

THE TECHNOLOGY OF
INTERCONNECTING
WIND FARM WITH
POWER
GRID

风电场 并网技术

朱莉 潘文霞 霍志红 杨磊 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

**THE TECHNOLOGY OF
INTERCONNECTING
WIND FARM WITH
POWER
GRID**

风电场 并网技术

朱莉 潘文霞 霍志红 杨磊 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要内容包括风电场的组成与控制, 风电场并网对电力系统的影响, 风电场并网技术规定和要求, 风电场并网方案, 风电场调压计算、潮流计算、稳定计算、一次部分计算、继电保护及安全自动装置、调度自动化、通信, 风光联合运行, 风能和抽水蓄能及其他储能系统联合运行, 可再生能源发电微电网运行等。

本书可供风电场并网技术研究人员参考, 也可供风电场并网规划、设计、运行、调度、管理等工程技术人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

风电场并网技术/朱莉等编著. —北京: 中国电力出版社, 2011. 1

ISBN 978-7-5123-1228-9

I. ①风… II. ①朱… III. ①风力发电-研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 004072 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2011 年 3 月第一版 2011 年 3 月北京第一次印刷
710 毫米×980 毫米 16 开本 12.75 印张 230 千字
印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



风电作为目前可再生能源开发利用中技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的发电方式之一，越来越受到世界各国的重视，得到了广泛的开发和利用。1990年以来，世界风力发电累计装机容量平均每年超过20%。

1986年山东建成国内第一座并网式风电场，我国风电从此起步。近年来，随着国家风电特许权项目的实施以及《中华人民共和国可再生能源法》的实施，风电进入了快速发展时期，装机增长迅速，截至2009年底，风电装机规模已超过2000万kW。随着风电的迅速发展，风电对电网的影响越来越大，通过总结风力发电机组特性，研究风电场并网技术要求、实例分析风电并网方案等，对促进我国风电发展具有重要实践意义。

本书的编写旨在为读者提供较为全面的风电场并网技术知识，希望借此能对从事风力发电及关注风力发电的人士有所帮助。

本书由河南省电力勘测设计院朱莉、杨磊，河海大学潘文霞、霍志红编著，其中第一、五章由潘文霞编写，第二章由霍志红编写，第三、四章由朱莉和杨磊编写，全书由朱莉统稿。

在本书编写工程中，得到了河南省电力公司、河南省电力勘测设计院以及风电场领导和专家的大力帮助，在此一并表示感谢，同时也感谢本书中引用文献资料及设计成果的作者。

由于水平有限，书中难免有错误和不足之处，恳请读者和专家批评指正。

编 者

2011年3月



前言

第一章 风资源与风力发电	1
第一节 风速.....	1
第二节 风速的模型	14
第三节 风能计算	15
第四节 风力发电发展与现状	21
第五节 风电成本与电价	23
第六节 风电的环境与社会效益	31
第二章 风力发电机组及其特性	35
第一节 风力机的基本理论	35
第二节 风力机的典型结构及其特性	46
第三节 风力发电机类型与特点	65
第四节 风力发电机组的控制	86
第五节 风电场的组成	95
第三章 风电场并网技术规定和要求	96
第一节 风电场并网对电力系统的影响	96
第二节 风电场并网技术规定和要求.....	100
第四章 风电场并网实例分析	110
第一节 风电场概述.....	110
第二节 风电场并网方案.....	115
第三节 调压计算.....	124
第四节 方案比较.....	157
第五节 潮流计算.....	159

第六节	稳定计算	160
第七节	一次部分结论	165
第八节	继电保护及安全自动装置	167
第九节	调度自动化	169
第十节	通信	176
第十一节	其他说明	177
第五章	风力发电与其他电源的联合运行	178
第一节	风光联合	178
第二节	风电和抽水蓄能及其他储能系统联合运行	189
第三节	可再生能源发电微电网运行	193
参考文献		197

第一章

风资源与风力发电

第一节 风 速

一、风

风是环绕地球大气层中的空气流动。流动的空气所具有的能量，也就是风所具有的动能，称为风能。风的描述包括空气流动的速度及流动的方向两个要素，即风速和风向。众所周知，风速与风向在不同的时间（每日、每月、每年）都有一定的周期性变化。为了估算某一地域的风能资源，必须测量出每日、每月、每年的风速及风向数据，以了解其变化的情况。

