

971887

TM621.4
2502

高等学校教材
专科适用

电厂汽轮机

北京电力高等专科学校 朱新华
上海电力学院 江运汉 合编
沈阳电力高等专科学校 张延峰



高等学校教材

||||| 专 科 适 用 |||||

电 厂 汽 轮 机

北京电力高等专科学校 朱新华

上 海 电 力 学 院 江运汉 合编

沈阳电力高等专科学校 张延峰

水利电力出版社

(京)新登字115号

高等学校教材
专科适用

电厂汽轮机

北京电力高等专科学校 朱新华
上海电力学院 江运汉 合编
沈阳电力高等专科学校 张延峰

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售
北京市地质矿产局印刷厂印刷

787×1092毫米 16开本 25.5印张 579千字 2插页

1993年10月第一版 1993年10月北京第一次印刷

印数 0001—5600册

ISBN 7-120-01828-0/TK·278

定价 11.70元

内 容 简 介

本书系统地阐明了汽轮机工作原理、主要零件结构和强度、汽轮机调节、汽轮机运行等,对汽轮机的凝汽设备和供热式机组也有介绍。本书在加强基本理论的同时吸收了本门学科的新技术,并注重体现应用性原则。

本书可作为高等专科学校电厂热能动力工程专业和电厂集控运行专业的教材,也可作为电视大学、职工大学、函授专科相应专业的教材或参考书。对于高等学校本科、中等专业学校相应专业的师生以及从事热能动力工程运行、安装、检修、设计的工程技术人员,也是一本有价值的参考书。

前 言

本书是根据1989年5月能源部高等专科学校热能动力类教研会郑州会议讨论通过的《电厂汽轮机》教材编写大纲编写的。编写大纲和教材贯彻了1988年7月该教研会南昌会议确定的原则！同时适用于电厂热能动力专业（110学时）和电厂集控运行专业（80学时），并按120学时编写。

根据培养高等工程技术应用性人才的要求，本书编写力求贯彻针对性和应用性原则，在加强基本理论的同时，注意吸收本门学科的新技术，努力体现高等专科学校特色。

全书共分八章，前三章介绍汽轮机工作的基本原理，第四章为汽轮机凝汽设备，第五章为汽轮机主要零件结构及强度，第六章为汽轮机的调节，第七章为供热式汽轮机，第八章为汽轮机运行。

本书第一和第六章由上海电力学院江运汉编写，第二、第四和第五章由沈阳电力高等专科学校张延峰编写，北京电力高等专科学校朱新华编写了第三、第七和第八章，并负责全书的统稿工作。

本书由沈阳电力高等专科学校赵义学主审，他对本书提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中，作者得到了华北电力学院研究生部张保衡、东北电力学院叶荣学、东北电力试验研究院陈金昌、上海电力学院张家齐、北京电力高等专科学校管楚定等专家的大力帮助，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请使用本教材的师生和读者给予批评指正。

编 者

一九九一年三月

54001102

目 录

前 言

绪 论	1
第一章 汽轮机级的工作原理	6
第一节 概述	6
第二节 可压缩流体的基本方程	10
第三节 蒸汽在喷嘴中的流动	13
第四节 蒸汽在动叶栅中的能量转换	24
第五节 级的轮周效率与速度比	30
第六节 叶栅的几何参数与叶栅损失	41
第七节 通流部分主要尺寸的确定及参数选择	45
第八节 级内损失和级效率	52
第九节 汽轮机级的热力计算示例	64
第十节 长叶片级	78
第二章 多级汽轮机	88
第一节 多级汽轮机的工作特点	88
第二节 汽轮机及其装置的效率	92
第三节 多级汽轮机的轴向推力	101
第四节 多级汽轮机的热力计算	103
第三章 汽轮机的变工况	122
第一节 喷嘴变工况	122
第二节 级组压力与流量的关系	129
第三节 工况变化时各级焓降的变化	133
第四节 工况变化时动叶进口处的撞击损失及级内反动度的变化	135
第五节 工况变化时汽轮机轴向推力的变化	140
第六节 汽轮机的调节方式和调节级变工况	142
第七节 凝汽式汽轮机工况图	160
第八节 变工况下的热力核算	162
第九节 蒸汽参数变化对汽轮机经济性和安全性的影响	166
第四章 汽轮机的凝汽设备	178
第一节 凝汽设备的组成及任务	178
第二节 机组运行对凝汽器的要求	178
第三节 凝汽器的热力特性	184
第四节 抽气器	189
第五节 多压凝汽器	192
第五章 汽轮机主要零部件的结构及强度	195
第一节 汽轮机的静止部分	196
第二节 汽轮机的转动部分	212

