

# 发电厂动力设备

FADIANCHANG DONGLISHEBEI

李郁侠 王新宏 贺梅 编著



陕西科学技术出版社

## 内 容 提 要

本书以发电厂动力设备为主,对能源的概念与分类、能源与环境、火力发电厂的生产过程、锅炉及汽轮机设备、水能的开发与利用、水轮机及其辅助设备、核能的开发利用、核反应堆设备、新能源发电设备(太阳能发电、风力发电)等作了较深入的介绍,重点介绍了火电厂热力设备与水电厂动力设备。

本书可供发电厂、电力系统工程技术人员参考,也可作为高等学校电气工程及其自动化专业、热能与动力工程专业教材使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

发电厂动力设备/李郁侠,王新宏,贺梅编著. —西安:  
陕西科学技术出版社,2003.8

ISBN 7-5369-3681-8

I. 发... II. ①李...②王... III. 发电厂—动力设备

IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 072268 号

- 
- 出 版 者** 陕西科学技术出版社  
西安市北大街 131 号 邮编: 710003  
电话: (029)7211894 传真: (029)7218236  
网址: <http://www.snstp.com>
- 发 行 者** 陕西科学技术出版社  
电话 (029)7212206 7260001
- 印 刷** 西安理工大学印刷厂
- 规 格** 787mm×1092mm 16 开本
- 印 张** 10.5 印张
- 字 数** 262 千字
- 印 数** 1—1500
- 版 次** 2003 年 8 月第 1 版  
2003 年 8 月第 1 次印刷
- 定 价** 23.00 元
- 

(如有印装质量问题,请与承印厂联系调换)

# 前 言

电能是现代化生产的主要动力来源。作为目前最清洁和使用最方便的二次能源,电力在推动社会经济进步、提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用。随着我国经济建设的发展和人民生活水平的提高,人们对电能的需求不断增长。近年来我国电力工业取得了突飞猛进的发展,新技术新设备在电力工业得到广泛应用,装机容量和发电量都已跃居世界第二位。秦山、大亚湾等核电厂相继建成并投入运行,对合理配置我国能源结构发挥了积极作用。随着太阳能发电与风力发电的迅速发展,我国新能源发电技术正在逐步完善。发电厂提供了人们生产生活所需要的大量电力,目前在我国电力系统中起主要作用的还是火电厂和水电厂,能大规模发电的能源只有核能,对其他新能源仍需要继续研究开发。本书是为介绍各种不同类型发电厂动力设备而编写的。

全书共分十三章,内容包括:绪论,火电厂热能基本知识,火力发电厂的生产过程及其组成,燃料及煤粉制备系统,锅炉设备,汽轮机,水力发电概述,水轮机的类型及其组成,水轮机的工作原理,水电站的主要辅助设备系统,核电站,太阳能发电,风力发电。

韩星明、陈洁、王卫勋同志参加了编辑工作,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,请读者批评指正。

作 者

2003年6月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b>	
1.1 能源的概念与分类 .....	1
1.2 我国能源资源概况 .....	2
1.3 我国电力工业发展概况 .....	10
1.4 发电厂的类型和特点 .....	11
1.5 电能生产的特点及运行经济指标 .....	13
<b>第 2 章 火电厂热能基本知识</b>	
2.1 火力发电简史 .....	16
2.2 火力发电厂 .....	17
2.3 工质及其状态参数 .....	17
2.4 水蒸气在定压下的形成过程 .....	19
2.5 火电厂热能的传递方式 .....	21
<b>第 3 章 火力发电厂的生产过程及其组成</b>	
3.1 火力发电厂的生产过程 .....	22
3.2 火电厂的主要生产系统 .....	24
3.3 建造火电厂应具备的条件 .....	25
<b>第 4 章 燃料及煤粉制备系统</b>	
4.1 燃料及其燃烧 .....	27
4.2 燃料输送及其主要设备的作用 .....	33
4.3 煤粉制备系统 .....	33
4.4 煤粉制备与输送设备 .....	35
<b>第 5 章 锅炉设备</b>	
5.1 电厂锅炉概述 .....	38
5.2 锅炉的热平衡 .....	41
5.3 煤粉炉 .....	43
5.4 锅炉受热面 .....	46
5.5 直流锅炉简介 .....	51
5.6 锅炉的主要辅助设备 .....	53
<b>第 6 章 汽轮机</b>	
6.1 汽轮机的一般概念 .....	56
6.2 汽轮机级内的工作过程 .....	56
6.3 多级汽轮机 .....	60
6.4 汽轮机的效率和功率 .....	61
6.5 汽轮机的构造 .....	63
6.6 汽轮机本体结构实例 .....	66
6.7 汽轮机的调速系统及主要辅助设备 .....	68

<b>第 7 章 水力发电概述</b>	
7.1 水力发电基本原理	73
7.2 水能开发方式与水电站类型	77
7.3 水电站的主要水工建筑物	83
7.4 我国水力发电概况	89
<b>第 8 章 水轮机的类型及组成部分</b>	
8.1 水轮机的分类与应用范围	92
8.2 水轮机的工作参数	97
8.3 水轮机的构造	99
8.4 水轮机蜗壳	102
8.5 水轮机尾水管	104
<b>第 9 章 水轮机的工作原理</b>	
9.1 水流在转轮中的运动	105
9.2 水轮机的基本方程式	106
9.3 水轮机的能量损失及效率	107
9.4 水轮机的汽蚀与泥沙磨损	108
<b>第 10 章 水电站的主要辅助设备系统</b>	
10.1 调速系统	112
10.2 油系统	113
10.3 压缩空气系统	114
10.4 水电站技术供水系统	115
10.5 排水系统	116
10.6 水力监测系统	117
<b>第 11 章 核电站</b>	
11.1 原子能发电的原理	118
11.2 核反应堆的类型	119
11.3 核电厂的安全防护	123
11.4 核电站发展概况	127
<b>第 12 章 太阳能发电</b>	
12.1 太阳能	132
12.2 太阳能的收集	133
12.3 太阳能的储存	136
12.4 太阳能的利用	137
12.5 太阳能发电	138
12.6 太阳能资源	144
<b>第 13 章 风力发电</b>	
13.1 风能的形成	146
13.2 风能的利用	150
13.3 风力发电	152
13.4 风力发电机组	157
13.5 我国的风能资源	159

