



全国高职高专新能源类“十三五”精品规划教材

风电场建设基础

主 编 张振伟

副主编 方占萍 程明杰 张 康 冯黎成



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

全国高职高专新能源类“十三五”精品规划教材

风电场建设基础

主 编 张振伟

副主编 方占萍 程明杰 张 康 冯黎成



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书按照“基于工作过程情境化教学”模式，基于不同地形风电场的建设过程与内容编写而成，内容包括风资源的测量与评估、风电场的选址、风力发电机组的选型、风力发电机组布置、风力发电机组的现场安装、风电场的工程施工、风电场的运营管理等七个学习情境。

本书是高职高专教育三年制风电类专业教材，也适合于成人教育、中等职业学校风电专业、风电企业新员工培训使用，同时可供风电场的设计、施工、运行、维护和管理等工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

风电场建设基础 / 张振伟主编. — 北京：中国水利水电出版社，2016.1
全国高职高专新能源类“十三五”精品规划教材
ISBN 978-7-5170-3891-7

I. ①风… II. ①张… III. ①风力发电—发电厂—高等职业教育—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第028704号

书 名	全国高职高专新能源类“十三五”精品规划教材 风电场建设基础
作 者	主编 张振伟 副主编 方占萍 程明杰 张康 冯黎成
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 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.75印张 421千字
版 次	2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



风能是清洁的可再生能源，风力发电是新能源领域中技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的发电方式之一。发展风电对于调整能源结构、减轻环境污染等方面有着非常重要的意义。近年来，世界风电装机容量以年均 30% 以上的速度快速增长，风电技术日渐成熟，单机容量不断增大，发电成本大幅降低。同时我国风电产业也呈现快速大规模发展趋势，陆上风电场大规模建设，海上风电场建设规模也逐步扩大，展现了良好的发展前景。

为适应风电产业快速发展，促进风电类专业建设，做好高职院校风电类专业精品课程建设，培养风电场建设技术人员，提高风力发电机组安装质量，规范施工工艺，推进技术创新，本书编者根据国内有关风电场工程施工实际、有关设计及设备资料，结合传统的电力建设、施工、建立、验收、风电场管理等通用经验，并参考有关文献、报告，同时与企业合作，较好地利用了金风科技股份有限公司、东方汽轮机有限公司等风电企业的技术资源，参照行业标准、职业标准，结合企业典型工作任务，体现工学结合思想，按企业实际工作过程组织内容，且符合高职教育理念，编写了此书。

本书的编写紧紧围绕培养风电类专业高级技术应用型专门人才开展工作，注重针对性和实用性，注重内容和体系的改革，注重方法和手段的改革，完全体现了校企合作、工学结合的特点，遵循“以就业为导向，以任务引领、项目主导”，突显岗位技能要求，提升实践操作技能，为风电专业类学生可持续发展和创新能力的提高打下坚实的基础。

本书的编写分工如下：学习情境一、学习情境二、学习情境六由张振伟编写，学习情境三由程明杰编写，学习情境四由张康编写，学习情境五由方占萍编写，学习情境七由冯黎成编写。全书由张振伟统稿。

本书编写过程中得到了金风科技股份有限公司、航天万源风电设备制造有限公司、东方汽轮机有限公司等企业工程技术人员的大力支持和帮助，他们对

由于编者水平有限，时间仓促，书中内容难免有不足和疏误，敬请读者批评指正。

2015 年 11 月

目 录

前言

学习情境一	风资源的测量与评估	1
任务一	平坦地形风资源的测量与评估	1
任务二	复杂地形风资源的测量与评估	45
任务三	海上风资源的测量与评估	48
学习情境二	风电场的选址	58
任务一	平坦地形风电场的选址	58
任务二	复杂地形风电场的选址	70
任务三	海上风电场的选址	75
学习情境三	风力发电机组的选型	81
任务一	风力发电机组机型选择	81
任务二	风力发电机组设备选型	90
任务三	新型风力发电机组	111
学习情境四	风力发电机组布置	141
任务一	平坦地形风力发电机组布置	141
任务二	复杂地形风力发电机组布置	143
任务三	海上风力发电机组布置	147
学习情境五	风力发电机组的现场安装	151
任务一	风力发电机组现场安装的安全规范及准备工作	151
任务二	风力发电机组主要部件的现场吊装	164
任务三	海上风力发电机组的安装	206
学习情境六	风电场的工程施工	214
任务一	平坦风电场工程施工	214
任务二	海上风电场工程施工	239
学习情境七	风电场的运营管理	253
任务一	风电场的运行	253
任务二	风电场的生产与技术管理	265
参考文献		275

