

普通高等教育“十三五”规划教材  
21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 发电厂 电气主系统

第3版

© 许珉 孙丰奇 车仁青 编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

21世纪电力系统及其自动化规划教材

# 发电厂电气主系统

第3版

许珉 孙丰奇 车仁青 编



机械工业出版社

本书着重讲述了发电厂和变电所电气主系统的有关基本理论和设计方法。主要内容有：导体的发热与电动力，主要电气设备的工作原理及选择计算方法，电气主接线、厂用电及设计，配电装置，发电厂与变电所的二次接线，电力变压器和同步发电机的运行理论等。本次修订结合电力系统新技术和新设备的发展，增加了现代大型火电厂和大型水电厂的电气主接线及厂用电接线等内容。本书内容全面，结合工程实际，注重介绍发电厂和变电所电气一次部分设计方法并兼顾全国注册电气工程师执业资格考试相关内容，实用性强，例题、习题丰富，力求概念阐述准确、清楚，公式推演全面，易于讲授，便于自学。每章附有思考题和习题，书后附有常用电气设备的技术参数和课程（毕业）设计题目及选择题和部分计算题参考答案。

本书主要作为普通高等院校电气工程及其自动化及相关专业的本科教材，也可作为远程教育、函授、高职高专教材以及从事发电厂和变电所的电气设计、施工、运行、管理以及相关工程技术人员的参考书。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后下载。

## 图书在版编目（CIP）数据

发电厂电气主系统/许珉，孙丰奇，车仁青编.—3版.—北京：机械工业出版社，2015.12

普通高等教育“十三五”规划教材 21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-51995-9

I. ①发… II. ①许…②孙…③车… III. ①发电厂—电气设备—高等学校—教材②电厂电气系统—高等学校—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第254691号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号 邮政编码100037）

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤

版式设计：霍永明 责任校对：张晓蓉

封面设计：张静 责任印制：乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2016年1月第3版第1次印刷

184mm×260mm·22.75印张·1插页·565千字

标准书号：ISBN 978-7-111-51995-9

定价：45.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
电话服务 网络服务

服务咨询热线：010-88379833 机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-88379649 机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面防伪标均为盗版

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 21世纪电力系统及其自动化规划教材

## 编 委 会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先 (兼秘书)

委 员：(以姓氏笔划排序)

尹项根 毛承雄 车仁飞 文明浩 文劲宇

叶俊杰 刘学东 刘宪林 孙丰奇 许 珉

李 扬 李庚银 吴耀武 陆继明 张 利

张 波 杨国旺 杨宛辉 杨淑英 杨德先

陈 卫 陈少华 罗 毅 房俊龙 易长松

赵书强 赵玉林 赵丽平 娄素华 栗 然

盛四清 常鲜戎 梁振光 韩学山 游志成

熊信银 蔡金锭 魏 萍



# 前 言

本书是针对高等教育本科电气工程及其自动化、电力系统及其自动化专业而编写的，可作为该专业“发电厂电气主系统”或“发电厂电气部分”课程的教学用书。随着电力工业的新发展和教学的需要，教材需要不断地更新与完善，与第2版相比有以下特点：

1) 结合电力系统新技术和新设备的发展，对部分章节的内容进行了充实和较大的修改，增加了大容量发电机组电气主接线、大型火电厂电气主接线及其电气总平面布置图和大型水电厂电气主接线；增加了大机组火电厂厂用电接线；修改了大型水电厂厂用电接线的内容；根据某新建电厂的设计资料修改了燃煤电厂厂用电负荷计算实例；增加了六氟化硫全封闭组合电器选择的内容；增加了电气主接线设计中涉及的发电机、主变压器、厂用变压器中性点接地方式的内容；修改了变压器绝缘老化和暂态温度计算的内容；修改了封闭母线发热计算等内容。

2) 在全面讲述发电厂和变电所电气主系统的基本理论的基础上，为培养学生工程设计能力，注重讲述电气一次设计方法，结合某发电厂电气一次初步设计图样和某变电所完整的电气一次初步设计图样，在相应章节详细介绍了发电厂和变电所电气一次部分的设计方法。可供本科学生课程设计和毕业设计参考，也可供远程教育、函授和高职高专学生课程设计和毕业设计参考。

3) 加强本课程实践性教学环节的内容，新增了课程（毕业）设计任务书，供课程实践性教学环节使用。

4) 修订后的教材内容全面，实用性强，更易于自学。增加修改了部分例题，在习题中增加了单项选择题，修改了常用电气设备的技术参数，并兼顾全国注册电气工程师执业资格考试相关内容和往年部分考题内容。

本书由许珉对全书进行了统稿与修改。其中，第一、五章由车仁青编写；第二、八章由孙丰奇和许珉编写；第三、四、七章由许珉和车仁青编写；第十章由孙丰奇编写；第六、九章，附录A、B、C、D、E由许珉编写。

本书编写过程中参阅了书末所列有关参考文献，以及国家标准、电力行业的运行与设计技术规程和有关设计单位的工程图纸与电气设备生产厂家等的技术资料，在此一并表示衷心的感谢，也感谢作者的研究生提供的帮助。

限于作者水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

作 者

# 目 录

前言	1	第四节 厂(所)用变压器的选择	122
<b>第一章 绪论</b>	<b>1</b>	第五节 厂用电动机的选择和自 启动校验	132
第一节 我国电力工业发展概况	1	思考题与习题	141
第二节 发电厂和变电所的基本类型	5	<b>第五章 导体的发热与电动力</b>	<b>143</b>
第三节 发电厂和变电所电气 设备简述	17	第一节 概述	143
思考题与习题	18	第二节 导体发热和散热的计算	144
<b>第二章 开关电器和互感器的原理</b>	<b>19</b>	第三节 导体的长期发热与载流量	147
第一节 开关电器	19	第四节 导体的短时发热	150
第二节 电流互感器	29	第五节 导体短路的电动力	154
第三节 电压互感器	36	第六节 大电流封闭母线的 发热和电动力	160
第四节 新型互感器简介	44	思考题与习题	165
思考题与习题	45	<b>第六章 电气设备的选择</b>	<b>167</b>
<b>第三章 电气主接线</b>	<b>47</b>	第一节 电气设备选择的一般条件	167
第一节 对电气主接线的基本要求	47	第二节 导体与电缆的选择	171
第二节 电气主接线的基本接线形式	49	第三节 支柱绝缘子与穿墙 套管的选择	183
第三节 发电厂和变电所主 变压器选择	59	第四节 高压断路器和隔离 开关的选择	185
第四节 限制短路电流的方法	64	第五节 高压熔断器的选择	187
第五节 发电厂和变电所的典型 电气主接线	68	第六节 限流电抗器的选择	189
第六节 电气主接线设计	75	第七节 互感器的选择	192
第七节 电气主接线的可靠性计算	94	第八节 六氟化硫全封闭式组合 电器的选择	199
思考题与习题	99	思考题与习题	201
<b>第四章 厂(所)用电</b>	<b>102</b>	<b>第七章 配电装置</b>	<b>204</b>
第一节 概述	102	第一节 概述	204
第二节 厂用电源及厂用电接线的 基本形式	104	第二节 成套配电装置	208
第三节 发电厂和变电所的厂(所)用电 典型接线分析	112	第三节 屋内配电装置	213
		第四节 屋外配电装置	224

