学校的理想装备

电子图书·学校专集

校园网上的最佳资源

电力科普知识

BOOK

内部资料 非卖品

目　录

第一章　电力技术与电力工业……（1）
第二章　火力发电……（8）
第三章　水力发电……（24）
第四章　核能发电……（32）
第五章　新能源和可再生能源发电……（39）
第六章　输电与配电……（46）
第七章　电力系统……（55）
第八章　供用电……（74）
第九章　电力环境保护……（86）
第十章　电力成本、电价和技术经济指标……（92）
第十一章　电力基本建设……（99）
第十二章　当代高新技术的发展与电力新技术……（108）

为贯彻中共中央、国务院“关于加强科学技术普及工作的若干意见”的精神和落实电力部领导关于加强科普工作的指示，进一步提高电力职工和各级领导干部的科技素质，更好地依靠科技进步，促进电力工业的迅速发展，特编写出版《电力科普知识》一书。本书对电力技术、生产建设和技术经济等知识，以及当代世界高新技术发展和电力科技的新发展等方面作了深入浅出的论述，知识面宽、通俗易懂，可作为技术工人、技术人员、管理人员和领导干部了解电力科技知识和高新技术知识的“入门”读物，供学习参考。

本书是在电力部电力科普知识竞赛组委会具体指导下，由电力科普知识编委会编写。参加编写人员有曾庆禹、刘纫■、杨勤明、肖国泉、周照茂、曾鸣、刘惠民、朱新华、宗士杰、饶纪杭、林江、杨飞、甄雷、楼重义、唐金生、王绍民、陈梅倩、孙海波、于海琴、冯爱玲、马驯、王洪生、杨学勤、周晖等。电力部电力科普知识竞赛组委会全体成员和有关专家对本书初稿进行了审阅，提出了宝贵的修改意见。本书的编写得到了电力部有关司局和在京有关单位的领导、专家和学者的指导，以及科技人员的支持与帮助，在此表示衷心感谢。由于时间仓促、水平与条件的限制，本书难免存在缺点与不足，请广大读者批评指正。

第一章　　电力技术与电力工业

一、电力技术与电力工业发展简史

电力技术的发明、电力工业的建立至今已有 100 余年的历史。今天，电与人们的生产、生活、科学技术研究和精神文明建设息息相关，对现代社会的各个方面已产生直接的或间接的巨大作用和影响，已成为现代文明社会的重要物质基础。

1831 年，法拉第发现电磁感应原理，奠定了发电机的理论基础。科学的发现，引起了技术的发明。1866 年，维·西门子发明了励磁电机，并预见：电力技术很有发展前途，它将会开创一个新纪元。接着，1876 年，贝尔发明了电话；1879 年，爱迪生发明了电灯。这三大发明照亮了人类实现电气化的道路，继蒸汽机技术革命后，引起了电力技术革命。

1882 年，爱迪生建成世界上第一座较正规的发电厂，装有 6 台直流发电机，共 900 马力（1 马力=0.735kw，下同），通过 110V 电缆供电，最大送电距离 1.6km，供 6200 盏白炽灯照明用，完成了初步的电力工业技术体系。

1881 年，卢西恩·高拉德和约翰·吉布斯取得“供电交流系统”专利，美国发明家乔治·威斯汀豪斯买下此专利，并以它为基础于 1885 年制成交流发电机和变压器，并于 1886 年建成第一个单相交流送电系统，1888 年又制成交流感应式电动机。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送电线路。三相交流电的出现克服了原来直流供电容量小，距离短的缺点，开创了远方供电，电力除照明外，用于电力拖动等各种用途的新局面。

电力技术和电力工业的出现和发展改变了人们的生产和生活面貌，促使经济以前所未有的速度向前发展。美国原来落后于英国、德国等国家，电力技术革命使美国后来者居上，成为最发达的国家。电力的广泛应用，电力需求的增加，促使电力技术和电力工业进一步向高电压、大机组、大电网方向发展。高压输电、大型汽轮发电机、大型水轮发电机应运而生，迅速发展。

1960 年，美国制成 50 万 kW 汽轮发电机，1963 年制成 100 万 kW 双轴汽轮发电机。1973 年，美国将 BBC 公司制造的 130 万 kW 双轴汽轮发电机投入运行。1971 年，原苏联将单轴 80 万 kW 机组投入运行。1980 年，在科斯特罗姆火电厂单轴 120 万 kW 机组投入运行，这是世界上唯一的一台单轴最大机组。

在高电压输电方面，瑞典于 1954 年首先建成第一条 380kV 输电线，此后美国、加拿大等欧美国家相继使用 330～345kV 输电系统。1964 年，美国建成第一条 500kV 输电线路，原苏联也于 1964 年完成了 500kV 输电系统。1965 年，原苏联建成±400kV 直流输电线路。1965 年，加拿大建成 765kV 输电线路。1989 年，原苏联建成一条世界上最高电压 1150kV、长 1900km 交流输电线路。到 1990 年，全世界拥有发电设备 27.46 亿 kW，其中火电占 64．9%，水电占 23%，核电占 12．1%，全世界发电量为 117340 亿 kW·h。

随着电子技术、电子计算机技术和自动化技术的发展，电力工业自

动化迅速向前发展。以大机组、大电厂、高电压、大电网、高度自动化为特点的现代化电力工业在不同的国家已经形成或正在形成。

二、中国电力工业发展

中国电力工业从 1882 年上海创建第一个 12kW 发电厂至今，已有 110 余年历史。1949 年，全国发电装机容量 185 万 kW，年发电量 43 亿 kW·h，分别名列世界第 25 位和 21 位。中华人民共和国成立后，用了 30 年时间，使全国发电装机容量达到 5712 万 kW，年发电量达 2566 亿 kW·h。自 1978 年改革开放以来，只用了 10 年时间，发电装机容量和年发电量就翻了一番。1990 年，全国发电装机容量达 13789 万 kW，年发电量达 6213 亿 kW·h，均名列世界第 4 位。1994 年，全国发电装机容量为 19990 万 kW，其中火电占 74%，水电占 24．8%，核电占 1．2%，年发电量为 9279 亿 kW·h。

随着电力工业的发展和电力技术的不断进步，1972 年建成了刘一天一关 330kV 输电线路，接着 1981 年建成了第一条姚—双—武 500kV 输电线路。1990 年，第一条葛洲坝至上海、南桥±500kV 直流输电线路投入运行。1975 年，我国自行设计制造的第一台 30 万 kW 汽轮发电机在姚孟电厂投入运行。目前，国内运行最大机组是 60 万 kW 汽轮发电机和 90 万 kW 核电机组；全国（除台湾省外）已形成东北、华北、华东、华中、西北和南方联营六大跨省（区）电网，以及山东、福建、四川、海南、新疆和西藏等省（区）独立电网。一个初步现代化的电力工业技术体系已经建立起来。

三、电力与能源

电力是通过一定的技术手段从其他能源转换而来的能源。人类利用的能源包括已开采出来可供使用的自然资源和经过加工或转换的二次能源。电力是二次能源。能源可分为可再生能源与非再生能源。可连续再生、永久持续利用的能源，如水力、风能、潮汐能和太阳能，均称为可再生能源，而经过亿万年形成的，短期内无法恢复的能源，如煤、石油、天然气等称为非再生能源。自然界存在的能源资源，通过相应的技术都可转换为电能。目前，用于发电的主要能源是煤、石油、天然气、水力、风能、潮汐、地热、太阳能、核能和生物质能。在技术、经济可行的情况下，应首先考虑利用可再生能源发电，造福人类。

电力是一种便于集中、传输、分散、控制和转换成其他形式的能源，它的利用已遍及国民经济和人民生活的各个方面，成为现代社会的必需品。同时，电力又是使用方便、清洁的能源。因此，世界各国都尽可能地将各种能源转换成电能再加以利用，例如：美国的发电能源消耗量占一次能源消耗总量的比重，1970 年为 24．7%，1980 年为 34．8%，1990 年为 43．6%，按预测，本世纪末将达到 50%以上。1990 年，我国的比重为 23．1%，按照规律，这一比重必将逐步增加。

电力消耗量的年增长率与国民经济增长率的比值称为电力弹性系数。它是分析电力工业发展与国民经济发展相互依存的内在关系的重要指标，系数的大小与产业结构和科技进步有关。为了保持国民经济持续、

快速、健康向前发展，电力工业要保持与国民经济同步发展（即电力弹性系数为 1），同时要加快技术改造和技术进步的步伐，坚持开发与节约并重的方针，使电力工业的发展适应国民经济发展和人民生活水平不断提高的需要。

四、电力技术与电力工业

人类对客观世界的认识出现飞跃，是科学革命；人类改造客观世界，技术的飞跃就是技术革命。而科学革命、技术革命会引起整个社会生产体系的变革，即产业革命。人类近代历史经历过蒸汽机技术革命和电力技术革命，因此，电力技术是人类历史上重要的知识宝库。

技术是什么？18 世纪末，法国科学家狄德罗在他主编的《百科全书》中，给技术下了一个定义，即“技术是为某一目的的共同协作组成的各种工具和规则体系”。他所阐述的技术概念包括 5 个方面的要点，即①技术是“有目的”，②强调技术的实现是通过广泛“社会协作”完成的；③技术表现首先是生产“工具”，即硬件；④技术表现的另一重要形式是“规则”，即生产工艺、方法、制度等知识，是软件；⑤技术是成套的知识体系。狄德罗给技术下的定义，今天仍有指导意义。

电力工业主要包括 5 个生产环节。①发电，包括火力发电、水力发电、核能和其他能源发电；②输电，包括交流输电和直流输电；③变电；④配电；⑤用电，包括用电设备的安装、使用和用电负荷的控制，以及将这 5 个环节所存在的设备连接起来的电力系统。此外，还包括规划、勘测设计和施工等电力基本建设，电力科学技术研究和电力机械设备制造。

电力技术，按照狄德罗给技术的定义是形成电力产业，发展电力产业的综合的知识体系，它随现代科学技术的发展而不断向前发展。电力技术的发展推动电力工业的发展，电力工业的发展史就是电力技术的发展史；电力工业的发展需要更先进的技术支持，反过来促进电力技术的发展。因此，电力工业发展必须依靠科学技术进步，电力科学技术的研究必须面向电力建设，为电力工业发展服务。

五、电力工业的特点

电力工业与生产其他商品的行业一样，其产品有生产、运输、销售和使用的过程，但又有显著的不同。目前，它是集产、运、销为一体。电力作为广泛利用的二次能源，电能与其他能源不一样，一般不能大规模储存。电力生产过程是连续的，发、输、变、配电和用电是在同一瞬间完成的，因此发电、供电、用电之间，必须随时保持平衡。

在一个电力系统内，电力用户有千家万户，其用电的时间和用电的数量虽然有一定规律，但很难准确预测。为了满足用户的电能需要，电力系统内的发电容量和设备均需要有相应的备用容量，以适应各种用户用电因素的变化。

在一个电力系统内，发电、供电和用电设备在电磁上相互连接，相互耦合，因此，任何一点发生故障或任何一个设备出现问题，都会在瞬

间影响和波及全系统，如果处理不及时和控制措施不恰当，往往会引起连锁反应，导致事故扩大，在严重情况下会使系统发生大面积停电事故。因此，保证电力系统的安全、稳定运行显得特别重要。所有发供用电设备在制造时，均有规定的额定容量和短时过负荷的能力，使用时必须按照厂家规定的容量使用，这样才能保证设备的安全。为了整个电力系统的安全、经济运行和可靠地向用户供电，电力生产过程有严格的统一调度制度。系统内各个电厂、变电站和供电所都必须接受统一调度，执行调度员的命令；在正常运行条件下，随时保持电力供需平衡；在故障出现时，按调度员命令，迅速处理事故，使事故的影响限制在最小范围，以减少事故的损失。

第二章　　火力发电

一、火力发电概述

利用煤、石油、天然气等自然界蕴藏量极其丰富的化石燃料发电称为火力发电。按发电方式，它可分为汽轮机发电、燃气轮机发电、内燃机发电和燃气-蒸汽联合循环发电，还有火电机组既供电又供热的“热电联产”。

汽轮机发电又称蒸汽发电，它利用燃料在锅炉中燃烧产生蒸汽，用蒸汽冲动汽轮机，再由汽轮机带动发电机发电。这种发电方式在火力发电中居主要地位，占世界火力发电总装机的95%以上。

内燃机和燃气轮机发电均称燃气发电。

内燃机发电主要指功率较大的柴油机发电。柴油机系统压缩点火式发动机，将吸入的空气用活塞压缩到高温与喷入的燃油着火燃烧产生高温高压，推动机械旋转运动，带动发电机发电。它的优点是单位容量重量轻，占地面积小，投资省、建设速度快，缺点是使用燃料价格高，发电成本贵、容量小、维修工作量大、运行周期短，除特殊场合外，多用作尖锋供用电电源和应急电源。目前，最大的单机柴油发电机组功率已达4．5万kW，净发电效率达30%～40%。

燃气轮机是旋转式机械，与柴油机相比更适宜于作为常用发电设备。它通过压气机将空气压缩后送入燃烧室，与喷入的燃料混合燃烧产生高温高压燃气，进入透平机膨胀作功，推动发电机发电。它的单机容量远比汽轮机小，最大功率已发展到13～21．6万kW，净发电效率可达35%以上，主要用于带尖峰负荷。

把燃气发电和蒸汽发电组合起来就是燃气-蒸汽联合循环发电，它有较高的电能转换效率，受到世界各国重视。

二、火力发电厂的基本生产过程

这里介绍的是汽轮机发电的基本生产过程。

火力发电厂的燃料主要有煤、石油（主要是重油、天然气）。我国的火电厂以燃煤为主，过去曾建过一批燃油电厂，目前的政策是尽量压缩烧油电厂，新建电厂全部烧煤。

火力发电厂由三大主要设备——锅炉、汽轮机、发电机及相应辅助设备组成，它们通过管道或线路相连构成生产主系统，即燃烧系统、汽水系统和电气系统。其生产过程简介如下。

1．燃烧系统

燃烧系统如图2－l所示，包括锅炉的燃烧部分和输煤、除灰和烟气排放系统等。煤由皮带输送到锅炉车间的煤斗，进入磨煤机磨成煤粉，然后与经过预热器预热的空气一起喷入炉内燃烧，将煤的化学能转换成热能，烟气经除尘器清除灰分后，由引风机抽出，经高大的烟囱排入大气。炉渣和除尘器下部的细灰由灰渣泵排至灰场。

2．汽水系统

汽水系统流程如图2－2所示，包括锅炉、汽轮机、凝汽器及给水泵

等组成的汽水循环和水处理系统、冷却水系统等。

水在锅炉中加热后蒸发成蒸汽，经过热器进一步加热，成为具有规定压力和温度的过热蒸汽，然后经过管道送入汽轮机。

在汽轮机中，蒸汽不断膨胀，高速流动，冲击汽轮机的转子，以额定转速（3000r／min）旋转，将热能转换成机械能，带动与汽轮机同轴的发电机发电。

在膨胀过程中，蒸汽的压力和温度不断降低。蒸汽做功后从汽轮机下部排出。排出的蒸汽称为乏汽，它排入凝汽器。在凝汽器中，汽轮机的乏汽被冷却水冷却，凝结成水。

凝汽器下部所凝结的水由凝结水泵升压后进入低压加热器和除氧器，提高水温并除去水中的氧（以防止腐蚀炉管等），再由给水泵进一步升压，然后进入高压加热器，回到锅炉，完成水—蒸汽—水的循环。给水泵以后的凝结水称为给水。

汽水系统中的蒸汽和凝结水在循环过程中总有一些损失，因此，必须不断向给水系统补充经过化学处理的水。补给水进入除氧器，同凝结水一块由给水泵打入锅炉。

3．电气系统

电气系统如图 2－3 所示，包括发电机、励磁系统、厂用电系统和升压变电站等。

发电机的机端电压和电流随其容量不同而变化，其电压一般在 10～20kV 之间，电流可达数千安至 20kA。因此，发电机发出的电，一般由主变压器升高电压后，经变电站高压电气设备和输电线送往电网。极少部分电，通过厂用变压器降低电压后，经厂用电配电装置和电缆供厂内风机、水泵等各种辅机设备和照明等用电。

4．火力发电厂的效率提高

在火力发电厂中，汽轮机组容量越大，效率越高。汽轮机组单机容量的增大是随蒸汽参数提高而实现的。蒸汽参数就是蒸汽的压力和温度，其单位分别是帕（Pa）和摄氏度（℃）。

最早的汽轮机组是低温、低压机组。随着科学技术的进步，汽轮机组逐渐发展为中温中压、高温高压、超高压、亚临界压力、超临界压力机组，现在正发展超超临界压力机组。水的临界压力是 227.98×10^5Pa（225 大气压），该值以上的压力称为超临界压力，172.25×10^5Pa（170～210 大气压）一般称为亚临界压力。水的压力越高，水的沸点（也称饱和温度）也越高。在临界压力下，水加热到沸点 374℃（称临界温度）时，一下子全部变成饱和蒸汽。此时，饱和蒸汽和饱和水的比重相同，两种状态没有任何区别。

目前，我国火力发电厂采用的蒸汽参数和相应的机组容量的关系如表 2－1 所示。

表 2－1 我国火力发电厂采用的蒸汽参数和
相应的机组容量的关系

电厂参数类型	汽轮机汽压（Pa）	汽轮机汽温（℃）	机组容量范围（MW）
中温在压	34×10^5	435	6～50
高温高压	88×10^5	535	25～100
超高压	132×10^5	535	125～200
亚临界压力	167×10^5	535	300
超临界压力	241.3×10^5	538/538	600

提高火电厂效率，必须减少生产过程中的热量损失。火电厂热量损失主要是汽轮机乏汽热损失，以中温中压机组为例，每公斤汽轮机进汽的热含量为 3.308×10^3kJ（790 大卡），而每公斤乏汽在凝汽器内损失的热量约为 2.093×10^3kJ（500 大卡），这是火电厂效率低的主要原因。

提高火电厂的效率措施除提高锅炉、汽轮机等设备的制造、运行水平外，主要是提高蒸汽参数和采用中间再热。进入汽轮机的蒸汽参数越高，含的热量也越高，但是汽轮机排出的乏汽损失的热量因蒸汽参数的提高却变化不大。这样蒸汽参数提高后，转变为机械能的热量相对增加，从而可提高火力发电的效率。

中间再热就是把在汽轮机高压缸内已经部分膨胀做功后降低了汽压、汽温的蒸汽，再送回锅炉内的中间再热器中重新加热到初蒸汽温度，然后再引回到汽轮机的中、低压缸继续做功，这样可提高效率 5%～6%，同时可降低汽轮机低压缸中蒸汽的水分，有利于安全运行。因此，超高压以上的机组普遍采用中间再热。

提高火电厂效率的另一途径是利用供热式汽轮机的抽汽或乏汽供生产或生活用，从而减少排到凝汽器中的热量损失。这种热电联产方式，发电效率可达 50%～80%。

目前世界上大多数国家，绝大多数机组采用亚临界压力；采用超临界压力机组最多的国家主要是美国、日本和原苏联。我国引进的超临界压力的 600MW 机组已投入运行。日本于 1990 年建成 2 台容量为 700MW 的超临界压力机组，发电效率为 40.6%，其蒸汽参数为 310×10^5Pa、566／566／566℃，居于现阶段汽轮机发电的领先地位。

三、锅炉设备

锅炉是利用燃料燃烧释放的热能加热给水以获得规定参数（温度、压力）和品质的蒸汽的设备，是火力发电厂的主要设备之一。按锅炉炉膛结构和燃烧方式，划分为链条炉、煤粉炉、液态排渣炉、旋风炉和沸腾炉等，在我国单机容量 25MW 以上的火电机组都是由煤粉炉供应蒸汽。按照锅炉水流动的方式，锅炉又可分为自然循环锅炉、强迫循环锅炉和直流锅炉。自然循环锅炉设备的组成，如图 2－4 所示。

锅炉是一庞大而复杂的设备，它由锅炉本体及辅助设备所组成。锅炉本体由“锅”和“炉”两大部分组成，所谓“锅”是指锅炉的汽水系统，主要包括汽包、下降管、水冷壁等；而“炉”是指燃烧系统，主要包括炉膛、燃烧器、烟风道及空气预热器，它的任务是使燃料燃烧放热，

产生高温火焰和烟气，并把热量传递给汽水系统。锅炉辅助设备包括输煤系统、制粉系统、给水系统、送风机、引风机、烟囱、除灰除尘设备，以及热工仪表自动调节装置等。

锅炉设备的主要工作过程简述如下：由输煤皮带运来的煤送入磨煤机磨制成煤粉后，被热空气烘干并携带出磨煤机进入粗粉分离器中分离，符合要求的煤粉送入输粉管道，经燃烧器喷入炉膛燃烧。在炉膛内煤粉的燃烧非常强烈，其中心温度可达 1300～1400℃。燃烧所形成的火焰及生成的烟气主要以辐射的方式把热量传给炉膛四周被称为水冷壁的管子上，加热其中的水并使其部分蒸发成蒸汽。离开炉膛的烟气依次流过过热器、省煤器等各个对流受热面，逐步将热量以对流的方式传给这些受热面中的蒸汽和水，最后流过空气预热器将热量传给来预热的空气。烟汽流出空气预热器，经高效除尘后被吸风机送入烟囱，排入大气。过热器是电站锅炉的重要组成部分，它的作用是把水冷壁中蒸发的饱和蒸汽加热成为具有一定温度的过热蒸汽。提高蒸汽温度可使蒸汽在汽轮机中的作功能力提高，从而提高热力循环的效率。流出过热器的蒸汽称为主蒸汽，主蒸汽经主汽管道流向汽轮机，推动汽轮机运转，从而带动发电机发电。

供给锅炉的水要经过严格的化学处理，除去硬度和氧以减少对设备的腐蚀。给水由给水泵在送到锅炉以前，已在汽轮机车间受到低压、高压加热器的加热，送入锅炉后经省煤器进一步加热。由此可知，锅炉的工作过程可以看成是燃料在炉膛内燃烧放热生成高温烟气，通过热交换不断地将热量由烟气传给水和蒸汽的过程。

省煤器和空气预热器都布置在锅炉尾部烟道中，故统称锅炉的尾部受热面。它们的共同作用是：吸收烟气的余热，降低排烟温度，提高锅炉效率，节约燃料。

自然循环锅炉的优点是可以将汽包内含杂质浓度较高的水连续排去一部分（连续排污），还可以在水冷壁下部定期放水，除去沉淀的水渣（定期排污），对给水质量要求稍低，自动调节系统较简单。目前我国火电厂采用的锅炉绝大部分是自然循环锅炉。

