



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

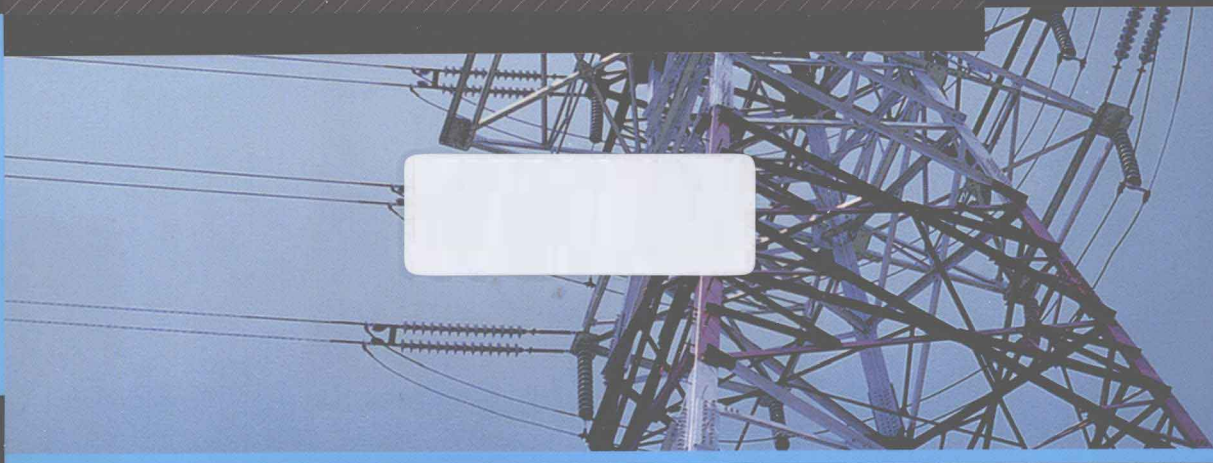
**F**undamentals of Electrical Engineering

# 电气工程基础

张铁岩 主编

林盛 邓玮 副主编

孙秋野 主审



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**F**undamentals of Electrical Engineering

# 电气工程基础

张铁岩 主编

林盛 邓玮 副主编

孙秋野 主审



人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

电气工程基础 / 张铁岩主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2012.12  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-29654-2

I. ①电… II. ①张… III. ①电气工程—高等学校—教材 IV. ①TM

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第274132号

## 内 容 提 要

本书共分 12 章, 主要内容包括电力系统概述、电力系统设备、电气主接线、电气二次接线、电力系统的负荷、电力网络的稳态分析、电力系统的短路计算、电力系统的继电保护、电力系统的安全保护、电力系统电气设备的选择、电力工程设计以及电力系统运行。本书以电力系统为主, 全面论述了发电、输变电和配电系统的构成、设计、运行以及管理的基本理论和设计计算方法, 具有内容全面、实用性强、方便教学等特点。

本书可供普通高等院校电气工程及其自动化、自动化等相关专业使用, 同时也可供从事发电厂和变电站的电气设计、运行和管理的电气工程技术人员参考。

### 21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材 电气工程基础

- 
- ◆ 主 编 张铁岩  
副 主 编 林 盛 邓 玮  
主 审 孙秋野  
责任编辑 李海涛
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
中国铁道出版社印刷厂印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 20 2012 年 12 月第 1 版  
字数: 501 千字 2012 年 12 月北京第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-29654-2

定价: 39.80 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

能源是社会经济发展的基础，电力是最主要的能源之一，电力工业的发展是确保社会经济快速发展的重要条件。近年来，随着经济的快速发展，我国的电力工业也得到了迅速的发展。能源亦称能量资源，是指可产生各种能量或可作功的物质的统称，是能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源，包括煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源，以及其他新能源和可再生能源。纵观人类发展历史，人类对能源的利用经历了柴草能源时期、煤炭能源时期以及石油天然气能源时期，目前正在朝新能源时期过渡。

计算机技术和控制技术的迅速发展和不断成熟，使电气工程的知识体系有了极大的拓展，将控制技术、计算机技术以及网络通信技术融入电力系统的测量、控制和保护中，将实现电力系统的全面自动化。

本书是本着重视理论基础、拓展专业知识和加强理论应用的教学改革需要编写的，覆盖电力系统的各个方面，诸如：电力系统的基本概念和基本知识，发电系统，输变电及配电系统，电力系统负荷，电力网络的稳态分析，电力系统的短路计算，电力系统的安全保护，电气主接线的设计与设备选择，电力系统的设计和运行等。为加强课程内容的理解，书中各章节均附有习题。

本书的特点是以工程应用作为出发点，重点培养解决实际工程技术问题的能力。在阐明基本原理的情况下，减少理论推导，使内容通俗易懂。通过例题和设计实例，使学生较好地理解和掌握所学的知识。

本书由沈阳工程学院张铁岩教授担任主编，林盛、邓玮担任副主编。全书共分12章，第1章、第3章、第4章及第7章由林盛编写，第2章、第5章、第6章及第8章由张铁岩编写，第9章、第10章、第11章及第12章由邓玮编写。同时，我们的硕士生和本科生郭博、张晨、张诗学、顾宜春、赵宇晴、周承锭、刘箭、刘放等，参与了本书的打字、绘图、排版。在此，谨向对我们的编写工作给予积极支持和大力帮助的人们表示诚挚的谢意！

