

陈云程 陈孝耀 朱成名 编



# 风力机 设计与应用

风力机设计及应用

陈云程 陈孝耀 朱成名 顾宪成  
沈德昌 鄂培超 杜仁清 陈余岳 编

**风力机设计及应用**

陈云程 陈孝耀 朱成名 顾宪成 编  
沈德昌 鄂培超 杜仁清 陈余岳

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海群众印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 14 字数 310,000

1990 年 5 月第 1 版 1990 年 5 月第 1 次印刷

印数 1—2,500

ISBN 7-5323-1949-0/TK·11

定价: 4.90 元

风  
力

## 前 言

我国幅域宽广，风能资源丰富，利用风能具有悠久的历史。随着科学技术的发展，“四化”建设的需要，能源供需矛盾日益尖锐，积极开发利用洁净丰富的风力资源具有重要的意义。尤其是高山、高原、草原、海岛等边远地区的照明、广播、电视、气象预报、航标灯、邮电通讯，以及铁路道班、边防哨所、微波中继站、电视调频差转台和驻军部队等特殊场所，利用风能发电为重要能源解决生活、生产问题，既有现实的经济价值，又有显著的社会效益。人们迫切需要有一本能为设计、试制、应用风力机具有一定指导作用的中级读物。为此我们特邀了国内从事风力机具研究利用方面具有一定理论知识、实践经验、操作技能的有关专家，组织编著了这本《风力机设计与应用》。旨在为贯彻“因地制宜，多能互补，综合利用，讲究效益”和“三自三主”的发展风能利用的方针政策，加速实现我国农村电气化作出应有的一份贡献。

本书系统地叙述了我国风力资源在世界上的重要地位及其利用前景；介绍了国内外风力机的发展和分类方法；综述了我国近年来风力机具研制应用取得的新进展、新成果；指出了空气动力学原理基础知识在风力机具设计中的重要性，并详细地阐明了水平轴风力机和垂直轴风力机的设计方法，尤其着重介绍了风力机具的两个最主要的应用——风力发电和风力提水。

我们在组织编著本书时，考虑到风力机设计涉及到的空气动力学、机械、发电、材料、气象、控制等多种学科知识的特点，既注意了理论与实际相结合的原则，采用了图文并茂的方法；又力使内容丰富，系统全面，重点突出，深入浅出，通俗易懂。因此，本书不仅可为大专院校的师生参考，也可供中等以上文化程度的风力机具业余爱好者阅读，学习。本书也将为从事风力机具研究设计、试制生产、安装调试的工程技术人员和组织管理工作提供一本专业性读物。

本书初稿由陈云程、朱成名两同志审定。上海科学技术出版社傅荣根同志也做了大量工作。

本书编著过程中，曾得到了有关单位的领导和同志的支持帮助，编者在此一并谨表谢意。

由于编著者水平有限，错漏之处在所难免，恭请读者批评指正。

上海市太阳能学会风能专业委员会  
中国能源情报网太阳能风能情报中心

1988年10月

# 目 录

## 前言

## 本书主要符号表

<b>第一章 风资源概述</b> .....	1
第一节 风的一般知识 .....	1
第二节 风的统计理论 .....	11
第三节 风能资源 .....	33
<b>第二章 风能利用的发展和风力机的分类</b> .....	38
第一节 国外风力机发展概况 .....	38
第二节 我国风能利用的现状 .....	44
第三节 风力机分类 .....	48
第四节 风能利用的前景 .....	52
<b>第三章 风力机空气动力学基础</b> .....	60
第一节 翼型的几何参数 .....	60
第二节 低速翼型空气动力学基础 .....	64
第三节 NACA翼型计算 .....	76
第四节 常用翼型数据及其性能曲线 .....	80
<b>第四章 水平轴风力机的桨叶设计</b> .....	94
第一节 水平轴风力机的主要组成 .....	94
第二节 风轮总体参数 .....	97
第三节 贝兹理论 .....	106
第四节 桨叶的外形设计 .....	108

