

21世纪能源与动力工程类 **创新型** 应用人才培养规划教材

风能与动力工程

# 风力机设计理论及方法

赵丹平 徐宝清 主编

- 紧贴热点：满足风电人才培养之急需
- 精选内容：阐述基础理论及发展脉络
- 结合案例：展现独具匠心的风能运用



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材·风能与动力工程

# 风力机设计理论及方法

主 编 赵丹平 徐宝清  
副主编 吴双群 田海清  
参 编 孙云峰 韦丽珍



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 内 容 简 介

本书针对风力发电机组的设计特点,介绍了风力发电机组设计的基本理论,重点论述了风力发电机组的总体设计方法及优化设计方法,比较系统地分析了风力发电机组的参数选择与匹配及维护。全书共分8章,主要内容包括风力机的类型与结构、基本设计理论、载荷分析、设计、输出功率特性,以及风力发电机组的参数选择与匹配、常见故障与检修等内容。

本书可作为高等院校风能专业、风能与动力工程专业及相关方向专业的本、专科高年级学生和非本专业研究生的教材,也可作为从事风力发电机组设计、运行、维护和管理等方面工作的专业技术人员的培训教材或参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力机设计理论及方法/赵丹平,徐宝清主编. —北京:北京大学出版社,2012.1

(21世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-20006-3

I. ①风… II. ①赵…②徐… III. ①风力发电机—高等学校—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第277697号

书 名: 风力机设计理论及方法

著作责任者: 赵丹平 徐宝清 主编

策 划 编 辑: 童君鑫

责 任 编 辑: 周 瑞

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-20006-3/TK·0005

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: [pup\\_6@163.com](mailto:pup_6@163.com)

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 16.25印张 383千字

2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷

定 价: 32.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 前 言

风能作为可再生能源，具有蕴藏量巨大、可再生、分布广、无污染等特点，风能利用技术是世界上发展速度最快的科学技术之一。风力发电已成为世界可再生能源发展的重要方向。据世界风能协会预计，全球风能市场将持续快速增长，世界风力发电能力在未来5年内将增长160%，全球风力发电装机容量将在2014年达到409GW。中国风能能力将继续以惊人的速度增长，2009年，中国占全球年度风能能力增加量的三分之一，新增风力发电场13GW，使总装机能力达到25.1GW，仅次于美国和德国，位居世界第三位。中国在未来数年内将继续是全球风能增长的主要动力之一，预计到2014年风能能力年增加量将超过20GW。因此，随着风力发电产业的迅猛发展，我国风电方面的人才需求量越来越大，其主要需要方面有风电场的规划、设计、施工、运行与维护人才，风力发电机组的设计与制造人才，风能资源的测量与评估人才和风力发电项目开发技术与管理人才。

本书作为风能与动力工程专业首批系列规划教材，由具有多年从事实践及教学经验的人员通过精心选材，对教材的结构和内容等方面进行归纳、总结，力求满足现代高等教育风能与动力工程专业发展对教材的需求。本书从风力机基本理论出发，介绍了风力发电的发展现状、风力发电的应用进展、风的特性和变化规律及中国风能资源的分布特点；以风力机的载荷分析为线索，阐述了风力机的类型与结构、风力机的基本设计理论；重点分析了风力机的设计理论及优化方法、风力发电机组的参数选择与匹配、风力发电机组的常见故障与检修及安全运行等内容。本书概念清晰、内容丰富、深入浅出地阐述了风力发电机设计的难点，适合从事风力发电设计工作的师生、工程技术人员学习和使用。

本书共分8章，由赵丹平和徐宝清担任主编，负责内容编排设计、部分内容的撰写和全书统稿，吴双群和田海清为副主编，参加编写的还有孙云峰、韦丽珍。本书编写过程中参考了大量的相关文献资料，借鉴吸收了众多专家学者的成果，在此对所引用的文献资料的作者表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中欠妥之处在所难免，恳切希望广大读者在使用本书时给予关注，并将意见和建议及时反馈给我们，以便完善，编者邮箱 zdpwsq@yahoo.cn。

