



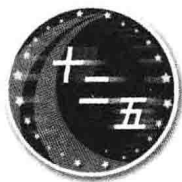
“十二五”高等职业教育能源类专业规划教材
国家示范性高等职业院校精品教材

风力发电技术及应用

曹莹 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



“十二五”高等职业教育能源类专业规划教材
国家示范性高等职业院校精品教材

风力发电技术及应用

曹莹 主编

马文静 陈群 副主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

内 容 简 介

本书以职业能力培养为重点,根据风力发电企业发展的需要和完成职业岗位实际工作任务所需要的知识、能力及素质要求,合理选取教学内容。

全书共设置了六个项目:风能资源的测量与评估,风力发电机组的选型,离网型风力发电系统的设计,并网运行风力发电系统控制技术,风力发电机组的安装、运行与维护,风力发电场建设。每个项目包含多个典型的工作任务,学生通过完成“任务”,理解相关理论知识,掌握相关操作技能。

本书教学 PPT 课件,可登录 www.51eds.com 下载。

本书可供高职院校风力发电技术及应用、新能源发电技术等专业的学生使用,也可供从事风力发电技术研究和应用的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电技术及应用 / 曹莹主编. —北京:中国铁道出版社,2013.8

“十二五”高等职业教育能源类专业规划教材

ISBN 978-7-113-16619-9

I. ①风… II. ①曹… 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(2013)第 177743 号

书 名:风力发电技术及应用

作 者:曹 莹 主编

策 划:吴 飞

读者热线:400-668-0820

责任编辑:吴 飞

编辑助理:绳 超

封面设计:付 巍

封面制作:白 雪

责任印制:李 佳

出版发行:中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)

网 址:<http://www.51eds.com>

印 刷:北京新魏印刷厂

版 次:2013年8月第1版 2013年8月第1次印刷

开 本:787mm×1092mm 1/16 印张:16.5 字数:417千

印 数:1~3000册

书 号:ISBN 978-7-113-16619-9

定 价:32.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有印制质量问题,请与本社教材图书营销部联系调换。电话(010)63550836

打击盗版举报电话:(010)63549504

风能是一种取之不尽、用之不竭的绿色环保的再生能源。随着经济的快速发展,能源消耗逐年增加,风力发电对缓解能源匮乏及减轻环境污染起着非常重要的作用。近年来,世界风力发电装机容量以每年平均30%以上的速度快速增长,风力发电技术日渐成熟,单机容量不断增长,风力发电成本大幅降低,展现了良好的发展前景。因此风力发电行业的人才需求也将大大增加,在此背景下,我们编写了《风力发电技术及应用》一书。

本书以职业能力培养为重点,与行业企业合作,进行了基于工作过程的课程开发与设计,充分体现了职业性、实践性和开放性的要求。根据风力发电企业发展的需要和完成就业岗位实际工作任务所需要的知识、能力及素质要求,选取教学内容。分解出从事相关岗位的综合能力和相关的专项能力,共设置了六个项目:风能资源的测量与评估,风力发电机组的选型,离网型风力发电系统的设计,并网运行风力发电系统控制技术,风力发电机组的安装、运行与维护,风力发电场建设。每个项目包含多个典型的工作任务,学生通过完成“任务”,理解相关理论知识,掌握相关操作技能,从而尽快达到岗位要求,实现零距离就业。

本书由曹莹任主编,马文静、陈群任副主编。具体编写分工:曹莹编写项目一、项目二、项目六,马文静编写项目三、项目四,陈群编写项目五。本书由曹莹负责内容编排设计、修改和全书的统稿工作。

本书在编写过程中得到了江苏龙源风力投资有限公司、江苏联能风力发电有限公司、南京康尼科技实业有限公司相关工程技术人员的大力支持和帮助。同时参考了大量的相关文献资料(详见书末的参考文献),借鉴吸收了众多专家、学者的研究成果,在此对相关作者一并表示衷心的感谢!

