

风资源与微观选址： 理论基础与工程应用

张怀全 编著

Wind Resource and Micro-siting
Science and Engineering



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

风资源与微观选址：理论 基础与工程应用

张怀全 编著



机械工业出版社

本书涵盖从风资源工程学、风数据分析到风能气象学等与风资源技术相关的几乎全部知识领域，并与国际前沿接轨。作者从事这方面技术工作多年，积累了丰富的工程实践经验。本书所涉及的内容都来源于作者的实际工作，以期具有较高的理论和实践指导价值。

本书的宗旨是为读者搭建风资源与微观选址的知识体系，并建立科学的理念。读者可以根据本书指引，对感兴趣的话题深入研究，起到抛砖引玉的作用。但对于一般读者，本书应该足以应对风资源技术的日常工作。相比之下，本书可能更适合对理论感兴趣，并有一定数学基础，尤其是概率统计学基础的读者。

图书在版编目（CIP）数据

风资源与微观选址：理论基础与工程应用/张怀全编著.

—北京：机械工业出版社，2013.6

ISBN 978 - 7 - 111 - 42165 - 8

I . ①风… II . ①张… III . ①风力能源 ②风力发电 - 发电厂 - 选址 IV . ①TK81②TM62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 075628 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：张俊红 责任编辑：赵玲丽

版式设计：霍永明 责任校对：杜雨霏

封面设计：马精明 责任印制：张楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15.75 印张 · 390 千字

0 001—3 000 册

标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 42165 - 8

定价：68.00 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

人们对风的研究由来已久，但风力发电把对风的研究推到前所未有的高度。风电作为取之不尽、用之不竭的可再生能源，被人们在能源饥渴的未来寄予厚望。作者致力于为中国风电事业发展尽一份绵薄之力。

风是琢磨不定的，有点“说不清，道不明”的感觉，导致很多同行都以经验为主导，而对风资源技术理论知之甚少。风具有极高的随机性和复杂性，没有理论基础支持的经验如何真正指导实践呢？况且很多经验都是想当然的、经不起推敲的。风是风力发电的食粮，其重要性不言而喻，因此必须引起我们的重视，从理论上对其进行解构。

风资源与微观选址这一学科涉及的内容十分广泛，包括概率统计、大气物理、气候学和流体力学等诸多学科，影响风资源的因素更是极其复杂。在面对一个风电场时，我们的所谓经验是不可靠的，就连商业化的计算软件也存在巨大的不确定性。我国目前风电场的营利水平多低于投资预期，这与风资源和微观选址过程的不科学和不重视不无关系。

风资源的不确定性是问题的关键，这些问题只能用概率统计的思维方式来解答。只有建立了概率统计模型，才能形成科学的工作理念。若想更好地理解风这种大气属性，需要理解基本的大气物理和气象学相关的知识，本书将用大量篇幅予以理论阐述，希望能够指导风资源工程技术人员的工作实践。开篇章节“风资源与微观选址工程”是对工程实践的指导，适合绝大多数对风资源技术感兴趣的读者阅读。最后，用几个章节阐述风资源与微观选址还需考虑的其他问题，如环境和风力机载荷等。

作者将尽力将风资源专业相关的重大问题归纳成章，同时每章分别可自成体系，使读者既可以系统地研究风资源理论，又可以针对具体问题直接参考对应章节。由于篇幅有限，涉及学科广泛，因此本书不可能把每个理论问题彻底理清，但希望给读者一个更深入研究的基本思路。由于国内极少有这方面的参考资料和书籍，因此本书引用和参考的几乎都是国外的文献，并期望做到与国际前沿接轨。

由于作者资历尚浅，能力和精力都十分有限，难免会有纰漏和不足之处，望读者见谅。同时，衷心期望读者能将问题反馈给本人，共同提高和进步。

作 者

目 录

前言

第1章 绪论..... 1

- 1.1 风资源评估学科介绍 1
- 1.2 风气候 2
 - 1.2.1 全球风气候 2
 - 1.2.2 中尺度风气候 3
 - 1.2.3 局地风气候 3
- 1.3 风资源的不确定性 4

第2章 风资源与微观选址

- 工程（上） 6
- 2.1 地表粗糙度 6
 - 2.1.1 粗糙度长度 6
 - 2.1.2 粗糙度与风廓线 9
 - 2.1.3 内部边界层 9
 - 2.1.4 粗糙长度改变模型 10
 - 2.1.5 置换高度 11
 - 2.1.6 风切变 12
- 2.2 地形加速效应 13
 - 2.2.1 水平风加速廓线 13
 - 2.2.2 垂直风加速廓线 14
 - 2.2.3 地形分类 16
 - 2.2.4 崎岖指数 18
- 2.3 障碍物遮挡效应 19
 - 2.3.1 风速降低效应 19
 - 2.3.2 湍流增加效应 21
- 2.4 风力发电机组的尾流 22
 - 2.4.1 尾流的基本结构特征 23
 - 2.4.2 尾流中风速减低效应的
计算模型 24
 - 2.4.3 尾流中湍流强度增加的
计算模型 25

