

电力生产基本知识丛书

汽轮机

西安电力学校编

6
电力工业出版社

电力生产基本知识丛书

汽 轮 机

西安电力学校编

*

电力工业出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 4.25印张 108千字

1981年12月第一版 1981年12月北京第一次印刷

印数00001—10120册 定价0.45元

书号15036·4254

内 容 提 要

本书简单介绍火力发电厂汽轮机及其辅助设备的结构和运行，全书共分六章。为了帮助读者熟悉各章的主要内容，章后均附有少量复习思考题。

本书供电力系统各级非技术干部了解汽轮机设备及其性能之用，也可供青工学习和参考。

出 版 说 明

为了加强干部培训工作，提高电力工业各级干部和管理人员的业务水平，电力工业部开办了局、厂长学习班，组织学习电力生产过程及生产技术管理知识；并委托有关单位和人员，在头几期学习班讲义的基础上，编写了这套《电力生产基本知识丛书》，交我社陆续出版，以满足广大干部学习的需要。

这套丛书共有《电力》、《热工学基础》、《锅炉》、《汽轮机》、《热力过程自动化》和《电厂化学》六个分册。

由于时间较紧，经验不足，书中不妥之处请读者批评指正。

电力工业出版社

一九七九年六月

目 录

出版说明

第一章 汽轮机的工作原理	1
第一节 力的冲动原理和反动原理	1
第二节 单级冲动式汽轮机	4
第三节 速度级汽轮机	11
第四节 多级汽轮机	12
第一章复习思考题	15
第二章 汽轮机的分类、型号以及汽轮发电机组的损失和效率	16
第一节 汽轮机的分类和型号	16
第二节 汽轮机的损失和效率	21
第三节 发电机和汽轮发电机组的损失和效率	26
第二章复习思考题	27
第三章 汽轮机的结构	28
第一节 汽缸	28
第二节 喷嘴与隔板	31
第三节 动叶片	34
第四节 转子	37
第五节 轴承	41
第六节 汽封	44
第七节 盘车装置	46
第三章复习思考题	46
第四章 汽轮机辅助设备及热力系统	47
第一节 凝汽设备及其系统	47
第二节 回热加热设备	56

第三节	除氧器	63
第四节	水泵	67
第五节	热力系统	75
第六节	热力系统范例	81
第四章复习思考题		83
第五章	汽轮机调节	84
第一节	调节系统的一般概念	84
第二节	汽轮机的保护装置	91
第三节	汽轮机的供油系统	94
第四节	中间再热式汽轮机的调节特点	96
第五节	功频电液调节简介	100
第五章复习思考题		104
第六章	汽轮机运行	105
第一节	汽轮机启动和主要零、部件的热应力及热变形	105
第二节	额定参数启动	112
第三节	滑参数启动	115
第四节	汽轮机停机	117
第五节	汽轮机的正常运行与维护	120
第六节	汽轮机的事故及处理	123
第六章复习思考题		126

第一章 汽轮机的工作原理

第一节 力的冲动原理和反动原理

汽轮机是一种利用蒸汽热能来做功的回转式机械。与蒸汽机、内燃机等其它原动机相比，它具有转速高、尺寸小、重量轻、功率大、效率高等优点，因此在动力工业、交通运输及国防等许多部门中得到了广泛的应用。在火力发电厂中（包括近代的原子能电站），几乎无例外地采用汽轮机来作为拖动发电机的原动机；在冶金、化工等部门中，也有不少用汽轮机来带动水泵和风机。此外很多大型舰船也是用汽轮机作为原动机的。所以，汽轮机在现代工业中占有相当重要的地位。

汽轮机的工作原理是基于蒸汽热能的应用。图 1-1 是一最简单的冲动式汽轮机简图，它主要由喷嘴 4、叶片 3、叶轮 2 和轴 1 组成。

具有一定压力和温度的蒸汽首先进入喷嘴 4 膨胀加速，将热能转变为动能，然后以很高的速度从喷嘴流出，冲击装在叶轮 2 上的动叶片 3，使叶轮 2 转动，最后通过轴 1 带动其它回转设备。叶轮之所以会转动，是因为装在叶轮上的叶片受到了蒸汽的冲动作用力的结果。这一冲动作用原理可用图 1-2 所示的汽流对小车的作用来说明。图中，由喷嘴喷射出来的高速汽流冲击在垂直于流动方向的小车上，对小车产生冲动力，推动小车向前移