由于风力发电技术涉及面广,发展迅速,加之编者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,敬请读者批评指正。

编者

2013年4月

目 录

| | |
|----------------|----|
| 项目一 风能资源的测量与评估 | 1 |
| 任务一 风和风能基础知识认知 | 1 |
| 学习目标 | 1 |
| 任务描述 | 1 |
| 相关知识 | 2 |
| 一、风的形成 | 2 |
| 二、风的测量 | 7 |
| 任务实施 | 11 |
| 任务二 风能资源的测量 | 12 |
| 学习目标 | 12 |
| 任务描述 | 12 |
| 相关知识 | 12 |
| 一、风能的特点 | 12 |
| 二、风能资源的数学描述 | 14 |
| 三、风能资源测量方法 | 22 |
| 任务实施 | 25 |
| 任务三 风能资源的评估 | 27 |
| 学习目标 | 27 |
| 任务描述 | 27 |
| 相关知识 | 27 |
| 一、风能资源评估步骤 | 27 |
| 二、风能资源资料的获得 | 28 |
| 三、风能资源评估 | 29 |
| 任务实施 | 31 |
| 知识拓展 | 36 |
| 复习思考题 | 39 |
| 项目二 风力发电机组的选型 | 40 |
| 任务一 风力发电机组的认识 | 40 |
| 学习目标 | 40 |
| 任务描述 | 40 |
| 相关知识 | 40 |
| 一、风力发电机组的分类 | 40 |
| 二、风力发电机组的基本构成 | 44 |
| 三、风力发电机组的铭牌数据 | 47 |

| | |
|---------------------------|-----|
| 四、风力机的基本原理和基本理论 | 48 |
| 五、风力发电的优越性 | 55 |
| 任务实施 | 56 |
| 任务二 风力发电机组选型原则和容量选择 | 61 |
| 学习目标 | 61 |
| 任务描述 | 61 |
| 相关知识 | 61 |
| 一、风力发电机组选型的理论基础 | 61 |
| 二、风力发电机组选型的原则 | 64 |
| 三、风力发电机组的容量选择 | 67 |
| 任务实施 | 70 |
| 任务三 风力发电机组主要部件选择 | 73 |
| 学习目标 | 73 |
| 任务描述 | 73 |
| 相关知识 | 73 |
| 一、风力发电部件选型的技术分析 | 73 |
| 二、风力发电部件选择的主要经济指标分析 | 74 |
| 三、风力发电机组主要部件的选择 | 74 |
| 任务实施 | 81 |
| 知识拓展 | 82 |
| 复习思考题 | 84 |
| 项目三 离网型风力发电系统的设计 | 85 |
| 任务一 认识离网型风力发电系统 | 85 |
| 学习目标 | 85 |
| 任务描述 | 85 |
| 相关知识 | 86 |
| 一、离网型风力发电系统的组成 | 86 |
| 二、离网型风力发电系统的供电系统 | 87 |
| 三、离网型风力发电系统中的风力发电机组 | 90 |
| 四、离网型风力发电系统的优缺点 | 91 |
| 任务实施 | 91 |
| 任务二 发电机的选择 | 93 |
| 学习目标 | 93 |
| 任务描述 | 93 |
| 相关知识 | 94 |
| 一、发电机的结构和类型 | 94 |
| 二、离网型风力发电系统中使用的发电机 | 98 |
| 任务实施 | 102 |

