



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 垂直轴 风力机

CHUIZHIZHOU  
FENGLIJI

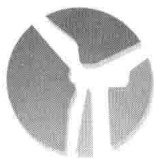
蔡新 高强 潘盼 郭兴文 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 垂直轴 风力机

蔡新 高强 潘盼 郭兴文 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一。本书详细介绍了垂直轴风力机的结构体系特点及工作性态，主要内容包括垂直轴风力机空气动力学、结构设计、现代计算方法、新型结构型式、疲劳寿命、运行调控与维护、风场特性等。

本书可供风力发电领域科研、设计、施工及运行管理的工程技术人员阅读参考，也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目（C I P）数据

垂直轴风力机 / 蔡新等编著. — 北京 : 中国水利水电出版社, 2016. 2

(风力发电工程技术丛书)

ISBN 978-7-5170-4101-6

I. ①垂… II. ①蔡… III. ①风力发电机 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第026972号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>垂直轴风力机</b>
作 者	蔡新 高强 潘盼 郭兴文 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2016年2月第1版 2016年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>35.00元</b>

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

# 《风力发电工程技术丛书》

## 编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军



## 主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学  
中国长江三峡集团公司  
中国水利水电出版社  
水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心  
华北电力大学  
水电水利规划设计总院  
水利部水利水电规划设计总院  
中国能源建设集团有限公司  
上海勘测设计研究院  
中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司  
中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司  
长江勘测规划设计研究院  
中水珠江规划勘测设计有限公司  
内蒙古电力勘测设计院  
新疆金风科技股份有限公司  
华锐风电科技股份有限公司  
中国水利水电第七工程局有限公司  
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司  
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司  
同济大学  
华南理工大学  
中国三峡新能源有限公司

丛书总策划 李 莉

## 编委会办公室

主 任	胡昌支	陈东明					
副 主 任	王春学	李 莉					
成 员	殷海军	丁 琪	高丽霄	王 梅	邹 昱		
	张秀娟	汤何美子	王 惠				



## 前 言

风力发电是风能利用的最主要方式，实现将风能转化为电能的装置是风力发电机。大功率并网式风力发电主要采用水平轴风力机，较小功率离网式风力发电多采用垂直轴风力机。传统认为垂直轴风力机风能利用率低而未能得到足够重视。垂直轴风力机的应用可追溯到几千年前，最早用以提水，利用垂直轴风力机进行发电的研究始于20世纪20年代，但到目前为止对其气动和流场特性的认识仍然是初步的。与水平轴风力机相比，垂直轴风力机具有受风多向性、结构简单、地面安装、检测控制方便、维修费用低、受力稳定、寿命更长、对自然环境影响小、投资成本低等诸多特点。随着研究技术水平的提高，垂直轴风力机同样可实现较高的风能利用率，同时有效地降低风电成本，具有广阔的应用前景。本书重点对垂直轴风力机的基本特性、结构设计和运维的核心技术问题作探讨。

本书共8章，主要介绍空气动力学原理及计算方法、垂直轴风力机气动特性、垂直轴风力机结构设计、垂直轴风力机疲劳寿命、新型垂直轴风力机、垂直轴风力机运行控制与防护、垂直轴风力机风场等。

本书主要由蔡新、高强、潘盼、郭兴文编著，蔡新教授任主编并统稿定稿。孟瑞、张羽、张远、丁文祥、王辰宇、吴飞宇参与了本书有关的研究工作和部分章节编写。参加研究工作的还有江泉、顾水涛、朱杰、顾荣蓉、张建新、舒超、张灵熙等。该书的部分研究成果为江苏高校首批“2011计划”（沿海开发与保护协同创新中心，苏政办发〔2013〕56号）。

限于作者水平及研究深度，书中难免存在不妥及疏漏之处，恳请读者批评指正。

2016年1月



# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能利用	1
1.2 风力发电技术	4
1.3 垂直轴风力机的发展	6
第 2 章 空气动力学原理及计算方法	17
2.1 基本气动参数	17
2.2 叶素理论	19
2.3 动量理论	21
2.4 涡流模型	29
2.5 动态失速模型	32
2.6 计算流体力学	36
第 3 章 垂直轴风力机气动特性	49
3.1 启动性能	49
3.2 动态尾流效应	53
3.3 动态失速效应	56
3.4 附加质量效应	57
3.5 翼型弯度效应	58
3.6 螺旋式叶片垂直轴风力机气动性能	60
第 4 章 垂直轴风力机结构设计	68
4.1 结构参数	68
4.2 载荷	80
4.3 材料	82
4.4 设计标准	84

