

FENGLI FADIANJIZU
YUANLI YU YINGYONG

风力发电机组 原理与应用

第2版

姚兴佳 宋俊 编著



风力发电机组原理与应用

第 2 版

姚兴佳 宋 俊 编著



机械工业出版社

本书主要介绍了大型风力发电机组原理及其应用的基本知识。全书共分为9章,包括绪论、风力机、发电系统、主传动与制动、变桨距、偏航与辅助系统、控制系统、风力发电机组的运行控制、支撑体系和风力发电机组的维护。

本书适于作为大、专院校教材,以及对从事风力发电机组设计、制造和使用的人员进行培训的教学用书,也可以作为风电爱好者的自学读物。

需要课件请登录机械工业出版社门户网下载,网址:<http://www.cmpbook.com>。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组原理与应用/姚兴佳,宋俊编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2011.4

ISBN 978-7-111-33860-4

I. ①风… II. ①姚…②宋… III. ①风力发电机-机组 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第048756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:林春泉 责任编辑:赵玲丽 责任校对:李秋荣

封面设计:鞠杨 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年6月第2版第1次印刷

169mm×239mm·19印张·347千字

0 001—3 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-33860-4

定价:44.80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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第2版序

本书自出版以来，受到广大读者的欢迎。在此我们对读者和本书出版发行过程中给予我们帮助的所有朋友表示衷心的感谢。

本书第2版根据读者的意见在原有基础上做了一些增补。主要是增加一些风力发电新技术；补充了一些原来缺少的基础内容；将原来附录中的部分内容插入正文；将原来各章中有关机组维护的内容合并为一章，并做了大量增补。这样，在深度上适当加强了对风力发电机组的两大基础部件——风力机和发电机的理论分析；在广度上基本覆盖了目前风电场运行和主导市场的各种机型。对于读者全面系统地了解风力发电机组的原理和应用是有益的。

修改以后，本书适合于大学本科及技术专科学校作为教材；适合于各类风电技术培训班作为教学用书；适合于风电场和风电主机或配套企业管理人员、技术人员作为自学读物。

本书的改版由姚兴佳教授总策划，由姚兴佳教授、宋俊教授执笔。课件由马铁强、徐成荫制作。

在编著的过程中，王益全教授审阅了部分书稿，陶福长高级工程师提供一些资料，马晓岩同学做了很多文字工作，在此特表感谢。

我们一如既往地希望广大读者对本书改版后的不当之处提出更多的批评和建议，这样可以增加我们的见识，将今后的工作提高一步。

编著者

2011年3月

第 1 版前言

本书主要介绍了大型风力发电机组原理及其应用的基本知识。原理包括相关理论、定义、结构和工作机理；应用包括运行、监控、维护、失效分析和故障处理。

本书在内容上的特点是以能量流和信息流为线索，用结构框图表达整机和部件原理；打破了学科的局限，以“功能块”为基本单元安排全书结构；以稳态工作点的设置为出发点，讨论风力发电机组的控制方式。

为了便于广大读者阅读，在不影响内容完整性的前提下，本书回避了高深的数学推证和繁杂的设计理论，集中讨论结构原理，注重介绍如何解决风力发电机组应用中的实际问题。力求使读者全面掌握风力发电机组的工作原理和了解使用风力发电机组的方法。

本书适于作为培训教材，对从事风力发电机组设计、制造和使用的人员进行培训，也可以作为高等院校相关专业的教学参考资料。

本书主要由姚兴佳教授、宋俊教授主持编写，负责内容编排设计、部分内容的撰写和全书统稿。参加编写的还有（排名不分先后）刘姝、邢作霞、单光坤、刘颖明、陈雷、宋筱文、孙传宗、邓英、周海滨。参加审稿的有郭庆鼎教授、龚良慈研究员、田世新教授、邓英高工。

