

“三五”普通高等教育本科规划教材

热力发电厂

陈海平 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

“十三五”普通高等教育本科规划教材

热力发电厂

主 编 陈海平

副主编 张永生 张学镭

参 编 李惊涛 于 刚 李志宏

主 审 李 政



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书考虑到我国电力工业的发展方向以及国家对节能与环保工作的基本要求,从电力工业可持续发展的角度出发,以热力发电厂整体为对象,系统地阐述了热力发电厂的工作原理及评价方法,总体系统及重要子系统的构成、功能和特性,主要设备结构及工作原理,发电厂的主要辅助系统等,简要介绍了火电厂运行与调整,以及其他热力发电技术,构成了结构合理、内容完整的体系。内容编写采用总分结构,使读者在学习中之既能够对热力发电厂有一个整体概念,又能把握各系统之间以及系统与发电厂整体之间的关联。本书内容反映了热力发电厂现状及国内外的新技术、新成果,并采用了最新的国家标准。书中附有典型计算例题,每章后还有复习思考题可供学生学习和思考。具体教学使用时,可根据教学目标和学时数,自行设计和选择书中内容和讲解详略程度。

本书可作为高等学校能源与动力工程专业热力发电厂课程教材,也可供相关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂/陈海平主编. —北京:中国电力出版社,2018.2

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5198-1635-3

I. ①热… II. ①陈… III. ①热电厂-高等学校-教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 329934 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:吴玉贤(010-63412540) 马雪倩

责任校对:马 宁

装帧设计:赵姗姗

责任印制:吴 迪

印 刷:北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次:2018 年 2 月第一版

印 次:2018 年 2 月第一版 北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:24.75

字 数:607 千字

定 价:58.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前 言

热力发电厂是能源与动力工程专业本科生的一门必修课。为适应高等学校能源与动力工程专业教学和工程应用的实际需求,编写了这部具有鲜明专业特色的教材。通过本课程的学习,学生应掌握热力发电厂的工作过程和基本原理,树立安全与经济效益、社会效益、环境效益相统一的观点,提高分析、研究和解决热力发电厂实际生产问题的独立工作能力。

考虑到我国电力工业的发展方向以及国家对节能和环保工作的基本要求,本书主要以300MW及以上亚临界、超(超)临界压力火力发电机组及其热力系统为对象,系统地阐述了热力发电厂的基本工作原理及其技术经济指标评价体系,重点介绍了火力发电厂原则性热力系统、全面性热力系统、冷端系统、供热系统的组成特点及其运行热经济性的分析与计算方法,扼要介绍了火力发电厂的优化运行与调整技术、燃气-蒸汽联合循环及新能源热发电技术等,力求将一些新知识、新技术在发电厂中的实际应用情况在相应章节进行客观的介绍与分析。

本书的编写综合了编者长期教学与科研工作的经验,在阐述热力循环基本原理和热经济性分析方法的基础上,注重联系机组运行实际,做到理论分析不脱离实际对象、实际效果与理论分析相结合,使学生在学习中既不会感到理论的枯燥,又可获得实践的乐趣。

本教材由华北电力大学陈海平教授担任主编并统稿。第一、第二、第三章由陈海平编写,第四章由陈海平和李惊涛编写,第五章由张学镭编写,第六章由张永生编写,第七章由陈海平和于刚编写,第八、第九章由陈海平和李志宏编写。

本书由清华大学李政教授主审。李政教授在百忙中详细审阅了全部书稿,提出了许多宝贵的建议和意见,使编者在修改过程中受益匪浅,在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请读者指正。

编 者

2018年1月

目 录

前言

第一章 概述	1
复习思考题	9
第二章 热力发电厂的评价指标及评价方法	10
第一节 热力发电厂的技术经济与环保指标	10
第二节 热力发电厂的热经济性评价方法	20
第三节 凝汽式发电厂的主要热经济性指标	43
复习思考题	48
习题	49
第三章 发电厂热力系统的拟定原则	50
第一节 热力系统的概念及分类	50
第二节 热力循环形式的确定	53
第三节 机组初终参数的确定	73
第四节 机组选型和容量的确定	85
第五节 汽水管道系统的设计	88
第六节 发电厂热力循环的汽水质量要求	98
复习思考题	102
第四章 火力发电厂原则性热力系统	103
第一节 概述	103
第二节 给水回热系统	104
第三节 给水除氧系统	119
第四节 电厂汽水损失及补给水系统	136
第五节 发电厂原则性热力系统举例	145
第六节 发电厂原则性热力系统的计算	163
第七节 原则性热力系统的计算举例	175
复习思考题	190
第五章 火力发电厂的冷端系统	192
第一节 冷端系统的组成及其作用	192
第二节 火力发电厂的湿式冷却系统	194
第三节 火力发电厂的空气冷却系统	212
第四节 火力发电厂冷端系统的优化	225
复习思考题	227

