

汽轮机运行与维护

QILUNJI
YUNXING YU WEIHU

主 编 吴晓娜 于 洁

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

014059369

TK26
20

汽轮机运行与维护

主 编 吴晓娜 于 洁
副主编 牛亚尊 闫水河
参 编 武振华



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TK26
20



北航

C1745777

内 容 简 介

本书系统地阐述了汽轮机的工作原理、结构,汽轮机系统、辅助设备的组成及运行,汽轮机运行,汽轮机事故预防及处理等内容,在加强理论的同时,讲述了电厂的生产过程。全书以模块、项目、任务的形式体现教学内容,力求能满足高等教育和培训的要求。

本书可作为高等院校电力技术类的教学用书,也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机运行与维护/吴晓娜,于洁主编. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 7

ISBN 978 - 7 - 5640 - 8914 - 6

I. ①汽… II. ①吴… ②于… III. ①汽轮机运行 - 高等学校 - 教材 ②蒸汽透平 - 维修 - 高等学校 - 教材 IV. ①TK26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 038324 号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京富达印务有限公司

开 本/710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张/16.25

字 数/270 千字

版 次/2014 年 7 月第 1 版 2014 年 7 月第 1 次印刷

定 价/49.00 元

责任编辑/张慧峰

文案编辑/多海鹏

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

PREFACE

本书通过对典型火力发电企业调研及对专业技能进行分析,由企业提供汽轮机运行与检修的规程、图纸、现场参数,并参照《国家职业技能鉴定规范·电力行业》(以下简称《规范》)和《国家职业标准》(以下简称《标准》),将课程内容对准岗位技能,以电厂汽轮机的工作过程为主线,重组序化了课程内容。本书按照模块化的方式进行编写,以模块、项目、任务的结构出现,形成一种培训的新模式;本书以行动导向引导学生学习与训练,浅显明了,通俗易懂,并紧贴《规范》和《标准》,突出操作技能,是与电力生产企业合作编写的工学结合特色教材。

全书共分为五个模块,主要内容以电力生产过程为主线,包括汽轮机认知及汽轮机本体结构认知,汽轮机系统分析及辅助设备运行,汽轮机运行,汽轮机事故预防及处理。为了便于学生对所学知识的理解,每个模块前都归纳了学习目标,模块后有习题。

本书由吴晓娜和于洁担任主编,由牛亚尊和闫水河担任副主编,武振华参与编写。其中,吴晓娜编写了模块一、模块四以及模块五中的项目二,于洁编写了模块三,牛亚尊编写了模块二,闫水河与武振华编写了模块五中的项目一和项目三。

本书在编写过程中得到上述专家及所在单位的大力支持,在此深表谢意。

由于水平有限,书中疏漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

CONTENTS

模块一 汽轮机认知 1

项目一 汽轮机概述 1

项目二 汽轮机工作过程分析 5

任务一 单级汽轮机的工作过程分析 6

任务二 多级汽轮机的工作过程分析 14

任务三 多级汽轮机的损失及经济性分析 19

习题 25

模块二 汽轮机本体结构认知 27

项目一 汽轮机静子认知 27

任务一 汽缸及滑销系统认知 27

任务二 喷嘴组与隔板认知 35

任务三 汽封认知 37

任务四 轴承认知 40

项目二 汽轮机转子认知 46

任务一 转子的结构组成认知 46

任务二 叶片认知 53

任务三 汽轮机盘车装置认知 57

习题 63

模块三	汽轮机系统分析及辅助设备运行	65
项目一	汽轮机调速保安系统运行	65
任务一	汽轮机调节系统运行分析	65
任务二	数字电液调节系统	68
任务三	保安系统及保护配备	76
项目二	汽轮机系统分析及设备运行	84
任务一	凝汽系统分析及设备运行	84
任务二	给水回热系统分析及设备运行	92
任务三	再热机组旁路系统分析及设备运行	103
任务四	汽轮机供油系统分析及设备运行	107
习题		111
模块四	汽轮机运行	112
项目一	汽轮机启动	112
任务一	汽轮机热状态分析	112
任务二	汽轮机启动	124
项目二	汽轮机停机	142
任务一	汽轮机停机方式	142
任务二	滑参数停机	143
任务三	停机后的维护	147
任务四	停机后的快速冷却	150
项目三	汽轮机运行中的维护	157
任务一	主要参数控制	157
任务二	正常维护	163
任务三	汽轮机调峰运行方式	167
任务四	汽轮机变压运行	176
任务五	机、炉协调控制	179
项目四	汽轮机寿命管理	183
任务一	汽轮机寿命	183
任务二	汽轮机寿命管理	185
习题		190

