

600MW 火电机组运行技术丛书

600MW HUO DIAN JI ZU YUN XING JI SHU CONG SHU

汽轮机分册

中国华东电力集团公司科学技术委员会 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

600MW 火电机组运行技术丛书

汽轮机分册

中国华东电力集团公司科学技术委员会 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从对火力发电厂设备进行全过程管理的观点出发,重点介绍了从国外引进的 600MW 汽轮机组,特别是 600MW 超临界汽轮机组的启动调试和运行技术经验。主要包括:4 种 6 台 600MW 汽轮机本体、热力系统及其辅助设备的主要结构及技术特点;对安装、启动、调试、运行过程中发现和发生的主要问题的分析及处理;机组的常规启停、中压缸启动、运行方式、滑参数停机、强制冷却;机组的全过程管理,主要包括电厂设计、设备招标评标、启动调试、运行管理、可靠性统计分析、汽轮机寿命管理、机组性能考核、运行经济性分析和运行管理、对机组实现状态检修的展望等。

本书可供从事新建、在建和已建的单机容量为 600MW 及以上机组的安装、调试、运行的工程技术人员和管理人员参考,也可供大专院校热动专业教学以及汽轮机制造行业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机/华东电业管理局科学技术委员会编著. - 北京:中国电力出版社,1999

(600MW 火电机组运行技术丛书)

ISBN 7-5083-0050-5

I. 汽… II. 华… III. 汽轮发电机-600MW-电力系统运行-基本知识 IV. TM311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 13226 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>)

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 1 月第一版 2000 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 15.25 印张 369 千字
印数 0001—5000 册 定价 25.00 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)

《600MW 火电机组运行技术丛书》

编 审 委 员 会

主 副 委	任 主 任 员	刘维烈		
		许国新	张 谦	吴大卫
		(按姓氏笔画排列)		
		王忠庆	王惠挺	邓国柱
		叶新福	乐长义	冯亚民
		朱建跃	刘崇和	杨新村
		李一新	邵关兴	沈佩华
		张立人	罗光华	金留根
		周新雅	赵 津	赵永源
		赵耀钟	茹 欣	施韵和
		徐惠兴	唐伯仁	程黎明

分 册 主 编 人 员

锅 炉 分 册	乐长义	周新雅
汽轮机分册	唐伯仁	邵关兴
电 气 分 册	施韵和	杨新村
仪 控 分 册	赵 津	冯亚民

序

20 世纪 80 年代,我国改革开放步伐加快,集资办电政策出台,华东电网发展面临新机遇,建设 6 台 600MW 火电机组,正此一时期之产物。1989 年 11 月,平圩电厂首台 600MW 机组投产,此后三年,北仑电厂、石洞口二厂和平圩电厂 4 台 600MW 机组相继投入运行,约占同期华东电网新增发电容量之四成,三省一市用电获益匪浅。1994 年 10 月,北仑电厂 2 号机组投产。至此,华东电网拥有 600MW 火电机组 6 台,为当时国内电网所罕见。

上述 600MW 火电机组中,装于安徽淮南平圩电厂之两台机组系哈尔滨三大动力设备厂引进美国 CE 公司和西屋公司技术制造;位于浙江宁波之北仑电厂 1 号机组由美国 CE 公司和日本东芝公司提供锅炉和汽轮发电机,2 号机组则由加拿大 B&W 公司和法国 ALSTHOM 公司供货;上海华能石洞口第二发电厂两台超临界机组之锅炉由 CE-SULZER 联合制造,汽轮发电机系瑞士 ABB 公司生产。总体而言,平圩电厂引进型机组技术相当国外 70 年代水平;北仑电厂进口机组相当国外 80 年代初水平;石洞口二厂进口超临界机组相当国外 80 年代中期水平。此类机组投产,使我国火电机组运行技术水平步入新境界。

600MW 火电机组加盟,推动华东电网 500kV 主网架之建设和发展,并对 500kV 电网安全稳定运行,起举足轻重之作用。600MW 机组之良好调峰性能和效率指标,更为华东电网优质经济运行,注入有利因素。因此,各方对其寄予厚望,不时倾心关注。600MW 机组投产初期,设备不够稳定,缺陷故障频发,三电厂进行大量工作,先后完成 110 项技术改进措施。华东电力集团公司 1993 年 9 月专门召开 600MW 机组技术研讨会,交流经验,提出对策,确立 38 项技术攻关课题。通过电厂和有关单位共同努力,机组状况有所改善,逐步达到稳发满发。上述 600MW 机组等效可用系数逐年上升,最高者如石洞口二厂 2 号机组近 3 年平均值已达 94%;强迫停运率逐年下降,半数机组近 3 年平均值皆小于 1%。在此期间,吾人克服重重困难,逐步积累 600MW 火电机组有关运行经验。毋庸讳言,某些事故教训亦予深刻汲取。

