



全国高等院校新能源专业规划教材

全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材

风能转换原理与技术

Principles and Technology for Wind Energy Conversion

主 编 田 德

副主编 汪建文 许 昌 邢作霞 李 岩



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

校新能源专业规划教材

等教育新能源类“十三五”精品规划教材

风能转换原理与技术

Principles and Technology for Wind Energy Conversion

主 编 田 德

副主编 汪建文 许 昌 邢作霞 李 岩



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书主要内容包括绪论、风特性与风资源、风电机组、风电场建设、风电并网技术、海上风力发电等。本书的特点是遵循国际和国家标准，坚持理论与工程实际相结合，体现风能转换原理与技术的系统性和完整性，重点突出风能转换的理论基础。

本书既可作为普通高等院校新能源科学与工程本科生的教材，也可作为新能源专业教师、科研人员和工程技术人员参考书。

图书在版编目（C I P）数据

风能转换原理与技术 / 田德主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2018.6
全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-6541-8

I. ①风… II. ①田… 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128505号

书 名	全国高等院校新能源专业规划教材 全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材 风能转换原理与技术 FENG NENG ZHUAN HUAN YUAN LI YU JI SHU
作 者	主 编 田 德 副主编 汪建文 许 昌 邢作霞 李 岩
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	中国水利水电出版社微机排版中心
刷 印	天津嘉恒印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.75印张 350千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	49.00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

丛书编委会

顾问 褚君浩 (中国科学院上海技术物理研究所)

徐建中 (中国科学院工程热物理研究所)

贺德馨 (中国风能协会)

刘吉臻 (华北电力大学)

杨德仁 (浙江大学)

张百良 (河南农业大学)

主任 杨勇平 (华北电力大学)

副主任 戴松元 (华北电力大学)

陈汉平 (华中科技大学)

黄志高 (福建师范大学)

汪建文 (内蒙古工业大学)

委员 (按姓氏笔画排序)

王 谦 (江苏大学)

王少清 (济南大学)

王景甫 (北京工业大学)

田 德 (华北电力大学)

邢作霞 (沈阳工业大学)

许 昌 (河海大学)

孙后环 (南京工业大学)

李 岩 (东北农业大学)

李 涛 (青海师范大学)

杨 晨 (重庆大学)

杨世关 (华北电力大学)

陈 荐 (长沙理工大学)

林 鹿 (厦门大学)

周建斌 (南京林业大学)

周继承 (中南大学)

钱 斌 (常熟理工学院)

本书编委会

主 编：田 德（华北电力大学）

副 主 编：汪建文（内蒙古工业大学）

许 昌（河海大学）

邢作霞（沈阳工业大学）

李 岩（东北农业大学）

编写人员：（按姓氏笔画排序）

王绍龙（华北理工大学）

邓 英（华北电力大学）

冯 放（东北农业大学）

邢军强（沈阳工程学院）

孙育宏（华能新能源股份有限公司广东分公司）

李 莉（华北电力大学）

李林敏（河海大学）

陈 静（华北电力大学）

孟鹏飞（华能新能源股份有限公司广东分公司）

钟淋涓（河海大学）

温彩凤（内蒙古工业大学）

丛 书 前 言

总算不负大家几年来的辛苦付出，终于到了该为这套教材写篇短序的时候了。

这套全国高等院校新能源专业规划教材、全国普通高等教育新能源类“十三五”精品规划教材建设的缘起，要追溯到 2009 年我国启动的国家战略性新兴产业发展计划，当时国家提出了要大力发展包括新能源在内的七大战略性新兴产业。经过不到十年的发展，我国新能源产业实现了重大跨越，成为全球新能源产业的领跑者。2016 年国务院印发的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，提出要把战略性新兴产业摆在经济社会发展更加突出的位置，强调要大幅提升新能源的应用比例，推动新能源成为支柱产业。

产业的飞速发展导致人才需求量的急剧增加。根据联合国环境规划署 2008 年发布的《绿色工作：在低碳、可持续发展的世界实现体面劳动》，2006 年全球新能源产业提供的工作岗位超过 230 万个，而根据国际可再生能源署发布的报告，2017 年仅我国可再生能源产业提供的就业岗位就达到了 388 万个。