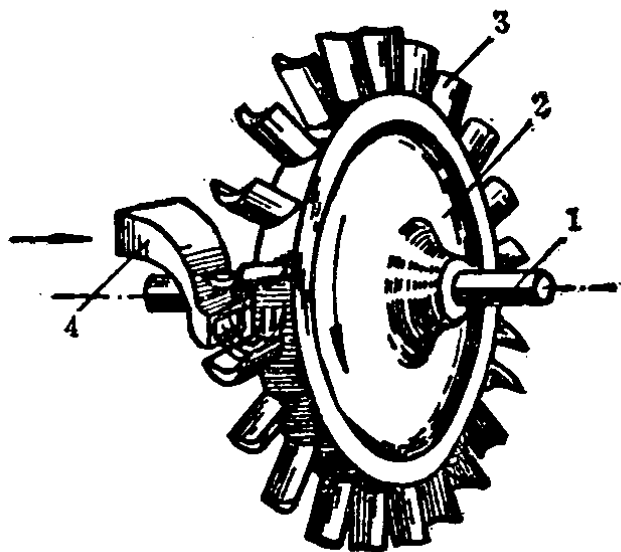


图 1-1 最简单的冲动式汽轮机简图
1—轴；2—叶轮；3—动叶片；4—喷嘴

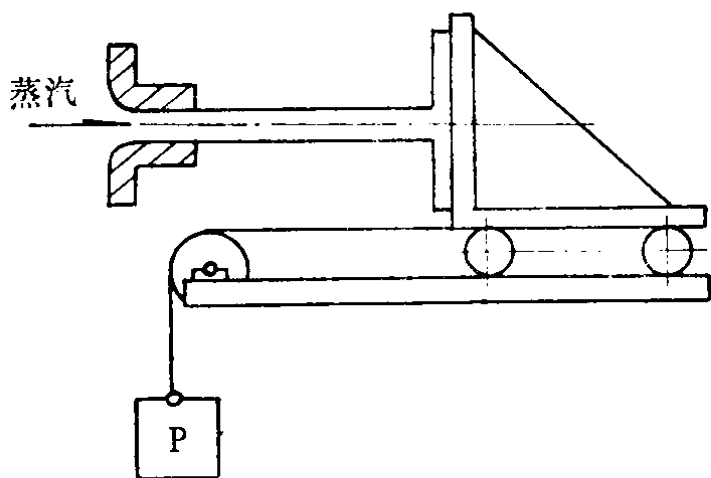


图 1-2 汽流对小车的作⽤

动。显然，推动⼩车移动的冲动力是由于汽流受到阻碍，速度发⽣改变时产⽣的。

⼩车受到的冲动力 P 可通过以下⽅法求得。根据作⽤⼒与反作⽤⼒数值相等⽽⽅向相反的原理，⾼速汽流对⼩车的冲动力 P 与⼩车给汽流的反作⽤⼒ P' ⼤⼩相等⽽⽅向相反，即 $P = -P'$ ；⽽ P' 可根据⽜顿第⼆定律（⼒ = 质量 $\times$ 加速度）由汽流运动情况来⽅定。

假设在 Δt 的时间内有 D 公⼑蒸汽喷射在⼩车上，则：

$$P' = ma = \frac{D}{g} \cdot \frac{c_2 - c_1}{\Delta t}, \quad (1-1)$$

式中 m —— Δt 时间内通过⼩车的蒸汽质量；

a ——汽流在⼩车内的平均加速度；

g ——重力加速度；

c_1, c_2 ——分别为汽流冲击⼩车前后的速度。

因为单位时间通过的蒸汽量称为蒸汽流量，即 $\frac{D}{\Delta t} = G$ ，故式（1-1）可写为：

$$P' = \frac{G}{g} (c_2 - c_1).$$

⼩车受到的冲动力 P 则为：

$$P = -P' = \frac{G}{g} (c_1 - c_2) . \quad (1-2)$$

式(1-2)说明, 小车受到的冲动力的大小与蒸汽流量 G 、蒸汽的喷射速度 c_1 和蒸汽离开小车时的速度 c_2 等因素有关。在这些因素中, 特别应指出的是 c_2 对冲动力的影响, 现举例说明如下。