锅炉的汽压越高，饱和蒸汽与饱和水的比重就越接近，使炉水自然循环的动力也越小。如果设计、运行不当，就容易发生水循环不良，引发爆管事故。一般汽压超过 16.6MPa（170 大气压）时不宜采用此种锅炉。

直流锅炉的特点是没有汽包，水在给水泵的压力下，一直流过锅炉的蒸发部分，不往返循环，如图 2－5 所示。

直流锅炉的优点是没有汽包，比较容易制造，钢材耗量少，缺点是不能排污，对水质要求高，自动调节也比较复杂。

直流锅炉可用于任何蒸汽参数，特别适用于超高压以上的电厂。

四、汽轮机设备

汽轮机设备包括汽轮机、调速系统、凝汽器和附属设备等。

汽轮机是以蒸汽作为工作介质的原动机，其作用是将来自锅炉的高温高压蒸汽所具有的热能转换为汽轮机转子旋转的机械能，转子带动发电机就可以将机械能再转换为电能。

汽轮机工作依靠的主要零部件是喷嘴（或称静叶片）和动叶片。喷嘴起着将蒸汽的势能转换为动能的作用，从喷嘴出来的蒸汽具有每秒数百米的高速，这样的高速汽流冲击到装在叶轮上的动叶片，就可以推动由动叶片、叶轮、轴等零部件组成的转子连续不断地高速旋转，再带动发电机源源不断地产生电能。动叶承受蒸汽冲击力作用的原理叫冲动原理。

当蒸汽在动叶流道中流过时，如果蒸汽在其内继续膨胀降压，进一步将热能转换为动能，蒸汽在高速离开动叶的同时给其一个反作用力，就象火箭的工作原理一样，这叫反作用原理。

根据蒸汽产生冲击力和反作用力大小比例以及结构的不同，汽轮机可分为冲动式和反动式两大类，目前我国均有生产。

由一列喷嘴（静叶片）和一列动叶片构成汽轮机最基本的作功单元，称为“级”。汽轮机是由许多级串联起来的，蒸汽在各级内逐级膨胀作功，组成多级汽轮机。现代电厂使用的大功率汽轮机往往由几十级至一百多级组成，分装在高压缸、中压缸、低压缸中，成为多缸汽轮机。图 2－6 所示为国产 300MW 汽轮机示意图。

在汽轮机内作完功的蒸汽被排至低压缸后的凝汽器，在凝汽器内蒸汽将热量进一步传给循环水，最终成为凝结水，凝结水再通过高低压加热器等进入锅炉。所以凝汽器的任务有两个：一是使作完功的蒸汽凝结，使排汽侧形成负压（称真空状态），以提高热效率；其次是回收作完功的蒸汽，供给锅炉洁净的凝结水。

调速系统的作用是保持汽轮机在额定转速 3000r／min 下稳定运行，调整进汽量，以适应电力负荷变化的需要。危急保安器是装在汽轮机大轴上的重要保护装置。当调速系统动作失灵，汽轮机转速超过 3300r／min 时，危急保安器动作，迅速将主汽门关闭，防止汽轮机超速破坏，以免造成设备破坏和人身伤亡事故。

五、汽轮发电机

火电厂中用来发电的电机都是由汽轮机或燃气轮机拖动的同步发电机。它是利用导线切割磁力线感应出电势的电磁感应原理，将原动机的机械能变为电能输出。同步发电机由定子和转子两部分组成。定子是发出电力的电枢，转子是磁极。定子由电枢铁芯，均匀排放的三相绕组及机座和端盖等组成。转子通常为隐极式，由励磁绕组、铁芯和轴、护环、中心环等组成。汽轮发电机的极数多为两极的，也有四极的。

转子的励磁绕组通入直流电流，产生接近于正弦分布磁场（称为转子磁场），其有效励磁磁通与静止的电枢绕组相交链。转子旋转时，转子磁场随同一起旋转、每转一周，磁力线顺序切割定子的每相绕组，在三相定子绕组内感应出三相交流电势。发电机带对称负载运行时，三相电枢电流合成产生一个同步转速的旋转磁场。定子磁场和转子磁场相互作用，会产生制动转矩。从汽轮机输入的机械转矩克服制动转矩而作功。发电机可发出有功功率和无功功率。所以，调整有功功率就得调节汽机的进汽量。转子磁场的强弱直接影响定子绕组的电压，所以，调发电机端电压或调发电机的无功功率必须调节转子电流。

发电机的有功功率和无功功率几何相加之和称为视在功率。有功功率和视在功率之比称为发电机的功率因数（力率），发电机的额定功率因数一般为 0.85。

供给发电机转子直流建立转子励磁的系统称为发电机励磁系统。大型发电机励磁方式分为：①它励励磁系统；②自并激励磁系统。它励励磁是由一台与发电机同轴的交流发电机产生交流电，经整流变成直流电，给发电机转子励磁。自并激励磁是将来自发电机机端的交流电经变压器降压，再整流变成直流电，作为发电机转子的励磁。

六、汽轮机乏汽的冷却

汽轮机乏汽的冷却过程是火力发电厂生产过程的一部分，通常选用水作为冷却介质（水冷），这种系统简单，初投资小，运行可靠，但水的散失量大。一座 1000MW 火力发电厂每日的耗水量约为 $1.15\times10^5m^3$。这给贫水富煤地区建设电厂带来了困难。为解决这一问题，人们提出了用空气作为乏汽的冷却介质（空冷）。早在 30 年代末，德国首先在鲁尔矿区的 1.5MW 汽轮机组应用了直接空冷系统，使在贫水地区建设电厂成为可能。1987 年和 1988 年，山西大同第二发电厂的两台 200MW 机组首次引进了匈牙利的海勒式间接空冷系统，使我国火电厂空冷技术的发展进入一个新的阶段，该两台机组每小时能节水 $470m^3$。

用于乏汽冷却的空冷系统主要有 3 种，即直接空冷系统、带喷射式凝汽器的间接空冷系统和带表面式凝汽器的间接空冷系统。

直接空冷系统是将汽轮机的乏汽引入粗大的排汽管道，送到室外的空冷凝汽器内，轴流冷却风机使空气流过散热器外表面，将乏汽在散热器内冷却成水。该系统一般与高背压汽轮机配套。

带喷射式凝汽器的间接空冷系统，又称海勒式间接空冷系统。冷却水进入凝汽器直接与汽轮机乏汽混合并将其冷凝。冷凝混合后的水绝大部分由冷却水循环泵送至空冷塔散热器，与空气进行表面式换热冷却后，通过调压水轮机返回到喷射式凝汽器。还有少部分水经过凝结水精处理装置处理后作为锅炉给水。该系统可与中背压汽轮机配套。

带表面式凝汽器的间接空冷系统，又称哈蒙式间接空冷系统。它是在海勒式间接空冷系统基础上发展的，所不同的是冷却水与汽轮机排汽不相混合，进行表面换热。这样可以满足大容量机组对锅炉给水水质较高的要求。

七、火电厂电子计算机控制——现代火电厂自动化

火力发电设备的发展方向是采用高参数带有中间再过热的大容量单元式机组。随着单机容量的增大，火电厂系统日趋复杂，辅助设备和辅机数量多、容量大，结构也复杂，生产工况变化多，监视与控制项目数量大，只有在高度自动化的前提下，才能确保火电厂的安全、可靠和经济运行。

随着电子计算机的迅速发展，采用电子计算机对火力发电机组进行控制，进而对火电厂全厂进行控制，不仅成为可能，而且具有显著的经

济效益。现代化的大型火力发电机组和发电厂将广泛采用电子计算机进行控制。

计算机控制可实现的功能随各电厂要求的控制方式和控制范围有所不同，主要功能有：

（1）安全监视、数据处理。包括巡回检测、参数处理、越限报警、参数显示、制表打印、性能计算等。这是火电厂计算机运用的一种初级和最基本的功能。

（2）正常调节。在正常运行时，对锅炉、汽机、发电机等主辅设备进行直接或间接控制。

（3）管理计算。对生产过程可按数学模型进行计算，寻找最优工况，实现最优控制；对各运行指标进行计算，改善全厂的运行管理。

（4）事故处理。对生产过程进行监视和趋势预报，事故发生时进行分析和处理，并记录下事故时的设备状态和参数，供运行人员事后分析。

（5）机组起停。实现发电机的自动起停。

计算机对电厂的控制可分开环控制和闭环控制。开环控制方式就是火电厂生产过程的计算机安全监视。闭环控制方式分为：①直接数字控制（DDC），即利用计算机在正常运行时对汽温、汽压、负荷、给水进行控制及锅炉的点火灭火、升温升压、汽机的升速和加负荷等几乎所有项目进行控制；②监视控制方式（SEC），是指计算机不直接操作发电设备而是通过常规仪表或子回路控制等去控制发电设备，适宜于已有常规仪表和子回路控制系统对发电设备实行闭环控制的情况，利用计算机只在它们的上层进行监视和指挥；③触发控制（STC），即计算机向程序控制器发出触发信号，程序控制器按规定顺序起停多种电动机，适宜于辅机的起停方面。

计算机对电厂的控制还可分为：集中控制和分布式控制方式。集中控制是指一台发电机或全厂各台发电机的监视、控制以及管理集中于一台或两台计算机上。分布式控制方式如图 2－7 所示，其特点是控制任务分散在下层各级机上，在上层设置小型机或中型机进行总的管理，这是一种有前途的控制方式。

采用计算机控制可以：①提高火电机组或全厂的运行效率，机组运行稳定；②减少和避免重大事故，延长设备寿命；③节省运行人员，减轻劳动强度。

第三章　　水力发电

一、水力资源和水电站

天然的水流所蕴藏的位能或动能统称为水能或称水力资

源。水力是一种宝贵的自然资源，是取之不尽用之不竭的可再生能源，而且是洁净的能源。利用水能的最普遍的形式是建设水电站，利用水流的流量和落差发电，或称为水力发电。世界各国都竟相优先开发水力发电，作为电力工业的重要组成部分。

我国幅员辽阔，河川纵横，是世界上水力资源最丰富的国家之一，水力资源的蕴藏量达 6．8 亿 kW，约占全世界的 1／6，居世界第一位，可能开发的容量约 4 亿 kW，年发电量 1～2 万亿 kW·h 左右。这相当于每年提供 4～8 亿吨标准煤或 3～6 亿吨重油的能量。

水力发电是利用江河水流从高处流到低处存在的位能进行发电。当江河的水由上游高水位，经过水轮机流向下游水位时，以所具流量和落差做功，推动水轮机旋转，带动发电机发出电力。水轮发电机发出的功率 P 与上下游水位的落差（即水头）H 和单位时间流过水轮机的水量（即流量）Q 成正比，用公式表示为 $P=9.81HQ\eta$，η 为引水系统水轮机和发电机的总效率，一般 $\eta\leq1.0$。

因此，为了有效地利用天然水能，需要用人工修建集中落差和能调节流量的水工建筑，如筑坝形成水库、建设引水建筑物和厂房等，以构成水电站。由于天然水能存在的状况不同，因此，水电站的型式多种多样。

二、水电站的型式

（1）按集中落差方式的不同，水电站可区分为堤坝式、引水式和混合式

堤坝式水电站又可按水电站厂房所处位置的不同，分为坝后式、河床式和岸边式。

坝后式水电站由堤坝集中水流落差，厂房设在堤坝下游坝处，不承受上游水的压力。

河床式水电站适宜于建筑在河床宽阔、落差小、流量大的平原河道上，厂房与堤坝一同起挡水作用。

岸边式水电站的厂房设在大坝下游的岸边，发电水流通过隧洞或埋管流入厂房。

引水式水电站是在河道坡度陡峻或急拐弯的山区河道，通过修引水工程将水流的落差集中用来发电。

混合式水电站的发电落差，一部分靠大坝蓄水提高水位，获得落差，一部分利用地形修建引水工程集中落差。

（2）按水库蓄水的调节能力不同，水电站可分为径流式水电站、日调节水电站、周调节水电站、年调节水电站和多年调节水电站。

径流式水电站没有调节水库，上游来多少水发多少电，发电能力随季节水量变化，丰水期要大量弃水。

日调节水电站有水库蓄水，但库容较小，只能将一天的来水蓄存起来用在当天要求发电的时候。

周调节水电站是将周休日的来水积存起来，平均在本周的工作日使用。

年调节水电站的库容较大，可将平水年的丰水期多余的水量贮存起来，在枯水期间使用。

多年调节水电站的库容更大，能把丰水年多余的水量积存起来在枯水年使用。

年调节和多年调节水电站具有比较稳定和稳定的发电能力，在运行时同样可以进行日调节和周调节，能够充分利用水力资源。

三、水电站的构成

水电站由水工建筑物、厂房、水轮发电机组以及变电站和送电设备组成，如图 3—1 所示。

（1）水工建筑物包括大坝、引水建筑物和泄水建筑物等。

大坝又称拦河坝，是水电站的主要建筑物，作用是挡水提高水位，积蓄水量，集中上游河段的落差形成一定水头和库容的水库，水轮发电机组从水库取水发电。大坝可分为混凝土坝和土石坝两大类。混凝土坝分为重力坝、拱坝和支墩坝 3 种。土石坝分为土坝、堆石坝、土石混合坝，又统称当地材料坝。大坝的选型要根据坝址的自然条件、建筑材料、施工现场、导流、工期、造价等进行综合比较后确定。

引水建筑物包括组成建筑物的进水口、拦污栅、闸门等以及组成输水建筑物的渠道、隧洞、调压室、压力管道等。

泄水建筑物主要包括溢洪坝、溢流坝、泄水闸、泄洪隧道及底孔等，用于渲泄洪水、放空水库、冲砂、排水和排放漂水等。

厂房是安装水轮发电机组及其配套设备的场所。根据自然条件、机组容量和电站规模可分为地面厂房、地下厂房和坝内厂房几种。

（2）水轮发电机组。水轮发电机组由水轮机与发电机的轴相联，水轮机接受水的位能和动能，转换为旋转的机械能驱动发电机发电。

水轮机按工作原理可分为冲击式水轮机和反击式水轮机。冲击式水轮机的转轮受到水流的冲击而旋转，此射水流的压力不变，转轮将水流的动能转换为旋转的机械能。反击式水轮机的转轮是接受水流的反作用力而旋转，此射水流的位能和动能都在改变，但主要是位能转换为旋转的机械能。

冲击式水轮机可分为切击式和斜击式两种。切击水轮机转轮圆周布置多种水斗，喷嘴将水的位能变为动能，形成高速水流沿转轮圆周的切线方向射向双 U 形水斗中部，水流在水斗中折转向两侧排出。斜击式水轮机的转轮圆周密布叶片，喷嘴出来的高速水流从转轮一侧倾斜冲击叶片使转轮旋转。水流经转轮上的叶折转后从另一侧流出。反击式水轮机由带有导叶的进水装置和具有数个叶片的转轮组成，可分为混流式、轴流式、斜流式和贯流式几种。在混流式水轮机中，水流径向流入导叶再进入转轮，然后轴向流出转轮。在轴流式水轮机中，水流径向进入导叶，在导叶与转轮间由径向转为轴向，转轮区域内水流沿轴向流动。在斜流

式水轮机中，水流倾斜于主轴某一角度流入转轮。

各式水轮机的使用水头和比转速见表 3－1，比转速是几何相似的水轮机在 1m 水头下发出 1kW 功率时的转速。定浆式的转轮叶片为固定的，转桨式的转轮叶片可以绕叶片轴旋转。

从表 3－1 中可以看出，混流式水轮机适用的水头范围大，广泛用于大中型水电站。

表 3－1 水轮机的使用水头和比转速

类别			使用水头（m）		比转速
			小型	大、中型	
冲击式	水斗式		大于 100	大于 300	10~35（单喷嘴）
	斜击式		20~300		30~70
反击式	轴流式	定桨式	3~70		200~800
		转桨式	3~80		200~800
	贯流式	定桨式	小于 20		600~1000
		转桨式	小于 20		600~1000
	混流式		5~200	30~700	50~300
	斜流式	定桨式	40~120		150~350
		转桨式	40~120		150~350

水轮发电机的特点是：①转速较低，一般均在 750r／min 以下，有的只有几十转／分；②由于转速低，故磁极数较多；③结构尺寸和重量都较大；④大、中型水轮发电机一般采用竖轴。

水轮发电机主要由定子、转子、推力轴承、机架、冷却系统和励磁系统等组成。定子是产生电能的部件，由绕组、铁芯和机壳组成。转子是产生磁场的转动部件，由支架、轮环和磁极组成。推力轴承是承受竖轴转子（水轮机和发电机）的重量和水轮机轴向推力的部件。大中型水轮发电机一般采用空气冷却，部分采用水冷却。目前，国外投入运行的大型水轮发电机采用水冷却。

四、水电建设

水电建设是水电开发的全过程，水电建设大多要建拦河坝截断水流，抬高水位，其功能除发电之外，还要起到防洪、灌溉、航运、养殖和旅游等效益，但也会对上下游交通和生态环境造成影响。因此，水电建设要按照全面规划、统筹兼顾、综合平衡的原则，正确处理远期与近期、干流与支流、上、中、下游、防洪、发电、灌溉、航运以及与当地电力系统实际情况的关系。在流域规划中应根据综合利用的原则和水

文、地质等条件进行河流的梯级开发。合理选择坝址，确定坝高和库容，以求最佳的综合效益。优先开发上游梯级，并使之具有较好的调节能力，将有利于下游梯级充分利用水能和改善航运。

五、水电站的运行

要根据所在电力系统的具体情况，发挥水电机组能够调峰、调频、调相和紧急备用的特点，充分利用水库的水量和水头来满足电力系统安全经济运行的需要。一般在洪水期间应充分利用水量多发电，使全部机组投入满发，承担电力系统的基荷。在水库供水期间，尽量保持水库高水位运行，以保持水轮机的效率，少用水多发电。要注意水库调度，处理好来水与用水、发电与防洪、发电与灌溉、水头与水量等各种矛盾。切忌不管水位高低，不顾来水如何超量发电造成被动。要根据水文变化情况结合预报，掌握各个时期水库来水量，了解各方的用水要求，及时蓄水放水，以求水库的最大综合效益。

六、抽水蓄能

电力的生产和消费是同时完成的。在负荷低谷时，发电厂的发电量可能超过了用户的需要，电力系统有剩余电能；而在负荷高峰时，又可能出现发电满足不了用户需要的情况。建设抽水蓄能电站能够较好地解决这个问题。抽水蓄能电站有一个建在高处的上水库（上池）和一个建在电站下游的下池。抽水蓄能电站的机组能起到作为一般水轮机的发电的作用和作为水泵将下池的水抽到上池的作用。在电力系统的低谷负荷时，抽水蓄能电站的机组作为水泵运行，在上池蓄水；在高峰负荷时，作为发电机组运行，利用上池的蓄水发电，送到电网。

建设抽水蓄能电站的关键是选好站址。一般要求上、下池之间的落差愈高愈好。大多在已有水库的地方寻找山头建设上池，以原有水库作为下池。也可选择已有水库附近的谷地建设下池，以原有水库作为上池。站址选对了可大量节约建设资金。

抽水蓄能电站的关键设备是水泵、水轮、电动发电机组。初期的机组是水泵与水轮机分开的组合式水泵水轮机组。以后才发展为可逆水泵水轮机，把水泵与水轮机合为一台机器。正转是水轮机，反转即是水泵。电动发电机也是一台特殊的电机，受电时是电动机驱动水泵抽水，为上池放水；水泵变为水轮机时，电动发电机也就成为发电机。

抽水蓄能电站除调峰、填谷之外，也可用作调频、调相和事故备用。抽水蓄能电站能提高电力系统高峰负荷时段的电力（功率），但它抽水和发电都有损耗，俗称用 4kW·h 换 3，即低谷时段如以 4kW·h 的电量去抽水，换来高峰时段放水发电只有 3kW·h。抽水蓄能电站的效益除峰谷电价差之外，更重要的是改善了电网的供电质量，提高了火电机组，特别是核电机组的负荷率，降低了这些机组的发电成本。

第四章　　核能发电

核能指原子核能，又称原子能，是原子结构发生变化时放出的能量。目前，从实用来讲，核能指的是一些重金属元素铀、钚的原子核发生分裂反应（又称裂变）或者轻元素氘、氚的原子核发生聚合反应（又称聚变）时，所放出的巨大能量，前者称为裂变能，后者称为聚变能。通常所说的核能是指受控核裂变链式反应产生的能量。

核能的特点是能量高度集中。lt 铀—235（U^{235}）在裂变反应所放出的能量约等于 lt 标准煤在化学反应中所放出能量的 240 万倍。据估算，地球上已探明的易开采的铀储量，如果以快中子堆加以利用的话，所提供的能量将大大超过全球可用的煤、石油和天然气储量的总和。现在核能已成为一种大规模和集中利用的能源，可以替代煤、石油和天然气，目前主要用于发电。

核能发电就是利用受控核裂变反应所释放的热能，将水加热为蒸汽，用蒸汽冲动汽轮机，带动发电机发电。从 1954 年原苏联建成世界上第一座核电站开始，到 1991 年全球已有 420 座核电站在 26 个国家运行。总装机容量达 3．27 亿 kW，发电量占全世界的 16%。核电发展比较领先的地区是那些缺乏煤、石油和天然气以及水力资源的地区，如法国、比利时、韩国、日本等。我国东南部沿海地区远离煤炭生产基地，电力需求增长快，经济发达，发展核电具有十分重要的现实意义。我国自行设计制造的第一座核电站——秦山核电站和引进设备的大亚湾核电站已分别于 1993 年和 1994 年投入运行，结束了我国无核电的历史。

一、核裂变反应

重金属元素铀—235 的原子核吸收一个中子后产生核反应,使这个重原子核分裂成两个（极少情况下会是 3 个）更轻的原子核以及 2～3 个自由中子，还有 β、γ 射线和中微子，并释放出巨大的能量，这一过程称为核裂变。

当中子轰击铀—235 原子核时，一部分铀—235 原子核吸收中子而发生裂变。如果铀—235 核裂变产生的中子又去轰击另一个铀—235，将再引起新的裂变，如此不断地持续进行下去，就是裂变的链式反应。这种链式裂变反应自己维持进行，或者维持自持链式裂变反应的条件（或状态）是至少有一个中子而且不多于一个中子从每一次裂变到达另一次裂变。这种状态称为“临界状态”。

中子与铀—235 核的自持链式反应可以由人来控制。目前最常用的控制方式是向产生链式反应的裂变物质（如铀—235）中放入或移出可以吸收中子的材料。正常工作时使裂变物质处于临界状态，维持稳定的链式裂变反应，因而保持稳定的核能释放。如需停止链式反应，就放入更多的吸收中子材料；如果要求释放更多的核能，可以移出一定的吸收中子材料。这种能维持和控制核裂变，因而维持和控制核能——热能转换的装置，叫反应堆。