为配合国家战略，2010 年教育部首次在高校设置国家战略性新兴产业相关专业，并批准华北电力大学、华中科技大学和中南大学等 11 所高校开设“新能源科学与工程”专业，截至 2017 年，全国开设该专业的高校已超过 100 所。

上述背景决定了新能源专业的建设无法复制传统的专业建设模式，在专业建设初期，面临着既缺乏参照又缺少支撑的局面。面对这种挑战，2013 年华北电力大学力邀多所开设该专业的高校，召开了一次专业建设研讨会，共商如何推进专业建设。以此次会议为契机，40 余所高校联合成立了“全国新能源科学与工程专业联盟”（简称联盟），联盟成立后发展迅速，目前已有近百所高校加入。

联盟成立后将教材建设列为头等大事，2015 年联盟在华北电力大学召开了首次教材建设研讨会。会议确定了教材建设总的指导思想：全面贯彻党的教育方针和科教兴国战略，广泛吸收新能源科学研究和教学改革的最新成果，认真对标中国工程教育专业认证标准，使人才培养更好地适应国家战略性新兴产业的发展需要。同时，提出了“专业共性课十方向特色课”的新能源专业课程体系建设思路，并由此确定了教材建设两步走的计划：第一步以建设新能源各个专业方向通用的共性课程教材为核心；第二步以建设专业方向特色课程教材为重点。此次会议还确定了第一批拟建设的教材及主编。同时，通过专家投票的方式，选定中国水利水电出版社作为教材建设的合作出版机构。在这次会议的基础上，联盟又于 2016 年在北京工业大学召开了教材建设推进会，讨论和审定了各部教材的编写大纲，确定了编写任务分工，由此教材正式进入编写阶段。

按照上述指导思想和建设思路，首批组织出版 9 部教材：面向大一学生编写了《新能源科学与工程专业导论》，以帮助学生建立对专业的整体认知，并激发他们的专业学习兴

趣；围绕太阳能、风能和生物质能3大新能源产业，以能量转换为核心，分别编写了《太阳能转换原理与技术》《风能转换原理与技术》《生物质能转化原理与技术》；鉴于储能技术在新能源发展过程中的重要作用，编写了《储能原理与技术》；按照工程专业认证标准对本科毕业生提出的“理解并掌握工程管理原理与经济决策方法”以及“能够理解和评价针对复杂工程问题的工程实践对环境、社会可持续发展的影响”两项要求，分别编写了《新能源技术经济学》《能源与环境》；根据实践能力培养需要，编写了《光伏发电实验实训教程》《智能微电网技术与实验系统》。

首批9部教材的出版，只是这套系列教材建设迈出的第一步。在教育信息化和“新工科”建设背景下，教材建设必须突破单纯依赖纸媒教材的局面，所以，联盟将在这套纸媒教材建设的基础上，充分利用互联网，继续实施数字化教学资源建设，并为此搭建了两个数字教学资源平台：新能源教学资源网（<http://www.creeu.org>）和新能源发电内容服务平台（<http://www.yn931.com>）。

在我国高等教育进入新时代的大背景下，联盟将紧跟国家能源战略需求，坚持立德树人的根本使命，继续探索多学科交叉融合支撑教材建设的途径，力争打造出精品教材，为创造有利于新能源卓越人才成长的环境、更好地培养高素质的新能源专业人才奠定更加坚实的基础。有鉴于此，新能源专业教材建设永远在路上！

丛书编委会

2018年1月

本书前言

风能是世界范围内作为一种清洁的替代能源，已经实现商业化应用，对于保证能源安全，减排温室气体，保护生态环境，具有重要促进作用。

在“全国新能源科学与工程专业联盟”的组织下，在中国水利水电出版社的大力支持下，本教材由全国风能行业的知名专家教授共同编写完成。本教材能适应国家战略性新兴产业的发展需要，吸收了风能行业科学研究与工程技术开发的最新成果，坚持理论与工程实际相结合，突出基础性、系统性和完整性。