全书由张铁岩教授统稿。沈阳工程学院刘莉教授主审了全书，并提出许多宝贵的意见和建议，在此深表谢意。同时，向本书所引用参考文献的所有作者一并表示衷心的感谢！

由于编者知识水平有限，编写时间仓促，书中疏漏在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2012年11月

# 目 录

第1章 电力系统概述	1	3.2.3 无汇流母线的电气主接线	54
1.1 电力系统的发展历程	1	3.3 主变压器和主接线的选择	56
1.2 电力系统基本概念	1	3.4 工厂供电系统主接线	57
1.3 发电系统	2	3.5 建筑配电系统接线	59
1.3.1 发电能源简介	2	3.5.1 城网主接线	60
1.3.2 火力发电	3	3.5.2 农网主接线	61
1.3.3 水力发电	6	本章小结	62
1.3.4 风力发电	9	习题	62
1.3.5 核能发电	10	第4章 电气二次接线	63
1.3.6 太阳能发电	14	4.1 二次接线基本概念	63
1.3.7 生物质发电	17	4.1.1 原理接线图	64
1.3.8 潮汐发电	19	4.1.2 安装接线图	65
1.4 电能的质量指标	20	4.2 控制回路	67
1.5 电力系统的电压等级	22	4.2.1 对控制回路的一般要求	68
1.6 变电站及类型	23	4.2.2 控制回路的组成	68
本章小结	24	4.2.3 控制回路和信号回路 操作过程分析	70
习题	25	4.3 信号回路	72
第2章 电力系统设备	26	4.3.1 位置信号	72
2.1 汽轮发电机	26	4.3.2 事故信号	72
2.2 水轮发电机	26	4.3.3 预告信号	72
2.3 风力发电机	27	4.4 变电站的综合自动化	73
2.4 输变电设备	29	4.4.1 变电站自动化的含义	73
2.5 配电装置	32	4.4.2 变电站综合自动化的 发展历程	73
2.6 高压电器	36	4.4.3 变电站综合自动化的特点	73
2.6.1 断路器	36	4.4.4 变电站综合自动化的基本功能	74
2.6.2 互感器	40	4.4.5 变电站综合自动化的结构	75
2.7 接地保护	44	本章小结	77
本章小结	47	习题	77
习题	47	第5章 电力系统的负荷	79
第3章 电气主接线	48	5.1 电力系统负荷的分类	79
3.1 电气主接线概念	48	5.2 电力系统负荷曲线	80
3.2 电气主接线的形式	48	5.3 电力系统负荷的计算	82
3.2.1 概述	48		
3.2.2 有汇流母线的电气主接线	49		

5.4	电网损耗的计算	88	6.6.5	高压直流输电系统的 主要电气设备	132
5.5	用户负荷的计算	90	6.6.6	光明的前景	133
5.6	尖峰电流的计算	91	本章小结		133
5.7	功率因数的确定与补偿	92	习题		134
5.8	电力系统负荷的特性	95	<b>第7章 电力系统的短路计算</b>		135
5.8.1	负荷的静特性与动特性	95	7.1	电力网络短路故障概述	135
5.8.2	负荷的综合特性	97	7.2	标幺值	137
本章小结		98	7.3	无限大功率电源供电网的 三相短路电流计算	141
习题		99	7.4	有限容量电力网三相短路 电流的实用计算	146
<b>第6章 电力网络的稳态分析</b>		100	7.5	电力系统各序网络的建立	154
6.1	输电线路的参数计算与等值电路	100	7.6	不对称短路的计算	158
6.1.1	参数计算	100	7.7	电力网短路电流的效应	159
6.1.2	等值电路	103	本章小结		162
6.2	变压器的参数计算与等值电路	104	习题		162
6.2.1	双绕组电力变压器	104	<b>第8章 电力系统的继电保护</b>		164
6.2.2	三绕组电力变压器	106	8.1	继电保护的基本概念	164
6.2.3	自耦变压器	109	8.1.1	继电保护的任務	165
6.2.4	分裂绕组变压器	110	8.1.2	对继电保护装置的要求	165
6.3	电力网络元件的电压和 功率分布计算	111	8.2	继电保护原理	167
6.3.1	输电线路	111	8.3	常用保护装置	167
6.3.2	变压器	113	8.4	电流保护	169
6.4	电力网络的无功功率和 电压调整	114	8.4.1	单侧电源电网相间短路的 电流保护	169
6.4.1	无功功率调整	114	8.4.2	多侧电源电网相间短路的 方向性电流保护	174
6.4.2	中枢纽电压管理	117	8.4.3	大电流接地系统零序 电流保护	176
6.4.3	电力系统调压措施	119	8.4.4	小电流接地系统零序 电流保护	180
6.5	潮流计算	124	8.5	距离保护	183
6.5.1	同电压等级开式电力网络	124	8.5.1	距离保护的基本原理	183
6.5.2	多电压等级开式电力网络	126	8.5.2	距离保护的主要组成部分	184
6.5.3	两端供电电力网络 功率分布	127	8.5.3	影响距离保护正常工作的 因素及其防止方法	184
6.5.4	考虑损耗时两端供电电力 网络功率和电压分布	128	8.5.4	距离保护的整定	191
6.6	直流输电简介	129	8.6	电力系统中变压器的保护	196
6.6.1	艰难的发展史	129			
6.6.2	独特的功能	130			
6.6.3	两端直流输电系统	130			
6.6.4	直流输电特点及应用范围	131			