# 第1章 绪论

电站的种类很多,如火电站、水电站、核电站、太阳能电站、风力发电站、潮汐电站、地热电站等。所谓发电站,就是把其他各种形式的能源转换为电能的能量转换工厂。电站的动力设备,就是完成能源形式转换的设备,具体地说,就是火电厂的锅炉、汽轮机、发电机、锅炉辅机、调速器等设备;水电厂的水轮机、发电机、调速器、辅助设备等装置;核电站的反应堆、蒸气发生器、汽轮机、发电机等设备;太阳能电站的聚热器、蒸气发生器、汽轮发电机等。本书针对能源动力类专业的特点,主要介绍火电站和水电站的动力设备;此外,也简要介绍有关核电站、风力发电站、太阳能电站方面的知识以及目前国内外这几种电站的发展概况。电站动力设备与能源的种类及其转换方式有关,在介绍电站动力设备内容之前,先介绍有关能源的概念。

## 1.1 能源的概念与分类

自然界中存在的可能为人类用来获取能量的自然资源称为能量资源,它的范围随着科学技术的发展而扩大。

能量资源按其来源可以分为4类:第1类是太阳能,除了直接的太阳辐射能之外,化石资源(煤、石油、天然气等)、生物质能、水能、风能、海洋能等资源都间接来自太阳能;第2类是以热能形式储藏于地球内部的地热能,如地下热水、地下蒸气、干热岩体;第3类是地球上的铀、钍等核裂变资源和氦、氘、锂等核聚变资源;第4类是月球和太阳等星球对地球的吸引力(以月球引力为主)所产生的能量,如潮汐能。

能源是人类取得能量的来源,包括已开采出来可供使用的自然资源与经过加工或转换的能量的来源。尚未开采出来的能量资源只称为资源,不列入“能源”的范畴,以免混淆。能源可按如下分类。

一次能源与二次能源。自然界现成存在、可直接取得又不改变其基本形态的能源称为一次能源,或称初次能源,如煤炭、石油、天然气、水能、生物质能、地热能、风能、太阳能等等。由一次能源经过加工转换成另一种形态的能源产品称为二次能源,如电力、蒸气、焦炭、煤气以及各种石油制品等。在生产过程中排出来的余能、余热,如高温烟气、可燃废气、废蒸气、排放的有压流体等也属于二次能源。一次能源无论经过转换多少次所得到的另一种能源,都称作二次能源。

常规能源与新能源。在一定历史时期和科学技术水平下,已经被人们广泛应用的能源,称为常规能源。现阶段的常规能源包括煤炭、石油、天然气、水力和核裂变能5种。目前世界上消费的能源几乎全靠这5种常规能源。许多古老的能源若采用先进的方法加以广泛利用,以及用新发展的先进技术利用的能源,称之为新能源或非常规能源,如太阳能、生物质能、地热能、风能、海洋能、核聚变能等。新能源中有些可以采用与古代不同的技术加以开发利用,有些尚未被大规模利用,有些还处在研究阶段。

可再生能源与非再生能源。在自然界中可以不断再生并有规律地得到补充的能源称为可

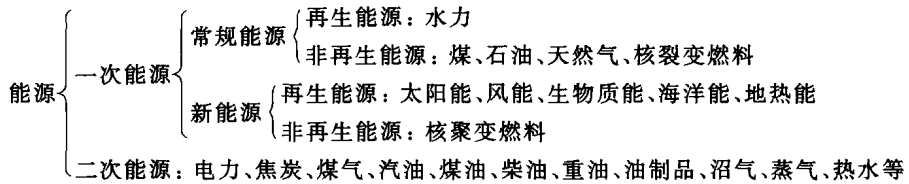
再生能源,如水能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能等。经过亿万年形成的、短期内无法恢复的能源,如煤炭、石油、天然气、核裂变燃料等,称为非再生能源,随着大规模的开采,其储量越来越少,总有枯竭之时。

化石燃料是指亿万年前因地壳变动,植物遗体演化或其他原因形成的燃料,如煤炭、石油、天然气等。

核燃料是指通过变革原子核(裂变或聚变)而得到能量的燃料。核裂变燃料有铀、钚等;核聚变燃料有氘、氚等。

能源的概念和分类可以归纳为表 1-1 所示。

表 1-1 能源的概念和分类



## 1.2 我国能源资源概况

我国幅员辽阔、地大物博、资源丰富、人口众多,国土面积 960 万平方公里,领海面积 100 万平方公里。已探明的主要资源有煤炭资源、石油与天然气资源以及水能资源。

### 1.2.1 煤炭资源

煤炭是地球上蕴藏量最丰富、分布地域最广的化石燃料。据 1997 年统计资料,世界煤炭探明的可采储量为  $1.03161 \times 10^4$  亿 t, 储采比为 224 年。其中 7 位储量最大的国家依次为美国、中国、澳大利亚、印度、德国、南非和波兰。这 7 个国家的煤炭储量和储采比见表 1-2。

表 1-2 煤炭探明储量及储采比

国 家	煤炭探明可采储量 /亿 t	占世界比例 /%	储采比 /年
美 国	2 405.58	23.3	249
中 国	1 145.00	11.1	85
澳大利亚	909.40	8.8	364
印 度	699.47	6.8	227
德 国	673.00	6.5	286
南 非	553.33	5.4	267
波 兰	421.00	4.1	212
世界合计	10 316.10	100.0	224

### 1.2.2 石油与天然气资源

1996 年世界剩余石油探明储量为 1 395.68 亿 t, 其中中东地区占 65%, 拉美地区占 12%, 欧洲占 9%, 非洲占 6%, 亚太占 4%, 北美占 4%; 沙特阿拉伯的探明储量最大, 按目前产量可开采 90 年以上。伊拉克、科威特等国可开采 100 年以上, 美国仅能开采 10 年。世界现有的石油资源还可维持 43 年。天然气是蕴藏量丰富、最清洁且便利的优质能源, 发展前景广阔。世界天然气资源丰富, 但分布很不均匀, 主要集中在中东、前苏联和东欧, 约占总储量的 70%。一些国家的石油、天然气储量如表 1-3 所示。

