

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANCHANG QILUNJI SHEBEI
JI YUNXING

电厂汽轮机设备 及运行

王 勇 孙文杰 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
TONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI (高职高专教育)



DIANCHANG QILUNJI SHEBEI
JI YUNXING

电厂汽轮机设备 及运行

主编 王 勇 孙文杰
编写 陈 焰 付妍玉
主审 安敏善



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（高职高专教育）。

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。

全书共分七章，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、汽轮机结构与强度、凝汽设备、汽轮机调节及保护系统、汽轮机运行与事故处理。为了便于学生对所学知识的理解，每章后均有复习思考题及习题。

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。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂汽轮机设备及运行/王勇, 孙文杰主编. —北京: 中国电力出版社, 2010

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育

ISBN 978-7-5083-9892-1

I. ①电… II. ①王…②孙… III. ①火电厂-蒸汽透平-高等学校: 技术学校-教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 237880 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.25 印张 419 千字

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

本书为普通高等教育“十一五”规划教材（高职高专教育），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，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；符合职业教育的规律，具有明显的职业教育特色。

全书共分七章，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、凝汽设备、汽轮机调节和汽轮机保护系统、汽轮机运行与事故处理。为了便于学生对所学知识的理解，每章后均有复习思考题及习题。

本书可作为高职高专电力技术类火电厂集控运行和电厂热能动力装置专业的教学用书，也可作为职业资格和岗位技能培训教材。

本书由西安电力高等专科学校王勇和孙文杰主编，其中王勇编写了绪论、第一～三章，孙文杰编写了第四、六章，陈焰编写了第五章，付妍玉编写了第七章。本书由西安热工研究院安敏善主审，主审老师提出了许多宝贵的意见，在此深表谢意！

由于编者水平所限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2009年12月

目 录

| | |
|-------------------------|-----|
| 前言 | |
| 绪论 | 1 |
| 第一章 汽轮机级的工作原理 | 10 |
| 第一节 概述 | 10 |
| 第二节 汽轮机级的工作过程 | 14 |
| 第三节 级的轮周功率与轮周效率 | 24 |
| 第四节 速比与轮周效率的关系 | 27 |
| 第五节 汽轮机的级内损失和级效率 | 35 |
| 复习思考题及习题 | 47 |
| 第二章 多级汽轮机 | 49 |
| 第一节 多级汽轮机的工作特点 | 49 |
| 第二节 汽轮机的损失及其装置的效率和热经济指标 | 53 |
| 第三节 多级汽轮机的轴向推力 | 60 |
| 复习思考题及习题 | 62 |
| 第三章 汽轮机的变工况 | 64 |
| 第一节 喷嘴变工况 | 64 |
| 第二节 级与级组的变工况 | 74 |
| 第三节 汽轮机的调节方式及调节级变工况 | 82 |
| 第四节 滑压运行的经济性与安全性 | 88 |
| 第五节 汽轮机轴向推力的变化规律 | 92 |
| 第六节 小容积流量工况 | 94 |
| 第七节 蒸汽参数变化对汽轮机工作安全性的影响 | 97 |
| 复习思考题及习题 | 100 |
| 第四章 汽轮机结构与强度 | 101 |
| 第一节 汽轮机的进汽部分 | 101 |
| 第二节 汽缸及滑销系统 | 106 |
| 第三节 喷嘴组与隔板 | 117 |
| 第四节 动叶片 | 124 |
| 第五节 转子 | 139 |
| 第六节 汽封 | 146 |
| 第七节 轴承 | 148 |
| 第八节 盘车装置 | 159 |
| 复习思考题及习题 | 161 |
| 第五章 凝汽设备 | 163 |

| | | |
|------------|-------------------|------------|
| 第一节 | 凝汽设备的作用和工作原理 | 163 |
| 第二节 | 表面式水冷凝汽器 | 164 |
| 第三节 | 凝汽器的真空 | 169 |
| 第四节 | 凝汽器的变工况及运行 | 175 |
| 第五节 | 抽气设备 | 181 |
| 第六节 | 空冷凝汽器系统 | 185 |
| | 复习思考题及习题 | 192 |
| 第六章 | 汽轮机调节及保护系统 | 193 |
| 第一节 | 汽轮机调节系统的任务与类型 | 193 |
| 第二节 | 汽轮机液压调节系统 | 197 |
| 第三节 | 汽轮机数字电液调节系统 | 209 |
| 第四节 | 汽轮机电液调节系统中的主要部件 | 217 |
| 第五节 | DEH 液压调节系统 | 223 |
| 第六节 | 汽轮机保安系统 | 229 |
| 第七节 | 主机供油系统 | 234 |
| | 复习思考题及习题 | 240 |
| 第七章 | 汽轮机运行与事故处理 | 242 |
| 第一节 | 汽轮机的热应力、热膨胀和热变形 | 242 |
| 第二节 | 汽轮机的寿命 | 248 |
| 第三节 | 汽轮机启动 | 252 |
| 第四节 | 汽轮机停机 | 258 |
| 第五节 | 汽轮机的典型事故及处理 | 260 |
| | 复习思考题及习题 | 267 |
| | 参考文献 | 268 |

