

超（超）临界火力发电技术

张 磊 叶 飞 编著
杨祥良 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

超（超）临界火力发电技术

张 磊 叶 飞 编著
杨祥良 主审



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了超(超)临界火力发电机组的新技术。内容包括超(超)临界机组的选型、锅炉、汽轮机、发电机的技术特点;也着重讲述了超(超)临界机组的耐热材料性能与焊接工艺、主要辅机、热力系统、化学处理技术、自动控制技术、机组优化、环保脱硫、事故处理等技术特点。

本书可作为从事超(超)临界发电机组运行与检修人员上岗工作前的培训教材使用,也可供从事超临界火力发电机组设计、制造、安装工作的技术人员,以及大、中专院校热动类专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

超(超)临界火力发电技术 / 张磊, 叶飞编著. --
北京: 中国水利水电出版社, 2009. 11
ISBN 978-7-5084-6952-2

I. ①超… II. ①张… ②叶… III. ①超临界—火力发电 IV. ①TM611

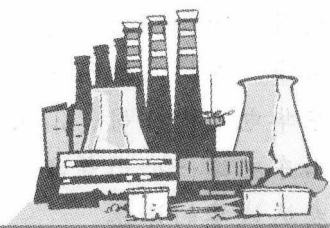
中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第203207号

书 名	超(超)临界火力发电技术
作 者	张磊 叶飞 编著 杨祥良 主审
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 24.75印张 587千字
版 次	2009年11月第1版 2009年11月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	62.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



根据国外和最近几年国内成功运行的实践证明，发展大容量高参数的超临界和超超临界机组是当今世界和我国火电发展的重要趋势之一。超临界和超超临界机组是现阶段提高煤电效率、降低单位发电量污染物排放的最有效的手段之一。

自华能沁北电厂首台国产 600MW 超临界和华能玉环电厂 1000MW 超超临界机组相继建成投运以来，我国迎来了建设超临界（包括超超临界）机组的高峰，截至 2008 年底全国火电装机容量 60132 万 kW，增长了 8.15%，尤其是一大批效率高、能耗低的大容量机组纷纷上马。截至 2009 年 6 月，全国投运百万千瓦超临界机组已达 13 台，投运 300~660MW 容量的超临界机组更是众多，还有大批待审或在建的项目。

未来火电建设将主要是发展高效率高参数的超临界（SC）和超超临界（USC）火电机组，我国下一步将建设的大容量机组都采用超临界甚至超超临界技术，同时我国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。随着我国电力体制改革的不断深入，火电企业对员工掌握新技术、新设备的培训越来越重视，为满足广大技术人员和现场生产人员了解引进型超临界火力发电机组的结构、运行、系统等知识的需要，山东省电力学校组织教师编写了本书。

本书主要介绍我国国产及部分引进的超临界机组的设计、运行、调试、维护等方面的内容，包括超临界机组选型、超临界锅炉、超临界汽轮机、超临界发电机、超临界机组材料及焊接、超临界机组主要辅机、超临界机组泵与风机、超临界机组热力系统、超临界机组化学处理技术、超临界机组自动控制技术、超临界机组优化、超临界机组环保脱硫、超临界机组事故处理等。

全书大部分资料出自现场，内容力求介绍新原理、新技术、新知识，同时尽量做到内容全面、理论实际相结合。本书由山东省电力学校张磊、叶飞

编著，国华陈家港电厂王亚平参编。全书由国电山东分公司副总经理杨祥良主审。在编写过程中得到各兄弟院校、火电建设单位、发电企业，尤其是山东华电发电公司、山东华能发电公司、山东国电发电公司、山东电力研究院、山东电建一公司等单位许多人员的大力帮助，为本书提供了大量资料，在此表达诚挚的谢意。

由于超（超）临界机组技术发展迅猛，技术流派众多，加之作者水平有限，时间仓促，难以全面概括超（超）临界机组新技术，其中错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2009年7月

目 录

前言

第一章 超临界机组简介	1
第一节 超临界机组概念.....	1
第二节 我国发展超临界机组的必要性.....	2
第三节 国外超临界机组的发展概况.....	7
第四节 国外发展超临界机组的经验教训.....	15
第五节 我国超临界燃煤发电机组的发展概况.....	19
第二章 超临界机组参数确定及选型	24
第一节 超临界机组容量选择.....	24
第二节 超临界机组蒸汽参数选择.....	30
第三节 超超临界机组热力参数优化.....	38
第四节 超临界机组主要设备选型.....	42
第五节 我国几个典型超临界机组简介.....	47
第三章 超临界锅炉技术	70
第一节 超临界锅炉的发展及特点.....	70
第二节 超临界锅炉发展的经验.....	75
第三节 超超临界锅炉发展中的关键问题.....	82
第四节 超超临界 1000MW 锅炉选型分析.....	88
第五节 600MW 超超临界机组锅炉设备设计选型.....	96
第四章 超临界及超超临界汽轮机	103
第一节 汽机基本性能指标.....	103
第二节 国外超临界汽轮机技术介绍.....	108
第三节 我国超临界汽轮机的发展特点.....	114
第四节 超临界汽轮机的选型.....	118
第五节 超超临界汽轮机的研究与开发.....	123
第五章 超临界机组发电机技术	129
第一节 国外 1000MW 超超临界火电机组发电机特点.....	129
第二节 国产 1000MW 汽轮发电机参数及结构特点.....	134
第三节 600MW 发电机与 1000MW 发电机的特点比较.....	142

