



“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

风力机 原理

FENGLIJI
YUANLI

赵振宙 王同光 郑源 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

风力机 原理

赵振宙 王同光 郑源 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，主要介绍了风力机的发电原理。全书主要内容包括风电场的概念，风的威布尔分布、瑞利分布以及风电场的规划与选址；风力机的分类以及风力机主要部件的工作原理；风轮的基本理论，包括 Betz 理论、叶素理论、涡流理论；风轮的空气动力学运行原理；风力机的结构设计；垂直轴风力机的运行原理；风力机的发电运行，包括风力发电系统和并网运行；风力机的运行和维护技术。本书还介绍了三种其他类型风轮的应用原理。

本书适合作为高等院校相关专业的教学、参考用书，也可为风力发电的专业人员在风力发电机组方面的学习提供参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

风力机原理 / 赵振宙, 王同光, 郑源编著. — 北京:
中国水利水电出版社, 2016. 1
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-4214-3

I. ①风… II. ①赵… ②王… ③郑… III. ①风力发
电机 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第063620号

书 名	风力发电工程技术丛书 风力机原理
作 者	赵振宙 王同光 郑源 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 17.5印张 415千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	62.00元

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

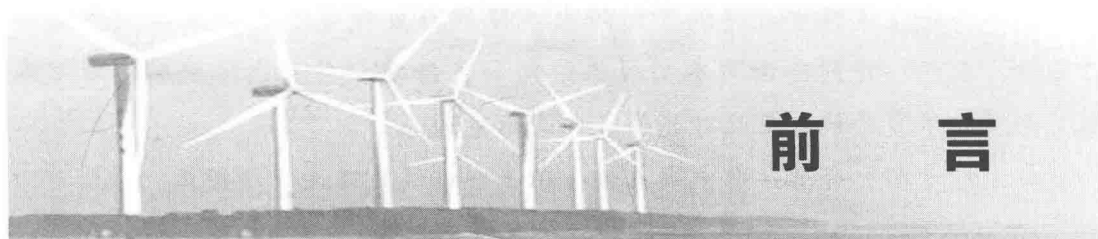
主要参编单位 (排名不分先后)

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

风能是清洁能源，具有取之不尽、用之不竭，就地可取、不需运输，广泛分布、分散使用，不污染环境、不破坏生态，周而复始、可以再生等诸多的优点。风能发电具有显著的社会和环保效益。

中国是风能大国，风资源总量达 20 亿 kW，其中陆上及近海的风资源达 15 亿 kW，海上可开发利用的达 5 亿 kW 以上，风能开发利用的潜力巨大。近年来，在《中华人民共和国可再生能源法》的推动下，在社会各界的积极支持下，中国风电产业步入跨越式发展，进入了世界领先行列。从国内发电比例而言，风电已经超过了核电，成为继煤电和水电后的第三大电源。风电装机容量快速增长，风电设备制造能力明显提高，2010 年年底我国风力发电机组容量已达到 4500 万 kW，位列世界第一位。但因起步较晚，预计即使到 2020 年风电发电量仅为全国发电量的 3% 左右。我国风电发展仍然与国外存在相当大的差距，风电专业人才的匮乏是制约中国风电发展的重要因素之一。

本书主要介绍了风力机的发电原理，为风力发电的专业人员在风力发电机组本体方面的学习提供参考。全书共分 11 章。第 1 章为绪论，介绍了风电发展现状、风力机历史发展过程以及未来的发展重点。第 2 章为风与风能，主要介绍了风的形成、风的种类、风的特性、风的测量等有关概念，还介绍了我国风资源的分布。第 3 章为风电场规划与选址，介绍了风的威布尔分布、瑞利分布以及风电场宏观与微观选址。第 4 章为风力机类型和构造。第 5 章为风力机基本气动理论，介绍了 Betz 理论、叶素理论、涡流理论等。第 6 章为水平轴风力机；第 7 章为风力机载荷和结构应力。第 8 章为垂直轴风力机。第 9 章为风力发电机组运行，介绍了风力发电系统和并网运行。第 10 章为风力机

