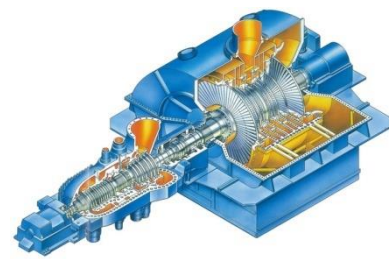


第三章 汽轮机的变工况

主讲教师：姜华伟

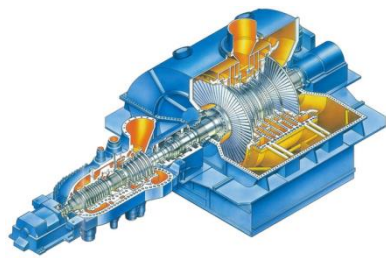
Email: jianghwwh@163.com

青岛大学能源与动力工程系



第三章 汽轮机的变工况

- 第一节 喷管的变工况
- 第二节 级组压力与流量的关系
- 第三节 工况变动时各级比焓降及反动度的变化
- 第四节 汽轮机调节方式和调节级的变工况
- 第五节 变工况时汽轮机轴向推力的变化
- 第六节 凝汽式汽轮机工况图
- 第七节 初终参数变化对汽轮机工作的影响
- 第八节 变工况下的热力计算
- 第九节 变转速汽轮机



一、工况变动时各级的比焓降变化规律

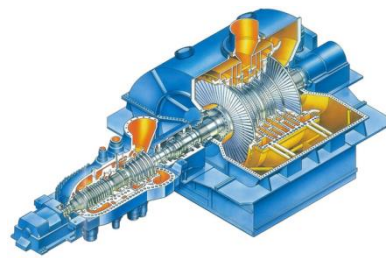
设计工况下的理想比焓降可表示为

$$\Delta h_t = \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{k}{k-1} RT_0 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

借用喷管理想比焓降的计算公式相类似的形式

变工况下级的理想比焓降可表示为

$$\Delta h_t' = \frac{k}{k-1} RT_{01} \left[1 - \left(\frac{p_{21}}{p_{01}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$



(一) 凝汽式汽轮机

1. 凝汽式汽轮机各中间级

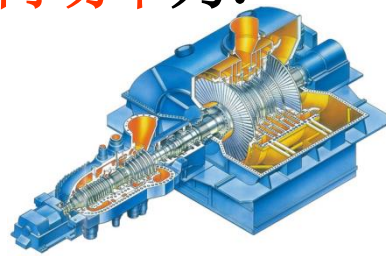
对凝汽式汽轮机，除调节级和最末一、二级外，无论级组是否处于临界状态，各级级前压力均与级组的流量成正比：

$$\left(\frac{G_1}{G}\right) = \frac{p_{01}}{p_0} = \frac{p_{21}}{p_2} = \frac{p_{41}}{p_4} = \dots \Rightarrow \frac{p_2}{p_0} = \frac{p_{21}}{p_{01}} \text{ 或 } \frac{p_4}{p_2} = \frac{p_{41}}{p_{21}} \dots$$

分析：

1) 当工况变动时，凝汽式汽轮机各中间级前后压力比不变。这样，级的理想比焓降不变。在定转速下，各级圆周速度不变；当级比焓降不变时，级的假想速度 $c_a = \sqrt{2\Delta h_t^*}$ 不变。因此级的速度比 $x_a = u/c_a$ 不变。工况变动时级的摩擦损失、漏汽损失、叶高损失等变化不大，因而级内效率将不变。而级的内功率为：

$$P_i = G\Delta h_t \eta_{ri} = BG$$



2. 凝汽式汽轮机的最末级

对于凝汽式汽轮机的**最末级**，由于**背压 p_c** 取决于凝汽器工况和**排汽管压损**， $G \geq (G_{cr})_{\min}$ 时，虽 p_0 正比于 G ，但背压 p_c 不与 G 成正比，一般 p_c 不变，末级前后压力比随流量变化而变化，有流量增大， Δh_t 增大；反之，流量减小， Δh_t 减小。

$G < (G_{cr})_{\min}$ 时， p_0 与 G 为双曲线， G 减小时， Δh_t 减得稍慢

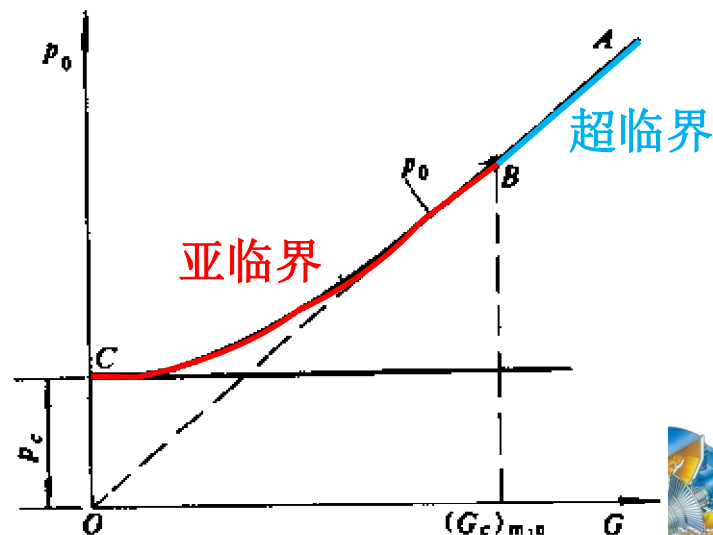
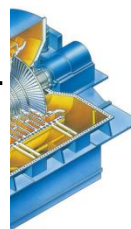


