



国际电气工程先进技术译丛

风能原理、风资源分析及风电场经济性

Wind Energy Fundamentals,
Resource Analysis and Economics

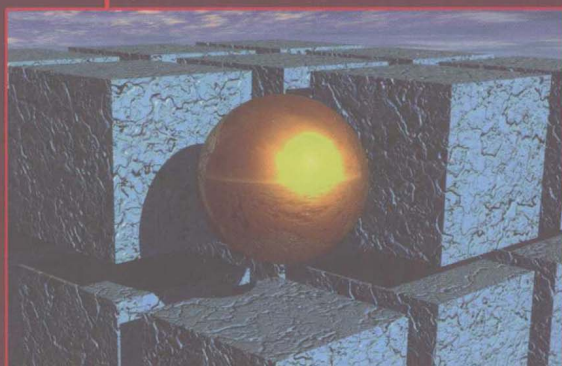
(印度) Sathyajith Mathew

许锋飞

著
译



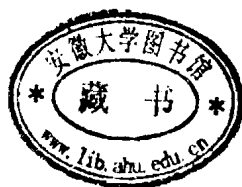
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风能原理、风资源分析及 风电场经济性

(印度) Sathyajith Mathew 著
许锋飞 译



机械工业出版社

随着全世界对能源问题 and 环境问题关注度的提高,风能行业已成为当前发展最快的可再生能源形式。本书全面而详细地介绍了风能转换技术的各个方面,包括风能利用的历史和现状及未来、风能开发利用的基本原理、风资源分析方法、风能转换系统、风能与环境以及风电场经济性分析。对海上风电这一热点问题,本书也有介绍。相比其他风电书籍,本书将风资源与风电项目的经济性做了统一阐述,把风和电两者联系起来。“为正确的风场选择正确的风机”,对风能项目的成功具有决定性意义。

本书可供新能源工程技术人员、研发人员以及风能项目决策和管理者使用,也可作为风能基础、风资源分析以及风电场经济性等方面的基础教材供高等院校师生使用。

Translation from the English Language edition;

Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics; edited by Sathyajith Mathew; Copyright© 2006 by Springer LLC. All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Springer 出版社授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2010-2059 号

图书在版编目(CIP)数据

风能原理、风资源分析及风电场经济性/(印度)马修(Mathew, S.)著;
许锋飞译.—北京:机械工业出版社,2011.5

(国际电气工程先进技术译丛)

Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics

ISBN 978-7-111-34207-6

I. ①风… II. ①马…②许… III. ①风力能源—研究②风力发电—研究
IV. ①TK81②TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 067367 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:赵玲丽

版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红

封面设计:马精明 责任印制:杨 曦

北京双青印刷厂印刷

2011 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·12 印张·239 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-34207-6

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

译者序

由于人类对能源和环境问题的日益重视，风能技术在全世界范围内再次引起了人们的关注。近5年来，世界风电产业蓬勃发展，年均增长率大约为40%。同时，我国风电机组装机容量也连续翻番，最新统计数据显示，截至2010年底，我国全年风力发电新增装机达1600万kW，累计装机容量达4182.7万kW，首次超过美国，跃居世界第一，我国的风电技术与风电产业在制造水平和人才储备上都获得了巨大的进步。然而，风能开发利用过程中存在项目上马快，缺少对风资源的认真评估和优化，对风电场宏观选址与风力机微观选址重视不够等现象，造成许多风电场装机后不能有效发电，风电场投资的经济性差，所以我们翻译本书，旨在向国内读者介绍一本风能的基本原理、风资源分析以及风电场经济性方面的参考书。

风电技术不但包括电力电子学、机械力学、材料科学等机电方面的知识，还涉及流体力学、大气科学以及空气动力学等风能方面的知识。唯有从“风”与“电”两个综合方面全面地思考风电场开发的相关问题，才能深刻地体会到风资源和风特性对风电场经济性的重要影响，从而能够最终确保风电场规划与开发的科学性。恰如作者在本书中提倡的，我们要“为正确的风电场选择正确的风力机”。随着风电技术的普及，未来在增加风电装机容量的同时，还会提高机组的设备利用率，从而提高风电场的发电量，为我国的能源需求和经济腾飞提供更多的可再生绿色能源。

