



火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

热力系统节能



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

推荐书目

- 燃料电池发电系统 (首届国家“三个一百”原创图书奖
国家“十一五”重点图书 电力科技专著出版资金资助项目)
- 火力发电厂节能技术丛书
 - 锅炉机组节能
 - 汽轮机设备及系统节能
 - 热力系统节能
 - 节能与控制
- 超超临界火电机组丛书
 - 锅炉设备与运行
 - 汽轮机设备与运行
 - 电气设备与运行
 - 热工自动化
- 超超临界火电机组技术问答丛书
 - 锅炉运行技术问答
 - 汽轮机运行技术问答
 - 电气运行技术问答
 - 热工控制系统技术问答
 - 环境保护与管理技术问答
- 600MW级火力发电机组丛书 (6分册)
- 300MW火电机组培训丛书 (5分册)
- 300MW火力发电机组故障分析
- 核电工程项目管理
- 火电厂高温部件剩余寿命评估 (电力科技专著出版资金资助项目)
- 大型火力发电机组故障分析
- 大型火力发电机组集控运行
- 电力企业新员工培训教材 (3分册)
- 电力企业安全性综合评价方法
- “职业健康安全管理体系”建立与运作100问
- 电厂烟气脱硫设备及运行
- 循环流化床锅炉技术600问
- 大型循环流化床锅炉设备与运行
- 大型发电设备检修工艺方法和质量标准丛书 (3分册)
- 火力发电厂烟风煤粉管道设计技术规程配套设计计算方法
- 电站锅炉手册
- 电站锅炉空气预热器
- 电力英语应用口语
- 热工自动装置检修
- 汽轮机辅机检修
- 锅炉辅机检修

责任编辑 赖广秀
联系电话 010-63416255
电子邮箱 lai_guangxiu@cepp.com.cn
封面设计 左 铭

上架建议: 电力工程 / 火力发电

ISBN 978-7-5083-6714-9



9 787508 367149 >

定价: 35.00元



火力发电厂节能技术丛书

中国电力企业联合会科技服务中心 合编
华中科技大学能源与动力工程学院

热力系统节能



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

本书是《火力发电厂节能技术丛书》之一。

本书以火力发电厂热力系统为对象，论述其工作过程中可能存在的能量损失及以节能为目标的运行优化技术和改造措施，并给出了参考案例和经济性分析方法。全书共分七章，包括热力系统节能分析原理，回热系统及设备节能，真空系统、凝结水系统及循环水系统节能，辅助热力系统节能，机组旁路系统、全厂疏水系统节能，现代动力循环及其节能分析等。

本书可供从事火电机组设计、运行工作的工程技术及管理人员使用，也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

热力系统节能/中国电力企业联合会科技服务中心·华中科技大学能源与动力工程学院编. —北京: 中国电力出版社, 2008. 3

(火力发电厂节能技术丛书)

ISBN 978-7-5083-6714-9

I. 热… II. ①中…②华… III. 火电厂-热力系统-节能 IV. TM621. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 014721 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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 259 千字

印数 0001—3000 册 定价 35.00 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

火力发电厂节能技术丛书

编 审 委 员 会

主任委员：李玉生

副主任委员：（按姓氏笔画为序）

刘传柱 刘建明 安洪光 祁智明 何 勇
周怀春 侯国立 赵 平 韩大伟 靳东来

委 员：（按姓氏笔画为序）

马国林 王彤音 石朝夕 毕诗方 吴玉鹏
李文学 陈 刚 陈汉平 罗发青 席志红
郭云高 陶洪才 高 伟 黄树红 曾汉才

主 编：周怀春

副 主 编：（按姓氏笔画为序）

王 坤 张小平 张燕平 杨 涛

参 编：（按姓氏笔画为序）

于 斐 马洪波 叶 涛 吴立增 张兴营
张春伟 张聘亭 李永生 李建兰 李昱彤
汪致远 陈汉平 陈 刚 陈 兵 岳 乔
姚斯亮 祝 宪 贺国强 席志红 郭云高
高 伟 黄树红 曾汉才