编 者  
2011年11月

# 目 录

|                               |    |                             |    |
|-------------------------------|----|-----------------------------|----|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....         | 1  | 3.3.2 作用于运动叶片上的空气动力         | 44 |
| 1.1 风力机的发展史 .....             | 2  | 3.3.3 升力系数和阻力系数的变化          | 46 |
| 1.1.1 人类早期对风能的利用 .....        | 2  | 复习思考题 .....                 | 46 |
| 1.1.2 风力发电 .....              | 4  | <b>第 4 章 风力机的载荷分析</b> ..... | 47 |
| 1.2 风与风能 .....                | 11 | 4.1 概述 .....                | 48 |
| 1.2.1 大气科学的基础知识 .....         | 11 | 4.2 叶片的结构 .....             | 48 |
| 1.2.2 风的形成 .....              | 13 | 4.2.1 水平轴风力机叶片的结构与特点 .....  | 48 |
| 1.2.3 风的特性 .....              | 16 | 4.2.2 垂直轴风力机叶片的结构与特点 .....  | 50 |
| 1.2.4 风能 .....                | 20 | 4.3 风轮的气动载荷分析与计算 .....      | 51 |
| 1.2.5 风能区划分 .....             | 23 | 4.3.1 翼型的来流速度 .....         | 51 |
| 复习思考题 .....                   | 25 | 4.3.2 空气动力载荷 .....          | 52 |
| <b>第 2 章 风力机的类型与结构</b> .....  | 26 | 4.3.3 离心力载荷 .....           | 53 |
| 2.1 风力发电机的类型 .....            | 27 | 4.3.4 重力载荷 .....            | 54 |
| 2.2 风力发电机的结构 .....            | 28 | 4.4 作用在整个风力机上的力 .....       | 55 |
| 2.3 翼型简介 .....                | 32 | 4.4.1 轴向推力 .....            | 55 |
| 复习思考题 .....                   | 34 | 4.4.2 俯仰力矩 .....            | 55 |
| <b>第 3 章 风力机的基本设计理论</b> ..... | 35 | 4.5 载荷情况 .....              | 56 |
| 3.1 贝兹理论 .....                | 36 | 复习思考题 .....                 | 60 |
| 3.2 经典设计理论 .....              | 38 | <b>第 5 章 风力机的设计</b> .....   | 61 |
| 3.2.1 涡流理论 .....              | 38 | 5.1 风力机设计方案 .....           | 62 |
| 3.2.2 叶素理论 .....              | 39 | 5.1.1 风场 .....              | 62 |
| 3.2.3 动量理论 .....              | 40 | 5.1.2 风力发电机组等级 .....        | 66 |
| 3.2.4 动量-叶素理论 .....           | 40 | 5.1.3 机组设计参数 .....          | 67 |
| 3.2.5 叶片梢部损失和根部损失修正 .....     | 41 | 5.1.4 离网型风力发电机组的基本配置 .....  | 71 |
| 3.2.6 塔影效果 .....              | 41 | 5.1.5 并网型风力发电机组的基本配置 .....  | 72 |
| 3.2.7 偏斜气流修正 .....            | 41 |                             |    |
| 3.2.8 风剪切 .....               | 42 |                             |    |
| 3.3 风力机叶片的空气动力特性 .....        | 43 |                             |    |
| 3.3.1 翼型的几何定义 .....           | 43 |                             |    |



|                        |                   |     |                                |                       |     |
|------------------------|-------------------|-----|--------------------------------|-----------------------|-----|
| 5.2                    | 风力机叶片的基本设计方法      | 73  | 6.5.1                          | 定桨距风力发电机组的<br>功率控制    | 191 |
| 5.2.1                  | 叶片设计参数            | 73  | 6.5.2                          | 变桨距风力发电机组的<br>功率控制    | 195 |
| 5.2.2                  | 叶片的基本设计方法         | 93  | 6.5.3                          | 变速风力发电机组的<br>功率控制     | 199 |
| 5.2.3                  | 叶片的内部结构           | 120 | 复习思考题                          |                       | 207 |
| 5.2.4                  | 叶片材料              | 122 | <b>第7章 风力发电机组的参数选择与<br/>匹配</b> |                       | 209 |
| 5.2.5                  | 叶片的加工工艺           | 125 | 7.1                            | 风力发电机组的参数与选择          | 210 |
| 5.3                    | 风力发电机叶片设计举例       | 126 | 7.1.1                          | 小型风力发电机组的<br>技术参数     | 210 |
| 5.3.1                  | 综合优化目标            | 126 | 7.1.2                          | 中型风力发电机组的<br>技术参数     | 211 |
| 5.3.2                  | 约束条件              | 127 | 7.1.3                          | 大型风力发电机组的<br>技术参数     | 213 |
| 5.3.3                  | 算法的实现             | 129 | 7.2                            | 风力发电机组的选型与性能<br>匹配    | 225 |
| 5.3.4                  | 叶片优化设计实例          | 129 | 7.2.1                          | 风力发电机组选型的<br>原则       | 226 |
| 5.3.5                  | 外形坐标设计            | 131 | 7.2.2                          | 风力发电机组选型的<br>影响因素     | 226 |
| 5.4                    | 风力机其他组件的设计方法      | 135 | 复习思考题                          |                       | 228 |
| 5.4.1                  | 发电机               | 135 | <b>第8章 风力发电机组的常见故障与<br/>检修</b> |                       | 229 |
| 5.4.2                  | 轮毂                | 142 | 8.1                            | 风力发电机组的常见故障           | 230 |
| 5.4.3                  | 逆变器               | 144 | 8.1.1                          | 齿轮箱的常见故障及<br>预防措施     | 230 |
| 5.4.4                  | 蓄电池               | 147 | 8.1.2                          | 风力发电机组发电机的<br>常见故障    | 232 |
| 5.4.5                  | 塔架                | 151 | 8.1.3                          | 偏航系统的常见故障             | 232 |
| 5.4.6                  | 传动装置              | 154 | 8.1.4                          | 控制与安全系统的<br>常见故障      | 233 |
| 5.4.7                  | 机舱                | 159 | 8.2                            | 风力发电机组的检测与维护          | 235 |
| 5.4.8                  | 刹车和锁定装置           | 160 | 8.2.1                          | 风力发电运行检修员的<br>资质      | 235 |
| 5.4.9                  | 液压系统              | 163 | 8.2.2                          | 风力发电机组维护检修<br>管理的基础工作 | 236 |
| 5.4.10                 | 偏航机械系统            | 166 | 8.2.3                          | 风力发电机组维护检修<br>安全措施    | 237 |
| 5.4.11                 | 控制系统              | 171 |                                |                       |     |
| 复习思考题                  |                   | 175 |                                |                       |     |
| <b>第6章 风力发电机输出功率特性</b> |                   | 177 |                                |                       |     |
| 6.1                    | 风轮转速              | 178 |                                |                       |     |
| 6.2                    | 风力发电机组功率特性的<br>测定 | 181 |                                |                       |     |
| 6.2.1                  | 试验场地              | 181 |                                |                       |     |
| 6.2.2                  | 测试仪器              | 182 |                                |                       |     |
| 6.2.3                  | 比恩法               | 183 |                                |                       |     |
| 6.2.4                  | 数据采集              | 184 |                                |                       |     |
| 6.2.5                  | 数据筛选              | 184 |                                |                       |     |
| 6.2.6                  | 数据回归              | 184 |                                |                       |     |
| 6.2.7                  | 功率测定              | 185 |                                |                       |     |
| 6.3                    | 风力发电机电气动性能参数      | 188 |                                |                       |     |
| 6.4                    | 年发电量计算            | 189 |                                |                       |     |
| 6.5                    | 输出功率的控制           | 191 |                                |                       |     |

