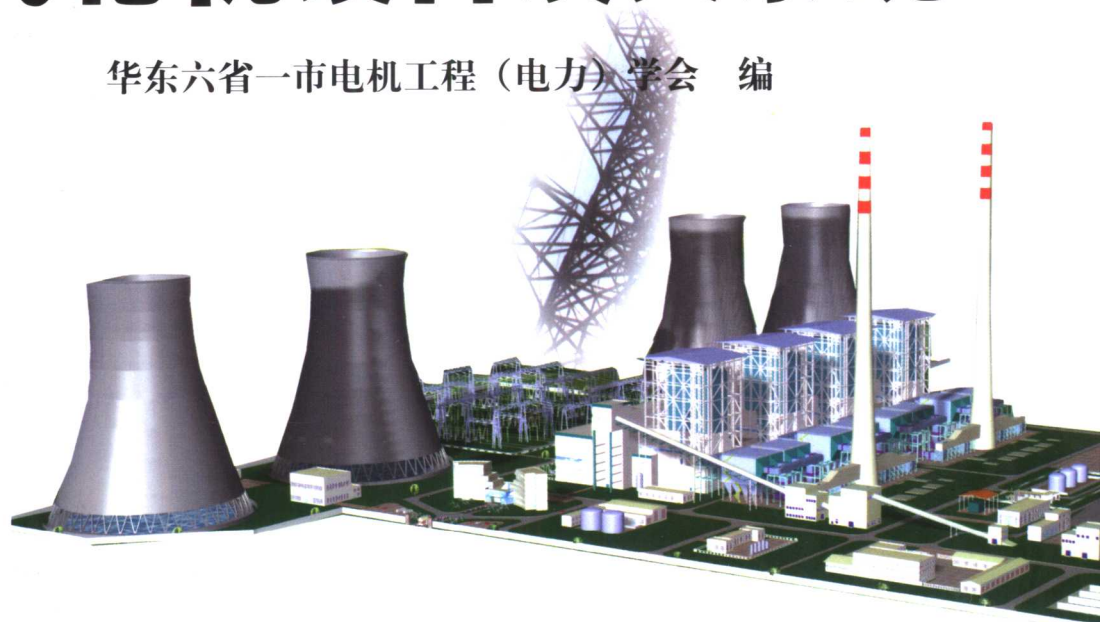


600MW 火力发电机组培训教材 (第二版)

600MW HUO LI FA DIAN JI ZU PEI XUN JIAO CAI(DI ER BAN)

汽轮机设备及其系统

华东六省一市电机工程(电力)学会 编



- * 首套 600MW 级火电机组的新投产培训、岗位技能培训和职业技能鉴定的理想培训教材
- * 突出亚临界、超临界、超超临界压力的 600MW 级机组安装调试、运行维护和检修试验
- * 适用于生产人员、工人、技术人员和管理干部等的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内容提要

2000年由华东六省一市电机工程(电力)学会组编的《600MW火力发电机组培训教材》(一套5册)出版以来,已深受了600MW级火力发电机组的生产人员、工人、技术人员和管理干部等上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的欢迎,为此在全国电力系统中600MW发电机组已成为人们认为最佳的主力机组和至今已有100多台投入了电网运行的情况下,决定对本套教材进行全面修订,以适应电力生产人员、工人、技术人员和管理干部认真学习和熟练掌握亚临界、超临界、超超临界压力的600MW级火力发电机组的运行技术和性能特点,更好地满足各类电力生产人员的培训需要。

本书是《600MW火力发电机组培训教材(第二版)》(汽轮机设备及其系统)分册,共分17章,主要介绍600MW汽轮机及其系统选择、技术参数和发展趋势;汽轮机组典型实例和本体主要部套;蒸汽系统及其设备;真空抽气系统及其运行监控;凝结水系统及其设备结构和参数;给水系统及其设备结构、参数和运行维护;给水泵小汽轮机及其系统、启动及运行;开闭式循环水系统和控制保护;主机润滑油、顶轴油、液压油及其净化系统;汽轮机调节及保安系统;发电机冷却和密封油系统;压缩空气系统结构及运行;汽轮机本体及其附件安装验收,油系统、蒸汽管道等检查和清洗;汽轮机主要工作系统调试;汽轮机整套启动、调试和甩负荷试验;500~1000MW超临界压力汽轮机组特性、技术规范、控制系统功能和调节保安系统;超临界压力汽轮机组运行监视、控制设定、启动和维护等。

本书可作为从事亚临界、超临界、超超临界压力的600MW级火力发电机组汽轮机设备及其系统的安装调试、运行维护和检修技术等岗位生产人员、工人、技术人员和管理干部的上岗培训、在岗培训、转岗培训、技能鉴定和继续教育等的理想培训教材,也可作为从事300~900MW火力发电机组工作的汽轮机设备及其系统生产人员、技术人员、管理干部和大中专院校有关师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机设备及其系统/华东六省一市电机工程(电力)学会编. —2版. —北京:中国电力出版社,2006
600MW火力发电机组培训教材
ISBN 7-5083-4559-2

I. 汽... II. 华... III. 火电厂-蒸汽透平-技术培训-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第077828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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年3月第一版

2006年11月第二版 2006年11月北京第六次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 34印张 922千字 2插页

印数15001—18000册 定价66.00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)

前言

近 10 多年来,大容量、高参数、高效率的大型发电机组在我国日益普及,由于 600MW 火力发电机组具有容量大、参数高、能耗低、可靠性高、环境污染小等特点,在我国《1994~2000~2010~2020 年电力工业科学技术发展规划》、《电力工业技术政策》及《电力工业装备政策》中都把 600MW 机组的开发研究和推广应用作为一项重要内容。自 1985 年以来,全国已有 100 多台的 600MW 机组陆续地投入了电网运行,它们即将成为我国电力系统的主力机组。为了确保 600MW 机组的安全、稳定、经济运行,600MW 机组岗位运行、技能鉴定和继续教育等培训工作就显着十分重要了。

为适应这一形势发展的需要,使广大生产岗位工人、技术人员和管理干部熟悉、了解和掌握 600MW 火力发电机组的技术性能和特点,经 2004 年 7 月华东地区六省一市电机工程(电力)学会联合编辑工作委员会联席会议认真讨论研究,决定组织修订《600MW 火力发电机组培训教材》(共 5 册),联合编委会根据联席会议精神,在中国电力出版社的积极支持和指导下,启动《600MW 火力发电机组培训教材》(第一版)的修订工作,选择修编专家和审稿专家,着手搜集资料,制订和审查编撰大纲等。2005 年 10 月各分册书稿陆续编写完毕,各负责单位分别对初稿组织专家进行了审查,随即送中国电力出版社编辑加工、出版和整个教材的编审工作,前后共花去了两年多的时间。

本套教材(第二版)共分五个分册,即《锅炉设备及其系统》、《汽轮机设备及其系统》、《电气设备及其系统》、《热工自动化》、《电厂化学与环境保护》,全套教材共约 350 万字。

