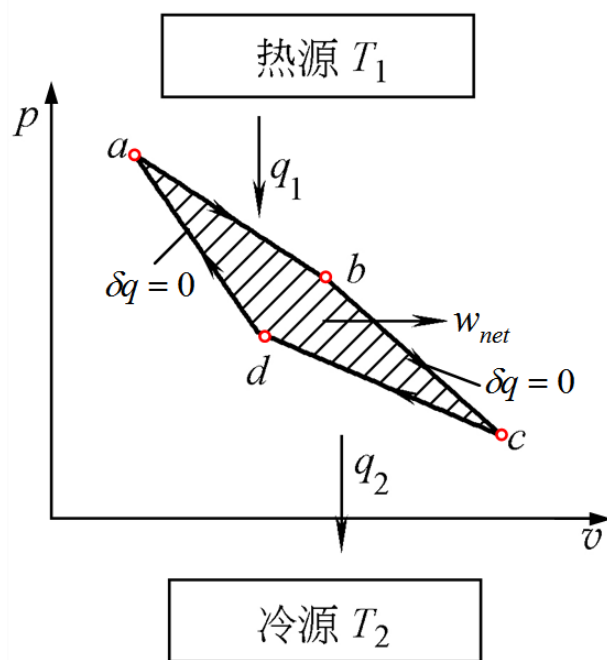
特点：功率大、效率高、运转可靠，应用广（火电、核电、太阳能发电）



据热力学第二定律：相同温限下，卡诺循环效率最高 $\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$



思考：气体动力循环为什么不采用卡诺循环？



- 1) 采用气体工质，定温吸、放热，一般难以实施；
- 2) 定温线和定熵线位置近，单位质量工质的循环净功小。

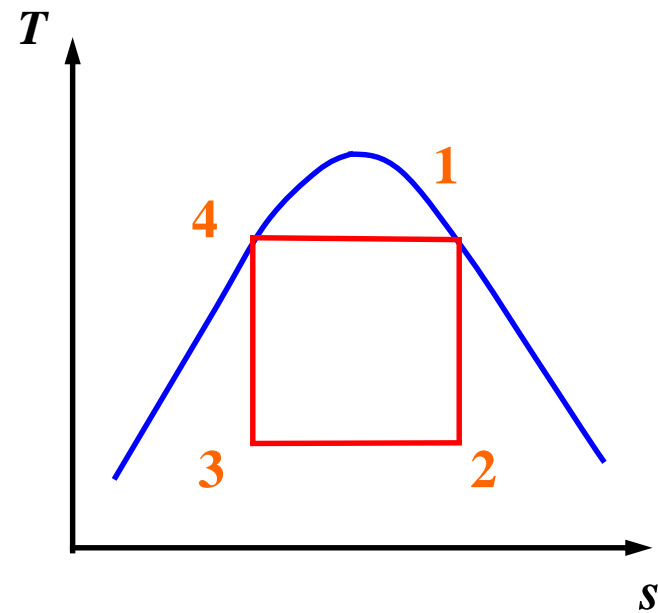
但若采用湿蒸汽工质，两相区可以实现定温（压）吸、放热！

如蒸汽动力循环实现卡诺循环：湿蒸汽区完成

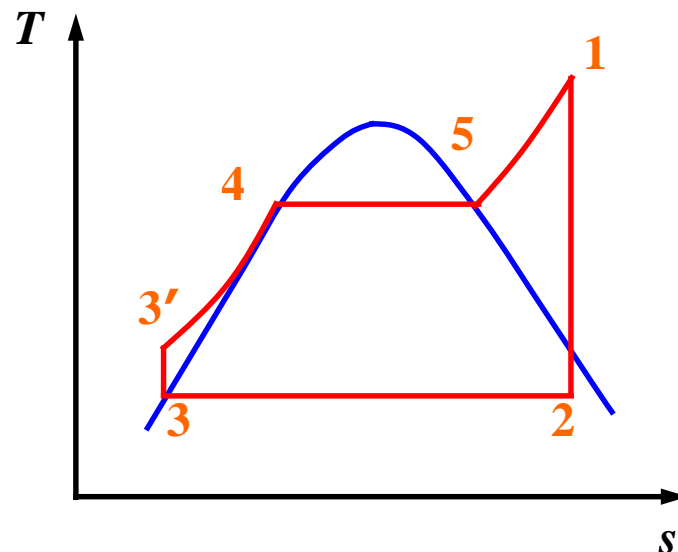
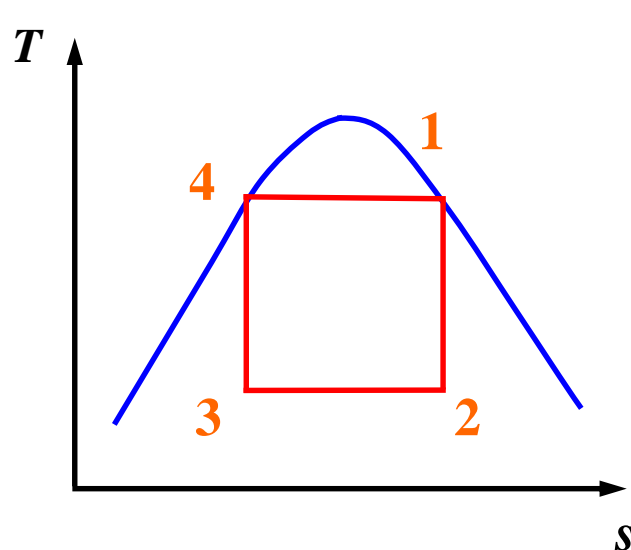
难点： 过程3-4，压缩机压缩低干度的汽水混合物，功耗大、工作条件恶劣，体积大。

缺点： 水临界温度 374°C ，远低于材料许用温度，吸热温度低，效率不高。

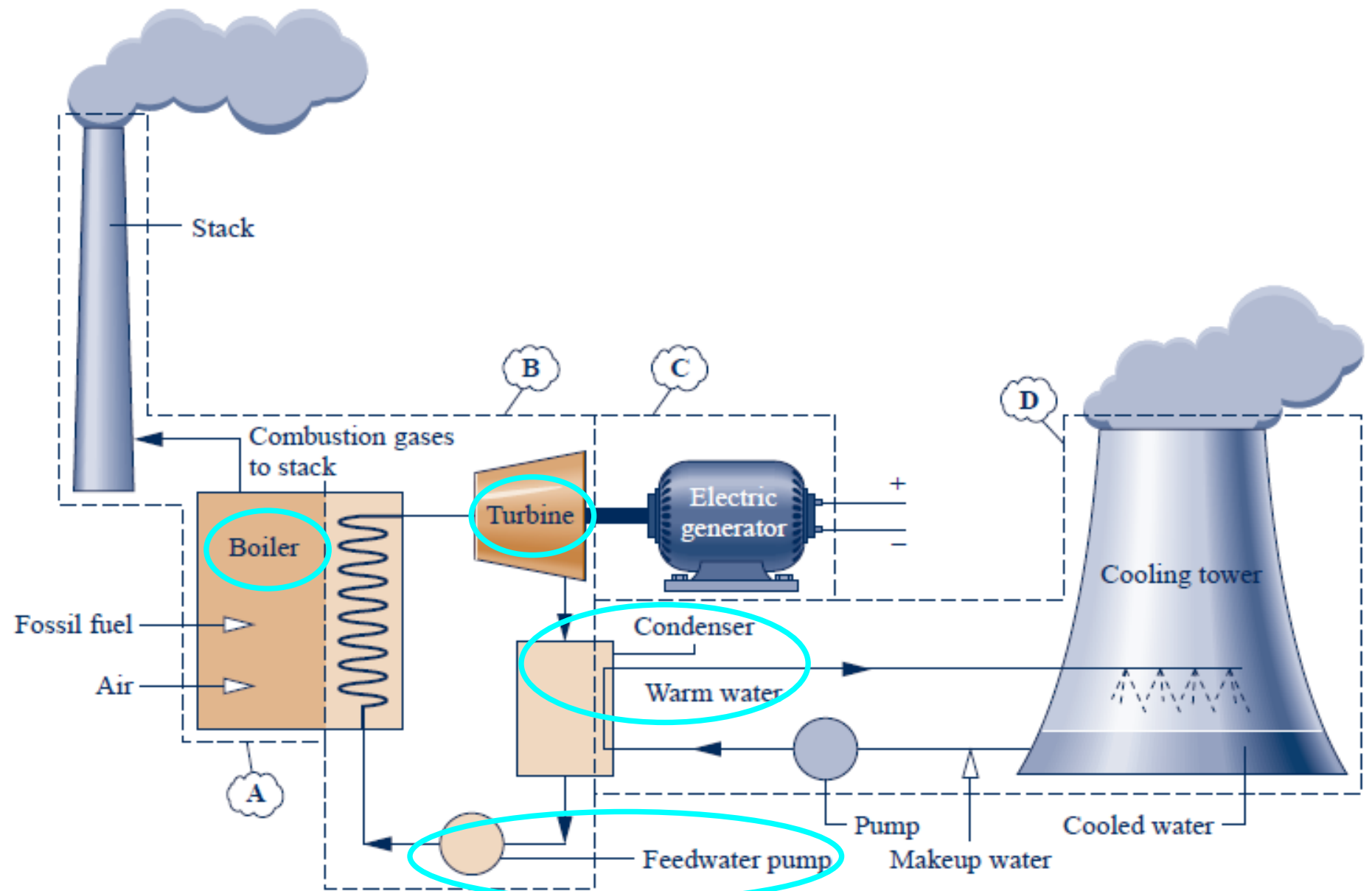
膨胀过程1-2，膨胀后为湿蒸汽，汽轮机在湿工况下工作会引起材料侵蚀、相对内效率下降的问题。



