

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



QILUNJI YUANLI

汽轮机原理

黄树红 主编



中国电力出版社

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

QILUNJI YUANLI

汽轮机原理

编写 黄树红 孙奉仲 盛德仁
刘华堂 屠 珊 杨建明
李树春
主审 杨勇平



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。

本书阐述汽轮机的工作原理、基本结构和计算方法。主要包括：蒸汽在汽轮机级中的流动与能量转换过程，多级汽轮机的设计计算，凝汽设备工作原理，汽轮机变工况运行的特点和计算，供热汽轮机、大型汽轮机与特种汽轮机，汽轮机零部件强度与振动，汽轮机自动控制原理与系统等。

本书适应现代专业教学的要求，引入了汽轮机技术发展的新内容，力求反映现代科学技术在汽轮机技术领域的应用与发展，为学生运用现代理论与方法解决实际问题提供了基本知识。

本书可作为普通高等院校能源动力类专业汽轮机课程的教材，也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机原理/黄树红主编. —北京：中国电力出版社，
2008

普通高等教育“十一·五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7269 - 3

I. 汽… II. 黄… III. 蒸汽透平—高等学校—教材
IV. TK26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 086905 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

*

2008 年 8 月第一版 2008 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 567 千字

定价 38.00 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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

本书为适应现代专业教学的要求,根据“汽轮机原理”多年的教学实践以及学生学习和应用相关专业知识的情况,引入了汽轮机技术发展的新内容,保留了最基本的理论部分,适当删减了基于一维理论的计算公式及较繁琐的论述。本书努力从理论、方法、计算、结构等方面反映现代科学技术在汽轮机技术领域的应用与发展。增加的新内容主要反映在汽轮机通流部分做功原理、超临界压力汽轮机、汽轮机转子寿命、汽轮机扭转振动、数字电液调节、汽轮机运行原理等方面,为学生在此基础上运用现代理论与方法解决实际工程问题提供基本知识。因此,本书与国内已经出版的《汽轮机原理》教科书相比有一些变化,可能也会出现不妥当的地方,敬请读者批评指正。

本书由华中科技大学黄树红教授主编并负责统稿,其中第一章、第八章、第九章的第五节~第八节由黄树红教授编写,第二章由山东大学孙奉仲教授编写,第三章、第四章和第十章的第五节由浙江大学盛德仁教授编写,第五章由华中科技大学刘华堂副教授和黄树红教授编写,第六章和第七章由西安交通大学屠珊副教授编写,第九章的第一节~第四节由东南大学杨建明教授编写,第十章的第一节~第四节由重庆大学李树春副教授编写。华中科技大学韩守木教授对全书的图表、公式以及书稿的整理做出了重要贡献。全书由华北电力大学杨勇平教授主审,付忠广教授仔细审阅了书稿,非常感谢他们为本书提出的宝贵意见。

本书的编写得到了教育部热能动力学科教学指导委员会热能与动力工程专业教学指导分委员会的大力支持,得到了编者所在学校的关心和帮助,得到了国内同行及本学科专家的爱护,在此表示衷心感谢!

谨向本书所引用文献的全体作者致以诚挚的谢意!

编 者

2008年7月



目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 汽轮机的发展	1
第二节 采用汽轮机的热力发电方式	3
第三节 汽轮机系统	5
第四节 汽轮机基本组成	7
第五节 汽轮机的分类和型号表示	8
第二章 汽轮机级内能量转换过程	11
第一节 汽轮机级的基本概念	11
第二节 蒸汽在级内的流动过程	14
第三节 级的轮周效率与最佳速度比	25
第四节 叶栅几何尺寸的确定	31
第五节 叶栅气动特性及叶栅损失	39
第六节 级内损失和级效率	46
第七节 级的二维和三维热力设计	54
第三章 多级汽轮机	64
第一节 多级汽轮机的工作过程	64
第二节 多级汽轮机的损失及汽轮机装置效率	68
第三节 多级汽轮机的轴向推力	83
第四章 汽轮机的凝汽系统及设备	86
第一节 凝汽系统的工作原理	86
第二节 凝汽系统	87
第三节 凝汽器	88
第四节 抽气设备	95
第五章 汽轮机的变工况特性	99
第一节 变工况下级的压力与流量的关系	99
第二节 变工况下级的比焓降和反动度的变化规律	104
第三节 配汽方式及调节级的变工况特性	109
第四节 凝汽式汽轮机的工况图	115
第五节 蒸汽初终参数变化对汽轮机工作的影响	117
第六节 汽轮机变工况热力核算	121
第六章 供热式汽轮机	127
第一节 供热式汽轮机的经济性	127

第二节	背压式汽轮机	129
第三节	调节抽汽式汽轮机	132
第四节	调节抽汽式汽轮机的热力设计特点	140
第七章	大型汽轮机及特种汽轮机	146
第一节	大型汽轮机简介	146
第二节	超临界压力汽轮机	155
第三节	核电站汽轮机	167
第四节	工业汽轮机	170
第八章	汽轮机零件强度与振动	178
第一节	概述	178
第二节	叶片的强度	179
第三节	叶片振动	192
第四节	转子的强度	205
第五节	机组的振动	216
第六节	汽缸、隔板的结构与强度	227
第七节	汽轮机转子寿命	234
第八节	汽轮机零部件的材料、许用应力及安全准则	237
第九章	汽轮机控制系统	252
第一节	汽轮机控制系统的任务和系统组成	252
第二节	汽轮机机械液压调节系统	257
第三节	汽轮机控制系统的工作特性	275
第四节	中间再热汽轮机控制保护的特点	287
第五节	汽轮机的数字电液控制系统	292
第六节	DEH 的计算机系统	305
第七节	DEH 的系统特性	309
第八节	供热式汽轮机的控制	314
第十章	汽轮机运行	322
第一节	单元制机组的运行	322
第二节	汽轮机的启动与停机	326
第三节	汽轮机的正常运行维护	346
第四节	汽轮机调峰运行	350
第五节	凝汽设备运行	356
附录 I	常用符号对照表（按字母先后排序）	359
附录 II	常用名词术语缩写表（按字母先后排序）	361
参考文献		362

