

21世纪能源与动力工程类 **创新型** 应用人才培养规划教材

风能与动力工程



风力发电原理

吴双群 赵丹平 主编

- 紧贴热点：满足风电人才培养之急需
- 精选内容：阐述基础理论及发展脉络
- 结合案例：展现独具匠心的风能运用



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材·风能与动力工程

风力发电原理

主 编 吴双群 赵丹平
副主编 韩巧丽
参 编 贾 彦 徐丽娜



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 介 绍

本书从风力发电机组基本发电原理出发,全面介绍了风力发电机的发展历程,风的特性及我国的风能资源分布特点,风力发电机的基本组成及水平、垂直风电机组特点,风电场项目规划与选址,风力发电机组安全运行与维护及影响风电发展的因素等。全书共分10章,主要内容包括绪论、风力机的结构类型、风力发电的基本原理、风力发电机组、风力发电技术、风力发电机组安全运行与维护、风电场的确定、风能存储、风能的其他用途、风力发电的发展等内容。

本书可作为高等院校风能专业、风能与动力工程专业及相关专业的本、专科高年级学生和研究生教材,也可作为从事风力发电机组设计、运行、维护和管理等方面工作的专业技术人员培训教材或参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电原理/吴双群,赵丹平主编. —北京:北京大学出版社,2011.10
(21世纪能源与动力工程类创新型应用人才培养规划教材·风能与动力工程)
ISBN 978-7-301-19631-1

I. ①风… II. ①吴…②赵… III. ①风力发电—高等学校—教材 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第209719号

书 名: 风力发电原理

著作责任者: 吴双群 赵丹平 主编

策划编辑: 童君鑫

责任编辑: 郭穗娟

标准书号: ISBN 978-7-301-19631-1/TK·0004

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 16.75印张 372千字

2011年10月第1版 2011年10月第1次印刷

定 价: 33.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

随着现代工业的飞速发展，人类对能源的需求明显增加，而地球上可利用的常规能源日趋匮乏。据专家预测，煤炭还可开采 221 年，石油还可开采 39 年，天然气还能用 60 年。这些预测也许不很准确，但常规能源必然是越用越少，总有一天要用尽的。同时，人口的增加，对能源的需求也越来越大，环境污染越来越严重。因此，人类必须解决人口、资源、环境的可持续发展问题。开发、利用新能源是实现能源持续发展的方向之一。风力发电以其无污染、可再生、技术成熟备受世人青睐，近几年以 25% 的增长速度位居各类能源之首。中国具有丰富的风能资源，这为发展中国的风电事业创造了十分有利的条件。但就中国目前电力事业而言，火力发电仍是中国的主力电源。以燃煤为主的火电厂，正在大量排放 CO_2 和 SO_2 等污染气体，这对中国的环保极为不利。而发展风电，一方面有利于中国电源结构的调整；另一方面又有利于减少污染气体的排放而缓解全球变暖的威胁。同时，又有利于减少能源进口方面的压力，对提高中国能源供应的多样性和安全性将作出积极的贡献。

风力发电是一个集计算机技术、空气动力学、结构力学和材料科学等综合性学科的技术。风能必将起着改变能源结构、减少对进口能源依赖的重要作用。因此，随着风力发电产业的迅猛发展，风电方面的人才需求量也会越来越大。主要需求方面有风电场的规划、设计、施工、运行与维护，风力发电机组设计与制造，风能资源测量与评估，风力发电项目开发等技术与管理。

本书是根据能源与动力工程类创新型应用人才培养要求，由具有多年从事实践及教学经验人员，通过精心选材，对教材的结构、内容等方面进行归纳、总结而编写的，力求满足现代高等教育风能与动力工程专业发展的要求。本书从风力发电的基本知识出发，介绍了风的形成、风的分类和风能定量评估；阐述了风力发电机组工作原理及其应用的基本知识，其包括相关理论、定义、结构和工作机理；分析了风力机的基本组成，水平轴离网、并网型风力机的基本工作原理；介绍了风力发电技术、风电场的确定、风能存储、风能的其他用途；简述了风力发电机组安全运行与维护及风电发展的影响。

