

21世纪能源与动力工程类 **创新型** 应用人才培养规划教材

风能与动力工程

风力发电技术及应用

范海宽 主编

- 紧贴热点：满足风电人才培养之急需
- 精选内容：阐述基础理论及发展脉络
- 结合案例：展现独具匠心的风能运用



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

· 013046918

TM614-43
05

21 世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材

风力发电技术及应用

主 编 范海宽
副主编 聂晶
参 编 张志宇 徐敏敏 贾瑞博



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



北航 C1652547

TM614-43
05

812820010

内 容 简 介

本书系统阐述了风力发电原理、风力发电技术以及风力发电并网方法,并总结和分析了国内外风电机组技术的应用状况。全书共分10章,包括风及风能资源,风力机的基础理论,风力机的类型及特性概述,风力发电系统,风力利用系统,风力机的安装、调试、维护及现场性能测试,并网风力发电系统,我国风电场工程项目,世界风能发展概况,以及中国风力发电状况。

本书可作为高等院校热能与动力工程、风能与动力工程等专业本、专科生的教材,也可以作为从事风力发电机设计研究的工程技术人员、生产风力发电机企业的工作人员及相关产业技术和管理人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术及应用/范海宽主编. —北京:北京大学出版社,2013.6

(21世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-22548-6

I. ①风… II. ①范… 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(2013)第105946号

书 名: 风力发电技术及应用

著作责任者: 范海宽 主编

策划编辑: 童君鑫 宋亚玲

责任编辑: 宋亚玲

标准书号: ISBN 978-7-301-22548-6/TH·0347

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 新浪官方微博: @北京大学出版社

电子信箱: pup_6@163.com

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 三河市博文印刷厂

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 14印张 322千字

2013年6月第1版 2013年6月第1次印刷

定 价: 32.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

风能是一种无污染、可再生的清洁能源。早在公元前 200 年，人类就开始利用风能了。提水、碾米、磨面及船的助航都有风能利用的记载。自第一次世界大战之后，丹麦仿造飞机的螺旋桨制造二叶和三叶高速风力发电机发电并网并使用直至今日，风力发电机经历了近百年的发展历程。20 世纪 80 年代之后，世界工业发达国家率先研究、快速发展了风力发电机，建设了风电场。现在风力发电机制造成本不断下降，已接近水力发电机的水平，制造及使用技术也日趋成熟。20 世纪末，世界每年风电装机容量以近 20% 的增长速度发展，风电成为世界诸能源中发展最快的能源。如果在总面积 0.6% 的地方安装上风力发电机，就能提供全部电力消耗的 20%，可以关闭供电能力 20% 的以燃烧煤、重油等碳氢化合物为燃料而排放 SO_2 、 CO_2 和烟尘对大气和地球环境造成污染和破坏的火电厂。

如今，风力发电已成为世界各国重点发展的能源之一，风力发电机的制造业也已成为新兴的机械制造业。风力发电机制造业的发展推动了诸如大型锥钢管、钢板等冶金行业，以及发电机制造，电器控制，液压机械，增强塑料、复合材料等行业的发展；也推动着蓄电池向大容量、小体积、免维修、高效率方向发展；同时拓宽了微机在风力发电机自控方面的应用和发展。风力发电机的发展及其拉动的行业发展为数以万计的人创造了就业机会。可见，发展风力发电机及风力发电对于发展经济，保护地球环境，有着重要意义。

我国地域辽阔，风能资源丰富，风能储量达 25.3 亿 MW。1996 年国家计委实施了“乘风计划”和“光明工程”，为中国全面发展大、中、小型风力发电机及风力发电创造了条件。2010 年，我国除台湾地区以外其他地区共新增风电装机 18.93GW ($1\text{GW} = 10^3\text{MW}$)，保持新增装机容量全球排名第一；累计风电装机容量 44.73GW，超过美国跃居世界第一。目前，我国已形成一定的风力发电基础并积累了较丰富的风力发电的经验。风力发电机除应用于风电场外，尚有广阔的应用领域。中、小型风力发电机可为我国东北、西北、华北风能资源丰富地区的大棚温室埋地热线以提高地温，为冬季种植蔬菜、水果、花卉提供电力；为农牧民温室养牛、羊、猪、鸡提供电力；为城市、农村、牧区冬季采暖提供电力。还可为风能资源区国家电网尚不能达到的地区的农民、牧民、海岛渔民提供生产和生活用电。可见，我国风力发电机及风力发电的发展前景十分广阔，前途光明。

