



高等学校教材

专科适用

电厂汽轮机设备及系统

沈阳电力高等专科学校 赵义学 主编



高等学校教材

————— 专 科 适 用 —————

电厂汽轮机设备及系统

沈阳电力高等专科学校 赵义学 主编

中国电力出版社

内 容 简 介

本书系统地阐述了汽轮机工作原理、汽轮机本体结构、汽轮机调节保护系统、汽轮机的辅助设备及热力系统、汽轮机运行等。本书在加强基本理论的同时，密切结合我国汽轮机发展的实际，着力反映国内外有关的先进技术，并努力体现应用性原则。

本书可作为高等专科学校电厂集控运行专业的教材，也可作为职工大学、函授专科相应专业的教材或参考书。对于热能动力工程专业的科技工作者，也是一本有价值的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂汽轮机设备及系统/赵义学主编. - 北京: 中国电力出版社, 1998

高等学校教材·专科适用

ISBN 7-80125-467-8

I. 电… II. 赵… III. 电厂-蒸汽透平-高等学校-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 19188 号

中国电力出版社出版

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1998 年 5 月第一版 1998 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 478 千字 1 插图

印数 0001—3770 册 定价 20.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据 1993 年 6 月能源部高等专科教学委员会集控教学组上海会议讨论通过的火电厂集控运行专业《电厂汽轮机设备及系统》教材编写大纲编写的。

根据培养高等工程技术应用型人才的要求，本书的编写在基础知识以够用为度的前提下，着重强调内容的系统性和应用性，努力体现高等专科火电厂集控运行专业的特点。

全书共分七章，主要内容有汽轮机级的工作原理，多级汽轮机，汽轮机的变工况，汽轮机本体的结构，汽轮机调节，汽轮机的辅助设备及热力系统，汽轮机运行基础。

本书第一、二章由沈阳电力高等专科学校赵义学教授编写；第三、四章由沈阳电力高等专科学校肖增弘副教授编写；第五章由上海电力学院齐进副教授编写；第六、七章由北京电力高等专科学校陈庚副教授编写。全书由赵义学教授负责统稿，担任主编，由北京电力高等专科学校朱新华副教授担任主审。

在编写过程中曾得到铁岭发电厂李国军总工程师和徐丰副总工程师等同志的大力支持与帮助，在此谨向有关同志致谢。

限于编写的水平，书中缺点和错误在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1997.3.

目 录

前言	
绪论	1
第一章 汽轮机级的工作原理	4
第一节 概述	4
第二节 汽轮机级的工作过程	9
第三节 最佳速度比	27
第四节 汽轮机的级内损失和级效率	37
第二章 多级汽轮机	50
第一节 多级汽轮机的工作过程及损失	50
第二节 汽轮机及其装置的效率和经济指标	56
第三节 多级汽轮机的轴向推力	62
第三章 汽轮机的变工况	66
第一节 喷嘴的变工况	66
第二节 级与级组的变工况	73
第三节 汽轮机的功率调节方式及调节级变工况	85
第四节 凝汽式汽轮机的工况图	93
第五节 蒸汽参数变化对汽轮机工作的影响	95
第六节 变工况时轴向推力的变化	102
第四章 汽轮机本体的结构	105
第一节 汽缸	105
第二节 隔板	116
第三节 汽封	117
第四节 转子	126
第五节 动叶片	134
第六节 轴承	144
第七节 盘车装置	156
第五章 汽轮机调节	163
第一节 汽轮机调节的任务与型式	163
第二节 液压调节系统	166
第三节 电液调节系统的工作原理	181
第四节 电液调节系统的主要装置	189
第五节 电液调节系统的典型调节工况	203
第六节 危急遮断保护系统	206
第七节 供油系统	213

第六章 汽轮机的辅助设备及热力系统	217
第一节 凝汽设备及系统	217
第二节 给水回热加热设备及系统	230
第三节 给水除氧设备及系统	250
第四节 再热机组的旁路系统	259
第五节 其它系统	263
第六节 火电厂的经济性	270
第七节 发电厂全面性热力系统简介	287
第七章 汽轮机运行	291
第一节 汽轮机启停时应注意的主要问题	291
第二节 汽轮机冷态启动	305
第三节 汽轮机热态启动	311
第四节 汽轮机停运	314
第五节 汽轮机的正常运行维护	319
第六节 典型事故及其预防措施	324
参考文献	330

