

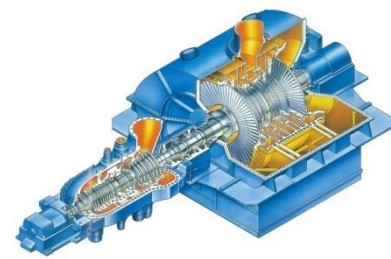
# 汽轮机原理

## 第一章 汽轮机级的工作原理

主讲教师：姜华伟

Email: [jianghwwh@163.com](mailto:jianghwwh@163.com)

青岛大学能源与动力工程系



## 第一节 概述

## 第二节 汽轮机级的工作过程

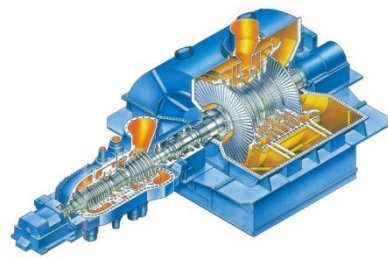
## 第三节 级的轮周效率与最佳速度比

## 第四节 级通流部分主要尺寸的确定

## 第五节 汽轮机级内损失和级效率

## 第六节 汽轮机级的热力计算示例

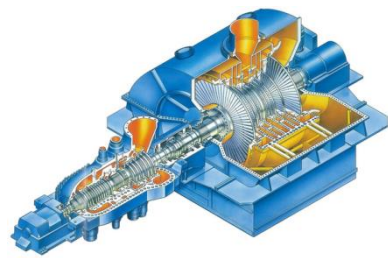
## 第七节 长叶片级



# 第四节 级通流部分主要尺寸的确定



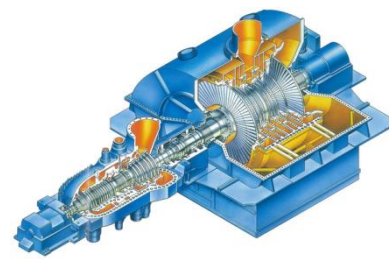
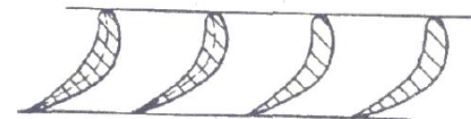
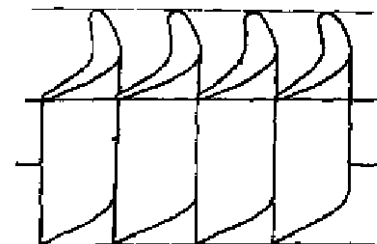
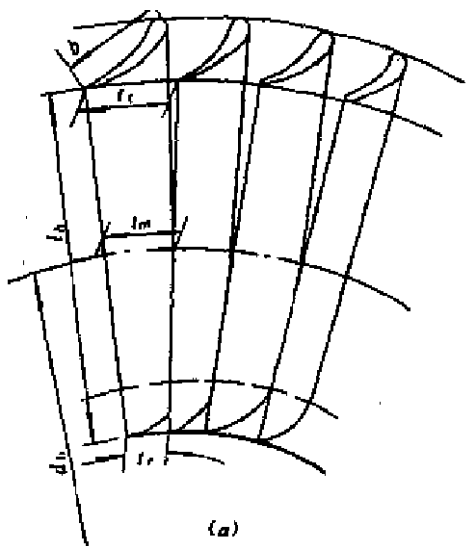
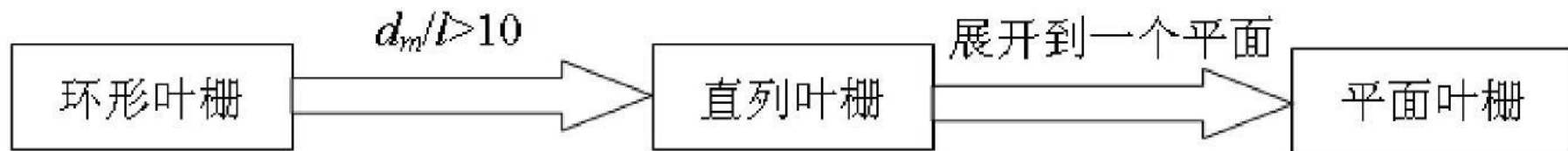
- 一、叶栅的几何特征
- 二、叶栅及叶型参数的选择
- 三、喷管叶栅和动叶栅尺寸的确定
- 四、冲动级内反动度的选择
- 五、汽轮机动静叶栅面积比的确定