|                          |     |                           |     |
|--------------------------|-----|---------------------------|-----|
| 8.2.4 风力发电机组维护检修项目 ..... | 239 | 8.2.7 风力发电机组的年度例行维护 ..... | 246 |
| 8.2.5 维护检修计划 .....       | 242 | 复习思考题 .....               | 249 |
| 8.2.6 机组常规巡检和故障处理 .....  | 243 | <b>参考文献</b> .....         | 251 |

# 第 1 章

## 绪 论



### 教学目标

了解人类对风能的利用历史，风力发电的发展历程，大气环流；理解海陆风、山谷风、季风、台风的形成；理解风特性；掌握平均风速和风向、湍流度；理解风速随时间的变化规律；掌握风速的垂直变化；理解风玫瑰图；掌握风能公式；熟悉中国风能资源分布特点。



### 教学要点

| 知识要点      | 掌握程度                               | 相关知识                                   |
|-----------|------------------------------------|--|
| 风力机的发展    | 了解人类早期对风能的利用；熟悉风力发电的发展             | 风帆的应用；风车的应用；水平轴风力发电机；垂直轴风力发电机；大型风力发电机组 |
| 大气科学的基础知识 | 了解大气科学的基础知识                        | 大气层；大气环流                               |
| 风的形成      | 了解风的成因；熟悉风的类型                      | 季风；海陆风；山谷风；台风                          |
| 风的特性      | 掌握风速和风向；理解脉动风速；熟悉风速随高度的变化规律；理解风玫瑰图 | 平均风速的变化规律；风向的方位；湍流强度和阵风因子；风速的垂直变化      |
| 风能与风能资源   | 掌握风能公式；熟悉我国风能资源的分布                 | 空气密度；风速的统计特性；平均风能密度和有效风能密度；风能资源区域的划分   |





## 导入案例

我国有着丰富的风能资源，风力发电技术近几年来也得到了快速的发展。我国“十二五”规划中可再生能源被列为战略性发展产业，并提出要建设6个陆上和2个沿海及海上大型风电基地，新建装机容量7000万千瓦以上。统计数据显示，2000—2005年，我国风电装机容量平均每年以20%的速度递增。特别是2005年国家颁布可再生能源法之后，至2009年，全国风电装机容量由126万千瓦增长到近2412万千瓦，以每年翻一番的速度发展，远高于世界风电平均发展速度。2005年，我国开始了百万千瓦级风电规划；2008年，我国起动了千万千瓦级风电基地的规划和建设工作。2008年，全国新增风电装机容量630万千瓦，位列全球第二，占全球新增装机容量的22%；2009年，全国新增风电装机容量1202万千瓦，位列全球第一，占全球新增装机容量的33%。2011年1月，中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会和国际环保组织绿色和平联合发布《中国风电发展报告2010》，从2005年到2010年，国内风电装机经历了5年的翻倍增长，截至2010年年底我国的风力发电装机容量以4183万千瓦超越美国成为全球第一风电大国。

能源是国民经济的命脉，是社会发展和提高人民生活水平的重要保障。现代社会依靠能源而运行，伴随着发展中国家的快速发展，特别是像中国和印度这样的人口大国，对能源的需求正在持续快速的生长。随着能源不断的、大量的消耗，煤炭、石油、天然气等传统能源已日趋枯竭，生态破坏、环境污染等问题更是日益严重，因此可再生能源越来越被世界各国所重视。

可再生能源包括风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等。风能蕴量巨大，全球的风能约为 $2.74 \times 10^9$  MW，其中可利用的风能为 $2 \times 10^7$  MW。风能作为一种清洁的可再生能源，同时风力发电是可再生能源领域中除水力发电外技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一，因此在世界各地得到迅速发展。发展风力发电对于调整能源结构、减轻环境污染、解决能源危机等方面有着非常重要的意义。

## 1.1 风力机的发展史

风能是人类最早使用的能源之一，风能的利用已有数千年的历史。在蒸汽机应用之前，风能曾经作为重要的动力源，用于船舶航行、提水灌溉及饮用、排水造田、磨面和锯木等。现代社会对风能的利用最主要的方向就是风力发电。

### 1.1.1 人类早期对风能的利用

#### 1. 风帆的应用

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”，用风帆推动船只前进。我国是最早使用帆船和风车的国家之一，大约公元前700多年的春秋时代，中国水域上就出现了早期的帆船。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，人类的航海活动才得以不断扩展，到达了更为辽阔遥远的海域。

