



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

# 风资源评估： 风电项目开发实用导则

Wind Resource Assessment:  
A Practical Guide to Developing a Wind Project

(美) Michael C. Brower 等著

刘长浥 张菲 王晓蓉 译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





## 本书特色

### 国际可再生能源专家组编撰 风资源评估实用权威性指南

编辑及首席作者Michael C. Brower是AWS Truepower, LLC的技术总监。他领导全公司的产品开发及确保质量和标准。他是一位物理学家和风电领域的杰出专家。他领导了世界各地很多企业规模风电项目的评估工作。他在风流场建模及短期风电预测方面的贡献很有名气。他与他的合著者是一个气象学、工程学和建模领域的专家组，他们共同评估了超过60000MW风电容量。

本书内容是综合性的，包含了从风的基础知识到前沿研究课题的重要信息，并给出了有价值的参考文献及讨论题。它是为国际读者设计的，是一部对提升全行业风资源评估统一标准至关重要的参考资料。





国际电气工程先进技术译丛

# 风资源评估：风电项目开发实用导则

Wind Resource Assessment: A Practical Guide to  
Developing a Wind Project

(美) Michael C. Brower 等著  
刘长浥 张菲 王晓蓉 译



机械工业出版社



本书向读者说明了如何实现高标准资源评估, 如何降低与长期资源性能相关的不确定性, 如何使他们的项目资产价值最大化。本书首先介绍高质量风电监测项目的选址、安装和运行, 接着论述数据质量控制和验证, 把测量结果从风速计高度外推至风力机高度, 历史气象条件下短期观测结果的修正, 以及考虑地形和地表条件的风流场建模等方法。

本书主编 Michael C. Brower 是 AWS Truepower, LLC 的技术总监。他领导了世界各地很多企业规模风电项目的评估工作, 在风流场建模及短期风电预测方面的贡献很有名气。他与他的合著者是一个气象学、工程学和建模领域的专家组, 他们共同评估了超过 60000MW 风电容量。

本书可供风电场的设计工程技术人员和管理人员使用, 也可供风电投资商参考。

Copyright © 2012 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project >, ISBN: 978-1-118-02232-0, by Michael C. Brower et al, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01-2012-8708 号

## 图书在版编目 (CIP) 数据

风资源评估: 风电项目开发实用导则/(美) 布劳尔 (Brower, M. C.) 著; 刘长浔, 张菲, 王晓蓉译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 8  
(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Wind resource assessment: a practical guide to developing a wind project

ISBN 978-7-111-47380-0

I. ①风… II. ①布…②刘…③张…④王… III. ①风力能源-资源评估-研究 IV. ①TK81

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 160170 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: 付承桂 责任编辑: 付承桂 张沪光 版式设计: 霍永明

责任校对: 刘雅娜 封面设计: 马精明 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)

2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.25 印张 · 275 千字

0001—2500 册

标准书号: ISBN 978-7-111-47380-0

定价: 59.00 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



# 译者序

可再生能源发电的迅猛发展是近年来电力产业最令人瞩目的现象之一。其中风力发电的增长又是最快的。到 2012 年底，全世界的累积风电装机容量已达到约 282.5GW，同比增长约 19%<sup>⊖</sup>，增速远远超过其他发电形式。

风资源评估是开发风电项目的首要且关键的一步。风资源评估是风电开发商和咨询机构估计一个风电场能发出多少电量的过程。工程开发的这一关键阶段发生错误意味着它的投资商会遭受惨重的经济损失。这种错误的最主要后果是工程完成后，风电场的实际发电量远低于预期。风电产业发展的早期，这类错误屡见不鲜。但通过在实践中学习，不断修正错误，风电产业已在发展过程中成熟。如今，这一试验期很大程度上已经过去，风电产业已经总结出了一系列能对预期发电量充满信心和令人信服的实践和标准。本书就是风资源评估领域得到验证的实践和标准的总结，也可以作为这一领域的权威性实用指南（至少在未来相当一段时期内）。

本书是该领域一个专家组（共 13 人）的合作成果。撰写本书时，他们都是总部位于美国纽约州阿尔巴尼（Albany）的 AWS Truepower 公司的员工。这是一个可再生能源咨询公司。各位作者分别撰写不同章节，然后由编辑 Michael C. Brower 组合成连贯的整体。

全书共 16 章，分为“风况监测”和“数据分析和资源评估”两篇。各章的主要内容见第 1.4 节“本书的宗旨和结构”的介绍，此处不再赘述。

本书的适用读者群是风力发电方面的研究人员、工程技术人员和决策人员，也可用作有关专业的大学生、研究生的教学参考资料。

本书的译校人员都是中国电力科学研究院新能源研究所的科研人员，具体分工为（按工作量排序）：刘长浥译辅文、第 1~5 章，并负责全书校对及统稿；张菲译第 12~16 章；王晓蓉译第 6~11 章。限于译者的英语和专业水平，本书译文难免存在缺点和错误，欢迎读者批评指正。

译者  
2014 年 4 月

---

⊖ 据 GWEC 《Global Wind 2012 Report》。



# 前言

在开始了解风电时，我还是一个刚从研究生院毕业的年轻物理学工作者。那时（20 世纪 90 年代）风电产业还处于它的襁褓期。虽然安装的风电机组台数成千上万，但它们绝大部分都是小机组，很容易发生故障，而且加在一起发出的电量在世界电力需求中所占的比例也微不足道。

现在我们取得了多大的进步啊！如今，企业规模的风电机组有着大型油轮一半长度那么高的巨大结构。它们高踞于地面景观之上，每台的发电功率高达几兆瓦，运行起来比汽车还可靠和安静。整个产业也飞速发展。到 2010 年底，风电已经占世界电力装机容量的近 4%，而且很可能在下一个十年结束时超过核电和水电装机容量（[http://www.gwec.net/fileadmin/images/Publications/GWEC\\_annual\\_market\\_update\\_2010\\_-\\_edition\\_April\\_2011.pdf](http://www.gwec.net/fileadmin/images/Publications/GWEC_annual_market_update_2010_-_edition_April_2011.pdf)）。

每个产业在它成熟时都需要标准。这些标准可以保证该产业的产品性能与广告宣传一致，帮助吸引它繁荣昌盛所需的用户和投资商。这一点对风资源评估尤其正确。风资源评估是风电开发商和咨询机构估计一个风电场能发出多少电量的过程。工程开发的这一关键阶段发生错误意味着它的金融支持者的惨重损失，也会让风电产业颜面扫地。

过去毫无疑问曾发生过大量错误。随着风电产业从实践中学习到哪些正确、哪些错误，资源评估方法，包括从风速计标定和安装标准，到地形和植被影响建模的每件事情，都在不断进化。它的原因在于很多工程的性能没能达到预期。

幸运的是，这一试验期很大程度上已经过去，风电产业已经总结出了一系列能使人们对实现预期发电量充满信心的合理一贯的实践和标准。把这些知识传授给风资源评估从业人员就是本书的主要目的。

确实，并非风资源评估的每个方面都已经尽善尽美。很多议题一直都存在争议，如遥感和风流场数值建模。而且随着风电机组单机容量和风电工程规模的增大，新的挑战也在不断涌现，人们也在不断引进风电测量和建模更先进的方法。尽管本书不能肯定能解决这些争议或预见每一个创新，但我们希望读者能获得足够的信息和知识，对应该使用的工具和方法作出正确决定。

本书是风资源评估领域的一个专家组的合作成果。撰写本书时，他们都是 AWS Truepower 公司的员工。这是一个总部位于美国纽约州阿尔巴尼（Albany）的可再生能源咨询公司。各位作者分别撰写不同章节，然后编辑成连贯的整体。我们希望，它能在未来几年里作为这一产业的权威性实用指南。

迈克尔 C. 布劳尔（Michael C. Brower）  
美国 纽约州 阿尔巴尼

# 致 谢

我们感谢纽约州能源研发局 (New York State Energy Research and Development Authority, NYSERDA) 支持撰写风资源评估手册 (《Wind Resource Assessment Handbook》, Albany, New York, USA; NYSERDA; 2010)。本书的一部分内容就是根据这本书编写的。我们还衷心感谢以下各位审阅者对手稿提出了有益的意见和修改: Dennis L. Elliott、Matthew Hendrickson、Ian Locker、Kathleen E. Moore、Ron Nierenberg、Andrew Oliver、Gordon Randall、Marc Schwarz 和 Richard L. Simon。虽然他们付出了辛勤的劳动, 但任何错误和疏漏仍然都是作者的独家责任。我们还感谢和高度赞赏 AWS Truepower 下列员工在准备手稿时给予的帮助: Alicia Jacobs、Alison Shang 和 Amber Trendell。

**Michael C. Brower (主编)**

**Bruce H. Bailey**

**Philippe Beaucage**

**Daniel W. Bernadett**

**James Doane**

**Matthew J. Eberhard**

**Kurt V. Elsholz**

**Matthew V. Filippelli**

**Erik Hale**

**Michael J. Markus**

**Dan Ryan**

**Mark A. Taylor**

**Jeremy C. Tensen**



# 目 录

译者序

前言

致谢

第1章 引言	1
1.1 风从哪里来?	1
1.2 风的关键特性	3
1.2.1 时间维度	4
1.2.2 空间维度	4
1.2.3 风资源的其他特性	5
1.3 风电场	5
1.4 本书的宗旨和结构	7
1.5 讨论题	9
深入阅读建议	9

## 第一篇 风 况 监 测

第2章 风资源评估活动概述	13
2.1 场址确认	13
2.2 风资源监测	14
2.2.1 风况监测活动设计	14
2.2.2 测量计划	15
2.2.3 监测策略	15
2.2.4 质量保证计划	16
2.3 风资源分析	17
2.3.1 数据验证	17
2.3.2 风资源观测结果特征描述	17
2.3.3 轮毂高度风资源估计	17
2.3.4 气候修正	17
2.3.5 风流场建模	17
2.3.6 风资源评估的不确定性	17

2.3.7 工程设计和发电量	18
深入阅读建议	18
<b>第3章 风电工程选址</b>	<b>19</b>
3.1 场址选择	19
3.2 区域风资源信息	20
3.2.1 风资源地图	21
3.2.2 风况测量	21
3.3 现场勘察	24
3.4 测风塔定位	25
3.4.1 专用测风塔	25
3.4.2 已有多功能高塔	26
3.5 风况监测许可	27
3.6 租地协议	27
3.7 讨论题	28
深入阅读建议	29
<b>第4章 监测站仪表及测量</b>	<b>30</b>
4.1 基本测量	30
4.1.1 水平风速	30
4.1.2 风向	34
4.1.3 空气温度	35
4.2 补充测量	35
4.2.1 垂直风速	36
4.2.2 加热风速计	37
4.2.3 温差	37
4.2.4 大气压力	37
4.2.5 相对湿度	38
4.2.6 阳光总辐射	38
4.3 记录参数和采样间隔	39
4.3.1 平均值	39
4.3.2 标准偏差	39
4.3.3 最大值和最小值	39
4.4 数据记录器	40
4.5 数据存储设备	41
4.5.1 数据处理和存储	41

4.5.2 存储设备	41
4.6 数据传输设备	42
4.6.1 手工数据传输	42
4.6.2 远程数据传输	42
4.7 电源	43
4.7.1 家用蓄电池	43
4.7.2 太阳能蓄电池系统	43
4.7.3 交流电源	43
4.7.4 其他电源	44
4.8 测风塔和传感器支持硬件	44
4.8.1 测风塔	44
4.8.2 传感器支持硬件	44
4.9 连线	45
4.10 测量系统的准确度和可靠性	45
4.10.1 准确度	45
4.10.2 可靠性	46
4.11 讨论题	46
参考文献	47
深入阅读建议	47
<b>第5章 监测站安装</b>	<b>48</b>
5.1 设备采购	48
5.2 设备验收试验和现场准备	48
5.2.1 验收试验	48
5.2.2 现场准备步骤	49
5.3 安装队伍	50
5.4 安全问题	50
5.5 确定真北	51
5.6 测风塔安装	52
5.6.1 新斜拉塔	52
5.6.2 新桁架塔	54
5.6.3 已有铁塔	55
5.7 传感器和设备安装	55
5.7.1 风速计	55
5.7.2 风向标	60
5.7.3 温度和其他传感器	60

5.7.4 数据记录器和相关硬件	60
5.7.5 传感器接头和连线	61
5.7.6 接地和防雷保护	61
5.8 现场调试	64
5.9 文件材料	64
5.10 成本和人工估计	65
5.11 讨论题	66
深入阅读建议	67
<b>第6章 监测站运行和维护</b>	<b>69</b>
6.1 站址巡查	69
6.2 运行维护程序	69
6.2.1 工程描述和运行维护方针	70
6.2.2 系统组成描述	70
6.2.3 设备例行维护指南	70
6.2.4 站址巡查流程	71
6.3 文件记录	72
6.4 备件清单	73
6.5 讨论题	74
<b>第7章 数据采集和处理</b>	<b>78</b>
7.1 原始数据存储	78
7.1.1 数据存储类型	78
7.1.2 数据存储容量	79
7.2 数据提取	79
7.3 数据提取频率	79
7.4 数据保护和存储	80
7.4.1 数据记录器	80
7.4.2 计算机硬件	80
7.4.3 数据处理过程	80
7.5 文档编制	80
7.6 讨论题	81
<b>第8章 陆基遥感系统</b>	<b>83</b>
8.1 声雷达 (Sodar)	83
8.2 光雷达 (Lidar)	85



8.3	遥感监测的设计和选址	86
8.4	数据采集和处理	87
8.5	与常规测风方法的比较	88
8.5.1	Sodar 的声束倾斜	88
8.5.2	矢量风速到标量风速的转换	88
8.5.3	Lidar 的环境条件	88
8.5.4	湍流强度和风速计超速	89
8.5.5	气流倾角与复杂地形	89
8.5.6	体积平均	89
8.5.7	与参考测风塔的距离	89
8.6	讨论题	90
	深入阅读建议	90

第二篇 数据分析和资源评估

第9章	数据验证	93
9.1	数据转换	93
9.2	数据验证	94
9.2.1	验证程序	95
9.2.2	可疑数据处理	98
9.3	后验证调节	99
9.3.1	杆塔影响	99
9.3.2	湍流	100
9.3.3	斜流	101
9.4	数据替换和平均	101
9.4.1	数据替换	101
9.4.2	数据平均	101
9.5	讨论题	102
	参考文献	103
	深入阅读建议	103
第10章	风资源观测结果特性描述	104
10.1	风资源观测结果归纳	104
10.1.1	数据恢复	104
10.1.2	平均风速和年平均风速	105
10.1.3	风切变	107

10.1.4	湍流强度	108
10.1.5	风功率密度	109
10.1.6	空气密度	109
10.1.7	风速频率分布和威布尔分布参数	110
10.1.8	风玫瑰图	111
10.2	讨论题	112
	深入阅读建议	113
<b>第 11 章</b>	<b>轮毂高度的风资源评估</b>	<b>114</b>
11.1	风速	114
11.1.1	直接测量	115
11.1.2	偏移高度	116
11.1.3	收敛高度	117
11.1.4	对数法	118
11.2	时变风速和风速分布	119
11.3	其他参数	121
11.3.1	风向	121
11.3.2	空气密度	121
11.3.3	湍流强度	121
11.4	讨论题	121
	参考文献	123
	深入阅读建议	123
<b>第 12 章</b>	<b>气候修正过程</b>	<b>124</b>
12.1	风气候稳定吗?	125
12.1.1	历史证据	125
12.1.2	未来气候变化展望	126
12.1.3	可能影响当地风气候的其他因素	126
12.2	准确 MCP 的要求	127
12.2.1	相关性	127
12.2.2	均衡的风速观测	129
12.3	参考数据源	132
12.3.1	安装了风资源评估仪器的高塔	132
12.3.2	地面气象站	132
12.3.3	探空观测站	133
12.3.4	建模数据集	134

**XII 风资源评估：风电项目开发实用导则**

12.4 目标-参考点的相关性 .....	135
12.4.1 数据分区 .....	136
12.4.2 拟合方法 .....	136
12.4.3 预测风速频率分布 .....	137
12.4.4 风向和其他参数 .....	138
12.4.5 小结 .....	138
12.5 讨论题 .....	138
参考文献 .....	140
深入阅读建议 .....	141
<b>第13章 风流场建模 .....</b>	<b>142</b>
13.1 风流场模型的种类 .....	142
13.1.1 概念模型 .....	142
13.1.2 试验模型 .....	143
13.1.3 统计模型 .....	143
13.1.4 风流场数值模型 .....	145
13.2 数值风流场模型的应用 .....	151
13.2.1 地形数据 .....	151
13.2.2 地表覆被数据 .....	151
13.2.3 测风塔数量和位置 .....	152
13.2.4 对多个测风塔的调整 .....	152
13.3 讨论题 .....	152
参考文献 .....	154
深入阅读建议 .....	155
<b>第14章 海上风资源评估 .....</b>	<b>156</b>
14.1 海上风环境的性质 .....	157
14.2 风资源监测系统 .....	161
14.2.1 专门建设的测风塔 .....	162
14.2.2 地表遥感系统 .....	164
14.2.3 使用已有的海上建筑 .....	167
14.2.4 浮标气象站 .....	168
14.2.5 数据记录和通信系统 .....	168
14.2.6 电源 .....	169
14.3 海上系统的运行维护 .....	169
14.3.1 监测站巡查 .....	170

14.3.2 运行维护程序	170
14.4 卫星微波传感器	171
14.4.1 传感器类型	171
14.4.2 使用卫星微波传感器进行风资源评估	173
参考文献	175
深入阅读建议	175
<b>第15章 风资源评估中的不确定性</b>	<b>176</b>
15.1 测量的不确定性	176
15.2 历史风资源	177
15.3 未来风资源	178
15.4 风切变	179
15.5 风流场建模的不确定性	180
15.6 组合不确定性	181
15.7 讨论题	184
参考文献	185
深入阅读建议	185
<b>第16章 风电场设计和发电量估算</b>	<b>186</b>
16.1 风电场设计软件	186
16.2 工程设置	187
16.3 风资源数据	189
16.3.1 风资源测量	189
16.3.2 风资源网格建模	190
16.4 选择风力机	192
16.5 风力机布局的设计和优化	194
16.6 总发电量和净发电量	195
16.6.1 尾流效应	196
16.6.2 停机时间	197
16.6.3 电气损耗	197
16.6.4 风力机性能系数	197
16.6.5 环境损耗	197
16.6.6 弃风	197
16.7 专题	198
16.7.1 将测风塔处风资源外推至风力机	198
16.7.2 使用多个测风塔	199



16.7.3 尾流建模.....	200
16.8 讨论题.....	205
参考文献.....	206
深入阅读建议.....	207
附录.....	208
附录 A 风资源评估设备销售商.....	208
附录 B 部分 GIS 数据源.....	210

# 第1章 引言

任何一个发电厂都需要燃料。对于风电场来说，它的“燃料”是风。

风资源评估是估计一个风电场在它的可用寿命期间有多少可用燃料的过程。这一过程是确定这个风电场能发出多少电量，并最终为它的业主挣到多少钱的最重要的一步。因此风电项目要想成功，准确的风资源评估是必不可少的。

测量风速的技术已经存在很多世纪了。风资源评估中最常使用的转杯风速计是19世纪中期开发的，而且从那时起，它的基本设计（三四个转杯装在垂直旋转轴上）至今也没有多少变化。

但准确估计大型风电项目的发电量远不止能在特定时间特定地点测量风速这么简单。它的要求是对风电项目开发地点，在广大的空间和时间尺度上——从数米到数千米，从数秒到数年——确定大气条件特性。这就必须综合使用从简单到复杂，通过成年累月的经验磨砺出来的严谨工艺技术。

这一技术的细节就是本书的主题。但在跳进这一技术的水池之前，还需要了解一点风资源评估知识的背景。风从哪里来？它的关键特性是什么？它如何在风电场中转换为电能？

## 1.1 风从哪里来？

这个问题的最简单回答是空气对地球表面不同部分之间的压力差，即梯度响应产生的运动。空气团总是倾向于向低压区运动，而离开高压区。如果没有干扰，产生的风最终会使压力差平衡并逐渐消失。

空气压力梯度永远不能完全消失的原因在于，它们持续不断地受到地表被阳光不均匀加热的作用。地表受热时，它上面的空气会膨胀并上升，压力下降。地表冷却时，会产生相反过程，空气压力会增大。由于地表不同点接收和保持的太阳辐射量的差异，地表温度和压力无论大小，都会持续发生变化。因此，在我们地球上总会有些地方有风。

太阳的不均衡加热是风的最终推动力量，地球旋转也起着关键作用。科里奥利效应<sup>⊖</sup>（Coriolis effect）使空气向两极转东方向运动，而赤道的受热空气向西运动。

---

⊖ 科里奥利效应是一种从旋转参照系观察的运动，这里的旋转参照系是地球。地表绕轴运动在赤道比在两极附近快。如果一个物体向赤道自由运动，它的下表面会向东加速。从地表观察者角度看，物体像是转向西。

这一影响意味着风永远不会直接向低压区运动，而是在地表影响以上的高度，沿等压线绕低压区旋转。这就是飓风中气旋的来源。

最重要的温度梯度驱动的全球风模式在赤道与两极之间。它与科里奥利效应一起，是著名的赤道信风和中纬度西风带的起因（见图 1-1）。赤道比较温暖，潮湿空气倾向于通过对流向高海拔上升。这会把空气拉向赤道，因而形成一种被称为哈德利环流圈（Hadley cell）（用第一个解释这种现象的一位 19 世纪气象学家的名字命名的）的循环。由于科里奥利效应，入流空气会转向西方，产生东贸易风。⊙

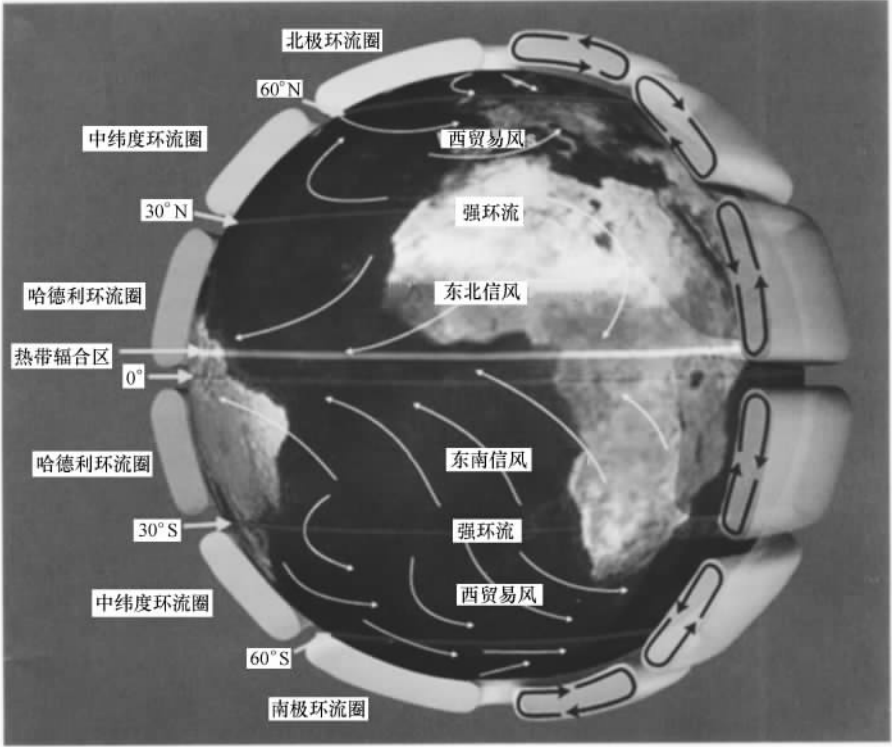


图 1-1 主要全球性大气循环（来源：NASA/JPL-Caltech）

被称为极环流圈（polar cell）的类似循环模式是在高纬度和两极之间建立的。在两极环流圈和哈德利环流圈之间的是以相反方向循环的费雷尔环流圈（Ferrel cell，即中纬度环流圈）。与前两者不同的是，它不是由对流驱动的，而是由来自邻近环流圈的空气升降作用产生的。沿地表流向两极的空气转向东方，科里奥利效应又一次显示出了它的正确性。西贸易风对北美、欧洲、亚洲（为 35° ~ 65°N）以及非洲最南端的南非和澳大利亚的中高纬度区通常都是有利风源。

叠加在这些全球性环流模式之上的是很多区域模式。陆地质块受热和冷却都比

⊙ 按惯例，风向用来风方向表示。如果空气向北运动，则称它为南风。

海洋快,即使不同的陆地质块之间,地表受热也有差异,如积雪覆盖的山顶和下方的绿色谷地之间,沙漠和垦殖平原之间。产生的温度梯度会形成所谓中尺度大气环流(mesoscale atmospheric circulation),称为中尺度是因为它们处于全球尺度和局部尺度或微尺度之间。

最常见的中尺度循环是海上微风。在正常夏季白昼,陆地会变得比海洋温暖,随着陆地表面的空气膨胀上升,压力会下降,比较凉爽的高密度空气会从海洋涌入。夜间的情况刚好相反,会产生陆地微风。通常,海洋微风比较弱,但对于风因地形而加强的地方,它的作用也会很强大。这是美国加利福尼亚、俄勒冈和华盛顿州海岸山口以及其他国家类似山口出现极强风的主要机制。

虽然温度和压力差会产生风,但地形和陆地表面情况对风也有强烈影响,比如海边山口就是例证。那里的风是由于地形上升驱动的,特别是在它的山脊是与气流横断的时候,会产生显著的加速作用,因为空气团被“挤压”通过有限的垂直空间。由于这种作用,世界上很多最好的风电场址都位于隆起的山顶、山脊、台地和其他起伏地形。然而,在那些地表附近的空气通常比它替代的空气冷和重的地方,如海洋微风的情况,它往往会寻找绕过高地的路径而不是翻越它。这种情况下,拥有最佳风资源的地方通常是山口而非山顶。

地表覆被和其他地面覆盖物,如房屋和其他结构,也会起重要作用。在气象学中,这一作用用称为表面粗糙长度(surface roughness length)或简称为粗糙度(roughness)的参数表示。由于施加于下部空气的摩擦或阻力,在粗糙度较高的区域,地面附近的风速通常较低。这也是美国东部的优良风电场址比大平原(Great Plains)<sup>①</sup>少的主要原因之一。相反地,开阔水面的粗糙度较低,这有助于解释为什么风资源通常会随着远离海岸而改善。

## 1.2 风的关键特性

年平均风速经常被作为风电工程等级或排序的指标,确实,它是一个方便的度量尺度。现在,大部分风电工程开发都在风力机<sup>②</sup>轮毂高度平均风速为6.5m/s或以上的地点进行,但在竞争电价较高或其他市场条件优惠的区域,风资源差些的场址也可以开发。然而,平均风速仅是风资源的粗略测度。为准确估计发电量,风资源特性还必须用时间和空间上的风速和风向的变化以及空气密度表示。

---

① 大平原是北美洲主要自然地理区之一。它北起马更些河(mackenzie river)三角洲,南抵美墨边界的格兰德河(Grand River),东接劳伦琴低高原(Laurentian Plateau)和内陆低平原,西至落基山脉东麓。南北长4800km,东西宽480~1120km,面积约2900000km<sup>2</sup>,是世界著名平原之一。——译者注

② wind turbine 在主要指其机械(功能)部分时,可译为“风力机”;强调其机电一体功能时,可译为“风电机组”。——译者注



##### 1.2.1 时间维度

秒级及以下的极短时间尺度是湍流的领域。它是用来表示短暂压力扰动或涡流引起的风速和风向快速波动的通用术语。人们通常感受到的湍流是阵风 and 间歇。湍流是大气摆脱太阳辐射建立的能量的关键机制。但遗憾的是，它对发电基本上没有好处，因为风力机对这种速度变化不能做出足够快的响应。实际上，当风力机的桨距设置有误或没有对正风向时，强湍流反而会导致风力机出力下降。此外，湍流还会加剧桨距动作器和偏航电动机等机械部件的磨损。因此，制造商可能不给湍流超过设计范围的风电机组提供保修。因此，了解场址的湍流情况对风资源评估非常重要。

风速和风向的波动也会发生在几分钟到数小时。然而，它们不同于湍流，这些变化是可以被风力机迅速捕获的，会导致出力变化。这是电力系统运营商最感兴趣的时间框架，因为运营商必须对风波动作出响应，相应改变系统其他电厂出力，以保持对用户稳定供电。因此，它是短时风电预测的重点。

在 12 ~ 24h 时间尺度，存在与地面受阳光加热和辐射冷却的日循环模式相关的变化。取决于地上高度和风气候性质，一个给定位置的风速通常在下午 3 时左右和夜间分别达到其高低峰值。在电价按白天需求确定的市场中，哪种用电模式占优势会对电厂收入产生重大影响。例如，在空调负荷很多的区域，电力需求高峰会出现在下午，而在家庭电取暖用得很多的区域，傍晚会出现用电高峰。

季节影响开始于月时间尺度。在多数中纬度区域，较好风况通常出现在晚秋到春季，而夏季通常很少刮风。经受强暖气候中尺度循环的地点，如前面提到的海岸边山口，通常是这一规则的例外，那里的风通常在晚春到早秋最强。由于这种季节变化，短于一整年的测量很难准确确定平均风资源。此外，如同日变化一样，季节变化也会影响风电场收入。通常在夏季峰值系统的夏季和冬季峰值系统的冬季电价最高。

年度和更长的时间尺度是区域、半球、全球气候振荡领域，如著名的厄尔尼诺（El Niño）现象。这些振荡以及随机过程是年度之间风气候变化性的主要原因。它们通常也是希望在场址进行符合长期历史规律的正确风况测量的主要原因。

##### 1.2.2 空间维度

风资源评估的空间维度对风电场设计非常重要。多数风电场都有不止一台风力机。为预测总发电量，必须理解各台风力机之间的风资源是如何变化的。这对于地形影响很强烈的复杂山区地形特别有挑战性。一种方法是在风电工程区域的多个地点测风。即使这样，通常也必须使用某种模型（通常是风流场数字模型）把观测到的风资源外推到其他地点。

人们感兴趣的空間尺度与风力机尺寸和风电工程规模有关。现代大型风力机风轮直径通常在 70 ~ 120m。风电机组间隔通常为 200 ~ 800m，而大型风电工程的地域跨度可达 10 ~ 30km。在这一总区域内，要做到风电机组优化布置和准确估计发

电量，就必须有标志各种变化的详细地图。

垂直维度也非常重要。风速随高度的变化称为风切变（wind shear）。多数地点的风切变是正值，意味着风速随高度增加而加大，因为地面阻力的影响减小了。了解风切变对于把在一个高度（如测风塔顶部）的风速测量值变换到另一高度（如风力机轮毂高度）相当重要。极端风切变（无论正负）都会导致风电机组部件磨损和发电量损失。风切变测量可以是在测风塔不止一个高度同时读取风速，也可以使用 Sodar（sonic detection and ranging，声雷达）或 Lidar（light detection and ranging，光雷达）等遥感装置。

### 1.2.3 风资源的其他特性

尽管风速是风资源的主导特性，但某些其他特性也很重要，如风向、空气密度、覆冰频度等。要想准确估计发电量，这些特性都必须正确描述。

风向的频率分布是优化风力机布局的关键。为降低风力机之间的尾流干扰（在后面说明），风力机在主导风向上的间距需要大于其他方向的间距。

空气密度会决定特定风速下风的可用能量：空气密度越大，可用能量越高，风电机组可发出的电量越大。空气密度主要取决于温度和海拔。

风力机叶片大量覆冰会大大降低发电量，因为它破坏了精心设计的叶片翼型，最严重时会导致风电机组停机。覆冰的两个主要原因是冻雨和直接沉积（晶冰）。可能影响风力机性能的其他条件还有附尘、脏污和昆虫。

## 1.3 风电场

从概念上来说，风电机组是一种简单机械（见图 1-2）。空气的运动由叶片（升力翼型与飞机的机翼非常相似）转换为作用于机轴的转矩。转矩使发电机旋转，使电功率流入电网。

然而，这一简单画面掩盖了很多微妙的设计特性。典型的现代大型风电机组是一种巨大而复杂的机械，轮毂高度达 65 ~ 100m，风轮直径达 70 ~ 120m，额定容量达 1 ~ 5MW。风电机组必须运行可靠，且能在广泛风况范围内运行于最高效率。这需要众多部件，从机舱风速计到变桨机构，从偏航驱动到电力电子设备，在一个集成系统内协调动作。

从风资源评估角度看，风电机组的关键特性是它的功率曲线（见图 1-3）。它表示作为轮毂高度测得的风速函数的输出功率。它的特征值有通常为 3 ~ 4m/s 的切入风速，在这一风速下，风力机开始旋转并发电；倾斜段，在这一段，输出功率随风速迅速上升；通常为 13 ~ 15m/s 的额定风速，风电机组在这一点达到额定容量；切出风速，高于这一风速时，为保护机组，风力机控制软件将它关停。

尽管运行良好的风电机组是一种精细调节的机械，但不能认为风力机会在每个



图 1-2 企业规模的风电机组（来源：AWS Truepower）

风速下都准确发出预期功率。例如，叶片磨损、脏污、设备磨损和控制软件设置都会使风电机组偏离它的理想功率曲线。此外，输出功率还取决于风况，如湍流、风轮两侧的风速变化、风流场相对于水平面的倾斜等。把这些变化考虑在内是估计发电量过程的一部分，要从对风资源的详细理解入手。

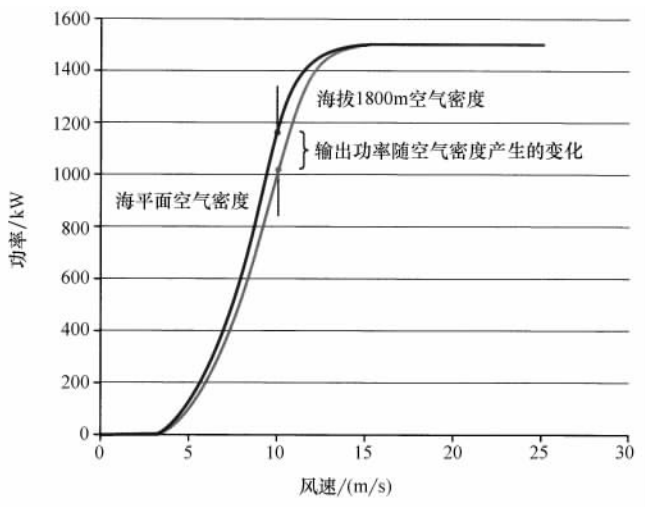


图 1-3 一台 1.5MW 风电机组在两种空气密度下的典型功率曲线

风电场从概念上说也很简单：它只是一个风电机组阵列，通过集电系统与电网相连（见图 1-4）。然而，风电工程设计经常必须在风电场总出力与其总造价之间做出权衡。

这一过程首先要详细描述风资源在场址的分布，并以测量和某种空间建模来支持。对于地形复杂和地面覆被情况变化很大的场址，这很可能是一个重大的技术挑战。使问题更加复杂的还有风电机组之间的尾流（或阵列）干扰。当风力机从风中汲取能量时，会在它后方产生一个风速降低和湍流加大的区域（见图 1-5）。在这一尾流内的任何风力机发出的电量都会低于没有上风风力机时的情况。幸运的是尾流会随着下风距离增大而膨胀和消散，因为湍流会与周边未受扰动的风流场交换能量。所有风电机组产生的尾流对风电场发电量的影响通常用专门的尾流模型估算。

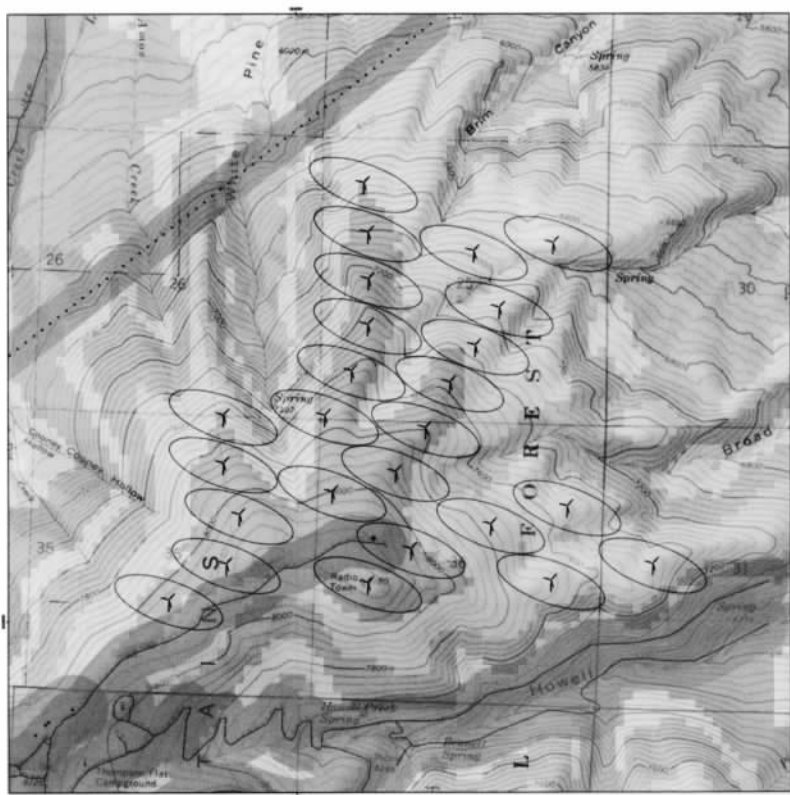


图 1-4 一个拟议风电场的布局（来源：AWS Truepower）

## 1.4 本书的宗旨和结构

如已经看到的，设计风电工程、估算它的发电量取决于对风资源详细和准确的评估，这也是本书的起点。本书首先是向从业人员和学生提供得到认可的对于企业规模风电场的风资源评估方法的指导。它的目标不是在每个方面都表现出一致性，相反，本书经常特别指出可用方法中存在合理变化甚至不一致的领域。尽管如此，



图 1-5 难得一见的海上风电场风力机尾流证据。每台风力机后面不断增大的湍流导致空气中水汽凝结成小水滴，形成可见的凝结尾。每个尾流的风速也降低了。

（来源：Vattenfall 拥有的 Horns Rev 1 风电场；摄影：Christian Steiness）

变化范围是有限的。在某些情况下，一个铁塔上安装两台不同高度的风速计是可接受的，极少只安装一台。使用新的与众不同的大气模型可能不错，但如果它的结果没有可靠的测量为根据或没对模型准确性进行验证就毫无用处。我们希望读者从本书得到的收益是清楚理解这些界限。

只要可能，本书就会超出一般菜单性内容，说明那些得到验证的技术的概念和原理。我们希望，这可以使读者在条件偏离理想状况（这是经常发生的）时能做出自己的判断。本书并不力图写成面面俱到的风资源评估综合参考资料。对那些引人关注的课题，可以参阅国际电工委员会（International Electrotechnical Commission, IEC）出版的标准、世界各地每年都举办的风电会议的论文和大量书籍以及互联网上的资源。

本书结构是按风资源评估的主要阶段顺序安排的。前面几章的重点是风资源测量工作的基本要素。首先概述风资源评估过程，然后论述选址、测量参数和测风塔仪表、测风塔安装维护及数据采集和处理。这一部分的最后一章第 8 章重点介绍遥感（Lidar 和 Sodar）。

下一部分各章介绍风资源数据分析。首先说明质量控制（Quality Control, QC）和验证，然后介绍观测风资源的特征描述。随后各章包括风资源外推到轮毂高度，把短期测量修正到长期历史条件及风流场建模。第 14 章专门论述海上场址各专题。第 15 章讨论风资源估计的不确定性，包括各类不确定性及它们的典型值。最后一章第 16 章概述风电工程设计及估算长期平均发电量的步骤。

多数章节给出了供课堂使用的讨论题并提出了深入阅读建议。



## 1.5 讨论题

1. 地球表面不同地点产生压力梯度（压力差）的主要原因是什么？压力梯度增大时，风通常会怎样变化？
2. 影响地表附近风速和风向的三种主要机制是什么？
3. 给出两个中尺度大气循环的例子。你所在国家或地区存在这些机制吗？如果存在，在哪里？
4. 草原和森林，哪一个表面粗糙度大？如果其他条件都相同，那么这种差别可能怎样影响风力机高度的风速？
5. 什么是湍流？它发生在什么时间尺度上？湍流对风电机组出力有何影响？
6. 什么是风切变？它为什么重要？
7. 估计一台风电机组发电量需要知道哪些风资源参数？设计不止一台风力机的风电场时，为什么必须知道主导风向？
8. 空气密度与风所能产生的能量的关系如何？

## 深入阅读建议

- Ahrens CD. Essentials of meteorology. 5th edn. USA: Brooks Cole; 2007. p. 504.
- Brock FV, Richardson SJ. Meteorological measurement systems. USA: Oxford University Press; 2001. p. 304.
- Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. New York: John Wiley & Sons, Inc.; 2001. p. 642.
- Garratt JR. The atmospheric boundary layer. New York: Cambridge University Press; 1992. p. 336.
- Lutgens FK, Tarbuck EJ, Tasa D. The atmosphere: an introduction to meteorology. 11th edn. USA: Prentice Hall; 2009. p. 508.
- Robinson P, Henderson-Sellers A. Contemporary climatology. 2nd edn. USA: Prentice Hall; 1999. p. 352.
- Stull RB. Meteorology for scientists and engineers. 2nd edn. USA: Brooks Cole; 1999. p. 528.
- Wallace JM, Hobbs PV. Atmospheric science: an introductory survey. 2nd edn. USA: Academic Press; 2006. p. 504.





## 第一篇 风况监测



## 第 2 章 风资源评估活动概述

风资源评估活动像其他技术项目一样，也需要在一组明确目标指引下仔细规划和协调。它经常受到紧张的预算和进度的限制。它的最终成功依靠项目的集合资产，即正确的选址和测量技术、训练有素的队伍、优质设备、正确的数据分析和建模技术。

本章概述风资源评估活动的设计和实施，并说明这些概念在本书哪些章节讨论。应该指出，风资源评估只是企业规模风电工程的寿命循环中的第一步。本书没有论述的其他主要步骤示于图 2-1，包括许可申请、融资、建设、运行和退役。要了解风资源评估阶段以外的风电工程知识，读者可以查阅“深入阅读建议”一节列举的资源。

风资源评估活动可分为三个主要阶段：场址确认、资源监测和资源分析。

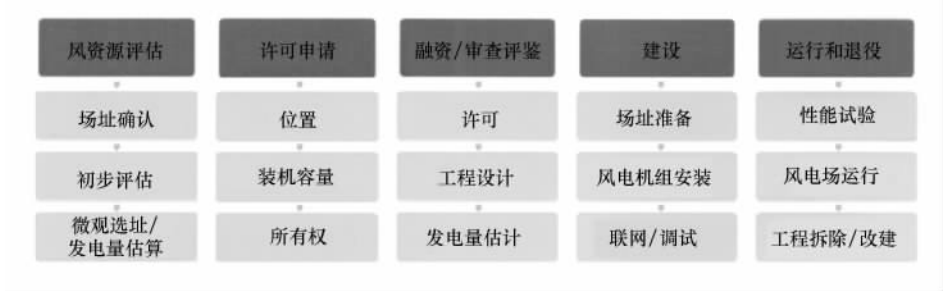


图 2-1 企业规模风电工程的寿命循环（来源：AWS Truepower）

### 2.1 场址确认

风资源评估活动的第一步是确认一个或多个备选风电工程场址。这可能涉及勘察较大区域（如一个县，一个省或州，或一个国家）。最主要的关注问题通常是风资源。它可以用风资源地图或公开发布的风况数据估计。需要关注的其他问题可能包括市场条件、输电接入和容量、场址可施工情况和进入条件、社区和政府支持情况以及环境和文化敏感性等。场址筛选技术和判据将在第 3 章说明。

完成第一步之后，建议收集和编制地理信息系统（Geographic Information System, GIS）的地理数据。GIS 项目创建完成后，以有效的系统方法用适当的判据选择备选场址。创建 GIS 项目的另一个优点是一旦选好备选场址，就可以在视在环境中进行风能监测活动设计并进而进行风电工程设计的很多工作。

无论是否使用 GIS，场址的最终选择都需要通过对场址的实际考察来获得信息，以确认据以选择的物理条件（如道路和输电线位置情况），对政治、监管、文化及对项目开发可能有帮助或妨碍的其他因素进行第一手评估。

## 2.2 风资源监测

备选场址一旦确认，第二步工作是风资源测量和特征描述。测风塔多半要在这一阶段安装。最常见的监测目标如下：

- 1) 确认是否有足够的风资源，以确定继续调研的合理性；
- 2) 在各备选场址之间比较和排序；
- 3) 获得供不同型号风电机组的性能和经济可行性估计的代表性数据；
- 4) 奠定风资源分析的坚实基础。

将在第 3~8 章介绍支持本阶段风资源评估活动的信息和建议，包括设计和进行全部测量项目的指导意见。

### 2.2.1 风况监测活动设计

风况监测活动的总目标是获得对风资源的可能最佳了解，它的涵盖范围是从风力机风轮顶部到底部及与工程预算和进度一致的整个工程区域。做到这一点的方法是在适当位置架设气象杆塔（测风塔）和安装陆基遥感系统，以获取可以描述风资源的足够数据。第 3~5 章会给出用高杆塔设计风况监测活动的指南；第 8 章讨论遥感系统。

#### 1. 测风塔数量和布置

决定安装多少测风塔以及它们安装在项目区域的什么地方时，主要目的是降低风电机组潜在位置的风资源不确定性。满足这一目标要求不仅需要监测风力最强的地方，还要捕捉风资源的全部多样性，风力机最可能经受的最差到最好的风况。在做出决定时，工程区域大小、地势、土地覆被情况及其他因素等都需要考虑。对测风塔数量和布置的建议在第 3 章介绍。

#### 2. 仪器高度

风资源测量在风力机轮毂高度进行，而不是将较低处的测量结果外推，这可以降低发电量估算的不确定性。高度选择取决于一系列因素，包括工程规模、测风塔成本、当地规定（如与航空有关的高度限制）以及对场址风切变的了解等。如果对风切变有充分了解，那么架设极高测风塔的价值就降低了；另一方面，如果风切变特征很难描述，架设这种杆塔就很有成本效益。对于大型风电项目（ $>100\text{MW}$ ），建议在三个测风塔中，至少有一个要达到轮毂高度。对轮毂高度和高测风塔的补充信息见第 3 章。

#### 3. 测风塔仪表

监测工作的主要任务是采集准确的风速、风向和空气温度数据。风速数据是一



个场址的最重要指标，需要进行多高度测量，以确定场址的风切变。风向频率信息对风电场内风力机布置优化和风流场及尾流建模非常重要。温度测量会提供场址条件的补充信息，并帮助确定空气密度。

标准仪表配置的建议在第4、5章详细讨论。这两章还概述与工程目标和预算相符的典型仪表配置的补充选项。这些选项说明了把所有变量考虑在内的详细活动设计的需要。

#### 4. 陆基遥感

Sodar 和 Lidar 是对可用风速测量技术的两种新近补充，可用于工程区域不同点的抽样校核，以及测量风轮扫掠面的风速分布。通常进行的是短期（4~12周）监测，但对于大型工程（>100MW）、复杂地形，或预期有显著的风切变季节性变化的情况，监测期最好更长或进行多次监测。对于遥感技术的更多信息见第8章。

#### 2.2.2 测量计划

所有监测项目的共同点是需要制定测量计划。它的目的是确保风况监测项目的所有方面加在一起能提供满足项目目标所需的数据。数据应该书面记录，并在工程实施之前由工程参与各方核验收。监测计划应规定以下内容：

- 1) 测量参数（如风速、风向和温度）；
- 2) 设备类型、数量和成本；
- 3) 设备监测高度和仪表安装梁的方向；
- 4) 测风塔数量和位置；
- 5) 期望的最低测量准确度、持续时间和数据恢复率；
- 6) 数据采样和记录间隔；
- 7) 设备安装、维护、数据验证和上报的负责方；
- 8) 数据传输、筛选和处理程序；
- 9) 质量控制（Quality Control, QC）措施；
- 10) 数据报告时间间隔和格式。

通常建议风况监测持续至少一年（连续12个月），但时间更长得到的结果更可靠，而且建议随后安装的测风塔在时间上要与第一个部分重叠。所有测量参数的数据恢复率要尽可能高，目标是至少覆盖90%的多数测风塔传感器，基本不能有大的数据间断。实际实现的恢复率取决于一系列因素，如场址的偏远情况、气候条件、仪器的类型和冗余度以及数据采集方法等。

#### 2.2.3 监测策略

监测策略的核心是良好的管理、合格的队伍和充足的资源。最好是所有相关人员都理解每个参与人员的作用和责任以及他们的权利和义务。每个人都应该熟悉项目的总体目标、测试计划和进度日程。参与人员之间的沟通应该频繁且公开。建议项目组至少包含一个有现场测量经验的人。数据分析、解释和计算机技巧也是重要的有利条件。可用的人力和物力资源必须与测量项目的目标相适应。高标准的数据

准确度和完整性要求具有相当水平的人员、优质设备和工具投入、对计划外事件（如设备运行中断）的即时响应、备件获取、定期现场巡查和及时检查数据。

构成监测策略的两个部分是监测站运行维护和数据采集处理。

### 1. 监测站运行维护

为保持数据完整性和达到测量活动目标，每个风资源监测站的持续维护和仔细记录是必不可少的。建议制定一个简要而全面的运行维护计划。该计划应包含保证质量的各项措施和所有项目人员的程序指导。风资源监测站的具体运行维护建议见第6章。

### 2. 数据采集和处理

数据采集和处理过程的目标是确保数据可用于分析并防止损坏和丢失。第7章提供数据在监测站本地储存和提取及保护的背景信息，还说明了适当的数据传输文档。

#### 2.2.4 质量保证计划

质量保证计划是每个测量项目必不可少的部分。它是保证高质量数据成功采集的组织和详细行动程序设定。一旦制定了测试计划，质量保证计划就应该以书面形式做出。

##### 1. 质量保证政策

项目经理应制定和认可质量保证计划，从而向所有人员赋予它的可信性。

##### 2. 质量保证协调人

把计划与项目管理联系起来的是质量保证协调人。这个人应熟悉采集有效数据的例行要求。如果要认真执行质量保证计划，这个人就必须被授权确保所有人员都得到适当培训，遵守正确程序，出现问题时采取正确措施。此外，协调人还必须持有有条理的适当记录。

数据质量通常用代表性、准确性和完整性来衡量。质量保证计划极大依赖于涉及支持数据质量的程序记录。建议质量保证计划包括以下内容：

- 1) 符合项目规范的设备采购；
- 2) 设备标定方法、频率和报告；
- 3) 监测站安装、确认和运行维护核查单；
- 4) 数据采集、筛选和存档；
- 5) 数据分析导则（包括计算）；
- 6) 数据验证方法，标记判据，报告频率和格式；
- 7) 内部核查，记录现场安装、运行维护和数据采集处理责任人的绩效。

质量保证的另一个目的是尽量降低会不可避免地进入测量过程每一步的不确定性。测风塔不能完美地代表它所代表的整个区域，传感器测量的准确性不可能毫无瑕疵，在有限时间范围收集的数据不能确切反映风电场在它寿命期间可能遭遇的所有条件。然而，如果这些不确定性的幅值是得到理解并通过质量保证计划得到控制

的，则结论可能在相当程度上是合格的，能够给出有用信息。

## 2.3 风资源分析

风资源评估活动的第三阶段是在所有相关时间和空间尺度做出风资源描述，以支持工程区域内的风力机优化布置，并尽可能准确估计发电量。本书第二篇从第9章到第16章都论述这一阶段的内容，包括数据验证、观测的风资源的特征描述、风切变和长期风气候修正、风流场数值建模、工程设计和发电量计算，以及不确定性。

### 2.3.1 数据验证

一旦数据从监测系统传输到办公室计算机环境，就必须进行数据错误检查和验证，评估数据的完整性和合理性，标出无效值和有疑问值。这一过程还可以检查仪表和记录仪的潜在问题。数据验证程序的建议见第9章。

### 2.3.2 风资源观测结果特征描述

风资源数据经过验证后，就要进行分析以生成各种有助于描述风资源特征的统计数据。常见的统计数据包括平均风速、风速和风向的频率分布、风切变、湍流强度和风功率密度。这些度量的标准和相关公式见第10章。

### 2.3.3 轮毂高度风资源估计

因为测风塔通常低于定义功率曲线的风力机轮毂高度（风塔中央）。所以经常必须把风速测量值在不同高度间互推。这一任务需要对测风塔和场址信息进行小心和通常有目标的分析，包括风切变观测值、当地气象、地形和土地覆被。第11章的信息可以帮助进行这一过程的分析。

### 2.3.4 气候修正

气候修正的目的是把在有限时间内获取的测量值修正到长期历史条件。这一点很重要，因为风速变化的实际时间尺度甚至可以为一年乃至更长。这个被称为MCP（Measure, Correlate, Predict：测量、关联和预测）的过程通常被用来把现场测量与长期基准关联起来并加以修正。它可以降低发电量估计的不确定性。第12章将概述MCP过程。

### 2.3.5 风流场建模

因为现场测风通常只限于工程区域的少数几个位置，因此通常必须使用计算机软件进行风流场建模，以估算可能布置风力机的所有位置的风资源。第13章概述可用风流场模型的类型、它们的输入和适用情况，以及相关的不确定性和难点。

### 2.3.6 风资源评估的不确定性

正确理解与风资源评估过程相关的不确定性对风电工程融资是必不可少的。第15章将概述不确定性的潜在来源以及它们的估算方法，并给出不确定度的典型范围。

### 2.3.7 工程设计和发电量

最后一步是工程设计和发电量估算。它通常是一个复杂过程，一般用专用软件进行。这一过程从风流场数值建模的结果开始，允许用户对不同风力机布局进行快速检验，并得出发电量最大的一个。该软件也计算由于风力机尾流影响导致的发电量损失。第 16 章将概述工程设计和发电量估算的过程。

## 深入阅读建议

Gipe P. Wind Energy Basics Revised: A Guide to Home- and Community-scale Wind Energy Systems. USA: Chelsea Green Publishing; 2009.

Windustry. Wind Energy Basics series. Available at <http://www.windustry.org/wind-basics/learn-about-wind-energy/learn-about-wind-energy>.

Wizelius T. Developing wind power projects: theory and practice. UK: Earthscan; 2007. Available at <http://books.google.com/books?id=eTaNkIVaQTYC>.

