

600MW火电机组系列培训教材

第一分册



单元机组集控运行

中国大唐集团公司 | 组编
长沙理工大学



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



600MW火电机组系列培训教材
第一分册

单元机组集控运行

中国大唐集团公司 组编
长沙理工大学
谭欣星 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为确保 600MW 火电机组的安全、稳定、经济运行,提高 600MW 火电机组的生产运行人员、检修人员和技术管理人员的技术素质和管理水平,适应员工岗位培训工作的需要,中国大唐集团公司和长沙理工大学组织编写了《600MW 火电机组系列培训教材》。

本书是《600MW 火电机组系列培训教材》中的第一分册。全书详细介绍了单元机组的结构特点,单元机组的启停过程、运行控制。共分为六章:第一章主要介绍 600MW 机组的基本生产情况,机组类型、结构特点,电力的生产过程,热力系统、电气系统和控制系统;第二章主要介绍单元机组启动方式和启动特点、单元机组的启动过程和停机过程;第三章主要介绍机组的控制与保护,包括锅炉的安全监控系统、汽轮机数字电液控制系统、汽轮机的旁路控制、给水控制、顺序控制系统、单元机组协调控制系统和单元机组的保护;第四章主要介绍单元机组的试验及运行经济性分析;第五章主要介绍机组运行中的事故现象、原因及事故处理;第六章主要介绍单元机组的仿真系统。

本套教材适用于 600MW 及其他大型火电机组的岗位培训和继续教育,也可供从事 600MW 及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,并可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

单元机组集控运行 / 中国大唐集团公司,长沙理工大学组编.
北京:中国电力出版社,2009.12

(600MW 火电机组系列培训教材:1)

ISBN 978-7-5083-9579-1

I. 单… II. ①中…②长… III. 火电厂-单元机组-集中
控制-运行-技术培训-教材 IV. TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 190720 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>)

三河市德利印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

2009 年 12 月第一版 2010 年 10 月北京第二次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.625 印张 432 千字
印数 5001—6000 册 定价 37.00 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

近年来,为进一步深入贯彻落实科学发展观以及适应国家节能减排及环保的需求,大容量、高参数、高自动化的大型火力发电机组在我国日益普及。600MW火电机组因其具有大容量、高参数、低能耗、低污染、高可靠性等优点,现已成为我国火力发电厂的主力机型。为确保600MW火电机组的安全、可靠、经济及环保运行,600MW火电机组从业人员的岗位培训显得十分重要。

为适应这一形势发展的需要,中国大唐集团公司与长沙理工大学组织人员编写了《600MW火电机组系列培训教材》。本系列教材目前包括《单元机组集控运行》、《单元机组设备运行》、《辅控集控设备及运行》、《点检定修管理》、《汽轮机设备检修》、《电气设备检修》、《锅炉设备检修》、《热工控制系统及设备》共八册。今后还将根据电力技术发展情况,不断地充实完善。

本系列教材适用于具有大中专及以上文化程度的600MW及其他大型火电机组生产人员和技术管理人员的岗位培训和继续教育,也可供从事600MW及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,以及高等院校相关专业师生参考。

《单元机组集控运行》是本系列培训教材中的第一分册。全书详细介绍了单元机组的结构特点,单元机组的启停过程、运行控制。本书分为六章:第一章主要介绍600MW机组的基本生产情况,机组类型和结构特点,电力的生产过程,热力系统、电气系统和控制系统;第二章主要介绍单元机组启动方式和启动特点、单元机组的启动过程和停机过程;第三章主要介绍机组的控制与保护,包括锅炉的安全监控系统、汽轮机数字电液控制系统、汽轮机的旁路控制、给水控制、顺序控制系统、单元机组协调控制系统和单元机组的保护;第四章主要介绍单元机组的试验及运行经济性分析;第五章主要介绍机组运行中的事故现象、原因及事故处理;第六章主要介绍单元机组的仿真系统。

本书由长沙理工大学谭欣星主编。

本书由张成虎、向勇林、龙冠湘、张家荣、郭跃武、王俊担任编审,他们对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见与建议,在此谨表诚挚的谢意。

本书在编写过程中得到了大唐国际发电股份有限公司下花园发电厂、大唐湘潭发电有限责任公司、大唐华银金竹山火力发电分公司、浙江大唐国际乌沙山发电有限责任公司等单位的大力支持。并参阅了相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等,在此一并表示感谢。

本系列教材由长沙理工大学陈冬林教授负责统稿。

由于编者水平所限和编写时间紧迫,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2009年7月

《600MW 火电机组系列培训教材》
编 委 会

主 任	翟若愚					
副 主 任	刘顺达	钟 俊	杨 庆	王 琳	蔡哲夫	
	邹嘉华	胡绳木	熊 皓	吴 静	金耀华	
常 务 委 员	武洪举	高智溥	洪源渤			
委 员	杨俊平	阮大伟	侯国力	雷 鸣	赵丕友	
	黄竹青	张 健	王彤音	张成虎		