学习情境一 风资源的测量与评估

任务一 平坦地形风资源的测量与评估

学习目标：

1. 了解风的形成。
2. 掌握测风系统的组成、工作原理、系统类型与设备功能。
3. 熟悉风资源的测量过程，学会正确使用各测风仪器设备。
4. 掌握测风数据的验证、计算、订正处理。
5. 学会风能资源的统计计算与评估。

风资源的形成受多种自然因素的影响，特别是天气气候背景及地形和海陆对风资源的形成有着至关重要的影响。由于风能在空间分布分散，时间分布具有不稳定和不连续性，风速对天气气候非常敏感。尽管如此，风能资源在时间和空间分布上仍存在着很强的地域性和时间性。中国风能资源丰富且主要分布在东北、西北、华北、江苏沿海及岛屿，在一些特殊地形或湖岸地区呈孤岛式分布。

要研究风能利用的发展前景，则需要对它的总储量进行科学的估算。风能的大小即计算气流所具有的动能，与气流通过的面积、空气密度和气流速度的立方成正比。要评价一个地区风能的潜力，需要分析当地的风况。风况是影响风力发电经济性的一个重要因素。风能资源的测量与评价是建设风电场成败的关键所在。

随着风力发电技术的不断完善，根据国内外大型风电场的开发建设经验，为保证风力发电机组稳定高效地运行，达到预期目的，风电场场址必须具备较丰富的风能资源。由此，对风能资源进行详细的勘测和研究越来越被人们所重视。风能资源评价主要是以现有测风塔和气象台站的测风数据为基础，通过整理、分析，对目标地区（区域）风况分布和风能资源的大小进行评价。

基于大型风电场的建设，要对预建风电场区域的风资源进行测量统计计算和评估，判定风资源是否满足风力发电场的建设要求和条件。

一、风能资源测量与评估的理论基础

（一）风的形成

风是人类最熟悉的一种自然现象，风无处不在。太阳辐射造成地球表面大气层受热不均，引起大气压力分布不均。在不均压力作用下，空气沿水平方向运动就形成了风。尽管大气运动很复杂，但大气运动始终遵循着大气动力学和热力学变化的规律。

1. 大气环流

风的形成是空气流动的结果。空气流动的原因是地球绕太阳运转,由于日地距离和方位不同,地球上各纬度所接受的太阳辐射强度也就各异。在赤道和低纬地区与极地和高纬地区相比太阳辐射强度强,地面和大气接受的热量多,因而温度高。这种温差形成了南北间的气压梯度,在北半球等压面向北倾斜,空气向北流动。

由于地球自转形成的地转偏向力称作科里奥利力,简称偏向力或科氏力。在此力的作用下,北半球使气流向右偏转,南半球使气流向左偏转。所以,地球大气的运动,除受到气压梯度力的作用外,还受地转偏向力的影响。地转偏向力在赤道为零,随着纬度的增高而增大,在极地达到最大。

当空气由赤道两侧上升向极地流动时,开始因地转偏向力很小,空气基本受气压梯度力影响,在北半球,由南向北流动,随着纬度的增加,地转偏向力逐渐加大,空气运动也就逐渐地向右偏转,即逐渐转向东方。在纬度 30° 附近,偏角到达 90° ,地转偏向力与气压梯度力相当,空气运动方向与纬圈平行,所以在纬度 30° 附近上空,赤道来的气流受到阻塞而聚积,气流下沉,形成这一地区地面气压升高,即副热带高压。