模块五 汽轮机事故预防及处理 192

项目一 事故处理原则及故障停机 192

任务一 汽轮机事故处理原则 192

任务二 故障停机 193

项目二 典型事故预防及处理 196

任务一 汽轮机真空下降 196

任务二 汽轮机甩负荷事故 199

任务三 汽轮机超速 204

任务四 汽轮机进水或进冷气 207

任务五 轴向位移增大 210

任务六 大轴弯曲 212

任务七 汽轮发电机组异常振动 216

任务八 叶片损坏 220

任务九 轴系断裂 224

任务十 油系统着火 226

任务十一 油系统故障 229

项目三 汽轮机辅机故障预防及处理 234

任务一 给水泵故障 234

任务二 泵的故障 238

任务三 加热器故障 239

任务四 除氧器故障 241

任务五 热网事故 244

习题 248

参考文献 250

模块一

汽轮机认知

学习目标

- 掌握汽轮机的分类及型号表示
- 掌握汽轮机的工作原理
- 能够分析汽轮机的工作过程
- 能够分析汽轮机工作的经济性

项目一 汽轮机概述

一、汽轮机的作用

汽轮机出现于 18 世纪末期，是用具有一定温度和压力的蒸汽来做功的回转式原动机。它在工作时先把蒸汽的热能转变成动能，然后再使蒸汽的动能转变成机械能。与其他类型原动机相比，汽轮机具有单机功率大、热经济性好、运行安全可靠、单位功率制造成本低等一系列优点。在火力发电厂和核电站中，绝大多数都是以汽轮机拖动发电机来生产电能的，约占总电能的 80%，所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。汽轮机还广泛应用于冶金、化工和船运等部门，直接拖动各种泵、风机、压缩机和船舶的螺旋桨等。汽轮机的排汽或中间抽汽可用来满足生产和生活上供热的需要，这种用于热能和电能联合生产的热电式汽轮机具有更高的热经济性，对节约能源具有重要意义。

二、汽轮机的发展史

从 1890 年瑞典工程师拉伐尔制造出第一台功率仅有 5 马力^①的汽轮机起，至今汽轮机制造业已有一百多年的历史。在这一百多年中，随着时间的推移，汽轮机制造业发展速度越来越快。目前，在发电汽轮机中已有由瑞士制造而在美国投运的双轴 1 300 MW 汽轮机和法国制造的 1 500 MW 核电汽轮机等，

^① 1 马力 = 0.735 kW。

2 000 MW 高参数全速汽轮机的开发研制工作也正在进行中。我国自 1955 年由上海汽轮机厂制造生产出第一台中压 6 MW 汽轮机之后,陆续生产出了 12 MW、25 MW、50 MW、100 MW、125 MW、200 MW 和 300 MW 汽轮发电机组。20 世纪 80 年代初,又从美国西屋电气公司引进了 300 MW 和 600 MW 机组的整套制造技术,经过消化吸收和不断优化,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了进一步发展。现在我国已设计、制造了 1 000 MW 的汽轮机。

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、负荷适应性与自动化水平始终是汽轮机发展的中心和重点。

近年来,核电站的发展很快,许多国家的发电量中核电所占比重很大。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高参数、大功率、高转速和多品种的方向发展。

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(LMZ)、哈尔科夫透平发动机厂(XTTB)和乌拉尔透平发电机厂(TMZ),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。

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。

三、汽轮机的分类

汽轮机的类型较多,为便于使用,常按热力过程特性、工作原理、新蒸汽参数、蒸汽流动方向及用途等方式对汽轮机进行分类。

1. 按热力过程特性分类

(1) 凝汽式汽轮机。进入汽轮机做功的蒸汽,除很少一部分漏掉外,全部或大部分排入凝汽器,这种汽轮机称为纯凝汽式汽轮机。在近代汽轮机中,多数采用回热循环,即从进入汽轮机的蒸汽中,分段抽出来加热锅炉给水,其余大部分排入凝汽器中,称为凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机。排汽直接用于工业或供热,排汽压力高于大气压力,没有凝汽器。当某汽轮机的排汽作为其他中、低压汽轮机的工作蒸汽时,称此汽轮机为前置式汽轮机,其没有冷源损失,能量利用率高,但发电量完全由热负荷决定(凝汽式机组排汽,在凝汽器中被冷却水带走的热量称为冷源

