

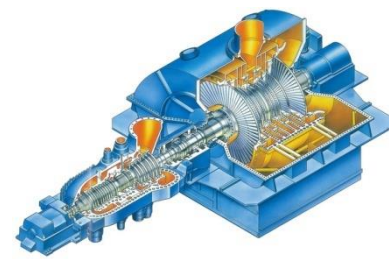
汽轮机原理

第一章 汽轮机级的工作原理

主讲教师：姜华伟

Email: jianghwwh@163.com

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

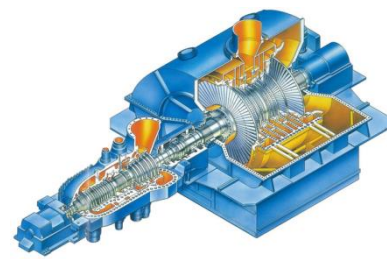
第三节 级的轮周效率与最佳速度比

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

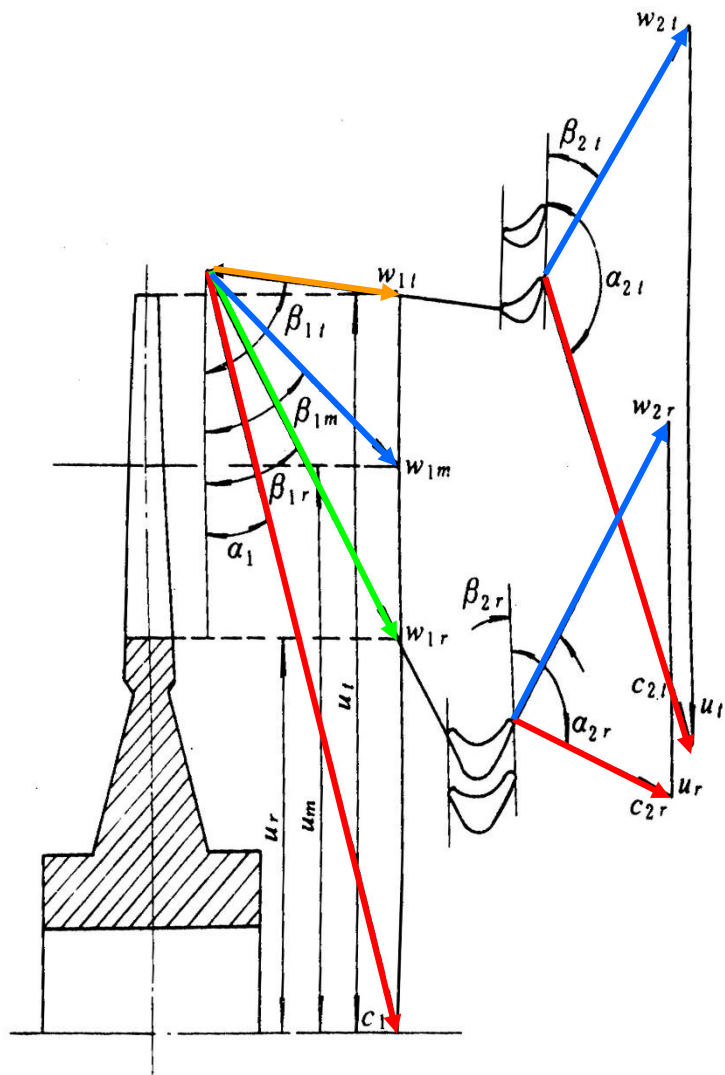
第七节 长叶片级



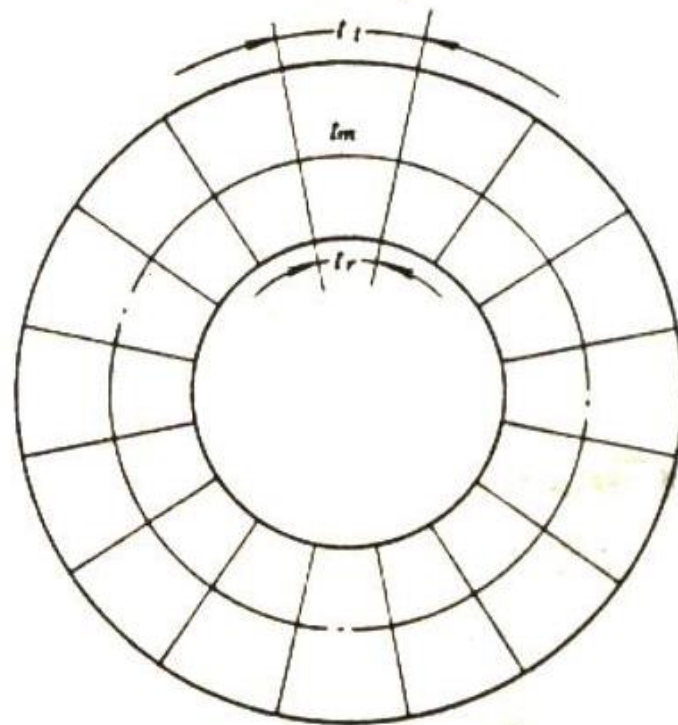
一. 概述

研究等截面直叶片时，认为汽流参数沿叶高和周向都不变，采用一元流动的方法进行分析。对于径高比较小，叶片很长的级，若仍以一元流理论为基础，不考虑汽流参数沿叶高的变化，设计成直叶片，就将产生多种附加损失，使效率下降。主要损失有：