本书由吴双群和赵丹平担任主编，负责内容编排设计和全书统稿。韩巧丽为副主编，参加编写的还有贾彦、徐丽娜。本书编写过程中参考了大量的相关文献资料，借鉴吸收了众多专家学者的成果，在此对所引用的文献资料的作者表示衷心的感谢！对给予大力支持的北京大学出版社表示衷心的感谢！另外，为方便教师授课和读者自学，编者提供了复习思考题。

由于编者水平有限，书中欠妥疏漏之处在所难免，恳切希望各兄弟院校教师和学生在使用本书时给予关注，并将意见和建议及时反馈给我们，以便完善，编者邮箱：zdpwsq@yahoo.cn。

编 者
2011 年 7 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.1.1 风轮	42
1.1 风的形成	2	3.1.2 发电机	42
1.1.1 大气环流	3	3.1.3 塔架	42
1.1.2 季风环流	4	3.2 风力发电基本理论	43
1.1.3 风力等级	6	3.2.1 贝茨(Betz)理论	43
1.1.4 风的测量	8	3.2.2 叶素理论	44
1.2 风能资源	10	3.2.3 涡流理论	46
1.2.1 风能的特点	10	3.2.4 动量理论	48
1.2.2 中国风能资源分布特点	12	复习思考题	49
1.3 风能的数学描述	14	第 4 章 风力发电机组	50
1.3.1 风特性	14	4.1 风力发电机组的分类和构成	51
1.3.2 风能公式	19	4.1.1 风力发电机组的分类	51
复习思考题	21	4.1.2 风力发电机组的构成	55
第 2 章 风力机的结构类型	22	4.2 风电发电机组的工作原理	59
2.1 风力机概念	23	4.2.1 基本定义	59
2.2 风力机的分类	24	4.2.2 空气动力特性	61
2.3 水平轴风力机	28	4.3 叶片	66
2.4 垂直轴风力机	31	4.3.1 叶片应满足的基本要求	66
2.5 其他风力机	34	4.3.2 叶片类型	67
2.5.1 带锥形罩型风力发电机	34	4.4 轮毂	69
2.5.2 旋风型风力发电机	35	4.4.1 固定式轮毂	69
2.5.3 无阻尼型风力发电机	35	4.4.2 叶片之间相对固定的 铰链式轮毂	69
2.5.4 离心甩出式风力发电机	35	4.4.3 各叶片自由的铰链式 轮毂	70
2.5.5 移动翼栅式风力发电机	36	4.5 塔架	70
2.5.6 四螺旋风力发电机	37	4.6 机舱及齿轮传动系统	72
2.5.7 升降传送式风力发电机	37	4.6.1 机舱	72
2.5.8 自动变形双组风叶多层 组装式风力发电机	37	4.6.2 齿轮箱	73
复习思考题	38	4.7 调向装置	78
第 3 章 风力发电的基本原理	39	4.7.1 尾翼调向	79
3.1 工作原理	40	4.7.2 侧轮调向	79