卡诺循环 改进 → 朗肯循环

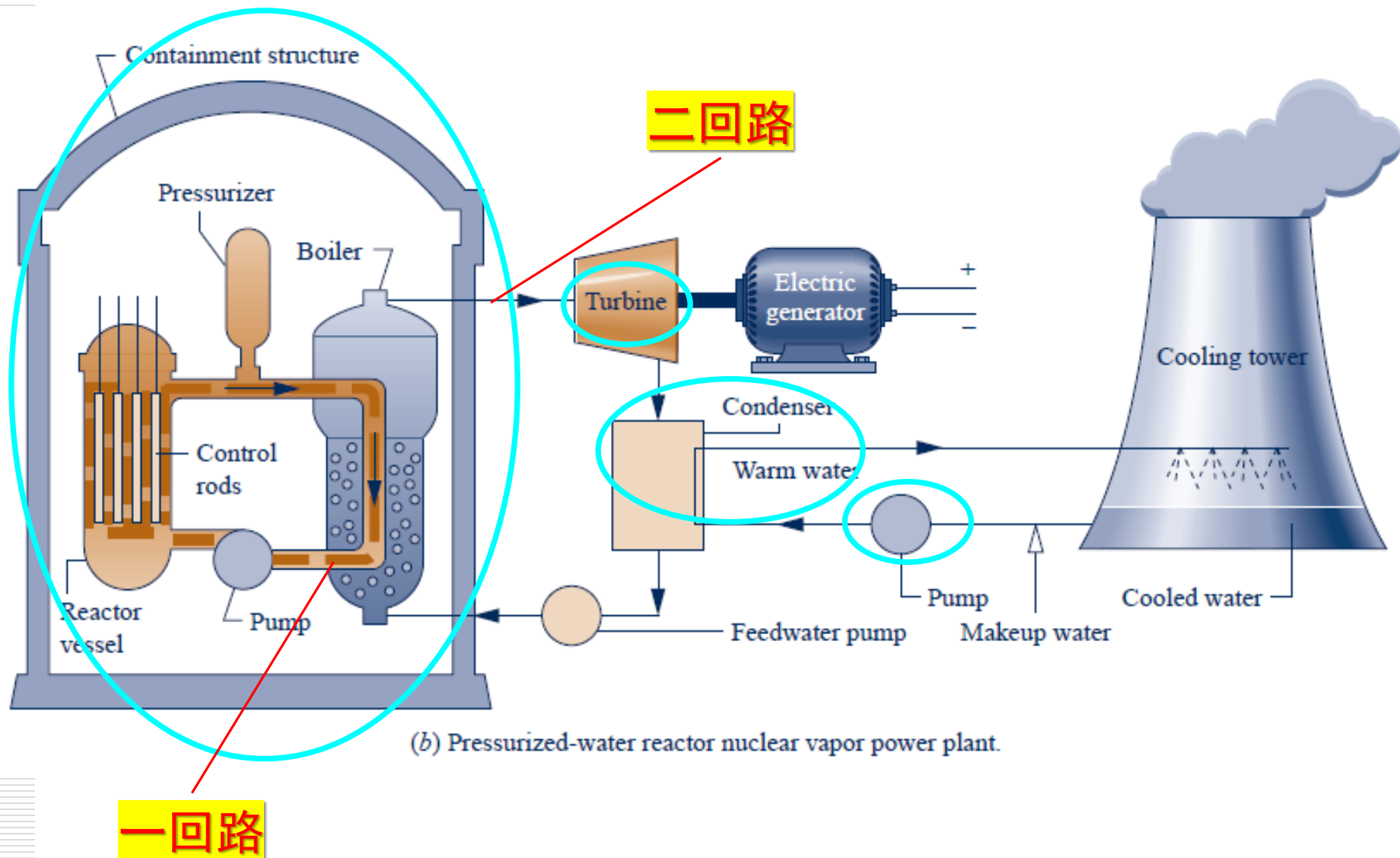


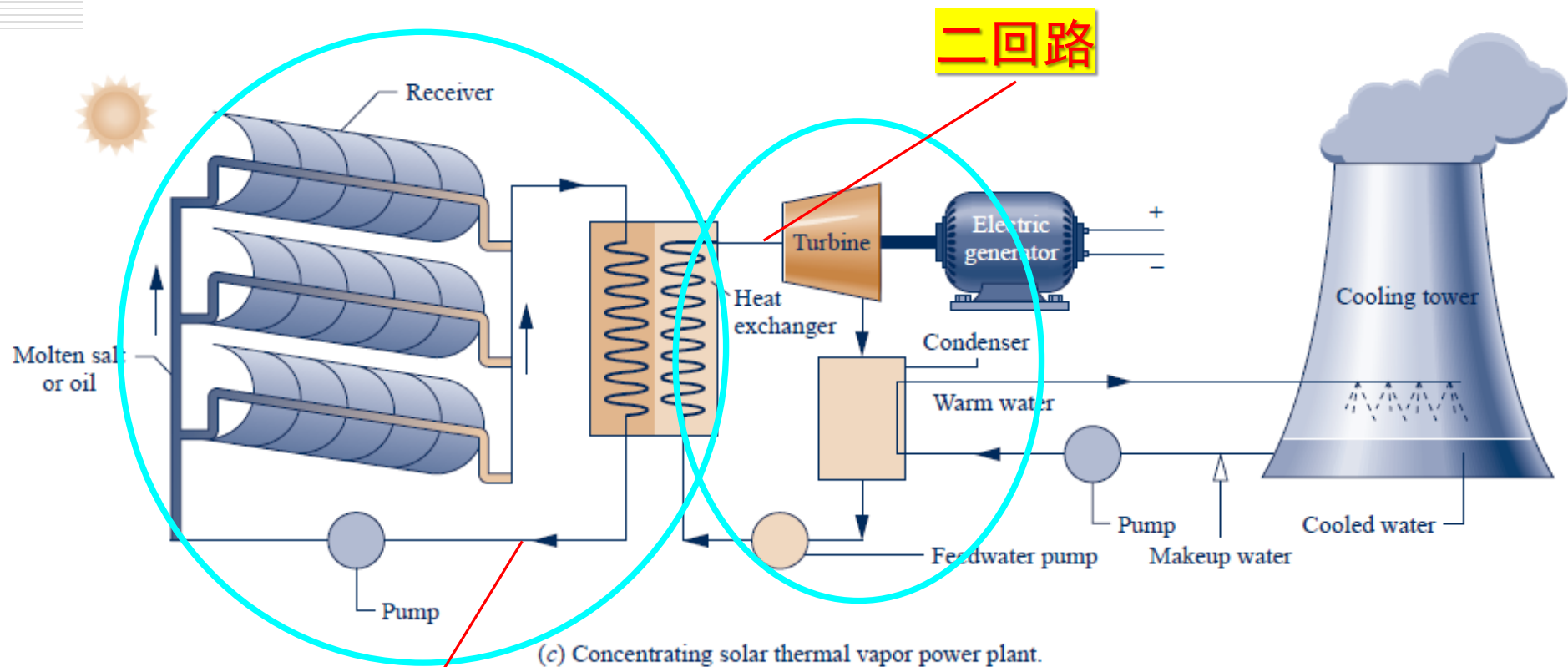
- ❖ 定压吸热 (3'-4-5-1) ——提高了吸热后工质的温度 (1点温度远高于临界温度) ;
- ❖ 提高了汽轮机出口湿蒸汽干度 (2点) ;
- ❖ 定压放热 (2-3) ——凝汽器出口为液态水 (3点) ;
- ❖ 采用水泵对液态水进行加压 (3-3')



(a) Fossil-fueled vapor power plant.







第十章 蒸汽动力循环

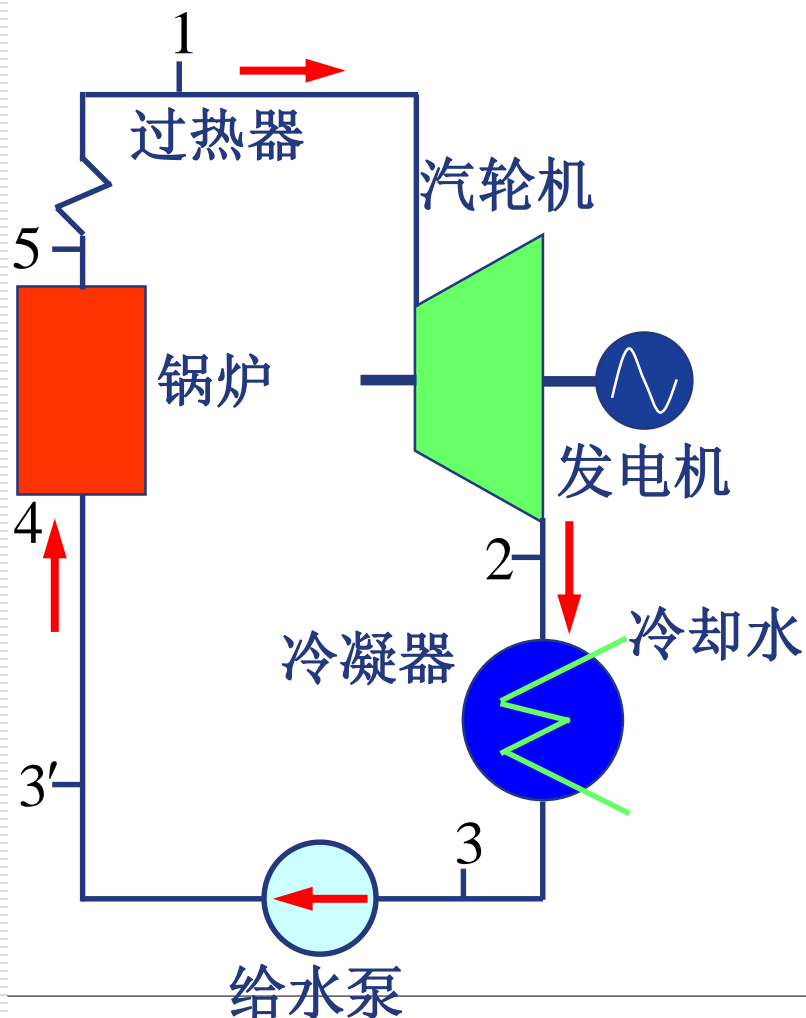
◆ 10-1 蒸汽动力基本循环——朗肯循环

◆ 10-2 再热循环与回热循环



10-1 蒸汽动力基本循环——朗肯循环

一、装置与流程



四个主要设备:

