

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANCHANG QILUNJI  
YUANLI JI XITONG

# 电厂汽轮机 原理及系统

(第二版)

山西大学工程学院 靳智平 主 编  
南京工程学院 王毅林 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



DIANCHANG QILUNJI  
YUANLI JI XITONG

# 电厂汽轮机 原理及系统

(第二版)

主 编 山西大学工程学院 靳智平  
副主编 南京工程学院 王毅林  
编 写 山西大学工程学院 张国庆  
主 审 太原理工大学 夏同棠



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书在加强基础理论的同时,结合我国汽轮机发展的现状,理论联系实际,力求体现先进性,应用性。

本书详细阐述了汽轮机工作原理,汽轮机本体结构和主要零件的振动,汽轮机调节系统,汽轮机凝汽设备及系统,汽轮机运行等。

本书可作为本科和高职高专热能动力工程及相近专业的教材,也可供从事相关专业的工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

电厂汽轮机原理及系统/靳智平主编. —2版. —北京:中国电力出版社, 2006

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 7-5083-4271-2

I. 电... II. 靳... III. 火电厂—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 (2006) 第 104143 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2004 年 10 月第一版

2006 年 9 月第二版 2006 年 9 月北京第四次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 463 千字 1 插页

印数 9001—12000 册 定价 35.00 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

根据本书第一版在若干高校相关专业使用的反馈意见,本书第二版对部分章节进行了调整和删改。本书的主要内容有汽轮机的工作原理,多级汽轮机,汽轮机的变工况,汽轮机的调节,供热式汽轮机,汽轮机主要零件结构与振动,汽轮机凝汽设备及系统和汽轮机运行。教材的编写在加强基础理论的同时,理论联系实际,注重实践与应用,力求体现先进性和应用性。

参加本书编写的有山西大学工程学院靳智平(绪论,第二、第六、第八章);南京工程学院王毅林(第四、第五章,第七章第一节);山西大学工程学院张国庆(第一、第三章,第七章第二节)。本书由靳智平担任主编,王毅林担任副主编。

本书在编写过程中,得到了很多有关院校老师和企业的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2006年6月

# 第一版前言

本书为高等学校本科热能与动力工程专业“电厂汽轮机原理及系统”课程的教材。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,汽轮机的调节,供热式汽轮机,汽轮机主要零件结构与振动,汽轮机热力系统及设备和汽轮机运行。教材的编写在加强基础理论的同时,理论联系实际,注重实践与应用,力求体现先进性和应用性。

本书由山西大学工程学院靳智平担任主编,南京工程学院王毅林担任副主编。

参加编写人员分工:山西大学工程学院靳智平编写绪论,第二章,第六章,第八章;南京工程学院王毅林编写第四章,第五章,第七章;山西大学工程学院张国庆编写第一章,第三章。全书由靳智平统稿。

本书由太原理工大学夏同棠教授担任主审。

在编写过程中,参考了有关兄弟院校和企业的诸多文献、资料,并得到有关院校老师和同事们的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

由于水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2004年6月

## 目 录

## 前 言

## 第一版前言

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 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 级的轮周效率与最佳速度比      | 21  |
| 第四节 级通流部分主要尺寸的确定      | 27  |
| 第五节 汽轮机级内损失和级效率       | 32  |
| 第六节 汽轮机级的热力计算示例       | 42  |
| 第七节 长叶片级              | 54  |
| 第二章 多级汽轮机             | 57  |
| 第一节 多级汽轮机的特点与损失       | 57  |
| 第二节 汽轮机及其装置的评价指标      | 66  |
| 第三节 多级汽轮机的轴向推力及其平衡    | 68  |
| 第四节 轴封及其系统            | 71  |
| 第三章 汽轮机的变工况           | 80  |
| 第一节 喷管的变工况            | 80  |
| 第二节 级组压力与流量的关系        | 83  |
| 第三节 工况变动时各级比焓降及反动度的变化 | 86  |
| 第四节 汽轮机调节方式和调节级的变工况   | 90  |
| 第五节 凝汽式汽轮机工况图         | 99  |
| 第六节 变工况时汽轮机轴向推力的变化    | 100 |
| 第七节 初终参数变化对汽轮机工作的影响   | 102 |
| 第八节 变工况下的热力计算         | 105 |
| 第九节 变转速汽轮机            | 109 |
| 第四章 汽轮机的调节            | 113 |
| 第一节 汽轮机调节的任务与组成       | 113 |
| 第二节 典型国产调速系统简介        | 116 |
| 第三节 汽轮机调节系统的静态特性、动态特性 | 118 |
| 第四节 汽轮机液压调节系统         | 125 |
| 第五节 中间再热机组的调节         | 137 |
| 第六节 调节系统的试验与调整        | 140 |
| 第七节 汽轮机保护系统及主要装置      | 143 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 第八节 汽轮机的供油系统 .....             | 147 |
| 第九节 数字电液调节系统 .....             | 151 |
| <b>第五章 供热式汽轮机</b> .....        | 166 |
| 第一节 背压式汽轮机 .....               | 166 |
| 第二节 一次调节抽汽式汽轮机 .....           | 167 |
| 第三节 二次调节抽汽式汽轮机 .....           | 172 |
| <b>第六章 汽轮机主要零件结构与振动</b> .....  | 175 |
| 第一节 汽轮机静止部分结构 .....            | 175 |
| 第二节 汽轮机转动部分结构 .....            | 194 |
| 第三节 叶片振动 .....                 | 206 |
| 第四节 汽轮机转子的振动 .....             | 219 |
| 第五节 汽轮机动静平衡试验简介 .....          | 225 |
| <b>第七章 汽轮机凝汽设备及系统</b> .....    | 234 |
| 第一节 汽轮机凝汽设备及系统 .....           | 234 |
| 第二节 发电厂空冷系统 .....              | 245 |
| <b>第八章 汽轮机运行</b> .....         | 251 |
| 第一节 汽轮机主要零部件的热应力、热膨胀及热变形 ..... | 251 |
| 第二节 汽轮机的启动 .....               | 259 |
| 第三节 汽轮机的停运 .....               | 273 |
| 第四节 汽轮机的正常运行维护 .....           | 281 |
| 第五节 汽轮机典型事故及其预防 .....          | 289 |
| <b>参考文献</b> .....              | 296 |

