

清华大学能源动力系列教材

可再生能源 及其利用技术

Renewable Energy Sources
and Utilization Technology

王淑娟 编著

清华大学出版社

清华大学能源动力系列教材

可再生能源 及其利用技术

Renewable Energy Sources
and Utilization Technology

王淑娟 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

可再生能源包括太阳能、生物质能、风能、水能、地热能和海洋能等,由于具有低污染、可再生等特点,越来越受到关注。本书涉及了所有的非水可再生能源,围绕着相关的基础知识和主要利用技术,对每种可再生能源进行了详细的介绍,涉及资源状况、发展现状和前景以及经济环境特性等方面。

本书内容全面,知识性强,可以作为高等学校能源相关专业的教材,也可供从事能源领域相关工作的专业技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源及其利用技术/王淑娟编著.--北京:清华大学出版社,2012.12

(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 978-7-302-30961-1

I. ①可… II. ①王… III. ①再生能源—高等学校—教材 IV. ①TK01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 293980 号

责任编辑:杨 倩 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市李旗庄少明印装厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:18 字 数:367 千字

版 次:2012 年 12 月第 1 版 印 次:2012 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:35.00 元

前言

FORWARD

随着人类社会的发展,化石能源被大量地开采和利用,随之而来的是资源的枯竭和环境的污染,人类面临着资源和环境两大难题。可再生能源由于具有可再生、低污染的特点,受到越来越多的重视。各国的可再生能源利用规模在不断扩大,可再生能源的利用技术也在不断地发展和完善。

可以说,可再生能源是既古老又年轻的能源形式。说它古老,是因为可再生能源一直存在,并且人类一直在或多或少地利用它;说它年轻,是因为现代的可再生能源技术发展的时间还很短,还很不成熟,人类还需要更深入地认识它,从而能够更好地利用它。

为此,很多高校都开设了可再生能源的相关课程,培养了一批又一批的可再生能源工作者,但是,教材比较缺乏,给广大教师和学生带来很大的不便。因此,我们编写了这本书。

本书包括太阳能、生物质能、风能、地热能、海洋能等几种可再生能源,对其基本理论和主要利用技术进行了介绍,同时也涉及资源状况、发展现状和前景、经济环境特性等方面。

全书共分10章,第一章是太阳能基础,第二章是太阳能集热器,第三章是太阳能的热利用,包括低温利用和太阳能热发电,第四章是太阳能光电转换,第五、六章是生物质能,分别介绍生物质能的物理和热化学转化,以及生物学转化,第七、八章是风能,分别介绍风能的基础理论和风能的利用,第九章是地热能,第十章是海洋能,包括潮汐能、波浪能、海流能、海洋热能和盐差能。本书在编写过程中得到了李定凯教授的大力支持,并对全书进行了审核,在此表示由衷的感谢。

本书在编写过程中,由于作者水平和掌握材料所限,难免有不足和欠妥之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2012.9

目 录

概论	1
第一节 能源的基本概念	1
一、能源的定义	1
二、一次能源的分类	1
第二节 能源形势	3
一、概况	3
二、我国能源基本国情	5
第三节 可再生能源的利用	6
一、可再生能源利用情况	6
二、我国可再生能源发展概况	7
习题	8
第一章 太阳能基础	9
第一节 概述	9
一、太阳能的特点	9
二、太阳能利用的方式与途径	10
第二节 太阳几何学	11
一、地平坐标系	11
二、赤道坐标系(地心坐标系)	12
三、坐标变换	13
四、太阳入射角	14
第三节 太阳辐射	15
一、基本概念	15
二、太阳辐射在大气中的衰减	15
三、地球表面的太阳辐射	17
四、倾斜面上的总辐射	17
五、斜面上的全天日照量	21
第四节 我国的太阳能资源	21
习题	22