<b>第 5 章 垂直轴风力机疲劳寿命</b> .....	89
5.1 疲劳特性 .....	89
5.2 疲劳寿命分析方法 .....	91
5.3 疲劳载荷谱 .....	99
5.4 抗疲劳设计方法 .....	102
<b>第 6 章 新型垂直轴风力机</b> .....	104
6.1 创新设计理论概述 .....	104
6.2 新结构专利机型 .....	109
6.3 新型垂直轴风力机展望 .....	117
<b>第 7 章 垂直轴风力机运行控制与防护</b> .....	121
7.1 运行控制技术 .....	121
7.2 垂直轴风力机防护技术 .....	129
<b>第 8 章 垂直轴风力机风场</b> .....	135
8.1 大气边界层内风特性 .....	135
8.2 风场选址 .....	144
8.3 垂直轴风力机布局设计 .....	148
8.4 不同风电场垂直轴风力机综合应用 .....	151
<b>参考文献</b> .....	155



# 第 1 章 绪 论

风能作为清洁、可再生能源，是一项受全球关注的重要新能源。风能利用的最主要方式是风力发电，而风力机结构体系的合理性和安全可靠性的直接影响着风能利用和风能转化的效率。

本章主要介绍风与风能利用、风力发电、垂直轴风力机的类型及特点。

## 1.1 风 能 利 用

风能是地球表面空气流动所产生的动能。由于地面各处受太阳辐照后气温变化不同和空气中水蒸气含量不同，因而引起各地气压差异，高压空气向低压地区流动，即形成风，因此风能是太阳能的一种重要转换形式。太阳把能量以热能的形式传到地球，其中大约 2% 转化为风能。地球表面的风能总量十分可观，约为  $2.74 \times 10^9$  MW，其中可利用风能约为  $2 \times 10^7$  MW。

### 1.1.1 风能特点

风能与其他能源相比，有其显著的特点。

#### 1. 风能的优越性

(1) 风能的蕴藏量巨大。太阳氢核稳定燃烧时间在 60 亿年以上，风能是太阳能的一种转化形式，故人们常以“取之不竭，用之不尽”来形容风能利用的长久性。根据专家估算，在全球边界层内风能总量相当于目前全世界每年所燃烧能量的 3000 倍左右。

(2) 就地可取，无需运输。由于矿物能源煤炭和石油资源地理分布的不均衡，给交通运输带来了压力。电力的传送虽然方便，但为了向人烟稀少的偏远地区送电而架设费用高昂的高压输电线路，显然需要较大的前期投入。因此，就地取材开发风能是解决我国偏远地区能源供应的重要途径。

(3) 分布广泛，分散使用。如果将在地表上 10m 高处、密度大于  $150\text{W}/\text{m}^2$  的风能作为有利用价值的能源，则全世界约有  $2/3$  的地区具有这样有价值的风能。虽然风能分布也有一定的局限性，但是与化石燃料、水能和地热能等相比，仍称得上是分布较广的一种能源。风力发电系统可大可小，因此便于分散使用。

(4) 不污染环境，不破坏生态。化石燃料在使用过程中会释放出大量的有害物质，使人类赖以生存的环境受到破坏和污染。风能在开发利用过程中不会给空气带来污染，也不破坏生态，是一种清洁安全的能源。

#### 2. 风能的弊端

(1) 能量密度低。空气的密度仅是水的  $1/773$ ，因此在风速为  $3\text{m}/\text{s}$  时，其能量密度仅为  $0.02\text{kW}/\text{m}^2$ ，而水流速为  $3\text{m}/\text{s}$  时，能量密度为  $20\text{kW}/\text{m}^2$ 。在相同流速下，要获得

与水能同样大的功率，风轮直径要相当于水轮的 27.8 倍。由此看来，风能是一种能量密度极其稀疏的能源，单位面积上只能获得很少的能量。

(2) 能量不稳定。风能对天气、气候以及地貌等非常敏感，随机性大。虽然各地区的风能特性在一个较长时间内大致有一定的规律可循，但是其强度每时每刻都在不断地变化之中，不仅年度间有变化，而且在很短的时间内还有无规律的脉动变化，即时空差异大，风能的这种不稳定性给风能开发利用带来了一定的难度。