- 2.4.4 大型风电场的尾流 26
- 2.4.5 复杂风电场的尾流 28

第3章 风资源与微观选址

- 工程（下） 29
- 3.1 风图谱分析与应用程序 29
 - 3.1.1 基本原理 29
 - 3.1.2 风流模型 30
 - 3.1.3 模型的适用性 31
 - 3.1.4 复杂地形修正 33
- 3.2 计算流体力学模型简述 34
 - 3.2.1 计算流体力学概述 34
 - 3.2.2 流体与流动的基本特性 35
 - 3.2.3 控制方程 37
 - 3.2.4 边界条件与初始条件 37
 - 3.2.5 网格化 38
 - 3.2.6 解析离散方程 39
 - 3.2.7 计算结果处理与显示 40
- 3.3 测风塔的代表性 41
 - 3.3.1 风气候相似 42
 - 3.3.2 地形地貌相似 43
 - 3.3.3 障碍物遮挡效应相似 43
- 3.4 微观选址 44
 - 3.4.1 排布效率 44
 - 3.4.2 载荷风况 45
 - 3.4.3 微观选址的流程 46
 - 3.4.4 现场定点及微调 46
 - 3.4.5 扇区管理 48
 - 3.4.6 风资源评估与微观选址报告 49

第4章 风数据统计分析 51

- 4.1 风数据时间序列 51
 - 4.1.1 随机现象 51

4.1.2 平均值与标准差	51	5.3.2 残差与决定系数	86
4.1.3 平均风速时间序列	51	5.3.3 预测值标准差的测量与估计	87
4.1.4 湍流强度时间序列	52	5.4 再分析数据的应用	88
4.1.5 风向时间序列	54	5.4.1 气压高度与 σ 高度	88
4.2 风速的概率密度分布	56	5.4.2 再分析数据的一致性	89
4.2.1 概率密度分布	56	5.4.3 再分析数据应用的不确定性	90
4.2.2 平均风速的计算	56		
4.2.3 威布尔概率密度分布	57	第6章 风资源评估的不确定性	91
4.2.4 威布尔累计概率分布	59	6.1 统计不确定性	91
4.2.5 威布尔分布的参数估计	60	6.1.1 正态分布函数特性	91
4.2.6 威布尔分布的决定系数	62	6.1.2 不确定度计算	92
4.2.7 瑞利分布	64	6.1.3 超越概率	93
4.2.8 风玫瑰图	64	6.1.4 平均风速敏感度分析	95
4.3 风功率密度与风能转化	65	6.2 损耗折减及其不确定度	96
4.3.1 风功率密度计算	65	6.2.1 尾流折减	96
4.3.2 贝兹极限	66	6.2.2 可利用率折减	97
4.3.3 风功率转化系数	68	6.2.3 功率曲线折减	98
4.3.4 风力发电机组的功率曲线	69	6.2.4 电气损耗	98
		6.2.5 环境损耗	99
第5章 风数据长期修正	71	6.2.6 缩减损耗	99
5.1 风数据相关性分析	71	6.3 偏差修正及其不确定度	99
5.1.1 风数据相关性的影响因素	71	6.3.1 平均风速长期修正	99
5.1.2 随机变量的相关性	72	6.3.2 复杂风场 RIX 修正	100
5.1.3 平均时间周期影响	73	6.3.3 超大型风场的模型问题	100
5.1.4 偏度与峰度	75	6.3.4 功率曲线修正	101
5.2 风数据回归分析及预测	75	6.4 风数据的不确定度	102
5.2.1 回归分析方法	76	6.4.1 风数据质量	102
5.2.2 风数据有效性	76	6.4.2 威布尔分布决定系数	102
5.2.3 简单线性模型	77	6.4.3 风速年度波动	102
5.2.4 方差比例模型	79	6.4.4 未来风气候趋势	103
5.2.5 二维线性回归模型	79	6.5 风流模型的不确定度	103
5.2.6 威布尔参数缩放模型	80	6.5.1 垂直外推	103
5.2.7 多项式模型	80	6.5.2 水平外推	104
5.2.8 莫蒂默模型	81	6.5.3 地表形态相似度	104
5.2.9 人工神经网络模型	81	6.5.4 森林	105
5.2.10 WindPRO 矩阵模型	82	6.5.5 风流模型不确定度小结	105
5.3 预测的不确定性分析	85	6.6 不确定度分析案例	106
5.3.1 同期风数据长度	85		