总 编 邹嘉华

副 总 编 武洪举 杨俊平

执行副总编 雷 鸣

编写工作组：

组 长 雷 鸣

副 组 长 张成虎 陈 荐

成 员 赵晓旻 刘 军 赵世杰 孙希瑾 戴曙光

目 录

前言

第一章 机组类型及系统简介	1
第一节 大型机组生产的基本情况.....	1
第二节 单元机组类型及特点.....	5
第三节 大型发电厂的生产过程.....	27
第四节 单元机组的热力系统简介.....	29
第五节 单元机组的电气系统简介.....	34
第六节 单元机组的控制系统简介.....	37
第二章 单元机组的启动与停运	45
第一节 单元机组的启停特点及方式.....	45
第二节 汽包锅炉的单元机组启动.....	51
第三节 直流锅炉的单元机组启动.....	63
第四节 单元机组的停运.....	70
第五节 机组停运后的维护和保养.....	82
第三章 机组的控制与保护	85
第一节 锅炉安全监控系统.....	85
第二节 汽轮机数字电液控制系统.....	94
第三节 汽轮机旁路控制.....	104
第四节 给水控制.....	108
第五节 顺序控制系统.....	118
第六节 单元机组协调控制系统.....	135
第七节 单元机组的保护.....	141
第四章 单元机组试验	156
第一节 单元机组试验的目的.....	156
第二节 汽轮机试验.....	156
第三节 锅炉试验.....	163
第四节 电气试验.....	171

第五节	辅助设备试验	174
第六节	单元机组能量平衡及热力试验	184
第七节	单元机组的运行经济性分析	191
第五章	机组事故与处理	199
第一节	机组事故处理的原则	199
第二节	汽轮机系统事故处理	200
第三节	锅炉系统事故处理	218
第四节	电气事故处理	242
第五节	DCS 事故处理	259
第六章	单元机组的仿真系统	269
参考文献		274

第一章

机组类型及系统简介

从1954年我国上海制造出第一台6MW火电机组开始,我国的电力工业取得了长足的发展。特别是近20多年,随着国民经济的快速发展,电力工业更是得到了跨越式的发展。改革开放以来,通过引进、吸收和消化国外的设计、制造技术,现在我国已能生产单机容量1000MW的超超临界机组,并投入使用。

20世纪80年代以前,我国电力设备的主机制造厂是配套建设的,如在四川的东方汽轮机厂、东方锅炉厂和东方发电机厂,因而某个火力发电厂的一台机组,它的锅炉、汽轮机和发电机基本上是一个地方生产的。80年代以后,随着我国的改革开放、经济体制的改革和政策的调整,现已形成哈尔滨电气、四川东方电气和上海电气等三大集团公司,以及后来成立的北京北重汽轮发电机有限责任公司。火电厂的建设不再像计划经济时期的一台机组由一个地方的电力设备制造厂提供,而是通过招标的形式采购到不同电气集团的汽轮机、锅炉、发电机和辅助设备。这种通过招投标形式采购电力设备的方式,不但促进了各电力设备制造集团之间和集团内部竞争和快速发展,也对电力生产和管理部门提出了更高要求。本章正是基于此现状,介绍这些制造集团的电力设备主机生产情况及其特点,电力生产过程和单元机组的相关系统。

第一节 大型机组生产的基本情况

大型机组是一个发展的、相对的概念,本书所提到的大型机组主要指功率为600MW及以上的火力发电机组。我国的大型机组的主机制造厂主要有哈尔滨电气、四川东方电气和上海电气等三大集团公司,下面分别对其生产的主机设备加以介绍。

一、哈尔滨电气集团(简称哈电集团)

(一) 1986年制造我国第一台600MW亚临界汽轮机

20世纪80年代,哈尔滨汽轮机厂从美国西屋公司引进了300MW和600MW亚临界汽轮机的全套设计和制造技术,于1986年成功制造了我国第一台600MW亚临界、中间再热、单轴、四缸四排汽凝汽式汽轮机(型号N600-17/537/537),并于1989年11月4日在安徽平圩电厂投入运行。与之配套的:锅炉是哈尔滨锅炉厂按照引进美国燃烧工程公司(CE公司)的技术设计制造的HG-2008/186-M型2008t/h亚临界中间再热式强制循环汽包炉;发电机(QFSN-600-2,功率因数0.9)是引进美国西屋公司技术,进口大部分主要机件,由哈尔滨电机厂组装生产(原西屋公司机组额定频率是60Hz,套用到国内为50Hz),发电机冷却方式为定子绕组水内冷,转子绕组氢内冷,定子铁芯氢冷,励磁系统是三机式无刷励磁方式,即由永

磁式交流励磁机、交流主励机、旋转整流装置组成，配有高起始快速响应自动励磁调节器。

之后，哈电集团相继为内蒙古元宝山电厂、哈尔滨哈三电厂、天津盘山等电厂提供了该类型机组。

（二）2004 年制造我国第一台 600MW 超临界汽轮机

2004 年，哈尔滨汽轮机厂引进日本三菱公司技术，制造了我国第一台 600MW 超临界、一次中间再热、单轴、三缸四排汽反动式凝汽式汽轮机（型号 CLN600-24.2/566/566），并于同年 10 月在河南省济源市沁北电厂（一期工程 2×600MW）投入运行。与之配套的：锅炉是东方锅炉厂按照引进日本巴布科克—日立公司超临界锅炉技术设计制造的 600MW 超临界本生炉（DG1900/25.4-II）；发电机由哈尔滨发电机厂生产。