第一章 概 论

第一节 汽轮机的发展

人类用水力驱动机械做功远早于用热力来驱动机械做功。如果说阿拉伯人 Taqial-Din 1551 年第一个描述了类似蒸汽轮机旋转的物理过程,那么 1629 年意大利物理学家 Giovanni Brance 用喷射的蒸汽推动一个改型的水轮机械旋转,就是最早的关于汽轮机的试验了。

1884 年,英国发明家 Thomas Parsons 获得了可实用的反动式透平机专利,这是世界上第一个有关汽轮机的专利,它比瓦特发明的蒸汽机晚了近 120 年。1895 年以后,Westinghouse 公司和 Allis-Chalmers 公司先后购买了 Parsons 的专利,开始生产汽轮机。1897 年,Westinghouse 公司生产出了一台 120kW 汽轮机,1900 年生产出转速为 1200r/min 的 1500kW 汽轮机,之后 Westinghouse 公司一直是世界上著名的汽轮机生产商。1998 年,Westinghouse 公司将汽轮机制造等业务卖给了 Siemens。Allis-Chalmers 公司生产汽轮机的历程并不顺利,但是在 1908 年它生产出了当时 1800r/min 转速下容量最大的汽轮机 (3250kW),到 20 世纪 60 年代被 Siemens 公司兼并。

BBC (Brown Boveri Co.) 公司也在 Parsons 专利的基础上从 1900 年开始制造汽轮机,并于 1901 年生产出了 250kW, 图 1-1 BBC 公司 1901 年生产的欧洲第一台汽轮机 3000r/min 的高转速汽轮机,这是在欧洲生产的第一台汽轮机 (见图 1-1)。1988 年,BBC 公司与 Asea 公司合并,成立 ABB 公司。20 世纪 90 年代 ABB 公司将汽轮机制造业务卖给 Alstom。

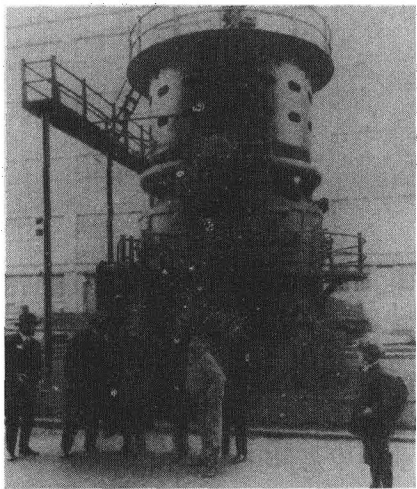
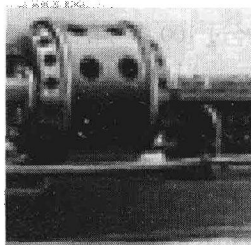


图 1-2 1922 年 Thomas A. Edison 等在 GE-5000kW 汽轮机前

1900 年,美国人 Charles Curtis 在 GE 公司的支持下获得了冲动式透平机专利。GE 公司的工程师 William LeRoy Emmett 改进了 Curtis 的汽轮机,并于 1900 年 8 月 24 日完成了与往复式蒸汽机的效率对比试验,证明汽轮机的效率高于蒸汽机。1901 年 11 月,GE 公司的第一台汽轮机投入运行,这台汽轮机水平轴布置,500kW,1800r/min,由两个汽缸组成,每个汽缸中有一个多排叶片的转子。之后,GE 公司开始生产立式汽轮机 (见图 1-2),最大容量曾达到 20MW。1913 年以后,GE 公司没有再生产过立式汽轮机。从 1903 年到 1907 年,GE 公司共获得 49 项与汽轮机相关的专利,其中三分之一对现代汽轮机的发展起到了重要作用。

随着材料工业的发展,特别是 20 世纪 20 年代铬

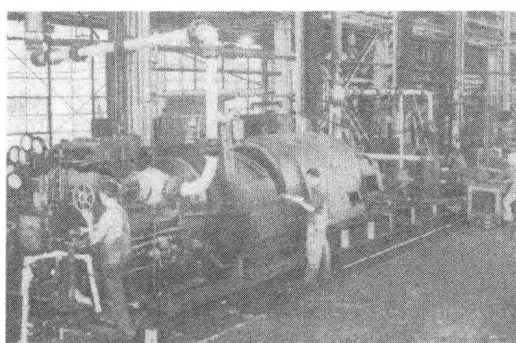


图 1-3 20 世纪 40 年代
美国 Dresser-Rand 汽轮机厂

不锈钢的应用, 汽轮机进口参数大幅度提高, 单机容量也随之提高, 结构设计水平不断进步。20 世纪 30 年代是汽轮机结构变化最快的时期, 双流排汽缸设计、双轴设计、低压缸顶置高压缸设计、三机组串联轴设计、再热结构设计等, 都出自该时期。