第四节	大容量发电机选型依据	148
第六章	超临界机组材料与焊接	156
第一节	超临界机组材料的发展	156
第二节	国外超临界机组材料问题	159
第三节	各国耐热钢开发历程及计划	163
第四节	超超临界火电机组选材分析	168
第五节	超临界机组常用材料焊接要求	174
第七章	超临界机组主要辅助设备	181
第一节	超临界机组加热器	181
第二节	超临界机组的凝汽器	187
第三节	除氧器	195
第四节	制粉系统主要设备	201
第五节	超临界机组输煤系统	207
第八章	超临界机组常用泵与风机	211
第一节	1000MW 给水泵组	211
第二节	600MW 给水泵特点	217
第三节	液力耦合器	220
第四节	循环水泵组	224
第五节	凝结水泵	226
第六节	真空泵	228
第七节	超临界机组四大风机的选型分析	229
第九章	超临界机组热力系统	240
第一节	热力系统概述	240
第二节	主蒸汽管道系统	241
第三节	机组旁路系统	244
第四节	回热抽汽系统	255
第五节	主凝结水系统	257
第六节	给水除氧系统	261
第七节	发电厂疏水系统	264
第十章	超临界机组化学处理技术	269
第一节	超临界机组化学处理技术特点	269
第二节	超临界机组水汽特点	274
第三节	超临界机组化水系统的设备选型	277
第四节	超临界机组的化学监督	282
第十一章	超临界机组调试启动运行	286
第一节	600MW 国产超临界机组调试的特点	286

第二节	1000MW 机组启动方案	293
第三节	超临界机组调试常见问题	300
第四节	超临界机组运行注意事项	304
第十二章	超临界机组自动控制技术	310
第一节	超临界机组控制系统简介	310
第二节	超临界锅炉控制系统的讨论	314
第三节	汽轮机调节保安系统	317
第四节	典型 1000MW 超临界机组控制系统	318
第十三章	超临界机组优化	326
第一节	超临界机组设计优化	326
第二节	超临界机组优化改造	330
第三节	1000MW 运行调整及燃烧优化	338
第十四章	超临界机组环保脱硫	341
第一节	超临界机组环保效应分析	341
第二节	除灰系统	343
第三节	脱硫工艺	347
第四节	电厂脱硝技术	349
第五节	电厂水资源节约利用	353
第十五章	超临界机组事故处理	359
第一节	事故处理总则	359
第二节	锅炉事故处理	359
第三节	汽机事故处理	367
第四节	电气事故处理	374
第五节	其他事故处理	382
参考文献	384

第一章 超临界机组简介

第一节 超临界机组概念

一、水的超临界状态

火电厂的工质是水，常规条件下对水进行加热，当水的温度达到给定压力下的饱和温度时，将产生相变，水开始从液态变成气态，出现一个饱和水与饱和蒸汽两相共存的区域，此时尽管加热仍在进行，但汽水两相的温度不再上升，直至液态水全部蒸发完毕，干饱和蒸汽才继续升温，成为过热蒸汽。在自然循环锅炉中，水加热到饱和温度后，即开始蒸发，在饱和温度下，水和蒸汽是两相共存的。由于水和蒸汽间存在巨大的比重差，推动锅水在循环回路中不断流动，使受热的炉管得到了可靠的冷却，从而保证了锅炉的安全工作。但随着工作压力的升高，饱和蒸汽和饱和水的比重差逐渐减小；因而，循环回路的流动压头减小，循环倍率相应降低。一般中压锅炉的循环倍率可达20~30，而亚临界压力锅炉的循环倍率只有4~6。因此，对于亚临界压力锅炉，为了防止传热恶化、金属过热，常采用带内螺纹的水冷壁管，为使加强管子内壁的扰动，防止因气泡积聚造成“模态沸腾”。但当锅炉压力达到临界压力22.12MPa时，如果水温达到了临界温度374.12℃，汽化即在一瞬间完成，水的液相就不存在，在临界点水和蒸汽的比重完全相同，其差别也完全消失了。事实上，在超临界压力下，液相和汽相间的转变是在连续渐变中完成的；在变化的过程中，不存在汽液共存的饱和段，变化中的物质始终是均相的。因此，依靠水和汽水混合物的比重差维持锅水循环流动的自然循环锅炉失去了存在的基础；取而代之的是直流锅炉和复合循环直流锅炉。

