



新能源系列 —— 风能专业规划教材

FENGLI
FADIAN
JICHU

风力发电基础

卢为平 主编

张翠霞 丁宏林 副主编



化学工业出版社



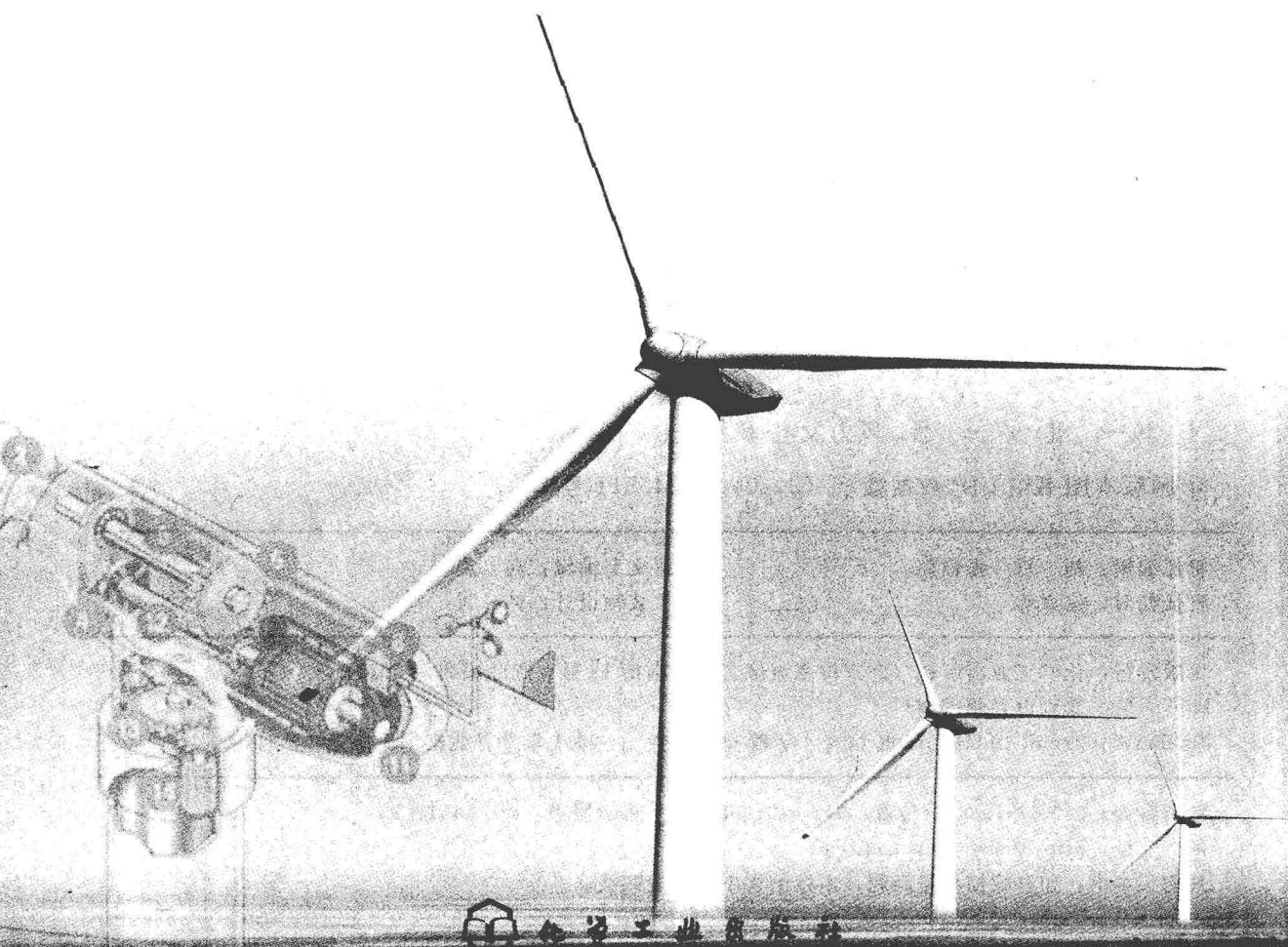
新能源系列 —— 风能专业规划教材

FENGLI
FADIAN
JICHU

风力发电基础

卢为平 主编

张翠霞 丁宏林 副主编



本书主要介绍了风力发电基础理论、水平轴与垂直轴风力发电机、独立运行与互补运行风力发电系统、并网运行风力发电系统,最后介绍了风力发电相关标准。本书深入浅出,通俗易懂,学以致用。

本书可作为职业院校风能与动力技术专业、风能与机械等专业教材,也可作为其他相关专业课程的教学参考书,还可以作为风力发电知识的普及读本,为从事风力发电领域的工程技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电基础/卢为平主编. —北京:化学工业出版社, 2011.1
(新能源系列)
风能专业规划教材
ISBN 978-7-122-10131-0

