



普通高等教育“十三五”规划教材
高等学校新能源科学与工程专业教材

风力发电原理与技术



韩巧丽 马广兴 主编

Principle and Technology
of Wind Power Generation



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

普通高等教育“十三五”规划教材
高等学校新能源科学与工程专业教材

风力发电原理与技术

| 主 编 韩巧丽 马广兴 |
| 副主编 李 明 王 涛 |
| 参 编 闫彩霞 吕 麟 |

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电原理与技术/韩巧丽, 马广兴主编. —北京:
中国轻工业出版社, 2018. 8

普通高等教育“十三五”规划教材. 高等学校新能源
科学与工程专业教材

ISBN 978-7-5184-1870-1

I. ①风… II. ①韩…②马… 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 (2018) 第 033292 号

责任编辑: 车向前

策划编辑: 江 娟 责任终审: 劳国强 封面设计: 锋尚设计

版式设计: 王超男 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2018 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787×1092 1/16 印张: 11.25

字 数: 270 千字

书 号: ISBN 978-7-5184-1870-1 定价: 45.00 元

邮购电话: 010-65241695

发行电话: 010-85119835 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请与我社邮购联系调换

160330J1X101ZBW



前 言

能源是人类生存、社会发展的重要物质基础。人类利用能源经历了柴草时期、煤炭时期和石油时期，随着社会生产力的提高，消耗能源量也在增加。目前，人类依靠的能源主要是煤炭、石油等化石能源，化石能源面临逐渐枯竭的危机，也会对生态环境造成污染。能源与环境问题已经成为可持续发展面临的主要问题，日益引起国际社会的广泛关注。风能作为一种重要的可再生能源，具有清洁、无污染、安全、储量丰富等特点，受到了各国的普遍重视。风力发电是最具规模化开发利用条件的清洁、可再生能源之一。近年来，风力发电技术发展迅速，全世界的风电装机容量也快速增长，我国已经成为世界上风力发电发展较快的国家之一。

本书在介绍与风电有关的基础知识和风电机整体结构的基础上，系统阐述了风能资源与转换原理、机组设备与结构、风电场运行与维护等内容。通过阅读本书，可使广大读者了解风力发电的技术现状和发展趋势，理解风力发电的基本原理与技术。由于风力发电技术涉及多学科的内容，考虑到不同专业知识背景的读者，本书以最基本的原理和概念为主，减少烦琐的数学推导，力求理论联系实际，内容通俗易懂。鉴于风力发电技术发展迅速，本书重点围绕目前主流的并网风电系统展开，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“新能源科学与工程”专业和其他相近专业的教材，也可供从事风力发电领域的工程技术人员参考。

全书共7章，其中第一章介绍风力发电技术的相关背景；第二章介绍风特性及风能；第三章介绍风力机的空气动力学；第四章介绍风电机组的结构；第五章介绍风电机组的控制及安全保护；第六章介绍风电场的控制与运行；第七章介绍风电场的规划与设计。

本书第一章、第三章由韩巧丽编写，第二章由马广兴编写，第四章和第七章由王涛和李明合作编写，第五章和第六章由闫彩霞和吕麟合作编写。李汪灏、邢为特、张正参与了部分内容的文字整理工作。

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

2018年1月

| 目 录 |

| | |
|-------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 | 1 |
| 第一节 风能利用及风力发电的历史 | 1 |
| 第二节 风电机组的类型 | 8 |
| 第三节 风力发电技术的发展现状 | 11 |
| 第二章 风特性及风能 | 13 |
| 第一节 风的形成 | 13 |
| 第二节 风的特性 | 16 |
| 第三节 风的测量 | 25 |
| 第四节 风能资源储量估算 | 27 |
| 第三章 风力机的空气动力学 | 29 |
| 第一节 风力机叶片翼型 | 29 |
| 第二节 叶片翼型的几何参数与空气动力特性 | 31 |
| 第三节 风力机叶片设计理论 | 36 |
| 第四节 风力机运行特性 | 40 |
| 第四章 风电机组的结构 | 41 |
| 第一节 水平轴风电机组 | 41 |
| 第二节 风轮 | 46 |
| 第三节 风电机组传动系统 | 55 |
| 第四节 机舱、主机架与偏航系统 | 78 |
| 第五节 塔架与基础 | 87 |
| 第六节 风电机组其他部件 | 93 |
| 第五章 风电机组的控制及安全保护 | 97 |
| 第一节 发电机类型与控制方式 | 97 |
| 第二节 笼型感应发电机 | 97 |
| 第三节 绕线转子异步发电机及其控制 | 101 |
| 第四节 双馈发电机 | 102 |
| 第五节 永磁同步发电机 | 107 |
| 第六节 离网型发电机 | 110 |
| 第七节 风电机组的控制技术 | 110 |
| 第八节 风电机组的桨距控制 | 118 |
| 第九节 风电机组的信号检测 | 120 |

| | |
|----------------------------|-----|
| 第十节 制动系统控制 | 122 |
| 第十一节 风电机组的安全保护 | 124 |
| 第六章 风电场的控制与运行 | 129 |
| 第一节 风电场电气设备构成 | 129 |
| 第二节 电力系统负荷曲线 | 141 |
| 第三节 电力系统中各类电源的运行特性 | 145 |
| 第四节 风电场接入电力系统 | 147 |
| 第五节 含风电场的电力系统及其运行方式 | 151 |
| 第七章 风电场的规划与设计 | 154 |
| 第一节 风能的特点 | 154 |
| 第二节 我国风能资源分布特点及开发 | 154 |
| 第三节 风能资源测量与评估 | 156 |
| 第四节 风电场的宏观选址 | 159 |
| 第五节 风电场的微观选址 | 165 |
| 参考文献 | 171 |