第二章 太阳能集热器	23
第一节 平板型集热器	23
一、集热器的结构	23
二、光学特性	25
三、平板型集热器的能量分析	26
四、集热器的效率	30
第二节 真空管集热器	34
一、全玻璃真空管集热器	35
二、热管式真空管集热器	35
三、其他形式金属吸热体真空管集热器	37
四、各种集热器的性能的比较与选择	38
第三节 聚光型集热器	39
一、聚光型集热器的构造	39
二、聚光比和最高集热温度	40
三、聚光型集热器的能量损失	42
四、有效热功率和效率	45
五、聚光型集热器和平板型集热器的比较	46
习题	47
第三章 太阳能的热利用	48
第一节 太阳能热水系统	48
一、类型	48
二、系统设计	49
第二节 太阳能干燥系统	52
一、干燥过程及机理	53
二、太阳能干燥系统介绍	55
第三节 太阳能采暖系统	59
一、被动式太阳房的性能指标	61
二、被动式太阳房的热性能分析	63
第四节 太阳能温室	66
一、温室热平衡	66
二、温室设计	68
三、几种温室的结构及特点	69

第五节 其他太阳能的低温利用	71
一、太阳能制冷与空调	71
二、太阳能水泵	73
第六节 聚焦式太阳能热发电系统	74
一、太阳能热发电系统的工作原理	74
二、太阳能热发电系统的组成	75
三、太阳能热发电系统的基本类型	77
习题	83
第四章 太阳能光电转换	84
第一节 概论	84
第二节 光电转换的理论基础	85
一、半导体的内部结构和导电性	86
二、半导体禁带宽度和光学特性	87
三、半导体的掺杂特性	89
四、p-n 结	90
五、太阳能电池的工作原理	91
第三节 太阳能电池的基本特性	92
一、太阳能电池等效电路	92
二、伏安特性和转换效率	93
三、影响太阳能电池转换效率的因素	96
第四节 几种典型的太阳能电池	99
一、晶体硅太阳能电池	99
二、薄膜太阳能电池	100
三、几种特殊的太阳能电池	100
第五节 太阳能光伏系统	101
一、太阳能电池的连接	101
二、太阳能光伏系统的构成	102
三、太阳能电池系统的应用	102
习题	104
第五章 生物质能转化的物理和热化学方法	105
第一节 概述	105
一、生物质的定义和分类	105

	二、生物质的结构	105
	三、生物质的化学特性	109
	四、生物质的物理特性	111
	五、生物质能转化技术分类	113
第二节	生物质能的物理转化方法	113
	一、压缩成型	113
	二、生物质固硫型煤技术	115
	三、压榨技术	116
第三节	生物质的燃烧	119
	一、燃烧过程	119
	二、省柴灶	120
	三、现代化燃烧技术	122
	四、生物质与煤的混合燃烧技术	125
	五、生物质燃烧发电/热电联产	126
第四节	生物质汽化	129
	一、概述	129
	二、汽化的基本原理	130
	三、汽化技术的分类	132
	四、生物质汽化炉	133
	五、生物质燃气	137
	六、生物质燃气的主要用途	137
第五节	生物质热解	138
	一、热解的概念	138
	二、热解过程和原理	139
	三、热解产物的特性	139
第六节	生物质直接液化	141
	一、直接液化工艺	141
	二、液化油的特性	141
	习题	142
第六章	生物质能转化的生物学方法	143
第一节	概述	143
第二节	沼气的生产	144
	一、沼气发酵的基本过程	145

二、沼气发酵的工艺条件	149
三、沼气发酵工艺和发酵装置	153
四、沼气利用技术	158
五、沼气的效益	161
第三节 燃料乙醇的生产	163
一、酒精发酵	164
二、纤维素降解制酒精	167
三、酒精蒸馏	168
四、酒精用作内燃机燃料	171
习题	173
第七章 风能的基本理论	174
第一节 概述	174
第二节 风的形成	175
一、形成风的力	176
二、大气环流	179
三、区域风	180
第三节 风的基本特征	181
一、风向	181
二、风速	181
三、风的能量	186
四、风的测量	187
第四节 升力和阻力	191
第五节 风能资源	192
一、风能资源的估计	192
二、我国的风能资源区划	193
习题	194
第八章 风能的利用	195
第一节 风力机的结构	195
一、风力机的分类	195
二、风力机的组成及各部件的功用	198
三、风轮	199
四、调向机构	200

