



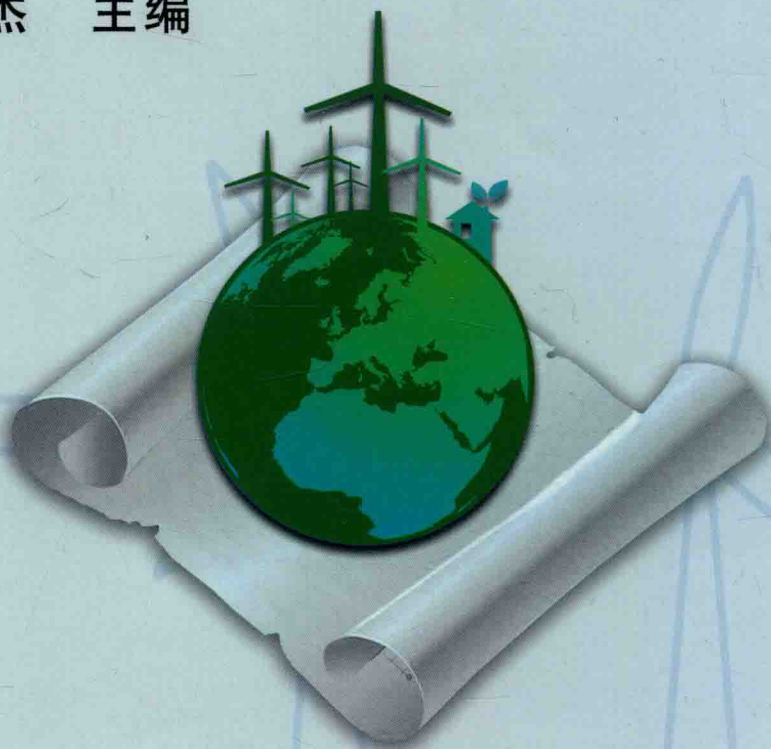
普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材



风能工程

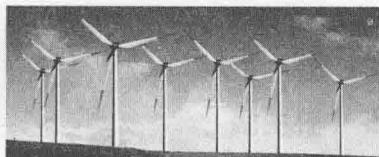
Fengneng Gongcheng

董良杰 主编



 中国农业出版社

普通高等教育农业部“十二五”规划教材
全国高等院校可再生能源工程系列教材



内容简介

风能工程

Fengneng Gongcheng

董良杰 主编



中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风能工程 / 董良杰主编. —北京: 中国农业出版社, 2016. 5

普通高等教育农业部“十二五”规划教材. 全国高等院校可再生能源工程系列教材

ISBN 978-7-109-21616-7

I. ①风… II. ①董… III. ①风力能源-资源开发-高等学校-教材 ②风力能源-资源利用-高等学校-教材 IV. ①TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 088249 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区麦子店街 18 号楼)

(邮政编码 100125)

策划编辑 马颀晨

文字编辑 李兴旺

北京中新伟业印刷有限公司印刷 新华书店北京发行所发行

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 13.5

字数: 320 千字

定价: 32.50 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

林楚良等 "正二十" 培业亦育建等高通普
林楚良等 野工能消主再可外制等高通全

内容简介



能源是人类赖以生存和发展的物质基础，能源的合理和有效利用关系到世界的未来。开发新能源和可再生能源，逐步减少化石能源的使用，是保护生态环境、走社会可持续发展之路的重大措施。风能在各类可再生能源中具有分布广、可再生、环境影响小的特点，被称为 21 世纪最有发展前景的绿色能源之一。基于经济发展、能源需求及环境保护的多种需求，风能作为清洁的可再生能源将在未来的社会发展中发挥重要作用，风能技术发展将是人类文明进步的重要表现。本书系统地阐述了国内外风能开发利用的现状与发展趋势，风能的基本知识，风力机基础理论及空气动力学知识，风力机设计，风力发电系统，风电场工程建设，风力机在风力提水、风力制热等方面的应用，以及风能工程的技术经济评价等内容。

