

热电厂实用技术丛书

汽轮机设备 运行及 事故处理

汪玉林 主编



化学工业出版社
环境·能源出版中心

热电厂实用技术丛书

汽轮机设备运行及事故处理

汪玉林 主编



化学工业出版社

环境·能源出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备运行及事故处理/汪玉林主编. —北京:
化学工业出版社, 2005. 10
(热电厂实用技术丛书)
ISBN 7-5025-7787-4

I. 汽… II. 汪… III. ①火电厂-汽轮机运行②火
电厂-蒸汽透平-事故-处理 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 125715 号

热电厂实用技术丛书
汽轮机设备运行及事故处理

汪玉林 主编

责任编辑: 郑叶琳

文字编辑: 丁建华 陈 喆

责任校对: 顾淑云 于志岩

封面设计: 关 飞

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 528 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7787-4

定 价: 45.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《热电厂实用技术丛书》编委会

主 任 周小谦

副 主 任 郁 刚 王振铭

编委 (以姓氏笔画为序)

王汝武 王国刚 王振铭 王鼎臣 邢培生

杜文学 汪玉林 郁 刚 周小谦

丛书主编 汪玉林

本分册主编 汪玉林

本分册编写人员 (以姓氏笔画为序)

闫永旭 汪玉林 张 静 陈海璞 寇 磊

鲍 军

序

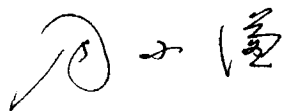
节约能源、保护环境是我国实现可持续发展战略的重要组成部分，这已成为我国的一项基本国策。目前，在商业企业可大规模实现能源转换的技术中，热电联产、热电装置的热电效率是最高的。建设热电厂，实现热电联产、热电冷联供是节约能源、保护环境、提高企业经济效益的有效途径。新中国成立以来，在我国电力和工业建设及城市建设中，都高度重视热电联产的建设，使热电联产在我国得到较大的发展。到2003年底，全国共有6MW以上热电联产机组2121台，总容量达到43691.8MW，占全国火电装机总容量的11.6%，为国民经济发展提供了强大动力，为节约能源、保护环境做出了巨大贡献。初步估算，从发电侧看比纯凝汽发电节省3000万吨以上原煤，从供热侧看比小锅炉节省4000多万吨原煤，相应估算减少CO₂排放1.8亿吨，减少SO₂排放120多万吨，并减少了NO_x和粉尘的排放。在我国能源结构中以煤为基础的格局，以电为中心的发展战略，在相当长的时间内是不会变的。

目前，在我国电厂的能源结构中，燃煤电厂的发电量约占全国总发电量的80%以上，即使到2020年，燃煤电厂的发电量仍将在70%以上。煤燃烧排放的SO₂和NO_x以及粉尘仍是大气主要污染源。努力提高能源利用率，尽可能减少煤炭消耗，减少温室气体和SO₂的排放，仍然是环境保护的重要任务。为此，继续加大热电联产建设步伐，扩大热电联产在电力装置中的比例，就成为今后电力建设中一个重要任务，也是我国实施节约能源、保护环境可持续发展战略的必然选择。

我们不仅要不断增加热电联产的比例、节约能源，同时还要不断提高热电联产的建设、运行管理水平，以进一步提高效率、降低消耗、减少污染、增加效益。近年来，随着科学技术的发展，一些新技术、新设备、新工艺、新的管理理念在火电厂广泛应用，促进了企业技术进步，在节约能源、改善环境方面取得显著成效。循环流化床燃烧技术的应用，不仅能燃烧劣质煤、高硫煤，而且使环境得到改善；脱硫除尘技术的广泛应用减少了SO₂、NO_x以及粉尘的排放，对保护和改善人类的生态环境，保障人体健康起到积极作用；电厂水处理采用膜分离技术，既减少水污染，又节约用水，提高企业经济效益；提高电厂主要设备锅炉、汽轮机、电气设备效率降低了煤耗，风机、水泵及其他辅助设备的电耗，降低工厂用电；完善电厂热力系统及设备的优化配置，改善运行操作，加强运行管理，采用综合利用技术、自动化技术等，都使能源消耗大幅度降低，提高了能源利用率，提高了企业经济效益。

随着热电联产产业的发展，热电厂建设迅速发展，从业人员迅猛增加，热电联产、节约能源、环境保护、综合利用、电厂自动化技术等新技术广泛应用，热电行业对热电新技术普及的要求日益强烈，因此，编辑出版一套适用于热电行业的技术丛书是很有必要的。