| | |
|--------------------|-----|
| 任务三 储能装置的选择 | 104 |
| 学习目标 | 104 |
| 任务描述 | 105 |
| 相关知识 | 105 |
| 一、储能装置的种类及选用的原则 | 105 |
| 二、常用蓄电池的种类及其主要性能参数 | 110 |
| 三、铅酸蓄电池的结构及工作原理 | 114 |
| 四、其他种类蓄电池 | 121 |
| 任务实施 | 124 |
| 任务四 控制器、逆变器选型 | 125 |
| 学习目标 | 125 |
| 任务描述 | 125 |
| 相关知识 | 126 |
| 一、离网运行风力发电系统控制器 | 126 |
| 二、逆变器 | 129 |
| 任务实施 | 135 |
| 任务五 离网型风力发电系统的设计 | 136 |
| 学习目标 | 136 |
| 任务描述 | 136 |
| 相关知识 | 136 |
| 任务实施 | 136 |
| 知识拓展 | 139 |
| 复习思考题 | 142 |
| 项目四 并网运行风力发电系统控制技术 | 143 |
| 任务一 并网运行风力发电系统的构成 | 143 |
| 学习目标 | 143 |
| 任务描述 | 143 |
| 相关知识 | 143 |
| 一、并网风力发电机组的组成 | 143 |
| 二、并网运行风力发电系统的主要形式 | 145 |
| 任务实施 | 147 |
| 任务二 并网用风力发电机 | 148 |
| 学习目标 | 148 |
| 任务描述 | 148 |
| 相关知识 | 149 |
| 一、恒速恒频发电系统中的发电机 | 149 |
| 二、变速恒频发电系统中的发电机 | 150 |
| 三、并网风力发电机的工作原理 | 150 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 任务实施····· | 159 |
| 任务三 并网运行风力发电系统控制技术····· | 159 |
| 学习目标····· | 159 |
| 任务描述····· | 160 |
| 相关知识····· | 160 |
| 一、恒速恒频发电系统的并网控制····· | 160 |
| 二、变速恒频发电系统的并网控制····· | 164 |
| 三、并网的经济效益和需要注意的问题····· | 168 |
| 任务实施····· | 168 |
| 知识拓展····· | 169 |
| 复习思考题····· | 171 |
| 项目五 风力发电机组的安装、运行与维护 ····· | 172 |
| 任务一 风力发电机组的安装 ····· | 172 |
| 学习目标····· | 172 |
| 任务描述····· | 172 |
| 相关知识····· | 172 |
| 一、风力发电机组安装前的准备工作····· | 172 |
| 二、风力发电机组安装程序····· | 174 |
| 三、风力发电机组安装计划与进度····· | 179 |
| 四、风力发电机组安装安全措施····· | 180 |
| 任务实施····· | 181 |
| 任务二 风力发电机组的安全运行 ····· | 182 |
| 学习目标····· | 182 |
| 任务描述····· | 182 |
| 相关知识····· | 182 |
| 一、风力发电机组的工作状态····· | 182 |
| 二、控制与安全系统安全运行的技术要求····· | 183 |
| 三、自动运行的控制要求····· | 185 |
| 四、变桨距风力发电机组的运行状态····· | 185 |
| 五、安全运行的保护要求····· | 187 |
| 任务实施····· | 187 |
| 任务三 风力发电机组的维护 ····· | 189 |
| 学习目标····· | 189 |
| 任务描述····· | 189 |
| 相关知识····· | 189 |
| 一、风力发电机组常规检查····· | 189 |
| 二、风力发电机组的日常故障检查处理····· | 190 |
| 三、风力发电机组的年度例行维护····· | 192 |