I. 风… II. 卢… III. 风力发电-教材 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 245511 号

责任编辑:刘哲 张建茹
责任校对:徐贞珍

文字编辑:高震
装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张14½ 字数367千字 2011年2月北京第1版第1次印刷

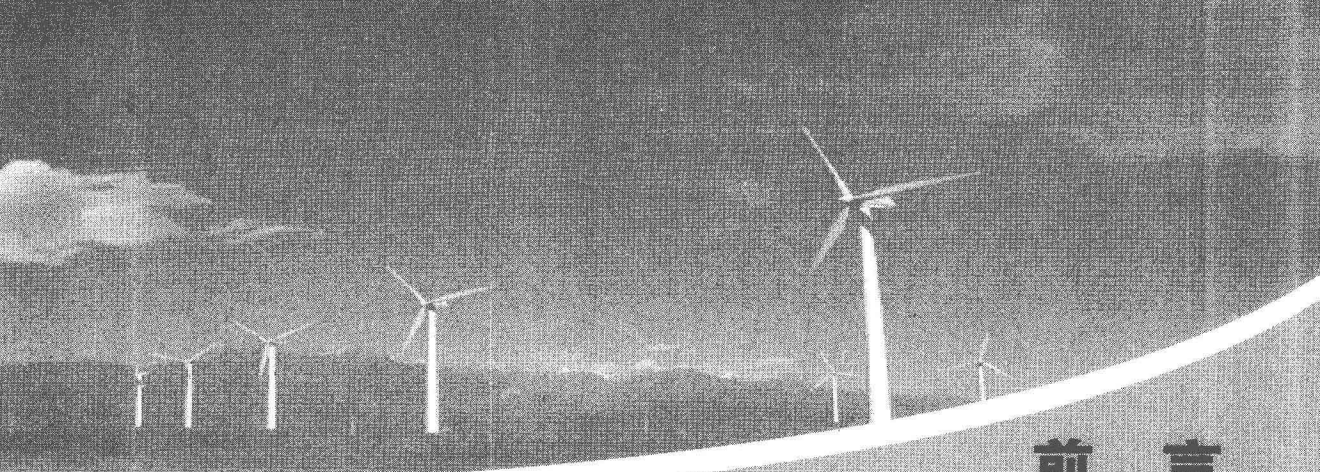
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 30.00 元

版权所有 违者必究



前言



能源是整个世界发展和经济增长最基本的驱动力，是人类赖以生存的基础。在全球经济高速发展的今天，能源短缺与环境污染是人类面临的两大紧迫问题。20 世纪 70 年代“石油危机”促使西方国家加快了新能源的开发速度，太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、氢能等新型能源被提上了开发日程。我国自 2005 年起，相继出台了《可再生能源法》、《可再生能源中长期发展规划》等多项扶持新能源产业发展的政策。随着相关发展目标的调整，中国在新能源领域的总投资将超过 3 万亿元。

在各类新能源中，风能是一种清洁的可再生能源，风力发电是风能利用的主要形式，由于其在减轻环境污染、解决偏远地区居民用电问题以及调整能源结构等诸多方面的突出作用，受到世界各国的重视，成为目前世界上新能源开发利用中技术最成熟、开发最具规模和最具商业化发展前景的发电方式之一。目前中国在风电发展方面继续领先，在 2009 年已经成为世界上新增风电装机的最大市场。

在此背景下，我们编写了《风力发电基础》一书。本书主要介绍了能源的种类与应用、风能利用及风力发电历史、风力发电基础理论、水平轴与垂直轴风力发电机、独立运行与互补运行风力发电系统、并网运行风力发电系统，最后介绍了风力发电相关标准及其发展趋势。本书在编写中力求深入浅出，通俗易懂，学以致用。

本书由卢为平担任主编，张翠霞、丁宏林担任副主编。张鹏义编写第 1 章、第 6 章，易俊诚编写第 2 章，张翠霞编写第 3 章，丁宏林编写第 4 章，卢卫萍编写第 5 章，秦燕编写第 7 章。全书由丁宏林、卢为平统稿。