（三）2006 年制造我国第一台 600MW 超超临界汽轮机

2006 年，哈尔滨汽轮机厂全套引进日本三菱公司的原机型设计、制造技术，制造了我国第一台 600MW 超超临界汽轮机，一次中间再热、单轴、二缸二排汽反动式凝汽式汽轮机（型号 CCLN600-25.0/600/600）。该机高中压合缸，低压缸采用一个 48in（1220mm）自带围带末级叶片，除高压缸喷嘴、主汽门与再热主汽门、末三级叶片需进口，其他均为国产设计生产。2007 年 8 月 31 日，该汽轮机在营口电厂二期工程 3 号机组中顺利通过 168h 试运。与之配套的：锅炉是哈尔滨锅炉有限公司（HBC）引进日本三菱公司（MHI）合作生产的超超临界直流锅炉（HBC-600MW），墙式切圆燃烧、垂直内螺纹水冷壁、PM 燃烧器；发电机由哈尔滨发电机厂引进日本三菱公司（MHI）技术生产。

（四）2005 年制造出我国第一台 1000MW 超超临界锅炉

2005 年，哈尔滨锅炉有限公司（HBC）引进日本三菱公司（MHI）技术合作生产了超超临界直流锅炉（HBC-1000MW），锅炉主汽压力、主蒸汽温度/再热汽温度分别为 27.5MPa、605℃/603℃、反向双切圆燃烧。2006 年 11 月，该锅炉在浙江玉环电厂投入运行。与之配置的：汽轮机是上海汽轮机厂引进德国西门子技术生产的一次中间再热、单轴、四缸四排汽、双背压、凝汽式汽轮机，带有八级回热抽汽，功率 1000MW，主汽压力、主蒸汽温度/再热汽温度分别为 26.25MPa、600℃/600℃、给水温度 292.5℃；发电机由上海发电机厂引进德国西门子技术生产。

（五）2004 年制造出我国第一台 600MW 亚临界直接空冷式汽轮机

2004 年，哈尔滨汽轮机厂制造出完全拥有自主知识产权的我国第一台 600MW 直接空冷式汽轮机（型号 NZK600-16.7/538/538），一次中间再热、四缸四排汽、直接空冷凝汽式（直接空冷岛由德国 GEA 能源技术公司成套设计、供货并提供技术服务）。2005 年 4 月，该汽轮机在山西大同第二发电厂投入运行。与之配套的：锅炉由东方锅炉厂与英国三井—巴布科克公司合作设计的采用前、后墙对冲燃烧亚临界 600MW 直流锅炉；发电机由哈尔滨发电机厂提供。

（六）2006 年制造出哈电集团第一台 1000MW 超超临界的汽轮机、发电机

2006 年，哈电集团引进日本东芝技术，由哈尔滨汽轮机厂和哈尔滨发电机厂分别制造了哈电集团的第一台 1000MW 超超临界汽轮机和发电机，并于 2007 年 12 月 6 日在江苏泰州市泰州电厂（1 号机组）投入商业运行。与之配套的：锅炉采用引进日本三菱重工技术的哈尔滨锅炉厂制造的超超临界变压运行直流锅炉、Π 型布置、单炉膛、改进型低 NO_x PM（Pollution Minimum）主燃烧器和 MACT（Mitsubishi Advanced Combustion Technology）型低 NO_x 分级送风燃烧系统、反向双切圆燃烧方式，炉膛采用内螺纹管垂直上升膜式水冷壁、循环泵启动

系统、一次中间再热、调温方式除煤/水比外，还采用烟气分配挡板、燃烧器摆动、喷水等方式。锅炉采用平衡通风，露天布置，固态排渣。

二、东方电气集团（简称东电集团）

（一）1995年制造出东电集团第一台600MW亚临界汽轮机

1995年，东方汽轮机厂与日本日立公司合作生产了两台600MW亚临界汽轮机，一次中间再热、冲动式、单轴三缸四排汽凝汽式、采用双背压凝汽器，额定工况下汽轮机的蒸汽参数为主蒸汽流量1810t/h、主蒸汽压力16.7MPa、主蒸汽温度538℃、再热蒸汽温度538℃、再热蒸汽压力3.61MPa、给水温度271.5℃、排汽压力分别是0.0044MPa（凝汽器A）和0.0054MPa（凝汽器B），并分别于1996年12月和1997年11月在山东邹县电厂投运。与之配套的：锅炉是由美国福斯特惠勒能源公司（FWEC）设计制造的自然循环燃煤单炉膛、单汽包炉、采用正压直吹式制粉系统、前后墙对冲布置旋流式燃烧器；采用日立设计制造的600MW氢冷发电机。之后又为浙江嘉兴电厂生产两台600MW汽轮机，国产化率超过80%。

（二）2004年制造出我国第一台600MW亚临界前、后对冲燃烧锅炉

东方锅炉（集团）股份有限公司与英国三井—巴布科克公司（MB）进行技术合作，成功地开发了前后墙对冲燃烧600MW亚临界机组锅炉（也是东方集团第一台600MW锅炉），并于2005年4月在山西大同第二发电厂投入运行。与之配套的：汽轮机是哈尔滨汽轮机生产的直接空冷式600MW亚临界汽轮机；发电机由哈尔滨发电机厂提供。

