

300MW火力发电机组丛书

第二版

第二分册

汽轮机设备及系统

吴季兰 主编



中国电力出版社

300MW火力发电机组丛书

要册卷内

第二版

第二分册

汽轮机设备及系统

吴季兰 主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是300MW火力发电机组丛书第二分册(第二版),在第一版的基础上对其内容进行了更新修改,并加以充实、提高,使之更适合大容量火电机组的目前状况。全书系统地介绍了300MW等级汽轮机设备及系统的原理、结构、特性以及运行、维护、典型事故处理等。内容包括汽轮机本体,数字电液调节和保护系统,辅助设备及系统,汽轮机的安全监视系统,运行维护,典型运行事故及其预防等。还介绍了大功率汽轮机设备的结构特点及当今世界汽轮机先进技术的发展趋势。全书内容丰富,论述精炼,反映了我国生产和进口的300MW等级机组的设备水平。

本书适合从事300MW火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,或作为培训教材使用,也可供其他高参数、大容量火电机组的有关专业人员以及高等院校热能动力类和电力工程类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机设备及系统/吴季兰主编. —2版. —北京:
中国电力出版社, 2006
(300MW火力发电机组丛书)
ISBN 7-5083-4135-X
I. 汽... II. 吴... III. 火电厂—蒸汽透平
IV. TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第012282号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1998年8月第一版

2006年4月第二版 2006年4月北京第八次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 28印张 684千字

印数22071—26070册 定价43.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《300MW 火力发电机组丛书》(第二版)

编 委 会

主 编 吴季兰

副 主 编 张晓梅 涂光瑜 高 伟

编 委 (按姓氏笔划排序)

丁学俊 尹项根 冯慧雯 叶 涛

刘 沛 吴季兰 陈 刚 张永立

张国强 张晓梅 张家琛 邱纪华

陆继明 郑 瑛 贺国强 胡能正

涂光瑜 高 伟 徐明厚 黄树红

熊信银

第二版前言

进入 21 世纪以来,随着我国经济的飞速发展,电力需求急速增长,促使电力工业进入了加快发展的新时期。我国电力工业的电源建设和技术装备水平有了较大的提高,大型火力发电机组有了较快增长,亚临界参数的 300、600MW 机组,甚至超临界的 600~800MW 机组,已经成为我国各大电网的主力机组。

由于引进型 300MW 机组具有调峰性能好、安全可靠性高、经济性好、负荷适应性广及自动化水平高等特点,早已成为我国现运营的火电机组中的主力机型,对我国电力事业的发展起到了积极的作用。有关工程技术人员、现场生产人员急需了解和掌握这些高参数、大容量机组的结构、系统和运行知识。为此,1998 年前我们在 300MW 火力发电机组培训教材的基础上组织编写了这套《300MW 火力发电机组丛书》。丛书第一版于 1998 年 8 月正式出版发行。

此套丛书面市以来,深受广大读者的厚爱,发行量逐年递增,已达数万套。为了适应当前电力大发展和广大读者日益增长的对大容量火电机组的知识需求,我们又根据制造厂、运行电厂、研究单位多年来对 300MW 等级机组在技术改进、结构完善、系统优化、运行水平提高等方面的新情况,对这套丛书各分册的内容进行了更新修改,并加以充实、提高,使之更适合大容量火电机组的目前状况以及有关工程技术人员、现场生产人员的知识需求和技术培训的要求,以及便于高等院校热能动力类和电力工程专业师生参考。

丛书包括《燃煤锅炉机组》、《汽轮机设备及系统》、《汽轮发电机及电气设备》、《计算机控制系统》四个分册。全套丛书由华中科技大学吴季兰担任总主编。

《汽轮机设备及系统》是 300MW 火力发电机组丛书的第二分册。本分册内容在第一版的基础上进行了更新修改,介绍了大功率汽轮机的结构特点及先进技术的发展趋势,侧重讲述我国汽轮机行业及运行单位,采用世界上先进的产品优化设计及制造技术对引进型 300MW 汽轮机设备及系统进行优化、完善及改造,实现设备的更新换代。力求反映我国的制造水平及技术特点,以及这些设备所采用的新原理、新技术、新材料和新工艺。

本分册由华中科技大学吴季兰担任主编,参加编写的人员有吴季兰(编写前言、第一、二、十、十一章)、丁学俊(编写第三章)、张家琛(编写第四章,第九章第一、三节)、黄树红(编写第五章)、叶涛(编写第六章、第七章)、冯慧雯(编写第八章)、贺国强(编写第九章第二节)。

本分册在收集资料和编写过程中,参阅了参考文献中列举的正式出版文献以及国内有关制造厂、研究单位、设计院、安装单位和高等院校编制的技术资料、说明书、图纸等。在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平和搜集的资料有限,编写时间仓促,书中缺点和谬误在所难免,诚恳希望读者批评指正。

编者

2005 年 12 月

第一版前言



为促进社会主义经济建设的发展,我国正大力发展电力工业,新建及在建不少高参数、大容量的火力发电机组,尤以300MW机组居多。300MW机组已成为我国各大电网的主力机组,因此有关工程技术人员、现场生产人员急需了解和掌握这些高参数、大容量机组的结构、系统和运行知识。为此,我们组织编写了这一套《300MW火力发电机组丛书》。

