

风能利用装置设计基础

王锦侠 车茂隆 编著

机械工业出版社

风能利用装置设计基础

王锦侠 车茂隆 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

机械工业出版社

内 容 简 介

本书首先介绍了风能的定义及其形成的原理,以及风能的测量方法和数据处理方法,然后在阐明空气动力学基本原理的基础上,详细地阐述了水平轴和垂直轴风力机的设计和计算方法,与此同时,也介绍了几种典型的风力机和风力机的应用装置。

本书可作为大专院校或农业机械学校有关新能源专业的参考教材;对于专业从事风能利用研究的工程技术人员和科技管理干部,以及知识青年自学方面也是一本较为系统的参考书。

风能利用装置设计基础

王锦侠 车茂隆 编著

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

江苏丹阳人民印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 • 印张 85/8 • 字数 213千字

1986年11月 上海第一版 • 1986年11月 上海第一次印刷

印数 0,001—8,000 • 定价: 2.30元

统一编号: 15033 • 6497H

前 言

风能是一种免费的、清洁的和取之不尽的能源。几千年以来，它长期被用来为人类服务，用于驱动帆船，驱动风轮机磨谷物、抽水和发出电力。二次世界大战以后的几十年中，由于石化燃料的大量开采，大规模发展水力、火力发电站与核电站，风能利用的趋势迅速下降。但是，地下能源资源终将日趋短缺，而且大量使用这些资源带来的环境污染问题正在威胁着人类未来的生存。因此，许多有识之士逐渐清醒地认识到，未来的能源需求将要由多种能源来提供，其中太阳能和风能将是最主要的补充和替代能源。从近期的技术与经济性的综合条件来衡量，风能是占第一位的可再生能源。

七十年代初期以来，许多工业发达的国家，包括美国、英国、加拿大、瑞典、丹麦、荷兰和意大利等国家，纷纷成立“太阳能-风能”专家小组，探索和评价上述可再生能源作为国家未来能源的潜力。得出的重要结论之一是：到2000年，预计各国的全年用电量中的10~20%将完全可以由风能来提供。许多国家的政府采纳了这一具有长远战略意义的科学论断，并以立法的形式制定了发展风能利用的政策、法律和实施计划。因此，近十年来，各国除了继续支持发展10kW以下的风轮机组供分散的边远和孤立地区使用以外，还大力发展几十kW和几百kW的风轮机组，以便在风力资源较好的地区建立风轮机群（风力田），并使其联机运行和并网供电。另外，从更长远的目标和技术储备出发，还要重点投资开发研制MW级的风力发电机组。正在运行、建造和设计中的包括有2000kW、2500kW、3200kW、4000kW和最大达7500kW的机组。以美国为例，近三年来，已有几十家公司在加利福尼亚州建立了上百个风轮机群，总共拥有几千台机组，正在并网运行。这一势头将在今后的几年内成倍地增长。MW级的机组也正在几个风场上进行运行试验中。正是由于应用了近代工业发展的成就和广泛采用了航空与航天技术，以及新一代电子计算机等方面的成果，才使上述令人鼓舞的风能利用势头得以实现。

我国从七十年代后期也开始重视风能利用的工作。先后研制了100W左右的微型机组、几kW的小型机组和几十kW的中型机组。同时，在近几年开始了几百kW和MW级风轮机组的研制工作。微型、小型和中型机组将主要供我国广大的缺乏常规能源的农、牧、边远、高山与沿海岛屿等地区作抽水灌溉和发电之用。在开发大西北中，为解决种草、种树，为恢复植被与生态平衡和提供家用燃料等所需的能源，利用中型机组建立风轮机群来发电和抽水将是近期最切实可行的方案。我国目前已有许多从事风能利用的研究单位、高等院校、工厂和地方科技部门，并拥有相当一批热爱风能利用工作的科技人员。

在风能利用工作中，有三个方面的主要工作内容：首先是通过风力资源的调查，选择合适的安装风轮机的场址；其次是设计出能最有效利用风能的风轮机；最后是设计出能将风能转换为需用能源的方法，并要找出能将高风时期产生的能量储存起来的方法，以便在无风时期仍能提供必要的能源。

本书在广泛收集国内外有关风能利用的近期资料的基础上，对上述的三个主要方面的基

本理论，设计与计算方法，以及工艺技术问题均作了较深入的论述。同时还着重介绍了风轮机的技术发展史和近况，风轮机的应用，以及风轮机的运行和维修保养等方面的基本知识。毫无疑问，本书将受到广大风能利用工作者的欢迎，也必定有利于提高现有的技术水平和人材的培养，同时在推动我国开发利用风能去解决未来能源的工作中将会起到非常积极的作用。

