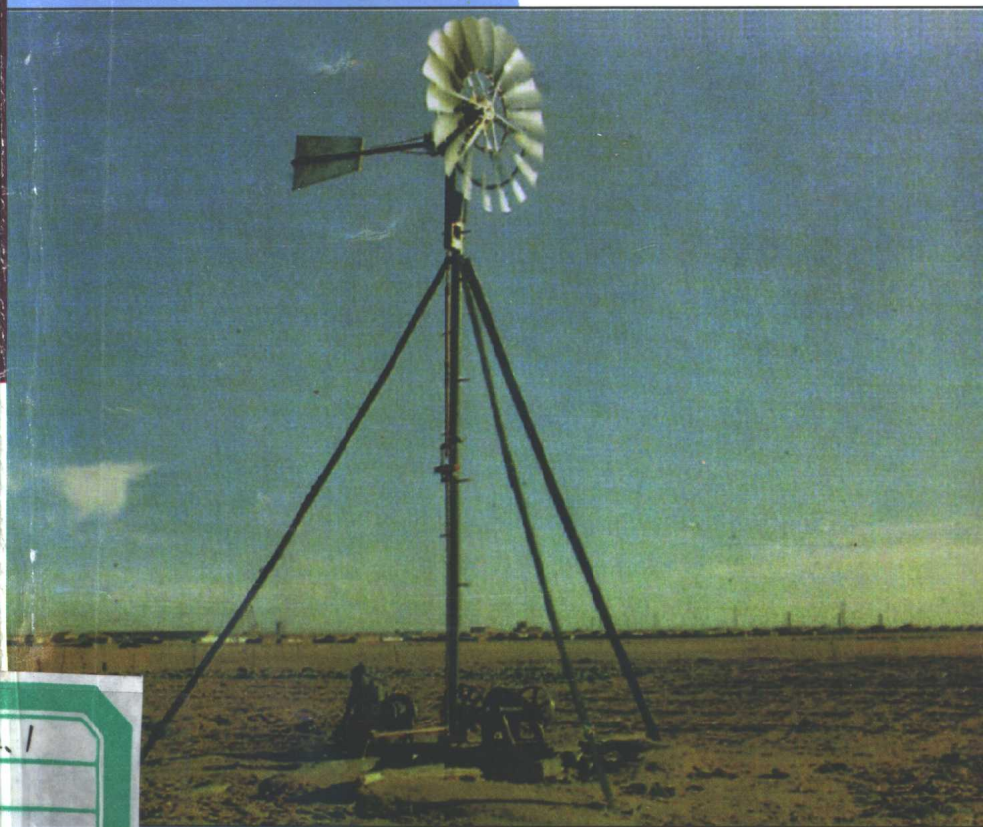


风力发电实用技术



金盾出版社

风力发电实用技术

王承煦 编著

金盾出版社

内 容 提 要

本书由清华大学王承煦教授编著。全书深入浅出地介绍了风力发电的基本知识、主要设备的基本原理、运行方式、地点选择和经济效能等,图文结合,通俗实用,可供从事风力发电的科研、开发和建设人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电实用技术/王承煦编著. —北京:金盾出版社,
1995.10(1999.1重印)

ISBN 7-80022-830-4

I. 风… II. 王… III. 风力发电-基本知识 IV. TM614

金盾出版社出版、总发行

北京太平路5号(地铁万寿路站往南)

邮政编码:100036 电话:68214039 68218137

传真:68276683 电挂:0234

封面印刷:北京天宇星印刷厂

正文印刷:北京1202工厂

各地新华书店经销

开本:787×1092 1/32 印张:5.25 字数:112千字

1999年1月第1版第2次印刷

印数:11001—14000册 定价:5.20元

(凡购买金盾出版社的图书,如有缺页、
倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

前 言

风能是一种干净的可再生能源。在当前人类对能源与环境问题日益关注的情况下,利用风能发电日益受到重视。自70年代以来,风力发电技术获得日新月异的进步。

从我国电力生产的情况看,部分农村、海岛、牧区无电或缺电现象仍很严重。随着经济建设的快速发展,城镇地区缺电现象也常发生,电力供应已成为影响经济发展的关键因素之一。我国地域辽阔,有着丰富的风能资源,充分利用风力发电,显得十分重要与迫切。为了加快发展风力发电,作者根据多年从事风力发电科研和教学工作的经验,从理论与实践上,对风力发电的实用技术作了较全面的介绍,希望能对从事风力发电的研究、开发及应用的人员有所帮助。

