 普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

# 风力发电原理

PRINCIPLE OF WIND  
POWER GENERATION



◎ 徐大平 柳亦兵 吕跃刚 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

中国可再生能源规模化发展项目资助

# 风力发电原理

主编 徐大平 柳亦兵 吕跃刚  
参编 陈 雷 杨锡运 肖运启 高 峰



机械工业出版社

风力发电是一种最具开发潜力的清洁可再生能源利用方式,作为风能与动力工程专业系列教材之一,编写本书的目的是使学生掌握风力发电的基本原理,了解主流风力发电机组设备。

全书共分7章,内容主要包括风力发电技术的基本概况、风能资源与转换原理、风力发电机组设备与结构、风力发电机组检测与控制等内容。对离网风力发电系统及储能技术也做了简要介绍。

由于风力发电技术涉及多学科内容,为适应不同专业知识背景的读者,本书力求理论联系实际,内容通俗易懂。本书可供风能与动力工程等相关专业师生选用,也可供从事风力发电领域相关工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

风力发电原理/徐大平等主编. —北京:机械工业出版社,2011.8  
普通高等教育风能与动力工程专业系列教材  
ISBN 978-7-111-35345-4

I. ①风… II. ①徐… III. ①风力发电-高等学校-教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第138902号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年9月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·11.75印张·285千字

标准书号:ISBN 978-7-111-35345-4

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育风能与动力工程专业 系列教材编审委员会

主任 贺德馨

副主任 徐大平 杨勇平 田 德

委员 (按姓氏拼音排名)

戴慧珠	邓 英	韩 爽	康 顺	黎作武	刘永前
柳亦兵	吕跃刚	齐同庆	芮晓明	施鹏飞	施跃文
宋 俊	王伟胜	王雅新	许国东	姚兴佳	叶杭冶
赵 斌	张世惠	张晓东	章立栋	朱永强	

# 序

开发利用风能是增加能源供应、调整能源结构、保障能源安全、减排温室气体、保护生态环境和构建和谐社会的一项重要措施，对于建设资源节约型和环境友好型社会，实现中国经济、社会可持续发展具有重要促进作用。目前，风力发电是风能利用的最主要方式。自2006年《中国可再生能源法》实施以来，我国风电连续多年保持快速增长，2010年成为全球风电新增和累计装机容量最多的国家，在短时间内步入世界风电大国行列。

随着我国风力发电产业的规模化发展和风能利用技术的不断进步，风力发电专业人才的培养显得越来越重要。2006年，教育部批准在华北电力大学设置了国内第一个“风能与动力工程”专业，之后国内多所高等院校也陆续设置了该专业。由于“风能与动力工程”专业是新专业，因此，其专业课程设置、教材建设和教学方法研究都需要一个探索和实践的过程。在中国政府/世界银行/全球环境基金—中国可再生能源规模化发展项目（CRESP）风电技术人才培养子赠款项目和中国—丹麦风能发展项目（WED）资助下，2008年成立了“风能与动力工程”本科专业教材编审委员会，开始组织编写“风力发电原理”、“风力机空气动力学”、“风力发电机组设计与制造”、“风力发电机组监测与控制”、“风力发电场”和“风电场电气工程”六部必修课教材。

风力发电是一个跨学科的专业，涉及许多学科领域。在专业教材编写时，从专业人才培养目标出发，除了要掌握专业基础知识外，还要掌握风能领域中的专业知识。教材初稿经过在华北电力大学本科学生的试用后，又对内容进行了修改和补充，形成了现在的第一版系列教材。随着我国从“风电大国”向“风电强国”，从“中国制造”向“中国创造”，从“国内市场”向“国际市场”的转变，我国风力发电产业将进入一个新的发展阶段，教材内容也需要不断补充和更新。编审委员会将会根据新的需求，结合教学实践对此系列教材不断进行完善。

在本教材编写和出版过程中，得到了中国可再生能源学会风能专业委员会、华北电力大学和机械工业出版社的具体指导，各书编审人员付出了辛勤的劳动，许多专家为本教材提供资料并审阅书稿，在此一并向他们表示衷心的感谢。

本教材除了用于高等院校“风能与动力工程”专业教材外，也可作为从事风电专业科技工作人员的参考书。

“风能与动力工程”专业教材编审委员会  
二〇一一年六月

# 前 言

能源是人类赖以生存、社会经济赖以发展的重要物质基础。自第一次工业革命以来，社会生产力飞速发展，同时，能源消耗也急剧增加。目前，人类主要依靠煤炭、石油等化石能源，这种能源利用方式，一方面面临化石能源逐渐枯竭的严重问题，另一方面也对人类和地球生物赖以生存的环境造成很大破坏。为了满足人类生存的需要，保持社会经济的可持续发展，能源节约和清洁能源的开发和利用越来越受到关注。风能是目前最具规模化开发利用条件的清洁、可再生能源之一，风力发电是风能利用的最主要方式。近年来，风力发电技术迅速发展，世界范围内的风电装机容量也快速增加。目前我国已成为世界上风力发电发展最快的国家。

编写本书的目的是使广大读者了解风力发电的技术现状和发展趋势，掌握风力发电的基本原理。由于风力发电技术涉及多学科内容，为适应不同专业知识背景的读者，本书力求讲清最基本的概念和原理，尽量减少烦琐的数学推导。鉴于风力发电技术的不断发展，新方法和新型设备不断出现，本书重点围绕目前主流的并网风力发电系统展开，对风力发电领域其他的相关技术和设备只做简要介绍。本书既可以作为高等院校“风能与动力工程”专业和其他相近专业的教材，也可供从事风力发电领域相关工作的工程技术人员参考。

