



普通高等教育“十二五”规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

能源动力类专业

现代发电厂概论

(第三版)

文 锋 李长云 主 编
史月涛 李艳红 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书以 300MW 和 600MW 汽轮发电机组为基础,系统地介绍了发电厂的生产过程和锅炉、汽轮机、发电机、变压器及各种变配电装置等主要生产设备的基本结构、工作原理和性能参数,并简单介绍了电气二次控制及生产安全管理的相关内容。

本书共十二章,主要内容有电力生产概述、燃料和锅炉热平衡、锅炉设备、汽轮机本体结构及系统、汽轮机辅助设备及系统、同步发电机、电力变压器、发电厂变配电装置、发电厂电气控制、单元机组集控运行、发电厂经济与管理 and 新能源发电技术。

本书可作为高等学校本科电气工程及其自动化、热能与动力工程类专业及高职高专电力技术类相关专业的实习教材,也可作为火电厂相关人员的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

现代发电厂概论/文锋,李长云主编.—3版.—北京:中国电力出版社,2014.2

普通高等教育“十二五”规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-5041-0

I. ①现… II. ①文… ②李… III. ①发电厂—高等学校—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 240189 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)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 9 月第一版

2014 年 2 月第三版 2014 年 2 月北京第十次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22.25 印张 542 千字

定价 39.80 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

此次修订的着眼点是,结合电力系统最新进展,补充最新的统计数据,对火力发电厂中的关键部件——锅炉、汽轮机、发电机及配电装置部分内容进行增补,同时,考虑到可再生能源在电力系统中的比重呈增大趋势,补充了新能源发电的部分内容。新增内容主要有:

(1) 汽轮机的辅助系统中,结合现场机组的最新应用情况,增加了目前世界上最先进的单体式除氧器的基本工作原理与基本结构;对冷却水源受限制的发电厂,直接空冷凝汽器具有突出的优点,因而补充了直接空冷系统和间接空冷系统的原理与应用。

(2) 发电机部分,补充了 1000MW 汽轮发电机的主要参数、结构及发电机的异常和事故运行的常见现象与处理方法。对发电厂高压配电装置,增加了 KW5 型空气断路器的灭弧室结构及电弧熄灭过程的介绍。新增了 500kV 断路器、隔离开关的控制回路和工作原理的介绍,便于和现场进行结合。

(3) 增加了新能源发电技术章节,对生物质能发电、太阳能热发电、太阳能光发电及风力发电系统的主要工作原理、结构部件进行了简明讲解。

本书以 600、1000MW 大容量、高参数的火力发电机组为基础进行讲解,便于电厂生产人员及电力系统相关专业学生对发电厂生产过程和主要生产设备的结构、工作原理及性能参数有一个系统全面的了解;以图形和文字对照的方式对火电厂主要生产设备进行简明概要的介绍,而避开详细的专业理论分析;每章后附有复习思考题,便于读者结合实物进行自学参考。

本书由山东大学文锋教授和齐鲁工业大学李长云主编,文锋编写了第一、八章,山东大学王乃华编写了第二、三章,山东大学史月涛编写了第四、五章和第十二章的部分内容,齐鲁工业大学臧家义编写了第六章,山东大学侯梅毅编写了第七章,李长云编写了第九、十一章和第十二章的部分内容,山东建筑大学李艳红编写了第十章。本书由山东电力研究院苏文博、郝卫东主审。山东大学孙奉仲教授对本书编写进行了积极指导,华电国际邹县发电厂、华能黄台电厂、华电潍坊发电厂、国电石横发电厂、胜利发电厂、大唐黄岛发电厂及山东电力咨询院等单位相关技术人员提供了有效的参考资料和有益的建议,对他们的大力支持,在此表示衷心感谢。

编者

2014 年 1 月



第二版前言

本书是根据高等学校电力类教学大纲的要求，为本科电气工程及其自动化、热能与动力工程专业和高职高专电力技术类专业编写的实习教材。随着我国电力工业的快速发展，300、600MW 大容量高参数的火力发电机组已成为国家电网的主力机组，因此电厂生产人员及电力类专业学生需要对发电厂生产过程和主要生产设备的基本结构、工作原理及性能参数有一个系统全面的了解。本书对火电厂主要生产设备以图形和文字对照的方式进行简明概要的介绍，而避开详细的专业理论分析。并在每章后附有复习思考题，便于读者结合实物进行自学参考。

本书由山东大学文锋教授主编并编写了第一、八、十一章，山东大学王乃华任副主编并编写了第二、三章，山东轻工业学院臧家义任副主编并编写了第六、七章，山东大学史月涛编写了第四、五章，山东轻工业学院李长云编写了第九章、山东建筑大学李艳红编写了第十章。本书由山东电力研究院苏文博教授、郝卫东高工主审，山东电力研究院的高级工程师对本书按专业进行了审核，其中锅炉专业由王金枝审核、汽机专业由牛卫东、郁岚审核，热工专业由王贵明审核，电气专业由刘延华、陈玉峰、陈立新、张小勇、曹志伟、姚金霞审核。山东大学孙奉仲教授对本书编写进行了积极的指导。本书在编写中得到了邹县发电厂、黄台发电厂、潍坊发电厂、石横发电厂、胜利发电厂、黄岛发电厂及山东电力咨询院等单位相关技术人员的大力支持，并提供了有效的参考资料和有益的建议，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促和资料收集条件以及编者水平所限，纰漏之处在所难免，恳请读者指正。

