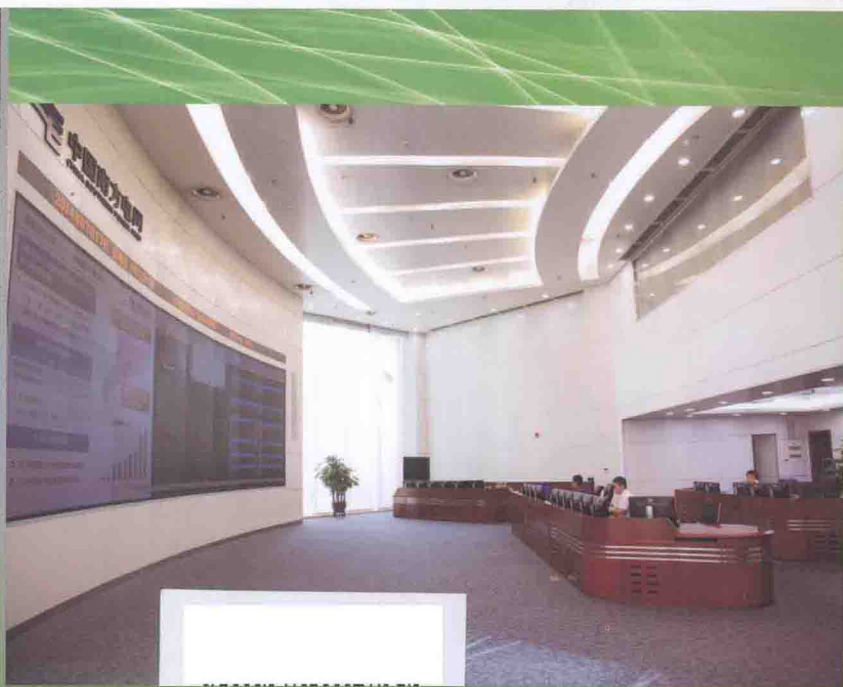


电力系统运行控制培训教材系列丛书

燃煤电厂运行控制

中国南方电网电力调度控制中心 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

电力系统运行控制培训教材系列丛书

燃煤电厂运行控制

中国南方电网电力调度控制中心 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是电力系统运行控制培训教材系列丛书的燃煤电厂运行控制分册,内容包括燃煤电厂概述、锅炉部分、汽轮机部分、电气部分、新机组建设与调试、涉网试验、机组的启动与停运、机组的运行与调整、机组控制与保护、节能降耗与减排环保、调度运行控制与管理、机组检修与修后试验等内容。

本书可作为电力调度人员及输配电系统运行人员掌握燃煤电厂运行与控制技术的培训教材,发电厂运行人员掌握电力调度运行控制与管理要求的培训教材,也可作为电力系统管理人员及大中专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

燃煤电厂运行控制 / 中国南方电网电力调度控制中心
编. —北京: 中国电力出版社, 2014.9
(电力系统运行控制培训教材系列丛书)
ISBN 978-7-5123-3596-7

I. ①燃… II. ①中… III. ①发电厂-电气设备-运行-技术培训-教材②发电厂-发电设备-控制-技术培训-教材 IV. ①TM621.7②TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 237551 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 9 月第一版 2014 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 23 印张 557 千字
印数 0001—2000 册 定价 65.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
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



序

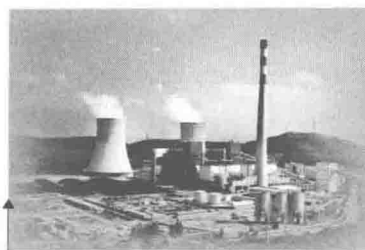
发电厂将一次能源转化为电能，是电能产生的源头，也是电力系统不可或缺的组成部分。长期以来，燃煤机组作为我国的主力发电机组，在保障电力系统安全稳定、满足全社会对电能的需求方面起着举足轻重的作用。正因如此，了解掌握燃煤电厂运行控制的理论和方法对电力系统从业人员来说就显得尤为重要。

培训是提高从业人员知识水平、工作能力的重要手段，而使用一本好的培训教材，可以达到事半功倍的效果。传统的发电厂培训教材主要从电厂运行的角度来讲运行控制，而此次南方电网电力调度控制中心组织编写的这本教材，将电网运行要求和电厂运行特点有机结合起来，特别关注燃煤电厂和系统运行间的相互影响，例如燃煤机组涉网运行的励磁、PSS 等装置的参数设置及试验、保护定值的厂网协调等问题，是一次很好的尝试。翻阅本书，既可学习燃煤电厂机组建设、调试及运行的相关理论和方法，也可了解大容量、超超临界机组运行调试的新经验，同时还可全面掌握电力系统运行对燃煤电厂的有关要求。是一本内容全面、针对性强的培训教材。