第五节	风轮的性能计算 .....	126
第六节	叶片的载荷分析 .....	128
第七节	叶片的材料和结构设计 .....	138
第八节	叶片的振动 .....	151
第九节	叶片设计实例 .....	165
<b>第五章</b>	<b>水平轴风力机的机械设计 .....</b>	<b>171</b>
第一节	风轮 .....	171
第二节	传动装置 .....	176
第三节	对风装置 .....	182
第四节	调速(限速)机构 .....	193
第五节	附属部件 .....	219
第六节	塔架设计 .....	223
<b>第六章</b>	<b>垂直轴风力机的设计 .....</b>	<b>246</b>
第一节	概述 .....	246
第二节	阻力型风力机工作原理 .....	247
第三节	阻力型风力机种类及性能 .....	248
第四节	升力型风力机Darrieus式风轮 .....	262
<b>第七章</b>	<b>风力发电 .....</b>	<b>283</b>
第一节	风力发电中常用的几种发电机 .....	283
第二节	风力发电机组的独立供电和储能 .....	296
第三节	风力发电机组的并网运行 .....	311
第四节	风力发电机组的防雷保护 .....	323
<b>第八章</b>	<b>风力提水及风力致热 .....</b>	<b>331</b>
第一节	概述 .....	331
第二节	风力提水机的类型 .....	333

第三节	风力提水机的工作原理和特点 .....	339
第四节	风力提水机的风轮设计 .....	346
第五节	风力提水机配套水泵 .....	372
第六节	风轮与水泵的匹配 .....	378
第七节	风力提水机在我国的应用 .....	401
第八节	风力致热 .....	407
<b>第九章</b>	<b>风力机的安装、调整、维护以及现场性能测试 .....</b>	<b>415</b>
第一节	风力机的安装及起吊 .....	415
第二节	风力机的调整 .....	419
第三节	风力机的使用维护 .....	422
第四节	风力机的现场性能测试 .....	426
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>437</b>

# 第一章 风资源概述

## 第一节 风的一般知识

### 一、风的形成

风是人类最常见的自然现象之一，它是由太阳的热辐射而引起的“空气流动”，所以风能是太阳能的一种表现形式。太阳对地球表面不均衡地加热，造成了大气层中温度和压力的差别。当太阳加热地球一面的空气、水面和大地时，地球的另一面通过向宇宙空间的热辐射而冷却，地球每天不停地转动，使其整个表面都轮流经历这种加热和散热的周期变化。由于地球轴线相对于太阳的倾斜角度，有着季节性的变化，从而造成了地球表面加热能量日常分布的季节性变化。

在赤道附近，地球所吸收的太阳能要比两极附近多得多，较轻的热空气在赤道附近上升，并向两极流动；而较重的冷空气作为替代，从两极移向赤道。在北半球，地球自西向东的自转，使向北流动的空气折而朝东，使向南流动的空气折而朝西。当向北流动的空气到达北纬 $30^{\circ}$ 时，它几乎已经折向正东了，因为这种风是从西边吹来的，故称之为“盛行西风”。

空气倾向于在北纬 $30^{\circ}$ 偏北一点的位置上积累起来，造成了这一带地区的高压带和温和的气候，从这个高压地区，一些空气向南流动，并由于地球的自转而被偏折向西，形成了全



世界海员所称呼的那种“信风”。类似的效应导致了在纬度高于  $50^{\circ}$  地区的“极区东风”。在赤道的南方，地球的自转将向南流动的空气折向朝东，而向北流动的空气折向朝西，故在南半球也有类似的盛行西风、信风和极区东风的情况。全球性气流的模式如图 1-1 所示。

