



普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风能利用

WIND POWER UTILIZATION



◎ 宋 俊 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风能利用

宋 俊 编著

机械工业出版社

本书全面介绍了风能利用的基本知识,共分9章,包括风能及其应用、风力机、双馈风力发电机组、永磁直驱风力发电机组及其他机组、风电场、分布式发电和微网、风力提水、风力制热、风帆助航。

本书图文并茂、详略得当,适于作为本科及高职高专院校“风能利用”课程教材,以及对从事风能利用的设计、制造和使用人员进行培训的专用教材,也可以作为风能利用爱好者的自学用书。

选用本书做教材的老师可登录机械工业出版社教材服务网注册下载课件,网址 <http://www.cmpedu.com>。

图书在版编目(CIP)数据

风能利用/宋俊编著. —北京:机械工业出版社,2014.3

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

ISBN 978-7-111-45670-4

I. ①风… II. ①宋… III. ①风力能源—能源利用—高等学校—教材 IV. ①TK81

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第022856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:王雅新 责任编辑:王雅新 孙阳 张丹丹

版式设计:常天培 责任校对:樊钟英 肖琳

封面设计:张静 责任印制:乔宇

唐山丰电印务有限公司印刷

2014年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm·15.5印张·379千字

标准书号:ISBN 978-7-111-45670-4

定价:32.00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

我曾经见过一个青年，给我讲了这样的故事：有一次，他和朋友对一个问题争论不下。这个问题是：高耸的风力发电机组塔筒是中空的呢，还是实心的呢？最后，他们求教一位风电场的负责人，这位负责人热心地接待了他们，并邀请他们参加风电场的建设。后来，这个青年成为了这家风电场的技术骨干。这个故事使我意识到，应该有一本全面简明地介绍风能利用知识的书，提供给渴求知识的青年。另外，经常有一些风电爱好者，带着他们自己制造的小型叶片或风轮，到我的工作单位咨询。在和他们的交谈中，我觉得，他们也需要一本全面简明地介绍风能利用知识的书。还有，近年出版的几套教材，都集中介绍风力发电，主要是并网发电。缺少一本全面地介绍风能利用知识的教学用书。这一切使我萌生写这本书的想法。

正是基于上述目的，本书写作的原则是低起点、全方位、新视角。低起点就是可以使具有初步物理学和化学知识的读者理解书中的内容；全方位就是尽量全面地介绍风能利用相关知识；新视角就是注重形式和内容的创新。也正是这些原则给我的写作带来了空前的困难，一方面因为现代的风能利用是与多学科的现代科学技术密不可分的，另一方面必须对大量的信息进行高浓缩，于是我只好小心翼翼地探索，就像一条日夜忙碌的小鱼，在海底的贝壳里去寻找一颗梦里的珍珠……

本书内容分为三大部分：一是各种类型的风力发电机组，重点是双馈风力发电机组和永磁直驱风力发电机组；二是风电场和分布式发电；三是风能的其它应用，包括风力提水、风力制热和风帆助航。不同读者可以有所侧重地阅读。本书可以帮助志在风能利用的探索者了解风力机械的秘密；可以帮助孜孜不倦的发明家创造出更为灵动的风力机；可以帮助本科及高职高专院校的老师为学生开出具有启迪性的“第一课”。当然，对于情系风能利用的所有人也都开卷有益。

在化石能源逐渐匮乏和亟需从雾霾中“解放”全人类的今天，可再生能源的利用成为世界关注的热点，并且取得了很大的成绩。这是进步，也是传承。实际上，风能利用一直与人类相伴，从数千年前海上竖起的第一叶风帆到国人正在建设的一座座“风电三峡”，人们在一代代繁衍中传递着一样的“风”情。