第三节	叶片的强度	220
第四节	叶片的振动	226
第五节	转子的临界转速	245
第六节	机组的振动	249
第七节	法兰螺栓的安装计算	255
第六章	汽轮机调节	263
第一节	汽轮机调节的基本概念	263
第二节	典型调速系统介绍	267
第三节	调速系统的转速感受机构	270
第四节	调节系统的传动放大机构	276
第五节	配汽机构	292
第六节	汽轮机调节系统的静态特性	297
第七节	调节系统静态特性试验和调整	307
第八节	调节系统的动态特性	311
第九节	汽轮机的保护系统及主要装置	315
第十节	汽轮机的供油系统及主要设备	324
第十一节	中间再热式汽轮机的调节	330
第十二节	功频电液调节系统	336
第十三节	数字电液调节	345
第七章	供热式汽轮机	349
第一节	背压式汽轮机	350
第二节	一次调节抽汽式汽轮机	351
第三节	二次调节抽汽式汽轮机	359
第八章	汽轮机运行	365
第一节	汽轮机的热应力	365
第二节	汽轮机的热膨胀	373
第三节	汽轮机的热变形	378
第四节	汽轮机的寿命	380
第五节	汽轮机的启动	384
第六节	汽轮机停机	394
第七节	汽轮机的几种典型事故	397

绪 论

一、汽轮机在国民经济中的地位

汽轮机是利用蒸汽的热能来作功的旋转式原动机。在热力发电厂中, 锅炉将燃料的化学能转变为蒸汽的热能, 蒸汽经汽轮机将热能转变为机械能, 汽轮机带动发电机又将机械能转变成电能。与其它热力原动机(如燃气轮机, 柴油机等)相比, 汽轮机具有单机功率大、效率高、运行平稳以及能使用廉价燃料——煤等优点, 因而在热力发电业中得到极为广泛的应用。由于汽轮机也能设计成变速运行, 所以还可用它直接驱动各种从动机械, 如泵、风机、高炉风机、压气机和船舶的螺旋桨等。因此, 汽轮机在国民经济中起着极其重要的作用。

电力生产量是衡量一个国家经济发展水平的重要标志之一。电力工业为国民经济各个领域和部门提供电能, 它的发展直接影响着国民经济的发展速度, 因此, 必须超前发展。1989年, 我国年发电量为5796亿kW·h, 装机容量达1.2亿kW, 从1949年占世界第25位, 跃居世界第五位, 仅次于美、苏、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要超过1.2万亿kW·h, 发电设备装机容量要达到2.4~2.6亿kW。其中火电年发电量为9000亿kW·h, 火电装机容量为1.8亿kW。电力事业发展的宏伟目标, 要求汽轮机在容量和效率方面都要上一个新的台阶, 在今后的一段时期内, 我国火电的主力机组将是300~600MW亚临界机组, 同时要发展超临界机组。

二、汽轮机发展概述

表0-1为汽轮机初期发展的一览表。从1883年第一台实用性汽轮机问世至1924年, 我们今天所能遇到的火力发电汽轮机的主要型式差不多都已具备。后来, 随着年代的推移, 汽轮机得到更完善的发展。

表 0 1 汽轮机初期发展一览表

时 间	国 家	发明者	汽 轮 机 类 型	汽 轮 机 特 点
1883年	瑞 典	拉伐尔	单级冲动轴流式汽轮机 ($P=5\text{hp}$, $n=26000\text{r/min}$)	采用了缩放喷嘴(拉伐尔喷嘴)和等强度叶轮
1884年	英 国	巴森斯	轴流多级反动式汽轮机 ($P=5\text{hp}$ $n=17000\text{r/min}$)	反动式原理 多级
1900年	美 国	寇蒂斯	单级复速级汽轮机(又称寇蒂斯透平)	采用复速级
1900~1903年	法 国	拉 透 利	多级冲动式汽轮机	把冲动原理应用于多级
1912年	瑞 典	容斯特罗姆	辐流式汽轮机	辐流
1920年			抽汽式或给水预热蒸汽汽轮机	提高了循环效率
1923年 1924年	德国西门子公司		22.05 MPa, 400℃超临界中间再热式汽轮机	提高循环效率