20 世纪 40 年代以后, 汽轮机的参数进一步提高, 结构形式逐步固定, 多缸单轴形式成为主流 (见图 1-3)。1945 年, 美国的主流汽轮机容量为 100MW, 1967 年主流容量为 700MW。今天, 汽轮机的主流容量仍然

在 600~1000MW, 但是蒸汽参数已经达到超临界或超超临界参数, 最高蒸汽压力达到 31MPa 以上, 最高蒸汽温度达到 620℃。下一个十年, 汽轮机进口蒸汽温度有望达到 700℃。20 世纪 60 年代以来, 核电汽轮机也得到长足发展, 目前的主流容量也为 1000MW 等级。

经过 100 多年的发展, 现在世界上著名的汽轮机生产商有 GE、Siemens、Alstom、Hitachi、Toshiba、Mitsubishi、俄罗斯的列宁格勒金属工厂 (Leningradsky Metallichesky Zavod, 以下简称 LMZ) 等。世界上 3000r/min 全速单轴燃煤发电汽轮机的最大容量已经超过 1200MW (LMZ); 3600r/min 全速单轴汽轮机的最大容量已经超过 1000MW (Toshiba); 用于核电的湿蒸汽半速汽轮机的最大容量已达到 1550MW (1500r/min, Alstom) 和 1380MW (1800r/min, Hitachi)。对于 3000r/min 的全速汽轮机, 长度为 1220mm 的钢制 (LMZ) 和 1415mm 的钛合金末级动叶片 (Siemens) 已经成功应用; 1400~1500mm 末级叶片为设计单机容量达到 1800MW 的高参数汽轮机和 1200MW 的湿蒸汽汽轮机奠定了基础。而针对核电半速汽轮机, Alstom 和 Siemens 正在开发长度为 1675~1830mm 的叶片, 将制造出容量超过 1700MW 的先进汽轮机。

中国使用汽轮机的历史可以追溯到 20 世纪 20 年代。图 1-4 是 1927 年上海江边电站中运行的 Alstom 公司生产的汽轮机。但是, 中国制造汽轮机的历史是从 1953 年开始, 上海汽轮机厂 1955 年制造出了第一台 6MW 汽轮机。之后中国逐渐建立了比较完整的汽轮机制造工业, 包括上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、北京重型电机厂、武汉汽轮发电机厂、杭州汽轮机厂、南京汽轮机厂、青岛汽轮机厂、

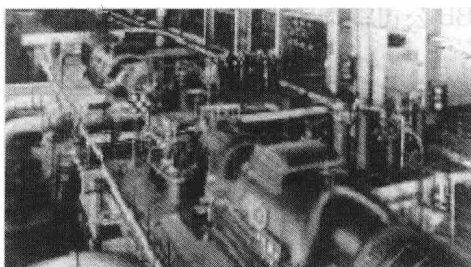


图 1-4 上海的江边电站

广州汽轮机厂、中州汽轮机厂等, 并建立了上海汽轮机锅炉研究所 (现上海发电设备成套设计研究院)、哈尔滨汽轮机锅炉研究所等制造行业的归口研究机构。20 世纪 60~70 年代, 中国依靠自己的力量设计制造了 100、125、200、300MW 汽轮机, 蒸汽参数从中压中温到高压高温、从超高压到亚临界, 为中国制造业的发展和电力工业的发展做出了巨大的贡献。

20 世纪 80 年代, 中国开始从发达国家引进先进的汽轮机制造技术。经过 20 多年的消

化和提高,中国已经能够制造 600~1000MW 的超超临界参数汽轮机和 1000MW 的核电汽轮机,也能制造先进的工业用和舰船驱动汽轮机。长度为 1200mm 的钢制末级叶片已经由哈尔滨汽轮机厂在国内首先制造,上海汽轮机厂和 Siemens 公司合作生产的 900MW (见图 1-5) 和 1000MW 超临界参数汽轮机也在国内投入运行。

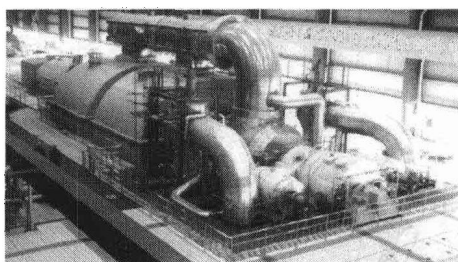


图 1-5 上海汽轮机厂与 Siemens 公司合作生产的 900MW 超临界汽轮机

目前,中国电力工业主要依靠国内制造厂商提供设备,总装机容量接近 7 亿千瓦,规模达到世界第二。其中,由汽轮机驱动发电的燃煤和核电机组占 75%。在长期的运行实践中,中国的发电企业和西安热工研究所(现西安热工研究院)等电力行业的归口研究机构,为国内汽轮机的完善、改进提供了重要的数据和试验环境,为中国汽轮机技术的发展做出了重要贡献。

第二节 采用汽轮机的热力发电方式

电能是应用最广泛的一种高品位的能量,通过升压设备和传输线路可将电能送至数千公里外的用户。电能工业、农业、交通、国防等国民经济各部门以及社会生活的各方面处于重要的地位。世界经济发展史证明,电力工业的发展是国民经济迅速发展的必要保障。

