



全国高等卫生职业教育护理专业“双证书”人才培养“十二五”规划教材
供护理、助产等专业使用

丛书顾问 文历阳 沈彬

营养与膳食

主 编 胡玉华 梁金香



Yingyang yu Shanshi



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
职业教育电力技术类专业教学用书

电厂汽轮机

(第二版)

主编 孙为民 杨巧云
编写 王学斌 李丽萍 王统彬
主审 孙奉仲 杨祥良



中国电力出版社

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

内 容 提 要

本书系统地阐述了汽轮机工作原理、汽轮机结构及零件强度、汽轮机调节保护系统、汽轮机运行等内容,同时对汽轮机的凝汽设备和供热机组的基本情况也有介绍。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,尽量反映国内外有关的先进技术,并力求贯彻针对性和实用性原则,努力体现高职高专的特色。

本书可作为高职高专学校电厂热动力装置专业和电厂集控运行专业的教材,也可作为函授专科相应专业的教材或参考书。对于从事热力工程专业的科技工作者,也不失为一本有价值的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电厂汽轮机/孙为民,杨巧云主编. —2版. —北京:
中国电力出版社, 2010

教育部职业教育与成人教育司推荐教材

ISBN 978-7-5083-9807-5

I. ①电… II. ①孙…②杨… III. ①火电厂-蒸汽透
平-成人教育: 高等教育-教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 217698 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

2005 年 3 月第一版

2010 年 1 月第二版 2012 年 1 月北京第十六次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 433 千字 1 插图

定价 28.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

随着经济的快速发展,我国发电行业已经发展到历史上最为辉煌的时期,装机总容量2008年底已达7.9亿kW,超超临界压力1000MW机组已有数十台投入运行。与此同时,国家对于节能减排的重视,使得我们面临新的挑战,新技术、新设备不断涌现,同时也给我们提出了更高的要求。

本书在修订时力争展现现代汽轮机方面的最新技术、最新发展,全面反映现代汽轮机的原理、结构、调节等内容,深浅适当,分量合适。在内容的叙述上,尽量做到层次清晰,由浅入深,循序渐进,并力求保证学科的系统性、完整性,同时又适当减低理论的难度,充分体现职业教育的性质、任务和培养目标;具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性;符合职业教育的特点和规律,具有明显的职业教育特色。

本次修订主要由原班编写人员完成。郑州电力高等专科学校孙为民编写绪论、第一章和第六章,并参加了第二章和第三章部分内容的编写;第二章的部分内容和第五章由武汉电力职业技术学院王学斌编写;第三章的部分内容由郑州电力高等专科学校李丽萍编写;第四章由武汉电力职业技术学院杨巧云编写;第七章由保定电力职业技术学院王统彬编写。本书由孙为民、杨巧云担任主编,孙为民负责全书的统稿工作。

本书由山东大学能源与动力学院孙奉仲教授和山东菏泽发电厂教授级高工杨祥良担任主审。二位审稿老师提出的许多宝贵意见使编者受益匪浅。同时,本书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专家的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2009年11月

第一版前言

本书为教育部职业教育与成人教育司推荐教材，是根据教育部审定的电力技术类专业主干课程的教学大纲编写而成的，并列入教育部《2004～2007年职业教育教材开发编写计划》。本书经中国电力教育协会和中国电力出版社组织专家评审，又列为全国电力高等职业教育规划教材，作为高等职业教育电力技术类专业教学用书。

本书体现了职业教育的性质、任务和培养目标；符合职业教育的课程教学基本要求和有关岗位资格和技术等级要求；具有思想性、科学性、适合国情的先进性和教学适应性；符合职业教育的特点和规律，具有明显的职业教育特色；符合国家有关部门颁发的技术质量标准。本书既可以作为学历教育教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书共分七章，主要内容包括汽轮机级的工作原理、多级汽轮机、汽轮机的变工况、汽轮机结构及零件强度、汽轮机的凝汽设备、汽轮机调节和汽轮机运行等。