8.6.1 变压器的纵差动保护	197	10.2.2 按短路条件校验	241
8.6.2 变压器的电流和电压保护	200	10.3 低压电器的选择	242
8.6.3 变压器的瓦斯保护	203	10.4 高压断路器的选择	245
8.7 电力电容器的保护	205	10.5 隔离开关及重合器和分段器的选择	246
8.8 线路的自动重合闸	209	10.6 互感器的选择	247
8.8.1 自动重合闸的要求和特点	209	10.6.1 电流互感器的选择	247
8.8.2 单侧电源线路的三相一次自动重合闸	210	10.6.2 电压互感器的选择	249
8.8.3 双侧电源线路的三相一次自动重合闸	211	10.7 限流电抗器的选择	249
8.8.4 具有同步检定和无电压检定的自动重合闸	213	10.8 电力系统母线和电缆的选择	252
8.8.5 自动重合闸动作时限选定原则	214	10.8.1 母线的选择与校验	252
8.8.6 自动重合闸与继电保护的配合	215	10.8.2 电缆的选择与校验	254
8.8.7 单相自动重合闸	216	本章小结	255
8.8.8 综合自动重合闸简介	218	习题	256
8.8.9 自动重合闸在 750kV 及以上特高压线路上的应用	218	<b>第 11 章 电力工程设计</b>	257
本章小结	219	11.1 电气工程绘图基本知识	257
习题	220	11.2 电气设备图形符号	260
<b>第 9 章 电力系统的安全保护</b>	221	11.3 电力工程 CAD 介绍	269
9.1 防雷保护	221	11.3.1 软件工程技术语	269
9.1.1 雷电的基本知识	221	11.3.2 系统环境	269
9.1.2 防雷保护装置	222	11.4 工厂供电设计示例	273
9.1.3 输电线路的防雷保护	225	11.4.1 工厂供电的意义和要求	273
9.1.4 发电厂的防雷保护	229	11.4.2 工厂供电设计的一般原则	274
9.1.5 变电站的防雷保护	231	11.4.3 设计内容及步骤	274
9.2 绝缘配合	234	11.4.4 负荷计算及功率补偿	275
9.3 电气装置的接地	236	11.4.5 变压器的选择	277
本章小结	237	11.4.6 短路计算	277
习题	238	11.4.7 导线、电缆的选择	280
<b>第 10 章 电力系统电气设备的选择</b>	239	11.4.8 高、低压设备的选择	281
10.1 电气设备选择遵循的条件	239	11.4.9 变压器的继电保护	281
10.2 高压电器的选择	240	11.4.10 变压器的瓦斯保护	283
10.2.1 按正常工作条件选择高压电气设备	240	11.4.11 二次回路操作电源和中央信号装置	284
		11.4.12 电测量仪表与绝缘监视装置	287
		11.4.13 防雷与接地	288
		11.5 变电站电气主接线设计	290
		本章小结	292
		习题	292

<b>第 12 章 电力系统运行</b> .....	293	12.4 电网运行的经济性 .....	308
12.1 有功功率及频率的调整 .....	293	本章小结 .....	311
12.2 无功功率及电压的调整 .....	296	习题 .....	311
12.3 系统运行的稳定性 .....	306	<b>参考文献</b> .....	312



电力系统是由发电厂内的发电机、电力网内的变压器及输电线路和用户的各种用电设备，按照一定规律连接组成的整体。为实现这一功能，电力系统在各个环节和不同层次还具有相应的信息与控制系统，对电能的生产过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，以保证用户获得安全、经济、优质的电能。

## 1.1 电力系统的发展历程

电力技术的产生和高速发展是理论指导实践的一个鲜活的实例。

1820年奥斯特通过实验证明了电流的磁效应，1831年法拉第发现了电磁感应定律，这些很快促成了电动机和发电机的发明。随之引发人们对电能的开发与应用。

在电能应用的初期，由小容量发电机单独向灯塔、轮船、车间等照明系统供电，可看作是简单的住户式供电系统。白炽灯发明后，出现了中心电站式供电系统，如1882年托马斯·阿尔瓦·爱迪生在纽约主持建造的珍珠街电站，它装有6台直流发电机（总容量约670kW），用110V电压供1300盏电灯照明。19世纪90年代，三相交流输电系统研制成功，并很快取代了直流输电，成为电力系统大发展的里程碑。

20世纪以后，人们普遍认识到扩大电力系统的规模可以在能源开发、工业布局、负荷调整、系统安全、经济运行等方面带来显著的社会经济效益。于是，电力系统的规模迅速增长。世界上覆盖面积最大的电力系统是前苏联的统一电力系统，它东西横越7000km，南北纵贯3000km，覆盖了约1000万平方千米的土地。

## 1.2 电力系统基本概念

如图1-1所示，由发电、变电、输电、配电、用电等环节组成的电能生产与消费系统被称为电力系统。它的功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置（一般主要包括锅炉、汽轮机、发电机及电厂辅助生产系统等）转化成电能，再经输、变电系统及配电系统将电能供应到各负荷中心，通过各种设备再转换成动力、热、光等不同形式的能量，为地区经济和人民生活服务。

