



“十三五”普通高等教育本科规划教材

卓越工程师系列教材

热能动力设备 原理及运行

马 进 李永华 李永玲 李 静 编著



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

卓越工程师系列教材

热能动力设备 原理及运行

编著 马 进 李永华 李永玲 李 静

主审 李 勇



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了热力发电的主要动力设备和系统。全书分为八章,分别介绍了热力发电过程、煤粉锅炉设备原理、汽轮机设备及系统、发电机与厂用电系统、单元机组运行、循环流化床锅炉与生物质锅炉、燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环、核电站原理及运行。

本书可作为高等学校自动化专业学生的教材,也可以作为非热能专业学生的入门读物,供大学高年级学生自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

热能动力设备原理及运行/马进等编著. —北京:中国电力出版社, 2016. 7

“十三五”普通高等教育本科规划教材 卓越工程师系列教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 9217 - 5

I. ①热… II. ①马… III. ①火电厂—热能—动力装置—高等学校—教材 IV. ①TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 085079 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](http://www.cepp.sgcc.com.cn))

北京天宇星印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 7 月第一版 2016 年 7 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.5 印张 453 千字

定价 38.00 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

前 言

电力工业是国民经济的重要基础产业，近年来得到了迅速发展，装机容量不断提高。火电单元机组向着高参数大容量发展，超（超）临界机组越来越多；其他类型的机组，如循环流化床机组、燃气轮机与联合循环机组、压水堆核电站等，其装机容量和比重也在逐年上升。

为适应单元机组的技术发展，便于自动化专业学生学习热力发电知识，我们编写了本书。本书主要介绍热能动力设备原理、系统与运行，内容覆盖了目前热力发电单元机组的主要类型。

全书共分为八章。第一章介绍发电过程概述，包括发电厂的生产过程、热力循环的基础理论、热力发电厂的发展趋势；第二章讲述煤粉锅炉设备原理，包括燃料特性、燃料燃烧计算和锅炉机组的热平衡、锅炉主要系统和设备（汽水系统、风烟系统、制粉系统等）、直流锅炉设备和运行特点；第三章介绍汽轮机设备及系统；第四章简述发电机及厂用电系统；第五章介绍单元机组运行，以典型 300MW 单元机组（亚临界强制循环汽包锅炉）仿真机为操作平台，介绍了单元机组启动、正常停机和事故停机的主要步骤与方法；第六章简介循环流化床锅炉与生物质锅炉；第七章讲述燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环；第八章简要介绍核电站原理及运行，包括核电站的发电原理、一回路主要设备和系统、核电站运行的基础知识。

本书第二章由华北电力大学李永华编写，第三章由华北电力大学李永玲编写，第四章由华北电力大学李静编写，其余章节由华北电力大学马进编写。本书由东北电力大学李勇主审。

在编写过程中，各位同事、自动化实验班学生对本书提出过许多宝贵的意见和建议，在此表示衷心的感谢。

编者教学经验和工程实践所限，书中不妥或者疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2016 年 7 月

目 录

前言

第一章 发电过程概述	1
第一节 能源.....	1
第二节 发电厂的生产过程.....	3
第三节 发电技术的发展趋势.....	6
第四节 热力循环基础.....	7
第二章 煤粉锅炉设备原理	10
第一节 概述	10
第二节 燃料特性	17
第三节 煤的燃烧计算和锅炉机组的热平衡	29
第四节 制粉系统	34
第五节 燃烧设备	43
第六节 蒸发系统与水冷壁	59
第七节 过热器和再热器	68
第八节 省煤器和空气预热器	77
第九节 超临界锅炉特点	86
第三章 汽轮机设备及系统	95
第一节 概述	95
第二节 汽轮机级的工作原理	99
第三节 汽轮机本体.....	122
第四节 汽轮机辅机设备及系统.....	131
第四章 发电机及厂用电系统	142
第一节 电力系统概述.....	142
第二节 发电机基本结构及原理.....	150
第三节 典型设备的结构与原理.....	157
第四节 励磁系统.....	165
第五节 厂用电系统和保安系统.....	171
第五章 单元机组运行	178
第一节 机组概述.....	178
第二节 机组启动.....	186
第三节 机组正常停机.....	201

第四节 事故停机·····	205
第六章 循环流化床锅炉与生物质锅炉·····	209
第一节 循环流化床锅炉工作原理及特点·····	209
第二节 循环流化床锅炉本体结构·····	215
第三节 循环流化床锅炉的辅助系统·····	225
第四节 主要污染物的排放和控制·····	232
第五节 生物质发电焚烧炉的结构、特点与应用·····	236
第七章 燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环·····	243
第一节 燃气轮机概述·····	243
第二节 燃气轮机的原理、结构和特点·····	245
第三节 燃气-蒸汽联合循环·····	249
第八章 核电站原理及运行·····	255
第一节 概述·····	255
第二节 核裂变基础知识·····	258
第三节 一回路主要设备和系统·····	265
第四节 反应堆控制原理·····	272
第五节 核电厂的运行·····	285
参考文献·····	289

第一章 发电过程概述

第一节 能源

一、能源的定义与分类

能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。在自然界中,一些自然资源本身拥有某种形式的能量,它们在一定的条件下能够转换为人类可以利用的能量,这些自然资源称为能源,如煤炭、石油、天然气、核能、太阳能、风能、水力、薪柴、地热能等。在生活和生产过程中,由于工作需要或者便于运输和使用,将上述能源经过一定的加工和转换,使其成为更符合要求的能量来源,如煤气、电力、沼气、焦炭等,它们也称为能源,同样为人类提供所需的能量。

