

FENGLI FADIAN JISHU JI GONGCHENG

风力发电 技术及工程

◎ 宋海辉 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

风力发电技术及工程

◎ 宋海辉 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书全面、系统地阐述了风力发电的发展现状,风及风能资源,风力发电机组及蓄能装置的基本结构原理,独立运行、互补运行、并网运行风力发电系统的结构与运行,风电场的选址、机组布置、开发建设、运行维护和管理等内容。本书通俗简练,系统翔实,图文并茂,适合从事风力发电领域的工程技术人员阅读参考,也适合作为高等院校相关专业的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术及工程/宋海辉主编. —北京:中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6082-6

I. 风… II. 宋… III. 风力发电 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 186417 号

书 名	风力发电技术及工程
作 者	宋海辉 主编
出版发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 63202266 (总机)、68367658 (营销中心) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 18.25 印张, 433 千字
版 次	2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—5000 册
定 价	39.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

风能是一种可再生的自然能源，是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均匀，引起大气层中压力分布不均匀，从而使空气沿水平方向运动，空气流动形成风能。据估计，地球上的风能理论蕴藏量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ，可开发利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，是地球水能的 10 倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需要。

风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一，在风力发电之前，风能主要用于风帆助航、风车提水、风力磨坊、风力锯木等。1887 年冬，美国人布拉什 (Brush) 安装了第一台自动运行的风力发电机组，开创了风力发电的新纪元，风力发电经历了创始期、徘徊发展期和迅猛发展期，如今，风力发电领域正随着航空、航天技术和空气动力学的发展以及计算机、复合材料的使用飞速发展，风力机结构日趋完善，可靠性不断提高，技术不断创新。

风力发电是目前世界上增长速度最快的能源，近年风电装机容量持续每年增长速度超过 20%；到 2005 年底，全球风力发电装机容量达 59113MW，足以供应约 3000 万普通家庭或 7500 万居民的电力需求，德国、丹麦及西班牙是世界上风能利用发展最好的 3 个国家，德国风电已占总发电量的 3%，丹麦风电已超过总发电量的 10%。目前，全球约有 50 多个国家加入了风力发电的行列，估计整个行业就业的员工超过 15 万人。

我国风力发电在 20 世纪 80 年代开始发展，初期大多是独立运行户用百瓦级风电机组，安装在边远、孤立无电地区供农、牧民使用。近年来，随着大型并网风力发电机组的引入和开发，在风资源丰富地区开始出现由多台风电机组组成的风电场，并入地区电网供电，并以难以想象的速度发展，截止到 2006 年年底，我国已累计在 16 个省（自治区、直辖市）累计安装风电机组 3297 台，风电场 92 个，装机容量 2589MW，相比 2005 年增长了 105%。尽管我国近几年风力发电年增长都在 50% 左右，但装备制造水平与装机总容量与发达国家相比还有较大差距，我国风力发电装机容量仅占全国电力装机的 0.11%，风力发电发展潜力巨大。

根据国家发展和改革委员会制定的中国中长期能源战略规划预测,到2020年,力争使风电装机容量达到20GW,每年可替代1500万吨标准煤,同时使中国的风电设计、制造和管理技术达到国际先进水平。

为实现我国风力发电发展的宏伟目标,推进风力发电技术的发展创新和风电场建设,我们特编写了本书,希望对从事风力发电领域的广大工程技术人员有所帮助。

本书分为两篇。第1篇为风力发电技术篇,内容包括风力发电的发展与现状,风及风能资源,风力发电机组及蓄能装置的基本结构原理,独立运行、互补运行、并网运行风力发电系统的结构与运行等内容;第2篇为风力发电场工程篇,内容包括风电场选址和风力发电机组的布置、风电场设备的选型、风电场的经济性及对环境的影响、风电项目开发及风电场工程建设、风电场运行维护管理等内容。

本书第2篇第2~4章由谢云敏编写,其余各章由宋海辉编写,全书由田德教授主审。由于作者的水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

本书在编著过程中得到了华北电力大学可再生能源学院博士生导师田德教授和武汉大学动机学院博士生导师蔡维由教授的大力支持和帮助,在此深表谢意!同时参阅了粤电能源部分资料和大量参考文献、网上资料,在此对其作者一并表示衷心的感谢!