一般将压力大于临界点 P_c 的范围称为超临界区，压力小于 P_c 的范围称为亚临界区。从物理意义上讲，根据机组采用的蒸汽参数划分，分为超临界和亚临界，超超临界是我国人为的一种区分，也称为优化的或高效的超临界参数。目前，超超临界与超临界的划界限尚无国际统一的标准，一般认为蒸汽压力大于25MPa，蒸汽温度高于580℃时的状态称为超超临界状态。

二、超临界和超超临界发电技术 (SC&USC)

在发电热力循环中，蒸汽参数是决定机组的热效率的重要参数。燃煤火电机组的热力系统是按照朗肯循环运行的，提高蒸汽的初参数（蒸汽压力和温度），采用再热系统和增加再热次数都能提高循环的热效率。在一定范围内，新蒸汽温度或再热蒸汽温度每次提高10℃，机组的热耗就可下降0.25%~0.3%。如果增加再热次数，例如采用二次再热，在



同样蒸汽参数下热效率可高于一次再热。超临界机组是指主蒸汽压力大于水的临界压力的机组，即压力不小于 22.12MPa。通常将主蒸汽压力大于 27MPa 的机组（有与之相配的蒸汽温度）统称为高效超临界机组或超超临界机组。所以，对于超临界机组可以分为两个层次，一个是常规超临界参数（conventional supercritical）机组，其主蒸汽压力一般为 24MPa 左右，主蒸汽和再热蒸汽温度为 540~560℃；另一个是高效超临界（high efficiency supercritical）机组，通常也称为超超临界（ultrasupercritical）机组或高参数超临界（advanced supercritical）机组，其主蒸汽压力在 25~35MPa 及以上，主蒸汽和再热蒸汽温度为 580℃ 及以上。常规超临界机组的效率可比亚临界机组高 2% 左右，高效超临界机组，其效率在常规超临界机组的基础上再提高 4% 左右。在环保方面，超超临界机组加装锅炉尾部烟气脱硫、脱硝和高效除尘装置，可满足严格的排放标准。同时，超超临界机组提高了效率，也节约了发电耗水量。

常规亚临界机组的典型参数为 16.7MPa/538℃/538℃，发电效率约为 38%~39%。超临界机组的典型参数为 24.1MPa/538℃/566℃，对应的发电效率约为 41%~42%。超超临界参数实际上是在超临界参数的基础上向更高压力和温度提高的过程。通常认为超超临界是指压力达到 30~35MPa，温度达到 593~600℃ 或者更高的参数，并具有二次再热的热力循环。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，任何超临界新蒸汽温度或再热蒸汽温度超过该数值时也被划为超超临界参数范畴，或者称为提高参数的超临界机组。在国外的技术资料上，Ultra Supercritical (USC) 通常用来代表这类参数的机组，为超超临界，也可理解为优化的或高效的超临界机组。

第二节 我国发展超临界机组的必要性

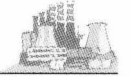
一、我国的能源结构和形势

2008 年，我国煤炭产量完成 27.16 亿 t，其中发电用煤占 50% 以上，见表 1-1。根据我国《电力工业中长期发展规划（2004~2020）》，在进行适当调控的情况下，2010 年预计煤电机组装机容量将达到 4.68 亿 kW，需耗用原煤 12 亿 t；2020 年预计煤电机组装机容量将达到 5.62 亿 kW，需耗用原煤 15 亿 t。发电用煤在煤炭总体消费中比例的逐步

表 1-1 2000~2020 年一次能源需求总量及构成

品 种	能源需求总量 (百万吨标煤)			年均增长率 (%)	构 成 (%)		
	2000 年	2010 年	2020 年		2000~2020 年	2000 年	2010 年
煤炭	907	1425	2047	4.22	69.9	66.7	63.2
石油	324	538	877	5.10	25.0	25.2	26.7
天然气	36	112	220	9.44	2.8	5.2	6.7
一次电力	29	63	109	6.77	2.3	2.9	3.3
总计	1297	2137	3280	4.75	100.0	100.0	100.0