第7章 极端风况	107	第9章 大气概论与空气密度	142
7.1 Gumbel 极值分布	107	9.1 干洁大气	142
7.2 极大风速估计	108	9.1.1 干洁大气的成分	142
7.2.1 独立大风事件	108	9.1.2 干洁大气状态方程	143
7.2.2 经典 Gumbel 极值分布法	110	9.2 湿润大气	143
7.2.3 柏拉图极值分布法	112	9.2.1 水汽压	144
7.3 极端风况	113	9.2.2 相对湿度与绝对湿度	145
7.3.1 极大阵风	113	9.2.3 湿润空气的状态方程	145
7.3.2 极端风向变化	114	9.3 大气压力	145
7.3.3 极端风切变	114	9.3.1 位势高度与几何高度	146
7.3.4 极端湍流	116	9.3.2 大气静力学平衡	147
7.4 台风	118	9.3.3 温度随高度的变化	147
第8章 风数据的测量	120	9.3.4 标准大气	148
8.1 杯式风速仪	120	9.3.5 气压随时间的变化	149
8.1.1 杯式风速仪的动力平衡	120	9.4 风场空气密度计算	150
8.1.2 杯式风速仪的测量值	121	9.4.1 干燥空气的密度	150
8.1.3 杯式风速仪的标定	122	9.4.2 湿润空气的密度	150
8.1.4 杯式风速仪的动态特性	122	9.4.3 空气密度随高度变化	151
8.1.5 杯式风速仪的选择	125	9.4.4 空气密度随湿度和压力的 变化	152
8.2 测风塔的安装规范	127	9.4.5 温度范围计算	152
8.2.1 实心圆柱形塔	128	第10章 边界层气象	154
8.2.2 空心三角架塔	128	10.1 大气热力结构分层	154
8.2.3 支杆与附件	129	10.1.1 对流层	154
8.2.4 切变气流	130	10.1.2 平流层	155
8.2.5 风向仪的安装	130	10.1.3 中间层	156
8.2.6 测风塔安装推荐标准	131	10.1.4 热层	156
8.2.7 测风塔安装的气候因素	131	10.2 大气边界层	157
8.2.8 风数据的不确定性评估	132	10.2.1 边界层的基本特征	157
8.3 测风塔的管理与维护	132	10.2.2 边界层内的风和气流	158
8.3.1 测风塔安装报告	133	10.2.3 大气边界层的厚度和结构	159
8.3.2 测风塔验收	135	10.2.4 变量的时间和空间尺度	160
8.3.3 测风塔监控与维护	136	10.2.5 风的平均值与湍流部分	161
8.4 其他种类测风仪器介绍	137	10.3 大气湍流	162
8.4.1 螺旋推进式测风仪	137	10.3.1 湍流的基本特征	162
8.4.2 超声波测风仪	138	10.3.2 湍流的产生机制及物理 过程	163
8.4.3 声雷达测风仪	139		
8.4.4 激光雷达测风仪	140		

10.3.3 泰勒假设	164	12.2 视觉污染	202
10.3.4 湍流动能	165	12.2.1 光影闪变现象	202
10.3.5 湍流通量与雷诺平均	166	12.2.2 光影闪变影响评估	203
10.4 大气边界层稳定度	167	12.2.3 风景美学	203
10.4.1 大气稳定度特征	167	12.3 噪声污染	204
10.4.2 垂直风切变	169	12.3.1 风力发电机的噪声曲线	204
第 11 章 大气环流及天气系统	172	12.3.2 声压级计算	205
11.1 基本大气环流	172	12.3.3 声强级的合成	207
11.1.1 压力梯度、力和风	172	12.4 其他环境与健康影响	208
11.1.2 地转风	174	12.4.1 公共健康与安全	208
11.1.3 地球能量平衡	175	12.4.2 无线通信	209
11.1.4 三圈环流模型	176	12.4.3 固体及危险废弃物	209
11.1.5 极锋与斜压不稳定	177	12.4.4 空气质量及气候影响	209
11.2 天气尺度天气系统	178	第 13 章 风力发电机组的功率性能	
11.2.1 气旋与反气旋	179	测试	211
11.2.2 天气前锋	180	13.1 确定测试扇区	211
11.2.3 热带风暴	180	13.1.1 测风塔的位置	211
11.3 中尺度天气系统	181	13.1.2 测量的扇区	212
11.3.1 中尺度定义	181	13.2 风电场校准及其不确定性	214
11.3.2 地形影响	182	13.2.1 不需要校准的简单地形	214
11.3.3 对流和雷暴	186	13.2.2 用两个测风塔校准风电场	215
11.3.4 海陆风	187	13.2.3 用机舱风速仪校准风电场	216
11.3.5 坡风和谷风	189	13.2.4 风电场校准参数的验证	217
11.3.6 低空急流	190	13.2.5 风电场校准的不确定性	218
11.3.7 下坡风暴	192	13.3 测试数据的采集与处理	219
11.4 数值模拟及天气预报	192	13.3.1 数据采集	219
11.4.1 物理公式	193	13.3.2 数据标准化	220
11.4.2 网格和边界条件	194	13.3.3 测量功率曲线的确定	220
11.4.3 中尺度气象模型的不确 定性	196	13.4 使用机舱风数据测试功率 曲线	221
11.4.4 中尺度气象模型的应用	199	13.4.1 机舱风速与自由风速的 关系	221
第 12 章 风电场的环境与健康影响 ..	200	13.4.2 机舱风速生成的功率曲线	222
12.1 生物影响	200	13.5 影响功率性能的其他因素	223
12.1.1 鸟类和蝙蝠	200	13.5.1 湍流对功率性能的影响	223
12.1.2 陆地生物	202	13.5.2 风切变对功率性能的影响	223
12.1.3 植被	202	13.5.3 入流角对功率性能的影响	224

第 14 章 风力发电机的载荷	225	14.3.4 等效载荷	232
14.1 载荷工况	225	14.3.5 载荷计算的不确定性	232
14.1.1 设计情形	225	14.3.6 极端载荷	233
14.1.2 风况条件	225	14.4 风力发电机载荷的术语	
14.1.3 设计载荷工况	226	定义	234
14.2 载荷类型	227	附录	236
14.2.1 惯性和重力载荷	227	附录 A IEC 对风力发电机组的	
14.2.2 空气动力载荷	228	分类标准	236
14.2.3 功能性载荷	229	附录 B 风电场气象及环境	
14.2.4 其他风源载荷	229	参数表	237
14.2.5 非风源载荷	229	附录 C 常用公式表	238
14.3 载荷计算	230	参考文献	239
14.3.1 气动力弹性载荷计算	230		
14.3.2 疲劳载荷与 $S-N$ 曲线	230		
14.3.3 应力区间分布	231		