作者

2009年2月

目 录

前言

第1篇 风力发电技术

第1章 绪论	3
1.1 风能利用史与风力发电的特点	3
1.2 世界风力发电发展与现状	6
1.3 中国风力发电发展、现状与展望	17
第2章 风与风能资源	29
2.1 风的形成	29
2.2 风的测量	33
2.3 中国的风能资源	45
第3章 风力机	49
3.1 风力机的类型	49
3.2 风力机的结构组成	53
3.3 风力机的基本参数与基本理论	68
第4章 风力发电机与蓄能装置	79
4.1 风力发电原理	79
4.2 风力发电系统及其风力发电机	82
4.3 风力发电的电能储存	100
4.4 风力发电的控制器与逆变器	105
第5章 风力发电机组的运行	113
5.1 风力发电机组的并网运行	113
5.2 风力发电与柴油发电联合运行	128
5.3 风力发电与太阳光发电联合运行	134
5.4 风力发电机组的独立运行	146

第2篇 风力发电场工程

第1章 风力发电场选址和风力发电机组的布置	155
-----------------------	-----

1.1	风力发电场选址概述	155
1.2	风能资源的评估	157
1.3	风力发电场宏观选址	161
1.4	风力发电场风况观测	166
1.5	风力发电场微观选址	169
1.6	风力发电机组的容量选择与排列布置	172
1.7	风力发电实用软件介绍	176
1.8	风力发电场年发电量估算	183
第2章	风力发电场设备选型	187
2.1	风力发电场设备选型概述	187
2.2	风力发电机组机械部分的选型	191
2.3	风力发电场的电力系统选型设计	198
2.4	风力发电场与电力系统的匹配	200
第3章	风力发电场的经济性及对环境的影响	207
3.1	风力发电的经济性指标	207
3.2	影响风力发电经济性的主要因素	211
3.3	风力发电场的经济性	213
3.4	风力发电场对环境的影响	216
第4章	风力发电项目开发及风力发电场工程建设	221
4.1	风力发电项目开发及风力发电场工程建设流程	221
4.2	风力发电投资项目的立项	224
4.3	风力发电投资项目的可行性研究	225
4.4	风力发电项目公司	226
4.5	风力发电场工程建设前期工作	230
4.6	风力发电场工程基础建设施工	236
4.7	风力发电机组的安装	241
4.8	风力发电机组的调整试验	248
4.9	风力发电机组的试运行	250
第5章	风力发电场运行维护和管理	252
5.1	风力发电场的运行	252
5.2	风力发电场的维护	260
5.3	风力发电场的异常运行和事故处理	265
5.4	风力发电机组的磨损与润滑	272
5.5	风力发电场的管理	275

第 1 篇

风 力 发 电 技 术



第 1 章 绪 论

1.1 风能利用史与风力发电的特点

1.1.1 风能利用史

风能是一种可再生的自然能源，是太阳能的一种转化形式。太阳的辐射造成地球表面受热不均匀，引起大气层中压力分布不均匀，从而使空气沿水平方向运动，空气流动所形成的动能称为风能。

据估计，地球上的风能理论蕴藏量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$ ，可开发利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ MW}$ ，是地球水能的 10 倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需要。

风能是人类利用历史最悠久的能源和动力之一，风能利用主要包括风力发电、风帆助航、风车提水、风力磨坊、风力锯木等。

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，人们利用风帆驱动水车灌溉农田。沿海沿江地区的风帆船和用风力提水灌溉或制盐的做法，一直延续到 20 世纪 50 年代，仅在江苏沿海利用风力提水的设备曾达 20 万台，如图 1-1-1 所示。

埃及也被认为是最先实际利用风能的国家之一，早在公元前几千年，古埃及人就开始用风帆来协助奴隶们划桨，后来，使用风帆来协助役畜磨谷（见图 1-1-2）和提水等。

在公元前几个世纪，波斯人也开始利用风能，到公元 700 年时，他们已建造了竖直转轴的风车，即“方格形风车”（Panemon）来带动石磨磨谷。其他的中东民族，主要是穆斯林，也建造了他们自己的方格形风车。