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。为保证汽轮机安全经济地进行能量转换，需配置若干附属设备，比如凝汽设备、回热加热设备和调节、保护装置及供油系统等，汽轮机及其附属设备通过管道和阀门连成的整体，称为汽轮机设备。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2600r/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、挠性轴和缩放喷嘴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，现在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，其发展的主要特点有以下几点。

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°C/538°C、 $n=3600\text{r}/\text{min}$) 在美国投入运行; 1976 年西德 KWU 公司制造的单轴半速 ($n=1500\text{r}/\text{min}$) 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°C/540°C) 在苏联投入运行。

增大单机功率不仅能迅速发展电力生产, 而且能相应减少大功率机组单位功率用的材料、人工等, 使单位功率投资成本降低; 可提高机组的热经济性, 如国产引进型 300MW 机组的热耗率为 8091kJ/kWh, 而国产 100MW 机组的热耗率 9252kJ/kWh, 前者为后者的 87%; 可加快电站建设速度, 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 (16~18MPa) 或超临界压力 (23~26MPa) 的机组, 甚至采用压力可达 32MPa 的超超临界压力的机组。蒸汽初温度多采用 535~565°C, 即尽量控制在珠光体钢所允许的 565°C 以下, 力求不用或少用奥氏体钢。

3. 采用中间再热

采用中间再热后可降低低压缸末级排汽湿度, 减轻末级叶片水蚀程度, 为提高初压创造了条件, 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

采用燃气—蒸汽联合循环, 可实现能量的梯级利用, 大大提高发电装置的热效率, 还可解决燃煤发电厂存在的严重环境污染问题, 节省大量冷却水, 而且投资相对降低, 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, 并保证了设备的使用寿命。

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、英国帕森斯公司、法国电气机械公司 (CMR) 公司等。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, 以后陆续生产出 12、25、50、100、125、200MW 和 300MW 汽轮发电机组。20 世纪 80 年代初又从美国电气公司引进了 300MW 和 600MW 机组整套制造技术, 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, 已经经历了从中压机组到超临界 600MW 机组的发展过程, 特别是近十几年内汽轮机的较快发展还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

蒸汽在汽轮机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，蒸汽主要在喷嘴叶栅（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，蒸汽在喷嘴叶栅（或静叶栅）和动叶栅中都进行膨胀，且膨胀程度相同。现代喷嘴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。汽轮机的排汽压力高于大气压力，直接供热用户使用，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，其余排汽仍排入凝汽器。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。

(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，与原来的蒸汽混合后共同膨胀做功。

背压式汽轮机 and 调整抽汽式汽轮机统称为供热式汽轮机，供热式汽轮机还有一种具有调整抽汽的背压式汽轮机，其调整抽汽和排汽分别供给不同的热用户。目前大容量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，汽轮机按不同的压力等级可分为如下几类。

(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。

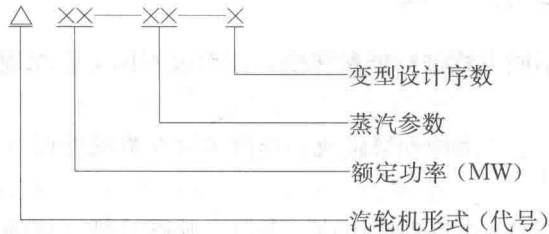
此外，按汽流方向分类可分为轴流式、辐流式；按用途分类可分为电站汽轮机、工业汽轮机、船用汽轮机；按汽缸数目分类可分为单缸、双缸和多缸汽轮机；按机组转轴数目分类