---

## 第 3 章 风电工程选址

风电工程选址通常有几个步骤，包括在一个广大区域内选择一个或多个风电工程备选场址，在每个场址确认安装风况监测系统的位置，获得许可和租用土地。

因为待勘查区域有时相当大（大到一个州、一个省，甚至一个国家），所以场址选择过程应该设计，以有效集中精力于最合适区域。本章讨论选址判据和某些最常用工具和技术。它还概要说明确认初始场址的主要步骤，包括现场勘察、选择测风塔的适当位置、获得测风塔安装许可和与土地业主签订租用期权协议。

### 3.1 场址选择

以下是选择风电工程场址的首要考虑因素：

#### 1. 风资源

这几乎永远是最关键的因素，因为资源越好，潜在的发电量和收益就越高。开展风况监测工作之前，开发商必须考虑区域风资源信息，以确认潜在的有吸引力的场址。这一过程将在第 3.2 节中说明。

#### 2. 可用多风区

有充分资源、可安装风力机的区域越大，风电工程就可以越大。可用多风区经常受限于地形，也还有下面说明的其他因素。

#### 3. 与已有输电线路的邻近情况

建设新线路把风电工程与已有输电网相连的成本和风险是一个实质性因素。一般来说，风电工程开发商会尽量减小新线路的覆盖距离。

#### 4. 通行道路

开发商应考虑以现有道路和小路用卡车运输风况监测设备是否可行，以及是否需要铺设新路或改造现有道路以支持最终的风电机组运送。

#### 5. 土地覆被

如果其他情况都相同，则森林覆盖地形的开发费用会高于其他地形，因为需要清除树木来架设测风塔和最终的风力机、修建辅助道路和满足风电场的其他需要。相反，有些土地覆被，如农田和牧场，则特别适于风电开发。

#### 6. 土地利用限制

有些区域土地不能使用，原因各种各样，如军用或野生动物保护等。这类限制会使有些场址不能考虑或限制可用面积。

#### 7. 与居民区的邻近情况

一个常见的社区关注是风力机靠近居民区。居民会担心风力机产生过多噪声或

破坏景观。很多地区把这种担心写进了法规，要求风力机避让已有房屋和其他建筑物。

### 8. 文化、环境和其他关注

这些问题可能延伸到官方指定的限制区之外。例如，出于历史或宗教原因，有些场址对某些特定人群特别重要。有的也可能蚕食了不在官方保护下的敏感野生动物栖息地。还有的可能是当地社区认为的特别景点或具有美学价值。尽管这些问题并不严格否决工程开发，但却可能导致公众反对并妨碍开发进程和增加成本。开发商应该意识到可能出现的反对意见，并在选择场址时把它考虑进去。

在拥有充分数据的情况下，上述因素的大部分都要用 GIS 进行定量分析。这种系统如今已经成为场址选择过程的有机组成部分，因为它使分析人员能高效组织和分析大量信息，根据一系列相互矛盾的判据进行场址筛选。例如，对于给定的必要输入，可以查询 GIS 找出所有适用场址。它们应在已确定排除区之外，在现有输电线路一定距离之内，包含足够大、可以支持一定规模的风电工程的连续面积，而且符合规定的最低平均风速条件。用判据进行某些检验之后，分析人员通常可以对满足开发商要求的备选场址“短名单”精雕细刻。

这一阶段纳入 GIS 的最有用地理数据如下：

- 1) 风资源地图；
- 2) 地形数据（数字高程或地势模型）；
- 3) 土地覆被数据（按植被类型或土地利用分类）；
- 4) 水体；
- 5) 行政管辖边界；
- 6) 排除区域（自然公园、军用区、城区等）；
- 7) 楼房和要求避让的其他建筑物；
- 8) 公路、铁路和道路；
- 9) 输电线和变电站；
- 10) 管路（天然气管路，输油管）；
- 11) 雷达和空域限制；
- 12) 竞争或相邻工程。

附录 B 列举了全球 GIS 数据的某些有用资源。还有某些地区和国家的可用补充数据资源。有些情况下，空间或卫星图像信息是数字化的（转换成 GIS 格式）。

GIS 不能处理每个可能的因素或关注，数据输入也并不总是准确的。因此，谨慎的做法是在基于 GIS 的场址筛选后进行现场勘察，如第 3.3 节中所述。

## 3.2 区域风资源信息

获得一个区域的风资源信息是场址选择过程的关键一步。尽管只根据它确定工

程可行性通常并不充分,但这些信息可以估计建在这一区域的风电工程的预期性能范围,可以指向潜在场址。区域风资源信息的两个常用来源是风资源地图和公开发表的风况测量结果。

### 3.2.1 风资源地图

区域风资源地图是确认有吸引力的风电工程场址的可用起点。除了使用户一眼就可以考察很大区域,它的另一个好处是与 GIS 兼容。从 20 世纪 90 年代以来,区域风资源地图的可用性急剧加大。北美和欧洲的某些部分等区域已经被一些公司和团体使用各种方法多次测绘成地图(见图 3-1)。某些风资源地图的来源列于附录 B。

然而,使用风资源地图必须小心谨慎,因为它们准确性和空间分辨率差异巨大。有些地图给出的除了一般性区域风资源概况外几乎什么也没有(它的依据也可能是有问题的方法和数据),而有些地图则可能具有足够的准确度和细节,可用于初步选址和风电场设计。对于分析人员来说,必须检查绘制具体地图使用的方法和数据,确定它是否与独立优质的风况测量进行过对比,如果是这样,就可以知道误差范围。

风资源地图给出的信息类型也多种多样。有些地图给出估算的长期平均风速,而有些地图给出预期平均风功率密度,单位是瓦特每平方米风轮扫掠面积。这两个参数都不能直接转换为风电机组发电量,因为发电量还取决于其他因素,如风速频率分布、空气密度以及风电机组具体型号和轮毂高度。有些风资源地图销售商还根据要求提供这类补充信息,包括特定风力机型号的容量系数估算。

即使最好的区域风资源地图也不能精确到可以取代现场观测,尽管有些小型工程可能是例外,对它们进行现场观测提高的准确度不能抵消风况监测活动的成本。平均风速报出的不确定性范围通常为十分之几到 1m/s 或更高,空间分辨率范围为 100m~5km。地图的可信性通常对较简单地形最高,因为这种情况下高质量测量可以给出得到充分验证的数据。对于复杂地形和数据稀疏区域,不确定度会加大。

### 3.2.2 风况测量

公开发表的风况数据可用来进行区域风资源评估,尤其是风况监测站位置对于可能的风电工程场址有代表性的情况。例如测风塔位于与考虑之中的山脊线平行的山脊线上的情况。优先考虑对象是专门安装了风资源评估仪器的高塔,但机场和其他气象站也可以提供有帮助的风资源指标。所有这些情况下,都必须获取每个观测站的尽可能多信息,以确定数据是否可靠。确定这一点时需要考虑以下因素:

- 1) 观测站位置;
- 2) 测风塔类型和尺寸;
- 3) 周边地形、障碍物和地表粗糙度;
- 4) 传感器高度、安装梁方向和与测风塔距离;
- 5) 传感器维护协议和记录;

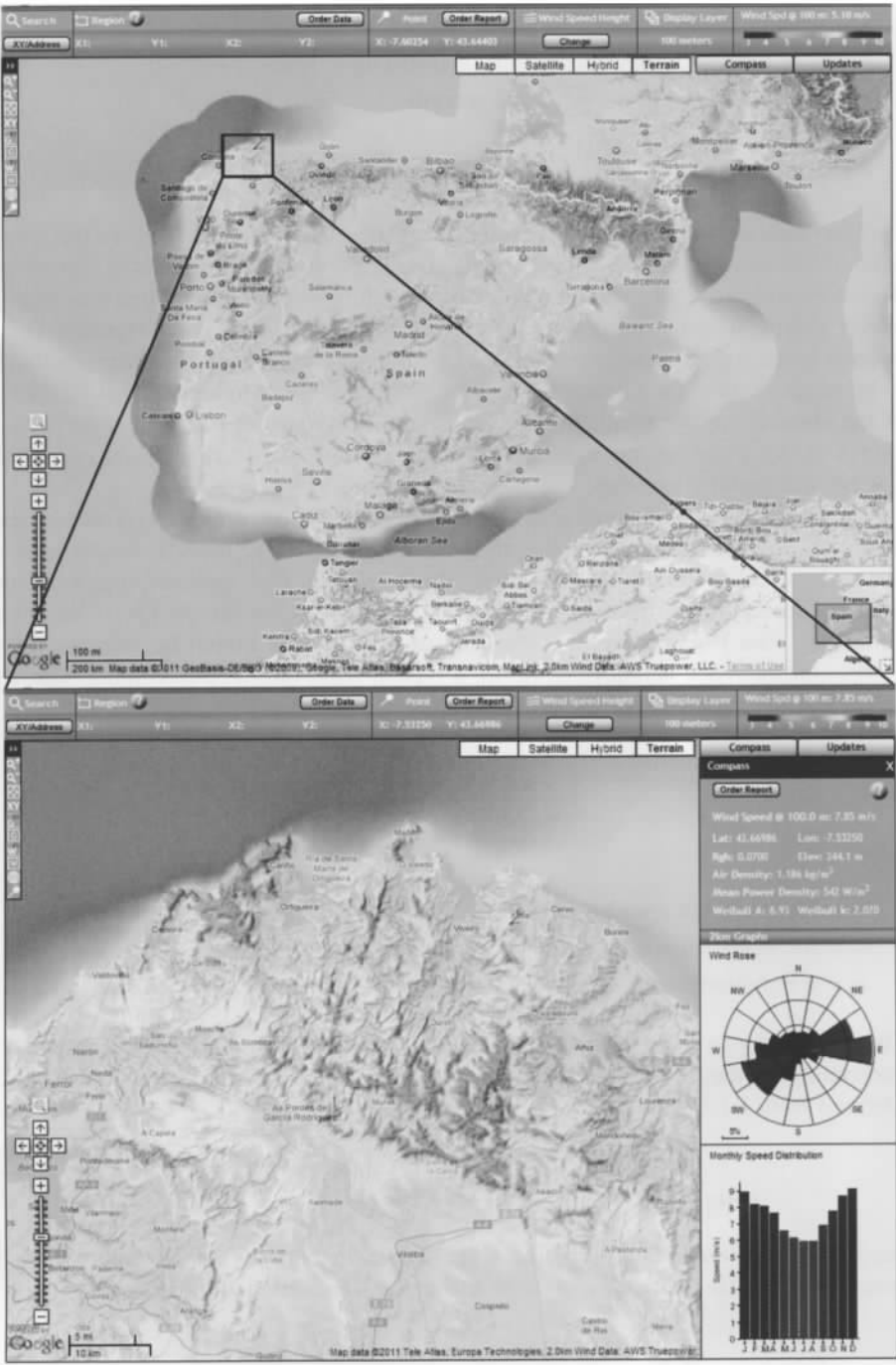


图 3-1 区域风资源地图实例，西班牙的情况。某些在线地图可提供补充信息，如风玫瑰图和季节变化模式，如下半部分地图板所示。（来源：AWS Truepower）



- 6) 数据记录持续时间;
- 7) 对数据的质量控制和分析。

周边区域地形比较平坦的风况数据通常更有代表性。对于复杂地形或靠近海岸线的情况,将信息可靠外推到紧靠测量站之外的能力更加有限,可能需要专家判断和风流场建模。即使在平坦地形,充分暴露在风下也是必不可少的,尤其是对于矮塔的情况。不应该在有障碍区域或屋顶进行测量,除非有充分理由相信障碍物的影响非常小。除极少例外,任何情况下,现有气象塔都不大可能替代风况监测活动的现场测量。

如今,装设风资源评估仪表的测风塔通常至少有 50m 高,而且能够提供数据、在 20 世纪 80 和 90 年代安装的测风塔经常只有 20 ~ 30m 高。多数多功能气象塔高度范围在 3 ~ 20m,国际标准为 10m。对不同监测站的数据进行比较时,平均风速应外推到共用基准高度(如 80m,典型风电机组轮毂高度)。用幂次定律可以方便地做到这一点:

$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3-1)$$

式中  $v_2$ ——期望高度  $h_2$  的预期风速;

$v_1$ ——测量高度  $h_1$  的观测风速;

$\alpha$ ——无量纲风切变指数。

预期风速的不确定性取决于高度比和风切变指数的不确定性,可以从下式看出[从式(3-1)推导得出]:

$$\sigma_v = 100 \sigma_\alpha \ln \frac{h_2}{h_1} \% \quad (3-2)$$

式中  $\sigma_\alpha$ ——风切变的不确定度<sup>①</sup>;

$\sigma_v$ ——预期风速的不确定度百分数;

$\ln$ ——自然对数。

例如,假定一个特定位置的风切变指数的不确定度判断为 0.10 (如  $\alpha = 0.20 \pm 0.10$ ),则从 30m 外推到 80m 的平均风速不确定度为 10%。(注:这仅是与风切变相关的不确定度;它没有考虑与风速测量和仪器高度相关的不确定度。)

对多数公开发表的可用数据集,风切变指数是未知的,而且即使发表了,也可能是不准确的。风切变指数变化范围很大,取决于植被覆盖、地形、大气特性以及其他因素。表 3-1 给出了不同区域和气候下的典型年平均风切变指数范围。必须指出,这些估计都假定考虑的测风塔高于周围植被和障碍物。如果情况并非如此,则把测量结果外推就没有任何保证。如有疑问,应向有该区域经验的风资源分析人员咨询。

① 此处和本书其他地方,不确定度以标准误差  $\sigma$  定义。它是可能的测量结果分布的标准偏差。对于正态分布数据,测量结果 68% 时间会落在分布平均值的一个标准误差内。

表 3-1 各种地形和土地覆被情况的风切变指数的典型范围

地形类型	土地覆被	年平均风切变指数大约范围
平坦或起伏地形	中低高度植被	0.12 ~ 0.25
平坦或起伏地形	散落树木或森林	0.25 ~ 0.40
复杂地形,谷地(被掩蔽的)	多样	0.25 ~ 0.60
复杂地形,谷地(峡谷或热流)	多样	0.10 ~ 0.20
复杂地形,山脊线	中低高度植被	0.15 ~ 0.25
复杂地形,山脊线	森林	0.20 ~ 0.35
海上,温带	水面	0.10 ~ 0.15
海上,热带	水面	0.07 ~ 0.10

理想情况下，数据集的跨度应至少为一年测量结果，以降低季节性和年间变化的影响，并应提供该时段至少 90% 的持续数据。一种有用的格式是每小时或 10min 风速和风向测量的时间序列。它可以用来分析一系列风特征，如日模式和季节模式。某些情况下还会给出风况的概要。这种概要虽然很方便，但使用时要小心谨慎，除非分析人员熟悉质量控制程序和分析方法，并确信能正确使用它们。否则通常最好的做法是自己根据原始数据进行分析。

3.3 现场勘察

建议亲自勘察所有备选风电工程场址。勘察的主要目的有三个：①确认基于 GIS 筛选场址使用的假设和数据（如是否已有道路和输电线路，及它们的位置）；②获得地图或 GIS 格式不具有的补充信息；③选择安装风况监测系统的位置。以下是现场勘察时通常记录的各项：

- 1) 场址的可到达情况；
- 2) 潜在的视觉和噪声关注（如著名的景观价值，附近居民）；
- 3) 潜在的文化、环境、历史或其他社区敏感问题；
- 4) 可能影响风况监测的主要障碍物位置；
- 5) 可能的风况监测位置，包括场址协调、可到达情况及周边情况（将在第 3.4 节讨论）；
- 6) 远程自动数据传输的蜂窝电话服务的可靠性。

场址评估人员应参考该区域的详细地形图来规划勘察，并注意要勘察的相关特性。勘察期间应使用全球定位系统（Global Positioning System，GPS）记录每个关注点的确切位置（纬度、经度和海拔）。把 GPS 连到便携计算机运行 GIS 软件非常方便。将勘察用录像或照片记录下来不仅有助于场址筛选，而且一旦进行监测，对后来的风资源数据分析和解释也很有帮助。评估测风塔的可能位置时，评估人员应估量是否需要清除树木以提供足够大的开阔面积来竖立测风塔。而且如果要架设拉

线式测风塔，还需要确定土壤条件以选择合适的地锚类型。（安装测风塔的更多信息见第5章）。

现场勘察还可以使开发商有机会结识土地业主、社区代表、企业领导、政府官员、拟议风电工程的其他相关和可能受到影响的人员，以及对风电工程审批有发言权的人员。监测项目的目标可以在友好、面对面的交流中介绍，如果可能的话，有关的问题和关注也可以提出和解决。尽管风电机组在很多地区已被接受，但环境、文化、视觉、噪声、许可和其他问题都可能形成重大挑战。从开发商利益考虑，在选址过程中，应在投入大量时间和金钱之前，尽早勘察和处理这些挑战。这些问题的更多信息可参阅“深入阅读建议”一节。

3.4 测风塔定位

有两种类型截然不同的测风塔：专门为风资源监测安装的测风塔和事先就存在的铁塔。

3.4.1 专用测风塔

选择新的专用测风塔位置时，要遵循以下几项规则：

- 1) 测风塔位置应尽可能远离对风力机位置没有代表性的明显障碍物。
- 2) 对于小型工程，选择位置应对可能安装的多数风力机有代表性，而不一定是风况最好的地点。
- 3) 对于大型工程，应选择能代表可能安装风力机的所有条件的一组位置。如果开始时只安装一个测风塔，它应该是对规划的风力机阵列最具代表性的位置。
- 4) 测风塔应远离输电线、埋藏输气管、电缆以及其他危险。

测风塔定位的一种方法是在拟议风力机与最近的测风塔之间保持规定限值。使用这种方法时，在进行测风塔选址前必须预想具体的风力机布局（至少是它们的大概情况）。如果没有明确的行业标准，可以使用表3-2中的指导意见。

表 3-2 根据地形和土地覆被推荐的测风塔与风力机之间的最大距离  
(来源：AWS Truepower)

工程场址	地形和土地覆被	拟议风力机位置与最近测风塔之间的推荐最大距离 <sup>①</sup> /km
简单	总体平坦,表面粗糙度一致	5 ~ 8
中等复杂	包括平缓起伏丘陵的内陆场址,与海岸距离相同的沿海场址,与主导风向垂直的单一山脊线	3 ~ 5
非常复杂	几何形状复杂的陡峭山脊线,与海岸距离多变,或森林茂密的沿海场址	1 ~ 3

① 假定测风塔位于拟议的风力机阵列之内。

距离不是需要考虑的唯一判据。同样重要的还有测风塔位置对最终安装风力机的地形应具有代表性。例如，风力机不仅安装在通常风力最强的山脊顶部，也安装

在与山顶有一定距离的斜坡上。这种情况并不少见。这种情况下，在离开山脊线的位置也安装一个或多个测风塔会大有益处。测风塔定位时小心谨慎可大大降低风流场建模的不确定性，从而降低风电场预测发电量的不确定性（见第 13 章）。

把测风塔位置选在楼房、露出地表的岩石、或孤立树木等重大障碍物附近，会对场址风特征分析产生不利影响（除非拟议风力机也会经受类似的障碍情况）。图 3-2 画出障碍物的影响，包括降低风速和加大湍流。湍流加大区在上风方向可延伸到障碍物高度的 2 倍，在下风方向延伸到障碍物高度的 10 ~ 20 倍，在垂直方向延伸到障碍物高度的 2 ~ 3 倍。作为指导意见，如果必须把传感器放置在障碍物附近，则它们在主导风向上应放在水平距离不小于 20 倍障碍物高度的位置。

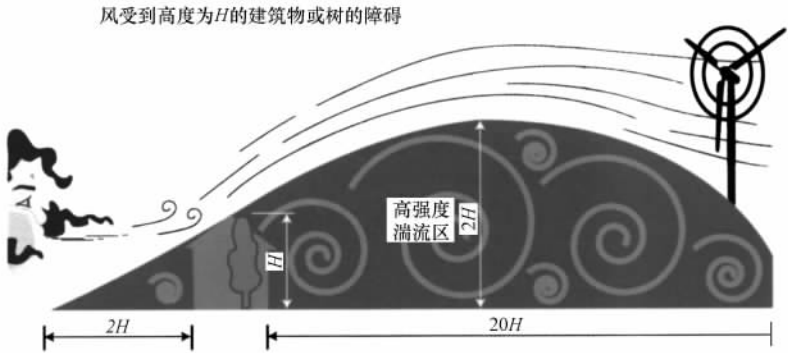


图 3-2 障碍物对气流的影响（来源：AWS Truepower）

尽管对大型工程和风切变有高度不确定性的区域，强烈建议使用极高（即轮毂高度或更高）测风塔，但这种测风塔的定位可能构成挑战。与低塔相比，它们经常需要更大的开阔面积来竖塔。在森林区，清理要求可能限制塔高或竖塔位置；对于陡峭地形，可能也存在这种情况。塔加高后也会经受比低塔更严酷的气候条件，必须设计为能抗御预期的覆冰、大风、雷电和其他潜在破坏性条件，因而会提高造价。它们可能还需要专门的航空许可和照明。

### 3.4.2 已有多功能高塔

乍看起来，与建专用新塔相比，现有的多功能高塔可能是很方便的有成本效益的替代物。它不需要新建，而且有现场电力来运行已有设备。然而，这种机会塔也可能有显著缺点，难以进行准确的风资源评估。选择已有高塔进行监测活动需要注意以下几点：

- 1) 如果已有铁塔远在拟议的风力机阵列之外，则它对监测活动的价值很可能是有限的。
- 2) 如果已有塔非常宽，或它上面装有如盘式通信天线和雷达中继器等设备，它就难以获得自由气流风速的准确读数。
- 3) 可以安装的仪器数量和它们的高度及横梁长度可能受到已有铁塔业主的限制。

制，或受限于结构考虑。

4) 在必须更换和检修风况监测设备时，可能不能随时进入铁塔区域。

5) 铁塔业主可能后来安装设备，使测量连续性被破坏；然而，可以在签订铁塔租用协议时包括避免发生这些情况的条款。

由于以上原因，实际操作时很少有风电工程仅仅或主要依靠从已有多功能塔采集的数据进行资源评估。

### 3.5 风况监测许可

安装测风塔之前，可能需要政府发布的许可。许可要求随国家而异，即使在一个国家内，有时也随时间变化，因此建议在风况监测活动早期，彻底了解许可申请过程和要求。

如果测风塔安装在公众或政府所有的土地上，就必须向这些控制进入的单位申请在这些土地开展工作。即使对私有土地，通常也有各种各样的管理单位，从当地的到国家的，负责许可审批程序，批准建设像测风塔那样高的建筑物。例如，民航管理局可能设置一个超过就必须申请许可的高度；在美国，这个高度是 61m (200ft)。如果建筑物处于飞机飞行路径之下或在机场某一距离之内，也需要申请许可。靠近有特殊的文化、环境、历史、宗教或其他重要性的地点也可能引发其他许可障碍。

在某些国家，地方当局（如镇政府）对它辖区的公有和私有土地的使用都有可观的控制权，独立于国家和省级管理之外。一些地方当局可能只要求在私有土地建设高建筑物之前通知备案即可，而有些则可能要求在建筑物图纸和锚泊系统设计加盖专业工程（Professional Engineering, PE）图章，并详细说明监测期结束时测风塔如何拆除。因为斜拉塔（tilt-up tower）通常属临时建筑范围，所以通常比固定式杆塔更容易获得许可。

### 3.6 租地协议

一旦潜在监测场址已经确认，开发商就要与土地业主（或某个控制该土地的实体）签订协议，获得在监测项目期间的该产业进入权并保证如果工程继续的话对该土地的权利。

这种协议通常是期权形式。期权有效期通常为 3~5 年，使开发商有充足时间建塔和对风资源进行评估。协议期满之前，开发商可选择需要延期租借风电工程用地期权，或者让期权失效。这样土地业主和开发商两者在有效期内的权益都会得到保证。开发商得到的保证是，如果工程继续进行，土地是可用的，而如果工程下马也不必去购买它或长期租用。土地业主得到的保证是，如果工程下马， he 可以把土

地提供给其他开发商或另作他用。

在期权有效期内，开发商通常向土地业主付费获得在场址安装风况监测设备的权利，有时还要补偿损失的收入及建设和运行造成的损坏。补偿情况千差万别，取决于当地习惯、风资源情况、期权时间长度、土地对风电开发的有利条件，以及不能作为他用而损失的收入或机会。

示例条款包括但不限于以下各项：

**1. 租用面积**

租用协议应明确说明测风塔位置和它们占用的总面积。需要避让的居民点和相关线路都要说明。

**2. 进入**

开发商应能在适当提前通知土地业主的情况下，定期接近监测设备以提取数据和进行检修维护。

**3. 土地使用认可**

租用或期权协议应规定土地业主保留的监测设备周围土地的使用权。例如，土地业主可能保留继续种植作物和饲养牲畜的权利。

**4. 农作物保护**

典型租用条款要求开发商尽量减少损害，并对发生的损害向土地业主进行补偿。协议中减少损害的措施应包括土壤保护或松土，以消除与工程相关的卡车通行的影响。

**5. 责任和保险**

协议应包含土地业主免除事故责任的条款。协议还应要求开发商采取一般性责任保险的政策。

**6. 期限和退役**

期权有效期应清楚说明。协议终止时，开发商通常负责拆除测风塔并把场址恢复到适当条件。

**7. 补偿支付日程**

协议应概述对土地业主如何补偿及支付日程。

### 3.7 讨论题

1. 对于你居住的区域，列举并简述可能影响风电工程选址的主要因素。按重要性降序排列这些关注，说明它们是否可以和如何量化，并确认可能的支持信息来源。

2. 风资源通常是风电工程选址的关键因素之一。你是否可以想象它可能不很重要的条件？考虑整个区域的风资源变化和风电工程可用激励类型等因素。

3. 你被雇用去设计你居住区域一个 100MW 风电工程的风况监测活动。在确定

以下各点时，需要注意什么平衡：①安装的测风塔数量；②它们的高度和配备仪表；③它们在工程区域内的位置。

4. 调研并讨论你所在地区的风电工程许可申请程序。在地方、州或省及国家层次，什么政府机构很可能参与？这些机构有风电工程经验吗？只考虑其中一个机构，说明需要的许可类型和获取程序。

5. 使用互联网寻找一个风电工程的租地样本或期权协议。考虑并讨论它在具体区域对具体土地业主（如农场主）的适用性。

## 深入阅读建议

American Wind Energy Association. Wind energy siting handbook. Prepared by Tetra Tech EC, Inc., and Nixon Peabody LLP. Feb 2008. Available at [http://www.awea.org/sitinghandbook/download\\_center.html](http://www.awea.org/sitinghandbook/download_center.html).

National Wind Coordinating Committee. Permitting of wind energy facilities: a handbook. Aug 2002. Available at <http://www.nationalwind.org/assets/publications/permitting2002.pdf>.

New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA). Wind energy toolkit. Prepared by AWS Truewind, LLC. May 2009. Available at <http://www.nyserda.ny.gov/en/Page-Sections/Renewables/Large-Wind/Wind-Energy-Toolkit.aspx>.

## 第 4 章 监测站仪表及测量

从安装在高塔上的气象仪表得到的测量值是多数风资源评估的基础。每个仪表的作用都是记录具体的环境参数。对任何风监测项目都必不可少的基本参数是水平风速、风向和空气温度。还需要采集其他选项参数，取决于风资源评估项目的优先级和预算。本章介绍通用气象仪表的类型以及它们记录的参数、采样间隔和期望测量准确度，有关的数据记录器、存储设备和传输设备，电源、测风塔类型和连线。

### 4.1 基本测量

#### 4.1.1 水平风速

风速是一个场址的风资源的最重要指标。因此，在代表性期间获得准确的自由流风速（即没有受到测风塔、仪器和监测站其他部件影响的风速）读数是任何风况监测活动的首要考虑。为达到这一目的，需要小心仔细地选择仪表、安装配置和测风塔设计。强烈建议使用多个冗余风速计和测量高度，以使数据恢复最大化和准确确定场址的风切变。传感器安装建议和典型监测配置见第 5.7 节的介绍。

表 4-1 基本传感器规范

规范	风速计( 风速)	风向标( 风向)	温度探头
测量范围	0 ~ 50m/s	0° ~ 360° ( ≤8° 死区)	- 40 ~ 60℃
起始阈值	≤1. 0m/s	≤1. 0m/s	不适用
距离常数	≤3. 0m	不适用	不适用
运行温度范围/℃	- 40 ~ 60	- 40 ~ 60	- 40 ~ 60
运行湿度范围( % )	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100
系统误差	≤1% ( 在 1σ )	5° ~ 10°	≤1℃
记录分辨率	≤0. 1 m/s	≤1°	≤0. 1℃
寿命( 运行时间间隔)/年	2	2 ~ 6	2 ~ 6

( 来源：AWS Truepower)

表 4-2 基本测量参数

需测量参数	举例高度( 60m 圆筒塔)	举例高度( 83m 桁架塔)
风速/( m/s)	57. 2m、47. 4m 和 32. 0m	80m、60m 和 40m
风向/( °)	53. 5m 和 43. 7m	80m、60m 和 40m
温度/℃	3m	3m 和/或轮毂高度

( 来源：AWS Truepower)



测量水平风速使用的风速计有三种类型。当然，这些类型中，转杯风速计是最普遍使用的，因为它成本低，而且准确度通常也不错。然而，某些配置也使用螺旋桨风速计和声学风速计。

### 1. 转杯风速计

这种仪器由连在一个垂直轴上的三或四个转杯组成。风会使转杯组件在优先方向转动。风速计上的变换器把这一旋转运动转换为电气信号，它再通过连线被送到数据记录器。记录器测量信号的频率或幅值，并使用预设的乘数（斜率）和偏置（截距）把信号转换为风速（见图 4-1）。



图 4-1 转杯风速计（来源：WindSensor）

### 2. 螺旋桨风速计或螺旋桨翼式风速计

这种仪器有一个安装在水平轴上的螺旋桨，水平轴由一个尾翼保持与风向一致。与转杯风速计一样，螺旋桨风速计产生一个频率和幅值与风速成正比的电气信号。与转杯风速计相比，这种风速计可记录湍流条件下的稍低风速。这一所谓的低风速（underspeeding）是由于螺旋桨尾翼倾向于围绕中枢方向振荡或落后于突变风向轴，结果是螺旋桨并不总是直接指向风向（见图 4-2）。

### 3. 声学风速计

这种仪器没有运动部件，用探测固定点之间传输的超声波（它的声波频率在



图 4-2 螺旋桨风速计和风向标（来源：R. M. Young Company）

人类听觉范围以上）速度的变化测量风速和风向。有些声学风速计测量风的两维速度，还有些测量三维。因为它们没有旋转惯量，所以与转杯和螺旋桨风速计相比，声学风速计对快速波动的风速和风向的响应更好。它们通常也比其他类型的风速计更昂贵，需要更多电力（见图 4-3）。

选择风速计类型和型号时，要考虑以下因素：

（1）持续时间。风资源监测活动通常要采集风况数据至少一到两年。为避免频繁和代价高昂的更换，建议选用至少在要求的现场使用期间能坚持存活并保持其标定的某些风速计。在某些环境下，可能需要混用不同类型的传感器，以达到存活能力、数据恢复和准确度之间的平衡。对于长期风况监测项目，应规定定期检查和更换风速计。

（2）运行环境。并非每种风速计都适用于每种环境。可能产生问题的情况有覆冰、大雨、雷电、沙尘、极端温度和盐水侵入。极端条件可导致风速计和风向标读数错误甚至完全停运。多数厂家会提供加热风速计以应对覆冰，对于可能严重覆



图 4-3 声学风速计（来源：Campbell Scientific）

冰地点，建议至少每个横梁安装一两个风速计。这可以减少数据丢失。加热风速计在第4.2节进一步讨论。

(3) 起点阈值。这是风速计开始和保持旋转的最低风速。因为低风速对发出风电没有作用，所以市场上多数风速计的起点阈值都适用于风资源评估。例外是用于测量垂直风速的风速计。它必须对于零风速的很小偏离（无论是正还是负）也很敏感。

(4) 距离常数。它是风速计对风速急剧变化需要多久才能做出响应的测度。它定义为风速计记录下风速瞬时变化的63%时，一个圆筒形体积的空气通过风速计的距离。与其他风速计相比，距离常数较大的风速计会高估湍流条件下的平均风速。这是因为它往往对风速上升的响应快于对风速下降的响应。声学风速计不会受到这种过速影响。通常用于风资源评估的不加热风速计的距离常数范围为1.8~3.0m，加热风速计由于有加热部件而比较笨重。它的距离常数通常会大得多。

(5) 对垂直风的响应。在比较陡峭的地形，风经常有显著的垂直分量。因为风力机仅对风速的水平分量很敏感，而且风电机组功率曲线是在水平气流条件下定义和测量的，所以理想情况下垂直分量应该忽略。在这一方面，不同风速计的特性也不同。最容易使用的是声学和螺旋桨风速计。如果安装正确，声学风速计会直接测量风速的水平分量，而螺旋桨风速计像风力机一样，仅对水平风速敏感。某些转杯风速计（被称为二维风速计）的性能与螺旋桨风速计相似，对风速垂直分量很不敏感或完全不敏感。还有些转杯风速计（被称为三维风速计）会对垂直风做出响应，因此会误导对水平风速的估计。如果垂直风速可以测量或估计且风速计对倾斜角的敏感度为已知，则可以对这些风速计进行修正<sup>[1]</sup>。

(6) 传感器标定。转杯和螺旋桨风速计的转换函数（斜率和偏置）都可能对同一型号的大量传感器进行试验预先确定的默认（或共识）函数，也可以对购买的传感器进行专门测量。对于后一种情况，称传感器被标定。两种方法都可以接受，取决于具体情况。有证据表明，尤其是对于NRG #40转杯风速计，与测量得到的转换函数相比，人们接受的共识函数得到的结果与功率性能试验使用的风速计更匹配<sup>[2,3]</sup>。无论是否使用转换函数，使用标定传感器的一个好处是更能保证“坏”传感器能在现场安装之前被发现。此外，使用标定传感器可以把它从现场拆下，重复试验，以确定在监测期间传感器响应的变化。优质无损的传感器应基本没有变化。与未标定传感器相比，标定传感器有时被赋予较低不确定度。

市场上有各种各样的为风电行业接受的风速计。附录A给出了一个清单。尽管每个型号的传感器都满足风电行业标准，但最好在每个测风塔配置不止一个型号。这种策略可以降低因只影响一个型号的问题导致的数据丢失和测量误差风险。

有些风速计按 MEASNET<sup>①</sup>或 IEC 等机构的标准分类。<sup>②</sup>这些风速计符合这些机构的高准确度应用规范，如功率曲线测定。然而，测风塔的风速计不必每个都满足这一标准。

#### 4.1.2 风向

风向测量对于工程区域风资源空间分布建模和优化风力机布局是必不可少的内容。通常使用风向标测量风向（对于螺旋桨风速计和声学传感器，无需专门的风向标，但最好有一两个作为冗余）。在人们最熟悉的类型之中，连到垂直轴的水平尾翼旋转对正风向（见图 4-4）。为在确定风向时有适当冗余，建议风向标至少安装在两个测量高度上。它们最好不安装在风速计的同一横梁甚至同一高度上，因为这会对获得准确的风速读数产生干扰。通常的做法是把风向标安装在风速计下面 1 ~ 2m。

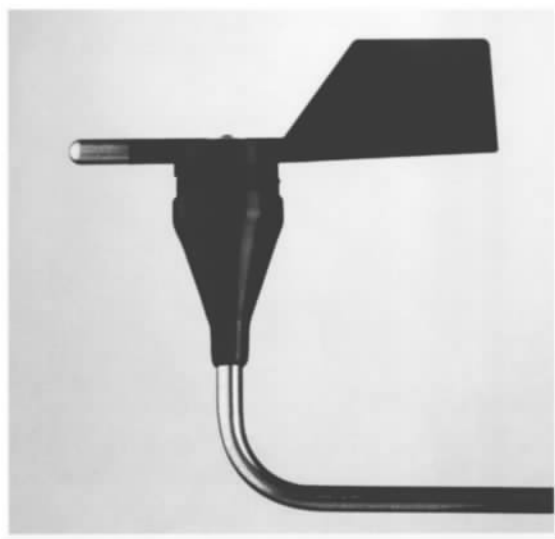


图 4-4 风向标（来源：NRG Systems, Inc）

对于带电位计型变换器的风向标，数据记录器通常在电位计整个阻性元件上加一个电压，并测量电位计滑片臂接触处的电压。这两个电压之比将决定风向标相对于其基准方向的位置。然而电位计不能覆盖全部 360°，在其起始点和终结

---

① 1996 年 11 月，一些风电发达国家的研究机构共同成立了一个国际风能测试组织，称为“MEASNET”。它在国际风电机组测试方面发挥着越来越重要的作用，也成为高质量风电机组测试结果的标志。MEASNET 目前有 18 个会员单位。2013 年 11 月 27 日，中国电力科学研究院被接受为 MEASNET 的成员单位，也是目前中国唯一的 MEASNET 的成员单位。——译者注

② IEC 对功率性能测量的标准（IEC 61400-12-1）按传感器准确度对转杯风速计分类。应该指出，这一文件要求使用经过标定的 I 级风速进行风力机试验，而且使用测得的标定常数。

点之间有一个小间隙。在这个所谓的死区中，输出信号随机漂移，无法确定方向。最好的做法是把死区调到不常用的方向，一般是直接朝向测风塔；此外，死区范围应不超过  $8^\circ$ 。风向标的方向准确度是另一个重要关注。建议分辨率优于或等于  $1^\circ$ 。

#### 4.1.3 空气温度

空气温度是风电场运行环境的重要特征之一。测量通常在地面之上  $2 \sim 3\text{m}$  或轮毂高度附近进行，或在两个高度都测量。多数位置的地面附近平均气温与轮毂高度平均气温差别不到  $1^\circ\text{C}$ 。空气温度用于估算空气密度，而空气密度会影响发电功率计算。空气温度读数也用于数据验证过程以检测覆冰。

环境空气温度传感器通常有三个部件：变换器、接口设备和辐射防护罩（见图 4-5）。变换器含电阻与温度之间关系已知的材料（通常是镍或铂）。常用的元件类型是热敏电阻、电阻温度检测器和对温度敏感的半导体器件。电阻值用数据记录器（或其他接口设备）测量。它可以根据已知关系计算空气温度。温度变换器装在辐射防护罩里面，以避免被阳光直射加热。



图 4-5 温度传感器（来源：Campbell Scientific）

## 4.2 补充测量

取决于场址条件和需要、检测项目优先级和预算，还需要增加一些传感器来测量垂直风速、高准确度温度（用于确定垂直温度梯度）、相对湿度、大气压力和阳

光辐射强度。表 4-3 列举了这些传感器的标称规范；表 4-4 归纳了与这些传感器有关的测量参数。要记住，增加每个仪器都需要电源，而且数据记录器支持的仪器通道数是有限的。

表 4-3 可选传感器规范

规范	日射强度计 (太阳辐射)	垂直螺旋 桨风速计	高精度温度	气压计 (大气压力)
测量范围	0 ~ 1500 W/m <sup>2</sup>	- 50 ~ 50 m/s	- 40 ~ 60℃	94 ~ 106 kPa (见等效高度)
起点阈值	不适用	≤ 1.0 m/s	不适用	不适用
距离常数	不适用	≤ 4.0 m	不适用	不适用
运行温度范围/℃	- 40 ~ 60	- 40 ~ 60	- 40 ~ 60	- 40 ~ 60
运行湿度范围(%)	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100	0 ~ 100
系统精度	≤ 5%	≤ 3%	≤ 0.1℃	≤ 1 kPa
记录分辨率	≤ 1 W/m <sup>2</sup>	≤ 0.1 m/s	≤ 0.01℃	≤ 0.2 kPa

(来源：AWS Truepower)

表 4-4 可选测量参数

需测量参数	典型监测高度
垂直风速/(m/s)	最顶部风速计高度之下 2m
温差/℃	高于地面 3m,最顶部风速计高度之下 2m
大气压力/kPa	高于地面 2 ~ 3m
相对湿度(%)	高于地面 3m,或最顶部风速计高度之下 2m
太阳辐射/(W/m <sup>2</sup> )	高于地面 3 ~ 4m

(来源：AWS Truepower)

4.2.1 垂直风速

对于复杂地形（IEC 的定义是距风力机 20 倍轮毂高度的距离内坡度大于 10%<sup>[4]</sup>），建议与标准仪器一起使用能测量垂直风速的风速计。通过直接测量风速垂直分量，可以更好地估算发电的风速水平分量。此外，垂直风速测量可能是风力机机械荷载和适当性计算的重要输入，因为剧烈和频繁的非水平风可能产生有害的荷载和磨损。

测量垂直风速的两个常用方法是安装转轴垂直指向的螺旋桨风速计（见图 4-6）或使用三维声学风速计。无论使用哪种方法，因为垂直风随离开地面的高度剧烈变化，所以建议风速计尽可能靠近轮毂高度，使之不干扰其他传感器（传感器之间垂直间隔通常应为 1 ~ 2m）。

因为垂直运动通常很小，因此应使用敏感度非常高的风速计。螺旋桨风速计需要可以指示向上和向下的变换器。信号通常是直流电压，它的符号和幅值由数据记录器（或接口设备）解释。声学传感器比螺旋桨风速计昂贵，但它的优点是可以

同时测量完全同一高度和位置的风速的水平 and 垂直分量。

### 4.2.2 加热风速计

覆冰可导致风速计旋转减慢、停止，甚至因荷载（如坠冰）而破坏。同样，它也可能让风向标失去平衡或改变气动分布，使方向读数畸变，或把它冻结在一个位置上。因此，在频繁或严重覆冰的地点，测风塔应至少配备一或两个加热风速计和风向标。但与不加热风速计相比，加热传感器会消耗更多电量（电源选项将在第4.7节讨论）。

除覆冰期之外，加热风速计的准确度都低于不加热风速计。因此建议以不加热风速计为主要数据来源，而加热风速计仅用来填补主要数据记录的缺口。此外，为尽可能保持加热风速计读数的一致性，建议全年都把电源加到加热元件上，而不仅仅在寒冷季节。在典型配置中，不加热风速计应在测风塔的最上面两个监

测高度上与加热风速计成对布放，而测风塔上的两个风向标应有一个是加热的。这种方法可以在总体数据的高恢复率与良好的测量准确度之间取得平衡。

### 4.2.3 温差

参数  $\Delta T$  指地面之上两个高度之间的温度差。它是大气热稳定性（或浮升力）的测度。它的难点在于测量的温度差需具有适用的充分准确度。按照 EPA<sup>⊖</sup> 质量保证手册（1989）的要求， $\Delta T$  的最大允许误差是  $0.003^{\circ}\text{C}/\text{m}$ （摄氏度每米高度）。例如，如果高度分别为 10m 和 40m，则允许误差仅为  $0.1^{\circ}\text{C}$ 。为达到这一要求，通常使用在制造厂校准和匹配的一对相同的温度传感子系统。为使高度差最大以得到准确结果，一个传感器需要放在离地面约 3m 高处，而另一个放在离它不远（如 2m）的测风塔最上面的传感高度之下。此外，两个传感器都应该以相同方式安装和遮蔽，使它们对环境条件的响应相同。为进一步降低误差，要求使用的遮蔽呼吸或者是强制（机械）的，或者是自然（被动）的（要满足 EPA 导则，可能需要使用强制呼吸）。应向数据记录器生产厂家咨询确定兼容的传感器类型和型号。

### 4.2.4 大气压力

在了解空气温度的同时又知道大气压力，有助于改进空气密度估算准确度，因为同一温度下压力的正常变化会影响空气密度约 1%。然而，在有风环境下，难以准确测量大气压力，因为流过仪表封壳的风会产生动态压力。因此，高准确度仪表



图 4-6 垂直螺旋桨风速计  
(来源: R. M. Young Company)

⊖ 这里 EPA 指（美国）环保署（Environmental Protection Agency）。——译者注

相当昂贵，所以多数风资源评估项目都不测量大气压力，而是仅依赖温度或海拔，或依赖区域气象站的压力读数。多数情况下，两种方法都能给出可接受的准确度。主要的例外是海拔极高（高于海平面 2000m 以上）的工程或附近没有海拔相似气象站的工程。这些情况下，建议进行高准确度大气压力测量。

有几种市场上有供货的大气压力传感器（见图 4-7）。多数型号使用把 DC 电压送到数据记录器的压电变换器。它可能需要外部电源。咨询数据记录器生产商，以确定兼容的传感器型号。注意，变换器需要暴露在外环境空气压力下。它绝不能安装在密封壳体中，或安装方式会使入口附近的风流场产生压力改变。



图 4-7 一种大气压力传感器（来源：Campbell Scientific）

#### 4.2.5 相对湿度

因为空气中水蒸气含量会影响它的密度，所以要使用相对湿度传感器来提高空气密度估算的准确性。然而，密度影响通常都很小，所以测量这个参数很少是为这个目的。在寒冷气候，相对湿度传感器有时用来进行覆冰分析。

#### 4.2.6 阳光总辐射

太阳能资源测量可以作为风况监测项目的一部分。太阳辐射与风速和每日时间一起使用也可以作为大气稳定性指标。

可以使用日射强度计测量阳光水平总辐射。它是照射到水平面的直射阳光和天空漫射光的组合。一种类型的日射强度计使用发光二极管。它产生与入射阳光量（称为辐照量）成正比的极小电流。另一种日射强度计使用热电堆。它是一组热传感器，会产生极小电压。数据记录器（或辅助接口设备）使用预设的乘数（斜率）和偏置（截距）来计算阳光总辐射读数。因为传感器的输出信号通常极小（数微安或数微伏），所以它可能需要放大才能被数据记录器读取。

日射强度计必须水平放置，以准确测量水平总辐射。当它在北半球安装在测风



塔上时，最好把传感器放置在向南伸出的横梁上，在障碍物之上或远离障碍物，以尽量减少来自其他仪器和测风塔的遮挡；如果在南半球，当然要取相反方向。建议测量高度是地面之上 3 ~ 4m。日射强度计需要经常进行现场维护检查，进行保洁和重新调整水平。

4.3 记录参数和采样间隔

强烈建议测量参数和它们的采样与记录间隔与风电行业典型实践保持一致。坚持这些标准可以使风资源分析和后续的外部检查变得简单易行。行业标准的记录间隔为 10min，尽管也偶尔使用其他间隔（通常更短）。在每个 10min 间隔内，每个参数通常每 1s 或 2s 采样一次（取决于数据记录器型号）（为避免误差，采样频率应不高于来自风速计的脉冲频率）。与参数有关，数据记录器记录间隔区间平均值、标准偏差和最大值、最小值。数据记录应为时间序列，所有记录都标有时间和日期。这些要求都是为风电应用设计的数据记录器的功能。应该指出，有些数据记录器的时间标记指的是前面的时间间隔，而有些指的是后面的间隔。

记录值是第 9 章描述的数据验证程序的基础。每个记录值将在下面介绍并归纳于表 4-5 中。

表 4-5 基本参数和补充参数的派生统计值

需测量参数	记录值
风速/( m/s)	平均值,标准偏差,最大/最小值
风向/(°)	平均值,标准偏差,最大阵风方向
温度/℃	平均值,最大/最小值
太阳辐射/( W/m <sup>2</sup> )	平均值,最大/最小值
垂直风速/( m/s)	平均值,标准偏差,最大/最小值
大气压力/kPa	平均值,最大/最小值
温差/℃	平均值,最大/最小值
相对湿度( % )	平均值,最大/最小值

4.3.1 平均值

除风向外，记录所有参数的每 10min 间隔平均值。对于风向，它的平均值定义为矢量合成值。它是用北方风速和东方风速表示的风向。该平均值用于报告风速变化性以及风速和风向的频率分布。

4.3.2 标准偏差

风速和风向都要确定标准偏差。它定义为对每个 10min 间隔内所有 1s 或 2s 样本的总体标准偏差  $\sigma$ 。风速和风向的标准偏差是湍流的指标。它们也用于检查可疑和错误数据。

4.3.3 最大值和最小值

在每个间隔都要记录观测到的每个参数的最大值和最小值。这对 3s 最大阵风

(速度) 尤其重要。它会影响到某一型号的风机被认为是否适用于某个场址。如可能, 也应记录与最大风速和最小风速相对应的同时风向。

## 4.4 数据记录器

数据记录器已经从人工拨号和人工阅读的带状记录纸进化到各种独立数字设备。很多制造商现在已经能提供把数据存储和传输功能集为一体的完整数据记录系统 (见图 4-8)。



图 4-8 数据记录器 (来源: Campbell Scientific)

所有数据记录器都就地存储数据, 很多还能通过蜂窝电话、射频 (radio frequency, RF) 遥测设备或卫星通信把数据传输到另一个位置。远程数据传输可以使用户无需频繁到现场就可以获取和检查数据, 也可以确认记录器运行是否正常。第 4.6 节将介绍数据传输设备选项的信息。

数据记录器必须与配置的传感器类型兼容, 而且必须支持期望的传感器数量、测量参数和采样与记录时间间隔。把记录器安装在防腐、防水和可封闭的外壳之内是一种明智的做法, 这可以保护记录器和外围设备免受环境、盗窃和破坏行为的危害。建议记录器具有以下功能:

- 1) 能按与相应时间和日期标记对应的顺序格式储存数据;
- 2) 从传感器接收的信号误差贡献应微不足道;
- 3) 内部数据储存能力至少要达到 40 天;
- 4) 拥有内载实时时钟, 使得即使记录器失去电源, 时间标记也是正确的;
- 5) 运行的极端环境与表 4-1 所列相同;
- 6) 远方上联不可能时, 可提供提取数据存储媒体;
- 7) 提供远程数据采集选项;
- 8) 可用蓄电池供电运行 (可以增加其他电源, 如太阳能板);
- 9) 提供非易失性的记忆存储, 使得电源失效时不会丢失数据。

很多满足这些标准的电子数据记录器都可以在市场上买到。它的销售商清单已

在附录 A 中给出。

4.5 数据存储设备

每个数据记录器都含有运行于操作系统软件的计算机。它包括暂时储存供处理数据的缓存器。计算机访问该缓存器计算平均值和标准偏差等期望参数。得到的数据值再储存在存储器中。有些数据记录器有一个不能更改或只能稍加修改的固定可靠的操作系统，而有些记录器则是与用户互动的，可以编程，用于不同任务。老式数据记录器的操作系统和数据缓存区有时储存于易丢失的内存中。它的缺点是需要连续电源来保存数据。最好使用集成了内部后备电池或使用不易失内存的数据记录器，因为这样才不容易丢失数据。

4.5.1 数据处理和存储

数据处理和储存的方法随数据记录器而异（见第 7 章）。记录和储存数据的常用格式有两种：环形存储器（ring memory）和满停存储器（fill and stop memory）。

1. 环形存储器

一旦可用存储器已经充满到全容量，最新数据记录将覆盖最早的数据。

2. 满停存储器

一旦存储器已经充满到全容量，其他数据就不能再存入。它会使数据记录停止。

过去，人们多使用环形存储器，而少用满停存储器，因为它可以在操作员不能在缓存器充满之前提取数据时仍继续记录数据。然而既然储存容量已经达到了现代数据记录器的水平，这个问题就不存在了。如今的缓存器容量通常可以储存 6 ~ 12 个月的数据，除非记录间隔远小于常用的 10min。

4.5.2 存储设备

多数制造商对数据储存设备都提供几个选项。最常见的选项见表 4-6。

表 4-6 数据存储设备

存储设备	说 明	下载方法/需要的外围设备
内存卡	用于数码相机和其他设备的各种格式的独立储存芯片（如 MMC、SD、microSD、SDHC、存储棒、USB 闪存）	就地读取和删除或更换。需要读设备和软件
固体模块	集成电子设备，与数据记录器直接相连	就地读取和删除或更换。需要读设备和软件
数据卡	插入数据记录器专用插槽的可编程读写设备	就地读取和删除或更换。需要读设备和软件
EEPROM 数据芯片	含可电擦除及可编程的只读存储（electrically erasable and programmable read-only memory）设备的集成电路芯片	需要 EEPROM 读设备和软件
磁卡	人们熟知的软盘或磁带（即盒式磁带）	需要从媒质读取数据的软件
便携计算机	膝上或笔记本型计算机	需要专用缆线、接口设备和/或软件

## 4.6 数据传输设备

数据传输和处理过程及数据记录器型号选择取决于监测项目的资源和要求。作为规则，应咨询制造商以确保系统部件之间的兼容性。此外，还建议部件应提前采购，以便在加入新监测系统配置前进行试验。

数据通常要手工或远程提取并传输到一台计算机上。

### 4.6.1 手工数据传输

手工提取需要到现场来传输数据。通常有两个步骤：

1) 把当前存储设备（如数据卡）拆下并更换，再送到另一个地点下载。数据也可以就地传输到膝上计算机。很多记录器使用 RS-232 串口作为与计算机的接口。没有 RS-232 串口的计算机可以使用 USB 接口和 USB/RS-232 适配器。

2) 采得的数据传输到一台进行数据分析和备份的中央计算机上。

手工传输的主要缺点是需要经常出现场以确保所有设备运行正常。如果一台传感器或记录器在两次出现场之间出现故障，从这时起直到下一次出现场期间应该采集的数据就会丢失。此外，数据误处理（如存储卡丢失或损坏）的风险也会加大。因此，如今的多数风况监测项目都依赖远程数据传输。

### 4.6.2 远程数据传输

远程数据传输需要数据记录器与中央计算机之间的通信联络。通信系统可以使用直连缆线、电话线、蜂窝电话、射频遥测或卫星遥测，或为保持冗余，把这几种方式结合使用。这一方法的主要优点在于，与出现场可以做到的相比，它的数据可以更经常地（如每周）提取和检查。这意味着设备出现问题可以更迅速地确认和解决，可以提高数据提取的可靠性。很多记录器制造商选择提供集成的远程数据采集设备。远程法的主要缺点是设备成本高。此外，有些场址蜂窝电话覆盖性很差，而对有些场址来说，非蜂窝电话选项的成本可能很昂贵。

远程数据提取有两种方法：一种是由受方启动的（调用），另一种是由记录器启动的（回拨）。第一种需要受方监视通信运行。它的步骤包括启动调用现场记录器、数据下载、确认数据传输和删除记录器储存。有些调用式数据记录器型号与基于计算机含批量调用的终端仿真软件兼容。批量调用使数据传输过程自动化，使用户能按预设时间间隔从多个监测站下载数据。编写批处理程序时也可以包含数据例行确认。应咨询记录器制造商，以确定设备与这一特性的兼容性。

回拨式数据记录器在预设时间自动呼唤计算机，以进行数据传输。过去，回拨法不能像调用法那样支持很多测风塔，因为调用时间必须间隔很长以容纳缓慢而重复的传输尝试。最新一代的数据记录器解决了这个问题。它使用互联网把数据作为附加电子邮件传出去。这种方法可以同时进行来自多个场址的数据传输。此外，数据还可以传送到不止一台计算机，使数据安全性和方便性大大提高。

带蜂窝电话通信的远程数据传输的数据记录器被广泛使用，因为它们使用方便，造价合理。现场的蜂窝信号强度和类型（GSM 或 CDMA）应事先确定；可以用便携电话做到这一点。对信号强度较弱的地点，有时用高增益天线就可以解决这一问题。如果不能解决，可以选用链接全球星（Globalstar）或铱星（Iridium）网络的卫星调制解调器。

数据记录器制造商通常会提供建立蜂窝账号的指导。一定要与设备供应商和蜂窝电话公司密切合作，在监测工作开始前解决所有问题。最好规定在非高峰时段传输数据，以利用价格折扣和高网速。

## 4.7 电源

所有电子数据记录器都需要电源。电源容量应满足整个监测系统的功率需求。最主要的电源选项列举如下。

### 4.7.1 家用蓄电池

最新一代记录器使用低能耗电子部件，可以用家用蓄电池（D 单格，9V，等等）维持运行 6 个月到 1 年。尽管这种系统通常很可靠，但一旦蓄电池失效，数据采集就会停止。此外，它的功率不足以支持含加热传感器或其他专用塔的需求。为解决这一问题，除记录器蓄电池外，还经常使用其他扩展电源。

### 4.7.2 太阳能蓄电池系统

为保证长期可靠运行及满足更高功率需求，最常用的选项是把铅酸蓄电池与太阳能板联合使用。所以，很多销售商会提供成套的太阳能蓄电池系统。

铅酸蓄电池是一个良好的选择，因为它可以耐受重复的充放电循环而不太影响它的储能容量，并能在低温下保持电荷。但在使用大容量蓄电池时一定要小心，不能让蓄电池端子短路。另外还建议使用把酸液吸入胶状体以防外溅的新设计。这种蓄电池称为无外溅电池或胶体电池。尽管寿命很长，但在经历多次充放电循环后，铅酸蓄电池容量最终还是会下降。如果准备在现场使用多年，就一定要在设计蓄电池容量时考虑到它的这种容量下降。

太阳能板容量必须足够大，能在最坏预期条件（通常在冬季）下支持整个监测系统的运行和为蓄电池充电。为避免停电导致数据丢失，建议太阳能发电加储能系统至少能自维持（不充电）运行 7 天。太阳能系统也必须用二极管进行反偏置保护，以避免蓄电池在夜间漏电。此外，还必须配置调压器使电压与蓄电池匹配，并防止阳光过足的月份过充。

成套提供太阳能蓄电池记录器的销售商可以对各种位置的合适容量提出建议。

### 4.7.3 交流电源

风况监测系统通常不需要交流电。而且一般来说，测风塔通常也不会距交流电源很近，值得与它架设连线（除通信塔外）。尽管如此，但如果交流电源很现成方

便，或仪器负荷非常大，太阳能板不适用等，此时就应该选择交流电源。应该仅用它来给蓄电池消流充电，而不是直接给记录器供电。应配备削峰限压设备，以防止系统受电气暂态损害。此外，整个系统还必须与公共接地点可靠连接（见第5章）。

#### 4.7.4 其他电源

在某些环境下可使用的其他电源有小型风电系统、风能/太阳能混合系统和柴油发电机。对于风能资源充足而太阳能有限（如极地环境）或太阳能板大部分时间很容易被树木或其他障碍物遮挡的地方，小型风电和风能/太阳能混合系统是一个不错的选择。柴油发电机需要补充燃料，但它在有些场址却很适用。

## 4.8 测风塔和传感器支持硬件

### 4.8.1 测风塔

风资源监测塔多种多样。它的结构有两种基本类型：圆筒式和桁架式。圆筒塔是一个中空筒体或几个头尾相接的筒体，而桁架塔是三个或四个用支柱互联的分段撑杆。两种塔都又分为三类：斜拉塔、伸缩塔和固定塔。斜拉塔安装在铰接基础上，而非铰接的一端使用绞盘和拉线立起就位。伸缩塔从垂直位置用千斤顶托起。而固定塔通常就地架起。此外，测风塔可以是自立的，也可以是用锚接到地面的拉线固定的。自立塔需要有足够的结构强度来抗御它受到的横向风荷载。拉线塔体积要小些，因为它利用拉线实现横向稳定。

多数场址都宁愿使用圆筒式斜拉塔，因为它比较容易立起也较低（即测风塔可以在地面组装，而且传感器也可以在地面安装和保养），它的地面准备工作量最小而且造价也较低。然而，圆筒式斜拉塔目前最高只能用到80m，如果希望高度更高就必须使用固定塔（通常是桁架式的）。有些地区所有高度都广泛使用桁架塔，因为它可以在当地低成本制造。

测风塔应有足够强度耐受当地的预期极端风荷载和覆冰荷载，应具备抵御风引起的振动的足够稳定能力。测风塔制造商应能提供允许环境条件的指导。注意，某些辖区有自己的风和覆冰荷载要求。它们会包含在许可审批过程中。在海岸环境下，抵御盐水侵蚀能力非常重要。拉线应使用符合当地土壤条件的地锚固定（销售商和安装人员应告知这一点）。防雷（安装避雷针、避雷线和接地棒等设备）也是必须注意的事项。某些地点还要求采取措施防止破坏、盗窃和未得允许登上测风塔，以及防止牲畜和其他大型动物破坏。

测风塔安装的详细信息见第5章，海上测风塔的要求将在第14章讨论。

### 4.8.2 传感器支持硬件

风速计和风向标多数安装在从测风塔一侧水平伸出的横梁上。横梁端部附近安装一个短的垂直桅柱来固定横梁上方的传感器。横梁和桅柱应足够长，使测风塔和横梁对风速和风向读数的影响很小，除非传感器直接位于测风塔下风方向。第5章会说明如何达到这一目的。

风速计也可以垂直安装在测风塔顶部。这样的好处是消除了测风塔尾流（即阴影）影响，但这需要注意使用足够长的垂直梁以尽可能减少测风塔顶部对风速观测的影响。因为与水平安装相比，垂直安装的风速计经受的测风塔影响是不同的，所以垂直安装的风速计不适用于测量风切变。这种配置的一种应用是风电机组功率特性检测。这种情况下通常是在轮毂高度垂直安装一对风速计。

还需要注意的是，固定横梁和垂直安装桅柱时必须让风速计轴准确垂直（对于转杯风速计、声学风速计及风向标）或准确水平（对于螺旋桨尾翼风速计）。横梁或桅柱倾斜或歪斜会导致自由流风速或风向测量结果错误。

最好使用与测风塔极端风荷载和覆冰荷载承受能力相同且不容易产生风致振动的传感器支持硬件。该支持硬件应采取防腐措施，尤其是在海岸环境下。传感器护罩排水孔应保持开敞以防止积水和结冰条件下的膨胀。应使用圆筒式（中空的）传感器横梁和支柱，而不用实心件。

仪器定位，包括传感器高度和横梁相对于主导风向的取向，在第5章介绍。

## 4.9 连线

下面是选择正确电气连线和导线类型的指导意见：

- 1) 使用的连线应符合电压等级和传感器类型要求；
- 2) 使用带抗紫外线绝缘护套的连线；
- 3) 使用对场址全部预期温度范围下都保持柔韧性的绝缘和导线类型；
- 4) 使用屏蔽和/或双绞线电缆；它们都能防止影响测量的环境电气噪声；通常做法是仅把屏蔽电缆接地线的一端接地。

多数传感器和数据记录器厂家都会提供满足这些要求且与他们的设备兼容的传感器电缆。

## 4.10 测量系统的准确度和可靠性

制造商会使用不同的定义和方法来表示他们的产品的准确度和可靠性。本节主要介绍如何选择合适设备和满足表4-1引用规范的必需基本信息。

### 4.10.1 准确度

所有系统的准确度都往往由它的最不准确的部件支配。对于多数风资源测量类型来说，这一部件通常是传感器。与电子子系统（数据记录器、信号调节器和相关连线及接头）相关的误差通常微不足道。

一个仪表的系统误差定义为大量同类仪表观测误差相对于可接受标准的标准偏差。对于给定仪表，测量值应在真实值的引用系统误差范围之内，对应的可信度为68%；或在真实值的2倍系统误差之内，对应于95%可信度。然而，系统误差仅

适用于可控条件；现场可能出现的湍流和测风塔对自由流风速影响等因素并没有考虑在内，但它们却可能相当可观。

各制造商表示系统误差的格式并不统一。通常，表示误差的方法是下述三者之一：

1. 表示为绝对差值（如 $\leq 1^{\circ}\text{C}$ ）

$$| \text{测量值} - \text{可接受标准值} |$$

2. 表示为百分差值（如 $\leq 3\%$ ）

$$100 \times \left( \frac{\text{测量值} - \text{可接受标准值}}{\text{可接受标准值}} \right)$$

3. 表示为对可接受标准值的最小比值（如95%准确度）

$$100 \times \left( \frac{\text{最小测量值}}{\text{可接受标准值}} \right)$$

人们经常把准确度与精确度混淆。系统精确度（有时也用标准偏差表示）指同一仪器在相同环境下重复记录数值的一致性。精确度也可以指数据记录器报出数字的位数。为避免在随后的分析中产生舍入误差，建议记录数值应比标称精确度多一位有效数字。

#### 4.10.2 可靠性

系统可靠性是系统不断提供有效数据能力的测度。销售商通常在他们的设备上进行可靠性检测，以确定产品寿命周期。他们还会经常引用某种条件下的故障平均间隔时间。尽管这一信息是有帮助的，但产品可靠性的最好指标之一是其他用户的经验。用户可以向销售商询问以做参考，也可以在会议和工作组相互接触。用户在保证系统可靠性方面也起重要作用，就是严格遵守制造商的安装运行指导意见，使用冗余传感器使关键数据恢复最大化，实施综合质量保证计划。

### 4.11 讨论题

1. 在所有风资源评估项目中，测量的最基本环境参数是什么？要使用哪些类型的仪器进行测量？

2. 使用互联网确认有足够可用技术信息的风速计，确定它是否适用于风资源评估活动。仪器的准确度如何？它是如何表示的？仪器的距离常数是多少？你会使用这个仪器进行风资源评估活动么？为什么是或不是？

3. 使用互联网确认风资源评估使用的成套测风塔和仪器设备，包括定价和交付信息。

4. 假设你准备在一个高海拔、陡峭地形、冬季很寒冷严酷的场址测量风资源。设计一套你觉得可以提供准确风资源评估必要信息的仪器设备。

5. 在测风塔上同一高度安装两台风速计的目的是什么？为什么风向、温度和



压力等其他传感器不这样做？

6. 假设你正在一个偏远地区实施风况监测活动。它距最近城镇的公路路程有80km (50mile)。该公路经常因为天气恶劣不能通行。该场址的蜂窝信号微弱而且是间歇的。你准备如何选择数据采集方法，以及如何对它们进行评估？如果该场址有5个测风塔而不是仅一个，你的优选项会因此不同么？

7. 你正在进行一项需要使用加热风速计的风资源评估。设想一种使用燃气轮机或柴油发电机是维持对设备供电蓄电池充电最好方法的情景。

### 参考文献

1. Papadopoulos KH, et al. Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. *Boundary-Layer Meteorol* 2001;101(1):77–107.
2. Hale E. Memorandum: NRG #40 transfer function validation and recommendation. Albany, New York, USA: AWS Truewind; 2010.
3. Young M, Babij N. Field measurements comparing the Riso P2546A anemometer to the NRG #40 anemometer. Seattle, Washington, USA: Global Energy Concepts; 2007.
4. International Electrotechnical Commission (IEC) IEC 61400-12-1 Wind turbine generator systems - Part 12: Wind turbine power performance testing. (First Edition 2005–12). (IEC publications can be purchased or downloaded from <http://webstore.iec.ch/>.)

### 深入阅读建议

Brock FV, Richardson SJ. *Meteorological measurement systems*. New York: Oxford University Press; 2001. p. 304.

Coquilla RV. Review of anemometer calibration standards. USA: OTECH Engineering, Inc.; 2009. p. 9. Available at <http://otechwind.com/wp-content/uploads/CANWEA-2009-Paper.pdf>. (Accessed 2012).

International Energy Agency Programme for Research and Development on Wind Energy Conversion Systems. Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: Topic 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry, Second Print. 2003. p. 60. Available at [http://www.ieawind.org/task\\_11/recommended\\_pract/11\\_Anemometry.pdf](http://www.ieawind.org/task_11/recommended_pract/11_Anemometry.pdf). (Accessed 2012).

Papadopoulos KH, Stefanatos N, Paulsen US, Morfiadakis E. Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. *Boundary-Layer Meteorol* 2001;101:77–107. Available at <https://springerlink3.metapress.com/content/m047808m32314343/resource-secured/?target=fulltext.pdf&sid=nlik5u45zxbzxb2rtiire1&sh=www.springerlink.com>. (Accessed 2012).

Strangeways I. *Measuring the natural environment*. 2nd ed. UK: Cambridge University Press; 2003. p. 548.