12 世纪，风车从中东传入欧洲。据认为，是班师的十字军将风车的概念和设计带到了欧洲，风力和水力很快就在中世纪的英格兰成了机械能的主要来源。荷兰人发明了水平转轴、螺旋桨式的风车，这种风车在荷兰和英国的乡村广泛应用。

16 世纪，荷兰人利用风车排水，与海争地，在低洼的海滩地上建国立业，逐渐发展成为一个经济发达的国家（见图 1-1-3）。

在整个中世纪，在诸如叶片空气动力学、齿轮设计和风车的整体设计这些领域中，新的技术改进不断产生。最老式的欧洲风车是“柱式风车”，它的螺旋桨安装在竖立在地上的柱子的顶端，磨坊工人通过转动柱子来将风车对准盛行的风向。后来进化为“帽式风车”，在这种风车中，对准风向的转轴是支撑叶片的“帽子”的一个组成部分。1750 年，发明了扇形尾自动调向机构，风车可以自动对准风向了。



图 1-1-1 风力提水装置

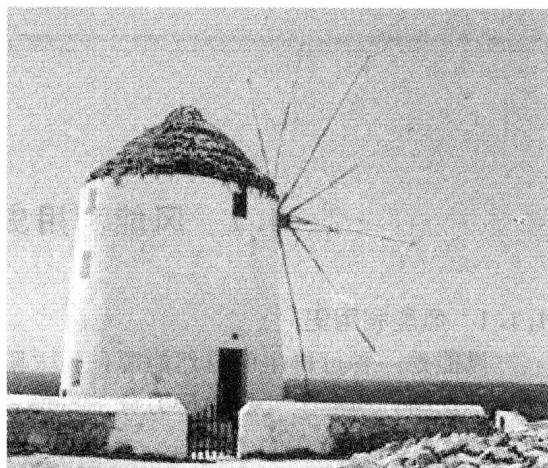


图 1-1-2 风力磨坊



图 1-1-3 古老的荷兰风车

今天，荷兰人将风车视为国宝，北欧国家保留的大量荷兰式的大风车，已成为人类文明史的见证。

1850 年，丹尼尔·哈利戴开始发展了后来演变成鼎鼎有名的“美国农场风车”。这种风车主要用来抽水，是一种在许多乡村地区仍可见到的为人们所熟悉的多叶片风车。即使在今天，假如没有这种风车，那么在美国、阿根廷和澳大利亚的许多地区，牲畜的牧场饲养也是不可能的。

19 世纪末，丹麦人首先研制了风力发电机。1891 年，丹麦建成了世界第一座风力发电站。20 世纪 20 年代，人们开始研究利用风车作大规模发电。风力发电在解决无电农牧



区居民的用电方面起到了重要的作用,1931年,在苏联的 Crimean Balaclava 地区建造了一座 100kW 容量的风力发电机,此乃最早商业化的风力发电机。到 20 世纪 30 年代,约有十多个美国公司生产和出售风力发电机,大部分是卖给在多风的密西西比河流域以西的大平原上的农场主。在刮风时,这些机器一般可以给出多至 1000W 的直流电功率。

20 世纪 40 年代在拉特兰、弗蒙特附近建造了史密斯—普特南风力发电机组,巨大的叶片长 175 英尺 (ft),可以提供 1250kW 的电力,用来为弗蒙特电网供电。但是由于战时材料的缺乏和经费的不足,使得这项工程在强风折断了它的两个 8 吨重的叶片中的一个之后便终止了。

一些欧洲国家建造了大量的风力发电机。在 20 世纪 50~60 年代,法国人建立了设计先进的 100~300kW 的发电机。德国人建造了一些 100kW 的风力发电机,来为他们的公用电网提供额外的电力。但是,由于便宜的矿物燃料发电机的激烈竞争,这些实验性机器后来停止了使用。

1973 年发生石油危机以后,美、欧等西方发达国家为寻求替代化石燃料的能源,投入大量经费,动员高科技产业,利用计算机、空气动力学、结构力学和材料科学等领域的新技术研制现代风力发电机组,开创了风能利用的新时期。风力发电进入了一个蓬勃发展的阶段,在世界不同地区建立了许多大、中型的风电场。