中国太阳能学会理事 陈启民
风能专业委员会副主任
一九八四年十月一日于北京

目 录

第一章 风和风能资源	1
§ 1-1 风能的形成及其要素	1
§ 1-2 风能要素的测量仪器及其使用方法	7
§ 1-3 风能要素测量数据的工程处理	10
§ 1-4 我国的风力资源	20
第二章 风力机的技术发展史和分类	24
§ 2-1 国外的风力机发展简史	24
§ 2-2 我国风能利用的概况	27
§ 2-3 风力机的分类	29
§ 2-4 当前发展中的几种新颖风力机	33
第三章 风力机械的理论基础	38
§ 3-1 风能利用系数	38
§ 3-2 风力机的功率估算	40
§ 3-3 风力机叶片断面的形状及其几何参数	41
§ 3-4 作用在翼型上的气动力	42
§ 3-5 翼型的气动特性曲线	43
§ 3-6 翼型系列	47
§ 3-7 风力机转子工作时的气动力及其力矩	47
§ 3-8 风力机的空气动力特性	49
§ 3-9 模型试验及相似原理	51
第四章 水平轴风力机	53
§ 4-1 水平轴风力机的分类	53
§ 4-2 叶片数目、直径及断面形状的确定	55
§ 4-3 叶片弦长的确定	59
§ 4-4 确定弦长和螺距角需要考虑的因素	67

§ 4-5 叶轮气动特性的计算	68
§ 4-6 水平轴风力机设计举例	71
§ 4-7 水平轴风力机叶片的强度计算	73
§ 4-8 水平轴风力机的迎风装置和调速装置	78
第五章 垂直轴风力机	84
§ 5-1 垂直轴风力机的分类	84
§ 5-2 “S”型转子垂直轴风力机	84
§ 5-3 “Φ”型转子风力机	89
§ 5-4 用电子计算机计算Φ型转子气动特性举例	93
第六章 风力机装置的应用	95
§ 6-1 中小型风力机装置的用途分类和效率	95
§ 6-2 低速风力机的提水装置	96
§ 6-3 高速风力机的提水装置	100
§ 6-4 中小型风力发电装置	102
第七章 风力机装置的检查和维修保养	105
§ 7-1 风力机装置运行前的检查	105
§ 7-2 风力机装置的维修保养	105
附录	107
I 美国的翼型系列	107
II 我国风能资源的分布	117
III 符号表	129
参考文献	131

第一章 风和风能资源

什么是风？概括地说，风就是大气的运动。

地球的最外部包围着一层厚厚的大气是不断地处于运动状态的，在气象学上一般把大气垂直方向的运动称为气流，水平方向的运动称为风。

风是气象要素之一，它可以将一处的热能、水汽、固体杂质等运送到遥远的另一处。在风的运动中，大气可以比作一台将热能转为动能的发动机，发动机的主要能量来源是太阳辐射。因为在地球赤道与两极之间接受太阳辐射的入射量不同，于是形成大气层各处的温度差异，从而产生大气垂直与水平方向的运动。所以，风能也是太阳能的转换形式之一。

地球接受到的太阳辐射能量约有23%被大气吸收，这部分能量有41万亿kW左右。据初步估算，地球上近地面风能的总量约为 $1.3 \times 10^{15} \text{ W}$ ，可以被利用的风能有 10^{12} W ，约为可利用水力资源的十倍。如果这一能量的1%可资利用，则相当于世界能量消耗率的3%，如把它用于发电，则发电量相当于世界总发电量的8~9%。所以，风能作为地球上巨大的能量资源，将是常规能源的一种重要的替代或补充。

§ 1-1 风能的形成及其要素

1. 风形成的原理

为了说明风的形成原理，可以做一个实验，假定有两个高度相同、断面相同的液体柱，两柱的上端假定为真空，且液体的密度均等。如果对左柱加热使温度升高，液体因此膨胀，结果左柱高度（横断面不变）增加，而右柱温度未变，液位亦保持原状。由此可见，比较左右两个液体柱在相同水平面上的压力，二者之间已有差别，水平愈高，差别愈大。当把两柱的底部连通时，为了使相同水平面上的压力得到平衡，液体就要流动，开始由左柱上部流向右柱上部，此时，较热的液柱散失了物质，因而变轻；而较冷的右柱获得了物质，因而变重。即在同一水平面上右柱压力增大，左柱减小，这样立刻引起液体流动，由较冷的液柱下部流向较热液柱下部，于是形成了液体循环。