| | |
|---------------------------------|------------|
| 四、风力发电机组维护检修工作安全注意事项 | 197 |
| 五、维护检修条件准备 | 199 |
| 任务实施 | 199 |
| 知识拓展 | 200 |
| 复习思考题 | 203 |
| 项目六 风力发电场建设 | 204 |
| 任务一 风力发电场的选址 | 204 |
| 学习目标 | 204 |
| 任务描述 | 204 |
| 相关知识 | 204 |
| 一、风力发电场选址须考虑的基本要素 | 205 |
| 二、风力发电场宏观选址 | 206 |
| 三、风力发电场微观选址 | 208 |
| 任务实施 | 210 |
| 任务二 风力发电机组实用排布软件认识 | 211 |
| 学习目标 | 211 |
| 任务描述 | 211 |
| 相关知识 | 211 |
| 一、WAsP 软件 | 211 |
| 二、Park 软件 | 214 |
| 三、WindFarmer 软件 | 214 |
| 四、Windsim 软件 | 214 |
| 五、WindPro 软件 | 214 |
| 任务实施 | 215 |
| 任务三 风力发电机组的布置 | 216 |
| 学习目标 | 216 |
| 任务描述 | 216 |
| 相关知识 | 217 |
| 一、风力发电机组尾流效应 | 217 |
| 二、风力发电机组的排列布置基本原则 | 217 |
| 三、风力发电机组的排列布置指导原则 | 218 |
| 四、风力发电机组排布实例 | 218 |
| 任务实施 | 220 |
| 任务四 风力发电场的管理 | 221 |
| 学习目标 | 221 |
| 任务描述 | 222 |
| 相关知识 | 222 |
| 一、生产指挥系统管理 | 223 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 二、安全管理 | 223 |
| 三、人员培训管理 | 224 |
| 四、生产运行管理 | 225 |
| 五、备品配件及工具的管理 | 226 |
| 六、风力发电场的经营管理 | 227 |
| 七、提高风力发电场综合经济效的技术措施 | 228 |
| 任务实施 | 229 |
| 知识拓展 | 230 |
| 复习思考题 | 235 |
| 附录 | 236 |
| 附录 A 风力发电科技发展“十二五”专项规划 | 236 |
| 附录 B 风力发电机组安装标准 | 245 |
| 参考文献 | 252 |

风能是太阳能的一种表现形式,是一种可再生的、对环境无污染、对生态无破坏的清洁能源。风能资源在空间分布上是分散的,在时间分布上也是不稳定和不连续的。但是,风能资源的分布仍存在着很强的地域性和时间性。我国的风能资源主要分布在北部、沿海及岛屿等地区。为保证风力发电机组高效率稳定地运行,达到预期的目标,风力发电场场址必须具备较丰富的风能资源,因此,对拟建风力发电场的地区进行细致的风能资源勘测研究、风能资源评估,是风力发电场建设项目前期必须进行的重要的工作。

本项目包括三个学习性工作任务:

任务一 风和风能基础知识认知

任务二 风能资源的测量

任务三 风能资源的评估

任务一 风和风能基础知识认知

学习目标

- (1) 了解风形成的原因以及大气环流的形成。
- (2) 掌握季风、海陆风、山风的形成。
- (3) 掌握测风系统的组成,风速和风向的测量方法。
- (4) 掌握模拟风力发电场装置的组装与调试方法。

任务描述

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,在不均的压力作用下空气沿水平方向运动就形成了风。风能是一种最具活力的可再生能源,它实质上是太阳能的转化形式,因此是取之不尽的。通过本任务的学习,掌握风的成因以及风速和风向的测量方法,了解模拟风力发电场装置的组成,掌握模拟风力发电场装置的安装方法。



相关知识

一、风的形成

1. 风的成因

风是由于空气受冷或者受热而导致从一个地方向另一个地方产生移动的结果。简单地说,空气的流动现象称为风。空气运动主要是由于地球上各个纬度所接受的太阳辐射强度不同形成的,风能实质上是太阳能的转化形式,因此是取之不尽的。

风在地表上形成的根本原因是太阳能量的传输,由于地球是一个球体,太阳光辐射到地球上的能量随纬度不同而不同。在赤道和低纬度地区,太阳高度角大,日照时间长,太阳辐射强度大,地面和大气接收的热量多、温度较高;在高纬度地区,太阳高度角小,日照时间短,地面和大气接收的热量少,温度较低。这种高纬度与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,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。

由于地球自转形成的地转偏向力称为科里奥利力,简称偏向力或科氏力。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影响外,还要受地转偏向力的影响。因此,大气的真实运动是两个力综合影响的结果。

实际上,地面上的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,山谷和海峡能改变气流运动的方向,还能使风速增大,而丘陵、山地由于摩擦大使风速减少,孤立山峰却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。