编者

2008年3月

目 录

前言

第二版前言

第一章 电力生产概述	1
第一节 电能和电力工业	1
第二节 电能生产过程	2
第三节 火电厂基本生产过程	7
复习思考题	10
第二章 燃料和锅炉热平衡	11
第一节 锅炉燃料	11
第二节 锅炉机组热平衡	17
复习思考题	20
第三章 锅炉设备	22
第一节 锅炉的基本特征	22
第二节 锅炉的本体结构	26
第三节 制粉系统设备	35
第四节 燃烧系统设备	44
第五节 烟风系统设备	50
第六节 锅炉汽水系统设备	52
第七节 锅炉的主要辅助设备	66
复习思考题	80
第四章 汽轮机本体结构及系统	81
第一节 汽轮机概述	81
第二节 汽轮机本体	86
第三节 汽轮机本体系统(汽、水、油系统)	105
复习思考题	115
第五章 汽轮机辅助设备及系统	117
第一节 概述	117
第二节 凝结水系统及设备	118
第三节 给水系统及设备	134
第四节 蒸汽系统及设备	145
第五节 给水泵汽轮机及其系统	154
第六节 汽轮机控制	157

复习思考题	165
第六章 同步发电机	167
第一节 同步发电机概述	167
第二节 同步发电机的构造	172
第三节 发电机的冷却	179
第四节 汽轮发电机的励磁系统	182
第五节 发电机的运行与控制	185
复习思考题	187
第七章 电力变压器	188
第一节 变压器概述	188
第二节 变压器的结构	191
第三节 变压器的运行和管理	197
第四节 其他形式变压器简介	198
复习思考题	200
第八章 发电厂变配电装置	201
第一节 电气主接线	201
第二节 高压开关设备	208
第三节 高压配电装置	219
第四节 厂用电系统	222
第五节 防雷与接地	223
复习思考题	225
第九章 发电厂电气控制	226
第一节 电气二次系统概述	226
第二节 断路器及隔离开关的控制	231
第三节 信号系统	239
第四节 测量及监察系统	241
第五节 操作电源	244
第六节 继电保护与自动装置	247
复习思考题	251
第十章 单元机组集控运行	252
第一节 单元机组的启停	252
第二节 单元机组的运行调整	268
第三节 单元机组的控制调节	274
第四节 单元机组的局部顺序控制	279
第五节 炉膛安全监控系统	283
第六节 火电厂计算机监控系统应用分析	288
第七节 AVC 在电厂中的应用	292

复习思考题.....	293
第十一章 发电厂经济与管理简介	295
第一节 发电厂的技术经济指标.....	295
第二节 电能质量与生产管理.....	296
第三节 发电厂安全运行与经济管理.....	299
复习思考题.....	302
第十二章 新能源发电技术	303
第一节 概述.....	303
第二节 生物质能发电.....	303
第三节 太阳能热发电.....	321
第四节 太阳能光发电.....	329
第五节 风力发电.....	335
第六节 其他能源发电简介.....	342
复习思考题.....	345
参考文献	346

第一章 电力生产概述

在现代社会的生产和人们的日常生活中,电能已被广泛应用于各个领域,尽管自然界中有各种形式的能源,但电能已成为使用最方便、最实用的一种能源。可以想象,如果没有了电能,现代文明社会将不复存在。

本章主要介绍电能及生产过程。

第一节 电能和电力工业

自然界中能源可分为两类:一次能源和二次能源。所谓一次能源,是指自然界中现成存在的可直接利用的能源,如煤、石油、天然气、风能、水能、太阳能、地热能、原子核能等能源;所谓二次能源,是指由一次能源加工转换成的能源,如电能、燃油(汽油、柴油等)、氢能、火药等。本书仅对电能进行讨论。

一、电能的特点

电能与其他形式的能源相比具有如下特点:

(1) 便于生产和输送。生产电能的一次能源广泛,可由煤、石油、核能、风能、水能等多种能源转换而成,并便于大规模生产。电能输送简单,便于远距离传输和分配。

(2) 便于转换和控制。电能可方便地转换成其他形式的能,如机械能、热能、光能、声能、化学能及粒子的动能等,同时使用方便,易于实现有效而精确的控制,被称为“最方便的能源”。

(3) 效率高。它可取代其他形式的能源,如用电动机代替柴油机、用电气机车代替蒸汽机车、用电炉代替其他加热炉等,可提高效率 20%~50%,被称为“节能的能源”。

(4) 无气体和噪声污染。如用电瓶车代替汽车、柴油车、蒸汽车等,成为“无公害车”,被称为“无污染的能源”。

二、电力工业及其发展

1752 年 7 月,美国印刷工人本杰明·富兰克林(1706—1790),冒着生命危险,在一个雷雨交加的荒野上,利用风筝将闪电引到地面,点燃了酒精,破除了人们对“天火”的迷信,打开了近代电学研究的大门。此后,经库仑、法拉第、麦克斯韦、爱迪生等许多科学家的努力,终于使“若神若鬼”的电成为人类驯服的动力。

1882 年,美国发明家爱迪生在纽约建立了世界上第一个发电厂,通过三线直流 220/110V 输电线路向不同用户的 400 盏 83W 白炽灯供电,这是世界上最早的电力系统。同年,法国科学家德善普勒进行高电压长距离输电试验,用 1500~2000V 电压,通过 57km 电话线路,从米斯巴赫煤矿将电送到慕尼黑,点亮了国际博览会上的电灯。