20 世纪 90 年代,我国经济飞速发展,电力建设步伐明显加快,电网装机容量迅猛扩大,600MW 火电机组已成跨省电网新建电厂之首选机型。华北、东北和山东电网先后开工建设 600MW 级火电机组。为加速其安装和调试进程,1995 年电力工业部领导曾要求华东电网遴选专家协同作战。鉴于电力建设已推行业主负责制,设备通过招标选定,监理根据合同进驻。华东专家对前期工作一无所知,唐突介入,不得要领,冒昧陈言,难以奏效。闻讯不胜惶恐,遂恳请免于成行,代之以书面总结华东 600MW 火电机组运行经验教训,供兄弟网省电力公司参考,或能起“协同作战”之类似作用。此议获部领导理解并首肯。《600MW 火电机组运行技术丛书》得以问世,其源盖出于此。

华东电网上述 600MW 火电机组分布于两省一市之三座电厂,投资主体多元,建设条件有别,设备情况各异,运行时间不一,如何“书面总结”,一时颇费踌躇。所幸三电厂领导

深谋远虑，鼎力支持，承诺提供人员资料，促其实现；中国电力出版社领导高瞻远瞩，慧眼独具，概允丛书纳入重点计划，优先安排出版；华东电力试验研究院领导深明大义，玉成此事，惠许为专家著述提供方便；集团公司科学技术委员会倍感责无旁贷，义无反顾地表态承担组稿、编写和审查重任。六方共襄盛举，“丛书工程”终于启动。

经过充分酝酿，1996年9月，华东电力集团公司科技委在沪召开丛书编写大纲审查会，电厂领导及中国电力出版社编辑与会。考虑篇幅庞大及600MW火发电机组特点，决定按锅炉、汽轮机、电气和仪控专业分册出版。会议审查通过丛书各分册编写大纲，落实分册主编及电厂参编人员，并就组建丛书编审委员会取得一致意见。会后编写工作正式开始。1997年5月中旬，汽轮机分册率先脱稿，即进行体例和术语等审校，嗣后电气、仪控和锅炉分册相继于同年6月、7月和8月中旬交稿。俟体例等审校完成，修改形成初稿，9月科技委发文将其送交三电厂初审，11月底收齐反馈意见，分册主编据以修改形成二稿。1998年1~3月，科技委组织集团公司专家二审，并对部分内容进行调整。5月将修改稿寄中国电力出版社征求意见。7月，丛书编审委员会在沪召开，对书稿进行三审，中国电力出版社编辑与会指导。会后分册主编根据三审意见修订润色、精绘图表，以利付梓。1998年10~12月，各分册三审修订稿陆续寄往中国电力出版社。专家笔耕不辍，审阅斧正有方，主编锲而不舍，督办穷催不怠，寒暑两易，书稿乃成。

丛书冠以“运行技术”，特色不言自明。为切实把握主题，各分册篇目设置划一。第一篇介绍设备概况。考虑集团公司技术委员会（科技委前身）1993年7月曾编写出版《华东电网三台600MW机组技术特点比较》技术报告，凡32万字，流传甚广。为免丛书与报告或拟议出版之类似书籍重复，介绍尽量从简，以阐明设备状况为度。读者若感不足，可参阅上述报告。第二篇讲述设备调试和运行，立意出于调试为运行之基础，运行乃调试之验证，两者相辅相成，不可或缺。丛书不以基建生产划线，重在研讨运行技术。第三篇介绍调试和运行中出现之问题及改进措施，其要义为实事求是。暴露运行问题不避其丑，说明改进措施不厌其详，旨在使国内筹建或在建之600MW级机组单位有所借鉴。第四篇统列全过程管理，其精髓有二：一为通过运行实践检验机组建设全过程，为确保质量提高效益之应兴应革；二为立足科技进步，探讨应用新技术提高机组运行水平，其前瞻性论述必将予人以新启迪。

丛书篇幅浩瀚，总字数逾180万字，按专业分册出版，便于阅读。然某些共性专题必须妥善安排，方能避免零散、雷同或遗漏。如化学水处理系统，机电炉均应涉及，为免重复，锅炉分册设章集中说明，其他分册不再赘述。可靠性管理覆盖全部设备，分册叙述，难以获得整体概念。遂决定汽轮机分册专设一章分析，机组可靠性数据全部纳入，俾便专业人员集中查觅。机组乃一整体，设备关联极多，仪控系统尤甚。分册出版，事出有因。读者阅读中，若能相互参照，多作印证、弥缝其阙，融会贯通，定会收举一反三之效。

书稿甫成，阅后思绪起伏，忆及当年往事，感慨良深。择其要者列后，以竭愚夫千虑。

华东600MW火电机组运行初期出现之问题，部分由于缺乏经验所致，然多数应在可以防范之列，症结即强化设备全过程管理。丛书各分册所以设专篇重点论述，寓意即在于此。我国基建自成体系，由于部门分割，生产人员前期较少介入，及至进入生产准备，眼见