### 1.1.2 风能利用的主要形式

我国是世界上最早利用风能的国家之一，早在商代就出现了帆船，有文字记载“随风张幔曰帆”，后来又发明了帆式风车，在《天工开物》中就有记载“杨郡以风帆数扇，俟风转车，风息则止”的论述。明代以后风车被广泛应用于提水灌溉、制盐等。在国外，相传公元前 17 世纪，巴比伦国王哈姆拉比（Hammurabi）曾经打算借助风力灌溉富饶的美索不达米亚平原，当时所设计的风力机雏形与伊朗高原现存的风车遗迹类似，伊朗高原风车遗址如图 1-1 所示。公元前 2 世纪，古波斯人利用垂直轴风车进行碾米，直到中世纪，风车才在意大利、法国、西班牙和葡萄牙出现，而传到英国、荷兰和德国还要晚一些，19 世纪出现的多叶片低速风车并没有在欧洲大陆上推广开来，却在 1870 年前后风靡美国，并由此得名“美国风车”。综合来看，风能利用主要有风力提水、风帆助航、风力制热、风力发电等形式。

#### 1. 风力提水

风力提水从古至今一直被广泛应用，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”。风力提水作为风能利用的主要方式之一，在解决农牧业灌排、边远地区的人畜饮水以及沿海养鱼、制盐等方面都不失为一种简单、可靠、有效的实用技术。根据提水方式的不同，现代风力提水机可分为风力直接提水和风力发电提水两大类，风力提水机又可分为高扬程小流量型、中扬程大流量型和低扬程大流量型。图 1-2 为典型的高扬程小流量风力提水机。

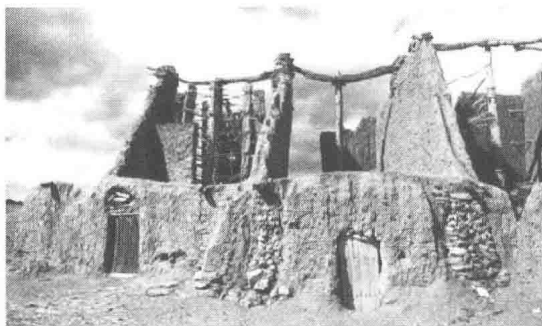


图 1-1 伊朗高原风车遗址

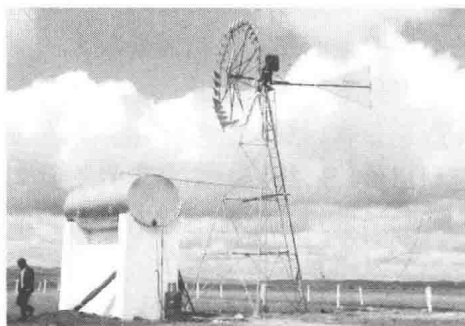


图 1-2 高扬程小流量风力提水机

#### 2. 风帆助航

我国是最早使用帆船的国家之一，至少在 3000 年前的商代就出现了帆船。唐代有“长风破浪会有时，直挂云帆济沧海”的诗句，可见那时风帆船已广泛用于江河航运。最



辉煌的风帆时代是我国的明代，14世纪初叶中国航海家郑和七下西洋，庞大的风帆船队功不可没。在机动船舶发展的今天，为节约燃油和提高航速，古老的风帆助航也得到了发展。航运大国日本已在万吨级货船上采用电脑控制的风帆助航，节油率达15%。图1-3为风帆助航用于现代航运。

### 3. 风力制热

风力制热主要有液体搅拌制热、固体摩擦制热、挤压液体制热和涡电流法制热等。目前，风力制热主要用于浴室、住房、花房、家禽、牲畜养殖房等的供热采暖。图1-4为液体搅拌风力制热系统装置。

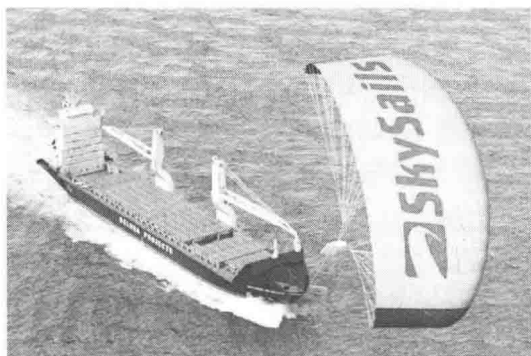


图1-3 风帆助航

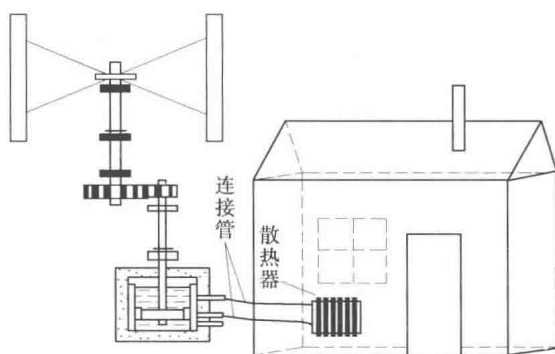
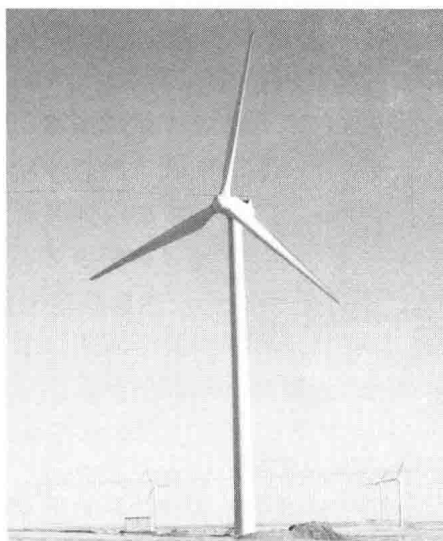