第 1 章 绪 论

能源的供给无疑是人类 21 世纪面临的最大挑战之一。传统能源日渐枯竭，同时释放大
量污染和温室气体，对人类的生存和发展造成难以估量的威胁。因此近些年，人们越来越对
可再生能源寄予厚望。

为了使风能成为经济的能源，风电行业正在沿着开发更大和更可靠的风力发电机组的方向
发展，风能开发也变得越来越资本密集。风电投资的经济性，即风力发电机组的发电回报，显
然极大地取决于风场的风资源情况，而其中隐含的重要内容是对风资源情况判断的准确性。我
们必须对多年的实际风气候进行准确判断，才能正确决策风场建设的地点，计算发电量和佐证
投资。可以说，风资源评估的水平对一个风电项目的成功与否起到决定性的作用。

1.1 风资源评估学科介绍

从气象学的角度，可以把对风资源的研究称为风能气象学，并发展成了一个独立的学
科。风能气象学可以描述成是应用地球物理流体力学，是气象学与气候学的结合。从广义上
讲，气象学又是大气科学的重要组成部分，它包括大气热力学和化学、大气运动的定性和定
量描述和大气与地球表面和生物圈的互动。气候学是研究气候及其实际应用的科学，侧重于
地球上某一特定地理位置的气候条件，显然也与地理学相关^[4]。

风能气象学是使用气象方法的应用科学，包含三个主要领域：风力发电机组的微观选
址、局地风能资源的评估和风功率的短期预测。

在风能气象学领域，选址的定义是对某一特定风力发电机组，在一个或多个特定地点的平
均发电量进行估算。除了风资源外，完整的选址过程包括对电网可用性和土地使用情况等诸多
内容的考虑，但这些并非本书所要涵盖的内容。预测未来数小时和几天的风功率给气象学带来
巨大挑战，由于计算机能力的进步和观测站点密度的增加（尤其是气象卫星的使用），使这一
切变得可能。但由于问题十分复杂，超出了一般风资源工程师的工作范围，因此风功率预测也
不在本书涉及的范围之内。但是，读者可以从第 10 章和第 11 章得到一定的体会。

风资源评估技术的发展伴随着风力发电机组的商业演化和大型并网风电场的建设。1970
年代初期，科学家和工程师们就开始研究与风力发电相关的气象学和气候学问题，并发表了
大量的文献。很多国家都在这时启动了国家风能项目，其中最著名的大概是由美国西北实验
室完成的美国风能资源图谱，和丹麦里索（Riso）国家实验室完成的丹麦风图谱，两者都发
表于 1980 年。除此之外，多个国家还发行了选址手册，最著名的有美国（1977 年和 1980
年）、加拿大（1984 年）、荷兰（1986 年）和可作为选址手册使用的欧洲风图谱（1989
年）^[4]。我国比较系统的风资源图谱^[2]发表于 2009 年《Renewable and Sustainable Energy
Reviews》杂志上。

20 世纪 80 年代，风力发电技术的发展非常迅猛，建造和测试了大型的风力发电机组，但
是多由于设计缺陷，运行几年后便拆除了。这段时间风电行业积累了大量宝贵的经验，风资源

评估的知识和微观选址的可靠方法变得越发清晰。20 世纪 90 年代，世界风能的利用出现持续稳定的增长，不同品牌的设备之间和需要大量投资的项目之间，都出现激烈的竞争。那么，究竟基于什么对项目进行选址呢？回答这一问题时，风能气象学发挥了越来越重要的作用。

值得一提的是，该学科经过 20 多年的发展，投入了大量的研发力量，提出了很多评估方法，其中有些评估方法都最终被淘汰，而准确和有效的评估方法被广泛采用。进入 21 世纪以来，国外出版了多本相关的书籍，但多以操作手册的形式指导实践。本书则致力于风资源与微观选址的理论剖析，搭建学科体系，为中国的风电事业发展尽一份绵薄之力。

1.2 风气候

1.2.1 全球风气候

全球风资源的分布是非常不均匀的，反映为大尺度的气候差异和由于地形产生的小尺度差异。大气是一个非常复杂的热力引擎，能量由太阳对地表的加热不断供给。

通常通过对长期风数据的分析来应对这种复杂性，但是这种长期数据一般受到局地的小尺度特征影响。因此，在应用这种数据做内推或外推时，如果没有经过充分的物理模型和统计模型对这些影响认真分析，那么风险无疑是巨大的。另外，历史风速数据的质量往往较差，测量高度较低（一般约为 10m），且通常距离风场较远，而风资源对小的风速错误又十分敏感（近似三次方关系）。

最近几年，另一种方法得到了越发普遍的应用：用全球气象模型分析多年的大气测量参数（包括温度、压力、湿度等）的准完整性，从而获得动态的、一致的数据和统计，即所谓的再分析数据。该方法避免了直接应用风数据带来的问题。实际上，多数再分析过程中并不考虑低空的风数据，以避免局地影响的“污染”^[1]。图 1-1 为用 40 年的再分析数据模拟