人类可以利用的能源多种多样,可以从不同角度进行分类。根据能源的形成条件可以将其分为一次能源与二次能源;一次能源可以进一步分为可再生能源与非可再生能源;根据其利用历史与技术水平分为常规能源与新能源;根据其对环境污染程度分为清洁能源和非清洁能源。

一次能源是指自然界中存在的天然能源,如煤炭、石油、天然气、太阳能、风能、水力、地热能等。其中煤炭、石油、天然气属于非可再生能源,太阳能、风能、水力、地热能属于可再生能源。

二次能源是由一次能源直接或者间接加工转换而成的人工能源,如电力、汽油、柴油、蒸汽、液化石油气等。二次能源又可以分为“过程性能源”与“含能体能源”。电能是应用最广泛的过程性能源,汽油、柴油是应用广泛的含能体能源,它们使用方便,易于利用,是高品质的能源。能源的分类、转化及利用如图 1-1 所示。

二、能源的利用历史

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础,是人类从事各种经济活动的原动力。能源消耗水平是人类生活水平和生活质量的重要尺度。人类文明的每一次重大进步都伴随着能源利用的改进与更替,能源的开发极大地推动了人类社会和世界经济的发展。回顾人类历史,可以清楚地看出能源与人类社会的关系。

古代人类从利用“火”开始,以薪柴、秸秆为燃料来煮食和取暖,以人力、畜力和风力水力机械作为动力进行生产活动。这个以薪柴等生物质燃料为主要能源的时代,生产和生活水平都很低,社会发展缓慢,延续了很长时间。

公元前 500 年左右,中国就开始利用煤炭作为燃料。18 世纪的产业革命以煤炭代替薪柴作为主要能源,蒸汽机成为生产的主要动力。采用蒸汽机的机械生产方式逐步取代了小作坊式的手工生产方式,工业得到迅速发展,劳动生产力有了较大的增长。1876 年德国人奥托创制了内燃机,进而形成了以内燃机为核心的汽车工业,带动了机械制造业的发展。19 世纪末,电力开始进入社会生活的各个领域,电动机代替了蒸汽机,电灯代替了油灯和蜡烛,电力成为工矿企业的主要动力和人类生活的主要动力来源。人类的生活水平有了极大提

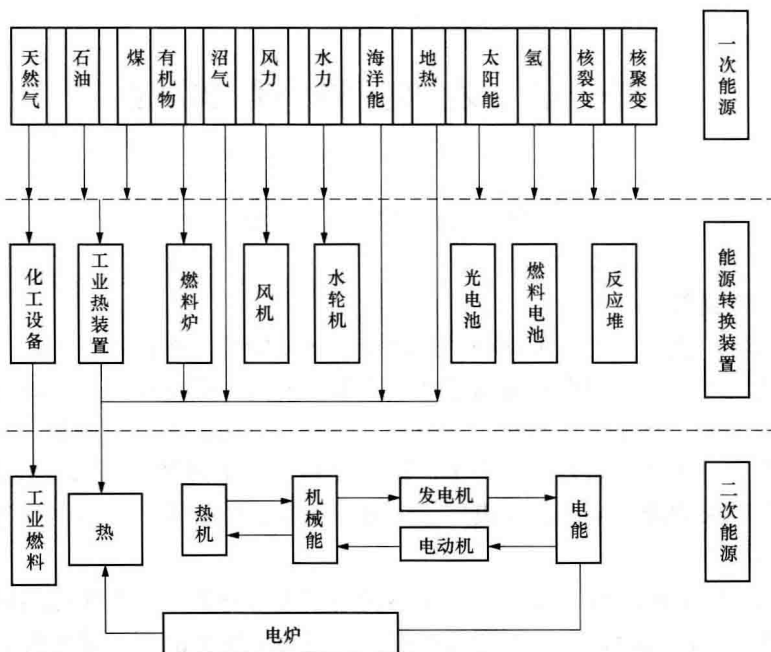


图 1-1 能源的分类、转化及利用

高，改变了人类社会的面貌。但此时的电力工业主要依靠煤炭作为燃料。

石油工业的发展开始了能源利用的新时期。20 世纪 50 年代开始，中东、美国、北非相继发现了巨大的油田和气田，西方国家很快将石油和天然气作为主要能源。石油资源的开发和利用，促进了汽车、飞机、内燃机车和远洋运输的迅猛发展，极大地缩短了地区和国家之间的距离，大大地促进了世界经济的繁荣。从这个角度来说，人类开发和利用能源的历史也是人类认识自然的历史。

三、能源状况

人类使用的能源最主要是非可再生能源，如石油、天然气、煤炭和裂变核燃料，占总能源消费量的 90% 左右，可再生能源如水力、植物燃料等只占 10% 左右。从长远角度来看，世界能源储量最多的是太阳能，在可再生能源中占 99.44%，水能、风能、地热能、生物能等不到 1%。在非可再生能源中，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、核裂变燃料等加起来不足千万分之一。所以，人类使用的能源归根结底要依靠太阳能。全球化石能源分布状况见表 1-1。

表 1-1 全球化石能源分布状况（截至 2011 年）

地区	石油			天然气			煤炭		
	储备 (G 桶)	比例 (%)	储采比	储备 (Tm ³)	比例 (%)	储采比	储备 (Mt)	比例 (%)	储采比
北美	217.5	13.2	41.7	10.8	5.2	12.5	245 088	28.5	228
美国	30.9	1.9	10.8	8.5	4.1	13.0	237 295	27.6	239
南美及中美洲	325.4	19.7	>100	7.6	3.6	45.2	12 508	1.5	124

