

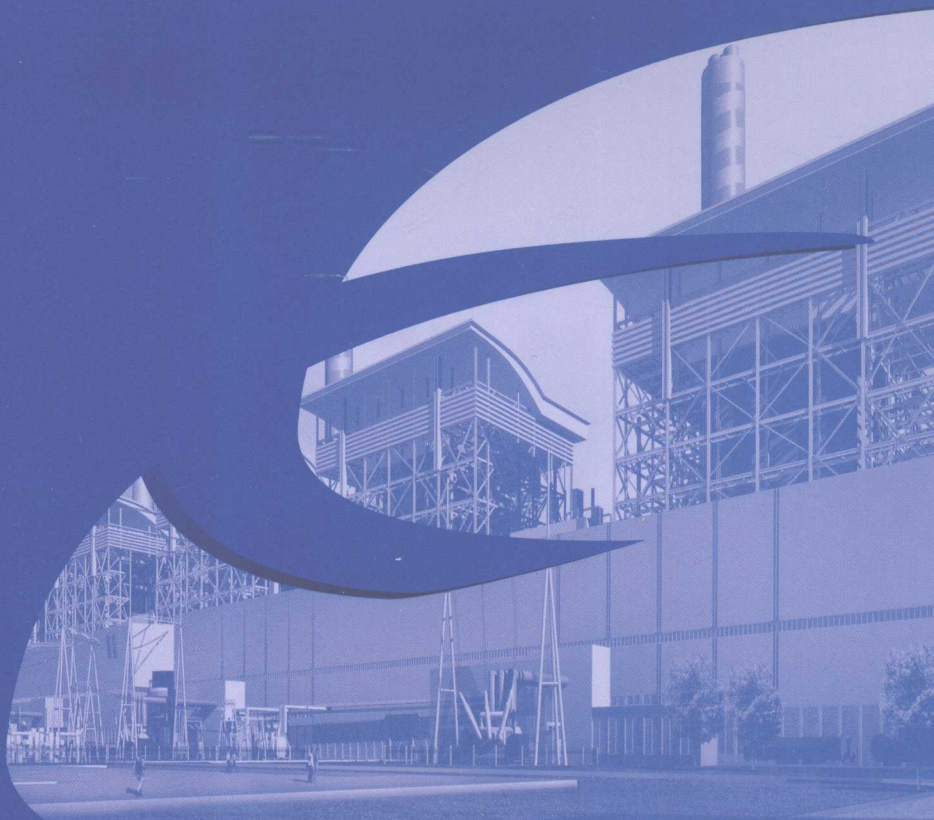


超超临界火力发电机组技术丛书

CHAOCHAO LINJIE HUOLI FADIANJIZU JISHU CONGSHU

超超临界机组 汽轮机设备及系统

胡念苏 主编



化学工业出版社



超超临界火力发电机组技术丛书

超超临界机组 汽轮机设备及系统

● 胡念苏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是《超超临界火力发电机组技术丛书》的第二分册。书中详细介绍了我国三大动力集团生产的引进型 1000MW 超超临界汽轮机及其热力系统、辅助设备的原理、结构、特性、运行、维护等,内容包括汽轮机本体结构、汽轮机调节与保护系统、汽轮机热力系统、汽轮机的辅助设备、汽轮机的启停及运行维护等。

本丛书可供从事超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材和高等院校相关专业师生的参考书。

超超临界火力发电机组技术丛书

图书在版编目 (CIP) 数据

超超临界机组汽轮机设备及系统/胡念苏主编. —北京:化学工业出版社, 2008. 5

(超超临界火力发电机组技术丛书)

ISBN 978-7-122-02726-9

I. 超… II. 胡… III. 火电厂-蒸汽透平 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 063165 号

责任编辑: 郑宇印 戴燕红

装帧设计: 于 兵

责任校对: 陈 静

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 466 千字 2008 年 9 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 56.00 元

版权所有 违者必究

前 言

全世界能源的日益紧张以及对环境保护要求的日益严格,促使火力发电机组采用更高参数、更大容量以获得更佳效率,也能相对更有效地减少对环境的污染。同时,新技术、新材料领域的成果也为高参数机组的制造和应用提供了条件。事实上,自从锅炉、汽轮机成为大规模火力发电的主要动力设备以来,其发电机组一直沿着不断提高蒸汽参数、增大单机功率、改进材料性能和制造工艺、提高自动化水平的方向发展。其经济性、安全性、可靠性、清洁性、灵活性以及自动化程度都在得到不断的改善。

火力发电机组采用超超临界技术是提高汽轮发电机组经济性的有效手段,与同容量亚临界和常规超临界火电机组比较,超超临界机组的效率有明显的提高。我国超临界和超超临界机组已经成为今后一个时期火力发电机组建设的重点,同时正在加快进行超临界和超超临界机组制造、运行中的关键技术研究。2006年11月和12月,华能玉环发电厂和华电国际邹县发电厂的1000MW超超临界发电机组分别建成投产,标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

为满足广大技术人员和现场生产人员了解引进型超超临界火力发电机组的结构、运行、系统等知识的需要,我们编写了这套《超超临界火力发电机组技术丛书》。丛书包括《超超临界机组锅炉设备及系统》、《超超临界机组汽轮机设备及系统》、《超超临界机组电气设备系统》、《超超临界机组控制设备及系统》、《超超临界机组烟气净化设备及系统》五个分册。

本丛书可供从事超超临界火力发电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为现场运行、检修人员的培训教材和高等院校相关专业师生的参考书。

《超超临界机组汽轮机设备及系统》是本丛书的第二分册。全书详细介绍了我国三大动力集团生产的引进型1000MW超超临界汽轮机及其热力系统、辅助设备的原理、结构、特性、运行、维护等,内容包括汽轮机本体结构、汽轮机调节与保护系统、汽轮机热力系统、汽轮机的辅助设备、汽轮机的启停及运行维护等。

本分册由武汉大学胡念苏主编,参加编写的人员有武汉大学的胡念苏(编写第一、五章),刘先斐(编写第二、三章),樊天竞(编写第四章),王建梅(编写第六、七章)。

本分册由武汉大学陈汝庆教授担任审稿,他对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见和建议,在此谨表示诚挚的谢意。