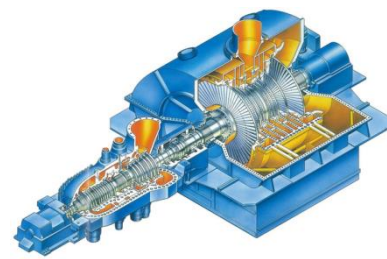
1. **沿叶高圆周速度不同所引起的损失**. 圆周速度沿叶高不一致，使叶顶和叶根处偏离最佳速比。在转速一定时，除平均直径处外，其他直径处动叶进口角偏离设计进口角，造成撞击损失；动叶出口绝对速度和出口角沿叶高变化造成流场扭曲，恶化下级的进汽状态。



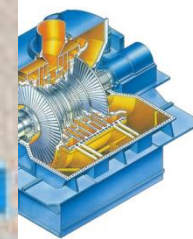
2. **沿叶高节距不同所引起的损失.** 节距沿叶高不一致 偏离最佳值, 使轮周效率下降。
3. **轴向间隙中汽流径向流动所引起的损失.** 汽流参数沿叶高变化 汽流的切向运动产生的离心力, 在动、静叶间隙中形成径向流动, 干扰主汽流造成损失。离心力产生的静压力使反动度沿高增大。
- 为了获得较高的级效率, 必须把长叶片设计成型线沿叶高变化的扭叶片, 以适应圆周速度和汽流参数沿叶高变化的规律。