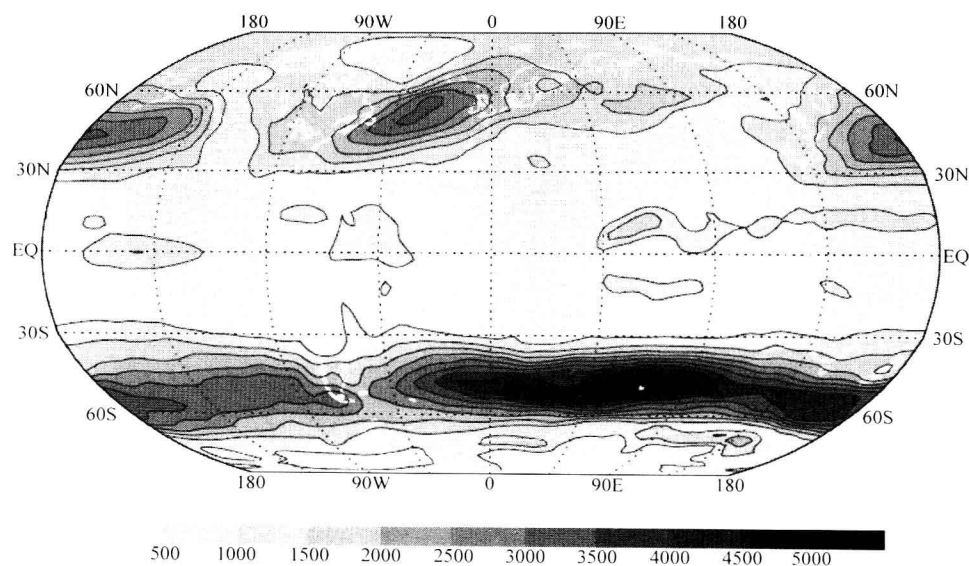


图 1-1 用 40 年的再分析数据模拟的全球 10m 高平均风速分布^[3]

的全球 10m 高平均风速分布。该图较好地展示了与大尺度天气系统相关的长期平均风速。图 1-2 为中国的风能密度分布。

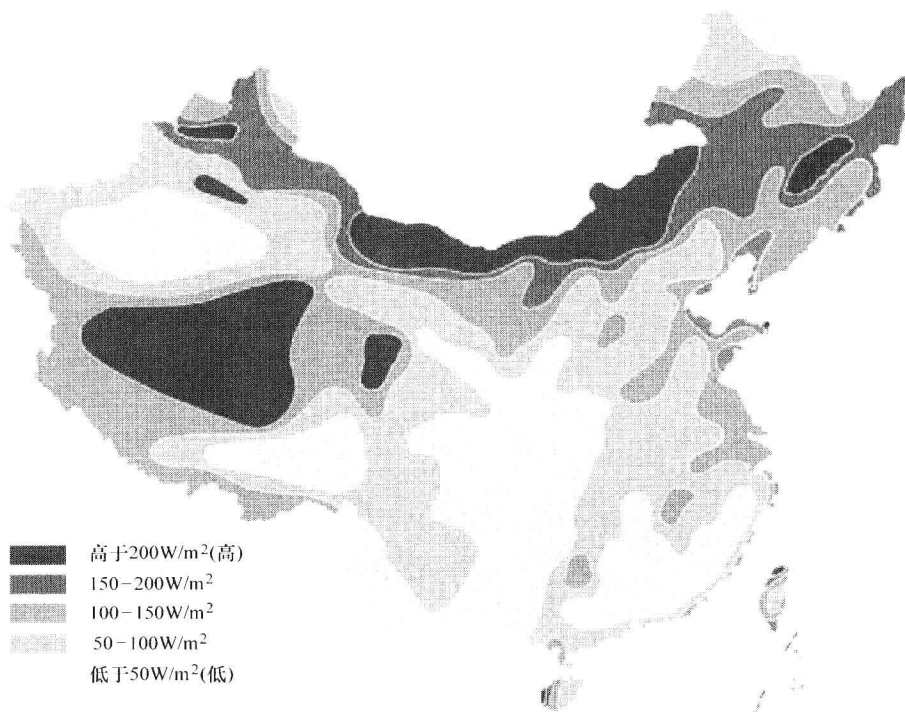


图 1-2 中国的风能密度分布^[2]

为了获得更高的空间分辨率，涵盖对风资源有重大影响的较小尺度现象，目前的常规做法是应用空间分辨率比全球再分析模型更高、但覆盖较小的区域的中尺度大气模型。

1.2.2 中尺度风气候

大尺度（天气尺度）分析模型不能捕捉与风资源相关的全部天气现象。中尺度表征了从大尺度到微观尺度或局地尺度之间缺失的尺度，涵盖特殊气象现象，如海陆风、热带风暴、对流风暴和龙卷风等。同时，中尺度模型还常用来描述地理特征（如山、山脉和地表特征）对大尺度风流的影响，因为大尺度模型没有对这些特征进行解析。因为大尺度和全球模型变得越来越复杂，分辨率变得越来越高，所以大尺度和中尺度的界限并不清晰且不断变化。

