



“十三五”普通高等教育本科规划教材

风力机原理与设计

贾彦 常泽辉 主 编
侯静 东雪青 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

风力机原理与设计

主 编 贾 彦 常泽辉
副主编 侯 静 东雪青
参 编 王睿怀 王思文
主 审 李 春



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。全书共10章,主要阐述了风力机的发展历史、现状及未来的发展趋势,风的特性、测量及资源的分布,风力机种类、构成及主要部件的工作原理,风力机相关的基本理论知识,风力机气动特性、翼型选择,水平轴和垂直轴风力机的结构及设计,风力机的发电及控制系统、风电场规划与选址,风力提水机设计等。

本书可作为普通高等教育本科新能源科学与工程、能源与动力工程等相关专业教材,也可供从事风力机设计、运行等相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力机原理与设计 / 贾彦, 常泽辉主编. —北京: 中国电力出版社, 2015.4

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-7609-0

I. ①风… II. ①贾… ②常… III. ①风力发电机—理论—高等学校—教材②风力发电机—设计—高等学校—教材 IV. ①TM611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 145059 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年4月第一版 2015年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17印张 410千字

定价 35.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

风能作为一种可再生能源，得到了众多研究学者的关注，它具有储量大、分布广、可持续再生、环保节能、不需长距离运输并可与其他能源耦合使用等诸多优点。随着技术的成熟和发电成本的降低，风力发电技术具有明显的经济效益和社会效益。

我国是一个风能资源极为丰富的国家，也是世界上最早开发利用风能的国家之一。其中，陆上及近海的风能资源达到 15 亿 kW，海上可开发利用的风能资源为 5 亿 kW 以上。面对当今人类社会大规模使用石油、煤炭等化石能源所带来的资源日益枯竭和生态环境不断恶化等严峻的现实，开发利用风能为人类提供绿色环保的能源意义重大，也是符合我国能源发展战略的。随着国家对风力发电技术的扶持力度加强，2010 年至今，我国的风力机总装机容量仅低于美国，位居世界第二位。

风能资源虽然丰富，但其品位较低、储存困难，在使用过程中还会受到季节、地域等的影响。因此，如何高效利用风能、降低风能利用设备的投资运行成本并确保机组安全可靠地运行，将是未来风力机技术研究的重点，这其中包含大量复杂的科学问题和工程问题。风能利用所涉及的学科包含空气动力学、气象学、遥感技术、热力学、机械学、材料学、电力电子技术、制造技术、控制技术以及测试技术等，这无疑为多学科交叉提供了一个良好的平台，同时也为科研技术人员提供了一个有所创新、有所探究、有所作为的广阔空间。

本书编写的宗旨，一是介绍风能利用技术的机理和特性，便于读者对所感兴趣的内容作进一步的学习和研究；二是突出风能利用技术的实用性，书中在介绍风能利用技术的种类及特点的基础上，加强了风能利用装置的设计环节，并采用实例的方式加以巩固和理解；三是突出风能利用技术新知识的融合，将国外相关专业书籍中的新知识和新观点与国内教材进行了有机的融合，提高了本书的参考学习价值。

本书共 10 章。第 1 章为风力机技术发展概述，介绍了目前风力发电技术的历史、现状及未来的发展趋势；第 2 章为风能资源，介绍了风的形成、风的特性、风的测量、风能资源的分布等相关知识；第 3 章为风力机种类及构成，介绍了风力机的不同分类以及水平轴风力机主要部件的工作原理；第 4 章为风力机基本理论，介绍了风轮的基本理论，包括贝兹理论、制动盘理论、叶素理论等基础知识；第 5 章为风力机翼型及气动设计，介绍了理想风轮设计模型、风轮叶片设计原理及风力机翼型选择等；第 6 章为水平轴风力机的结构设计，介绍了风力机主要部件的设计原则和方法；第 7 章为垂直轴风力机及其他风力机，介绍了垂直轴风力机的结构特点和组成，以及其他独具特色的风力机；第 8 章为风力机的发电及控制系统，介绍了风力机发电部分的工作原理及常见的发电模式；第 9 章为风电场规划与选址，介绍了风电场风速统计模型、风电场宏观选址和微观选址等知识；第 10 章为风力提水机设计，介绍了风力提水装置的结构、设计过程等应用理论。

本书由内蒙古工业大学贾彦副教授、常泽辉博士统稿，其中第 1、第 4 章由内蒙古建筑职业技术学院侯静编写，第 2、第 8、第 9 章由贾彦编写，第 3、第 5、第 6 章由常泽辉编写，第 7 章由内蒙古建筑职业技术学院王思文编写，第 10 章由内蒙古建筑职业技术学院王睿怀编

写，课后习题及课程 PPT 由内蒙古工业大学东雪青副教授编写。全书由上海理工大学教授李春主审。本书编写过程中得到了研究生于苗苗、任哲、郭亮等的帮助，在此表示衷心感谢！

