

SONGDIAN XIANLU
YUNXING HE
JIANXIU

送电线路 运行和检修

江苏省电力公司 王清葵



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

ONGDIAN XIANLU
UNXING HE
IANXIU

送电线路 运行和检修

江苏省电力公司 王清葵



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是新编电力线路类培训教材,也可作线路技术工作参考用书。全书共分三篇十章。第一篇线路电气基础知识,分为电力生产常识、电力网电气计算知识和线路过电压及保护三章。第二篇线路运行,分为线路运行管理、线路巡视与检查、线路故障及预防和运行中的线路测量与试验四章。第三篇线路检修,分为线路停电检修、线路带电作业和电缆作业三章。

全书符合现行各电压等级架空线路、绝缘架空线路和电缆线路的设计规程、运行规程、施工验收规程和过电压保护规程。电力生产常识大多引用新版电力大百科全书,知识规范、权威。内容翔实,可操作性强,可以做到一本书在手,免翻十多本规程、规范、行业标准。本书既有教材全面、系统、说理性强的特点,也有技术书的结合实际,符合现行规程、规范、行业标准的特点。书中反映了我国线路运行、检修中不少新材料、新工艺、新技术。

本书可作为电力工业学校、电力培训中心输配电线路运行检修专业教材,也可作为各地电业局、供电局的电力线路运行、检修部门技术人员的生产用科技书。

图书在版编目(CIP)数据

送电线路运行和检修/王清葵编著. —北京:中国电力出版社, 2003

ISBN 978-7-5083-1725-0

I. 送… II. 王… III. ①输电线路-运行②输电线路-检修 IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 073534 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003 年 12 月第一版 2008 年 5 月北京第七次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 26.25 印张 598 千字

印数 17001—20000 册 定价 41.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

本书既为电力工业学校、电力培训中心更新输配电专业“线路运行与检修”教材编写,也是为输配电行业电力线路技术人员科技用书而编写。长期以来“输配电线路运行检修”教材适合初步涉及线路工作的初中毕业生,脱离线路运行、检修行业中规程、规范、行业标准不断更新的实际,难以作为电力行业已参加实际工作的技工作培训用教材。而作为线路电气基础知识介绍的内容陈旧,不能反映电力行业发展的实际。电业局、供电局的线路工作者长期以来缺乏一本反映现行规程、规范、行业标准的科技书,只能同时翻阅十多种规程、规范、行业标准。往往只知其然不知其所以然,而且常常顾此失彼。对于从初级工到高级技师的应知要求中都要求掌握的电力生产的常识,长久以来很少有通俗读物对此作定性不定量的正确、全面、概括的介绍。本书作者是从供电局线路运检部门转到电力学校的电力科技工作者,近40年中一直从事输配电专业的教学,也参加过线路生产实践。编写本书就是针对上述情况的补遗填缺。

输配电线路运行检修共分三篇十章,分别介绍线路电气基础知识、线路运行和线路检修。第一篇是对后二篇的必要准备,也是一个线路运检工作者对本电力系统、对电气理论知识的最基本要求,但编写中决不蹈常袭故,人云亦云,大多参照、引用新版电力大百科全书。例如,电力网按5种接地方式分类,阀式避雷器包括金属氧化物避雷器,消弧线圈改称为接地故障消除器,操作过电压仅作为内部过电压一种形式,内过电压大小不再用额定电压倍数而改用标么值表示等等,都是率先其他书籍更新、规范的。介绍发电厂时也介绍了核电站,着重指出其不可能发生核爆炸,是安全、干净的能源。火力发电厂中还介绍了内燃机发电、燃气轮机发电及各种联合循环发电方式,这是符合当今我国能源政策的。对内过电压、电力网计算都规避了复杂的理论和复数运算,侧重作科普性介绍。线路运行和检修是实用性很强的内容,涉及四种线路(66~500kV架空线路、66kV以下架空线路、架空绝缘配电线路和电缆线路)的设计规程、运行规程、施工验收规范以及《交流电气装置过电压和绝缘配合》、《电业事故和安全考核》等规程。这些内容这几年来大都作了大幅度修订、更新,但大多数教材、书籍引用的资料还是旧的,学用不能结合。为此,编者花了很多精力,收集、整理、对比、分析这些资料,以希望读者有了这一本书就不必去翻近20本小册子了。线路带电作业、电缆作业都是当今线路工作中较需普及的知识,在检修篇中停电作业侧重管理,带电作业侧重原理、工具和常用项目,电缆作业则主要介绍用得最多的高低电压塑料电缆作业,并从理性上了解关键工艺和操作步骤,使读者学了就敢于实践。全书均注重介绍新材料、新工艺和新技术,如电力网中性点经电阻或低值电抗接

地、发电方式新技术、雷电定位、定向测定、电缆故障检测车、配电线路带电作业、热缩或冷缩电缆头制作等都是当今着重推广的新技术，虽未作详细介绍，但也开拓了读者的视野和知识面。