在图1-2中, 小车受力面为平板形, 汽流冲击后向四面飞溅, 即高速汽流突然受阻, 故它在小车运动方向的速度 $c_2 = 0$, 如果汽流速度 c_1 为98.1米/秒, 蒸汽流量 G 为1公斤/秒, 则按式(1-2)求得冲动力应为:

$$P = \frac{1}{9.81} (98.1 - 0) = 10 (\text{公斤}).$$

如果像图1-3那样, 把小车受力面做成半圆形的弯曲面, 汽流冲动叶片后, 沿弯曲面改变流动方向, 最后以与 c_1 同样大小的速度 c_2 , 朝相反的方向流出, 即 $c_2 = -c_1 = -98.1$ 米/秒, 此时再接式(1-2)求得的冲动力变为:

$$P = \frac{1}{9.81} [98.1 - (-98.1)] = 20 (\text{公斤}).$$

显然, 小车的受力面由平板形状改为弯曲的半圆弧形后, 冲动力增加了一倍, 故实践中的叶片断面均为近似的圆弧形。

通常, 把这种高速汽流运动受阻, 速度发生变化时所产生的对阻碍物体(例如叶片)的作用力称为冲动力。按这种原理工作的汽轮机则称为冲动式汽轮机, 图1-1所示的汽轮机就是这种冲动式汽轮机。

在汽轮机中, 除了按上述冲动原理工作的冲动式汽轮机外, 还有一种反动式汽轮机,

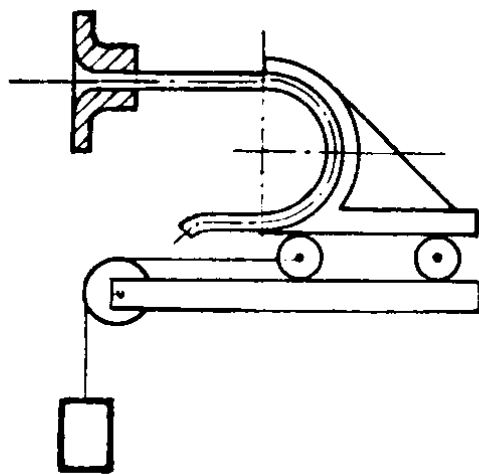


图 1-3 受力面改变后的冲动力

这种汽轮机是按力的反动作用原理工作的。力的反动作用原理可用图1-4来说明。图为 春节 期间人们燃放的一种花炮示意图，花

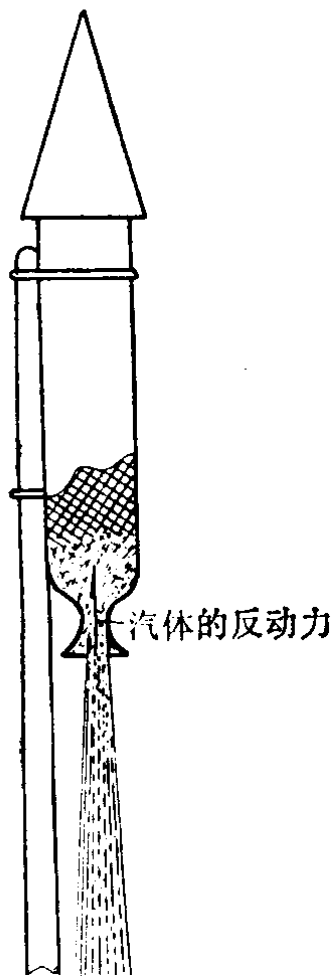


图 1-4 力的反动原理的应用——花炮示意图

炮内火药燃烧所产生的高压气体以很高的速度从其尾部喷出，花炮便向气流的相反的方向高速升起。花炮是靠什么力来运动的呢？我们知道，花炮内的火药在点燃前是静止不动的，点燃后它变成气体由花炮尾部高速喷出，这说明火药在花炮内部得到加速。气流之所以能够加速必定受到外力的作用，这个外力只能是花炮本身给予的。既然花炮给气流以作用力，那末气流必然给花炮一个大小相等、方向相反的反作用力，这个力称为反动作用力。花炮正是凭借这个反动作用力升上天空的。这就是力的反动作用原理。由上述过程可以看出，产生反动作用力的关键在于气流的加速，即施力物体速度的变化。如果像图 1-3 那样，汽流进入叶片的速度和离开叶片的速度相等，即汽流在叶片内并不加速的话（即汽流的压力、温度不降低），