本教材共6章。第1章为绪论，包括风电发展历程、风电特点、风电系统、风电现状与发展趋势；第2章为风特性与风资源，包括风的形成、大气边界层风特性、风特性的测量、风能资源评估；第3章为风电机组，包括风电机组分类、风电机组结构与工作原理、风能转换原理、风电机组控制和安全保护、垂直轴风电机组；第4章为风电场建设，包括风电场规划与选址、风电场设计与施工、风电场的运行与维护、风电场后评价；第5章为风电并网技术，包括风电场电力系统、风电场数学模型、风电并网对电力系统的影响；第6章为海上风力发电，包括海上风能利用特点、海上风电机组、海上风电场、海上风电场运行与维护等。

本教材有田德任主编，汪建文、许昌、邢作霞、李岩任副主编。第1章由田德、汪建文、温彩凤、陈静编写；第2章由李莉编写；第3章由田德、李岩、王绍龙、冯放、邓英、陈静编写；第4章由许昌、李莉、孟鹏飞、孙育宏编写；第5章由邢作霞、邢军强编写；第6章由许昌、李林敏、钟淋涓编写。全书由田德统稿。

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。

本书为普通高等院校新能源科学与工程专业本科生教材，并可供有关专业教师、科研人员和工程技术人员参考。

由于编者水平所限，书中难免存在疏漏与不足之处，诚请广大同行和读者批评指正。

编者

2018年1月

目 录

丛书前言

本书前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风电发展历程	1
1.2 风电特点	4
1.3 风电系统	9
1.4 风电现状与发展趋势	11
习题	26
参考文献	26
第 2 章 风特性与风资源	27
2.1 风的形成	27
2.2 大气边界层风特性	30
2.3 风特性的测量	38
2.4 风能资源评估	43
习题	48
参考文献	48
第 3 章 风电机组	49
3.1 风电机组分类	49
3.2 风电机组结构与工作原理	50
3.3 风能转换原理	67
3.4 风电机组控制和安全保护	75
3.5 垂直轴风电机组	79
习题	88
参考文献	89
第 4 章 风电场建设	90
4.1 风电场规划与选址	90
4.2 风电场设计与施工	94
4.3 风电场的运行与维护	105
4.4 风电场后评价	119
习题	123

参考文献 124

第 5 章 风电并网技术 125

5.1 风电场电力系统 125

5.2 风电场数学模型 130

5.3 风电并网对电力系统的影响 144

习题 170

参考文献 171

第 6 章 海上风力发电 172

6.1 海上风能利用特点 172

6.2 海上风电机组 184

6.3 海上风电场 196

6.4 海上风电场运行与维护 207

习题 210

参考文献 210

附录 212

第1章 绪论

1.1 风电发展历程

1. 全球风电发展

人类对风能的利用可以追溯到公元前，已有数千年的历史。在蒸汽机发明以前，风能曾作为重要的动力，其最早的利用方式是“风帆行舟”。约在几千年前，古埃及人的风帆船在尼罗河上航行，中国在商代出现了帆船。风车的起源可追溯到 3000 年前，人们利用风车灌溉田地、磨面、舂米，一直持续到了 19 世纪。

将风能用于发电的设想源于 1887 年，提出这种设想的是美国电力工业奠基者之一的查尔斯 F. 布拉什（1849—1929 年）。1887—1888 年冬，查尔斯 F. 布拉什在美国俄亥俄州的克里夫兰安装了一台被认为是第一台用于发电的自动运行的风电机组，其叶轮直径达到 17m，并有 144 个材质为雪松木的叶片，采用 12kW 的直流发电机，输出电压为 70V。虽然这个风电机组是个庞然大物，但由于其转速很低，发电功率仅为 12kW，因此在其运行的 20 年间，仅仅被用来为地窖里的蓄电池充电。

随后，丹麦气象学家保罗·拉·库尔（1846—1908 年）发现叶片数少且快速转动的风电机组的发电效率要远高于低转速的风电机组。1891 年，他成功研制出了第一台四叶片的风电机组，将其发出的电力用于电解生产氢气，供瓦斯灯使用。1897 年，他又发明了两台实验风电机组，安装在丹麦的 Askov Folk 高中。保罗·拉·库尔同样也是现代风电机组空气动力学的鼻祖，他建造了一个属于他自己的风洞来对风电机组进行空气动力学实验。