审 稿：（按姓氏笔画为序）

马永真 周世祥 雍双春 靖长财

前言

“建设节约型社会，实现可持续发展”已经被明确为我国的基本国策。资源与环境的压力，迫切要求各领域（尤其是产能和耗能单位）落实国家既定的发展目标。随着一次能源转换为电能的比重、电能占终端能源消费量的比重不断提高，电力行业固有的资源密集型、资源紧缺性的特点，使电力行业成为我国环境资源工作的关键所在，建设节约型电力企业的重任摆在了所有电力工作者的面前。

电力工业是技术密集型工业，能量的转换和传输是一个关联性强、比较复杂的系统，因而节能工作实施的效果往往不能通过单独的一个环节来认定，也不能片面强调节约而忽略安全。之前电力企业在某些节能工作方面的“谨慎”态度，一定程度上也说明了推动电力行业节能工作的艰巨性和复杂性。因此，电力行业节能工作应该遵循科学、系统、实践、推广的规律，既不能畏难不前，也不能求快冒进。

为了有效地配合电力企业节能工作的开展，发挥电力行业技术服务部门的作用，中国电力企业联合会科技服务中心在认真分析了电力企业节能工作特点的基础上，联合华中科技大学，有针对性地组织编写了《火力发电厂节能技术丛书》（以下简称《丛书》），分为《锅炉机组节能》、《汽轮机设备与系统节能》、《热力系统节能》、《节能与控制》四个分册。《丛书》突出强调三个方面：

1. 实用性：强调应用、借鉴和参考价值。建立以电力企业生产过程中涉及到的能量转换原理、能量传输过程为依据，以节能分析为展开线索，以节能手段为落脚点的三重结构。
2. 开放性：强调聚集全行业的智慧和经验。丛书的编写不局限于某几个人的思路，而是面向电力行业所有相关人员，并长期向电力行业开展电力节能案例征集工作。
3. 长期性：强调在完善总结的基础上，与时俱进地跟踪反映电力节能技术的发展。随着认识水平的提升、技术的进步，会产生很多新的、实用的节能措施和手段，《丛书》将根据电力行业的节能技术的进展情况适时再版。

相信在大家的关注和支持下，随着时间的推移、认识的加深、经验的积累，《丛书》一定会为电力企业的节能工作发挥积极的作用。

《丛书》的编写得到了各电力集团公司和发电企业的大力支持和指导，在此表示衷心的感谢！

由于水平所限、时间仓促，又加上电力节能技术是一个围绕实践、应用发展起来的跨专业、跨学科的技术汇总和研究，因而《丛书》疏漏、错误之处在所难免，敬请广大读者批评指正！

《火力发电厂节能技术丛书》编委会

2008年1月

分册前言

热力系统的结构和设备优化,以及热力系统运行管理优化是实现火力发电厂节能降耗的关键问题之一。随着全社会对节能减排的重视和关注,如何减少火力发电厂的能量损失、提高其工作效率,是所有从业人员所面临的挑战。国内外发电企业以节能为目标,从运行优化和节能改造两个方面进行了许多有益的尝试,并已取得了很好的效果。

本书作为《火力发电厂节能技术丛书》之一,对发电厂及热力系统节能潜力进行了分析,阐述了热力系统节能分析的基本理论和一般方法,并对发电厂各热力系统及相关设备近年来成功的改造经验和优化运行实践进行了归纳总结,同时辅以大量典型案例及其技术经济性分析。书中所列举的改造实例均来自公开发表的文献资料。在此谨向本书所引用文献的全体作者致以衷心的感谢!

本书由张燕平、李建兰、叶涛主编,汪致远参与编写。鲁能河曲发电厂周世祥审阅全书,并提出宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,中国电力企业联合会科技服务中心的郭云高先生、席志红先生,华中科技大学能源与动力工程学院黄树红教授、周怀春教授、高伟教授、韩守木教授给予了有力指导和大量帮助,在此表示诚挚的谢意!