续表

地区	石油			天然气			煤炭		
	储备 (G 桶)	比例 (%)	储采比	储备 (Tm ³)	比例 (%)	储采比	储备 (Mt)	比例 (%)	储采比
欧洲及欧亚地区	141.1	8.5	22.3	78.7	37.8	75.9	304 604	35.4	242
中东地区	795.0	48.1	78.7	80	38.4	>100	1203	0.1	>500
非洲	132.4	8.0	41.2	14.5	7.0	71.7	31 692	3.7	123
亚太地区	41.3	2.5	14.0	16.8	8.0	35.0	265 843	30.9	53
中国	14.7	0.9	9.9	3.1	1.5	29.8	114 500	13.3	48
全球合计	1652.7	100	54.2	208.4	100.0	63.6	860 938	100.0	147

从表 1-1 中可以看出,截至 2011 年底,全球石油已经探明的经济可开采量为 16 527 亿桶,煤炭为 8609 亿 t。石油的平均储采比为 54.2 年,煤炭的平均储采比为 147 年,因此,石油不会长期占据能源消耗的首位。

世界能源资源分布是不均衡的。例如,石油储量最多的地区是中东,占 48.1%;天然气储量最多的是中东和欧洲,各占 38.4%和 37.8%;煤炭储量最多的是亚太和欧洲地区,各占 30.9%和 35.4%。亚洲地区除煤炭储量较多外,石油和天然气所占比例很小,只有 2.5%和 8.0%。这种能源资源分布的不均衡,对世界政治、经济格局产生了重大的影响。

中国的能源资源总量名列世界前列。水资源居世界首位,煤炭可采储量居世界第三位,但是人均能源资源占有量很低。据 2011 年的统计,我国煤炭保有量为 11 800 亿 t,可采储量为 1145 亿 t;石油的资源量为 930 亿 t;天然气的资源量为 38 万亿 m³。我国能源的地区分布总体来说是北多南少、西富东贫。能源品种的分布是:煤大多在北方地区,油气在西部地区,水能多集中在西南地区,经济发达、能源需求量大的地区多位于东南沿海地区。表 1-2 为我国主要能源储量及人均储量。

表 1-2 我国主要能源储量及人均储量 (截至 2011 年)

能源种类	基础储量	人均储量
石油 (亿 t)	200	14.84 (t/人)
天然气 (万亿 m ³)	3.1	0.23 (万 m ³ /人)
煤 (百万 t)	114 500	84.98 (t/人)

第二节 发电厂的生产过程

现代社会人类需要的能源形式主要是电能、热能(冷能)和机械能。电能是唯一能够大规模利用煤炭、水力、原子能和各种可再生能源的优质二次能源,具有能量转换方便、便于大规模生产与灵活分散使用、易于实现工业生产自动化、充分利用地区性动力资源等优点,因此在最终能源消费中具有无可比拟的优越性。自然界存在的一次能源中,除了风能、水力和部分海洋能作为机械能可以直接利用外,其他各种能源或者直接以热能形式存在,或者经

过燃烧反应、核裂变反应将其转化为热能再予以利用。据统计,世界上大约 3/4 的能源是在发电厂中转化为电能供人类使用的。

发电厂的类型很多,分类方式不尽相同。按照其所利用的一次能源种类,可以划分如下:

(1) 火力发电厂。以煤炭、石油、天然气为主要燃料,将燃料的化学能转化为热能,再转化为机械能,最后变为电能的电厂称为火力发电厂(也称为火电站),例如常规燃煤机组、循环流化床机组、燃气轮机发电机组等。

(2) 核电厂(站)。利用核反应堆裂变反应产生的热量,将给水加热成蒸汽,推动汽轮机并带动发电机发电,这种电厂称为核电厂(或核电站)。

(3) 水力发电厂。水轮机利用水的高低落差蕴含的势能,带动发电机进行发电,这种电厂称为水力发电厂(或称水电站)。

(4) 风力发电厂。利用风力推动原动机转动,带动发电机发电的电厂。

(5) 太阳能发电厂。有两种形式的太阳能电厂:一种是利用太阳能电池,直接将太阳光转化为电能;另外一种是将太阳光聚集后加热水或者空气,再推动汽轮发电机进行发电。

图 1-2 是燃煤火力发电厂生产过程。煤粉在锅炉炉膛中燃烧,将燃料的化学能转变为高温烟气的热能。热能通过锅炉的省煤器、水冷壁、过热器等受热面使给水变成过热蒸汽;过热蒸汽推动汽轮机,将热能转变为机械能,带动发电机产生电能;汽轮机内膨胀做功后的蒸汽进入凝汽器内凝结成水;凝结水由水泵提升压头后送入低压加热器、除氧器和高压加热器,又回到锅炉,完成一个汽水循环过程。

