

发电厂、变电所电气设备 运行与维护

乌兰 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

发电厂、变电所电气 设备运行与维护

主 编 乌 兰
副主编 李丹洋 卫 翔 包红风
参 编 高聪晋 格日勒

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

发电厂、变电所电气设备运行与维护 / 乌兰主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2017. 2

ISBN 978 - 7 - 5682 - 3692 - 8

I. ①发… II. ①乌… III. ①发电厂-电气设备-运行-高等学校-教材②发电厂-电气设备-维修-高等学校-教材③变电所-电气设备-运行-高等学校-教材④变电所-电气设备-维修-高等学校-教材 IV. ①TM62
②TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 018411 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 16

字 数 / 377 千字

版 次 / 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 52.00 元

责任编辑 / 李志敏

文案编辑 / 李志敏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

前 言

本教材是根据高等院校电气类专业的人才培养方案，以专业对应各岗位群的职责、任务分析为依据，与行业企业结合进行基于工作工程的课程开发与设计，在深入开展课程改革的基础上，编写而成的基于工作过程的教学用书。按照“工学结合、职业导向、能力本位”的理念，实现以就业为导向，以学生岗位能力培养为核心，以真实工作任务为教学实践内容，以真实工作为教学情境的课程开发与设计，充分体现职业性、实践性和开放性的要求。将相关的岗位群所对应的工作过程中的任务分解，结合专业培养目标、职业技能要求，梳理出与本专业内容相关的知识目标、能力目标、素质目标。在教学实施中以岗位真实的工作任务为载体，设计课程教学内容。以工作过程为导向，实施任务驱动、行业标准牵引，理论和实践并进的教学模式。在内容方面，本教材进行了整体的优化，结合学生工作岗位要求，适当降低了理论难度，更注重了学生就业后的岗位应用。

在内容编排上突出“实用、够用”的原则。本教材内容由电力系统的认知、电力变压器的运行与维护、户外高压配电装置的运行与维护、户内配电装置的运行与维护、电气主接线的倒闸操作等5个学习情境，发电厂变电所的认知、中性点运行方式、电弧的燃烧与熄灭、电力变压器的运行与监视、电力变压器的停送电操作、电力变压器运行中的故障分析及处理、电力变压器的检修与试验、出线间隔设备的运行与维护、保护间隔设备的运行与维护、高压开关柜的运行与维护、低压配电屏的运行与维护、电气主接线的运行方式、发电厂变电所电气主接线的倒闸操作等13个项目单元组成。

本教材由乌兰担任主编，李丹洋、卫翔（企业）、包红风担任副主编，格日勒、高聪晋参编。教材具体编写任务如下：乌兰、卫翔编写学习情境一；乌兰、包红风、高聪晋编写学习情境二；乌兰、李丹洋、格日勒编写学习情境三；乌兰、卫翔、包红风编写学习情境四；乌兰、卫翔编写学习情境五。全书由乌兰负责统稿，胡建栋、王华主审。

由于编写人员的水平有限，因此在写作方式和内容上难免有不足之处，希望广大读者不吝赐教，对书中的不足之处给予指正。

目 录

Contents

▶ 学习情境一 电力系统的认知	1
单元一 发电厂、变电所的认知	1
单元二 中性点的运行方式	19
单元三 电弧的燃烧与熄灭	30
▶ 学习情境二 电力变压器运行与维护	42
单元一 电力变压的运行与监视	42
单元二 电力变压器的停送电	56
单元三 电力变压器运行中的故障分析与处理	59
单元四 电力电压器的检修与试验	67
▶ 学习情景三 户外高压配电装置的运行与维护	80
单元一 出线间隔设备的运行与维护	80
任务一 高压断路器的运行与维护	80
任务二 高压隔离开关的运行与维护	93
任务三 熔断器的运行与维护	102
任务四 负荷开关的运行与维护	108
任务五 裸导线的运行与维护	113
任务六 电缆的运行与维护	124
任务七 绝缘子的运行与维护	131
单元二 保护间隔设备的运行与维护	135
任务一 互感器的运行与维护	135
任务二 限流电器的运行与维护	151
任务三 避雷装置的运行与维护	159
任务四 接地装置的运行与维护	170
▶ 学习情境四 户内配电装置的运行与维护	180
单元一 高压开关柜的运行与维护	180
单元二 低压配电屏的运行与维护	200

