



职工中等专业学校教材

南京电力专科学校 俞国泰 主编

汽轮机设备及运行



内 容 提 要

本书是电力职工中专的教材，系统地结合职工中专的特点，讲授汽轮机的原理和结构。原理部分有汽轮机的工作原理、调节系统和保护系统的工作原理、汽轮机的设计工况和变工况；结构部分有汽轮机的本体结构、凝汽设备、供热式和背压式汽轮机等。本书还留有一定的篇幅介绍汽轮机的运行。

本书主要给电力部门在职工工作为学习汽轮机课程的教材，也可作为自学参考书。

职工中等专业学校教材

汽轮机设备及运行

南京电力专科学校 俞国泰 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

北京市房山区十渡印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 23印张 565千字 2插页

1989年12月第一版 1989年12月北京第一次印刷

印数0001—6200册

ISBN 7-120-00988-5/TK·160

定价5.70元

前 言

为了提高水利电力系统职工的技术水平，使水利电力职工中等专业学校的教学工作走向正规化、系统化，我司统一组织编写了这套水利电力职工中专教材。这套教材是根据我司1985年制定的《水利电力系统成人中专教学计划及教学大纲》，由水利电力系统内各职工中等专业和普通中专学校中有经验的教师分工编写的。在编写过程中，力求在保证理论的系统性、完整性的同时，密切联系生产实际、深入浅出，突出职工教育的特点。

水利电力职工中专教材分基础课及专业课两大部分，包括发电厂及电力系统、输配电工程、用电管理、电厂热动力装置、电厂热工测量及自动化、水工建筑、水电工程施工、水电厂动力设备、陆地水文、工业与民用建筑及经济管理等11个专业，共约120种教材。

《汽轮机设备及运行》系热动专业的教材之一，全书共分七章。其中，第一、二章由长春电力学校王春同志编写；第三、四、七章由南京电力专科学校俞国泰同志编写；第五、六章由哈尔滨电力学校郝立达同志编写。全书由俞国泰同志主编，由沈阳电力专科学校赵义学同志主审。

由于编写时间仓促，教材中错误难免，恳请读者批评指出。

水利电力部教育司

一九八九年六月

目 录

前 言

第一章 汽轮机的工作原理	1
第一节 汽轮机的一般概念	1
第二节 蒸汽在喷嘴中的流动	11
第三节 蒸汽在叶片中的能量转换	27
第四节 级的损失与最佳速比	35
第五节 多级汽轮机	62
第二章 汽轮机的变工况	87
第一节 喷嘴的变工况	87
第二节 汽轮机级的变工况	95
第三节 多级汽轮机的变工况	99
第四节 汽轮机的调节方式和调节级的变工况	106
第五节 变工况下汽轮机的热力核算	113
第六节 蒸汽参数变化对汽轮机工作的影响	135
第三章 汽轮机的调节系统和保护装置	139
第一节 概述	139
第二节 感受机构及其静态特性	144
第三节 放大机构及其静态特性	150
第四节 反馈机构	162
第五节 执行机构及其静态特性	165
第六节 调节系统的静态特性	171
第七节 同步器	176
第八节 调节系统的动态特性	181
第九节 中间再热式机组的调节特点	187
第十节 汽轮机的保护装置	190
第四章 汽轮机结构及部分校正技术	198
第一节 汽轮机本体概述	198
第二节 汽缸的结构及其热膨胀	199
第三节 隔板及其支承	205
第四节 轴承	209
第五节 叶片的结构及其振动	218
第六节 转子的结构及其动平衡	228
第七节 联轴器和对轮校中心	248
第八节 汽封装置	256

第九节	盘车装置	259
第十节	国产典型机组的结构介绍	261
第五章	供热汽轮机	264
第一节	背压式汽轮机	264
第二节	一次可调节抽汽式汽轮机	267
第三节	二次可调节抽汽式汽轮机	273
第四节	调节抽汽式汽轮机调节系统简介	278
第六章	凝汽设备	284
第一节	凝汽设备的任务及组成	284
第二节	凝汽设备的热力计算和热力特性	304
第三节	凝汽器的运行	316
第七章	汽轮机的运行	321
第一节	汽缸和转子的热膨胀、热应力、热变形	321
第二节	母管制机组的冷态启动	329
第三节	单元制机组的冷态启动	336
第四节	热态启动	340
第五节	停机	343
第六节	机组的正常维护	348
第七节	汽轮机典型事故及其预防措施	354

第一章 汽轮机的工作原理

汽轮机是利用蒸汽的热能转变成旋转机械能的一种原动机。它在工作时，先将蒸汽的热能转变成动能，然后再将蒸汽的动能转变成旋转机械能。因此，汽轮机的工作原理主要是阐述这些能量转变的条件、限度和数量关系，以便实现最佳的能量转换。

在全面论述汽轮机的工作原理以前，必须对汽轮机的分类、型号等作一般介绍，为深入叙述其工作原理打下基础。

第一节 汽轮机的一般概念

一、冲动式和反动式汽轮机的基本工作原理

在汽轮机中，蒸汽的热能转变成旋转的机械能，一般可以通过两种不同的作用原理来实现：一种是冲动作用原理；另一种是反动作用原理。

(一) 冲动作用原理

由力学已知，当一运动物体碰到另一个静止的或运动速度较低的物体时，就会受到阻碍而改变其速度，同时给阻碍它的物体一个作用力，这个作用力称为冲动力。冲动力的大小取决于运动物体的质量和速度变化。质量越大冲动力越大，速度变化越大，冲动力也越大。受到冲动力作用的物体产生了速度变化，该运动物体就做了机械功。

图1-1是最简单的单级汽轮机结构图。蒸汽在喷嘴4中产生膨胀、压力降低、速度增加，蒸汽的热能转变成蒸汽的动能。高速汽流流经叶片3时，由于汽流方向改变，产生了对叶片的冲动力，推动叶轮2旋转做功，将蒸汽的动能转变成轴旋转的机械能，这种利用冲动力做功的原理，称为冲动作用原理。