二、风的测量与记录

风既有大小也有方向，因此风的测量通常包括风向和风速两个参数。图 1-1 和图 1-2 所示分别是风杯式风向和风速测量仪示意图及其装置图，它可以连续地测量和记录当地的风向和风速。测量仪一般都安装在离地 10m 高处，风向和风速都是不断交替变化的。

空气团运动速度的方向称为风向。如果气流从东方吹来就称为东风。风向可

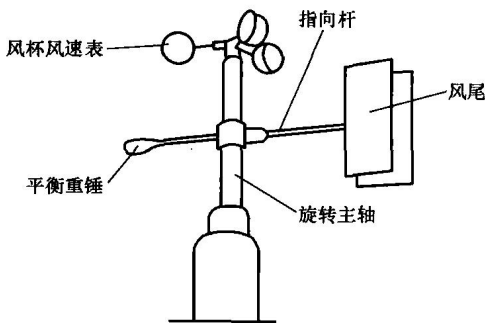


图 1-1 风杯式风向和风速测量仪示意图

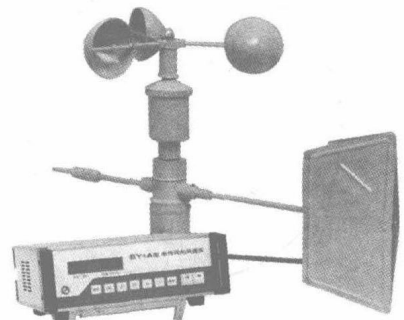


图 1-2 风杯式风向和风速测量仪装置图

由风向标等仪器指示出来，从风向标与一固定不变的主方位指示杆之间的相对位置就可以观测出风向。实际上在比较重要的气象站里和在风力机性能试验的场合，风向和风速是同时被精准的仪器连续地测量和记录下来的。

风向标由风尾、指向杆、平衡重锤和旋转主轴 4 个部分组成，如图 1-1 所示。风尾是感受风力的部件，在风力的作用下产生旋转力矩，使指向杆—风尾轴线不断调整它的方向，与风向保持一致。指向杆指向风的来向。平衡重锤安装在指向杆上，使整个风向标对支点（旋转主轴）保持重力矩平衡。旋转主轴则是风向标的转动中心，并通过它带动传感元件，把风向标指示的度数传送到室内的指示仪表上，如图 1-2 所示。

利用各地每日的测量记录数据，可画出一幅极线图，显示出各种风向发生时间的百分比（该百分比数字沿半径线标注）；同时记录该方向风速的平均值以径向矢量的长度来表示，如图 1-3 所示。

地球上某一地域的风向由于其所处地理位置（例如离赤道或南北极的远近）及受地球表面不同情况（例如海洋、陆地、山谷等）的影响，是经常变动的。我国所处的地理位置，季节性的温差明显，不同季节风的强弱差别大，风向的变化也大，冬季多为西北风或北风，夏季多为东南风或南风，属于季风特征。

风向一般用 16 个方位表示，如图 1-4 所示，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° 。

