

普通高等教育“十二五”规划教材

# 可再生能源

## 发电技术

*Renewable Energy Generation Technology*

● 程明 张建忠 王念春 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

# 可再生能源发电技术

程 明 张建忠 王念春 编著



机械工业出版社

# 前 言

能源是人类社会赖以生存的物质基础。随着世界各国对能源需求的不断增大,传统化石能源资源短缺和污染环境等问题日益突出,制约着人类经济社会的可持续发展。与煤炭、石油等传统化石能源相比,风能、太阳能、生物质能等可再生能源不仅取之不尽、用之不竭,而且清洁、污染少。

我国是能源生产和消耗大国,能源结构和地域分布都不合理,环境污染和生态破坏等问题日益凸显。在此背景下,开发利用可再生能源已成为我国经济社会实现可持续发展的必然选择。我国于2006年实施了《中华人民共和国可再生能源法》,将可再生能源开发利用列为能源发展的优先领域,并制定了可再生能源中长期发展规划等一系列政策和法规,极大地推动了我国可再生能源事业的发展。可再生能源发电是可再生能源的主要利用方式。近年来,我国风力发电、太阳能光伏发电、生物质发电等可再生能源发电获得了快速发展,取得了一系列成就。但是,与发达国家相比,不仅可再生能源发电所占比例仍很低,发展任务还十分艰巨,而且缺少核心技术,人才严重匮乏。因此,在电气工程等相关专业开设可再生能源发电技术,使学生了解和掌握可再生能源发电的基本原理和基本技术,已成为我国高等工程教育面临的一项重要任务。为此,作者结合近年所开展的教学和科研工作,编写了本书,以期对我国可再生能源发电技术的人才培养、研究开发、推广应用、工程建设和科学普及等有所裨益。

全书共8章,第1章绪论,介绍能源的分类、能源形势、可再生能源的特点和发展概况等;第2~6章分别介绍风力发电、太阳能发电、海洋能发电、生物质发电和地热发电技术,重点介绍各种可再生能源发电的基本原理和基本技术,并简要介绍国内外的最新进展等;第7、8章分别介绍在可再生能源发电中必不可少的功率变换技术和电力储能技术。

本书在编写上着重基本概念的阐述,尽可能联系实际。在介绍基本原理和技术的基础上,也适当介绍该领域的最新技术发展,以期为学生发挥想象力提供一定的空间。每章后都提供了一定量的思考题与习题,供巩固所学内容。

本书适合作为理工科高等学校高年级本科生的教材,也可作为研究生的参考教材。全书内容学习大约需40~50学时,也可利用30学时有选择地学习。本书还可供从事可再生能源发电技术研究开发、工程建设与管理的工程技术人员阅读参考。

本书由东南大学程明教授、张建忠副教授和王念春教授编著,第1章绪论、第2章风力发电和附录由程明撰写,第4章海洋能发电、第5章生物质发电、第6章地热发电和第8章可再生能源发电中的电力储能技术由张建忠撰写,第3章太阳能发电和第7章可再生能源发电中的功率变换技术由王念春撰写。全书由程明统稿。东南大学电气工程学院研究生张淦、黄星星、刘宇等协助绘制了部分插图,谨表谢意。

本书在撰写过程中,参阅了大量的国内外文献,引用了许多不同来源的资料和图片,谨在此致以衷心的感谢。

## IV 可再生能源发电技术

由于可再生能源发电技术涵盖了多个学科，涉及广泛的物理和化学等知识，并且近年发展迅速，各种新技术不断呈现，因此，编写这样一本教材，需要很宽的知识背景和对国内外学术前沿的深入了解。由于作者主要是在电气工程领域从事教学和科研，尽管已竭尽所能，但因水平和时间所限，错误和疏漏之处在所难免，诚恳希望读者发现后及时批评指正，以利于以后的重印和再版。