本分册在编写过程中,参阅了书后列出的参考文献以及相关电厂、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,得到了众多单位的大力支持,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限和编写时间紧迫,错漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2008年3月

目 录

第一章 概述	1
第一节 国内外超超临界机组的发展	1
第二节 国产引进型超超临界汽轮机技术特性	5
第三节 超超临界汽轮机热力系统及热力特性	18
第四节 超超临界汽轮机的厂房布置	29
第二章 汽轮机本体结构	35
第一节 汽缸及滑销系统	35
第二节 转子	45
第三节 叶片	48
第四节 汽封及轴封系统	57
第五节 轴系	61
第三章 汽轮机调节及保护系统	65
第一节 汽轮机进汽阀门	65
第二节 DEH 调节系统	72
第三节 DEH 的液压伺服系统	79
第四节 汽轮机的保护系统	89
第四章 汽轮机热力系统	95
第一节 概述	95
第二节 主蒸汽系统	98
第三节 汽轮机旁路系统	102
第四节 回热抽汽系统	106
第五节 主凝结水系统	111
第六节 主给水及除氧系统	116
第七节 加热器的疏水与放气系统	124
第八节 辅助蒸汽系统	132
第九节 凝汽器抽真空及其连接管道系统	136
第十节 循环冷却水系统及工业水系统	140
第五章 汽轮机辅助设备	151
第一节 凝汽器	151
第二节 真空泵组	160
第三节 高压加热器	164
第四节 低压加热器	170
第五节 疏水泵	177
第六节 除氧器	178
第七节 给水泵组	189
第八节 凝结水泵	199
第九节 循环水泵	205

第六章 汽轮机的启动和停机	212
第一节 汽轮机启停概述	212
第二节 冷态滑参数启动	217
第三节 热态滑参数启动	238
第四节 汽轮机正常停机	241
第五节 汽轮机事故停机	248
第七章 汽轮机的正常运行和维护	251
第一节 汽轮机的正常运行	251
第二节 汽轮机辅助设备及系统的运行	260
第三节 汽轮机的异常运行	264
第四节 汽轮机的联锁保护	268
第五节 汽轮机组的试验	274
参考文献	285

第一章 概述

全世界能源供应的日益紧张以及对环境保护要求的日益严格,促使火力发电机组采用更高的参数以获得更佳效率,同时,新材料的开发成功也为高参数机组的制造和应用从技术上提供了条件。事实上,自从锅炉、汽轮机成为大规模火力发电的主要动力机械以来,其发电机组一直沿着不断提高蒸汽参数、增大单机功率、改进材料性能和制造工艺、提高自动化水平的方向发展。其经济性、安全性、可靠性、清洁性、灵活性以及自动化程度都在不断地改善。

火力发电机组采用大容量和超临界技术是提高汽轮发电机组经济性的有效手段,已经被世界上先进国家广泛采用。与同容量亚临界火电机组比较,超临界机组可提高效率2%~2.5%,超超临界机组更可提高效率约5%。世界许多先进国家超临界和超超临界机组的发电量已占火力发电的40%~60%。

我国相关决策部门已确定超临界机组为今后一个时期火力发电机组建设的重点之一,同时正在加快研究超临界和超超临界机组制造、运行中的关键技术。目前有一大批超临界机组已经投入运行和正在建设。2006年11月和12月,华能玉环发电厂和华电国际邹县发电厂的1000MW超超临界发电机组分别建成投产,标志着我国火力发电设备的制造和运行水平都进入了一个新阶段。

第一节 国内外超超临界机组的发展

一、关于超临界和超超临界的概念

(1) 超临界机组的概念 水(H_2O)作为汽轮发电机组动力装置的常用工质,具有其自身的物理特性,在压力较低的情况下,当水被加热成为水蒸气的过程当中,有一个汽、水共存的汽化阶段。但是在压力提高到临界参数的情况下,水从液态加热到气态(水蒸气)的过程中不再有汽化这一阶段,即水完全汽化会在一瞬间完成,在饱和水和饱和蒸汽之间不再有两相区存在。

由于水的临界状态点的参数为22.12MPa、374.15℃,因此将锅炉出口蒸汽的参数高于临界参数的汽轮发电机组即称为超临界机组,目前引进型国产超临界机组锅炉的出口参数大多为25.5MPa/571℃(对应的汽轮机进口参数为24.2MPa/566℃)。

由于参数超过临界参数后,水的汽化过程已经不存在,水的汽化过程与低于临界参数时有很大的区别,所以火力发电机组的结构型式以及运行方式等都有其自身的特点,例如,超临界机组必须采用直流锅炉。

(2) 超超临界机组的概念 超超临界(Ultra Super-Critical,也有称高效超临界、高参数超临界等)机组是相对于常规超临界机组的蒸汽参数而言的,与超临界的概念有明确的物理定义不同,超超临界是20世纪90年代提出来的一个工程产品的商业性概念,不同国家对超超临界的定义不完全相同。1993年,日本最早提出超超临界机组为蒸汽压力 ≥ 24.2 MPa,

温度 $\geq 593^{\circ}\text{C}$ 的机组；而丹麦认为压力 $\geq 27.5\text{MPa}$ ；1997 年，西门子公司则以采用“ 600°C 材料”的机组来区分。尽管这样，国际上普遍认为，在常规超临界参数的基础上压力和/或温度再提升一个档次，也就是工作压力超过 24.2MPa （a）或者主蒸汽温度/再热蒸汽温度超过 566°C ，都属于超超临界机组的范畴。目前国际上已经在运营或正在设计建设的超超临界机组压力参数分为 25MPa 、 27MPa 和 $30\sim 31\text{MPa}$ 三个级别，温度则为 $580\sim 620^{\circ}\text{C}$ 。

我国电力百科全书认为主蒸汽压力 $\geq 27\text{MPa}$ 为超超临界机组。2003 年，我国“国家高技术研究发展计划（863 计划）”项目“超超临界燃煤发电技术”中定义超超临界参数为压力 $\geq 25\text{MPa}$ ，温度 $\geq 580^{\circ}\text{C}$ 。目前国内已经投产和正在建设的几座 1000MW 级超超临界机组汽轮机进口初参数为 $25\sim 26.25\text{MPa}$ （a）、主蒸汽/高温再热蒸汽温度为 $600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 。