由于编者水平所限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 4 月

目 录

前言	
第 1 章 风力发电技术发展概述	1
1.1 能源与可再生能源.....	1
1.2 风力发电技术的特点.....	2
1.3 利用风力发电技术的历史.....	3
1.4 风力发电技术的发展现状.....	12
1.5 世界风力机装机现状.....	14
1.6 风力发电技术的发展趋势.....	16
思考题与习题.....	17
第 2 章 风能资源	18
2.1 风的形成.....	18
2.2 风的特性.....	22
2.3 理论风能.....	33
2.4 有效可用风能.....	35
2.5 风的测量.....	37
2.6 我国风能资源的分布.....	45
2.7 世界风能资源的分布.....	49
思考题与习题.....	50
第 3 章 风力机分类及构成	51
3.1 风力机的类型.....	51
3.2 水平轴风力机的构造.....	56
思考题与习题.....	69
第 4 章 风力机基本理论	70
4.1 基本概念和定律.....	70
4.2 贝兹理论.....	73
4.3 叶片的翼型及风轮的空气动力学特性.....	76
4.4 几何相似风力机的特性.....	90
思考题与习题.....	94
第 5 章 风力机翼型及气动设计	95
5.1 理想风轮的设计模型.....	95
5.2 风轮叶片的性能.....	104

5.3	风轮叶片的设计	107
5.4	风轮叶片翼型的分类及命名	123
5.5	风轮叶片翼型的选择	127
5.6	风轮的调向控制	128
5.7	风力机风轮的空气动力学调速控制	129
5.8	风力机风轮尾流	135
	思考题与习题	137
第6章	水平轴风力机的结构设计	138
6.1	叶片部分	138
6.2	轮毂部分	140
6.3	机舱部分	141
6.4	刹车和锁定部分	142
6.5	传动部分	144
6.6	液压系统	147
6.7	偏航系统	149
6.8	调速装置	152
6.9	塔架及基础	152
6.10	水平轴风力机风轮的设计关键	154
6.11	风力机结构载荷的影响	156
	思考题与习题	157
第7章	垂直轴风力机及其他风力机	158
7.1	垂直轴风力机的概况	158
7.2	垂直轴风力机的分类	159
7.3	垂直轴风力机的关键参数	162
7.4	垂直轴风轮翼型	165
7.5	垂直轴风力机的特点	165
7.6	达里厄风力机的设计	168
7.7	独具特色的风力机	176
	思考题与习题	178
第8章	风力机的发电及控制系统	179
8.1	发电机的基本类型	179
8.2	发电机的结构、工作原理及其并网	180
8.3	风力发电系统中的发电机	188
8.4	风力发电机组的控制	190
	思考题与习题	196
第9章	风电场规划与选址	197
9.1	风电场数据统计分析	197
9.2	风电场风速统计模型	211
9.3	风能资源评估	215

9.4	风能资源评估的不确定性	219
9.5	风电场的宏观选址	224
9.6	风电场的微观选址	226
9.7	风电场的风机布置	228
9.8	风电场对环境的影响	230
	思考题与习题	234
第 10 章	风力提水机设计	235
10.1	供需水调查与风轮直径的确定	235
10.2	风力提水机的结构	237
10.3	各类泵的性能及其与风轮特性的匹配	243
10.4	多叶片风轮-活塞水泵设计算例	258
	思考题与习题	259
	参考文献	261

第1章 风力发电技术发展概述

本章介绍了风力机技术的发展历史、应用现状及其未来的发展趋势。风力机技术可以提供一种性价比较高的清洁用能方案,用以改善依赖煤炭或石油等化石能源的发电现状。这项技术在输出电能时,不会产生温室效应,也不会排放有害气体。除此之外,风力机安装和生产电能的成本相比其他可再生能源发电技术(如太阳能光伏发电、潮汐涡轮发电、地热、水力、生物燃料等)来说更加低廉。

几千年来,人类一直在开发和利用风能。其中,最古老的方式包括汲取井水、将谷物磨成面粉及驱动风帆等。目前,对风能利用的最主要的形式是风力发电。20世纪70年代石油危机后,在美国、丹麦和德国,为寻求可替代能源投入了大量的研发资金,随之而来的是风力发电领域显示出的蓬勃发展势头。本章将从能源的角度引入风力机技术等知识。

1.1 能源与可再生能源

能源是指能够产生能量(如热能、光能、机械能、电能等)的物质,它是人类赖以生存和发展的物质基础。人们的各种活动,无论是生产劳动,还是日常生活,时时刻刻都离不开能源。对于每个人,能源如同空气和水一样重要,没有能量的供给,人的生命也就停止了。人们的衣、食、住、行、用,都是以能源为依托。难以想象,在没有能源或能源极度缺乏的情况下,生活、环境将是什么样。

地球上有多多种能源供人类生存与发展,人们正是有效地利用了这些能源,才把地球装扮得美丽多彩、生机勃勃。宏观上讲,地球上的能源主要来自以下三个方面:

(1) 来自太阳的能源。太阳除了其光和热可以直接被人类利用外,太阳能还是地球上多种能源的主要来源。目前,人类所需能量的绝大部分都直接或间接地来源于太阳能。例如,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,一部分在地球表面,供人类和动物利用;另一部分由于地壳的变迁被埋入地下,变成了化石燃料,如煤炭、石油、天然气等矿物燃料,它们是古代被埋在地下的动植物,经过漫长的年代,在不同的地质条件下形成的,所以矿物燃料实质上是古代生物固定下来的太阳能。另外,风能、水能和海洋波浪能等,也都是由太阳能转换而来的。

(2) 地球内部固有的能源,如地热能与核能。地球是个巨大的热库,里面蕴藏着异常丰富的热能,其热量一方面是地球形成时所固有的,另一方面是地球内部非稳定元素的同位素衰变所释放出来的。现有核电站所使用的主要原料是重金属元素铀、钚等,它们通过原子核分裂(裂变)释放出能量;除此之外,还存在由轻元素的原子核发生聚合反应(聚变)而释放能量的核电站,其主要原料是氢的同位素(氘或氚)。核能所用的主要原料可分别从矿石和海水中提取。

(3) 潮汐能。潮汐是由月球(主要的)、太阳(次要的)乃至其他天体(更为次要的)对随地球旋转的海水产生的万有引力而形成的涨潮和落潮。海洋水位的升降伴随着海水的

流动, 当其运动受到弯曲的海岸阻碍时, 会使涨潮和落潮的水位高度差(潮差)产生较大的变化, 如加拿大的芬地湾, 最大潮差竟达 16m。潮汐电站就是为了利用海水位能的变化而建造的。

随着世界经济的发展, 对煤炭、石油、天然气等化石燃料的需求越来越大, 然而它们的储量毕竟是有限的, 日益加剧的开采和使用, 终将导致这些化石燃料的枯竭。大量燃用这些化石燃料, 还会造成空气污染和地球变暖等重大环境问题。为了缓解和改善这种局面, 目前世界各国都纷纷采取提高能源利用效率、节省能源消耗、改善能源结构的措施, 寻求化石燃料的替代能源, 其中包括太阳能、生物质能、风能、水能、地热能和海洋能等可再生能源。可再生能源是指不会随其本身的转化或人类的利用而日益减少的一种能量资源, 其以合理的成本提供了清洁、可持续利用、对环境无影响的能源生产, 为生活带来诸多益处。依据国内外学者们所进行的研究成果, 风能和太阳能可以提供最洁净和最具市场前景的可再生能源利用方式。进一步的研究表明, 风力机最适合用于发电、海水(苦咸水)淡化、灌溉农田、在沿海地区进行食品加工等。尤其在缺乏淡水的沿海地区, 进行海水淡化是极其有效的。

任何一种可再生能源生产方案, 都需要正确的设计和安装等操作条件来确保符合成本效益的运营。某些可再生能源需要在安装阶段进行大量投资, 而另外一些可再生能源的获取则需要有独特的运行机制, 如在特殊的地理位置或地形独特的地方进行能源生产。诚然, 每种可再生能源生产方式都有其各自的缺点。例如, 水力发电安装期间需要水库用于恒定水压; 潮汐发电需要海浪具备特定的条件, 如在葡萄牙沿海地区开发潮汐能, 需要根据其海浪特征进行相应的设计; 地热能要求在高温地下区域利用能源, 此类地域目前只存在于冰岛境内; 生物质能需要大量的原材料供应。但是, 这些可再生能源储量巨大, 分布广泛, 能陆续再生, 不必担心资源枯竭的问题。

1.2 风力发电技术的特点

1.2.1 优点

与其他能源相比, 风力发电技术可以实现可靠、无污染的可持续运行。风力发电技术的主要优点可以归纳为如下几点:

(1) 节约成本。风力发电技术对燃料没有需求, 其发电成本主要来自于后期的维护和运行成本, 而不存在燃料短缺之虞。

(2) 清洁环保。风力发电为环境友好型, 发电过程基本是零排放, 不污染环境, 尤其是不会对土壤、水源等造成污染。

(3) 小型垂直轴风力机可以与建筑结合, 安装不会损坏原房屋、办公楼或者商业楼的结构, 并且安装过程可以随时终止, 不会在安装地点留下不良影响。

(4) 风力机不需要频繁、间歇地维修, 不需要大量专业维护人员, 与蒸汽和燃气锅炉发电系统相比, 节省了维护或运营成本。

(5) 风力发电技术基本上可以满足缺乏常规能源地区的住户离网时的生活用电。

1.2.2 缺点

尽管风力发电技术具有如上优点, 但也存在如下缺点:

(1) 风力发电过程所伴随的持续噪声会对附近的居民造成一定影响，所以在建设风电场时，一般选择在远离居民区、学校和商业区的地区。

(2) 为了有效将风力发电输出，需要架设昂贵的输变电线路。而风大的地方不适合人类居住，所以，多风地区通常离人口聚居区很远，这就意味着利用风能所发的电力须经过输变电线路向人口聚居的地区输送。

