

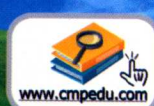
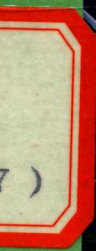


“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
高职高专新能源类专业规划教材

风力发电技术

F engli fadian jishu

◆ 侯雪 张润华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

赠电子课件
及模拟试卷等



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
高职高专新能源类专业规划教材

风力发电技术

主 编 侯 雪 张润华
副主编 卑五九 黄亚勤 刘 準
参 编 洪 城 于 玲 王 欣 李良君 赵元元



机械工业出版社

本书共有9章,主要讲述风与风资源,风力发电的特点、现状与发展趋势,风力发电机,风力发电的空气动力学基础,风力发电机组的结构,风电场电气系统,风力发电机组的控制及安全,风电场远程监控与运行,海上风电场。

本书可作为高职高专院校风力发电技术、风能与动力技术、新能源应用技术等专业及相关专业的专业基础课教材,也可供相关技术人员参考。

为方便教学,本书配有电子课件、模拟试卷及解答等,凡选用本书作为教材的学校,均可来电免费索取。咨询电话:010-88379375;电子邮箱:wangzongf@163.com。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术/侯雪,张润华主编. —北京:机械工业出版社,2014.8

“十二五”职业教育国家规划教材·高职高专新能源类专业规划教材
ISBN 978-7-111-47413-5

I. ①风… II. ①侯… ②张… III. ①风力发电—高等职业教育—教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第161648号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王宗锋 责任编辑:王宗锋 张利萍

版式设计:霍永明 责任校对:潘蕊

封面设计:陈沛 责任印制:李洋

北京市四季青双青印刷厂印刷

2015年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·11.5印张·263千字

0 001—2 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-47413-5

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视。风能蕴量巨大,全球可利用的风能比地球上可开发利用的水能总量要大10倍。利用风力发电的尝试,早在20世纪初就已经开始了。20世纪30年代,丹麦、瑞典、苏联和美国应用航空工业的旋翼技术,成功地研制了一些小型风力发电装置,广泛地用在多风的海岛和偏僻的乡村,目前我国拥有10亿kW可开发利用的风能资源。我国风力发电累计装机容量居世界第一。随着技术进步和环保事业的发展,风能发电在商业上将完全可以与燃煤发电竞争。风能将有望成为未来替代矿物燃料的主要新能源之一。

本书以风力发电技术的基础知识为主要内容,提供了大量的实物照片和示意图,可提高学生的学习兴趣;并且基础知识与应用前沿相结合,内容丰富,涉猎面广;针对高职学生的接受能力,增强可读性。

本书由侯雪、张润华任主编,参加编写的还有卑五九、黄亚勤、刘準、洪城、于玲、王欣、李良君、赵元元。其中,侯雪、李良君编写第1、2章,洪城编写第3章,赵元元、卑五九编写第4章,张润华、王欣编写第7章,刘準、黄亚勤、于玲编写第5、6、8、9章。

在本书编写过程中,编者参考了诸多论著和教材,在此对参考文献中的各位作者深表谢意!

由于时间仓促,编者水平有限,书中错误之处在所难免,敬请批评指正。

编 者

目 录

前言	5.3 风力发电机组传动系统	88
第1章 风与风资源	5.4 机舱、主机架与偏航系统	91
1.1 风	5.5 其他部件	94
1.2 风能资源	5.6 风力发电机组迎风技术	97
本章小结	本章小结	101
本章习题	本章习题	101
第2章 风力发电的特点、现状与发展趋势	第6章 风电场电气系统	103
2.1 风力发电概述	6.1 风电场概述	103
2.2 风力发电的意义、特点及存在问题	6.2 风电场集电系统	106
2.3 风力发电的现状与发展趋势	6.3 接地系统	109
本章小结	6.4 防雷保护	112
本章习题	6.5 电气保护	118
第3章 风力发电机	本章小结	120
3.1 风力发电的基本原理	本章习题	120
3.2 风力发电系统的种类	第7章 风力发电机组的控制及安全	121
3.3 风力发电机组的型式	7.1 风力发电机组控制系统概述	121
本章小结	7.2 风力发电机组控制系统的常见类型	124
本章习题	7.3 风力发电机组信号检测部分	128
第4章 风力发电的空气动力学基础	7.4 风力发电机组的基本控制	131
4.1 叶片的空气动力技术	7.5 大型风力发电机组控制系统的安全保护功能	140
4.2 风轮的空气动力学特性	7.6 风电场的计算机监控系统	143
4.3 风轮轴功率	本章小结	145
4.4 风轮功率调节	本章习题	145
本章小结	第8章 风电场远程监控与运行	146
本章习题	8.1 远程监控系统概述	146
第5章 风力发电机组的结构	8.2 风电场远程监控系统的组成	150
5.1 风力发电机组概述	8.3 风电场的运行	152
5.2 风轮	8.4 风电场的维护	155

本章小结	159	9.4 海上风力发电现状及前景	169
本章习题	159	本章小结	174
第9章 海上风电场	160	本章习题	174
9.1 海上风电场的构成	160	附录 与小型风力发电有关的技术标准	175
9.2 海上风电场与陆上风电场的区别	163	参考文献	178
9.3 海上风电场的建设	165		