绪 论

汽轮机是一种将水蒸气的热能转变成高速旋转机械功的热力原动机。在热力发电厂中，锅炉将燃料的化学能转变成蒸汽的热能，蒸汽经过汽轮机将热能转变为旋转机械能，汽轮机带动发电机又将机械能转变成电能。汽轮机与其它原动机（如燃气轮机，柴油机等）相比，具有单机功率大，效率高，转速快，运行平稳和寿命长等特点，因此在火力发电厂中得到广泛的应用。由于汽轮机又能设计成变转速运行，所以还可以用它直接驱动泵、风机、压气机和船舶的螺旋桨等各种从动机械。因此，汽轮机在电热能生产和工业生产上都有着极其重要的作用。

在将蒸汽的热能转变成机械能的过程中，只有汽轮机本体是不够的，还必须设置与它相配套的热力系统及辅助设备。

电力工业的发展标志着国民经济的发展水平，它的发展直接影响着国民经济的发展速度。1996年，我国年发电量为10794亿kW·h，装机容量达23654万kW，从1949年占世界第25位，跃居世界第二位，仅次于美、俄、日、加拿大。为实现我国工农业总产值到本世纪末翻两番的目标，我国电力工业到本世纪末年发电量将超过1.4万亿kW·h，发电设备装机容量将达到3.0亿kW。电力事业发展要求汽轮机设备在容量和完善程度等方面都要上一个新的台阶。

从1883年第一台实用型汽轮机问世以来，汽轮机制造业的发展已有一百多年的历史。尤其是近20年来汽轮机制造业发展得特别迅速，其主要特点是增大单机容量和提高进汽参数。它的好处主要是：①可降低机组单位容量的造价；②可提高机组的效率；③可加快电站建设速度等。因此现代电厂都尽量采用高参数、大容量机组。随着机组容量的增大，辅机系统及有关配套设备更加复杂，为了进一步提高效率，循环更加完善。

目前世界发达国家如美国、俄国、日本等都已普遍采用单机容量为600~1000MW以上的大容量机组作为电网的主力机组。已投入运行的最大单机容量为1300MW，是瑞士勃朗鲍威利公司为美国制造的。

但需要指出，汽轮机单机容量的增大，亦需要与电网容量相适应。一般情况下，容量为1000~10000MW的电网，最经济的单机容量为电网容量的6%~10%。

目前，在世界汽轮机制造业中，美国和俄罗斯发展得比较快。美国生产汽轮机的工厂主要有通用电气公司（GE）、西屋公司（WH）和帕特·怀特公司（PW）。俄罗斯生产汽轮机的工厂主要有彼得格勒金属工厂（AM3）和哈尔科夫汽轮机厂（XTT3）。除美国和俄罗斯外，日本、英国、德国、加拿大、法国、瑞士和意大利等发达国家的汽轮机制造业亦较发达。

我国的汽轮机制造业是在解放后兴起的，先后建立了上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、北京重型电机厂、青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等一批汽轮机制

造厂，还建立了以生产工业汽轮机为主的杭州汽轮机厂和南京汽轮发电机厂。

从1955年上海汽轮机厂生产了我国第一台汽轮机（功率6MW）以来，我国已生产了100MW、125MW、200MW、300MW和600MW等发电用汽轮机以及各种工业用汽轮机。

汽轮机按其不同用途有很多类型，可按不同方法分类。按工作原理分，有冲动式和反动式汽轮机；按级数分，有单级和多级汽轮机；按热力过程分，有凝汽式汽轮机、背压式汽轮机、抽汽式汽轮机和中间再热式汽轮机；按蒸汽参数分，有低压、中压、高压、亚临界及超临界汽轮机；按其结构分，有单缸、多缸、轴流式、辐流式等汽轮机；按用途分，有发电用、船用和工业用汽轮机。

为了便于识别汽轮机的类别，常用一些符号来表示它的基本特性或用途，这些符号称为汽轮机的型号。我国生产的汽轮机所采用的系列标准及型号已经统一，由四部分组成，各部分的含义为：