编著者于沈阳工业大学

缩略语译注

AC——交流 [电]	OPC——操作控制
ANN——人工神经网络	PI——比例加积分
ARIMA——自回归累积移动平均 [模型] (差分自回归移动平均模型)	PLC——可编程逻辑控制器
Boost——升压器	PLL——锁相环 [电路]
Buck——降压器	PMSG——永磁同步发电机
CAN——现场控制网络	PT——电压互感器
CFRP——碳纤维增强塑料	PWM——脉宽调制
DC——直流 [电]	RCC——转子电流控制
DFIG——双馈感应发电机	RSR——[盘式永磁电机] 转子 - 定子 - 转 子结构
DPC——直接功率控制	RTU——远方终端 (远程控制单元)
DSP——数字信号处理器	SCADA——监视控制和数据采集
DTC——直接转矩控制	SCIG——笼型感应发电机
EESG——电励磁同步发电机	SPWM——正弦脉宽调制
GFRP——玻璃纤维增强塑料 (玻璃纤维复 合材料、玻璃钢)	SRG——开关磁阻发电机
GIS——气体全封闭组合电器	SRS——[盘式永磁电机] 定子 - 转子 - 定 子结构
GPS——全球定位系统	STATCOM——静止同步补偿器
GTO——门极可关断 [晶闸管]	SVC——静止型动态无功补偿器
HVAC——高压交流 [输电]	SVG——静态无功发生器
HVDC——高压直流 [输电]	SVPWM——空间矢量脉宽调制
ICCP——外加电源阴极保护	TCR——晶闸管可控电抗器
IGBT——绝缘栅双极晶体管	THD——总谐波失真
IGCT——集成门极换向晶闸管	UPS——不间断电源
LCC - HVDC——基于线性整流变流器的高 压直流输电	VC——矢量控制
LVRT——低电压穿越	VSC - HVDC——基于电压源变流器的高压 直流输电
MCR——磁控型电抗器	WRIG——绕线转子感应发电机
MCU——主控制器 (中央处理器)	

主要物理量符号表

A ——面积	P_1 ——电机定子有功功率
A_d ——风轮扫掠面积	P_2 ——电机转子有功功率
c ——几何弦长	P_r ——风轮输出功率
C ——电容	P_{el} ——发电机有功功率
C_p ——风能利用系数	P_N ——额定功率
C_l ——升力特征系数	P_{Cu1} ——定子铜耗
C_d ——阻力特征系数	P_{Cu2} ——转子铜耗
C_m ——气动俯仰力矩系数	P_m ——电机轴上的机械功率；水泵轴功率
C_D ——推力系数	P_{em} ——电磁功率
C_T ——转矩系数	P_p ——水泵有效功率
D ——叶片所受阻力	P_0 ——水泵配套功率
f ——电动势的频率	Q ——水泵的实际流量
f_1 ——定子电流的频率（同步频率）；电网频率	Q_0 ——活塞泵的理论流量
f_2 ——转子电流的频率	Q_1 ——电机定子无功功率
f_e ——电磁力	Q_2 ——电机转子无功功率
F ——整个风轮上的轴向推力	r ——叶片所在半径
F_t ——叶片所受驱动力	R ——风轮半径；电阻；气动合力
F_n ——叶片所受向轴向推力	R_2 ——转子一相绕组的电阻
g ——重力加速度	s ——转差率
h_w ——损失扬程	s_p ——临界转差率
H ——桨距；水泵净扬程	S ——活塞泵冲程
I ——直流电流定子绕组的线电流有效值	t ——时间
I_N ——额定电流	T ——风轮轴上总转矩
k ——功率裕度	T_e ——电磁转矩
L ——叶片所受升力	T_N ——额定转矩
m ——质量；空气质量；液体质量	u ——叶片运动方向（切向）与气流相对速度
n ——发电机转速；水泵活塞每分钟往复次数	U ——直流电压定子三相绕组上的线电压有效值
n_1 ——同步转速	U_N ——额定电压
N ——叶片数	v ——风速
p ——电机绕组的极对数	v_d ——致动盘（或风轮）处的气流速度
p_w ——风功率密度	v_∞ ——风轮上游未受扰动的气流速度
P_∞ ——致动盘（或风轮）正面来风的总能量	v_w ——风轮尾流远端气流速度
	V ——体积