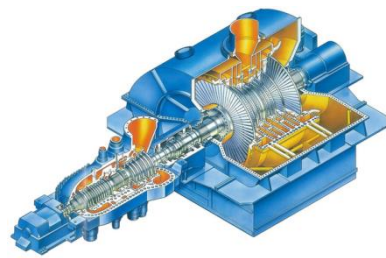
图 3.2.3 凝汽式汽轮机末级 p_0 - G 关系曲线



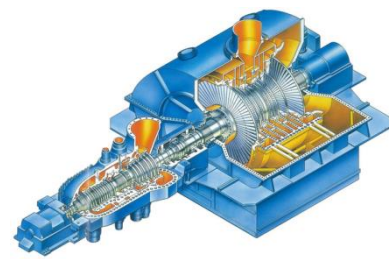
3. 凝汽式汽轮机的调节级

从后面的研究可知，在某调节阀全开以上的工况，**全开调节阀后的喷管组级前压力不变或变化很小，而其级后压力是与流量成正比地变化。**

当流量增大时，调节级级后压力上升，级的比焓降减小；
当流量减小时，调节级级后压力降低，级的比焓降增大。



★在计算汽轮机各中间级的变动工况时，不需要逐级进行详细计算，只需求得各级前的压力，然后将设计工况热力过程曲线平移即可。而调节级和最末级的变动工况，则要进行详细计算。

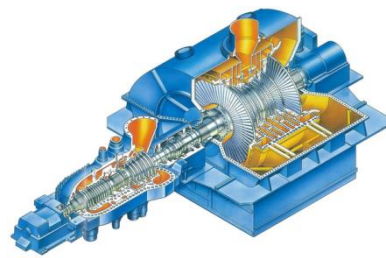


(二) 背压式汽轮机

1. 如果背压式汽轮机**最后一级达临界**，则各级前的压力与流量成正比。其焓降、效率、反动度、功率的变化规律和凝汽式汽轮机各中间级一样。
2. 但是，背压式汽轮机的**末级一般不会达临界**，其压力与流量的关系应按弗留格尔公式进行计算

$$\left(\frac{G_1}{G}\right) = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_0^2 - p_z^2}}$$

$$\text{变换为: } p_{01}^2 = \left(\frac{G_1}{G}\right)^2 (p_0^2 - p_z^2) + p_{z1}^2$$



同时对于级后即下一级的级前有：

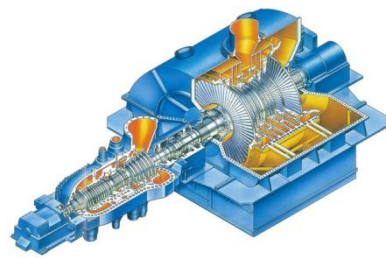
$$p_{21}^2 = \left(\frac{G_1}{G}\right)^2 (p_2^2 - p_z^2) + p_{z1}^2$$

两式相除得：

$$\left(\frac{p_{21}}{p_{01}}\right)^2 = \frac{p_2^2 - p_z^2 + p_{z1}^2 \left(\frac{G}{G_1}\right)^2}{p_0^2 - p_z^2 + p_{z1}^2 \left(\frac{G}{G_1}\right)^2}$$

整理得：

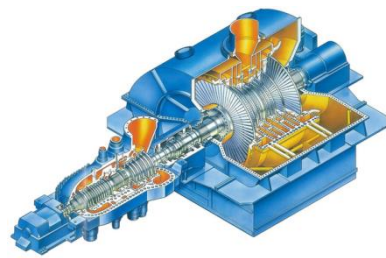
$$\left(\frac{p_{21}}{p_{01}}\right)^2 = 1 - \frac{p_0^2 - p_2^2}{p_0^2 - p_z^2 + p_{z1}^2 \left(\frac{G}{G_1}\right)^2}$$



$$\left(\frac{p_{21}}{p_{01}}\right)^2 = 1 - \frac{p_0^2 - p_2^2}{p_0^2 - p_z^2 + p_{z1}^2 \left(\frac{G}{G_1}\right)^2}$$