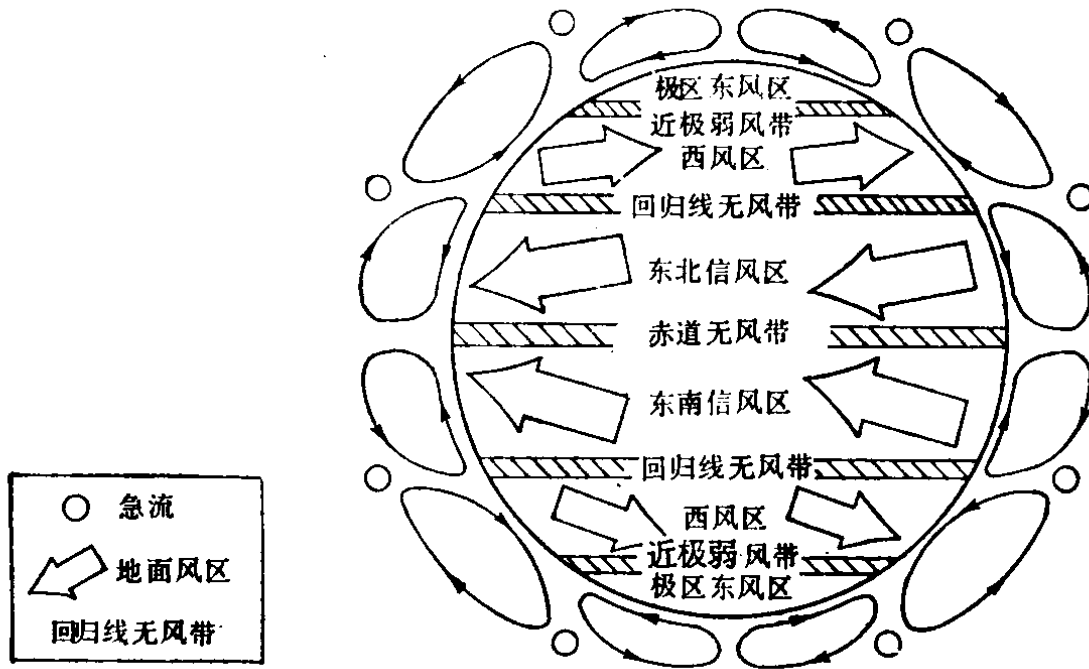


图 1-1 全球性气流模式

由于陆地的比热比海洋小，所以白天陆地上的气温比海面上的空气温度上升得更快，这样，陆地上较热的空气就膨胀上升，而海面上较冷的空气便流向陆地，以补充上升的热空气，这种吹向陆地的风称为“海风”。在夜间，其风向恰恰相反，因为陆地比海洋冷却得更快，所以陆地上的冷空气流向海面以补充上升的热空气，这种从陆地吹向海洋的风，称之为“陆风”。它在中纬度地区可以从海岸线深入内陆五十多km；而在热带地区则可深入内陆远至二百多km。海风，陆风的形成过程如图 1-2 所示。