在本书的编写过程中，得到杨树人教授的指导和帮助，钟明昉老师提供了很多宝贵资料，在此一并表示感谢。

本书涉及的学科很多，包括气象学、空气动力学、机械原理、机械零件、流体传动与控制、电机学、电力电子学、控制理论、振动理论和测试技术等。将诸多学科有机地结合起来，应用于风力发电机组的实际，并系统地进行介绍是比较困难的。更加困难的是对这些内容进行深入浅出的表述，便于读者阅读和掌握。在这方面我们做了最大的努力。同时，我们自己也感到本书在内容上还存在不足，甚至可能有一些错误。尽管如此，我们在整个成书过程中，在引用资料方面还是非常谨慎的，也做了不少勘误工作，相信细心的读者定能体会到我们的苦心。

编著者于沈阳工业大学

2009年2月9日

目 录

第 2 版序

第 1 版前言

第一章 绪论	1
第一节 风	1
一、风的形成	1
二、风力等级	6
三、风的测量	8
四、风的数学描述	11
五、风能可利用区的划分	19
第二节 风力发电机组	20
一、风力发电机组的工作原理	20
二、风力发电机组的构成和分类	22
第三节 大型风力发电机组的典型结构	26
一、双馈式风力发电机组	26
二、直驱式永磁风力发电机组	27
三、中传动比齿轮箱型(“半直驱”)机组	28
第二章 风力机	29
第一节 风力机动力学模型	29
一、贝兹极限	29
二、旋转尾流模型	32
第二节 风力机的结构	35
一、叶片的构造	35
二、定桨距叶片叶柄结构	35
三、叶片数	35
四、轮毂	37
第三节 叶片的空气动力特性	39
一、叶片的基本几何定义	39
二、作用在叶片上的空气动力	41
第四节 风轮的空气动力特性	43
一、风轮的几何定义与参数	43
二、作用在风轮上的空气动力	43
第三章 发电系统	47
第一节 发电系统的构成	47

一、发电系统的总体结构	47
二、变压器	47
三、开关电器	49
四、继电器	52
五、母线与电缆	53
第二节 变流器	55
一、电力电子器件	55
二、AC-DC 变换电路	61
三、DC-DC 变换电路	66
四、DC-AC 变换电路	67
五、AC-AC 变换电路	69
六、风力发电机组变流器的应用技术	71
第三节 异步发电机及其并网	72
一、结构	72
二、工作原理	73
三、并网方式	73
四、并网运行时的功率输出及无功功率补偿	75
五、变速恒频技术	76
第四节 同步发电机及其并网	77
一、结构	77
二、工作原理	78
三、并网条件和方式	79
四、转矩-转速特性	80
五、功率调节和补偿	80
六、变速恒频技术	82
第五节 双馈异步发电机发电系统	82
一、结构	82
二、工作原理	83
三、变速恒频风力发电系统	89
四、背靠背恒压源 PWM 调制电路	90
五、双馈发电机矢量控制技术	91
第六节 永磁同步发电机发电系统	99
一、结构	99
二、发电系统	101
三、变流方案	101
四、变速恒频控制技术	103
第四章 主传动与制动	105
第一节 主传动	105

一、主轴及主轴承	105
二、齿轮箱	106
三、联轴器	114
第二节 制动	118
一、机械制动	119
二、空气动力制动	123
第五章 变桨距、偏航与辅助系统	126
第一节 变桨距系统	126
一、液压变桨距系统	126
二、电动变桨距系统	128
三、电-液变桨距系统	131
四、变桨距系统的控制	132
五、叶片载荷的采集	135
第二节 偏航系统	135
一、偏航系统的功能	135
二、偏航系统的组成和工作原理	135
三、执行机构	136
四、偏航系统的控制	139
第三节 液压系统	142
一、液压元件	142
二、定桨距机组液压系统	154
三、变桨距机组液压系统	156
第四节 润滑与温控	158
一、润滑	158
二、温度控制	163
第六章 控制系统	167
第一节 控制系统的结构与功能	167
一、控制系统的总体结构	167
二、主控制器	168
三、控制系统的功能	170
第二节 安全保护	170
一、机组运行安全保护系统	171
二、微控制器抗干扰保护系统	172
三、微控制器的自动检测功能	172
四、安全链	177
第三节 信号测量	177
一、需要检测的信号	177
二、主要信号测量技术	178