就不存在汽流对叶片的反动作用力。因此，根据汽流是否在运动的叶片内加速，即是否在动叶片内放出热能，便很容易判断汽轮机是按冲动原理还是按反动原理工作的。

第二节 单级冲动式汽轮机

一、单级汽轮机的工作过程

单级汽轮机是最简单的一种实用汽轮机，如图 1-5 所示。喷嘴 4 装在汽缸 5 上，动叶片（工作叶片）3 装在叶轮 2 的轮缘

上，叶轮与轴紧配合，并用键固定。图中还绘出了喷嘴和叶片的流道形状和工作叶片的运动方向。

由图可以看出，蒸汽进入喷嘴后，在喷嘴中膨胀，其压力由 p_0 降低为 p_1 ，汽流速度由 c_0 增至 c_1 ，就是说蒸汽在喷嘴中膨胀加速，将热能转换为动能；此后此高速汽流进入动叶片，沿叶片流道改变流动方向，按冲动原理给动叶片作用力，使叶轮和轴旋转，输出机械功，就是说蒸汽冲动叶片做功，将动能转换为机械功。最后蒸汽以 c_2 的速度离开动叶片。由于大部分动能转换为机械功，故 c_2 比 c_1 大为降低。在这类汽轮机中，由于蒸汽在动叶片内不再膨胀，故动叶片的进出口压力相等，即 $p_1 = p_2$ 。

由上分析知，冲动式汽轮机的工作特点是：蒸汽只在喷嘴中膨胀加速，而在动叶片中不膨胀。

蒸汽最后离开叶片时，仍具有一定速度 c_2 ，称为余速。由于这部分动能未能在叶片内转换为机械功，形成损失，故称为余速损失，

以符号 Δh_{c_2} 表示。如不考虑蒸汽在喷嘴和叶片中的其他流动损失，则在单级冲动式汽轮机中，蒸汽膨胀的热力过程线就如图 1-6 所示。图中 i_0 、 i_1 分别表示蒸汽进入和离开喷嘴时的焓值， h_0 ($h_0 = i_0 - i_1$) 为蒸汽在喷嘴中的理想焓降。 i_2 为蒸汽离开汽轮机时的排汽焓值， Δh_{c_2} ($\Delta h_{c_2} = \frac{A}{2g} c_2^2 = i_2 - i_1$) 为余速损失。蒸

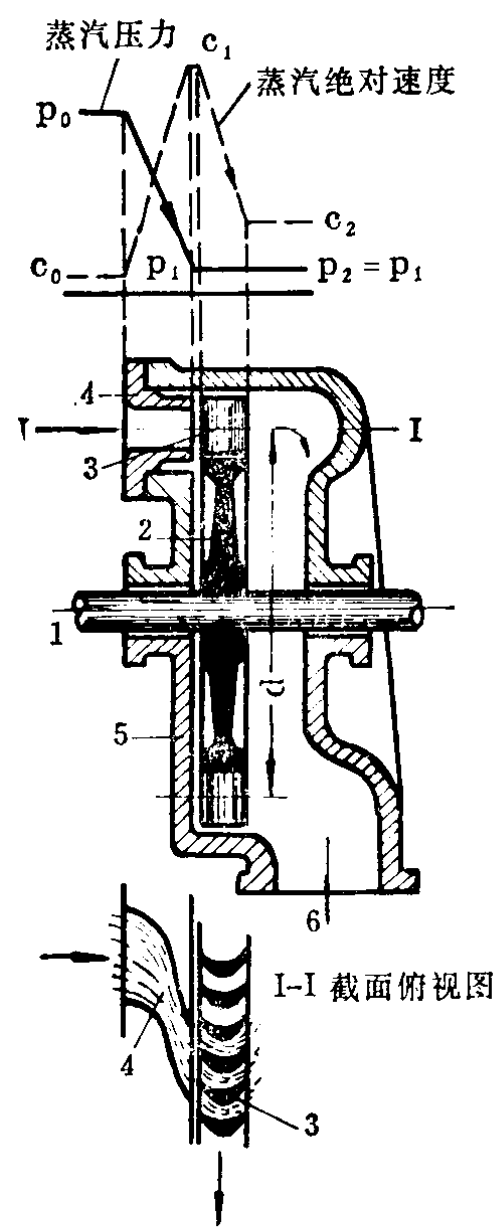


图 1-5 单级冲动式汽轮机
1—轴；2—叶轮；3—动叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—排汽