本套教材(第二版)是以亚临界、超临界压力的 600MW 火力发电机组为介绍对象,并适当增加超超临界压力机组的内容。本套教材(第二版)是在对 600MW 机组各子系统的结构、原理、功能、性能和特点进行详细介绍的基础上,重点突出 600MW 火力发电机组的岗位运行和技能操作特点;在理论阐述和技能深度方面,以岗位运行知识为基础,提高技能操作能力为目的;在语言描述和整体内容方面,力求通俗易懂,深入浅出,并配备操作实例。本教材(第二版)属于 600MW 火力发电机组岗位运行、技能操作和继续教育的培训教材,适用于对具有大中专及以上文化程度的 600MW 火力发电机组生产岗位和技术管理人员培训之用,也可借用于高等院校热能动力和电力等专业的相关师生参考。

在本套教材的第二版修编过程中,华东地区六省一市电力公司、相关大专院校、发电厂以及有关专家学者和科技人员给予了热情的支持和帮助,我们在此一并表示感谢。我们还要感谢中国电力出版社,在历次联合编委会会议上都派出编辑参加和指导,经常关心编撰工作进度,协助解决疑难问题,对我们的工作给予了全方位的支持和鼓励。

限于编审人员的水平,本套教材第二版的疏漏之处一定不少,恳请广大读者提出宝贵意见,以便今后修订,提高质量,使之能更好地为我国电力工业的建设和发展服务。

华东地区六省一市电机工程(电力)学会

2006 年 5 月

编者的话

按照《华东地区六省一市电机工程（电力）学会联合编辑工作委员会 2004 年工作会议会议纪要》，根据形势发展的需求，对《600MW 火力发电机组培训教材》（第一版）内容进行调整和完善，增补近 10 多年来该领域的新技术、新材料、新工艺、新要求等内容，在本套教材第一版的内容基础上增加新的技术内容，删除部分过时的内容，形成一套学术水平和出版质量达到国内一流水平的大容量火力发电机组技术培训教材，并予以正式出版发行。

本次是《600MW 火力发电机组培训教材（第一版）》（汽轮机设备及其系统）分册的修编版，也是《600MW 火力发电机组岗位培训教材（第二版）》分册之一。我们认为《600MW 火力发电机组培训教材》修订后应成为在岗、在职 600MW 火力发电机组岗位运行、技能操作和继续教育的培训教材。

本次修编基本上保持了原书第一版的分篇格式，但对内容做了较大的增删和更新，改编后的内容力求反映近 10 多年来我国 600MW 大型火力发电机组，包括亚临界、超临界和超超临界压力机组的大量建设所带来的汽轮机设备及其系统的最新技术。

随着社会生活的现代化，各行各业需要越来越多的电力，对电力供应的可靠性要求也越来越高。因此，建设大容量电厂是满足上述要求的必然途径。我国电力工业自 20 世纪 80 年代以来，兴建的电厂越来越多地采用大功率发电机组，并优先选用的是 600MW 或更大的发电机组。自从 1985 年以来，全国已有 100 多台的 600MW 机组陆续地投入了电网运行，它们即将成为我国电力系统的主力机组。因此，全面地掌握 600MW 机组的性能，才能建设好、管理好和运行好大型电厂。

本书是以我国已采用的 600MW 机组的实践经验为基础进行编写的，共十七章。第一章阐述机组的选型，以及机组的主要技术参数；第二章对 600MW 汽轮机主要设备的结构和功能进行详细的阐述；第三章至第十二章详细讨论与汽轮机有关的各个工作系统；第十三章介绍汽轮机本体的安装；第十四章简述汽轮机及其有关工作系统的调试；第十五章介绍汽轮机整套启动的工作安排；第十六章介绍 500~1000MW 超临界汽轮机的特性；第十七章针对超临界汽轮机运行、维护中必须解决的关键技术问题，作了详尽、明确的阐述。

本书由浙江省电力公司丁有宇和杭州市电力局丁一合作编写，并由丁有宇完成全书统稿工作，最后全稿由王作宾审稿。

编者

2006 年 5 月

目 录

前言

编者的话

第一章 概述	1
第一节 汽轮机及其系统选择	1
第二节 600MW 汽轮机主要技术参数	2
一、汽轮机经济技术参数 (2) 二、汽轮机安全技术参数 (9) 三、启动、停机、变负荷特性 (16)	
第三节 600MW 汽轮机现状和发展趋势	17
第二章 600MW 汽轮机本体主要部套	22
第一节 600MW 汽轮机典型实例	22
一、哈尔滨第三电厂 600MW 汽轮机 (22) 二、北仑发电厂 2 号 600MW 汽轮机 (26) 三、邹县发电厂 600MW 汽轮机 (29) 四、华能石洞口第二发电厂 600MW 汽轮机 (32)	
第二节 600MW 汽轮机进汽部分	33
一、进汽部分布置方式 (34) 二、主汽阀结构和工作原理 (36) 三、调节阀结构和工作原理 (42) 四、再热主汽/调节阀 (中联门) (45) 五、导汽管和喷嘴室 (51)	
第三节 汽缸	52
一、华能石洞口第二发电厂超临界压力 600MW 汽轮机汽缸结构 (55) 二、冲动式汽轮机汽缸结构 (58)	
第四节 隔板、静叶和汽封	61
一、隔板结构和功能 (61) 二、静叶 (62) 三、汽封 (63)	
第五节 转子和动叶	67
一、转子结构和材料 (67) 二、转子支承和轴系连接方式 (72) 三、动叶片 (73)	
第六节 轴承和轴承座	79
一、轴承结构和功能 (79) 二、轴承座 (箱) (88)	
第七节 汽轮机盘车装置	89
一、电动盘车装置主要功能 (90) 二、电动盘车装置对工作条件的要求 (91)	
第八节 滑销系统	92
第三章 蒸汽系统及其设备	95
第一节 主蒸汽和再热蒸汽系统	95
第二节 旁路系统	99
一、压力控制部分 (106) 二、阀门控制器 (106)	
第三节 轴封蒸汽系统	107
第四节 辅助蒸汽系统	111
第五节 回热抽汽系统及其设备	112
一、回热抽汽系统概况 (112) 二、回热抽汽系统主要设备 (121)	
第四章 真空抽气系统	136

• 第一节 真空泵及其系统	136
• 第二节 真空系统运行和监控	144
一、蒸汽凝结区真空抽气系统 (144) 二、水室真空抽气系统 (150)	
第五章 凝结水系统及其设备	151
• 第一节 系统概述	151
• 第二节 主要设备结构及技术参数	153
一、凝汽器 (153) 二、凝结水泵 (158) 三、凝结水储存水箱及凝结水输送泵 (163) 四、凝结水收集箱及凝结水收集泵 (163)	
第六章 给水系统及其设备	164
• 第一节 系统概述	164
一、汽动给水泵组 (164) 二、电动给水泵组 (166) 三、减温水及暖泵措施 (166) 四、给水泵轴封冷却水 (166)	
• 第二节 给水泵结构及技术参数	167
一、汽动给水泵及其前置泵 (167) 二、电动给水泵及其前置泵 (172) 三、电动给水泵液力传动装置 (177) 四、事故密封水泵 (182)	
• 第三节 给水泵组运行与维护	183
一、泵组启动前检查 (183) 二、泵组启动与试运转 (183) 三、启动和停机操作程序 (184) 四、给水泵故障、原因及处理 (185)	
第七章 驱动给水泵小汽轮机及其系统	186
• 第一节 小汽轮机蒸汽系统	186
• 第二节 小汽轮机润滑油系统	190
• 第三节 小汽轮机压力油系统	193
• 第四节 小汽轮机调节保护系统	195
一、给水泵小汽轮机数字式电子调节系统 (196) 二、电气调节系统主要功能 (197) 三、液力调速、保护执行装置及其功能 (200) 四、给水泵小汽轮机安全保护系统 (202) 五、模拟式电液控制系统简述 (204)	
• 第五节 给水泵小汽轮机启动及运行	205
一、启动步骤 (205) 二、运行监视 (205)	
第八章 循环水系统	207
• 第一节 主机循环水系统主要设备	208
一、循环水泵 (208) 二、循环水泵出口处液压止回蝶阀 (214) 三、凝汽器循环水进/出口蝶阀 (217) 四、循环水泵房滤网设备 (217)	
• 第二节 开式循环冷却水系统	220
一、自清洗滤网 (221) 二、开式循环冷却水泵 (223)	
• 第三节 闭式循环冷却水系统	224
一、系统概述 (225) 二、主要设备及技术参数 (225) 三、系统控制和保护 (228)	
第九章 主机油系统	229
• 第一节 润滑油系统	229
• 第二节 顶轴油系统	234
• 第三节 润滑油净化系统	235
• 第四节 液压油系统	237
一、液压油箱 (238) 二、液压油供油系统 (238) 三、液压油冷却系统 (239) 四、液压油再生系统 (239) 五、液压油系统运行控制 (240)	

