

风能及其利用

WIND ENERGY
AND ITS UTILIZATION

黄群武 王一平 编著
鲁林平 朱 丽

风能及其利用

WIND ENERGY AND ITS UTILIZATION

黄群武 王一平 编著
鲁林平 朱 丽

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书主要讲述风的特性和风能资源、各国风能政策、风能利用发展史、风力发电机组基础理论和系统设计、风力发电的经济性分析、风能对环境的影响、风能利用的新想法及展望等内容。

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科生的教材,也可作为从事风力发电技术领域的工程技术人员、研发人员、管理人员等的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风能及其利用/黄群武等编著. —天津:天津大学出版社,2015. 11

ISBN 978-7-5618-5463-1

I. ①风… II. ①黄… III. ①风力能源—能源利用
IV. ①TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 286751 号

出版发行	天津大学出版社
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话	发行部:022-27403647
网 址	publish. tju. edu. cn
印 刷	北京京华虎彩印刷有限公司
经 销	全国各地新华书店
开 本	169mm × 239mm
印 张	10.75
字 数	223 千
版 次	2015 年 11 月第 1 版
印 次	2015 年 11 月第 1 次
定 价	49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

我国风能资源极为丰富,也是世界上最早开发利用风能的国家之一。由于大规模使用煤炭、石油、天然气等化石能源,当今世界面临常规不可再生能源日益枯竭和环境不断恶化的双重危机。节约能源消耗、提高能源利用效率,开发利用太阳能、风能、生物质能等可再生能源,是我国长期的能源发展战略,也是保障我国经济持续稳定发展的基础。最近几年,各种可再生能源发展得如火如荼,其中以风能发展尤为突出,风能发电成本大幅度下降,日益接近火力发电。因此,风能是21世纪最值得大力开发的可再生能源。

风能虽然数量丰富、分布广泛,但是其品位较低、储存困难,具有季节性、随机性等特点。因此,如何提高其利用效率,降低风能利用设备的制造、运行成本,并确保机组的安全、可靠运行,涉及了气象学、空气动力学、热力学、机械学、材料学、电力电子技术、控制技术等多学科交叉领域中大量的科学技术和工程实际问题。风能利用技术的发展既有利于推动各学科间的相互促进和渗透,也为从事科学技术研究开发的人员提供了一个广阔的空间。

随着社会对能源和环境问题的日益关注,风能及其利用已成为社会热点。以在校大学生为主的广大有志青年迫切希望了解风能利用技术的相关知识,目前有关风能的书籍大多侧重于风力发电技术,专业性比较强,不能满足专业背景各异的广大大学生的阅读需要。因此,本书编写的宗旨是由浅入深地全面介绍风能及其利用的相关知识,让每个读者都能在本书中找到他所感兴趣的内容,激发读者展开新的风能利用技术的研究和开发。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不足之处,欢迎读者予以批评和指正。

编者

2015年9月

第1章 风	(1)
1.1 风的形成	(1)
1.2 地球的气压带和风带	(1)
1.2.1 气压带	(1)
1.2.2 风带	(2)
1.3 影响风的因素	(3)
1.3.1 气压	(3)
1.3.2 地球偏转力	(3)
1.3.3 季风	(4)
1.3.4 海陆风	(4)
1.3.5 山谷风	(5)
1.4 描述风的参数	(6)
1.4.1 风向的测量与表示方法	(6)
1.4.2 风速的测量与表示方法	(7)
1.4.3 风速与风级	(7)
思考题	(8)
第2章 风能资源	(9)
2.1 人类早期风能利用史	(9)
2.2 理论可用风能	(10)
2.3 有效可用风能	(11)
2.4 世界风能资源分布	(11)
2.5 我国风能资源分布	(14)
思考题	(16)
第3章 风能的利用	(17)
3.1 一般用途	(17)
3.1.1 风帆助航	(17)
3.1.2 清选谷物	(18)
3.1.3 风力提水	(19)
3.1.4 风能制热	(21)
3.2 风力发电	(22)
3.2.1 风力发电的历史进程	(22)