由中国电机工程学会组织编写，化学工业出版社出版的《热电厂实用技术丛书》（以下简称《丛书》）正是适应了这一形势要求。《丛书》涵盖了热电厂建设、热电设备、热电技术各个领域，对当今热电厂已经应用的新技术、新设备、新工艺都作了论述，并着重介绍实际应用成果，理论联系实际，经验实用具体。参加《丛书》编写的人员大多是在热电行业第一线的高级工程师，具有丰富的理论和实践经验，《丛书》的编写具有科学性、实用性和可操作性。相信这套《丛书》对于提高我国热电厂的建设技术和管理水平、热电厂的综合利用、环境保护的水准以及提高企业的经济效益都将会起到积极的促进作用。对于热电行业的专业技术人员、技术工人以及热电厂设计、运行、管理及相关人员，这套《丛书》是一套很好的参考书。因此，我向广大热电科技工作者及有关人员推荐《热电厂实用技术丛书》，以飨读者。



2005 年 11 月

前 言

近年来，随着国民经济的迅速发展，热电联产产业发展日新月异，热电厂建设逐年增加，热电联产汽轮机的单机容量不断增大。目前已发展到单机 200MW，正在向 300MW 发展。随着科学技术的发展，一些新技术、新工艺、新材料也在汽轮机制造业应用，供热式汽轮机设计制造正在向热电化、积木化、高速化、自动化方向发展。

汽轮机是热电厂的主要动力设备，汽轮机设备运行的正常与否，直接影响到电厂的安全生产和经济效益。因此，向汽轮机从业人员及相关人员加强汽轮机设备运行及事故处理专业知识教育至关重要。为了适应这一形势，编写了《汽轮机设备运行及事故处理》一书，作为《热电厂实用技术丛书》之一推荐给读者。本书是结合多年来举办“汽轮机技术培训班”的经验，将汽轮机设备运行与维修的实践与系统理论和最新技术相结合，为热电厂、地方电厂广大汽轮机专业技术人员、技术工人以及热电技术设计和管理人员而编写的。本书主要介绍各类汽轮机，尤其是热电联产汽轮机的结构及特点，并对汽轮机的发展、设备运行及事故处理进行了专门论述。电液自动调节是新发展的汽轮机调节自动化技术，已在大型汽轮机上广泛应用，并正在向热电联产汽轮机推广。本书以引进型 300MW 中间再热汽轮机的数字式电液自动调节系统为例，详细地介绍了电液自动调节技术的原理、结构、运行、故障处理及其在热电联产汽轮机上的应用。

本书由汪玉林、闫永旭、陈海璞、张静、鲍军、寇磊编写，由汪玉林统一校阅、统稿。全书由南京汽轮电机厂高级工程师寇磊审阅。

本书在编写过程中得到中国电机工程学会热电专业委员会、化学工业出版社、青岛捷能汽轮机股份有限公司、南京汽轮电机厂、武汉汽轮发电机厂及有关热电企业等单位的大力支持，在此表示衷心地感谢。

鉴于汽轮机工业发展迅速，新技术广泛应用，书中难免存在疏漏，恳请读者批评指正。

编者

2006 年 1 月

目 录

第一篇 综 述

第一章 概论	1
第一节 汽轮机的基本结构和分类.....	1
第二节 供热式汽轮机.....	5
第三节 工业汽轮机.....	9
第四节 低品位热能汽轮机	10
第五节 汽轮机的型号和蒸汽参数	12
第二章 汽轮机的工作原理	14
第一节 蒸汽在喷嘴中的流动	14
第二节 喷嘴截面变化与流速的关系	15
第三节 蒸汽在动叶片中的流动	17
第四节 蒸汽在汽轮机内的损失及热效率	19
第三章 汽轮机本体结构	24
第一节 汽轮机静子	24
第二节 主轴承和推力轴承	34
第三节 汽轮机转子	38
第四节 叶轮	40
第五节 叶片	42
第六节 联轴器	44
第七节 盘车装置	45
第八节 几种供热汽轮机简介	47
第四章 汽轮机的调节与保护	51
第一节 调节系统的基本原理	51
第二节 调速系统的基本结构	54
第三节 调节系统的静态特性	61
第四节 调节系统的动态特性	65
第五节 同步器	67
第六节 汽轮机的保护装置	69
第七节 汽轮机润滑油路系统	75
第八节 供热式汽轮机的调节	80

第九节 几种类型的汽轮机调节系统比较	84
第十节 调节系统试验	89

第五章 汽轮机组的热力系统及辅助设备	94
第一节 汽轮机组的热力系统	94
第二节 凝汽设备	97
第三节 给水回热加热设备	106
第四节 给水除氧设备	112
第五节 热力系统管道及附件	115