4.7.3	下风向调向	79	5.3.4	风力机变转速技术	127
4.7.4	电机调向	80	5.4	发电系统	128
4.8	风力机功率输出及功率调节装置	82	5.4.1	恒频恒速发电系统	128
4.8.1	风力机功率输出	82	5.4.2	变速恒频发电系统	135
4.8.2	风力机功率调节方式	83	5.4.3	恒速恒频发电系统	146
4.9	制动装置	87	5.4.4	小型直流发电系统	148
4.9.1	空气动力制动	87	5.5	控制技术	151
4.9.2	机械制动	88	5.5.1	双速异步发电机的运行控制	151
4.10	发电机	90	5.5.2	风力机驱动滑差可调的绕线式异步发电机的运行控制	155
4.10.1	类型	90	5.5.3	同步发电机的变频控制	157
4.10.2	发电机常见故障	96	5.5.4	功率控制系统	158
4.11	常用控制器	97	5.5.5	转子电流控制器的原理	159
4.11.1	整流器	97	5.5.6	转子电流控制器的结构	160
4.11.2	逆变器	99	5.5.7	采用转子电流控制器的功率调节	161
4.11.3	变频器	102	5.5.8	转子电流控制器在实际应用中的效果	162
4.11.4	充电控制器	106	5.6	供电方式	162
4.12	避雷系统	107	5.6.1	离网供电	162
4.12.1	避雷系统 3 个主要构成要素	107	5.6.2	直接并网	168
4.12.2	部件防雷措施	108	5.6.3	间接并网	172
复习思考题		111	复习思考题		175
第 5 章	风力发电技术	112	第 6 章	风力发电机组安全运行与维护	177
5.1	功率调节	113	6.1	风电机组的安全运行要求	178
5.1.1	风力发电技术的发展	114	6.1.1	安全运行的思想	178
5.1.2	功率调节方式	115	6.1.2	安全运行的自动运行控制	178
5.1.3	滑差可调异步发电机的功率调节	118	6.1.3	安全运行的保护要求	179
5.1.4	双速发电机的功率调节	120	6.1.4	控制安全系统安全运行的技术要求	180
5.2	变转速运行	121	6.2	风电场的运行与维护	181
5.2.1	概述	121	6.3	风力发电机组常见故障及维护	182
5.2.2	变转速发电机	122			
5.3	变转速及恒频	123			
5.3.1	异步发电机的变速恒频技术	125			
5.3.2	同步发电机的变速恒频技术	126			
5.3.3	双馈异步发电机的变速恒频技术	126			

6.3.1	故障分类	182	第9章 风能的其他用途	214	
6.3.2	风力发电机组的日常 故障检查处理	182	9.1 风力提水	216	
6.3.3	风力发电机组的年度 例行维护	184	9.1.1 风力提水的工作原理	217	
6.4	噪声	185	9.1.2 发展风力提水的前景	221	
6.4.1	基本概念	185	9.1.3 风力提水与风力发电 提水存在的问题	222	
6.4.2	风力机的噪声	186	9.2 风力制热	222	
6.4.3	噪声的控制原理和 方法	187	9.2.1 风能转换为热能的 途径	223	
6.4.4	齿轮箱噪声	187	9.2.2 风热直接转换的原理 与形式	223	
6.4.5	风电场噪声测量	188	9.2.3 风力致热应用中的 实例	225	
复习思考题	189	9.2.4 风力致热的展望	230	9.3 离网型风光互补发电系统	231
第7章 风电场的确定	190	9.3.1 风光互补系统的工作 原理	232	9.3.2 风光互补离网发电 系统的设计	234
7.1 风电场选址	192	9.3.3 风光互补系统的典型 应用	236	9.3.4 风光互补系统存在的 问题及解决方法	237
7.1.1 风电场开发	192	9.3.5 风光互补发电系统的 发展前景	239	复习思考题	239
7.1.2 风电场宏观选址	194	第10章 风力发电的发展	240	10.1 风力发电发展的影响因素及 存在的问题	241
7.1.3 风电场微观选址	196	10.1.1 风力发电发展的影响 因素	241	10.1.2 风力发电发展存在的 问题	243
7.2 可行性评估	199	10.2 风力发电发展展望	246	10.2.1 商品化风电机组的 单机容量进一步向 大型化发展	246
7.2.1 地形特性评估	199	10.2.2 变速恒频风电机组的 开发和商品化	246		
7.2.2 噪声评估	200				
7.2.3 生态评估	201				
7.3 风电机安装及设计软件介绍	201				
7.3.1 WAsP	202				
7.3.2 其他软件简介	204				
复习思考题	206				
第8章 风能存储	207				
8.1 化学储能	208				
8.1.1 蓄电池	208				
8.1.2 电解水制氢储能	209				
8.2 水力储能	210				
8.3 飞轮储能	210				
8.4 热能储能	211				
8.4.1 固体摩擦致热	212				
8.4.2 搅拌液体致热	212				
8.4.3 挤压液体致热	212				
8.4.4 涡电流致热	212				
复习思考题	213				



10.2.3 机械方面的改进	248	附录三 风力发电机组电工术语	251
10.2.4 空气动力方面的改进 ...	248	附录四 主要符号	256
复习思考题	248	参考文献	259
附录一 风力等级表	249		
附录二 风能资源分布图	250		