本书从风能基础知识入手，把风资源和风电场经济性统一起来，利用全寿命周期的全局观来考察风电项目，弥补了我国风电行业在风资源和微观选址技术资料方面的不足。本书附带的风能资源分析（WERA）软件（参考 extras.springer.com）能够引起没有相关风资源背景的读者对风资源和风电场潜能计算的兴趣，对读者进一步学习较复杂的风资源和产能计算软件亦有辅助作用。

本书主要由许锋飞翻译，经济师姜建华、风资源工程师林炜、马辉和电气工程师郭子铭在统稿过程中进行了审校工作，感谢他们提出的宝贵意见。

由于译者水平有限，错误和疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

原 书 序

日渐增长的能源需求和环境意识的觉醒再次唤起了人们对风能的兴趣，风能因此成为当今世界增长最快的能源形式。在各类可再生能源中，风能必将是重要的一种。

鉴于风能行业的迅速发展，世界各地的大学都在他们的本科生与研究生课程中对风能技术给予了相应的重视，这些学术项目吸引了从社会科学背景到工程技术背景等不同专业的学生。本书前面一些章节所讨论的风能转换的基本原理即把这些学生作为读者对象，所开发的高级风资源分析实用工具对风能领域的专业学者和研究者都大有帮助。本书提供的风能资源分析（Wind Energy Resource Analysis, WERA）软件是风能从业者预先评估风场潜在风能和模拟风力机性能的有效工具。

引言一章描述了风能技术发展的历史、现状和未来。接下来，第2章介绍了风能转换的基本原理，对风力机的不同类型及其各自性能进行了简要介绍，第2章还介绍了叶轮空气动力学的基本原理及其在风力机设计中的应用。

第3章致力于描述风能利用时风频谱的测量及其分析方法，介绍了风能分析的统计方法，并把这些方法推广，使用这些方法来进一步开发用来评估预建风场风能潜力的计算机模型。

第4章描述了各种风能转换系统（Wind Energy Covertion System, WECS）及其子系统的构造特点，除了风力发电系统，还介绍了风力泵系统。本章还阐述了陆上风电场和海上风电场的各自特点。

第5章介绍了风能转换系统（WECS）的性能模型，介绍了模拟风力发电系统和风力泵系统现场性能的工具，并论述了如何使风能转换系统（WECS）和风场达到最佳匹配。

第6章致力于描述风能转换利用时的环境问题，在强调风能在环境方面的有益之处的同时，鸟类影响、视觉影响、噪声污染等这些人们关注的风能问题也不容忽视，讨论这些问题时，采用了基于寿命周期的分析方法。

第7章依据现值法介绍了风能转换利用的经济性，讨论了风力发电系统的成本和收益的影响因素，并引出了一些项目经济性评价的指标。

本书提供的风能资源分析（WERA）软件对那些不熟悉风资源分析数值技术的读者将有很大帮助。本书各个章节都有针对性的例题，作为补充，这些例题使文字部分阐述的概念更完备透彻。

本书中的内容大都来源于我对工程专业的本科生和研究生授课时的教学实践。

对风能转换系统的理论研究和现场经验也对我阐述本书内容大有裨益。此外，作为许多风能培训项目风资源方面培训人的经历，也有助于我在本书写作时采用多学科交叉的方法，尤其对风能这一领域，多学科交叉的方法是非常关键的。因此，我在此要感谢我的学生对本书的贡献。

写作自然科学方面的一本书需要收集各个方面的信息，感谢本书各个章节所参考的研究论文和报告的作者。一些企业和组织也为本书提供了至关重要的信息和材料，由此，需要特别感谢夏威夷电力公司 (Hawaiian Electric Company)、可再生能源系统有限公司 (Renewable Energy Systems Ltd)、泰雷兹设备股份有限公司 (THALES instruments GmbH)、维萨拉公司 (Vaisala Oyj)、西门子风能有限公司 (Siemens Wind Power A/S)、Resoft 公司以及维基百科。