一百多年来汽轮机主要沿着以下几方面发展:

1. 增加功率

汽轮机单机功率从最初的几个、几十个千瓦, 发展到现在的几十万乃至上百万千瓦。

2. 提高蒸汽初参数

汽轮机进汽初参数从最初的 200°C 、 0.1MPa , 发展到现在的 540°C 、 24MPa 。

3. 提高效率

汽轮机的内效率从小于80%提高到接近90%。由于采用了复杂的循环, 使汽轮发电机组的效率从低于15%提高到45%。

4. 降低金属消耗量和成本

金属消耗量由早期的小功率汽轮机的 $4\sim 8\text{kg/kW}$, 降低到现在大功率汽轮机的 $2\sim 3\text{kg/kW}$ 。汽轮机的制造成本也随着金属消耗量的减少和加工量的减少而降低。

5. 提高负荷的适应性

在汽轮机发展过程中, 人们不断地对汽轮机的结构、运行方式以及控制手段进行改进, 使汽轮机更好地适应负荷的变化, 以提高供电质量。

上述诸方面是相互关联的, 如提高单机功率, 既能降低单位功率机组成本, 又能提高机组效率, 同时还便于集中控制, 提高负荷的适应性; 而提高蒸汽参数, 既可提高机组效率, 又可提高单机功率。

当今汽轮机制造工业主要发达国家的制造厂见表0-2。

表 0-2 世界主要国家汽轮机制造业概况

国 名	公司或制造厂	汽 轮 机 产 品	生产能力
美 国	通用电气公司 (GE)	大型火电和核电汽轮机	年产汽轮机近25000 MW
	西屋电气公司 (WH)	大型火电和核电汽轮机	年产汽轮机近20000 MW
原苏联	列宁格勒金属工厂 (ЛМЗ)	200~1200 MW 凝汽式汽轮机 60~210 MW 供热机组 1000 MW 核电汽轮机	年产汽轮机约10000 MW
	哈尔科夫汽轮机厂 (ХТЗ)	160~500 MW 凝汽式汽轮机 220~500 MW 核电汽轮机	年产汽轮机约6000 MW
日 本	日立公司 (HIT)	可生产单机容量1000 MW 的大容量机组	年产汽轮机1500 MW
	东芝公司 (TOS)	700~1000 MW 汽轮发电机组	年产汽轮机5000~6000 MW
	三菱重工业公司 (MHI)	可生产单机容量1000 MW 的大容量机组	年产汽轮机4000~5000 MW
瑞 士	勃朗·鲍威尔公司 (BBC)	可生产单机容量1300 MW 的大容量汽轮机	年产汽轮机10000 MW

我国汽轮机的发展历史较短，解放前没有汽轮机制造工业。在解放后短短的三十多年中，先后建立了上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂和东方汽轮机厂等大型汽轮机制造厂，以及北京重型电机厂、青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等中小型汽轮机厂，还建立了以生产工业汽轮机为主的杭州汽轮机厂和以生产燃气轮机为主的南京汽轮发电机厂。

从1955年上海汽轮机厂制成了我国第一台汽轮机（功率为6000kW）以来，我国已生产了50MW、100MW、125MW、200MW、300MW和600MW等发电用凝汽式汽轮机以及各种工业用汽轮机。

三、汽轮机的分类及型号

汽轮机的类型很多，可按不同的方法分类。按工作原理分，有冲动式和反动式；按级数分，有单级和多级；按热力过程分，有凝汽式、背压式、抽汽式、中间再热式；按工质参数分，有低压、中压、高压、亚临界及超临界；按主要结构分，有单缸式、多缸式、轴流式、辐流式等；按用途分，有发电用、船用、工业用。

