

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电厂汽轮机原理

DIANCHANG QILUNJI YUANLI

牛卫东 主 编
李 琳 副主编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

21 世纪高等学校规划教材
Textbook Series of 21st Century



电厂汽轮机原理

DIANCHANG QILUNJI YUANLI

主 编 牛卫东
副主编 李 琳
编 写 王 伟
主 审 黄保海



中国电力出版社

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



21 世纪高等学校规划教材 内 容 提 要

本书为 21 世纪高等学校规划教材。本书的编写结合火力发电厂 300MW 以上机组的设备、系统和技术特点,介绍了电站汽轮机的工作原理及主要设备、系统。主要内容包括:蒸汽在喷嘴叶栅和动叶栅中的流动与能量转换,多级汽轮机的工作特点和热力设计,汽轮机在变工况下的工作规律,汽轮机的静止部分和转动部分的结构及叶片的强度校核方法,汽轮机调节保护系统的工作原理及特性,供热式汽轮机工作特性及主要凝汽设备工作原理等。本书强调基本理论,紧密联系生产实践,突出工程应用性,体现大机组的特点。

本书可作为高职高专电力技术类电厂热能动力装置专业和火电厂集控运行专业的教材,也可供从事火电厂工作的工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂汽轮机原理/牛卫东主编. —北京:中国电力出版社,
2008.1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-6223-6

I. 电… II. 牛… III. 火电厂—蒸汽透平—高等学校—
教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 174653 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 402 千字

定价 26.80 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

主 编 牛 卫 东
主 审 王 建 国
主 审 黄 彩 霞

前 言

本书为能源动力类专业的一门必修课教材。主要包括：汽轮机级的工作原理、多级汽轮机的工作过程、汽轮机的变工况下的工作特性、汽轮机结构及叶片的强度、汽轮机调节保护、供热式汽轮机及汽轮机凝汽设备。

本书在取材上尽量反映目前国内汽轮机的技术水平，强调基本理论，紧密联系生产实践，突出大型汽轮机的基本特征；根据现代化电力工业的发展及我国能源发展现状，增添了部分核电汽轮机的内容。本书在编写过程中力求文字精练、通顺流畅。

全书共分六章，绪论和第一、四章由牛卫东编写；第二、三章由李琳编写；第五、六章由王伟编写。本书由山东电力高等专科学校牛卫东担任主编，并对全书进行统稿。

全书由山东电力研究院黄保海教授担任主审，黄保海教授对书稿进行了认真仔细的审阅，并提出了很多宝贵意见。本书在编写过程中得到了有关单位的大力支持，在此表示衷心的感谢。

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

2007 年 10 月

目 录

前言	1
绪论	1
第一章 汽轮机工作原理	9
第一节 汽轮机级的基本工作原理	9
第二节 蒸汽在喷嘴中的流动过程	14
第三节 蒸汽在动叶中的工作过程	19
第四节 轮周效率和速比	24
第五节 级的通流部分尺寸的确定	32
第六节 级内损失和级的内效率	36
第七节 级的热力计算举例	48
第八节 多级汽轮机的工作	59
第九节 汽轮机的热力设计	74
思考题和习题	80
第二章 汽轮机的变工况	83
第一节 概述	83
第二节 喷嘴的变工况特性	83
第三节 级组的变工况特性	88
第四节 汽轮机的变工况	92
第五节 汽轮机的配汽方式和调节级的变工况	97
第六节 凝汽式汽轮机的工况图	102
第七节 蒸汽参数变化对汽轮机经济性和安全性的影响	106
第八节 变工况下的热力计算	111
思考题和习题	115
第三章 汽轮机零部件的结构及强度	117
第一节 汽轮机的静止部分	117
第二节 汽轮机的转动部分	133
第三节 叶片的强度	143
第四节 叶片的振动	147
第五节 机组振动	160
第六节 核电汽轮机结构	165
思考题和习题	169
第四章 汽轮机调节和保护	171
第一节 概述	171

第二节	国产典型液压调速系统	175
第三节	汽轮机调节系统的静态特性	189
第四节	调节系统的动态特性	198
第五节	中间再热汽轮机调节的特点	201
第六节	汽轮机数字电液调节(DEH)	203
第七节	汽轮机的保护系统及主要装置	212
第八节	汽轮机的供油系统及主要设备	217
	思考题和习题	223
第五章	供热式汽轮机	225
第一节	供热式汽轮机的形式及特点	225
第二节	背压式汽轮机	226
第三节	一次调节抽汽式汽轮机	228
第四节	二次调节抽汽式汽轮机	231
	思考题和习题	234
第六章	汽轮机的凝汽设备	235
第一节	凝汽设备及系统	235
第二节	凝汽器	236
第三节	抽气设备	245
	思考题和习题	248
附录	电厂汽轮机常用术语汉英对照	250
参考文献		257