本书先是在江苏省电力局科教处冯文秀处长鼓励下，先写了后二篇内容作内部出版，供培训输配电线路运检专业工人用。后在浙西电力学校马黎任副校长、胡国荣老师推荐下，得到中国电力出版社约稿后修改了全书，并补充了第一篇电气基础知识。在历经多年的写作修改过程中，曾到上海电力工业局超高压输变电处、江苏省苏州、徐州、常州、南通、无锡等供电局收集资料、调查研究，得到高国平高级技师、施光华局长、沈仲华教授级高工等许多同志的支持帮助，浙西电力学校陈杏春老师百忙之中，详细审阅了书稿，提出不少中肯建议，为本书增色不少，在此一并谨致谢意。

本书尚有许多不妥和错误，规程、规范和行业标准也在不断推新，恳请读者指正。

编者

2003年4月

目 录

前言

第一篇 线路电气基础知识

第一章 电力生产常识	1
第一节 发电厂	1
第二节 电力网	10
第三节 电力系统	17
第四节 电力系统中性点接地方式	21
第五节 输电线路技术的发展	27
思考题	32
第二章 电力网电气计算知识	34
第一节 电力网的参数和等值电路	34
第二节 架空输电线路中电压损耗与功率损耗	38
第三节 电力网潮流分布计算基本知识和电力系统的电压调整方法	40
第四节 电力网线损率和电能损耗计算	46
第五节 降低线损措施	49
第六节 导线截面选择方法	53
思考题	64
第三章 线路过电压及保护	66
第一节 雷电过电压	66
第二节 电力系统内部过电压	70
第三节 过电压保护设备	78
第四节 输配电线路防雷保护	86
第五节 电气装置接地与接地装置	96
思考题	100

第二篇 线路运行

第四章 线路运行管理	102
第一节 输配电线路运行检修的任务	102

第二节	严格执行送配电线路现场运行规程	105
第三节	输配电线路的防护	111
第四节	输配电线路反事故措施	116
第五节	电业生产事故调查和安全考核	119
思考题		127
第五章	线路的巡视与检查	129
第一节	架空线路的巡视	129
第二节	架空送电线路巡视的主要内容	134
第三节	架空送电线路各元件的运行要求	145
第四节	架空配电线路及设备的巡视与检查	155
第五节	电力电缆的运行要求	177
思考题		191
第六章	线路的故障与预防	194
第一节	概述	194
第二节	雷害事故及预防	196
第三节	污闪事故及预防	205
第四节	线路覆冰及预防	213
第五节	架空线路防风工作(上)——防振	219
第六节	架空线路防风工作(下)——防舞动	227
第七节	春夏季的多发事故及预防	233
思考题		238
第七章	运行中的线路测量与试验	240
第一节	概述	240
第二节	雷电流的观测	241
第三节	接地电阻的测量	246
第四节	绝缘子的测试	248
第五节	绝缘子污秽检测	253
第六节	配电变压器的电压及负荷电流的测量	254
第七节	导线弛度、限距、交叉跨越距离测量	256
第八节	导线连接器的检验	256
第九节	电力电缆的预防性试验	258
思考题		260

第三篇 线路检修

第八章	线路停电检修	262
第一节	停电检修概述	262
第二节	停电检修的安全措施	269
第三节	停电检修项目与操作	273
第四节	停电检修中推广线路技术革新与改进	280

思考题	284
第九章 带电作业	285
第一节 带电作业的原理和方法	285
第二节 带电作业常用的绝缘材料及金属材料	294
第三节 带电作业安全技术	303
第四节 带电作业工器具及试验、保管	326
第五节 带电作业项目与操作	341
思考题	359
第十章 电缆作业	361
第一节 电力电缆概述	361
第二节 电缆的结构和选用	365
第三节 电缆的敷设	372
第四节 对电缆接头的要求	381
第五节 塑料电缆终端头和中间接头的制作	388
第六节 电力电缆试验和验收	406
思考题	411

线路电气基础知识

第一章

电力生产常识

由发电、输电、配电、用电等设备及其辅助系统（继电保护、安全、自动、测量、调度自动化和通信等装置），按规定的技术和经济要求组成的、将一次能源转换为电能并输送分配到用户使用的系统称为电力系统。电力系统中输送、交换和分配电能的那一部分称为电力网。电力网包括输电网和配电网。利用电能生产设备将其他形式的能源转变为电能的过程称发电。

第一节 发电厂

生产电能的主要方式有火力发电、水力发电、核能发电、地热发电、风能发电、太阳能发电、潮汐能发电、波浪能发电、海洋温差发电、燃料电池发电等。前三种发电形式是目前电力生产的主要方式。

一、火力发电厂

火力发电是通过化石燃料的燃烧将化学能转化成热能，再利用动力机械转换成机械能驱动发电机发电的技术。实现这种电能技术转换的工厂称为火力发电厂。火力发电的化石燃料，包括固体燃料（主要为煤炭）、液体燃料（主要为原油、重油、柴油等石油制品）、气体燃料（主要是天然气、液化天然气、煤层气及由煤转换的各种煤气）。火力发电主要有蒸汽动力发电、内燃机发电、燃气轮发电，以及燃气—蒸汽联合循环发电。在上述发电基础上发展起来的热电联产电厂（热电厂），使火电机组既发电又供热，进一步提高了热能的利用率。