丛书包括《燃煤锅炉机组》、《汽轮机设备及系统》、《汽轮发电机及电气设备》、《计算机控制系统》四个分册。全套丛书由华中理工大学吴季兰担任总主编。

本丛书可供从事300MW火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修及管理工作的工程技术人员阅读,或作为培训教材使用,也可供其他高参数、大容量火电机组的有关人员以及高等院校热动力类和电力工程专业师生参考。

《汽轮机设备及系统》是300MW火力发电机组丛书的第二分册。这一分册共分十章,主要讲述300MW汽轮机设备的原理、结构、特性以及运行、事故处理等。其内容包括:概述,汽轮机本体,凝汽设备及其系统,再热汽轮机数字电液调节及其保护系统,供油系统,热力系统及其设备,火电厂主要水泵、驱动给水泵汽轮机、汽轮机的运行,汽轮机几种典型运行事故及其预防等。

本分册内容密切结合我国现有的300MW汽轮机设备情况,同时介绍了国外有关同类产品的先进技术,侧重介绍国产优化引进型300MW汽轮机设备结构、特性等,并与同类型机组作了比较。

本分册由华中理工大学吴季兰担任主编,参加编写的人员有吴季兰(编写前言、第一、二、九、十章)、丁学俊(编写第三章)、张家琛(编写第四章)、黄树红(编写第五章)、李树人(编写第六章)、叶涛(编写第七章)、冯慧雯(编写第八章)。

本分册由武汉水利电力大学陈汝庆担任主审。

本分册在收集资料和编写过程中,参阅了参考文献中列举的正式出版文献以及国内有关制造厂、研究单位、设计院、安装单位和高等院校编制的技术资料、说明书、图纸等。在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平和搜集的资料有限,编写时间仓促,书中缺点和谬误在所难免,诚恳希望读者批评指正。

编者

1998年3月

目 录

第二版前言

第一版前言

▶ 第一章 概述	1
第一节 汽轮机的特点、作用和发展趋势	1
第二节 汽轮机的分类和型号	11
第三节 汽轮发电机组的容量、参数与型式	15
第四节 300MW 等级汽轮机的主要技术规范与保证值	17
第五节 300MW 等级汽轮机的整体概述	23
第六节 汽轮机设备的经济性和可靠性	31
▶ 第二章 汽轮机本体	36
第一节 叶片	36
第二节 转子	49
第三节 汽缸与滑销系统	60
第四节 隔板、隔板套和静叶环、静叶持环	76
第五节 汽封与轴封系统	79
第六节 轴承	95
第七节 盘车装置	105
第八节 汽轮机本体疏水系统	108
第九节 国产引进型 300MW 汽轮机本体完善改进	109
第十节 国产新一代引进型 300~350MW 汽轮机	122
▶ 第三章 凝汽设备及其系统	126
第一节 凝汽设备的作用及工作过程	126
第二节 凝汽器的压力与传热	129
第三节 凝汽器的管束布置	136
第四节 国产引进型 300MW 机组凝汽器及有关机组凝汽器特点的比较	141
第五节 抽气设备	151
第六节 凝汽设备及系统的运行	158
第七节 引进型 300MW 机组凝汽设备及系统的改造	166

▶ 第四章 再热汽轮机数字电液调节及其保护系统	176
第一节 再热汽轮机调节的特点	176
第二节 再热汽轮机调节系统简介	177
第三节 DEH 调节系统综述	181
第四节 DEH 调节系统的自动控制原理	185
第五节 DEH 调节的计算机系统	193
第六节 DEH 的液压控制系统及其设备	199
第七节 汽轮机的保护和危急遮断系统	208
第八节 DEH 调节系统的特性	220
第九节 DEH 调节系统的运行	225
▶ 第五章 供油系统	233
第一节 概述	233
第二节 润滑油系统	235
第三节 润滑油系统的主要设备	238
第四节 EH 抗燃油系统	249
第五节 EH 抗燃油系统主要设备	250
▶ 第六章 热力系统及设备	256
第一节 回热加热系统及设备	256
第二节 给水除氧系统及设备	261
第三节 主蒸汽、再热蒸汽系统	268
第四节 旁路系统	271
第五节 主给水系统	278
第六节 辅助热力设备、系统及运行	280
▶ 第七章 火电厂主要水泵	289
第一节 概述	289
第二节 给水泵组	289
第三节 液力耦合器	303
第四节 给水泵最小流量控制装置	311
第五节 给水泵组水管路	312
第六节 给水泵组油管路	315
第七节 给水泵组的运行	316
第八节 凝结水泵组	322
第九节 循环水泵	326

