



中国电力企业联合会审定

全国电力继续教育规划教材

# 汽轮机设备及其系统

牛卫东 丁翠兰 主 编  
陈义森 黑 鹏 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



全国电力继续教育规划教材

# 汽轮机设备及其系统

主 编 牛卫东 丁翠兰  
副主编 陈义森 黑 鹏  
编 写 齐砚东  
主 审 孙为民



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要结合火力发电厂 600、1000MW 汽轮机设备、系统和技术特点编写,介绍了汽轮机的基本知识、主要设备和系统、启停操作和事故处理等,重视实际操作技能和事故预判及处理能力的培养,突出继续教育的特点,着力于拓宽专业知识,提升专业素质。

本书为全国电力继续教育规划教材,编写过程中坚持少而精的原则,力求结构清晰、重点突出,便于自学和培训,适用于具有一定汽轮机理论基础的新入职员工、从事过一段时间运行工作需要提升或转岗的员工。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备及其系统/牛卫东,丁翠兰主编. —北京:中国电力出版社,2014.7

全国电力继续教育规划教材

ISBN 978-7-5123-5721-1

I. ①汽… II. ①牛…②丁… III. ①火电厂-蒸汽透平  
IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 060272 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://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2014 年 7 月第一版 2014 年 7 月北京第一次印刷

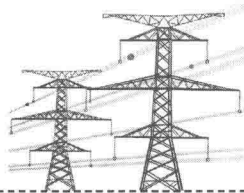
787 毫米×1092 毫米 16 开本 24.75 印张 605 千字

定价 50.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
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

本书为全国电力继续教育规划教材，内容安排以实用为主，突出应用，结合 600、1000MW 汽轮机设备及系统技术特点和新工艺，重视培养实际操作技能和事故预判及处理的能力，突出继续教育的特点，便于汽轮机运行岗位人员工作提升或其他岗位人员转岗学习使用。

本书编写坚持少而精的原则，结构清晰、重点突出，便于自学和培训，适用于电力企业专业技术人员拓展专业知识、提升专业素质，既可作为在职专业人员继续教育培训教材，也可作为专业技术人员工作参考书。

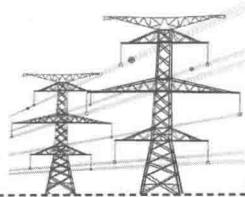
本书由国网技术学院牛卫东教授和华电国际莱州发电有限公司丁翠兰高工担任主编，牛卫东对全书进行统稿；山东电力科学研究院陈义森高工和大唐山东电力检修运营公司黑鹏高工担任副主编；百年电力发展股份有限公司齐砚东参编。牛卫东编写了第一章第一节、第五章和第七章，丁翠兰编写第二章、第三章和第四章部分内容，陈义森编写第一章第二节和第六章，黑鹏编写了第三章第五节，齐砚东编写了第四章第五节。

全书由孙为民担任主审，审稿人对书稿进行了认真仔细的审阅，并提出很多宝贵意见。本书在编写过程中得到了有关单位的大力支持，在此表示衷心地感谢。

限于编者水平，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 1 月



# 目 录

## 前言

<b>第一章 汽轮机基础知识</b> .....	1
第一节 汽轮机概述.....	1
第二节 汽轮机运行规章制度 .....	33
复习思考题 .....	41
<b>第二章 汽轮机本体设备及系统</b> .....	42
第一节 汽轮机本体结构 .....	42
第二节 滑销系统 .....	74
第三节 轴封系统 .....	78
第四节 本体疏水系统 .....	86
复习思考题 .....	91
<b>第三章 汽轮机辅机及热力系统</b> .....	92
第一节 蒸汽系统 .....	92
第二节 凝汽及凝结水系统.....	112
第三节 给水除氧系统.....	133
第四节 循环水、开式水、闭式水系统.....	152
第五节 真空系统.....	174
第六节 加热器疏水系统.....	179
复习思考题.....	182
<b>第四章 汽轮机的调节与保护</b> .....	184
第一节 概述.....	184
第二节 汽轮机油系统.....	187
第三节 汽轮机调节系统.....	203
第四节 汽轮机保护系统.....	220
第五节 电网调频.....	224
复习思考题.....	227
<b>第五章 汽轮机的启停操作</b> .....	228
第一节 汽轮机启停概述.....	228
第二节 汽轮机启动.....	246
第三节 汽轮机停运.....	262
复习思考题.....	274
<b>第六章 汽轮机运行监视及试验</b> .....	276
第一节 汽轮机运行监视.....	276
第二节 汽轮机主要试验.....	284

复习思考题	308
第七章 汽轮机运行危险点分析及事故处理	309
第一节 汽轮机运行危险点分析	309
第二节 汽轮机常见事故及处理	314
复习思考题	341
附录 汽轮机运行危险点预测预控	342
参考文献	387

# 第一章 汽轮机基础知识

## 第一节 汽轮机概述

### 一、汽轮机作用及发展

汽轮机是将蒸汽的热能转换成机械能的一种旋转式原动机，又称“蒸汽透平”。与其他形式的原动机（如蒸汽机、汽油机、柴油机等）相比，汽轮机具有单机功率大、热经济性好、运行安全可靠、使用寿命长等优点，广泛用于常规火力发电厂和核电厂中带动发电机来生产电能。另外，汽轮机可以设计成变转速运行，用于直接驱动给水泵、风机和船舶的螺旋桨等。因此，汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备，在国民经济中起着极其重要的作用。