目前,热力发电是最主要的发电方式。采用煤、石油、天然气或其他燃料生产蒸汽,利用蒸汽轮机驱动发电机,又是热力发电的主要方式。

一、燃煤发电

在世界范围内,燃煤发电是最主要的发电方式之一。在我国,电力总装机容量已经处于世界第二位,燃煤发电装机容量占 70% 以上。

图 1-6 是典型燃煤电厂生产过程示意图。煤通过磨煤机制成煤粉后送往炉膛燃烧,在燃烧过程中,燃料的化学能转变为热能,这些热量通过锅炉的换热器件(省煤器、水冷壁、过热器、再热器等)传给循环工质(水及其蒸汽)。由锅炉生产的过热、再热蒸汽,在汽轮机中膨胀做功,驱动发电机发电。在这一过程中,化学能转化为热能,热能转化为机械能,机械能转化为电能。现代先进燃煤发电装置的热效率可达到 42% 以上。随着科技的不断发展,未来新蒸汽压力达到 35MPa,新蒸汽和再热蒸汽温度达到 700/720℃ 的汽轮机会有更高的效率。

二、蒸汽—燃气联合循环发电

燃气轮机是一种结构紧凑、质量轻、启动快的热力原动机,不需要或仅需要少量冷却水。除航空燃气轮机外,世界上数千万千瓦燃气轮机的总量中,有 70% 是供发电用的。燃气轮机的进气温度很高,但排气温度也高达 300~400℃,将高温排气送入余热锅炉生产水蒸气,驱动汽轮发电机组发电。这种发电装置称为蒸汽—燃气联合循环发电。理论和实践证明,联合循环发电可大幅提高发电热经济性,现代蒸汽—燃气联合循环发电装置的热效率可超过 60%。

三、核能发电

重核分裂和轻核聚合时,都能释放出巨大的能量,这种能量统称为核能,也称原子能,

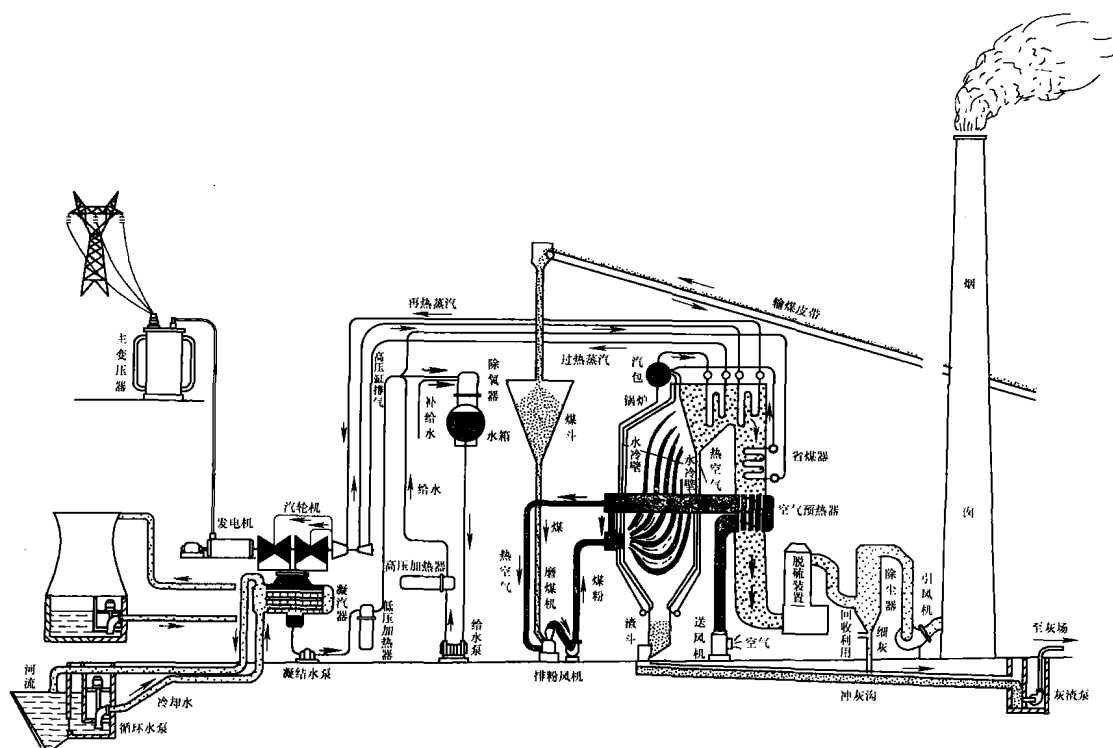


图 1-6 典型燃煤电厂生产过程示意图

核电站即原子能发电厂。

目前投入商业化发电的核电站都是利用铀裂变放出的能量作为热源的。1kg 铀裂变释放出的能量，相当于 2700t 标准煤完全燃烧所放出的热能。反应堆是核电站的主要部分，它相当于普通火电厂中的锅炉设备，由蒸汽发生器生产的蒸汽，通过汽轮机转换为机械能再发电。

轻核聚合所释放出的能量是十分巨大的。如聚合成 1kg 的氢所释放的能量就相当于 10000t 标准煤完全燃烧所放出的热能。地球上能用来作为聚变的物质极为丰富，仅在海水中的氘就达 25 万亿 t，使核聚变所放出的能量能供人类应用几十亿年之久。但是，聚变能发电仍然处于早期研究阶段，离商业发电还有很长的距离。

四、地热发电

地球是一个巨大的椭球体，从赤道到地心的半径约为 6000km。由地心算起半径约为 3500km 的部分称“地核”，最外层 30~40km 的部分称“地壳”。目前，人们能直接测量的地温，仅限于地下 10km 以内的范围，地核的温度据推测约为 5000℃。因此，地球是一个巨大的热源。据估计，如把全世界煤的总储量折算为热能作为基数，石油的总能量仅为煤的 3%，目前能够利用的核燃料仅为煤的 15%，然而地下热能却为煤的 1.7 亿倍。仅在地面以下 3km 之内可开发的热能，就相当于 2.9 万亿 t 标准煤的能量。