由于电源点与负荷中心多数处于不同地区，并且电能无法大量储存，故其生产、输送、分配和消费都在同一时间内完成，并在同一地域内有机地组成一个整体，电能生产必须时刻保持与消费平衡。因此，电能的集中开发与分散使用，以及电能的连续供应与负荷的随机变化，就制约了电力系统的结构和运行。因此，电力系统要实现其功能，就需在各个环节和不同层次设置相应的

信息与控制系统,以便对电能的生产和输运过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度,确保用户获得安全、经济、优质的电能。

建立结构合理的大型电力系统不仅便于电能生产与消费的集中管理、统一调度和分配,减少总装机容量,节省动力设施投资,且有利于地区能源资源的合理开发和利用,更限度地满足地区国民经济日益增长的用电需要。电力系统建设往往是国家及地区国民经济发展规划的重要组成部分。

电力系统的出现,使高效、无污染、使用方便、易于调控的电能得到广泛应用,推动了社会生产各个领域的变化,开创了电力时代。电力系统的规模和技术水准已成为一个国家经济发展水平的标志之一。

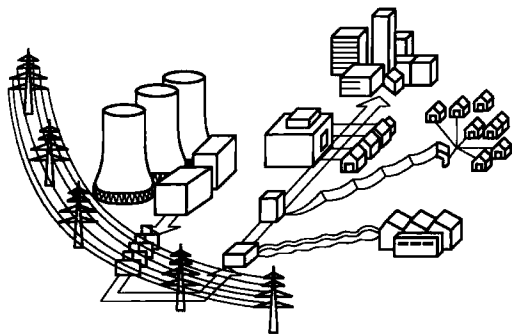


图 1-1 电力系统图

## 1.3 发电系统

### 1.3.1 发电能源简介

能源亦称能量资源或能源资源,是指可产生各种能量(如热量、电能、光能和机械能等)或可做功的物质的统称,是指能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源,包括煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源,以及其他新能源和可再生能源。纵观人类发展历史,人类对能源的利用经历了柴草能源时期、煤炭能源时期以及石油天然气能源时期,目前正在朝新能源时期过渡。

电能属于二次能源,多由一次能源转化而来。目前世界上用于发电的能源主要有煤炭、石油、天然气、核能、水能,还有少量风能、太阳能、地热能、潮汐能以及生物质能等。发电能源的构成随科学技术的发展而变化。如核能作为发电能源,是在核技术被人类掌握,并在发电领域中成熟应用的结果。随着科学技术的发展,可用于发电的新能源和可再生能源将逐步得到应用。

由于各个国家的政治、经济、社会、资源、地理环境以及科学技术等方面的情况不同,发电能源构成有很大的差异。加拿大、挪威、瑞士等国以水电为主;俄罗斯、日本等国以燃油、燃天然气电站为主;法国以核电为主;美国、德国、印度和中国以燃煤电站为主。

中国的发电能源以煤为主,其次是水能,核电的比重比较小。中国各地区的发电能源结构也不尽相同,主要受各地区一次能源的制约,过去水能作为发电能源多为就地利用,所以华北、华东、东北因水能资源较少,水电比重较低;西南、中南、西北地区水能资源丰富,则水电比重较高。中国近年来实施西部大开发,正在加快西部地区的水电开发,实行“西电东送”。

截至 2009 年年底,全国水电装机容量 1.96 亿 kW,占总装机容量的 22.46%,比重比上年提高 0.68 个百分点,我国已成为世界上水电装机规模最大的国家。另外核电在建施工规模居世界首位。2009 年年底,全国核电装机容量 908 万 kW,位列世界第九位;在建施工规模 2 192 万 kW,居世界首位。并网风电装机和发电量连续四年翻倍增长。2009 年底,全国并网风电装机容量 1 760 万 kW,同比增长 109.82%;2009 年,全国风电发电量增长 111.1%,高于其装机容量增长速度。并网风电装机和发电量连续四年翻倍增长。非化石能源发电装机容量所占比重加大。全国 6 000kW 及以上电厂非化石能源(水电、核电、风电、太阳能、地热、潮汐能等清洁能源以及生物质能、垃圾能、余热余压能等资源循环利用)发电装机容量合计为 2.22 亿 kW。

### 1.3.2 火力发电

利用煤炭、石油、天然气、油页岩等作为燃料的发电厂通常被称为火力发电厂。按照燃烧能源的种类不同，火电厂可以分为汽轮机电厂、燃气轮机电厂以及蒸汽—燃气轮机联合循环电厂。如果单从能量转换的角度而言，基本过程都是燃料的化学能→热能→机械能→电能的转化过程。首先燃料在锅炉炉膛中燃烧，锅炉中的水受到高温加热后变成高温高压蒸汽，蒸汽推动汽轮机转动，从而带动发电机发电。

我国煤炭资源十分丰富，燃煤火电厂是我国目前最主要的电能产生方式。随着技术的发展，单台大容量、超临界甚至超超临界的机组不断上马，但是出于环保降低碳排放的考虑，国家开始逐渐将电力生产的发展重心转移到核电及其他新能源上。根据国家发改委能源局的统计，截至2009年年底，全国火电装机容量6.51亿kW（其中煤电5.99亿kW），占全部装机容量的74.49%，虽然仍然占有很高的比例，但比上年下降了1.56个百分点，火电装机比重自2002年连续7年提高后，已经实现连续两年下降。