本书可作为农业建筑环境与能源工程以及新能源和可再生能源领域相关专业的教材和参考书，也可作为从事相关专业的高等院校师生、科研和工程技术人员的参考用书。

中国农业大学出版社

全国高等院校可再生能源工程系列教材

编 审 委 员 会

主 任 李文哲 (东北农业大学)

副主任 张全国 (河南农业大学)

易维明 (山东理工大学)

夏朝凤 (云南师范大学)

委 员 (按姓名笔画排序)

王效华 (南京农业大学)

刘圣勇 (河南农业大学)

刘庆玉 (沈阳农业大学)

刘建禹 (东北农业大学)

刘荣厚 (上海交通大学)

李 明 (云南师范大学)

张衍林 (华中农业大学)

周福君 (东北农业大学)

柏雪源 (山东理工大学)

施正香 (中国农业大学)

秦京光 (农业部规划设计研究院)

郭康权 (西北农林科技大学)

董长青 (华北电力大学)

董良杰 (吉林农业大学)

全国高等院校图书馆工作委员会

内容简介

主 编 董良杰 (吉林农业大学)

副主编 李 岩 (东北农业大学)

(李 轶 (沈阳农业大学)

(李 刚 (河南农业大学)

编 者 (按姓名笔画排序)

公维佳 (东北农业大学)

冯 放 (东北农业大学)

孙育峰 (河南农业大学)

李 刚 (河南农业大学)

李 岩 (东北农业大学)

李 轶 (沈阳农业大学)

李金洋 (沈阳农业大学)

张 敏 (沈阳农业大学)

赵 玲 (沈阳农业大学)

董良杰 (吉林农业大学)

审 稿 李 明 (云南师范大学)

(李 明 (云南师范大学)

(李 明 (云南师范大学)

(李 明 (云南师范大学)

前 言

能源是人类赖以生存和进行经济建设的物质基础，能源的合理和有效利用关系到世界的未来。当今世界正面临着人口与资源、社会发展与环境保护等多重压力的挑战，而支持社会发展的能源资源（煤、石油、天然气等化石能源）储量却越来越少。因此，开发新能源和可再生能源，逐步减少化石能源的使用，是保护生态环境、实现社会可持续发展的重要措施。因此，从21世纪开始，世界能源体系将逐步由化石能源向以太阳能、风能及生物质能等为代表的清洁可再生能源转化，以满足社会不断进步对能源和环境的更高要求。

风能是太阳能的一种转化形式，是清洁的可再生能源。风能利用已有数千年的历史，风力提水、风力助帆等风能利用形式在世界各地得到了广泛应用。自20世纪70年代中期以来，受化石能源供应形势紧张、环境保护压力增大及国家能源安全等多方面因素影响，世界主要发达国家和一些发展中国家都开始重视风能的开发利用，尤其是风力发电技术得到了迅速发展。1990年世界风电装机总容量仅为1.7 GW，2000年则达到17.4 GW，2009年则达到158 GW，世界风电装机容量的年平均增长率超过了30%。2014年全球风电新增装机容量为51 473 MW，累计装机容量为369 597 MW，风力发电约占世界电力消耗的3.33%。与此同时，限制风能大规模商业开发利用的主要因素——风力发电成本在过去的20年中有了大幅的下降，2014年陆上风电发电成本为497~522元/(MW·h)，接近与化石能源发电相竞争的水平。按照当前风力发电技术的发展态势，预计2020年、2030年、2050年世界风电机的累计装机容量分别达到801 GW、1 934 GW和4 042 GW，发电量分别占世界电力总消费量的8.9%、18.9%和30.6%。因此，风能将是21世纪最有发展前景的绿色能源之一，是人类社会经济可持续发展的主要新动力源。

根据普通高等教育农业部“十二五”规划教材的要求，本教材主要作为农

业建筑环境与能源工程、新能源科学与工程等本科专业的专业课教材。在参阅大量资料的基础上,编者根据多年的教学与科研经验,结合当今世界风能研究领域的发展前沿,在教材中系统地阐述了风能利用的意义,国内外风能开发利用的现状与发展趋势,风能基本知识,风力机基础理论及空气动力学知识,风力机的设计,风力发电系统,风电场工程建设,风力机在风力提水、风力制热等方面的应用,以及风能工程的技术经济评价等。本教材具有广泛的适用性,既可作为新能源和可再生能源领域相关专业本科生的教材,也可供其他相关专业的高等院校师生、科研和工程技术人员参考。希望本教材能对我国风能的教学、科研、开发、推广、应用和管理提供有益的帮助。