第一章 绪 论

大自然在几百万年，甚至几亿年漫长岁月中造就的石油、煤炭、天然气等化石能源，是目前人类社会的主体能源，为人类的文明、进步做出了巨大贡献。但是，化石能源是有限的，是不可再生的能源。可以预见，人类在利用化石能源推进现代文明的同时，将面临能源与资源枯竭、污染环境、生态平衡破坏等一系列问题。从化石能源向可再生能源过渡的时期，科学技术支撑着向新能源转型，体现着国家的经济实力。风能是一种取之不尽、用之不竭、对大气无污染、不破坏生态平衡的自然资源，很早以前就被用来为人类造福。加快发展风电已成为国际社会推动能源转型发展、应对全球气候变化的普遍共识和一致行动。

2000年，风电占欧洲新增装机的30%；2007年，风电占美国新增装机的33%；2015年，风电在丹麦、西班牙和德国用电量中的占比分别达到42%、19%和13%。随着全球发展可再生能源的共识不断增强，风电在未来能源电力系统中将发挥更加重要的作用。美国提出到2030年20%的用电量由风电供应，丹麦、德国等国把开发风电作为实现2050年高比例可再生能源发展目标的核心措施。随着全球范围内风电开发利用技术的不断进步及应用规模的持续扩大，风电开发利用成本也在逐年降低。

“十三五”时期是我国能源发展战略的重要时期。为实现2020年和2030年非化石能源分别占一次能源消费比例15%和20%的目标，推动能源结构转型升级，促进风电产业持续健康发展，按照《可再生能源法》要求，根据《能源发展“十三五”规划》和《可再生能源发展“十三五”规划》，到2020年年底，风电累计并网装机容量确保达到 2.1×10^8 kW以上，其中海上风电并网装机容量达到 500×10^4 kW以上；风电年发电量确保达到4200 kW·h，约占全国总发电量的6%。为有效解决弃风问题，在充分挖掘本地风电消纳能力的基础上，借助“三北”地区已开工建设和明确规划的超高压跨省区输电通道，在落实消纳市场的前提下，最大限度地输送可再生能源，扩大风能资源的配置范围，促进风电消纳。优化风电调度运行管理，建立辅助服务市场，加强需求侧管理和用户响应体系建设，提高风电功率预测精度并加大考核力度，在发电计划中留足风电电量空间，合理安排常规电源开机规模和发电计划，将风电纳入电力平衡和开机组合，鼓励风电等机组通过参与市场辅助服务和实时电价竞争等方式，逐步提高系统消纳风电的能力。

第一节 风能利用及风力发电的历史

风能是人类最早使用的能源之一，利用方式有风帆助航、风力提水、风力磨面。最初的古代风机是一种简单的垂直轴风力机，公元644年波斯人制造了立轴式磨面用风力机，图1-1为古代风力机。后来又出现了一种水平轴风力机，它的风轮具有十根梁，其间用张线固定，每根梁上有一块小帆布。至20世纪80年代在江苏一带还可见到竹木帆布结构的

风力机。这种风力机在农田灌溉和盐池提水方面仍起重要作用。

到公元 11 世纪，在中东，古代风力机应用很广泛；13 世纪，这种风力机传到了欧洲；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；16 世纪，荷兰先后建造了当时的第一个制油厂、第一个造纸厂以及锯木厂，这些都是利用风力作动力的；19 世纪中叶，在荷兰有 9000 台传统风力机在运行，图 1-2 为中世纪传统风力机。中国宋朝是风力机的全盛时期，当时流行着垂直轴天津风车。美国中西部的多叶式风力提水机，叶片由金属制成，风轮直径 3~5m，功率 500~1000W，在 18 世纪末曾多达数百万台。