1.1.1 风的形成

风是地球上的一种自然现象,它是由太阳辐射热引起的。太阳光照射到地球表面,地球表面各处因受热不同会产生温差,从而引起大气的对流运动。在气象学上,把垂直方向的大气运动称为气流,水平方向的大气运动则称为风,风的形成乃是空气流动的结果。

风形成的原因有两个,即地球的转动以及地球表面受太阳加热程度的差别。地球是转动的,这意味着某个站在地球赤道上的大每天大约要运动 2.5 万 mile (1 mile = 1609.344 m)。地球表面对大气的摩擦使此人头顶上的空气同样发生运动。但由于大气与地面没有固定地连接,其运动速度相对较慢。因此在地面上的人看来,好像是空气在动。但由于太阳的存在,风的运动情况更加复杂。在陆地和海洋受太阳辐射最多的地方,空气较为温暖,并向上运动,反之则向下运动。向下的空气产生高压区,高压区的空气会流向低压区,于是我们便有了风。这只是关于风的最简单的解释。

要理解风的成因,先要弄清两个关键的概念:空气和气压。空气的构成包括:氧分子(占空气总体积的 21%)、氮分子(约占 78%)、水蒸气和其他微量成分。所有空气分子以很快的速度移动着,彼此之间迅速碰撞,并和地平线上任何物体发生碰撞。

气压可以定义为:在一个给定区域内,空气分子在该区域施加的压力大小。一般而言,在某个区域空气分子存在越多,这个区域的气压就越大。相应来说,风是气压梯度力作用的结果。而气压的变化,有些是风暴引起的,有些是地表受热不均引起的,有些是在一定的水平区域上,大气分子被迫从气压相对较低地带流向低气压地带引起的。

大部分显示在气象图上的高压带和低压带,通常形成了伴随我们的温和的微风。而产生微风所需的气压差仅占大气压力本身的 1%,许多区域范围内都会发生这种气压变化。相对而言,强风暴的形成源于更大、更集中的气压区域的变化。

形成风的直接原因,是水平气压梯度力。但是实际上,我们每天看到的风是一种十分复杂的现象,其原因除了上述作用力外,风还受大气环流、地形、水域等不同因素的综合影响,表现形式多种多样,如季风、地方性的海陆风、山谷风等。

1. 季风

理论上讲应沿水平气压梯度方向吹,即垂直于等压线从高压向低压吹,但实际上,由于地球自转,使空气来流逐渐发生偏向的力,称为地转偏向力,这种力使北半球的气流向右偏转,所以地球大气运动除受气压梯度力外,还受地转偏向力的影响。

第1章 风与风资源

1.1 风

1.1.1 风的形成

风是地球上的一种自然现象，它是由太阳辐射热引起的。太阳光照射到地球表面，地球表面各处因受热不同会产生温差，从而引起大气的对流运动。在气象学上，把垂直方向的大气运动称为气流，水平方向的大气运动则称为风，风的形成乃是空气流动的结果。

风形成的原因有两个，即地球的转动以及地球表面受太阳加热程度的差别。地球是转动的，这意味着某个站在地球赤道上的人每天大约要运动 2.5 万 mile (1mile = 1609.344m)。地球表面对大气的摩擦使此人头顶上的空气同样发生运动。但由于大气与地面没有固定的连接，其运动速度相对较慢，因此在地面上的人看来，好像是空气在动。但由于太阳的存在，风的运动情况更加复杂。在陆地和海洋受太阳辐射最多的地方，空气较为温暖，并向上运动，反之则向下运动。向下的空气产生高压区，高压区的空气会流向低压区，于是我们便看到了风。这只是关于风的最简单的解释。

要理解风的成因，先要弄清两个关键的概念：空气和气压。空气的构成包括：氮分子（占空气总体积的 78%）、氧分子（约占 21%）、水蒸气和其他微量成分。所有空气分子以很快的速度移动着，彼此之间迅速碰撞，并和地平线上任何物体发生碰撞。

气压可以定义为：在一个给定区域内，空气分子在该区域施加的压力大小。一般而言，在某个区域空气分子存在越多，这个区域的气压就越大。相应来说，风是气压梯度力作用的结果。而气压的变化，有些是风暴引起的，有些是地表受热不均引起的，有些是在一定的水平区域上，大气分子被迫从气压相对较高的地带流向低气压地带引起的。

大部分显示在气象图上的高压带和低压带，只是形成了伴随我们的温和的微风。而产生微风所需的气压差仅占大气压力本身的 1%，许多区域范围内都会发生这种气压变化。相对而言，强风暴的形成源于更大、更集中的气压区域的变化。

形成风的直接原因，是水平气压梯度力。但是实际上，我们每天看到的风是一种十分复杂的现象，其原因除了上述作用力外，风还受大气环流、地形、水域等不同因素的综合影响，表现形式多种多样，如季风、地方性的海陆风、山谷风等。

1. 季风

理论上风应沿水平气压梯度方向吹，即垂直于等压线从高压向低压吹，但是地球在自转，使空气水平运动发生偏向的力，称为地转偏向力，这种力使北半球气流向右偏转，南半球气流向左偏转，所以地球大气运动除受气压梯度力外，还受地转偏向力的影响。大气真实