（一）蒸汽动力发电

1. 概况

蒸汽动力发电是利用燃料在锅炉中燃烧释放热能产生一定压力和温度的蒸汽，蒸汽热能在汽轮机中转换成为机械能，再通过发电机转换成为电能的发电方式。这种发电方式目前在火力发电中居主要地位，其中仅向用户提供电能的为凝汽式电厂，供电的同时还以汽轮机抽汽（或排汽）向外界供热的则为热电厂，也称热电联产。凝汽式电厂的生产过程和

主要设备如图 1-1 所示。

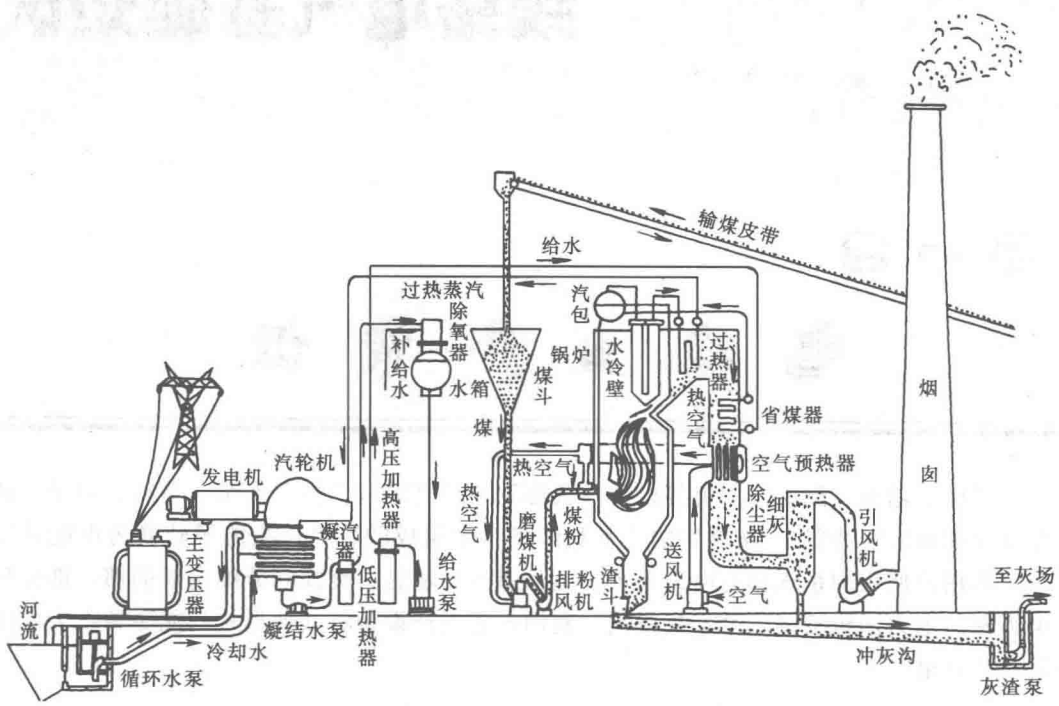


图 1-1 凝汽式电厂的生产过程和主要设备

经过 100 多年发展，目前单机最大功率达 1200MW（单轴）和 1300MW（双轴）。汽轮机一般采用亚临界压力 25MPa 左右，温度为 540~570℃。日本 1990 年投产两台 700MW 机组，其参数为超临界 31MPa，566/566/560℃，二次再热。容量最大的电厂是俄罗斯苏尔古特 2 号电厂，容量 4800MW（6×800MW，燃用天然气）。

2. 蒸汽动力电厂的基本生产过程

蒸汽动力电厂的主要生产系统包括汽水系统、燃烧系统和电气系统。

汽水系统由锅炉、汽轮机、凝汽器和给水泵等组成，如图 1-2 所示。它包括汽水循环、化学水处理和冷却水系统等。水在锅炉中被加热成蒸汽，进一步加热后变成过热蒸汽

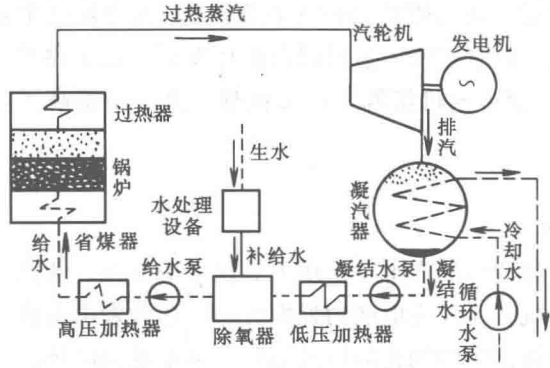


图 1-2 汽水系统流程

蒸汽，再通过主蒸汽管道进入汽轮机。由于蒸汽不断膨胀，高速流动的蒸汽冲动汽轮机叶片转动，从而带动发电机发电。蒸汽在膨胀过程中，压力和温度不断降低，最后排入凝汽器并被冷却水冷却，凝结成水。凝结水集中在凝汽器下部，由凝结水泵打至低压加热器和除氧器，经加温和脱氧后由给水泵将其打入高压加热器加热，最后打入锅炉。汽水系统尚需补充经过化学处理的软化水。