分析上式可知：

当流量 G_1 减小时， G/G_1 值增大， p_{21}/p_{01} 增大，即级的压比增大，级内比焓降减小，反之，当流量增大时，级内比焓降增大。



当流量 G_1 减小时，第五级比焓降减小最明显，第四级次之；而第一、二级比焓降减小较少。当流量 G_1 减小到40%以下时，第一、二级比焓降才急剧下降。

结论：对背压式汽轮机非调节级，当级组流量变化时，级的比焓降的变化是从高压到低压方向逐级增大的，末级的比焓降变化最大。越靠近前面的级，其比焓降变化越小。

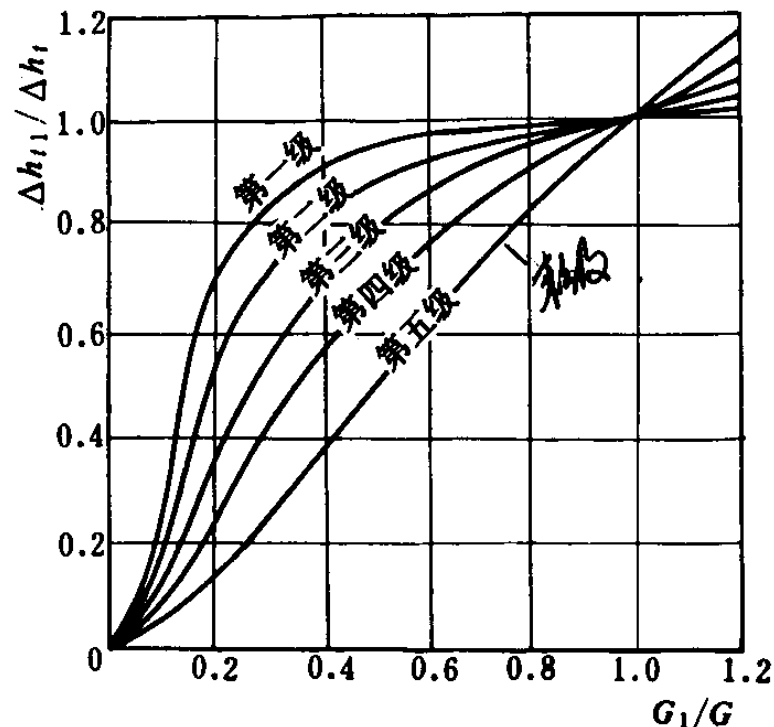
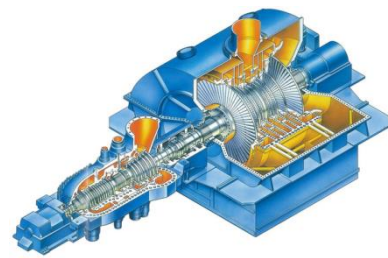


图 3.2.5 背压式汽轮机非调节级理想比焓降变化规律



二、工况变动时，级内反动度的变化

1. 比焓降变化时，级内反动度的变化

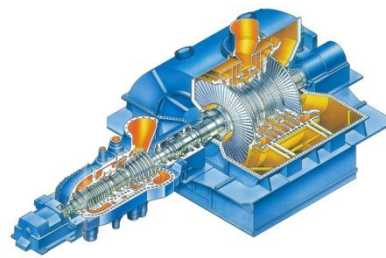
研究级内反动度变化规律的目的：了解级在变工况后的全部热力过程，核算汽轮机通流部分零件的强度以及轴向推力的变化。

级反动度变化的物理本质，可以根据连续流动方程加以说明。

喷管出口的蒸汽流量为 $G = A_n c_1 \rho_1$

进入动叶的蒸汽流量为 $G = A'_b \omega_1 \rho_1$

两式联立得 $A_n c_1 = A'_b \omega_1 \Rightarrow \frac{\omega_1}{c_1} = \frac{A_n}{A'_b} = \text{常数}$