为了便于识别汽轮机的类别，每台汽轮机都有个产品型号。我国生产的汽轮机所采用的系列标准及型号已经统一，汽轮机产品型号的表示方法是：

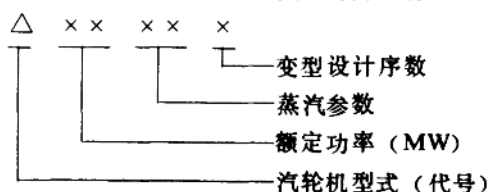


表0-3列出了国产汽轮机型号的代表号。

表 0-3 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
两 次 调 整 抽 汽 式	CC	移 动 式	Y

示例：

N50-8.82：凝汽式50MW，蒸汽初压8.82MPa，按原设计制造的汽轮机。N200-12.75/535/535：凝汽式200MW，蒸汽初压12.75MPa，初温535℃，中间再热温度535℃，按原设计制造的汽轮机。

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

CC12-3.43/0.98/0.118：两次调整抽汽式12MW，蒸汽初压3.43MPa，高压抽汽压力0.98MPa，低压抽汽压力0.118MPa，按原设计制造的汽轮机。

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

CB25-8.82/1.47/0.49：抽汽背压式25MW，蒸汽初压8.82MPa，抽汽压力1.47MPa，背

压0.49MPa,按原设计制造的汽轮机。

四、汽轮机的结构简图

图0-1是单级汽轮机主要部分结构图。动叶按一定的距离和一定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。动叶栅与叶轮以及叶轮轴组成汽轮机的转动部分称为转子。静叶按一定距离和一定角度排列形成静叶栅,静叶栅是固定不动的,静叶栅构成的蒸汽通道称为喷嘴。转子以及静叶都装在汽缸内。具有一定的压力和一定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,在动叶通道中汽流改变速度,对动叶产

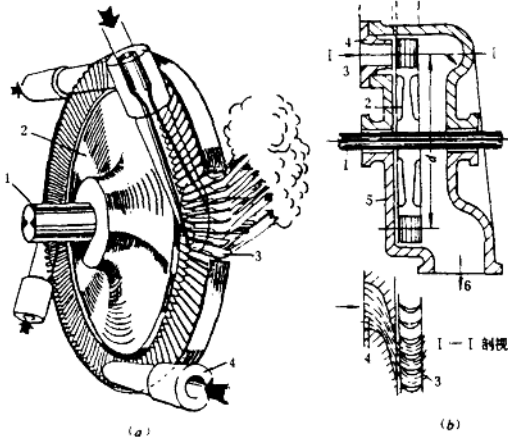


图 0-1 单级汽轮机的结构简图

(a) 立体图; (b) 剖面图

1—主轴; 2—叶轮; 3—动叶;
4—喷嘴; 5—汽缸; 6—排汽口

生一个作用力,推动转子转动,完成动能到机械能的转换。一系列静叶栅和一系列动叶栅组成了从热能到机械能转换的基本单元,称之为级。汽轮机可以是单级的,但绝大多数是多级的。

图0-2为多级汽轮机的纵剖面图。虽然汽轮机由很多零部件组成,但概括地看,仍分为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轮(或如图0-2所示把主轴和叶轮一体制造),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,汽缸可以是一个,也可以是多个独立部分。隔板装在汽缸上,隔板上装有喷嘴(或静叶),在一个汽轮机中,静叶列数和动叶列数相同。轴承支持轴承和推力轴承。支持轴承保证了静子对转子的支承作用,并且确定转子与静子的相对幅向位置。推力轴承保证了转子在轴向推力的作用之下仍旧能够维持相对于静子的正确轴向位置。

转子和静子之间的密封是用汽封来实现的,它的作用是减少运动表面和静止表面之间的间隙中可漏过的工质流量,以保证汽机有较高的效率。在汽轮机内部,凡是有压力差存在而又不希望有大量工质流过的地方都装有汽封。在汽缸的两端,转子轴由汽缸内穿出来的地方装有轴封;在多级汽轮机的级与级之间装有隔板轴封;在动叶顶部装有叶顶汽封。