VI 风能利用

W ——能量

w ——合成气流速度

z_0 ——粗糙长度

α ——攻角；风切变指数；双馈电机转子电压的相位

α_{cr} ——临界攻角

β ——桨距角

η ——效率

η_N ——额定效率

η_v ——容积效率

η_i ——传动效率

λ ——尖速比

λ_r ——周速比

ρ ——密度

φ ——功率因数角；气流倾角

ω_1 ——同步角速度

Ω ——风轮转动角速度

目 录

前言

缩略语译注

主要物理量符号表

第1章 风能及其应用..... 1

1.1 风..... 1

1.1.1 风速和风向..... 1

1.1.2 风力等级..... 1

1.1.3 风的测量..... 2

1.1.4 风功率..... 3

1.1.5 风频特性..... 4

1.1.6 风切变..... 5

1.1.7 湍流..... 6

1.1.8 风能资源..... 6

1.2 风能的利用..... 7

1.2.1 助航..... 8

1.2.2 磨面..... 9

1.2.3 提水..... 10

1.2.4 发电..... 10

1.2.5 制热..... 12

1.3 风力发电..... 12

1.3.1 风电机组结构和基本 参数..... 12

1.3.2 风电机组的分类..... 13

1.3.3 供电方式..... 13

思考题..... 14

第2章 风力机..... 15

2.1 风力机的组成与分类..... 15

2.2 水平轴升力型风力机综览..... 16

2.3 大型水平轴升力型风力机..... 18

2.3.1 叶片..... 18

2.3.2 轮毂..... 22

2.3.3 风轮..... 23

2.3.4 额定功率调节..... 33

2.3.5 偏航..... 39

2.3.6 支承体系..... 41

2.4 小型水平轴升力型风力机..... 44

2.4.1 风轮..... 44

2.4.2 转速调节..... 46

2.4.3 方向调节..... 49

2.4.4 安全控制..... 50

2.4.5 塔架..... 50

2.4.6 回转体..... 51

2.5 垂直轴升力型风力机..... 52

2.6 阻力型风力机..... 54

2.7 水平轴和垂直轴风力机的 比较..... 57

2.7.1 综合性能..... 57

2.7.2 风能利用系数..... 58

2.7.3 转矩系数..... 58

2.8 其他形式风力机..... 59

思考题..... 60

第3章 双馈风力发电机组..... 61

3.1 概述..... 61

3.2 发电系统..... 62

3.2.1 双馈发电机..... 62

3.2.2 变流器..... 68

3.2.3 变流器控制策略..... 73

3.2.4 运行状态..... 74

3.2.5 功率流程..... 75

3.2.6 无刷双馈发电机..... 75

3.3 主传动与制动..... 76

3.3.1 主轴及主轴承..... 76

3.3.2 齿轮箱..... 78

3.3.3 联轴器..... 79

3.3.4 制动..... 80

3.4 液压系统..... 82

3.4.1 电液比例阀..... 82

3.4.2 变桨距机组液压系统

实例	83	4.5.3 双速恒频机组	122
3.5 润滑、温控、接地与避雷	84	4.5.4 优化转差机组	125
3.5.1 润滑	85	4.5.5 变速恒频机组	127
3.5.2 温度控制	85	思考题	130
3.5.3 接地	85	第5章 风电场	131
3.5.4 避雷	85	5.1 概述	131
3.6 主控系统	85	5.1.1 风电场工程	131
3.6.1 基本功能	86	5.1.2 风电场电气系统结构	131
3.6.2 主控系统硬件结构	86	5.1.3 风力发电机组的布局	132
3.6.3 传感器	87	5.2 风电场电气主系统	133
3.6.4 安全保护	89	5.2.1 主要电气设备	133
3.7 机组的运行	90	5.2.2 无功补偿装置及其控制策略	136
3.7.1 起动与关机	90	5.2.3 风电场电气主接线	138