第十章 600MW 汽轮机调节及保安系统	242
• 第一节 调节及保安系统概述	243
一、汽轮机调节系统特性 (243) 二、大型中间再热汽轮机组调节特点 (248) 三、单元制汽轮机— 锅炉控制和运行方式 (250) 四、液压调速系统及其设备 (254) 五、安全系统及其设备 (260)	
• 第二节 汽轮机数字电液控制系统 (DEH)	263
一、哈尔滨汽轮机厂采用 DEH (263) 二、北仑发电厂 2 号机 DEH 系统 (268)	
第十一章 发电机冷却系统和密封油系统	282
• 第一节 发电机氢冷系统	282
一、系统概况 (282) 二、氢冷系统主要参数 (283) 三、氢冷系统运行控制 (284) 四、氢冷系统 气密性试验 (284) 五、氢冷系统气体置换 (285)	
• 第二节 发电机密封油系统	286
一、系统设备设置及其功能 (286) 二、系统及设备主要技术参数 (287) 三、系统运行控制 (288)	
• 第三节 发电机定子冷却水系统	288
一、系统主要技术参数 (289) 二、系统运行控制 (290)	
第十二章 压缩空气系统	291
• 第一节 系统概述	291
• 第二节 空压机结构及运行	292
一、空压机装置概况 (292) 二、空压机主要部套 (293) 三、空压机润滑油系统 (295) 四、空压 机运行控制及维护 (295)	
• 第三节 储气罐和干燥器	297
一、储气罐 (297) 二、干燥器结构与控制 (297)	
第十三章 600MW 汽轮机安装	298
• 第一节 基础和设备验收	298
一、基础检验 (298) 二、设备检验 (298)	
• 第二节 汽轮机本体安装	300
一、凝汽器安装 (300) 二、台板、低压缸和轴承座就位 (300) 三、汽缸就位和找中 (301) 四、 隔板就位和找中 (303) 五、轴承找中、转子就位和通流间隙调整 (303) 六、汽缸下部进/排(抽)汽 管道连接 (304) 七、汽轮机扣缸 (305) 八、汽轮机主汽阀/调节阀安装 (305) 九、汽轮发电机组各 转子连接 (305)	
• 第三节 汽轮机本体附件安装	306
• 第四节 油系统冲洗	307
一、油冲洗准备 (307) 二、油冲洗操作要领 (308) 三、油冲洗程序 (308)	
• 第五节 蒸汽管道吹扫	311
一、准备及吹扫 (311) 二、吹扫后恢复 (313)	
• 第六节 液压油系统冲洗	316
一、第一阶段冲洗 (316) 二、液压油系统耐压试验 (317) 三、第二阶段冲洗 (317) 四、系统恢 复 (318)	
• 第七节 其他系统检查和清洗	318
一、回热抽汽系统设备检查和清洗 (318) 二、冷油器检查和清洗 (319) 三、抽真空系统设备检查 (319)	
第十四章 600MW 汽轮机主要工作系统调试	320
• 第一节 润滑油系统调试	320
一、系统连锁和报警试验 (320) 二、主油泵特性试验和润滑油压调整 (322) 三、顶轴油系统试验 (322)	

• 第二节 EHC 液动部分调试	323
一、液压油供油系统调试 (323) 二、EHC 液动部分静态试验 (323) 三、EHC 液动部分空载试验 (328)	
• 第三节 发电机冷却水、密封油和氢冷系统调试	329
一、冷却水系统调试 (329) 二、密封油系统调试 (331) 三、气体系统调试 (333)	
• 第四节 汽动给水泵调试	334
一、给水泵组油系统油冲洗 (334) 二、泵组机械控制系统调整 (334) 三、给水泵组热工保护连锁试验 (334) 四、小汽轮机单机试运转 (335) 五、小汽轮机带泵试运转 (335)	
• 第五节 抽真空系统调试	336
一、抽真空设备性能测试 (336) 二、真空系统查漏及泄漏量的测量 (337)	
• 第六节 循环水系统调试	337
一、循环水泵调试 (337) 二、循环水泵出口阀门、凝汽器进出口阀门调试 (338) 三、耙草机及旋转滤网调试 (338) 四、开式和闭式循环水系统调试 (339)	
• 第七节 凝结水系统调试	339
一、设备性能测试 (340) 二、系统连锁和报警试验 (340)	
• 第八节 汽轮机监控系统连锁试验	341
一、汽轮机本体监控试验 (341) 二、各工作系统与汽轮机本体的连锁试验——安全系统试验 (341)	
第十五章 汽轮机整套启动调试	343
• 第一节 整套启动前检查	343
一、润滑油泵自动启动试验 (343) 二、主机润滑油压调整 (343) 三、汽门活动试验 (343) 四、给水回热系统检查 (343) 五、蒸汽系统检查 (344) 六、辅助蒸汽系统及轴封系统检查 (344)	
• 第二节 暖管与暖机	344
• 第三节 汽轮机启动	345
一、汽轮机启动和运行时主要监视项目 (346) 二、汽轮机启动和运行时应记录的主要技术数据 (346) 三、大型汽轮机组启动实例 (346)	
• 第四节 汽轮机甩负荷试验	356
一、甩负荷试验前应具备的主要条件 (356) 二、试验前机组运行方式 (357) 三、试验前检查 (357) 四、甩负荷试验安全措施 (357) 五、试验及试验后检查与调整 (358)	
第十六章 超临界压力汽轮机组特性	359
• 第一节 我国早期超临界压力汽轮机及其运行	359
一、已投入运行的超临界压力汽轮机简介 (359) 二、引进型超临界压力汽轮机运行中出现的问题 (371)	
• 第二节 超临界压力汽轮机及主要辅机技术规范	372
一、汽轮机技术规范 (372) 二、主要辅机技术规范 (374)	
• 第三节 超临界压力机组自动控制系统功能要求	375
一、机组控制水平 (375) 二、控制系统硬件 (375) 三、分级控制 (376) 四、变压运行和负荷跟踪 (377) 五、机组自启停 (377) 六、汽轮机重点控制项目 (377) 七、自动控制系统涵盖范围 (378)	
• 第四节 国产超临界压力汽轮机组	381
一、汽轮机概述 (381) 二、阀门 (390) 三、连通管 (392) 四、通流部分 (392) 五、端部汽封 (398) 六、轴封供油系统 (401) 七、转子联轴器 (408) 八、疏水系统和低压缸喷水系统 (410) 九、滑销系统 (413) 十、轴承、轴承座和挡油环 (413)	
• 第五节 汽轮机调节保安系统	420
一、概述 (420) 二、低压保安系统 (421) 三、液压伺服系统 (424) 四、供油系统 (425) 五、	