第 1 章

绪 论



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
风的形成	熟悉大气环流、季风环流，掌握我国季风环流的形成，熟悉海陆风、山谷风的形成	空气的组成 影响分子热运动状态参数
风的测量	掌握测风系统组成、风速和风向测量方法	风杯式、热线式、风压式测量原理
风能资源	理解风能的特点，熟悉中国风能资源分布特点，掌握风能丰富区分布	风电场分布情况
风特性	掌握平均风速和风向、湍流度和阵风因子，掌握风速随高度变化规律；掌握风能公式	风的随机性对风力机设计和控制的影响



导入案例

风力发电过程中,风轮将风能转化机械能,发电机将机械能转化电能。在能量转化与传递过程中,风能的特性是决定因素。自然风是一种随机的湍流运动,其不稳定性也是风能利用的弱点之一,影响风电机组中机械设备、电气设备的稳定性,对电网造成冲击。风能密度低是促使风电度电成本高的因素之一。风能是太阳能的一种表现形式,贮量巨大。对全球风能贮量的估计早在1948年曾有普特南姆(Putnam)进行过估算,大气总能量约为 10^{14} MW。1954年世界气象组织假定上述数量的1千万分之一是可为人们所利用的,即可利用的风能为 10^7 MW。1974年,阿尔克斯(von Arx. W. S.)认为地球上可以利用的风能为106 MW。1979年,古斯塔夫逊(M. R. Gustavson)认为风能从根本上说是来源于太阳能,因此可以通过估算到达地球表面的太阳辐射有多少能够转变为风能,来得知有多少可利用的风能,从另一个角度推算全球的总量是 1.3×10^{14} W。因此在可再生能源中,风能是一种非常可观的、有前途的能源。

1.1 风的形成

风是与地面大致平行的大气流动。在90 km以下,气体成分一般可分为两类,一类是常定成分,各成分之间的相对比例大致不变,如氮、氧等;另一类为可变成分,它们会随时间、地点而变,其中水汽变化最大,并有相变。另外, CO_2 、 O_3 的含量也有变化,且对气候有影响。此外,还有 CO 、 SO_2 、 H_2S 、 CH_4 等,它们的含量虽然极微,但在某些特殊条件下,浓度也会变化较大,对人类有危害。大气成分虽然很复杂,但其主要成分是氮和氧,占整个大气质量的98%以上,如果再加上氩气,那就在99.9%以上,其余气体所占不到0.1%。

空气的分子处于永恒不停的运动中。由气体分子组成的热力系统,气体的温度在宏观上表示系统的冷热程度。温度不是一个独立参量,而是系统的几何参量、力学参数、化学参数和电磁参量的函数。对于空气系统,一般没有电磁场作用,空气成分也不发生变化,温度只是几何参量和力学参量的函数,气体的温度可以由压强和体积来表示。气体的体积是气体分子所能到达的空间,而不是气体分子本身体积的总和。气体的密度、压强与其本身的温度有着密切的关系。

大气运动是很复杂的,始终遵循着大气动力学和热力学变化的规律。空气运动及天气变化与大气压力的分布及变化相互之间有着密切的关系,即大气静力学方程,也称静力平衡方程,即式(1-1):

$$dp = -\rho g dz \quad (1-1)$$

式中 p ——大气压力, Pa;

z ——海拔高度, m;

g ——重力加速度, m/s^2 。

除了有强烈对流运动的区域外,静力方程在应用中具有很高的精度,误差仅为1%。

分析大气静力学方程如下。

(1) 当 $dz > 0$ 时, $dp < 0$, 即气压是随高度的增加而减小的。

(2) 因为重力加速度近似于常数, 所以气压随高度增加而减少的快慢主要取决于空气的密度。气层的密度大, 气压随高度增加而减小得快; 气层的密度小, 气压随高度增加而减小得慢。