第二篇 汽轮机电液自动调节

第六章 汽轮机自动调节系统	124
第七章 数字式电液调节	131
第一节 数字式电液调节系统 (DEH)	131
第二节 数字式电液调节系统的逻辑分析	148
第三节 EH 供油系统	170
第四节 电液伺服执行机构	181
第五节 危急遮断系统	189
第六节 润滑油系统	206
第七节 低压透平油数字式电液调节系统	219

第三篇 汽轮机运行

第八章 汽轮机的启动与停机	235
第一节 汽轮机的正常启动	235
第二节 汽轮机的热态启动	240
第三节 汽轮机的滑参数启动	241
第四节 汽轮机的停机	243
第九章 汽轮机的运行	246
第一节 汽轮机的运行与维护	246
第二节 汽轮机的变工况运行	249
第三节 汽轮机的变压运行	250
第四节 供热汽轮机的运行特点	252
第五节 汽轮机低真空运行	254
第六节 数字式电液调节系统的运行	257

第四篇 汽轮机运行事故处理

第十章 汽轮机重大事故处理	263
第一节 汽轮机重大事故处理的原则	263

第二节	汽轮机动静部分摩擦和大轴弯曲·····	264
第三节	汽轮机的水冲击·····	265
第四节	汽轮机叶片损坏与脱落·····	266
第五节	汽轮机超速·····	268
第六节	汽轮机发电机组的轴承事故·····	269
第七节	汽轮机油系统着火·····	271
第八节	汽轮发电机甩负荷·····	272
第十一章	汽轮机常见故障处理·····	275
第一节	汽轮机本体常见故障处理·····	275
第二节	调节系统常见故障处理·····	284
第三节	热力系统与辅助设备常见故障处理·····	288
第十二章	典型事故处理实例·····	296
第一节	汽轮机本体典型事故处理实例·····	296
第二节	汽轮机调节系统典型事故处理实例·····	301
第三节	DEH 调节系统的事故处理实例·····	304

附 录

附录 I	常用法定计量单位及换算·····	307
附录 II	水蒸气热力特性·····	308
附录 III	几种汽轮机的纵剖面·····	316
附录 IV	几种汽轮机的调节、保安、油路系统·····	320
附录 V	几种汽轮机的热力系统·····	325
参考文献	·····	330

第一篇 综 述

第一章 概 论

汽轮机是一种以水蒸气作为工质的高速回转原动机。从 1884 年瑞典工程师拉伐尔 (Laval) 设计制造出世界上第一台功率为 5hp ($1\text{hp}=745.700\text{W}$) 的汽轮机, 1884 年英国工程师柏生斯 (Parsons) 设计制造出第一台反动式汽轮机, 至今汽轮机制造业已经有一百多年的历史。在这一个多世纪中, 汽轮机制造业发展速度越来越快, 特别是 20 世纪 50 年代以后的 50 多年间, 随着科学技术的不断进步, 金属材料工业的迅速发展, 机械加工工艺设备越来越先进, 透平理论研究的成果不断地得到推广应用, 汽轮机的设计和制造水平有了很大的提高, 汽轮机向着高参数、大功率、高效率 and 高度自动化方向发展。目前世界上已经出现了超临界参数 (初压 35MPa, 初温 649°C) 的汽轮机, 单机最大功率达到 1300MW。

我国在 20 世纪 50 年代才发展起来一批汽轮机制造厂, 主要有上海、哈尔滨、东方、北京、武汉、青岛、南京、杭州和广州等汽轮机制造厂。1956 年, 上海汽轮机厂制造出第一台容量为 6MW 的凝汽式汽轮机, 安装在淮南发电厂。随后 12MW、25MW、50MW、100MW、125MW、200MW 汽轮机相继投产发电。1974 年, 上海汽轮机厂制造出第一台 300MW 汽轮机。1990 年, 哈尔滨汽轮机厂设计制造出第一台 600MW 汽轮机。目前, 300MW、600MW 汽轮机已形成生产规模, 并采用了数字式电液自动调节系统, 正在向提高蒸汽初参数方向发展。在大功率汽轮机发展的同时, 小功率汽轮机尤其是热电联产汽轮机 (又称供热式汽轮机) 也得到较快发展, 已形成凝汽式、抽汽凝汽式、背压式、抽汽背压式汽轮机, 低品位热能汽轮机、地热汽轮机以及工业汽轮机、船舶汽轮机等系列, 各类汽轮机都已批量生产, 能满足各行各业对汽轮机的需求。

近年来, 随着国民经济的迅速发展, 热电联产产业发展日新月异, 热电厂建设逐年增加, 供热式汽轮机的单机容量不断增大。目前已发展到单机 200MW, 正在向 300MW 发展。随着科学技术的发展, 一些新技术、新工艺、新材料也在汽轮机制造业应用, 供热式汽轮机设计制造正在向热电化、积木化、高速化、自动化方向发展。