由于水平所限,加之时间仓促,疏漏之处在所难免,恳请读者批评指正。

编者

2008年1月

目 录

前言

分册前言

第一章 火力发电厂能效现状与节能潜力分析	1
第一节 火力发电厂能效现状	1
第二节 热力系统节能潜力分析	6
第二章 热力系统节能分析原理	10
第一节 发电厂热经济性分析方法	10
第二节 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	15
第三节 耗差分析方法	17
第三章 回热系统及设备节能技术	27
第一节 回热加热器节能技术	27
第二节 加热器疏水系统节能技术	42
第三节 给水系统节能技术	53
第四节 除氧系统节能技术	61
第四章 真空系统、凝结水系统及循环水系统节能	71
第一节 真空系统节能基础	71
第二节 真空系统节能改造案例	78
第三节 凝结水系统节能技术	85
第四节 循环水系统节能技术	93
第五节 循环水系统节水技术	100
第五章 辅助热力系统节能	106
第一节 锅炉连续排污系统节能	106
第二节 废热及工质回收利用节能技术	113
第三节 补充水系统节能	118
第六章 机组旁路系统、全厂疏水系统节能	124
第一节 机组旁路系统节能	124
第二节 汽轮机疏水系统节能	133
第七章 现代动力循环及其节能分析	145
第一节 蒸汽动力循环—朗肯循环	145

第二节 热电联产循环及其节能分析..... 146

第三节 燃气—蒸汽联合循环及其节能分析..... 155

第四节 整体煤气化联合循环 IGCC 及其节能分析..... 164

参考文献..... 174

前言

前言附注

1 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

1 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

6 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

10 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

10 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

21 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

74 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第三章

78 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第三章

78 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

84 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

88 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第三章

91 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第四章

11 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第四章

11 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

28 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

82 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第三章

88 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第四章

100 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第五章

108 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第五章

108 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

113 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

118 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第三章

124 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第六章

124 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

133 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第二章

142 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第七章

142 火电厂烟气脱硫系统运行与维护 第一章

火力发电厂能效现状与节能潜力分析

第一节 火力发电厂能效现状

一、国际能源展望与节能策略

今后二十多年全球能源消费将迅速增长，特别是发展中国家的能源需求将随着经济的快速增长而迅猛增加。美国能源部的《国际能源展望报告》预测，到2025年，全球能源消费量将比2001年增长54%，其中工业国家每年将增长1.2%；亚洲发展中国家将比目前增加一倍，占全球能源需求增长量的40%，占发展中国家增长量的70%；东欧和前苏联国家每年将增长1.5%。

随着全球能源形势的日益严峻，节能和新能源的开发成为各国能源政策的两个主题。

美国是世界最大的能源消费国和进口国。2003年8月14日，包括纽约市在内的美国东北部地区发生大面积停电事故，这进一步引起了美国朝野对能源安全问题的高度关注。美国政府积极主张增加国内能源产量，提高节能效益和燃料利用效率。对包括石油在内的国内能源生产提供新的减税优惠，同时，不断探索和开发太阳能、生物能等多种能源产品。

德国制定了《可再生能源法》等政策法规，力求实现能源生产和消费的可持续发展。2000年，德国政府出于环保和节省成本等考虑，决定逐步放弃已初具规模的核电，并以此为契机，大力开发太阳能、风能、生物能等可再生能源。德国政府希望通过能源结构调整，到2010年使所谓“生态能源”的发电量占到全国发电总量的10%，50年后，力争使可再生能源成为国民使用的主要能源。

多年来，法国奉行使能源发展和需求增长相平衡的能源政策，一方面积极发展能源工业；另一方面努力节制能源消耗的增长。

日本通过立法提高能源使用效率，大力发展节能技术。

二、中国能源利用现状与节能目标

随着中国国民经济的持续快速增长，能源消费量越来越大，我国已成为世界第二大能源消费国，并成为世界上对能源依赖程度最高的国家之一。特别是近两年，我国大部分地区，尤其是长江三角洲和珠江三角洲地区电力供应缺口较大，能源短缺已成为制约经济与社会可持续发展的重要因素之一。

我国还没有完全改变“高投入、高消耗、高排放、不协调、难循环、低效率”的粗放型经济增长方式。高消耗换来的增长，导致废弃物排放多、环境污染严重。我国单位GDP的废水、固体废弃物排放水平都大大高于发达国家。由于经济增长方式粗放，因此付出的资源环境代价过大，加剧了能源、资源短缺的压力，带来了煤电油运全面紧张，经济运行绷得过紧等问题。