2. 大气环流

大气环流是指大范围的大气运动状态。某一大范围的地区、某一大气层在一个长时期的大气运动的平均状态或者某一个时段的大气运动的变化过程,都可以称为大气环流。

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,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,在地转偏向力作用下,北半球吹东北风,南半球吹东南风,风速稳定且不大(3~4级),这就是所谓的信风,所以在南北纬度 30° 之间的地带称为信风地带,这支气流补充了赤道的上升气流,构成了一个闭合的环流圈,称为哈德莱(Hadley)环流,又称正环流圈,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,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 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 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,正好与哈德莱环流流向相反,此环流圈北面上升、南面下沉,所以称为反环流圈,又称费雷尔(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,与哈德莱环流流向类似,因此又称正环流。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,由于地球表面受热不均,引起大气层中空气压力不均衡,因此,形成地面与高空的大气环流。各环流圈伸屈的高度,以赤道最高,中纬度次之,极地最低。这主要是由于地球表面增热程度随纬度增高而降低的缘故。这种环流在地球地转偏向力的作用下,形成了赤道~纬度 30° 环流圈(哈德莱环流)、纬度 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 环流圈(费雷尔环流)和纬度 $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 环流圈(极地环流),这便是著名的三圈环流,如图 1.1 所示。

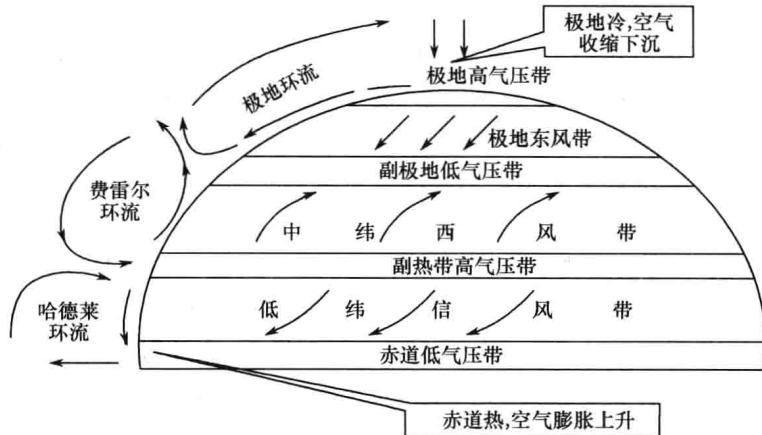


图 1.1 三圈环流示意图

3. 风的类型

风受大气环流、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、台风等。

1) 季风

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有规律转变风向的风称为季风。

季风环流是季风气候的主要反映。季风环流形成的主要原因是由于海陆分布的热力差异、行星风带的季节转换以及地形特征等综合形成的,如图 1.2 所示。

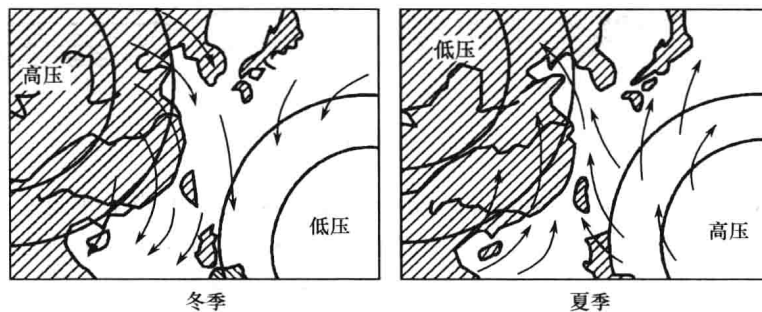


图 1.2 季风的形成

(1) 海陆分布对我国季风的影响。海洋的热容量比陆地大得多。夏季,陆地比海洋暖,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;冬季正好相反,海洋很快变暖,陆地相对较冷,大陆气压高于海洋,气压梯度力由大陆指向海洋,风从大陆吹向海洋。我国东临太平洋,南临印度洋,冬夏的温差大,所以季风明显。