郑州电力高等专科学校孙为民编写绪论、第一章和第六章，并参加了第二章和第三章部分内容的编写；第二章的部分内容和第五章由武汉电力职业技术学院王学斌编写；第三章的部分内容由郑州电力高等专科学校李丽萍编写；第四章由武汉电力职业技术学院杨巧云编写；第七章由保定电力职业技术学院王统彬编写。本书由孙为民、杨巧云担任主编，孙为民负责全书的统稿工作。

本书由山东大学能源与动力学院孙奉仲教授和山东菏泽发电厂教授级高工杨祥良担任主审。二位审稿老师提出的许多宝贵意见使编者受益匪浅。同时，本书在编写过程中，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，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2004年12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	5
第一节 概述	5
第二节 汽轮机级的工作过程	9
第三节 级的轮周功率与轮周效率	22
第四节 汽轮机的级内损失和级效率	33
第五节 级的热力设计原理	45
第六节 级的热力计算示例	52
第七节 扭叶片级	57
复习思考题及习题	60
第二章 多级汽轮机	62
第一节 多级汽轮机的工作特点	62
第二节 汽轮机的损失及其装置的效率和热经济指标	66
第三节 多级汽轮机的轴向推力	74
复习思考题及习题	76
第三章 汽轮机的变工况	78
第一节 喷管变工况	78
第二节 级与级组的变工况	83
第三节 汽轮机的调节方式及调节级变工况	92
第四节 小容积流量工况与叶片颤振	101
第五节 汽轮机的工况图与热电联产汽轮机	104
第六节 蒸汽参数变化对汽轮机工作安全性的影响	113
复习思考题及习题	114
第四章 汽轮机结构及零件强度	116
第一节 动叶片	116
第二节 转子	128
第三节 汽缸	135
第四节 喷管组及隔板	147
第五节 汽封	152
第六节 盘车装置	155

第七节 轴承·····	157
第八节 汽轮发电机组的振动·····	165
复习思考题及习题·····	168
第五章 汽轮机的凝汽设备·····	169
第一节 凝汽设备的作用及工作过程·····	169
第二节 凝汽器的压力与传热·····	171
第三节 抽气设备·····	176
第四节 凝汽器的变工况及多压凝汽器·····	179
复习思考题及习题·····	183
第六章 汽轮机调节·····	184
第一节 汽轮机调节的任务与形式·····	184
第二节 液压调节系统·····	188
第三节 功频电液调节系统·····	201
第四节 数字电液调节系统·····	205
第五节 电液调节系统的主要装置·····	220
第六节 危急遮断保护系统和供油系统·····	235
第七节 背压式和抽汽式汽轮机的调节·····	242
复习思考题及习题·····	244
第七章 汽轮机运行·····	246
第一节 汽轮机启停时应注意的主要问题·····	246
第二节 汽轮机的启动与停机·····	254
第三节 汽轮机的典型事故处理·····	264
复习思考题及习题·····	274
参考文献·····	276

绪 论

一、汽轮机在国民经济中的地位

汽轮机又名“蒸汽透平”，是以水蒸气为工质，将热能转变为机械能的高速旋转式原动机。它与其他原动机（如燃气轮机，柴油机等）相比，具有单机功率大、效率高、运转平稳、单位功率制造成本低和使用寿命长等优点，广泛用于常规火电厂和核电站中驱动发电机来生产电能。汽轮机与发电机的组合称为汽轮发电机组，全世界由汽轮发电机组发出的电量约占各种形式发电总量的 80% 左右。汽轮机可以设计成变速运行，用于驱动泵、风机、压气机和船舶螺旋桨等。此外，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，具有更高的经济性，对节约能源和环境保护具有重要意义。所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。