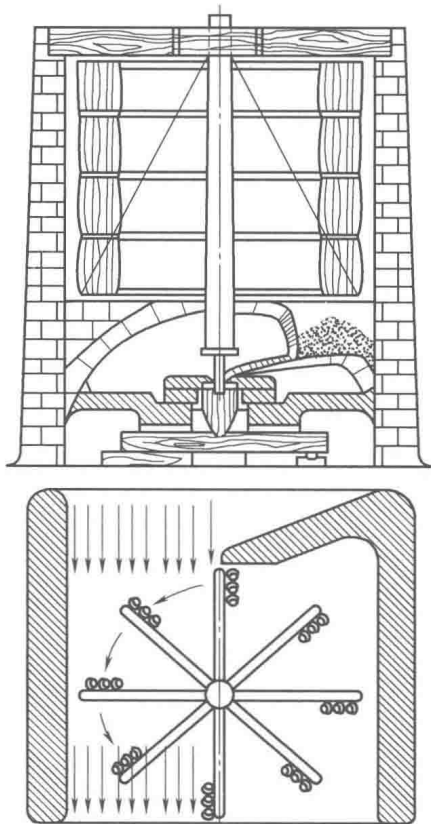


图 1-1 古代风力机



图 1-2 中世纪传统风力机

1891 年丹麦物理学家 Poul la Cour 进行了风洞实验，研制成功了 30kW 左右的风电机，叶片数少，转速高，如图 1-3 所示。19 世纪末，丹麦拥有 3000 台工业用的风力机和 30000 台用于家庭和农场的风力机。1908 年丹麦已建成几百个小型风力发电站。自 20 世纪初至 20 世纪 60 年代末，一些国家对风能资源的开发，尚处于小规模利用阶段。从 50 年代到 60 年代，中国研制了 10 多种风力机，最大的已超过 30kW。从 60 年代开始研制的小型风力提水机，有 30 种不同型号，对我国开发利用风能起了积极作用。小型风力提水机如图 1-4 所示，应用较多的小型风电机组如图 1-5 所示。

1970 年以前国际上研制的 100kW 级及以上的风电机组，包括美国在 1941 年投入运行的机组，额定功率 1250kW，额定风速 13.5m/s，叶片数 2 个，叶片由铁质材料制成，直径达 53m，进行变桨距控制，机组运行到 1945 年；丹麦在 1957 年投入运行的机组，额定



图 1-3 30kW 风电机



图 1-4 小型风力提水机

功率 200kW，额定风速 15m/s，叶片数 3 个；英国、法国、德国等也进行了大型机组研制。

随着大型水电、火电机组的采用和电力系统的发展，1970 年以前研制的中、大型风电机组因造价高和可靠性差而逐渐被淘汰，到 20 世纪 60 年代末相继都停止了运转。这一阶段的试验研究表明，这些中、大型机组一般在技术上还是可行的，它为 20 世纪 70 年代后期的大发展奠定了基础。

1973 年，国际上出现了石油危机，不少国家面临能源短缺的困境，为此提出了能源多样化发展战略，因而风能的研究和开发工作得到了重视。美国、荷兰、丹麦、英国、德国、日本、加拿大等国都对大力开发风能制定了规划，制定了采取扶持资助的鼓励性政策和法规。中国也开始重视风能的研究和开发。美国 Mod-0 风电机组 1975 年投入运行，风轮直径 38m、功率 100kW。1975 年 5 月，Mod-1 型风电机投入运行，其额定功率为 2000kW，风轮直径 61m，如图 1-6 所示。直到 1987 年投入 Mod-5B 机组，风轮直径 97.5m、功率 2.5MW，如图 1-7 所示。加拿大研究垂直轴风电机组达到了 4MW。1981 年，美国研究了

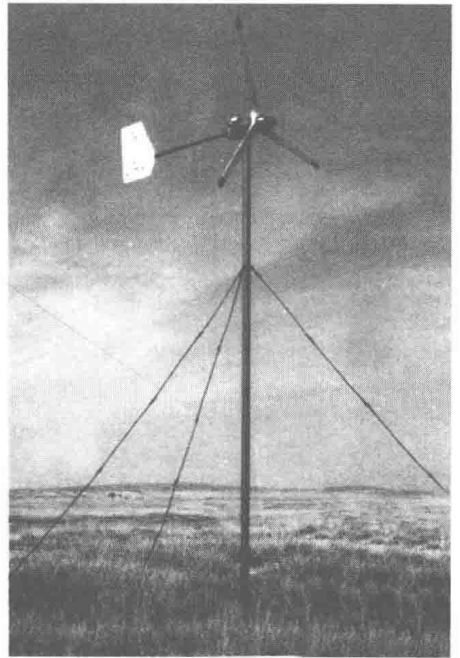


图 1-5 小型风电机组



图 1-6 Mod-1 型风电机



图 1-7 Mod-5B 风电机

新型 3MW 水平轴风电机组，该机组利用液压驱动进行偏航对风。在一段时间内最佳叶片数没有确定，单叶片、双叶片、三叶片均有，后来出现了“丹麦型”风电机组，具有三叶片、叶片失速调节和恒速运行感应发电机的传动系统，成功应用在百瓦级风电机组。随着机组容量的增加，为提高风能利用率，兆瓦级以上机组采用变速变桨运行控制方式。

1980 年以来，国际上风电机技术日益走向商业化。主要机组容量有 300kW、600kW、750kW、850kW、1MW、2MW。1991 年丹麦建成了世界上第一个海上风电场，由 11 台丹麦 Bonus 450kW 单机组成，总装机容量 4.95MW，如图 1-8 所示。随后荷兰、瑞典、英国相继建成了自己的海上风电场。