写作本书时，我幸运地获得了我的教授和同事们全心全意的支持。感谢 K. I. Koshy 教授、C. P. Muhammad 教授和 Jippu · Jacob 教授仔细研读了原稿。感谢 Anil-kumar · V 教授和 Damodar · Rao 博士对 WERA 软件开发做出的贡献。还要感谢 John · D · Burton 教授、K. P · Pandey 教授、Ashok · Alex · Philip 教授、Vishnu · B 教授、Dhalin · D 博士和 Er. Nisha T. V 博士在本书写作的各个阶段所提供的帮助。

“人非圣贤，孰能无过”，欢迎对本书错误之处提供建议，以帮助对本书内容的斧正。

Sathyajith Mathew

目 录

译者序

原书序

第1章 引言	1
1.1 风能的历史	2
1.2 风能利用的现状与未来	6
参考文献	8
第2章 风能转换基本原理	9
2.1 风频谱中可利用的能量	9
2.2 风力机风功率与扭矩	10
2.3 风力机的分类	12
2.3.1 水平轴风力机	12
2.3.2 垂直轴风力机	14
2.4 风力机叶轮特性	16
2.5 风力机空气动力学	17
2.5.1 翼型	17
2.5.2 空气动力学理论	20
2.6 叶轮设计	26
2.7 叶轮性能	30
参考文献	32
第3章 风况分析	33
3.1 风	33
3.1.1 局地效应	34
3.1.2 风切变	35
3.1.3 湍流	37
3.1.4 加速效应	37
3.1.5 时变性	38
3.2 风的测量	40
3.2.1 生态指示物	40
3.2.2 风速仪	41
3.2.3 风向	45
3.3 风数据分析	46
3.3.1 平均风速	47
3.3.2 风速分布	47

3.3.3 风数据分析统计模型	51
3.4 风能分析	60
3.4.1 威布尔分布法	60
3.4.2 瑞利分布法	63
参考文献	66
第4章 风能转换系统	68
4.1 风力发电机	68
4.1.1 塔架	69
4.1.2 叶轮	73
4.1.3 齿轮箱	76
4.1.4 功率调节	77
4.1.5 安全制动系统	80
4.1.6 发电机	81
4.1.7 恒速和变速运行	84
4.1.8 并网	86
4.2 风电场	88
4.3 海上风电	91
4.4 风力泵	93
4.4.1 风力驱动活塞泵	94
4.4.2 风力驱动活塞泵的局限	96
4.4.3 双动泵	100
4.4.4 风力驱动转子动力泵	101
4.4.5 风能电力泵	104
参考文献	106
第5章 风能转换系统的性能	108
5.1 风力机的功率曲线	108
5.2 风力机的产能	112
5.2.1 威布尔分析法	113
5.2.2 瑞利分析法	114
5.3 容量系数	115
5.4 使风力机和风频谱相匹配	119
5.5 风力泵系统的性能	123
5.5.1 风力驱动活塞泵	124
5.5.2 风力驱动转子动力泵	129
5.5.3 风能电力泵	132
参考文献	133
第6章 风能与环境	135
6.1 风能的环境效益	135

VIII 风能原理、风资源分析及风电场经济性

6.2 生命周期分析	138
6.2.1 净能量分析法	140
6.2.2 全生命周期排放分析法	144
6.3 风能利用的环境问题	146
6.3.1 鸟类问题	147
6.3.2 噪声污染	149
6.3.3 视觉影响	154
参考文献	156
第7章 风能的经济性	159
7.1 影响风能经济性的因素	159
7.1.1 风场特定因素	160
7.1.2 风力机参数	161
7.1.3 能源市场	162
7.1.4 激励和免税政策	163
7.2 净现值法	164
7.3 风能成本	167
7.3.1 初投资	168
7.3.2 运行和维护成本	169
7.3.3 年际成本的现值	170
7.4 风能的效益	171
7.5 经济效益评价指标	172
7.5.1 净现值	173
7.5.2 收益成本比	173
7.5.3 回收期	173
7.5.4 内部收益率	174
7.6 投资折旧减免税	176
参考文献	178
附录 风能资源分析 (WERA) 软件	179

