

风电场 规划设计与施工

主 编 曹 云 副主编 孙 华

FENGDIANCHANG
GUIHUA SHEJI YU SHIGONG



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

风电场 规划设计与施工

主 编 曹 云 副主编 孙 华



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是依据中国风力发电标准、规程与规范,并紧密结合风电场建设的实际情况而编写,能够满足技术人员对大型风电场规划设计与施工知识的需求。

本书内容共八章,主要包括风与风能资源、风电场场址选择、风电场机组选型、风电场电气设计、风电场消防设计、项目投资概算及财务分析、风电场工程施工、风电场劳动安全与工业卫生。

本书可作为大中专院校风电专业、新能源和可再生能源技术类专业教材,也可供从事风力发电的技术人员与管理人员培训使用。

图书在版编目(CIP)数据

风电场规划设计与施工/曹云主编. —北京:中国水利水电出版社, 2009

ISBN 978-7-5084-6552-4

I. 风… II. 曹… III. ①风力发电-发电厂-设计②风力发电-发电厂-工程施工 IV. TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 068582 号

书 名	风电场规划设计与施工
作 者	主编 曹云 副主编 孙华
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	140mm×203mm 32 开本 5 印张 134 千字
版 次	2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷
印 数	0001—3050 册
定 价	25.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

近年来，化石能源日趋枯竭，受能源安全、环境保护及经济利益的驱动，可再生能源的开发利用日益受到世界各国的重视。风力发电作为一种可再生的清洁能源，已经被列入我国研究和开发的重点。

国家发展和改革委员会制定的《可再生能源发展“十一五”规划》中要求，选择一些高等学校和中专学校，设立风电专业课程，逐步建立起风电专业，同时结合风电发展需要，定期举办风电技术培训班，解决目前风电人才紧缺的问题。为此，作者在多年从事风电教学和科研工作的基础上，参考大量国内外文献和工程技术经验，编写了这本目前国内比较系统和全面介绍风电场规划设计与施工的教材。

本书第一、第二、第三、第四、第六章由曹云编写，第五、第七、第八章由孙华编写。曹云高级工程师进行全书的统稿，江晓林、高桂英对书中的内容作了大量的文字修改，本书在编写过程中得到了许多同仁的支持和帮助，江晓林、高桂英对书中的内容作了大量的文字修改，内蒙古大学电子工程学院张哲教授、水利部牧区水利科学研究所吴永忠教授级高工、内蒙古大学电子工程学院李全虎副教授对书稿进行了认真的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢！

由于水平有限，书中定有不足之处，希望读者批评指正。

作 者

2009 年 4 月

目 录

前言

绪论	1
第一章 风与风能资源	3
第一节 风的形成	3
第二节 风的测量	3
第三节 风能资源的计算及分布	8
第四节 风电场所在地区气象站资料分析	20
第五节 风电场测风资料分析	23
第六节 风能资源评价	28
复习思考题	29
第二章 风电场场址选择	30
第一节 概述	30
第二节 风电场选址的地质条件	30
第三节 风电场宏观选址	31
第四节 风电场微观选址	33
第五节 风电场选址软件介绍	35
复习思考题	38
第三章 风电场机组选型	39
第一节 概述	39
第二节 风力发电机组单机容量及机型的选择	39
第三节 风电机组的布置	43
第四节 风电场年上网电量计算	44
复习思考题	46

第四章 风电场电气设计	47
第一节 风电场变电站（所）电气一次部分	47
第二节 风电场变电站（所）	52
第三节 风电场变电站（所）电气二次部分	56
第四节 风电场变电站（所）通信系统	61
复习思考题	62
第五章 风电场消防设计	63
第一节 概述	63
第二节 工程消防设计	64
第三节 施工消防管理	73
复习思考题	75
第六章 项目投资概算及财务分析	76
第一节 项目概况	76
第二节 概算表及附件	77
第三节 财务评价	77
第四节 财务估算	80
第五节 ××风电场项目投资概算及财务指标	80
复习思考题	107
第七章 风电场工程施工	108
第一节 施工组织	108
第二节 工程管理	109
第三节 环境保护	111
第四节 水土保持	113
复习思考题	115
第八章 风电场劳动安全与工业卫生	117
第一节 设计依据、任务与目的	117
第二节 工程安全与卫生危害因素分析	118
第三节 机构设置、人员配备与管理制度	118

第四节	劳动安全设计和工业卫生设计	119
第五节	事故应急救援预案	122
第六节	劳动安全与工业投资效果评价	127
复习思考题		128
附录 A		129
附录 B		140
参考文献		149