#### 一、火力发电厂生产流程

图1-2所示为燃煤蒸汽动力火力发电厂的生产流程图。燃料（煤粉）被送入锅炉炉膛21，燃烧后放出大量的热量，锅炉中的水受热后，变成高温高压蒸汽进入汽包1，随后经由密封管路送入汽轮机3，高温高压蒸汽推动汽轮机叶片转动做功，热能转化成机械能，汽轮机的转轴带动发电机18发电，机械能转化成电能。做功后的蒸汽温度和压力均大大下降，排入凝汽器4，被冷却水冷却后凝结成水，经过一系列处理工序后，又被重新打入锅炉受热。如此反复循环，燃烧的热能就源源不断地转化成电能。

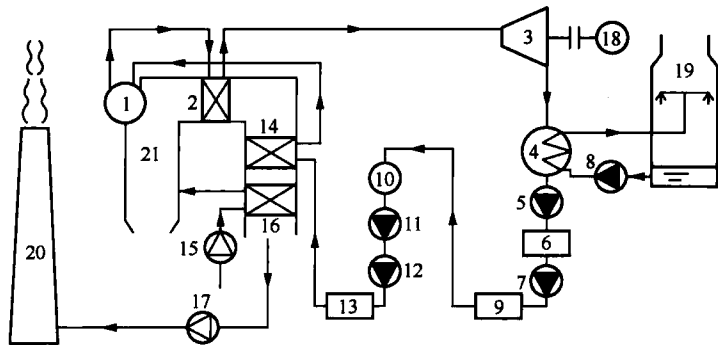


图 1-2 凝汽式火力发电厂生产流程图

- 1—汽包；2—过热器；3—汽轮机；4—凝汽器；5—凝结水泵；6—除盐设备；7—凝结水升压泵；8—循环水泵；  
9—低压加热器；10—除氧器；11—前置水泵；12—给水泵；13—高压加热器；14—省煤器；  
15—送风机；16—空气预热器；17—引风机；18—发电机；  
19—冷却塔；20—烟囱；21—锅炉炉膛

锅炉、汽轮机和发电机是凝汽式火力发电厂的三大主机。实际上火力发电厂的生产过程要复杂得多，除了三大主机以外，还需要很多辅助系统来维系生产，比如输煤系统、除尘系统、供水系统以及水处理系统等。

在凝汽式火力发电厂中，大量的热量都被流经凝汽器的循环水带走，所以其热效率比较低，只有30%~40%。在有的火电厂中，汽轮机中一部分做过功的蒸汽被抽走供给热用户使用或者经热交换器加热水后供热用户使用，这样一来就减少了被循环水带走的热损耗，热效率可以提高至60%~70%。

## 二、火力发电厂的主要组成

火力发电厂的整个生产过程可概括为 3 个系统，分别为燃烧系统、汽水系统和电气系统。

### 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，这个系统称为燃烧系统。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。

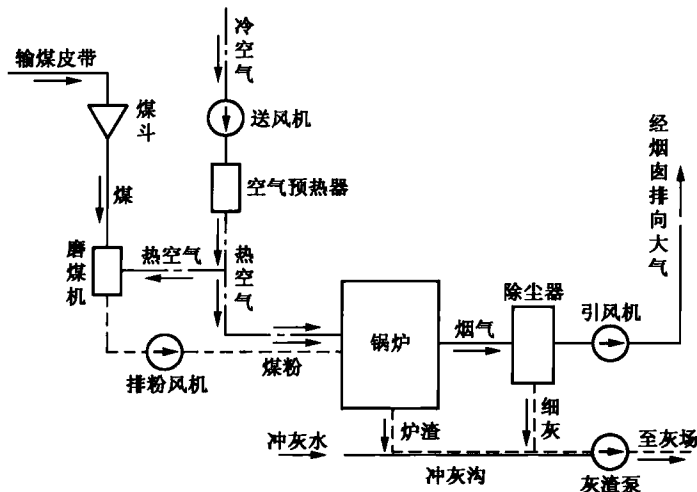


图 1-3 燃烧系统示意图

#### (1) 运煤

火力发电厂的用煤量是很大的，据统计，我国用于发电的煤约占煤炭总产量的 1/2，这部分煤主要靠铁路运输，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

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，并经空气预热器来的一次风烘干后带至粗粉分离器。在粗粉分离器中将不合格的粗粉分离返回磨煤机再行磨制，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) 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% 左右未能分离出的细煤粉)，经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喷燃器喷入锅炉炉膛内燃烧。

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 1 000t/h (亚临界压力)，采用强制循环的汽包炉；600MW 机组的锅炉为 2 000t/h 直流锅炉。在锅炉的四壁上，均匀分布着 4 支或 8 支喷燃器，将煤粉(或燃油、天然气)喷入锅炉炉膛，炉膛内的火焰呈旋转状燃烧上升，因此又被称为悬浮燃烧炉。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连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叫自然循环汽包炉，而当压力高到 16.66~17.64MPa 时，水、汽重度差变小，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、排粉风机进入炉壁，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沿烟道经过过热器、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，经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，经碎渣机破碎后也排入冲灰沟，再经灰渣泵将细灰和碎炉渣经冲灰管道排往灰场。

### 2. 汽水系统

锅炉产生的蒸汽进入汽轮机，冲动汽轮机的转子旋转，将热能转变为机械能，称为汽水系统，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、循环水系统和补充给水系统，如图 1-4 所示。