叶片并不是正规的半圆弧形，为了保证喷嘴喷出来的汽流能切向进入叶片，汽流与叶轮运动方向，总是保持一定的夹角。如图1-2所示，作用在叶片上的冲动力的合力 \bar{F}_{im} 必然与叶

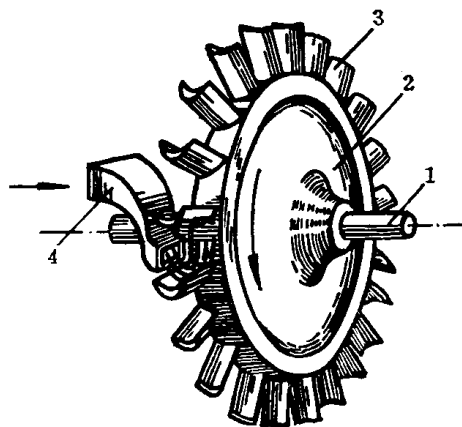


图 1-1 冲动式汽轮机简图

1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷嘴

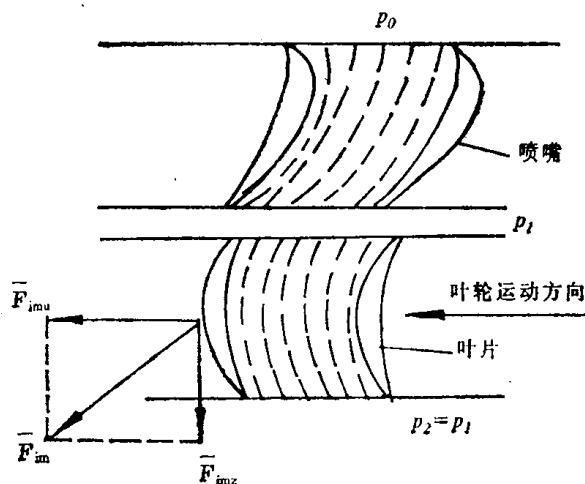


图 1-2 蒸汽对冲动式叶片的冲动力

轮运动方向有一夹角。冲动力 \bar{F}_{im} 可分解为轴向分力 \bar{F}_{imz} 力和圆周分力 \bar{F}_{imu} 、 \bar{F}_{imn} 作用在叶片上，使叶片向左运动带动叶轮旋转做机械功。轴向分力 \bar{F}_{imz} 对叶片只产生轴向推力而不做功。

(二) 反动作用原理

由牛顿第三定律可知，一物体对另一物体施加一作用力时，这个物体上必然要受到与其作用力大小相等、方向相反的反作用力。在该力作用下，另一物体产生运动或加速。这个反作用力称之为反动力。利用反动力做功的原理，称为反动作用原理。

在反动式汽轮机中，蒸汽不仅在喷嘴中产生膨胀，压力降低，速度增加，高速气流对叶片产生一个冲动力；而且蒸汽经叶片时也产生膨胀，使蒸汽在叶片中加速流出，对叶片还产生一个反作用力，即反动力，推动叶片旋转做功。这就是反动式汽轮机反动作用原理。它是使叶片在蒸汽冲击力和反动力的共同作用下旋转做功的。如图 1-3 所示，冲动力 \bar{F}_{im} 和反动力 \bar{F}_{re} 的合力为 \bar{F} 作用在叶轮上。同样可将合力 \bar{F} 分解为圆周分力 \bar{F}_u 及轴向分力 \bar{F}_z 。

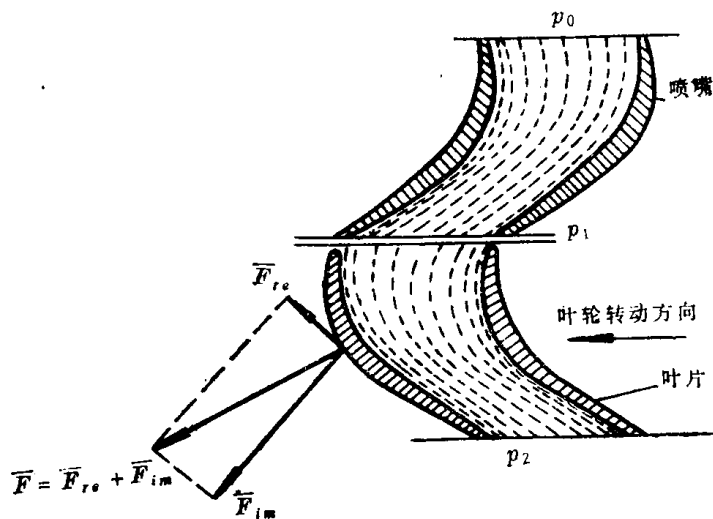


图 1-3 蒸汽对反动式汽轮机叶片的作用力

(三) 汽轮机的级及反动度

在汽轮机中完成蒸汽热能转换为机械功的基本单元称为汽轮机的级。它主要由喷嘴（静叶栅）和它后面的叶片（动叶栅）组成。喷嘴装在汽缸的隔板体上，叶片装在叶轮上，随叶轮一起转动。

在汽轮机中常用级的反动度来衡量蒸汽在叶片中膨胀程度的大小。蒸汽在叶片中的理想焓降 Δh_b 与级的滞止理想焓降 Δh_i^* 之比称为级的反动度。所谓级的滞止理想焓降，就是假想气流被等熵滞止到初速度等于零的状态参数（称为滞止参数）时，蒸汽以此作为初参数在级内等熵膨胀所具有的焓降，称为级的滞止理想焓降。级的反动度用 ρ 表示。

$$\rho = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_i^*} \approx \frac{\Delta h_b}{\Delta h_i^* + \Delta h_b} \quad (1-1)$$