本书是在历年讲稿和校内教材的基础上，经过多次修改完成。全书共7章，其中第1章介绍风力发电技术的相关背景；第2章介绍风的特性及风能转换基本原理；第3~5章主要结合大型水平轴并网风力发电机组，介绍风力发电机组设备、风力发电机以及风力发电机组运行控制的相关知识；对垂直轴风力发电机组、小型离网型机组的相关内容，分别在第6章和第7章做单独介绍。

本书第1章由徐大平、吕跃刚编写，第2章由陈雷、高峰编写，第3章由柳亦兵编写，第4章由杨锡运、肖运启编写，第5章由吕跃刚、肖运启编写，第6章由高峰编写，第7章由徐大平编写。博士研究生刘吉宏、范晓旭也参加了部分内容的文字整理工作。中国可再生能源学会风能专委会贺德馨教授对全书进行了审阅。

本书在编写过程中，参考了国内外有关文献资料，在此谨向相关文献资料的作者表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，书中难免有不妥和疏漏之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

<b>第1章 绪论</b> .....	1
1.1 风能利用及风力发电历史 .....	2
1.2 中国风能资源与开发前景 .....	4
1.2.1 风能特点 .....	4
1.2.2 我国风能资源分布特点及 开发前景 .....	5
1.2.3 风电发展概况 .....	7
1.3 风力发电技术现状与发展 .....	8
1.3.1 风力发电机组的类型 .....	8
1.3.2 大型水平轴并网风电机组的 基本结构 .....	10
1.3.3 风力发电技术的发展状况 .....	11
1.4 风电机组相关设计标准 .....	14
1.4.1 国际电工委员会标准 .....	14
1.4.2 国外主要风电标准 .....	15
1.4.3 中国主要风电标准 .....	16
思考题 .....	17
<b>第2章 风能及其转换原理</b> .....	18
2.1 风的种类及其特性 .....	18
2.1.1 风的形成及其基本特性 .....	18
2.1.2 全球性的风 .....	21
2.1.3 地方性的风 .....	22
2.1.4 平均风 .....	23
2.1.5 脉动风 .....	27
2.1.6 极端风 .....	29
2.1.7 地形地貌对风的影响 .....	31
2.2 风的测量与估计 .....	32
2.2.1 风向的测量 .....	33
2.2.2 风速的测量 .....	33
2.2.3 风能估计 .....	34
2.3 风能资源评估及风电场选址概述 .....	37
2.3.1 风能资源评估 .....	38
2.3.2 风电场选址 .....	38
2.4 风能转换基本原理 .....	40
2.4.1 叶片上的气动力 .....	40
2.4.2 风能转换基础理论 .....	42

2.5 风力机的特性 .....	46
2.5.1 风轮空气动力特性 .....	46
2.5.2 风力机的运行特性 .....	47
2.5.3 实度对风力机特性的影响 .....	48
思考题 .....	50
<b>第3章 风力发电机组的结构</b> .....	51
3.1 水平轴风电机组概述 .....	51
3.1.1 风电机组的基本结构、性能 和类型 .....	51
3.1.2 风电机组主要参数 .....	56
3.1.3 风电机组设计级别 .....	60
3.2 风轮 .....	61
3.2.1 叶片 .....	61
3.2.2 轮毂 .....	66
3.2.3 变桨机构 .....	67
3.3 风电机组传动系统 .....	69
3.3.1 风轮主轴 .....	69
3.3.2 增速齿轮箱 .....	71
3.3.3 轴的连接与制动 .....	79
3.4 机舱、主机架与偏航系统 .....	80
3.4.1 机舱 .....	80
3.4.2 主机架 .....	80
3.4.3 偏航系统 .....	81
3.5 塔架与基础 .....	84
3.5.1 塔架 .....	84
3.5.2 陆上风电机组的基础 .....	88
3.5.3 海上风电机组的基础 .....	90
3.6 风电机组其他部件 .....	91
思考题 .....	91
<b>第4章 风力发电机</b> .....	92
4.1 发电机的工作原理 .....	92
4.1.1 发电机的基本类型 .....	92
4.1.2 直流发电机的基本工作原理 .....	94
4.1.3 同步交流发电机的基本工作 原理 .....	95
4.1.4 异步交流发电机的基本工作 原理 .....	97