3.2.2 风力机的类型	(24)
3.2.3 国内外风力发电的发展	(25)
3.2.4 国内外风力发电政策	(28)
思考题	(30)
第4章 水平轴风力机的空气动力学	(31)
4.1 概述	(31)
4.2 风力机特征系数	(31)
4.3 风能转化过程	(35)
4.4 致动盘	(36)
4.5 风轮圆盘理论	(38)
4.6 叶素理论	(39)
4.7 叶片设计	(41)
4.7.1 概述	(41)
4.7.2 叶片设计的方向	(42)
4.7.3 变速运行时的优化设计	(44)
4.7.4 实际叶片设计	(45)
4.7.5 阻力对最佳叶片设计的影响	(46)
4.7.6 恒速运行时的最佳叶片设计	(47)
4.8 翼型的升力与阻力	(47)
4.8.1 升力和阻力的产生	(47)
4.8.2 翼型	(48)
4.8.3 翼型的升力与阻力特性	(50)
思考题	(52)
第5章 水平轴风力机的特性	(53)
5.1 特性曲线	(53)
5.1.1 概述	(53)
5.1.2 $C_p - \lambda$ 功率特性曲线	(53)
5.1.3 叶片实度对功率特性的影响	(53)
5.1.4 $C_Q - \lambda$ 力矩曲线	(55)
5.1.5 $C_T - \lambda$ 推力曲线	(55)
5.2 荷载分析	(57)
5.2.1 概述	(57)
5.2.2 荷载分类	(57)
5.2.3 重力荷载	(58)
5.2.4 惯性荷载	(60)
5.2.5 气动荷载	(62)

5.2.6 运行荷载	(63)
思考题	(64)
第6章 水平轴风力机的整体设计	(65)
6.1 概述	(65)
6.2 风力机的直径	(65)
6.2.1 成本模型	(65)
6.2.2 基准机型	(66)
6.2.3 成本模型实例分析	(66)
6.3 风力机的功率	(68)
6.3.1 风力机容量的简化优化模型	(68)
6.3.2 最佳额定风速与年平均风速的关系	(70)
6.4 风轮转速	(71)
6.5 叶片数量	(72)
6.5.1 风轮转速与实度的理想关系	(72)
6.5.2 最佳风轮转速	(72)
6.5.3 噪声限制对风轮转速的影响	(72)
6.5.4 视觉考虑	(73)
6.5.5 叶片数目	(73)
6.6 功率调节	(75)
6.6.1 被动失速调节	(75)
6.6.2 主动变桨距调节	(76)
6.6.3 被动变桨距调节	(78)
6.6.4 主动失速调节	(78)
6.6.5 偏航调节	(79)
6.7 制动系统	(79)
6.7.1 空气动力制动	(79)
6.7.2 机械制动	(80)
6.7.3 停机和空转比较	(81)
6.8 恒速、双速或变速方案	(81)
6.8.1 恒速方案	(81)
6.8.2 双速方案	(81)
6.8.3 变速方案	(82)
6.9 风轮相对于塔架的位置	(82)
6.9.1 上风向布置	(83)
6.9.2 下风向布置	(83)
6.10 塔架的刚度	(83)

思考题	(84)
第7章 水平轴风力机的零部件及辅助系统	(85)
7.1 风力机的整体结构	(85)
7.2 叶片	(85)
7.2.1 空气动力设计	(86)
7.2.2 叶片内部结构	(87)
7.2.3 叶片材料	(87)
7.2.4 叶片制造工艺	(89)
7.2.5 叶片防雷结构	(90)
7.2.6 叶片根部的固定	(90)
7.3 变桨轴承	(91)
7.4 轮毂	(93)
7.5 齿轮箱	(93)
7.5.1 齿轮箱的分类	(93)
7.5.2 风力发电机组用齿轮箱	(94)
7.6 发电机	(95)
7.6.1 发电机的基本工作原理	(95)
7.6.2 发电机的分类	(96)
7.6.3 风力发电用发电机的特殊性	(97)
7.6.4 常用风力发电用发电机	(97)
7.7 制动器	(99)
7.8 偏航系统	(100)
7.9 塔架	(101)
7.10 基础	(102)
思考题	(103)
第8章 垂直轴风力机	(104)
8.1 概述	(104)
8.2 阻力型垂直轴风力机	(104)
8.2.1 阻力的产生	(104)
8.2.2 基本工作原理	(105)
8.2.3 特点	(107)
8.2.4 用途	(107)
8.3 升力型垂直轴风力机	(108)
8.4 垂直轴风力机的关键参数及存在的问题	(110)
8.4.1 关键参数	(110)
8.4.2 存在的问题	(111)