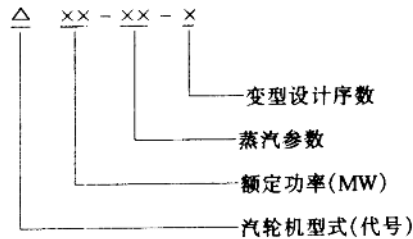


表 0-1 列出了国产汽轮机型号的代表号。

表 0-1 汽轮机代号

型 式	代 号	型 式	代 号
凝汽式	N	抽汽背压式	CB
背压式	B	船用	H
一次调整抽汽式	C	工业用	G
二次调整抽汽式	CC	移动式	Y

示例：

N50-8.82：表示凝汽式，功率为50MW，蒸汽初压为8.82MPa，按原设计制造的汽轮机。

N200-12.75/535/535：表示凝汽式，功率为200MW，蒸汽初压为12.75MPa，初温为535℃，中间再热温度为535℃，按原设计制造的汽轮机。

N50-8.82-1：表示凝汽式，功率为50MW，蒸汽初压为8.82MPa，按第一次变型设计制造的汽轮机。

CC12-3.43/0.98/0.118：表示两次调整抽汽式，功率为12MW，蒸汽初压为

3.43MPa, 高压抽汽压力为 0.98MPa, 低压抽汽压力为 0.118MPa, 按原设计制造汽轮机。

B25 - 8.82/0.98: 表示背压式, 功率为 25MW, 蒸汽初压为 8.82MPa, 背压为 0.98MPa, 按原设计制造的汽轮机。

CB25 - 8.82/1.47/0.49: 表示抽汽背压式, 功率为 25MW, 蒸汽初压为 8.82MPa, 抽汽压力为 1.47MPa, 背压为 0.49MPa, 按原设计制造的汽轮机。

第一章 汽轮机级的工作原理

第一节 概 述

一、汽轮机的结构简介

汽轮机从结构上可分为单级和多级汽轮机。图 1-1 是一单级冲动式汽轮机主要部分结构图。动叶按一定的距离和一定的角度安装在叶轮上形成动叶栅，动叶栅构成了许多相同的蒸汽通道。动叶栅装在叶轮上，与叶轮以及转轴组成汽轮机的转动部分，称为转子。静叶按一定的距离和一定的角度排列形成静叶栅，静叶栅固定不动，构成的蒸汽通道称为喷嘴。具有一定压力和温度的蒸汽先在固定不动的喷嘴中膨胀，膨胀时，蒸汽压力、温度降低、速度增加，使其热能转换成动能，从喷嘴出来的高速汽流，以一定的方向进入动叶通道，在动叶通道中汽流速度改变，对动叶产生一个作用力，推动转子转动，使蒸汽的热能转换成转子的机械能。一系列静叶栅和一系列动叶栅组成了从蒸汽的热能转换成转子的机械能的基本单元，称之为级。图 1-2 表示汽轮机级的示意图。汽轮机可以是单级的，但绝大多数是多级的。

图 1-3 为一多级汽轮机的纵剖面图。虽然汽轮机由很多零部件组成，但概括起来，仍可分为两大部分，即转动部分和静止部分。转动部分即转子，转子的中心部分是一根轴，称为主轴，主轴上固定着一个或若干个叶