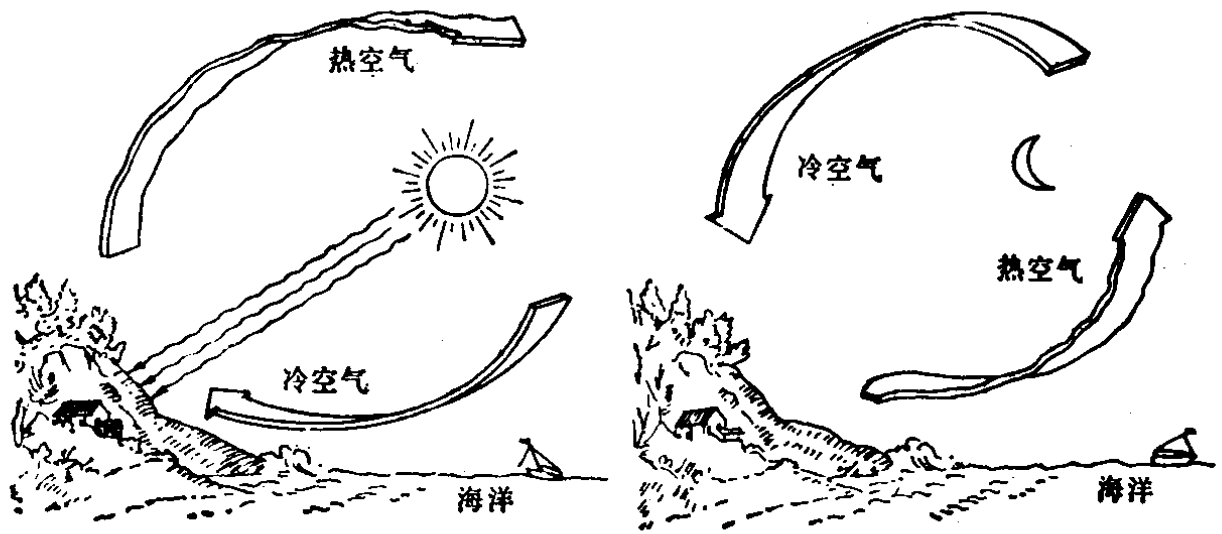


图 1-2 海风、陆风的形成过程示意

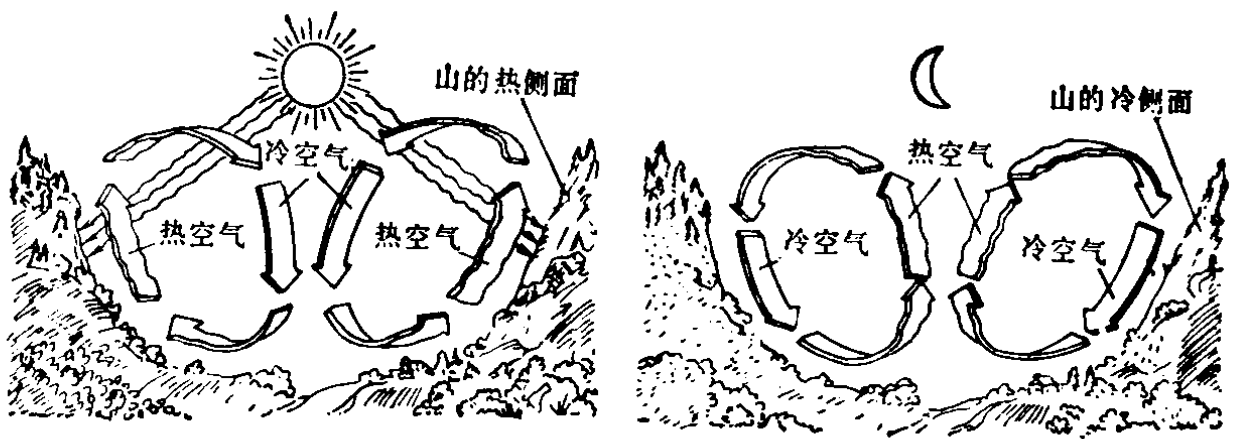


图 1-3 山谷风的形成过程示意

在多山地区也会出现类似的地方性风。白天因为山顶比山谷热得早，所以山顶上的空气变轻上升，山谷里冷而重的空气就沿着山坡流向山顶以补充上升的空气，这种由山谷吹向山顶的风称为“山谷风”。夜间则发生相反的过程，亦即风从山顶吹向山谷。山谷风的形成过程如图 1-3 所示。

## 二、风向与风速

风是一种矢量，它通常用风向与风速这两个要素来表示。

### 1. 风向

风向是由风吹来的方向确定的。如果风是从西边吹来的，则称为西风。风向可以由风向标给出，从风向标相对于罗盘主方位固定臂的位置，可很容易地看出风的方向。风向标必须转动灵活，且要水平安装在四周空旷的地区，并高出地面10~12m。目前国内使用的EL型电接风向风速仪，通过电缆把风向标的摆动信号接到室内记录仪上，每间隔2.5min，记录一次瞬时风向，这样，在室内就可以观测和记录风向了。