2000年的统计数据表明，我国人均石油可采储量、人均天然气可采储量、人均煤炭可采储量分别仅为世界平均值的11.1%、4.3%和55.4%。我国能源探明储量中，煤炭占94%，石油占5.4%，天然气占0.6%。我国富煤贫油少气的能源资源特点决定了我国能源生产以煤为主的格局长期不会改变。目前煤炭在我国一次能源的消费中占75%左右，在可以预见的未来较长时期内，煤炭在国民经济中的地位不可替代。

我国煤炭资源可采储量虽居世界第三位，但探明程度较低，开采条件在世界上属于中等偏下，且多数分布在经济落后的中西部和北部地区。加上我国煤田勘探资金投入少，矿井开发前期准备工作滞后，开采情况并不乐观。2002年末，全国尚未利用的探明储量为6565亿t，其中可供开采的煤炭仅618亿t。

与世界先进水平相比，我国能源利用效率和经济效益还存在着较大差距。高耗能产品的能源单耗要比发达国家平均水平高40%左右，单位产值能耗大约是世界平均水平的两倍多，能源有效利用率要比世界平均水平低十多个百分点。因此，节约能源和提高能效的潜力很大。充分挖掘节能潜力，降低能源消耗，是摆在我国政府和人民面前的一项紧迫任务。

“十五”期间，我国国内生产总值的年均增长率是9.48%，能源消费弹性系数高达1.191。今后15年，如果继续这种能源消费态势，按国内生产总值年均增长率7%测算，到2020年的能源需求量将超过60亿t标准煤。而在能源生产供应方面，受资源、技术和经济条件的制约，据有关部门和专家预计，国内到2020年可能达到的一次能源（包括煤、油、气、水电、核电和可再生能源等）生产能力预计只有25亿~26亿t标准煤，加上进口量4亿~5亿t标准煤（约相当于能源生产量的18%），合计的能源供应量在30亿t标准煤左右，与能源需求之间的差距甚大。因此，节能工作面临的形势是严峻的，节能任务艰巨且任重而道远。

能源专家指出，要加强我国能源工业的发展，应该加快资源的勘探，为能源的开发创造条件；加强能源，特别是煤炭资源的管理；大力开展节能、推广洁净燃料技术和综合利用；大力推进清洁能源和新能源的研发，促进能源、经济、环境协调发展和能源工业的持续健康发展。国务院发展研究中心课题组甚至提出“为确立节能的重要战略地位，建议将节约资源提升到基本国策的高度”。

专家们建议，在注重各行业用能改革的同时，还应积极开展以提高能源利用效率和开发利用新能源为目标的能源科学技术的研究和推广。坚持节约与开发并重，力求合理高效用能。

随着我国科学技术的发展，能源利用效率虽然近年来有了较大提高，但与世界发达国家相比仍有差距，尚有很大的提高潜力。据文献[3]统计，我国目前能源效率比国际先

进水平低 10 个百分点，其中火电机组平均效率为 33.8%，比国际先进水平低 6~7 个百分点。

在能源供应总量不能满足需求的情况下，节约是解决供需不平衡最现实、最有效的途径，这正是我国把经济社会发展切实转入全面协调可持续发展的轨道，必须加快转变经济增长方式的要求。为此，国家发展和改革委员会制定并实施了国家《节能中长期专项规划》，明确提出宏观节能目标是在 2003~2020 年年均节能率为 3%，形成的节能能力为 14 亿 t 标准煤。这是一个经过努力可以达到的节能目标。在《节能中长期专项规划》中还具体规定了主要产品的单位能耗指标：2010 年总体达到或接近 20 世纪 90 年代初期国际先进水平，其中大中型企业达到 21 世纪初国际先进水平；2020 年达到或接近国际先进水平。对电力生产的指标规定了火电供电煤耗，2010 年达到 360g 标准煤/(kW·h)，2020 年达到 320g 标准煤/(kW·h)。

在 2006 年 3 月第十届全国人民代表大会第四次会议通过的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》中，进一步提出我国“十一五”规划期间单位国内生产总值能源消耗降低 20% 左右的目标要求，即万元国内生产总值（按 2000 年可比价计算）能耗应由 2005 年的 1.43t 标准煤下降到 2010 年 1.14t 标准煤左右，年均节能率约 4.4%，年均节能量在 8200 万~8300 万 t 标准煤左右。