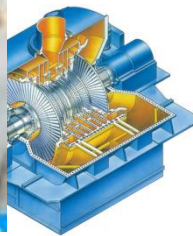
环形叶栅示意图



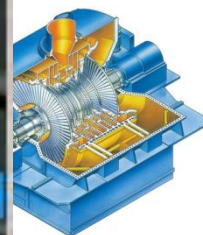
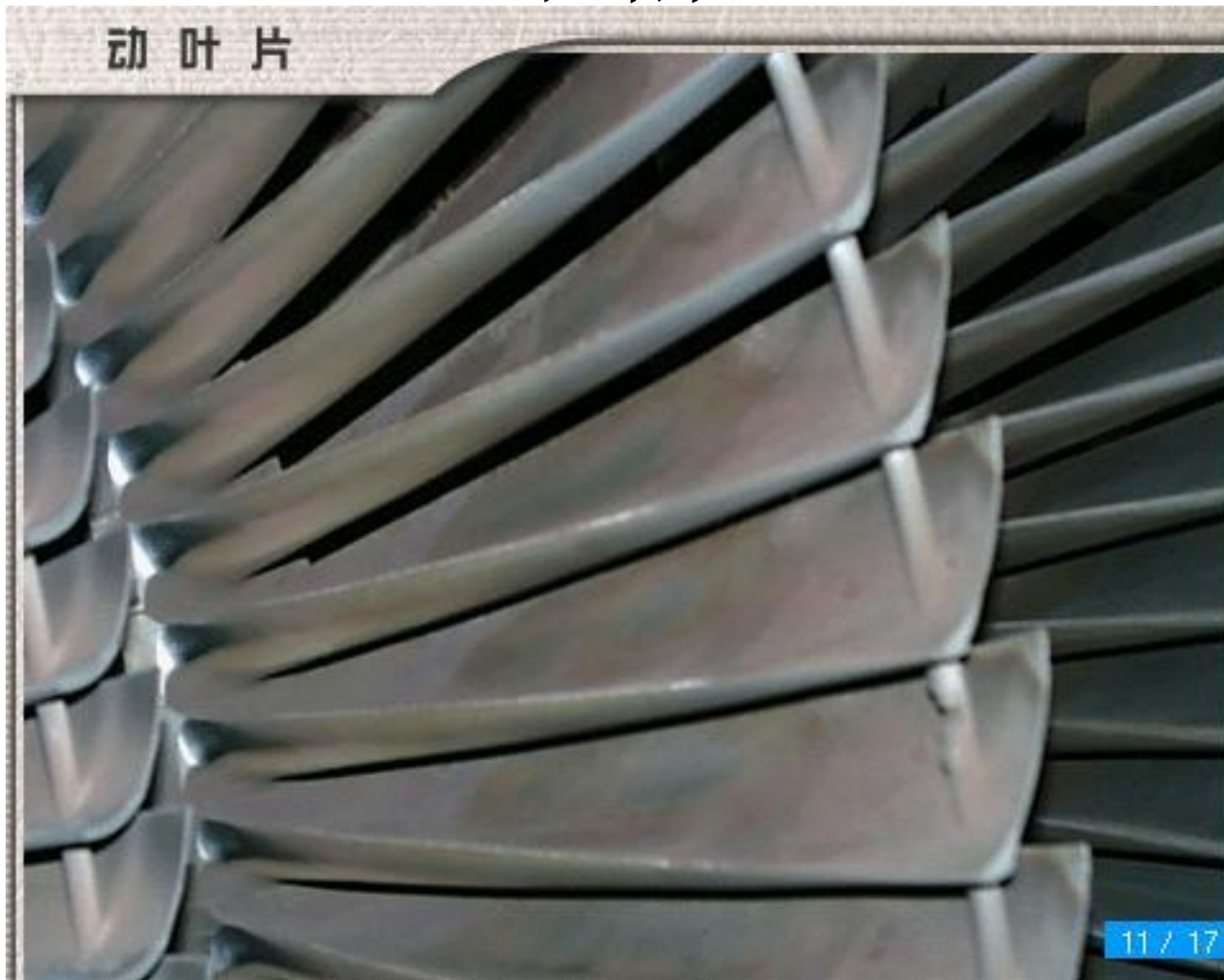
扭叶片