二、超超临界机组的优势

超超临界机组由于参数较高，因此效率高是其最显著的特点，效率的提高又使得有害物质的排放量相对减少，燃料的运输量相对降低。同时超超临界机组往往伴随着大容量（通常为大于 600MW ），因此又具有单位容量造价低、定员少、易于进行烟气净化（包括除尘、脱硫、脱硝等）等一系列的优势。随着材料技术、制造工艺以及自动控制技术的不断提高，超超临界机组的安全性、可靠性、灵活性、自动化程度都达到了新的高度。

（1）超超临界机组的效率 目前，世界上超超临界机组的最高热效率已达 47% 。一般认为参数为 $24.1\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$ 的机组比参数为 $17.1\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$ 的亚临界机组效率提高 $2.0\%\sim 2.5\%$ ，参数为 $31\text{MPa}/566^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ 的机组比参数 $17.1\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/538^{\circ}\text{C}$ 的机组可提高效率 $4.0\%\sim 6.0\%$ 。参数为 $30\text{MPa}/600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 的机组比参数为 $18\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}/540^{\circ}\text{C}$ 的机组可提高相对效率 6% 。

一般亚临界燃煤火电站的效率在 37% 左右。前苏联 20 世纪 80 年代运行的一批超临界机组火电站蒸汽参数为 $23.5\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}/540^{\circ}\text{C}$ ，效率为 39.6% 。

一般认为蒸汽参数为 $25\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}/560^{\circ}\text{C}$ 的超临界火电机组，电站效率为 $42\%\sim 43\%$ 。如 1987 年投运的挪威 650MW HEMWEG 电站，蒸汽参数为 $26\text{MPa}/540^{\circ}\text{C}/568^{\circ}\text{C}$ ，电站设计效率 42.3% ，实测为 43.2% ，而我国 1992 年投产的石洞口二厂 $2\times 600\text{MW}$ 机组，参数为 $24.2\text{MPa}/538^{\circ}\text{C}/566^{\circ}\text{C}$ ，供电煤耗为 $313\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，电站效率为 39.2% 。近来世界上出现了一大批高参数超超临界机组，蒸汽参数为 $28\sim 30\text{MPa}$ ， $580^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ ，它们的电站效率均为 45% ，个别的高达 48% 。

超超临界机组的温度参数一般有 $580^{\circ}\text{C}/580^{\circ}\text{C}$ 、 $580^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}/600^{\circ}\text{C}$ 等档次，如果机组进行二次再热，效率还会进一步提高，根据美国 GE 公司的测算，不同温度档次以及二次再热的机组效率如表 1-1 所示。

表 1-1 蒸汽参数对机组纯效率的影响

一次再热机组	蒸汽初温/再热蒸汽温度/ $(^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C})$	580/580	580/600	600/600
	机组效率/ $\%$	44.94	45.11	45.33
二次再热机组	蒸汽初温/一次再热蒸汽温度/二次再热蒸汽温度/ $(^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C})$	580/580/580	580/590/600	600/600/600
	机组效率/ $\%$	45.51	45.67	45.9

（2）超超临界机组的电站投资和发电成本 火力发电的发电成本主要取决于电站的投资与燃料价格，由于超超临界机组的参数较高，其主蒸汽和再热蒸汽的管道、阀门以及相关的部件的材料投资较高，因此，与亚临界和常规超临界机组比较，超超临界机组在发电成本上

的优势则主要取决于材料与燃料的价格比，随着材料技术的不断提高和世界能源的日益紧张，超超临界机组的优势将越来越得到体现。表 1-2 是美国某电站超超临界机组的技术经济比较。

表 1-2 某 650MW 燃煤火电站的技术经济比较

电 站 型 式	亚临界机组	超超临界机组
功率/MW	650	650
蒸汽参数/(MPa/°C/°C)	18.0/540/540	27.0/580/600
电站净效率/%	41.7	44.1
电站的投资/(\$/kW)	750	775
每年度的发电成本/[美分/(kW·h)]	3.06	3.02

(3) 超超临界机组的污染控制 以表 1-2 中所列超超临界机组为例，按每年满负荷运行 7500h 计算，该机组比亚临界发电机组每年节约国际通用煤（25000kJ/kg）115000t，每年可少排放 CO₂ 270000t。进一步计算表明，若将机组参数提高到 35.0MPa/700°C/720°C，则每年节约国际通用煤 335000t，每年可少排放 CO₂ 780000t。

(4) 超超临界机组的运行特性 对于运行时间，一般超临界火电机组的冷态启动时间（到带满负荷）为 7h 30min，比亚临界火电机组冷态启动时间多 1h。超超临界机组在停机 40h 后的启动时间为 4h 20min，比亚临界火电机组在停机 40h 后的启动时间多 1h 10min。

从机组的调峰能力来看，超超临界机组在 50%~100%额定负荷之间的变负荷率可以达到 (7%~8%)/min，甚至比亚临界机组在同样负荷范围内的变负荷率 5%/min 要好。

由于超超临界机组具有较好的热机动性，通常采用复合变压运行方式。在低负荷下，机组仍能保持较高的效率，对于二班制运行的机组，深夜停机后从点火到满负荷的启动时间约为 3h。

三、国外超超临界机组的发展

自 1957 年 3 月第一台超临界机组投入商业运行以来，经过许多国家 50 余年的实践，特别是冶金工业技术的发展，提供了发电设备用的铁素体钢、奥氏体钢，甚至超合金钢，到今天超临界和超超临界机组已大量投运，并取得了良好的运行业绩。

美国是发展超临界机组最早的国家，从 20 个世纪 50~70 年代起，以美国 GE 和西屋公司为核心的发电机组制造企业就开始了超临界机组的生产，当时的起点就是超超临界参数。1959 年，325MW 超超临界机组的进汽压力为 34.5MPa，进汽温度达到 649°C，该机组目前仍以 33MPa/607°C/566°C/566°C 参数在运行，是目前世界上运行时间最长的超超临界机组。