	五、调速(限速)机构	200
第二节	风轮的基本理论	204
	一、风轮功率、轴向力及扭矩	204
	二、尖速比、风轮面积与风轮实度	206
	三、风轮的动力特性	207
第三节	风力发电	209
	一、风力发电的类型	209
	二、海上风力发电	211
	三、风力发电的环境影响	213
	四、我国的风力发电	214
第四节	风力机的其他应用	216
	一、风力提水	216
	二、风力致热	216
	三、风力助航	218
	习题	218
第九章	地热能	220
第一节	地热的来源及分类	220
	一、地热之库——地球	220
	二、地热显示	222
	三、地热的来源	223
	四、地球内部热的传递	224
	五、地热资源	225
第二节	地热发电	227
	一、干蒸汽发电系统	228
	二、闪蒸式发电系统	229
	三、双循环发电系统	231
	四、全流发电系统	232
	五、干热岩发电系统	233
第三节	地热能的直接利用	234
	一、地热供热	236
	二、地热在工业方面的利用	237
	三、地热在农业方面的应用	238
	四、地热在旅游方面的应用	240

第四节 地热资源开发和保护.....	240
一、地热田的开发效应.....	240
二、地热回灌.....	241
习题.....	243
第十章 海洋能.....	244
第一节 潮汐能.....	245
一、月亮潮.....	245
二、太阳导致的潮汐及综合效果.....	247
三、潮汐的功率.....	249
四、潮汐发电.....	251
第二节 波浪能.....	253
一、波浪的产生和发展.....	254
二、波浪的运动.....	254
三、波浪能及功率.....	257
四、波力发电.....	259
五、波浪能的聚集.....	264
第三节 海流能.....	265
第四节 海洋热能.....	267
第五节 盐差能.....	269
一、概况.....	269
二、盐差能发电.....	270
习题.....	272
参考文献.....	273

概 论

第一节 能源的基本概念

能源是社会存在与发展的基础,人类的任何生产与生存活动都离不开能源。

一、能源的定义

关于能源的定义,目前约有 20 种。例如,《科学技术百科全书》说“能源是可从其获得热、光和动力之类能量的资源”;《大英百科全书》说“能源是一个包括所有燃料、流水、阳光和风的术语,人类用适当的转换手段便可让它为自己提供所需的能量”;《日本大百科全书》说“在各种生产活动中,我们利用热能、机械能、光能和电能等来做功,可以用来作为这些能量源泉的自然界中的各种载体,称为能源”;我国的《能源百科全书》说“能源是可以直接或经转换提供人类所需的光、热、动力等任一形式能量的载能体资源”。可见,能源是一种呈多种形式的,且可以相互转换的能量的源泉。

“能”的含义是“做功的本领”,是“能量”的简称。能源即为能量的来源,是含能体或能量过程。含能体主要指比较集中而又较易转化的含能物质,比如煤炭、石油、天然气等;能量过程指物质在运动或转化过程中产生的能量,如水的势能落差运动产生水能,空气运动产生风能,原子核裂变或聚变产生核能等。

能源分为一次能源和二次能源。一次能源是自然界以自然形态存在的、可以利用的能源,其中有些可以直接利用,但通常需要经过适当加工转换后才能利用。由一次能源加工转换后的能源称为二次能源。下面所说能源,如无特殊说明,皆指一次能源。

二、一次能源的分类

能源按其来源,可以分为三大类。第一类是来自地球以外的天体的能源,包括太阳辐射能和各种宇宙射线,其中太阳辐射能包括太阳直接辐射能,以及太阳辐射经过生物转化、空气转化、水转化、热转化产生的能量形式。第二类是来自地球内部的能源,包括煤炭、石油、天然气、地热能和核原料等。第三类是来自地球和其他天体的作用产生的能量,如潮汐能等。