副热带高压下沉气流分为两支。一支从副热带高压向南流动,指向赤道。在地转偏向力的作用下,北半球吹东北风,南半球吹东南风,风速稳定且不大,约3~4级,即信风,所以在南北纬 30° 之间的地带称为信风带。这一支气流补充了赤道上升气流,构成了一个闭合的环流圈,称此为哈德来(Hadley)环流,也称为正环流圈。此环流圈南面上升,北面下沉。另一支从副热带高压向北流动的气流,在地转偏向力的作用下,北半球吹西风,且风速较大,这就是所调的西风带。在北纬 60° 附近处,西风带遇到了由极地向南流来的冷空气,被迫沿冷空气上面爬升,在北纬 60° 地面出现一个副极地低压带。

副极地低压带的上升气流到了高空又分成两股:一股向南,一股向北。向南的一股气流在副热带地区下沉,构成一个中纬度闭合圈,正好与哈德来环流流向相反,此环流圈北面上升、南面下沉,所以称为反环流圈,也称费雷尔(Ferrel)环流圈。向北的一股气流从上升到达极地后冷却下沉,形成极地高压带,这股气流补偿了地面流向副极地的气流,而且形成了一个闭合圈,此环流圈南面上升、北面下沉,且与哈德来环流流向类似的环流圈,因此也称为正环流。在北半球,此气流由北向南,受地转偏向力的作用,吹偏东风,在 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间,形成了极地东风带。

综上所述,在地球上由于地球表面受热不均形成地面与高空的大气环流。各环流圈伸屈的高度,以热带最高,中纬度次之,极低最低,这主要由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球自转偏向力的作用下,形成了赤道到纬度 30° 环流圈(哈德来环流)、北纬 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 环流圈和纬度北纬 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 环流赤道圈,这便是著名的“三圈环流”,如图1-1-1所示。

当然,“三圈环流”仍是一种理论的环流模型。由于地球上海陆分布不均匀,因此,实际的环流比上述情况要复杂得多。

2. 季风环流

在一个大范围地区内,它的盛行风向或气压系统有明显的季节变化,这种在一年内随着季节不同而有规律转变风向的风称为季风。季风盛行地区的气候又称季风气候。



图 1-1-1 三圈环流示意图

季风明显的程度可用一个定量的参数来表示，称为季风指数。地面冬夏盛行风向之间的夹角在 $120^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 之间称为季风，季风指数采用 1 月和 7 月盛行风向出现的频率 F_1 和 F_2 表示为

$$I = \frac{(F_1 + F_2)}{2}$$

当 $I > 40\%$ 为季风区 (1 区)， $I = 40\% \sim 60\%$ 为较明显季风区 (2 区)， $I > 60\%$ 为明显季风区 (3 区)。亚洲东部的季风主要包括我国的东部、朝鲜、日本等地区；亚洲南部的季风以印度半岛最为显著，这是世界闻名的印度季风。

我国位于亚洲的东南部，所以东亚季风和南亚季风对我国天气气候变化都有很大影响。

形成我国季风环流的因素很多，主要包括海陆分布、行星风带位置的季节转换以及地形特征等。

(1) 海陆分布对我国季风的作用。海洋的热容量比陆地大得多，冬季陆地比海洋冷，大陆气压高于海洋，气压梯度力自大陆指向海洋，风从大陆吹向海洋；夏季则相反，陆地很快变暖，海洋相对较冷，陆地气压低于海洋，气压梯度力由海洋指向大陆，风从海洋吹向大陆。我国东临太平洋，南临印度洋，冬夏的海陆温差大，所以季风明显。

(2) 行星风带位置的季节转换对我国季风的作用。地球上存在着 5 个风带，即信风带、盛行西风带、极地东风带，这 5 个风带在南半球和北半球对称分布，在北半球的夏季都向北移动，而冬季则向南移动。冬季西风带的南缘地带，夏季可以变成东风带，因此，冬夏盛行风就会发生 180° 的变化。冬季我国主要在西风带影响下，强大的西伯利亚高压笼罩着全国，盛行偏北气流。夏季西风带北移，我国在大陆热低压控制之下，副热带高压也北移，盛行偏南风。

(3) 地形特征对我国季风的作用。青藏高原占我国陆地的 $1/4$ ，平均海拔在 4000m 以上，对应于周围地区具有热力作用。在冬季，高原上温度较低，周围大气温度较高，这样