图 1-8 丹麦海上风电

2004 年年底，已经具备离岸风力发电设备商业生产能力的厂家主要有丹麦的 Vestas (包括被其整合的 NEG-Micon)，美国的 GE 风能，德国的 Nordex、Repower、Pfleiderer/Prokon、Bonus 和德国著名的 Enercon 公司。单机额定功率覆盖范围从 2MW、2.3MW、3.6MW、4.2MW、4.5MW 到 5MW，叶轮直径从 80m、82.4m、100m、110m、114m、116m 到 126.5m，风电机大型化、巨型化趋势十分明显。

据世界风能协会统计，2005—2015 年世界风电装机容量和新增风电装机如图 1-9 所示。2015 年全世界新增风电装机 6.3×10^4 MW。其中，我国 2015 年新增加 3.074×10^4 MW，总计装机 14.5362×10^4 MW，位居世界风力发电总计装机容量第一名。此外，美国新增风电装机容量 8598MW，总装机容量 7.4471×10^4 MW，位居总计风力发电装机容量第二名；德国新增 6013MW，总装机容量 4.4947×10^4 MW，成为了全球风电机组总计装机容量第三位。

我国于 2005 年 2 月 28 日，全国人大通过了《可再生能源法》，2006 年 1 月 1 日开始施行。2005 年我国国内生产的 600kW 和 750kW 风电机组占当年装机容量的 28%。由科技部 863 项目支持的沈阳工业大学风能研究所自行研制开发的 1.0MW 双馈变速恒频型风

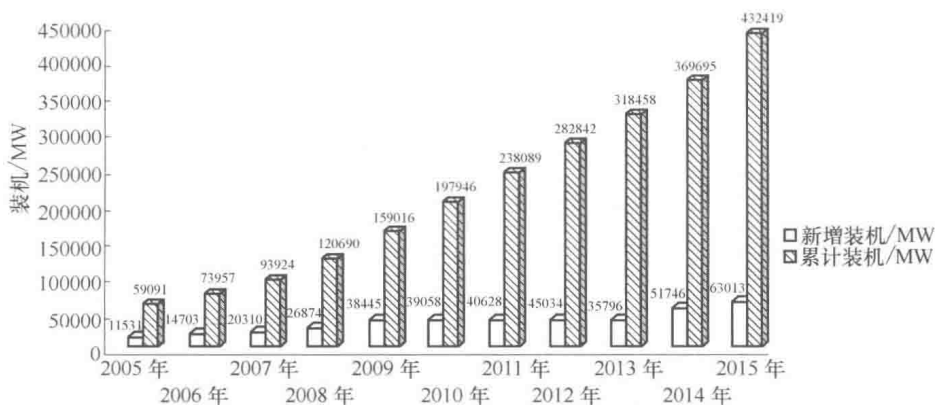


图 1-9 2005—2015 年世界风电装机容量

电机组和金风科技股份有限公司与国外公司联合研发的 1.2MW 永磁直驱型风电机组第一台样机分别投入运行，经改进后的第二台样机在 2006 年投入使用。由国内企业引进技术生产的 1.5MW 变速恒频风电机组也已投入运行。

“十二五”期间，我国风电新增装机容量连续五年领跑全球，累计新增 9800×10^4 kW，占同期全国新增装机总量的 18%，在电源结构中的比例逐年提高。中东部和南方地区的风电开发建设取得积极成效。到 2015 年年底，全国风电并网装机达到 1.29×10^8 kW，年发电量 1863×10^8 kW·h，占全国总发电量的 3.3%，比 2010 年提高 2.1 个百分点。风电已成为我国继煤电、水电之后的第三大电源。

根据中国风能协会的初步统计，我国在 2015 年全年新增机组安装量为 16740 台，新增装机容量约为 3.074×10^4 MW，历年总计安装台数为 93000 万台，历年总计装机容量约为 14.5362×10^4 MW，如图 1-10 所示。

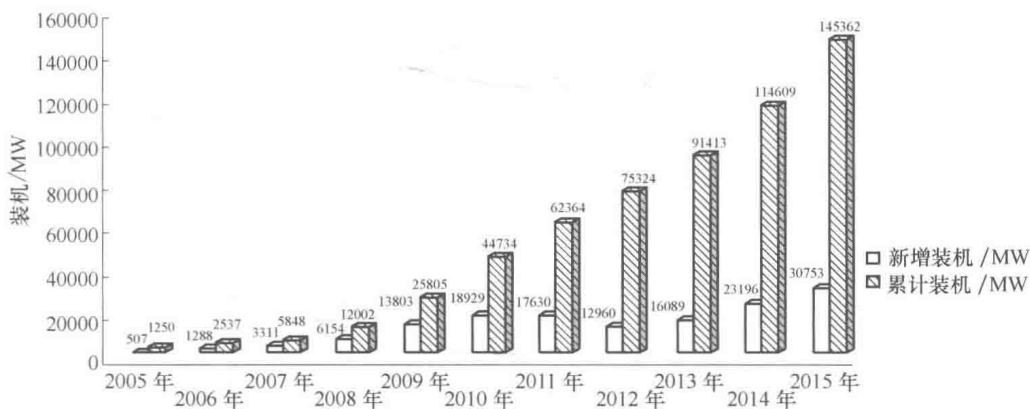


图 1-10 2005—2015 年我国风电装机容量

发展海上风电是国际上风电发展的一个方向。世界上对海上风电的研究与开发始于 20 世纪 90 年代，经过多年的发展，海上风电技术正日趋成熟，并开始进入规模开发阶段。海上风电场一般都在水深 10m、距海岸线 10km 左右的近海大陆架区域建设。与陆上相比，海上风电机组必须牢固地固定在海底，其支撑结构（主要包括塔架、基础和连接等）要求更加坚固。所发电能需要铺设海底电缆输送，加之建设和维护工作需要使用专业船只