式中 Δh_i^* ——级的滞止理想焓降， $\Delta h_i^* = h_0^* - h_{2i}'$ ；

Δh_b ——蒸汽在叶片内的理想焓降， $\Delta h_b = h_1 - h_{2i}$ ；

Δh_0^* ——蒸汽在喷嘴内的滞止理想焓降。

由反动度的定义可知，当知道了 Δh_i^* 和 ρ 就可计算出相应的 Δh_n^* 和 Δh_b ，即：

$$\Delta h_n^* = (1 - \rho) \Delta h_i^* \quad (1-2)$$

$$\Delta h_b = \rho \cdot \Delta h_i^* \quad (1-3)$$

一般来说，由于气流受离心力的影响蒸汽参数沿叶片高度是不同的，所以叶片不同半径截面上的反动度也是不同的。为了计算方便，常用叶片平均半径截面上的反动度，通常称其为平均反动度，用 ρ_m 或 ρ 表示。

(四) 汽轮机级的类型及其特点

在不同的级内，蒸汽在叶片中的理想焓降也不同。据此，可分为以下几种类型的汽轮机级。

1. 纯冲动级

这种级的理想滞止焓降 Δh_i^* 全部在喷嘴中产生并转变为蒸汽的动能。从喷嘴流出来的高速气流进入叶片，给叶片一个冲动力，使叶片带动叶轮一起旋转，把蒸汽的动能转变成机械能。因为蒸汽在叶片内不膨胀，所以叶片内理想焓降 $\Delta h_b = 0$ 、反动度 $\rho = 0$ 、 $\Delta h_n^* = \Delta h_i^*$ 。叶片前后压力相等($p_1 = p_2$)，叶片相应采用等截面流道，叶型对称弯曲，流道不收缩。蒸汽在级内热力过程及流道型式为图 1-5 (a) 所示。

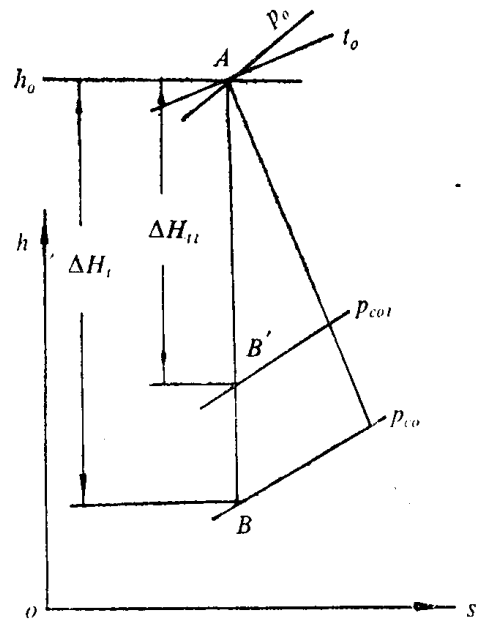


图 1-4 级内热力过程 $h-s$ 图

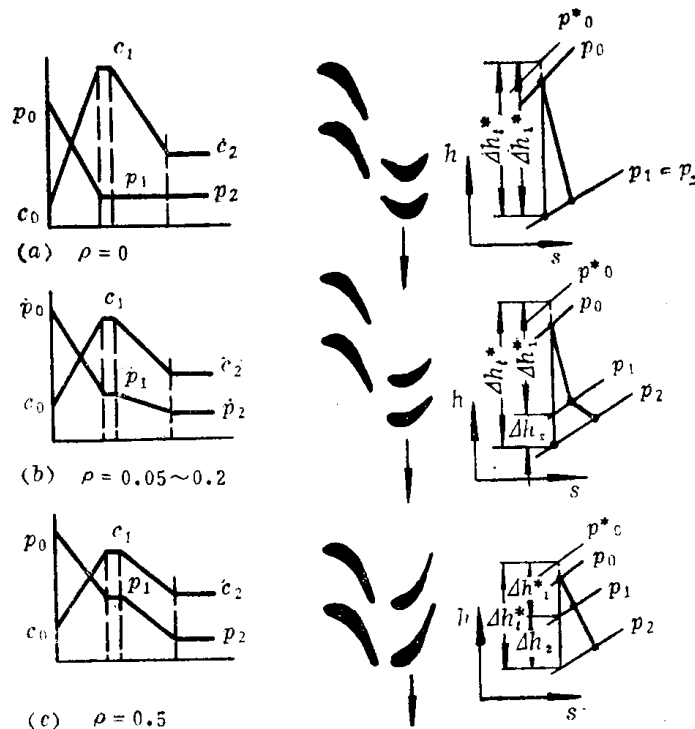


图 1-5 不同型式级的叶片形状及 $h-s$ 图

2. 反动级

通常将喷嘴和叶片中理想焓降相等的级称为反动级，其反动度一般为 $\rho \approx 0.5$ 。叶片前后

压差也较大。既然喷嘴和叶片中理想焓降相等，这说明，蒸汽在它们当中流动情况基本是一样的，因此，喷嘴和叶片流道的几何形状相同。反动级的叶片形式及级的热力过程如图 1-5 (c) 所示。反动级既利用了冲动作用原理，又利用了反动作用原理。

3. 带有反动度的冲动级

为了提高汽轮机级内能量转换的效率，在现代汽轮机中均不采用纯冲动级，而是采用带有少量反动度的冲动级，其反动度一般在 $\rho = 0.05 \sim 0.20$ 。在这种级中，蒸汽作用在叶片上的力主要是冲动力，而反动力较小。它的焓降分配及叶片形式介于纯冲动级和反动级之间，反动度越大越接近反动级。叶片形式及热力过程如图 1-5 (b) 所示。

(五) 单级汽轮机

只有一个级的汽轮机称为单级汽轮机。它能完成将蒸汽的热能转变为机械能的能量转换过程，是最简单的汽轮机。它由汽缸、喷嘴、叶片、叶轮及主轴等部件组成，如图 1-6 (a) 所示。