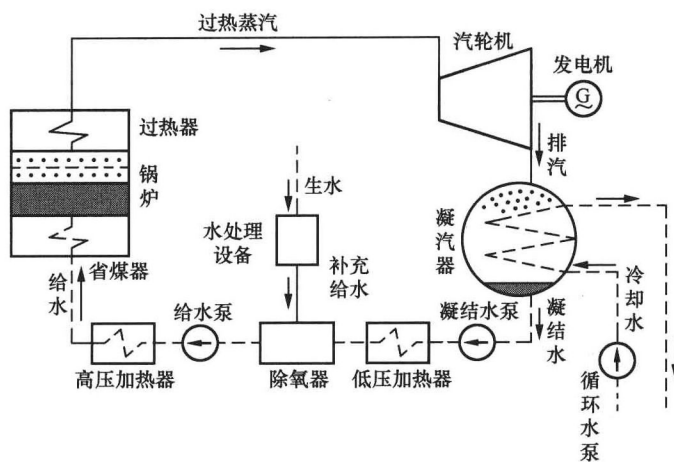


图 1-4 汽水系统示意图

#### (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，被排入凝汽器并被冷却水（循环水）冷却凝结成水（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（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），用以加热给水（给水回热循环），或把做过一段功的蒸汽以汽轮机某一中间级全部抽出，送到锅炉的加热器中加热后再引入汽轮机的以后几级中继续做功（再热循环）。

#### (2) 补充给水系统

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，这些补充给水一般补入除氧器或凝汽器中，即是补充给水系统。

#### (3) 循环水系统

为了将汽轮机中做过功后排入凝汽器中的蒸汽冷却凝结成水，需由循环水泵从凉水塔抽取大

量的冷却水送入凝汽器，冷却水吸收蒸汽的热量后再回到凉水塔冷却，冷却水是循环使用的。这就是循环水系统。

### 3. 电气系统

由汽轮机转子旋转的机械能带动发电机旋转，把机械能变为电能，称为电气系统，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站等，如图 1-5 所示。

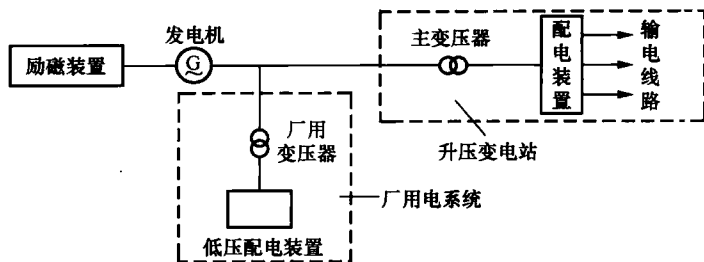


图 1-5 电气系统示意图

发电机的机端电压和电流随着容量的不同而各不相同，额定电压一般在  $10\sim 20\text{kV}$ ，而额定电流可达  $20\text{kA}$  及以上。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后，经厂用电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、输电线路送入电力系统。

### 三、火力发电的特点

火电厂与水电厂和其他类型的发电厂相比，具有以下特点。

- (1) 火电厂布局灵活，装机容量的大小可按需求决定。
- (2) 火电厂的一次性建造投资少，仅为水电厂的一半左右。火电厂建造工期短，例如， $2\times 300\text{MW}$  发电机组，工期为  $3\sim 4$  年。发电设备年利用小时数较高，约为水电厂的 1.5 倍。
- (3) 火电厂耗煤量大，目前发电用煤约占全国煤炭总产量的  $50\%$  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  $3\sim 4$  倍。
- (4) 火电厂动力设备繁多，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) 大型发电机组由停机到开机并带满负荷需要几个到十余个小时，并附加耗用大量燃料。例如，一台  $12\times 104\text{kW}$  发电机组启、停一次耗煤可达  $84\text{t}$  之多。
- (6) 火电厂担负急剧升降的负荷时，必须付出附加燃料消耗的代价。例如，据统计某电网火电平均煤耗约  $0.4\text{kg/kW}\cdot\text{h}$ ，而参与调峰煤耗将增至  $0.468\sim 0.511\text{kg/kW}\cdot\text{h}$ ，平均增加  $22\%\sim 29\%$ 。
- (7) 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。据此，从经济性和供电可靠性考虑，火电厂应当尽可能担负较均匀的负荷。
- (8) 火电厂对空气和环境的污染较大。

#### 1.3.3 水力发电

水能是蕴藏在江河湖海水体中的巨大能量，是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源。我国地势西高东低、北高南低，有多条大河，因此水力资源十分丰富。2000 年到 2004 年，我国进行了水力资源复查工作，结果显示，我国水力资源的理论蕴藏量高达  $6.94$  亿  $\text{kW}$ ，其中技术可开发的装机容量为  $5.42$  亿  $\text{kW}$ ，经济可开发装机容量为  $4.02$  亿  $\text{kW}$ ，高居世界首位。近年以来，我国

水电事业发展迅速，截至 2008 年年底，全国水电装机容量达到 1.72 亿 kW，居世界第一，年发电量达到 5 633 亿 kW 时，分别占全国电力装机容量和年发电量的 21.6% 和 16.4%。

水力发电厂简称水电厂，又叫水电站，是把水的势能和动能转化为电能的工厂。其基本能量转化过程是这样的：水能（势能和动能）→机械能→电能。图 1-6 是水电站示意图，通过在河流上游筑坝，从而集中河水的流量并形成较大的落差，水坝内的水通过压力水管流经涡轮机，由于水坝内的水具有较高的势能，从而带动涡轮机转动，涡轮机通过轴再带动发电机发电，最终将水能转化成电能。