表 1-3 一些国家的石油、天然气储量

国 家	石油探明储量/亿 t	天然气探明储量/亿 m <sup>3</sup>
沙 特	233	35 089
科威特	125	9 905
前苏联	83	438 650
伊 朗	65	127 350
伊拉克	60	7 924
美 国	38	52 468
中 国	33	11 704

### 1.2.3 水能资源

水能资源最显著的特点是可再生、无污染。开发水能资源对促进国民经济发展、改善能源结构、缓解由于消耗煤炭和石油资源所带来的环境污染有重要意义,因此世界各国都把开发水能资源放在能源发展战略的优先地位。

世界上一些国家可能开发的水能资源如表 1-4 所示。我国水能资源丰富,可开发装机容量与年发电量均居世界首位。

表 1-4 世界上一些国家可能开发的水能资源

国 家	可开发水电装机容量 /万 kW	1990 年开发程度 /%	1996 年开发程度 /%	2000 年开发程度 /%
中 国	37 800	9.5	15.8	19.3
前苏联	26 900	24.3	—	—
巴 西	21 300	22.9	—	—
美 国	17 860	39.3	—	—
加拿大	15 290	39.2	—	—
印 度	7 000	20.9	—	—
日 本	4 960	61.3	—	—
瑞 士	1 100	111.49	—	—
法 国	2 100	98.1	—	—
挪 威	2 960	72.1	—	—

### 1.2.4 我国能源资源的特点

#### 1) 能源资源总量虽多,但人均占有量较少

新中国建立以来,中国能源工业在许多领域已接近或赶上世界先进水平,这是值得我们自豪的地方,但是同时我们也应该对我国的资源情况进行客观详实的分析。中国地大物博、资源丰富,自然资源总量排世界第 7 位,能源资源总量约 40 000 亿 t 标准煤,居世界第 3 位。煤炭保有储量为 10 024.9 亿 t,可采储量 1 145 亿 t;石油的资源量为 930 亿 t,天然气的资源量为 380 000 亿 m<sup>3</sup>, 现已探明的石油和天然气储量分别只占资源量的约 20%和约 3%;水电可开发装机容量为 3.78 亿 kW,居世界首位;新能源与可再生能源资源丰富,风能资源量约为 16 亿 kW,可开发利用的风能资源约 2.53 亿 kW,地热资源的远景储量为 1 353.5 亿 t 标准煤,探明储量为 31.6 亿 t 标准煤,太阳能、生物质能、海洋能等储量更是居世界领先地位。1997 年我国原煤产量 13.73 亿 t,居世界第 1 位,占世界煤炭总产量的 29.5%;发电量达 11 342 亿 kWh,仅次于美国,居世界第 2 位;原油产量 1.607 亿 t,居世界第 5 位;天然气产量 227 亿 m<sup>3</sup>,居世界第 18 位。中国在进入 21 世纪时,已拥有世界第 3 位的能源生产系统。



但我国人口众多,现已达 13 亿多,故人均资源占有量较小,能源资源相对匮乏。我国人口占世界总人口 21%,已探明的煤炭储量占世界储量的 11%、原油占 2.4%、天然气仅占 1.2%。中国人均能源资源探明量(以吨煤当量计)只有 135 t,相当于世界平均拥有量(以吨煤当量计) 264 t 的 51%,石油仅为 10%。

我国 1997 年一次能源生产量为 13.34 亿 t 标准煤,人均能源消费量仅为 1.165 t 标准煤,人均电量为 893 kWh,不足世界人均能源消费水平 2.4 t 标准煤的一半,居世界第 89 位。原煤世界人均 209 t,美国人均 962 t,中国人均 95 t。石油储量世界人均 28 t,美国人均 15 t,我国人均 2.3 t。天然气储量世界人均 28 400 m<sup>3</sup>,美国人均 118 400 m<sup>3</sup>,我国人均 1 416 m<sup>3</sup>。1995 年世界人均能源消费量如表 1-5 所示。

表 1-5 1995 年世界人均能源消费量

国 家	消费总量 /t 标准煤	硬 煤 /t	石 油 /t	天然气 /m <sup>3</sup>	电 力 /kWh
中 国	1.14	1.19	0.143	0.015	884
美 国	11.49	2.94	2.94	2.320	13 583
日 本	5.1	1.03	2.11	0.500	7 927
德 国	5.65	0.91	1.67	1.170	6 538
加拿大	10.84	1.33	2.70	2.690	17 269
英 国	5.32	1.33	1.42	1.270	5 911
巴 西	0.93	—	0.50	—	1 698
法 国	5.32	0.39	1.55	0.580	7 284
印 度	0.38	0.29	—	—	365
俄罗斯	6.79	1.20	—	2.560	5 119

### 2) 能源资源品种较多,但优质能源较少

目前,在我国已探明的能源资源量中,煤炭约占 72%,油气资源约占 28%,优质能源比重相对较少,从而影响着我国能源生产和消费构成。我国石油资源的储备严重不足,并且已影响了我国石油工业的发展。尽管我国的石油资源储量由于受投资、技术等条件的限制还没有最终探明,但就目前情况看,油气资源少于煤炭资源。经过 50 余年的发展,我国能源工业已经形成了以煤炭为主、多能互补的能源生产体系,在一次能源生产和消费总量中的比重大约为:煤炭 75%,石油 17%,天然气 2%,一次电力(水电、核电、新能源发电)6%。

### 3) 资源储存条件差,地域分布不均

能源资源储量的存在并不意味着有生产能力,有了生产能力,也并不意味着就有经济使用价值。我国东部经济发达地区的能源资源已基本面临枯竭,今后的能源开发将依靠西部和北部资源。目前我国的煤炭现有储量中,山西、内蒙古、贵州、宁夏、安徽、陕西等约占全国的 80%,其中山西、内蒙古约占 60%,而预测储量最多的是新疆。但这些地区距耗能中心至少在 1 000 km 以上,除了地理环境较差外,还将带来巨大的运输压力。石油的生产目前依靠东北、华北的油田,但其勘探、开发程度均已很高,已很难实现今后石油开发的目标。因此,勘探、开发的重点将转向浅海大陆架和西北部的三大盆地(塔里木、准葛尔、柴达木)。这些地区环境条件恶劣,地质条件复杂,开发难度较大。我国的水力资源大部集中于西南,约占全国的 60%以上,这一地区距我国的工业负荷中心在 2 000 km 以上。而西南水电的大规模开发没有 110 万 V 超高压输电技术,其资源就没有开发价值。但我国目前只能生产 50 万 V 电压等级的输变电设备,且质量还不过关。因此,西南水电的大规模开发还需要相当长的时间。