绪 论

一、汽轮机概述

汽轮机又称“蒸汽透平”，是将蒸汽的热能转换成机械功的一种旋转式原动机。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、可利用多种燃料和使用寿命长等优点。因此，汽轮机被广泛用于常规火力发电厂和核电站中拖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。

电力工业是现代化国家的基础工业，电力生产是一个国家经济发展水平的重要指针之一。为适应电力工业的发展，汽轮机的单机容量不断增大，目前世界上运行的最大双轴汽轮机组为瑞士 ABB 公司制造的 1300MW 机组，最大单轴汽轮机组为前苏联制造的 1200MW 机组。在我国，目前的主力机组为 300MW 汽轮机组，国产亚临界压力 600MW 汽轮机组和引进超临界压力 600MW 汽轮机组也已投入运行。近几年，我国建成投产的主力机组，仍为单机容量 300~600MW 的机组，超超临界压力 1000MW 机组也相继投产，采用大功率机组的好处是：

(1) 提高机组效率。如国产引进型 300MW 机组的热耗率为 8091kJ/(kW·h)，而国产 100MW 机组的热耗率为 9252kJ/(kW·h)，前者仅为后者的 87%。

(2) 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 45 个月，后者 66 个月），缩短工期 32%。

(3) 降低单位功率的造价。大功率机组单位功率用的材料、人工等相对减少，降低了成本。

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和降低运行费用等。

单机功率的增大必然导致汽轮机的热力系统、自动调节系统、保护系统及监测和控制系统进一步复杂。计算机技术的应用，提高了大功率机组运行的自动化水平，目前 300MW 以上的机组，一般均采用机、炉、电协调控制运行方式。

二、汽轮机发展概况

19 世纪末，瑞典拉瓦尔和英国帕森斯分别创制了实用的汽轮机。拉瓦尔于 1883 年制成了第一台 5 马力 (3.67kW) 的单级冲动式汽轮机，并解决了有关的喷嘴设计和强度设计问题。单级冲动式汽轮机功率很小，现在已很少采用。

帕森斯在 1884 年取得英国专利，制成了第一台 10 马力的多级反动式汽轮机，这台汽轮机的功率和效率在当时都占领先地位。20 世纪初，法国拉托和瑞士佐莱分别制造了多级冲动式汽轮机。多级结构为增大汽轮机功率开拓了道路，已被广泛采用，机组功率不断增大。

20 世纪初，美国的柯蒂斯制成多个速度级的汽轮机，每个速度级一般有两列动叶，第一列动叶后在汽缸上装有导向叶片，将汽流导向第二列动叶。现在速度级只用于小型的汽轮

机上,主要驱动泵、鼓风机等,也常用作中小型多级汽轮机的第一级。

经过十几年的发展,逐步形成了汽轮机的两种基本类型——多级冲动式汽轮机和多级反动式汽轮机。

1903年至1907年间,出现了热能、电能联合生产的汽轮机,即背压式及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,出现了给水回热式汽轮机。这种汽轮机的应用提高了装置的循环效率,也提高了汽轮机本身的相对内效率,特别是创造了提高单机功率的条件。因此,此后给水回热式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循环效率。

1921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蒸汽参数的汽轮机。

汽轮机经历了单级向多级、小容量向大容量的发展,蒸汽参数也逐渐升高,发展的趋势是超临界压力和超超临界压力机组。

世界上早期研制的超临界压力机组曾遇到所选用蒸汽参数过高的误区,超越了当时的技术发展水平,运行中出现过很多问题,如锅炉过热器受热面的高温腐蚀、汽轮机高压缸的蠕变变形、运行灵活性差而不能带周期性负荷运行等。以后,世界上发展的超临界压力机组多采用压力为24MPa等级、主/再热蒸汽温度538~566℃。从20世纪90年代起,随着科学技术的进步和材料技术的发展,超临界压力机组的蒸汽参数又有提高的趋势。

随着超临界压力机组的蒸汽参数进一步提高,为了便于区别,在国际上又提出了超超临界压力汽轮机组的概念(Ultra Supercritical Steam Turbine)。一般将压力等于或大于25MPa、温度为600~610℃蒸汽参数的汽轮机组称为超超临界压力汽轮机组。