二、核能发电

核能发电的核心装置是核反应堆。核反应堆按引起裂变的中子能量分为热中子反应堆和快中子反应堆。

快中子是指裂变反应释放的中子。热中子则是快中子慢化后的中子。目前，大量运行的是热中子反应堆，其中需要慢化剂，通过它的原子核与快中子弹性碰撞将快中子慢化成热中子。热中子堆使用的燃料主要是天然铀（铀—235 含量 0．7%）和稍加浓缩铀（铀—235 含量 3%左右）。根据慢化剂、冷堆剂和燃料不同，热中子反应堆分为轻水堆（包括压水堆和沸水堆）、重水堆、石墨气冷堆和石墨水冷堆。目前已运行的核电站以轻水堆居多，我国已选定压水堆作为第一代核电站。

核反应堆的起动、停堆和功率控制依靠控制棒，它由强吸收中子能力的材料（如硼、镉）做成。为保证核反应堆安全，停堆用的安全棒也是由强吸收中子材料做成。

下面简要介绍压水堆和快中子堆核电站。

1．压水堆

压水堆是指用高压水作冷却剂，堆中的水在高压下通过蒸发器将二次回路的水加热变成蒸汽的反应堆。这种反应堆慢化剂也是水，用 2%～3%的低浓缩铀作燃料，用传热效率较高的水作介质，因此反应堆体积小，造价低，技术上比较容易掌握。其原理流程如图 4—1 所示。

整个一次回路系统被称为核蒸汽供应系统，也称为核岛，它相当于常规火电厂的锅炉系统。由蒸汽驱动汽轮发电机组进行发电的二次回路系统，与常规的火电厂汽轮机发电机基本相同，称为常规岛。

2．快中子增殖堆——核燃料的增殖

热中子反应堆主要利用天然铀内的少量铀—235，以及在反应堆生成的少量钚—239。因此，热中子堆仅能利用天然铀中 2%左右的铀。由快中子来产生和维持链式裂变反应的反应堆——快中子反应堆，有可能实现核燃料的增殖。快中子堆以钚—239 为裂变燃料，以铀—238 为增殖原料（不裂变）。钚—239 裂变反应应用的是快中子，而不是热中子。裂变产生的中子即是快中子，因此快中子堆中不需要慢化剂。用快中子轰击钚—239 原子核产生裂变；一个钚—239 原子核裂变放出的中子数平均值比一个铀—235 核裂变放出的中子数多，因此钚—239 裂变产生的中子数除维持反应堆的链式反应外，多余的中子被铀—238 俘获后可产生新的钚—239，而且新生的钚—239 比堆芯内消耗的钚—239 还多，这样就实现了核燃料的增殖。

快中子增殖堆的结构以钚—239 为核燃料组成堆芯，铀—238 为增殖原料，安放在堆芯周围形成增殖层（再生区）。冷却剂用液态钠，以大大减少中子的吸收损失。快中子增殖核电站原理流程如图 4—2 所示。

1951 年，美国按上述原理建成世界上第一座快中子增殖堆。到 70 年代末，快中子示范电站功率已达 3 万 kW，开始进入实用阶段。目前，已建成商业规模的示范堆。快中子增殖堆理论上可利用全部铀资源，实际上由于各种损失，估计可利用铀资源 60%以上，它被认为是最有前途的发电用反应堆。

三、核电站安全保障系统

为了保护核电站工作人员和核电站周围居民的健康，核电站必须始终坚持“质量第一，安全第一”的原则。

核电站的设计、建造和运行均采用纵深防御的原则，从设备、措施上提供多等级的重迭保护，以确保核电站对功率能有效控制，对燃料组件能充分冷却，对放射性物质不发生泄漏。纵深防御原则一般包括五层防线，即第一层防线：精心设计、制造、施工，确保核电站有精良的硬件环境。建立周密的程序，严格的制度，对核电站工作人员有高水平的教育和培训，人人注意和关心安全，有完备的软件环境。第二层防线：加强运行管理和监督，及时正确处理异常情况，排除故障。第三层防线：在严重异常情况下，反应堆正常的控制和保护系统动作，防止设备故障和人为差错造成事故。第四层防线：发生事故情况时，启用核电站安全系统，包括各外设安全系统，加强事故中的电站管理，防止事故扩大，保护反应堆厂房（安全壳）。第五层防线：万一发生极不可能发生的事故，并伴有放射性外泄，启用厂内外应急响应计划，努力减轻事故对周围居民和环境的影响。

按照纵深防御的原则，目前的设计在核燃料和环境（外部空气）之间设置了四道屏障（指中国目前使用的压水堆核电站）。即第一道屏障：燃料芯块，核燃料放在氧化铀陶瓷芯块中，并使得大部分裂变产物和气体产物98%以上保存在芯块内。第二道屏障：燃料包壳，燃料芯块密封在锆合金制造的包壳中，构成核燃料芯棒，锆合金具有足够的强度，且在高温下不与水发生反应。第三道屏障：压力管道和容器（冷却剂系统），将核燃料芯棒封闭在20cm以上的钢质耐高压系统中，避免放射性物质泄漏到反应堆厂房内。第四道屏障：反应堆安全壳，用预应力钢筋混凝土构筑，壁厚近100cm，内表面加有0.6cm的钢衬，可以抗御来自内部或外界的飞出物，防止放射性物质进入环境。

核电站配置的外设安全系统包括：①隔离系统，用来将反应堆厂房隔离开来，主要有自动关闭穿过厂房的各条运行管道的阀门，收集厂房内泄漏物质，将其过滤后再排出厂外。②注水系统，在反应堆可能“失水”时，向堆芯注水，以冷却燃料组件，避免包壳破裂，注入水中含有硼，用以制止核链式反应。注水系统使用压力氮气，在无电流和无人操作情况下，在一定压力下可自动注水。③事故冷却器和喷淋系统，用来冷却厂房以降低厂房的压力。在厂房压力上升时先启动空气冷却（风机——换热器）的事故冷却器；再进一步可以启动厂房喷淋系统将冷水或含硼水喷入厂房，以降热和降压。以上所有安全保护系统均采用独立设备和冗余布置，均备有事故电源，安全系统可以抗地震和在蒸汽——空气及放射性物质的恶劣环境中运行。

核电站运行人员须经严格的技术和管理培训，通过国家核安全局主持的资格考试，获得国家核安全局颁发的运行值岗操作员或高级操作员执照才能上岗，无照不得上岗。执照在规定期内有效，过期后必须申请核发机关再次审查。

万一发生了核外泄事故，应启动应急计划。应急计划的内容主要包括：疏散人员，封闭核污染区（核反应堆及核电站），清除核污染，以保证人身安全和环境清洁。

以上所述核电站安全保障体系，可以确保核电站的安全运行。

第五章　　新能源和可再生能源发电

一、风力发电

通常所说的风能是空气流动所具有的动能。风力发电就是将空气流动的动能转变为电能。大风包含着很大的能量。风速为 9～10m／s 的五级风吹到物体表面上的力，每平方米面积上约 10kg，风速为 20m／s 的九级风吹到每平米面积上的力约为 50kg,风速为 50～60m／s 的台风这个力可达 200kg。风中含有的能量比人类迄今所能控制的能量高得多，风力是地球上重要的能源之一。

风力发电机组主要包括转子（回转叶片等）、升速装置、发电机、控制装置、调速系统以及支撑铁塔等。当风力发电装置作为稳定电源经常供电时，还必须装设蓄能装置（如蓄电池）。转子上的回转叶片受风力冲动，将风力转变为回转的机械力，通过升速装置驱动发电机发电。转子一般为立式，叶片数一般为 2～3 片，叶片的方向与风向垂直，转速只有 40～50r／min，而发电机的转速较高（例如 1500r／min、50Hz 的发电机），必须装设升速装置（齿轮、链条和皮带等）。控制装置包括定向装置（将转子调整对准风向）、起动和停机装置、调整风力装置（调整叶片角度以调整接受的风力）和保护装置（在过高风速时停机以及发电机保护等）。调速装置用来维持发电机定速回转。支撑铁塔用来支撑和提高转子位置，使回转叶片能接受较大风速（因风速随高度而升高）。风力发电站如图 5—1 所示。

因风能具有随机性，而电力负荷则有其本身的规律，为使供电可靠，大规模风电是建设多台大型风电机组形成的风电场与电网并联运行；在电网达不到的边远地区则采用风电机组与柴油发电机组联合运行的方式，既可节油又可保证连续供电。

我国风能资源比较丰富，是风能利用的大国之一，风力提水和风帆运输曾有过辉煌历史。近代风力发电在我国起步较晚，前些年主要是建设小型风力发电机（10kW 以下）。50～200W 微型风力发电机组已定型投入批量生产，年生产能力达一万台以上；1～20kW 容量的中、小型风力发电机组已达到小批量生产阶段。目前正在研制 50～200kW 大、中型风力发电机组。据 1992 年末的统计，已推广使用微型风力发电机组约 12 万台，总装机容量约 16.8MW。并在国际合作和引进国外机组的条件下，已在新疆、内蒙古等区建立了 14 个风力发电试验场，安装大、中型风力发电机组多台。仅新疆达坂城风电场装机容量已突破 10MW，其经济效益越来越明显。

二、地热发电

地热能就是地球内部的热释放到地表的能量。地球内部包含着巨大的热量，由于这一热量的影响，地球表层以下的温度随深度逐渐增高，大部分地区每深入 100m，温度增加 3 度，以后其增长速度又逐渐减慢，到一定深度就不再升高了。估计地核的温度在 5000℃以上。现在能被我们控制利用的地热能主要是地下热水、地热蒸汽和热岩层。我国地热资

源相当丰富，但温度偏低，可以用来发电的主要集中在西藏和滇西一带。

根据地热资源的特点以及采用技术方案的不同，可把地热发电划分为很多的方式，但目前出现较多的有下面 4 种方式：

（1）直接利用蒸汽法。在干蒸汽田上，从热井喷出的是温度和压力都比较高的蒸汽，将其过滤后，直接用管道输入电厂驱动汽轮发电机组旋转发电。

（2）汽水分离法。把从地热井喷出的蒸汽和热水混合物引入汽水分离装置，将分离出的蒸汽送入汽轮机。

（3）减压扩容法。把喷出（或用水泵抽出）的温度较高的热水导入扩容蒸发设备，由于压力降低，一部分水蒸发变为水蒸汽，将蒸发出的水蒸汽送入汽轮机。

（4）低沸点工质法。以地下热水为放热物质，通过热交换器把热量传给低沸点的工质，使其沸腾并产生蒸汽，然后用这种蒸汽驱动汽轮发电机组。

我国在地热发电方面，已建成闻名世界的西藏羊八井电站，现有装机容量达到 25MW，发电方式是将地热井出来的汽水混合物经汽水分离器分离出来的蒸汽送入汽轮机，分离出来的热水经减压扩容产生的蒸汽也送入汽轮机。羊八井地热电站的出力稳定，其发电量已占到拉萨电网的 40%。

三、太阳能发电

太阳能就是太阳辐射能。在太阳里，每时每刻都进行着激裂的核裂变和核聚变反应，从而产生大量的热。太阳表面的温度达 6000℃左右，内部温度高达数百万度。由于太阳的温度很高，它不断地向宇宙空间辐射能量，包括可见光，不可见光和各种微粒，总称为太阳辐射。

地球上除核能以外的一切能源，无论是煤炭、石油、天然气、水力或风力都来自太阳。全球人类目前每年能源消费的总和只相当于太阳在 40 分钟内照射到地球表面的能量。太阳能随处可得，不必远距离输送，而且是洁净的能源。由于这些独特的优点，太阳能发电作为新兴的产业正在迅速崛起。

太阳能发电系统可分为太阳能热发电和太阳能光发电两类。太阳能热发电就是利用太阳能将水加热，使产生的蒸汽去驱动汽轮发电机组。根据热电转换方式的不同，把太阳能电站分为集中型太阳能电站和分散型太阳能电站。塔式太阳能电站是集中型的一种，即在地面上敷设大量的集热器（即反射器）阵列，在阵列中适当地点建一高塔，在塔顶设置吸热器（即锅炉），从集热器来的阳光热聚集到吸热器上，使吸热器内的工作介质温度提高，变成蒸汽，通过管道把蒸汽送到地面上的汽轮发电机组发电。塔式太阳能电站示意如图 5—2 所示。

分散型太阳能电站的集热装置的特点是以一个镜体配合一个吸热器组成一个独立的单元。根据发电容量的设计要求，串、并联若干单元组成电站。

太阳能光发电是利用太阳电池组将太阳能直接转换为电能。太阳电池由单晶硅或非晶硅薄膜制成，转换效率最多为 10%～17%。将太阳电

池排成方阵，其总面积决定所需的功率。太阳电池发出直流电，而且要随阳光的强弱变化，所以还得配备逆变器（将直流电变为交流电）、蓄电池和相应的调控设备。太阳能光发电已广泛用于人造地球卫星和宇航设备上，也可作为孤立地区的独立电源。然而将来其造价进一步降低之后，太阳能发电将进入千家万户。

近年来人们对建造宇宙空间太阳能电站的问题进行了大量的研究。宇宙空间太阳能电站的主要技术内容是：在绕地球的同步轨道上建造卫星电站，太阳辐射能通过光电池转变成电能，用微波发生装置将电能转变为微波，然后再以集束形式把微波发射到地面接收站，地面接收装置再把微波转变成电能输送到电网中。

四、海洋能发电

海洋能是海流动能、海洋热能、潮汐能和波浪能等的总称。海洋能用于发电有海流发电、海洋温差发电、波浪发电和潮汐发电等几种方式。目前成熟的只有潮汐发电。

潮汐发电大体有 3 种形式：

（1）单库单向发电。在海湾（或河口）建造堤坝、厂房和水闸，将海湾（或河口）与外海分隔，涨潮时开启水闸，将水库充满，落潮时其水位与外海潮位保持一定的潮差，带动水轮发电机组发电。这种形式只建造一个水库，只能在落潮时发电。也有的采用反向形式，即利用涨潮时水流由外海流向水库时发电，落潮时开闸把库水放低。

（2）单库双向发电。同样是建造一个水库，只是采用一定的水工布置形式或采用双向水轮发电机组，保证电站在涨落潮时都能发电。

（3）双库双向发电。是在有条件的海湾建造两个水库，在涨、落潮过程中，两水库的水位始终保持一定的落差，水轮发电机组在两水库之间，使其连续不断地发电。

我国蕴藏丰富的潮汐资源。据 1985 年我国潮汐资源普查统计，装机 500kW 以上的有 191 个站点，可能开发的装机容量为 2158 万 kW，年发电量 619 亿 kW·h。我国从 60 年代至今建成小型潮汐电站 8 座，计 11180kW，其中以浙江省江厦潮汐电站最大，容量为 3200kW，居世界第三位。

第六章　　输电与配电

各种类型的发电厂发出的电力通过输电和配电才能将其送给电力用户使用。输电指的是从发电厂或发电中心向消费电能地区输送大量电力的主干渠道或不同电网之间互送电力的联络渠道，而配电则是消费电能地区内将电力分配至用户的分配手段，直接为用户服务。配电可以是将电力分配到城市、郊区、乡镇和农村，也可以是分配和供给农业、工业、商业、居民住宅以及特殊需要的用电。

输电和配电设施都包括变电站、线路等设备。所有输电设备连接起来组成输电网。从输电网到用户之间的配电设备组成的网络，称为配电网。它们有时也称为输电系统和配电系统。输电系统和配电系统再加上发电厂和用电设备统称为电力系统。

电力系统中各种不同的电力设备均有各自的额定电压，它们构成整个电力系统的电压等级。输电采用的电压高于配电电压。输电和配电电压界限的划分不是固定不变的，随电网覆盖的区域和容量大小而变化。我国已颁发的《城市电力网规划设计导则》规定：35～110kV 为高压配电电压；10kV 为中压配电电压；220／380V 为低压配电电压。在某些地区 220kV 输电网尚未形成前，110kV（甚至 35kV）也可作为输电电压。就我国目前绝大多数电网来说，220kV 为高压输电电压（HV），330kV、500kV 为超高压输电电压（EHV），更高一级输电电压正在研究论证之中。美国国家标准规定：超高压为高于 242kV，但低于 1000kV 的最高系统电压；特高压为等于或高于 1000kV 的最高系统电压。

一、变电站

变电站是电力系统中变换电压、接受和分配电能、控制电力的流向和调整电压的电力设施，它通过其变压器将各级电压的电网联系起来。

变电站起变换电压作用的设备是变压器，除此之外，变电站的设备还有开闭电路的开关设备，汇集电流的母线，计量和控制用互感器、仪表、继电保护装置和防雷保护装置、调度通信装置等，有的变电站还有无功补偿设备。

变电站的主要设备和连接方式，按其功能不同而有差异。图 6—1 所示为一变电站主接线示意图。变压器。如图 6—1 所示，变压器是变电站的主要设备，分为双绕组变压器、三绕组变压器和自耦变压器（即高、低压每相共用一个绕组，从高压绕组中间抽出一个头作为低压绕组的出线的变压器）。电压高低与绕组匝数成正比，电流则与绕组匝数成反比。

变压器按其作用，可分为升压变压器和降压变压器，前者用于电力系统送端变电站，后者用于受端变电站。

变压器的电压需与电力系统的电压相适应。为了在不同负荷情况下保持合格的电压，有时需要切换变压器的分接头。按分接头切换方式，变压器有带负荷（有载）调压变压器和无负荷（无载）调压变压器。有载调压变压器主要用于受端变电站。

电压互感器和电流互感器。它们的工作原理和变压器相似，它们把高电压（设备和母线的运行电压）、大电流（即设备和母线的负荷或短

路电流）按规定比例变成测量仪表、继电保护及控制设备的低电压和小电流。在额定运行情况下，电压互感器二次电压为 100V，电流互感器二次电流为 5A 或 1A。电流互感器的二次绕组经常与负荷相连，近于短路，请注意：绝不能让其开路，否则将因高电压而危及设备和人身安全或使电流互感器烧毁。

开关设备。它包括断路器、隔离开关、负荷开关、高压熔断器等，都是断开和合上电路的设备。断路器在电力系统正常运行情况下用来合上和断开电路，故障时，在继电保护装置控制下自动把故障设备和线路断开，还可以有自动重合闸功能。在我国，220kV 以上变电站使用较多的是空气断路器和六氟化硫断路器。

隔离开关（刀闸）的主要作用是在设备或线路检修时隔离电压，以保证安全。它不能断开负荷电流和短路电流，应与断路器配合使用。在停电时，应先拉断路器，后拉隔离开关；送电时，应先合隔离开关，后合断路器。如果误操作，将引起设备损坏和人身伤亡。

负荷开关能在正常运行时断开负荷电流，没有断开故障电流的能力，一般与高压熔断器配合用于 10kV 及以上电压且不经常操作的变压器或出线上。

为了减少变电站的占地面积，近年来，积极发展六氟化硫全封闭组合电器（GIS）。它把断路器、隔离开关、母线、接地开关、互感器、出线套管或电缆终端头等分别装在各自密封间中，集中组成一个整体外壳，充以（3.039～5.065）$\times 10^5$Pa（3～5 大气压）的六氟化硫气体作为绝缘介质。这种组合电器具有结构紧凑，体积小，重量轻，不受大气条件影响，检修间隔长，无触电事故和电噪声干扰等优点，具有发展前途。在国外，这种设备的最高电压已发到 765kV，已在变电站投入运行。目前，它的缺点是价格贵，制造和检修工艺要求高。

变电站还装有防雷设备，主要有避雷针和避雷器。避雷针是为了防止变电站遭受直接雷击，将雷电对其自身放电，把雷电流引入大地。在变电站附近的线路上落雷时，雷电波会沿导线进入变电站，产生过电压。另外，断路器操作等也会引起过电压。避雷器的作用是当过电压超过一定限值时，自动对地放电，降低电压，保护设备，放电后又迅速自动灭弧，保证系统正常运行。目前，使用最多的是氧化锌避雷器。

二、送电线路

目前采用的送电线路有两种，一种是电力电缆，它采用特殊加工制造而成的电缆线，埋没于地下或敷设在电缆隧道中；另一种是最常见的架空线路，它一般使用无绝缘的裸导线，通过立于地面的杆塔作为支持物，将导线用绝缘子悬架于杆塔上。由于电缆价格较贵，目前大部分配电线路、绝大部分高压输电线路和全部超高压及特高压输电线路都采用架空线路。

送电线路的输送容量及输送距离均与电压有关。线路电压越高，输送距离越远。线路及系统的电压需根据其输送的距离和容量来确定。一般送电电压、容量、距离三者的大致关系如表 6—1 中所列。

表 6—1 送电电压、容量、距离三者的关系

输电电压（ky）	35	110	220	330	500
输送容量（万 kw）	1～2	2～7	10～25	30～60	100～150
输送距离（km）	20～50	50～100	200～300	250～500	300～800

在相同的送电电压下，送电容量越小，可输送的距离越长，反之，容量越大，则送电距离越短。另外，输送容量和距离还取决于其他技术条件和是否采用补偿措施。

电力电缆一般由导线、绝缘层和保护层组成，有单芯、双芯和三芯电缆。高压架空线路一般由导线、绝缘子、金具、杆塔及其基础、避雷线、接地装置和防振锤等构成。图 6—2 所示为架空线路示意图。

高压架空线路具有一定的宽度，线路以下的地面面积再向两侧延伸一定的距离所占有的范围称为线路走廊。走廊内不允许有高大建筑及高大植物出现。在国外，占有线路走廊要付出相当可观的费用，如美国线路走廊的占地费用要占线路建设总投资的 12%。我国的线路走廊虽然并非如此昂贵，但在有限的土地资源中如何节省占地，提高线路走廊的利用率，则是不得不认真考虑的重要问题。

减少高压架空线路的走廊主要有两种办法：①多回路同杆塔并架线路，即在同一杆塔架设多回线路；②紧凑型架空输电线路。

同杆并架线路。多回路同杆并架是在同一线路走廊架设多回线路，提高了输送容量，从而减少了线路走廊用地，但多回线路相线的排列和继电保护的配置要仔细考虑，使线路遭雷击时不同时断开，以保证多回线路输电的可靠性与单杆单回线相同。

紧凑型架空输电线。它与常规输电线不同的基本特点是：①相导线采用多分裂结构，并加大子导线间距；②缩小相间距离，为避免风吹导线振动造成相间短路，相间采用间隔棒固定相间距离；③采用相间无构架的杆塔结构形式。

