

21世纪可持续能源丛书

风能开发利用

张希良 主编



化学工业出版社

21世纪可持续能源丛书

风能开发利用

张希良 主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

风能开发利用/张希良主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 1

(21 世纪可持续能源丛书)

ISBN 7-5025-6063-7

I. 风… II. 张… III. 风力发电-基本知识
IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 087796 号

21 世纪可持续能源丛书

风能开发利用

张希良 主编

责任编辑: 陈志良

责任校对: 吴桂萍 王 侠

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

[http:// www. cip. com. cn](http://www.cip.com.cn)

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 10¼ 彩插 2 字数 145 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6063-7/TK·11

定 价: 23.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

张希良

1963年生，河北南皮人。清华大学博士研究生毕业，能源经济博士学位。清华大学能源环境经济研究院副教授，能源系统分析研究室副主任，清华大学国际技术转移中心副主任，同时任中国能源研究会农村能源专业委员会副主任。目前从事可再生能源技术评价理论与方法、激励机制与政策设计等研究。1999年获联合国气候变化框架公约(UNFCCC)青年科学家奖学金；2004年被政府间气候变化委员会(IPCC)选为第4次全球气候变化评估报告能源供应部分的主要作者。发表论文30余篇，编、译图书各1部。

内容提要

本书是《21世纪可持续能源丛书》之一。

风能是重要的新能源和可再生能源。我国风能资源丰富，开发前景广阔。书中介绍了风能最主要的利用形式——风力发电的原理和技术，介绍了世界风力发电的发展现状和趋势，论述了风能开发利用在实现社会经济可持续发展 and 环境保护中的作用。并分章介绍了中国、欧盟、美国和印度风能开发利用的实践和经验以及鼓励风能开发利用的主要政策工具与制度安排。

本书可供从事新能源和可再生能源，特别是风能的研究人员、管理人员阅读参考。

序

能源是人类社会存在与发展的物质基础。过去 200 多年，建立在煤炭、石油、天然气等化石燃料基础上的能源体系极大地推动了人类社会的发展。然而，人们在物质生活和精神生活不断提高的同时，也越来越感悟到大规模使用化石燃料所带来的严重后果：资源日益枯竭，环境不断恶化，还诱发了不少国与国之间、地区之间的政治经济纠纷，甚至冲突和战争。因此，人类必须寻求一种新的、清洁、安全、可靠的可持续能源系统。

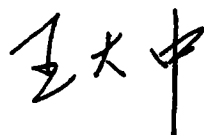
我国经济正在快速持续发展，但又面临着有限的化石燃料资源和更高的环境保护要求的严峻挑战。坚持节能优先，提高能源效率；优化能源结构，以煤为主多元化发展；加强环境保护，开展煤清洁化利用；采取综合措施，保障能源安全；依靠科技进步，开发利用新能源和可再生能源等，是我国长期的能源发展战略，也是我国建立可持续能源系统最主要的政策措施。

面临这样一个能源发展的形势，化学工业出版社组织了一批知名学者和专家，撰写了这套《21 世纪可持续能源丛书》是非常及时和必要的。

这套丛书共有 11 册，以每一个能源品种为一册，内容十分广泛、丰富和充实，包括资源评价，新的工艺技术特性介绍，开发应用中的经济性和环境影响，还涉及到推广应用和产业化发展中的政策和机制等。可以说，在我国能源领域中，这套丛书在深度和广度上都达到了较高的学术水平和实用价值，不仅为能源工作者提供了丰富的能源科学技术方面的专业知识、信息和综合分析的政策工具，而且也能使广大读者更好地了解当今世界正在走向一个可持续发展的、与环境友好的能源新时代，因此值得一读。

我们期待本丛书的出版发行，在探索和建立我国可持续能源体系的进程中作出应有的贡献。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters '王大中' (Wang Dazhong).

2004 年 7 月 8 日

前 言

风能是太阳能的一种转化形式，是一种不产生任何污染物排放的可再生的自然能源。

风能开发利用已有数千年的历史。在蒸汽机发明以前，风能就曾作为重要的动力，用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、磨面和锯木等。在几千年前，埃及的风帆船就在尼罗河上航行。中国是最早使用帆船和风车的国家之一，至少在三千年前的商代就出现了帆船。唐代有“乘风破浪会有时，直挂云帆济沧海”的诗句，可见那时风帆船已广泛用于江河航运。方以智著的《物理小识》记载有：“用风帆六幅，车水灌田，淮阳海皆为之”，描述利用风车驱动水车灌田的场景。

受化石能源资源日趋枯竭、能源供应安全和保护环境等的驱动，自20世纪70年代中期以来，世界主要发达国家和一些发展中国家都重视风能的开发利用。特别是自20世纪90年代初以来，现代风能最主要的利用形式——风力发电的发展十分迅速，世界风电机装机容量的年平均增长率超过了30%，从1993年的216万千瓦上升到2003年的4030万千瓦。

与此同时，限制风能大规模商业开发利用的主要因素——风力发电成本在过去的20年中有了大幅的下降。随风力资源不同、风电场规模

不同和采用技术不同，风力发电成本也有所不同。目前，低风力发电成本已降至 3~5 美分/千瓦时，高风力发电成本也降到 10~12 美分/千瓦时。到 2010 年，它们将分别降到 2~4 美分/千瓦时和 6~9 美分/千瓦时，达到和化石能源发电相竞争的水平。