# 一、叶栅的几何特征

## 1. 什么是叶栅?

**叶栅：由相同叶片构成的汽流通道的组合体**



## 2. 叶型及叶型参数

(1) **叶型**：叶片的横断面形状，包括等截面叶型和变截面叶型。

(2) 叶栅几何特性参数

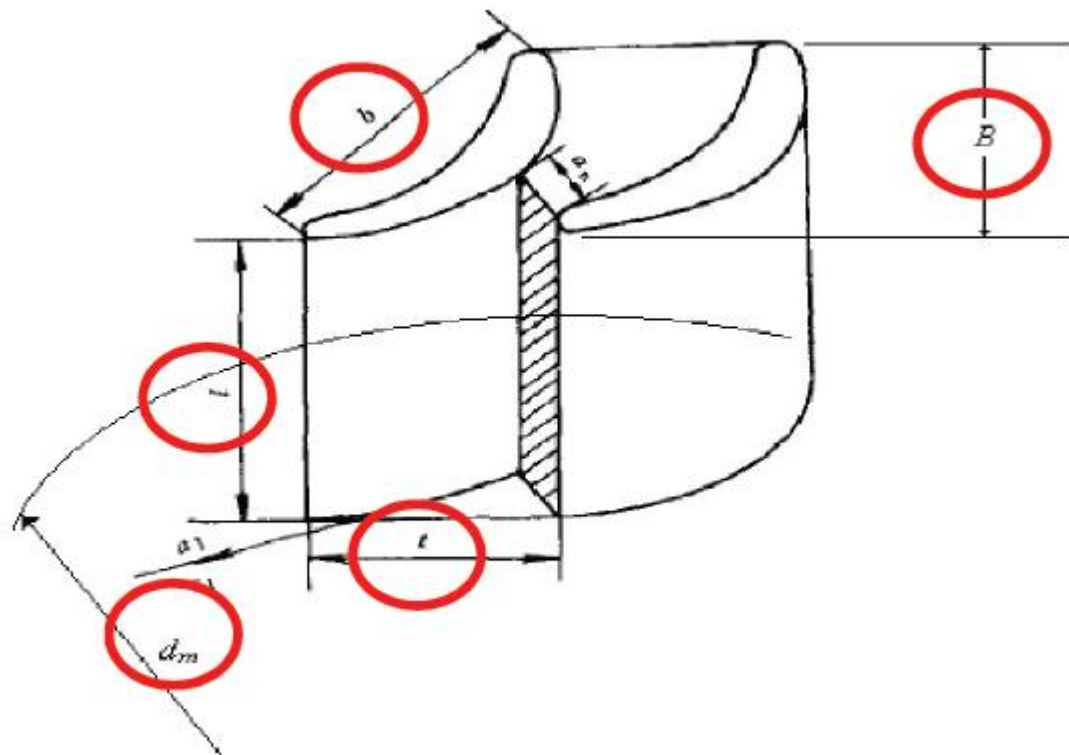
$d_m$ —平均直径。

$l$ —叶片高度。

$t$ —叶栅节距。

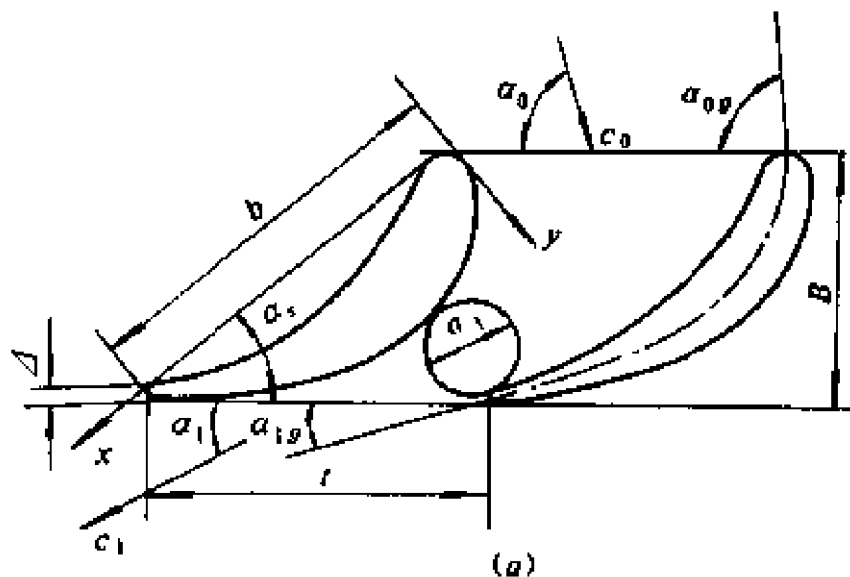
$B$ —叶栅宽度。

$b$ —叶栅弦长。

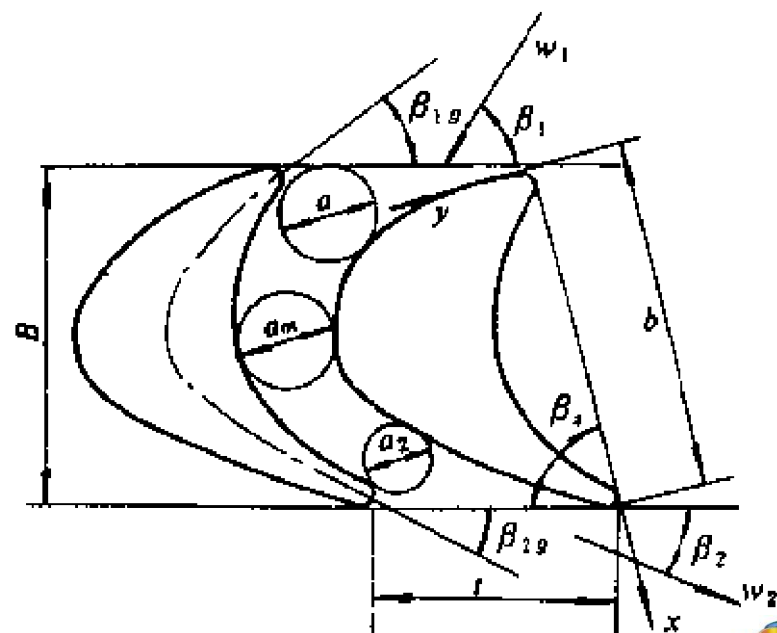


## 叶栅几何特性参数

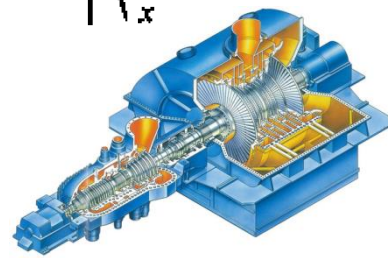
平均直径 $d_m$ 、叶片高度 $l$ 、叶栅节距 $t$ 、叶型宽度 $B$ 、叶型弦长 $b$ 、出口边厚度 $\Delta$ 、进口边宽度 $a$ 和出口边宽度 $a_1$ 与 $a_2$ 等



(a) 喷管叶栅



(b) 动叶栅

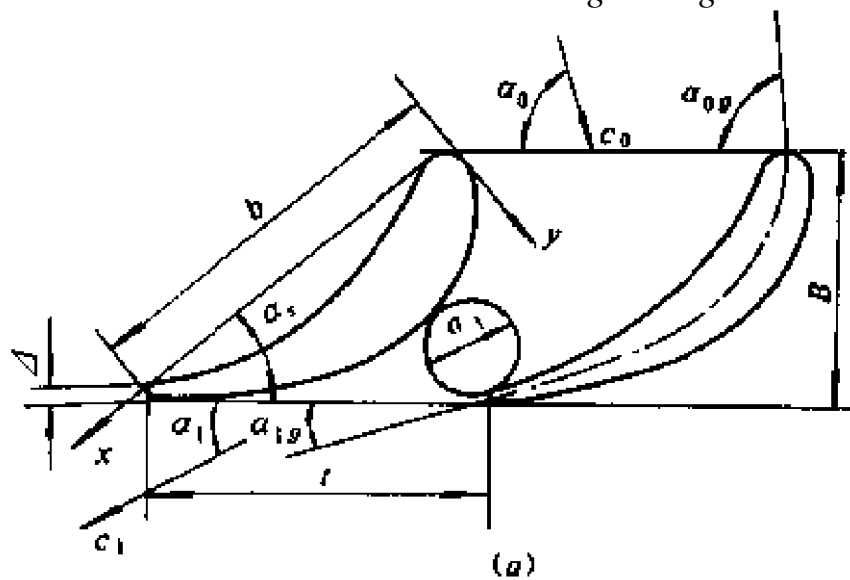


与叶栅通道形状和汽流方向有关的**叶型角**和**汽流角**:

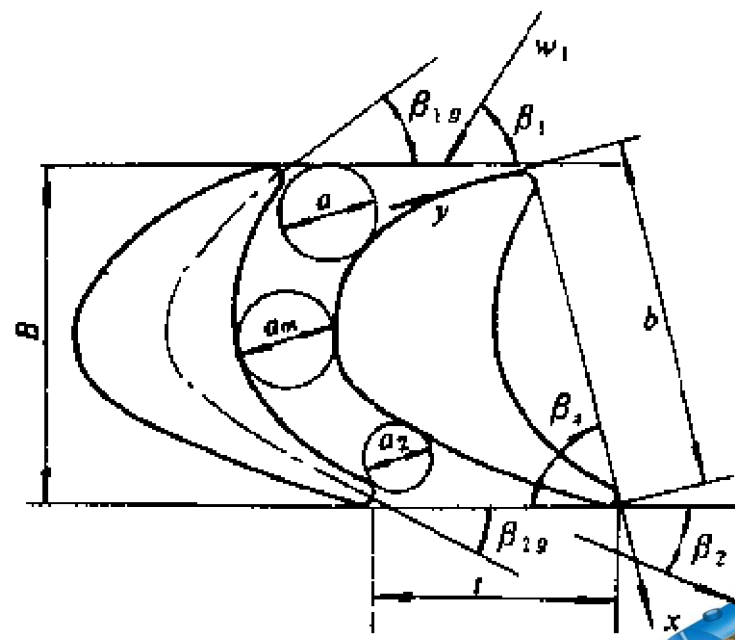
叶栅的安装角  $\alpha_s, \beta_s$

叶型进口几何角  $\alpha_{0g}, \beta_{1g}$

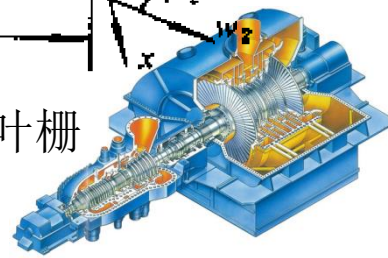
叶型出口几何角  $\alpha_{1g}, \beta_{2g}$



(a) 喷管叶栅



(b) 动叶栅



## 二、叶栅及叶型参数的选择

### 1. 叶栅类型的选择

叶栅通道分为**渐缩**和**缩放**两种型式

- (1) 当  $\varepsilon_n \geq \varepsilon_{cr}$  时，采用渐缩型式
- (2) 当  $\varepsilon_{ld} < \varepsilon_n < \varepsilon_{cr}$  时，仍采用渐缩型，此时可利用其斜切部分来满足气流膨胀的要求
- (3) 当  $\varepsilon_n \leq \varepsilon_{ld}$  时，采用缩放型

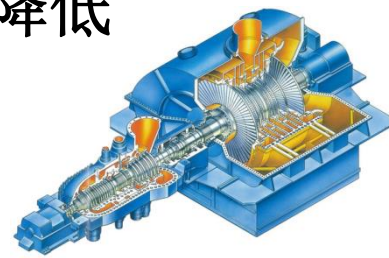
喷管  
叶栅

渐缩喷管

缩放喷管

**动叶栅一般采用渐缩型**

**原因：**缩放叶栅加工困难，在工况变动时效率降低



## 2. 叶栅出口汽流角 $\alpha_1$ 和 $\beta_2^*$ 的选择

喷管出汽角应由选用的喷管叶栅型线来确定，一般 $\alpha_1 = 11^\circ \sim 14^\circ$   
 对于复速级喷管叶栅，出汽角选得比较大一些， $\alpha_1 = 13^\circ \sim 18^\circ$ ，  
 这是因为复速级的喷管出口速度 $c_1$ 比圆周速度 $u$ 大得多，而且往往是超声速的，如果 $\alpha_1$ 选得太小， $\beta_1$ 与 $\beta_2^*$ 也会很小，将使动叶损失增加。另外，对于复速级的通流部分，光滑地变化是一个很重要的要求，为保证叶栅高度逐渐增大，各列叶栅应选择适当的反动度和出汽角。

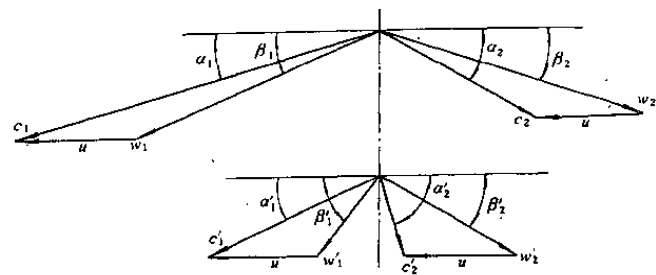


图 1.3.10 复速级的速度三角形

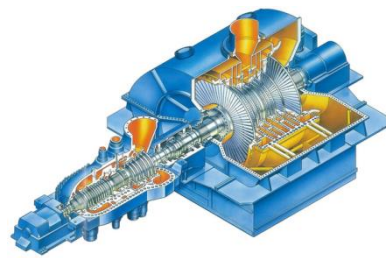
### 3. 部分进汽度的选择

工作喷管所占的弧段长度  $Z_n t_n$  与整个圆周长  $\pi d_n$  的比值表示部分进汽的程度：

$$e = \frac{Z_n t_n}{\pi d_n}$$

一般**压力级**中都采用全周进汽，即 $e=1$ ，而**调节级**毫无例外地采用部分进汽，即 $e<1$ 。

选择部分进汽度时，应考虑叶栅高度不能小于12-15mm，以保证较高的流动效率。



## 4. 盖度的选择

为了使蒸汽从喷管叶栅流出时不致与动叶栅顶部和根部发生碰撞，从而顺利地流进动叶栅，动叶栅进口高度  $l'_b$  须稍大于喷管叶栅的出口高度  $l_n$ ，两者之差称为盖度。