## 绪 论

汽轮机是以蒸汽为工质的将热能转变为机械能的旋转式原动机。与其他热力原动机相比,它具有单机功率大、效率较高、运转平稳、单位功率制造成本低和使用寿命长等一系列优点,因而得到广泛应用。汽轮机不仅是现代火电厂和核电站中普遍采用的发动机,而且还广泛用于冶金、化工、船运等部门用来直接驱动各种从动机械,如各种泵、风机、压缩机和传动螺旋桨等。在使用化石燃料的现代常规火电厂、核电站以及地热发电站中,汽轮机是用来驱动发电机生产电能的,故汽轮机与发电机的组合称为汽轮发电机组。全世界发电总量的80%左右是由汽轮发电机组发出的,所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。

汽轮机设备是火电厂的三大主要设备之一。在火力发电厂,锅炉将燃料的化学能转变为蒸汽的热能,汽轮机将蒸汽的热能转变为机械能,发电机将转轴的机械能转变为电能。

### 一、汽轮机的发展史

从1883年制造出第一台实用的单级冲动式汽轮机以来,汽轮机已有了一百多年的历史,近几十年汽轮机发展尤为迅速。

目前,在发电汽轮机中已有瑞士制造的双轴1300MW汽轮机、前苏联制造的单轴1200MW汽轮机和法国制造的1500MW核电汽轮机等投入运行,2000MW高参数全速汽轮机的开发研制工作也正在进行中。

汽轮机是在高温、高压、高转速下工作的大型精密动力机械,它的研发和制造涉及到许多高科技领域和工业部门,汽轮机的制造水平是一个国家科学技术和工业装备技术发展的标志之一。

随着电力需求的迅速增长、电力工业的迅猛发展以及电网容量的不断扩大,汽轮机正向着高参数、大容量方向发展,提高汽轮机的经济性、安全性、负荷适应性和自动化水平始终是汽轮机发展的中心和重点。

随着汽轮机参数和容量的不断增大,汽轮机的热力系统、调节保护系统、监测控制系统等都进一步复杂化。

核电是一种安全、可靠、清洁的能源。近年来,核电站的发展很快,许多国家核电所占比重很大。核电汽轮机是在火电汽轮机的基础上发展起来的,其发展的主流是大型化,为多缸、单轴、中间再热凝汽式汽轮机。与火电汽轮机一样,供热汽轮机以及工业汽轮机也正向着高参数、大功率、高转速、多品种的方向发展。

近几十年汽轮机发展的主要特点是:

(1) 增大单机功率。增大单机功率不仅能迅速发展电力生产,而且可降低单位功率投资成本,可提高机组的热经济性,可加快电站建设速度。

(2) 提高蒸汽参数。提高蒸汽初参数是提高热效率的重要途径,同时也可提高单机功率。

(3) 普遍采用一次中间再热。采用中间再热后可降低低压缸末级排汽湿度,为提高蒸汽初压创造了条件,从而可提高机组内效率、热效率和运行可靠性。

(4) 采用燃气—蒸汽联合循环发电装置。燃气轮机和蒸汽轮机联合工作的装置,大大提高了装置的热效率,还可解决燃煤发电存在的严重环境污染问题,节省大量冷却水,另投资相对降低,负荷适应性也较好。