之后，东电集团又为盘南电厂、托克托电厂三期工程提供了该类型锅炉。

（三）2004年制造出我国第一台600MW超临界锅炉

东方锅炉（集团）股份有限公司与日立巴布科克公司合资建立了东方日立锅炉有限公司，引进了日立公司300、600、1000MW本生型超临界锅炉全套技术，并完成了600MW超临界本生炉方案的设计，于2004年制造完成我国第一台超临界国产化锅炉（华能沁北电厂一期工程2×600MW）。

（四）2004年制造出东电集团第一台600MW超临界汽轮机

2004年，东方汽轮机厂与日本日立公司合作生产了东电集团的首台600MW超临界汽轮机（型号N600-24.2/538/566）。该机为一次中间再热、单轴三缸四排汽纯凝汽式、双背压、冲动式汽轮机，轴系中除1、2号轴承采用可倾瓦式轴承外，其余均采用椭圆形轴承，于2005年1月在江苏常熟二电厂投运。与之配套的：锅炉是哈尔滨锅炉厂有限责任公司引进三井—巴布科克技术生产的HG1952/25.4-YM1型超临界、变压运行、复合循环本生直流锅炉；发电机为东方电机厂生产的QFSN-600-2-22A型发电机。

（五）2005年制造出我国第一台600MW亚临界“W”型火焰锅炉

2005年，东方锅炉（集团）股份有限公司与美国福斯特惠勒公司（FW）合作，开发设计、制造了我国第一台（世界首台）600MW亚临界“W”型火焰锅炉，并于2006年3月（第二台11月）在湖南金竹山电厂投入运行。与之配套的汽轮机和发电机分别由哈尔滨汽轮机厂和哈尔滨发电机厂提供。

（六）2005年制造出东电集团第一台600MW亚临界直接空冷式汽轮机

2005年，东方汽轮机厂制造出东电集团第一台亚临界直接空冷式汽轮机[GEA空冷岛（两排管）]。该机是三缸优化型亚临界机组，除高中压合缸外，低压缸采用2个空冷300MW机组低压缸，采用645mm专用空冷叶片作末级，低压轴承落地、三层缸结构及喷水装置，于

2005年9月在内蒙古托克托电厂三期(2×600MW)投入运行。与之配套的汽轮机和发电机分别由东方汽轮机厂和东方发电机厂提供。

(七) 2005年制造出东电集团第一台1000MW超超临界机组

2005年,东方汽轮机厂与日本日立公司合作设计生产了东电集团首台1000MW超超临界汽轮机(型号N1000-25.0/600/600)。该机为一次中间再热、单轴四缸四排汽纯凝汽式、双背压、冲动式汽轮机,高压缸排汽压力和温度分别为4.73MPa、344.8℃,中压缸进汽压力和温度分别为4.25MPa、600℃,排汽压力为4.5、5.7kPa。东方锅炉(集团)有限责任公司引进日本巴布科克—日立公司(BHK)技术,生产东电集团首台1000MW超超临界、前后墙对冲燃烧方式直流锅炉(型号DBC-1000MW),锅炉出口蒸汽参数为26.25MPa(a)/605/603℃,最大连续蒸发量(BMCR)为3033t/h。东方发电机厂引进日本日立技术,生产东电集团首台1000MW发电机(QFSN-1000)。2006年12月,该机组在山东邹县发电厂投入运行。

(八) 2006年制造我国第一台660MW超超临界汽轮机

2006年,为安徽芜湖电厂生产两台三缸四排汽660MW超超临界汽轮机,采用40in末级叶片,于2008年5月投入运行。与之配套的锅炉和发电机分别由哈尔滨锅炉厂有限责任公司、东方电机股份有限公司提供。

三、上海电气电站集团(简称上电集团)

(一) 1999年制造出上电集团第一台600MW亚临界机组

1999年,上电集团成套设计和制造出首台600MW亚临界机组,2000年7月在上海吴泾第二发电厂投入运行。汽轮机由上海汽轮机有限公司引进德国西门子技术设计制造,锅炉由上海锅炉有限公司制造。锅炉采用摆动式燃烧器四角切向燃烧、同心反切的燃烧技术,一次风喷嘴采用不等间距四角布置、切圆燃烧、摆动喷嘴燃烧方式;具有煤种适应性好、燃烧均匀完全和有效降低NO_x生成量等优点。其参数为:过热蒸汽流量2008t/h,再热蒸汽流量1649t/h,过热蒸汽出口温度541℃,过热蒸汽出口压力17.5MPa,再热蒸汽温度进/出327/541℃,再热蒸汽压力进/出3.83/3.63MPa,给水温度277℃,循环方式为控制循环。发电机由上海发电机有限公司提供。

(二) 2001年参与制造我国第一台900MW超临界机组

上海外高桥发电厂第二期工程2×900MW超临界机组,1997年由世界银行贷款,因而工程采用国际竞标,中标供货商分别是:汽机岛为德国西门子公司(SIEMENS);锅炉岛为德国阿尔斯通公司(ALSTOM);仪控岛(I&C)为日本日立公司(HITACHI);除灰岛为德国穆勒公司(MÜLLER);升压站岛(GIS)为日本三菱公司(MITSUBISHI);发电机为德国SIEMENS公司设计制造。两台900MW机组分别在2004年4月、10月顺利通过168h试运,随后投入商业运行。