## 第 5 章 监测站安装

一旦场址已经选定，监测系统设计已经完成，所有许可申请已经获批，必要设备已经采购，监测项目就进入安装阶段。本章将介绍关键安装步骤的指导意见，包括设备采购、检查和准备，测风塔安装，传感器和设备安装，现场调试和文件记录。

### 5.1 设备采购

整个过程的第一步是采购监测计划规定的满足风况监测项目目标所需的设备。这一过程包括成本、方便性和性能之间的平衡。在工程开发的这一早期阶段，预算可能比较紧张，所以希望设备采购节省资金。尽管成本是永远都需要考虑的重要问题，但如果设计监测项目时把成本看成至高无上的问题，则该项目是不会成功的。例如，配置的测风塔数量低于建议数量能节省开支，但也加大了工程发电量估计的不确定性。其结果可能是开发商付出的工程最终成本远高于开始时节省的开支。

采购过程开始时通常先要确定测风塔数量、测风塔类型和高度、希望测量的参数、希望的数据采样和记录时间间隔。然后项目主管要确定传感器类型和数量（包括备件）；每个传感器需要的安装梁、电缆和硬件；数据记录器处理要求和需要的数据通道类型和数量（它可能影响记录器型号和制造商的选择）；以及数据提取方法（手工的还是远程的）。同时还要考察场址的正常和极端气候条件，以确保设备能全年可靠运行。

最后，需要得到满足项目目标的成套设备报价，以及保修信息、产品支持信息、交货期，并对不同供货商进行比较。对产品提供综合支持的制造商对于监测系统安装和运行消缺来说是非常宝贵的资源；有些供货商甚至提供培训服务。附录 A 是设备销售商的清单。

### 5.2 设备验收试验和现场准备

#### 5.2.1 验收试验

一旦设备运抵，最好立即检查是否有破损或部件丢失，而且要全面彻底检测所有系统部件。检查结果应记录形成文件，不满足规范要求的部件应立即返厂更换。

建议进行以下验收试验：

### 1. 数据记录器

- 1) 与传感器连接前先接地，以防静电放电损坏；
- 2) 给数据记录器通电，检查系统的各个电压；
- 3) 如可能，按制造商说明建立和激活通信账号（蜂窝的或卫星的）及电子邮件服务；
- 4) 先连接接地线，然后用屏蔽电缆把所有传感器接到数据记录器端子；
- 5) 确认所有传感器输入都运行正常；
- 6) 确认记录器数据采集和数据传输过程。

下面是测试情况的简单情景：按照厂家说明把一个传感器接到数据记录器，以平均间隔 1min 的频率采集数据样本。把记录的数据从存储装置（如数据卡）传输到一台使用记录器数据管理软件的计算机。观察数据并确保①数据记录器工作正常；②数据传输成功；③存储装置工作正常；④记录值合理。如有要求，用远程传输重复上述步骤。

### 2. 风速计和风向标

- 1) 如果采购的风速计已经经过标定，检查每个标定合格证，确保报告值在正常范围内。
- 2) 检测每台风速计和风向标，确保它们转动灵活并能达到整个圆周。倾听结合部位和牵引部位，检查是否有不正常摩擦。
- 3) 使用屏蔽电缆，按照制造商说明把每个传感器连接到正确的数据记录器端子。确认数据记录器上显示的每个传感器输出的合理性。对于风速计，握住转杯或螺旋桨然后松开让它们旋转，确认它们的零值和非零值。对于风向标，确认四个方位基点：东、西、南、北。

### 3. 温度传感器

在室温下进行单点标定校核；数值稳定后，把传感器温度读数与已知标定温度计读数比较。两个传感器之间的偏差应不大于 1℃。

### 4. 太阳能板电源

把它放在阳光直射下，确认输出电压。注意，连接到某些记录器端子时，一定要注意极性。

### 5. 安装硬件

- 1) 检查传感器安装梁，确保它坚固耐用；
- 2) 检查焊接和连接点，不能有裂缝；
- 3) 每类传感器都要进行预组装，确认无部件缺失。

#### 5.2.2 现场准备步骤

到现场安装设备之前周密准备可以节省时间，降低产生需要代价高昂的往返现场问题的风险。

- 1) 为每个监测场址编号，清楚标示到每个场址去的设备；

- 2) 在场址信息记录文件上输入场址和所有传感器的相关信息（见第 5.9 节）；
- 3) 在一台个人计算机上安装数据记录器管理软件，并输入需要的信息；
- 4) 如果希望，可为数据记录器编写含场址和传感器（斜率和截距）的适当信息的程序；把正确日期和时间输入数据记录器；
- 5) 插入数据记录器的数据存储卡或其他存储装置；
- 6) 为节省宝贵的现场安装时间，在后方预组装尽可能多的部件；例如，传感器可预先连线并安装在梁上；
- 7) 某些传感器是易损件，因此需要妥善包装所有设备以安全运抵现场；
- 8) 包装好现场需要的所有工具；
- 9) 如可能的话，每种部件都要配至少一个备件；备件数量取决于监测期间设备预期损耗量，以及得到更换的预期提前时间；备用设备的成本应与一旦需要更换时所需的时间和代价权衡。

### 5.3 安装队伍

风况监测项目获得数据的质量取决于安装质量。安装队伍应拥有经验丰富的人员，其中一人应被明确指派为监督角色。这样可以提高效率和保证安全。安装队人数应满足想要安装的塔型和设备的需要。安装 50 ~ 60m 圆筒形斜拉塔通常需要 4 人，含监督人。安装桁架塔需要的人工取决于具体情况，应由有资质的工程师确定。

负责场址选择的人员不一定总会参加安装。如果选址人员不参加安装，则安装队长必须得到相关场址的全部信息，包括纬度和经度（可用 GPS 接收器确认）、主导风向、道路地图、所有大门的密码和钥匙，以及地形图和精确显示测风塔计划位置的现场照片。

### 5.4 安全问题

安装铁塔肯定是一项有危险的工作。铁塔和设备可能落到人身上，登塔人可能从塔上掉下来，而且如果有交流电源或附近有电力线路的话，还有电击危险。在某些偏远地区，也可能有野生动物造成的危险。安装队长必须严格强制执行安全规约。此外，工作人员经验丰富、按制造商建议行事和采取公认的预防措施可以降低安全风险。安装队的注意事项如下：

- 1) 受过培训并遵守所有适用的安全要求；
- 2) 相互间和与后方办公室保持联络；
- 3) 遵守测风塔和设备制造商的安全守则；
- 4) 安装期间遵守共识：例如，如果有雷电活动，就应该暂停工作，直至危险

过去；

- 5) 配备适当的安全设备，包括安全帽、保护手套、护目镜、合适的鞋或靴子、醒目的背心、急救箱，如果需要登塔，要配上合格的安全带和系索；
- 6) 注意防止脱水，使用防晒物品，需要时应穿适当的防寒服；
- 7) 要受过急救和心肺复苏<sup>⊙</sup>（cardiopulmonary resuscitation, CPR）培训；
- 8) 离开道路驾驶时要特别注意不发生事故；
- 9) 保证铁塔基部与架空线距离至少为 1.5 倍塔高；
- 10) 注意测风塔上的任何设备都可能带电，如果可能，在登塔作业前先在塔基切断电源；
- 11) 挖掘和安装地锚或接地棒前，先联系当地地下设施保护单位，确认和标出存在的危险区域（如埋藏电缆线或天然气管道等）；
- 12) 开始新的作业前先检查现有的铁塔、地锚和拉线；
- 13) 按铁塔制造商规范紧固拉线；
- 14) 安装桁架塔时，要有至少两名受过铁塔救援培训的登塔人员；
- 15) 竖立新塔时要通告当地机场，保证飞行员意识到新建筑，还要确保铁塔按当地要求做相应的标识。

## 5.5 确定真北

对于说明方向数据来说，知道真正北方是必不可少的。而且它对测风塔布局 and 安装来说也很有用。很多监测项目的风向标和风速计没有按正确记录的方向调整，数量之多令人吃惊。这会导致风流程和尾流建模产生重大误差，会导致风力机布局不佳。

方向误差产生的原因经常是由于混淆了（地）磁北和真北。磁北是罗盘磁针北端指的方向；而真北是沿当地经线指向北极的方向。有时，把磁北修正到真北被错误应用，而且有时被应用两次，一次是在现场，另一次是被数据分析人员。如果铁塔安装人员使用磁罗盘，让他们相对于磁北调节传感器并且在分析数据时把读数修正到真北，可以降低误差风险。幸好如今多数 GPS 接收器可以指示真北，从而可以完全不必考虑磁北。

如果需要磁北修正，则必须确定当地磁偏角（单位：度）。这一修正值可以在该区域的地形图或等偏角地图上找到（图 5-1 是一个实例）。如何修正取决于磁北是在真北的东边还是西边。如果在东边，磁偏角用真北西边的度数表示，因此朝向真北的方位就等于磁偏角。如果在西边，真北方位为  $360^\circ$  减去磁偏角。在这两种情况下，真北方位都必须加到相对于磁北的方向才能得到相对于真北的方向。

---

⊙ 即人工呼吸。——译者注

例如，假如传感器横梁方向是偏离磁北  $150^\circ$ 。如果当地磁偏角是  $15^\circ\text{W}$ ，则横梁偏离真北方向  $135^\circ$ 。然而，如果磁偏角是  $15^\circ\text{E}$ ，则横梁偏离真北方向  $165^\circ$ 。

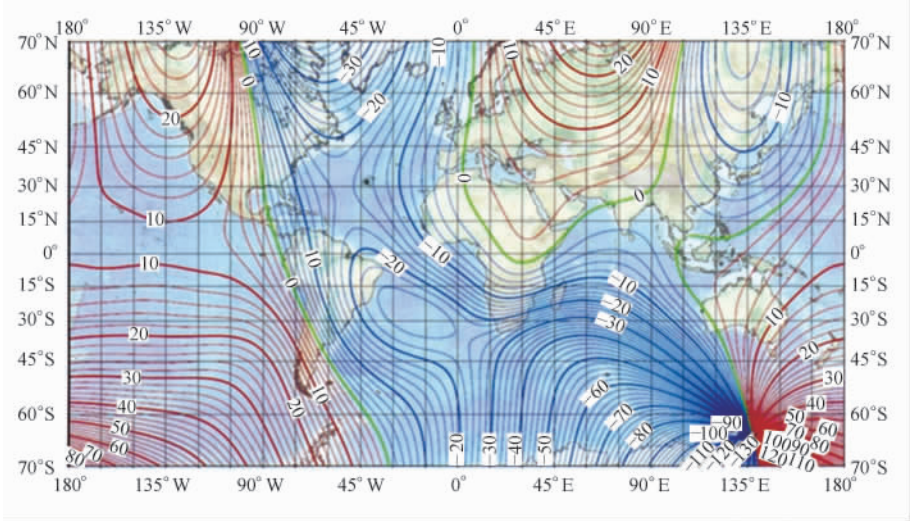


图 5-1<sup>⊙</sup> 2004 年世界磁偏角地图。蓝线表示磁北在真北的西边；而红线则表示相反情况。（来源：美国国家海洋和电气管理局）

## 5.6 测风塔安装

### 5.6.1 新斜拉塔

斜拉塔几乎可以在任何地点安装，但如果地形比较平坦且没有树木，则工作就会容易得多。如果铁塔要安装在斜坡或不平的地面，则竖塔时拉线可能需要调节。如果铁塔要竖立在树木或其他障碍物较多的区域，则必须清理铁塔周围的地面。清理区应足够大，供铁塔放平和安装拉线地锚。拉线式斜拉塔需要的清理区可能相当大。例如，60m 斜拉塔需要在铁塔基础周围的四个方向拉线。每个角最外部拉线地锚可能距基础 50m（164ft）远。因此，在本例中，四个地锚点组成一个每边大约 71m（233ft）的正方形。铁塔放平时，它会延伸到最外地锚之一的外部约 10m（33ft）再加上避雷针或传感器垂直梁的长度。这会形成一个风筝形印迹，其两边为 71m，另外两边至少 80m（见图 5-2）。

建议拉线地锚位于相对于真北的八个主方向中的四个（即 N、S、E、W 或 NE、SE、SW、NW），按方位基准桩指示，并且令其中之一尽可能对正主导风向。这样做的好处是，首先，容易根据俯卧铁塔方位确认传感器横梁方向；其次，把铁塔迎着主导风向竖立（或把铁塔顺着主导风向放倒）时，可以让提升拉线维持张

<sup>⊙</sup> 图 5-1 的彩色图请见封二。——编辑注

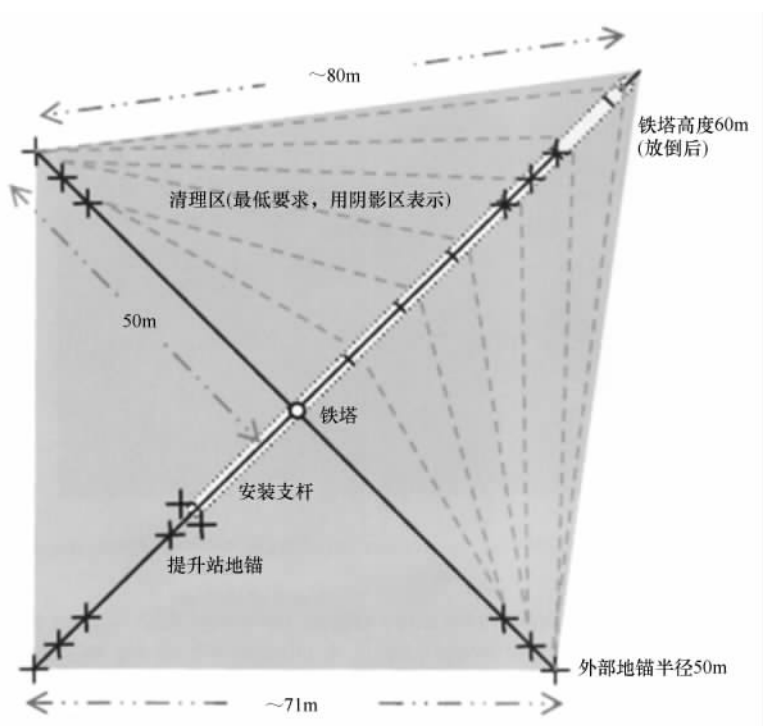


图 5-2 本图画出了斜拉塔地面印迹。本例中，主导风向假定为西南。“×”号表示地锚埋点。灰虚线表示铁塔竖起时的拉线，黑实线表示铁塔完全竖起时拉线的轨迹。  
(来源：AWS Truepower)

力不变来保持相当程度的稳定性。无论什么情况下，都绝不要在大风或阵风期竖立或放倒铁塔。

铁塔通常使用安装支杆和绞车滑轮竖立（见图 5-3）。选择升降站（安装支杆装在地面的地方）和连线的地锚是关键问题。地锚通常是打进地下的（见图 5-4），但这样是否合适以及应使用的地锚类型取决于场址地表下面的情况，这一点应该在起初的场址勘察时确定。地锚类型与土壤条件不匹配可能导致地锚拔出和铁塔倒塌。注意，土壤荷载能力会随天气变化。例如，冬季融雪之后土壤水饱和时，土壤荷载能力会远低于同样土壤在其他季节的荷载能力。

如果不能把地锚打入土壤（如因为有地下设施或有危险），可使用混凝土块作为配重。这种方法的两个主要缺点是地锚成本较高，且需要它们运到现场。

每个拉线地锚和升降站地锚都必须遵守制造商的说明。升降站地锚通常要连到一个绞盘滑轮系统，一定要特别小心，因为它必须承受整个铁塔的荷载。最大荷载发生在铁塔刚刚离开地面悬起的时候。这一时刻是评估选用地锚的性能的最好机会。如果地锚看来不适合土壤条件，就应该在铁塔立起就位前确认需要使用的替代锚定方法，并加以试验。铁塔竖起时，所有人员都应避开可能倒落的区域。

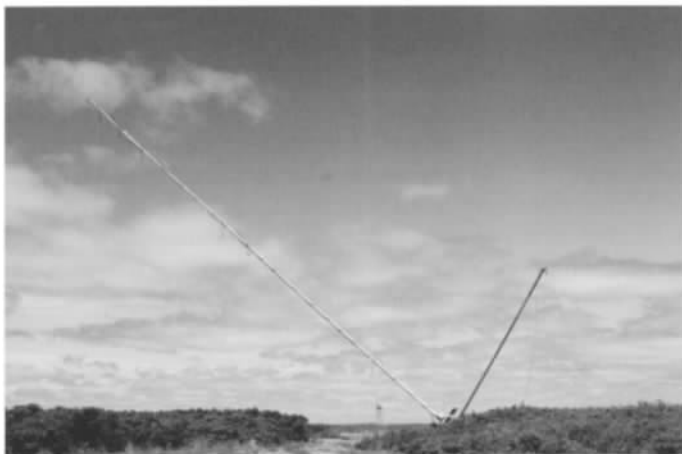


图 5-3 正在用安装支杆竖起的斜拉式测风塔（来源：AWS Truepower）



图 5-4 旋入式拉线地锚安装实例（来源：AWS Truepower）

拉线在适当张力下保持铁塔垂直并尽量减少其摇动。如果张力不适当或不均匀会导致铁塔弯曲或倒塌。应遵守制造商对于拉线张力的建议。安装队长应保证所有拉线张力调节平缓、协调进行。最好将拉线下部用反光、醒目的材料（如亮色塑料拉线套）标出，以提醒行人和车辆司机。该标志应符合州或当地的规定。如果有大型动物在场址附近觅食或生活，可能需要装设护栏保护拉线站或铁塔。

### 5.6.2 新桁架塔

在需要很高的铁塔或宁愿在当地制造时，通常使用桁架塔。桁架塔基本类型有两种：拉线式的和自立式的。两种类型通常都用首尾相连的几个固定长度段组成。



这些塔段可以平放在地面组装起来，然后用起重机把塔整体吊起就位；也可以在现场用绞盘臂杆系统把塔段叠上去。塔段可能外观相似，但安装时必须顺序正确（因此塔段通常会编号）。

拉线塔拉线装在不同高度上，而且至少装在三个方向上，以使结构稳定。自立式铁塔的底部附近较宽，以支持它上面的结构。两种塔都需要底部坚实，通常它要座在混凝土基础上。拉线塔需要把锚点设在距底部 80% 铁塔高度的部位。自立塔通常有三个撑腿，每个撑腿有用混凝土墩做的结实塔脚；塔基的每一侧长度大约为塔高的 10%。

### 5.6.3 已有铁塔

使用通信塔等已有铁塔可能会有些困难。它们的尺寸和桁架设计多种多样，因此它的传感器安装硬件经常必须根据客户的要求设计专门制造。设计需求必须在现场初始勘查期间确定；而这绝非一日之功。此外，建议每项设计都遵守第 5.7 节介绍的传感器安装和防护规范。例如，为尽量降低尤其是宽桁架塔对风速测量的影响，可能需要使用更重的杆件制成的长得多的安装梁。在可能情况下，风速计应安装在塔上已安装设备（如盘式通信设备、天线和避雷针等）产生的气流扰动最小的高度。

与斜拉式铁塔不同，固定式铁塔必须登塔安装、检修和更换设备。在得到允许登塔之前，应由有资质的人员评估铁塔的结构整体性，尤其是攀爬桩、爬梯、攀爬保险索和拉线（如果有的话）。登塔人必须受过适当培训并配以合适的装备。因为作业在空中进行，所以必须密切注意天气情况。强风会使举起安装件非常困难。寒冷大风天气会大大增加冻伤危险，会使需要手的灵活性的工作变得非常困难。

注意，加装风速计和其他仪器的支撑梁可能会导致风荷载和覆冰荷载超过铁塔设计规范。涉及对已有铁塔加装设备的问题应由有资质的工程师加以审核。

## 5.7 传感器和设备安装

在铁塔上安装传感器应使它能提供期望的资源信息，同时又尽量减少铁塔、安装硬件、其他设备和传感器对测量的影响。要实现这一点就需要遵守下述指导意见，参考制造商说明书，并参照图 5-5 和图 5-6 的安装配置案例。

### 5.7.1 风速计

测量风速的高度数量一定程度上取决于铁塔高度。对于 50m 或 60m 测风塔，风速计通常安装在三个高度上，更高的铁塔可能安装在四个高度。以下指导意见将决定高度选择并适用于多数铁塔。

- 1) 高度之一应尽可能靠近风力机预期轮毂高度，同时满足其他要求。

- 2) 最上部的风速计如果安装在水平横梁上而非铁塔之上，则应至少在塔顶之下 10 倍铁塔直径，以避免塔顶气流（被称为 3D 气流）影响。

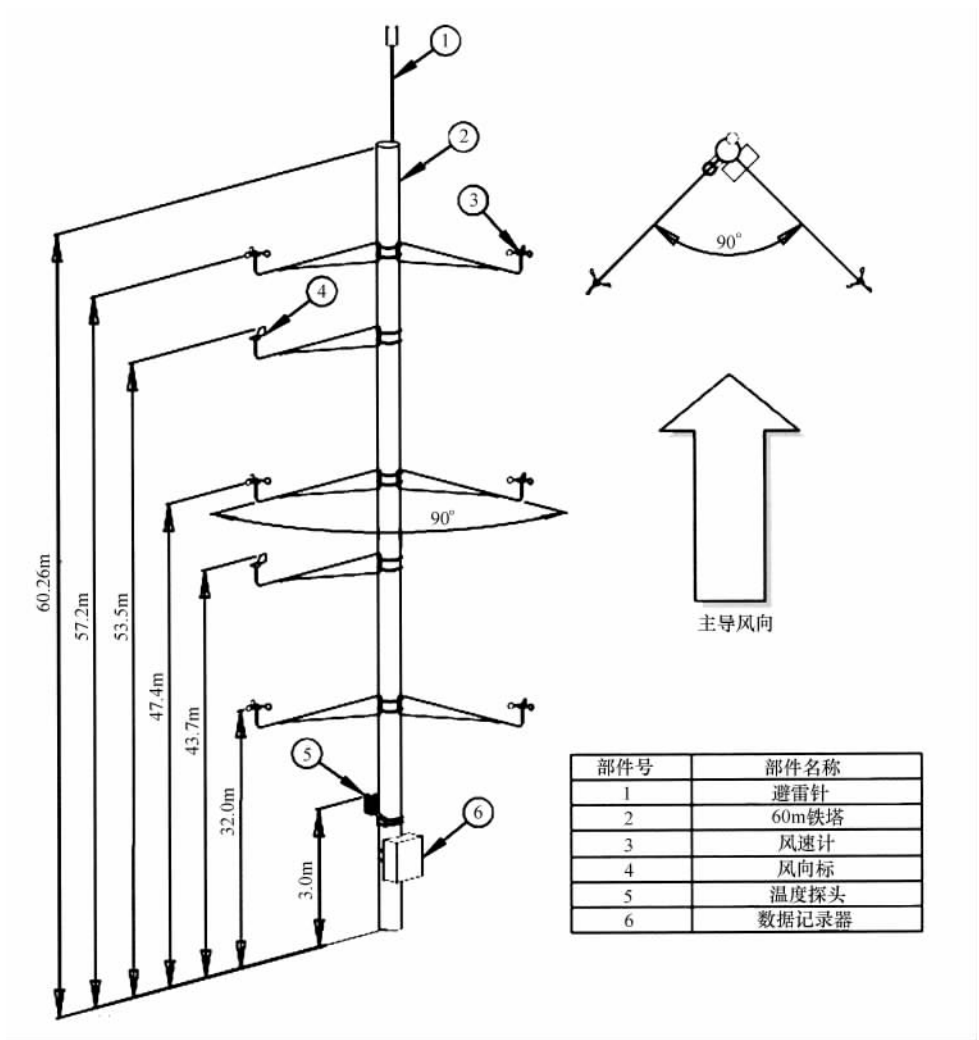


图 5-5 60m 圆筒形 NRG 高塔的典型建议安装配置（来源：AWS Truepower）

注：1. 刚好在拉线环之上安装 57.2m 风速计横梁；2. 刚好在次高拉线环之上安装 47.4m 风速计横梁；  
3. 在铁塔颈部拉线环之上 1m 安装 32m 风速计横梁；4. 距离为地面到传感器（而非到横梁）。

- 3) 最低高度应靠近风力机风轮扫掠面底部或在它下面，但应高于受到树木、建筑物和其他障碍物影响的高度；典型高度为 30m。
- 4) 这些高度应尽可能大大分离，以尽量减少风切变的不确定性，但也要同时满足其他要求。顶部与底部风速计的高度比建议至少为 1.6。例如，如果顶部风速计安装高度为 50m，那么最低的风速计安装高度可以为 30m，因为它们两者之比为 1.66。
- 5) 对于有多个监测站（测风塔或遥感）的工程，可以让不同监测站的一个或多个高度相匹配，以便相互比较。

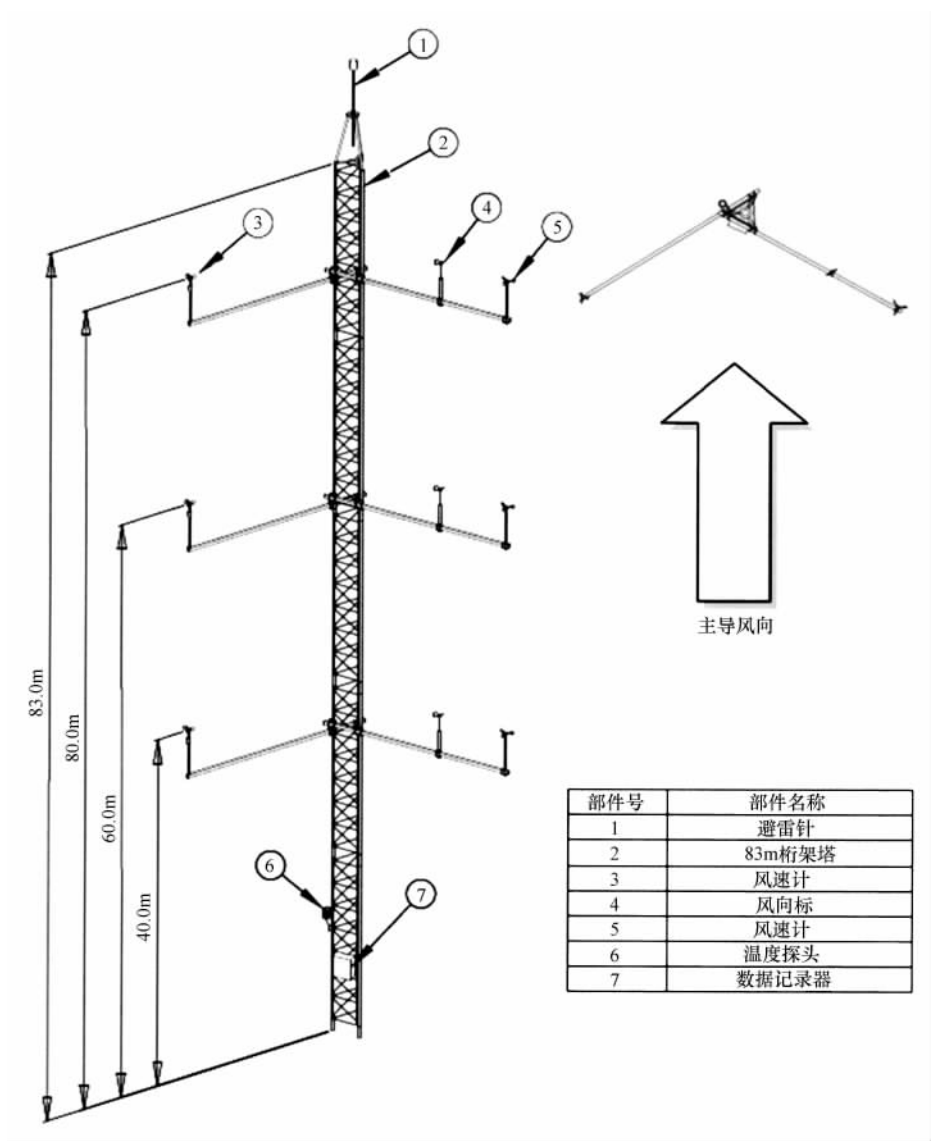


图 5-6 一个 83m 高的拉线桁架测风塔的典型建议安装配置（来源：AWS Truepower）  
注：距离为从地面到传感器（而非到横梁）。

以下两段说明这些指导意见如何应用于圆筒塔和桁架塔。

1. 圆筒塔

圆筒塔上的仪器安装高度比较灵活，但通常选择尽量减少拉线和拉线环影响的方式。例如，对于 NRG 系列的 60m 高塔，测量高度通常如下：

(1) 57.2m。距塔顶足够低，可以避免 3D 气流效应；这一点的塔宽为 203mm (8in)，符合 10 倍塔宽条件。

(2) 47.4m。刚好在次高拉线环之上。把风速计放置在拉线环之上，可保证风速测量不会受拉线环影响。

(3) 32.0m。刚好位于铁塔直径从 254mm (10in) 变到 203mm (8in) 的连接处的拉线环之上。这可以保证铁塔直径与上部安装风速计处相同，从而降低风切变误差。

## 2. 桁架塔

桁架塔设计多种多样。除高度外，需要知道的重要特性包括表面宽度、三个或四个面的罗盘指向（确定可能的横梁方向）、拉线环高度、桁架管（或棒）的直径；对于已有铁塔，还包括塔上已安装的其他仪器的大致高度和尺寸。尽管不可能对每种情况都确定合适的风速计高度，但对于新建的专用桁架塔，典型高度如下。

(1) 80m。这一高度代表典型企业规模风力机的大致轮毂高度。此高度以上的塔顶高至少有 10 倍表面宽度，因此塔顶以上的气流不会影响风速读数。

(2) 60m。把这一中间测量高度包括在内是为了提供冗余并有助于确定风切变分布。选择的高度应使测量不受拉线影响。拉线影响会保持非常长的距离——可以达到下游 40 倍拉线直径（对 6mm 拉线约为 0.25m）。

(3) 40m。这大约是大型风力机叶尖能达到的最低高度。

安装。多数风速计安装在从铁塔一侧水平伸出的横梁上。横梁应使用中空圆管而非实心材料制造，而且要注意传感器排水孔不被堵塞。

为最准确估计风切变，强烈建议不同高度的横梁指向同一方向，从而使铁塔对每一高度的风速读数的影响相似。出于同一理由，最上部的风速计应至少在塔顶之下 10 倍塔宽；把它安放得过于靠近塔顶会导致风切变估计的重大误差。

当然，所有横梁都应尽量水平以准确读取水平风速。同样重要的还有，它们应该足够长，以降低铁塔对风速测量值（除风速计直接被铁塔遮蔽以外）的影响。横梁太短会导致风速测量的重大误差（例如，当风速计处于铁塔上风时会导致风速下降，处于铁塔侧外时会导致风速加大）。按照 IEC 出版的风力机功率特性测试规范<sup>①</sup>，风速计至少应离开铁塔 7 倍铁塔直径。例如，如果铁塔直径为 203mm (8in)，则建议最小距离为 1.4m (4.7ft)。对于孔隙度较低的桁架塔，距离可降低到约 3.75 倍塔宽（对于三角形桁架塔，塔宽指一个面的宽度）。

风速计应安装在横梁上部以减少横梁对风速测量值的影响。按照同一批 IEC 出版物的规定，横梁与风速计之间的最小垂直距离应为 7 倍横梁直径，但规范做法是使距离大很多（12 倍或 15 倍直径）（对于矩形材料，直径指垂直面高度）。

① 作者们感谢 IEC 允许复制它的国际出版物 IEC 61 400-12-1 ed. 1.0 (2005) 的信息，所有摘录的版权都属于瑞士日内瓦 IEC。保留所有权利。关于 IEC 的其他信息见 [www.iec.ch](http://www.iec.ch)。IEC 对作者复制的摘录和环境背景不负责任。IEC 也不以任何方式对它们的内容及准确性负责。IEC 61 400-12-1 ed. 1.0 版权©2005 瑞士日内瓦 IEC。[www.iec.ch](http://www.iec.ch)。

在两个或更多高度，通常是在上面两个高度，风速计应成对安装在不同横梁上。这一冗余做法可降低传感器失效或铁塔遮挡导致的数据损失。圆筒塔的典型配置是两横梁方向相差  $90^\circ$ ，且分别在主导风向两侧  $45^\circ$ ，朝向主导风向。对于三角形桁架塔，横梁通常安装在相差  $120^\circ$  的两个塔面上，分别在主导风向两侧  $60^\circ$ 。然而，如果存在强劲的第二风向，最好不要采用这种方法。例如，如果东和西都是经常的来风方向，那么如果可能的话，最好把风速计分别朝南和朝北安装，两者相差  $180^\circ$ 。图 5-7 的图是圆筒塔和三角形桁架塔周围的风流场湍流的典型模式，可以用它来指导横梁定位。

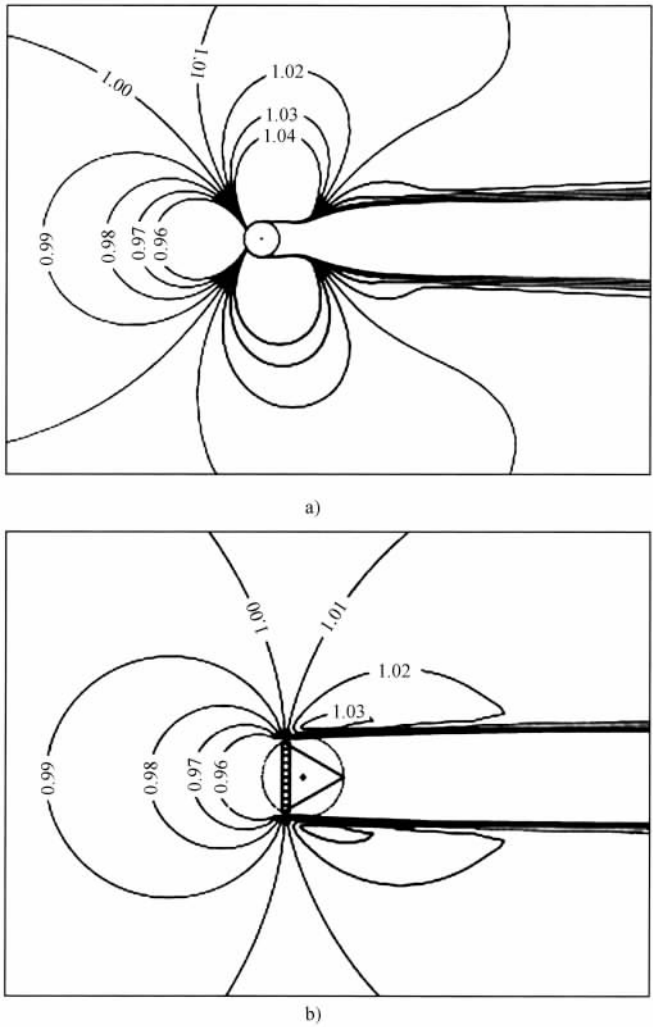


图 5-7 靠近铁塔的气流变形图：a) 圆筒塔，b) 桁架塔。风从每个图的左侧吹来。  
线条代表扰动风速与自由气流风速之比为固定值的廓线。  
(来源：IEC 61 400-12，附录 G-测风塔仪器安装)

安装在垂直梁上的风速计应最好高于塔顶至少 7 倍铁塔直径。这种配置很大程度上可以在所有方向上不受铁塔影响，能得到准确风速测量值。一种用两个这类风速计从而取得冗余的“足球门柱”配置也经常使用，尤其是用于风机功率特性试验。从这种垂直安装的风速计得到的读数不应与水平安装的风速计读数联合使用来估计风切变，因为人们都知道，铁塔对风流场影响的差异会导致重大误差。因此，不能因为在塔顶垂直安装了风速计就不需要在塔顶附近水平安装的两台风速计。

### 5.7.2 风向标

风向标通常布置在两个高度。人们的习惯做法是把它们安装在距最近风速计横梁至少 1m 的横梁上，以避免对风速测量的干扰。如果把风向标安装在单独横梁上不易操作，则应把它放在风速计横梁上风速计与铁塔表面的中间位置。这可以保证仅在风速计处于铁塔阴影中时，风向标才会干扰风速计读数。此外，建议风向标朝向偏离所有拉线至少  $10^\circ$ ，以避免两次现场检查中间出现的拉线松弛对风向标转动的干扰。

必须注意保证风向标相对于真北或磁北的准确方向读数。理想情况是，风向标的死区应沿横梁朝向铁塔。这不仅可以保证风向标不会在死区停留时间过久，而且很容易在地面用精准罗盘或 GPS 分表确认死区朝向。死区朝向必须记录下来并输入数据记录器软件，使记录器能修正和报告相对于真北或磁北的风向。参照传感器或记录器制造商的建议确定和报告死区位置。

### 5.7.3 温度和其他传感器

得到保护的温度传感器在水平横梁上的安装位置应离开塔面至少 1 个铁塔直径，以尽量减少铁塔对空气温度的影响。传感器应暴露于主导风向以保证大部分时间都能适当通风。如果使用一组两个温度传感器进行  $\Delta T$  测量（见第 4.2.3 节），则两个传感器的朝向应该一样（在不同高度上），以保证它们的暴露条件相同。如可能，把传感器安装在铁塔北侧（在南半球安装在南侧），以限制太阳直射的热量；这种配置还可以降低铁塔表面热辐射的影响。

其他传感器应按照供应商说明安装在测风塔上。

### 5.7.4 数据记录器和相关硬件

数据记录器应以耐风雨且安全的方式与连线接头、通信设备和其他敏感部件一起置于保护罩内。它通常可从数据记录器供应商处购得。应把干燥剂包（通常与记录器一起提供）放在保护罩内吸收潮气，所有明显透气位置都应密封，以防雨水、昆虫和啮齿动物造成损害。另外，所有进入保护罩的电缆都必须有水落环管，以防止雨水通过电缆流进端子排引起潮气腐蚀。

保护罩应安装在铁塔上面并距地面有足够高度，应高于现场可能的最深积雪。对于适用情况，蜂窝通信天线应放置在可到达高度，通常就位于数据记录器保护罩上方。如果使用太阳能发电系统，太阳能板应放在记录器上方，以防止遮挡；还应该朝南（在南半球朝北），并取能在冬季（此时太阳高度低）发出足够电量的倾

角。最好取接近垂直朝向，以最大程度减少会降低出力的积污积尘。

### 5.7.5 传感器接头和连线

应遵守制造商对传感器和数据记录器的连线配置说明。一般性的指导意见如下：

1) 暴露的传感器端子接头应用硅胶填缝密封，采用橡胶或塑料套保护，避免直接暴露。

2) 传感器沿铁塔高度的连线应该用防紫外线和防晒的绑带和电工包带绕包和固定。传感器连线在铁塔或塔脚上绕包时应消除所有松弛情况。过分松弛会使传感器连线在刮风时摇动，最终导致断裂。

3) 如果安装不是由厂家进行，可以考虑在每台风速计和风向标的两端子之间安装一个金属氧化物限压器（Metal Oxide Varistor, MOV），以加强电气暂态保护。

4) 对于传感器连线和支撑件会发生磨损的部位（如斜拉塔地锚套），连线应妥善保护和紧固。

### 5.7.6 接地和防雷保护

接地设备对现代电子数据记录器和传感器特别重要，因为它们很容易因静电放电、雷电和地电位差引起电气冲击损坏<sup>①</sup>。多数铁塔和数据记录器制造商都提供接地套件。然而，不同监测区域可能有不同要求。雷电活动频繁的场址对保护水平的要求可能非常高。经常需要从数据记录器制造商购买或用硬件商店常用材料制作的增强保护设备。作为规划过程的一部分，应该调研当地的雷电活动频率。可以参考图 5-8 那样的雷电频率地图和从当地气象部门得到有用的指导。但即使保护很完

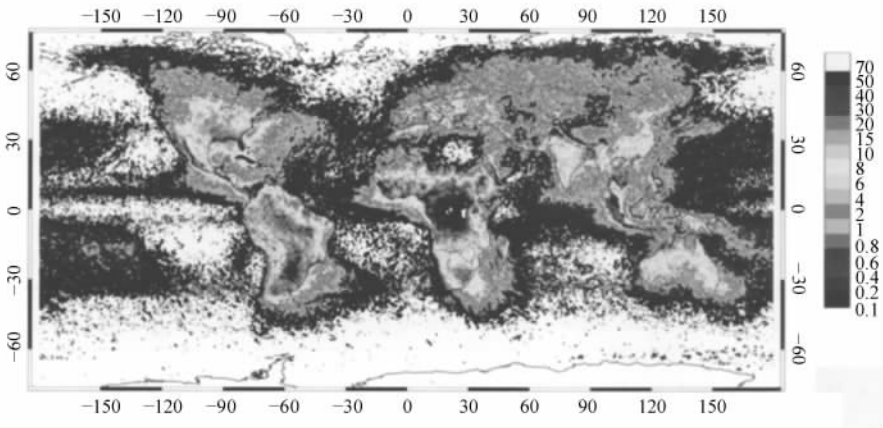


图 5-8 全球年雷击频率（单位：次/km<sup>2</sup> · a）地图（来源：美国国家航空航天局）

① 关于接地的更多信息可参考相关国家或地区的相应电气规范（如美国的国家电气法规：205 款——接地和连接；欧洲的 IEC 60 364；加拿大的加拿大电气法规；英国的 BS 7671；法国的 NF C 15-100）。

善，也不能担保设备能在直击雷下幸存。

1. 基本指导方针

建议使用图 5-9 所示的单点接地系统配置。这种布局可尽量减小接地环路产生电压偏置的可能性。在这一系统中，引下线（线规 10 或更小<sup>Ⓐ</sup>）通过接地棒、接地环或接地板（或几者的组合）直接接入大地。它不应通过数据记录器的接地螺栓。传感器泄流或屏蔽线应通过数据记录器的共用接地母线（端子排）电气连接到同一个地。这个“地”是大地参考电位（电压）。通常，接地棒、接地环和接地板都以铜为材料，提供低阻泄流路径。

接地装置的尺寸将决定它与土壤的接触面积，这是系统接地是否妥善的关键因素。各种接地装置可以结合使用以增加接触面积，如果它们都电气互联的话。要获得合适的接触面积，至少需要一根直径 12.5cm（1/2in），长 2.4m（8ft）的接地棒。所有接地机械接头都需要使用去氧剂以保证低阻接地。接地棒应没有任何不导电涂层，如漆或瓷釉。因为它们会使与土壤接触不良。所有接地棒都必须打入地下。如果遇到岩石，接地棒可以以 45°角打入，或埋入至少 0.6m（2ft）深的沟中（越深越好）。最后，所有接地棒必须连到一起以保证电气连续性。土壤上面的接地棒终端和它们的导线附件都应该加以保护，以防损坏。

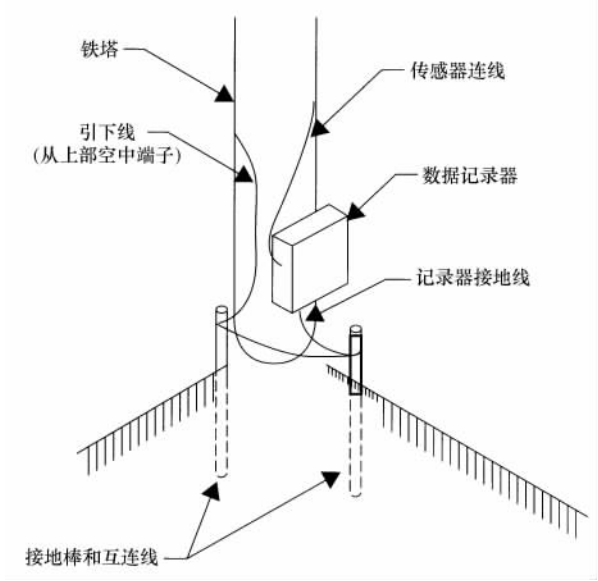


图 5-9 单点接地系统

Ⓐ 这里的线规应指美国线规（American Wire Gauge, AWG），即美国区分导线直径的标准，它的编号越小表示线越粗。例如，线规 10 的导线直径为 2.588mm。——译者注



了解土壤电阻率有助于选择合适的接地系统。土壤电阻率指电流流经单位体积土壤遭遇的电阻。它一般指大地表面附近的土壤。它可以用万用表测量打入土壤一定深度有一定距离的两根导电棒之间的电阻来近似。接地系统与大地之间的电阻应小于  $100\Omega$ 。一般来说,大地土壤电阻率越低,接地就越好。低电阻率土壤(如湿泥)会快速消散两点之间建立的电位差,提供良好接地。而高电阻率土壤(如干沙)可以产生有破坏性的高电压或大电流。如果电阻率很高,可能需要多根接地棒。对于土壤会结冻的地方,接地棒应打到冻土线以下。

土壤电阻率会随季节变化。冬季融雪后的早春值可能不会反映夏季雷电活动季节的土壤情况。此外,如果系统接地不良,当干旱气候时铁塔容易发生静电放电。如果有疑问,建议采用保守方法和加强保护措施。这是长期运行中最省钱的方法。

对于已有铁塔,应对铁塔接地系统进行评估。如果认为它是适当的,就把数据记录器接地与它连接。如果认为不合适,就应装设单独的接地系统,然后把它与已有接地系统物理连接。

## 2. 数据记录器和传感器接地

放电间隙、暂态吸收器和 MOV 等雷电保护装置应纳入数据记录器系统的电子设备中,以加强接地。风速计和风向标把 MOV 作为它们的电路的一部分,通常与它们一起供货。它们的主要作用是把冲击电压峰值限制到被保护设备的允许值,消散大部分破坏性电流。每台记录器获得的保护应向制造商确认。在雷电多发区可能需要加强的保护设备。

## 3. 铁塔接地

铁塔上必须安装雷电保护装置,并与共用地相连。雷电保护套件通常包括安装在铁塔顶端的空中端子,它有时被称为避雷针,以及被称为引下线的低线规(线规 10 或更小)裸铜线。它与大地(接地棒或地埋环)连接。多数国家通常把避雷针视为铁塔高度的一部分,因此避雷针顶部不得超过高度限制。

## 4. 暂态保护加强措施

可以采取一系列补充措施加强电气暂态保护:

1) 在与数据记录器输入端子连接前,传感器连线可以先接到一组附加的火花间隙(或避雷器)。

2) 带多个尖端的较长空中端子可以保护塔顶附近侧面安装的传感器,需要把传感器放置在  $45^\circ$  理论“保护锥”之内。空中端子的作用是提供带电粒子流光放电的低阻路径;保护锥是空中端子之下不太可能受到雷击的区域。

3) 要使用长接地棒。这样有两个好处:首先,随着深度增加,土壤导电特性通常会改善;其次,可以增加接触面积。适于较深土壤的接地棒可以在市场买到。

4) 所有导线与接地棒的接头都可以使用压紧或焊接的包铜配件。

5) 加大引线截面积(即降低导线线规)可以提高引下线载流容量。

6) 引下线可用带夹紧固到铁塔金属表面(每个塔段一个)。去氧剂胶有助于

保证连接良好。

7) 埋藏地铜板或接地环应分布在推荐深度，以加大土壤接触面积。它应该与其他接地棒相连。

8) 水平安装的空中端子应安装在铁塔的不同高度和不同方向，以为电荷提供附加消散点。每个避雷针都应引下线相连，以避免影响传感器读数。

9) 如果铁塔用不能提供对地低阻路径的混凝土或（防腐）涂层拉线紧固，建议拉线接地。

## 5.8 现场调试

所有设备都应在斜拉塔竖起之前或登塔人员仍在高处时进行试验，以确保它们能正常运行。一旦安装完成，这些功能试验应再重复一次。手边有备用设备会使检修比较容易，如果在试验期间出现问题的话。建议进行以下试验：

1) 确保所有传感器报出合理值；

2) 确认所有系统电源运行正常；

3) 确认需要的数据记录器编程输入：包括场址标识码、日期、时间、传感器斜率和偏置数值和死区朝向；

4) 确认数据提取过程：对于蜂窝电话系统，用后方基地计算机进行成功的软件下载，把传输值与现场读数进行比较。

5) 确保数据记录器处于妥善的长期供电模式。

离开现场时，工作组人员应把设备保护罩用挂锁锁好，并记录离开时间及其他有关的观察情况。

## 5.9 文件材料

所有现场特性以及数据记录器、传感器和支持硬件信息的完整详细记录应保存在“现场信息记录”文件中。本章末尾是一份这种文件的例子。记录文件应包括以下主要内容：

### 1. 场址描述

它应该包括唯一的场址标识码，场址海拔，测风塔和地锚的经纬度，安装日期和调试时间。场址坐标应在安装时使用 GPS 确定。通常，坐标的表示精度在经度和纬度上应高于  $0.01'$ （约 10m），在海拔上应高于 10m。GPS 读数应与从地形图上得到的坐标交叉比对，如有显著偏差，则需要设法解决。

### 2. 现场设备清单

对所有设备（数据记录器、传感器和支持硬件），都要记录它们的制造商、型号、序列号；安装高度、朝向（包括死区方向、电话天线及太阳能板方向）；输入

记录器软件的传感器斜率和偏置值；数据记录器端子连接编号。

3. 通信信息

应记录所有相关的蜂窝电话或卫星联络编程信息。

4. 联系信息

应列出所有相关土地业主和蜂窝电话/卫星电话公司的联系信息。

5.10 成本和人工估计

本节说明在编制风况监测项目预算时需要考虑的主要成本元素。下面报出的成本适用于北美。对于其他地区，劳动力成本可能有差异（高些或低些）。如果设备需要进口，则应该把进口税考虑在内。此外，在当地生产某些设备，如铁塔，可能是一个有成本效益的选项。

购买和安装 50m 或 60m 的单一监测站并运行 2 年，包括设备和人工在内，它的总成本大约为 50000 ~ 70000 美元，不包括管理费用。对于 80m 桁架塔，成本约为 100000 ~ 200000 美元。实际成本取决于具体塔型和选择的设备、现场是否容易到达、运行维护队伍是否邻近，以及需要出现场的次数。

监测成本分为以下三个主要部分：

1. 人工

表 5-1 列举了进行人工预算时需要考虑的主要任务。有些工作仅需要一个人，而另外一些工作，尤其是涉及设备安装和维护的工作，则需要两个人或更多。

表 5-1 编制预算时需要考虑的人工

管理 项目监督 测试方案编制 质量保证方案编制	场址选择 后方远程筛选 现场勘查并与土地业主接触 获取土地使用协议和许可
设备 确定设备规范及采购 试验及现场准备 安装（通常需要四人）	运行维护 例行出现场（一人） 计划外出现场（两人） 预防性维护工作 期终标定 场址报废（四人）
数据处理和报告 验证、处理和生成报告 数据和质量保证报告	

2. 设备

测量规范一旦确定，就可以从销售商获得设备成本信息。预算中其他需要考虑的条目有运费、税费、进口税、保险费、备件费用，以及铁塔安装运行需要的工具费用。一个使用 60m 斜拉式圆筒拉线塔、有三个传感器安装高度的场址，估计设备总成本通常为 15000 ~ 20000 美元。

### 3. 其他开支

其他相关开支包括出差、租地费用、蜂窝电话或卫星电话费用（如适用的话）以及传感器标定费用。出差费应考虑场址选择、安装、维护和报废需要到现场出差的预期次数。有些现场出差可能需要过夜住宿和用餐。使用蜂窝电话或卫星电话联络进行远程数据传输会增加费用，通常为每月 50 ~ 70 美元，取决于通话次数、持续时间以及话费单价。

多个铁塔可以取得规模经济效益。主要节省在人工方面。粗略讲，每增加一个场址人工开支仅比单一场址增加约 30%，取决于场址数量和它们的相互靠近程度。如果一次出差能到不止一个场址，则出差费用也会降低。通过销售商折扣和各场址共用安装设备（如安装支杆和绞盘套件），也可以节省设备费用。总体来说，安装和运行第二个场址的总成本通常会比第一个场址低 10% ~ 15%。五塔监测网络的每个塔平均成本会比单塔低约 20%。

风资源评估项目应有一个项目主管、一个现场主管和一个数据管理员，以及其他支持人员，如现场技工。他们的作用规定如下（有的人员可以起几个作用）：

1) 项目主管指导风况监测项目，并保证人力和材料资源满足项目目标需求且及时可用。项目主管还应监督测试方案及质量保证方案的设计和对这些方案的遵守。

2) 现场主管负责监测设备的安装维护，以及把数据传输给后方办公室。当现场出现问题时，此人或他的助理应随时立即到达现场。斜拉塔的安装和报废以及现场作业需要把铁塔降低时，需要至少一组四个人。对于可以由人员登塔作业的桁架塔，建议维护时至少有两名登塔人员。

3) 数据管理员负责与数据有关的所有工作，包括数据验证和报告生成。对于正确的数据验证和解释来说，必不可少的要求是熟悉有关方法和监测场址及设备，以及与现场主管的密切工作沟通。

4) 现场技工要与现场主管密切合作，组织和协调资源评估项目的方方面面。技工的责任是测风塔评估和选址，硬件采购，监督铁塔安装、进行已有铁塔确认，并在项目期间提供维护支持。

## 5.11 讨论题

1. 假设开发商雇用你领导一项风资源评估活动，他希望建设一个 50MW 的风电工程。请编制一组成套仪器和测风塔的规范。指出你希望的铁塔高度，你可能选择的风速、风向、温度传感器和其他传感器的高度，以及每个高度上的传感器数量。

2. 使用互联网查找你希望使用的成套设备的报价和供货情况，至少要有两个销售商。确定你考虑了税费和进口税。整套设备的总成本是多少？他们提供的设备（包括铁塔）是基本相同的还是有差异？按你的意见，哪一家能以较高成本效益满足你雇主的需求？

3. 说明收到你的首选成套设备后, 如何对它们进行验收试验, 以及如何进行现场准备。

4. 说出并说明本章包含的至少 4 项具体安全导则。说明它们为什么重要, 如果不遵守它们会产生什么后果。

5. 假设你在现场, 而且你的 GPS 损坏了。如果你有一个罗盘, 那么如何确定真北? 你所在地区的磁偏角大约是多少?

6. 你负责在一个农场主的土地上安装一个 60m 的斜拉式圆筒塔。制造商运来的铁塔地锚宽 44mm、长 381mm。你应该感到担心吗? 为什么? 如果担心, 那么你应该怎么做?

7. 说明斜拉塔安装支杆的作用。假设你正在安装一个斜拉塔, 风况中等, 是西风。安装支杆应朝哪个方向? 为什么?

8. 雇主要求你评估某个公司安装的已配置了仪器的铁塔, 他有意对该公司的这个风电工程投资。你到达现场, 用激光测距仪测得铁塔高 60m、宽 0.5m, 是用户建造的方形桁架塔。你又观察到一台风速计安装在塔顶以上 0.5m 的垂直梁上, 一台风速计安装在约 45m 高、从塔侧面伸出 2m 的横梁上。同一横梁上还安装了一个风向标。你认为该公司的监测布置是不正确的。为什么? 你认为应该如何改进?

9. 说明在同一高度安装两台风速计的道理。让横梁朝向分开  $90^\circ$  且各在主导风向一侧  $45^\circ$  的目的是什么? 为什么不同高度的横梁应取同一朝向?

10. 测风塔设备接地的目的是什么? 在你居住的地区, 支配包括接地的电气安装法规是什么?

11. 用互联网调研你认为可能建设风电工程的区域的雷电活动信息。它的风险高还是低? 每年什么时间的风险最高?

12. 说明为什么确认和记录测风塔和它的监测设备的安装信息很重要。

## 深入阅读建议

NRG Systems, Inc. 60 m and 50 m XHD TallTower installation manual and specifications, April 2010. Available at <http://www.nrgsystems.com/FileLibrary/03e8c4ba85de4996a33abe3227d57873/NRG%2060m%20and%2050m%20XHD%20TallTower%20Installation%20Manual%20-%20Rev%202.01.pdf>.

International Electrotechnical Commission (IEC) 61400-12, Wind Turbine Power Performance Testing. Annex G—mounting of instruments on the meteorology mast. Available at <http://webstore.iec.ch/webstore/webstore.nsf/mysearchajax?Openform&key=61400&sorting=&start=1&onglet=1>. (Accessed 2012).

International Energy Agency. Program for Research and Development on Wind Energy Conversion Systems. Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation: Topic 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry', Second Print, 2003. p. 60. Available at [http://www.ieawind.org/Task\\_11/Recommended\\_Pract/11%20Anemometry\\_secondPrint.pdf](http://www.ieawind.org/Task_11/Recommended_Pract/11%20Anemometry_secondPrint.pdf). (Accessed 2012).

场址信息记录示例

场址描述	
场址名称	
位置	
海拔	
安装/调试日期	
调试时间	
土壤类型	
周边情况说明	
主导风向	
磁偏角	

现场设备清单						
设备描述	安装高度	序列号	传感器斜率	传感器偏置	数据记录器端子号	横梁方向 (风向标死区)

通信信息	
装置制造商	
装置型号	
装置序列号	
网络 ID	
电话号码	
程序员	
编程日期	
电子邮件地址	
隶属线路	
密码	
天线类型	
天线位置	
电源	

联系信息	
土地业主	
● 地址	
● 电话号码	
蜂窝/卫星电话公司	
● 电话号码	
● 联系人	
● 其他联系人	

## 第 6 章 监测站运行和维护

风能资源监测活动运行维护阶段的目标是以可靠方式确保收集的风能资源数据准确。可能会出现一系列导致数据丢失或读取错误的问题。气象仪器可能损坏、安装位置可能移动、测风塔可能弯曲或倒塌。另外，从传感器到拉线等各种系统部件都需要定期维护，以保证测量的准确性。

为达到这些要求，需要制定一个简要但全面的运行维护计划，并遵照执行。计划的关键点包括定期和不定期的现场巡查；检查流程、检查清单和记录；以及标定核查和备件检查。本章介绍制定这一计划的指导意见。

尽管健全的运行维护计划是必需的和基本的，但计划的成功取决于现场人员的敬业精神和所受培训。要向他们简要介绍计划的各个方面以及监测设备的工作原理。他们还需要成为尽职的、细心和用心的纪录者和优良的问题处理者。

### 6.1 站址巡查

站址巡查有定期和不定期两种。定期巡查通常是为了下述两个目的之一。第一个是执行日常巡视和维护任务，如更换电池、调整拉线张力、检查横梁方向。通常每几个月进行一次这样的巡查，它取决于设备的期望寿命和制造商提供的操作指南。第二个目的是从数据采集器中人工提取数据，这只在远程操作不可用时进行。出现场人工提取数据的频率取决于记录器的存储容量，但任何情况下应不少于两周一次。这样安排有助于保证及时发现传感器故障并进行修理，使数据缺失最少（数据提取过程将在第 7 章详细介绍）。

当数据采集出现明显问题时，就需要进行不定期现场巡查。这可能发生在下述情况下，如远程提取数据失败、传感器数据读数不合理、一个或多个传感器读数与其他传感器相比有明显变化，以及其他情况。当预报场址周边出现诸如大风、闪电、冰冻等极端天气时可能就意味着需要巡查。这种情况下，应尽快安排不定期巡查，以减小潜在的数据损失。做项目预算和人员计划时，每年每个塔至少应安排一次不定期巡查。

### 6.2 运行维护程序

应按照运行维护手册要求编制运行维护项目文档。该手册的目的是为执行定期和不定期运行维护任务的现场人员给出全面操作步骤。手册需要包括以下几

部分。

### 6.2.1 工程描述和运行维护方针

手册应从工程描述及其总体目标开始，重点介绍保证数据质量和完整性的关键技术规则。

### 6.2.2 系统组成描述

手册需要对所有仪器（风速计、风向标、温度传感器、数据记录器等）及其工作原理进行简要描述。手头还应配备诸如制造商提供的手册等详细信息作为参考。这些信息将有助于现场技术人员在遇到突发情况时，能快速响应并更好地完成他们的工作。

### 6.2.3 设备例行维护指南

手册中应给出所有需要例行维护的设备名单及其维护指南。例行维护任务可分为两类：与测风塔结构、支撑和接地有关的任务，和与仪器及数据采集系统有关的任务。下面列出每类需要完成的典型任务。

#### 1. 测风塔结构、支撑和接地

##### (1) 地锚状态

- 1) 检查是否有锈蚀和损坏迹象；
- 2) 评估地锚随时间移动的情况；
- 3) 检验地锚连接的整体性。例如，如果连接点附近有动物挖洞，则地锚抵抗力可能会变化。

##### (2) 拉线状态

- 1) 按照制造商指南检查拉线张力是否适当，如果需要，将拉线收紧；
- 2) 检查拉线及其连接点是否有锈蚀迹象；
- 3) 保证所用拉线夹数量正确，确保拉线及线夹状态良好。

##### (3) 杆塔状态

- 1) 检查是否有锈蚀和损坏迹象；
- 2) 确保杆塔是垂直的；
- 3) 对于圆筒塔，检查各塔段之间连接点处是否有扩口迹象；
- 4) 检查底板或基础，确保没有下沉或被破坏，即没有损坏。

##### (4) 接地系统

确认接地系统连接正确、电气接触状态良好。

#### 2. 仪器和数据采集系统

##### (1) 传感器

- 1) 检查传感器安装梁和仪器支柱，确保它们水平或垂直，且状态良好；
- 2) 安装梁可能滑动或旋转；确保所有安装梁高度及指向正确；
- 3) 更换那些经过数据分析显示可能退化或损坏的传感器（见第9章）；
- 4) 定期更换风向标和风速计，把它作为预防性维护计划的一部分；典型的更



换计划是两年一次；为保证数据记录的连续性，一次巡查通常只更换同一高度一对传感器中的一个；

5) 如果对仪器标定的稳定性有怀疑，最好取下风速计重新标定；对比安装前后的标定参数，可以检测出传感器响应中的明显漂移；

6) 有些类型的风速计需要进行周期性整修，如更换滚珠轴承和重新标定。

#### (2) 数据采集系统

1) 检查记录器和外壳，查找是否有腐蚀、损坏、潮湿以及啮齿动物或昆虫出现的迹象；

2) 检查接线板，确保传感器连接良好；

3) 检查蓄电池电压，需要时更换蓄电池；

4) 如果用太阳能系统给蓄电池充电，应清洁太阳能电池板并检查它们的对准情况，并检查太阳能板、连线和电器连接是否有裂纹并确认它们的防水性能；

5) 如果使用柴油机或其他发电机，应该对其进行测试并加油。

### 6.2.4 站址巡查流程

站址巡查可分三个阶段：室内准备、现场作业、撤离现场。

#### 1. 室内准备

1) 需要告诉现场团队巡查的原因和需要执行的任务。例如，是定期检查和维护巡查还是应对测风塔或设备的可能故障？是需要将杆塔放倒到地上或登塔，还是仅需接近塔基设备即可完成任务？

2) 只要可以，就应事先将巡查事项通知土地业主。除了礼貌问题外，从长远来看，与土地业主保持良好关系将有助于风电工程的开展。

3) 需要为团队提供完成全部任务所需的工具、电源、设备手册、备件等整套装备。现场巡查清单（见第6.3节）列出了所需的工具和电源。清单中应包括下载现场数据需要的所有设备，如备有配套电缆和特殊硬件的笔记本电脑。

4) 外部存储卡必不可少，进入现场之前需要在室内对其测试。如果更换存储卡是提取数据的主要方法，则这一点就非常重要。可能需要一个备用室内数据采集器用于测试。

5) 必须确保到现场的人员数量满足执行任务的需要。为了安全，登塔至少需要两个人：一个登塔，另一个在地面准备响应可能出现的问题。提升或放倒斜拉塔，通常至少需要四个人。

6) 领队需要将团队要去的地方及大概返回时间通知后方基地。若场址特别远或处于危险区域，团队应与后方基地始终保持正常联系。如果在延长期联系中断或团队无法按时返回，应立即通知管理层。

#### 2. 现场作业程序

1) 建议现场工作开始前首先召开通报会，检查下一天的计划安排。也可趁

机检查所需人员保护设备（Personal Protective Equipment, PPE）的完备性及安全规程。

2) 如果要在巡查过程中提取数据，首先要尽量降低因操作错误、静电或检查处理其他系统设备时的电涌导致数据丢失的风险。

3) 如果条件许可，不管出于何种目的，每次巡查应都通过全面的外观检查（用双筒望远镜或数码相机）及测试来检查是否有损坏或故障元器件。要将结果记录在现场巡查清单中。需要检查以下内容：

- 数据记录器
- 传感器
- 通信系统
- 接地系统
- 布线及接头
- 电源
- 支撑梁
- 杆塔部件（对于拉线式杆塔，包括地锚、拉线张力和塔的垂直指向等）

4) 如果需要，巡查期间应完成定期的部件更换（如蓄电池）、运行检查和故障诊断。在进行第一次现场巡查前就应制定故障诊断导则。

5) 需要进行数据记录器的瞬时读数检查，以验证所有测量值的合理性。

6) 应填写现场巡查清单，以保证完成所有运行和维护任务，并记录重要信息。

### 3. 撤离现场程序

1) 离开现场前必须验证数据提取系统能正确工作。它包括能成功将数据传给计算机（对于远程系统）或现场的笔记本电脑（对于人工系统）。对于远程系统，可在现场使用可进入现场的数据邮箱（例如 email 账户或 FTP 文件夹）校验数据传输功能。这一简单测试可保证系统正常运行，且远程传输系统（天线定向和电话连接）不会在巡查期间被不经意改变。

2) 应将数据记录器恢复为正确的长期供电模式。一些记录器型号在正常运行时使用低功率模式，可以节省系统电力。忘记恢复这一模式将大大降低电源寿命，可能造成数据丢失。

3) 数据记录器外壳应配有高强度、高质量的挂锁，以防止好奇的人或破坏分子造成损坏。

4) 应在现场巡查清单中记录离开时间及执行的所有操作和观察。

## 6.3 文件记录

现场巡查清单是现场技术人员的有用工具，它按照运行维护手册中的操作流

程大纲编写。它提醒人们每次巡查需要做什么，并作为实际操作的记录。准确、翔实的记录有助于解释有问题数据的时间区间，以避免数据验证时丢弃大量数据。

由于这些原因，应针对每次现场巡查编写完善的标准化清单，并以文件形式保存。清单中应包括的示例信息和操作如下：

### 1. 基本信息

场址名称、技术人员姓名、现场巡查日期和时间、要完成的工作。[注：为避免混淆，在此和其他地方记录的所有时间都是当地标准时间，即 LST (Local Standard Time)。]

### 2. 室内准备

列出必需的工具、设备和电源（包括备用）、文档、地图和安全用具。

### 3. 现场操作

按顺序列出各种现场操作，包括设备检查、数据提取、与杆塔有关的工作（提升或放低程序）及撤离操作。

### 4. 发现和建议

详细记录执行的工作、发现和观测结果，如有可能，给出进一步的处理建议。

本章结尾给出了一个现场巡查清单示例。

## 6.4 备件清单

运行和维护计划必须预估设备故障或损坏情况。为使停运时间最短，应保证备件库存充足，满足场址巡查期间使用。库存应包括测风塔上的设备，诸如传感器、横梁及配套的安裝硬件。可能还需要其他备件。在确定需要的库存时应考虑以下几点：

### 1. 监测网络的规模

备件库存的规模部分取决于监测网络中测风塔的数量。作为指导意见，有 6 个测风塔的网络所需部件库存应足够装备 2 个塔。对于这种规模或更大的网络，还建议库存包含一个备用的数据记录器和远程通信设备。

### 2. 环境条件

在易出现极端天气的区域，测风塔应配备额外备件。推荐的额外备件包括风速计、风向标和安装传感器的横梁。

### 3. 设备可得性

对于那些供货商配货需要更长提前时间的物品，需要增加其备品库存。数据记录器和传感器等关键设备的周转时间至关重要。

4. 运行和维护历史

需要根据每个场址项目经验调整库存。有时传感器损坏比预期频繁，就需要增加备品。

5. 恶意破坏

有些场址可能容易遭到恶意破坏。风速计的风杯有时会成为射击目标，安装在靠近地面的设备，如太阳能电池板和接地系统，可能会被偷走。如果不需经常进入提取数据，可考虑将基站设备（记录仪及外壳）安装在塔的更高位置，使它不易到达。如果恶意破坏是一关注点，可考虑在塔基周边装设护栏。

6.5 讨论题

- 1. 数据恢复率定义为给定期间确认有效的数据占所有可能记录的百分率。数据损失等于 100% 减去数据恢复率。①解释风况监测站数据提取频率如何影响数据恢复率；②假设数据记录器平均每年损坏一次；如果每两周进行一次数据检查（手工或远程），查找问题，任何问题都会通过站址巡查迅速解决；因故障造成的最大数据损失是多少？对应的数据恢复率是多少？③如果数据检查改为一周一次，答案变为多少？一月一次呢？
- 2. 总结拉线式斜拉塔的巡检方案。包括要评估的所有主要零部件和设备、如何进行评估。
- 3. 讨论本章提到的三种安全措施。说明如果不注意这些措施会发生什么情况。
- 4. 假设你的公司在现场有三个测风塔。为每个塔上的仪器制定一个规范（如风速计、风向标及其他传感器的数量和型号），确定合适的备件库存并给出定价——可借助互联网。
- 5. 为什么说按时取下测风塔上的风速计并送去标定是个好主意？针对问题 4 中你指定的一个塔，提出合适的拆取计划。

现场巡查核查单示例

A. 基本信息

场址名称		
场址位置		
巡查组成员		
日期		
时间 (LST)	到达：	离开：
巡查类型 (选项)	定期 <input type="checkbox"/>	不定期 <input type="checkbox"/>
工作计划		

B. 室内准备

勾选所需条目前的方框

- ☐ 室内支持人员:\_\_\_\_\_
- ☐ 复制场址信息标识
- ☐ 所需的必要工具、设备和备件
  - ☐ 电气用品:电压表、熔丝、卷尺、接插件、电缆接头、蓄电池夹钳等
  - ☐ 呆扳手、活扳手、电工钳、螺钉旋具、套筒扳手、内六角扳手、大锤、钢丝钳等
  - ☐ 设备杂项:硅橡胶、磁性液位计、双筒望远镜、相机、GPS 等
  - ☐ 备件:布线、地锚、横梁、安装硬件等
- 1) 传感器:
  - 1) 传感器:\_\_\_\_\_ 系列号#\_\_\_\_\_ 斜率/偏置\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_
  - 2) 传感器:\_\_\_\_\_ 系列号#\_\_\_\_\_ 斜率/偏置\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_
  - 3) 传感器:\_\_\_\_\_ 系列号#\_\_\_\_\_ 斜率/偏置\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_
- 2) 数据记录器:序号#\_\_\_\_\_
- ☐ 场址的道路和地形图
- ☐ 租赁设备:手提钻、压缩机、卡车/拖车等
- ☐ 带 12V 电池和电池充电器的绞盘
- ☐ 安装支杆及相关硬件
- ☐ 安保设备:安全帽、手套、合适的服装、急救包等
- ☐ 有关安装和消缺的用户手册(传感器、数据记录器等)

其他信息和说明:\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

C. 基本现场操作

勾选适合的方框。如果没有,在下面说明。

- 常规现场巡查
  - 是☐ 否☐ 区域未受恶意破坏?
  - 是☐ 否☐ 杆塔垂直?
  - 是☐ 否☐ 拉线拉紧、保障合理?
  - 是☐ 否☐ 太阳能电池板干净且朝向正确?
  - 是☐ 否☐ 测风传感器完好,天线未受冰雪影响?
  - 是☐ 否☐ 接地系统完好?
  - 是☐ 否☐ 蜂窝天线方向正确?