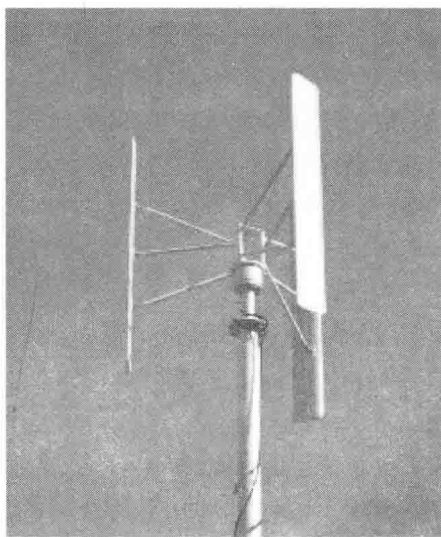
图1-4 液体搅拌风力制热系统装置

### 4. 风力发电

风力发电是指把风的动能先转变成机械动能，再把机械能转化为电能。风力发电的工作原理，是利用风力带动风力机叶片旋转，再通过增速齿轮提高旋转速度，进而驱动发电机发电。因为风力发电不需要使用燃料，也不会产生辐射或空气污染，因而正风靡全球。图1-5为现代风力机的两种主要型式。



(a) 水平轴风力机



(b) 垂直轴风力机

图1-5 风力机

## 1.2 风力发电技术

风力发电技术是涉及空气动力学、机械传动、电机、电力电子、自动控制、力学、材料学等多学科的综合性高技术系统工程。本节对两种主要的风力机机型，即水平轴风力机与垂直轴风力机各组成部件作简要介绍，并概述了离网型风力发电系统和并网型风力发电系统。

### 1.2.1 风力机类型

实现将风能转化为电能的装置是风力发电机组。风力发电机组的单机容量由几十瓦到几兆瓦不等，按照容量大小可将风力发电机组分为大型（100kW 以上）、中型（10~100kW）、小型（1~10kW）和微型（50~1000W）；按照风轮结构及其旋转轴相对于气流的位置又可分为水平轴风力机和垂直轴风力机，其中旋转轴与气流平行的为水平轴风力机，与气流垂直的为垂直轴风力机。

#### 1. 水平轴风力机

水平轴风力机一般由叶片、轮毂、机舱、叶轮轴与主轴连接件、主轴、齿轮箱、刹车机构、联轴器、发电机、散热器、冷却风扇、风速仪与风向标、控制系统等部件所组成，水平轴风力机结构体系示意图如图 1-6 所示。叶片安装在轮毂上组成风轮，其作用是将风能转换为机械能，低速转动的风轮由增速齿轮箱增速后，将动力传递给发电机。齿轮箱与发电机都布置在机舱里，机舱由塔架支撑。为了有效地利用风能，偏航装置根据风向传感器测得的风向信号，由控制器控制偏航电机，驱动与塔架上大齿轮啮合的小齿轮转动，使风轮始终正对风向。由于齿轮箱在兆瓦级风力机中损坏率较高，国外研制出了直驱型风力机，这种风力机采用风轮与多级异步电机直接连接并进行驱动的方式，避免使用齿轮箱。

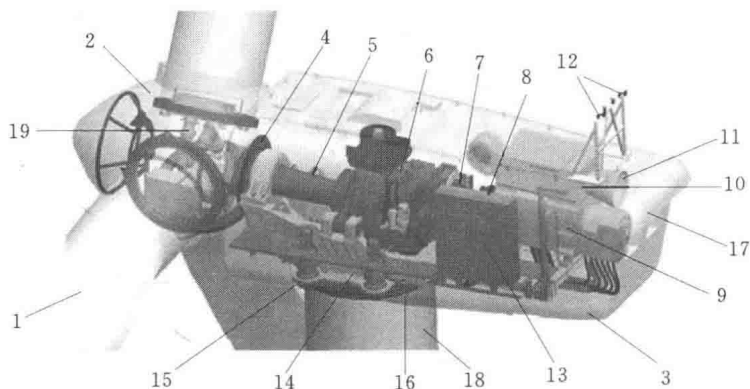


图 1-6 水平轴风力机结构体系示意图

- 1—叶片；2—轮毂；3—机舱；4—叶轮轴与主轴连接件；5—主轴；6—齿轮箱；7—刹车机构；8—联轴器；  
9—发电机；10—散热器；11—冷却风扇；12—风速仪与风向标；13—控制系统；14—液压系统；  
15—偏航驱动；16—偏航轴承；17—机舱盖；18—塔架；19—变桨距系统