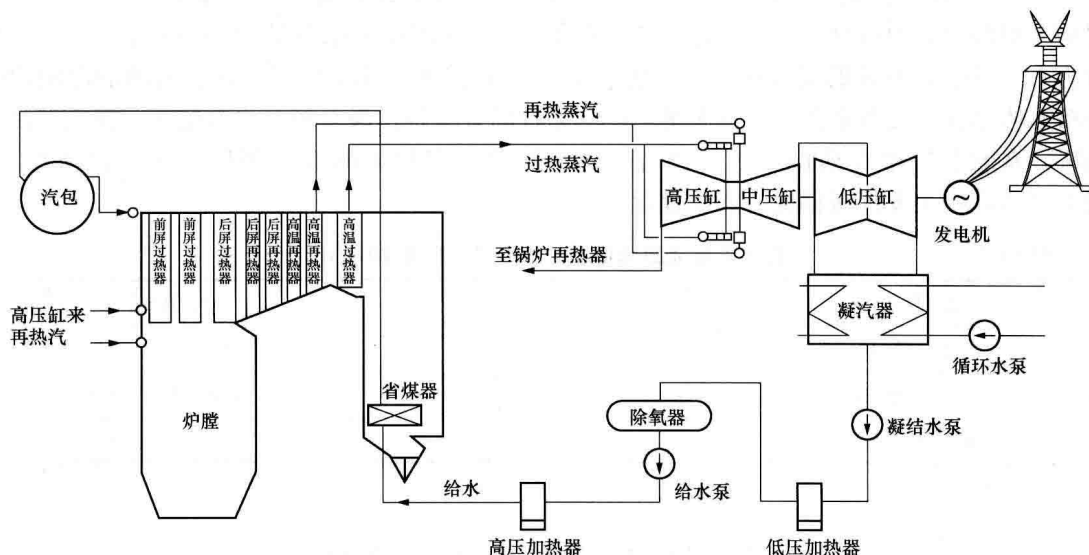


图 1-2 燃煤火力发电厂生产过程

燃气轮机是内燃机的一种形式,它是以连续流动的气体为工质,将热能转化为机械能的旋转式动力机械,主要由压气机、燃烧室和涡轮机三大部件组成。图 1-3 是燃气轮机装置简图。压气机从外界大气中吸入空气,并逐级压缩(空气的温度和压力逐级升高);压缩空气进入燃烧室与喷入的燃料混合燃烧产生高温高压的燃气;燃气进入涡轮机膨胀做功。涡轮

机排气可以直接排到大气中，也可以通过各种换热设备回收部分余热。燃气轮机中燃气的膨胀功 $2/3$ 左右用来带动压气机， $1/3$ 左右以动力形式对外输出。

往复式内燃机是应用广泛的一种动力机械，包括汽油机和柴油机。燃料在气缸内进行压缩、点火、燃烧，产生高温高压的燃气，推动活塞对外做功。内燃机也是将燃料燃烧所放出的热量转换为机械功，属于流体机械。

蒸汽轮机、燃气轮机、往复式内燃机、水轮机以及风力机等设备输出机械功率，可以带动发电机发电，也可以作为动力驱动其他机械，因此也被称为动力机械。

与火力发电厂不同，核电站的热源来自核燃料裂变反应产生的能量。核电站的设备和系统通常由两大部分组成：核系统和设备（又称核岛）、常规系统和设备（又称常规岛）。图 1-4 是压水堆核电站示意图。核电站整个系统分成一回路系统和二回路系统两个部分。在一回路系统中，高压水被主泵送入反应堆中，吸收燃料元件放出的热量后，进入蒸汽发生器 U 形管的下部，将热量传递给二回路的给水；然后返回主泵入口，继续循环。二回路的给水在 U 形管外部流动，吸收一回路水的热量后变成汽水混合物，在蒸汽发生器上部进行汽水分离，产生的蒸汽进入汽轮机做功；高压缸排汽经再热器后温度上升后，进入汽轮机低压缸做功；低压缸排出的乏汽在凝汽器中凝结成水，由凝结水泵、给水泵提升压头后送到蒸汽发生器，形成一个汽水循环回路。