“木已成舟”。审查设计者鲜闻承担运行责任，负责运行者难能选择适用设备。推行全过程管理阻力重重，步履维艰，一言难尽！所幸近年建设项目实施业主负责制，权、责、利统一格局之确立，为推行全过程管理奠定基础。可以预期，对设备质量效能在建设全过程中实施严格有序之控制，我国新建 600MW 级火电机组自投产之日起定会稳定运行，并取得良好经济效益。

600MW 火电机组仪控系统日趋完善，对安全经济运行之重要性已不亚于机电炉等本体。丛书设分册专论仪控，即基于此种考虑。华东机组早期发生之若干问题，部分由仪控系统缺陷引起，经过改进和加强管理，仪控系统备受运行人员信赖，巡回抄表重负顿释。孰料竟导致个别电厂一度疏于运行分析，计算机自动打印之报表，成卷束之高阁，无人问津，以致身历险境而不觉，几陷“拼设备”之泥沼。事故警示吾人，“保设备”仍为电厂天职。即使自动化程度提高，选取仪控系统提供之数据，强化各级人员运行分析，依然是机组安全经济运行重要和可靠之保证。

进口机组落户中国，烧国产设计煤种，用当地合格水源，正常运行，应无大碍。岂料部分机组竟会“水土不服”，当初并未领悟，以致付出不小代价。我国长期处于短缺经济环境，煤炭历来供应紧张，饥不择食，烧“百家煤”已成我国电站锅炉无可奈何之陋习。600MW 机组投产初期未能免俗，煤种依然多变，造成不少严重后果，甚至成为事故诱因。痛定思痛，严格燃用设计煤种，掺烧需经试验论证，已列为事故重要反措。水汽品质长期不受重视，为抢进度，每置之于不顾，且基于中小机组建立之化学技术监督标准偏低，600MW 机组初期因此蒙受一定损失。华东电力集团公司有鉴于此，1993 年紧急制订若干规定，方才扭转颓势。此中教训，足为后来者戒！

600MW 进口机组合同基本引用国际或外国先进技术标准，理应据此安装、调试和运行。建设初期，对此尚有争论。吾人惯用国标，崇尚规程，发现问题，难与外方取得一致。通过长期磨合，逐步形成共识。掌握外国标准，联系中国实际，方能立于不败之地。诚然，引用先进技术标准，难能一蹴而就，既有一认识过程，亦要创造外部条件。如 600MW 机组检修，初仍沿用国内规程，每年 2 次小修，3 年一大修为循环。后经石洞口二厂试行按国外检修模式分 A、B、C、D 四级，延长检修间隔，经济效益显著。集团公司认为条件具备，1994 年开始向华东电网全部 600MW 机组推广，现已达 6 年一循环，使国际先进标准终于植根华夏大地。

进口国外发电设备，既要引进先进技术，更要引进现代化管理，否则将影响机组运行水平之提高。600MW 火电机组采用计算机集中控制，每台设机电炉合一之全能值班员 1 人，与目前国内大机组机电炉分设 3 人之“控制集中”模式大相径庭。解决办法应为强化专业培训，提高人员素质，适应全能上岗要求，断非退而求其次，误入歧途，徒增干扰。往昔对引进现代化管理认识不足，谬以为沿用老办法亦能“管好”600MW 机组，实践证明此路不通。其结果不外安全水平低下，经济效益不高，事倍而功半。1992 年能源部“新厂新办法”政策出台，引起各级领导警觉。此前所作所为，已经难于挽回。华东 600MW 机组电厂，由于建厂时间不同，受历史条件限制，引进现代化管理程度迥异，早期厂人员数倍于后建厂，即为明证。正在建厂者，可不慎欤？

综上所述,600MW 火电机组的问世,决非机组容量之简单增大,实隐含量变引起质变之某种飞跃。面对新生事物,症结依然为认识和观念之转变。倘能用全新理念,高屋建瓴地思考和处理问题,机组运行水平定将提高,并且臻完美境地。丛书虽以论述运行技术为本,然字里行间无不蕴涵“取人之长,为我所用”之基本思路,切盼读者理解其实质而发扬光大。

丛书编写过程中,平圩、北仑和石洞口二厂领导给予大力支持,电厂参编人员提供宝贵素材或撰写部分章节;分册主编抽暇辛勤笔耕,不遗余力,使丛书得以如期问世;审阅人员一丝不苟,直陈所见,使丛书内容增色不少;中国电力出版社编辑不辞辛苦,两次南下,指导编审工作有序进行;华东电力试验研究院领导关注丛书进程,为编印出人出力,使书稿终成正果。在此,谨向他们表示衷心之感谢!丛书倘能为我国正在筹建、建设和运行之 600MW 级火电机组有关人士提供实用信息,全体编审人员将不胜欣慰。由于时间仓促,经验不足,地域局限,丛书谬误欠妥之处在所难免,尚祈读者不吝指教。