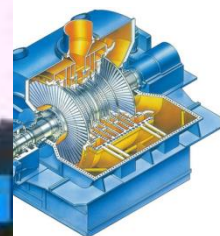
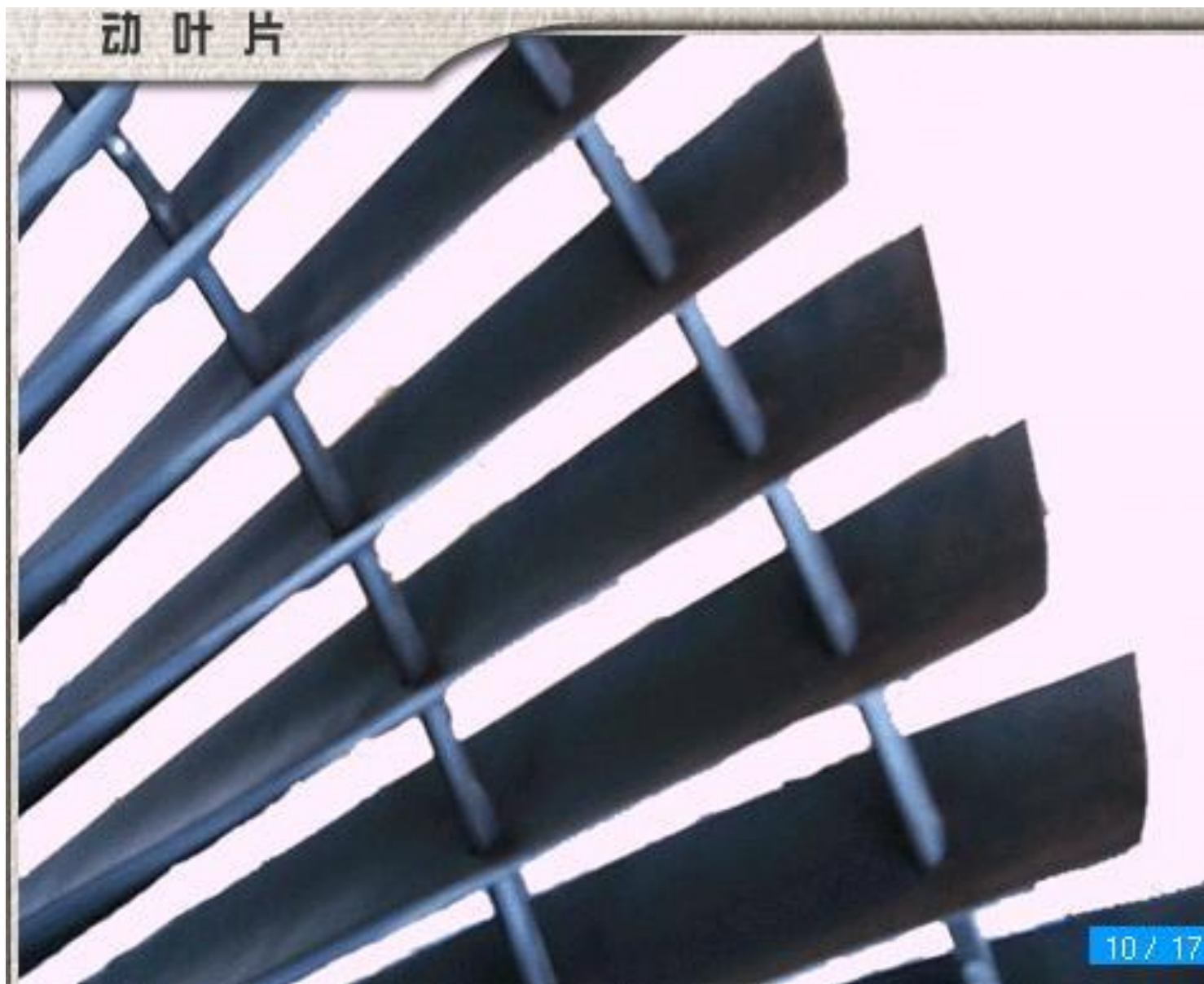
扭叶片



扭叶片



扭叶片



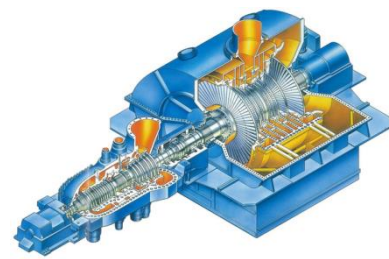
当 $\theta = 8^\circ$ 时，较好的扭叶片比直叶片提高效率 1.5%~2.5%；