第四节 人机界面	188
一、运行操作	188
二、状态显示	189
三、故障监测	189
第七章 风力发电机组的运行控制	193
第一节 常规运行过程	193
一、风力发电机组的稳态工作点	193
二、风力发电机组工作状态及其转换	194
三、机组的起动	196
第二节 定桨距-双速发电机机组	196
一、机组的控制特性	196
二、运行过程	200
三、双速发电机机组控制系统	203
四、参数监测和处理	206
第三节 变桨距-优化转差机组	210
一、机组的控制特性	210
二、运行状态	211
三、带调整发电机转差率的变桨距系统	213
四、发电机转子电流控制技术	215
第四节 变速恒频机组	219
一、最佳风能利用系数	221
二、风力机的转矩-速度特性	223
三、运行状态	223
四、总体控制方式	224
第八章 支撑体系	228
第一节 机舱壳体	228
一、机舱底盘	228
二、机舱罩	228
三、整流罩	229
第二节 塔架	229
一、塔架的分类	229
二、塔架结构	231
三、塔架的固有频率	234
四、塔架-风轮系统振动模态	235
五、搬运及安全设备	237
第三节 基础	238
一、陆上风力发电机组的基础	238
二、海上风力发电机组的基础	240

第四节 接地与避雷	241
一、电气接地保护	241
二、避雷系统	243
第九章 风力发电机组的维护	247
第一节 风力发电机组的维护概述	247
一、维护周期	247
二、维修所需的常用工具	247
第二节 风力机的维护	247
一、叶片的维护	248
二、叶片轴承的维护	250
三、轮毂的维护	250
第三节 发电系统的维护	250
一、发电机的维护及故障分析	250
二、变流系统的维护及故障处理	252
三、变压器的维护	254
四、其他常用电气部件的维修	255
第四节 主传动与制动系统的维护	263
一、齿轮箱的使用及维护	263
二、齿轮箱常见故障及排除	266
三、联轴器的维护	269
四、制动机构的维护及故障排除	270
第五节 变桨距、偏航及辅助系统的维护	271
一、变桨距系统的维护	271
二、偏航系统的维护及常见故障	273
三、液压系统的维护及常见故障	275
第六节 控制系统的故障与防护	277
一、控制系统的常见故障	277
二、减少故障的方法	279
第七节 支撑体系的维护	280
一、联接件的维护	280
二、结构件的维护	280
三、电缆和电缆夹块的维护	280
四、塔基水平度检测	280
五、塔筒标识的维护	281
六、接地装置的维护	281
附录 中华人民共和国国家标准 电工术语 风力发电机组	283
参考文献	292

第一章 绪 论

本章主要介绍了风资源的相关知识，风力发电机组的构成及其分类，以及风力发电机组的典型结构。

第一节 风

一、风的形成

风的形成是空气流动的结果。在地球上，风的成因主要是大气环流、季风环流和局地环流。

1. 大气环流

大气环流是指在全球范围内空气沿一封闭轨迹的运动。它是地球绕太阳转过程中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各异所造成的。赤道和低纬地区比极地和高纬地区太阳辐射强度强，地面和大气接受的热量多，因而温度高。这种温差使北半球等压面向北倾斜，高空空气向北流动（以下均以北半球为例说明）。

地球在自转，使水平运动的空气受到偏向的力，称为地转偏向力，又叫做科里奥利力（Coriolis forces），简称偏向力或科氏力。这种力使北半球气流向右偏转，所以地球大气运动除受温度影响外，还要受地转偏向力的影响。气流真实运动是由于这两个因素综合作用的结果。