形成下沉气流，从而加强了地面高压系统，使冬季风增强；在夏季，高原相对于周围自由大气是一个热源，加强了高原周围地区的低区系统，使夏季风得到加强。另外，在夏季，西南季风由孟加拉湾向北推进时，沿着青藏高原东部的南北走向的横断山脉流向我国的西南地区。

3. 局地环流

(1) 海陆风。海陆风的形成与季风相同，也是大陆与海洋之间的温度差异的转变引起的。不过海陆风的范围小，以日为周期，势力也薄弱。

由于海陆物理属性的差异，造成海陆受热不均，白天陆上增温比海洋快，空气上升，而海洋上空气温相对较低，使地面有风自海洋吹向大陆，补充大陆地区上升气流，而陆上的

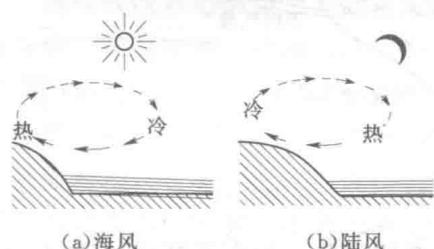


图 1-1-2 海陆风形成示意

的上升气流流向海洋上空而下沉，补充海上吹向大陆气流，形成一个完整的热力环流；夜间环流的方向正好相反，所以风从陆地吹向海洋。将这种白天风从海洋吹向大陆称海风，夜间风从陆地吹向海洋称陆风，故将在 1d 中海陆之间的周期性环流总称为海陆风（图 1-1-2）。

此外，在大湖附近同样日间有风自湖面吹向陆地称为湖风，夜间自陆地吹向湖面称为陆风，合称湖陆风。

(2) 山谷风。山谷风的形成原理跟海陆风类似。白天，山坡接受太阳光热较多，空气增温较多；而山谷上空同高度上的空气因离地较远，增温较少。于是山坡上的暖空气不断上升，并从山坡上空流向谷地上空，谷底的空气则沿山坡向山顶补充，这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向山坡，称为谷风。到了夜间，山坡上的空气受山坡辐射冷却影响，空气降温较多；而谷地上空，同高度的空气因离地面较远，降温较少。于是山坡上的冷空气因密度大，顺山坡流入谷地，谷底的空气因会合而上升，并从上面向山顶上空流去，形成与白天相反的热力环流。下层风由山坡吹向谷地，称为山风。白天风从山谷吹向山坡的风称为谷风；到夜间，风自山坡吹向山谷，这种风称为山风。山风和谷风又总称为山谷风（图 1-1-3）。

山谷风一般较弱，谷风比山风大一些，谷风一般为 $2\sim 4\text{m/s}$ ，有时可达 $6\sim 7\text{m/s}$ ，谷风通过山隘时，风速加大。山风一般仅 $1\sim 2\text{m/s}$ ，但在峡谷中，风力还能增大一些。

(二) 风力等级

风力等级是风速的数值等级，它是表示风强度的一种方法，风越强，数值越大。用风速仪测得的风速可以套用为风级，同时也可目测海面、陆地上物体征象估计风力等级。

1. 风级

风力等级（简称风级）是根据风对地面或海面物体影响而引起的各种现象，按风力的

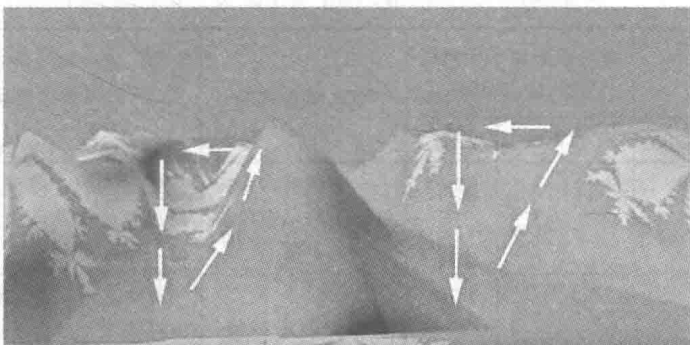


图 1-1-3 山谷风形成示意图

强度等级来估计风力的大小。国际上采用的系英国人蒲福（Francis Beaufort，1774—1859）于 1805 年所拟定的风力等级，故又称“蒲福风级”。蒲福风级从静风到飓风共分 13 级。自 1946 年以来，人们又对蒲福风级做了一些修订，由 13 级变为 17 级，见表 1-1-1。