上电集团合作制造了低压内外缸、低压第二、三级隔板、导流环、1~5号轴承座,制造出2号机组的发电机定子,标志着我国已具备制造百万千瓦等级发电机的能力。

(三) 2005年制造出上电集团第一台600MW超临界机组

2005年,上电集团成套制造出集团的第一台600MW超临界机组,2005年11月8日在江苏太仓电厂一次通过了168h满负荷运行。实际上上电集团2003年8月与江苏镇江电厂签订了第一台600MW超临界机组合同,3天后即2005年11月11日,镇江电厂的第一台600MW超临界机组(5号机组)也一次通过了168h满负荷运行。

锅炉是上海锅炉厂有限公司于 2002 年从美国阿尔斯通能源公司 (ALSTOM) 引进的 600MW 超临界机组设计技术生产的, 为超临界参数变压运行螺旋管圈直流炉 (SG-1910/25.4-M951 型、1910t/h 超临界压力直流锅炉), 采用单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧方式、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊结构、Π 型、露天布置方式, 其中燃烧设备的设计中采用能有效降低 NO_x 排放的 LNCFS 燃烧系统。

汽轮机采用由上海汽轮机有限公司引进美国西屋公司技术制造的超临界、一次中间再热、三缸四排汽、单轴、凝汽器为单流程双背压、凝汽式汽轮机 (型号 N600-24.2/566/566)。

发电机为上海汽轮发电机有限公司引进美国西屋公司技术制造, 采用自并励静止励磁系统。发电机冷却方式为水—氢—氢。

(四) 2006 年制造出上电集团第一台 600MW 亚临界空冷机组

2005 年 8 月, 山西柳林电厂二期 $2 \times 600\text{MW}$ 工程项目被国家列为重点项目, 也是山西省重点工程项目。该项目选用国产亚临界燃煤空冷发电机组 (空冷岛 SPX), 烟气治理采用高效静电除尘器和特效脱硫装置, 属高效、节水、环保型电厂。项目按国际惯例采用 EPC 交钥匙总承包模式, 总承包商为上电集团。2007 年 8 月, 柳林电厂二期第一台 600MW 空冷发电机组投入运行。

(五) 2006 年制造出我国第一台 1000MW 超超临界汽轮机、发电机

2003 年 10 月, 上电集团签订了玉环电厂超超临界火电机组的汽轮机、发电机供货合同。上电集团引进德国西门子技术制造出我国第一台 1000MW 超超临界汽轮机和发电机, 并于 2006 年 11 月在浙江玉环电厂投入运行。与之配套的锅炉是哈尔滨锅炉有限公司 (HBC) 引进日本三菱公司 (MHI) 合作生产的超超临界直流锅炉。

(六) 2007 年制造出上电集团第一台 1000MW 超超临界锅炉

2007 年, 上海锅炉厂有限公司 (SBWL) 引进、吸收德国阿尔斯通 (ALSTOM) 技术生产出上电集团第一台 1000MW 超超临界锅炉, 并于 2007 年 12 月在上海外高桥电厂三期工程中投入运行。与之配置的汽轮机和发电机是由上海电气集团分别引进、吸收德国阿尔斯通和西门子技术生产的。

第二节 单元机组类型及特点

利用煤、石油和天然气等作为燃料的发电厂称为火力发电厂。目前, 我国火力发电厂主要以煤为燃料, 分为凝汽式电厂和热电厂。凝汽式电厂用于发电, 而热电厂则发电和供热必须兼顾。热电厂在电力系统中的运行方式远不如凝汽式电厂灵活, 但其热效率较高。

凝汽式电厂的单元机组按压力的不同可分为亚临界和超临界、超超临界机组, 根据冷却介质的不同又可分为湿冷机组和空冷机组。单元机组中的锅炉有汽包锅炉和直流锅炉两种, 制粉系统有中间储仓式和直吹式两种, 燃烧方式主要可分为四角切圆燃烧和对冲燃烧。单元机组的类型不同, 必然会使其结构不一样, 下面对机组的分类及其结构特点加以介绍。

一、单元机组的类型

(一) 按压力分类

对于 600MW 及以上的凝汽式机组, 按蒸汽压力可分为亚临界机组和超临界、超超临界机组。亚临界机组的蒸汽压力低于临界压力 (水蒸气的临界压力为 22.12MPa、临界温度为

374.15℃), 典型蒸汽参数主蒸汽压力/主蒸汽温度/再热蒸汽温度为 16.7MPa/538℃/538℃; 超临界机组的蒸汽压力高于临界压力, 其主蒸汽压力一般为 24MPa 左右, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 538~560℃, 其典型参数为 24.2MPa/566℃/566℃; 超超临界机组的主蒸汽压力为 25~31MPa 及以上, 主蒸汽和再热蒸汽温度为 580~600℃及以上。