汽轮机

凝汽器

给水泵

锅炉（反应堆、太阳能集热器）

过程简化:

1-2 定熵膨胀——汽轮机

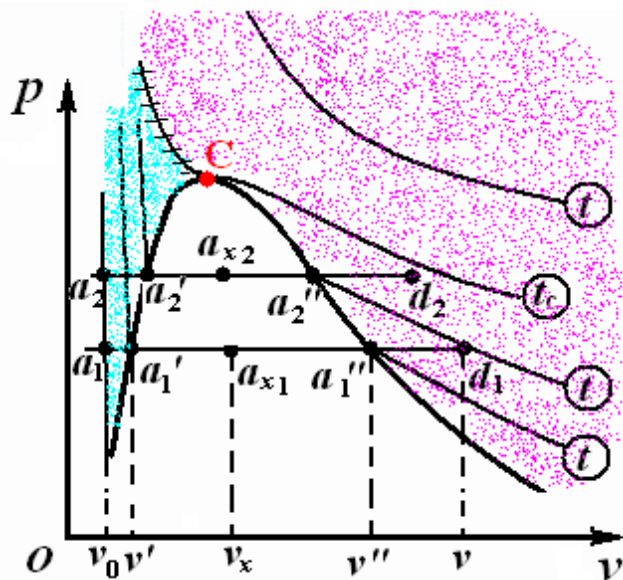
2-3 定压冷却——凝汽器

3-3' 定熵压缩——给水泵

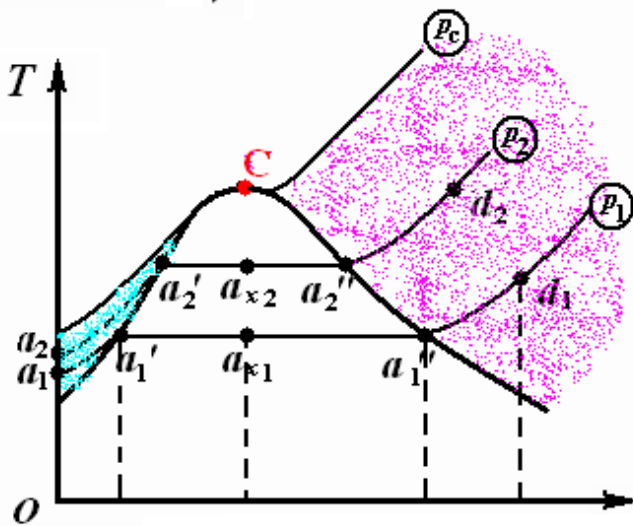
3'-4-5-1 定压加热——锅炉/过热器

二、朗肯循环在水蒸气图上的表达

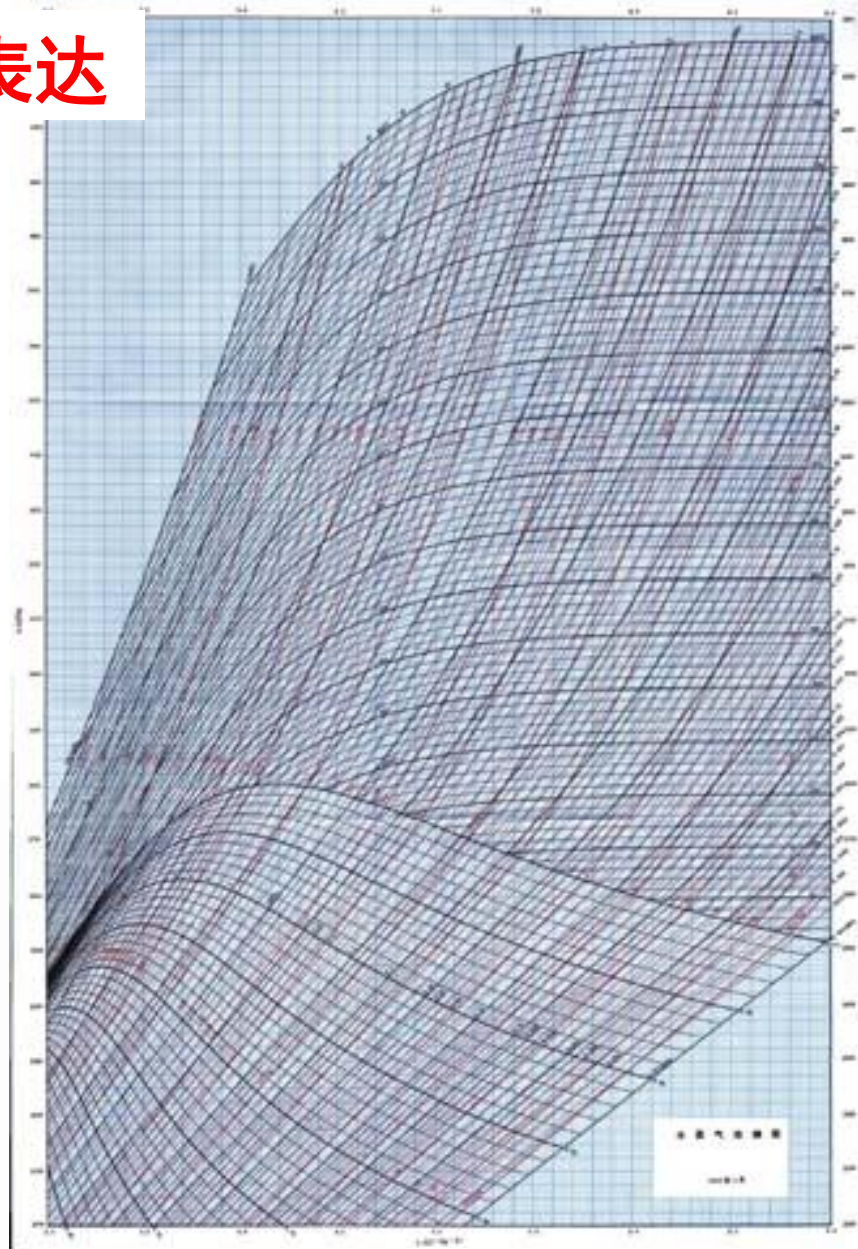
水蒸气图回顾：1点2线3区5态



$p-v$ 图



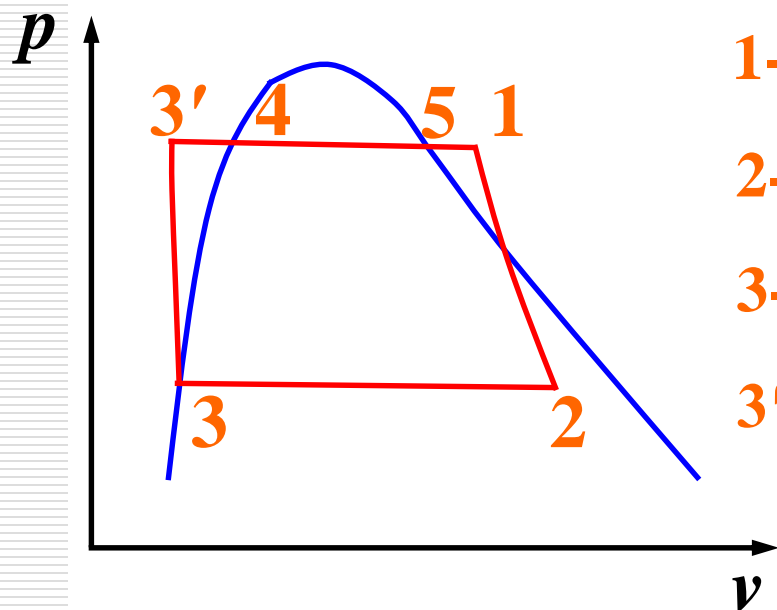
$T-s$ 图



$h-s$ 图

二、朗肯循环在水蒸气图上的表达

thermodynamics

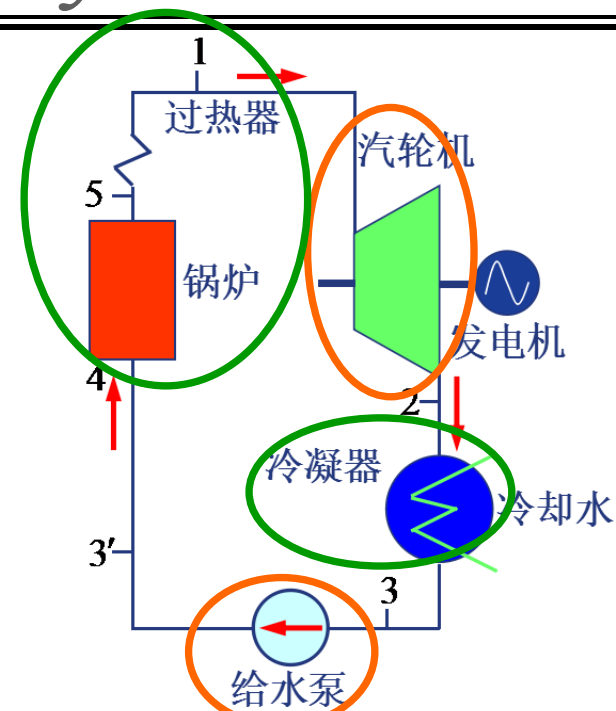
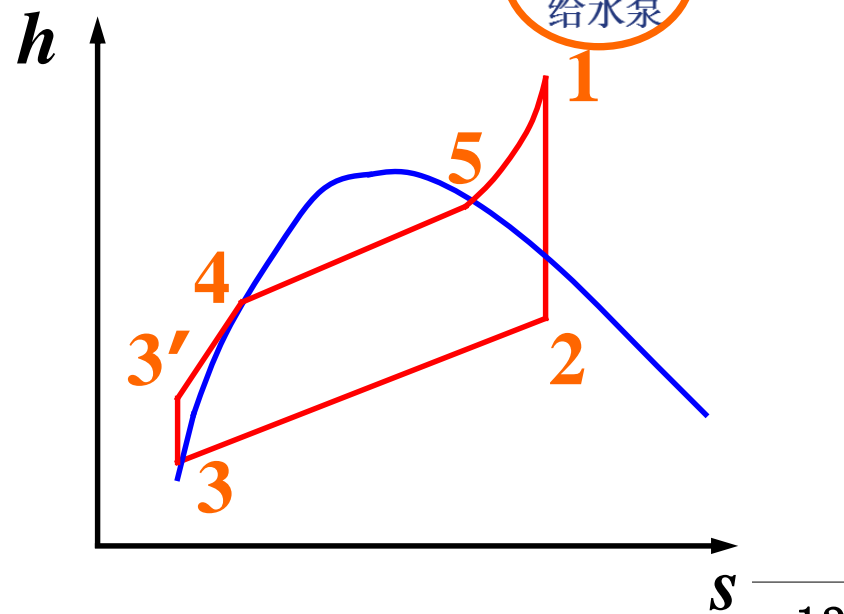
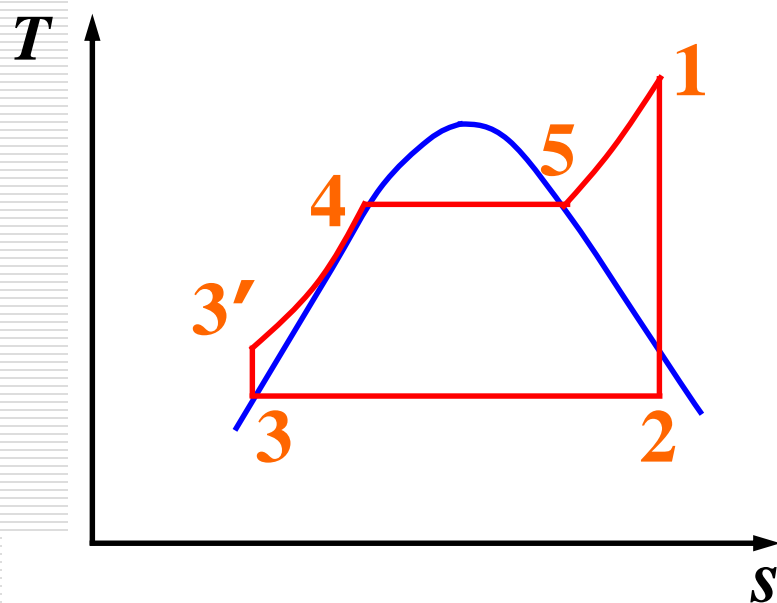


1-2 定熵膨胀

2-3 定压冷却

3-3' 定熵压缩

3'-4-5-1 定压加热



三、朗肯循环的能量分析及热效率

汽轮机做功：