数据来源：国务院发展研究中心《国家能源战略的基本构想》（2003 年）。



加大，无形中加大了环保的压力。燃煤火电长期占主导地位，决定了我国电力工业环境保护必须坚持提高能源转换效率和电源结构调整相结合的道路。

二、我国目前火电机组的现状

电力行业是国民经济的重要基础行业，是国家经济发展战略的重点和先行产业。随着我国经济持续健康发展，用电量的需求也随之增长。截至 2008 年底（2008 年数据均来自于中电联快报统计），全国发电装机容量达到 79253 万 kW，同比增长 10.34%；火电 60132 万 kW，同比增长 8.15%；2008 年，电力供应量继续增长，但增速放缓。全国全年发电量 34334 亿 kW·h，同比增长 5.18%。火电发电量 27793 亿 kW·h，同比增长了 2.17%；2008 年，全国基建新增发电装机容量 9051 万 kW，火电 6575 万 kW。而且根据统计火电装机增幅比 2007 年下降 6.44 个百分点，但机组结构日趋合理，大容量、节水环保的机组发展速度加快。上海外高桥电厂 2 台、江苏泰州电厂 1 台百万千瓦超超临界机组相继投运，全国在运百万千瓦超超临界机组已达 10 台，世界首台百万千瓦空冷机组在宁夏开工建设。

2008 年，全国发电生产耗用原煤量 13.40 亿 t，同比增长 4.05%；全国平均供电煤耗为 349g/(kW·h)，比 2007 年降低了 7g/(kW·h)，1997~2008 年，我国供电煤耗逐年降低，从 408g/(kW·h) 下降到 349g/(kW·h)，如图 1-1 所示。但与发达国家 2005 年平均供电煤耗 335g/(kW·h) 相比还有较大差距，同时火电机组污染物排放总量占据全社会总排放量基本在一半以上。这就要求人们必须发展大容量高效机组，以降低能耗，减少污染物排放。

所以火电机组的发展水平成为我国经济发展决定性因素之一，是人民生活水平提高的重要保证。但是目前我国火电机组存在的诸多问题成为制约我国电力行业发展的重要桎梏。主要表现在：

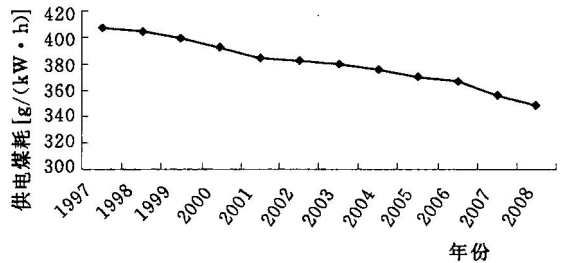


图 1-1 最近十几年我国供电煤耗形势图

(1) 大批低效率的小机组在运行，耗煤低、高效的火电机组所占比率低常规小火电机组比例过大，单机容量偏小。12.5 万 kW 以下机组还占据相当比例，这些机组不仅降低了经济效益，同时也增加了可观的污染物排放量。在 6 亿多 kW 的火电机组中，超临界机组比例还比较低。

(2) 洁净煤发电技术处于开始阶段。采用洁净煤燃烧技术机组：常压循环流化床、增压循环流化床联合循环、整体煤气化联合循环发电机组比例相当低。

(3) 电源调峰性能较低。目前燃煤火电机组将负荷运行是电网调峰的主要手段，调峰性能差，且调峰经济性较差。

(4) 排放性能差，环境污染严重。煤燃烧所引起的环境问题是全世界共同面临的难题，我国燃煤污染防治技术起步较晚。大部分电厂难以达到排放的标准。SO₂ 造成城市大气污染，酸雨面积加速蔓延。目前，我国 SO₂ 排放量世界第一，而火电厂 SO₂ 排放量又占排放总量的 37%。煤燃烧所排放的 SO₂ 占全国排放量的 87%。NO_x 排放总量将随着燃



煤机组的大幅度增加而增加，如不采取有效的治理措施，在未来的 5~10 年内，NO_x 排放总量将超过 SO₂，称为电力行业第一大酸雨气体污染物。从 2003 年开始，国家发展和改革委员会明确要求，今后投产的新火电机组必须安装烟气脱硫设施。但脱硫技术和设备全部依赖进口，成本高，国家发展和改革委员会随即发文鼓励加快火电厂烟气脱硫产业化发展，支持发展拥有自主知识产权的脱硫技术。

三、超临界机组的优势和不足

1. 超临界优势

(1) 效率高。超超临界机组效率高可以达到 43% 以上，超超临界机组效率比超临界机组高 3%~4%。表 1-2 给出了超超临界机组供电端的效率。

表 1-2 超超临界机组效率比较

蒸汽参数	供电端效率 (%)	供电煤耗 [g/(kW·h)]	蒸汽参数	供电端效率 (%)	供电煤耗 [g/(kW·h)]
24.1MPa/538℃/566℃	40.94	300	31.0MPa/593℃/593℃/593℃	43.1~43.3	284~285
31.0MPa/566℃/566℃/566℃	42.8	287	34.5MPa/649℃/593℃/593℃	43.7~44.0	279~281