▶ 学习情境五 电气主接线的倒闸操作 208

 单元一 电气主接线的运行方式 208

 单元二 发电厂、变电所电气主接线的倒闸操作 231

学习情境一

电力系统的认知

单元一 发电厂、变电所的认知

学习目标

- * 了解目前我国电力系统发展情况。
- * 掌握电力系统的重要组成部分。
- * 掌握发电厂和变电所的概念、分类及作用。

重点

- * 电力系统的重要组成部分。
- * 发电厂和变电所的概念、分类及作用。

难点

- * 发电厂和变电所的概念、分类及作用。

一、我国电力工业的发展

(一) 我国电力工业的发展简况

1882年7月26日,上海电气公司在上海成立,安装了一台以蒸汽机带动的直流发电机,并正式发电,从电厂到外滩沿街架线,供给照明用电,这是我国的第一座火电厂。这与世界上第一座火电厂——法国巴黎火车站电厂的建成相距仅7年,与美国的第一座火电

厂——旧金山实验电厂建成相距 3 年，与英国的第一座火电厂——伦敦霍尔蓬电厂同年建成，说明当年我国电力建设和世界强国差距并不大。

从 1882 年 7 月上海第一台发电机组开始发电到 1949 年新中国成立，这 60 多年，经历了辛亥革命、土地革命、抗日战争和解放战争，这时期电力工业发展迟缓，全国发电设备的总装机容量 184.86 万 kW（当时占世界第 21 位），年发电量仅 43.1 亿 kW·h（当时占世界第 25 位），人均年占有发电量不足 10 kW·h。

新中国成立后，电力工业有了很大的发展，尤其是 1978 年以后，改革开放、发展国民经济的正确决策和综合国力的提高，使电力工业取得了突飞猛进、举世瞩目的辉煌成就。到 1995 年末，全国年发电量已达到 10 000 亿 kW·h，仅次于美国而跃居世界第 2 位；全国发电设备总装机容量达 2.1 亿 kW，当时居世界第 3 位。

截至 2013 年底，全国发电装机容量达到 12.5 亿 kW，首次超越美国位居世界第 1 位。从电力生产情况看，全年发电量达到 5.35 万亿 kW·h，同比增长 7.5%。全国火电机组供电标准煤耗 321 g/(kW·h)，提前实现国家节能减排“十二五”规划目标，煤电机组供电标准煤耗继续居世界先进水平。

根据国家能源局公布的数据显示，2015 年风电新增装机容量 3 297 万 kW，新增装机容量再创历史新高。截至 2015 年底，风电累计并网装机容量达到 1.29 亿 kW，占全部发电装机容量的 8.6%。风电发电量 1 863 亿 kW·h，占全部发电量的 3.3%。

1972 年，我国建成了第一条超高压 330 kV 输电线路，从甘肃刘家峡水电厂到陕西关中地区。2005 年 9 月，我国第一个超高压 750 kV 输变电工程（官厅至兰州东）正式投入运行，这是我国电力工业发展史上一个新的里程碑。2006 年 8 月 19 日，我国特高压试验示范工程 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门工程正式奠基。

2014 年 7 月，溪洛渡左岸—浙江金华 ±800 kV 特高压直流输电工程正式投运。该工程在世界上首次实现单回直流工程 800 万 kW 连续运行和 840 万 kW 过负荷输电运行，创造了超大容量直流输电的新纪录。

目前，我国最大的火电机组容量为 110 万 kW（新疆农六师煤电有限公司二期工程），最大的水电机组容量为 80 万 kW（向家坝水电站），最大的核电机组容量为 175 万 kW（台山核电站）；最大的火力发电厂装机容量为 540 万 kW（内蒙古托克托电厂，8×60 万+2×30 万 kW），最大的水力发电厂装机容量为 2 250 万 kW（三峡电厂，32×70 万+2×5 万 kW），最大的核电发电厂装机容量为 651.6 万 kW（秦山一期 30 万 kW，秦山二期 4×65 万 kW，秦山三期 2×72.8 万 kW，方家山核电 2×108 万 kW），最大的抽水蓄能厂装机容量为 240 万 kW（广东抽水蓄能电厂，8×30 万 kW）。

为国民经济各部门和人民生活供给充足、可靠、优质、廉价的电能，是电力系统的基本任务。节能减排，“一特四大”，实现高度自动化，西电东送，南北互供，发展联合电力系统，是我国电力工业的发展方向，也是一项全局性的庞大系统工程。要实现这一目标，还有很多事要做。

