

国家风力发电工程技术研究中心资助出版

FENGLI FADIAN
JICHU

风力发电基础

王海云 王维庆 朱新湘 梁 斌 编著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

国家风力发电工程技术研究中心资助出版

风力发电基础

王海云 王维庆 朱新湘 梁 斌 编著

重庆大学出版社

内容提要

本书是针对风力发电专业编写的教材。书中全面介绍了风力机的发展史,世界风能发展状况,风的特性及我国的风能资源分布特点,风力机的基本组成,水平轴并网型风力机的基本工作原理,风电场项目规划与选址,风力机的选型、运输与安装,风电场与电力系统的关系,风能系统的经济评价方式,风能系统的成本构成,以及世界可再生能源状况、全球和中国的可再生能源政策。本书较全面地涵盖了风力发电相关的技术领域,从政策、风电发展史、风力机的组成、风电场的建设、风电接入电力系统、经济性评价等多方面对风电系统作了介绍。

本书覆盖范围广,概念清晰,内容丰富,深入浅出地介绍风电的技术难点,适合我国从事风电技术工作的师生、工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电基础/王海云等编著. —重庆:重庆大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5624-5661-2

I. ①风… II. ①王… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 162529 号

风力发电基础

王海云 王维庆 朱新湘 梁 斌 编著
责任编辑:曾显跃 何建云 版式设计:曾显跃
责任校对:夏 宇 责任印制:赵 晟

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆华林天美印务有限公司印刷

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:331 千

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-5661-2 定价:25.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

人口、能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的最为紧迫的问题。随着世界人口的增加和经济的迅速发展,人类消耗能源也与日俱增,目前广泛应用的常规能源,如石油、天然气及核能等都是有限的,并会产生污染。而洁净的可再生能源(如太阳能、风能等)最近一些年来得到了迅猛发展,其中风能是一种洁净、无污染、可再生的绿色能源,在世界各国蕴藏十分巨大,是目前最具大规模开发利用前景的能源,也是一种最具竞争力的规模能源。近年来,随着风电技术的日益成熟,风电装机容量不断增大,并网性能不断改善,发电效率不断提高,风电设备在全球能源设备中脱颖而出。

风力发电指利用风力发电机组直接将风能转化为电能的发电方式,是风能利用的主要形式,也是目前可再生能源中技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一,对减少温室效应,保持生态平衡,改善电力结构将起到重要作用。

风力发电是集空气动力、电机制造、液压传动和计算机自动控制为一体的综合性技术。风轮是将风能转换为机械能的装置,由气动性能优异的叶片(目前商业机组一般为2~3个叶片)装在轮毂上所组成,低速转动的风轮通过传动系统由增速齿轮箱增速,将动力传递给发电机。由于风向经常变化,为了有效地利用风能,偏航系统根据风向传感器测得的风向信号,通过控制器控制偏航电机,使机舱始终对风。风电机组的整体设计、叶片的材料和加工技术、自动化控制系统、液压和传感技术是风力发电机组制造的关键。

风电场包括风力发电机组、辅助设备和其他配套设施。风力发电机组包括风力发电机、机舱、塔架、控制器等。辅助设备(即通用的电力和控制设备)包括输变电设备及线路,通信控制系统等。配套设施包括风力发电机组以及辅助设备的基础、厂房、道路等。风力发电机组和辅助设备的零部件在国内各专门厂家生产,通过铁路和公路运输运送到风电场,并在现场进行总装和吊装。

风力发电技术属于新兴的交叉学科领域,涉及气象学、流体力学、机械工程、电气工程、材料科学、环境科学、电子技术、

海洋工程等多种学科和专业。我国在风力发电技术的人才储备、技术和装备基础等方面较薄弱,本书可为风电领域的科研和工作人员提供技术支持,也可作为大专院校风力发电及相关专业师生的参考书。

本书介绍了风力机的发展史,世界风能发展状况,中国的风电现状;介绍了气象学基础知识、风的形成、风的特性和风能计算,中国的风能资源分布特点;阐述了风力机的分类,基本组成,主要部件的结构和特点,水平轴并网型风力机的基本工作原理,以及其他风能转换系统;介绍了风电场项目规划及风电场项目的可行性研究,风力机的选型、运输与安装,风电场宏观选址和微观选址,风电机组的排列方式和风电场年上网电量的计算;介绍了风电场容量与电力系统的关系,风电场接入系统的组成,风电场对电力系统的影响,风电场对环境的影响,以及风电场的产能预报技术;介绍了风能系统经济评价方式,风能系统的资金成本、运行维护成本,风能的节约成本和环保效益;最后回顾了世界可再生能源状况,京都议定书,全球可再生能源政策,中国能源结构与环境现状,中国的可再生能源政策。