▶ 第八章 驱动给水泵汽轮机	331
第一节 概述	331
第二节 驱动给水泵汽轮机的结构	338
第三节 驱动给水泵汽轮机的热力系统	346
第四节 驱动给水泵汽轮机的变工况运行	348
第五节 驱动给水泵汽轮机的调节、保安及供油系统	355
▶ 第九章 汽轮机的安全监视系统 (TSI)	368
第一节 汽轮机安全监视系统概述	368
第二节 汽轮机安全监视系统传感器	375
第三节 汽轮机的主要监视装置	389
▶ 第十章 汽轮机的运行	405
第一节 汽轮机主要零部件的热应力、热膨胀和热变形	405
第二节 汽轮机的启动和停机	409
第三节 汽轮机的正常运行维护	423
▶ 第十一章 汽轮机几种典型运行事故及其预防	428
第一节 汽轮机大轴弯曲事故	428
第二节 轴瓦烧损事故	430
第三节 通流部分动静磨损事故	431
第四节 汽轮发电机组严重超速事故	432
第五节 叶片损坏事故	433
第六节 汽轮机油系统着火事故	434
参考文献	436

第一章 概 述

第一节 汽轮机的特点、作用和发展趋势

一、汽轮机在火电厂中的地位

自然界中能够产生能量的资源称为能源。电力工业是能源转换的工业,它把一次能源(如煤炭、石油、天然气、水能、风能、核聚变能等)转化为电能,使之成为通用性更强的二次能源。

生产电能的工厂称作发电厂(如火力发电厂、水力发电厂、核电站等)。火力发电厂简称火电厂,它是利用化石燃料(煤、石油、天然气等)中蕴藏的化学能,在蒸汽锅炉内通过燃烧转变为蒸汽的热能,然后在汽轮机内将蒸汽的热能转变成机械能带动发电机发电的工厂。在世界范围内,火电厂中,燃煤电厂所占比例最大,如英国和德国高达70%,美国和前苏联几乎占50%,我国超过70%。由于我国的天然可用能源以煤为主和核能的清洁性,决定了目前和将来我国的发电手段仍是以火力发电为主,原子能电站逐步发展的情况。

汽轮机是以水蒸气为工质,将热能转变为机械能的外燃高速旋转式原动机。它具有单机功率大、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。在现代火电厂和核电站中,汽轮机是用来驱动发电机生产电能的,故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。汽轮机还可用来驱动泵、风机、压气机和船舶螺旋桨等。所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。

汽轮机设备是火电厂的三大主要设备之一,汽轮机设备及系统包括汽轮机本体、调节保安油系统、辅助设备及热力系统等。汽轮机本体是由汽轮机的转动部分(转子)和固定部分(静体或静子)组成;调节保安油系统主要包括调节汽阀、调速器、调速传动机构、主油泵、油箱、安全保护装置等;辅助设备主要包括凝汽器、抽气器(或水环真空泵)、高低压加热器、除氧器、给水泵、凝结水泵、凝升泵、循环水泵等;热力系统主要指主蒸汽系统、再热蒸汽系统、旁路系统、凝汽系统、给水回热系统、给水除氧系统等。

由于电能无法大量储存,发电设备的功率随外界负荷的变化而相应地变化,即发电、供电、用电同时完成,所以电能的生产不同于其他生产,这是发电厂生产的一个重要特点。因此汽轮机必须要有自动调节系统,以便调节汽轮机功率,使之满足用户的需要,并保证供电质量(电压和频率),同时还要确保电能生产具有高度的可靠性和安全性。如果电能质量降低,就会影响用户产品的产量和质量。若发生事故,供电中断,将会造成国民经济各部门生产停顿、减产,甚至损坏用户设备,发生人身事故。

二、汽轮机发展史概述

自1883年瑞典工程师拉瓦尔和1884年英国工程师帕森斯分别创制了第一台实用的单级

冲动式和多级反动式汽轮机以来，汽轮机已有一百余年的历史，近几十年汽轮机发展尤为迅速。

(一) 汽轮机发展的主要特点

1. 增大单机功率

纵观电站汽轮机近百年的发展，汽轮机单机功率迅速增长。图 1-1 所示为国外电站汽轮机单机功率增长的示意图，其中横坐标表示年份，纵坐标表示世界上第一次投运的不同功率等级电站汽轮机的单机功率，同一条横线上有时出现不止一个圆点，仅反映同一功率等级汽轮机的不同型式，如单轴或双轴，火电或核电。图 1-1 中左方 3 条直线表示世界上电站汽轮机单机功率从 1910 年~2000 年增长的 basic 趋势，在图 1-1 中右方一些方点和 2 条虚线表示国内电站汽轮机单机功率的增长情况。比较图 1-1 中虚线和实线所示的发展规律，可以看出我国汽轮机制造业起步较晚，单机功率至今落后国外约 20 年。