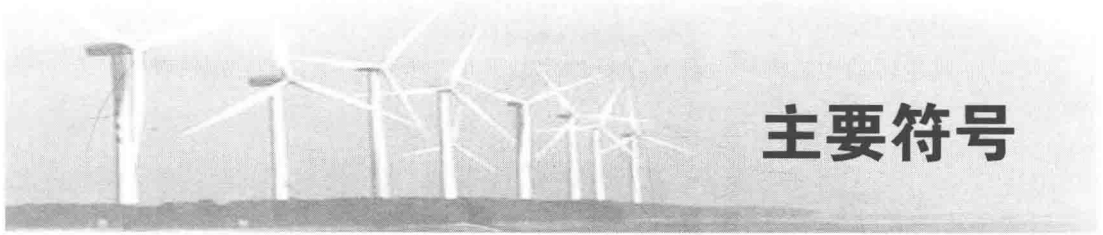
运行与维护。第11章为其他风力机，介绍了三种其他类型风力机。希望本书能为同行从业者的入门提供帮助。

在本书编写过程中，得到了河海大学能源与电气学院新能源系相关老师的支持。在此，特别感谢为本书提供帮助和支持的相关同志。同时，本书参阅了大量的参考文献，在此对其作者也表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免会存在一些错误，敬请批评指正。

作者

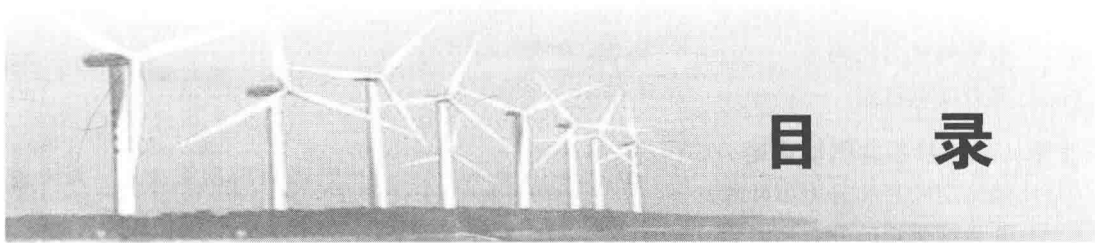
2015年12月



主要符号

- A ——风力机扫风面积，尾舵面积， m^2 ；
- B ——叶片数；
- C ——比例因子；
- C_D ——空气动力学阻力系数；
- C_L ——空气动力学升力系数；
- C_M ——叶片仰俯力矩系数；
- C_P ——风能利用系数，Betz 风能利用系数为 0.593；
- d ——风轮直径， m ；
- D ——阻力， N ；
- e ——偏心矩， $N \cdot m$ ；
- F ——风轮扫掠面积， m^2 ；
- F_g ——离心力， N ；
- f ——频率， Hz ；
- G ——重力， N ；
- H ——高度， m ；
- h ——塔架高，翼型最大厚度， m ；
- i ——增速比，传动比；
- k ——威布尔形状因子；
- L ——升力， N ；
- L/D ——叶片翼型的升阻比；
- l ——叶片长度；
- M ——制动力矩， $N \cdot m$ ；
- M_D ——阻力对叶片轴的弯矩， $N \cdot m$ ；
- M_g ——重力对叶片轴的弯矩， $N \cdot m$ ；
- M_L ——升力对叶片轴的弯矩， $N \cdot m$ ；
- n ——风轮额定转速， r/min ；
- P ——风功率， W 或 kW ；