(3) 风力发电会对鸟类造成损害，尤其是建设在鸟类迁徙路线上的风电场。除此之外，还会由于建设风电场清除树林而对动物造成影响。

(4) 风力发电对政府补贴的依赖性强，小风电项目依赖程度更高。小风电项目（容量低于 100kW），尤其是 15kW 及以下的风力发电机组，发电成本仍会居高不下，其单位千瓦投资成本可能会是大型风电场单位千瓦成本的 3~5 倍。

综上所述，对任何潜在的负面影响进行周密分析，并采取措施减轻这些影响对于风力发电技术的推广具有现实意义。各种证据均显示，风力发电能够为环境和经济带来显著的益处。

1.3 利用风力发电技术的历史

人类利用风能已有数千年的历史，在蒸汽机发明之前风能曾经是人类社会的重要动力，主要用于船舶航行、提水饮用、排水造田、磨面锯木和灌溉等。

1.3.1 人类早期对风能的利用

1. 风帆助航

人类利用风能的历史可以追溯到公元前，人类最早利用风能的主要方式之一就是“风帆助航”，利用风推动船帆使船只前进。中国是最早使用帆船的国家之一。在公元前 700 多年的春秋时代，中国水域上就出现了早期的帆船，如图 1-1 所示。帆的出现就是为了解决船只用桨橹推进耗费人力和速度慢的问题，当能借助大自然风力进行远距离航行的木帆船出现后，人类的航海活动范围才得以不断扩展，甚至可以到达更为遥远的海洋。



图 1-1 中国早期广东帆船

风帆的使用到汉代已较普遍。晋代周处《风土论》中提到：“帆从风之幔也，施于船前，各随宜大小而制，大者用布 120 幅，高 9 丈”，这样大的帆当然用于大中型船只。初期的帆只是简单的单帆，而且也不能转动。到三国时期，出现了 4~7 帆的多桅帆船，特别是出现了能利用前侧风的平衡纵帆。它的帆不是朝向前方，而是转至一个角度，帆的总面积随风的大小而增减。这种平衡纵帆操作简便、转动自如，适应不同的风向和风速。它的出现在帆的发展史上是一个很大的突破，为远洋航行提供了必不可少的条件。这一时期，中国的航海技术在世界上已处于领先地位。

最辉煌的帆船时代是中国的明朝。伟大的航海家郑和，在永乐三年（1405年）至宣德八年（1433年）的28年间，率领200余艘海船和27000多人组成的庞大船队，7次远航，走访了亚洲、非洲30多个国家和地区，为促进中国与各国的友谊和经济文化交流做出了重大贡献。1405年郑和首下西洋，比哥伦布探险活动早87年，比麦哲轮到菲律宾早116年。无论在船队规模、船舶载重吨位，还是航海应用技术领域，均领先于其他国家。

与同时代的东方相比，欧洲人的造船和航海术一直相对落后。7世纪以后，欧洲开始使用可以转动的三角形纵帆，15世纪才出现多桅多帆船。

中世纪之前的欧洲，帆船是沿着南欧和北欧两种风格分别发展的。北欧地区水域宽广，居民们很早就建造了船只作为水上交通工具。8世纪，维京人的船开始发展为帆船，后来发展为有一根或者两根张着纵帆的桅杆。桅杆一般立在中心处，并有支桅索。船上还设计有帆脚索，可以牵动帆顶风的那一面，使船在横风的情况下仍能借风航行。

欧洲南部的造船历史可追溯到接受过地中海东岸文明的克里特人。公元前2世纪中期的克里特帆船两端起翘，单桅，悬一方帆。9世纪前后，拜占庭人接受了阿拉伯人的技术，建造平滑船体的船，使用新式大三角帆装置，船能在风向的 60° 角内行驶。这种船型在12、13世纪发展成具有3层甲板、多种帆桅组合的形式。全装置帆船在16世纪基本定型，此后几个世纪，西欧帆船的标准装置多为3桅26帆。帆船技术在17世纪以后，除船体在逐渐增大外，没有更进一步的发展。随着18、19世纪蒸汽机和内燃机的发明，风帆船逐渐被取代，到20世纪中叶几乎从远洋运输中消失。

2. 风车的应用

风车主要应用于提水灌溉、排水造田、磨面锯木，其原理是利用风作用在叶片上的力，推动叶片绕主轴旋转，叶片将气流的直线运动转变为风轮绕其主轴的圆周运动，进而把自然风的动能转换为风车的机械能。

风车是最早利用风能的机械设备。公元644年，波斯人阿布·鲁鲁亚发明了最早的风车，其结构如图1-2所示，构造简单，整体为木质结构，旋转轴垂直于地面，主要用来磨制谷物。

