

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材



原理与应用技术

FENGDIAN YUANLI YU YINGYONG JISHU

关新◎编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

风电原理与应用技术

FENGDIAN YUANLI YU YINGYONG JISHU

关新◎编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

本书介绍了风力发电基本原理和风力发电机组的组成结构,具体包括风能、能量转换和传输理论、风力机、风力发电机、风电机组、风力发电技术、风电机组安全运行与维护以及风能储存等内容。

全书内容通俗简练,系统全面,图文并茂,既可作为高等学校风电专业及风电相关专业课程的基础教材,也可作为风电场运行和检修人员的培训教材,还可供风力发电、电气自动化技术等专业的工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

风电原理与应用技术 / 关新编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017. 3
全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-5130-5

I. ①风… II. ①关… 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(2017)第015684号

书 名	全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 风电原理与应用技术 FENGDIAN YUANLI YU YINGYONG JISHU
作 者	关新 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 (营销中心)
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	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
规 格	184mm×260mm 16开本 16.5印张 391千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	52.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言



风能是一种可再生、清洁的自然能源，是太阳能转化能量的一种形式。据统计，地球上风能理论蕴藏量约为 $2.74 \times 10^9 \text{ W}$ ，可开发利用的风能为 $2 \times 10^7 \text{ W}$ ，是地球水能的 10 倍，只要利用地球上 1% 的风能就能满足全球能源的需求。

我国的风力发电始于 20 世纪 50 年代后期，在吉林、辽宁、新疆等省区建立了单台容量在 10kW 以下的小型风电场，但其后就处于停滞状态。直到 1986 年，在山东荣成建成了我国第一座并网运行的风电场后，从此并网运行的风电场建设进入了探索和示范阶段，但其特点是规模和单机容量均较小。到 1990 年已建成 4 座并网型风电场，在此基础上中国风电迅猛发展。截至 2014 年年底，全国累计核准风电项目容量 176860MW，其中并网容量 97320MW，在建容量 79540MW，并网容量占核准容量的 55%。2014 年全国风电新增核准容量 39210MW，同比 2013 年增加 25%。

自 2010 年以来，全球风电发展呈现出向经济欠发达地区的强力扩张趋势。这一趋势明显说明风电正在成为更具市场竞争力的装机技术，而安装和使用风电并非经济发达国家的专利。2014 年风电在非洲近 1GW 的装机成绩更加说明风电技术已经具备向全球各地推广的商业基础。

根据全球风能理事会的统计，2014 年风电装机容量超过 1GW 的国家共有 24 个，其中欧洲国家 16 个，4 个亚洲国家，3 个北美国家和 1 个拉美国家。风电装机容量超过 10GW 的国家有 6 个，这 6 个国家包括中国 (114GW)、美国 (65GW)、德国 (39GW)、西班牙 (23GW)、印度 (22GW) 和英国 (12GW)。

我国风电行业发展快速，同时风电专业技术人员短缺，技术水平参差不齐等问题也逐渐暴露，而且风电行业的技术人员由于岗位（运行岗位、检修岗位、设计岗位、制造岗位）不同，其所需的专业知识种类和多寡均不同。针对以上问题，作者开展本书编写工作。

本书分为 9 章，主要包括：绪论；风能；能量转换和传输理论；风力机；风

力发电机；风电机组；风力发电技术；风电机组安全运行与维护；风能储存等。在编著过程中作者参阅了大量文献、论文，并采纳部分作者硕士、博士论文。

本书在编写过程中得到了沈阳工程学院新能源学院许多老师的大力支持和帮助，得到了风能与动力工程（技术）专业应往届毕业生的帮助及中国华电铁岭风电场的鼎力支持，在此深表感谢！本书参阅了大量的文献、网上资料等相关资料，在此对其作者一并表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中欠妥之处在所难免，恳请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作者，以便完善，编者邮箱 xin_guan@sina.com。

作者

2016年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风能利用及风力发电历史	2
1.2 风能资源	4
1.3 风力发电技术现状与发展	9
1.4 风电相关技术标准	14
习题	18
第 2 章 风能	19
2.1 风的种类及形成	19
2.2 风的特征	28
2.3 风的测量与评估	35
习题	42
第 3 章 能量转换和传输理论	43
3.1 风能捕获理论	43
3.2 能量传递理论	62
习题	67
第 4 章 风力机	68
4.1 风力机的分类	68
4.2 水平轴风力机	73
4.3 垂直轴风力机	74
4.4 其他风力机	77
习题	79
第 5 章 风力发电机	80
5.1 一次能源系统	80
5.2 主传动系统	85
5.3 支撑系统	100
5.4 制动系统	112
5.5 变桨系统	115