第 1 章 引 言

“在各种自然作用力中，我认为风中蕴含的能量最大”。——亚伯拉罕 林肯

能源是社会经济发展的必需品之一。一个国家使用能源的多少通常能反应这个国家可能达到的富裕程度。人的社会经济幸福感可以用联合国发展计划署设定的人类发展指数（Human Development Index, HDI）来衡量。研究发现，大多数具有较高人类发展指数的发达国家，其年人均能源消耗量在 4000kg 石油当量到 9000kg 石油当量之间^[14]，另一方面，对于年人均能源消耗量较低的发展中国家（大多数国家人均值小于 500kg 石油当量），其能够达到的人类发展指数也较低，其值只有 0.5。为了达到更高的（值为 0.8）人类发展指数，必然要增加人均能源消耗量，至少要达到年人均能源消耗量 1000kg 石油当量的水平。

世界人口日渐增长，发展中国家的人口增长速度比发达的工业化国家更快^[4]。由于人口增长及人类发展活动引起的能源需求也随之增加。在过去的十年里，工业化国家的一次能源消耗量以每年 1.5% 的速度递增，在发展中国家，其增长速度是 3.2%^[14]。以这样的趋势发展下去，未来全球能源需求会急剧增加。进一步的估算表明，一次能源供应总量到 2010 年将增加到 121 亿吨石油当量，而到 2030 年会增加到 163 亿吨石油当量^[5]。

世界能源需求由不同类型的能源形式来满足。石化燃料包括煤炭、石油和天然气，占总需求的 80%^[15]，核能所占的比例大概是 7%，可再生能源所占的比例为 13.7%，可再生能源的形式主要是传统的生物质能和大型水电站。目前，新兴可再生能源（风能、太阳能等）所占的比例仅有 2.2%。因此，如果以当前的速度继续发展下去，人类必然还得过度依赖石化资源，以满足其能源需求。

不幸的是，石化资源是有限的非可再生资源，总有一天会枯竭。已探明的煤炭储量仅有 5660 亿吨石油当量，和煤炭资源类似，石油和天然气储量分别仅有 1430 亿吨石油当量和 1380 亿吨石油当量。仅以当前年均 22.6 亿吨石油当量的消耗速度来计算，所探明的煤炭储量也仅够开采 250 年。

石油和天然气的储量也面临即将开采殆尽的类似状况。尽管我们仍能够发现这些资源的新储量，然而，过去 40 年里，人类发现新储量的速度已经显著下降了。因此，当我们的能源需求日渐增长的时候，可供利用的资源也在枯竭。这无疑将导致我们对能源危机的更多关注，然而，由于新能源的发现，能源危机到来的时间会延长，也许能源危机还不是迫在眉睫的现实。

石化资源问题的另外一个不利方面是以石化燃料为原料的发电站所引起的环境污染。这些发电站会向大气排放温室气体（Greenhouse Gases, GHG）和颗粒物，致使全球变暖和气候变化。由于能源生产和使用而排放到大气中的温室气体占全球总排放的50%~60%。随着能源需求的增加，由能源部门产生的环境污染在不久的将来仍会持续增加。为了制定减少人类活动所造成大气污染的措施，全球性的协商已经开展了多次。京都议定书和约翰内斯堡峰会是人类向低碳社会发展的积极迈进。为了减少排放水平，人类已经达成广泛的共识——至少10%的能源供应应当来自可再生能源。

因此，可持续能源（比如风能）的重要性引起了人们的关注。风中蕴含的能量巨大，在当前技术背景下，风能是环境友好和商业角度有经济开发价值两者兼得的能源利用形式。

以下章节将论述风能转换利用的历史、现状及其未来。

1.1 风能的历史

人类利用风能的历史可以追溯到远古时代，那时人类利用风帆来推动船只航行。后来，人类利用风能来为谷物研磨磨坊和风力泵系统提供动力。由过去粗重的机器演变成今天精密化的设备，风能技术发展经历了许多不同的阶段。