本书可作为高等职业技术学校风能与动力技术专业规划教材，亦可作

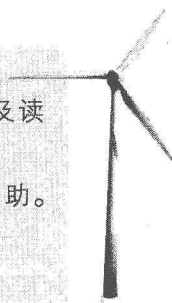


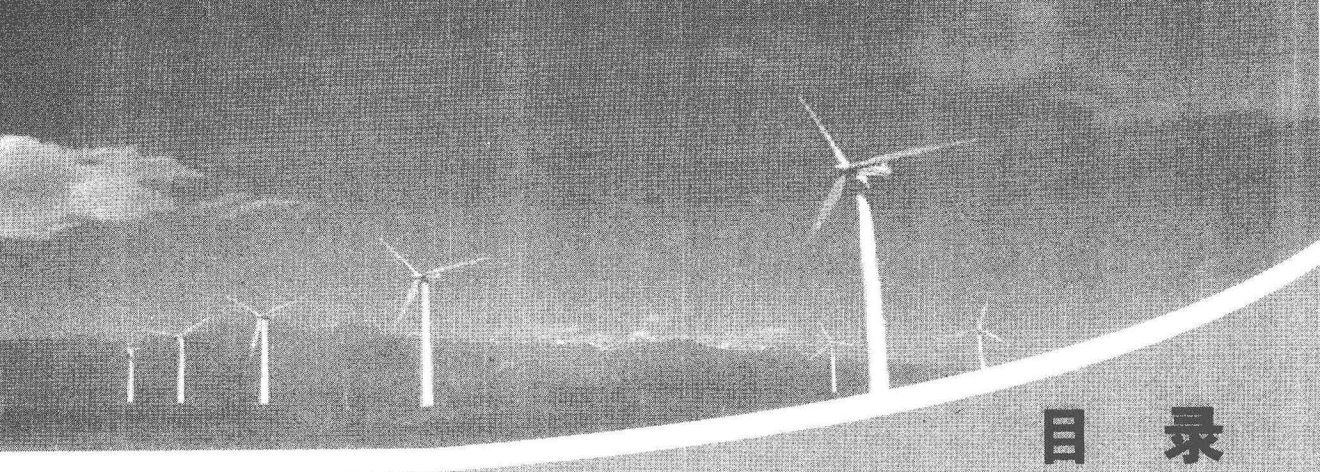
前言

为其他相关专业课程的教学参考书，还可以作为风力发电知识的普及读本，为风力发电领域的工程技术人员提供参考。

本书在编写过程中得到了编者所在单位领导和同事们的支持与帮助。由于编者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编者
2010.12





目 录



第 1 章 绪论	1
1.1 能源与清洁能源	1
1.1.1 人类对能源的需求	1
1.1.2 能源的种类	2
1.1.3 清洁能源的特点及应用	4
1.2 风能利用史	5
1.2.1 风力发电技术出现以前的风能利用	5
1.2.2 风力发电发展简史	7
1.3 风力发电的特点	9
1.3.1 风力发电的意义	9
1.3.2 风力发电的特点	10
1.3.3 风力发电存在的问题	10
1.4 风力发电的现状与发展趋势	11
1.4.1 世界风力发电的现状	11
1.4.2 中国风力发电的现状	13
1.4.3 风力发电的发展趋势	14
习题	15
第 2 章 风力发电基础理论	16
2.1 风的测量	16
2.1.1 风的形成及其特点	16
2.1.2 风向测量	21
2.1.3 风速测量	22
2.2 风力发电机原理	23
2.2.1 风力机基本结构特征	23
2.2.2 风力发电机能量转换过程	29
2.3 风力机的基本参数与基本理论	31

目 录

2.3.1 风力机空气动力学的基本概念	31
2.3.2 风力机基本理论	35
2.3.3 风力机性能参数	38
2.4 风力发电机种类与特性	40
2.4.1 风力发电机分类	40
2.4.2 风力发电系统的种类及特征	42
实训1 风速风向仪安装调试	45
实训2 小型风力发电机性能测试	46
习题	47
第3章 水平轴风力发电机	48
3.1 水平轴风力发电机工作原理	48
3.1.1 水平轴风力发电机运行过程	48
3.1.2 水平轴风力发电机的功率控制	59
3.2 水平轴风力发电机结构分析	67
3.2.1 小型风力发电机基本结构	68
3.2.2 大中型风力发电机基本结构	69
实训3 水平轴风力发电机机头组装	77
实训4 水平轴风力发电机控制器组装	80
实训5 水平轴风力发电机安装调试	81
习题	82
第4章 垂直轴风力发电机	83
4.1 垂直轴风力发电机组基本概念	84
4.1.1 垂直轴风力发电机组的分类	84
4.1.2 垂直轴风力机的工作原理	88
4.1.3 垂直轴风力发电机组的基本结构	90
4.2 垂直轴风力发电机原理分析	90