此后，保罗·拉·库尔的设计理念在一定范围内得到了应用，到 1908 年为止，丹麦已建成数百个小型风力发电站，其额定功率为 5~25kW 不等。而到了 1918 年，丹麦已经约有 120 台单机容量为 20~35kW 的风电机组，均采用保罗·拉·库尔的设计理念，总装机容量达到 3MW，发电量约占当时丹麦总电力消耗量的 3%。

1919 年，德国物理学家艾伯特·贝茨（1885—1968 年）对风轮空气动力学进行了深入研究，提出了贝茨理论，指出在理想情况下风能所能转换成动能的极限比值约为 59.3%，为现代风电机组空气动力学奠定了基础。

1931 年，法国一位名叫乔治斯·达里厄的工程师发明了一种升力型垂直轴风电机组，称为达里厄（Darrieus）风电机组。但一直未得到重视，直到 20 世纪 60 年代末才开始引起注意。



20 世纪 40 年代前后,在第二次世界大战期间,丹麦工程公司 F. L. 史密斯在波波岛上安装了一批两叶片和三叶片的风电机组,仍旧采用的是直流发电机,用于给小岛供电。1950 年,约翰尼斯·尤尔在丹麦的 Vester Egesborg 发明了世界上第一台交流风电机组。1951 年,约翰尼斯·尤尔将波波岛安装的采用直流发电机的风电机组用 35kW 的交流异步发电机所取代,成为世界上第二台交流风电机组。

1957 年在丹麦南部的盖瑟海岸,约翰尼斯·尤尔为 SEAS 电力公司安装了盖瑟风电机组,其功率以及达到 200kW,三叶片,上风向,具有电动机械偏航、交流异步发电机和失速型叶片等结构,并实现了并网发电。盖瑟风电机组是失速调节型风电机组,约翰尼斯·尤尔发明了紧急气动叶尖刹车,在风电机组超速时通过离心力的作用释放。这种结构的风电机组被称为“丹麦概念风电机组”,被认为是现代风电机组的设计先驱。这台风电机组在随后的很多年内一直保持着世界最大风电机组的地位。它在无需维护的情况下,运行了 11 年,风电机组的机舱和风轮现在收藏于丹麦比耶灵布罗电力博物馆中。

在上述半个多世纪里,由于内燃机的广泛使用,人类开始大规模开发利用化石能源,使用化石燃料的发电机组成为主要的电力来源。风电由于高成本和低效率的缺点,没有被广泛应用。直到 20 世纪 70 年代,世界范围内爆发了两次石油危机,使发达国家意识到化石能源终将消耗殆尽,必须大力开发可再生能源,以丹麦、美国、德国、英国、瑞典为代表的欧美国家纷纷加大对风能的研究,建立风电机组试验场对样机进行测试,政府也出台相关补贴的激励政策来促进风电技术的研究与发展,风电由小型逐渐向大中型发展。20 世纪 80 年代初期,美国加利福尼亚出现风电装机热潮,建成早期的风电场,拉动了风电机组制造业的发展。

20 世纪 80 年代后,制造商开始设计具有独特风格的风电机组。许多设计都是以古典盖瑟风电机组或古典低转速多叶片的美国“风能玫瑰”的经验为基础,但大部分都只有为 5~11kW。与此不同的是 Tvind 2 MW 风电机组,它是一台下风向变速风电机组,风轮直径为 54m,发电机为同步发电机。最后,经过不断的研究与验证,由盖瑟风电机组改良的古典三叶片、上风向风电机组设计获得了最大的认可,在激烈的竞争中成为赢家。随着风力发电技术逐渐成熟起来,丹麦一些农用机械生产商,如维斯塔斯、Nordtank 和 Bonus 等开始涉足风电产业,进行风电设备的制造,并很快在风电行业占据了主导地位,为之后风电大规模的发展奠定了基础。