表 1-1-1 蒲福（Beaufort）风级表

风力等级	名 称		相当于平地十米高处的风速/(m/s)		陆上地物征象	海面 and 渔船征象	海面大概的波高/m	
	中文	英文	范围	中数			一般	最高
0	静风	calm	0.0~0.2	0	静、烟直上	海面平静	—	—
1	轻风	light air	0.3~1.5	1	烟能表示风向，树叶略有动摇	微波如鱼鳞状，没有浪花，刚好能使舵	0.1	0.1
2	轻风	light breeze	1.6~3.3	2	人面感觉有风，树叶有微响。旗子开始飘动，高的草开始摇动	小波，波长尚短，但波形显著，波峰光亮但都破裂。渔船张帆时，可随风移行 1.86~3.71km/h	0.2	0.3
3	微风	centle breeze	3.4~5.4	4	树叶及小枝摇动不息，旗子展开。高的草，摇动不息	小波加大，波峰开始破裂；浪沫光亮，有时可有散见的白浪花。渔船开始簸动	0.6	1.0
4	和风	moderate breeze	5.5~7.9	7	能吹风地面灰尘和纸张，树枝动摇。高的草呈波浪起伏	小波，波长变长；白波成群出现。渔船满帆的时可使船身倾于一侧	1.0	1.5
5	清劲风	fresh breeze	8.0~10.7	9	有叶的小树摇摆，内陆的水面有小波。高的草波浪起伏明显	中浪，具有较显著的长波形状；许多波浪形成（偶有飞沫）。渔船需缩船一部分	2.0	2.5
6	强风	stong breeze	10.8~13.8	12	大树枝摇动，电线呼呼有声，撑伞困难。高的草不时倾于地	轻度大浪开始形成；到处都有更大的白沫峰（有时有些飞沫）。渔船缩船大部分	3.0	4.0

续表

风力等级	名称		相当于平地十米高处的风速/(m/s)		陆上地物征象	海面 and 渔船征象	海面大概的波高/m	
	中文	英文	范围	中数			一般	最高
7	疾风	near gale	13.9~17.1	16	全树摇动，大树枝弯下来，迎风前行感觉不便	轻度大浪，碎浪而成白沫沿风向呈条状。渔船不再出港，在海者下锚	4.0	5.5
8	大风	gale	17.2~20.7	19	可折毁小树枝，人迎风前行感觉阻力甚大	有中度大浪，波长较长，波峰边缘开始破碎成飞沫片；白沫沿风向明显的条带。所有近海渔船都要靠港，停留不出	5.5	7.5
9	烈风	stong gale	20.8~24.4	23	草房遭受破坏，屋瓦被掀起，大树枝可折断	狂浪，沿风向白沫呈浓密的条带状，波峰开始翻滚，飞沫可影响能见度。机帆船航行困难	7.0	10.0
10	狂风	storm	24.5~28.4	26	树枝可被吹到，一般建筑物遭破坏	狂浪，波峰长而翻卷；白沫成片出现，沿风向呈白沫浓密条带；整个海面颠簸加大的振动感，能见度受影响。机帆船航行颇危险	9.0	12.5
11	暴风	violent storm	28.5~32.6	31	大树可被吹倒，一般建筑物遭严重破坏	异常狂涛（中小船只可一时隐没在浪后）；海面完全被沿风向吹出的白沫片所掩盖；波浪到处破成泡沫，能见度受影响。机帆船遇之极危险	11.5	16.0
12	飓风	hurricane	>32.6	>33	陆上少见，其摧毁力极大	空中充满了白色的浪花和飞沫；海面完全变白，能见度严重受到影响	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 13~17 级风力是当风速可以用仪器测定时使用，故未列特征。