$$\Delta = l'_b - l_n = \Delta_t + \Delta_r$$

$\Delta_t$  和  $\Delta_r$  分别表示动叶栅的顶部盖度和根部盖度，一般  $\Delta_t > \Delta_r$

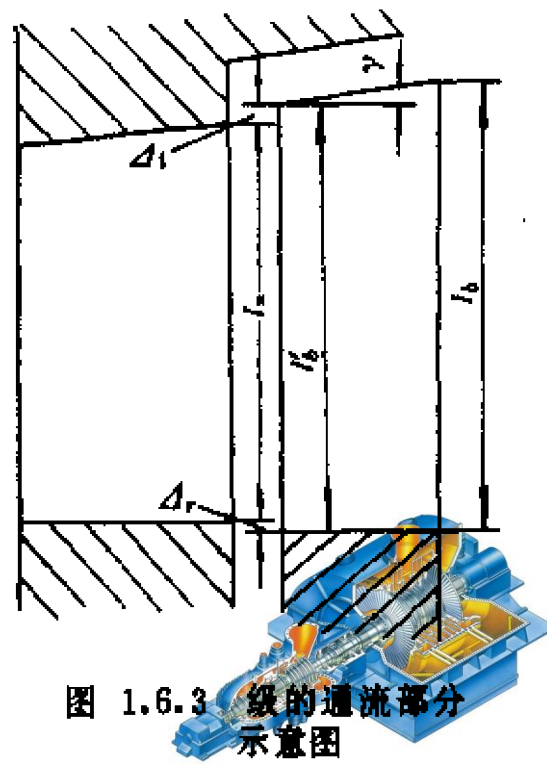
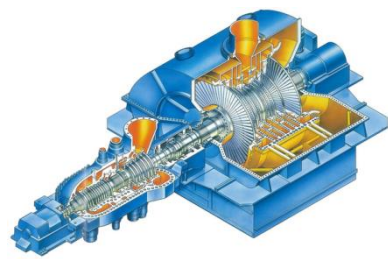


图 1.6.3 级的通流部分示意图

**盖度过小时**，由于不可避免的制造和安装误差以及运行时动静部分变形的不一致或汽流径向扩散等原因，仍然会使汽流撞击动叶栅而造成损失；

**盖度过大时**，会使停滞蒸汽被吸到动叶汽道中扰乱主流，造成损失。



影响

能满足蒸汽沿径向扩散的要求

能减少叶顶的漏气

能避免喷嘴气流冲击叶根，减少流动损失

有利

制造与安装时会出现动静叶径向位置的偏差，运行时也会出现径向变形的不一致

不利

盖度较大时，会产生径向分速，形成漩涡，降低效率

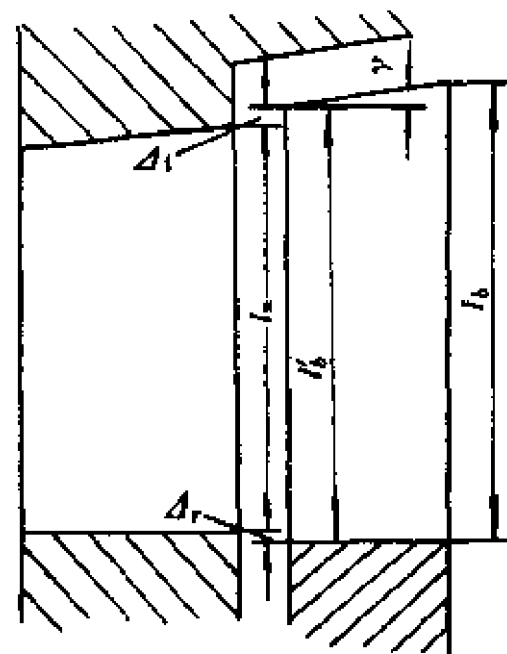
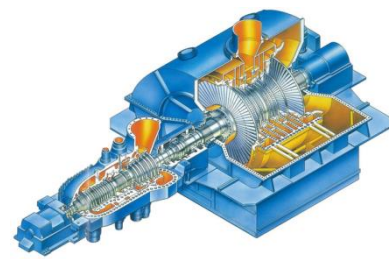


图 1.6.3 级的通流部分示意图



## 合理选择盖度

表 1.6.3 叶高与盖度之间的关系(mm)

喷嘴高度 $l$ ,	$<50$	61~90	91~150	$>150$
叶顶盖度 $\Delta$ ,	1.5	2	2~2.5	2.5~3.5
叶根盖度 $\Delta$ ,	0.5	1	1~1.5	1.5
直径之差 ( $d_b - d_n$ )	1	1	1	1~2

### $\Delta$ 对 $\eta_i$ 的影响

无径向汽封时,  $\Delta$ 对 $\eta_i$ 的影响大

有径向汽封时,  $\Delta$ 对 $\eta_i$ 的影响小,

当 $\Delta$ 达到一定值时,  $\Delta \uparrow$ ,  $\eta_i \downarrow$

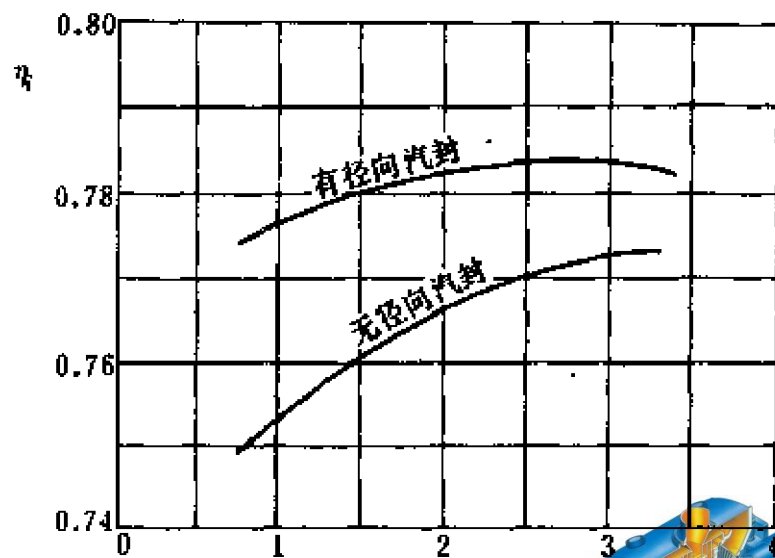
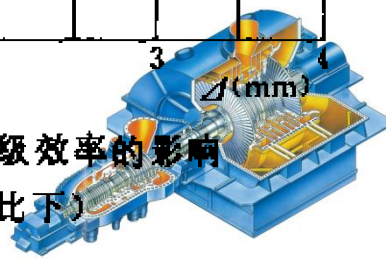