观测陆地上的风向，一般采用16个方位(观测海上的风向通常采用32个方位)，即以正北为零，顺时针每转过 $22.5^\circ$ 为一个方位，表1-1列出16个方位的风向符号，图1-4是风向的方位图。

表 1-1 16 个方位风向符号

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

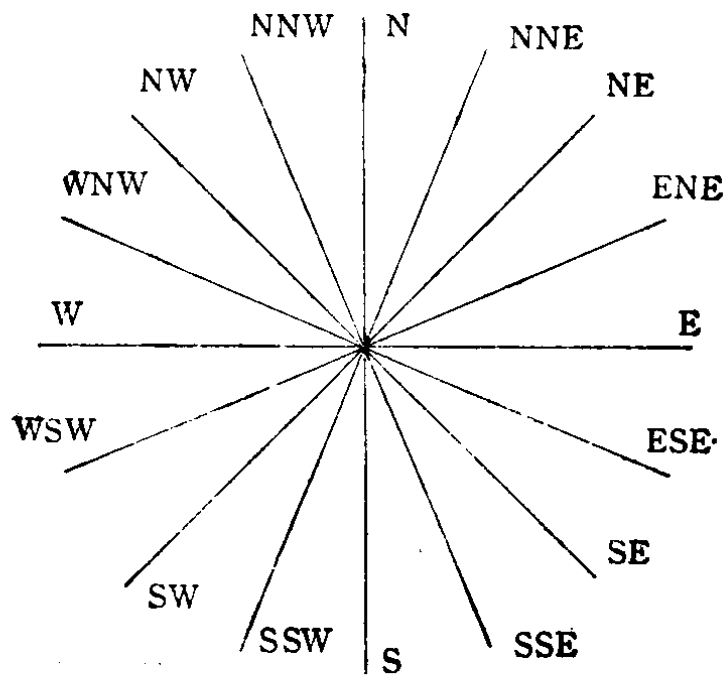


图 1-4 风向的方位图

## 2. 风速

风速要用风速仪测量。它表示空气在单位时间内流过的距离，单位是  $m/s$  或  $km/h$ 。由于风力变幻莫测，于是在实用中就有瞬时风速与平均风速这两个概念。前者可以用风速仪在极短时间 ( $0.5\sim 1.0s$ ) 内测得，后者实际上是某一时间间隔内各瞬时风速的平均值，因此就有日平均风速、月平均风速、年平均风速等。

(1) 风速仪。国内风电站最常用的风速仪是上海气象仪表厂生产的EL型电接风向风速仪。它既可以记录风的行程，又能每间隔 $2.5min$ 记录一次瞬时风向，根据记录可以求出任意 $10min$ 的平均风速和相应的风向。该表的风速测量范围为 $2\sim 40m/s$ ，风向的测量范围是16个方位。此外，风电站一般还配有携带式风速仪，用以观测瞬时风速。

目前美国、丹麦等国都是使用带有微处理机的转杯式风

向风速仪。采样密度 6 次/s, 有实时数据处理与存贮功能, 可自动给出阶段的平均值、最大值和最小值。存贮时间 2~6 周不等。

当今气象部门已广泛使用测风气球来测量风速。它是一种体积为  $0.2\sim 0.3\text{m}^3$ 、内充氢气且不携带仪器的橡皮球, 当气球飞升之后, 在地面上利用经纬仪跟踪观测, 并计算出纵横的角度来, 根据这些角度和测风气球的上升速度, 就可以决定各种高度上的风向与风速。然而它仅限于在晴朗少云的天气使用, 要全天候观测, 宜用无线电测位仪。