P_e ——风有效功率, kW;
 p ——压强, N/m^2 ;
 R ——风轮半径, m;
 R ——力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;
 r_i ——风轮转动中心到叶片任意位置的半径, m;
 S_y ——一个叶片的面积, m^2 ;
 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$;
 l ——弦长, m;
 u ——叶尖线速度, m/s;
 v ——风速, m/s;
 v_r ——相对风速, m/s;
 z_0 ——地面粗糙度系数;
 α ——叶片攻角, 或者叶片迎角, ($^{\circ}$);
 α_i ——叶片旋转中心到叶片任一半径 r_i 部位的攻角, 或者叶片迎角, ($^{\circ}$);
 β ——叶片翼型安装角, ($^{\circ}$);
 γ ——风轮偏航角, ($^{\circ}$);
 η ——风力发电机的全效率, %;
 β_i ——叶片旋转中心到叶片任一半径 r_i 部位翼型安装角, ($^{\circ}$);
 λ ——叶尖速比;
 λ_i ——从风轮转动中心到叶片任一位置的半径 r_i 的叶尖速比;
 ρ ——空气密度, kg/m^3 ;
 σ ——叶片的密实度;
 θ ——叶片入流角, ($^{\circ}$);
 φ_i ——叶片旋转中心到叶片任一半径 r_i 部位相对风向角, ($^{\circ}$);
 ω ——角速度, rad/s;
 ωr ——叶片翼型的线速度, m/s。



目 录

前言

主要符号

第 1 章 绪论	1
1.1 风电的发展现状	1
1.2 风车起源	5
1.3 风力发电历史过程.....	9
1.4 20 世纪 50 年代的风力机	13
1.5 能源危机时期的风力机	15
1.6 20 世纪 80 年代的大型风力机.....	15
1.7 风力发电机组的发展趋势	21
第 2 章 风与风能	23
2.1 风的形成	23
2.2 风的种类	26
2.3 风廓线	28
2.4 地形和障碍物对风速的影响	30
2.5 风的特性	32
2.6 风力等级	37
2.7 风速测量	38
2.8 中国风能资源分布	43
2.9 世界风能资源分布	43
2.10 可用风能	43
第 3 章 风电场规划与选址	48
3.1 风场数据分析	48
3.2 风场风速统计模型	52
3.3 风电场宏观选址	58
3.4 风电场微观选址	60

3.5	风电场的布置	63
第4章	风力机类型和构造	65
4.1	风力机类型	65
4.2	水平轴风力机构造	69
4.3	风力发电机组	100
第5章	风力机基本气动理论	107
5.1	阻力型叶片和升力型叶片	107
5.2	升力型风轮的升力和阻力	109
5.3	动量理论	115
5.4	叶素-动量理论	118
5.5	涡流理论	121
5.6	NACA 翼型命名	125
5.7	风轮叶片专用翼型	127
5.8	翼型的选择	130
第6章	水平轴风力机	132
6.1	气动设计模型	132
6.2	风轮功率特性	135
6.3	风轮重要设计参数的气动性能	138
6.4	现代风轮叶片设计	150
6.5	风轮的偏航控制	151
6.6	转速-功率空气动力学控制	153
6.7	风轮尾流	163
6.8	试验风轮的空气动力学	164
第7章	风力机载荷和结构应力	170
7.1	风力机载荷类型	170
7.2	载荷来源	172
7.3	设计载荷假设	182
7.4	设计工况与载荷状况	185
7.5	载荷分析基本要求	187
7.6	疲劳强度分析基础	188
7.7	疲劳强度设计	192
7.8	弹性结构模型	193
7.9	塔架静态特性的影响因素	194
7.10	塔架-风轮系统振动模态	196
第8章	垂直轴风力机	198
8.1	垂直轴风力机的分类	198

8.2	升力型风轮输出功率计算	203
8.3	垂直轴风轮的关键参数	211
8.4	垂直轴风轮翼型	212
8.5	垂直轴风力机实例	212
8.6	与水平轴风力机比较	213
8.7	垂直轴风力机存在的问题	214
第9章	风力发电机组运行	215
9.1	风力机的额定工况设计	215
9.2	主要电气设备	217
9.3	发电系统	222
9.4	供电方式	229
9.5	风能与其他能源联合发电系统	236
9.6	风力发电机组的独立运行	241
第10章	风力机运行与维护	244
10.1	风力机运行技术	244
10.2	风力发电机组的运行状态	246
10.3	风力发电机组的基本运行过程	247
10.4	风电场的监控系统	250
10.5	陆上风电场运行维护措施	252
10.6	风力机易损部件	254
10.7	风力机故障分析	257
第11章	其他风力机	262
11.1	风道式风轮	262
11.2	“龙卷风”风轮	263
11.3	热气流风力机	264
	参考文献	266