作者联系方式：[mcheng@seu.edu.cn](mailto:mcheng@seu.edu.cn)。

作者

# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

### 1.1 能源及其分类 ..... 1

#### 1.1.1 一次能源与二次能源 ..... 1

#### 1.1.2 可再生能源与非再生能源 ..... 1

#### 1.1.3 常规能源与新能源 ..... 1

### 1.2 能源的计量单位与品质评价 ..... 3

#### 1.2.1 能源的计量单位 ..... 3

#### 1.2.2 能源的品质评价 ..... 3

### 1.3 开发利用可再生能源的必要性 ..... 4

#### 1.3.1 能源形势 ..... 4

#### 1.3.2 环境污染 ..... 6

### 1.4 可再生能源发电的基本特点和 发展概况 ..... 7

#### 1.4.1 全球可再生能源发电发展概况 ..... 7

#### 1.4.2 中国可再生能源发电发展概况 ..... 10

### 思考题与习题 ..... 13

## 第2章 风力发电 ..... 14

### 2.1 概论 ..... 14

#### 2.1.1 风能的转换与利用 ..... 14

#### 2.1.2 风力发电系统的基本构成 与类型 ..... 15

### 2.2 风 ..... 16

#### 2.2.1 风的形成 ..... 16

#### 2.2.2 风速与风力等级 ..... 19

#### 2.2.3 风向与风频 ..... 21

### 2.3 风资源 ..... 22

### 2.4 风力机的基本原理与结构 ..... 23

#### 2.4.1 风力机的基本类型 ..... 23

#### 2.4.2 风力机的工作原理 ..... 25

#### 2.4.3 风能利用系数 ..... 28

#### 2.4.4 风力机的功率控制 ..... 29

### 2.5 风力发电机 ..... 32

#### 2.5.1 风力发电机的主要类型 ..... 32

#### 2.5.2 笼型异步发电机——恒速运行 ..... 32

#### 2.5.3 双馈异步发电机——变速运行 ..... 35

#### 2.5.4 低速永磁同步发电机——变速 运行 ..... 39

#### 2.5.5 风力发电机的最新发展 ..... 43

### 2.6 变桨系统与偏航系统 ..... 46

#### 2.6.1 变桨系统 ..... 46

#### 2.6.2 偏航系统 ..... 48

### 2.7 风力发电机组的运行与控制 ..... 49

#### 2.7.1 控制目标 ..... 49

#### 2.7.2 基本控制内容 ..... 50

#### 2.7.3 定桨距恒速风力发电机组的运行 与控制 ..... 52

#### 2.7.4 变桨距恒速风力发电机组的运行 与控制 ..... 53

#### 2.7.5 变桨距变速风力发电机组的运行 与控制 ..... 55

### 2.8 风力发电机组的低电压穿越 ..... 61

#### 2.8.1 低电压穿越的基本概念 及相关规范 ..... 61

#### 2.8.2 低电压对风力发电机组的影响 ..... 62

#### 2.8.3 低电压穿越技术 ..... 63

### 思考题与习题 ..... 65

## 第3章 太阳能发电 ..... 67

### 3.1 概述 ..... 67

### 3.2 太阳辐射 ..... 69

#### 3.2.1 日地关系与太阳常数 ..... 69

#### 3.2.2 太阳辐射入射角的计算 ..... 70

#### 3.2.3 日出与日落时角 ..... 71

#### 3.2.4 日照时间 ..... 71

### 3.3 中国的太阳能资源及分布情况 ..... 72

### 3.4 太阳能热发电技术 ..... 73

#### 3.4.1 塔式太阳能热发电系统 ..... 73

#### 3.4.2 槽式太阳能热发电系统 ..... 79

#### 3.4.3 碟式太阳能热发电系统 ..... 83

### 3.5 太阳能光伏发电技术 ..... 86

#### 3.5.1 太阳能电池的分类 ..... 87

#### 3.5.2 晶硅太阳能电池的发电原理 ..... 89

## VI 可再生能源发电技术

3.5.3 太阳电池的基本电学特性	92	5.4.1 沼气发电	155
3.5.4 太阳电池的等效电路	95	5.4.2 生物质燃料电池	158
3.5.5 太阳电池最大功率点跟踪控制	96	思考题与习题	160
3.6 太阳电池的建模与仿真	100	<b>第6章 地热发电</b>	161
3.7 光伏系统的应用分类与设计实例	102	6.1 概述	161
3.7.1 离网非户用系统	103	6.1.1 地热资源的分类	162
3.7.2 离网户用系统	104	6.1.2 中国的地热资源	162
3.7.3 光伏并网系统	105	6.1.3 国内外地热资源开发利用的现状 与前景	164
3.7.4 混合系统	106	6.2 地热发电技术	165
3.7.5 光伏并网系统设计	107	6.2.1 地热发电的方式	165
3.7.6 光伏离网系统设计	108	6.2.2 世界典型地热电站介绍	168
思考题与习题	112	6.3 地热能利用的制约因素和环境保护	169
<b>第4章 海洋能发电</b>	113	6.3.1 常见的制约因素	169
4.1 概述	113	6.3.2 对环境的影响	171
4.1.1 海洋能的分类	113	思考题与习题	172
4.1.2 海洋能的开发	114	<b>第7章 可再生能源发电中的功率 变换技术</b>	173
4.1.3 中国海洋能资源及开发 利用概况	115	7.1 功率半导体器件与驱动保护电路	173
4.2 海洋能发电技术	117	7.1.1 功率半导体器件概述	173
4.2.1 潮汐发电	117	7.1.2 功率二极管与晶闸管	175
4.2.2 波浪发电	122	7.1.3 全控型功率器件	178
4.2.3 海洋温差发电	126	7.1.4 功率器件的驱动与保护电路	179
4.2.4 海流发电	128	7.2 交流一直流整流电路	182
4.2.5 海洋盐差发电	132	7.2.1 单相桥式不可控整流电路	182
4.3 海洋能发电的未来展望	135	7.2.2 单相和三相可控整流电路	183
思考题与习题	136	7.2.3 PWM 整流电路	186
<b>第5章 生物质发电</b>	137	7.3 基本直流一直流变换电路	188
5.1 概述	137	7.3.1 降压式 (Buck) 变换电路	188
5.1.1 生物质和生物质能	137	7.3.2 升压式 (Boost) 变换电路	191
5.1.2 生物质能转化利用技术	138	7.3.3 升降压式 (Boost-Buck) 变换电路 与库克电路 (Cuk 电路)	192
5.1.3 中国的生物质资源	139	7.4 直流—交流逆变技术	193
5.2 生物质燃烧发电技术	140	7.5 大功率变流技术	197
5.2.1 生物质燃烧技术	141	7.5.1 电力电子器件的串并联技术	198
5.2.2 固体燃料成型技术	143	7.5.2 多电平变流技术	199
5.2.3 生物质燃烧热发电	145	7.6 典型方案实例	203
5.2.4 生物质燃烧的污染排放 与控制	147	7.6.1 光伏并网逆变器典型方案	204
5.3 生物质气化发电技术	148	7.6.2 不可控整流 + 晶闸管逆变方案	205
5.3.1 生物质的气化技术	148	7.6.3 二极管整流 + Boost + 逆变方案	205
5.3.2 生物质气化发电	152	7.6.4 PWM 整流 + 逆变 (背靠背双 PWM) 方案	206
5.3.3 城市固体废弃物气化 熔融技术	153	思考题与习题	206
5.4 生物质生物转化发电技术	155		

