



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

风力发电技术

郑 宁 汤晓华 黄华圣 主 编
洪 霞 曹连芃 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

风力发电技术

主 编 汤晓华 黄华圣
副主编 郑 宁 洪 霞 曹连芃
编 写 蒋正炎
主 审 康书亭



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

本书分为基础篇和应用篇两部分,内容反映风力发电的技术趋势,对接风力发电运行检修员职业岗位能力需求,围绕风力发电的基本知识、异步双馈风力发电机及永磁同步风力发电机典型机组的工作原理等内容展开,强调引入风力发电场最新技术的应用,体现了高等职业教育课程改革的经验。不仅有应知应会的知识点,也有递进的拓展学习性工作任务,便于读者学习使用。

本书案例选取既有天煌科技实业有限公司典型风电实训装备,又有丰富的三维虚拟教学资源,也有 VESTAS、金风、湘电等风电设备厂家的真实设备。本书可作为高职高专院校新能源发电工程类专业及其他相关专业的教学用书,也可作为风电企业技术培训参考教材和企业专业技术人员的参考工具书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术/汤晓华,黄华圣主编. —北京:中国电力出版社,2014.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-6030-3

I. ①风… II. ①汤…②黄… III. ①风力发电-高等职业教育-教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 170502 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月第 版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.25 印张 269 千字

定价 24.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

21 世纪, 中国和世界经济的发展都翻开了新的一页, 而经济的增长依赖于能源的配套供应。风能是太阳能的一种转换形式, 是一种重要的自然能源。据有关资料推算, 全球的风能资源比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。目前, 风力发电量占全球发电总量的比例不到 1%, 预计到 2020 年, 风力发电将提供世界电力需求的 10%。国家对风电产业扶持态度明确, 国内风电行业风生水起, 但相关领域人才相对匮乏。风电人才包括风资源评估人员、研发人员、工程师、制造企业工人、运行维护人员等。据有关统计, “到 2020 年, 中国风电人才缺口将在 40 万人左右, 其中高端人才占比高达 40%, 特别是一些技术性更强的技术人才极度缺乏。”

当今风电场缺乏专业的运行维护人员。但风电有其特殊性, 近年来吊装和调试过程中出现了人员伤亡等重大事故, 主要是因为违规操作, 而违规操作的主要原因是了解风机原理。吊装涉及自然风, 要注意什么风力下可以吊装, 安装调试也存在安全问题, 例如调试叶片应该顺桨刹车, 如果调试的时候没有顺桨刹车, 突然来了阵风, 再加上没有并网复合, 就会出现飞车事故。我国风电行业未来还会有长足发展, 如此多的风机, 需要大量的风电技术运行维护人员。

2006 年后, 国内陆续有近百所院校开办了新能源发电工程类专业。风电场的技术在不断发展, 运行与管理模式也在发展, 目前高职院校的人才培养方案需要不断完善, 教学标准和完整的课程教材亟待建设。

本教材涉及风力发电技术方面的内容, 是新能源发电工程类专业的核心课程, 依据风力发电运行检修员职业标准所要求的核心知识与技能, 融入风力发电场的企业技术标准和先进技术内容, 与风力发电运行检修员职业标准所要求的应知、应会相对应, 与学生毕业后从事的风力发电场运行与维护、风电设备制造企业安装、调试、检修等岗位对接。

随着高职教育教学改革的深入, 基于工作过程的课程由校企合作共同开发教材成为主流。教材的编写力求深入浅出、图文并茂。为满足项目教学的需要, 在应用篇(第六章、第七章)后配有拓展工作任务, 培养学生自主学习和实践的能力。同时配套了图纸、图片、虚拟动画、视频、试题等丰富的助学资源和电子课件、参考教案、工程案例库、习题库等助教资源。

教材力求在讲清基本概念、基本理论的基础上, 强调工程实际应用, 教材注重内容的实用性、针对性、时代性、先进性, 将龙头企业最新的技术成果、典型风电场实际工程案例纳入教材。笔者尝试从工程的角度出发, 按照专业对应的职业特征, 培养学生的工程素养以及应用技术分析问题、解决问题的能力。

本教材由天津中德职业技术学院汤晓华和浙江天煌科技实业有限公司黄华圣共同策划并统稿, 汤晓华编写了第一~三章的内容; 汤晓华、深圳能源集团教授级高工曹连芃共同编写第四章的内容, 武汉电力职业技术学院洪霞编写了第五章及附录的内容, 天津中德职业技术学院郑宁、黄华圣共同编写了第六章的内容; 汤晓华、黄华圣、郑宁、常州轻工职业技术学

院蒋正炎共同编写了第七章的内容。

教材编写中参阅了大量文献资料，得到了风电行业许多专家的支持。中广核风电有限公司康书亭先生对书稿进行了认真的审阅；曹连芃教授退休后致力于新能源基础教育与科普工作，为本教材绘制了许多三维图片，令人敬佩；全国电力行指委对本书的编写给予了支持，在此一并感谢。限于编者水平，加之时间仓促，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2014年6月