（二）特高压发展前景

2016 年 8 月 16 日，内蒙古通辽扎鲁特旗—山东潍坊青州 ±800 千伏特高压直流工程获得核准，8 月 25 日，扎鲁特—青州 ±800 千伏特高压直流工程开工动员大会在京召开。此时，特高压已纳入我国“十二五”规划纲要、能源发展“十二五”规划、中长期科技发展

长 1 653 km。

● 浙北—福州 1 000 kV 高压交流输变电工程（下称“浙福特高压工程”），于 2014 年 12 月 26 日投运，新建线路 2×603 km。

国网公司在建工程：

● 锡盟—山东 1 000 kV 高压交流输变电工程，新建线路 2×730 km。

● 淮南—南京—上海 1 000 kV 高压交流输变电工程，新建线路 2×780 km。

● 宁夏宁东—浙江绍兴 ± 800 kV 高压直流输电工程，线路长 1 720 km。

● 山西晋北—江苏南京 ± 800 kV 高压直流输电工程，线路全长 1 119 km。2015 年 6 月开工。

● 酒泉—湖南 ± 800 kV 高压直流工程，线路全长 2 383 km。2015 年 6 月开工。

● 锡盟—泰州 ± 800 kV 高压直流输电工程，线路全长 1 620 km。2015 年 12 月开工。

● 上海庙—山东 ± 800 kV 高压直流输电工程，线路全长 1 238 km。2015 年 12 月开工。

● 准东—皖南 $\pm 1 100$ kV 高压直流输电工程，线路全长 3 324 km。该工程是目前世界上电压等级最高、输送容量最大、输送距离最远、技术水平最先进的特高压输电工程。2016 年 1 月开工。

● 内蒙古通辽扎鲁特旗—山东潍坊青州 ± 800 kV 高压直流工程，线路全长 1 234 km。2016 年 8 月开工。

南方电网公司已建成的“八交八直”工程：

● 500 kV 天广交流一、二、三、四回。

● 500 kV 贵广交流一、二、三、四回。

● ± 500 kV 天广直流 I 回（天生桥—广州北郊）（1 800 MVA）。

● ± 500 kV 贵广直流 I 回（安顺—肇庆）（3 000 MVA）。

● ± 500 kV 贵广直流 II 回（兴仁—深圳）（3 000 MVA）。

● ± 500 kV 三峡—广东直流（三峡—惠州）（3 000 MVA）。

● ± 800 kV 云广直流 I 回（楚雄—穗东）（5 000 MVA）。

● ± 800 kV 云广特高压直流输电工程。

● 云南普洱至广东江门 ± 800 kV 直流输电工程（简称“糯扎渡直流工程”）。

● 溪洛渡右岸电站送电广东双回 ± 500 kV 直流输电工程（简称“溪洛渡直流工程”）。

二、电力系统概述

电力系统：由发、输、变、配、用电等环节组成的电能生产和消费系统。

电力系统是由发电厂、电力网和电能用户组成的一个发电、输电、变配电和用电的整体，称为电力系统。

它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置转化为电能，再经变电、输电、配电将电能供应到各用户。由于电能的生产、输送、分配和消费是在同一时间内完成的，而交流电又不能直接存储，所以各环节必须连接成一整体。

（一）发电厂

发电厂的作用是将自然界的各种能量（煤、石油、天然气、水、地热、潮汐、风、太阳、原子能等）转换为二次能源（电能）的工厂。电能与其他形式的能源相比，其特点有

以下几个：

- (1) 电能可以大规模生产和远距离输送。
- (2) 电能方便转换且易于控制。
- (3) 损耗小。
- (4) 效率高。
- (5) 电能在使用时没有污染，噪声小。