4.2 风力发电系统中的发电机	98	思考题	143
4.2.1 并网风电机组使用的发电机	99	<b>第6章 垂直轴风力发电机组</b>	145
4.2.2 离网风电机组使用的发电机	100	6.1 垂直轴风力发电机组及其发展	
4.3 并网风力发电机	101	概况	145
4.3.1 同步发电机	101	6.1.1 垂直轴风力发电机组的发展	
4.3.2 异步发电机	103	概况	145
4.3.3 双馈异步发电机	104	6.1.2 垂直轴风力机的类型	146
4.3.4 直驱型发电机	107	6.1.3 垂直轴风力机的主要特点	148
思考题	110	6.2 垂直轴风力机基本原理	149
<b>第5章 风力发电机组的控制及安全</b>		6.2.1 阻力型垂直轴风力机	149
<b>保护</b>	111	6.2.2 升力型垂直轴风力机	151
5.1 风力发电机组的控制技术	111	6.3 水平轴与垂直轴风力机的对比	152
5.1.1 风力发电机组的基本控制		思考题	153
要求	111	<b>第7章 离网风力发电系统</b>	154
5.1.2 风力发电机组的控制系统		7.1 离网风力发电机组的应用	154
结构	114	7.1.1 向大用户直接供电	154
5.1.3 风力发电机组的运行控制		7.1.2 向农户、村落、农牧场供电	155
过程	115	7.2 微、小型风力发电机组结构	156
5.2 风力机控制	117	7.2.1 叶片与风轮	157
5.2.1 风力机控制的空气动力学		7.2.2 调速装置	157
原理	117	7.2.3 调向装置	158
5.2.2 定桨距风力机控制	118	7.2.4 发电机	159
5.2.3 变桨距风力机控制	119	7.2.5 塔架	160
5.2.4 功率控制	121	7.2.6 蓄电池	160
5.3 发电机控制	123	7.2.7 控制器和逆变器	160
5.3.1 风力发电机控制要求	123	7.3 互补发电系统	160
5.3.2 异步风力发电机控制	124	7.3.1 风-光互补发电系统	160
5.3.3 双馈式发电机控制	129	7.3.2 风力发电机与蓄电池系统	162
5.3.4 直驱式发电机控制	132	7.3.3 风力-柴油互补发电系统	164
5.4 风力发电机组信号检测	135	7.4 储能装置	166
5.4.1 风速及风向信号检测	135	7.4.1 蓄电池	166
5.4.2 转速信号检测	135	7.4.2 抽水蓄能	170
5.5 控制系统的执行机构	136	7.4.3 飞轮储能	170
5.5.1 制动保护系统	137	7.4.4 超导储能	171
5.5.2 变桨距执行系统	137	7.4.5 其他储能方式	171
5.5.3 偏航系统	139	思考题	171
5.6 风电机组的安全保护	140	<b>附录 风力发电名词术语汉英对照</b>	172
5.6.1 风电机组安全保护系统设计	140	<b>参考文献</b>	178
5.6.2 风电机组安全链系统	141		
5.6.3 风力发电机组防雷保护	142		



# 第 1 章 绪 论

众所周知，人类的生存和发展离不开能源，能源问题与人类文明的演进息息相关。随着社会和经济的发展，能源的消耗在急骤增长。目前，煤、石油、天然气是人类社会的主要能源，这些化石能源都是不可再生的。人类大规模开发这些能源的历史不过二三百年，却已将地球亿万年来形成的极为有限的化石能源几乎快要消耗殆尽。另外，人类无限制地燃烧煤炭、天然气、石油等燃料发电，也是产生温室效应及污染物排放的主要因素，以致世界性的能源危机加剧和全球环境日趋恶化。

为了实现人类社会未来的可持续发展与解决化石能源带来的环境问题，必须大力发展新型能源。在能源发电领域，我国目前主要以火力发电与水力发电为主，两者占到了总发电容量的 90% 以上（见图 1-1），其中又有 3/4 的电能来自于煤炭，每年仅中国要烧掉超过 1.4Gt 煤用来发电。地球除了煤炭等化石能源，还有着丰富的风力、太阳能等可再生能源。随着人类科学技术的发展，大规模地开发使用风能与太阳能，以满足人们对电能的需求已经成为现实。以我国为例，2010 年的年用电总量是 41923 亿 kW·h 左右，而我国经济可开发利用的风力发电资源在 10 亿 kW 左右，考虑到风的间歇性，全部开发完成后的风力发电总量，可以满足目前 50% 左右电力的需求。除此以外，其他新型能源（如潮汐、地热、生物质能等）也会逐步为人类所利用。

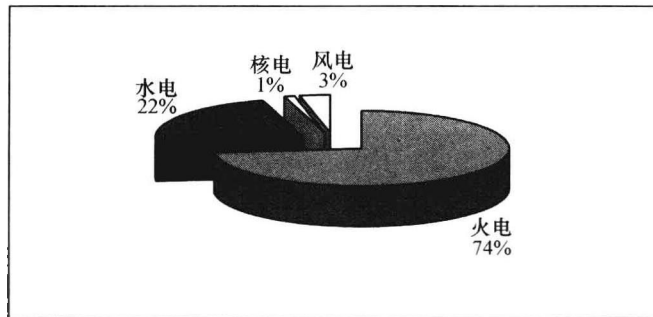


图 1-1 2010 年中国发电装机结构

由于风力发电具有良好的发展前景，开发利用风力资源对于缓解能源短缺、保护生态环境具有重要意义，因此受到了世界各国的广泛关注。我国地域辽阔，风力资源丰富，风力发电技术日趋成熟，具备了规模开发条件，因此，风力发电在我国有着很大的发展空间。

2005 年以前，我国的风力发电规模很小，风力发电主要用于远离电网的离散用户，如牧区、海岛、边防哨所等。风力发电机组的制造以中小型机组为主，并网发电的大型风电机组数量很少。自能源危机之后，尤其在 2006 年国家《可再生能源法》颁布后，将可再生能源（风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源）开发利用的科学研究和产业化发展列为科技发展与高技术产业发展的优先领域。根据国家发展与改革委员会的《可再生能源中长期发展规划》，2020 年中国风电机组装机容量将达到 3000 万 kW，以