燃烧系统由锅炉的燃烧部分、输煤部分和除灰部分组成，如图 1-3 所示。煤由皮带机输入仓间的煤斗内，经给煤机进入磨煤机磨成煤粉，然后经过空气预热器预热过的空气一起喷入炉内燃烧。烟气经除尘器除尘后由引风机抽出，最后经烟囱排入大气。炉渣经碎渣机破碎后连同除尘器下部细灰一起由灰渣泵经灰管打至贮灰场。

电气系统由发电机、变压器和高压配电装置等组成。

发电厂整个生产过程，除了上述基本过程以外还应有供水系统、化学水处理系统、输煤系统和热工自动化等各种辅助系统和设施。

3. 蒸汽动力电厂的效率

燃料燃烧中释放的发热量并非全部转换成电能。转换后的电能与转换前的热能比值的百分数，通常被称为发电厂效率。各种参数的蒸汽动力电厂及其能量损失和发电效率一般如表 1-1 所示。

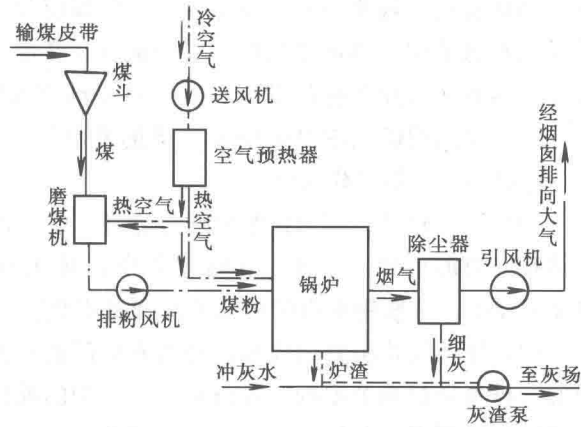


图 1-3 燃烧系统流程（煤粉炉）

表 1-1 电厂能量损失和发电效率

项 目	中温中压电厂	高温高压电厂	超高压电厂	超临界压力电厂
锅炉损失 (%)	11	10	9	8
汽轮机的机械损失 (%)	1	0.5	0.5	0.5
发电机损失 (%)	1	0.5	0.5	0.5
管道系统损失 (%)	1	1	0.5	0.5
汽轮机排汽热损失 (%)	61.5	57.5	52.5	50.5
总损失 (%)	75.5	69.5	63	60
发电效率 (%)	24.5	30.5	37	40

注 1. 主要决定于蒸汽参数；
2. 表中所列数据为一般的平均数。

汽轮机的排热损失就是排汽在凝汽器中凝结成水时被冷却水所吸收和带走的潜热损失。以中温中压电厂为例，每千克汽轮机进汽含热量为 $790 \times 4.184\text{J}$ ，而每千克排汽在凝汽器中损失的热量为 $500 \times 4.184\text{J}$ ，因此排汽凝结成水时热损失为最大，这就是蒸汽动力发电效率低的主要原因。热电厂就是充分利用供热式汽轮机的抽汽或排汽的潜热供工业企业生产或采暖用，达到既发电又供热的热能综合利用，因此这样的发电厂效率可达 50% ~ 80%。但此类电厂发电受到供热限制，而且厂址局限于靠近城市和工业企业。

(二) 内燃机发电

内燃机有煤气机、汽油机、柴油机等不同类型，用于发电的主要是功率较大的低速柴油机。目前功率最大可达 68MW，净发电效率达 40% ~ 50%，如果采用废气热能回收系统，加装余热锅炉产生蒸汽，再供汽轮机发电，热效率可进一步得到提高。

(三) 燃气轮机发电

这是用燃气轮机或燃气—蒸汽联合循环中的燃气轮机和汽轮机驱动发电机的发电厂。前者一般作为电网的调峰机组，后者用来携带中间负荷和基本负荷。目前，燃气轮机及其联合循环主要燃用液体燃料（柴油、重油、渣油和原油）或气体燃料（天然气、焦炉煤气、高炉煤气、液化石油气、炼油厂气和煤层气等），直接燃用超净水煤浆和煤粉的燃气轮机正在试验中。整体煤气化燃气—蒸汽循环电厂和燃煤的增压流化床燃气—蒸汽联合循环电厂尚处于商业示范阶段，21 世纪将逐渐进入市场。燃气轮机发电厂主要有下面几种：

(1) 单纯用燃气轮机驱动发电机的发电厂。大型燃气轮机已达 260MW，供电效率为 35% ~ 41%，一般用作调峰。

(2) 燃气轮机与汽轮机组组成联合循环。它可以是余热锅炉型、补燃的余热锅炉和双流体循环 (STIG) 型。目前，单轴式联合循环机组的单机功率已达 390MW，供电效率为 55% ~ 58%，一般用来携带中间负荷和基本负荷。

(3) 用燃气轮机对燃煤蒸汽动力发电厂进行改造，它可以改造成为不补燃的余热锅炉型的、排气助燃锅炉型的、并行动力布置型的或给水加热型的。目前，为了满足日益严格的环保质量要求，并提高电厂的功率和效率，国外已有很多燃煤电厂按此方式进行改造。