中尺度气象模型已经普遍地应用到了风资源评估工作中，本书将在“第 10 章边界层气象”中，对不同尺度的大气物理和气象现象过程进行描述。

1.2.3 局地风气候

局地风气候是反映从大尺度气候系统到中尺度现象，再到最小尺度特征的影响的风气候。从气象学的角度，更多的是代表微观尺度的气候特征，这也是微观选址术语的由来。

各种影响风的地形地貌特征一起,组成了局地的地理特征。在地表附近,中小尺度的山体,与典型的植被和障碍物密度的变化,对风速的影响程度是差不多的^[4]。图1-3展示了,在距地面10m高处,从丹麦海岸线向内陆推进的平均风速的波动情况(有一定程度夸张)。在微观选址时,应该对图中各种局地的微观地形地貌特征予以充分的考虑。基本上,在局地建立测风塔可以实现对测风点的风资源评估。若考虑各种局地效益,也可以对不同高度和测量点附近不同地点的风资源进行有效的评估。

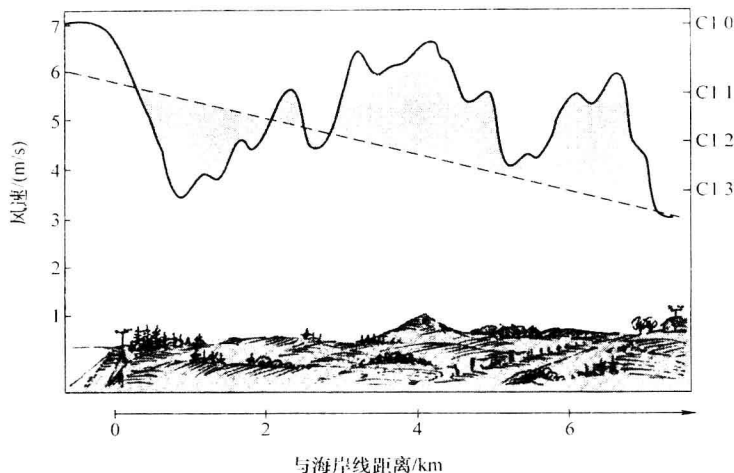


图1-3 由于局地地形影响,10m 高平均风速的波动情况^[4]

在世界大多数地方,风气候本质上取决于大尺度的天气系统,如中纬度西风、信风带和季风等。局地风气候是大尺度系统和局地效应的叠加,其中大尺度系统决定了风资源的总体走势(长期的)。因此,对大尺度系统的研究通常需要多年的长期测风数据,而局地风数据的测量可以较短(一年)。风数据的长期相关性分析,在很大程度上,就是研究局地效应和大尺度系统的相关性,本书第5章将专门对此进行阐述。

必须考虑和评估的最重要的局地效应包括:障碍物遮挡效应(如果测量高度较低,则变得尤为重要)、地形效应、地表粗糙度条件和地表热效应(大气稳定度)^[1]。本书将在第2章和第3章对这些效应,从物理理论到工程应用做较为深入的阐述。

风资源是一个统计量,对风资源的评估也是从风速和风向数据的统计开始。绝大多数情况下,都需要就地建设测风塔,以降低风资源评估和风力发电机组载荷评估的风险。测风塔的数量由风电场的复杂程度,根据具体情况而定。测风塔的高度一般尽量接近风力发电机组的轮毂高度,但需同时在多个高度测风,以便更好地评估局地效应对风的影响。由于测风塔的建设难度较大,近些年,基于地面的可测量数百米高度的远程传感器,也得到了越来越广泛的应用。

本书将在第8章中对风数据的测量进行详细的阐述,并在第2章中对测风塔的代表性问题进行说明。

1.3 风资源的不确定性

风资源问题之所以复杂,在很大程度上就是因为其不确定性,因此这也是研究风资源问

题的关键切入点。统计学本身的特性也决定了作为一种随机变量的统计量，风资源的评估必然存在各种不确定性。

风速的波动是十分明显的，如图 1-4 所示。每月的平均风速波动十分剧烈，每年的平均风速相差也很大，就算是每 10 年平均仍不能得到稳定的平均风速值。风力发电机组的发电量大概与风速的三次方成正比，那么发电量的波动就更加敏感和剧烈了。

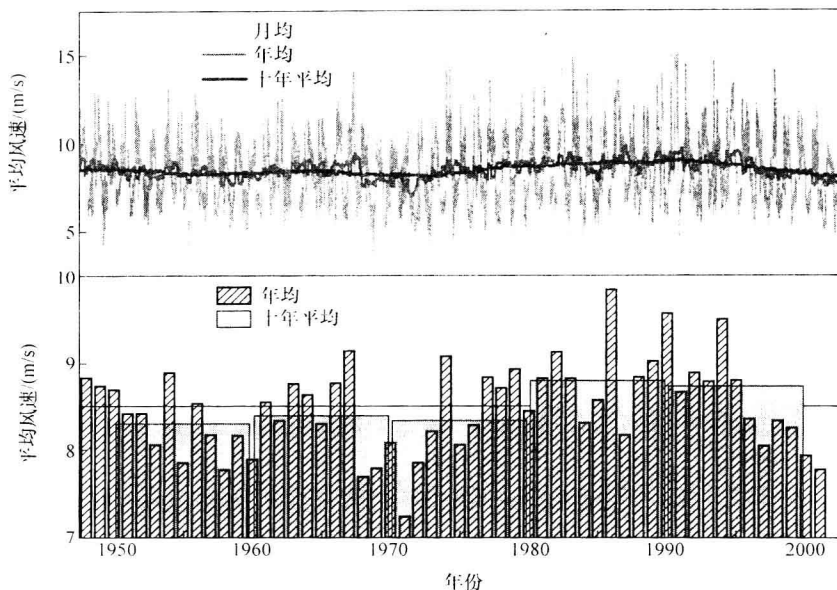


图 1-4 爱尔兰一点的再分析风数据，表明风速的波动情况^[4]