发现/操作:\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

- 数据提取
    - 手工☐ 远程☐ (下载方法)
    - 是☐ 否☐ 下载成功? 如果否,在下面说明原因。
- 发现/操作:\_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_
- \_\_\_\_\_

(续)

● 放低杆塔操作

- 是□ 否□ 检查所有地锚,无活动迹象?
- 是□ 否□ 绞车用地锚固定,安全绳与车辆底盘连接?
- 是□ 否□ 安装支杆与安全链和快速链接带连在一起?
- 是□ 否□ 塔基用螺栓紧固?
- 是□ 否□ 安装支杆安全链安装和拉紧正确(安装支杆笔直)?
- 是□ 否□ 天气条件安全?
- 是□ 否□ 清理该区域人员?
- 是□ 否□ 标明放低杆塔的时间\_\_\_\_\_(LST)
- 是□ 否□ 接通绞车电源、覆盖终端?
- 是□ 否□ 将拉线附件拉升至要检查的安装支杆?

发现/操作: \_\_\_\_\_

● 地面一般操作

- 是□ 否□ 传感器和接地线安全安装?
- 是□ 否□ 接地系统无损、安全?
- 是□ 否□ 传感器吊杆安全夹紧?
- 是□ 否□ 吊杆方向正确?
- 是□ 否□ 吊杆焊接完好?
- 是□ 否□ 在场址信息日志中注明风向标死区方位?
- 是□ 否□ 传感器水平和方位正确?
- 是□ 否□ 传感器接线安全、用硅胶密封?
- 是□ 否□ 传感器标识损坏?
- 是□ 否□ 检查传感器输出和功能正确?
- 是□ 否□ 在场址信息日志中注明传感器序号?
- 是□ 否□ 更换传感器和/或数据记录器? 如果是:
- 1) 传感器: \_\_\_\_\_ 系列号# \_\_\_\_\_ 斜率/偏置 \_\_\_\_\_/ \_\_\_\_\_
- 高度: \_\_\_\_\_ 方位: \_\_\_\_\_
- 2) 传感器: \_\_\_\_\_ 系列号# \_\_\_\_\_ 斜率/偏置 \_\_\_\_\_/ \_\_\_\_\_
- 高度: \_\_\_\_\_ 方位: \_\_\_\_\_

发现/操作: \_\_\_\_\_

● 提升杆塔操作

- 是□ 否□ 拉线接箍位置正确?
- 是□ 否□ 拉升线和地锚线正确固定?
- 是□ 否□ 安装支杆安全、线拉紧、起重桅杆笔直、拉紧?
- 是□ 否□ 天气条件安全?
- 是□ 否□ 拉线正确拉紧?
- 是□ 否□ 杆塔笔直?

● 注明在线时间: \_\_\_\_\_(LST)

● 场址撤离操作

- 是□ 否□ 数据成功传输到办公室电脑?

(续)

- 是 ☐ 否 ☐ 检查天线和电话连接?
- 是 ☐ 否 ☐ 数据记录器数据/时间正确?
- 是 ☐ 否 ☐ 数据记录器外壳锁好?
- 是 ☐ 否 ☐ 清理现场?
- 是 ☐ 否 ☐ 拉线明确标注?

发现/操作: \_\_\_\_\_

D. 发现和建议

是 ☐ 否 ☐ 需要进一步处理? 如果是,在下面说明:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## 第 7 章 数据采集和处理

数据采集和处理的主要目的是使测风设备测到的气象数据满足分析要求，防止数据被篡改或丢失。本章重点介绍达到这一目的的关键点，包括数据存储、提取、保护及文档编制。

### 7.1 原始数据存储

数据通常以紧凑的二进制文件（非文本）格式储存在数据记录器中，须用专门的软件读取。这种格式的数据通常被称作原始数据。为保证监测项目具有较高的数据恢复率，数据记录器的内部存储介质应具有非易失性；这意味着，即使记录器断电，数据仍能保存。而且，应在储满其容量之前，将原始数据从记录器中取出。

一旦将数据从记录器转移到计算机中，至关重要的是将记录器中的原始数据永久存档和保存。因为它是测风塔上收集的数据没有被更改、仍保存着原始传感器读取所用的转换常数的原始记录（这一点对于那些仅提供转换后的数据、而非传感器原始输出的数据记录器非常重要）的最佳证据。如果不访问这些文件，独立浏览人员可能会对测量的可靠性和准确度产生疑问。

#### 7.1.1 数据存储类型

下面是常用的数据存储介质。

##### 1. 数据卡

这种小巧、可移动的存储设备广泛用于数码相机、摄像机及其他类似设备中，它有很多以品牌命名的名字，如索尼记忆棒、多媒体卡（MultiMediaCard，MMC）、安全数字卡（SecureDigital，SD）等。很多笔记本电脑可以直接读取这类数据卡。也可以用读卡器将数据导入笔记本电脑或台式机。

##### 2. 固态模块（Solid-State Module，SSM）

这些非易失性设备也称为内存存储器，放置在数据记录器中。可以直接通过一根连接记录器和笔记本电脑的传输线读取数据。

##### 3. EEPROM 数据芯片

这是一种比较老的集成电路技术，曾被用作早期记录器的内存。数据传输需要制造商提供的软件和 EEPROM 读取设备。

如果在现场传输数据，就需要一台笔记本电脑。这是推荐的手工数据提取方法，它允许在站址巡查时验证数据的完整性。如果没有可用的笔记本电脑，需要用一个新卡替代原有数据卡，然后将数据卡带回公司办公室。根据存储类型，可



能还需要专用传输线、接口硬件、外部电源、软件以及便携式驱动器或 USB 驱动器。

### 7.1.2 数据存储容量

数据记录器所需的最小容量由多种因素决定，包括数据提取频率（推荐每 2 周一次或更短）、数据记录间隔（通常 10min）、安装的传感器数量（1 个 60m 塔通常有 8~12 个），以及数据记录器计算和存储参数的数量。现在常用的数据存储设备的容量至少为 16MB，在多数情况下这是足够的。但当希望的记录间隔短于 10min，如 2s 或 1min 时，可能是个例外。这时可能需要更大的数据存储容量或更高的数据提取频率。另一个例外可能出现在连续数月都无法巡查测风塔（如由于冬天下雪或结冰）的情况。如果远程通信上传失败，可能要求数据记录器存储数月数据。

制造商通常提供表格或计算方法来计算不同存储结构大概的可用存储容量（用天表示）。容量估计也可用于估算提取数据的延时。

## 7.2 数据提取

数据传输和处理方式（手工或远程）的选择取决于场址特征和监测程序的需要。人们通常更愿意远程提取数据，因为它通常意味着更节省工时和旅费。然而，某些场址可能缺少可靠的移动电话设备，而其他远程连接方式可能很贵。选择传输方式时，应考虑以下几点：

- 1) 人工成本和可用性；
- 2) 路途时间和花费；
- 3) 场址的全年可进入性；
- 4) 移动电话设备的可用性；
- 5) 通信设备的费用和电力需求；
- 6) 所需的支撑系统（如，计算机、调制解调器、分析和显示软件）。

## 7.3 数据提取频率

不管是手工提取还是远程提取数据，经常提取和及时浏览是提高数据质量、减少数据丢失的关键。需要按计划定期传输或下载场址数据。推荐的最大间隔为两周。对于远程数据传输，传输数据集的大小是一个需要考虑的重要因素。为可靠传输，文件应尽可能小。每周一次应该足够，当然间隔更短，如每 1~3 天一次会更好。

也可能出现非定期传输的情况。例如，浏览数据时发现传感器不正常，这就需要继续传输，看问题是否依然存在。结冰或场址周边极端天气报告可以成为非定期

提取数据的动因，以确保传感器依然工作正常。当然，在任何时候，如怀疑有问题，都应尽快派人员到现场对测风塔和设备进行检查。

## 7.4 数据保护和存储

下述各节给出指导意见，以使数据丢失或破坏的风险最小化。

### 7.4.1 数据记录器

为保证存储在数据记录器中的数据得到有效保护，需要按照正确的程序安装，包括所有设备应接地和使用火花间隙。

### 7.4.2 计算机硬件

工作数据库最初通常保存在个人计算机中，因此需要小心以确保计算机，特别是其硬件设备处于良好的工作状态，并且经常备份数据。

### 7.4.3 数据处理过程

数据处理不当会加大数据丢失风险。与数据和存储介质有关的所有人都应进行全面培训并理解以下几点：

- 1) 数据提取软件和计算机操作系统：技术人员应注意各种可能导致数据偶然被覆盖或删除的情况；
- 2) 良好的数据存储介质处理经验：应对数据卡和硬盘驱动器进行保护，使其免受静电、电磁场和极端温度的影响；
- 3) 计算机操作和安全经验，包括接地要求。

为降低数据丢失风险，记录器原始文件应永久保存和安全存档，并经常对工作数据库备份（至少与数据提取的频率相同）。压缩和备份文件应保存在与主文件不同的位置，并应不在同一建筑内。数据备份常用的方法包括使用 CD、DVD 和磁盘。最近，在线备份设备使用越来越普遍，使经常备份变得更加安全和方便。

对于通过电子邮件远程传输来说，另一种非常有效的数据保护策略是设置备份电子邮件账户，将电子邮件文件传到不同地方的不同计算机上。

## 7.5 文档编制

每一场址都需要撰写一个场址数据传输报告，作为原始数据文件记录，本章末尾给出了一个例子。该报告也可用于跟踪远程数据传输结果和文件备份情况。下面列出了场址数据传输报告中应包括的基本信息：

- 1) 场址名称；
- 2) 场址位置；
- 3) 数据传输方法（手工或远程）；

- 4) 最近的传输日期和时间（本地时间或 GMT<sup>⊖</sup>）；
- 5) 备份系统和位置；
- 6) 传输间隔；
- 7) 说明、问题和措施。

该文档提供有关设备性能和数据完整性的宝贵信息。例如，查阅过去的报告可能发现尽管数据被成功提取，但场址通信的建立和维护变得越来越困难。这可能是系统的通信系统或电源即将发生故障的初始迹象，意味着应该到现场巡查，以防数据丢失。

## 7.6 讨论题

1. 你希望从同一个场址采集 10min 平均和 2s 瞬时数据。为达到该目的，应选用哪种合适的存储介质和提取方式？
2. 你要在远处安装一个测风塔，该地有多种通信方式可选（卫星、无线电话）。讨论每个选择的费用和好处。你为该地推荐哪种方式，为什么？
3. 在编写远程数据传输报告时，你发现一个场址已有十多天未与基础软件通信了。造成这一结果的可能原因有哪些？哪些可以远程诊断，什么情况需要进行现场巡查？
4. 你要到远处进行现场巡查，但没有有关数据记录器配置的相关信息。列出从常见配置的数据记录器提取数据需要带的设备，以及现场可能需要的合适的备用设备？
5. 有一个测风场址，任何季节土地业主都很容易进入去手工提取数据。讨论手工和远程数据提取的优缺点，并为每一选项制定一个计划以保证数据完整性。
6. 很多现代数据记录器可通过编程预设数据传输间隔。从短（每日一次）到长（每周一次、两周一次或更长）、从设备和一般监控活动的视角，说明不同数据传输间隔的优点。

---

⊖ GMT 是 Greenwich Mean Time（格林尼治标准时间）的缩写。——译者注



## 第 8 章 陆基遥感系统

随着风电机组尺寸越来越大以及风电项目容量和复杂性增加，需要高度更高和项目区域内更多位置的风资源数据。陆基遥感，包括声雷达（Sodar）和光雷达（Lidar），可帮助满足这一需求。Sodar 和 Lidar 可测量地面 150m 以上或更高高度的风资源，远远超出斜拉塔所能达到的高度。对于那些固定式测风塔价格昂贵且技术不可行的环境条件，Sodar 和 Lidar 可能是唯一可用的测风设备。更常见的情况是它们与符合资源评估标准的固定式测风塔一起使用。尽管实际应用中完全依靠遥感数据的案例很少，但随着其技术成本的降低，它似乎变得越来越常见，而且准确度和可靠性不断提高，使用经验也不断增加。

遥感的主要优点是可以测量多数测风塔可测高度以上以及现代大型风电机组风轮扫掠面的风特性。这可以降低风切变和发电量估算的不确定性。还可以得到湍流、垂直运动、风向切变（方向变化）等信息——这些都会影响风电机组的性能。

遥感的另一个优点是设备安装和移动相对容易，这样可以在一个项目区域内的多个位置收集风资源数据，与使用高塔相比，通常费用更低、时间更短。在一些案例中，可将它们放置在无法或被禁止安装测风塔的场址。通常，当遥感系统与长期测风塔同时测量时，测量时间可从几周到几个月，或认为从统计意义上足以获得大气条件代表样本的时长。

Sodar 和 Lidar 的测风都与传统测风有很大不同。对比由它们获得的风特性时，要考虑这些测量系统的差异。一个不同点是它们测量的是一定体积空气内的风速而非某一点的风速。另一个不同是，它们记录的是矢量平均风速而非标量平均风速。在冰雹、湍流及风速垂直变化明显的情况下，遥感装置与风速计有不同特性；而且，它们的性能还会受到温度、复杂地形和其他因素影响。

下面两节将讨论当前行业内认可的实践应用以及使用 Sodar 和 Lidar 进行风资源评估项目的相关技术。还将提到比较活跃的研究和开发领域。附录 A 列出了一些遥感设备供货商。

### 8.1 声雷达（Sodar）

Sodar 通过向上发射声波脉冲（听得见的唧唧声或嘟嘟声）并接收向后反射的回声来工作。散射是由风流携带的湍流涡旋（空气密度的小尺度波动）引起的。这些涡旋移动会造成多普勒频移——与救护车警笛产生的效应近似，通过音高变化

作为警示方法，并传给接收者。用软件分析频移，以确定传播脉冲的径向风速；进而根据声束的角度和方向，由径向风速推得水平和垂直风速。回波时间决定散射发生的高度。多数用于风资源评估的 Sodar 设备测量地面30 ~ 200m 的风速，间隔 5 ~ 20m。图 8-1 介绍了 Sodar 的工作原理，图 8-2 给出了两种专门的 Sodar 装置。

一个典型的 Sodar 系统包括多个作为反射器和接收器的扬声器、一个装有运行和数据处理软件（包括自我诊断）的机载计算机、一个电源以及综合数据存储和通信的程序包。很多 Sodar 装在拖车上，所以能灵活移动，而且为了安全和免受天气影响，拖车通常是封闭的。电源容量必须满足 Sodar 和通信设备连续运行的需要。如果 Sodar 离网运行，还必须有蓄电池充电系统，如柴油或燃气发电机、太阳电池板或风力发电机等。Sodar 装置（与 Lidar 装置一样）比大多数测风塔耗电多。

与测风塔相比，Sodar 系统需要更复杂的数据质量筛选和分析程序。需要检查

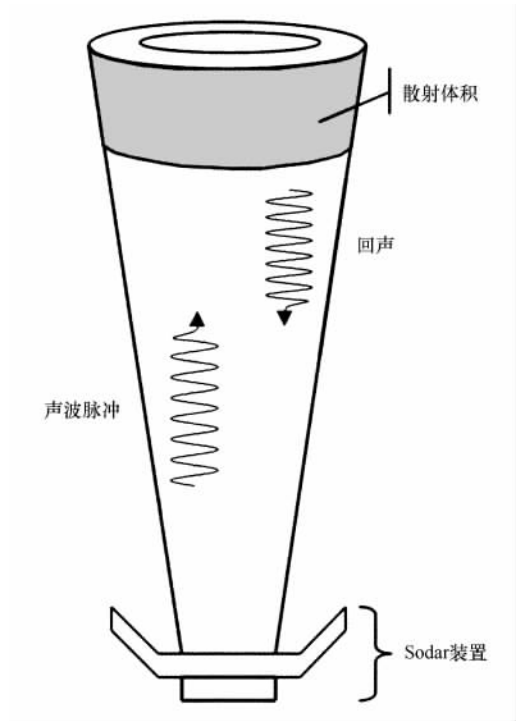


图 8-1 Sodar 工作原理示意图；Sodar 装置发射声波脉冲，随后通过测量向后反射信号的频率和时延来确定风速和高度。（来源：AWS Truepower）

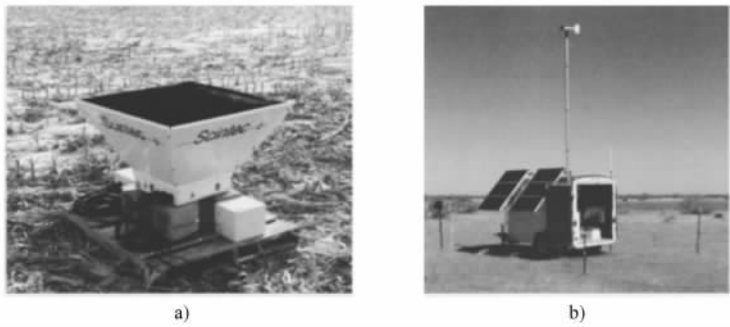


图 8-2 a) Scintec SFAS Sodar 装置；  
b) 大气研究与技术 VT-1 Sodar 装置（放在拖车内）。

（来源：AWS Truepower）

更多参数,对不同大气事件(如雨、雪及其他降水)有不同的系统响应,并且为得到准确结果需要进行更多分析。为获得与风速计读数可比的结果,在复杂气流条件下需要作进一步的分析。因此建议对分析人员进行专门培训或由有经验的咨询人员来承担数据验证和初步分析。

需要测量 Sodar 场址的气温和降水,这有助于进行数据质量筛选、提高测量准确度。气温是准确计算声速所必需的,而声速又决定了回声对应的高度和所估计的 Sodar 相控阵发射的声束倾角。它也可使垂直风速测量无效。基于这些原因,应识别可测的降水时段,而且大多情况下要在数据分析时将其剔除。

## 8.2 光雷达 (Lidar)

Lidar 通过发射激光信号(脉冲或连续波)、部分信号被空气中悬浮的气溶胶粒子沿发射方向向后散射来工作。与 Sodar 系统的声波频移类似,这些粒子散射的光也会产生频移。根据这一频移得到沿激光路径的径向风速。规定角度的多激光器测量可获得 3D 风速分量。但运行特性、测角数量、观测层深度,甚至测量体积的形状都会随 Lidar 型号不同而变化。

当前用于风资源测量的 Lidar 主要有两种全然不同的类型。廓线 Lidar 测量一个维度的风速,通常是垂直方向,生成与测风塔或 Sodar 结果类似的风廓线。这类 Lidar 通常可测量高至设备以上 200m 的风速。而三维扫描 Lidar 能够发射两轴激光,使它可以测量半球容积内的所有风速。设计的侧扫描装置可以得到一个较大区域的三维网格风速。一些设备的扫描范围可达数千米。尽管侧扫描 Lidar 有可能更广泛地用于风资源测量,但本章主要介绍测试和使用更广的廓线设备。

一个典型的廓线 Lidar 系统装有一个或多个激光发射器和接收器、一台装有运行和数据处理软件(包括自诊断)的机载计算机、加热和冷却系统及综合数据存储和通信的程序包。尽管大多 Lidar 装有交流电源插头,并有车载备用电池以防电网停电,但还须获得远程供电或配有定制电源,以实现脱网独立运行。像 Sodar 那样,Lidar 设备也可装在拖车上,部分密闭。但制造商销售的大都是单机。图 8-3 给出了两种 Lidar 装置。

为风能应用而设计的 Lidar 出现在 Sodar 之后,并且相当昂贵。然而,它的普及程度在不断提高,特别是在大多领先制造商的所在地欧洲。Lidar 受益于一系列的测试试验,使其建立了高准确度的声望。另外,Lidar 在很多专门领域得到越来越多的应用,如海上风资源评估、替代风电机组机舱上的风速计、放在已建风电场内及其周边进行性能评估。可以预见,随着其价格下降、使用经验增多及其技术越来越被接受,未来 Lidar 的应用还将会不断扩展。



图 8-3 NRG/Leosphere 的 Windcube Lidar (右)<sup>①</sup>和 Natural Power 公司的 ZephIR Lidar 设备。  
(来源：AWS Truepower)

### 8.3 遥感监测的设计和选址

成功的遥感监测，不管是使用 Sodar 或 Lidar 或两者都用，都需要非常专业的选址、系统运行、数据分析和解释。

与测风塔一样，遥感系统应放置在能代表风电机组所处风况条件的位置。设备需要水平安装，并确定和记录它们相对真北的方位。

为了避免影响数据质量的噪声回波，Sodar 放置位置应远离测风塔、树木或建筑物等障碍物，其距离要大于障碍物高度。有些场址，特别是那些周边有很多障碍物的场址（如林中空地），需要更大的避让空间。旋转 Sodar 使其声波束绕开障碍物，有时可以减少回声。如果可能，应避开发电机、空调及其他产生高声波的噪声源。最后，由于嘟嘟声或唧唧声会对附近的居民产生影响，所以 Sodar 放置在开阔、平坦地形时至少需距离民居 500m；而其他地形至少为 350m。

从理论上讲，由于激光束比声波聚焦能力更强，所以与 Sodar 相比，Lidar 受周边障碍物的干扰更小。这将使那些使用 Sodar 有困难的地方，可能可以使用 Lidar，从而可以将其放在离测风塔更近的位置，使测得的数据与风速计数据更吻合。然而，还是希望设备的“测量锥”尽可能不受干扰，特别是来自移动物体的干扰，诸如树枝、拉线和风速计等。尽管一些 Lidar 设备能够容忍扫描视野重要部分的阻

① 原文是“left（左）”，但图片右侧设备才是 Windcube Lidar（译者所在单位已购买，故可以辨识），故改正。——译者注



挡,但这会降低数据恢复率、加大观测风速的误差范围。一些 Lidar 设备能够旋转,从而使其光束避开障碍物。

在复杂地形条件下, Sodar 和 Lidar 测量的水平风速都会出现偏差。这是因为径向读值的偏差随测量高度增加而迅速增大;而且,在复杂地形条件下,采样容积内气流的垂直分量并非整齐划一。对于很复杂的地形,偏差可能高达 5%,但通常会小得多。遥感测量的这一特性以及可能的校正方法是该领域的研究热点(见 8.6 节)。

一个场址需要采集的 Sodar 和 Lidar 数据量以及测量时段取决于风况及研究目的。当该系统是唯一的测风来源时,建议至少采集 1 年(连续 12 个月)的数据,就像侧风塔那样。更常见的情况是场址上有一个参考测风塔,通常短得多的测量时段就足够了。在这种情况下,比较理想的是,所收集的数据覆盖风速风向的典型区间。在大多数位置,4~6 周就可完成。通过与邻近参考测风塔同期风速对比或观察重要风向风速区间样本数量,就可估计测量的准确度。为进一步提高观测廓线的置信度,应在一年内不同时间进行测量,特别在是那些期望风速、风向、风切变等风资源要素随季节明显变化的场址。

## 8.4 数据采集和处理

Sodar 和 Lidar 系统每个高度上的基本输出是水平风速和风向、垂直风速以及相应的标准偏差。另外,通常还会给出信号质量指标,如信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)和可靠数据的最大高度。了解这些参数的定义和阈值对于建立合适的数据筛选程序以及识别可疑数据段非常有用。

记录间隔必须与 Sodar 或 Lidar 读数进行比对的其他测量系统所用间隔(通常是 10min)兼容。如果需要,随后可以计算其他均值,如 60min 或日均值。所有系统的数据采集卡的时钟必须同步。

Sodar 系统通过软件来设置确定的高度区间和间隔,记录每一时刻的风廓线。Sodar 的脉冲重复率(或占空比)部分由最大测量高度确定。增加高度会减少每一记录区间有效数据样本的数量。例如,对于某类常用的 Sodar,与最大高度设为 150m 相比,最大高度设为 200m 时,每 10min 记录区间样本数通常减少 15%。由于 SNR 与样本大小有关,这一设置可能会影响数据质量和数据恢复率,这取决于大气条件。

用户可编程设定 Lidar 距离门(所记录数据的高度间隔)的高度,但当前报告水平的个数限定在 5~10 级之间,取决于设备类型。由于限定了报告高度的个数,因此需要仔细选择报告高度。例如,其中两个 Lidar 距离门可选择与参考测风塔顶上两个风速计的高度相一致,以便直接比较所测风速。第三个可选择预期的风电机组轮毂高度,剩余的选在风轮平面上。

## 8.5 与常规测风方法的比较

由于当前风电机组的功率曲线用 IEC I 级风速计所测风速来定义，因此必须理解并量化 Sodar 或 Lidar 读数相对这类风速计的偏差源。

不进行以下所述的调整，Sodar 读取的风速比风速计低 5% ~ 7%。在某些场址，Lidar 风速与转杯风速计读数的差别也可高达 4% ~ 6%。如果装在参考测风塔上的风速计不是 IEC I 级，那么了解它的动态响应特性是同等重要的，而且如果有必要，将其读数修正到 IEC I 级标准。

下面将讨论造成 Sodar、Lidar 与转杯风速计偏差的主要因素。一旦考虑了这些因素，Sodar 和 Lidar 测量的风速与同高度邻近风速计同期测量值的偏差通常会降到 2% 以下。

### 8.5.1 Sodar 的声束倾斜

相控阵 Sodar 所发出声束的倾角随空气中声速变化而略有变化，而该声速是气温的函数。这种变化会影响推导风速的准确度。大多 Sodar 制造商通过连续测量 Sodar 设备的温度并计算声束的几何形状来解决这一问题。邻近测风塔的温度数据也可用于数据后处理。不考虑温度变化影响可使 Sodar 与邻近风速计的偏差达 2% ~ 3%。

### 8.5.2 矢量风速到标量风速的转换

Sodar 和 Lidar 通常在每一平均区间结束时记录水平风速的矢量平均。在湍流条件下，风向变化会导致矢量平均小于标量平均（风速计的通常输出）。<sup>①</sup>如果知道风向的标准偏差，可以估计矢量平均值的修正值。遗憾的是，不可能依靠 Sodar 或 Lidar 自身的水平标准偏差读值来完成这一修正，因为它们也是基于矢量平均的。一个选择是使用邻近测风塔上风速计记录的风向标准偏差。如果这不可能，可以使用 Sodar 或 Lidar 测得的垂直风速的标准偏差代替，矢量到标量的偏差修正通常为 1% ~ 3%。

一些设备在数据处理过程中进行矢量到标量的修正。这要经过制造商确认。

### 8.5.3 Lidar 的环境条件

对于所有 Lidar 设备，数据恢复率取决于大气中气溶胶粒子的数量和尺寸。在特别干净的空气中（如高山上的空气或暴雨后的其他环境），所有测量高度的数据恢复率都将降低，而且无法测量 150m 以上的风速。一些 Lidar 设备对云的方向散射也很敏感，虽然已经有了一些针对这些条件的修正算法，但它仍是一个正在发展的领域。最后，在进行特定分析时需要剔除降水时段收集的数据。尽管雨雪对水平

① 进行矢量平均时，分别对风速的东西和南北向分量进行平均，然后再把它们转化成一个值。如果一个平均区间内风速变化时风向也发生变化，如由东风变为西风，则矢量平均将比标量平均风速小很多。

风速测量的影响可能很小，但垂直风速几乎被降水的向下运动淹没，必须剔除这些区间的数据。

#### 8.5.4 湍流强度和风速计超速

第4章提到，在湍流条件下，由于转杯风速计对阵风来时的加速度比阵风过后的减速度响应快很多，所以它有对平均风速过估的趋势。不同类型的传感器的这一效应差别很大，对于非 IEC I 类风速计，它可使 Lidar 和 Sodar 读数与风速计的测量值之间产生 1% ~ 3% 的负偏差。这种情况下，应该调整风速计的数据以避免可能对风电机组发电量的过估。这一话题将在第9章中详细介绍。

#### 8.5.5 气流倾角与复杂地形

由于 Sodar 和 Lidar 与转杯风速计不同，它生成真正的水平风速，因此有必要确定偏离水平的风是否会造成其与风速计数据的明显偏差。多数情况下，差别小于 1%，但在极端的斜坡，差别可能达到 3%。由于风力机只响应风速水平分量，因此需要根据传感器对气流倾角的响应对风速计数据进行调整，这将在第9章介绍。

某些情况下，特别是对于狭窄山脊或其他复杂地形，Sodar 或 Lidar 测量空间内的气流倾角是不同的。这可造成与邻近风速计读数有 3% ~ 5% 的差异。这一影响随风速计和遥感设备的特性、地形复杂程度、土地覆被以及测量之间的距离变化而变化。这是一个需要继续调研的领域。要完全描述复杂场址，并使风速计与遥感测量值一致，可能需要其他辅助工具，包括高分辨率气流模型和高频 3D 点和体积测量。

#### 8.5.6 体积平均

Sodar 和 Lidar 测量的都是一定空气体积内的风速，不同于风速计的“点”测量。Sodar 测量的每一层（不管所记录风速在哪一风速区间）实际代表的是在 20m 甚至更宽范围信息的总和。在风切变大的层，体积平均可使 Sodar 低估测量高度处的平均风速，最高达 3%。

对于 Lidar，测量容积的厚度从不到 1m 到大于 50m。实际厚度取决于 Lidar 的类型，而且在整个廓线上是变化值或固定值。容积的厚度越大，引入的切变偏差越大，这与在 Sodar 系统看到的情况类似。

#### 8.5.7 与参考测风塔的距离

有时，Sodar 和 Lidar 放置位置必须与参考测风塔有一定距离，以减小测风塔对测量的干扰，以获得最大数据恢复率，或满足其他监测要求。在中等或复杂地形条件、以及土地覆被有明显变化的区域，仅仅因为两个位置之间的距离不同，测量值之间就会产生很明显的偏差。通常需要由专家来估计偏差的显著程度，有时要用数值风流场建模来帮助评估。

## 8.6 讨论题

1. Lidar 和 Sodar 是如何工作的？请描述它们的基本工作原理。

2. 通常，与一个 60m 斜拉塔相比，Lidar 和 Sodar 有哪些优点和缺点？讨论每类遥感系统积极和消极的方面。

3. Lidar 和 Sodar 测量的都是一定“体积”的空气。它们与风速计测量有什么不同？这一不同意味着什么？假设风速在 90 ~ 110m 高度区间接指数规律增大（见第 3 章），幂指数是 0.5。进一步假设 100m 处的风速正好是 10m/s。那么 90m、100m 和 110m 的平均风速是多少？与真实的 100m 处的风速相比，这一表示的百分比误差是多少？

4. “SNR”是什么，它如何用于陆基遥感设备？

5. 你正参与一个风资源评估项目，希望确定风切变对风电机组轮毂高度选择的影响。你打算使用两个 60m 测风塔和一台陆基遥感设备完成当前的评估工作。可用的监测位置附近有 30m 高树木组成的树林和一条经常有车通过的公路。你的预算允许你购买一台 Lidar 或 Sodar，而且你可从满足你计划安排的供货商那里得到它。①你希望选择哪种类型的设备？②所选设备为什么适合场址条件？③在布置过程中需要注意哪些选址条件？

6. 备选的风电工程场址在主导风向上面对一陡峭的斜坡。与使用转杯风速计的测风塔采集的风数据相比，用 Lidar 或 Sodar 收集数据时，需要考虑做哪些修正？说明需要考虑或调整的条目和参数，以及它是用于所有遥感系统还是仅针对特定类型。

## 深入阅读建议

- Deolia RA. Characterization of winds through the rotor plane using a phased array SODAR, Sandia National Laboratory, Report SAND2009-7895, Feb 2010. Available at <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2009/097895.pdf>. (Accessed 2012).
- Kelly ND, et al. Comparing pulsed doppler LIDAR with SODAR and direct measurements for wind assessment. National Renewable Energy Laboratory, Conference Paper CP-500-41792, 2005. Available at <http://www.nrel.gov/wind/pdfs/41792.pdf>. (Accessed 2012).
- Moore K. Recommended practices for the use of sodar in wind energy resource assessment, Integrated Environmental Data, June 2010. Available at [www.iedat.com/documents/SODARRecommendedPractices\\_IEARRevised22June.doc](http://www.iedat.com/documents/SODARRecommendedPractices_IEARRevised22June.doc). (Accessed 2012).
- Weitkamp C, editor. Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere, Springer series in optical sciences. 2005. p. 460.
- Wharton S, Lundquist JK. Atmospheric stability impacts on power curves of tall wind turbines, Lawrence Livermore National Laboratory, Report LLNL-TR-424425, Feb 2010. Available at <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/387609.pdf>. (Accessed 2012).



## 第二篇 数据分析和资源评估



## 第9章 数据验证

收集完风能资源测量数据，并将其传到办公室的计算机系统后，下一步就是质量控制（Quality Control, QC）和数据验证。这一过程的目的是保证后续分析中，使用的都是有效数据，并且数据尽可能准确。在这一阶段，忽略某些问题可能导致估计的风电工程发电量出现很大偏差。

尽管不同分析人员使用的术语不同，但 QC 通常指数据的初步筛选，以找出明显错误，如记录器和传感器故障及数据传输失败等。这一步应在数据从记录器传过来后尽快进行，以保证迅速发现仪器故障，并进行维修。

数据验证是一个更为复杂的过程，其执行的频度也更低（通常每月或每季度一次）。数据验证意味着检查数据的完整性和可靠性，检查并标出数据记录中的坏（无效或可疑）数据。可用方法很多，本章将做详细介绍。然而，需要指出的是，数据验证并不能找出所有坏数据，而且还可能错删一些好数据。数据验证与任何统计决策过程一样，会产生 I 型（正误识）和 II 型（负误识）误差。一些方法仅能降低某一类误差，但会导致其他类误差数量过多。良好的数据验证程序会使两类误差最小化。

本章中，适用于 QC 和数据验证的技术都包含在验证程序中。

遥感数据的验证是一个更为专业的课题，不在本书论述范围之内。

### 9.1 数据转换

首先根据不同的数据记录器制造商和模型，将记录器记录的原始二进制数据转换成文本文件、电子表格、数据库或其他可用格式。应用广泛的记录器的制造商（如 Campbell Scientific、NRG Systems、Second Wind）都提供进行该操作的软件，它们或是记录器软件的一部分，或是在计算机上独立运行。

进行数据转换时，分析人员必须保证在转换文件中输入数据的风杯死区、风速计传递函数、时区等设置是正确的。这似乎是一个很平常的要求，但令人奇怪的是这一阶段常会出现很多错误。例如场址文件中横梁方位和磁偏角输入错误，或传感器通道号被互换等，当然这些并不常见。如果开始没找出这些和其他常见错误，就可能使描述的风能资源特性出现明显错误。

基于这一原因，作为一般性规则，分析人员应尽可能寻找关键信息的相关佐证。例如，图片有助于确认所报告传感器的高度、横梁长度和方位；一对风速计的风速比随风向变化的散点图有助于验证风速计横梁方位和设计。如果没有详细的场

址文件，或文件是由其他方提供的，建议进行现场考察，以获取或确认所需信息。

经过标定的风速计应有校准试验部门出具的证明。分析人员应检查该证明以确认传感器传递函数，并证实传感器经过了正规测试。对于经过标定的风速计，进行原始数据转换时，是使用测量的传递函数，还是使用由同类型不同传感器的大量试验得到的平均“一致”函数，当前在风电界内还存在一些争论。通常这两种方法都是可接受的。不过有证据证明，特别是 NRG #40 和 Second Wind C3 转杯风速计，与测量函数相比，一致传递函数得到的结果与功率曲线测试使用的 IEC I 类风速计更吻合<sup>[1,2]</sup>。

作为一个良好的数据处理习惯，应永久保存原始数据和转换后数据。后续所有的数据验证和分析都应在转换后数据文件的副本中进行。为防止混淆，应使用不同的文件扩展名，如原始数据给定的扩展名为 raw，而经过验证的数据的扩展名为 ver。

## 9.2 数据验证

目前，借助于功能强大的个人计算机，多数数据验证都可使用自动化工具来完成。然而，我们仍然大力推荐人工检查。可以从一些数据记录器制造商那里获得验证软件，也有一些商业软件。制造商做过很多数据验证，通常会形成他们自己的利用电子表格的自动处理方法，或用 Fortran、Visual Basic、C++ 或 R 语言编写的通用软件。

不管用哪种方法，数据验证都要包含两个阶段：自动筛选和深入检查。自动筛选是利用一些算法标出可疑数据记录。可疑记录指正常范围之外的值。可根据先验知识或同一测风塔上的其他传感器得到数据的正常范围。算法通常包括相关性检验、范围检验和趋势检验。

第二阶段，有时称为核实，包括逐一确定可疑数据的处理方案——作为有效数据保存或作为无效数据剔除。该步最好由熟悉监测设备和当地气候条件的有经验人员来判断。本阶段可能会使用那些不在自动筛选范围内的信息，如区域气象数据。

通过一个例子来说明该过程。通过自动筛选，标出某段 10min 风速序列是有问题的，因为它们比之前和之后的风速都大得多。该尖峰到底是真实的，还是由于诸如连接不良等记录器电子故障造成的？在核查阶段，核查人员通过检查发现，同一塔上其他传感器也有相似的尖峰，这可能意味着它不是单个传感器或记录器通道的问题。那么他/她就可能要查看区域气象记录，并发现当时该区域正好有雷电活动，这样，结论就是尖峰很可能是由过境的雷电造成的，数据分析时不应将其剔除。

图 9-1 给出了另一个例子。经过一段时间的平稳正常运行，一个风速计 10min 平均风速的读数降到偏移值（表明无可测风），而标准偏差则降为零。后来又都恢复到正常水平。核查人员检查温度值时发现该事件发生前气温在冰点附近徘徊，结



束时又升到冰点以上。而且风向的标准偏差（未显示）在风速标准偏差降为零之前不久也降为零，在差不多相同时刻恢复正常。结论是，这可能是一结冰事件，应将其排除。

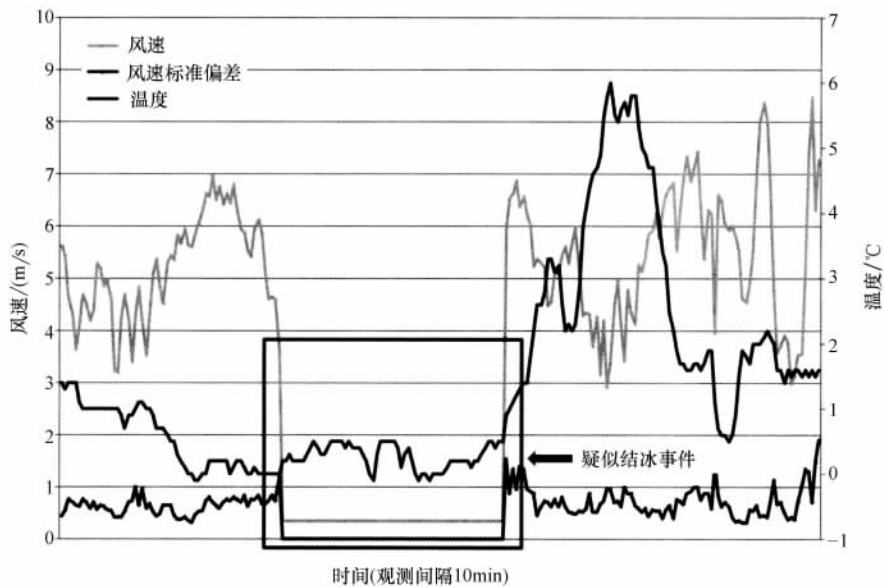


图 9-1 10min 平均风速、风速标准偏差和温度曲线，说明是一疑似结冰事件。

类似这样的时间序列图是可疑坏数据验证的有用工具。（来源：AWS Truepower）

在这种两段验证方法中，自动筛选有时会过于敏感，即它产生的正误识（即虽然实际是好数据，但被标为坏数据）的数量比负误识（即虽被认为是好数据，但实际是坏数据）的数量多，这是合理的。偏差偏向过度检测的一个原因是，在核查阶段还有机会再次检查坏数据记录，而好的记录通常不再进一步详细核查。另一个原因是，即使很少的一部分坏数据未被删除，也会使风能资源分析产生很大偏差；而去掉适量的好数据，很少会有如此大的影响。然而，在设计自动筛选机制时必须非常小心，以防因过量正误识而淹没校验阶段。需要在尝试与错误之间找到正确的平衡点。

9.2.1 验证程序

验证程序的设计目的是筛选每个测量参数，并标注出需要校验的可疑数据。可将它们分为两大类：一般性系统检验和测量参数检验。

1. 一般性系统检验

下面介绍两个简单的测试以评估所收集数据的完整性：

- 1) 数据记录。数据域的数量必须与每个记录的测量参数的预期数量相等。
- 2) 时间序列。检查每个数据记录的时间和日期标识，看有没有缺失或超出序列的数据。

2. 测量参数检验

测量参数检验通常包括：范围检验、相关性检验和趋势检验。按顺序进行这些检验，数据通过所有这三个检验后，才被认定是有效的。

1) 范围检验。在进行范围检验时，将测量数据与允许的上下限值<sup>①</sup>比较，这是最简单和最常用的检验方式。表 9-1 给出了范围检验判据示例。10min 平均风速的合理范围，最小等于风速计偏移量，最大为 30m/s。任何低于风速计偏移量的数值都应标为缺失或无效；风速高于 30m/s 是可能的，但须验证。范围检验的每个限值都要设定，以使它们的范围接近场址所有可信值区间。另外，如果需要，应按季调整限值。例如，气温和太阳辐照的限值，冬天应比夏天低。

表 9-1 范围检验判据举例  
(来源：AWS Truepower)

参 数 <sup>①</sup>	验 证 判 据
风速:水平	
均值	偏移量 < 均值 < 30m/s
标准偏差	0 < 标准偏差 < 3m/s
最大阵风	偏移量 < 最大值 < 35m/s
风向	
均值	0° < 均值 < 360°
标准偏差	3° < 标准偏差 < 75°
温度	随季节变化
典型范围	- 35℃ < 均值 < 35℃
风速:垂直	随地形变化
均值(S 或 C)	偏移量 < 均值 < ± (2 或 4) m/s
标准偏差(S 或 C)	偏移量 < 标准偏差 < ± (1 或 2) m/s
最大阵风(S 或 C)	偏移量 < 最大值 < ± (3 或 6) m/s
气压	海平面
均值	94kPa < 均值 < 106kPa
温差	
平均差	> 1.0℃ (白天)
平均差	< 1.0℃ (夜间)

注：S—简单地形；C—复杂地形。

① 除标注外的所有监测等级。

2) 相关性检验。这一检验取决于测量参数之间的关系。例如，相似高度的风速应该相近（除了当某一风速计被测风塔遮挡时）；不同高度间的风切变应在合理范围内（可能随日或季节变化）。表 9-2 给出了 10min 数据相关性检验判据的示例。这些检验应保证对物理上不可能出现的情况（如 25m 高度风速比 40m 高度风速大

① 注意，测量不同系统（通信设备、内部电池电压、外部电源测量）使用的电压测量系统不同。每种系统的运行范围不同，因此设定这些装置的范围和相关性检验时，应小心进行。

很多) 进行细致检查。相同高度上的一对传感器的比较是非常有价值的。

表 9-2 相关性检验判据举例

(来源: AWS Truepower)

参 数 <sup>①</sup>	验 证 判 据
风速	
最大阵风与均值之比	最大阵风 < 2.5 × 均值
60/40m 平均风速差	≤ 3 m/s
60/40m 日最大风速差	≤ 5 m/s
60/25m 平均风速差	≤ 5 m/s
60/25m 日最大风速差	≤ 8 m/s
风速: 相同高度	
平均差值	≤ 0.5 m/s
最大差值	≤ 3.0 m/s
风向	
60/25m 平均风向差	≤ 20°
风切变	
60/25m 平均值	$-0.05 < \alpha^{②} < 0.45$

① 除标注外的所有监测等级。

② 风切变指数。

相同高度上一对传感器之间的风速比随风速变化的散点图对于问题检查非常有用。图 9-2 给出了两个例子, 第一个是正常情况下的散点图, 第二个是不正常的情况, 很可能是由于其中一个或两个风速计老化或损坏引起的。

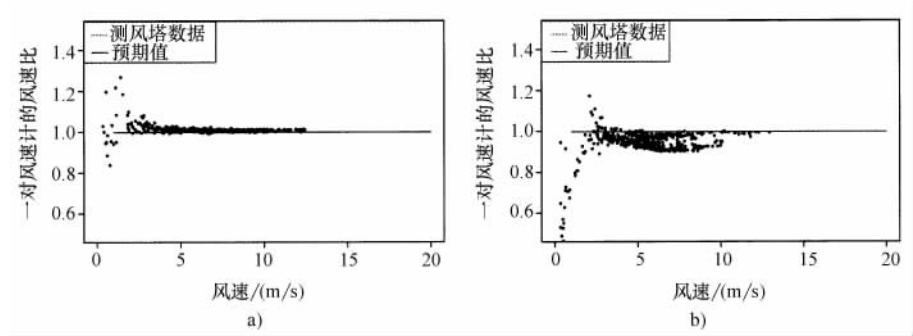


图 9-2 相同高度处一对风速计风速比随风速的变化图。a) 普遍的紧密关系, 低风速时出现分散是正常情况; b) 该图说明两个传感器中至少有一个运行不正常。

(来源: AWS Truepower)

3) 趋势检验。根据数值随时间的变化率来检验。表 9-3 给出趋势检验判据示例。实际的阈值应尽可能根据场址情况进行调整。注意, 没有考虑风向的趋势, 这是因为除其他条件外, 在恶劣天气或锋面过境事件过程中风向可能突变。

表 9-3 趋势检验判据举例  
(来源：AWS Truepower)

样本参数 <sup>①</sup>	验证判据
平均风速	所有传感器类型
1h 变化	< 5.0 m/s
平均气温	
1h 变化	≤ 5℃
3h 变化	≤ 1℃ <sup>⊙</sup>
温差	
3h 变化	高于或低于冰点变化 2 次

① 除标注外的所有监测等级。

表 9-1 ~ 表 9-3 给出的校验判据示例并不完全、也并不适用于所有场址。根据经验，分析人员可以知道特定条件下哪些判据是最有用的。

除了这些标准检验外，有两种情况通常需要特殊标记：塔影和结冰。

(1) 塔影

当两个风速计的相关性检验失败，而风来自某一方向使得其中一个风速计处在测风塔的下风向时，就认定为塔影。塔影区域的角宽度取决于测风塔的几何形状，但通常为与塔所成直线两边各约 30°。例如，如果横梁支点在塔的正东方，风向从 240° ~ 300° 应该标记。对于桁架塔，由于它的横梁通常偏离测风塔中心，所以它的塔影区域可能会不同。使用这一判据时，最好的方法是绘制相同高度两个风速计风速比随风向的变化图（见图 9-3）来验证峰值塔影方向和遮挡区域。该图还可以显示杆塔和安装在上面设备的意想不到的影响。

(2) 结冰

当风向标记录的标准偏差为零或接近零、且气温接近或低于冰点时，通常标记为结冰事件。这是一个比较保守的方法，因为风向标通常比风速计被冻结得早。在观测到的结冰期，不应该依靠非加热风速计的数据，哪怕风速高于偏移量，因为它们可能因中度积冰而反应变慢。

9.2.2 可疑数据处理

原始数据经过自动校验检查后，核查人员需要决定如何处理可疑数据。一些可疑值可能代表的是真实（虽然不常见）的气象现象，它们不应被排除在资源评估外，而其他的则可能反映传感器或记录器故障，应该被剔除。

这里给出一些处理可疑数据的参考：

- 1) 查看同一杆塔上其他传感器的数据，看是否能确认可疑数据。如果某一风速计被标记有一瞬时特征，如风速有一较大跳变，其他风速计是否也存在相似跳变？如果只有一个风速计显示这一特征，该传感器的这些数据很可能是无效的。
- 2) 使用不同来源的数据来验证天气条件。如果怀疑结冰，观测的气温是否支

⊙ 原文单位（kPa）有误，已改正。——译者注

持这一怀疑？如果记录中看到风速或温度存在大变化，当地气象站是否给出过可以解释这一过程的气象预报？

3) 检查传感器与时间的关系。非常常见的情况是，传感器老化是一个缓慢过程，如果只检查一段时间，如两周或一个月的数据很难发现。检查数月或更长时间的数据关系，老化就比较明显了。其他问题，如结冰，发生和消失的时间都很短，而且对不同高度传感器的影响程度不同。应该仔细检查标注结冰的区间，确保起止时间经过仔细验证。这是因为，风速计有时在达到结冰事件限值信号之前就会变慢。

4) 为无效数据设定代码，说明可疑原因。表 9-4 列出一些验证代码示例。对运行维护日志、场址温度数据和数据传输日志的检查有助于确定正确的代码。

5) 在日志文件中，保存每个监测场址所有数据校验操作的完整记录。

表 9-4 校验代码示例

代 码	拒 绝 判 据
- 990	未知事件
- 991	结冰或湿雪事件
- 992	静电放电
- 993	风被杆塔遮挡
- 995	风向标死区
- 996	操作错误
- 997	设备故障
- 998	设备服务
- 999	数据丢失(可能无值)

9.3 后验证调节

安装正确、质量良好的传感器应能在大多数时间准确测量风速、风向及其他气象参数。然而，为了准确估计真正的自由流风速，有几个因素通常需要考虑。本节详细介绍三类调整：杆塔影响、湍流和斜流。一些调整仅适用于特定类型的风速计。

9.3.1 杆塔影响

即使在塔影直接影响区域之外，与真正的自由流风速相比，杆塔的存在也可增大或降低观测风速。影响大小与风向、传感器到测风塔的距离、塔的宽度和类型有关。对于塔高以上的“门柱”形结构，杆塔影响或可以忽略。在正上风向的杆塔会阻挡风流，使风速降低；而在塔两侧的某些角度，测风塔可能使风流增速，使观测风速增大（参见图 5-7）。这些影响通常可清晰地显示在相同高度的两个风速计风速比随风向变化的散点图（图 9-3）中。

受横梁长度和杆塔几何形状影响，杆塔的次生影响可达百分之几，对资源评估会产生显著影响，特别是当风从一个很窄的方向吹来时。例如，风速计横梁通常安

装在与主导风向垂直方向、且彼此有  $180^\circ$  偏移。对于圆筒塔，这种结构可能导致对两个传感器处自由流风速的过估。

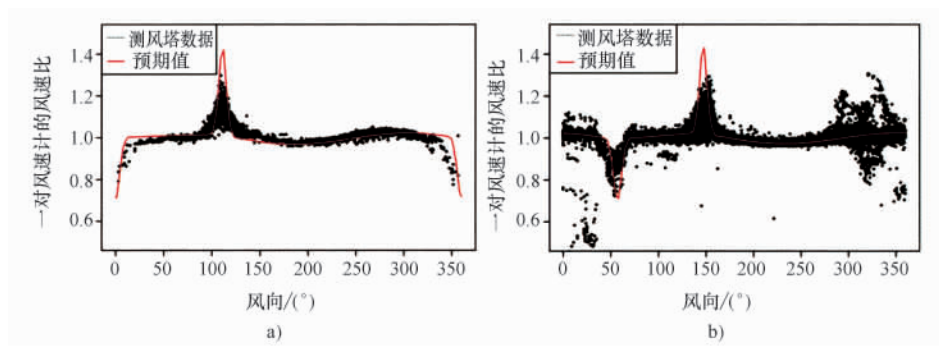


图 9-3<sup>⊙</sup> 相同高度的两个风速计风速比随风向的变化图。红线是计算流体力学模型计算的杆塔影响。两个图中明显的谷和峰代表塔影影响。注意，横梁的方向与风向相差  $180^\circ$ 。

a) 正常散点图，杆塔的次生影响在塔影方向外；b) 次生影响相对较大，可能是由塔上的设备或障碍引起的。(来源：AWS Truepower)

通过修正这些塔影影响，可以得到单个传感器更精确的自由流风速。然而，当前没有可用的商业工具完成这一工作，资源分析人员必须利用参考文献 [3] 中的可用信息，自己开发专门的工具。作为一种替代，取相同高度的两个传感器的有效数据平均，并选择推荐的角度（取决于塔的类型），通常可以减弱并实质上的消除综合数据记录中的塔影影响。在 9.4.2 节将详细讨论数据平均问题。

### 9.3.2 湍流

众所周知，在湍流条件下，转杯风速计会高估风速，因为风速计对风速突然增大的响应比快速降低时快。过速的大小取决于传感器的类型和湍流强度。

研究表明，距离常数较大的风速计，如 NRG #40 和 Second Wind C3，在湍流条件下记录的风速比用于功率特性测试和认证的 IEC I 级风速计要大。湍流小时，会出现相反趋势。通过对传感器进行专门调节，考虑这种趋势，估计的发电量会更准确<sup>[4]</sup>。

与转杯风速计相反，螺旋桨风向标式风速计受湍流影响时，倾向于低估风速。这是因为风向变化太快，风向标无法使螺旋桨准确对风。螺旋桨风速计仅测量与其旋转轴平行的风速分量；观测风速降低的系数等于偏角的余弦。由于湍流越大，产生的风向偏移越大，螺旋桨风向标式风速计对风速的低估量通常随着湍流强度的增加而增大<sup>[5]</sup>。

声波风速计没有运动部件，对湍流不敏感。但为使它们的测量结果与 I 级传感器相一致，也需要引入湍流调节，尽管它通常很小。

⊙ 图 9-3 的彩色图请见封二。——编辑注

### 9.3.3 斜流

水平轴风电机组产生的功率来自与风轮旋转平面垂直的风分量。为了准确估计发电量,理想情况下,风速计应仅测量该分量。然而,尤其是转杯风速计,对风偏离水平的敏感程度取决于转杯的几何形状和仪器。有研究给出了对于不同类型的转杯风速计,入流角对风速记录的影响<sup>[6]</sup>。但要使用这一信息需要知道杆塔处的入流角。这可以通过 Sodar、Lidar 或安装在塔上的垂直风速计获得。若没有直接测量结果,可以根据地形坡度和入流角模型来估计入流角。对于平坦地形,在低风速、强地面加热时段也可能出现斜流,但它的影响通常很小,不需要修正。

## 9.4 数据替换和平均

到目前为止,数据验证过程试图完好无损地保留每个传感器的有效数据,并与同一测风塔上其他传感器数据区分开。本节将讨论两种将不同传感器数据结合的方法:替换和平均。数据替换的目的是利用一个或多个其他传感器数据填补传感器记录的空缺,以得到尽可能长的数据记录;数据平均是将相同高度的两个不同风速计的测量结果结合到一起,以降低观测风速的不确定性。

### 9.4.1 数据替换

由于风资源监测程序的主要目的是获得覆盖尽可能长的区间风数据序列,因此希望如果可能,用其他传感器的有效数据填补记录中的所有空缺。对于测风塔最高处的风速计和最高的风向标,尤其需要进行数据替换,因为它们对于风能资源评估来说最重要。低层风速计或气温和气压传感器是否需要数据进行数据替换,则是一个见仁见智的问题(原因将在第10章说明,替换后的数据将用于估计风切变)。

对于风速计,理想的替换数据应来自相同高度的设备,也可能要使用不同高度风速计的数据,尽管这种情况很少见——如当某一时间段顶部的两个风速计都出了问题。无论何种情况,进行数据替换前,都需要根据两个风速计同期有效数据建立它们之间的联系(如线形回归强制通过起始点或一个简单比率)。分析人员应该验证它们之间是紧密和线性相关的,否则结果将不可信。当传感器读数之间存在明显的持续性偏差时,这种“现场校准”就非常重要。使用不同类型(如加热和不加热)或不同高度的风速计时就可能出现这种偏差。

通常直接用其他风向标的有效数据填补风向数据记录的空缺。分析人员仅需核查以确保两个风向标风向读数之间在都有有效数据的时段没有明显的持续性偏差。这一偏差可能意味着横梁方向不符或风向标死区,如果可能,需要进行调查并予以修正。注意,在多变微风情况下,可能出现大的瞬时风向偏差;然而,当风很强时,高度差在20~30m内的风向记录应该接近相等(5°之内)。

### 9.4.2 数据平均

如果塔上每个高度都装有一对风速计,则问题又出现了,风能资源特性分析时

是否需要使用所有的测量数据，如果需要，如何将它们结合在一起？

常用的方法是，指定其中一个风速计为主传感器、另一个为从传感器。除那些被标为可疑或无效的数据外，使用主传感器的数据进行分析。在那些区间，利用上一节介绍的方法，用从传感器的有效数据替代标注的数据。（如果没有有效的冗余数据，数据记录将出现空缺。）

这种方法暗含的假定是两个传感器之中，主传感器更精确。在一些情况下，这一假设是合理的——例如，从传感器是一加热的转杯风速计（加热的转杯风速计通常比非加热的杯式传感器精度低，当然结冰情况除外）；当主传感器的质量更高时；或从传感器受的塔影影响比主传感器多得多等。

然而，更常见的是没有理由假设在多数时间一个传感器比另一个更准确，而主传感器的选择却是随意的。这时最好的方法是将两个风速计的数据平均。假设两个传感器的测量误差不相关且数量级大致相同，则与仅依靠一个传感器的数据相比，这种方法可将观测风速的不确定度降低到  $1/\sqrt{2}$  即  $1/1.414$ （0.707）倍。数据平均还有助于降低杆塔次生影响。

只有当两个传感器的数据都有效时，才可使用数据平均；当一个被遮挡或存在其他问题，只能使用另一个的数据。在这些区间，不确定度恢复到单个传感器的不确定度。（资源评估的不确定度在第 15 章介绍。）

## 9.5 讨论题

1. 为什么常规的自动筛选比较敏感，产生的正误识比负误识多？
2. 为什么横梁方向准确很重要？说出如果假设横梁方向错误对发电量估计准确度的两种可能影响。有什么方法可以独立验证场址文件中给出的风速计的横梁方向？
3. 给出一个方案使测风塔能人为地增大风速计记录的平均风速。在什么情况下它会降低？（忽略塔影）
4. 假设某给定时间段内风速值等于转换公式中的偏移量，而且标准偏差为零。导致这种现象的原因可能是什么，有什么方法来验证该因素？
5. 为什么认为风向标结冰往往比风速计早？
6. 说明范围检验、相关性检验和趋势检验间的差别。每种给出几个例子。
7. 说明 QC 与气象数据校验的差别。为什么它们都很重要？
8. 给出风速计距离常数的定义。距离常数是如何影响风速测量的？
9. 假设你画出了两个相同高度风速计记录的风速比随风向的变化图，而结果显示的塔影角度明显与场址信息给出的预期不一致。可能是什么问题？有哪些方法来确定问题的来源？
10. 从物理角度说明大气湍流对观测的平均风速的影响。为什么一些风速计在



高湍流环境下测得的平均风速比 IEC I 级传感器大，而在低湍流环境下测得的风速更小？螺旋桨风向标式风速计又如何？

11. 为什么人们通常更愿意使用数据平均而非数据替换？给出一个需要进行数据替换的场景。

### 参考文献

1. Hale E. Memorandum: NRG #40 transfer function validation and recommendation, AWS Truewind, 8 Jan 2010.
2. Young M, Babij N. Field measurements comparing the Riso P2546A anemometer to the NRG #40 anemometer. Global Energy Concepts 2007.
3. IEC 61400-12-1. ed. 1.0. Geneva, Switzerland: IEC. Copyright © 2005.
4. Filippelli MV, et al. Adjustment of anemometer readings for energy production estimates. In: Proceedings of Windpower 2008, Houston, Texas, USA, June 2008.
5. Tangler J, et al. Measured and predicted rotor performance for the SERI advanced wind turbine blades. In: Proceedings of Windpower 1991, Palm Springs, California, USA, Feb 1992.
6. Papadopoulos KH, et al. Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field. Boundary-Layer Meteorol 2001;101(1):77–107.