第五节 发电机、变压器与配电装置的连接.....	237	第五节 自耦变压器的工作原理与运行.....	286
第六节 发电厂和变电所的电气总平面布置.....	240	第六节 变压器的并列运行.....	295
思考题与习题.....	248	思考题与习题.....	301
<b>第八章 发电厂与变电所的二次接线</b> .....	249	<b>第十章 同步发电机的运行</b> .....	303
第一节 发电厂和变电所的控制方式.....	249	第一节 同步发电机的参数及其额定值.....	303
第二节 电气二次接线图.....	251	第二节 同步发电机的正常运行.....	306
第三节 断路器控制回路.....	257	第三节 同步发电机的特殊运行方式.....	312
第四节 微机保护与监控装置中的断路器控制回路.....	262	第四节 同步发电机的非正常运行方式.....	318
第五节 中央信号.....	266	思考题与习题.....	322
思考题与习题.....	272	<b>附录</b> .....	323
<b>第九章 电力变压器的运行</b> .....	273	附录 A 常用电气设备的技术参数.....	323
第一节 变压器的温升与温度计算.....	273	附录 B 课程(毕业)设计任务书1.....	344
第二节 变压器的绝缘老化.....	279	附录 C 课程(毕业)设计任务书2.....	348
第三节 变压器的正常过负荷.....	280	附录 D 课程(毕业)设计任务书3.....	351
第四节 变压器的事事故过负荷.....	285	附录 E 选择题和部分计算题参考答案.....	355
		<b>参考文献</b> .....	358

# 第一章 绪 论

## 第一节 我国电力工业发展概况

电是能量的一种表现形式，是现代社会中最方便、最洁净和最重要的能源。在工农业生产、交通运输以及城乡人民的日常生活等各个方面，广泛地使用着电能。电能有许多优点：第一，电能便于转换，在电能生产部门，可以方便地将其他形式的能源转换成电能，在电能使用部门，可方便地将电能转换成其他形式的能量。例如，通过电动机将电能转换成机械能，拖动各种机械设备；通过各种灯具转换成光能，满足用户照明需要；通过电炉等设备，转换成热能，满足加热和熔炼需要。第二，电能通过输电线路可以远距离经济输送，供给远方用户使用。第三，电能便于控制，生产部门利用电能控制生产过程，容易实现自动化，能提高产品质量和企业的经济效益。第四，电能是洁净能源，不会对环境造成污染。

自从1882年有电力以来至1949年，经过67年发展，我国装机总容量只达到185万kW，年发电量43亿kW·h，分别居世界第21位和第25位。新中国成立以后，我国电力工业以世界罕见的速度向前发展。目前，比较完备、先进的电力工业体系已经基本建立，技术装备水平正在逐步提高。除去我国台湾省和港、澳地区外，已经形成华北（北京、天津、山西、河北及内蒙古部分）、东北（东三省及内蒙古部分）、华东（上海、江苏、浙江、安徽）、华中（河南、湖北、湖南、江西）、西北（陕西、甘肃、青海、宁夏）、川渝（四川、重庆）和南方联营（广东、广西、云南、贵州）等7个跨省区电网，以及山东、福建、海南、乌鲁木齐和拉萨5个独立的省级电网。跨省、跨大区电网的全国互联已经在2013年9月实现（台湾除外）。我国目前主要的大型电网公司有：国家电网公司和南方电网公司；主要的大型发电公司有中国华能集团公司（华能国际）、中国华电集团公司（华电国际）、中国大唐集团公司（大唐发电）、中国国电集团公司（国电电力）、国家电力投资集团公司（中国电力投资集团公司与国家核电技术有限公司重组成立）。

从1996年起，我国发电机装机容量和年发电量均居世界第二位，仅次于美国。2005年我国全年发电量24975亿kW·h，全国发电装机容量51718万kW，水电11739万kW。2010年我国全年发电量42278亿kW·h，全国发电装机容量96641万kW，水电21606万kW。2014年我国全年发电量55459亿kW·h，全国发电装机容量136019万kW，水电30183万kW（含抽水蓄能2183万kW）。

经过几十年的建设，我国电力工业的建设与发展在节能减排，绿色环保，大力发展水电，有计划地建设大型火电基地，开发清洁煤发电技术，有重点有步骤地建设核电，优化发电能源结构，开发环保绿色发电能源，发展智能电网和大型联合电力系统等方面取得了重大进展，很多技术水平达到世界先进水平。

### 1. 大力开发水电

水力资源是一种便宜且绿色的用之不竭的可再生能源。我国水能资源丰富，河流水能资



源技术可开发装机容量为 5.4 亿 kW，经济可开发装机容量为 3.95 亿 kW，是世界上水力资源最丰富的国家。至 2010 年我国的水电装机容量约为 21606 万 kW，水电装机容量超过美国居世界第一；2014 年我国水电装机容量 30183 万 kW（含抽水蓄能 2183 万 kW），占全部装机容量的 22.2%。我国水电的发展潜力非常大，水力资源是一种不利用便浪费的资源，现在我国的经济实力雄厚，为大力开发水电奠定了坚实的基础。水力发电不用燃料，成本低，不污染环境。我国水电重点开发了黄河上游、长江中上游、红水河、金沙江、澜沧江中下游和乌江等流域的大型水电站；在一些小河流进行连续梯级开发，因地制宜开发中小型水电站；有选择地开发抽水蓄能水电站，以满足电网的调峰要求。