气候变化也推动了风电技术发展的进一步升温。2005 年 2 月,“京都议定书”正式生效,成为推动风电发展的新动力,欧洲将风电的发展作为实现减排二氧化碳等温室气体承诺的措施,减轻环境的压力正在驱动风力发电的高速发展。

预计到 21 世纪中叶,风能将会成为世界能源供应的支柱之一,成为人类社会可持续发展的主要动力源。

1.1.2 风力发电的意义及特点

随着现代工业的飞速发展,人类对能源的需求明显增加,而地球上可利用的常规能源日趋匮乏。据专家预测:煤炭还可开采 221 年、石油 39 年、天然气只能用 60 年,如何实现能源的持续发展?唯一的出路就是有计划地利用常规能源、节约能源、开发新能源和可再生能源,目前电能产生主要靠火力发电,但火力发电产生大量的污染物,为减少对大气的污染,实现能源的持续发展,世界各国都在积极发展风力发电,可以预见,在今后 10 年,风力发电必将成为世界各国更加重视和重点开发的能源之一。

风力发电是利用风能来发电的,与其他常规能源发电相比,风力发电有其自己的特点。

1. 风力发电是可再生的洁净能源

风力发电是一种可再生的洁净能源,不消耗资源,不污染环境,这是其他常规能源(如煤电、油电)与核电所无法比拟的优点。

2. 建设周期短

风力发电场建设工期短,单台机组安装仅需几周,从土建、安装到投产,1 万千瓦级的风电场建设期只需 0.5~1 年时间,是煤电、核电无可比拟的。

3. 装机规模灵活

投资规模灵活,可根据资金情况,决定一次装机规模,有了一台资金就可加装一台,



投产一台。

4. 可靠性高

把现代高科技应用于风力发电机组,使风力发电可靠性大大提高,大、中型风力发电机组可靠性已达 98%,机组寿命可达 20 年。

5. 造价低,和常规能源发电相比具有竞争力

单位千瓦的造价和单位千瓦时的电价已接近火力发电,低于油电与核电,若计及煤电的环境保护与交通运输的间接投资,则风电经济性将优于煤电。

6. 运行维护简单

风力机自动化水平很高,完全可以无人值守,只需定期进行必要的维护,不存在火力发电大修问题。

7. 实际占地面积小

机组监控、变电等建筑仅占整个风力发电场范围 1% 的土地,其余场地仍可以供农、牧、渔业使用。

8. 发电方式多样化

风力发电既可并网运行,也可和其他能源(如柴油发电、太阳能发电、水力发电)组成互补系统,还可独立运行,如建在孤岛、海滩或边远沙漠等荒凉不毛之地,对于解决远离电网的老、少、边地区用电,脱贫致富将发挥重大作用。

1.2 世界风力发电发展与现状

1.2.1 世界风力发电的发展

风能利用具有悠久的历史,而将其用于发电却只有 100 多年时间。回顾风力发电的发展历程,大致可分为 3 个阶段。

1. 风力发电创始期

1887~1888 年冬,美国人布拉什安装了一台被现代人认为是第一台自动运行的且用于发电的风力发电机。这台发电机仅为 12kW,却是个庞然大物——叶轮直径足有 17m,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,如图 1-1-4 所示。

1891 年,丹麦人拉库尔(La Cour)教授设计建造了世界上第一座风力发电试验站,采用蓄电池充、放电方式供电,获得成功,并得到推广应用。1897 年,La Cour 教授发明了快速转动、叶片数少的风力机,在发电时比低转速的风力机效率高得多,如图 1-1-5 所示。到 1910 年,丹麦已建成 100 座容量为 5~25kW 的风力发电站,风力发电量占全国总发电量的 1/4。丹麦人如此积极开发利用风能,其原因在于:丹麦石油资源贫乏,所需石油基本从国外进口,有着相当丰富的风能资源和技术储备,因此丹麦政府大力倡导开发利用风能和其他能源。