本书由国家风力发电工程技术中心资助出版,同时还得到新疆金风科技股份有限公司的大力协作,武钢、郭健、霍晓萍等人对本书作出了贡献,在此向他们表示衷心的感谢。

另外,本书的编著参阅了贺德馨、宫靖远等前辈的著作和大量参考文献,在此对作者一并致谢。

由于水平所限,书中定有不妥之处,谨请专家与读者批评指正。

编 者
2010年5月

目 录

第1章 风能的开发与利用	1
1.1 风力发电的历史变迁	1
1.2 世界风力发电现状与未来	16
1.3 我国风力发电的现状与未来	22
第2章 风能资源	28
2.1 气象学基础知识	28
2.2 风的形成	30
2.3 风的特性	33
2.4 我国的风能资源分布特点	49
第3章 风力发电机组	52
3.1 风力发电机组的基本类型	52
3.2 水平轴风力机的基本构成	58
3.3 风力发电机组设计基础	69
3.4 水平轴风力机的工作原理	80
3.5 垂直轴风力机的工作原理	90
3.6 其他风能转换系统	99
第4章 风电场项目概述	106
4.1 风电场项目建议书	106
4.2 风电场项目的可行性研究	110
4.3 风电场的风力发电机	114
4.4 风电场场址的选择	119
第5章 风电场与电力系统	130
5.1 风电场容量与电力系统	130
5.2 风电场接入系统的组成	132
5.3 风电场和电力系统的相互影响	137
5.4 风电场对环境的影响	150
5.5 风电场的产能预报	156

第 6 章 风能系统的经济性	163
6.1 引言	163
6.2 风能系统经济评价概述	164
6.3 风能系统的资金成本	167
6.4 运行维护成本	173
6.5 风能价值	175
第 7 章 风力发电政策	181
7.1 世界可再生能源状况	181
7.2 全球可再生能源政策	183
7.3 中国能源结构与环境现状	189
7.4 中国可再生能源政策	191
附录 世界各国的可再生能源政策	194
附录 1 德国可再生能源发展状况和有关法律政策 ...	194
附录 2 丹麦可再生能源发展状况和有关法律政策 ...	197
附录 3 英国可再生能源发展状况和有关法律政策 ...	199
附录 4 美国的可再生能源政策	201
附录 5 印度可再生能源政策	202
参考文献	204

第 1 章

风能的开发与利用

1.1 风力发电的历史变迁

1.1.1 垂直轴风力发电机的历史

人类利用风能已有数千年历史,在蒸汽机发明以前风能曾经作为重要的动力,用于船舶航行、提水饮用、灌溉、排水造田、磨面和锯木等。据考证,人类利用风能的历史源于亚洲。早在公元前 2 000 多年,中国和波斯国(现伊朗)就开始利用风车提水、灌溉农田、磨面、舂米,用风帆推动船舶前进,到了宋代更是我国应用风车的全盛时期(图 1.1)。公元前 1 700 多年,亚洲的巴比伦王国也开始利用风车灌溉农田,可以在阿富汗看到风机遗迹(图 1.2)。古代风机都是垂直轴风车,当时流行将 8 个帆各编在一个直立的杆上,帆的正中上端各由一绳系之,造成不对称,旋转过程中,“叶片”(常用芦苇制成)有 2 个位置(图 1.3),与风向无关,形成立帆式垂直轴风车。