二、汽轮机的发展概述

1883 年瑞典工程师拉伐尔（Laval）创造出世界上第一台轴流式汽轮机，这是一台 3.7kW 的单级冲动式汽轮机，转速高达 26000r/min，相应的圆周速度为 475m/s。在这台汽轮机中，拉伐尔解决了等强度轮盘、挠性轴和缩放喷管等较为复杂的汽轮机技术问题。

1884~1894 年，英国工程师帕森斯（C. A. Parsons）相继创造了轴流式多级反动式汽轮机、辐流式汽轮机和背压式汽轮机。

1900 年前后，美国工程师寇蒂斯（Curtis）创造出了复速级单级汽轮机。与此同时，法国工程师拉托（Rateau）和瑞士工程师崔利（Zoelly）分别在拉伐尔的基础上制造出了多级冲动式汽轮机。

这样在前后十几年的时间里，已形成了汽轮机的两种基本类型，即多级冲动式和多级反动式汽轮机。

1903~1907 年间，出现了热能、电能联合生产的汽轮机，即背压式和调节抽汽式汽轮机，以满足其他工业部门对蒸汽的需要。

1920 年左右，随着蒸汽动力装置循环的改进，出现了采用回热循环的汽轮机。这种汽轮机的应用提高了装置的循环效率，特别是创造了提高单机功率的条件。所以，此后采用回热循环的汽轮机几乎完全代替了原来的纯凝汽式汽轮机，一直使用到现在。

1925 年出现了第一台中间再热式汽轮机。这种汽轮机的优点是减少了末级的蒸汽湿度，能提高汽轮机的相对内效率和在再热参数选择合适时提高循环效率。

1912 年瑞典的容斯特罗姆兄弟创造了具有两个反向转子的辐流式汽轮机，这种汽轮机的缺点是不能制造成大功率机组。1930 年德国西门子公司将辐流式高压级与普通的任何一种轴流式低压级结合起来，制造成一种能应用较高参数的汽轮机。

至此，今天所能见到的电站汽轮机主要类型已经基本具备。

自汽轮机产生到现在的一百多年时间里，其发展速度很快，尤其是近几十年发展更加迅速，其发展的主要特点是：

1. 增大单机功率

世界工业发达国家的汽轮机生产在 20 世纪 60 年代已达到 500~600MW 机组等级水平。1972 年瑞士 BBC 公司制造的 1300MW 双轴全速汽轮机 (24MPa/538℃/538℃、 $n=3600\text{r/min}$) 在美国投入运行; 1976 年西德 KWU 公司制造的单轴半速 ($n=1500\text{r/min}$) 1300MW 饱和蒸汽参数汽轮机投入运行; 1982 年世界最大 1200MW 单轴全速汽轮机 (24MPa/540℃/540℃) 在苏联投入运行。增大单机功率不仅能迅速发展电力生产, 而且具有下列优点:

(1) 单位功率投资成本低。大功率机组单位功率用的材料、人工等相应减少, 降低了成本。

(2) 单机功率越大, 机组的热经济性越好。如国产引进型 300MW 机组的热耗率为 $8091\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 而国产 100MW 机组的热耗率为 $9252\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$, 前者为后者的 87%。

(3) 加快电站建设速度, 降低电站建设投资和运行费用。

2. 提高蒸汽参数

增大单机功率后适宜采用较高的蒸汽参数。当今世界上 300MW 以上容量的机组均采用亚临界或超临界压力的机组, 甚至采用超超临界压力的机组。蒸汽初温度多采用 535~565℃, 即尽量控制在珠光体钢所允许的 565℃ 以下, 力求不用或少用奥氏体钢。