(5) 提高机组的运行水平。现代大型机组增设和改善了保护、报警和状态监测系统,有的还配置了智能化故障诊断系统,提高了机组运行、维护和检修水平,增强了机组运行的可靠性,并保证了规定的设备使用寿命。

目前世界上汽轮机的主要制造企业有:美国的通用电气公司(GE)、西屋电气公司(WH),日本的三菱、东芝和日立公司,欧洲的ABB公司,俄罗斯的列宁格勒金属工厂(JIM3)、哈尔科夫透平发动机厂(XTF3)和乌拉尔透平发动机厂(TM3),英国的通用电气公司(GEC),法国的阿尔斯通—大西洋公司(AA),德国的电站设备联合制造公司(KWU)等等。

我国自1955年开始生产出第一台中压6MW汽轮机,此后陆续生产出12MW、25MW、50MW、100MW、125MW、200MW和300MW汽轮发电机组。80年代初又从美国西屋电气公司引进了300MW和600MW机组的整套制造技术,经过消化吸收、不断优化,机组的各项技术性能均基本达到国外同类机组的先进水平,使我国电力工业得到进一步发展。我国生产汽轮机的主要工厂有上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、北京重型电机厂,以及青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等,南京汽轮发电机厂以生产燃气轮机为主,杭州汽轮机厂以生产工业汽轮机为主。

## 二、汽轮机的分类及型号

### (一) 汽轮机的分类

#### 1. 按工作原理分

级是汽轮机中最基本的作功单元,它是由喷管叶栅和与它相配合的动叶栅组成的。蒸汽在汽轮机级中以不同方式进行能量转换,便形成不同工作原理的汽轮机,即冲动式汽轮机和反动式汽轮机。

(1) 冲动式汽轮机:主要由冲动级组成,蒸汽主要在喷管叶栅(或静叶栅)中膨胀,在动叶栅中只有少量膨胀。

(2) 反动式汽轮机:主要由反动级组成,蒸汽在喷管叶栅(或静叶栅)和动叶栅中都进行膨胀,且膨胀程度大致相同。

#### 2. 按热力特性分

(1) 凝汽式汽轮机:蒸汽在汽轮机中膨胀做功,做完功后的蒸汽在低于大气压力的真空状态下进入凝汽器凝结成水。若将蒸汽在汽轮机某级后引出再次加热,然后再返回汽轮机继续膨胀做功,这就是中间再热凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机:汽轮机的排汽压力大于大气压力,排汽直接供热用户使用,而不进入凝汽器。当排汽作为其他中、低压汽轮机的工作蒸汽时,又称前置式汽轮机。

(3) 抽汽式汽轮机:从汽轮机中间某级后抽出一定的可以调整参数、流量的蒸汽对外供热,其余汽流排入凝汽器。可分为一次调整抽汽式汽轮机和两次调整抽汽式汽轮机。

(4) 抽汽背压式汽轮机:具有调整抽汽的背压式汽轮机,调整抽汽和排汽都分别供热用户。

(5) 多压式汽轮机:汽轮机的进汽不止一个参数,在汽轮机的某中间级前又引入其他来源的蒸汽,与原来的蒸汽混合共同膨胀做功。

### 3. 按主蒸汽压力分

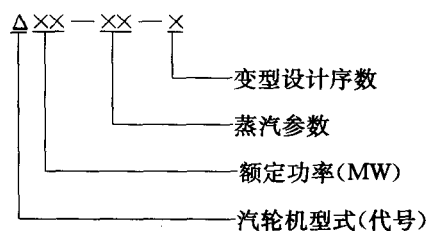
按不同的压力等级可分为：

- (1) 低压汽轮机：主蒸汽压力为 0.12~1.5MPa。
- (2) 中压汽轮机：主蒸汽压力为 2~4MPa。
- (3) 高压汽轮机：主蒸汽压力为 6~10MPa。
- (4) 超高压汽轮机：主蒸汽压力为 12~14MPa。
- (5) 亚临界压力汽轮机：主蒸汽压力为 16~18MPa。
- (6) 超临界压力汽轮机：主蒸汽压力大于 22.1MPa。
- (7) 超超临界压力汽轮机：主蒸汽压力大于 32MPa。

此外，按汽流方向可分为轴流式、辐流式和周流（回流）式汽轮机；按汽缸数目可分为单缸、双缸和多缸汽轮机；按用途可分为电站汽轮机、工业汽轮机和船用汽轮机；按布置方式可分为单轴、双轴汽轮机；按工作状态可分为固定式和移动式（如列车电站）汽轮机等。

### （二）汽轮机的型号

为了便于识别汽轮机的类别，每台汽轮机都有产品型号。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



汽轮机型式代号如表 0-1 所示。

表 0-1 汽轮机型式代号

| 代 号 | 型 式     | 代 号 | 型 式     | 代 号 | 型 式   |
|-----|---------|-----|---------|-----|-------|
| N   | 凝汽式     | CC  | 两次调整抽汽式 | Y   | 移动式   |
| B   | 背压式     | CB  | 抽汽背压式   | HN  | 核电汽轮机 |
| C   | 一次调整抽汽式 | CY  | 船用      |     |       |