抗燃油系统安装及首次启动 (429)	六、常规操作及检查 (433)	七、试验及其他 (436)	八、喷油试验和 提升转速试验 (437)	九、甩负荷试验 (439)	十、抗燃油 (442)	
• 第六节 1000MW 超 (超) 临界压力汽轮机组						444
一、浙江国华宁海电厂二期 1000MW 汽轮机组技术参数 (444)	二、浙江华能玉环电厂 1000MW 汽 轮机组技术参数 (447)					
第十七章 超临界压力汽轮机组运行维护导则						458
• 第一节 重要技术措施						458
一、防止汽轮机本体及相关管道进水或积水 (458)	二、控制热应力和差胀 (463)	三、避免蒸汽所 携带的固体颗粒对汽流通道的冲蚀 (466)	四、防止汽轮机通流部分积垢 (468)	五、防止汽轮机转子 强烈振动 (473)		
• 第二节 监视仪表和控制设定值						474
一、监视仪表 (474)	二、汽轮机组运行限制条件及注意事项 (481)					
• 第三节 汽轮机组启动前准备						489
一、总则 (489)	二、汽轮机启动前检查 (489)					
• 第四节 汽轮机启动运行						494
一、启动状态划分 (494)	二、汽轮机组启动 (494)	三、汽轮机正常运行 (504)	四、汽轮机组异 常状况检查和操作 (504)	五、汽轮机停机工况 (508)	六、调节方式切换 (510)	七、司机自动控制 方式 (511)
八、远方自动控制方式 (515)	九、汽轮机自动控制 (515)	十、手动控制方式 (516)				
• 第五节 超临界压力汽轮机组维护						516
一、进汽阀试验 (516)	二、定期功能试验 (520)					

概 述

第一节 汽轮机及其系统选择

建设火力发电厂的目的是把燃料的化学能转换为电能，并由送变电设施把电能输送到各个用户。从经济角度考虑，还希望用较少的燃料，发出尽可能多的电能。这就要求电厂既要安全、可靠，又要有较高的总效率。因此，选择良好的发电设备，是建设电厂的首要任务。

下面对汽轮机及其系统的选择作出简要的介绍。

汽轮机本体的安全、可靠及效率，对于定型的汽轮机，已由制造厂在设计、制造过程确定。电厂用户只能通过对比分析的方法，最后择优选用。对比分析一般从如下几方面进行：

(1) 主要部件的结构性能。包括主汽门、调节汽门、导汽管的结构性能和布置方式，喷嘴室的结构和配汽方式，高、中、低压缸的结构性能，高、中、低压转子的结构性能，末级叶片长度，轴承的结构性能，盘车装置的结构性能，轴系的连接方式以及机组的热膨胀性能等。

(2) 机组的布置方式。机组的布置方式对安装、运行、检修都有影响。如目前已投运的机组中，有的机组把主汽门和调节汽门都布置在运行层下面，运行平台上只有汽轮发电机组，运行层十分敞亮畅通，有的机组却把调节汽门和各个轴承的滤油装置都布置在平台上，结果整个平台显得拥挤不堪。

(3) 机组的控制方式。包括主机和系统的控制，都应根据用户的具体要求加以分析比较后选定。我国已投运的机组，主机采用的是数字式电液控制系统（DEHC），各个辅机系统采用的是分散式控制系统（DCS），两者相互协调，形成了具有较高水平的闭环式自动控制体系，在集控室内通过计算机桌面、屏幕就能够了解各个系统的状况，发出相应的控制指令，运行管理既集中又方便。

(4) 运行方案的确定。机组运行年限和运行方式的不同，对汽轮机的结构和材料的选用有一定的影响。因此，在选用汽轮机时，应将机组的运行规划通知汽轮机制造厂，以便制造厂在机组的结构和材料选用方面能更好地满足用户的需要。

(5) 给水回热系统的选择。给水回热系统的总体性能对机组的效率影响甚大，在加热器数量相同的情况下，抽汽点（即抽汽参数）、抽汽流量的调整，以及加热器疏水导向的不同、给水旁路的不同，都会明显地影响机组的热循环效率。

(6) 主蒸汽旁路的选择。机组启动、运行方式的不同，对主蒸汽旁路的容量和控制方式的要求也不同。因此，必须根据已规划好的启动、运行方式来选用主蒸汽旁路的容量和控制方式。应当注意的是，旁路不是越大越好。选择旁路时还应当注意旁路阀门的驱动方式，液力驱动的阀门动作较快（可以在0.3s以内完成动作），电动阀门的动作较慢（约在0.5s时间内完成动作）。

(7) 真空凝结水和循环冷却水系统的选择 我国幅员辽阔，东西南北各占数千公里，从北方的漠河寒带到南沙群岛的热带，从西北的干旱高原到东海之滨的江南水乡，地理和气候条件千差

万别。因此，要根据具体的地理气候条件来选择真空凝结水系统和循环冷却水系统。

要根据具体的水温、水质、水源条件来选用系统和设备、材料。如西北缺水地区，多选用闭式循环冷却水系统；海边电厂考虑凝汽器的材料时，则选用全钛管凝汽器；黑龙江地区在选用凝汽器的真空时，可以选取全年平均水温 15°C ，在海南岛年平均水温将取 25°C 或更高。

(8) 再热系统的选择。对于亚临界压力机组，只采用一次中间再热，再热的冷端主蒸汽参数为高压缸的排汽参数。对于超临界压力机组，可以一次再热，也可以二次再热。采用哪种方案，要考虑经济性，也要考虑建造费用和运行管理等因素。第一次再热蒸汽的压力已较低，体积流量较大，因此再热蒸汽管道又长又粗大；第二次再热蒸汽的压力就更低，体积流量也更大，再热蒸汽管道就更加长、更加粗大。再热管系将十分庞大复杂，对整个汽轮机岛和锅炉岛的总体布置将有较大的影响，建造费用将明显增加，运行管理也较为困难。因此，超临界压力机组多数还是采用一次中间再热，采用二次再热的只占 15% 左右。