通过紧凑型的这种结构，可提高线路输送能力，减少输电回路数，从而减少线路走廊用地。其基本原理如下：通过增大相分裂导线（子导线）之间的距离，优化导线布置，压缩相间距离，使电荷在各导线表面分布均匀，从而表面场强均匀，导线导电面积得到充分利用；相间距离明显缩小，使线路的正序电容上升，正序电感下降，线路的波组抗（Z）与电容（C）平方根成反比，与电感（L）平方根成正比，即$Z=\sqrt{\frac{L}{C}}$。

紧凑型输电线可明显减少波阻抗。线路输送的自然功率（P）与波阻抗成反比，即 $P=3U_{\phi}/Z$。自然功率越大，则线路输送能力越大。因此，紧凑型输电线路可显著提高输电能力，一般可提高 30%～70%。

我国分别在华北和湖北省建成的 220kV 紧凑型输电试验线路段已于 1994 年投入运行。

三、高压直流输电（HVDC）

高压直流输电是将三相交流电通过换流站整流变成直流电，然后通

过直流输电线路送往另一个换流站逆变成三相交流电的输电方式。它基本上由两个换流站和直流输电线组成，两个换流站与两端的交流系统相连接。

直流输电线造价低于交流输电线路，但换流站造价却比交流变电站高得多。一般认为架空线路超过 600～800km，电缆线路超过 40～60km，直流输电较交流输电经济。随着高电压大容量可控硅及控制保护技术的发展，换流设备造价逐渐降低，直流输电近年来发展较快。我国从国外引进设备和技术建设的葛洲坝—上海 1100km、±500kV、输送容量 1200MW 的直流输电工程，已于 1990 年建成并投入运行。

直流输电技术的主要优点是：不增加系统的短路容量；便于实现两大电力系统的非同期联网运行和不同频率的电力系统的联网；利用直流系统的功率调制能提高电力系统的阻尼，抑制低频振荡，提高并列运行的交流输电线的输电能力。它的主要缺点是直流输电线路难于引出分支线路，绝大部分只用于端对端送电。加拿大原计划开发和建设五端直流输电系统，现已建成三端直流输电系统。实现多端直流输电系统的主要技术困难是各种运行方式下的线路功率控制问题。目前，一般认为三端以上的直流输电系统技术上难实现，经济合理性待研究。

直流输电的原理及运行方式。如图 6—3 所示。

换流站的主要设备包括换流器、换流变压器、平波电抗器、交流滤波器、直流避雷器及控制保护设备等。

换流器又称换流阀，是换流站的关键设备，其功能是实现整流和逆变。目前，换流器多数采用晶闸管（可控硅整流管）组成三相桥式整流作为基本单元，称为换流桥。一般由两个或多个换流桥组成换流系统，实现交流变直流，直流变交流的功能。

换流器在整流和逆变过程中将要产生 5、7、11、13、17、19…等多次谐波。为了减少各次谐波进入交流系统，在换流站交流母线上要装设滤波器。它由电抗线圈、电容器和小电阻 3 种设备串联组成，通过调谐的参数配合可滤掉多次谐波。一般在换流站的交流侧母线装有 5、7、11、13 次谐波滤波器组。

如图 6—3 所示，直流输电分为单极线路和双极线路。单极又分为一线一地和单极两线的方式。直流输电一般采用双极线路，当换流器有一极退出运行时，直流系统可按单极两线运行，但输送功率要减少一半。

第七章　电力系统

一、概述

1．电力系统的组成及其作用

电力系统是由发电厂、输电网、配电网和电力用户组成的整体，是将一次能源转换成电能并输送和分配到用户的一个统一系统。输电网和配电网统称为电网，是电力系统的重要组成部分。发电厂将一次能源转换成电能，经过电网将电能输送和分配到电力用户的用电设备，从而完成电能从生产到使用的整个过程。电力系统还包括保证其安全可靠运行的继电保护装置、安全自动装置、调度自动化系统和电力通信等相应的辅助系统（一般称为二次系统）。

输电网是电力系统中最高电压等级的电网，是电力系统中的主要网络（简称主网），起到电力系统骨架的作用，所以又可称为网架。在一个现代电力系统中既有超高压交流输电，又有超高压直流输电。这种输电系统通常称为交、直流混合输电系统。

配电网是将电能从枢纽变电站直接分配到用户区或用户的电网，它的作用是将电力分配到配电变电站后再向用户供电，也有一部分电力不经配电变电站，直接分配到大用户，由大用户的配电装置进行配电。

电力系统如图 7—1 所示。在电力系统中，电网按电压等级的高低分层，按负荷密度的地域分区。不同容量的发电厂和用户应分别接入不同电压等级的电网。大容量主力电厂应接入主网，较大容量的电厂应接入较高压的电网，容量较小的可接入较低电压的电网。

配电网应按地区划分，一个配电网担任分配一个地区的电力及向该地区供电的任务。因此，它不应当与邻近的地区配电网直接进行横向联系，若要联系应通过高一级电网发生横向联系。配电网之间通过输电网发生联系。不同电压等级电网的纵向联系通过输电网逐级降压形成。不同电压等级的电网要避免电磁环网。

电力系统之间通过输电线连接，形成互联电力系统。连接两个电力系统的输电线称为联络线。

2．电力系统的负荷

电力系统中所有用电设备消耗的功率称为电力系统的负荷。其中把电能转换为其他能量形式（如机械能、光能、热能等），并在用电设备中真实消耗掉的功率称为有功负荷。电动机带动风机、水泵、机床和轧钢设备等机械，完成电能转换为机械能还要消耗无功。例如，异步电动机要带动机械，需要在其定子中产生磁场，通过电磁感应在其转子中感应出电流，使转子转动，从而带动机械运转。这种为产生磁场所消耗的功率称为无功功率。变压器要变换电压，也需要在其一次绕组中产生磁场，才能在二次绕组中感应出电压，同样要消耗无功功率。因此，没有无功，电动机就转不动，变压器也不能转换电压。无功功率和有功功率同样重要，只是因为无功完成的是电磁能量的相互转换，不直接作功，才称为“无功”的。电力系统负荷包括有功功率和无功功率，其全部功率称为视在功率，等于电压和电流的乘积（单位千伏安）。有功功率与视在功率的比值称为功率因数。电动机在额定负荷下的功率因数为 0．8

左右，负荷越小，其值越低；普通白炽灯和电热炉，不消耗无功，功率因数等于 1。

电力系统负荷随时间而不断变化，具有随机性，其变化情况用负荷曲线来表示。通常有日负荷曲线、月负荷曲线（国外多用周负荷曲线）、年负荷曲线。图 7—2 所示为年、日负荷曲线图。年负荷曲线表示的是每月的最高负荷值。日负荷曲线是将电力系统每日 24h 的负荷绘制成的曲线。日负荷曲线中负荷曲线的最高点为日最大负荷（又称为高峰负荷），负荷曲线的最低点为最小负荷（又称为低谷负荷），它们是一天内负荷变化的两个极限值，高峰负荷与低谷负荷之差称为峰谷差。峰谷差越大，电力调峰的难度也就越大。根据负荷曲线可求出日平均负荷。日平均负荷与最高负荷的百分比值，称为负荷率。负荷率高，则设备利用率高。最小负荷水平线以下部分称为基荷；平均负荷水平线以上的部分为峰荷；最小负荷与平均负荷之间的部分称为腰荷。为了满足系统负荷的需要，应进行负荷预测工作，绘制不同用途的负荷曲线。

二、电力系统互联

电力系统互联可以获得显著的技术经济效益。它的主要作用和优越性有以下几个方面：

（1）更经济合理开发一次能源，实现水、火电资源优势互补。

各地区的能源资源分布不尽相同，能源资源和负荷分布也不尽平衡。电力系统互联，可以在煤炭丰富的矿口建设大型火电厂向能源缺乏的地区送电，可以建设具有调节能力的大型水电厂，以充分利用水力资源。这样既可解决能源和负荷分布的不平衡性，又可充分发挥水电和火电在电力系统运行的特点。

（2）降低系统总的负荷峰值，减少总的装机容量。由于各电力系统的用电构成和负荷特性、电力消费习惯性的不同，以及地区间存在着时间差和季节差，因此，各个系统的年和日负荷曲线不同，出现高峰负荷不在同时发生。而整个互联系统的日最高负荷和季节最高负荷不是各个系统高峰负荷的线性相加，结果使整个系统的最高负荷比各系统的最高负荷之和要低，峰谷差也要减少。电力系统互联有显著的错峰效益，可减少各系统的总装机容量。

（3）减少备用容量。各发电厂的机组可以按地区轮流检修，错开检修时间。通过电力系统互联，各个电网相互支援，可减少检修备用。各电力系统发生故障或事故时，电力系统之间可以通过联络线互相紧急支援，避免大的停电事故，提高了各系统的安全可靠性，又可减少事故备用。总之，可减少整个系统的备用容量和各系统装机容量。

（4）提高供电可靠性。由于系统容量加大，个别环节故障对系统的影响较小，而多个环节同时发生故障的概率相对较小，因此能提高供电可靠性。但是，个别环节发生故障，如果不及时消除，就有可能扩大，波及相邻的系统，严重情况下会导致大面积停电。因此，互联电力系统要形成合理的网架结构，提高电力系统自动化水平，以保证电力系统互联高可靠性的实现。

（5）提高电能质量。电力系统负荷波动会引起频率变化。由于电力

系统容量增大，供电范围扩大，总的负荷波动比各地区的负荷波动之和要小，因此，引起系统频率的变化也相对要小。同样，冲击负荷引起的频率变化也要小。

（6）提高运行经济性。各个电力系统的供电成本不相同，在资源丰富地区建设发电厂，其发电成本较低。实现互联电力系统的经济调度，可获得补充的经济效益。

电力系统互联，由于联系增强也带来了新问题。如故障会波及相邻系统，如果处理不当，严重情况下会导致大面积停电；系统短路容量可能增加，导致要增加断路器等设备容量；需要进行联络线功率控制等。这些都要求研究和采取相应技术措施，提高自动化水平，才能充分发挥互联电力系统的作用和优越性。

由于发展电力系统互联能带来显著的效益，相邻地区甚至相邻国家电力系统互联是电力工业发展的一个趋势。如日本 9 个电力系统形成了互联电力系统。美国形成了全国互联电力系统，并且与加拿大电网连接。西欧各国除各自形成全国电力系统外，互联形成了西欧的国际互联电力系统，并正在通过直流背靠背与东欧国家电力系统相连。埃及能源部长在 1994 年巴黎国际大电网年会开幕式上还提出了非洲、欧洲和阿拉伯地区实现跨洲联网的设想，得到与会者重视。我国已形成东北、华北、华东、华中、西北和南方联营等 6 大跨省（区）电力系统，其中华东和华中电网通过葛—上±500kV 直流输电线实现了跨大区电网的互联。世界最大的水电站——三峡水电站将安装 26 台 70 万 kw 机组，已于 1994 年 12 月开工建设，2009 年将建成发电，其强大的电力将送往华东、华中和四川电网。它的建成发电将推动全国跨大区电网的互联。

三、电力系统规划

电力系统投资巨大和建设周期长的特点要求做好电力系统规划，以保证电力系统的建设满足整个社会对电力的需求，同时合理地利用能源资源，以获得最佳的投资效果，使未来电力系统安全、可靠、经济运行。

电力系统规划的任务是：研究电力系统发展（包括电源开发和电网发展）的战略目标及部署；研究电力如何与国民经济其它各部门协调发展以及电力工业内部各环节之间如何协调发展；研究合理的发电能源结构；研究电源、电网的发展规模和合理布局；研究如何充足、可靠、优质地向用户提供电能和节能节电战略等。

电力系统规划一般可以分为近期、中期和长期 3 个阶段。近期规划的规划期一般为 5 年左右。近期规划要尽可能准确地预见规划期内逐年需要的电力和电量及峰谷差，逐年进行电力和电量平衡，安排各个工程项目的建设和逐年投资。

由于大型火电厂从前期准备工作开始到第一台机组投产需要6～7年时间，全部建成需要更多时间。大型水电厂和核电厂的建设周期还要更长一些。因此，仅编制近期规划还不够，还必须编制 5～15 年左右的中期规划，以研究电源具体的发展方案、电网建设的方案和节能节电方案，它是编制近期规划的依据。

长远规划的规划期一般为 15～30 年左右。制定长远规划时，必须进

行三大环境条件的分析，即未来电力负荷需求的预测、可能开发的能源资源情况、新技术的发展趋势和设备供应条件的分析。在充分考虑原有系统的条件下提出电源的构成和布局、电网主网架发展规划及其电压等级。由于研制更大容量的发电设备、更高一级电压的输变电设备需要较长的周期才能提供合格的产品，而且建设大型水电站、核电站都有许多复杂的技术问题需要研究解决，因此编制电力系统长远规划要包括技术发展规划，以便提前安排研究和开发任务，使未来工程采用先进的成熟技术，并使未来的电力系统技术先进、安全可靠、经济效益高。

电力系统中、长期规划，由于其规划期限长，不确定因素多，因而需要根据各种变化条件，以“滚动”方式，每隔 2～3 年重做一次，以适应变化的情况。

四、电力系统运行与控制

（一）电力系统的运行状态

电力系统是由发电机、变压器、输配电线路和用电设备按一定方式连接组成的整体。其运行特点是发电、输电、配电和用电同时完成。因此，为了向用户连续提供质量合格的电能，电力系统各发电机发出的有功和无功功率应随时随刻与随机变化的电力系统负荷消耗的有功功率和无功功率（包括系统损耗）相等，同时，发电机发出的有功功率和无功功率、线路上的功率潮流（视在功率）和系统各级电压应在安全运行的允许范围之内。要保证电力系统这种正常运行状态，必须满足两点基本要求：

（1）电力系统中所有电气设备处于正常状态，能满足各种工况的需要。

（2）电力系统中所有发电机以同一频率保持同步运行。

现代电力系统的特点是大机组、高电压、大电网、交直流远距离输电、电网互联，因而其结构复杂，覆盖不同环境的辽阔地域。这样，在实际运行中，自然灾害的作用、设备缺陷和人为因素都会造成设备故障和运行条件发生变化，因而电力系统还会出现其他非正常运行的状态。

电力系统的运行状态可分为 3 种：正常状态、紧急状态（事故状态）和恢复状态（事故后状态）。图 7－3 画出了 3 种运行状态及其相互间的转化关系。

1．正常状态

在正常运行状态下，电力系统中总的有功和无功功率出力能和负荷总的有功和无功功率的需求达到平衡；电力系统的各母线电压和频率均在正常运行的允许偏差范围内；各电源设备和输配电设备均在规定的限额内运行；电力系统有足够的旋转备用和紧急备用以及必要的调节手段，使系统能承受正常的干扰（如无故障开断一台发电机或一条线路），而不会产生系统中各设备的过载，或电压和频率偏差超出允许范围。

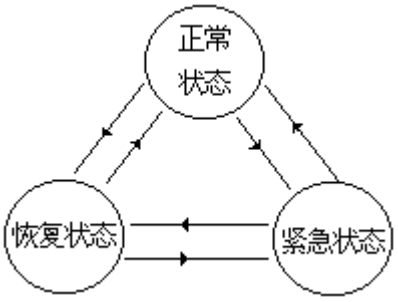

图 7-3　　电力系统运行状态示意图

在正常运行状态下，电力系统对不大的负荷变化能通过调节手段，可从一个正常运行状态连续变化到另一个正常运行状态。在正常运行状态下，还能在保证安全运行条件下，实现电力系统的经济运行。

2．紧急状态

电力系统遭受严重的故障（或事故），其正常运行状态将被破坏，进入紧急状况（事故状态）。

电力系统的严重故障主要有：

（1）线路、母线、变压器和发电机短路。短路有单相接地、两相和三相短路。短路又分瞬间短路和永久性短路。在实际运行中，单相短路出现的可能性比三相短路多，而三相短路对电力系统影响最严重。当然尤其严重的是三相永久性短路，这是极其稀小的。在雷击等情况下，有可能在电力系统中若干点同时发生短路，形成多重故障。

（2）突然跳开大容量发电机或大的负荷引起电力系统的有功功率和无功功率严重不平衡。

（3）发电机失步，即不能保持同步运行。

电力系统出现紧急状态将危及其安全运行，主要事故有以下几个方面：

（1）频率下降。在紧急状态下，发电机和负荷间的功率严重不平衡，会引起电力系统频率突然大幅度下降，如不采取措施，使频率迅速恢复，将使整个电厂解列，其恶性循环将会产生频率崩溃，导致全电力系统瓦解。

（2）电压下降。在紧急状态下，无功电源可能被突然切除，引起电压大幅度下降，甚至发生电压崩溃现象。这时，电力系统中大量电动机停止转动，大量发电机甩掉负荷，导致电力系统解列，甚至使电力系统的一部分或全部瓦解。

（3）线路和变压器过负荷。在紧急状态下，线路过负荷，如不采取相应技术措施，会连锁反应，出现新的故障，导致电力系统运行进一步恶化。

（4）出现稳定问题。在紧急状态下，如不及时采取相应的控制措施或措施不够有效，则电力系统将失去稳定。所谓电力系统稳定，就是要求保持电力系统中所有同步发电机并列同步运行。电力系统失去稳定就是各发电机不再以同一频率，保持固定功角运行，电压和功率大幅度来回摇动。电力系统稳定的破坏会对电力系统安全运行产生最严重后果，将可能导致全系统崩溃，造成大面积停电事故。

60 年代以来，国际上出现过多次大面积停电事故。例如，1977 年 7 月 13 日，美国纽约电力系统由于遭受雷击，保护装置不正确动作，调度

中心掌握信息不足以及通信困难等原因，造成事故的连锁发展和扩大，致使全系统瓦解。事故前后延续 25h，影响 900 万居民供电，直接和间接经济损失达 3．5 亿美元。

电力系统进入紧急状态后，应及时依靠继电保护和安全自动装置有选择地快速切除故障，采取提高安全稳定性措施，避免发生连锁性的故障，导致事故扩大和系统的瓦解。

3．恢复状态

在紧急状态后，借助继电保护和自动装置或人工干预，使故障隔离，事故不扩大，电力系统大体可以稳定下来。这时，部分发电机或线路（变压器）仍处于断开状态，部分用户仍然停电，严重情况下电力系统可能被分解成几个独立部分，电力系统进入恢复状态。这时，要采取一系列操作，采取各种恢复出力和送电能力的措施，尽快恢复对用户的供电，使系统恢复到正常状态。

（二）电力系统稳定性和提高稳定的基本措施

1．电力系统稳定性

电力系统稳定性可分为静态稳定、暂态稳定和动态稳定。

（1）电力系统静态稳定是指电力系统受到小干扰后，不发生非周期性的失步，自动恢复到起始运行状态的能力。

（2）电力系统暂态稳定指的是电力系统受到大干扰后，各发电机保持同步运行并过渡到新的或恢得到原来稳定运行状态的能力，通常指第一或第二摆不失步。

（3）电力系统动态稳定是指系统受到干扰后，不发生振幅不断增大的振荡而失步。

远距离输电线路的输电能力受这 3 种稳定能力的限制，有一个极限。它既不能等于或超过静态稳定极限，也不能超过暂态稳定极限和动态稳定极限。在我国，由于网架结构薄弱，暂态稳定问题较突出，因而线路输送能力相对国外来说要小一些。

2．提高系统稳定的基本措施

提高系统稳定的措施可以分为两大类：一类是加强网架结构；另一类是提高系统稳定的控制和采用保护装置。

（1）加强电网网架，提高系统稳定。线路输送功率能力与线路两端电压之积成正比，而与线路阻抗成反比。减少线路电抗和维持电压，可提高系统稳定性。增加输电线回路数、采用紧凑型线路都可减少线路阻抗，前者造价较高。在线路上装设串联电容是一种有效的减少线路阻抗的方法，比增加线路回路数要经济。串连电容的容抗占线路电抗的百分数称为补偿度，一般在 50%左右，过高将容易引起次同步振荡。在长线路中间装设静止无功补偿装置（SVC），能有效地保持线路中间电压水平（相当于长线路变成两段短线路），并快速调整系统无功，是提高系统稳定性的重要手段。

（2）电力系统稳定控制和保护装置。提高电力系统稳定性的控制可包括两个方面：①失去稳定前，采取措施提高系统的稳定性；②失去稳定后，采取措施重新恢复新的稳定运行。下面介绍几种主要的稳定控制措施。

发电机励磁系统及控制。发电机励磁系统是电力系统正常运行必不

可少的重要设备，同时，在故障状态能快速调节发电机机端电压，促进电压、电磁功率摆动的快速平息。因此，充分发挥其改善系统稳定的潜力是提高系统稳定性最经济的措施，国外得到普遍重视。常规励磁系统采用 PID 调节并附加电力系统稳定器（PSS），既可提高静态稳定又可阻尼低频振荡，提高动态稳定性。目前国外较多的是采用快速高顶值可控硅励磁系统，配以高放大倍数调节器和 PSS 装置，这样可同时提高静态、暂态和动态 3 种稳定性。

电气制动及其控制装置。在系统发生故障瞬间，送端发电机输出电磁功率下降，而原动机功率不变，产生过剩功率，使发电机与系统间的功角加大，如不采取措施，发电机将失步。在短路瞬间投入与发电机并联的制动电阻，吸收剩余功率（即电气制动），是一种有效的提高暂态稳定的措施。

快关汽门及其控制。在系统发生故障时，另一项减少功率不平衡的措施是快关汽门，以减少发电机输入功率。用控制汽轮机的中间阀门实现快关汽门可有效提高暂态稳定性。但是，它的实现要解决比较复杂的技术问题，是否采用快关措施要进行研究和比较。

此外还有在送端切机，同时在受端切负荷来提高整个系统的稳定性，以保证绝大多数用户的连续供电。

继电保护及重合闸装置。它是提高电力系统暂态稳定的重要的有效措施之一。对继电保护的要求是：无故障时保护装置不误动，发生故障时可靠动作。它的正确选择、快速切除故障可使电力系统尽快恢复正常运行状态。高压线路上发生的大多数故障是瞬时性短路故障。继电保护装置动作，跳断路器，断开线路，使线路处于无电压状态，电弧就能自动熄灭。在绝缘恢复后，重新将断开的线路投入，恢复供电。这种自动重合断路器的措施称为自动重合闸。它分为单相和三相重合闸，也是一项显著提高暂态稳定性的措施。