2. 风速与风级的关系

除查表外，还可以通过风速与风级之间的关系来计算风速，即

$$\bar{v}_N=0.1+0.824N^{1.505}$$

式中 N——风的级数；

$\bar{v}_N$ ——N 级风的平均风速，m/s。

如已知风的级数 N，即可算出平均风速 $\bar{v}_N$ 。

N 级风的最大风速 $\bar{v}_{N,max}$ 的计算式为

$$\bar{v}_{N,\max} = 0.2 + 0.824N^{1.505} + 0.5N^{0.56}$$

N 级风的最小风速 $\bar{v}_{N,\min}$ 的计算式为

$$\bar{v}_{N,\min} = 0.824N^{1.505} - 0.056$$

(三) 测风系统

风电场选址时,当采用气象台、站所提供的统计数据时,往往只是提供较大区域内的风能资源情况,而且其采用的测量设备精度也不一定能满足风电场微观选址的需要。因此,一般要求对初选的风电场选址区用高精度的自动测风系统进行风的测量。

1. 测风系统的组成

自动测风系统主要由六部分组成,包括传感器、主机、数据存储装置、电源、安全与保护装置。

传感器分风速传感器、风向传感器、温度传感器(即温度计)和气压传感器。输出信号为频率(数字)或模拟信号。

主机利用微处理器对传感器发送的信号进行采集、计算和存储,由数据记录装置、数据读取装置、微处理器、就地显示装置组成。

由于测风系统安装在野外,因此数据存储装置(数据存储盒)应有足够的存储容量,而且为了野外操作方便,采用可插接形式。一般,系统工作一定时间后,将已存有数据的存储盒从主机上替换下来,进行风能资源数据分析处理。

测风系统电源一般采用电池。为提高系统工作可靠性,应配备一套或两套备用电源,如太阳能光电板等。主电源和备用电源互为备用,当出现某一故障时可自动切换。对有固定电源地段(如地方电网),可利用其为主电源,但也应配备一套备用电源。

由于系统长期工作在野外,输入信号可能会受到各种干扰,设备会随时遭受破坏,如恶劣的冰雪天气会影响传感器信号、雷电天气干扰传输信号出现误差,甚至毁坏设备等,因此,一般在传感器输入信号和主机之间增设保护和隔离装置,从而提高系统运行可靠性。另外,测风设备应远离居住区,并在离地面一定高度区内采取措施进行保护以防人为破坏,主机箱应严格密封,防止沙尘进入。

总之,测风系统应具有较高的性能和精度,防止自然灾害和人为破坏和保护数据安全准确的功能。

风为矢量,既有大小,又有方向。风的测量包括风向测量和风速测量。风向测量是指测量风的来向,风速测量是测量单位时间内空气在水平方向上所移动的距离。

2. 风向测量

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 1-1-4 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,称为风向玫瑰图,如图 1-1-5 所示。同理,统计各种风向

的风能图称为风能玫瑰图。



图 1-1-4 风向 16 方位图

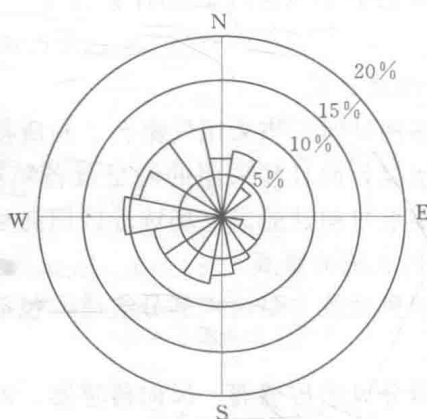


图 1-1-5 风向玫瑰图

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（图 1-1-6）。风向标一般是由尾翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴四部分组成的首尾不对称的平衡装置。其重心在支撑轴的轴心上，整个风向标可以绕垂直轴自由摆动。在风的动压力作用下取得指向风的来向的一个平衡位置，即为风向的指示。传送和指示风向标所在方位的方法很多，有电触点盘、环形电位、自整角机和光电码盘 4 种类型，其中最常用的是码盘。