本书共分六章:第一、第二章概述了风能、风能资源、风能利用及风力发电的基本知识;第三、第四章介绍了风力发电主要设备的基本原理、结构及特性;第五章分析和介绍了风力发电系统的运行方式;第六章介绍了风力发电装置地点的选择,并对风力发电的经济性进行了分析。

由于编著者的水平有限,如有不妥之处,恳请读者批评指正。

编著者

1995年6月于清华大学

目 录

第一章 风能及风能资源	(1)
一、风的成因	(1)
二、风速及风向	(3)
(一)风速	(3)
(二)风向	(5)
三、风沿高度的变化	(6)
四、风能密度	(7)
(一)平均风能密度	(7)
(二)有效风能密度	(8)
五、风速的频率分布(风频)	(9)
六、风速持续时间分布	(9)
七、风速的测量及风力等级表	(10)
(一)固定式自动风速测量仪	(10)
(二)手提式测风仪	(11)
(三)风级计数仪	(12)
(四)利用计算机的风速数据采集、处理及图象显示系统	(13)
(五)风力等级表	(15)
八、我国的风能资源	(17)
第二章 风能利用及风力发电	(19)
一、风能利用	(19)
二、风力发电的发展及现状	(20)

三、风力发电系统的组成	(28)
(一)风力发电机组	(28)
(二)控制装置	(31)
(三)监测显示装置	(32)
(四)蓄能装置	(32)
第三章 风轮机的基本理论及结构	(35)
一、风轮机的结构型式及分类	(35)
二、风轮机的功率及风能利用系数	(40)
(一)穿过风轮桨叶扫掠面的风能	(40)
(二)风能利用系数 C_p	(41)
(三)风轮的功率	(41)
三、风轮机的叶尖速比(高速性系数)	(42)
四、风轮机的转矩系数	(42)
五、风能利用系数、转矩系数与叶尖速比的关系	(43)
六、风轮机的功率-转速特性曲线及转矩-转速特性曲线	(45)
(一)功率-转速特性曲线	(45)
(二)转矩-转速特性曲线	(45)
七、风能利用系数最大值(贝茨)理论	(47)
八、风轮机的输出功率曲线	(49)
九、风轮机的输出能量及可利用率	(51)
(一)计算法	(51)
(二)图示法	(52)
(三)风轮机的可利用率	(53)
十、风轮机的调向装置	(53)
(一)尾舵	(54)
(二)尾车	(55)

(三) 伺服电动机驱动的齿轮传动调向装置	(55)
十一、风轮机的调速装置	(55)
(一) 风轮偏侧调速	(56)
(二) 改变风轮叶片桨距调速	(59)
十二、风轮机的保护装置	(59)
(一) 叶尖阻尼板	(60)
(二) 扰流器	(60)
(三) 顺桨机构	(60)
(四) 风轮侧偏或上仰机构	(61)
(五) 阻尼板	(62)
第四章 发电机、蓄电池及变流装置	(63)
一、直流发电机	(63)
(一) 基本参数、运行状态及特性曲线	(63)
(二) 与直流电网联接	(65)
(三) 与变化的负载电阻联接	(67)
二、同步发电机	(70)
(一) 同步发电机联接到电网上	(70)
(二) 同步发电机与变化的负载电阻联接	(72)
三、异步发电机	(73)
(一) 异步电机作为发电机与电网并联	(74)
(二) 单机运行的自激异步发电机	(76)
四、发电机与风轮机的匹配	(79)
(一) 风轮机-并激直流发电机带电阻负载运行系统	(79)
(二) 风轮机-同步发电机或异步发电机与电网并 联运行系统	(80)
五、蓄电池	(81)