目前，我国最大也是世界最大的水力发电厂是三峡水力发电厂，共安装 32 台 70 万 kW 水轮发电机组，其中左岸 14 台，右岸 12 台，地下 6 台，另外还有两台 5 万 kW 的厂用电源机组，总装机容量 2250 万 kW，远远超过位居世界第二的巴西伊泰普水电站（共安装 20 台 70 万 kW 水轮发电机组）；溪洛渡水电站是我国第二大，世界第三大，金沙江上最大的一座水电站，安装 18 台单机容量 77 万 kW 的水轮发电机组，总装机 1386 万 kW；向家坝水电站是我国第三大水电站，安装 8 台世界上单机容量最大的 80 万 kW 的巨型水轮发电机组，总装机  $8 \times 80$  万 kW +  $3 \times 45$  万 kW 共 775 万 kW；红水河龙滩水电工程规划总装机容量 630 万 kW，安装 9 台 70 万 kW 的水轮发电机组，年均发电量 187 亿 kW·h，一期建设装机容量 490 万 kW，安装 7 台 70 万 kW 的水轮发电机组；澜沧江糯扎渡水电站是云南境内最大的电站，共安装 9 台单机 65 万 kW 机组，总装机容量 585 万 kW 全部投产，多年平均发电量达 239.12 亿 kW·h。我国最大的抽水蓄能电厂是广州抽水蓄能电厂，装机容量  $8 \times 30$  万 kW。目前我国最大的水轮发电机组容量为 80 万 kW，安装在向家坝水电站。

## 2. 建设大型火电基地

我国有丰富的煤炭资源，截至 2013 年底，我国查明煤炭资源储量 14800 亿 t。在我国的电源结构中，现在火电设备容量约占总装机容量的 70%，由于火电项目建设周期短，建设投资相对较少，我国煤炭的储量又较大，所以在今后一段时期内，火电建设仍然是主要的。尽管我国有丰富的煤炭资源，但煤炭的用途非常广泛，煤炭是工业的粮食，尤其对于化工工业；煤炭也是人们日常生活不可缺少的资源，节约煤炭资源将造福子孙后代。为了节约用煤，提高煤炭的利用效率，我国火电建设的重点是：采用高参数、大容量、高效率、高调节性、节水型，单机容量为 600MW 及以上为主的超临界、超超临界大型机组，建设矿口电厂，建设煤炭基地的电站群，以改变送煤为送电，减轻对运输的压力；鼓励热电联产，以提高能源综合利用率。还有，燃煤电厂是二氧化硫（ $\text{SO}_2$ ）、氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）、二氧化碳（ $\text{CO}_2$ ）和粉尘物等大气污染源之一，产生了大量的雾霾。燃煤产生的  $\text{SO}_2$  将引起酸雨，腐蚀材料，毁坏庄稼；燃煤产生大量  $\text{CO}_2$ ，而  $\text{CO}_2$  将引起温室效应，使全球气候变暖，导致全球气候变化异常，冰山融化，地球陆地变小，威胁人类未来的生存；燃煤产生的  $\text{NO}_x$ ，会破坏臭氧层，造成紫外线对地面生物的强烈辐射，危害生物。所以要注重环境保护，关停效率低、环保不达标的中小火电机组，同时在煤电生产过程中大力开发清洁煤发电技术和采取脱硫措施，以减轻对环境的污染。目前我国燃煤电厂烟气超低排放或“近零排放”技术已经发展的比较成熟，该技术可以将烟尘控制在  $1 \sim 2 \text{mg}/\text{m}^3$ ，氮氧化物控制在  $30 \text{mg}/\text{m}^3$ ，硫氧化物控制在  $25 \text{mg}/\text{m}^3$ ，除尘效率可达 99.9% 以上。“近零排放”技术正在向全国推广，这对改善空气质量、降低大气污染将起重要作用。

2014年我国火电装机容量91569万kW(含煤电82524万kW、气电5567万kW),占全国全部装机容量的67.4%。容量为110万kW的超超临界燃煤凝汽式发电机组是我国最大的燃煤机组,60万kW和100万kW机组已经成为燃煤电厂的主力机型。已建成一批总装机容量在400万kW以上的大型燃煤火电厂,如内蒙古大唐托克托电厂540万kW( $8 \times 60$ 万kW +  $2 \times 30$ 万kW)、浙江国电北仑电厂500万kW( $5 \times 60$ 万kW +  $2 \times 100$ 万kW)、山东华电国际邹县发电厂454万kW( $4 \times 33.5$ 万kW +  $2 \times 60$ 万kW +  $2 \times 100$ 万kW)、河南华能沁北电厂440万kW( $4 \times 60$ 万kW +  $2 \times 100$ 万kW)、浙江国华宁海电厂440万kW( $4 \times 60$ 万kW +  $2 \times 100$ 万kW)、浙江华能玉环电厂400万kW( $4 \times 100$ 万kW,规划 $6 \times 100$ 万kW)等。目前我国最大的火电机组(容量为110万kW),安装在新疆农六师煤电有限公司。

### 3. 积极发展核电

核电是一种可供长期使用的清洁能源。一个1000MW的火电厂一天要燃烧9600t标准煤,一年需要燃烧300万吨标准煤。而相应1000MW的核电厂,一天只需要使用3.3kg的铀-235。煤炭资源是有限的,煤炭的用途又十分广泛,目前核电技术已经成熟、可积极慎重建设核电厂特别是在沿海地区以核电厂替代燃煤火电厂的建设,这样既可节约煤炭又减少了对大气环境的污染。2014年我国核电装机容量1988万kW。我国最大的核电厂是岭澳核电厂,建成4台百万kW机组,装机容量398万kW。秦山核电基地9台机组全部投产发电,总装机容量达到654.6万kW。目前已建成的核电机组23台,已运行在浙江秦山,秦山扩建方家山,广东大亚湾,江苏田湾,福建宁德,福建福清,辽宁红沿河等核电站。在建的核电机组25台,如广西防城港、海南昌江、山东海阳核电站等。山东海阳核电项目是我国规划建设最大核电厂,它位于胶东半岛青岛、烟台、威海三大城市之间,厂址三面环海,总投资是1200多亿。核电项目采用美国西屋公司设计的当今世界上最先进的AP1000三代核电技术。这个技术的特点是运用非能动安全系统,可较大幅度地简化系统,减少设备数量,提高核电站的安全性和经济性。整个项目计划建设8台125万kW机组,总装机容量达到1000万kW。一期工程建设两台125万kW机组,计划于2016年投产。一期工程建成后,年发电量达到175亿kW·h。我国最大的核电机组容量为175万kW,安装在广东台山核电站。