风向杆的安装方位指向正南，风速仪（风速和风向）一般安装在离地 10m 的高度上。

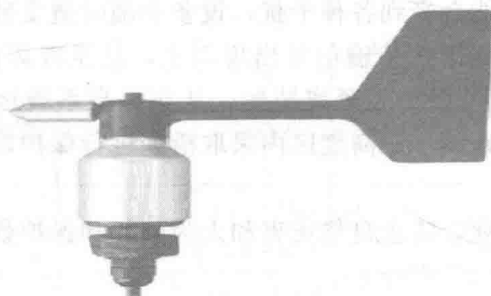


图 1-1-6 风向标示意图

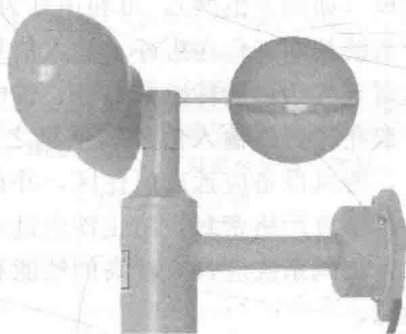


图 1-1-7 旋转式风速计

3. 风速测量

风速是单位时间内空气在水平方向上移动的距离。风速的测量仪器有旋转式风速计、散热式风速计、超声波风速计、风廓线仪等。

(1) 旋转式风速计。旋转式风速计如图 1-1-7 所示。它的感应部分是一个固定转轴上的感应风的组件，常用的有风杯和螺旋桨叶片两种类型。风杯旋转轴垂直于风的来向，螺旋桨叶片的旋转轴平行于风的来向。

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它与风向无关，所以百余年来获得了世界上广泛的采用。

杯形风速计一般由 3 个或 4 个半球形或抛物锥形的空心杯壳组成。杯形风速计固定在

互成 120° 的三叉星形支架上或互成 90° 的十字形支架上，杯的凹面顺着同一方向，整个横臂架则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，在风杯受到扭力作用而开始旋转。它的转速与风速成一定的关系。推导风标转速与风速关系可以有多种途径，大都在设计风速计时要进行详细的推导。

(2) 压力式风速计。压力式风速计是利用风的压力测定风速的仪器，利用流体的全压力与静压差来测定风速的大小。

压力式风速计具有双联皮托管，一个管口迎着气流的来向，它感应着气流的全压力 p_0 ；另一个管口背着气流的来向，因为所感应的压力 p 有抽吸作用，比静压力稍低些。两个管子所感应的有一个压力差 Δp 为

$$\Delta p = p_0 - p = \frac{1}{2} \rho v^2 (1 + c)$$

$$v = \left[\frac{2\Delta p}{\rho(1+c)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

式中 ρ ——空气密度， kg/m^3 ；

v ——风速， m/s ；

c ——修正系数。

由上式可计算出风速，并可以看出 v 与 Δp 不是线性关系。

(3) 散热式风速计。散热式风速计利用被加热物体的散热速率与周围空气流速的关系来测量风速。它主要适用于测量小风速，但不能测量风向。

(4) 声学风速计。声学风速计是利用声波在大气中传播速度与风速间的函数关系来测量风速。在大气中传播的速度为声波传播速度与气流速度的代数和，它与气温、气压、湿度等有关。在一定距离内，声波顺风与逆风传播有一个时间差，由这个时间差，便可确定气度。

声学风速计没有转动部件，响应快，能测定沿任何指定方向的风速分量等特性，但造价太高。一般的测量风速还是用旋转式风速计。

4. 风速记录

风速记录是通过信号的转换方法来实现，一般有 4 种方法。

(1) 机械式。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程，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，凸轮相当于开关，使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程。

5. 风速表示

各国表示速度的单位的方法不尽相同，如用 m/s、n mile/h、km/h、ft/s、mil/h 等。各种单位换算的方法见表 1-1-2。

表 1-1-2 各种风速单位换算表

单位	m/s	n mile/h	km/h	ft/s	mile/h
m/s	1	1.944	3.600	3.281	2.237
n mile/h	0.514	1	1.852	1.688	1.151
km/h	0.278	0.540	1	0.911	0.621
ft/s	0.305	0.592	1.097	1	0.682
mile/h	0.447	0.869	1.609	1.467	1

风速大小与风速计安装高度和观测时间有关。

各国基本上都以 10m 高度处观测为基准，但取多长时间的平均风速不统一，有取 1min、2min、10min 平均风速，有取 1h 平均风速，也有取瞬时风速等。

我国气象站观测时有三种风速：一日 4 次定时 2min 平均风速，自记 10min 平均风速和瞬时风速。风能资源计算时，都用自记 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。