(一) 蓄电池的种类及工作原理	(81)
(二) 蓄电池的性能	(83)
(三) 蓄电池的结构	(86)
(四) 蓄电池的维护与保养	(86)
六、变流装置	(88)
(一) 整流器	(88)
(二) 逆变器	(91)
第五章 风力发电系统运行分析	(96)
一、风轮机-直流发电机-蓄电池-负载系统	(96)
二、风轮机-交流发电机-整流-蓄电池-负载系统	(97)
三、变速恒频风力发电系统	(98)
(一) 电磁滑差联接变速恒频发电系统	(100)
(二) 转差频率励磁变速恒频发电系统	(106)
(三) 磁场调制发电机及降频变换系统组成的变速 恒频发电系统	(113)
四、采用负载调节的独立运行风力发电系统	(121)
(一) 最佳功率负载线	(121)
(二) 实际功率负载线的确定及负载调节	(122)
(三) 分级负载控制器	(124)
五、与常规能源发电联合的风力发电系统——风力- 柴油联合发电系统	(126)
(一) 应用风力-柴油联合发电的目的	(126)
(二) 风力-柴油联合发电系统的结构型式	(127)
第六章 风力发电装置安装场地选择及经济性分析	(134)
一、风力发电装置安装地点的选择	(134)
(一) 选择风力发电装置安装地点时应考虑的因素	

.....	(134)
(二)在开阔平地上安装风力发电机.....	(136)
(三)在山顶上安装风力发电机.....	(137)
(四)在建筑物附近或建筑物上安装风力发电机	(137)
二、风电场	(139)
(一)规划和选择风电场场址的原则.....	(140)
(二)风电场内风力发电机的布局及尾流效应.....	(141)
三、风力发电经济性分析	(141)
(一)影响风力发电经济性的因素.....	(141)
(二)风力发电成本的计算.....	(143)
(三)风力发电与其他可再生能源发电成本的比较	(145)
(四)风力发电的社会效益.....	(146)
参考文献.....	(148)
附 图 我国风能有效能量密度分布图(瓦/米 ²) 全年 3~20 米/秒累积小时数分布图	

第一章 风能及风能资源

一、风的成因

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,就称为风能。从广义太阳能的观点看,风能是由太阳能转化而来的。来自太阳的辐射能不断地传送到地球表面周围,因受太阳照射而受热的情况不同,地球表面各处产生了温差,因而产生气压差,由此形成了空气的流动。因此,可以说是太阳把能量以热能的形式传到地球而后又转换成风能的。

大气环流——地球表面的大气环流是由于太阳辐射及地球自转而引起的。在赤道上,太阳垂直照射,地面受热很强;而在地球两极地区,太阳是倾斜照射的,地面受热则较弱,热空气较冷空气轻,就造成在赤道附近热空气向空间上升,并通过大气层上部流向两极;两极地区的冷空气则流向赤道。由于地球本身自西向东旋转的结果,这种大气环流在北半球产生了东北风,在南半球则产生了东南风,分别称为东北信风和东南信风,如图 1-1 所示。

海陆风——沿海地区陆地与海上所形成的风向交替的海风与陆风,它们是由于昼夜之间温度变化而造成的。在白日,陆地上接受的太阳辐射热量较海水要强,因而陆地上的空气受热向上流动,而海洋面上的空气较冷,较冷的空气则自海洋

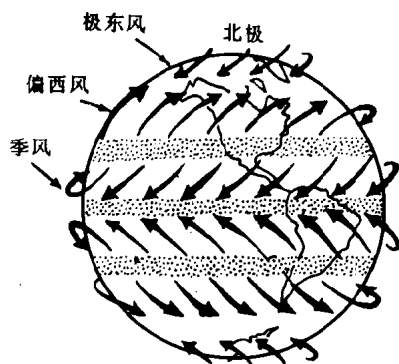


图 1-1 地球上风的运动方向

流向沿岸陆地,这样就形成了海风;在夜间,陆地上的空气比海洋上的空气冷却要快,这样就造成海洋上的空气上升,而陆地上较冷的空气沿地面流向海洋,形成了陆风,如图 1-2 所示。