表 1-2 风力等级、征象及相应风速

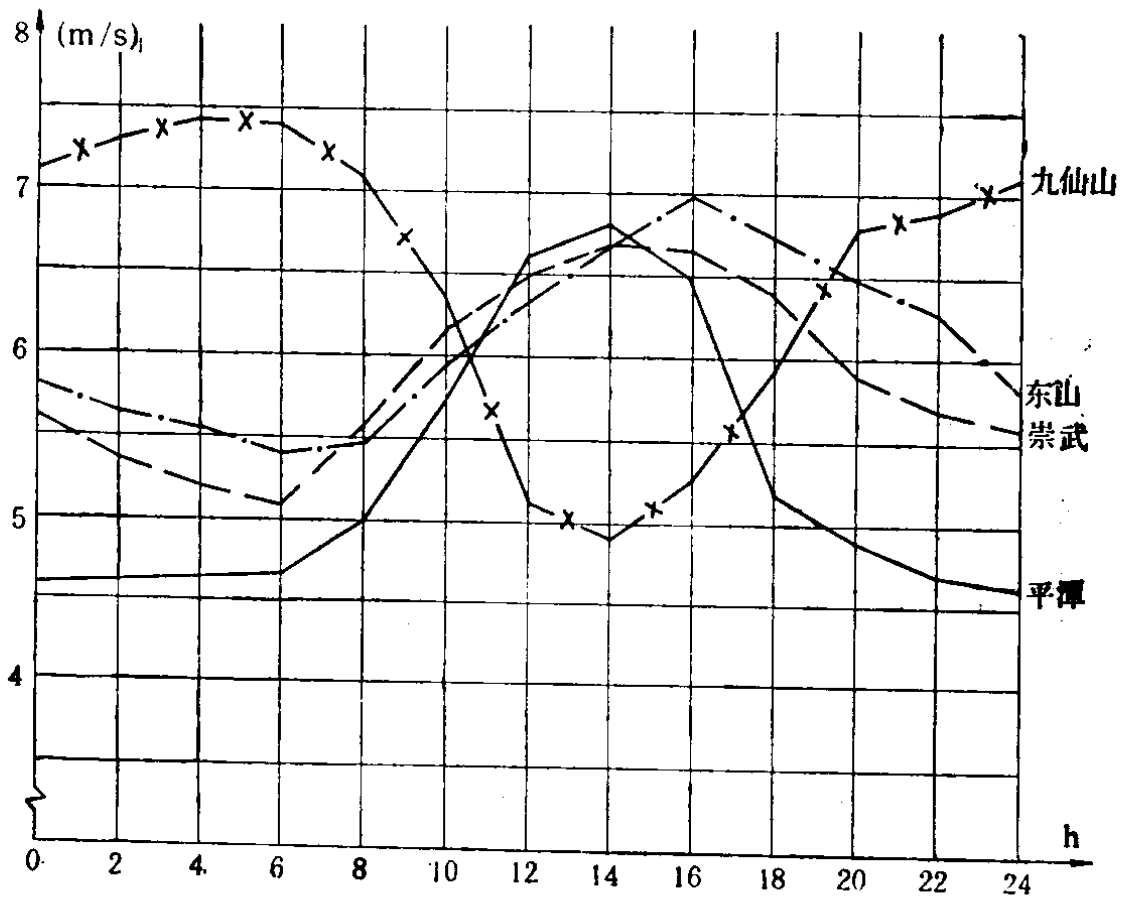
风力等级	风的名称	陆地地面物的征象	相应风速	
			(km/h)	(m/s)
0	无风	大气稳静、炊烟直上	<1	0~0.2
1	软风	烟随风飘动, 风向可辨, 但风标不动	1~5	0.3~1.5
2	轻风	脸有风感, 树叶动, 风标也动	6~11	1.6~3.3
3	微风	树叶和细枝摇动, 小旗展开	12~19	3.4~5.4
4	和风	尘砂刮起、纸片飞舞, 小树枝摇动	20~28	5.5~7.9
5	清风	有小树摇动, 池塘、沼泽水面掀起浪花	29~38	8.0~10.7
6	强风	大树摇动, 电线鸣叫, 举伞困难	39~49	10.8~13.8
7	疾风	树身摇动, 顶风行走甚感不便	50~61	13.9~17.1
8	大风	小树枝折断, 顶风行走极为困难	62~74	17.2~20.7
9	烈风	房屋发生轻微损坏(烟囱倒塌, 屋顶瓦片揭掉)	75~88	20.8~24.4
10	狂风	陆地少见, 树木连根拔起, 建筑物严重破坏	89~102	24.5~28.4
11	暴风	陆地很少, 一旦发生必有重大损毁	103~117	28.5~32.6
12	飓风	陆地绝少, 其摧毁力极大	>117	>32.6