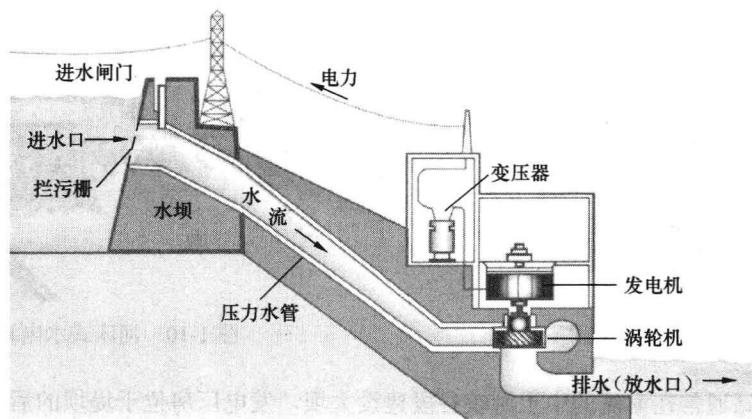


图 1-6 水电站示意图

水电站的发电容量，取决于水的流量和落差，具体计算公式为

$$P = 0.98\eta QH \quad (1-1)$$

其中， $P$  为发电容量，单位为 kW； $Q$  为通过涡轮机的流量，单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ； $H$  为水位落差，也称水头，单位为 m； $\eta$  为发电机组的效率，大小一般为 0.80~0.85。

### 一、水电站的分类

根据水电站取水方式的不同，水电站可分为径流式水电站、堤坝式水电站以及抽水蓄能水电站。

#### 1. 径流式水电站

径流式水电站，也叫引水式水电站，通常在高落差的中上游湍急河道上修建低堰（拦河闸），然后通过引水渠造成水头，再经过引水管进入水轮机进行发电。这种水电站需要修建的挡水建筑高度较低，淹没少甚至可以不淹没，集中后的水头也可以达到很大的数值，但受所处河流自然径流量或者低堰截面尺寸影响较大，无库容，因此引水流量不会很大，其发电量承担日负荷曲线中的基本负荷。径流式水电站分有压式和无压式两种，分别如图 1-7 和图 1-8 所示。

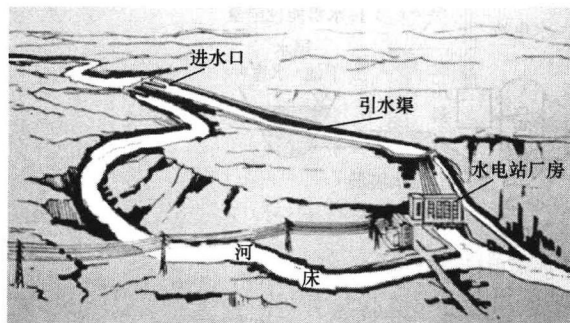


图 1-7 无压径流式水电站

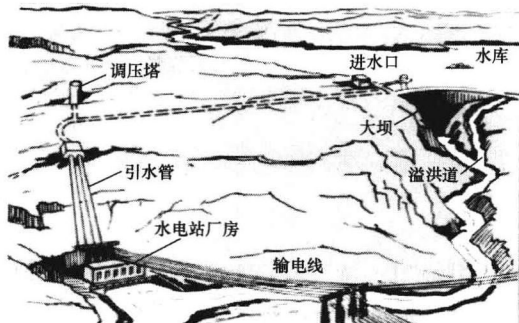


图 1-8 有压径流式水电站

## 2. 堤坝式水电站

堤坝式水电站是通过在河床上修建拦河大坝把水蓄积起来，从而抬高上游的水位形成大水头来进行发电。堤坝式水电站按照发电厂房和大坝位置关系不同，分为坝后式和河床式两种，分别如图 1-9 和图 1-10 所示。

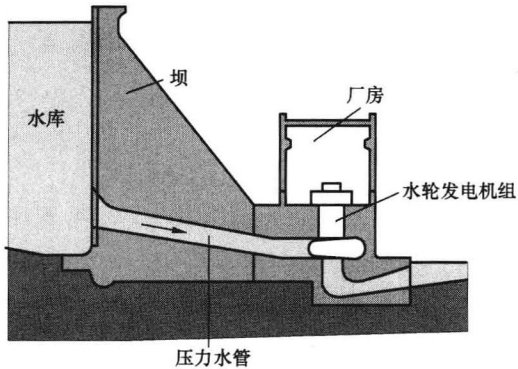


图 1-9 坝后式水电站

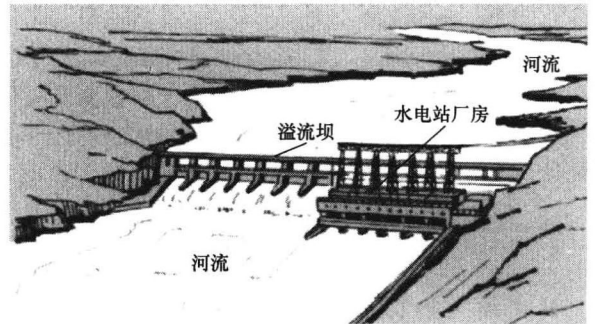


图 1-10 河床式水电站

坝后式水电站通常在河流的中上游峡谷段建设大坝，发电厂房位于堤坝的后方，水压由堤坝承受，如果允许一定的淹没，则堤坝可以建得较高，这样可以制造更大的水头。我国的三峡水电站就属于坝后式水电站。