上述可知,汽轮机本体的主要结构是比较简单的。但是光有上述的转子和静子是不能工作的,还必须有附属于本体的各种系统,包括汽水系统、调节保护系统、润滑系统、滑销系统等,只有在各系统协同一致的条件下,汽轮机才能很好地完成自己所负担的任务。

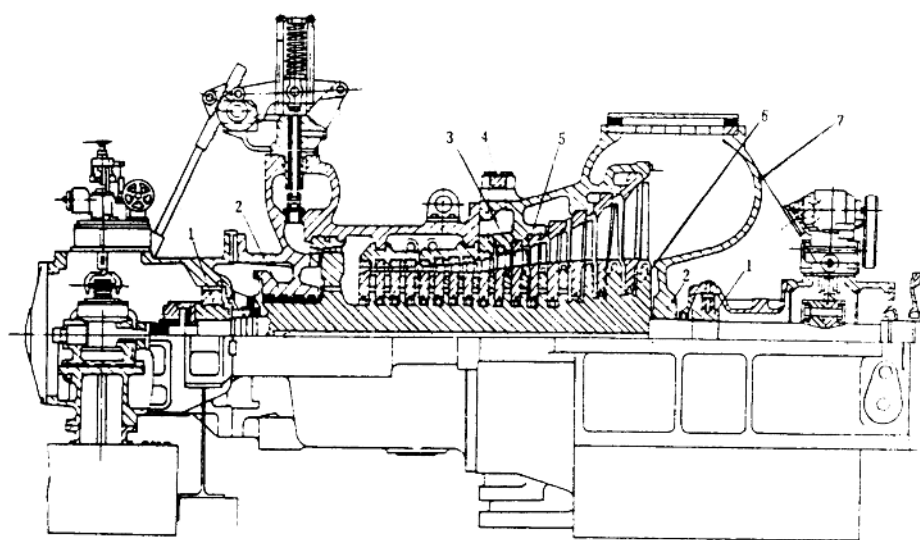


图 0-2 多级汽轮机纵剖面图

1 -- 轴承: 2 -- 轴封: 3 -- 静叶: 4 -- 隔板: 5 -- 动叶:
6 -- 转子: 7 -- 汽缸

第一章 汽轮机级的工作原理

第一节 概 述

汽轮机的作用是将高温、高压的汽体所具有的热能转换为机械功，而能完成这个转换的基本单元称之为级。从结构上看，级主要是由一系列喷嘴叶栅（或静叶栅）和一系列动叶栅

组成，如图1-1所示。当压力为 p_0 、速度为 c_0 的蒸汽通过静叶通道时，在其中膨胀，流出静叶时，压力降低到 p_1 ，速度由 c_0 升至 c_1 ，完成了由热能向动能的转换。从喷嘴出来的具有一定速度的蒸汽流，进入动叶通道时，一方面对动叶产生一个冲动力，蒸汽将其在静叶内所获得的动能转换为动叶上的机械功，另一方面蒸汽在动叶通道中继续膨胀加速，对动叶产生一个反作用力（称为反动力）。在这二个力的合力作用下，动叶转动产生机械功。

一、冲动作用原理和反动作用原理

1. 冲动作用原理

由力学知道，当运动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，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，高速汽流冲击在汽轮机的动叶上，受到动叶阻碍，而改变其速度的大小和方向，则汽流给动叶施加一个冲动力。图1-2所示为无膨胀的动叶通道，蒸汽以速度 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 w_2 出动叶，则蒸汽对动叶施加一个轮周方向的冲动力 F_t ，这个力的大小，主要决定于单位时间内通过动叶通道的蒸汽质量及其速度的变化。蒸汽质量越大，速度变化越大，则冲动力就越大。

冲动作用的特点是蒸汽仅把从喷嘴中获得的动能转变为机械功，不涉及蒸汽在动叶通道中的膨胀

2. 反动作用原理

反动作用原理和冲动作用原理不同。当蒸汽流经动叶通道时，如果得到继续膨胀、加速，则在汽流离开动叶时，施加给动叶一个与汽流运动方向相反的作用力，这个力就叫反动力。如同从火箭尾部喷出的高速气流给火箭一个与气流方向相反的作用力，推动火箭向上运动的原理一样