(2) 单机容量大。超超临界机组的单机容量可以达到 1000MW 以上，与其他洁净煤发电技术相比可以很大程度上降低机组的单位造价。

(3) 可靠性好。在目前的洁净煤发电技术中，超超临界机组发电技术运行可靠性能最高。可用率及可靠性比较超临界机组的设备可用率与亚临界机组相当，已被国内外超临界机组电厂的运行实践所证实。据统计美国 7 台 1300MW 超临界机组，可用率在 83.03% 以上，平均年运行小时在 7000h 以上。日本的可用率在 90% 以上；俄罗斯的可用率在 87.8% 以上。我国已投运的超临界机组可用率也比较高。石洞口二厂 2 台机组的平均可用率为 88.02%。在可靠性上不存在超临界、亚临界两种机组的差异，也不存在机组容量越大，其可靠性越小的问题。

(4) 可调性较好。同样完好的超临界机组与亚临界机组如能都配备有好的热工自动控制系统，便有良好的调节性能，超临界机组锅炉无厚壁元件（无汽包），变负荷性能好，可适应电网调峰的要求，其允许的最低负荷和负荷变化率与亚临界机组相仿，带中间负荷已经有成熟的经验。600MW 超临界机组晚间调峰负荷可为 300MW（50% ECR）左右，国内石洞口二厂单机最低负荷可达 180 MW（30% ECR），亚临界机组调峰也只在 50% 左右。无论超临界机组还是亚临界机组，都设计为复合变压运行，这种运行方式为定压—滑压一定压。在高负荷运行时保持额定压力，使机组具有最好的循环效率；在中间负荷范围采用变压运行，可使汽机的内效率较高和热应力较小；在低负荷时蒸汽比容大，运行经济性好，注意保持最低的许可供汽压力，以防止压力过低出现流动不稳等现象，故有最佳的综合效益。超临界机组具有夜间停机、快速启动以及频繁改变负荷的能力，使机组在高负荷和低负荷时都保持高效率。总之，只要亚—超临界机组都配有好的自控系统，两者调节性能相差不大。

(5) 环保指标先进。超超临界机组具有明显的排放优势。超超临界机组在达到高发电



效率的同时通过采用烟气脱硝、烟气脱硫等技术降低污染物的排放。

(6) 造价低廉。超临界锅炉价格比亚临界锅炉高出 5% 左右, 汽轮机的价格变化不大, 而整个火电机组价格增加 2%~3%。虽然电站的投资费用增大 2% 左右 (随着科技进步和单机容量增大, 高级钢材的价格将有所下降, 电站的单位造价将减少), 但超临界机组的供电效率可提高 2% 左右, 并且燃料的价格不断上涨, 那么在 4 年左右能用所节省的煤量折价去抵消投资费用的增量部分, 因此在我国煤价相对较高的东南部广大地区使用超临界机组是有利的, 见表 1-3。

表 1-3 超临界机组不同容量造价比较

机组容量 (MW)	100	200	300	600	800	1000	1300
相对造价 (%)	100	88	80	70	67	65	63
单位造价 (美元/kW)	1538	1353	1230	1100	1030	980	960

表中已有的数据看到 300 MW 超临界机组的单位造价最高。理论计算和工程实践证明: 大容量机组比同参数的较小容量机组效率要高。超临界机组蒸汽压力高、比容小, 汽机高压缸叶片短, 加上级间压差大, 影响内效率, 故超临界及超超临界参数更适用于大容量机组。600MW 超临界机组和两台同参数的 300MW 超临界机组相比, 它的投资可减少 10%~20%, 占地面积减少 20%, 热耗降低 0.5%, 并且制造和安装周期可缩短, 由以上分析看出作为超临界机组 300MW 容量偏小, 因此综合考虑我国电网的运行情况认为: 我国选用 600~1000MW 范围超临界机组是比较合适的。并在金属材料许可的情况下, 提高蒸汽参数, 以有利于提高热效率。

2. 我国发展超临界在技术上的不足

火电发电业内不乏质疑的声音, 这种声音认为我国超临界技术的超常规发展带来相当多的隐患: 首先是技术。由于我国并不掌握超临界的关键技术, 只有靠与国外企业的合作。在超临界技术层面, 国外企业所提供给的只是技术上的支持, 而技术支持与技术转让不是一个概念, 他们提供的只是设计方案, 不是核心, 又无自主知识产权, 另外这种合作也是不稳定的。以我国超超临界的先行者哈锅为例, 其亚临界项目跟阿尔斯通合作, 超临界项目跟英巴合作, 超超临界是三菱, 目前正在与三菱公司谈判技术转让事宜。可以看出, 在非常规火电锅炉方面, 我国哈锅没有一个清晰的技术路线, 其他锅炉厂也是如此。