中国在宋代时期，风车获得了较快的发展，当时流行的垂直轴风车一直沿用到今天，如图1-3所示。明代以后，风车得到了广泛的使用，宋应星所著《天工开物》一书中记载有“扬

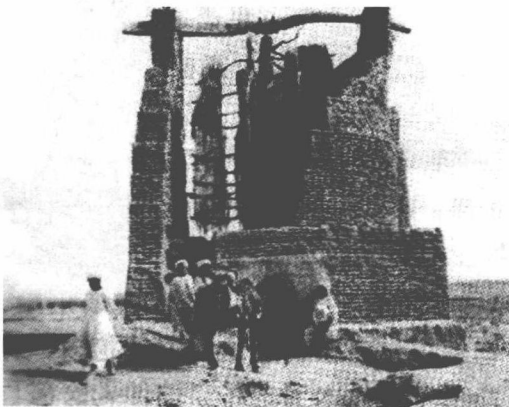


图 1-2 古老的波斯风车

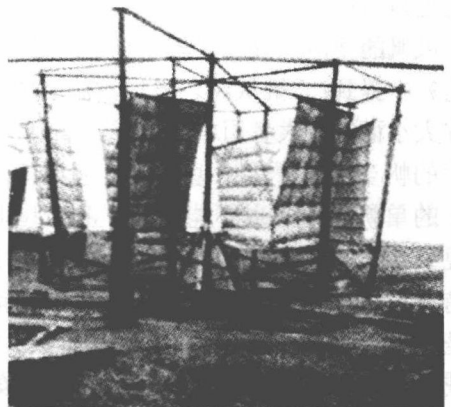


图 1-3 中国宋代的垂直轴风车

郡以风帆数扇，俟风转车，风息则止”，这是对风车的一个比较全面的描述。方以智所著《物理小识》中记载有“用风帆六幅，车水灌田，淮阳海皆为之”，表明当时人们已经懂得利用风帆驱动水车灌溉田地。中国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。

最早的水平轴风车源于欧洲。据报道，早在1119年，布拉班特（前西欧公国，现分为两部分，分属荷兰和比利时两国）就有所谓的柱风车发明。后来，迅速从欧洲的西北区域传播到北欧和东欧，如芬兰和俄国。到了13世纪，风车在德国随处可见。两个世纪后，改进的塔风车诞生，风车固定在一个由石块砌成的圆柱塔的顶部，这种风车主要是从法国传到地中海区域。后在16世纪，荷兰对此类风车进行了极大的改进，产生了新的风车，就是所谓的荷兰风车。荷兰风车塔顶可以自由旋转，适时对风，因此应用范围十分广泛。

1.3.2 早期风车

1. 波斯风车

公元前2世纪，古波斯人就利用垂直轴风车磨制谷物，所使用的风力磨坊如图1-4所示。其工作原理是在相对高墙的一端留了半边口，这端的洞口吹入强风，推动风车旋转，而另一端让风自由地散去。这些风车只有在风向稳定时才能运转，而恰恰当时波斯地区的风向都比较稳定，因此这些风车在当地也比较盛行。

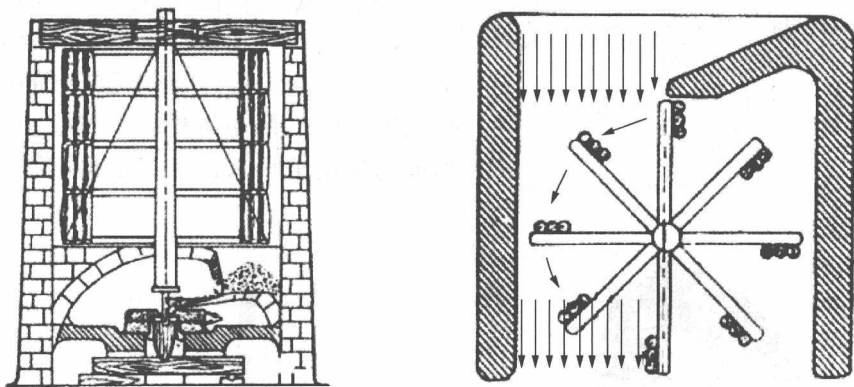


图1-4 古波斯的垂直轴风车结构示意图

2. 德国柱风车

在历史记载中，最早的水平轴风车为柱风车，其特点是整个风车都固定在一个柱轴上，并围绕其旋转，结构如图1-5所示。风车底端由4根方木固定，顶端伸入磨房与磨横梁连接，横梁用来固定磨盘。粮食从漏斗进入磨内，研磨后从出口流出。风轮旋转产生的力矩驱动垂直轴，从而带动磨盘旋转，对粮食进行研磨。整个磨房外有一个木制尾巴，其末端离地较近，作用是利用人工来调节风轮叶片的对风位置。因此，柱风车的另一个特点是，整个磨房都可以绕柱轴旋转，且仅用来磨制谷物。风车停运时，其原理类似热气球，依靠装满砂子的麻袋载重，通过绳索来制动转轴，通过齿轮的力矩传递来制动风轮；当需要运行时，卸掉麻袋则可继续运转。