为了使从事风力发电机设计的工程技术人员、生产风力发电机企业的工程技术人员、工人及风力发电机使用、管理人员更多地了解风力发电机的结构、设计、使用和维护等方面的知识特编写了本书。本书系统阐述了风力发电原理、风力发电技术以及风力发电并网方法，总结和分析了国内外风电机组技术的应用状况。全书共分 10 章，包括风及风能资源，风力机的基础理论，风力机的类型及特性概述，风力发电系统，风力利用系统，风力机的安装、调试、维护及现场性能测试，并网风力发电系统，我国风电场工程项目，世界风能发展概况，以及中国风力发电状况。本书在风力发电基本知识 with 基本理论、设备的结构与工作原理等内容上加强了针对性和应用性，理论联系实际，力求把传授知识和培养实践能力结合起来。

本书由内蒙古工业大学范海宽担任主编，内蒙古工业大学聂晶担任副主编。内蒙古科技大学贾瑞博(第1章)、张志宇(第2、3章)，内蒙古工业大学范海宽(第8章)、聂晶(第4、5、9、10章)、徐敏敏(第6、7章)共同完成了本书的编写。

本书引用了有关教材、专业期刊的许多资料，在此对其作者一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不足之处，敬请读者批评指正。

编者

2013年2月

目 录

第 1 章 风及风能资源	1	2.4.3 推力、扭矩和功率的一般关系式	28
1.1 风的形成及影响因素	2	2.5 简化的风车理论	28
1.1.1 风的形成	2	2.5.1 基本关系的确定	28
1.1.2 风的分类	3	2.5.2 上述关系的转换和简化	29
1.2 风的测量	5	2.5.3 关于叶片外形设计的计算和方法	30
1.2.1 风向测量	5	2.5.4 叶素的理论气动效率和最佳攻角	30
1.2.2 风速的测量	6	2.6 葛劳渥(Glauert)漩涡流理论	31
1.2.3 风能密度	9	2.6.1 风轮的漩涡系统	31
1.3 风资源分布	10	2.6.2 诱导速度的确定	32
1.3.1 世界风能资源分布	10	2.6.3 轴向推力和扭矩计算	32
1.3.2 中国风能资源的分布	10	2.6.4 当地功率系数	34
思考题	12	2.6.5 倾斜角 I 和 C_{tbl} 的最佳值	35
第 2 章 风力机的基础理论	13	2.6.6 阻力不可忽略时非理想叶片的当地功率系数和最佳攻角	40
2.1 贝兹(Betz)理论	14	2.6.7 叶片数的影响	40
2.2 翼型的几何参数和空气动力特性	16	2.6.8 实际风力机的 C_p 曲线	41
2.2.1 翼型的几何参数和气流角	16	2.7 风力机的相似特性和换算	41
2.2.2 作用在运动翼型上的气动力	17	2.7.1 相似准则	41
2.2.3 升力和阻力系数的变化曲线	18	2.7.2 风力机相似的条件	41
2.2.4 有限叶片的影响	20	2.7.3 换算关系	42
2.2.5 弦线和法线方向的气动力(李连塞尔极曲线——Lilienthal Polar)	20	思考题	44
2.3 翼型数据	21	第 3 章 风力机的类型及特性概述	45
2.3.1 叶型数据和特性	21	3.1 风力机概述	46
2.3.2 各种叶型的气动特性	25	3.1.1 风力机的发展历程	46
2.4 风轮的气动力学	26	3.1.2 风力机的分类	48
2.4.1 几何定义	26	3.2 水平轴风力机	50
2.4.2 叶素特性分析	27	3.2.1 水平轴风力机概述	50
		3.2.2 低速风力机	52