当级的比焓降 Δh_t 减小，即速比 χ_a 增大时，喷管出口速度 c_1 相应减小

由图(a)可知：动叶进口实际有效相对速度为 $w_{11} \cos \theta$

$$\frac{w_{11} \cos \theta}{c_{11}} < \frac{w_1}{c_1}$$

说明工况变动后，不能使喷管中流出的气流全部进入动叶内，形成流动阻塞。

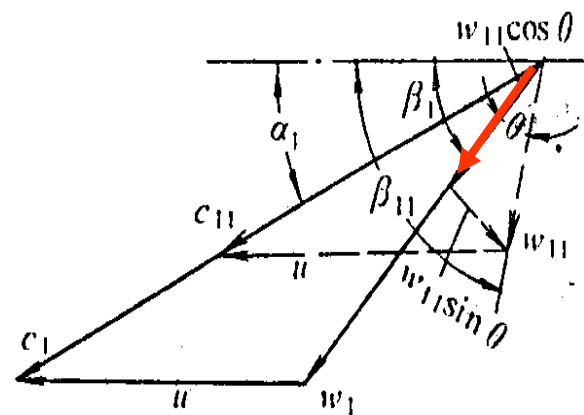
为符合流动的连续性，级内热力参数将自发调整，结果使动叶前压力升高，

动叶比焓降增大而喷管比焓降减小，使动叶气流

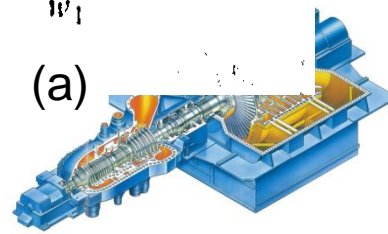
得到额外加速，同时，喷管气流得到一定的抑制，

动叶比焓降增大而喷管比焓降减小，即级内反动

度增加。



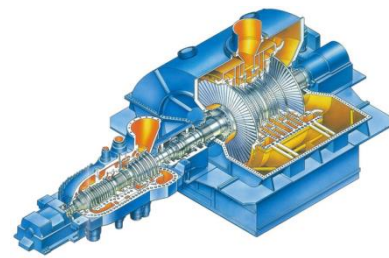
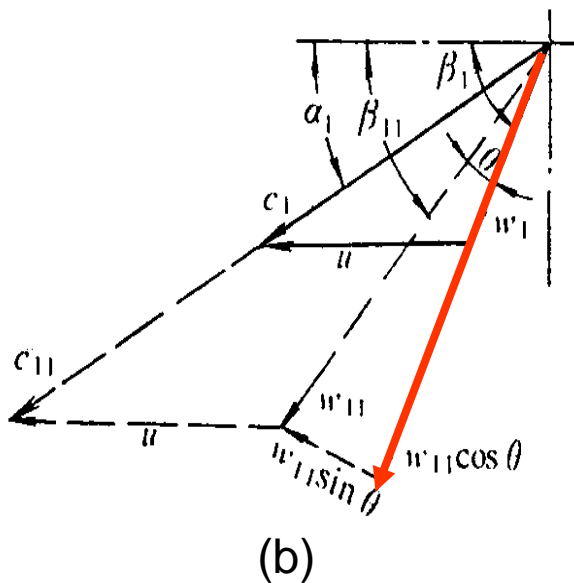
(a)



同理，如级的比焓降 Δh_t 增大，即速比 χ_a 减小时，有

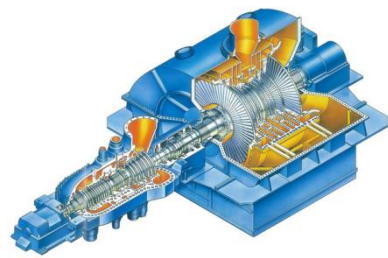
$$\frac{w_{11} \cos \theta}{c_{11}} > \frac{w_1}{c_1}$$

此时，级内自发调整所要克服的是出少进多的压缩流动，级内反动度将减小。



当面积比 f 一定、 Δh_t 变化使速度 χ_a 变化时，反动度设计值较小的级，反动度变化较大；反动度设计值较大的级，其反动度变化小。

原因：设计反动度很小时，动叶出口速度 w_2 主要决定于 w_1 ， Δh_b 对 w_2 的影响很小，当焓降变化时，只有反动度变化较大，才能 w_{21} 的变化满足流动连续的要求；设计反动度较大时，动叶出口速度 w_2 主要决定于 Δh_b ，受 w_1 的影响很小，当焓降变化时，反动度变化较小， w_{21} 就能满足流动连续的要求。



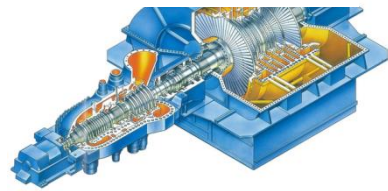
中间级的反动度的变化规律:

级的比焓降增大，即速比减小时，反动度减小；反之亦然。设计反动度较小的级，比焓降变化时，反动度变化较大；反之，变化较小；反动级的反动度基本不变。

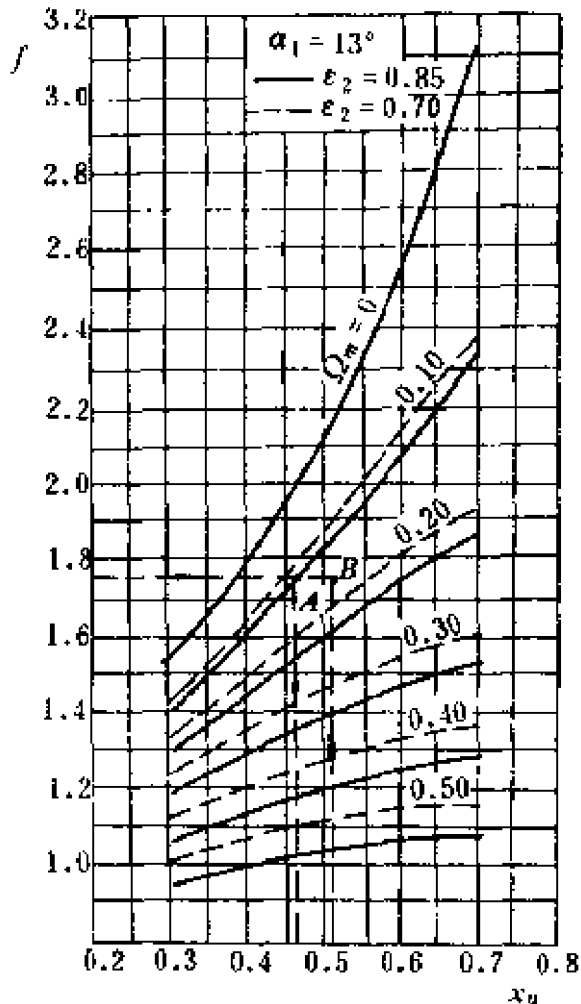
末级的反动度的变化规律:

对于凝汽式汽轮机末级，已达临界的条件下，若排汽压力 p_c 下降，则 Δh_b 增大而 Δh_n 不变，即级的比焓降增大时反动度增大；若 p_c 上升，同理，级的比焓降减小而反动度减小。

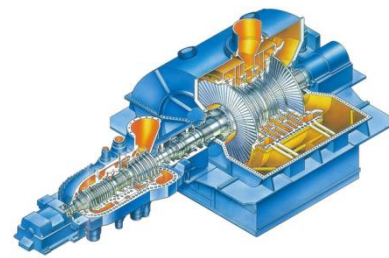
若末级未达到临界，反动度的变化规律同一般级。



2. 通流面积变化时，级内反动度的变化



当面积比 $f = A_b / A_n$ 减小时，从喷管流出的汽流在动叶汽道中引起阻塞流动，使动叶前压力升高，级内反动度增大；反之，面积比增大时，级内反动度减小。



3. 工况变动时，级内反动度变化的估算

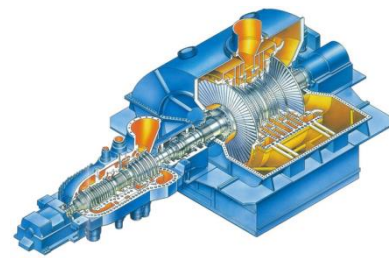
由级的比焓降 Δh_t 变化引起反动度变化，通常用下式计算

1. 当 $\frac{\Delta x_a}{x_a}$ 在很大范围内变化时，用下式计算

$$\frac{\Delta \Omega_x}{1 - \Omega_m} = 0.5 \frac{\Delta x_a}{x_a} - 0.3 \left(\frac{\Delta x_a}{x_a} \right)^2$$

2. 当 $\frac{\Delta x_a}{x_a}$ 在 $(-0.1 < \frac{\Delta x_a}{x_a} < 0.2)$ 范围内变化时，可以用下式计算

$$\frac{\Delta \Omega_x}{1 - \Omega_m} = 0.4 \frac{\Delta x_a}{x_a}$$



§ 3.3 工况变动时各级比焓降及反动度的变化

由于动静叶栅出口面积比 $f = A_b / A_n$ 变化引起的反动度变化可以用下式计算

$$\Delta\Omega_f = -0.7 \frac{\Delta f}{f}$$

其中 $\Delta f = f_1 - f$;

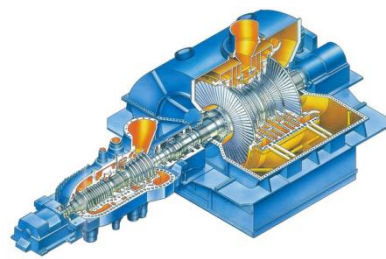
$\Delta\Omega_f$ ——动静面积变化引起的反动度的变化, $\Delta\Omega_f = \Omega_{m1} - \Omega_m$;

f_1, f ——分别为变工况后和设计工况下的动静面积比

压比的变化引起反动度的变化, 可以用下式计算:

$$\Delta\Omega_\varepsilon = -0.2 \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} (1 + \Omega_m)$$

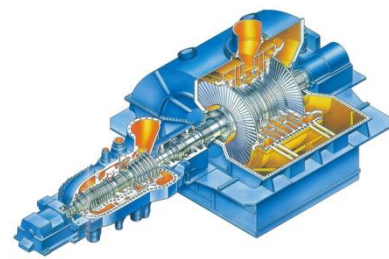
其中 $\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon$