按能源使用消耗后的可恢复性,可以分为可再生能源和不可再生能源。可再生能源

指在自然界中不会随本身的转化或人类利用而日益减少,能有规律地得到补充的能源,包括太阳能、生物质能、风能、水能、地热能和海洋能。不可再生能源指经过亿万年形成的、使用后逐渐减少、短期内无法恢复的能源,如煤炭、石油、天然气和核原料等。表 0-1~表 0-3 列出了目前世界及部分国家的煤炭、石油和天然气的探明可采储量情况。

表 0-1 世界及部分国家的煤炭探明可采储量(2011 年)

国 家	可采储量/亿 t	占世界总储量比例/%
世界	8609.38	100.0
美国	2372.95	27.6
俄罗斯	1570.1	18.2
中国	1145.0	13.3
澳大利亚	764.0	8.9
印度	606.0	7.0
德国	406.99	4.7
乌克兰	338.73	3.9
哈萨克斯坦	336.0	3.9
南非	301.56	3.5

表 0-2 世界及部分国家的石油探明可采储量(2011 年)

国 家	可采储量/亿 t	占世界总储量比例/%
世界	2343	100.0
委内瑞拉	463	17.9
沙特阿拉伯	365	16.1
伊朗	208	9.1
伊拉克	193	8.7
科威特	140	6.1
阿联酋	130	5.9
俄罗斯	121	5.3
美国	37	1.9
中国	20	0.9

表 0-3 世界及部分国家的天然气探明可采储量(2011 年)

国 家	可采储量/ 10^{12} m^3	占世界总储量比例/%
世界	208.4	100.0
俄罗斯	44.6	21.4
伊朗	33.1	15.9
卡塔尔	25.0	12.0

续表

国 家	可采储量/ 10^{12}m^3	占世界总储量比例/%
美国	8.5	4.1
沙特阿拉伯	8.2	3.9
阿联酋	6.1	2.9
中国	3.1	1.5

注：以上三表的数据均来自 BP Statistical Review of World Energy, 2012。

考虑一种能源是否为可再生能源,是指在一定的时间尺度下,和化石燃料相比,所有的可再生能源都能在较短的时间内得到补充。但是在很短的时间尺度上,即使是可再生能源也是会枯竭的。这一特点在我们考虑怎样以及何时开发和利用可再生能源时是非常重要的。

随着可持续发展问题的提出,出现了一个新的能源概念——可持续能源(sustainable energy)。可持续能源的定义为:为获取能源密集型产品并服务社会大众,同时为子孙后代的生存发展而保护地球所建立起来的一种动态和谐的、长远持续的能源开发和利用模式。为了实现可持续能源,需要发展一系列的能源技术及能源密集型技术的战略、政策和实施方案,包括提高能源生产和使用的效率,降低能源消耗,可再生、循环的能源技术,公众可以接受的核能技术,以环境友好的方式利用化石燃料等。

第二节 能源形势

一、概况

世界能源消费以石油、煤炭、天然气等化石能源为主。表 0-4 列出了 2011 年一些国家及世界的一次能源消费量。

表 0-4 2011 年一些国家及世界的一次能源消费量

Mtoe^①

国家	石油	天然气	煤炭	核电	水电	可再生能源	总计
美国	833.6	626.0	501.9	188.2	74.3	45.3	2269.3
加拿大	103.1	94.3	21.8	21.4	85.2	4.4	330.3
墨西哥	89.7	62.0	9.9	2.3	8.1	1.8	173.7
俄罗斯	136.0	382.1	90.9	39.2	37.3	0.1	685.6

① 1 Mtoe 表示百万吨油当量。

续表

国家	石油	天然气	煤炭	核电	水电	可再生能源	总计
日本	201.4	95.0	117.7	36.9	19.2	7.4	477.6
意大利	71.1	64.2	15.4	0	10.1	7.7	168.5
巴西	120.7	24.0	13.9	3.5	97.2	7.5	266.9
法国	82.9	36.3	9.0	100.0	10.3	4.3	242.9
德国	111.5	65.3	77.6	24.4	4.4	23.2	306.4
英国	71.6	72.2	30.8	15.6	1.3	6.6	198.2
荷兰	50.1	34.3	7.8	0.9	—	2.7	95.8
中国	461.8	117.6	1839.4	19.5	157.0	17.7	2613.2
印度	162.3	55.0	295.6	7.3	29.8	9.2	559.1
世界	4059.1	2905.6	3724.3	599.3	791.5	194.8	12 274.6