中国华东电力集团公司
科学技术委员会主任

刘维烈

1998 年 12 月于上海

汽轮机分册前言

由于电力系统负荷增长及峰谷差的增大,电网中原来所装 300MW 以下的机组已不能满足需要,因此,华东电网从 1989 年开始至 1994 年底止,先后在平圩、北仑、石洞口第二电厂各投入了 2 台 600MW 火力发电机组运行。这 6 台 600MW 机组,不仅单机容量是电网中的最大者,而且在新蒸汽参数、结构、运行性能和自动化水平等方面,均为 300MW 容量以下机组所不及。其中的汽轮机均为一次中间再热、单轴、四缸、四排汽、凝汽式机组。它们中有 4 台为反动式的,另 2 台为冲动式的;新蒸汽参数方面,有 4 台为亚临界的,另 2 台为超临界的。这 6 台机组的实测热耗率虽均未达到保证值,实测平均值为 $7819.9\text{kJ}/(\text{kWh})$,但相对而言还是较低,特别是 ABB 的超临界机组,在更换低压缸后,实测值为 $7547.7\text{kJ}/(\text{kWh})$,这一数值,在同类型机组中不能不谓首屈一指。这些机组在启动、停机和正常运行控制方面均能自动进行,在 30% 额定负荷至额定负荷间运行,负荷可任意调节,值得一提的是 G/A600MW 机组的中压缸启动方式是国内少有的先进方法。尽管这些机组具有以上优点和先进性,但是由于种种原因,在规划设计、安装、调试、运行和管理等方面难免会发生和发现一些问题。本书试图对这些机组在建设过程中和投运后的不久,所发生和发现的一些问题及其分析处理进行总结,以期能给同业者们在将建或在建时起一点抛砖引玉之作用。

本书为《600MW 火力发电机组运行技术丛书》中的汽轮机分册,全书分四篇十七章和附录。本分册由唐伯仁和邵关兴主编。其中第一、二、三、四、七、十四、十五章及附录由唐伯仁编写;第五、六、八、九、十、十一章由平圩电厂操海鹏、陶建国、葛林,北仑电厂章建叶和石洞口二厂王坚等编写,第十二、十三、十六章由唐伯仁和章建叶编写,王坚和操海鹏参与个别章节工作;第十七章由邵关兴编写,章建叶参与部分工作。全书由唐伯仁和邵关兴统稿。

本分册在编写过程中承华东电力集团公司生技处刘崇和、张勇、华能石洞口第二发电厂张巍等为本书提供资料;华东电力集团公司生技处李一新、石洞口二厂王坚、华东电力试验研究院袁伯英、顾宏、顾敏、马丽萍、李颖等协助电脑文字和图形处理;华东电力集团公司赵耀钟进行了全书审阅,并提出了很多有益意见。对以上各位深表感谢。

编 者

1999 年 8 月

第一节	运行管理目标	161
第二节	运行管理措施	163
第三节	运行人员培训	165
第十三章	汽轮机的全过程管理	168
第一节	电厂设计	168
第二节	设备选型及设备招标评标	169
第三节	监造及验收	169
第四节	安装及调试	170
第十四章	可靠性管理	173
第一节	600MW 机组的运行可靠性统计	173
第二节	600MW 机组的可靠性统计分析	176
第十五章	汽轮机的热应力及寿命管理	192
第一节	基本概念	192
第二节	交变热应力及转子的寿命损耗	196
第三节	热冲击	197
第四节	低温脆性	197
第五节	高温蠕变	198
第六节	汽轮机寿命损耗管理	199
第十六章	汽轮机运行经济性及其管理	203
第一节	实测热耗率与设计值的对比分析	203
第二节	运行煤耗率统计与分析	210
第三节	辅机耗电及其分析	216
第十七章	在线监测及故障诊断水平的提高	219
第一节	已有监测装置投用率和正确率的提高	219
第二节	状态监测和故障诊断技术的完善和开发	220
附录	四种引进 600MW 级汽轮机组技术特点汇总	225
参考文献		231

设 备 概 况

第一章 概 况

第一节 简 介

到 1995 年底为止,华东电网已安装的 600MW 汽轮发电机组共 6 台。其中平圩电厂 1、2 号机组是从美国西屋公司(WestingHouse)引进技术,由哈尔滨汽轮机厂制造的,分别于 1989 年 11 月 4 日和 1992 年 12 月 25 日投运;北仑港电厂 1 号机组是从日本东芝公司(TOSHIBA)引进的(美国通用电气公司的制造许可证),2 号机组是从法国 ALSTHOM 公司引进的,1、2 号机组分别于 1991 年 10 月 30 日和 1994 年 10 月 20 日投运;石洞口第二电厂 1、2 号机组是从瑞士 ABB 公司引进的,分别于 1992 年 6 月 11 日和 1992 年 12 月 23 日投产。

第二节 主设备配套简况

平圩电厂 1、2 号汽轮机组为亚临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、反动、双背压、凝汽式,北仑港电厂 1、2 号汽轮机组为亚临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、冲动、双背压、凝汽式,石洞口第二电厂 1、2 号汽轮机组为超临界、一次中间再热、单轴、四缸四排汽、反动、单背压、凝汽式。各机组的技术规范详见附件。