和设备,所以海上风电的建设成本一般是陆上风电的2~3倍。海上风电场的优点主要是不占用宝贵的土地资源,基本不受地形地貌影响,风速更高,风能资源更为丰富,而且运输和吊装条件优越,风电机组单机容量更大,年利用小时数更高。

20世纪80年代,丹麦在探讨海上风力发电的可行性时得到结论:为了弥补海上风力发电的建设和输电成本,必须采用1~2MW的大型风力机,而在当时尚不具备生产这样大型风力机的能力。截至2014年年底,世界海上风电装机总容量约8759MW,而绝大部分(约91%)海上风电分布在欧洲。

我国于2007年安装了首个海上试验风电机组平台,目前已有数个海上风电场投入运行。但总体上看,我国海上风电起步晚,相关产业发展不成熟,发展道路上的挑战和机遇并存。

我国拥有漫长的海岸线,海上风能资源丰富。根据2009年国家气候中心的评估结果,离岸50km范围内的可开发风能资源为 $7.58 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。丰富的海上风能为我国的海上风电开发提供了可能性,经过数年发展,我国海上风电已经初具规模。2007年到2016年年底海上风电装机总容量从1.5MW发展到1627MW。

到2014年年底,除了试验风电项目外,我国业已建成数个规模化的海上风电场。其中东海大桥一期和二期风电场海域水深约为10m,除此之外,其他已经建成的规模化风电场均位于潮间带。我国正在积累海上风电建设经验,海上风能资源测量与评估以及海上风电机组国产化已起步,海上风电建设技术规范体系也已逐步建立。

“十三五”期间重点推动江苏、浙江、福建、广东等省的海上风电建设,到2020年四省海上风电开工建设规模均达到百万千瓦以上,积极推动天津、河北、上海、海南等省(市)的海上风电建设,探索性推进辽宁、山东、广西等省(区)的海上风电项目。到2020年,全国海上风电开工建设规模达到 $1000 \times 10^4 \text{ kW}$,力争累计并网容量达到 $500 \times 10^4 \text{ kW}$ 以上。

风能领域研究领先的国家主要在欧洲,如德国、西班牙和丹麦等。这三个国家风电机组的装机容量约占欧洲总量的84%。新兴的国家有奥地利、意大利、荷兰、瑞典和英国。欧洲之外发展风电的主要国家有美国、印度、中国和日本。风能技术发展好的国家都离不开研发机构、实验室的支持,如丹麦的Riso国家实验室、德国风能机构(DEWI)、美国的国家可再生能源实验室国家风能技术中心(NWTC)。

我国风电技术研发也随着风电产业而快速发展,目前已经可以自主设计开发兆瓦级风电机组。和国际先进水平相比,尽管我国在风电技术研发的系统性、基础研究领域和技术创新能力等方面仍有不足,但在风电产业快速发展和国家科技政策的有力支持下,我国完全可以在风电技术领域提高研发水平,实现自主创新和技术领先,从而提高我国在风电市场中的核心竞争力。

1986年4月,山东荣成陆上风电场并网发电,是我国第一个并网发电的风电场;截至2013年,我国风电场分布如图1-11所示。

至2013年年底,中国(台湾省未计入)有31个省(直辖市)、自治区和特别行政区参加了风电场建设,累计安装并网型风电机组63120台,累计装机容量约9141.29×



图 1-11 全国风电场分布情况

10^4 kW (其中海上风电 41.9×10^4 kW)。中国风电累计装机超过 600×10^4 kW 的省份有 5 个,分别为内蒙古 (2027.031×10^4 kW)、河北 (850×10^4 kW)、甘肃 (709.6×10^4 kW)、山东 (698×10^4 kW) 和辽宁 (675.8×10^4 kW),其中风力资源丰富的内蒙古在我国实现累计风电装机容量 2027.031×10^4 kW,建成了辉腾锡勒、辉腾梁、巴音郭勒和赤峰等多处大型风力发电场,成为唯一超过 2000×10^4 kW 级风电装机大省。

为了更好地促进风电产业集中高效的发展,我国出台了千万千瓦 (10GW) 风电基地的规划,计划集中力量建成包括新疆 (哈密)、甘肃省 (酒泉)、内蒙古 (分为内蒙古东和内蒙古西)、吉林 (西部)、河北、黑龙江、山东和江苏八个省区的 9 个千万千瓦级风电基地规划,大量风电场集中在“三北”地区。