运动是这两个力的合力。实际上，地面风不仅受这两个力的支配，而且在很大程度上受海洋、地形的影响，山隘和海峡能改变气流运动的方向，还能使风速增大，而丘陵、山地因摩擦大使风速减小，孤立山峰因海拔高使风速增大。因此，风向和风速的时空分布较为复杂。如海陆差异对气流运动的影响，在冬季，大陆比海洋冷，大陆气压比海洋高，风从大陆吹向海洋；夏季相反，大陆比海洋热，风从海洋吹向内陆。这种随季节转换的风称为季风。

2. 海陆风

所谓的海陆风也是白昼时，大陆上的气流受热膨胀上升至高空流向海洋，到海洋上空冷却下沉，在近地层海洋上的气流吹向大陆，补偿大陆的上升气流，低层风从海洋吹向大陆称为海风。夜间（冬季）时，情况相反，低层风从大陆吹向海洋，称为陆风。在沿海地区，白天由于陆地与海洋的温度差，而形成海风吹向陆地；晚上则由陆地吹向海上。

3. 山谷风

在山区由于热力原因引起的白天风由谷地吹向平原或山坡，夜间风由平原或山坡吹向谷地。这是由于白天山坡受热快，温度高于山谷上方同高度的空气温度，坡地上的暖空气从山坡流向谷地上方，谷地的空气则沿着山坡向上补充流失的空气，这时由山谷吹向山坡的风，称为谷风。夜间，山坡因辐射冷却，其降温速度比同高度的空气较快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。

1.1.2 风向与风速

风向和风速是两个描述风的重要参数。风向和风速这两个参数都是在变化的。

1. 风向

早在商朝，就有对风向的定义和观测。风向是指风吹来的方向，例如风来自南方叫做南风，从北方吹来的就称为北风。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，可看出风的方向。气象上使用的风向标要求转动灵活，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。

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° 为一个方位，图 1-1 列出 16 个方位的风向符号，风向的测量单位我们用方位来表示。如陆地上，一般用 16 个方位表示，海上多用 36 个方位表示；在高空则用角度表示风向，是把圆周分成 360°，北风（N）是 0°（即 360°），东风（E）是 90°，南风（S）是 180°，西风（W）是 270°，其余的风向都可以由此计算出来。

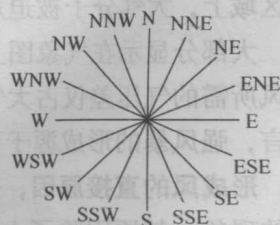


图 1-1 风向 16 方位图

2. 风速

风速是表示风移动的速度，即单位时间内空气流动所经过的距离。风具有随机性，如果用自动记录仪来记录风速，就会发现风速是不断变化的。紊乱气流所产生的瞬时高峰风速也叫阵风风速。世界气象组织根据风的强弱将风力分为 13 个等级。

风速以米/秒 (m/s) 为单位, 取一位小数。最大风速是指在某个时段内出现的最大 10min 平均风速值。极大风速 (阵风) 是指某个时段内出现的最大瞬时风速值。平均风速就是单位时间内空气在水平方向上移动的距离, 通常指一段时间内的风速的算术平均值。瞬时风速是指 3s 内的平均风速。影响风速的主要因素有:

(1) 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, 可按式 (1-1) 求之。

关于风速随高度而变化的经验公式很多, 通常采用所谓指数公式, 即

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

式中 v ——距地面高度为 h 处的风速 (m/s);

v_1 ——高度为 h_1 处的风速 (m/s);

n ——经验指数, 它取决于大气稳定度和地面粗糙度, 其值为 $1/80 \sim 1/2$ 。

(2) 地形地貌 风速受地形地貌的影响, 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。

(3) 地理位置 由于地表摩擦阻力的作用, 所以海面上的风比海岸大, 而沿海的风要比内陆大得多。比如台风登陆后 100km, 其风速几乎衰减了一半, 又如, 在平均风速 $4 \sim 6$ m/s 时, 海岸线外 70km 处的风速要比海岸大 60% ~ 70%。

(4) 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。所以在障碍物下侧布置风力发电机组时, 应远离其高度 10 倍以上。

3. 风速测量仪器

风速测量仪器主要有风杯式风速计、螺旋桨式风速计、热线风速计等。

风杯式风速计是最常见的一种风速计。风杯式风速计最早由英国鲁滨逊发明, 当时是四杯, 后来改用三杯。三个互成角度固定在架上的抛物形或半球形的空杯都顺一面, 整个架子连同风杯装在一个可以自由转动的轴上。在风力的作用下风杯绕轴旋转, 其转速正比于风速。转速可以用电触点、测速发电机或光电计数器等记录。