第六章 热电联产及其供热系统	228
第一节 热负荷及其载热工质.....	228
第二节 热电联产及热电厂总热耗量的分配.....	237
第三节 热电厂的对外供热系统.....	243
第四节 热电厂主要热经济性指标及热电联产的综合效益.....	252
第五节 热电厂的热化系数与供热式机组的选型.....	271
复习思考题.....	277
习题.....	278
第七章 火力发电厂全面性热力系统	279
第一节 概述.....	279
第二节 主蒸汽及再热蒸汽系统.....	280
第三节 旁路系统.....	287
第四节 机组回热全面性热力系统.....	296
第五节 全厂公用汽水系统.....	327
第六节 锅炉排污系统.....	332
第七节 发电厂全面性热力系统举例.....	333
复习思考题.....	335
第八章 火力发电厂优化运行与调整	336
第一节 单元机组的运行与调整.....	336
第二节 热力系统主要设备的运行与调整.....	344
第三节 发电厂主要热力系统的优化运行.....	359
第四节 运行参数的监视与调整.....	361
第五节 并列运行单元机组之间负荷经济分配.....	367
复习思考题.....	372
第九章 其他热力发电技术简介	373
第一节 燃气-蒸汽联合循环.....	373
第二节 核能发电厂.....	378
第三节 太阳能热发电技术.....	381
第四节 其他新能源热发电技术简介.....	386
复习思考题.....	387
参考文献	388

第一章 概 述

一、能源概述

能源是社会发展的物质基础。我国的《能源百科全书》说：“能源是可以直接或间接转换提供给人类所需要的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源”。也就是说，能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源，是人类赖以生存和社会进步的物质基础，我们今天的一切，都离不开对能源的需求。

人类社会的发展过程，其实就是一部不断向自然界索取能源的历史。远古时代的钻木取火，开创了人类社会的文明史，是人类利用能源划时代的第一步。蒸汽机的发明，使煤炭一跃成为第二代主体能源，极大地推动了第一次工业革命。1854年，美国宾夕法尼亚州打出了世界上第一口油井，石油工业由此发端，到20世纪60年代，全球石油消费量超过煤炭，成为第三代主体能源。19世纪电磁感应现象的发现，使得以蒸汽轮机为动力的发电机应运而生，从此人类的生产和生活方式发生了根本改变，进入了“电世纪”。电能是由一次能源转化而来的二次能源，它无声无息地服务于人类生活的各个角落，由于其使用方便、清洁环保、易于输送，并且容易转化成其他形式的能量，因而得到了最广泛的应用。

1. 能源分类

一次能源与二次能源。经过数亿年的演变，在自然界中形成并天然存在的能源，称为一次能源（天然能源），如煤炭、石油、天然气等。由一次能源经过加工转换成另一种形态的能源产品称为二次能源，如广泛使用的电力、煤气等。大部分一次能源被开采后，都转换成容易输送、分配和使用的二次能源，以适应消费者的需要。

可再生能源与不可再生能源。在自然界中可以不断再生并有规律地得到补充的能源，称为可再生能源，如太阳能和由太阳能转换而成的水力能、风能、生物质能、海洋能等，它们都可以循环再生，不会因长期使用而减少。经过亿万年才形成的、短期内无法恢复的能源，称之为不可再生能源，如煤炭、石油、天然气、核燃料等，随着大规模的开采利用，它们的储量越来越少，总有枯竭之时。

常规能源与新能源。煤炭、石油、天然气、电力等能源，已经被人类长期广泛利用，为人们所熟知，这些能源称之为常规能源。太阳能、地热能、潮汐能、固体可燃冰等，是近才被人们重视或发现的，一般被视为新能源。常规能源与新能源是相对而言的，现在的常规能源过去也曾是新能源，今天的新能源将来也会成为常规能源。

燃料能源与非燃料能源。通过直接燃烧而发出能量的物质称之为燃料能源，反之即为非燃料能源。属于燃料能源的有矿物燃料（如煤炭、石油、天然气等），生物质燃料（如薪柴、沼气、有机废物等），化工燃料（如甲醇、酒精、丙烷以及可燃原料铝、镁等），核燃料（如铀、钍、钚、氦等）共四类。非燃料能源多数具有机械能（如水能、风能等），有的含有热能（如地热能、海洋热能等），有的含有光能（如太阳能、激光等）。

表 1-1 列出了能源种类的一般分类情况。

表 1-1 能源种类的一般分类情况

按使用 情况分类	按性质分类	按一、二次能源分类		
		一次能源（天然能源）		二次能源（人工能源）
		可再生能源	不可再生能源	
常规能源	燃料能源	生物燃料	煤，油页岩，油砂，原油，天然气，天然气水合物	煤气，余热，焦炭，汽油，煤油，柴油，重油，液化石油气，丙烷，甲醇，酒精，苯胺，火药
	非燃料能源	水力能	—	电，蒸汽，热水，余热
新能源	燃料能源	—	核燃料	沼气，氢
	非燃料能源	太阳能，风能，地热能，潮汐能，海水温差，波浪能	—	激光