(2) 行星风带的季节转换对我国季风的影响。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分布的。这 5 个风带在北半球的夏季都向北移动,而冬季向南移动,这样冬季西风带的南缘地带在夏季就可以变成东风带。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影响。青藏高原占我国陆地的 1/4,平均海拔在 4 000 m 以上,对于周围地区具有热力作用。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,使冬季风加强;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) 海陆风

海陆风是因海洋和陆地受热不均匀而在海岸附近形成的一种有日变化的风系,周期为一昼夜,其势力相对薄弱。白天风从海上吹向陆地,夜晚风从陆地吹向海洋。前者称为海风,后者称为陆风,合称为海陆风。白天,地表受太阳辐射而增温,由于陆地土壤热容量比海水热容量小得多,陆地升温比海洋快得多,因此陆地上的气温显著比附近海洋上的气温高。陆地上空气在水平气压梯度力的作用下,上空的空气从陆地流向海洋,然后下沉至低空,又由海面流向陆地,再度上升,遂形成低层海风和铅直剖面上的海风环流。海风从每天上午开始直到傍晚,风力下午最强。日落以后,陆地降温比海洋快;到了夜间,海上气温高于陆地,就出现与白天相反的热力环流而形成低层陆风和铅直剖面上的陆风环流。海陆的温差,白天大于夜晚,所以海风较陆风强,如图 1.3 所示。

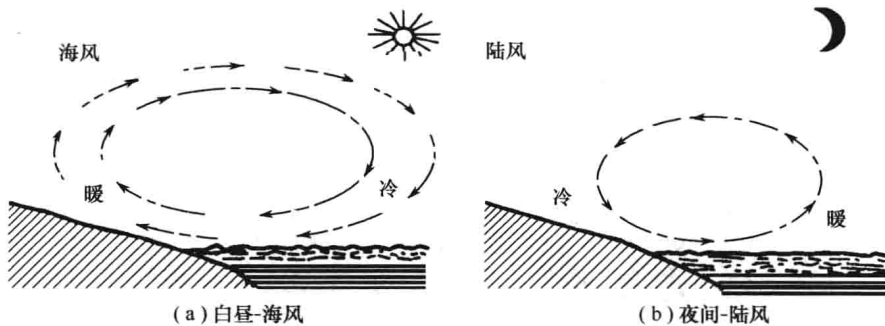


图 1.3 海陆风的形成

海陆风的强度在海岸最大,随着离岸距离的增加而减弱,一般影响距离在 20~50 km。海风的风速比陆风大,在典型的情况下,海风风速为 4~7 m/s,而陆风一般为 2 m/s。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,合称为湖陆风。

3) 山谷风

山谷风是由于山谷与其附近空气之间的热力差异而引起的,形成原理与海陆风类似。白天,山坡接受太阳光热较多,成为一只小小的“加热炉”,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,并在上层从山坡流向谷地,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,“加热炉”变成了“冷却器”,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。山风和谷风合称为山谷风,如图 1.4 所示。