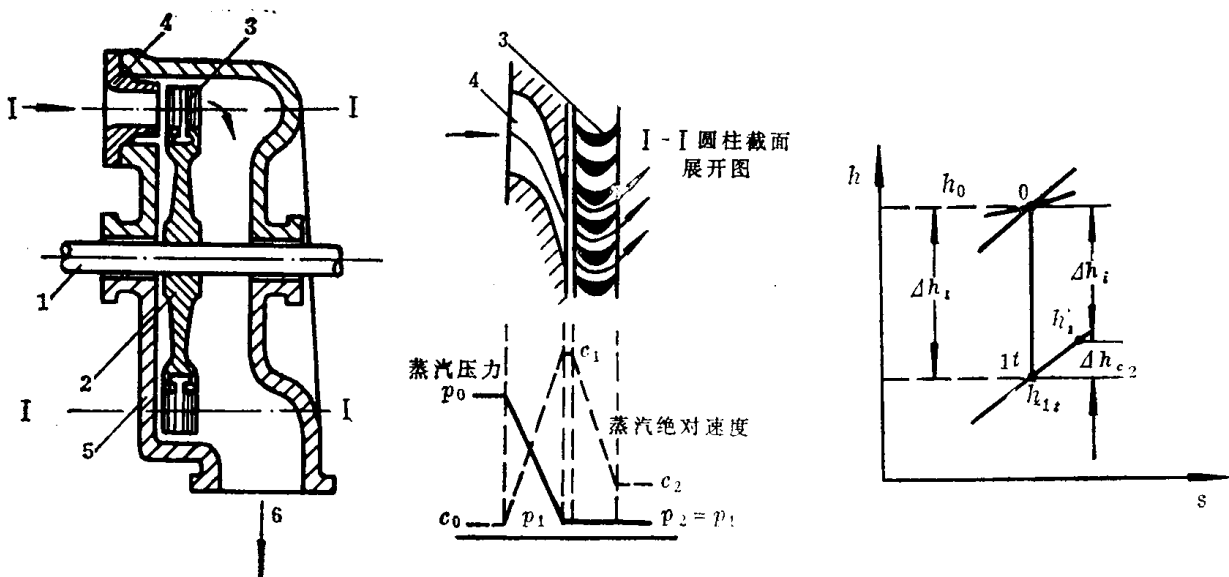


图 1-6 单级纯冲动式汽轮机示意

(a) 结构；(b) 参数变化；(c) 热力过程的 $h-s$ 图

1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷嘴；5—汽缸

由锅炉来的蒸汽进入喷嘴后，压力由 p_0 降至 p_2 、流速从 c_0 增至 c_1 ，即在喷嘴中蒸汽的热能转换为动能。此后蒸汽进入叶片流道，在叶片内改变流动方向，按冲动原理给叶片以作用力，使转子旋转输出机械功，即在叶片中，蒸汽的动能转换为机械能。由于蒸汽的大部分动能在叶片流道中转换为机械功，所以离开叶片时的速度降低至 c_2 ，称为余速。因为该动能未被利用作功，故称其为余速损失。

由以上分析可知，在汽轮机中蒸汽能量的转换分为两个过程：首先在喷嘴中将蒸汽的热能转换为动能，然后在叶片中再将蒸汽的动能转换为叶轮转动的机械能。如果蒸汽的热能转换为动能的过程只在喷嘴中进行，这种汽轮机称为纯冲动式汽轮机，即反动度等于零。如果蒸汽的热能转换为动能的过程大部分在喷嘴中进行，很少部分在叶片中进行，这种汽轮机称为冲动式汽轮机。如果蒸汽的热能转换为动能，在喷嘴和叶片中平均分配（约各占一半），这种汽轮机称为反动式汽轮机。

在纯冲动式单级汽轮机中，由于蒸汽只在喷嘴中膨胀，在叶片中不膨胀，故叶片前后压力相等 ($p_1 = p_2$)。如不考虑喷嘴和叶片中的损失，则单级汽轮机中蒸汽压力和速度变化关系及热力过程线如图1-6 (b) (c) 所示。图中 h_0 表示喷嘴前蒸汽的焓值， h_{1i} 为喷嘴后蒸汽的焓值。 $\Delta h_n = h_0 - h_{1i}$ 为喷嘴中的理想焓降。 h_2 为汽轮机排汽焓值。 $\Delta h_{c_{2i}} = h_2 - h_{1i}$ 为余速损失，汽轮机有效利用的焓降为 $\Delta h_i = h_0 - h_2$ 。

单级汽轮机由于功率较小，在发电厂中通常用来带动功率不大的辅助机械，如汽动油泵和汽动给水泵等。

(六) 速度级单级汽轮机

在上述单级汽轮机中一个叶轮上只装有一列叶片，蒸汽离开叶片时速度 c_2 仍然较大。这部分排汽由于动能未被利用形成很大的余速损失，从而降低了汽轮机的经济性。如果焓降选得越大，余速损失就越大。采用双列速度级可以使速度 c_2 的动能一部分继续转变为机械功，这样就可以减少余速损失。或者在余速损失相同的条件下，速度级可以取较大焓降。只由一个双列速度级（又称寇蒂斯级）组成的汽轮机称为速度级汽轮机。可以说双列速度级是冲动级的一种扩展。双列速度级汽轮机基本结构如图1-7所示。

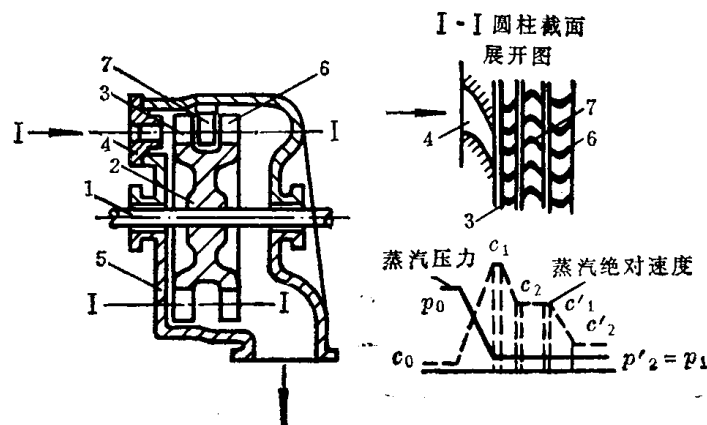


图 1-7 双列速度级汽轮机示意

1—轴；2—叶轮；3—第一列叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—第二列叶片；7—导向叶片