电力工业作为节能重点领域中的 8 个重点工业之首，担负着很大的节能任务。在《节能中长期规划》中，对电力工业的节能任务作了如下描述：大力发展 60 万千瓦及以上超（超）临界机组、大型联合循环机组；采用高效、洁净发电技术，改造在运火电机组，提高机组发电效率；实施“以大代小”、“上大压小”和小汽轮机组淘汰退役，提高单机容量；发展热电联产、热电冷联产和热电煤气多联供；推进跨大区联网，实施电网经济运行技术；采用先进的输、变、配电技术和设备，逐步淘汰能耗高的老旧设备，降低输、变、配电损耗；采用天然气发电机组替代燃油小汽轮机组；优化电源布局，适当发展以天然气、煤层气和其他工业废气为燃料的小型分散电源，加强电力安全；减少电厂自用电。

三、火电机组能效现状

（一）我国火电机组装机结构特点

近年来，我国电力装机容量逐年增长。2006 年我国电力装机容量突破 6 亿 kW（参见表 1-1），较 2005 年增长约 1 亿 kW，电力供需形势进一步缓和。

表 1-1 我国 2006 年电力生产情况

种类	装机容量 (亿 kW)		发电量 (亿 kW·h)	
	容量	占比	电量	占比
火电	4.8405	77.8%	23573	83.2%
水电	1.2857	20.7%	4167	14.7%
核电	0.0685	1.1%	543	1.9%
风电	0.0187	0.3%	27	0.1%
合计	6.22	100%	28344	100%

从火电装机结构来看,全国火电厂单机容量由10年前的以100MW、200MW为主,上升到现在的以300MW、600MW为主。到2005年底,300MW及以上机组占火电装机的42%,600MW超临界国产机组已经投产。2006年,国产首批超超临界百万千瓦机组相继投运。随着对凝汽式燃煤小型汽轮机组和老小燃油机组的陆续关停,我国火电装机结构将逐步改善。

从电厂容量来看,我国目前已进入电力大国的行列。1994年底,我国已投运和在建的装机容量1000MW以上火电厂有56座,300MW机组有91台,500MW机组有6台,600MW机组有15台,800MW机组有两台,其中超临界机组6台。到2006年底,我国发电装机容量1000MW以上电厂已发展到145座,其中容量最大的托克托发电厂总装机容量达4800MW。

(二) 我国火电机组的煤耗水平

20世纪90年代以来,我国电力节能工作者通过不断地努力,探索适合我国国情的火电节能新技术和节能管理的新办法,使我国火电机组供电煤耗逐年下降。特别是20世纪90年代,我国供电煤耗平均每年以3.6g/(kW·h)的速度下降,1978年,全国火电机组发电煤耗和供电煤耗分别为434g/(kW·h)和471g/(kW·h),到2000年,已分别下降到363g/(kW·h)和392g/(kW·h)。2006年,我国供电煤耗为366g/(kW·h),比2005年降低4g/(kW·h)。电网输电线路损失率为7.08%,比2005年低0.1个百分点。全国发电设备累计平均利用小时为5221h,比2005年降低203h。

2007年1~5月,全国供电煤耗率为355g/(kW·h),比2006年同期下降9g/(kW·h)。全国发电厂用电率为6%,其中水电为0.48%,火电为6.64%,线路损失率为5.99%。

(三) 国外火电厂装机结构特点及能耗水平

国外火电机组装机特点体现在三个方面,一是超临界大机组的采用,二是大容量电厂的建设,三是燃汽—蒸汽联合循环发电机组的使用。

(1) 发展超临界参数的大容量火电机组。发电厂的热经济性除了与循环方式有关外,还取决于蒸汽的初、终参数。蒸汽初参数(初温、初压)对电厂热经济性的影响主要取决于对汽轮机绝对内效率的影响。随着蒸汽初参数的提高,为了使汽轮机组有较高的绝对内效率,在汽轮机组的进汽参数与容量的配合上,必然是“高参数必须是大容量”。随着蒸汽初参数的提高和机组单机容量的增加,发电厂的热经济性是提高了。机组参数与供电煤耗及电厂效率的关系参见表1-2。