各机组主设备配套情况如下:西屋引进型汽轮机组所配锅炉为从美国 CE 公司引进技术,由哈尔滨锅炉厂制造的亚临界控制循环汽包炉,蒸汽流量为 2008t/h(MCR),主蒸汽压力为 18.3MPa,主蒸汽温度为 540.6℃,再热蒸汽压力为 3.64MPa,再热蒸汽温度为 540.6℃;燃烧方式为燃烧器四角切圆布置,水冷壁装有内螺纹管;热控装置为 FOXBORO 的 SPEC-200 系统,锅炉可定压运行,也可滑压运行,滑压运行范围为额定负荷的 20%~88%;所配发电机也为引进西屋公司技术由哈尔滨电机厂制造的 QFSN-600 型水氢氢发电机。

东芝的汽轮机组所配锅炉为直接从美国 CE 公司引进的亚临界控制循环汽包炉,其主要特性和结构同上述引进技术锅炉,热控装置为美国 CE 公司的 MOD 300,所配发电机为东芝制造的 TAKS 型、额定出力为 659.34MW 的水氢氢发电机。

与 ALSTHOM 公司 600MW 汽轮机配套的锅炉是加拿大 B&W 公司设计制造的亚临界、自然循环、最大连续蒸发量为 2027t/h 的汽包炉,水冷壁管径较粗,为内光管。36 个双调

节旋流式燃烧器，以每组 6 个分上、中、下三排布置在前后墙的中部，形成对冲式燃烧方式。每 6 个燃烧器为一组，与一台磨煤机相连，磨煤机共 6 台。同组 6 个燃烧器，投则同投，停则同停。5 组燃烧器与相应的磨煤机投入就可满足锅炉最大连续出力的要求。锅炉配有美国 CE 公司生产的 MOD - 300 型分散式微机控制系统，与汽轮机的 MICROREC 系统组成协调控制系统。配套发电机为 ALSTHOM 公司制造的水氢氢冷却发电机。

ABB 的汽轮机组所配锅炉为由苏尔寿公司设计、CE 公司和苏尔寿公司联合制造的超临界螺旋管圈直流炉，设计蒸汽流量为 1900t/h，过热蒸汽压力为 25.4MPa，燃烧器四角切圆布置，内置式分离器。热控装置为加拿大 Bailey 公司的 N - 90。螺旋管圈直流锅炉，在 36% ~ 90% MCR 范围内可以变压直流运行，所配发电机也为 ABB 设计制造的 50WT23E - 123600 - 2 型水氢氢发电机。

为便于讨论本书所论及四种汽轮机组的运行技术，以下从第二章到第四章将简要介绍四种汽轮机组及其热力系统和附属设备的主要特点。主要内容为：四种汽轮机整体设计上所具有的特点；为提高汽轮机运行安全可靠性和所具有的特点；为提高汽轮机运行经济性及灵活性所具有的特点；为降低成本、增强市场竞争力所具有的特点。

第二章 整体设计及为提高运行安全可靠性所具有的特点

第一节 整体设计特点

ABB 公司、西屋公司、东芝公司（GE 公司设计）、GEC - ALSTHOM 公司（以下分别简称 ABB、WH、东芝和 G/A）等制造厂制造的 600MW 汽轮机组，它们共同的特点之一，是采用了通用化、系列化和标准化设计原则。在主机设计方面均采用了积木块式的设计方法，例如：高、中、低压缸的组合，根据用户要求可任意组合成容量不同的机组。与主机配套的设备或装置也大都都是组装式结构，例如 DEH 系统、EH 系统、润滑油系统、发电机氢冷却系统、高压自动主汽门及调节汽门、中压主汽门及调节汽门等均组合成一体，独立布置。由此，给制造带来了很大的方便，同时也方便了运输、安装、检修及运行维护等。

近年来，随着电力设备行业的发展，ABB 极力推行设计工作程序化。新产品设计计算时，均有章可循，并有相应资料需查阅，设计计算人员不能随心所欲。一般主要部件关键尺寸的确定都需查阅相应的手册性资料，因此，此类资料齐全，并定期完善和充实。相同机组及关键部件的性能计算也都有确定的程序可应用，并定期修改和完善。这样，产品设计就能够做到通用化、系列化和标准化。

在本书所论的四种机型，它们的又一共同特点是：整体结构是一次中间再热、单轴、四缸四排汽、凝汽式，而且均为喷嘴调节。但它们之间又具有较大的不同点和差别，主要为：WH、ABB 机组为反动式，东芝、G/A 机组为冲动式；ABB 机组为超临界参数，WH、东芝、G/A 机组为亚临界参数；ABB 机组的凝汽器为单背压，WH、东芝、G/A 机组为双背压等。

第二节 叶 片

叶片是汽轮机工作的关键部件，而且数量很多，任何一个叶片损坏都将直接影响整台机组的安全运行。因此各个汽轮机制造厂对叶片的设计、制造均十分重视。以下分级段介绍有关机组叶片的特点。