汽轮机的出现推动了电力工业的发展，随着电力负荷的快速增长，汽轮机也得到了迅猛发展。在单机容量增大的同时，蒸汽参数也向超临界、超超临界提高。一般在 600~1000MW，最大单轴汽轮机为 1200MW，双轴为 1300MW，蒸汽压力一般为 16.5~18MPa 的亚临界、24MPa 的超临界或者 25~30MPa 的超超临界，主汽温度为 538、566 或者 580~600℃。大机组一般都配有完善的电液调节保安系统、汽轮机监视仪表和转子应力及寿命检测系统。

#### （一）国际上汽轮机发展状况

1883 年瑞典工程师拉瓦尔设计制造出了第一台单级冲动式汽轮机，随后在 1884 年英国工程师帕森斯设计制造了第一台单级反动式汽轮机，虽然当时的汽轮机与现在的汽轮机相比结构非常简单，但是从此推动了汽轮机在世界范围内的应用，被广泛应用在电站、航海和大型工业中。

20 世纪 60 年代，世界工业发达的国家生产的汽轮机功率已经达到 500~600MW 等级水平。1972 年瑞士 BBC 公司制造的 1300MW 双轴全速汽轮机在美国投入运行，设计参数达到 24MPa，蒸汽温度 538℃，3600r/min；1974 年联邦德国 KWU 公司制造的 1300MW 单轴半速（1500r/min）饱和蒸汽参数汽轮机投入运行；1982 年世界上最大的 1200MW 单轴全速汽轮机在苏联投入运行，压力 24MPa，蒸汽温度 540℃。

目前世界各国都在研究和开发大容量、高参数汽轮机，如俄罗斯正在研究 2000MW 汽轮机。大容量汽轮机有如下特点：

（1）降低单位功率投资成本。如 800MW 机组比 500MW 汽轮机的千瓦造价低 17%；1200MW 机组比 800MW 机组的千瓦造价低 15%~20%。

（2）提高运行经济性。如法国的 600MW 机组比国产的 125MW 机组的热耗率低 276kJ/(kW·h)，每年可节约燃煤 4 万 t。

（3）缩短电站建设工期。如日本建设 2×600MW 机组电厂与建设 5×250MW 机组的电厂相比，缩短工期 21 个月（前者为 45 个月，后者为 66 个月），缩短工期 32%。

(4) 提高电网的调峰能力, 满足经济发展需要。

此外, 增大单机功率还可以减少电站的占地面积、减少运行及检修人员、降低运行费用等。

经过 40 多年的不断完善和发展, 目前超临界参数机组的发展已进入了成熟和实用阶段, 超超临界参数的机组也已成功投入商业运行。

美国是发展超临界机组最早的国家, 世界上第一台超临界机组 1957 年在 Philo 电厂 6 号机组投运, 容量为 125MW, 参数为 31MPa/621°C/566°C/560°C, 该机组由 B&W 和 GE 公司设计制造。1958 年第二台超临界机组在 Eddystone 电厂 1 号机组投运, 容量为 325MW, 机组的参数为 34.4MPa/649°C/566°C/566°C, 该机组由 CE 和 WH 公司设计制造; 迄今为止, 它们是最高参数的超超临界机组。这两台机组为美国超临界机组的设计、制造、运行取得了宝贵经验。到 60 年代中期, 新增机组中有一半采用超临界参数, 但到 70 年代订货台数急剧下降。根据 EPRI 的一份调查报告认为, 这一下降的原因是多方面的, 当时美国缺乏超临界机组调峰运行的经验, 最重要的是核电站担负起了基本负荷, 因而对带基本负荷的超临界机组的需求量下降, 在采用超临界参数方面出现了反复。尽管如此, 美国在 1967 年至 1976 年的 10 年期间, 共安装 118 台超临界机组, 单机最大容量为 1300MW, 到 80 年代初, 超临界机组增至 170 余台, 其中多数为超超临界机组, 占燃煤机组的 70% 以上, 占总装机容量的 25.22%, 其中, 单机容量介于 500~800MW 的占 60%~70%, 至 1994 年共安装和投运了 9 台 1300MW 的超临界机组。

苏联是发展超临界机组最坚决的国家, 也是拥有超临界机组最多的国家。所有 300MW 及以上容量机组全部采用超临界参数, 因此共有超临界机组 224 台, 占总装机容量的 50% 以上, 且大多数为 300MW 机组。由于大量采用超临界机组, 苏联火电机组的平均供电煤耗率位居世界前列, 达到 326g/(kW·h)。苏联发展超临界技术主要依靠本国力量, 以自我开发为主, 初期也走过不少弯路, 出现过各种各样的问题, 但经过长期的试验研究已具有一套比较完整的超临界技术和产品系列, 超临界机组成为国内火力发电厂的主力机组。但由于 300MW 机组容量偏小, 不适合电网发展, 500MW 燃煤机组由于可用率低及热耗高而没有大量采用, 800MW 和 1200MW 机组只用于燃油与燃气, 且 1200MW 机组的可用率也较低。由于不能吸收别国先进技术, 苏联超临界技术发展不快, 总体技术水平不高。目前, 俄罗斯研制的新一代大型超超临界机组采用的参数为 28~30MPa, 580~600°C。