如果级内速度比、面积比及压比都发生了变化，则级内反动度的变化可以认为是各自引起的变化量的总和，即：

$$\Delta\Omega_m = \Delta\Omega_x + \Delta\Omega_f + \Delta\Omega_\varepsilon$$

注：上述公式只适用于亚临界工况



三、各级 p_0 、 Δh_t 、 Ω_m 、 x_a 、 η_i 、 P_i 的变化规律

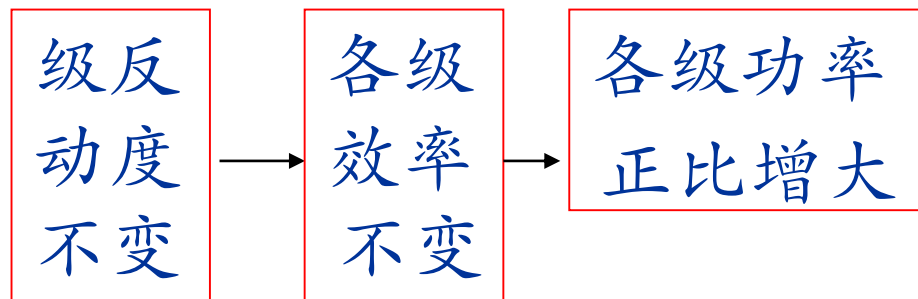
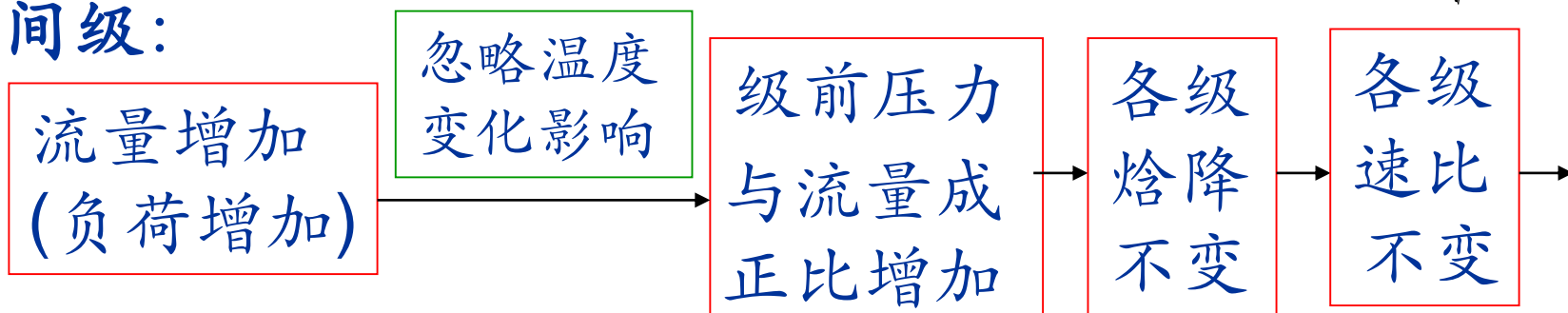
1. 凝汽式汽轮机

a. 末级为临界工况（中间级、末级）

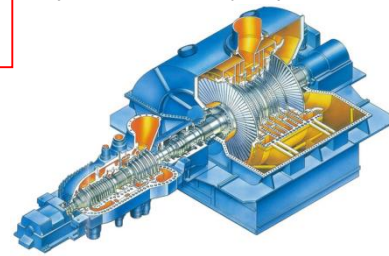
$$x_a = u/c_a$$

$$c_a = \sqrt{2\Delta h_t^*}$$

中间级：



$$P_i = G\Delta h_t \eta_i$$



§ 3.3 工况变动时各级比焓降及反动度的变化

末级:

流量增加
(负荷增加)

忽略温度
变化影响、
级后压力
不变

级前压力
与流量成
正比增加

级焓
降
增加

级速
比
减小

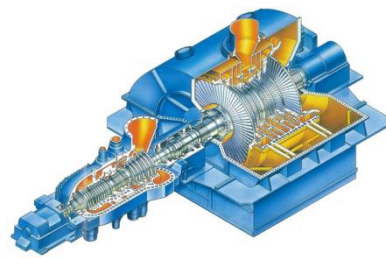
$$x_a = u/c_a$$
$$c_a = \sqrt{2\Delta h_t^*}$$