<b>第 8 章 可再生能源发电中的电力</b>	
<b>储能技术</b> .....	208
8.1 电力储能系统的作用和类型 .....	208
8.2 蓄电池储能 .....	211
8.2.1 常用蓄电池的类型 .....	211
8.2.2 蓄电池的等效电路 .....	214
8.2.3 蓄电池的主要特性 .....	214
8.2.4 蓄电池的充放电控制 .....	216
8.3 飞轮储能 .....	217
8.3.1 飞轮储能概述 .....	217
8.3.2 飞轮储能的原理 .....	218
8.3.3 飞轮储能的结构 .....	218
8.4 超导磁体储能 .....	220
8.5 超级电容器储能 .....	222
8.5.1 超级电容器的原理 .....	223
8.5.2 超级电容器的特点和类型 .....	225
8.5.3 超级电容器的应用 .....	226
思考题与习题 .....	229
<b>附录</b> .....	230
<b>附录 A 常用单位</b> .....	230
<b>附录 B 主要符号表</b> .....	231
<b>参考文献</b> .....	234

# 第1章 绪论

## 1.1 能源及其分类

能源是人类赖以生存的重要物质基础，人类社会的发展与人类认识和利用能源的历史密切相关，社会越发展，科技文化越进步，人类对能源的依赖程度就越高。

那么什么是“能源”呢？到目前为止，尚无统一、明确的定义。简单地讲，能源就是能量的来源，即能够提供能量的自然资源及其转化物。从物理学的观点看，能量可以简单地定义为做功的能力。广义而言，任何物质都可以转化为能量，但不同物质转化为能量的数量、转化的难易程度是不同的。人们通常所讲的能源主要是指比较集中而又比较容易转化的含能物质，如煤、石油、太阳、风、电力等。

能源的形式多种多样，可以有不同的分类方法。

### 1.1.1 一次能源与二次能源

按照生产方式不同可将能源分为一次能源和二次能源。一次能源是指各种以原始形态存在于自然界而没有经过加工转换的能源，包括煤炭、石油、天然气以及水能、太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等。

二次能源是指直接或间接由一次能源转化加工而产生的其他形式的能源，如电能、煤气、汽油、柴油、焦炭、酒精、沼气等。除了少数情况下一次能源能够以原始形态直接使用外，更多的情况是根据不同目的对一次能源进行加工，转换成便于使用的二次能源。随着科学技术水平的不断提高和现代社会需求的增长，二次能源在整个能源消费中的比例正不断扩大。其中，电能因清洁安全、输送快速高效、分配便捷、控制精确等一系列优点，成为迄今为止人类文明史上最优质的能源，正在人类社会发展中发挥着越来越重要的作用。

### 1.1.2 可再生能源与非再生能源

按照是否可以再生，一次能源可以分为可再生能源和非再生能源。可再生能源是指在自然界中可以不断得到补充或能在较短周期内再产生，取之不尽、用之不竭的能源，如太阳能、风能、水能、生物质能、地热能、海洋能等。随着人类的利用而逐渐减少的能源称为非再生能源，如煤炭、石油、天然气、核能等，它们经过亿万年形成而在短期内无法恢复再生，用掉一点便少一点。

### 1.1.3 常规能源与新能源

根据开发利用的广泛程度不同，能源可分为常规能源和新能源。常规能源是指开发利用时间长，技术成熟，已经大规模生产并得到广泛使用的能源，如煤炭、石油、天然气、水能和核能等，目前这五类能源几乎支撑着全世界的能源消费。所谓新能源，就是目前还没有被



## 2 可再生能源发电技术

大规模利用、正在积极研究开发的能源，或是采用新技术和新材料，在新技术基础上系统地开发利用的能源。新能源是相对于常规能源而言的，在不同的历史时期和科技水平下，新能源的含义也不相同。当今社会新能源主要指太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等。其中，核能利用技术十分复杂，核裂变发电技术已经广泛使用，而可控核聚变反应至今未能实现，所以，目前主流的观点是将核裂变能看成常规能源，而将核聚变能视为新能源。

表 1-1 给出了能源的常见分类。

表 1-1 能源的常见分类

类 别		可再生能源	非再生能源
一次能源	常规能源	水能	煤炭、石油、天然气、核能（核裂变）
	新能源	风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能	核能（核聚变）
二次能源		焦炭、煤气、电力、氢、蒸汽、酒精、汽油、柴油、重油、液化气、电石等	

由于水力发电在世界上许多国家得到大规模利用，技术相对成熟，已被认为是一种常规发电方式，因此不属于本书的内容。如无特别说明，本书所说可再生能源，均指风能、太阳能、生物质能、地热能和海洋能。

除了上述常见分类外，还可以按照地球上能量的来源不同，将一次能源分为三类。

(1) 来自地球以外天体的能源 人类所需能量绝大部分都直接或间接地来自太阳。各种植物通过光合作用将太阳能转化为化学能存储在植物体内。地球上的煤炭、石油、天然气等化石燃料，均是由埋藏在地下的古代动植物经过漫长的地质年代而形成的，所以，化石燃料本质上是储存下来的太阳能。此外，风能、水能、海浪能、海流能以及生物质能等，也都直接或间接来自太阳。