利用风能来获得机械能这一概念起源于何处，目前并未形成统一意见。一些人认为上述概念起源于古巴比伦。公元前17世纪，巴比伦国王汉谟拉比计划用风能来修建雄心勃勃的灌溉工程^[3]。还有人认为风车最早起源于印度。考底利耶（Kautiliya）公元前4世纪用梵语所著的经典《政事论》中引述了利用风力提水的发明创造^[12]，然而，没有任何记录可以证明上述概念最早转化成了实际的机器。

最早有记录的风车可以追溯到公元前200年，当时，波斯人利用风车来研磨谷物。这类风车是垂直轴的，轴上的帆由成束的芦苇或者木材做成。研磨谷物的石头联在垂直轴上，帆通过水平支杆连接在中心竖轴上。帆的大小由制造它们的材料决定，通常5m长，9m高。

到13世纪，在欧洲大部分地区都可以非常普遍地看到用来研磨谷物的风车。这一技术于公元1105年和1191年，先后被法国人和英国人所采用。和波斯人设计的垂直轴风车不同，欧洲的风车是水平轴形式的。这些立柱式的风车构造样式非常漂亮，它们的立塔截面形状通常为圆形或者多边形，利用木材或者砖头建成。叶轮通过调整尾舵可以进行手动对风。通过把叶轮从风中偏出或者移去覆盖叶轮的帆布进行收帆，可以避免大风对风车的损害。

荷兰著名的设计家Jan·Adriaensoon是制造这些风车的先驱。荷兰人对风车在设计上进行了许多改进并发明了多种不同类型的风车，例如，用来排水的风车（tjasker）和样式类似欧式长罩衫的斯莫克风车（Smock mills）。叶轮开始采用原始

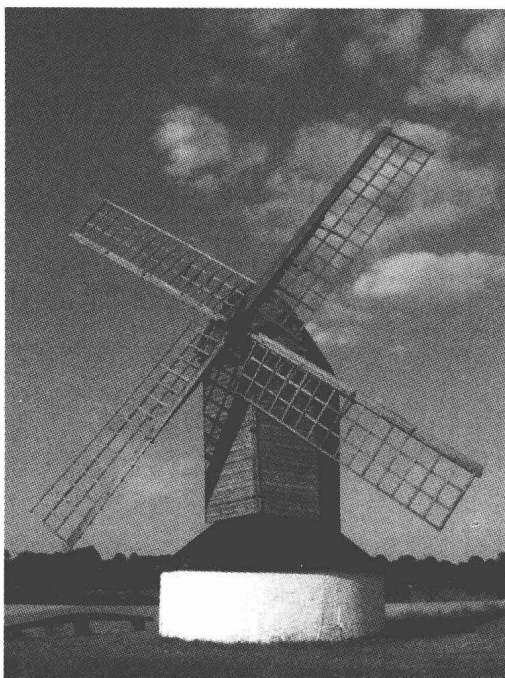


图 1-1 英国的老风车

(作者: Michael · Reeve, 来源: 维基百科, <http://wikipedia.org>。本图适用 GNU 自由文档许可证。)

的翼型,以提高效率。除了研磨谷物,风车还用来在荷兰低洼的沼泽地进行排水。在 18 世纪中期,荷兰移民把风车技术带到了美国。



图 1-2 西班牙的古老风场

(作者: Lourdes · Cardenal, 来源: 维基百科, <http://wikipedia.org>。本图适用 GNU 自由文档许可证。)

风能成功利用的另外一种形式就是后来发展的风力提水风车。在 19 世纪中期,所谓的美式多叶片风力机出现在风能历史的舞台上。这种应用形式的风车其叶轮相对较小,直径范围一米至几米,其主要目的是把水从低于地面几米的地方抽上来供农业使用。这些风力泵系统使用金属叶片,工程设计更加优良,为其优良的现场实际运行性能提供了保障。从 1850 年到 1930 年,仅美国就安装了超过 600 万台这类风力泵机组。