日本发展超临界机组起步较晚, 但发展速度很快, 收效显著。自日立公司向美国 B&W 公司引进第一台超临界的 600MW 机组于 1967 年在沛崎电厂投运后, 日本其他公司也分别引进了美国和德国的超临界技术, 同时建立了自己的试验台。日本发展超临界技术采用的是引进、仿制、创新的技术路线。先从国外引进成熟的机组和制造技术, 然后立即组织力量进行技术消化和仿制, 然后在消化引进技术的基础上, 进一步投入开发研究, 形成本国的技术特点, 再进行精心设计、制造和批量生产。从引进技术到自制机组只需 2~3 年时间, 容量从 600MW 到 1000MW 等级, 只需 3~5 年时间。20 世纪 70 年代以来, 由于电网负荷峰谷差增大, 加之适合带基本负荷的核电站的兴起, 日本的超超临界机组不仅高效, 而且具有亚临界机组同样的可靠性与运行灵活性, 能自如地适应变压运行带周期性调峰负荷的要求。目前, 日本已跃居为发展超超临界机组的先进国家。日本在对提高蒸汽压力和温度参数能提高多少机组效率分别进行的比较中, 证明采用 31MPa 主蒸汽压力和二次中间再热, 由于压力



的提高和系统复杂, 机组制造成本明显提高, 缺乏市场竞争力。所以在 20 世纪 90 年代后, 日本各公司都转向生产高参数的超超临界机组。2000 年在橘湾电厂 (2 号) 投运的容量为 1050MW、蒸汽参数为 25.5MPa/600°C/610°C 的超超临界机组是目前日本蒸汽温度参数最高的机组。截止到 1989 年 3 月, 日本各大电力公司的 48 个主要火电厂的总装机容量 75 870MW 中, 超临界压力的为 49 350MW, 占总装机量的 65%, 比重很大, 致使火电机组全国供电煤耗率由 1963 年的 366g/(kW·h) 降低到 1987 年 335g/(kW·h)。1989 年和 1990 年在川越电厂投运的两台 700MW 机组的参数是两次再过热的 31MPa/566°C/566°C/566°C, 在满负荷下的热效率达 41.9%, 投运以来情况很好。目前在日本, 450MW 以上的机组全部采用超临界参数。从 1993 年以后已把蒸汽温度提高到 566°C/593°C 和 593°C/593°C, 一次再过热, 即全部采用了我们所说的超超临界技术。

德国是研究、制造超临界机组最早的国家之一, 1956 年投运了一台容量为 88MW 的超超临界机组, 因容量较小, 未获得很大的发展。70 年代由于燃料价格上涨, 政府对环保要求日益严格和加强对排放量的控制, 需要建造以煤为燃料的高效率电厂, 便开始发展大功率超临界机组。1972 年投运了一台 430MW 的超临界机组, 1979 年投入了一台 475MW 二次再过热的机组。德国 VEAG 电力公司在 1999 和 2000 年于 Lippendorf 电厂投产的两台 900MW 褐煤机组, 蒸汽参数为 26.8MPa/554°C/583°C, 净效率为 42%。目前, 德国已投运和在建的超临界和超超临界机组近 20 台, 其中具有代表性的机组是 2000 年在 Niederahnem 电厂投运的 965MW 超超临界机组 (蒸汽参数为 26.9MPa/580°C/600°C); 2000 年在 Hessler 电厂投运的 700MW 超超临界机组 (蒸汽参数为 30MPa/580°C/600°C)。由于采用了以超超临界参数为主的多项提高效率的措施, 净效率高达 45.2%, 机组滑压运行, 可超负荷 5%, 最低负荷为 50%, 电厂大修期最少为 4 年。

丹麦是热能动力方面很先进的国家, 在火电机组方面也处于领先地位。1998 年在 Skaeabæk 发电厂投产的 400MW 机组, 两次中间再过热, 蒸汽参数为 29MPa/582°C/582°C/582°C, 加以海水直接冷却, 额定背压为 2.2kPa, 净效率高达 49%, 是当今世界上效率最高的火电机组。1999 年在 Nordjylands 电厂投产的 400MW 机组, 使用同样的蒸汽初参数, 效率也高达 47%。丹麦计划 2001 年在 Avedøre 电厂投产的 375MW 机组, 采用的参数为 30MPa/580°C/600°C, 其净效率也是高达 48%。

## (二) 中国汽轮机发展状况

中国于 1956 年投运了自己制造的第一台 6MW 汽轮机。此后我国分别设计制造了 50、100、200、300MW 等容量的凝汽式汽轮机及不同容量和类型的供热式汽轮机。20 世纪 80 年代, 我国引进消化国外技术自行制造了 300MW 及 600MW 亚临界凝汽式机组。为迅速扭转我国火电机组煤耗长期居高不下的局面, 缩小我国火电技术与国外先进水平的差距, 满足我国国民经济迅速发展需要, 同时, 适应愈来愈高的环保和控制污染排放的标准, 发展高效、节能、环保的超临界、超超临界火力发电机组势在必行。目前国内已具备利用引进技术设计和制造 600MW 以上容量等级超临界机组的能力。从容量等级来说, 国产超临界机组从 600MW 起步, 更大容量考虑采用 1000MW 等级, 对 1000MW 机组选用单轴方案在技术上是可行的, 并有利于降低机组造价。

上海汽轮机有限公司 (简称上汽) 建立于 1953 年, 是我国第一家汽轮机制造厂。上汽以设计、制造火电汽轮机、核电汽轮机和重型燃气轮机为主, 兼产船用汽轮机、风机等其他