目 录

前言	1
第一篇 基础篇	
第一章 风力发电的认识	1
第一节 风力发电的历史	2
第二节 何谓风力发电	4
第三节 风力发电的发展	6
思考与拓展	13
第二章 认识风及风能资源	15
第一节 什么是风	16
第二节 风是怎样形成的	16
第三节 风的特性	19
第四节 风力的大小	19
第五节 风能的特点	21
第六节 风能的计算	22
第七节 风能的测量	23
第八节 我国的风能资源	24
思考与拓展	26
第三章 风力机工作的基本原理	29
第一节 空气动力学的基本知识	30
第二节 风力机的种类	33
第三节 风力机是如何转起来的	41
第四节 风力机的功率	48
第五节 风力机的功率调节	49
思考与拓展	54
第四章 风力发电机组的组成	55
第一节 水平轴风机的结构组成	56
第二节 双馈式风力机组电气控制系统组成	70
第三节 永磁直驱式风力发电机	75
第四节 垂直轴风机风力发电机的结构组成	82
思考与拓展	85
第五章 风力发电场	87
第一节 风力发电系统的类型	88
第二节 风力发电场的组成	91

第三节	风电场选址和风电机组的排列	93
第四节	风力发电机组设备的选型	102
	思考与拓展	109

第二篇 应用篇

第六章	异步双馈风力发电机的原理及运行	111
第一节	概述	112
第二节	异步电机的基本结构与原理	113
第三节	异步发电机在风力发电机中的应用	120
第四节	双馈电机在风力发电机中的应用	121
第五节	项目拓展训练	128
	思考与拓展	142
第七章	直驱永磁同步式风力发电机原理及运行	143
第一节	永磁电机的发展历史	144
第二节	同步电机的结构与原理	145
第三节	永磁电机的磁路结构	148
第四节	永磁发电机的磁场与磁通方向	149
第五节	永磁同步发电机的控制特性	151
第六节	永磁同步发电机功率控制器拓扑结构	154
第七节	永磁直驱风电系统的控制策略	155
第八节	项目拓展训练	159
	思考与拓展	167
附录	风机常用英汉词汇对照表	168
	参考文献	171

第一篇 基础篇

风力发电的认识

第一章



有一样东西，你肯定不陌生，那就是儿童们逢年过节玩耍的“风车”。其实，风力发电机就是由它逐渐演变而来的。

玩具风车产生的年代较早，在辽阳三道壕出土的东汉晚期汉墓壁画中就已出现，由此可以推断，这种风车至少已有 1700 多年的历史了。有关风车的记载，还可见于明代刘侗所著《帝京景物略》一书，在该书中是这样介绍风车的：“剖秫秸二寸，错互贴方纸其两端。纸各红绿，中孔以细竹横安秫竿上，迎风张而急走，则旋转如轮，红绿浑浑如晕，曰‘风车’。”

不难想象，如果根据同样的原理，只要采用强固的材料来替换玩具风车所用的秫秸，并从尺寸上加以适当放大，便成为一台生产上可以用作动力的水平轴风力机，如果再配以发电机，并组成一个整体的话，那就成了一台风力发电机。

第一节 风力发电的历史

风能的利用，已有数千年的历史，在蒸汽机发明以前，风能曾经作为重要的动力，用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、磨面和锯木等。最早的利用方式是“风帆行舟”。埃及被认为可能是最先利用风能的国家，约在几千年前，他们的风帆船就在尼罗河上航行。

我国是最早使用帆船和风车的国家之一，至少在 3000 年前的商代就出现了帆船。在距今 1800 年以前，东汉刘熙所著的《释名》一书上，对帆字做了“随风张幔曰帆”的解释；唐代有“乘风破浪会有时，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中国的明代，14 世纪初，中国航海家郑和七下西洋，庞大的风帆船队功不可没。明代以后，风车得到了广泛的使用，宋应星的《天工开物》一书中记载有：“扬郡以风帆数扇，俟风转车，风息则止”，这是对风车的一个比较完整的描述。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”，描述了当时人们已经懂得利用风帆驱动水车灌田的技术。中国沿海沿江地区的风帆船和用风力提水灌溉或制盐的做法，一直延续到 20 世纪 50 年代，仅在江苏沿海利用风力提水的设备曾达 20 万台。



图 1-1 古代波斯的风车

1. 第一个风车 (The first windmill)

人类运用风能的历史悠久，早在公元 7 世纪，最早的风车建在波斯（今伊朗），主要用来碾磨粮食。

图 1-1 揭示了古代波斯风车的工作原理。

早在 1300 多年前，中国就已经出现一种古老的垂直轴风车。如图 1-2 所示，风的力量推动织物转轮，促使垂直轴带动下方的磨石旋转。风轮的位置是固定的，转动过程中，始终有一半的风轮在背风侧，当然这只适合固定风向。