### 深入阅读建议

- DeGaetano A. A quality control routine for hourly wind observations. J Atmos Oceanic Technol 1997;14:308–317.
- Fiebrich C, Morgan C, McCombs A. Quality assurance procedures for mesoscale meteorological data. J Atmos Oceanic Technol 2010;27:1565–1582.
- Makkonen L, Lehtonen P, Helle L. Anemometry in icing conditions. J Atmos Oceanic Technol 2001;18:1457–1469.

# 第 10 章 风资源观测结果特性描述

完成数据校验以后，就可以开始进行数据分析、生成各种风资源统计和信息报告。这类分析提供整个监测流程所观测风资源的一个有用总结。很多供应商，包括一些记录器制造商都可以提供完成此类工作的软件。利用电子表格或数据库软件也可生成自定义报告。

## 10.1 风资源观测结果归纳

表 10-1 给出了风资源报告通常提供的汇总统计清单。这些统计，或它们的一些子项，是针对一段时间进行的，如月度、季度、年度以及监测项目结束。图 10-1 给出了一个简单的月度报告示例。

下节将介绍如何得到各个参数。

表 10-1 风资源统计报告示例

报 告 结 果	单 位
数据恢复 (DR) 比例	%
平均和年平均风速	m/s
平均风功率密度 (WPD)	W/m <sup>2</sup>
风切变	无量纲指数
湍流强度 (TI)	%
平均气温	℃
平均空气密度	kg/m <sup>3</sup>
风速频率分布	图表
威布尔分布参数 <i>A</i> 和 <i>k</i>	m/s( <i>A</i> ), 无量纲数( <i>k</i> )
风玫瑰图	图表
日和小时风速分布	图表

### 10.1.1 数据恢复

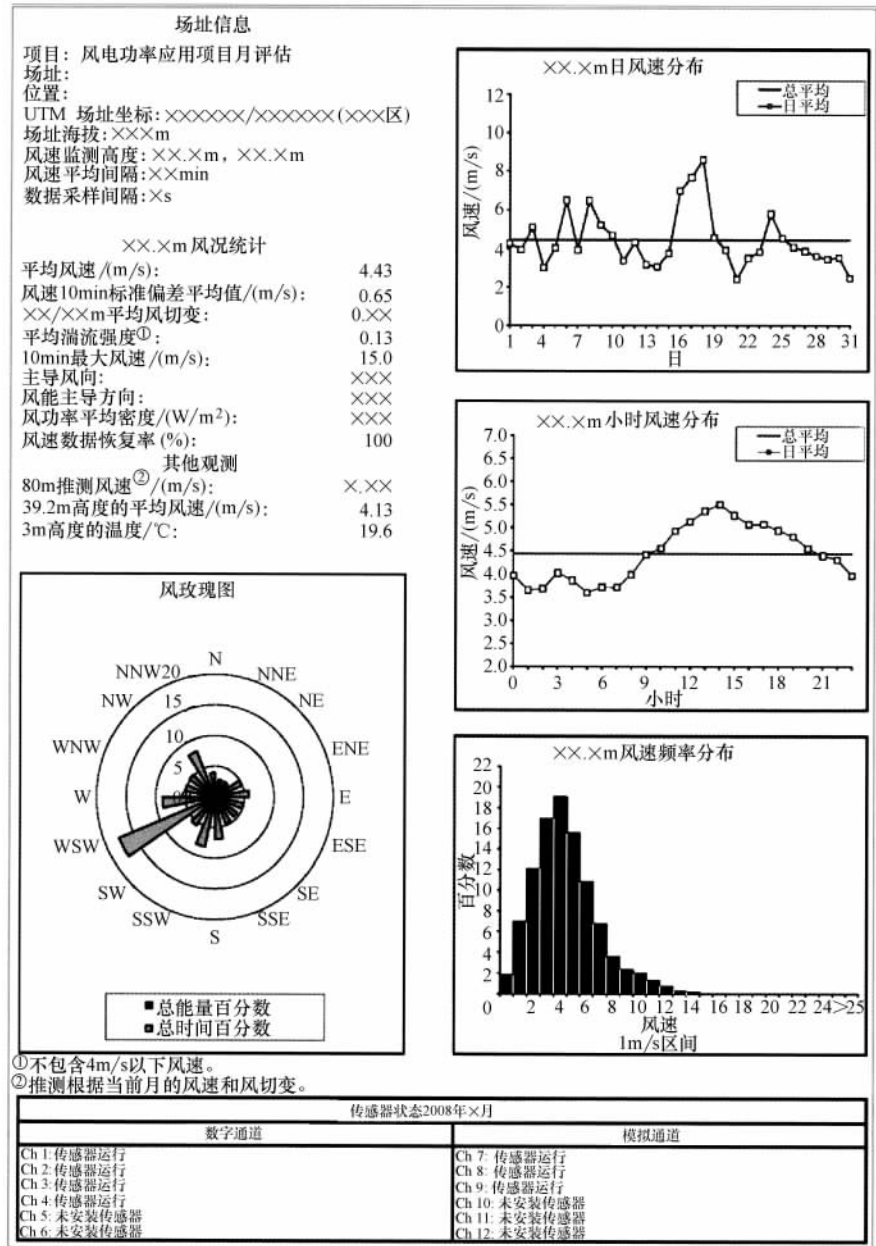
数据恢复 (Data Recovery, DR) 定义为有效数据记录个数  $N_{\text{valid}}$  除以报告期间可能的记录总数  $N$ 。它通常用百分数表示。公式如下：

$$\text{DR} = 100 \times \frac{N_{\text{valid}}}{N} \% \tag{10-1}$$

例如，11 月份可能的 10min 数据记录总数为 4464。如果有 264 个记录被认为是无效数据，那么收集的有效数据记录为 4200 (4464 - 264) 个。这个例子中的 DR 是

$$\text{DR} = 100 \times \left( \frac{4200}{4464} \right) \% = 94.1 \% \tag{10-2}$$

DR 应对每个场址所有高度上的每个传感器确定。



$$\bar{v} = \frac{1}{N_{\text{valid}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{valid}}} v_i \tag{10-3}$$

然而，平均风速有时可能成为风能资源的误导指标。如果数据长度远远短于一年，平均值就无法反映风的完整季节周期变化。即使数据满一年，但如果记录中存在很长时间的缺失，那么均值则偏向于数据更完整的月份。如果数据超过1年，但不是整数年，一些日历月出现得比其他月份多，也可能在估计平均风速时产生偏差。

作为一个例子，假设有14个月的数据，一月和二月出现了两次。如果冬季月份是典型的大风月，那么整个区间风速的简单平均，将可能高估真实的年平均风速。或者，假设恰好有12个月的数据记录，但由于结冰，冬天有一半数据缺失。在这种情况下，计算的平均风速则可能低估真实的平均风速。

采用年平均风速的概念试图来纠正这些问题。注意，这不是长期历史平均风速，而是对数据观测周期的季节修正。（长期修正过程将在第12章介绍。）年度平均的估计方法有多种，但在计算中是常用的，第一种是取每个日历月的平均；第二种是对各月平均用每个月的天数加权得到总平均，用公式表示为

$$\bar{v}_{\text{annual}} = \frac{1}{365.25} \sum_{m=1}^{12} D_m \bar{v}_m = \frac{1}{365.25} \sum_{m=1}^{12} D_m \left( \frac{1}{N_m} \sum_{i=1}^{N_m} v_{im} \right) \tag{10-4}$$

外面的求和是全部12个日历月， $D_m$ 是第 $m$ 个月的平均天数（考虑闰年，二月是28.25）。里面的求和是对所有落在特定日历月中的风速。表10-2给出了计算说明。这里有17个月的数据记录，从2008年1月到2009年5月，1月到5月是重复的。直接平均风速（考虑每个月的天数）是7.49m/s。而年平均风速则只有7.39m/s，因为从平均值看，重复的月比其他月份的风速要大。

表 10-2 某监测站月度数据记录示例，说明记录周期和年平均风速的不同

月份	各月天数	2008	2009	平均
1 月	31	8.94	8.68	8.81
2 月	28.5	8.35	7.37	7.86
3 月	31	7.63	8.13	7.88
4 月	30	6.79	7.00	6.90
5 月	31	6.56	6.85	6.71
6 月	30	6.58	—	6.58
7 月	31	5.81	—	5.81
8 月	31	6.25	—	6.25
9 月	30	7.5	—	7.50
10 月	31	7.85	—	7.85
11 月	30	8.26	—	8.26
12 月	31	8.36	—	8.36
年度平均				7.39

当然，只有至少有12个月的数据记录时，这种方法才可用。然而，如果仅比

12 个月少 1 个或 2 个月，假设缺失月份与它之前或之后的月份相似，也可得到近似的年度平均。用类似的方式，这种方法也适用于其他参数，如风切变。

10.1.3 风切变

风切变（水平风速随高度的变化率）通常用称为阿尔法（ $\alpha$ ）的无量纲幂指数表示。两个不同高度的风速幂律方程用下式表示：

$$\frac{v_2}{v_1} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \tag{10-5}$$

式中  $v_2$ ——高度  $h_2$  处的风速；  
 $v_1$ ——高度  $h_1$  处的风速。

对该公式进行变换，可得到由测量的平均风速和高度确定的  $\alpha$ ：

$$\bar{\alpha} = \frac{\log\left(\frac{\bar{v}_2}{v_1}\right)}{\log\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \tag{10-6}$$

图 10-2 所示为与一系列风切变指数对应的风廓线，假设 120m 高度的风速为 8.5m/s。

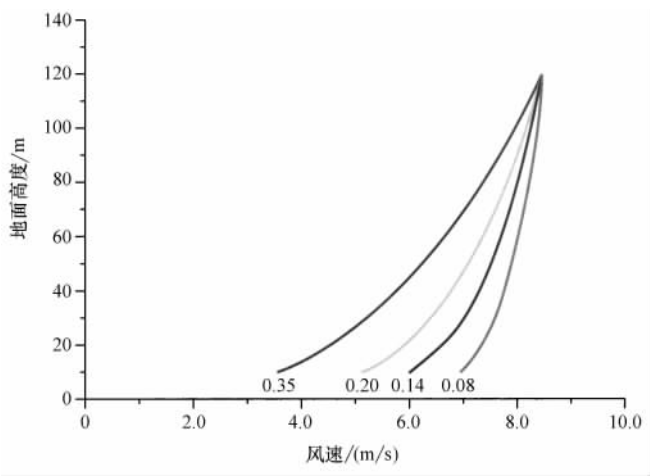


图 10-2 风速随高度变化的理论风廓线，风切变指数  $\alpha$  在一定范围（0.08、0.14、0.20 和 0.35）。  
所有曲线都假设 120m 高度风速为 8.5m/s。（来源：AWS Truepower）

根据上面的公式，计算风切变前对风速取平均，就可很方便地得到时间平均的风切变指数，这是这一分析阶段最感兴趣的参数。时均风切变指数的范围可从不到 0.1 到大于 4.0，取决于地表覆被、地形、时刻和其他因素。若时间较短，特别是小风或不稳定的风，风切变指数有可能超出这一范围。表 10-3 给出了不同场址条件下的典型平均风切变指数值（该表是第 3 章表的重复）。若其他所有条件相同，植被和障碍物越高，切变就越大。通常复杂地形的切变较大，但暴露山脊或山顶除

外，因为地形的加速作用使切变降低。因其大气通常不是热稳定的，所以热带场址的切变与相似的温带场址相比要小。（热稳定的作用在下一章讨论。）

表 10-3 不同场址条件下的典型风切变指数

地形类型	土地覆被	年平均风切变指数大致范围
平坦或起伏地形	中低高度植被	0.12 ~ 0.25
平坦或起伏地形	散落树木或森林	0.25 ~ 0.40
复杂地形,谷地(被掩蔽的)	多样	0.25 ~ 0.60
复杂地形,谷地(峡谷或热流)	多样	0.10 ~ 0.20
复杂地形,山脊线	中低高度植被	0.15 ~ 0.25
复杂地形,山脊线	森林	0.20 ~ 0.35
海上,温带	水面	0.10 ~ 0.15
海上,热带	水面	0.07 ~ 0.10

(来源：AWS Truepower)

风切变的计算值对两个高度的相对风速的误差比较敏感，且其敏感性随两个高度（ $h_1$  和  $h_2$ ）比的增加而下降。这从下列风切变指数误差公式可以清楚看出：

$$\Delta\alpha \approx \frac{\log(1 + \varepsilon)}{\log\left(\frac{h_2}{h_1}\right)} \tag{10-7}$$

式中  $\varepsilon$ ——顶部和底部风速计测量风速比的误差。

例如，对于 40m 和 60m 高度的风速计（高度比是 1.5），其风速比的误差是 1.5%——根据场址条件有一合理的偏差——得到的风切变指数的误差是 0.037，进而使 80m 的预测风速有 1.1% 的误差。对于 50m 和 60m 高度（高度比是 1.2），相同的相对风速误差造成切变系数的误差是 0.082，80m 风速误差为 2.4%。

对于计算得到的相对小风速误差的切变敏感度已经给定的情况，要得到相对准确的切变估计，需要满足以下三个条件：第一，必须用两个高度同期、有效的风速记录计算风速比；这可避免因不同时间区间、不同数据恢复率的数据混合而引入的误差；第二，风切变计算的两个高度的高度比至少为 1.5（例如，33m 与 50m 或 40m 与 60m）；第三，所取风速数据的风速计安装横梁的水平长度应相同，且相对杆塔的方位相同，这样杆塔对观测风速的影响将相似。最后一个条件意味着，风切变计算时通常不应使用来自其他传感器的替换数据。换句话说，只有来自两个同方向的风速计的原始数据才适合该计算。

在风资源报告中，每对高度通常只提供一个平均风切变值。这一切变可利用上面介绍的方法来计算：先对每个风速计同期数据取平均，然后用它们的比值计算风切变指数。一些分析人员在这一计算中选择把低于 3m/s 或 4m/s 的风速排除在外，因为小风时切变的变化比较大，但它对发电量的贡献很小。下一章将讨论利用瞬时或各区间的风切变指数将风速序列外推到轮毂高度，以及可能将风切变调整到高于顶层风速计的高度。

10.1.4 湍流强度

湍流定义为风速风向的快速波动，它会对风力机的性能和载荷产生明显影响。

最常用的湍流指数是根据 10min 记录区间内 1s 或 2s 采样样本计算的风速标准偏差  $\sigma$ 。该值除以相同区间内的平均风速就得到湍流强度 (Turbulence Intensity, TI):

$$TI = \frac{\sigma}{v} \quad (10-8)$$

式中  $\sigma$ ——记录区间风速的标准偏差;

$v$ ——记录区间的平均风速。

平均 TI 通常随风速的增大而减小, 直到 7 ~ 10m/s, 之后接近为常数。超过 10m/s 后, TI 的范围通常从地形相对平坦、树木或其他障碍物很少时的不到 0.10, 到森林、陡峭地形时的超过 0.25。与平均风速和空气密度一起, 15m/s 处的 TI 可以确定风力机类型对项目场址的适用性。最后的决定通常由制造商来做, 因为他们负责保修, 可能要考虑湍流的分布和上游机组产生的湍流。(参见 16 章。)

### 10.1.5 风功率密度

风功率密度 (Wind Power Density, WPD) 定义为单位截面上风的动能通量, 其单位为  $W/m^2$ 。它与场址的风速分布和空气密度一起, 反映了场址的可能风能, 由下列公式计算:

$$WPD = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \rho_i v_i^3 \quad (10-9)$$

式中  $N$ ——区间的记录个数;

$\rho_i$ ——空气密度 ( $kg/m^3$ );

$v_i$ ——记录  $i$  的平均风速 ( $m/s$ )。

公式中的空气密度须根据其他信息来计算, 将在下一节介绍。

注意, 要计算每个记录的三次方, 然后求和, 如上式所示, 而不是对所有记录的平均风速求三次方。因为受三次方关系的作用, 高于平均的风速对 WPD 的贡献要远大于低于平均的风速。即使这样, 估计的 WPD 也不准确, 因为它忽略了每个记录区间内风速的变化。真实的 WPD 通常比该公式的计算值大几个百分点。因为发电量并不直接用 WPD 来计算, 所以这对风资源评估来说通常并不重要。

### 10.1.6 空气密度

空气密度由温度和气压 (因而是海拔) 决定, 随季节的变化可能有 10% ~ 15% 的波动。如果有场址气压的测量值, 空气密度 ( $kg/m^3$ ) 可以由理想气体定律来计算:

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (10-10)$$

式中  $P$ ——场址气压 ( $Pa$  或  $N/m^2$ );

$R$ ——干燥空气的比气体常数 [ $287.04 J/(kg \cdot K)$ ];

$T$ ——用开氏温标表示的气温 ( $^{\circ}C + 273.15$ )。

如果没有可用的场址气压 (通常如此), 空气密度 ( $kg/m^3$ ) 可由场址的海拔

和温度来估算，如下式：

$$\rho = \left( \frac{P_0}{RT} \right) e^{\left( \frac{-gz}{RT} \right)} \tag{10-11}$$

式中  $P_0$ ——用 Pa 表示的标准海平面气压（101325Pa）；  
 $T$ ——气温（K）， $T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$ ；  
 $g$ ——重力常数（9.807m/s<sup>2</sup>）；  
 $z$ ——温度传感器的海拔（m）。

将  $P_0$ 、 $R$  和  $g$  的值代入，则公式变为

$$\rho = \left( \frac{353.05}{T} \right) e^{-0.03417 \frac{z}{T}} \tag{10-12}$$

尽管该公式相当准确（对大多数场址，误差在 0.2% 以内），但由于气压并不完全是指数函数，因此误差将随高度增加而增大。

10.1.7 风速频率分布和威布尔分布参数

风速的频率分布是一个非常重要的信息，因为它常被直接用于估计机组的输出功率。频率分布表示观测风速落在特定范围或区间的记录个数。风速区间通常为 0.5 或 1m/s 宽，至少覆盖功率曲线所定义的风速范围，即 0 ~ 25m/s 或更高。在报告中，它通常用条形图也称直方图表示，包含所有风向。另外，用表格形式保存各个风向的风频分布，作为风电场设计软件的输入。

威布尔分布（Weibull distribution）是通常用来描述场址风频分布的数学函数。在威布尔分布中，概率密度（风速落在中心为  $v$  的单位区间内的概率）由下式表示：

$$p(v) = \frac{k}{A} \left( \frac{v}{A} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{A} \right)^k} \tag{10-13}$$

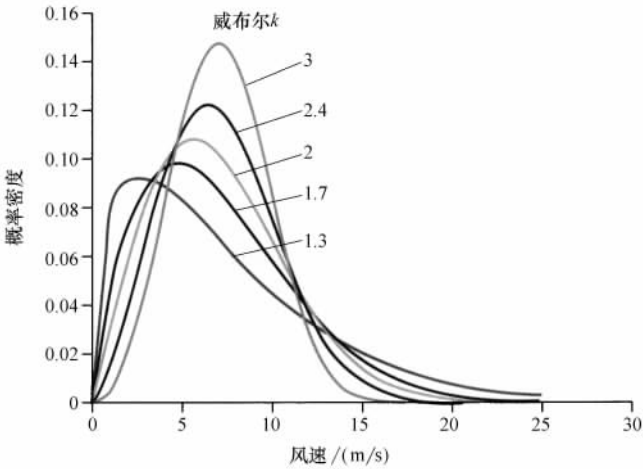


图 10-3 一组  $k$  值对应的威布尔概率密度曲线。所有曲线  $A$  值相同：8.0m/s  
(来源：AWS Truepower)



威布尔函数有两个参数：尺度参数  $A$ ，其量纲是风速，与平均风速密切相关；和无量纲形状参数  $k$ ，它控制着分布的宽度。 $k$  的范围是  $1 \sim 3.5$ ，值越大意味着频率分布越窄（即稳定的、变化较小的风）。通常观测到的  $k$  的范围是  $1.6 \sim 2.4$ 。在这一范围内，平均风速通常是尺度参数的  $0.89$  倍。图 10-3 给出了  $A$  为常数、 $k$  取多个值时的威布尔概率密度曲线。

描述场址的风资源特性时，以威布尔参数，特别是  $k$ ，做参照是非常方便的。然而重要的是要记住，威布尔曲线充其量只是真实风频分布的近似。尽管很多场址，真实的风频分布与威布尔曲线拟合得非常好，但也有一些场址拟合得很差，如图 10-4 所示。由于这个原因，估计发电量时不能用威布尔曲线来代替观测的风频分布，初步分析除外。很多资源分析人员选择完全忽略它。

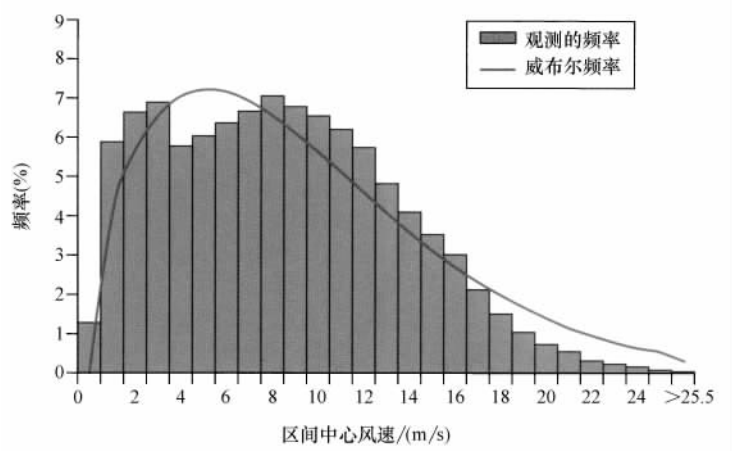


图 10-4 观测的风频分布与威布尔曲线对比的例子。本例中观测的分布是双峰的，即它有两个峰值，无法与威布尔曲线很好拟合。多数场址威布尔函数对观测分布的拟合比这个好。（来源：AWS Truepower）

10.1.8 风玫瑰图

在多数工程项目中，通常沿主导风向的机组的距离比与它垂直方向上要大得多，以减小机组间的尾流影响。因此，风向的频率分布是风能资源的一个关键特征。

显示风向出现频率的极坐标图被称为风玫瑰图。风玫瑰图通常显示特定风速区间风流的时间百分比，不同区间用不同颜色表示。另一种被称作风能玫瑰图，显示每一来风方向上总风能的百分比。有时将这两个图合而为一。绘制风玫瑰图和风能玫瑰图时，首先将风数据按期望的扇区数目分组，通常为 12 或 16 组，然后计算每个扇区的相关统计数值。

频率 (%) :  $f_i = 100 \frac{N_i}{N}$

总风能的百分比： $E_i = 100 \frac{N_i \times WPD_i}{N \times WPD}$

在上面公式中， $N_i$ 代表第  $i$  个风向扇区记录的个数， $N$  是数据集中记录的总数， $WPD_i$ 是所有记录的平均风功率密度。图 10-5 给出了一个包含风频和风能百分比的典型图。

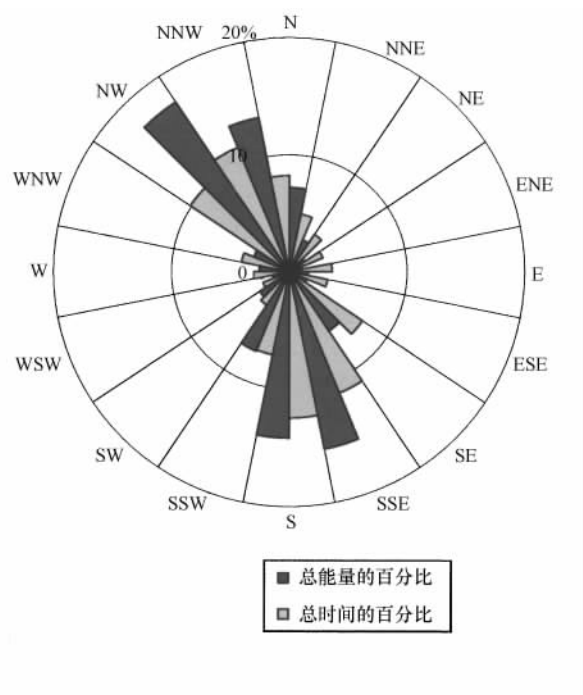


图 10-5 风玫瑰图和风能玫瑰图示例（来源：AWS Truepower）

10.2 讨论题

- 1. 给出一些年平均风速与观测平均风速有明显差别的情况。说明为什么对风能资源描述来说，年平均风速通常更好。
- 2. 说明 WPD 的含义。通过因特网查找一篇或多篇用 WPD 描述场址或区域风能资源的参考文献，并与你找到的用平均风速进行的相应估计进行比较。WPD 和平均风速之间是否是一一对应关系？
- 3. 从风电工程开发商的角度，从最重要到最不重要，对本章介绍的风资源特性排序。为什么选择这一顺序？
- 4. 为什么测量风切变时必须保证两个水平的高度比大于等于 1.5？假设相对风速误差是 1.2%，两个高度是 50m 和 40m，风切变对 80m 风速误差的贡献是多大？
- 5. 给出一种无法用威布尔函数很好表示的风频分布形式。

6. 假设某场址观测的风频分布的  $k$  值是 1.3。那么你认为, 与  $k$  值为 2.3 的场址相比, 该场址的风的波动更大还是更小? 假设这两个场址的  $A$  值相同, 都为  $9\text{m/s}$ , 那么与第二个场址相比, 第一个场址出现  $12\text{m/s}$  风速的可能性更大还是更小? 哪个场址的发电量可能更多?

7. 为什么认为在风玫瑰图中包含各风向的频率外的更多信息是有用的? 你更期望包括各风向的平均风速还是风能百分比? 说明原因。

8. 式 (10-9) 忽略了水蒸气的影响。说说, 考虑水蒸气会对空气密度估计产生什么影响?

9. 空气密度对风的有效动能有什么影响? 若风频分布相同、平均风速相同, 空气密度高还是低时, 场址的发电量更大? 为什么?

10. 为什么说风玫瑰图对测风塔上仪器的设计很重要? 它对机组排布位置的选择是否也重要?

## 深入阅读建议

Burton T, Sharpe D, Jenkins N, Bossanyi E. Wind energy handbook. West Sussex: John Wiley & Sons; 2001.

Danish Wind Industry Association. Guided Tour on Wind Energy. Available at <http://www.heliosat3.de/e-learning/wind-energy/windpowr.pdf>.

Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind energy explained: theory, design, and application. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons; 2009.

## 第 11 章 轮毂高度的风资源评估

由于很多测风塔顶层风速计的高度低于现代大型风电机组的轮毂高度，经常需要将风资源数据外推到轮毂高度，该高度是功率曲线对应的高度<sup>⊖</sup>。不仅风速，其他信息也是如此，如空气密度和湍流强度（TI）。在这一阶段，资源分析人员要从严格测量的信息转到必须假设或建模的对象。该任务需要对场址信息进行细致的、通常是主观的分析，包括当地的气象、地形、土地覆被以及数据本身。本章介绍进行这一分析的方法。

### 11.1 风速

将观测高度处的风速映射到轮毂高度，使用最广的方法是幂指数律。第 10 章已经做了简要介绍，在此再次将其公式列出：

$$v_2 = v_1 \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (11-1)$$

这里， $h_1$  和  $h_2$  分别代表顶层风速计高度和轮毂高度，并对公式进行了改写，将所有已知参数都放在了公式右侧。令人惊讶的是，幂指数方程并没有气象理论依据，但在实际中却被证明非常有用。因为它对很多风廓线都拟合得非常好，而且简单，只需要一个参数，即风切变指数  $\alpha$ 。另一种可选方法是对数方程，它有更严格的理论依据，将在本章后面讨论。

应用幂指数律时，一个关键问题是需要对风切变指数做哪些假设。使用计算的第一（顶层）和第二高度间的指数似乎更合理，或如果这两个高度的比值不够大，不足以获得准确的切变值，就用第一和第三高度之间的切变值。实际上，这仅是一个合理的起点，但不是分析的终点。

挑战来自确定在测风塔顶之上的风切变指数是否随高度变化。对于非常开阔和平坦的地形，通常不会有太大变化。但在其他情况下，风切变指数为常数的假设是不成立的，例如存在茂密的森林、很强的地形提升、对风流的阻塞或当大部分风能被限制在接近地面的狭窄层中，或出现在热力驱动的下泄（下降）风流。在这些情况下，对平均风切变指数进行调整可能是合理的。

---

⊖ 尽管估计轮毂高度处的风速是资源评估的主要目的，但从机组叶轮低端到顶端的资源特性受到越来越多的关注。这对于那些风切变有很大不确定性或变化的场址尤其重要。在这些情况下，可能需要使用超高的塔或地面遥感系统。但本章介绍的原理仍然适用。

下面几节将讨论几种策略, 可据此决定如果需要, 什么样的切变调整是合理的。

### 11.1.1 直接测量

理想情况是测量直到 (甚至超过) 机组轮毂高度的风速。这可以通过一个高度为轮毂高度的测风塔或地面 Sodar 或 Lidar 系统来实现。严格地说, 这样的测量只能用在可这样操作的位置进行。为什么不使每个测风塔简单直接地测量到轮毂高度的风廓线? 尽管希望那样做, 但有两个原因说明它并不总是现实的。第一, 轮毂高度的测风塔非常昂贵, 而且在某些场址很难安装; 第二, 通常不可能正好在已有测风塔旁边放置 Sodar 或 Lidar。如果场址地形比较整齐划一——几乎没有树的开阔地带、且地形不很陡——那样整个场址区域的风切变接近为常数, 则通常影响不大。那样, 在某一位置观测的到轮毂高度的切变可以比较有把握地用到其他位置。

然而, 对于更加复杂的风场, 遥测的风廓线也不能与场址上测风塔观测的风廓线很好地吻合。在那种情况下, 剩下的就是决定如何利用轮毂高度的测风塔或遥感系统提供的信息来调整每个测风塔观测的风切变。一种方法是根据 Sodar 数据得到的切变变化来修正测风塔观测的切变。

$$\text{差分法:} \quad \alpha_{h_2 \rightarrow h_h}^{(m)} = \alpha_{h_1 \rightarrow h_2}^{(m)} + (\alpha_{h_2 \rightarrow h_h}^{(s)} - \alpha_{h_1 \rightarrow h_2}^{(s)}) \quad (11-2)$$

式中, 上标 (m)、(s) 分别代表测风塔和 Sodar (或 Lidar) 测得的切变; 下标  $h_1 \rightarrow h_2$ 、 $h_2 \rightarrow h_h$  分别代表测风塔风速计的底层高度 (1) 与顶层高度 (2) 之间以及顶层高度与轮毂高度之间测量的切变。

尽管方法是合理的, 但必须小心, 以防得到不现实或不合理的结果。

下面给出几个例子说明在实际应用中是如何进行调整的。

#### 1. 简单案例

假设在一个相对开阔平坦的场址区域有一 60m 测风塔和一套 Sodar 设备。而且假设测风塔测到的 40 ~ 60m 的风切变指数是 0.18, Sodar 测到的 40 ~ 60m 的风切变指数是 0.20, 60 ~ 80m (假定的轮毂高度) 的风切变指数降为 0.16。在这种情况下, 假设测风塔的切变也随高度增大而降低是合理的。差分法计算的测风塔的风切变指数下降了 0.04。

#### 2. 挑战性案例

假设在一片复杂林地有一 60m 测风塔和一套 Sodar 设备。测风塔在悬崖边, Sodar 放在距悬崖边后退 100m 的森林深处的一个空地。测风塔测到的 40 ~ 60m 间的风切变指数是 0.25, Sodar 测到的 40 ~ 60m 间的风切变指数是 0.40, 60 ~ 80m 间的风切变指数为 0.20。利用差分法推算的测风塔 60 ~ 80m 间的切变是  $0.25 + (0.20 - 0.40) = 0.05$ 。然而, 结果似乎低得不切实际。很明显, Sodar 的位置不好, 不能代表测风塔的风廓线。这种情况下, 合理的办法是假设测风塔的到轮毂高度的风切变有一微小降低, 可能为 0.20。

由第二个案例可以看出, 直接测量的到轮毂高度的切变并不都很容易解释, 而且也不能排除从观测高度外推到轮毂高度的所有不确定性。随着 Sodar 和 Lidar 的

应用越来越广，这一过程的不确定性会逐渐降低。

当所用的到轮毂高度的直接测量数据不满一年时，必须同时考虑风切变的季节变化。如果可能，只比较测风塔和遥感系统的同期数据。例如，Sodar 测量的一个月的风切变应只与测风塔同期的测量数据进行比较。由于受大气条件的影响，风切变的变化可能很大，如果没有同期数据，遥感数据可能完全无法使用。一般来说，最准确的调整需要轮毂高度测风塔或遥感系统直接测量的完整一年的数据，或完整一年的统计代表样本。

### 11.1.2 偏移高度

风切变随高度变化的原因是风流会因地表植被影响发生偏移，如稠密、密闭的森林。这时风廓线为零的有效地面距实际地面会有一定距离，称为偏移高度（displacement height）。偏移高度受周边植被高度和密度以及塔基到植被距离的影响。粗略估计，对于靠近测风塔的茂密植被，它通常为植被高度的 0.6 ~ 0.9 倍<sup>[1]</sup>。考虑偏移高度后，风切变指数的计算公式如下：

$$\alpha_{h_1 \rightarrow h_2}^{(d)} = \frac{\log(v_2/v_1)}{\log[(h_2 - d)/(h_1 - d)]} = \alpha_{h_1 \rightarrow h_2}^{(g)} \frac{\log(h_2/h_1)}{\log[(h_2 - d)/(h_1 - d)]} \quad (11-3)$$

式中，上标（d）、（g）分别代表相对偏移高度和地面的风切变指数。

由于右侧的比值总是小于 1，因此相对偏移高度的风切变指数总是小于相对地面的风切变指数。

现在假设，相对偏移高度的风切变指数不随高度变化（这相当于说偏移效应是切变随高度的所有变化的原因）。那么，顶层风速计高度与轮毂高度之间相对地面的切变为

$$\alpha_{h_2 \rightarrow h_h}^{(g)} = \alpha_{h_1 \rightarrow h_2}^{(g)} \frac{\log[(h_h - d)/(h_2 - d)]}{\log(h_h/h_2)} \frac{\log(h_2/h_1)}{\log[(h_2 - d)/(h_1 - d)]} \quad (11-4)$$

该公式只在这些高度都大于偏移高度时才有效。修正后的指数总是小于观测的相对地面的指数；换句话说，偏移效应使相对地面的风切变指数随高度降低。

作为说明，假设测量的 40m（ $h_1$ ）和 60m（ $h_2$ ）间的风切变指数是 0.35，测风塔周边是平均高度为 15m 的茂密阔叶林。分析人员估计偏移高度  $d$  大概为树高的 2/3，即 10m。推算的从 60m 到 80m 轮毂高度  $h_h$  的风切变指数为

$$0.35 \times \frac{\log(70/50)}{\log(80/60)} \times \frac{\log(60/40)}{\log(50/30)} = 0.325$$

说明比观测的指数减小了 7%。图 11-1 给出了轮毂高度为 80m 时，相对地面的表观切变随 40 ~ 60m 间观测的风切变指数和塔高的偏移高度的变化。

如果有足够的信息，可以计算按风向加权的偏移高度；在这一点，场址照片很有帮助。偏移高度随植被到测风塔距离的增大而减小。但可惜的是没有估计这一减小的得到验证的方法。在方法缺失的情况下，假设其在植被高度 20 ~ 50 倍距离范围内线性减小是合理的。

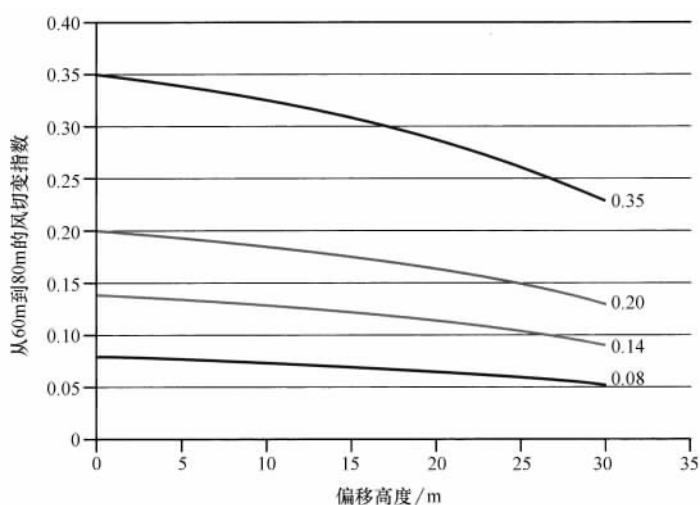


图 11-1 相对不同的观测切变, 偏移高度对测风塔顶层高度和轮毂高度间的风切变指数的影响。观测的切变是 40 ~ 60m 间的计算结果, 假设每种情况轮毂高度都是 80m。(来源: AWS Truepower)

作为一个实际问题, 如果植被不高于数米, 则偏移的影响很小, 可以忽略。只有在树木高于 10m 的森林里, 偏移对高于测风塔顶层高度的预期切变的作用才变得比较明显。

对于至少有四个测量高度的测风塔, 有时可以不考虑偏移高度, 用观测的切变变化直接拟合。在这种情况下, 对数方程通常拟合得比较好。然而, 由于有四层测量高度的塔很少, 这种方法通常并不可行。另外, 如果最低一层被树木或障碍物遮挡, 则拟合的曲线将不可靠。

### 11.1.3 收敛高度

大气边界层的一个特性是地形和地面覆被变化的影响往往随高度的增加而减小。收敛高度的概念巧妙地反映了这一现象。收敛高度定义为项目区域内不同点的风廓线汇合到一起, 风资源变得均匀的距离地面的高度。

没有一个标准、简单的计算收敛高度的方法: 它的变化很大, 取决于场址和大气条件。在接近平坦、无特征的地形, 它可能就是实际的地面高度; 这意味着, 在整个场址区域风资源的变化很小。对于地形复杂、地表覆被混杂的情况, 收敛高度可能是平均地面高度以上数百到数千米。

收敛高度最有用的是它的推论: 靠近地面, 风切变往往与平均风速成反比。这是因为, 切变越大, 风速从收敛高度到地表下降得越快, 因此测量高度的风速越低。(如果假设收敛高度是 120m, 在图 10-2<sup>⊖</sup>中可以看到这一结果。)

⊖ 原文误写为图 10-1。——译者注

只有当切变随高度的变化接近为常数，或至少在项目区域内随高度的变化规律相近时，风切变与风速成反比的假设才成立。而且还可以看到，情况并非总是如此。尽管如此，令人吃惊的是这种关系经常能观测到，所以可以作为一个工具来调整高于特定测风塔切变的变化。

例如，假设与场址区域内的其他测风塔相比，某个塔的切变和平均风速都很高。可以合理推断这一切变无法保持到很高高度，否则在该测风塔之上的风廓线将会与其他塔的风廓线偏离。同样，风速和切变都比较低的测风塔可以猜想其切变随高度增大。可利用风切变指数随风速变化的简单散点图来识别那些值得仔细验证的塔（注意，风速与切变对应的高度和时间区间必须相同）。对于质量较差的数据，首先要识别异常值，仪器高度不正确或其他问题可能会导致明显偏差。如果没有发现此类错误，可以调整远离中心的测风塔的风切变指数，以避免风廓线不切实际的发散。图 11-2 介绍了该方法，它取自美国的一个风电项目场址。在这个例子中，用圆圈圈出的奇异点的切变应向下调整。

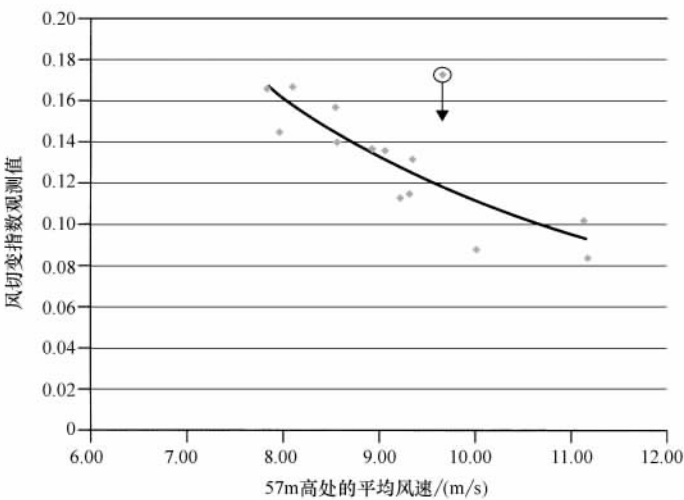


图 11-2 风切变随 57m 高处平均风速变化的散点图。

图中显示有一远离中心的塔，它的风切变明显高于预期值。

对于这种情况，将切变降低是合理的。（来源：AWS Truepower）

11.1.4 对数法

最常用的风切变的对数表示如下：

$$v_2 = v_1 \frac{\log(h_2/z_0)}{\log(h_1/z_0)} \tag{11-5}$$

式中  $z_0$ ——地表粗糙长度，它是与塔周边植被及其他粗糙度元素的高度和密度有关的参数。



严格地说，只有当大气边界层是漂浮中性<sup>⊙</sup>时，该公式才成立。当它处于热稳定（负浮力）时，需要使用带有附加参数和稳定长度的更复杂的形式。这一附加参数的影响是使切变增大。遗憾的是，稳定长度必须利用多个高度的温度数据才能估计，而这是很难满足的。

因此，为了方便，多数分析人员只使用中性形式的方程。这非常重要，因为如果粗糙度仅根据植被（或其他地表覆被）特性来确定，则它往往会低估风切变，特别是在像北美那样的温带气候下。因此，通常必须把  $z_0$  看作用来拟合数据的经验参数，与风切变指数非常类似。表 11-1 给出了与 40 ~ 60m 高度之间计算  $\alpha$  值对应的  $z_0$  值。

一个重要问题是，当将风速映射到轮毂高度时如何比较这两种方法。保持  $z_0$  为一常数，等效于随高度增加降低风切变指数。对于 0.14 ~ 0.35 范围的切变，从 60m 变到 80m 减小 5% ~ 11%。对轮毂高度处风速的影响大概为 -0.2% ( $\alpha = 0.14$ ) ~ -1.1% ( $\alpha = 0.35$ )。

因此，对数法更偏于保守。然而，尽管有相当多场址的风切变指数随高度降低，但也有一些保持不变或增大。例如，在美国的大平原（Great Plain），非常著名的夜间喷流现象（由稳定的夜间条件下，较低层大气与表面粗糙度解耦造成的）常常造成随高度增大的风切变指数。已发表的有限几篇关于幂指数律和对数方法的比较研究还无法明确确定在多数情况下哪种方法更准确。

表 11-1 中性浮力条件下 40 ~ 60m 高度间  $\alpha$  和  $z_0$  的等效值

$\alpha$	$z_0$
0.08	0.0002
0.14	0.039
0.2	0.33
0.35	2.8

总之，指数律和对数方法的差异很小，使用哪种方法多半取决于资源分析人员的偏好。本章之后的部分，只讨论指数律方法。

## 11.2 时变风速和风速分布

尽管对于场址风资源特性描述来说，时间平均风切变指数是一个非常方便的参数，但它并不适合按比例缩放风速时间序列数据或风频分布。原因是它忽略了切变

⊙ 浮力用温度变化随高度变化的绝热率来定义。它是气团温度的变化率。气团向上或向下移动只由压力变化引起，与周边空气没有热交换。如果实际的温度递减率超过这一临界值，气团将向上移动，并发现它比周边的空气更冷、更重，因而将趋于下降，这是负浮力或热稳定。反之，如果递减率低于这一临界值，大气就称为热不稳定和对流混合效果。

中大的变化，特别是与风向有关的逐日和逐年的变化。图 11-3 给出了切变的典型日变化曲线，可以看到，它在白天大气边界层混合得很好时最小，而在夜间热稳定条件下最大。依靠平均切变可能会给轮毂高度处的风速分布引入误差，进而影响发电量估计。

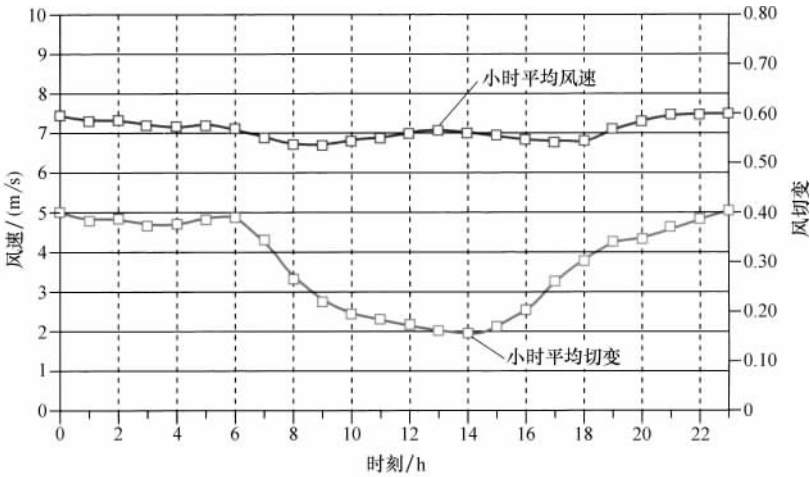


图 11-3 平均风速和切变的典型日变化曲线。本例中，风速是 60m 的观测值，切变是 40m 和 60m 间的计算值。（来源：AWS Truepower）

解决这一问题的方法之一是计算每一时间区间（如 10min）的风切变指数，并用这一指数将顶层风速计的风速外推到轮毂高度。这种“瞬时切变”方法的潜在缺点是记录中可能会出现极大切变值（尽管是有效的），而它无法保持到轮毂高度。这些极端值会产生不实际的极高或极低的轮毂高度风速，但它们通常很少见。更常见的问题是，只有那些顶层和底层传感器都有有效数据记录时，才能得到切变值。该方法不能用于替代数据。这一问题是否严重取决于替换数据的数量。

作为一种替代方法，很多分析人员选择按风向，逐日、逐年或它们的组合对风速分段，计算每个区段的平均风速和平均切变。然后利用每个记录适当区段的切变，将 10min 风速外推到轮毂高度。在处理点数很少或没有点的区段时必须非常小心，要选择合适的方法，如利用相邻区段的平均风速和切变。使用这一方法时，按日分段总是非常重要的，它能捕捉到大气稳定性的日变化特性。

由于公认切变是随高度变化的，使用瞬时或分段风切变指数会引入新的挑战，因为原则上必须分别调整每个切变值，但很少能有足够的信息来保证这一操作具有较高置信度。一个替代方法是使用时间平均的切变来得到轮毂高度处的平均风速，如果是偏移或其他影响的需要，就对切变进行调整。这一平均风速与由外推的时间序列或风速分布得到的平均风速的任何差异都可通过重新调整外推数

据来解决，因此均值是吻合的。令每个风速值乘以预期的轮毂高度平均风速与外推数据均值的比值来重新调整。这种方法尽管不很理想，但它代表了在使用时间平均切变的简单透明与由分段或时变切变推出的风速分布的更高准确性之间的一种常识性折中。

### 11.3 其他参数

风资源特性的另外三个参数风向、空气密度和湍流强度（TI）也需要映射到轮毂高度，以估计机组或风电场的发电量。

#### 11.3.1 风向

通常假设高于顶层风速计高度的风向是不变的。但即使是原则上，这也并不完全正确，因为地球转动与摩擦力和压力的相互作用往往使风速矢量随离地高度的增加而产生旋转。然而这一影响非常小，所以假设风向不变通常不会产生问题。因此，通常直接将顶层风速计的风向标（在需要时作为替代）的风向记录映射到轮毂高度，不做任何变化。

有些场址，由于受地形或强温度梯度的影响，经常能观测到风向随高度的实质性变化（转向）。这种向移会减少机组的发电量，因为风矢量可能不始终与整个叶轮面垂直。利用 Sodar 或 Lidar 的遥感可观测到这些情况。

#### 11.3.2 空气密度

两个参数影响空气密度随高度的变化：气压（或海拔）和气温。通常是用  $6.5^{\circ}\text{C (K)}/\text{km}$  的标准大气温度递减率，将气温从温度计高度外推到轮毂高度。若温度计高度是 3m，轮毂高度是 80m，则表示温度大概降低  $0.5^{\circ}\text{C}$ 。将温度和高度变化带入空气密度公式（式（10-12）），其作用使空气密度下降  $0.6\% \sim 0.8\%$ （与海拔无关）。

#### 11.3.3 湍流强度

估计轮毂高度处的 TI 时，通常假设 10min 平均风速随高于顶层风速计高度的增加而增大，而它们的标准偏差保持不变。因此每个记录的 TI 随高度增加而减小，风速平均的 TI 也如此。15m/s 区间的平均 TI——判定特定机组类型是否适合场址的标准参考系数——即使有变化也很小。

### 11.4 讨论题

1. 利用轮毂高度测风塔或遥感系统测量轮毂高度的风资源有什么优缺点？对于简单和复杂地形条件，答案有什么不同？
2. 给出收敛高度的定义，并说明如何利用它进行场址切变分析。什么时候收

敛高度的推论不正确？

3. 给出三种方法，将风速时间序列数据或风频分布按比例缩放到轮毂高度。你认为哪种方法最好？

4. 影响空气密度随高度变化的两个参数是什么？

5. 测风塔测得的 58.5m 高处的平均风速是 7.1m/s，32.2m 高处的是 6.2m/s。

a) 利用式 (10-6) 计算风切变指数。

b) 假设该指数不随高度变化。根据指数律，将风速从 58.5m 外推到 80m。

c) 根据式 (11-5)，利用电子表格或计算器，寻找使 58.5m 风速正确的  $z_0$  值。

为了这一目标，令  $h_1 = 32.2\text{m}$ ， $h_2 = 58.5\text{m}$ ， $v_1 = 6.2\text{m/s}$ 。（可以通过给定不同的  $z_0$  值试算。如果愿意，也可以使用 Microsoft Excel 求解函数。）与表 11-1 对照，得到的值是否合理？

d) 使用相同的  $z_0$  值，将 58.5m 的平均风速映射到 80m。为了这一目标，令  $h_1 = 58.5\text{m}$ ， $h_2 = 80\text{m}$ ， $v_1 = 7.1\text{m/s}$ 。

e) 对比本题 b) 和 d) 的结果。用百分比表示的外推风速的差值是多少？与对数法相比，用指数律外推到高于顶层测量高度时，计算的切变是更大还是更小？

6. 一个 60m 测风塔的风速测量高度是 30m、40m 和 60m。各高度的平均风速分别是 5.3m/s、5.7m/s 和 6.4m/s。

a) 使用指数律计算下述各对高度之间的观测风切变指数：30m 与 40m、40m 与 60m、和 30m 与 60m。

b) 假设所有已知的风速和高度的确定度相同，你认为这些切变值中哪一个最准确？

c) 假设高度是确知的，任意两个高度间风速比的不确定度是 1.5% [即在式 (10-7) 中  $\varepsilon = 0.015$ ]。你计算的每个风切变指数的不确定度是多少？你认为应使用哪个风切变指数将 60m 风速外推到 80m，为什么？

7. 一个 60m 测风塔立在林地中，各方向的偏移高度大概是 7m。在塔上观测到的 40m 与 60m 间的风切变指数是 0.32。假设风切变指数对应的偏移高度不随高度变化。顶层风速计高度与 80m 轮毂高度间，观测的相对地面的切变将是多少？

8. 在测风塔 5m 高处安装了一个温度计。估计在 5 ~ 80m 之间平均温度可能下降多少摄氏度？

9. 50m 测风塔观测到的 10min 平均风速是 6.8m/s，相应的标准偏差是 1.1m/s。TI 是多少？如果映射到 80m 轮毂高度的同期风速为 7.5m/s，作为一个好的假设，轮毂高度的 TI 将是多少？

## 参 考 文 献

1. Garratt JR. The atmospheric boundary layer. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 1992. p. 290.

## 深入阅读建议

- Feuquay LF. Validation study of the use of wind shear exponents in extrapolating wind speeds for wind resource estimations. In: 13th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation; USA: 2005.
- Garratt JR. The atmospheric boundary layer. UK: Cambridge University Press; 1992.
- Lubitz WD. Accuracy of vertically extrapolating meteorological tower wind speed measurements. Conference Proceedings: CanWEA; Winnipeg, Manitoba, Canada; 2006. Available at [http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/wlubitz/Lubitz\\_CanWEA\\_2006.pdf](http://www.soe.uoguelph.ca/webfiles/wlubitz/Lubitz_CanWEA_2006.pdf). (Accessed 2012).
- Ray ML, Rogers AL, McGowan JG. Analysis of wind shear models and trends in different terrains. In: Conference Proceedings: AWEA Windpower; Pittsburgh, Pennsylvania, USA; 2006. Available at <http://ceere.org/rerl/publications/published/2006/AWEA%202006%20Wind%20Shear.pdf>. (Accessed 2012).