新中国建立后,汽轮机制造工业才得到发展,从1955年制成第一台6MW凝汽式汽轮机起,在短短的几十年中,已经生产了12、25、50、100、125、200、300MW及600MW以上的各种类型的汽轮机。目前,我国已开始引进蒸汽压力为25~26.5MPa,温度为600~610℃,容量为1000MW等级的高效超临界(亦称超超临界)参数汽轮发电机组。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、东方汽轮机厂和北京重型电机厂。此外,还有青岛汽轮机厂、武汉汽轮机厂等中小型汽轮机厂,以及生产工业汽轮机为主的杭州汽轮机厂和生产燃汽轮机为主的南京汽轮机厂。

三、汽轮机分类与型号

1. 汽轮机分类

汽轮机在社会经济的各部门中都有广泛的应用。汽轮机种类很多,并有不同的分类方法。

按结构分:有单级汽轮机和多级汽轮机;各级装在一个汽缸内的单缸汽轮机和各级分装在几个汽缸内的多缸汽轮机;各级装在一根轴上的单轴汽轮机和各级装在两根平行轴上的双轴汽轮机等。

按工作原理分:有蒸汽主要在各级喷嘴(或静叶)中膨胀的冲动式汽轮机;蒸汽在静叶

和动叶中都膨胀的反动式汽轮机；以及蒸汽在喷嘴中膨胀后的动能在几列动叶上加以利用的速度级汽轮机。

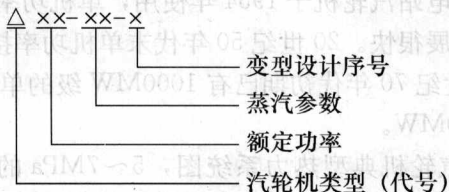
按热力特性分：有凝汽式、供热式（背压式、抽汽式）汽轮机等类型。凝汽式汽轮机排出的蒸汽流入凝汽器，排汽压力低于大气压力，因此具有良好的热力性能，是最常用的一种汽轮机。供热式汽轮机既提供动力驱动发电机或其他机械，又提供生产或生活用热，具有较高的热能利用率。背压式汽轮机是排汽压力大于大气压力的汽轮机；抽汽式汽轮机是从中间级抽出蒸汽供热的汽轮机。

按工作蒸汽的状态分：有过热蒸汽汽轮机和饱和蒸汽轮机。过热蒸汽汽轮机是以过热蒸汽作为新蒸汽的汽轮机，广泛用于火力发电厂；饱和蒸汽轮机是以饱和状态的蒸汽作为新蒸汽的汽轮机，它用于常用堆型的核电站和核动力船舰中，在地热能动力装置和太阳能动力装置中也可应用。

2. 汽轮机型号

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 0-1 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 0-2；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。

表 0-1 国产汽轮类型的代号

代 号	类 型	代 号	类 型
N	凝 汽 式	CB	抽汽背压式
B	背 压 式	B	船 用
C	一次调节抽汽式	Y	移 动 式
CC	两次调节抽汽式		

表 0-2 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/中间再热温度	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
两次调节抽汽式	主蒸汽压力/高压抽汽压力/低压抽汽压力	CC25—8.82/0.98/0.118
背压式	主蒸汽压力/背压	B50—8.82/0.98
抽汽背压式	主蒸汽压力/抽汽压力/背压	CB25—8.82/0.98/0.118

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。

四、汽轮机的发展方向

研制大型汽轮机组是汽轮机未来发展的一个重要方向, 这其中研制更长的末级叶片, 是进一步发展大型汽轮机的一个关键; 提高热效率是汽轮机发展的另一方向, 采用更高蒸汽参数和二次再热, 研制调峰机组, 推广供热汽轮机的应用是这方面发展的重要因素。

现代核电站汽轮机的数量正在快速增加, 因此研究适用于不同反应堆型的、性能良好的汽轮机具有特别重要的意义。核电站汽轮机依核反应堆型的不同有不同的类型和要求。在压水堆、沸水堆、重水堆和气冷堆等堆型的核电站中, 常采用进汽压力为 5~7MPa 的饱和蒸汽轮机。除沸水堆核电站外, 其他堆型核电站的饱和蒸汽轮机的工质蒸汽均不直接与核反应堆接触, 基本上无放射性污染, 汽轮机的运行操作人员不需要特殊保护。改进型气冷堆和一些新型反应堆(如熔盐增殖堆、快中子堆)核电站能提供 500℃ 以上的过热蒸汽, 因而同火电站一样, 可采用亚临界或超临界压力的高温再热汽轮机, 所用汽轮机的类型和要求也与火电站的基本相同。第一台核电站汽轮机于 1954 年使用, 单机功率为 6MW。为了降低核电站单位功率造价, 单机功率发展很快。20 世纪 50 年代末单机功率接近 300MW, 到 20 世纪 60 年代达 600~700MW, 20 世纪 70 年代初期已有 1000MW 级的单机出现, 20 世纪 80 年代投入运行的单机功率已达 1300MW。