风帆的使用到汉代已较普遍。晋代周处《风土论》说：“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中大型船只。初期的帆只是简单的单帆，而且也不能转动。在三国时期，出现了四到七帆的多桅帆船，特别是出现了能利用前侧风的平衡纵帆。它的帆不是正向前方，而是转至一个角度，帆的总面积是随风的大小而增减的。这种纵帆操作简便，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很大的一个突破，为远洋航行提供了必不可少的条件。这一时期，我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。我国伟大的航海家郑和，在永乐三年(1405 年)至宣德八年(1433 年)的 28 年间，率领百余艘船舶和两万七千多人组成的庞大船队，7 次远航，遍访了亚洲、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作出了重大贡献。1405 年郑和首下西洋，比哥伦布探险活动早 87 年，比麦哲伦到菲律宾早 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。后来开始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溯源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 度角内行驶。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 世纪中叶已几乎从远洋运输中消失了。

## 2. 风车的应用

风车主要应用于提水灌溉、排水、磨面，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。

我国在宋代时期，风车的发展较快，当时流行的垂直轴风车一直沿用至今，宋代的垂直轴风车如图 1.1 所示。明代以后，风车得到了广

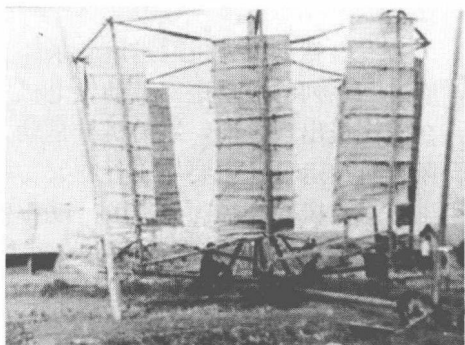


图 1.1 宋代的垂直轴风车



泛的使用，宋应星的《天工开物》一书中记载有“扬郡以风帆数扇，俟风转车，风息则止”，这是对风车的一个比较全面的描述。我国风帆船的制造已领先于世界。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”，描述了当时人们已经懂得利用风帆驱动水车灌溉田地的技术。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。

公元前 1700 多年，亚洲的古巴比伦王国开始利用风车灌溉农田，直到今天人们在伊朗和阿富汗还可以看到风力机的遗迹。公元前 2

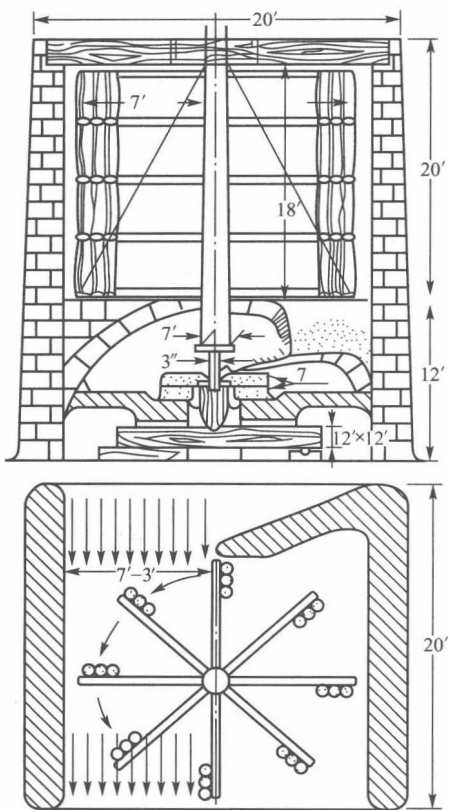


图 1.2 古代的风力磨坊

世纪，古波斯人就利用垂直轴风车磨谷物。古代的风力磨坊如图 1.2 所示。10 世纪伊斯兰人用风车提水，11 世纪风车在中东地区已得到了广泛的应用。到了 13 世纪，风车传至欧洲，在 14 世纪，荷兰率先改进了古代风力机，并广泛利用这种改进后的风力机为莱茵河三角洲的沼泽地和湖泊抽水，以后又用于榨油和锯木。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，成为著名的风车之国。

荷兰风车有着不同的设计，从原先的杆形风车到后期只有顶端旋转并保持叶片与风向垂直的风车。这种可以泵抽大量水的大型机器直径达 25m，几乎全用木头构造，甚至螺旋泵、阿基米德螺钉也是用木头制作的，在空气动力学方面叶片是非常精细的。依靠一根系在木梁顶端的绳子，绞车能够将风车的顶部从地面旋转(摇)上来，所以转子能与风向垂直。今天，风车已经成为荷兰著名的旅游景观。荷兰风车在欧洲大陆非常普遍，成为机械能的主要来源。后来由于蒸汽机的出现，才使欧洲风车数目急剧下降，北欧国家至今仍保留着大量荷兰式的风车，已成为人类文明的见证。

### 1.1.2 风力发电

风力发电就是风力机通过风轮来捕获风能，利用风对叶片的作用力推动叶片绕主轴旋转，通过一系列的传动进而带动发电机发电，把吸收的风的动能转换为电能输出。

在蒸汽机出现之前，风力机械是动力机械的一大支柱。18 到 19 世纪的欧洲，有数十万台风力机在运行，主要用于谷物磨坊和提水灌溉。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，其中 150000 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)，多叶片风轮的转速相对较低，能产生了较大的转矩，可以直接驱动活塞泵进行泵水。风轮的后方安装了尾翼，在尾翼的对风作用下，风轮的旋转平面可以保持与风向垂直，使风轮正对风向。后来随着煤炭、石油、天然气的大规模开采和较低成本电力的获得，各种曾经被广泛使用的风力机