风能为代表的清洁可再生能源发电在我国进入了快速发展时期。

### 1.1 风能利用及风力发电历史

人类利用风能的历史悠久，古代埃及、波斯和中国有资料记载的就有几千年的历史。在蒸汽机发明以前，风能曾作为重要的动力，最早的利用方式是“风帆行舟”。约在几千年前，古埃及人的风帆船就在尼罗河上航行。我国在商代出现了帆船，最辉煌的风帆时代是明朝。15世纪中叶，中国的航海家郑和七下西洋，庞大的船队就是用风帆作为动力的，当时我国的帆船制造技术已领先于世界。风车使用的起源最早可以追溯到3000年前，那时候风车的主要用途是提水、锯木和推磨等，欧洲一些国家现在仍然保留着许多风车，已成为人类文明史的见证（见图1-2）。在蒸汽机出现以前，风力机械是人类的主要动力来源之一，随着化石燃料能源的开采及利用，尤其是火力发电技术的大规模应用，风能作为动力逐渐退出了历史的舞台。

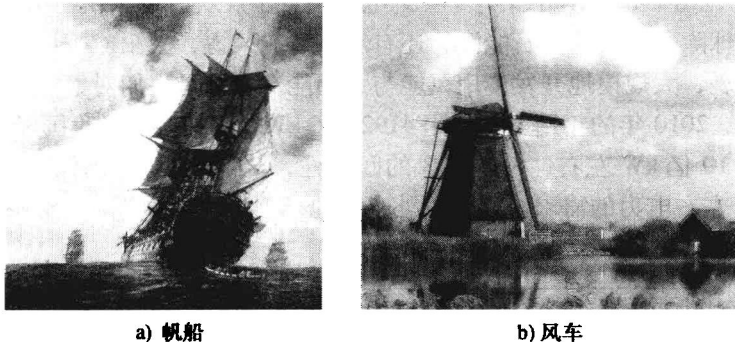


图 1-2 人类早期风能利用示例

风力发电的历史始于19世纪晚期。1887年底，美国人 Charles F. Brush（1849—1929）研制出世界上第一台12kW直流风力发电机，用来给家里的蓄电池充电。该机组风轮直径17m，安装了144个叶片，运行了将近20年（见图1-3a）。

丹麦物理学家 Poul La Cour（1846—1908）通过风洞试验发现，叶片数少、转速高的风轮具有更高效率，提出了“快速风轮”的概念，即叶尖转速高于风速。根据研究结果，Poul La Cour 于1891年建造了一台30kW左右的具有现代意义的风力发电机组（见图1-3b），发出直流电，用于制氢，供附近小学的汽灯照明，一直持续到1902年。

1926年德国科学家 Albert Betz（1885—1968）对风轮空气动力学进行了深入研究，提出了“贝茨理论”，指出风能的最大利用率为59.3%，为现代风电机组空气动力学设计奠定了基础。从20世纪20年代起，前苏联、美国和一些欧洲国家纷纷开展了风力发电技术的研究。

1925年 Sigurd Savonius 发明了一种阻力型垂直轴风电机组类型，称为“Savonius 机组”，由于其空气动力学特性非常复杂，效率低，实际应用较少。1931年法国人 Georges Darrieus 发明了另外一种升力型的垂直轴风电机组，称为“Darrieus（达里厄）机组”。

美国工程师 Palmer Cosslett Putnam（1910—1986）首先提出并网风电设想。他与

S. Morgan Smith 公司合作, 于 1940 年将其设想变为现实, 制造出风电发展历史上第一个 1250kW 超大型的 Smith-Putnam 风电机组 (见图 1-3c)。该机组的塔架高度 32.6m, 风轮直径 53.3m, 两叶片, 每个叶片重量达到 8t。在当时的技术条件下, 由于材料强度不能满足要求, 机组只运行了 4 年时间, 就发生了叶片折断事故。这也促使人们在叶片结构优化和轻质材料方面开始进行深入的研究。



图 1-3 早期的风电机组

德国人 Ulrich Huetter (1910—1989) 一直致力于风电机组结构优化研究, 于 1942 年提出“叶素动量理论”, 1957 年建成容量 100kW 的风电机组 W-34 型 (见图 1-4a), 该机组风轮直径 34m, 两叶片, 叶片采用了优化的细长结构。丹麦人 Johannes Juul 于 1957 年建造了一台 200kW 风电机组 Gedser (见图 1-4b), 并实现并网发电。该机组具有三个固定叶片, 采用异步发电机, 风轮定速旋转。这种结构形式的风电机组被称为“丹麦概念风电机组”。这两台风电机组的许多设计思想和试验数据对后来的现代大型风电机组设计产生了重要影响。

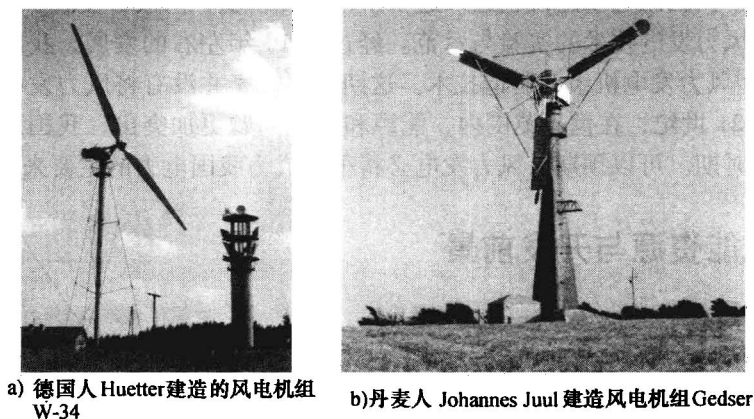


图 1-4 现代风电机组的先驱

在上述半个多世纪里, 人们对风力发电技术进行了持续不断的研究, 但由于可以广泛使用化石能源提供的廉价电力, 因而对风力发电的应用没有足够的兴趣, 这种现象一直持续到