级反
动度
减小

级效
率
减小

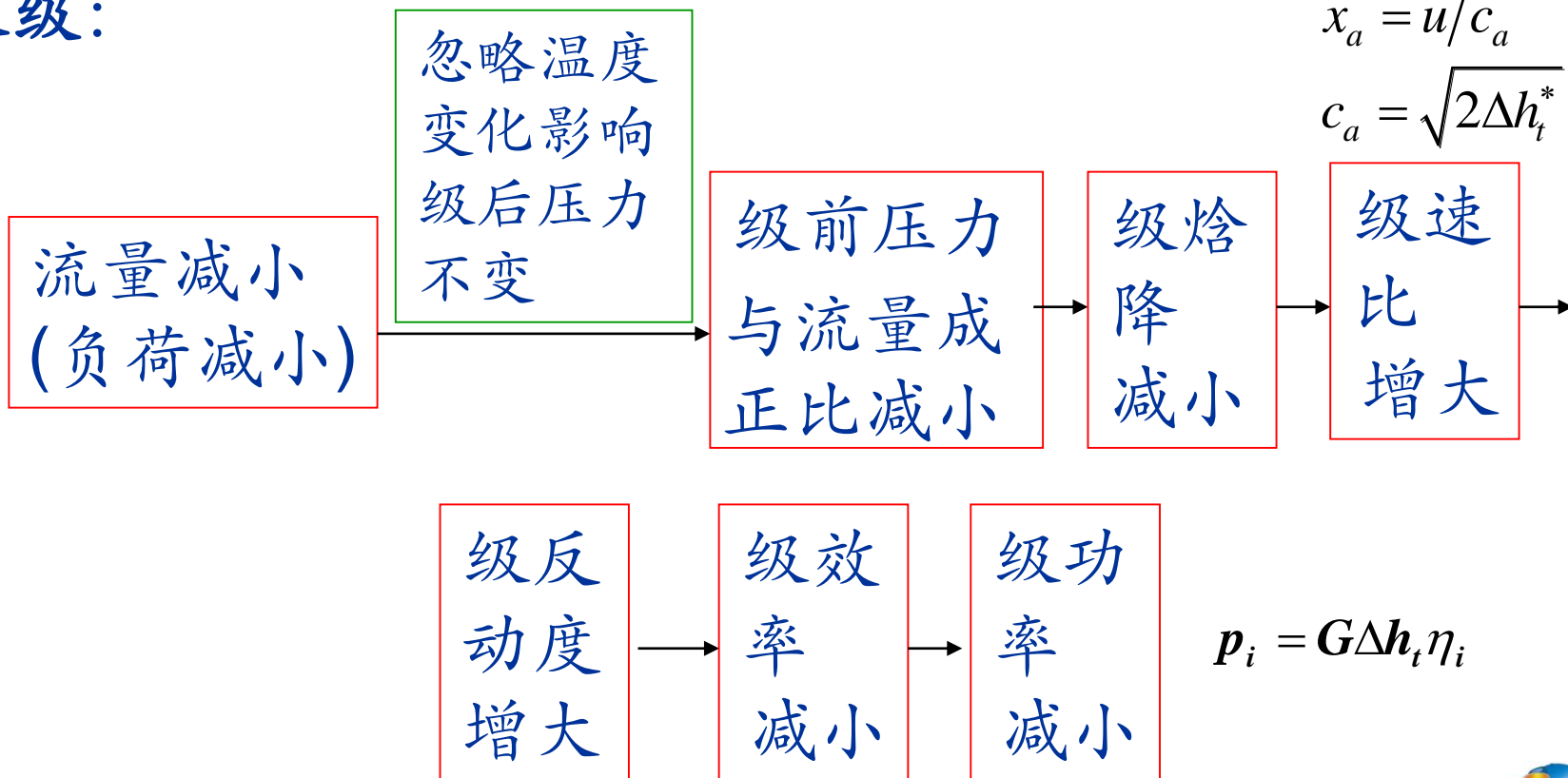
级功
率
增大

$$p_i = G\Delta h_t \eta_i$$



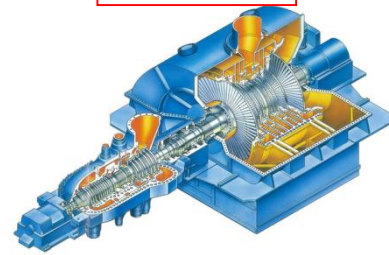
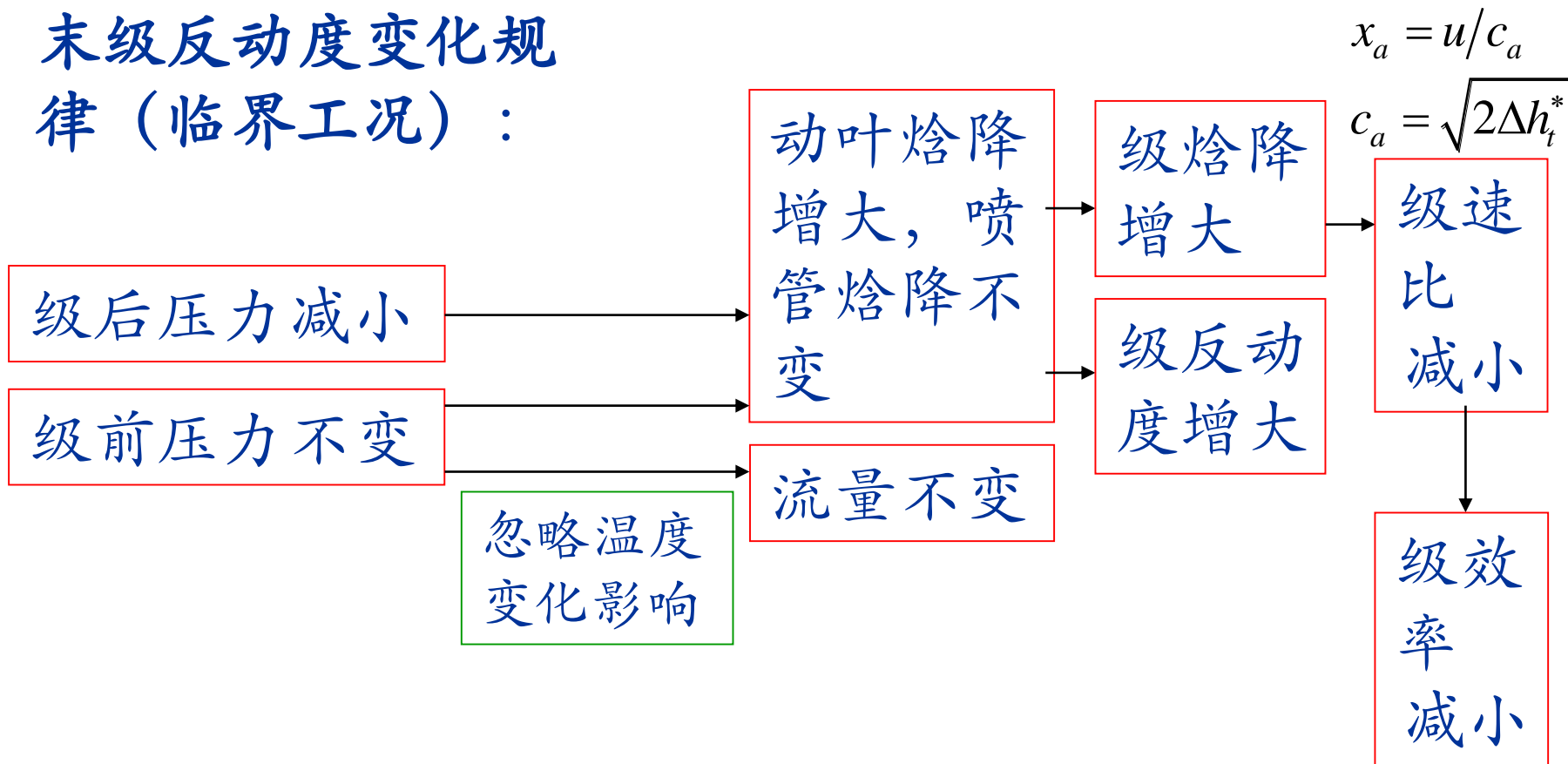
§ 3.3 工况变动时各级比焓降及反动度的变化