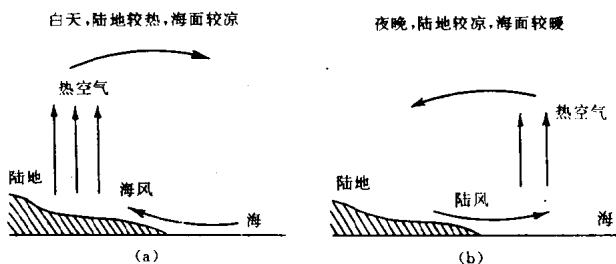


图 1-2 海陆风形成示意图

(a)海风 (b)陆风

山谷风——山岳地区在一昼夜间风向交替的山风(或称

山岳风)与谷风(或称平原风)。谷风的产生是由于日间太阳照射使山坡上的空气温度升高,热空气上升,而地势低处的冷空气则自山谷向上流动,这就形成了谷风;到了夜晚,空气中的热量向高空散发,高空中的空气密度增大,空气则沿山坡向下流动,这就形成了山风。

二、风速及风向

如上所述,风是由于空气的流动而形成的,因此风可被看做是向量,包括空气流动的速度及流动的方向两个要素,也即是风速和风向。对于人类来说,风是最熟悉的自然现象之一,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,了解其变化的情况。

(一)风速

空气在单位时间内所流过的距离称为风速,通常以米/秒作为计量单位。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。目前国际上对于风力状况进行分析并作为计算风能资源的基本依据是每小时的平均风速值。每小时平均风速值可以通过以下方式测算得出:

1. 将每小时内量测的瞬时风速取平均值;
2. 将每小时最后 10 分钟内量测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量测的风速值取平均值。

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,采用上述后两种方式量测风速时,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:

日平均风速值:一昼夜(24 小时)中各小时风速值的平均值;

月平均风速值:一个月中各日风速值的平均值;

年平均风速值:一年中各月风速值的平均值。

图 1-3(a)及(b)分别表示按此方法计算得出的全天(24 小时)风速图及全年(12 个月)风速图。

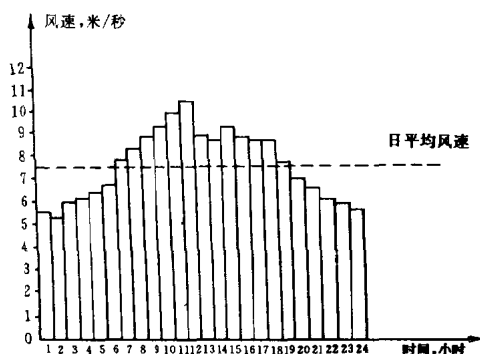


图 1-3(a) 全天(24 小时)风速图

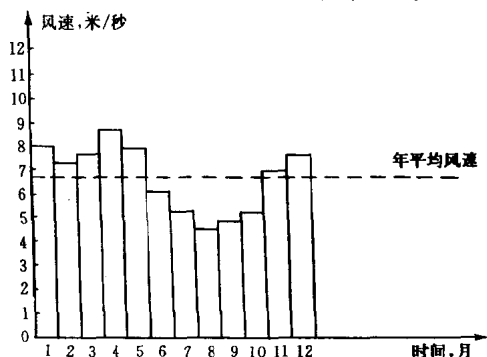


图 1-3(b) 全年(12 个月)风速图

(二) 风向

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,不同的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。

国际上通用的十六方位风向的表示方式,是在东、南、西、北四个方位间各插入一个方位,组成八个方位;再在此八个方位间各插入一个方位,即组成十六个方位,如图 1-4 所示。按照在此十六个方位风向出现的频率而绘成的描述风向(在一

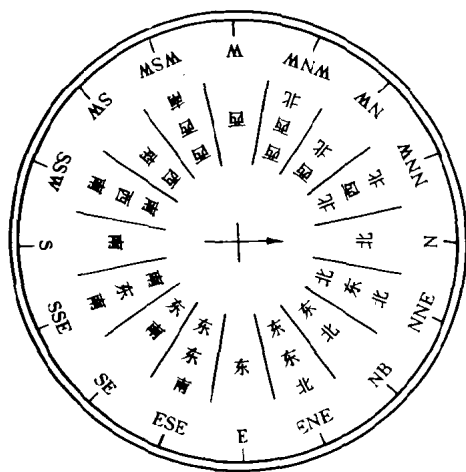


图 1-4 风向十六方位图

定时间内)变化的图形,称为风玫瑰图,如图 1-5 所示。在风玫瑰图中,径向矢量的长度代表沿该方向的风吹过的时间的百

分数,数字则表示沿该方向的平均风速值。从图 1-5 所示的风玫瑰图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。分析一天或一年的风玫瑰图就可了解一天或一年中风向的变化情况。