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，空气基本受温度影响，在北半球，高空气流由南向北流动，随着纬度的增加，地转偏向力逐渐加大，空气运动也就逐渐的向右偏转，也就是逐渐转向东方。在纬度 30° 附近，偏角到达 90° ，地转偏向力与温度影响作用力相当，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下沉，造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。一支从副热带高压区流向赤道。在地转偏向力的作用下，北半球吹东北风，风速稳定且不大，约3~4级，这是所谓的信风，所以从赤道至北纬 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，称为哈德来（Hadley）环流，也叫做正环流圈。在北半球此环流圈南面上升，北面下沉。

另一支从副热带高压区向极地流动的气流，在地转偏向力的作用下吹西风，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。在北半球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，是与哈德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 60°~90°N 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。各环流圈的高度，以热带最高，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。这种环流在地球自转偏向力的作用下，形成了赤道到纬度 30°环流圈、30°~60°环流圈和纬度 60°~90°环流圈，这便是著名的“三圈环流”，如图 1-1 所示。三圈环流在北半球地面上形成的低纬东北信风带、中纬西风带和高纬东北风带又称“行星风带”。

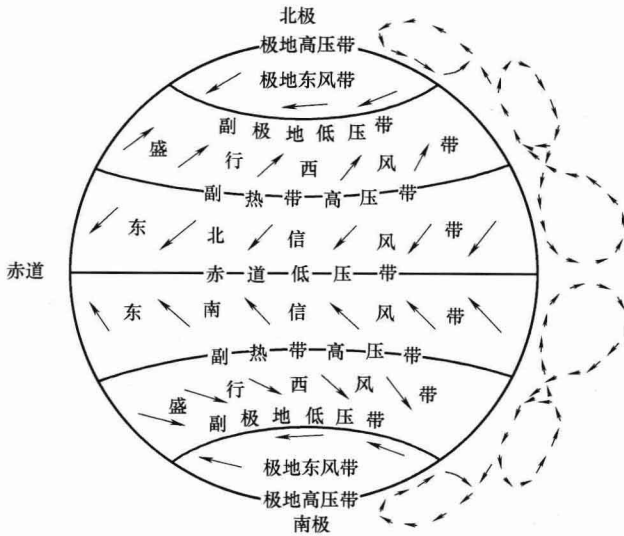


图 1-1 三圈环流示意图

南半球的风向与北半球关于赤道对称。

当然，所谓“三圈环流”乃是一种理论的环境模型。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的不同，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。

季风程度可用一个定量的参数来表示，称为季风指数。当地面冬夏盛行风向之间的夹角在 $120^\circ \sim 180^\circ$ 之间，认为是属于季风，然后用1月和7月盛行风向出现的频率相加除以2，即 $I = (f_1 + f_7) / 2$ 为季风指数，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），如图1-2所示。由图可知，全球明显季风区主要在亚洲的东部和南部，东非的索马里和西非几内亚。季风区有澳大利亚的北部和东南部，北美的东南岸和南美的巴西东岸等地区。