图 0-1 所示为饱和蒸汽轮机典型热力系统图, 5~7MPa 的饱和蒸汽进入汽轮机高压缸, 高压缸的排汽流经汽水分离—再热器分离掉蒸汽中绝大部分水滴并再次加热, 然后

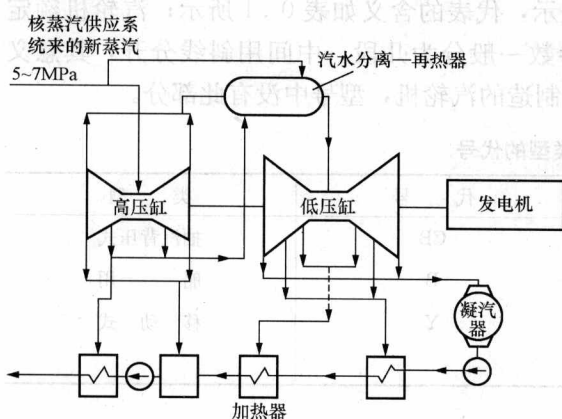


图 0-1 饱和蒸汽轮机典型热力系统图

通入低压缸膨胀做功。这种方法可使效率相对提高约 2%。由于经济和安全原因, 汽水分离—再热器一般布置在低压缸两侧, 采用新蒸汽或同时采用高压缸的抽汽加热。低压缸的进汽压力一般取新蒸汽压力的 10%~20%。由于饱和蒸汽轮机的各级都在湿蒸汽环境中工作, 高速湿蒸汽流中的微小水滴不仅影响汽轮机的效率, 而且对汽轮机零部件有很大的冲蚀作用。为了及时去除或减少蒸汽中的水滴并降低其冲蚀的影响, 在饱和蒸汽轮机高压部分采用特殊的除湿、防蚀结构。

地热发电可分为蒸汽型和热水型两种方式。蒸汽型发电是将地球深部断层中不掺杂热水的蒸汽直接通过地热井引入汽轮机组发电, 但是这种干蒸汽的地热资源较少, 而且大多存在于比较深的地层里, 所以进行充分的开发利用有一定的困难。目前, 世界上的地热电站大多属于热水型。热水型地热发电, 要求地下热水储藏深度在 1500m 左右, 温度在 150~300℃, 溶解盐类的含量不超过一定的百分比, 从蒸汽井里喷出的汽水混合物里分离出的蒸汽引入汽轮发电机组即可发电。由于地热蒸汽里含有大量的腐蚀性气体和杂质, 为了防止地热电站的汽轮机磨损、腐蚀和污损, 在送去汽轮机前, 还要用专门的净化装置把它里面的杂质去掉。

也可以把地热蒸汽作为热源,用它来加热干净的水,使干净的水变成蒸汽来推动汽轮机发电,这就是“二次蒸汽”发电。

另外,在汽轮机设计、制造和运行过程中,采用新的理论和技术,以改善汽轮机的性能,也是未来汽轮机研究的一个重要内容。例如:气体动力学方面的三维流动理论,湿蒸汽双相流动理论;强度方面的有限元法和断裂力学分析;设计、制造工艺、试验测量和运行监测等方面的电子计算机技术;寿命监控方面的超声检查和耗损计算。此外,还将研究氟利昂等新工质的应用,以及采用新结构、新工艺和新材料等。

五、汽轮机的结构简介

冲动式汽轮机和反动式汽轮机在现代火力发电厂中都得到了广泛的应用,这两种汽轮机的工作原理不同,结构上也有一定差异,虽然二者都是由静止部分和转动部分组成,但冲动式汽轮机采用轮式转子,反动式汽轮机采用鼓式转子。