《风能工程》是全国高等院校可再生能源工程系列教材之一,在编写过程中,教材编审委员会多次组织召开教材编写研讨会,对本教材的结构和内容进行了详细的讨论,并提出了许多宝贵的意见和建议,本教材编写组成员也多次对书稿进行研讨和修改,这些都为该教材的质量保证提供了有力的支撑。

本教材由董良杰主编,李岩、李轶、李刚为副主编。张敏、李金洋、公维佳、冯放、孙育峰和赵玲参加编写。其中,董良杰和李刚编写第一章;董良杰编写第二章;李岩编写第三章;张敏编写第四章;李轶编写第五章和第六章;李刚编写第七章;最后由董良杰教授统稿,经李明教授审定后定稿。李金洋、公维佳、冯放、孙育峰和赵玲参加了书中的部分插图绘制和文稿修改整理工作。

本教材在编写过程中,参考了国内外大量资料,在此对资料的作者表示深深的谢意。由于书中内容涉及面广,编者水平所限,书中难免存在错误和不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2015年11月

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
第一节 风与风能	1
一、风的形成	1
二、风向	2
三、风速	2
四、风的测量	6
五、风的能量	8
第二节 风能资源	9
一、风能资源的特点	9
二、影响我国风能资源的因素	10
三、我国风能资源区划	11
第三节 风能利用状况与发展趋势	16
一、风能利用的意义	16
二、国内外风能利用状况与发展趋势	17
第四节 风能工程课程的主要内容	20
复习思考题	21
第二章 风力机基础理论	22
第一节 风力机的分类与组成	22
一、风力机分类	22
二、风力机的组成	26
第二节 风力机叶片的空气动力学基本理论	29
一、风力机叶片的空气动力学基本知识	29
二、叶片空气动力学理论	34
第三节 风力机工作基本原理	36
一、阻力型风力机工作原理	36

二、升力型风力机工作原理	37
第四节 风力机的动力特性	37
一、风力机的性能参数	37
二、风力机的动力特性曲线	42
三、风力机的性能测试	49
复习思考题	50
第三章 风力机的设计	51
第一节 风力机设计基础	51
一、风力机的总体设计	51
二、风力机风轮的动力学设计概述	52
三、风力机的可靠性设计要求	54
第二节 风力机叶片的设计	55
一、风力机叶片的材料和结构	55
二、风力机叶片的设计方法	59
三、叶片的升力	66
四、叶片的阻力	66
五、叶片的离心力	67
六、叶片的角动量和尾翼所受的力	67
七、风轮的正面压力	69
八、风力机的扭矩	70
九、风力机的负荷条件	70
第三节 风力机其他主要部件的设计	71
一、轮毂	71
二、齿轮箱	73
三、制动装置	82
四、机舱底盘	85
五、塔架	86
六、基础	89
七、风力机的偏航调向装置	91
八、风力机的转速控制装置	95
九、风力机的增速机构	99
复习思考题	100
第四章 风力发电系统	101
第一节 小型离网型风力发电系统	101
一、小型离网型风力发电概述	101
二、小型风力发电系统的组成和特性	102
三、小型风力发电系统的选择和匹配	103