当 $\theta = 6^\circ$ 时，提高效率 3%~4%；当 $\theta = 4^\circ$ 时，提高效率 7%~8%。

可见 θ 越小，采用扭叶片对级效率的提高越显著。

但扭叶片加工比较困难，成本较高，所以长叶片级中是否

采用扭叶片，需要进行技术经济比较才能确定。



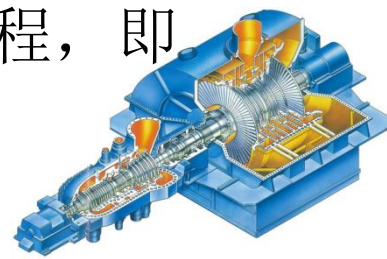
二. 扭叶片设计方法简介

目前扭叶片级设计普遍采用**径向平衡法**，即在级的轴向间隙中确定汽流的平衡条件，使之不产生径向流动，由此建立汽体流动的模型，从而得出不同轴向间隙中汽流参数沿叶高的变化规律。

径向平衡法 { 简单径向平衡法
完全径向平衡法

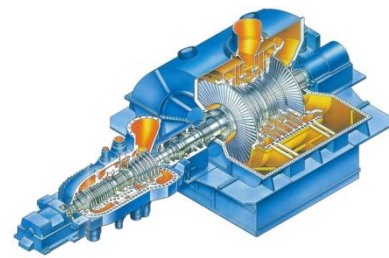
简单径向平衡法是假定汽流在级的轴向间隙中作与轴对称的圆柱面流动，这是**按二元流建立的气体流动模型**，克服了一元流理论中的缺陷，使级效率显著提高。

对于的长叶片，应采用**完全径向平衡流型**的特性方程，即**三元流动的方程式**进行设计。



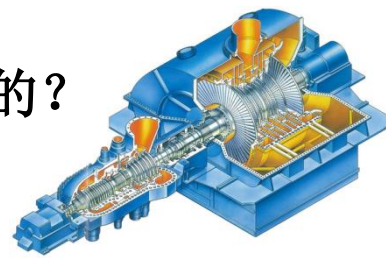
根据径向平衡理论，在某些特定条件下，可求得长叶片不同的扭曲规律或流型，常用的流型有：

- (1) 等环量流型
 - (2) 等 α_1 角流型
 - (3) 等密度流型
 - (4) 可控涡流型
- 基于简单径向平衡理论

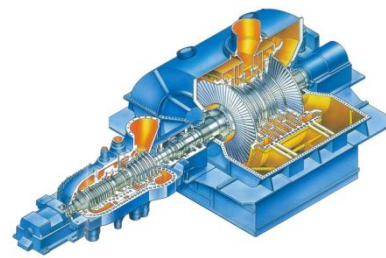


本章思考题

- (1) 按蒸汽的动能转换为转子机械能的过程不同，汽轮机级可分为哪两种？按级通流面积是否随负荷大小而变，汽轮机级可分为哪两种？
- (2) 简述蒸汽在轴流式汽轮机的冲动级、反动级和复速级内的能量转换特点，并比较它们的效率及做功能力。
- (3) 蒸汽在级的叶栅通道中的流动实际是有黏性、非连续、非定常的三元流动，为了突出主要矛盾，揭示蒸汽实际流动的主要规律，通常作那些简化假设？
- (4) 已知汽轮机某级喷管出口速度 $c_1=275\text{ m/s}$ ，动叶进、出口速度分别为 $w_1=124\text{ m/s}$ 、 $w_2=205\text{ m/s}$ ，喷管、动叶的速度系数分别为 $\varphi=0.97$ ， $\psi=0.94$ ，试计算该级的反动度。
- (5) 汽轮机级的轮周效率、相对内效率、内功率是如何定义的？