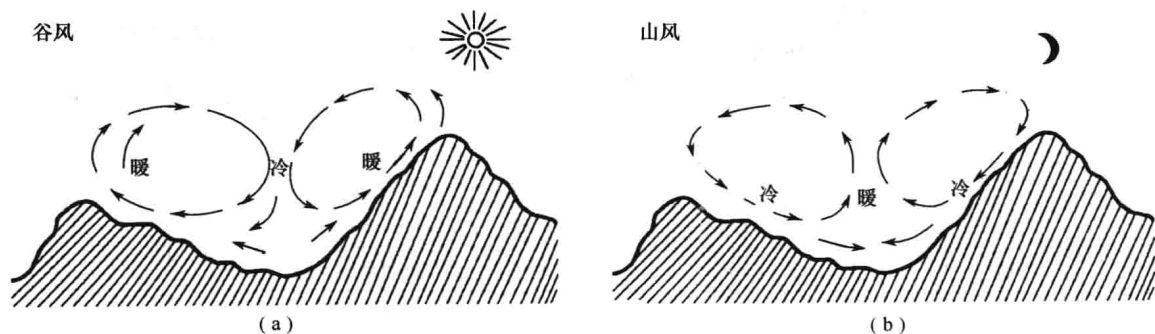


图 1.4 山谷风形成图

山谷风一般比较弱,谷风比山风大一些,谷风风速一般为 $2\sim 4\text{ m/s}$,有时为 $6\sim 7\text{ m/s}$,在通过山隘时,风速加大。山风风速一般仅为 $1\sim 2\text{ m/s}$,但在峡谷中,风力可能还会大一些。

4) 台风

台风是发生在热带海洋上强烈的热带气旋。它像在流动江河中前进的涡旋一样,一边绕自己的中心急速旋转,一边随周围大气向前移动。在北半球热带气旋中的气流绕中心呈逆时针方向旋转,在南半球则相反。愈靠近热带气旋中心,气压愈低,风力愈大。但发展强烈的热带气旋,如台风,其中心却是一片风平浪静的晴空区,即台风眼。台风中心气压很低,一般为 $87\sim 99\text{ kPa}$,中心附近地面最大风速一般为 $30\sim 50\text{ m/s}$,有时可超过 80 m/s ,如图 1.5 所示。

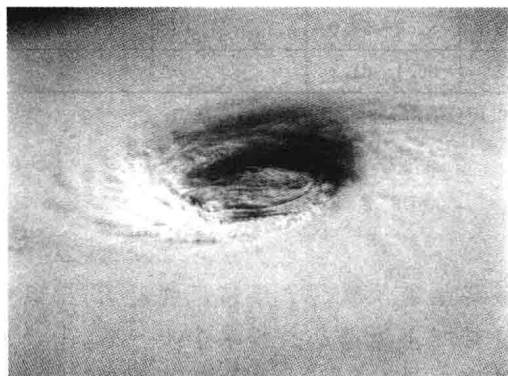


图 1.5 台风眼

4. 风力等级

风力等级(wind scale)简称风级,是风强度的一种表示方法。风越强,数值越大。用风速仪测得的风速可以套用为风级,同时也可通过目测陆地或者海面上的物体征象估计风力等级。

1) 风级

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,国际上通用的风力等级是由英国人蒲福(Francis Beaufort)于1805年拟定的,所以又称“蒲福风力等级”。他最初是根据风对炊烟、沙尘、地物、渔船、海浪等的影响,将风力从静风到飓风分为13个等级(0~12级),1946年以后又增加到18个等级(0~17级),见表1.1。我国天气预报中一般采用13等级分法。一般风力达到6级时,气象台就发布大风警报。