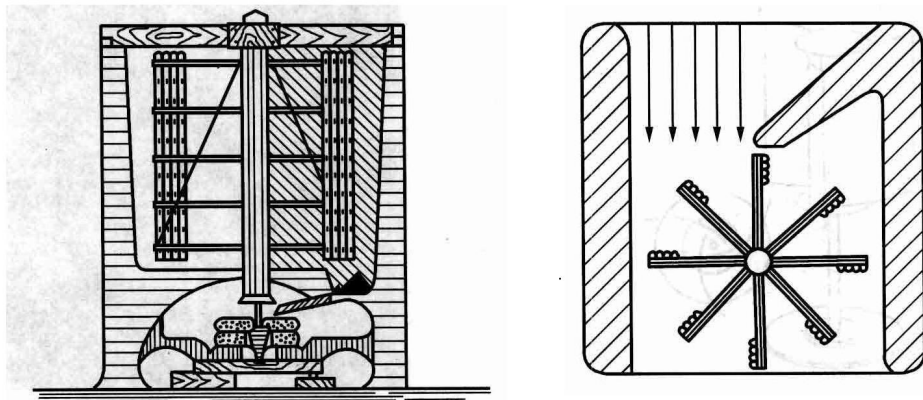


图 1.1 古代波斯和中国的垂直轴风机示意图

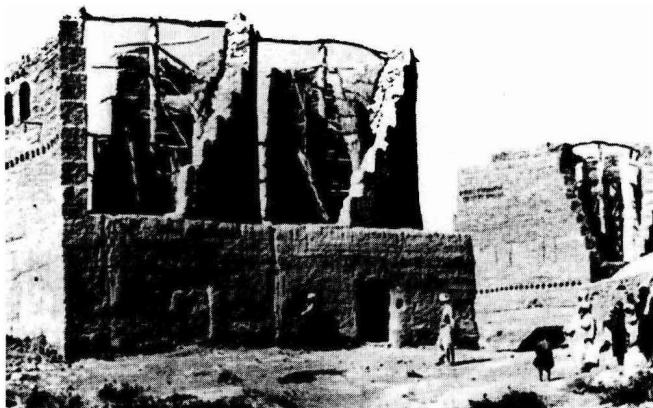


图 1.2 阿富汗风机遗迹

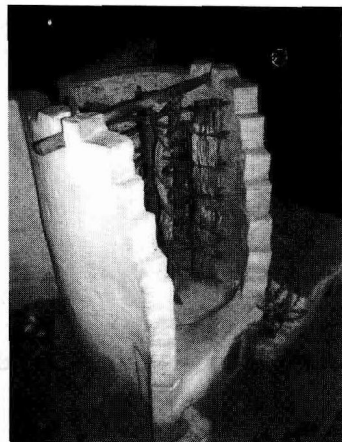


图 1.3 18 世纪波斯的风车

公元 10 世纪伊斯兰人用风车提水,11 世纪风车在中东获得广泛的应用。欧洲风机的起源尚有争议,据说 13 世纪,十字军东征从叙利亚带回了第一台风机。大约公元 1200 年,英国祷告书中第一次记录了风力机,14 世纪风机已成为欧洲不可缺少的原动机。在荷兰,风车先用于莱茵河三角洲湖地汲水,以后又用于榨油和锯木。荷兰人发展了水平轴的风车。18 世纪,荷兰曾利用近万座风车将海堤内的水排干,造出的良田相当于国土面积的 $1/3$,成了著名的风车之国。这种风车在欧洲大陆和英国的乡村非常普遍,成为机械能的主要来源。随着蒸汽机的出现,欧洲风车的数目急剧下降。

垂直轴风力发电机的发明则要比水平轴风力发电机晚一些,直到 20 世纪 20 年代才开始出现。萨布纽斯式风力机是 20 世纪 20 年代发明的垂直轴风力机,它以发明者萨布纽斯 Savonius 的名字命名(S 型风力机),如图 1.4 所示。这种风力机通常由两枚半圆筒形的叶片构成,也有用 3~4 枚叶片的,往往上下重叠多层,效率最大不超过 10%。20 世纪 30 年代初,法国人 Darrieus 想出了卷曲成形的立轴风轮,带有所谓的叶片铰链机构,通过绳索或铰链在两端固定,在重力作用下自然下垂,利用产生的翼形升力产生驱动转矩,如图 1.5 所示。

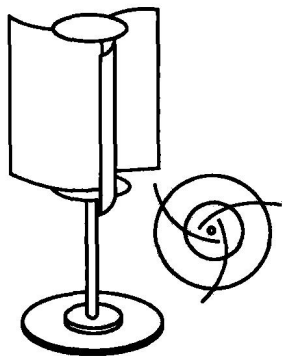


图 1.4 S 型垂直轴风力机

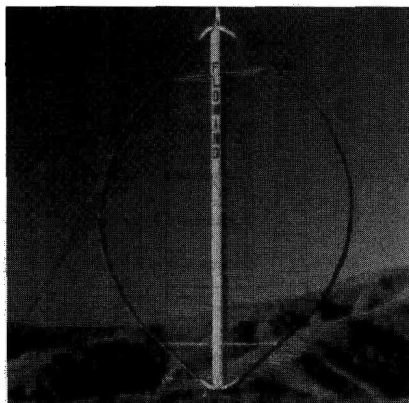


图 1.5 Flowind 150 kW, 17 m, 美国

由于人们普遍认为垂直轴风力发电机的风能利用率要低于水平轴风力发电机,导致垂直轴风力发电机长期得不到重视。20 世纪 70 年代以后,垂直轴机型不再发挥太大的作用。后

来,加拿大人重新想起 Darrieus 的主意,美国、荷兰和德国的公司也开始了自己在立轴风轮领域的研究,研究的风轮直径局限在 20 m 以内。1985 年 Darrieus 风轮的研究首先在加拿大达到了 70 m,功率达到 4 MW,1987 年投入使用。

1976 年,英国和美国的科学家研究发现,排列叶片可以避免垂直轴风轮不能自启动的缺点,设计了 H 型排列的叶片(图 1.6)。直的叶片能调整叶片角度,实现输出功率的调节。

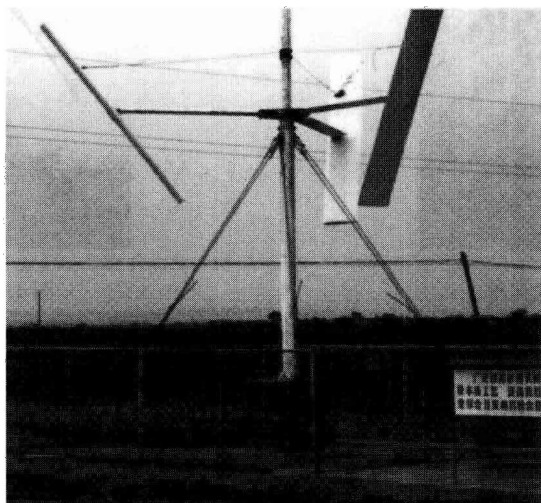


图 1.6 H 型风轮

可以肯定地说,直到今天,垂直轴风力发电机也没有能够得到广泛地推广。因此,垂直轴风力发电机的发展状态也明显落后于水平轴式风力发电机。唯一获得成功的制造者是美国的 Flowind,在加利福尼亚大约安装有 700 台(图 1.5),风轮直径为 17 m 和 19 m。与水平轴式风力发电机相比,垂直轴风力机看起来简单,但没有明显降低成本。因此,对垂直轴风力机还有待进一步研究。

1.1.2 水平轴风力发电机的历史

水平轴风力发电机是现在最流行、最为广泛采用的机型,起源可以追溯到 12 世纪。1759 年,英国人 John Smeaton 在著名的荷兰风力磨坊上把效率提高到 $C_p = 0.28$ 。这种风力磨坊一般有四只转动的叶片,有些风力磨坊设计选用五只、六只或八只叶片。叶片用横梁和板条制成,上面绷紧一块帆布,帆布能够根据风力大小或多或少地展开。帆布随风力的大小伸展,改变了对能量转换起决定作用的受风面积大小,并且有效地保护了设备,避免了过高的功率消耗。在水平轴机型发展的起始阶段,旋转叶片垂直于主风向安装,不跟踪风向。