第一节 汽轮机的基本结构和分类

汽轮机按照基本工作原理可以分为冲动式汽轮机和反动式汽轮机两种类型。

一、冲动式汽轮机

所谓冲动式汽轮机是利用冲动作用原理设计出来的汽轮机, 即蒸汽只在喷嘴中膨胀, 将蒸汽热能转换成动能, 而在动叶片中蒸汽不发生膨胀, 没有压力降, 只改变了气流流动的方向, 将蒸汽的动能转变成机械能。如图 1-1 所示为单级冲动式汽轮机的结构。它主要由主轴 1、叶轮 2、叶片 3、喷嘴 4、汽缸 5 等部件组成, 图中表示出蒸汽在汽轮机内的做功过程, 蒸汽在喷嘴中膨胀, 其压力不断降低, 而速度不断提高, 离开喷嘴时压力为 p_1 , 速度为 c_1 。在喷嘴和动叶片之间的间隙处, 其压力和速度不变。但是当蒸汽进入动叶片以后, 压力不发

生变化, 改变流动方向时, 给动叶片一个冲动力, 气流速度由 c_1 降到 c_2 , 蒸汽的一部分动能转化为机械能。做功以后的蒸汽, 仍具有一定的速度 c_2 , 通常称之为蒸汽的余速。显然, 这一部分余速所具有的动能没有被利用做功就排出汽轮机, 故把这部分没有利用的动能叫做余速损失。

由于单机冲动式汽轮机只有一列动叶片, 气流离开动叶片的速度很高, 余速损失较大, 汽轮机的热效率低。为了降低余速损失, 提高热效率, 在同一个叶轮上再加一列喷嘴和一系列动叶片, 使蒸汽的动能被进一步利用。这样的汽轮机称为速度级汽轮机, 也称为复速级汽轮机。如图 1-2 所示为速度级汽轮机的结构。图中表示出了蒸汽压力和速度在汽轮机中的变化过程, 压力为 p_0 的新蒸汽进入喷嘴 4, 其压力降低到 p_1 , 速度由 c_0 增加到 c_1 , 热能转变成动能, 然后进入第一列动叶片 3 中, 改变流动方向, 动能转换成机械能。蒸汽做功后, 离开第一列动叶片时虽然速度降低一些, 但仍有较大的速度 c_2 可以利用, 蒸汽经过导向叶片 7 改变流动方向后再进入第二列动叶片 6 中继续做功, 蒸汽在导向叶片中不再膨胀, 压力基本不变, 但是由于气流的流动损失, 速度由 c_2 略有降低, 变成 c'_2 , 在第二列动叶片中, 蒸汽也不再膨胀, 只是蒸汽的动能进一步被利用, 排汽的速度降低到了 c''_2 。

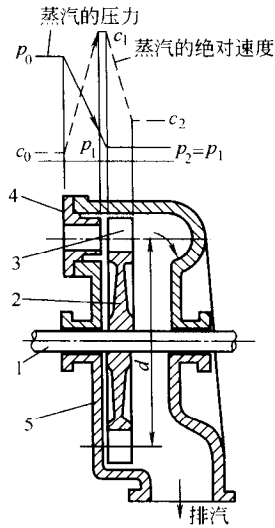


图 1-1 单级冲动式汽轮机的结构

1—主轴; 2—叶轮; 3—叶片;
4—喷嘴; 5—汽缸

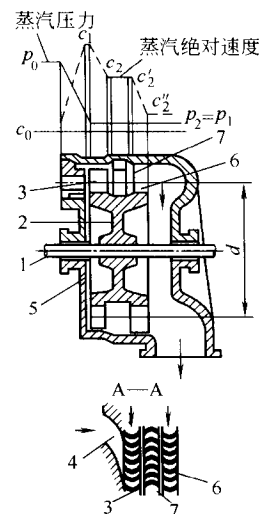


图 1-2 速度级汽轮机的结构

1—主轴; 2—叶轮; 3—第一列动叶片; 4—喷嘴;
5—汽缸; 6—第二列动叶片; 7—导向叶片

这种汽轮机和单级冲动式汽轮机一样, 蒸汽的全部膨胀是在一级喷嘴中进行的, 不同之处是, 第一列动叶片的排汽动能可进一步得到利用。因此, 这种汽轮机的单级功率比单级冲动式汽轮机大。

二、反动式汽轮机

蒸汽不仅在喷嘴中发生膨胀, 而且在动叶片中也发生膨胀, 即蒸汽的热能转变成动能的过程在喷嘴和动叶片同时进行, 这种汽轮机叫做反动式汽轮机。如图 1-3 所示, 蒸汽在喷嘴（静叶片）中膨胀, 使其压力从 p_0 降低到 p_1 , 气流速度从 c_0 提高到 c_1 , 然后进入动叶片继续膨胀, 压力从 p_1 降低到 p_2 , 气流速度由 c_1 降到 c_2 , 将一部分动能转变为机械能。蒸汽在动、静叶片中经过两次膨胀, 动叶片出口的速度似乎应该比动叶片入口的速度高, 但是实