第 1 章 绪 论

风是极其普遍的自然现象，发电是风能的主要利用方式。据科学计算，整个地球所蕴含的风能约为 2.74 亿 MW，可利用的风能约为总含量的 1%，是地球上可利用总水能的 11 倍。作为当前可再生能源技术中相对成熟，并同时可商业化开发和规模化发展的一种清洁能源，风能的利用方式和发电技术的发展受到世界越来越多的关注。

本章主要介绍了目前风电发展现状、风力机发展过程和未来发展方向。

1.1 风电的发展现状

1.1.1 世界风电的发展现状

1973 年石油危机暴发后，美国以及西欧等发达国家为寻求替代化石燃料的能源投入了大量经费，组织了空气动力学、结构力学和材料科学等领域学者，利用新技术来研制现代风力发电机组，开创了风能开发的新时代。

经过数十年的努力，风电的发展取得了相当大的成就。在 20 世纪末，世界范围内的风电装机总容量每隔三年翻一番，发电成本降低到 80 年代早期的 1/6 左右。进入 21 世纪后，全球风电依然保持着快速增长的势头。其主要表现在三个方面。

首先，从新增装机容量来看。如图 1-1 所示，2014 年，全球风电产业新装机容量高达 51477MW，同比增长 44%。2012 年，全球风电新增装机容量排名前十位的国家分别是中国、德国、美国、巴西、印度、意大利、英国、瑞典、法国、土耳其，新增装机容量分别为 23351MW、5279MW、4854MW、2472MW、2515MW、1871MW、1736MW、1050MW、1042MW、804MW，占全球风电新增装机容量的市场份额分别为 45.2%、10.2%、9.4%、4.8%、4.5%、3.6%、3.4%、2%、2%、1.6%。

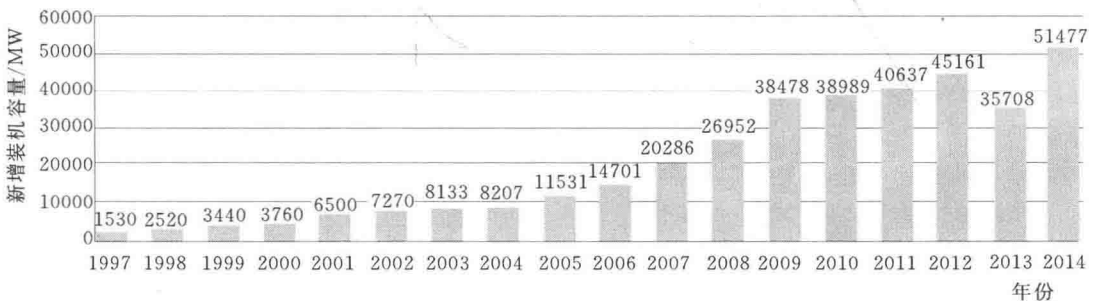


图 1-1 全球 1997—2014 年新增装机容量（数据来源：全球风能理事会）

其次，从累计装机容量看。如图 1-2 所示，2012 年，全球风电产业累计装机容量高达 283068MW，同比增加 18.7%。从主要国家来看，中国、美国、德国、西班牙、印度、英国、意大利、法国、加拿大、葡萄牙等国家的累计装机容量位居全球前十位，2014 年，累计装机容量分别为 114763MW、65879MW、39165MW、22987MW、22466MW、12440MW、9694MW、9285MW、8663MW、5939MW，占全球风电累计装机容量的市场份额依次为 31%、17.8%、10.6%、6.2%、6.1%、3.4%、2.6%、2.5%、2.3%、1.6%。