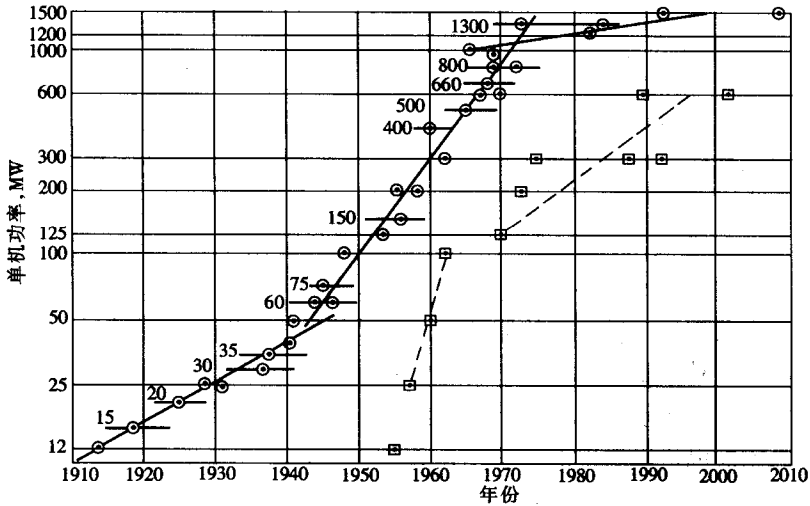


图 1-1 电站汽轮机单机功率的增长趋势

从图 1-1 可以发现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。20 世纪投运的火电双轴最大功率汽轮机是瑞士 BBC 公司制造的 24.2~25.4MPa/538℃/538℃超临界 1300MW 汽轮机，一次中间再热、反动式、6 缸 8 排汽、低压末级叶片高度 760 或 1016mm， $n = 3600/3600$ (r/min) 或 $3600/1800$ (r/min)。首台全速 1300MW 汽轮机，1972 年在美国投入运行；1976 年联邦德国 KWU 公司制造的单轴半速 ($n = 1500$ r/min) 1300MW 饱和蒸汽参数汽轮机投入运行；20 世纪投运的火电单轴全速最大功率汽轮机是原苏联列宁格勒金属工厂制造的 23.5MPa/540℃/540℃超临界 1200MW 汽轮机，一次中间再热、冲动式、五缸六排汽、低压末级叶片高度 1200mm， $n = 3000$ r/min，设计热耗 7650kJ/(kW·h)，于 1982 年 12 月正式投运；列宁格勒金属工厂现在正在设计开发火电 1600MW 单轴超临界汽轮机，还准备进一步研制火电 2000MW 单轴超临界汽轮机（该厂已设计了全速 1300、2000MW 的核电汽轮机，低压末级叶片高度为 1500mm 的钛合金叶片，由于切尔诺贝利核电站事故等缘故，投产试制已搁置起来）；20 世纪最大功率的核电汽轮机是 GEC-AL STOM（阿尔斯通）公司制造的 7.1MPa/286.3℃、功率为 1531MW 的汽轮机，冲动

式、单轴、四缸六排汽、1500r/min，低压末级动叶片高度为1450mm，首台产品于1992年在法国Chooz核电站投运。前苏联ЛИКТИ正在全力推进2000MW的高参数全速汽轮机的开发工作。增大单机功率不仅能迅速发展电力生产，而且具有下列优点：

(1) 单位功率投资成本低。如前苏联800MW机组的单位功率成本比500MW机组的低17%，而1200MW机组的单位功率成本又比800MW机组的低15%~20%。

(2) 单机功率越大，机组的热经济性越好。如法国的600MW机组的热耗率比125MW机组的热耗率降低了276.3kJ/(kW·h)，即每年可节约标准煤4万t。

(3) 加快电站建设速度，降低电站建设投资和运行费用。列宁格勒金属工厂认为：1200MW的单轴汽轮机与800MW单轴汽轮机相比，电站投资可降低4%，发电成本可降低2.5%。

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及以上容量的机组，蒸汽参数采用亚临界(16~18MPa)或超临界压力(23~26MPa)，蒸汽初温度多采用535~566℃，甚至采用超超临界参数，通常认为超超临界参数是指压力达到30~35MPa，温度达到593~650℃或者更高的参数。还有一种观点认为，温度566℃事实上一直是超临界参数的准则，任何超临界新汽温度或再热汽温度超过这一数值时，则被认为是超超临界参数。例如，美国早在20世纪50年代后期就生产出34.4MPa/649℃/566℃/566℃的325MW超超临界汽轮机，1958年投运，但这台汽轮机的运行情况不理想，后降低参数为31MPa/610℃/566℃/566℃运行。

随着蒸汽参数的提高，早期超临界汽轮机在投运后都程度不同地遇到了可靠性下降的难题。据美国爱迪生研究所发布的报告，若1000MW机组强迫停运率增加1%，所造成的损失将使汽轮机功率增大和蒸汽参数提高所产生的收益丧失殆尽。20世纪60年代至80年代初期，电站汽轮机的蒸汽参数呈下降趋势，不少亚临界汽轮机的蒸汽温度下降至535~540℃，如图1-2所示。

20世纪80年代后期，随着科学技术和制造工艺的进步以及材料技术的发展，国外电站汽轮机蒸汽参数又出现增长趋势。火电汽轮机的蒸汽参数出现高温高压化倾向，大功率超临界机组的可用率、可靠性和运行灵活性也都达到了亚临界机组的水平，目前，较经济的亚临界汽轮机容量普遍采用300和600MW等级。而对于容量为600~1000MW等级的汽轮机，国外一些公司更趋向于采用超临界参数以提高机组效率。一般而言，24.1MPa/538℃/566℃超临界机组热效率可比同量级亚临界机组提高约2%~2.5%，并且已经发展到成熟阶段，在经济发达国家中广泛应用并得到了显著的节能和减少污染的效果，由于其具有高效、节能和环保的明显优势，将成为我国21世纪很具竞争力的燃煤火电机组。