按一次能源的不同，发电厂可分为：火力发电厂、水力发电厂、核能发电厂、风力发电厂、地热发电厂、太阳能发电厂、潮汐发电厂等。

1. 火力发电厂

1) 火电厂的分类

按原动机的不同，火电厂可以分为：凝汽式汽轮机发电厂、燃气轮机发电厂、内燃机发电厂、蒸汽—燃气轮机发电厂等。

按燃料的不同，火电厂可以分为：燃煤发电厂、燃油发电厂、燃气发电厂、余热发电厂等。

按蒸汽压力和温度的不同，火电厂可以分为：

- (1) 中低压发电厂，其蒸汽压力为 3.92 MPa、温度为 450℃，单机功率小于 25 MW。
- (2) 高压发电厂，其蒸汽压力一般为 9.9 MPa、温度为 540℃，单机功率小于 100 MW。
- (3) 超高压发电厂，其蒸汽压力一般为 13.83 MPa、温度为 540/540℃，单机功率小于 200 MW。
- (4) 亚临界压力发电厂，其蒸汽压力一般为 16.77 MPa、温度为 540 /540℃，单机功率为 300 MW ~ 1 000 MW。
- (5) 超临界压力发电厂，其蒸汽压力大于 22.11 MPa、温度为 550/550℃，机组功率为 600 MW 或 800 MW 及以上。
- (6) 超超临界压力发电厂，其蒸汽压力为 26.25 MPa、温度为 600/600℃，机组功率为 1 000 MW 及以上。

2) 火电厂的电能生产过程

概括地说，火力发电厂的生产过程是把煤炭中含有的化学能转变为电能的过程，如图 1-2 所示的凝汽式电厂，整个生产过程可分为三个阶段。

(1) 燃烧系统：燃料的化学能在锅炉燃烧中转变为热能，加热锅炉中的水使之变为蒸汽。

燃烧系统由运煤、磨煤、燃烧、风烟、灰渣等环节组成，其流程如图 1-3 所示。

燃烧系统一般包括的子系统有：运煤系统、磨煤系统、燃烧系统、风烟系统、灰渣系统等。

(2) 汽水系统：锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，冲击汽轮机的转子旋转，将热能转化为机械能。