汽轮机蒸汽参数表示方式见表 0-2，表内示例中功率的单位为 MW，蒸汽压力的单位为 MPa，蒸汽温度的单位为℃。

表 0-2 蒸汽参数表示方式

| 型 式         | 参数表示方式             | 示 例                 |
|-------------|--------------------|---------------------|
| 凝汽式         | 蒸汽初压               | N50-8.83            |
| 凝汽式（具有中间再热） | 蒸汽初压/蒸汽初温/再热温度     | N300-16.7/538/538   |
| 抽汽式         | 蒸汽初压/高压抽汽压力/低压抽汽压力 | CC12-3.43/0.98/0.12 |
| 背压式         | 蒸汽初压/背压            | B25-8.83/0.98       |
| 抽汽背压式       | 蒸汽初压/抽汽压力/背压       | CB25-8.83/1.47/0.49 |

# 第一章 汽轮机级的工作原理

## 第一节 概 述

汽轮机是将蒸汽工质的热能转变成动能,再将动能转变成机械能的一种热机。多级汽轮机由若干个级构成,而每个级就是汽轮机做功的基本单元,级是由喷管叶栅和与之相配合的动叶栅所组成。喷管叶栅将蒸汽的热能转变成动能,动叶栅将蒸汽的动能转变成机械能。

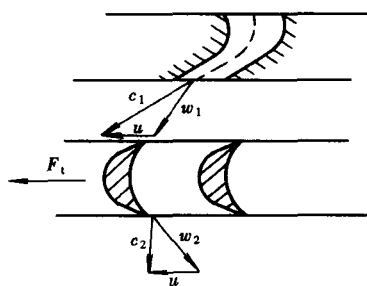


图 1-1 无膨胀动叶汽道内蒸汽的流动情况

### 一、蒸汽的冲动原理和反动原理

高速汽流通过动叶栅时,发生动量变化对动叶栅产生冲力,使动叶栅转动做功而获得机械能。由动量定理可知,机械能的大小决定于工作蒸汽的质量流量和速度变化量,质量流量越大,速度变化越大,作用力也越大。图 1-1 所示为无膨胀的动叶通道,汽流在动叶汽道内不膨胀加速,而只随汽道形状改变其流动方向,汽流改变流动方向对汽道所产生的离心力,叫做冲动力,这时蒸汽所做的机械功等于它在动叶栅中动能的变化量,这种级叫做冲动级。

蒸汽在动叶汽道内随汽道改变流动方向的同时仍继续膨胀、加速,加速的汽流流出汽道时,对动叶栅将施加一个与汽流流出方向相反的反作用力,此力类似于火箭发射时,高速气体从火箭尾部流出,给火箭一个与流动方向相反的反作用力,这个作用力叫做反动力。依靠反动力做功的级叫做反动级,如图 1-2 所示。

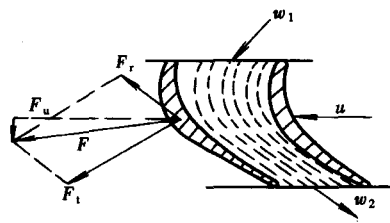


图 1-2 蒸汽在动叶汽道内膨胀的流动情况

现代汽轮机级中,冲动力和反动力通常是同时作用的,在这两个力的合力作用下,使动叶栅旋转而产生机械功。这两个力的作用效果是不同的,冲动力的做功能力较大,而反动力的流动效率较高,这一点会在以后的讨论中说明。

### 二、级的反动度

为了说明汽轮机级中反动力的比例,即蒸汽在动叶中膨胀程度的大小,常用级的反动度  $\Omega$  表示,它等于蒸汽在动叶栅中膨胀时的理想比焓降  $\Delta h_b$  和整个级的滞止理想比焓降  $\Delta h_t^*$  之比,即

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

式中  $\Omega_m$ ——称为级的平均反动度,是指在级的平均直径截面上的反动度,它由平均直径截面上喷管和动叶中的理想比焓降所确定。平均直径是动叶项部和根部处叶轮直径的平均值。

图 1-3 是级中蒸汽膨胀在焓熵图上的热力过程线。 $O$  点是级前的蒸汽状态点,  $O^*$  点是蒸汽等熵滞止到初速等于零的状态点,  $p_1$ 、 $p_2$  分别为喷管出口压力和动叶出口压力。蒸汽从滞止状态  $O^*$  点在级内等熵膨胀到  $p_2$  时的比焓降  $\Delta h_t^*$  为级的滞止理想比焓降  $\Delta h_n^*$  为蒸汽在喷管中的滞止理想比焓降,  $\Delta h_b$  为蒸汽在动叶中的理想比焓降。