由于当时机组所用材料的问题，电厂可靠性较差，美国从 20 世纪 60 年代后期开始至 80 年代，超临界机组所采用的参数均降低到常规超临界参数，即压力为 3500psi (24.1MPa)，温度为 1000°F/1050°F (538°C/566°C)。这个时期，美国超临界机组总数达到 159 台，并不断对已投运的机组进行大规模的优化及改造，到 1985 年，常规超临界机组的可靠性问题得到彻底解决，已达到亚临界机组相同的水平。这个时期，随着计算机技术的发展和改造实践，还形成了一批经过验证的新设计方法、新结构，大大提高了机组的经济性、可靠性和运行灵活性。

日本发展超临界机组是采用引进美国和欧洲的技术，并进行二次开发创新，现已跃居世界发展超临界技术的先进国家行列。日本 450MW 以上的火力发电机组全部采用超临界或超

超临界机组，其容量占总装机容量的 61%。俄罗斯 300MW 以上容量机组全部采用超临界参数，共有超临界机组 224 台。从 20 世纪 90 年代开始起，随着新技术和与耐高温材料出现，欧洲及日本燃煤发电工业进入了一个采用更高参数的发展阶段。火电厂投运机组的主汽温度最高达到 600℃，再热温度最高为 610℃。这些机组采用的主汽压力，除东芝 1989 年有两台 31MPa 的两次再热 700MW 机组外，日本 1990 年以来所有机组的压力均低于 25MPa，欧洲除丹麦 1997/ 1998 年投运两台 29MPa 压力、两次再热的 415MW 机组外，西门子公司 1998 年后也有较高压力的业绩，但目前投运的大功率（包括 1025MW）机组的进汽压力均不大于 26.5MPa（表 1-3）。

表 1-3 日本与欧洲部分超超临界机组参数与容量

参数 (MPa/℃/℃/℃)	功率 /MW	周波 /Hz	转子	公司 (机/炉)	电 厂	投运日期
31/566/566/566	700	60	单	东芝/三菱	川越 1 号	1989. 9
31/566/566/566	700	60	单	东芝/三菱	川越 2 号	1990. 6
24. 1/538/593	700	60	单	三菱/IHI	碧南 3 号	1993. 4
24. 1/566/593	600	50	单	日立/ IHI	能代 2 号	1994. 12
24. 1/566/593	500	60	单	三菱/日立	七尾太田 1 号	1995. 3
24. 5/566/593	1000	50	双	东芝/三菱	原町 1 号	1997. 7
24. 5/600/600	1000	60	双	三菱/三菱	三隅 1 号	1998. 6
24. 5/600/600	1000	50	双	日立/日立	原町 2 号	1998. 7
24. 1/566/593	700	60	单	日立/ IHI	七尾太田 2 号	1998. 7
24. 1/593/593	1000	60	双	三菱/日立	松蒲 2 号	1999. 7
24. 1/566/593	700	60	单	东芝/日立	四国电力	2000. 7
25/600/610	1050	60	双	东芝,GE/IHI	橘湾 1 号	2000. 7
24. 1/593/593	700	60	单	东芝/三菱	敦贺 2 号	2000. 10
25/600/610	1050	60	双	三菱/日立	橘湾 2 号	2001. 1
25/600/610	600	50	单	富士/IHI	丸子 1 号	2002. 3
25/600/600	700	50	单	日立/IHI	占东厚真 4 号	2002. 6
24. 1/566/593	1000	60	单	东芝/ IHI	碧南 4 号	2001. 11
24. 1/566/593	1000	60	单	东芝/ IHI	碧南 5 号	2002. 11
24. 1/593/593	700	60	单	东芝/三菱	苓北 2 号	2003. 7
24. 5/600/600	1000	50	双	日立/日立	常陆那珂 1 号	2003. 12
24. 5/600/600	600	50	单	三菱/三菱	广野 5 号	2004. 7
24. 5/595/595	900	60	双	三菱/三菱	舞鹤 1 号	2004. 8
29/582/582/582	415	50	单	ALSTOM/SMITH	丹麦 ELSAM	1997
29/582/582/582	415	50	单	ALSTOM/SMITH	丹麦 ELSAM	1998
26. 4/544/560	874	50	单	西门子 KWU	SCHWARZE UMPE1	1997
26. 4/544/560	874	50	单	西门子 KWU	SCHWARZE UMPE2	1997
26. 0/540/580	910	50	单	西门子 KWU	BOXBERGBLOCK Q	1999
25. 1/600/610	600	50	单	西门子 KWU	ISOGO(日本)	2002
26. 5/576/599	1025	50	单	西门子 KWU	NIEDERAUSSEM	2002
25/575/595	750	50	单	西门子 KWU	BEXBACH	2002

目前,超临界参数的蒸汽轮电站已经在主要工业化国家趋于成熟,并获得了广泛应用,日本各制造公司正着手对参数为 $34.5\text{MPa}/620^{\circ}\text{C}/650^{\circ}\text{C}$ 、 $31\text{MPa}/593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}$ 和 $34.4\text{MPa}/649^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}/593^{\circ}\text{C}$ 的超超临界机组进行全面的研究,力求其相对热效率提高10%以上。据报道,丹麦投运了2台412MW的超超临界参数机组,一台燃煤,一台燃天然气,蒸汽参数为 $28.5\text{MPa}/580^{\circ}\text{C}/580^{\circ}\text{C}/580^{\circ}\text{C}$,凝汽器背压为 2.3kPa ,热效率可达47%。倘若对汽轮机的元件效率等进行改进,尚能把机组的效率提高2个百分点,即高温超超临界参数机组可能实现的供电效率大约是46.6%。倘若像SIEMENS公司所期望的那样,把亚临界参数机组的供电效率改善为41.9%,那么高温超超临界参数机组可能实现的供电效率的极限值大约为50.5%。

四、国内超超临界机组的发展

国内的超超临界机组是在常规超临界机组的基础上发展的,2002年9月,随着国家“863”计划“超超临界燃煤发电技术”以及依托工程——华能玉环电厂启动,国内各大动力制造厂都相继引进了国外成熟的超超临界技术,到目前为止,国产1000MW超超临界机组投产情况见表1-4。