(4) 整体煤气化燃气—蒸汽联合循环 (IGCC)。对煤进行气化，得到的煤气驱动燃气轮机发电，再利用燃气轮机高温尾气加热水得到的蒸汽驱动蒸汽轮机发电，简称 IGCC。这种发电方式已取得示范成功。单机功率达 300MW，供电效率为 40% ~ 43%，为用煤为燃料的燃气—蒸汽联合循环提供了条件。中国已开始筹建。

(5) 燃煤的增压流化床燃气—蒸汽联合循环。它已取得示范成功，单机功率可达 356MW，供电效率为 40% ~ 42%，是直接燃煤的联合循环。今后也将推广使用，我国已开始筹建。

(6) 利用石化企业和钢铁企业的廉价燃料（炼油厂气、石油焦、高硫重油、高炉煤气等）进行直接燃烧或气化合成合成煤气后燃烧的联合循环发电厂。这已是国外正在兴起的独立发电商的一个投资方向，经济效益甚佳。

(7) 燃气轮机的储气蓄能发电厂。利用深夜电网的剩余电力来拖动空气压缩机，把压缩空气密储于洞穴中。当电网急需高峰用电时，把储存的压缩空气释放出来，经燃烧升温后，送到燃气透平中去做功发电，以适应调峰需要。其单机容量已达 300MW。

(8) 汽车、船舶和列车的燃气轮机移动发电厂。它充分利用了燃气轮机的体积小，单位功率的质量轻 (2 ~ 10kg/kW) 的特点。

二、水力发电厂

1. 水力发电类型

开发河川或海洋的水能资源，转换水能为电能的工程技术称水力发电。水力发电有多种形式，利用河川径流水能发电的为常规水电；利用海洋潮汐能发电的为潮汐发电；利用波浪能发电的称为波浪发电；利用电力系统低谷负荷时的剩余电力抽水蓄能，高峰负荷时放水发电的称为抽水蓄能发电。

2. 水力发电的特点

水能是可再生能源，不像煤、油和铀等是不可再生的宝贵矿产资源；水力发电是清洁的电力生产；水力发电效率高，常规水电站水能利用率在 80% 以上；水力发电和火电等不同，可同时完成一次能源开发和二次能源转换；水力发电成本低廉，劳动生产率高，管理和运行简便，运行可靠性较高；水轮发电机组起停灵活，输出功率增减快，可变幅度大，是电力系统调峰、调频和事故备用电源；受河川天然径流丰枯变化影响，需建设水库调节径流以满足电力系统负荷的需要；水库可以综合利用，承担防洪、灌溉、航运、供水、养殖、旅游等任务；水库淹没损失大，移民较多，改变生态环境，需妥善处理；水能资源在地理上分布不匀，水电站往往位于远离用电中心的偏僻地区，施工条件困难，需建较长输电线路，增加了造价和输电损失。

3. 我国水电开发状况

中国建设水电站起步较迟，1905 年台湾省曾建龟山水电站。1912 年云南省建石龙坝水电站（ $2 \times 240\text{kW}$ ）。1949 年之前，除丰满（563MW）、水丰（630MW）水电站之外，其他电站规模均甚小。1949 年后，水电事业有了长足的进步，1981 年 7 月发电的葛洲坝水电站，装机 2715MW，装有世界上直径最大的水轮机。1998 年 8 月发电的二滩水电站，装机 3300MW，单机容量 550MW，双曲拱坝高 240m。长江三峡工程设计装机容量 18200MW，单机容量 700MW，到 2009 年建成时，将成为世界规模最大的水电站。现在又着手开发金沙江的水力，其装机容量将为三峡的 2 倍左右。

4. 常规水力发电

坝式水电站和引水式水电站是水电开发的两种基本方式。坝式水电站由挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统、厂房及机电设备等组成，如图 1-4 所示。由坝作挡水建筑物时多为中高水头水电站。由闸作挡水建筑物时多为低水头水电站。当水头不高且河道较宽阔