表 1-2 不同机组参数的热经济性对照

序号	机组类型	蒸汽压力(MPa)	蒸汽温度(°C)	电厂效率(%)	供电煤耗[g/(kW·h)]
1	超高压	13	535/535	35	360
2	亚临界	17	540/540	38	324
3	超临界	25.5	567/567	41	300
4	高温超临界	25	600/600	44	278
5	超超临界	30	600/600	48	256
6	高温超超临界	30	700	57	215
7	超700°C	>30	>700	60	205

为提高热效率,各国火力发电机组都积极采用超临界参数的大容量机组。美国第一台试验性超临界(31MPa, 621℃/566℃/566℃)125MW 机组于1957年投入运行,到20世纪80年代初期,美国超临界机组投运了170套,占总装机容量的25%,单机最大容量为1300MW;苏联到1985年投运了185台超临界机组,占当时前苏联火电装机量的50.5%;日本、德国及英国、意大利等国也相继投入超临界机组,经过近四十年的努力,超临界技术日趋成熟,可靠性与亚临界机组等同,热效率明显提高(见表1-3)。超临界汽轮机热耗比亚临界机组低192.559kJ/(kW·h),相对热效率改善约为2.5%。特别是丹麦 Vestkraft 电厂1992年投运的407MW 机组(25.1MPa, 560℃/560℃),经优化设计和改进,供电效率达45.3%[供电煤耗272g/(kW·h)],为超临界机组树立了榜样。

表 1-3 部分已投运超临界机组经济性

电厂项目	蒸汽参数	机组效率 (%)	投运年份
丹麦 Vestkraft 电厂 407MW	25.1MPa, 560℃/560℃	45.3	1992年
法国 Staudinge 电厂 550MW	25MPa, 540℃/560℃	42.5	1992年
德国罗斯托克 (Rostock) 电厂 559MW	25MPa, 540℃/560℃	42.5	1994年
韩国某电厂 500MW	24MPa, 538℃/538℃	41	未知
石洞口二厂 600MW	24.2MPa, 538℃/566℃	41.09	1992年
西门子设计 400~1000MW	27.5MPa, 589℃/600℃	>45	1999年
丹麦拟建设 412MW	28.5MPa, 580℃/580℃/580℃	49	1998年

随着超临界机组技术的成熟、可用率的提高及耐热材料研制成功,人们开始涉足超超临界机组(超超临界蒸汽参数界限规定为24.1MPa/566℃)。缺乏能源及对超临界机组的设计与运行积累了一定经验的日本成为研究超超临界机组的开路先锋。日本川越电厂两台700MW 超超临界压力机组(31MPa/566℃/566℃/566℃)分别于1989年和1990年投入运行,其热效率在100%和50%负荷下为41.9%和40%,比一般超临界机组(24MPa/538℃/566℃)热效率相对提高5%,最低稳定运行负荷为10%,自动化程度高,两台机组仅需一名运行人员。随着耐高温金属材料的开发成功,初参数为24.1MPa/566℃/593℃的700MW 机组已在日本碧南电厂投运,初温为593℃/593℃,649℃/593℃机组的验证试验正在进行。超超临界机组最终目标拟达到34.3MPa/649℃/593℃/593℃,机组热效率可达44%。

(2) 建设有大容量火电机组群的大电厂。为发挥坑口电站靠近煤矿的运输及供煤的优势,世界上建设大型火电厂的趋势有增无减。1996年底,世界上2000MW 以上大型火电厂有82座,其中4000MW 以上火电厂5座,3001~4000MW 火电厂24座,2501~3000MW 火电厂24座,2000~2500MW 火电厂29座。世界上最大的燃褐煤和烟煤的火电厂分别是波兰的贝尔哈托夫电厂和南非的肯达尔电厂,其装机容量分别为4320MW 和4116MW;最大的燃气和燃油电厂分别是俄罗斯的苏尔古特第二火电厂和日本的鹿岛火电厂,其装机容量分别为4800MW 和4400MW。

(3) 燃气—蒸汽联合循环。联合循环就是把在中低温区工作的蒸汽轮机的朗肯(Rankine)循环和在高温区工作的燃气轮机的布雷登(Brayton)循环叠置,组成一个总