表 1-4 中国百万等级超超临界参数机组

电 厂	容量 /MW	燃料	蒸汽参数		制造厂家 (锅炉/汽轮机/发电机)	投 产 时 间
			压力 /MPa	温度 /($^{\circ}\text{C}$ / $^{\circ}\text{C}$)		
华能玉环	4×1000	煤	26.25	600/600	哈尔滨/上海/上海	2006.11.28,2006.12.20,2007.11.11
外高桥	2×1025	煤	27	600/600	上海/上海/上海	
山东邹县	2×1000	煤	25	600/600	东方/东方/东方	2006.12.4,2007.7.5
泰州电厂	2×1000	煤	25	600/600	哈尔滨/哈尔滨/哈尔滨	2007.12,2008年上半年

为配合国内上述1000MW超超临界机组工程的建设,国内上海、哈尔滨、东方三大动力设备制造基地以及北京北重、北京巴威公司分别与国外大型公司合作,引进了百万千瓦等级主机设计、制造技术,目前均具备有百万千瓦等级超超临界机组的制造能力。其中,东方锅炉厂、上海锅炉厂、哈尔滨锅炉厂以及北京巴威公司分别引进日本日立-巴布科克公司(BHK)、阿尔斯通(ALSTOM)公司、日本三菱公司、美国巴威公司的技术。国内四大汽轮机制造企业的上海汽轮机有限公司(STC)、哈尔滨汽轮机厂有限责任公司、东方汽轮机有限公司、北京北重汽轮电机有限责任公司则分别引进了西门子(SIMENS),日本东芝、日立(HITACHI)及阿尔斯通(ALSTOM)公司技术。

2006年11月,装备我国第一台国产引进型的1000MW超超临界机组华能玉环电厂正式投入商业运行,标志着我国超超临界机组的制造和运行水平进入了又一个新阶段。目前,除了已经投产的机组外,还有一大批百万级的超超临界机组正在进行建设和可行性研究,相信它们在我国电力工业中将扮演越来越重要的角色。

第二节 国产引进型超超临界汽轮机技术特性

目前国内四大汽轮机制造厂分别与国外具有成熟产品的公司合作,引进技术,成为生产超超临界机组的主要企业。它们的主要技术特点见表1-5。

表 1-5 国产引进型超超临界汽轮机技术特点

项 目		上海汽轮机厂	哈尔滨汽轮机厂	东方汽轮机厂	北京北重
技术支持方		德国西门子公司 (SIEMENS)	日本东芝公司	日本日立公司 (HITACHI)	阿尔斯通(ALSTOM)
高压 模块	型式	单流	双流调节级+单 流压力级	双流调节级+单 流压力级	单流
	级数	15	2×1+9	2×1+8	20
	转子	整锻无中心孔	整锻无中心孔	整锻无中心孔	焊接转子
	第一级叶片	斜置式静叶、全周 进汽		调节级整体围 带+铆接围带成组	径流式静叶、全周进汽
	其余叶片	整体围带、马刀形 三维叶片		高压 1、2 压力级 铆接围带,其余级整 体围带	整体围带、三维叶片
	汽缸	轴 向 对 分 筒 形 外缸	内、外缸,螺栓连 接水平中分面	内、外缸,螺栓连 接水平中分面	两半内缸、紧箍环安装, 切向 180°进汽
中压 模块	型式	双流	双流	双流	双流
	级数	2×14	2×7	2×6	2×17
	转子	整锻无中心孔	整锻无中心孔	整锻无中心孔	焊接转子
	第一级叶片	斜置式静叶		铆接围带、高负荷 扭曲叶片	径流式静叶
	其余叶片	整体围带叶片		铆接围带叶片	整体围带、三维叶片
	汽缸	内、外缸,螺栓连 接水平中分面	内、外缸,螺栓连 接水平中分面	内、外缸,螺栓连 接水平中分面	切向 180°进汽,内、外 缸,螺栓连接水平中分面
低压 模块	型式	两缸四排汽	两缸四排汽	两缸四排汽	两缸四排汽
	级数	2×2×6	2×2×6	2×2×6	2×2×6
	转子	整锻无中心孔	整锻无中心孔	整锻无中心孔	焊接转子
	末级叶片	自由叶片、枫树型 叶根、空心静叶、激 光表面硬化		整体围带和凸台 拉筋,8 叉叶根,加 焊司太立合金片	自由叶片、枫树型叶根、 前掠静叶,高频淬火
	次末级叶片	整体围带,全三维		整体围带,三维 设计	整体围带,全三维
	其余叶片	整体围带,马刀形 三维叶片		整体围带、高负荷 扭曲叶片	整体围带、三维叶片
转子支承方式		单轴承支撑	双轴承支撑	双轴承支撑	单轴承支撑
调节方式		滑压调节(定-滑)	喷嘴调节(定-滑- 定)	喷嘴调节(定-滑- 定)	滑压调节(定-滑)
防固体颗粒侵蚀 (SPE)措施		全周进汽,20%反动 级高、中压第一级斜置 静叶加大了静、动间 隙,无防 SPE 措施	高压喷嘴采用渗 硼处理,中压喷嘴采 用涂陶瓷材料处理	高压喷嘴和中压 第一级静叶表面 渗硼	全周进汽,50%反动级 高、中压第一级径流静叶 加大了静、动间隙,无防 SPE 措施
型式		单轴、四缸四排汽			
外形尺寸(长× 宽×高,m)		29×10.4×7.75	40×10.1×7.5	37.9×9.9×6.8	27.16×13.5×8.5

这些生产企业与外方的合作方式基本相同,即由中方签订主机合同及设备的总成,由外方负责进行整个机组的设计,提供所有的制造加工图纸。外方与中方共同合作完成国内项目机组的制造、服务、调试,并对机组性能进行担保。从长远的市场开发,更好为用户提供优质服务,的角度,中方同时与外方签订技术转让合同,包括设计技术、制造、质保、安装、服务等并进行培训和技术咨询。

西门子公司具有成熟的单轴反动式 HMN 积木块式四缸四排汽双背压机型,主要结构特点是高压外缸为轴向对分筒形结构,高压内缸为对剖垂直中分面的筒形结构,高中压第一级为斜置静叶以及采用切向进汽等。