我相信本书的出版，将有利于加深燃煤电厂及系统运行从业人员间对彼此业务的相互了解，促进系统运行各环节之间的协调配合，进一步提高从业人员对现代电力系统的认知能力和运行控制水平。

钟俊

2014 年 7 月



前言

当今互联大电网新设备、新技术广泛应用，电网结构复杂、运行特性多变。为适应电力系统发展新要求，不断提高从业人员对现代电力系统运行的认知水平，南方电网电力调度控制中心组织一批技术、技能培训能手联合编著了本套系列丛书。

本书是燃煤电厂运行控制分册，主要讲述燃煤火力发电的基础理论、运行控制特点和要求，特别是对于最新的大容量、超超临界燃煤机组的结构及运行调试等进行了深入介绍，对燃煤机组涉网运行特点和调度规则进行了细致讲解，内容新颖实用。本书既可作为电力调度人员及输配电系统运行人员掌握燃煤电厂运行与控制技术的培训教材，发电厂运行人员掌握电力调度运行控制与管理要求的培训教材，也可作为电力系统管理人员及大中专院校有关专业师生的参考书。

全书由汪际锋主编，第1~10章、第12章由田丰编写，第11章由刘淼、苏寅生编写。本书第1~5章、第11章由张昆统稿，第6~10章、第12章由赵曼勇统稿。蒋玉利、吴善庆、李宝根、隆波为本书的编写提供了很好的建议，在此表示真诚地感谢。

由于编者水平有限，编写时间仓促，本书难免存在疏漏，恳请各位专家和读者提出宝贵意见。

编者

2014年7月



目 录

序 前言

第一篇 概 论

► 第 1 章 燃煤电厂概述	3
1.1 能源利用及发展	3
1.2 燃煤电厂分类	5
1.3 洁净煤发电技术	12
1.4 燃煤电厂热力学原理	19
1.5 燃煤电厂生产过程	21
1.6 燃煤电厂可靠性指标	24
► 第 2 章 锅炉部分	26
2.1 锅炉的分类	26
2.2 高参数大容量锅炉特点	31
2.3 锅炉工作基本过程	32
2.4 锅炉燃料及特性	33
2.5 锅炉设备及系统	36
► 第 3 章 汽轮机部分	52
3.1 概述	52
3.2 汽轮机工作原理及分类	53
3.3 超(超)临界压力汽轮机的特点	54
3.4 汽轮机设备	55
3.5 汽轮机调节、保安及油系统	68
3.6 发电机冷却系统	77
3.7 汽轮机热力系统及设备	82
► 第 4 章 电气部分	95
4.1 同步发电机	95

4.2	发电机附属系统	99
4.3	变压器	105
4.4	厂用电系统	109
4.5	发电机—变压器组继电保护	111
4.6	发电厂机网协调	116

第二篇 新机组建设与调控

► 第 5 章	新机组建设与调试	121
5.1	燃煤电厂建设过程	121
5.2	调试的组织机构	124
5.3	调试程序	127
5.4	汽轮机的启动及机组调试典型计划	132
5.5	国产 1000MW 超超临界机组调试实例	143
5.6	主要调试项目介绍	145
► 第 6 章	涉网试验	158
6.1	汽轮机及其调节系统模型参数测试	158
6.2	锅炉最低稳燃试验	161
6.3	发电机进相运行试验	162
6.4	PSS 现场整定投运试验	163
6.5	励磁系统参数实测试验	166
6.6	AGC 试验	170
6.7	一次调频试验	175
6.8	汽轮机甩负荷试验	177
6.9	RB 功能试验	180

第三篇 机组运行与调控

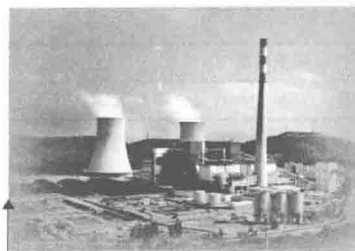
► 第 7 章	机组的启动与停运	185
7.1	单元制的概念	185
7.2	单元机组的启动	186
7.3	单元机组的停运	198
7.4	机组停运后的保养	202
► 第 8 章	机组的运行与调整	205
8.1	锅炉	205
8.2	汽轮机	212
8.3	电气系统	216