实际上蒸汽参数沿叶高是变化的, 在动叶不同直径截面上的理想比焓降是不同的, 因此, 反动度沿动叶高度亦不相同。对于较短的直叶片级, 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, 须用相应截面的反动度。

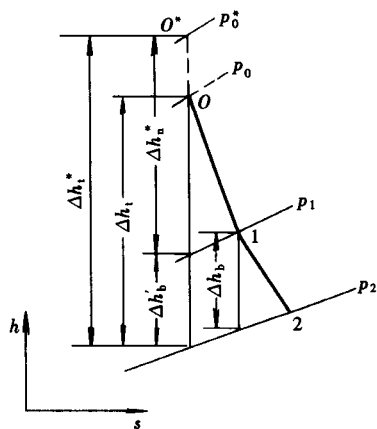


图 1-3 级的热力过程线

### 三、汽轮机级的类型

根据蒸汽在汽轮机级的通流部分中的流动方向, 汽轮机级可分为轴流式与辐流式两种。目前电站用汽轮机绝大多数采用轴流式级。轴流式级通常有下列几种分类方法。

#### （一）冲动级和反动级

冲动级有三种不同的形式。

##### 1. 纯冲动级

反动度  $\Omega_m = 0$  的级称为纯冲动级, 它的特点是蒸汽只在喷管叶栅中膨胀, 在动叶栅中不膨胀而只改变其流动方向。其动叶片的形式为对称叶片。因此动叶栅进出口压力相等, 即  $p_1 = p_2$ 、 $\Delta h_b = 0$ 、 $\Delta h_t^* = \Delta h_n^*$ 。纯冲动级做功能力大, 流动效率较低, 现代汽轮机中均不采用。

##### 2. 带反动度的冲动级

为了提高汽轮机级的效率, 冲动级应具有一定的反动度 ( $\Omega_m = 0.05 \sim 0.20$ ), 这时蒸汽的膨胀大部分在喷管叶栅中进行, 只有一小部分在动叶栅中继续膨胀。因此  $p_1 > p_2$ 、 $\Delta h_n > \Delta h_b$ 。由流体力学知识可知, 加速气流可改善气流的流动状况, 故冲动级具有做功能力大和效率较高的特点, 得到了广泛的应用。

##### 3. 复速级（双列速度级）

复速级通常是一级内要求承担很大比焓降时才采用。它由喷管叶栅、装于同一叶轮上的两列动叶栅和两列动叶之间固定不动的导向叶栅组成, 故又称双列速度级。第 II 列动叶栅是为了将第 I 列动叶栅的余速动能  $\frac{C_2^2}{2}$  进一步转换成机械能, 导向叶栅的作用是改变气流方向, 使之与第 II 列动叶栅进汽方向相符。

复速级的做功能力比单列冲动级要大, 但流动效率较低, 为了改善复速级的效率, 也采用一定的反动度, 使蒸汽在各列动叶栅和导向叶栅中也进行适当的膨胀。

图 1-4 表示蒸汽流经各种冲动级的通流部分时, 其压力和速度的变化情况。

反动度  $\Omega_m \approx 0.5$  的级叫做反动级。其特点是  $\Delta h_n^* = \Delta h_b = \frac{1}{2} \Delta h_t^*$ , 即蒸汽在喷管叶栅和动叶栅中的膨胀各占一半左右, 流动情况一样, 故动静叶栅称为互为镜内映射状叶栅, 如图