2. 塔式风车 (tower windmill)

图 1-3 是过去 1000 年左右在地中海地区盛行的塔式风车。在一些国家，这类风车仍然

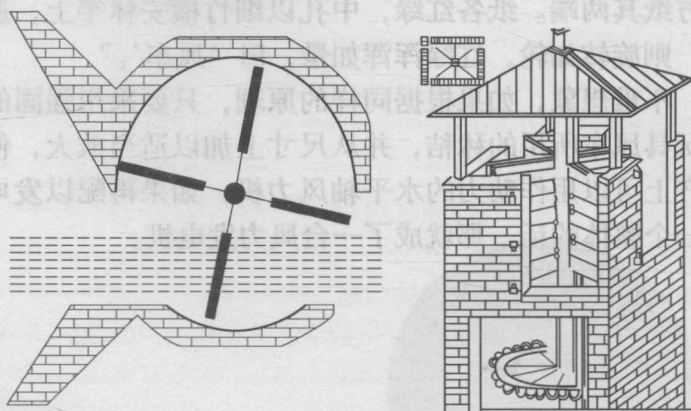


图 1-2 中国的垂直轴风车

沿用至今。配带帆、风轮旋转，通过齿轮传动机构，以移动磨石。

12 世纪，风车从中东传入欧洲。16 世纪，荷兰人利用风车排水、与海争地，在低洼的海滩地上建国立业，逐渐发展成为一个经济发达的国家。今天，荷兰人将风车视为国宝，北欧国家保留的大量荷兰式的大风车，已成为人类文明发展的见证。

从中世纪到 18 世纪，德国式风车是最常见的类型，在欧洲中部和东部常可看到如图 1-4 所示的风车，这种风车设计能够跟随风向变化，整个磨坊可以通过尾翼旋转，磨坊安装在基座上。



图 1-3 地中海的塔式风车

3. 荷兰的风车

17 世纪，风车发展到了较先进的阶段，荷兰人发明了水平轴的风车。荷兰风车的发展考虑了风向的变化，如图 1-5 所示，屋顶冠上安装风车旋转的叶片，沿着塔的边缘安装轱，风车的尾翼被用来按照风向进行偏转。这样的风车磨坊是固定的，这使得它更稳定，功率更大。

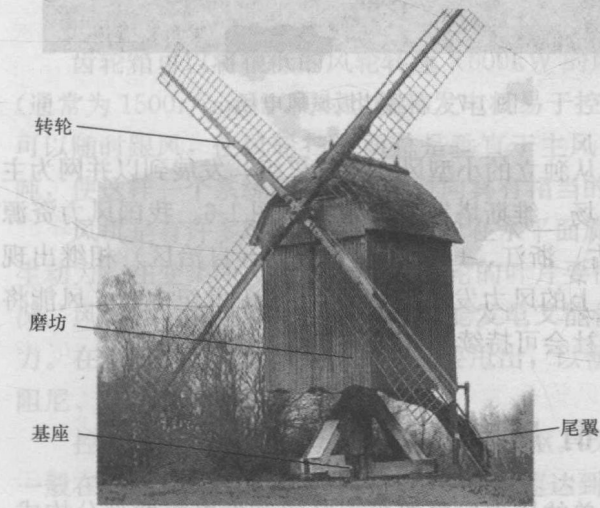


图 1-4 德国式风车

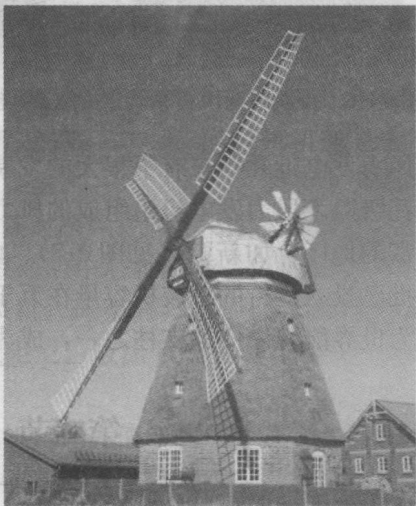


图 1-5 荷兰风车

欧洲到中世纪才广泛利用风能，18 世纪荷兰曾利用近万座风车将海堤内的水排干，造出的良田相当于国土面积的三分之一，成了著名的风车之国。这种风车在欧洲大陆和英国的乡村是很普遍的，成为机械能的主要来源。

4. 现代的风力发电机

在蒸汽机出现之前，风力机械是动力机械的一大支柱，其后随着煤、石油、天然气的大规模开采和廉价电力的获得，各种曾经被广泛使用的风力机械，由于成本高、效率低、使用不方便等原因，无法与蒸汽机、内燃机和电动机等竞争，逐渐被淘汰。