3.7.2 并网与脱网	91	5.3 配电装置	142
3.7.3 工作状态的转移	92	5.3.1 装配式配电装置	142
3.7.4 功率控制	93	5.3.2 成套配电装置	142
思考题	96	5.3.3 屋内配电装置	143
第4章 永磁直驱风力发电机组及		5.3.4 屋外配电装置	144
其他	97	5.4 风电场监控系统	145
4.1 永磁直驱风电机组的组成	97	5.4.1 升压站监控系统	145
4.2 永磁直驱风电机组发电系统	98	5.4.2 风电机组群监控系统	147
4.2.1 永磁同步发电机	99	5.4.3 风电场监控及数据采集系统	147
4.2.2 变流器	101	5.5 风电场运行	149
4.2.3 发电系统保护电路	104	5.5.1 风电机组运行	149
4.2.4 变流器的控制策略	106	5.5.2 配电装置运行	149
4.3 永磁直驱风电机组机舱总成	108	5.5.3 风电场运行调度	149
4.3.1 主传动	108	5.6 海上风电场	150
4.3.2 制动	110	5.6.1 海上风电的防腐	150
4.3.3 冷却与除湿	110	5.6.2 海上风电机组的基础	153
4.4 其他同步风电机组	112	5.6.3 海上风电机组的吊装与维护	155
4.4.1 电励磁直驱式风电机组	112	5.6.4 海上输变电	157
4.4.2 应用液力机械增速箱的风电机组	113	思考题	161
4.4.3 应用电磁调速的风电机组	114	第6章 分布式发电和微网	162
4.4.4 其他电励磁风电机组	115	6.1 概论	162
4.5 基于感应发电机的风电机组	116	6.2 风能储存	163
4.5.1 笼型感应发电机	116	6.2.1 蓄电池	163
4.5.2 恒速恒频风电机组	118		

6.2.2 其他储能方法	169	8.1.5 涡电流制热器	205
6.2.3 储能方法的比较	170	8.1.6 压缩空气制热	206
6.3 风-光互补发电	171	8.1.7 热泵	207
6.3.1 太阳能电池	171	8.2 换热器	207
6.3.2 风-光互补发电系统	172	8.2.1 管式换热器	208
6.4 风-柴油互补发电	174	8.2.2 板式换热器	210
6.5 微网的应用技术	174	8.3 热能存储	211
6.6 离网供电系统	175	8.3.1 显热存储	211
6.6.1 小型风电机组	176	8.3.2 潜热存储	213
6.6.2 控制器	179	8.3.3 化学存储	213
6.6.3 逆变器	180	8.4 风力制热机组	213
6.6.4 卸荷器	180	8.4.1 搅拌液体式机组	214
思考题	181	8.4.2 油压阻尼式机组	215
第7章 风力提水	182	8.4.3 热泵式机组	216
7.1 提水设备	182	思考题	217
7.1.1 往复式提水设备	182	第9章 风帆助航	218
7.1.2 旋转式提水设备	188	9.1 帆船的结构	218
7.1.3 流体作用式提水设备	192	9.2 帆的工作原理	218
7.2 风力提水机组	194	9.2.1 升力驱动和阻力驱动	218
7.2.1 高扬程机组	195	9.2.2 帆的最佳角度	219
7.2.2 低扬程机组	200	9.3 帆船出航	220
7.2.3 远距离提水	201	9.3.1 航行方向的调节	220
思考题	202	9.3.2 航向与风向	221
第8章 风力制热	203	9.3.3 换舷转向	222
8.1 制热设备	203	9.3.4 起航与停船	223
8.1.1 搅拌液体制热器	203	思考题	223
8.1.2 油压阻尼孔制热	204	附录 水平轴风力机的动力学	
8.1.3 固体摩擦制热器	204	理论	224
8.1.4 液力偶合器制热	204	参考文献	235

第 1 章 风能及其应用

流动空气所具有的动能称为风能。本章简要介绍风能资源，风能应用的领域及历史，以及风力发电的几个基本问题。

1.1 风

风是空气流动的结果，在地球上主要表现为大气环流、季风环流和局地环流。大气环流是由于地球绕太阳运转过程中日地距离和方位不同，在地球上造成的大尺度风带；季风环流是在一个大范围地区内，随着季节不同有规律转变方向的气流；局地环流则是小范围内由日夜温差引起的气流变化，如海陆风、山谷风等。