图 1.6.4 盖度 $\Delta$ 对级效率的影响  
(在一定速比下)



### 三、喷管叶栅和动叶栅尺寸的确定

喷管和动叶的尺寸计算主要是**确定各出口面积和叶片高度**

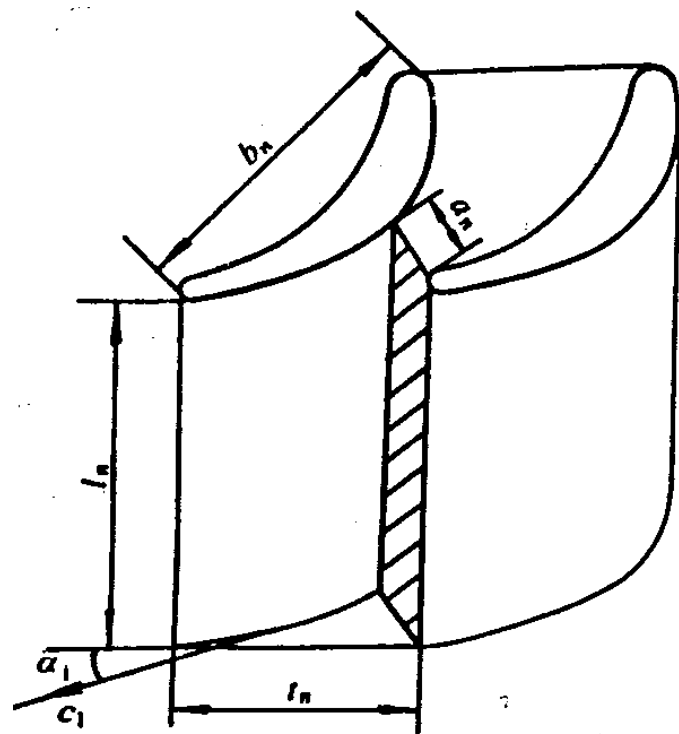
一般蒸汽流量 $G$ 、级前压力 $p_0$ 、温度 $t_0$ 、级后压力 $p_2$ 、汽轮机转速 $n$ 以及级的平均直径 $d_m$ 为已知。

#### (一) 渐缩喷管

##### 1. 喷管中为亚声速流动

$\varepsilon_n > \varepsilon_{cr}$ , 斜切部分无膨胀

喷管的出口截面积: 
$$A_n = \frac{G_n}{\mu_n \rho_{1t} c_{1t}}$$



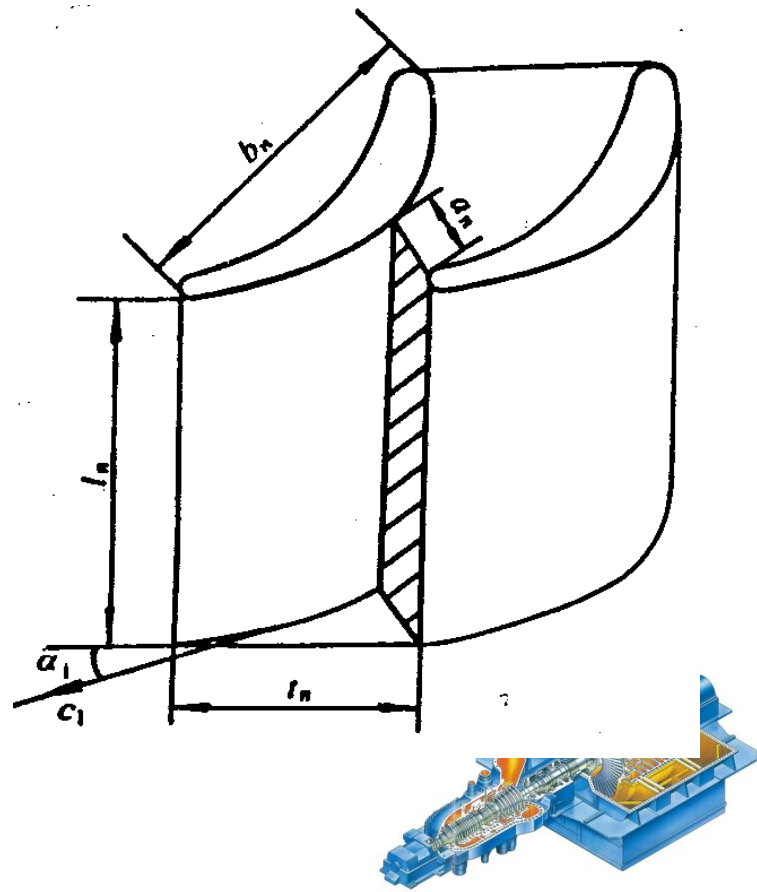
实际喷管的总出口面积是由 $z_n$ 个喷管喉部面积 $a_n l_n$ 所组成的，