（三）电力系统安全控制

电力系统安全控制的目的是采取各种措施使系统尽可能运行在正常运行状态。

在正常运行状态下，通过制定运行计划和运用计算机监控系统（SCADA 或 EMS），实时进行电力系统运行信息的收集和处理，在线安全监视和安全分析等，使系统处于最优的正常运行状态。同时，在正常运行时，确定各项预防性控制，以对可能出现的紧急状态提高处理能力。这些控制内容包括：调整发电机出力、切换网络和负荷、调整潮流、改变保护整定值、切换变压器分接头等。

当电力系统一旦出现故障进入紧急状态后，则靠紧急控制来处理。这些控制措施包括继电保护装置正确快速动作和各种稳定控制装置。通过紧急控制将系统恢复到正常状态或事故后状态。当系统处于事故后状态时，还需要用恢复控制手段，使其重新进入正常运行状态。表 7－1 列出了各种系统状态下的控制内容和效果。

表 7－1 各种系统状态下的控制内容和效果

系统状态	控制内容	控制效果
正常状态：系统以额定工况运行	调整发电机有功、无功，切换系统负荷，改变继电保护整定值和变压器分接头，更改系统解列点	使系统运行在最佳状态，在系统发生事故时有较高的安全水平
紧急状态：系统发生故障，正常支行遭受破坏	继电保护动作切除故障。各种控制措施：电气制动、快关汽门、快速励磁、直流调制、低额减载、解列系统、限制负荷和出力、起动备用等	切除故障，防止事故扩大，平衡有功和无功，使系统趋于稳定
恢复状态：系统已脱离事故状态，但尚未恢复到正常状态	人工（或自动）操作，恢复正常运行。调整发电机出力，系统并列，切换负荷，向用户供电	系统恢复到正常

各类安全控制可按其功能分为：

（1）提高系统稳定的措施有快速励磁、电力系统稳定器（PSS）、电气制动、快关汽机和切机、串联补偿、静止无功补偿（SVC）、超导电磁蓄能和直流调制等。

（2）维持系统频率的措施有低频减负荷、低频降电压、低频自起动、抽水蓄能机组低频抽水改发电、低频发电机解列、高频切机、高频减出力等。

（3）预防线路过负荷的措施有过负荷切电源、过负荷切负荷等。

电力系统安全控制的发展趋势将是计算机分层控制、控制装置微处理机化和智能化、发展电力系统综合自恢复控制。

五、电力系统计算机监控系统——电力系统调度自动化系统

（一）计算机监控系统的构成及其作用

电力系统计算机监控系统由计算机硬件、软件、远动和信道所组成的一项复杂的系统工程，系统工程各个部分相互有机配合，缺一不可。

电力系统实现计算机监控有如下几方面的好处：

（1）经济。利用计算机实现在线经济调度可以合理地利用一次能源资源，降低全系统的发电成本和网耗。

（2）安全。利用配置彩色屏幕显示器的计算机可以随时监视电力系统的运行情况。当发生事故时可以及时处理，有助于防止事故扩大，减少停电损失。

（3）提高运行质量。利用计算机实现自动发电控制（AGC）可以自动维持频率不变和联络线功率为事先安排的数值；利用计算机实现无功——电压调节可显著提高全电网的电压质量。

（4）运行记录自动化。自动记录电力系统的正常运行情况、事故运行情况和事故的顺序事件记录，有助于事故分析，还可减轻运行人员的重复劳动。

（二）计算机监控系统的配置和功能

电力系统计算机监控系统的核心或大脑是电子计算机。因为计算机

监控系统是一个实时的控制系统，对计算机的可靠性要求很高。对整个计算机监控系统的可靠性通常用可用率（AV）来表示。系统的可用率用下式计算

$$AV = \frac{\text{系统运行时间}}{(\text{系统运行时间} + \text{系统停用时间})} \times 100\%$$

现代计算机双机系统可用率在 99.9%以上。

计算机监控系统最初系用一台计算机，后来采用双机系

统，接着采用主机—前置机系统，前置机承担处理周期快而计算简单的实时任务（如远动信息的采集和处理、计算机通信控制等），主机处理更复杂的任务。主机和前置机都用两套，形成广义双机系统。近年来，微型计算机和计算机工作站迅速发展，性能不断提高，因此出现了用多微机组成的分布式监控系统。这种分布式系统的特点是分别用专用计算机来处理某种功能。例如，数据采集、CRT 管理，通信处理、AGC 发电、安全分析等功能分别用专用计算机处理，整个组成一套分布处理系统。为了提高可靠性，实行整套备用，宏观上来看是对称的双机系统。

彩色屏幕显示器实现人机联系，使运行人员能直观看到整个电力系统的运行状况和处理结果，通过键盘操作等可直接干预和控制电力系统的运行。

远动装置（RTU）是电力系统计算机监控系统的基础。远动装置是远方信息收集，实现遥信、遥测、遥控和遥调的不可缺少的环节，现在都是采用微机远动装置。现代化微机 RTU 沿着两个方向发展：一种是循环式；另一种是应答式。循环式就是由发送端循环不断地将信息发送到接收端；而应答式则是由主站端依次查询每台 RTU 有无信息发送。如无信息要送，则立即查询下一台 RTU。如有信息要送，则将该 RTU 的信息送完，主站端再查询下一台 RTU。目前，世界上多数国家使用应答式 RTU，日本国则采用循环式 RTU。

通信相当于电力系统计算机监控系统的神经系统，远动信息经通信送到控制中心，而调度中心的控制命令经过通信才能送到发电厂和变电站。通信和运动都是电力系统计算机监控系统的基础部分。目前，电力系统计算机监控系统的通信主要采用微波和载波通信。

计算机监控系统有了硬件只是一个基础，还要配上成套的软件才能发挥应有的功能。计算机都配有系统软件，它是管理程序的程序，是为其他程序服务并提供方便的程序。系统软件的内容大致有：①为用户编程提供各种方便的手段和工具，如各种语言的编译程序、各种用于调试程序的软件工具等；②对计算机运行进行调度和管理的操作系统；③其它服务性程序，如诊断查错程序、系统生成和初始化程序等。

电力系统计算机监控系统发挥作用还必须有支持软件。支持软件主要由实时数据库、人——机联系和信息收集系统构成，对应用软件起重要的支持作用。

（三）计算机监控的应用软件

电力系统的安全和经济运行最终要靠应用软件来实现。因此，应用软件是电力系统计算机监控系统的重要组成部分。

应用软件可分为三类：基本的 SCADA 软件、经济调度应用软件和安全分析的应用软件。

1．SCADA 软件

SCADA 是数据采集与监控的英文缩写。SCADA 内容包括：

（1）实时数据显示。把各厂、站收集的实时数据显示在屏幕上，供调度员监视全电力系统的运行状态。

（2）越限报警。如果电力系统中的发电机、变压器、输电线、母线发生过负荷和电压越限，则发出报警，引起调度人员注意。

（3）事件记录。电力系统中的断路器、继电保护或某些隔离开关改变状态及调度员在屏幕上操作都自动打印，还有顺序事件记录等。

（4）遥控和遥调。调度员远方操作断路器和变压器分接头以及 AGC 设定点的调节。

（5）事故后分析或故障追忆以及运行报表自动记录。

2．经济调度应用软件

（1）自动发电控制（AGC／EDC）。它有 3 个功能：①维持系统频率在允许范围内；②维持联络线功率；③配合经济调度程序，合理分配各发电厂出力，使全系统发电成本最小。

（2）经济调度。它可在电力系统安全条件下，用等微增率法，使全电力系统成本最小，将全电力系统的总负荷最佳分配给各个电厂和电厂各台机组。据报导，在线经济调度可节省燃料 0．5%～2%。

（3）开停机计划与水、火电调度计划。在满足全系统负荷的前提下，如何开机、停机的问题是一个较复杂的问题。据文献报导，利用计算机合理安排开停机计划，可以节约燃料 2%～6%。

3．安全分析的应用软件

它包括安全分析、优化潮流计算、状态估计和调度员培训模拟等。

（1）安全分析或事故预想。它是对电网安全实行预防性控制的软件。在正常运行时，进行事故预想计算。通常考虑一处断线或一台机跳闸或母线故障，即所谓 n—1 事故预想计算，检查过负荷或电压越限。如发现过负荷或电压越限，则向调度员报警，并转入再分配计算，向调度员提供消除过负荷或越限的对策。这就是所谓的 n—1 静态安全分折。目前，动态安全分析尚待研究。

（2）优化潮流计算。它的基本思路是在满足负荷约束与运行约束条件下，使电力系统燃料消耗（或发电成本）最小。它综合考虑了电力系统的经济运行和安全约束，是全面考虑有功和无功负荷分配的新计算方法。

（3）状态估计。它可向安全分析和在线潮流等应用软件提供可靠的数据库。

（4）调度员培训模拟。它有两种：一种利用备用计算机来开发模拟软件，调度员可利用备用计算机进行模拟操作，以提高其处理事故的经验；另一种是利用一台离线计算机，但控制室、模拟盘、操作台与在线计算机控制的环境一样，同样可以培训调度员。这种方式投资要高一些。

（四）能量管理系统

计算机监控系统可分为 3 种情况：第一种是安全监视控制（SCADA）系统，主要执行安全监视与控制功能，硬件和软件较简单。这种控制系统适用于配电系统的监视与控制。第二种叫做 SCADA＋AGC／EDC 系统，这种系统可用于部分省网的调度系统和大的地区调度系统。第三种叫做

能量管理系统（EMS）。这种系统除了具有 SCADA 和 AGC／EDC 功能外，还包括安全分析等高级应用软件，主要用于大电力系统或跨省电网调度中心。

第八章　　供用电

电能是一种使用方便、清洁，容易控制和转换成其他能

源的二次能源。用电就是按预定的目的，把电能转换为其他形式能量，消耗电能的行为。今天，它的应用范围已深入到人们生产、生活和社会政治、经济和文化的所有方面。电气化程度已成为衡量一个国家工业、农业、科学技术和国防现代化和居民生活水平的重要标志。电力工业发展的目标就是适应社会发展和人民生活水平提高的需要，提供充足、可靠、优质的电能，并采取技术的、经济的有效措施，更有效地利用电能。

一、电能质量

电能的质量标准有频率、电压以及电压的不对称性和非正弦性标准。

1．频率质量

频率标准和容许偏差。频率是整个电力系统统一的运行参数，一个电力系统只有一个频率。我国和世界上大多数国家电力系统的额定频率为 50Hz。大多数国家规定频率偏差±0.1～0.3Hz 之间。在我国，300 万 kW 以上的电力系统频率偏差规定不得超过±0.2Hz；而 300 万 kW 以下的小量电力系统的频率偏差规定不得超过±0.5Hz。

由于大机组的运行对电力系统频率偏差要求比较严格，因此有些国家对电力系统故障运行方式的频率偏差也作了规定，一般规定在±0.5～±1Hz 之间。超过允许的频率偏差，大机组将跳闸，这不利于系统的安全稳定运行。

频率变化的原因。在电力系统内，发电机发出的功率与用电设备及送电设备消耗的功率不平衡，将引起电力系统频率变化。当系统负荷超过或低于发电厂的出力时，系统频率就要降低或升高，发电厂出力的变化同样也将引起系统频率变化。在系统有旋转备用容量（运行备用容量）的情况下，发电厂出力能通过频率调节器较快地适应负荷的变化，因此负荷变化引起的频率偏差值较小。若没有旋转备用容量，负荷增大引起的频率下降较大。电力系统的负荷始终随时间在不断地变化，要随时保持发电厂的有功功率与用户有功功率的平衡，维持系统频率恒定，因此，电力系统应具有一定的旋转备用容量，一般运行备用容量要求达到 1%～3%。

低频率运行的危害。电力系统低频率运行对发电厂和用户都会产生不利影响。系统低频率运行时将产生以下不利的影响：汽轮机低压级叶片将由于振动加大而产生裂纹，甚至发生断落事故；电厂中所有的交流电动机的转速相应降低，使给水泵、风机、磨煤机等辅助机械的出力相应降低，严重影响火力发电厂的出力，促使频率进一步下降，引起恶性循环，甚至可能造成全厂停电的严重事故；同时，所有用户的交流电动机的转速也要降低，工农业的产量和质量将不同程度地降低，例如频率降到 49Hz 以下时，纺织品、纸张将发生毛疵和厚薄不匀的质量问题。

高频率运行对系统本身和用户也将产生不利影响，如使系统电压升

高对绝缘不利，增加用户和系统的损耗等。

防止系统低（高）频率运行的对策，主要是提高日负荷曲线预测精度，使计划开机的发电出力与实际的负荷偏差较少；充分发挥 AGC 的功能，严格要求在正常运行方式下系统频率偏差不大于规定值。在故障情况，系统频率下降时，动用系统旋转备用容量，进行低频率减负荷，自动切除部分次要负荷；当频率升高时，快速减少发电机出力，甚至进行高频率切机，使系统频率尽快恢复在额定值附近。目前，多数电力系统高峰容量不足，可能出现低频率运行。在这种情况下，可用适当的峰谷电价差，鼓励用户避开高峰用电或少用电；用电大户在实行计划用电的电网中不超指标用电。要保证系统频率质量，只有电力部门和用户共同努力才能实现。

2．电压质量

供电电压标准及容许偏差。我国对用电单位的供电额定电压及容许偏差规定为：①低电压 220V／380V，用于照明用户时允许偏差＋5%～—10%；用于其他为±7%。②高电压 10kV，10kV 及以下允许偏差为±7%；对特殊用户有 35kV、110kV 供电的，允许偏差为±5%。

电压偏离额定值的原因。电力通过变压器和线路输送将产生电压降，使受电端电压较送电端电压低一定数值。一般情况下，离电源越近，负荷越小的用户，电压降越小；反之，电压降越大。用户消耗的功率包括有功和无功。如果用户所需无功经变压器和线路送来，则会产生较大的电压降，使用户电压偏低，用户吸收的无功越大，则用户端的电压越低。用户的用电功率因素将直接影响用户本身的电压质量。

用电设备低电压运行的危害：①将使电动机的电流过大，线圈温度过高，甚至使电动机拖不动机械或无法起动，进而烧坏电动机；②电灯发暗，日光灯起动困难；③线路损耗增加；④在电网枢纽变电所和受电地区的电压降低到额定电压的 70%左右时，将可能发生电压崩溃事故，即用户消耗的无功稍有增加，线路电压降加大，使受电地区电压下降，这样又进一步造成线路电压降增加，如此循环下去，将导致甩掉大量负荷，造成大面积停电。

用电设备高电压运行可使用户设备（如灯泡）寿命降低，电动机发热，损耗增加。

提高电压质量的措施：①采取无功补偿措施，做到无功分级即各个电压等级、分区平衡，即每个电压等级发出的无功与消耗的无功平衡，每个地区发出的无功与消耗的无功平衡，尽可能减少无功远距离输送。做到在负荷点装设无功补偿设备。无功补偿设备可以是电容器、静止无功补偿器等。②由用户装设适当的电容器，提高用户的功率因数在 0.9 以上。集中装有电容器的大用电户应注意：在小负荷时切除部分电容器，以避免电压升高和向电网送无功，引起网损增加。用户最好装设跟踪无功负荷的自动投切电容器或静止无功补偿器。③在负荷密集的地区变电站采用带负荷调压的变压器。

3．电压的不对称性和非正弦性

在现代的用电设备中，出现了换流一整流设备、变频一调速设备、电弧炉、电气机车、电视机等非线性负荷。它们不但引起电压波动，而且造成电压的不对称性和非正弦性。

电压的不对称性系指三相电压间的不对称。根据对称分量法，不对称的三相电压可分解为对称的正序、负序和零序分量。

电压的非正弦性是指电压波形的畸变。根据傅立叶变换，非正弦的电压可分解为基波（50Hz）电压和一系列高次谐波电压。总谐波电压是所有高次谐波电压的均方根值之和。我国对供电的谐波电压和电流允许值作了规定。以 10kV 的电网为例，总的电压谐波畸变率（GHD）应小于 4%，奇次谐波应小于 3．2%，偶次谐波应小于 1．6%；而各次谐波总的电流允许值见表 8－1。

表 8－1 各次谐波电流允许值

谐波次数	2	3	4	5	6	7
电流允许值（A）	26	20	13	20	8.5	15

注　　短路容量以 100Mvar 为基准。

用户和供电部门共同努力才能保证电网谐波在允许范围。电网谐波如果不治理，将导致电气设备寿命缩短、网损增加、仪表指示不准、干扰通信线路，甚至引起继电保护和自动装置误动。

二、供电可靠性

电力系统从发电厂、变电站、输配电线路到电力用户，有成千上万的设备及其控制和保护装置，它们分布在各种不同的环境和地区，都可能发生不同类型的故障或事故，影响电力系统正常运行和对用户的正常供电。

各种故障和事故造成的用户停电，会给工农业生产和人民生活造成不同程度的损失。一般说来会造成产量下降，质量降低，严重时会造成设备损坏。例如，高炉停电超过 30min，铁水就要凝固，造成重大损失。停电也可威胁人身安全。例如煤矿矿井停电，使风机停转，井下风量不足，空气瓦斯过高，引起窒息的人身事故。停电会给社会造成经济损失。

供电可靠性是供电的重要指标。它用用户平均停电频率（CAIFI，次／年）和用户平均停电累计时间（CAIDI，min／年）以及全部用户平均供电时间占全年时间的百分数来表示，即

CAIFI＝用户停电总次数／停电用户总数

CAIDI＝用户停电累计时间总和／停电用户总数

提高供电可靠性可减少停电造成的社会经济损失，同时它意味着增加建设投资和运行费用。因此，要从这两方面考虑经济合理的供电可靠性指标。经济发展水平不同的国家，供电可靠性指标应有所不同。美国和加拿大的供电可靠性指标一般为：用户平均年停电 0.1～0.5 次（即为 2～10 年停电一次），全年累计停电时间为 10～120min，即供电可靠性为 99．98%以上。

提高供电可靠性的措施。供电可靠性与发电、供电和线路可靠性，电网结构和变电站主接线可靠性，继电保护及安全自动装置配置，电力系统备用容量和运行方式等都有关系。因此，从电力系统规划到运行都要重视供电可靠性的提高。提高供电可靠性的措施是多方面的，下面仅

介绍与供电直接相关的几项措施：

（1）合理配置继电保护装置，包括高低压用电设备的熔丝保护及保护整定值的配合。当电气设备发生事故时，用保护装置迅速切断故障，使事故影响限制在最小的范围。

（2）采用安全自动装置。例如，在变电站装设低频率自动减负荷装置，当系统频率降低到一定数值时，自动断开某些配电线路的断路器，切除部分不重要负荷，使电力系统出力与用电负荷平衡，频率迅速恢复正常，以确保重要用户的连续供电。提高供电可靠性的自动装置还有高压线路的自动重合闸、自动解列装置、按功率或电压稳定极限的自动切负荷装置等等。

（3）提高供电设备的可靠性，首先要选用高度可靠的供电设备，其次要做好供电设备的维护工作，防止各种可能的误操作。

对于电气设备维修，我国长期实行“定期计划维修”制度，其主要特点是将时间周期作为设备维修的基础，只要到了计划维修的时间周期，在无特殊情况下都必须进行设备大修或小修。这种维修制度对保证电力系统安全运行，提高供电可靠性起到了预防为主的积极作用。随着电气检测技术的进步，以及在线诊断和计算机数据信息处理的发展，目前正在研究和推广“状态维修”制度。它的主要特点是利用各种测试手段（包括常规和在线监测）、数理统计和在线诊断等技术，对运行中的电力设备的实际状态、变化趋势和规律，进行科学预测和评估，作出是否需要进行检修的决定。它与“定期计划维修”的主要区别是，以实际运行状态取代固定的维修周期。在科学管理的基础上，“状态维修”制度比定期计划维修制度要优越，它不但可提高供电可靠性，而且有显著经济效益。

（4）提高送电线路和变电站主接线的可靠性。向城市和工业地区供电的变电站进线应采用双回线，以不同的电源供电。重要的用户亦要采用双回线双电源供电。双回线供电与单回线供电相比，可靠性要高得多。

（5）配（供）电管理系统。配电系统计算机监控和信息管理系统不仅能提高供电可靠性，而且具有显著经济效益。过去十几年，我国对供电过程的计算机监控和信息管理有了很大发展。配（供）电系统是一个庞大的系统，可分为不同的工作领域。在配电系统的各个不同领域正在发展不同程度的自动化。配电系统自动化发展总的趋势将是向着综合化和智能化方向发展。目前正在研究的配电管理系统（DMS），是在用于输电系统的能量管理系统（EMS）基础上发展起来的综合自动化系统。它是一个以电力系统中的配电系统，直至用户为控制与管理对象，具备数据采集与监视（SCADA）、负荷控制与管理、自动绘制地图与设备管理、工作顺序管理和网络分析等功能的计算机控制系统。

三、电力负荷控制

电力负荷控制不仅是配电自动化的组成部分，而且是负荷管理的技术手段。在国外，电力负荷控制已有较长时间的应用，其目的是采用合理的峰谷电价差别，调动广大用户参加电力系统调峰；它是利用自动控制技术，由供电公司远方控制用户部分用电设备开关的关断，使用户尽

可能避开日高峰时段用电，移到低谷用电，起到系统削峰填谷的作用的技术措施，它不影响用户的工作和生活环境。进行电力负荷控制，对供电部门来说，在保证供电和用电电量平衡的情况下，可以少装发电机组，提高现有发电设备的利用率；对用户来说，用同样多的电量可少花钱。因此，对供、用电双方都有明显的经济效益。例如，在国外，许多家庭（还有宾馆、工厂等）采用贮蓄式电热水器供应热水，供电公司利用电力负荷控制技术直接控制热水器的开关，分时段安排它们在后夜系统低谷时段通电热水。这样，减少了白天及高峰时间的用电，增加了低谷用电，峰填谷，达到自动调峰的目的。

目前，在我国，电力供应不足，发电厂发出的电力和电量不能完全满足用户的需要。在这种情况下，电力负荷控制除担任调峰功能外，主要是计划用电，即在一定时间内限制用电的技术手段，以避免采用拉闸的办法分区停电，从而影响重要用户或大用户内重要负荷的电力供应，确保电网安全。随着电力工业的发展，供电量与用电量将会做到平衡，但居民用电所占比例将增加，峰谷矛盾会仍然突出。那时，电力负荷控制的功能将会转变为象国外那样的功能，但仍然是需要的。

电力负荷控制按照通信媒介（或信道）不同，分为无线电力负荷控制、电力载波负荷控制、音频负荷控制和电话线复用方式负荷控制。目前，前两种负荷控制应用较多。

无线电力负荷控制是由中央控制器和分散安装在用户处的各种单、双向终端组成，由无线电作信道来传输控制命令的监控系统。在平原地区，通常监控半径为 30km，如范围更大则要设中继站。