(2) 地球本身蕴藏的能源 主要指与地球内部的热能有关的能源和原子核能。与地球内部热能有关的能源，称之为地热能，有地下热水、地下蒸汽、岩浆等；原子核能简称核能，是指原子核的结构发生变化时释放出的大量能量，包括地壳中储存的铀、钚等发生裂变反应时的核裂变能，以及海洋中储存的氘、氚、锂等发生聚变时的核聚变能。

(3) 地球与其他天体相互作用所产生的能源 主要指地球与月球以及太阳之间的引力作用所引起的海水规律性的涨落而形成的潮汐能。

从环境保护的角度出发，能源还可以分为污染型和清洁型的。清洁型能源还有广义和狭义之分。狭义的清洁能源仅指可再生能源，包括水能、太阳能、风能等，它们消耗以后不产生或很少产生污染物，并能很快得到补充或恢复。广义的清洁能源除可再生能源外，还包括在生产过程中低污染或无污染的能源，如低污染的天然气，利用洁净能源技术处理过的洁净煤和洁净油等化石能源，以及核能等。

随着人类社会和经济发展对能源需求的日益增加，能源问题已上升为国家安全问题而受到世界各国的高度关注。近年来，许多发达国家都更加重视新能源和可再生能源的研究与开发。相信随着科学技术的不断进步，人类将会开发出越来越多的新能源和可再生能源来代替现有能源，以满足经济发展和人类生存对能源日益增长的需求。图 1-1 所示为世界能源理事会于 1998 年发表的《全球能源前景》中提出的世界能源情景之一，描绘了过去百余年来世界能源利用的变化情况和今后 100 年内能源发展趋势。

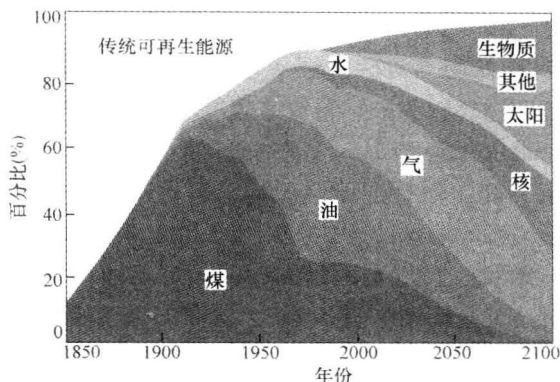


图 1-1 世界能源利用历史与趋势

## 1.2 能源的计量单位与品质评价

### 1.2.1 能源的计量单位

能源的单位也就是能量的单位。在国际单位制中，能量的单位是焦耳，其他常用单位有千卡、千瓦时等，能量单位之间的换算关系参见附录的表 A-2。

由于各种能源的热值是不同的，在统计能源的产量和消费量以及计算能耗指标时，为了便于比较和计算，通常将各种能源折合为“煤当量（标准煤）”或“油当量（标准油）”。标准煤的定义为：凡能产生  $7000\text{kcal}^{\ominus}$  或  $29.3076\text{MJ}$  热量的任何数量的燃料折合为  $1\text{kg}$  标准煤。 $1\text{kg}$  标准油的热当量值为  $41.87\text{MJ}$ 。千克标准煤用符号  $\text{kgce}$  表示，千克标准油用符号  $\text{kgoe}$  表示，也可以用吨标准煤（符号为  $\text{tce}$ ）或吨标准油（符号为  $\text{toe}$ ）及更大的单位计量能源。

西方国家常用“桶”作为石油计量单位。每桶原油约为  $137\text{kg}$ ，折合约  $0.2\text{t}$  标准煤。

常见能源折合标准煤参考系数见附录的表 A-3。

### 1.2.2 能源的品质评价

能源的种类很多，各有优劣。从目前的技术水平来看，能源的品质评价主要有以下技术指标。

(1) 能流密度 在单位体积或面积内从能源所能获得的功率，称为能流密度。显然，如果能流密度很小，就很难作为主力能源了。新能源如风能、太阳能的能流密度较小，大约为  $100\text{W}/\text{m}^2$ ；核能的能流密度就很高；常规能源的能流密度也较大。

(2) 开发费用与设备价格 化石能源和核燃料，从勘探、开采，到加工、运输，需投入大量人力和物力，而风能、太阳能等新能源，由大自然提供，不需要花费太大的开发代价。但风能、太阳能等发电设备的一次性投资很大。根据目前的技术水平，太阳能、海洋能等发电设备的价格为每千瓦上万元到几十万元，陆上风力发电设备已降至每千瓦  $4000$  元甚至更低；石油、天然气的发电设备以及水电设备，为每千瓦几百到几千元，初投资小，资金

<sup>⊖</sup> 非法定计量单位， $1\text{kcal} = 4186.8\text{J}$ 。

周转快。

(3) 供能的连续性和存储的可能性 要求能源可以连续供应,不需要时能存储起来,需要时能立刻发出能量。矿物燃料和核燃料等常规能源容易存储,而太阳能、风能等可再生能源则难以连续供应,也难以存储。

(4) 运输费用与损耗 能源需从产地运送到使用地,运输本身既要消耗能源,也需要投资,因此,远距离运输会影响能源的开发利用。风能、太阳能、地热能等难以运输;石油和天然气可方便地通过管道运输;煤炭因是固体,虽可运输,但较困难;水能本身不可运输,只有在转换成电能后通过高压输电线路输送到远处,但输送损耗和基建投资都较大。

(5) 对环境的影响 在能源利用中,对环境的影响是必须考虑的因素。环境污染的主要来源是耗能过程。燃烧化石能源会产生污染物排放,导致温室效应、酸雨等;核电站存在放射性污染和核废料;可再生能源多数都是无污染的清洁能源。