### 4. 加大新能源发电的开发力度

新能源发电是指利用太阳能、风能、地热能、潮汐能及生物质能等绿色能源发电。新能源是可再生能源,在电能的生产过程中不产生或很少排放对环境有害的废气和污染废物。我国新能源资源十分丰富,改变能源消费结构,要加大新能源发电的开发力度,这也是世界各国共同的发展趋势。

太阳能是太阳向宇宙空间发射的辐射能,到达地球表面的太阳能约为 $8.2 \times 10^9$ 万kW,太阳辐射功率密度为 $1000\text{W}/\text{m}^2$ 左右。我国每年接受的太阳辐射能约相当于24000亿t标准煤,若将其千分之一转换为电能,就能满足我国电力用户的用电需求。太阳能是取之不尽,用之不竭的清洁能源。全国陆地太阳能资源理论储量1.86万亿kW。

风力资源也是一种取之不尽,又不会产生任何污染的可再生能源和过程性的能源。在新能源发电中,风力发电在技术上比较成熟,并具备了进行较大规模开发的条件。初步估计,地球上的风能资源约为每年200万亿kW·h,仅1%的地面风力,就能满足全世界对能量的需求。我国风力资源丰富,实际可开发利用的陆地上风能资源储量为2.53亿kW,陆地70m高度平均风功率密度达到 $200\text{W}/\text{m}^2$ 及以上等级的风能资源技术可开发量为50亿kW(风能

丰富区年平均风速在  $6\text{m/s}$  以上, 年平均风功率密度大于  $300\text{W/m}^2$ ,  $3\sim 25\text{m/s}$  风速小时数在  $5000\text{h}$  以上)。目前, 在我国最大风力发电机容量为  $5\text{MW}$ , 风力发电正向大型化发展。大型化的优点是可以降低单位发电量的投资。

垃圾发电与生物质能发电。用城市大量的垃圾发电, 既可充分利用能源, 又可减轻环境的污染。生物质能发电是利用农田秸秆等物质发电, 我国的秸秆数量是非常庞大的, 这样既增加了农民的经济收入, 也避免了焚烧秸秆对大气的污染。

我国新能源发电发展加速, 2013 年并网风电  $7548$  万  $\text{kW}$ ; 并网太阳能发电  $1479$  万  $\text{kW}$ 。2014 年并网风电  $9581$  万  $\text{kW}$ , 并网太阳能发电  $2652$  万  $\text{kW}$ 。

### 5. 发展全国性联合电力网

电力系统越大, 抵抗事故能力越强, 承受冲击负荷的能力越强, 提高了供电可靠性和电能质量。发展联合电力系统, 实现全国联网运行, 有很大的优越性, 很多问题都可以迎刃而解。

建设联合电力网, 将有利于优化电网的电源结构, 有利于实现“西电东送”和“北电南送”。有利于进行电力系统经济调度, 充分利用水能与核能, 实现水电、核电与火电互补, 尽量多发水电和核电, 少发火电, 以减少燃煤消耗, 节约煤炭资源, 从而降低电能成本, 提高运行的经济性。同时还能降低  $\text{CO}_2$ 、烟尘等有害气体的排放, 减轻环境污染。

联合电力网占有很大的地域, 存在时差和季差, 各地区中最大负荷出现时间不同。可以利用时差和季差, 错开高峰用电, 从而减小系统的高峰负荷, 减少系统内的调峰发电机装机容量。另外由于联合电力网内各部分之间的备用容量可以相互支援, 可减少电网的备用容量, 提高发电设备的利用率, 减少联合电力网中发电设备的总容量, 降低电网的建设投资。

联合电力网容量很大, 个别机组的开停甚至故障甩负荷, 对系统的影响将减小, 有利于高效大容量机组的应用, 从而可节约投资, 降低煤耗, 降低成本。

国家电网公司在“十二五”规划中提出, 今后我国将建设连接大型能源基地(大型水电站和火电基地)与主要负荷中心的“三纵三横一环网”特高压骨干网架和 13 项直流输电工程(其中特高压直流 10 项), 形成大规模“西电东送”、“北电南送”的能源配置格局。在“十三五”规划中提出, 到 2020 年, 国家电网将建成“五纵五横”特高压交流骨干网架和 27 条特高压直流输电工程, 形成  $4.5$  亿  $\text{kW}$  的跨区跨省输送能力, 建成以“三华”电网为核心, 通过直流和东北、西北、南方电网互联, 连接各大煤电、水电、核电、可再生能源发电基地和主要负荷中心。即通过建设以特高压电网为骨干网架的统一坚强智能电网, 促进大水电、大煤电、大核电、大型可再生能源发电基地的集约化发展, 实现更大范围内能源资源优化配置(“一特四大”战略)。坚强智能电网是以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强网架为基础, 以通信信息平台为支撑, 具有信息化、自动化、互动化特征, 包含电力系统的发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节, 覆盖所有电压等级, 实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合, 具有坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放和友好互动内涵的现代电网。

1981 年我国建成第一条  $500\text{kV}$ , 全长  $595\text{km}$ , 河南平顶山姚孟电厂—武汉凤凰山的超高压( $35\sim 220\text{kV}$  为高压,  $330\sim 750\text{kV}$  为超高压,  $1000\text{kV}$  及以上为特高压)输电线路, 目前, 除西北电网主网架电压等级为  $330\text{kV}$  外, 其他跨省电网和山东电网已建成  $500\text{kV}$  主网架。全长  $146\text{km}$  的青海官亭—兰州东  $750\text{kV}$  超高压输变电示范工程在 2005 年 10 月投运, 它是世界海拔最高的输变电工程。全长  $654\text{km}$  的晋东南—南阳—荆门  $1000\text{kV}$  特高压交流输变