德国进一步发展了棚架式风力磨坊(图 1.7),旋转叶片和整个风力磨坊主体建筑(塔架)安装在一个地基上随风转动,克服了水平轴机型不跟踪风向的缺点。这种设计方法造价高,后来在荷兰,通过增加现代化旋转机头,进一步改善了对风装置,与旋转平面成 90° 安装的侧轮能够自动进行风向跟踪(图 1.8)。这种方法在 1745 年由 Edmund Lee 设计,并获得专利。

18 世纪中期,为了更好地进行功率限制,人们认识到了旋转叶片的重要性,发明了“合页”式叶片叶轮。合页式叶片的运动部件像百叶窗,在弹簧的作用下,“合页”停留在有效的动力学位置上,直到风压达到或超过一定值,“合页”推开,起作用的风轮表面明显急剧减少。

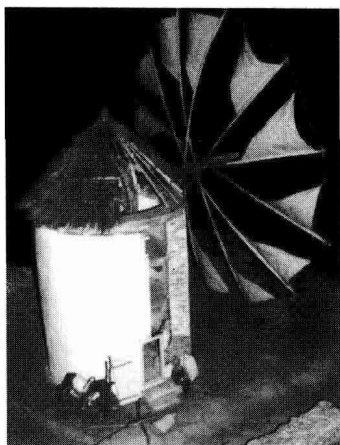


图 1.7 棚架式风磨



图 1.8 荷兰风磨



图 1.9 多叶片风力机

19 世纪中末期至 20 世纪初,风力发电技术还处于独立运行、多叶片、低转速、发电效率低的状态。19 世纪的欧洲,大约有数十万台风力发电机,风轮直径可达 25 m,功率在风力很好时达 25 ~ 30 kW,主要用于谷物磨坊。19 世纪的美国,成百万的多叶片式风力发电机用于泵水,风轮直径为 3 ~ 5 m,功率为 500 ~ 1 000 W,其中 150 000 台至今仍可以见到。由于叶片的数量多(根据直径大小,每个风轮可达到或超过 30 片,图 1.9),多叶片风轮在相对低的转速下,产生了较大的转矩,能够直接驱动恒定转矩的活塞泵。风轮的背风面安装了尾翼,依靠尾翼,风轮的旋转平面能够始终保持正对风向。尾翼向旁边转动 90°,风轮就会与风向平行,风力发电机则处于非运行状态。

Charles F. Brush(1849—1929)是风能研究的先驱者。1887—1888 年冬,他安装了一台被现代人认为是第一台自动运行的用于发电的风力机(图 1.10)。它的单机容量为 12 kW,是个庞然大物——叶轮直径是 17 m,有 144 个由雪松木制成的叶片。风力机运行了约 20 年,用来给他家地窖里的蓄电池充电。Charles F. Brush 是美国电力工业的奠基人之一。他发明了一种效率非常高的直流发电机应用于公共电网,发明了第一个商业化电弧光灯,找到了一种高效的制造铅酸蓄电池的方法。他自己的公司 Brush Electric 位于俄亥俄州 Cleveland 市。1889 年他卖掉了公司,1892 年与爱迪生通用电气公司合并取名为通用电气公司(GE)。

Poul la Cour(1846—1908)是一名气象学家,同时也是现代风力发电机的先驱。他是现代空气动力学的鼻祖,建立了第一个用于实验风力发电机的风洞。Poul la Cour 致力于能源储存的研究,将风力机发出的电力用于电解来生产氢气,供他学校的瓦斯灯使用。这个计划的唯一缺点是:由于氢气中含有少量氧气,致使氢气爆炸,他不得不数次更换学校的窗户。

Poul la Cour 继 Brush 之后发明了快速转动、叶片数少的风力机,在发电时比低转速的风力机效率高很多。1897 年,他发明的两台实验风力机,安装在丹麦 Askov Folk 高中(图 1.11)。Poul la Cour 于 1905 年创立了风电工人协会,风电工人协会成立一年后,就拥有了 356 个会员。

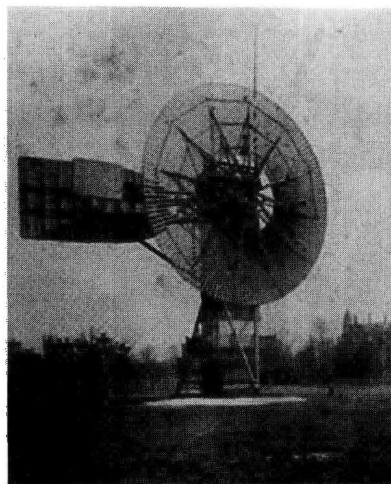
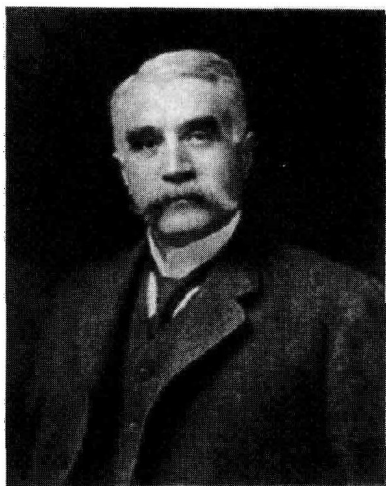