(6) 储藏量 作为能源的一个必要条件是它的储藏量要足够丰富。例如,我国的煤炭的储藏量世界第三,水利资源也十分丰富,居世界第一位,其他常规能源和新能源也不少。

(7) 能源品位 根据转换为电能的难易程度不同,能源有低品位和高品位之分。例如,水能可直接转化为机械能,再转化为电能;化石能源需先经过燃烧转化为热能,再转化为机械能,然后才转化为电能。可见,水能更容易转化为电能,因此为高品位能源。在比较不同温度的热源时,高温热源被认为是高品位能源,低温能源则是低品位能源。能源品位的高低是相对的,不是绝对的。

## 1.3 开发利用可再生能源的必要性

### 1.3.1 能源形势

能源是人类赖以生存的基础,是现代社会的命脉。能源对于现代社会的重要性如同粮食对于人类的重要性,没有粮食,人类就不能生存;没有能源,现代社会将陷入瘫痪。因此,人类进化的历史,也是一部不断向自然界索取能源的历史。伴随着能源的开发利用,人类社会逐渐地从远古的刀耕火种走向现代文明。从主要的能源使用情况来看,人类社会已经经历了薪柴时代、煤炭时代和石油时代三个能源时期,并正在步入可再生能源时期。

目前,煤炭、石油和天然气三大传统化石能源仍然是世界经济的三大能源支柱,支撑着世界90%左右的能源消费。而这三大化石能源都是不可再生的,用掉一点就少一点。根据世界上通行的能源预测,石油将在未来40年左右枯竭,天然气将在60年左右枯竭,煤炭也只能用100多年。表1-2给出了截止2008年底全世界三大化石能源的探明储量和储采比。

表 1-2 化石能源的探明储量和储采比

种 类	世界储量	中国储量	中国储量比	储采比(中国/世界)
石油	1708 亿 t	21 亿 t	1.2%	11.1/42 年
天然气	185.02 万亿 m <sup>3</sup>	2.46 万亿 m <sup>3</sup>	1.3%	32.3/60.4 年
煤	8260.01 亿 t	1145 亿 t	13.9%	41/122 年

注:资料来源是《BP世界能源统计2009》。

更为重要的是，人类的能源消耗量是随着经济的发展和水平的提高而不断增长的。表1-3给出了过去100年左右的时间内世界人均能耗的增长情况，可见，从1900~2000年的100年内，人均年能耗增长了约6倍。另一方面，世界人口仍在不断增长，预计到2050年将达到100亿左右。因此，化石能源将无法满足人类日益增长的需求。

表1-3 过去100年世界人均能耗的增长情况

年 份	总人口 (亿)	人均能耗/[t标准煤/(人·年)]
1900	15.71	0.493
1950	25.01	1.026
2000	60.50	3.300

在人口众多的我国，能源形势更为严峻，人均能源拥有量仅为世界平均值的一半，化石燃料的储采比远低于世界平均值。表1-2同时列出了我国三大化石能源的储量、占世界储量的比例以及储采比。归纳起来，我国的能源形势具有如下的主要特点。

(1) 人均能源不足 虽然我国的煤炭、天然气等能源的总量位居世界前列，但我国人口众多，约占世界总人口的21%，人均能源资源占有量不足世界平均水平的一半。其中，煤炭占有量相当于世界平均值的50%，石油可采储量仅为世界平均值的10%，用电量也仅为世界平均值的50%。

(2) 能源分布不合理 我国的煤炭、石油、天然气三大化石能源主要集中在东北、华北和西部地区，水资源则主要集中在西南地区，而人口密集、经济发达的东部沿海地区能源严重匮乏。因此，造成了我国“北煤南运”、“西电东送”的不合理格局，既产生了大量的能源运输损耗，又增加了运输成本。

(3) 能源结构不合理 煤炭在我国一次能源生产和消费中所占比重一直保持在70%左右。图1-2所示为2007年我国一次能源的消费结构，可见，煤占69.5%，比世界平均水平高出40多个百分点，而优质能源（石油和天然气）所占比重远低于世界平均水平。大量燃烧煤炭不仅效率低、效益差，而且造成严重的空气污染，带来了许多环境和社会问题。

(4) 能源效率低 我国的能源利用效率远低于西方发达国家，单位产值能耗是世界上最高的国家之一。我国的能源利用效率只有33%，比国际先进水平约低10%。我国每创造1美元GDP所消耗的能源，是美国的4.3倍、德国和法国的7.7倍、日本的11.5倍<sup>①</sup>。能源利用效率低，除了能源技术落后等原因外，也与以煤炭为主的能源结构密切相关。以煤炭为主的能源结构的能源效率比以石油、天然气为主的能源效率低8~10个百分点。能源利用效率低意味着能源的大量浪费，在能源短缺的情况下这种浪费形成更为强烈的反差。国家“十一五”规划纲要提出的2010年单位GDP能耗降低

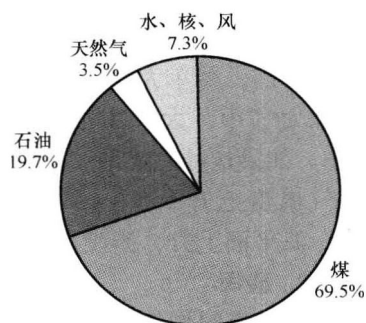


图1-2 2007年我国一次能源的消费结构 (资料来源: 中国能源发展报告2009)