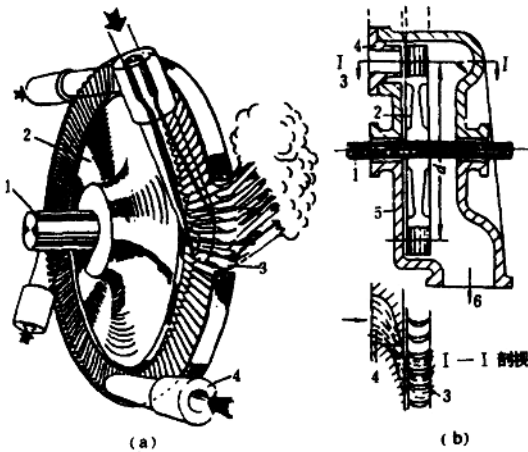


图 1-1 单级汽轮机结构简图

(a) 立体图；(b) 剖面图

1—主轴；2—叶轮；3—动叶；4—喷嘴；5—汽缸；6—排气口

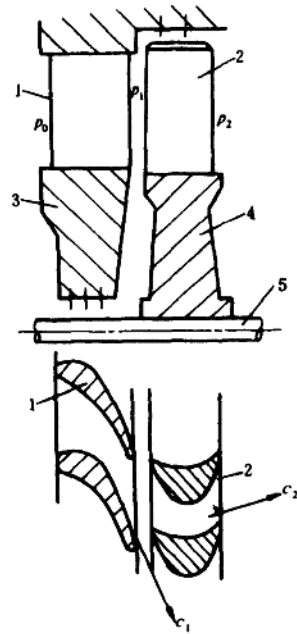


图 1-2 汽轮机级示意图

1—喷嘴叶栅；2—动叶栅；3—隔板；

4—叶轮；5—轴

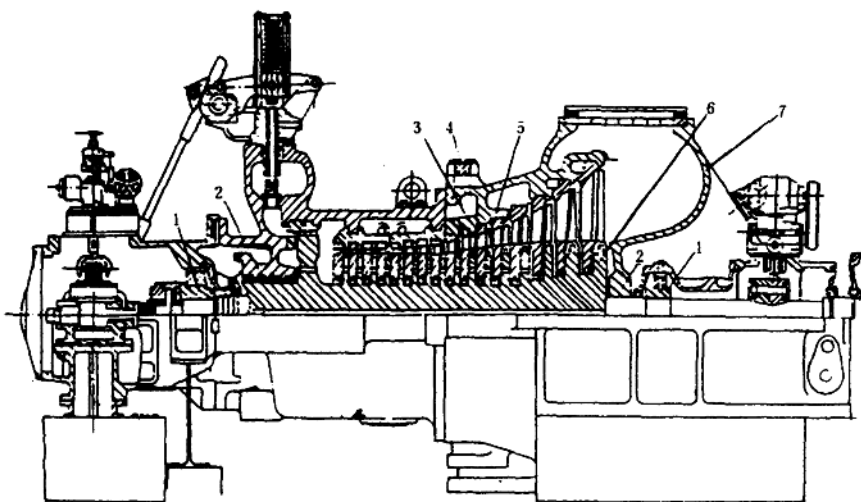


图 1-3 多级汽轮机纵剖面图

1—轴承；2—轴封；3—静叶；4—隔板；5—动叶；6—转子；7—汽缸

轮，叶轮上嵌有动叶片。静止部分主要是汽缸、隔板、静叶以及轴承等。汽缸的作用是形成一个空间，容纳蒸汽在其中流动和转子在其中旋转，并支持装在汽缸内的其它部分。隔板装在汽缸上，而喷嘴叶栅（静叶）装在隔板上。在一个汽轮机中，静叶的列数和动叶列数是相同的。轴承分支持轴承和推力轴承，支持轴承是用来承受转子的重量及确定转子在汽缸中的水平位置的；推力轴承是用来承受转子的轴向推力及确定转子在汽缸中的轴向位置的。

转子和静子之间的密封是用汽封来实现的，通过汽封可减少由于压差的作用从汽轮机的动、静体之间的间隙处漏过的漏汽量，以提高汽轮机的效率。在汽轮机内部，凡是有压差而又不希望有大量工质流过的地方都装有汽封，如隔板汽封、叶顶汽封等，在汽缸的两端，转轴穿出汽缸的地方均装有一系列轴封。汽轮机组除以上介绍的汽轮机本体的主要结构之外，还必须配有各种辅助设备和系统，如汽水系统、调节保护系统、供油系统、滑销系统等。

二、蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理

汽轮机是将蒸汽的热能转变为转子的机械能的一种动力机械，这种能量的转变通常是通过冲动作用原理和反动作用原理两种方式来实现的。

（一）冲动作用原理

由力学可知，当一运动的物体碰到另一个静止的或速度不同的物体时，就会受到阻碍而改变其速度的大小和方向，同时给阻碍它运动的物体一个作用力，这个力称为冲动力。同理，从喷嘴中流出的高速气流冲击在汽轮机的动叶上，受到动叶的阻碍，而改变了其速度的大小和方向，同时气流给动叶施加了一个冲动力。图 1-4 所示为无膨胀的动叶通道，蒸汽以速度 \vec{w}_1 进入通道，由于受到动叶的阻碍不断地改变运动方向，最后以速度 \vec{w}_2 流出

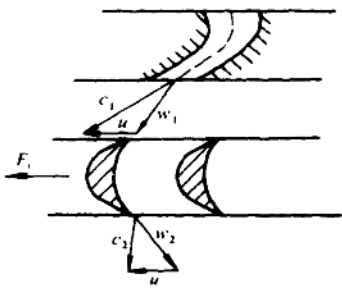


图 1-4 蒸汽流过无膨胀动叶通道时速度的变化

在汽轮机中，当蒸汽流经动叶通道时，如果还继续膨胀、加速，则在汽流离开动叶时，会给动叶一个与汽流运动方向相反的作用力，即反动力。

随着反动力的产生，蒸汽在动叶栅中完成了两次能量的转换，首先是蒸汽经动叶通道膨胀，将热能转换成蒸汽流动的动能，同时随着蒸汽的加速，则又给动叶栅一个反动力，推动转子转动，完成动能到机械功的转换。