3.2.3 高速风力机	53	6.1.2 工程工艺流程	114
3.3 垂直轴风力机	66	6.2 风力机的调试	124
3.3.1 垂直轴风力机概述	66	6.2.1 概述	124
3.3.2 阻力型风力机	66	6.2.2 厂内调试	124
3.3.3 升力型风力机	72	6.3 风力机的维护	128
思考题	81	6.3.1 基本原则	128
第4章 风力发电系统	82	6.3.2 齿轮箱的维护	129
4.1 系统组成	83	6.3.3 发电机的维护	131
4.1.1 风轮	83	6.3.4 偏航系统的维护	132
4.1.2 调向装置	85	6.3.5 机组常规巡检	133
4.1.3 调速机构	86	思考题	134
4.1.4 传动装置	88	第7章 并网风力发电系统	135
4.1.5 发电装置	88	7.1 风电场址的选择和风电机组的 排列	136
4.1.6 蓄能装置	90	7.1.1 风电场场址的选择	136
4.1.7 整流、逆变装置	92	7.1.2 风电机组选型和布置	138
4.1.8 控制装置	92	7.2 风电场运行	138
4.1.9 塔架	93	7.2.1 风电场运行概况	138
4.1.10 其他附属部件	93	7.2.2 风力发电机组的运行	139
4.2 风力发电系统的运行方式	93	7.2.3 输变电设施的运行	139
4.2.1 独立运行的风力发电 系统	93	7.3 风电场与电力系统	140
4.2.2 风力-柴油发电联合 运行	95	7.3.1 风电场接入电力系统 技术规定	140
4.3 并网发电	100	7.3.2 内蒙古风电发展与电力 系统	145
思考题	101	7.4 风电场的经济及环境效益 评估	149
第5章 风力利用系统	102	7.4.1 环境保护和水土保持 设计	149
5.1 风力提水	103	7.4.2 水土保持设计	150
5.2 风力压缩机驱动	106	7.4.3 劳动安全与工业卫生 设计	150
5.3 风力制热	107	7.5 海上风电场	151
5.4 风力助帆	109	7.5.1 海上风电场与陆上 风电场的不同点	151
5.5 风能和其他可再生能源综合 利用	110	7.5.2 海上风力发电机组的 发展	152
思考题	111	7.6 海上风力发电现状	154
第6章 风力机的安装、调试、维护及 现场性能测试	112	7.6.1 风力发电概况	154
6.1 风力机的安装及起吊	113	7.6.2 近海风电场址的选择	157
6.1.1 风电场吊装工程概况	113		

7.6.3 海上风电机组的基础结构	158	第 9 章 世界风能发展概况	186
7.6.4 海上风电机组吊装方法	160	9.1 世界新能源和可再生能源时代 发展背景	187
7.6.5 海上输电系统	161	9.2 世界风能资源分布	187
7.6.6 海上风电所呈现的问题	162	9.3 世界风电装机容量分析	188
7.6.7 中国海上风力发电发展 迅猛	163	9.4 世界风力发电的政策环境	190
思考题	163	9.4.1 支持风电产业发展的 直接政策	191
第 8 章 我国风电场工程项目	164	9.4.2 促进风电产业发展的 间接政策	192
8.1 离网户用小型风力发电	165	9.5 世界风电发展状况	194
8.1.1 行业现状	165	思考题	197
8.1.2 机组的技术特点及 参数	166	第 10 章 中国风力发电状况	198
8.1.3 研发技术与装备	167	10.1 中国风能资源	199
8.1.4 行业发展趋势与特点	170	10.2 中国风电发展现状	201
8.1.5 发展障碍与问题	171	10.2.1 装机容量	201
8.2 我国并网风力发电	172	10.2.2 风电场概况	203
8.2.1 行业发展历程	172	10.3 风电产业发展趋势及现状	205
8.2.2 风电场项目的可行性研究 报告	174	10.3.1 风电行业成本研究 分析	205
8.2.3 风电场项目的实施	177	10.3.2 中国风电的发展现状	209
8.2.4 我国风电运行管理特点及 现状	178	10.4 我国风电发展前景	212
8.2.5 内蒙古风力发电成就	179	10.4.1 风力发电有利条件	212
8.2.6 内蒙古电网建设	182	10.4.2 风电发展前景	212
思考题	185	思考题	213
		参考文献	214