风能动力的应用已有数千年的悠久历史，但风力发电的研发始于 19 世纪末期，丹麦人首先研制了风力发电机。1891 年，丹麦建成了世界第一座风力发电站。风力发电在解

决发展中国家无电农牧区居民的用电方面起到了重要的作用，特别是 20 世纪 70 年代以后，利用风力发电进入了一个蓬勃发展的阶段，在世界不同地区建立了许多大中型的风电场。

工业革命以来，世界能源消费剧增，煤炭、石油、天然气等化石能源资源消耗迅速，生态环境不断恶化，特别是温室气体排放导致日益严峻的全球气候变化，人类社会的可持续发展受到严重威胁。风能是取之不尽用之不竭的可再生能源，开发利用风力资源，发展风力发电，有利于保护环境，改善能源结构。



图 1-6 维斯塔斯风力系统



图 1-7 新疆达坂城风电场

风力发电近几年来有了很大的发展，已从独立的小型风力发电机组，发展到以并网为主的兆瓦级以上风力发电机组组成的风力发电场。维斯塔斯风力系统见图 1-6。我国风力资源较丰富的地区，如新疆（见图 1-7）、内蒙古、浙江、广东、辽宁等省（自治区）相继出现了一批已投入运行的总装机容量在万千瓦以上的风力发电场。预计到 21 世纪中叶，风能将会成为世界能源供应的支柱之一，成为人类社会可持续发展的主要动力来源。

第二节 何谓风力发电

风力发电的原理说起来非常简单，最简单的风力发电机可由叶轮和发电机两部分构成，如图 1-8 所示。空气流动的动能作用在叶轮上，将动能转换成机械能，从而推动叶轮旋转。如果将叶轮的转轴与发电机的转轴相连，就会带动发电机发出电来。孩童玩的纸质风车就是风力机的雏形，在它的轴上装台极微型的发电机就可发电。

风力发电的原理这么简单，为什么到 20 世纪的中后期才获得应用呢？

第一，常规发电还能满足基本需要，社会生产力水平不够高，还无法顾及降低环境污染和解决偏远地区的供电问题；

第二，能够并网的风力发电机的设计与制造，只有在现代技术水平下才可能实现，20 世纪初期是造不出现代风力发电机的。

那么，现代风力发电机是什么样呢？下面我们就介绍一下现代风机的结构与技术特点。

图 1-8 所示的风力发电机发出的电时有时无，电压和频率都不稳定，是没有实际应用价

值的。当你急需用电时,可能无风;当你不想用电时负载很轻,一阵狂风吹来,风轮越转越快,系统就会被吹垮。

为了解决这些问题,现代风机增加了齿轮箱、偏航系统、液压系统、刹车系统和控制系统等,可根据需要并网。现代风机的示意如图 1-9 所示。

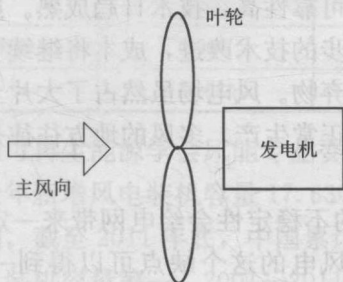


图 1-8 风力发电的原理示意

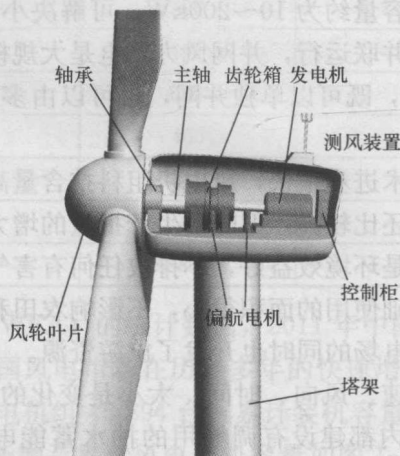


图 1-9 现代风力发电机系统示意

齿轮箱可以将很低的风轮转速(600kW 的风机通常为 27r/min)变成很高的发电机转速(通常为 1500r/min),同时也使得发电机易于控制,实现稳定的频率和电压输出。偏航系统可以随时跟风,使风轮扫掠面总是垂直于主风向。要知道,600kW 的风机机舱总重 20 多吨,使这样一个系统随时对准主风向具有相当的技术难度。

风机是有许多转动部件的。机舱在水平面旋转,随时跟风;风轮沿水平轴旋转,以便产生动力;在变桨距风机中,组成风轮的叶片要围绕根部的中心轴旋转,以便适应不同的风况。风天时,减小叶片迎风面,既能发电又能保护风机;风小时,增加迎风面以便提高出力。在停机时,有的风机叶片尖部要甩出,以便形成阻尼。液压系统就是在调节叶片桨距、阻尼、停机、刹车等状态下使用。