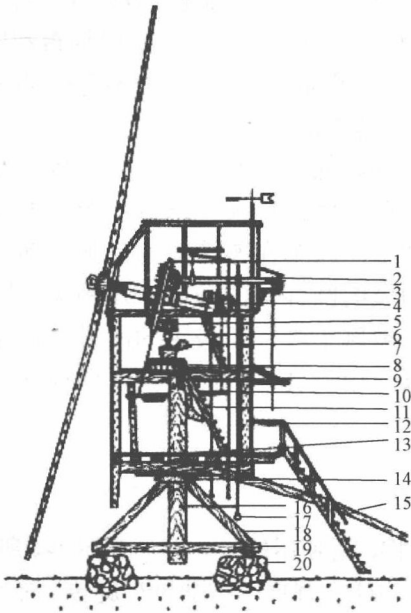


图 1-5 德国柱风车结构示意图

- 1—风轮齿轮；2—麻袋停运；3—风轮轴；4—刹车；
5—磨齿轮；6—磨轴；7—漏斗；8—磨盘；9—
石板；10—谷物粉板；11—磨房梁；12—磨
石；13—谷物粉出口；14—粮食仓
地板；15—冠状轴；16—刹车链；17—
方形柱；18—主轴；19—支架；20—装置基础

15 世纪早期，人类开始尝试利用柱风车来驱动水泵，为此，必须对柱风车进行改造，以使用获得的风能来驱动位置很低的水泵。经过工匠们的不断改造，在柱风车诞生 300 年后，出现了专门用于泵水的摇臂式风车。摇臂式风车可旋转的机房内部只有一对传动齿轮，原来的石磨换成了水轮，为此驱动轴必须从风车中传出去。

柱风车未能在南欧获得应用，而另一种类型的风车——塔风车广为传播。塔风车初期是用来提水灌溉的，应用于 13 世纪。这种地中海式古老风车的特点是磨坊建成圆柱形，茅草屋顶，风轮为 8 叶片或多叶片帆轮，如图 1-6 所示。此后在法国南部出现了改进的风磨，木质屋顶可旋转，有 4 个木质叶片。

在此期间，出现了另一种与柱风车结构相似的仅有顶部可旋转的管状柱风车，如图 1-7 所示。此柱风车底座呈金字塔形且固定不旋转，其顶部固定的风轮可以根据风向调节旋转。风车内结构大大简化，取消了复杂的磨结构，只有风轮齿轮、传动齿轮和风车轴承等。此类风车最初仅用来吸水，后逐步也用来磨制谷物及锯木。

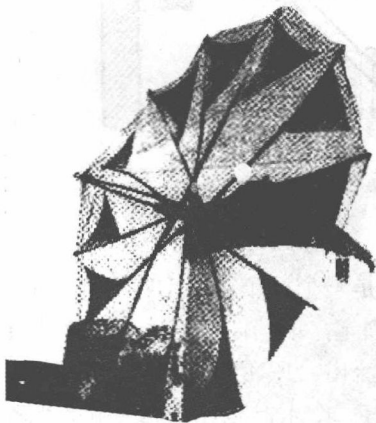


图 1-6 塔风车

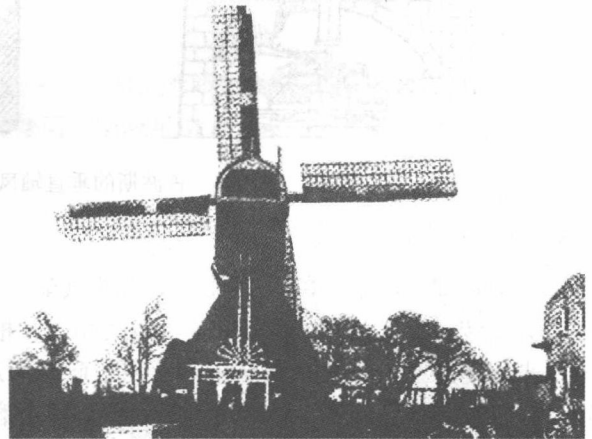


图 1-7 管状柱风车

3. 荷兰风车

14 世纪，荷兰率先改进了古代风车。由于荷兰坐落在地球的盛行西风带，同时濒临大西洋，是典型的海洋性气候国家，海陆风长年不息。这就给缺乏水力和动力资源的荷兰利用风

能提供了优越的条件。

荷兰风车最早从德国引进,最初仅用于磨制谷物之类。到了16~17世纪,风车对荷兰的经济起到了重要的推动作用。当时,在世界商业中占首要地位的各种原料,从水道运往荷兰来利用风车加工,其中包括北欧各国和波罗的海沿岸各国的木材、德国的大麻子和亚麻子、印度和东南亚的肉桂和胡椒。在荷兰的大港鹿特丹和阿姆斯特丹近郊,有很多风车的磨坊、锯木厂和造纸厂。荷兰风车的主要特征是屋顶可以旋转,在荷兰潮湿松软的地面上,八角木结构的风车要比笨重的石头结构容易建造。在荷兰,这种风车主要用于围海造田时抽水,风车在这项艰巨的工程中发挥了巨大的作用:根据当地湿润多雨、风向多变的气候特点,荷兰对风车进行了改进,使荷兰风车比柱风车的功能更强大,能够满足当时各种动力需求,如磨面、泵水和锯木等,并给风车配上了活动的顶篷;为了能四面迎风,又把风车的顶篷安装在滚轮上,如图1-8所示。