5.6 偏航系统	117
习题	125
第6章 风电机组	127
6.1 液压系统	127
6.2 安全保护系统	139
6.3 发电设备	147
6.4 监测系统	164
6.5 操作系统	172
6.6 常用控制器	174
习题	182
第7章 风力发电技术	184
7.1 风电机组的控制技术	184
7.2 风力机控制	192
7.3 风力发电机控制	198
7.4 发电系统	206
7.5 供电方式	225
习题	235
第8章 风电机组安全运行与维护	236
8.1 风电机组安全运行要求	236
8.2 风电场的运行与维护	239
8.3 风电机组常见故障及维护	240
习题	243
第9章 风能储存	244
9.1 化学储能	244
9.2 抽水储能	245
9.3 飞轮储能	246
9.4 热能储能	247
9.5 超导储能	249
9.6 其他储能	249
附录 风电机组电工术语	250
参考文献	255

第1章 绪 论

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，能源的消耗在急剧增长。目前，煤、石油、天然气是人类社会的主要能源，但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两三百年来，却已将地球亿万年来形成的极为有限的化石能源消耗殆尽。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，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，两者占总发电容量的90%以上，2010年我国能源结构见图1.1，其中有3/4的电能来自煤炭，每年仅我国要烧掉超过1.4Gt煤用来发电。地球除了煤炭等化石能源，还有着丰富的风能、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。我国2014年年用电总量约为18.6亿kW·h，考虑到风的间歇性，全部开发完成后的风电总量，可以满足目前53.7%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。

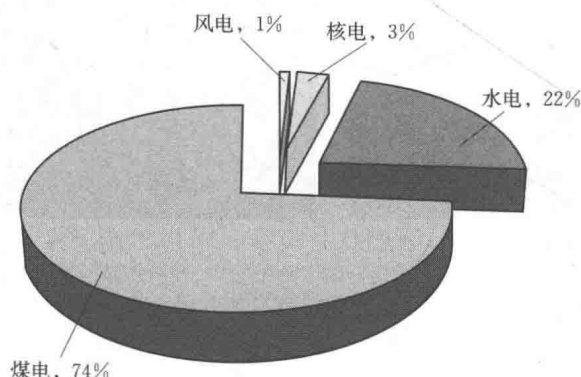


图 1.1 2010 年我国能源结构

由于风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，风电技术日趋成熟，具备了规模开发条件，因此，风电在我国有着很大的发展空间。

2005 年以前，我国的风电规模很小，风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。《国家应对气候变化规划（2014—2020 年）》提出，到 2020 年并网风电装机容量达到 200GW 的发展目标。根据这

一目标测算,“十三五”期间,我国风电每年需要投产 20GW 以上。这意味着风电发展的目标任务基本清晰,风电产业将在较长时间内保持快速增长势头。

1.1 风能利用及风力发电历史

人类利用风能的历史悠久,古埃及、波斯和我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,我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舞台。



(a) 帆船



(b) 风车

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。该机组风轮直径为 17m,安装了 144 个叶片,运行了将近 20 年,见图 1.3 (a)。

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的效率,提出了“快速风轮”的概念,即叶尖线速度高于风速。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电机组,见图 1.3 (b),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“贝兹理论”,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,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 1.3 (c)。该机组的塔架（筒）高度为 32.6m，风轮直径为 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，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 1.4 (a)，该机组风轮直径为 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 1.4 (b)，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。这种结构型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