$$w_T = h_1 - h_2$$

水泵绝热压缩耗功：

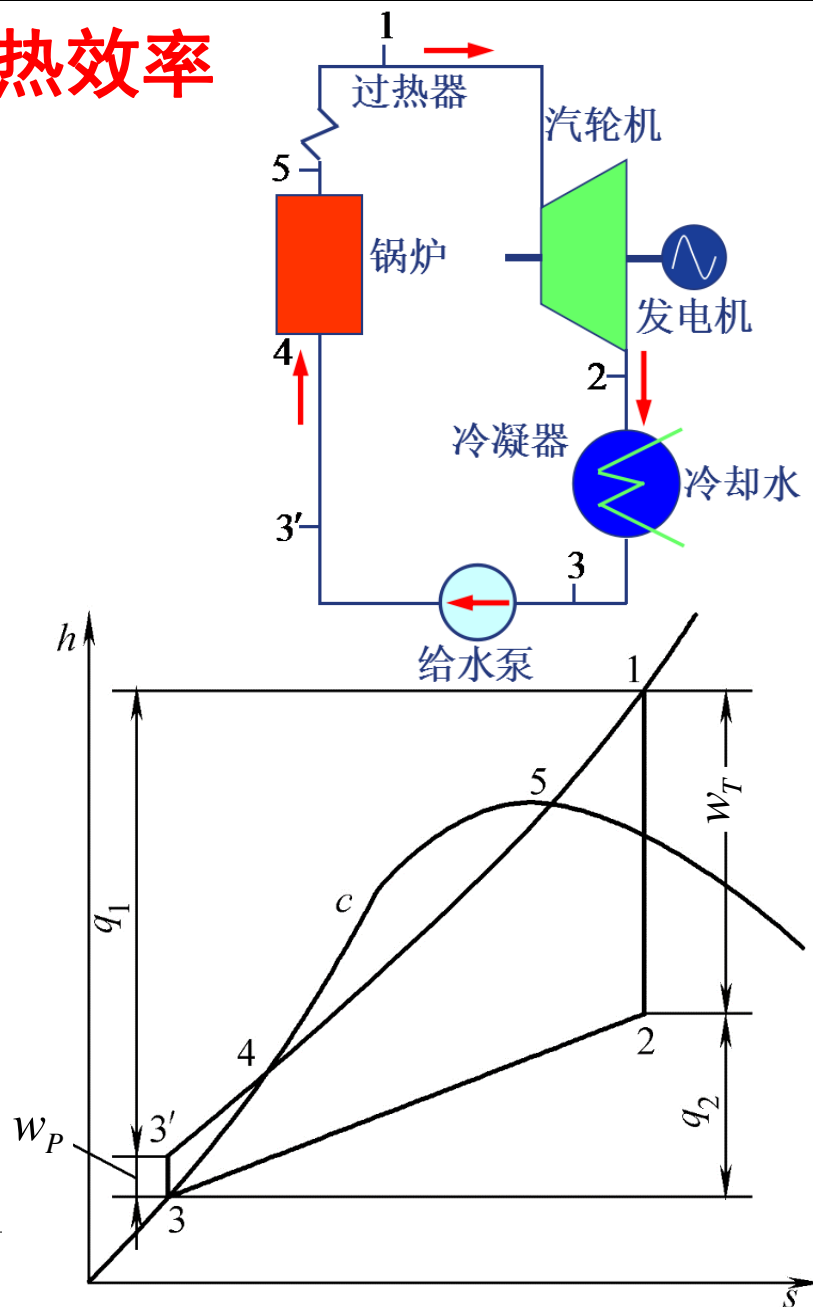
$$w_P = h_{3'} - h_3 = v_3(p_1 - p_2)$$

锅炉/过热器中的定压吸热量：

$$q_1 = h_1 - h_{3'}$$

凝汽器中的定压放热量：

$$q_2 = h_2 - h_3$$



若取整个装置作热力系统，则有：

$$\oint \delta w = \oint \delta q$$

即： $q_1 - q_2 = w_T - w_P = w_{net}$

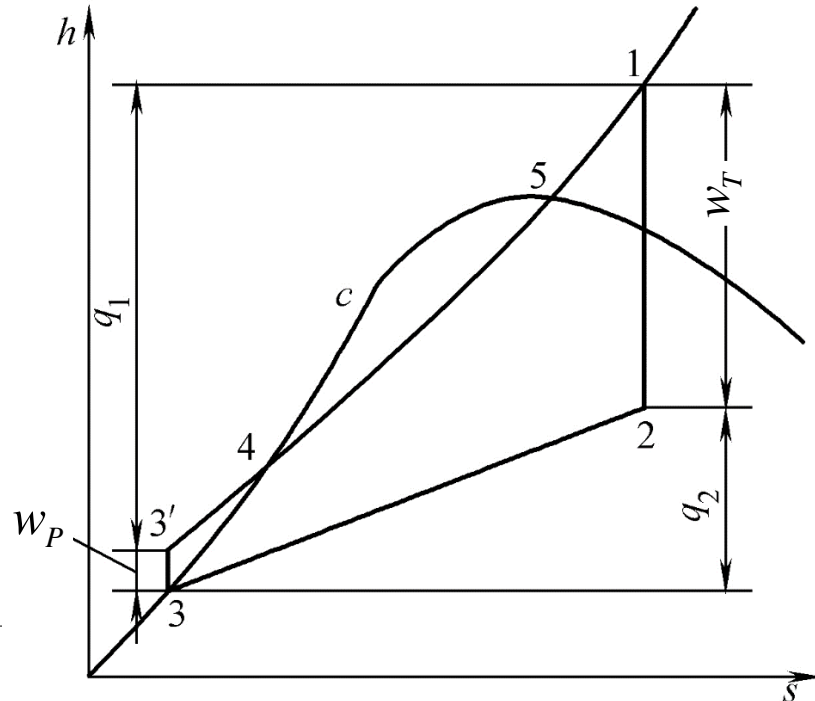
$$\eta_t = \frac{w_{net}}{q_1} = \frac{w_T - w_P}{q_1} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_{3'}) - (h_2 - h_3)}{h_1 - h_{3'}}$$

回头查看作业 1-17。

水泵耗功与汽轮机作功量相比

很小，忽略时有： $h_{3'} = h_3$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_3}$$