河床式水电站多建在河道宽阔、坡度平缓的河段上，其大坝和发电厂房连为一体，发电厂房也起到挡水的作用。我国长江上的葛洲坝水力枢纽就属于这一类的水电站。

## 3. 抽水蓄能水电站

抽水蓄能水电站如图 1-11 所示，是一种特殊形式的水电站。当电网的用电负荷处在低谷时，它利用富裕的电能，用电动机—水泵的工作方式，将下池（水库）的水抽至上池（水库）储存起来。当电网的用电负荷达到高峰的时候，再利用上池储存的水推动水轮机进而带动发电机发电，回馈电网，满足电网调峰的需要。另外抽水蓄能水电站还具备调频、调相、负荷备用以及事故备用等功能。截至 2009 年，我国已建成抽水蓄能水电站 20 座，装机总容量 1 184.5 万 kW，在建的 11 座，总容量 1 308 万 kW。

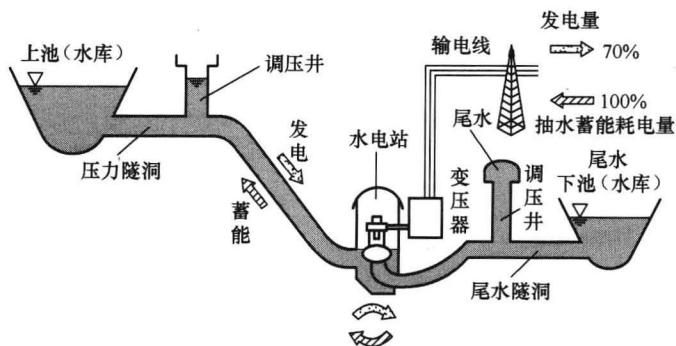


图 1-11 抽水蓄能水电站示意图

## 二、水电站的特点

水电厂与火电厂和其他类型的发电厂相比，具有以下特点。



(1) 可综合利用水能资源。除发电以外, 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。

(2) 发电成本低、效率高。利用循环不息的水能发电, 节省大量燃料。因为不用燃料, 也省去了运输、加工等多个环节, 运行维护人员少, 厂用电率低, 发电成本仅是同容量火电厂的  $1/3 \sim 1/4$  或更低。

(3) 运行灵活。由于水电厂设备简单, 易于实现自动化, 机组启动快, 水电机组从静止状态到载满负荷运行只需  $4 \sim 5 \text{min}$ , 紧急情况时可只用  $1 \text{min}$ 。水电厂能适应负荷的急剧变化, 适合于承担系统的调峰、调频和作为事故备用。

(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, 而水能资源则可借助水库进行调节和储蓄, 而且可兴建抽水蓄能发电厂, 扩大利用水能能源。

(5) 水力发电不污染环境。相反, 大型水库可能调节空气的温度和湿度, 改善自然生态环境。

(6) 水电厂建设投资较大, 工期较长。

(7) 水电站建设和生产都受到河流的地形、水量及季节气象条件限制, 因此发电量也受到水气象条件的制约, 有丰水期和枯水期之别, 因而发电不均衡。

(8) 大坝以下水流侵蚀加剧, 对河坝冲刷造成安全隐患。

(9) 对河流的切断造成某些水生动植物生存环境破坏。

(10) 修筑大坝的时候, 往往需要进行大规模的移民安置, 投资巨大。

(11) 由于大坝的拦截作用, 造成河流泥沙沉淀在坝底, 且下游肥沃的冲积土减少给农业生产带来一些不利影响。

### 1.3.4 风力发电

风是空气流动的结果。地球除了自转以外, 还在不停地绕太阳公转, 再加上地球表面不同地方的差异, 地表的各处受到太阳的辐射强度是不均匀的, 这就使得各处的空气产生温度差, 由于热空气的上升和冷空气的下沉, 产生了大气压力差, 最终形成空气的流动, 产生了风。这种流动的空气所具有的能量叫做风能, 它本质上是太阳能转化而来的, 是可再生能源的一种。

从台风巨大的破坏里人们可以看到, 风的能量是巨大的。根据斯坦福大学的数据分析, 全球风能可利用资源量为 72 万亿千瓦。即使只成功利用了其中的 20%, 也相当于世界能源消费量的总和或电力需求的 7 倍。因此很早以来人们就尝试着利用风能, 比如风车王国荷兰的众多磨坊。而利用风能进行发电的尝试, 最早开始于 20 世纪 30 年代。丹麦、瑞典、前苏联以及美国等一些国家, 利用航空工业中的旋翼技术, 成功研制出了一些小型的风力发电装置。由于风力发电没有火力发电等过程中造成的环境污染, 属于清洁能源, 并且风力发电技术也日趋成熟, 产品质量可靠, 经济性日益提高, 从那以后, 风力发电的发展十分迅速。在世界各国的发电总量中, 风力发电所占的比重也越来越大。

#### 一、风力发电的运行

风力发电系统主要由风力发电机及其控制系统组成。现代风力发电机采用空气动力学原理, 就像飞机的机翼一样。风并非“推”动风轮叶片, 而是吹过叶片形成叶片正反面的压差, 这种压差会产生升力, 令风轮旋转并不断横切风流。