1882 年,英国工程师立德尔在上海建立了中国第一个电气公司,安装了 100V 直流发电机。

1885 年,威斯汀豪斯公司安装了第一个试验交流系统。

1890 年，美国的第一条单相输电线路投入运行，把水力发电厂（简称水电厂）的电力送到 20km 以外的城镇用户。

1891 年，在德国劳芬电厂安装了世界第一台三相交流发电机，建成第一条三相交流输电线路。

据统计，从 1920 年以来，世界上发电设备容量和年发电量一直以大约 10 年增加 1 倍的速度发展。电压等级，从 110kV 到 330、500kV 甚至 750kV 以上的超高压电力网及 1000kV 的特高压电力网已取得运行经验。现在世界上已建成了跨越几千公里、贯穿几个国家的巨大电力系统。

我国的动力资源非常丰富，水力资源居世界第一位，而煤、石油、天然气、地热等资源也十分丰富。但是，直到新中国成立前夕，全国发电机装机容量仅有 1849MW，年发电量为 43 亿 kW·h，居世界第 25 位，人均占有年发电量仅为 9.1kW·h。新中国成立后，我国电力工业发展迅速；至 1998 年底，在近半个世纪的时间里，装机容量已达 2.7 亿 kW，是 1949 年的 146 倍，年发电量达 11 600 亿 kW·h，居世界第 2 位，人均占有年发电量为 966kW·h，增长了 100 多倍；到 2006 年底，装机容量则突破了 6 亿 kW，年发电量达到了 28 344 亿 kW·h，人均占有年发电量为 2169kW·h；截至 2011 年底，装机容量为 10.63 亿 kW，年发电量为 47 300 亿 kW·h，跃居世界第一。

我国发电装机容量和年发电量的发展情况见表 1-1。

表 1-1 我国发电装机容量和年发电量的发展情况

时间 (年)	总装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)	时间 (年)	总装机容量 (MW)	年发电量 (亿 kW·h)
1949	1849	43.1	1998	270 000	11 600
1960	111 918	594.2	2000	319 320	13 685
1970	23 770	1158.6	2002	350 000	16 400
1980	65 869	3006.3	2007	713 290	32 559
1990	137 890	6213.2	2009	874 900	36 506
1992	166 532	7542	2011	1 063 000	47 300

第二节 电能生产过程

电能生产过程实质上是电能的生产、输配和耗用的过程，又常分为发电、输电、变电、配电和用电五个环节。这五个环节连续、同时进行，即构成了完整的电力生产过程。

一、电力系统的构成

电力系统是由发电厂、电力网和电力负荷三部分组成的。发电厂是电力系统的中心环节，它是将其他形式的能源转换为电能的一种工厂。火力发电厂（简称火电厂）由锅炉、汽轮机和发电机构成；水力发电厂由水库、水轮机、发电机构成。电力网由输（配）电线路和变电所组成。电力负荷就是电力用户。

近 20 年来，我国电力工业取得了快速发展，已建成了多个以 300MW 和 600MW 大型机组为主力的现代发电厂和以 500kV 超高压输电线路为主的跨省大型电力系统，全国性的

大电力系统已经形成。构成大电力系统在技术上和经济上有很大的优越性：①可以充分开发边远地区的动力资源，将电能远距离送往负荷中心；②使不同地区间的电能互相调剂，发电机组互为备用；③有效地进行水电、火电的调配，更合理地利用能源，取得更好的社会、经济效益；④能充分利用地域和时差的不同进行补偿调节，发挥错峰效益；⑤大电网能承受更大的冲击负荷，保持系统的稳定运行。

二、常规发电厂简介

发电厂是将各种一次能源转变成电能的工厂。按一次能源的不同，发电厂可分为火力发电厂（以煤、石油和天然气为燃料）、水力发电厂（以水的位能作动力）、原子（核）能发电厂以及风力发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂、潮汐发电厂等。目前我国以火力发电厂为主，其发电量占全国总发电量的70%以上，多处大型水力发电厂正在加紧建设中，核电厂的建设也已取得了重大成绩。下面仅对在国民经济中占重要地位的火电厂、水电厂和核电厂的基本状况进行简要的介绍。

（一）火力发电厂

以煤、石油或天然气作为燃料的发电厂统称为火电厂。

1. 火电厂的分类

（1）按燃料分类：①燃煤发电厂，即以煤作为燃料的发电厂；②燃油发电厂，即以石油（实际是提取汽油、煤油、柴油后的渣油）为燃料的发电厂；③燃气发电厂，即以天然气、煤气等可燃气体为燃料的发电厂；④余热发电厂，即用工业企业的各种余热进行发电的发电厂。此外，还有利用垃圾及工业废料作燃料的发电厂。

（2）按原动机分类：凝汽式汽轮机发电厂、燃汽轮机发电厂、内燃机发电厂和蒸汽—燃汽轮机发电厂等。

（3）按供出能源分类：①凝汽式发电厂，即只向外供应电能的电厂，其效率低，只有30%~40%；②热电厂，即同时向外供应电能和热能的电厂，其效率高，一般为60%~70%。