图1-8 荷兰风车

17~18世纪荷兰经历了风能利用的高潮,人们制造了数以千计的风车,每台大约有4400kW。大量的制造促成了当时风车的标准化,虽然出现了诸如多层楼阁式风车,但仍然以荷兰风车为基本类型。这些风车用来碾制谷物、粗盐、烟叶,榨油,压滚毛呢、毛毡,造纸以及排除沼泽地的积水。同时风车不停地吸水、排水,保障了荷兰2/3的土地免受沉沦,并为荷兰充分开拓和利用土地提供了条件。

4. 美国风车

美国风车约于19世纪中叶开始研制,主要在北美用于风力提水灌溉或饮用,另外也为西部铁路机车供水。美国风车如图1-9(a)所示,拥有10~30片叶片和1个尾翼。美国风车旋转速度较慢,产生较大的转矩,通过一个长长的与地面垂直的传动轴,将转矩传到风车底部的水泵。但是,美国风车结构十分复杂,在恶劣天气时,无法调整风轮转速,经常遭到破坏。

随后,美国风车首次实现了偏航和风暴保护的自动调节。当风速较大时,尾翼向展向平行于风车旋转面旋转,从而在尾翼的作用下,将风车移出风向,风车停止旋转;当风速较小时,尾翼再向展向垂直于风车旋转面的方向偏转,使得风车正对来风,如图1-9(b)所示。美国风车的直径通常为5~8m。这些多叶片风车特别适用于低风速状况,在2~3m/s的风速下就开始转动,气动力矩相对较高。

美国风车发展很快,很受农民们的欢迎,从而被许多小工厂生产出来。到1899年,有77家风车工厂生产美国风车。到1930年,有100多家工厂生产美国风车,数量达600万台,并销往世界各地,利润较高。但是,因欧洲风车的盛行,美国风车始终未在欧洲立足。

1.3.3 风力发电

人类利用风力机发电是在城市早已实现了电力供应,而在农村仍没有电力覆盖的工业背景下开始的。当时欧洲风车和美国风车依然盛行,人们尝试利用原本用于泵水的风车来发

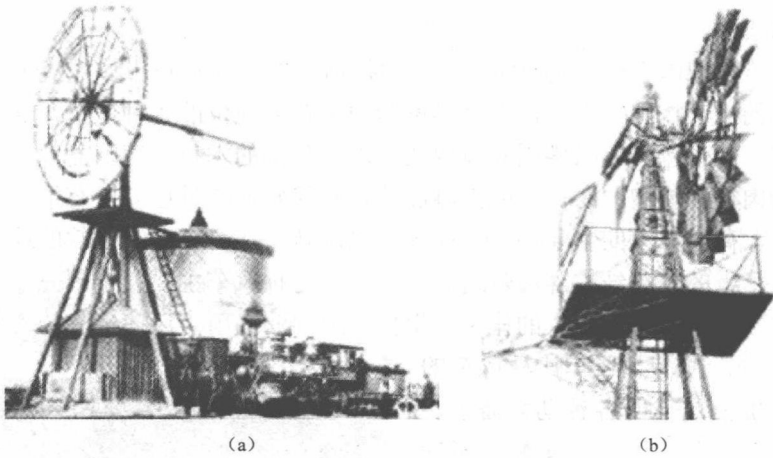


图 1-9 美国风车
(a) 工作中；(b) 停止状态

电。风力发电技术的研究始于 19 世纪，当时在美国，成百万的多叶片式风力机用于泵水，风轮直径为 3~5m，功率为 500~1000W。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），多叶片风轮的转速相对较低，能产生较大的转矩，直接驱动活塞泵进行泵水。

美国的 Charles F.Brush (1849~1929) 是风力发电技术研究的前驱者之一。1887~1888 年，他在俄亥俄州克利夫兰市安装了被现代人认为是第一台自动运行且用于发电的风力机，见图 1-10。该风力机的功率为 12kW，风轮直径为 17m，叶片由 144 块雪松木制成。风力机运行了约 20 年，发出的电用于对家中地窖里的蓄电池充电。

丹麦阿斯考夫技术学院物理学家 Poul La Cour (1846~1908) 教授为解决丹麦农村供电难题，于 1891 年开始研究风力机发电的可能性，并很快发现美国风力机的慢速特性不适合用来发电。同时，他也是第一个基于科学理论对传统风车进行完善的研究者，为历史风车向现代风力机的转变起到了至关重要的作用。他研制了一种能够自调节的 4 叶片直流发电风力机，供单个用户使用，见图 1-11，此风力机已经初具现代风力机的规模。Poul La Cour 还致力于