图 0-2 是一台东方汽轮机厂生产的 300MW 汽轮机纵剖面图,该汽轮机为冲动式,采用轮式转子。转动部分主要由主轴、叶轮、动叶片及联轴器组成;静止部分主要由汽缸、隔板、喷嘴及轴承组成。转动部分和静止部分之间的密封是用汽封实现的,它的作用是减少运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,凡是有压力差存在而又不希望有大量工质流过的地方都装有汽封。在汽缸的两端,转子轴由汽缸内穿出来的地方装有轴封;在多级汽轮机的级与级之间装有隔板汽封;在动叶顶部装有叶顶汽封。该汽轮机采用双缸双排汽形式,从锅炉来的新蒸汽从高中压缸中间进入高压缸,向左逐级流动做功,高压缸左端的排汽回到锅炉的再热器再热后进入中压缸从左向右逐级流动做功,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,蒸汽向左、右流动做功后,乏汽从两侧的排汽口排入凝汽器。

图 0-3 为东方汽轮机厂引进的超超临界压力 1000MW 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,喷嘴装在汽缸内部圆周的表面上或持环上,没有轮盘和隔板。高压缸共 1+8 个热力通流级,高压缸为双层缸结构,分别与四个调节阀对应的喷嘴室装在内缸上。固定在内缸上的四根进汽管允许其内外缸、喷嘴室自由地热胀而不影响三者的同心定位。中压缸分流共 2×6 级,与高压部分一样采用双层缸结构,为了使中压外缸材料可沿用亚临界传统的 Cr-Mo-V 铸钢,下半进汽部分结构特殊设计,使再热蒸汽不通过外缸缸体,直接进入内缸进汽室。低压分两个缸,均为分流 2×6 级。为减小热应力,采用三层缸结构以避免进汽部分膨胀不畅引起内缸变形。内外缸均采用缸板拼焊结构,低压转子采用整锻结构,选用超纯净 Ni-Cr-Mo-V 钢锻件。

六、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,汽轮机的结构、主要部件的强度计算和振动问题,汽轮机的调节和保安系统及凝汽设备。

学习汽轮机原理与构造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,研究方法也不相同。在学习汽轮机原理时,主要用到工程热力学和流体力学方面的知识,主要研究级的通流特性和通流能力问题,研究级的能量转换和效率问题以及多级汽轮机的特殊问题,还要研究级的变工况问题,为以后学习运行课打好基础;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,研究主要部件的结构,介绍主要部件的应力计算方