## 2. 垂直轴风力机

垂直轴风力机一般由叶片、支撑杆、轴套、塔架、基座、机房、传动轴、发电机、刹车装置、电器柜等部件组成，垂直轴风力机结构体系示意图如图 1-7 所示。叶片截面一般采用 NACA 00XX 系列对称翼型，叶片通过水平支撑杆与转子中心支柱连接。转子中心支柱一般为薄壁圆筒钢管，部分采用三菱柱桁架结构。刹车装置、变速箱与发电机可安装在地面，结构稳定性好，便于维修。

实践表明，与水平轴风力机相比，垂直轴风力机单位千瓦的投资成本可下降 50% 左右，且维护费用低、检修简单、寿命更长。由于研究不足，一段时间内人们普遍认为垂直轴风力机风能利用率低于水平轴风力机，因此垂直轴风力机不被重视。后经大量的试验和计算表明垂直轴风力机实际风能利用率可达 0.4 以上，与水平轴风力机相当。因此，发展垂直轴风力机发电技术可有效降低风电成本，对风电行业的发展具有重大意义。

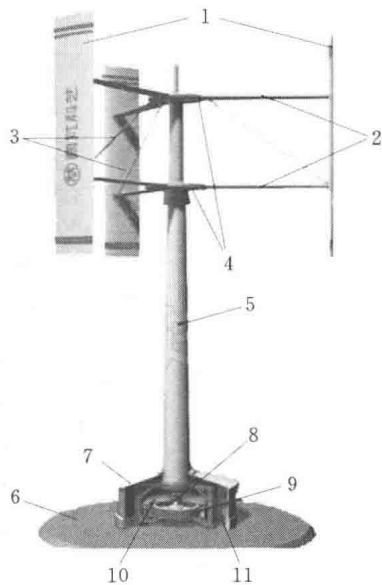


图 1-7 垂直轴风力机结构体系示意图  
1—叶片；2—水平支撑杆；3—斜支撑杆；4—轴套；5—塔架；6—基座；7—机房；8—传动轴；9—发电机；10—刹车装置；11—电器柜

### 1.2.2 风力发电方式

风力发电主要运行方式有离网型和并网型两大类。

#### 1.2.2.1 离网型风力发电

离网型风力发电多针对微小型风力机。微小型风力机因其安装方便、机动性高等优点已被广泛应用于风力资源丰富的地区。目前，我国安装使用的微小型风力机有 50W、100W、150W、200W、300W、500W、1kW、2kW、3kW、6kW 和 10kW 等 11 种型号若干种机型。微小型风力机由叶片、发电机、回转体、尾翼、立柱、蓄电池和底座等构成。由于风是间歇性的，利用风力发电并希望得到稳定电能的简单办法就是利用蓄电池，具体方法为：强风时，将发出的电输入蓄电池中；风力不足时，由蓄电池进行放电输出电能。离网型风力发电通常包括独立运行和组合运行两种方式。

##### 1. 独立运行方式

独立运行方式，又称离网运行方式，通常是一台小型风力发电机组向一户或几户居民提供电力，用蓄电池储能，以保证无风时的用电。

##### 2. 组合运行方式

风力发电与其他发电方式（如柴油机发电或太阳能发电）相结合，向一个单位、一个村庄或一个海岛供电。组合运行方式的小型风力发电机组，是我国远离电网的边远偏僻农村、牧区、海岛和特殊处所发展风力发电解决其基本用电问题的主要运行方式，除具有风力发电的一般优点外，其自身优点主要如下：



- (1) 机动性高。小型发电机可配合需要增加或变更组件大小。
- (2) 安装方便。可根据需要随时安装，安装简单，快速解决日常用电问题。
- (3) 能源使用多元化。小型发电机可与多种不同的可再生能源组合，方便可靠。
- (4) 量身定做。某些小型发电机种可以配合实际的电力需求调节发电量，提升发电效率。
- (5) 减少对环境的冲击。代替传统能源，减少环境污染。

### 1.2.2.2 并网型风力发电

离网型风力发电在没有电网覆盖、人烟稀少的地方能够发挥其特有优势，但是其缺点也明显，即不能保证供电质量（电压和频率的稳定性）和可靠性（发生故障就得停电）。相对于离网型风力发电，并网型风力发电则能确保供电质量与可靠性，也是最具发展前景和规模化、商业化的风力发电方式。