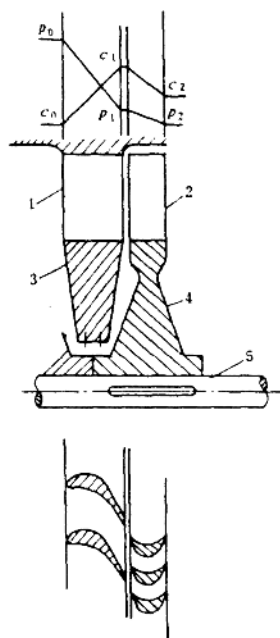


图 1-1 汽轮机级的示意图

1—静叶；2—动叶；3—隔板；
4—叶轮；5—轴

随着反动力的产生，蒸汽在动叶栅中已完成了二次能量的转换，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，再则是随着蒸汽的加速，给动叶栅一个反动力，推动转子转动，作出机械功，完成动能到机械功的转换。

通常蒸汽在动叶通道中总会产生不同程度的膨胀，因此，如同图1-3所示，动叶既受到蒸汽的冲动作用力 F_i ，也受到蒸汽的反作用力 F_r 。这两个力的方向都不和轮周方向一致。推动动叶转动的力，是它们的合力 F 在轮周方向的分力 F_u 。

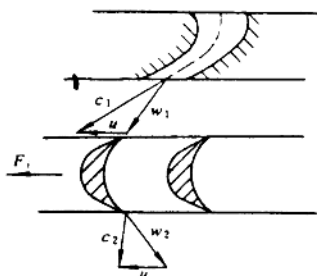


图 1-2 蒸汽流过无膨胀动叶通道时速度的变化

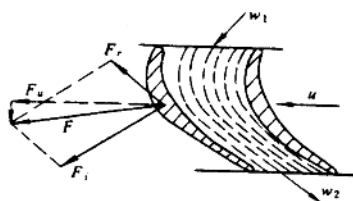


图 1-3 蒸汽在动叶汽道内膨胀时对动叶的作用力

二、汽轮机级的反动度

级的动叶栅可以是仅受蒸汽冲动力的作用，也可以是既受冲动力的作用，又受反动力的作用。判别有无反动力的作用，作用力的大小，是根据蒸汽在动叶栅中膨胀的程度。而动叶栅中蒸汽膨胀程度，是用级的反动度 Ω_m 衡量的，它等于蒸汽在动叶通道内膨胀时的理想焓降 Δh_b 和在整个级的滞止理想焓降 Δh_t^* 之比，即

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

图1-4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*点是汽流被等熵地滞止到初速等于零的状态， 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*，在级内等熵膨胀到 p_2 时的焓降 Δh_t^* ，称为级的滞止理想焓降。而蒸汽从0点状态在级内等熵膨胀到 p_2 时的焓降 Δh_t ，称为级的理想焓降。按同样定义， Δh_n^* 为喷嘴的滞止理想焓降，而 Δh_b 为动叶的理想焓降。

根据图1-4，公式(1-1)又可表示为

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

因为等压线向着熵增方向有扩张趋势，所以

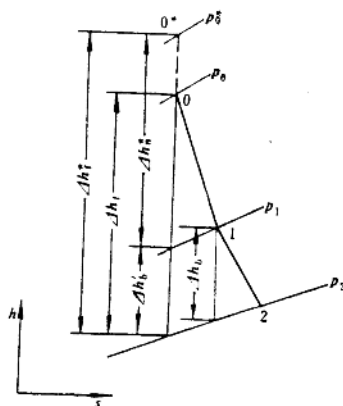


图 1-4 用于确定反动度的级的热力过程线

$\Delta h'_b$ 不等于 Δh_b , 但可认为 $\Delta h'_b \approx \Delta h_b$ 。

根据式 (1-1) 和图 1-4 可得

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

和

$$\Delta h_a^* = (1 - \Omega_m) \Delta h_t^*$$

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

级的反动度沿动叶高度是不相同的, 以 m 为注脚的反动度 Ω_m 是表示平均直径截面处的反动度, 称为平均反动度。平均直径是动叶顶部和根部直径的平均值。对较短的直叶片级, 由于反动度沿叶高变化不大, 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。