20 世纪 90 年代后,现代风力发电技术开始发展起来,风电日益走向商业规模化并网运行,风电的装机容量开始以平均每年 20% 以上的速度增长,成为当时世界上各种能源中增长最快的一种。到 20 世纪末,全球的风电装机容量已达到 13600MW,主要风电机组容量有 300kW、600kW、750kW、850kW、1MW、1.5MW 等。1995 年,恩德公司制造了世界上第一台兆瓦级风电机组,维斯塔斯 1.5MW 风电机组的样机也于 1996 年研制出来,自此风电机组逐渐向着更大的单机容量发展起来。与此同时,海上风电机组也开始进入研究阶段,丹麦、荷兰和瑞典首先完成了样机的研制,通过对样机的试验,获得了海上风电机组的工作经验。1991 年丹麦在温讷比建成了世界上第一个海上风电场,由 11 台单机容量为 450kW 的风电机组组成,总装机容量为 4.95MW,经过 25 年多的运行后,温讷比海上风电场已于 2017 年退役。



进入 21 世纪以后,全球经济发展较快,能源需求不断增长,同时环境污染问题日益突出,风电以其清洁、无污染、可再生的优势和成熟的技术条件,成为最具有潜在开发价值的能源之一。目前,三叶片、上风向、水平轴、变速变桨距等兆瓦级大型风电机组已成为主流,同时海上风电也已经走向了兆瓦级以上风电机组商业应用阶段。2002 年,欧洲 5 个海上风电场的建设,功率为 1.5~2MW 的风电机组向公共电网输送电力,开始了海上风电机组发展的新阶段。2010 年,英国 Thanet 海上风电场,总装机容量达到 300MW,安装了 100 台 3MW 的维斯塔斯风电机组,为英国成为全球最大海上风电市场奠定了基础。2013 年建成的英国伦敦矩阵海上风电场,由德国西门子公司的 175 台 3.6MW 风电机组组成,总装机容量为 630MW,现在依旧保持着世界最大海上风电场的地位。据世界风能协会统计,截至 2017 年底,全球风电市场新增装机容量 52.57GW,累计装机容量达到 539.58GW;全球海上风电新增装机容量达到 4.3GW,累计装机容量达到 18.81GW,实现创纪录突破。

2. 中国风电发展

中国风电技术的研究始于 20 世纪 70 年代末,主要是从离网型小风电机组的研发推广开始的。在国家相关部门的支持下,经过对国外先进技术的不断学习,实现了 55kW 以下的小型风电机组的应用和推广,成为离网型风电机组的主力,解决了农村无电地区的电力供应问题,对保证边远地区的居民基本生活用电做出了巨大贡献。

20 世纪 80 年代,中国在研发离网型小型风电机组的经验上,开始了对大型风电机组技术的研究。1977 年,首次成功研制出单机容量为 18kW 的 FD-13-18 中型风电机组,并在浙江嵊泗岛茶园子镇上实施并网安装;1986 年,中国第一个并网型风电场在山东省荣城建成投运,马兰风力发电场的建成,意味着中国商业风力发电场开始进入运营,其引进维斯塔斯公司生产的 3 台 55kW 的风电机组;同年 10 月,福建省平潭风电场建成,安装了比利时 Windmaster 公司的 4 台 200kW 风电机组。

1990 年以来,为了促进风电并网的发展,中国政府推出了一系列的风电发展支持政策,风电技术不断提升,风电装机容量和并网容量不断提高。1994 年,新疆达坂城风电总装机容量达 10.1MW,成为中国第一个装机容量达到万千瓦级的风电场,其最大单机容量为 500kW。1996 年,原中华人民共和国国家计划委员会推出的“乘风计划”“双加工程”“国债风电项目”,使中国风电事业正式进入大规模发展阶段。

从 2003 年开始,中华人民共和国国家发展与改革委员会(以下简称国家发改委)开始实施风电特许权招标项目,2005 年《中华人民共和国可再生能源法》颁布,2006 年,国家又陆续颁布一系列配套法规和实施细则,这些法律法规为促进可再生能源产业的快速发展起到了重要的推动作用,中国风电也步入了快速增长时期。2008 年以后,中国风电实现了逐年翻番式增长,2008 年新增装机容量增速为 85.87%,而 2009 年新增装机容量增速达到 124.29%。该阶段风电的高速发展,形成了中国自主创新的风电机组研发技术,提升了中国在国际风电技术市场上的竞争力。

2010 年以后,风电增速逐渐放缓,2011 年,风电新增装机容量增速降至 48%,进入稳定发展阶段。随着陆上风电的发展,中国大型兆瓦级海上风力发电技术逐渐成熟。2010 年,中国第一个海上风电场——上海东海大桥海上风电场实现并网发电,总装机容量