目 录



4.2.1 垂直轴风力发电机的叶片翼型	90
4.2.2 垂直轴风机气动性能研究进展	94
4.2.3 垂直轴风机叶轮气动性能模型	96
4.3 垂直轴风力发电机组设计与实验	97
4.3.1 垂直轴发电机组设计	97
4.3.2 垂直轴风电机组实验	100
4.4 垂直轴风力发电机的最新应用	101
实训 6 垂直轴风力发电机机头组装	102
实训 7 垂直轴风力发电系统安装调试	103
习题	105
第 5 章 独立运行的风力发电系统	106
5.1 独立运行风力发电系统的组成	106
5.1.1 独立运行风力发电机组的构成	106
5.1.2 独立运行风力发电机组的供电方式	108
5.2 独立运行风力发电系统的储能装置	110
5.2.1 蓄电池的种类及其型号	110
5.2.2 蓄电池的主要性能参数	110
5.2.3 铅酸蓄电池	114
5.2.4 其他种类蓄电池	117
5.2.5 蓄电池组的串并联	119
5.2.6 蓄电池组容量选择与计算	120
5.2.7 其他形式的蓄能装置	122
5.3 独立运行风力发电系统的控制系统	124
5.3.1 风力发电控制器的分类和基本参数	124
5.3.2 控制器的基本工作原理及总体结构	126
5.3.3 控制系统的功能	126

5.3.4 风力发电机常规控制内容	127
5.3.5 控制系统对蓄电池充放电的控制机理	130
5.4 独立运行风力发电系统的逆变装置	132
5.4.1 逆变器的工作原理	132
5.4.2 逆变器的基本技术参数	133
5.4.3 逆变器的选用	135
5.5 独立运行风力发电系统的供电系统	136
5.5.1 直流系统	136
5.5.2 交流系统	137
5.6 独立运行风力发电系统维修与保养及常见故障	137
5.6.1 风力发电机组维修与保养的主要内容	138
5.6.2 风力发电机组的常见故障类型	138
实训8 独立运行风力发电系统原理	140
实训9 独立运行风力发电系统的偏航系统	141
习题	142

第6章 互补运行发电系统

6.1 互补运行发电系统概述	143
6.1.1 主要特点	143
6.1.2 主要类型	143
6.2 风力-光伏互补发电系统	144
6.2.1 系统的组成	144
6.2.2 系统的特点	148
6.2.3 光伏电池发电原理及其特性	149
6.2.4 蓄电池充电控制原理	152
6.2.5 系统的设计步骤	154
6.2.6 风光互补发电系统的应用前景	155



目 录

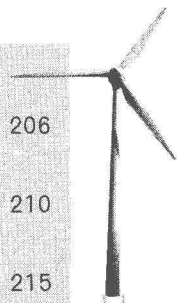


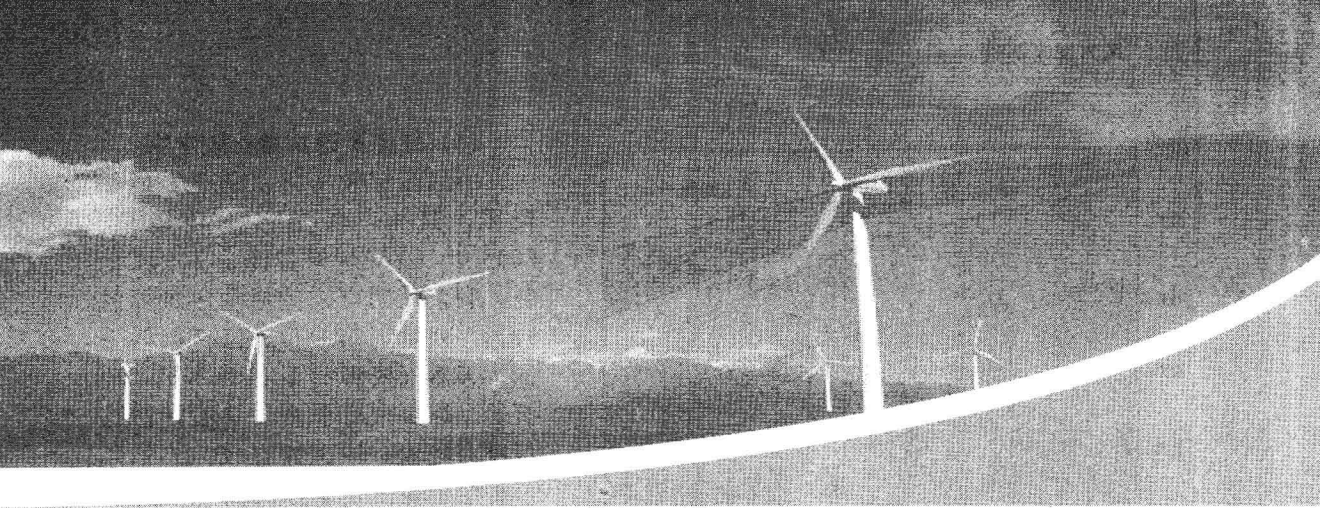
6.3 风力-柴油互补发电系统	157
6.3.1 系统的组成	158
6.3.2 系统的实用性评价	160
6.3.3 减少系统成本的措施	161
实训 10 风光互补发电系统的安装、调试与维护	162
实训 11 蓄电池组的安装、常见故障检测与维护	163
实训 12 太阳能电池发电原理研究与分析	165
习题	168
第 7 章 并网运行风力发电系统	169
7.1 恒速恒频发电机的并网运行	169
7.1.1 同步发电机的并网运行控制	169
7.1.2 感应发电机的并网运行控制	170
7.2 变速恒频发电机的并网运行	172
7.2.1 永磁同步发电机的并网运行控制	172
7.2.2 双馈感应发电机的并网运行控制	177
习题	179
附录	180
附录 1 风力发电场运行规程 (DL/T 666—1999)	180
附录 2 风力发电场设计技术规范 (DL/T 5383—2007)	183
附录 3 风力发电机组装配和安装规范 (GB/T 19568—2004)	187
附录 4 风力发电机组——控制器技术条件 (GB/T 19069—2003)	190
附录 5 风力发电机组——控制器试验方法 (GB/T 19070—2003)	201
附录 6 风力发电机组——偏航系统技术条件 (JB/T 10425.1—2004)	204