阿尔斯通和西门子采用单轴承而东芝、日立采用双轴承支承,因此东芝、日立机型轴承数量多,机组长度比阿尔斯通、西门子多出 8~12m,更长的轴系对处理轴系稳定性问题时难度增加。

东芝和日立采用喷嘴调节方式,在部分进汽情况下调节级叶片遭遇严重的强度、振动问题,因此高压模块不得不使用双流调节级+单流压力级这种结构,对提高高压缸效率不利。

阿尔斯通和西门子采用全周进汽、节流调节方式,高压第一级分别是径流(阿尔斯通)和斜置(西门子)静叶,第一级动叶的设计与一般压力级无异,不存在特殊的强度和振动问题,对提高汽轮机效率也较有利,但如要满足电网调频要求,运行过程中采用滑压调节,由于锅炉燃烧调节相对滞后,汽轮机的调节阀或补汽阀必须动态节流,会降低机组效率。

一、上海汽轮机有限公司引进型超超临界 1000MW 汽轮机

目前,上海汽轮机有限公司(STC,以下简称上汽)为中德合资企业,由中德双方共同参与经营管理。通过玉环 4×1000MW 超超临界项目的技术转让及合作设计制造,STC 的技术设计开发体系也将与西门子同步接轨。

上汽为玉环电厂制造的超超临界汽轮机为西门子公司设计,并由西门子公司提供整个高压缸、中压转子动静叶片及低压末级叶片等关键部件。

(1) 总体结构特点 机组的总体型式为单轴四缸四排汽,所采用的积木块是西门子公司近期开发的 3 个最大功率可达到 1100MW 等级的“HMN”型积木块组合。1 个单流圆筒型 H30 高压缸,1 个双流 M30 中压缸,2 个 N30 双流低压缸,高、中、低压缸采用串联布置,各汽缸之间仅一个轴承,全部四缸五个轴承(图 1-1)。

机组整个高压缸和中压缸的静子件由猫爪支承在汽缸前后轴承座上,低压部分的静子件中,外缸重量与其他静子件的支承方式是分离的。所有轴承座与低压缸猫爪之间的滑动支承面均采用低摩擦合金。其优点是具有良好的摩擦性能,不需要润滑,有利于机组膨胀顺畅。

机组整个轴系是以 2 号轴承座为死点向两头膨胀,而高压缸和中压缸的猫爪在 2 号轴承座处也是固定的。因此,高压外缸受热后也是以 2 号轴承座为死点向机头方向膨胀,而中压外缸与中压转子的温差远远小于低压外缸与低压转子的温差。因此,这样的滑销系统在运行中通流部分动静之间的差胀比较小,有利于机组快速启动。盘车装置采用液压马达,安装于高压转子调阀端的顶端。

(2) 高压缸特点 高压缸采用单流、双层缸设计,共 14 级。

高压缸采用单流程和全周进汽是该机组的特有技术特点,采用单流,既提高了效率又解决了强度及附加汽隙激振的问题,与双流+喷嘴调节方式相比,在可靠性、经济性上都显示出较大的优势。配合全周进汽的设计,该汽轮机上引进了补汽技术,即从 TMCR 工况开始,从主汽阀后、主调阀前引进出汽量的 5%~10% 的新蒸汽,经节流降低参数(温度约降低 30℃)后进入高压第五级动叶后空间,这股蒸汽与主流蒸汽混合后在以后各级继续膨胀做

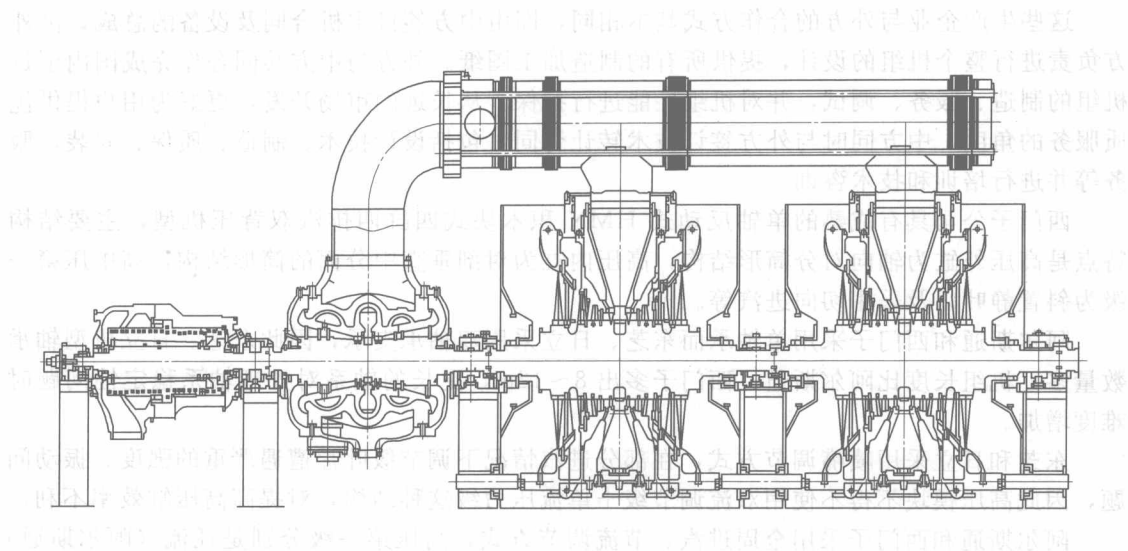


图 1-1 上汽 1000MW 超超临界机组汽轮机整体结构

功。补汽技术提高了汽轮机的过载和调频能力，此外，由于在各个主要工况下阀门可以全开而避免了蒸汽节流。

无中分面的圆筒型高压外缸是该机组的另一个技术特点，高压缸由圆筒型前后外缸及具有水平中分面的内缸组成。这种汽缸结构对螺栓轴向密封应力要求很低，能做到整个汽缸壁厚沿圆周方向一致，减少了应力集中，同时，沿着轴向分成的垂直中分面结构可以根据工作温度而采用不同的材料，降低了成本。高压缸积木块 H30 的设计压力达到 30MPa。

在高压缸径向进汽通道向轴向叶片级折转过程中，配置了一种独特的斜置静叶，该静叶同时起到导流作用且无径向漏汽，结构合理紧凑，损失小。第一级为低反动度（约 20 %）叶栅，一方面不像冲动式调节级会在动叶片进口形成小进汽角的高速气流，避免硬质颗粒冲蚀，另一方面又可有较大的焓降，可降低转子的工作温度。