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、循环水系统和补充给水系统，如图 1-4 所示。

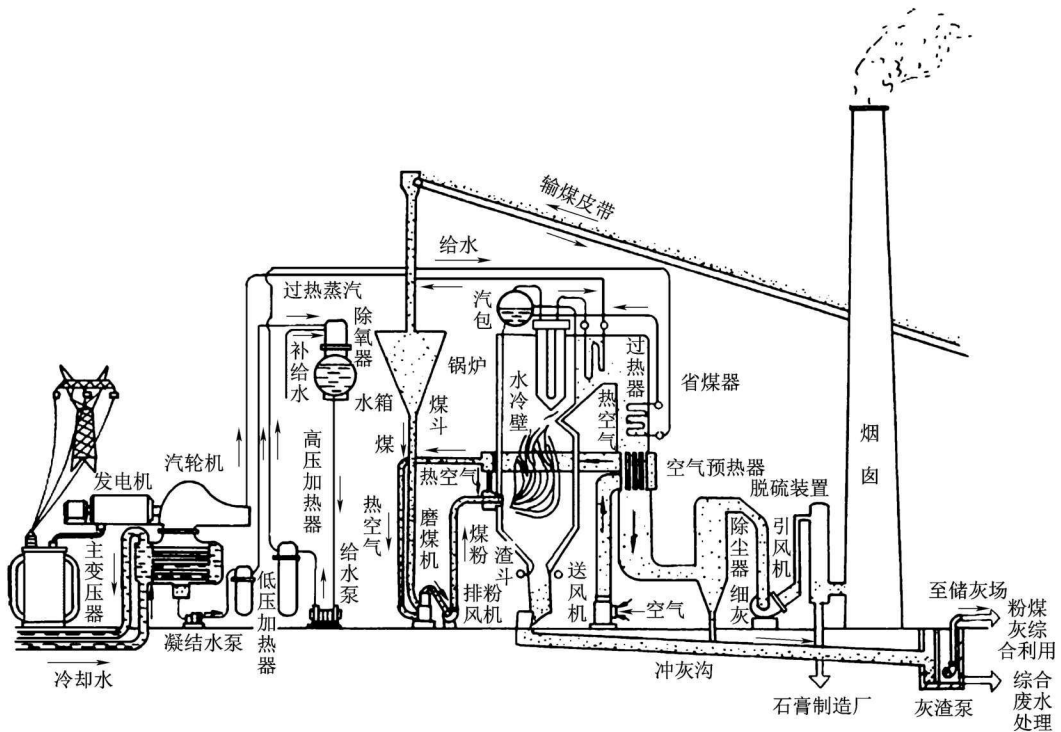


图 1-2 凝汽式发电厂生产过程示意图

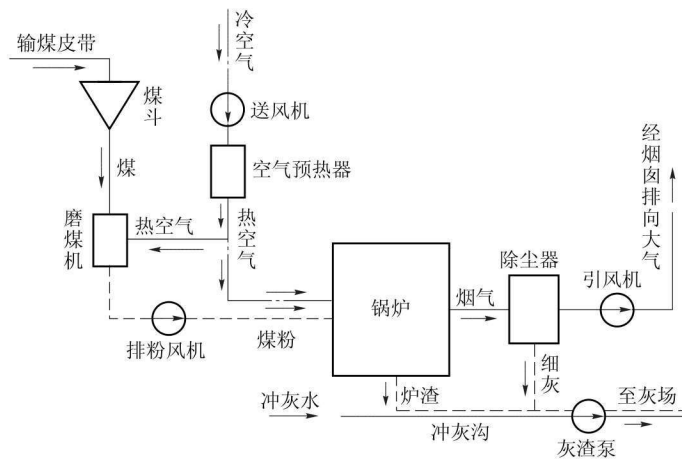


图 1-3 火电厂燃烧系统流程示意图

(3) 电气系统：由汽轮机转子旋转的机械能带动发电机转子旋转，把机械能转化为电能。

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站等。

3) 火电厂的特点

- (1) 布局灵活，装机容量的大小可按需要决定。
- (2) 一次性建造投资少，单位容量的投资仅为同容量水电厂的一半左右。
- (3) 耗煤量大。

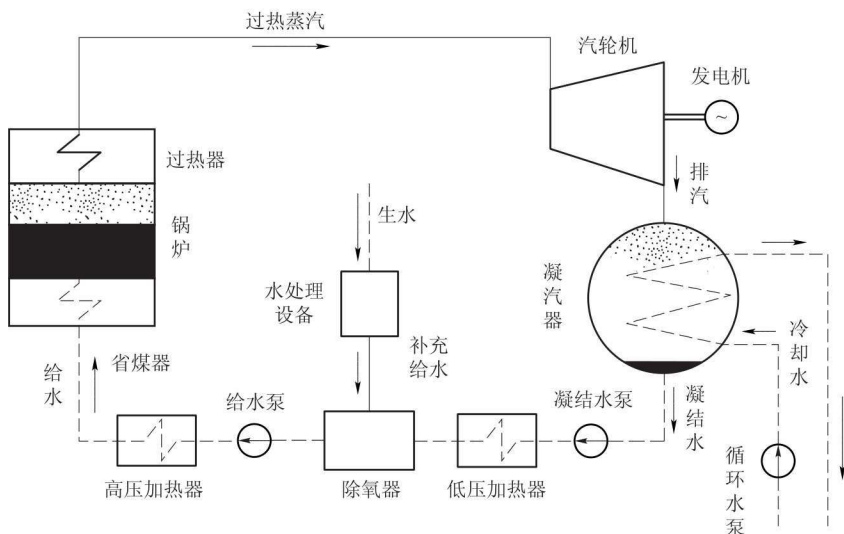


图 1-4 火电厂汽水系统流程示意图

(4) 动力设备繁多，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) 燃煤发电机组由停机到开机并带满负荷需要几小时到十几小时，并附加耗用大量燃料。

(6) 火电厂担负调峰、调频或事故备用，相应的事故增多，强迫停运率增高，厂用电率增高。

(7) 火电厂的各种排放物（如烟气、灰渣和废水）对环境的污染较大。

2. 水力发电厂

1) 水电厂的分类

水电厂按照水流的集中落差来分，可分为 3 种。

(1) 堤坝式水电厂。在河流中落差较大的适宜地段拦河建坝，形成水库，将水积蓄起来，抬高上游水位，形成发电水头，这种开发模式称为堤坝式。由于水电厂厂房在水利枢纽中的位置不同，堤坝式水电厂又分为坝后式和河床式两种型式。坝后式水电厂示意图如图 1-5 所示。河床式水电厂示意图如图 1-6 所示。