8.5 水平轴和垂直轴风力机的比较	(111)
思考题	(113)
第9章 风力发电系统	(114)
9.1 系统组成	(114)
9.1.1 机械装置	(114)
9.1.2 控制系统	(115)
9.1.3 电气系统	(117)
9.2 风力发电系统运行方式	(119)
9.2.1 离网运行	(119)
9.2.2 并网运行	(119)
9.3 风能的储存	(120)
9.3.1 电池储能	(120)
9.3.2 飞轮储能	(120)
9.3.3 抽水储能	(121)
9.3.4 压缩空气储能	(121)
9.3.5 电解水制氢储能	(122)
9.3.6 超导储能	(123)
9.4 风光互补系统	(124)
9.5 风水互补系统	(125)
思考题	(125)
第10章 风电场	(126)
10.1 风电场前期工作	(126)
10.1.1 风电场宏观选址	(126)
10.1.2 风电场的测风	(127)
10.1.3 风电场的规划	(128)
10.1.4 风电场预可行性研究报告和可行性研究报告	(128)
10.1.5 风电场微观选址	(129)
10.2 海上风电场	(130)
10.2.1 海上风电场的发展	(131)
10.2.2 海上风电场关键技术	(132)
思考题	(136)
第11章 风力发电的经济性分析	(137)
11.1 容量系数与年发电量	(137)
11.2 发电成本	(139)
11.3 风力发电的环境价值	(140)
11.3.1 火力发电与风力发电对环境的影响	(140)

11.3.2	污染物环境价值标准	(140)
11.3.3	风力发电的环境价值分析	(141)
11.4	风力发电的经济性分析	(142)
11.4.1	风力发电实际成本状况分析	(142)
11.4.2	火力发电成本	(143)
11.4.3	火力发电综合成本	(144)
11.5	碳交易	(144)
11.5.1	交易基本原理	(144)
11.5.2	机制	(145)
11.5.3	低碳经济	(145)
	思考题	(146)
第12章	风力发电的展望	(147)
12.1	风力发电的奇思妙想	(147)
12.1.1	人造龙卷风发电	(147)
12.1.2	全永磁悬浮风力发电机	(148)
12.1.3	利用风筝发电	(148)
12.1.4	高楼大厦之间的风力发电	(150)
12.1.5	太阳能烟囱热能风力发电	(150)
12.1.6	多转子风力发电机	(152)
12.1.7	无叶片风力发电机	(154)
12.2	风力发电的未来主要课题	(155)
12.2.1	风力制氢	(155)
12.2.2	智能电网	(157)
	思考题	(157)
	参考文献	(159)

第 1 章

风

1.1 风的形成

在地球周围有数公里厚的大气层,太阳辐射使地球表面受热不均,引起大气层中压力分布不均,大气沿水平方向运动形成风。地球上各纬度所接受的太阳辐射强度是不同的,在赤道和低纬度地区,太阳高度角大,日照时间长,太阳辐射强度强,地面和大气接受的热量多、温度较高;在高纬度地区太阳高度角小,日照时间短,地面和大气接受的热量少,温度低。这种高纬度和低纬度之间的温度差异,形成南北之间的气压梯度,使大气做水平运动。地球的自转使大气水平运动发生偏向的力,称为地转偏向力。地球大气运动除受气压梯度力外,还受地转偏向力的影响。大气运动是这两种力综合影响的结果。

1.2 地球的气压带和风带

根据气压大小及其形成的风,在地球表面分布着 7 个气压带和 6 个风带,如图 1.1 所示。

1.2.1 气压带

由于地球表面不同纬度接受的太阳辐射不同,形成不同的气压区域,这些区域就是气压带。

1. 赤道低气压带(1 个)

赤道低气压带分布在赤道附近,由于终年高温,空气受热膨胀上升,到高空向两侧外流,引起气柱质量减少,低空形成低压带。

2. 副热带高压带(2 个)

副热带高压带分布在南、北纬 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$,自低纬高空向极地流动的气流在地转偏向力作用下质量增加而形成。它随季节南、北移动达几十个纬度,活动范围约占地球的一半,是对大气环流影响最大的气压带。