3. 提高效率

采用中间再热和燃气—蒸汽联合循环, 可以提高电厂效率。

4. 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。

目前世界上生产多级轴流冲动式汽轮机的主要制造企业有美国的通用电气公司 (GE)、英国的通用电气公司 (GEC)、日本的东芝公司和日立公司、意大利的安莎多公司, 以及俄罗斯的列宁格勒金属工厂、哈尔科夫透平发动机厂和乌拉尔透平发动机厂等。制造反动式汽轮机的企业有美国西屋公司 (WH)、欧洲 ABB 公司、日本的三菱公司、英国帕森斯公司、法国电气机械公司 (CMR) 等。另外, 法国的阿尔斯通—大西洋公司 (AA), 既生产冲动式汽轮机也生产反动式汽轮机。

我国自 1955 年制造第一台中压 6MW 汽轮机以来, 在以后的近 50 年时间里, 已经走完了从中压机组到超临界压力 600MW 机组的全过程, 特别是近十几年内, 发展较快。这预示着我国将制造出更大功率等级的汽轮机, 逐步赶上世界先进水平。

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, 其次有北京重型电机厂、青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等, 还有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等。

三、汽轮机的分类及型号

(一) 汽轮机的分类

汽轮机的用途广泛, 类型繁多, 可以从不同的角度对汽轮机进行分类。

1. 按工作原理分类

(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，且膨胀程度相同。现代喷管调节的反动式汽轮机，因反动级不能做成部分进汽，故第一级调节级常采用单列冲动级或双列速度级。

2. 按热力特性分类

(1) 凝汽式汽轮机。蒸汽在汽轮机中膨胀做功后，进入高度真空状态下的凝汽器，凝结成水。

(2) 背压式汽轮机。排汽压力高于大气压力，直接用于供热，无凝汽器。当排汽作为其他中、低压汽轮机的工作蒸汽时，称为前置式汽轮机。

(3) 调整抽汽式汽轮机。从汽轮机中间某几级后抽出一定参数、一定流量的蒸汽（在规定的压力下）对外供热，其排汽仍排入凝汽器。根据供热需要，有一次调整抽汽和二次调整抽汽之分。

(4) 中间再热汽轮机。蒸汽在汽轮机内膨胀做功过程中被引出，再次加热后返回汽轮机继续膨胀做功。

背压式汽轮机和调整抽汽式汽轮机统称为供热式汽轮机。目前凝汽式汽轮机均采用回热抽汽和中间再热。

3. 按主蒸汽参数分类

进入汽轮机的蒸汽参数是指进汽的压力和温度，按不同的压力等级可分为：

- (1) 低压汽轮机：主蒸汽压力小于 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 22.15MPa。
- (7) 超超临界压力汽轮机：主蒸汽压力大于 32MPa。

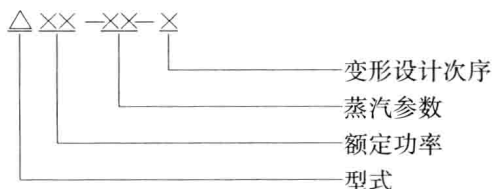
注：对于超超临界压力汽轮机目前没有完全统一的定义。工程上，当蒸汽压力达到 30~35MPa，温度达到 593~650℃或更高参数时，称为超超临界参数。不同国家或地区的分类不一致。如日本通过把主蒸汽或再热蒸汽温度提高到 593℃或 600℃，生产超超临界压力汽轮机，而欧洲则把蒸汽参数提高到 28MPa 或 580℃来生产超超临界压力汽轮机。

此外，按汽流方向分类，可分为轴流式、辐流式；按用途分类，可分为电站汽轮机、工业汽轮机、船用汽轮机；按汽缸数目分类，可分为单缸、双缸和多缸汽轮机；按机组转轴数目分类，可分为单轴和双轴汽轮机；按工作状况分类，可分为固定式和移动式汽轮机等。