各国提高功率和蒸汽参数的计划不但早已制订，并正在付诸实现。日本和德国汽轮机制造企业

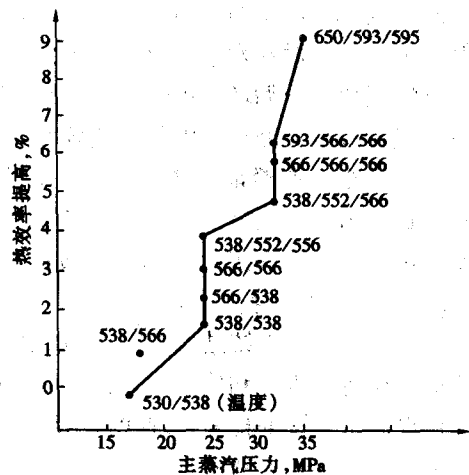


图 1-2 蒸汽参数对热效率影响的变化曲线

业处于领先水平。20世纪蒸汽参数最高的百万千瓦级大功率汽轮机是日本三菱公司和日立公司生产的 24.5MPa/600℃/600℃超临界 1000MW 汽轮机。三菱公司的机组型式为一次中间再热、反动式、双轴、四缸四排汽、低压缸末级叶片高度为 1168mm、3600/1800r/min，发电热效率达到 44%，首台产品 1998 年 6 月在日本三隅（1 号）投运。日立公司的机组型式为一次中间再热、冲动式、双轴、四缸四排汽，3000/1500r/min，低压末级叶片高度为 1041.1mm，发电热效率为 44.74%，首台产品 1998 年 6 月在日本原町（2 号）投运。三菱公司生产的橘湾（1 号）25MPa/600℃/610℃的 1050MW 汽轮机也已安装投运。东芝公司已完成 625℃的 1000MW 超临界汽轮机设计。预计日本在 21 世纪初就有可能达到蒸汽参数为 31 ~ 34.5MPa/650℃/610℃。德国 SIEMENS（西门子）公司除了与日本富士电机公司合作开发了 600℃的超临界 750 ~ 1000MW 汽轮机外，还自主开发了 26MPa/580℃/600℃超超临界 965MW 汽轮机，于 2002 年投运，其热效率为 45.2%（SIEMENS 亚临界 600MW 机组的热效率为 35.5%）。SIEMENS 为丹麦 Elsam 电力公司生产的 32.5MPa/610℃/630℃大功率超超临界汽轮机，预计在 2005 年投运，据说热效率可达 50%。欧洲 ABB 公司（ABB 公司发电部 2000 年与 ALSTOM 公司合并）已有 30MPa/605℃/635℃汽轮机，该公司的最终目标是生产 32MPa/620℃/650℃的超超临界汽轮机。美国 GE 公司在 20 世纪 70 年代，蒸汽参数大部分采用 24.2MPa/538℃/538℃，450 ~ 750MW 等级超临界机组，目前开发了 32.6MPa/593℃/593℃超超临界 360MW 汽轮机，完成了参数为 31MPa/593℃/593℃/593℃超超临界 700MW 汽轮机设计及 25MPa/600℃/610℃超超临界 1100MW 汽轮机设计。

3. 普遍采用中间再热

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，为提高蒸汽初压创造了条件，从而可提高机组内效率、热效率和运行可靠性。

采用一次中间再热一般可使热效率相对提高 5%，二次中间再热，还可使热效率相对再提高 2.0%。对于亚临界机组一般采用一次中间再热，而对于超临界机组，可以采用一次中间再热，也可以采用二次再热。目前，国外超临界一次再热机组热效率一般可达 40% 以上，超超临界二次再热机组的热效率达到 45% 左右。

4. 采用燃气—蒸汽联合循环，以提高电厂效率

20 世纪 80 年代以后，燃气—蒸汽联合循环电站快速发展，目前以天然气和油为燃料的燃气—蒸汽联合循环发电效率已达 50% 以上，技术已经成熟；以煤为燃料的联合循环，例如整体煤气化联合循环（IGCC），在我国也在筹划建设中。

燃气轮机联合循环发电具有热效率高、容量大、少用水、系统简单、自动化水平高、低成本、污染小、调峰能力强等优点。国外发展非常迅速，目前以 GE、SIEMENS、WH（西屋）、ALSTOM、三菱等公司为核心，形成了重型燃气轮机高度垄断的局面。其先进的单轴联合循环机组最大功率接近 500MW，最高发电热效率达 60%。

5. 提高机组的运行水平

机组容量大，系统结构复杂，相应地发生事故的因素也增多，其安全可靠性降低。为了提高机组运行、维护和检修水平，以增强机组运行的可靠性，引入计算机技术，使得机组的自动化控制水平逐渐提高，现代机组增设和大大改善了保护、报警和状态监测系统，有的还配置了智能化故障诊断系统。