械, 由于成本高、效率低、使用不方便等因素, 无法与蒸汽机、内燃机和电动机相竞争, 逐渐被淘汰。但是, 近半个世纪的实践表明, 风力发电在解决发展中国家无电农、牧区居民的用电方面起到了积极且重要的作用, 特别是 20 世纪 70 年代以后风力发电更是进入了一个蓬勃发展的阶段, 风力发电技术及风电产业得到了快速的发展, 世界各地建立了很多大中型的风电场。

风力发电技术的研究始于 19 世纪。美国的 Charles F. Brush(1849—1929)是风电技术研究的先驱者之一, 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(图 1.3)。这台风力发电机的功率为 12kW, 叶轮直径为 17m, 有 144 个由雪松木制成的叶片, 运行了约 20 年, 发出的电充到他家地窖里的蓄电池中。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。

丹麦的 Poul la Cour(1846—1908)于 1891 年制造了用来发电的风力机。Poul la Cour 是一名气象学家, 同时也是现代风力发电机的先驱, 他建立了第一个用于风力发电机实验的风洞, 并发现叶片数少, 转动较快的风力机在发电时比低转速的风力机效率高得多。他发明的 2 台实验风力发电机被安装在丹麦 Askov Folk 高中(图 1.4)。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。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。他还创办了世界上第一个风力发电期刊 Journal of Wind Electricity。

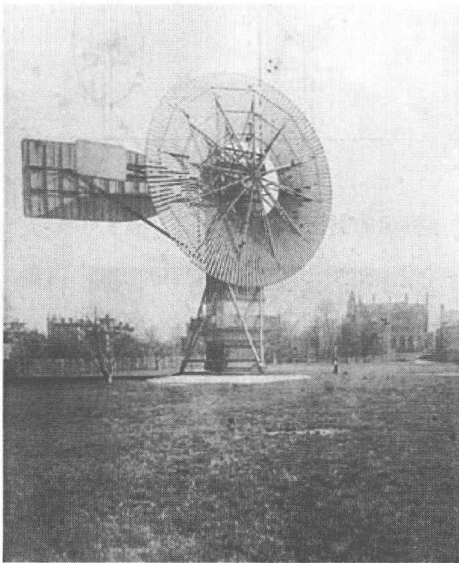


图 1.3 Charles F. Brush 用于发电的风力机

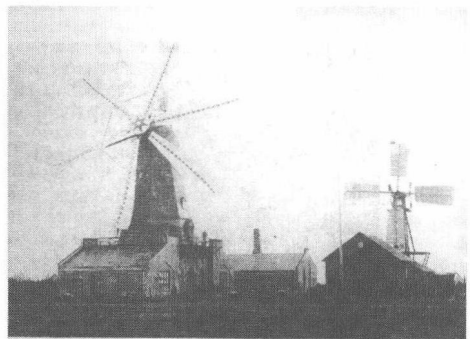


图 1.4 Poul la Cour 用于发电的风力机

1920 年至 1930 年, 丹麦约有 120 个地方公用事业拥有风力发电机, 单机容量一般为 20~35kW, 总装机容量约 3MW。这些风电容量当时占丹麦电力消耗量的 3%。丹麦对风力发电的重视度在随后的若干年逐渐减退, 直到第二次世界大战期间出现供电危机。

垂直轴风力发电机的发明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。芬兰的工程师 Savonius 于 20 世纪 20 年代发明了典型的阻力型垂直轴风力发电机，它以发明者的名字命名为萨窝纽斯型风力机。这种风力机选用的是 S 型风轮。它由两个半圆筒形叶片组成，两圆筒的轴线相互错开一段距离，也有用 3~4 枚叶片的，往往上下重叠多层。其优点是起动转矩较大，起动性能良好，但是它的转速低，风能利用系数低于水平轴风力发电机组，并且在运行中围绕着风轮会产生不对称气流，从而产生侧向推力。特别是对于较大型的风力发电机组，因为受偏转与安全极限应力的限制，采用这种结构形式是比较困难的。萨窝纽斯型风力发电机组的叶尖速比不可能大于 1，所以它的转速低，风能利用系数也低于高速型的其他垂直轴风力发电机组，缺乏市场竞争力。

升力型垂直轴风力发电机组利用翼型的升力做功，最典型的是由法国工程师达里厄 (G. J. M. Darrieus) 于 1927 年发明的达里厄型 (Darrieustype) 风力发电机组，他于 1931 年获得专利，但一直未被重视。20 世纪后期，加拿大国家空气动力实验室和美国 Sandia 实验室进行了大量的试验研究，结果认为与所有垂直轴风力发电机组相比，该机的风能利用系数最高。根据叶片的形状，达里厄型风力发电机组可分为直叶片和弯叶片两种，叶片的翼型剖面多为对称翼型。弯叶片 ( $\Phi$  型) 主要是使叶片只承受张力，不承受离心力，但其几何形状固定不变，不便采用变桨距方法控制转速，且弯叶片制造成本比直叶片高。直叶片一般都采用轮毂臂和拉索支撑，以防止离心力引起过大的弯曲应力，但这些支撑会产生气动阻力，降低效率。如图 1.5 所示，达里厄型风力发电机组有多种形式，如 H 型、 $\Delta$  型、棱型、Y 型和  $\Phi$  型等，其中以 H 型和  $\Phi$  型风力发电机组最为典型，如图 1.6 所示。