8.4 单元机组的涉网运行	217
► 第 9 章 机组控制与保护	227
9.1 集散控制系统	227
9.2 厂级监控信息系统	233
9.3 单元机组的主要控制系统	237
9.4 单元机组的保护	258
9.5 汽轮机调节系统超加速度保护及改进实例	267
► 第 10 章 节能降耗与减排环保	270
10.1 燃煤电厂主要经济指标	270
10.2 燃煤电厂各项损失和效率	272
10.3 燃煤电厂发电效率和全厂净效率	275
10.4 燃煤电厂成本	277
10.5 燃煤电厂提高效率的措施	279
10.6 燃煤电厂节能发电调度	290
10.7 燃煤电厂减排环保概述	293
10.8 燃煤电厂脱硫	296
10.9 燃煤电厂脱硝	304
► 第 11 章 调度运行控制与管理	310
11.1 并网管理	310
11.2 计划编制	318
11.3 风险防控	323
11.4 调控操作	328
11.5 评价改进	332
11.6 二次系统	336
11.7 综合支持	340
► 第 12 章 机组检修与修后试验	342
12.1 机组检修概述	342
12.2 并网运行机组检修管理	348
12.3 机组检修后的试验	349
附录 缩略语及专业术语注释	352
参考文献	354

第一篇

概 论





第 1 章

燃煤电厂概述

能源是人类进行生产和赖以生存以及经济社会发展的重要物质基础。自然界存在的能源有很多种,除了煤炭、石油、天然气以外,还有太阳能、风能、水力能、潮汐能、波浪能、地热能以及核能等。世界能源最多是太阳能,占再生能源的 99.44%,而水能、风能、地热能、生物能等不到 1%。在非再生能源中,利用海水中的氘资源产生的人造太阳能(聚变核能)几乎占 100%,煤炭、石油、天然气、裂变核燃料加起来也不足千万分之一。

在自然界中,天然存在的、没有经过加工或者转换的能量称之为一次能源,如煤炭、石油、天然气、太阳能、风能、地热等。为满足生产和生活的特定需要,便于输送和使用,提高劳动生产率和能源利用率,自然界现成的能源,除有些可以直接利用外,通常需要经过加工以后再加以利用。由一次能源加工转换而成的能源,称为二次能源,如电力、煤气、蒸汽及各种石油制品等。

火力发电厂泛指通过燃烧煤、石油、天然气等一次能源将燃料的化学能转化为热能,热能转化为机械能,最终将机械能转化为二次能源——电能的工厂,简称火电厂。火电厂不包括水力、风力、核能和太阳能等发电厂。燃煤电厂是将煤作为一次能源的火电厂,长期以来,燃煤机组是我国的主力发电机组,装机容量占总装机容量的 2/3 以上。截至 2012 年底全国燃煤电厂装机 75 811 万 kW,占总装机容量的 66%。“十二五”时期,全国还将新增燃煤机组 3 亿 kW。

1.1 能源利用及发展

随着经济社会的发展,人们使用能源特别是化石能源越来越多,能源对经济社会发展的制约日益突出,对赖以生存的自然环境的影响也越来越大,而化石能源最终将消耗殆尽。因此,提高能源利用效率、调整能源结构、开发和利用可再生能源将是能源发展的必然选择。

当前,世界能源主要趋势主要表现在以下几个方面:

(1) 化石燃料高效和清洁开发利用技术不断取得进展,节能技术快速发展,机动车的燃油经济性提高近 1 倍,主要工业国家单位 GDP 的能源消耗下降了 30%以上,清洁能源技术全面进步,新工艺、新技术不断推出。

(2) 可再生能源迅速发展,欧洲、日本、中国等国家正大力发展风电、太阳能、生物质能等可再生能源。表 1-1 列出了常见的可再生能源与非再生能源。

(3) 核能出现复苏。

(4) CO₂ 近零排放成为煤炭利用的新方向。

表 1-1

可再生能源与非再生能源

可再生能源	非再生能源
太阳能、波浪能、潮汐能、生物质能、地热能、水力	煤炭、风能、海洋能、石油、天然气、核能、油页岩

(5) 氢能将作为未来清洁能源的理想选择。

2004 年，欧洲联合研究中心（JRC）根据各种能源技术的发展潜力及其资源量，对全球未来 100 年的能源需求总量和结构变化做出预测（见图 1-1）：可再生能源的比重将不断上升，2020、2030、2040、2050 年和 2100 年将分别达到 20%、30%、50%、62%和 86%。其中，化石能源消耗总量将于 2030 年出现拐点，太阳能在未来能源结构中的比重将越来越大。