同样的原理也发生在地面上的大气中，如果地面上的空气各方面所受的压力相等，成为平衡状态，就不会发生流动；如果空气各方面所受的压力不等，空气将从压力较大的一方向压力较小的一方移动。地面上由于气温分布不均匀，所以气压分布也不均匀，这样就引起空气运动而产生风，故而地面风的形成是由于气压的差异，换句话说，也就是决定于气压梯度。

在大气中，气压随着高度非常迅速地递减，而沿水平方向的气压变化则比较滞缓，因此气压梯度几乎是垂直向上的，等压面几乎是水平的。如果等压面和地面完全水平地平行，那末垂直向上的气压梯度为地球的重力所平衡，地面就将没有空气流动，即不会形成风。但是当等压面不完全水平时，则气压梯度将和垂直方向交成一个角度，这时可以将气压梯度 G 分成两个分力：垂直梯度 G_v 和水平梯度 G_h ，如图1-1所示。

在这种情况下，垂直分力 G_v 为空气的重力所平衡，而水平分力 G_h 没有力来平衡，空气开始向气压小的方向移动，于是形成风。所以形成风的动力是水平的气压梯度。

水平梯度是以单位距离除气压差来计量的，其单位距离通常用111.1km（即经度1度之长）。如果两地的气压差是266.6 Pa，而距离是200 km，则其水平梯度为

$$G_h = \frac{266.6 \times 111.1}{200} = 147.96 \text{ Pa}$$

当等压面和地面不平行而倾斜时，无论在大气的低层或高层，大气的流动都遵循等压面的斜度由高往低，而且倾斜愈甚，则水平气压梯度愈大，风力也愈强。

2. 形成风的作用力

（1）梯度力 当等压面处于非水平状态时，气压梯度的水平分力没有其它的力来平衡它，空气在该力的作用下便开始沿这个力的方向移动，这个力就是梯度力，它是风的最基本因素。风应向梯度方向运动，也就是应该向等压线的垂直方向运动（见图1-2）。但是，由于大气除了受梯度力的作用之外，尚有其它力的作用，所以风的实际方向有所转变。

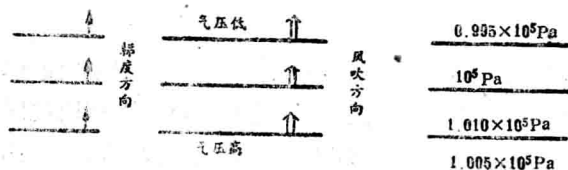


图1-2 梯度方向和风吹方向图

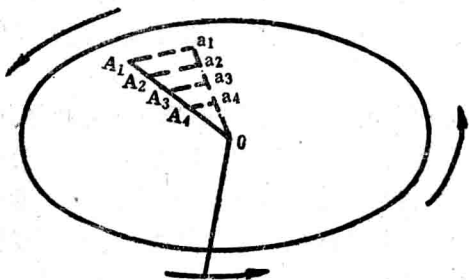


图1-3 由于水平面旋转而偏离直线的轨迹图

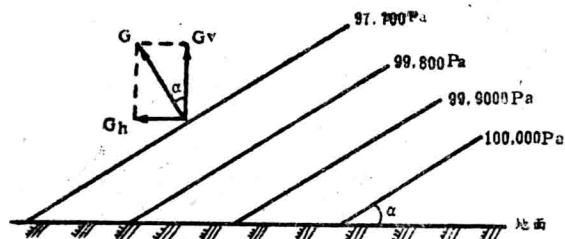


图1-1 等压面倾斜时气压梯度的分力示意图

（2）地转偏向力 地转偏向力是地球自西向东自转的力。北半球所有运动物体的运动方向都偏向于起始运动的右方（南半球偏向于左方），因此风的方向也偏向于气压梯度的右方。正如图1-3所示，物体从O点沿直线运动，依次应达到A₁，A₂，A₃和A₄的位置。但是，由于水平面在旋转，当物体将到A₁点时，a₁点已代替了A₁点的位置。依次类推，物体在平面上所画的运动轨迹将是a₁，a₂，a₃，a₄都是偏向右方。所以在地转偏向力的影响之下，北半球的风都向右偏（南半球的风都向左偏）。

地转偏向力常常是以垂直的方向作用于空气运动的方向，作用于一个单位

①根据1985年4月上海市颁发的《法定计量单位使用手册》，压力压强法定计量单位名称为“帕斯卡”（Pa），原来的巴（b）改为：1b=0.1MPa=10⁵Pa，1mmHg=133.322Pa。