#### 4) 水能资源开发利用程度低

我国水能资源理论蕴藏总量(未包括台湾省)达 6.76 亿 kW,可开发容量约 3.78 亿 kW,相应年发电量 19 200 亿 kWh,居世界第一。我国水电建设历经坎坷曲折,从小到大,从弱到强,不断发展。新中国成立后,党和政府重视水电开发,水电建设发展迅速,特别是改革开放以来,兴建了一批大中型水电站,取得了很大的成就。但是,目前我国水电开发程度仍较低,2000 年开发率按电量算只有 11.1%左右,按装机容量算只有 19.3%,不但远远落后于美国、加拿大、西欧等发达国家,而且也落后于巴西、埃及、印度等发展中国家。因此,我国水电开发潜力巨大。1990 年一些国家水能资源开发及利用程度如表 1-6(见第 6 页)所示。

综上所述,我国的能源资源并不丰富,人均拥有量与资源大国相比更是贫乏,而且优质能源较少。因此,决不能盲目乐观。

### 1.2.5 能源与环境

世界经济发展和人类赖以生存的环境是不协调的,经济发展和人口增长给环境造成了巨大的压力,对发展中国家这种情况尤为突出。从引起环境问题的根源考虑,环境问题可分为两类:由自然力引起的原生环境问题和由人类活动引起的次生环境问题。第一类环境问题,主要是指地震、洪涝、干旱、滑坡等自然灾害所引起的环境问题,对于这类环境问题,目前人类的抵御能力还很薄弱。第二类环境问题,又可分为环境污染和生态破坏两大类型。

环境问题是一个全球性问题。污染物可以在生活圈中停留相当长时间,并且通过扩散或漂移可输送到离污染源很远的地方。联合国环境署的报告表明,整个地球的环境正在全面恶化,其主要表现在:①南极的臭氧空洞正以每年一个美国陆地面积的速度扩大,受臭氧空洞的影响,太阳紫外线辐射使人类皮肤癌的发病率不断上升;②空气质量严重恶化,全球有 1.25 亿人口生活在污浊的空气中;③温室气体的过度释放造成全球气候变暖,沿海低地和一些岛屿国家正面临海面上涨的威胁;④全球有 12 亿人口生活在缺水地区,有 14 亿人的生活环境中没有生活污水排放装置;⑤全球每年的土壤流失量达 20 Gt,全世界的森林正以每年  $4.6 \times 10^6$  ha 的速度从地球上消失;⑥全球有 12%的哺乳动物和 11%的鸟类濒临灭绝;每 24 h 就有 150~200 种生物从地球上消失;由于过度捕捞,有 40 多种鱼类也濒临灭绝。

人类从来没有像今天这样意识到和感受到生存环境所受的威胁,社会也从来没有像现在这样期盼生活空间质量的改善。

能源作为人类赖以生存的基础,在其开采、输送、加工、转换、利用和消费过程中,都直接或间接地改变着地球上的物质平衡和能量平衡,必然对生态系统产生各种影响,成为环境污染的主要根源。能源对环境的污染主要表现在以下几个方面。

#### 1) 温室效应

空气中的氮、氧、氢等双原子气体的辐射能力微不足道,均可看作是透明体。然而二氧化碳和水蒸气等三原子气体都有相当大的辐射能力和吸收能力。与固体不同,上述这些气体的辐射和吸收有选择性,它们只能辐射和吸收某些波长区间的能量。对于二氧化碳这类气体,它们能让太阳的短波辐射自由地通过,同时却吸收地面发出的长波辐射。这样一来,大部分太阳短波辐射可以通过大气层到达地面,使地球表面温度升高;与此同时,由于二氧化碳等气体强烈地吸收地面的长波辐射,使散失到宇宙空间的热量减少,于是地面吸收的热量多,散失的热量少,导致地球气温升高,这就是所谓“温室效应”。