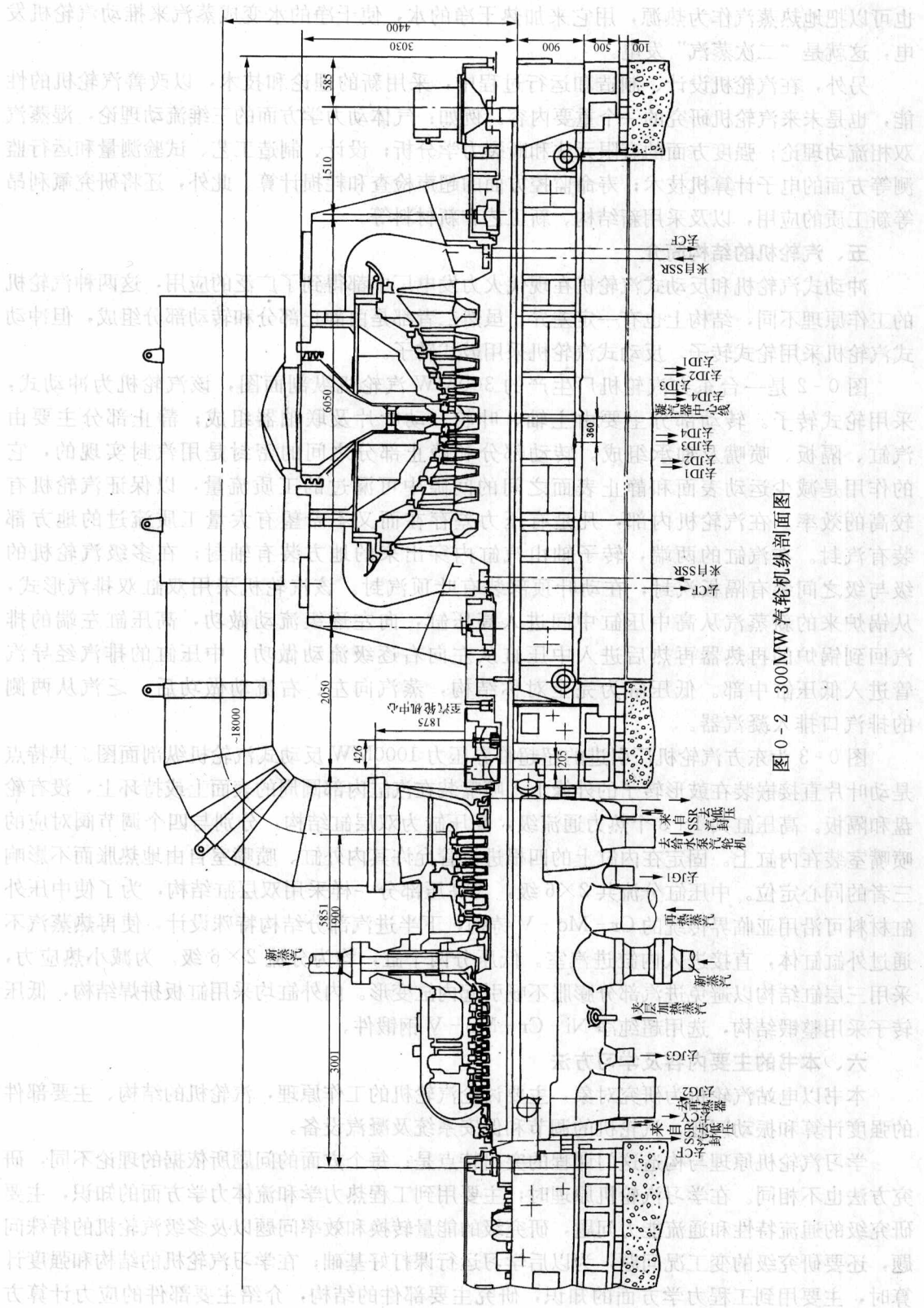


图 0-2 300MW 汽轮机纵剖面图

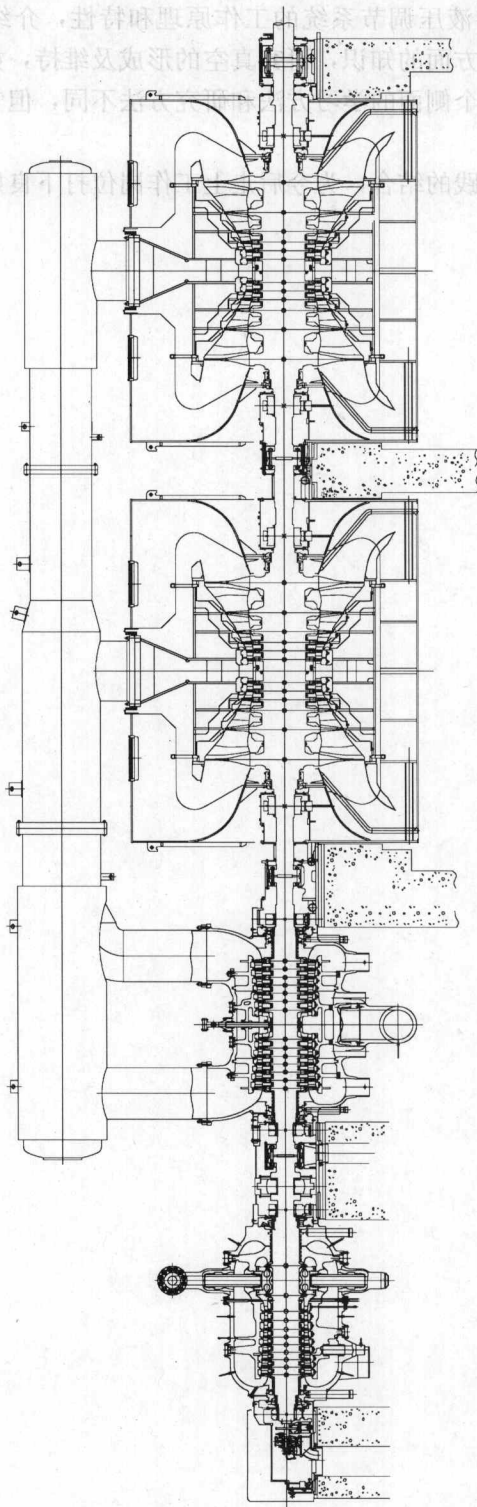
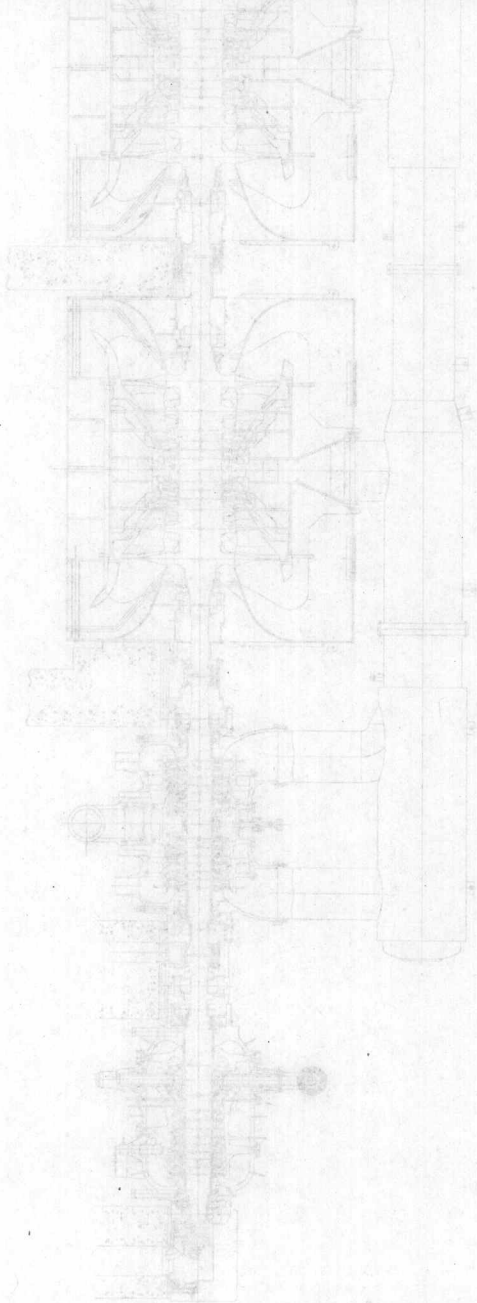


