

一、热力发电厂热经济性

(一) 热量法

1. 锅炉: $\eta_b = \frac{Q_b}{Q_{cp}}$, Q_{cp} 为全厂热耗量, $Q_b = D_b(h_b - h_{fw})$

热损失率 $\zeta_b = \frac{\Delta Q_b}{Q_{cp}} = 1 - \eta_b$

2. 管道: $\eta_p = \frac{Q_0}{Q_b}$, $Q_0 = D_0(h_0 - h_{fw})$

热损失率 $\zeta_p = \frac{\Delta Q_p}{Q_{cp}} = \eta_b(1 - \eta_p)$

3. 汽轮机: 绝对内效率 = 相对内效率 · 循环热效率, $\eta_i = \eta_{ri}\eta_t$

热损失率 $\zeta_c = \frac{\Delta Q_c}{Q_{cp}} = \eta_b\eta_p(1 - \eta_i)$

4. 机械: 机械效率 η_m , 热损失率 $\zeta_m = \frac{\Delta Q_m}{Q_{cp}} = \eta_b\eta_p\eta_i(1 - \eta_m)$

5. 发电机: 发电机效率 η_g , 热损失率 $\zeta_g = \frac{\Delta Q_g}{Q_{cp}} = \eta_b\eta_p\eta_i\eta_m(1 - \eta_g)$

(绝对电效率: $\eta_e = \eta_i\eta_m\eta_g$)

6. 总效率: $\eta_{cp} = \eta_b\eta_p\eta_i\eta_m\eta_g = \frac{3600P_e}{Q_{cp}}$

(热量法认为: 凝汽器的热损失最大)

(二) 熵方法/焓方法

做功能力损失 $I = T_{en}\Delta s$

具体各部分损失见书上的 T-s 图

(熵方法认为, 锅炉的做功能力损失最大)

(三) 热经济性指标

1. 汽轮机汽耗量: $D_0 = \frac{3600P_e}{w_i\eta_m\eta_g}$

汽轮机汽耗率: $d_0 = \frac{3600}{w_i\eta_m\eta_g}$

2. 汽轮机热耗量: $Q_0 = D_0(h_0 - h_{fw})$

汽轮机汽耗率: $q_0 = d_0(h_0 - h_{fw}) = \frac{3600}{\eta_i\eta_m\eta_g}$

(热耗率反映了发电厂的热经济性)

3.发电厂热耗量: $Q_{cp} = \frac{3600P_e}{\eta_{cp}}$

发电厂热耗率: $q_{cp} = \frac{3600}{\eta_{cp}}$

4.发电厂煤耗量: $B_{cp} = \frac{3600P_e}{\eta_{cp}Q_{net}}$

发电厂煤耗率: $b_{cp} = \frac{3600}{\eta_{cp}Q_{net}}$

发电厂标准煤耗率: $b_{cp}^s = \frac{0.123}{\eta_{cp}}$

5.全厂净效率: $\eta_{cp}^n = \eta_{cp}(1 - \zeta_{ap})$

全厂供电标准煤耗率: $b_{cp}^n = \frac{0.123}{\eta_{cp}^n}$

(q 和 b 是通用的热经济性指标, 但 d 不能单独用作热经济性指标)

(四) 回热循环

给水回热的意义: 回热使进入汽轮机的凝汽量减少了, 冷源热损失降低了; 提高了锅炉给水温度, 使平均吸热温度提高, 且减小了传热温差, 减小了做功能力损失

最佳给水温度: 回热循环汽轮机绝对内效率最大时对应的给水温度

给水温度一定时, 回热级数越多循环热效率越高

(存在最佳给水温度的原因: 一方面汽耗率 d 增加, 另一方面工质吸热量 q_0 减少, 热耗率 $q = dq_0$ 和绝对内效率受双重影响)

回热级数越多, 最佳给水温度和回热循环效率越高

加热级数增多, 回热效率的增加值逐渐减小 (最高点附近平坦)

补: 回热循环做功量 (以两级回热为例):

$$w_i = (1 - \alpha_1 - \alpha_2)(h_0 - h_c) + \alpha_1(h_0 - h_1) + \alpha_2(h_0 - h_2)$$

(五) 蒸汽参数的影响

- 1.提高初温会增大理想循环效率和相对内效率
- 2.提高初压理想循环效率先增大后减小（极限压力），相对内效率会减小
- 3.降低排汽压力会增大循环热效率，但相对内效率减小（极限背压），排汽饱和温度 $t_c = t_{c1} + \Delta t + \delta t$, $\Delta t = t_{c2} - t_{c1}$