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组成。

1. 产品型号组成



2. 汽轮机型号的汉语拼音代号

汽轮机型号的汉语拼音代号见表 0-1。

表 0-1 汽轮机型号的汉语拼音代号

| 代号 | N | B | C | CC | CB | H | Y |
|----|-----|-----|---------|---------|-------|----|-----|
| 形式 | 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见表 0-2。

表 0-2 汽轮机型号中蒸汽参数表示法

| 形式 | 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；压力单位为 MPa；温度单位为℃。

四、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 0-1 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，而喷嘴叶栅（静叶）装在隔板上。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

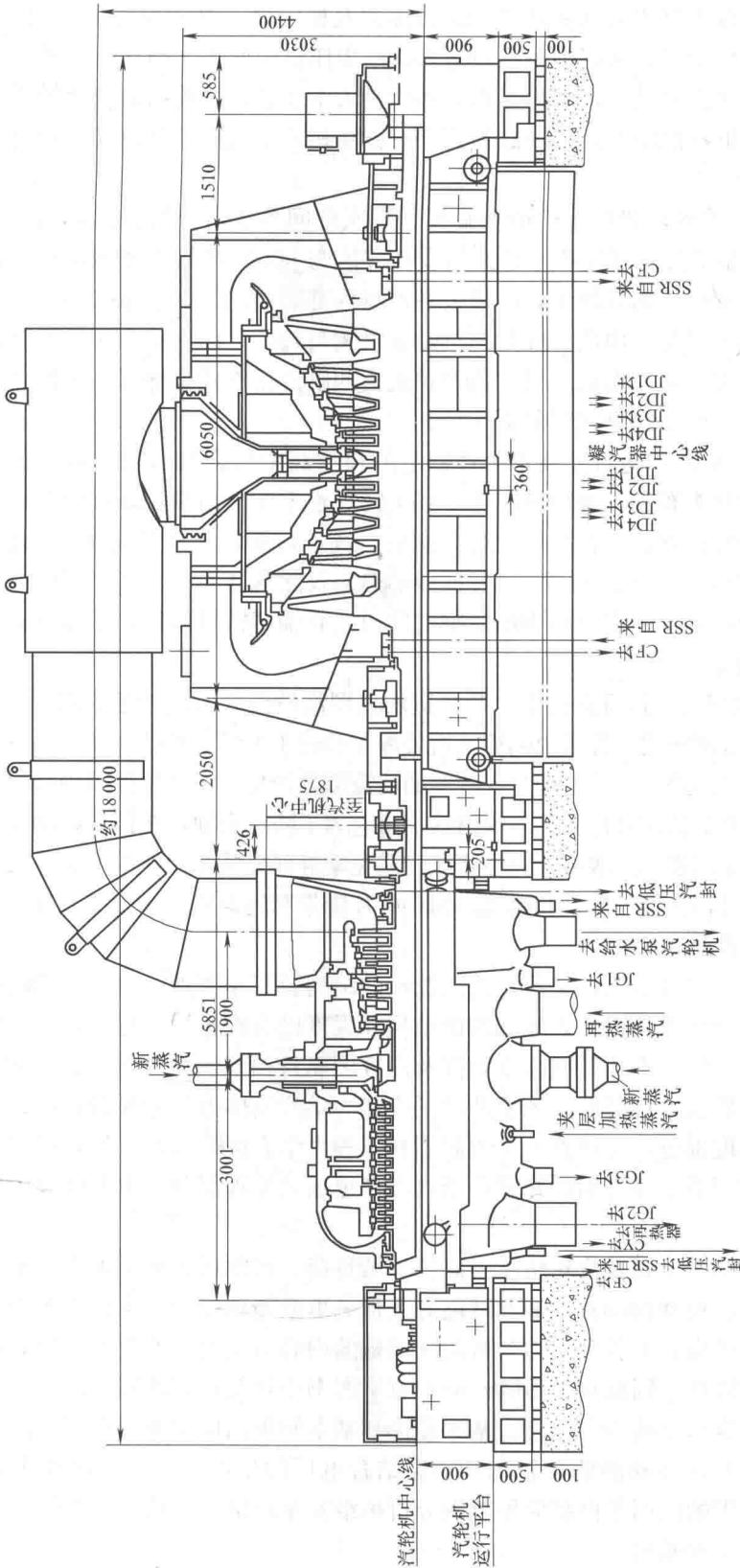


图 0-1 东方汽轮机厂生产的 300MW 冲动式多级汽轮机纵剖面图

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 0-2 是一台哈尔滨汽轮机厂生产的亚临界、一次中间再热、单轴、两缸两排汽反动式 300MW 汽轮机的纵剖面图，采用积木块式的设计并能与 600MW 机组通用组合。其特点是动叶片直接嵌装在鼓形转子的外缘上，喷嘴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，叶片与汽缸或喷嘴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。