螺旋桨式风速计是一组三叶或四叶螺旋桨绕水平轴旋转的风速计。螺旋桨装在一个风向标的前部, 使其旋转平面始终正对风的来向, 它的转速正比于风速。

热线风速计是一根被电流加热的金属丝, 流动的空气使它散热, 利用散热速率和风速的二次方根成线性关系, 再通过电子线路线性化 (以便于刻度和读数) 即可制成热线风速计。热线风速计分旁热式和直热式两种。旁热式的热线一般为锰铜丝, 其电阻温度系数近于零, 它的表面另置有测温元件。直热式的热线多为铂丝, 在测量风速的同时可以直接测定热线本身的温度。热线风速计在小风速时灵敏度较高, 适用于小风速测量。它的时间常数只有百分之几秒, 是大气湍流和农业气象测量的重要工具。

声学风速表。在声波传播方向的风速分量将增加（或减低）声波传播速度，利用这种特性制作的声学风速表可用来测量风速分量。声学风速表至少有两对感应元件，每对包括发声器和接收器各一个。使两个发声器的声波传播方向相反，如果一组声波顺着风速分量传播，另一组恰好逆风传播，则两个接收器收到声脉冲的时间差值将与风速分量成正比。如果同时在水平和铅直方向各装上两对元件，就可以分别计算出水平风速、风向和铅直风速。由于超声波具有抗干扰、方向性好的优点，声学风速表发射的声波频率多在超声波段。

风速的测量现一般采用风杯式风速计，如图 1-2 所示。

一般情况下，风速计与风向标配合使用可以记录风速和风向数据。最佳的风速测量方法是在具有风资源开发潜力的地区安装测风塔，测风高度与预装风力发电机组的轮毂高度尽量接近，并且测风设备安装在测风塔的顶端，这样，一方面可以减小利用风切变系数计算不同高度处的风速所带来的不确定性，另一方面也可以减小测风塔本身对测风设备造成的影响（塔影效应）。如果测风设备安装在测风塔的中部，应尽量使测风设备的支架方向与主风向保持垂直，并使测风设备与测风塔保持足够的距离。

目前，拉线式管状测风塔一般比桁架式测风塔更有优势，这样可以减小塔影效应；管状测风塔的各段圆管应方便现场安装，最好可以不使用起重设备辅助安装。风速和风向数据经过采集后传输到由微处理器控制的电子芯片中，这套设备称为数据记录仪，一般通过电池供电，可以使用很长一段时间。图 1-3 为一个数据记录仪照片。数据记录仪一般需要 1 个月左右时间取一次数据，取出存储芯片，换上新的空白芯片。在冬季寒冷潮湿的地区，为防止仪器结冰，测风设备应有加热装置及相应的加热电源。目前国际上大多数国家采用的风速数据主要是 10min 平均数据，如果风速的平均周期不一致，相应的风速结果也会不同。

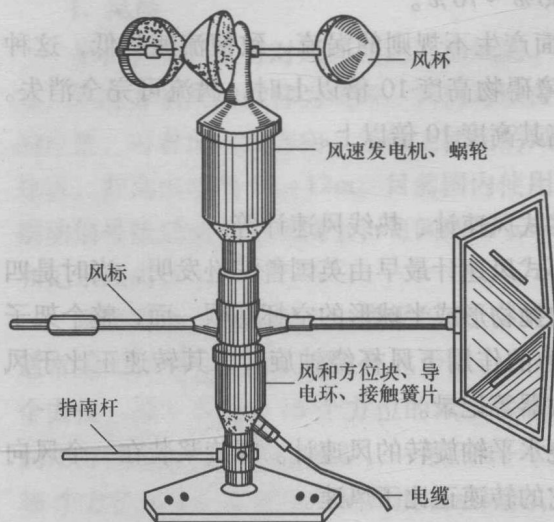


图 1-2 风杯式风速计

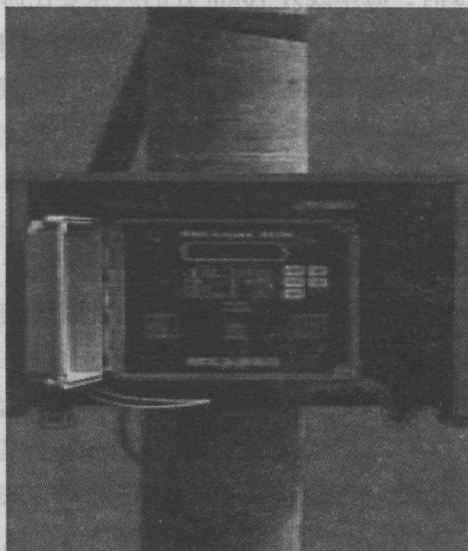


图 1-3 数据记录仪

1.1.3 风向频率

为了表示某个方向的风出现的频率，通常用风向频率这个量，它是指一年（月）内某

方向风出现的次数和各方向风出现的总次数的百分比,即

$$\text{风向变化} = \text{某风向出现次数} / \text{风向的总观测次数} \times 100\%$$

为了表示一个地区在某一时间内的风频、风速等情况,就需要更科学、更直观的统计方式——风玫瑰图,用风玫瑰图来反映一个地区的气流情况,更贴近现实。风玫瑰图在气象统计、城市规划、工业布局等方面有着十分广泛的应用。风玫瑰图包括风向玫瑰图、风速玫瑰图、风频玫瑰图等。风向玫瑰图是在极坐标图上绘出一地在一年中各种风向出现的频率,因图形似玫瑰花朵而得名。风向玫瑰图表示风向的频率。风向玫瑰图是一个给定地点一段时间内的风向分布图。图中线段最长者即为当地主导风向。风向玫瑰图又称风频图,最常见的风向玫瑰图是一个圆,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。在各方向线上按各方向风的出现频率,截取相应的长度,将相邻方向线上的截点用直线连接的闭合折线图形如图1-4a所示。在图中该地区最大风频的风向为北风,约为20% (每一间隔代表风向频率5%);中心圆圈内的数字代表静风的频率。有些风向玫瑰图上还指示出了各风向的风速范围。