在一次能源中，除风能、水能、波浪能和海洋潮汐能是以机械能的形式（指空气的动能和水的势能）提供给人类之外，其余的往往都是以热能的形式提供给人类。太阳以热辐射的方式向地球传送大量的热能；地热能可以将水加热成为热水或蒸汽以传送热能；煤、石油和天然气等的化学能常通过燃烧转换为热能；核能通过裂变反应或聚变反应释放出来的能量都是高温热能的形式。以上事实说明，人类从自然能源中获得能量的主要形式是热能，据统计，经过热能形式而被利用的能量，在我国占 90% 以上，世界其他国家也超过 85%。

热能利用有两种基本方式：一种是直接利用，即将热能直接用于加热物体，如烘干、蒸煮、采暖、熔化等；另一种是间接利用，通常指将热能转化为其他形式的能量，如机械能或者电能而加以利用，热力发电厂、车辆、船舶、飞机等动力装置均属此类。

2. 我国的能源结构

我国是一次能源比较丰富的国家，但其地域分布严重不均。水能资源的 90% 左右在西南、西北部，煤炭资源的 80% 左右在西北部，而能源消费的 70% 左右却集中在东部及沿海发达地区，因而造成西电东送、北煤南运的格局。2015 年我国的能源生产和消费构成见表 1-2。

表 1-2 2015 年我国的能源生产和消费构成*

类别	单位	能源生产及构成		能源消费及构成	
		生产量	构成比例（%）	消费量	构成比例（%）
能源总量（标准煤）	亿 t	36.2	100	43	100
原煤	亿 t	37.5	72.1	39.6	64
石油	亿 t	2.1456	8.5	5.5	18.1
天然气	亿 m ³	1346	4.9	1930	5.9
其他能源	—	—	14.5		12

注 * 信息来源：国家统计局，2016 年 03 月 14 日。

在能源生产及消费结构中，我国是世界上少有的几个以煤炭为主要能源的国家，并且这

一格局在今后几十年内不会有大的变化。燃煤火力发电厂是耗煤大户，其耗煤量占煤炭生产总量的 50% 左右。大规模的能源消费对人类的生存环境提出了严峻挑战，安全、经济、清洁的能源保障，是我国实行可持续发展战略的基本要求。因此，必须跨越能源与环境这两座高山，实行“节能优先、结构多元、环境友好”的可持续能源发展战略。

二、热力发电厂生产的实质及其主要生产系统

世界上生产电能的方式种类繁多，有火电、水电、核电、风电、太阳能发电、潮汐能发电以及地热发电等。利用一次能源所蕴含的热能（如地热等）或经过某种转换而产生的热能（如煤、石油、天然气、核能等）转化为机械能，再将机械能转变为电能的发电厂统称为热力发电厂，其中利用煤、石油、天然气等化石燃料作为燃料燃烧的发电厂称为火力发电厂。我国的资源禀赋决定了今后相当长时期内仍然是以燃煤火力发电为主的电力生产格局，因此本书主要以燃煤火力发电厂为对象进行论述，对其他热力发电厂只作简单介绍。

从能量转换的角度来看，火力发电厂生产的实质就是将燃料的化学能转化为热能，热能转化为机械能，机械能转化为电能的过程。对于燃煤火力发电厂，锅炉、汽轮机、发电机是实现燃煤化学能转变为热能、机械能、电能的三大主机。

现代大型火电厂的锅炉热效率在 90%~95% 之间，汽轮机的高、中、低压缸效率可达 90% 以上，发电机效率均在 98% 以上。但是，由于在能量转换过程中存在着不可逆热损失，火力发电厂最终的能量有效利用率（亦即全厂热效率）为 40%~60%。因此，降低能量转换损失，提高发电热效率是热力发电技术一直追求的目标。

依据火力发电厂三大主机的工作范围及特点，按照系统构成方式来划分，火力发电厂的主要生产系统可分为热力系统、燃烧系统、电气系统和控制系统。燃煤火力发电厂的生产工艺流程如图 1-1 所示。