动力机械。具有生产世界级先进水平的 6~1000MW 等级火电系列和 300MW 以上核电汽轮机的制造水平。

哈尔滨汽轮机厂有限责任公司（简称哈汽）1956 年建厂，生产 300、600MW 汽轮机，300、600MW 直接空冷汽轮机，600MW 超临界汽轮机，1000MW 以上的超超临界汽轮机、1000MW 等级的核电汽轮机、舰船主动力蒸汽轮机和重型燃气轮机组。

东方汽轮机有限公司（简称东汽）于 1965 年筹建，1966 年开工建设，1974 成投产，与美国 GE 公司、法国 ALSTOM 公司和日本日立、三菱、东芝公司等国际著名大公司进行广泛经济技术合作，努力开发研制超临界、超超临界大功率汽轮机、核电汽轮机、重型燃气轮机以及蒸汽燃气联合循环机组。

北重汽轮机有限责任公司，以 300MW 机组为主导产品，它是由始建于 1958 年的北京重型电机厂通过资产转型在 2000 年 10 月成立的又一大动力厂。

## 二、汽轮机基本工作原理

汽轮机是能将蒸汽热能转化为机械功的回转式机械，来自锅炉的蒸汽进入汽轮机后，依次经过一系列环形配置的静叶栅（喷嘴）和动叶栅，将蒸汽的热能转化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。

汽轮机基本的工作单元为级。图 1-1 是一个最简单的单级汽轮机结构，由图可以看出蒸汽在汽轮机中将热能转换为机械功的过程。首先，具有一定压力和温度的蒸汽流经固定不动的喷嘴中膨胀，蒸汽的压力、温度不断降低，速度不断增加，使蒸汽的热能转化为动能，然后，喷嘴出口的高速汽流以一定的方向进入装在叶轮上的动叶通道中，由于汽流速度的大小和方向改变，汽流给动叶片一作用力，推动叶轮旋转做功。可见，一系列固定的喷嘴叶栅（静叶栅）和与它相配合的动叶栅构成了汽轮机的基本做功单元，称为汽轮机的级。蒸汽在汽轮机内的工作过程也就是逐级做功的过程。

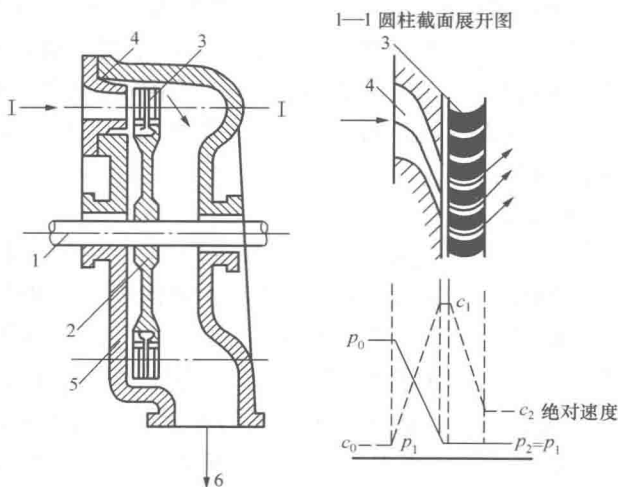


图 1-1 单级冲动式汽轮机示意

1—轴；2—叶轮；3—动叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—排汽口

### （一）汽轮机的基本工作原理

在汽轮机中，蒸汽的热能转化成旋转的机械能，一般可通过两种不同的作用原理来实

现：一种是冲动作用原理，另外一种是反动作用原理。

### 1. 冲动作用原理

由力学知识可知，当一运动物体碰到另一个静止的物体或者运动速度低于它的物体时，就会受到阻碍而改变其速度大小或方向，同时给阻碍它的物体一个作用力，该作用力称为冲动力。运行物体质量的大小和速度的变化决定了冲动力的大小，质量越大，冲动力越大；速度变化越大，冲动力越大。若在冲动力作用下，阻碍运动物体的速度改变，则运动物体就做出了机械功。根据能量守恒定律，运动物体能的变化值就等于其所做出的机械功。利用冲动力做功的原理，称为冲动作用原理。

图 1-2 为只按冲动原理做功的动叶通道，喷嘴出口的蒸汽以相对速度  $w_1$  进入动叶通道，由于受到动叶的阻碍，气流方向不断改变，最后以相对速度  $w_2$  流出动叶通道，在流道中蒸汽对动叶产生一个轮周方向的冲动力  $F_i$ ，该力对动叶做功使动叶转动。冲动作用原理的特点是蒸汽仅把从喷嘴中获得的动能转变为机械功，蒸汽在动叶通道中不膨胀，动叶通道不收缩。

### 2. 反动作用原理

根据动量守恒定律，当气体从容器中加速流出时，要对容器产生一个与流动方向相反的力，称为反动力，利用反动力做功的原理，称为反动作用原理。火箭的发射是利用反动作用原理的典型例子，火箭内燃料燃烧时，大量气体从火箭尾部喷出，高速汽流就给火箭一个与汽流方向相反的反动力，使火箭向上运动。