一般情况下，蒸汽在动叶通道中流动时，一方面给动叶栅一个冲动力 F_i 的作用，另一方面，在动叶栅中继续膨胀，给动叶栅一个反动力 F_r 的作用，这两个力的方向都不与轮周方向一致。两个力的合力 F 作用在动叶栅上，其在轮周方向上的分力 F_u 使动叶栅旋转而产生机械功，如图 1-5 所示。

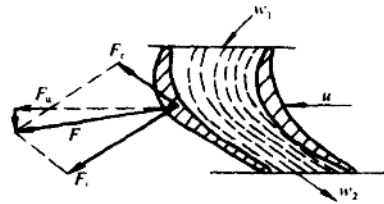


图 1-5 蒸汽在动叶通道内膨胀时对动叶的作用力

三、汽轮机级的类型和特点

(一) 汽轮机级的反动度

在现代汽轮机中，为了改善蒸汽在动叶通道中的流动状态，以减少流动损失，常将动叶通道设计成蒸汽在其中流动时也有一定的膨胀，通常用反动度 Ω_m 来衡量蒸汽在动叶栅中膨胀的程度。它等于蒸汽在动叶栅中膨胀时的理想焓降 Δh_b 和在整个级的滞止理想焓降 Δh_1^* 之比，即

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_1^*} \quad (1-1)$$

图 1-6 是级中蒸汽膨胀在焓熵图上的热力过程线。0 点是级前的蒸汽状态点，0* 点是汽流等熵滞止到初速等于零的状态点， p_1 、 p_2 分别为喷嘴出口压力和动叶出口压力。蒸汽从滞止状态 0* 点在级内等熵膨胀到 p_2 时的焓降 Δh_1^* 为级的滞止理想焓降。 Δh_n^* 为蒸汽在喷嘴中的理想滞止焓降， Δh_b 为蒸汽在动叶中的理想焓降。

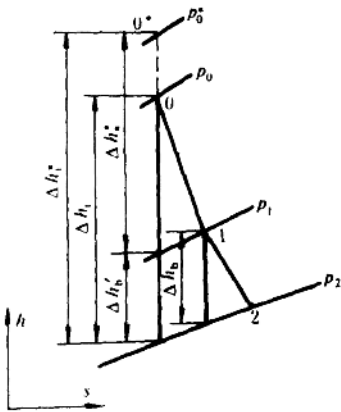


图 1-6 级的热力过程线

根据图 1-5，式 (1-1) 又可表示为

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b} \approx \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b} \quad (1-2)$$

根据式 (1-1) 和图 1-5 又可得到

$$\Delta h_b = \Omega_m \Delta h_1^*$$

$$\Delta h_n^* = (1 - \Omega_m) \Delta h_1^*$$

由上式可知, Ω_m 越大, Δh_b 越大, 则蒸汽对动叶栅的反动力也越大。

实际上蒸汽参数沿动叶高度是变化的, 所以在动叶不同直径截面上的理想焓降是不同的, 因此, 反动度沿动叶高度亦不相同。用 Ω_m 表示动叶平均直径截面上的理想焓降所确定的反动度, 称为平均反动度。对较短的直叶片级, 由于蒸汽参数沿叶高差别不大, 所以通常不计反动度沿叶高的变化, 均用平均反动度表示级的反动度。对于长叶片级, 在计算不同截面时, 必须用相应截面的反动度。

(二) 汽轮机级的类型

根据蒸汽在级通流部分的流动方向, 可将汽轮机级分为轴流式 (汽流方向与轴平行) 和辐流式 (汽流方向和轴垂直) 两种。目前国内发电用汽轮机绝大多数为轴流式。轴流式级通常分成下列几种。

1. 冲动级和反动级

按蒸汽在动叶通道内膨胀程度的不同, 即反动度的大小不同, 轴流式级可分为冲动级和反动级。

(1) 冲动级

反动度 $\Omega_m = 0$ 的级称为纯冲动级, 如图 1-7 所示。它的特点是蒸汽只在喷嘴叶栅中膨胀, 在动叶栅中不膨胀而只改变其流动方向, 蒸汽作用在动叶片上的力为冲动力。因此, 动叶栅进出口蒸汽压力相等, 即 $p_1 = p_2$, 且 $\Delta h_b = 0$, 故 $\Delta h_1^* = \Delta h_n^*$, 它的结构特点是, 动叶叶型几乎为对称弯曲, 即动叶通道内各通流截面近似相同。纯冲动级作功能力大, 但效率较低, 现代汽轮机中均不采用纯冲动级, 而是采用带少量反动度 ($\Omega_m = 0.05 \sim 0.2$) 的冲动级。这种级既有冲动级的特征, 又有反动级的性质。它的特点是蒸汽的膨胀大部分在喷嘴叶栅中进行, 只有一小部分在动叶栅中进行。因此 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n > \Delta h_b$ 。蒸汽作用在动叶栅上的力主要是冲动力, 还有一小部分是反动力。在最佳速比下, 它的作功能力比反动级大, 效率比纯冲动级高, 在汽轮机中得到了广泛的应用。