到 20 世纪 30 年代初,小容量的风力发电机组技术已经比较成熟,并得到广泛的推广和应用。

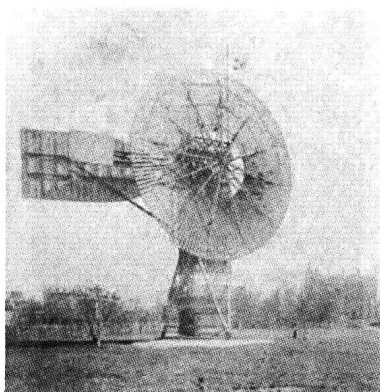


图 1-1-4 俄亥俄州 Cleveland 市的
Brush 风车

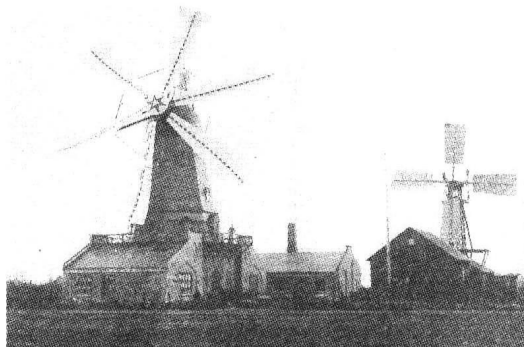


图 1-1-5 La Cour 的
少叶片风力机

2. 风力发电徘徊发展期

从 20 世纪 30 年代初到 60 年代末,为风力发电的第二个阶段。此时风力发电处于徘徊时期。

20 世纪 30 年代初,美国、丹麦、法国、英国、加拿大和德国等欧美国家开始大力研制技术相对复杂的大、中型风力发电机组,渴望探索到廉价的能源。

1932 年,美国工程师霍尼弗(Honnet)设计了一种庞大的风力发电机组,它有两个直径达 160m 反向旋转的风轮,功率达 20MW。由于发电机定、转子的反向运动使速度翻了一倍,从而减小了发电机重量,可这种风力发电机组无法用于实际。

1941 年,美国设计了一台 1250kW 的伯能(Putnam)大型风力发电机,采用二叶片及直接产生交流电的设计,可直接并网运行。经过 1000h 的运转后,到 1945 年,一只叶片因金属疲劳而断裂。当时正值第二次世界大战,美国金属材料异常缺乏,经过研究,发现即使修复也无法与当时火力发电相竞争,因而放弃了重建计划。20 世纪 50 年代及 60 年代,风力发电在美国几乎没有得到重视。

丹麦在风力机并网方面研究比较深入,取得了很多成果。1942 年,丹麦 F. L. Smidth 公司在 Bobo 岛安装了一批两叶片和三叶片的风机,这些风机(与它们的前辈一样)发的是直流电,如图 1-1-6 所示。最具代表性的风力机是盖瑟(Gedser)风力发电机组,如图 1-1-7 所示。这是 1956 年在盖瑟地域建造的试验风力机,额定功率为 200kW,1957 年投入运行。直到 1968 年,由于风力发电价格高于石油发电价格的 2 倍才停止运转。1973 年,由于发生了世界性的石油危机,它又被重新整修,于 1977 年再次运转发电。

1950 年, Johannes Juul 在丹麦的 Vester Egesborg 成为了世界上开发第一台交流风力发电机的先驱,如图 1-1-8 所示。

创新的 200kW 盖瑟风力发电机在 1956~1957 年由 Johannes Juul 为 SEAS 电力公司建成,风机安装在丹麦南部的盖瑟海岸(见图 1-1-9)。三叶片,上风向,带有电动机机械偏航和异步发电机的风力发电机是现代风力发电机的设计先驱。这台风力机是失速调节型风力机, Johannes Juul 发明了紧急气动叶尖刹车,在风机过速时通过离心力的作用释放。基本上与现代失速型风力发电机上使用着相同的系统。这台风力发电机,在随后的很