四、风力发电的供电与储能	108
五、小型风力发电系统的维护与保养	109
六、小型风力发电机组发展趋势	112
第二节 并网型风力发电系统	114
一、并网风力发电现状概述	114
二、风力发电并网运行的条件、连接及运行方式	116
三、并网型风力发电机及其风电系统	119
四、并网风力发电技术发展趋势	128
复习思考题	129
第五章 风能的其他利用	130
第一节 风力提水系统	130
一、风力提水系统的优点	130
二、风力提水发展现状及技术概述	130
三、风力提水机配套水泵	133
四、风力提水机的结构	136
第二节 风力提水机的工作特性	138
第三节 风力提水机风轮的设计	138
一、基本参数的选择	138
二、叶片弦长和安装角的计算	140
三、理想叶片弦长和叶片安装角的线性化处理	141
四、风轮框架的结构设计	143
第四节 风力提水系统的设计	143
一、供需水调查与风轮直径的确定	143
二、各类泵的性能曲线及其与风轮特性的匹配	145
第五节 风力制热	148
一、风热转换途径	148
二、风热转换的形式	149
三、国外风力制热实例	150
第六节 风能与其他能源的互补利用	151
一、风能与太阳能	151
二、风能与水能	151
三、风能与内燃机	152
四、风能与水电互补系统	152
复习思考题	152
第六章 风电场工程建设	153
第一节 风场选址概述	153
一、风场选址的基本原则	153

二、风场选址的规定	154
第二节 小型风力机及风电场的选址	155
一、小型风力机的选址	155
二、风电场场址的选择	156
第三节 风场选址时的具体判断分析	158
一、不同地形下的流场特点	158
二、风力机位置的确定	160
第四节 风电场工程设计	161
一、风电场设计	161
二、风电场建设	163
第五节 风电场运行、维护与管理	164
一、风电场的运行	164
二、风电场的维护	165
三、风电场的管理	166
复习思考题	167
第七章 风能工程的技术经济评价	168
第一节 技术经济评价的基本理论	168
一、技术经济评价的基本原则	168
二、技术经济评价的基本理论	168
第二节 技术经济评价的基本方法和指标体系	171
一、静态经济评价方法	171
二、动态经济评价方法	172
第三节 不确定性分析	174
一、盈亏平衡分析	174
二、敏感性分析	176
第四节 社会效益评价	178
一、社会效益评价的内容	178
二、社会效益评价的方法	178
第五节 风能工程的技术经济评价实例	180
一、某风电场工程基本情况概述	180
二、机组选型	180
三、经济性评价	184
复习思考题	202
主要参考文献	203

它的变化也很大。在某一瞬间测得的风速称为瞬时风速；在某一时间段内，瞬时风速的算术平均值称为平均风速。

如果将一天内所测瞬时风速相加，再除以24，就得到了一天的平均风速。同理，可求得月、季、年、十年、二十年、五十年、一百年、五百年、一千年、一万年、一亿年、一兆年的平均风速。

第一章

绪 论

本章介绍了与风有关的知识，如风的定义和特点、表征风的参数（如风速和风向）、影响风的主要因素；介绍了我国风资源的情况，我国各地区风资源的分布特点；概述了国内外风能发展的历史、现状和未来发展趋势。

第一节 风与风能

一、风的形成

风是地球上的一种自然现象，即空气的流动现象，一般指空气相对地面的水平运动。风是一种矢量，通常用风向和风速两个要素来表示。

风的形成是空气流动的结果，而空气流动主要由压差、温差或外力引起。当地球围绕太阳运转时，由于日地距离和方位不同，太阳光照射到地球表面时，地球上各纬度所接受的太阳辐射强度也就各异，地球表面各处受热不同，产生温差，从而引起大气的对流运动形成风。因此，可以说风是由太阳辐射热引起的。

由于地球自转轴与太阳的公转轴存在 66.5° 的夹角，因此对地球上的不同地点，太阳照射的角度是不同的，而且对同一地点一年中这个角度也是变化的。地球上某处所接受的太阳辐射能与该地点太阳能照射角的正弦成正比。地球南北极接受太阳辐射能少，所以温度低，气压高；而赤道接受热量多，温度高，气压低。如果地球表面情况是一样的，并且忽略地球转动的作用，则赤道附近空气受热膨胀向上，流向两极；而两极附近的冷空气沿表面流向赤道。此外地球又绕自转轴每 24 h 旋转一周，地球表面的温度、气压将发生昼夜变化。这样由于地球表面各处的温度、气压变化，气流就会从压力高处向压力低处运动，而形成不同方向的风，并伴随不同的气象变化，气压差值越大，风速也就越大。

地球上各处的地形地貌也会影响风的形成。这些复杂因素造成了地球上不同地区、不同季节里空气的流动是变化多样的，因而风向、风速是变化无常的。典型的海陆风和山谷风，如图 1-1 和图 1-2 所示。