通常风电项目仅有 1 年的实测风数据，而且仅能代表历史。如何能够准确评估未来 20 年的平均风速，并预测风电场整个生命周期的发电量和收益呢？图 1-4 中，1971 年的风速仅为 7.2m/s 左右，而 1986 年竟然达到了将近 9.5m/s。

实际上，风气候的年度消长不仅使风电场投资收益的评估过程充满风险，还可能导致风力发电机组的机型错配。若根据 1971 年的风数据，该风电场为 IEC Ⅲ类风电场，而 1986 年则指向了 IEC I 类，而风电场长期实际是 IEC II 类。若选用 IEC I 的机型，则不能发挥最大的发电效益；若选用 IEC Ⅲ类的机型，则难以承受载荷，造成机组寿命缩短，故障频发。

因此，风数据的长期修正就变得异常重要，这是本书第 5 章所要讨论的内容，在此基础上，风电场发电量预测的不确定性分析则放在了第 6 章中单独论述。

第2章 风资源与微观选址工程（上）

风资源评估工程范围从对某一大块区域进行风能的总体评估到某一具体风力发电机组的年发电量的评估。前者为区域评估，后者为微观选址。微观选址所需要的信息要比区域评估多得多，但是两者都是应用地形分析和区域风气候分析的基本概念。

为了计算地形和地貌对风的影响，需要我们对其特征进行系统的描述。地形和地貌对风的影响主要来自于三个方面：地形、障碍物和粗糙度，本章将分别对此予以阐述。

风资源评估的工程应用往往是对真实情况的简化，使风资源工程师们在经过短期训练后就可以开展大量工作。但对于高级风资源工程师来说，就要对各种风资源简化模型背后的深层次理论和局限性了如指掌，在实际工作中做到心中有数，能够发现问题和风险。

由于 WAsP 模型是基于边界层气象学的最经典的风资源模型，对风资源工程应用起到关键的指导作用，因此下章将以 WAsP 模型为基础，做重点论述。

2.1 地表粗糙度

2.1.1 粗糙度长度

地表粗糙度由地表粗糙元的尺寸和分布决定。对于陆地表面，粗糙元主要有植被、建筑区和土壤表面。关于粗糙度的概念在本书的第 10 章中还有进一步的讲解。地表粗糙度是作为大气下边界出现的几何长度，是对数风廓线中平均风速等于零的高度。中性稳定大气近地层的风廓线为

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (2-1)$$

式中 z_0 ——地表粗糙长度，单位为 m；

u_* ——具有速度量纲的非负常数，称为摩擦速度。

u_* 的二次方具有湍流切应力的性质。根据粗糙度的概念，当平均风速 $u(z)$ 为零时的高度就是 z_0 。根据式 (2-1) 可知，只要测量两个高度的平均风速，就可以很容易地推导出 u_* 和 z_0 ，也可以根据对数函数的外推，估算平均风速为零时的高度。

虽然粗糙长度不等于每个地表粗糙元的高度，但是这些粗糙元与粗糙长度却存在着——对应的关系。换句话说，一旦确定了某一特定表面的粗糙长度，它将不随风速、大气稳定性和应力而改变。当地表粗糙元改变时，例如植被高度和覆盖率的变化、竖起篱笆、建造房屋和森林砍伐等，粗糙长度才可能变化。粗糙元的高度越高，粗糙长度越大，但是粗糙长度总是小于粗糙元的物理高度。

Lettau 于 1969 年提出了粗糙元与粗糙长度的简单经验关系式^[5]。可以用高度 h 、迎风面的截面积 S 描述粗糙元的形态。如果多个粗糙元均匀地分布在一个区域范围内，那么平均每个粗糙元所占的面积为 A （总面积/粗糙元个数），则有

$$z_0 = 0.5 \frac{hS}{A} \quad (2-2)$$

当粗糙元分布均匀、彼此之间缝隙较大、大小和形状类似时,根据式(2-2)计算的结果是可以接受的。计算粗糙元迎风面的截面积 S 时,应该考虑孔隙率,如树林和树丛等。

【例2-1】一块均匀分散着小树丛的陆地,面积为 5000m^2 。单个树丛的平均高度约为 50cm ,平均宽度约为 1m ,这块地上大约有 500 个这样的小树丛。由于盛夏季节,树叶饱满,孔隙率取 20% ,求这块地的粗糙长度?