在一个叶轮上装有第一列叶片3和第二列叶片6，在两列叶片之间于汽缸上装有导向叶片7。蒸汽在喷嘴中膨胀后，压力由 p_0 降为 p_1 。若反动度 $\rho = 0$ ，则 $p_1 = p_2$ ，速度由 c_0 增加到 c_1 ，首先进入第一列叶片做功，速度降为 c_2 。然后进入导向叶片。蒸汽在导向叶片中不膨胀，只改变汽流方向，所以导向叶片出口速度 $c'_1 = c_2$ 。在第二列叶片中，蒸汽仍不膨胀，仅将一部分动能继续转变为机械功。蒸汽离开第二列叶片时速度降为 c'_2 。因为 $c'_2 < c_2$ ，所以双列速度级汽轮机的余速损失显著减少。蒸汽在级内压力和速度变化关系如图1-7所示。双列速度级单级汽轮机功率仍较小，只适用于带动辅助机械及作为多级汽轮机的调节级。

(七) 冲动式多级汽轮机

由若干个冲动级所组成的汽轮机称为冲动式多级汽轮机。随着汽轮机向高参数，大功率和高效率方向发展，汽轮机的级数也相应地增多。为了适应电力生产的需要，在发电厂中广泛采用多级汽轮机带动发电机发电。

在多级汽轮机中根据各级的工作特点，常分为速度级，又名调节级和非速度级。所谓速度

级是指通汽面积（进汽度）能改变的级。这种级在工作时可改变其通流面积来控制进汽量，以达到调节汽轮机功率的目的。一般中小型汽轮机采用双列速度级作为调节级。因为速度级效率较低，大型汽轮机常用单列冲动级作为调节级。速度级总是设计成部分进汽的。所谓非速度级是指通汽面积（进汽度）不能改变的级。非速度级既可以设计成全周进汽也可以设计成部分进汽。一般在大型汽轮机中非速度级常设计成全周进汽。图 1-8 所示为一台具有三个冲动级的多级汽轮机。转子上有三个叶轮，第一级的喷嘴2装设在环形蒸汽室1的旁边，第二级和第三级叶轮的前面都装设隔板7。隔板嵌在汽缸壁上，隔板由上下两半组合而成。隔板周围装有喷嘴4。在轴贯穿隔板轴孔处，设有梳齿形汽封装置，以防止蒸汽自隔板前向隔板后漏过。蒸汽进入汽轮机后，首先在一级喷嘴2中产生膨胀，压力由 p_0 降至 p_1 ，汽流速度由 c_0 增至 c_1 ，然后进入第一级叶片中做功。做功后流出叶片的汽流速降至 c_2 。由于蒸汽在叶片中不产生膨胀，叶片后的压力（即第一级后压力） p_2 等于喷嘴后压力 p_1 。从第一级流出的蒸汽，再依次进入后面的两级并重复上述做功过程，最后经排汽管进入凝汽器。蒸汽在各级中压力和速度的变化情况由图 1-8 所示。由于流经各级后的蒸汽压力逐渐降低，比容逐渐增大，故蒸汽的容积流量（单位时间内流过的蒸汽体积）也逐渐增大。为了使蒸汽能顺利流过，汽轮机的通流面积相应逐渐增加，所以喷嘴和叶片的高度以及级的直径均逐渐增加。多级汽轮机的功率是各级功率之和，因此多级汽轮机的功率可以按需要设计制作。

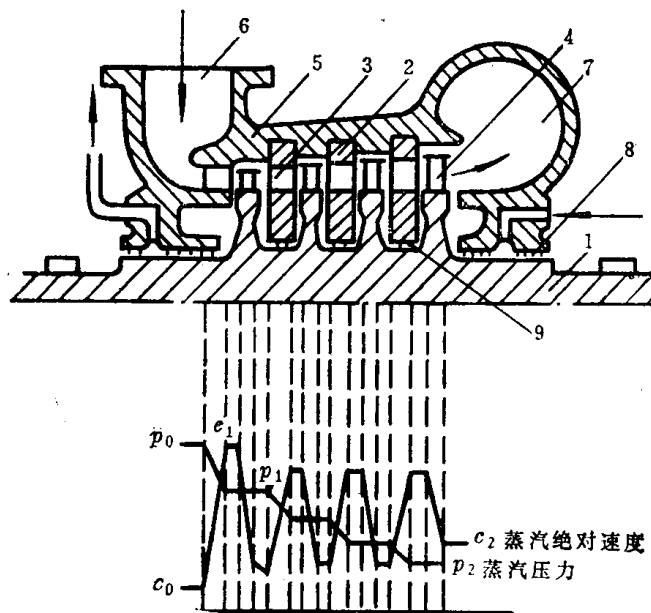


图 1-8 具有三个冲动级的多级汽轮机示意

1—转子；2—隔板；3—喷嘴；4—叶片；5—第二级叶片；6—汽室；7—排汽口；8、9—汽封

(八) 多级反动式汽轮机

由若干个反动级所组成的汽轮机称为反动式多级汽轮机。反动式汽轮机都是制成多级的。按蒸汽在汽轮机中流动方向分为轴流式和辐流式两种。图 1-9 为轴流式多级反动式汽轮机示意图。叶片直接装在轮鼓上，每列动叶片①之前，装有静叶片。动叶片和静叶片的断面形状基本相同。压力为 p_0 的新蒸汽由环形汽室6进入汽轮机后，在第一级静叶栅中膨胀，压