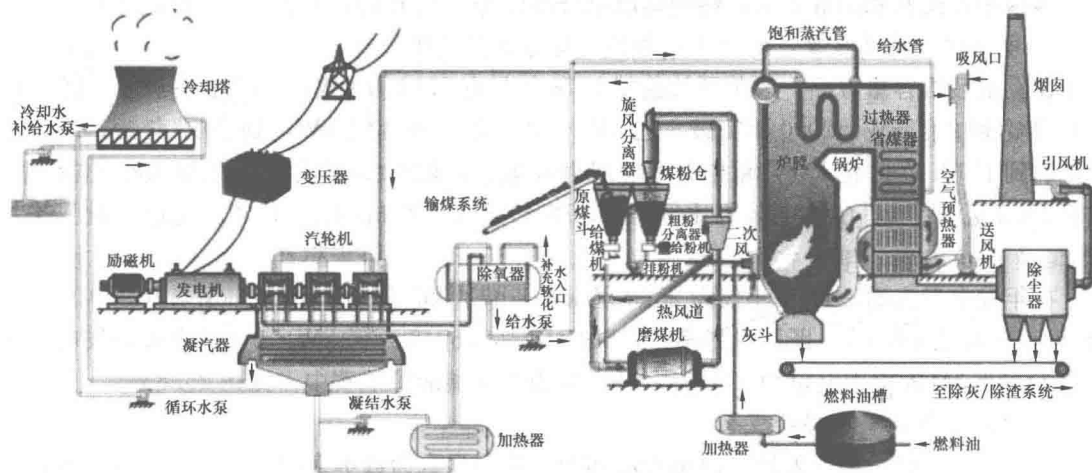


图 1-1 燃煤火力发电厂的生产工艺流程示意

1. 热力系统

热力系统实际上是电厂汽水动力循环在中国的通俗名称，是常规火力发电厂实现热功转换热力部分的工艺系统。它通过热力管道及阀门将各热力设备有机地联系起来，其任务是在各种工况下能够安全、高效、连续地将燃料燃烧所产生的热能传递给水和水蒸气，然后再将

蒸汽的热能转换成机械能。热力系统是发电厂的关键环节,提高热力系统的循环效率,减少系统中的汽水损失,是发电厂实现节能减排需要重点关注的内容,也是本书的重点,后续章节将对其进行详细介绍。

2. 燃烧系统

燃烧系统包括锅炉的燃烧部分及燃料供应系统、风烟系统、除灰渣系统等,其任务是将燃料中蕴藏的化学能通过燃烧释放出来,转换成热能。燃烧系统运行性能的好坏将直接影响锅炉热效率的高低。

3. 电气系统

电气系统包括对外供电系统和厂用电系统,其主要任务是通过汽轮机带动发电机将机械能转换成电能。发电机发出电的电压常为 6.3、10.5、13.8、15.55、18.0kV 等,为了远距离输送,一般由主变压器将电压升高至 110、220、330、400、500、750、800kV 等,然后再经高压配电装置和输电线路向外供电。电厂自用部分则由厂用变压器降低电压后,经厂用配电装置和电缆供厂内各种辅机及照明等。

4. 控制系统

控制系统主要包括数据采集及处理系统、模拟量控制系统、顺序控制系统、保护连锁系统、电气控制系统、辅助设备及系统的控制系统等,其主要任务是实现火力发电生产过程的自动化和机—炉—电的集中控制,以保障机组经济、安全、可靠地运行。

三、中国电力工业的发展与现状

1949 年,全国装机容量仅 1.85GW,居世界第 21 位;发电量 4.3TW·h,居世界第 25 位;年人均用电量仅 8kW·h;供电标准煤耗率高达 1.13kg/(kW·h)。所建电厂多在东北和沿海地区,发电设备全部依赖进口。

自中华人民共和国成立后,特别是改革开放以来,我国发电工业有了飞速的发展。

1. 电力建设成绩显著,电力生产和供应能力逐步增强

在发电装机容量方面,改革开放前的 1978 年只有 5712 万 kW,1987 年突破了 1 亿 kW,1995 年达到 2 亿 kW,2000 年突破 3 亿 kW,2004 年突破 4 亿 kW,到 2013 年底,装机总容量达到了 12.4738 亿 kW,超越美国位居世界第一。截至 2015 年底,发电装机总容量达到了 15.3 亿 kW (其中火电装机比例为 65.72%),人均装机约 1.11kW,超过了世界平均水平。

在年发电量方面,1978 年仅为 2566 亿 kW·h,1995 年为 8395 亿 kW·h,2011 年达到了 4.73 万亿 kW·h,跃居世界第一,2015 年为 5.6045 万亿 kW·h (其中火力发电量比例为 73.1%),人均用电量约 4142kW·h,电力在终端能源消费中占比达 25.8%。

2. 电源结构调整取得新成果

以煤电为基础,多元发展。改革开放初期,我国只有为数不多的 200MW 火电机组,经过 30 多年的发展,到 2015 年底,300MW 及以上机组的装机比例达到了 78.6%,单机 600MW 及以上机组的比重达到 41%,居世界首位。同时,加快了新能源发电、可再生能源发电的建设步伐,全国水电、风电、太阳能等的新增装机增速高于火电,到 2015 年底,非化石能源发电装机容量占全国发电装机总容量的比例达到了 35%。

3. 电力生产安全平稳

电力行业坚持安全第一的方针,全国电力设备运行可靠性水平稳步提高,实现了电力供

需的总体平衡,保障了电力安全供应以及经济社会发展对电力的需求。100MW及以上燃煤发电机组等效可用系数达到了92.93%,40MW及以上水电机组等效可用系数达到了92.47%。