（4）按发电厂总装机容量的多少分类：①小容量发电厂，其装机总容量在100MW以下的发电厂；②中容量发电厂，其装机总容量在100~250MW范围内的发电厂；③大中容量发电厂，其装机总容量在250~600MW范围内的发电厂；④大容量发电厂，其装机总容量在600~1000MW范围内的发电厂；⑤特大容量发电厂，其装机容量在1000MW及以上的发电厂。

（5）按蒸汽压力和温度分类：①中低压发电厂，其蒸汽压力（绝对）为3.92MPa（40kgf/cm²）、温度为450℃的发电厂，单机功率小于25MW；②高压发电厂，其蒸汽压力一般为9.9MPa（101kgf/cm²）、温度为540℃的发电厂，单机功率小于100MW；③超高压发电厂，其蒸汽压力一般为13.83MPa（141kgf/cm²）、温度为540/540℃的发电厂，单机功率小于200MW；④亚临界压力发电厂，其蒸汽压力一般为16.77MPa（171kgf/cm²）、温度为540/540℃的发电厂，单机功率为300~1000MW；⑤超临界压力发电厂，其蒸汽压力大于22.11MPa（225.6kgf/cm²）、温度为550/550℃的发电厂，机组功率为600MW及以上；⑥超超临界压力发电厂，其蒸汽压力大于31MPa（316kgf/cm²）、温度为600/600℃，机组功率为1000MW以上。

（6）按供电范围分类：①区域性发电厂，在电网内运行，承担一定区域供电的大中型发电厂；②孤立发电厂，是不并入电网内，单独运行的发电厂；③自备发电厂，由大型企业自己建造，主要供本单位用电的发电厂（一般也与电网相连）。

2. 火电厂的生产流程及特点

火电厂的种类虽很多,但从能量转换的观点分析,其生产过程却是基本相同的,其基本生产流程如下:

燃料的化学能 $\xrightarrow{\text{锅炉}}$ 高温高压水蒸气热能 $\xrightarrow{\text{汽轮机}}$ 机械能 $\xrightarrow{\text{发电机}}$ 电能 $\xrightarrow{\text{变压器}}$ 电力系统。

与水电厂和其他类型的电厂相比,火电厂有如下特点:

- (1) 火电厂布局灵活,装机容量的大小可按需要决定。
- (2) 火电厂建造工期短,一般为水电厂的一半甚至更短;一次性建造投资少,仅为水电厂的一半左右。
- (3) 火电厂耗煤量大,目前发电用煤约占全国煤炭总产量的 25% 左右,加上运煤费用和大量用水,其生产成本比水力发电要高出 3~4 倍。
- (4) 火电厂动力设备多,发电机组控制操作复杂,厂用电量和运行人员都多于水电厂,运行费用高。
- (5) 汽轮机开、停机过程时间长,耗资大,不宜作为调峰电源用。
- (6) 火电厂对空气和环境的污染大。

(二) 水力发电厂

水力发电厂是利用自然界的江河湖泊的水所蕴藏的能量(位能)转换成电能的发电厂。因为水的能量与其流量和落差(水头)成正比,所以利用水能发电的关键是集中大量的水和造成大的水位落差。我国是世界上水资源最丰富的国家,蕴藏量为 6.76 亿 kW。长江三峡水电站,位于葛洲坝水电站上游约 40km 处,总库容为 393 亿 m^3 ,装机容量为 $32 \times 70 \text{ 万 kW} + 2 \times 5 \text{ 万 kW} = 2250 \text{ 万 kW}$,远远超过位居世界第二的巴西依泰普水电站(位于南美洲巴西边界的巴拉那河中游,总库容 290 亿 m^3 ,装机容量为 $20 \times 70 \text{ 万 kW} = 1400 \text{ 万 kW}$)。

1. 水电站的类型

水电站按取得水头的方式不同可分为堤坝式、引水式和混合式;按运行方式不同可分为无调节、有调节和抽水蓄能式。

(1) 堤坝式水电站。该水电站在河流中落差较大的适宜地段拦河建坝,形成水库,以提高坝前后的水头。由于水电站厂房的位置不同,又分为坝后式和河床式两种形式。

1) 坝后式水电站。厂房建在坝的后面,水历经坝体内的水轮机管道引入厂房的水轮发电机发电。这种水电站有库容,可按计划调节,更科学、合理地利用水能。其上游水压由坝体承受,适用于水头较高的坝后式水电站。图 1-1 所示为坝后式水电站示意。这是我国最常见的水电站形式,葛洲坝和三峡电站都属于此类。

2) 河床式水电站。水电站的厂房代替一部分坝体,直接承受上游水的压力,水流由上游进入厂房,转动水轮发电机后泄入下游。这种电站无库容,也不需要专门的水轮机管道,又称为径流式水电站,一般建于中、下游平原河段。

(2) 引水式水电站。引水式水电站是将坡降较小的弯曲弧形河段用直线形引水管道将落差集中引入厂房中的水轮发电机发电,其尾水泄入河的下游。这种水电站的特点是具有较长的引水道,如广西红水河天生桥二级水电厂,引入渠道长达 9555m,设计水头 176m。河床式水电站和引水式水电站都是无调节的。