如果用这种方法表示各方向的平均风速,就成为风速玫瑰图。风玫瑰图还有其他形式,如图1-4b、c为风频、风速玫瑰图,每一方向上既反映风频大小(线段的长度),又反映这一方向上的平均风速(线段末段的风羽多少);图1-4d、e为无量化的风玫瑰简易图,线段的长度表示风频的相对大小。

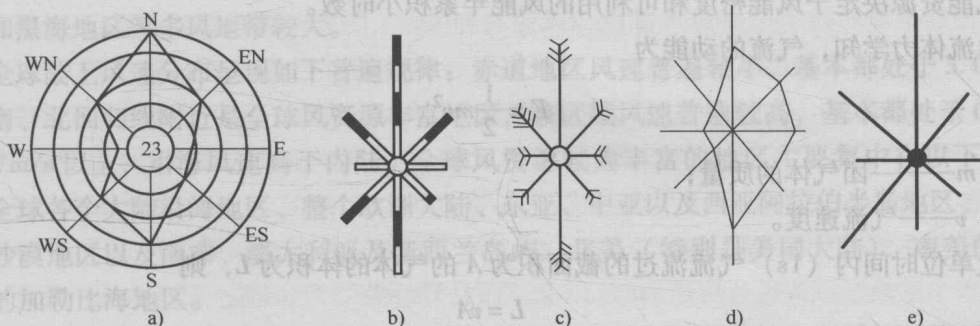


图 1-4 风玫瑰图

1.1.4 风速频率

风速频率又称风速的重复性,是指在一个月或一年的周期中发生相同风速的时数占这段时间刮风总时数的百分比。

1.1.5 风能特点

风能与其他能源相比,既有其明显的优点,又有其突出的局限性。风能具有蕴含量巨大、可以再生、分布广泛、没有污染四个优点。

风能的三个弱点:

1) 能量密度低: 这是风能的一个重要缺陷。由于风能来源于空气的流动, 而空气的密度是很小的, 因此风力的能量密度也很小, 只有水力的 $1/816$ 。在各种能源中, 风能的含能量是极低的, 给其利用带来一定的困难。

2) 不稳定: 由于气流瞬息万变, 因此风的脉动、日变化、季变化以至年变化都十分明显, 波动很大, 极不稳定。

3) 地区差异大: 由于地形的影响, 风力的地区差异非常明显。一个邻近的区域, 有利地形下的风力, 往往是不利地形下的几倍甚至几十倍。

1.2 风能资源

1.2.1 风能及风能密度

流动的空气所具有的动能称为风能。风不仅含有的能量很大, 而且它在自然界中所起的作用也是很大的。它可使山岩发生侵蚀, 造成沙漠, 还可完成地面输送水分的工作, 水汽主要是由强大的空气流输送的, 从而影响气候, 造成雨季和旱季。风中含有的能量比人类迄今为止所能控制的能量高得多。全世界每年燃烧煤炭得到的能量, 还不到风力在同一时间内所提供给人类的能量的 1% 。可见, 风能是地球上重要的能源之一, 是太阳能的一种转化形式。风能资源决定于风能密度和可利用的风能年累积小时数。

由流体力学知, 气流的动能为

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

式中 m ——一团气体的质量;

v ——气流速度。

设单位时间内 ($1s$) 气流流过的截面积为 A 的气体的体积为 L , 则

$$L = vA$$

如果以 ρ 表示空气的密度, 于是该体积的空气的质量为

$$m = \rho L = \rho vA$$

此时气流所具有的动能为

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

由风能公式可以看出, 风能的大小与气流的密度和通过的面积成正比, 与气流速度的三次方成正比。因此, 在风能计算中, 最重要的因素是风速, 风速取得准确与否对风能的大小起决定性作用, 风速大一倍, 风能可以大到八倍之多。

风能密度是单位时间内通过单位截面积的风能, 即在 $1s$ 内以速度为 v 流过单位面积产生的动能称为风能密度。它是描述一个地方风能潜力的最方便最有价值的量, 但是现实中风速每时每刻都在变化, 不能使用某个瞬时风速值来计算风能密度, 只有长期风速观察资料才能反映其规律, 故引出了平均风能密度的概念。空气密度取决于气压和温度。因此, 不同地

方、不同条件的风能密度是不同的。一般来说,海边地势低,气压高,空气密度大,风能密度就高。在这种情况下,若有适当的风速,风能潜力自然大。高山气压低,空气稀薄,风能密度就小些。但是如果高山风速大,气温低,仍会有相当的风能潜力。