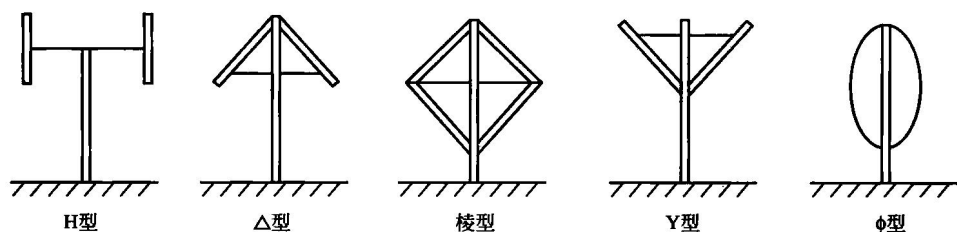


图 1.5 达里厄型风力发电机组的类型

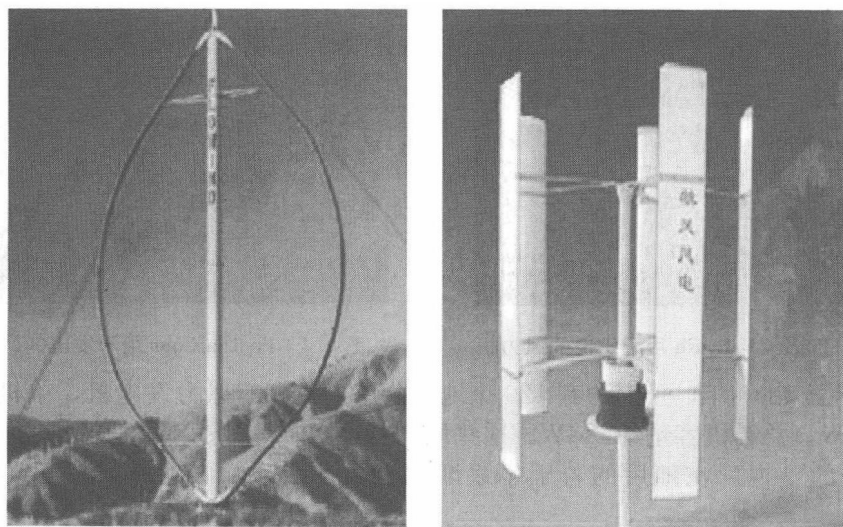


图 1.6  $\Phi$  型与 H 型垂直轴风力发电机

达里厄型风力发电机组的转速较高, 旋转惯性大, 结构相对简单, 成本较低, 适合大型风力发电机组。但达里厄型风力发电机组一般都起动转矩小, 起动性能差, 必须靠其他动力起动, 达到要求的转速才能正常运行, 并且风能利用率低。这种风力发电机组大都需具有起动机构和离合器等, 这样就增加了系统结构的复杂性, 提高了成本。

随着垂直轴风力发电机组技术的发展, 现在已有在风速为  $2\text{m/s}$  时就可以带负载自动的 H 型垂直轴风力发电机组, 并且风能利用系数高, 这将使大型垂直轴风力发电机组更具有竞争力。

在 20 世纪初期, 德国就开始尝试利用风能发电, 首先是理论阵营引发了风力发电机发展的浪潮。基于军用和民用螺旋桨飞机的设计经验, 在航空机翼空气动力学的背景下, 物理学家 Albert Betz 对风力机的物理和气动性能进行了严格的计算, 并得出在理想条件下风力机最大风能转化率为  $59.3\%$ 。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。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。在稍作改进后, 今天仍然以 Betz 理论为叶片设计的基础。

德国人在 20 世纪 30 年代主要致力于风力机的理论研究和大的风电计划, 1931 年在 USSR 建立了第一个大型的 WIMED-30 风力机, 如图 1.7 所示, 采用 3 叶片风轮, 桁架式塔身, 风轮直径为  $30\text{m}$ , 额定功率为  $100\text{kW}$ , 额定风速为  $10.5\text{m/s}$ , 额定转速为  $30\text{r/min}$ , 叶尖速比为  $4.5$ , 叶片为变桨距控制, 通过在一个圆形轨道上移动机舱来进行偏航。这台风力发电机在 1931—1942 年间一直运行良好, 生产电力并入小型电网。该风力发电机的良好运行的实践经验, 更增强了德国人建造  $5000\text{kW}$  大型风力机的信心, 但这些计划都因随后的第二次世界大战而终止。



图 1.7 WIMED-30 型风力发电机

在 1930—1940 年期间, 由于德国本土燃料和电力的缺乏, 于 1939 年成立了 RAW 风能研究组织, 聚集了许多科学家、技术人员和工业企业等。RAW 组织资助了很多风电的项目, 其成果都在 *memoranda* 上发表。其中一项值得特别注意的是, 在 1937 年工程师 Franz Klein-henz 发布的巨型风力机计划, 结构如图 1.8 所示。该风轮的结构参数为: 风轮直径为  $130\text{m}$ , 有 3 或 4 个叶片, 额定功率为  $10000\text{kW}$ , 叶尖速比为  $5$ , 风轮为上风式, 轮毂高度为  $250\text{m}$ , 直趋式电动机的直径为  $28.5\text{m}$ , 或者通过几个机械传动进行驱动, 电动机驱动偏航。直到 1942 年该项目还处于积极的筹备之中, 但当世界大战爆发后该项目实施计划破灭。