第 1 章

风及风能资源



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
风的形成, 风的分类	掌握风形成的基本原理; 熟悉风的分类, 并了解各种风形成的基本原理	风能和太阳能的关系; 各种风对社会产生的影响及其防范
风向和风速的测量, 风能密度的概念	熟悉风向和风速的测量; 理解风能密度的概念	风速测量在相关行业的应用
世界风资源分布, 中国风资源分布	了解世界风资源分布; 熟悉中国风资源的分布	风资源分布和风能的开发利用



导入案例

世界风资源分布

地球上的风能资源十分丰富,根据相关资料统计,每年来自外层空间的辐射能为 1.5×10^{18} kWh, 其中的 2.5%, 即 3.8×10^{16} kWh 的能量被大气吸收, 产生大约 4.3×10^{12} kWh 的风能。这一能量是 1973 年全世界电厂 1×10^{10} kW 功率的约 400 倍。

风能资源受地形的影响较大,世界风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带,如美国的加利福尼亚州沿岸和北欧一些国家。世界气象组织于 1981 年发表了全世界范围风能资源估计分布图,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上,大陆上风能则一般不超过 7 级,其中以美国西部、西北欧沿海、乌拉尔山顶部和黑海地区等多风地带较大。

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 级所占的面积比例/(%)
北美	19339	7876	41
拉丁美洲和加勒比	18482	3310	18
西欧	4742	1968	42
东欧和独联体	23049	6783	29
中东和北非	8142	2566	32
撒哈拉以南非洲	7255	2209	30
太平洋地区	21354	4188	20
(中国)	9597	1056	11
中亚和南亚	4299	243	6
总计	106660	29143	27

1.1 风的形成及影响因素

1.1.1 风的形成

简单地说,空气的流动形成了风。空气流动得越快,风就越大。我们知道大气是由氮、氧、二氧化碳、水蒸气等多种气体混合组成,大约总重量为 6×10^{15} t。因为空气有重量,也就有压力。但是地球表面各处的气体压力并不均衡,从而引起空气从高压区向低压区流动,于是形成了所谓的“风”。由于气压的高低受多种因素影响,如地形的高低、大气温度的高低和湿度的大小,以及所处的纬度的高低的不同等都会对气压产生影响,从而制造出各种各样的“风”,如微风、狂风、暴风还有龙卷风等。

产生风的诸多因素中,气温的变化起最主要的作用。而气温的变化又是由于太阳辐射引起的,所以追根到底,风来自太阳的辐射,它是太阳能的一种转化形式。太阳光照在地球上使地球变热,由于地球上各地区纬度不同,所接受的太阳辐射强度也不一样。在赤道和低纬度地区,由于太阳高度角大,日照时间长,太阳辐射强度强,地区和大气接受的热量多,温度就比较高;在高纬度和地球两极地区,因为太阳高度角小,日照时间短,地面和大气接受的热量少,温度低。由于这种高纬度与低纬度之间的温度差异,导致南北之间的气压梯度使空气发生自然的水平运动,风应沿水平气压梯度方向吹,即垂直于等压线从高压向低压吹。地球赤道附近的热空气向上升,并通过大气层上部流向地球南北两极,两极地区的冷空气流向赤道。但是,因为地球每时每刻都在自西向东旋转,使得空气水平运动发生偏向。这种使空气水平运动发生偏向的力引起了北半球围绕低压区的反时针方向环流和南半球顺时针方向的环流,所以在气压梯度力和地转偏向力的综合作用下,地球大气发生运动,如图 1-1 所示。