1.1.1 风速和风向

风速和风向是风的基本特征量。

(1) 风速 空气在单位时间内所流过的距离。

(2) 风向 风速在 2m/s 以上的风的流动方向。

(3) 平均风速 在某个时距内空间某点上各瞬时风速的平均值。

(4) 极端风速 在某个重现周期中， t (s) 时距内的最高平均风速，国际标准采用的重现周期为 50 年或 1 年。

(5) 阵风 超过平均风速的突然和短暂的风速变化。

1.1.2 风力等级

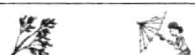
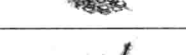
风力等级（简称风级）是根据风速大小来划分的。国际上采用的风力等级是英国人蒲福（Francis Beaufort, 1774—1859）于 1805 年拟定的，故又称“蒲福风级”。从无风到飓风分为 13 个级别（0~12 级，见表 1-1）。自 1946 年以来风力等级又作了一些修订，由 13 个级别变为 18 个级别，13~17 级风力是当风速可以用仪器测定时才使用，故未列入表 1-1 中。

表 1-1 蒲福风力等级

等级	名 称	海岸船只征象	陆地地面物征象	相当风速	
				km/h	m/s
0	无风			小于 1	0~0.2
1	软风		 	1~5	0.3~1.5
2	轻风		  	6~11	1.6~3.3

2 风能利用

(续)

等级	名 称	海岸船只征象	陆地地面物征象	相当风速	
				km/h	m/s
3	微风			12 ~ 19	3.4 ~ 5.4
4	和风			20 ~ 28	5.5 ~ 7.9
5	清风			29 ~ 38	8.0 ~ 10.7
6	强风			39 ~ 49	10.8 ~ 13.8
7	疾风			50 ~ 61	13.9 ~ 17.1
8	大风			62 ~ 74	17.2 ~ 20.7
9	烈风			75 ~ 88	20.8 ~ 24.4
10	狂风			89 ~ 102	24.5 ~ 28.4
11	暴风			103 ~ 117	28.5 ~ 32.6
12	飓风			118 ~ 138	32.7 ~ 36.9

1.1.3 风的测量

1. 测风系统

风的测量包括风向测量和风速测量。自动测风系统主要由传感器、主机、数据存储装置、电源、安全与保护装置组成。

传感器分为风速传感器、风向传感器、温度传感器（即温度计）、气压传感器。传感器的输出信号为数字或模拟信号。

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。主机由数据记录装置、数据读取装置、微处理器和就地显示装置组成。

2. 风向测量

(1) 风向标 风向标是测量风向最为通用的装置，有单翼型、双翼型和流线型等。风向标一般是由尾舵、指向杆、平衡锤及旋转主轴 4 部分组成的首尾不对称的平衡装置（见图 1-1），在风的动压力作用下指向风的来向。传送和指示风向标所在方位的

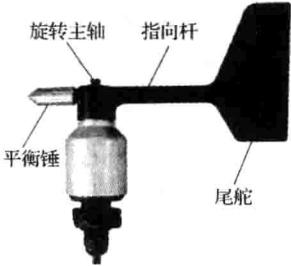


图 1-1 风向标

有电触点盘、环形电位器、自整角机和光电码盘等装置。

(2) 风向表示 风向一般用16个方位表示,如图1-2所示。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° 。

3. 风速测量

(1) 风速计 风速计是测量风速的仪器,有很多种,根据工作原理的不同,常用风速计可以分为:

1) 杯式风速计:测定风速最常用的传感器是杯式风速计,简称风杯(见图1-3)。杯式风速计一般由3个或4个半球形或抛物锥形的空心杯壳组成。杯式风速计固定在互成 120° 角的三叉星形支架上或互成 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时,它的转速与风速成一定的关系。

2) 声学风速计:又称超声波风速计(见图1-4),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,便可确定气流速度。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。