图 0-3 为东方汽轮机厂引进日立技术生产制造的典型高中压合缸汽轮机高中压部分结构示意图。高中压缸为对头布置，采用单流程、双层缸、水平中分结构，外缸为上猫爪支撑形式，上下缸之间采用螺栓连接。在高压缸第 6 级后、高压缸排汽、中压缸第 11 级后和中压缸排汽布置四级抽汽口，分别供 1、2、3 号高压加热器及除氧器用汽。高中压内缸之间设置有分缸隔板，在高中压外缸两端及高中压内缸之间设置有轴端密封装置，在高中压外缸和轴承座之间设置有挡油环。

图 0-4 为东方汽轮机厂引进日立技术生产制造的典型汽轮机低压缸的通流部分，两个低压缸完全相同，对称双分流布置，都是由隔板上组装静子和转子上组装动叶组成，蒸汽沿中心线方向引入低压缸，经环形进汽室，均匀进入两侧的通流部分做功。内缸组件采用分段组合结构，有利于金属材料的有效利用及回热抽汽管道的引出。为了防止水蚀，在低压缸动叶顶部设置了去湿装置。为保证蒸汽在每一级中能自由膨胀，避免动静部分的摩擦，动静部分设置了一定的间隙，为了减少漏汽，在转子围带和隔板之间，叶片围带和隔板之间均设置了汽封装置。

五、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，主要讨论汽轮机的结构及工作原理、汽轮机的调节和保护、凝汽设备组成及原理、汽轮机主要零部件的结构和强度以及汽轮机运行等方面的内容。

这门课程的突出特点是，专业新概念多，涉及内容多而且抽象，每个方面的问题所依据的理论也不同，例如汽轮机原理部分，主要涉及工程热力学和流体力学方面的知识；汽轮机的主要零部件结构和强度部分，主要涉及工程制图和工程力学方面的知识；汽轮机调节和保护部分，主要涉及自动调节原理方面的知识；凝汽设备组成及原理部分，主要涉及传热学方面的知识等。

通过课程的学习，学生应具备汽轮机设备启停、低负荷、正常运行的基本操作能力，具备基本汽轮机设备安装、启动调试和性能测试能力及常见事故处理能力。本课程各个侧面的学习是使学生获得并提高以上各项能力为目的。课程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。因此在学习时，应重点掌握书中相关内容的概念、基本理论和基本知识，同时应掌握这些基本概念、基本理论和基本知识的应用条件和应用范围。在学习过程中，应主动积极，多动脑筋勤思考，学会结合发电厂的生产实际，应用相关基本概念、基本理论和基本知识的应用条件和应用范围分析机组安全经济运行的具体实际问题，为毕业后尽快上岗打下坚实的基础。