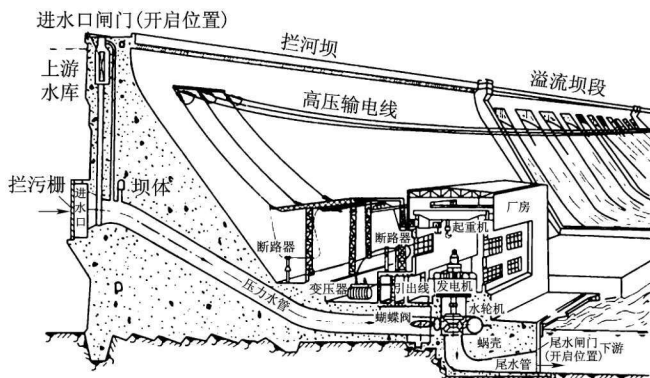


图 1-5 坝后式水电厂示意图

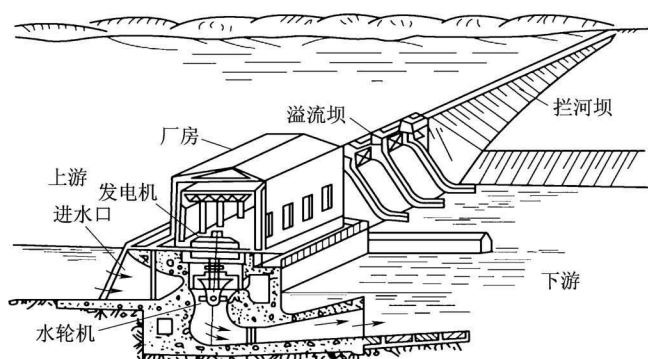


图 1-6 河床式水电厂示意图

(2) 引水式水电厂，如图 1-7 所示由引水渠道造成水头，用于河床坡度较大的高水头中小型水电厂。

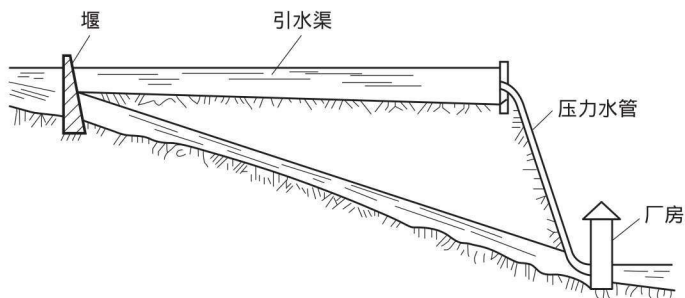


图 1-7 引水式水电厂示意图

(3) 混合式水电厂。在适宜开发的河段拦河筑坝，坝上游河段的落差由坝集中，坝下游河段的落差由有压力引水道集中，而水电厂的水头则由这两部分落差共同形成，这种集中落差的方式称为混合开发模式，由此而修建的水电厂称为混合式水电厂，它兼有堤坝式和引水式两种水电厂的特点。

按照径流调节的程度来分，水电厂可分为无调节水电厂和有调节水电厂。根据水库对径流的调节程度，又可将水电厂分为：日调节水电厂、年调节水电厂和多年调节水电厂。

2) 水电厂的特点

- (1) 可综合利用水能资源。
- (2) 发电成本低、效率高。
- (3) 运行灵活。
- (4) 水能可储蓄和调节。
- (5) 水力发电不污染环境。
- (6) 水电厂建设投资较大，工期较长。
- (7) 发电不均衡。
- (8) 给农业生产带来一些不利，还可能在一定程度破坏自然界的生态平衡。