第二节 600MW 汽轮机组主要技术参数

汽轮机组的技术参数归结为两大类：①影响机组经济性的技术参数称为经济技术参数；②影响机组安全的技术参数称为安全技术参数。

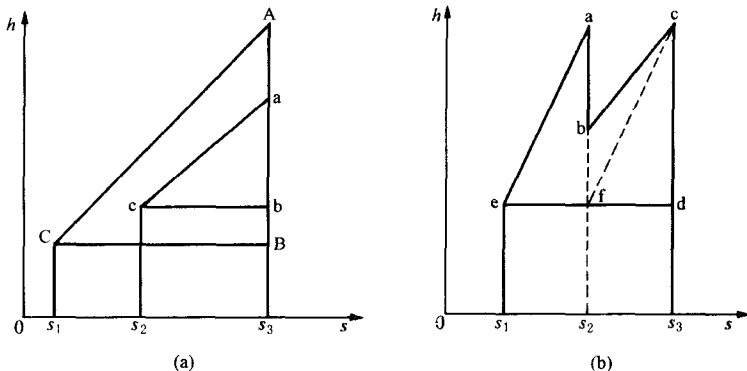
一、汽轮机组经济技术参数

汽轮机组的经济性主要由工质参数、设备的结构性能、各辅助工作系统的配置状况所决定。为了提高汽轮机组的经济性能，必须从这三方面下功夫，使其尽量符合人们的愿望。

1. 蒸汽参数对机组效率的影响

这里指的蒸汽参数是蒸汽的压力和温度。用来驱动汽轮机的单位流量蒸汽压力和温度越高，携带的能量越大，而做功后的压力和温度越低，则带走的无用能量（焓）就越小，这样蒸汽可能的做功能量（理想焓降）就越大；在能量相同的情况下，压力和温度越高，可能用来做功的能量比例就越大，无法做功而不得被放弃的能量比例就越小（即熵值越小）。这就是蒸汽的基本热力性质。因此，为了提高单位流量蒸汽的做功能力和做功效率，应当尽可能地提高将要进入汽轮机的新蒸汽的压力和温度，同时尽量降低做功后“废蒸汽”的压力和温度。从焓熵图上蒸汽的循环过程线可以明显地看到这种效果。

图 1-1 (a) 是最简单的蒸汽理想热循环在 $h-s$ 图上的示意图。过程线 $a-b-c-a$ 所包围的面积代表有可能做理想功



(即未计及做功过程的其他能量损失) 的能量， $b-c-s_2-s_3-b$ 折线所包围的面积代表无法利用的汽化潜热； $A-B-C-A$ 过程线表示提高初参数、降低背参数后的过程线。显然， $A-B-C-A$ 折线所包围的面积大于 $a-b-c-a$ 折线所包围的面积，能量转换效率 $ABCA / (ABCA + BCs_1s_3B)$ 大于 $abca /$

图 1-1 蒸汽热循环过程示意

(a) 提高初参数、降低背参数效果示意；(b) 中间再热效果示意

($abca + bcs_2s_3b$)，也就是说，提高初参数、降低背参数后的 A—B—C—A 过程做功能力大，效率也高了。

此外，如果在蒸汽尚未丧失做功能力时，将其再次提高温度（即再热），也能较有效地增加蒸汽做功能力的比例，即提高循环的热效率。如图 1-1 (b) 所示，蒸汽由 a 点开始热/功转换到 b 点时，将其再次加热到 c 点，然后再由 c 点到 d—e—a 点。这样，整个循环的做功能量由 a—b—c—d—e—a 折线所包围的面积表示，而其中 b—c—f—b 折线包围的面积所代表的能量在热功转换过程中无熵增，它由 b—c—d—f—b 折线所包围的面积趋近于理想热循环的矩形面积（即假想的矩形 a—c—d—f—a 的面积）。这样，单位流量蒸汽的做功能力增大了，效率也提高了。这是一次再热的情况。理论上，再热次数越多则由 a—b—c—d…n 折线所包围的面积就越接近于理想热循环的矩形面积。但实际上，多次再热从技术上实现很困难，从经济技术角度考虑也不合理，通常只采用一次再热，最多两次再热。

600MW 亚临界压力汽轮机组均采用一次中间再热，超临界压力机组大多数也只采用一次中间再热，只有少数采用二次中间再热。

蒸汽参数的提高受到材料性能的限制。亚临界压力机组的初参数，压力约为 16~17.5MPa，温度约为 535~570℃；超临界压力机组的初参数，压力约为 24~26MPa，温度约为 550~570℃。如果想采用更高的初温，锅炉和汽轮机本体都要采用十分昂贵的材料，制造成本将大大提高，从经济技术角度考虑也是不合理的。压力的提高固然不受材料性能的限制，但对于超临界压力机组，是由直流锅炉供汽，“水”在锅炉中已没有液态和汽态之分，压力越高，可能溶解于“水”中的其他物质就越多。蒸汽在汽轮机的通流部分做功后压力将降低下来，原来在高压状态下溶解于“水”的物质将会释放出来，聚集于汽轮机的通流部分。初参数的压力越高，在通流部分的积垢就越快，这将使通流部分的效率明显降低。因此，在选用汽轮机组的初参数时，压力也不是越高越好。

由图 1-1 可以看出，降低背参数对提高机组热效率有显著的效果。背参数的降低，受两方面的限制：一方面受末级排汽面积的限制；另一方面还受大气温度的限制。在我国的地理条件下，背压大约为 0.0035~0.006MPa。

由图 1-1 还可以看出，不论提高初参数，还是采用中间再热，在增加理想焓降的同时，蒸汽的熵也增加了。也就是说，用提高初参数的办法，特别是用中间再热的办法来增加机组出力，在增加出力的同时，总是伴随着无用能量的增加。为了尽量减少无用能量的增加，必须采用别的办法，这就是回热抽汽。

2. 回热抽汽系统的作用

在汽轮机组中设置回热抽汽系统的目的，就是为了尽量减少进入凝汽器的无用能量。下面分析回热抽汽系统是怎样减少进入凝汽器的无用能量的。

在图 1-2 上给出了单位流量蒸汽一次水—汽—做功—汽—水的循环过程线。这是一个有一次中间再热的蒸汽热循环过程示意图。从过程线 A—B—c—d—e—A 可以看出，未采用回热抽汽情况下，中间再热单位流量蒸汽做功能力的增加量是折线 c—d—e—e1—c 所包围的面积，而同时增加的无用能量是折线 e—f—f1—e1—e 所包围的面积。采用回热抽汽之后，过程线是 A—B—1—2—C—D—3—4—5—6—…—n—E—A，无用能量的增量由折线 e—f—f1

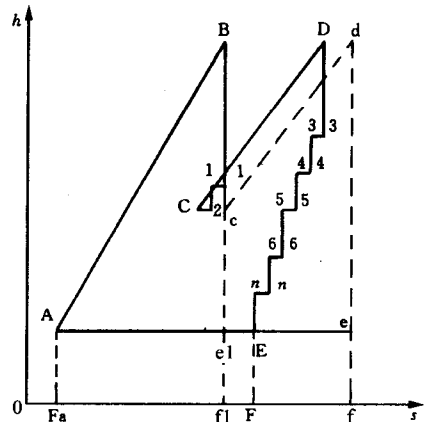


图 1-2 回热抽汽效果示意

—e1—e 所包围的面积缩小成由折线 E—F—f₁—e1—E 所包围的面积。可见，回热抽汽对减少进入凝汽器的无用能量（也即提高热循环的效率）有十分明显的效果。

上面只是对在理想条件下（即循环过程中，蒸汽释放的内能完全用于做功），简单地比较了无回热抽汽与有回热抽汽两者之间的差别。实际上，在同样有回热抽汽的循环中，回热系统抽汽点的不同，以及各抽汽点抽汽量的不同，都会造成循环效率的不同。