随着全球风力发电产业的发展,风电机组的装机容量不断增长。由于电网建设的滞后等因素,风电的消纳成为风电投资的主要制约因素。以 2012 年为例,2012 年一年新增加容量约 1300×10^4 kW,总计装机容量 7532×10^4 kW,而电网建设和负荷消纳跟不上机组的安装速度,弃风电量 208×10^8 kW·h,损失巨大。

“十三五”期间,到 2020 年,预计“三北”地区在基本解决弃风问题的基础上,通过促进就地消纳和利用现有通道外送,新增风电并网装机容量 3500×10^4 kW 左右,累计并网容量达到 1.35×10^8 kW·h 左右。相关省 (区、市) 在风电利用小时数未达到最低保障性收购小时数之前,并网规模不宜突破规划确定的发展目标。借助“三北”地区已开工建

设和已规划的跨省跨区输电通道，统筹优化风、光、火等各类电源配置方案，在确保消纳的基础上，鼓励各省（区、市）进一步扩大风电发展规模，鼓励风电占比较低、运行情况良好的地区积极接受外来风电。

按照“就近接入、本地消纳”的原则，发挥风能资源分布广泛和应用灵活的特点，在做好环境保护、水土保持和植被恢复工作的基础上，加快中东部和南方地区陆上风能资源规模化开发。中东部和南方地区陆上风电新增并网装机容量 $4200 \times 10^4 \text{ kW}$ 以上，累计并网装机容量达到 $7000 \times 10^4 \text{ kW}$ 以上。结合电网布局和农村电网改造升级，因地制宜推动接入低压配电网的分散式风电开发建设，推动风电与其他分布式能源融合发展。

第二节 风电机组的类型

风电机组的形式多样。一般来说，可按照风轮的旋转轴与风向的位置关系分为水平轴风力机和垂直轴风力机；按工作原理分为升力型和阻力型；根据水平轴风力机的风轮与塔架迎风先后，分为上风式风力机和下风式风力机。

一、升力型和阻力型

当分析物体受到风的作用力时，可以将该力分解成与风垂直和与风平行的两个分力，垂直方向的力称为升力，平行方向的力称为阻力。这其中，主要依靠升力的作用而转动的风电机组称为升力型，螺旋桨型、达里厄型和直线翼垂直轴型都属于这种类型。由于有升力的作用，风轮圆周速度可以达到风速的几倍至十倍，因此多被用于风力发电。

相反，主要依靠阻力来转动的风电机组称为阻力型，主要包括多翼型、萨涅纽斯型和涡轮型等。虽然该类风电机组不能产生比风速高许多的转速，但往往风轮转轴的输出扭矩很大，因此常被用来扬水、拉磨等动力用风电机组使用。

二、水平轴风力机和垂直轴风力机

水平轴风力机可以是升力装置（即升力驱动风轮），也可以是阻力装置（阻力驱动风轮）。设计者一般喜欢利用升力装置，因为升力比阻力大得多。另外，阻力装置一般运动速度没有风速快；升力装置可以得到较大的尖速比（风轮叶片尖端速度与风速之比），因此输出功率与质量之比大，价格和功率之比较低。水平轴风力机的叶片数量可以不同，从具有配平物的单叶片风力机，到具有很多叶片（最多可达 50 片以上）的风力机均可见到。有些水平轴风力机没有对风装置，风力机不能绕垂直于风向的垂直轴旋转，一般说来，这种风力机只用于有一个主方向风的地方。而大多数水平轴风力机具有对风装置，能随风向改变而转动。这种对风装置，对于小型风力机，是采用尾舵，而对于大的风力机，则利用对风敏感元件。如图 1-12 所示。