损失, 为 $2\,140 \sim 2\,220 \text{ kJ/kg}$, 而蒸汽带入汽轮机的热量为 $3\,400 \text{ kJ/kg}$ 左右)。

(3) 调节抽汽式汽轮机。从汽轮机某级后抽出一定压力的部分蒸汽对外供热, 其余排汽仍进入凝汽器。由于热用户对供热压力有一定的要求, 需要对抽汽压力进行自动调节 (用于回热抽汽的压力无需调节), 因而汽轮机装备有抽汽压力调节机构, 以维持抽汽压力恒定, 称为调节抽汽。根据用户需要, 有一次调节抽汽和两次调节抽汽。

(4) 抽汽背压式汽轮机。调整抽汽式汽轮机组的排汽, 以高于大气压的压力排出, 继续供给工业或采暖使用, 这种汽轮机称为抽汽背压式汽轮机。

(5) 中间再热式汽轮机。蒸汽在汽轮机前面若干级做功后, 全部引至锅炉内再次加热到某一温度, 然后再重新返回汽轮机的中、低压缸部分继续做功, 这类汽轮机叫中间再热式汽轮机。其再热次数可以是一次、两次或多次, 但一般多采用一次中间再热。

此外还有利用其他蒸汽设备 (如蒸汽机、蒸汽锤等) 排汽的汽轮机, 称为乏汽汽轮机; 而同时使用锅炉供汽和其他蒸汽设备排汽的汽轮机, 称为混压式汽轮机。

2. 按工作原理分类

(1) 冲动式汽轮机。根据冲动做功原理工作的汽轮机称为冲动式汽轮机。它工作时, 蒸汽的膨胀主要在喷嘴中进行, 少部分在动叶片中进行。

(2) 反动式汽轮机。根据反动做功原理工作的汽轮机称为反动式汽轮机。它工作时, 蒸汽在喷嘴、动叶片中都进行膨胀, 且膨胀程度相同。

(3) 冲动反动联合式汽轮机。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。

3. 按蒸汽压力分类

(1) 低压汽轮机。蒸汽压力为 $0.176 \sim 1.47 \text{ MPa}$ 。

(2) 中压汽轮机。蒸汽压力为 $1.96 \sim 3.92 \text{ MPa}$ 。

(3) 高压汽轮机。蒸汽压力为 $5.88 \sim 9.8 \text{ MPa}$ 。

(4) 超高压汽轮机。蒸汽压力为 $11.76 \sim 13.72 \text{ MPa}$ 。

(5) 亚临界压力汽轮机。蒸汽压力为 $15.68 \sim 17.64 \text{ MPa}$ 。

(6) 超临界压力汽轮机。蒸汽压力在 22.2 MPa 以上。

(7) 超超临界压力汽轮机。蒸汽压力在 27 MPa 以上。

4. 按蒸汽流动方向分类

(1) 轴流式汽轮机。组成汽轮机的各级叶栅沿轴向依次排列, 气流方向的总趋势是轴向的。绝大多数汽轮机都是轴流式汽轮机。

(2) 辐流式汽轮机。蒸汽流动总体方向大致与轴垂直。



(3) 周流式汽轮机。蒸汽大致沿叶轮轮周方向流动。

5. 按用途分类

(1) 电站汽轮机。用于拖动发电机，汽轮发电机组需按供电频率定转速运行，故也称定转速汽轮机；主要采用凝汽式汽轮机，也采用同时供热、供电的（背压式、抽汽式）汽轮机，通常称为热电汽轮机或供热式汽轮机。