3. 抽水蓄能电厂

如图 1-8 所示为抽水蓄能电厂示意图，抽水蓄能电厂以一定水量作为能量载体，通

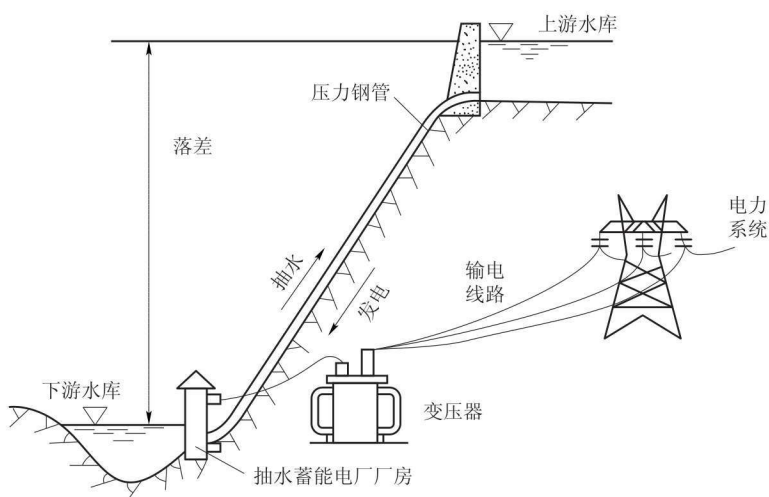


图 1-8 抽水蓄能电厂示意图

过能量转换向电力系统提供电能。简单地说，用电需求多时，放水发电，提供电能；用电需求少时，抽水进库，储存势能，待有用电需求时，再放水发电。

抽水蓄能电厂在电力系统中具有调峰、填谷、事故备用、调频、调相、黑启动、蓄能等作用。

4. 核能发电厂

1) 核电厂的分类

(1) 压水堆核电厂。

如图 1-9 所示为压水堆核电厂的示意图。整个系统分成两大部分，即一回路系统和二回路系统。在一回路系统中，压力为 15 MPa 的高压水被冷却剂主泵送进反应堆，吸收燃料元件的释热后，进入蒸汽发生器下部的 U 形管内，将热量传给二回路的水，再返回冷却剂

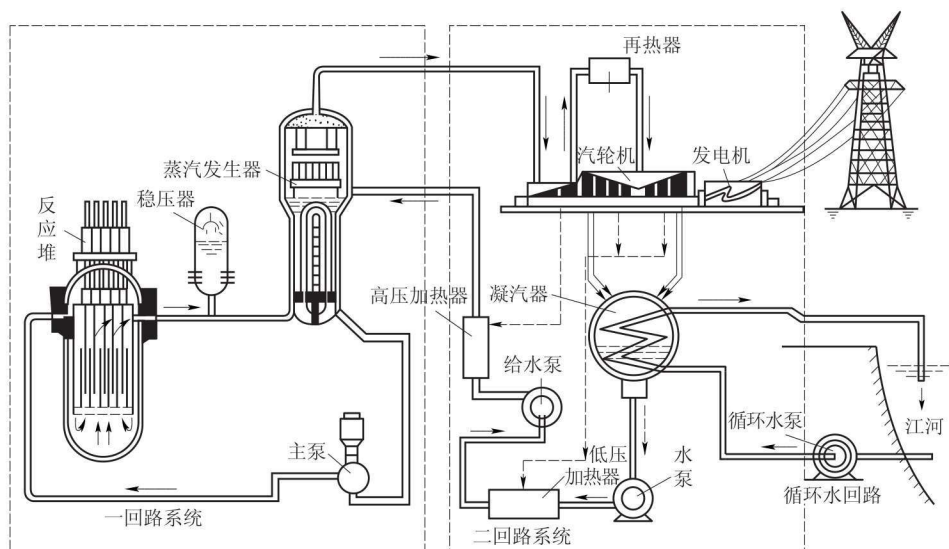


图 1-9 压水堆核电厂示意图

主泵入口，形成一个闭合回路。二回路系统的水在 U 形管外部流过，吸收一回路水的热量后沸腾，产生的蒸汽进入汽轮机的高压缸做功；高压缸的排汽经再热器再热提高温度后，再进入汽轮机的低压缸做功；膨胀做功后的蒸汽在凝汽器中被凝结成水，再送回蒸汽发生器，形成一个闭合回路。

(2) 沸水堆核电站。

如图 1-10 所示为沸水堆核电站的示意图。在沸水堆核电站中，堆芯产生的饱和蒸汽经分离器与干燥器除去水分后直接送入汽轮机做功。在沸水堆核电站中反应堆的功率主要由堆芯的含汽量来控制。

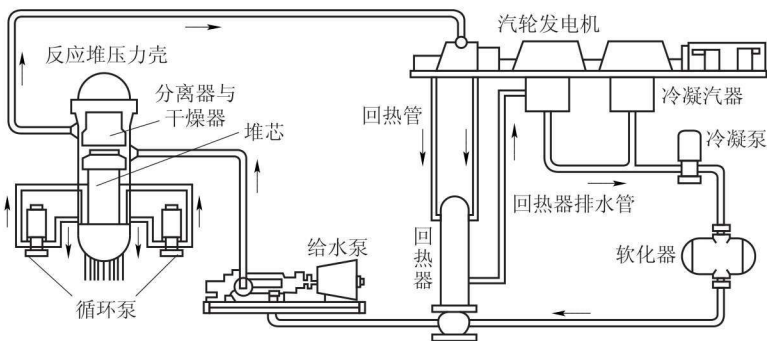


图 1-10 沸水堆核电站的示意图

2) 核电站的系统

核电站简单分为核岛、常规岛两部分。

核岛是核电站安全壳内的核反应堆及与反应堆有关的各个系统的统称。核岛的主要功能是利用核裂变能产生蒸汽。核岛厂房主要包括反应堆厂房（安全壳）、核燃料厂房、核辅助厂房、核服务厂房、排气烟囱、电气厂房和应急柴油发电机厂房等。