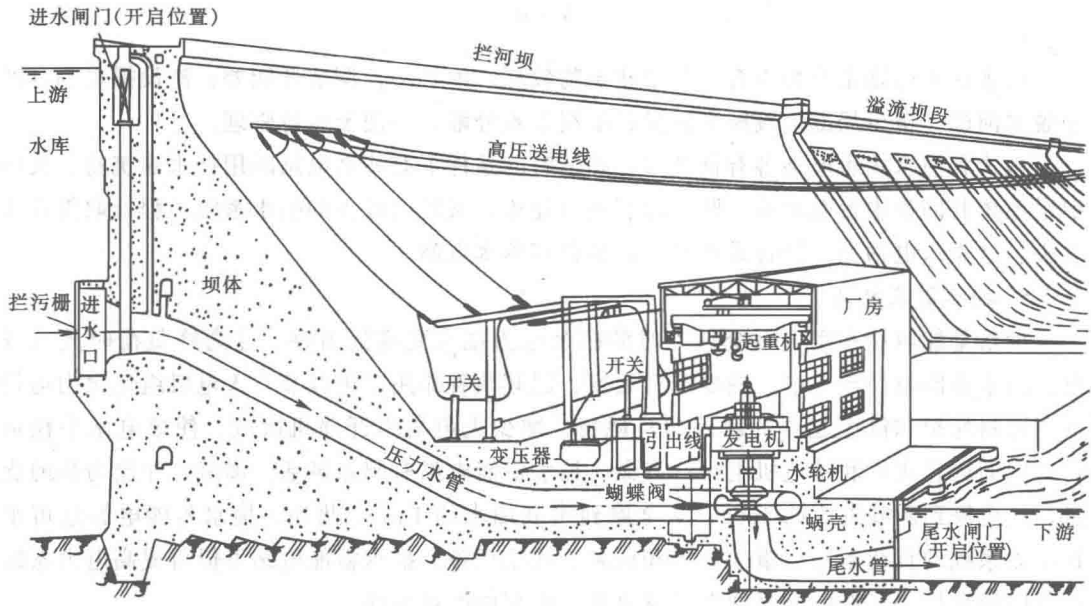


图 1-4 坝式水电站

时,可用厂房作挡水建筑物的一部分,这类水电站又称为河床式水电站,也属坝式水电站。坝式水电站按厂房与坝相对位置可分为:坝后式厂房,厂房在坝后,压力管道通过坝体,如刘家峡水电站;坝内式厂房,压力管道和厂房都在坝内,如凤滩水电站;溢流式厂房,厂房在溢流坝后,泄洪水流从厂房顶部越过,如新安江水电站;岸边式厂房,厂房在下游岸边,如白山水电站二期;地下式厂房,厂房和引水道都在坝侧地下,如二滩水电站;河床式厂房,如大化水电站。

由引水系统将天然河道落差集中发电的水电站称为引水式水电站。它一般由挡水建筑物、泄水建筑物、引水系统、水电站厂房、尾水隧洞(或明渠)及机电设备等组成(见图1-5)。这种电站宜建在河道多弯曲或河道坡降较陡的河段,用较短的引水系统可集中较大的水头;也适宜于高水头水电站,避免建设过高的挡水建筑物。跨流域引水发电的水电站,必然是引水式水电站。



图 1-5 引水式水电站布置图

1—拦河坝和溢洪道; 2—进水口; 3—沉沙池; 4—引水渠道; 5—调节池; 6—前池; 7—压力水管; 8—发电厂房; 9—变电所; 10—旁侧泄流

引水式水电站主要特点有:挡水建筑物较低,库容小;调节性能差;淹没损失小;产生脱水河段,至少局部河段减少流量;枢纽布置分散,不便于运行管理。

坝式和引水式水电站各有优缺点,在适宜的条件下有些水电站既用挡水建筑物、又用引水系统共同集中发电水头,既有库容调节径流,又可用较少的引水系统工程量取得较大水头。这类水电站称为混合式水电站,如鲁布革水电站。

5. 抽水蓄能电站

抽水蓄能电站利用电力系统低谷时的剩余电力抽水到高处蓄存,在高峰负荷时放水发电。抽水蓄能电站与火电、核电配合运行,因其填谷作用,可以节省火电机组低出力运行的高燃料耗费和机组起停的额外燃料耗费,减少火电机组开停机次数,使核电站平稳运行,因而增长火电和核电机组运行寿命。抽水蓄能电站有起停灵活、增减工作出力快的优点,从全停到满载发电约 5min,从全停到满载抽水约 1min。此外,抽水蓄能电站还可承担电力系统的负荷备用、事故备用和调频、调相任务。抽水蓄能电站不但可提高电力系统运行的经济性,且有助于降低系统事故率、提高供电可靠性。

纯抽水蓄能电站原理如图 1-6 所示。其发电量绝大部分来自抽水蓄存的水能。发电的

水量基本上等于抽水蓄存的水能。混合式抽水蓄能电站的上水库有天然径流来源，既可利用天然径流发电，也可从下水库抽水蓄能发电。调水式抽水蓄能电站是从分水岭某一侧建下水库，并设水泵站抽水到上水库。在分水岭另一侧河流设常规水电站，从上水库引水发电。

三、核电站

1. 基本原理

核电站的基本原理是把原子核裂变所产生的原子能转变为热能，将水加热为蒸汽，然后同一般火力发电厂一样，用蒸汽推动汽轮机，再带动发电机发电。原子能发电厂与火力发电厂在构成上的主要区别是前者用核蒸汽发生系统（反应堆、蒸汽发生器、泵和管道）来代替后者的蒸汽锅炉。原子能发电厂的主要优点之一是可以大量节省煤、石油等燃料。例如一座 50 万 kW 的火电厂，每年至少要烧掉 150 万吨煤，而同容量原子能发电厂只需消耗 600kg 的铀燃料。其造价比火电高，发电成本和烧煤电厂差不多。

2. 核反应堆的类型和发展

核反应堆中主要燃料是铀-235。它必须被慢中子轰击时才会裂变，而且慢中子还不容易被铀-238 吸收，以使链式反应能进行下去。所以，必须将燃料棒插在能使中子减速而不使能量损失的慢化剂材料之中。重水是较好的慢化剂，它是氢的同位素（重氢）和氧组成的水，普通水中只含有 1/5000 的重水。可用电解分离出重水，但耗电很多，所以常用一般水做慢化剂，即所谓轻水。石墨的慢化能力只有氢的 1/12，但它不大吸收中子，开采、提纯都不难，所以高温气堆都用石墨做慢化剂。