目 录

附录 7 风力发电机组——偏航系统试验方法 (JB/T 10425.2—2004)	206
附录 8 风力发电机组——制动系统技术条件 (JB/T 10426.1—2004)	210
附录 9 风力发电机组——制动系统试验方法 (JB/T 10426.2—2004)	215
参考文献	219





第1章

绪论



1.1 能源与清洁能源

1.1.1 人类对能源的需求

能源是整个世界发展和经济增长最基本的驱动力,是人类赖以生存的基础。伴随着人类社会对能源需求的增加,能源安全逐渐与政治、经济安全紧密联系在一起。人类在享受能源带来的经济发展、科技进步等利益的同时,也遇到一系列无法避免的能源安全挑战,能源短缺、资源争夺以及过度使用能源造成的环境污染等问题,威胁着人类的生存与发展。石油、煤炭等目前大量使用的传统化石能源储量越来越少,同时新的能源生产供应体系又未能建立,在交通运输、金融业、工商业等方面造成一系列问题。

目前美国、加拿大、日本、欧盟等都在积极开发如太阳能、风能、海洋能(包括潮汐能和波浪能)等可再生新能源,或者将注意力转向海底可燃冰(天然气水合物结晶)等新的化石能源。同时,氢气、甲醇等燃料作为汽油、柴油的替代品,也受到了广泛关注。国内外研究的氢燃料电池电动汽车,就是此类能源应用的典型代表。

从能源、电力产业看,20世纪90年代,世界能源市场发展最迅速的已不再是石油、煤和天然气,太阳能发电、风力发电等可再生能源异军突起。在20世纪末,国际一些能源专家预言:就能源、电力方面而言,21世纪将是可再生能源的世纪,能源、电力的开发利用将发生历史的变革(见图1-1)。

作为世界上最大的发展中国家,中国是一个能源生产和消费大国。能源生产量仅次于美国和俄罗斯,居世界第三位;基本能源消费占世界总消费量的1/10,仅次于美国,居世界第二位。中国又是一个以煤炭为主要能源的国家,经济发展与环境污染的矛盾比较突出。近年来能源安全问题也日益成为国家生活乃至全社会关注的焦点。

中国能源资源有以下特点。

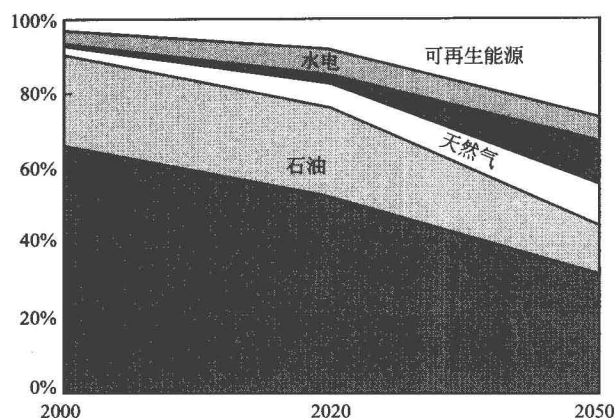


图 1-1 中国未来能源构成变化趋势

12%，列世界首位。

(2) 人均能源资源拥有量较低

中国人口众多，人均能源资源拥有量在世界上处于较低水平。煤炭和水力资源人均拥有量相当于世界平均水平的 50%，石油、天然气人均资源量仅为世界平均水平的 1/15 左右。耕地资源不足世界人均水平的 30%，制约了生物质能源的开发。

(3) 能源资源赋存分布不均衡

中国能源资源分布广泛但不均衡。煤炭资源主要分布在华北、西北地区，水力资源主要分布在西南地区，石油、天然气资源主要分布在中、西部地区和海域。中国主要的能源消费地区集中在东南沿海经济发达地区，资源分布与能源消费地域存在明显差别。大规模、长距离的北煤南运、北油南运、西气东输、西电东送，是中国能源流向的显著特征和能源运输的基本格局。