由风能的表达式可以得到风能密度公式为

$$W = \frac{1}{2} \rho v^3$$

式中 W ——风能密度 (W/m^2);

v ——气流速度。

1.2.2 地球上风能资源分布

地球上的风能资源十分丰富,根据相关资料统计,每年来自外层空间的辐射能为 $1.5 \times 10^{18} \text{ kW} \cdot \text{h}$, 其中的 2.5%, 即 $3.8 \times 10^{16} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的能量被大气吸收,产生大约 $4.3 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ 的风能。

风能资源受地形的影响较大,世界风能资源多集中在沿海和开阔大陆的收缩地带,如美国的加利福尼亚州沿岸和北欧一些国家。世界气象组织发表了全世界范围风能资源估计分布图,按平均风能密度和相应的年平均风速将全世界风能资源分为 10 个等级。8 级以上的风能高值区主要分布于南半球中高纬度洋面和北半球的北大西洋、北太平洋以及北冰洋的中高纬度部分洋面上,大陆上风能则一般不超过 7 级,其中以美国西部、西北欧沿海、乌拉尔山顶部和黑海地区等多风地带较大。

全球陆上风速分布呈现如下普遍规律:赤道地区风速普遍较小,基本都处于 3.0 m/s 以下;南、北回归线附近是全球风资源丰富地区,该区域风速普遍较高,基本都处于 6 m/s 以上或 7 m/s 以上;沿海风速高于内陆。全球风资源较为丰富的地区主要集中在以下几个区域:全球各个大陆沿海地区、整个欧洲大陆、东亚、中亚以及西亚阿拉伯半岛地区、北非撒哈拉沙漠地区以及南非、澳大利亚及新西兰岛屿、北美(特别是美国大陆)、南美的南部、中美的加勒比海地区。

欧洲是世界风能利用最发达的地区,其风资源非常丰富。沿海地区是欧洲风资源最为丰富的地区,主要包括英国和冰岛沿海、西班牙、法国、德国和挪威的大西洋沿海,以及波罗的海沿海地区,其年平均风速可达 9 m/s 以上。其次,欧洲的陆上风资源也很丰富。整个欧洲大陆,除了伊比利亚半岛中部、意大利北部、罗马尼亚和保加利亚等部分东南欧地区以及土耳其地区以外(该区域风速较小,在 4 m/s 以下或 5 m/s 以下),其他大部分地区的风速都较大,基本在 6 m/s 以上或 7 m/s 以上,其中英国、冰岛、爱尔兰、法国、荷兰、德国、丹麦、挪威南部、波兰以及俄罗斯东部部分地区等都是风资源集中的地区。另外,地中海沿海地区的风速也较大,均在 6 m/s 以上。

亚洲大陆面积广袤,地形复杂,气候多变,风资源也很丰富,其主要分布于以下几个区域:中亚地区(主要是哈萨克斯坦及其周边地区)、阿拉伯半岛及其沿海、蒙古高原、南亚次大陆沿海以及亚洲东部及其沿海地区,中亚地区和蒙古高原以草原为主,阿拉伯半岛地处沙漠,这些地区的共同特点是地势平坦,地形简单,故风速较大,大部分地区都在 $6 \sim 7 \text{ m/s}$,蕴含的风能十分丰富。亚洲东部及其沿海地区风资源很丰富,其风速均在 6 m/s

以上或 7m/s 以上, 部分区域的风速甚至达到 $8\sim 9\text{m/s}$ 。但是该地区沿西太平洋的海域较深, 而且气候复杂多变, 地震、台风、海啸等自然灾害较多, 故不利于风能开发。另外, 青藏高原虽然风速很大, 能达到 9m/s , 但是由于其地势太高, 空气密度太低, 反而风功率密度很低, 风资源比较贫乏。而俄罗斯沿北冰洋海岸的风速较大, 在 6m/s 左右, 但是气温太低, 环境太恶劣, 无法进行风能开发。

非洲风能集中区域主要分为两大块: 撒哈拉沙漠及其以北地区以及南部沿海地区, 撒哈拉沙漠及其以北地区, 由于大部分是沙漠地形, 地势平坦开阔, 故其风速也较大, 基本在 6m/s 以上或 7m/s 以上。撒哈拉沙漠以南的陆上地区风资源较为贫乏, 风速较低, 大部分地区均在 5m/s 以下, 部分地区甚至不到 3m/s , 只有南非陆上风资源较好, 其风速能达到 7m/s 以上。非洲南部沿海风速很大, 达到 8m/s 以上或 9m/s 以上, 中东部沿海风速也较大, 达到 $6\sim 7\text{m/s}$, 具有较大风资源储量。

北美洲由于其独特的地理位置, 及其开阔平坦的地形特征, 其风资源十分丰富, 主要分布于北美大陆中东部及其东西部沿海以及加勒比海地区, 北美大陆风资源的特点是风速大、分布广泛, 其分布范围几乎涵盖了大半个北美大陆, 特别是美国中部地区, 地处广袤的北美大草原, 地势平坦开阔, 其年平均风速均在 7m/s 以上, 风资源蕴藏量巨大, 开发价值很大。北美洲东西部沿海风速可达到 9m/s , 加勒比海地区岛屿众多, 大部分沿海风速均在 7m/s 以上, 风能储量也十分巨大。