① 《中国能源发展报告2009》，262页。

20%左右以及“十二五”规划的目标说明,转变能源生产和消费模式,改善能源结构,提高能源效率,减少能源消费,是我国一项长期而艰巨的任务。

随着我国社会经济的高速发展,对能源的需求将不断增长。图 1-3 所示为国家环保总局和国家信息中心对我国能源消费总量的统计和预测,2010 年我国的能源需求达到 28.9 亿 t 标准煤,2020 年时将达 41.8 亿 t 标准煤。因此,大力开发利用可再生能源已成为我国一项紧迫的任务。

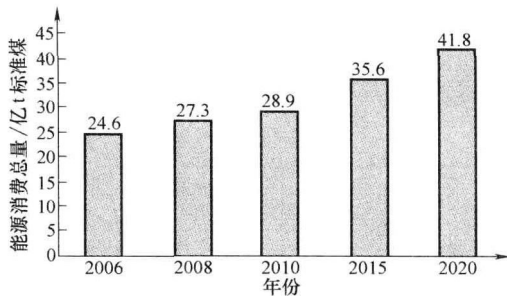


图 1-3 我国能源消费总量的统计和预测

### 1.3.2 环境污染

从农业文明到工业文明,人类的生产和生活方式发生了一场大的革命。机器的采用极大地提高了人类改造自然的能力,使人类在与自然的斗争中取得了辉煌的胜利。然而,在人类文明和工业化不断进步的同时,环境和能源的压力也在急剧增加。人类在进入工业化社会之后,大量使用地球上的石油、煤炭等化石能源,对环境造成了极其严重的危害。化石能源特别是煤炭,从开采、运输到最终的使用,都会带来严重的污染,使得空气中的  $\text{CO}_2$  和  $\text{SO}_2$  急剧增加,造成了酸雨蔓延和温室效应。

#### 1. 温室效应

$\text{CO}_2$  气体允许来自太阳的短波辐射通过,却能够吸收地球发出的红外长波辐射,然后再返回到地球上。过多的  $\text{CO}_2$  等气体就如同温室中的玻璃一样,阻挡地球的热量散发,这就是温室效应。

研究发现,自 19 世纪初的工业革命以来,大气中的  $\text{CO}_2$  含量已经从  $280\text{ppm}^\ominus$  增加到现在的约  $368\text{ppm}$ ,增长了 30% 以上,如图 1-4 所示。目前,每年大约有 260 亿 t  $\text{CO}_2$  被释放到地球大气中,大气中的  $\text{CO}_2$  含量每年增加约 3%。如果这种趋势继续下去,未来 50 年内全球气温将上升  $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$ ,将使极地冰雪融化,海平面上升,淹没全球大多数沿海地区。

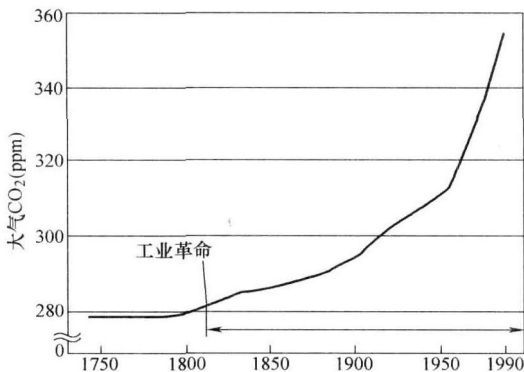


图 1-4 大气中的  $\text{CO}_2$  含量变化

#### 2. 酸雨

化石燃料燃烧过程中排放出大量  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  以及粉尘等污染物。据统计,我国 2008 年  $\text{SO}_2$  排放量为 2321.2 万 t,  $\text{NO}_x$  排放量为 1624.5 万 t, 粉尘排放量 901.6 万 t。这些污染物会形成酸雨,不仅导致森林、庄稼毁坏,土壤板结酸化,而且污染水源、动物和人,对人类健康构成直接威胁。

$\ominus$   $1\text{ppm} = 10^{-6}$ , 在此处表示每立方米的大气中含有污染物的体积数(立方厘米)。

我国以煤炭为主要能源，是大气污染最严重的国家之一，主要污染物的排放量居世界第二，仅次于美国。

因此，从可持续发展的角度看，发展清洁的可再生能源以及化石能源的清洁利用技术，是目前研究的重点和今后发展的方向。

## 1.4 可再生能源发电的基本特点和发展概况

电能是迄今为止人类历史上最优质的能源，它不仅易于实现与其他能量（如机械能、热能、光能等）的相互转换，而且容易控制与变换，便于大规模生产、远距离输送和分配，同时还是信息的载体，在现代人类生产、生活和科研活动中发挥着不可替代的作用。因此，可再生能源发电便成为可再生能源开发利用的主要方式。

如表 1-1 所列，可再生能源主要指风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能等。可再生能源发电的优点是，没有或很少有污染，可以循环使用，分布广泛，随处可得；其中风力发电和太阳能光伏发电不需要水，对于干旱缺水地区是尤为突出的优点，而火力发电（包括核电）需要大量的水。

表 1-4 给出了不同发电方式 CO<sub>2</sub>排放量的对比。

表 1-4 不同发电方式 CO<sub>2</sub>排放量的对比 [单位:g/(kW·h)]

燃煤发电	燃油发电	液化天然气发电	风力、太阳能发电
246.32	188.42	128.86	0

可再生能源发电的缺点是，能流密度低，随机性和间歇性强，因此，发电设施往往占地面积大，需要大容量的储能装置或备用电源，导致初投资大；风力发电、太阳能光伏发电等有视觉和/或噪声污染，影响周围居民生活和鸟类生存；生物质能会散发异味；海上风电会对海上油气开采、航运等产生不利影响等。