(二) 国产汽轮机产品型号组成及蒸汽参数表示法

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，主要由汉语拼音和数字所组成。

1. 产品型号组成



2. 汽轮机型号的汉语拼音代号

代号	N	B	C	CC	CB	H	Y
型式	凝汽式	背压式	一次调整抽汽式	二次调整抽汽式	抽汽背压式	船用	移动式

3. 汽轮机型号中蒸汽参数表示法

型 式	参数表示方法	示 例
凝汽式	主蒸汽压力/主蒸汽温度	N100—8.83/535
中间再热式	主蒸汽压力/主蒸汽温度/中间再热温度	N300—16.7/535/538
抽汽式	主蒸汽压力/高压抽汽压力/低压抽汽压力	C50—8.83/0.98/0.118
背压式	主蒸汽压力/背压	B50—8.83/0.98
抽汽背压式	主蒸汽压力/抽汽压力/背压	CB25—8.82/0.98/0.118

注 功率单位为 MW，压力单位 MPa，温度单位为℃。

四、本书的主要内容及学习方法

本书以电站汽轮机为研究对象，主要讨论汽轮机的工作原理、汽轮机的调节、凝汽设备、汽轮机主要零部件的结构和强度以及汽轮机运行等。

学习这门课程的突出特点是，每个方面的问题所依据的理论不同。例如在学习汽轮机原理时，主要涉及工程热力学和流体力学方面的知识；在学习汽轮机的结构和强度计算时，主要用到工程力学方面的知识；在学习汽轮机调节时，主要用到自动调节原理方面的知识；在学习凝汽设备时，主要用到传热学方面的知识等。虽然各个侧面的学习方法和研究方法不同，但它们又是互相联系和彼此影响的。此外本书的内容与发电厂的生产实际有着密切的联系，它有较强的实践性，因此除重视掌握基本理论和基本知识外，还必须注意加强理论联系实际，为毕业后尽快上岗打下坚实的基础。

汽轮机级的工作原理

第一节 概 述

一、蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理

在汽轮机中，级是最基本的工作单元，在结构上它是由喷管和其后的动叶栅所组成。蒸汽的热能转变成机械能的能量转变过程就是在级内进行的。汽轮机从结构上可分为单级汽轮机和多级汽轮机。只有一个级的汽轮机称单级汽轮机。有多个级的汽轮机称多级汽轮机。

图 1-1 是最简单的单级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，并构成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管。具有一定压力和温度的蒸汽先在喷管中膨胀，蒸汽压力、温度降低，速度增加，使其热能转换成动能，从喷管出来的高速汽流，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，完成动能到机械能的转换。

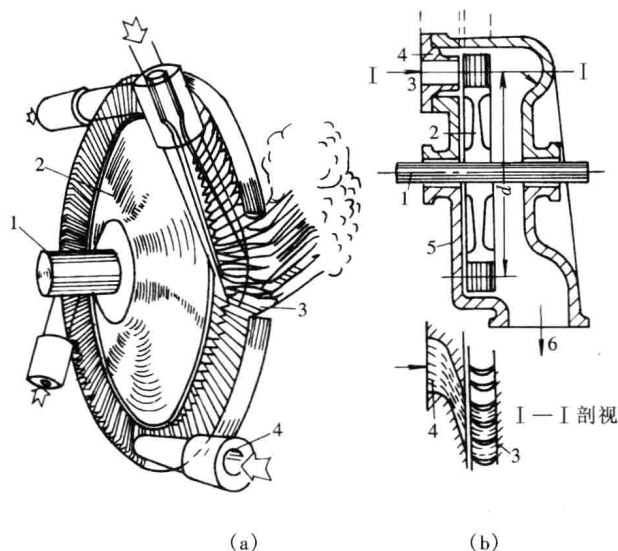


图 1-1 单级汽轮机主要部分结构简图

(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

在汽轮机的级中能量的转变是通过冲动作用原理和反动作用原理两种方式实现的。

1. 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。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，冲动力越大。若在冲击力的作用下，阻碍运动的物体速度改变，则运动物体就做出了机械功。根据能量守恒定律，运动物体动能的变化值就等于其做出的机械功。利用冲击力做功的原理就是冲动作用原理。