(1) 超临界机组的控制系统比亚临界机组更复杂。超临界机组与亚临界机组相比, 其动态特性要复杂得多, 主要体现在: ①超临界机组锅炉中水、汽不能自动分离, 只能采用直流锅炉。由于没有汽包的缓冲, 机炉紧密牵连, 超临界锅炉动态特性受扰动的影响比汽包式锅炉大。物流和能流互相耦合, 从而在各个控制回路, 如给水、汽温及负荷控制回路之间存在着很强的非线性耦合。②超临界机组的被控特性复杂多变, 机组的动态特性参数随着机组负荷的变化而变化, 在调峰时更是大幅度变化。为了提高经济性, 超临界机组普遍采用变压运行, 即是超临界机组有时也在亚临界压力范围内运行。由于亚一超临界区工质特性的巨大差异, 使超临界机组呈现很强的非线性特性和变参数特性, 远比常规的亚临界机组难于控制。③与同容量的亚临界机组相比, 超临界机组蓄热量和蓄质量相对较小, 故负荷调节的灵敏性好, 可实现快速启停和调节负荷; 但由于超临界机组对外界的扰动响



应较快,因而更容易产生较大的热偏差,引起较大的温度波动,甚至发生超温、超压爆管。由于超临界机组的动态特性比亚临界机组复杂,更难于控制,为了保证超临界机组的运行稳定性和经济性,因此必须研究运用非线性控制技术、容错控制技术、信息融合等现代控制理论和高新技术,必须采用高性能、高可靠度的自动控制系统。

(2) 其次是材料方面的问题。超临界锅炉价格比亚临界锅炉高出 5% 左右,汽轮机的价格变化小,而整个火电机组价格增加 2%~3%。虽然电站的投资费用增大 2% 左右(随着科技进步和单机容量增大,高级钢材的价格将有所下降,电站的单位造价将减少),但超临界机组的供电效率可提高 2% 左右,并且燃料的价格不断上涨,那么在 4 年左右能用所节省的煤量折价去抵消投资费用的增量部分,因此在我国煤价相对较高的东南部广大地区使用超临界机组是有利的。在超临界锅炉上,尤其是超超临界锅炉重要元件的材料性能是很关键的。如高压蒸汽管、联箱、过热器管和水冷壁管,这些都要符合蠕变强度的要求。这对所用材料提出了很高的要求。超超临界所用的材料都没有做过试验,目前我国超超临界用的材料主要从国外采购。从国外情况来看,日本从超临界到超超临界在材料准备上就用了 12 年时间,为把材料性能摸清。从 566~600℃ 又用了 7 年时间,从材料到温度用了将近 20 年的时间。据介绍,美国和德国等国家早期开发的超超临界机组投运初期曾出现一系列问题,从而导致超超临界机组的可靠性较低,影响了超临界和超超临界技术的进一步发展。后来,美国爱迪生电气研究所(EEI)通过对大型火电机组运行状况的专门调查、统计和分析,发现超临界机组和超超临界机组运行中出现的问题并不是由于采用超临界或超超临界参数引起,而是因为蒸汽参数的选择超出了当时的金属材料技术水平,过分依赖并大量使用了奥氏体钢。

(3) 再次是整个系统设计经验缺乏。在辅机配件、控制系统方面我们没有经验,从设计、制造、安装到工地焊接,我国同样没有经验。如果还不注意积累经验、尽快掌握超超临界的核心技术,那么的超超临界机组很可能会是沙上建塔。

一面是实然的高效益的诱惑;另一面是或然的技术漏洞。选择上与不上,无论对火电厂来说,还是对制造厂来说,都是问题,但火电厂无法抗拒超超临界机组高效益的诱惑;哈锅某工程师提醒说,超超临界技术对于制造厂来说没有问题,但是对于发电厂来说,超超临界的步子迈得有点大了,超超临界机组最关键的是机组启停以及运行过程中的监控,而发电厂在这几方面都缺乏经验。

超临界国外基础研究投入多,国内没有投入或者投入很少。国内应用研究还可以,通过吸收消化,完成了技术储备。对于超超临界的基础研究,由于在国内竞争大,各大生产厂都在压低价格,企业利润率降低,无力从事基础研究,这对我国今后超超临界技术的发展产生不良影响。

四、我国发展超临界机组的可能性

我国的能源结构决定了电力工业以煤炭为主,这在未来相当长时间内都不会改变。但是煤电对环境的影响将制约煤电的可持续发展,并且由温室气体引起的全球气候变暖是未来能源与环境问题中引人关注的难点问题。因此,中国未来电力工业可持续发展的首要任务是要解决煤电的可持续发展问题。超临界机组发电技术在我国的发展成为解决这些问题