(3) 抽水蓄能式水电站。抽水蓄能式水电站有高位和低位两个水库,安装既可抽水又能发电的可逆式两用机组。在高峰负荷时,机组作为水轮机—发电机组,将高位水库的水放下

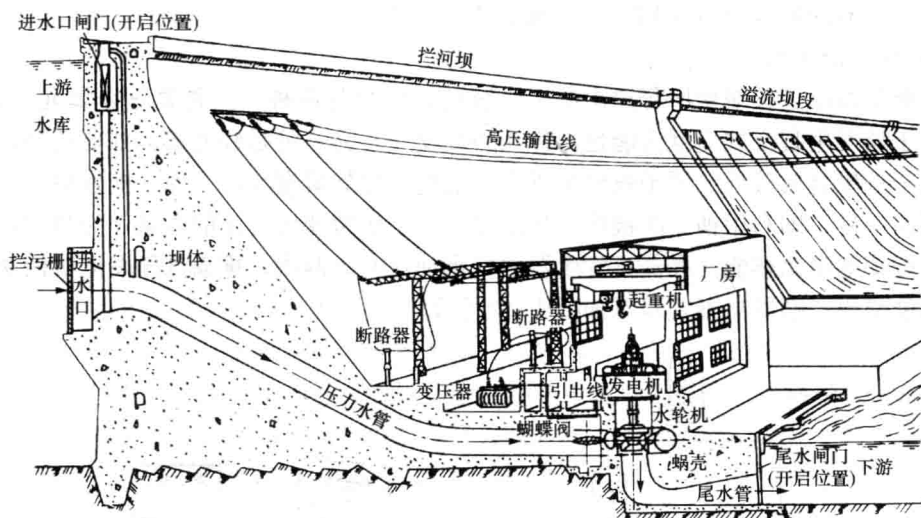


图 1-1 坝后式水电站示意

来通过机组发电，对电力系统供电；当低峰负荷（如深夜不用电）时，可逆机组则作为电动机—水泵机组，用系统的电能将低位水库的水抽入高位水库蓄能；在系统缺电时（枯水期或用电高峰时），高位水库的水再用来发电。近年来，国外电力行业很重视抽水蓄能式水电站的建设，我国在建的广州抽水蓄能式水电站，装机容量为 $4 \times 300\text{MW}$ ；随着泰安抽水蓄能式水电站 3、4 号机组启动并网，山东泰安抽水蓄能式水电站装机容量已达到 $4 \times 250\text{MW}$ 。

2. 水力发电的生产流程及特点

水力发电的方式很多，但其基本生产流程是相同的，即

拦河建坝集中落差的水能 $\xrightarrow{\text{水轮机}}$ 机械能 $\xrightarrow{\text{发电机}}$ 电能 $\xrightarrow{\text{变压器}}$ 电力系统。

水力发电的主要特点如下：

(1) 发电成本低、效率高。水能是可再生能源，不像火电厂的煤和石油。因不用燃料，也省去了开采、运输、加工等多个环节，运行人员少（是同容量火电厂的 20%~25%），厂用电率低，发电成本仅是同容量火电厂的 1/10 或更低。

(2) 可综合利用水资源。除发电外，还有防洪、灌溉、航运、供水、养殖及旅游等多方面综合效益，并且可以因地制宜，将一条河流分为若干河段，分别修建水利枢纽，实行梯级开发。

(3) 运行灵活。由于水电站设备简单，机组启动快（水电机组从静止状态到满负荷运行只需 4~5min，紧急情况可只用 1min，而火电机组则需要数小时），运行操作灵活，易于实现自动化，因此水电站适合于承担系统的调峰、调频和事故备用（容量）的任务。

(4) 水能可储蓄和调节。电能的生产是发、输、用同时完成的，不能大量储存，而水资源则可借助水库进行调节和储蓄，而且可建造抽水蓄能式水电站，扩大利用水的能源。

(5) 水力发电不污染环境。水力发电不产生烟气和废渣，不会造成环境污染。相反，大水库可调节空气的温度和湿度，改善自然生态，往往成为旅游和疗养胜地。

(6) 水电站建设投资大、工期长。修建水电站的施工工程量大，需修建拦河大坝，改建道路，而且常常淹没土地，移民搬迁及远距离输电等，工程量、工期和投资都远比火电厂大。

(7) 水电站建设受自然条件限制。水电站的建设和生产都受河流的地形、水量及季节气

象条件限制，因此发电量也受到水文气象条件的制约。

（三）原子能发电

原子能是指原子核裂变所释放出的巨大核能，可分为两种：一种是重金属元素，如铀、钚等的原子核发生裂变放出巨大能量，称为裂变反应；另一种是轻元素，如氢的同位素氘和氚等的原子核聚合成较重的原子核放出巨大的能量，称为聚变反应。原子能发电厂即核电厂主要采用前一种，即利用铀²³⁵被中子轰击发生原子核裂变所放出的能量作为热源，由水或气体作为冷却剂带出热能，在蒸汽发生器中把水加热变为蒸汽，推动汽轮发电机做功发出电能。压水堆型原子能发电方式示意如图 1-2 所示。