4. 电力改革取得新进展

随着社会主义市场经济体制的不断建立发展和改革开放的不断深入,按照公司化原则、商业化运营、法制化管理的改革思路,电力行业逐步实现了政企分开,颁布实施了《电力法》,确立了电力企业的法人主体地位。2002年,按照国务院5号文件,电力行业实施厂网分开,组建了两家电网公司、五家发电集团公司和四家辅业集团公司。2015年3月中共中央国务院发布了“关于进一步深化电力体制改革的若干意见”,标志着电力体制改革进入了新的阶段,为发电工业完成市场化奠定了基础。

5. 科技创新步伐加快

通过引进、消化、吸收的技术路线,我国的电力装备制造技术取得了长足进步,主要体现在:

(1) 超超临界压力火电机组的技术应用达到了国际先进水平。2015年9月25日,世界首台1000MW超超临界压力二次再热燃煤发电机组在国电泰州电厂正式投入运营,其设计发电煤耗256.2g/(kW·h),二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和粉尘排放量减少5%以上,首次在全世界将二次再热技术应用到百万千瓦超超临界压力燃煤发电机组。2014年1月16日,新疆农六师煤电有限公司1100MW火电机组顺利投产发电,是目前我国火电单机容量最大的机组。

(2) 大型空冷机组的开发应用居国际领先地位,2007年华能铜川电厂首台国产600MW空冷燃煤机组以及2010年底华电宁夏灵武电厂全球首台1000MW超超临界压力燃煤空冷机组的顺利投产发电,标志着我国已成功掌握了世界先进大容量、高参数空冷火力发电技术,为富煤缺水地区建设大型火电厂探索出一条可行途径。

(3) 我国已成为大型循环流化床锅炉应用最多的国家,已掌握300MW亚临界和600MW超临界压力循环流化床锅炉设计制造技术;2013年4月14日,超临界压力600MW循环流化床锅炉在四川白马循环流化床示范电站正式投入运行。

(4) 以三峡工程为代表的大型水力发电机组的制造能力和水平迅速崛起,水电站控制自动化水平、大坝建设等技术取得了重大突破,已达到世界先进水平,世界首台单机容量800MW的水轮发电机组在金沙江向家坝水电站于2012年正式投产运行。

(5) 掌握了300、1000MW压水堆核电机组的设计和建造技术,具有自主知识产权的“华龙一号”、CAP1400三代核电技术和具有四代安全特征的高温气冷堆核电技术研发成功。

(6) 自主研发、自主设计、自主制造、自主建设、自主运营的华能天津IGCC电站示范工程2012年投产,标志着我国洁净煤发电技术取得了重大突破。

(7) 可再生能源发电技术发展迅速,技术开发取得实质进展,产业建设初现规模。

6. 火电机组节能减排成效显著

随着小火电机组的逐步关停和大容量、高参数火电机组的大量投运,以及诸多节能降耗措施的实施和运行管理水平的提高,全国火电机组供电标准煤耗率逐年下降,到2015年底,全国火电机组供电标准煤耗率为315g/(kW·h),居世界先进水平。

烟尘年排放量下降。自改革开放以来,我国的电力工业得到了飞速发展,但其烟尘的排

放量却是在下降的。我国电力烟尘年排放量在 1978 年约为 400 万 t，2007 年在 300 万 t 左右，2014 年下降到 98 万 t 左右，煤电平均除尘效率达到 99.75% 以上，基本达到了世界发达国家的水平。

二氧化硫排放量大幅下降。截至 2014 年底，统计口径内的燃煤发电机组基本上全部采取了脱硫措施，其中，烟气脱硫机组容量约 7.55 亿 kW，约占全国煤电机组容量的 91.5%，比 2005 年提高 77 个百分点；其他机组主要为具有炉内脱硫能力的循环流化床锅炉。2014 年电力二氧化硫排放量在 620 万 t 左右，超额完成了节能减排“十二五”规划规定的 800 万 t 的减排目标。

氮氧化物控制方面。到 2014 年底，烟气脱硝机组容量约 6.6 亿 kW，约占全国煤电装机容量容量的 80%，比 2013 年提高了近 22 个百分点；2014 年电力氮氧化物排放量在 620 万 t 左右，完成了节能减排“十二五”规划规定的 750 万 t 的减排目标，扭转了电力氮氧化物排放量逐年增加的局面。

单位发电量二氧化碳排放量持续下降。2006~2014 年，电力行业通过发展非化石能源、降低供电标准煤耗率和线损率等措施，累计减排二氧化碳约 60 亿 t。2014 年电力行业单位发电量二氧化碳排放量比 2005 年减少约 19%。截至 2015 年底，煤电机组二氧化碳排放强度下降到约 890g/(kW·h)。

综上所述，改革开放使我国电力工业在规模上、技术上均跨入了世界电力的先进行列，取得了很大成绩，但我国电力工业的发展仍面临着诸多挑战，在保障能源电力的经济和可持续供应、推进能源电力生态文明建设、保障电力安全、推进电力科技创新、推进电力体制机制改革创新等方面任重道远。