1. 海陆风 由于海水的比热容大，接受太阳辐射能后，表面升温慢，陆地的比热容小，升温比较快。于是在白天，由于陆地空气温度高，空气上升而形成海面吹向陆地的海陆风。反之在夜晚，海水降温慢，海面空气温度高，空气上升而形成由陆地吹向海面的陆海风。

2. 山谷风 在山区，白天太阳使山上空气温度升高，随着热空气上升，山谷冷空气随之向上运动，形成“谷风”；相反，到夜间，空气中的热量向高处散发，气体密度增加，空气沿山坡向下移动，又形成所谓“山风”。

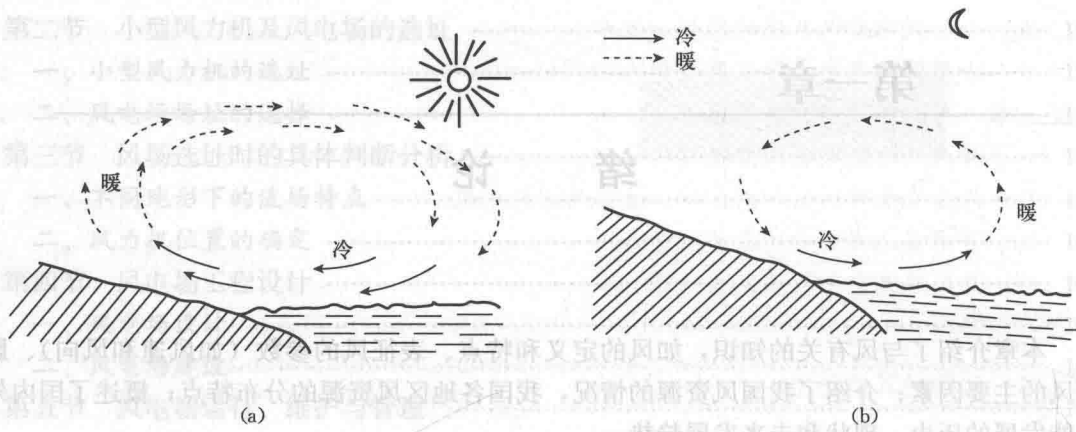


图 1-1 海陆风形成示意

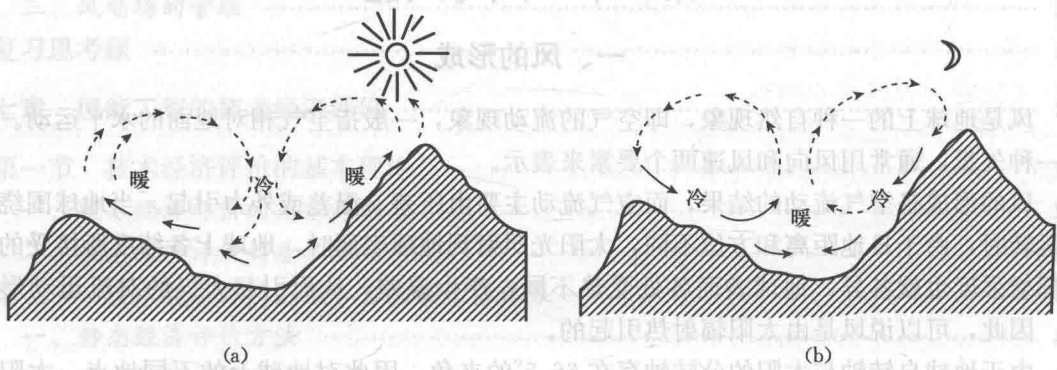


图 1-2 山谷风形成示意

二、风 向

风向是指风吹来的方向。如果风是从东面吹来，则称为东风。观测陆地上的风向一般采用 16 个方位（海上的风向通常采用 32 个方位），即以正北为 0°，顺时针每转过 22.5°为一个方位，如图 1-3 所示。

风向频率是指在一定的时间范围内，某风向出现的次数占各风向出现的总次数的百分比，即

$$\text{某风向频率} = \frac{\text{某风向出现次数}}{\text{风向的总观测次数}} \times 100\%$$

(1-1)