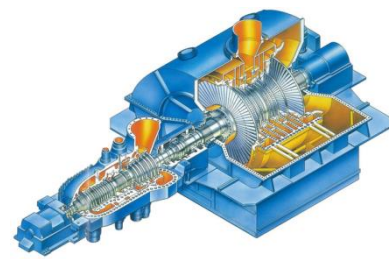
- (6) 为什么对于复速级喷管叶栅，出汽角选得比较大一些？
- (7) 当根部反动度较大时，根部反动度很小或为负时，根部反动度 $\Omega_r=0.03\sim 0.05$ 时，蒸汽在级内的流动情况如何？可能带来什么级内损失，对级效率的影响如何？
- (8) 级内损失由哪几种？分别说出每种损失的产生原因。
- (9) 为什么反动级的漏汽损失比冲动级大？
- (10) 对于径高比较小，叶片很长的级，若仍以一元流理论为基础，不考虑汽流参数沿叶高的变化，设计成直叶片，就将产生多种附加损失，使效率下降，其主要损失有哪几方面？



本章小结

重点：本章内容的重点是汽轮机的级将热能转换为机械能的工作原理。
以喷嘴叶栅和动叶栅的工作过程为基础，循序展开。

学习技巧：蒸汽在这两种叶栅中的流动规律是相似的。学习时，以动叶栅作为旋转的喷嘴叶栅来分析，可得到事半功倍的效果；



本章小结

内容：蒸汽流经汽轮机的级做出了**轮周功**，自然就联系到能量转换的**效率**问题，而效率又与级的性质(冲动级、带反动度的冲动级、反动级、复速级)有关，还与利用余速的程度有关，是根据**轮周效率**的概念、引出了各种情况下汽轮机级的特性——**最佳速比**的概念。

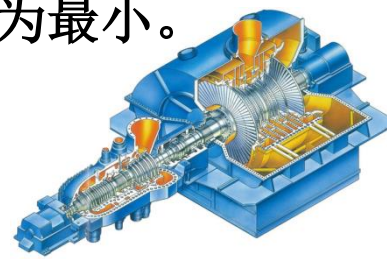
在最佳速比的条件下，根据流量连续性方程、便可以确定静、动叶栅的**高度**。其中，选择**反动度 Ω_m** 、**部分进汽度 e** 、**汽流进口角 α_1** 等是特别重要的。

(1)在选取 α_1 时，一般高压级的较小，低压级的较大。

(2)反动度 Ω_m 选择的依据，应使叶根部位不漏不吸，才能获得高的级效率。

(3)该反动度在实际中的实现，必须在结构上得到保证，于是使引出了动、静叶栅面积比的概念。

(4)部分进汽度 e 的选择，应使叶栅损失和部分进汽损失之和为最小。



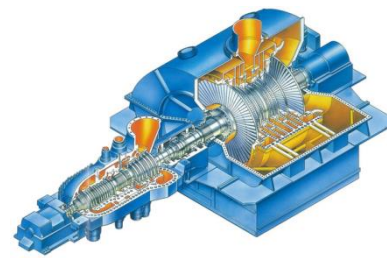
本章小结

由于在级内能量转换的最终形式是**内功率**，由此在轮周功率中还应扣除各项**级内损失**，它们多半是依据经验或半经验公式计算的，掌握其运算方法和主要影响因素即可。

级内各项损失都与**速比**有关，从 η_u - X_a 线中减去除喷嘴、动叶、余速损失以外的其他级内损失，即得 η_i - X_a 曲线，因此表示能量最终转换完善程度的指标为级的**内效率**，对应最高内效率的速比才是最终的**最佳速比**。它表示着汽轮机级做功的最终完善程度

决定级内效率的，首先为级的**热力因素**，但级的**结构因素**的影响也是十分重要的，如动静之间的间隙，在安装、检修或改进中应给予认真的调整，防止间隙过大，造成额外损失，使级效率降低：

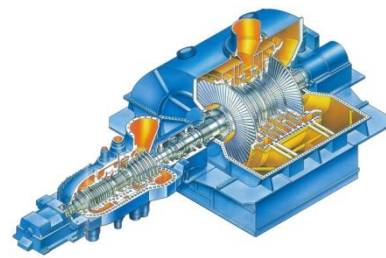
以上这些以一元流理论设计的观点，适用于径高比 $\theta > 8-12$ 的短叶片级。对于径高比 $\theta < 8-12$ 的较长叶片级，须用二元流的计算方法。