(二) 按冷却介质分类

凝汽式单元机组按冷却介质可分为湿冷机组和空冷机组。湿冷机组以水为冷却介质, 分为开式循环和闭式循环; 空冷机组以空气为冷却介质。

在我国南方, 水资源相对较丰富, 火电厂大部分建在江河边或沿海而建, 都属于湿冷机组。湿冷机组利用江河水或海水作循环水直接冷却凝汽器里的汽轮机排汽, 循环水吸热后排入江河或海里, 也即通常所说的开式循环。

在我国北方很多地区, 水资源相对贫乏, 火电厂的冷却方式主要采用空气冷却。空冷系统有直接空冷系统、带混合式凝汽器的间接空冷系统和带表面式凝汽器的间接空冷系统。

(1) 直接空冷系统是指汽轮机的排汽直接用空气冷却, 空气与蒸汽之间进行表面式换热, 由机械通风方式供应所需空气。直接空冷的凝汽设备称为空冷凝汽器。汽轮机排汽通过排汽管道送到室外的空冷凝汽器内, 轴流冷却风机使空气流过其外表面, 将排汽冷凝成水, 凝结水再经凝结水泵送回汽轮机回热系统。直接空冷系统的优点是设备少, 系统简单, 基建投资较少, 占地少, 空气量的调节灵活。该系统一般与高背压(大于 19.6kPa)汽轮机配套。这种系统的缺点是运行时排汽管道密封困难, 维持管内的真空困难, 启动时建立真空所需时间长。

(2) 混合式间接空冷系统, 又称海勒式间接空冷系统, 主要由喷射式(混合式)凝汽器和装有福哥型散热器的空冷却塔组成。由外表面经过防腐处理的圆形铝管、套以铝翅片的管束所组成的散热器, 称为缺口冷却三角, 在缺口处装上百叶窗就成为冷却三角。系统中的冷却水是高纯度的中性水, pH=6.8~7.2。中性冷却水进入凝汽器, 直接与汽轮机排汽混合并将其冷凝。受热后的冷却水绝大部分由冷却循环泵送至空冷却塔散热器, 经与空气对流换热冷却后通过调压水轮机将冷却水再送至喷射式凝汽器进入下一个循环。受热后的循环冷却水的极少部分经凝结水精处理装置处理后送至回热系统。系统采用自然通风方式冷却。海勒式间接空冷系统的优点是以微正压的低压水运行, 较易掌握; 可与中背压(9.8kPa 左右)汽轮机配套; 配用海勒系统的汽轮机, 其年平均背压低于直接空冷机组, 稍低于表面式凝汽器间接空冷机组, 故机组煤耗较低。缺点是设备多、系统复杂、冷却水循环泵的泵坑较深、自动控制系统复杂、全铝制散热器的防冻性能差。

(3) 表面式凝汽器的间接空冷系统, 又称哈蒙式间接空冷系统。这种空冷系统是在海勒式间接空冷系统的运行实践基础上发展起来的新系统, 由表面式凝汽器与空冷却塔构成。该系统与常规的湿冷系统基本相似, 所不同的是用碱性除盐水代替循环水, 用闭式循环冷却水系统代替开式循环冷却水系统。系统采用自然通风方式冷却。哈蒙式间接空冷系统优点是节约厂用电、设备少、冷却水系统与汽水系统分开, 两者水质可按各自要求控制; 冷却水量可根据季节调整, 在高寒山区, 冷却水系统中可充以防冻液防冻。缺点是空冷塔占地大、基建投资多; 系统中需两次换热, 且都属于表面式换热, 使全厂效率有所降低。

(三) 按锅炉的工质流动方式分类

凝汽式单元机组中的锅炉按其工质的流动方式可分为汽包锅炉和直流锅炉, 汽包锅炉又可分为自然循环炉和控制循环炉。

(1) 自然循环锅炉的汽水流动主要依靠下降管内水的平均密度与水冷壁内汽水混合物的

平均密度差而进行，由于它们的密度差造成一定的流动压头，从而使蒸发受热面内工质达到往复循环流动。自然循环锅炉的特点是流动方式简单、运行可靠，能适应炉膛内吸热量变化而进行自动调节；因其吸收热量最多的管子通过的水量也最多，可防止传热不均现象的产生；自然循环不需循环泵，故投资及运行费用相对减少。

(2) 控制循环锅炉是在锅炉循环回路的下降管和上升管之间加装循环泵（炉水泵）以提高循环回路的流动压头，因此汽包及上升管、下降管可采用较小的直径。但循环泵运行时需消耗一定的功率。

(3) 直流锅炉没有汽包，在水的加热受热面和蒸发受热面间，及蒸发受热面和过热受热面间无固定的分界点，在工况变化时，各受热面会发生变化。在直流锅炉蒸发受热面中，由于工质的流动不是依靠汽水密度差来推动，而是通过给水泵压头来实现，工质一次通过各受热面，蒸发量等于给水量，故认为直流锅炉的循环倍率为 1。直流锅炉对给水品质要求高，对控制系统要求也高。直流锅炉由于没有汽包，在启停过程及变负荷运行过程中的升、降温速度可快些，锅炉启停时间可大大缩短，锅炉变负荷速度提高。直流锅炉适合于超临界压力及亚临界压力参数机组；自然循环及控制循环锅炉只适宜亚临界压力参数机组。由于超临界压力下水与蒸汽的密度差很小，无法进行汽水分离，所以超临界参数锅炉不能采用带汽包的循环锅炉，只能采用直流锅炉。也有采用复合循环锅炉，但目前国内还没有。