南美洲陆上风资源丰富地区主要集中在阿根廷、巴西东南部的高原地区以及安第斯山脉, 阿根廷全境均处于风资源丰富区, 风速均在 6m/s 以上, 其南部地区的风速甚至达到 $8\sim 9\text{m/s}$, 而且地势平坦、海拔不高, 风能储量极其丰富。巴西东南部的高原地区风速在 7m/s 以上, 安第斯山脉地区海拔很高, 其风速达到 9m/s 以上。南美洲沿海地区风速最大的区域几乎遍布了其整个大陆的东部沿海以及南部沿海, 这部分地区的风速普遍达到 $8\sim 9\text{m/s}$ 。其次, 其东部沿海的风速也达到了 7m/s 。

澳大利亚的风资源蕴藏量极其丰富。整个澳大利亚大陆几乎就是一个超大型的天然风场, 其整个陆地区域的风速均在 7m/s 以上, 而且环绕整个海岸线的沿海地区风速都在 $8\sim 9\text{m/s}$ 。另外, 新西兰岛的风资源也很丰富, 主要分布于其环岛屿的沿海地区, 风速达到 $8\sim 9\text{m/s}$ 。

1.2.3 我国风能资源分布

我国幅员辽阔, 海岸线长, 风能资源比较丰富。我国位于亚洲大陆东南、濒临太平洋西岸, 季风强盛。季风是我国气候的基本特征, 如冬季季风在华北长达 6 个月, 东北长达 7 个月。东南季风则遍及我国的东半壁。

我国风能资源主要分布在东南沿海及附近岛屿, 新疆、内蒙古和甘肃走廊、东北、西北、华北和青藏高原等部分地区, 每年风速在 3m/s 以上的时间近 4000h 左右, 一些地区年平均风速可达 7m/s 以上, 具有很大的开发利用价值。我国面积广大, 地形地貌复杂, 故而风能资源状况及分布特点随地形、地理位置不同而有所不同, 据此可将风能资源划分为四个区域 (包括海上建设的风电场)。

(1) 东南沿海及其岛屿地区风能丰富带 沿海及其岛屿风能丰富带, 年有效风功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 风功率密度线平行于海岸线, 沿海岛屿风功率密度在 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 如台山、平潭、东山、南鹿、大陈、嵊泗、南澳、马祖、马公、东沙等, 可利用小时数在 $7000 \sim 8000\text{h}$ 。这一地区特别是东南沿海, 由海岸向内陆是丘陵连绵, 风能丰富地区仅在距海岸 50km 之内。

东南沿海受台湾海峡的影响, 每当冷空气南下到达海峡时, 由于狭管效应使风速增大。冬春季的冷空气、夏秋的风, 都能影响到沿海及其岛屿, 是我国风能最佳丰富区。我国有海岸线约 1800km , 岛屿 6000 多个, 这是风能大有开发利用前景的地区。

(2) 三北(东北、华北、西北)地区风能较丰富带 此丰富带包括东北三省、河北、内蒙古、甘肃、青海、西藏和新疆等省/自治区近 200km 宽的地带, 风功率密度在 $200 \sim 300\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 有的可达 $500\text{W}/\text{m}^2$ 以上, 可开发利用的风能储量约 2 亿 kW , 约占全国可利用储量的 79% 。如阿拉山口、达坂城、辉腾锡勒、锡林浩特的灰腾梁、承德围场等, 可利用小时数在 5000h 以上, 有的可达 7000h 以上。这一风能较丰富带的形成, 主要是由于北部地区处于中高纬度的地理位置。

由于欧亚大陆面积广大, 北部地区气温又低, 是北半球冷高压活动最频繁的地区, 而我国地处欧亚大陆东岸, 正是冷高压南下必经之路。北部地区是冷空气入侵我国的前沿, 在冷锋(冷高压前锋)过境时, 在冷锋后面 200km 附近经常可出现 $6 \sim 10$ 级 ($10.8 \sim 24.4\text{m/s}$) 大风。对风能资源利用来说, 就是可以有效利用的高质量大风。这一地区的风能密度, 虽较东南沿海为小, 但其分布范围较广, 是我国连成一片的最大风能资源区。

该地区风电场地形平坦, 交通方便, 没有破坏性风速, 是我国连成一片的最大风能资源区, 有利于大规模地开发风电场。但是, 建设风电场时应注意低温和沙尘暴的影响, 有的地方联网条件差, 应与电网统筹规划发展。

(3) 内陆局部风能丰富区 此丰富带在两个风能丰富带之外, 风功率密度一般在 $100\text{W}/\text{m}^2$ 以下, 可利用小时数在 3000h 以下。但是在一些地区由于湖泊和特殊地形的影响, 风能也较丰富, 如鄱阳湖附近较周围地区风能就大, 湖南衡山、湖北的九宫山、河南的嵩山、山西的五台山、安徽的黄山、云南太华山等也较平地风能大。