能系统循环，它有很高的燃气初温（1200~1500℃）和蒸汽做功后很低的终温（30~40℃），实现了热能的梯级利用，使总的循环效率很高。涂层技术、耐高温材料和冷却技术的进步等，大大提高了燃气初温（初温为1350℃的701F燃气轮机已投运，初温为1427~1649℃的水冷燃气轮机正在研制中），加之设计、制造技术的进步，使燃气轮机在半个世纪的发展中，不论是燃气初温、单机容量还是压缩机效率都逐步提高。目前，燃气轮机简单循环的热效率已突破30%，高的可达38%~39.5%，单机功率已超过300MW；蒸汽轮机在一个世纪的发展中，由于蒸汽参数的提高，采用蒸汽再热、三维设计、多级回热及复压式凝汽器等先进技术的应用，使蒸汽轮机经济性不断提高，从而使联合循环发电效率已超过60%，参见表1-4。

表 1-4 当代先进燃气轮机及联合循环性能

项目 \ 机型	501-ATS	GE-MS7001H	GT26	KWU
燃汽初温 (°C)	1510	1430	1260	1190
压比		23	30	16.6
简单循环净出力 (MW)	290		265	240
简单循环效率 (%)	41		38.5	38
联合循环净出力 (MW)	426	400	396	359
联合循环效率 (%)	61	60	58.5	58.1

(四) 我国火电机组与国外机组的差距

与国外火力发电技术相比，我国火电行业在能量利用方面存在的问题是：

(1) 单机容量偏小。我国火电厂建设时间早，机组多，但也带来了单机容量偏小，小型低容量的凝汽式机组在现阶段不是多数但仍普遍存在。截至目前，在我国电网构成中，300MW左右亚临界及125MW、200MW超高压机组在电网中占大部分发电比例，而这些机组的热经济性相对超临界等机组而言有明显差距。这无论对环境还是对热经济性都造成了不利影响。

(2) 超临界或超超临界及燃气轮机的科技研究领域仍处于相对落后地位。由于技术的引进，我国在亚临界机组的研制方面技术已趋于成熟，但也导致了国内汽轮机厂过于依赖国外技术，将各自的有关燃气轮机等的生产和科研机构完全撤除。这反映出我们的科研前瞻性不够，使汽轮机生产技术水平与先进发达国家目前已达到的新台阶之间的差距拉大。

(3) 新技术普及率低，速度慢。由于体制上的原因，我国火电行业节能技术改造和革新与国外新技术相比总是落后一拍，有些电厂节能眼光不够长远，节能过程过于注重于减少节能改造投资方面，而忽视了后续节能效果及对环境的影响。从分析中可以看出，国内引进型机组的火电厂在节能改造方面相比其他电厂做得好，技术革新快，效率较理想。

第二节 热力系统节能潜力分析

2006年，我国平均供电煤耗率为366g/(kW·h)，比世界先进国家高出60~70g/(kW·h)。

造成供电煤耗差距的主要原因是设备相对落后，火电机组绝大多数是亚临界和超高压机组，600MW 及其以上的火电机组比重较小，超临界机组更是凤毛麟角。此外，电厂对火电机组的优化运行及调整重视程度不够、对机组的节能潜力缺乏了解也是造成我国总体煤耗水平较高的一个重要原因。

一、各型机组的节能空间分析

(一) 200MW 机组

自 1972 年国产第一台 200MW 机组投运以来，这种设计于 20 世纪 60 年代初期的三缸三排汽汽轮机组一度成为我国各电网的主力机组。目前，200MW 机组的总装机容量仍占火电装机容量的 20% 左右。因此，200MW 机组的性能对节约能源、保护环境和电网安全有着重要意义。

国产 200MW 燃煤机组设计供电煤耗为 350~355g/(kW·h)，实际供电煤耗则为 372~355g/(kW·h)，比设计值偏高 22~62g/(kW·h)，节能空间较大。

(二) 300MW 机组

目前，我国火电主力机组为 300MW 机组，国产引进型 300MW 汽轮机组是 20 世纪 80 年代初我国引进美国西屋公司汽轮机制造技术，分别由上海汽轮机有限公司（简称上汽公司）和哈尔滨汽轮机有限责任公司（简称哈汽公司）生产制造。该机组的投产提高了我国大型火电机组的运行水平，缩小了我国大型火电机组与国际水平的差距；但由于设计、制造、安装、运行与维护等方面的因素，又不同程度地暴露出一些问题，影响到机组运行的安全性和经济性，使机组本应达到的经济效益不能得到充分发挥。