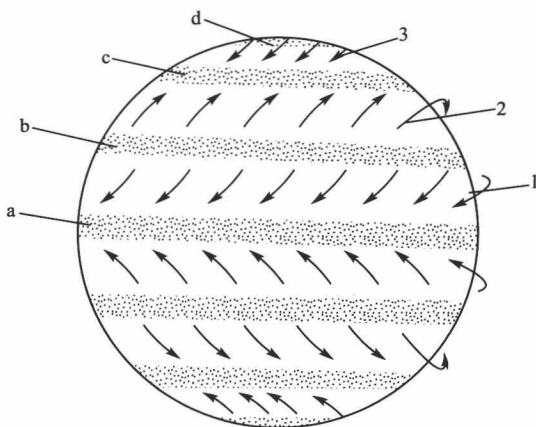


图 1-1 大气风带

a—赤道低压带; b—副热带高压带;
c—副极地低压带; d—极地高压带;
1—信风带; 2—西风带; 3—极地东风带

1.1.2 风的分类

一般来说,风可以分为以下几类。

1. 季风

由于地球的公转和自转,风具有季节性和方向性。因为大陆与海洋的比热容不同,陆地的比热比海洋中海水的比热小,冬季内陆的高气压往往流向海洋温暖的低气压区。例如中国,海洋多数在南边,所以冬季多刮北风。相反,夏季太阳辐射到陆地,比海洋更热,因此多刮南风,我们称这种随季节转换的风为季风。在一天之中,昼夜风向也有变化,因为海水热容量大,太阳辐射升温慢,陆地则升温快,空气上升,气压低,所以白天海风向陆地吹。晚上陆地散热快,海水散热慢,温度高,气压低,陆地的风就刮向海洋。同样道理,大面积的湖泊与沿岸的风向关系也是这样。

2. 山谷风

地势高低不同,也能引起空气流动。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 1-2)。另外局部温度梯度等因素也会使风能分布发生变化。当然这只是一般规律,特殊的地势情况往往会产生更为复杂的“风”。

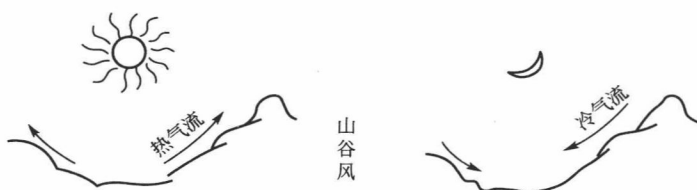


图 1-2 山谷风的形成

3. 海陆风

海陆物理属性的差异造成海陆受热不均。白天，陆上增温较海洋快，空气上升，而海洋上空气温相对较低，使地面有风自海洋吹向大陆，以补充大陆地区上升气流，而陆上的上升气流流向海洋上空后下沉，补充海上吹向大陆的气流，形成一个完整的热力环流；夜间环流的方向正好相反，所以风从陆地吹向海洋。这种白天从海洋吹向大陆的风称为海风，夜间从陆地吹向海洋的风称为陆风，一天中海陆之间的周期性环流总称为海陆风(图 1-3)。

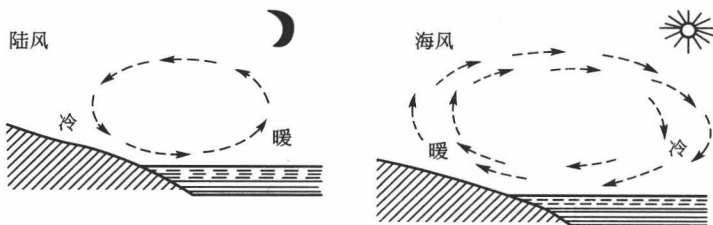


图 1-3 海陆风示意图

4. 台风

台风是产生于热带洋面上的强烈的热带气旋。在太阳的照射下，热带海洋的海面的海水温度逐渐升高，容易蒸发为水汽散布到空气中。热空气上升以后，四周的冷空气便乘虚而入，流入补充，然后，冷空气又因太阳照射变成热空气，再度向上升高。如此循环，最后使整个气流不断扩大而形成“风”。在广阔的海面上，气流循环不断加大。因为地球不停地由西而东自转，致使气流柱和地球表面产生摩擦，越接近赤道摩擦力越强，这就引导气流柱逆时针旋转(南半球是顺时针旋转)。由于地球自转的速度快而气流柱跟不上地球自转的速度便形成感觉上的西行，也就形成台风和台风路径。当近地面最大风速达到或超过 17.2m/s 时，称为台风。