绪 论

一、风电场规划设计与施工课程的作用和任务

风电场规划设计与施工是主要研究大型风电场规划设计与施工的工程专业课程。对于大中专院校风电专业及从事风电场开发研究的技术人员具有一定的实用性，是一门重要课程。作为技术专业课程它应具有基础性、应用性和先进性。基础是指理论基本知识和基本技能，不仅为从事风电场开发研究打基础，也为自学深造拓宽和创新打基础。

从事风电专业的学生学习本课程时重在应用，要理论联系实际，要培养他们分析和解决问题的能力，要重视实践技能的训练。

课程内容必须具有先进性，这是不言而喻的，本课程的内容和体系应随着风电技术发展和风电专业的教学需要而不断深化和改革。

二、风电技术发展概况

风能利用，主要是将大气运动时所具有的动能转化为其他形式的能量，是不产生任何污染排放的可再生的自然能源，具体方式包括风车提水、风帆助航、风力制冷采暖和风力发电等。

在几千年前，埃及的风帆船就在尼罗河上航行。

我国是世界上风力资源最丰富的国家之一，也是最早利用风能的国家，至少在 3000 年前的商代就出现了帆船。

近年来，石化能源资源日趋枯竭，能源供应安全和保护环境等的驱动，可再生能源的开发利用日益受到社会的重视，许多国家提出明确的发展目标，制定了支持可再生能源发展的法规和政策。特别是 20 世纪 90 年代初以来，现代风能最主要的利用形

式——风力发电机的发展十分迅速。

世界风电装机容量已从 1993 年的 216 万 kW 上升到 2005 年底的 6000 万 kW，年平均增长率超过 30%。随着风电技术的进步和应用规模的扩大，风电成本持续下降，经济性和常规能源已十分接近。到 2020 年世界风电装机容量预计达到 12.45 亿 kW，发电量占世界风力消耗的 12%。到 2020 年我国风电装机容量预计达到 3000 万 kW。因此，风能将是 21 世纪最有发展前景的绿色能源，是人类社会经济可持续发展的主要能源。

三、课程的学习方法

为了学好本课程，首先要求具有正确的学习目的和态度，应为我国风电事业发展而努力学习。

要求学生通过这门课的课堂教学、实验、实习，能初步综合掌握风电场总体规划设计的内容和程序及一般的相关专业基础知识，以便在工作中能够处理所遇到的一般风电场设备运行、管理的技术问题，为风电场的安全、稳定运行作出努力，为风电事业的发展创新作出贡献。

第一章 风与风能资源

第一节 风的形成

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。所以，风就是水平运动的空气。

空气产生运动主要是由地球上各纬度所接收的太阳辐射强度不同而形成的。在赤道及低纬度地区，太阳高度角大，日照时间长，太阳辐射强度高，地面和大气接收的热量多，温度高；在高纬度地区，太阳高度角小，日照时间短，地面接收的热量少，温度低。这种高低纬度之间的温度差异，形成了南北之间的气压梯度，使空气做水平运动。地球在自转，使空气水平运动发生偏向力，称为地球偏向力，所以地球大气运动是受两种力作用的综合影响的结果。

另外，地面风不仅受上述两种力的支配，还在很大程度上受海洋、地形的影响，山隘和海峡能改变空气流动的方向，并能使风速增大，而丘陵、山地由于摩擦力大，会使风速减小。风是一种可供利用的自然能源，称为风能。由于风能不会因人类的开发利用而枯竭，并且在使用过程成中不会向空气中排放有毒气体，因此风能是一种清洁、无任何污染的可再生能源。

第二节 风的测量

风为矢量，既有大小，也有方向，所以风的测量包括风向测量和风速测量。

一、风向标

风向标是测量风向的最通用的装置，有单翼型、双翼型和流线型等。风向标主要由尾翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴四部分组成。它是在风的动压力作用下，取得指向来风的一个平衡位置，即为风向的指示。

传送和指示风向方位的方法很多，常用的有电触点盘、环形电位、自整角机和光电码盘四种类型。

二、风向表示法

风向一般用 16 个方位表示，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° ，如图 1-1（a）所示。

各种风向的出现频率通常用风向玫瑰图来表示。风向玫瑰图是在极坐标图上点出某年或某月各种风向出现的频率，如图 1-1（b）所示。

三、风速测量

空间特定点的风速为该点周围气体微团移动的速度。

在国际单位制中，风速常以 m/s 、 km/h 为单位。测量风速常用的风速计有旋转式风速计、散热式风速计和声学风速计等，使用最多的是旋转式风速计。

1. 旋转式风速计

旋转式风速计是测量风速的常用装置，其感应部分是一个固定在转轴上的感应风的组件，常用的有风杯、螺旋桨片和平板片三种类型，其中风杯的旋转轴垂直于风的来向，而螺旋桨片和平板片的旋转轴平行于风的来向。