四、我国电力发展规划及发电技术发展动向

1. 我国电力发展规划

综合考虑我国发电能源资源禀赋特征和用电负荷分布，统筹协调经济社会发展、生态文明建设、电力安全保障以及技术经济制约，我国“十三五”制定的电力发展规划为：积极发展水电，统筹开发与外送；大力发展新能源，优化调整开布局；安全发展核电，推进沿海核电建设；有序发展天然气发电，大力推进分布式气电建设；加快煤电转型升级，促进清洁有序发展；加强调峰能力建设，提升系统灵活性；优化电网结构，提高系统安全水平；升级改造配电网，推进智能电网建设；推进集中供热，逐步替代燃煤小锅炉；积极发展分布式发电，鼓励能源就近高效利用；深化电力体制改革，完善电力市场体系。据此分析，预计到 2050 年，我国电力结构将实现从煤电为主向非化石能源发电为主的转换，未来我国电力需求以及发电装机情况预测见表 1-3。

表 1-3 未来我国电力需求以及发电装机情况预测*

名 称	2020 年	2030 年	2050 年
全社会用电量 (万亿 kW·h)	6.8~7.2	12.0	14.0
人均用电量 (kW·h/人)	4860~5140	8260	10000
发电装机总容量 (亿 kW)	20.0	30.2	39.8
人均装机容量 (kW/人)	1.4	2.1	2.8

续表

名 称		2020 年	2030 年	2050 年
发电装 机预测	水电装机容量 (亿 kW)	3.8	4.5~5	6~6.5
	其中:抽水蓄能发电	0.4	1.5	3.0
	风电装机容量 (亿 kW)	2.1	6.7	13.3
	太阳能发电装机容量 (亿 kW)	1.1		
	核电装机容量 (亿 kW)	0.58	2.0	4.0
	煤电装机容量 (亿 kW)	<11.0	13.5	12.0
	天然气发电装机容量 (亿 kW)	1.1	2.0	3.0
	其中:分布式能源系统	0.4	1.2	2.0
	其他发电方式装机容量 (亿 kW)	0.6	1.0	1.0

注 * 信息来源:电力发展“十三五”规划,国家发展改革委、国家能源局。

2. 热力发电技术的发展动向

(1) 超(超)临界压力火力发电技术。发展高效、节能、环保的超(超)临界压力火力发电机组是我国火电建设的主要方向。在材料工业发展的支持下,超超临界压力机组朝着更高参数的方向发展,一些国家和制造厂商已经公布了发展下一代超超临界压力机组的计划,蒸汽初温将提高到 700℃,再热蒸汽温度达 720℃,相应的压力将从目前的 30MPa 左右提高到 35~40MPa,发电厂供电热效率可达到 50%~55%。

(2) 洁净燃烧发电与烟气净化技术。洁净燃烧发电技术是指煤炭从开发到利用全过程中,旨在减少污染物排放和提高利用效率的加工、转化、燃烧和污染控制等高新技术的总称,按其生产和利用过程,可分为:

1) 燃烧前的煤炭加工和转化技术。煤炭燃烧之前的洗选、型煤、水煤浆技术以及煤气化和液化技术。

2) 燃烧中的净化技术。先进的燃烧器与燃烧技术(如低 NO₂ 燃烧器),分级燃烧技术;循环流化床燃烧技术(circulating fluidized bed combustion, CFBC);增压流化床联合循环技术(pressurized fluidized bed combustion combined cycle, PFBC-CC);整体煤气化联合循环技术(integrated gasification combined cycle, IGCC);直接燃用超净煤粉的燃气-蒸汽联合循环技术等。

3) 燃烧后的净化技术。烟气脱硫技术(flue gas desulfurization, FGD)、烟气脱硝技术(selective catalytic reduction, SCR)、高效除尘成套技术、烟气碳捕捉技术、烟气脱水技术以及重金属脱除技术等。

(3) 安全高效的核电技术。世界首台 AP1000 三代核电机组已于 2016 年 12 月 15 日在浙江三门核电站正式进入性能测试的最后阶段,已于 2017 年并网发电,这标志着我国对 AP1000 关键技术的引进消化吸收已基本完成;具有自主知识产权的“华龙一号”、CAP1400 核电技术和具有四代安全特征的高温气冷堆核电技术研发成功;CAP1700 的商标设计和国际注册工作已经启动。

(4) 以大型燃气轮机为核心的联合循环发电技术。发展单机容量 300MW 及以上的燃气发电机组,提高其在总装机容量中的比重,对于改善电网运行状况,为电网提供更加灵活的

备用电源，增大调峰的灵活性，减少 CO₂、SO₂的排放都具有重要意义。

(5) 热电联产技术。建设高效燃煤热电联产机组，同步完善配套供热管网，对集中供热范围内的分散燃煤小锅炉实施替代和限期淘汰。在符合条件的大中型城市，适度建设大型热电机组，鼓励建设背压式热电机组；在中小型城市和热负荷集中的工业园区，优先建设背压式热电机组；鼓励发展热电冷多联供。