控制系统是现代风力发电机的神经中枢。现代风机是无人值守的。就 600kW 风机而言,一般在 4m/s 左右的风速自动启动,在风速达到 14m/s 左右发出额定功率。然后,随着风速的增加,一直控制在额定功率附近发电,直到风速达到 25m/s 时自动停机。现代风机的存活风速为 $60\sim 70\text{m/s}$,也就是说在这么大的风速下风机也不会被吹坏。要知道,通常所说的 12 级飓风,其风速范围也仅为 $32.7\sim 36.9\text{m/s}$ 。可以说,风机通常能抗 17 级强台风。风机的控制系统,要在这样恶劣的条件下,根据风速、风向对系统加以控制,在稳定的电压和频率下运行,自动地并网和脱网;并监视齿轮箱、发电机的运行温度,液压系统的油压,随时显示各种运行参数,对出现的任何异常进行报警,必要时自动停机。

风轮是风电机组最主要的部件,由桨叶和轮毂组成。桨叶具有良好的空气动力外形,在气流作用下能产生空气动力使风轮旋转,将风能转换成机械能,再通过齿轮箱增速驱动发电机,将机械能转变成电能。在理论上,最好的风轮只能将约 60% 的风能转换为机械能。现代风电机组风轮的效率可达到 40%。在风电机组的输出功率达到额定功率之前,其功率与风速的立方成正比,即风速增加 1 倍,输出功率达到 8 倍,由此可见风力发电的效率与当地

的风速关系极大。

风力发电的运行方式主要有两类。一类是独立运行供电系统,即在电网未通达的偏远地区,用小型风电机组为蓄电池充电,再通过逆变器转换成交流电向终端电器供电,单机容量一般为 $100\text{W}\sim 10\text{kW}$;或者采用中型风电机组与柴油发电机或太阳能电池组成混合供电系统,系统的容量约为 $10\sim 200\text{kW}$,可解决小的社区用电问题。另一类是作为常规电网的电源,与电网并联运行,并网风力发电是大规模利用风能最经济的方式。机组单机容量范围在 200kW 以上,既可以单独并网,也可以由多台,甚至成百上千台组成风力发电场,简称风电场。

风电技术进步很快,风电机组科技含量高,机组可靠性高,技术日趋成熟。虽然目前风电机组成本还比较高,但随着生产批量的增大和进一步的技术改进,成本将继续下降。风电的突出优点是环境效益好,不排放任何有害气体和废弃物。风电场虽然占了大片土地,但是风电机组基础使用的面积很小,不影响农田和牧场的正常生产。多风的地方往往是荒滩或山地,建设风电场的同时也开发了旅游资源。

由于风速、风向、时间、大小是变化的,风电的不稳定性会给电网带来一定影响,目前许多电网内都建设有调峰用的抽水蓄能电站,使风电的这个缺点可以得到一定程度的克服。

第三节 风力发电的发展

地球上所接收到的太阳辐射能大约有 2% 转换成风能,全球的风能约为 274 万 GW ,其中可利用的风能约为 2 万 GW ,是地球上可开发利用的水能总量的 10 倍。

风电技术日趋成熟,产品质量可靠,可用率已达 95% 以上,已是一种安全可靠的能源,风力发电的经济性日益提高,发电成本已接近煤电,低于油电与核电。风力发电场建设工期短,是煤电、核电无可比拟的。对沿海岛屿,交通不便的边远山区,地广人稀的草原牧场,以及远离电网和近期内电网还难以覆盖的农村、边疆来说,可作为解决生产和生活能源的一种有效途径,风能作为一种高效清洁的新能源有着巨大的发展潜力。

从可持续发展看,人类当前主要依靠的化石能源终将耗竭,未来的主要能源只能依赖于可再生能源和受控核聚变能,对此,科技界已形成比较一致的共识。风能作为一种取之不尽、用之不竭的清洁可替代能源,风力发电成为目前新能源发电技术中最成熟、最具有大规模开发条件和商业化发展前景的发电方式。

1. 我国的风力发电现状

根据最新风能资源评价,全国陆地可利用风能资源 6 亿 ~ 10 亿 kW ,加上近岸海域可利用风能资源,中国可开发风电装机容量共计约 1 亿 ~ 2 亿 kW 。主要分布在两大风带:一是“三北地区”(东北、华北北部和西北地区);二是东部沿海陆地、岛屿及近岸海域。重点在东部沿海和“三北”地区,建设 30 个左右 10 万 kW 级的大型风电项目,形成江苏、河北、内蒙古 3 个 100 万 kW 级的风电基地。建成 $1\sim 2$ 个 10 万 kW 级海上风电试点项目。到 2013 年,全国风电总装机容量约 8000 万 kW ,建成若干个总装机容量 200 万 kW 以上的风电大省。截至 2011 年底,全国风电基地建设情况如表 1-1 所示。