电示范工程是我国第一条特高压输电线路，也是世界上目前运行电压最高、技术水平最为先进的交流输变电工程。该线路在 2009 年 1 月通电试运行，导线采用  $8 \times \text{LGJ}-500/35$  钢心铝绞线，自然输送功率为 500 万 kW，目前南阳开关站已改建为变电站。1000kV 交流的输送能力是 500kV 交流的 4~5 倍，经济输电距离为 500kV 交流的 3 倍，线路损耗率为 500kV 交流的  $1/4 \sim 1/3$ ，单位走廊宽度的输送容量为 500kV 的 2.5~3.1 倍。已投运的淮南—上海 1000kV 特高压交流输电示范工程全长 656km，输送容量 500 万 kW；浙北—福州 1000kV 特高压交流输变电工程全线双回路架设，全长  $2 \times 603$ km，输送容量 500 万 kW。1990 年我国建成第一条全长 1050km 的葛洲坝—上海  $\pm 500$ kV 超高压直流输电线路，输送容量 120 万 kW。线路全长 1373km。额定容量 500 万 kW 的世界第一条  $\pm 800$ kV 特高压直流（ $\pm 400$ kV， $\pm 500$ kV， $\pm 660$ kV 为超高压， $\pm 800$ kV 及以上为特高压）输电线路（云南楚雄—广东广州）于 2010 年 6 月全部建成投运。线路全长 1907km、额定容量 640 万 kW 的向家坝—上海  $\pm 800$ kV 特高压直流输电线路 2010 年 7 月全部建成投运。2014 年 1 月，哈密南—郑州  $\pm 800$ kV 特高压直流输电工程正式投运，工程起于新疆哈密南天山换流站，止于河南郑州中州换流站，途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南 6 省（区），线路全长 2192km，额定输送功率 800 万 kW。哈密南—郑州  $\pm 800$ kV 特高压直流输电工程是目前世界上输送功率最大、输送距离最长的直流输电工程，是国家实施“疆电外送”战略和西北地区大型火电、风电基地电力打捆送出的首个特高压工程。 $\pm 800$ kV 直流的输送能力是  $\pm 500$ kV 直流的 2.3 倍，经济输电距离为  $\pm 500$ kV 直流的 2.7 倍，线路损耗率为  $\pm 500$ kV 直流的  $2/5$ ，单位走廊宽度的输送容量为  $\pm 500$ kV 直流的 1.6 倍。

## 6. 开发和节约并重

在开发能源的同时，还必须节约能源，提高能源利用效率。在能源开发方面，继续发展热电联产来提高热效率、开发了高效的 100 万 kW 超超临界燃煤发电机组，该机型已经成为火电厂新一代的主力机型（超超临界机组与超临界机组相比，热效率提高 12%，供电煤耗，供电电量 = 总发电电量 - 厂用电量，降低到  $280\text{g}/\text{kW} \cdot \text{h}$  左右），开发了燃气—蒸汽联合循环机组等新技术；彻底退役低效、高耗能、高污染的中小型凝汽式机组（10 万 kW 机组供电煤耗高达  $390\text{g}/\text{kW} \cdot \text{h}$  左右）和超期服役机组，提高火电机组的热效率（关停以下燃煤和油机组：单机容量 5 万 kW 以下的常规火电机组；运行满 20 年、单机 10 万 kW 级以下的常规火电机组；按照设计寿命，服役期满、单机 20 万 kW 以下的各类机组）。在用电方面，牢固树立节约资源的观念，加强电力需求侧管理，通过节能政策引导，淘汰高耗能产业，让人们在生产生活中养成节能意识，提倡低碳生活，人人作为节能减排做贡献，建立资源节约型国民经济体系和资源节约型社会。

## 第二节 发电厂和变电所的基本类型

电能不能大量储存，电能生产的特点是，发电、输电、变电、配电和用电是在同一瞬间完成的，即发电厂生产电能和用户消耗电能是同时完成的。大部分大型发电厂都远离用户，发电厂生产的电能需要经过变压器升压和高压输电线路远距离输送、再经过降压变电所若干次降压后用户才可使用。发电厂、输电线路、变电所、配电线路和用户构成了一个整体——电力系统。



## 一、发电厂的基本类型

发电厂是把各种一次能源，如燃料的化学能、水能、核能、风能、太阳能和其他能源转换成二次能源——电能的工厂。按照发电厂所消耗一次能源的不同，发电厂有：

### 1. 火力发电厂

以煤炭、石油、天然气等为燃料的发电厂称为火力发电厂。燃煤电厂使用的工质是水，水的临界压力是 22.115MPa 和 347.15℃，在这个压力和温度下，水的密度和蒸汽的密度是相同的，这就是水的临界点。一般把锅炉内工质压力低于这个值的称为亚临界锅炉，高于这个压力值的叫超临界锅炉；炉内温度不低于 593℃、炉内蒸汽压力 27MPa 及以上称为超超临界锅炉。在超临界与超超临界状态，水由液态直接变为汽态，即由湿蒸汽直接成为饱和蒸汽、过热蒸汽，超临界与超超临界机组只能采用没有汽包的直流锅炉。

火力发电厂按蒸汽压力和温度的不同分为以下几类：

1) 中低压发电厂：蒸汽压力一般为 3.92MPa、温度为 450℃ 的发电厂，单机功率小于 25MW。

2) 高压发电厂：蒸汽压力一般为 5.88~9.9MPa、温度为 540℃ 的发电厂，单机功率小于 100MW。

3) 超高压发电厂：蒸汽压力一般为 11.77~13.83MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率小于等于 200MW。

4) 亚临界压力发电厂：蒸汽压力一般为 16.77MPa、温度为 540℃/540℃ 的发电厂，单机功率为 300MW 直至 1000MW 不等。

5) 超临界压力发电厂：蒸汽压力大于 22.115MPa、温度为 550℃/550℃ 的发电厂，单机功率为 600MW 及以上。

6) 超超临界压力发电厂，其主蒸汽压力为 27MPa 及以上，主蒸汽和再热蒸汽温度一般在 600℃ 及以上，单机功率为 600MW 及以上。700℃ 超超临界燃煤发电机组是超超临界发电技术发展前沿，且温度越高，热效率越高，煤耗越少，与 600℃ 超超临界发电技术相比，700℃ 超超临界燃煤发电技术的供电效率将提高至 50%，每千瓦时煤耗可再降低 70g 左右，二氧化碳排放减少 14%。