(3) 将大气静力学方程从 P_1, z_1 到 P_2, z_2 进行积分得

$$P_2 - P_1 = - \int_{z_1}^{z_2} \rho g dz \quad (1-2)$$

从式(1-2)可看出, 任一气层上下界面的压力差等于该层空气的重量。如果令 z_2 趋于大气上界, 那么可得到: 某一高度 z_1 上的气压等于从该高度直到大气上界的单位截面积空气柱的重量。这是大气静力学的气压定义。

在实际工作中, 还常常用到一个称作为“单位气压高度差”的物理量, 也称气压阶。它定义为在垂直气柱中, 每改变单位气压(通常指 1hPa)时所对应的高度差, 以 h 表示, 即有

$$h = - \frac{dz}{dp} \quad (1-3)$$

把大气静力学基本方程代入式(1-3), 得

$$h = \frac{1}{\rho g} \quad (1-4)$$

式(1-4)表示单位气压高度差主要随密度的改变而改变。在密度大的气层中, 单位气压高度差小; 在密度小的气层中, 单位气压高度差大。

由于在实际大气中密度总是随高度减小的, 所以高空的单位气压高度差比低空的单位气压高度差大。

式(1-4)中的空气密度在气象上不是直接测量的, 所以不便应用, 为此, 将干空气状态方程代入式(1-4), 再将 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $R_d = 287 \text{ m}^2/\text{s}^2 \text{ K}$, $T = 273(1 + \alpha t)$, $\alpha = \frac{1}{273}$ 一起引入, p 以 hPa 为单位, 可得到便于计算的表达式

$$h = \frac{8000}{p} (1 + \alpha t) \quad (1-5)$$

式中 T ——热力学温度, K;

t ——气层的平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

由此可见, 气压愈低(即高度愈高), 单位气压高度差愈大, 如在 0°C 时, 地面附近(约 1000hPa)的平均单位气压高度差为 8m/hPa, 在 5.5km 处, 约为 16m/hPa, 在 16km 处(约 100hPa)约为 80m/hPa。温度愈高, 单位气压高度差亦愈大。此外, 当气层不太厚, 精度要求又不很高时, 还可用式(1-5)做海平面气压修正和其他一些近似估算。

众所周知, 在均匀下垫面的自转地球上, 高、低气压带沿着纬度圈呈带状分布, 也即等压线的分布是与纬度圈平行的。可是, 实际地表并不是均匀化的, 尤其是有大陆和海洋的差异。

1.1.1 大气环流

风是空气相对于地球表面的运动。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各异。在赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳辐射强度高，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的存在，这种力称为科里奥利力，简称偏向力或科氏力。在此力的作用下，在北半球使气流向右偏转，在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，还受到地转偏向力的影响。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，空气基本上只受气压梯度力影响，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，也就是逐渐转向东方。在纬度 30° 附近，偏角达到 90° ，地转偏向力与气压梯度力相当，空气运动方向与纬度圈平行，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，使这一地区地面气压升高，就是所谓的副热带高压。

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 $3\sim 4$ 级，这是所谓的信风，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，称此为哈得来(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，这就是所谓的西风带。在纬度 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，在纬度 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，正好与哈得来环流流向相反，此环流圈北面上升、南面下沉，所以叫反环流圈，也称费雷尔(Ferrel)环流圈；向北的一股气流从上空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带的气流，而且形成了一个闭合圈，此环流圈南面上升、北面下沉，是与哈得来环流流向类似的环流圈，因此也叫正环流。在北半球，此气流由北向南，受地转偏向力的作用，吹偏东风，在纬度 $60^\circ\sim 90^\circ$ 之间形成了极地东风带。

综合上述，在地球上由于地球表面受热不均，引起大气层中空气压力不平衡，因此，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，极地最低，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(哈得来环流)、 $30^\circ\sim 60^\circ$ 环流圈和纬度 $60^\circ\sim 90^\circ$ 环流圈，这便是著名的“三圈环流”，如图 1.1 所示。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，“三圈环流”只是一种理论的环流模型。

1.1.2 季风环流

1. 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 1 年内随着季节不同，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。