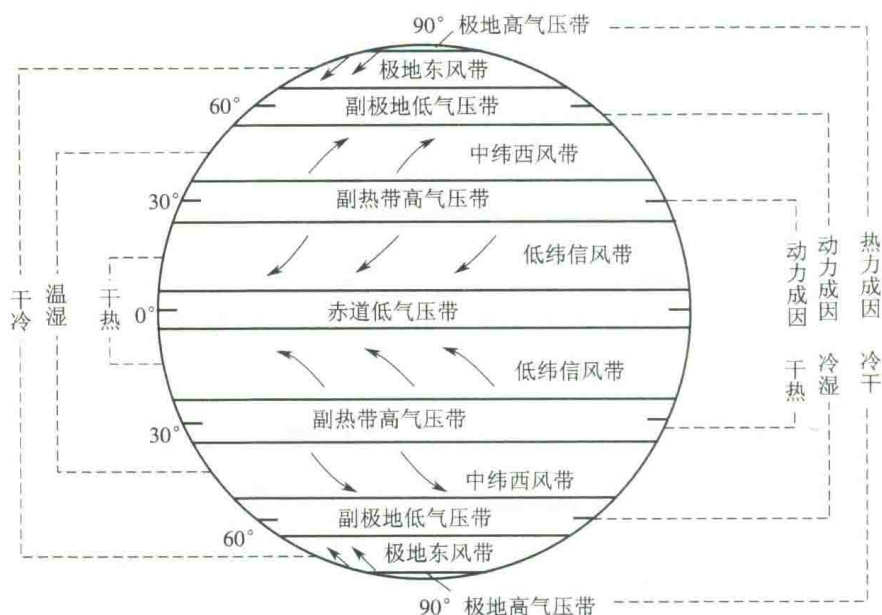


图 1.1 气压带和风带

3. 副极地低气压带(2个)

副极地低气压带分布在南、北纬 60° 及其两侧各约 5° , 是由于来自副热带高压带的热空气向高纬度移动与来自极地高压带的冷空气相遇, 热空气被迫抬升, 地面形成低压而形成的。

4. 极地高压带(2个)

极地高压带分布在北极和南极极区, 空气受冷收缩、积聚、质量增加, 在低空形成的高压带。冬季强度增大, 其范围扩展; 夏季势力减弱, 其范围收缩。

全球 7 个纬向气压带排列规则, 高、低压带交错分布, 并且气压带可随太阳直射点位置的变化而南北平移, 就北半球而言, 气压带的位置大致是夏季偏北, 冬季偏南, 上下移动各约 5° 。

1.2.2 风带

在忽略地表高低起伏、海陆分布差异的情况下, 由于三圈环流, 在气压带之间形成全球性大气环流。全球性大气环流分布在不同纬度位置, 形成了不同性质的大气水平运动地带, 叫作风带。风带共有 6 个, 包括极地东风带(2 个)、中纬西风带(2 个)和东北(南)信风带(2 个), 南北半球相似。风带的形成和特点见表 1.1。

表 1.1 风带的形成和特点

风名	成因	风带	风向
信风带	从副热带高压带吹向赤道低压带的定向风	终年吹着信风的地带	北半球盛行东北信风, 南半球盛行东南信风
西风带	从副热带高压带吹向副极地低压带的定向风	在南北纬 40° ~ 60° 盛行西风的地带	偏转为西风(南北半球都为西风)
东风带	从极地高压带吹向副极地低压带的风	在极地盛行东风的地带	偏转为东风(南北半球相同)

1.3 影响风的因素

气压、地转偏向力(科里奥利力)、季节、海陆差异、地形差异都对风有影响。

1.3.1 气压

气压的大小与海拔高度、大气温度、大气密度等有关,一般随高度升高按指数规律递减。气压有日变化和年变化,一年之中冬季比夏季气压高;一天中气压有一个最高值和一个最低值,分别出现在 9:00 ~ 10:00 和 15:00 ~ 16:00,还有一个次高值和一个次低值,分别出现在 21:00 ~ 22:00 和 3:00 ~ 4:00。气压日变化幅度较小,一般为 0.1 ~ 0.4 kPa,并随纬度增高而减小。

气压变化与风关系密切,风的起动和快慢都取决于气压。

1.3.2 地球偏转力

地球上水平运动的物体,无论朝着哪个方向运动,都会发生偏向:在北半球向右偏,在南半球向左偏,这种现象称作地球自转偏向力,也叫地球偏转力,如图 1.2 所示。

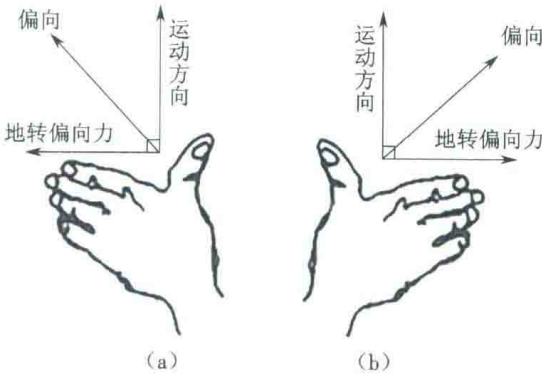


图 1.2 地球偏转力对运动的影响
(a) 南半球 (b) 北半球

地转偏向力是人们为了便于对这种偏向现象进行研究而假想的一种力。这种假想的力与风向是垂直的,在北半球指向风向的右侧,而在南半球指向风向的左侧。由于它只说明空气和转动着的地面之间存在相对运动,而并不是作用于空气的实际的力,因此只能使风向偏转,而不能使风起动,也不能使已经起动的风改变速率。