电力线载波负荷控制由中心站、各变电站的载波信号收发装置和用户处的单、双向终端组成，中心站到变电站的信道可以是光纤、电缆或无线电，变电站到用户的信道则是配电网络的载波通信。

音频电力负荷控制技术与载波控制技术基本相同，差别在于只用单向终端。

电话线复用方式负荷控制由中心站、直接接到电话线的各种终端组成。通过中心站自动拨号或随机拨号接通某一终端进行负荷控制。

无线电负荷控制一般适用于平原地区，负荷分散、密度不大及边远地区；电力载波和音频负荷控制适宜用于负荷密度较大的城市及工业区。

四、电力需求侧管理（DSM）——节能节电的新举措

电力需求侧管理是指电力部门——电能供应方积极采取行政手段（如法规、标准和制度等）、经济手段（如电价、奖励和罚款等）、技术措施（如负荷监控、节能技术等），鼓励用户——能源需求方采取包括改变需求方式在内的各种有效的节能措施的用电管理，在保持能源服务水平的条件下，它可实现减少或推迟新建电厂和电网的投资和一次能源消费对大气的污染等，从而取得明显的经济效益和社会效益。

DSM 的根本目标在于发掘有效潜力，降低用户对电量和装机（尤其是调峰装机）的需求，尽量推迟新建电厂。就其技术措施而言，可分成 4 大类：①提高用户终端设备效率；②建筑节电设计与改造；③负荷控制

技术；④蓄热和蓄冷技术。与传统的负荷管理不同，DSM 强调用户的积极参与，且使用户承担一定的初投资。

DSM 的主要方法和措施是：

（1）通过广告、宣传、教育等活动增加用户对节能节电和提高能源效率的意识。

（2）争取制造厂家的支持，进行必要的技术开发和使用高效产品。

（3）直接给用户以财政补贴或财政奖励；

（4）改革电价，采用分时电价和季节性电价等。

（5）制订标准和法规。

DSM 计划由计划设计、计划实施和计划监督、评估 3 个阶段组成。首先要进行调查，调查用户要求、市场基础、环境保护、法规和各方面支持程度等。在此基础上进行设计，主要工作是确定负荷形状改善和节电目标，对为达到既定目标拟采取的技术和经济措施进行评估和选择，初选方案并对初选方案进行排队，进行成本／效益分析，选出最佳方案并付诸实施。在计划实施过程中要根据反馈信息，不断予以调整。最后要对实施效果进行定量评估。

DSM 是在 70 年代能源危机之后，因能源价格上升，使发电成本大幅度上升，80 年代环境保护更加严格的情况下研究和实施的。美国是最早研究 DSM 并逐步实施的国家。80 年代中期之后，许多发展中国家也开始实施 DSM，并已取得效益。

我国既是世界上的能源大国，又是世界上能源消费强度较高的国家之一。目前，我国能源利用率只有 30%左右，比先进国家低很多；主要产品单位能耗比国外先进水平高 30%以上；单位能耗所创造的国民生产总值仅为世界水平的 14．3%。这说明，我国节能节电潜力大。目前，我国仍然处于缺电局面，特别缺少调峰容量。因此，我国在加快电力开发的同时，借鉴国外成功经验，积极研究和推广 DSM，鼓励广大用户节能节电，将会对整个国家产生巨大的经济效益。

五、节电新技术

用电设备所吸收的电能包括有效消耗和损耗两部分。有效消耗系指直接消耗在产品生产过程或其他必须的电能；损耗则是指在产品生产过程中，由于设备特性和生产操作过程本身所损耗或其他形式损耗的电能。

节约用电指的是采取各种措施，降低电能损耗（包括电网网损），提高有效用电程度。

研究和推广下列节电新技术，可产生显著节电效果，具有重要的经济意义。

（1）高效电动机。它是采用新材料和改进设计，具有低损耗、高功率因数的电动机。目前，电动机用电占我国总用电量的 60%。高效电动机的效率比一般标准电动机高 2%～7%，永磁电动机可提高效率 4%～10%。

（2）高效节电照明技术。如稀土荧光灯在同等照度下消耗电能仅为普通白炽灯的 20%；节能电灯代替白炽灯可提高效率 50%以上。

（3）电力电子技术。它是大功率电子器件、微电子和微处理技术及现代控制论相结合的综合性技术，在工亚、交通运输、家用电器等领域有广泛的用途，可产生很好的节能节电效果。例如，风机、水泵的阀门流量调节改为交流变频调速控制，可节电 30%～40%；直流传动改为可关断晶闸管变频传动，可节电三分之一左右。

（4）远红外线加热技术。它是利用远红外辐射元件发生的远红外线，使被加热物体吸收，直接转变成热能的一种加热方式。

（5）电热膜加热技术。它是将电子电热膜直接制作在被加热体的表面上，当通电加热时，热量能很快传给被加热体。电热膜加热效率比普通电热丝加热效率高一倍以上。

第九章　　电力环境的保护

一、概述

这里所说的环境是指围绕着人群的空间，及其可以直接、间接影响人类生活和发展的各种自然因素的总体。环境是人类生存的根本。人类社会和经济的发展必然对环境产生影响。现代大生产对环境的影响尤为严重，电力工业的发展也不例外。环境保护就是采取行政的、法律的、经济的、科学技术的多方面措施，合理地利用自然资源、防止环境污染和破坏，以求保持和发展生态平衡，保持人类社会的发展。

电力环境保护是指发电、输电和配电各环节对环境影响的防护和治理。1983 年底，国务院明确规定：“ 环境保护为现代化建设中的一项基本保证条件和战略任务，是一个基本国策 ”。电力工业的发展必须贯彻这一基本国策，使电力生产建设与环境保护协调发展。

二、火力发电与环境

从火力、水力和核能发电相比较来说，火电生产对环境污染最大，治理工作最重，可归纳成废水、废气、废渣（以上三项俗称三废）、废热、噪声 5 种基本污染形式。污染源有以下几种：

（1）粉尘。它是随烟气进入大气的微小固体污染物，包括燃料燃烧后的飞灰和未燃烧完全的炭粒，分飘尘（＜10μm）和降尘（＞10μm）两种，以漂尘的有害影响最大。治理的方法是采用各式降尘器来消除烟尘。其中以静电除尘器效率最高，可达 99.99%，是今后的发展方向。

（2）二氧化硫。它是燃料中的硫燃烧后生成的污染物，随烟气排入大气，是形成酸雨的主要物质之一。目前我国火电厂 SO_2 排放基本处于失控状态，将是制约电力发展的重要因素。防治 SO_2 的措施有燃烧前燃料脱硫、燃烧中（炉内喷钙或流化床）脱硫和燃烧后（烟气）脱硫。目前可以推广的主要是烟气脱硫。

（3）NO_x。NO 与血红蛋白结合能力远远大于 O_2，且生成不可逆转的变性血红蛋白，造成血液缺氧，严重损害呼吸及中枢神经系统。NO_x 也是形成酸雨的主要物质之一。治理 NO_x 的措施主要有：采用选择性催化还原法，使烟气中的 NO_x 还原为 N 和 H_2O。但更主要是采用新式低 NO_x 燃烧器，在炉膛燃烧时降低 NO_x 的生成。

（4）粉煤灰。它包括燃烧后的煤灰、炉渣和收集的飞灰，是电厂排放量最大的一种固体污染物。粉煤灰目前仍以灰场贮存为主，浪费土地资源，并随其扩散、迁移、积累，污染大气、水和土壤环境。但粉煤灰可用于填充山沟、低洼地、矿井等，上面覆土造田可防治二次污染，又可充分利用土地。此外，粉煤灰又是一种潜力很大的宝贵资源，可以综合利用，如回收有用成分做建筑材料、筑路、做肥料等，用途广泛。

（5）冲灰水。排放量大，PH 高（＞9），浊度、氟离子、砷等超标，这些是冲灰水的主要污染问题。冲灰水治理是一个较突出的难题，核心集中在解决 PH 超标、管道结垢、排放量大的问题上。既节水又少污染的

冲灰水循环利用是有待完善的发展方向。

（6）热污染。它是指火电厂不采用冷却塔的直接水系统的温排水。这类火电厂热量的 50%以上是以温排水方式排入水中，使水（或局部）温度升高，会破坏水生物的正常温度环境，影响其生存和繁殖。目前，解决热污染的办法是局部采用冷却塔，将循环水冷却到允许的温度再返回接纳水体。

（7）噪声。火电厂大功率旋转设备及高压、高速蒸汽的扩容、排放、泄漏是主要的噪声源，如汽轮机、电动机、磨煤机、风机等。

噪声对人的影响是广泛的。严重的可造成耳聋（听力损失）、耳外伤等。噪声影响人的生理机能，造成神经紧张、失眠、消化不良等；噪声干扰睡眠和正常交谈，降低工作效率，使人烦燥、易怒，甚至影响生物正常生长。

特别是排汽等高频噪声，突发性强，危害更大。

噪声防治除采用屏蔽设备、隔离设备，还应重视个人防护。

三、水电开发与环境

水电生产过程不释放污染物，没有热污染，利用的是可再生的资源，这是它不同于火电的优势。但它对自然环境和生态系统的影响多是潜在性的，主要表现在以下几个方面：

（1）自然方面。水库蓄水使地面沉降，库岸滑坡，淹没大片土地，并可诱发地震；库区蒸发量大，改变小气候；使下游水文条件改变，地下水位降低。

（2）生物方面。大片生物区被淹，改变了上、下游的水陆环境，影响下游鱼类的迁移习性。

（3）地球化学方面。水的流动特性改变，使水流自净能力下降，从而改变水的物理化学性质（颜色、气味、水温、溶氧量等）。水电开发对环境的影响问题有的尚在讨论之中。但水电有无可争辩的优越性，其对环境的影响问题可在勘测、设计和施工阶段精心处理，使影响减至最小程度。

四、核电与环境

总体而言，核电是清洁、安全的能源，没有火电排放的粉尘、SO_2、NO_x和温室气体 CO_2。核电建设特别重视安全问题。正常运行时，反应堆属于低水平辐照污染，其排放剂量严格按规定标准控制，具有较高的安全性。年排放剂量比累计看电视或一次 X 光透视所受辐射要小得多。核废料、失效的滤料、树脂、污染的工具、衣服等都不会直接接触环境。停堆后要对其采取严密的保存及后处理措施（冷却、固化、隔离），保证放射性污染扩散不出来。为确保放射性不外泄，反应堆设置了四道防护屏障（压水堆），针对事故性问题有专门的中子自控设施，足以使事故污染不扩展，控制在最低限度，外泄量在允许标准内。

核电站热能的 60%～70%以温排水的方式损失掉，温排水量比相同容量的火电厂要大。

五、输变电与环境

在输变电线路附近，存在一个工频交变电磁场，不断以电磁波形式向外辐射，在近场区会产生电磁干扰。它对环境的影响主要表现在：电晕放电干扰无线电和电视；会使空气发生碰撞游离，生成少量 O_3 和 NO_x；会产生电磁噪声（暴风雨天气较重），但不足以损伤听力。

由于电力电子器件的广泛采用，使电网供电电压波形产生畸变，即在正常的工频正弦波的基础上包含了许多高次谐波，严重时会对用户的用电设备造成危害。这需要用电部门和供电部门协调采用谐波抑制措施，使供电谐波在规定的范围内。

六、污染物的迁移转化——温室效应和酸雨问题

目前的环境问题，已由“局部性”影响扩大、融合为“区域性”，甚至“全球性”的灾难，而且这种灾难每年仍以一定的速度在加剧。如果继续扩展下去，后果让人忧虑，要想控制，难度极大。这些“全球性”的环保问题现已不是一个争论的概念问题，而是实际存在的威胁。“应当站得更高些看得更远些”，使环保工作具有“全球意识、发展意识、未来意识”，长远规划，造福后世，功在千秋。电力企业的全球性环境污染主要有两项。

（1）温室效应。燃料燃烧产生 CO_2，是“温室效应”的主要责任者，其中 40%～50%滞留在大气近地层。它允许太阳光透过，加热地球，地球作为热源，向空间发射红外辐射，被 CO_2 强烈吸收，热散不出去，近地层大气因此升温。这种作用就象温室一样，故称“温室效应”。

全球变暖的原因是多方面的，但温室效应是主要的。全球变暖的潜在影响是，海洋热膨胀和极地冰架溶化，使海平面上升，将对大洋中的低洼岛国和沿海地区造成严重影响。同时，将使区域降水发生变化，后果难以估量。

目前有效延缓这种灾难的方法就是：节约能源，提高机组热效率；改变能源结构，减少燃煤份额；开发水电、核电及其它清洁能源。

（2）酸雨。大气中含有 CO_2 以及环境中存在其他酸性物质，可使大气降水（雨、雪、雾）呈弱酸性，其 pH 值低于 5.65。如大气中存在过量的由燃烧产生的 SO_2 和 NO_2，则大气降水的 pH 值低于 5.6 以下，称为酸雨。

酸雨属于二次污染物，其环境影响是区域性的。目前在世界范围已形成几大酸雨区，我国西南地区酸雨污染严重，频率高，单场雨 pH 值最低曾达 3.35（重庆）和 3.41（贵阳），并已蔓延到广东、广西等省。酸雨破坏植物组织，降低光合作用速度，影响植物生长；使土壤酸化，溶出重金属成分，抑制微生物活动，淋洗营养成分，降低肥力，污染水体；改变水生物的酸、碱环境，影响生长和繁殖；严重腐蚀建筑物和其他设备。若不加以控制，农、牧、渔业要受很大损失。所以发达国家都制订了严格控制 SO_2 及 NO_x 的排放限量的法规。

第十章　　电力成本、电价和技术经济指标

一、电力成本

电力成本指电力（产品）生产经营全过程中所发生的全部生产耗费，它是包括发电成本、购电成本、供电成本及售电成本的总称。电力企业管理费用以及为筹集资金而发生的财务费用，包括企业生产经营期间发生的利息支出、汇总净损失、调剂外汇手续费等，直接计入当期损益。

电力成本构成计入电力成本的项目有：①燃料费，指发电直接耗用的各种燃料（煤、油、气等）的费用；②购入电力费，指电力企业向外单位购入有功电量而支付的电费；③用水费，指发电生产用的外购水费，包括除灰、冷却和补给水水费，水电厂发电和蓄能用水水费、水电厂按规定提取的库区维护费用等；④材料费，指为生产经营过程耗用的材料、事故备品、低值易耗品、以及不应计入燃料项目的其他各种生产用燃料等所支付的费用；⑤工资及福利费，工资是指电力生产人员和管理人员的工资及各种津贴，以及按国家规定的职工工资总额的一定比率提取的职工福利费；⑥折旧费，指提取的固定资产折旧费；⑦修理费，指固定资产的修理费用；⑧其他费用，指不属于以上各项而应计入电力成本的其他费用，包括办公费、水电费、差旅费、低值易耗品摊销费、劳动保护费、外部劳务费、运输费、工会经费、职工教育经费、业务费、保险费、租赁费、税金、取暖费、土地使用费、业务招待费和技术转让费等。

电力产品从生产到销售，分为发电、供电和售电 3 个环节，其成本的计算也就分为 3 个环节，即发电企业计算发电成本，供电企业计算供电成本，电力公司汇总计算售电成本。

（1）发电成本。以发电企业为成本计算单位，核算为发电所发生的全部耗费。发电单位成本是按发电总成本除以厂供电量（即发电量减去厂用电量）计算，其公式为

发电单位成本＝发电总成本／厂供电量

（2）购电成本。以供电企业或省级电力公司为成本计算单位，核算为转售电力从外单位购入电量所支付的购电费用。一般计算购电总成本和购电单位成本。购电单位成本，按购电总成本除以购电量计算，其公式为

购电单位成本＝购电总成本／购电量

（3）供电成本。以供电企业为成本计算单位，核算为送电、变电、配电、用电以及售电所发生的全部耗费。供电单位成本，按供电总成本除以售电量计算，其公式为

供电单位成本＝供电总成本／售电量

（4）售电成本。以电力公司为成本计算单位，汇总为发电、供电、购电、售电全过程所发生的全部耗费。售电成本是电力工业企业的商品成本。售电单位成本，按售电总成本除以售电量计算（实行统一核算的网内各省（区）互供电量应冲抵后计算），其公式为

售电单位成本＝（发电总成本＋购电总成本＋供电总成本＋汇编单位管理费用及其他机构成本）／售电量

二、电价

电价是电能商品价格的总称。电价按照生产环节可以划分为上网电价、互供电价、销售电价和趸售电价；按照电价制度可以划分两部制电价、电量制电价、定额制电价等；按照用电时间序列可以划分为峰谷电价和丰枯电价等。合理制定电价，将促进电力工业的健康发展，调节电能供需关系，提高电力企业的经济效益。

世界上政府或企业制定和管理电价一般遵循 3 条原则：

①成本补偿原则，电价必须能够补偿电能生产全过程的成本费用支出。②合理盈利原则，电业是公用事业，一方面，政府不允许其获取超额利润，以保护电力消费者的利益；另一方面，社会对电力的需求日益增长，电业必须不断发展才能满足日益增长的电力需求，加之电业是资金密集型产业，需要大量建设资金，而建设资金必须通过电费收入以及吸引社会资金来筹集，因此，电价应保证电业以及投资者的合理收益达到一定的盈利水平。③公平负担原则，应根据用户的用电时间、用电地点、用电条件的不同，分别制定不同的电价标准。

电价制度是指电费的计收方式。电价制度的基本形式有定额电价制、计量电价制（即电度电价制）和两部电价制 3 种。世界各国在电业发展的不同阶段，在上述 3 种电价制度的基础上，还采用了其他一些电价制度，如底度制、直线制、梯级制、区段制、峰谷电价制、季节性电价制、依功率因数调整电价制、负荷率折扣电价制、随燃料价格浮动电价制等。

世界上采用的电价分类主要方法有：①按供电电压分类，如日本的电力用电电价分为低压电价、高压电价，超高压电价；②按用电负荷率分类，如法国的黄色电价和绿色电价均分为最大负荷率电价、大负荷率电价、一般负荷率电价和小负荷率电价；③按电能用途分类，分为照明电价、电热电价和电力电价；④按用电容量和电量分类，如美国洛杉矶水电公司的电价分为大用户、中等用户、小用户及居民用电 4 种电价；⑤按用电性质和用途分类，如中国电价分为照明电价，非工业电价，普通工业电价，大工业电价，农业生产电价，趸售电价，省、市、自治区电网互供电价，其他电价 8 类。

三、技术经济指标

1．发电用一次能源构成

能源是能够转换成为机械能、热能、电磁能、化学能等各种能量的资源。自然界中以现成形式存在的能源，称为一次能源。由一次能源直接或间接加工转换后形成的能源，称为二次能源。一次能源在具备了必要的技术条件时，均可转换为电能。换句话说，自然界存在的一次能源均是发电能源。

发电用一次能源构成是指发电能源中各种一次能源的构成及其比例关系。目前，世界各国的发电用一次能源构成中，煤炭、石油、水能、核燃料等占较大比重，地热能、风能、潮汐能和生物质能等在某些国家

也占有一定比重，太阳能和海洋能用于发电尚在试验研究阶段。中国目前的发电用一次能源构成中、煤炭占70%左右，水能约占20%，石油和天然气的比重不到10%，核燃料用于发电刚刚起步不久，本世纪末所占比重尚小，其他一次能源用于发电，在发电能源构成中所占比重极小。

2．电力消费构成

电力消费构成是指国民经济各部门及居民用电情况及其比例关系。为了反映国家电气化发展水平和趋势，以及反映经济增长与电力消费量增长的关系，需对电力消费及其构成进行统计分类。1986年前，中国电力消费构成分为农村用电（包括农村生产、农副产品加工、农村工副业、农村生活等用电），工业用电（包括轻工业用电和重工业用电），交通运输用电（包括车站、码头及机场的动力和通信用电，电气化铁路、电气运输机械等用电）和市政生活用电（包括上下水道用电、生活照明用电和非工业动力用电）等4大类。1986年后，电力消费构成改分为八大类：①农、林、牧、渔和水利业用电（包括生产和服务业用电）；②工业用电（指城乡工业企业中用于工业生产的用电）；③地质普查和勘探业用电；④建筑业用电；⑤交通运输和邮电通信业用电；⑥商业、公共饮食业、物资供销和仓储业用电；⑦其他事业用电（包括公共服务和咨询业，卫生体育社会福利事业，教育文艺和广播电视业，科研和综合技术服务业，国家党政机关和社会团体等的用电）；⑧城乡居民生活用电。据1990年的统计资料，各部分用电比例结构如下：农、林、牧、渔和水利业为6．85%，工业为78．22%（其中轻工业15．98%，重工业为62．24%），建筑业为1．04%，交通运输和邮电通信业为1．70%，商业、饮食、物资供销和仓储业为1．22%，城乡居民生活用电为7．72%，其他非物质生产部门用电合计为3．15%。

3．发电量

发电量是计算电能生产数量的指标，单位为千瓦时（kW·h）。发电量根据发电机端电能表读数计算。在每天24点准时抄表，求出与前一天24点电能表读数之差，再乘以该电能表的倍率（即电能表的常数），就得到该发电机组的日发电量。一个发电厂内各发电机组日发电量之和，即为该发电厂的日发电量。同一地域某一时间内各发电厂发电量之和，即为该地域某一时间的发电量。

4．供电量

供电量是电力部门为满足用户用电需要而供出的电量。供电量等于最终用户（包括国民经济各部门和城乡居民）的用电量与本供电地区内线路损失电量之和。从一个地区的电量平衡来看，供电量＝（本地区公用电厂发电量－厂用电量＋（购入其他电厂的发电量）＋（电网输入电量－电网输出电量）。

5．厂用电

厂用电指发电厂厂用负荷耗用的电量（或功率），它包括电力生产过程中电动机、照明、采暖通风以及其他控制、保护装置等所耗用的电量（或功率），是电力生产过程中所必需的。通常，厂用电多指厂用电量。发电厂电力生产过程中必需的自用电量（或功率）占电厂发电量（或发电功率）的百分比，称为厂用电率。厂用电率是发电厂的主要技术经济指标之一。烧煤电厂的厂用电率一般为6%～8%。通过提高辅机效率，

改善辅机运行方式，降低烟风道及管道系统阻力等措施，可降低发电厂的厂用电率，提高发电厂的经济效益。

6．线损

线损指一定时间内，电流流经电网中各电力设备（不包括用户侧的电力设备）时所产生的电力和电能损耗，包括与负荷变动无关的固定损耗，随负荷变动而变化的变动损耗，以及其他损耗（如漏电、窃电、变电所直流整流设备和控制、信号、保护、通风冷却等设备所消耗的电力和电量）。电力网（或供电企业）线损电量（或功率）与供电量（或供电功率）的百分值，称为线损率。它是电网（或供电企业）的主要技术经济指标之一。1990 年，中国电力企业采用简化网络和电压等级，调整电力潮流，更改陈旧和能耗高的电力设备，提高供用电管理水平，杜绝偷漏电现象等措施，可有效降低线损率，提高供电企业的经济效益。