（3）中低压缸的特点 中压缸采用分流式、双层缸设计，共 2×13 级。中压高温进汽仅局限于内缸的进汽部分，而中压外缸只承受中压排汽的较低压力和较低温度。同时，外缸中的压力也降低了内缸法兰的负荷，因为内缸只需承受压差即可。中压缸第一级进汽除了与高压缸一样采用低反动度叶片级（约 20% 的反动度）以及切向进汽的第一级斜置静叶结构外，为冷却中压转子还采取了一种切向涡流冷却技术，以降低中压转子的温度。

中压缸径向进汽通道向轴向叶片级折转过程中也配置了斜置静叶。两个低压缸采用 N30 积木块，为分流式设计，共 4×6 级。低压外缸由 2 个端板、2 个侧板和一个上盖组成。

由于压力的原因，超超临界机组低压缸的排汽湿度比同样进汽温度的亚临界机组要大，低压末级及次末级叶片的抗应力腐蚀及抗水蚀性能尤为重要。因此该机组除了在结构上设计有足够通量的疏水槽、相当大的轴向间隙和采用中空末级静叶外，末级叶片采用抗腐蚀性能好的 17-4PH 材料，该材料在钠盐及水中的疲劳强度均明显高于 12Cr 钢。同时，末级和次末级动叶片采用了新型的激光表面硬化技术。

（4）运行及维护特性 该机组由于采用“HMN”模块，因此具有比传统结构的亚临界、超临界 300MW、600MW 机组更为灵活的运行性能，更便利的安装及维护特性。其机组大修间隔可达到有效运行时间 9.6 万小时（约 10~12 年），机组在所有正常的运行

启动状态下（大修后首次启动除外），从冲转开始到额定转速 3000r/min 的时间均为 5min，能快速增加锅炉负荷、减轻旁路负担和快速通过轴系所有临界转速区。同时，在机组启动时，对低旁参数的设置要求更为宽松，有利于机炉与旁路的匹配和运行，提高整机的运行灵活性。

（5）技术参数及主要部件材料 该机组的主要技术参数和主要零部件采用的材料分别见表 1-6 和表 1-7。

表 1-6 上汽 N1000-25.0/600/600 汽轮机技术参数

项 目		参 数
铭牌/最大功率/(MW/MW)		1000/1049.8
额定主蒸汽压力(绝)/MPa		26.25
额定主蒸汽/再热温度/℃		600/600
额定高压缸排汽口压力(绝)/MPa		5.946
额定高压缸排汽口温度/℃		362.9
额定再热蒸汽进口压力(绝)/MPa		5.350
主蒸汽额定/最大进汽量[(t/h)/(t/h)]		2733/2953
再热蒸汽额定进汽量/(t/h)		2274
额定排汽压力(绝)/(MPa/MPa)		0.0044/0.00539
夏季排汽压力(绝)/(MPa/MPa)		0.0096/0.00769
配汽方式		全周进汽+补汽阀
额定给水温度(TMCR)/℃		292.5
末级叶片高度/mm		1146
尺寸	汽轮机外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	29×10.4×7.75(汽机中心线以上)
	机组总长(包括罩壳)/m	29
	机组最大宽度(包括罩壳)/m	10.4
	运行层标高/m	17(取决于凝汽器)
	最大起吊高度/m	13(距运行层)
	吊钩至中心线(带/不带横担时)/m	11.5/8.5
汽口数量 及尺寸	高压缸排/(个/mm)	2/φ700
	中压缸排/(个/mm)	1/φ2000
	低压缸排/(个/mm)	2/(10400×6700)
设备最高点距运转层的高度/mm		9250
重量	转子(高/中/低压转子)/(kg/kg/kg)	14000/39200/2×6000
	上汽缸(每个内外上缸)/kg	高压前外缸:42000,排汽缸:23000; 高压内缸:26000;中压内外:32500/32000; 低压外:125000,外内:39000,内内:28500
	下汽缸(每个内外下缸)/kg	中压内外:39000/36000; 低压外内:60000,内内:26500
	总重/kg	1570000(包括附件)

表 1-7 上汽 N1000-25.0/600/600 汽轮机主要零部件材料

部 件 名 称		材 料 标 号	ASTM 相近材料	力学性能(室温)	
				说明	屈服强度 /(N/mm ²)
高 压 缸	高压转子	X12CrMoWVNbN10-1-1	10%Cr	锻件	≥700
	第一级斜置静叶	X12CrMoWVNbN10-1-1	10%Cr	锻件	≥700
	外缸	进汽段:X12CrMoWVNbN10-1-1	A356Gr12 或更好	铸件	≥520
		排汽段:G17CrMoV5-10	A356Gr9	铸件	≥440
	内缸	GX12CrMoVNB9-1	A356Gr12 或更好	铸件	≥500
中 压 缸	中压转子	X12CrMoWVNbN10-1-1	10%Cr	锻件	≥700
	第一级斜置静叶	X12CrMoWVNbN10-1-1	10%Cr 钢	锻件	≥700
	外缸	GJS-400-18U-RT	铸铁或铸钢	铸件	≥220
	内缸	GX12CrMoVNB9-1	A356Gr12 或更好	铸件	≥500
进 汽 阀	MSV/GV 阀体阀壳	GX12CrMoWVNbN10-1-1	A356Gr12 或更好	铸件	≥520
	RSV/IV 阀体阀壳	GX12CrMoWVNbN10-1-1	A356Gr12 或更好	铸件	≥520
低 压 缸	低压转子	26NiCrMoV14-5	31/2%Ni 钢	锻件	≥750
	低压外缸	S235JRG2+N	A516Gr60		≥225
	低压内缸	P265GH	A516Gr70		≥205
	末级动叶	X5CrNiCuNb16-4	A705Gr630	锻件	≥930
	次末级动叶	X10CrNiMoV12-2-2	12%Cr 钢	锻件	≥785
	其他动叶	X20Cr13	A276Type420	棒料	≥600
	末级及次末级静叶	L-2:X5CrNiCuNb16-4	A705Gr630	锻件	≥930
		L-0:X2CrNi12	12%Cr	板料	≥250
	低压其他静叶	L-1:G-X4CrNi134	A743GrCA6NM	铸件	≥550
		X20Cr13	A276 Type420	棒料	≥600