一、调节级叶片

大机组调节级叶片的工作环境恶劣，其受力情况复杂。WH600MW 机组的调节级叶片为冲动式，叶根采用三销、三叉的结构。东芝的 600MW 机组调节级叶片为冲动式宽型叶片，复环为轴向双道，叶根为外包型（菌型）。G/A600MW 机组的调节级叶片也为冲动式，叶根为枞树型轴向装入。

ABB 的超临界 600MW 机组的调节级采用了整体组焊式调节级动叶片。也就是把叶片、围带组焊成整圈，然后再与叶轮组焊。据制造厂介绍，这种组焊式的调节级动叶结构具有很多优点：即叶根部分没有组装式的应力集中问题和松动的麻烦；整个叶片环加工完毕后进行

整体热处理，焊接处的材料特性较均匀；叶片围带焊成整圈后，叶片的成组系数大大提高，叶片动应力大大降低，能满足超临界参数的运行要求。缺点是个别叶片损坏后无法修理。

ABB 的超临界 600MW 机组的调节级叶片原设计型号选用 AS85/27/22，机组投运约 9000h 发生了调节级断叶片（断三片，详见第三篇第十章），后更换高压转子，调节级叶片型号改为 AS100/27/22。

二、中间级叶片

中间级叶片范围较广，它包括自调节级后第一压力级直至低压缸的前几级（一般前三级）。中间级叶片的工作条件较调节级和末几级平稳，但因级数多，故对整机的安全性和经济性影响较大。

1. WH 公司机组

WH600MW 机组的调节级以后的各级均为反动级叶片。但高、中压缸的静叶环采用类似冲动式汽轮机的隔板结构，并设有弹性汽封，以减少级间的漏汽损失。反动级动、静叶片型线的进汽边，采用了对进汽角度变化范围适应性较大的大圆弧进汽边的叶型。这种出汽边薄，进汽边圆弧半径大的厚叶片，具有良好的强度性能，同时在较小的进汽角和进汽角在较宽范围内（ $65^{\circ} \sim 95^{\circ}$ ）变化时，仍具有良好的气动性能，即使在级数少、速比（ u/c_0 ）较低的情况下，仍能保持相当水平的效率。这样，就使本机的级数比典型的反动式汽轮机少得多，结构较为简单。

低压缸的最后三级动叶片和两级静叶采用变截面的扭叶片，其余各级动、静叶片全部采用等截面的直叶片。为使高、中压缸最后几级叶片的径高比大于 8，满足直叶片条件，对机组效率不致影响过大，高、中压缸通流部分的轴向流道均设计成斜通道结构，即转子的根径沿汽流流动方向逐级增大，且静叶和动叶根部和顶部的流道与轴向中心线成一定的倾斜角度（从进口向出口逐渐扩大），围带内侧和叶片流动方向倾斜角度一致，外侧仍和转轴中心线保持平行。这种结构可提高通流效率。

除末级叶片用拉筋分组连接、次末级为自由叶片外，其他各级动、静叶片均设有围带和叶根径向汽封。整个通流部分，轴向间隙都设计得较大，各级围带的径向汽封齿数多，间隙较小，围带与汽封齿的密封面保持与转子的轴向平行（非迷宫型）。这样，既使机组的运行经济性较好，又允许较大的相对膨胀，使启停的灵活性和可靠性增加。

除调节级外，其余各级叶片叶根均为轴向装入式、枞树型。次末级和末级为圆弧四齿枞树型，其余各级为直线三齿枞树型。

WH 的 600MW 机组的叶片级数为：（高压缸调节级 + 10 级反动级）+（中压缸 2×9 级反动级）+（低压缸 $2 \times 2 \times 7$ 级反动级）= 27 级 57 列。

2. 东芝公司机组

东芝的 600MW 机组中间级为冲动式，各级叶片采用可控漩涡法设计，中间级叶片均为变截面扭叶片。高中压缸采用焊接式隔板，低压缸采用铸造式隔板。隔板汽封和复环汽封均采用梳齿式汽封。除末级叶片外，所有各级叶片叶根均为外包式（菌型）叶根。机组叶片级数（高压缸调节级 + 7 级压力级）+（中压缸 2×6 级压力级）+（低压缸 $2 \times 2 \times 5$ 级压力级）= 19 级 40 列。

3. G/A 公司机组

G/A 的 600MW 机组中间级均为冲动式，高压缸全部为直叶片，中低压缸全部为扭叶

片。高、中、低压缸的前三级动叶片均有复环，而静叶均为隔板结构，两个低压转子的第1至第3级叶片是自带菱形围带的扭叶片。围带具有0.6mm的预扭紧力，第1、2级叶根均为三叉型，第3级为五叉型，第4级为自由叶片。叶根为松装枫树型，底部有弹性销。机组叶片级数：高压缸1+8级，中压缸9级，低压缸 $2 \times 2 \times 5$ 级，共23级38列。