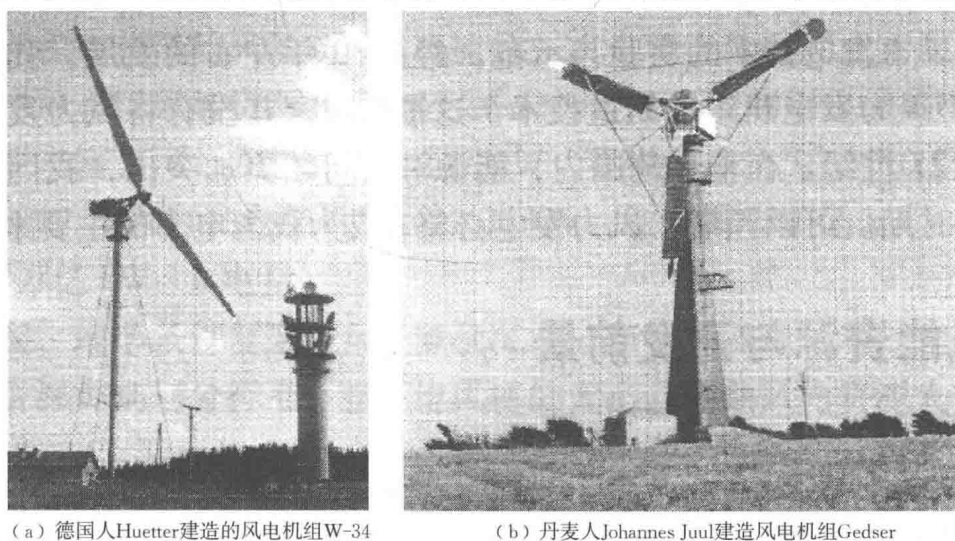


图 1.4 现代风电机组的先驱

组设计产生了重要影响。

在近半个多世纪里,人们对风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,风电作为清洁可再生资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规模化并网运行。

大型风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、恒速运行的风电机组,这一简单结构的机组被证明相当成功。目前,风电机组实现了变桨距、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电机组,同时,风电机组由陆地走向了海洋。

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电机组运行平稳、质量可靠,使用寿命在25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大型风电机组的制造技术。这期间,我国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 风能资源

1.2.1 风能的特点

与其他能源形式相比,风能具有以下特点:

(1) 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% 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, 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, 包括风能、水能、太阳能、潮汐能、生物质能等。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, 远小于汽车的噪声, 在距风电机组 500m 外已基本不受影响, 但风电机组对鸟类的歇息环境可能有一定影响。因此, 风电属清洁能源, 对环境的负面影响非常有限, 对于保护地球环境、减少 CO₂ 温室气体排放具有重要意义。

(4) 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 (在 1 个标准大气压、0℃ 条件下, 空气密度是淡水密度的 1.293%, 即淡水密度是空气密度的 773.3 倍), 因此风能的能量密度也很小, 只有水能的 1/816, 这是风能的一个重要缺陷。因此, 风电机组的单机容量一般较小。我国目前以 1.5~3MW 级风电机组为主, 世界上最大的商业运行机组也只有 10MW。

(5) 不同地区风能差异大。由于地形的影响, 风能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) 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

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。风速为 9~10m/s 的 5 级风吹到物体表面上的力, 每平方米约为 10kg。风速为 20m/s 的 9 级风, 吹到物体表面上的力, 每平方米可达 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, 可高达 200kg。

某个区域风能资源的大小取决于该区域的风功率密度和可利用的风能年累积小时数。风功率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, 全国风能实际可开发量为 2.53×10^{11} W。按 2014 年风电新增装机容量 39210MW, 发电量 653 亿 kW·h 推算, 未来每年可提供 3 万亿~5 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 地域风资源类别划分标准

等级	年有效风功率密度/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	风速年累计小时数/h	年平均风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
风资源丰富区	>200	>5000	>6
风资源次丰富区	$200 \sim 150$	$5000 \sim 4000$	5.5
风资源可利用区	$150 \sim 100$	$4000 \sim 2000$	5
风资源贫乏区	<100	<2000	4.5

我国风能资源丰富的地区主要分布情况，见表 1.2。

表 1.2 风资源分布区域

风资源丰富区	风资源次丰富区	风资源可利用区	风资源贫乏区
东南沿海、山东和辽东半岛，沿海及岛屿，内蒙古和甘肃北部，松花江下游地区	沿海地区，三北地区，青藏高原中部和北部地区	两广沿海，大、小兴安岭山地，三北中部	以四川为中心，雅鲁藏布江河谷和塔里木盆地西部