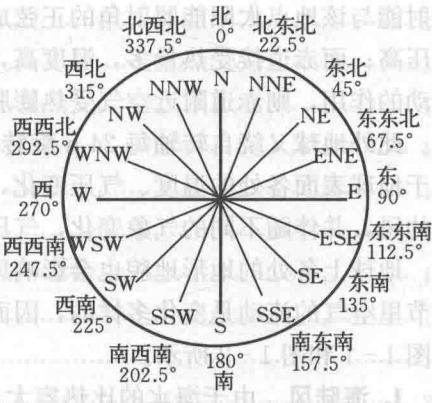


图 1-3 风向 16 方位图

三、风 速

风速是表示风移动的速度，即风在单位时间内通过的距离称为风速，单位为米/秒 (m/s)。

1. 瞬时风速与平均风速 通常，自然界中的风速是不稳定的，即使在很短的时间内，

它的变化也很大。在某一瞬间测得的风速称为瞬时风速；在某一段时间内，瞬时风速的算术平均值称为平均风速。

如果将一昼夜中每 24 h 所测得的风速相加，再除以 24，就得到了一天的平均风速。同理，可求得月平均风速和年平均风速。

2. 风速频率与风速变幅 在一定的时间内，相同风速出现的时数占测量总时数的百分比称作风速频率，即

$$\text{某风速频率} = \frac{\text{某相同风速时数}}{\text{测量风速总时数}} \times 100\% \quad (1-2)$$

在求得平均风速的限定时间内，最大风速与最小风速之差称为风速变幅。对风能利用来说，既希望平均风速较高，又希望风速变幅越小越好，以保证风力机平稳运行和便于控制。

3. 启动风速、切入风速、额定风速、切出风速、有效风速 启动风速是风力机风轮由静止开始转动并能连续运转的最小风速。

切入风速是风力机对额定负载开始有功率输出时的最小风速。

额定风速是指风力机达到额定功率输出时的风速。

切出风速是风力机超速运行的上限风速，大于这个风速时风力机必须停转，否则将有因超速旋转而损坏的危险。

通常，风力机取 3 m/s 为启动风速，25（或 20）m/s 为切出风速，把 3~25 m/s 的风速称为有效风速。据此计算出来的风速频率和风能分别称为有效风频和有效风能。

4. 风速级别 世界气象组织将风力分为 13 个等级，如表 1-1 所示，在没有风速计时可以根据它来粗略估计风速。表 1-1 中的风级 B 与风速 v (m/s) 的关系为

$$v = 0.86B^{\frac{3}{2}} \quad (1-3)$$

表 1-1 风速级别及其特征

风速 级别	风速/ (m/s)	风级 名称	陆地物象	海上波浪	浪高/m
0	0.0~0.2	静风	静烟直上	海面如镜	0.01
1	0.3~1.5	软风	烟能表示风向，但风标不能转动	出现鱼鳞似的微波，但不构成浪	0.1
2	1.6~3.3	轻风	人的脸部感到有风，树叶微响，风标能转动	小波浪清晰，出现浪花，但并不翻滚	0.2
3	3.4~5.4	微风	树叶和细树枝摇动不息，旗帜展开	小波浪增大，浪花开始翻滚，水泡透明像玻璃，并且到处出现白浪	0.6
4	5.5~7.9	和风	沙尘风扬，纸片飘起，小树枝摇动	小波浪增长，白浪增多	1.05
5	8.0~10.7	劲风	有树叶的灌木摇动，池塘内的水面起小波浪	波浪中等，浪延伸更清楚，白浪更多（有时出现泡沫）	2.0
6	10.8~13.8	强风	大树枝摇动，电线发出响声，举伞困难	开始产生大的波浪，到处呈现白沫，浪花的范围更大（泡沫更多）	3.0

(续)