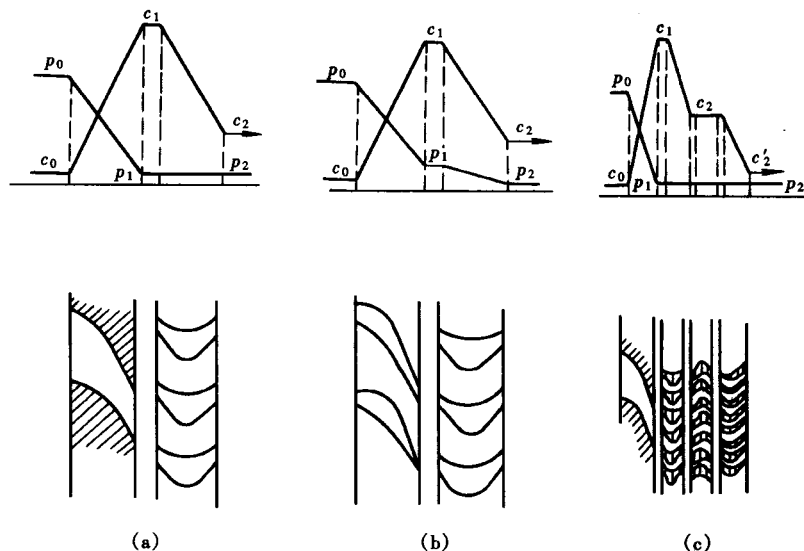


图 1-4 冲动级中蒸汽压力和速度变化示意图

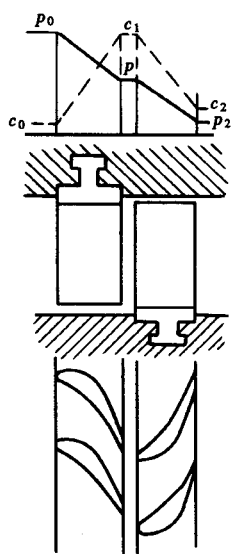


图 1-5 反动级中蒸汽压力速度变化示意图

1-5 所示。由于蒸汽在动叶栅中膨胀加速,是在冲动力和反动力的合力下使叶轮转动做功的,所以,反动级的效率比冲动级高,但做功能力较小。

### (二) 压力级和速度级

按照蒸汽的动能转换为转子机械能的过程不同,汽轮机级可分为压力级和速度级。

速度级有双列和多列之分,如复速级,它是以利用蒸汽流速为主的级,级的比焓降较大。压力级是以利用级组中合理分配的压力降或比焓降为主的级,效率较高,又称单列级,压力级可以是冲动级,也可以是反动级。

### (三) 调节级和非调节级

按级通流面积是否随负荷大小而变,汽轮机级可分为调节级和非调节级。

在采用喷管调节的汽轮机中,第一级的通流面积是可以随负荷变化而改变的,这种改变另一个原因是部分进汽,我们称它为调节级,调节级可以是复速级,也可以是单列级。反之是非调节级。

## 四、级的工作过程的研究方法

### (一) 基本假设

蒸汽在汽轮机中的流动,实际上是有黏性、非连续和非定常的三元流动。利用三元流动理论对蒸汽的实际流动状态进行计算是准确的,尤其是目前计算机技术的高速发展,更完善了三元流场的计算,现阶段汽轮机制造厂已经在对低压缸进行三元流场计算了。

在设计计算相对高度较小的叶栅时,传统的一元流动计算方法是可以得到满意的结果的。即使是目前,汽轮机的研究中在许多方面仍有赖于简单明了的一元流动理论。为将复杂的

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，特作如下假定：

(1) 一元流动，也称轴对称流动。即叶栅汽道中的蒸汽参数只沿流动方向改变，而垂直截面上不变，在分析问题和计算时，各参数均用平均直径处的数值表示。

(2) 定常流动，也称稳定流动。即叶栅汽道中任一点的参数不随时间变化。此项假设适用于汽轮机的稳定运行工况，即当汽轮机的负荷参数变化不大时，可以近似地认为是稳定流动。

(3) 绝热流动。即蒸汽快速通过叶栅汽道时，与外界不产生热交换。

这样，蒸汽在级内的流动和能量转换就简化为可压缩流体的一元定常绝热流动。

## (二) 基本方程

根据自然界三大守恒定律，即质量守恒、动量守恒、能量守恒，和三个基本假设联系起来，导出计算级内蒸汽流动和能量转换所需要的基本方程。

### 1. 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。对稳定流动来说，单位时间内流过流道各截面的蒸汽流量是相等的。

$$\text{即} \quad G = \rho c A = \rho_1 c_1 A_1 = \rho_2 c_2 A_2 = \text{常数} \quad (1-2)$$

式中  $G$ ——蒸汽质量流量，kg/s；

$A$ ——汽道内任一横截面积， $\text{m}^2$ ；

$c$ ——垂直于截面  $A$  的蒸汽流速，m/s；

$\rho$ ——截面  $A$  上的蒸汽密度， $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

连续方程式也可用微分形式表示为

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} + \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (1-3)$$

它们表明了稳定流动中，汽流的通流面积、汽流速度和蒸汽密度相互之间的变化关系。

### 2. 动量方程

所谓动量方程，也称运动方程，它是牛顿第二定律的数学表达式，是联系作用于流体上的力与流体速度变化的基本方程。

如图 1-6 所示，在汽流中沿流动方向上任意截取一个微元段，若不计该微元段的重力作用，则作用于微元段上的压力、阻力和汽流运动的加速度之间的关系，可写成

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

式中  $A$ ——微元段起始端的截面积， $\text{m}^2$ ；

$p$ ——作用在截面  $A$  上的压力，Pa；

$dR$ ——作用于微元段上的摩擦阻力，Pa；

$c$ ——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，整理后得

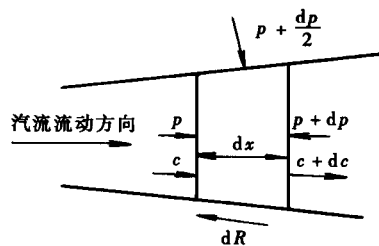


图 1-6 作用在汽流微元段上的力

$$-\frac{dp}{\rho} - Rdx = cdc \quad (1-4)$$

式中  $dx$ ——微元段长度, m;