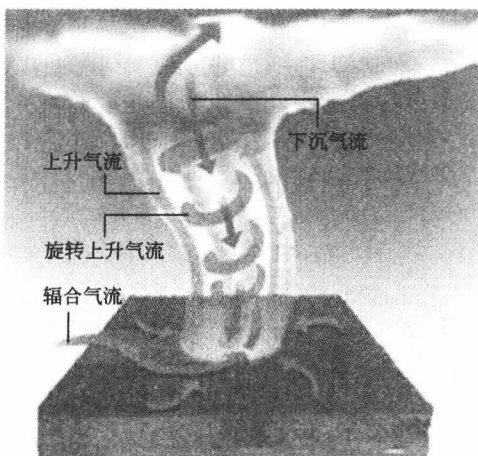


图 1-4 龙卷风示意图

5. 龙卷风

龙卷风是一种小范围的非常强烈的空气涡旋，是在极不稳定的天气条件下由空气强烈对运动而产生的，是由雷暴云底伸展到地面的漏斗状云产生的强烈的旋风，如图 1-4 所示，其风力可达 12 级以上。

阅读材料1-1

空中“象鼻”龙卷风

龙卷风是一种小范围的非常强烈的旋风，也是一种威力十分强大的旋风。虽然它的范围很小，一般只有二三百米，大的也不过2km，但破坏力却很大。

龙卷风的风速快达每秒100多米，甚至超过每秒200m，比台风的速度还要大得多。它的样子很像一个巨大的漏斗或大象的鼻子，从乌云中伸向地面。它往往来得非常迅速而突然，并伴有巨大的轰鸣声。有时会带来大雨、雷电或冰雹。龙卷风内部的空气很稀薄，压力很低，具有很强的吮吸作用，就像一只巨大的吸尘器，能把沿途的一切都吸到它的“漏斗”里，直到旋风的势力减弱变小或随龙卷风内的下沉气流下沉时，再把吸来的东西抛下来。因此，龙卷风对人、畜、树木、房屋等生命财产都有很大的破坏作用。当它伸到陆地表面时，可拔树倒屋，把大量沙尘等物吸到空中，形成尘柱，称陆龙卷；当它伸到海面或其他水面时，能吸起高大水柱，还会把海水连鱼甚至船只一起吸到空中，称海龙卷或水龙卷，中国民间也称为“龙吸水”。由于龙卷风有巨大的卷吸力，常常把海中的鱼类、粮仓中的粮食或其他带有颜色的东西卷吸到高空，然后再随暴雨降落到地面，于是就形成了“鱼雨”、“豆雨”、“血雨”甚至“钱雨”等奇怪的现象。

龙卷风形成的原因目前尚无定论。一般认为，在夏季对流运动特别强烈的雷雨云中，上下温差很大，空气扰动十分厉害，在地面，气温是摄氏二十几度，越往高空，温度越低。在雷雨云顶部八千多米的高空，温度低到摄氏零下三十几度。这样，上面冷的气流急速下降，下面热的空气猛烈上升。当强烈上升的气流到达高空时，如遇到很大的水平方向的风，就会迫使上升的气流向下降转，结果就会产生许多小漩涡。经过上下层空气进一步的激烈扰动，这些漩涡便会逐渐扩大，形成一个呈水平方向的空气旋转柱。然后，这个空气旋转柱的一端渐渐向下伸出云底呈漏斗状，这就是龙卷风。

1.2 风的测量

风为矢量，既有大小，又有方向，所以风的测量包括风向和风速两项。

1.2.1 风向测量

风向测量是指测量风的来向。

1. 风向标

风向标是测量风向的最通用的装置，有单翼型、双翼型和流线型等。风向标一般是由层翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴四部分组成的首尾不对称的平衡装置。其重心在支撑轴的轴心上，整个风向标可以绕垂直轴自由摆动，在风的动压力作用下取得指向风的来向的一个平衡位置。风向的指示、传送和指示风向标所在方位的方



法很多，有电触点盘、环形电位、自整角机和光电码盘 4 种类型，其中最常用的是光电码盘。

风向杆的安装方位指向正南。风速仪(风速和风向)一般安装在离地 10m 的高度上。

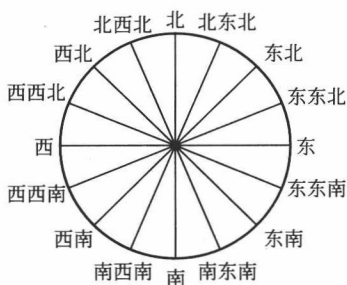


图 1-5 风向方位图

2. 风向表示法

风向一般用 16 个方位表示，即北东北 (NNE)、东北 (NE)、东东北 (ENE)、东 (E)、东东南 (ESE)、东南 (SE)、南东南 (SSE)、南 (S)、南西南 (SSW)、西南 (SW)、西西南 (WSW)、西 (W)、西西北 (WNW)、西北 (NW)、北西北 (NNW)、北 (N)。静风记为 C。风向也可以用角度来表示，以正北为基准。顺时针方向旋转，东风为 90°，南风为 180°，西风为 270°，北风为 360°，如图 1-5 所示。