风速 级别	风速/ (m/s)	风级 名称	陆地物象	海上波浪	浪高/m
7	13.9~17.1	疾风	整个树木摇动,人迎风行走 不便	浪大,浪翻滚,白沫像带子一 样随风飘动	4.08
8	17.2~20.7	大风	小的树枝折断,迎风行走很 困难	波浪加大变长,浪花顶端出现 水雾,泡沫像带子一样清楚地随 风飘动	5.5
9	20.8~24.4	烈风	建筑物有轻微损坏(如烟窗倒 塌,瓦片飞出)	出现大的波浪,泡沫呈粗的带 子随风飘动,浪前倾,翻滚,倒 卷,飞沫挡住视线	7.0
10	24.5~28.4	狂风	陆上少见,可使树木连根拔起 或将建筑物严重损坏	浪变长,形成更大的波浪,大 块的泡沫像白色带子随风飘动, 整个海面呈白色,波浪翻滚	9.0
11	28.5~32.6	暴风	陆上很少见,有则必引起严重 破坏	浪大高如山(中小船舶有时被 波浪挡住而看不见),海面全被 随风流动的泡沫覆盖。浪花顶端 刮起水雾,视线受到阻挡	11.5
12	32.7或更高	飓风	摧毁巨大	空气里充满水泡和飞沫,海面 由于溅起的飞沫变成一片白色, 影响视线	14

注:本表所列风速是指平地上离地 10 m 处的风速值。

5. 影响风速的主要因素

(1) 垂直高度。从空气运动的角度,通常将 1 km 以下的大气层分为三个区域:离地面 2 m 以内的区域称为底层;2~100 m 的区域称为下部摩擦层,二者总称为地面境界层;从 100~1 000 m 区域称为上部摩擦层。以上三区域总称为摩擦层(大气境界层)。摩擦层之上是自由大气。

由于地面境界层内空气的运动受紊流黏性和地面摩擦的影响,风向大体一致,但风速则随着垂直高度的增加而增大。关于风速随高度变化的经验公式很多,通常在离地面 100 m 的高度范围内,风速在垂直高度上的变化可按式(1-4)的指数公式求得:

$$v=v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^n \tag{1-4}$$

式中 v ——高度 H 处风速 (m/s);

v_0 ——高度 H_0 处的风速 (m/s, 气象站风速仪的安装高度一般为 10 m, 所以 H_0 一般为 10 m);

n ——地表面摩擦系数,其数值常为 0.1~0.4, n 的典型数值可由表 1-2 查出。

表 1-2 地表面典型摩擦系数

地表状态	摩擦系数 n
平坦坚硬的地面、湖面或海面	0.1
长满短草的未耕地	0.14
长有 30 cm 左右高的草, 偶尔有树, 平坦的田野	0.16
高大的一行行庄稼, 矮树墙, 有些树	0.20
许多树, 间杂着有建筑物	0.22~0.24
乡间树林, 小城镇和郊区	0.28~0.30
有高大建筑物的城区	0.4

(2) 地形地貌。风速受地形地貌的影响如表 1-3 和表 1-4 所示。式 (1-5) 是根据我国几个观测站得出的山顶、山麓风速比与高差关系的经验公式:

$$k_s = 2 - e^{-\alpha \sqrt{\Delta h}} \quad (1-5)$$

式中 k_s ——山顶山麓风速比;

Δh ——山顶山麓相对高差 (m);

$\alpha = 0.007$ 。

表 1-3 不同地形与平坦地面的风速比值

不同地形	比 值	
	3~5 m/s	6~8 m/s
山间盆地	0.95~0.85	0.85~0.80
弯曲的河谷底	0.80~0.70	0.70~0.60
山背风坡	0.90~0.80	0.80~0.70
山迎风坡	1.10~1.20	1.10
峡谷口或山口	1.30~1.40	1.20

表 1-4 山顶与山麓的风速比值

相对高度/m	50	100	200	300	500	700	1 000
比值	1.38	1.50	1.60	1.70	1.80	1.84	1.90

(3) 地理位置。由于陆地表面和海面对风的摩擦阻力不同, 造成了海面上的风比岸上风大, 沿海的风比内陆风大。风速随陆地和海岸变化情况如表 1-5 和表 1-6 所示。

表 1-5 台风登陆后与登陆时的风速比值

距离海岸/km	0	10	25	50	100
比值	1.00	0.97	0.86	0.72	0.55