蒸汽流经利用反动原理做功的级时，先在喷嘴中膨胀，压力降低，速度增加。进入动叶后，一方面通过速度方向的改变产生冲动力  $F_i$ ，另一方面蒸汽在动叶中继续膨胀，压力降低，所产生的比焓降转化为动能，由于动叶是旋转的，所以这一转化造成动叶出口的相对速度  $w_2$  大于进口相对速度  $w_1$ ，相对速度的增加使汽流产生了作用于动叶上的与汽流方向相反的反动力  $F_r$ 。在蒸汽的冲动和反动力合力作用下的轮周方向分为  $F_u$  推动动叶旋转做功，如图 1-3 所示。反动作用原理的基本特点是蒸汽在动叶流道中不仅要改变方向，而且还要膨胀加速，从结构上看动叶通道是逐渐收缩的。

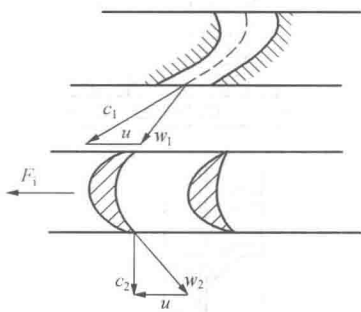


图 1-2 蒸汽流过无膨胀动叶通道

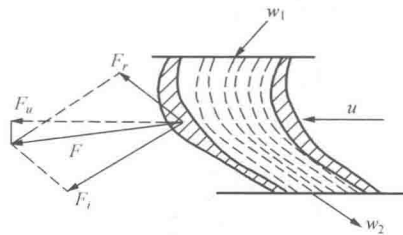


图 1-3 蒸汽在动叶汽道内膨胀

### 3. 级的反动度和级的类型

(1) 反动度。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\* 点是汽流被等熵地滞止到初速等于零的状态， $p_1$ 、 $p_2$  分别为喷嘴出口压力和动叶出口压力。蒸汽在级内从滞止状态 0\* 等熵膨胀

到  $p_2$  时的比焓降  $\Delta h_t^*$  称为级的滞止理想比焓降，而蒸汽在级内从 0 点等熵膨胀到  $p_2$  时的比焓降  $\Delta h_t$  称为级的理想比焓降。按同样定义， $\Delta h_n^*$  为喷嘴的滞止理想比焓降，而  $\Delta h_b$  为动叶的理想比焓降。

级的反动度  $\Omega_m$  是表示蒸汽在动叶通道内膨胀程度大小的指标。它等于蒸汽在动叶通道中的理想比焓降  $\Delta h_b$  与喷嘴的滞止理想比焓降  $\Delta h_n^*$  和动叶通道中理想比焓降  $\Delta h_b$  之和的比值。级的平均直径处（即 1/2 叶高处）的反动度用  $\Omega_m$  表示，其表达式为

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

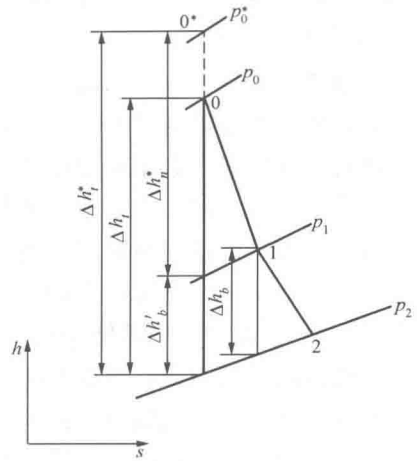


图 1-4 用于确定反动度的级的热力过程线

(2) 级的类型及特点。根据蒸汽在级中的流动方向，可将汽轮机的级分为轴流式和辐流式两种，电站汽轮机大多采用轴流式级。按照蒸汽在动叶通道内的膨胀程度，轴流式级分为冲动级和反动级两大类。