三、汽轮机级的类型及其特点

根据蒸汽在汽轮机级通流部分中的流动方向, 汽轮机级可分为轴流式和辐流式两种。电站汽轮机一般都为轴流式。轴流式级按蒸汽在级的动叶内的膨胀程度, 即反动度大小, 可分为冲动级和反动级。冲动级又包括纯冲动级、带反动度的冲动级以及复速级。

(一) 冲动级

1. 纯冲动级

反动度 $\Omega_m = 0$ 的级称为纯冲动级, 如图 1-5 所示。级内能量转换的特点是, 蒸汽只在喷嘴叶栅中进行膨胀, 将蒸汽的热能转变成动能, 在动叶中无膨胀, 蒸汽仅对动叶施加冲动力, 而将动能转换为机械功。因此, 动叶进出口蒸汽压力相等, 即 $p_1 = p_2$, 且 $\Delta h_b = 0$, 故有 $\Delta h_a^* = \Delta h_t^*$ 。它的结构特点是, 动叶叶型近乎对称弯曲。纯冲动级作功能力大, 但效率比较低。

2. 带反动度的冲动级

为了使动叶通道有一定的收缩趋势, 以提高级效率, 通常在冲动级中设置一定的反动度, 一般 $\Omega_m = 0.05 \sim 0.20$ 。这样, 它就既具有冲动级的特征, 又包含有反动级的因素, 故称之为带反动度的冲动级, 如图 1-1 所示。级内能量转换的特点是, 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, $p_1 > p_2$, $\Delta h_a > \Delta h_b$ 。蒸汽对动叶栅的作用力以冲动力为主, 但也有一部分反动力。它的作功能力比反动级的大, 效率又比纯冲动级的高, 在汽轮机中得到广泛应用。

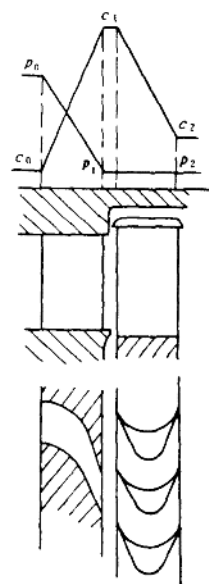


图 1-5 纯冲动级中压力和速度变化示意图

3. 复速级

复速级又称双列速度级。这种级实质上是单列冲动级的一种延伸, 如图 1-6 所示。即在单列级动叶之后增加一列转向导叶和一列动叶。蒸汽在第一列动叶作功之后, 经转向导叶进入第二列动叶, 继续将蒸汽的动能转换为机械功。因此, 复速级的作功能力比单列冲动级要大。通常在级的焓降很大, 喷嘴出口速度很高时采用复速级。

为了提高复速级的效率,也可以将其设计成带反动度的,即除了在喷嘴内有焓降外,在各列动叶和导叶中也分配适当的焓降。

当第二列动叶出口速度仍较大时,可再增加一列导叶和动叶,这种级就称为三列速度级

(二) 反动级

蒸汽在级中的理想焓降,平均分配在喷嘴叶栅和动叶栅的级称为反动级。在反动级中, $p_1 > p_2$, $\Delta h_n = \Delta h_b$, $\Omega_m \approx 0.5$ 。蒸汽经动叶通道时,除了给动叶施加冲动力外,还由于在动叶中膨胀、加速,给动叶一个比较大的反动作用力。它的结构特点是,动叶叶型与喷嘴叶型相同(如图1-7)。反动级的效率比冲动级高,但作功能力比较小。

不论是哪种类型的级,当蒸汽离开级时仍具有一定的速度 c_2 ,其动能 $\frac{c_2^2}{2}$ 称为余速动能,余速动能如果在后面的级中得不到利用,就成了损失,称为余速损失。

以上是根据级内能量转换的不同把汽轮机的级分成四种,而在使用中往往把汽轮机的级分为速度级和压力级两种。速度级有双列和多列之分。单列冲动级和反动级都属压力级。

在喷嘴调节的汽轮机中,因为第一级的通流面积是随负荷变化而变化的,所以喷嘴调节汽轮机的第一级又称为调节级,调节级可以是单列级,也可以是复速级,一般中小容量机组采用复速级,大容量汽轮机采用单列冲动级。