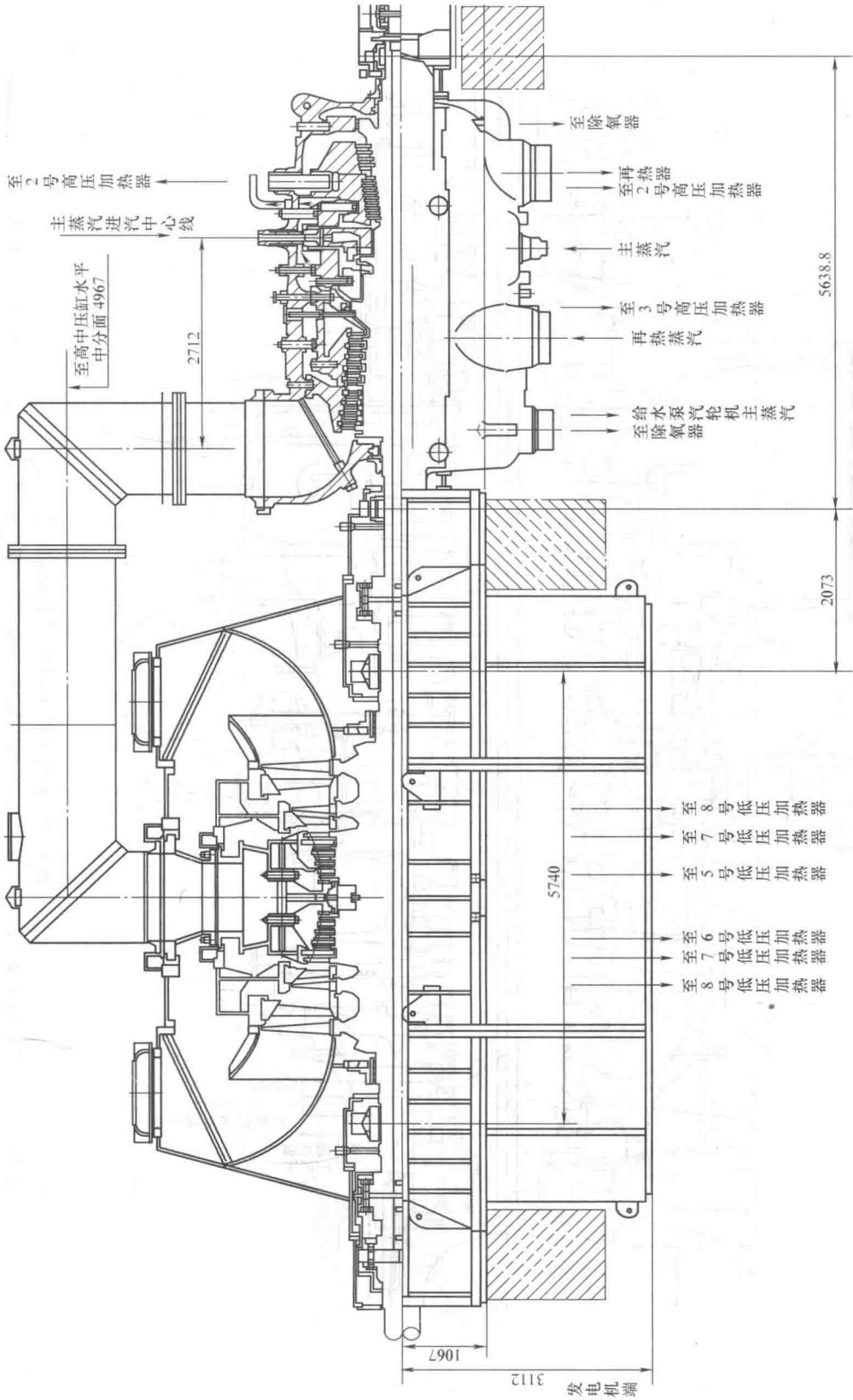


图 0-2 哈尔滨汽轮机厂生产的 300MW 汽轮机纵剖面

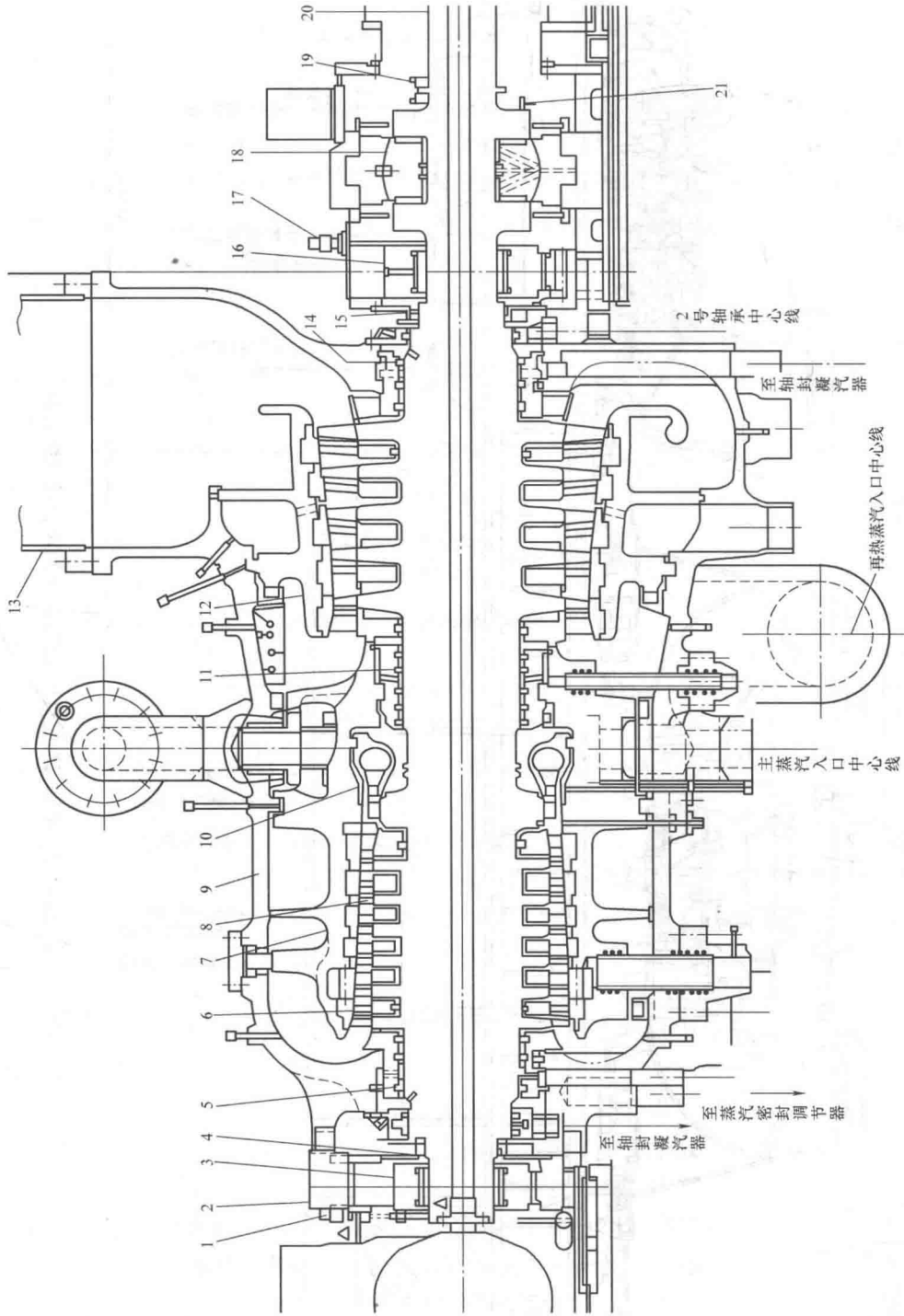


图 0-3 典型汽轮机高中压缸结构示意图

1—轴振监测仪；2—汽轮机机架；3—1号支撑轴承；4—挡油环；5—轴封；6—喷嘴隔板；7—高压内缸；8—叶片；9—高压外缸；
 10—第一级喷嘴汽室；11—轴封；12—中压内缸；13—连通管；14—轴封；15—挡油环；16—支撑轴承；
 17—轴承测振仪；18—推力轴承；19—推力轴承磨损监测器；20—转子；21—轴向位移监测仪