各种风向的出现频率通常用风玫瑰图来表示，风玫瑰图是在极坐标图上，点出某年或某月各种风向出现的频率，如图 1-6 所示，不同地点和不同时间里，风玫瑰图是不一样的。同理，统计各种风向上的平均风速和风能的图分别称为风速玫瑰图和风能玫瑰图。测定风向的仪器之一为风速风向仪，如图 1-7 所示。

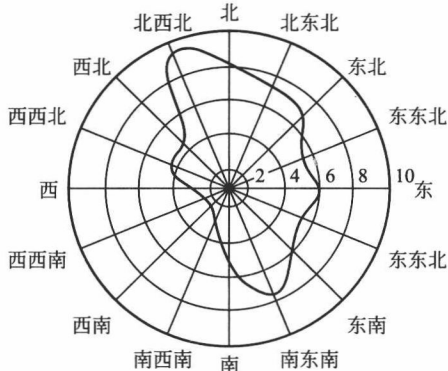


图 1-6 风玫瑰图



图 1-7 风速风向仪

风速风向仪一般设在离地面 10~12m 高的位置，如果附近有障碍物，其安置高度至少要高出障碍物 6m 以上，指北的短棒要正对北方。风向箭头指在哪个方向，就表示当时刮什么方向的风。测风器上还有一块长方形的风压板，风压板旁边装一个弧形框架，框架上有长短齿。风压板扬起所经过长短齿的数目表示风力大小。

1.2.2 风速的测量

风时有时无，时大时小，很不稳定，风的大小是用风速和风力来衡量的。风速就是指空气在单位时间内流动的距离，常用 m/s、km/h 等来表示。测量风速的仪器称为风速仪，用风速仪测得的风速是当时的瞬时风速，由于风速是不断地变化的，所

以风速常用某一段时间内的平均值来表示,如日平均风速、月平均风速或年平均风速。

虽然风的大小能用风速来表示,但日常生活中人们更习惯用风级来表示风的强弱,特别是在天气预报中。我国是用风级来表示风大小的古老国家之一,远在唐代,科学家李淳风就在他的著作《乙巳占》中提出过九级风的划分标准,而且非常直观形象,如“动叶、鸣条、摇枝、坠叶、折小枝、折大枝、折木、飞沙石、拔大树”。1805年,英国人蒲福总结提出了更精确的风级划分标准,从0级到12级,共分13个等级。随后又补充了每级风的相应的风速数据,使人们从直接的直观现象发展到依靠精确的风速数来确定风级。后来逐渐被国际公认,称它为“蒲氏风级”。1946年国际风级的划分增加到18级。但是人们常用的还是12级风的标准,因为13级以上的风很少出现。在我国,人们还是习惯用根据民间经验歌谣划分风级的大小,见表1-1。在没有风速计时可以根据它来粗略估计风速。

表 1-1 风的等级

级别	风速/(m/s)	陆地	海面	浪高/m
0	小于 0.3	静烟直上	水面平静,几乎看不到水波	
1	0.3~0.6	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	1.6~3.4	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	3.4~5.5	树叶和细树枝摇动不息,旌旗展开	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	5.5~8.0	沙尘风扬,纸片飘起,小树枝摇动	小波浪增长,白浪增多	1
5	8.0~10.8	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(有时出现飞沫)	2
6	10.8~13.9	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(飞沫更多)	3
7	13.9~17.2	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



(续)