并网型风力发电系统是指风力机与电网相连，向电网输送有功功率，同时吸收或者发出无功功率的风力发电系统，一般包括风力机（含传动系统、偏航系统、液压与制动系统、发电机、控制和安全系统等）、线路、变压器等。电网供电与单机供电相比，其优点主要如下：

(1) 提高了供电的可靠性，一台风力机发生故障或定期检修不会引起停电事故。

(2) 提高了供电的经济性和灵活性，例如风电厂与火电厂并联时，两种电厂可以调配发电，使得风资源与化石燃料资源得到合理使用。在用电高峰期和低谷期，可以灵活地决定投入电网的发电机数量，提高了发电效率和供电灵活性。

(3) 提高了供电质量，电网的容量巨大（相对于单台发电机或者个别负载可视为无穷大），单台发电机的投入与停机或个别负载的变化对电网的影响甚微，衡量供电质量的电压和频率可视为恒定不变的常数。

## 1.3 垂直轴风力机的发展

垂直轴风力机的应用可以追溯到几千年前，人们利用垂直轴风力机进行提水，但直到 20 世纪 20 年代后才开始对利用垂直轴风力机进行发电的研究，随着人们对垂直轴风力机性能的逐步认识和开发，垂直轴风力机有了更广阔的应用空间。

如前所述，垂直轴风力机的旋转轴垂直于地面或来流方向。所以，垂直轴风力机工作时不受流体方向改变的影响，无需设置偏航结构，且其齿轮箱和发电机安装在地面，相对于安装在离地面几十米高的水平轴风力机来说，具有更好的结构稳定性和可维护性。但是，垂直轴式风轮在工作过程中，周围扰动流体呈现强烈的周期性非稳态变化特征，具有叶片载荷变化剧烈，流动干扰复杂等问题。因此，垂直轴叶轮结构、气动性能设计中诸多问题逐渐呈现，认识和解决这些问题对于提升现代垂直轴风力机风能利用率、延长其疲劳寿命、降低制造成本具有重要意义。

### 1.3.1 垂直轴风力机分类

垂直轴风力机主要分为两种形式，即阻力型与升力型，后来结合两者优点又研发了组合型风力机。





### 1.3.1.1 阻力型风力机

利用气流对叶片前后表面的压强差来驱动叶轮的风力机称为阻力型风力机。

#### 1. Blyth-Rotor 型风力机

第一台被用于发电的垂直轴风力机是由苏格兰工程师 James Blyth 于 1887 年发明的 Blyth-Rotor 型风力机，如图 1-8 所示。该风力机利用纯阻力型叶片驱动发电机转子为蓄电池充电。虽然当时对居民照明而言该风力机显得非常不经济，但是在偏远和人口稀少地区，没有电力传输设备，该类型风力机却发挥了很好的作用。

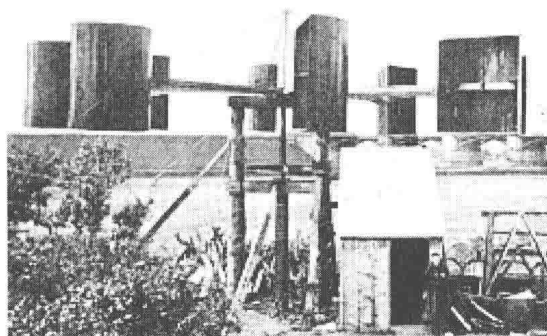


图 1-8 Blyth-Rotor 型风力机

#### 2. LaFond 型风力机

受到离心式风扇和水利机械中的涡轮启发，法国工程师 Montpeuier 在 1930 年设计了 LaFond 型垂直轴风力机，如图 1-9 所示，它包括外围固定聚风板和内部多阻力型叶片转子。这种风力机叶片凹面和凸面受到风力作用后，形成较大阻力差，驱动内部转子快速旋转，风由上风向吹至下风向时，对途经的下风向叶片产生额外驱动力矩，因此，这种风轮具有较大的启动力矩，通常在 2.5m/s 的风速下就能正常启动。