## 第 12 章 气候修正过程

在将描述风资源监测站址处风资源特性外推至风机位置之前，最后的主要步骤是将观测风气候修正到历史正常水平。无论是一年或更久，其平均风速会偏离正常水平很多。通常，基于仅一年测量值的长期平均风速的不确定性大约是 3% ~ 6%<sup>⊙</sup>，相应的风电场平均发电量不确定性可能是 5% ~ 10%，这是评估投资风电项目风险的重要因素。减小这种不确定性是气候修正过程的主要目标。

进行气候修正的主要方法一般叫做 MCP，意为测量、关联和预测（Measure, Correlate, Predict）。在某一场址（有时称为目标点）进行为期几个月到几年的风资源测量。将在目标场址观测的风况与长期参考点（如机场气象站）的记录进行相关性分析，以此建立它们之间的关系。然后，将参考点更长的历史记录用于该关系，来预测目标场址的长期平均风资源。图 12-1 是一个参考站址记录与测风塔之间关系的示例。

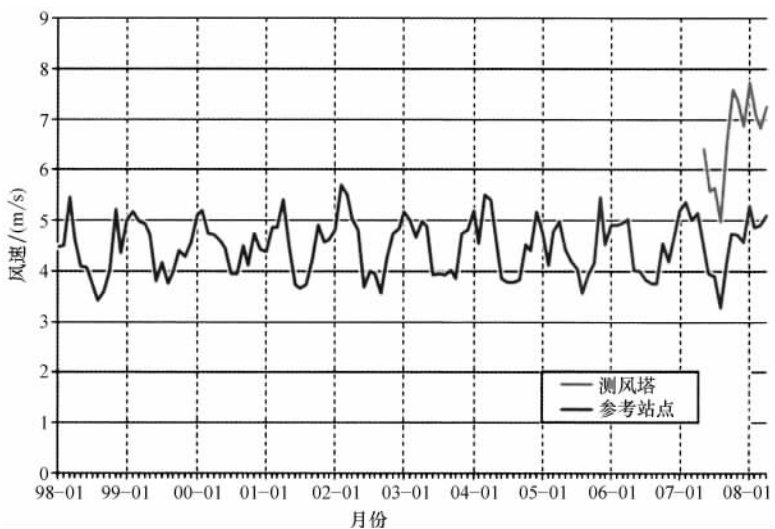


图 12-1 来自测风塔和参考站址的观测风速（来源：AWS Truepower）

这是预计的操作过程，通常效果很好。然而，有时会出现复杂情况，得到的长期风资源估算的准确性取决于如何处理它们。

本章主要内容是：① MCP 的内在假设条件；② 成功的 MCP 必须满足的要求；

⊙ 根据 AWS Truepower 对北美一级气象站数据的分析。某些其他地点的年际变化可能超出这个范围。

③ MCP 最常使用的数据源，包括它们的优缺点；④ 目标点与参考点的观测风况进行关联和预测长期风资源的各种方法。

## 12.1 风气候稳定吗？

所有 MCP 方法的暗含关键假设是未来风资源与过去类似；就是说风气候是稳定的。在如今气候变化的年代，对该假设是否还正确，以及它对发电量预测准确性的可能影响等的提问是合乎情理的。即使没有与温室气体排放相关的气候变化，也必须考虑站址风气候其他变化源的可能性，包括厄尔尼诺南方涛动（El Niño Southern Oscillation, ENSO）等周期性天气现象，以及如城镇化和植被覆盖变化等局部因素。

### 12.1.1 历史证据

有关风气候长期稳定性的历史证据是混杂的。关键问题在于在同样高度同一位置，使用不变的测量规则和同样的仪器或仪器类型进行超过 10 ~ 15 年连续测风的监测站很少。真正同质的长期数据集的缺乏，加上正常短期气候波动的影响，使得准确检测由长期气候变化引起的趋势很困难。

然而，很多研究人员已经尝试找出长期风况的趋势。在一个最综合的研究中，一组欧洲研究人员考查了来自北半球几百个地面气象站的观测数据，以及被称为再分析数据的两类全球天气建模信息<sup>[1]</sup>。无一例外，地面气象站数据表现出明显的风速下降趋势，30 年期间达到 5% ~ 15%。然而，有两个再分析数据集表现的这种趋势很微弱，它在正值到负值之间变化，取决于所在区域。

那么哪种结果正确呢？作者将地面观测数据的趋势归因于由于树木生长引起的地表粗糙度变化。虽然这貌似合理，但很多测量值也可能受到非均一的保养措施和仪器、高度、位置的变化，以及城市化效应的影响，研究人员无法通过质量控制（QC）过程去除所有影响。多数这种情况与风能资源没有关系。另一方面，生成再分析数据的全球大气模型主要由来自探空气球、卫星、直升机和其他平台的观测数据驱动。尽管它们有其自身问题（下面将讨论），但再分析数据集至少一定程度上与影响地表风观测的非均一性隔绝，因此可以给出更真实的长期趋势。

更仔细地研究特定国家或区域可能更有启发性。举一个研究例子，美国自 1973 年以来，地面气象站记录的平均风速表现出明显的下降趋势<sup>[2]</sup>。据作者陈述，似乎是 20 世纪 90 年代中期地表自动观测系统（Automated Surface Observing System, ASOS）的出现，以及其他诸如城市化和树木生长等变化，对这种减小影响很大。他们提到“我们没有尝试修正这些非均一性，但它们的出现强烈说明需要使用其他数据集…”总体来说，他们所说的其他数据集主要就是再分析数据，它不支持观测到的地表风速减小趋势，同样，同一区域探空气球的长期观测值也不支持这种结论<sup>[3]</sup>。

总而言之，没有可靠证据证明全球大部分地区在过去几十年，风资源由于气候变化而明显增加或减小。考虑到数据不确定性，发生的任何变化可能都在置信检验水平之下。

### 12.1.2 未来气候变化展望

未来会怎么样？尽管研究结果还远没有确定，但总的来说，它们指出北半球中纬度在未来 50 ~ 100 年风资源可能会减少。这与驱动大气循环格局的大尺度气温梯度在温暖环境中可能会逐渐减小的事实一致。尤其两极地区可能比赤道地区升温更多，因此可能导致两环极射流力度减小，并向两极移动。然而有些区域风资源可能会增加。

以下是迄今为止发布的一些研究示例。

1) 将两个大气环流模式（General Circulation Models, GCM）在未来温室气体一定水平情景下的结果画图，表明与 1948 ~ 1975 年基准线相比，美国 48 个州年平均风速到 2050 年会减少 1.0% ~ 3.2%，到 2100 年会减少 1.4% ~ 4.5%。GCM 是气候研究人员用来预测气候变化的全球天气模型。这两个模型在减少幅度上明显不同，表明结论存在很大不确定性<sup>[4]</sup>。

2) 研究人员将一种统计“降尺度”方法用于两种温室气体情景下的四个 GCM，并计算对美国西北部五个气象站的气候变化影响。他们发现这些站址的平均风速减小最多可达到 10%，取决于站址和一年的不同时间，多数站址夏天时减小最多。不同模型和情景下结果基本一致<sup>[5]</sup>。

3) 使用高分辨率数值天气预报（Numerical Weather Prediction, NWP）模型将一个 GCM 和温室气体情景降尺度到加利福尼亚南部。研究发现，与 1980 ~ 1999 年相比，2041 ~ 2060 年平均风速表现出适度有增有减的形式。与其他研究不同，该研究特别选取了一个有运行风电场的区域：Tehachapi 山口。预测风电项目集中区域的年平均风速减小 2% ~ 4%。多数减小发生在秋季到冬季；主要发电月份 4 ~ 8 月的预测变化很小<sup>[6]</sup>。

4) 将中国 8 个气候模型的结果画图，结论是气温上升会使风功率密度减小。研究表明，两个气候模型预测下个世纪风功率密度大约减小 14%（代表平均风速减小 5% 左右）<sup>[7]</sup>。

根据这些研究发现，在风电项目投资时间范围内（可达 25 年），风气候的任何变化似乎是适度的。即使年平均风速 50 年减小 5%，如果它以线性形式变化，那么在风电项目的前十年平均风速只会减小 0.5%。很多研究表明，变化步伐在刚开始可能会更小。因为这个原因，目前对于风电项目投资来说，与风资源评估不确定性的其他来源相比，“气候变化风险”似乎很小。

### 12.1.3 可能影响当地风气候的其他因素

除了气候变化，与温室气体有关的其他因素也会改变项目站址的未来风气候。其中有周期性天气现象，包括著名的 ENSO，以及少有人知的北大西洋涛动（North



Atlantic Oscillation, NAO) 和太平洋年代际震荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 等现象。ENSO 事件的影响很明显, 通常持续 6 个月到 2 年, 它的出现周期大概是每 4~6 年一次。尽管 ENSO 事件的产生原因还存在争论, 但是这种现象与东太平洋表面风引起的表面水温变化或异常紧密相关。这些温度异常对太平洋沿岸地区乃至全球的天气现象有重要影响。

为了减小这些周期性现象对 MCP 结果的影响, 参考点数据记录应该至少覆盖 2~3 个振荡周期。对于 ENSO, 这意味着大约 10~15 年, 这对有可靠参考数据的大多数地区的 MCP 是个可行的时间范围, 但对其他区域仍然不够。由于旧的参考数据集存在刚才提到的问题, 因此很难修正具有 20~30 年周期的 PDO 以及其他周期很长的现象。考虑到这些震荡周期与风电项目的投资期相当或更大, 同时无法可靠预测它们的行为, 因此是否需要进行这些修正还存在疑问。

站址附近的地表覆被变化, 尤其是树木生长或砍伐, 也会改变风气候。只考虑离风机非常近的森林变化的影响, 通常树木生长速度是每年 0.2m, 这在项目期前 10 年末, 会使 80m 高度的平均风资源大约减少 0.5%。这种影响与全球气候变化可能趋势带来的程度相当, 然而与气候变化不同, 它可能很容易通过对森林状况的估计进行预测。相反, 根据砍伐范围不同, 砍伐风机附近 10m 高的树木能够使可用风资源最多增加 2%。如果发生在项目周围几千米范围的更大区域, 那么这两种影响将会更大。

## 12.2 准确 MCP 的要求

假设风气候稳定, MCP 得到可靠结果必须满足三个关键要求:

### 1. 场址和参考点的风气候必须大体一样

这意味着两个点的风速变化在时间上相关性很好。将目标点和参考点的观测风速画成时间序列散点图, 可以定量估算它们的相关性。也可以使用皮尔逊 (Pearson) 相关系数  $r$  等定量尺度。可以认为相关系数的二次方  $r^2$  是能用另一个变量的线性方程来解释的某一变量值的变化。

### 2. 目标点和参考点必须具有均衡的风速记录

如果在同一位置同样高度, 使用相同或相当的仪器连续测量, 这样的风速记录可以说是均衡的。对于参考点, 它的记录应该更长, 且覆盖目标点的记录。

### 3. 目标-参考点同期时段应该能捕捉到季节变化

实践中, 这意味着至少连续 9 个月, 最好是一年或更长。

下面章节将会清楚说明通常前两个要求尤其不容易满足。

#### 12.2.1 相关性

当风电项目位于平坦开阔地形, 通常很容易找到附近位于相同风气候的气象站。然而在地形复杂地区, 可用的参考站却常常处于完全不同的风气候条件下。例

如，项目点可能位于开阔的山脊或山顶，而最近的参考站都位于掩蔽的山谷；或者项目点可能靠近海岸线，而可用的参考站都在内陆。这些情况下，目标点和参考站之间的相关性就会非常差（见图 12-2）。

与参考站的相关性越差，目标点经校正的长期风资源的不确定性就越大。假设年风速波动呈正态分布，且具有均衡的参考点数据记录，可以用下面的相关系数  $r^2$  函数的简单方程来估算长期平均风速的总体不确定性：

$$\sigma = \sqrt{\frac{r^2}{N_R} \sigma_R^2 + \frac{1-r^2}{N_T} \sigma_T^2} \tag{12-1}$$

式中  $\sigma_R$ 、 $\sigma_T$ ——分别是参考点和目标点年平均风速的标准偏差，以平均风速的百分数表示。

通常假设两个点的标准偏差相同。基于北美数据的一般范围是 3% ~ 6%，其他区域可能更大或更小。 $N_R$  是参考数据的年数， $N_T$  是参考点和目标点同期数据的年数。由于季节效应，当  $N_T < 1$  时不应该使用该方程。

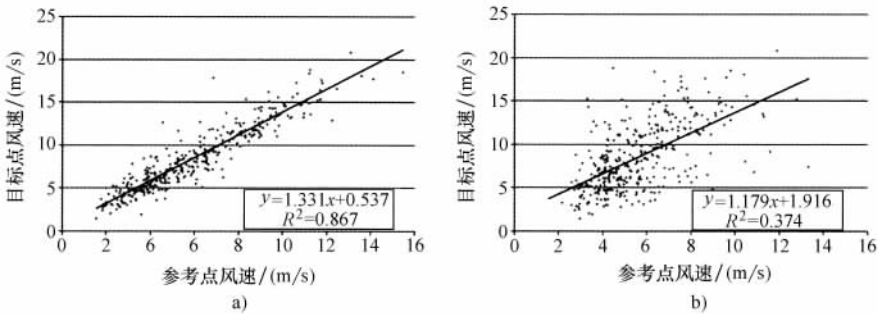


图 12-2 目标点和参考点风速的典型散点图。a) 相关性较高，表明两个点的风气候非常相似；b) 相关性较差。（来源：AWS Truepower）

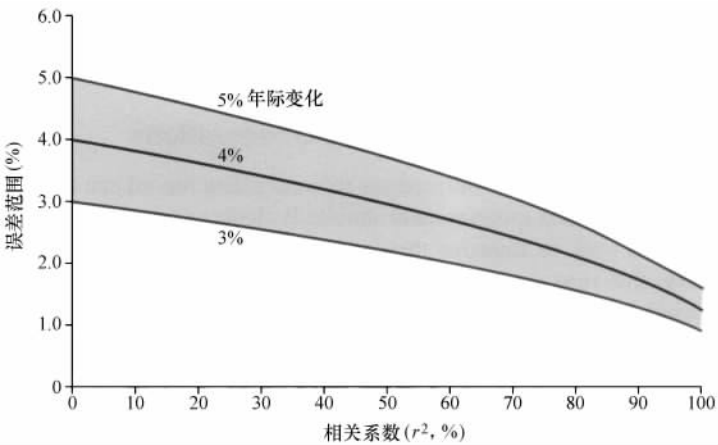


图 12-3 假设有 1 年站址数据和 10 年参考数据，估算的长期平均风速的大概不确定性范围与它们之间的相关性系数  $r^2$  和风速年际变化的关系。（来源：AWS Truepower）

图 12-3 是  $r^2$  和  $\sigma$  范围的变化图。假设参考点和目标点有一年同期数据。以中间一条线为例。当没有相关性时 ( $r^2 = 0$ )，误差上限就等于年际变化，即 4%。当  $r^2$  处于中间范围时，不确定性减小了 1/4，达到 3%。当相关性非常高时，不确定性减小近 70%，达到 1.3%。如图 12-3 所示，当  $r^2$  小于 50% 时选用的参考点数据没有意义；很多资源分析人员不会考虑  $r^2$  低于 60% ~ 70% 的站址数据。

一个重要问题是使用 MCP 时，风速的平均间隔应该是多少。MCP 最理想的平均间隔与参考点和目标点同时经历的风波动的时间尺度有关。如果间隔太短，那么风速波动的很大部分可能包含两个站址关系的无用信息；它们只是杂音。如果间隔太长，那么可能丢失两者关系的重要信息。

最优时间间隔还与典型天气扰动的尺度和它们的运动速率有关。一般来说，无论是秒级的阵风或延续数天的大风，风“事件”的持续时间大约等于相关的天气扰动尺度（范围可能是小的湍流涡到大的暴风系统或锋面）除以它相对于观察者的风速。风的波动不能同时发生在两个点，除非两者都位于相同扰动的影响范围内。因此，发生相关波动的最短时间尺度  $\Delta t$  (s) 近似等于目标点和参考点之间的距离  $D$  (m) 除以典型或平均的背景风速  $v$  (m/s)：

$$\Delta t \approx \frac{D}{v} \quad (12-2)$$

假设典型平均风速是 7m/s。那么相距 100km 的相关站址的最短合理时间尺度大约是 14285s，即 4h。

一般原则是，当参考站址是与目标塔有一定距离的常规地面气象站，那么日平均值就足够了。它的优点是应用简单，且可以减少与塔高和站址位置有关的风速日变化差异的影响（还会给相关性带来杂音）。当参考点距目标点小于数千米时，使用 1h 或 10min 的更短时间间隔才合理。当项目区域内次要测风塔与主测风塔相关时，经常会发生这种情况。

### 12.2.2 均衡的风速观测

长期、均衡的参考数据记录要求同样很难满足。一个问题是国家气象局为提高测量技术和改进数据产品，不断改变测量标准。遗憾的是，这与风电企业寻求一致、长期风况数据的兴趣相冲突。以美国为例，几乎所有主要气象站点在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初都改用了 ASOS 标准。在此过程中，塔高由 6.1m 变成 10m（一般情况），许多塔被移动，以前的人工记录技术被自动数字设备替代。结果是记录的风速存在大量不连续性，致使在使用 ASOS 之前收集的数据不能用于 MCP。

最近在美国，作为美国气象站几十年标准的转杯风速计被超声不冻（ice-free wind, IFW）风速计替代，导致风速测量的连续性再次被破坏。幸运的是，这一改变的影响没有使用 ASOS 那样严重。因为监测高度、位置和数据收集方法

没有变化，所以多数 ASOS 站点可以使用校准因子来补偿风速计变化带来的影响。然而，这种校准又带来另外的不确定性，使用这些站点 IFW 之前的数据时必须考虑。

类似的测量设备、塔高和位置的变化也发生在很多国家。遗憾的是，这些变化通常没有很好记录，分析人员需要调查每个参考站的历史，而这项工作很费时。

另一个挑战是参考站周围条件的变化，使得观测风速出现与一般风气候无关的趋势。在图 12-4 中显示了一种极端情况：美国马萨诸塞州蓝山（Blue Hill）气象台在 20 世纪中期观测到风速出现下降趋势。而这种趋势在该区域其他大气记录中并没有出现，根据照片可知，至少部分原因是大蓝山周围以前被砍伐的森林又重新生长起来。

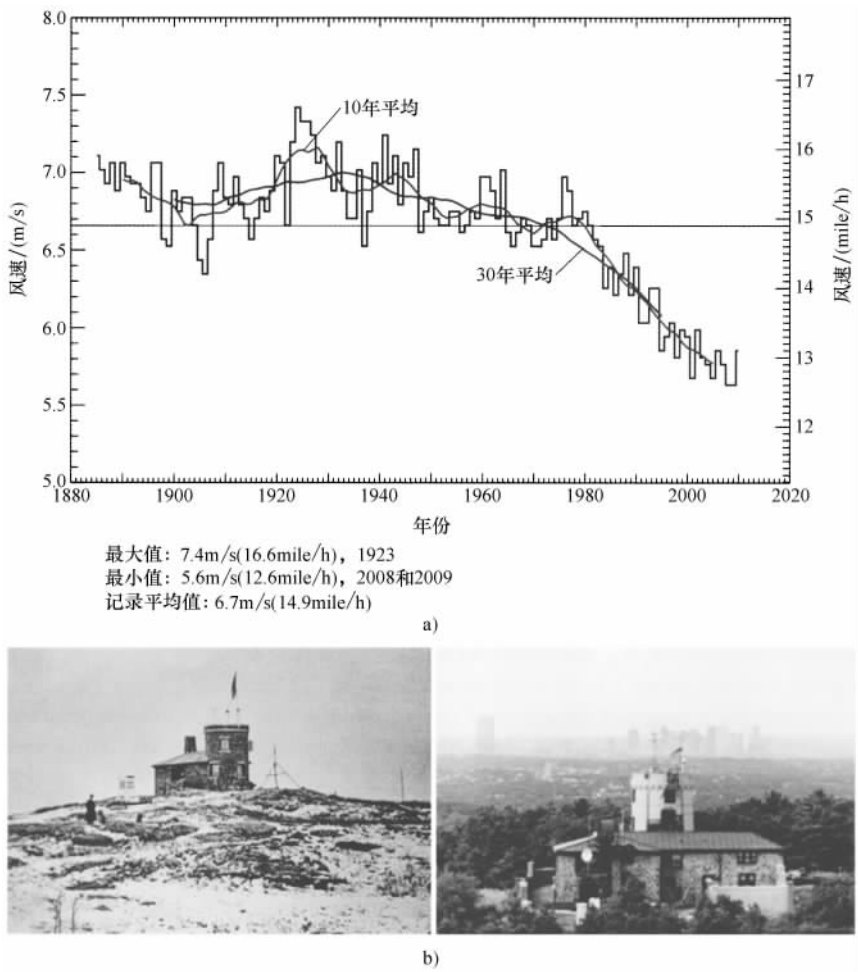


图 12-4 a) 波士顿郊外蓝山气象台 1885 ~ 2010 年年平均风速和 10 年、30 年滚动平均；  
b) 摄于 1886 年（左）和现在（右）的蓝山气象台照片。[来源：蓝山气象台（[www.bluehill.org](http://www.bluehill.org)）]

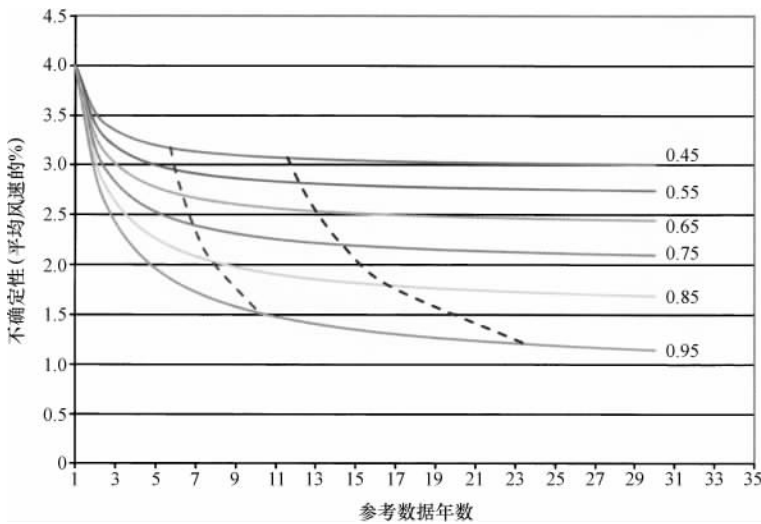


图 12-5 目标点长期年平均风速的统计不确定性随参考数据年数和不同  $r^2$  值的变化图。两个短虚线表示与不用 MCP 相比，不确定性最大可能减小 80%（左边虚线）和 90%（右边虚线）时所需的年数。该曲线由式（12-1）得到，假设风速年际变化是 4%，参考点和目标点数据有一年重叠期，且参考数据没有明显的趋势或不连续。（来源：AWS Truepower）

当出现明显趋势或不连续时，由 MCP 得到的长期平均风速的不确定性应随着参考站记录长度的增加而降低。这在式（12-1）中很明显：参考数据时间越长， $N_R$  越好。然而多数实际情况下，参考数据超过 10 ~ 15 年时效果很有限。图 12-5 显示了当  $N_T = 1$  且  $\sigma_R = \sigma_T = 4\%$  时，根据同样方程式得到的一定范围  $r^2$ （介于 0.45 ~ 0.5）和  $N_R$ （1 ~ 30 年）的不确定性变化。两条短虚线标记出不确定性最大可能减小 80%（左边曲线）和 90%（右边曲线）的点。对于所有合理的  $r^2$  值，使用少于 10 年的参考数据就能达到 80% 的最大收益。当  $r^2 \leq 0.85$ ，使用少于 17 年的参考数据就能达到 90% 收益。

参考数据存在的趋势或不连续性，无论是人为改变场站条件或测量技术，还是真实的气候变化，都会对 MCP 准确性产生不良影响。假设参考风速存在线性趋势。如果该趋势不反映风气候的真实变化（可能由于站址周围的树木生长，或风速计由于磨损而速度减慢），那么校正后的长期平均风速将会产生由趋势线斜率和参考数据记录长度决定的数量为  $\varepsilon$  的偏差：

$$\varepsilon \approx -\frac{N}{2}s \quad (12-3)$$

式中  $s$ ——每年的趋势斜率（每年的百分数）；

$N$ ——参考数据记录的年数。（本式中，假设站址和参考点数据有一年重叠，且相关性良好。）

因此，当出现错误趋势时，可能的偏差幅度会随参考期的长度而增加。如果趋势是由真实且持续的气候变化引起，问题就变复杂了；也就是说，违反了气候稳定的假设。那么，如果未来这种趋势仍然持续，那么由普通 MCP 引起的偏差可能更大。

因此，作为风资源评估主要手段的 MCP，无法消除长期风气候中的所有不确定性，应用时必须非常谨慎。下面将介绍实用指导意见。

1) 应该广泛使用可能的参考点和数据源。可供分析人员使用的数据集越多，越容易发现非均一性。

2) 参考站址的数据恢复在时间上要密集且一致。数据恢复中的长时间缺失或明显变化说明应该怀疑数据的均一性。

3) 应该仔细检查每个站址的可用记录，确定其仪器、塔高、位置或测量协议是否变化。参考期应该是最接近的时期，这样站址条件大致一样。

4) 应该直观评价每个站址的参考数据，并适当使用统计检验找出那些不容易用正常波动解释的更大趋势或非均一性。

5) 对于长于 15 年的参考数据，即使没有站址仪器或测量协议变化的资料记录，资源分析人员也要当心。很难保证这种旧测量值（或者是建模数据，如再分析数据）能与最新数据保持一致，这在 MCP 过程中存在引起明显误差的风险。

6) MCP 校准中，尤其对一年或多年站址数据大于 4% 的向上校准，分析人员应该当心，因为这很可能表明参考数据存在问题。应该至少使用两种或三种独立参考数据源对观测趋势进行确认。

## 12.3 参考数据源

多数参考数据源分为四大类：安装了风资源评估仪器的高塔、地面气象站、探空观测站和建模数据集。本节讨论每种参考数据源的优缺点，并给出如何使用数据的指导。

### 12.3.1 安装了风资源评估仪器的高塔

从高塔获取足够长可用于 MCP 的参考数据，虽然不常见但也不是不可能。只要证明数据与目标点相关性很好，且时间上分布均衡，它们就是很好的参考。分析人员应该注意数据记录中的缺失，风速计的可能变化以及它们的安装和高度。还应该对风机建于高塔附近的可能情况（很多这样的高塔位于风资源良好的地方，这存在明显风险）进行校正。如果最近的上风向风机与测风塔的距离小于 20 倍风轮直径，那么数据就不能使用。最好不要相信公布的资料汇总和预处理数据文件。只要可能，就应该获取来自测风塔的原始数据，使分析人员可以自己进行质量控制。

### 12.3.2 地面气象站

MCP 主要依靠地面气象站。在美国，MCP 倾向于使用 ASOS 站，因为它们记

录齐全，除了将转杯风速计更换为超声 IFW 风速计，它们的设备、维护和数据记录协议自 ASOS 建立之日起就保持不变。美国大约有 900 个 ASOS 站点。尽管它们的地理分布不均衡，但仍能很好覆盖美国大部分地区。类似的网络在多数其他国家也有，尽管数据质量和可用率可能不同。

多数站点的数据记录是小时级的。每个风速值不是该小时的实际平均，而是通常代表该小时前几分钟的 2min 平均值。因此，即使一个站点离风电项目区域非常近，也不要期望小时风速的相关性很好，而应该使用日平均来代替。

尽管很多地面站点可以给出各自区域风速变化趋势的一致情况，但很多问题也会造成非均一性。三种常见问题是不断扩张的城市化、开荒（例如森林砍伐）和树木生长。位于多建筑物区域的地面站点尤其值得怀疑。分析人员还要警惕维护不良或不一致的站点。由于数据恢复率变化很大或数据记录中有很频繁或较长时间的缺失，因此这些情况经常很明显。无论何种情况，都必须逐个评估每个站点数据记录的均一性，经常使用的方法是比较相同区域不同站点的趋势。将不同参考站点的月或年均风速比值画成散点图是找出可疑趋势的有用工具。当两个明显可靠的站点表现出不同的趋势，一个向上、一个向下，且没有其他站点可以比较时，通常摒弃向下趋势的站点更安全，因为地面站点的很多问题都可能引起风速减小。



图 12-6 美国纽约州奥尔巴尼市奥尔巴尼机场的 ASOS 气象站

[来源：美国国家海洋和大气管理局（NOAA）]

### 12.3.3 探空观测站

来自装有仪器的探空气球（即探空观测站）（图 12-7）的数据有时对 MCP 很有用。探空观测的一个优点是它们的测量一般是在地表以上进行的（高度可以是固定或变化的，用气压定义），因此很大程度上不受地表覆被变化的影响。另一个

优点是它们可以在风电项目点的山脊高度附近测量，因此与易受遮挡的地面气象站相比，能提供与目标塔更好的相关性。最低的强制监测等级是 1000mb、925mb、850mb 和 700mb<sup>⊖</sup>，涵盖了从近海平面向上至 3000m 的垂直面。此外，还有几个要求报告风速风向数据的固定高度<sup>[8]</sup>。

探空站也有它的缺点。探空站数量远比地面站少，这意味着离项目点最近的探空站经常比最近的地面站远得多。此外，气球一天只发射两次，分别是协调世界时（Universal Coordinated Time, UTC；也称格林尼治标准时）下午 12 点和午夜；目前，一些气球一天发射四次，但这是最近才这样做的，因此为了保证长期数据集的均一性，通常必须去掉多余的两次观测值。因为观测值太少，所以基于日平均风速相关得到的结果很差，因而需要周或月平均。这大大减少了可用于建立目标-参考点关系的独立信息量。

尽管有这些不足，但它仍是不错的办法，尤其对处于复杂地形的项目，从附近站点得到的探空数据可以直接用于 MCP，也可用来确认可用的地面气象站数据的均一性。

#### 12.3.4 建模数据集

近年来，使用大气模型产生的参考数据集越来越常见，尽管它还不是行业规范。有时称它们是虚拟测风塔，即 VMM（Virtual Meteorological Masts）。最有名的建模数据类型称为再分析数据（reanalysis data）。它有很多种类，由不同国家气象局生产，包括美国环境预测中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）/美国大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR），以及欧洲中尺度天气预报中心（European Center for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF）。NCEP/NCAR 数据可以免费获取，因此使用最广泛。

所有再分析数据都使用历史天气观测值（一般来自地表、探空、卫星或机载仪器）运行全球或区域 NWP 模型得到。模型运行时，从模型中的每个网格点、不

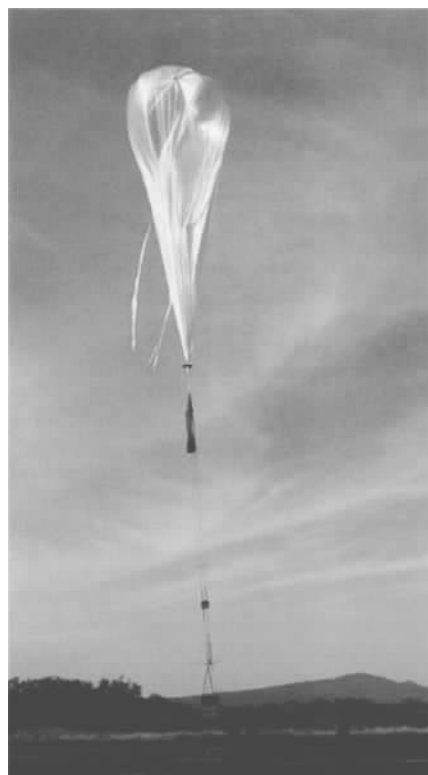


图 12-7 用于大气探测的探空气球

[来源：美国国家海洋和大气  
管理局（NOAA）]

⊖ mb（毫巴）是压力单位，但不是我国的法定计量单位，1mb = 100Pa。——译者注



同层次提取天气参数（包括气温、气压、风和降水）。再分析数据集是为支持气候研究而建立的。与频繁修改的实时天气预报模型不同，再分析模型在整个历史仿真中是固定不变的。

再分析数据有很多优点，包括方便、多层次和多类型的天气参数，以及较长时期的数据记录（有些数据集长于 60 年）。因为模型覆盖的每个地方都有可用的网格数据，所以不难找到合适的网格点。这减少了寻找地面气象站和数据集的很多工作，给 MCP 研究提供了共用数据源。在地面气象观测值不可靠的某些地方，再分析数据（以及其他建模数据集）可能是 MCP 唯一可靠的参考数据源。

然而，再分析数据也有明显缺点，使用时必须注意。首先，再分析风数据与测风塔观测值的相关性取决于地形的复杂程度和再分析模型的分辨率。NCEP/NCAR 全球再分析数据集尤其粗糙，分辨率大约是  $3^\circ$  经纬度（略大于 200km），因而在山区地形、海岸边界以及风梯度大的地方结果较差。

更重要的是，再分析数据的均一性受到用来驱动模型的观测系统的限制，而该系统近几十年变化很大。20 世纪 50、60 年代探空气球的主要天气观测由陆上和船载的观测值补充。气象卫星在 20 世纪 70、80 年代越来越重要，这些年发生的其他重要事件还有气象观测船退役，更多使用商业直升机补充气象观测，以及地面和探空站的气象观测频率的大大增加<sup>[9]</sup>。

一定程度上，大气模型应能减弱这些变化的影响，因为来自新平台或传感器的观测值会用已有传感器的可用值进行调整。然而在不同时间和不同地点，新数据的可用性会明显改变模型的分析，导致风况和其他参数的虚假趋势和波动<sup>[10]</sup>。

针对这些关注，人们引入了“可控再分析”概念。这种方法与再分析类似，但要更小心选用不变的观测系统和平台数据（例如从固定的探空站取固定的层次数）。研究表明，这种方法可以减少传统再分析中的不一致性<sup>[11]</sup>。

总的来说，建模数据集是地面和探空观测站的有用补充，但是资源分析人员应该小心，尽量不要完全依赖它们进行 MCP，除非没有可用或足够的直接观测。同样，建模数据的一致性也要通过与独立数据源比较进行修正。

## 12.4 目标-参考点的相关性

一旦选定了参考站点（一个或多个），下一步就是建立参考点和目标点风速的相关性。这一相关性可用来根据参考点的所有有效（均一的）记录预测目标点的长期风资源。

可以使用的函数关系有很多类型，这里无法全面介绍。（各种方法的总结可参阅文献 [12] 和 [13]。）最常用的方法基于参考点和目标点风速（有时候是风向）的线性转换。常见的线性方程是  $y = mx + b$ ，其中  $x$  是参考点风速， $y$  是目标点

风速， $m$  是斜率， $b$  是截距。如果参考点“真实的”长期平均风速已知，那么可以用下式得到预测平均值。

$$\bar{y} = m \bar{x} + b \quad (12-4)$$

式中，变量上方的横线表示平均值。一般通过最小二乘法拟合确定该方程，称为线性回归（下面介绍）。

此外还提出并研究了多种非线性方法（例如人工神经网络或支持向量机），但是它们比线性方法复杂，且需要更多技术。此处只讨论线性方法。

#### 12.4.1 数据分区

不同线性方法的一个区别是如何对数据分区，即分为不同子集。所谓的整体法是对所有数据一次性得到一个线性方程。指向法也很流行，它对每个方向扇区分别建立不同的线性方程。矩阵法更进一步，对风向和风速都分区（有时建立一个统一的线性方程以获得一个比率）<sup>[14]</sup>。还有一些方法根据一天的时间（当使用日平均时没有意义）或一年的时间对数据分区。

整体法的使用最简单，也可能最稳健，这意味着对没有经验的人员或远非理想的条件下最不容易产生大误差。其他方法则需要更多的时间和经验。多分区方法的一项复杂性在于，需要对数据不够的区间进行处理，以获得可靠的拟合或比率。可以与相邻区间合并，或使用灵活的分区大小来克服这个困难。

采用特定方法能否得到更一致准确的长期平均风资源估算还不清楚，至少部分取决于如何定义目标。如果只有平均风速一个参数，采用 8 对不同参考/目标数据的研究表明，三种线性方法之间几乎没有差别：整体线性回归法、矩阵比率法和方差比率法（之后介绍）<sup>①</sup>。另一项研究发现，与整体线性回归法相比，采用多种方向和每日不同时间分区的方法只会使误差略微减小<sup>[15]</sup>。

然而，预测风速频率分布时，整体线性回归法效果不太好。这点将在下面介绍。

#### 12.4.2 拟合方法

将两个测风塔的风速进行关联的最简单方法是取其平均值的比值（相当于线性方程中  $b=0$ ）。这种方法的主要问题是它假设两者完全相关：即参考点风速增加 10% 会使目标点风速也增加 10%。如果相关系数实际上远低于 1，那么结果会导致预测的长期平均风速产生很大误差，这是因为给目标点赋予的权重过大。

采用比率分区法在定义目标-参考关系时有更多自由，可以一定程度上解决这个问题。它假设分区能覆盖很大风速范围；而仅采用风向分区是不够的。通过风速分区的矩阵法能够满足这个检验要求。

另外，还可以通过线性回归建立线性方程。所有电子表格程序和一些商业风资

① 参考文献 Rogers（2005）中的表 4。第四种方法对水平风矢量每一项都建立独立的线性方程，其效果很差。因为这种方法将风向和风速混在一起，此处不把它当作线性方法。

源分析软件都包含这个方法。线性回归最关键点在于寻求误差平方和的最小化，这意味着它们对预测值和实际值之间的大偏差非常敏感。结果是，只要有几个偏远数据点（例如质量控制不合理时出现的风数据）就会使拟合曲线明显偏向一侧。因此，专业统计人员宁愿使用另一种更稳健的拟合方法，但对于普通用户，通常会选择简单和易操作的线性回归法。

线性回归不假设完全相关。当相关性差时，斜率很小，这样参考风速的变化对预测目标风速的影响就很小。线性回归的另一个优点是它可以一次包含多个参考点（多元线性回归）。有时不同参考点可以捕获目标点风气候不同方面的特征；例如，当风来自海洋时，沿海站点比内陆站点更能代表目标点特征，反之，当风来自内陆时也一样。拟合中赋予每个参考点的权重取决于该站点与目标点的相关性，以及与其他站点的统计独立性。多元线性回归是提高整体相关性的简便方法，能够客观确定不同站点的相对值。然而，如果多元线性回归中使用过多参考点，尤其是当它们高度相关时，就有产生回归过度的风险。这样会得到不良结果。

#### 12.4.3 预测风速频率分布

线性回归一个显著的缺点是它会低估目标点风速变化的程度，尤其当相关性差时。对于给定线性方程  $y = mx + b$ ，预测风速的方差即标准偏差二次方用下式计算：

$$\sigma_y^2 = m^2 \sigma_x^2 \quad (12-5)$$

相关性越差，则斜率  $m$  越小，因此预测风速的方差越小。为了准确预测风速频率分布，一般来说需要使用线性回归以外的方法。

一种简单但经常有效的方法是将目标点的观测风速按比例缩放到预测的长期平均。目标数据中的每个风速值乘以预测长期平均与观测平均的比值：

$$v_i^{(\text{pred})} = \left( \frac{\bar{v}^{(\text{pred})}}{\bar{v}^{(\text{obs})}} \right) v_i^{(\text{obs})} \quad (12-6)$$

实际上，它假设站点测量数据能准确捕获风速的相对变化，因此只需要调整平均风速。实际上，这个假设通常很好：因为对于同一平均值，估算发电量的变动很少因同一测风塔风速分布的年际变化而大于 1% ~ 2%。

然而，这种方法只有在至少有一年站点观测值时才可用。当测量期短于一年时，需要考虑风速分布的季节性变化（和预测平均风速的准确性一样）。

方差比率法是保留目标点方差的另一种方法。该方法的想法是选择线性方程  $y = mx + b$  的斜率和截距，以重现观察到的方差和平均值：

$$y = \frac{\sigma_y}{\sigma_x} x + \left[ \bar{y} - \left( \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \right) \bar{x} \right] \quad (12-7)$$

平均值（带上划线的）来自目标和参考点的同期数据。根据这个方程或线性回归法，可以得到预测的长期平均风速。人们一般倾向使用后者，因为只有线性回归在确定 MCP 调整大小时会考虑相关性；否则方差比率法会假设完全相关。

尽管方差比率法会与观测风速的方差相匹配，然而不能保证一定会得到正确详

细的风速频率分布，这是因为目标点和参考点的风速关系会随着风速、风向、时间等其他因素发生变化。矩阵比率法可以通过恰当分区克服这个难点；然而当每个风速和风向分区内的相关性不太强，也就是说，某一参考风速风向和相应的目标风速风向之间没有一一对应关系时，这些方法都会失败。最后一个缺点可以在重建目标数据集时引入随机噪声项来解决，但这只能得到近似解。

#### 12.4.4 风向和其他参数

只要目标点至少有一年的风向数据，则通常不需要使用 MCP 来预测目标点的风向分布。当站点观测值不充分时，最简单的解决办法是找到每个参考风向扇区的同期参考风向与目标风向之间的平均偏移，并将该偏移应用到所有参考数据记录。当风向高度相关时，这样做的效果如预期一样好，但在不太理想的情况下，效果就不好。更常用的解决办法是对目标点每个参考风向的风向分布取样。这种方法很容易与前一节最后介绍的矩阵采样法结合起来。

其他参数例如观测温度，可以采用与风速同样的方法，利用参考点和目标点的线性回归关系校准到历史正常水平。如果可用，也可以使用这种方法校准气压测量值。其结果可用来校准站点的估算空气密度。

#### 12.4.5 小结

尽管每种方法都各有其优缺点，但对于缺乏经验的分析人员，最好使用相对简单、经过验证的方法。根据这个标准，线性回归法通常是最好的。它应用简单，且估算的长期平均风速与其他任何线性方法一样准确。但它不适合用来预测风速分布；正因如此，只要有至少 9 个月的有效站点数据，建议将观测风速按比例换算到预测平均值。更复杂的方法最好留给有时间和经验的分析人员，他们充分了解这些方法应用到数据样本时的可能优点和缺陷。

## 12.5 讨论题

1. 假设你观察到大于 15 年的参考站点数据存在明显的下降趋势，你很确信测量值的一致性和数据质量。那么引起这种趋势的可能原因是什么？对于你找出的每种原因，使用该站点进行 MCP 时意味着什么？

2. 讨论在 MCP 中使用少于 1 年的站点数据的可能风险。

3. 你的项目场址的参考测风塔有 5 年数据，两个测风塔各有 1 年数据。当两个短期测风塔数据与参考测风塔数据相关时，一个  $r^2 = 0.8$ ，另一个  $r^2 = 0.5$ 。讨论引起这个差异的可能原因。如果这个问题无法补救，那么每个测风塔预计的 5 年平均值的不确定度是多少？假设年际变化率  $\sigma$  是 4%。

4. 对 MCP 来说，地表和高空数据的相对优缺点是什么？是否存在某些项目条件促使你倾向于使用某种数据？是否存在某些宁愿使用建模数据而不使用其他任何测量数据源的情况？

5. 除了距离，还有哪些其他因素会影响目标点和长期参考点之间风速相关性的强度？

6. 多数地面观测站测量 10m 高度的风速，而风能评估主要使用更高的高度。讨论这个区别对 MCP 分析的可能影响，以及如何减小这些影响。

7. 你的场址有 1 年数据，其年均风速是 6.51m/s。你的 MCP 分析（使用线性回归）得到的长期（long-term, LT）平均风速列在下表中，包括 10 个不同的可能参考站点。你在分析中会选择哪些站点，为什么？你能想出得到最终长期平均风速估算值的两种方法吗？

参考站点	斜率	截距	$r^2$	预计 LT 风速
A	1.24	2.15	0.90	6.39
B	0.88	0.45	0.89	6.56
C	0.90	0.54	0.89	6.59
D	1.36	2.04	0.89	6.25
E	1.30	1.44	0.88	6.31
F	1.30	0.82	0.83	6.24
G	1.26	1.39	0.76	6.36
H	1.19	1.89	0.62	6.37
I	0.38	2.49	0.61	6.35
J	1.06	2.85	0.47	6.68

8. 你正在考虑使用两个参考站点进行多元线性回归。A 站点记录始于 1995 年，B 站点始于 1980 年。你认为追溯到 1980 年合理吗？请解释为什么。请描述你确定 A 和 B 站点参考期的共同起始年可能使用的过程。然后概述确定你的场址测风塔轮毂高度处长期风速的步骤和所需方程。

9. 参考图 12-8 所示的趋势图。假设所有 5 个站点与你的站点相关性都很好。

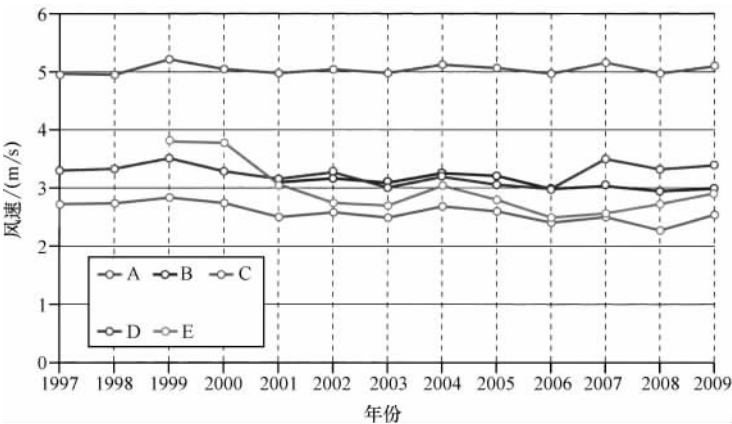


图 12-8 风速趋势图

不同站点用 A ~ E 表示，请评价它们对长期气候校准的适用性，你是否会考虑使用。

10. 讨论下面五种目标-参考数据相关方法中至少三种的优缺点：①平均风速比率法；②零截距线性回归法；③非约束线性回归法；④根据风向和风速分区的矩阵法；⑤人工神经网络法。

11. 当建立反映长期历史状况的目标数据时间序列时，为什么避免减小风速的波动性很重要？本章讨论的哪些方法能够满足这个要求？一般来说，减小波动性会如何影响发电量估算？

### 参 考 文 献

1. Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, Thépaut J-N, Ciais P. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nat GeoSci* 2010;3:756–761.
2. Pryor SC, Barthelmie RJ, Young DT, Takle ES, Arritt RW, Flory D, Gutowski Jr. WJ, Nunes A, Roads J. Wind speed trends over the contiguous United States. *J Geophys Res* 2009;114:D14105. doi: 10.1029/2008JD011416, 2009.
3. Freedman JM, Zack JW. Climate and Wind Energy: Outlook for Wind in a World Undergoing Climate Change—Recent Trends in Wind Speed, American Wind Energy Association Wind Power 2007, June 2007.
4. Breslow PB, Sailor DJ. Vulnerability of wind power resources to climate change in the continental United States. *Renew Energy* 2002;27:585–598.
5. Sailor DJ, Smith M, Hart M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. *Renew Energy* 2008;33:2393–2406.
6. Freedman JM. Final Report: effects of climate change on production of electricity from wind power in California. California Energy Commission; 2009.
7. Ren D. Effects of global warming on wind energy availability. *J Renew Sustain Energy* 2010;2:052301.
8. Federal Meteorological Handbook No.3. Rawinsonde and Pibal Observations, Office of the Federal Coordinator for Meteorology, 29 May 2007.
9. Kistler R, Kalnay E, Collins W, Saha S, White G, Woollen J, Chelliah M, Ebisuzaki W, Kanamitsu M, Kousky V, van den Dool H, Jenne R, Fiorino M. The NCEP/NCAR reanalysis. *Bull Am Met Soc* 2001;8:247–267.
10. Brower MC. The Use of NCEP/NCAR Reanalysis Data in MCP, AWS Truepower; 2006.
11. Waight K. Validation of MASS wind anomaly simulations: 1997–2006, AWS Truepower; March 2008.
12. Rogers A, Rogers J, Manwell J. Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms. *J Wind Energy Ind Aerodyn* 2005;93:243–264.
13. Thoegersen ML. Measure-correlate-predict methods: case studies and software implementation. Milan, Italy: European Wind Energy Conference; 2007.
14. Anderson M. A Review of MCP techniques. UK: Renewable Energy Systems Ltd.; 2004.
15. Oliver A, Zarling K. Time of day correlations for improved wind speed predictions. Chicago, Illinois: American Wind Energy Association, Windpower 2009, May 2009. Renewable Energy Systems, Ltd.

## 深入阅读建议

- Rogers A, Rogers J, Manwell J. Comparison of the performance of four measure-correlate-predict algorithms. *J Wind Energy Ind Aerodyn* 2005;93:243–264. Available at [http://www-unix.ecs.umass.edu/~arogers/\\_html\\_version/publications/\\_publicationpdfs/AnthonyRogers\\_2005\\_JWEIA\\_Measure\\_Correlate\\_Predict.pdf](http://www-unix.ecs.umass.edu/~arogers/_html_version/publications/_publicationpdfs/AnthonyRogers_2005_JWEIA_Measure_Correlate_Predict.pdf). (Accessed 2012).
- Sarachik S, Crane M. *The El Ni no-Southern oscillation phenomenon*. UK: Cambridge University Press; 2010.
- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL, editors. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 2007. UK: Cambridge University Press; 2007. Available at [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html). (Accessed 2012).

## 第 13 章 风流场建模

风流场建模的主要目的是估算每个计划或潜在风机位置的风资源，以计算风电场发电量，并进行优化设计。这通常意味着使用某种数值风流场模型将一个或多个测风塔测量的风资源外推。

理想情况下，风流场建模与风切变和长期气候修正一样，并不是必须的。在每个可能的风机位置处进行风况测量可以减小可能的明显误差。然而对于大多数工程，这种做法花费太高。实际情况中，风流场建模是风资源操作人员使用工具的重要部分。它也是多数发电量估算中最大的不确定性来源之一。

除了估算项目区域内风资源的变化，风流场建模还必须考虑每台风机对其他风机运行的影响，也就是尾流效应。尾流模型通常使用专业软件，与风流场建模分开进行。这将在第 16 章介绍。

与本书其他章节不同，本章不介绍推荐的（建模）方法。这方面具有不同特性和应用的方法实在太多，无法选取其中的某一种。因而我们概括介绍可用的不同建模方法，包括它们的优缺点，并建立适用于所有方法的一般性导则，最重要的是恰当使用测量值来管理和限制误差。

### 13.1 风流场模型的种类

空间建模方法可以很方便地分为四大类：概念型、试验型、统计型和数值型。

#### 13.1.1 概念模型

概念性模型是描述风资源经过某种地形如何变化的理论。它们通常基于实践经验和边界层气象理论理解的结合。

一个简单的概念模型可能会说一个位置（风机）的风资源与不同位置（测风塔）的测量值一样。对于相对平坦的地形或沿着基本一致的山脊线，这种模型是相当不错的。但当地形和地表覆被变化很大时，通常需要更细致的描述。一般考虑以下理论，包括高度对平均风速的影响、迎风坡和背风坡的关系、地形加速、山口管道效应以及树木和其他植被的影响。然后这些理论或概念再加上可能的风资源估算，转化为风机选址的实际建议。

因为风电工程越来越大，并建在风气候变化很大的地方，所以精确或可重复地使用纯粹概念方法变得越来越困难。不管怎么说，很好理解风资源概念在所有空间建模中都具有很高价值。最重要的是，它可以用来检验其他方法的合理性。好的概念理解比差的数值模型或数值模型虽好却应用错误要好得多。



13.1.2 试验模型

本文中试验指的是建立风电项目区域的仿真比例模型（如图 13-1 所示），并在风洞中测试。（这也称为物理建模，所以不这样叫是为了避免可能与基于物理原理的数值风场模型混淆。）风洞中的条件，如风速和湍流，必须与模型的比例匹配，并尽可能复制实际条件。运行风洞试验时，使用微小风速计（通常是热线风速计）在比例模型的不同点测量风速。结果会形成场址内风速变化的图像。然后通常将各点之间的相对风速与现场测风塔的测量风速关联起来。

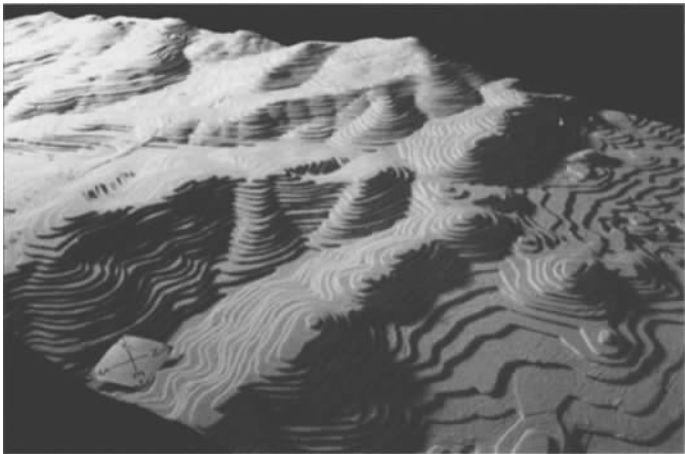


图 13-1 风洞试验中使用的 Altamont 山口的比例模型 [来源：Lubitz WD, White RB. Prediction of wind power production using wind-tunnel data, a component of a wind power forecasting system（使用风洞数据进行风力发电量预测，风电功率预测系统的组件）. Proceedings of AEWA WindPower 2004]

尽管将试验模型和其他方法比较的研究很少，但不能因此认为这种方法在多数情况下效果不好。它甚至可以给数值风场模型容易失败的区域提供一种独特视角，例如陡峭悬崖靠近边界处。然而，很少风资源分析人员会采用这种方法，因为建立合适的模型需要很多时间和特殊技巧，还需要使用风洞。此外，这种方法存在局限性（例如热稳定条件建模困难，以及将大气参数合理匹配到物理尺度的挑战）。

13.1.3 统计模型

统计模型建立在全部或主要来自现场风测量值的关系基础上。一般情况下，检验不同的预测参数，从中找出与不同测风塔的风资源观测值相关性最强的，这些参数包括海拔、坡度、朝向、地表粗糙度或其他指标。原则上可以使用任何参数，然而在实践中，关注那些有合理理论基础支持应该存在关系的参数才有意义。这时很好的概念理解就很有帮助。

通过案例解释这种方法可能最容易。假设拥有一个风资源区域内不同点多个测风塔的平均风速测量值。假设将风速与海拔关系画成散点图，发现两者高度相关。

根据这个关系，可以得到线性方程 ( $y = mx + b$ )，然后用来预测区域内其他点的风速。

统计模型很吸引人，因为它很好地基于测量值并且相当简单明确，而不像数值风流场模型经常看起来像是“黑箱”。它们的效果出人意料的好，尤其对于天气尺度风驱使的风气候（例如大范围出现热驱动的中尺度循环），能够最清楚地展示风向和某些地形指标（如高度和朝向）的关系。在图 13-2 中说明了 7 个风资源区域 74 座测风塔观测的风速变化和下风向暴露的关系，下风向暴露的定义是给定点的高度和下风向至 3000m 处平均高度的差值。

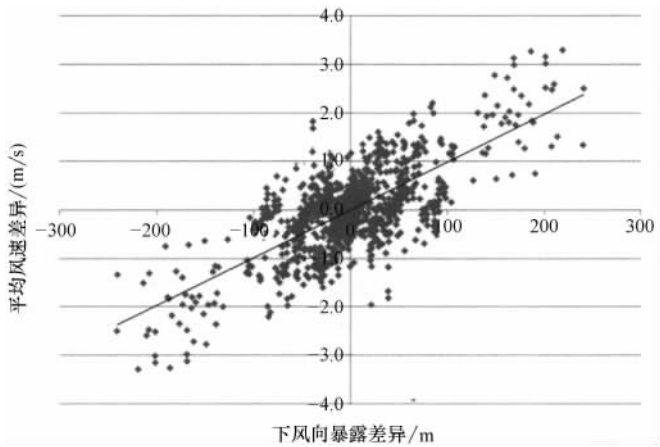


图 13-2 来自 7 个风资源区域 74 座测风塔的数据表明平均风速差异和下风向暴露差异有明显相关性。这种统计相关性可用来预测项目区域内风速的变化。（来源：AWS Truepower）

统计模型的一个可能局限在于，当在训练模型使用条件范围之外进行预测时，会产生超过预期的更大误差。例如数据来自沿山脊顶部不同高度分布的 3 座测风塔。那么由这 3 座塔的平均风速与高度等建立的关系能否用于预测山脊顶部以外的风速呢？答案是不一定，因为与山坡相比，山顶地形对风流场的影响完全不同。就这点来说，统计模型可能没有数值风流场模型可靠，因为后者在很宽条件范围内都可以产生合理（如果不能说准确的话）结果。

确定统计模型的准确度是该方法的一个重要挑战。为得到不确定度的客观估计，必须将数据集分为两组：一组用来训练模型，另一组用来验证模型。最严格的程序是通过对“训练”数据拟合变量和函数得到经验关系式，再根据预留的“验证”数据确定误差。很多站点缺乏足够数据进行验证。对于验证数据必须包含在训练数据集中的情况，会导致低估误差。

不管怎么说，只要遵守合理的操作流程，统计模型就是一种有效的方法。统计方法也可以与数值风流场模型等其他方法结合。一个很好的例子是在 WAsP（Wind

Atlas Statistical Package) 模型 (下面介绍) 中经常使用的险峻指数 (Ruggedness Index, RIX) 修正。通过统计建模发现, 在某些情况下 RIX 是 WAsP 误差的良好预报器<sup>[1]</sup>。

### 13.1.4 风流场数值模型

最流行的空间建模方法主要依靠风流场数值模型。目前风电行业使用的风流场模型很多, 都是基于各种各样的理论方法。所有模型都试图求解一些驱动大气运动的物理方程, 其复杂程度各不相同。模型分为四大类: 质量守恒、Jackson-Hunt、计算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 和中尺度数值天气预报 (Numerical Weather Prediction, NWP) 模型。

#### 1. 质量守恒模型

质量守恒模型是 20 世纪七八十年代开发的第一代风流场模型 (例如 NO-ABL<sup>[2]</sup>、MINERVE), 所以这么叫是因为它们只求解一个控制质量守恒的运动物理方程。当用于大气时 (假设其不可压缩, 这对边界层是很好的假设), 质量守恒意味着风吹过更高地形时必须加速, 这样在给定时间内通过区域的空气体积才相同。结果是, 这些模型预测山顶和山脊顶的风更强, 而山谷的风更弱。它们不能处理热驱动类型的风, 例如海风和山谷循环风, 以及丘陵或山脉背风面的气流分离。

质量守恒模型的解不是唯一的: 实际上控制方程有无数多解。相反, 多数模型设计成从偏离根据观测资料或其他模型 (例如, 采用更粗糙分辨率的 NWP 模型) 得到的初始风流场“猜测”值的最小可能量开始。这种特性使此类模型与其他不做该假设的数值模型不同。它还意味着质量守恒模型可以自然利用其他测风塔的数据, 从而修正初始猜测。

#### 2. Jackson-Hunt 模型

下一代模型 (例如 WAsP<sup>[3,4]</sup>、MS Micro 或 MS3DJH<sup>[5,6]</sup>、Raptor<sup>[7]</sup>、Raptor NL<sup>[8]</sup>) 最初于 20 世纪八九十年代根据 Jackson 和 Hunt<sup>[9]</sup> 提出的理论开发出来。除了质量守恒, 它们还通过求解支配风流场的 Navier-Stokes 方程的线性化形式把动量守恒包括在内。Jackson-Hunt 理论最重要的简化是地形引起本来稳定的背景风产生小扰动。这个假设可以用快速数值技术求解方程。

没有哪个空间建模的章节不包括对 WAsP (见图 13-3 和图 13-4) 的讨论, Jackson-Hunt 模型由丹麦国家实验室 Risø 研发, 它可能仍是风电行业使用最广泛的数值风流场模型。“WAsP 法”在空间建模应用中地位牢固, 尤其在欧洲。它分为两步。首先用测风塔的观测风况得到背景风场, 代表没有地形起伏时可能存在的风资源。这类背景风场通常保存在风地图或库文件中。然后使用背景风作为输入, 预测其他点的风廓线。

除了执行基本的 Jackson-Hunt 方法, WAsP 还包含一些强调风流场建模多种需要的模块, 包括考虑表面粗糙度变化和障碍物影响的能力。可能因为 WAsP 模型是在地形相对平坦的北欧研发出来的, 这里粗糙度变化和障碍物是影响风资源的主要

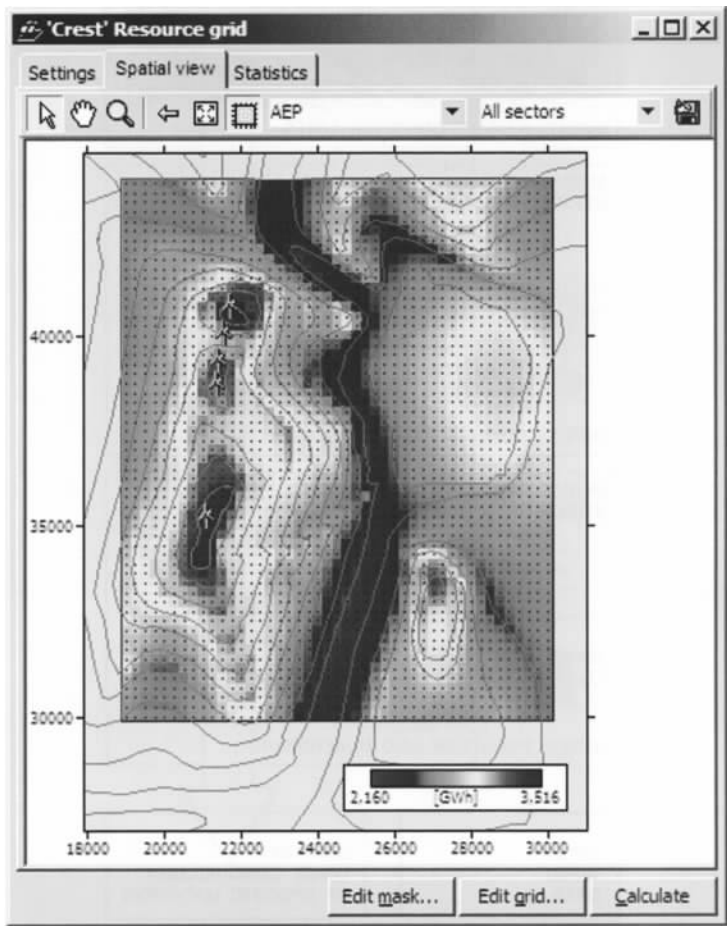


图 13-3 常用的风流场建模应用软件 WAsP 模型的风功率地图。像其他 Jackson-Hunt 模型及质量守恒模型一样，WAsP 捕捉风速在跨越高地时的增加趋势和在谷地的降低趋势。与风流场垂直的山脊会显示最大的地形加速度。（来源：Risø 国家实验室）

因素，这些模块研究已经达到很先进的程度。

人们普遍承认，WAsP 和其他 Jackson-Hunt 模型不适合处理复杂地形。（本文中“复杂”的一般定义是大部分区域坡度超过 30% 的地形。）重要问题是陡峭地形引起风流场变化，因而不满足小扰动的假设。被忽视的影响可能包括悬崖后的气流反复循环，坡度突然变化时的分流以及垂直风。

WAsP 模型还忽略了热稳定和气温梯度的影响。热分层和浮力对风遇到地形的响应有很大影响。当边界层处于热稳定状态时，接近地表的空气比上空的更冷更密集。因而，风不往更高处地形流动，而是在周围通过通道或豁口寻找路径，或者保持不动。事实上，当 WAsP 第一次应用于建有美国第一个风电场的沿海山口时，它

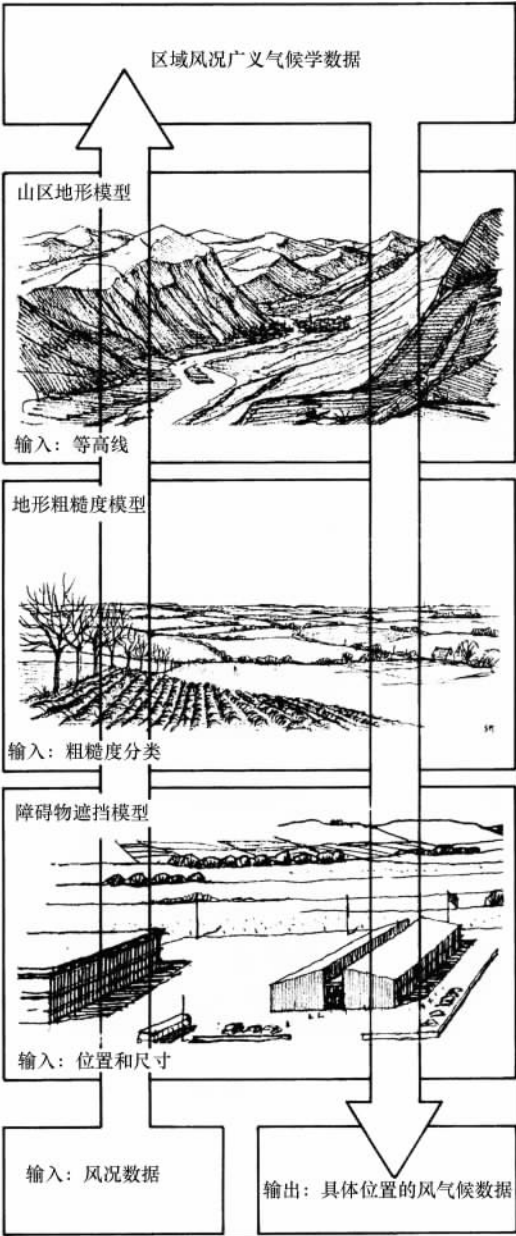


图 13-4 WAsP 的绘图过程（来源：Risø 国家实验室）

无法准确预测风资源分布。这个经历使得风场模型在美国风资源评估圈中很多年都名声不佳。

尽管它有很多已知的不足，但 WAsP 仍然很流行。部分原因是很多风电项目场址没有非常陡峭的地形或明显的中尺度循环。此外，可以采取实际措施来改善结果。一种方法是建更多测风塔，这样可以减小必须采用模型外推来评估风资源时的

距离。此外，某些情况下，事实证明通过 RIX 调整可以减小误差。RIX 参数代表某一点上风向地形超过一定坡度的限值，例如 30%。根据两点之间 RIX 的差异构建简单方程，来调整它们之间的相对风速。试验表明这种调整相当有效。

最后，有时更复杂的模型（在后面说明）还没有第一、二代风流场模型准确。这最后一点反映了大气建模的残酷事实：要做好它非常困难，有时候忽略无法很好模拟的风流场部分比模拟不良的结果还要好一些。

### 3. CFD 模型

随着个人计算机的功能越来越强大，很自然地会将 CFD 模型用于空间风资源建模，它的最初设计是用于飞机机体和喷气发动机等系统的湍流计算程序。

CFD 和 Jackson-Hunt 模型的关键区别在于 CFD 模型求解更完整的运动方程，即雷诺兹平均纳维-斯托克斯（Reynolds-averaged Navier-Stokes, RANS）方程。它不假设地形使稳定风流场产生小扰动。这意味着它能模拟风对陡峭地形的非线性响应，例如风流分离和反复循环（见图 13-5）。它也不需要做其他简化假设，例如切变应力和湍流只发生在表面附近。这可以使 CFD 模型直接模拟粗糙度变化和障碍物的影响。（而 WAsP 和其他线性流场模型一般在单独模块操作。）

CFD 模型代表风资源分析人员工具包中一种重要的新工具。它的优点是可以给出风资源的独立图像，完全不同于 Jackson-Hunt 模型如 WAsP 等生成的结果，它可以提供复杂地形下有关湍流强度、风切变、方向偏移和风流场其他特征的有用信息。

对于理想化的悬崖和陡峭山脉附近，甚至在反复循环区域的背风面，CFD 模型的表现有时与二维和三维流场风洞试验结果高度一致<sup>[10,11]</sup>。一些使用现场数据的试验同样证明它比线性模型有很大改善。例如，在一个有 14 个测风塔的样例中，方均根误差减少 50%<sup>[12]</sup>。但其他平行试验却得到不同结论。例如，在有多种地形条件的 4 个风电项目场址试验发现，CFD 模型比 WAsP 误差平均大 22%<sup>[18]</sup>。由丹麦国家实验室 Risø 开展的 Bolund 试验包括超过 35 个不同的 CFD 模型，结果表明“预测平均风速前十名的模型（都是基于 RANS 的）对主要风向的平均总误差是 13% ~ 17%”<sup>[13]</sup>，结果令人失望。看起来 CFD 模型似乎非常依赖特定情况，（可能）还有用户体验。

很明显，不能确保 CFD 模型一定会成功，需要继续使用高质量的风测量值验证 CFD 结果。这个问题归因于多种因素，包括初始和边界条件不准确（通常假设它们是均匀的，符合中性分层的对数风廓线），网格分辨率有限，以及湍流处理。模型增加的复杂性可能也是问题，因为有些用户可能没有合适的配置来合理运行它们。另一个因素是，CFD 模型设计时通常没有考虑气温梯度带来的任何循环。CFD 模型中缺少完整的气温预报方程，这恰恰是多数 CFD 模型使用另一个假设的结果，即风流场处于稳定状态。和 WAsP 处理方式不同，大多数 CFD 模型假设有稳定进入的风流场。