3) 激光风速计:激光风速计(见图1-5)可以检测空气分子反射的相干光波,从而辨别气流速度。

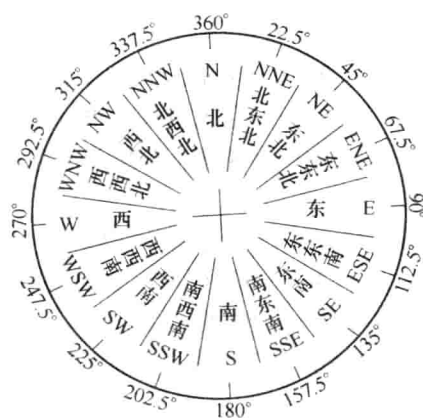


图1-2 风向16方位图



图1-3 杯式风速计



图1-4 超声波风速计

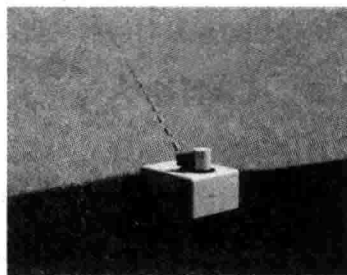


图1-5 激光风速计

(2) 风速表示 风速大小与风速计安装高度和观测时间有关。世界各国基本上都以10m高度处观测为基准,但取多长时间的平均风速则根据需要而定,有取1min、2min、10min平均风速,有取1h平均风速,也有取瞬时风速等。

根据得到的风测量数据,进行数据的验证及计算处理,从而得出能反映长期风况的代表性数据。将修正后的数据通过分析计算,变成评估风能资源所需要的标准参数。

1.1.4 风功率

风功率是指单位时间内,以速度 v 垂直流过截面 A 的气流所具有的动能。

气流所具有的动能为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-1)$$

式中 W ——风能, 单位为 J;
 m ——空气质量, 单位为 kg;
 v ——风速, 单位为 m/s。

$$\text{又} \quad m = \rho Avt \quad (1-2)$$

式中 ρ ——空气密度, 单位为 kg/m³;
 A ——截面面积, 单位为 m²;
 t ——时间, 单位为 s。

将式 (1-2) 代入式 (1-1), 可得

$$W = \frac{1}{2}(\rho Avt)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3t \quad (1-3)$$

所以, 风功率 P_w (W) 为

$$P_w = W/t = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可见, 风功率与风速的三次方成正比, 也就是说, 当风速增加一倍时, 风功率将增加 7 倍。

风功率密度 p_w (W/m²) 是气流垂直通过单位面积的风功率。它是表征一个地方风能资源多少的指标, 即

$$p_w = P_w/A = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (1-5)$$

衡量某一地区风能大小, 要视常年平均风能的多少而定。由于风速是一个随机性很大的量, 必须通过较长时间的观测来了解它的平均状况。

1.1.5 风频特性

1. 风向频率

在一定时间内各种风向出现的次数占所观测总次数的百分比, 称为风向频率, 即

$$\text{风向频率} = \frac{\text{该风向出现的次数}}{\text{风向总观测次数}} \times 100\% \quad (1-6)$$

2. 风速频率

风速频率反映风的重复性, 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。

3. 风玫瑰图

参照图 1-2 将风向分为若干方位, 根据各方向风出现的频率按相应的比例长度绘制在图上, 就是风向玫瑰图 (见图 1-6a)。在风向玫瑰图中可以获得如下信息:

1) 盛行风向。指根据当地多年观测资料绘制的年风向玫瑰图中, 风向频率较大的方向。以季度绘制的可以有四季的盛行风向。

2) 风向旋转方向。指风向随着季节旋转。在季风区, 一年中风向由偏北逐渐过渡到偏南, 再由偏南逐渐过渡到偏北。有些地区风向不是逐步过渡而是直接交替的, 这时风向旋转方向就不存在了。

3) 最小风向频率。指两个盛行风向对应轴大致垂直两侧风向频率最小的方向。当盛行风向有季节风向旋转性质时, 最小风向频率应该在旋转方向的另一侧。

风向玫瑰图对风力机械的排列布阵很有参考价值, 当某个方位风频很小时, 对此方位的障碍物和建筑可以不予考虑。

同样也可以用这种方法表示各方向的平均风速, 称为风速玫瑰图。

图 1-6b 所示为某地的风能玫瑰图。它同时含有风向和风速的信息, 反映风能资源的特性。图中每一条辐射线的方向代表风的方向, 长度表示该风向频率与平均风速三次方的乘积。