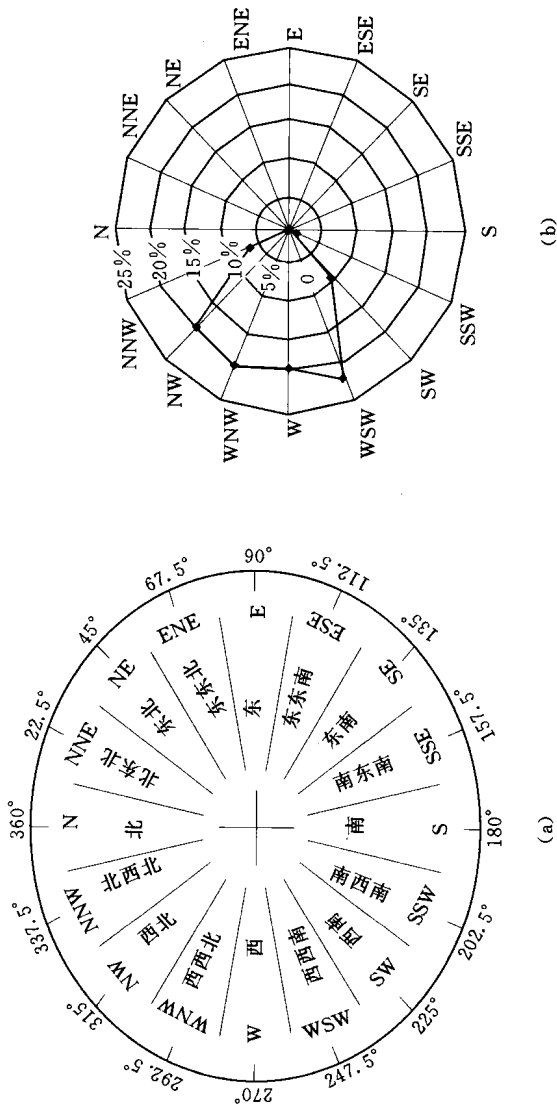


图 1-1 风向表示法

(a) 风向 16 方位图; (b) 风向玫瑰图

测定风速最常用的传感器是风杯，杯形风速计的主要优点是
与风向无关，所以百余年来获得了广泛的应用。杯形风速计是由
3 个或 4 个半球形或抛物锥形的空心杯组成的。杯形风速计固定
在互成 120° 角的三叉心形支架或互成 90° 角的十字形支架上，杯
的凹面顺着同一方向，整个横臂架固定在能旋转的垂直轴上。

由于凹面和凸面所受的风压力不相等，风杯在受到扭力作用
时开始旋转，它的转速与风速成一定关系。风速和风杯转速的关
系可由风洞试验得出，即风速

$$V = a + bN + cN^2$$

$$b = 2\pi RK$$

式中： a 为由阻力矩所决定的常数，数值上等于启动风速 V_0 ，
通常 $a = 0.5 \sim 1.2 \text{ m/s}$ ； b 为风速表系数，它与风杯的结构和大
小有关； c 为一个很小的系数， $c/b \approx 10^{-4}$ ，表明风速与风杯并不
成严格的线性关系； N 为单位时间内风杯的转速。

此外，散热式风速计利用一个被加热物体的散热速率与周围
空气的流速有关，这种特性可以测量风速。它主要用于测量小风
速，但不能测量风向。

声学风速计的原理是利用声波在大气中的传播速度与风速间
的函数关系来测定风速。声学风速计有转动部件，响应快，能测
定沿任何指定方向的风速分量，但造价较高。

2. 风速记录

风速记录是通过信号转换方法来实现的，常用以下四种
方法：

(1) 机械法。当风速感应器旋转时，通过蜗杆带动涡轮转
动，再通过齿轮系统带动指针旋转，从刻度盘上直接读出风的行
速，再除以时间得到平均风速。

(2) 电接式。由风杯驱动的蜗杆，通过齿轮系统连接到一个
偏心凸轮上，风速旋转一定圈数，凸轮便使相当于开关作用的两个
接点闭合或打开，完成一次接触，表示一定的风程。