质量上的地转偏向力 Θ ，其公式是

$$W = 2\omega V \sin \phi \quad (1-1)$$

式中 W ——地转偏向力 (N)；

ω ——地球旋转的角速度，即等于0.000073；

ϕ ——地理纬度 (°)；

V ——风速 (m/s)。

所以，上式亦可写为

$$W = 0.000146 V \sin \phi \quad (1-2)$$

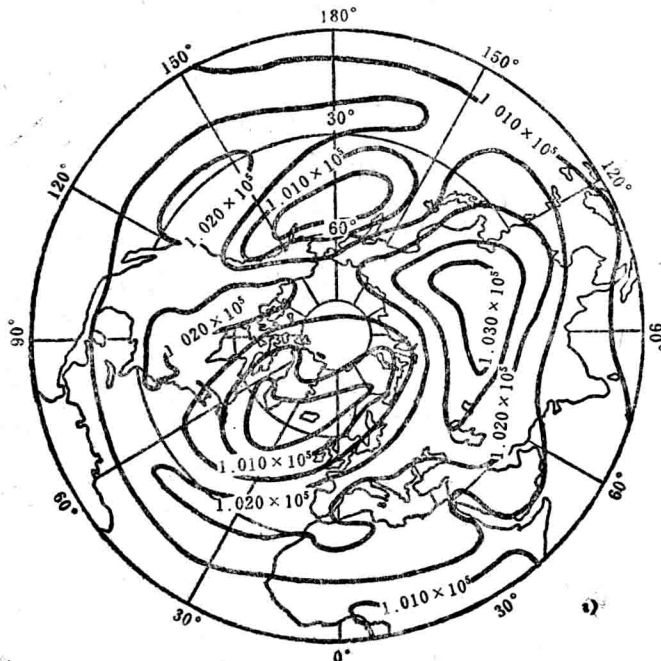
在地球赤道上 $\phi = 0^\circ$ ，地转偏向力也等于零；在地球两极 $\phi = 90^\circ$ ， $\sin 90^\circ = 1$ ，所以偏向力最大， $W = 2\omega V$

由此可见，地球上纬度愈高，偏向力愈大；纬度愈低，偏向力愈小。另一方面，风速愈大，偏向力也愈大。

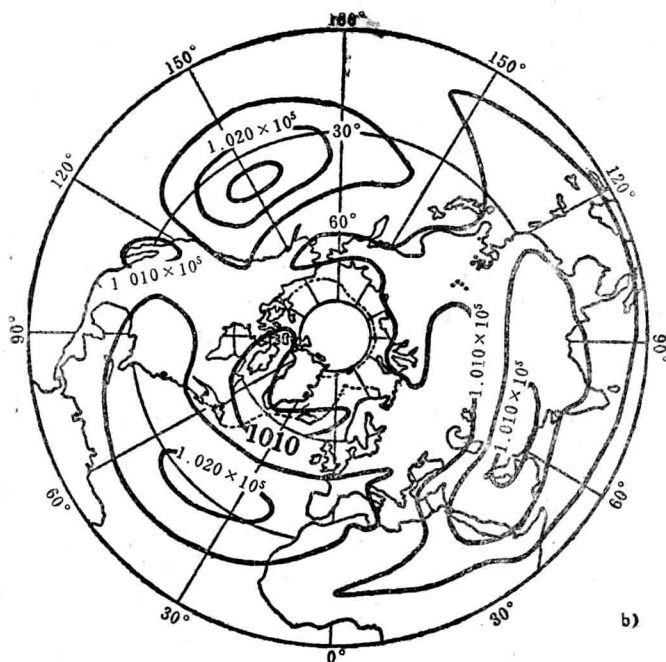
(3) 离心力 假如等压线不是直线，而是弯曲成闭合的圆形或椭圆形时，空气质点沿曲线运动，就要有离心力作用于质点上。离心力总是向着曲线突出的方向，并且与运动质点成直角，所以离心力的方向，或者与偏向力的方向一致，或者与之相反。

图1-4a、b是北半球，2月份和8月份海平面气压分布图 (单位为Pa)。这些圆形或椭圆形的等压线，假如愈向中心气压愈低，就称为低气压或气旋；假如愈向中心气压愈高，就称为高气压或反气旋。

在这种等压线的情况下，空气只有沿着等压线移动，梯度力、偏向力和离心力这三个水平方向的力才可能平衡。在气旋里，离心力指向运动方向的右方，和偏向力方向相同，空气沿等压线成逆时针方向的环流 (北半球)；当梯度力为偏向力和离心力所平衡时，也就形成