随着风能这一态势的发展，世界风电机的装机容量到 2020 年预计会达到 12.45 亿千瓦，发电量占世界电力消费量的 12%。因此，风能将是 21 世纪最有发展前景的绿色能源，是人类社会经济可持续发展的主要新动力源。

本书介绍了风能最主要的利用形式——风力发电的原理和技术，概要描述了世界风能开发利用的历史、现状和发展趋势，总结了中国、欧盟、美国 and 印度风能开发利用的实践和经验，介绍了鼓励风能开发利用的主要政策工具与制度安排，论述了风能开发利用在实现社会经济可持续发展和保护环境中的作用。

本书共分 7 章，由清华大学能源环境经济研究院和清华大学核能与新能源研究院的研究人员编写：第 1 章由张希良编写；第 2 章由张希良、汪婧编写；第 3 章由汪婧、郑彤编写；第 4 章由陈荣、郑彤编写；第 5 章由美国加州大学伯克利分校的 Joanna Lewis（清华大学高级访问学者）编写，陈荣、戴凌燕翻译；第 6 章由王本编写；第 7 章由戴凌燕译编。由于水平、时间和条件所限，书中难免有不妥甚至错误之处，欢迎同行和读者提出批评指正。

编者

2004 年 8 月

内 容 提 要

本书是《21 世纪可持续能源丛书》之一。

风能是重要的新能源和可再生能源。我国风能资源丰富，开发前景广阔。书中介绍了风能最主要的利用形式——风力发电的原理和技术，介绍了世界风力发电的发展现状和趋势，论述了风能开发利用在实现社会经济可持续发展和环境保护中的作用。并分章介绍了中国、欧盟、美国和印度风能开发利用的实践和经验以及鼓励风能开发利用的主要政策工具与制度安排。

本书可供从事新能源和可再生能源，特别是风能的研究人员、管理人员阅读参考。



图1 风车——洁净的能源



图2 建在山地的风力发电场



图3 风轮的运输



图4 大连小长岛风电机吊装



图5 正在运行中的风力发电机



图6 塔架吊装

图7 海岸风力发电场



图8 海上风力发电场

图9 光伏发电和风力发电机组系统





图 10 内蒙古草原上的风力发电场



图 11 达坂城风力发电场



图 12 南澳风力发电场



图 13 辉腾锡勒风力发电场

目 录

第1章 技术、制度与世界风能发展	1
1.1 人类开发利用风能的历史	1
1.2 开发利用风能的动因	3
1.2.1 经济驱动力	3
1.2.2 环境驱动力	4
1.2.3 社会驱动力	4
1.2.4 技术驱动力	4
1.3 世界风能开发现状与展望	5
1.4 世界鼓励风能开发利用的政策措施	7
1.4.1 长期保护性电价	7
1.4.2 可再生能源配额制政策	8
1.4.3 公共效益基金	9
1.4.4 招投标政策	9
1.5 中国风能发展需要制度创新	10
1.5.1 国家目标制度	10
1.5.2 长期保护性电价制度	11
1.5.3 电网企业社会普遍服务制度	11

1.5.4	财政专项资金制度	11
1.5.5	化石燃料税制度和可再生能源税收减免制度	11
第2章	风力发电原理和技术	12
2.1	风与风能的形成	12
2.2	风能的基本特征	13
2.2.1	风速	13
2.2.2	风级	13
2.2.3	风能密度	14
2.2.4	风能的计算	14
2.3	风力发电原理	16
2.4	风力发电机安装场址选择	20
2.5	风力发电系统的种类	21
2.6	风力发电技术的经济性	22
2.6.1	微小型离网风力发电技术	22
2.6.2	大中型并网风力发电技术	23
2.7	风电技术的发展趋势	24
2.7.1	单机容量增大	24
2.7.2	风电机桨叶的变化	25
2.7.3	塔架高度上升	26
2.7.4	控制技术的发展	26
2.7.5	海上风力发电	26
第3章	中国风力发电发展	27
3.1	中国的风能资源	28
3.1.1	影响中国风能资源的因素	28
3.1.2	我国风能资源的特点	31
3.1.3	我国风能资源的区划	33
3.2	离网户用小型风力发电	38
3.2.1	行业发展历程	38
3.2.2	行业现状	40
3.2.3	机组的技术特点及参数	42

3.2.4	潜在市场及发展趋势	43
3.2.5	障碍与问题	49
3.2.6	政策与建议	50
3.3	并网风力发电	51
3.3.1	行业发展历程	52
3.3.2	行业发展现状	54
3.3.3	潜在市场及发展趋势	58
3.3.4	新疆达坂城风力发电场	60
3.3.5	广东南澳风力发电场	61
3.3.6	内蒙古辉腾锡勒风力电电场	61
3.3.7	障碍与政策	63
第4章	欧盟风电发展	67
4.1	丹麦——世界风机生产基地	67
4.1.1	发展风电的背景	67
4.1.2	风力资源	68
4.1.3	风电发展成就	68
4.1.4	风机产业的发展现状	69
4.1.5	政策环境	72
4.1.6	风电产业的发展前景和困难	74
4.2	德国——世界风电的领头羊	75
4.2.1	发展背景	75
4.2.2	风力资源	76
4.2.3	风电现状	76
4.2.4	风电技术的发展	78
4.2.5	促进政策	81
4.3	英国——大步前进中的风电产业	83
4.3.1	发展背景	83
4.3.2	风力资源	83
4.3.3	风电现状	84
4.3.4	促进政策	84