表 1.1 蒲福风力等级

| 风力等级 | 名称 | 相当于离平地 10 m 高处的风速 | | 陆上地物征象 | 海面波浪 | 海面大概的波高/m | |
|------|----|-------------------|-----------|--------|--------|-----------|------|
| | | mile/h | m/s | | | 一般 | 最高 |
| 0 | 静风 | 0~1 | 0.0~0.2 | 烟直上 | 海面平静 | — | — |
| 1 | 软风 | 1~3 | 0.3~1.5 | 烟示风向 | 微波峰无飞沫 | 0.1 | 0.1 |
| 2 | 轻风 | 4~6 | 1.6~3.3 | 感觉有风 | 小波峰未破碎 | 0.2 | 0.3 |
| 3 | 微风 | 7~10 | 3.4~5.4 | 旌旗展开 | 小波峰顶破碎 | 0.6 | 1.0 |
| 4 | 和风 | 11~16 | 5.5~7.9 | 吹起尘土 | 小浪白沫波峰 | 1.0 | 1.5 |
| 5 | 劲风 | 17~21 | 8.0~10.7 | 小树摇摆 | 中浪折沫峰群 | 2.0 | 2.5 |
| 6 | 强风 | 22~27 | 10.8~13.8 | 电线有声 | 大浪白沫高峰 | 3.0 | 4.0 |
| 7 | 疾风 | 28~33 | 13.9~17.1 | 步行困难 | 破峰白沫成条 | 4.0 | 5.5 |
| 8 | 大风 | 34~40 | 17.2~20.7 | 折毁树枝 | 浪长高有浪花 | 5.5 | 7.5 |
| 9 | 烈风 | 41~47 | 20.8~24.4 | 小损房屋 | 浪峰倒卷 | 7.0 | 10.0 |
| 10 | 狂风 | 48~55 | 24.5~28.4 | 拔起树木 | 海浪翻滚咆哮 | 9.0 | 12.5 |
| 11 | 暴风 | 56~63 | 28.5~32.6 | 损毁重大 | 波峰全呈飞沫 | 11.5 | 16.0 |
| 12 | 飓风 | 64~71 | 32.7~36.9 | 摧毁极大 | 海浪滔天 | 14.0 | — |
| 13 | | 72~80 | 37.0~41.4 | | | | |
| 14 | | 81~89 | 41.5~46.1 | | | | |
| 15 | | 90~99 | 46.2~50.9 | | | | |
| 16 | | 100~108 | 51.0~56.0 | | | | |
| 17 | | 109~118 | 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。

阅读材料 1.1

风 力 歌

零级烟柱直冲天,一级轻烟随风飘。二级清风吹脸面,三级叶动红旗展。
四级枝摇飞纸片,五级带叶小树摇。六级举伞步行难,七级迎风走不便。
八级风吹树枝断,九级屋顶飞瓦片。十级拔树又倒屋,十一二级陆上少。

2) 风速与风级的关系

除了查表外,还可以通过式(1.1)~式(1.3)来计算风速。

如已知某一风级时,其关系式为

$$\bar{V}_N = 0.1 + 0.824N^{1.505} \tag{1.1}$$

式中 N ——风的级数；

\bar{V}_N —— N 级风的平均风速，m/s。

若计算 N 级风的最大风速 \bar{V}_{Nmax} ，其公式为

$$\bar{V}_{Nmax} = 0.2 + 0.824N^{1.505} + 0.5N^{0.56} \quad (1.2)$$

若计算 N 级风的最小风速 \bar{V}_{Nmin} ，其公式为

$$\bar{V}_{Nmin} = 0.824N^{1.505} - 0.56 \quad (1.3)$$

二、风的测量

测风，主要是测量风向和风速，有了风速，就可以计算出当时的气压、温度、湿度下的风能。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移动的距离。

1. 测风系统

对于初选的风力发电场选址区应采用高精度的自动测风系统进行风的测量。

自动测风系统主要由 5 部分组成，包括主机、传感器、数据存储装置、保护和隔离装置、电源。

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

传感器种类很多，分为风速传感器、风向传感器、温度传感器、气压传感器。输出信号一般为数字信号。

由于测风系统安装在野外，因此数据存储装置应有足够的存储空间，而且为了野外操作方便，最好采用可插接形式。

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因而出现误差等。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，从而提高系统运行的可靠性。

测风系统电源一般采用电池供电。为了提高系统工作的可靠性，还应配备一套或两套备用的电源，如太阳能光板等。主电源和备用电源互为备用，可自动切换。

2. 风向测量

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。

1) 风向测量仪器

风向标是一种应用比较广泛的风向测量装置，有单翼型、双翼型和流线型等。风向标一般是由尾翼、指向杆、平衡锤及旋转主轴四个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，取得指向风来向的一个平衡位置，即风向的指示。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四种类型。其中，最常用的是光电码盘。

风向杆的安装方位指向正南，一般安装在离地 10 m 的高度上，如图 1.6 所示。

2) 风向表示

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，以正北为零度，顺时针方向旋转，每转过 22.5° 为一个方位，东风为 90°，南风为 180°，西风为 270°，北风为 360°，如图 1.7 所示。