102MW,全部采用中国自主研发的3MW海上风电机组,标志着中国海上风电技术的成熟,为之后的大规模发展海上风电奠定了基础。2018年6月30日,作为当时亚洲最大容量海上风电场的滨海风电场实现并网发电,总装机容量400MW,共安装100台4MW风力发电机组。

截至2017年,中国风电新增装机容量为1966万kW,累计装机容量达到1.88亿kW,继续位居世界首位。其中,海上风电新增装机容量为116万kW,累计总装机容量达到279万kW,排名全球第三,仅次于英国和德国。风电已成为中国继煤电、水电之后的第三大电力来源。

1.2 风电特点

1.2.1 风能的特点

风能是一种可再生的清洁能源。风电产业规模化发展对提高可再生清洁能源在能源结构中的比例,加强节能减排、低碳经济增长、能源安全起到重大作用。此外,风电经济效益较好,资源有效性较高,且商业化潜力较大,近年来得到了各国政府、科研机构、高等院校和企业的高度关注,成为世界范围内发展较快的新能源之一。

风的能量来源于太阳辐射。太阳光以热辐射的形式将能量带到地表,地表各处受热不均产生温差,大气中的对流换热过程是形成风的主要原因。太阳辐射的光和热是风取之不尽的动力源泉,故风能作为可再生清洁能源为人们提供了一种新的能源利用形式。

1. 风能的优点

(1) 储量大。据世界气象组织有关专家估算,在全球范围内,风能总功率为 $1.3 \times 10^{15} \text{ W}$,平均每年约有 $1.14 \times 10^{16} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的风能,相当于目前能源消费水平全世界每年化石燃料燃烧总量的3000倍左右。

(2) 可再生。风能是太阳能的一种转化能源。太阳内部氢元素间发生核聚变,释放出大量光和热,这就是太阳能风能的来源。根据科学家测算,氢核稳定燃烧时间可达60亿年以上,也就是说太阳能至少还可以像现在这样近于无期限地被利用。故人们常以“取之不尽,用之不竭”来形容太阳能和风能利用的长久性。

(3) 分布广。一般将10m高处、密度大于 $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$ 的风能称为有利用价值的风能,其覆盖了全世界约2/3的地区。与化石燃料、水能和地热能等其他能源相比,其分布相对广泛。风电系统可根据实际需要配置相应的装机容量,便于风能分散利用。

(4) 无污染。化石燃料在使用过程中会产生大量有害物质,使人类赖以生存的环境受到破坏和污染。风能的开发利用避免了传统能源导致的空气污染,保护生态环境,是一种清洁安全的能源。

2. 风能的缺点

(1) 密度低。这是风能的一个重要缺陷。由于空气本身的密度极低,而风能来源于空气流动,因此风携带的能量密度也很低,只有水能的1/816。风能能量密度低的缺陷给风



能利用带来诸多不便。

(2) 不稳定。由于气流瞬息万变, 风的脉动、月变化、季变化以及年变化都十分明显, 因此具有波动性、间歇性、随机性和明显的不稳定性。

(3) 地区差异大。由于受地形影响, 风能的地区差异性非常明显。两个临近区域, 一个有利地形的风能往往是不利地形风能的几倍甚至几十倍。

虽然具有上述不可避免的缺点, 风能仍具有巨大的发展优势与潜力。

风能是地球上最重要的能源之一。据世界气象组织估计, 虽然到达地球的太阳能中大约只有 2% 转化为风能, 但其总量仍十分可观, 整个地球上可以利用的风能为 2×10^7 MW, 为地球上可利用水能总量的 10 倍。且风资源可转化的能量远远超过人类迄今为止所能控制的所有能量的总和。全世界每年燃烧煤炭所能得到的能量还不及风能的 1%。全球风电已形成年产值超过 50 亿美元的产业, 特别近几十年来随着社会进步与经济迅猛发展, 风电这一风能利用形式已越来越受到世界各国的高度重视。

1.2.2 世界风能资源分布

世界上的风能资源十分丰富, 根据世界气象组织相关资料统计, 每年来自外层空间的辐射能约为 1.5×10^{18} kW · h, 其中 2.5%, 即 3.8×10^{16} kW · h 的能量被大气吸收, 产生大约 4.3×10^{12} kW · h 的风能, 远远超过全世界火电厂年产总电量。