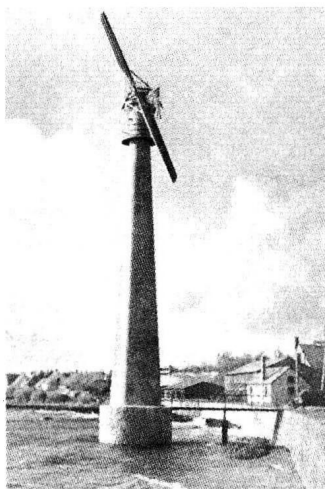


图 1-1-6 F. L. Smidth 二叶片风力发电机组



图 1-1-7 盖瑟风力发电机组

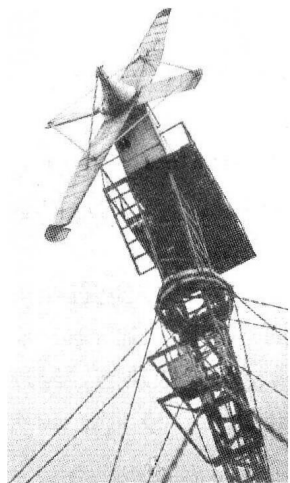


图 1-1-8 Vester Egesborg 风力发电机组

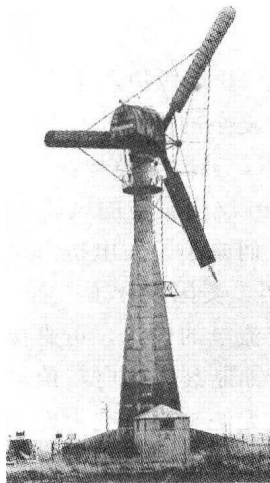


图 1-1-9 200kW Gedser 风力发电机组

多年中一直是世界上最大的。它在无需维护的情况下，运行了 11 年。风力机的机舱和叶轮现在在丹麦 Bjerringbro 电力博物馆中展出。

1958~1966 年，在法国研制的大型风力发电机中，有 3 种比较具有代表性。尼尔必克（Neypic）风力发电机于 1958 年投入运行，额定功率 132kW，三叶片，最大功率可达 150kW。贝斯·罗曼尼风力发电机，额定功率 800kW，三叶片，风轮直径 30.2m。1963 年投运一台 1MW 风力机，三叶片，风轮直径 35m，后来由于刹车系统问题而停止运行。

英国风力发电机主要是在 1948~1963 年这 15 年中发展起来的。1952 年，约翰·布朗（John·Brown）设计的 100kW 风力发电机，最大功率可达 130kW，但由于设计不完善，于 1956 年停运。另一台设计独特的 100kW 恩菲·安德鲁风力发电机，其叶片是中空的，尖端有开口。当叶片转动时，根据空气动力学原理，在开口处产生低压，抽出叶片内一直通到塔内的空气。由于塔底部开有进风口，空气可不断地从底部向上流，从而使安装在塔内的风力



涡轮发电机发电。当风速高时,空气流动快,发电量也增加。在一般情况下,顶部叶片转速为 $90\sim 130\text{r/min}$ 。这台风力机因叶片根部轴承损坏,无法找到替代的零件而停止运行。

德国由于不产石油,所以像其他欧洲国家一样,积极地开发风能资源。1957~1968年,在风力专家胡特(Prof. Wrcu Hutter)教授的指导下,先后建造了6kW、100kW风力发电机,如图1-1-10所示。其特点是叶片均采用玻璃纤维为主要材料,有些还采用了复合材料,这在当时是非常先进并通过多年的试验证实的技术。

从以上分析不难看出,为了找到更加廉价的能源,世界各国对风力发电寄予厚望,也投入了大量人力、物力、财力,研制成功了一些大型风力发电机,取得了一些经验,但得到的结论却正好相反,小型风力机较经济,而大型风力机却造价昂贵,其总运行费用超出燃料发电,风力发电因此受到很大阻碍。特别是在20世纪60年代初,由于石油价格降低,风力发电在造价和稳定可靠性方面远竞争不过火力发电,所以风力发电的研究又停滞下来。



图1-1-10 Hutter 风力
发电机组

3. 风力发电迅猛发展期

1973年秋,全球爆发了石油危机,很多国家面临能源短缺的困境,风能的开发研究又重新得到重视。美国、丹麦、英国、德国、日本、加拿大等对大力开发风能有了新的认识,并积极开展了成本低、可靠性高的大、中型风力发电机组的选型、制造和试验工作。