注：数据来自 BP Statistical Review of World Energy, 2012。

这种能源消费面临两大难题：资源问题和环境问题。随着世界经济的发展和经济规模的不断扩大，能源消耗量不断增加，石油、天然气、煤炭等不可再生能源面临资源枯竭的问题。同时，大量的化石能源的使用，带来了严重的环境问题，如大气污染、水体污染、土地荒漠化、森林锐减、臭氧层破坏、气候变暖、酸雨蔓延、生物多样性减少、固体废弃物污染等。

资料 0-1 亚洲褐云(Asia brown cloud, ABC)

20 世纪 90 年代初期，有关人士在南亚上空距地面 14km 处发现了一片 3km 厚的褐色云层，推测它可能对亚洲乃至全球的气候产生影响。这一发现引起了联合国环境规划署的高度重视。1995 年，亚洲开发银行资助 4000 万美元，由联合国环境规划署牵头，成立了一个由 200 多名来自世界各国的科学家组成的研究小组，对这块云层进行研究。他们经过 5 年的努力，使用船只、飞机、人造卫星等手段，初步揭开了“亚洲褐云”的秘密。

据研究小组成员、德国马克斯-普朗克化学研究所的科学家保罗·克鲁森介绍，“亚洲褐云”由灰尘、煤烟、酸性物及其他有害悬浮粒子组成。研究证实，亚洲受褐云遮蔽地区的日照量减少了 10%~15%，温度变低，相反低层大气的温度却升高了，这样冬季季风的风向被改变，造成巴基斯坦西北部、阿富汗、中国内地西部等地区和中亚西部的降雨量减少了 20%~40%，而亚洲大陆东部地区、孟加拉国、尼泊尔及印度东北多省则洪水泛滥。还损害成千上万人的呼吸系统健康，甚至引起死亡。

科学家们认为，“亚洲褐云”可能和地球温室效应一样是影响地球大气的罪魁祸首，但其究竟会给世界造成何种程度的影响尚难定论，有待进一步研究和观察。科学家还指出，“亚洲褐云”的成因中有 80% 是人为因素。

二、我国能源基本国情

我国能源总体具有以下特点。

第一,煤炭资源总量相对丰富,石油、天然气资源缺乏;人均能源资源量严重不足。由表 0-1~表 0-3 可以看出,我国探明的煤炭可采储量 1145 亿 t,约占世界总量的 13.3%,居世界第三位;探明的石油可采储量 20 亿 t,占世界总量的 0.9%;天然气可采量 $3.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占世界总量的 1.5%。但从人均能源资源占有量来看,只是世界平均水平的 1/2,仅为美国的 1/10。

第二,能源资源分布很不均匀。煤炭资源大部分集中在华北,石油资源偏于东北,天然气资源偏于西北,水力资源则偏于西南,而人口密集、工业发达的东部和南部地区则能源资源很少。因此,我国呈现北煤南运、西气东输、西电东送等总体的能源输送态势,不但增加了能源开采利用成本,也对环境造成了额外的不利影响。

第三,我国能源消费以煤炭为主。如 2005 年,我国能源消费总量 22.3319 亿 t 标准煤,其中煤炭占 68.9%(图 0-1),远远超过其他一次能源消费量。而大量消费煤炭造成了严重的 SO_2 、 NO_x 、酸雨、可吸入颗粒物、有害重金属等污染问题,还排放大量的 CO_2 导致温室效应。在我国,不适当的煤炭资源开发也给矿区的地质和地理生态环境带来不利影响,比石油和天然气开发要严重得多。据 1995 年世界能源研究所和中国环境监测总站测算,环境污染和生态破坏已成为危害人类健康、制约经济和社会发展的的重要因素。1995 年在我国 SO_2 和酸雨“两控区”内因 SO_2 排放就造成 1138.8 亿元的经济损失,占当年全国 GNP 的 1.98%。