现在，世界上已经建成了不少利用地热产生蒸汽，驱动汽轮发电机组发电的地热电站。由于只利用了浅层地热，地热发电的蒸汽参数还不高。

五、太阳能集热发电

太阳表面温度 6000°C 左右, 内部温度高达摄氏 2000 万 $^{\circ}\text{C}$ 。利用太阳辐射能发电, 有光伏电池发电、太阳能集热发电等方式。

太阳能集热发电, 接收或聚集太阳的辐射能, 使之转换为热能, 将工质加热蒸发, 生产蒸汽去驱动汽轮发电机组发电。目前, 大规模太阳能集热发电均采用这种模式, 但是, 由于技术上的原因, 现在的发电成本还远高于常规能源发电和核能发电。

由于太阳能能量十分巨大, 且可实现无污染转化和利用, 随着世界性的能源供需日趋紧张和现代科学技术水平的迅速提高, 大规模利用太阳能是必然的趋势。预计在不远的将来, 太阳能发电将成为一种重要的发电方式。

第三节 汽 轮 机 系 统

除了发电, 汽轮机还被用作大型舰船动力装备, 并广泛作为工业动力源, 用于驱动鼓风机、泵、压缩机等设备。

大多数情况下, 汽轮机与蒸汽发生设备以及冷凝设备构成循环做功系统。

一、蒸汽动力循环和汽轮机做功过程

(一) 蒸汽动力循环

1. 朗肯循环

最简单的蒸汽动力装置理想循环是朗肯循环。朗肯循环系统由锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵组成, 图 1-7 所示为朗肯循环示意图。燃料在锅炉 1 中燃烧, 放出热量, 水在锅炉中定压吸热, 汽化为饱和蒸汽; 饱和蒸汽在锅炉过热器 2 中吸热成为过热蒸汽; 蒸汽通过汽轮机 3 膨胀做功, 并有一定热损失, 在汽轮机排汽口, 蒸汽呈低压湿蒸气状态; 在汽轮机中膨胀做功后的乏汽进入凝汽器 5 并凝结成水, 放出潜热; 给水泵 6 将凝结水提高压力并重新泵入锅炉, 完成一个循环。这种简单蒸汽动力循环热效率不高, 因为蒸汽在锅炉中的吸热量只有一小部分转化为汽轮机的功, 而大部分热量(潜热)作为冷源损失在凝汽器中被循环冷却水所带走。

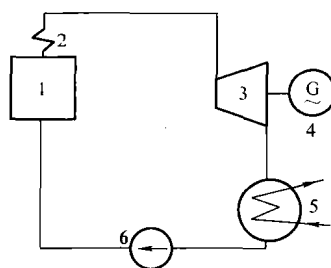


图 1-7 朗肯循环

1—锅炉; 2—过热器; 3—汽轮机;
4—发电机; 5—凝汽器;
6—给水泵

2. 回热循环

朗肯循环热效率低的主要原因在于工质平均吸热温度不高。为了提高平均吸热温度, 可以提高蒸汽初参数, 同时, 采用给水回热也是有效途径。把多级汽轮机中做过功的部分蒸汽, 逐级抽出来加热给水, 减少冷源损失, 提高锅炉给水温度, 从而提高蒸汽平均吸热温度, 循环热效率得到改善。这种循环称为给水回热循环(见图 1-8)。

3. 中间再热循环

提高蒸汽的初压, 可以提高朗肯循环的热效率。但是, 蒸汽初压的提高, 会引起乏汽的湿度增加, 对汽轮机不利。如果同时提高蒸汽的初压和初温, 又受到金属材料性能的限制。为了解决这一问题, 采用了蒸汽中间再热的办法(见图 1-9)。先让新蒸汽进入汽轮机高压部分膨胀做功, 将做功后的蒸汽引到锅炉的再热器中再加热(通常是将汽温提高到与新蒸汽

相当的温度), 然后再送到汽轮机的中、低压部分继续膨胀做功。经过再过热之后, 乏汽的干度明显增大, 避免了由于提高初压而带来的困难。所以, 现代大型火电机组都采用中间再热循环。

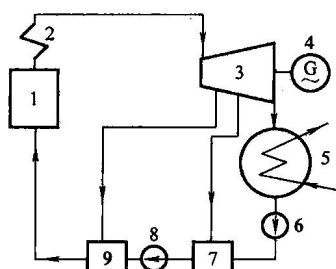


图 1-8 实际蒸汽动力装置回热循环

1—锅炉; 2—过热器; 3—汽轮机; 4—发电机;
5—凝汽器; 6—凝结水泵; 7—低压加热器;
8—给水泵; 9—高压加热器

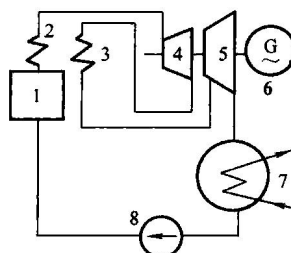


图 1-9 中间再热循环

1—锅炉; 2—过热器; 3—再热器; 4—汽轮机高压部分; 5—汽轮机中低压部分;
6—发电机; 7—凝汽器; 8—给水泵

(二) 汽轮机做功过程

蒸汽在汽轮机中要从高参数膨胀到凝汽器的真空环境, 比焓降很大, 不可能一次转化成机械能, 所以需要多次逐级转化。图 1-10 是某 300MW 汽轮机的结构图, 可以看到, 汽轮机由许多级串联组成, 其总输出功率是各级输出功率之和。