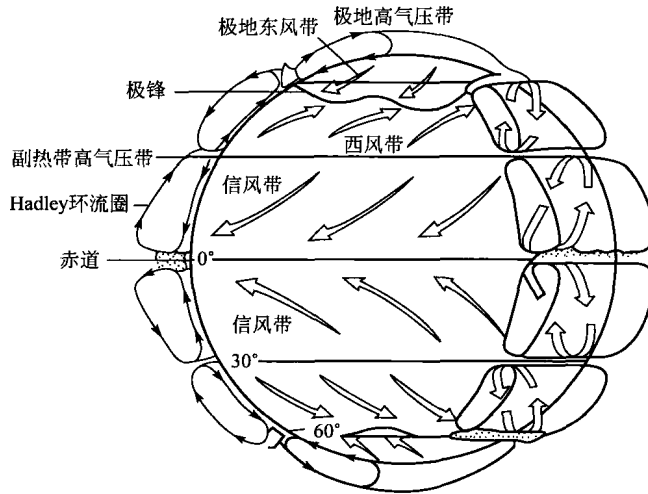


图 1.1 三圈环流示意图

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，主要是由海陆差异，行星风带的季节转换以及地形特征等综合形成的。

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，大陆气压低于海洋，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) 行星风带位置季节转换对我国季风的作用

从图 1.1 可以看出，地球上存在着 5 个风带，信风带、盛行西风带、极地东风带在南半球和北半球是对称的分布。这 5 个风带在北半球的夏季都向北移动，而冬季则向南移动。这样冬季西风带的南缘地带在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，盛行偏北风。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) 青藏高原对我国季风的作用

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压系统，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。

2. 局地环流

1) 海陆风

海陆风的形成与季风相同，也是由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，白天陆上增温较海洋快，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，补充大陆地区的上升气流，而陆上的上升气流流向海洋上空而下沉，补充海上吹向大陆的气流，形成一个完整的热力环流；夜间环流的方向正好相反，所以风从大陆吹向海洋。将这种白天从海洋吹向大陆的风称为海风，夜间从大陆吹向海洋的风称为陆风，所以，将在1天中海陆之间的周期性环流总称为海陆风(图 1.2)。

海陆风的强度在海岸最大，随着离岸的距离变远而减弱，一般影响距离在 20~50km 左右。海风的风速比陆风大，在典型的情况下，风速可达 4~7m/s。而陆风一般仅 2m/s 左右。海陆风最强烈的地区发生在温度日变化最大及昼夜海陆温差最大的地区。低纬度日射强，所以海陆风较为明显，尤以夏季为甚。

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

2) 山谷风

山谷风的形成原理与海陆风是类似的。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，谷底的空气因汇合而上升，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。故将白天从山谷吹向山坡的这种风叫谷风；到夜间，自山坡吹向山谷的这种风称山风。山风和谷风又总称为山谷风(图 1.3)。

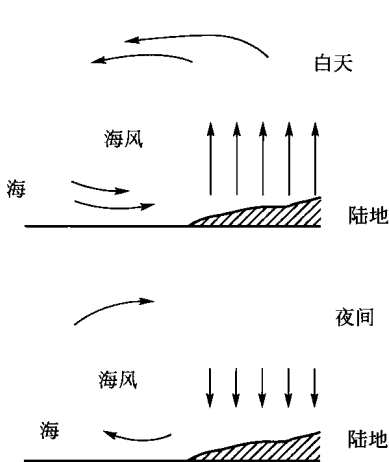


图 1.2 海陆风形成示意图

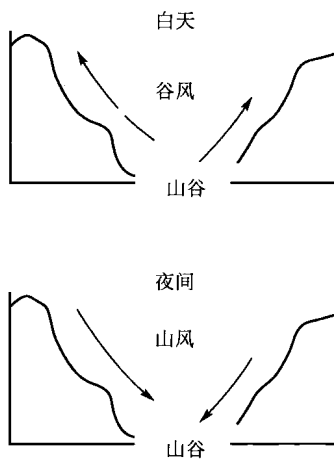


图 1.3 山谷风形成示意图

山谷风风速一般较弱，谷风比山风大一些，谷风一般为 2~4m/s，有时可达 6~7m/s。谷风通过山隘时，风速加大。山风一般仅 1~2m/s，但在峡谷中，风力还能增大一些。