(4) 能源资源开发难度较大

与世界相比，中国煤炭资源地质开采条件较差，大部分储量需要矿井开采，极少量可供露天开采。石油天然气资源地质条件复杂，埋藏深，勘探开发技术要求较高。未开发的水力资源多集中在西南部的高山深谷，远离负荷中心，开发难度和成本较大。非常规能源资源勘探程度低，经济性较差，缺乏竞争力。

1.1.2 能源的种类

关于能源的定义，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。确切而简单地说，能源是自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。

能源亦称能量资源或能源资源，是指可产生各种能量（如热量、电能、光能和机械能等）或可做功的物质的统称，是指能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源，包括煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源，以及其他新能源和可再生能源。

能源种类繁多，而且经过人类不断的开发与研究，更多新型能源已经开始能够满足人类需求。根据不同的划分方式，能源也可分为不同的类型。

(1) 能源资源总量比较丰富

中国拥有较为丰富的化石能源资源。其中，煤炭占主导地位。2006 年，煤炭保有资源量 10345 亿吨，剩余探明可采储量约占世界的 13%，列世界第三位。已探明的石油、天然气资源储量相对不足，油页岩、煤层气等非常规化石能源储量潜力较大。中国拥有较为丰富的可再生能源资源。水力资源理论蕴藏量折合年发电量为 6.19 万亿千瓦时，经济可开发年发电量约 1.76 万亿千瓦时，为世界水力资源总量的

(1) 按来源分类

1) 来自地球外部天体的能源 (主要是太阳能) 除直接辐射外, 并为风能、水能、生物能和矿物能源等的产生提供基础。人类所需能量的绝大部分都直接或间接地来自太阳。正是各种植物通过光合作用把太阳能转变成化学能, 在植物体内储存下来。煤炭、石油、天然气等化石燃料也是由古代埋在地下的动植物经过漫长的地质年代形成的。此外, 水能、风能、波浪能、海流能等也都是由太阳能转换来的。

2) 地球本身蕴藏的能量 如核能、地热能等。

3) 地球和其他天体相互作用而产生的能量, 如潮汐能。太阳和月亮等星球对大海的引潮力所产生的涨潮和落潮拥有正大的潮汐能。

(2) 按能源的基本形态分类

1) 一次能源 即天然能源。一次能源是指自然界中以天然形式存在并没有经过加工或转换的能量资源。一次能源包括可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气资源, 其中水、石油和天然气三种能源是一次能源的核心, 它们成为全球能源的基础。除此以外, 太阳能、风能、地热能、海洋能、生物能以及核能等可再生能源也属于一次能源。

2) 二次能源 是指由一次能源直接或间接转换成其他种类和形式的能量资源。例如电力、煤气、汽油、柴油、焦炭、洁净煤、激光和沼气等能源都属于二次能源。

(3) 按能源是否具有再生性质分类

1) 可再生能源 人们对一次能源又进一步加以分类。凡是可以不断得到补充或能在较短周期内再产生的能源称为可再生能源。风能、水能、海洋能、潮汐能、太阳能和生物质能等是可再生能源。其特点如表 1-1 所示。

表 1-1 可再生能源的优缺点

能 源	优 点	缺 点
太阳能	用之不竭, 污染极小	太阳光照射不稳定, 太阳能发电厂成本昂贵
风能	用之不竭, 成本低, 污染极小	涡轮噪声大, 受地域限制
水能	对水和空气污染小	受地域限制, 水坝会影响生态环境
地热能	用之不竭, 成本低	受地域限制, 对空气和水轻度污染
海洋能	用之不竭, 空气污染小, 土地干扰少	适当位置少、造价高, 能源输出不稳定, 破坏正常潮汐可能会影响河口水生生物
生物质能	分布广, 储量大, 环保	热值及热效率低

2) 非再生能源 凡是不可以不断得到补充或不能在较短周期内再产生的能源称为非再生能源。煤、石油和天然气等是非再生能源。地热能基本上是非再生能源, 但从地球内部巨大的蕴藏量来看, 又具有再生的性质。其特点如表 1-2 所示。

表 1-2 非再生能源的优缺点

能 源	优 点	缺 点
煤炭	容易获得, 成本较低	易造成空气和水的污染
石油	使用便宜, 容易运输	会造成空气污染, 油泄漏会污染土壤和水
天然气	使用方便, 污染很小	储量有限
核能	不会造成大气污染	建造反应堆成本昂贵, 核废料处理是问题, 有发生核事故的危险