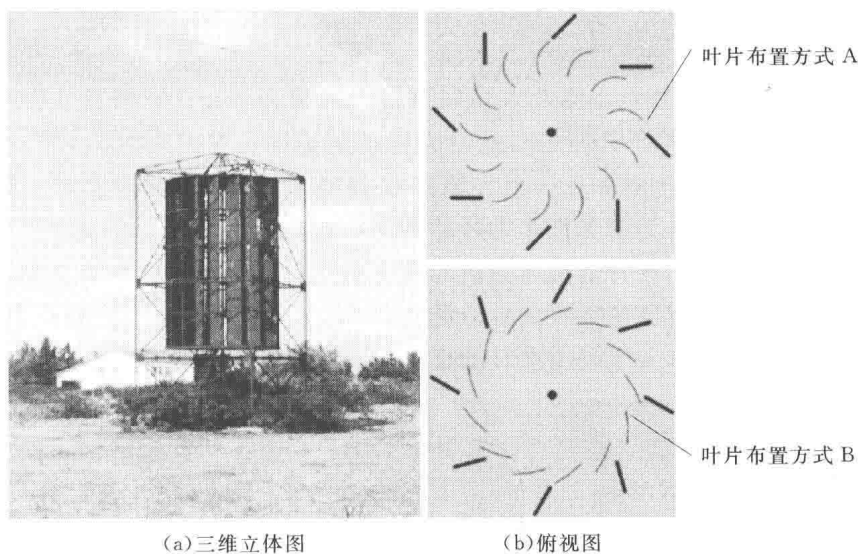


图 1-9 LaFond 型风力机

#### 3. Savonius 型风力机

Savonius 型风力机的概念是由芬兰工程师 S. J. Savonius 于 20 世纪 30 年代提出，是一种阻力型垂直轴风力机，如图 1-10 所示。Savonius 型风力机将两个半圆形叶片开口相对组成 S 形，并在旋转中心处有一部分重叠区，即在两叶片端部之间形成一定的间隙，该风力机具有结构简单、成本低、可设计性强、转动力矩高等优点，自诞生以来，大量工程



师对其进行了风洞试验研究并改进,使其最大风能利用系数达到了 0.3。但与利用升力型的现代桨叶式水平轴风力机相比,其转速和效率依旧偏低,基于这个原因,Savonius 型风力机被用于较小功率需求并具有经济性的场合,如抽水、驱动小型发电机、通风换气以及在冬季搅拌水塘防止结冰、海流计等方面。

#### 4. 风杯式风力机

风杯式风轮由两个或三个半球面围绕转轴对称安装,球面方向相反,它利用气流在叶片前后形成的压强差来推动叶轮工作,如图 1-11 所示。当受到来自水平方向的风时,凹面承受的风阻力要比凸面承受的阻力大 3~4 倍,两侧的力矩差即为风力机输出扭矩。为提升风能利用率,并且使风力机转动平稳,风轮至少需安装 3 个风杯。然而该类型风力机最大线速度接近风速,叶尖速比  $\lambda$  通常小于 1,且叶片在逆风区时产生的反向力矩降低了转动轴的总力矩,因此风能利用率较低。

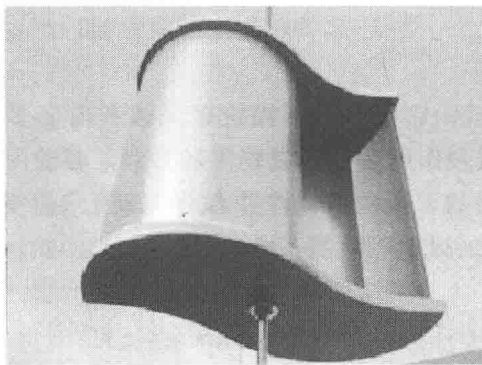


图 1-10 Savonius 型风力机

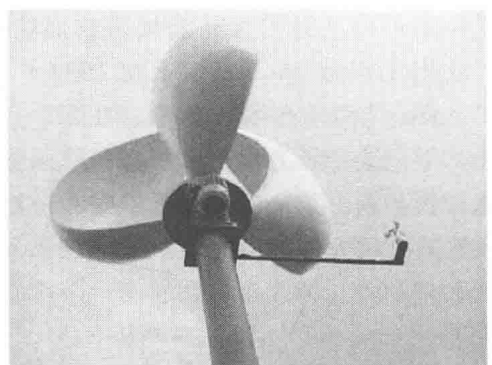


图 1-11 风杯式风力机

### 1.3.1.2 升力型风力机

升力型风力机,引入升力型翼型作为叶片截面,在高速旋转时可保证在顺风区内气流也吹向翼型前缘,风速作用在升力型风力机叶片上的气动力可分解为与入流风速平行和垂直的两个分力,其中与入流风速垂直的分力称为升力,与入流风速平行的分力称为阻力,升力在叶片转动方向的投影大于阻力在转动反方向的投影,风轮由升力驱动。