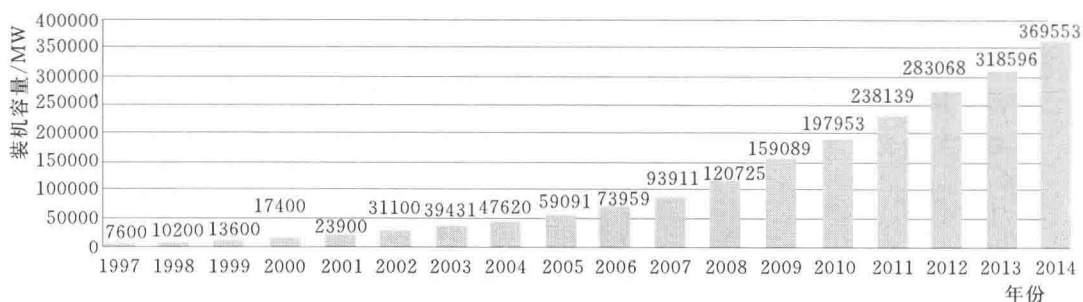


图 1-2 1997—2014 年全球风电累计装机容量 (数据来源: 全球风能理事会)

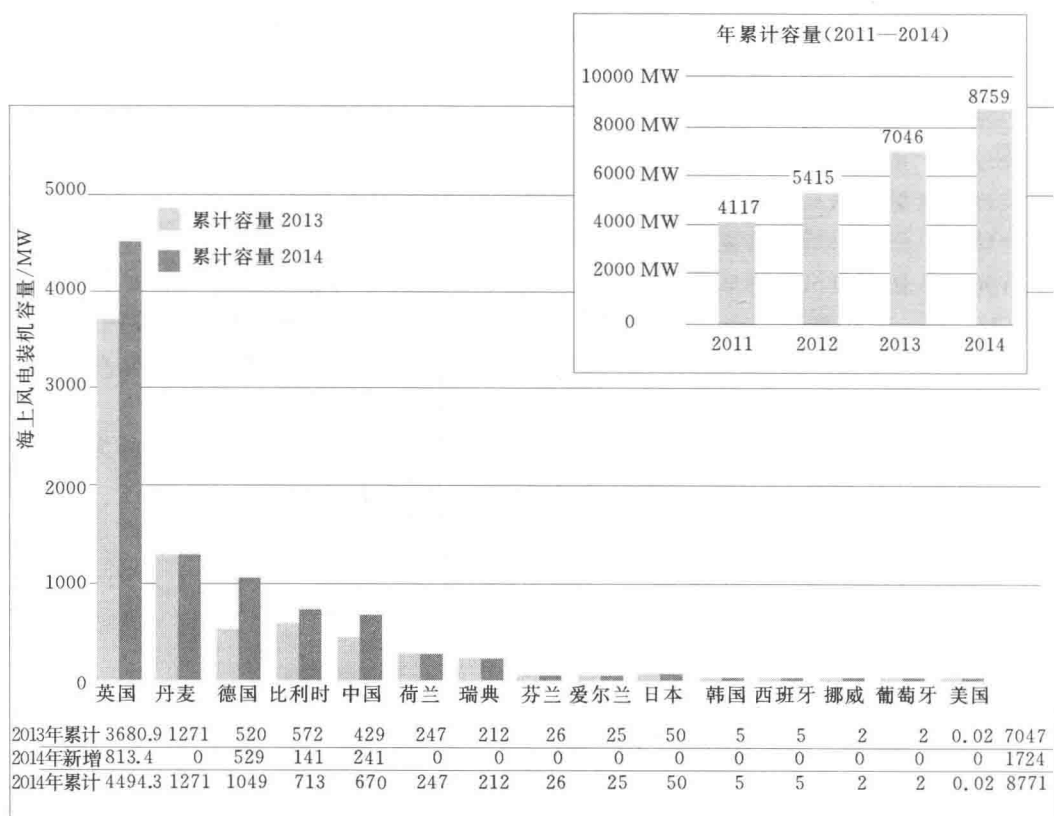


图 1-3 世界各国海上风电装机容量 (数据来源: 全球风能理事会)