常规岛是核电装置中汽轮发电机组及其配套设施和它们所在厂房的统称。常规岛的主要功能是将核岛产生的蒸汽的热能转换成汽轮机的机械能，再通过发电机转变成电能。常规岛厂房主要包括汽轮机厂房、冷却水泵房和水处理厂房、变压器区构筑物、开关站、网控楼、变电站及配电所等。

3) 核电站的特点

核电站与其他类型电厂相比有以下一些新的特点：

- (1) 压水堆核电站的反应堆，只能对反应堆堆芯一次装料，并定期停堆换料。
- (2) 反应堆的堆芯内，在核燃料发生裂变反应释放核能的同时，也释放出瞬发中子和瞬发射线。
- (3) 反应堆在停闭后，运行过程中积累起来的裂变碎片和衰变，将继续使堆芯产生余热（又称衰变热）。
- (4) 核电站在运行过程中，会产生气态、液态和固态的放射性废物。
- (5) 核电站的建设费用高，但燃料费用较为便宜。

(二) 变配电所

变配电所，是指用来升压变电或降压变电的厂所。根据变压器的功能分为升压变电所和

降压变电所。根据变电所在系统中所处的地位分为枢纽变电所、中间变电所、终端变电所。根据变电所所在电力网的位置分为区域变电所、地方变电所。变电所还可分为户内式、户外式和组合式等三种基本类型。

近些年，随着智能电网的加速发展，智能变电站的建设得到了明显的提速。在此，对数字化变电站、智能变电站、直流输电换流站作简单介绍。

1. 数字化变电站

1) 含义和结构

数字化变电站是由智能化一次设备、网络化二次设备在 IEC 61850 通信协议基础上分层构建，能够实现智能设备间信息共享和互操作的现代化变电站。数字化变电站自动化系统的结构在物理上可分为两类，即智能化的一次设备和网络化的二次设备；在逻辑结构上可分为三个层次，分别为过程层、间隔层、站控层。

2) 主要特点与优点

特点：(1) 变电站传输和处理的信息全数字化；(2) 过程层设备智能化；(3) 统一的信息模型，包括数据模型和功能模型；(4) 统一的通信协议，数据无缝交换；(5) 高质量信息，具有可靠性、完整性、实时性；(6) 各种设备和功能共享统一的信息平台。

优点：(1) 各种功能共用统一的信息平台，避免设备重复投入；(2) 测量准确度高、无饱和、无电流互感器二次开路；(3) 二次接线简单；(4) 光纤取代电缆，电磁兼容性能优越；(5) 信息传输通道都可自检，可靠性高；(6) 管理自动化。

2. 智能变电站

智能变电站是指采用先进、可靠、集成、低碳、环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和监测等基本功能，并可根据需要实现支持电网实时自动控制、智能调节、在线分析决策、协同互动等高级功能的变电站。

1) 智能设备

智能设备是指附加了智能组件的高压设备。智能组件通过状态感知元件和指令执行元件，实现状态的可视化、控制的网络化和信息互动化，为智能电网提供最基础的功能支撑。

2) 智能变电站高级应用功能

- (1) 设备状态可视化。
- (2) 变电站智能告警在线处理专家系统。
- (3) 变电站事故信息综合分析辅助决策系统。
- (4) 智能变电站经济运行与优化控制。
- (5) 与智能电网其他节点的互动。

3. 直流输电换流站

1) 换流站简介

在输电系统的送端需要将交流电转换为直流电（此过程称为整流），经过直流输电线路将电能送往受端；而在受端又必须将直流电转换为交流电（此过程称为逆变），然后送到受端的交流系统中去，供用户使用。在这个系统的送端进行整流变换的地方称为整流站，而在受端进行逆变变换的地方称为逆变站，两者统称为换流站。