表 1-6 1990 年一些国家水能资源开发及利用程度

序号	国名	可开发水能资源		1990 年已开发的常规水电		水能资源利用程度	
		容量 /万 kW	电量 /亿 kWh	容量 /万 kW	电量 /亿 kWh	容量 /%	电量 /%
	全世界	226 110.7	98 024.2	—	—	—	—
1	中国	37 853	19 233	3 604.6	1 263.5	9.5	6.6
2	独联体	26 900	14 200	6 524.3	2 233.25	24.25	15.7
3	巴西	21 300	11 949	4 884.7	2 133.78	22.93	17.85
4	美国	19 430	7 015	7 640.5	2 798.39	39.32	39.89
5	加拿大	15 290	5 352	5 989.7	2 931.47	39.17	54.77
6	扎伊尔	12 000	5 300	248.7	51.59	2.07	0.97
7	印度	8 400	4 500	1 754.7	577.93	20.89	12.84
8	哥伦比亚	5 000	3 000	680	242.2	13.6	8.07
9	阿根廷	4 812	1 910	572	176.5	11.89	9.24
10	缅甸	7 500	2 250	25.8	11.21	0.34	0.5
11	马达加斯加	6 400	3 200	10.8	3.04	0.17	0.1
12	尼泊尔	4 213	1 400	23.2	7.07	0.55	0.51
13	挪威	3 800	1 720	2 740.6	1 216.01	72.12	70.7
14	日本	3 339	1 306	2 048.1	879.68	61.34	67.36
15	印度尼西亚	3 000	1 500	200.6	53.01	6.69	3.53
16	西班牙	2 922	675	1 775	256.94	60.75	38.01
17	喀麦隆	2 300	1 148	53.1	23.25	2.31	2.03
18	安哥拉	2 300	1 000	43.4	13.35	1.89	1.34
19	厄瓜多尔	2 100	1 150	93.7	49.34	4.46	4.29
20	法国	2 100	720	2 060	696	98.1	96.67
21	瑞典	2 010	990	16 720	714.59	83.18	72.18
22	墨西哥	2 034.4	993	773.4	208	38.02	20.95
23	意大利	1 920	650	1 469	311.15	76.51	47.87
24	奥地利	1 852	537	1 160	324.91	62.63	60.51
25	玻利维亚	1 800	900	36.5	11.42	2.03	1.27
26	巴基斯坦	2 000	1 050	301	155.31	15.05	14.79
27	南斯拉夫	1 695.7	636	676.7	243.91	39.91	38.35
28	莫桑比克	1 500	720	236.3	132.9	15.75	18.46
29	秘鲁	1 250	1 092	385	110	30.8	10.07
30	埃塞俄比亚	1 200	600	37.3	10.04	3.11	1.67
31	赞比亚	1 200	540	196.3	95.12	16.36	17.62
32	新西兰	1 080	550	460.52	218.91	42.64	39.8
33	瑞士	1 100	410	1 226.4	306.75	111.49	74.82
34	尼日利亚	1 240	380	133.8	31.59	10.79	8.32
35	智利	1 578	886	231	114.58	14.64	12.93
36	土耳其	1 520	720	689.5	231.48	45.36	32.15
37	委内瑞拉	1 164	980	1 098.7	346.67	94.39	35.37
38	澳大利亚	860.5	300	729.45	145.68	84.77	48.56
39	罗马尼亚	803	380	599	109	74.6	28.08
40	葡萄牙	618.8	240	313.83	91.87	50.72	38.28
41	德国	440	240	358.9	178.25	81.57	74.27
42	芬兰	371	200	290	120	78.17	60

图 1-1 表示近 100 年来全球地表温度年平均值的变化情况。图中 0 线为 1950~1979 年的平均值,曲线是按各年的温度值相对于这个平均值的偏差绘制的。可以看出,近 100 多年来全

球平均地表温度经历了一冷一暖两次波动,但总的趋势是上升的。20世纪80年代全球平均气温比19世纪下半叶升高了 $0.6^{\circ}\text{C}$ 。最近的预测发现,当 $\text{CO}_2$ 浓度增加为目前的2倍时,地表平均温度将上升 $1.5^{\circ}\text{C}\sim 4.5^{\circ}\text{C}$ 。这将引起南极冰山融化,导致海平面升高,并淹没大片陆地。

对于地球上适于居住环境有最直接影响的是大气中的 $\text{CO}_2$ 含量。 $\text{CO}_2$ 太多,地球就会像金星那样变成一个温室; $\text{CO}_2$ 太少,地球就会像土星一样寒冷。直到工业革命以前大气中 $\text{CO}_2$ 的含量极为稳定。可是工业革命一开始,由于烧煤以及后来烧其他化石燃料,实际上 $\text{CO}_2$ 的排放量已经超过了自然界对 $\text{CO}_2$ 固定和吸收的自然速率,大气中的 $\text{CO}_2$ 含量便开始上升。从工业革命开始到1959年这段时间里,大气中的 $\text{CO}_2$ 浓度增加了13%;而从1959年到1993年,大气中的 $\text{CO}_2$ 又增加了13%。仅仅34年,大气中 $\text{CO}_2$ 浓度的上升幅度就与前两个世纪上升的幅度一样大。显然,如果 $\text{CO}_2$ 的浓度继续上升,可以肯定其结果将会给社会和经济带来破坏性的气候变化。

据统计,全球每年因燃烧而产生的 $\text{CO}_2$ 就高达60000亿t。图1-2给出了世界相关国家主要因燃烧化石燃料而产生的 $\text{CO}_2$ 量的比较。国际能源机构指出,到2010年,化石燃料将提供90%的世界能源需求量,这意味着今后温室气体的排放量将进一步增加;2010年世界 $\text{CO}_2$ 排放量预计将比1990年增加30%~42%,这是非常危险的。

由温室效应所带来的全球气候变暖已经受到全世界的关注。1992年,在里约热内卢由150多个国家发起并组织召开了“气候化框架会议”,这一会议旨在讨论如何减少温室气体的排放,提高对气候变化过程影响的认识,并在许多方面达成共识,例如把2000年温室气体的排放量控制在1990年的水平;共享减少温室气体排放方面的研究成果;政府对减少温室气体排放方面的财政和科技支持等。减缓温室效应的对策有:①提高能源的利用率,减少化石燃料的消耗量;②开发不产生 $\text{CO}_2$ 的新能源,如核能、太阳能、地热能、海洋能;③推广植树绿化,限制森林砍伐,制止对热带雨林的破坏;④减慢世界人口增长进度,在农村发展“能源农场”,一方面利用种植薪柴树木通过光合作用固定 $\text{CO}_2$ ,另一方面燃烧薪柴比燃用化石燃料产生的 $\text{CO}_2$ 要少得多;⑤采用天然气等低含碳燃料,大力发展氢能。

## 2) 酸雨

天然降水的本底的pH值为6.55,一般将pH值小于5.6的降水称为酸雨。可能引起雨水酸化的主要物质是 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ ,它们形成的酸雨占总酸雨量的90%以上。而上述两类物质的90%都是因燃烧化石燃料造成的。我国的酸雨以硫酸为主,硝酸的含量不到硫酸的1/10,这与我国以煤为主的能源结构有关。