按中子慢化方式不同，核反应堆可分为轻水堆、重水堆、高温气堆和快中子增殖堆。

（1）轻水堆。轻水堆用低浓度二氧化铀作核燃料，用净化的普通水作中子慢化剂和冷却剂。按冷却剂在堆内工作状态不同，可分为不允许水在反应堆内沸腾的压水堆和允许水在反应堆内发生汽水沸腾的沸水堆。

压水堆是目前应用最广、最安全的堆型。它的蒸汽回路分成两个回路，一回路蒸汽连接反应堆，蒸汽带放射性；二回路蒸汽直接进入汽轮机发电，不带放射性。两个回路之间是热交换器——蒸汽发生器。压水堆单堆电功率已达 10000MW，发电效率已达 34%，燃料消耗不断加深，核燃料在堆内利用率已比初期提高到三倍左右，同样大小压力壳内功率大大增加。我国秦山核电站一期就属于压水堆。

沸水堆与压水堆本质区别是降低了一回路冷却的工作压力，允许一回路水在堆心内沸腾并将蒸汽直接送入汽轮机发电，轻水沸水堆内水既作中子慢化剂又作冷却剂，而且还是驱动汽轮机转动的工作介质。与压水堆相比，其特点是：①压力壳承受压力只有压水堆一半，但壳内设备多，所以壳的厚度薄但尺寸大；②省去了二回路，也就省去了故障较多的蒸汽发生器；③沸水堆采用堆内再循环，减少了反应堆开孔接管，并缩小了管径，从而

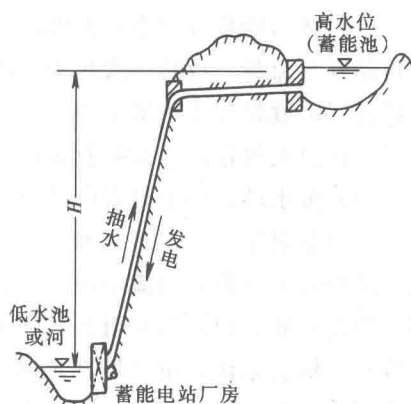


图 1-6 抽水蓄能电站

使失水事故可能性及严重性大大降低；④沸水堆的功率控制除了调节燃料棒，还可通过改变再循环泵流量，故功率变化速度可及时满足电网需要；⑤比功率较小，同样条件下，沸水堆燃料装载量比压水堆多 50%，总投资较大；⑥蒸汽带有放射性，汽轮机受到放射性沾污，故汽轮机设计、维护及维修均较压水堆复杂。

(2) 重水堆。重水具有中子吸收截面小而慢化性能好的优点。但重水贵，为防止重水泄漏，设备复杂。我国秦山核电站三期工程采用重水堆。20 世纪 70 年代发展了重水慢化、沸腾轻水在管道内流动冷却，直接形成蒸汽，送汽轮机发电。这样，可以减少重水装量，简化设备，但要防止重水和轻水间相互渗漏，并且燃料中要加低浓铀或钚，提高了燃料成本。综合来说，重水堆在重水生产和设备制造上造价较高，但是可以直接采用天然铀，燃料成本低。此外，相同功率重水堆产值比压水堆高。所以，重水堆天然铀的需要量比压水堆少，是一种节省铀资源的反应堆。

(3) 高温气冷堆。这种堆型是石墨气冷堆（石墨慢化，二氧化碳冷却，天然铀作燃料）的继续与发展。它利用低浓铀或高浓钚的涂敷颗粒做核燃料，石墨为中子慢化剂，高温氦气作冷却剂的先进堆型。氦气被加热到 750°C ，进入蒸汽发生器加热二回路的水。高温气堆出口温度高，可采用高参数汽轮机，效率高；中子充分利用，并可利用资源较多的钚作再生核材料，每年补充核燃料少；反应堆升温慢，即使失氦也不致堆心熔化，安全性好；氦做冷却剂，一回路放射剂量低，而且热效率高，如果出口温度能进一步提高，热机效率将更高，并可直接用于炼铁、煤气化等生产领域。但是这种堆型技术尚未成熟，只有美、英、前西德先后建成三座实验性反应堆。

(4) 快中子增殖堆。堆心中核燃料裂变反应主要由平均能量为 0.1 兆电子伏特以上的快中子引起的反应堆。由于中子能量较高，所以不需要慢化中子的材料，相应地反应堆中的中子有害吸收损失进一步减少，因而快中子堆的新燃料转换比可进一步提高。快中子反应堆中裂变材料每次裂变可以放出 2~3 个中子，被铀-238、钚-232 吸收产生新的核燃料，所以是很好的增殖反应堆。在发电的同时，还能将堆内大量铀-238 转化为钚-239，而且生产的可裂变燃料要比消耗掉的还多。利用快中子增殖堆使热中子反应堆中不能充分利用的铀-238 获得了充分利用，自然铀资源的能量利用率从 1%~2% 提高到 60%~70%。由于快中子增殖堆的堆心体积小而发出功率大，所以要求采用传热性能好而中子慢化性能差的冷却剂。目前用作快中子增殖堆冷却剂的材料主要有液态钠和高温高流速氦气。从燃料增殖性看，氦冷快中子堆优越，从工艺技术看钠冷快中子堆实践较多，著名的法国凤凰堆就属于这种。快中子增殖堆技术要求高，还不成熟，同时，快中子堆中如何控制链式反应，也是必须慎重研究的大问题。所以，快中子增殖堆是最有发展前途的堆型，但技术上的成熟还有待时间。