① 在反动式汽轮机中喷嘴和叶片常称为静叶片和动叶片，一组叶片称叶栅。——编辑

力降低，速度增加。然后进入第一级动叶栅，改变流动方向，产生冲动力。在动叶栅中蒸汽继续膨胀，压力下降，速度增加，对动叶片产生反动力。转子在冲动力和反动力的共同作用下旋转做功。从第一级流出的蒸汽依次进入以后各级重复上述过程，直到流过最后一级动叶栅，排入凝汽器。由于蒸汽的比容随着压力的降低而增加，因此叶片的高度均相应的增加，使通流面积逐渐增大，以保证蒸汽顺利地流过。由于反动式汽轮机每一级动叶片前后压差较大，因此整个转子上由前向后产生很大的轴向推力。为了减少这个轴向推力，在转子前部装有平衡活塞4，来抵消轴向推力。活塞前的空间用接管7和排汽室联接，使活塞上产生一个向前的轴向推力，达到平衡转子轴向推力的目的。

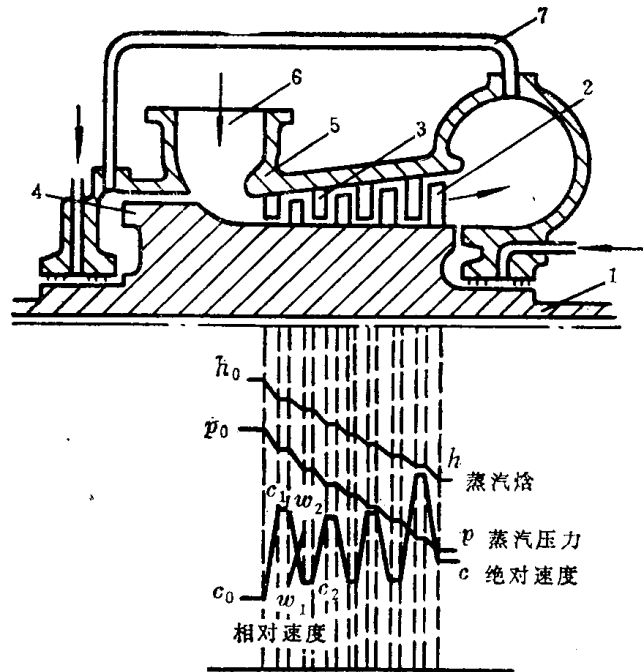


图 1-9 轴流式多级反动汽轮机示意

1—鼓形转子；2—动叶片；3—静叶片；4—平衡活塞；5—汽缸；6—汽室；7—接管

图1-10为辐流式多级反动式汽轮机示意图。汽轮机有两个转轴4和5，叶轮1和2分别安装在两个转轴上，叶片6分别垂直安装在两个叶轮的端面上，组成动叶栅。辐流式反动汽轮机是利用反动作用原理来工作的，新蒸汽从新蒸汽管3进入汽轮机的蒸汽室，然后流经各级

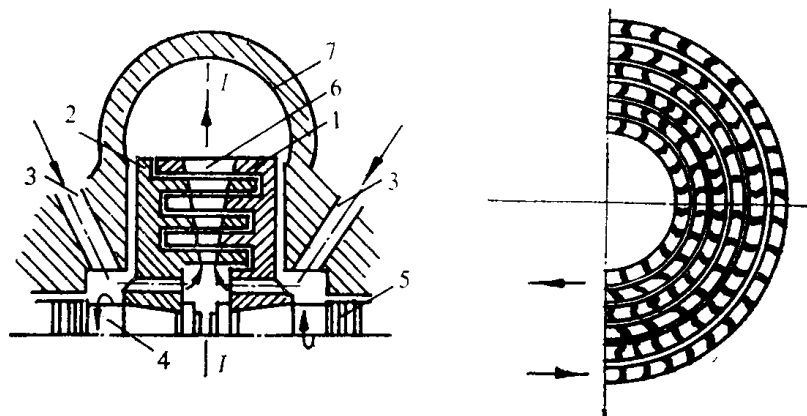


图 1-10 辐流式多级反动式汽轮机示意

1,2—叶轮；3—新蒸汽管；4,5—汽轮机轴；6—动叶片；7—汽缸

动叶栅逐渐膨胀，利用汽流对叶片的反动力推动叶轮旋转做功，将蒸汽的热能转变为机械能。辐流式汽轮机的两个转子按相反的方向旋转，可以分别带动两个发电机同时工作。

二、汽轮机的分类与型号

(一) 汽轮机的分类

汽轮机在国民经济许多部门中被广泛用作原动机。为了适应不同用户的需要，生产的汽轮机类型很多。通常按工作原理，新汽参数，热力过程特性等对汽轮机进行分类。

1. 按工作原理分类

(1) 冲动式汽轮机：按冲动作用原理工作的汽轮机称为冲动式汽轮机。在近代冲动式汽轮机中，蒸汽在各级叶片内都有一定程度的膨胀（即按反动作用原理工作），习惯上仍称之为冲动式汽轮机。

(2) 反动式汽轮机：按反动作用原理工作的汽轮机称为反动式汽轮机。近代反动式汽轮机常用冲动级或双列速度级作调节级，但仍称为反动式汽轮机。

(3) 冲动反动联合式汽轮机：由冲动级和反动级组合而成的汽轮机称为冲动反动联合式汽轮机。

2. 按热力特性分类

(1) 凝汽式汽轮机：蒸汽在汽轮机内做功后，除少量漏汽外，全部排入凝汽器，这种汽轮机称为纯凝汽式汽轮机。近代汽轮机一般都采用回热抽汽，这类汽轮机仍称为凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机：蒸汽在汽轮机中工作后，在高于大气压力下排出，排汽可供给工业热力用户或生活采暖用户使用。这种汽轮机称为背压式汽轮机。排汽供给中、低压汽轮机工作的背压式汽轮机又称前置式汽轮机。

(3) 调整抽汽式汽轮机：汽轮机中若有做过功的部分蒸汽在一种或两种压力下，从汽轮机内抽出（该压力在一定范围内可调整），供工业或采暖用热，而其余蒸汽仍进入凝汽器，这种汽轮机称调整抽汽式汽轮机。