实际上由于流经动叶片的蒸汽对动叶片产生了一个冲动力 $F_{\text{冲}}$ ，离开动叶片时又对动叶片产生一个反动力 $F_{\text{反}}$ ，两个力的合力构成推动叶轮转动的周向力 $F_{\text{周}}$ ，对叶片做了功，将一部分动能转变成机械能，速度也降低下来。因此，动叶片出口的气流速度 c_2 永远低于入口速度 c_1 。

冲动式汽轮机与反动式汽轮机在结构上的最大不同：冲动式汽轮机的动叶片出、入口侧比较薄，中间比较厚，从入口到出口，流道横截面积基本不变，叶片断面形状如图 1-4 所示；反动式汽轮机动叶片入口侧比较厚，出口侧比较薄，流道从入口到出口横截面积逐渐缩小，叶片断面形状如图 1-5 所示。

另外，冲动式汽轮机的叶片装在叶轮上，如图 1-6 所示；反动式汽轮机的叶片装在转子上，因此反动式汽轮机的转子看上去比较粗，如图 1-7 所示。

不管是冲动式汽轮机还是反动式汽轮机，都存在轴向推力。冲动式汽轮机动叶片前后几乎没有压力差，因此轴向推力较小；

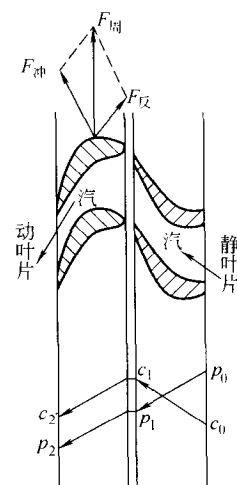


图 1-3 蒸汽在反动式汽轮机内的膨胀过程



图 1-4 冲动式汽轮机叶片断面

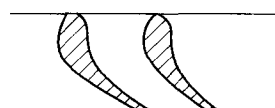


图 1-5 反动式汽轮机叶片断面

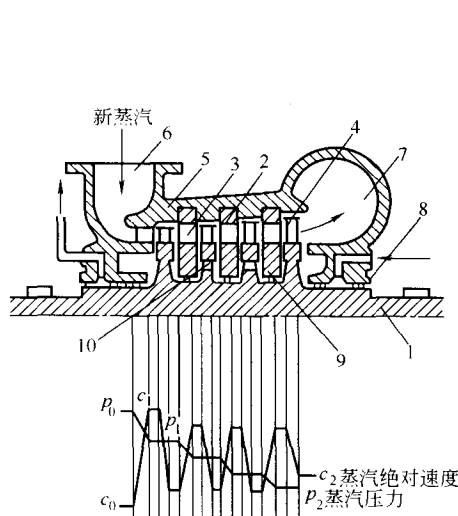


图 1-6 多级冲动式汽轮机结构示意图

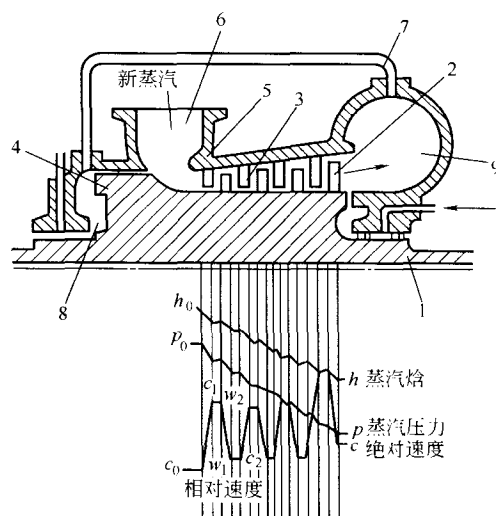


图 1-7 反动式汽轮机结构示意图

1—转子；2—隔板；3—喷嘴；4—动叶片；5—汽缸；6—进汽室；7—排汽室；8—轴封；9—隔板汽封；10—平衡孔

1—转子；2—动叶片；3—喷嘴；4—平衡活塞；5—汽缸；6—进汽室；7—平衡管；8—平衡室；9—排汽室

而反动式汽轮机动叶片前后存在压力差，在动叶片上作用着一个指向低压侧的轴向力，因此轴向推力较大，为了减少轴向力，将转子做成转鼓型，又在转子上装有平衡活塞，如图 1-7 所示，平衡活塞的右侧作用着高压蒸汽，而左侧与排汽室相连，这样平衡活塞在压力差的作用下，产生一个反向推力，抵消蒸汽对叶片的轴向推力。