图 1.10 Charles F. Brush 与位于俄亥俄州 Cleveland 市的 Brush 风力发电机

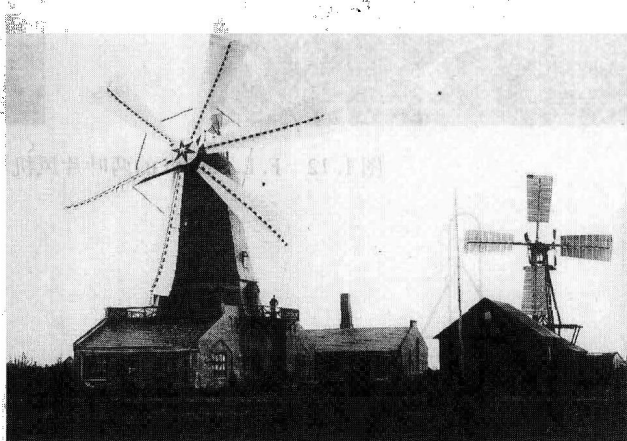
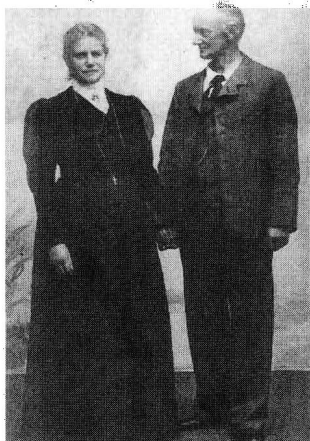


图 1.11 Poul la Cour 与他的实验风力机

他还创办了世界上第一个风力发电期刊 *Journal of Wind Electricity*。

1920 年至 1930 年,丹麦约有 120 个地方公用事业拥有风力发电机,通常的单机容量是 20 ~ 35 kW,总装机约 3 MW。这些风电容量当时占丹麦电力消耗量的 3%。丹麦对风力发电的兴趣在随后的若干年逐渐减退,直到二次世界大战期间出现供电危机。

1940 年至 1950 年,在二次世界大战期间,丹麦工程公司 F. L. Smidth (现在是水泥机械制造商)安装了一批两叶片和三叶片的风机(图 1.12)。丹麦风机制造商已经生产出了两叶片的风机,所有这些风机(与它们的“前辈”一样)发的是直流电。其中三叶片 F. L. Smidth 风机于 1942 年安装在 Bobo 岛,它们看起来很像所谓的“丹麦概念式”风机,是风-柴系统的一部分,给小岛供电。1951 年后,这些直流发电机逐渐被 35 kW 的交流异步发电机取代。

Johannes Juul 工程师是 Poul La Cour 1904 年开办的“风电工程”培训班中的一名学生。1950 年,在丹麦的 Vester Egesborg,他开发了世界上第一台交流风力发电机。1956—1957 年, Johannes Juul 为 SEAS 电力公司安装了一台创新的 200 kW Gedser 风力发电机(图 1.13),风机安装在丹麦南部的 Gedser 海岸。在随后的很多年中,这台交流风力发电机一直是世界上最大

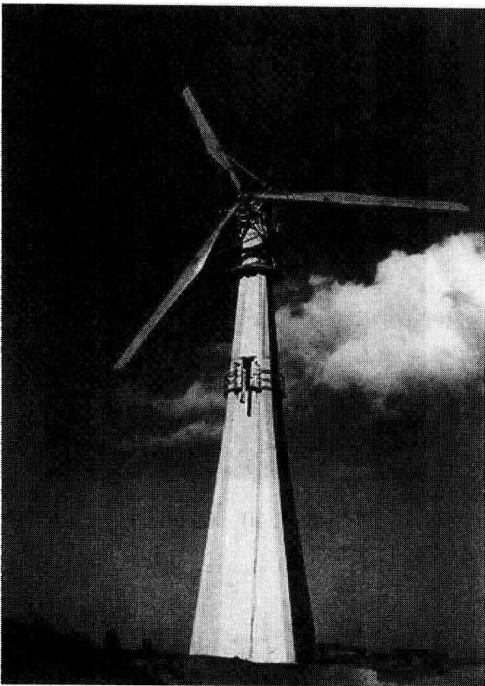


图 1.12 F. L. Smidth 的两叶片风机和三叶片风机

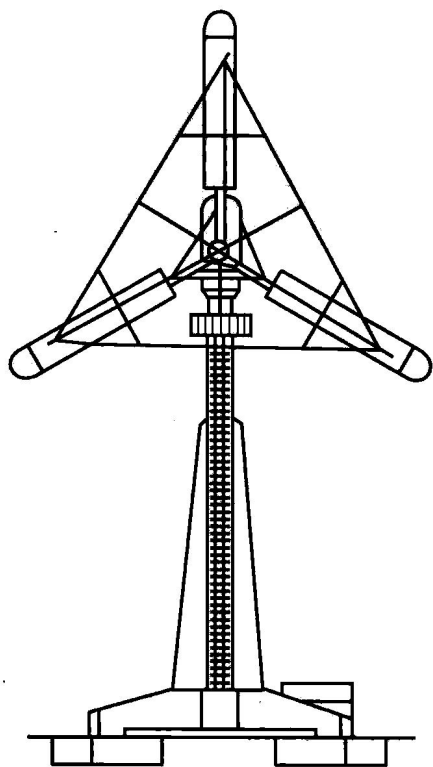


图 1.13 Johannes Juul 的 Gedser 风力发电机

的。这是一台三叶片、上风向、带有电动机械偏航和异步发电机的失速调节型风力机。这种设计概念是现代风力发电机的设计先驱。Johannes Juul 发明了紧急气动叶尖刹车,在风机过速时通过离心力作用释放。这台风力机在无需维护的情况下,运行了 11 年。现在这台风力机的机舱和叶轮在丹麦 Bjerringbro 电力博物馆中展出。