20 世纪 70 年代。发生于 1973 年的石油危机，促进了西方各国政府对风力发电的重视，通过政策优惠及项目资助促进了风电技术的应用研究与发展，人们获得了许多重要的科学知识和工程实践经验，并开始建造了一系列示范试验机组。1981 年，美国建造并试验了新型的水平轴 3MW 风力发电机组，该机组利用液压驱动进行偏航对风，整个机舱始终处于迎风方向。德国、英国、加拿大等国在同期也先后进行了兆瓦级风电机组的实验研究工作，然而，在一段时间里，叶片数目的最佳选择始终不确定，单叶片、双叶片以及三叶片的大型风力发电机组始终处于并存状态。

进入 20 世纪 90 年代，环境污染和气候变化逐渐引起人们的注意，风力发电作为清洁能源重新受到许多国家政府重视，尤其在欧洲，风力发电开始了商业化并网运行。

大型风力发电机组处于无人值守的野外，运行过程中要受到恶劣气候的影响，在示范性试验中的样机经常出现问题，机组的可靠性也不高。因此，对于首先投入商业运行的机组，人们选择了容量偏小、三叶片、失速调节、交流感应发电机、恒速运行的风力发电机组，这一简单结构的机组被证明相当成功。目前，商业化运行的风力发电机组单机容量已经达到 20 世纪 80 年代示范机组的规模，机组实现了变桨距、变速方式调节运行，使得机组的效率得到了很大提高，出现了更先进的双馈式及直驱式新型风力发电机组，同时，风力发电机组由陆地走向了近海。

我国现代风力发电技术的开发利用起源于 20 世纪 70 年代。当时根据牧区需要，从仿制国外机组到自行研究，设计了 30W ~ 2kW 的多种小型风电机组。经过不断地学习国外先进研发及制造技术，我国 55kW 以下的小型风力发电机组逐渐形成系列化产品，解决了边远农村、牧区、海岛、边防哨所、通信基站等偏远用户的用电问题，成为离网型风电机组的主力。经过近 30 年的技术发展，我国自行研制开发的小型风力发电机组运行平稳、质量可靠，使用寿命在 15 年以上。这些机组经济性好、成本低、价格便宜，得到了广泛使用，生产能力居世界首位，并出口到世界很多国家和地区。

进入 20 世纪 80 年代后，我国开始研究并网型风力发电机组，1984 年研制出了 200kW 风电机组，同期，我国风电场建设也进入起步阶段，在新疆、内蒙古安装了数台国外引进机组，开始了并网风力发电技术的实验与示范。经过了 10 年左右的发展，我国已基本掌握了 200 ~ 600kW 大型风力发电机组的制造技术。这期间，国家并没有将风力发电作为重要电力来源，直到进入 21 世纪，在世界范围内，能源和环境问题更加突出，我国风力发电才逐渐进入了高速发展时期。可以预期，风力发电必将很快成为我国电力的主要来源之一。

## 1.2 中国风能资源与开发前景

### 1.2.1 风能特点

与其他能源形式相比，风能具有以下特点：

(1) 风能蕴藏量大、分布广 据世界气象组织估计，全球的可利用风能源约为 200 亿 kW，为地球上可利用水能资源的 10 倍。我国约 20% 左右的国土面积具有比较丰富的风能资源，据推测，我国风能的经济可开发量在 10 亿 kW 左右。

(2) 风能是可再生能源 不可再生能源是指消耗一点少一点，短期内不能再产生的自

然能源。它包括煤、石油、天然气、核燃料等。可再生能源是指可循环使用或不断得到补充的自然能源。如：风能、水能、太阳能、潮汐能、生物质能等。因此，风能又是一种过程性能源，不能直接储存，不用就过去了。

(3) 风能利用基本没有对环境的直接污染和影响 风电机组运行时，只降低了地球表面气流的速度，对大气环境的影响较小。风电机组噪声在 40 ~ 50dB 左右，远小于汽车的噪声，在距风电机组 500m 外已基本不受影响。风电机组对鸟类的歇息环境可能有一定影响。因此，风力发电属清洁能源，对环境的负面影响非常有限，对于保护地球环境、减少 CO<sub>2</sub> 温室气体排放具有重要意义。

(4) 风能的能量密度低 由于风能来源于空气的流动，而空气的密度是很小的，因此风力的能量密度也很小，只有水力的 1/816，这是风能的一个重要缺陷。因此，风力发电机组的单机容量一般较小。我国目前以 1.2 ~ 2MW 级机组为主，世界上最大的商业运行机组也只有 5MW。

(5) 不同地区风能差异大 由于地形的影响，风力的地区差异非常明显。一个邻近的区域，有利地形下的风力，往往是不利地形下的几倍甚至几十倍。

(6) 风能具有不稳定性 风能随季节性影响较大，我国位于亚洲大陆东部，濒临太平洋，季风强盛。冬季我国北方受西伯利亚冷空气影响较大，夏季我国东南部受太平洋季风影响较大。由于气流瞬息万变，因此风的脉动、日变化、季变化以至年际的变化都十分明显，波动很大，极不稳定。