背压式汽轮机和调整抽汽式汽轮机统称为供热式汽轮机或热电合供式汽轮机。

(4) 中间再热式汽轮机：新蒸汽在汽轮机前面若干级做功后，引至锅炉内再次加热到某一温度，然后回到汽轮机继续膨胀做功，这种汽轮机称中间再热式汽轮机。

3. 按用途分类

(1) 电站汽轮机：在发电厂中用以发电的汽轮机。

(2) 工业汽轮机：应用于工业企业中的固定式汽轮机的总称，包括自备动力站的发电用汽轮机（通常是等转速的）和驱动水泵及风机等用的汽轮机（通常是变转速的）。

(3) 船用汽轮机：用于船舶推进的动力装置，驱动螺旋桨。

4. 按新蒸汽参数分类

(1) 低压汽轮机：新蒸汽压力为1.18~1.47MPa（12~15*绝对大气压）。

(2) 中压汽轮机：新蒸汽压力为1.96~3.92MPa（20~40绝对大气压）。

(3) 高压汽轮机：新蒸汽压力为5.88~9.8MPa（60~100绝对大气压）。

(4) 超高压汽轮机：新蒸汽压力为11.78~13.73MPa（120~140绝对大气压）。

• 1个绝对大气压等于0.101325MPa或近似为0.1MPa。——编辑

(5) 亚临界汽轮机：新蒸汽压力为15.69~17.65MPa (160~180绝对大气压)。

(6) 超临界汽轮机：新蒸汽压力超过22.16MPa (超过226绝对大气压)。

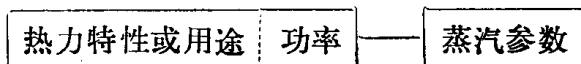
除以上分类方法外，还可以按汽流方向分为轴流式和辐流式汽轮机；按汽缸数目分为单缸、双缸和多缸汽轮机；按汽轮机轴数分为单轴、双轴和多轴汽轮机等。

(二) 汽轮机的型号

汽轮机的种类很多，为了便于使用，采用一定的符号来表示汽轮机的基本特性（蒸汽参数、热力特性和功率等），这些符号称为汽轮机的型号。

1. 我国现代汽轮机的型号

现代汽轮机是采用汉语拼音和数字来表示其型号的。用这种方法所表示的型号分为如下所示的两段：



第一段用拼音字母表示汽轮机的热力特性或用途，后面用数字表示汽轮机的功率，单位为MW，即(兆瓦)。第二段为几组数字，第一组数字表示蒸汽压力（斜线前）。第二组数字表示的意义取决于机组的类型，如果是凝汽式汽轮机，则表示新蒸汽温度；如果是背压式汽轮机，则表示背压；如果是中间再热式汽轮机，则表示新蒸汽温度。第三组数字表示中间再热温度；如果是调整抽汽式汽轮机，第二组和第三组数字表示调整抽汽压力。例如：N100-8.82/535型汽轮机，表示凝汽式，功率为100MW，新蒸汽压力为8.82MPa，新蒸汽温度为535°C；CC25-8.82/0.98/0.11型汽轮机，表示两次调整抽汽式，功率为25MW，新蒸汽压力为8.82MPa，高压调整抽汽压力为0.98MPa，低压调整抽汽压力为0.11MPa；N200-12.75/535/535型汽轮机，表示凝汽式，功率为200MW，新蒸汽压力为12.75MPa，新蒸汽温度为535°C，再热蒸汽温度535°C。

热力特性或用途代号详见表1-1。汽轮机产品的标准化和系列化（即统一规定蒸汽参

表 1-1

热力特性或用途代号表

热 力 特 性	代 号	用 途	代 号
凝 汽 式	N	工业用	G
背 压 式	B	船用	H
一次调整抽汽式	C	移动式	Y
二次调整抽汽式	CC		

表 1-2

电站凝汽式汽轮机的进汽参数

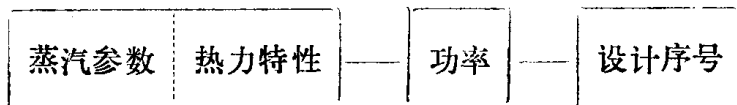
额定功率 (MW)	进 汽 参 数	
	初压(MPa)	初温(°C)
0.75, 1.5, 3	2.35MPa(24at)	390
6, 12, 25	3.43MPa(35at)	435
50, 100	8.82MPa(90at)	535
125, 200	12.75~13.24MPa(130~135at)	535/535(550/550) ^①
300, 600	16.18MPa(165at) ^②	550/550(565/565) ^①

① 上海汽轮机厂生产的125MW和300MW汽轮机曾采用过的数据。

数、功率、型式等)工作我国正在进行。标准化和系列化可以最合理地组织汽轮机的生产和电站设备的配套,有利于成批生产和改进制造工艺,尽快地提高产品的质量和数量。目前我国对电站汽轮机已采用了按蒸汽参数、功率等级的产品系列。表1-2给出了电站凝汽式汽轮机的进汽参数。

2. 我国过去生产汽轮机的型号

我国50年代、60年代生产的汽轮机目前仍然在使用,但是型号和现代汽轮机不同,故称为汽轮机旧型号。这种型号由三段数字组成,如下所示:



第一段的前一个数字代表汽轮机的蒸汽规范,如表1-3所示;后一个数字代表汽轮机的热力特性,如表1-4所示。第二段数字代表汽轮机的功率MW,第三段数字代表汽轮机设计的次序。

表 1-3 旧型号汽轮机新汽参数代号表

参数分类	蒸汽参数		旧型号 代 号	苏 联 代 号
	初压(MPa)	初温(°C)		
低参数	1.18~1.96 (12~20at)	300~360	2	Г
中参数	2.06~3.92 (21~40at)	361~450	3	A
次高参数	4.02~7.84 (41~80at)	451~480	4	Б
高参数	7.94~12.26 (81~12.5at)	481~535	5	B
过高参数	12.36~14.71 (126~150at)	536~570	6	ПБ
超高参数	14.8~22.06		7	СБ
超临界参数	22.16(226at)以上	600以上	8	СК