冲动式汽轮机可以做成单级的，也可以做成多级的，而反动式汽轮机一般都做成多级的，在新蒸汽参数和功率相同的条件下，反动式汽轮机的级数要比冲动式汽轮机的级数多，同样热效率也相应提高，但是反动式汽轮机制造难度相对较大，因此冲动式汽轮机的应用比较广泛。

实际上纯粹冲动式汽轮机是不存在的，蒸汽在动叶片中或多或少都会产生膨胀，压力有所降低，为了提高冲动式汽轮机的热效率，通常会将动叶片设计成一定的反动度，即让蒸汽在动叶片中稍微膨胀，产生一定的压力降，减少在动叶片中的流动损失。为了减少汽轮机的级数，提高汽轮机的热效率，也有采用冲动、反动联合式的，即前面几级为冲动式的，后面几级就为反动式的。

多级冲动式汽轮机的第一级称为调节级，国产小型汽轮机的调节级一般制成双列速度级。采用双列速度级有以下三个方面的优点。

(1) 在蒸汽参数、汽轮机功率相同的条件下，可使汽轮机的级数减少，轴向尺寸减少，结构更加紧凑，降低汽轮机的造价。

(2) 双列速度级的焓降大，新蒸汽经过这一级后，压力和温度都要下降很多，所以使调节级后的高压、高温段缩短，节省了优质材料。

(3) 蒸汽经过双列速度级后，压力降低很多，所以高压轴封结构可以大大简化，而且可以大大减少漏汽损失。

但是由于双列速度级的焓降大，气流速度高，从第二列动叶片排出的蒸汽具有很高的速度，仍有很大的动能没有被利用，热效率较低。

三、汽轮机的分类

汽轮机的分类方法很多，可以按热力特性分类，也可以按用途、蒸汽参数、工作原理、级数分类，还可以按转子个数分类等。通常的分类方法有以下三种。

1. 按汽轮机的热力特性分类

(1) 凝汽式汽轮机 即蒸汽在汽轮机内膨胀做功以后，除了小部分轴封漏气外，全部进入凝汽器凝结成水的汽轮机。实际上为了提高汽轮机的热效率，减少汽轮机排汽缸的直径尺寸，将做过部分功的蒸汽从汽轮机内抽出来，送入回热加热器，用以加热锅炉给水，这种不调整抽汽式汽轮机，也统称为凝汽式汽轮机。

(2) 抽汽凝汽式汽轮机 即蒸汽进入汽轮机内做过部分功以后，从中间某一级抽出来一部分，用于工业生产或居民采暖，其余排入凝汽器凝结成水的汽轮机（称为一次抽汽式或单抽式）。从不同的级间抽出两种不同压力的蒸汽，分别供给不同的用户或生产过程的汽轮机称为双抽式（二次抽汽式）汽轮机。

(3) 背压式汽轮机 即蒸汽进入汽轮机做功以后，以高于大气压力排出汽轮机，用于工业生产或居民采暖的汽轮机。

(4) 抽汽背压式汽轮机 即为了满足不同用户的需要，从背压式汽轮机内抽出部分压力较高的蒸汽用于工业生产，其余的蒸汽继续做功后以较低的压力排出，供给工业生产或居民采暖的背压式汽轮机。

(5) 中间再热式汽轮机 对于高参数、大功率的汽轮机，主蒸汽的初温、初压都比较高，蒸汽在汽轮机内膨胀到末几级，其湿度不断加大，对汽轮机的安全运行很不利，为了减少排汽湿度，将做过部分功的蒸汽从高压缸排出，再返回锅炉重新加热，使温度接近初始状态，然后再进入汽轮机中的低压缸继续做功，这样的汽轮机称为中间再热式汽轮机。蒸汽采