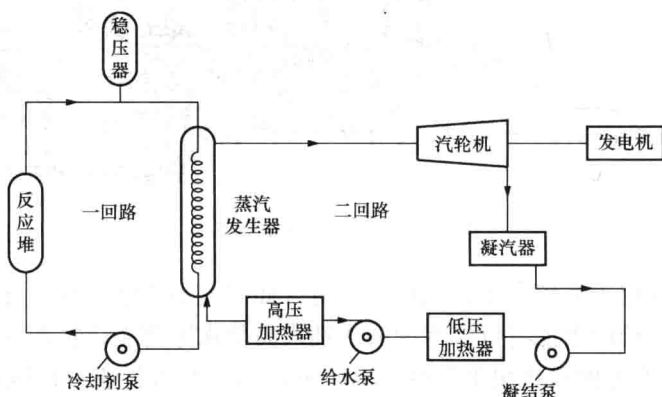


图 1-2 压水堆型原子能发电方式示意

1. 核电厂结构分析

核电厂同火电厂相比，除燃料系统外，其汽水系统、电气系统均大致相同。

核反应堆相当于火电厂的锅炉炉体，主要由核原料、减速剂、冷却系统、控制调节系统、危急保安系统和防护屏蔽层等组成。图 1-2 所示即为美、俄等国家常用的轻水型压力堆核锅炉发电厂示意。我国第一座 300MW 核电厂——秦山核电厂也属于这种类型。

核电厂的主要特点是：没有送风、引风设备和煤粉制备及输送装置，烟囱低而小；汽轮机参数比火电厂机组低得多。但是热污染较为严重，用水量大，对安全可靠性和防护措施的要求极为严格。

2. 核电厂的特点及发展概况

核电厂在近 20 年来得到很快的发展，压水堆、沸水堆、重水堆等技术已经成熟，尽管一次性建造的投资大，但发电成本低（为燃煤电厂的 60% 左右）且无烟尘污染。在放射性方面，由于处理十分严格，对人类无影响。

核能储量远比化学能大，1kg 的²³⁵U 裂变释放的能量，相当于 2700t 标准煤完全燃烧所放出的热量，所以大大减少了燃料的运输工作量。

核电厂的反应堆进行核裂变时不需要空气助燃，因此电厂可设在地下、水下、山洞等地方。

目前，世界上已有 30 个国家和地区的 400 多座核电厂投入运行，其发电量占总发电量的近 16%。我国核电厂建设起步虽较晚，但发展很快，秦山核电厂 310MW 发电机组于 1991 年并网发电；我国目前还有大亚湾、秦山、岭澳等核电站。截至 2010 年 12 月，中国核电装机容量为 3650 万 kW；预计到 2020 年，我国核电装机容量约为 7000 万 kW，核电比

重占电力总容量的 4.6%；预计到 2030 年，我国核电装机容量将达到 2 亿万 kW，核电比重将占电力总容量的 10%；预计到 2050 年，我国核电装机容量约为 4 亿 kW，核电比重约占电力总容量的 16%。

第三节 火电厂基本生产过程

我国火力发电厂所使用的燃料主要是煤，且主力电厂是凝汽式发电厂。下面就以煤粉炉、凝汽式火电厂为例，介绍火力发电厂的基本生产过程。

火力发电厂的生产过程概括地说是把燃料（煤）中含有的化学能转变为电能的过程。整个生产过程可分为三个阶段：①燃料的化学能在锅炉中转变为热能，加热锅炉中的水使之变为蒸汽，称为燃烧系统；②锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，推动汽轮机旋转，将热能转变为机械能，称为汽水系统；③由汽轮机旋转的机械能带动发电机发电，把机械能变为电能，称为电气系统。整个电能生产过程如图 1-3 所示。

一、燃烧系统

燃烧系统由输煤、磨煤、燃烧、风烟、灰渣等环节组成，其流程示意如图 1-4 所示。

(1) 输煤。火电厂的用煤量是很大的，一座装机容量为 $4 \times 300\text{MW}$ 的现代火力发电厂，标准煤耗率按 $360\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 计，每天需用标准煤（每千克煤产生 $29\,270\text{kJ}$ ，即 7000kcal 热量） $360 \times 1200 \times 24 \times 10^{-3} = 10\,368\text{t}$ 。因为电厂燃煤多为劣质煤，且中、小汽轮发电机组的标准煤耗率为 $400 \sim 500\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，所以用煤量会更大。据统计，我国用于发电的煤约占总产量的 $1/4$ ，主要靠铁路运输，约占铁路全部运输量的 40%。为保证电厂安全生产，一般要求电厂储备 10 天以上的用煤量。

(2) 磨煤。用火车、汽车或轮船等将煤运至电厂的储煤场后，经初步筛选处理，用输煤皮带送到锅炉间的原煤仓。煤从原煤仓落入煤斗，由给煤机送入磨煤机磨成煤粉，经空气预热器来的一次风烘干并带至粗粉分离器。粗粉分离器将不合格的粗粉分离并送回磨煤机再磨制，合格的细煤粉被一次风带入旋风分离器，使煤粉与空气分离后进入煤粉仓。

(3) 锅炉与燃烧。煤粉由可调节的给粉机按锅炉需要送入一次风管，同时，由旋风分离器送来的气体（含有约 10% 的未能分离出的细煤粉），由排粉风机提高压头后作为一次风将进入一次风管的煤粉经燃烧器喷入炉膛内燃烧。

目前我国新建电厂以 300MW 及以上机组为主。 300MW 机组的锅炉蒸发量为 1000t/h （亚临界压力），采用强制循环的汽包炉； 600MW 机组的锅炉为 2000t/h 的直流锅炉或者采用强制循环炉。在锅炉的四壁上，均匀分布着四只或八只燃烧器，将煤粉（或燃油、天然气）喷入炉膛，火焰呈旋转状燃烧上升，又称为悬浮燃烧炉。在炉的顶端，有储水、储汽的汽包，内有汽水分离装置，炉膛内壁有彼此紧密排列的水冷壁管，炉膛内的高温火焰将水冷壁管内的水加热成汽水混合物上升进入汽包，而炉外下降管则将汽包中的低温水靠自重下降至水联箱与炉内水冷壁管接通，靠炉外冷水下降而炉内水冷壁管中热水自然上升的锅炉称为自然循环汽包炉，而当压力高到 $16.66 \sim 17.64\text{MPa}$ 时，水、汽密度差变小，必须在循环回路中加装循环泵，即称为强制循环锅炉。当压力超过 18.62MPa 时，应采用直流锅炉。