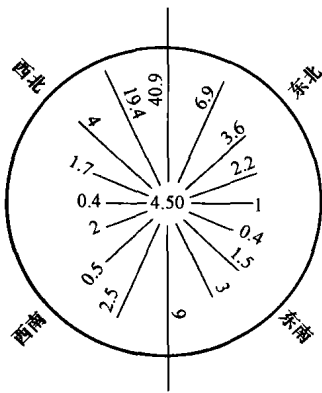


图 1-3 风玫瑰图

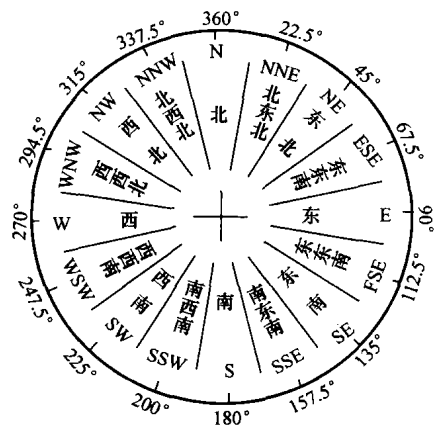


图 1-4 风向 16 方位图

图 1-5 为根据测量数据绘制的某地风速玫瑰图。从图 1-5 可以看出全年中出现频率最高的风向是东北风和西南风。风玫瑰图既可画成每小时的，也可画成每日、每月或每年的风速玫瑰图。分析一天或一年的风玫瑰图就可以了解一天或一年风向的变化情况。图 1-6 为北京某地不同统计时间的风玫瑰图，含冬季大风速 1 月和夏季小风速 7 月，以及全年 12 个月的风玫瑰图。有时候，如果将统计各种风向上的平均风速换为风能数据，则风速玫瑰图就变成风能玫瑰图。

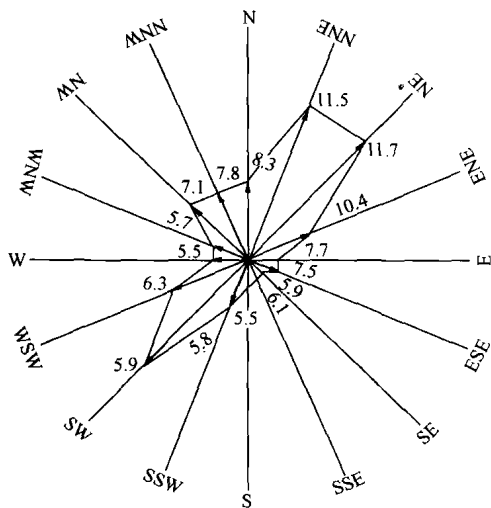


图 1-5 某地风速玫瑰图

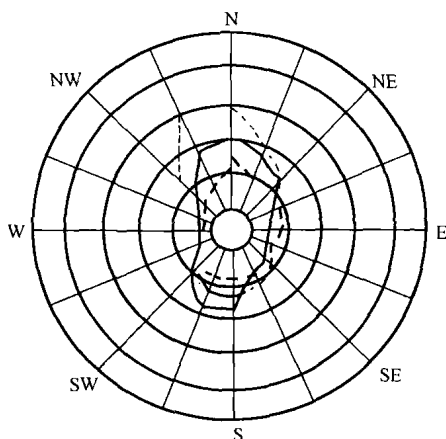


图 1-6 北京某地不同统计时间的风玫瑰图
(点线为 1 月，断线为 7 月，实线为全年)

空气在单位时间内所流过的距离称为风速，通常以米/秒 (m/s) 作为计量单位。风速是不稳定的随机量，甚至在很短的时间内也有很大的变化。目前国际上将每小时的平均风速值作为对风力状况进行分析和计算风能资源的基本依据。每小时平均风速值可以通过以下方式测算得出：

- (1) 将每小时内测量的瞬时风速取平均值。
- (2) 将每小时最后 10min 内测量的风速取平均值作为每小时的平均风速值 (世界气象组织规定采用此方法)。
- (3) 将每小时内几个瞬间测量的风速值取平均值。

我国气象台站给出的每小时平均风速值是按第二种方式测定的，采用上述 (2)、(3) 两种方式测量风速时，最大阵风速度是不可能得到的。

以每小时平均风速值为基础可以计算得出每日、每月、每年的平均风速值，即

- (1) 日平均风速值：一昼夜（24h）中各小时风速值的平均值。
- (2) 月平均风速值：一个月中各日风速值的平均值。
- (3) 年平均风速值：一年中各月风速值的平均值。

图 1-7 和图 1-8 分别为按上述方法计算出的全天（24h）风速—时间图及全年（12 个月）风速—时间图。

各国表示风速单位有所差异，有 m/s、mile/s、km/h、mile/h、ft/h 等，应用时应注意换算。各国基本都以 10m 高度为观测基准，但在取多长时间的平均风速上不大统一。有 1、2、10min 平均风速，也有 1h 平均风速和瞬时风速。