(2) 工业汽轮机。用于拖动风机、水泵等转动机械，其运行速度经常是变动的，也称变速汽轮机。

(3) 船用汽轮机。用于船舶推进动力装置、驱动螺旋桨。为了适应倒车需要，其转动方向是可变的，也称变向汽轮机。

此外，还有一些分类方法，例如，按汽缸的数目分为单缸、双缸、多缸汽轮机；按汽轮机转轴数目分为单轴、双轴汽轮机；按功率分为大、中、小功率汽轮机等。

四、汽轮机的型号

表示汽轮机基本特性的符号称为汽轮机的型号。目前我国采用汉语拼音和数字来表示汽轮机的型号，型号中第一组符号的汉语拼音表示汽轮机的热力特性或用途，见表1-1；汉语拼音后数字表示汽轮机的额定功率（MW）。第二组符号由数字组成，表示汽轮机主蒸汽参数，所示对不同的汽轮机有不同的意义，见表1-2。最后一组符号为数字，表示改型序号。

汽轮机型号表示如下：

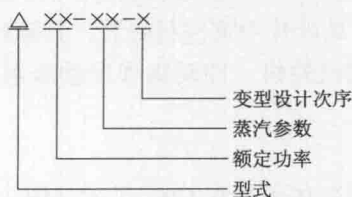


表 1-1 汽轮机类型的代号

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
抽背式	CB	移动式	Y
一次调整抽汽式	C	再热式	Z
二次调整抽汽式	CC	空冷式	K

表 1-2 第二组数字代表的意义

汽轮机类别	第二组数字意义
凝汽式	初压
凝汽中间再热式	初压/初温/再热温度
抽汽式	初压/高压抽汽压/低压抽汽压
背压式	初压/背压
抽汽背压式	初压/抽汽压/背压

下面举例说明国产机型号：

(1) N300-16.7/537/537-3：亚临界一次中间再热、凝汽式汽轮机，额定功率为 300 MW；主蒸汽额定压力为 16.7 MPa，主、再热蒸汽额定温度为 537℃；第三次改型设计。

(2) NZK300-16.7/537/537：亚临界一次中间再热、直接空冷凝汽式汽轮机，额定功率为 300 MW；主蒸汽额定压力为 16.7 MPa，主、再热蒸汽额定温度为 537℃。

(3) N/C300/220-16.7-537/537：一次调整抽汽凝汽式，额定功率为 300 MW，额定功率为 220 MW；主蒸汽压力为 16.7 MPa，主、再热蒸汽温度为 537℃。

(4) CC25-8.82/0.98/0.118：二次调整抽汽式，额定功率为 25 MW；主蒸汽压力为 8.82 MPa，高压调整抽汽压力为 0.98 MPa，低压调整抽汽压力为 0.118 MPa。

(5) N1000-27.0/600/600：超超临界一次中间再热、凝汽式汽轮机，额定功率为 1 000 MW；主蒸汽额定压力为 27.0 MPa，主、再热蒸汽温度为 600℃。

项目二 汽轮机工作过程分析

汽轮机中最基本的做功单元称为级，由一系列环形配置的喷嘴（静叶栅）和一系列动叶栅组成，如图 1-1 所示。火力发电厂中，来自锅炉的过热蒸汽进入汽轮机后，依次经过喷嘴（静叶栅）和动叶栅，将蒸汽的热能转变为汽轮机转子旋转的机械能。蒸汽在汽轮机中，以不同方式进行能量转换，便构成了不同工作原理的汽轮机。