(4) 风烟系统。送风机将冷风送到空气预热器加热，加热后的气体一部分经磨煤机、排粉风机进入炉膛，另一部分经喷燃器外侧套筒直接进入炉膛。炉膛内燃烧形成的高温烟气，

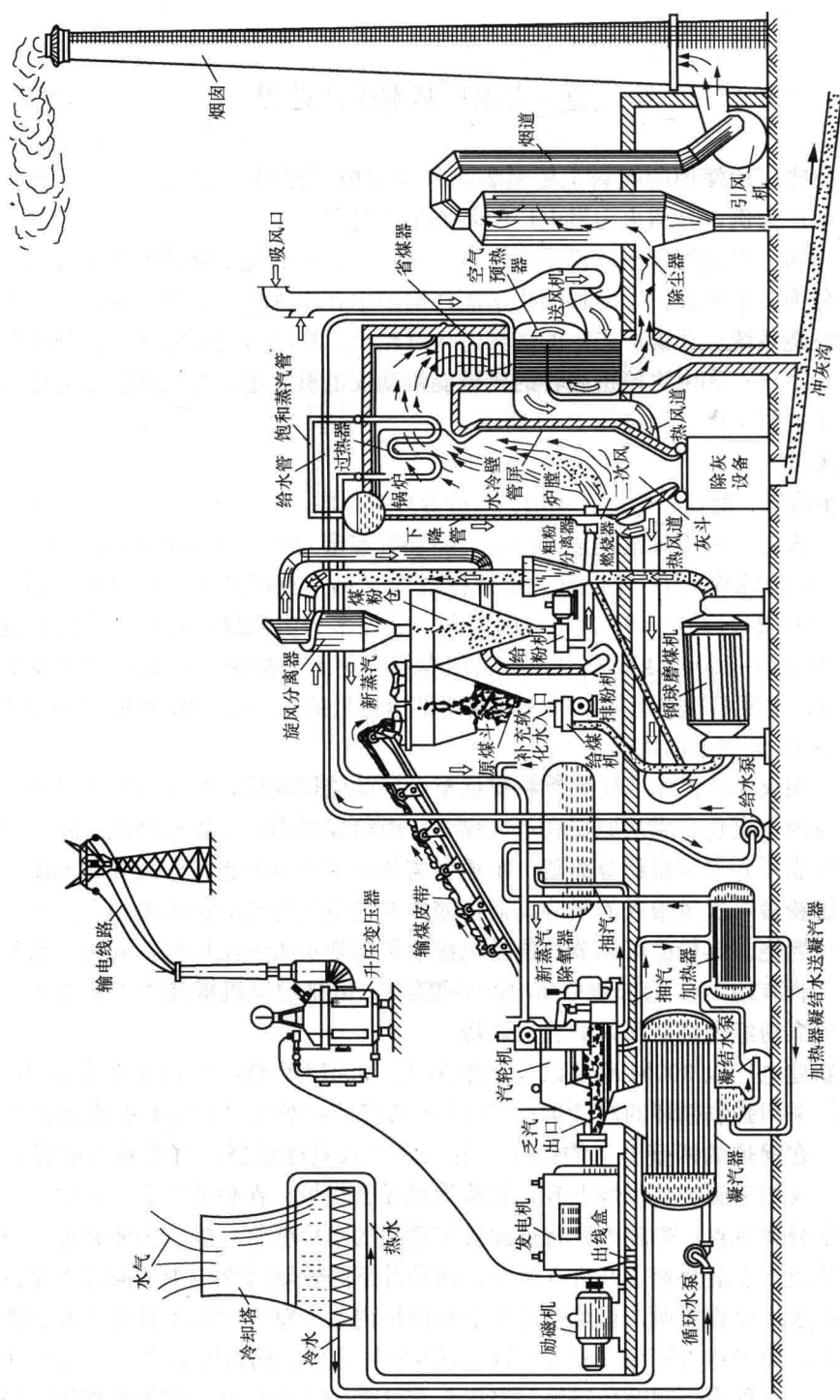


图 1-3 凝汽式火力发电厂电能生产过程示意

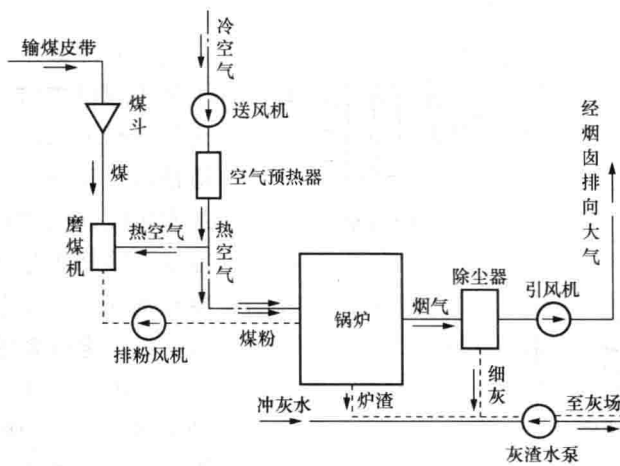


图 1-4 火电厂煤粉炉燃烧系统流程示意

沿烟道经过热器、省煤器、空气预热器逐渐降温，再经除尘器除去 90%~99%（电除尘器可除去 99%）的灰尘，经引风机送入烟囱，排向大气。

（5）灰渣系统。炉膛内煤粉燃烧后生成的小灰粒，被除尘器收集成细灰排入冲灰沟，燃烧中因结焦形成的大块炉渣，下落到锅炉底部的渣斗内，经过碎渣机破碎后也排入冲灰沟，再经灰渣水泵将细灰和碎炉渣经冲灰管道排往灰场（或用汽车将炉渣运走）。

二、汽水系统

火电厂的汽水系统由锅炉、汽轮机、凝汽器、除氧器、加热器等设备及管道构成，包括给水系统、冷却水（循环水）系统和补水系统，如图 1-5 所示。

（1）给水系统。由锅炉产生的过热蒸汽沿主蒸汽管道进入汽轮机，高速流动的蒸汽冲动汽轮机叶片转动，带动发电机旋转产生电能。在汽轮机内做功后的蒸汽，其温度和压力大大降低，最后排入凝汽器并被冷却水冷却凝结成水（称为凝结水），汇集在凝汽器的热水井中。凝结水由凝结水泵打至低压加热器中加热，再经除氧器除氧并继续加热。由除氧器出来的水（即锅炉给水），经给水泵升压和高压加热器加热，最后送入锅炉汽包。在现代大型机组中，一般都从汽轮机的某些中间级抽出做过功的部分蒸汽（称为抽汽），用于加热给水（称为给水回热循环），或把做过一段功的蒸汽从汽轮机某一中间级全部抽出，送到锅炉的再热器中加热后再引入汽轮机的以后几级中继续做功（称为再热循环）。