风力发电机组的起始年代大致在 20 世纪。在丹麦,第一台专门用来发电的现代化风电机组建成于 1890 年,向乡村地区提供电力。在同一时期,在美国俄亥俄州的克利夫兰建成了一台大型的风电机组,该机组有着 17m 长的叶片,叶片形状类似削尖的竖桩栅栏的样子。该机组在 12kW 的额定功率下运行了 20 年。

这一时期,更多的系统化的方法被用来改进风力机的工程设计。通过采用低实度叶轮和空气动力化设计的叶片,这些系统的现场实际运行性能非常优良。到 1910 年,丹麦已装有几百个这类风力机,用来向一些乡村地区供应电力。到 1925 年,风力发电机组开始在美洲市场上商业化。此外,容量 0.2 ~ 3kW 不等的两叶片和三叶片机组还被用来为蓄电池充电。

同时,大容量的机组也被开发出来。1931 年,俄罗斯安装了第一台专门用于公用设施系统的机组,这台 100kW 的风力机安装在黑海岸边,工作了 2 年,提供了大约 2 万 kWh 的电力。后来,实验性的风电场开始在美国、丹麦、法国、德国以及英国建成。大型机组的一个重大发展是 Palmer C · Putman 建造的 1250kW 的机组,该机组于 1941 年在 Grandpa's Knob 建成投入运行,位于美国佛蒙特州的拉特兰附近^[8]。其 53m 的叶轮装在 34m 高的塔架上,这台机组在建成后的 5 年里运行了 1100h,直到 1945 年其叶片损坏。鉴于这台机组能够实际证明大型风力发电机组具有技术可行性,因此,建造这台机组的项目可以说是成功的。

在同一时期,还有一些令人感兴趣的风力机组被投入到实验研究中来。法国工程师达里厄·G. J. M 在 1920 年提出了达里厄型风力机的设计,并在 1931 年获得了美国专利^[9]。相比普及的水平轴叶轮,达里厄风力机设有绕其垂直轴旋转的细窄曲线型叶片。在同一时期,Julius D · Madaras 依据马格努斯效应 (Magnus effect) 设计了一台风力机,大体上,马格努斯效应是由气流中旋转圆柱体上受到的力产生的。这时的另外一个重大发展是 S. J · 萨渥纽斯 (Savonius) 在芬兰发明了萨渥纽斯形叶轮。这种叶轮通过把一个圆柱面纵向切割成两半并径向安置于一个竖轴上做成,叶轮的横断面形状类似字母“S”^[10],迎着气流方向,在凸凹半圆柱面上作用的推力的大小不同,以此驱动叶轮旋转。

对风力机的深入研究开始于 20 世纪 50 年代。这时提出了高叶尖速比低实度风力机的理念。例如,德国在 1986 年开发了轻质恒速叶轮,它们配有玻璃钢叶片,安装在由拉索固定的构造简单的中空塔架上,其中最大的有 15m 的叶轮直径,额

定输出为 100kW。

再后来，以石化燃料为原料的发电站提供的电力更便宜、更可靠，在 1940 年时，风电的成本大概在 12 美分/kWh 到 30 美分/kWh，以其他能源形式为原料的电力成本是 3 美分/kWh 到 6 美分/kWh^[7]。到 1970 年，基于石化燃料的电力成本进一步降到了小于 3 美分/kWh。当时，有充足的价格低廉的石化燃料可供使用。同时，数个核电工程也得以开展，而且，核能还被认为是能够最终解决未来能源需求的能源形式。因此，人们对风能的兴趣逐渐减弱了，尤其是到了 1970 年。