最后,从海上风电装机容量看。如图 1-3 所示,2014 年全球海上风电累计装机容量高达 8771MW,同比增长 24%;新增装机容量 1724MW。其中,英国、丹麦、德国、比利时、中国、荷兰、瑞典、日本、芬兰、爱尔兰、韩国、西班牙等国家海上风电累计装机容量位居全球前列,累计装机容量分别为 4494.3MW、1271MW、1049.2MW、712.5MW、670MW、246.8MW、211.7MW、49.7MW、26.3MW、25.2MW、5MW、5MW。从海上风电新增装机容量看,2014 年英国、德国、中国、比利时海上风电新增装机容量分别为 813.4MW、529MW、241MW、141MW。

根据 2004 年“Wind Force 12 (风能 12)”发表的 2005—2020 年世界风电和电力需求增长的预测报告,按照风电目前的发展趋势,2005—2007 年期间的平均当年装机容量增长率为 25%,2008—2012 年期间降为 20%,预测到 2015 年降为 15%,2017—2020 年期间降为 10%。根据 2015 年全球理事会发表的全球风电发展年报预测 2015 年新增的装机容量将再次达到 50GW,到 2018 年将达到 60GW。

当然,世界风电的飞速发展,与各国积极地采取各种激励政策密不可分。鼓励风能开发利用的政策有多种,如长期保护性电价、配额制、可再生能源效益基金和招投标等政策。从应用实践来看,保护性电价政策是一种更为有效刺激风电发展的措施,欧洲 14 个国家采用了这一政策。20 世纪 90 年代以来,德国、丹麦、西班牙等国风电迅速增长,主要归功于保护性电价政策措施的实施。

1.1.2 中国风电的发展现状

据中国气象局研究结果,风能资源可开发量为 7 亿~12 亿 kW,具有巨大的潜力,表明中国风能资源非常丰富。我国风电发展历经了以下三个阶段。

第一阶段为 1986—1990 年,为我国并网风电项目的探索和示范阶段。特点是项目规模小,单机容量小。在此期间共建立了 4 个风电场,安装了 32 台风力发电机组,最大单机容量为 200kW,总装机容量为 4.215MW,平均年新增装机容量仅为 0.843MW。

第二阶段为 1991—1995 年,为示范项目取得成效并逐步推广阶段。共建立了 5 个风电场,安装风力发电机组 131 台,装机容量为 33.285MW,最大单机容量为 500kW,平均年新增装机容量为 6.097MW。

第三阶段为 1996 年以后,为扩大建设规模阶段。特点是项目规模和装机容量较大,发展速度较快,平均年新增装机容量为 61.8MW,最大单机容量达 1.3MW。2005 年《中华人民共和国可再生能源法案》颁布后,我国风能事业进入了一个新的时期。如图 1-4 所示,根据风能协会数据,从 2005 年开始,我国每年风电总装机容量成倍增长。到 2008 年,我国新增风电装机容量 6154MW,累计总装机容量已经达到 12002MW,我国超过印度成为继美国、德国和西班牙之后的第四风电大国。2012 年,我国累计风电装机容量已经超过美国,全球排名第一,且 2013 年和 2014 年持续引领增长势头,如图 1-5 所示。

2002 年年底,我国先后建起了 32 个风电场,全国风电总装机容量达到 46.62 万 kW,此外还有我国台湾的云林、新竹和澎湖等三个风电场,装机容量为 8.5MW。如图 1-6 所