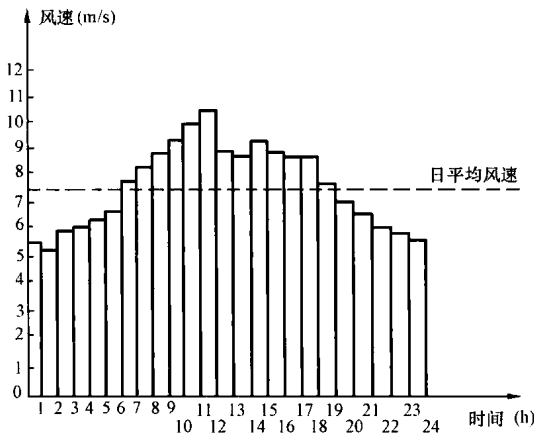


图 1-7 全天（24h）风速—时间图

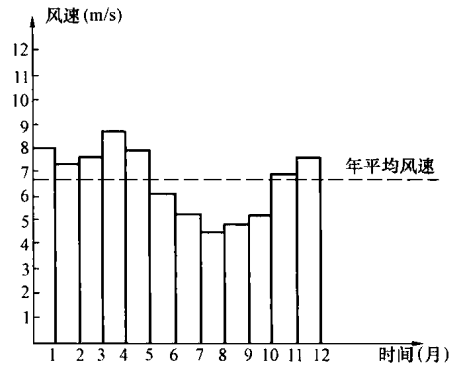


图 1-8 全年（12 个月）风速—时间图

中国气象站观测也有一日 4 次定时（02、08、14、20 时）2min 平均风速、自记 10min 平均风速和瞬时风速三种。风能资源计算时，采用自记 10min 平均风速、安全风速计算时用最大风速（10min 平均最大风速）或瞬时风速。

英国人蒲福（Francis Beaufot）于 1805 年依风力的大小把静风（0 级）到飓风（12 级）分为 13 个等级，称之为蒲福风级，后修订为 17 级，见表 1-1。如果没有风速测量仪，或者当风速测量仪发生故障时，我们可以利用表 1-1 来粗略地估计风速的大小。

表 1-1 蒲福风力等级表

风力等级	风速 (m/s)	风的名称	陆地观察征象	海洋观察征象	海面浪高 (m)
0	0~0.2	无风	烟垂直上升	海面平如镜	0
1	0.3~1.5	软风	烟被风吹斜，但风向标不能转动	海面出现波纹，但未构成浪	0.1

续表

风力等级	风速 (m/s)	风的名称	陆地观察征象	海洋观察征象	海面浪高 (m)
2	1.6~3.3	清风	人脸部感觉有风, 树叶颤动, 风向标转动	海面上小波浪清晰, 出现浪花, 但不翻滚	0.2
3	3.4~5.4	微风	树叶和细树枝轻轻摇动不止, 旗子展开	小波浪增大, 浪花开始翻滚, 玻璃状波面出现泡沫, 波峰可能散布白沫	0.6
4	5.5~7.9	和风	风将尘土吹起, 树枝摇动, 树叶落下, 纸片飘起	小波浪增长, 白浪增多	1.0
5	8.0~10.7	清劲风	小树开始摇动	波浪中等, 形成更明显的长浪, 白浪更多	2.0
6	10.8~13.8	强风	大树枝摇动, 电线发出响声, 撑伞感觉困难	大浪形成, 白色泡沫的浪峰扩展到各处, 飞沫更多	3.0
7	13.9~17.1	疾风	整个树木摇动, 人迎风行走感觉不便	浪大, 翻滚, 白色泡沫像带子一样顺风吹成线状	4.0
8	17.2~20.7	大风	小树枝折断, 迎风行走很困难	波浪加大变长, 浪花顶端出现水雾, 泡沫顺风吹成明显的条带	5.5
9	20.8~24.4	烈风	树枝折断, 建筑物有轻微损坏 (如烟囪倒塌, 瓦片飞出)	出现高的大波浪, 浪前倾、翻滚, 顺风吹成粗的、浓密的泡沫带, 飞溅的浪花影响能见度	7.0
10	24.5~28.4	狂风	可使树木连根拔起, 屋顶被吹毁或将建筑物严重损坏 (陆地上少见)	形成更大的波浪, 浪更长, 大片的飞沫形成白色带子随风飘动, 整个海面呈白色, 波浪翻滚	9.0
11	28.5~32.6	暴风	可造成重大损毁, 树根翻起, 建筑物遭到破坏 (陆地上绝少见)	惊涛骇浪, 浪大高如山, 在浪涛后面的中小船只有时被浪涛挡住而看不见, 海面完全被大片白色泡沫覆盖, 能见度很差	11.5
12	32.7~36.9	飓风		空气中充满泡沫和浪花, 整个海面笼罩在白色飞雾之中, 能见度极差	14.0
13	37.0~41.4				
14	41.5~46.1				
15	46.2~50.9				
16	51.0~56.0				
17	56.1~61.2				