以煤炭、天然气为燃料的火力发电厂的生产过程简介如下：

(1) 凝汽式火电厂 凝汽式火电厂中，煤粉（或石油、天然气等）在锅炉的炉膛里燃烧时将化学能转换成热能，加热锅炉里的软化水产生蒸汽，蒸汽通过管道送到汽轮机，推动汽轮机旋转，将热能转换成机械能。汽轮机带动发电机旋转，再将机械能转换成电能。凝汽式火电厂的生产过程为：

图 1-1 为某 600MW 超超临界机组风烟、制粉系统流程示意图。煤场原煤用斗轮机装到输煤带上输送到锅炉间的原煤斗，再落入给煤机，由给煤机调节煤量，送进磨煤机磨成煤粉，这部分煤粉再进入煤粉分离器将煤粉分成粗细两部分，粗粉返回磨煤机重新磨制，合格的细分煤粉经一次风管道被混合的一次风（经一次风机进入空气预热器加热送到磨煤机的风叫一次热风，而经一次风机直接送到磨煤机的风叫一次冷风）吹进燃烧器，进入锅炉炉膛内燃烧。同时冷空气经送风机进入空气预热器加热为热空气（称为二次风）送到炉膛助燃。锅炉的三大风机包括送风机、引风机和一次风机，它们是火力发电厂的主要辅机之一，

其耗电量约占发电厂发电量的 1.5% ~ 2.5%。600MW 机组有两台送风机，两台引风机，两台一次风机，另有两台密封风机（供给磨煤机密封用空气的风机）。

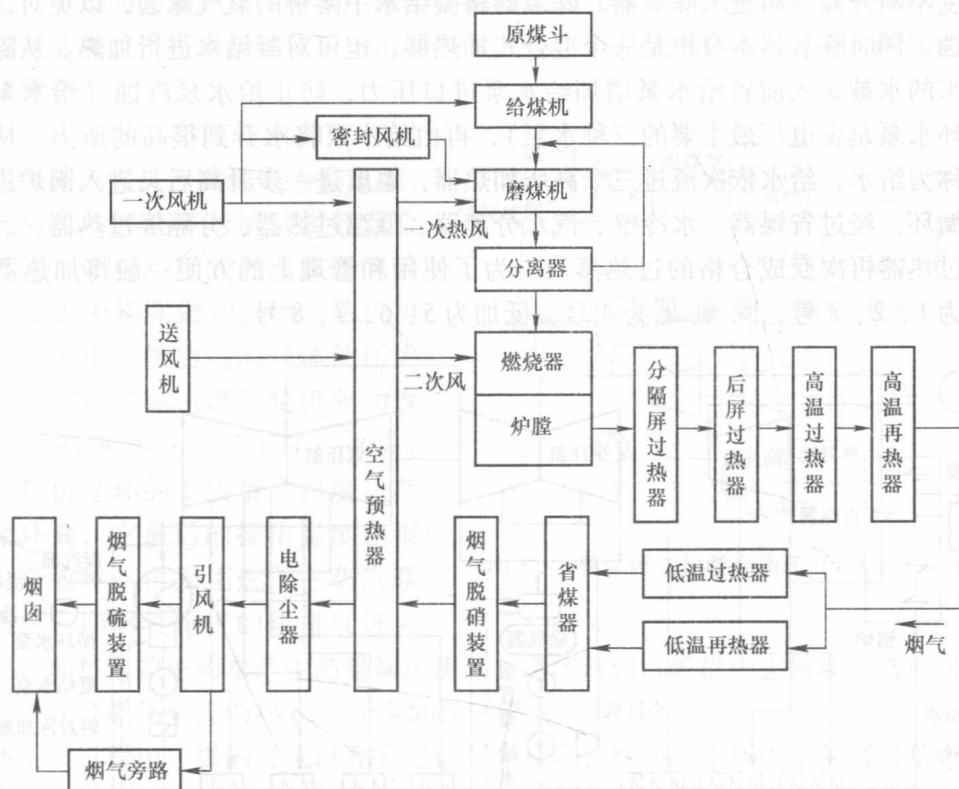


图 1-1 某 600MW 超超临界机组风烟、制粉系统流程示意图

在炉膛内，燃料燃烧放出热量，其热量加热炉膛内四周水冷壁内的软化水，成为蒸汽进入过热器。布置在炉膛上部的分隔屏过热器、后屏过热器和高温过热器主要吸收炉膛辐射热量加热蒸汽，另外它们还依次吸收烟气热量来加热蒸汽。烟气在排出过程中继续经过水平烟道的高温再热器和尾部双烟道内安置的低温再热器、低温过热器、省煤器和空气预热器，把热量传给过热蒸汽、水和空气。尾部烟道底部的低温烟气经脱硝装置脱硝、电除尘器除去烟气中的灰尘、脱硫装置脱硫后，通过引风机从烟囱排入大气。

燃料在炉膛内燃烧后落入锅炉底部的灰渣和除尘器下部排出的细灰，用高压水将其冲到灰渣泵房，经灰渣泵排至储灰场。大机组多采用气力除灰，用空压机在管道中传送煤灰到灰库。

图 1-2 为某 600MW 机组原则性热力系统，该机组采用 3 台高压加热器、1 台除氧器及 4 台低压加热器的 8 级回热系统。来自锅炉（直流锅炉）的过热蒸汽首先在汽轮机高压缸内做功，从高压缸排出后又送入锅炉低温再热器和高温再热器中再加热，加热后的蒸汽又进入中压缸、低压缸继续做功，最后汽轮机的排汽进入凝汽器，并被冷却水冷却（循环水泵从冷水塔抽取大量的冷却水经管道进入凝汽器吸收热量），凝结成水。冷却水将吸收的热量排入冷（凉）水塔冷却后循环使用。为了提高机组的热效率，凝结水并不直接送入锅炉中，而是经过一系列的加热器加热后再进入锅炉。加热器的热源来自汽缸的不同部位抽出的蒸