图 13-5 Wind Sim 等 CFD 模型能模拟非线性流场特征，例如陡峭地形背后的反复循环。（来源：WindSim AS）

#### 4. 中尺度数值天气预报模型

本章介绍的最后一类风流场模型是中尺度 NWP 模型。这类模型最初是为天气预报开发的。和 CFD 模型一样，中尺度模型也求解纳维叶-斯托克斯方程。然而与 CFD 模型不同的是，它们包括了太阳和热辐射、云微物理和对流（积云）以及土壤模型等参数化机制。因而，它们考虑了能量和时间的多维性，能够模拟例如热驱动的中尺度循环（例如海风）和大气稳定性或浮力等现象。在中尺度建模中，和真实世界一样，风在地形中永远不会处于平衡状态，这是因为由于太阳辐射、辐射冷却、蒸发和降水，总有能量进出一个区域，一层层湍流动能会降至最小尺度，并耗散成热量。

因此中尺度模型给准确预测复杂地形的风流场提供了很大希望。然而，它有一个很大的缺点：对于风电项目评估所要求的尺度，需要巨大的计算能力来运行。多数中尺度仿真的典型模型分辨率是千米级的，意味着每个网格有几千米宽。显然这种尺度不可能得到项目区域内详细的风资源图。

解决这个问题一个方法是将中尺度模型与某种微尺度模型结合起来。如果有充足的站址风数据建立可靠的统计关系，那就是统计模型。更多时候是简化的风流场模型，通常是质量守恒模型或 Jackson-Hunt 模型。这类例子包括 AWS Truepower 的 MesoMap 和 SiteWind 系统<sup>[14]</sup>，3TIER 的 FullView 系统，丹麦国家实验室 Risø 的 KAMM-WAsP 系统<sup>[15]</sup>和加拿大环境署的 AnemoScope 系统<sup>[16]</sup>。

不出所料，研究表明这些方法比简化风流场模型更准确，其中中尺度效应起了很大作用。一个例子是沿海山口的风资源，例如加利福尼亚阿尔塔蒙特山口（Altamont Pass）。案例中，WAsP 等模型预测最好的风应该在山口顶部，而中尺度-微尺度建模方法预测相对冷和密集的海洋气团随着坡度下行时会加速。结果是准确度提高非常明显（见图 13-6）。

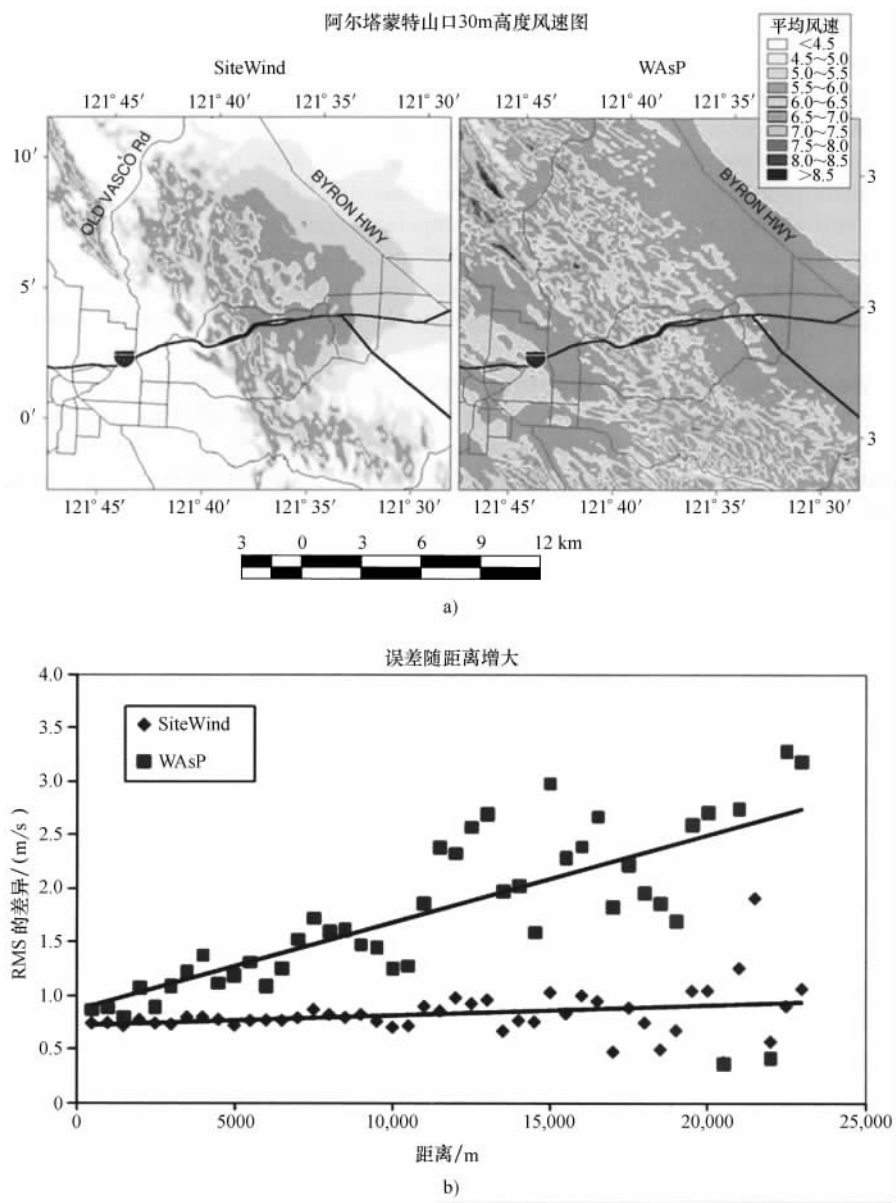


图 13-6 a) 加利福尼亚阿尔塔蒙特山口的风资源地图，左侧是 SiteWind 中尺度-微尺度模型系统，右侧是 WAsP。SiteWind 地图表明风资源集中在东坡，这是重力作用于相对冷和密集的海洋气团的结果。WAsP 表明风资源分布更广泛，最大值在山口顶部。b) 与观测值比较表明中尺度-微尺度模型更正确；与 SiteWind 相比，WAsP 误差随参考测风塔的距离增大得更迅速。<sup>[17]</sup>

阿尔塔蒙特山口是一个代表性试验点，有很多其他模型也在此试验，因为那里的测风塔群跨度很大，接近 25km，而中尺度循环是决定风资源空间分布的关键因



素。另一方面,在天气尺度风主导的项目区域,其优点就没这么确定,它们在离测风塔很近时,就可能进一步减弱或消失。在中尺度模型有效尺度之下,也就是几百米到几千米,微尺度模型起主导作用,而常规建模则可能没有改善。

最终,是希望将中尺度模型在风电场微观选址所需的分辨率(例如 50m)下直接运行,这就无需使用简化降尺度方法。在这种模式中,通过适当修正,模型可以像以非常高的分辨率(米级)模拟不稳定气流的大涡仿真模型一样运行。随着现代高性能计算机群的发展,这种方法变得越来越可行。然而,这里还没有评估与计算机成本相关的准确率的可能提高。如果评估结果成功的话,那么这种方法最可能用于增加成本是合理正当的最大最复杂的风电项目区域。

## 13.2 数值风流场模型的应用

空间建模的选择多种多样,显然不能推荐出一种广泛适用于每一种情况并优于其他方法的方法。为了缩小讨论范围,我们关注目前应用最广泛的数值风流场模型。以下指导原则可用于这类模型。

### 13.2.1 地形数据

准确、高分辨率的地形数据对所有数值风流场建模都非常重要。一般用于建模的空间分辨率是 50m(通常从更高分辨率重采样而得)。有时使用的分辨率高达 10m 或 30m,但它们能否提高总准确率还不太清楚,因为风力机风轮直径通常是 70~100m,而且风力机有效拉平了整个区域的风资源。

在美国,地形数据的首选来源是美国地质勘探局(US Geological Survey, USGS)国家高程数据集(National Elevation Dataset, NED),其空间分辨率是 10m 或 30m(除了阿拉斯加,它的分辨率是 60m)。在美国以外,类似质量的数据通常来自国家地图局,如果没有更好的,分析人员可以使用飞船雷达地形测绘任务平台的数据集,其分辨率大约是 90m。

### 13.2.2 地表覆被数据

使用准确、高分辨率的地表覆被数据同样很重要。多数地表覆被数据由卫星影像生成,例如 Landsat 和 SPOT 卫星(Satellite Pour l'Observation de la Terre, 地球观测卫星)。因为地表覆被分类是通过计算机软件分析光谱测量值而得,只检查一定区域,所以会产生误差。如果可能的话,应该通过航拍和地表图片对其准确性进行验证。

在美国,首选数据集是美国国家地表覆被数据库(National Land Cover Database, NLCD 2001),它是根据 Landsat 专题制图得到的 30m 分辨率的数据集。类似的数据集还有 EarthSat GeoCover,世界上其他地区可以从 MDA Federal 公司购买得到。很多国家有自产的地表覆被数据集,欧洲整个被环境信息协调(Coordination for Information on the Environment, CORINE)系统覆盖。

多数情况下，地表覆被分类必须转化成粗糙度值（以米为单位），才能用于数值风流场建模。目前还没有广泛接受的粗糙度转换系统。表 13-1 是 AWS Truepower 使用的粗糙度范围值。

为得到更精确的地表覆被信息，一些私人公司（例如 Intermap Technologies）提供高分辨率的地表模型，除了地形高度数据，它还包括建筑、植被、道路等信息。

表 13-1    典型土地利用/土地覆被分类的粗糙度范围（这些数值可能随地理位置变化）

土地覆被类型	粗糙度范围/m	土地覆被类型	粗糙度范围/m
水体	0.001	湿地	0.15 ~ 0.66
城市/已开发区域	0.3 ~ 0.75	灌木林地	0.1 ~ 0.2
森林	0.9 ~ 1.125	农田	0.03 ~ 0.07

（来源：AWS Truepower）

13.2.3    测风塔数量和位置

为达到用于实际规模风电项目的发电量评估所需的准确度标准，所有风流场建模必须固定在项目区域内高质量的观测点。推荐按照本书描述的规范最少安装一个测风塔，尽管有些情况下遥感系统可能是主要的观测平台。

风资源数据应该在项目中代表风力机最可能遇到的所有风况的地方收集。如果不满足这个标准，空间建模的不确定性将大大增加。有时这个标准会转化成距离，如导则中指出复杂地形下风力机不能安装在离测风塔超过 1 ~ 3km 的地方（见表 3-2）。不过距离只是需要考虑的一个因素；高度、地形朝向、坡度和方位（对北方的偏角）等差异也很重要。

一般来说，使用的测风塔数量越多，预测风资源的不确定性就越小。然而，这只是测风塔很好分布于预计安装风机的地方时才正确。如果测风塔分布不均匀，那么多个测风塔的好处就减小了。最坏情况下，如果测风塔聚集在某一区域，而风力机在不同区域，那么测风塔增多就不能带来益处。图 13-7 给出了测风塔首选和不良配置的示例。第 15 章将深入讨论不确定性。

13.2.4    对多个测风塔的调整

多数数值风流场模型只使用来自一个测风塔的数据。然而现在，风电项目经常使用多个测风塔。这就提出如何最好使用新增数据的问题。因为多个测风塔预测值的组合多数情况使用风电场设计软件，而不是风流场软件，因此这个主题将在第 16 章讨论。

13.3    讨论题

1. 假设你正在对处于山脊顶的风电项目建立概念模型。你的模型是否假设风速随海拔增加或减小？你认为对于沿着山脊线和沿山坡往下的高度变化，风速与海

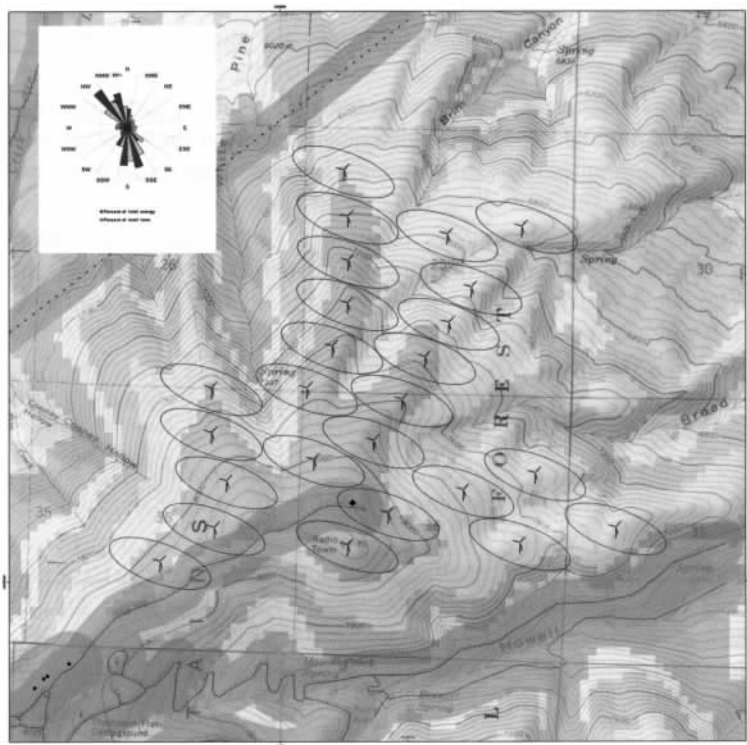


图 13-7 对于假设风力机布局的首选和较差的测风塔布局示例。左下角用圆点表示的四个测风塔对于该风力机布局来说，选址不佳。靠近布局中央的单个测风塔（菱形方块）选址较好，但因为它处于最高处，即使使用数值风场建模，也可能无法准确捕获较低高度处的风力机的风资源。（来源：AWS Truepower）

拔之间的关系是否一样？请解释为什么。

- 2. 假设你正在建立位于内陆平坦地形的风电项目的概念模型。你的模型是否会假设风速随植被变密变高而增加或减小？请解释为什么。
- 3. 为什么质量守恒原理说明风通过高地形之后一定会加速？
- 4. 使用互联网或其他任意可用参考，了解构成纳维叶-斯托克斯方程基础 of 守恒原理。你能由此推论说，求解纳维叶-斯托克斯方程的模型比质量守恒模型能提供更全面的地形对风场影响的描述吗？请解释为什么。
- 5. 质量守恒和 Jackson-Hunt 风场模型对复杂地形都存在困难。请解释为什么会这样。本文中，大部分区域坡度超过多少时才被认为是“复杂”地形？
- 6. 使用互联网或其他任意途径，找出 WAsP 模型最初是什么时候开发的。同时确定当时个人计算机的常见时钟速度是多少。现在又是多少？
- 7. CFD 模型和 Jackson-Hunt 模型最主要的区别是什么？中尺度 NWP 模型和

CFD 模型最主要的区别是什么？哪类模型能最全面描述影响风的多种因素？

8. 除了风的三个矢量项，中尺度 NWP 模型预测的其他四个主要气象变量是什么？（如果需要请借助互联网。）

9. 中尺度 NWP 模型常见的分辨率是多少？为什么这些模型不采用更高分辨率运行？目前解决这个问题的建模方法是什么？

10. 假定有三个风电项目，范围都是 10km：①一些平缓波状丘陵地，相对高度 100m，最大坡度 5%；②陡峭的山脊线，相对高度 500m，最大坡度 50%；③沿海山口。哪种通用模型能足够应对这三种情况？

### 参 考 文 献

1. Mortensen NG, Bowen AJ, Antoniou I. Improving WASP predictions in (too) complex terrain. In: Proceedings of the European Wind Energy Conference; Athens, Greece; 2006.
2. Phillips GT. A preliminary user's guide for the NOABL objective analysis code. La Jolla (CA): Report from Science Applications, Inc.; 1979.115.
3. Troen I, Petersen EL. European wind atlas. Roskilde, Denmark: Report from the Risoe National Laboratory; 1989.
4. Troen I. A high resolution spectral model for flow in complex terrain. Proceedings from the 9th Symposium on Turbulence and Diffusion, Roskilde, Denmark; 1990.
5. Beljaars ACM, Walmsley JL, Taylor PA. A mixed spectral finite-difference model for neutrally stratified boundary-layer flow over roughness changes and topography. Boundary-Layer Meteorol 1987;38:273–303.
6. Taylor PA, Walmsley JL, Salmon JR. A simple model of neutrally stratified boundary-layer flow over real terrain incorporating wave number-dependent scaling. Boundary-Layer Meteorol 1983;26:169–189.
7. Ayotte KW, Taylor PA. A mixed spectral finite-difference 3D model of neutral planetary boundary-layer flow over topography. J Atmos Sci 1995;52:3523–3537.
8. Ayotte KW. A nonlinear wind flow model for wind energy resource assessment in steep terrain. In: Proceedings of Global WindPower Conference, Paris, France; 2002.
9. Jackson PS, Hunt JCR. Turbulent wind flow over low hill. Q J Roy Meteorol Soc 1975; 101:929–955.
10. Bitsuamlak GT, Stathopoulos T, Bédard C. Numerical evaluation of wind flow over complex terrain: Review. J Aerosp Eng 2004;17:135–145.
11. Murakami S, Mochida A, Kato S. Development of local area wind prediction system for selecting suitable site for windmill. J Wind Eng Ind Aerodyn 2003;91:1759–1775.
12. Pereira R, Guedes R, Santos CS. Comparing WAsP and CFD wind resource estimates for the 'Regular' User. In: Proceedings of the European Wind Energy Conference; Warsaw, Poland. 2010.
13. Sumner J, Sibuet Watters C, Masson C. CFD in wind energy: the virtual, multiscale wind tunnel. Energies 2010;3:989–1013.
14. Brower M. Validation of the WindMap Program and Development of MesoMap. In: Proceeding from AWEA's WindPower conference; Washington (DC); 1999.
15. Frank HP, Rathmann O, Mortensen N, Landberg L. The Numerical Wind Atlas, the KAMM/WAsP Method. Riso-R-1252 report from the Risoe National Laboratory, Roskilde, Denmark; 2001. p. 59.

16. Yu W, Benoit R, Girard C, Glazer A, Lemarquis D, Salmon JR, Pinard J-P. Wind Energy Simulation Toolkit (WEST): a wind mapping system for use by the wind-energy industry. *Wind Eng* 2006;30:15–33.
17. Reed R, Brower M, Kreiselman J. Comparing SiteWind with standard models for energy output estimation. In: *Proceedings from EWEC*; London; 2004.
18. Beaucage P, Brower M. Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping. Submitted to the related special issue of the *Wind Energy Journal* (June 2011).

## 深入阅读建议

- Ferziger JH, Peric M. *Computational methods for fluid dynamics*. USA: Springer-Verlag Ed; 2002.
- Kalnay E. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. UK: Cambridge University Press; 2003.
- Pielke RA. *Mesoscale meteorological modeling*. USA: Academic Press; 2002.
- Stensrud DJ. *Parameterization schemes: keys to understanding numerical weather prediction models*. UK: Cambridge University Press; 2007.
- Stull RB. *An introduction to boundary layer meteorology*. USA: Kluwer Academic Publishers; 1988.
- Troen I, Petersen EL. *European wind atlas*. Roskilde, Denmark: Report from the Risoe National Laboratory; 1989.

## 第 14 章 海上风资源评估

目前，世界风能开发的海上份额，包括湖泊和海洋，在逐渐增长。一定程度上是因为海上很多地区拥有非常好的风资源。更重要的原因是它们有利于大规模开发，而这在靠近人口密度大和受保护的沿海区域是不可行的。这有助于解释为什么世界上多数在建或计划的海上风电项目处于人口密度很高的欧洲西部，这里可用于大规模风电项目的土地非常少。迄今为止，多数海上风电项目都建在离岸边不到 25km 且水深小于 40m 的地方。随着风力机基底技术（包括浮式平台）和安装经验的提高，未来的风电项目可能会建在离岸边更远且水更深的地方。

无论海上风电项目位于什么地方，其成功与否和陆上项目一样，取决于合理的风资源评估。本书介绍的许多风资源评估基本原理和指导原则同样适用于海上风电项目。它们的大部分仪器和测量参数都一样，还有收集数据和质量控制的方法、资源特征分析、将测量值推算至风力机轮毂高度、短期气候变化的修正以及使用数值风流场模型将风资源推算至风力机位置等。

然而，海上环境存在特有的挑战。包括缺少轮毂高度附近的现有高质量的测风数据；安装海上测量平台的花费和延迟；设计平台时需要考虑洋流、海浪以及覆冰（气温低时）的影响；海上站点维护和修理的困难，尤其在恶劣天气；现场人员安全风险更高；仪器暴露于诸如海浪、盐水和高湿度的腐蚀性环境；极端风暴引起的大风和海浪。这些挑战意味着海上测量通常比陆上同样规模的花费更高。

本章主要讨论海上风资源评估的特殊考虑和需求。它包括海上风环境的特点；监测站类型和仪器的多样化，包括用于资源评估的遥感；诸如电源、数据采集和通信等辅助系统；海上安装的挑战；运行和维护等。

除了风资源监测，海上风电项目的设计和获得许可还需要掌握海洋或湖泊环境的其他特征，包括洋流、波浪、覆冰和水温；海底或湖底的地球物理特征；鱼类、鸟类和其他野生生物。尽管这不是本章主要讨论的内容，但随着风资源评估的发展，也需要评估这些参数，因为它们会影响海上监测站的选址、设计和运行。例如，海洋和野生生物监测仪器需要更大的平台来容纳，它们可能需要更可靠的电源、额外的数据采集和通信设备，可能还需要不同的运行维护计划。这些因素会增加资金和运行维护成本。

最后，决定海上监测站<sup>⊙</sup>放在哪里，还应该考虑项目寿命期内收集数据的潜在价值。像通常陆上项目所做的一样，将主要监测站放在预计风力机排布中，以提高

---

⊙ 原文中此处是“陆上监测站”，结合上下文，将其改为“海上监测站”。——译者注

风场建模的准确性，但这意味着风力机后面收集的所有风资源数据会受到风力机尾流的影响，从而难以获得准确测量的自由流风速。将监测站置于预计风力机排布的上风向，可以得到用于风电场性能分析的有用数据，且不会明显减小筹建评估的准确性，这是因为海上风资源变化很小。因为开展海上站点资源评估所需的花费、挑战和时间，在刚开始就考虑项目所需的所有数据尤其重要，包括筹建期和后建设期。协调风电项目的设计、许可、工程和运行数据需求将会带来更全面和高价值的监测行动。

## 14.1 海上风环境的性质

海上风环境与陆上风环境存在很多差异。其中之一是开阔水面的表面粗糙度（它决定最低层大气表面的阻力）比大多数陆地表面小得多。数值模型中典型的粗糙度长度假设是  $0.001\text{m}$ ，尽管它会随浪高和风速变化。相比之下，大多数陆地表面的粗糙度长度在  $0.03\text{m}$  到  $1.0\text{m}$  以上（见表 13-1）。水的粗糙度低意味着海上风切变比陆上观测值更低。海上风切变指数平均值一般介于  $0.07 \sim 0.15$ ，而陆上是  $0.1 \sim 0.6$ （见表 10-3）。湍流通常也更小些。

另一个不同是海上表面温度变化的日曲线比陆上的波动小，这是因为水比土壤的热容量大得多，因此可以使温度在一天中更加稳定。这个特点也会使大气稳定性和风切变的变化更小。而在陆地上，平均风切变昼夜之间变化非常大（见图 11-3），这个特点与海上显著不同。一般来说，热带水中的平均风切变指数（ $0.07 \sim 0.10$ ）小于温带和寒带（ $0.10 \sim 0.15$ ）。这是因为在热带，水更温暖，大气全年接近中性稳定。而在较冷气候下，气温和水温的季节相对变化改变了稳定性和风切变，从而使平均风切变整体增高。

由于没有地形变化，海上风况和其他气象条件在空间上常常更一致，尤其在距离陆地  $5\text{km}$  以外的地方。这对风电项目开发来说很有益，因为这意味着无需建更多监测站点就可以准确描述项目区域内的风资源特点。即使这样，也可能出现极其复杂的风现象。以下举例说明。

### 1. 山脉和岛屿阻挡

作为障碍物，沿海山脉和岛屿会对顺风 and 逆风都产生低风速区域。根据大气条件和障碍物大小，这种效应可在海上延伸数千米。图 14-1 显示了美国夏威夷 Maui 岛上山脉的阻挡作用。

### 2. 间隙流

沿海山脉和岛屿之间或周围的间隙可以将风聚集起来并产生很高的海上风速。图 14-1 显示了 Maui 岛、Lanai 岛和 Molokai 岛之间这样的通道。这种例子还有很多，有些名字人们很熟悉，例如法国南部的 Mistral<sup>⊖</sup>，穿过直布罗陀海峡的 Levant 等。

⊖ Mistral 指法国南部干冷而强劲的北风或西北风。——译者注

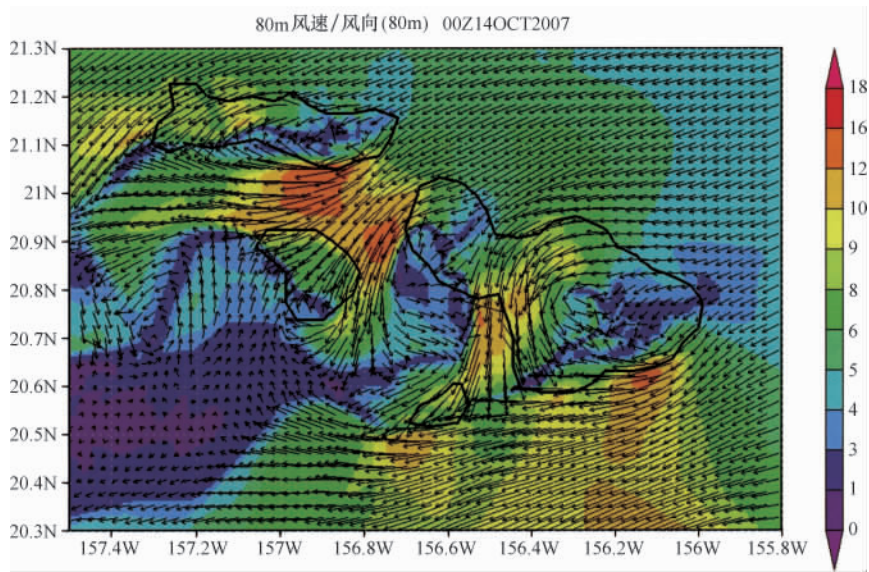


图 14-1<sup>⊙</sup> 夏威夷群岛上 Maui、Lanai 和 Molokai 岛附近 80m 高度风速风向的数值模拟，表现了山体阻挡（蓝色和紫色区域）和通道（红色区域）效应。注意用箭头表示的风向如何受岛屿上风向高压和背风向低压影响而发生偏转。（来源：AWS Truepower）

### 3. 沿岸障碍急流

当天气条件有利于产生几乎与海岸线平行的气流时，地形会将气流聚集起来，产生低空高风速急流。图 14-2 显示了加拿大圣劳伦斯河北岸的这种急流，分别是数值模拟和合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar, SAR）图像。

### 4. 粗糙度变化

当风离开陆地时，粗糙度迅速减小使表面附近产生逐渐增加的风速区域，称为内边界层（Internal Boundary Layer, IBL），它的深度随着离岸距离而增加（见图 14-3）。在 IBL 以上，原始风廓线大部分不受影响。受风向、离岸距离、IBL 增长速率影响，海上风电项目中这种变化可能发生在风力机轮毂高度以上或之下。

### 5. 稳定性变化

除了粗糙度减小，风离开陆地后有时会遇到完全不同的表面温度，从而使热稳定性发生变化。例如，如果温暖的空气移动到更冷的水面，边界层变得热稳定，这通常发生在中高纬度的夏天。它会使空气从表面层解耦，从而使风力机轮毂高度附近的风增强。

⊙ 图 14-1 的彩色图请见封三。——编辑注



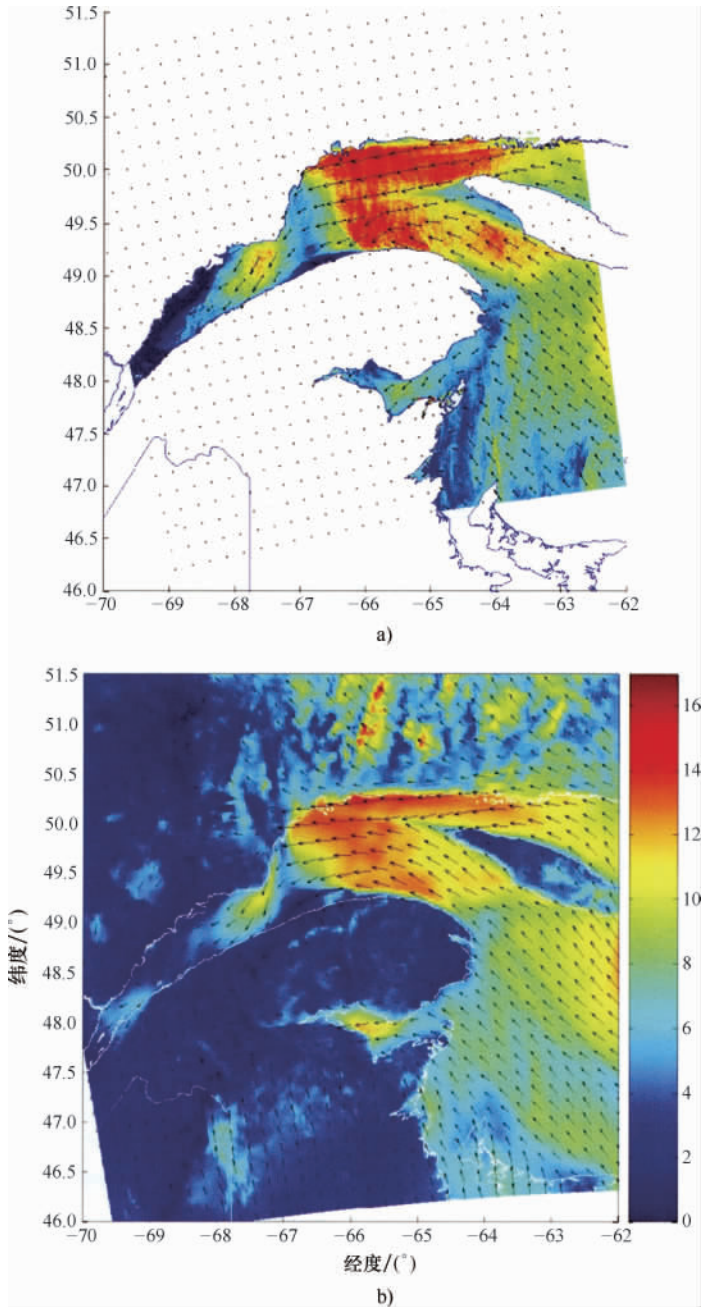


图 14-2<sup>⊖</sup> 圣劳伦斯河同一天同一时间 10m 高度风速风向的 a) SAR 图像和 b) 数值模拟结果。两幅图中北岸红色区域是沿岸障碍气流。(来源: Beaucage 等, 2007<sup>[1]</sup>)

⊖ 图 14-2 的彩色图请见封三。——编辑注

6. 中尺度循环

表面温度和湿度梯度可以产生中尺度风循环，这会影响海上风资源。温度引起循环的典型例子是海风或湖风（见图 14-4）。在典型夏季日，随着太阳加热陆地表面，它上面的空气变暖并上升，使较冷且较潮湿的空气从水面补充过来。（相反的循环是陆风，随着陆地变冷而发生在晚上，但通常很少提及它。）当存在强烈的背景风流场时，海风锋面会从海岸线向陆地最多前进 50km<sup>[2]</sup>。当空气流加强了海风循环时，会产生高速低空急流。例如，研究表明，这样的急流在温暖季节会在美国纽约州和新泽西州的海岸周期性出现。这样形成的大范围强风有利于该区域的海上风力发电（见图 14-5）<sup>[3]</sup>。

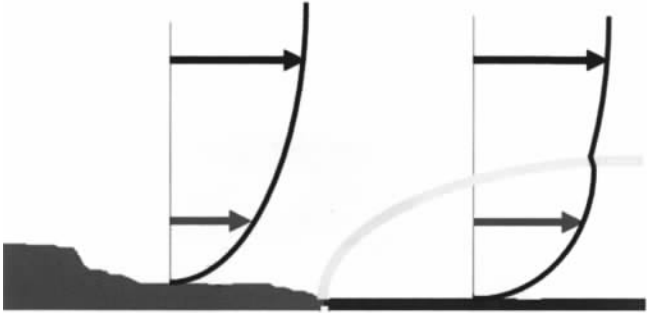


图 14-3 风从陆地向水面运动时风廓线变化图示（从左到右）。最初的风廓线反映了地表粗糙度。随着空气移到更平滑的水面，会产生一个 IBL（见图中的粗灰曲线），并随着离岸距离增加而增加。在 IBL 里面，风速增加，风廓线代表海上风切变模式。（来源：AWS Truepower）

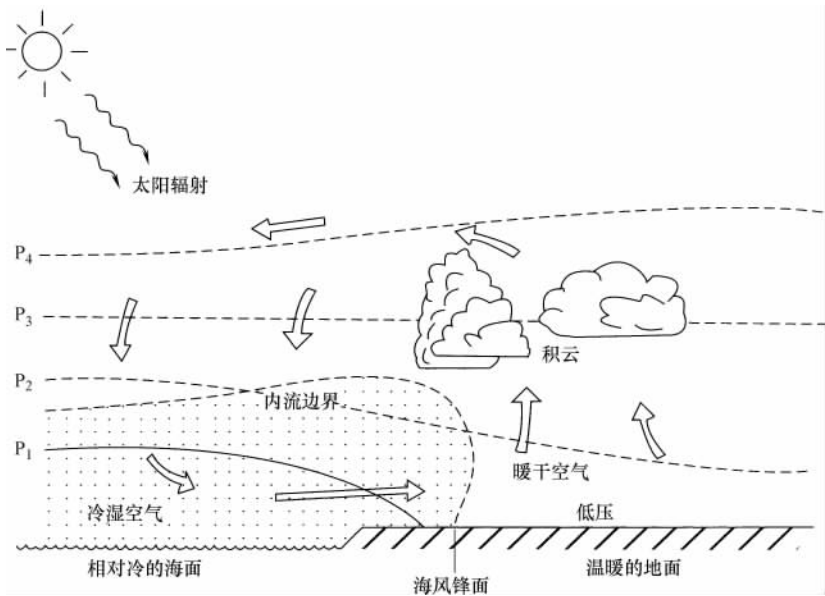


图 14-4 海风循环图示。随着太阳加热地面，地面以上空气变暖并上升（右侧）。这促使气压降低，使冷空气从水面流入。（来源：英国皇家气象学会）

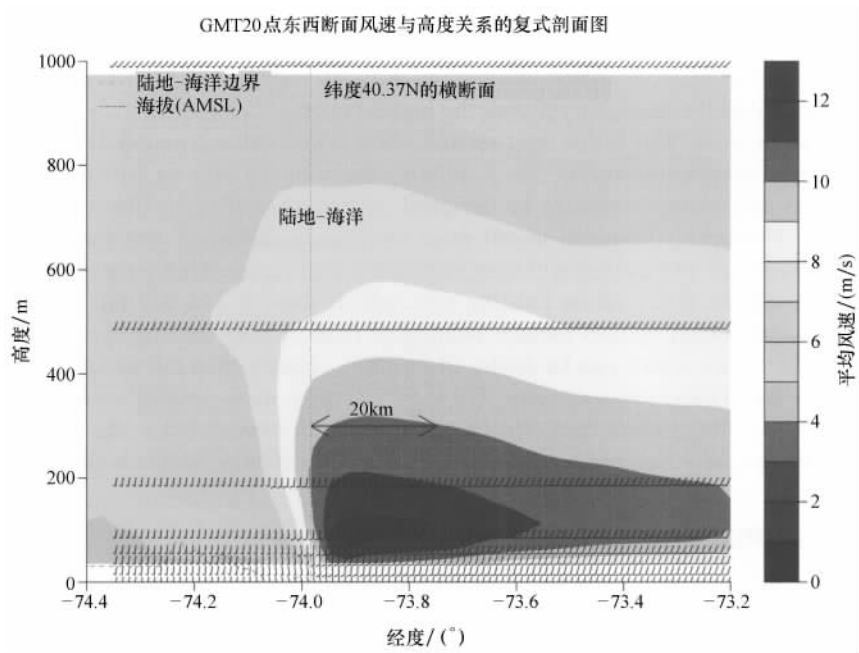


图 14-5<sup>⊖</sup> 美国新泽西州海岸夏季 40 天当地时间下午 4 点, 数值模拟的平均风速 (m/s) 随高度 (纵坐标) 和从西到东经度变化 (横坐标) 的截面图。模拟表明, 当形成这样的海风驱动急流时, 大于 10m/s 的风速可以从海岸附近 50 ~ 300m 高度延伸到海上数十公里处。(来源: Freedman 等, 2010<sup>[4]</sup>)

## 14.2 风资源监测系统

海上风电行业还没有建立海上风资源评估的标准方法。即使在海上风电已经运行 20 多年的欧洲, 项目采用的测量方法也多种多样, 包括在轮毂高度的测风塔上安装风速计、独立光雷达, 有些情况下甚至根本不进行现场测量。

尽管实际做法各种各样, 但装有仪器的固定高塔仍然被认为是置信度和准确度最高的方法。但这样的监测塔花费非常高, 一般超过 2 ~ 3 百万美元, 有些甚至高达 1 千万美元, 其原因在下节介绍。而设计、获得许可和建设也会耗费数月。因此, 很少有项目开发愿意建设多于 1 个这样的塔, 他们更倾向于选用替代方法。一种可能的选择是将塔安装在离项目区域不太远的已有建筑物上。其他选择包括浮动或固定遥感系统 (主要是 Lidar 和 Sodar), 这些都比高塔便宜得多, 另外还有卫星雷达测量。目前, 这些选择被认为是专用高塔的补充, 而不是它的替代物, 但是未来, 尤其是雷达可能成为海上风资源评估的主要手段。

⊖ 图 14-5 中, AMSL 意为 Above Mean Sea Level, 即平均海平面以上。——译者注

14.2.1 专门建设的测风塔

迄今为止，欧洲大多数用于风资源评估的海上测风塔都是专门建造的自立式桁架结构，如图 14-6 所示。想想它的塔高等于水上和水下高度之和，就可以理解这种塔为什么这么昂贵。因此，置于水下 30m 深、水上 80m 高的气象塔的实际高度是海床以上 110m。此外，与水相接部分必须能够抵挡强烈的海洋洋流和波浪。水比空气密度大 800 倍，因此典型的潮汐流，假设速度为 2m/s，其力量相当于 57m/s 的风速，相当于 3 级飓风。暴风雨期间，海浪可以产生的力量更大；气候寒冷时，还要在结构设计中考虑覆冰影响。以及风和冰对水上结构部分的可能影响，其结果是海上测风塔必须巨大且底座牢靠固定在海底上。



图 14-6 a) 北海风电项目海上监测塔；b) 北海风电项目测风塔图示。b 图左侧的横梁组装截面图说明加固横梁结构设计。（来源：Eecen PJ, Branlard E. The OWEZ Meteorological Mast. Analysis of mast-top displacements. NoordzeeWind report. Report OWEZ\_R\_121\_mast\_top\_movement. pdf)



图 14-6 (续)

海上测风塔一般安装的仪器与陆上的很类似，包括风速计、风向标、气温和气压传感器，但可能需要使用航海级型号。此外，测风塔和平台上可能还装有监测风和波浪引起偏差的运动传感器，这些都会影响风速测量，还有许多测量洋流、浪高、水温和其他参数的仪器，甚至包括对鸟类活动的监测。这些因素使海上测风塔变成一个给风电项目设计和许可申请提供重要数据的海洋-大气-野生生物全面监测系统。

海上测风塔的风速计配置一般与陆上推荐使用的有些不同。通常每个监测高度装有三个或者更多风速计（至少每个塔面一个），而不是只有两个。增加这些冗余配置的目的是为了更全面的数据覆盖，而且可以减少维修量。此外，每个高度有三个风速计（相互间隔  $120^\circ$ ）可以保证每个风向至少有两个传感器测量，以减小巨大塔体对风测量的影响。

自立式海上监测塔的一个主要挑战是它巨大的表面宽度。为了减少气流畸变对测量的影响，IEC 导则推荐桁架塔上传感器安装的最小间隔是 3 ~ 4 个表面宽度，取决于结构孔隙度。要想在每个监测高度都达到这个标准不太可能。尽管如此，为达到足够的仪器间隔，需要横梁比通常安装在陆地测风塔上的更长。它们需要特别加固以维持结构稳定，如图 14-6 所示。图中的测风塔横梁设计成旋转至垂直于塔体，以方便维修人员到达横梁尾部维护仪器。横梁用与塔体连接的金属拉线固定。

海上测风塔的设计和安装通常比陆上塔费时更长。一般来说，需要一些筹建研究来获得必要的许可。需要进行多种气象、海洋和地球物理研究来描述塔体将会面临的环境条件，以及海底或湖底的地质环境。

如图 14-7 所示，安装北海海上气象监测塔的 FINO 1 号研究平台需要多种船舶和设备。为进行这一特殊安装，需要首先将桩基结构放低到海床，然后将桩穿过基地的桩基套，并用液压锤把它打进海床。再用水泥将桩和基底粘合起来。接下来，使用起重船安装已装有部分测风塔的平台，并采用灌浆固定。最后，使用自升式驳船起重机安装测风塔的其他部分。

FINO 1 塔只能代表建造海上塔体的一种方法。根据平台和测风塔的特点，可以采用很多其他方法。例如，可以使用起重拔杆安装桁架塔，把它伸到要安装的塔体部分的上部，并装备滑轮，将下一部分塔体起吊到位。

海上监测塔在运行期间很容易受到风 and 海浪影响而产生一定程度的倾斜。尽管以前研究发现这种位移对风速测量影响非常小<sup>[5]</sup>，但对某些具体测风塔的影响取决于站点设计和仪器选择。因而，需要谨慎地直接测量这种偏差，用于定量分析对风速的影响。为此应考虑在每个监测高度安装多轴加速计。

#### 14.2.2 地表遥感系统

和陆上一样，地表遥感技术，主要包括 Lidar 和 Sodar，是海上传统塔式测量的有益补充。装到测风塔上之后，它们可将风资源测量从测风塔高度提升到风轮扫掠面的顶部。随着遥感的使用和人们对它的接受程度的提高，海上风电开发商越来越



图 14-7 使用自升式驳船（左侧）和起重驳船（右侧）安装 FINO 1 海上研究平台。（来源：FINO 1 research platform, Copyright Bilfinger Berger Civil, Germany）

转向将这些设备（主要是 Lidar）作为独立的风况监测工具。随着使用遥感进行功率曲线验证等应用的增加，这种趋势还在进一步增强。因为 Lidar 和 Sodar 系统比高塔更小更轻，因此它们的安装成本要低得多。正因为这个原因，开发商决定投资建设塔体之前，通常先用它们得到项目区域风资源的最初指标。

本节将概述地表遥感的多种应用，包括垂直和侧扫描 Lidar 和 Sodar。卫星雷达等其他遥感技术将在本章后面讨论。

### 1. 垂直风廓线雷达

近年来，海上使用垂直风廓线雷达越来越多。雷达在海上比在陆地上更为人们广泛接受，因为海上没有地形变化且表面粗糙度低，对于定义风力机功率曲线的标准来说，它与转杯风速计更一致。

雷达可以安装在包括自升式驳船的多类固定平台上。但必须小心放置和安装，以确保准确性和数据质量。具体要求部分取决于系统类型。一般来说，雷达应该放在不受平台其他设备及仪器（如监测塔、维护建筑和风速计及风向标等运动设备）干扰的地点。还需要方便到达，以进行周期性维护。另外，有些雷达器件使用机载气象传感器作为数据处理的输入，必须将其很好暴露于环境。

尽管在固定平台上安装雷达比建高塔便宜，但仍然很昂贵且费时。一种有前景的替代方法是将雷达放在浮动平台或浮标上（见图 14-8）。理论上，这样比固定平台便宜得多，还可以安装在许可约束较少的深水中。和陆上移动雷达一样，浮动雷达也可以到处移动进行风资源现场勘探和抽样检查，也可对在运行中的风电项目进行性能测量。随着雷达技术的发展和业内接受度的提高，浮动雷达将会大大有益于海上资源评估。

有些公司正在开发浮动雷达，少量系统已经有市场供货。然而，考虑到该技术带来的挑战（包括运动补偿或修正，电源集成和系统整体可靠性），在它们被完全

接受为与塔式测量等同之前，系统可能还需要大量验证和测试。

## 2. 侧扫描雷达

侧扫描雷达与垂直风廓线雷达运行的物理机制一样，但从字面上看，激光束还可以指向侧面，使它可以进行半球扫描。这项技术对海上资源评估的潜在优势在于，侧扫描雷达扫描范围足够宽，可安装在项目区域外的陆上或方便的海上结构上。从这个优点看，该装置可以得到区域内最高至风力机轮毂高度及以上的三维风速网格。目前商业可用的侧扫描雷达最大范围是 4 ~ 15km，很有发展前景。然而将侧扫描雷达用于风资源评估仍是这项技术较新的应用。因此，将它完全用于风资源评估之前还需要更多验证。



图 14-8 含有 Catch the Wind 的 Vindicator 雷达的 WindSentinel 水上雷达系统，安装在 AXYS Technologies 开发的 NOMAD 浮标上。（来源：AXYS Technologies）

## 3. 声雷达（Sodar）

声雷达系统已经被安装在海上固定平台上，用于风资源评估和风能研究（见图 14-9）。声雷达海上运行有很吸引人的特点，例如电源需求适中、可靠性好、成本较低等。然而，声雷达易受声音干扰影响。数据质量会受到风穿过结构组件的声音、语音导航以及海浪和野生生物的噪声影响。因而，声雷达的商业浮动版的开发还没有达到光雷达的水平。虽然声雷达对某些海上测量是一个可行选择，但光雷达的主导地位仍将持续强化。





图 14-9 a) 安装在美国纽约州沿海 Ambrose Light C-MAN 站点的 Scintec 雷达。(来源: AWS Truepower); b) 美国南卡罗莱纳海上一台 Second Wind 声雷达正在往美国海岸警卫队 (U. S. Coast Guard) 平台上吊装。(来源: Second Wind)

### 14.2.3 使用已有的海上建筑

某些情况下, 可以利用已有建筑来安装海上测风塔和遥感系统。假设站点风况能恰代表计划项目区域的风况, 且建筑物在不影响自身运行的情况下能支持期望的监测系统, 那么对于海上风资源评估来说, 使用已有海上设备比专门建造平台的花费会低很多。暴露点的灯塔, 美国沿海海洋自动观测网络 (Coastal-Marine Automated Network, C-MAN) 台站和其他类似站点, 钻井平台, 甚至小而低的外围岛屿等都可用于此目的。

使用这种方法的一个例子是 Cleveland Crib, 它在伊利湖岸边为美国俄亥俄州克利夫兰市提供主要的市政用水 (见图 14-10a)。2005 年在它顶部安装了有三层仪器的 30m 单杆监测塔, 用于支持湖上风电场开发。最近, 在它的上面又安装了光雷达设备。

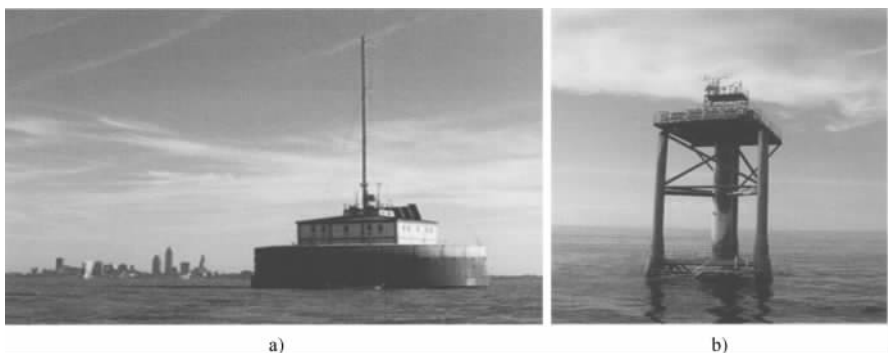


图 14-10 a) 安装在 Cleveland Crib 设备上的监测塔 (来源: EcoWatch, Ohio); b) Ambrose Light C-MAN 站点安装了一套风资源评估设备。(来源: AWS Truepower)

另一个例子是美国纽约长岛海岸的 Ambrose Light C-MAN 站点（见图 14-10b）。它由美国国家航标数据中心所有并负责维护，该 C-MAN 站点安装了风速计和声雷达系统，用于监测纽约和新泽西州沿岸大西洋的海上风环境特征。

通常，使用已有建筑的重要挑战是它可能会影响风况测量。诸如灯塔、钻井平台等大型建筑会引起周围风流场的明显畸变，根据形状、风向和测风系统位置的不同，会减小或加大观测风速，这些变化有时可以估算出来，并通过计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）模型部分消除，但不管怎么说，它仍会影响修正测量的准确性。

#### 14.2.4 浮标气象站

浮标气象站对海上资源评估有很多用处。首先，在开发阶段安装容易，与固定平台相比，受到的准许限制更少，因而可用于前期场站评估，并有助于建立地面气象和海洋测量的长期基线<sup>①</sup>。之后，如果建造了固定平台，可以将浮标和平台的测量结果结合起来，从而更全面地评估海洋风环境。其次，浮标气象站也可当作海洋参数数据的主收集站，包括海浪、洋流、水平面、温度、盐度等，可以减少使用固定平台测量这些参数的需求。最后，随着固定主监测站的建立，可以在项目区域内安置一个或多个浮标气象站（或重新安置）来补充风资源评估。

浮标气象站的基本大气监测应该包括风速、风向（在水面至少 3m 以上，使用冗余传感器）、气压、大气和水体表面温度。浮标气象站应包括随身数据采集系统、电源和能至少每两周进行一次数据传输的通信包。传输数据时把 GPS 位置读数包含在内，将有助于业主在浮标从系泊处松开并漂移的情况下追踪浮标。

#### 14.2.5 数据记录和通信系统

海上数据记录和传输与陆上的大致相同：采集数据并把它们临时存储在数据记录器中，然后远程提取，如果不行就到现场提取。因为巡查海上平台所需花费和时间较多，因此推荐使用额外冗余，以确保数据采集和远距离传输尽量可靠。应考虑配备第二套平行数据采集系统作为备用。此外还推荐在现场安装计算机或其他冗余数据存储设备，以便一旦发生长时间通信失败时提供备用存储。如果使用计算机，应该将其连接到网络中不同的监测系统。如果安装冗余、高容量数据存储时（如磁盘阵列），计算机可作为所有联网设备数据的可靠存储库。此外，若安装合理，计算机可以为远程用户连接设备提供一种冗余手段。

高可靠通信对传输、接收数据和监测海上仪器的运行状态等是必不可少的。因此，推荐所有海上监测仪器都安装冗余远程通信和控制系统。通信系统还必须有足够的带宽或速度，来支持传输数据所需的容量。假设有许多海上项目点位于移动网络覆盖区域之外，那么移动通信就不太可行。卫星连接也是一种可能方法，但是由

---

<sup>①</sup> 需要注意的是，结冰严重的环境中，可能需要在冬天撤下浮标气象站。数据流的这种缺失会减小它的一些优势。

于带宽限制、数据传输上限和成本等原因，可能不适于传输大数据文件。

点对点无线电连接通常是传输大数据文件的最好方式，它给海上系统提供了高速远程连接（低反应时间）。这种技术在陆上资源评估中很少使用，它采用一对相互直接指向的定向天线，将陆上基站计算机与海上平台远程计算机连接（见图 14-11）。通过授权或未授权的频带，天线在两台计算机之间形成高带宽的无线网络连接。文件可以迅速从远程计算机传输。与商业移动或卫星连接不同，它没有那些强加到设备上的数据传输限制。这种方法要求基站位于海上天线的覆盖范围内，并在清楚视线之内。

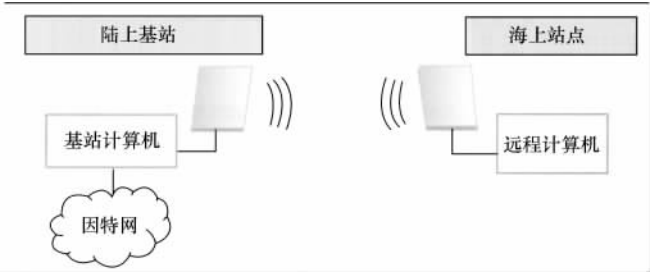


图 14-11 一种海上监测站和陆上计算机之间点对点无线连接示意图  
(来源：AWS Truepower)

14.2.6 电源

很多海上平台没有联网电力，因此通常需要独立电源。这限制了平台所能支持的监测仪器数量和类型，尤其是平台面积、载荷考虑以及其他仪器都会限制电源的可用空间。多数海上电源包括发电系统（光伏电池板、小型风力机、燃料电池、发电机，或它们的组合）和深循环蓄电池组。电源的设计容量和构造受连接设备的影响，包括传感器、数据记录器和通信系统，还有期望传输频率、正常运行时间和系统无人照管时的运行时长。某些情况下，电源也会影响许可的获取，尤其是在需要将柴油、汽油或其他燃料运送到平台并储存的情况下。

安装在监测塔上的标准仪器和它们的数据记录器耗电量很小。更大的压力来自遥感系统，尤其是光雷达。尽管制造商不断努力减少器件的耗电量，但对海上平台来说，光雷达仍占用电源需求的很大部分。光雷达所需的功率随设备和运行条件而异。通常，在极冷或极热天气时期，光雷达的随身温度控制系统需要的功率更大。有些光雷达器件在冬天会用“外套”进行热隔离，以调节器件温度。

除了风资源评估系统，平台上其他仪器，如警示灯、导航辅助系统、生物监测仪器（如雷达），以及海洋环境传感器等，在确定整体功率需求时都必须考虑。

14.3 海上系统的运行维护

不管使用什么样的监测系统和平台，资源评估中收集数据的置信度取决于是否

有有效的运行维护计划。这些计划的原则对海上和陆上都是一样的。然而，海上环境使运行维护的挑战更大且成本更高。下一节重点说明海上监测站的典型运行维护与陆上监测站的区别。

### 14.3.1 监测站巡查

巡查海上监测站通常需要小到中型作业船，取决于开展活动的范围。冬季寒冷天气时，可能需要使用破冰器具。前往大站点时，尤其是远海，最好使用直升机（假设监测站上有合适的直升机着陆平台）。直升机减少了路上时间，从而增加了在监测站作业的时间。

无论使用什么方法都需要关注天气，当计划巡查海上监测站时，咨询天气和海情预报非常重要。一般来说，从作业船登上海上平台的最大允许浪高是 1.5m；当人员或仪器需要在船只与平台或其他海上建筑之间转移时，能耐受的海浪可能更小。直升机可以飞过海浪，但易受大风影响。因为这些原因，一年中大风和强风暴时期很难找到现场巡查的机会（冬季，对于多数海上风电开发区域）。如果可能，主要维修活动应该安排在风况和海情都比较平稳的月份。

### 14.3.2 运行维护程序

海上监测站的许多维护程序与陆上监测站一样，但更复杂且成本更高。另外，多数海上测风塔不能像陆上经常使用的拉线斜拉塔那样放倒。这意味着所有登塔作业都必须由有资质的登塔人员完成。他们安全有效完成该工作的能力取决于现场条件。

监测站例行维护的工作量取决于监测仪器。一般情况下，带有标准气象传感器和数据记录器的自立式铁塔所需的维护量最少。和陆上情况一样，建议定期更换风向标和转杯风速计（不低于每 24 个月一次），把它作为预防维修方案的一部分。光雷达和声雷达通常比监测塔需要的现场维修更频繁，尽管生产商会采用专为适应严酷和遥远海上环境的系统，但是现场维修间隔还是需要缩短。光雷达和声雷达的定期维护包括补充洗窗液、更换雨刮片、去除鸟粪，还需要替换干燥剂以控制湿度。

海上电源也需要定期维护。在无人平台上，鸟类喜欢聚集在可达到的横梁上。因此，在使用光伏板的地方需要监测其输出，并与日射强度表读数比较，判断光伏板是否已经比较脏污。建议对所有重要仪器都考虑驱鸟。如果没有这类措施或者措施无效，可能就需要时不时人工清洁光伏板和其他设备。当发电机是电源系统的组成部分时，作为主要或应急备用电源，就不仅需要补充燃料，还要定期维修，例如更换机油，可能还需要大修发动机，这取决于是否经常使用。如果电源的蓄电池放在密闭空间中，那就需要采取预防措施，因为它们会给空气质量带来危害，因此需要额外的安全培训和设备（例如空气质量监测仪）。

运行期间，必须定期分析数据来监测传感器状态。此外，建议监测站传输的数据包含塔上辅助设备的状态指示，例如警示灯和电源。监测这些数据可以确认系统

运行是否正常，并有助于规划维护。

因为巡查海上监测站进行现场维护成本高昂并有难度，建议现场维护时带足重要设备备件。对于更换交付提前时间较长的设备更是这样，例如经过标定的风速计。

## 14.4 卫星微波传感器

由于地表风监测系统成本不菲而且不方便，人们很自然会对其他可能的海上风资源测量方法产生兴趣。首要备选项是卫星微波传感器，尤其是微波辐射计、散射仪（SCAT）和合成孔径雷达（SAR）。这些设备的运行原理是风产生风波，从而影响海洋表面粗糙度。粗糙度等级，尤其是随风立即形成的小水波的尺寸分布<sup>①</sup>，反过来与微波辐射量或不同频率的地表反射量有关。主要用浮标气象站的风速测量值作为比较标准，研究人员已经开发了风速测量值与不同类型和频率带微波观测值之间的半经验关系式。作为这项研究过去 20 年的成果，用各种仪器测量的大量海洋表面风速数据已经可以使用<sup>[6]</sup>。

不使用电磁波频谱的其他部分而使用微波的主要优点在于，它们在白天和晚上一样，可以穿透大多数云层，与频率有关。此外，与示踪云卫星不同，微波传感卫星测量的是近表面风速。然而，卫星传感器的覆盖范围、空间分辨率和重访频率<sup>②</sup>变化很大。辐射计和 SCAT 比 SAR 覆盖大片区域的频率更高，但空间分辨率却更粗糙。SAR 可以达到更高的空间分辨率，但由于可用的 SAR 图像更少，所以空间覆盖范围更有限。

因为它们不直接测量风速，而是根据海洋表面特性推算，所以对于资源评估，卫星微波观测不可能达到替代测风塔、光雷达或声雷达所需的准确度。一个重要局限是微波信号是根据离海平面大约 10m 高的浮标测量值校准的。得到的风速估算值必须再转化到风力机轮毂高度。这个过程的每一步都包含估算和假设，从而影响准确度。然而，由于数值大气模式的特点，卫星微波数据仍是一种很好的现场勘探工具，与高质量地表风测量值结合起来，可用于描述项目区域内风资源的变化。

### 14.4.1 传感器类型

表 14-1 列出了许多广泛使用的卫星微波传感器。因为每年都有改进传感器的新型卫星问世，所以这个表也经常变化。下面介绍三类主要仪器，分别是微波辐射计、SCAT 和 SAR。

#### 1. 被动微波辐射计

SSM/I、TMI、AMRS-E 和 WindSat 等被动微波辐射计，以很多频道记录地表辐

① 微波传感器探测的信号对与微波波长同样大小的波浪最敏感。对多数卫星微波设备，范围从 1mm 到几厘米。

② 重访频率指卫星每天经过同一位置范围的次数。

射。（称为“被动”是因为它们与雷达不同，不从地表返回信号，而只是被动观测辐射。）根据这些测量值，可以得到水平分辨率大约 25km 的全球每日风地图。这些地图可以加工成月平均、季平均和年平均风速图。因为风速估算的准确性受到传感器视野中存在的地面影响，所以在海岸线 25km 以内有效观测受到限制，但多数海上风电项目却都在这类地点。

表 14-1 提供海洋表面风速数据的卫星微波传感器（来源：Beaucage 等，2008<sup>[7]</sup>）

卫 星	所属机构	发射年份	使用设备	雷达波段	分辨率
SSM/I	NASA	1987	微波辐射计 <sup>①</sup>	K、Q、W	25km
RADARSAR-1	CSA	1995	SAR <sup>②</sup>	C	≈25m
ERS-2/SAR	ESA	1995	SAR <sup>②</sup>	C	≈25m
TMI	NASA-JAXA	1997	微波辐射计 <sup>①</sup>	X、K、Q、W	25km
Quick SCAT/Sea Winds	NASA	1999	SCAT	Ku	25km
ENVISAT/ASAR	ESA	2002	SAR <sup>②</sup>	C	≈30m
AMRS-E	JAXA	2002	微波辐射计 <sup>①</sup>	C、X、K、Q、W	25km
WindSat	NASA	2003	微波辐射计 <sup>①</sup>	K、Q	25km
ASCAT/METOP-1	ESA	2006	SCAT	C	25km
ALOS	JAXA	2006	SAR <sup>②</sup>	L	≈25m
RADARSAT-2	CSA	2007	SAR <sup>②</sup>	C	≈25m

注：CSA（Canadian Space Agency）—加拿大太空局；ESA（European Space Agency）—欧洲航天局；JAXA（Japan Aerospace Exploration Agency）—日本太空发展署。

- ① 被动微波辐射计通常以几种不同频率记录地表辐射。
- ② 星载 SAR 有不同的光束模式，每种像素大小不同。

2. 微波散射仪（SCAT）

微波 SCAT 是一种雷达。它包含向地表发射微波脉冲的发射机，以及接收回波的接收机。（多数 SCAT 的发射机和接收机使用同一天线。）可以使用经验关系式将反向散射信号与 10m 高度风速关联起来。降雨会污染来自 SCAT 的信号，尤其对那些采用更小波长（频率更高）的信号，但是数据中的降雨标记使分析人员可以去掉这些污染数据。主要的 SCAT 每天覆盖超过 90% 的海洋表面，空间分辨率约为 25km。与被动微波辐射计一样，它的覆盖面积和质量在海岸线附近比较有限。然而与被动微波辐射计不同的是，SCAT 还可以测量风向，这对资源评估是一个重要优点。

3. 合成孔径雷达（SAR）

SCAT 主要针对全球海洋风地图设计，而 SAR 系统则用于多种研究目的，例如覆冰特征和绘图、油泄漏检测、船舶探测，以及风和海浪测量<sup>[8]</sup>。与 SCAT 一样，SAR 也分析反向散射信号的特征，但它们允许移动发射机/接收机模拟更大的天线，使用这种信号处理技巧，可以达到更精细的空间分辨率（可达 10m）。与 SCAT 一样，SAR 使用经验关系式从反向散射信号得到表面风速。然而与 SCAT 不同的是，SAR 系统不能直接测量风向，尽管有时候它可通过大气涡流或风纹的出现进行推断。更常见的是，分析人员必须从其他来源获得风向数据（例如表面测

量、其他卫星传感器或数值天气模型)。

与其他卫星微波传感器一样, SAR 系统可以提供特定时间地表风的快照(或图像)。因为图像取回必须向通用传感器请求, 所以不同区域的 SAR 图像存档数量各不相同。此外, 因为它们覆盖的区域更小(最多数百千米宽), 与其他 SCAT 和微波散射仪卫星相比, SAR 卫星经过同一地点的频率要低得多。这引起的结果就是, 与 SCAT 和微波散射仪不同, SAR 系统不能提供网格数据, 因此需要某些从原始图像推导风速的雷达影像处理技术。

#### 14.4.2 使用卫星微波传感器进行风资源评估

来自微波辐射计和 SCAT 的风资源地图能提供某区域风资源的初步印象, 这很有用。它们的优点是可以免费获取, 并提供卫星每天或更高频率的全球覆盖。来自 SSM/I 微波辐射计的大量存档数据集从 1987 年开始就可以获得。然而, 一般认为从 SCAT(例如 QuikSCAT)推导的风速比来自微波辐射计的更准确。虽然 QuikSCAT 数据集的记录期是 1999~2009 年<sup>①</sup>, 没有 SSM/I 那么长, 但对于估算相对可靠的长期平均风速是足够的。一些研究表明, QuikSCAT 数据的瞬时风矢量的准确度(方均根误差)大约是 1.0~2.0 m/s, 可能比数值天气预报模式好一些, 但比风速计、光雷达或声雷达差些。图 14-12 显示了可以从 QuikSCAT 数据得到的全球海洋表面风资源地图的两个例子。

另一方面, 卫星 SAR 影像给项目资源评估提供了不错的前景, 因为与微波辐射计和 SCAT 相比, 它可以达到更高分辨率, 还可以测量海岸线附近的风况(图 14-2a 是 SAR 图像, 显示了圣劳伦斯河近海的复杂风况)。尽管 SAR 空间分辨率原则上可以非常精确, 但实际上斑点等问题使多数应用的网格间距限制在数百米。尽管如此, 这与风电项目中风力机间距还是相当的。因而, SAR 可以给风电场设计提供可实际应用的风资源分布信息。

一些研究表明, 与浮标气象站相比, 由 SAR 得到的风速与来自 SCAT 的风速准确性相近。除了方法本身的局限, 由 SAR 得到风速的效果主要取决于某特定地点可用的 SAR 图像数量<sup>②</sup>。可惜的是, SAR 图像很昂贵。一幅图像的商业价格大约是几百到几千美元, 取决于卫星和经销商, 然而对于统计可靠的年平均风速估计, 需要几十到几百幅图像。(以存档文件形式存储的图像非常便宜, 将来可能通过政府机构或由诸如欧洲航天局或加拿大太空局出资的研究项目免费获得。)

在可预见的未来, SAR 可能会成为现场测量和数值风流场建模的补充, 但不能取代它们。如果 SAR 图像价格降低, 并且处理大量图像的方法得到改进, 那么它的重要性将可能会提高。SAR 一个潜在的有效应用是绘制海上风电场运行的尾

<sup>①</sup> NASA PO. DAAC 网址: <http://podaac.jpl.nasa.gov/>。法国海洋开发研究所 (Ifremer) 网址: <http://www.ifremer.fr/cersat/en/data/overview/gridded/mwfsqcat.htm>。QuikSCAT 从 2009 年 11 月停止运行。

<sup>②</sup> 对于采样分布良好的 SAR 图像, 平均风速总的不确定性大概减少到图像数量平方根的倒数。

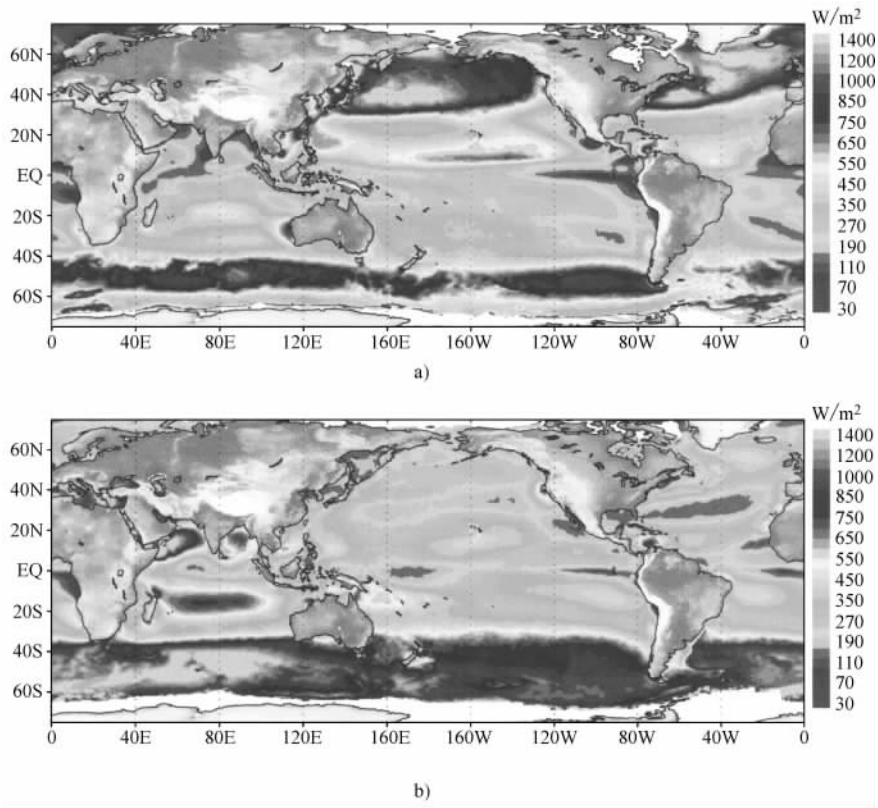


图 14-12 从 QuikSCAT 得到的 a) 北半球冬季（12、1、2 月）和 b) 北半球夏季（6、7、8 月）从 2000 年到 2007 年 8 年时间的平均风功率密度地图。灰阶图对应地形。（来源：Liu 等，2008<sup>[9]</sup>）

流图。海上尾流的影响程度是一个重要问题，随着计划在诸如北海等地建立超大型风电项目，真实尾流的仿真对于数值模型来说仍有很大挑战。

解释来自所有卫星微波传感器的风速时，一定要谨记以下几点：

- 1) 当海洋表面覆冰时，微波传感器不能获得风速，这意味着对于全球某些地方，图像或数据采样无法适当表现冬季风。
- 2) 风速代表特定时刻传感器有效分辨率内的空间平均值，而风速计和地表遥感系统一般测量特定点的时间平均风速。这个区别意味着卫星测量值极少与地表测量值准确匹配。
- 3) 大多数卫星都是极轨道的，即每天特定时间经过同一地点。例如，QuikSCAT 卫星一天两次经过加拿大东部，大约是 UTC<sup>⊙</sup>10 点和 22 点。因此，从这些卫

⊙ UTC 是 Universal Time Coordinated 的缩写，意为协调世界时。又称世界统一时间，世界标准时间，国际协调时间，是以原子时秒长为基础，在时刻上尽量接近于世界时的一种时间计量系统。——译者注



星不能得到完整的风速日内变化。幸运的是,海上风速日内变化通常比陆上小得多,因此,由于采样有限导致的误差通常很小。

### 参 考 文 献

1. Beaucage P, Glazer A, Choisnard J, Yu W, Bernier M, Benoit R, Lafrance G. Wind assessment in a coastal environment using the synthetic aperture radar satellite imagery and a numerical weather prediction model. *Can J Remote Sens* 2007;33:368–377.
2. Stull RB. Introduction to boundary layer meteorology. USA: Kluwer Academic Publishers; 1988. p. 666.
3. Colle BA, Novak DR. The New York Bight jet: climatology and dynamical evolution. *Mon Weather Rev* 2010;138:2385–2404.
4. Freedman JF, Bailey B, Young S, Zack J, Manobianco J, Alonge CJ, Brower M. Offshore wind power production and the sea breeze circulation (and the offshore low-level “jet”). Atlanta, GA: Presentation given at the American Meteorological Society; 2010.
5. Eecen PJ, Branlard E. The OWEZ meteorological mast—analysis of mast-top displacements. Netherlands: Energy Research Centre of the Netherlands; 2008.
6. Zhang H-M, Bates JJ, Reynolds RW. Assessment of composite global sampling: sea surface wind speed. *Geophys Res Lett* 2006;33:L17714.
7. Beaucage P, Bernier M, Lafrance G, Choisnard J. Regional mapping of the offshore wind resource: towards a significant contribution from space-borne synthetic aperture radars. *IEEE JSTARS* 2008;1:48–56.
8. Jackson C, Apel J. Synthetic aperture radar marine user’s manual. Washington, DC: U.S. Department of Commerce; 2004 p. 464. Available at <http://www.sarusersmanual.com/>. (Accessed 2012).
9. Liu WT, Tang W, Xie X. Wind power distribution over the ocean. *Geophys Res Lett* 2008;35:L13808.