70年代,酸雨在世界上仍是局部性问题,进入80年代后,酸雨危害更加严重,并且扩展到世界范围。目前酸雨已成为全球面临的主要环境问题之一。

酸雨会以不同的方式危害水生生态系统和陆生生态系统;腐蚀材料和影响人体健康。首先,酸雨会使湖泊变成酸性,引起水生生物死亡。例如瑞典的9万个湖泊中有2万个已遭到某

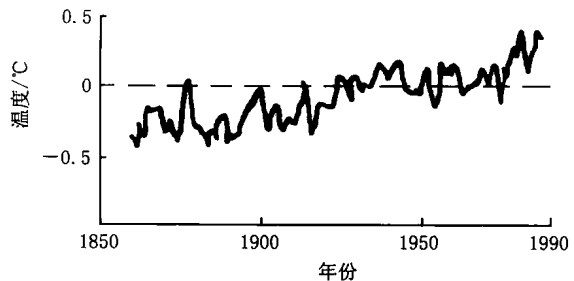


图 1-1 全球地表温度平均值的变化

种程度的酸雨损害,4 000 个生态系统被完全破坏;挪威南部的 5 000 个湖泊中已有 1 750 个鱼虾绝迹;加拿大的安大略省已经有 2 000~4 000 个湖泊变成酸性,鲑鱼和鲈鱼已不能生存。其次,酸雨是造成大面积森林死亡的原因。例如德国巴伐利亚州山区的 12 000 ha 森林有 1/4 因酸雨而坏死;捷克受害森林占其森林总面积的 1/5。酸雨还加速了建筑结构、桥梁、水坝、工业设备、供水管网和名胜古迹的腐蚀,影响人体健康,例如酸雨使地面水成酸性,地下水中的金属含量增加,饮用这种水或食用酸性河水中的鱼类会对人体健康产生危害。

化石燃料燃烧,特别是煤炭燃烧所产生的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ,是产生酸雨的主要原因。近一个多世纪以来,全球的  $\text{SO}_2$  排放量一直在上升(见图 1-3);我国的能源消耗以煤为主,因此  $\text{SO}_2$  的排放更加严重,图 1-4 是中国 1960~2000 年  $\text{SO}_2$  排放趋势,图中虚线为采取切实有效的措施后  $\text{SO}_2$  排放量。针对上述情况,世界各国都在采取切实有效的措施控制  $\text{SO}_2$  的排放,其中最重要的是洁净煤技术。

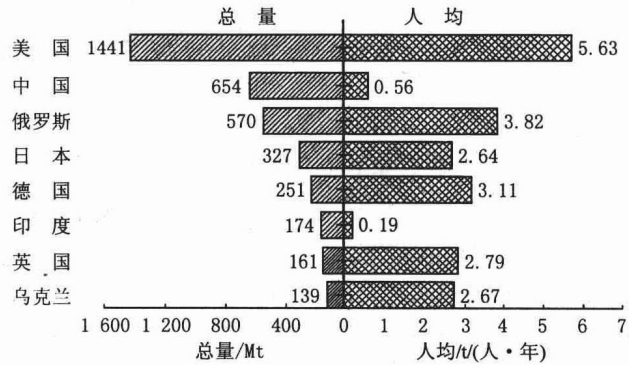


图 1-2 1992 年世界相关国家主要因燃烧化石燃料的  $\text{CO}_2$  排放量

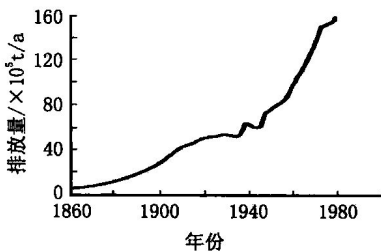


图 1-3 1860~1980 年全球  $\text{SO}_2$  的排放趋势

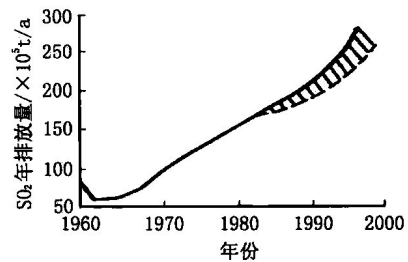


图 1-4 1960~2000 年中国  $\text{SO}_2$  的排放趋势

### 3) 臭氧层的被破坏

1984 年英国科学家首次发现南极上空出现了臭氧空洞,随后的气象卫星证实,由于人类的活动,这个臭氧空洞已在迅速扩大。造成臭氧层被破坏的主要原因是人类过多地使用氟氯烃类物质和燃料燃烧产生的  $\text{N}_2\text{O}$  所致。

臭氧( $\text{O}_3$ )是氧的同素异形体,它存在于距地面 10 km 以上的大气平流层中,吸收掉太阳辐射中对人类、动物、植物有害的紫外光中的大部分,为地球提供了一个防止太阳紫外辐射的屏障。研究表明,臭氧浓度降低 1.0%,地面紫外辐射强度将提高 2.0%,皮肤癌患者的数量必将增加百分之几。

大气中的  $\text{N}_2\text{O}$  的浓度每年正以 0.2%~0.3% 的速度增长,而  $\text{N}_2\text{O}$  浓度的增加将引起臭

氧层中 NO 浓度增加,NO 和臭氧作用将生成 NO<sub>2</sub> 和氧,最终导致臭氧层变薄。大气中的 N<sub>2</sub>O 主要来源于自然土壤的排放和化石燃料及生物燃料的燃烧。因此,发展低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术及烟气和尾气的脱硝是减少 N<sub>2</sub>O 排放的关键。

#### 4) 热污染

用江河、湖泊水作冷源的火力发电厂和其他工业锅炉、工业炉窑等用热设备,冷却水吸收热量后,温度将升高 6℃~9℃,然后再返回自然水源。于是大量的排热进入到自然水域,引起自然水温升高,从而形成所谓的热污染。

热污染会导致水中的含氧量减小,影响水中鱼类和其他浮游生物的生长,同时使水中藻类大量繁殖,堵塞航道,破坏自然水域的生态平衡。

火电厂和核电站是热污染的主要来源,例如美国发电使用的冷却水就占全部冷却水用量的 80%;一座 1 000 MW 的火电厂,每小时就有  $4.6 \times 10^{12}$  J 的热量排放到自然水域中。位于法国吉隆河入海口的布来埃核电站装有 4 台 900 MW 的机组,每秒钟产生的温水高达 225 m<sup>3</sup>,致使吉隆河口几公里范围内的水温升高了 5℃。法国巴黎塞纳河水也由于大量废热的涌入,使水温升高了 5℃。另外,采用冷却塔的电厂,由于冷却水蒸发也会使周围空气温度增高,这种温度较高的湿空气对电厂周围的建筑也有强烈的腐蚀作用。例如德国莱茵河畔的费森海姆核电站,冷却塔高达 180 m,直径 100 m,每小时耗水 3 600 t,冷却水的蒸发使周围空气温度升高了 15℃。