由于风能资源受地形影响很大, 世界风能多集中在沿海及开阔大陆收缩的地带, 如加利福尼亚州沿岸和北欧一些国家。世界气象组织发表过全世界风能资源估计分布表 (表 1.1), 按平均风能密度和相应的年平均风速将全世界风能资源分为 10 个等级。8 级以上的风能高值区, 主要分布于南半球中高纬度洋面和北半球的北大西洋。北太平洋以及北冰洋的中高纬度部分洋面、陆地风能一般不超过 7 级, 其中以美国西部、西北欧沿岸、乌拉尔山顶部和黑海地区等多风地带较大。

表 1.1 世界风能资源估计分布表

国家和地区	陆地面积/km ²	风力为 3~7 级所占的面积 /km ²	风力为 3~7 级所占的比例 /%
北美	19339	7876	40.7
拉丁美洲和加勒比	18482	3310	17.9
西欧	4742	1968	41.5
东欧和独联体	23049	6783	29.4
中东和北非	8142	2566	31.5
撒哈拉以南非洲	7255	2209	30.4
太平洋地区	21354	4188	19.6
中国	9597	1056	11.0
中亚和南非	4299	243	5.6
总计	116259	30199	26.0



1.2.3 中国风能资源及分布

中国风能资源特点之一是明显的季节性，主要表现在夏季匮乏，春秋冬三季较为丰富。这是由于中国大陆主要受季风影响明显，春、冬两季风速较大且持续时间长，故风能资源较为丰富。

中国风能资源另一个特点是地理分布不均。在中国大陆北方地区有非常丰富的风能资源，但其电力负荷较少，导致风能建设得不到有效发展；而沿海地区对电力需求较大，但陆地面积稀少制约了丰富风资源的有效利用，尽管海上风力发电弥补了一些不足，仍存在较多风能资源浪费的情况。总体上，很多地区风能利用效率低，没有形成规模化开发。

1. 三级区划指标

中国幅员辽阔，海岸线长，风能资源比较丰富。据国家气象局估算，全国风能密度为 $100\text{W}/\text{m}^2$ ，风能资源总储量约 $1.6 \times 10^5 \text{MW}$ ，特别是东南沿海及附近岛屿，内蒙古和甘肃走廊，东北、西北、华北和青藏高原等部分地区，每年风速在 $3\text{m}/\text{s}$ 以上的时间有近 4000h 左右，一些地区年平均风速可达 $6 \sim 7\text{m}/\text{s}$ 以上，具有很大的开发利用价值。国家气象局专家对中国风能区域划分采用三级区域指标体系。

(1) 第一级区划指标。主要考虑有效风能密度大小和全年有效累积小时数。将年平均有效风能密度大于 $200\text{W}/\text{m}^2$ 、风速 $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的年累积小时数大于 5000h 的地区划为风能丰富区，用“Ⅰ”表示；将年平均有效风能密度 $150 \sim 200\text{W}/\text{m}^2$ 、风速 $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的年累积小时数在 $3000 \sim 5000\text{h}$ 的地区划为风能较丰富区，用“Ⅱ”表示；将年平均有效风能密度 $50 \sim 150\text{W}/\text{m}^2$ 、风速 $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的年累积小时数在 $2000 \sim 3000\text{h}$ 的地区划为风能可利用区，用“Ⅲ”表示；将年平均有效风能密度 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下、风速 $3 \sim 20\text{m}/\text{s}$ 的年累积小时数在 2000h 以下的地区划为风能贫乏区，用“Ⅳ”表示。另外，在代表这4个区的罗马数字后面加大写英文字母，表示各个地理区域。

(2) 第二级区划指标。主要考虑一年四季中各季风能密度和有效风速出现小时数的分配情况。利用1961—1970年每日4次定时观测的风速资料，先将483个气象站风速大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 的有效风速小时数点连成年变化曲线。然后，将变化趋势一致的归在一起，作为一个区。再将各季有效风速累积小时数相加，按大小次序排列。这里，春季指3—5月，夏季指6—8月，秋季指9—11月，冬季指12月至翌年2月。分别以“1”“2”“3”“4”表示春、夏、秋、冬四季，如果春季有效风速（包括有效风能）出现小时数最多，冬季次多，则用“14”表示；如果秋季最多，夏季次多，则用“32”表示；其余依此类推。