在汽轮机中，从喷管中流出的高速汽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，同时汽流给动叶施加了一个冲动力。图 1-2 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

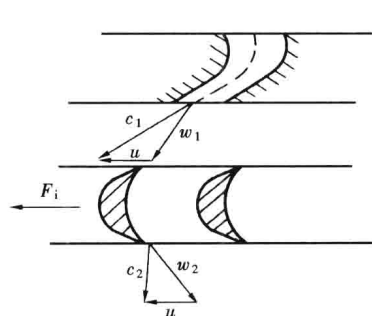


图 1-2 蒸汽流过无膨胀
动叶通道时速度的变化

w_2 流出动叶, 则蒸汽对动叶施加了一个轮周方向的冲动力 F_i , 该力对动叶做功使动叶带动转子转动。 F_i 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。

2. 反动作用原理

反动力的产生与冲击力的产生原因不同。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加而产生的。例如火箭内燃料燃烧所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。这种由于膨胀加速产生的作用力称为反动力。在汽轮机中, 蒸汽在动叶构成的汽道内膨胀加速时, 气流必然对动叶片作用一个反动力, 推动叶片运动, 做机械功。这就是反动做功原理。

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 1-3 所示。

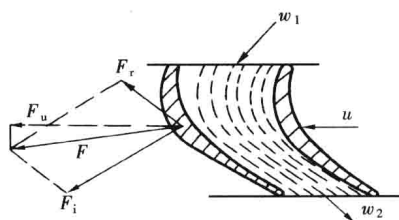


图 1-3 蒸汽在动叶通道内
膨胀时对动叶的作用力

二、反动度和级的类型

(一) 汽轮机级的反动度

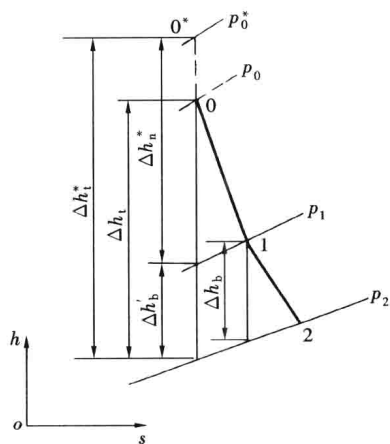


图 1-4 级的热力过程线

实际汽轮机的级, 大多按冲动和反动两种原理做功, 蒸汽在级中膨胀的热力过程如图 1-4 所示。0 点是级前的蒸汽状态点, 0* 点是气流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 0* 滞止状态点在级内等熵膨胀到 p_2 时的焓(沿用习惯的说法, 实际应为比焓, 本书中如不加特别说明, 焓均指比焓)降 Δh_{t1}^* 为级的滞止理想焓降。按同样的定义, Δh_{n1}^* 为蒸汽在喷管中的滞止理想焓降, 而 Δh_{b1} 为蒸汽在动叶中的理想焓降。

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_{b1} 和蒸汽在整个级中膨胀时的滞止理想焓降 Δh_{t1}^* 之比, 即

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

根据图 1-4, 式 (1-1) 又可表示为

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b'} \approx \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b}$$

因为在 $h-s$ 图上等压线向着熵增方向有扩张趋势, 所以 $\Delta h_b'$ 不等于 Δh_b , 但可认为 $\Delta h_b' \approx \Delta h_b$ 。根据式 (1-1) 又可得到

$$\Delta h_b = \Omega_m \Delta h_t^* \quad , \quad \Delta h_n^* = (1 - \Omega_m) \Delta h_t^*$$