(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%，风功率密度在 $200 \sim 300 \text{W}/\text{m}^2$ 以上，有的可达 $500 \text{W}/\text{m}^2$ 以上。全年可利用小时数在 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，是我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 $2 \sim 4 \text{m}/\text{s}$ 。沿海近 10km 宽的地带，年风功率密度在 $200 \text{W}/\text{m}^2$ 以上。在风能资源丰富的东南沿海及其附近岛屿地区，全年风速不小于 $3 \text{m}/\text{s}$ 的小时数为 7000~8000h，不小于 $6 \text{m}/\text{s}$ 的小时数为 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。

我国有海岸线约 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，风功率密度仅为 $50 \text{W}/\text{m}^2$ 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，全年可利用小时数可达 6500h，但青藏高原海拔高，空气密度小，所以有效风功率密度也较低，有效风功率密度为 $150 \sim 200 \text{W}/\text{m}^2$ 。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。

我国海上风能资源丰富,东部沿海水深 2~15m 的海域面积辽阔,近海可利用的风能储量有 1 亿~2 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。

由于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。统计方法是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 1.3 列出我国部分省区的风能资源量。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 1.3 我国部分省区的风能资源量

省区	风能资源/MW	省区	风能资源/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

近几年世界新增风电装机容量的年增长率保持在 30%左右,根据全球风能理事会统计,2014 年全球风电年新增装机容量 51.47GW,创历史新高突破 50GW 大关,年增长率 44%。至 2014 年底,全球风电累计装机容量达到了 369.60GW,同比增长 16%。而同时,风电电价在逐步降低。2004—2014 年世界风电装机容量发展状况见图 1.5。

表 1.4 列出世界上风电装机容量较多的前 10 位国家于 2014 年的总装机容量和当年新增装机容量。

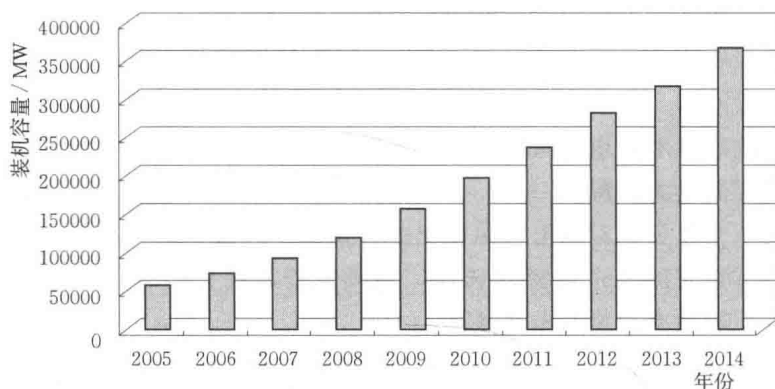


图 1.5 世界风电装机容量发展 (2004—2014 年)

表 1.4

2014 年世界风电装机最多的 10 个国家

国家	总装机容量/MW	百分比/%	国家	2014 年装机容量/MW	百分比/%
中国	114609	31	中国	23196	45.1
美国	65879	17.8	德国	5279	10.2
德国	39165	10.6	美国	4854	9.4
西班牙	22987	6.2	巴西	2472	4.8
印度	22465	6.1	印度	2315	4.5
英国	12440	3.4	加拿大	1871	3.6
加拿大	9694	2.6	英国	1736	3.4
法国	9285	2.5	瑞典	1050	2
意大利	8663	2.3	法国	1042	2
巴西	5939	1.6	土耳其	804	1.6
全球其他	58473	15.8	全球其他	6852	13.3
前十名总计	311124	84.2	前十名总计	44620	87
全球总和	369597	100	全球总和	51473	100

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，据中国可再生能源学会风能专业委员会（中国风能协会，以下简称 CWEA）的年终统计数据，2014 年全国风电新增装机容量 23196MW（不含台湾省），超过 2010 年历史高点（18928MW），创造了新的纪录，与 2013 年的 16089MW 相比增加了 7100MW，具体见图 1.6；2014 年全国累计风电装机容量达到 114.6GW，在全球范围内成为第一个突破 100GW 风电装机容量的国家；从装机台数统计，2014 年新增装机 13121 台，累计装机 76241 台；全国各个省、自治区、直辖市都已经建立了规模不等的风电场。2008—2014 年全国风电新增和累计装机容量见图 1.7。另据国家能源局公布的数据，2014 年全国新增风电并网容量 19810MW，累计并网容量 97320MW，占全国各类电源总装机容量的 6.2%。