汽在单级冲动式汽轮机中，最终转变为机械功的有效焓降为：

$$h_i = h_0 - \Delta h_{c_2} = i_0 - i_2.$$

有效焓降 h_i 与蒸汽的理想焓降 h_0 之比，即为这台汽轮机的工作效率，通常称之为汽轮机的相对内效率（此处忽略了蒸汽在喷嘴和叶片内的其他流动损失），以 η_{oi} 表示，其计算式为：

$$\eta_{oi} = \frac{h_i}{h_0} \times 100\%.$$

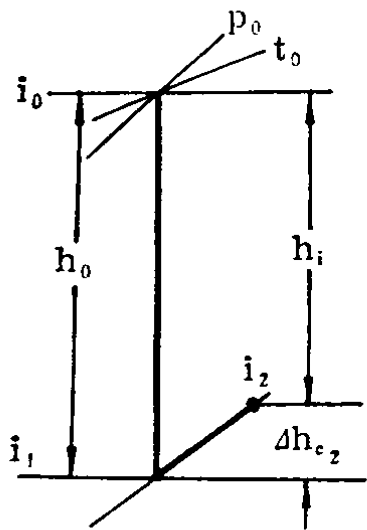


图 1-6 单级冲动式汽轮机蒸汽膨胀过程图

綜上述，单级冲动式汽轮机的整个工作过程分为两个部分：1）在喷嘴中，蒸汽的热能转换为动能，即蒸汽在喷嘴中膨胀加速，压力、温度降低，焓值减小，速度增加；2）在动叶片中，蒸汽的压力、温度及焓值不变，但速度减小，动能转换为机械能。显然，喷嘴和动叶片组成了汽轮机的基本做功单元，通常把一系列喷嘴和与其相应的动叶片所组成的这种最小做功单位称之为级。只有一级的汽轮机就叫做单级汽轮机。

二、蒸汽在喷嘴中的流动

由热工学知，蒸汽通过喷嘴所获得的喷射速度是由蒸汽在喷嘴中的焓降来确定的，即

$$c_1 = 91.5 \sqrt{i_0 - i_1} = 91.5 \sqrt{h_0}, \quad (1-3)$$

式中 c_1 ——喷嘴出口的蒸汽速度，米/秒；

h_0 ——蒸汽在喷嘴中的理想焓降，大卡/公斤；

i_0 、 i_1 ——分别为喷嘴前、后的蒸汽焓值，大卡/公斤。

当喷嘴前后的蒸汽状态确定之后，便可由 $i-s$ 图上查出 i_0 与 i_1 的数值，从而根据式（1-3）计算出蒸汽离开喷嘴时的喷射速度 c_1 。显然，蒸汽在喷嘴中的理想焓降越大，喷嘴出口的速度 c_1 也越高。但是，蒸汽所能达到的最高喷射速度还受到所用喷嘴的型式的影响。汽轮机所用的喷嘴有渐缩形和缩放形两种型式，见图1-

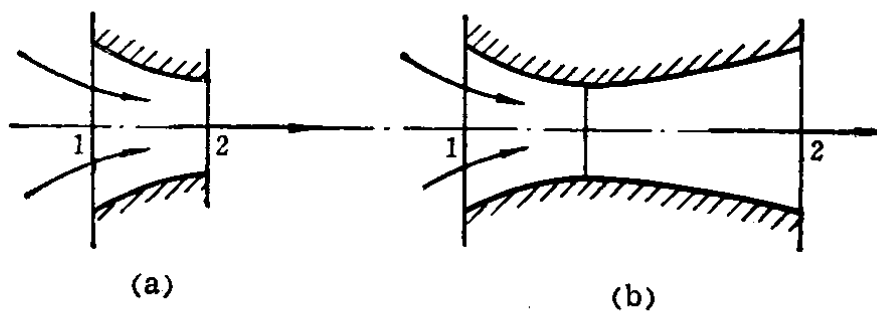


图 1-7 两种喷嘴型式
(a)渐缩形喷嘴；(b)缩放形喷嘴

7。渐缩形喷嘴的通流面积逐渐缩小，至出口流通面积最小，蒸汽在这种喷嘴中膨胀加速时最多只能达到音速，通常称此为临界速度。要想进一步提高蒸汽的喷射速度以获得超音速气流时，除了要提高蒸汽在喷嘴中的理想焓降外，还必须在喷嘴型式上给以保证，即采用通流面积先缩小而后