1.3.3 季风

在一个大范围区域内,它的盛行风向或气压系统明显受季节变化的影响。这种在一年内随着季节不同有规律转变风向的风,称为季风(中国古称信风)。季风盛行地区的气候,称为季风气候。

季风形成的原因,主要是海陆间热力环流的季节变化。夏季大陆增热比海洋剧烈,气压随高度变化慢于海洋上空,所以到一定高度,就产生从大陆指向海洋的水平气压梯度,空气由大陆流向海洋;在地球表面,海洋上形成高压、大陆形成低压,空气从海洋吹向大陆,形成了与高空方向相反气流,构成了夏季的季风环流。在我国为东南季风和西南季风,夏季风特别温暖而湿润。

冬季大陆迅速冷却,海洋上温度比陆地要高些,因此大陆为高压,海洋上为低压,低层气流由大陆流向海洋,高层气流由海洋流向大陆,形成冬季的季风环流。在我国为西北季风,部分地区变为东北季风,冬季风十分干冷。

世界上季风明显的地区主要有南亚、东亚、非洲中部、北美东南部、南美巴西东部以及澳大利亚北部,其中以印度季风和东亚季风最著名。有季风的地区都会出现雨季和旱季等季风气候。夏季时,吹向大陆的风将湿润的海洋空气输进内陆,往往在那里被迫上升成云致雨,形成雨季;冬季时,风自大陆吹向海洋,空气干燥伴以下沉,天气晴好,形成旱季。

1.3.4 海陆风

海陆风的形成与季风相同,也是由大陆与海洋之间的温度差异的转变引起的。不过海陆风的范围小,以日为周期,势力也薄弱。由于海、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,大陆上的气流受热膨胀上升至高空流向海洋,到海洋上空冷却下降,近海面上的空气吹向大陆,补充大陆的上升气流,形成一个完整的热力环流;夜间环流的方向正好相反,所以风从大陆吹向海洋,如图 1.3 所示。这种白天从海洋吹向大陆的风称为海风,夜间从大陆吹向海洋的风称为陆风。

海陆风的强度在海岸最大,随着离岸的距离变远而减弱,一般影响距离在 20 ~ 50 km。海风的风速比陆风大,在典型的情况下,风速可达 4 ~ 7 m/s,而陆风一般仅 2 m/s 左右。海陆风最强烈的地区在温度日变化最大及昼夜海陆温差最大的地区。低纬度日射强,所以海陆风较为明显,尤以夏季为甚。

此外,在大湖附近同样日间有风自湖面吹向陆地,称为湖风;夜间有风自陆地吹向湖面,称为陆风,两者合称湖陆风。

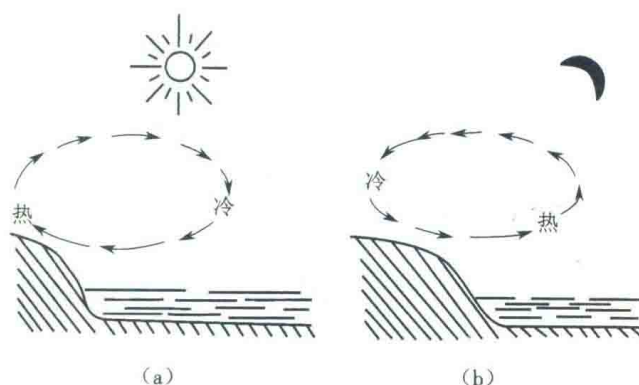


图 1.3 海陆风示意图

(a) 海风 (b) 陆风

1.3.5 山谷风

山谷风的形成原理与海陆风是类似的,如图 1.4 所示。在山区,由于白天山坡接受太阳光较多,空气增温较快,温度高于同高度山谷的空气温度,山坡上的暖空气从坡地流向谷地上方,谷地的空气则沿着山坡向上弥补流失的空气,从而形成由山谷吹向山坡的风,称为谷风。