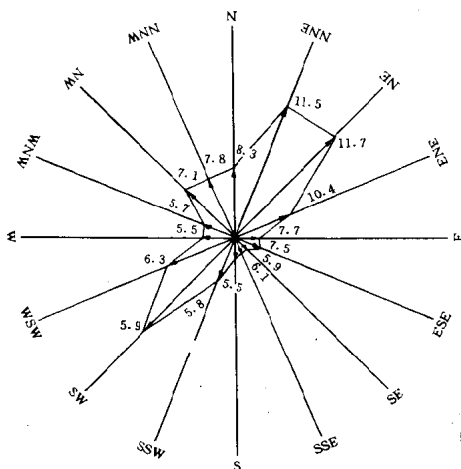


图 1-5 风玫瑰图

三、风沿高度的变化

从地球表面到 100 米高的高空层内,空气的流动受到涡流、粘性和地面摩擦等因素的影响,靠近地面的风速较小,离地面越高则风速越大,这种风速沿高度的变化可用指数法则公式或对数法则公式计算。工程上通常使用指数法则公式,如式(1-1)所示:

$$v = v_1 \left(\frac{h}{h_1} \right)^n \quad (1-1)$$

式中 h, h_1 ——欲求和已知离地面的高度, 米;

v_1 ——已知的离地面高度为 h_1 处的风速, 米/秒;

v ——欲求的离地面高度为 h 处的风速, 米/秒。

式(1-1)为经验公式, 式中指数 n 与地面的平整程度(粗糙度)及大气的热稳定度等因素有关, 其值为 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{8}$, 在开阔、平坦、稳定度正常的地区为 $1/7$ 。中国气象部门通过在全国各地测风塔或电视塔测量各种不同高度下的风速得出指数 n 的平均值为 $0.19 \sim 0.20$, 一般情况下可用此值估算不同高度处的风速值。

风能的大小与风速的立方成正比, 在高空捕获的风能远比地面要大, 了解风速沿高度变化的情况, 对于选择和确定风力装置离地面的高度是非常重要的。

四、风能密度

垂直穿过单位截面的流动空气所具有的动能称为风能密度, 如式(1-2)所示:

$$w = \frac{1}{2} \rho \cdot v^3 \quad (1-2)$$

式中 w ——风能密度, 瓦/米²;

ρ ——空气密度, 千克/米³;

v ——风速, 米/秒。

由于风速是变化的, 因而风能密度的大小也是随时间变化的。

(一) 平均风能密度

一定时间周期(例如一年或一月)内风能密度的平均值,称为平均风能密度,可用式(1-3)表示:

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho \cdot v^3(t) \cdot dt \quad (1-3)$$

式中 $\bar{w}$ ——一定时间周期内的平均风能密度,瓦/米²;

T ——时间周期;

$v(t)$ ——随时间变化的风速值,米/秒。

在风速测量中,若能得到时间周期(T)内不同的风速 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 及其所对应的持续时间 $t_1, t_2, \dots, t_n$, 则平均风能密度也可按式(1-4)计算

$$\bar{w} = \frac{1}{T} \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \rho \cdot v_i^3 \cdot t_i \right] \quad (1-4)$$

(二)有效风能密度

在实际风能利用中,风力装置只是在一定的风速范围内运转,对应于此一定风速范围内的风能密度称为有效风能密度。我国有效风能密度所对应的风速范围为 3~20 米/秒。

一般情况下,计算风能密度采用标准大气压下的空气密度。由于不同地区海拔高度不同,其气温及气压也不同,因而空气密度也不同。在海拔高度 500 米以下,也即是常温标准大气压力下,空气密度值为 1.225 千克/米³;如果海拔高度超过 500 米,则必须考虑空气密度的变化。根据我国气象台站经验给出的空气密度与海拔高度的计算关系式如式(1-5)所示:

$$\rho_h = 1.225 h^{-0.00012} \text{ 千克/米}^3 \quad (1-5)$$

式中 h ——海拔高度,米;

ρ_h ——海拔高度为 h 处的空气密度值,千克/米³。