1.1.3 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，同时也可用目测海面、陆地上物体征象估计风力等级。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，按风力的强度等级来估计风力的大小，国际上采用的风级是英国人蒲福(Francis Beaufort)于1805年所拟定的，故又称“蒲福风级”。他把从静风到飓风分为13级。自1946年以来风力等级又作了一些修订，由13级变为17级，见表1-1。

表 1-1 蒲福(Beaufort)风力等级表

风力等级	名称		相当于平地 10m 高处的风速/(m/s)		陆上地物征象
	中文	英文	范围	中数	
0	静风	Calm	0.0~0.2	0	静、烟直上
1	软风	Light air	0.3~1.5	1	烟能表示风向，树叶略有摇动
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，高的草和庄稼开始摇动
3	微风	Gentle 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
4	和风	Moderate breeze	5.5~7.9	7	能吹起地面灰尘和纸张，树枝动摇，高的草和庄稼呈波浪起伏
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，高的草和庄稼波浪起伏明显
6	强风	Strong breeze	10.8~13.8	12	大树枝摇动，电线呼呼有声，撑伞困难，高的草和庄稼不时倾伏于地
7	疾风	Near gale	13.9~17.1	16	全树摇动，大树枝弯下来，迎风步行感觉不便
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
9	烈风	Strong gale	20.8~24.4	23	草房遭受破坏，屋瓦被掀起，大树枝可折断
10	狂风	Storm	24.5~28.4	26	树木可被吹倒，一般建筑物遭破坏
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
12	飓风	Hurricane	>32.6	>33	陆上少见，摧毁力极大
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级风力当风速可以用仪器测定时使用，故不列特征。



1.1.4 风的测量

1. 测风系统

风电场宏观选址时,采用气象台、站提供的较大区域内的风能资源。对初选的风电场选址区即微观选址一般要求用高精度的自动测风系统进行风的测量。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,风速测量是指测量单位时间内空气在水平方向上所移动的距离。

自动测风系统主要由6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。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。测风系统电源一般采用电池供电。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,可自动切换。

测风系统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。

2. 风速测量

1) 风速计

(1) 旋转式风速计。常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与风向无关。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,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详细的推导。一般测量风速选用旋转式风速计。

(2) 压力式风速仪。利用风的压力测定风速的仪器。利用流体的全压力与静压力之差来测定风的动压。

利用皮托静压管,总压管口迎着气流的来向,它感应着气流的全压力(p_0);静压管口与来流的方向垂直,它感应的压力因为有抽吸作用,比静压力稍低些(p)。来流风的动压为

$$\begin{aligned}\Delta p &= p_0 - p = \frac{1}{2} \rho V^2 (1 + c) \\ V &= \left[\frac{2 \Delta p}{\rho (1 + c)} \right]^{1/2}\end{aligned}\tag{1-6}$$

由式(1-6)可计算出风速, 由式可看出 V 与 Δp 不是线性关系, c 是修正系数。

(3) 散热式风速计。一个被加热物体的散热速率与周围空气的流速有关, 利用这种特性可以测量风速。它主要适用于测量小风速, 而且不能测量风向。

2) 风速记录

风速记录通过信号的转换方法来实现, 一般有 4 种方法: 机械式, 当风速感应器旋转时, 通过蜗杆带动蜗轮转动, 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; 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, 风杯旋转一定圈数, 凸轮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; 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; 光电式, 风速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。

3) 风速表示

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

表 1-2 各种风速单位换算表

单位	m/s	$n \text{ mile/h}$	km/h	ft/s	$mile/h$
m/s	1	1.944	3.600	3.281	2.237
$n \text{ mile/h}$	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。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不统一, 有取 1min、2min、10min 平均风速, 有 1h 平均风速, 也有取瞬时风速等。

我国气象站观测时有 3 种风速: 1 日 4 次定时 2min 平均风速、自记 10min 平均风速和瞬时风速。风能资源计算时选用自记 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。

3. 风向测量

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。风向标一般是由尾翼、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。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, 其中最常用的是光电码盘。

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