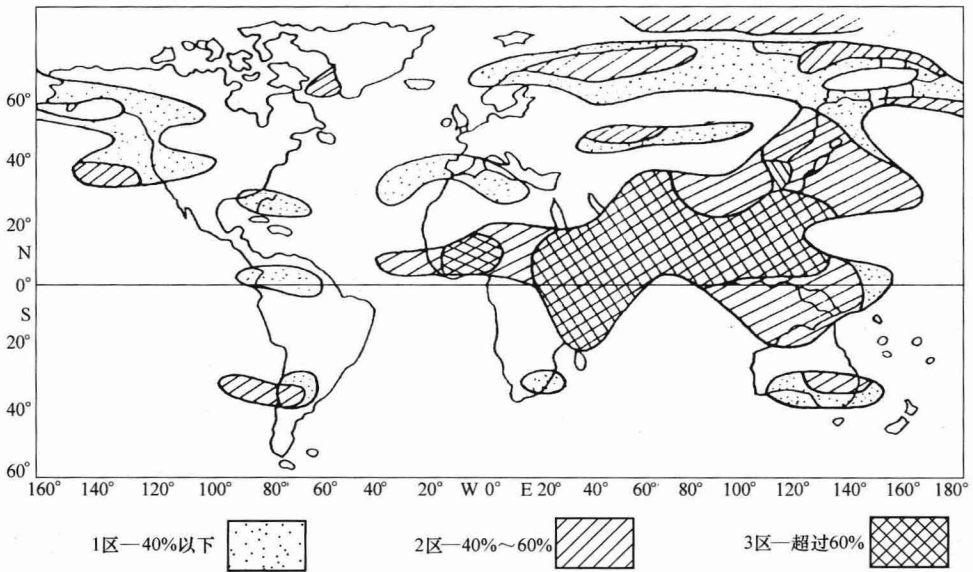


图1-2 季风的地理分布

亚洲东部的季风区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气候变化都有很大的影响。

形成我国季风环流的因素很多，主要是由于海陆差异，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，陆地气压低于海洋气压，气压梯度力由海洋指向大陆，风从海洋吹向大陆，如图 1-3 所示。

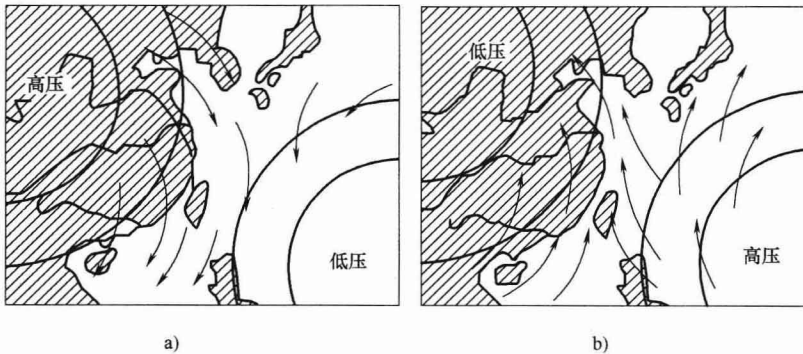


图 1-3 海陆热力差异引起的季风示意图

a) 冬季 b) 夏季

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 地球上存在着 5 个风带。从图 1-1 可以看出，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。行星风带的边缘，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，夏季可以变成东北风带。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) 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。

3. 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，白天陆地上增温较海洋快，空气上升，而海洋上空气温度相对较低，使地面有风自海洋吹向大陆，

补充大陆地区上升气流，而陆地上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，所以将在一天中海陆之间的周期性环流总称为海陆风，如图 1-4 所示。

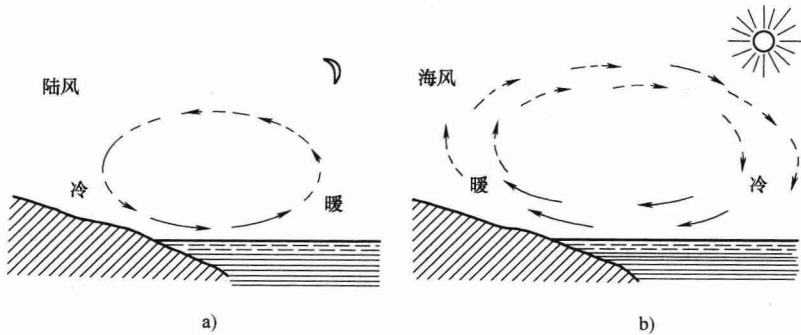


图 1-4 海陆风形成示意图

a) 夜间 b) 白天

海陆风的强度在海岸最大，随着离岸的距离而减弱，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度最高的地区。低纬度日照强，所以海陆风较为明显，尤以夏季为甚。

此外，在大湖附近与海岸类似，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底上空，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