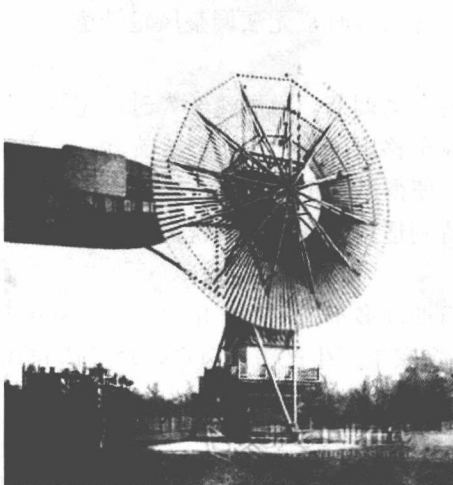


图 1-10 Charles F.Brush 风力机

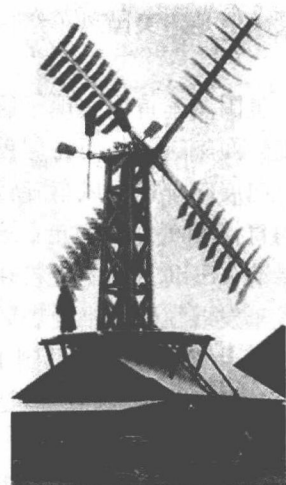


图 1-11 Poul La Cour 风力机

能量储存的研究,将风力机发出的电力用于电解水来制取氢气,供他所在学校的瓦斯灯使用。Poul la Cour 对世界风电的发展还做出了很多贡献,他是第一个采用风洞实验检测风力机性能的科学家,并于 1905 年创立了风电工人协会。该协会成立一年后,就拥有了 356 个会员。此外,他还创办了世界上第一个风力发电学术期刊 *Journal of Wind Electricity*。

1920~1930 年,丹麦约有 120 个地方公用事业拥有风力机,风力机单机容量一般为 20~35kW,总装机容量约 3MW。这些风力机的容量占当时丹麦电力消耗量的 3%。丹麦对风力发电的兴趣在随后的几十年内逐渐减退,直到第二次世界大战期间出现供电危机。

在第一次世界大战之前,德国就开始尝试利用风能来发电。20 世纪 30 年代,在美国的许可下,生产了 3600 台美国风车,主要用于提水,少量的风车经改装后用于发电。

第一次世界大战后,基于军用和民用螺旋桨风力机的设计经验,出现了风力机研究的新热潮。在航空动力学的背景下,德国人 Albert Betz 对风力机的物理和气动性能展开了理论研究,得出了风力机最大风能转化效率为 0.593 的结论。1926 年,他把动量和能量定理与叶型升力理论相结合,建立了叶片最优设计的理论。关于风力机叶片的气动性能理论,直到现在都依然被证明是正确的。此外,其空气动力学理论和叶片的轻型设计在 20 世纪也迅速发展,为目前大型风力机的发展奠定了基础。

另一个致力于风力机新理论研究的德国科学家是钢铁结构工程师 Hermann Honnef,他构思了如图 1-12 所示的 Honnef 风力机。该风力机的结构是一个巨型的塔架支撑了 5 个风轮,每一个风轮的直径为 160m,额定输出功率为 2MW。在极端风速下,位于桁架塔顶部的风轮驱动件可以在强风的作用下使风轮倾斜,最后处于水平位置。但是,由于此风力机的设计是基于数学和工程原理,其实现所面临的问题远比想象的要多,因此,这仅仅是一个疯狂的想法。

1930~1940 年,由于德国本土燃料和电力的缺乏,1939 年 RAW 风能研究组织成立,汇聚了许多科学家、技术人员和工业企业等。RAW 组织资助了很多风电项目,其成果都在 *Memoranda* 上发表。值得一提的是,1937 年,工程师 Franz Klein-henz 发布了巨型风力机计划,该风力机结构如图 1-13 所示。该风力机风轮直径为 130m,共 3 个或 4 个叶片,额定功率

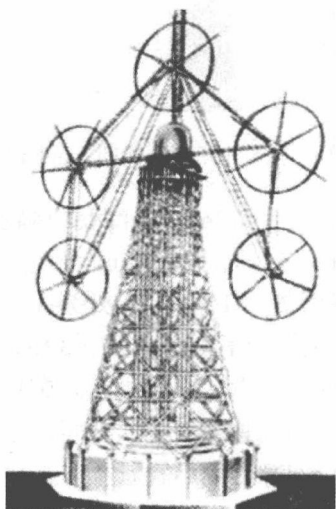


图 1-12 Honnef 风力机

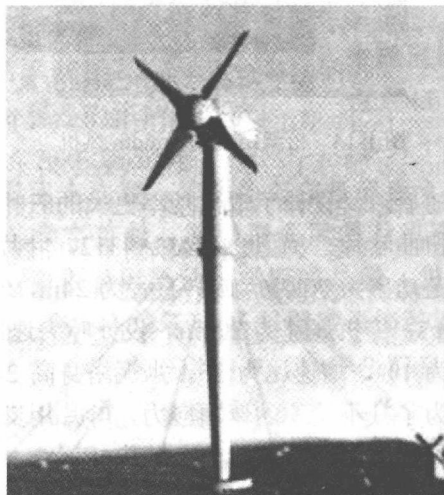


图 1-13 巨型风力机