回热抽汽的安排应当是：高品位（即处于高热焓、低熵值蒸汽状态）处不抽汽或少抽汽，低品位处则尽可能地多抽汽。这是提高回热抽汽系统节能效果的重要原则。

此外，抽出的蒸汽在把热能传给锅炉给水（凝结水）之后，它本身也冷却下来变成凝结水，这些凝结水通常称为加热器的疏水。这些疏水的不同导向，也会造成不同的结果。因此，这些疏水的导向，应经过对整个热循环系统进行详细的热平衡计算后予以确定。

3. 真空系统的作用

真空系统由抽真空系统和密封系统两部分组成。它的作用是用来建立汽轮机组的低背压，也即用来建立凝汽器的高真空，使蒸汽能够最大限度地把热焓转变为汽轮机的动能。对于凝汽式汽轮机，蒸汽到了最后几级，已进入饱和区，蒸汽的饱和压力和饱和温度一一对应；压力越低，温度也就越低。凝汽器中的高真空，使蒸汽能够工作到很低的压力和温度，最后被冷却水带走的能量也就减少了，汽轮机效率提高了。

应当注意，抽真空系统所建立的真空，只是建立凝汽器真空的一个必要条件。在汽轮机组尚未投入运行时，凝汽器中的真空取决于抽真空系统所建立的真空；在汽轮机组投入运行后，抽真空系统的作用只是把泄漏到汽轮机内部的空气及时地抽走，是确保凝汽器真空的一个必要条件。在汽轮机组投入运行后，凝汽器内的真空还（甚至是主要）取决于进入凝汽器内的蒸汽与循环冷却水的热交换状况。蒸汽与循环冷却水的热交换状况主要取决于凝汽器的换热面积和循环冷却水的温度 t_w （ t_w 取决于环境温度）、水量。由此可见，在具体的电厂环境条件下（也就是说，在具体的环境温度条件下），要确保凝汽器内具有良好的真空，必须保证抽真空系统性能良好，有足够大的凝汽器换热面积和足够的循环冷却水量。通常，要求循环水冷却倍率（在相同的单位时间内，进入凝汽器的循环水与蒸汽的质量比）不小于 60。

在某些特殊的运行工况下，如低负荷运行时，蒸汽到了末几级已不能够继续膨胀做功，汽轮机的这几级变成了鼓风机，蒸汽可能被加热、升温，导致凝汽器内的真空变坏。此时，应当调整运行方式，使汽轮机末几级有足够的冷却流量。如果无法调整运行方式，则必须向凝汽器内喷注冷却水，以确保凝汽器和汽轮机末几级的安全。凝汽器的喷水冷却装置是保证凝汽器真空的后备设施。

4. 轴封系统的作用

轴端汽封系统的功能有两个方面。在汽轮机组的压力区段，它防止蒸汽向汽轮机外泄漏，确保进入汽轮机的全部蒸汽量都沿着汽轮机的叶栅通道前进、做功。它是保证汽轮机效率的重要手段之一。在真空区段，它防止汽轮机外侧的空气向汽轮机内泄漏，保证汽轮机真空系统有良好的真空，从而保证汽轮机组有尽可能低的背参数，即保证了汽轮机效率。

通常，汽轮机组的每一个汽缸两端各有一组轴封，每组轴封由多段组成，如图 1-3 所示。对于低压区段，送汽 0.101MPa 压力的目的是使外部的空气不能进入汽轮机内部，抽汽 0.096MPa 压力的目的是使蒸汽不至泄漏到大气中；对于高压区段，省去了 0.101MPa 压力的送汽。

汽封和转子之间的径向间隙通常为 0.4~0.6mm。目前，已发明了“自动调整汽封”，可以将汽封的径向间隙自动调整到使转子磨损接近于零，汽轮机组的运行效率相应提高。

5. 汽封系统的作用

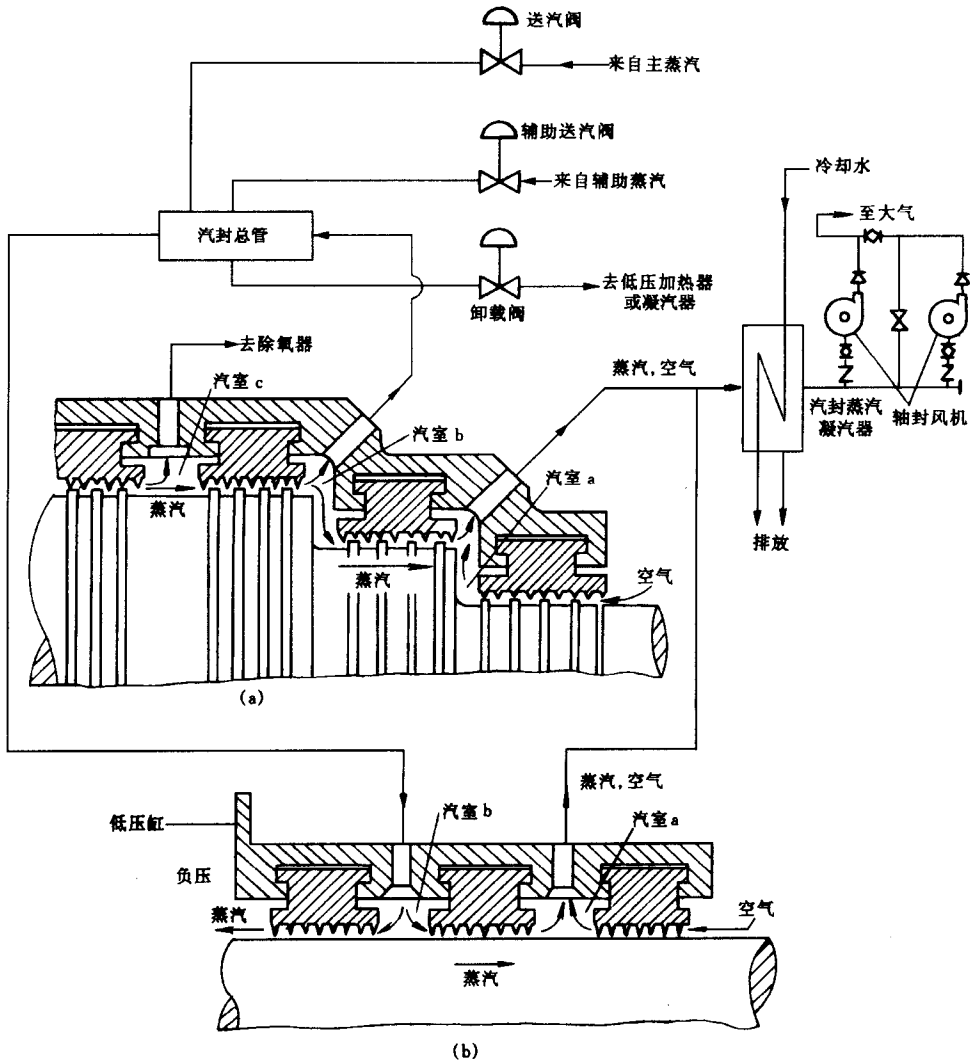


图 1-3 汽轮机轴封系统示意
(a) 高压轴封; (b) 低压轴封

这里是指汽轮机通流部分的汽封。设置它的目的是尽量减少蒸汽从高压区段通过非做功通道泄漏到低压区段，以保证尽可能多的蒸汽在做功通道做功，这样才能保证汽轮机通流部分有较高的效率。