注 1. 风速指距地 10m 高处的相当风速。

2. 海面浪高指一般状况。

根据研究,表 1-1 中风速 1~13 级与风速之间的经验关系为

$$\bar{v} = 0.1 + 0.824N^{1.505} \quad (1-1)$$

式中: \bar{v} 为 N 级风的平均风速, N 为风的级数。当风速测量数据缺失时,如已知风的级数,可以按式 (1-1) 估算出当时的平均风速。另外,风级与最大风速和最小风速的关系分别为

$$v_{\max} = 0.2 + 0.824N^{1.505} + 0.5N^{0.56} \quad (1-2)$$

$$v_{\min} = 0.824N^{1.505} - 0.56 \quad (1-3)$$

分析风随时间的变化规律,对研究利用风能是非常重要的。在一天之中,风的强弱有周期性。统计规律表明,地面上是夜间风弱,白天风强;高空中却是夜里风强,白天风弱。这个逆转的临界位置在高度为 100~150m 的空中。由于在不同的季节,太阳和地球的相对位置不同,使地球上存在季节性温度变化,因此,风也会产生季节性变化规律。我国大部分地区是冬春两季风比较大,而夏秋两季风比较小,但也有部分地区例外,如沿海的温州地区,则是夏季风最强,春季风最弱。

三、风廓线

从地球表面以上底层大气的风受人类活动影响较大。同一地点不同高度测到的风速也有很大的变化,靠近地面的风速较小,离地面越高则风速越大,并且随着地面粗糙度的增加,这种现象越发显著。长期观测的风速平均值随距地面高度变化的曲线称为风廓线。图 1-9 为不同地面粗糙度的风廓线示意图。

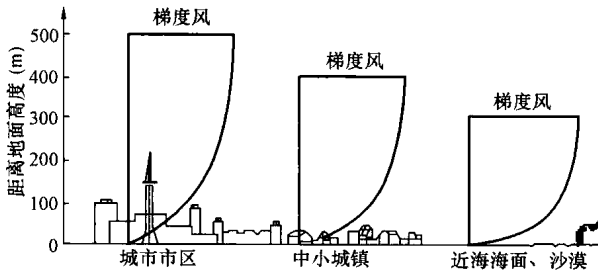


图 1-9 不同地面粗糙度的风廓线示意图

气象观测表明,沿高度增加风速的相对变化量因地而异。1885 年 Achibalcd 提出以指数规律来表示风廓线

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (1-4)$$

式中: $h(h_0)$ 为距地面高度, m; v_0 为距地面高度 h_0 处测量的平均风速, m/s; v 为距地面高度 h 处测量的平均风速, m/s; α 为与地表粗糙度密切相关的地表摩擦

系数。D·F·沃纳 (Warne) 和 P·C·卡尔南 (Calnan) 建立了地面粗糙度 z 和地表摩擦系数 α 之间的关系

$$\alpha = 0.04 \ln z + 0.003 (\ln z)^2 + 0.24 \quad (1-5)$$

当式 (1-5) 中直接引入表面粗糙度参数时, 风廓线还可以用对数关系来表达

$$\frac{v}{v_0} = \frac{\ln(h/z)}{\ln(h_0/z)} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 在 30~50m 的高度范围内对风廓线拟合得最好, 而在整个边层高度内, 式 (1-4) 指数规律更精确, 而且更简便, 适用高度范围更大。

一般 h_0 的值为 10m, α 的取值在 0.1~0.4。使用式 (1-6) 计算时需要注意的是 h 和 h_0 不应看做是距土地表面的高度, 而是距零风速平面的高度。该平面在玉米地里取玉米秆平均高度处, 在麦田里取麦子平均高度处, 森林里的零风速高度是相邻树之间枝杈接触的高度。表 1-2 给出了不同地表特征的表面粗糙度 z 和相应地表摩擦系数 α 的值。