### 1.4.1 全球可再生能源发电发展概况

迄今为止，世界可再生能源的发展经历过三次高潮。第一次是 1973 年的石油危机以后，美、日、西欧等发达国家和地区为应对高油价对经济的沉重打击，建立了可再生能源研究机构，并制订相应的专项计划，加强可再生能源的研究与应用，力图减小对常规能源的依赖。但受当时技术水平的限制，可再生能源转换效率低、成本高，很难与传统化石能源竞争，可再生能源如“昙花一现”。第二次高潮以 1992 年在巴西里约热内卢召开的环境与发展大会上通过的《里约宣言》和《21 世纪议程》等重要文件为标志，确定了相关环境责任原则，可持续发展的观念逐渐形成，可再生能源的开发利用再次提上议事日程。第三次高潮是进入 21 世纪后，全球气候问题日益凸显，能源供需矛盾日益加剧，世界各国从可持续发展的角度和保障能源供应安全的角度，调整了各自的能源政策，进一步将可再生能源发展纳入国家发展战略。2005 年 2 月 16 日《京都议定书》强制生效，其确立的到 2010 年所有发达国家 CO<sub>2</sub> 等六种温室气体的排放量，要比 1990 年减少 5.2% 的目标，已经促使承担减排义务的各国为完成温室气体减排，加大了对可再生能源的支持力度，使可再生能源开始蓬勃发展。

在可再生能源发电领域，欧洲、美国、日本等发达国家和地区走在世界前列。例如，在风力发电方面，欧洲是领跑者。早在 2005 年，位列世界风电装机容量前 5 位国家是德国、西班牙、美国、印度、丹麦，装机容量均在 3000MW 以上，其他一些国家包括意大利、英国、荷兰、日本、葡萄牙等的风电装机容量也都达 1000MW 以上。在 2005 ~ 2009 年的 5 年内，世界风电装机容量的平均年增长率为 33%。截止 2010 年底，全球累计风电装机容量已达 199.5GW。图 1-5 给出了最近 15 年来全球风电装机容量的增长情况。从累计装机来看，2010 年中国已超过美国成为世界第一的装机大国。此外前 10 名还包括美国、德国、西班牙、印度、法国、英国、意大利、加拿大、葡萄牙，如图 1-6 所示。

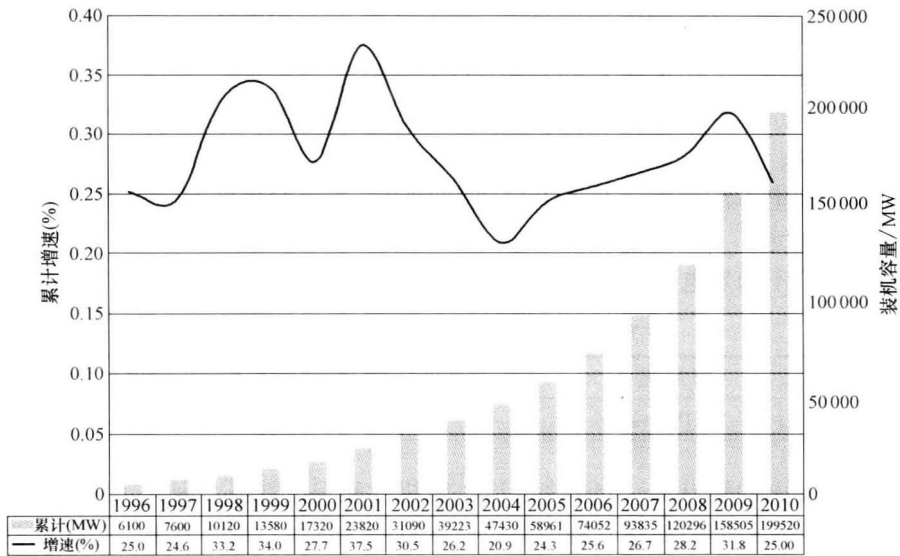


图 1-5 近 15 年全球风电装机容量的增长情况

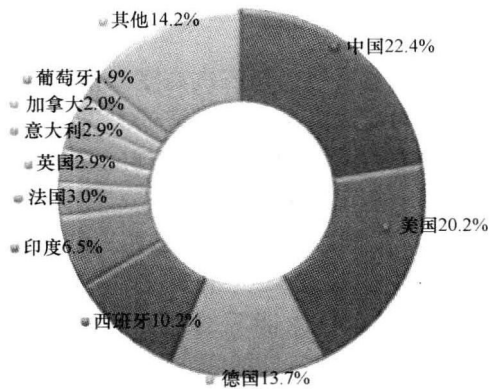


图 1-6 2010 年底全球风电累计装机前 10 名国家

需要指出的是，虽然近年来风力发电装机容量增长迅猛，但风力发电量占总发电量的比例仍然很小。截止到 2010 年底，全球风力发电量为 430TW·h，仅占全球电力供应总量的 2.5%。不过，在欧洲的某些国家，风力发电已成为重要的电力来源之一，例如丹麦 21% 的

电力来自风能，葡萄牙为18%，西班牙为16%，德国为9%。而在中国，风电提供了1.2%的电力供应。

在太阳能光伏发电领域，欧洲同样处于世界前列。早在2000年，德国率先实施“上网电价”法，大大拉动了德国国内光伏市场。欧洲其他国家也效仿德国，先后开始实施“上网电价”法，使得整个欧洲的光伏市场迅速上升，带动了全球光伏市场的快速增长。2010年，全球光伏市场延续了之前强劲的增长态势，光伏市场新增15.8GW，年增速超过100%，全球新增光伏市场迈进千万千瓦的时代。图1-7所示为近10年来全球太阳能光伏发电装机容量增长情况。2010年全球光伏市场分布如图1-8所示。其中，德国是世界最大的光伏市场，德国2010年累计安装量接近6.7GW，占世界市场份额的42.5%。