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) 汽轮机级的类型及特点

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。轴流式级通常可分为下列几种。

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 1-5 所示。它的工作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, 当不考虑损失时, 动叶通道进出口压力相等, 相对速度也相等 (即 $w_1 = w_2$), 且 $\Delta h_b = 0$, 故 $\Delta h_t^* = \Delta h_n^*$ 。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。纯冲动级做功能力大, 但效率比较低, 现代汽轮机均不采用纯冲动级, 而是采用带少量反动度 ($\Omega_m = 0.05 \sim 0.2$) 的冲动级。它的工作特点是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进行, 即 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n > \Delta h_b$ 。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。这种级的做功能力比反动级大, 效率比纯冲动级高, 所以得到了广泛的应用。

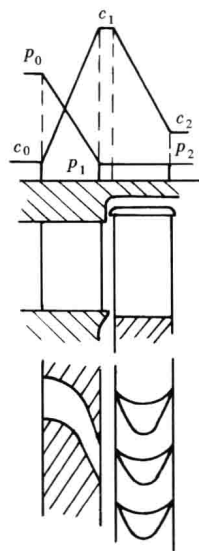


图 1-5 纯冲动级中压力和速度变化示意图

(2) 反动级。反动度 $\Omega_m \approx 0.5$ 的级称为反动级。它的工作特点是蒸汽在喷管和动叶通道中的膨胀程度相等, 即 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n \approx \Delta h_b \approx 0.5 \Delta h_t^*$ (因为 $c_0^2/2$ 一般较小)。由于蒸汽在动叶中的膨胀占了整级膨胀的一半, 产生的反动力很大, 所以在这种级中做功的力基本上冲动力和反动力各占一半。这种级的结构特点是动叶叶型与喷管叶型相同, 如图 1-6 所示。反动级的效率比纯冲动级高, 但做功能力较小。

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, 还把汽轮机的级分为速度级和压力级

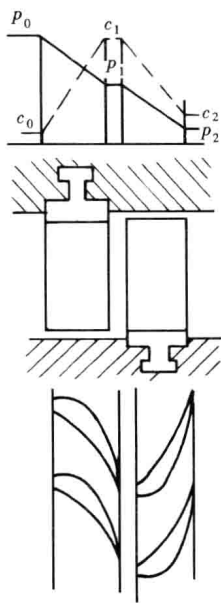


图 1-6 反动级中蒸汽压力和速度变化示意图

两种。

(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，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，速度级可以是双列的和多列的。

蒸汽从单列级动叶通道流出时，仍具有一定的速度 c_2 ，其带走的动能为 $\frac{c_2^2}{2}$ ，这部分动能在本级中无法转变成机械功，称为余速损失。

当级的焓降很大时，动叶的排汽余速 c_2 也很大，仍具有一定的做功能力，此时，可以在同一叶轮的第一列动叶后再装一列动叶，由于第一列动叶出口的汽流方向与叶轮旋转方向相反，所以在两列动叶之间还要装设一列固定在汽缸上的导向叶片。第一列动叶通道的排汽经过导向叶片后改变方向，然后进入第二列动叶通道继续做功。这种只有一列喷管，后面有两列或更多列动叶片的级，称为速度级。采用最多的是同一叶轮上装有两列动叶片的双列速度级，又称复速级。

速度级是冲动式的，蒸汽在速度级中流动时，主要在喷管中膨胀加速，在动叶和导向叶片通道中基本不膨胀，所以可将速度级看作是单列冲动级的延伸。图 1-7 绘出了复速级中汽流压力和速度的变化。

复速级的做功能力很大，但效率低，通常在一级内要求承担很大的焓降时才采用复速级。常用于单级汽轮机和中、小型多级汽轮机的第一级。

3. 调节级和非调节级

按通流面积是否随负荷大小而变，又可将汽轮机的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。如喷管调节汽轮机的第一级，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，调节级总是做部分进汽，而非调节级可以是全周进汽，也可以是部分进汽。