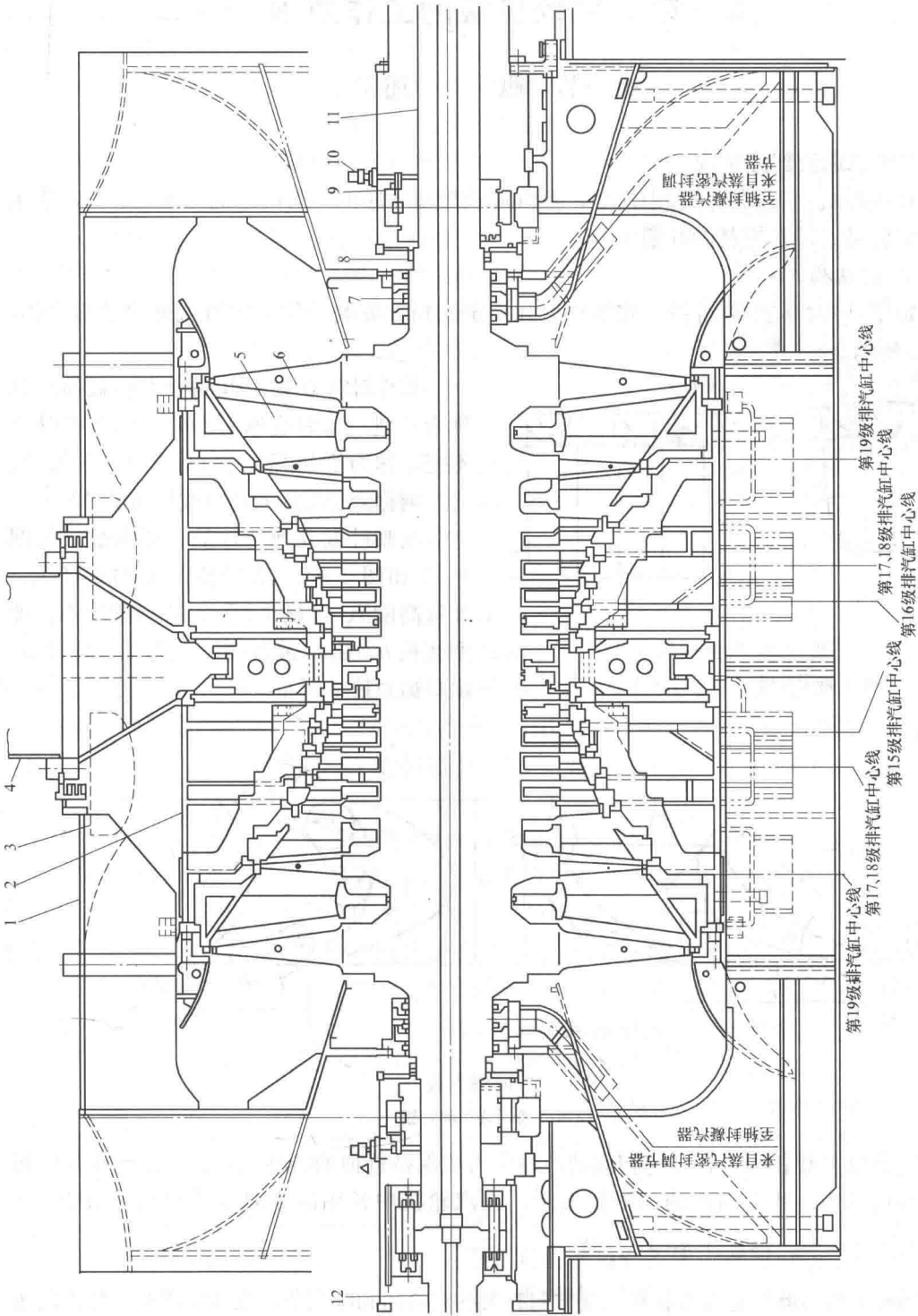


图 0-4 典型汽轮机低压缸的纵剖面图

1—低压外缸；2—低压内缸；3—大气泄放阀；4—连接管；5—喷嘴隔板；6—叶片；7—汽封；
 8—挡油环；9—轴承座；10—轴振动监测仪；11—低压转子；12—高中压转子

第一章 汽轮机级的工作原理

第一节 概 述

一、汽轮机通流部分结构

蒸汽在汽轮机内流动的过程中做功，蒸汽流动做功的通道称为汽轮机的通流部分，它主要由一系列转动、静止交替的叶栅组成。

(一) 叶栅结构

叶栅是指结构相同的叶片按一定的距离和一定的角度安装而构成的汽流通道的组合体，如图 1-1 所示。

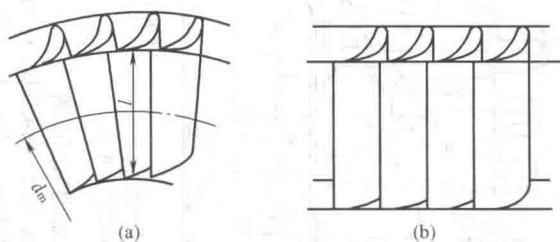


图 1-1 叶栅示意

(a) 环形叶栅；(b) 直列叶栅

单个叶片在某一叶高处的横截面形状称为叶型，其周线称为型线。叶型沿叶高不变，称为等截面叶片（或称直叶片）；反之，则称为变截面叶片（或称扭曲叶片）。

反映叶栅几何特性的主要参数（见图 1-1 和图 1-2）有叶栅的平均直径 d_m 、叶片高度 l 、叶栅节距 t 、叶栅宽度 B 、叶型弦长 b 、出口边厚度 Δ 、进口边宽度 a 、出口边宽度 a_1 与 a_2 等。