(4) 按能源使用的类型分类

1) 常规能源 利用技术上成熟、使用比较普遍的能源称为常规能源。包括一次能源中的可再生的水力资源和不可再生的煤炭、石油、天然气等资源。

2) 新能源 新近利用或正在着手开发的能源称为新能源。新能源是相对于常规能源而言的,包括太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能、氢能以及用于核能发电的核燃料等能源。由于新能源的能量密度较小,或品位较低,或有间歇性,按已有的技术条件转换利用的经济性尚差,还处于研究、发展阶段,只能因地制宜地开发和利用,但新能源大多数是再生能源,资源丰富,分布广阔,是未来的主要能源之一。

(5) 按是否造成环境污染分类

1) 污染型能源 主要包括煤炭、石油等。

2) 清洁型能源 包括水力、电力、太阳能、风能以及核能等。

1.1.3 清洁能源的特点及应用

太阳能和风能是大自然馈赠给我们的两种最重要的天然能源,也是取之不尽的可再生的清洁能源。太阳能是地球上一切能源的来源,没有太阳,世间万物都将不复存在。而风能则是太阳能在地球表面的另外一种表现形式。地球表面的不同形态(如沙土地面、植被地面和水面)对太阳光照的吸热系数不同,从而在地球表面形成温差,这种温差就形成了空气对流,即风能。

(1) 太阳能和风能的优点

太阳能和风能是目前应用得比较广泛的两种可再生的清洁能源。太阳能和风能与其他常规能源相比在利用上具有以下优点。

1) 取之不尽,用之不竭 太阳内部由于氢核的聚变热核反应,从而释放出巨大的光和热,这就是太阳能的来源。在氢核聚变产能区中,氢核稳定燃烧的时间可在 60 亿年以上。也就是说,太阳能至少还可像现在这样有 60 亿年的利用时间,故人们常用“取之不尽,用之不竭”来形容它的长久性。尤其在常规能源越来越少的情况下,这对人们更有极大的吸引力。太阳射出的能量,地球上仅获得 20 万分之一,其余部分都散失到太空中去了。即使这样,能量也是很可观的。地球表面一年仍可获得 $7.034 \times 10^{24} \text{J}$ 的能量,它相当于燃烧 200 万吨煤所发出的巨大热量。

2) 就地可取,不需运输 矿物能源煤炭和石油地理分布不均匀和工业布局的不均衡,造成了煤炭和石油运输的不均衡。这些能源必须经过开采后长途运送到目的地,给交通运输带来压力。即使能够靠电网供电,但一些高山、孤岛、草原和高原等电网不易到达的地方,充分利用清洁能源这一优点,则会带来方便。

3) 分布广泛,分散使用 虽然太阳能和风能分布也有一定的局限性,但与矿物能、水能和地热能等相比较仍可视作分布较广的一种能源。如世界石油的资源在地球上的分布极不均匀,世界探明的石油储量,仅在中东地区就占世界总储量的 57%,而有些消费石油较多的国家拥有的石油储量和产量却相对较小,有的甚至不生产石油。煤炭资源分布也极为不均匀,世界煤炭资源的绝大部分埋藏在北纬 30° 以上的地区,俄罗斯、美国和中国约占世界煤炭储量的 90%。

4) 不污染环境,不破坏生态 人类利用矿物燃料的过程中,必然排放出大量有害物质,使人类赖以生存的环境受到破坏和污染。大气污染的主要原因是矿物燃料的大量使用。特别是将煤作为燃料,每年要排出几亿吨煤渣,排放出大量煤尘或有害气体到大气中去,仅以

SO₂ 而论,全世界就有几千万吨。大气中另一个有害物质是 CO₂,它也是矿物燃料在燃烧过程中排放出来的。此外,新能源中水电、核能、地热能等在开发利用的过程中,也都存在着一些不能忽视的环境问题。但太阳能和风能在利用中则不会给空气中带来污染,也不会破坏生态。

5) 周而复始,可以再生 在自然界可以不断生成并有规律地得到补充的能源,称为可再生能源。太阳能和风能就属于这种能源。煤炭、石油和天然气等是经过几十亿年形成的,短期是无法生成的。当今世界消耗石油、天然气和煤炭的速度比大自然生成它们的速度要快一百万倍,也就是说几十亿年生成的矿物能源在几个世纪就会消耗掉。

(2) 太阳能和风能的缺点

太阳能和风能尽管在利用上具有以上的优点,但也存在以下的缺点。

1) 能量密度低 空气的密度在标准状况下为 1.29kg/m^3 ,它仅是水的密度的 $1/773$,所以在 3m/s 风速时,其能量密度为 0.02kW/m^2 ,水流速 3m/s 时,能量密度为 20kW/m^2 。在相同流速下,要获得与水能同样大的功率,风轮直径要相当于水轮的 27.8 倍。在晴天白天太阳能平均密度为 1kW/m^2 ,夜间平均为 0.16kW/m^2 ,其能量密度也很低,故必须装置相当大受光面积的太阳能板,才能采集到足够的功率。所以不论太阳能还是风能,都是一种能量密度极其稀疏的能源,也就是单位面积上所获得的能量小,而且还不能像水那样可以用水库来控制,积蓄起来,所以给利用带来困难。