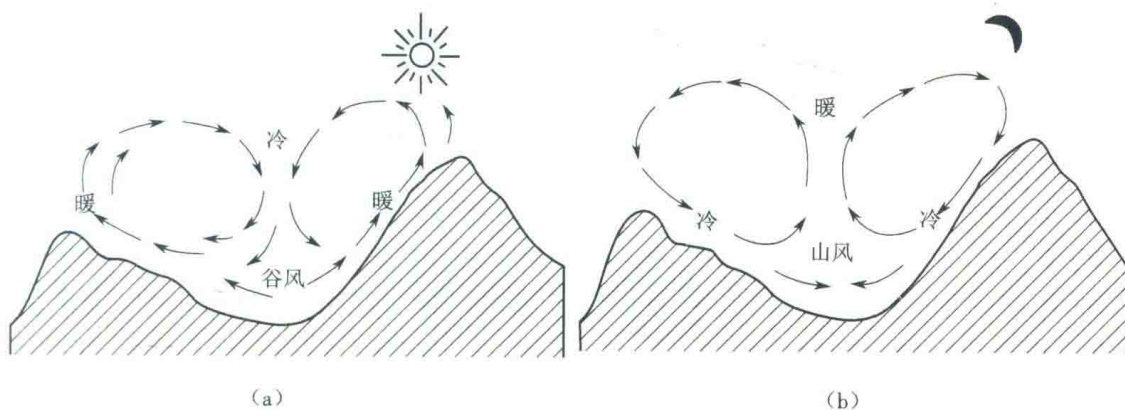


图 1.4 山谷风

(a) 谷风 (b) 山风

夜间,山坡上的空气因辐射冷却,空气降温较快,而谷地上空,同高度的空气因离地面较远,降温较慢。于是山坡上的冷空气因密度大,沿坡地流下山谷,称为山风。

山谷风的风速一般较弱,谷风比山风大一些,谷风一般为 $2 \sim 4 \text{ m/s}$,有时可达 $6 \sim 7 \text{ m/s}$ 。谷风通过山隘时,风速加大。山风一般仅 $1 \sim 2 \text{ m/s}$,但在峡谷中,风力还能增大一些。

1.4 描述风的参数

风是矢量,既有大小,又有方向,所以描述风的参数有风向和风速。

1.4.1 风向的测量与表示方法

风向测量是指测量风的来向,风向标是测量风向的最通用的装置(图 1.5),一般由层翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴四部分组成。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。



图 1.5 风向标

风向一般用 16 个方位表示,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° 。

各种风向出现的频率标注在极坐标图上,则形成风向玫瑰图,如图 1.6 所示。最常见的风向玫瑰图是在一个圆上引出 16 条放射线,它们代表 16 个不同的方向,每条直线的长度与这个方向的风的频率成正比。

风速仪(风速和风向)一般安装在离地 $10 \sim 12$ m 的高度,如果附近有障碍物,其安置高度至少要高出障碍物 6 m 以上,指北的短棒要正对北方,风向箭头指示风的方向。

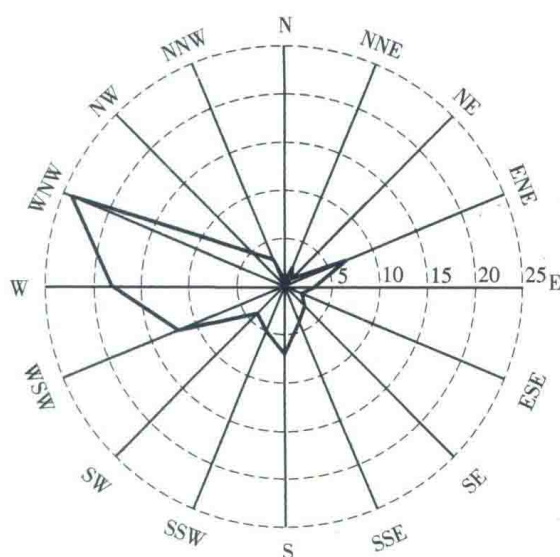


图 1.6 风向玫瑰图

1.4.2 风速的测量与表示方法

风时有时无、时强时弱,其大小可以用风速和风级来衡量。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(图 1.7)。用风速仪测得的风速是当时的瞬时风速,由于风速是不断变化的,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、季平均风速或年平均风速。



图 1.7 风速仪

1.4.3 风速与风级

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。我国唐代李淳风在他的著作《乙巳占》中提出过 9 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