(6) 大型火电机组的自动控制技术。将火电厂常规技术与目前先进的信息化技术有机融合，最大限度地实现火力发电厂的数字化工程、数字化管理和数字化控制，最终实现电厂运行控制的高度智能化和信息化。

(7) 可再生能源发电技术。可再生能源发电技术将取得重要突破，在发电能源结构中的比例将显著提高。尤其是太阳能热发电技术，将形成以塔式和槽式为主要集热方式的太阳能热发电系统。同时，光-煤互补复合发电系统的关键技术有望获得突破，是火电机组实现深度节能减排的一条可行途径。

(8) 稳步发展生物质发电，在具备资源条件的地级市及部分县城，稳步发展城镇生活垃圾焚烧发电；根据生物质资源条件，有序发展农林生物质直燃发电和沼气发电。

五、热力发电厂的类型及要求

热力发电厂的类型见表 1-4。

表 1-4 热力发电厂的类型

分类方法	热力发电厂类型
能源	化石燃料发电厂，核能发电厂，地热发电厂，太阳能发电厂，磁流体发电厂，垃圾发电厂等
原动机类型	蒸汽轮机发电厂，燃气轮机发电厂，内燃机发电厂，燃气-蒸汽联合循环发电厂等
蒸汽初参数 (压力 p_0)	中低压发电厂 ($\leq 3.43\text{MPa}$)，高压发电厂 (8.83MPa)，超高压发电厂 (12.75MPa)，亚临界压力发电厂 (16.18MPa)，超临界压力发电厂 ($\geq 22.129\text{MPa}$)，超超临界压力发电厂 ($\geq 24.2\text{MPa}$) [*]
电厂功能	供电的纯凝汽式发电厂，热-电联供的热电厂，热-电-冷联供发电厂，热-电-煤气联供发电厂，多功能热电厂
电厂容量	小型发电厂 ($<200\text{MW}$)，中型发电厂 ($200\sim1000\text{MW}$)，大型发电厂 ($\geq 1000\text{MW}$)
承担负荷特性	基本负荷发电厂，中间负荷发电厂，调峰负荷发电厂
服务性质	孤立发电厂，移动式发电厂，企业自备发电厂，区域性发电厂等
电厂位置	负荷中心发电厂，坑口\路口\港口发电厂，煤电联营发电厂等

注 ^{*} 目前，对超临界与超超临界的划分界限尚无国际统一标准，只是人为的一种区分。超超临界参数实际上是超临界参数向更高压力和更高温度提高的过程。通常认为超超临界参数是指压力在 24.2MPa 以上，温度在 570℃ 以上。目前国内制造的 1000MW 超超临界汽轮机参数：哈尔滨汽轮机厂为 25MPa，600/600℃；上海汽轮机厂为 26.25~27MPa，600/600℃；东方汽轮机厂为 25MPa，600/600℃。

对热力发电厂的基本要求是：在满足安全可靠生产的前提下，经济适用，符合环保要求及有关环保的法令、条例、标准和规定，满足可持续发展要求，以合理的投资获得最佳的经济效益和社会效益；提高发电厂的可靠性、劳动生产率和文明生产水平；节约能源、节约用地、节约用水、节约材料，并确保质量；瞄准国际先进水平的一流企业不懈努力和提高。

六、本课程的任务和作用

在已学能源与动力工程专业基础课、专业课的基础上学习热力发电厂课程。本课程

是以热力发电厂整体为对象,着重研究不同热力发电厂的热功转换理论基础,并以大型汽轮机发电厂的热力设备及其热力系统为重点,在满足安全、经济、适用、灵活、环保的要求下,分析热力发电厂的经济效益,并侧重于热经济性的研究,热经济性的定性分析以熵方法为主,定量计算以常规方法为主。

热力发电厂是一门政策性和综合性强、与电厂生产实际紧密相连的专业课程。通过本课程的学习,培养学生树立安全、效益(经济效益、社会效益、环保效益)相统一的观点,以提高学生分析、研究、解决热力发电厂课程业务范围内生产实际问题的独立工作能力。



复习思考题

- 1-1 什么是能源? 能源如何来分类?
- 1-2 我国的能源结构特点如何?
- 1-3 热力发电厂生产的实质是什么?
- 1-4 简述热力发电技术的发展动态。
- 1-5 简要说明热力发电厂的主要形式和分类。
- 1-6 超(超)临界参数火力发电技术特点有哪些?
- 1-7 我国未来电力发展战略布局是什么?
- 1-8 提高热力发电厂经济效益的主要途径有哪些?
- 1-9 我国电力工业发展所面临的主要挑战是什么?
- 1-10 火力发电厂主要生产系统各自的任务是什么?