又扩大的缩放形喷嘴。需指出的是，缩放形喷嘴虽然能够获得超音速气流，但它有着效率低，制造工艺复杂等缺陷，因而在汽轮机中一般尽可能避免采用它。实际上，汽轮机所采用的喷嘴都是像图 1-8 所

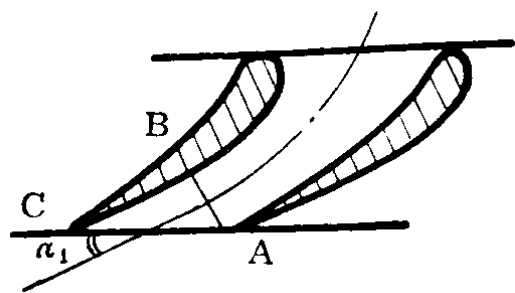


图 1-8 斜切喷嘴

表示的那样带斜切出口的，这是为了保证从喷嘴中出来的高速气流进入动叶片时有良好的方向，这种喷嘴称为斜切喷嘴。斜切喷嘴由于具有斜切部分 ABC，使蒸汽经最小截面 AB 后仍可在斜切部分继续膨胀，从而可使斜切喷嘴在一定程度上代替缩放喷嘴，获得超音速气流。

三、蒸汽在动叶片中的流动

1. 蒸汽进入、离开动叶片的方向

具有一定方向的高速气流离开喷嘴后即进入动叶片。由于喷嘴固定不动而动叶片却在不断旋转，因此蒸汽不能以离开喷嘴时所具有的方向进入动叶片。那么蒸汽以什么方向进入动叶片呢？这可用日常生活中的例子来说明。例如人在下雨的时候骑自行车

车，虽然雨点是垂直下落的，但雨点并非垂直落在骑车人身上，而是倾斜地打在骑车人前胸部，这是因为骑车人本身在以一定的速度运动，骑车人与雨点产生了相对运动的原因。当我们站在固定不动的地面（例如人行道）上来看雨点的运动和骑车人的运动时，我们只能看到两种运动速度，即雨点垂直下落的速度和骑车人前进的速度。在这种情况下，雨点垂直下落的速度称为绝对速度，以符号 c 表示；骑车人的速度称为牵连速度，以符号 u 表示。对于骑车人而言，还有一个雨点打在骑车人身上的速度，即雨点相对于骑车人的速度，称为相对速度，以符号 w 表示。理论和实践均证明了绝对速度 c 、相对速度 w 和牵连速度 u 的大小关系正好组成一个三角形，称为速度三角形，如图 1-9（a）所示。汽轮机中，蒸汽离开固定不动的喷嘴、进入不断旋转的动叶片时的情形，与上述雨天骑车的例子相同，即蒸汽离开喷嘴时的速度 c_1 称为绝对速度，叶片旋转的轮周速度（叶片作圆周运动时的线速度称为叶片的轮周速度）为 u ，则蒸汽进入动叶片的相对速度 w_1 可通过图 1-9（b）所示由 c_1 、 u 和 w_1 组成的速度三角形求出。该速度三角形称为动叶片进口速度三角形。同理，可作出动叶片出口速度三角形，如图 1-9（c）所示。