表 1-1 各基地建设情况汇总表

基地名称	规划 (MW)	标准 (MW)	并网 (MW)	在建 (MW)
酒泉一期	3800	3800	3600	200
通辽开鲁	1500	1500	700.5	799.5
乌拉特中旗	2100	300	300	0
包头达茂	1600	200	200	0
张北一期	1350	1350	1350	0
张北二期	1500	500	400	100
承德	1000	450	336	114
哈密东南部	2000	0	0	0
合计	14 850	8100	6886.5	1213.5

据中国可再生能源学会风能专业委员会（CWEA）的统计数据，2011 年中国（不含港、澳、台）全年新增风电装机容量 17.63GW，中国风电市场在历经多年的快速增长后正步入稳健发展期。截至 2011 年底，中国累计安装风电机组 45 894 台，累计装机容量 62.36GW，为全球风电装机容量第一。2001—2011 年中国新增及累计风电装机容量如图 1-10 所示。至 2011 年底，中国有 30 个省、市、自治区（不含港、澳、台）有了自己的风电场，风电累计装机超过 1GW 的省份超过 10 个，其中超过 2GW 的省份 9 个。领跑我国风电发展的地区仍是内蒙古自治区，其累计装机 17.59GW，紧随其后的是河北、甘肃和辽宁，累计装机容量都超过 5GW。

中国海岸线长约 1.8 万 km，岛屿 6000 多个。近海风能资源主要集中在东南沿海及其附近岛屿，有效风能密度在 300W/m² 以上。5~25m 水深、50m 高度海上风电开发潜力约 2 亿 kW；5~50m 水深、70m 高度海上风电开发潜力约 5 亿 kW。除了丰富的海上风能资源外，中国东部沿海地区经济发达，能源需求大；电网结构强，风电接网条件好，因此，中国发展海上风电具有得天独厚的优势。

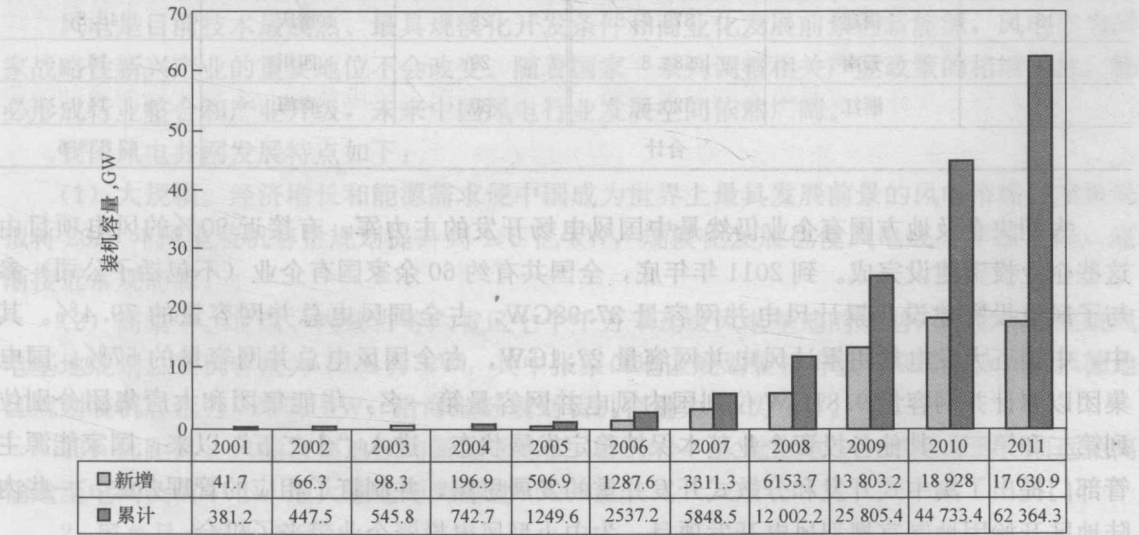


图 1-10 中国新增及累计风电装机容量（2001—2011 年）

中国海上风电建设正在有序推进，上海、江苏、山东、河北、浙江、广东海上风电规划已经完成；辽宁、福建、广西、海南等省的海上风电规划正在完善和制定。完成的规划中，初步确定了 43GW 的海上风能资源开发潜力，目前已有 38 个项目共 16.5GW 的风电规划在开展各项前期工作。2011 年，江苏如东 150MW 海上风电场示范工程完成 100MW 风电机组吊装；上海安装了单机容量 3.6MW 和 5MW 的试验机组各一台；到 2011 年年底，全国海上风电共完成吊装容量 242.5MW。

2011 年风电新增并网接近 17GW，基本与全年吊装容量相当，并网难的问题得到了初步的缓解。全国风电并网容量累计达到了 47.84GW。根据中国水电水利规划设计总院的数据，2011 年中国各省（自治区）风电并网数据见表 1-2。