汽轮机通流部分的汽封分径向汽封和轴向汽封两种，如图 1-4 所示。

对于冲动式汽轮机，隔板汽封起主要作用；隔板汽封只用于有隔板的通流部分。对于反动式汽轮机，如果静叶叶栅做成隔板式，那么隔板汽封和叶顶汽封同样重要。对于转鼓反动式汽轮机，静叶顶部和动叶顶部汽封同样重要。轴向汽封只起辅助作用。600MW 汽轮机组的轴向总长度较大，运行时汽缸、转子的相对膨胀较大，设置动静叶根轴向汽封已失去实际意义，有的制造厂将冲动式汽轮机的动、静叶根轴向汽封改为径向汽封，这样既保证了轴向的膨胀不受影响，又起到了汽封的作用。

隔板汽封和静叶栅顶部汽封的径向间隙约为 0.4~0.6mm，动叶顶部汽封的径向间隙则与动

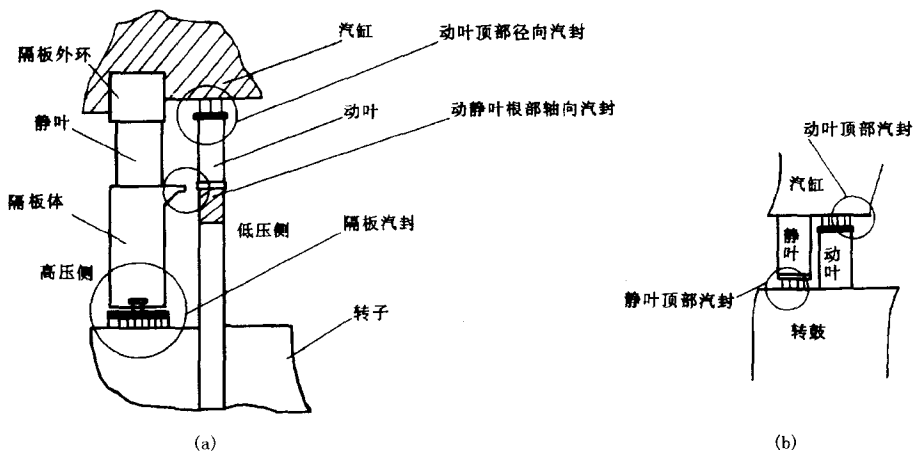


图 1-4 汽轮机通流部分汽封示意图

(a) 动叶顶部、动静叶根部汽封；(b) 转鼓式汽轮机动静叶顶部汽封

叶长度有关。

以上只是简要地说明了汽轮机组主要工作系统对机组效率的影响，以及如何改进系统的性能，确保汽轮机组的效率如愿以偿。对汽轮机组的效率影响最大的是蒸汽在汽轮机内通流部分的工作效率，以及相应的管道、阀门内的工作效率。

6. 通流部分的性能

汽轮机有成千上万的零部件，对每一个零部件的结构、材料、工艺性能要求都很高，目的是使蒸汽在汽轮机内安全地、高效率地把内能转变为转子的动能。蒸汽的内能转变为转子动能的过程是在通流部分内进行的。对于大功率汽轮机来说，是在许多级（静叶栅和动叶栅构成了汽轮机通流部分的“级”）的静叶栅和动叶栅所构成的通道内进行的。确保蒸汽在每一级内高效率地把内能转变为转子的动能，也就是保证了通流部分的高效率。先来简单了解通流部分单独一级的工作情况，参见图 1-5。

蒸汽在进入静叶栅通道时，其 $h-s$ 图上的状态点是 $0(p_0, t_0)$ ，从 0 点开始，由 p_0 膨胀至 p_2 ，理论上的过程线是 $0-a-b$ 。但实际上，蒸汽在膨胀和流动过程中，由于叶片型面和叶片端部的涡流损失，消耗了一部分能量。这一部分消耗了的能量，又变成热能，使蒸汽的温度升高了一些，在 p_1 和 p_2 情况下等压加热，即在不做功的情况下，使蒸汽的熵值由 s_0 增大到 s_2 。因此，从 0 点开始，由 p_0 膨胀至 p_2 ，蒸汽膨胀做功的过程线是 $0-1-2$ 。由于上述汽流通道内的损失，实际过程比理论过程少做功 (Δh)。为了尽量减少这种损失，叶片不仅要求做得很光滑，而且型线要求也很严格。其中按三元流动原理设计的可控涡流型的级效率较为理想。

蒸汽在静叶通道内膨胀，压力从 p_0 降到 p_1 的同时，其速度也从静叶进口处的 c_0 增加到出口处的 c_1 ，然后进入动叶。从动叶出口速度三角形可以看出， c_1 越大， c_{2u} 也即余速 c_2 就越大。这就是说，对于一定的 u 值，加大 c_1 的结果，蒸汽所做的功并没有增大，而是增大了动叶出口处的余速。能够做功的是 u 所代表的动能，即单位流量蒸汽做功的能力为

$$w = \frac{u^2}{2}$$

其中： u 是叶片在蒸汽沿圆周方向（也称切向）动能推动下形成的圆周速度， $u=c_{1u}-c_{2u}$ ，m/s。

从动叶出口速度三角形还可以看出，气流速度的轴向分量 $c_{1a}=c_{2a}$ ，它们代表汽流在单位面积内的通流能力。

人们的目的是蒸汽要能够尽可能多做功，又不会形成太大的余速。这就要选择最佳速比 u/c 。在通流部分静（动）叶平均直径上，通常选择 $u/c \approx 0.5$ 。在这种条件下，余速 c_2 最小， $c_{1u} \approx u$ ， $c_{2u} \approx 0$ 。此时余速 c_2 的方向近似垂直于 u ，与汽轮机的轴向基本相同。这就是说，蒸汽由初参数膨胀到背参数，其总焓降应当合理分配。在高压缸，蒸汽的体积流量变化不很大，叶片高度的变化也较缓慢，焓降的分配差别也较小；中压缸的前几级，焓降差别也不很大，到了中压缸后几级，特别到了低压缸，各级焓降的差别就很大。其目的就是为了使通流部分有合理的焓降分配，提高通流部分的效率。此外，还应注意，圆周速度 u 是沿着叶片高度变化的，静动叶片的截面型线要相应地变化，以适应气流流线的变化。正如上面所说的，用三元流动的理论来设计和选用叶片。

600MW 汽轮机的通流部分是由许多级组成的，而且还分为高压、中压、低压汽缸。

在高压缸的调节级后和每个汽缸的最后一级，余速 c_2 无法利用或无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ；在有抽汽口处，余速 c_2 也无法大部分利用来作为下一级的 c_0 ；其他中间各级的余速，如果动静叶的型线匹配得当，余速能够大部分利用来作为下一级的 c_0 。

根据各级焓降应合理分配和尽可能利用余速 c_2 的要求，同一个汽缸内的通流部分应当是一个平滑完整的汽流通道。它从高压缸第 2 级至高压缸最后一级、中低压缸各自的第一级到最后一级，其汽流通道应当是平滑地逐渐扩展的流线型通道。