20 世纪 70 年代,在 1973 年第一次石油危机后,几个国家重新燃起了对风能研究的兴趣。在丹麦,电力公司立即把目标放在制造大型风力发电机上,德国、瑞典、英国和美国也紧跟其后。1979 年,丹麦安装了两台 630 kW 风力发电机,一台是桨矩控制的,另一台是失速控制的。

20 世纪 80 年代,一个名叫 Christian Riisager 的木匠,在自己家的后院安装了一台小型的 22 kW 风力发电机(图 1.14),他以 Gedser 风力机的设计为基础,尽可能地采用便宜的标准部件(比如用一台电动机作为发电机,把汽车的部件用作齿轮箱和机械刹车)。Riisager 的风力发电机在丹麦许多私人家庭中成为了成功的典范,同时他的成功给丹麦的风力发电机制造商提供了灵感。从 1980 年起,制造商开始设计他们自己的风力发电机。



图 1.14 Riisager 风力发电机

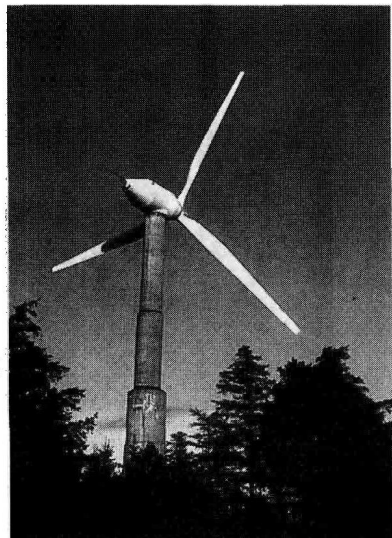


图 1.15 Twind 2 MW 风力发电机

20 世纪 80 年代,欧洲风力发电机组设计概念出现了多元化格局,风力发电机的研究出现双轨现象。小型风电设备的制造者们致力于设备的系列化,通过风电机组按比例地放大制造,保持着技术上的优势,直到出现中型容量、有市场竞争力的风力发电机。大型风电设备的研究开始于 80 年代后期,相对来说没有依赖中、小型风电设备的制造经验,在制造中增加了新的变型。对于小、中型设备来说,采用了流行的三叶片式设计方案,而大型风电机组从一个叶片到三个叶片都有。最后,由 Gedser 风力机改良的古典三叶片、上风向风力机设计在疯狂的竞争中成为商业赢家。Twind 2 MW 风力发电机是最早的兆瓦级风力机(图 1.15),采用下风向设计,叶轮直径为 54 m,发电机为同步发电机。

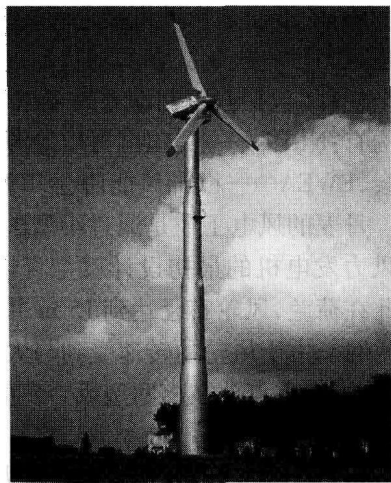


图 1.16 Bonus 30 kW 风力发电机

Bonus 30 kW 风力发电机(图 1.16)从 1980 年开始制造,是现在制造商早期模型的代表。与丹麦大多数制造商相似,Bonus 公司最初是一个农业机械制造厂。

1980—1981 年开发的 55 kW 风力发电机是现代风力发电工业和技术上的突破。随着这种风力机的诞生,风力发电每度电的成本下降了约 50%,由 Risoe 丹麦国家实验室开发的欧洲风图谱对降低度电成本也是非常重要的。图 1.17 展示的是 Nortank 55 kW 风力发电机组独特的选址思维方式,这些风力发电机组安装在丹麦 Ebeltøft 镇的港口码头。



图 1.17 Nortank 55 kW 风力发电机

Risoe 国家实验室因其在风能领域中的工作而广为人知。Risoe 国家实验室的风能和大气物理部有约 100 名员工从事空气弹性学的基础研究(空气动力和结构动力之间的交互作用),以及风资源的评估工作。此外 Risoe 还从事独立的商业化活动——对风力发电机作类型鉴定。Risoe 最初是为风机鉴定而成立的,源于 20 世纪 60 年代丹麦政府支持的风电项目。为了保证风力发电机购买者的利益,政府要求所有被支持的风力发电机必须通过安全鉴定,严格的安全规程(包括双重制动系统要求)使风力发电机更加安全可靠。世界风力发电协会及研究机构有:NREL——美国可再生能源实验室,ECN——荷兰能源研究中心,AWEA——美国风能协会,EWEA——欧洲风能协会,BWEA——英国风能协会,CWEA——中国风能协会。