末级:



§ 3.3 工况变动时各级比焓降及反动度的变化

末级反动度变化规律（临界工况）：

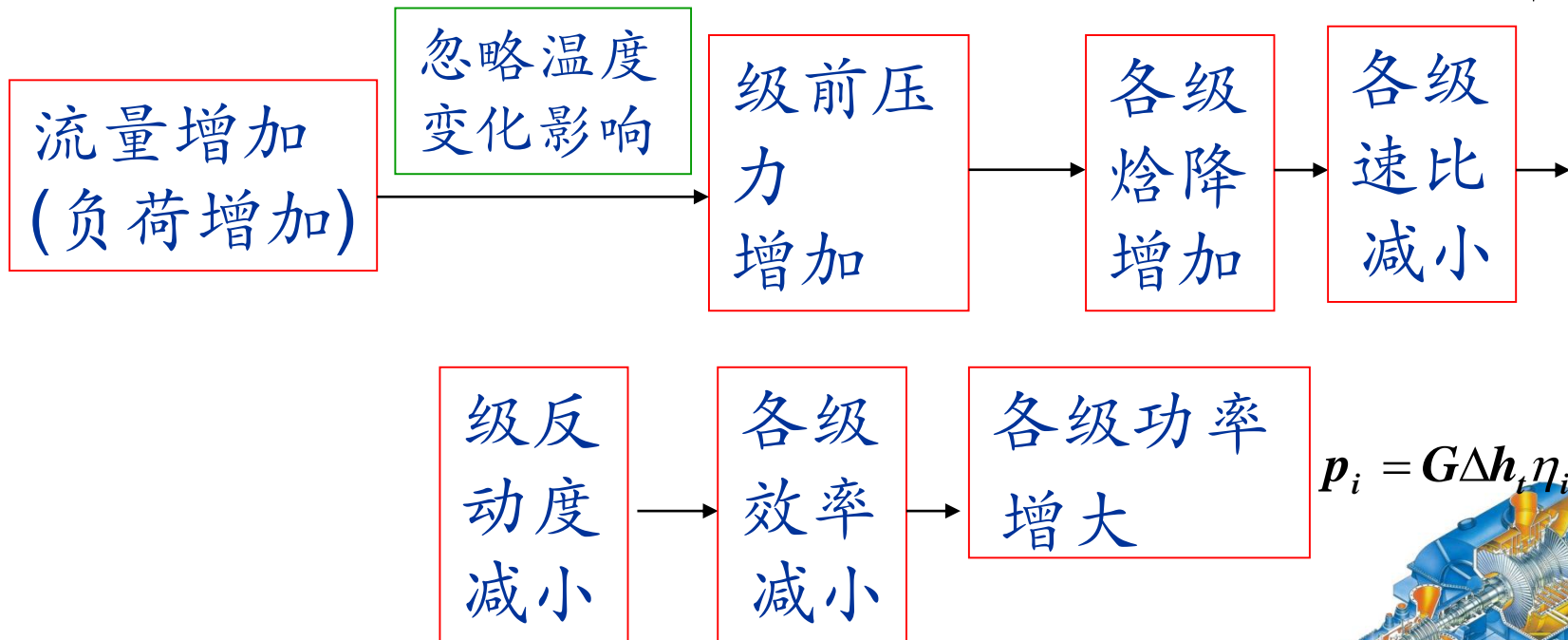


b. 末级为亚临界工况

只有最后两、三级的变化规律与背压式汽轮机非调节级相同，其余各级均与临界工况相同。

2. 背压式汽轮机非调节级（末级一般为亚临界工况）

$$x_a = u/c_a \quad c_a = \sqrt{2\Delta h_t^*}$$



$$p_i = G\Delta h_t \eta_i$$