(四) 按锅炉制粉系统分类

凝汽式单元机组中锅炉的制粉系统可分为中间储仓式和直吹式两种。中间储仓式是将磨好的煤粉先储存在煤粉仓中，然后再根据负荷的需要，通过给粉机将煤粉仓中的煤粉送入炉膛中燃烧；而直吹式是将磨煤机磨好的煤粉直接送入炉膛中燃烧。不同的制粉系统配置不同类型的磨煤机。对于中间储仓式制粉系统，除个别情况外，所配置磨煤机一般都是低速筒型钢球磨煤机；而直吹式制粉系统所配置的磨煤机则为中速磨煤机、高速磨煤机以及双进双出钢球磨煤机。在直吹式制粉系统中，磨煤机制备的煤粉全部送入炉膛燃烧，因此在任何时候制粉系统的制粉量均等于锅炉的燃料消耗量。这表明制粉系统的工作情况直接影响锅炉的运行工况，要求制粉系统的制粉量能随时适应锅炉负荷的变化。600MW 机组锅炉的制粉系统几乎都是直吹式制粉系统。

(五) 锅炉按燃烧方式分类

锅炉按燃烧方式主要可分为四角切圆燃烧和对冲燃烧。四角切圆的燃烧方式是将煤粉（一次风）和二次风在炉膛四角喷入炉膛，在炉膛中心形成一个或两个假想切圆相切的方式，实现煤粉的切圆燃烧。四角切圆燃烧技术，可以实现空气分级供风、燃料分级的燃烧，具有炉膛充满度好，扰动大、有利于燃烬，从而实现降低 NO_x 排放量、低负荷稳燃等。四角切圆燃烧采用直流燃烧器。对冲燃烧是燃烧器中的燃料和空气喷入炉膛各自扩展并对向撞击后产生上升气流进行燃烧的方式，包括前后墙对冲、侧墙对冲和四角对冲。对冲燃烧是将每一个旋流燃烧器作为一个独立的燃烧单元来组织燃烧，一、二次风喷口同轴流动，具有一定流速的二次风在燃烧器出口中心部位形成负压，造成高温烟气的回流，为一次风的着火创造了非常有利的条件。对冲燃烧采用旋流燃烧器，自稳燃性能好，炉膛出口烟温偏差易控制。

二、单元机组的结构特点

(一) 600MW 超临界机组的基本特点

1. 汽轮机的特点

国内三大电气集团的汽轮机厂引进的亚临界 600MW 汽轮机，虽然技术各有不同，但较



早期均是 4 缸 4 排汽。之后，随着技术的进步改成 3 缸 4 排汽。而超临界 600MW 汽轮机则是在 3 缸 4 排汽亚临界 600MW 汽轮机基础上的发展，主要反映在进汽阀门和高压缸部分材料的改进、防固粒磨损和汽隙振荡的措施等。

目前我国亚临界 600MW 机组采用的进汽参数为 16.7MPa/538℃/538℃，而超临界 600MW 机组的进汽参数为 24.2MPa/566℃/566℃，与设计热耗比较，后者效率提高 2%~3%，发电标准煤耗降低 8~10g/kWh，经济价值十分巨大。

由前面的叙述可知，哈尔滨汽轮机厂的 600MW 超临界汽轮机是在原亚临界基础上采用三菱的高压部分；东方汽轮机厂则仍依靠日立公司的技术；上海汽轮机厂在西门子公司的支持下沿用西屋的技术。哈汽、上汽为反动式，东汽为冲动式。

(1) 主要技术规范

汽轮机型式：超临界、一次中间再热、3 缸 4 排汽、单轴、凝汽式

进汽参数：24.2MPa/566℃/566℃

额定功率（铭牌功率 TRL）：600MW

阀门全开（VVO）功率：约 660MW

加热器级数：8 级

给水温度（TRL 工况）：约 280℃

工作转速：3000r/min

机组能安全连续运行的频率范围：48.5~51Hz

(2) 结构特点。机组高中压合缸，低压为 2 缸 4 排汽。东汽为冲动式机型，高压 1+7 级，中压 6 级，低压 4×7 级；上汽、哈汽为反动式机型，全机除调节级为冲动级外，其余均为反动级。上汽为高压 1+11 级，中压 8 级，低压 4×7 级。哈汽为高压 1+9 级，中压 6 级，低压 4×7 级。汽缸均采用传统的双层缸结构。

主汽门、调节汽门、中压联合汽门选择较好的阀腔室及合适的通道型线，以减少冲击波和涡流损失，以及降低汽流激振力和振动噪声。阀座、阀芯的阀口处镶焊硬质合金，运行中全开的阀门设置门杆与门杆套的密封（镶焊硬质合金），以保证在正常运行中门杆不漏汽。各门杆漏汽疏放合理，不对外漏汽。

汽轮机转子采用整锻无中心孔转子。汽轮机设计允许不揭缸进行转子的动平衡。在整个高中低压通流部分全面推广应用全三元气动技术。弯扭叶片设计广泛用于通流部分各叶片级。新一代整体自带围带叶片被各家采用。与铆接围带相比，整体围带结构彻底解决了动叶片的高温蠕变问题，应力集中下降 2/3。