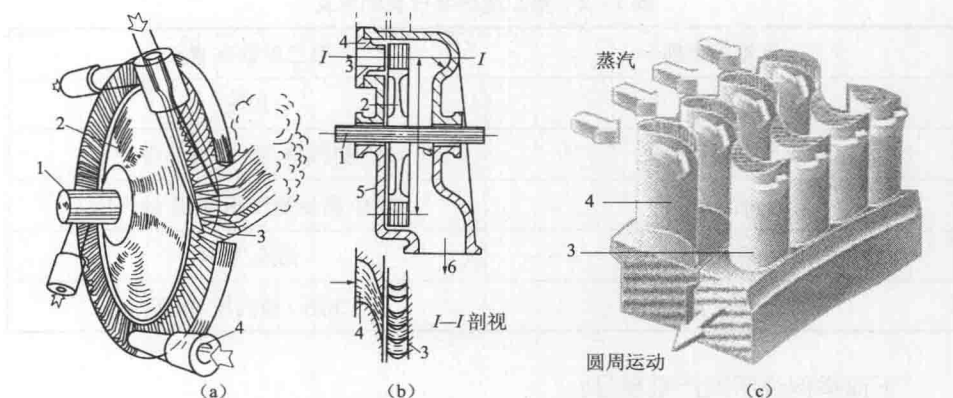


图 1-1 单级汽轮机的结构

(a) 立体图；(b) 剖面图；(c) 实物图

1—主轴；2—叶轮；3—动叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—排气口

任务一 单级汽轮机的工作过程分析

一、冲动作用原理和反动作用原理

由力学可知，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。若阻碍运动的物体在此力作用下产生了速度变化，则运动物体就做了机械功。例如，将高速汽流冲击在一个静止的小车上（见图 1-2），则汽流的速度发生变化，对车产生冲动作用力，使小车向前移动而做功。小车所做的功即汽流动能的变化。

在汽轮机中（见图 1-1），蒸汽在喷嘴中产生膨胀，压力降低，速度增加，热能转变成动能。高速汽流流经动叶片 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。

反动力的产生与上述冲动力产生的原因不同，反动力是由原来静止或运动速度较小的物体，在离开或通过另一物体时，骤然获得一个较大的速度增量而产生的。如图 1-2 所示，火箭内燃料燃烧而产生的高压气体以很高的速度从火箭尾部喷出，这时从火箭尾部喷出的高速气流就给火箭一个与气流方向相反的作用力，在此力的推动下火箭就向上运动，这种反作用力称为反动力。在汽轮机中，当蒸汽在动叶片构成的汽道内膨胀加速时，汽流必然对动叶片作用一个反动力，推动叶片运动做功，这种做功原理称为反动作用

原理。

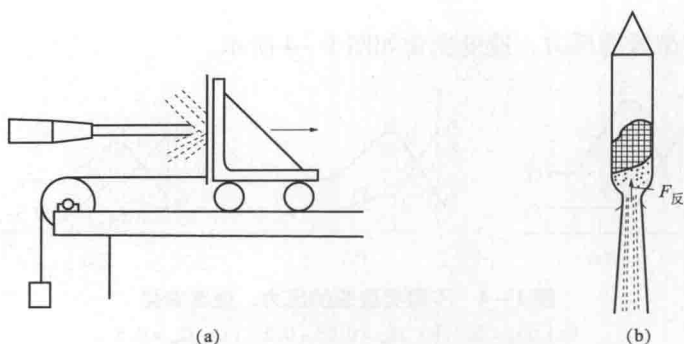


图 1-2 蒸汽的冲动原理及气体的反动原理

二、级的反动度与级的类型

在汽轮机级中, 蒸汽在动叶汽道内膨胀份额的大小, 常用级的反动度 Ω_m 来表示。在图 1-3 中, Δh_n^* 为喷嘴的理想滞止比焓降, Δh_b 为动叶片中的理想比焓降。级的反动度等于蒸汽在动叶片中的理想比焓降 Δh_b 与整个级上的滞止理想比焓降 Δh_t^* (约 $\Delta h_n^* + \Delta h_b$) 之比, 即:

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

当已知级的滞止理想比焓降 Δh_t^* 后, 只要选定一个合适的反动度 Ω_m 便可根据式 (1-1) 来确定蒸汽在喷嘴的理想滞止比焓降和动叶中的理想比焓降, 一般情况下, 上述的 Δh_n^* 和 Δh_b 是指叶道平均直径截面上的理想比焓降, 所以所确定的反动度也是级的平均反动度。根据级的反动度 Ω_m 的大小, 可把级分为以下三种类型。

(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嘴中膨胀, 在动叶片中不进行膨胀而只改变流动方向, 故动叶栅进出口压力相等, 即 $p_1 = p_2$, $\Delta h_b = 0$, $\Delta h_n^* = \Delta h_t^*$ 。

(2) 反动级。通常把反动度 $\Omega_m = 0.5$ 的级称为反动级。它的工作特点是蒸汽的膨胀约有 1/2 在喷嘴中发生, 另外 1/2 在动叶栅中发生, 即:

$$\Delta h_b = \Delta h_n^* = 0.5 \Delta h_t^* \quad (p_1 > p_2)$$

(3) 带反动度的冲动级。这种级介于纯冲动级和反动级之间, 其反动度为 $0 < \Omega_m < 0.5$, 一般取 $\Omega_m = 0.05 \sim 0.2$ 。也就是说, 在这种级中, 蒸汽的膨