例如我国生产的51-50-3型汽轮机代号的含义是:高参数凝汽式、功率为50MW、第三次设计;又如54-25-1型汽轮机代号的含义是:高参数两次可调整抽汽式(工业与供暖用)、功率为25MW,第一次设计。苏联生产的BK-50-1型汽轮机,代号的含义是:高参数凝汽式、功率为50MW,第一次设计。又如BIIT-25-3型汽轮机,代号的含义是:高参数,功率为25MW,具有工业和供暖两次抽汽,第三次设计的汽轮机。

表 1-4 旧型号汽轮机热力特性代号表

热 力 特 性	我国旧型号代号	苏 联 代 号
凝 汽 式	1	K
一次可调整供暖抽汽式	2	T
二次可调整工业用抽汽式	3	П
二次可调整抽汽式	4	ПТ
背 压 式	5	P

表1-3和表1-4中同时还列出了苏联代号，苏联旧型号的编制规律与我国旧型号的编制规律基本相同。

小 结

1. 汽轮机的级是汽轮机的基本能量转换单元，因此级的工作原理就体现了汽轮机的工作原理。级的工作原理只有冲动作用原理和反动作用原理两种。如果蒸汽只在喷嘴中膨胀加速，叶片只是在冲动力作用下做功，这种级为纯冲动级，即反动度 $\rho = 0$ 。若蒸汽在喷嘴和叶片内都产生膨胀加速，且喷嘴焓降大于叶片焓降，则叶片在较大冲动力和较小反动力的作用下旋转做功，这种级称为带有反动度的冲动级。若蒸汽在喷嘴和叶片内膨胀加速的程度相同，即反动度 $\rho \approx 0.5$ 。这种按反动力和冲动力共同作用的级，称为反动级。

2. 级的反动度，是衡量蒸汽在叶片内膨胀程度的重要技术参数，它能够反映出级的类型及特点。反动度的大小取决于叶片流道截面积的变化情况。

3. 多级汽轮机的分类很多，重点应掌握。按工作原理，按热力特性，按新蒸汽参数分类。

4. 重点应掌握我国现代汽轮机的型号。

复 习 思 考 题

1. 为什么要求汽流在叶片内不断改变方向？

2. 反动作用原理的叶片受到冲动力和反动力作用，而且这两个力的方向并不一致，能否互相抵消一部分或一大部分？抵消那个方向的力？

习 题

1. 喷嘴前蒸汽初压 $p_0 = 4\text{MPa}$ ，初温 $t_0 = 400^\circ\text{C}$ ，喷嘴后压力 $p_1 = 3\text{MPa}$ ，叶片后压力 $p_2 = 2.8\text{MPa}$ ，求级的反动度？

2. 喷嘴前蒸汽初压 $p_0 = 3.5\text{MPa}$ ，初温 $t_0 = 350^\circ\text{C}$ ，叶片后压力（级后压力） $p_2 = 2.9\text{MPa}$ ，级的反动度 $\rho = 0.2$ ，求喷嘴出口压力？

第二节 蒸汽在喷嘴中的流动

一、蒸汽流动的基本方程式及滞止参数

（一）基本假定

蒸汽在喷嘴和叶片的弯曲流道内流动时，具有不稳定三元流动的特性，所以是一个相当复杂的流动问题。目前在进行级的分析计算时，往往对蒸汽的实际流动状况及蒸汽本身的性质作某些假定，从而获得一个简化的流动模型，达到既能反映出蒸汽实际流动的主要规律，又能使问题简化而获得解决。这些假定如下：

（1）假定是稳定流动（又称定常流），即叶道内任一点的汽流参数不随时间变化。当汽轮机的负荷不变时，可以近似地认为是稳定流动。

（2）假定是一元流动，即叶道内的汽流参数只沿流动方向变化，而在垂直于流动方向截面上的参数是均匀一致的。显然这个假定对于较短的叶片级才有较高的准确性。

（3）假定是绝热流动，即认为级内蒸汽与外界无热交换。

通过上述假定，可以把蒸汽在级内的流动简化为可压缩流体的稳定、绝热、一元流动。实践证明，这种简化方法，不但可以说明汽轮机的能量转换过程和变工况特性，而且对于较短的叶片级可以得到足够精确的计算结果。但对于长叶片级误差较大，可采用简化的二元流或三元流动模型。

(二) 可压缩流体的基本方程式

在进行汽轮机级的热力计算及研究蒸汽在级内流动规律时要用到几个基本方程式。这些基本方程式（一元流动模型）是在基本假定条件下建立的，常用的是：状态方程式，过程方程式，连续方程式，动量方程式及能量方程式。这些方程式已在流体力学和热工学中作了较详细地介绍，但为了适应汽轮机理论研究的需要，还须对这些方程式加深理解和使用。

1. 状态方程式及过程方程式

(1) 状态方程式

理想气体的状态方程式为：

$$pv = RT \quad (1-4)$$

其微分式为：

$$\frac{dp}{p} + \frac{dv}{v} - \frac{dT}{T} = 0$$

式中 p ——气体压力，Pa（或MPa）；

v ——气体的比容， m^3/kg ；

R ——气体常数， $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ；

T ——绝对温度，K。

(2) 过程方程式

理想气体的理想绝热（等熵）过程方程式为：

$$pv^k = \text{常数} \quad (1-5)$$

式中 k ——绝热指数，

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

c_p ——定压比热， $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$ ；

c_v ——定容比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

将式（1-5）取自然对数并微分可得绝热过程的微分表达式为：

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0 \quad (1-6)$$

由于水蒸汽是实际气体，严格讲不能应用以上方程式，因为 R 和 k 不是一个常数，它随水蒸汽的压力和温度不同而略有改变，尤其是湿蒸汽区域内这种变动更大。因此，在汽轮机的热力计算中常用水蒸汽的 h - s 图或水蒸汽表来确定状态参数。但在蒸汽流动理论分析时，仍可利用上式。只是 $k \neq \frac{c_p}{c_v}$ ，而是一个实验系数，在不同区域内取不同的 k 值。对过热蒸汽