冲动级有纯冲动级、带反动度的冲动级和速度（复速）级三种类型（如图 1-5~图 1-8 所示）。

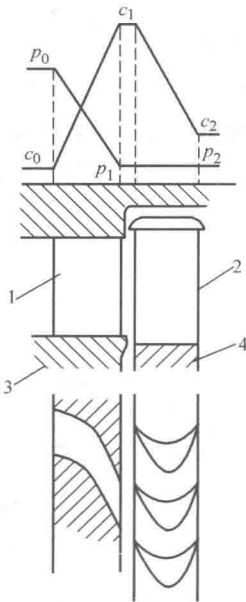


图 1-5 纯冲动级中压力和速度变化示意

1—喷嘴；2—动叶；3—隔板；4—叶轮

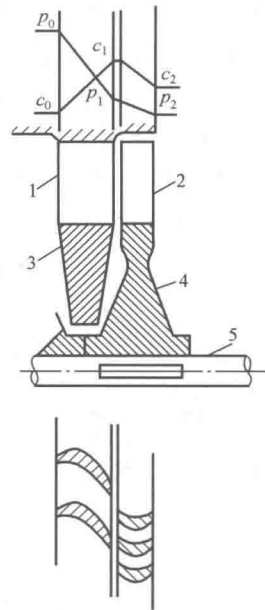


图 1-6 带反动度的冲动级中蒸汽压力和速度变化示意

1—喷嘴；2—动叶；3—隔板；4—叶轮；5—轴

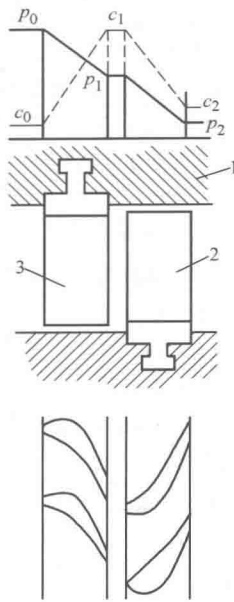


图 1-7 反动级中蒸汽压力和速度变化示意  
1—静叶持环；2—动叶；3—喷嘴

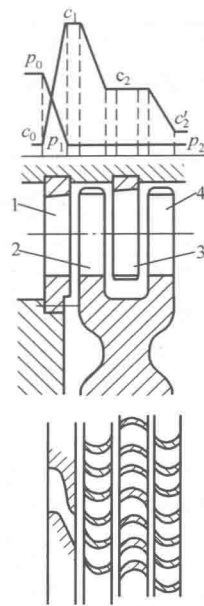


图 1-8 复速级  
1—喷嘴；2—第一列动叶；  
3—导叶；4—第二列动叶

## (二) 汽轮机的分类以及型号

### 1. 汽轮机的分类

汽轮机历史较久，用途广泛，类型繁多，可以从不同的角度将汽轮机进行分类，见表 1-1。

表 1-1 汽轮机的分类

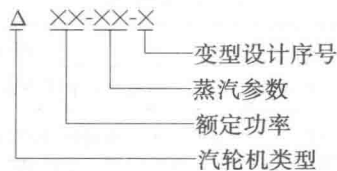
分类原则	类型	简要说明
按工作原理分	冲动式汽轮机	主要由冲动级组成，蒸汽主要在静叶栅中进行膨胀，在动叶栅中只有少量膨胀
	反动式汽轮机	主要由反动级组成，蒸汽在静叶栅和动叶栅中膨胀量基本相同。由于反动级不能做成部分进汽，调节级常采用冲动级
按热力特性分	凝汽式汽轮机	汽轮机排汽在低于大气压力的真空状态下进入凝汽器，并凝结成水
	背压式汽轮机	汽轮机排汽压力大于大气压力，排汽供热用户使用。当排汽用作其他中低压汽轮机的工作蒸汽时，则称为前置式汽轮机
	抽汽凝汽式汽轮机	在汽轮机的级间调整抽汽，供应热用户，其排汽则进入凝汽器，包括一次调整抽汽式和二次调整抽汽式
	抽汽背压式汽轮机	具有调整抽汽的背压式汽轮机
	中间再热式汽轮机	蒸汽膨胀到某一压力后，被送入锅炉再热器中再热，然后再进入汽轮机继续膨胀做功，最后排入凝汽器，大容量汽轮机主要采用这种形式
	多压式汽轮机	利用其他来源的蒸汽引入汽轮机相应的中间级，与原来的蒸汽一起工作。通常用于联合循环电站工业生产流程中，用来综合利用蒸汽的热能

分类原则	类型	简要说明
按进汽参数分	超超临界汽轮机	进汽压力（绝对）大于 28MPa 或主蒸汽或再热蒸汽温度高于 580℃
	超临界汽轮机	进汽压力超过蒸汽的临界压力（绝对）22.2MPa，温度为 538~566℃
	亚临界汽轮机	进汽压力（绝对）为 16~18MPa，温度为 535~540℃
	超高压汽轮机	进汽压力（绝对）为 12~14MPa，温度为 535~540℃
	高压汽轮机	进汽压力（绝对）为 8.8MPa 左右，温度为 535℃
	次高压汽轮机	进汽压力（绝对）为 4.9~5.88MPa，温度为 435~470℃
	中压汽轮机	进汽压力（绝对）为 3.43MPa 左右，温度为 435~470℃
	次中压汽轮机	进汽压力（绝对）为 2.35MPa 左右，温度为 390℃
	低压汽轮机	进汽压力（绝对）为 1.28MPa 以下，温度为 340℃
	湿蒸汽汽轮机	新蒸汽为饱和蒸汽或湿蒸汽，绝大多数的核电汽轮机为湿蒸汽汽轮机
按蒸汽流向分	轴流式汽轮机	在汽轮机内，蒸汽基本上沿轴向流动
	辐流式汽轮机	在汽轮机内，蒸汽基本上沿辐（径）向流动
按用途分	电站汽轮机	用于发电或供热并发电的汽轮机
	工业汽轮机	用于驱动其他旋转机械的汽轮机
	船用汽轮机	用于驱动船舶螺旋桨的汽轮机
按排列方式分	单轴汽轮机	汽轮机与发电机呈串联排列，同轴驱动
	双轴汽轮机	汽轮机由多缸组成，呈并联排列，驱动两台发电机，机组的功率为两台发电机功率之和。通常，高中压缸驱动一台全转速的发电机，低压驱动另一台半转速的发电机；也可由高压缸和一个低压缸驱动一台发电机，中压缸和另一个低压缸驱动另一台发电机

## 2. 汽轮机的型号

用来表示汽轮机基本特性的符号称为汽轮机的型号。

目前，国产汽轮机的型号分为三组，即



我国目前制造的汽轮机类型用汉语拼音表示，代表的含义如表 1-2 所示；汽轮机额定功率用阿拉伯数字表示，单位为 MW；蒸汽参数一般分为几段，中间用斜线分开，其意义见表 1-3；设计序号用数字表示，若为按原型制造的汽轮机，型号中没有此部分。

例如，N300-16.2/535/535 型汽轮机，表示为凝汽式 \ 额定功率为 300MW，新蒸汽压力为 16.2MPa，新蒸汽温度为 535℃，再热蒸汽温度为 535℃ 的中间再热式汽轮机。