(2) 反动级

反动度 $\Omega_m \approx 0.5$ 的级称为反动级。蒸汽在反动级中膨胀时, 一半发生在喷嘴中, 另一半发生在动叶栅中, 所以 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n \approx \Delta h_b \approx 0.5 \Delta h_1$ (因为 $\frac{c_0^2}{2}$ 一般较小)。蒸汽流经动叶通道时, 除给动叶栅一冲动力外, 还由于蒸汽在动叶中的膨胀、加速, 给动叶一个比较大的反动力作用。此外, 由于蒸汽在喷嘴和动叶中的膨

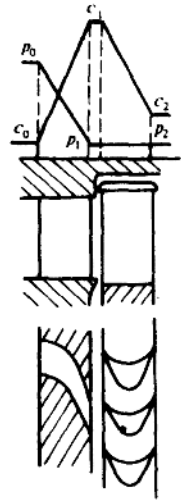


图 1-7 纯冲动级中压力和速度变化示意图

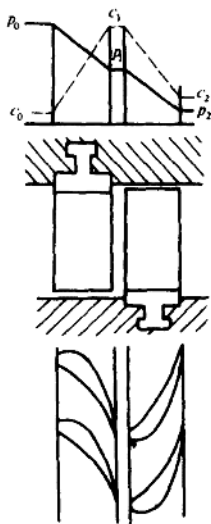


图 1-8 反动级中蒸汽压力和速度变化示意图

复速级都是冲动式的。蒸汽在喷嘴中膨胀加速后，在第一列动叶栅中只将其中一部分动能转变为机械功，然后经导向叶栅转向，进入第二列动叶栅，又将另一部分动能转变为机械功。因此，复速级的作功能力比单列冲动级要大，通常在一级内要求承担很大的焓降时才采用复速级。为了提高复速级的效率，也将其设计成带有一定的反动度，使蒸汽在各列动叶栅和导向叶栅中也进行适当的膨胀。

3. 调节级和非调节级

按级的通流面积是否随负荷大小而变，又可将级分为调节级和非调节级。

(1) 调节级

通流面积能随负荷改变而改变的级称为调节级。如：喷嘴调节汽轮机的第一级为调节级。这种级在运行时，可通过改变其通流面积来控制其进汽量，从而达到调节汽轮机负荷的目的。一般中小型汽轮机用复速级作为调节级，而大型汽轮机常用单列冲动级作为调节级。

(2) 非调节级

通流面积不随负荷改变而改变的级称为非调节级。

调节级与非调节级的另一个不同是，调节级总是做成部分进汽，而非调节级可以是全周进汽，也可以是部分进汽。

胀程度相同，所以蒸汽在喷嘴和动叶中的流动情况基本一样，因此，喷嘴和动叶采用的叶型相同（见图 1-8）。反动级的效率比纯冲动级高，但作功能力较小。

2. 压力级和速度级

按蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程不同，轴流式级可分为压力级和速度级。

(1) 压力级

蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程在级内只进行一次级称为压力级。这种级在叶轮上只装一列动叶栅，故又称单列级。压力级可以是冲动级，也可以是反动级。

(2) 速度级

蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程在级内进行一次以上的级称为速度级。目前常用的是进行两次转变的级。这种级实质上是单列级的一种延伸，如图 1-9 所示。即在单列级动叶栅之后增加一列转向导叶栅和一列动叶栅，故称双列速度级，又称复速级。

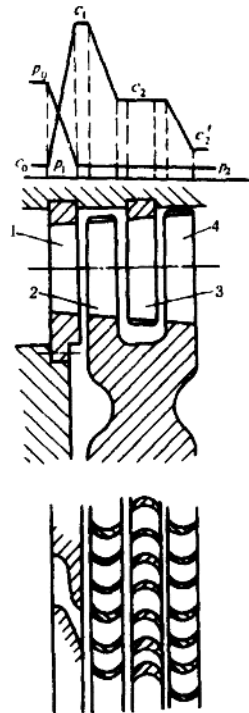


图 1-9 复速级中汽流压力和速度变化示意图

1—喷嘴；2—第一列动叶；
3—导叶；4—第二列动叶

第二节 汽轮机级的工作过程

一、蒸汽流动的基本方程

蒸汽在汽轮机中的流动，实际上是有粘性、非连续和非定常的三元流动。目前还无法按照蒸汽的这种实际流动状态进行级的计算。因此，为了便于对蒸汽流动进行分析与研究，需将复杂的流动简化为能反映蒸汽实际流动的主要规律的简单流动模型，为此作如下假定：