然而，1973 年发生的石油危机迫使科学家、工程师以及政策制定者开始二次反思对石化燃料的依赖问题。他们意识到政治干预会抬高石化资源的价格，限制石化资源的可获得性。而且，人们还意识到石化资源的储量迟早有一天将会枯竭。由于安全原因，很多人不能接受核能利用形式。这些因素导致了人们对风能的再次关注，风资源分析、硬件开发以及降低成本技术的研究得以加强。美国委托其国家航空和航天管理局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）进行了大型风力机的开发，由此，一系列水平轴风力机：MOD-0、MOD-1、MOD-2 和 MOD-5 被开发出来^[6]。由于各种不同的原因，这些项目在 20 世纪 80 年代中期都被终止了。同一时期，桑迪亚实验室的科学家开始关注于达里厄风力机的设计和开发^[11]，他们在 20 世纪 80 年代建造了几个大小不同的达里厄风力机模型。

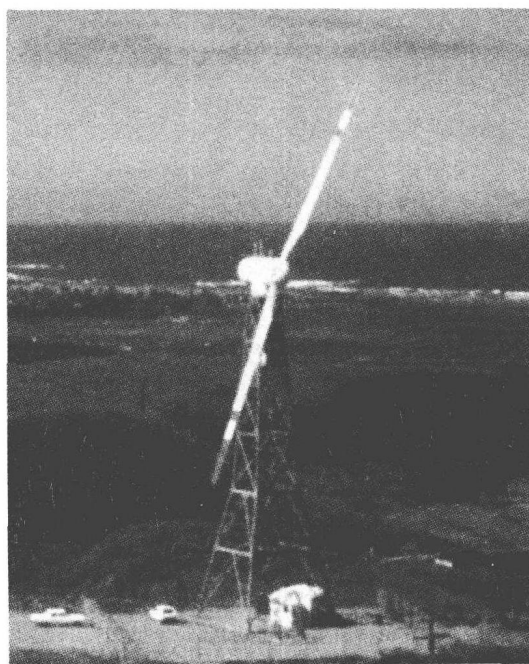


图 1-3 MOD OA 风力机

（图片承蒙夏威夷电力公司授权使用：<http://heco.com>）

后来，对风能的研究和开发日渐加强。一些新颖的理念，例如涡流风力机、扩散放大型风力机的设计，缪斯格洛夫（Musgrove）叶轮等等也是在这一时期提出来的。这些风力机都建有样机并进行过样机测试。然而，仅有水平轴叶轮设计在商业化层面获得了成功。

1.2 风能利用的现状与未来

由于我们承诺减少温室气体排放量，并为发展中国家提供足够的能源，人们开始致力于以可再生能源来作为对基础能源的补充。好几个国家都已经制定了政策框架，以确保可再生能源在未来的能源图景中发挥重要作用。例如，欧盟制定的目标是到2010年可再生能源占其总能源需求的22%。风能，作为商业上可行且经济上有竞争力的可再生能源形式，将在实现上述目标的过程中发挥重要作用。



图 1-4 风电场（汉米斯山/图片由可再生能源系统有限公司授权使用，www.resltd.com）

现在，风能是世界上增长最快的能源形式，第一位的增长速度已经连续保持了5年。全球风电容量在过去的5年里以4.2倍的扩容系数增长。2004年全球总装机容量是39434MW，不同的地区的装机容量如图1-5所示。欧洲的装机容量占全球总装机容量的73%以上，德国位于欧洲第一位，第二位和第三位的国家依次是西班牙和丹麦。风电装机前5位的国家见表1-1。