表 1-2 2011 年中国累计风电并网装机容量

序号	省（市、自治区）	累计并网容量 (MW)	序号	省（市、自治区）	累计并网容量 (MW)
1	内蒙古	14 384.4	16	上海	269.4
2	甘肃	5551.6	17	海南	254.7
3	河北	4991.3	18	安徽	247.5
4	辽宁	4039.5	19	陕西	245.5
5	吉林	2936.3	20	河南	154
6	山东	2718.6	21	北京	150
7	黑龙江	2625.5	22	湖南	133.8
8	江苏	1704.3	23	江西	133.5
9	新疆	1659.8	24	天津	125
10	宁夏	1361.5	25	湖北	115.4
11	山西	1035	26	贵州	60.9
12	广东	933	27	广西	49.5
13	福建	873.7	28	重庆	46.8
14	云南	684.8	29	四川	16
15	浙江	320.5	30	青海	14
合计					47 835.6

大型央企及地方国有企业仍然是中国风电场开发的主力军，有接近 90% 的风电项目由这些企业投资建设完成。到 2011 年年底，全国共有约 60 余家国有企业（不包括子公司）参与了风电投资建设，累计风电并网容量 37.98GW，占全国风电总并网容量的 79.4%。其中，中国五大发电集团累计风电并网容量 27.1GW，占全国风电总并网容量的 57%。国电集团以累计并网容量 9.81GW 位列国内风电并网容量第一名，华能集团和大唐集团分别位列第二和第三，其他各投资企业基本保持稳定发展状态。进入“十二五”以来，国家能源主管部门提出了集中式开发和分散式开发并重的发展思路，并制订了相应的管理办法，一些内陆地区开始因地制宜规划风电开发项目，为中小型风电投资企业带来了机会。

2011 年中国风电新增装机市场排名前五的制造商分别为金风科技、华锐风电、国电联

合动力、明阳风电和东方电气，其中国电联合动力技术有限公司 2011 年装机达到 2847MW，比前一年增长 73%，成为 2011 年最受瞩目的企业。中国累计风电装机市场排名前五的企业分别为华锐风电、金风科技、东方电气、联合动力和维斯塔斯，金风科技和华锐风电在装机容量上都比上年有所下降，但仍然保持了中国市场第一和第二的位置。2011 年中国新安装的风力发电机组中，平均功率 1.545MW，与 2010 年相比继续保持增长，制造业面向海上风电积极研制多兆瓦级风电机组。据不完全统计，到 2011 年，中国大约有 20 家整机企业宣布了研制多兆瓦级大功率风电机组的计划，功率范围多集中在 3~6MW。

到 2012 年底，全国（不含港、澳、台）共建设 1445 个风电场，安装风电机组 52827 台。单机容量 1.5MW 和 2MW 的风电机组是目前国内风电市场主流机型，占吊装容量的 81%。

截至 2013 年 6 月底统计，全国风电累计并网容量 6749 万 kW，在建容量 4823 万 kW，并网容量占核准容量的 58%。其中，内蒙古风电并网容量突破 1700 万 kW，领跑全国；河北、甘肃、辽宁、山东、吉林、黑龙江、新疆、宁夏、江苏、山西、云南、广东、福建等 14 个省（区、市）并网容量也均超过 100 万 kW。

根据国家能源局发布的《可再生能源“十二五”规划》，十二五期间，中国将新增风电装机容量 70GW，到 2015 年，风电装机容量将达到 100GW。

分布式风电的比重会进一步提高，但仍然以规模化开发和陆上风电开发为主，分布式风电的比例最高可达到 30%。随着电网公司特高压输电线路、智能电网等基础建设的提升，电网大范围消纳风电能力和跨区域风电输送规模将增加，风电并网率将进一步改善。风电制造业进入了高成本的微利时代，这意味着行业内竞争加剧，市场更加成熟，风电制造企业将面临更大的市场考验。但风电产业成熟度和成本的降低提高了风电相对于传统能源的竞争力，风电已经成为实力较强的新生电源技术，并将逐步增大在中国能源结构中的比例。根据《可再生能源“十二五”规划》，预计到 2015 年，将建成海上风电 5GW，形成海上风电产业链。2015 年后，中国海上风电将进入规模化发展阶段，达到国际先进技术水平。2020 年中国海上风电将达到 30GW。

风电是目前技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的新能源，风电作为国家战略性新兴产业的重要地位不会改变。随着国家一系列调整相关产业政策的相继出台，势必形成行业整合和产业升级，未来中国风电行业发展空间依然广阔。

我国风电并网发展特点如下：

(1) 大规模。经济增长和能源需求使中国成为世界上最具发展前景的风电市场，能源局拟将 2020 年风电装机容量规划提升到 1.5 亿 kW，规模化发展也使风电成本不断下降，逐渐接近常规能源。