青藏高原海拔 4000m 以上, 这里的风速比较大, 但空气密度小, 如在海拔 4000m 的空气密度大致为海平面的 67% , 也就是说, 同样是 8m/s 的风速, 在海平面风功率密度为 $313.6\text{W}/\text{m}^2$, 而在海拔 4000m 只有 $209.9\text{W}/\text{m}^2$ 。这里年平均风速为 $3 \sim 5\text{m/s}$, 风能仍属一般地区。

(4) 海上风能丰富区 我国海上风能资源丰富, 10m 高度可利用的风能资源约是陆上的 3 倍, 即 7.5 亿 kW 。海上风速高, 很少有静风期, 可以有效利用风力发电机组的发电容量。风速随高度的变化小, 可以降低塔架高度。海上风的湍流强度低, 没有复杂地形对气流的影响, 可减少风力发电机组的疲劳载荷, 延长使用寿命。一般估计海上风速比平原沿岸高 20% , 发电量增加 70% , 在陆上设计寿命 20 年的风力发电机组在海上可达 $25 \sim 30$ 年, 且距离电力负荷中心很近。随着海上风电场技术的发展成熟, 经济上可行, 将来必然会成为重要的可持续能源。

本章小结

风是空气相对于地球表面的运动。风能是指太阳辐射造成地球各部分受热不均匀,引起各地温差和气压不同,导致空气运动而产生的能量。风能是一种清洁、安全、可再生的绿色能源,它取之不尽,用之不竭。风能对环境无污染,对生态无破坏,环保效益和生态效益良好,对于人类社会可持续发展具有重要意义。现今调整能源结构、减少温室气体排放、缓解环境污染、加强能源安全已成为国内外关注的热点。国家对可再生能源的利用,特别是风能开发利用给予了高度重视。

本章习题

1. 简述风形成的原因。
2. 什么是气压梯度力?
3. 如何评价一个地区风能资源丰富与否?有哪些指标?
4. 影响风速的主要因素有哪些?
5. 简述全球及我国的风资源的分布状况。
6. 风能利用的优缺点有哪些?
7. 什么是风玫瑰图?
8. 试论述我国风电发展的概况及存在的问题。

第2章 风力发电的特点、现状与发展趋势

2.1 风力发电概述

能源问题作为关系到世界经济发展和人们生存环境的重大问题正日益受到世界各国的广泛关注。在全球生态环境恶化和化石能源逐渐枯竭的双重压力下,对新能源的研究和利用已成为全球各国关注的焦点。除水力发电技术外,风力发电是新能源发电技术中最成熟、最具大规模开发和最有商业化发展前景的发电方式。由于在改善生态环境、优化能源结构、促进社会经济可持续发展等方面的突出作用,目前世界各国都在大力发展和研究风力发电及其相关技术。随着世界经济的迅猛发展,各行各业对能源的需求也与日俱增。迅速膨胀的人类社会,正以自人类产生以来从未有过的空前速度,大量消耗着地球上亿万年前形成的极为有限的化石燃料——煤、石油、天然气。这些传统资源的开发和利用在一定程度上满足了生产发展和人们生活的能源需要。但是,对这些不可再生资源的掠夺性开采和过度利用,已经在全球范围内造成了严重的环境污染和生态环境恶化等问题。一切有远见的人们都开始考虑如何不以牺牲后代生存环境、经济资源为代价来发展我们的社会,也即可持续发展的战略问题。在能源领域,开发利用新的可再生的清洁能源(即新能源,主要有风能、太阳能、生物质能、海洋能、地热能等)就是该战略其中之一。作为一种重要的可再生能源,风能的开发和利用在新能源研究中一直被广泛关注。

风的能量是由太阳辐射能转化来的,太阳每小时辐射地球的能量是 $1.74 \times 10^{11} \text{ MW}$, 换句话说,地球每小时接收了 $1.74 \times 10^{11} \text{ MW}$ 的能量。太阳的辐射造成地球表面受热不均,引起大气层中压力分布不均,空气沿水平方向运动形成风。风能大约占太阳提供总能量的百分之一或二,太阳辐射能量中的一部分被地球上的植物转换成生物能,而被转化的风能总量是生物能的 50~100 倍。全球的风能约为 $2.74 \times 10^9 \text{ MW}$, 其中可利用的风能为 $2.0 \times 10^7 \text{ MW}$, 比地球上可开发利用的水能总量还要大 10 倍。

我国 10m 高度层的风能资源总储量为 32.26 亿 kW, 其中实际可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿 kW。而据估计,我国近海风能资源约为陆地的 3 倍,所以,我国可开发风能资源总量约为 10 亿 kW。其中青海、甘肃、新疆和内蒙古可开发的风能储量分别为 1143 万 kW、2421 万 kW、3433 万 kW 和 6178 万 kW, 是我国大陆风能储备最丰富的地区。

风能是一种干净的自然能源,没有常规能源(如煤电、油电)会造成环境污染的问题。平均每装一台单机容量为 1MW 的风能发电机,每年可以减排 2000t 二氧化碳(相当于种植 1 平方英里的树木)、10t 二氧化硫、6t 二氧化氮。风能产生 $1 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的电量可以减少 0.8~0.9t 的温室气体,相当于煤或矿物燃料一年产生的气体量。而且风力发电机组不会危害鸟类和其他野生动物。在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,风能作为一种高效清