Θ 原来力的单位用达因 (dyn)，现一律改为牛顿 (N)，1dyn = 10^{-5} N。速度单位为m/s



1-4海平面气压分布图

a)2月份海平面气压

b)8月份海平面气压

与等压线平行的梯度风。

(4) 摩擦力 对风起决定作用的力除了梯度力、偏向力和离心力之外, 还有摩擦力。摩擦力分两种: 一种是近地面的空气与地面的摩擦, 另一种是运动着的空气内部自身所产生的摩擦。前一种摩擦力的方向与空气运动的方向相反, 其大小和空气运动的速度成正比。

由于摩擦力的存在, 当地面空气作直线运动时, 风向常与等压线成一角度, 如图 1-5 所示, 其中G为梯度力, V为风速, F为摩擦力, D为偏向力, R为D和F的合力。当G、D和F三者达到平衡时, G应等于R, 而方向则相反。由于V与R之间的角度大于 90° , 因而G与V之间的夹角 α 必小于 90° , 结果风速V偏向于等压线的左侧, 而不与等压线平行。当摩擦力减小时, α 角增大, 风向风速开始逐渐与等压线平行, 这就是所谓的地转风 (V_g)。

摩擦力的大小视地面的起伏情况而定, 地面愈不平坦, 摩擦力越大, 风速越小。所以在同样的梯度力之下, 风的速度是海上大于陆上, 草原大于林地, 平原大于丘陵, 高空大于地面。

在有森林的地方, 风速急剧地减小, 在森林边缘50m处, 风速减弱60~70%; 在距森林100m的地方, 风速减弱7%; 在距森林200m的地方, 减弱2~3%; 在离地面300m的高处, 比地面21m处的风速全年约大四倍。

另一种摩擦是空气内部自身的摩

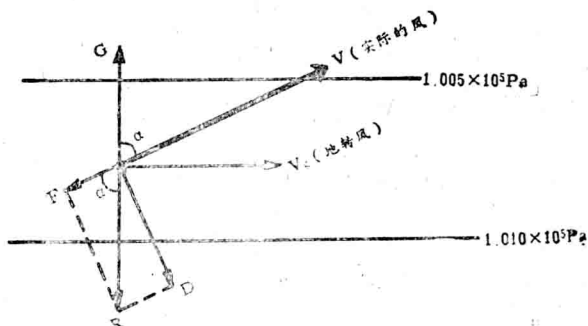


图1-5 梯度力偏向力摩擦力的平衡图

擦，也称为内侧摩擦，它使空气的运动由一个层传到另一个层。接近地面的空气层，因摩擦而产生很大的减速，上层减速较小，愈向上愈小，所以空气运动的速度是随着高度增加而逐渐增大（见图1-6）。

空气在500m高度以下，摩擦力的作用表现得最显著，这叫作摩擦层。陆地面上实际风速平均为地转风速的40%，海面上为70%。摩擦层以上，风速仍继续增大，直至大气的对流层顶才逐渐减小。

据统计资料结果表明，在陆地表面上，风速约为梯度风的40%，风向约与等压线成 20° 以上的交角；风速愈小，交角愈大。在崎岖的山地，风速甚小，交角可大至 60° 。在平滑的海面，平均风速约为梯度风的70%，风向与等压线成 $10^\circ \sim 15^\circ$ 交角。风力越强，就越和梯度风相接近，在台风的近中心部分，风向几乎与等压线平行。

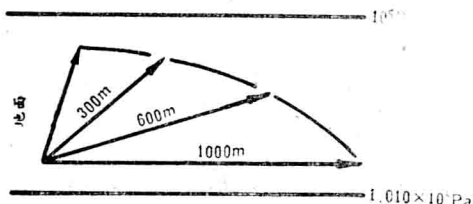


图1-6 风向风速的垂直分布图

3. 气流涡动

风是大气的水平流动，假如它的风向和风速一直固定不变，那末在某一点上通过的空气必将沿着同一流线流动。但是，因为地面本身凹凸起伏，且又有各种障碍物，所以空气沿着某一点流动时，决不可能是水平流动，而是伴随着无数的涡动。这时在任何一点上观测，从这点上通过的空气，它的几速和风向是不规则的，稍为呈现一种周期的变化，这叫作乱流。乱流的形状仿佛为有风时烟囱里冒出的长烟尾部那样，出现一个又一个的涡流，这又称为涡动。

气流的涡动，简单地说，就是空气无定向、无定速的涡旋式的流动。按其发生的原因，可分为动力涡动和热力涡动两种。

动力涡动是发生在空气与地面摩擦，以及气流围绕地面的树木、丘陵、建筑物等流动的时候，因为地面粗糙，气流经过障碍物时（见图1-7），由于空气的粘滞性，接近地面的空气粒子运动很慢，故而作相反的运动，于是形成涡流。