用中间再热,不仅减少了汽轮机的排汽湿度,改善了末几级叶片的工作条件,同时也提高了汽轮机的相对内效率。

2. 按用途分类

(1) 电站汽轮机 仅用来带动发电机发电的汽轮机称为电站汽轮机。

(2) 供热式汽轮机 既带动发电机发电又对外供热的汽轮机称为供热式汽轮机,又称热电联产汽轮机。

(3) 工业汽轮机 用来驱动风机、水泵、压缩机等机械设备的汽轮机称为工业汽轮机。

(4) 船用汽轮机 专门用于船舶推进动力装置的汽轮机称为船用汽轮机。

3. 按汽轮机的进汽压力分类

(1) 低压汽轮机 进汽压力为 $1.2 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 。

(2) 中压汽轮机 进汽压力为 $2.0 \sim 4.0 \text{ MPa}$ 。

(3) 次高压汽轮机 进汽压力为 $5.0 \sim 6.0 \text{ MPa}$ 。

(4) 高压汽轮机 进汽压力为 $6.0 \sim 10.0 \text{ MPa}$ 。

(5) 超高压汽轮机 进汽压力为 $12.0 \sim 14.0 \text{ MPa}$ 。

(6) 亚临界汽轮机 进汽压力为 $16.0 \sim 18.0 \text{ MPa}$ 。

(7) 超临界汽轮机 进汽压力大于 22.17 MPa 。

第二节 供热式汽轮机

供热式汽轮机又称热电联产汽轮机,具有节约能源、保护环境等突出优点,是国家重点支持推广的节能产品,在国民经济发展中占据重要的位置,因此被广泛应用在石油、化工、印染、纺织、水泥、造纸、制糖等行业和城市集中供热工程中。热电联产汽轮机的具体形式有背压式、抽汽凝汽式、抽汽背压式等。

1. 背压式汽轮机

排汽压力大于大气压力的汽轮机称为背压式汽轮机。汽轮机的排汽压力可根据热用户的要求来设计,一般都在 $0.12 \sim 1.5 \text{ MPa}$ 之间。背压式汽轮机具有以下特点。

(1) 背压式汽轮机没有冷源损失,做过功的蒸汽送到热用户,热能几乎全部被利用了,大大提高了机组的运行经济性,发电煤耗率可大大降低,一般背压式汽轮机的发电煤耗率相当于凝汽式汽轮机的 $1/2$ 。

(2) 背压式汽轮机排汽压力较高,蒸汽的容积流量小,通流部分截面变化小,因此机组结构比较紧凑。

(3) 背压式汽轮机排汽全部用于供热,不需要冷凝器和冷却水循环系统,因此系统简单,便于安装,节省投资。

(4) 背压式汽轮机的压力降小,级数少,热能转换电能的比例减少,热效率较低,但是由于背压式汽轮机不设凝汽器,蒸汽的热能几乎全部被利用了,因此背压式汽轮机的热能利用系数 K 值比较高。

$$K = (\text{转化为电能的热量} + \text{供给热用户的热量}) / \text{工质从热源吸收的热量}$$

(5) 背压式汽轮机虽然能同时对外供电和供热,但是汽轮机的调节系统不能同时满足电负荷和热负荷变化的需要,而只能以热定电,由热负荷来决定电负荷,或者以电定热。因为电负荷是随着热负荷的变化而变化的,当热负荷增加时,发电量也随着增加,当热负荷减少时,发电量也随之减少。所以通常背压式汽轮机要与凝汽式汽轮机或抽汽式汽轮机配对运

行, 而不单独运行。但是对于热负荷比较稳定的情况, 选择背压式汽轮机更为经济。

近几年来, 随着城市居民生活水平的不断提高, 城市集中供热技术的迅速发展, 热电厂的数量和规模不断扩大, 背压式汽轮机的应用也越来越广泛。表 1-1 列出了几种背压式汽轮机的主要技术数据。

表 1-1 背压式汽轮机主要技术数据

项 目	汽 轮 机 型 号						
	B0.75-2.35 /0.294	B0.75-2.35 /0.49	B1.0-2.35 /0.294	B1.5-2.35 /0.294	B1.5-2.35 /0.49	B1.5-2.35 /0.981	B1.5-3.43 /0.49
额定功率/MW	0.75	0.75	1	1.5	1.5	1.5	1.5
额定转速/(r/min)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
蒸汽初压/MPa	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	2.35	3.43
蒸汽初温/℃	390	390	390	390	390	390	435
额定工况进汽量/(t/h)	11.97	12.89	12.95	18.08	22.28	39.39	17.80
排汽压力/MPa	0.294	0.49	0.294	0.294	0.49	0.981	0.49
通流部分结构形式	1C+2P	1C+2P	1C+2P	1C+2P	1C+2P	1C	1C+2P
非调整抽汽口位置	C 后	C 后	C 后	C 后	C 后		C 后
汽轮机效率	0.6309	0.6412	0.6618	0.6881	0.6913	0.6455	0.6591
额定工况汽耗率/[kg/(kW·h)]	15.96	17.18	12.95	12.05	14.84	26.39	12.2
汽轮机总长/m	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10	3.28	3.10
汽轮机总重/t	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	12.9	15.2
单位功率长度/(m/MW)	4.13	4.13	3.10	2.01	2.07	2.19	2.07
单位功率质量/(t/MW)	20.27	20.27	15.2	10.13	10.13	8.60	10.03
项 目	汽 轮 机 型 号						
	B1.5-3.43 /0.981	B3-2.35 /0.49	B3-3.43 /0.49	B3-3.43 /0.981	B6-3.43 /0.49	B6-3.43 /0.981	B6-5.88 /0.981
额定功率/MW	1.5	3	3	3	6	6	6
额定转速/(r/min)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
蒸汽初压/MPa	3.43	2.35	3.43	3.43	3.43	3.43	5.88
蒸汽初温/℃	435	390	435	435	435	435	435
额定工况进汽量/(t/h)	27.65	42.39	32.10	47.8	57.96	86.9	68.3
排汽压力/MPa	0.981	0.49	0.49	0.981	0.49	0.981	0.981
通流部分结构形式	1C+2P	1C+2P	1C+4P	1C+2P	1C+4P	1C+2P	1C+5P
非调整抽汽口位置	C 后	C 后					
汽轮机效率	0.6392	0.7118	0.7575	0.7446	0.8146	0.7952	0.7467
额定工况汽耗率/[kg/(kW·h)]	18.43	14.13	10.70	15.93	9.66	14.48	10.75
汽轮机总长/m	3.10	3.75	3.92	3.92	3.92	3.92	4.38
汽轮机总重/t	14.6	16.0	7.8	15.9	17.8	15.9	12.5
单位功率长度/(m/MW)	2.07	1.25	1.31	1.31	0.65	0.65	0.73
单位功率质量/(t/MW)	9.73	5.33	5.93	5.30	2.97	2.65	2.08