德国发动的第二次世界大战使这一发展停顿, 而美国的风力发电机的研制还在持续进行。工程师 Palmer C. Putnam 和 马萨诸塞州一些著名的科学家和技术人员合作开发研制了第一台大型的并网风力发电机。1941 年 10 月这台风力发电机在佛蒙特州的小山顶上安装, 它可能是世界上第一台大型风力发电机, 如图 1.9 所示。该风力发电机主要参数为: 风轮直径为  $53.3\text{m}$ , 额定输出功率为  $1250\text{kW}$ , 塔高为  $35.6\text{m}$ , 重  $75\text{t}$ , 叶片采用不锈钢制造, 无扭曲, 翼型为 NACA4418, 恒定弦长为  $3.7\text{m}$ , 叶片有效长度为  $20\text{m}$ , 每个叶片重量为  $6.9\text{t}$ , 两个叶片采用拍向铰链连接, 以减少强风下叶片的风载荷, 风轮轴与叶片轴之间的



角度随风速和转速变化,风轮能够承受  $62\text{m/s}$  的风速,额定风速为  $13.5\text{m/s}$ ,额定转速为  $29\text{r/min}$ ,仰角为  $12.5^\circ$ ,锥角可变  $6^\circ\sim 20^\circ$ ,齿轮箱的增速比为  $20.6$ ,风力机的速度和功率输出控制采用叶片液压系统实现,采用  $1250\text{kW}$  的同步发电机。

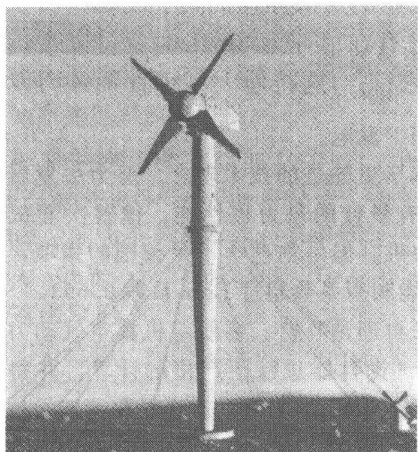


图 1.8 RAW 资助项目的风力发电机



图 1.9 美国的大型风力发电机

这台风力发电机运行了 4 年,直到 1945 年 3 月 26 日,一个叶片在运行中折断,由于缺少资金去维修而被拆除。作为一个兆瓦级实验风力发电机,已是相当成功的了。

1940 年至 1950 年,在第二次世界大战期间,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力机(图 1.10)。丹麦风机制造商已经生产出了两叶片的风力机,所有这些风力机发的是直流电。其中三叶片 F. L. Smidth 风力机于 1942 年安装在 Bobo 岛,它们看起来很像所谓的“丹麦概念式”风力机,是风-柴系统中的一部分,给小岛供电。1951 年后,这些直流发电机逐渐被  $35\text{kW}$  的交流异步发电机取代。

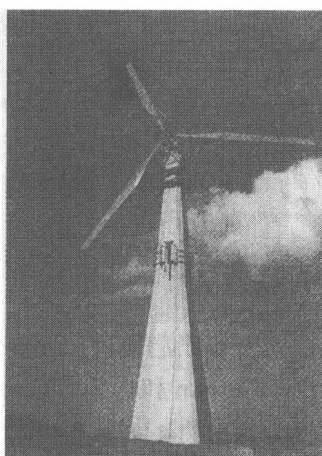
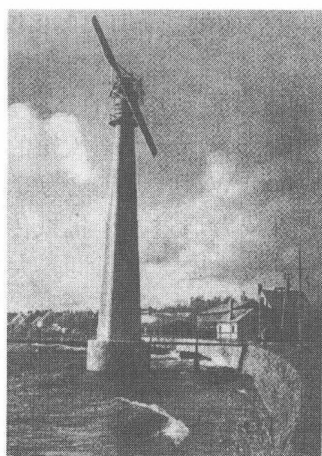


图 1.10 F. L. Smidth 的两叶片风力机和三叶片风力机

丹麦人 Johannes Juul 是 Poul la Cour 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,并在 1956 到

1957年为SWAS电力公司在丹麦南部的Gedser海岸建成了新型的200kW的Gedser风力发电机，这是当时是世界上功率最大的交流风力发电机。它是一台三叶片、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还发明了紧急叶尖刹车，可在风轮转速过快时通过离心力的作用释放刹车片，以降低风轮的转动速度。Gedser风力发电机在不需维护的情况下运行了11年(图1.11)。现在丹麦的Bjerringbro电力博物馆里还可以看到这台风力发电机的机舱和叶轮。

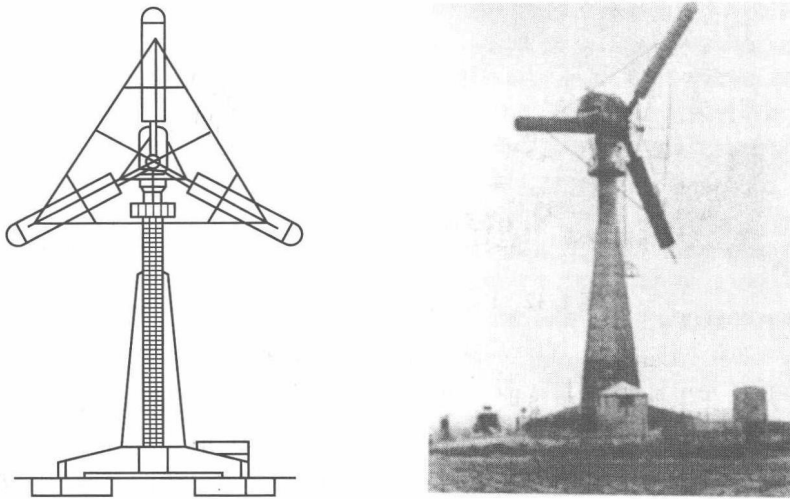


图 1.11 Johannes Juul 的 Gedser 风力发电机

第二次世界大战后，风力发电机的研究与发展主要集中在欧洲。E. W. Golding总结了英国的先进技术，在联合国的会议进程中又报告了进一步的工作进展。英国建造了两个大型风力发电机，其中一个是在1955年，由John Brown公司在Costa Hill, Orkney建造。据检测，John Brown机组在风速16m/s的条件下功率可达100kW，它的转子安装在24m高的塔上，直径为15m。这个风力发电机与柴油发电机一起并入电网，在1955年由于操作问题只是间断地运行。