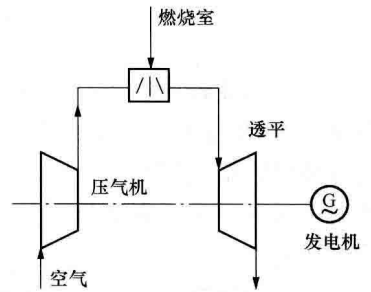


图 1-3 燃气轮机装置简图

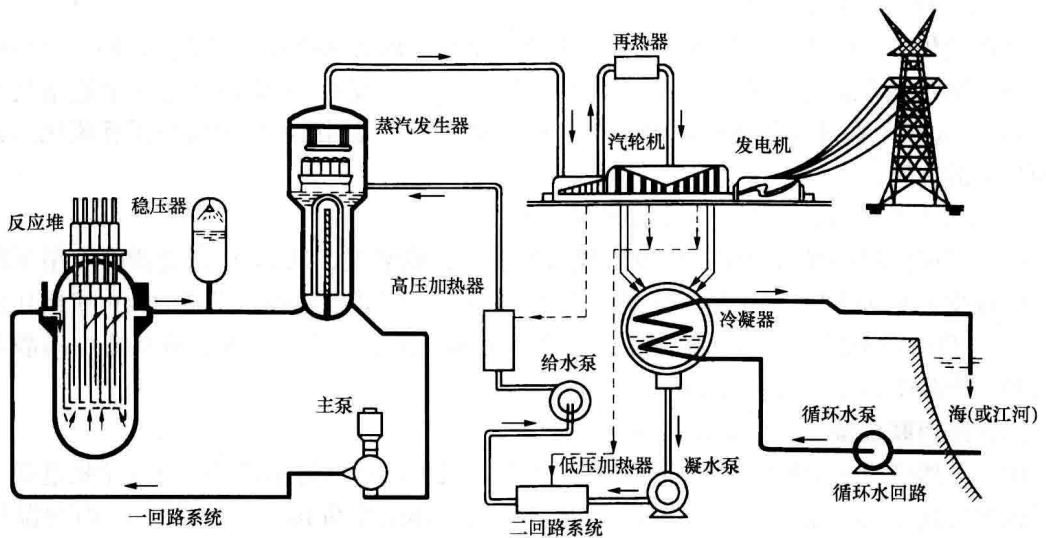


图 1-4 压水堆核电站示意图

上述设备可以分成两种：一种是燃烧产生的燃气直接进入流体机械中进行能量交换，如燃气轮机和内燃机；另一种是将燃料释放出来的热量传递给某种流体工质（一般为水），流体工质（一般为蒸汽）进入流体机械再进行热功转换，如火力发电厂的锅炉和蒸汽轮机、核电站的一回路和二回路。二者的共同点在于都是将热能转变为机械能。这里将热能转换为机械能的装置称为热能动力机械（又称热机），燃烧设备、热能动力机械及其辅助设备统称为

热能动力装置（或者热能动力设备）。

第三节 发电技术的发展趋势

电力工业是国民经济重要的基础产业，改革开放 30 多年来，电力工业得到了迅速发展。截至 2014 年年底，中国火电装机容量达 9.156 9 亿 kW，水电装机容量达到 3.018 3 亿 kW，核电装机容量达到 0.198 8 亿 kW，风电装机容量达到 0.958 1 亿 kW，水电和风电装机容量跃居世界第一位。在装机容量不断提高的同时，发电企业不断采用新技术提高发电厂效率、减少环境污染。

一、发展高参数大容量机组提高火电机组效率

汽轮机发电的理论基础是蒸汽的朗肯循环，根据朗肯循环原理，蒸汽的初参数（即蒸汽的压力与温度）越高，循环效率就越高。提高蒸汽参数与扩大机组容量相结合是提高常规热力发电厂效率及降低单位容量造价的最有效途径。初参数的提高主要受金属材料在高温下性能是否稳定的限制，目前，超临界压力机组初温可达 $538\sim 576^{\circ}\text{C}$ 。随着冶金技术的发展，耐高温性能材料的不断出现，超超临界压力机组的初温已经达到 600°C 。

目前火电机组的建设以 600、1000MW 超临界和超超临界压力机组为主，它们具有效率高、煤耗低、自动化程度高、运行人员少的特点。火电机组今后仍然会向着高参数、大容量方向发展。

二、采用煤炭洁净燃烧技术减少环境污染

1. 大型循环流化床电站

循环流化床锅炉具有燃料适用性强、燃烧效率高、低污染物排放等优点。四川白马电厂 300、600MW 循环流化床电站示范工程已经成功投运。目前，大型循环流化床电站技术已经成熟，300MW 循环流化床锅炉的国产化率达到 95%。我国已经成为大型循环流化床锅炉应用最多的国家。

2. 烟气脱硫、脱硝、高效除尘技术的大力推广

随着环保要求的提高和相关环境法规的出台，脱硫装置、低 NO_x 燃烧器的应用不断增加，以减少 SO_2 和 NO_x 的排放。截至 2013 年三季度，安装投运脱硫设施的火电机组比重达到 92%，我国每千瓦时的 SO_2 排放量已经低于美国。推广高效、节能、价格适中的静电除尘器和布袋除尘器，可减少烟尘的排放量。

三、采用联合循环提高热经济性

由于天然气产量的增加和其环保特点，燃气轮机电站得以迅速发展。燃气轮机进口初温有了较大提高，当初温为 $1260\sim 1300^{\circ}\text{C}$ 时，联合循环效率可达 55%~58%；当初温达到 1430°C 时，联合循环效率可达 60%。资料表明，目前世界新增火电机组中，燃气轮机及其联合循环机组占 50% 以上。我国燃气轮机发电的装机容量仅占总装机容量的 2%~8%，且单机容量偏小。今后需要发展单机容量 300MW 级的燃气发电机组，对于增大调峰的灵活性、改善电网运行状况，减少 SO_2 和 NO_x 的排放具有重要意义。

整体煤气化联合循环发电（IGCC）将燃煤气化为可燃气，供燃气轮机使用，再与余热锅炉组成联合循环，是高效清洁的燃煤联合循环发电技术。目前，世界上有 6 台 250~300MW 级的 IGCC 机组投入运行，最高效率达到 45%， SO_2 和 NO_x 以及粉尘排放都非常

低,技术已经基本成熟。华能天津 IGCC 电站是世界上第 6 台、国内第 1 台 250MW IGCC 示范电站。建立示范电站的同时引进部分技术,逐步实现国产化。

四、采用空冷发电技术

汽轮机的排汽进入凝汽器,一般由循环冷却水对排汽进行冷却,使其凝结成水。这种冷却方式需要大量循环水,一座 1000MW 大型火力发电厂每天用水量约 500 万 t,耗水量约 10 万 t,相当于一座中等城市的日用水量。在缺水和少水地区,这一水冷方式难以实现。汽轮机排汽采用空气冷却这一新技术已得到应用,它有直接空冷与间接空冷两种:直接空冷是汽轮机排汽进入空冷散热器,用空气直接冷却排汽;间接冷却是用空气来冷却循环凝结水,再用冷却后的循环凝结水与排汽直接接触冷凝排汽。2007 年,采用直接空冷技术的铜川电厂首台国产 600MW 燃煤机组顺利投产发电,标志着我国成功掌握了世界先进的大型空冷发电技术,为同类型机组的设计与运行起到示范作用,为富煤缺水地区建设火电厂探索出可行道路。