$\rho$ ——微元段蒸汽密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

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  $R=0$ , 于是一元稳定无损失流动的运动方程为

$$-\frac{dp}{\rho} = cdc \quad (1-5)$$

式(1-4)与式(1-5)中负号说明流动过程中的压力和阻力是与流速量相反方向变化的。

### (三) 能量方程

根据能量守恒定律, 对于稳定流动热力系统, 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

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + q = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + W \quad (1-6)$$

式中  $h_0$ 、 $h_1$ ——蒸汽进入和流出系统的比焓值,  $\text{J}/\text{kg}$ ;

$c_0$ 、 $c_1$ ——蒸汽进入和流出系统时的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;

$q$ —— $1\text{kg}$  蒸汽通过系统时, 从外界吸收的热量,  $\text{J}/\text{kg}$ ;

$W$ —— $1\text{kg}$  蒸汽通过系统时, 对外界所作的机械功,  $\text{J}/\text{kg}$ 。

式(1-6)对有损失的流动和无损失的流动都适用。

### (四) 状态方程

对于水蒸气, 建立它的纯理论的状态方程是很困难的, 即使是通过理论和实践相结合建立的过热蒸汽状态方程, 其本身也是极为复杂的。所以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。

在对水蒸气流动进行分析和计算时, 可以近似地使用理想气体的状态方程。

理想气体的状态方程

$$p/\rho = RT \quad (1-7)$$

式中  $p$ ——气体绝对压力,  $\text{Pa}$ ;

$\rho$ ——气体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$R$ ——通用气体常数,  $R=461.76\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ 。

需要指出的是, 水蒸气的气体常数  $R$ , 即使在过热蒸汽区也不是常数, 在湿蒸汽区  $R$  值的变化就更大了。

蒸汽等熵膨胀过程方程式可写成

$$p/\rho^\kappa = \text{常数} \quad (1-8)$$

式中  $\kappa$ ——等熵指数, 它随气体常数  $R$  值的变化而变。对于过热蒸汽,  $\kappa=1.3$ ; 对于湿蒸汽,  $\kappa=1.035+0.1x$  (其中  $x$  是膨胀过程初态的蒸汽干度)。

蒸汽的绝热过程可表示为

$$p/\rho^n = \text{常数} \quad (1-9)$$

式中  $n$ ——多变过程指数。

## 第二节 汽轮机级的工作过程

### 一、蒸汽在喷管中的流动

#### (一) 蒸汽在喷管中实现能量转换的条件

蒸汽在喷管中流动时,要实现热能向动能的转换,这是一个膨胀过程,能否实现这一过程取决于力学条件和几何条件是否满足。

#### 1. 力学条件

式(1-5)的动量方程式给出了蒸汽在喷管中加速流动( $dc > 0$ )的力学条件,蒸汽通过喷管时要加速流动,压力必须降低( $dp < 0$ )。图1-7为蒸汽在喷管中膨胀的热力过程线,  $O$  点是喷管前的蒸汽状态点,  $O^*$  是喷管前蒸汽的滞止状态点。具有初速  $c_0$ 、初压  $p_0$ 、初比焓  $h_0$  的蒸汽在喷管中膨胀到背压  $p_1$ , 在无损失的情况下,等熵膨胀到  $1t$  点,在有损失的情况下,实际热力过程线为  $0-1$ , 喷管的实际出口状态点为  $1$ 。

在无损失的情况下,喷管流动的等熵膨胀过程,用式(1-5)的积分式可计算出喷管出口的理想速度。

由理想气体的等熵过程方程  $p/p^* = \rho_0^*/(\rho_0^*)^\kappa$  可解出  $\rho = \rho_0^* p_0^{*\frac{1}{\kappa-1}} p^{\frac{1}{\kappa-1}}$ , 代入式(1-5)中积分,得

$$\frac{c_{1t}^2}{2} = - \int_{p_0^*}^{p_1} \frac{dp}{\rho} = - \int_{p_0^*}^{p_1} \rho_0^{*\frac{1}{\kappa-1}} p_0^{*\frac{1}{\kappa-1}} p^{-\frac{1}{\kappa-1}} dp = \frac{\kappa}{\kappa-1} \left( \frac{p_0^*}{\rho_0^*} - \frac{p_1}{\rho_1} \right) = \frac{\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0^*}{\rho_0^*} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right] \quad (1-10)$$

$$c_{1t} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1} \frac{p_0^*}{\rho_0^*} \left[ 1 - \left( \frac{p_1}{p_0^*} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right]} \quad (1-11)$$

式(1-11)是用动量方程表示的喷管出口理想速度公式,常用该式分析蒸汽在喷管中的流动情况。当蒸汽初参数一定时,随着汽流压力  $p_1$  的降低,比焓降  $\Delta h_n^*$  的增大,汽流速度不断增大,热能相应减小并转变成动能。