每个树丛作为一个粗糙元,其迎风面的截面积为

$$S = 1 \times 0.5 \times (1 - 20\%) \text{m}^2 = 0.4\text{m}^2$$

平均每个粗糙元所占的面积为

$$A = 5000/500\text{m}^2 = 10\text{m}^2$$

于是,粗糙长度为

$$z_0 = 0.5 \frac{hS}{A} = 0.5 \times \frac{0.5 \times 0.4}{10} \text{m} = 0.01\text{m}$$

实际工作中,经常会遇到多种大小和形状不同的粗糙元混合的情形。为了计算这种情形下的粗糙长度,Kondo和Yamazawa于1986年提出了类似的经验关系式^[6]:

$$z_0 = \frac{0.25}{S_T} \sum_{i=1}^n h_i S_i \quad (2-3)$$

式中 S_i ——第 i 个粗糙元的迎风面截面积;

h_i ——第 i 个粗糙元的高度;

S_T —— n 个粗糙元所占的总面积。

水的表面情况比较特殊,因为水波是动态的,水波的振幅与风速有关。当不考虑粘性效应和水的表面张力时,Charnock于1955年提出了估算水面粗糙度的经验公式^[7]:

$$z_0 = b \frac{u_*^2}{g} \quad (2-4)$$

式中 b ——常数,约等于 0.014 ;

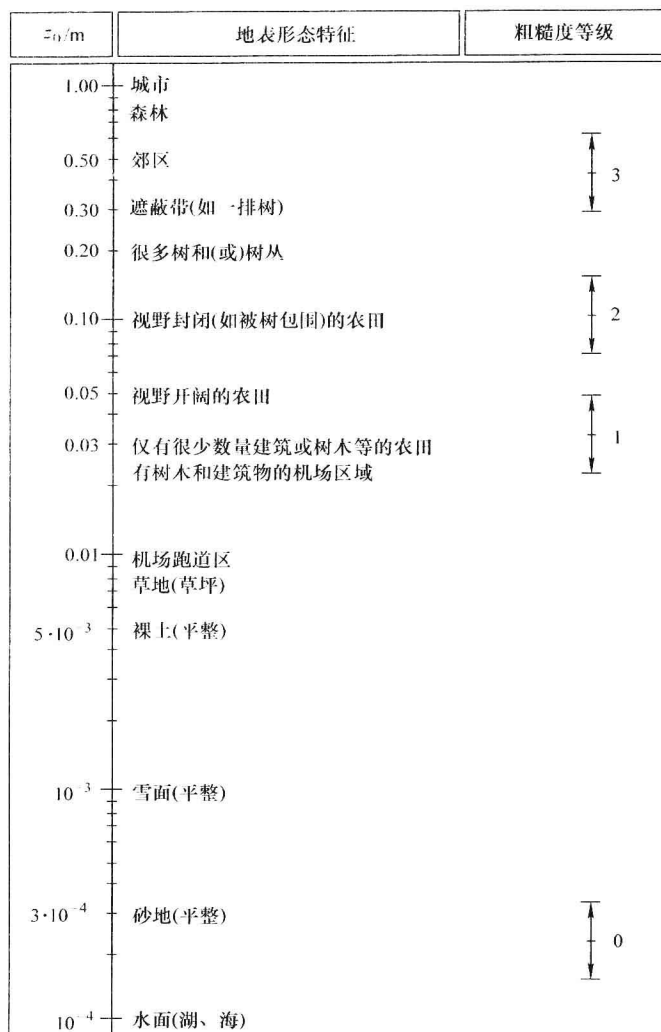
g ——重力加速度;

u_* ——摩擦速度。

对海洋表面的粗糙长度讨论,应该区分光滑流和粗糙流。实验表明,在风速小的开阔洋面上,层流厚度可覆盖水面涟漪所构成的粗糙元,故认为是光滑流,此时粗糙长度随着风速的增大而减小。而当风速进一步增大后,洋面等大水体表面上粗糙长度的取值将与波浪的起伏状况有关,这时的流动称为粗糙流。式(2-4)就是针对这种粗糙流,并假设海洋波浪属于重力波,波浪的高低与近地层风切变强度有关,表明开阔水面上粗糙长度随风速增大而很快增大。虽然水面的粗糙长度并不固定,但是因为非常小,一般的风资源软件模型中把它简化成固定值(如 0.0002m),但是在模拟开阔水面上的湍流时,通常不能这样简化。

在风资源和微观选址工程应用中,一般不会直接计算粗糙长度。上面的计算过程意在使读者更好地了解粗糙长度的影响因素和物理特征。实际工作中,通常通过经验,根据地表粗糙元的特征进行估计。

根据长时间的各地观测结果,归纳得出的各种地表粗糙长度 z_0 的典型值如图2-1所示^[89,4]。

图 2-1 各种典型地表形态的粗糙长度^[4]

地表粗糙长度受季节影响非常大,如北方冬天冰雪覆盖,粗糙长度为 0.001m,而夏天的农田则被庄稼覆盖,粗糙长度为 0.05m,是冬天的 50 倍!因此,在风资源与微观选址工作中,通常只能选用年均粗糙长度。准确评估年均粗糙长度无疑是困难的,理论上可以根据不同季节的平均风速进行加权平均,但实际操作仍然极其困难。

最简单的方法,也是必要的步骤,是在初步设置好粗糙长度后,用同一测风塔不同测风高度的平均风速相互推算,看推算值与实测值是否一致(或非常接近),如果不一致,则需要重新调整粗糙长度的设置,直到得到满意的结果为止。

这里提到的年平均概念贯穿风资源评估工作的始终,如年平均大气稳定度、年平均空气密度、年平均风速等。因为气象问题十分复杂,时刻都在变,随机性很大,以目前的计算水平,不可能进行长期连续的模拟计算,所以这种简化是绝对必要的。

应该注意的是,应该把粗糙长度当作气象参数对待,而计算风力发电机组的发电量也应