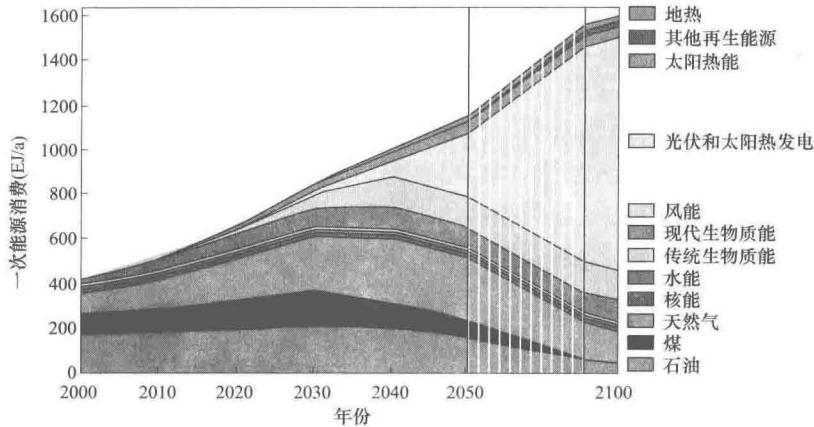


图 1-1 未来 100 年世界能源结构变化预测

在火力发电方面，超超临界机组向更高参数（35MPa，700℃）方向发展；燃气轮机向更高温度（1500℃）方向发展；以煤气化为基础的 IGCC 和多联产以及煤气化—燃料电池—燃气—蒸汽联合循环等高效、清洁的发电技术得到快速发展。在环保和减排方面，除尘、脱硫、脱硝和 CO₂ 捕集技术向多元化、集成化方向发展。

“十一五”期间，我国能源快速发展，一次能源生产总量连续五年位居世界第一，2011 年，中国一次能源生产总量达到 31.8 亿 t 标准煤，其中，原煤产量 35.2 亿 t，原油产量稳定在 2 亿 t，成品油产量 2.7 亿 t。与此同时，清洁能源比重逐步增加，2011 年，我国水电装机规模达到 2.3 亿 kW，位居世界第一；已投运核电机组 15 台、装机容量 1254 万 kW，在建机组 26 台、核电在建规模 2924 万 kW，占世界核电在建规模的 40%以上；风电并网装机容量达到 4700 万 kW，居世界第一；太阳能热水器集热面积超过 2 亿 m²，继续保持世界第一，非化石能源占一次能源消费的比重达到 8%。“十一五”期间，我国太阳能电池产量以超过 100%的年均增长率快速发展。2007~2010 年连续四年产量世界第一，2010 年太阳能电池产量约为 10GW，占全球总产量的 50%。太阳能光伏产业发展迅速，已成为我国为数不多的、可以同步参与国际竞争、并有望达到国际领先水平的行业，市场占有率稳居世界前列。

作为世界第一大能源生产国，中国主要依靠自身力量发展能源，能源自给率始终保持在 90%左右。2011 年中国人均一次能源消费量达到 2.6t 标准煤，人均天然气消费量 89.6m³，人均用电量 3493kWh，全国使用天然气人口超过 1.8 亿。虽然近年来中国能源消费增长较快，但作为一个拥有 13 亿多人口的发展中国家，从人均能源资源拥有量看在世界上处于较低水

平,煤炭、石油和天然气的人均占有量仅为世界平均水平的 67%、5.4%和 7.5%,仅为发达国家平均水平的 1/3。此外,我国在能源供给和利用方式上存在着一系列突出问题,如能源结不合理、能源利用效率不高、可再生能源开发利用比例低、能源安全利用水平有待进一步提高等,如单位国内生产总值能耗不仅远高于发达国家,也高于一些新兴工业化国家;能源密集型产业技术落后,第二产业特别是高耗能工业能源消耗比重过高,钢铁、有色、化工、建材四大高耗能行业用能占到全社会用能的 40%左右;能源储备规模较小,应急能力相对较弱,能源安全形势严峻。总体上讲,我国能源工业大而不强,与发达国家相比,在技术创新能力方面存在很大差距。

“十二五”时期,世情国情继续发生深刻变化,世界政治经济形势更加复杂严峻,能源发展呈现新的阶段性特征,我国既面临由能源大国向能源强国转变的难得历史机遇,又面临诸多问题和挑战。能源发展的长期矛盾和短期问题相互交织,国内外因素互相影响,资源和环境约束进一步加剧,节能减排形势严峻,能源资源对外依存度快速攀升,能源控总量、调结构、保安全面临全新的挑战。我国“十二五”规划纲要 2015 年能源发展的主要目标是:

(1) 能源消费总量与效率。实施能源消费强度和消费总量双控制,能源消费总量 40 亿吨标煤,用电量 6.15 万亿 kWh,单位国内生产总值能耗比 2010 年下降 16%,能源综合效率提高到 38%,火电供电标准煤耗下降到 323g/kWh。

(2) 能源生产与供应能力。一次能源供应能力 43 亿 t 标准煤,其中国内生产能力 36.6 亿 t 标准煤。

(3) 能源结构优化。非化石能源消费比重提高到 11.4%,非化石能源发电装机容量比重达到 30%,天然气占一次能源消费比重提高到 7.5%,煤炭消费比重降低到 65%左右。

1.2 燃煤电厂分类

1.2.1 按能源种类分类

火电厂按能源种类分类,可分为化石燃料(燃煤、燃用石油和天然气)发电厂、煤矸石发电厂、生物质能发电厂、垃圾发电厂等。

到 2015 年,我国生物质能发电装机规模达到 1300 万 kW,其中城市生活垃圾发电装机容量达到 300 万 kW。而燃用石油和天然气的发电厂一般用燃气轮机驱动,它直接利用重油、轻油、液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)等燃料燃烧,产生高温燃气驱动燃气轮机做功。图 1-2 所示是 M701F 型燃气轮机轴测图,图 1-3 所示是 1 台在总装平台上的 GE 公司 9H 型燃气轮机。

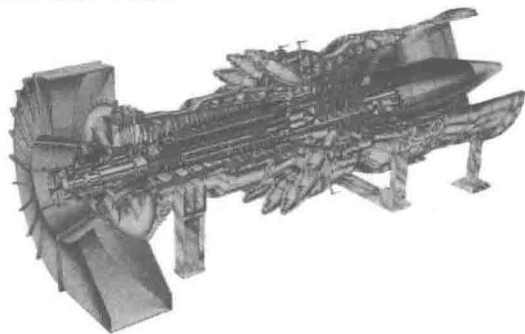


图 1-2 M701F 型燃气轮机轴测图

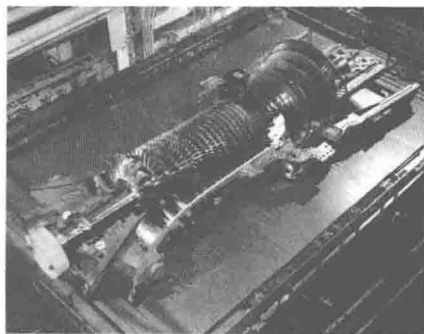


图 1-3 总装平台上的 GE 公司 9H 型燃气轮机

直接用燃气轮机驱动发电效率不高，将燃气轮机做功后温度较高的排气在余热锅炉中再利用，加热产生蒸汽驱动汽轮机做功，即燃气—蒸汽联合发电。按联合循环机组轴系配置型式又可分为单轴和多轴联合循环，其中根据发电机在整个轴系所处的位置不同，又分发电机中间布置和末端布置两种；而按一台蒸汽轮发电机组所配燃气轮机的数量，又可分为“一拖一”、“二拖一”、“三拖一”及“四拖一”等，统称“×拖一”，见图 1-4。