(3) 第三级区划指标。风电机组最大设计风速一般取当地最大风速。在此风速下，要求风电机组能抵抗垂直于风向平面上所受压力，使风电机组保持稳定、安全，不致产生倾斜或被破坏。由于风电机组寿命一般为20~30年，为了安全，取30年一遇最大风速值作为最大设计风速（国家标准规定取50年一遇最大风速值作为最大设计风速）。

2. 4级风速

根据中国建筑结构规范规定，“以一般空旷平坦地面、离地10m高、30年一遇、



10min 平均最大风速”作为计算标准，计算了全国 700 多个气象台及气象站 30 年内的最大风速。按照风速，将全国划分为 4 级：风速在 $35\sim 40\text{m/s}$ 以上（瞬时风速为 $50\sim 60\text{m/s}$ ），为特强最大设计风速，称特强压型；风速 $30\sim 35\text{m/s}$ （瞬时风速为 $40\sim 50\text{m/s}$ ），为强设计风速，称强压型；风速 $25\sim 30\text{m/s}$ （瞬时风速为 $30\sim 40\text{m/s}$ ），为中等最大设计风速，称中压型；风速 25m/s 以下，为弱最大设计风速，称弱压型。4 个等级分别以字母 a、b、c、d 表示。

3. 风能资源划分

根据上述原则，可将中国风能资源划分为 4 个大区、30 个小区。各区的地理位置如下：

(1) I 区：风能丰富区。I A34a——东南沿海及台湾岛屿和南海群岛秋冬特强压型；I A21b——海南岛南部夏春强压型；I A14b——山东、辽东沿海春冬强压型；I B12b——内蒙古北部以西和锡林郭勒盟春夏强压型；I B14b——内蒙古阴山到大兴安岭以北春冬强压型；I C13b-c——松花江下游春秋强中压型。

(2) II 区：风能较丰富区。II D34b——东南沿海（离海岸 $20\sim 50\text{km}$ ）秋冬强压型；II D14a——海南岛东部春冬特强压型；II D14b——渤海沿海春冬强压型；II D34a——台湾东部秋冬特强压型；II E13b——东北平原春秋强压型；II E14b——内蒙古南部春冬强压型；II E12b——河西走廊及其邻近春夏强压型；II E21b——新疆北部的夏春强压型；II F12b——青藏高原春夏强压型。

(3) III 区：风能可利用区。III G43b——福建沿海（离海岸 $50\sim 100\text{km}$ ）和广东沿海冬秋强压型；III G14a——广西沿海及雷州半岛春冬特强压型；III H13b——大小兴安岭山地春秋强压型；III I12c——辽河流域和苏北春夏中压型；III I14c——黄河、长江中下游春冬中压型；III I31c——湖南、湖北和江西秋春中压型；III I12c——新疆、陕西、甘肃、青海、宁夏以及西北的一部分、西藏的东部和南部春夏中压型；III I14c——四川西南和云贵的北部春冬中压型。

(4) IV：风能欠缺区。IV J12d——四川、甘南、陕西、鄂西、湘西和贵北春夏弱压型；IV J14d——南岭山地以北冬春弱压型；IV J43d——南岭山地以南的冬秋弱压型；IV J14d——云贵南部春冬弱压型；IV K14d——雅鲁藏布江河谷春冬弱压型；IV K12c——昌都地区春夏中压型；IV L12c——塔里木盆地西部春夏中压型。

1.2.4 风电的优势与不足

当前中国风电装机容量较大，但在中国电源总装机容量中所占的比例依然很小，风能利用在中国依然有相当大的发展前景。风力发电被广泛关注并且不断发展，主要有以下方面原因：

(1) 可再生、无污染。风能资源取之不尽用之不绝，利用风力发电可以减少环境污染，节省煤炭、石油等常规能源。

(2) 建设周期短。一个万千瓦级的风电场建设期不到一年。

(3) 装机规模灵活。可根据当下的资金情况决定。装机的规模，有一台风电机组的资金就可安装投产一台。