二、东方汽轮机有限公司引进型超超临界 1000MW 汽轮机

东方汽轮机有限公司（以下简称东汽）与日本日立公司具有长期的合作关系。1996 年和 1997 年，双方第一次合作设计、制造的亚临界 600MW 汽轮机先后在山东邹县电厂（5 号、6 号机）成功投入商业运行，机组设计热耗为 1884kcal/(kW·h) [1kcal/(kW·h)=4.1840kJ/(kW·h)，下同]，试验热耗为 1864kcal/(kW·h)。2002 年，双方又签订了 2×600MW 超临界机组技术转让合同，东方汽轮机厂已完成了从亚临界到超临界机组设计制造技术的跨越。在此成功合作基础上，东方汽轮机厂 2003 年又引进了日立公司具有世界先进水平的超超临界 1000MW 汽轮机。

(1) 整体结构 东汽超超临界 1000MW 汽轮机为单轴四缸四排汽型式，从机头到机尾依次串联一个单流高压缸、一个双流中压缸及两个双流低压缸。高压缸呈反向布置（头对中压缸），由一个双流调节级与 8 个单流压力级组成。中压缸共有 2×6 个压力级。两个低压缸压力级总数为 2×2×6 级。末级叶片高度为 43″，采用一次中间再热（图 1-2）。

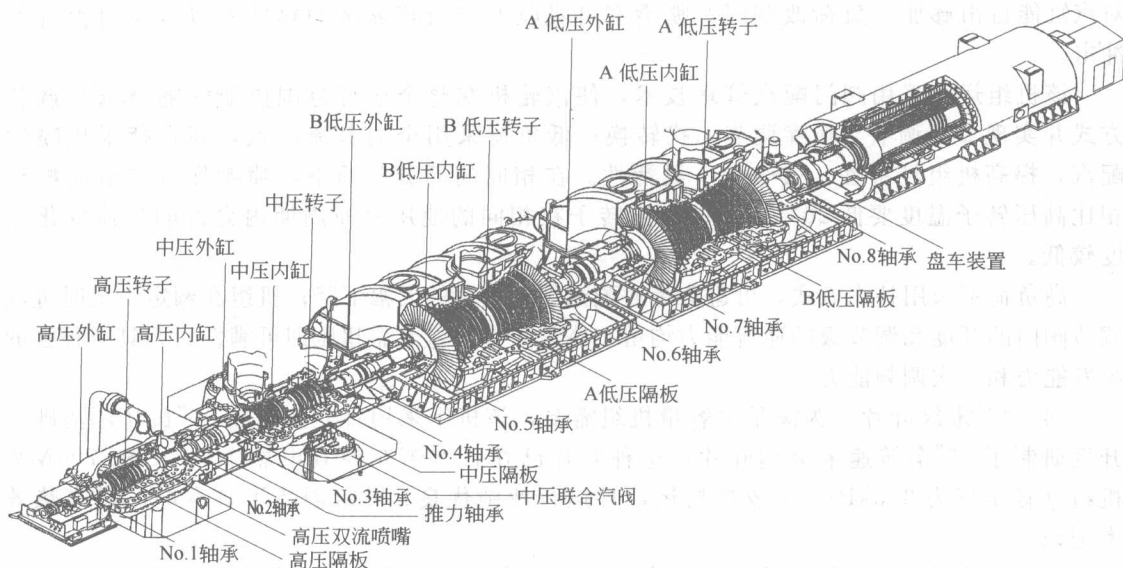


图 1-2 东汽 1000MW 超超临界机组汽轮机整体结构

上述日立公司 700MW 机组创造了日本电厂最高热效率记录。其设计热耗为 $7226 \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ [$1726 \text{ kcal}/(\text{kW} \cdot \text{h})$]，实测值为 $7194 \text{ kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ [$1718.2 \text{ kcal}/(\text{kW} \cdot \text{h})$]，实测热效率达到 50%。

(2) 高、中、低压模块 高压缸为单流式双层缸结构，内缸和外缸之间的夹层只接触高压排汽，使缸壁设计较薄。高压排汽占据内外缸空间，以简化汽缸结构。高压内、外缸均由合金钢铸件制成，其水平中分面经精确加工和手工研磨以达到严密接触。压力级采用具有高效率和良好的空气动力效率的全三维设计冲动式叶片。为降低高压外缸所承受的温度，进汽部分结构较为特殊，主蒸汽通过导汽套管直接进入喷嘴室，同时在外缸进汽口与导汽套管之间引入冷却蒸汽（一段回热抽汽），对外缸进汽口进行隔离与冷却。

中压缸采用双分流、双层缸结构，每个流向包括全三维设计的 6 个冲动式压力级。中压外缸下半进入的再热蒸汽也通过导汽套管直接进入内缸进汽室，同时在外缸进汽口与导汽套管之间引入冷却蒸汽，对外缸进汽口进行隔离冷却，使中压外缸只承受较低压力和较低温度。汽缸的法兰部分可设计得较小，因为中压高温进汽仅局限于内缸的进汽部分。

中压转子采用改良 12Cr 无中心孔整锻结构。为减少正反第一级间的热应力，从第一级抽汽引入低温蒸汽与中压阀后引入的一股蒸汽混合后形成冷却蒸汽进入中压第一级前，通过正反第一、第二级轮缘叶根处的间隙，冷却中压转子高温段轮毂及轮面，极大地降低第一级叶片槽底热应力。

低压分 ALP、BLP 两个双流缸，每个流向包括 6 个冲动式压力级，低压末级为 $43''$ 叶片。为减小热应力并避免进汽部分膨胀不畅引起内缸变形，低压缸采用三层缸结构，内、外缸均采用钢板拼焊结构。低压缸在结构上有足够的疏水槽，低压转子采用超纯净 Ni-Cr-Mo-V 钢整锻结构。

(3) 复合配汽滑压运行与双流喷嘴室 该机组采用双流喷嘴室的结构，大大地减少了汽