级别	风速/(m/s)	陆地	海面	浪高/m
8	17.2~20.8	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	20.8~24.5	建筑物有轻微损坏(如烟囱倒塌, 瓦片飞出)	出现大的波浪, 泡沫呈粗的带子随风对动, 浪前倾, 翻滚, 倒卷, 泡沫挡住视线	7
10	24.5~28.5	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
11	28.5~32.7	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 以上	陆上极少见, 有则必引起严重破坏	空气里充满水泡和飞沫变成一片白色, 影响视线	14

为了准确测量风力大小, 人们在野外常用轻便风速仪来测风。风速仪一般由感应部分和计数器组成。感应部分一般为叶轮形式, 叶轮的轴杆启动内含 8 个电磁极的圆形磁铁。置于磁铁旁的双霍尔传感器测到磁场中电极的转变信号。传感器的信号转换为电子频率且和风速成正比, 可观测到旋转方向, 如图 1-8、1-9 所示。



图 1-8 便携式风速仪

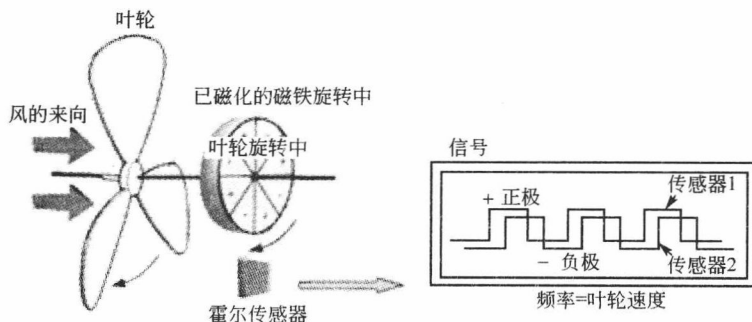


图 1-9 风速仪原理图



阅读材料1-2

风速测量仪器

1. 风杯风速计

它是最常见的一种风速计。转杯式风速计最早由英国鲁宾孙发明，当时是四杯，后来改用三杯。3个互成度固定在架上的抛物形或半球形的空杯都顺一面，整个架子连同风杯装在一个可以自由转动的轴上。在风力的作用下风杯绕轴旋转，其转速正比于风速。转速可以用电触点、测速发电机或光电计数器等记录。

2. 螺旋桨式风速计

它是一组三叶或四叶螺旋桨绕水平轴旋转的风速计。螺旋桨装在一个风标的前部，使其旋转平面始终正对风的来风速计向，它的转速正比于风速。

3. 热线风速计

它是一根被电流加热的金属丝。流动的空气使它散热，利用散热速率和风速的平方根呈线性关系，再通过电子线路线性化（以便于刻度和读数），即可制成热线风速计。热线风速计分旁热式和直热式两种。旁热式的热线一般为锰铜丝，其电阻温度系数近于零，它的表面另置有测温元件。直热式的热线多为铂丝，在测量风速的同时可以直接测定热线本身的温度。热线风速计在小风速时灵敏度较高，适用于对小风速测量。它的时间常数只有百分之几秒，是大气湍流和农业气象测量的重要工具。

4. 声学风速表

在声波传播方向的风速分量将增加（或减低）声波传播速度，利用这种特性制作的声学风速表可用来测量风速分量。声学风速表至少有两对感应元件，每对包括发声器和接收器各一个。使两个发声器的声波传播方向相反，如果一组声波顺着风速分量传播，另一组恰好逆风传播，则两个接收器收到声脉冲的时间差值将与风速分量成正比。如果同时在水平和铅直方向各装上两对元件，就可以分别计算出水平风速、风向和铅直风速。由于超声波具有抗干扰、方向性好的优点，声学风速表发射的声波频率多在超声波段。

资料来源：<http://baike.baidu.com/view/865062.htm>

1.2.3 风能密度

空气具有质量，流动的空气具有速度，所以流动的空气具有动能，也就是说风具有动能，我们称之为风能。通过单位截面积的风所含的能量称为风能密度，常以 W/m^2 来表示。也就是空气在一秒钟时间内以 V 的速度流过单位面积所产生的动能为风能，它的一般表达式为

$$E = \frac{1}{2} \rho V^3$$

式中： E ——风能密度；

ρ ——空气密度；

V ——空气速度。

从上式可看出，风能密度与空气的速度的立方成正比，所以风速的大小对风能密度有