## 1.2.2 我国风能资源分布特点及开发前景

风能是地球表面大量空气流动所产生的动能，风拥有巨大的能量。风速 9 ~ 10m/s 的 5 级风，吹到物体表面上的力，每平方米面积上约有 10kg。风速 20m/s 的 9 级风，吹到物体表面上的力，每平方米面积可达 50kg 左右。台风的风速可达 50 ~ 60m/s，它对每平方米物体表面上的压力，竟可高达 200kg 以上。

某个区域风能资源的大小取决于该区域的风能密度和可利用的风能年累积小时数。风能密度是单位迎风面积可获得的风的功率，与风速的三次方和空气密度成正比关系。据世界气象组织估计，全球可利用风能资源约为 200 亿 kW，为地球上可利用水能的 10 倍。

我国风力资源丰富，可开发量约为 7 ~ 12 亿 kW，其中陆地约为 6 ~ 10 亿 kW，海上约为 1 ~ 2 亿 kW，按 2009 年风力发电装机容量 1613 万 kW，发电量 269 亿 kW · h 推算，未来每年可提供 1.2 ~ 2 万亿 kW · h 电量。

我国幅员辽阔，地形条件复杂，风能资源状况及分布特点随地形和地理位置的不同而相差较大。根据风资源类别划分标准，按年平均风速的大小，各地风力资源大体可划分为 4 个区域，见表 1-1。

表 1-1 风力资源区域划分

区别	平均风速/ (m/s)	分布地区
丰富区	>6.5	东南沿海、山东半岛和辽东半岛、三北北部区、松花江下游区
较丰富区	5.5 ~ 6.5	东南沿海内陆和渤海沿海、三北南部区、青藏高原区
可利用区	3.0 ~ 5.5	两广沿海区、大小兴安岭地区、中部地区
贫乏区	<3.0	云贵川和南岭山区、雅鲁藏布江和昌都区、塔里木盆地西部区

我国风能资源丰富的地区主要分布在：

(1) 西北、华北、东北地区（简称“三北”地区） 在该区域内风能资源储量丰富，占全国陆地风能资源总储量的 79%，风能功率密度在  $200 \sim 300 \text{W/m}^2$  以上，有的可达  $500 \text{W/m}^2$  以上。全年可利用的小时数在 5000h 以上，有的可达 7000h 以上，具有建设大型风电基地的资源条件。这一风能丰富带的形成，主要是由于三北地区处于中高纬度的地理位置，尤其是内蒙古和甘肃北部地区，高空终年在西风带的控制下。三北地区的风能分布范围较广，是中国陆地上连片区域最大、风能资源最丰富的地区，这些地区随着经济发展，电网将不断延伸和增强，风电的开发将与地区电力规划相协调发展。

(2) 东南沿海及其附近岛屿地区 我国有漫长的海岸线，形成了丰富的沿海风能带。与大陆相比，海洋温度变化慢，具有明显的热惰性。所以，冬季海洋地区较大陆地区温暖，夏季海洋地区较大陆地区凉爽。在这种海陆温差的影响下，在冬季每当冷空气到达海上时风速增大，再加上海洋表面平滑、摩擦阻力小，一般风速比大陆增大  $2 \sim 4 \text{m/s}$ 。沿海近 10km 宽的地带，年风功率密度在  $200 \text{W/m}^2$  米以上。在风能资源丰富的东南沿海及其附近岛屿地区，全年风速大于或等于  $3 \text{m/s}$  的时数约为 7000 ~ 8000h，大于或等于  $6 \text{m/s}$  的时数为 4000h。沿海地区风能资源的另一个分布特点是南大北小，台风的影响地区也呈现由南向北递减的趋势。

中国有海岸线约 18000km，岛屿 7000 多个，这是风能大有开发利用前景的地区。该地区也是我国经济发达地区，是电力负荷中心，有较强的高压输电网，风电与水电具有较好的季节互补性。由于该地区风电在电网中的比例相对较小，因此，对电网的影响较小。

但在我国海岸线的南端，由于靠近海岸的内陆多为丘陵地区，气流受到地形阻碍的影响，风能功率密度仅  $50 \text{W/m}^2$  左右，基本上是风能不能利用的地区。

(3) 青藏高原北部 该区域风能资源也较为丰富，全年可利用的小时数可达 6500h，但青藏高原海拔高，空气密度小，所以有效风能密度也较低，有效风能密度为  $150 \sim 200 \text{W/m}^2$ 。另外，内陆个别地区由于湖泊和特殊地形的影响，风能也较丰富，如鄱阳湖、湖南衡山、湖北的九宫山、河南的嵩山、山西的五台山、安徽的黄山、云南太华山等也较平地风能大，但风能范围一般仅限制在较小区域内。

中国海上风能资源丰富，东部沿海水深  $2 \sim 15 \text{m}$  的海域面积辽阔，近海可利用的风能储量有 1 ~ 2 亿 kW，而且距离电力负荷中心很近，适合建设海上风电场。海上风电具有风速高、风速稳定、不占用宝贵陆地资源的特点，随着海上风电场技术的发展成熟，将来必然会成为重要的电力来源。

根据目前我国气象资料对风电资源做出的评估偏于宏观，且误差较大，在具体风电场建设中，还要进行重新测风来做微观选址，对风能资源进行准确评估是制定风能利用规划、风电场选址、风电功率预测的重要基础。