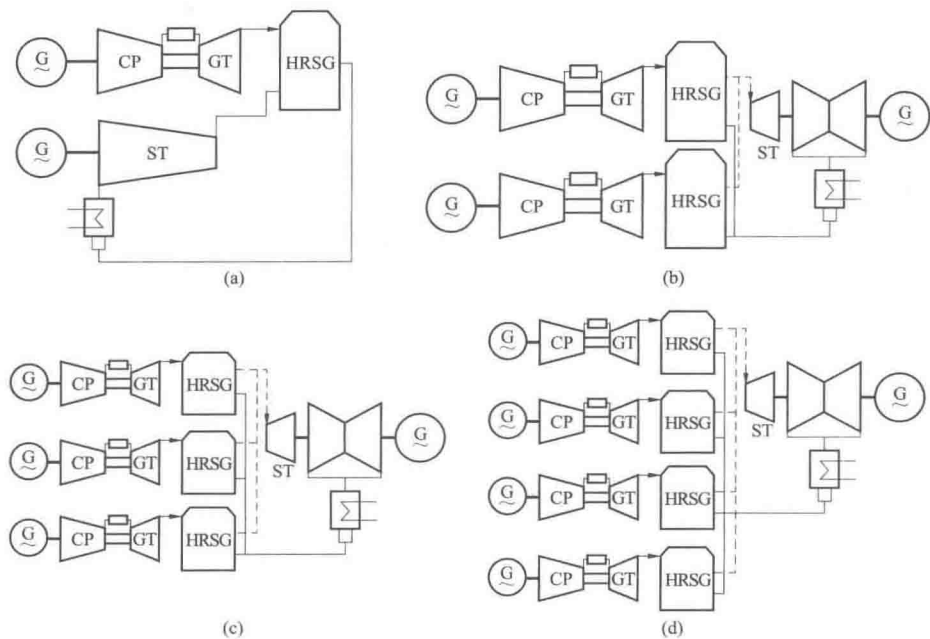


图 1-4 多轴燃气—蒸汽轮发电机组“×拖一”配置

(a) 一拖一；(b) 二拖一；(c) 三拖一；(d) 四拖一

G—发电机；CP—压气机；GT—燃气轮机；HRSG—余热锅炉；ST—汽轮机

图 1-5 和图 1-6 是燃气—蒸汽联合发电厂外貌图，图 1-7 是发电机冷端布置的单轴联合循环机组热力系统示意图。

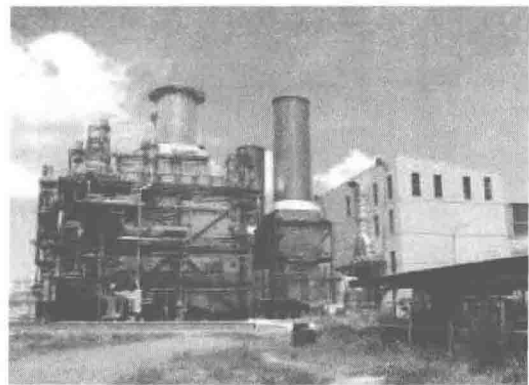


图 1-5 燃气—蒸汽联合循环发电厂（一）



图 1-6 燃气—蒸汽联合循环发电厂（二）

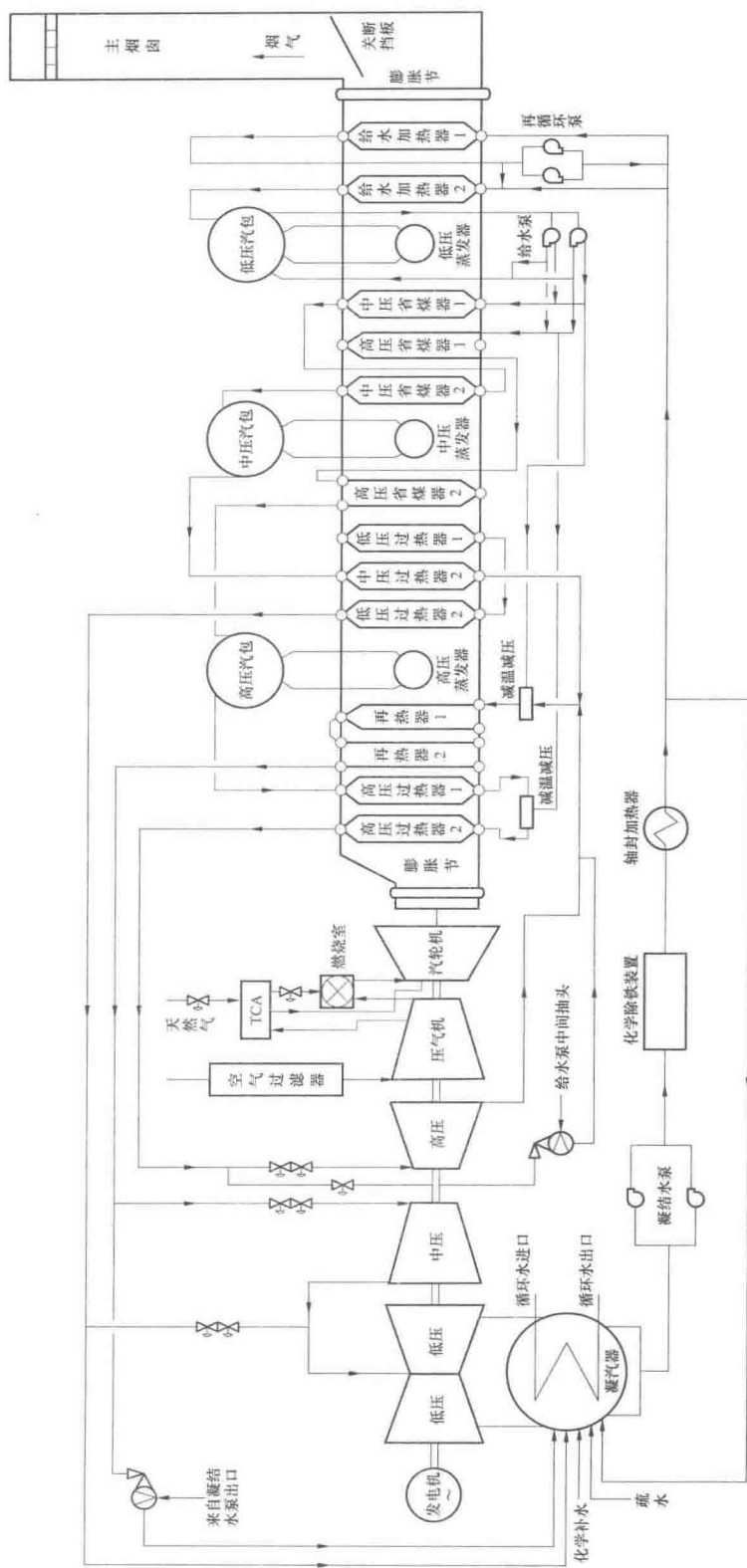


图 1-7 发电机冷端布置的单轴联合循环机组热力系统示意图

燃气轮机及其联合循环发电作为一种环保、清洁、高效和调峰性能好的先进发电技术，在全世界范围内得到了广泛的发展和应用。世界能源机构预测，到 2020 年，全球天然气发电将占到 30% 左右。为优化能源结构、提高能源效率和进一步节能减排、保护生态环境，我国提出了“大力开发水电，优化发展煤电，积极推进核电，适度发展天然气发电”的电力发展方针，利用“西气东输”工程和沿海省份进口 LNG 项目“打捆招标”的方式，“以市场换技术”，结合国家“863”重大专项研究，积极推进重型燃机的研制与开发。“十二五”时期，在电价承受能力强、热负荷需求大的中心城市，将优先发展大型燃气蒸汽联合循环热电联产项目，积极推广天然气热电冷联供。“十二五”期间将加快建设西北（中国—中亚）、东北（中俄）、西南（中缅）和海上四大进口通道，形成以西气东输、川气东送、陕京输气管道为大动脉，连接主要生产区、消费区和储气库的骨干管网。