的一个良好途径。我国人均煤炭存量低，预计在 2020 年我国发电用煤将达到 15 亿 t 左右。就需要采用有效的措施提高煤炭利用率，以减少用煤总量。超临界机组可高效率利用燃煤进行发电，可以大大节省煤炭的使用量。

国外成功运行的实践证明，发展大容量高参数的超临界和超超临界机组是当今世界火电发展的重要趋势之一。一方面材料工业的发展，使超临界机组采用更高参数成为可能；另一方面超临界和超超临界机组是现阶段提高煤电效率、降低单位发电量污染物排放的最有效的手段之一。

超临界机组发电效率较我国之前主要采用的亚临界机组高出 3.2%，超超临界机组更是高出 10%。1998 年，最早投入运行的超超临界机组安装在丹麦的 Nordjyllands 发电厂，由丹麦 BWE 公司设计生产，发电效率创造了世界纪录，达到 47%。2002 年我国把开发超超临界锅炉列为国家 863 重大项目攻关计划，2003 年原国家经济贸易委员会和科技部都把超超临界锅炉列入国家重大技术装备研制计划。

超超临界锅炉主要通过提高锅炉主蒸汽的压力和温度进而提高锅炉的热效率，煤耗低、环保性能好、技术含量高，据研究人员测算，常规超临界锅炉热效率比亚临界锅炉高 2% 左右，而超超临界锅炉热效率在常规超临界机组基础上提高约 4%。

大容量超超临界锅炉还具有良好的启动运行和调峰性能，变负荷速率比常规锅炉高出 10~20 个百分点。热效率高、煤耗低、环保性好，对于以煤电为主的中国来说，超超临界机组具备大干快上的理由。综上所述，机组效率的提高，尤其对于大容量机组，具有极其重要的意义。如果机组效率提高了 0.1%，对于一台 1000MW 的机组来说，相当于多输出了 1MW 的电量，是相当可观的。因此，效率的提高成为了所有人关注的话题。

第三节 国外超临界机组的发展概况

一、国际上超临界机组的发展趋势

超临界机组的发展趋势主要表现在以下 3 个方面：

(1) 不取太高的蒸汽压力，而取相对较高的蒸汽温度，主要以日本的技术发展为代表。

(2) 取较高的蒸汽压力和蒸汽温度，从而获得更高的效率，主要以欧洲的技术发展为代表。

(3) 更大容量等级的超超临界机组的开发。为尽量减少汽缸数，大容量机组的发展更注重大型低压缸的开发和应用。日本几家公司和德国西门子、美国阿尔斯通等在大功率机组中已开始使用末级钛合金长叶片。

目前全世界有 600 台超临界机组在运行。到 20 世纪 80 年代初期，锅炉和蒸汽轮机的制造材料有很大改善，并且对水化学机理也有了更新的认识。这些改善的结果使得全世界增加了许多新的超临界电厂。新材料使人们可以建造超超临界电厂，在 24MPa/611℃ 蒸汽条件下运行，近期有望在 28 MPa/638℃ 蒸汽条件下运行。



二、美国发展超临界机组情况

美国是世界上发展超临界技术最早的国家之一。美国超临界机组单机双轴最大容量达1300MW，其中单机容量大于500MW的占70%以上。其中800MW以上的机组107台，1300MW机组至今已有9台投入运行，蒸汽参数大都为24.11MPa，538℃/538℃。到目前为止，美国有大约160多台超临界机组，总功率达86GW，占美国燃煤电厂机组总容量的15%。所有机组都采用新的水化学控制技术。只有6台机组运行在583℃主蒸汽温度下；18台机组再热蒸汽温度为583℃。其他机组，除Eddystone 1号机组外，蒸汽温度为556℃。多数机组带基本负荷运行。美国多数超临界机组带基本负荷。在超临界机组中，73%的机组是燃煤机组，其中84%为单再热。

20世纪50年代后期的美国，由于希望增加效率，因此引入了很多超临界锅炉，1957年美国第一台超临界125MW试验机组投产，安装在费洛电厂（自1957年以来一直由俄亥俄电力公司拥有并运行），为参数高达31MPa/621℃/566℃/566℃的二级再热机组。运行温度在556℃或以上，运行压力不小于24MPa。拥有超临界锅炉的电厂有：Eddystone 1号机组（自1959年以来一直由Philadelphia电力公司拥有并运行）；第二台超临界机组为阿尔斯通电厂的1号机组，装机容量325MW，参数为34.4MPa/650℃/566℃/566℃，1959年投入运行，但由于机械和金相问题，将参数降为参数为34.4MPa/610℃/560℃/560℃运行，其在服役期内大都是在32MPa/622℃工况下运行。1960年有数台大容量的双轴机组投运，其参数为24.1MPa/566℃/566℃。