风能资源评估方法有统计方法和数值方法两类，统计方法根据多年观测的气象数据和资料，对风能进行估计。数值方法则是在气象模型的基础上，利用计算机进行数值模拟，编制高分辨率的风能资源分布图，评估风能资源技术可开发量，数值方法的应用范围越来越广泛。在现有气象台站的观测数据的基础上，按照近年来国际通用的规范进行资源总量评估，进而采用数值模拟技术，更重要的是利用 GIS（地理信息系统）技术将电网、道路、场址可利用土地，环境影响、当地社会经济发展规划等因素综合考虑，进行经济可开发储量评估，

将更具实际意义。

表 1-2 列出我国一些省区的风能资源量。目前我国主要开发的是陆地风力资源，近海风能资源的开发处于起步阶段。在我国内陆地区，从东北、内蒙古、甘肃河西走廊至新疆一带的广阔地区风力资源比较丰富，沿海内陆的辽东半岛、山东、江苏至海南，东南沿海及岛屿具有较好的风力资源，青藏高原及部分内陆地区也存在一定的开发潜力。

表 1-2 风能资源比较丰富的省区

省 区	风力资源/MW	省 区	风力资源/MW
内蒙古	61780	山东	3940
新疆	34330	江西	2930
黑龙江	17230	江苏	2380
甘肃	11430	广东	1950
吉林	6380	浙江	1640
河北	6120	福建	1370
辽宁	6060	海南	640

### 1.2.3 风电发展概况

世界上近几年新增风电装机容量的年增长率保持在 25% 左右，其中 2009 年新增机组 37.50GW，增长率高达 31%。据统计，到 2009 年底，世界风电装机容量（联网装机）为 159.21GW，其中 54.6% 在欧洲。预计到 2010 年底，世界并网风电装机将达 200GW（见图 1-5）。同时，风电电价在逐步降低。表 1-3 列出世界上风电装机容量较多的前 10 位国家于 2009 年的总装机容量和当年新增装机容量。

世界风电装机容量发展(2001年~2010年)

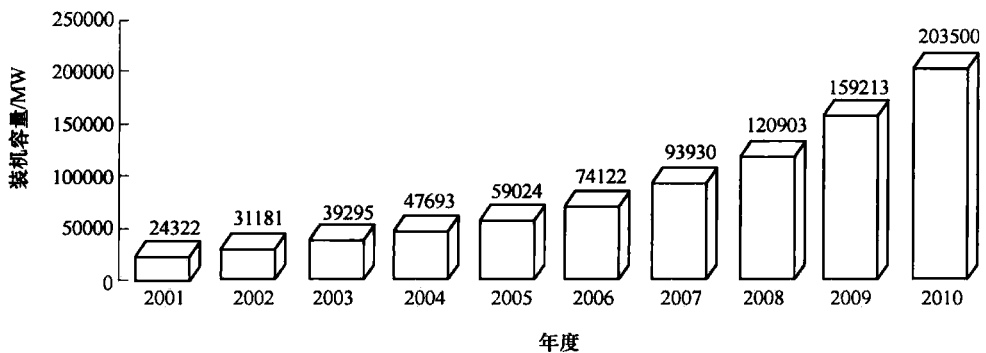


图 1-5 世界风电装机容量（来源：世界风能协会（WWEA）2009 世界风能报告）

表 1-3 2009 年世界风电装机最多的 10 个国家 [世界风能协会（WWEA）2009 世界风能报告]

国 家	美国	中国	德国	西班牙	印度	意大利	法国	英国	葡萄牙	丹麦
当年装机/MW	9922	13800	1880	2460	1338	1114	1117	897	673	334
累计装机/MW	35159	26010	25777	19149	10925	4850	4521	4092	3535	3497
比例/(%)	22.1	16.3	16.2	11.5	6.8	3.0	2.8	2.6	2.2	2.2

## 8 风力发电原理

我国的风电装机容量更是突飞猛进，尤其是近三年来保持了 100% 以上的增长速度，截至 2010 年底，全国风电装机容量达到 4182 万 kW。过去 10 年，我国并网风电装机（除台湾省外）的增长情况如图 1-6 所示。

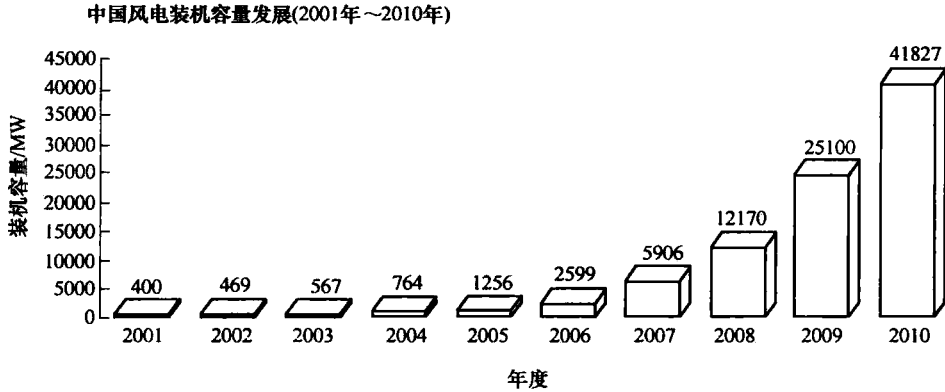


图 1-6 我国并网风电装机（除台湾省外）的增长情况

发展风能是我国长期的战略任务，在国家可再生能源的中长期发展规划中，提出了我国风电发展目标，其中 2010 年总装机容量达到 5000MW 的目标已提前实现。国际风电发展的经验和我国风电发展的过程表明：技术进步是风电持续发展的基础。为了实现我国风电发展的战略目标，根据我国国情，我国风电发展的基本路线是：重点发展陆地风电，积极推进海上风电。在主要发展并网风电的同时，还要发展离网风电和分布式发电系统。