统筹沿海液化天然气（LNG）接收站、跨省联络线、配气管网及地下储气库建设，完善长三角、环渤海、川渝地区天然气管网，基本建成东北、珠三角、中南地区等区域管网，形成天然气、煤层气、页岩气、煤制气等多种气源公平接入、统一输送的格局，推动液化天然气（LNG）造船业和运输业发展。“十二五”时期，全国将新增天然气管道 4.4 万 km，沿海液化天然气年接收能力新增 5000 万 t 以上，新增燃气电站 3000 万 kW。设备制造方面，开发具有自主知识产权的重型燃气轮机，掌握 E 级和 F 级燃气轮机核心部件的制造技术、燃用中低热值合成气的 F 级燃气轮机改造设计技术，以及燃用中低热值合成气的 E 级和 F 级燃气轮机制造技术。到 2015 年末，我国天然气发电装机容量达 5600 万 kW，专家预测，到 2020 年，我国天然气发电将占到 6%~7%。

随着我国发电设备装机容量不断发展，火电在其中占比例不断下降，2006~2011 年期间我国发电装机容量及火电占比例见图 1-8。2011 年 7 月 15 日，以新疆乌苏热电厂 2 号机组投产为标志，我国发电设备装机容量突破 10 亿 kW，2012 年全国火电机组新增容量 5065 万 kW，截至 2012 年底全国发电装机容量达到 114 475 万 kW，居世界第二，其中，水电 24 890 万 kW（含抽水蓄能 2031 万 kW），占总装机容量的 21.74%；火电 81 917 万 kW（含煤电 75 811 万 kW、气电 3827 万 kW），占全部装机容量的 71.56%；核电 1257 万 kW，占全部装机容量的 1.10%；并网风电 6083 万 kW，占全部装机容量的 5.31%；并网太阳能发电 328 万 kW，占全部装机容量的 0.29%。装机结构情况见图 1-9。“十二五”时期，全国将新增燃煤发电机组 3 亿 kW，到 2015 年末装机容量将发展到 14.9 亿 kW 的规模。