表 1-2

国产汽轮机类型代号

代号	类型	代号	类型	代号	类型
N	凝汽式	C	一次调节抽汽式	CB	抽汽背压式
B	背压式	CC	两次调节抽汽式	H	船用式
CLN	超临界式	CCLN	超超临界式		

表 1-3 汽轮机型号中参数的表示方法

汽轮机类型	蒸汽参数表示方法	示例
凝汽式	主蒸汽压力/主蒸汽温度	N50-8.82/535
中间再热式	主蒸汽压力/主蒸汽温度/再热蒸汽温度	N300-16.7/537/537
一次调节抽汽式	主蒸汽压力/调节抽汽压力	C50-8.82/0.118
抽汽背压式	主蒸汽压力/高压抽汽压力/低压抽汽压力	CB25-8.82/0.98/0.118
背压式	主蒸汽压力/背压	B50-8.82/0.98
超临界式	主蒸汽压力/主蒸汽温度/再热蒸汽温度	CLN600-24.2/566/566
超超临界式	主蒸汽压力/主蒸汽温度/再热蒸汽温度	CCLN1000-25/600/600

### 3. 检验标准和项目

汽轮机的检验标准主要有 GB 5578《固定式发电用汽轮机技术条件》和 GB 754《汽轮机参数系列》，以及合同或技术协议规定的标准。汽轮机的整体及其附属设备、零部件必须经制造厂检验合格后，方可依据合同或技术协议所订标准或技术、经济指标进行出口检验。检验内容包括：资料审核、一般外观检验，性能试验和包装检验。

(1) 资料审核。主要核对设计、制造依据、图纸、产品说明书、合格证、有关材料的材质报告、理化性能以及性能试验报告和必要的试验、检验数据（如无损检测报告、耐压试验报告）等。核对相关的商务资料，如合同、信用证、装箱单等。核查货、证是否相符。

(2) 一般外观检查。根据出口标准规定和合同要求，对外观进行全面检查，主要包括：产品规格、型号、外形尺寸、铭牌等是否货证相符；外观质量，有无残损、锈蚀、渗漏、涂漆颜色是否符合要求；传动部件是否转动灵活、运转平稳；控制部分是否灵敏、可靠、准确；焊接件的成型质量和焊缝质量等。

(3) 性能、经济指标检验和试验：全面考核汽轮机的性能是否稳定地达到合同或技术协议规定的性能要求和经济指标。性能试验可在制造厂、试验场地或安装现场进行，应视产品特点进行安排，有的需在合同中予以列明。

检验中的主要项目有：出厂试验、预备性试验、回热工况试验、阶段效率试验、调节安全系统性能试验等。

通过以上试验，对汽轮机的设备状况、系统流量平衡、测量仪表的可靠性、机组在额定条件下的汽耗及出力、配汽机构及回热系统的特性、调节系统的静态和动态特性、安全系统动作的准确性和可靠性等进行检验，分析比较测试数据，综合评定产品性能。

(4) 包装质量检查。视汽轮机本体、附属设备及零部件的不同包装方式，根据出口标准和合同要求，检查包装质量是否符合要求，核对标记和防护措施是否正确、完整、有效，检查装箱资料和附件是否齐全。

#### (三) 汽轮机工况的定义

汽轮机工况的定义涉及机、炉、电容量的匹配，最典型的工况如下：

##### 1. 额定工况（热耗考核工况、THA 工况）

当汽轮机在额定主蒸汽、再热蒸汽参数及所规定的汽水品质，额定背压，回热系统正常投运，补给水率为零，规定的最终给水温度，以及发电机为额定运行条件、额定效率时，汽轮发电机组输出额定功率的工况称为汽轮机的额定工况，此时的蒸汽流量称为汽轮机的额定



蒸汽流量。机组在此工况运行最经济，通常作为热耗率保证值的验收工况，也称为热耗考核工况。

#### 2. 能力工况（TRL 工况、铭牌功率工况）

当汽轮机在额定主蒸汽、再热蒸汽参数及所规定的汽水品质、对湿冷机组一般背压为 11.8kPa（对空冷机组背压一般为 30kPa）、回热系统正常投运、补给水率为 3%、规定的最终给水温度，以及发电机为额定运行条件与额定效率时，汽轮发电机组输出额定功率的工况称为汽轮机的能力工况。此时的蒸汽流量称为能力流量，或最大保证流量。此工况通常作为汽轮机额定出力的验收工况。

我国规定，在夏季冷却水温或气温升高时，汽轮机应能发出额定功率。冷却水温及汽温升高时对应的凝汽器压力，一般在上述背压附近，故汽轮机能力工况通常也称为汽轮机夏季工况或铭牌功率工况。

#### 3. 最大连续功率工况（T-MCR 工况）

当汽轮机在额定进汽参数和额定背压下，回热系统正常投运，补给水率为零，发电机额定运行条件、额定效率时，通过汽轮机的流量为能力工况的蒸汽流量时，汽轮发电机组输出功率为汽轮机的最大连续功率。

#### 4. 调节阀全开工况（VWO 工况）

此为汽轮发电机组当汽轮机为调节阀全开、额定进汽参数和额定背压、回热系统正常投运、补给水率为零，以及发电机为额定运行条件时的工况，称此工况下的汽轮发电机组输出功率为汽轮机的最大功率。此时通过汽轮机的流量约为能力工况流量的 103%~105%。汽轮机的最大功率一般不作为保证值。此工况又称为汽轮机的最大计算工况。