另外一个机组由Enfield公司制造，于1952年建在了St. Albans(图1.12)。Enfield-Andreau风力发电机安装在30m高的塔上，风轮直径为24m。这个机组与其他机组的最大不同之处在于它的叶片是空心的，基于法国工程师Andreau的设计理念，空心叶片旋转时，离心力使叶片内的空气从轮毂流向叶尖。轮毂处于低压状态，将空气从塔底吸入，驱动装在塔身中的汽轮机和发电机。主要特点为：双活动连接空心叶片、自调向风轮，装有灵敏的功率控制系统，利用液压伺服电动机的自动变桨距控制机构，可变锥角。额定功率为100kW，额定风速为13.5m/s，在13.5~29m/s风速范围内功率保持恒定。风轮的转速可变，最大为95r/min，吸气量为1655m<sup>3</sup>/min，同步发电机为100kW/415V。在1957年这个机组被搬到了阿尔及利亚的Grand vent，用于进一步的测试。由于摩擦损失过大，效率较低，这个机组最终还是没能取得成功。

在1958—1966年，法国人建造了几个风力发电机样机，功率为800kW，位于Nogent Le Roi，转子直径是31m，与同步发电机相连以恒定速度运行。其机舱重达162t并被安装在32m高的塔架上。这个机组在1958—1963年间为国家电网提供电力。另外两个机组坐



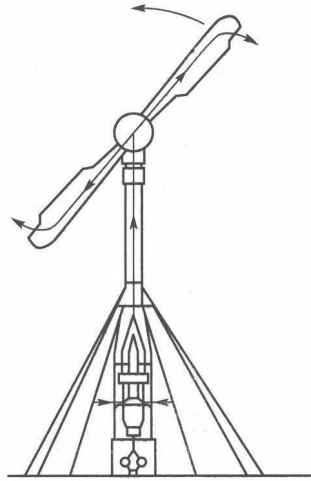
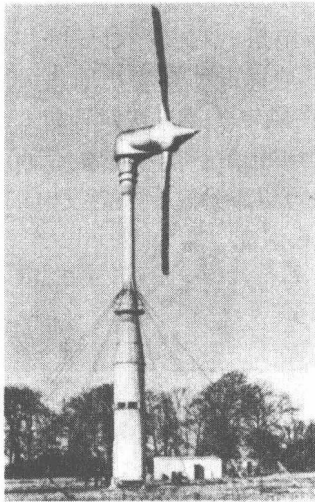


图 1.12 Enfield - Andreau 风力发电机

落于 St. Remy - Des - Landes。较小的 Neyrpic 机组的转子安装在 17m 高的塔架上，风轮直径为 21m，并且在风速为 12m/s 时，机组的功率为 130kW。较大的机组在风速为 17m/s 的情况下额定功率为 1000kW，运行了 7 个月，直到 1964 年 6 月由于涡轮轴损坏才停止运行。尽管这些样机证明了将风力发电机与电网相连接的可行性，但法国政府仍在 1964 年决定停止对风能的继续发展和研究。

在 20 世纪 50 年代，德国设计制造了在技术上领先于那个时代的风力机，并在以后的 20 年时间里保持领先地位。其转子上的叶片由玻璃纤维制成，所以质量很轻，而且安装在一个带有桨距控制和圆锥的可转动轮毂上。10kW 的机组被开发并测试，一个直径为 34m 的机组，在风速 8m/s 时功率达到 100kW。这个机组在 1957—1968 年间运行了 4000h。然而，由于资金及叶片振动问题，该实验进展得很慢。

作为风力发电技术的最初尝试，这些研究和实践为后来的风电发展奠定了很好的基础。

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。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 20 世纪 80 年代后期，政府资助和启动风电项目主要趋向于组建大型试验风力机。同时，由于公共事业是这些大型风力发电机的潜在买家，因此，这时的大型风力发电机已经向 MW 级发展。大型风力发电机组从一个叶片到三个叶片都有，后来三叶片逐渐发展为主流。

20 世纪 90 年代，单机容量不断增加，300kW、450kW、600kW、750kW 风力发电机成为主流机型，开始商业化兆瓦级风力发电机组的研制，并且出现海上风电场。海上风能的应用前景非常好，海上拥有比陆地上更好的风能资源，并且不占用宝贵的土地资源。

风力发电机大型化可以减少占地、降低并网成本和单位功率造价，有利于提高风能利用效率。因此风力发电机组的技术也正沿着增大单机容量、提高转换效率的方向发展。近年来，全球 MW 级机组的市场份额明显增大，1997 年以前还不到 10%，2001 年则超过一半，2002 年达到 62.1%，2003 年全球安装的风力发电机组平均单机容量达到 1.2MW。