2) 能量不稳定 太阳能、风能对天气和气候非常敏感,所以它是一种随机能源。虽然各地区的太阳辐射和风的特性在一较长时间内大致上有一定的统计规律可循,但是其强度无时无刻都在变化,不但各年间有变化,甚至在很短时间内也有无规律的脉动变化。太阳能还有昼夜规律的变化。这种时大时小的不稳定性给使用带来了很大困难。

由于存在以上困难,所以要想把这两种能源转变为经济而又可靠的电能,存在着很多技术难题,这也是几个世纪以来一直发展缓慢的原因。但是,随着现代科学技术的发展,太阳能和风能的利用在技术上有了突破,很多产品已经进入商业性应用领域。

1.2 风能利用史

风能是一种可再生的清洁能源,是太阳能的一种转化形式。风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一,如风力磨坊、风力提水、风帆助航以及后来的风力发电等。

1.2.1 风力发电技术出现以前的风能利用

风能利用,已有数千年的历史。风能最早的利用方式是“风帆行舟”。我国是最早使用帆船和风车的国家之一。至少在 3000 年前的商代就出现了帆船,明代航海家郑和七下西洋,开创了中国辉煌的风帆时代。同时,风车也得到了广泛的使用,人们利用风车驱动水车灌溉农田。沿海地区利用风力提水灌溉和制盐的做法,一直延续到 20 世纪 50 年代。古代中国的风车如图 1-2 所示。

在国外,约公元前 200 年,波斯人也开始利用垂直轴风车碾米。10 世纪,伊斯兰人利用风车提水。到了 11 世纪,风车广泛应用在中东地区,13 世纪风车技术传到欧洲,14 世纪风车成为欧洲不可缺少的原动机。

风力磨坊是当时利用风能最具代表性的风力机械。早期的风力磨坊通常有四只叶片,并且垂直于主风向安装,叶片不能自动跟踪风向,风能不能得到充分利用。为了解决叶片自动

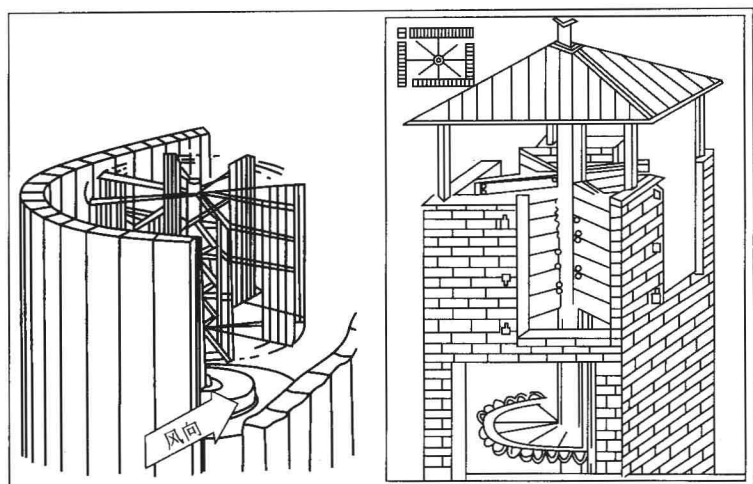


图 1-2 古代中国的风车

对风的问题，德国人发明了一种栅架式风力磨坊，如图 1-3 所示。栅架固定在地面上，叶片和风力磨房主体建筑由栅架支承，并可以随风向转动。这种磨房造价很高。1745 年荷兰人 Edmund Lee 发明了旋转机头，并获专利，应用在荷兰风力磨坊，如图 1-4 所示。其特点是在可转动的机头上安装一个和旋转平面成 90° 的侧轮，当侧轮不平行于风向时，侧轮转动驱动机头正向对风。由于采用 3000 : 1 的高传动比，所以调节对风十分平稳，避免了对风产生的回转力矩。



图 1-3 德国栅架式风力磨坊



图 1-4 荷兰风力磨坊

风力提水机也是早期人们广泛使用的风力机械。10 世纪伊斯兰人就利用风车提水。19 世纪的欧洲，大约有数十万台风力提水机，最大风轮直径可达 25m，功率为 30kW。特别是 19 世纪的美国，有数百万台多叶片风力提水机，风轮直径为 3~5m，功率为 0.5~1kW，如图 1-5 所示。由于叶片数量较多，风轮转速较低，能够产生较大的转矩，所以可以直接驱动恒定转矩的水泵。在风轮的背风面安装一块尾翼，从而保证风轮旋转平面和风向垂直。当尾