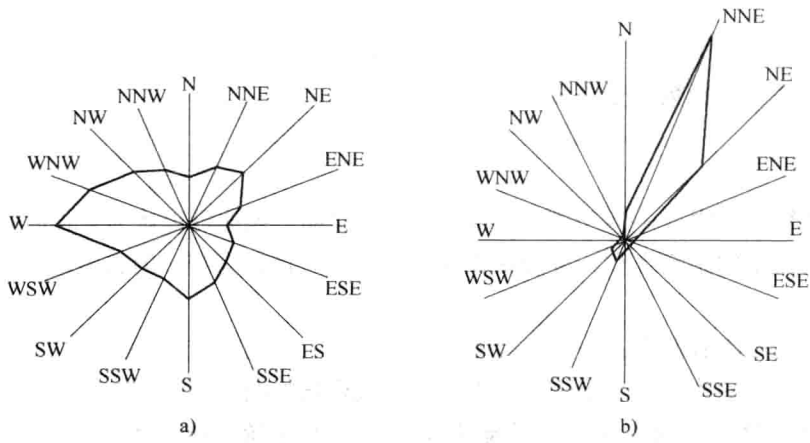


图 1-6 风玫瑰图
a) 风向玫瑰图 b) 风能玫瑰图

1.1.6 风切变

风切变是指风速在垂直于风向平面内的变化, 主要指垂直于地面的变化, 这一变化是由于地面对风的摩擦力产生的。通常可以用风廓线来表示, 如图 1-7 所示。图 1-7 的横坐标为某高度处的平均风速 $\bar{v}$ 与风力机轮毂中心处平均风速 $\bar{v}_0$ 的比值, 纵坐标为某高度 h 与风力机轮毂中心高度 h_0 的比值。 z_0 为地表的表面粗糙长度, 它是衡量地面的摩擦力大小的指标。不同地表的表面粗糙长度见表 1-2。

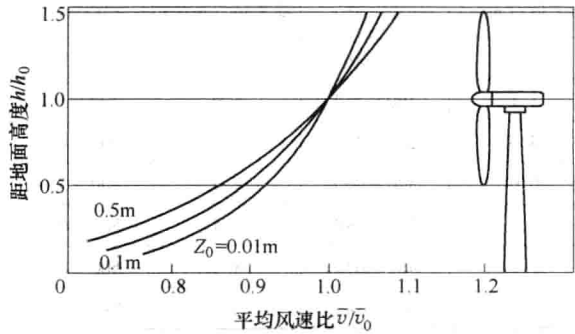


图 1-7 不同表面粗糙长度的风廓线

6 风能利用

表 1-2 不同地表的表面粗糙长度 z_0 和风切变指数 α

地 面 类 型	z_0 /m	α
光滑（水面、沙、雪）	0.001 ~ 0.02	0.10 ~ 0.13
较粗糙（短草、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

风廓线还可以应用指数公式描述，即

$$\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha$$

(1-7)

式中 α ——风切变指数，见表 1-2。

1.1.7 湍流

湍流是指短时间内（一般小于 10min）的风速波动。风速可以认为是长时间作用的平均风速与短时间作用的湍流之和，可能在长时间内湍流矢量和为零，但在短时间内会引起风速的突然变化。