四、提高朗肯循环热效率的基本途径

工质在锅炉中吸热量

$$q_1 = \text{面积}3451673$$

$$= \text{等效矩形面积}98679$$

$$q_1 = \int_3^1 T ds = T_{m1} (s_6 - s_7)$$

平均吸热温度：

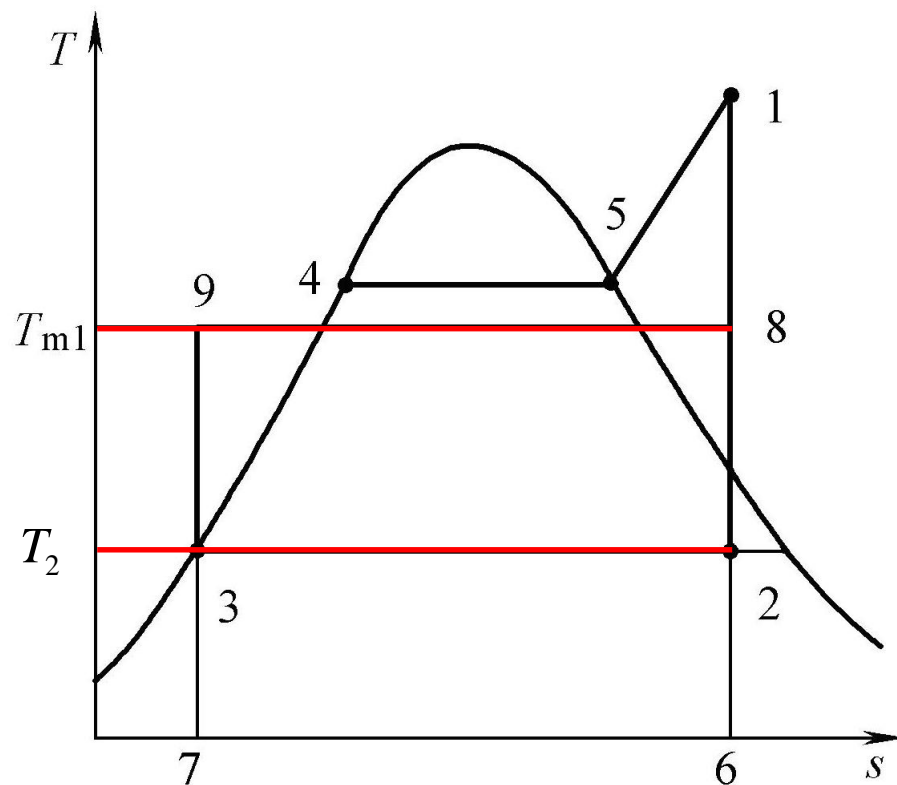
$$T_{m1} = \frac{\int_3^1 T ds}{(s_6 - s_7)}$$