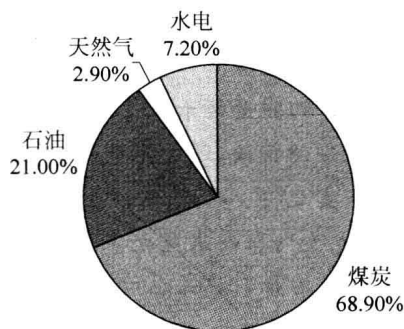


图 0-1 我国 2005 年商品能源消费总量构成

注: 2005 年我国核电机组发电 530.88 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$, 仅占全国总发电量的 2.2%, 在能源消费总量中比例很小。

第四,可再生能源利用水平低。可再生能源以其可再生、低污染等特点,越来越受到各国的重视。近年来,我国可再生能源的开发和利用发展很快,但和发达国家相比,总体的水平还比较落后。

资料 0-2 “两控区”

1995 年 8 月,全国人大常委会通过了新修订的《中华人民共和国大气污染防治法》,其中明确规定要在全中国划定酸雨控制区和 SO_2 污染控制区,以求在两控区内强化对酸雨和 SO_2 的污染控制。

酸雨控制区

一般将 pH 值小于 5.60 的降水叫酸雨,将年均降水 pH 值小于 5.60 的地区叫酸雨地区。目前,我国年均降水 pH 值低于 5.60 的地区已达国土面积 40% 左右。酸雨是区域问题。大部分地区的酸雨仅仅是少部分城市排放的酸性物质经大气长程传送形成的,只要消灭了少数城市的污染源,大面积酸雨现象自然会消失。所以,酸雨控制区应不同于酸雨地区,要比酸雨地区小得多。当降水 pH 值低于 4.60 时,将会对森林、农作物和材料产生损害。西方发达国家多将降水 pH 值低于 4.60 作为受控对象的标准。除了这一标准外,还要考虑生态系统对酸雨的承受能力问题。不同地区的土壤和植被等生态系统对硫沉降的承受能力不同,硫沉降负荷反映了该承受能力之大小,当区域的实际硫沉降超过对硫沉降的承受能力时就应予以控制。此外,酸雨控制区应包括酸雨污染最严重地区及其周边 SO_2 排放最大区域。依此标准,我国酸雨控制地区的面积约为 80 万 km^2 ,占国土面积的 8.40%。它主要包括上海市、重庆市和浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、四川、贵州、云南等省、市、自治区的部分城市地区。

SO_2 控制区

南方的酸雨还和北方 SO_2 的大量排放有关,仅控制酸雨地区的酸性物质排放而忽略北方 SO_2 的排放,还是不能有效地控制酸雨。 SO_2 年平均浓度的二级标准是 $0.06\text{mg}/\text{m}^3$,在此浓度之下,人群在环境中长期暴露将不受危害; SO_2 日平均浓度三级标准是 $0.25\text{mg}/\text{m}^3$,在此浓度之下,人群在环境中短期暴露不受急性健康损害。环境空气中 SO_2 的主要危害是引起人体呼吸系统疾病,导致死亡率增加。 SO_2 污染主要来自燃煤,集中在城市,应以城市特别是大城市为控制单元。依此标准,我国 SO_2 污染控制区面积为 29 万 km^2 ,占国土面积 3%,主要包括北京市、天津市及河北、山西、内蒙古、辽宁、吉林、江苏、河南、陕西、甘肃、宁夏、新疆等省、市、自治区的部分城市。

在“两控区”内,2000 年 SO_2 浓度达到国家空气质量二级标准的城市有 119 个,占“两控区”地级城市的 69.6%;超过二级标准但达到三级标准的城市有 24 个,占 14%;超过三级标准的城市有 28 个,占 16.4%。

第三节 可再生能源的利用

一、可再生能源利用情况

如前所述,可再生能源具有可再生、低污染等特点,开发利用可再生能源是减轻资源、环境压力,实现可持续发展的重要途径之一。表 0-5 和表 0-6 列出了全球可再生能源的资源量和利用状况。由两表可以看出,可再生能源的资源总量巨大,但利用规模还很小,