3. 核电厂不会核爆炸，潜在的危险是放射性泄漏

(1) 核电站不会核爆炸。核电厂反应堆目的是使核裂变持续稳定地进行，并使核裂变产生的能量有控制地缓慢释放；而原子弹是让核裂变能量在瞬间一下子迸发出来。核反应堆大多采用低浓度铀，甚至用天然铀作燃料，并分散放置在反应堆内，不具备在一瞬间大量释放（即爆炸）的条件，另外反应堆还采取了一系列安全控制措施，即使反应堆失控或堆心损坏，核裂变最终会自然停止，绝不可能发生核爆炸。而原子弹内装有高浓度（大于

93%) 的铀-235 或钚-239, 这些核燃料布置得很易于达到临界, 并且原子弹内装有复杂精密的引爆系统。当引爆装置点火起爆后, 其爆炸力使核装料压紧在一起, 大大超过临界条件, 产生不受控制的链式裂变反应, 即发生核爆炸。打个不十分贴切的比喻, 原子弹的核装料像烈性酒那样, 火柴一点就着; 而核反应堆的燃料像啤酒, 是绝不会烧起来的。

(2) 核电站应很好地防止核泄漏。核电站潜在危险决非是爆炸, 而应重视核反应堆积累的放射性问题。首先, 核裂变是铀-235 在受到一个慢中子轰击时, 就变得不稳定而分裂成二个“碎片”, 并一部分质量转化为巨大能量释放出来。同时放出 2~3 个中子和 γ 射线。这些中子是维持链式裂变反应的重要条件。裂变碎片(新原子核)是大小不等两块(极少数为三块), 这些新生成的原子核是极不稳定的, 它会发生一系列的裂变。裂变的同时也就增加了大量放射性裂变产物, 存在于原来燃料元件内部。其次, 反应堆中物质受到中子活化作用而转换成放射性物质, 但它的数量和裂变产物相比是很少的。据估计, 核燃料裂变后的放射性活度, 大约要比裂变前增强 10 亿倍以上。

压水堆核电站禁锢放射性物质一般采取七道屏障(见图 1-7): ①核电站核燃料一般被压制成型, 高温烧结成陶瓷体心块, 放射性物质在后处理时才会释放出来; ②表面加工得高度光洁的几十个燃料块装入薄壁锆合金包壳管内; ③反应堆容器和除气净化系统; ④混凝土屏蔽可以挡住中子和电离辐射; ⑤安全壳不仅能承受内部的冲击, 还能承受七级以下地震, 甚至一架失事飞机的直接撞击, 安全壳内保持负压, 排出气体是经空气净化处理, 再稀释后经高烟囱排出; ⑥在反应堆厂房 1.5km 范围内划定为非居住区; ⑦将核电站选择在远离居民中心地方。

(3) 核电站的考验与教训。1979 年美国发生三里岛核电厂事故, 在一系列误操作下, 人为使应急冷却系统停止工作长达 8h 之久, 堆心二次发生严重失水也没有发生堆心熔化事故。事故后果当时被夸大了, 事故并没有造成任何人死亡, 三名因工作需要进入辅助厂房工作, 他们所受辐射剂量均未超过规定值。对周围居民造成外照辐射影响比一次 X 光透视所接受的剂量还小。1980 年前苏联的切尔诺贝里核电站事故死亡 31 人, 使核电厂周围 1000 (km)² 地区受到放射性污染, 人们不得不从该电厂周围 30km 范围内疏散。这主要是由于该电站采用的石墨沸水压力管堆是一种陈旧的、应该淘汰的堆型。事故是在停堆前试验时发生的, 试验前

未作正确准备, 没有得到主管部门批准, 同时在试验中反应系数增加太快, 使反应堆功率急剧增加, 堆心温度剧增、元件熔化引起石墨燃料, 造成这次灾难事故。但是对切尔诺贝里核电站事故也应有正确认识。与其他发电方式相比, 这种损害并不是独有的, 如采煤和运输时也有伤亡, 煤电对环境的影响也十分大。何况现用的反应堆, 尤其是压水堆, 绝对不

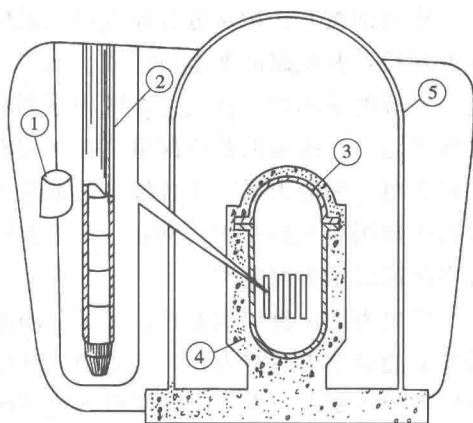


图 1-7 核电厂中对放射性物质的多重屏障

1—陶瓷体燃料心块; 2—金属包壳管; 3—反应堆压力容器; 4—混凝土屏蔽; 5—安全壳