（存在极限背压的原因：一方面理想比内功增加，另一方面余速损失增加）

凝汽器的最佳真空：使发电厂净燃料消耗量最小的真空（本质是确定循环水流量）

（六）中间再热

- 1.中间再热的好处：湿汽损失减小，平均吸热温度提高
- 2.只有当附加循环效率高于原始效率时热经济性才会提高，且原始循环效率越低，再热加入的热量越大，热经济效益越大
- 3.再热温度增大，循环效率增大；但存在最佳再热压力
- 4.再热对回热的影响：再热使蒸汽做功增加，新蒸汽流量将减少；再热使回热抽汽的温度和焓值都提高，使回热抽汽量减小，回热抽汽做功减小，而凝汽做功增加，从而使冷源热损失增加，效率降低。工业上使用增大高压缸排汽的抽汽来增大再热前一级水的焓升，从而减小给水加热的不可逆损失

（七）燃气-蒸汽联合循环

- 1.燃气轮机由压气机、燃烧室、燃气透平组成
- 2.联合循环中的中高温由燃气轮机做功，中低温由蒸汽轮机做功；联

合循环的效率高于燃气轮机循环的效率和普通朗肯循环的效率

3.联合循环的类型：余热锅炉型、排汽补燃型、增压燃烧型、加热锅炉给水型（余热锅炉型热经济性最好）

（八）核能发电

1.压水堆核电站一回路系统包括反应堆、稳压器、蒸汽发生器、冷却剂泵，二回路系统则是蒸汽热力循环系统

2.压水堆核电站蒸汽初参数较低，要先汽水分离，且流量大

3.再热器高低压缸均为双流程，不用烟气而用高压缸抽汽进行加热

二、发电厂的回热加热系统

（一）加热器类型

1.混合式加热器热经济性高、结构简单、金属耗量少，但全混合加热系统安全性、可靠性低

2.表面式加热器热经济性较差，但全表面式加热系统运行可靠，布置方便。实际电厂采用表面式和混合式结合，混合式用作除氧器

3.卧式加热器在低负荷时可借助布置的高度差克服自流压差小的问题，因此热经济性高；而立式加热器占地面积小，换热效果较差

（二）表面加热器

1.端差：加热器汽侧出口疏水温度（饱和温度）和水侧出口温度之差

2.蒸汽冷却器：让过热度较大的抽汽先经过一个冷却器再经过加热器，既可减少温差传热带来的不可逆损失，又可提高出口水温

3.蒸汽冷却器分为内置和外置两种，连接方式有并联和串联两种；其中串联换热温差小，热经济性好，但给水系统阻力大消耗泵功多，并

联恰好相反

4.疏水泵的热经济性较好，而疏水逐级自流从热量法来说进入高压的水温降低，焓升增加，高压回热抽汽量增加，低压回热抽汽减少；从熵方法来说水吸热平均温度降低焓损增大，热经济性低（低压抽汽受热量排挤）；但疏水逐级自流是更多采用的方式

5.疏水冷却器：为了减少疏水逐级自流排挤低压抽汽引起的附加冷源损失，将水温度降低后再排至压力较低的加热器中，也分为内置式和外置式

（1x3 的表面式加热器中，出口处为过热蒸汽冷却器，入口处为疏水冷却器）

补充：高压加热器在左侧，低压加热器在右侧，压力指的是水侧的压力，在集水泵后压力最高。而对于汽侧压力左高右低。主回路最开头的水泵为凝结水泵，中间的水泵为集水泵

（三）除氧器

1.原理：除氧器对水进行定压加热，水蒸发不断进行，水面上蒸汽分压力增大，溶于水中其他气体的分压力逐渐减小，这些气体由水中不断扩散，当水蒸气分压接近于水面上气体全压力时，表明水中几乎不含有其他气体。该过程会不可避免带来工质损失

2.要求：同时满足传质和传热两个条件，且要把逸出的气体及时排走，在除氧后期压差很小，可制造扰动来强化深度除氧

3.除氧器按压力分类可以分为真空除氧器、大气压式除氧器、高压除氧器，压力高可以提高除氧效果，且可以避免自生沸腾

(自生沸腾: 凭其他进入除氧器的蒸汽和疏水就可以将水加热到饱和温度)

4.除氧器定压运行: 保证除氧器工作压力为定值, 在汽轮机出汽口后连接压力调节阀。汽轮机该级压力高于除氧器压力, 当负荷为 100% 时调节阀开最小, 随着负荷逐渐降低到 70%调节阀逐渐开到最大, 之后切换阀切换到高压, 调节阀重新开到最小, 之后再逐渐开大

前置连接定压除氧器是在除氧器出口水前方设置一个高压除氧器来弥补加热不足

5.除氧器滑压运行: 汽轮机出口后不安装调节阀, 除氧器压力随负荷变化, 当负荷降到 20%以下时也切换到高压 (且有调节阀)

6.定压除氧器一方面有节流损失, 另一方面当低负荷时切换到高压抽汽, 使得其热经济性较低。当负荷为 100%时效率差最大, 之后逐渐降低, 到 70%时从 0 突变到另一大值, 之后在 20%时又降为 0