图 0-3 1000MW 汽轮机纵剖面图

法, 讨论引起机组振动的主要因素及减少振动的措施; 在学习汽轮机调节时主要用到处在动调节原理方面的知识, 研究国产主要液压调节系统的工作原理和特性, 介绍机组的主要保护; 凝汽设备的学习主要用到传热学方面的知识, 研究真空的形成及维持, 如何提高传热效果及维持在最佳真空下运行。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。

学习本书时, 还应加强理论与实践的结合, 为今后走上工作岗位打下良好基础。

图 0-3 1000MW 汽轮机原理图



第一章 汽轮机工作原理

第一节 汽轮机级的基本工作原理

一、级的概念及工作原理

(一) 汽轮机的级

图 1-1 是一个最简单的单级冲动式汽轮机示意图, 由图可以看出蒸汽在汽轮机中将热能转换为机械能的过程。首先, 具有一定压力和温度的蒸汽流经固定不动的喷嘴膨胀, 蒸汽的压力和温度不断降低, 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。

由相同叶片按相同的节距、相同的安装角在同一回转面构成汽流流道的组合体称为叶栅。如果叶栅是静止的, 称为静叶栅; 如果叶栅是转动的, 称为动叶栅。汽轮机的叶栅还可以分成冲动式叶栅和反动式叶栅两大类。反动式叶栅包括喷嘴叶栅和反动度较大的动叶栅, 叶栅前后有静压差, 汽道断面进口到出口逐渐收缩, 如图 1-2 (a) 所示。冲动式叶栅包括冲动式叶栅和导向叶栅, 叶栅前后静压力近似相等, 汽流通过时主要改变流动方向, 基本不加速, 但在实际应用中为了减小流动损失, 汽道截面都略有收缩, 即有一定的反动度, 如图 1-2 (b) 所示。

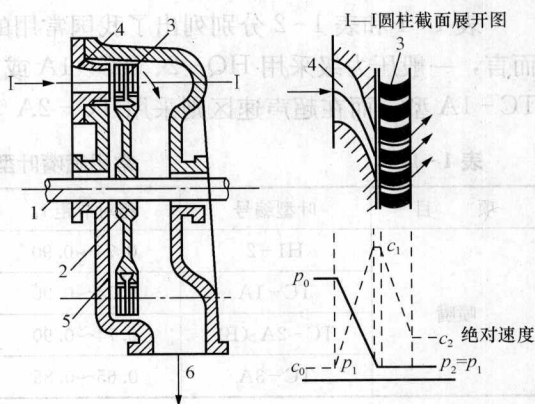


图 1-1 单级冲动式汽轮机示意图

1—轴；2—叶轮；3—动叶片；4—喷嘴；
5—汽缸；6—排汽口

叶片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; 反之, 则称为变截面叶片。

反映叶栅几何特性的主要参数有: 平均直径 d_m 、叶片高度 l 、叶栅节距 t 、叶型宽度 B 、叶栅通道进口宽度 a 和出口宽度 a_1 与 a_2 、叶型弦长 b 和出口边厚度 Δ 等, 如图 1-2 所示。