第二章 热力发电厂的评价指标及评价方法

本章提要

安全、高效、清洁是发电厂运行管理的基本要求。本章先介绍热力发电厂的技术经济与环保指标,然后重点介绍热力发电厂热经济性评价的两种基本方法,以及凝汽式发电厂的热经济性指标。

第一节 热力发电厂的技术经济与环保指标

热力发电厂既是能源转换企业,又是耗能大户,因此技术经济与环保指标对发电厂的生产、经营和管理至关重要。技术经济与环保指标不仅反映发电企业的生产能力、管理水平,还可以指导发电厂的生产、管理、经营等各方面的工作。热力发电厂必须在满足安全生产的前提下力求经济(热经济和技术经济),并能实现环境保护和可持续发展。

一、技术经济指标

热力发电厂通常采用各项技术经济指标来评价发电厂的运行经济性和生产管理技术水平,其评价指标主要有发电厂的可靠性指标、成本指标以及供电标准煤耗率指标等。

1. 可靠性评价指标

提高发电机组的运行可靠性水平,是保障电力系统安全、稳定、可靠运行的基础。热力发电厂的可靠性是指在预定的时间区间内和规定的技术条件下,保持系统、设备、部件、元件发出额定电力的能力,并以量化的可靠性指标来体现。目前,300MW 及以上火电机组已成为我国电力装机的主力机型,为此,依据《电力监管条例》《电力安全生产监督管理办法》《电力可靠性监督管理办法》,国家能源局于 2014 年 5 月 10 日颁布了《火力发电机组可靠性评价实施办法》(国能安全〔2014〕203 号),办法规定,300MW 及以上等级的常规火电机组,采用机组年度可靠性综合评价系数(generators reliability compositive factor, GRCF)作为火力发电机组可靠性的评价指标,该指标是反映机组综合出力能力的指标,其表达式为

$$GRCF = EAF + B_F + B_{MT} + B_R \quad (2-1)$$

其中

$$EAF = \frac{AH - EUNDH}{PH} \times 100\% \quad (2-2)$$

$$EUNDH = \frac{\sum D_i T_i}{GMC} \quad (2-3)$$

$$AH = SH + RH \quad (2-4)$$

$$B_F = -\sum(FOT \times C_F) \quad (2-5)$$

$$B_{MT} = \frac{SH_{MT} - \frac{2}{3}SH_{DA}}{\frac{2}{3}SH_{DA}} \times 1.5\% \quad (2-6)$$

$$B_R = -\max\left(RH - \frac{2}{3}RH_{DA}, 0\right) / PH \times C_R \quad (2-7)$$

式中 GRCF——机组年度可靠性综合评价系数；

EAF——机组台年平均等效可用系数；

AH——机组处于可用状态的小时数，h；

SH——机组运行小时数，h；

RH——机组备用小时数，h；

PH——机组的统计期间小时数，h；

EUNDH——机组降出力等效停运小时数，h；

D_i ——统计期内机组各次降低出力数，即机组在降低出力状态时，实际能达到的最大连续出力与毛最大容量的差值，MW；

T_i ——各次降低出力的运行和备用时间，h；

GMC——机组的毛最大容量，即机组在给定时间区间内能够连续承载的最大容量，一般可取机组的铭牌额定容量，MW；

B_F ——机组强迫停运次数影响值；

FOT——机组台年平均强迫停运次数；

C_F ——强迫停运影响系数，第一类非计划停运取值 0.6%，第二类非计划停运取值 0.5%，第三类非计划停运取值 0.4%；

B_{MT} ——机组最长连续运行时间影响值；

SH_{DA} ——机组所在电网统调大型火电机组年度平均运行小时数，h；

SH_{MT} ——机组最长连续运行时间，其值从评价年度的上一年度算起，若跨年度连续运行时间在评价年度内的时间不足 30% 的，则该事件按年度内时间比例占 30% 计算持续时间，最长连续运行时间大于 $2SH_{DA}/3$ 的，其值按 $2SH_{DA}/3$ 计算，h；

B_R ——备用时间权重影响值；

$\max()$ ——取最大值函数；

RH_{DA} ——机组所在电网统调大型火电机组年度平均备用小时数，h；

C_R ——备用时间权重修正系数，取值 10%。

我国火力发电机组可靠性评价采用全国与区域相结合的方式，每年评价一次。在可靠性评价期内和评价当年发生人员责任电力事故或电力安全事件、未开展辅助设备和输变电设施可靠性评价工作的企业，评价年度机组备用次数超过 5 次（机组因配合电网建设、检修、试验的备用次数不计在内）及机组停用时间超过 300h 的不参与实名列示。

评价按照可靠性评价指标分值对位于前列的机组进行实名列示，例如，2013 年全国 A 级机组数量为：1000MW 级火力发电机组 5 台，600MW 级、300MW 级火力发电机组各 20 台。华北、东北、华东、华中、西北、南方六个区域 B 级机组数量分别为各区域 600MW 级、300MW 级机组总台数的 3%。A、B 级机组不重复列示。2013 年度全国火力发电机组