提高电厂和一切用热设备的热效率,不仅可提高能量的有效利用率,而且也因排热减少而减轻对环境的热污染。

#### 5) 放射性污染

核燃料的开采与运输,核废渣的处理也会给环境造成污染。从污染物对人和生物的危害程度看,放射性物质要比其他污染物严重得多。因此,从核能开发以来,人们就对放射性污染的防治极其重视,采取一系列严格的措施,并将这些措施以法律的形式明确下来。例如对核电站,国际原子能机构和我国国家核安全局就制定了核电站厂址选择、设计、运行和质量保证等 4 个安全法规。正是这些法规的实施,使核电站的安全有了可靠的保证。

#### 6) 影响人体健康

化石燃料燃烧时排放的大量粉尘、SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、NO<sub>x</sub> 等除了污染环境外,还会影响人体健康。例如过量的 SO<sub>2</sub> 会导致呼吸道疾病,最典型的例子是 1952 年发生的伦敦烟雾事件。事件的污染源是进入大气的大量烟尘和 SO<sub>2</sub>,这些污染物在当时特定的气候条件下聚集起来,浓度越来越大并长时间不消散。4 天中死亡 4 000 人,发生事件的一周中,因支气管炎死亡 704 人,为事件发生前一周的死亡人数的 9.3 倍。后来的研究发现,煤尘中含有 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 成分,它促使空气中的 SO<sub>2</sub> 形成硫酸液沫,并附着在烟尘粒上进入人的呼吸道致病。

另外原煤中均含有微量重金属元素,这些微量重金属元素在燃烧过程中会随烟尘和炉渣排出,从而对大气、水和土壤产生污染,并影响人体健康。例如砷会使人体细胞正常代谢发生障碍,导致细胞死亡;铅会影响神经系统,抑制血红蛋白的合成代谢;镉中毒,会引起肾功能障碍;汞中毒,更会引起肾功能衰竭,并损害神经系统;镍是致癌物质,某些铬化合物可能致肺癌。因此化石燃料燃烧中的重金属污染日益引起人们的重视。

能源对环境的影响是一种综合的影响。我国是发展中国家,改革开放以来随着经济的迅速发展和人民生活水平的提高,我国能源开发利用引起的环境污染也日趋严重。我国燃煤占世界

煤炭消费量的 27%，是全世界少有的以煤炭为主的能源消费大国，二氧化碳排放量在苏联解体后仅次于美国居世界第 2 位；单位国内生产总值二氧化碳排放量远高于发达国家，大约是美国的 5 倍、日本和法国的 12 倍左右。我国煤炭产量已连续 12 年居世界第 1 位。1996 年我国煤炭在一次能源生产和消费结构中均占 75% 左右，石油占 17.2%，水电和核电占 5.87%，天然气占 1.88%；而发达国家燃煤约为 22%，能源消费结构中的 78% 是石油、天然气、核电和水电等高效、清洁、方便的能源。煤炭燃烧对温室气体的贡献率比燃烧同热值的天然气高出 69%、比燃油高出 29%。1997 年，我国排放二氧化碳 6~7 亿 t，其中 85% 是由燃煤排放的；排放二氧化硫 2 400 万 t，其中 90% 是由燃煤排放的；排放烟尘 1 744 万 t，其中 73% 是由能源开发利用排放的。由于能源利用和其他污染源大量排放环境污染物，造成全国 57% 的城市颗粒物超过国家限值，有 48 个城市的 SO<sub>2</sub> 浓度超过国家二级排放标准，82% 的城市出现过酸雨，酸雨面积已达国土面积的 30%，许多城市的氮氧化物浓度有增无减，其中北京、广州、乌鲁木齐和鞍山超过国家二级排放标准，北京市区 SO<sub>2</sub> 的含量已经超过世界卫生组织警戒值的 5 倍。近年来，由于大城市汽车数量大幅度增加，汽车尾气已成为城市环境的重要污染源。环境污染问题已成为我国可持续发展的重要制约因素。新能源与可再生能源没有环境污染，是实现可持续发展战略的最佳途径之一。因此，在提高能源利用率的同时大力治理能源所造成的环境污染已是我国当务之急。

能源的可持续发展的作用既有积极的一面，又有消极的一面。正如联合国 1980 年通过的《世界自然资源保护大纲》中指出的：“地球是宇宙中唯一已知的可以维持生命的星球”；“人类寻求经济发展及享用自然界丰富的资源，必须符合资源有限的事实及生态系统的支持能力，还必须考虑子孙后代的需要”。因此，使能源与环境协调发展是摆在全人类面前的共同任务。

### 1.3 我国电力工业发展概况

建国以前，我国电力发展十分缓慢，至 1949 年，全国发电装机容量只有 184.9 万 kW，年发电量 43 亿 kWh，电力工业居世界第 25 位。经过 40 多年的建设，电力工业有了很大发展。特别是改革开放以来，我国电力工业的发展成就举世瞩目，全国发电量和装机容量已于 1987 年跃居世界第 4 位（前 3 位为美国、前苏联、日本），并一直保持了高速增长的好势头，1996 年发电量与装机容量跃居世界第 2 位。目前，我国电力工业已经进入了大机组、大电厂、大电网、高电压、高自动化的新阶段。2000 年底的全国电力工业统计资料如表 1-7 所示。

表 1-7 2000 年底全国电力工业统计资料

类 型	设备总量/万 kW	百分比/%	发电量/亿 kWh	百分比/%
水 电	7 297	24	2 133	17.3
火 电	22 343	75	10 049	81.5
核 电	210	1	148	1.2
总 量	29 877	100	12 331	100

至 1996 年底，全国单机容量 20 万 kW 以上的火电机组共有 335 台，占火电装机容量的 50.16%，水电机组 52 台，占水电装机容量的 18.2%，全国已有 30 余座装机容量超过 100 万 kW 的电厂和 5 个容量超过 1 000 万 kW 的电网。1996 年我国五大电网的基本情况如表 1-8 所示。

表 1-8 1996 年我国五大电网基本情况

电 网	设备容量/万 kW	水电/万 kW	火电/万 kW
华北电网	3 293	160	3 133
东北电网	2 950	458	2 492
华东电网	3 822	248	3 574
华中电网	3 374	1 192	2 182
西北电网	1 370	526	844