#### 1. Giromill 型风力机

Giromill 型风力机为垂直轴直叶片升力型风力机,如图 1-12 所示,其叶片截面一般采用常用的航空翼型,如 NACA 和 SAND 系列。该类型风力机最早由法国工程师 Georges Darrieus 于 1927 年申请并获得专利。它通常由 2~4 根直翼型叶片,在风力作用下产生升力来驱动装置旋转发电。

Giromill 型风力机风能利用系数可达到 0.3 以上。其结构型式和材料能够适应风轮在运转过程中产生的较大应力变化。在风力和惯性力作用下,该风力机可维持较为稳定的转速,并在湍流风况中运行良好。因此在许多特殊环境地区可替代水平轴风力机进行风力发电。

Giromill 型风力机外形尽管简单,但是流经其旋转域的气流流场非常复杂,对其近场动态尾流研究一直是该类型风力机优化设计的热点。

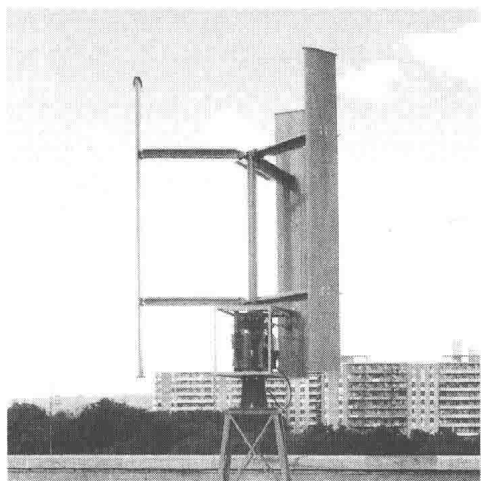


图 1-12 Giromill 型垂直轴风力机

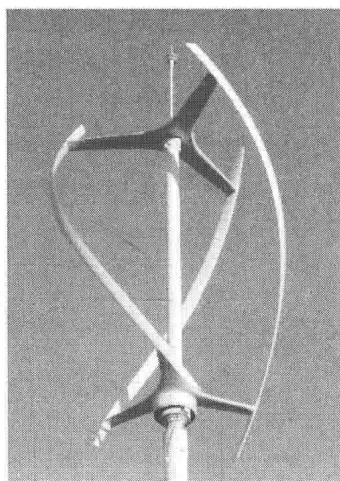


图 1-13 Gorlov 型螺旋叶片垂直轴风力机

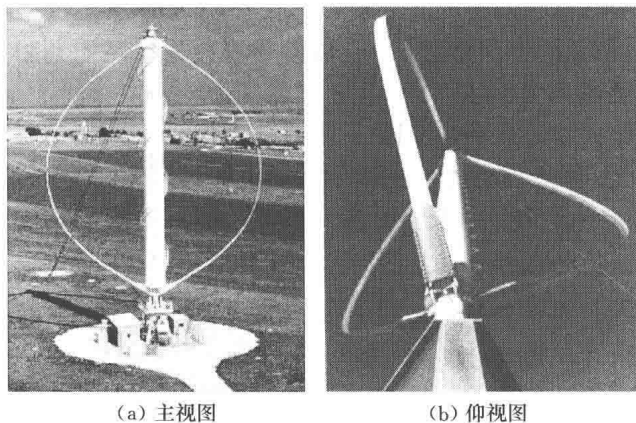
## 2. Gorlov 型风力机

Gorlov 型风力机由 Giromill 型直叶片风力机演变而来，其最大的特点是将直叶片沿旋转圆域外围盘绕，沿其轴向看，叶片的投影长度等于旋转域的周长，如图 1-13 所示。该类型风力机由美国西北大学 Gorlov 教授于 1995 年申请专利。

Gorlov 型风力机公开的风洞试验数据显示，其风能利用率分布在 24.4%~39% 之间，最佳叶尖速比为 2~2.5。由于 Gorlov 型风力机叶片在旋转域圆周处呈螺旋形分布，旋转过程中，在各个叶片之间的每支叶片的某一截面都处于最佳迎风攻角，使得风轮的启动力矩达到最大值。相对于 Giromill 型风力机存在启动力矩差且需要采用额外电能带动风轮旋转的缺点，Gorlov 型风力机具有极佳的启动性能。Gorlov 型风力机另一明显的优势是转矩输出平稳，因此相对于直叶片 Giromill 型风力机，具有扭曲外形的 Gorlov 型风力机可保持更长的使用寿命。

## 3. Darrieus 型风力机

Darrieus 型系列风力机中最适合于风场发电的机型为  $\Phi$  型风力机，该类型风力机具有“搅蛋器”外形，通常具有 2~3 根叶片，Darrieus 型垂直轴风力机如图 1-14 所示。



(a) 主视图

(b) 仰视图

图 1-14 Darrieus 型垂直轴风力机