热力涡流是由于地面各点增热不一致所造成的。所有的岩石、土壤的性质、色泽、湿度以及斜坡方向等的不同，都能引起土壤和空气的增热不同。在增热较多的点上空气上升，增热较少的点上空气下降。在这两点接近的地方，就有上升与下降两种气柱发生，这两种气柱引起空气的颤动，也会形成涡动。这种涡动发展到很大的程度时，上升气流与下降气流可以贯穿整个对流层。

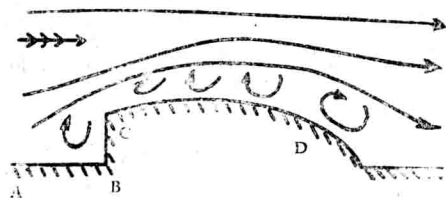


图1-7 气压在粗糙地面上的涡动图

4. 风能的主要特点

风能是一种巨大的、无污染的、可再生的能源。风能利用装置把风能转换成电力或其它能量形式，而不会产生任何污染物质。但是风能也存在着一些固有的缺点。

（1）能量密度低 风的能量就是空气运动的动能，据动力学分析结果，其能量密度的数学表达式为

$$\rho_1 = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (1-3)$$

式中 ρ ——空气密度，在标准状态下数值为 $1.225\text{kg}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ ；
 V ——瞬时风速（ m/s ）；
 ρ_1 ——能量密度（ kW/m^2 ）。

风能与水能相比，由于空气的密度仅是水的密度的 $1/816$ ，所以在相同流速下，欲获得与水能同样大小的功率，风轮直径要比水轮直径大几十倍到几百倍。即使与某些新能源相比，风能密度也是比较低的，例如太阳能的平均辐射强度约为 $1\text{kW}/\text{m}^2$ ，而风能要达到同级功率水平，风速必须在 11.7m/s 左右。

表（1-1）是一部分新能源的密度比较。

表1-1 风能与有关的能源密度比较表

能 源		密 度	
风 力	（风速在 3m/s ）	0.02	kW/m^2
水 力	（流速在 3m/s ）	20	kW/m^2
波浪力	（波高 2m ）	30	kW/m^2
潮汐力	（潮差 10m ）	100	kW/m^2
太阳能	{晴天平均} {昼夜平均}	{1 0.13}	kW/m^2
地 热	（全球平均）	10^{-6}	kW/m^2

（2）稳定性差 由于表征风力特性的各种参数都是随变量，如风向、风速等均受气候、温度、地形等许多因素的影响，所以风力的稳定性相对较差。一般来说，对某一地点的风能利用，要求一年中风向的变化及风向的频率能保持相对稳定。我国的地理位置，冬季为西伯利亚高压带产生的西北季风，夏季为太平洋上高压带产生的东南季风，而且比较稳定。我国因此是世界上著名的“季风国家”。

风速的变化对风能利用也有很大影响。因为风是无规则的脉动气流，有时在很短的时间内风速变化很大，有时在较长时间内风速变化较为平缓，故形成时大时小的不稳定性。

风速的测量，可以分别测瞬时风速、每小时平均风速、日平均风速、月平均风速和年平均风速，这些参数也都随时间发生变化。由于风与地表面摩擦的结果，风速随着距离地面高度的降低而减小，只有离地面 300m 以上的空间，风才不受地表面的影响。风速在垂直高度上的变化因地面高度而异，其数学表达式为

$$\frac{V_z}{V_1} = \left(\frac{Z_z}{Z_1} \right)^\alpha \quad (1-4)$$

式中 V_z ——高度 Z_z 上的风速；
 V_1 ——给定高度 Z_1 上的已知风速；
 α ——地表的粗糙系数。

对不同地点，相同高度上的风速视粗糙系数而定，地面粗糙度越大，风速越小。

§ 1-2 风能要素的测量仪器及其使用方法

风能主要的要素是风向和风速。

风向是指风吹来的方向（风出发的方向）；风速是指单位时间内空气流动所经过的距离。所以风的测量主要是风向和风速。观测风向和风速的仪器有不少，这里将介绍几种较简单且常用的仪器及其使用方法。

1. 观测风向的仪器

观测陆地上的风，一般均采用16个方位（见表1-2），观测海上的风，一般采用32个方位。

表1-2是表示16个方位的风向符号，图1-8是16个风向方位图。

表1-2 风向符号（16个方位）表

风 向	符 号	风 向	符 号
北	N	东北偏北	NNE
东	E	东南偏东	ESE
南	S	西南偏南	SSW
西	W	西北偏西	WNW
东 北	NE	东北偏东	ENE
东 南	SE	东南偏南	SSE
西 南	SW	西南偏西	WSW
西 北	NW	西北偏北	NNW