本章小结

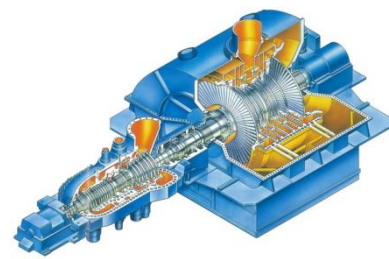
一、蒸汽在喷嘴中的流动

蒸汽在喷嘴中的流动是汽轮机级的原理的基础内容之一，其重点可以分为四个部分：喷嘴出口汽流速度的计算，临界压力和临界压力比。喷嘴截面积的变化规律，通过喷嘴的流量。学习本节的内容，建议以下列要点为序：



本章小结

- (1)喷嘴叶栅的结构和喷嘴通道的形状
- (2)喷嘴前后的压力；
- (3)喷嘴的进出口速度；
- (4)喷嘴能量损失系数；
- (5)喷嘴的压力比；
- (6)喷嘴通道截面积变化规律；
- (8)喷嘴中的流量；
- (9)蒸汽在喷嘴中热力过程 $h-s$ 图表示

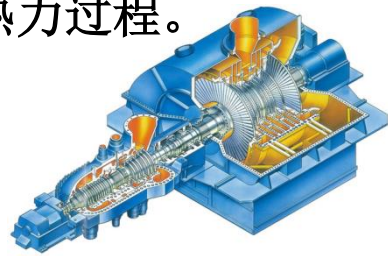


本章小结

二、蒸汽在动叶通道中的流动

蒸汽在动叶汽道中的流动是汽轮机级原理的基础内容之一。动叶通道可视为旋转的喷嘴，蒸汽在两者通道中的流动规律，均可类比：动叶通道在能量转换方面的进出口速度三角形和动叶的受力必须透彻理解。学习本节内容，建议以下列要点为序：

- (1)动叶栅通道的结构和形状；
- (2)动叶通道前后的压力；
- (3)动叶通道进出口速度；
- (4)动叶能量损失系数；
- (5)动叶通道中的流量；
- (6)蒸汽作用在动叶片上的力；
- (7)蒸汽所作的轮周功；
- (8)蒸汽流经动叶通道在 $h-s$ 图中的热力过程。



本章小结

三、级的轮周效率与最佳速比

本节内容研究蒸汽在级中能量转换的效率。蒸汽的热能在级中转换成轮周功是随级的性质不同而在量上有所差异，于是对应的轮周效率也就不同，轮周效率最高时的是最佳速比，它是级的工作原理中的一个非常重要的特性，标志着汽轮机的级做功的初步完善程度，对它的物理意义必须理解透彻。

1. 纯冲动级的轮周效率和最佳速比

(1) 不考虑余速利用；

(2) 考虑余速利用、

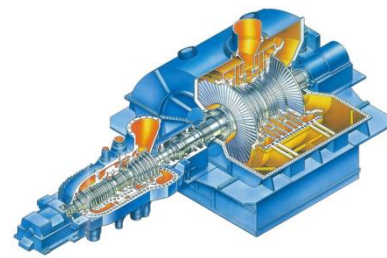
2. 带反动度的冲动级的轮周效率和最佳速比

(1) 不考虑余速利用；

(2) 考虑余速利用；

3. 反动级的轮周效率和最佳速比

4. 复速级的轮周效率和最佳速比



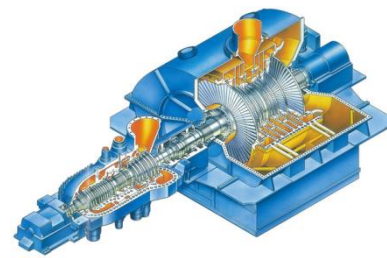
本章小结

学习本节的要点是：

(1)按照轮周效率的定义，应从物理意义和数学表达式上去理解最佳速比的意义。

(2)对于纯冲动级、反动级的最佳速比表达式，必须牢记。轮周功率和轮周效率的普遍表达式，不同性质级 η_u - X_a 的关系，必须理解且熟悉。

(3)蒸汽在级内完成的热力过程在h-s图中的表示。级的焓熵图不仅要标注清楚得体，而且能熟练掌握各种速度动能在焓熵图中对应的焓降。这是十分重要的。对理解和分析问题将大有帮助。