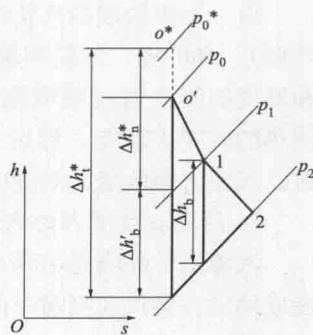


图 1-3 确定级反动度用的热力过程示意图



胀大部分发生在喷嘴中, 只有少部分膨胀发生在动叶栅中, 所以 $\Delta h_b < \Delta h_n^*$, $p_1 > p_2$ 。

不同类型级的压力、速度变化如图 1-4 所示。

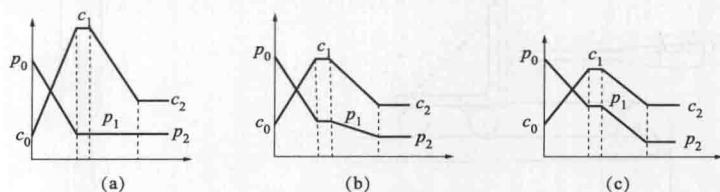


图 1-4 不同类型级的压力、速度变化

(a) $\Omega_m = 0$; (b) $\Omega_m = 0.05 \sim 0.2$; (c) $\Omega_m = 0.5$

三、单级汽轮机的工作过程分析

由一个级构成的汽轮机称为单级汽轮机, 如图 1-1 所示。它由喷嘴 (静叶栅)、动叶栅、叶轮和轴等基本部件组成。由图 1-1 可见, 具有一定压力和温度的蒸汽通过喷嘴膨胀加速, 这时蒸汽的压力、温度降低, 速度增加, 使热能转变成动能。然后, 具有较高速度的蒸汽由喷嘴流出, 进入动叶片流道, 气流方向改变, 对动叶片施加冲动力, 完成动能到机械能的转换。

1. 蒸汽在喷嘴内的流动

汽轮机的喷嘴是由两个相邻叶片构成的静止蒸汽道, 它把蒸汽的热能转变成动能。蒸汽在喷嘴中的流动过程、压力和速度变化如图 1-5 所示。

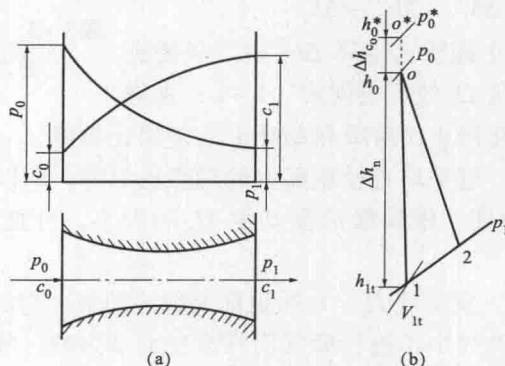


图 1-5 蒸汽在喷嘴中的流动

(a) 喷嘴中蒸汽压力和速度的变化; (b) 蒸汽在喷嘴中的热力过程

1) 喷嘴出口的理想速度

假设蒸汽在喷嘴中流动为理想流动, 则喷嘴出口处的汽流速度称为喷嘴出口理想速度 c_{1t} 。即能量方程:

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

将式(1-2)应用于喷嘴时,由于喷嘴固定不动,所以不对外做功,即 $P=0$ 。其次,可以认为蒸汽在喷嘴中流动时与外界无热能交换,即绝热过程, $q=0$ 。故能量方程变成下列形式:

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_{1t} + \frac{c_{1t}^2}{2} \quad (1-3)$$

由式(1-3)(式中符号如图1-5所示)可求得喷嘴出口的理想汽流速度为:

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} \quad (1-4)$$

为了便于计算和分析,引用滞止参数,即设想蒸汽被等熵地滞止到初速度等于零时的状态参数,那么滞止比焓则为 $h_0^* = h_0 + \frac{c_0^2}{2}$,这样,喷嘴出口理想速度为:

$$c_{1t} = 1.414 \sqrt{h_0^* - h_{1t}} = 1.414 \sqrt{\Delta h_n^*} \quad (1-5)$$

2) 蒸汽在喷嘴出口的实际速度

在实际流动过程中,由于蒸汽是具有一定黏性的气体,蒸汽流经喷嘴时,总是存在损失的,从而使汽流获得的动能减小。因此,喷嘴出口的实际汽流速度 c_1 要比理想速度 c_{1t} 小。一般用喷嘴的速度系数 φ ($\varphi = c_1/c_{1t}$)来表示这个损失。这样喷嘴出口的实际速度为:

$$c_1 = \varphi c_{1t} = 1.414 \varphi \sqrt{\Delta h_n^*} \quad (1-6)$$

喷嘴中动能损失(简称喷嘴损失) $\Delta h_{n\zeta}$ 可以表示为:

$$\Delta h_{n\zeta} = \frac{c_{1t}^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} = (1 - \varphi^2) \Delta h_n^* \quad (1-7)$$

3) 喷嘴的流量

由连续方程式可导出喷嘴理想流量 q_{m1t} 的计算式为:

$$q_{m1t} = A_1 \times \frac{c_{1t}}{V_{1t}} \quad (1-8)$$

式中 c_{1t} ——喷嘴出口处的理想速度, m/s;

V_{1t} ——喷嘴出口处理想比体积, m^3/kg ;

A ——喷嘴出口截面积, m^2 。

实际流动中,由于存在流动损失,不仅使喷嘴出口的汽流实际速度降低,也使通过喷嘴的实际流量小于理想流量 q_{m1t} ,通常用流量系数 μ_n 来表示实际流量比理想流量减小的程度,它等于通过喷嘴的实际流量与理想流量之比,即:

$$\mu_n = \frac{q_{m1}}{q_{m1t}} \quad (1-9)$$

流量系数往往用试验方法求得,图1-6所示为根据试验数据绘制的喷嘴和动叶的流量系数曲线。由图1-6可见,当喷嘴工作在过热蒸汽区域时,其流量系数一般可取0.97;当喷嘴在湿蒸汽区域工作时,其流量系数大于1,一般取 $\mu_n = 1.02$ 。

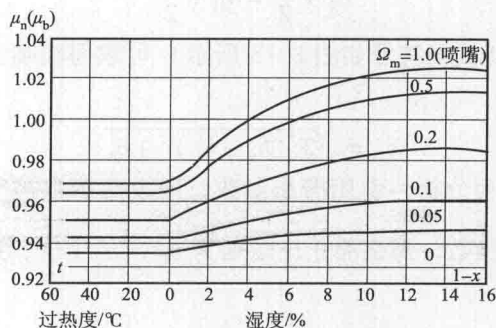


图1-6 喷嘴和动叶的流量系数

2. 蒸汽在动叶中的流动

从喷嘴出来的高速汽流,进入动叶,推动叶轮旋转,所以动叶栅有一个切向速度,即圆周速度 u 。由于动叶栅是以圆周速度 u 在转动,所以动叶栅进口蒸汽速度不是喷嘴出口速度,而是一个相对动叶片速度。

1) 动叶片的进出口速度三角形

由力学可知,进入动叶栅的相对速度 $\vec{\omega}_1$ 应为绝对速度 $\vec{c}_1$ 与圆周速度 $\vec{u}$ 的向量差,即:

$$\vec{\omega}_1 = \vec{c}_1 - \vec{u} \quad (1-10)$$

$$u = \frac{\pi d_b n}{60} \quad (1-11)$$

式中 d_b ——动叶平均直径, m;
 n ——叶轮转速, r/min。

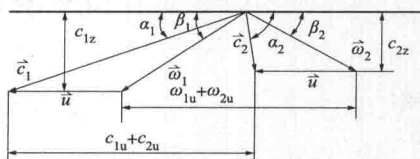


图1-7 动叶进出口速度三角形

如图1-7所示, $\vec{c}$ 、 $\vec{\omega}$ 、 $\vec{u}$ 之间关系的三角形称为速度三角形。运用速度三角形,可在已知喷嘴出口速度 $\vec{c}_1$ 和圆周速度 $\vec{u}$ 的条件下,求出蒸汽进入动叶的速度 $\vec{\omega}_1$,或在已知动叶出口相对速度 $\vec{\omega}_2$ 和圆周速度 $\vec{u}$ 的条件下,求出动叶出口绝对速