表 1-1 风力发电全球前 5 位的国家

国家	装机容量/MW
德国	14609
美国	6352
西班牙	6202
丹麦	3115
印度	2120

随着对可再生能源推动的加强和风电成本的降低，风能在未来仍会持续增长。根据欧洲风能协会估算，到 2020 年，风能装机容量可能达到 120 万 MW 的水平。

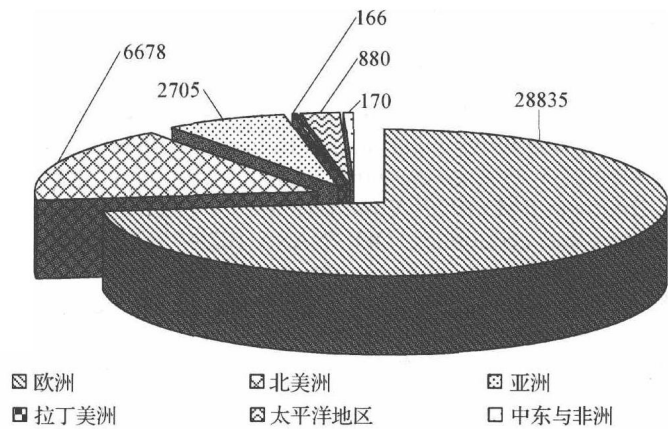


图 1-5 不同地区风能装机容量图 (MW)

伴随着风能行业的增长，风能技术也在日新月异地变化。最显著的一点就是从陆上风电向海上风电的转变。有许多雄心勃勃的海上项目正在开展。例如，在德国，有大约 30 个海上项目分处在项目进展的各种不同阶段，累计装机容量 60000MW。美国也在加强海上风电的开发力度。

风电行业的另外一个趋势是大容量机组。由于大机组的单位千瓦造价更低，风电行业正在从单兆瓦机组向多兆瓦机组迈进。大于 2MW 的机组增长迅速，好几个制造商，比如 RE Power 公司，甚至即将推出 5MW 机组。RE Power 这一机组配置有直径 125m 的巨型叶轮，叶轮的单个叶片大约重达 19 吨^[2]。另外，业界还在致力于减少机头总质量，即叶轮和机舱的总质量。减轻机头总质量对系统的动力学性能有积极作用。通过采用精巧的工程设计，NEG Micon 公司能够将其 4.2MW 样机的机头总质量减轻到 214 吨，这是很不寻常的成就。由于更积极主动的电网支持和更高的效率，利用双馈感应发电机的变速机组渐成行业主流。另外一个创新理念是直驱机组，其高效性能在未来也许会得到证明。

参 考 文 献

- [1] de Azua CR, Colasimone L (2003) Record growth for global wind power in 2002; 28% increase, wind technology worth \$7.3 billion installed last year. AWEA-EWEA News release, Global Wind Power Installations, <http://www.ewea.org>
- [2] de Vries E (2003) Wind turbine technology trends – review 2003. *Renewable Energy World* 6(4): 154-167
- [3] Golding E (1976) The generation of electricity by wind power. Halsted Press, New York
- [4] International Energy Agency (2003) Energy balances of non-OECD Countries 2000-2001, Paris : IEA and OECD
- [5] International Energy Agency (2003) Key world energy statistics. France, <http://www.iea.org>
- [6] Johnson GL (2001) Wind energy systems. <http://www.rpc.com.au>
- [7] Kloeffer RG, Sitz EL (1946) Electric energy from winds. Kansas State College of Engineering Experiment Station Bulletin 52, Manhattan, Kans
- [8] Putnam PC (1948) Power from the wind. Van Nostrand, New York
- [9] Ramler JR, Donovan RM (1979) Wind turbines for electric utilities: Development status and economics. DOE/NASA/1028-79/23, NASA TM-79170, AIAA-79-0965
- [10] Savonius SJ (1931) The S-rotor and its applications. *Mechanical Engineering* 53(5) :333-338
- [11] Sheldahl RE, Blackwell BF (1977) Free-air performance tests of a 5-meter-diameter darrieus turbine. Sandia Laboratories Report SAND 77-1063
- [12] Sorensen B (1995) History of, and recent progress in, wind-energy utilization. *Annual Review of Energy and the Environment* 20(1) : 387-424
- [13] The Windicator (2005) Wind energy facts and figures from windpower monthly. *Windpower Monthly News Magazine*, Denmark, USA : 1-2
- [14] UNDP, World Energy Council (2004) World energy assessment: overview 2004 update. Bureau for development policy, New York : 25-31
- [15] World Energy Council (2000) World Energy Assessment: Energy and the challenge of sustainability. New York
- [16] Zaaier M, Henderson A (2003) Offshore update – A global look at offshore wind energy. *Renewable Energy World* 6(4): 102-119