1972年,美国成立了能源部,专门设置了负责发展风力发电的机构。由美国国家航空和航天局(NASA)负责研制大型风力发电机组(100kW以上);中型(10~100kW)及小型风力发电机组(10kW以下)中的水平轴风力发电机组由洛克威尔公司拉克弗来斯分公司(Rockwell Corp. Rocky Flats Branch)负责制造;垂直轴风力发电机组由桑迪亚(Sandia)研究所负责生产。1976~1980年,美国政府发展风力发电机的预算每年都大幅度增加。1975年9月,研制了100kW MOD-0型风力发电机,叶片为铝合金材料。1977年,200kW MOD-0A风力发电机投入运行,叶片改为更适合耐久的叠层木材料,但发电成本还是太高。1979年5月,MOD-1型风力发电机投入运行,其额定功率为2000kW,风轮直径61m,该机组叶片采用铁质材料,不但噪声大,而且干扰电视信号,受到当地居民的强烈反对,很快就被拆除了。

1980年12月,MOD-2型风力发电机开始运转,额定功率为2500kW,风轮直径为91.5m,叶片主要材料仍采用铁,但其尖端转动部分则采用复合材料,最后运转时间的记录是14000h。1983年,由波音公司研制的MOD-5b型风力发电机组投入运行,其额定功率为3.2MW,风轮直径98m,如图1-1-11所示。

丹麦在20世纪70年代初,也开始研制大型风力发电机组。1978年,特文德(Tvind)风力发电机组投入运行,它是一台相当革命的风力发电机组。该风力发电机额定功率为2MW,下风向变速风机,同步发电机,风轮直径为54m,三叶片,叶片材料采用玻璃纤维制造,如图1-1-12所示。该机组是由特文德学院的师生共同设计制造的,并得到一些专家的指导。其目

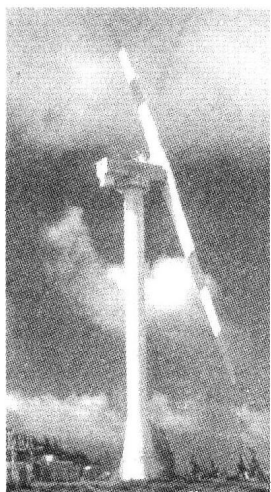


图 1-1-11 MOD-5b 型风力发电机组



图 1-1-12 Tvind 风力发电机组

的是解决学院的供电和取暖问题，也希望能借此说服主管能源的政府部门，证明一部分电力能源可以从风力资源获得。为了节省费用，增速齿轮箱是采用一个原来为矿场制造而退货的齿轮箱，顶部转动的底盘轴承是利用一个起重机轴承，再加上一个旧发电机，共同拼装起来，可以说是世界上最便宜的风力发电机。其设计的独特之处是在叶尖处储备一个降落伞，当叶片超速时，自动把伞推出，以降低转速。目前，这台风力发电机还在正常运行之中。此外，还有丹麦木匠 Christian Riisager 设计的 Riisager 风力发电机组，如图 1-1-13 所示。

Bonus 30kW 风力发电机组从 1980 年开始制造，是丹麦现代制造商早期模型的代表，如图 1-1-14 所示。

丹麦于 1980~1981 年开发的 Nortank 55kW 风力发电机是现代风力发电机工业和技术上的一个突破。随着这种风力发电机的诞生，风力发电每度电的成本下降了约 50%。风能工业变得越来越专业了，此外相应地由 RISO 国家实验室开发的欧洲风图谱对降低每



图 1-1-13 Riisager 风力发电机组

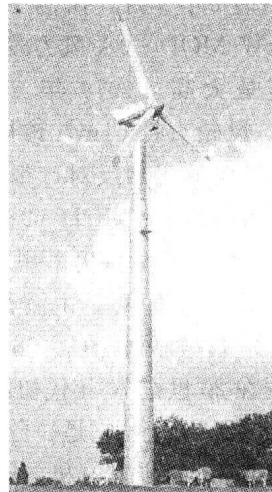


图 1-1-14 Bonus 30kW 风力发电机组