7．煤耗率

煤耗率是指在一定时区内，烧化石燃料电厂所消耗的燃料与输出电量之比，简称煤耗，单位为 g／（kw·h）。发电煤耗量与发电量之比（或单位时间燃煤消耗量 g／h 与发电机功率 kw 之比），称为发电煤耗率。发电量扣除厂用电量称为供电量，发电煤耗量与供电量之比，称为供电煤耗率。为使燃用不同发热量的煤炭或其他燃料的发电厂的煤耗率指标具有可比性，将所消耗的煤炭折合成低位发热量为 29.3×10^6J／kg（7000 大卡／千克）的标准煤计算，所得的煤耗率指标称为标准煤耗率（简称标准煤耗）。供电煤耗率指标是发电厂主要的技术经济指标，它是反映电厂发电能源利用效率的指标。供电煤耗率与电厂的热效率有关，热效率越高，供电煤耗率就越低。一般中温中压凝汽式电厂的供电标准煤耗率约 480g／（kw·h），高温高压电厂约为 380g／（kw·h），超高压电厂约为 360g／（kw·h），热电联产的热电厂由于减少了汽轮机排汽的热量损失，其供电标准煤耗率随发电量与对外供热的产热量的比例而变化，可低至 280g／（kw·h）左右。

第十一章　　电力基本建设

电力基本建设是电力固定资产扩大再生产的活动，是电力工业发展的重要方面，电力工程的建设必须遵循基建程序。基建程序是指一个工程建设项目从规划立项到竣工投产全过程所必须遵循的先后次序。这个次序是由建设过程的客观规律和经济规律所决定的。

电力建设程序根据多年来电力基本建设的实践经验而定。通常可划分为 3 个阶段、8 个主要步骤。第一阶段是前期工作阶段，从项目提出到开工兴建；第二阶段是施工阶段，从工程开工到机组安装结束；第三阶段是调试投产阶段，从整套启动、移交生产到试生产结束、竣工验收。8 个主要步骤是：

（l）初步可行性研究。
（2）报批项目建议书。
（3）可行性研究（设计任务书）。
（4）初步设计和施工图。
（5）施工准备。
（6）施工—建筑安装。
（7）启动调试。
（8）试生产和竣工验收。

前 4 个步骤属第一阶段，第 5、6 个步骤属第二阶段，第 7、8 个步骤属第三阶段。有的步骤是相互交叉的，如初步设计和施工准备、施工图和施工、施工和启动调试、调试和试生产。

一、可行性研究

可行性研究是指“项目实现的可能性探讨”，是基本建设程序的主要环节，建设前期工作的重要步骤。可行性研究分为两个阶段进行，即“初步可行性研究”（包括规划选厂）和“可行性研究”（包括工程选厂）两个阶段。“初可”和“可行”的内容基本类同，但研究深度不同。可行性研究应根据经过审查的初步可行性研究和审批的项目建议书进行工作。

可行性研究应包括以下基本内容：

（1）项目提出的目的和依据。
（2）需求预测和拟建规模。
（3）资源、原材料、燃料供应及公用设施情况。
（4）建厂条件和厂地选择方案。
（5）设计方案和设备选型。
（6）环境保护、防震、防空要求。
（7）生产组织和劳动定员。
（8）建设工期和实施进度。
（9）投资估算和资金筹措方式。
（10）经济效果和社会效益分析论证。

二、勘察设计

勘察设计是为了查明工程建设场地的地形地貌、地质构造、水文地质和各种自然现象所进行的调查、测量、观察、试验工作。

设计是工程建设的灵魂和龙头，是对建设项目在技术和经济上进行的详细规划和全面安排。根据批准的设计任务书编制设计文件，一般按初步设计、施工图设计两个阶段进行，技术复杂的项目，可增加技术设计阶段。

初步设计一般由说明书、图纸、计算书和专题论证报告 4 部分组成。说明书应包括下列内容：(1)总纲；(2)电力系统；(3)总图运输；(4)热机；(5)运煤；(6)除灰渣；(7)电厂化学；(8)电气；(9)热工自动化；(10)建筑结构；(11)采暖通风及空气调节；(12)水工；(13)环境保护；(14)消防；(15)劳动安全及工业卫生；(16)节约能源及原材料；(17)施工组织大纲；(18)运行组织及设计定员；(19)概算；(20)主要设备材料清册。

施工图设计根据批准的初步设计编制，其深度应能满足建设材料的采购、非标准设备的加工、建筑安装工程施工的需要和施工预算的编制。

设计应采用和推广标准化。

三、招投标

招投标是发展市场经济，适应竞争需要的一种经济行为。招投标必须贯彻公平公正、平等竞争、讲求信用的原则，可适用于电力建设中的设计、设备供应、施工等任何阶段的工作。

招标一般可分为公开招标、邀请招标、议标 3 种方式。招投标的程序一般可分成 5 个阶段：

（1）编制标底和招标文件。由招标单位或委托具备资质的单位编制。每个标只能有一个标底，必须严格保密。招标文件应由主管部门批准。

（2）招标。发出招标公告（通知），出售招标文件。向投标单位解答有关问题，成立专家评标小组。

（3）投标。投标单位必须具有法人资格，按规定的日期报送投标申请书，同时提交投标保函、资格证明文件、营业执照复印件、本单位业绩情况、人员、设备、技术、资产、供应等能力情况及质量保证体系的情况。

（4）开标、评标、定标。在上级主管部门监督下，由招标单位主持，必要时请公证部门公证。按招标文件规定的时间和地点当众开标，并经投标者验示。评标由专家小组进行，择优选定中标单位或评出中标的几个方案，提供招标领导小组及项目法人最后决定中标单位。

（5）签订合同。定标后发出中标通知书，由招标单位与中标单位进行合同谈判，合同条款内容应与招标文件原则一致，双方协商同意后签约，成为发承包双方都必须遵守的法律文件。

四、建设监理

建设监理是指专职监理单位受业主委托对建设工程项目进行以控制

投资、进度和保证质量为核心的监督与管理的一种方式。建设监理是深化电力基建改革，建立和发展社会主义市场经济并与国际接轨的需要，是电力基本建设迅速发展的需要。

建设监理的依据是国家和电力工业主管部门有关的方针、政策、法规、标准、规定、定额和经过批准的建设计划、设计文件和经济合同。

监理单位是自主经营、独立核算、自负盈亏的企业，必须具有法人资格，经有关主管部门资质认证、审批、核定监理业务范围，发给资质证书后方可承担监理业务。委托方必须与监理单位签定监理委托合同。电力工程项目的建设监理实行总监理师负责制，总监理师和专业监理工程师应经有关主管部门资质认证，审批资格，注册颁证，持证上岗。

建设监理业务，可以分阶段监理，也可全过程监理，或按工程项目分类监理。

五、投融资

我国基本建设投资来源主要有 4 条渠道：一是国家预算拨款；二是建设银行贷款；三是各地区、各部门、各企业单位的自筹资金；四是利用外资。

改革开放以来，我国投资体制实施了一系列改革，先后采取了改财政拨款为贷款，下放项目决策管理权限，建立经济杠杆调控体系，设立基本建设基金，成立国家专业投资公司、国家开发银行和开征投资方向调节税等措施，在投资领域形成了投资主体多元化，投资资金多渠道，项目决策分层次，投资方式多样化和建设实施引入市场竞争机制的新格局。

电力工业是资金密集型行业，80 年代以来，改变了独家办电的方针，实行集资办电厂、电网由国家统一建设、统一管理的原则，采取多家办电、集资办电、征收电力建设基金、利用外资办电等政策，为建立新的投融资体系奠定了基础。单一由中央政府投资的主体格局已完全改变，各级地方政府以及国有企业、集体企业已逐步成为直接投资的重要主体，逐步建立“谁投资、谁决策、谁受益、谁承担投资风险”的机制。目前，中央与地方、地方与地方、政府与企业、企业与企业之间的联合投资以及中外合资、合作建设项目已十分普遍。

电力投融资体制可充分调动各方办电的积极性，以最大限度多方筹集电力建设资金，增加电力投入。因此，电力集团公司要加强和充实投融资中心功能，充分发挥财务公司在投融资方面的作用。

六、施工准备

施工准备是基本建设程序中的一项重要内容。从初步设计批准，工程用地征妥，施工单位进入现场，一直到工程正式开工，均为施工准备阶段。

施工准备的主要内容包括：

（1）编制施工组织设计。

（2）建立施工组织机构。

（3）清除现场障碍。

（4）完成“五通一平”，即水通、电通、路通、汽通、通信通和场地平整。

（5）建设必需的生活和生产临时建筑。

（6）配备施工机械和工具。

（7）组织氧气、乙炔、氩气、压缩空气等气源和设备的供应。

（8）组织材料、设备进厂。

（9）特殊工种培训。

（10）对检测仪器、仪表及热处理设备等进行检查校验。

（11）组织施工图纸会审。

（12）落实外委加工项目。

（13）编制质保大纲、质量保证手册等文件。

（14）进行技术交底。

七、施工——建筑安装

施工是基本建设的主要阶段，是把计划文件和设计图纸付诸实施的过程。现代化工程施工要实行专业化、工厂化和机械化。

电力建设工程施工分为建筑工程和安装工程两大部分。建筑工程施工的基本内容包括土方工程、地基与基础工程、混凝土和钢筋混凝土工程、钢结构工程、砌体和墙体工程、吊装工程、抹灰装饰工程、屋面工程、门窗工程、上下水道工程、采暖通风工程、照明工程等。对火电厂而言，安装工程施工包括锅炉、汽机、发电机、电气、热控仪表自动化、管道、焊接、保温、起重、修配加工等。

对施工的基本要求是保证安全、质量、文明施工，保证建设工期，这不断降低成本，提高经济效益。贯彻“一安全、二质量、三工期”的科学建设方针。

施工是工程优化的核心，起着承前启后的作用。设计、设备的缺陷，要通过施工来纠正和处理，而调试启动能否顺利进行，要看施工质量是否切实保证。施工质量是重中之重，必须坚决贯彻GB／T19000—ISO9000《质量管理与质量保证》系列标准。

八、启动调试

启动调试是电力建设工程的关键阶段和重要环节。启动调试是一个独立的阶段，由各方代表组成的启动验收委员会负责领导，由业主指定启动调试总指挥，从分部试运开始工作，一直到试生产结束。由调试单位负责人具体负责试运指挥。

火电工程启动调试及验收的程序一般包括：建筑工程验收，分部试运，整套启动，技术资料和备品备件移交，工程验收，试生产，竣工验收。

建筑工程验收一般包括：检查完工程度、技术资料的完整性与准确性、质量情况、外委工程（如铁路专用线、码头、厂外公路、环境保护、综合利用工程）等的验收。

分部试运是由厂用电受电开始到整套启动前的单机试运和分系统试运，由安装单位负责，建设、调试、生产、设计单位参加，主要辅机设备还应有制造厂人员参加。经分别试运合格的设备和系统，如由于生产或试运需要须继续运转时，经双方协商，可交由生产单位代行保管并负责运行维护。

整套启动是指由机炉电第一次联合启动试运开始到 96h（72＋24h，300MW 以下火电机组）或 7d（168h，300MW 及以上火电机组）试运合格移交生产运行为止。该阶段由启动委员会负责，启动调试工作由试运指挥组负责组织有关人员按照批准的整套启动方案进行。72＋24h 或 168h 带负荷试运，主机和辅机均应连续运行不中断。整套启动试运合格后即可移交生产单位进入试生产阶段。

九、试生产和竣工验收

试生产是在机组单机容量越来越大，自动化水平越来越高的情况下，为使机组更加完善而进行性能调试的阶段。单机容量为 200MW 以上的火电机组，移交生产单位后有 6 个月的试生产期。试生产仍属基本建设阶段，生产单位负责机组运行和维护，而设计、制造、施工单位负责消除各自缺陷，调试工作由建设单位组织有关各方共同完成。试生产结束，应由业主验收。

试生产的主要任务是：使机组在各种工况下运行，进一步暴露和消除缺陷；进行未完调试项目的调试和运行调试；对设备是否符合设计性能进行全面考核；使自动和程控装置投入运行后调节和控制质量指标达到设计要求；确定机组的各项技术经济指标和完成基建未完项目。

竣工验收是指电力基本建设工程按批准的设计文件所规定的内容全部建成，该期工程最后一台机组试生产结束后，由有关单位及时组织检查验收。一般工程由业主主持验收；单机容量在 600MW 及以上和工程容量在 1200MW 及以上的火电厂基建工程，由电力部主持竣工验收。特大容量、特别重要的工程，由国家主持竣工验收。

第十二章　当代高新技术的发展与电力新技术

电力技术，包括发电、输电、配电、用电和节电技术，涉及多个学科领域，是综合的应用科学技术体系，它随着现代科学技术的进步而不断发展。因此，了解当代科学技术，特别是高新技术的发展趋势，对于应用当代最新的科学技术成果推动电力科技进步具有重要意义。

一、当代高新技术发展的重要领域

目前，世界各国公认并列入 21 世纪重点研究的高新技术领域主要有：生物技术、信息技术、新材料技术、新能源技术、激光技术、航天技术和海洋技术等。

生物技术又称生物工程，包括基因工程、细胞工程、酶工程和发酵工程 4 个方面。它是 21 世纪高新技术的核心，不仅直接关系到农业、医药、卫生事业的发展，而且对环保、能源技术有极强的渗透力。

信息技术主要指信息的获取、传递、处理等技术。它包括微电子技术、计算机技术和通信技术等方面，是高新技术的前导。

新材料，主要指最近发展或正在发展的具有比传统材料更为优异性能的一类材料。新材料技术是高新技术的基础，它包括超导材料、人工合成材料、陶瓷材料、单晶材料、高温材料、非晶态材料等的开发和利用。

新能源技术，包括核能技术、太阳能技术、燃煤、磁流体发电技术，地热能技术、海洋能技术。它与信息技术、材料技术一起，被国际社会公认是现代文明的三大支柱。

激光技术，以激光器为基础，正在迅速发展。激光器是一种特殊性能的光源，它与普通光源相比具有方向性强、亮度极高、颜色极纯的特点。激光技术开发及其在工农业生产、医疗卫生、能源电力、通信和信息、军事、文艺和科学技术研究的应用，是正在走向实用化的高新技术，在一些世界前沿科学技术发展中起着支持作用。

航天技术是探索、开发和利用太空以及地球以外的天体的综合性工程技术，包括大型运载火箭、巨型卫星、宇宙飞船、航天飞机、永久空间站、空间资源、空间工业、空间运输和空间军事技术的研究与开发。

当代高新技术的发展将对电力技术未来的发展产生直接的或间接的重要影响。限于篇幅，下面仅简要介绍构成信息技术的微电子技术、计算机技术和通信技术 3 个方面的基本情况和发展趋势。

1.微电子技术

微电子技术是微小型电子元器件和电路的研制、生产，以及应用它们实现电子系统功能的技术，主要领域是集成电路技术，是以大规模集成电路技术为标志的一门新兴技术。微电子技术的起源是晶体管的出现。1947 年，美国电话电报公司制成了第一支晶体管，开始了晶体管代替电子管的时代。根据晶体管制造工艺和应用的发展，科学家进行了把晶体管、电阻等元器件和连接线象制造晶体管那样制造在一块硅基片上，实现电路的微小型化的研究。1958 年，世界上出现了第一块晶体管集成电路。它是以半导体晶体材料为基片，采用专门工艺将组成电路的

元器件和互相连接的线路集成在基片内、表面或基片上的微小型电路或系统。集成电路发展水平指标之一是集成度，指的是在一定尺寸芯片上（通常芯片尺寸比小姆指指甲还小）做出多少个晶体管或做出多少门电路（通常一个门电路由一个或数个晶体管组成）来衡量。一般将集成 100 个晶体管以下的集成电路称为小规模集成电路；集成 1000 个以上的元器件的集成电路称为大规模集成电路。目前已进入超大规模集成电路时代，芯片上集成元件已达 10 万个以上，已经突破 100 万个大关。一块集成电路既可能是一个复杂的功能部件，也可能是一台整机（如单片计算机）。

微电子技术的发展、集成电路的出现给社会的生产和生活产生了深远的影响，首先引起了计算机技术的巨大变革。计算机的心脏——中央处理器的高度集成化，使微型计算机应运而生，近十几年得到了迅速发展。80 年代初，我国电力工业仅在主要的科研，设计和运行部门使用 VAX11／780 或 IBM4341 等小型计算机从事电力系统分析计算。使用这种计算机需要庞大的机房、空调系统。时隔几年，微型计算机在我国电力部门得到了广泛的应用。目前，一台普通 486 微型机，其功能、运算速度等已超过当年的 VAX 系列计算机。微电子技术的发展，也引起了电力系统控制和保护的深刻变革。例如，在十几年时间里，我国电力系统继电保护已从机电型继电保护，经历集成电路继电保护，已进入到微机继电保护的广泛应用。80 年代初，我国大型发电机励磁调节器用的是小规模集成电路，目前已在推广微机励磁调节器。微电子技术可提供价廉、可靠、体积小、重量轻的微电子产品，不仅渗透到国民经济发展的各个部门，而且迅速进入普通百姓家。

总之，作为现代信息技术的核心，微电子技术已成为一种既代表国家现代化又与人民生活息息相关的高新技术。

2．计算机技术

计算机是人类制造出来的信息加工工具，作为代替人脑进行信息加工来说，被认为是人的大脑延伸。1946 年，制成了世界第一台电子数字计算机 ENIAC，它由 18000 只电子管组成，占地 150㎡，重 30t，耗电数百千瓦，完成的计算只相当于今天一台高级袖珍计算器的计算工作。但它的出现开辟了计算机科学的新纪元。我国电子计算机研制始于 1958 年，1958～1959 年研制成功电子管计算机，60 年代中期研制一批晶体管计算机，70 年代研制成功大型集成电路计算机，80 年代以后重点研制并逐步推广微型计算机，研制成功亿次每秒的银河巨型计算机。

现代计算机的主机由微处理器（包括运算器和控制器）、存储器和外设接口电路 3 部分组成。

运算器是计算机的信息加工部件，它如同算盘，用来进行数值运算，获得运算结果。除数值运算外，它还可进行逻辑运算。这两种运算统称为信息加工。

计算机的数值运算是用二进制而不是我们日常习惯使用的十进制。二进制可由元件两种状态来实现，例如晶体管的导通用 1 代表，截止则用 0 代表。二进制也是一种进位计数制，它逢 2 进 1 而不是逢 10 进 1。但计算机的结果仍以人们习惯的形式提供出来。在计算机中逻辑关系也是以二进制形式出现，例如 1 代表肯定，则 0 代表否定，以此为基础建

立“与”、“或”和“非”等逻辑关系，形成逻辑代数。运算器可以按照逻辑代数规则进行逻辑运算，建立逻辑“判断”。运算器只管运算，如何输入数据，怎样进行计算，运算结果的处理则由控制器来完成。

控制器是计算机的司令部，发出一系列的控制信号，指挥着计算机各部分的工作。随着大规模集成电路的发展，现代计算机把运算器和控制器做成一体，叫做微处理器。

计算机的计算是按照存储于计算机内的程序自动进行的。现代计算机都是存储程序计算机。人们按照要解决的问题的数学描述，用计算机能接收的“语言”编写成程序，输入并存储于计算机，经过外部设备的操作，计算机就按人们的意图，自动地、高速地完成运算并输出结果。显然，计算机要有一个输入／输出接口电路，这样各种运算才能进行。

计算机的程序、数据以及在运算中产生的中间结果和最后结果的存储地方称为存储器。

微处理器配以一定规模的存储器就构成计算机的本体。

微处理器、存储器和输入／输出接口电路组成的总体称为计算机的主机。

人们有了主机还不能使用计算机进行信息处理，还必须配备一定的外部设备。主要外部设备包括键盘、显示器、磁盘驱动器和打印机等。主机和外部设备组成人们使用的计算机系统。

组成计算机的基本部件的集成电路和外部设备一般称为硬件。

为管理计算机本身和针对不同信息处理任务编制的程序称为软件。软件分系统软件和应用软件。系统软件指的是一种管理计算机系统或为计算机服务的程序，操作系统就是典型的系统软件。应用软件则是使用计算机解决特定任务而编写的程序。计算机丰富的软件和硬件的结合，使计算机不仅有非凡的计算能力，惊人的记忆功能，而且具有判断能力。

计算机技术被认为是当今信息社会的支柱，正飞速向前发展。使计算机具备人工智能（即解决问题、感知、推理、学习和执行的功能）是计算机技术发展的趋势。目前，在计算机智能化方面，如辅助设计（CAD）、专家系统、机器人、翻译、自动情报检索、绘画等已取得重要进展。人工神经网络、智能计算机系统已成为研究的重点，计算机主要向着以RISC，并行处理、多媒体技术为主，软件和网络相应发展的趋势发展。

RISC 是精简指令系统计算机的英文缩写。指令系统是计算机所能执行的操作命令的集合，程序最终都要变成指令的序列，计算机才能执行。指令系统越丰富，功能也越强。RISC 系统是将指令系统精简，使系统简单，以减少指令执行时间，提高计算机的处理速度。

并行处理。在普通计算机中，一般只有一个中央处理器，程序的执行是一条接一条地串连进行，叫串行执行指令。并行处理技术可在同一时间内在多个处理器执行多个相关的或独立的程序，它不但极大地提高处理速度，而且可扩大应用领域。例如，应用并行处理技术，可实现电力系统全数字仿真。

多媒体技术是计算机应用领域的新技术。它把文字、数据、图形、图像和声音等信息媒体作为一个集成体由计算机来处理，把计算机带入一个声、像、图、文集成的应用领域。国际上有句口号叫“多媒体技术——下一代的浪潮”，预计多媒体技术的发展将对人类社会产生巨大的

影响。

计算机网络是指地理上分散分布的多台独立计算机通过通信线路互连构成的计算机系统。根据联网区域大小，它分为局域网和远程网。例如通过全国联网的计算机系统，电力部门的领导可以了解全国各电网的运行情况和参数，通过它可实现全国联网调度。计算机组成网络可大大提高计算机软硬件和数据的使用效率，扩大人类知识财富的共享。

电子计算机飞速发展的同时，光学计算机也取得了突破性进展，它的运算速度可比当今的超级计算机快 1000 至 10000 倍。已经开始研究的生物计算机（或分子计算机）将具有比电子和光学计算机更优异的性能。