五、增加核能发电比重

节约一次能源、减少有害废气排放、降低地球温室效应是各国政府十分关注的问题。中国电力企业联合会统计表明,2011 年全国发电量为 47 217 亿 kWh,其中核电总发电量为 874 亿 kWh,同比增长 16.95%,占全部发电量的 1.85%。这一比例远远低于世界 17% 的平均水平。我国政府于 2004 年确定了积极发展核电的方针,预计到 2020 年,还要建设 30 多座核电站,核电装机容量争取达到 4000 万 kW,装机比重预计达到 4%。因此,大力发展核能发电,对于替代化石燃料使用、减少二氧化碳排放、缓解东南沿海地区的能源紧张问题,具有突出作用。

第四节 热力循环基础

在热力发电厂中,热能转化为机械能这一过程是通过热力循环来实现的,通常以蒸汽(水)为介质,也称为蒸汽动力循环。热力循环是建立在热力学第一定律和第二定律基础上的。热力学第一定律即能量守恒定律,它表明热能和机械能之间是可以相互转化和守恒的。热力学第二定律表明,载热体只有从热源中吸收热量,并向冷源放出热量才能做功。

一、卡诺循环

卡诺循环是由两个定温过程及两个绝热过程组成的理想循环。湿饱和蒸汽的卡诺循环如图 1-5 所示。

工质在等温 T_1 下自热源吸入热量 Q_1 ,在可逆绝热膨胀过程中,工质温度自 T_1 降至 T_2 ,然后,工质在等温 T_2 下向冷源放出热量 Q_2 。最后经可逆的绝热压缩过程,工质温度由 T_2 升高到 T_1 ,从而完成一个可逆循环 1-2-5-4。

卡诺循环的热效率公式为

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1-1)$$

卡诺循环在历史上首先奠定了热力学第二定律的

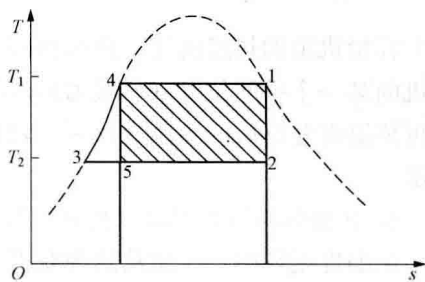


图 1-5 湿饱和蒸汽的卡诺循环

基础。它表明,从热源获得的热量只有一部分可以转换为机械能,而另一部分热量放给了冷源。从卡诺循环的分析可以得到以下几条重要的结论:

(1) 卡诺循环确定了实际热力循环的热效率可以接近的极限值,从而可以度量实际热力循环的热力学完善程度。

(2) 卡诺循环对如何提高热力循环的热效率指出了方向:尽可能提高工质吸热时的温度,以及尽可能使工质膨胀至低的温度,在接近自然环境温度下对外放热。

(3) 对任意复杂循环,提出了广义(等价)卡诺循环的概念,即以平均吸热温度 T_1 及平均放热温度 T_2 来代替 T_1 及 T_2 的概念,两者具有相同的热效率。

尽管卡诺循环在热力学理论方面具有重大的意义,但是迄今为止在工程上还没有制造出完全按卡诺循环工作的热力发动机。这是因为在绝热膨胀末期蒸汽湿度很高,对动力机不利。另外,在低温放热终了时,蒸汽未完全凝结,汽水混合物的比体积很大,湿蒸汽压缩有困难,且耗功太多,是水的 165 倍。实际热力循环装置的热功转换过程是以朗肯循环为基础的。

二、朗肯循环

朗肯循环是一种无过热、无再热、无回热的简单循环。理想朗肯循环是研究各种复杂蒸汽动力装置的基本循环。

饱和蒸汽的朗肯循环与卡诺循环的不同之处在于排放蒸汽是完全凝结成水的,如图 1-5 所示,即不是止于点 5 而是一直进行到点 3,使乏汽全部液化。显然,水的压缩要比汽水混合物容易得多,因而简化了设备,朗肯循环效率如图 1-6 所示,其公式为

$$\eta_t^R = \frac{\text{面积 } ABCD}{\text{面积 } aABCDc} \quad (1-2)$$

朗肯循环的效率要低于卡诺循环的效率。

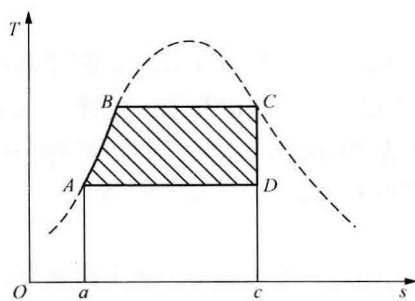


图 1-6 朗肯循环效率

1. 蒸汽再热朗肯循环(再热循环)

再热循环是在朗肯循环的基础上适当改进得到的。对于朗肯循环,提高汽轮机的进汽压力、降低排汽压力可以提高循环效率,但是会使汽轮机的排汽干度下降,湿度增大,不利于汽轮机的安全经济运行,因此采用蒸汽再热的办法保证汽轮机的最终湿度在允许范围内。

目前大型火力发电厂都采用蒸汽中间再热系统,其主要目的在于提高中、低压缸前蒸汽参数,从而提高大容量机组的热经济性。

再热循环是指过热蒸汽在汽轮机中膨胀做功到一定压力后,从汽轮机的某一个中间位置(一般为高压缸排汽)引出来,送到锅炉再热器中进行第二次加热,经再热温度升高后的蒸汽又回到汽轮机中、低压缸继续膨胀做功,最后成为乏汽,如图 1-7 所示。