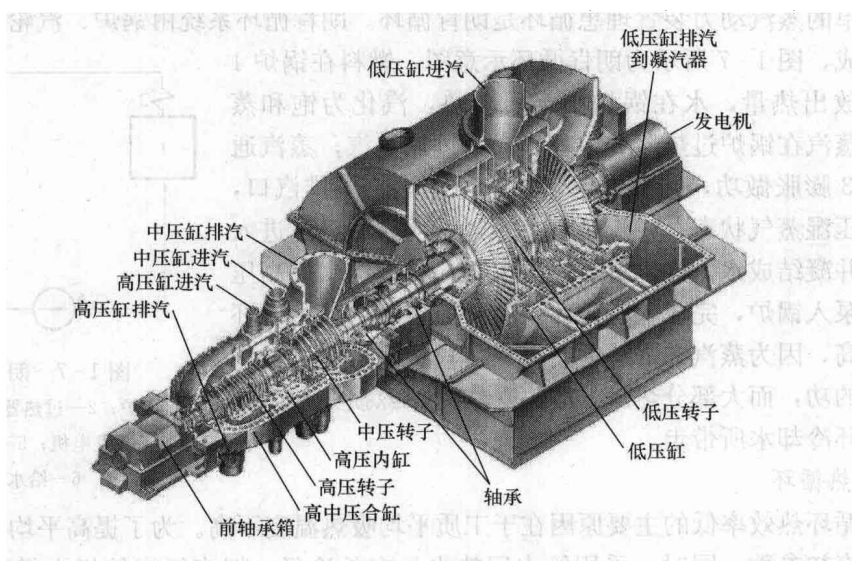


图 1-10 某 300MW 汽轮机本体

汽轮机运行时, 从锅炉来的过热蒸汽通过控制阀门进入高压缸, 逐级做功后排出, 送入锅炉再热器; 再热蒸汽通过中压控制阀门进入中压缸继续膨胀做功, 然后从中压缸排出; 中压缸排汽由连通管送到低压缸继续做功, 最后一级的排汽进入凝汽器。蒸汽流过汽轮机级时, 首先在喷嘴叶栅中将部分蒸汽的热能转变成为动能, 然后在动叶栅中将其动能和热能转变为机械能, 使得叶轮和轴转动, 从而完成将蒸汽热能转换为汽轮机转子旋转机械能的任务。

二、汽轮机设备及其系统

汽轮机设备及系统包括汽轮机本体、控制保安系统、辅助设备及系统等。汽轮机本体由转动部分和固定部分组成；控制保安系统包括主汽阀、调节汽阀、控制执行机构、信号变送器、控制油系统、计算机控制系统、安全保护装置等；辅助设备包括凝汽器、抽气器（或水环真空泵）、高压和低压加热器、除氧器、给水泵、凝结水泵、凝升泵、循环水泵等。汽轮机的重要系统包括主蒸汽系统、再热蒸汽系统、凝汽系统、给水回热系统、润滑油系统等。

第四节 汽轮机基本组成

汽轮机本体由转动部分（转子）和固定部分（静子）组成，见图 1-10。转动部分包括动叶栅、叶轮（或转鼓）、主轴、联轴器等；固定部分包括汽缸、蒸汽室、喷嘴室、隔板、隔板套（或静叶持环）、汽封、轴承、轴承座、机座、滑销系统等。

一、汽轮机级

汽轮机的级由喷嘴叶栅（或静叶栅）和与它相配合的动叶栅组成。

喷嘴的作用是把蒸汽的热能转变成动能，也就是使蒸汽膨胀降压增加流速，按一定的方向喷射出去，进入动叶栅中做功。喷嘴直接安装在喷嘴室和隔板上，见图 1-11。

叶片按用途可分为动叶片和静叶片（又称喷嘴叶片）两种。动叶片安装在转子叶轮（冲动式汽轮机）或转鼓（反动式汽轮机）上。静叶片安装在隔板或汽缸上，起喷嘴作用；在双列速度调节级中，第二列静叶作导向叶片，使汽流改变方向，引导蒸汽进入动叶片。

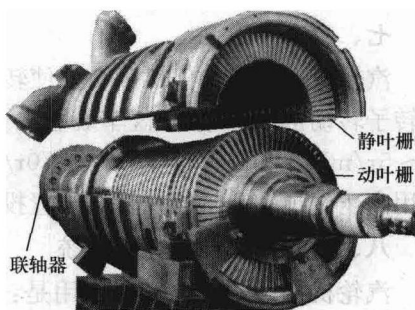


图 1-11 汽轮机通流部分

二、汽轮机转子

汽轮机中所有转动部件的合体叫做转子，它是汽轮机最重要的部件之一，担负着工质能量转换及扭矩传递的重任。转子由主轴、轴套、叶轮、叶片、联轴器、轴封套（汽封套）等部件组成，有些转子还包括带动主油泵和调速器的附加轴。

三、汽轮机汽缸与隔板

汽缸的主要作用是将汽轮机的通流部分与外界隔开，保证蒸汽在汽轮机内完成做功过程。此外，它还要支承汽轮机的一些静止部件（隔板、喷嘴室、汽封套等）。汽缸通常制成具有水平接合面的对分形式，上半部叫上汽缸，下半部叫下汽缸。上、下汽缸之间用法兰螺栓连接在一起。为了减小汽缸应力，现代汽轮机也有采用无水平接合面汽缸的。