随着电网容量的不断增大，调峰任务也势必落到大机组上，因此大机组在结构、系统方

面应能适应变工况运行的性能要求。经常保持主辅设备和系统的优化运行，以提高机组运行的经济性，并保证规定的设备使用寿命，这是评价大容量机组技术水平的重要标尺。

从现代大型汽轮机的发展情况看，发电设备总的发展趋势是向大容量、高参数、高效率、低污染、高可靠性、负荷适应性、经济性、自动化方向发展。

6. 现代大功率汽轮机的结构特点

(1) 汽轮机级数多，采用多汽缸、多排汽口结构。

(2) 汽缸采用内、外双层或多层结构。

(3) 高、中压汽缸采用分流合缸或分缸结构。一般来说，对亚临界参数的汽轮机，功率在 300~400MW 及其以下功率的机组宜采用高、中压合缸结构，而对于 500~600MW 及更大容量的机组宜采用分缸结构。超临界参数的机组多采用分缸结构。

(4) 采用单独阀体结构。大功率汽轮机采用了把蒸汽室和调节阀从高压缸的缸体上分离出去，设计成单独的蒸汽室—调节阀体的结构型式，并布置于汽轮机两侧的基础上。

(5) 采用长低压末级叶片。目前，世界上最长的汽轮机叶片为 1450mm，用于 1531MW、1500r/min 的核电汽轮机上。我国大机组一般额定转速为 3000r/min，实用最长的叶片为 1000~1050mm。

(6) “后加载”高效静叶型，又称为“鱼头”叶型。这是 20 世纪 80 年代后期国内外开始研制的新一代高效率透平叶型。图 1-3 为传统叶型和后加载叶型的示意图。传统的汽轮机叶栅速度分布规律为“均匀加载”型或“前部加载”型，而“后加载”叶栅的最大气动负荷位置明显地向下游方向移动，图中圆圈所示的三个区域最为体现这种叶型的特征：

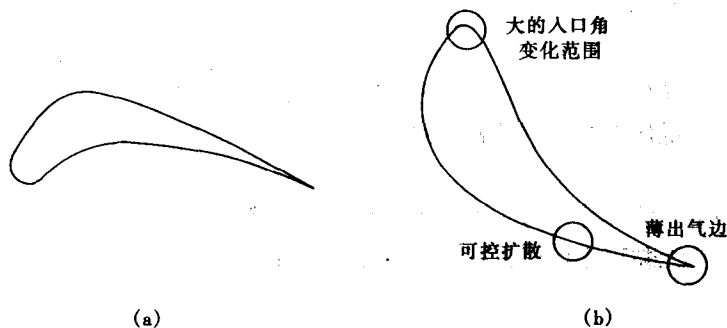


图 1-3 传统叶型和后加载叶型

(a) 传统叶型；(b) 后加载叶型

- 1) 叶片表面最大气动负荷在叶栅流道的后部，减少二次流损失；
- 2) 吸力面、压力面均由高阶连续光滑样条曲线构成，减少叶型损失；
- 3) 叶片前缘小圆半径较小且具有更好的流线形状，在来流方向（攻角）由 $-30^\circ \sim +30^\circ$ 的大范围变化时，仍保持叶栅低损失特性，而老叶型的这一范围约为 $\pm 20^\circ$ ；
- 4) 叶片尾缘小圆半径较小，减少尾缘损失；
- 5) 叶型最大厚度较大增强了叶片刚性。

实验表明，采用后部加载叶型，可以提高效率 1.5%。

(7) 全三维先进设计体系分析通流部分。汽轮机技术进步大体可分为三个阶段：1980 年以前为第一代，以实验气动力学为基础，汽轮机设计以平均截面上—维流动的计算为主，

叶片广泛采用直叶片和自由涡流型的正扭转叶片；20世纪80年代为第二代，计算气动力学逐步代替实验气动力学，出现了以可控涡概念为代表的二维设计理论，叶片按较为复杂的造型规律扭转，利用流线的反曲率改善反动度沿叶高的分布，使级效率可提高约1.5%；90年代进入第三代，即以计算气动力学为主，全三维设计概念开始应用，其突出代表是弯扭联合成型的弯曲叶片，又称马刀形叶片。图1-4给出了三代叶片的结构形式。

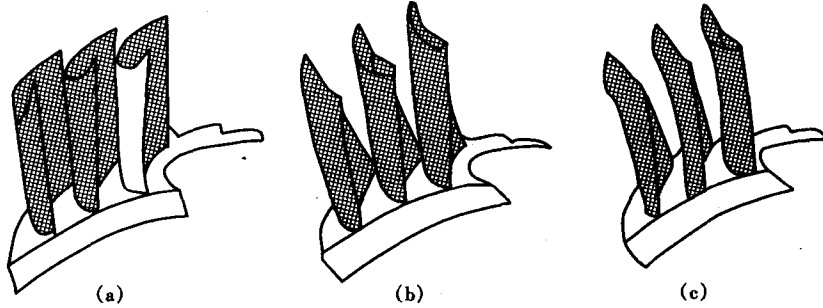


图1-4 三代叶片的结构形式
(a) 直叶片；(b) 扭曲中片；(c) 弯扭叶片

目前，以一维、准三维、全三维气动热力分析计算为核心的汽轮机通流部分设计方法已用于工程设计和实践，弯扭联合成型全三维叶片其效率比第二代汽轮机（可控涡设计）提高约1.5%。这一设计体系主要特征是：