(3) 电机式。风速感应器驱动一个小型发电机中的转子，输

出与风速感应器转速成正比的交变电流，输送到风速的指示系统。

(4) 光电式。风杯旋转轴上装有一圆盘，盘上有等距的孔，孔上面有一红外光源，正下方有一光电半导体，风杯带动圆盘旋转时，由于孔的不连续性，形成光脉冲信号，经光电半导体元件接收放大后变成电脉冲信号输出，每一个脉冲信号表示一定的风的行程。

风级是根据风对地面或海面物体影响引起的各种现象，按风力的强度等级来估计风力的大小。早在 1805 年，英国人浦禄 (Francis Beaufort, 1774~1859 年) 就拟定了风速的等级，国际上称为浦禄风级，自 1946 年以来风力等级又做了一些修订，由 13 个等级改为 18 个等级，实际上应用的还是 0~12 级的风级，所以最大的风速就是人们常说的 12 级台风。表 1-1 列出了风级的表现。

表 1-1 风 级 的 表 现

风 级	名 称	相应风速 (m/s)	表 现
0	无风	0~0.2	0 级无风炊烟上
1	软风	0.3~1.5	1 级软风烟稍斜
2	轻风	1.6~3.3	2 级轻风树叶响
3	微风	3.4~5.4	3 级微风树枝晃
4	和风	5.5~7.9	4 级和风灰尘起
5	清劲风	8.0~10.7	5 级清风水起波
6	强风	10.8~13.8	6 级强风大树摇
7	疾风	13.9~17.1	7 级疾风步难行
8	大风	17.2~20.7	8 级大风树枝折
9	烈风	20.8~24.4	9 级烈风烟囱毁
10	狂风	24.5~28.4	10 级狂风树根拔
11	暴风	28.5~32.6	11 级暴风陆罕见
12	飓风	>32.6	12 级飓风浪滔天

第三节 风能资源的计算及分布

一、平均风速

规定时间内瞬时风速的平均值定义为平均风速，平均风速由下式确定

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^N V_i}{N} \quad (1-1)$$

式中： $\bar{V}$ 为平均风速； V_i 为观测点风速； N 为观测点样本个数。

由式（1-1）可见，平均风速是能反映风能资源情况的重要参数，平均风速可以是日平均风速、月平均风速、年平均风速。年平均风速是全年瞬时风速的平均值，年平均风速越高，则该地区风资源越好。

二、风功率公式

在单位时间内流过垂直于风速截面积 S 的风能，就是风功率。即

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

式中： D_w 为风功率，W； ρ 为空气密度， kg/m^3 ； V 为风速， m/s ； S 为面积， m^2 。

式（1-2）是常用的风功率公式。而风力工程中，则习惯称为风能公式。

由式（1-2）可见，风功率大小与气流速度的立方、空气密度和气流通过的面积成正比。在风能计算中，最重要的因素是风速，如风速大 1 倍，风功率可增至 8 倍。

三、风能密度公式

为了衡量一个地区风能的大小，风能密度是最方便和有价值

风能密度是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能。式(1-2)中的风功率取 $S=1$ ，便得到风功率密度公式，也称风能密度公式，即

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

式中： D_{WE} 为风能密度， W/m^2 。

由于风速是一个随机性很大的量，必须通过一定时间长度的观测来了解它的平均状况，因此在一定时间长度内的平均风能密度，可以将式(1-3)对时间积分后平均求得。

四、风能密度计算方法

可用直接计算法和概率分布计算法计算平均风能密度。

1. 直接计算法

将某地一年(月)每天24h逐时测到的风速数据，按某间距(比如间隔为1m/s)分成各等级风速，如 $V_1(3m/s)$ 、 $V_2(4m/s)$ 、 $\dots$ 、 $V_i(i+2m/s)$ ，然后将各等级风速在该年(月)出现的累计小时数($n_1, n_2, \dots$)分别乘以相应风速下的风能密度 $\frac{1}{2} n_i \rho V_i^3$ ，再将各等级风能密度相加之后除以年(月)总时数 N ，即可求得该地一年(月)的平均风能密度为

$$\bar{D}_{WE} = \frac{\sum \frac{1}{2} n_i \rho V_i^3}{N} \quad (1-4)$$

式中： $\bar{D}_{WE}$ 为平均风能密度， W/m^2 ； ρ 为当地空气密度的年平均计算值，它取决于温度和压力(海拔高度)。

如果风场测风有压力和温度的记录，则空气密度按下式计算

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (1-5)$$

式中： P 为年平均大气压，Pa； R 为气体常数， $R = 287J/(kg \cdot K)$ ； T 为年平均空气开氏温标绝对温度，K。

如果没有风场大气压的实测值，空气密度可以作为海拔高度(Z)和温度(T)的函数，按照下式计算出估计值