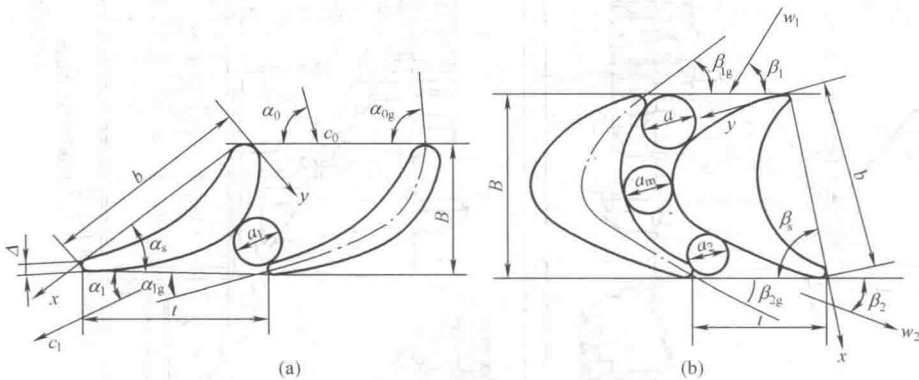


图 1-2 叶栅参数

(a) 喷嘴叶栅；(b) 动叶栅

由于进出口参数相同时，几何相似的叶栅中汽流保持近似的特性，所以决定叶栅几何形状的参数都可以用一些无因次的相对值表示。在汽轮机中常用的相对参数有相对节距 $\bar{t} = \frac{t}{b}$ ，相对高度 $\bar{l} = \frac{l}{b}$ ，径高比 $\theta = \bar{t}/d_m$ 等。

另外还有一些与叶栅通道形状和汽流方向有关的汽流角和叶型角，也是叶栅几何特性的重要参数。图 1-2 中 α_1 和 β_2 为喷嘴叶栅和动叶栅的出口汽流角； α_0 和 β_1 为进口汽流角； α_s 和 β_s 为叶栅的安装角，它是叶栅额线与弦长之间的夹角，对一定的叶型，安装角直接影响到叶栅汽道

的形状和出口汽流角 $\alpha_1(\beta_2)$ 的大小; α_{0g} 和 β_{1g} 为叶型进口角, 它是叶型中弧线在前缘点的切线与叶栅前额线之间的夹角, 它只随安装角变化, 与汽流无关。叶型几何进口角与汽流进口角之差称为汽流冲角, 用 δ 表示, 当叶型几何进口角大于汽流角时, 称为正冲角, 反之称为负冲角。

(二) 通流部分的构成

在汽轮机中, 级是最基本的做功单元, 在结构上它是由一系列静止的喷嘴叶栅和其后相邻的一系列与汽轮机轴一起转动的动叶栅组成。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。因此, 研究级的工作原理, 就掌握了整个汽轮机工作原理的核心。

图 1-3 是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嘴或静叶栅。

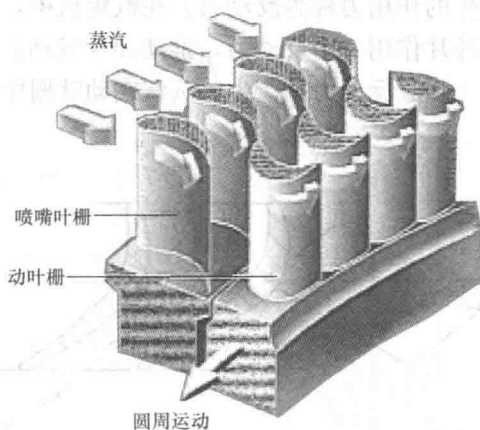


图 1-3 单级汽轮机结构简图

二、蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理

高速汽流经过级叶栅时, 具有一定压力和温度的蒸汽先在喷嘴中膨胀, 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, 完成动能到机械能的转换。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。

(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较低的物体时, 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。

在汽轮机中, 从喷嘴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, 从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 1-4 所示为无膨胀的

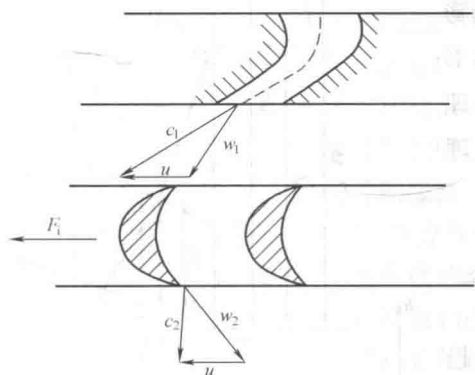


图 1-4 蒸汽流过无膨胀动叶通道时速度的变化

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 流出动叶, 则蒸汽对动叶施加了一个轮周方向的冲动力 F_1 , 该力对动叶做功使动叶带动转子转动。 F_1 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。若在冲动力的作用下, 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。利用冲动力做功的原理就是冲动作用原理。