2. 有回热的朗肯循环(回热循环)

在朗肯循环中,工质从热源获得的热量约有 60% 要向冷源排放,其余的热量才是通过热动力装置对外做功的部分。这是动力发电厂热经济性不高的基本原因。采用回热系统,减少热量向冷源的排放,是改善热力循环效率的方向之一。

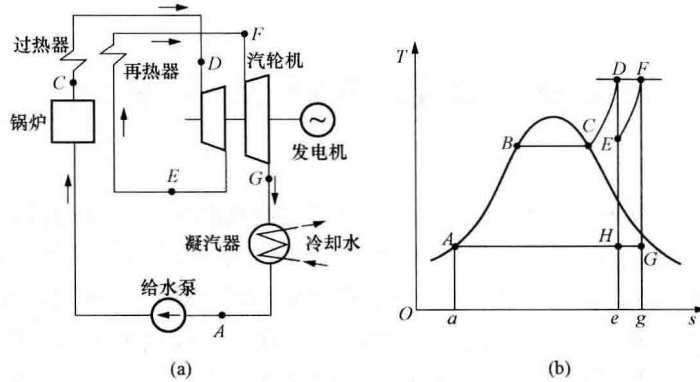


图 1-7 蒸汽再热朗肯循环

(a) 工作原理图; (b) $T-s$ 图

回热循环与朗肯循环的区别仅在于设置了加热器，对给水进行加热。加热器的热源是从汽轮机蒸汽膨胀过程中抽出的一部分蒸汽。这部分蒸汽将它的汽化潜热传给了给水而不是传给了冷却水，部分消除了朗肯循环在较低温度下吸热的不利影响，提高了循环的热效率，见图 1-8。

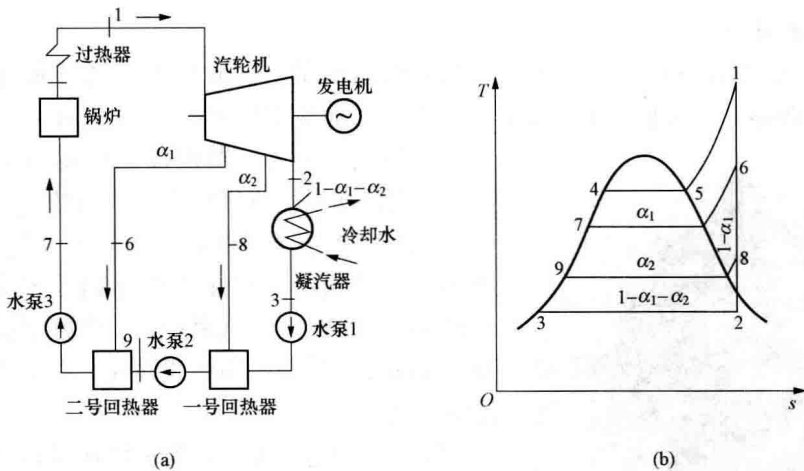


图 1-8 有回热的朗肯循环

(a) 工作原理图; (b) $T-s$ 图

第二章 煤粉锅炉设备原理

将燃料的化学能转变成工质的热能,生产规定参数和品质的工质的设备称为锅炉。锅炉的燃烧设备为燃料提供良好的燃烧条件,以求能将燃料的化学能最大限度地释放出来并转化为热能,再通过换热装置利用烟气的热量将工质水加热成为热水或蒸汽。锅炉包括锅和炉两大部分,锅的原义是指在火上加热的盛水容器,炉是指燃烧燃料的场所。锅炉中产生的热水或蒸汽可直接为生产和生活提供所需要的热能,也可通过蒸汽动力装置转换为机械能,或再通过发电机将机械能转换为电能。提供热水的锅炉称为热水锅炉,主要用于生活,工业生产中也有少量应用。产生蒸汽的锅炉称为蒸汽锅炉,又称蒸汽发生器,常简称为锅炉,是蒸汽动力装置的重要组成部分,多用于火电站、船舶、机车和工矿企业等。用于发电的锅炉称为电站锅炉。

第一节 概 述

一、锅炉的发展

1720年,英国人海科(Haycock)首先发明了锅炉。这时的锅炉和开水壶没有多大区别,即在金属锅壳里充满水,在底部加热。1720年海科锅炉如图2-1所示。

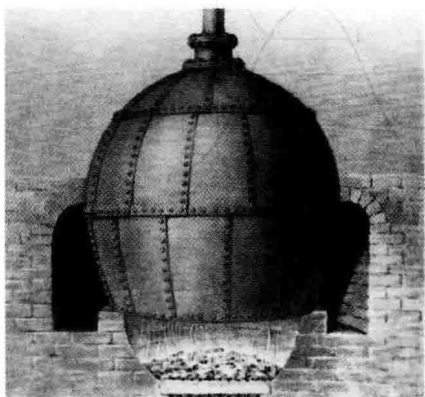


图2-1 1720年海科锅炉

18世纪上半叶,英国煤矿使用的蒸汽机,包括瓦特发明的初期蒸汽机在内,所用的蒸汽压力等于大气压力。18世纪下半叶,改用高于大气压力的蒸汽。19世纪,常用的蒸汽压力提高到0.8MPa左右。与此相适应,最早的蒸汽锅炉是一个盛水的大直径圆筒形立式锅壳,后来改用卧式锅壳,在锅壳下方砖砌炉体中烧火。