表 1-2 不同地表特征的表面粗糙度 z 和相应地表摩擦系数 α

地面类型	z	α
光滑 (水面、沙、雪)	0.001~0.02	0.10~0.13
略为粗糙 (矮草、农作物、乡村地区)	0.02~0.30	0.13~0.20
粗糙 (树林、城市郊区)	0.30~2	0.20~0.27
非常粗糙 (城市、高大建筑)	2~10	0.27~0.40

风速不会随高度无限制地增长, 甚至会变得更慢。墨西哥某机场采集的数据典型说明, 从地表直到 450m 的高度, 风速随高度增加, 之后风速开始下降 (如图 1-10 所示)。在 4500m 高度的风速可达到地表附近风速的 4~5 倍。

四、风速分布

用平均风速的概念来衡量一个地方的风资源非常方便, 但由于风速变化的随机性, 另一参数对风资源的评估也十分重要, 这就是风速分布, 也就是说风速随时间的随机变化用概率密度函数

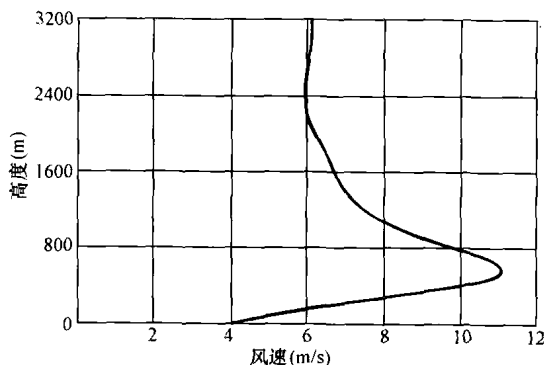


图 1-10 墨西哥某机场风速随高度的变化

来描述。

年风速分布可以由风速—时间图（曲线）给出。在年风速分布理论计算时常把风速的间隔定为 1m/s，先求出某一风速间隔（如 4~5m/s）在一年中出现的时间（次数和），这个时间等于年风速—时间曲线上对应于所有 4m/s 和 5m/s 的

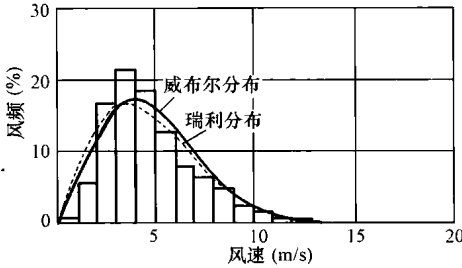


图 1-11 年风速分布图

点在横坐标上时间值之差（次数）的叠加，该风速间隔在风速分布曲线风速坐标上以其中值表示，即对应的速度为 4.5m/s，而该风速间隔的风速分布则由它出现的时间除以全年的风速测量时间。这一方法也就是国际能源机构（IEA）推荐的比恩法（Method of Bins），由此方法得到如图 1-11 所示

的年风速分布图，其中定义

$$f = \frac{\text{风速在 } v \text{ 和 } v + \Delta v \text{ 之间的时间占总时间之比}}{\Delta v}$$

$$\int_0^{+\infty} f(v)dv = 1 \quad (1-7)$$

因为时间段经常选择为 1 年，所以以 1 年中的小时数的形式来表示概率分布函数，画风速分布图时有

$$f = \frac{\text{每年风速在 } v \text{ 和 } v + \Delta v \text{ 之间的小时数} / 8760}{\Delta v} \quad (1-8)$$

对风速分布，可以用数学线型来进行拟合、描述。通常用于拟合风速分布的数学曲线型有威布尔（Weibull）分布、瑞利（Rayleigh）分布、对数正态分布、三参数威布尔分布等。

根据大量实测结果来看，普遍认为威布尔双参数曲线是适于对风速分布规律作理论计算、拟合描述的概率密度函数。

威布尔分布是一种单峰的、以形状参数 k 和尺度参数 C 表述的曲线。可表达为

$$f(v) = \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} \quad (1-9)$$

分布函数能够完整地描述“风速”这一随机变量的统计特性，它的随机分布数字特征，如数学期望、方差等人们往往也很关心。数学期望又称为均值，风速的数学期望定义为

$$\mu = \int_0^{+\infty} vf(v)dv = C\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) \quad (1-10)$$