风向不是固定不变的，它在一昼夜和一年之间随时都有变化。如果对某一地点进行长时间的测定，就可以得到每一种风的风向频度（或称风向频率），所以可按照地平圈上的点来

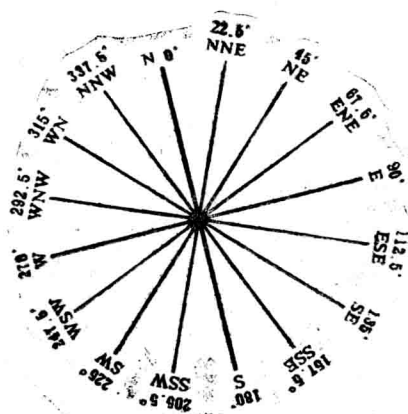


图1-8 风向方位图

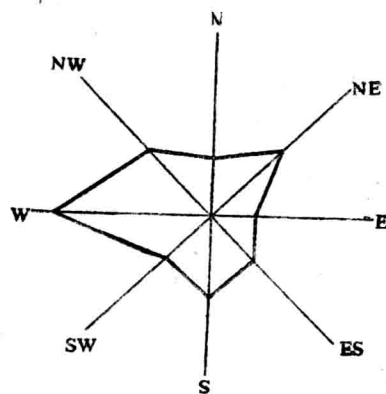


图1-9 风向频度图

确定风向的特征。为了正确地表明风向的分配情形，气象学上常常采用一种特殊的图式，即风向频度图，如图1-9所示。由于这种图式象一朵盛开的玫瑰花，所以有人也叫它作“风向玫瑰图”。

风向频度的计算方法，是将某一段时间内（月、季、年）的风向观测次数，按八个方位或十个方位分类统计，以每一风向的观测次数除以该时间内观测的总次数，再乘以100，即得到各种风向的频度（见表1-3）。然后将各种风向的频度画在频度图上，即可得出某一段时间内哪一种方向的风占据优势，例如在某一地点根据观测记录所作的风向频度图，如图1-9所示。

表1-3 风向频度观测统计表

风 向	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	总 计
观测次数	8	10	8	9	12	10	31	9	97
无风次数	8								
风向频度	$N = \frac{8}{97} \times 100$								

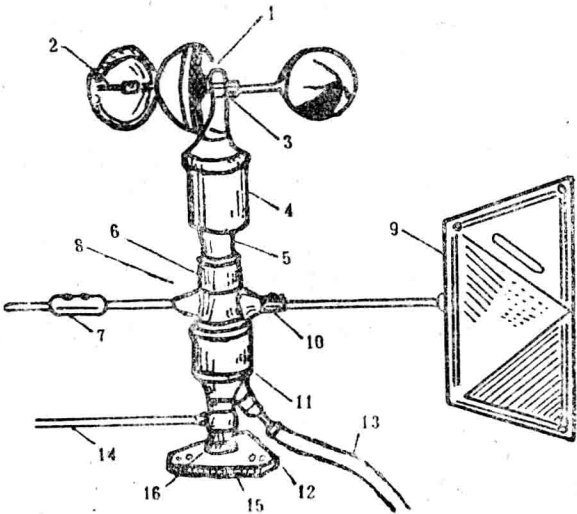


图1-10 电接风向风速计的感应器图

- | | | | |
|-----------|-------------|----------|-----------|
| 1—风杯压帽 | 2—风杯 | 3—风杯固定螺钉 | 4—风速表 |
| 5—风速表固定螺钉 | 6—风标座 | 7—平衡锤 | 8—锤臂固定螺钉 |
| 9—风向尾叶 | 10—风向尾叶固定螺钉 | 11—风向接触器 | 12—防水插头座 |
| 13—电缆 | 14—指南针 | 15—底座 | 16—底座固定螺钉 |

观测风向的仪器一般采用风向标(图1-10)。风向标的种类很多,但基本的构造是中部为一根垂直的转动轴,一端为头部,另一端为尾部(图1-10中的7、9)。当宽大的尾部受风吹动时,指标移动,使头部指向风之来向,可结合其下部设有的指示方向的横杆,就可识别风向。

风向标必须转动灵活,安装时必须水平的装在四周空旷地区,要高出地面10~12m(如果地面上有障碍物,它的安置高度至少要高出障碍物数米以上)。风向标下如装有指向杆,则指标向北所指的方向必与正北方向相符合。因为风向标不时地摆动,所以测定风向时,一定要走近风向杆,站在指示方向的标杆下,注视风向标在大约两分钟的摇摆范围后,才能确定其中央位置,再定当时的风向。现在国产的电接风向风速计,就是把风向标的摆动信号用电缆接到室内指示器和记录仪上,所以在室内就可以观测和记录风向了。