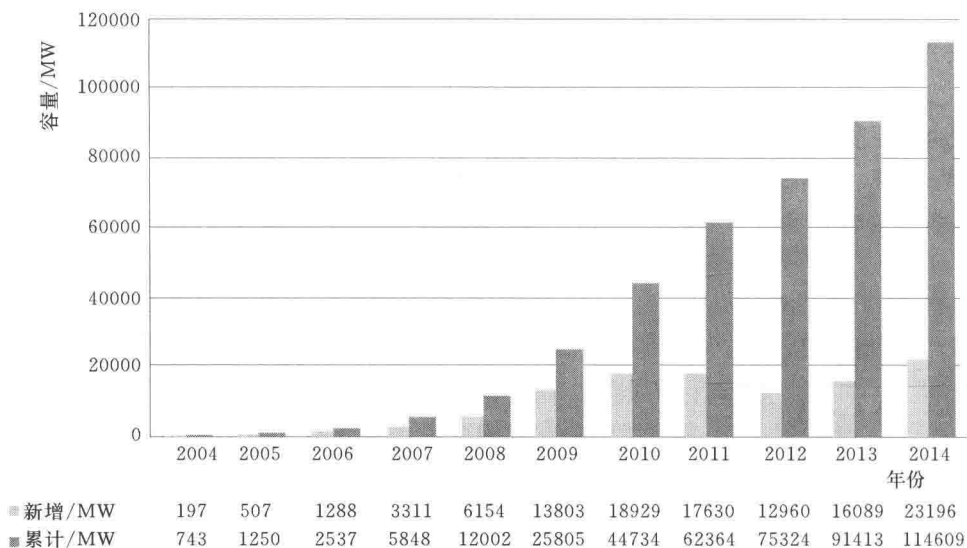


图 1-4 2004—2014 年中国新增及累计风电机装机容量

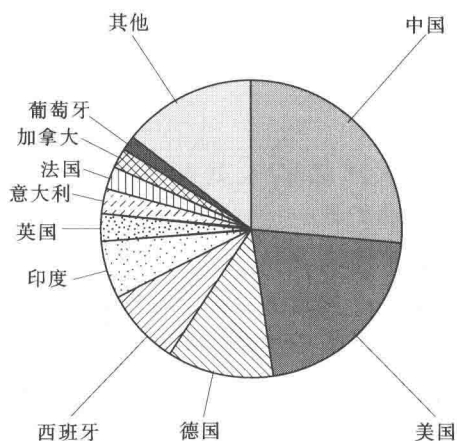


图 1-5 2012 年全球累计风电装机容量前 10 位国家

示，根据风能协会数据，我国风电发展在各地区呈现不均衡的态势，主要集中在华北、东北、西北以及华东地区。其中，辽宁、新疆、广东和内蒙古是我国风电发展最快的 4 个省（自治区），占全国风电装机容量的 75%。装机容量居前三位的风电场依次为新疆达坂城二场、广东南澳风电场和内蒙古辉腾锡勒风电场，其装机容量占全国总装机容量的 37.3%。

我国风电的发展也顺应世界风电的发展趋势。除陆上风电以外，我国也在积极地发展海上风电，根据风能协会数据，截至 2014 年年底，我国已经建成的海上风电项目共计 657.88MW，如图 1-7 所示，是除英国、丹麦以外海上风电装机最多的国家。我国第一个、也是亚洲第一个

海上风电场为上海东海大桥海上风电场。上海东海大桥海上风电场一期项目于 2008 年 5 月 5 日由国家发改委核准，作为海上风电示范项目建设，位于东海大桥东侧 1.0km 以外，北端距陆地岸线 8km，南端距陆地岸线 13km，场址范围海域面积 14km²，由 34 台国产 3MW 离岸型风电机组组成，总装机容量为 10.2 万 kW。项目投资 21.22 亿元。风电场通过 35kV 海底电缆接入岸上 110kV 风电场升压变电站，接入上海市电网。

国内风电建设的热潮达到了白热化的程度。目前，国家拟建 7 个千万千瓦级风电基地：甘肃酒泉地区为 1100 万 kW，新疆哈密地区为 2000 万 kW，吉林西部为 2000 万 kW，内蒙古（包含蒙东和蒙西两个地区）为 5000 万 kW，河北沿海和北部地区为 1000 万 kW，江苏沿海和近海地区为 1000 万 kW。