而  $a_n = t_n \sin \alpha_1$

$$\Rightarrow A_n = z_n l_n t_n \sin \alpha_1$$

根据部分进汽程度的计算式  $e = \frac{z_n t_n}{\pi d_n}$

得 喷管出口高度  $l_n = \frac{A_n}{e \pi d_n \sin \alpha_1}$



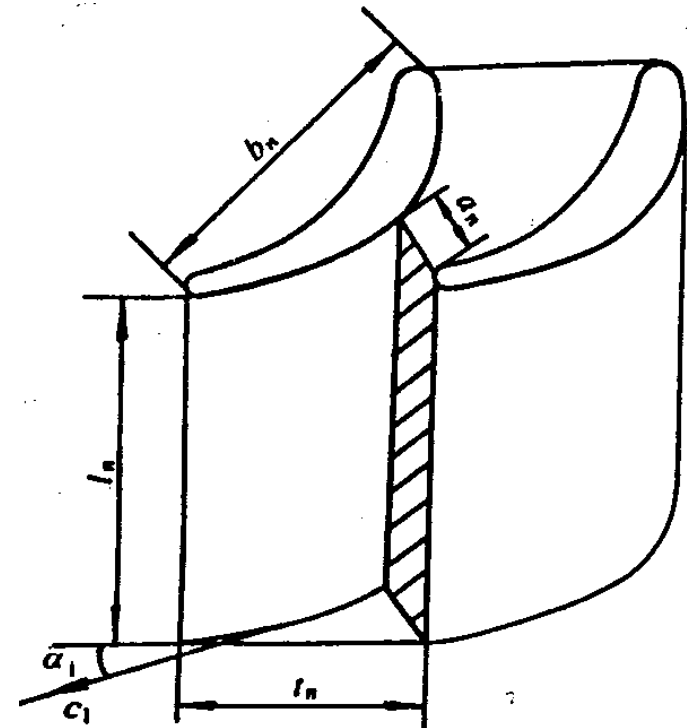
## 2. 喷管中为超声速流动

$\varepsilon_n < \varepsilon_{cr}$ ，喷管喉部为临界流动状态，超声速发生在斜切部分，汽流在斜切部分发生偏转，应计算偏转角

用下式计算 $A_n$ 、 $l_n$

$$A_n = \frac{G_n}{0.648 \sqrt{p_0^* \rho_0^*}}$$

$$l_n = \frac{A_n}{e \pi d_n \sin \alpha_1}$$



## (二) 缩放喷管

需要确定喉部截面和出口截面尺寸

出口截面积: 
$$A_n = \frac{G_n}{\mu_n \rho_{1t} c_{1t}}$$

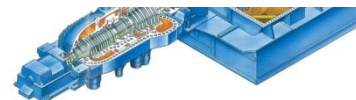
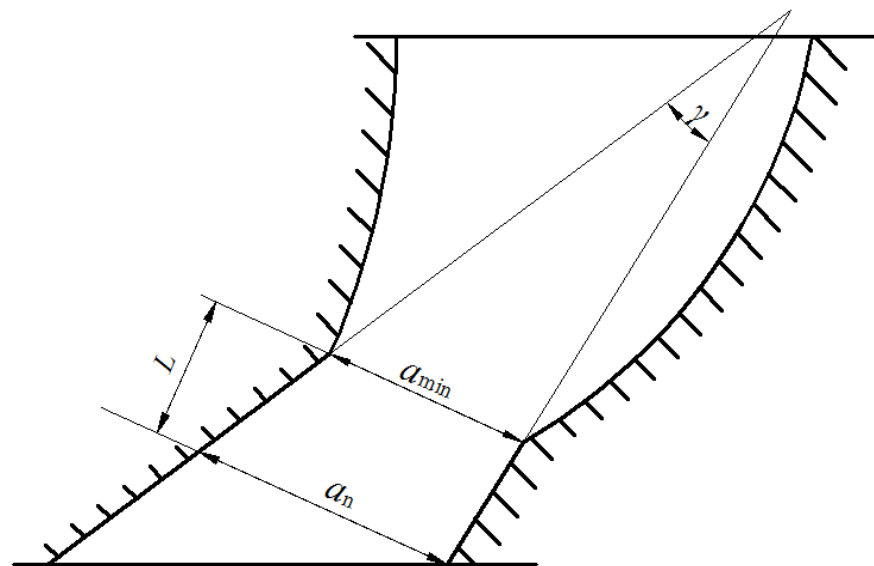
出口高度: 
$$l_n = \frac{A_n}{e \pi d_n \sin \alpha_1}$$

出口宽度: 
$$\begin{aligned} \because A_n &= z_n l_n a_n \\ \therefore a_n &= \frac{A_n}{z_n l_n} \end{aligned}$$

缩放喷管喉部为临界状态,

可按下式计算:

$$(A_n)_{cr} = \frac{G_n}{0.648 \sqrt{p_0^* \rho_0^*}} = z_n (l_n)_{cr} a_{\min}$$



### (三) 动叶栅

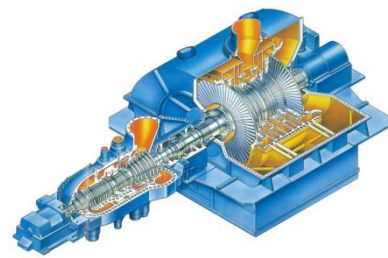
动叶栅汽流通道一般都是渐缩型的。

在斜切部分是否有补充膨胀，要通过动叶压力比  $\varepsilon_b$  来判别  
当  $\varepsilon_b < \varepsilon_{cr}$  时，斜切部分中有汽流膨胀，需要计算出口汽流偏转角。

汽流在动叶栅内多半是亚临界流动，可用下列公式分别计算动叶栅出口面积和出口高度：

$$A_b = \frac{G_b}{\mu_b \rho_{2t} w_{1t}} = e \pi d_b l_b \sin \beta_2^*$$

$$l_b = \frac{A_b}{e \pi d_b \sin \beta_2^*}$$



## 四、冲动级内反动度的选择

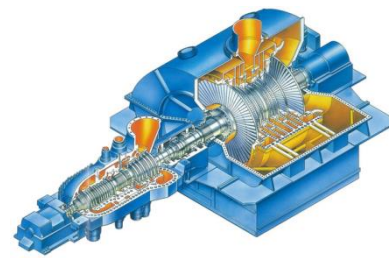
纯冲动级具有做功能力大的特点，但其效率较低。当适当地选用反动度之后，就可以达到提高效率的目的。