(2) 风力等级表。在没有风速仪时，欲知风速的大致数据，可用表 1-2 所列的风级表。表中风级  $B$  与风速  $V$  (m/s) 的关系为

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

### (3) 风速的周期变化

a. 风速的日变化。在一天之中，风的强弱是不一样的。地面上一般是夜间风弱，白天风强；相反，高空却是夜间风强，白天风弱。图 1-5 示出的福建省四个气象站(平潭、崇武、东山和九仙山)风速的日变化曲线，证实了这一结论的正确性。九仙山由于海拔高，所以白天(8~18点)风弱，夜间风强，而其他三个站因地处沿海，正好相反，是白天风强，夜间风弱。福



■ 1-5 福建省四个气象站风速的日变化曲线

建沿海风速日变化的高峰时段,与工厂的开工高峰期基本相符,因此发展风电对该省具有日调节作用。

b. 风速的季节变化。一年之中,由于地球表面高压区和低压区的变动,风的速度与方向一般也发生变化。图 1-6 是福建省 4 个气象站月平均风速的展开图。从图上不难看出 4 条曲线的走向基本上是一致的,从第一年 9 月到第二年 3 月,风速都比较高,是利用风能的最好季节,而这几个月正好又是该省水电的枯水期,所以大力开发福建省的风能,发展风车田,将对该省以水电为主的电网起到调节与补充作用。