4. ABB公司机组

ABB的600MW超临界机组，整个机组除调节级、末级和次末级动叶外，其余各级（中间级）动叶均采用单只整铣叶片，预扭安装。叶片型线为8000型。该型叶片虽是等截面直叶片，但对进汽角的变化不敏感，当进汽角约在 50° 范围内变化时其损失几乎不变。这是ABB在该机上不用较多级扭曲动叶的主要原因。8000型动叶片均自带围带，叶根为周向“T”形或双“T”形，叶片与叶片间夹有一个隔叶垫片，用以调整叶片节距。封口叶片的隔叶垫片为两只半垫叶，中间夹有锁紧销子。叶轮槽子没有轴向窗口。

由于中压缸的进汽温度为 566°C ，故中压缸的第一级叶片采用ST17/13材料（相当于我国的Cr17Ni13W材料）。此种材料耐高温性能好，许用应力高。除中压第一级外，其余各中间级叶片，均为ST12T材料（相当于我国的2Cr13材料）。

等截面叶片采用预扭安装，即在安装时将叶片复环相对于叶根扭转一个角度，在运行时，由于在离心力的作用下，复环要彼此分开，它相对于叶根又回转一个角度，仍然保持复环之间的紧密接触。叶片预扭角必须控制在一定范围内。如太大，会使叶片产生塑性变形，运行时不能向回扭转；如预扭太小，则会使复环之间运行时仍存在间隙，达不到预扭的目的。预扭角的大小与叶片高度和弦长有一定关系。各种叶片的预扭角，可以用专用程序计算。

叶片预扭后，叶片的单独振动不复存在，与叶轮混为一体，且叶片的成组系数接近于1，叶片刚度大大提高。ABB的超临界600MW汽轮机的所有中间级叶片，其固有振动频率与转子工作转速频率之比均大于4.4，属于不调频叶片。

ABB的600MW汽轮机，其高、中压缸的静叶均直接装在内缸静叶槽内。而低压缸则是每只低压缸内用4只静叶环，所有静叶均装于静叶环上，再将静叶环装于汽缸内。

静叶型线和动叶一样，均为8000型。有的自带复环，采用预扭安装，叶根两侧各有一只安装槽；另一种为铆接复环，叶根只有一只安装槽，不预扭安装。高压缸的第一、二两列静叶以及中压缸第一列静叶均采用预扭安装。ABB规定：调节级后的第一列静叶，必须为预扭安装，但一只缸内最多只能有3级为预扭。

ABB规定，预扭静叶的固有振动频率与转频之比大于4.4时为不调频叶片，也不考虑动叶出汽边引起的激振力。不预扭静叶的固有振动频率必须算出四种振型，即轴向振型、切向振型、单节点振型和扭转振型。固有振动频率与转频比大于4.4时可不调频，低于4.4时须调频，并且要避开动叶出汽边引起的激振力。

机组叶片级数：高压缸1+21级，中压缸 2×17 级，低压缸 $2 \times 2 \times 5$ 级，共44级76列。

三、末级叶片

大型汽轮机的末级叶片，是衡量该机技术水平的重要标志之一。

WH600MW机组的末级叶片工作高度为869mm，用拉筋分组连接。叶片近顶部进口背部焊有与叶片型线相同的硬质合金，用以防止水蚀。

东芝 600MW 机组末级叶片工作高度为 851mm，叶片近顶部进口背部焊有与叶片型线相同的硬质合金，用以防止水蚀，叶根为叉型插入式。

G/A600MW 机组末级叶片工作高度为 1050mm，是四种 600MW 机组中末级叶片最长的机组。叶片为自带拉筋的半自由叶片，各拉筋间均留有间隙，叶根为松装枞树型，底部有弹性销，叶片上部用高频淬火防水蚀。

ABB 超临界 600MW 机组末级叶片的工作高度为 867mm，在背弧进口侧、自叶顶向下 150mm 的范围内进行高频淬火使其硬化，以防水蚀。另在末级前设有抽汽口，将带有大量水珠的湿蒸汽抽至加热器，减少进入末级叶片蒸汽中的水分。另外，又采取在不影响末级叶片效率的前提下，拉大静叶与动叶间的轴向距离，以使水滴撕裂，减少水点对叶片的冲蚀。末级和次末级叶片均为自由叶片，且为调频叶片，叶根为轴向纵树型。

第三节 转 子 结 构

一、整锻转子

大型汽轮机组的转子广泛采用整锻转子。整锻转子的叶轮和主轴是一体锻造出来的，所以，不存在键槽应力腐蚀开裂和套装件的松弛等问题，比套装转子具有明显的优越性。整锻转子的应用主要取决于钢厂的冶炼水平和钢锭的质量。通过钢包精炼、真空注锭和多种重熔工艺，使锻件芯部夹杂物含量和偏析程度大大降低。随着鼓风冷却和喷水冷却工艺的日益完善，转子热处理后的性能得到提高，不同部位性能差异减少，而且组织均匀，晶粒细小，为转子高灵敏度超声波探伤创造了条件。同时，也能得到较低的脆性转变温度（FATT），从而保证了整锻转子良好的机械性能和启动运行的灵活性。