汽，用它们对加热器中的水进行加热。凝结水集中在凝汽器下部由凝结水泵升压后依次流过轴封冷却器（也称加热器）和4个低压加热器，在那里吸收来自汽轮机低压缸抽汽的热量，凝结水温度不断升高然后进入除氧器，除氧器将凝结水中溶解的氧气除去，以免对设备和管道造成腐蚀。同时除氧器本身也是一个混合式加热器，也可对凝结水进行加热。从除氧器下部水箱出来的水被送入前置给水泵增加给水泵进口压力，防止给水泵汽蚀（给水泵、凝结水泵、循环水泵是发电厂最主要的三种水泵），再由给水泵将水升到很高的压力。从给水泵出来的水称为给水，给水依次流过三个高压加热器，温度进一步升高后又进入锅炉进行下一轮的汽水循环，经过省煤器、水冷壁、汽水分离器、低温过热器、分隔屏过热器、后屏过热器、高温过热器再次变成合格的过热蒸汽。为了使用和管理上的方便一般将加热器进行编号，高加为1、2、3号，除氧器为4号，低加为5、6、7、8号。

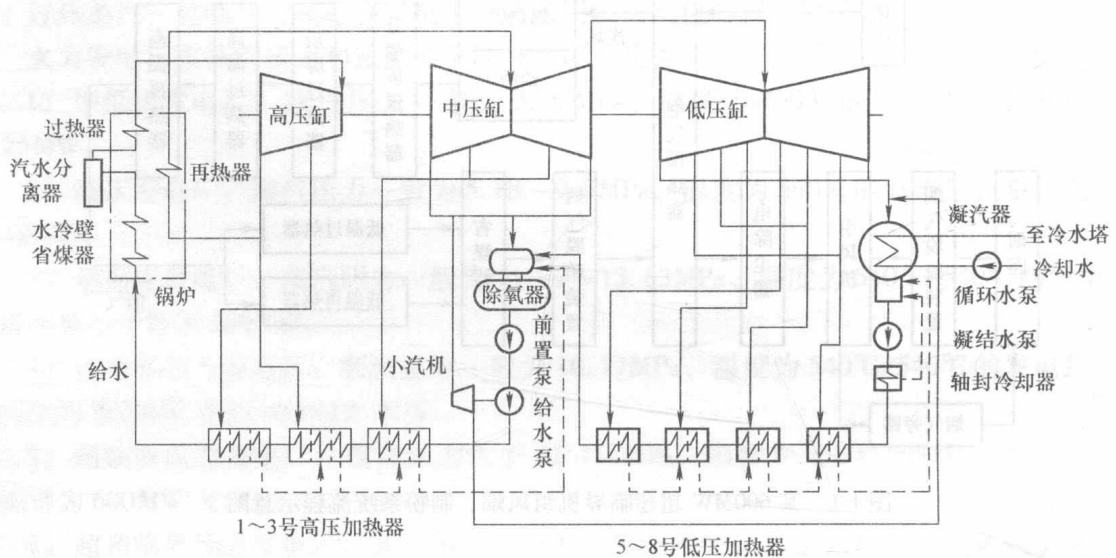


图 1-2 某 600MW 机组原则性热力系统

汽水系统中的蒸汽和凝结水，由于经过许多管道、阀门和设备，难免产生泄漏等各种汽水损失，因此必须不断向系统补充经过化学处理的补充给水，这些补充给水一般都补入除氧器或凝汽器中。

蒸汽在加热器中对凝结水或给水加热过程中不断放出热量而降温凝结成水，这种在加热器内由蒸汽凝结成的水称为疏水。高压加热器疏水逐级自流入除氧器，低压加热器疏水逐级自流入凝汽器。

汽水分离器内装有脱水装置，防止蒸汽带水进入过热器管中，水经连接管进入储水箱再与给水混合后进入省煤器、水冷壁进行再循环或至凝汽器。在启动时或低负荷时，起汽水分离作用，在正常运行时，分离器呈干态运行，只作为一个通道。

由于在凝汽器中，大量的热量被循环水带走，故一般凝汽式火电厂的效率都比较低，即使是现代超超高温高压的凝汽式火电厂，效率也只有40%~50%。

(2) 热电厂 热电厂除了发电以外，还向用户供热。它与凝汽式火力发电厂不同之处主要是从汽轮机中间段抽出一部分做过功的蒸汽供给热用户使用，或经热交换器将水加热后，供给用户热水。这样，可以减少被循环水带走的热量损失，提高总效率。热电厂的总效

率可达到 60% ~ 70%。

(3) 燃气轮机发电厂 燃气轮机发电厂中的燃气轮机与凝汽式火力发电厂的汽轮机工作原理相似, 所不同的是燃气轮机的工质是高温高压的气体而不是蒸汽。这些作为工质的气体可以用清洁煤技术将煤炭转化成的清洁煤气(也可以是天然气等), 进入燃气轮机的燃烧炉中燃烧做功。

由图 1-3 可见, 燃气轮机的工作过程是, 空气被压气机连续地吸入和压缩, 压力升高后流入燃烧室与清洁煤气混合成高温燃气, 燃烧产生的高温高压气体进入燃气轮机中膨胀做功, 燃气轮机再带动发电机发电, 做功后的气体的压力降低排出。这种单纯用燃气轮机驱动发电机的电厂的热效率只有 35% ~ 40%。因为燃气轮机循环的工质最高温度比蒸汽动力循环高, 它最后的排出温度还很高, 为提高效率, 再采用燃气—蒸汽联合循环系统, 即燃气轮机的热排气进入余热锅炉, 加热锅炉中的水产生高温高压蒸汽, 送蒸汽到汽轮机中去做功, 从而带动发电机再次发电。联合循环系统的热效率可达 56% ~ 85%。

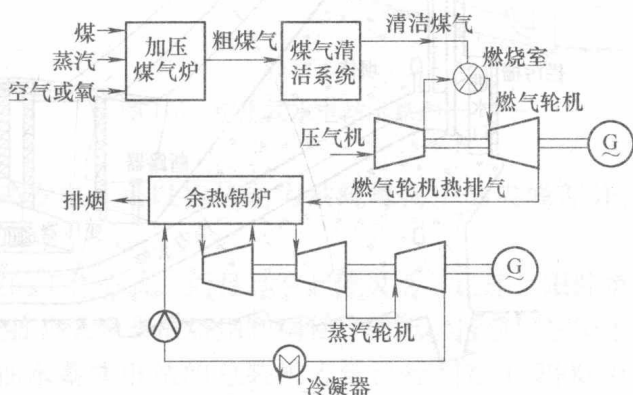


图 1-3 整体煤气化联合循环 (IGCC) 基本流程图

上述生产过程中, 煤的气化过程需要空气和蒸汽, 在联合循环中空气可以从燃气轮机的压气机中抽气供给, 蒸汽可以从汽轮机或锅炉中抽气供给, 这样就把煤的气化与联合循环的主要部件组成一个有机整体, 故称为整体煤气化联合循环。采用清洁煤技术的整体煤气化联合循环 (IGCC) 电站, 对提高发电厂的效率 and 环境保护, 无疑意义是巨大的。