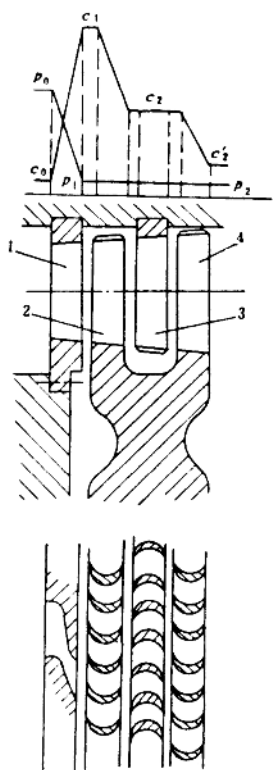


图 1-6 复速级中汽流压力和速度变化示意图

1—喷嘴; 2—第一列动叶; 3—导叶; 4—第二列动叶

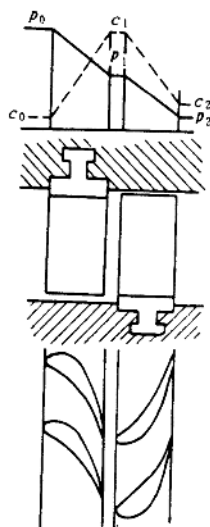


图 1-7 反动级中蒸汽压力和速度变化示意图

第二节 可压缩流体的基本方程

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。求解这样的蒸汽流动问题是相当困难,甚至是不可能的。为了便于对流动进行分析、研究,除略去蒸汽的粘性外,并作以下的假定:

(1) 蒸汽在叶栅通道中的流动是稳定流动,即流动过程中,蒸汽质点的参数只与该质点所处的位置有关,而不随时间改变。当汽轮机功率和蒸汽参数变化不大时,可以近似地看成是稳定流动。

(2) 蒸汽在叶栅通道中的流动是一元流动,即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,即在叶栅通道中的蒸汽与外界没有热交换。由于汽轮机的叶片都是成组布置的,各个叶片通道中蒸汽参数相同,且蒸汽通过通道的时间又极短,可以认为彼此之间没有热交换。

经上述假定后,蒸汽在叶栅中十分复杂的实际流动,就变成稳定的、绝热的一元流动。这样,就可借助一元流动的理论 and 基本方程来进行分析、计算。但在实际工程技术问题中,还应根据具体条件选用上述假定,使之既有利于分析、计算,又能使得计算结果接近实际。例如当设计计算相对高度较小的叶栅时,运用以上假定进行计算可以得到满意的精确性。但对相对高度较大的叶栅进行计算时,还必须根据不同情况,采取更合理的方法。

可压缩流体的稳定、绝热、一元流动的基本理论在《流体力学》、《工程热力学》中已作详细分析、讨论。这里仅就汽轮机级的热力计算中所用到的可压缩流体的一元流动基本方程,作一简单介绍。

一、连续性方程

连续性方程是质量守恒定律的数学表达式。

图1-8是一个变截面流管示意图,流过1-1和2-2截面的流量为

$$G_1 = c_1 \rho_1 A_1, G_2 = c_2 \rho_2 A_2$$

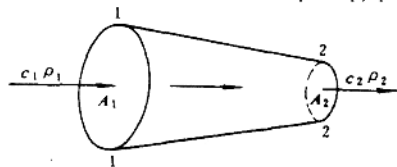


图 1-8 流管简图

根据质量守恒定律,在稳定流动条件下,单位时间内流过流管各截面的蒸汽量是相等的。
则

$$G_1 = G_2 = G = \text{常数}$$

$$c_1 \rho_1 A_1 = c_2 \rho_2 A_2 = c \rho A = \text{常数}$$

$$\text{亦即 } G = c \rho A \quad (1-3)$$

式中 G ——通过流管横截面的蒸汽质量流量 (kg/s);

A ——管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);

ρ ——截面 A 上的蒸汽密度 (kg/m^3)。

式 (1-3) 就是蒸汽稳定流动的连续方程, 对该式进行微分, 可得到连续方程的微分表