目前,我国已建成 2 座核电站,包括 1991 年投运的秦山核电站一号机组和大亚湾核电站一号机组(二号机组也已投入试运行)。我国火电厂最大单机容量为 60 万 kW,水电厂为 32 万 kW,核电厂为 90 万 kW。大亚湾核电站扩建,岭奥核电厂、田湾核电厂正在建设中。

我国电力工业虽然有了很大发展,但还不能满足国民经济和人民生活迅速增长的需要。目前,我国还有约 1 亿农村人口未用上电。由于人口众多,我国人均用电量仅占世界第 80 位,如表 1-9、表 1-10 所示。

表 1-9 我国人均电力生产与消费

年 份	人均电力生产/kWh	生活用电/kWh
1953	15.82	—
1960	89.05	—
1970	141.63	—
1980	306.35	10.7
1990	548.81	42.4
1996	884	93.1
2000	1 081.10	132.1

表 1-10 世界一些国家人均用电量(1982 年)

国 家	用电量/kWh	国 家	用电量/kWh
美 国	10 074	巴 西	1 196
前苏联	4 980	波 兰	3 172
日 本	4 916	瑞 典	12 439
德 国	6 032	南 非	3 222
加拿大	14 421	中 国	325
英 国	4 877	印 度	193

我国电能占总能源消费比重落后于世界平均水平 20 年。许多发电设备超强度运行。电网中有 2 000 万 kW 左右的中低压机组需进行彻底改造或设备更新,还有 700 万 kW 存在严重缺陷的水力发电机组和 600 万 kW 超期服役的供热机组在运行。全国很多城市的低压配电网设备陈旧,这些都影响着电网的安全性、可靠性和经济性。

## 1.4 发电厂的类型和特点

发电厂是把各种天然能源如煤炭、水能、原子能等转换成电能的工厂,根据所利用的能源形式可分为火电厂、水电厂、核电厂以及潮汐、风力、燃气轮机发电等。目前在电力系统中起主导作用的电厂还是火电厂和水电厂。



### 1.4.1 火力发电厂

利用煤、石油和天然气等作为燃料的发电厂称为火电厂。目前我国火电厂主要以煤为燃料,分为凝汽式电厂和热电厂。凝汽式电厂是单纯用来发电的电厂,一般都是建设在燃料基地或矿区附近,发出的电能用高压线路送往负荷中心,这样既免去了燃料的长途运输,提高了能量输送效益,同时又可防止煤灰对城市周围环境污染。这种建设在燃料基地的凝汽式电厂又称为坑口电厂,也是今后兴建大型火电厂的主要方向。热电厂是既发电又兼供热的电厂,由于供热网络不能太长,所以一般都建设在热用户附近靠近工业区或大城市,发电与供热必须兼顾,在电力系统中的运行方式远不如凝汽式电厂灵活,但其热效率较高。

火电厂目前我国电力系统中装机容量约占70%以上,它的特点是:①布局比较灵活,装机容量大小可按需要而定;②建设初投资较水电厂为小,根据正在建设的各大中型电厂概算统计,火电厂平均每千瓦投资约为5000元,而水电厂每千瓦投资约为10000元;③修建工期短,火电厂热机部分的修建远比水电厂的水动部分省时省力,一般兴建一座大中型火电厂只需3~5年,而水电厂则需7~8年或更长时间;④火电厂的主要燃料为煤炭,属于消耗性能源,虽然我国煤炭资源丰富,但化工、冶金更需要煤炭资源,目前每年发电用煤约占总产量的25%左右,火电的电能生产成本远比水电为高;⑤相对于水电厂而言,火电厂动力部分设备较为复杂,厂用电量消耗也大,需求人员多,运行费比较高;⑥汽轮发电机组操作控制比较复杂,开停机时间长,因此在电力系统中最宜于带基荷和腰荷,不适宜于担任系统中变动较大的尖峰负荷,否则不仅使煤耗量增大而且会缩短机组使用寿命;⑦火电厂的排烟、除灰可造成空气和环境的污染,我国一年烧煤约12亿t,产生二氧化硫2100万t。全国火电厂2亿多千瓦装机容量,每年飞灰量约1200万t,加上其他工业飞灰排放量,全国每年约有2100万t以上飞灰污染大气。

### 1.4.2 水力发电厂

水电厂是利用江、河、湖、泊所蕴藏的水能资源而生产电能的工厂。根据开发方式的不同分为堤坝式、引水式和混合式等类型。它的特点是:①使用的能源是取之不尽、用之不竭的水能,属于再生性能源,因此它的电能成本只是火电厂的1/3~1/4;②水力发电机组效率高,常规水电站水能利用效率在80%以上,而火电厂的热效率只有30%~50%,水力机组易于实现全盘自动化,运行灵活,从机组启动到带满负荷只需几分钟,能够适应电力系统负荷变化,可担任系统调频、调峰及负荷备用;③水电厂发电成本低廉,运行费用低,厂用电量小,运行人员较少;④不会产生对空气和环境的污染,水工部分还可以发挥综合利用效益,如防洪、灌溉、航运、给水和水产养殖等,使国民经济取得更多的效益;⑤水电厂的寿命为50年,比火电厂25年寿命大1倍;⑥水电厂多建筑在江河、湖泊、峡谷地带,远离城市和负荷中心,电能通过高压输电传送,增大输变电投资,同时水工建筑设施投资高、工期长,甚至可能因修建调节水库而引起淹没村庄、耕地,涉及居民搬迁和交通改道等问题;⑦水电厂的工况受水文条件限制较大,分洪水期、平水期和枯水期,虽有水库调节,但也有一定限度,因此水电厂的发电量将受到水文和气象条件的一定制约。

### 1.4.3 核电厂

核电厂又称为原子能发电厂,是利用原子核内的变化所释放的核能转变成电能的场所。核燃料(铀U)在反应堆内发生核裂变,既所谓链式反应,释放出大量热能,由水或气体作为冷却剂带出,在蒸气发生器中把水加热变为蒸气,推动汽轮发电机做功获得电能,其生产过程与火