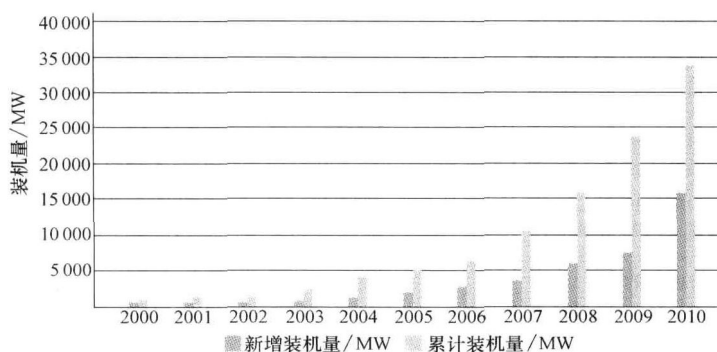


图 1-7 全球太阳能光伏发电装机容量增长情况

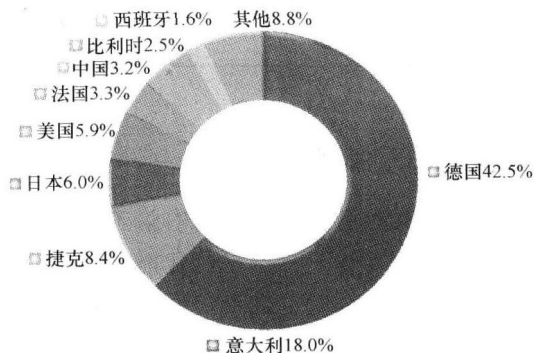


图 1-8 2010 年全球光伏市场分布

在太阳能热发电方面，美国、以色列、西班牙等国处于领先地位。早在20世纪80年代，美国加州就建设了10座总装机450MW的太阳能发电站，进入21世纪以来，美国又建设了1MW的太阳能热发电站，西班牙也先后建造了两座50MW的太阳能热发电站。此外，德国、意大利、澳大利亚等国也看好太阳能热发电的发展前景，投入了大量资金和研究项目，发展此项技术。

海洋占地球表面的71%，资源十分丰富。早在20世纪初欧洲的德国、法国等就开始研究开发潮汐发电。德国于1912年建成了世界上最早的潮汐发电站；1995年英国建成了2MW



的波浪发电站等。海洋能的利用虽然问题很多，难度很大，但是随着技术的发展，人类开发利用海洋能的前景越来越广阔。

从世界可再生能源的利用和发展趋势看，风能、太阳能和生物质能发展最快，产业前景最好。其中，风能是近几年世界上增长最快的能源，而太阳能、生物质能、地热能等其他可再生能源发电成本也已接近或达到大规模商业化生产的要求，为可再生能源的进一步推广利用奠定了基础。表 1-5 归纳了主要可再生能源发电技术现状及成本特点分析。

表 1-5 全球主要可再生能源发电技术现状及成本特点分析

技术名称	特点	成本/[美分/(kW·h)]	成本走向及降低可能
陆上风电	风机功率：1~3MW 风轮直径：60~100m	4~6	全球装机容量每翻一番，成本降低12%~18%
近海风电	风机功率：1.5~5MW 风轮直径：70~125m	6~10	市场依然较小。未来将通过培育市场及改良技术来降低成本
太阳能光伏发电	电池类型及效率： 单晶硅：17% 多晶硅：15% 薄膜：10%~12%	20~40	全球装机容量每翻一番，成本降低20%，每年约降5%
太阳能热发电	适合电站容量： 塔式：30~200MW 槽式：30~80MW 盘式：7.5~25MW	12~18（槽式）	通过扩大规模，改进技术，成本将进一步降低
生物质发电	电站容量：1~20MW	5~12	稳定
地热发电	电站容量：1~100MW	4~7	通过先进的勘探技术、低廉的钻井手段和高效的热利用，成本可进一步降低

注：资料来自《中国能源发展报告 2009》。

## 1.4.2 中国可再生能源发电发展概况

如前所述，我国传统化石能源相对贫乏，人均占有量不到世界平均水平的二分之一。因此，对于中国来说，大力开发和利用可再生能源是优化能源结构、改善环境、促进经济社会可持续发展的重要战略措施。我国地域辽阔，地形多变，蕴藏着极其丰富的可再生能源和巨大的开发潜力。与西方发达国家相比，虽然我国在可再生能源的开发利用方面起步较晚，技术较为落后，但近年来政府给予了高度重视，采取了一系列法律、经济和技术措施，促进了我国可再生能源在“十一五”期间较为迅速地发展。特别是 2006 年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，从法律上确立了可再生能源开发利用的地位，我国可再生能源的发展进入了一个新的历史阶段，国家在“十二五”规划中又进一步将可再生能源列为战略性新兴产业，进一步推动了可再生能源事业的快速发展，并取得了一系列成就。其中又以风力发电、太阳能光伏发电等发展尤为突出。

### 1. 风力发电

我国的大规模并网风电从 20 世纪 80 年代开始，“十五”期间进入快速发展期，到“十一五”更是呈现出井喷式发展，总装机容量从 2005 年的 1266MW 增长到 2010 年的