### 1.3 风力发电技术现状与发展

无论何种风力发电形式，在风力发电系统中的主要设备是风力发电机组。早期一些专业资料中，将整个风力发电机组设备称为风力机，或者风轮机（wind turbine），现在逐渐通用的名称叫做风力发电机组，简称为风电机组。实际上从能量转换的角度，风力发电机组由风力机和发电机两个部分组成。风力机主要指风轮部分，其作用是将风能转换为旋转机械能。发电机则将旋转机械能转换为电能。在本书中，“风力发电机组”或“风电机组”指整个风力发电设备，“风力机”专指风轮部分。

#### 1.3.1 风力发电机组的类型

下面从不同的角度对风力发电机组进行分类。

##### 1. 微型、小型、中型及大型风电机组

按照额定功率的大小，可以将风电机组分为：

- 1) 微型风力发电机组：额定功率小于 1kW；
- 2) 小型风力发电机组：额定功率 1 ~ 99kW；
- 3) 中型风力发电机组：额定功率 100 ~ 600kW；
- 4) 大型风力发电机组：额定功率大于 600kW。



## 2. 离网型风电机组和并网型风电机组

按照风电机组与电网的关系，分为离网型风电机组和并网型风电机组。

(1) 离网型风电机组 一般指单台独立运行，所发出的电能不接入电网的风力发电机组。这种机组一般容量较小（常为微小型机和中型机），专为家庭或村落等小的用电单位使用，常需要与其他发电或储电装置联合运行。

(2) 并网型风电机组 一般指以机群布阵成风力发电场，并与电网连接运行的大、中型风力发电机组。

## 3. 水平轴和垂直轴风电机组

按照风轮旋转主轴与地面相对位置的关系，风电机组分为水平轴风电机组和垂直轴风电机组。

(1) 水平轴风电机组 风轮旋转轴与地面平行，叶片数量视用途而定。水平轴风电机组又可分为升力型（darrieus 型）和阻力型（savonius 型）。升力型风电机组利用叶片两个表面空气流速不同产生升力，使风轮旋转；阻力型风电机组则利用叶片在风轮旋转轴两侧受到风的推力（对风的阻力）不同，从而产生转矩，使风轮旋转。升力型风轮旋转轴与风向平行，转速较高，风能利用系数高，阻力型的很少应用。

图 1-7 所示为多种不同形式的水平轴风电机组。目前大型风力发电机组几乎全部为水平轴升力型，叶片数 1~3 个，主要原因是水平轴风电机组具有较高的风能利用系数，目前达到 0.4~0.5。图中还示出一些特殊形式的水平轴风轮，例如轮辐式风轮、多转子式、带扩流管或聚流罩的聚能式风轮等。

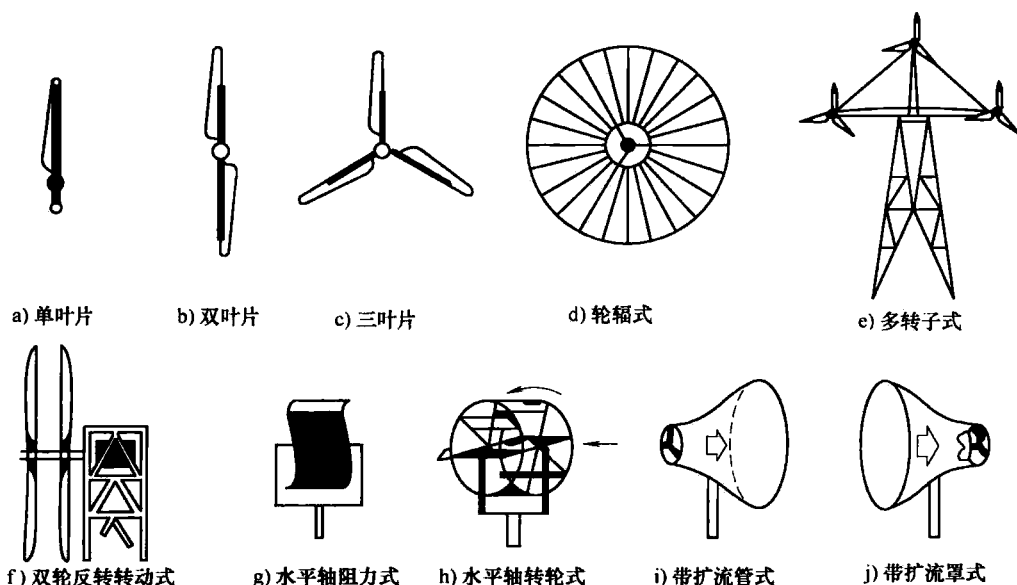


图 1-7 水平轴风电机组类型

2) 垂直轴风电机组 分为阻力型和升力型两大类。图 1-8 所示为这两种不同类型的垂直轴风电机组及其各种变化形式，例如阻力型机组中的多叶片式、板式、杯式，升力型机组中的  $\phi$  形、H 形风轮等。垂直轴风电机组的风轮围绕一个与地面垂直的轴旋转，机组的运