丹麦的风电工业是通过小型国内市场的经验发展壮大起来的,因此领先于其他国家。丹麦风力发电机的最初设计就是直接向公共电网供电,在其他国家,甚至在德国,也是没有的。因此在荷兰,风轮直径达到 15 m 并经过试验的小型风力发电设备,通过控制,都可以与公共电网联网。由于风轮的转速受到与大电网相连的异步发电机的限制,大大简化了控制策略。相反,德国把重点放在离网型风力发电机上,由于控制技术复杂,开发离网型风力机明显花费多,耗时长,可靠性低。

到 1988 年,丹麦的中、小型风力发电机占了世界市场的 3/4,用风轮直径 10~30 m 的风力机控制了市场。20 世纪 80 年代初期,美国通过国家颁布的免税政策,为风力发电机向电网送

电提供了市场。数千台风力发电机被运送到美国加利福尼亚 Palm Springs 风电场(图 1.18), Micon 55 kW 风力发电机也是其中之一。到了 80 年代的末期,美国的风力发电场主要是欧洲机型,早 5 年开始制造风力机的丹麦制造商比其他国家的公司销售业绩更佳。在加州,有将近一半的风机来自丹麦。大约在 1985 年,加利福尼亚支持计划终结的前一夜,美国的风能市场消失了。尽管看起来市场已经崛起,但从那时起只有很少量的装机投运。然而伟大的加利福尼亚风暴为现代风力发电工业发展的贡献功不可没。后来由于市场政策、财政资助等多方面因素,动摇了丹麦风机在美国市场上的地位。到 2007 年底,德国已成为世界上最大的风电市场,而且德国的装机容量也是全球最大的。

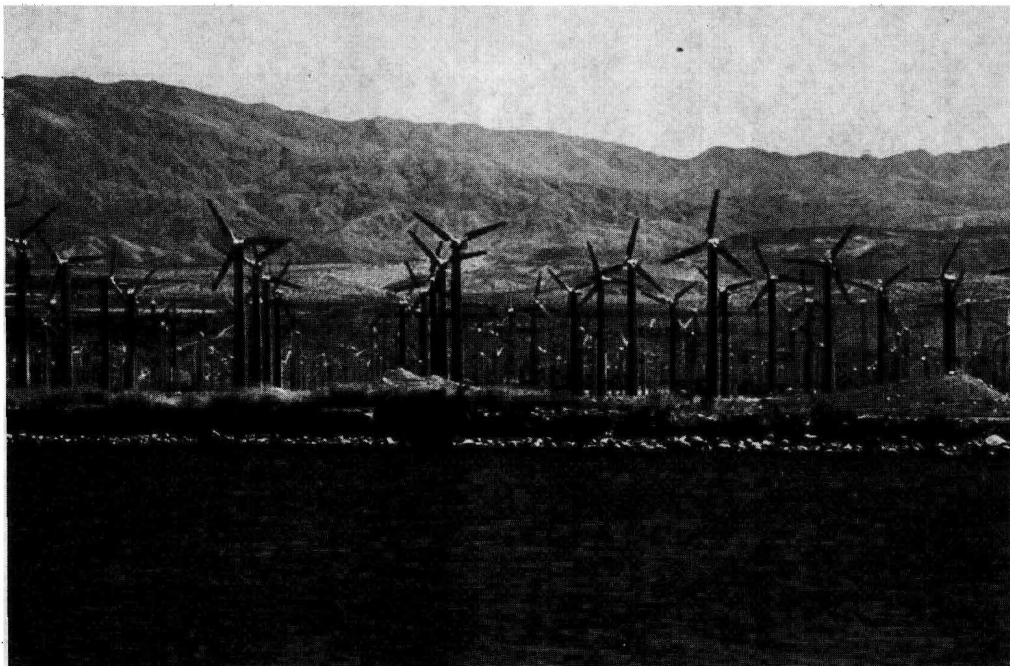


图 1.18 美国加利福尼亚 Palm Springs 风电场

20 世纪 90 年代,单机容量不断增加,300 kW、450 kW、600 kW、750 kW 风力发电机成为主流机型,开始商业化兆瓦级风电机组的研制,出现海上风电场。海上风能的应用前景非常好,对高人口密度和在陆地上很难找到合适安装地点的国家尤为如此。

Vindeby 风电场位于波罗的海丹麦海岸,于 1991 年由公用事业公司 SEAS 建成(图 1.19)。风电场拥有 11 台 Bonus 450 kW 失速调节型风力机,风机位于洛兰岛海岸 1.5~3 km 以北,靠近 Vindeby 村。尽管洛兰岛对从南部来的风有影响,使得产量有些减少,但发电量比容量相同的陆地风电场还是高出 20%。

1995 年,Midtkraft 公用事业公司建造了 Tuno Knob 海上风电场,位于丹麦海岸的 Kattegat 海域(图 1.20),这张照片展示的是水上浮动式起重机在从事安装工作。风电场拥有 10 台 Vestas 500 kW 风力发电机。风力机根据海洋环境进行了修改,每台风机上都安装了一个电动吊,用来更换主要部件(如发电机),无需使用浮吊。此外,这些风机的齿轮箱也进行了修改,转速比陆地风机提高了 10%。这样可以使电能产量增加 5%。