对一个汽轮机级存在一个使效率最高的反动度。

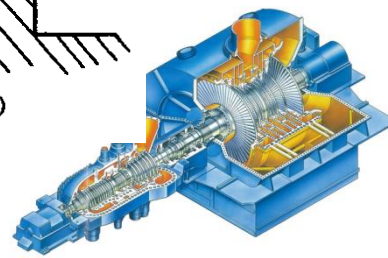
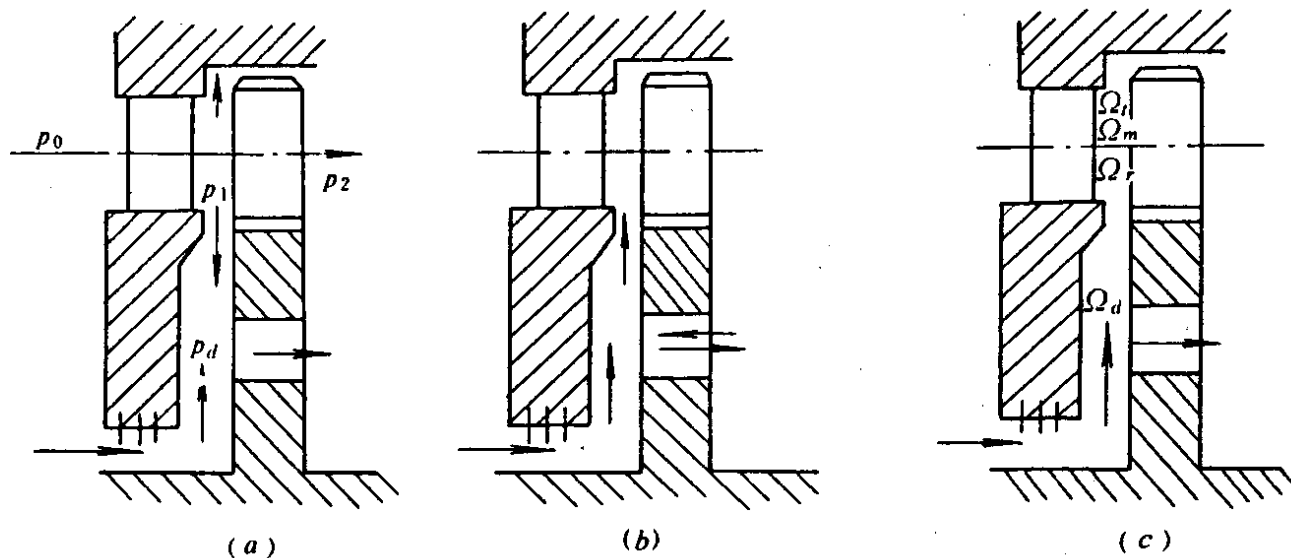
一般先选定一个合理的根部反动度  $\Omega_r$ ，然后根据等截面直叶片中反动度沿叶高的变化规律，计算出平均反动度  $\Omega_m$  和叶顶反动度  $\Omega_t$

$$\Omega_m = 1 - \left[ (1 - \Omega_r) \left( \frac{d_b - l_b}{d_b} \right) \right]$$

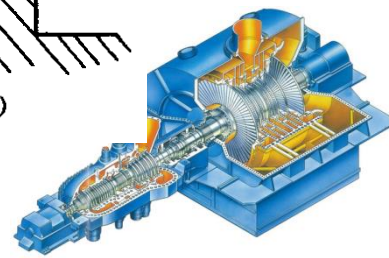
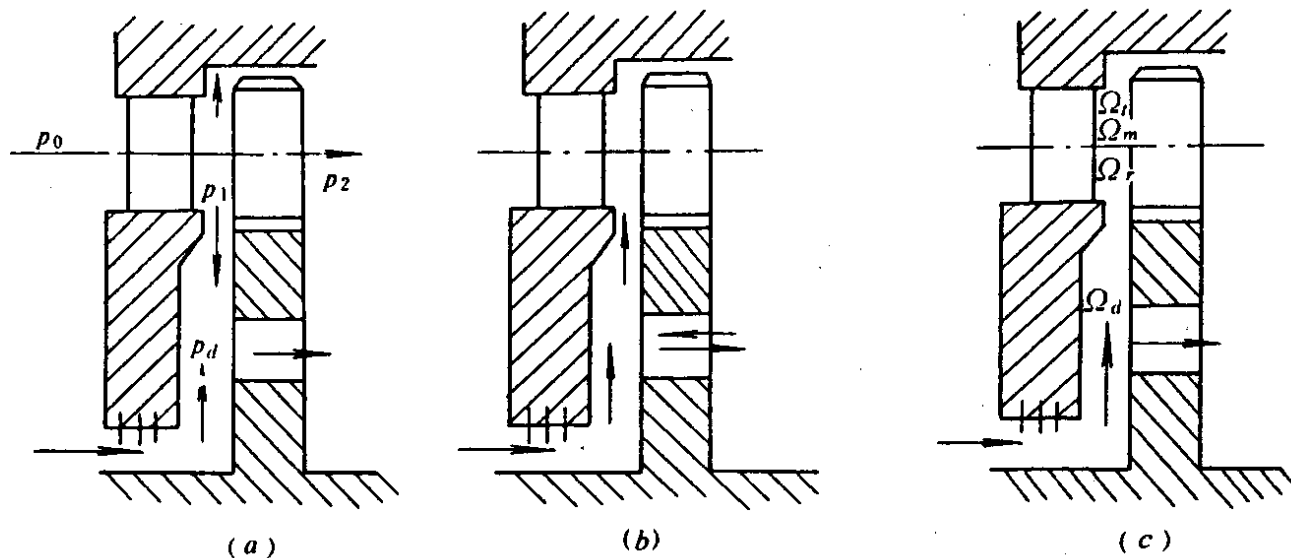
$$\Omega_t = 1 - \left[ (1 - \Omega_r) \left( \frac{d_b - l_b}{d_b + l_b} \right) \right]$$