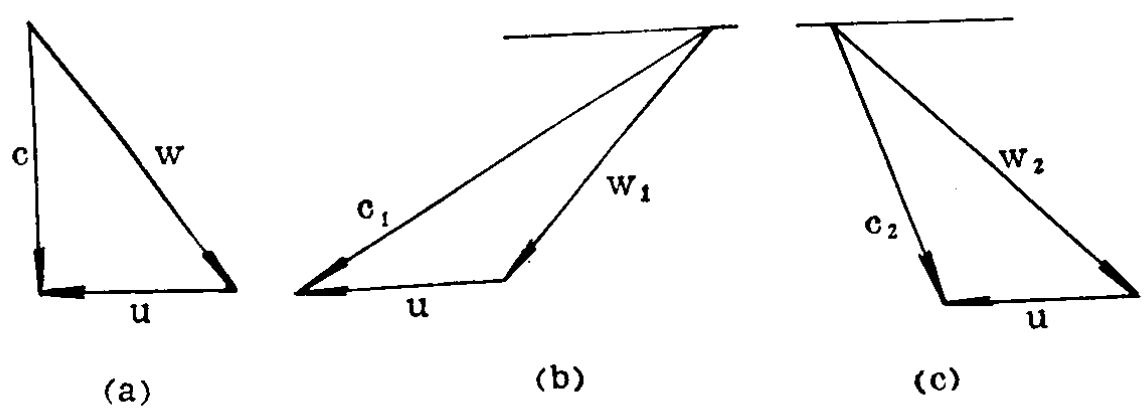


图 1-9 速度三角形

动叶片的轮周速度 u 可由下式求得：

$$u = \frac{\pi d_{\varphi} n}{60}, \tag{1-4}$$

式中 u ——叶片的轮周速度，米/秒；

$d_{\text{平}}$ ——叶轮的平均直径，米；
 n ——汽轮机的转速，转/分；
 π ——圆周率， $\pi = 3.14$ 。

2. 速度比

动叶片的轮周速度 u 与蒸汽离开喷嘴时的绝对速度 c_1 之比，称为级的速度比，简称速比，用符号 x_1 表示，即

$$x_1 = \frac{u}{c_1}. \quad (1-5)$$

速比是一项影响蒸汽在动叶片内能量转换的特性参数，速比的大小影响着级的效率。现以图1-10来说明轮周速度 u 与蒸汽喷射速度 c_1 的比值对蒸汽在动叶片内能量转换的影响。有两种极限情况：一种是 $x_1 = 0$ ，即叶轮的轮周速度 u 为零的情况，此时汽流产生的冲击力虽最大，但因叶片不动，因此蒸汽的动能没有被利用，即输出功为零；另一种情况是 $x_1 = 1$ ，即叶片的轮周速度 u 与蒸汽的喷射速度 c_1 相等，此时虽动叶片速度很大，但它与汽流保持相对静止，蒸汽对叶片不产生作用力，因此蒸汽动能也无法利用，蒸汽对叶片做功也为零。进一步的分析可证明，在 $x_1 = 0$ 至 $x_1 = 1$ 之间，有一个最佳速比 $x_{1\text{最佳}}$ 值，在此最佳速比下工作时，蒸汽在动叶片内能量转换的损失最小，即级的效率最高。对于图1-10所示情况，这个最佳速比值为0.5。实际上，由于汽轮机中的喷嘴都是图1-8所示的斜切喷嘴，其中心线并不与叶轮旋转平面平行，而是成一定倾斜角度 α_1 ，因而蒸汽也以 α_1 角的倾斜方向进入动叶片，这使得汽轮机冲动级的最佳速比值要比图1-10所示情况的最佳速比值小一些，但倾斜角 α_1 不大，一般为 $11^\circ \sim 20^\circ$ ，所以冲动级最佳速比减小得不多，一般约为0.48，仍非常接近0.5。其