三、现代汽轮机的结构简介

多级冲动式汽轮机和反动式汽轮机在现代电厂中都获得了广泛应用。这两种类型汽轮机的差异不仅表现在工作原理上，而且还表现在结构上，前者为隔板型，后者为转鼓型。

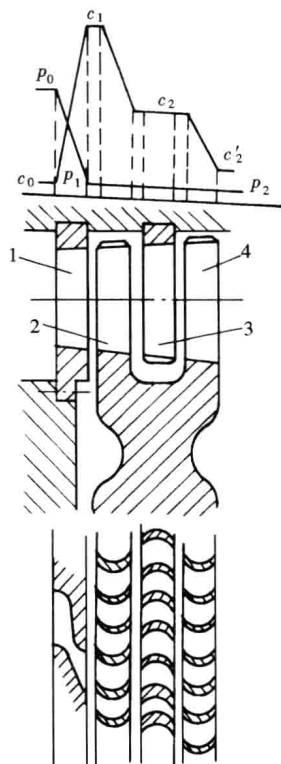


图 1-7 复速级中汽流压力和速度变化示意图

1—喷管；2—第一列动叶；
3—导叶；4—第二列动叶

图 1-8（见文后插页）是东方汽轮机厂生产的 300MW 冲动式多级汽轮机的纵剖面图。虽然汽轮机由很多部件组成，但概括地看，仍分为两大部分，即转动部分和静止部分。转动部分即转子，转子主要由主轴、叶轮、动叶片及联轴器组成。静止部分主要由汽缸、隔板、静叶以及轴承组成。转动部分和静止部分之间的密封是用汽封实现的，它的作用是减少转动表面和静止表面之间的间隙中可漏过的工质流量，以保证汽轮机有较高的效率。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轴封。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他部分。隔板装在汽缸上，而喷管叶栅（静叶）装在隔板上。轴承支持转子和推力轴承，推力轴承是用来承受转子的重量及确定转子在汽缸中的径向位置的；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。该汽轮机采用双缸双排汽型式，从锅炉来的新蒸汽从高中压缸中间进入高压缸，然后逐级流动做功，高压缸末端的排汽回到锅炉的再热器再热后进入中压缸，从前向后流动做功，中压缸的排汽经导汽管进入低压缸中部。低压缸为完全对称结构，蒸汽向两侧流动做功后，乏汽从两侧的排汽口排入凝汽器。

图 1-9（见文后插页）为哈尔滨汽轮机厂制造的亚临界压力 600MW 反动式汽轮机纵剖面图。其特点是动叶片直接嵌装在鼓形转子的外缘上，喷管装在汽缸内部圆周的表面上或持环上，没有轮盘和隔板。叶片的一端可以是自由的，叶片与汽缸或喷管与转子之间形成很小的间隙，也可以在叶片端部附加一条围带，以形成汽封。该汽轮机为四缸四排汽式，即有一个独立的高压缸和一个独立的中压缸，两个完全相同的低压缸。

第二节 汽轮机级的工作过程

蒸汽在汽轮机级中的流动，实际上是有黏性、非连续和非定常的三元流动。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。

一、可压缩流体一元流动的基本方程

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，需要用到可压缩流体的一元流动基本方程。

1. 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

$$pv = RT \quad (1-2)$$

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, $R=461.76\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

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。蒸汽等熵膨胀过程方程式可写成

$$pv^\kappa = \text{常数} \quad (1-3)$$

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); 对于干饱和蒸汽; $\kappa=1.135$ 。

蒸汽的绝热过程方程式可表示为

$$pv^n = \text{常数} \quad (1-4)$$

式中 n ——多变过程指数。

2. 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

$$G = \frac{Ac}{v} = \frac{A_1 c_1}{v_1} = \frac{A_2 c_2}{v_2} = \text{常数} \quad (1-5)$$

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 。

式 (1-5) 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:

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} - \frac{dv}{v} = 0 \quad (1-6)$$

式 (1-6) 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。

3. 运动方程

运动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。一元无损失流动的运动方程式为