由于进出口参数相同时, 几何相似的叶栅中汽流保持近似相同的特性, 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: 相对节距 $\bar{t} = \frac{t}{b}$ 、相对高度 $\bar{l} = \frac{l}{b}$ 、相对长度 (径高比) $\theta = \frac{d}{l}$ 等。

α_s 和 β_s 称为叶栅的安装角, 它是叶栅额线与弦长之间的夹角。对一定的叶型, 安装角直

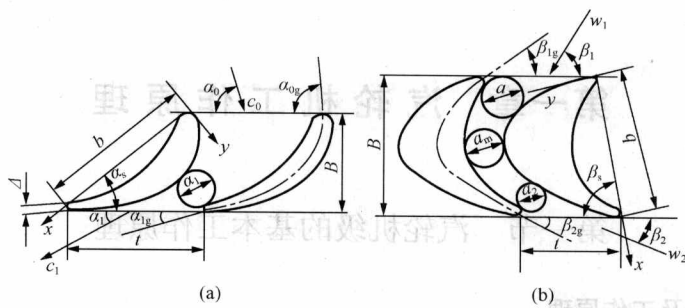


图 1-2 汽轮机叶栅参数
(a) 喷嘴叶栅; (b) 动叶栅

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,即 $\delta_0=\alpha_{0g}-\alpha_0$, $\delta_1=\beta_{1g}-\beta_1$ 。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。同理, α_{1g} 和 β_{2g} 为叶型出口几何角。

表 1-1 和表 1-2 分别列出了我国常用的喷嘴叶型和动叶叶型的基本几何特性。就喷嘴而言,一般压力级采用 HQ-2、TC-1A 或 TC-2A 型,复速级在亚声速区采用 HQ-2 或 TC-1A 型,而在超声速区则采用 TC-2A (B) 型。

表 1-1 常用喷嘴叶型的基本几何特性

项 目	叶型编号	相对节距 $\bar{t}_a$	进汽角 α_0	出汽角 α_1	备 注
喷嘴	H1-2	0.74~0.90	70°~100°	11°~13°	A: 亚声速 B: 超声速 T: 汽轮机 C: 喷嘴
	TC-1A	0.74~0.90	70°~100°	10°~14°	
	TC-2A (B)	0.74~0.90	70°~100°	13°~17°	
	TC-3A	0.65~0.85	70°~100°	16°~22°	

表 1-2 常用动叶叶型的基本几何特性

项 目	叶型编号	进汽角 β_1	出汽角 β_2	安装角 β_1	相对节距 $\bar{t}_b$
动叶	HQ-1	22°~23°	19°~21°	76°~79°	0.60~0.80
	TP-OA	14°~25°	13°~15°	76°~79°	0.60~0.75
	TP-1A (B)	18°~33°	16°~19°	76°~79°	0.60~0.70
	TP-2A (B)	25°~40°	19°~22°	76°~79°	0.58~0.65
	TP-3A	28°~45°	24°~28°	77°~80°	0.56~0.64
	TP-4A	35°~50°	28°~32°	74°~78°	0.55~0.64
	TP-5A	40°~35°	32°~36°	76°~79°	0.52~0.60

注 P—动叶片; A、B—意义与表 1-1 同。

选用动叶栅叶型时,除了要根据动叶压比 $\epsilon_b=\frac{p_2}{p_1}$ 判断动叶中流动是否超临界外,还应考虑动叶的型线与喷嘴型线配对的要求。

1.1 冲动(二)级的基本工作原理

1. 冲动作用原理

由力学知识, 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, 运动物体能量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 1-3 所示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, 汽流方向不断改变, 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_1 , 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_1 , 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 1-4 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。

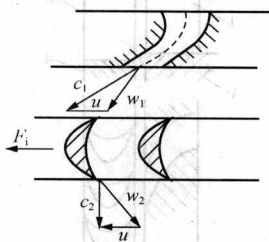


图 1-3 蒸汽流过无膨胀动叶通道

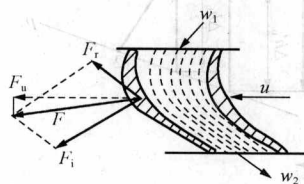


图 1-4 蒸汽在动叶汽道内膨胀

二、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 1-5 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 Δh_0^* 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 Δh_1 称为