WH 的 600MW 机组的高、中、低 A、低 B 转子均采用整锻转子，而且均具有 $\phi 100$ 的中心孔。各个转子上按轴向位置的不同，其运行中各段所受应力状况也不同，在探伤时按各处不同的应力状况（预先计算好的）采用不同的灵敏度进行探测。为了降低中压转子进汽部位高应力区的蠕变损伤，在中压转子的中段和第一级叶片根部，采用高压缸的排汽进行冷却。该蒸汽参数为 3.65MPa、313.4℃，流量为 30.53t/h。冷却后的蒸汽，进入中压缸第一级动叶的工作通道。东芝和 G/A 机组的中压高温区也采取了与 WH 相类似的冷却措施。

高压转子的汽流通道为单流式，中、低 A、低 B 的汽流通道均为对称分流结构。各个转子的轴向推力大致达到平衡。高压转子在调节级前设有直径为 $\phi 973.12$ 的一个平衡鼓，以平衡反动级叶片产生的轴向推力。

高、中、低 A、低 B 转子的对轮均为与转子一体整锻的刚性靠背轮。两个低压转子间和低 B 与发电机转子间，还带有长度不同的中间连接轴段。这样，可使两个低压转子的轴向尺寸完全相同，便于实现低压部分的积木块化。

二、无中心孔的整锻转子

大型汽轮机转子广泛采用无中心孔的整锻转子。过去生产的大型汽轮机转子多数是有中心孔的。开中心孔的目的主要是为除去转子中心材质最薄弱的部位，同时也便于探伤检查。但转子开中心孔后带来不少弊端。中心孔的存在使孔面的离心应力增加一倍以上。工作应力的上升还使工作在高温区转子的材料蠕变损伤速度加快。

大容量汽轮机的低压转子，直径达到 2m 以上，在作超速试验时，中心孔表面的离心切

向应力和热应力的合成应力已接近材料的屈服极限，从而制约了整锻转子末级叶片长度的增加

随着炼钢、锻造、热处理以及探伤技术水平的提高，无中心孔的整锻转子结构得到了广泛的应用。德国、俄罗斯、日本等国都相继采用了无中心孔的结构。我国近期从日本东芝和法国 G/A 引进的 600MW 机组，其转子均采用了无中心孔的结构。美国汽轮机制造厂家，特别是 WH 曾极力反对取消转子中心孔，但自 80 年代以来，他们也改变观点并积极采用无中心孔转子结构。无中心孔转子归纳起来有以下优点：

- 1) 工作应力低；
- 2) 安全性能好；
- 3) 有利于使用更长的叶片；
- 4) 可以延长机组的使用寿命；
- 5) 有利于改善机组的启动性能，缩短启动时间；
- 6) 造价便宜。

东芝的 600MW 机组的高压转子汽流通道为单流式，中、低 A、低 B 转子汽流通道为对称分流式，各靠背轮均为刚性。

G/A 的 600MW 机组的高、中压转子汽流通道为单流式，低 A、低 B 为对称分流式。各靠背轮均为刚性。

三、焊接式转子

ABB 的超临界 600MW 机组，均采用焊接式转鼓型转子。ABB 采用焊接式转子已有 60 多年经验，在这 60 多年中，大大小小生产投运了 4000 多根转子，与套装式和整锻转子相比，明显具有以下优点：

1) 焊接式转鼓型转子为中空腔室结构，其热应力和离心应力较低，启动灵活并能适应负荷的快速变化，使用寿命长。

2) 每个转子是用多块小锻件组合焊接的，各段的质量可得到保证，探伤比较彻底，个别段即使发生质量问题，处理也较方便。

3) 小块锻件，热处理淬透性好，残余应力低，材质均匀。

4) 材料可按需要灵活选用。例如，中压缸进汽温度为 566℃，中压转子必须使用价格昂贵的 12%Cr 钢。但对于焊接式转子，仅在高温段选用 12%Cr 钢，其余中、低温段便可使用中碳铬钼钢。因此，不但大大地降低了成本，也免去了中压转子高温段第一级叶片根部的冷却措施。这样使机组的结构简单，而且运行经济性也有所提高。

高压转子近进汽端具有平衡轴向推力的平衡鼓。

ABB 超临界 600MW 机组高、中、低 A、低 B 转子和发电机转子对轮均为刚性，且各对轮均用止口配合连接。其对轮螺栓为胀套式。

对焊接式、无中心孔的整锻转子和有中心孔的整锻转子等三种型式转子的应力进行计算分析表明，焊接转子具有中空腔室，传热较好，因而热应力较低。调节级叶轮的外表面最大热应力比整锻转子（有中心孔和无中心孔）约低 40%，对尺寸相似的焊接转子和实心整锻转子，用相当的边界条件进行对比计算，其结果是：机组冷态和停机 56h 后的温态启动，焊接转子的寿命损耗仅为实心整锻转子的 1/3；热态启动和负荷变化时，焊接转子的寿命损耗仅为实心整锻转子的 50%。