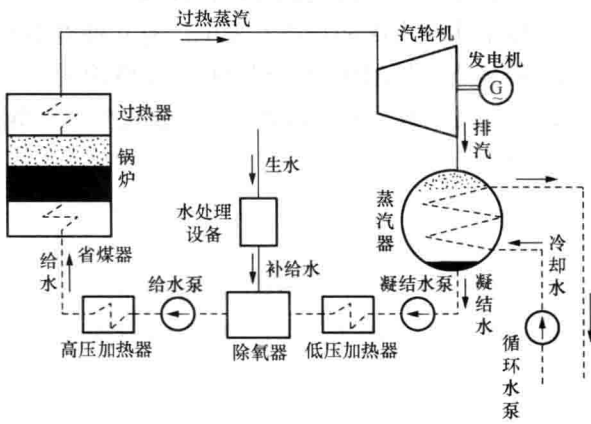


图 1-5 电厂汽水系统流程示意

（2）补水系统。在汽水循环过程中总难免有汽、水泄漏等损失，为维持汽水循环的正常进行，必须不断地向系统补充经过化学处理的软化水，这些补给水一般补入除氧器或凝汽器

中, 这就是补水系统。

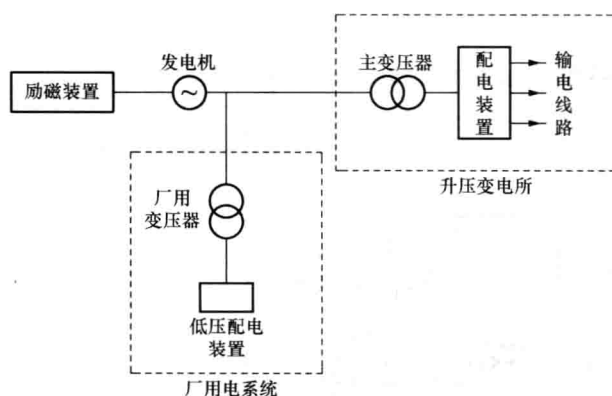


图 1-6 发电厂电气系统示意

(3) 冷却水(循环水)系统。为了将汽轮机中做功后排入凝汽器中的乏汽冷凝成水, 需由循环水泵从冷却塔抽取大量的冷却水送入凝汽器, 冷却水吸收乏汽的热量后再回到冷却塔冷却, 冷却水是循环使用的, 这就是冷却水或循环水系统。

三、电气系统

发电厂的电气系统包括发电机、励磁装置、厂用电系统和升压变电所等, 其示意如图 1-6 所示。

发电机的机端电压和电流随着容量的不同而各不相同, 一般额定电压为 $10\sim 20\text{kV}$, 而额定电流可达 20kA 。发电机发出的电能, 其中一小部分(占发电机容量的 $4\%\sim 8\%$)由厂用变压器降低电压(一般为 6.3kV 和 0.4kV 两个电压等级)后, 经厂用低压配电装置由电缆供给水泵、送风机、磨煤机等各种辅机和电厂照明等设备用电, 称为厂用电(或自用电), 其余大部分电能, 由主变压器升压后, 经高压配电装置、输电线路送入电网。

复习思考题

1. 我国电力工业发展的方针是什么?
2. 电能生产有哪些特点? 发电厂有几种类型?
3. 简述火电厂的生产过程(按三系统说明)。
4. (实习) 本厂的装机容量、年发电量、日煤耗量、除尘率各是多少?