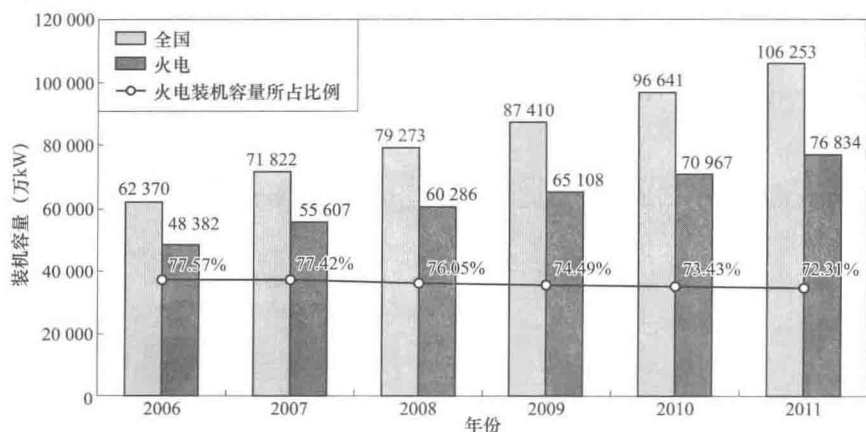


图 1-8 2006~2011 年期间我国发电装机容量及火电占比例

1.2.2 按容量大小分类

燃煤电厂按容量大小进行分类,可分为:

小型发电厂:单机容量 50MW 以下,全厂总装机容量在 200MW 以下的发电厂。

中型发电厂:单机容量 300MW 及以下,全厂总装机容量在 200~800MW 的发电厂。

大型发电厂:单机容量 300MW 及以上,全厂总装机容量在 800~1000MW 的发电厂。图 1-10 是某大型燃煤电厂全貌实拍图,图 1-11 是

某大型沿海燃煤电厂鸟瞰图。

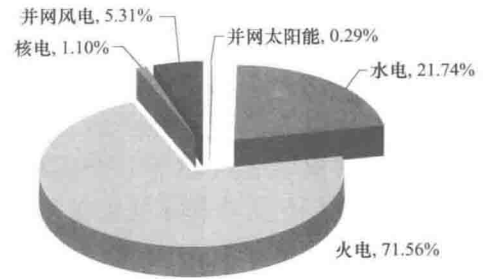


图 1-9 2012 年底全国全口径发电装机结构情况

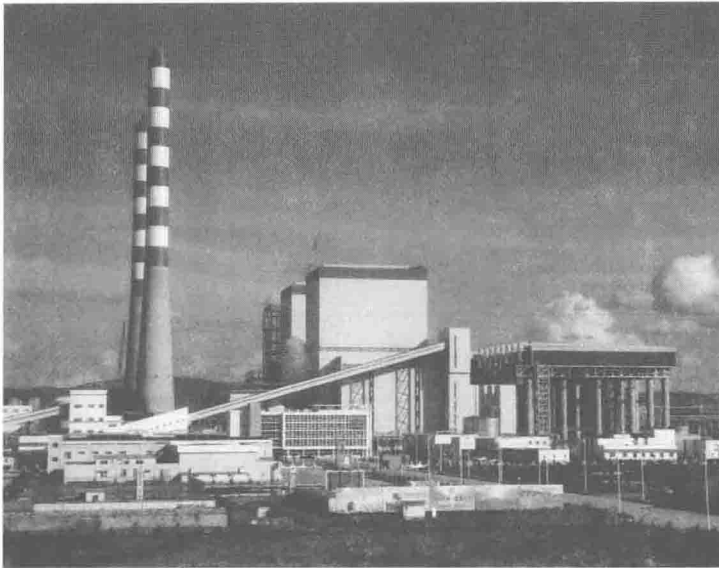


图 1-10 某大型燃煤电厂全貌实拍图

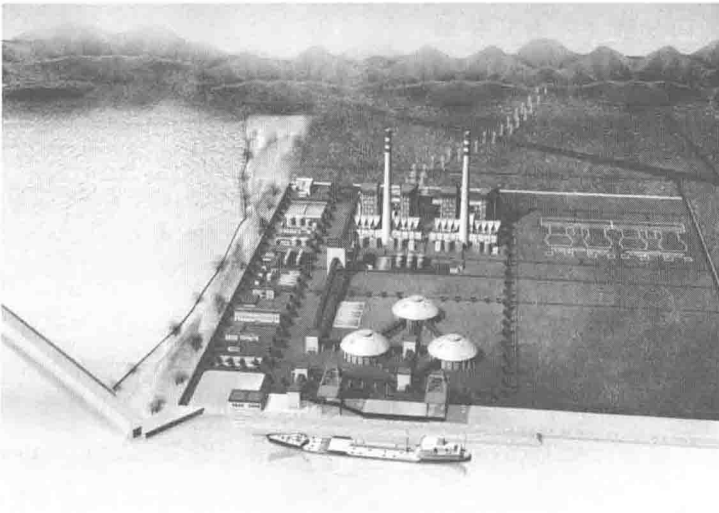


图 1-11 某大型沿海燃煤电厂鸟瞰图