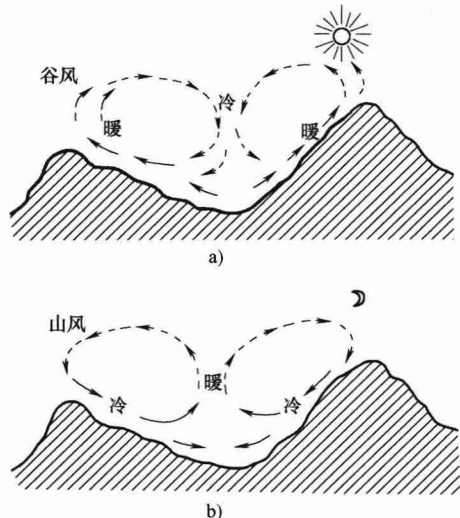


图 1-5 山谷风形成示意图

a) 白天 b) 夜间

较多；而谷底上空，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，顺山坡流入谷底，谷底的空气汇合上升，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底，称为山风。山风和谷风又总称为山谷风，如图 1-5 所示。

山谷风的风速一般较弱，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。山风一般仅为 $1 \sim 2\text{m/s}$ 。但在峡谷中，风力还能增大一些。

二、风力等级

1. 风级的划分

风力等级（简称风级）是根据风速的大小来划分的。国际上采用的风力等级是英国人蒲福（Francis Beaufort, 1774—1859）于 1805 年所拟定的，故又称“蒲福风级”。从静风到飓风分为 13 级。自 1946 年以来风力等级又做了一些修订，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	海面 and 渔船征象	海面大概的浪高/m	
		范围	中数			一般	最高
0	静风	0.0 ~ 0.2	0	静、烟直上	海面平静	—	—
1	软风	0.3 ~ 1.5	1	烟能表示风向，树叶略有摇动	微波如鱼鳞状，没有浪花。一般渔船正好能使舵	0.1	0.1
2	轻风	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，波峰光亮但不破裂。渔船张帆时，可随风移行每小时 1 ~ 2 海里	0.2	0.3
3	微风	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，张帆随风移行每小时 3 ~ 4 海里	0.6	1.0
4	和风	5.5 ~ 7.9	7	能吹起地面灰尘和纸张，树枝动摇。高的草呈波浪起伏	小浪，波长变长；白浪成群出现。渔船满帆的，可使船身倾于一侧	1.0	1.5
5	轻劲风	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；许多白浪形成（偶有飞沫）。渔船需缩帆一部分	2.0	2.5

(续)

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	海面 and 渔船征象	海面大概的浪高/m	
		范围	中数			一般	最高
6	强风	10.8 ~ 13.8	12	大树枝摇动, 电线呼呼有声, 撑伞困难, 高的草不时倾伏于地	轻度大浪开始形成; 到处都有更大的白沫峰(有时有些飞沫)。渔船缩帆大部分, 并注意风险	3.0	4.0
7	疾风	13.9 ~ 17.1	16	全树摇动, 大树枝弯下来, 迎风步行感觉不便	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	17.2 ~ 20.7	19	可折毁小树枝, 人迎风前行感觉阻力甚大	有中度的大浪, 波长较长, 波峰边缘开始破碎成飞沫片; 白沫沿风向呈明显的条带。所有近海渔船都要靠港, 停留不出	5.5	7.5
9	烈风	20.8 ~ 24.4	23	草房遭受破坏, 屋瓦被掀起, 大树枝可折断	狂涛, 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	24.5 ~ 28.4	26	树木可被吹倒, 一般建筑物遭破坏	狂涛, 波峰长而翻卷; 白沫成片出现, 沿风向呈白色浓密条带; 整个海面呈白色; 海面颠簸加大震动感, 能见度受影响。机帆船航行颇危险	9.0	12.5
11	暴风	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	32.7 ~ 37.0	35	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, 能见度严重地受到影响	14.0	—
13		37.1 ~ 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。