随着锅炉越做越大,为了增加受热面积,在锅壳中加装火筒,在火筒前端烧火,烟气从火筒后面出来,通过砖砌的烟道排向烟囱并对锅壳的外部加热,这种锅炉称为火筒锅炉。开始只装一只火筒,称为单火筒锅炉或康尼许锅炉,后来加到两只火筒,称为双

火筒锅炉或兰开夏锅炉。

1804年左右,在掌握了优质钢管的生产和胀管技术之后,出现了火管锅炉。一些火管装在锅壳中,构成锅炉的主要受热面,火(烟气)在管内流过。在锅壳的存水线以下装上尽量多的火管,这种锅炉称为卧式外燃回火管锅炉。它的金属耗量较低,但需要很大的砌体。图2-2为早期的火管锅炉。

早期的这两种锅炉都是对装有大量饱和水的容器直接加热,存在引起灾难性爆炸的危险。尤其是火管锅炉,燃料在相对密封的小空间里燃烧,爆炸危险性更大。这种危险几乎危

及工业的继续发展, 因此火管锅炉被逐渐淘汰。

19 世纪中叶, 出现了水管锅炉。锅炉受热面是锅壳外的水管, 取代了锅壳本身和锅壳内的火筒、火管。锅炉的受热面积和蒸汽压力的增加不再受到锅壳直径的限制, 有利于提高锅炉蒸发量和蒸汽压力。这种锅炉中的圆筒形锅壳遂改名为锅筒, 后发展为汽包。初期的水管锅炉只用直水管, 直水管锅炉的压力和容量都受到限制。图 2-3 为水管锅炉。

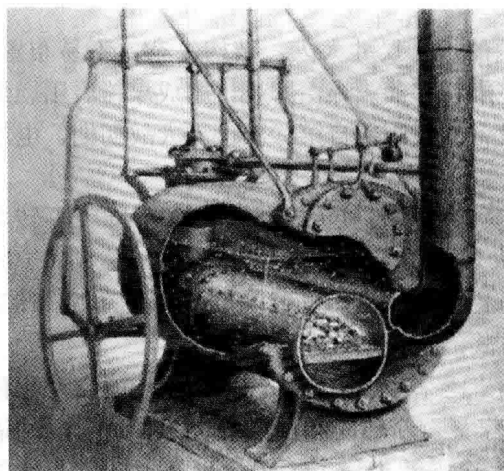


图 2-2 早期的火管锅炉

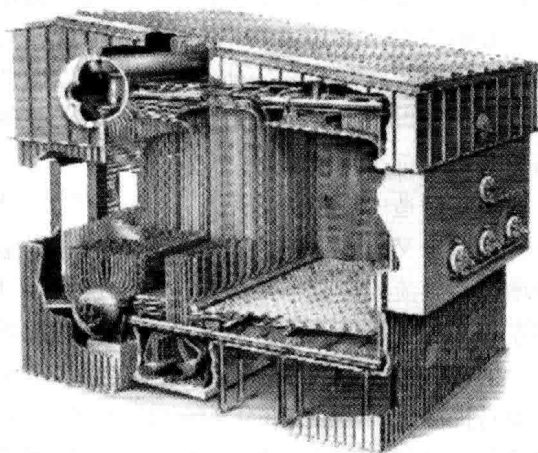


图 2-3 水管锅炉

20 世纪初期, 汽轮机开始发展, 它要求配以容量和蒸汽参数较高的锅炉。直水管锅炉已不能满足要求。随着制造工艺和水处理技术的发展, 出现了弯水管式锅炉。开始是采用多锅筒式锅炉, 随着水冷壁、过热器和省煤器的应用, 以及锅筒内部汽、水分离元件的改进, 锅筒数目逐渐减少, 这样既节约了金属, 又有利于提高锅炉的压力、温度、容量和效率。

以前的火筒锅炉、火管锅炉和水管锅炉都属于自然循环锅炉, 水汽在上升、下降管路中因受热情况不同, 造成密度差而产生自然流动。在发展自然循环锅炉的同时, 从 20 世纪 30 年代开始应用直流锅炉, 40 年代开始应用控制循环锅炉。

控制循环锅炉又称强制循环锅炉, 它是在自然循环锅炉的基础上发展起来的。在下降管系统内加装循环泵, 以加强蒸发受热面的水循环。直流锅炉中没有汽包, 给水由给水泵送入省煤器, 经水冷壁和过热器等受热面, 变成过热蒸汽送往汽轮机, 各部分流动阻力全由给水泵来克服。

第二次世界大战以后, 这两种形式的锅炉得到较快发展, 因为当时发电机组要求高温高压和大容量。发展这两种锅炉的目的是缩小或不用汽包, 可以采用小直径管子作受热面, 以及比较自由地布置受热面。随着自动控制和水处理技术的进步, 这两种锅炉渐趋成熟。在超临界压力时, 直流锅炉是唯一可以采用的一种锅炉。20 世纪 70 年代投产的 27MPa 压力配 1300MW 发电机组仍然是目前世界上最大的单台容量机组, 为双轴机组, 共有 9 台, 均在美国。单轴机组最大容量为 1200MW, 全世界仅有 1 台, 在俄罗斯投运。后来又发展了由控制循环锅炉和直流锅炉结合而成的复合循环锅炉。

在锅炉的发展过程中, 燃料种类对炉膛和燃烧设备有很大的影响。因此, 不但要求发展各种炉型来适应不同燃料的燃烧特点, 而且还要提高燃烧效率以节约能源。此外, 炉膛和燃