#### 2. 几何条件

蒸汽在喷管中流动时,流速变化、状态变化和截面积变化的关系,可以从等熵流动的基本方程组中求得。

将等熵过程方程  $p/\rho^\kappa = \text{常数}$  微分,得  $dp = \kappa p \frac{d\rho}{\rho}$ , 代入动量方程(1-5)中得

$$\frac{dp}{\rho} = \frac{-c dc}{\kappa \frac{p}{\rho}} = -Ma^2 \frac{dc}{c} \quad (1-12)$$

再将式(1-12)代入连续方程(1-3)中,就得到了喷管截面变化与喷管汽流速度变化之间的关系:

$$\frac{dA}{A} = (Ma^2 - 1) \frac{dc}{c} \quad (1-13)$$

由式(1-13)可知,喷管截面的变化  $dA$  不仅决定于压力的变化  $dp$ ,而且决定于所要

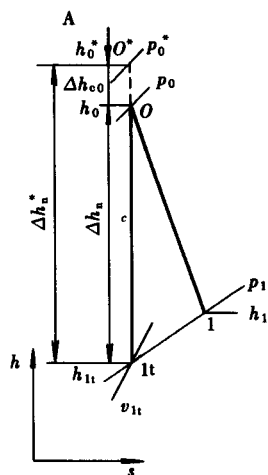


图 1-7 蒸汽在喷管中膨胀的热力过程线

得到的速度  $Ma$ ，当蒸汽在喷管内膨胀时，须满足  $dp < 0$  的力学条件和以下的几何条件：

(1) 当喷管内气流为亚声速流动时（马赫数  $Ma < 1$ ），则  $dA < 0$ ，汽道的横截面积随着气流加速而逐渐减小，这种喷管称为渐缩喷管。

(2) 当喷管内气流为超声速流动时（ $Ma > 1$ ），则  $dA > 0$ ，汽道的横截面积随着气流的加速而增大，这种喷管称为渐扩喷管。

(3) 当喷管内气流速度等于当地声速时（ $Ma = 1$ ），则  $dA = 0$ ，即喷管的横截面积达到最小值，这个截面为临界截面或称喉部截面。

(4) 欲使气流在喷管中自亚声速增加至超声速，则汽道横截面积沿气流方向的变化应由渐缩变为渐扩，呈缩放形。这种喷管称为缩放喷管或拉伐尔喷管。

## (二) 喷管中气流速度的计算

式 (1-11) 作为喷管出口气流速度计算公式，通常是用于喷管中蒸汽流动特性的理论讨论，实际中喷管内气流速度的计算是借助于水蒸气图表进行的。

根据一元稳定流动的能量方程

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + q = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + W$$

因为蒸汽在喷管中的流动为绝热过程，蒸汽流经固定不动的喷管时不做功，故  $q = 0$ 、 $W = 0$ 。蒸汽流过喷管的能量方程可简化为

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 对有损失的流动和无损失的流动都适用。

### 1. 喷管出口的理想流速

若不考虑损失，蒸汽在喷管中为等熵流动过程，式 (1-14) 可写成

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_{1t} + \frac{c_{1t}^2}{2} \quad (1-15)$$

喷管出口的理想流速为

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} = \sqrt{2\Delta h_n + c_0^2} \quad (1-16)$$

式中  $h_{1t}$ ——蒸汽等熵膨胀的终比焓，J/kg；

$\Delta h_n$ ——喷管的理想比焓降。

计算时，蒸汽比焓值均可在水蒸气的焓熵图中查得，较为方便。

为了便于计算分析，将气流等熵滞止到初速为零的滞止状态点  $O^*$ ，此时蒸汽参数称为滞止参数，即喷管进口状态由原来具有初速  $c_0$  的初参数  $p_0$ 、 $t_0$  和  $h_0$  的“O”点，转变为初速为零的滞止参数  $p_0^*$ 、 $t_0^*$  和  $h_0^*$  的  $O^*$  点，如图 1-7 所示。于是，由式 (1-16) 可得

$$c_{1t} = \sqrt{2\Delta h_n + c_0^2} = \sqrt{2\left(\Delta h_n + \frac{c_0^2}{2}\right)} = \sqrt{2\Delta h_n^*} \quad (1-17)$$

式中  $\Delta h_n^*$ ——蒸汽在喷管中的滞止理想比焓降，J/kg。

### 2. 喷嘴出口的实际流速

蒸汽在喷管中的流动是有损失的，其中包括黏性气体的摩擦损失，膨胀过程的不可逆损失等，这些损失造成喷管出口的实际速度  $c_1$  小于理想速度  $c_{1t}$ ，其比值称为喷管速度系数，用  $\varphi$  表示，即