7.负荷骤升时, 压力突然增大, 但除氧器中水温滞后变化, 因此水蒸气变为不饱和, 水面上气体又回到水中, 即“反氧”, 使得除氧效果差; 但是给水泵因压力上升、水温滞后而运行更安全

负荷骤降时, 给水箱中的水会“闪蒸”, 使除氧效果变好, 水温逐渐下降, 但水泵入口水温滞后下降, 而压力下降, 当该入口水温对应汽化压力大于给水泵最低压力时, 会发生汽蚀

三、热电厂供热系统

(○) 热负荷类型: 供暖、通风、空调、生活热水、生产工艺

(一) 热电联产定义

热电联产是指电厂对用户供应电能和热能，并且生产的热能是取自汽轮机做过全部功或部分功的蒸汽，即同一股蒸汽先发电后供热

热平衡（发电功率）方程： $(D_h(h_0 - h_c) + D_c(h_0 - h_h))\eta_{mg} = 3600P_{el}$

（二）热电联产和热电分产比较

1. 供热：

$$\text{分产：} B_{d,h}^s = \frac{34.1Q_h\eta_{hs}}{\eta_{b,d}\eta_{p,d}}, \quad b_{d,h}^s = \frac{34.1}{\eta_{b,d}\eta_{p,d}}$$

$$\text{联产：} B_{tp,h}^s = \frac{34.1Q_h}{\eta_b\eta_p}, \quad b_{tp,h}^s = \frac{34.1}{\eta_b\eta_p}$$

$$\text{省煤量：} \Delta B_h^s = 34.1Q_h\left(\frac{\eta_{hs}}{\eta_{b,d}\eta_{p,d}} - \frac{1}{\eta_b\eta_p}\right)$$

要求 $\eta_b\eta_{hs} > \eta_{b,d}$ ，其中 η_{hs} 为热电联产热网效率

2. 发电：

$$\text{分产：} B_{cp}^s = b_{cp}^s W = b_{cp}^s (W_h + W_c) = \frac{0.123}{\eta_b\eta_p\eta_i\eta_m\eta_g} W$$

$$\text{联产：} B_{tp,e}^s = b_{e,h}^s W_h + b_{e,c}^s W_c = \frac{0.123W_h}{\eta_b\eta_p\eta_m\eta_g} + \frac{0.123W_c}{\eta_b\eta_p\eta_{ic}\eta_m\eta_g}$$

省煤量：

$$\Delta B_e^s = W_h(b_{cp}^s - b_{e,h}^s) - W_c(b_{e,c}^s - b_{cp}^s) = \frac{0.123}{\eta_b\eta_p\eta_m\eta_g} \left(\frac{W}{\eta_i} - (W_h + \frac{W_c}{\eta_{ic}}) \right)$$

定义热化发电比 $X = \frac{W_h}{W}$ ，热化供热量 $Q_{h,t} = D_{h,t}(h_h - h_h')$

节煤条件：实际的热化发电比大于临界热化发电比

3. 汽轮机效率比较： $\eta_{ic} < \eta_i < \eta_{ih} = 1$

（三）热电厂经济性指标

1. 总热耗量： $Q_{tp} = \frac{Q_0}{\eta_b\eta_p}$ ，热用户得到热量： $Q = Q_h\eta_{hs}$

2. 燃料利用系数： $\eta_{tp} = \frac{3600W + Q_h}{Q_{tp}}$

表征燃料能量在数量上的有效利用程度，不是质量指标，因此不能比较热经济性，不能作为评价的单一指标

3.热化发电率 $\omega = \frac{W_h}{Q_{tp,t}}$, 热化发电量 $W_h = \frac{D_h(h_0-h_h)\eta_m\eta_g}{3600}$, 热化供热量

$$Q_h = Q_{tp,t} = \frac{D_h(h_h-h_h')}{3600} \text{ (单位: kW)}$$

热化发电率是评价热电联产技术完善程度的质量指标, 但只能评价相同参数的供热机组的热经济性, 也不能作为单一指标

4.热电比: $R_{tp} = \frac{Q_{tp,t}}{W}$

热电比表征本机组热电联产的利用程度, 但不能用于横向比较

(四) 热电联产热量分配

1.热量法: 也称为好处归电法, 将节能效益全部由发电部分独占, 没有反映热电两种产品的不等价

2.实际焓降法: 也称为好处归热法, 将冷源热损失全部由发电部分承担, 而节能效益全部归于供热方面

3.做功能力法: 将最大做功能力在热电两种产品之间进行分配, 同时考虑了热电在质量和数量上的差别

(五) 供热机组的选择

背压式适合全年性热负荷; 抽汽式适合全年性和季节性热负荷; 凝气-采暖式适合季节性热负荷