数学期望与参数 C 以及由参数 k 构成的 Γ 函数有关。研究风速分布 $f(v)$ 的随机变量 v 与其均值（数学期望）偏离的程度可用方差 $D(v)$ 来度量 v 与其均值 $\mu(v)$ 的偏离程度。由定义知，方差就是 v 的函数 $g(v) = [v - \mu(v)]^2$ 的数学期望，于是对于连续型变化的 v 有

$$\begin{aligned} D(v) &= \int_0^{+\infty} [v - \mu(v)]^2 f(v) dv \\ &= A^2 \left\{ \Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \left[\Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (1-11)$$

在应用上，还引入与随机变量 v 具有相同量纲的标准差，或均方差 $\sigma(v) = \sqrt{D(v)}$ 。

(一) 参数 C 和 k 的估计

计算威布尔分布的参数 C 和 k 的方法有多种，根据所提供的风速观测统计资料可做出不同的选择，可采用的方法有：最小二乘法；用风速均值（数学期望）和标准差估计威布尔分布参数的方法；用平均风速和最大风速估计的方法等。

1. 最小二乘法估计威布尔参数 C 和 k

最小二乘法估计威布尔参数 C 和 k 的前提是已获得了由统计得到的离散型风速分布数据。由于风速按威布尔分布，风速小于 v_0 的累计风速概率为

$$p(v) = \int_0^{v_0} \frac{k}{C} \left(\frac{v}{C}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{C}\right)^k} dv = 1 - e^{-\left(\frac{v_0}{C}\right)^k} \quad (1-12)$$

取对数整理后，有

$$\ln \left\{ -\ln \left[1 - p(v \leq v_0 \lim_{\delta r \rightarrow 0}) \right] \right\} = k \ln v_0 - k \ln C \quad (1-13)$$

令 $y = \ln \left\{ -\ln \left[1 - p(v \leq v_0 \lim_{\delta r \rightarrow 0}) \right] \right\}$, $x = \ln v_0$, $a = k \ln C$, $b = k$, 这样参数 C 和 k 就可以用最小二乘法拟合函数 $y = a + bx$ 得到。

具体做法如下：将测量得到的风速出现范围划分成 n 个风速间隔，即 $0 \sim v_1, v_1 \sim v_2, \dots, v_{n-1} \sim v_n$ ，以其中值表示该风速间隔的风速值，统计各风速间隔观测值出现的风速分布 f_1, f_2, \dots, f_n 和累积风速概率 $p_1 = f_1, p_2 = p_1 + f_1, \dots, p_n = p_{n-1} + f_n$ 。取变换

$$x_i = \ln v_i$$

$$y_i = \ln \left[-\ln(1 - p_i) \right] (i = 1, 2, \dots, n)$$

令 $a = -k \ln C$, $b = k$, 由此依据各风速值、各风速累积概率值及式 (1-13), 便可得到 a, b 的最小二乘法计算值

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-14)$$

$$b = \frac{-\sum x_i \sum y_i - n \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (1-15)$$

由式 (1-14) 和式 (1-15) 得到拟合的威布尔分布曲线 C 和 k

$$A = e^{-\left(\frac{c}{b}\right)} \quad (1-16)$$

$$C = b \quad (1-17)$$

2. 用风速均值和标准差估计威布尔分布参数 C 和 k

根据威布尔分布风速的均值和方差式 (1-10) 和式 (1-11) 有

$$\left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2 = \frac{\Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right)}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)^2} - 1 \quad (1-18)$$

从式 (1-18) 知, σ/μ 仅是 k 的函数。因而, 若知道了风速的均值和方差便可求出 k 。有时也可用式 (1-18) 的近似关系式

$$k = \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^{-1.086} \quad (1-19)$$