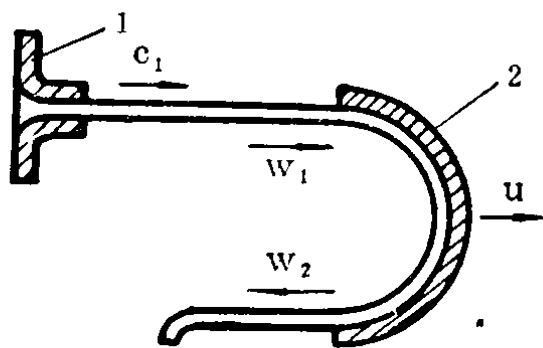


图 1-10 蒸汽的喷射速度和叶片运动速度的关系
 1—喷嘴；2—动叶片

具体值可以下式表示：

$$X_{1\text{最佳}} = \frac{1}{2} \cos \alpha_1. \quad (1-6)$$

四、单级汽轮机的功率

单级汽轮机的功率可由下式计算：

$$N = \frac{DH_0}{860} \eta_{oi} \eta_m \eta_g,$$

式中 N ——汽轮机的电功率，千瓦；

D ——进入汽轮机的蒸汽流量，公斤/小时；

H_0 ——蒸汽在汽轮机中的理想焓降，大卡/公斤；

η_{oi} ——汽轮机的相对内效率；

η_m ——汽轮机的机械效率；

η_g ——发电机效率。

在单级汽轮机中，由于它只有一个级，蒸汽的全部焓降都要在这一级的喷嘴中转变为动能。如果为增大单级汽轮机的功率而将焓降取得较大，由喷嘴出来的汽流速度 c_1 也将很大，为保证级效率必须使级的速比在最佳速比左右，为此叶片的轮周速度 u 必相应很大，这将使叶轮转动时的离心力大大增加，以至超出叶轮及动叶片强度所允许的范围，使动叶片损伤甚至脱落。例如，采用13公斤/厘米²、340℃的低参数蒸汽，当汽轮机排汽压力为0.085绝对大气压时，蒸汽的理想焓降 h_0 为212大卡/公斤，由式(1-3)求出此时蒸汽流出喷嘴的速度 c_1 为1340米/秒，再由式(1-5)计算出在保证轮周效率的情况下，叶轮的轮周速度 u 为648米/秒。在目前技术条件下，由于材料强度的限制，如此大的圆周速度是不可能实现的，即使采用优质合金钢材，一般也不能在圆周速度超过400米/秒的条件下工作。为此，单级汽轮机在生产实践中只宜于制成热降不大的小容量机组，在发电厂中常作为带动功率不大的辅助设备之用，如汽动油泵、汽动给水泵等。

为了充分利用较大的蒸汽焓降而又不至于降低效率和增大轮周速度，可采用速度分级（即速度级汽轮机）和压力分级（即多

级汽轮机) 的办法来解决, 这将在下面两节中分别予以介绍。

第三节 速度级汽轮机

速度级汽轮机就是把喷嘴的高速汽流所具有的动能分几次在动叶片中利用, 如图1-11所示。其结构为: 在叶轮 2 上装有两列动叶片 3 与 6, 并在两列动叶片之间装入一系列作导向用的导叶 7。从喷嘴出来的高速汽流首先进入第一列动叶片做功, 然后进入导叶改变流动方向后再进入第二列动叶片继续做功。这种在一个叶轮上装有两列动叶片的速度级汽轮机称为双列速度级汽轮机, 简称速度级汽轮机。显然, 由于蒸汽的动能分两次在动叶片中加以利用, 因此虽采用较大蒸汽焓降 (即蒸汽具有较高速率 c_1 的条件下), 速度级的余速损失比前述单级冲动式汽轮机小, 因而效率较单级汽轮机高。双列速度级也有自己的最佳速比, 其值可用下式表示:

$$x_{1\text{最佳}}^{\text{双}} = \frac{1}{4} \cos \alpha_1. \quad (1-7)$$

比较式 (1-6) 与 (1-7) 可以看出, 速度级的最佳速比较冲动级的最佳速比小一半, 就是说在同一 c_1 条件下, 速度级汽轮机叶轮的轮周速度 u 比单级冲动式汽轮机的轮周速度减小一半, 或者说在相同的轮周速度条件下, 速度级汽轮机喷嘴出口速度可为单级冲动式汽轮机的两倍, 它所能利用的焓降可为单级冲动式汽轮机的四倍[由式 (1-3) 知, c_1 和 h_0 的平方根成正比], 这是速

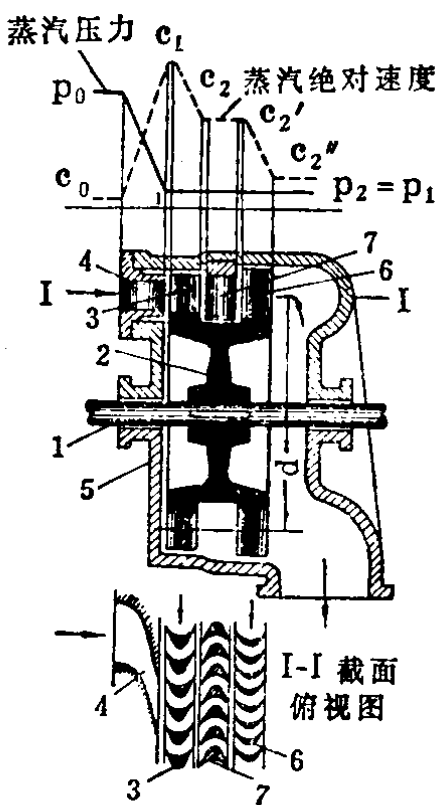


图 1-11 双列速度级汽轮机
1—轴; 2—叶轮; 3—第一列动叶片; 4—喷嘴; 5—汽缸; 6—第二列动叶片; 7—导叶