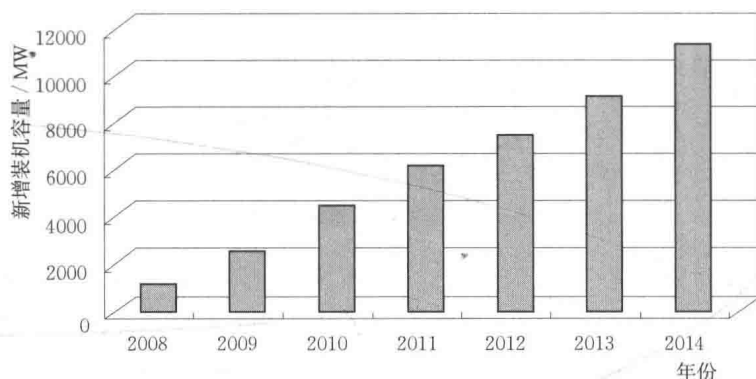


图 1.6 我国并网风电装机（除台湾省外）的增长情况

发展风能是我国长期的战略任务，国家可再生能源的中长期发展规划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为风力发电机组，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。

1.3.1 风电机组的典型分类

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

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）两种。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。

多种不同型式的水平轴风电机组见图 1.7。目前大型风电机组基本采用水平轴升力型，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，目前可达到 0.4~0.5。图中还示出一些特殊型式的水平轴风轮，例如轮辐式 [图 1.7 (d)]、多转子式 [图 1.7 (e)]、带扩流管式 [图 1.7 (i)] 或聚流罩式 [图 1.7 (j)] 等的聚能式风轮等。



图 1.7 水平轴风电机组类型

2. 垂直轴风电机组

垂直轴风电机组分为阻力型和升力型两大类。这两种不同类型的垂直轴风电机组及其各种变化形式见图 1.8，例如阻力型机组中的单叶片式、多叶片式、板式、杯式等，升力型机组中的 Φ 型、 Δ 型、H型、叶轮式等。垂直轴风电机组的风轮围绕一个与地面垂直的轴旋转，机组的运转与风向无关，故不需要对风驱动装置，同时，其变速箱、发电机、制动机构、控制装置都可安置于地面，使结构和安装大大简化，也便于检修。此外，垂直轴风电机组的叶片与轮毂的连接型式可以有多种选择，这样有利于改善叶片所受的载荷。

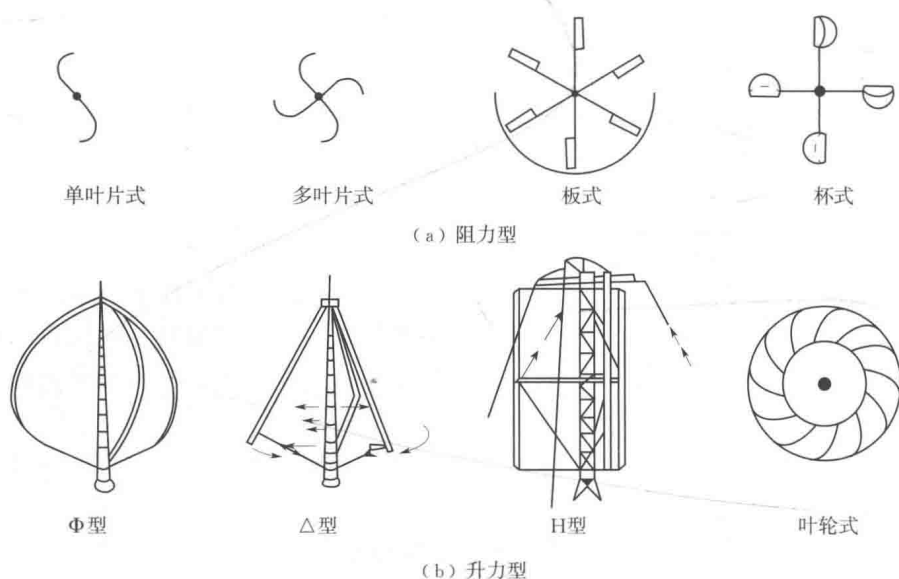


图 1.8 垂直轴风电机组类型