多级汽轮机调节级后的各压力级是在不同的压力下工作的。为了保持各级前后的压力差、安装静叶片和阻止级间漏汽，汽缸上装设有多个隔板，它可以直接安装在汽缸内壁的隔板槽中，也可以借助隔板套安装在汽缸上。隔板通常做成水平对分形式，其内圆孔处安装有隔板汽封。反动式汽轮机没有隔板，但会在汽缸上安装支承静叶的持环。

四、汽封

汽轮机运转时，转子高速旋转，汽缸、隔板（或静叶环）等静止不动。因此转子和静止

部件之间需留有适当的间隙,防止相互碰摩。然而间隙的存在会导致蒸汽泄漏,这不仅会降低机组效率,还会影响机组安全运行。为了减少蒸汽泄漏和防止空气漏入,采用了汽封装置。汽封按其安装位置的不同,可分为叶顶汽封、隔板(或静叶环)汽封、轴端汽封以及径向汽封等。反动式汽轮机还装有平衡活塞汽封。

为了防止和减少漏汽以及回收漏汽,很多汽轮机设有由轴端汽封加上与之相连接的管道、阀门及附属设备组成的轴封蒸汽调整系统,并配置自动调节装置。

五、汽轮机轴承

汽轮机轴承包括径向支持轴承和推力轴承。径向支持轴承承担转子的质量和旋转动反力,并保证转子的径向位置。推力轴承承受蒸汽作用在转子上的部分轴向推力,保持转子工作时的轴向位置,以保证通流部分动静轴向间隙。推力轴承的工作面是转子相对于汽缸的定位点,称为汽轮机转子对静子的相对死点。

六、联轴器

联轴器是汽轮机各转子间、汽轮机转子和发电机转子间的连接件。通过联轴器把汽轮机转子的转动转矩传递给发电机。汽轮发电机组主要联轴器多采用刚性联轴器。

七、盘车装置

汽轮机冲转前和停机后,要使转子连续转动一段时间,以保证转子均匀受热和冷却。带动转子转动的装置称为盘车装置,它可以自动投入和切除。汽轮机的盘车分为低速盘车($3\sim 5\text{r/min}$)和高速盘车($40\sim 70\text{r/min}$)两种。汽轮机启动时,为减小盘车电动机功率,采用高压油顶轴装置,在盘车装置投入前用压力油将转子顶起以减小启动转矩。

八、汽轮机控制与保护系统

汽轮机控制系统的主要作用是:当发电机负载变化时,使主汽阀和调节汽阀改变进汽量,调节汽轮机的输出功率,使其与外界负荷相适应,维持汽轮机转速在规定范围内,保证电能质量。供热汽轮机还具备供热蒸汽压力自动调节系统。

此外,为保证运行安全,汽轮机还设有各种保护装置,如超速保护、轴向位移保护及低油压保护等。当这些参数超出安全范围时,保护系统自动切断汽轮机进汽,停止设备运转,避免事故发生与扩大。

第五节 汽轮机的分类和型号表示

一、汽轮机的分类

根据做功原理、热力过程特性、参数水平的差异等可以将汽轮机进行以下分类。

1. 按做功原理分类

(1) 冲动式汽轮机。按冲动原理做功的级构成的汽轮机叫冲动式汽轮机。为了提高效率,冲动式汽轮机级均带有一定反动度,习惯上仍称为冲动式汽轮机。

(2) 反动式汽轮机。按反动原理做功的级构成的汽轮机叫反动式汽轮机。现代反动式汽轮机常以冲动级(单列级或复速级)作调节级,但习惯上仍称为反动式汽轮机。

2. 按热力过程特性分类

(1) 凝汽式汽轮机。进入汽轮机的蒸汽在流经汽轮机各级后,除少量漏汽外全部进入凝

汽器,这种汽轮机叫做凝汽式汽轮机。现代汽轮机为提高循环热效率,一般都采用若干段回热抽汽加热给水,这类汽轮机习惯上仍称为凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机。进入汽轮机的蒸汽流经各级做功后,在高于大气压力的情况下排出,以供工业或生活之用,这种汽轮机称为背压式汽轮机。

(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、一定质量流量^❶的蒸汽,供给工业或生活之用,其余的蒸汽流入凝汽器,这种汽轮机称为调整抽汽式汽轮机。调整抽汽式汽轮机和背压式汽轮机统称为供热式汽轮机。

(4) 中间再热式汽轮机。将在汽轮机若干级中做过功的蒸汽(如高压汽缸的排汽)引入锅炉再次加热,然后又回到汽轮机后面的一些级(如中低压汽缸)内继续膨胀做功,乏汽进入凝汽器,这种汽轮机叫中间再热式汽轮机。

3. 按蒸汽压力分类

(1) 低压汽轮机。新汽压力为 $1.2 \sim 2.0 \text{ MPa}$ (例如新汽压力为 1.3 MPa , 温度为 340°C)。

(2) 中压汽轮机。新汽压力为 $2.1 \sim 4.0 \text{ MPa}$ (例如新汽压力为 3.43 MPa , 温度为 435°C)。

(3) 高压汽轮机。新汽压力为 $8.1 \sim 12.5 \text{ MPa}$ (例如新汽压力为 9.0 MPa , 温度为 535°C)。

(4) 超高压汽轮机。新汽压力为 $12.6 \sim 15.0 \text{ MPa}$ (例如新汽压力为 13.0 MPa 或 13.5 MPa 、温度为 535°C 或 550°C , 再热温度为 535°C 或 550°C)。