(1) 蒸汽在叶栅通道中的流动为稳定流动，即汽流通道内任一点的蒸汽参数不随时间变化。当汽轮机的负荷和参数变化不大时，可以近似地认为是稳定流动。

(2) 蒸汽在叶栅通道中的流动是一元流动，即在叶栅通道中汽流参数只沿流动方向变化，而在其垂直截面上是不变的。

(3) 蒸汽在叶栅通道中的流动是绝热的，即认为级内蒸汽与外界无热交换。

通过以上假定，则把蒸汽在级内的复杂流动简化为绝热的一元稳定流。实践证明，这种一元流动模型，不但可以说明汽轮机级的能量转换过程和变工况特性，而且对叶片较短的级可以获得足够精确的计算结果。但对叶片较长的级误差较大，这时应采用简化的二元或三元流动模型。

在讨论汽轮机级内蒸汽的能量转换以及进行级的热力计算时，需要用到下列可压缩流体的一元流动基本方程。

(一) 状态方程

汽流在某一截面上的各状态参数之间的关系由状态方程式确定，对于理想气体的状态方程式为：

$$pv = RT \quad (1-3)$$

式中 p ——气体压力，Pa；

v ——气体比体积， m^3/kg ；

T ——热力学温度，K；

R ——通用气体常数， $R = 461.76 J / (kg \cdot K)$ 。

对于水蒸气，由于其性质复杂，至今尚未能建立起它的纯理论的状态方程式，即使是通过理论和实验相结合而得到的过热水蒸气状态方程式也极为复杂。因此，在实际计算水蒸气的有关问题时，主要采用水蒸气图表来确定其状态。

蒸汽从一个状态变化到另一个状态的过程可以是各种各样的，而每一种过程均可用一定的过程方程式来描述。当气体进行等熵过程时，其过程方程式为：

$$pv^\kappa = \text{常数} \quad (1-4)$$

式中， κ 为等熵指数，它随气体的状态变化而变化。对于过热蒸汽， $\kappa = 1.3$ ；对于湿蒸汽， $\kappa = 1.035 + 0.1x$ （其中 x 为过程初态的干度）；对于饱和蒸汽， $\kappa = 1.135$ 。

对于有损失的绝热过程，可用多变过程方程式来表示：

$$pv^n = \text{常数} \quad (1-5)$$

式中 n ——多变过程指数。

(二) 连续方程

连续方程式是以数学公式来表达流体流动时的质量守恒定律。对于稳定流动，流过通道不同截面上的流量（见图 1-3）不变，即

$$G = \frac{Ac}{v} = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \text{常数} \quad (1-6)$$

式中 G ——流过通道各横截面的蒸汽质量流量，
kg/s；

A ——通道内相应横截面的面积， m^2 ；

c ——垂直于面积 A 的汽流速度， m/s ；

v ——截面 A 上的蒸汽比体积， m^3/kg 。

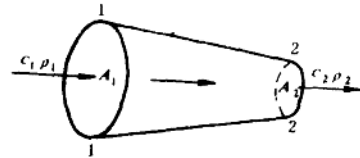


图 1-10 流管简图

式 (1-6) 即为可压缩流体稳定流动的连续方程，

它表示在稳定流动中通道截面积、汽流速度、汽流比体积之间的相互关系，不论是理想气体还是实际气体，以及流动中是否有损失均适用。

对上式进行微分，可得到连续方程的微分表达式

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} - \frac{dv}{v} = 0 \quad (1-7)$$

式 (1-7) 表示通道截面积的变化率与速度和比体积的变化率有关。如果流动中速度变化率大于比体积变化率，则通道截面积将随速度的增大而减小。反之，则随速度的增大而增大。