- 1) 对静、动叶片不同截面叶型的流动性能进行详细的一维、准三维计算分析与设计优化。
- 2) 对静、动叶栅内部的流动进行全三维计算分析与设计优化。
- 3) 对高、中、低压缸多级汽轮机各级静、动叶栅的相互匹配进行准三维与全三维流场计算与设计优化。
- 4) 对所有的动、静叶片进行三阶样条的平面光滑及三维造型。
- 5) 使用先进的无黏程序可以进行快速的单级和多级连算，沿叶高保证动、静叶片能够适应进角的变化。
- 6) 对通流部分的一维、二维和三维流场进行详细的有黏分析，包括单级计算和多级连算，考虑多级之间的影响，确保级与级之间能够进行合理的匹配，使设计能够接近真实的流场情况。

(8) 采用弯扭叶片、斜扭叶片。此两种叶片是综合可控涡和叶片力原理设计的。根据最新的气动及试验分析表明，提高级效率的主要方向应以减少二次流损失为主。二次流损失是由于叶栅内气流与边界层互相干扰而产生的，它与叶型、节距、叶高、壁面形状、折转角和反动度分布等因素有关，其中尤以折转角及反动度影响最大。根部反动度增加时减少了根部边界层向主流的扩展，顶部反动度减少则有利于减少主流向边界层的流动及漏汽损失。折转角的减少也有利于降低二次流损失。由于叶片级根部段的二次流大于顶部，因此提高根部反动度，减少根部折转角的效果较大。所以如何控制大扇度的环形叶栅流道中的径向压力梯度和横向压力梯度，以减小二次流的强度，是改善低压级大扇度环形叶栅气动性能，提高级效率的关键所在。

20世纪90年代前后,随着计算机技术的发展,叶片设计者可以通过叶片的斜置或弯曲的方法,产生叶片力在径向的分力 F_r ,而径向压力梯度与径向分力是密切相关的,于是设计者可以利用叶片力大小和方向来控制叶栅流道内径向压力梯度的大小和方向。如在叶片的根部,将叶片正倾斜,此时叶片力为负值,只要将倾斜角(折转角)控制适当,在叶片根部便可得到负的径向压力梯度,在这样的负压梯度作用下,叶片表面的附面层不再向根部迁移、积聚,而是被吸入流道中部,被主气流带走,从而使根部的气动性能得到明显的改善。反之,在叶片的顶部,将叶片作负倾斜,此时叶片力为正,于是在叶片顶部形成了正的径向压力梯度,在这样的压力梯度作用下,顶部端壁附面层被吸入主流,减弱了顶部的二次流强度,从而使顶部的气动性能得到改善。由此可知:由叶根正倾斜(即根部向内弧方向倾斜),顶部负倾斜所构成的弯曲叶片(弯扭叶片、弓形叶片、马刀形叶片)沿径向呈弯曲状,在流道内使静压沿叶高呈C型分布,如图1-5所示。这样一来,两端的低能气流压向主流区,从而减少了端部损失。

以全三维弯扭叶片为代表的新一代汽轮机已成为当代汽轮机行业的制高点技术。目前世界上几乎所有主要的汽轮机和航空发动机生产厂家,如GE、WH、ABB、GEC、ALSTOM、三菱、日立、SIEMENS、RR、PW以及我国哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂、上海汽轮机厂、北京重型电机厂等,均已将弯扭叶片应用于实际机组中,并已投入运行。

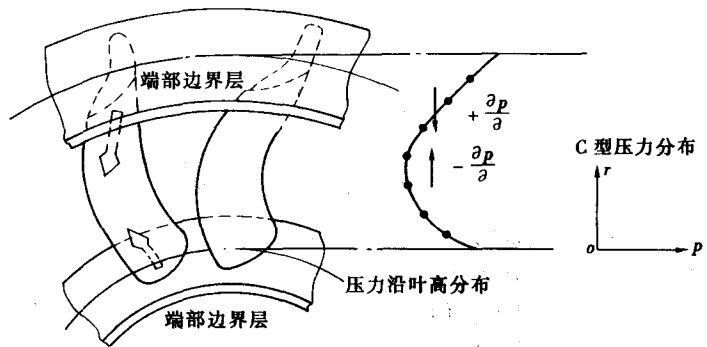


图1-5 弯曲叶片沿叶高的C型压力分布

随着长叶片气动性能的日臻完善,叶片的工艺难度和要求也越来越高,特别对大功率汽轮机而言,低压末级叶片的长度较大,在叶片加工和隔板浇铸过程中,由于叶片的收缩率和变形量较大,难以控制它的弯曲度和倾斜度。因此要求能设计出既具有弯曲叶片气动性能的优点,而工艺难度又不大的新型叶片——斜扭叶片。把斜置和扭曲两种手段结合起来,提出叶片根部反扭,顶部正扭,再复合以适当正倾斜的斜扭叶片。上海汽轮机厂300MW优化机组末级新的905静叶就是采用斜扭叶片,而原905静叶是根据可控涡原理设计的径向反扭叶片。倾斜角为 12° 时,斜扭叶片的气动性能最为良好,其平均能量损失系数 $\bar{\xi} = 0.05$,而原905静叶的平均损失系数 $\bar{\xi} = 0.069$,两者相比,新的905斜扭静叶的能量损失系数降低了1.9%,气动效率提高1%左右,可以与马刀型弯扭叶片相媲美,达到20世纪90年代国际同类产品的先进水平。