(5) 亚临界压力汽轮机。新汽压力为 $15.1 \sim 22.5 \text{ MPa}$ (例如新汽压力为 16.5 MPa 、温度为 535°C , 再热温度为 535°C)。

(6) 超临界压力汽轮机。新汽压力大于 22.1 MPa 。例如国内某 600 MW 超临界压力汽轮机参数为:新汽压力 23.8 MPa , 温度 566°C , 再热温度 566°C 。

(7) 超超临界压力汽轮机。新汽压力在 27 MPa 以上或蒸汽温度达到 $600/620^\circ\text{C}$ 以上的汽轮机。例如国内某 900 MW 超超临界压力汽轮机参数为:新汽压力 26.25 MPa , 温度 600°C , 再热温度 600°C 。

此外,按汽缸数可以分为单缸汽轮机和多缸汽轮机;按机组转轴数可以分为单轴汽轮机和双轴汽轮机;按工作状况可以分为固定式汽轮机和移动式汽轮机等。

二、汽轮机的型号表示

汽轮机型号虽然随制造者的习惯不同而不同,但是一般都包含了汽轮机的形式、容量、新蒸汽参数和再热蒸汽参数等信息,供热汽轮机型号还包括供热蒸汽参数。因此,从汽轮机的型号可以基本判断出汽轮机的主要特征。

我国制造的汽轮机的型号大多包含三部分信息。第一部分信息由汉语拼音字母表示汽轮机的形式(见表 1-1);由数字表示汽轮机的容量,即额定功率(MW);第二部分信息用几组由斜线分隔的数字分别表示新蒸汽参数、再热蒸汽参数、供热蒸汽参数等(见表 1-2)。功率单位为 MW,蒸汽压力参数的单位为 MPa,温度参数的单位为 $^\circ\text{C}$,第三部分为厂家设计序号。

❶ 本书提及的流量,如无特别说明,均为质量流量。

第二章 汽轮机级内能量转换过程

第一节 汽轮机级的基本概念

一、汽轮机的级

汽轮机的级是最基本的做功单元。这些级中供蒸汽流动的通道构成了汽轮机的通流部分。一台汽轮机可由单级组成，也可以由多级组成。现代大型汽轮机均由多级串联组成，例如 600MW 汽轮机的总级数可达 40 多级。汽轮机的总输出功率是汽轮机各级输出功率之和。汽轮机组的经济性和安全性很大程度上取决于每一个单级的经济性和可靠性。所以研究级内的能量转换过程是研究整个汽轮机组工作过程的基础。

汽轮机的级由喷嘴叶栅和与它相配合的动叶栅组成，如图 2-1 所示。喷嘴叶栅是由一系列安装在隔板体上的喷嘴叶片构成，又称静叶栅。动叶栅是由一系列安装在叶轮外缘上的动叶片构成。为了分析方便，选取三个特征截面：喷嘴叶栅前截面 0—0，即级的进口截面；喷嘴叶栅和动叶栅之间的截面 1—1，即喷嘴的出口截面；动叶栅后截面 2—2，即级的出口截面。各截面上的汽流参数分别注以下标 0、1 和 2，下标 n 表示喷嘴、b 表示动叶。

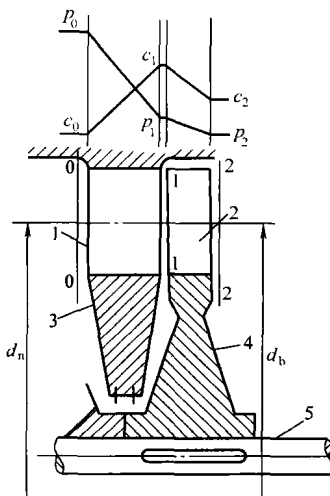


图 2-1 汽轮机级的示意图

1—喷嘴；2—动叶片；3—隔板；
4—叶轮；5—轴

当蒸汽通过汽轮机级时，首先在喷嘴叶栅中将热能转变成为动能，然后在动叶栅中将其动能转变为机械能，使得叶轮和轴转动，从而完成汽轮机利用蒸汽热能做功的任务。蒸汽在汽轮机级内进行能量转换，必须具备相应的条件。首先，蒸汽应具有一定品位的热能，即蒸汽需具有足够高的温度和压力，而且喷嘴进出口应具有一定的蒸汽压差。其次，进行能量转换的叶栅也需具备有一定的结构条件，如叶栅流道截面积的变化应满足连续流动方程，叶片的截面应为流线型，流道应具有良好的几何形状，流道的壁面应光滑等。同时，动叶栅结构形式应满足汽流产生冲动力和反动力的要求，即动叶栅必须是有合理的曲面流道，且可以绕轴心线运动。此外，喷嘴叶栅喷出的高速汽流应能顺利地进入动叶栅流道，故喷嘴叶栅也应为弯曲的流道。

汽轮机级的做功过程是蒸汽不断膨胀，压力逐渐降低的过程。图 2-2 为蒸汽在级中做功时的热力过程线。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点。蒸汽从滞止状态 0* 在级内等熵膨胀到 p_2 时的比焓降 Δh_0^* 称为级的滞止理想比焓降。蒸汽从 0 点在级内等熵膨胀到 p_2 时的比焓降 Δh_0 称为级的理想比焓降。按同样定义， Δh_n^* 为喷嘴的滞止理想比焓降，而 Δh_b 为动叶的理想比焓降。实质上，级的滞止理想比焓降表示了理想情况下单位质量的蒸汽流过一个级时能够做功的大小。根据热力学原理，蒸汽在