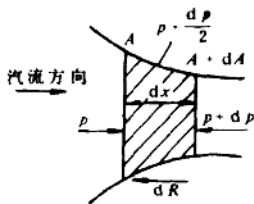


图 1-11 作用在汽流
微元段上的力

(三) 动量方程

动量方程是反映作用于汽流上的力与汽流速度变化之间的关系式。如图 1-11 所示，在汽流中沿流动方向任意截取一个微元段，若不计该微元段的重力作用，则作用于这微元段上的压力、阻力和汽流运动的加速度之间的关系，可根据牛顿第二定律写成

$$Ap + \left(p + \frac{dp}{2}\right)dA - (p + dp)(A + dA) - dR = dG \frac{dc}{dt}$$

式中 A ——微元段起始端的截面积， m^2 ；

p ——作用在截面 A 上的压力， Pa ；

dR ——作用于微元段上的摩擦阻力， N ；

c ——微元段的流动速度， m/s ；

dG ——微元段蒸汽的质量， kg 。

将上式展开，简化并略去二阶微量后整理最终得：

$$-vdp - Rdx = cdc \quad (1-8)$$

其中 $R = \frac{dR}{dG}$ 为作用在单位质量蒸汽上的摩擦阻力，若流动是无损失的等熵流动，则 $R = 0$ ，于是无损失流动的运动方程为

$$cdc = -vdp \quad (1-9)$$

以上两式中的负号说明, 在无损失流动过程中, 压力和速度是相反方向变化的, 即当通道内汽流压力降低时, 则汽流的速度增加; 反之, 汽流的压力升高时, 速度减小。

(四) 能量方程

对于稳定流动, 根据能量守恒定律, 输入系统的能量必须等于输出系统的能量。若略去势能的变化, 则系统的能量方程式可写成:

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + q = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + w \quad (1-10)$$

式中 c_0 、 c_1 ——蒸汽流入和流出系统时的速度, m/s;

h_0 、 h_1 ——蒸汽流入和流出系统时的焓值, J/kg;

q ——每千克质量蒸汽流过系统时从外界吸收的热量, J/kg;

w ——每千克质量蒸汽流过系统时对外界作出的机械功, J/kg。

能量方程式 (1-10) 对有损失的流动与无损失的流动都适用。

二、蒸汽在喷嘴中的膨胀过程

蒸汽流经喷嘴时, 压力逐渐降低, 速度逐渐增加, 使蒸汽的热能不断转变为蒸汽的动能, 图 1-12 为蒸汽在喷嘴中膨胀的热力过程线, 0 点是喷嘴前蒸汽的状态点, 0* 是喷嘴前蒸汽的滞止状态点。具有初速 c_0 、初压 p_0 、初焓 h_0 的蒸汽在喷嘴中膨胀到背压 p_1 , 在无损失情况下, 沿着等熵线 0-1t 膨胀到 1t 点, 喷嘴的焓降为 Δh_n , 在有损失的情况下, 膨胀的热力过程沿 0-1 线进行, 喷嘴出口实际状态点为 1。

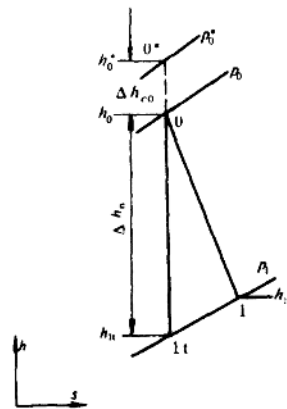


图 1-12 蒸汽在喷嘴中膨胀的热力过程线

(一) 喷嘴中汽流速度的计算

1. 喷嘴出口的理想速度

在进行喷嘴计算时, 一般喷嘴前的蒸汽参数及喷嘴后的压力均为已知。若喷嘴前的蒸汽参数为 p_0 、 t_0 , 初速为 c_0 , 背压为 p_1 , 膨胀过程如图 1-12 所示, 则喷嘴出口的理想速度 c_{1t} 可由下面方法求出。

在轴流式汽轮机中, 由于喷嘴是固定不动的, 因此蒸汽通过喷嘴时, 不对外做功, 即 $W=0$ 。若蒸汽在喷嘴中流动时, 与外界无热交换, 即 $q=0$ 。则根据式 (1-10) 蒸汽在喷嘴中的能量转换规律为

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_{1t} + \frac{c_{1t}^2}{2} \quad (1-11)$$

则喷嘴出口的理想速度 c_{1t} 为

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} = \sqrt{2\Delta h_n + c_0^2} \quad (1-12)$$

式中 h_{1t} ——蒸汽等熵膨胀的终点焓, kJ/kg;

Δh_n ——蒸汽在喷嘴中的理想焓降, $\Delta h_n = h_0 - h_{1t}$ 。

为了便于计算与分析, 引用滞止参数, 如图 1-5 中点 0*, 滞止状态的焓值为