放热温度 T_2

朗肯循环1-2-3-4-5-1

忽略水泵耗功：

吸热过程从点3开始



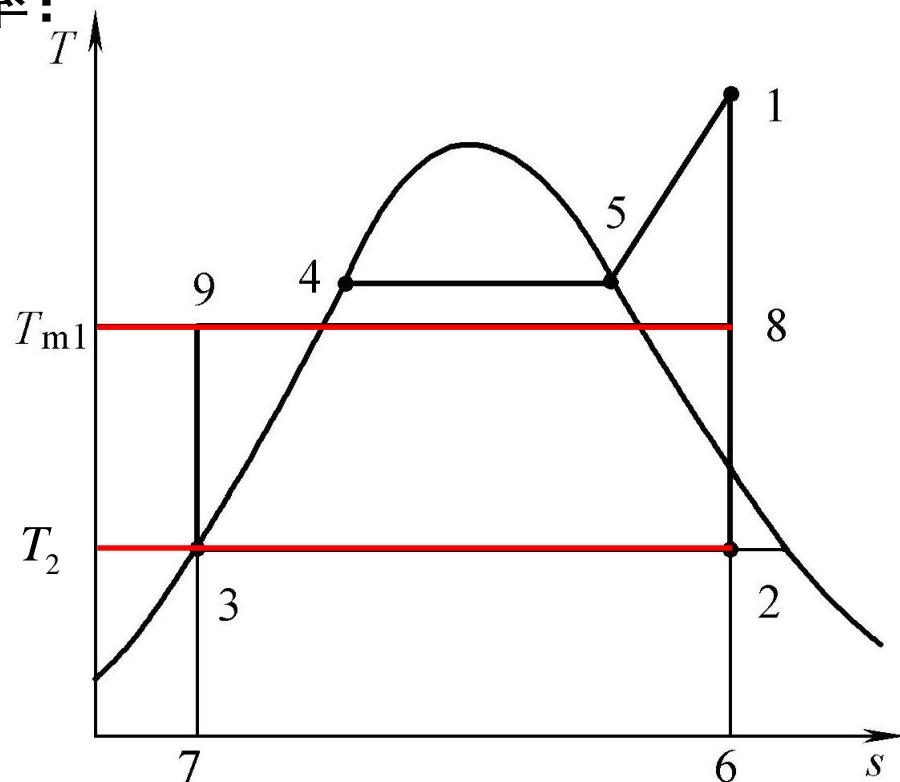
等效于卡诺循环98239，其热效率：

$$\eta_{t.c} = 1 - \frac{T_2}{T_{m1}}$$

提高朗肯循环效率的基本途径：

——提高平均吸热温度；

——降低放热温度。



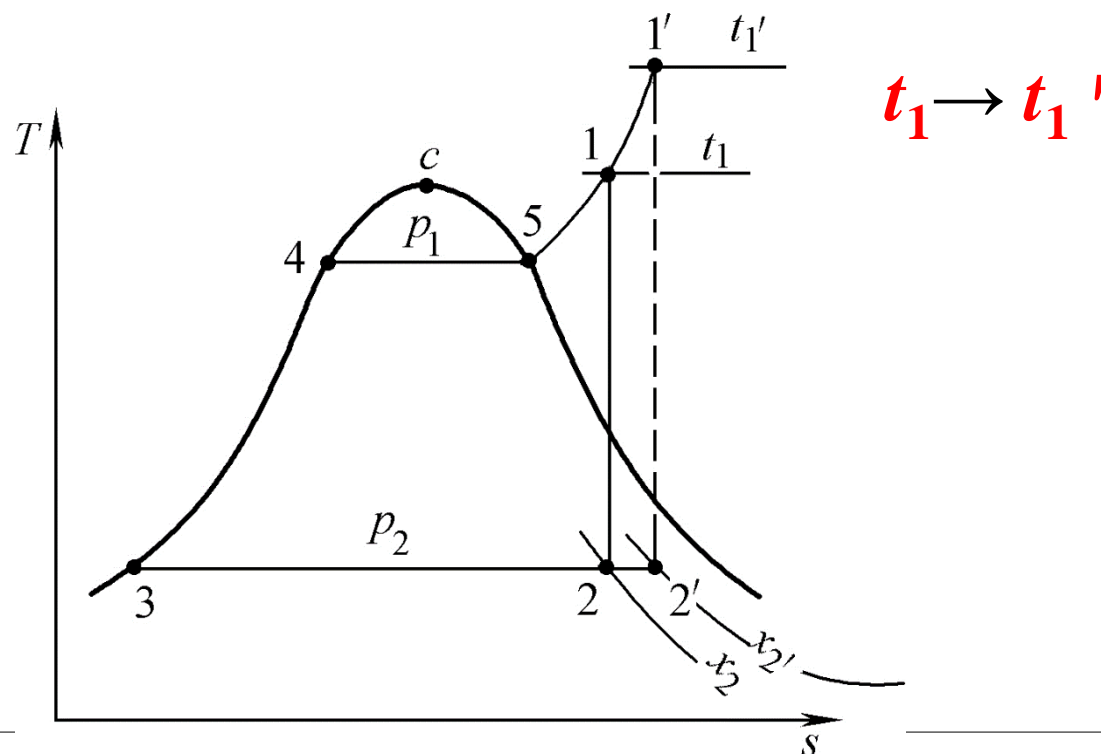
——提高蒸汽参数 T_1 或压力 p_1 以提高 T_{m1} ；

——降低冷源温度 T_2 ——受环境温度的限制。

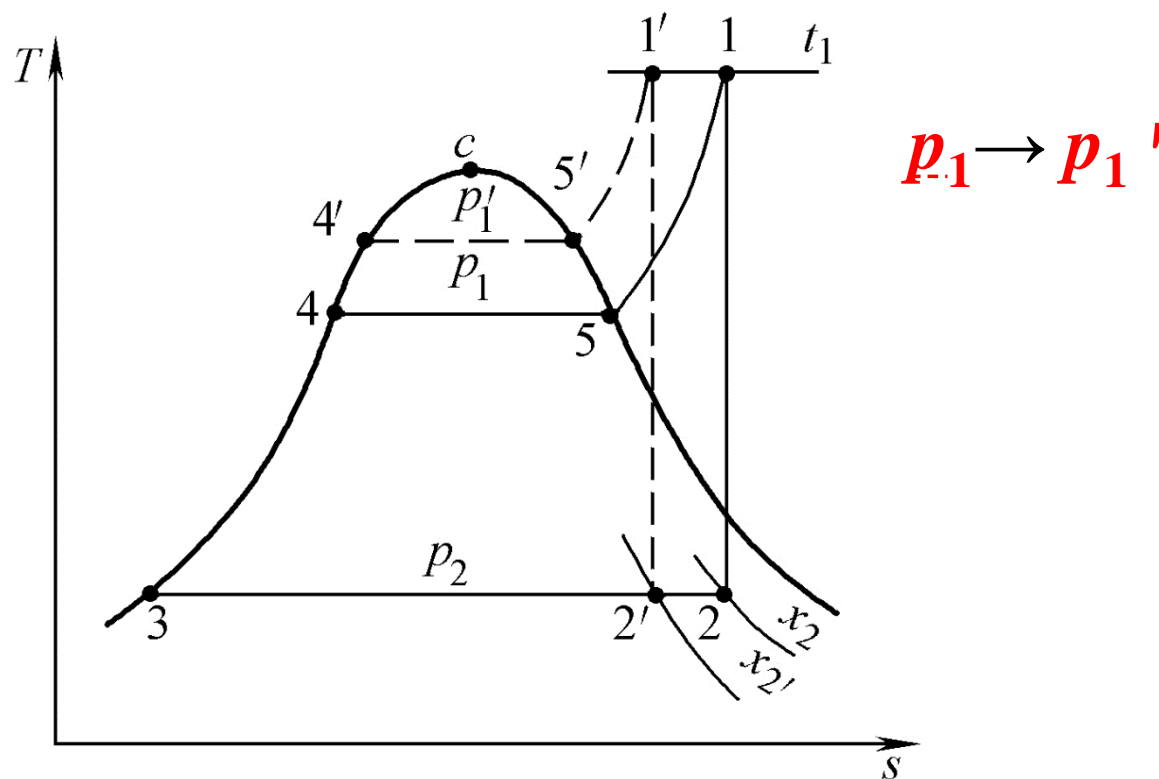


- 提高蒸汽初温 t_1 （相同初压 p_1 和冷凝压力 p_2 条件下）
平均吸热温度增高，热效率提高。

对材料耐热及强度要求高，目前 t_1 一般小于 620°C ；
乏汽干度提高，有利于汽机工作，一般要求汽轮机出口
干度大于 0.88。

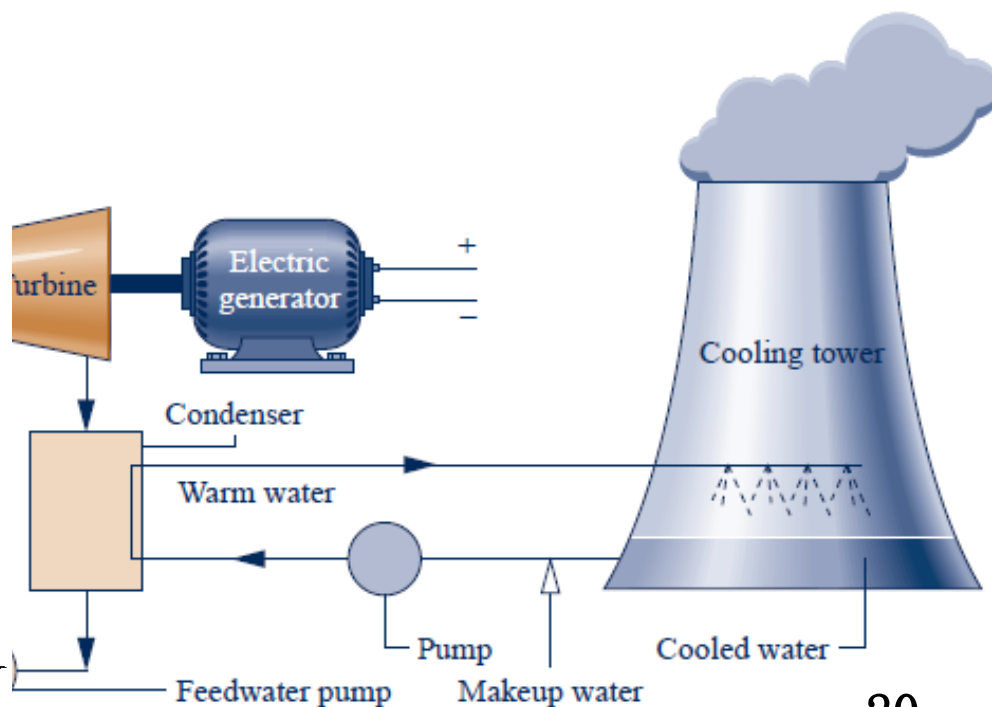
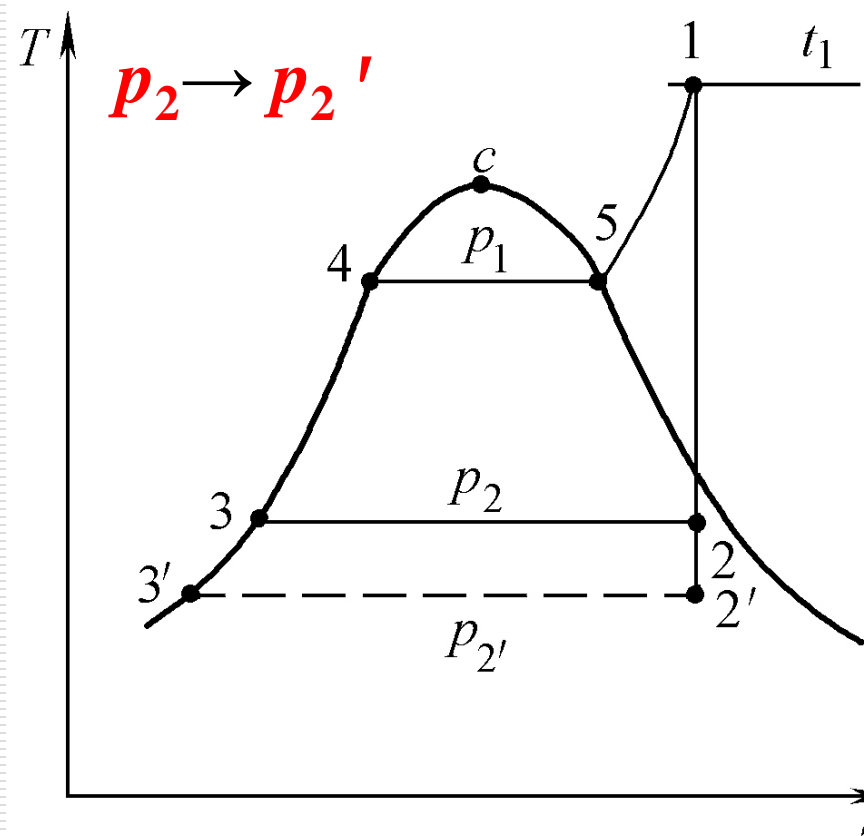


- 提高蒸汽初压 p_1 （相同初温 t_1 和冷凝压力 p_2 条件下）
 平均吸热温度增高，热效率提高；
 对汽轮机材料强度要求高；
 乏汽的干度减小，汽轮机相对内效率降低，叶片受侵蚀。



- 降低冷凝压力 p_2 (也叫汽轮机背压, p_1 、 t_1 不变)
也即降低汽轮机出口压力——背压, 平均放热温度降低,
但冷凝压力的值主要取决于冷却水的温度, 不能任意降低, 与当地环境温度有关。

冬季运行的热效率高于夏季,
北方机组的热效率高于南方。

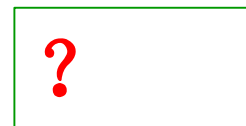


提高朗肯循环热效率 / 热能利用率的途径:

改变循环参数 { 提高初温 t_1
提高初压 p_1
降低背压 p_2



改变循环形式 { 再热循环 Reheat
回热循环 Regenerative



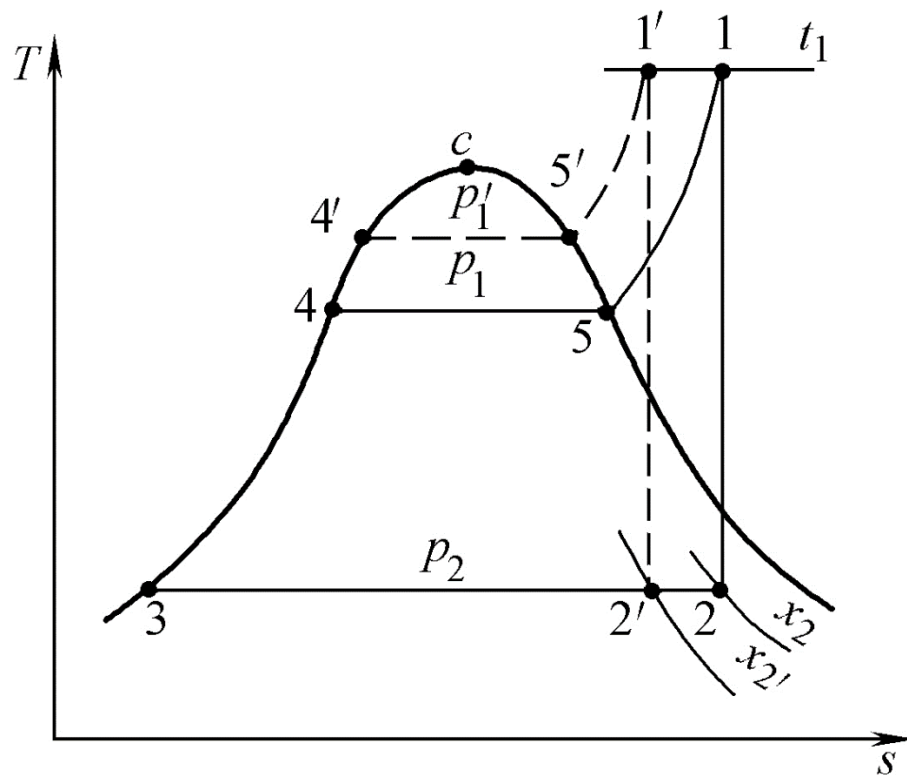
采用联合循环 { 热电联产—余热利用 Cogeneration
燃气—蒸汽联合循环