引进西屋公司技术经优化改进制造的 350MW 机组与国产引进型 300MW 机组属同类型机组。2000 年度各电厂公布的技术指标统计见表 1-5。

表 1-5 300MW 进口机组与国产机组各项经济指标对比

项 目	单 位	进口机组	国产机组	相差
平均负荷率	%	69.95	76.93	6.98
等效可用系数	%	89.97	90.17	0.2
厂用电率	%	4.19	5.26	1.07
补水率	%	0.8	3.2	2.4
凝汽器真空度	%	94.84	94.15	-0.69
锅炉效率	%	93.49	92.1	-1.39
供电煤耗率	g/(kW·h)	323.6	346.6	23

国产引进型 300MW 机组与日本三菱公司引进西屋公司技术经优化改进制造的 350MW 机组属同类型机组。国内进口已投运的日本三菱公司机组和国产引进型机组各项经济性质表对比见表 1-6。可见，现役的国产引进型 300MW 机组各项经济性指标与同类型进口机组相差较大，机组经济效益不能得到充分发挥。

表 1-6 三菱 300MW 机组与国产机组经济性指标对比
(据 1999、2000 年度公布数据)

项 目	单 位	三菱机组	国产引进型机组	相 差
平均负荷率	%	74.7	74	-0.7
等效可用系数	%	92.56	88.44	-4.12
厂用电率	%	3.97	5.54	1.57
补水率	%	0.8	3.2	2.4
凝汽器真空度	%	95	93.45	-1.55
锅炉效率	%	92.31	89.58	-2.73
供电煤耗率	g/(kW·h)	320.75	351.23	30.48

由表 1-5 和表 1-6 可见, 现运行的国产引进型 300MW 机组各项经济性指标与同类型进口机组相差甚大, 国产 300MW 机组节能潜力较大。

亚临界 600MW 机组具有较高的热经济性, 如平圩电厂 1 号 600MW 机组 1999 年的供电煤耗为 351g/(kW·h), 北仑电厂 1 号 600MW 机组的供电煤耗为 322g/(kW·h), 但与国外先进水平相比仍有一定差距, 具有较大的节能空间。

(三) 超(超)临界参数机组

我国超临界机组的发展始于 20 世纪 80 年代。自 1992 年在上海石洞口电厂投产两台引进型 600MW 超临界机组后, 又有华能南京、营口等电厂一批 300MW, 盘山、伊敏等电厂 4 台 500MW, 绥中电厂两台 800MW 等进口的超临界机组投运。再后来, 多台进口的 600MW 级超临界机组及外高桥电厂两台 900MW 超临界机组投产。华能玉环电厂 1 号机组作为国产首台 100 万 kW 超超临界机组, 已于 2006 年 8 月投产。随后, 2006 年 12 月又有一台 100 万 kW 超超临界机组在华电国际邹县发电厂投产。我国超临界机组在十几年来得到了长足的发展。

超临界参数机组的煤耗水平明显低于亚临界机组。如华能玉环电厂 1 号机组的设计供电煤耗为 285g/(kW·h); 石洞口电厂 600MW 超临界机组 1999 年的实际供电煤耗为 311g/(kW·h)。因此, 大力发展 600MW 及以上等级超临界机组, 并将 600MW 以上机组作为中小型汽轮机更新换代的一种主要模式, 对优化我国火电结构、节约能源、减少污染都具有重要的意义。

超(超)临界机组热经济性较高, 但在我国的发展较晚, 在机组优化运行与调整方面有待进一步积累经验。

二、热力系统节能潜力

综合考虑设计、制造、安装、运行与维护等方面的因素, 火力发电厂节能工作主要归结有以下两个方面: 一方面是针对主设备和主要辅机进行优化改造, 提高主机热效率, 降低辅机电耗, 以达到节能目的; 另一方面是针对热力系统, 着眼于优化和完善热力系统及其设备, 改善运行操作, 提高运行效率, 以实现节能目标。