3．现代通信技术

计算机技术的发展趋势，如上所述，一是提高信息处理速度和容量，二是计算机联网，扩大其作用的领域和功能。信息的收集和传输离不开通信，计算机联网并发挥更大的作用更需要现代通信技术、通信网络。现代通信技术与微电子和计算机技术的结合正在为人们提供越来越多的新颖的信息服务，使人类社会正逐步进入现代信息社会。

最近，下列几种现代信息系统正在逐步进入人们的生产、生活和文化娱乐各个方面。

电子信箱（E-Mail），在国际上的正式名称为文电处理系统（MHS）。它利用数字通信技术及数据网络，把世界各地的成千上万台计算机联起来，形成电子邮件系统。参加的用户向系统开办一个或数个信箱名，“打开”电子信箱便可以将“信函”发往任何地方；也可以在任何方便的时候“打开”信箱取出电子“信函”。电子信箱使信函传递发生根本性变革。电子邮件系统扩展了现有传真等通信手段的功能，传递快，比传真通信“邮资”便宜，保密性好。商贸系统以此形成“电子数据交换”(EDI)，在最短的时间内完成商贸手续，将使传统的贸易方式发生重大变革。

电子货币。它指的是通过数字通信网络，借助于计算机实现金融部门与用户间的结算、转帐和支付的系统。如信用卡，它可以代替现行的纸货币进行支付的转帐，是一种典型的电子货币。电子货币系统可以大幅度减少现金流通，大大加速资金的周转，大大提高经济运行效率。

可视电话，就是在通电话的同时能看到对方图像的通信方式。利用可视电话交换机，可以形成会议电视电话的接续等功能。若通过摄像机，显示设备和通信网络来传递和显示“与会者”的声音和图像，则可把两个或两个以上地方举行“会议”的场面的图像，传到“与会者”面前的屏幕上显示出来，这就是“会议电视电话系统”。

可视图文信息系统，是把用户终端（计算机和电话机）通过通信网络与图文信息中心计算机的数据库连接起来进行数据通信，使信息资源在最大范围内实现共享的系统。这种系统亦可称为可视数据系统，是实现办公自动化和家庭自动化的重要工具，将使人们的生活发生一系列的改变，给生产管理等带来极大方便。

除上述现代信息系统以外，利用电视广播网传递图文、数据信息的图文电视系统，由于其投资小、信息量大、收效快，正在迅速发展。高清晰度电视系统与多媒体技术的结合，将给人们的工作方式和文化娱乐产生重大影响。

上述种种现代信息系统都是以计算机为基础，通过通信网实现的。

通信网由终端设备、传输设备和交换设备组成。终端设备包括电话机、传真机、数据终端和图像终端等。传输设备（即传输信道）分为有线传输设备和无线传输设备，与此相应的通信方式分别称为有线通信和无线通信。过去和目前用得较多的是电缆，电力部门普遍使用的是电力载波和微波中继通信，而最有发展前途的是光纤和卫星通信。交换设备指的是信号交换和接续的设备。通信网可分为模拟通信网和数字通信网，后者传输的信号是象计算机那样的“0”和“1”的数字编码，是通信网的发展方向。

数据通信是为了提高计算机利用率，扩大计算机的应用范围和信息处理功能（如计算机用于办公自动化和实时控制）等需要，将计算机与通信技术相结合的一种新通信方式。它的通信对象是“人与计算机”和“计算机与计算机”。它通过通信网络实现数字信息的接收、存储、处理和传输，并对信息流加以控制、管理和校验。

数据通信网是用于数据通信的通信网，它以计算机为中心，用通信网将分布在各地的数据终端及其他计算机连接起来，从而实现数据通信的系统。电力生产过程中安全监视数据、运行调度数据、远动数据、水文预报及财务、供应、计划管理等的收集、处理、传输和控制，就是一个典型的数据通信系统。

数据通信系统基本上由数据终端、通信网络、调制解调器、通信控制装置和主计算机构成。要完成数据通信任务，除上述硬件系统外，还必须有丰富的软件，其主要作用是保证系统自动地正确地运行和管理。

数据通信网可分为局域网和远程网。局域网是将多台微机、小型机以及终端设备用通信线路互连起来实现通信的系统。在该系统中，计算机既能独立工作，又能交换数据进行通信。系统连接距离一般在1～2km以内，用于办公、生产信息管理。远程网则是由远距离通信干线网和较大型计算机或局域网组成的大型数据通信网。电力部门建立的范围遍及全国的数据通信网就是专用远程网。

现代通信技术（包括数据通信技术）的发展趋势是实现数字化、智能化、宽带化和综合化。各种信息传输将都是数字传输，如数字光纤、数字微波和数字卫星通信等。光纤，由于结构紧凑、体积小、传输损耗小、传输距离远、保密性强、成本低等，将成为理想的传输媒介。美国提出的“信息高速公路”就是以光纤信息网为基础设施，把全国各局域数据信息网连接起来，使信息传送速度比目前高数千倍，以使经济高速运作的信息系统。目前，各国正在发展综合业务数字网（ISDN），它是以数字程控交换机为核心，一切信息（包括声像、数据等）用数字统一起来，用于多种业务的端对端的通信网。在此基础上，各国正朝着宽带综合业务数字网（B－ISDN）、智能化和个人信息化迈进。

二、电力新技术

电力技术是综合性的技术体系，它的新发展是多方面的，有些已在前面有所叙述，这里仅介绍几项对未来电力工业发展有重大影响的新技术。

1．高效、洁净煤发电技术

我国煤炭资源丰富，是煤炭的生产和消费大国。煤炭是我国用于发电的主要一次能源。1994 年，燃煤发电量占我国年发电量的 75%左右。估计到 21 世纪前期，燃煤发电仍将是主要的。目前采用的燃煤发电方式要向大气排放 SO_2 和 NO_x，它们在空中形成酸雨，造成严重的环境污染。因此，发展洁净煤发电技术，减少污染物排放，提高燃煤发电效率是一项重要的战略任务。

洁净煤发电技术可分为燃烧前处理和洁净、燃烧中洁净和燃烧后洁净。火电厂的烟气除尘和脱硫装置系燃烧后的烟气净化。这里主要介绍的是燃烧净化并提高热效率的技术。目前，公认具有发展前途的高效、洁净煤发电有循环流化床燃烧（CFBC）、整体煤气化联合循环（IGCC）、增压流化床燃烧联合循环（PFBC－CC）和燃煤磁流体发电。

（1）循环流化床燃烧（CFBC）。流化床燃烧是一种新型煤燃烧技术。这项技术的最初炉型是沸腾炉。循环流化床锅炉是在沸腾炉基础上发展起来的。

流化床锅炉如图 12－1 所示。它有固定的炉排（布风板），上面钻有许多孔，每个孔上都装有风帽。被破碎的煤粒和石灰石（吸附剂）从炉排上面进入炉膛，从炉排下鼓风，使煤粒和石灰石流化呈悬浮状，煤粒在沸腾状态燃烧，形成“沸腾床”。煤粒燃烧后从溢流孔中以溢流灰排出。流化所形成的湍流、强烈混合条件提高了燃烧效率。同时，它的蓄热量远大于煤粉炉，可在 880～900℃较低的温度下燃烧，因而大大减少 NO 的生成；石灰石固硫可减少 SO_2 的排放。与采用煤粉炉和烟气净化装置相比，SO_2 和 NO_x 排放可减少 50%～70%，无需烟气脱硫装置。

我国小型工业用沸腾炉已遍地开花，但是它的结构不宜大型化，因而限制了它在火力发电的应用。循环流化床锅炉（CFBC）是在沸腾炉基础上发展起来的，其性能指标超过沸腾炉。CFBC 锅炉的特点是进一步细化煤粒，提高流化风速，在炉膛出口安装了高温分离器，使颗粒与气流分离，气流进入省煤器加热燃烧用空气，固体颗粒再送进炉膛流化燃烧，以此反复循环流化。这样，它延长了燃料在炉内燃烧时间，可大大提高燃烧效率。石灰石（脱硫）同时参与循环，可提高脱硫率。它的燃烧、传热过程发展到整个炉膛，可使锅炉容量扩大。通过调节燃料的循环流量可使锅炉负荷调节范围达到 25%～100%，它适宜参与调峰运行。它对煤种适应性强，同时污染物排放低，在电力工业具有发展前景。目前，国外 10～20 万 kW 的 CFBC 锅炉技术已成熟，正在向 25～30 万 kW 及以上容量发展。

（2）整体煤气化联合循环发电（IGCC）。煤炭的高效、清洁利用途径是煤的气化和液化。IGCC 发电是首先将煤气化，在汽化过程脱硫除氮，然后以煤气作燃料参与燃气蒸汽联合循环的发电技术，如图 12－2 所示。

煤气化是把经过适当处理的煤送入反应器，在一定的温度和压力下通过气化剂（空气或氧和蒸气），以一定的流动方式转化成燃料气体。煤气化主要产生 CO 和 H_2，而灰可形成废渣排出。煤气可在燃烧前脱除气态硫和氮。粗煤气中的硫化氢，可在煤气冷却后通过化学吸收或物理吸附脱除。这些净化工艺可脱除 90%的硫。还可在气化过程中加石灰石固硫，可脱硫 90%。煤气中的氮容易除去，形成氨还可回收利用。

煤的气化，目前采用常压水煤气工艺，常压固定床一段气化工艺。正在开发常压循环流化床和常压固定床两段气化工艺等。国外正在开发多种煤气化新工艺，以扩大气化煤种，提高效率，减少污染物排放。

整体煤气化联合循环发电过程，与天然气或石油为燃料的燃气蒸汽联合循环发电一样，不同之处就是以煤气代替天然气和石油，以煤气化生产的燃料气，先驱动燃气轮机组发电，余气再送往锅炉燃烧，产生蒸汽，驱动汽轮发电机组发电。煤气联合循环发电可提高系统热效率。即使烧含硫较多的煤的煤气化联合循环发电站，SO_2 排放量比煤粉炉加烟气脱硫少 70%，比常压流化床少 50%，N 的排放分别减少 60%和 25%，固体废料分别减少 60%和 75%。新一代煤气化联合循环发电的供电效率可达 43%～46%，同时能满足当代严格的环境保护要求。

煤气化联合循环发电是美国洁净煤技术计划的重点，可望在本世纪末商业化，到下个世纪将成为煤发电的主导技术。目前的示范电站，单套机组容量已达 35～60 万 kw。

煤气化联合循环发电除整体煤气化联合循环发电（IGCC）外，还有增压流化床煤气化联合循环发电和第二代增压流化床（顶部循环）煤气化联合循环发电（PFBC－CC）。后者是以蒸汽发电作为主导部分（60%以上），对现有火电厂的更新改造来说，将是一项更为实用的新技术。

（3）燃煤磁流体发电技术。它亦称为等离子体发电，是使极高温度并高度电离的气体高速流经强磁场直接发电的技术。当燃煤得到的 2.6×10^6℃以上的高温等离子气体以高速流过强磁场时，气体中的电子受磁力作用，沿着与磁力线垂直的方向流向电极，发出直流电，经直流逆变为交流送入交流电网。从磁流体排出的气体可送往一般锅炉，继续燃烧把水变成蒸汽，驱动汽轮机发电，组成高效的联合循环发电，总的热效率可达 50%～60%。同样，它可有效地脱硫，有效地控制 NO 的产生，也是一种低污染的煤气化联合循环发电技术。此技术正在研究之中。

2．人类用之不竭的清洁能源——受控核聚变能发电

核聚变反应是两个或两个以上较轻原子核〔如氘（D）和氚（T）〕，在超高温等特定条件下聚合成一个较重的原子核，同时释放出巨大能量。这种反应是在极高温度（1～5 亿℃）下进行，所以叫热核反应。据计算，1kg 核聚变燃料放出的能量为核裂变的 4 倍。利用受控核聚变放出的热能发电是核能发电的另一种形式。

核聚变原料主要是氢〔氘（D）和氚（T）〕，氘也叫重氢。1kg 海水中含有 0.034 克氘。据估算，地球上汪洋大海中有 23.4 万亿吨氘，足够人类使用几十亿年，是一项无穷无尽的持久的发电能源，它的利用将开创能源的新时代。

适合应用的核聚变反应有 D-D、D-T 和 D-He^3 反应。D-T 聚变反应堆最有希望首先运行，它的成功可导致 D-D 堆的发展。

由于带电的原子核之间的静电排斥力非常强，只有使两个粒子或其中的一个粒子具有很高速度（很高的温度）才能克服静电斥力，使两个原子核靠近，发生核聚变反应。等离子体有可能被加热到核聚变反应的温度（点火温度）、因此，是最有希望实现核聚变的介质。

实现受控核聚变反应的条件，一是在反应堆形成等离子体，二是把等离子体加热到点火温度，还要控制反应物的密度和维持其密度的时

间。实现产生核聚变反应的条件和进行人工控制，远比核裂变能的利用困难得多。

大功率激光器能产生巨大能量，高度集中的焦班和超短的脉冲时间被认为是实现受控核聚变反应可能最有效的途径。

核聚变能发电目前尚处于研究阶段，离实用尚有相当距离，但由于它取之不尽的资源来源和能量的巨大，又不会产生大量放射性废料，作为发电的能源，有很好的前景。人们预计，它在下世纪中叶可望能商业运行。

3．电力系统自动化技术的新发展

电能的质量主要是电压和频率维持在规定的范围内，通常用汽轮机和水轮机的调速器维持其转速恒定来实现频率稳定；用发电机电压调节器维持其机端电压，以保证电压在给定的水平。当需要改变发电机的有功出力时，用人工改变调速器的整定值（输入量）来实现；当需要升高或降低发电机端电压时，用手动改变电压调节器整定值（输入量）就可实现。它们的调节过程是（以电压调节为例），当机端电压变化时，检测机端电压实际值与给定值进行比较、给出偏差值，其值经放大去调节发电机励磁电流，使发电机端电压回到原来的水平。这是一个自动的没有人直接参与的自动调节过程。实现这种自动调节的装置就是自动控制系统，而且是闭环控制系统。

由上所述，不难看出自动控制系统基本上由检测装置、控制装置和执行装置组成，如图 12-3（a）所示。其工作原理是：检测装置用于检测被控对象的状态信息、指令信息以及外界变化信息，并将其变换成电信号传给控制装置。控制装置计算被控对象的当前实际状态（称为被控量或系统的输出量），与所期望的状态（称为输入量）之差，并根据这一偏差（称为误差信号），按一定规律产生出控制信号，然后经过放大，送给操作执行机构。操作机构用于驱动被控对象运动，直到其状态变到所期望的状态为止。这种把系统的输出或系统的另外一些受控变量和系统的输入作比较后形成的控制，称为闭环控制或反馈控制。

还有一种控制系统，其输出量不反馈到控制装置同输入量进行比较，只是单方向地由控制装置改变被控对象的状态，这种自动控制称为开环控制系统[如图 12-3（b）所示]。

研究自动控制系统的构造、性能、设计方法以及应用的理论就是控制理论，最初的控制理论以频率法为基础，称为经典控制理论。80 年代以前，电力系统中的单机或单个过程控制（如电压和转速调节），均以经典控制论为基础，几乎都是比例式调节。这种调节方式，调节能力差。例如，比例式电压调节器就不能较好地维持发电机端电压恒定。虽然增大比例调节的放大倍数可使电压恒定能力好些，但可能出现控制系统本身的不稳定而不能正常工作。这样，为解决调节精度与稳定的矛盾，电力系统的一些调节器采用了比例——积分——微分（PID）调节方式。

随着工业过程控制，社会和经济的控制与决策的需要以及计算机技术的发展，控制理论得到了迅速发展，形成了现代控制理论。控制理论从经典控制到状态空间、动态规划、最优控制、自适应控制，今天已发展到智能控制与大系统控制。现代控制理论在电力系统控制的应用研究工作从 70 年代末以来异常活跃，目前在我国已取得重要研究成果，已在

工程实际中有应用。最优控制就是保证系统某种（某些）性能指标为最佳（如火电厂全厂热效率最高）的控制。自适应控制是在系统和环境的信息不齐备的情况下，自动适应被控对象参数的缓慢变化或自动适应对象特性难以确知的情况，并能保证系统性能优良的控制方法。它主要有模型参数自适应（MRAC）和自校正控制（STC）。它们都是根据输入输出参数，辩识对象的模型或参数，通过在线调正控制装置的参数对系统进行控制。自适应控制理论仍在发展中。智能控制是将人脑的智能、计算机技术与控制理论结合起来，自动识别图象和自然语言，会学习和积累经验，能自主地进行推理、规划和决策的新近发展起来的控制方式。目前，它主要有专家系统控制和模糊控制等方法。神经网络，由于它可以处理那些难于用模型或规则描述的过程或系统，采用并行处理，本质的非线性系统特点和很强的综合信息能力，因而在自动控制系统中的应用已有不少研究。神经网络自动控制对于多变量、复杂系统和大系统的控制将具有明显的优势。

电力系统自动化技术包括电厂（包括火电厂、水电厂和核电厂）自动化、变电站自动化、电网控制自动化和配电自动化等方面的自动控制技术。由于现代控制技术以计算机技术为核心，具有综合信息的能力，可实现电力系统多变量，保证性能指标最优以及复杂的自动控制功能，能明显提高劳动生产率和经济效益，因而它在电力系统中的应用具有广阔的前景。

火电厂自动化的发展趋势将是：在当前计算机监控系统基础上，实现发电厂的最优控制，不仅使锅炉运行在最优工况，而且寻找火电机组全热力系统最优热效率及火电厂全厂的经济负荷分配，以节省燃料，降低发电成本。它具有显著的经济效益。

水电厂自动化的发展趋势是在用计算机实现自动操作和安全监视的基础上，实现整个水电厂甚至梯级水电厂的运行优化控制。这最优化控制同样具有显著经济效益。

变电站将向综合自动化趋势发展，建立分布式微机控制系统，就地处理信息，进行综合监视与控制，实现远方安全监视、操作与控制。

电力系统计算机监控系统是在发电厂和变电站之上的自动控制系统，目前已从安全监视控制（SCADA）、自动发电控制与经济调度（AGE/EDC），发展到今天的能量管理系统（EMS），它是一个以电力系统发输电为控制与管理对象，具备数据采集与监视、发电计划与控制和网络分析等功能的计算机控制系统。计算机的硬件配置和操作系统正向开放式系统发展，因此 EMS 系统也正在向开放的 EMS 系统发展。总的来说，电力系统自动化技术将向综合化，智能化方向发展。

电力系统自动化技术除了上述的生产控制自动化外，还包括经营管理自动化技术。管理自动化技术将向网络化和智能化方向发展，两个方面的自动化技术对于电力工业发展来说都是不能偏废的，它们相互联系，相互渗透，相互促进，它们的广泛应用将提高电力工业的经济效益和劳动生产率。

4．灵活交流输电系统（FACTS）

灵活交流输电系统（FACTS）是利用现代电力电子技术、计算机技术、现代通信技术和自动控制技术，对传统的交流输电系统进行根本变革的

新的输电概念。1986 年，美国电力科学研究院提出这个新概念后，FACTS 技术受到各国极大重视，研究开发工作迅速发展。有人认为，FACTS 技术的实现将是输电技术上的革命。

FACTS 技术的基础是大功率可控晶闸管（如可控硅整流器、GTO 可控晶闸管），利用它们可以实现输电系统参量的快速控制。

FACTS 技术可以做到：

（1）改变传统交流输电系统有功和无功的自然传输状态和不可控的情况，能让所希望的功率按指定的输电线路输送到任何期望的地方。当一条输电线过负荷时，可将功率迅速地转移到负荷比较小的线路上。

（2）极大地提高输电系统的输电能力，把线路的输送能力安全地提高到接近线路的静态极限、短时过负荷热稳定极限，并且能适应各种可能出现的紧急故障情况。

（3）互联的电力系统通过提高了输电能力的联络线，能从其他系统得到紧急功率支援，从而可减少备用容量。

（4）逐级断开多重故障线路或机组，限制多重故障导致主要系统瓦解的影响。

（5）用增加电压等级或电流额定值来使原有输电线路升级。总体来说，建设更高一级电压电网来适应未来负荷增加的概念可以修正，电流升级也是有效的替代方案。

总之，FACTS 技术可以提供能力，以最小的投资，分阶段，一个又一个地克服过去输电系统的各种限制，将使输电系统发挥他们最大的潜力。

FACTS 技术不是一个单个的大功率控制器，而是控制器（装置）的集成。这些控制器既能单独、也可以分阶段应用来控制输电系统的相关参数。

各种 FACTS 控制装置及其功能和作用如表 12-1 所示。

表 12-1 各种 FACTS 控制装置及其功能和作用

FACTS 控制装置	功能和作用
次同步阻尼器（SSR－D）	阻尼振荡，串联阻抗控制提高暂态稳定
静止补偿器（SVC）	电压控制，无功补偿阻尼振荡
晶闸管控制的串联补偿（TCSE）	功率控制，串联阻抗控制 阻尼振荡，提高暂态稳定
静止无功发生器（STAT-CON）	电压控制，无功补偿 阻尼振荡，提高暂态稳定
晶闸管控制的相角调节器（TCPAR）	功率控制，相角控制 阻尼振荡，提高暂态稳定
联合功率控制器（UPC）	功率控制，无功补偿
（又称联合潮流控制器，UPFC）	电压控制，相角控制 阻尼振荡，提高暂态稳定
晶闸管控制的动态电气制动（TCDB）	阻尼振荡，提高暂态稳定

由表 12-1 不难看出：串联控制器可提供强有力的功率控制，最主要

的是有功，也有部分是无功；并联控制器可提供电压和无功控制。阻尼器可配合任何其他 FACTS 控制器一块使用。

目前正在研究的或进行样机试验的 FACTS 装置还有：①大功率晶闸管开关，其开断时间仅有 0.3～1ms，可速断各种故障，提高暂态稳定，减少操作过电压；②高能无间隙氧化锌避雷器（HEGZOA），其箝制过电压达 1.1～1.2 倍，时间达数十个周波。

Siemens 公司制造的晶闸管控制的串联补偿（TCSE）装置已在美国西部电管局凯雅塔变电站投入试运行。ABB 公司制造的晶闸管开关样机已装在美国的 AEP 系统。GE 公司制造的模块结构、调节范围大的 TCSE 装置已在美国 BPA500kV 斯劣特变电站投入试运行。在我国，FACTS 技术的研究刚起步。由于 FACTS 技术的应用具有投资少、效益高的特点，特别适合我国缺乏投资的情况。预计，FACTS 技术的研究和应用在我国有非常好的前景。FACTS 技术的研究和应用要作好规划，做到具体情况具体分析。