湍流生成的原因有两个：一是环境的表面粗糙度，不同的地形特性，如山谷、丘陵等地面障碍物引起气流的改变；二是热效应引起的空气密度的改变。

当湍流过大时，会减少风力机的输出功率、引起系统的振动和载荷的不均匀，影响风力机正常运行，最终可能使风力机受到损坏。大型风力机已经采取一些措施减小湍流的影响。

1.1.8 风能资源

衡量风能资源的综合指标是风功率密度。在《风电场风能资源评估方法》（GB/T 18710—2002）中给出了风功率密度 7 个级别，见表 1-3。

表 1-3 风功率密度等级

风功率 密度等级	10m 高度		30m 高度		50m 高度		应用于 并网风 力发电
	风功率密度/ (W/ m ²)	年平均风速 参考值/(m/s)	风功率密度/ (W/ m ²)	年平均风速 参考值/(m/s)	风功率密度/ (W/ m ²)	年平均风速 参考值/(m/s)	
1	<100	4.4	<160	5.1	<200	5.6	
2	100 ~ 150	5.1	160 ~ 240	5.9	200 ~ 300	6.4	
3	150 ~ 200	5.6	240 ~ 320	6.5	300 ~ 400	7.0	较好
4	200 ~ 250	6.0	320 ~ 400	7.0	400 ~ 500	7.5	好
5	250 ~ 300	6.4	400 ~ 480	7.4	500 ~ 600	8.0	很好
6	300 ~ 400	7.0	480 ~ 640	8.2	600 ~ 800	8.8	很好
7	400 ~ 1000	9.4	640 ~ 1600	11.0	800 ~ 2000	11.9	很好

注：1. 不同高度的年平均风速参考值是按风切变指数为 1/7 推算的。
2. 与风功率密度上限值对应的年平均风速参考值，按海平面标准大气压及风速频率符合瑞利分布的情况推算。

风能资源评估程序如图 1-8 所示。

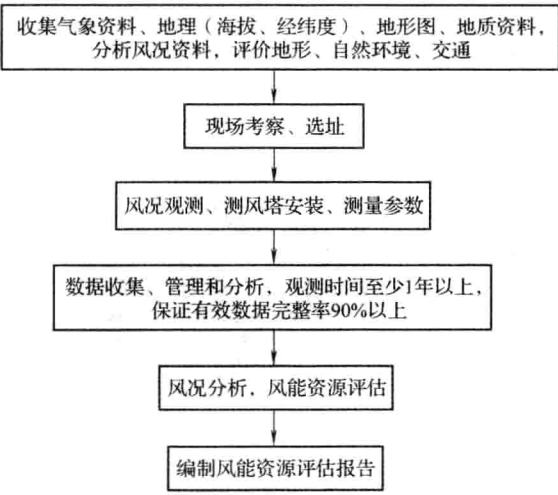


图 1-8 风能资源评估程序

我国风能资源较丰富的地区有东南沿海及其岛屿、内蒙古、甘肃北部、黑龙江、吉林东部和辽东半岛沿海等。

1.2 风能的利用

人类利用风能已有数千年历史，在蒸汽机发明以前风能曾经作为重要的动力，用于船舶航行、提水饮用和灌溉、排水造田、碾米、磨面和锯木等。图 1-9 所示为风能利用的分类。这里将结合历史介绍风能利用的主要领域。

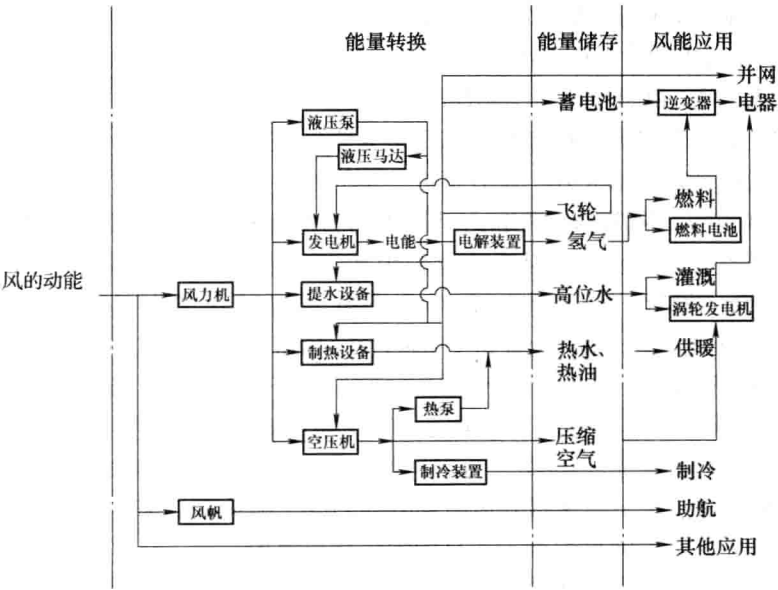


图 1-9 风能利用的分类