(2) 高集中。甘肃、内蒙古等六省区七个千万千瓦级风电基地的规划；河北省千瓦级风电基地规划总装机容量为 1078 万 kW，其中张家口地区规划装机容量为 713 万 kW，承德地区规划装机容量为 320 万 kW；沿海地区规划装机容量为 45 万 kW。

(3) 远距离。风能富集地区均属偏远地区，负荷小、火电水电少、电网薄弱，须远距离输送至电网负荷中心，最大输送距离超过 1000km。

2. 国外风力发电概况

随着现代科学技术的飞速发展，特别是空气动力学、尖端航天材料和大功率电力电子技

术应用于新型风电系统的开发研制,风力发电技术在近二十年里有了飞速发展。欧美国家在风能的开发利用方面已取得了巨大成功,以丹麦、德国、西班牙、美国为主形成了一个规模巨大的产业链条——从风机的制造到机组的销售,从基础科学研究到工程实际应用,风力发电已成为当今电力系统最为活跃的研究领域之一。

据全球风能协会公布的数据,欧洲各国风力发电发展最快,其中利用风能最成功的国家是丹麦、西班牙和德国。风力发电能力占本国总发电量比例分别为 20%、6.5%、7%。欧洲的电力供应一直在增长,在新增的装机容量中,大约有二分之一的电力将由风力发电提供。美国和加拿大是北美利用风能最好的国家。为促进风力发电的发展,世界各国政府特别是欧美国家出台了许多优惠政策,主要包括:投资补贴、低利率贷款、规定新能源必须在电源中占有一定比例、从电费中征收附加基金用于发展风电、减排 CO₂ 奖励等。欧洲的德国、丹麦、荷兰等采用政府财政扶持、直接补贴的措施发展本国的风力发电事业;美国通过金融支持,由联邦和州政府提供信贷资助来扶持风力发电事业;印度通过鼓励外来投资和加强对外合作交流发展风力发电;日本采取的措施则是优先采购风电。多种多样的优惠政策促进了各国风力发电的快速发展。大力发展风电已成为一些国家的国策,最积极的是欧洲,其目标是 2020 年达 1.8 亿 kW。

据全球风能理事会 (GWEC) 统计数据显示,2011 年全球新增风电装机容量达 40 564MW;这一新增容量使全球累计风电装机容量达到 237 669MW。据全球风能理事会的统计,2011 年全球风电新增装机排名前十位的国家分别是中国 (17 631MW)、美国 (6810MW)、印度 (3019MW)、德国 (2086MW)、英国 (1293MW)、加拿大 (1267MW)、西班牙 (1050MW)、意大利 (950MW)、法国 (830MW) 和瑞典 (763MW) (见图 1-11)。年新增装机容量超过 1GW 的国家达到 7 个。中国的新增风电装机容量在 2010 年 18GW 的水平上略有下降;美国风电市场从前一年的重创中稳步复苏;印度新增风电装机创纪录地突破了 3GW 大关;而德国位居欧洲装机容量的首位,风电装机容量首度超过 2GW;英国和加拿大新增风电装机也都突破了 1GW 装机大关;加拿大年新增市场更是实现了翻番式的突破性增长,使其成为令全球瞩目的风电装机市场。全球前十位国家的装机容量主导着全球 88% 的风电新增装机市场。

风电机组大型化一直是技术的发展趋势。特别是在海上风电领域,大型化机型更加适应

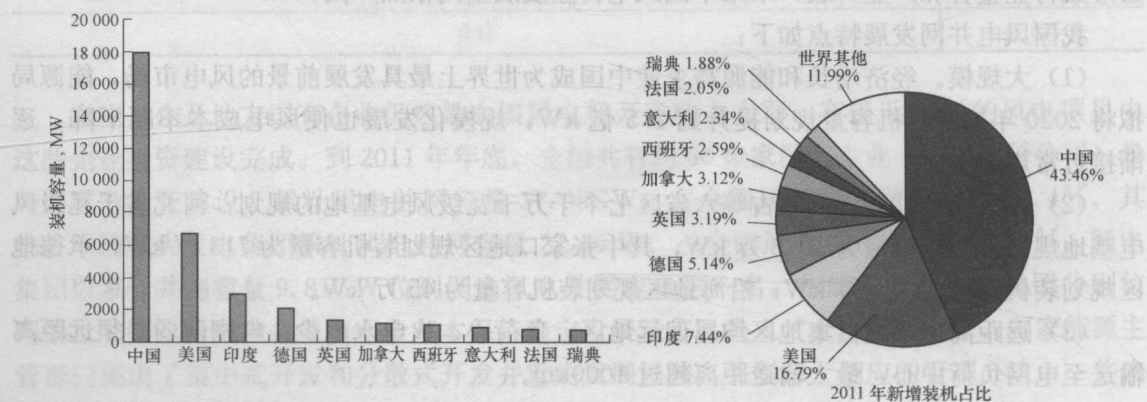


图 1-11 2011 年全球风电新增装机前十位国家