2. 抽汽凝汽式汽轮机（抽汽式汽轮机）

在汽轮机中，将部分做过功的蒸汽从汽轮机中抽出用于供热，剩余蒸汽排入凝汽器凝结成水，这种汽轮机称为抽汽凝汽式汽轮机（或抽汽式汽轮机）。抽汽式汽轮机可以分为一次抽汽式（单抽）和二次抽汽式（双抽）两种。一次抽汽式只能满足一种热负荷要求，二次抽汽式则可以满足两种负荷要求。抽汽式汽轮机相当于背压式汽轮机与凝汽式汽轮机的组合，是一种结构紧凑、运行操作方便、目前应用比较广泛的供热汽轮机。

同背压式汽轮机相比，抽汽式汽轮机具有以下特点。

（1）抽汽式汽轮机能同时满足电负荷和热负荷的需求，而背压式汽轮机以供热为主，以热定电。

（2）抽汽式汽轮机以发电为主，要求尽量提高机组效率，降低热耗率，因而同凝汽式汽轮机一样，采用较低的背压（0.005~0.007MPa）和回热给水循环，提高了机组经济性，但系统比背压式汽轮机复杂，成本增加。

（3）抽汽式汽轮机供热量可以在最大抽汽量以下范围内调节，即使在抽汽量为零时（无热负荷），也可以保证汽轮机发出额定功率。因而可在较大范围内同时满足热负荷和电负荷的要求。

（4）抽汽式汽轮机为了保证在抽汽量变化时，机组发出额定功率，通常将功率和抽汽量为额定值时的总进汽量作为高压段的设计流量，而最大流量取此流量的1.2倍。低压段设计流量取高压段设计流量的70%~80%。因此，在正常运行时，通流部分面积过大，热效率相对较低。但是，抽汽式汽轮机所能发出的最大功率比额定功率要大，一般允许在超过额定功率25%~30%的情况下长期运行。

双抽式汽轮机是在单抽式汽轮机的基础上，再增加一级抽汽，通过一台汽轮机可以提供两种不同参数的蒸汽，以满足不同热用户的需要。双抽式汽轮机的优点是不仅能够同时满足两种热用户的热负荷变化的需要，而且能够同时满足电负荷的需要，因此被广泛应用于热电站工程上。表1-2列出了几种抽汽式汽轮机的主要技术数据。

表 1-2 几种抽汽式汽轮机的主要技术数据

项 目	汽 轮 机 型 号					
	C1.5-2.35 /0.49	C1.5-2.35 /0.49	C1.5-3.43 /0.49	C1.5-2.35 /0.49	C3-2.35 /0.49	C3-3.43 /0.981
额定功率/MW	1.5	1.5	1.5	1.5	3	3
额定转速/(r/min)	3000	6500	3000	6500	3000	3000
蒸汽初压/MPa	2.35	2.35	3.43	3.43	3.43	3.43
蒸汽初温/℃	390	390	435	435	435	435
额定工况进汽量/(t/h)	17.0	15.9	16.2	12.6	28.0	27.4
额定抽汽压力/MPa	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.981
额定抽汽温度/℃	257		276		258	10
额定抽汽量/(t/h)	12		12		20	15
排汽压力/MPa	0.008	0.008	0.008	0.008	0.0073	0.0073
回热抽汽次数	3	3	3	3	3	0.073
给水温度/℃	105	105	150	150	150	150