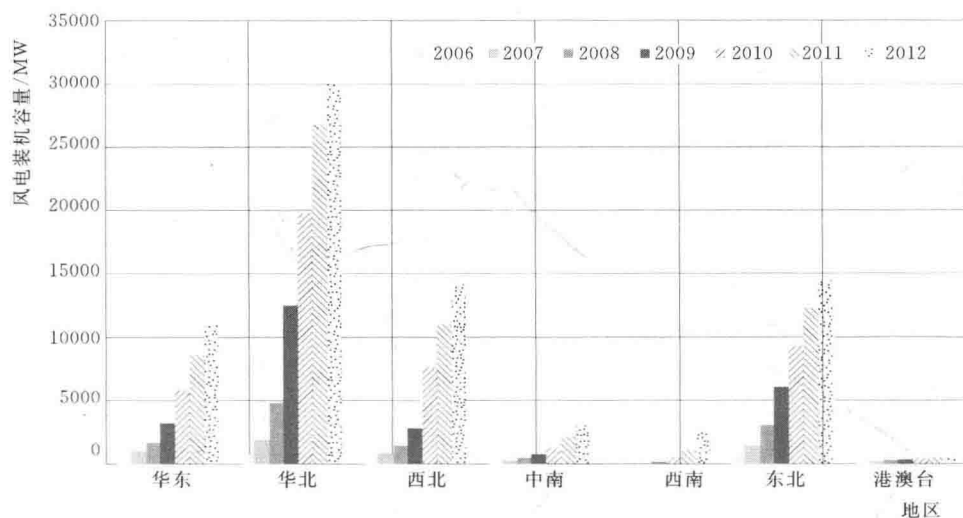


图 1-6 2006—2012 年我国各地区累计风电装机容量

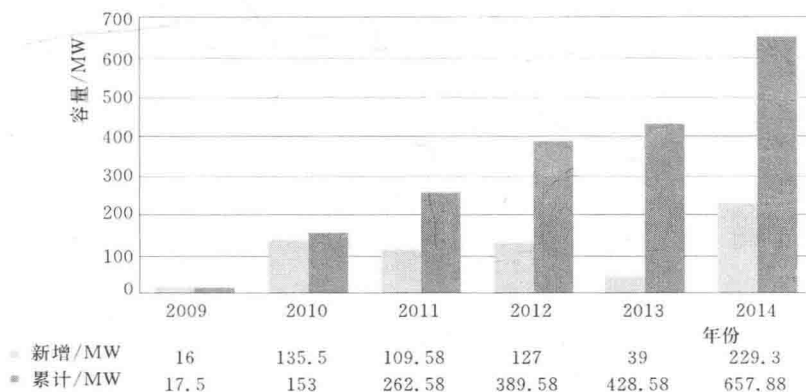


图 1-7 2014 年年底中国海上风电装机容量

1.2 风车起源

风车是最早利用风能的机械设备，在公元 644 年由波斯人阿布·鲁鲁亚发明，结构如图 1-8 所示。风车结构简单，整体为木质结构，旋转轴垂直于地面，主要用来磨制谷物。

在 13 世纪中叶，我国人民利用简易的垂直轴风车来进行提水灌溉、碾米等工作，结构如图 1-9 所示。风车翼板由竹竿和帆布构成，风车轴垂直旋转。

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（Post Windmill）。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 13 世纪，这种全木质制作的柱风车在德国随处可见。在两个世纪后，一种塔风车诞生，这种风车固定在一个由石块砌成的圆柱形塔顶，后从法国传到地中海区域。在 16 世纪，荷兰对此类风车进行了极大的改进，产生了荷兰风车。荷兰风车塔顶可以旋转，允许变向，应用范围十分广阔，到了 19 世纪，荷兰风车已经极为完善。