2. 观测风速的仪器

观测风速的仪器除了用电接风向风速计之外,一般常用携带式的三杯或四杯(或叶轮式)的风速仪,其计算单位用m/s或km/h。

转杯风速仪的构造是有3~4个半圆形的风杯,以等长和水平地装在垂直轴上,在轴的两端有蜗杆,此蜗杆与齿轮相联,齿轮系带动三个指针,这些指针就是风杯转数的计算器。有风时,因风杯凹凸两面所受风之压力不同而水平绕轴旋转,通过齿轮系带动指针在刻度盘上旋转,刻度盘上分别以个数计、百数计和千数计。

电接风向风速计是将风速表与风向标装在同一杆架上,它可以记录风的行程,同时每隔二分半钟记录一次瞬时风向。从记录中可以求出任意十分钟的平均风速和相应风向。该仪器的风速测量范围为2~40m/s,风向测量范围是16个方位。

目前各气象台已经广泛应用的是测风气球。这是一种体积为 $0.2\sim 0.3\text{m}^3$,充满着氢气的橡皮球,其上不携带仪器,当测风球飞升之后,在地面上利用经纬仪来观测,从经纬仪上计算出纵横的角度来,计算这些角度和测风气球上升的速度,就可以决定在各种高度上的风向和风速。但是,利用测风气球只能观测云少时的风向和风速,如在阴沉的天气中,测风气球很快就会被淹没在云里,使地面无法观测到测风气球。所以,为了要在任何天气中都能利用测风气球来决定风向和风速,目前一般运用无线电测位仪。它是在充满氢气的橡皮气球上装一种用金属杆制成的十字形照准器——无线电波反射器,金属杆的位置放在横面上。这种有照准器的气球被无线电测位仪的发送机朝其发出的无线电波照射着,照准器把这些电波反射出来,结果返回到无线电测位仪的接收机上。这样就能够确定在一定时间内带有照准器的气球在天空里的位置,从而确定各种高度中的风向和风速。所以这种带有照准器的气球称之为无线电测风气球。

3. 蒲福风力分级表

如果在没有风速仪的地方,或者当仪器发生故障的时候,可以利用风力等级来观测。风力等级是根据风对地面物体所引起的现象,将风的大小分为13级,以0~12数字记载(见表1-4)。

在用蒲福风力分级表的方法观测时,需要选择比较标准的观测点。在观测点处的地上物体必须在空旷的、不受任何障碍影响的地方,每次观测要同时选择几个标准物体进行观测。

表1-4 风力等级表（陆地地面特征）

风力等级	风的名称	陆地地面物征象	相当风速	
			km/h	m/s
0	无风	静，烟直上	小于1	0~0.2
1	软风	烟能表示风向，但风向标不能转动	1~5	0.3~1.5
2	轻风	人面感觉有风，树叶有微响，风向标能转动	6~11	1.6~3.3
3	微风	树叶及微枝摇动不息，旌旗展开	12~19	3.4~5.4
4	和风	能吹起地面灰尘和纸张，树的小枝摇动	20~28	5.5~7.9
5	清劲风	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波	29~38	8.0~10.7
6	强风	大树枝摇动，电线呼呼有声，举伞困难	39~49	10.8~13.8
7	疾风	全树动摇，迎风步行感觉不便	50~61	13.9~17.1
8	大风	微枝折毁，人向前行感觉阻力甚大	62~74	17.2~20.7
9	烈风	建筑物有小损坏（烟囱顶部及屋顶瓦片移动）	75~88	20.8~24.4
10	狂风	陆上少见，有则可使树木拔起或将建筑物损坏较重	89~102	24.5~28.4
11	暴风	陆上很少，有则必有重大损毁	103~117	28.5~32.6
12	飓风	陆上绝少，其摧毁力极大	118~133	32.7~36.9

§ 1-3 风能要素测量数据的工程处理

风的资料被广泛地应用于风能利用的实际和理论工作中。这些资料对于风力机械的设计具有特别重要的意义。

当前，应用风能资源的关键问题之一，是如何降低从风中获取单位能量的成本。解决这一问题的途径，除了正确的择址，提高风力机风轮、电机以及转动部件的能量转换效率以外，还要正确地选定设计参数，尤其是设计风速（或称为额定风速）。

风是向量，所以用方向和速率来描述，它们必须合在一起整理。因此，风的基本特征之一，应当是风的平均值或合成值（又可称为合成风或盛行风）。合成风可以计算在一定时间内（例如：月、季、年），在该地点所吹的风的影响下，空气质点所移动的路径。对于解决