## 2. 水力发电厂

水力发电厂是将水的位能和动能转换成电能的工厂, 也称水电站。根据水利枢纽布置的不同, 水电站的类型可以分为堤坝式、引水式和混合式等。

(1) 堤坝式水电站 由于水的位能和动能是与水流量及水的落差(也称为水头)成正比的, 它直接影响到水电站的总装机容量。在水流量一定的情况下, 要提高水电站的总装机容量必须提高水头。但是许多河流水位的落差沿河流是分散的, 为提高落差就需要在河流的上游修建堤坝蓄水, 提高水头, 进行发电。这种水电站就叫做堤坝式水电站, 通常这类水电站又细分为堤后式和河床式两种。

1) 堤后式水电站 这种水电站的厂房建在坝后, 全部水头的压力由坝体承受, 水库的水由压力水管引入厂房, 推动水轮发电机发电。坝后式水电站适合于高、中水头的场合, 其布置情况如图 1-4 所示。著名的三峡水电站就是采用坝后式的布置方式。

2) 河床式水电站。这种水电站的厂房和挡水坝连成一体, 厂房也起挡水作用。由于厂房修建在河床中, 故称河床式。河床式水电站的水头一般较低, 大都在 20 ~ 30m 以下, 其布置情况如图 1-5 所示。葛洲坝水电站采用的是河床式布置方式。

(2) 引水式水电站 这种水电站建在山区水流湍急的河道上或河床坡度较陡的地段, 由引水渠道提供水头, 一般不需要修建堤坝, 或只修低堰, 适用于水头比较高的情况。其布



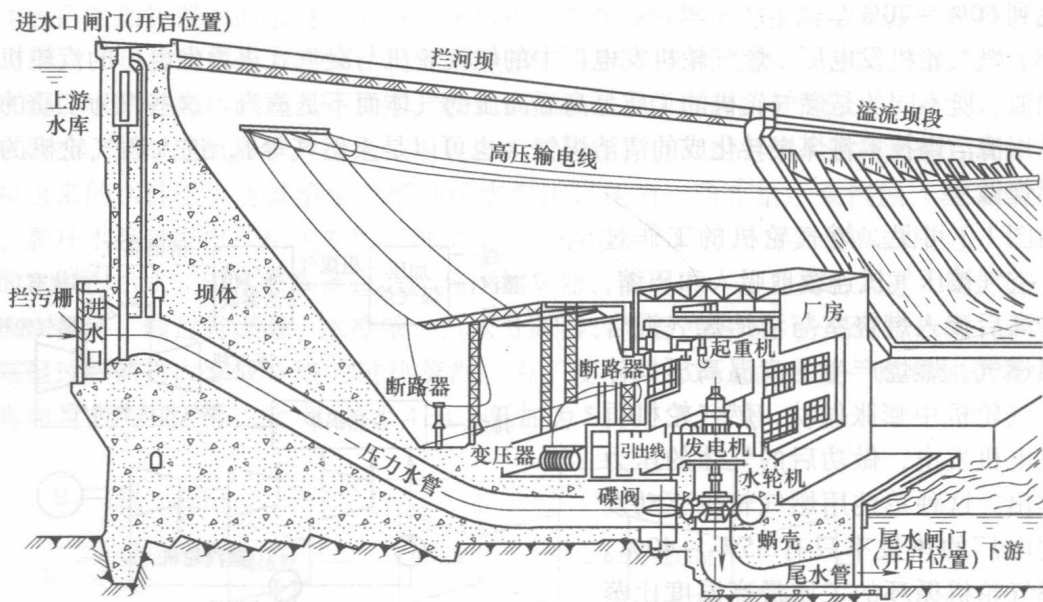


图 1-4 坝后式水电站示意图

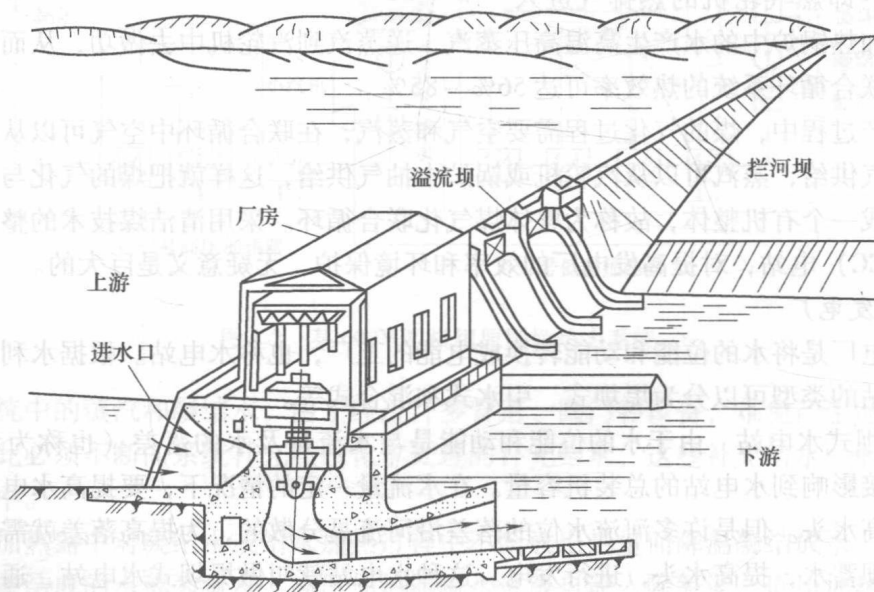


图 1-5 河床式水电站示意图

置情况如图 1-6 所示。

(3) 混合式水电站 这种类型的水电站是在适合开发的河段拦河筑坝，坝上游河段的落差由坝积蓄，而压力引水道集中坝下游河段的落差，水电站的水头是这两部分落差之和。这就是混合开发模式，而由这种集中落差方式修建的水电站称为混合式水电站，它具有堤坝式和引水式两种水电站的特点。

### 3. 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站示意图如图 1-7 所示，它有上水库和下水库两个水库，装设具有“水轮机