求解, 而由式 (1-10) 可得

$$C = \frac{\mu}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (1-20)$$

由式 (1-19) 和式 (1-20) 可求出威布尔分布曲线参数 C 和 k 的估计值。

3. 用平均风速和最大风速估计威布尔分布参数 C 和 k

按中国气象观测规范的规定, 最大风速的挑选指的是 1 日任意时间的 10min 平均最大风速值。设 v_{\max} 为时间 T 内观测到的 10min 平均最大风速, 显然它出现的概率为

$$p(v \geq v_{\max}) = e^{-\left(\frac{v_{\max}}{C}\right)^k} = \frac{1}{T} \quad (1-21)$$

对式 (1-21) 做逆变换, 并引入式 (1-20), 有

$$\frac{v_{\max}}{\mu} = \frac{\ln(T)^{1/k}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (1-22)$$

当已知平均风速 $\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$ 和最大风速 v_{\max} 时, 以 \bar{v} 作为 μ 的近似值, 由式 (1-22) 即可求出 k 。通常 k 值的变动范围在 1.0~2.6 之间, 此时 $\Gamma = (1/k + 1) \approx 0.889$, 于是可按式 (1-23) 求得 k 值的近似解

$$k = \frac{\ln[\ln(T)]}{\ln\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (1-23)$$

C 则由式 (1-24) 求得

$$C = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right)} \quad (1-24)$$

考虑到 v_{\max} 的抽样随机性很大, 不同年份的值有较大变化, 因而, 为减小抽样随机性误差, 在评估某地的平均风能潜力时, 应取 v_{\max} 、 \bar{v} 多年 (最好 10 年以上) 的平均值来估计风速的威布尔参数, 这样才有较好的代表性。

由上述三种方法估计出来的威布尔参数并不完全相同, 因此用这些参数计算出来的风能将会有所差别。究竟采用哪一种方法, 要视实际情况确定。

(二) 参数 C 和 k 的物理含义

根据式 (1-9), 当 $C = 10 \text{ mile/h}$, 取 3 个不同 k 值时 f 对 v 的曲线如图 1-12 所示。 $k = 1$ 的曲线有很大的偏置, 这说明多数天是无风的。 $k = 3$ 时的曲线像一个正态分布, 说明风速高和风速低的天数大致相同。 $k = 2$ 的曲线也是很多风场的典型风速分布曲线, 该分布下风速低于平均风速的天数更多一些, 或者说高风速的天数相对少一些。参数 k 决定了曲线的形状, 所以叫做形状参数。

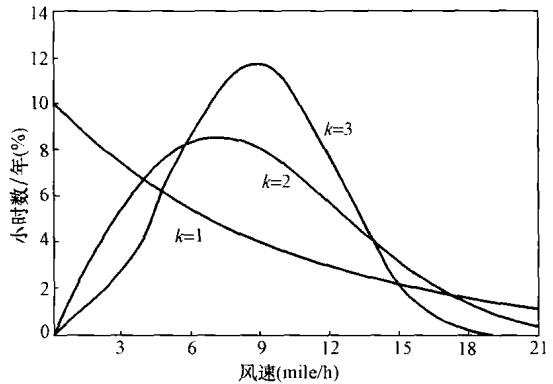


图 1-12 尺度参数 $C=10 \text{ mile/h}$, $k=1, 2, 3$ 时的威布尔风速分布函数

图 1-13 显示在 $k = 2$, C 从 $8 \sim 16 \text{ mile/h}$ 范围内取不同值时的风速分布曲线。对于更大的 C 值, 曲线向右移动至更大的风速, 也就是说 C 越大, 高风速的天数越多, 因为参数 C 代表了高风速时的分布小时数, 所以 C 叫尺度参数。

多数风电场尺度参数 C 在 $10 \sim 20 \text{ mile/h}$ (约 $5 \sim 10 \text{ m/s}$), 形状参数 k 取值在 $1.5 \sim 2.6$ (很少到 3) 之间。

(三) 威布尔分布参数随高度的变化

若某地一定高度风速的威布尔分布已知, 即该处分布参数的 C 、 k 值已知, 就可以根据分布参数随高度变化的规律, 从这一高度推求该地另一高度的风速分布。根据美国杰斯图斯 (Justus) 等人的研究, 同时经中国武汉、南京等铁塔梯度观测资料验证, 威布尔分布的尺度参数 C 在近地层中随高度 H 的变化也符合指数规律