垂直轴风力机在风向改变时，无需对风。在这点上，相对水平轴风力机是一大优点，这使其结构简化，同时也减少了风轮对风时的陀螺力。

利用阻力旋转风轮的垂直轴风力机有几种类型。其中有利用平板和杯子做成的风轮，这是一种纯阻力装置；S 形风轮，具有部分升力，但主要还是阻力装置。这些装置有较大

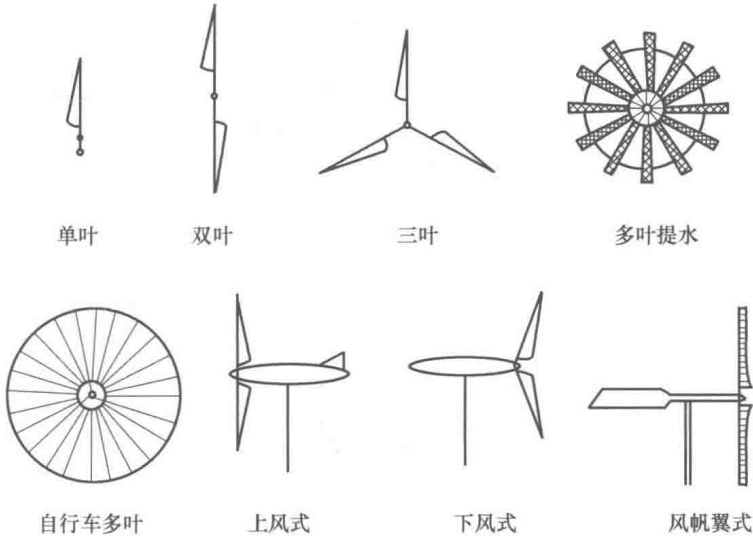


图 1-12 水平轴风力机

的启动力矩（和升力装置相比），但尖速比较低。在风轮尺寸、质量和成本一定的情况下，提供的功率输出较低。

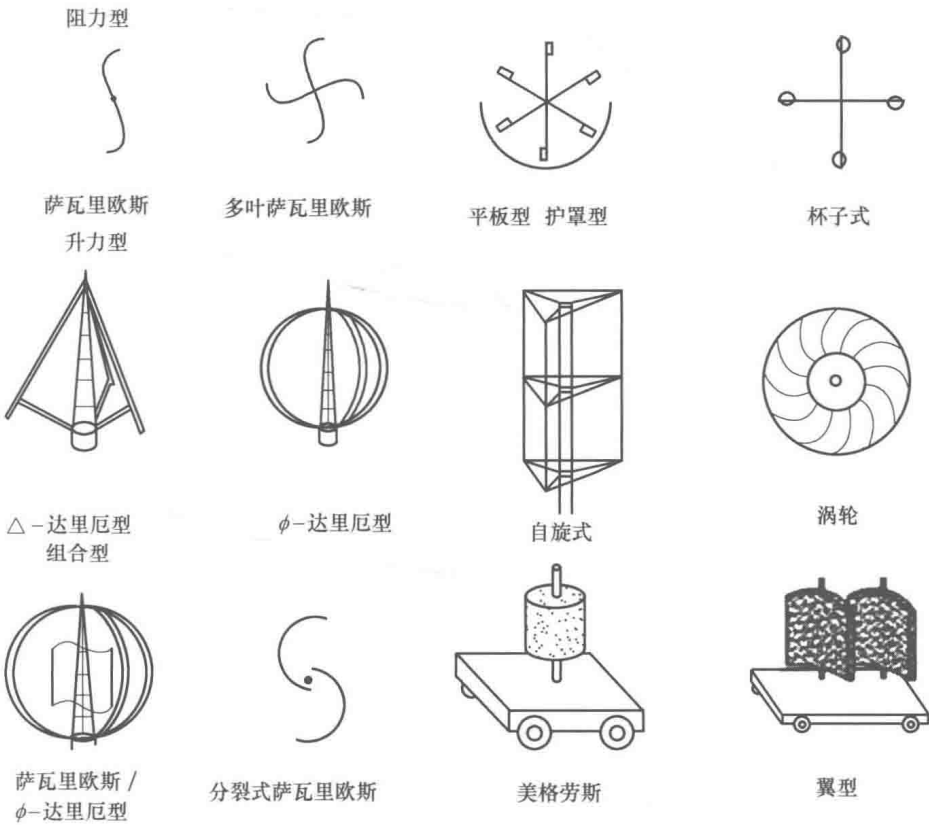


图 1-13 垂直轴风力机

达里厄式风轮是法国 G. J. M. 达里厄于 19 世纪 20 年代发明的。20 世纪 70 年代初，加拿大国家科学研究院对其进行了大量的研究，是水平轴风力机的主要竞争者。

达里厄型风轮是一种升力装置，弯曲叶片的剖面是翼型，它的启动扭矩低，但尖速比可以很高，对于给定的风轮质量和成本，有较高的功率输出。现在有多种达里厄风力机，如 ϕ 形、 Δ 形、Y 形、 \diamond 形等。这些风轮可设计成单叶片、双叶片、三叶片或多叶片。其他形式的垂直轴风轮有美格劳斯效应风轮，它由自旋的圆柱体组成，当它在气流中工作时，产生的移动力是由于美格劳斯效应引起的，其大小与风速成正比。如图 1-13 所示。