截至1969年，一种结构较为简单的单轴二级再热设计表明了在技术上的成熟。该设计把24.1MPa/538℃新蒸汽和552℃一级再热蒸汽以反向流动的方式安排在一个汽缸内；另外将566℃的二级再热蒸汽引入一个双流式汽缸，以提供足够的容积通流能力，并把温度最高的区域安排在汽缸的中间。该设计显示了很高的可靠性，其性能也超过了预期的指标。

在20世纪60~70年代，除了二级再热机组，还有不少参数为24.1MPa/538℃/538℃单级再热机组投入运行。其中，包括容量为350~884MW单轴机组，单机容量最大的机组为1300MW机组。采用较低的超临界参数，目的是在于防止高温腐蚀，以提高机组可用率。到80年代，美国EPRI又开发了参数为31MPa/593℃/593℃/593℃的两级再热机组。

20世纪60~70年代，当人们认识到超临界循环比亚临界循环的效率更高时，全世界的电力公司都利用该技术大力兴建电厂。但是20世纪80年代美国对这一技术的兴趣有所减弱，有两个原因：①对超临界电厂可用性的担心和美国国内相对较低的民用燃料价格；②使投资者不会长期投资不仅总投资高而且初期投资也高的超临界循环项目。

同一时期，在海外市场，燃料价格造成电厂的总投资要比美国高，这时超临界循环在投资上更有利，因此其建设会一直持续下去。尽管美国是超临界循环技术的先锋，但20世纪八九十年代，当电力公司继续开发此技术并建立电厂时，美国与欧洲、日本相比失去了其在研发方面的领导地位。目前，由于各种原因，美国的投资者越发关注超临界电厂。煤的储量在美国非常丰富，并且也是美国的经济支柱。而天然气价格最近大幅度上扬对美国电力公司造成了强烈影响，他们将计划着眼于燃煤电厂。对于效率和环保的需求是运行



超临界电厂的另一个促进因素。如表 1-4 所示效率高的电厂更具竞争力，因为它们用的燃料少，而且排放的 SO_x 、 NO_x 和 CO_2 更少。由于全世界到 2010 年的限制温室气体协定，现在一个电厂发电后要使温室气体排放达到最低（例如 CO_2 气体），这一点正变得越来越重要。某 800MW 的电厂在其服役期间每增加 1% 的效率，就会少产生大约 100 万 t 的 CO_2 气体。

表 1-4 美国现役单机容量最大机组 (1300MW)

电 站	锅炉蒸发量 (t/h)	运行方式	蒸汽参数 (MPa/°C/°C)	投运年份
Cumberland	4535	定压	24. 2/538/538	1972
Amos	4433	定压	24. 2/538/538	1973
Gavin	4433	定压	24. 2/538/538	1974
Mountaineer	4433	定压	24. 2/538/538	1980
Zimmer	4433	定压	25. 2/538/538	1991

另外，从目前来看，第一代超临界电厂的问题可能仅是开始时暂时的困难，目前已解决。

最近的长期运行性能分析显示，超临界机组的可用性和维护费用与亚临界机组相差不大。

总之，美国发展超临界技术有以下几个特点：

(1) 美国超临界机组发展起步早、发展快、装机容量大，但是早期发展出现大幅度变化。在第一台、第二台超临界机组投运后，1960 年前后又投产多台超临界机组。由于这些机组在运行中暴露出很多问题，在 1962 年左右出现订货低潮。其后由于燃料费用比较贵以及对已投运机组进行了改进，1964 年前后又出现订货高潮，但此时机组的参数一般已降至 24.12MPa/538°C/538°C 等级，或稍高一些的参数。1970 年美国超临界机组的订货容量占该年总订货容量的 64.27%，但日后再次出现第二次订货低潮。

美国早期超临界技术的发展对世界发展超临界技术起了比较大的促进作用，但在早期也出现了较大的问题：

1) 美国第一台、第二台机组已采用超超临界参数，超越了当时的技术水平，以后出现问题参数又有回落。在技术未经验证的情况下，大量推广应用，结果早期出现大起大落、盲目发展的情况。

2) 在前几台机组出现问题后，对机组进行了改进设计。EPRI 把 20 世纪 50 年代设计的机组称为第一代燃煤超临界机组，60 年代设计的称为第二代燃煤超临界机组。但由于进度的原因，有些第二代机组可能先投产，第一代机组反而后投产，一时很难确定某改进效果。后来在统计可靠性时，对这两种机组分别统计，证明了改进后的机组可靠性有明显的提高。

3) 其他问题，例如：早期有的辅机寿命很短，后来进行了改进；美国对超临界机组的调峰性能不如欧洲重视等。

(2) 美国安装超临界机组的高峰是在 20 世纪 70 年代，至 1982 年美国超临界机组总