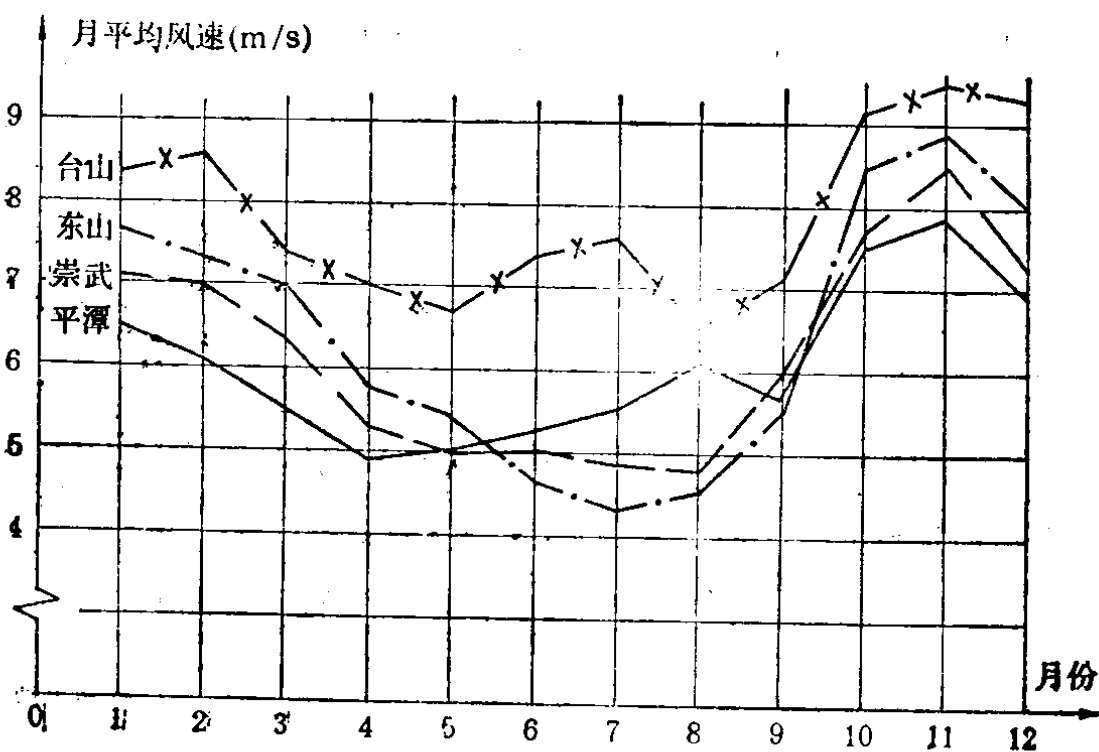


图 1-6 福建省四个气象站月平均风速变化曲线

#### (4) 影响风速的主要因素

a. 垂直高度。由于风与地表面摩擦的结果,所以风速是随着垂直高度的增加而增强,只有离地面 300m 以上的高空才不受其影响。风速在垂直高度上的变化,可按下式求之

$$V = V_0 \left( \frac{H}{H_0} \right)^n \quad (1-2)$$

式中：  $V$ ——高度  $H$  处风速；

$V_0$ ——高度  $H_0$  处风速（气象站风速仪的安装高度一般为 10m，所以  $H_0$  一般取 10）；

$n$ ——地表摩擦系数，其数值通常在 0.1（非常光滑的地面）至 0.4（非常粗糙的地面）之间， $n$  的典型数值可从表 1-3 查得。

表 1-3 地表典型摩擦系数

地 表 状 态	摩擦系数 $n$
平坦坚硬的地面, 湖面或海面	0.10
长满短草的未耕土地	0.14
长有 300mm 高的草, 偶尔有树的平坦的乡间田野	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	0.40

表 1-4 不同地形与平坦地面的风速比值

不 同 地 形	平坦地面的平均风速(m/s)	
	3~5	6~8
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	1.1
峡谷口或山口	1.30~1.40	1.2



b. 地形地貌。风速受地形地貌的影响,可从表 1-4 和表 1-5 所列的数据看出。

表 1-5 山顶与山麓的风速比值

相对高度 (m)	50	100	200	300	500	700	1000
比值	1.38	1.50	1.60	1.70	1.80	1.84	1.90

当然,自然界的实际情况要比上列的典型地形复杂得多,比如,山口风速比平地大多少,则要视风向与谷口轴线的夹角以及谷口前的阻挡距离而定;河谷风速的大小又与谷底的闭塞程度有关。又如,在同一山谷或盆地中,不同位置的风速也不尽相同,此时往往是地形与高度交错地影响着风速,有时以前者为主,有时又以后者为主,要视具体地形而定。

c. 地理位置。由于地表面摩擦阻力的作用,所以海面上的风比海岸大,而沿海的风要比内陆大得多。具体影响程度可从表 1-6 和表 1-7 所列的比值看出。比如,台风登陆后 100 km,其风速几乎衰减了一半,又如,在平均风速 4~6m/s 时,海岸线外 70km 处的风速要比海岸大 60~70%。

d. 障碍物。风流经障碍物时,会在其后面产生不规则的涡流,致使流速降低,这种涡流随着远离障碍物而逐渐消失。当距离大于障碍物高度 10 倍以上时,涡流可完全消失。所以在障碍物下侧设置风力机时,应远离其高度 10 倍以上。

表 1-6 台风登陆后与登陆时的风速比值

距海岸距离 (km)	0	10	25	50	100	150
比值(%)	100	97	86	72	55	—