(9) 采用可调式汽封(布莱登汽封)。近年来,大型汽轮机汽封设计多采用可调式汽封,即随着机组启动运行工况的变化,汽封间隙是自动进行调整的,始终保持在最佳间隙状态,因而可明显提高汽轮机在启动时的安全可靠和正常运行下的经济性。

(10) 采用蜂窝式密(汽)封。从2002年起,蜂窝式汽封开始试用。图1-6为其结构示意图,从图中可看出,它保留了传统高低齿迷宫汽封的高齿,而用蜂窝带取代其低齿部

分，即在两个相邻高齿之间用高温真空钎焊技术焊接上正六边形蜂窝带。蜂窝带（见图 1-7）由厚度为 0.05~0.1mm 的不锈钢板（如 0.05mm 厚的高镍合金箔片）加工而成，其材质硬度小，不会对与其相接触的转轴产生磨损，只会自身被磨掉，蜂窝带叠合成正六边形，使其在高度方向上强度较高，不会在接触时被压溃。

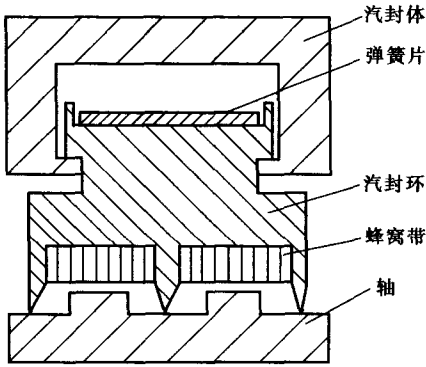


图 1-6 蜂窝式汽封结构示意图

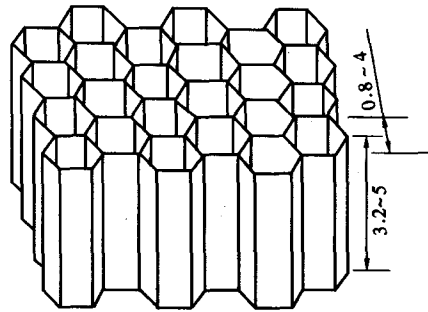


图 1-7 蜂窝带示意图

蜂窝式汽封密封原理其微观分析是复杂的流体动力学问题，这里仅作一宏观分析。蜂窝密封是气（汽）体流过蜂窝带时产生阻尼所造成的。一方面由于汽封两侧的压差会使气（汽）体沿转轴的轴向流动，另一方面由于转轴的高速转动又要带动气体沿轴的切向运动，受到两方面力作用的气体流经环绕转轴的蜂窝状结构的蜂窝带表面时，受到蜂窝对气体产生的轴向和切向的阻力，使之在每个蜂窝表面形成气流旋窝，犹如一个具有很强张力的“气泡”，而整个蜂窝汽封带表面则形成由均匀分布的“气泡”构成的一层气膜，它具有很强的张力和弹性，对气流产生相当大的阻尼，阻止气体进一步前进，起到良好的密封效果。同时，因各个蜂窝的“气泡”在蜂窝带气膜层内是均匀而轴对称分布的，它们对气流运动的阻力也就均匀分布，转轴与蜂窝带接触时是一个很宽的密封面 [以轴凸台宽“密封”，凸台宽对应 N 个蜂窝时，就相当于增加了 $(N-1)$ 个低齿参与密封，因此比传统迷宫汽封的低齿以齿尖密封效果好，可减少 30%~50% 的漏汽量] 接触，相当于力作用于一个平面上，接触面局部压强很小，且中间隔有很强张力和弹性的气泡膜层，保证汽封的有效退让，使弹簧片真正起到作用。而且蜂窝汽封在切向及轴向都有阻尼，有效阻止了气（汽）体在周向的运动。而迷宫汽封由于在周向没有阻尼，气体的高速周向运动是造成转子气流激振的主要原因。因此，蜂窝汽封不仅有较好的密封效果，而且使转轴运转时，有很好的稳定性和安全可靠性。

近年来，大型汽轮机低压部分汽封设计多采用蜂窝汽封，如我国新一代优化引进型 300~350MW 机组，低压缸采用此汽封，超超临界机组，低压缸去湿防水蚀，尽可能采用新型的蜂窝式汽封；老机组汽封改造也采用蜂窝汽封。

(11) 采用自密封式汽封。

(二) 汽轮机发展概况

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)、日本的东芝和日立、意大利的安莎多以及前苏联的列宁格勒金属工厂 (JIM3)、哈尔科夫透平发动机厂 (XTT3) 和乌拉尔透平发动机厂 (YTM3) 等。