10-2 再热循环与回热循环

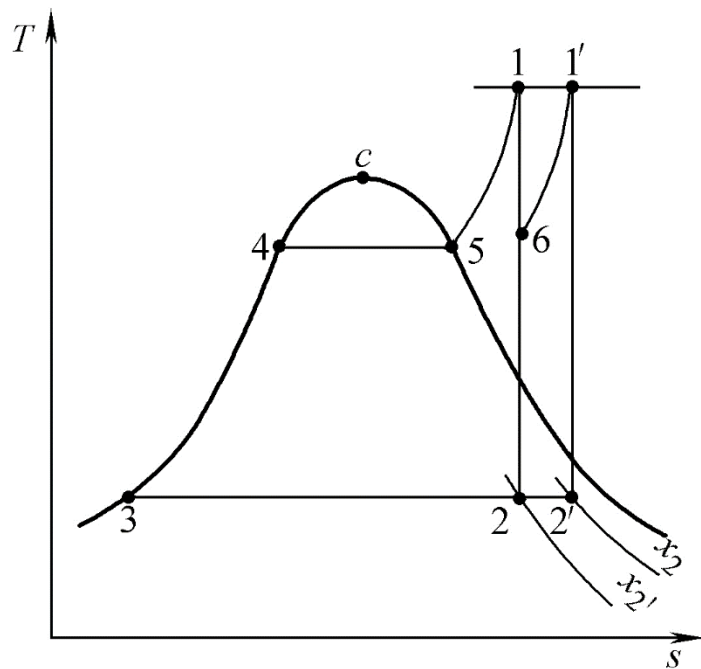
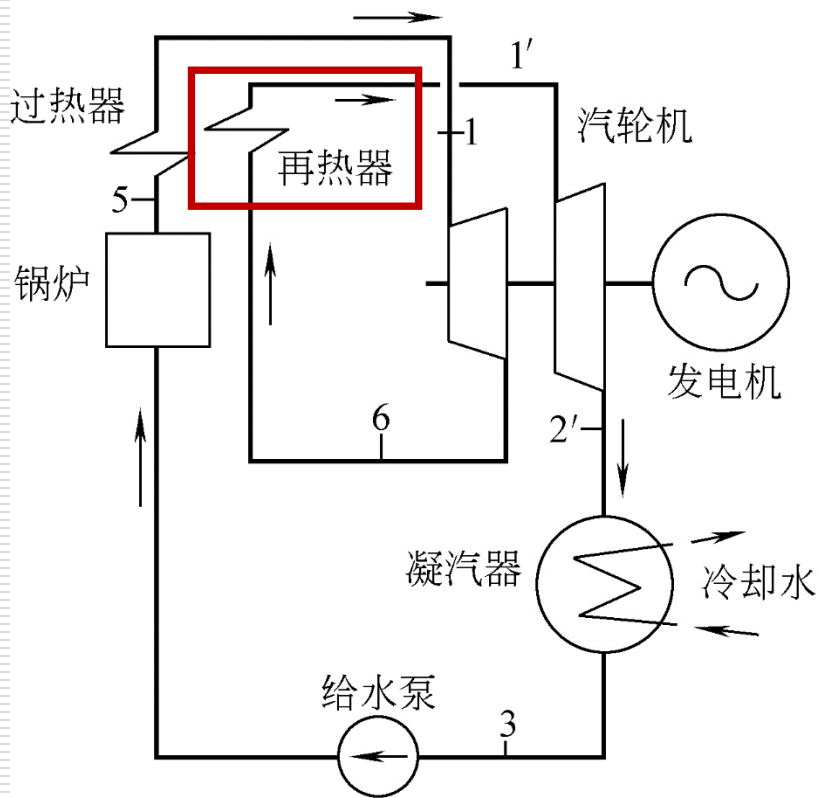
一、再热循环

基本思想： 在提高 p_1 的同时提高汽轮机出口乏汽的干度，改善汽轮机工作条件。



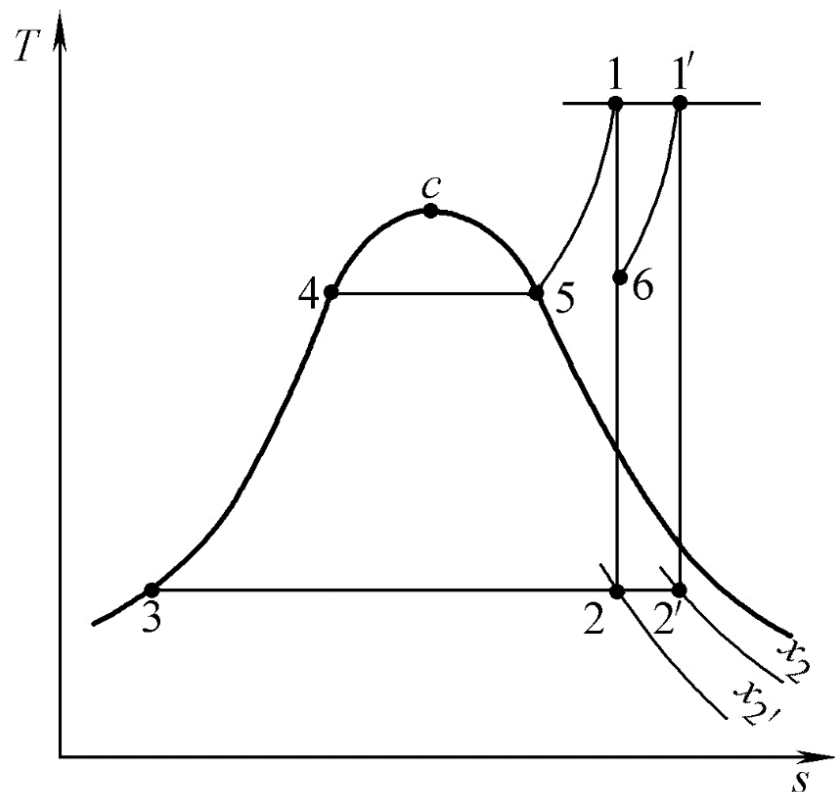
一、再热循环——分级膨胀、中间再热

初蒸汽经高压级汽轮机膨胀到中间压力，蒸汽重新引到锅炉的再热器加热升温，然后送入低压级汽轮机使之膨胀到背压。



一、再热循环

吸热量增加、净功也增加。



- 再热循环本身**不一定**提高循环热效率，与选择的再热压力有关；
- 选取再热压力合适，一般采用一次再热可使热效率提高2%~3.5%。
- x_2 提高，给提高初压创造了条件，这是采用再热的根本目的。

蒸汽再热循环的实践：

- 再热压力 $p_b = p_a \approx 0.2 \sim 0.3p_1$
- $p_1 < 10\text{MPa}$ ，一般不采用再热
- 我国常见机组，10、12.5、20、30万kW机组
 $p_1 > 13.5\text{MPa}$ ，一次再热
- 超临界机组， $t_1 > 600^\circ\text{C}$ ， $p_1 > 25\text{MPa}$ ，二次再热