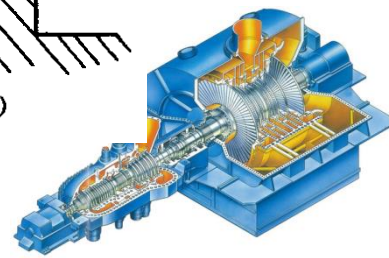
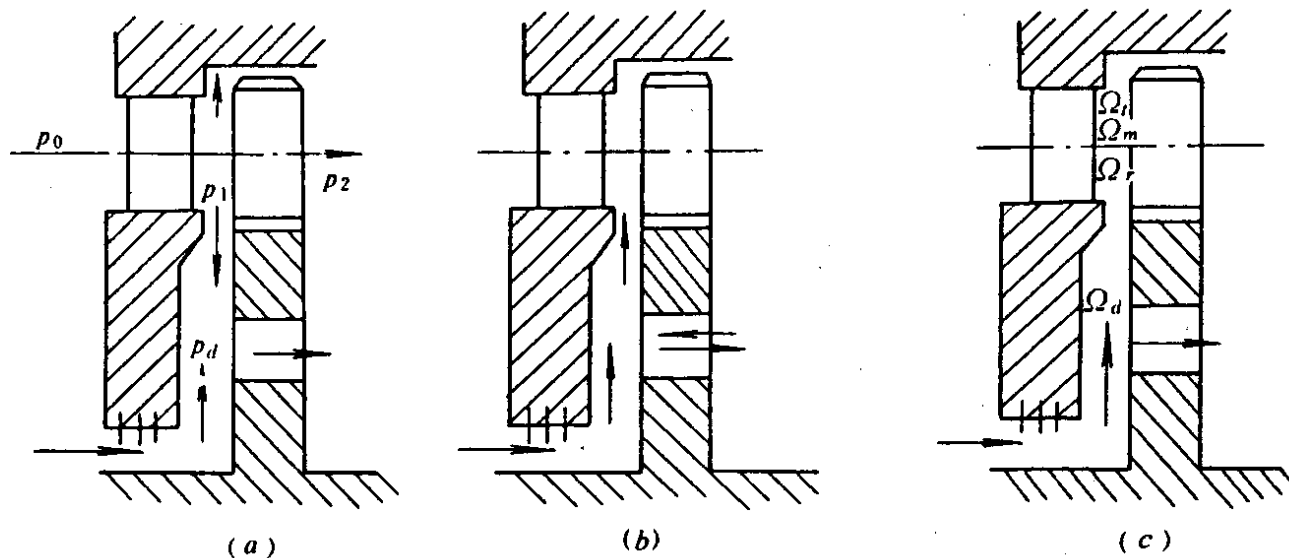
**1. 当根部反动度较大时：**在动叶通道根部进出口有较大的压力差，从喷管流出的部分气流交替进入动叶进口侧的轴向间隙处漏到级后。由于叶根漏气量不能做功，造成漏气损失。对等截面直叶片，由于反动度随着叶片高度逐渐增大，当叶根反动度较大时，将会使叶顶反动度更大，使顶部漏汽损失较大。



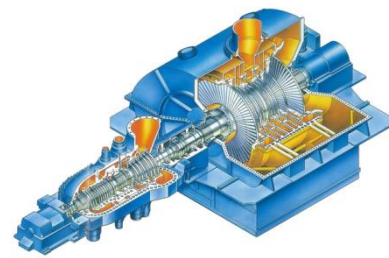
**2. 当根部反动度很小或为负时：**动叶根部进口压力略大于或低于出口压力，隔板汽封漏汽的一部分或全部就可能不经过平衡孔流到级后，而是通过动叶进口侧的轴向间隙流入汽道。当根部反动度为负时，一部分级后蒸汽会通过平衡孔流到叶轮前，然后经轴向间隙被吸入主流汽道。



3. 当根部反动度 $\Omega_r=0.03\sim 0.05$ ：能使叶根处不吸不漏，而隔板汽封处过来的蒸汽通过平衡孔漏至级后，根部不产生漏汽和吸汽的附加损失，提高了效率。



上述结论也适用于复速级及扭叶片级。对于部分进汽级，反动度可取得低一些，因为部分进汽级存在进汽段的蒸汽向两旁（不进汽段）漏逸的可能，反动度大，这种损失也相应增大。



## 五、汽轮机动静叶栅面积比的确定

合理的叶根反动度，可获得较高的级效率，根据反动度沿叶高的变化规律，可得到平均直径处的反动度 $\Omega_m$ 。

级反动度的实现，需要合理地选择动静叶型和动静面积比

$$A_b/A_n$$

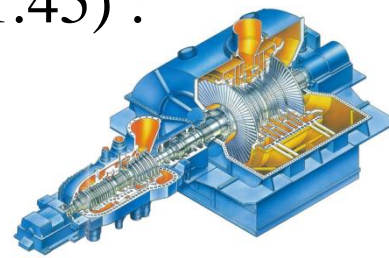
汽轮机常用的动静叶栅面积比 $f=A_b/A_n$ 的范围如下：

直叶片压力级： $\Omega_m=0.05\sim 0.20$ ， $f=1.85\sim 1.65$

扭叶片级： $\Omega_m=0.20\sim 0.40$ ， $f=1.7\sim 1.4$

复速级： $\Omega_m=0.03\sim 0.08$ ， $A_n:A_b:A_{gb}:A_b'=1:(1.6\sim 1.45):$

$(2.6\sim 2.35):(4\sim 3.2)$



# 作业与思考题：

- 1、已知机组某级级前压力  $p_0=1.85\text{MPa}$ ，温度  $t_0=340\text{ }^\circ\text{C}$ ；级后蒸汽压力为  $p_2=1.5\text{MPa}$ 。级的反动度  $\Omega_m=0.12$ 。喷嘴出汽角  $\alpha_1=11.1^\circ$ ，动叶出汽角  $\beta_2=18.3^\circ$ 。若级的速度比  $x_1=u/c_1=0.54$ ，喷嘴速度系数  $\varphi=0.97$ ，进入喷嘴的初速度  $c_0=52.3\text{m/s}$ ，试计算动叶出口相对速度  $w_2$  及绝对速度  $c_2$ ，并绘制动叶进出口速度三角形(标出速度、角的符号和数值)。
- 2、已知汽轮机的第三级前压力  $p_2=5.13\text{MPa}$ ，温度  $t_0=467.5\text{ }^\circ\text{C}$ ；级后蒸汽压力为  $p_4=4.37\text{MPa}$ 。进口初速动能  $\Delta h_{c0}=1.214\text{ kJ/kg}$ ，级的平均直径  $d_m=998.5\text{ mm}$ ，级的反动度为  $\Omega_m=0.0794$ 。喷嘴出汽角  $\alpha_1=10.78^\circ$ ，动叶出汽角  $\beta_2=17.9^\circ$ 。喷嘴和动叶的速度系数分别为  $\varphi=0.97$ 、 $\psi=0.935$ ，机组转速  $n=3000\text{r/m}$ 。试绘制动叶进出口速度三角形(标出速度、角的符号和数值)。