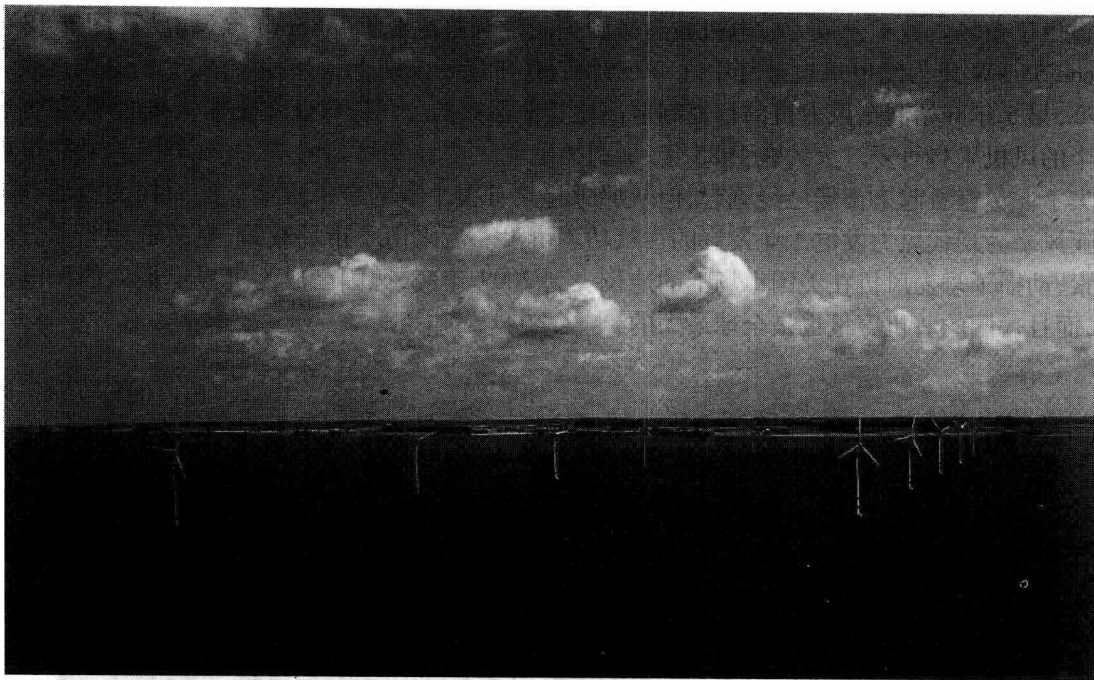


图 1.19 Vindeby 风电场

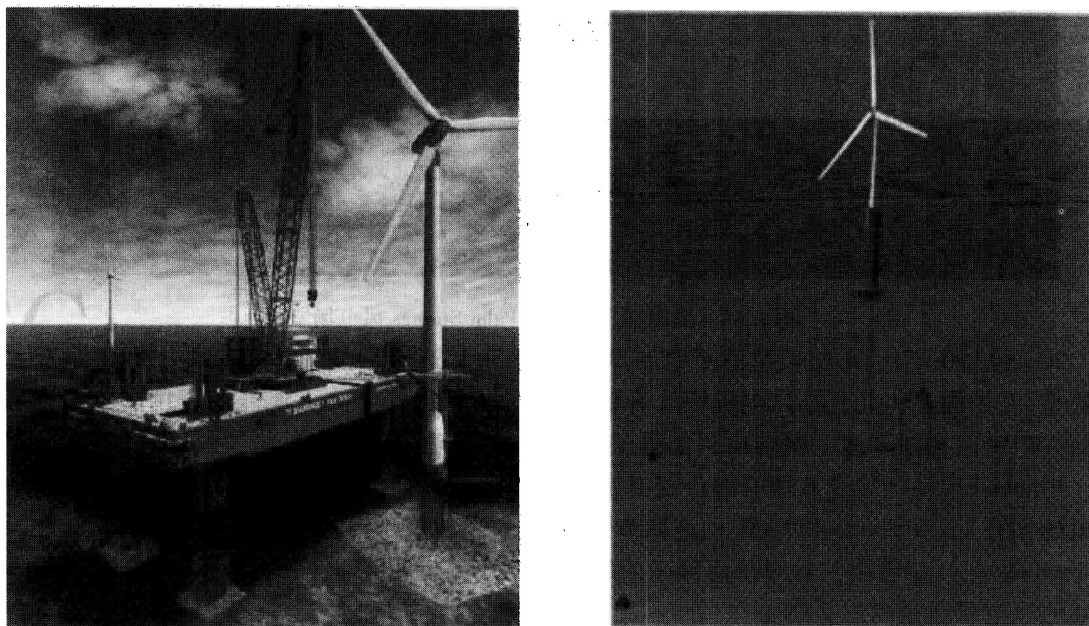


图 1.20 Tuno Knob 海上风电场

1998 年,丹麦建成位于洛兰岛的 Syltholm 风电场,是当时最大的陆地风电场(图 1.21),拥有 35 台 NEG Micon 750 kW 风力机,总装机容量为 26.25 MW。2001 年 5 月,丹麦建成的 Middelgrunden 风电场,是当时最大的海上风电场(图 1.22),拥有 20 台 Bonus 2 MW 风力机,总装机容量为 40 MW。