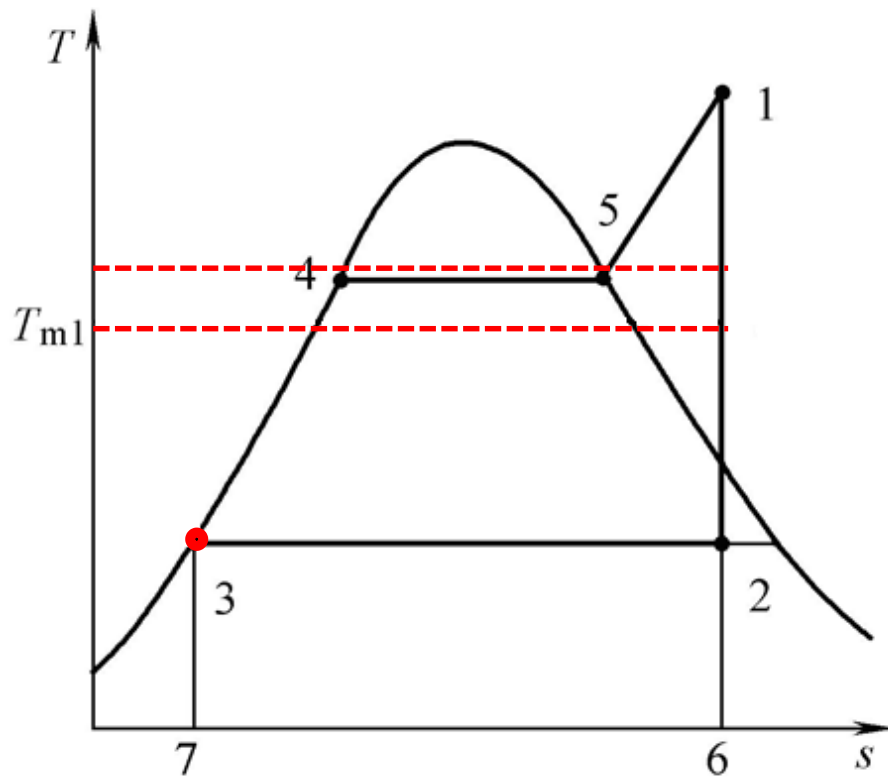


二、回热循环

朗肯循环热效率不高的主要原因，锅炉给水为未饱和水（点3），温度低，加热过程的平均吸热温度不高。

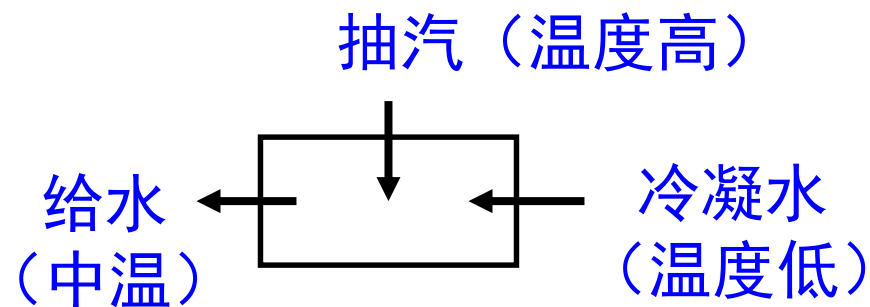
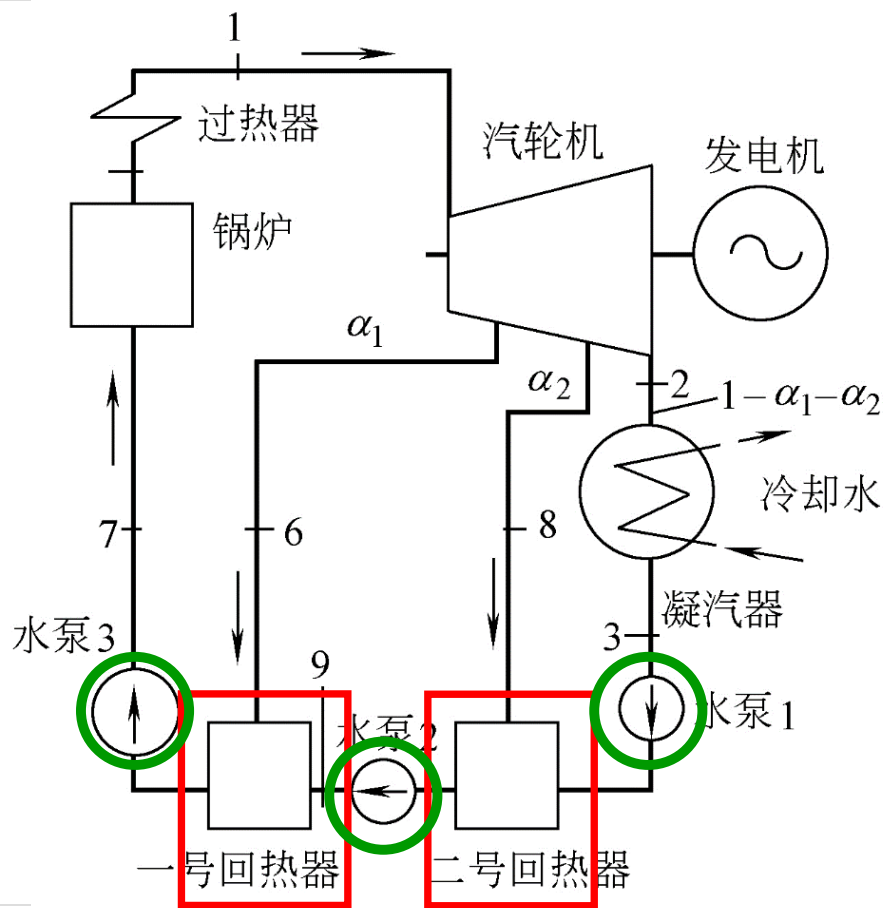
回热的基本思想:

提高锅炉给水温度，从而提高平均吸热温度。



二、抽汽回热循环——与燃气轮机装置回热循环不同

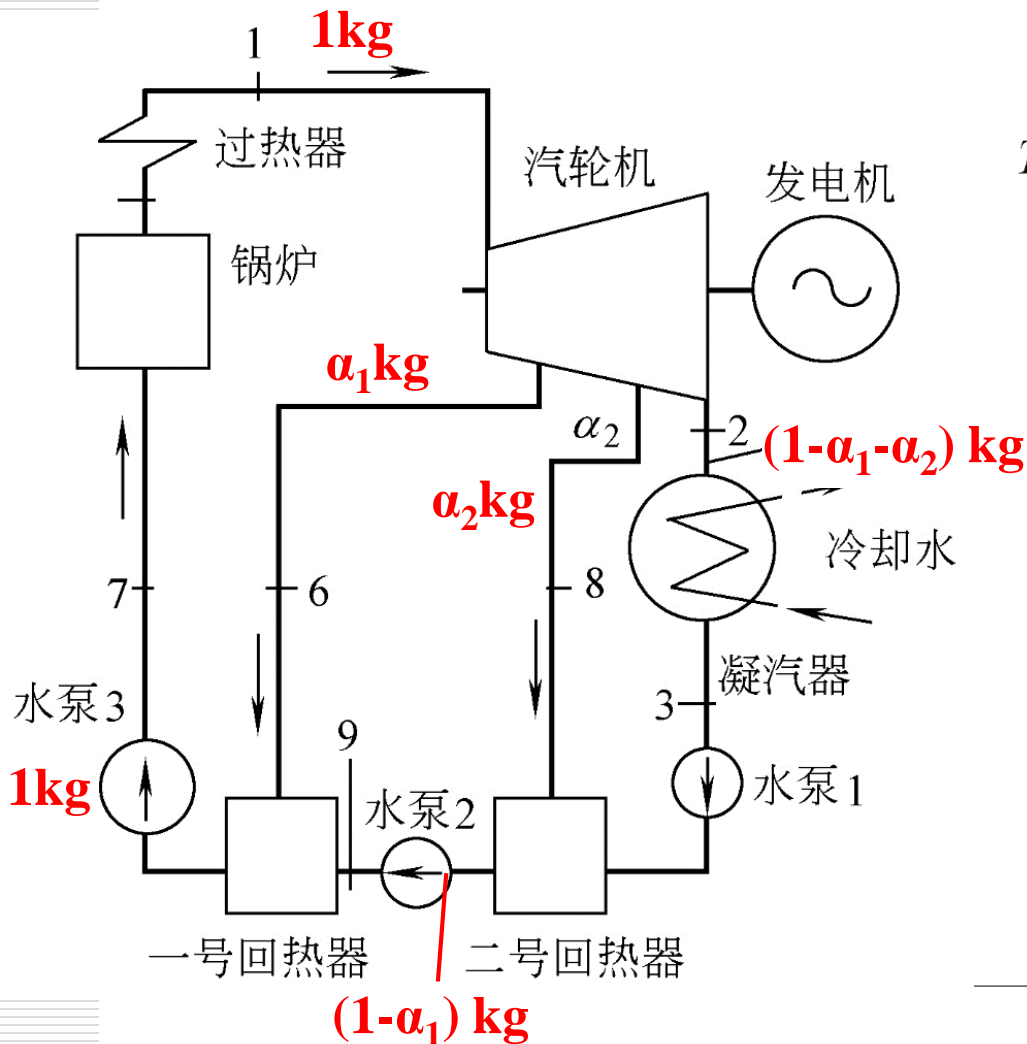
从汽轮机中抽取高温蒸汽，送入回热器，与低温水混合提高锅炉前给水温度，以提高平均吸热温度。



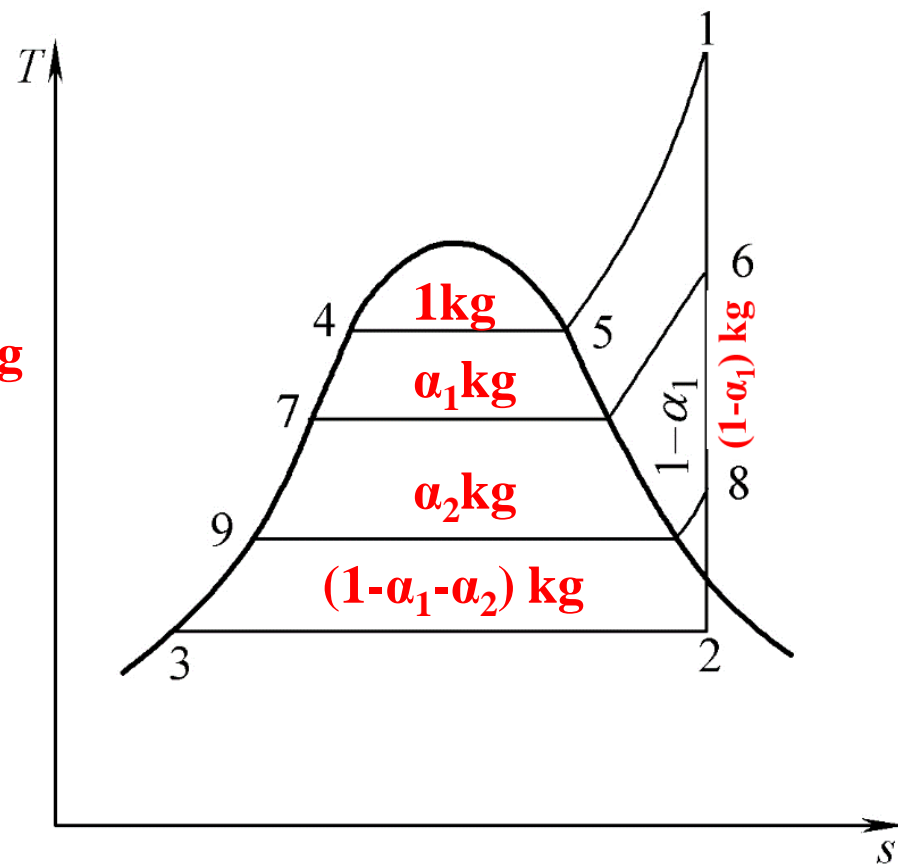
二号混合式回热器

抽汽回热循环

二级抽汽回热



以“凝结水被加热到抽汽压力下的饱和温度”为原则
——回热器出来的是饱和水。



抽气回热循环

优点： 循环热效率提高；
锅炉的热负荷降低，锅炉受热面减小；
汽轮机低压级尺寸减小，末级叶片变短；
进入冷凝器的乏汽减少，冷凝器尺寸、体积减小。

缺点： 循环比功减小，汽耗率增加；
设备复杂性增加；
因回热器投资增加。

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。



本章要求

1. 掌握组成蒸汽动力循环（朗肯循环）的主要设备、基本热力工程；
2. 理解朗肯循环在 p - v 图、 T - s 图、 h - s 图上的表达。
3. 了解提高蒸汽动力循环效率的基本途径，解释原因。



作 业:

P350-351, 思考题 10-1

10-4

10-11