末级叶片各家均采用自己有使用业绩的较成熟的叶片。上汽末叶长 905mm，环形面积 4×7.25m²；哈汽末叶长 1000mm，环形面积 4×8.5m²；东汽末叶长 1016mm，环形面积 4×8.76m²。

(3) 轴系稳定性。汽轮发电机组轴系由高中压转子、低压转子 I、低压转子 II、发电机转子组成，支承在 9 个轴承上。其中，汽轮机部分转子均为双支点结构，而发电机转子和接长轴转子则组成为三支点结构。

轴系的各阶临界转速均满足避开 15%~10%额定转速的要求，扭振频率满足避开工频 ±10%和 (-7%~+8%) 2 倍工频的准则，说明机组的轴系特性非常良好。

三个制造厂轴承型式均以可倾瓦为主，但配置和尺寸略有不同；轴承比压均在适当范围内；失稳转速计算值均大于 4500r/min；轴瓦金属温度设计值控制在 90℃以下。因此，轴系

的稳定性是可靠的。从已投产的几台超临界 600MW 汽轮机的运行实际业绩看, 效果良好。

(4) 防固粒冲蚀措施。由于超临界机组采用直流式锅炉, 给水携带的各种杂质和炉管腐蚀沉积物的脱离, 构成了对汽轮机进汽端的冲蚀。因此, 超临界汽轮机必须有防固粒冲蚀措施。

1) 哈尔滨汽轮机和上海汽轮机防固粒冲蚀措施有:

a. 由于反动级的进汽冲角远大于冲动式, 而进汽速度低于冲动式, 因此反动级的动叶片的冲蚀明显小于冲动式。因除高压调节级外均采用反动级, 显然在防止冲蚀方面远比采用冲动式的机型更为有利。

b. 强化静叶片型线, 减少静叶出汽边的破裂。

c. 在进汽喷嘴或叶片采用表面镀层技术。经多种工艺优选, 采用扩散法涂硼化物的方法。

2) 东方汽轮机防固粒冲蚀措施有:

a. 由于是冲动式机组, 固粒冲蚀从机理上看相对较重。

b. 调节级的固粒冲蚀主要产生在喷嘴出汽边内弧上, 为此不仅采用合理的喷嘴型线减轻冲击, 而且采用涂层保护。

c. 中压缸第 1 级固粒冲蚀主要表现在导叶出口背弧上, 是动静叶片间粒子复杂的多重反射冲击所致。因此, 合理加大动静叶轴向间隙, 使从动叶反射的粒子被主流吹回动叶流道而不能打在静叶出口背弧上, 切断粒子多重反射的途径, 同时对静叶采用等离子淬火层保护技术。

(5) 防汽隙振荡措施。对超临界汽轮机, 由于蒸汽密度增加, 必须考虑蒸汽激振力的影响。为防止蒸汽激振引起的低频振动, 在机组设计时首先考虑了调速汽门开启顺序的关联影响, 即调节级喷嘴进汽的不对称性对轴承负荷和动特性的影响。同时考虑汽封动静间隙漏汽汽流力的影响, 包括轴向流动和周向流动两部分的汽流力。它们与轴封的几何尺寸、轴封蒸汽流量、温度、压力、轴封齿的平均间隙以及转子角速度等因素有关。因此, 高压部分汽封需选择合适的汽封间隙及结构型式, 汽缸端部汽封及隔板汽封留有适当的弹性和退让间隙。同时转子要精确动平衡, 避免转子偏心, 并采用引进计算程序及设计规范, 用于超临界 600MW 机组的轴系稳定性计算。

(6) 运行和启动方式。从汽轮机方面分析, 超临界机组的运行和启动方式与亚临界差别不大, 只是由于锅炉是直流炉, 要求机炉配合更紧密。超临界 600MW 机组可采用定压运行、滑压运行及定—滑—一定等多种运行模式。一般来说, 滑压起始点由锅炉最低不投油稳燃压力确定, 终止点则可根据机组经济性来决定。

哈汽、上汽机组可采用高压缸启动, 也可采用高、中压缸同时控制启动的方式。但后者使用较广泛, 它采用双回路系统: 即高压缸—高压排汽通风阀—凝汽器回路以及中低压—凝汽器回路。为避免汽轮机在高负荷脱扣或失去负荷后高压缸叶片出现过热, 在脱扣或失去负荷时迅速打开通风阀, 避免高压排汽温度很快提高。为保护高压排汽端, 当高压排汽切换到再热旁路时, 旁路压力必须小于 0.828MPa。此时, 高压调节级后压力与高压缸排汽压力之比要求大于 1.7, 信号接入 DEH。此外, 高压缸排汽温度不大于 427℃, 保护信号接入 DEH。哈汽、上汽机组由于是反动式, 轴向间隙大, 一般运行不受差胀的限制。

东汽机组是典型的冲动式机组, 推荐采用中压缸启动。此种方式使用得当, 可减小汽缸和转子的热应力, 缩短启动时间。冷态启动(汽轮机金属温度低于 150℃)时需通过再热冷段