在实际风电场建设中会用到以下几种风速：

(1) 3s 平均风速。在风机运行过程中，只要检测到 3s 内的平均风速超出了风机的最大切出风机，风机就会停机。

(2) 10min 平均风速。风机在启动过程中，只要 10min 的平均风速达到风机的切入风速，风机就会启动。

(3) 年平均风速。根据年平均风速，可以得出该地区的风资源是否丰富，是否具有开发风电场的意义。

(4) 有效风速。风机在启动和停机之间的风速。

(四) 风资源测量与评估的通用方法

风能资源评估方法可分为统计分析方法和数值模拟方法两类。其中统计分析方法又可分为基于气象站历史观测资料的统计分析方法和基于测风塔观测资料的统计分析方法两种。我国目前主要采用基于气象站历史观测资料的统计分析方法和数值模拟方法对风能资源进行评估。

在一个给定的地区内调查风能资源时可以划分为 3 种基本的风能资源评估的规模或阶段：区域的初步识别、区域风能资源估计和微观选址。

1. 区域的初步识别

区域的初步识别是从一个相对大的区域中筛选合适的风能资源区域，筛选是基于气象站测风资料、地貌、被风吹得倾向一侧的树木和其他标志物等。在这个阶段，可以选择新的测风位置。

2. 区域风能资源估计

区域风能资源估计阶段采用测风计划以表征一个指定区域或一组区域的风能资源，这

些区域已经考虑要发展风电。在这个规模上测风最基本的目标是：①确定和验证该区域内是否存在充足的风能资源，以支持进一步的具体场址调查；②比较各区域以辨别相对发展潜力；③获得代表性资料来估计选择的风电机组的性能及经济性；④筛选潜在的风电机组安装场址。

3. 微观选址

风能资源评估的第三步是微观选址，用来为一台或更多风电机组定位，以使风电场的全部电力输出最大，风电机组排布最佳。

(五) 风能资源测量与评估程序与步骤

1. 风资源测量与评估程序

风能资源评估的目标是确定该区域是否有丰富（或者较好）的风能资源，通过数据估算选择合适的风电机组，提高经济性，并为微观选址提供依据。风能资源测评程序如图 1-1-8 所示。

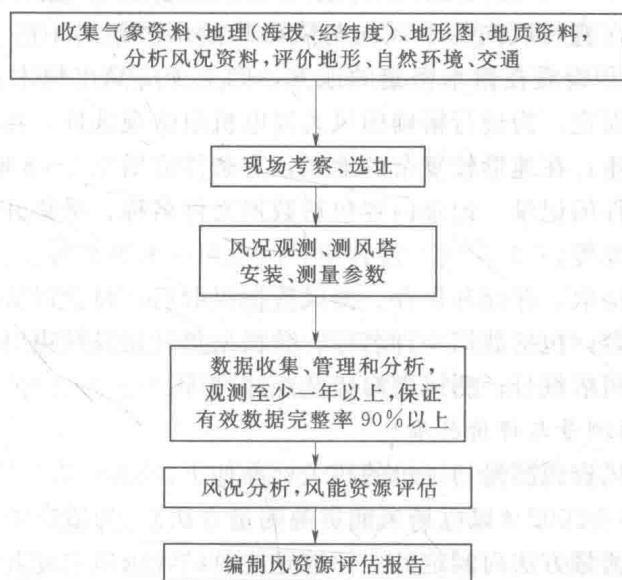


图 1-1-8 风能资源测量与评估程序

2. 测风步骤

现场测风的目的是获取准确的风电场选址区的风况数据，要求数据具有代表性、精确性和完整性。因此，应制定严格的测风计划和步骤。

(1) 制定测风原则。为了能够确定在各种时间和空间条件下风能变化的特性，需要测量风速、风向及其湍流特性；为进行风力发电机组微观选址，根据建设项目规模和地形地貌，需要确定测风点及塔的数量、测风设备的数量。测风时间应足够长，以便分析风能的日变化和年变化，还应借助与风电场有关联的气象台、站长期记录数据以分析风的年际变化。

测风时间应连续，至少一年以上。连续漏测时间应不大于全年的 5%。有效数据不得少于全部测风时间的 90%。采样时间为 1s，每 10min 计算有关参数并进行记录。