在汽轮机的通流部分中，第一级（即调节级）和最后一级（末级）的性能对通流部分性能的影响最大。先来看看调节级，参见图 1-6。

对于正常设计的调节级，蒸汽在调节级中的膨胀过程线是从 0 到 a；如果调节级的性能不好，蒸汽在调节级中的膨胀过程线是从 0 到 b，而蒸汽在整个高压缸中的膨胀过程线将由 0-a-b₁ 移至 0-b-b₂。蒸汽的品位降低了，蒸汽在整个高压缸中的做功能力也降低了。当然，整个高压缸的效率也降低了。通常调节级的焓降比高压缸中压力级的焓降大，尤其是在部分负荷时，影响更大。为了使调节级有良好的性能，应当选用最佳的 u/c ，尽量完善动叶和静叶（喷

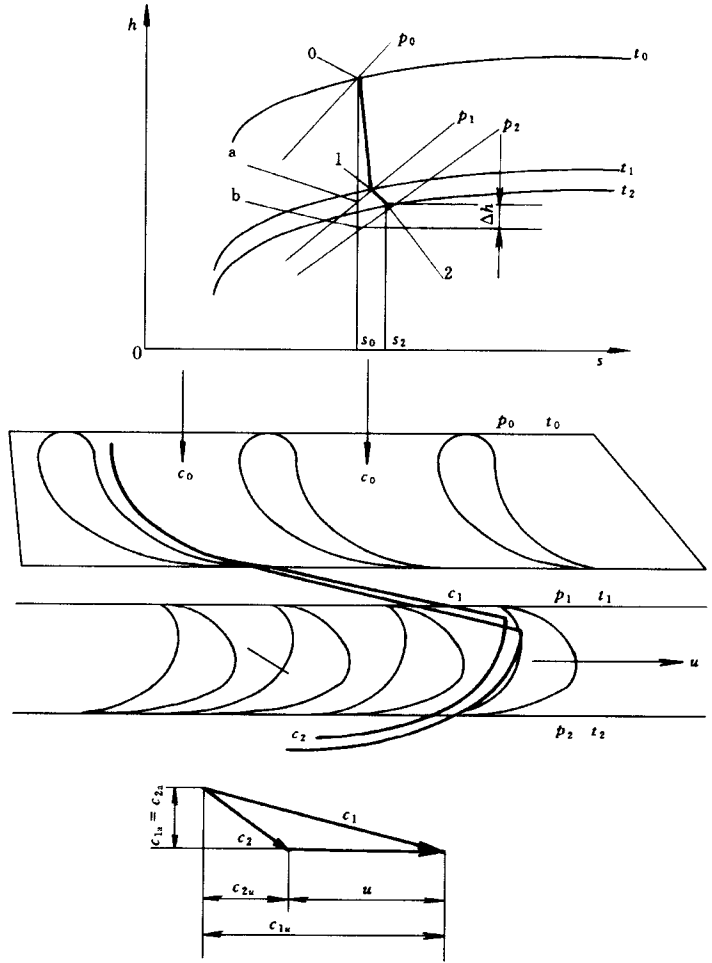


图 1-5 蒸汽在汽轮机一级内的能量转换示意图
 u —叶片的圆周速度； c_1 —静叶出口速度； c_2 —动叶出口速度

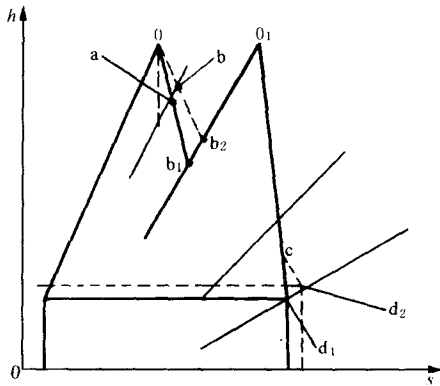


图 1-6 调节级和末级性能对机组性能的影响示意图

嘴)的型线;调节级的性能还与喷嘴组的布置方法及运行方式有关。因此,无论是在设计时,还是在选用和运行时,都要经过详细分析、综合比较之后,作出最佳选择。

通流部分最后一级即末级的性能,对汽轮机的效率影响也很大。

对于正常设计的末级,蒸汽的膨胀过程线是从 c 到 d_1 ; 如果末级的性能不好,蒸汽在末级中的膨胀过程线变成从 c 到 d_2 。这样,不仅末级的效率降低了,而且整个蒸汽热循环过程的背参数也被提高了。这不仅影响机组效率,严重时还可能影响汽轮机通流部分的通流能力,从而影响机组的总功率。

影响末级性能的主要因素有四方面,即蒸汽的参数、动静叶片的结构型线、凝汽器的真空(如前面“真空系统的作用”所述)和排汽部分的结构型线。

这里蒸汽参数主要指蒸汽的湿度,也即水在蒸汽中的比率。末级中蒸汽所含的水,不但不能做功,而且对末级叶片还产生冲刷腐蚀作用。水的比率越大,影响就越严重。为了尽量减少末级蒸汽中水的比率,通常从两方面着手。首先,尽可能地提高进入低压缸蒸汽的过热度。这就意味着要尽可能地提高蒸汽的再热温度。在相同的再热温度条件下,初参数为超临界压力的蒸汽到末级时的湿度,大于亚临界压力参数的蒸汽湿度。无论是超临界压力还是亚临界压力机组,在次末级和末级安装除湿结构,是排除蒸汽中所含水分的另一手段。

优良的末级叶片结构、型线是提高末级效率的重要因素。提供足够大的末级通流面积,是保证末级有较高效率的主要条件。这就意味着采用尽可能长的叶片。现在,成功应用的末级叶片长度已达到 1000mm 以上;已设计并试验成功的钛合金叶片,长度已达到 1300mm 以上。与此同时,末级叶片的型线也作了精密细致的改进,使其完全适应末级气流三元流动的流线特性。

蒸汽从末级排出,要设置良好的导流结构,将蒸汽导入凝汽器。这样,可以保证末级有畅通无阻的“后路”,蒸汽可以充分地膨胀做功,对提高末级效率很有好处。

7. 配汽机构对汽轮机组效率的影响

这里是指管道、阀门的结构以及配汽方式对机组效率的影响。

蒸汽在管道内流动,其速度越大,损失的能量也就越大。为了减小沿管道的能量损失,应当合理地限制蒸汽的管内速度。如要求沿管道的压力损失 $\leq 1\%$,那么利用流体的能量方程和连续方程,就可以确定汽流的管内速度和求出相应的管径。管道应当避免直角急转弯,管内表面粗糙也是必须避免的。而良好的保温,可以减少热量损失。

主汽阀和配汽阀门的压力损耗应当尽量减小。阀门应当有足够的通流直径,阀门喉部后面要有足够有效的扩压段;汽轮机运行时主汽阀全开;配汽阀门的功率分配应当注意到在几个主要工况(如 50%、70%、85%、100% 负荷)下不发生节流现象;配汽阀门后面的导汽管和配汽室的结构型线要尽可能符合蒸汽的流线,尽量避免撞击和涡流区。

通过上述对汽轮机组各个工作系统和通流部分特性的简要分析,已了解影响机组效率的各种客观因素。这些因素只有在特定条件下(即设计工况),才能具有最佳效果。在其他条件下,这些因素可能变差了(如部分负荷运行),于是机组的效率有可能下降。这就是人为因素对机组效