本章小结

四、级通流部分主要尺寸的确定

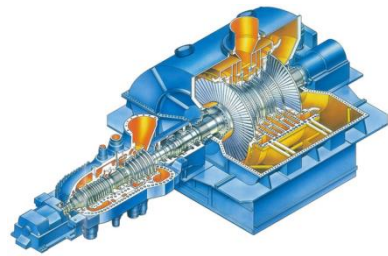
本节的主要内容是计算级通流部分的主要尺寸，即喷管叶栅和动叶栅的出口高度，需要注意以下几点：

(一)叶栅型式的选择

选择好的叶栅型式，是取得较高级效率的主要保证，选择时应该意动、静叶栅的配对要求。

(二)叶栅高度计算

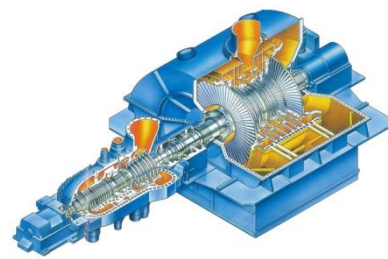
叶栅出口高度是按流量连续性方程来确定的，因为动叶栅即为旋转的喷管叶栅，因此它们的高度计算公式中的各项具有一一对应性。



本章小结

(三)叶高公式中几个主要参数的选择

(四)动、静叶栅面积比



本章小结

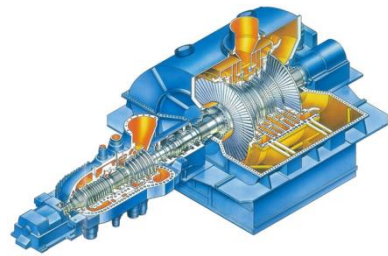
五、级内损失和级效率

本节主要内容有：汽轮机级内的各项损失、级内效率、影响级内效率的结构因素。

汽轮机级内的各项损失，除喷嘴损失、动叶损失、余速损失外，其余所有的级内损失之和用 $\Sigma\Delta h$ 表示，这在绘制和记住焓熵图时比较方便。

$\Sigma\Delta h$ 内的各项损失，目前尚不能在理论上做到精确的计算，因此多采用经验或半经验公式来计算。

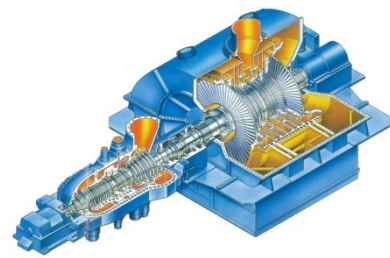
决定级内效率的，首先为级的热力因素、但级的结构因素的影响也是十分重要的。



复习思考题

一
简
答

- 1、轮周效率：
- 2、级内损失有哪些？
- 3、余速损失：
- 4、轮周功率：
- 5、鼓风损失：
- 6、蒸汽在级的叶栅通道中的流动是粘性可压缩流体的三元不稳定流动，为了突出主要矛盾，揭示流动的内在规律，通常作那些简化假设？
- 7、彭台门系数：



复习思考题

一
论
述

- 1、叶片的相对高度对叶高损失有什么样的影响？
- 2、喷嘴的流量系数当工质参数不同时，数值不一样，分析一下原因。
- 3、阐述端部损失产生的机理
- 4、根部反动度过大或过小对级效率有何种影响？说明并画图示意。
- 5、分析一下纯冲动级中，轮周效率与速比的关系（假设）

$$\mu_0 = \mu_1 = 0$$