上述各工况中的汽轮机功率，当采用静态励磁、电动主油泵时，应为扣除各项所消耗后的功率。

### （四）汽轮机的配汽方式

改变汽轮机进汽量的方式叫配汽方式。最典型的配汽方式有节流配汽（又称单阀调节）和喷嘴配汽（又称顺序阀调节）。从运行方式上有复合配汽和滑压配汽。另外，还有旁通配汽方式。

#### 1. 喷嘴配汽

喷嘴配汽如图 1-9 所示，汽轮机有多个（组）调节阀，每个（组）调节阀只控制一个喷嘴组进汽。依次开启（或关闭）调节阀，即可改变喷嘴组面积，控制进入汽轮机的流量，实现负荷改变。由于各阀依次开启（或关闭），在任意工况下，仅一阀部分开启，其余各阀均为全开（全关），故进入汽轮机的总流量中，只有流过部分开启的阀门的小部分蒸汽受到节流，从而大大改善了机组低负荷的热经济性。

#### 2. 节流配汽

在蒸汽参数一定的情况下通过开大或关小一个或多个调节阀，通过调节阀门的开度以实现控制进入汽轮机的流量。节流配汽汽轮机结构简单，无调节级，制造成本较低。

节流配汽在部分负荷下产生较大的节流损失，效率较低，但各级温度随负荷而变动的幅度较小；喷嘴配汽在部分负荷下通过顺序开大或关小各个调节阀，节流损失小，效率较高，但调节级后蒸汽温度在变工况下变动较大。喷嘴配汽和节流配汽对汽轮机经济性影响见图 1-10。



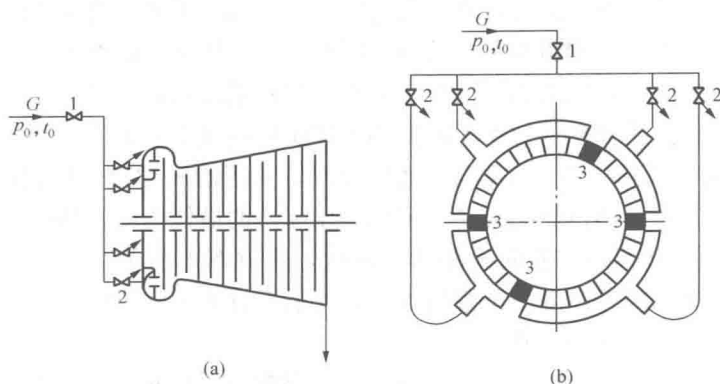


图 1-9 喷嘴配汽汽轮机示意

(a) 全机示意; (b) 调节级示意

1—自动主汽门; 2—调节汽门; 3—喷嘴组间壁

### 3. 复合配汽

为了吸收节流配汽和喷嘴配汽的长处, 大功率汽轮机一般采用复合配汽。即在启动及低负荷时采用所有调节阀同时开启(单阀)的节流调节配汽, 以减小启动过程中的热冲击避免汽缸及转子应力过大, 利于快速启动及运行安全可靠, 而随着负荷的增加, 温度场趋于稳定后, 配汽方式逐渐由单阀节流调节配汽过渡到调节阀顺序开启的喷嘴调节配汽。

### 4. 滑压配汽

为了避免汽轮机在部分负荷下的节流损失, 从运行方式考虑还有滑压配汽, 它不是一种结构形式, 而是一种运行方式。滑压配汽是指单元制机组中, 汽轮机所有的调节阀均全开, 随着负荷的改变, 调整锅炉的燃料量和给水量, 改变锅炉出口蒸汽压力(蒸汽温度保持不变), 以适应汽轮机负荷的变化。相对滑压配汽而言, 前述各种配汽方式的调节统称为定压调节。滑压配汽与定压调节相比具有以下优点。

(1) 增加了机组运行的可靠性和对负荷的适应性。滑压配汽机组在部分负荷下, 蒸汽压力降低, 而蒸汽温度基本不变。因此当负荷变化, 尤其是机组启、停时, 汽轮机各部件的金属温度变化小, 减少了热应力和热变形, 提高了机组运行的可靠性和对负荷的适应性, 缩短了机组的启、停时间, 同时延长了所有承压部件的寿命。

(2) 提高了部分负荷下机组的热效率。由于变压运行时主蒸汽流量、压力基本上与负荷成线性关系, 各级温度在工况变动时保持不变, 则进入汽轮机的容积流量也基本不变, 各级的速度比、比焓降及温度变化很小, 机组的节流损失小(因所有调节阀全开), 且末级的排汽湿度降低, 湿汽损失相应减小, 从而提高了机组尤其是高压缸的内效率。同时蒸汽压力的降低引起蒸汽比热容的下降, 使高压缸排汽温度, 即再热器蒸汽温度有所提高, 从而改善了

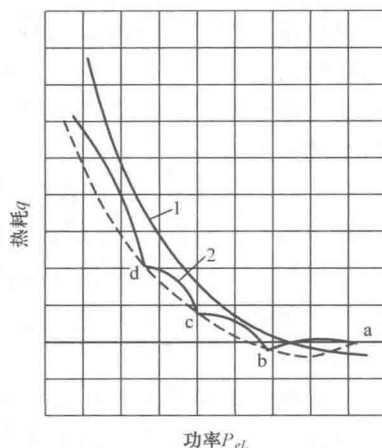


图 1-10 喷嘴配汽和节流配汽汽轮机热耗曲线

1—节流配汽; 2—喷嘴配汽