三、特殊型风力机

特殊型风电机多属于组合型，种类多，有水平轴类型、垂直轴类型等，如图 1-14 所示。

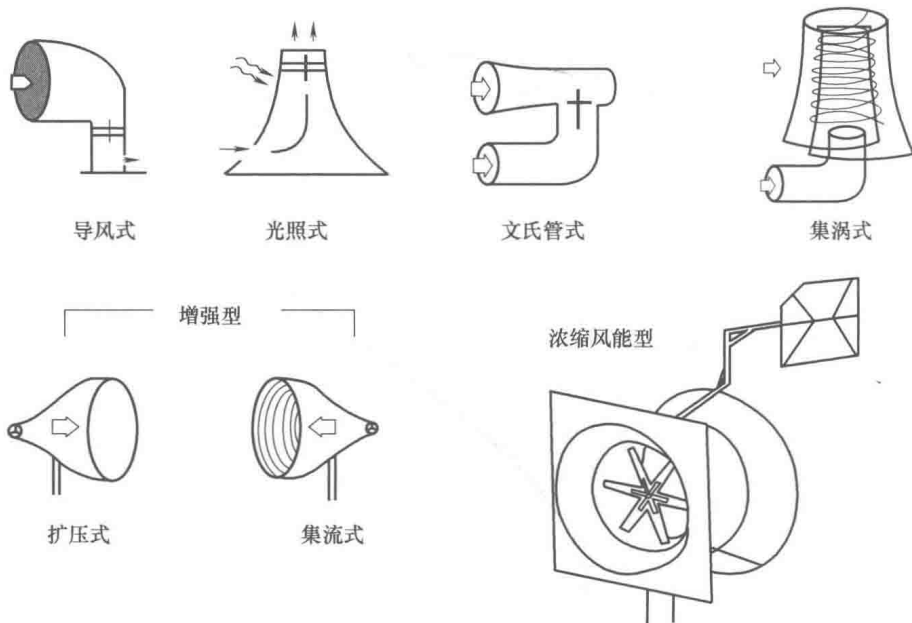


图 1-14 特殊型风力机

水平轴风力机有的具有反转叶片的叶轮；有的在一个塔架上安装多个叶轮，以便在输出功率一定的条件下，减少塔架的成本。30kW 双叶轮风力机 2001 年 2 月安装运行，后一叶轮直径大于前一叶轮，前一叶轮内侧风速大幅度下降，外侧风速增加了 10% 以上，利用外侧风速增加使整机空气动力效率增加。

水平轴风电机有的利用锥形罩，使气流通过水平叶轮时，集中或扩散，因此使之加速。收缩、扩散组合中间为中央圆筒，中央圆筒的增速效果比单独只有扩散管增速高。该组合式改变外部形状时也会增加中央流路的流速。浓缩风能型风电机是在叶轮前方设收缩管，在叶轮后方设扩散管，在叶轮周围设置包括增压弧板在内的浓缩风能装置。当自然风通过浓缩风能装置流经叶轮时，是被加速、整流、流速均匀化后的高质量的气流，因此，此风力机叶轮直径小、切入风速低、噪声低、安全性高、发电量大。

垂直轴叶轮有的使用管道或旋涡发生器塔,通过套管或扩压器使水平气流变成垂直方向,以增加速度。有些还利用太阳能或燃烧某种燃料来增加气流流速。

第三节 风力发电技术的发展现状

风电机组的发展主要呈现出大型化、变桨距、变速运行、无齿轮箱等特点。目前全球风电制造技术发展主要有以下特点。

(1) 水平轴风电机组技术成为主流 水平轴风轮具有风能转换效率高、转轴较短、在大型风电机组上成本较低等优点,是风电发展的主流机型,并占到95%以上的市场份额。垂直轴风电机组因转轴过长,风轮转换效率低,启动、停机和变桨困难等问题,市场份额很小,应用数量有限。

(2) 风电机组容量大型化 风电机组风轮直径和输出功率逐年趋于大型化。近几年风轮直径80~130m,输出功率达到8MW,陆地上以2~3MW机组为主导机组,近海风电机组以3~5MW机组为主导机组。

(3) 叶片设计理论和技术不断发展 风力机叶片设计理论计算应用来自空气动力学知识和经验,逐步发展为贝茨极限、简化风车法、Glauert理论、动量叶素理论、Schmits理论、叶栅理论。叶片翼型,从当初飞机使用翼型开始,发展为最近使用的专用风力机翼型,在低雷诺数领域内得到更高的升阻比等,与飞机使用翼型比较,其厚度增加,有利于结构设计。

为了增加叶片的刚度,在叶片长度大于50m时,广泛使用强化碳纤维材料、热塑性复合材料叶片。目前使用的风电叶片都是由热固性复合材料制造,很难自然降解。热塑性复合材料具有可回收利用、质量轻、抗冲击性能好、生产周期短等一系列优异性能。但是,使用热塑性复合材料制造叶片的工艺成本较高,成为限制热塑性复合材料用于风力发电叶片的关键问题。

分段式叶片的发展趋势:由于玻璃纤维使用的环氧树脂或多元脂产量大,价格便宜,传统的兆瓦级风电机组叶片普遍都是采用玻璃钢强化塑料(GFRP)制作。玻璃钢强化塑料由于刚度和强度的限制,使大型风电机组叶片质量太重,导致制造、运输和安装的困难。为了方便兆瓦级叶片的道路运输,某些公司已经开始尝试分段制作叶片。

(4) 变速恒频技术 恒速恒频技术逐渐发展为变速恒频。变速运行的风电机组具有发电量大、对风速变化的适应性好、生产成本低、效率高等优点。变速恒频机组中应用较多是双馈异步发电机。随着电力电子技术的发展,大型变流器在双馈发电机组及直驱式永磁发电机组中广泛应用,结合变桨距技术,在额定风速下具有较高的效率,在额定风速上发电机输出功率更加平稳。

(5) 直驱技术 传统的风电机组叶轮和发电机之间有增速齿轮箱,随着风电机组容量的增加,其质量增大、故障率增多、噪声增加、维修成本增加。为此研发了多级转速发电机与叶轮直接连接进行驱动的方式,减少了维修成本、降低了噪声。

(6) 智能化控制技术 风电机组运行过程中,一旦出现叶片所承受外界载荷(温度、