### 深入阅读建议

- Melnik M, Andersen R. Offshore power: building renewable energy projects in U.S. waters. PennWell Corp; 2009. p. 496.
- Peinke J, Schaumann P, Barth S, editors. Wind energy: proceedings of the Euromech colloquium. USA: Springer; 2011. p. 363.
- Twidell J, Gaudiosi G, editors. Offshore wind power. UK: Multi-Science Publishing; 2009. p. 425.

## 第 15 章 风资源评估中的不确定性

只有很好定义风资源评估的不确定性，其结果才是可用的。除非分析人员能提供风资源在具体范围内的置信度，否则就不可能建立风电项目投资的合理经济模型。经济模型由风险决定，对于风电项目来说，风险很大程度上由风资源的不确定性决定。

所有风资源评估的不确定性主要与下列因素有关：风速测量、它们与历史气候的关系、未来气候的可能变化、风切变以及风资源空间分布。本章将介绍这些因素，并给出每种因素的估计范围。此外，还将讨论来自不同源的不确定性的组合方法由它们彼此之间的相关性决定。（注意，除非特别说明，此处涉及的不确定估计用风速的百分数表示，代表正态分布的标准误差。）

本章不讨论风速不确定性和发电量不确定之间的关系，这一关系会随风力机型号、平均风速、风频分布及其他因素等变化。此外也没有考虑风力机性能和损耗的不确定性。这些问题和发电量估算的其他内容将在下一章讨论。

### 15.1 测量的不确定性

测量的不确定性指风速计测量的自由流风速经过数据验证和修正之后的不确定性。它不仅反映处于理想风洞条件运行时的仪器敏感性的不确定性，还包括它们在现场的性能，包括可能受到的湍流和偏离水平风的影响、测风塔和其他障碍物对观测风速的可能影响，以及在验证时可能会忽略的结冰等问题。还有与某些风速计有关的其他不确定性，包括由制造或设计缺陷，或运行中损坏等引起的不确定性<sup>①</sup>。

理想条件下，对于单个风速计，与风速计有关的不确定性（称为传感器响应不确定性）一般估计为 1.0% ~ 1.5%。考虑到它们将用来进行功率曲线测试，因而代表估算风力机输出的约定俗成的标准，可以假设 I 级传感器比其他传感器的不确定性更低些。测量不确定性的其他部分随环境变化。强湍流、明显的垂直风、风速计安装梁过长或影响自由流风速的测风塔影响等其他因素，都会导致不确定性增大。假设数据质量良好，单个风速计不确定性的一般估计范围与本书列出的参考值一致，大约为 1.5% ~ 2.5%。

将安装在测风塔同一高度不同方向的两个传感器数据取平均值，能够减小测量

---

① 现实中明显的制造或设计缺陷的一个实例是“静摩擦碰撞”问题，这是 2006 年 5 月到 2008 年 12 月之间生产的部分 NRG Maximum 40 风速计经历的振动模式。这个问题一般会使平均风速最多减小几个百分点，与没有问题的基准风速计相比，它会产生异常的离散分布<sup>[1,2]</sup>。

误差。对于所有传感器都不处于测风塔遮挡范围的方向扇区的情况，其测量不确定性最多可以减小到 $\sqrt{2}$ （1.414）分之一，意味着组合不确定性范围可减小至 1.1% ~ 1.8%。这个策略也能减小由测风塔影响带来的系统误差风险。例如，两个风速计相互垂直安装，当一个直接对着测风塔上风向时，另一个指向侧面。第一个风速计可以测出自由流风速的减小，而另一个可以测出增加。结果是两个测量值的平均几乎没有偏差。

然而当存在影响两个传感器的明显偏差时，平均带来的优点就减少了。可能的例子包括湍流和垂直风的影响，如果采用同一类型的仪器，那么两个传感器的结果类似。由于这些影响可能很多，所以对于平均只能选择性信任。

## 15.2 历史风资源

这种不确定性强调现场数据（经过 MCP 修正后）代表历史正常水平的准确程度。它与现场数据量、风气候的年际变化、历史参考期长度以及现场数据与长期参考值的相关性有关。再次参考第 12 章的方程式：

$$\sigma_{\text{历史}} \approx \sqrt{\frac{r^2}{N_R} \sigma_R^2 + \frac{1-r^2}{N_T} \sigma_T^2} \quad (15-1)$$

式中  $\sigma_R$ 、 $\sigma_T$ ——分别是参考点（R）和目标点（T）一定时期的年平均风速标准偏差（风气候年际变化的测度）；

$N_R$ 、 $N_T$ ——分别是参考点和参考-目标数据重叠的年数；

$r$ ——基于合适的平均时段（例如日平均）的 Pearson 相关系数；

$\sigma_{\text{历史}}$ ——目标点获取的历史平均风速的不确定性。

如第 12 章的讨论，该方程式做了很多假设，其中最重要的是整个时段内参考数据记录连续，没有因位置改变、仪器、环境等其他因素引起中断或趋势变化。考虑到难以满足参考数据超过 10 ~ 15 年的要求，所以  $N_R$  最好不超过 15。此外，由于季节影响，若目标和参考数据重叠期不到 1 年，最好不使用该方程式。

即使满足这些条件，实际误差也可能严重偏离该方程式。图 15-1 显示了使用 3 个高测风塔数据进行 MCP 不确定性测试的试验结果。其中两个塔的结果（菱形和方形）与式（15-1）的理论曲线基本一致，但第三个塔的误差（空心三角形）比预测值低很多。

历史风况记录表明年平均风速的标准偏差一般介于 3% ~ 6%，取决于位置和数据来源。某些区域该变化可能更大或更小。如果没有对某一区域历史风况数据的完整分析（由于风况测量长期一致性的问题，经常不可能做到），假设该值等于 4% 是合理的。当重叠数据是 1 年，参考记录一般是 7 ~ 15 年时，其相关系数介于 0.6 ~ 0.9，由式（15-1）得到的结果是不确定性范围为 1.6% ~ 2.8%。当缺少合适的参考监测站时，其不确定性就是现场观测值的不确定性（例如，对于 1 年，该值是 4%）。

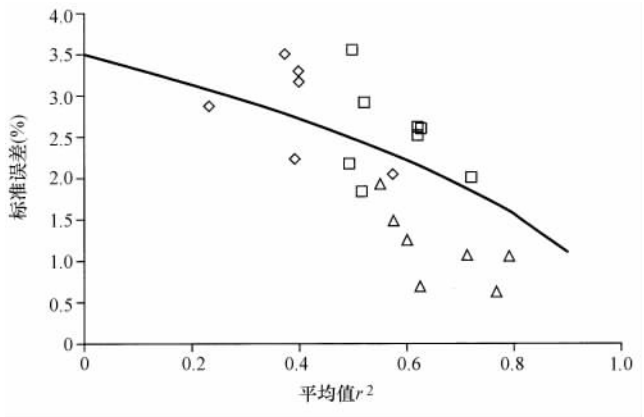


图 15-1 确定位于美国不同地区 3 座测风塔 MCP 不确定性的试验结果。每个点代表根据地面参考点和测风塔 12 个月无约束线性回归的预测平均风速的标准误差。平滑曲线是根据式 (15-1) 得到的理论不确定性，这三个测风塔的年际标准偏差假定为 3.5%。(来源：Taylor M 等，An analysis of wind resource uncertainty in energy production estimates. AWS Truepower, 2004)

15.3 未来风资源

未来风资源的不确定性可分为两个分量，分别由风气候的正常变化和长期气候变化引起。假设这两个分量互不相关，总的不确定性可以由平方和的平方根求得<sup>⊖</sup>，即

$$\sigma_{\text{未来}} = \sqrt{\sigma_{\text{正常}}^2 + \sigma_{\text{气候}}^2} \tag{15-2}$$

对于第一个分量  $\sigma_{\text{正常}}$ ，可以假设使用与估算历史气候不确定性相同的年际变化。由式 (15-1) 可得

$$\sigma_{\text{正常}} \approx \frac{\sigma_R}{\sqrt{N_p}} \tag{15-3}$$

式中  $N_p$ ——用于计算平均值的年数。

它可以是风电项目投资的财务期，通常是 10 ~ 25 年。假设年际变化是 4%，那么不确定性的正常变化部分对于 10 年是 1.3%，对 25 年是 0.8%。

尽管不确定性的气候变化部分更具猜测性，但也不应忽略。根据最新研究（见第 12 章的概述），由于气候变化引起的合理的不确定性范围是 0.5% ~ 2%。该

⊖ 独立误差源的平方和可根据样本数据的方差（标准偏差平方）公式得到。当组合两个大型数据时，组合分布的方差的线性交叉部分会抵消，因为它们对于平均值随机分布，只留下平方项。结果是组合分布的方差等于独立分布的方差之和。若想了解更多信息，请参考统计方面的标准说明。

范围的低值适用于 10 年尺度，高值适用于最长 25 年。

将这两个分量组合，得到 10 年项目期的不确定性是 1.4%，25 年项目期是 2.2%。第一种情况下气候变化分量可以忽略，忽略仅会导致不确定性减小 0.1%。随着时间范围增大，它的重要性也在增加。

需要注意的是，这些不确定性估算忽略了货币的时间值。在现值分析支持风电场投资决策中，风电场发电量，以及利润等，与不远的将来相比，遥远未来的风电场发电量折扣更多。考虑这一点能减弱与气候变化有关的预期经济风险，但是会增加与正常气候波动有关的风险。

## 15.4 风切变

风切变的不确定性也可以分为两个分量：由于可能的测量误差引起观测风切变的不确定性，以及测风塔高度以上风切变变化的不确定性。这两个分量相互独立，因此使用平方和准则。

第一个分量可用下式估算，与第 10 章略有不同<sup>①</sup>：

$$\Delta\alpha_{\text{obs},v} \approx \frac{\log(1 + \sigma_{r,v})}{\log(h_2/h_1)} \quad (15-4)$$

它的分子包括风速比的不确定性  $\sigma_{r,v}$ 。多数情况下，约等于每个高度测量风速的不确定性乘以  $\sqrt{2}$ <sup>②</sup>。因为风速比的不确定性为 1.4% ~ 3.5%（相应的单个风速计不确定性为 1.0% ~ 2.5%），对于上下两个高度分别为 60m ( $h_2$ ) 和 40m ( $h_1$ ) 的情况，风切变指数的不确定性  $\Delta\alpha$  为 0.034 ~ 0.085。

注意，测风塔或其他设备对风速影响的任何变化都会使不确定性增加（假设不能修正）。案例包括安置在最上层的传感器离测风塔顶部太近，传感器横梁没有指向同一方向，以及横梁长度与塔宽的比值变化等。

式 (15-4) 忽略了仪器高度不确定性的影响。高度对不确定性的贡献可用下式估算：

$$\Delta\alpha_{\text{obs},h} \approx \alpha \frac{\log(1 + \sigma_{r,h})}{\log(h_2/h_1)} \quad (15-5)$$

它与式 (15-4) 非常类似，除了风速比不确定性用高度比不确定性  $\sigma_{r,h}$  代替，还增加了风切变指数因子  $\alpha$ 。因为高度都可以在现场准确确定，而  $\alpha$  通常远小于 1，因此这部分的不确定性经常比与风速有关的部分小得多。然而，某些情况下它的贡

① 与本章提到的其他不确定性不同，风切变不确定性表示为幅值偏差，而不是平均值的比例。我们使用  $\Delta$  前缀提醒读者这点区别。这样做的一个原因是风切变指数可能很小，甚至是负值，使得百分比不确定性很难解释。此外，风切变偏差直接转化为轮毂高度风速的百分比偏差 [式 (15-6)]。

② 这是因为假设每个高度风速测量的误差不相关。因而，它们在不确定性中的比率等于每个风速不确定性二次方和的平方根。假设两个风速的不确定性一样，结果是两倍风速不确定性的平方根。

献可能很大（例如有时不可能到测风塔处核实仪器高度），如果这样的话，应该用平方和将其加到与风速相关的不确定性上。

第二个分量测风塔高度以上风切变变化的不确定性更难估算，且随场站变化很大。经验法则是，根据来自非常高的测风塔的数据，AWS Truepower 估算得测风塔之上风切变指数的不确定性是观测到的风切变的 10% ~ 20%，并与地形复杂程度和地表覆被有关。如果观测到的切变指数是 0.20，且地形平坦开阔，则可以假定不确定性是 0.02；如果观测到的切变指数是 0.30，地形复杂，那么不确定性可高达 0.06。（注意，某些情况下，可以使用遥感来降低不确定性。）

将这两个分量组合，得到风切变指数的总不确定性为 0.04 ~ 0.10。对应轮毂高度风速的不确定性用下式估算：

$$\sigma_{v, hh} = 100 \left[ \left( \frac{h_h}{h_2} \right)^{\Delta\alpha} - 1 \right] \% \quad (15-6)$$

结果对相对高度也很敏感，当然切变不确定性也是如此。对于测风塔高 60m，轮毂高度 80m 的情况，轮毂高度风速的不确定性范围是 1.1% ~ 3.0%。对于测风塔高 50m，轮毂高度 90m，不确定性范围的上限增至 6.3%。

## 15.5 风流场建模的不确定性

风流场建模的不确定性<sup>⊙</sup>可以定义为与现场测风塔的观测风速相关的任一点平均风速的不确定性。实际中不确定性的范围可能很宽，简单开阔地形时低至 2%，复杂地形时为 10% 或更高，并取决于使用的模型、模型分辨率、地形和风气候、测风塔的安装位置以及其他因素。

理想情况下，直接用现场风测量值确定不确定性。但需要满足以下条件：

- 1) 项目区域内至少有 5 个，最好是 10 个或更多测风塔；
- 2) 测风塔很好地分布在预计的风力机阵列内，能较好代表风力机将会处于的风况条件；
- 3) 每个测风塔数据充足，能准确比较年平均风速。

计算过程如下。首先，将其中一个测风塔指定为基准测风塔。接下来，使用风流场模型，根据基准测风塔预测其他测风塔处的平均风速。然后计算预测和观测平均风速的误差。将每个测风塔作为基准测风塔，重复上述过程。最后，计算所有误差的标准偏差，从而估算风流场建模的不确定性。

上述条件经常无法满足。那样的话，资源分析人员必须依靠类似站点的经验（最好使用同样的模型）。技术会议资料对此有很好的参考作用。地形复杂程度、地表覆被变化、测风塔安装位置的评估，沿海海风和其他大气循环的可能出现在这

⊙ 本章主要论述与数值风流场模型有关的不确定性；然而，同样方法也适用于其他定量模型。

里都会起作用。

## 15.6 组合不确定性

一旦定义不同的不确定性分量之后，必须以某种方式将其组合，得到整个风力机阵列的平均风速的不确定性。在此之前，需要考虑这些不同的误差源是否相关或不相关。不相关的误差相互独立——一个误差的符号<sup>①</sup>和大小与其他误差的符号和大小没有关系。假设一系列小船漂浮在波涛汹涌的海面。每个小船都在自己的波浪上前进，它的运动与其他船的运动没有关系。而相关性误差彼此之间步调一致。可以用使所有船只同时抬升或降低的潮汐类比。

不确定性不相关会比较好，因为这样它们不用以线性方式累加，而是平方和的平方根。这样会减小组合不确定性。例如，假设测量不确定性和切变不确定性都是 2%，且不相关。那么组合不确定性就是

$$\sqrt{0.02^2 + 0.02^2} = 2.8\%$$

另一方面，如果不确定性相关性很好，则组合不确定性是它们的线性和， $0.02 + 0.02 = 4\%$ ，比之前大了 40%。

人们面临的挑战是确定哪些误差相关，哪些不相关。（一些误差可能部分相关；然而，这种情况的处理通常是将不确定性分为独立分量，要么完全相关，要么完全不相关。）通常情况下，假设单个测风塔不确定性的不同分量不相关，因而可以通过平方和将其组合。尽管这种情况并不完全正确<sup>②</sup>，但它仍是一个好的假设。因此可以将之前讨论的单个测风塔的各个不确定性分量组合成总体范围，见表 15-1。

在进行不同测风塔不确定性的组合估算时，需要更多关注误差相关的可能性。以下是一些例子：

1) 当项目点的测风塔处于相同或类似时期，那么它们的长期平均风速估算的偏差可能类似。

2) 根据历史平均得到的未来风资源的偏差将会等同地适用于项目所有部分，而与资源评估中使用的测风塔数量无关。

3) 如果测风塔位于同一种地形（例如沿着山脊线），而有些风力机位于不同种类的地形（在山坡上），那么风流场建模的误差可能属于系统偏差。

4) 如果风速计都安装在相对盛行风的相同方向（特别需要注意的是每个高度

① 这里的“符号”指该误差的正负号。——译者注

② 这种情况之前曾经提过：所有风速计的湍流或垂直风的偏差可能类似。发生这种情况时，将同一高度的两个风速计的风速平均并不能减小不确定性。另一个例子是，当在最顶上安装的风速计离测风塔顶过近时，可能会高估平均风速和风切变。

只安装一个风速计)，那么铁塔影响对风速测量可能产生持续偏差。

5) 在有些站点，测风塔以上的风切变可能随高度持续变化，导致预测的轮毂高度风速产生系统偏差。

表 15-1 根据本书介绍的指导意见进行安装、维修和分析的单个测风塔各类不确定度一般范围的汇总。每种不确定度范围的解释请参看相应内容（来源：AWS Truepower）

类 型	不确定度(%)
测量准确性(单个风速计)	1.0 ~ 2.5
历史风资源	1.6 ~ 4.0
未来风资源(风电场寿命是 10 年或 25 年)	1.4 ~ 2.2
风切变	0.0 ~ 6.3
风流场建模	2.0 ~ 10.0
总不确定度	3 ~ 13

注：假设不同项之间互不相关，因此总不确定度等于单个不确定度平方和的平方根。

一个测风塔的每个不确定度分量应该与其他测风塔的同类不确定度分量组合起来，根据它们是否相关来决定是使用加权线性求和还是使用平方和方法。赋予每个测风塔的权重应该与它们对总阵列平均风速的影响成正比。确定权重的一种方法是将阵列划分成不同组风力机，每组与一个特定的邻近测风塔关联。这样会产生如下方程式：

对于不确定度不相关的情况：
$$\sigma_{\text{组合}} = \frac{(\sum_{i=1}^M N_i^2 \sigma_i^2)^{1/2}}{N_T} \quad (15-7)$$

对于不确定度相关的情况：
$$\sigma_{\text{组合}} = \frac{\sum_{i=1}^M N_i \sigma_i}{N_T} \quad (15-8)$$

此处是对测风塔总数  $M$  求和； $N_i$  是与测风塔  $i$  关联的风力机数量； $\sigma_i$  是该组风力机对平均风速的不确定度百分数； $N_T$  是阵列中的风力机总数。（此处对来自不同测风塔的预测风速使用了平滑合成方式，不确定性方程自然变得更复杂，但仍然保持相同的一般原则。）

式（15-7）说明，测风塔在风力机之间分布越均匀，那么不确定性的不相关部分就越会减小。图 15-2 用两个不确定度各为 10% 的测风塔说明了这种影响。如果一个测风塔主要影响一半风力机，而另一个测风塔主要影响另一半风力机，则总的不确定性度减少至 7.1%。实际上，假设所有测风塔各自的不确定度都一样（称为  $\sigma_0$ ），且与每个测风塔有关的风力机数量相等，则式（15-7）可简化为

$$\sigma_{\text{组合}} \approx \frac{\sigma_0}{\sqrt{M}} \quad (15-9)$$

这是个人们很熟悉的方程式，它说明一定数量平均值的不确定性会随着独立测量点数量的平方根值减小。对于相反的极端情况，如果所有风力机只与一个测风塔



$i$  关联（例如，因为其他测风塔离风力机太远），那么

$$\sigma_{\text{组合}} = \sigma_i \tag{15-10}$$

这些公式证实阵列平均风速的不确定性不仅受到测风塔数量的强烈影响，而且受它们在预计风力机阵列中的位置影响。它们清楚表明了为什么将测风塔安装在风力机阵列的代表性位置非常重要，这也是我们强调的。

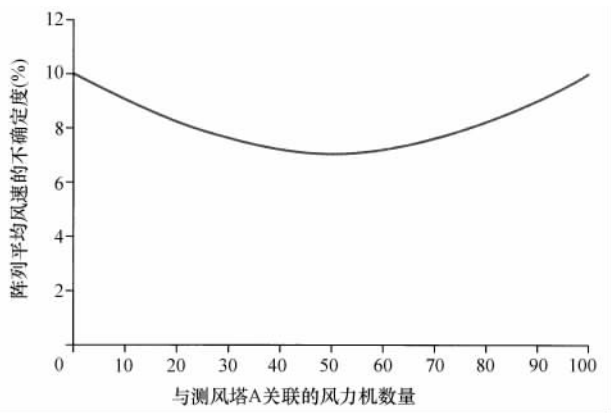


图 15-2 有两个测风塔时，阵列平均风速的组合不相关的不确定性随着与一个测风塔 A 关联的风力机数量的变化。其他风力机与测风塔 B 关联。假设基于单个测风塔的不确定性是 10%。  
(来源：AWS Truepower)

现在，组合多个测风塔的不确定性的所有元素已经具备。尽管刚开始觉得这个过程很困难，但只要确定了某一不确定性在各个测风塔之间是否相关，就很容易把式 (15-7) 和式 (15-8) 应用于电子表格程序。表 15-2 给出一个有 5 个测风塔的例子，假设各测风塔的历史和未来风资源的不确定性相关（而不是各测风塔之间），而其他不确定性不相关。正确的做法是，不应该对单个测风塔的不确定性求和。而应该根据它们是否相关，对所有测风塔各个不确定性分量进行组合（例如沿每列向下，如箭头所示）。然后假设它们都不相关，组合不确定度等于其总和（例如最后一行的总和）。<sup>⊖</sup>

本例中得到的总组合不确定度是 4.3%，其结果介于假设所有不确定都不相关（3.1%）和假设所有不确定性都相关（6.7%）之间。这表明完全相关和完全不相关的误差组合会如何产生部分相关。

最后需要注意的是，不确定性不相关的假设很诱人，它的好处是可以直接使用平方和规则；但得到的结果可能偏于乐观。风电发展历史中出现过很多假设不同的误差源是随机和不相关的案例，但实际上它们存在一致性的偏差。例如，有段时间

⊖ 可以通过诸如 Palisades、GoldSim 和 Lumenaut 等供应商提供的统计包进行更复杂的不确定性分析。这些程序包是为了模拟包含大量偏差相关和协变量的复杂统计问题而设计的。

表 15-2    与 5 个不同测风塔相关联的 65 台风力机排布的阵列平均不确定性计算示例。  
箭头表示计算顺序。首先，根据式（15-8）将相关的不确定性列进行组合，根据式（15-7）将不相关的不确定性列进行组合。然后，假设各个不确定性分量不相关，将最后一行总的不确定性进行组合。（来源：AWS Truepower）

测风塔	风力机数量	历史风资源(相关)	未来风资源(相关)	其他不确定性(不相关)	合计
A	15	3.0%	1.5%	5.5%	6.4%
B	7	3.0%	1.5%	6.2%	7.0%
C	20	3.0%	1.5%	5.8%	6.7%
D	9	3.0%	1.5%	6.0%	6.9%
E	14	3.0%	1.5%	5.6%	6.5%
总组合	65	3.0%	1.5%	2.7%	4.3%

很流行将风速计垂直安装在测风塔顶部短桅上。因为测风塔顶部的风加速，引起观测风速和风切变都产生正偏差，从而导致轮毂高度处预计风速的双重过高估算。同样，过去很流行将测风塔建在项目区域最好的位置，即最佳暴露、最高海拔处。这样有时也会导致风资源估算产生偏差，因为风流场模型会低估随着海拔降低引起的风速减小。

鉴于这些历史，保守的分析人员会选择假设与某个测风塔有关的所有误差与其他测风塔的误差都相关。然而这个假设对于有多个测风塔的项目区域并无好处，会导致对风电项目经济风险的过度悲观估计。判断每种误差源的情况并始终如一对待，可能会实现对风资源不确定性的客观评估。

15.7    讨论题

1. 什么是不确定性？为什么必须在风资源评估分析中考虑不确定性范围？
2. 定量分析一个风资源评估项目的不确定性时，通常考虑的首要因素是什么？确定每个范围的特定因素是什么？
3. 为什么将同一高度两个风速计的同期有效观测值进行平均会减少总的测量不确定性？
4. 如第 12 章所讨论的，可能情况下修正观测数据记录来代表长期气候条件很重要。请从不确定性角度解释这样修正的影响。
5. 如果用于 MCP 的长期参考点的数据存在变化趋势，那么它对结果的影响是否可当作一种不确定性？请解释为什么。使用互联网或其他资源，搜索并讨论不确定性和偏差的区别。

6. 假设测风塔记录的风速所在高度低于预期的风力机轮毂高度。参考本章公式，在监测设置的设计和数据分析中应该引入哪些具体措施，以减小将观测值外推至轮毂高度时带来的不确定性？

7. 设计风资源评估活动时，能减小复杂地形下预计项目的风流场建模不确定性的方法有哪些？请解释为什么这些操作有效。要想同时减小这种不确定性，应该怎么做？

8. 假设项目区域内基于任意测风塔的任一点风流场建模的不确定性是 8%。假设测风塔在阵列内均匀分布，当有 1、4 或 8 个测风塔时，阵列平均风速的不确定性是多少？以 4 个测风塔为例。假设让一半风力机与一个测风塔关联，而另一半风力机平均配属于其他三个测风塔。那么阵列平均的不确定性又是多少？

9. 假设上述问题中每增加一个测风塔 1 年所需的安装和维护费用是 25000 美元。那么从 1 个测风塔增至 4 个，以及从 4 个增至 8 个时，不确定性每减小 1 个百分点所需的边际成本是多少？假设测风塔在阵列内均匀分布。

10. 假设某风电项目有两个测风塔。一个与包含 20 台风力机的项目北部区域关联；另一个与含 30 台风机的南部区域关联。你已经估算了每项不确定性，并确定了它们是否相关（见下表）。使用式（15-7）和式（15-8）以及表 15-2 列出的方法，估算阵列平均风速的组合不确定性。

来源	测风塔 A (%)	测风塔 B (%)	是否相关
测量	1.5	2.0	不相关
MCP	3.0	3.0	相关
未来风资源	2.2	2.2	相关
风切变	3.0	2.0	相关
风流场建模	4.0	4.0	不相关

## 参 考 文 献

1. Clark S., et al. Investigation of the NRG #40 anemometer slowdown. NRG Systems. Presented at Windpower, Chicago (IL); 2009.
2. Hale E, Fusina L, White E, Brower M. Correction factors for NRG #40 anemometers potentially affected by dry friction whip. USA: AWS Truepower, 2011.

## 深入阅读建议

- Coquilla RV, Obermeier J, White BR. Calibration procedures and uncertainty in wind power anemometers. *Wind Eng* 2007;31(5):303–316.
- Garson GD. Statnotes: topics in multivariate analysis. Retrieved <http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/pa765/statnote.htm>. (Accessed 2012).
- Lackner MA, Rogers AL, Manwell JF. Uncertainty analysis in MCP-based wind resource assessment and energy production estimation. *J Solar Energy Eng* 2008;130:pp. 1–10.
- Wilks DS. Statistical methods in the atmospheric sciences. USA: Academic Press; 1995.

## 第 16 章 风电场设计和发电量估算

风电场设计和发电量估算的方法和挑战可以很容易写成一本书。本章概述这个主题的目的是完成风资源评估的讨论。读者可以了解发电量估算的基本原理和方法，并熟悉主要步骤，包括选择合适的风力机型号、导入或创建风资源网格 (WRG)、尾流建模、设计和优化布局，以及损耗估算。

### 16.1 风电场设计软件

风电项目设计和评估的第一步是选择风电场设计软件（见图 16-1）。市场上有很多可用的软件包，包括 GL Garrad Hassan 的 WindFarmer、ReSoft 的 WindFarm、EMD 国际的 WindPro，以及 AWS Truepower 的 openWind。这些程序有很多共同特点和功能。用户使用它们可以：

- 1) 从一个或多个测风塔导入风频分布；
- 2) 创建或导入风场仿真结果；
- 3) 以轮毂高度、风轮直径、在一定风速范围下的风力机出力和推力等大量参数描述风力机特征；
- 4) 将风力机放置在项目区域内；
- 5) 估算总发电量（没有损耗）；
- 6) 计算尾流损耗和其他损耗，得到净发电量。

这些特点构成发电量模拟的基本要素。多数软件包在满足一定约束时（如考虑产权边界和避让），还具有自动调整风力机位置使净发电量最大化的功能。这个过程称为优化。它一般在将风力机紧凑排布在风资源最丰富的区域并在使它们保持足够间距与使尾流损耗（由尾流导致的湍流引起的额外损耗）最小两者之间取得平衡。尽管也有例外，但一般情况下意味着，对于陆上项目，风力机间距在主导风向上不超过 6~10 倍风轮直径，最小风频风向上不超过 3~4 倍风轮直径。在海上，这个距离通常更大，因为尾流会持续更长距离。

这些程序还提供很多可选功能，这些选项随不同软件而异。这些功能允许用户：

- 1) 计算噪声水平，从而约束布局来满足特定边界或特定点上的噪声限制；
- 2) 画出可视域（视觉影响域），从而约束布局以满足某特定点上风力机可视度的最小化；
- 3) 模拟风力机设计的关机策略，减少由附近风力机尾流引起的机械磨损（称

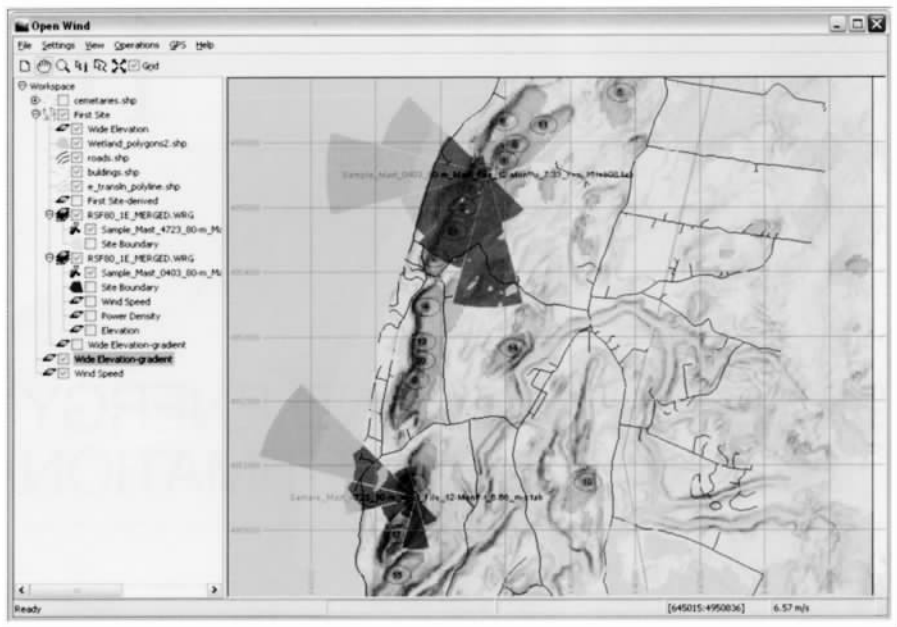


图 16-1 openWind 风电场设计和优化软件的主屏幕截图（来源：AWS Truepower）

为扇区管理或方向性弃风)；

- 4) 将多个监测塔的风流场建模组合；
- 5) 进行不确定性分析；
- 6) 设计入场道路和集电系统，并估算其成本。

选择一个程序之前，资源分析人员应该调查它的特点、设计局限（例如可以建模的风力机最大数量）、用户界面、所需的运行系统和计算机平台、与其他文件类型的兼容性，当然，还有价格和技术支持服务。初学者应该选择相对容易使用且支持包强大的软件。在购买之前先试用一下免费演示版本，应是个比较好的主意（对于 openWind，可以使用免费开源版本）。

16.2 工程设置

项目建立之初通常需要将包括描述项目区域重要地理和地球物理特点的大量图形图像背景、栅格图层和矢量图层导入软件。这些特征中应最先考虑的是：

- 1) 地形高度；
- 2) 地表覆被类型；
- 3) 河流和水体；
- 4) 道路和小路；
- 5) 输电和配电线路；

- 6) 行政边界（镇、县、省等）；
- 7) 产权和其他地块边界；
- 8) 居民区位置；
- 9) 公园、军用保留区和其他需要排除的区域；
- 10) 楼房和通信塔等大型建筑的位置；
- 11) 可能影响选址决策的重大文化、宗教、旅游或其他地标的位置。

这些数据可以通过多种来源获得，有些列在附录 B 中。也可以通过数字化航拍图片或地形图创建数据层。（这可能需要某些 GIS 技术和数字化设备。）

对分析人员来说，熟悉以下三种地理和地球物理文件非常有用，经常会用到它们。它们的主要作用如下。

1. 背景图像

仅用于视觉参考。它们有助于用户在地形上确定方向，确保其他所有对象排列合理（图 16-2 是一个示例）。背景可以包括航拍照片和地形图，通常可用的是地理参照格式，例如 geotiff，或带有地理参照文件（如 ESRI ArcInfo “world” 文件）的标准图片格式（bmp、tif、jpeg）。如果没有这些地理参照信息，则可能需要在 GIS 中创建。

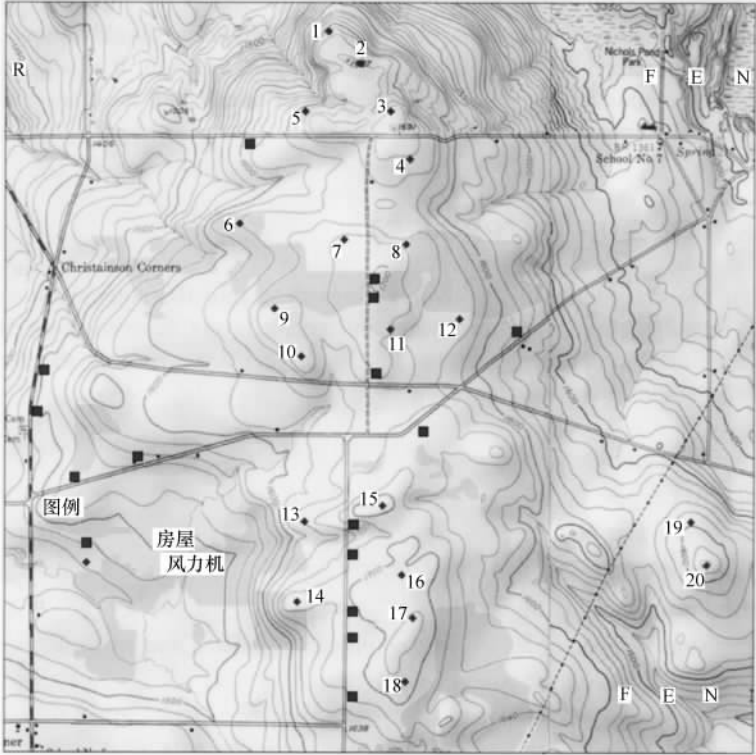


图 16-2 来自 USGS 地形图的背景图像，叠加的点图层代表房屋（方块）和风力机（菱形），多边形图层代表项目边界。（来源：AWS Truepower）

## 2. 栅格图层

包含等间隔网格的数值，通常每个网格或节点一个值（尽管存在交错和其他多维格式）。文件可以包含数字地形模型（Digital Terrain Models, DTM）或者数字高程模型（Digital Elevation Models, DEM）、土地覆被类别、地表粗糙度值、风速、允许或排除开发区域的定义，以及其他很多类型信息。除了提供视觉参考，这些信息也可以直接用于分析。例如，如果软件包含风流场模型，则它在模拟中可以利用高程模型和粗糙度地图。可以直接使用高程模型，或者获取如坡度等其他信息，用来决定在哪里放置风力机。土地覆被分类地图可用来定义区域，例如需要在开发中排除的水体或湿地。

## 3. 矢量图层

由点、线或多边形组成。它们经常用来定义重要对象的位置和范围，例如建筑物和水体、行政（如市和县）边界、地块，以及项目区域自身。另外还常用于定义地形等高线，也就是代表高度不变的连线。尽管几乎所有矢量图层中可表达的对象都可以转化成栅格图层，反之亦然，但是矢量图层不受空间分辨率限制，而栅格图层却存在固定的网格间距。这使它们非常适合准确定义边界和位置。它们还可以包含更多与描述性数据库文件有关的其他信息，例如土地所有者的姓名和地址，水体名字或输电电压。

项目建立过程中，用户必须定义可以放置风力机的边界。这些土地通常由开发商控制，或者其他与开发商就土地转让达成一致的控制。一种实现方法是选择矢量图层中已经定义的地块。根据选中的区块，可以创建新的矢量图层；另一种方法是手工绘制边界。对于某些软件，这些方法可能需要 GIS。

# 16.3 风资源数据

项目一旦设置后，下一步通常是导入或创建仿真所需的风资源信息。这正是本书之前介绍内容的实际应用。风电场设计软件使用的风资源信息主要有两类：点测量值，如测风塔，以及描述项目区域内风资源变化的数值风流场模型输出。多数情况下，准确模拟需要这两类信息，并将它们结合使用。

## 16.3.1 风资源测量

风资源测量是发电量仿真的关键。只有来自项目区域内的直接测量才能以高可信度捕捉决定可能发电量的真实风速和风向频率分布。没有这些数据的支持，很少有金融机构或投资商愿意冒险花钱建设大规模风电项目。

风资源数据通常以一般称为 TAB 文件的表格文件形式导入风电场设计软件。对项目区域内每个测风塔都要导入一个这样的文件，用来进行发电量仿真。TAB 文件提供具体风速和风向分区内观测风的发生频率。图 16-3 是这种格式的一个示例。原则上，也可以使用风况测量的时间序列，但只有某些程序支持这一选项。







16.4 选择风力机

一旦项目建立并导入风资源信息之后，分析人员就可以设计风力机排布了。该过程从挑选风力机型号开始。有时候选择是毫无疑义的；可能开发商与风力机供应商有关系，或者已经为该项目和其他项目订购了大量风力机。然而通常情况下，开发商可以自由考虑任一种风力机型号。

然而，并不是每种风力机都适合于每个场址。项目过程中应该提早关注风力机适用性问题，避免浪费时间去评估不适用的类型，或得到不切实际的项目性能期望。（风力机适用性的最终决定在于生产商，它必须决定风力机对于该场址是否有保证，如果有，是在怎样的运行条件下。）

分析人员必须熟悉表 16-1 归纳的 IEC 标准风力机分类。经常听到的场址适用“ⅡB”或“ⅢA”类是由其自身风资源决定的。本表中， $V_{ref}$ 是轮毂高度处 50 年 10min 平均风速的最大值， $I_{ref}$ 是轮毂高度风速为 15m/s 时湍流强度的预期平均值。这两个值都可以通过场址测量值估算而得。 $V_{ref}$ 是在标准海平面空气密度  $1.225\text{kg}/\text{m}^3$  下定义的。当场址空气密度差异很大时，也可以调整，应咨询生产商来决定是否能做以及怎样做。

表 16-1 标准海平面空气密度  $1.225\text{kg}/\text{m}^3$  下风力机适用性的 IEC 分类

风力机类别	Ⅰ			Ⅱ			Ⅲ		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
$V_{ref}/(\text{m}/\text{s})$	50	50	50	42.5	42.5	42.5	37.5	37.5	37.5
$I_{ref}(\%)$	16	14	12	16	14	12	16	14	12

（来源：IEC 61400-1 第三版，2005-8）

Ⅰ类风力机针对抵抗最大风力而设计。与相同标称功率的其他类型的风力机相比，它们的风轮直径设计经常更小，但也不总是这样。与类似的Ⅰ类风力机相比，Ⅱ类和Ⅲ类风力机在低风速时通常发电量会更多。与其他风力机相比，Ⅲ类风力机高切出风速阈值通常更低，意味着风速高时风力机会放弃发电。许多Ⅲ类风力机也会采用相对其额定功率更大的风轮和更小的发电机。这些差别会加大它的容量系数（平均输出功率除以最大输出功率），使其在中等资源地方的成本效益更高。

经常通过考虑风力机的所有可能位置并找出最低适用类别来决定风电项目的风力机类型。如果项目区域内风资源最丰富和湍流最大点需要ⅡA类风力机，那么其他风力机通常也选用ⅡA类。个别情况下，同一风电项目可能选用对应不同 IEC 类别的两种风力机，以充分利用资源变化的特点。

除了适用类别，选择风力机类型时还要考虑其他因素，包括价格、保修和技术支持、技术成熟度和业绩、设备运行维护的邻近性，以及期望的平均输出功率。分

析人员可以从列出场址适用的所有可用风力机开始。然后联系生产商获取价格、可用性、保修及其他相关信息，还包括风力机功率曲线。使用场址测风塔观测的风速频率分布，分析人员可以迅速方便地估算每台风力机的平均输出功率，并比较单位输出功率的建设和运行成本。

除了轮毂高度、风轮直径和额定容量，最重要的风力机特性还包括在一定范围风速和空气密度下产生的功率和推力（迎风力）。图 16-5 所示为在一定范围空气密度下的功率曲线族。已知风力机位置处的平均空气密度估计值和合适的风速间隔，使用软件可以根据这些数据内插得到功率。

风速/(m/s)	空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )											
	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22	1.225
0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.0	30	31	32	34	35	36	38	38	40	41	42	42
5.0	94	98	100	103	106	108	111	114	117	119	122	122
6.0	194	199	204	209	214	218	223	228	233	238	242	243
7.0	336	344	351	358	366	374	382	389	397	404	412	414
8.0	526	537	548	559	570	582	593	604	615	626	637	640
9.0	766	782	797	813	828	844	859	874	890	906	921	925
10.0	1065	1087	1109	1131	1154	1176	1198	1220	1242	1265	1287	1293
11.0	1418	1442	1466	1490	1512	1535	1558	1579	1601	1622	1644	1649
12.0	1731	1750	1769	1786	1803	1819	1834	1850	1863	1877	1890	1893
13.0	1926	1937	1946	1954	1960	1966	1970	1974	1978	1980	1981	1982
14.0	1990	1993	1995	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998	1998
15.0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
16.0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
...	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
25.0	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

图 16-5 在空气密度的一定范围内，假定的 2MW 风力机的功率曲线族示例。

该曲线风速增量为 1m/s，然而多数情况下功率曲线的风速增量为 0.5m/s。此外，通常提供空气密度大于 1.225kg/m<sup>3</sup> 的值。（来源：AWS Truepower）

如果只有一个空气密度（例如标准海平面密度）下的功率曲线，可以通过空气密度的立方根等比例修正风速之后，再估算输出功率如下：

$$v_{\text{调整}} = v_{\text{场站}} \left( \frac{\rho_{\text{场站}}}{\rho_0} \right)^{1/3} \quad (16-1)$$

式中  $\rho_{\text{场站}}$ ——场址空气密度；

$\rho_0$ ——定义功率曲线时所用的标称空气密度<sup>⊖</sup>。

⊖ 该式中立方根来源于风功率密度和风速之间的立方关系（见第 10 章）。

然后照常将调整后的风速用于功率曲线。这种方法适用于变桨距风力机，它在大型并网风力机中占大多数。而失速型风力机主要用于居民或农场使用的小型风力机，可用下式估算功率：

$$P_{\text{调整}} = P \left( \frac{\rho_{\text{场站}}}{\rho_0} \right) \quad (16-2)$$

式中  $P$ ——标称空气密度下给定风速的风力机输出功率。

这种调整对于发电量的初步估算是可以接受的，然而强烈推荐分析人员在最终估算项目发电量之前，从风力机厂商那获取一定空气密度范围下经过认证的功率曲线。

## 16.5 风力机布局的设计和优化

选择风力机型号之后，资源分析人员开始设计风力机布局。这个过程通常包括在很多相互矛盾的目标之间取得平衡。

1) 第一个目标是希望最大程度利用开发商控制的土地。一定程度上，可以在场址增加风力机数量来提高可能的发电量，随之增加收益。把项目的固定建设成本（如工程研究、运行维护建筑、变电站和输电线等）分摊到更多机组，增加的利润会使电量总成本降低，从而使项目更有竞争性且更加有利可图。因此多数开发商都希望项目规模尽可能大。

2) 其次，希望容量系数（即平均输出功率占额定容量的比例）最大化。假设单位额定容量的安装成本一样，那么容量系数越高，一定电量售价下的项目边际利润就越大。这个目标与第一个相悖，因为它意味着只利用项目区域内风资源最好的地方，并且风力机间距足够远，以保证尾流损失最小。

3) 第三个目标是使风电场建设成本最小化。除了风力机自身，影响建设成本的两大关键因素是进场道路和连接风力机的集电系统。总体来说，需要的道路和线路越短，成本就越低。此外，还需要考虑地形坡度和障碍物，例如河流和保护区。这个目标通常要求布局相对紧凑，没有“搁浅”风力机（一台或一小组风力机远离其他风力机）。

4) 最后，风力机布局必须满足各种各样的管理机构要求（例如避让产权边界）、环境约束（例如居民点噪声限制）、社区关注（包括视觉和噪声影响）以及其他可能约束风力机布置的事项。其中有些约束可以客观满足，但其他需要主观或定性判断。

分析人员通常首先沿着显著地形特征或风资源良好的地域手工布置风力机。如果站址有强烈的主导风向，通常的做法是在与主导风向垂直的方向上相对紧凑地布置风力机，间距大约 3~4 倍风轮直径，而在盛行风的下风向，风力机间距较大，

约为 6~10 倍风轮直径或更大。这样做通常会使得到的风力机数量接近最大，且尾流损失和湍流引起的机械荷载都可以控制。

多数软件程序都有优化功能，在考虑所有避让、排除区和其他客观约束下，通过成百上千次循环自动调整风力机位置，从中找出净发电量（包括了尾流损失）最大的一种。这些程序很有效，尽管对于包含上百台或更多风力机的大型布局，有时运行会非常慢（通宵或整个周末都很常见）。它们的一个缺点是没有考虑建设成本。结果可能是建设成本非常高的“搁浅”风力机。经常需要手工去除或移动这些风力机来调整布局。openWind 等软件包含电量成本优化特性，它会设计道路和架空线网络，并将其考虑到成本中。使用这个特性通常会得到更紧凑的布局。

然而，不管这些优化解多么令人满意，开发商还是希望做些调整。用于建立避让和其他排除条件的 GIS 数据层可能不是非常准确。一些地图上未标明的特征，如建筑和岩石裸露等，也可能使得无法在原计划位置安装风力机。社区关注的噪声和视觉感受可能也会影响选址决定。多数风电场设计软件都可以生成图像模拟，如图 16-6 所示，它经常是征求项目的社区反馈和取得社区支持的有用工具。



图 16-6 风电场设计软件创建的拟建风电场的图像模拟。这些模拟对于征求社区反馈和取得社区支持很有用。（来源：AWS Truepower）

## 16.6 总发电量和净发电量

总发电量是不考虑尾流或其他损耗的风电场年发电量。对于布局中的每台风力机，采用如下方程式计算（该式是按方向步长数  $N_d$  和风速区间数  $N_v$  求和）：

$$E_k = 8766 \sum_{i=1}^{N_d} \sum_{j=1}^{N_v} F_{ijk} P_{ijk} \tag{16-3}$$

式中  $F_{ijk}$ ——出现频率（以分数形式表示）；  
 $P_{ijk}$ ——风力机  $k$  在方向扇区  $i$ 、风速区间  $j$  上的输出功率；  
8766——系数是年平均小时数（考虑每四年有一个多 24h 的闰年）。  
发电量单位是千瓦时或兆瓦时，取决于风力机输出功率是用千瓦还是兆瓦表示。

根据 WRG 文件定义的关系，对 TAB 文件中的观测风速和风向频率分布使用加速比和方向偏移，从而得到总频率。将功率曲线内插或外推到适当的空气密度，得到功率输出。这些计算都由软件自动执行，通常不需要用户去探究它们。然而，深入理解它们有时也会有帮助。因此，在 16.7 节将着重介绍一些关键方法和公式，以及尾流建模的重要议题。

净发电量等于总发电量减去损耗。准确估算风电场损耗对于准确确定风电项目的长期经济效益非常重要。低估损耗是风电场发电量经常低于前期研究预测的原因之一。在北美，2008 年之前建设的项目平均高估约 10%<sup>[1,2]</sup>。改善资源评估方法和如下所述的更准确地估计损耗，将会大大减小这个差异<sup>[10]</sup>。

表 16-2 列出主要损耗的分类，在实际应用中每个都有一定范围（占发电量的百分数）。下面将详细介绍损耗类型。应该强调的是，每个项目都是不同的，有些可能超出表中列出的损耗范围。此外，损耗会随时间变化。尤其是可用率损耗，在运行刚开始的 6~12 个月比较大，因为此时会发现并解决问题。风力机性能也会随时间改变，因为风力机部件例如叶片会磨损和出现凹点。

表 16-2 损耗分类和典型值（来源：AWS Truepower）

损耗类别	低值	典型值	高值
尾流效应(%)	3	6.7	15
可用率(%)	2	6.0	10
电气损耗(%)	2	2.1	3
风力机性能(%)	0	2.5	5
环境损耗(%)	1	2.6	6
弃风(%)	0	0	5
合计(%)	7.8	18.5	37.0

注：这些范围适用于运行成熟的风电场；损耗，尤其是可用率损耗，在建设之后最初 6~12 个月较大。  
有些风电场的损耗可能超出此处标注的范围。总损耗要通过各能效之积得到，见式（16-4）。

16.6.1 尾流效应

它是发生在风力机下游的风速减少和湍流增加。在风力机数量较多的项目中，尾流效应通常会使总发电量减少 3%~15%。为保持这个损耗可控，主导风向上风力机间距很少小于 6 倍风轮直径。此外，尾流引起的湍流经常会引起风力机部件磨

损，因此风力机在侧风方向间距不小于 3 倍风轮直径，在一定条件下可能需要关停风力机，以满足制造商质保要求。

因为尾流效应随布局改变，所以风电场设计软件必须包含某种尾流模型，多数都包含不止一种。本章后面介绍 3 种经常使用的主要类型：Park 和修正 Park 模型、涡黏性（Eddy Viscosity, EV）模型和深阵列（或大型阵列）尾流模型。其他基于 CFD 和 LES（Large-eddy Simulation, 大涡仿真）的模型还在研发中，不在本书讨论范围内。

### 16.6.2 停机时间

假设风力足够时，风电场或风力机能够发满额定功率，就可以说它是可用的。当工程中一些风力机或整个工程因为某些原因不能运行时，就出现可用率损失。它发生的原因也可能是电网或变电站故障。发电量研究中通常假设风电场总可用率是 97% ~ 98%（2% ~ 3% 损耗），但这种估计可能偏于乐观，除非有充分证据表明，对于所讨论的风力机型号，风电场运营商经常能达到这样的高性能。风力机起动问题、维修延迟、风力机需要改造的整体性问题以及其他问题都可以导致停机时间延长，从而降低寿命期的平均可用率。一些观察人员还发现，风力机往往在大风条件下停机，从而加大电量损失（例如，3% 停机时间可能实际对应 5% 电量损失）。运行中一般遇到的平均可用率损失是 2% ~ 10%。

### 16.6.3 电气损耗

风电工程的所有电气元件都有损耗，包括组合式变压器、集电系统和配电变压器。这些损耗在电系统设计中已经考虑。一般损耗范围是 2% ~ 3%。

### 16.6.4 风力机性能系数

这个因素包括未达最佳状态的风力机控制设置影响（例如，偏航未校准、控制风速计标定误差、叶片桨距不准确或未对正），大风控制滞后（原因是因大风而停机的风力机在重新起动之前，必须等到风速降低至低于低风速阈值），以及强湍流、风切变或斜流等超过功率曲线定义时的范围等影响。这些损耗每一个都很小，但是当站点经历异常大风、强湍流或其他极端条件时，它们累计起来可达到 3%。此外，有证据表明，风力机经常达不到广告宣传的功率曲线，即使是符合 IEC 认证的功率曲线测试<sup>[10]</sup>。这可能会额外增加 2% ~ 3% 损耗。

### 16.6.5 环境损耗

这一类损耗包括由叶片覆冰、叶片污损和破坏、极高或极低温度或闪电引起的停机，以及恶劣天气下无法去场站进行维修等原因引起的损耗。这些损耗在某些情况下可以根据场站收集的信息进行估算，例如风数据校验中观察到的温度记录和结冰频率，或者闪电频率地图和降雪记录等区域性记录。在恶劣天气下可能难以到达的远距离场站，包括海上站点，经常发生高于正常的损耗。

### 16.6.6 弃风

如果风力机间距小于 3 倍风轮直径，制造商可能会强制执行弃风策略，以限制

因尾流湍流产生的磨损。这通常要求当风来自一定方向范围并且高于一定风速时，应该关停一些风力机（例如一行中每隔一台停一台机）。

此外，电力公司或电网运营商会强制执行整个风电场范围的弃风，作为输电网管理的一种辅助方式。随着风电在系统中的穿透率不断提高，风电场级的弃风越来越常见，在某些区域，它们的影响比这里提到的“高”估计还要大。弃风也可能因为环境原因而在某个时间执行，例如为了避免影响鸟类和蝙蝠飞行、满足夜间噪声限制，以及减少（由叶片反射的阳光引起的）阴影閃变。

**组合损耗。**各损耗因素的组合并不是直接相加，而要通过效率的乘积（定义为1减去损耗）得到。总损耗由下式得到，

$$L_{\text{总损耗}} = 100\% - (100\% - L_1)(100\% - L_2)(100\% - L_3) \cdots \quad (16-4)$$

式中  $L_n$ ——单个损耗的百分数（本式中只列出前三个）。

## 16.7 专题

尽管不理解基本计算细节也能使用风电场设计软件，但是了解程序如何运作很有好处，它能帮助用户做合理的选择并诊断问题。下面章节讨论如何将风资源从一个或多个测风塔外推至风力机位置、总发电量计算以及尾流建模的方法。

### 16.7.1 将测风塔处风资源外推至风力机

尽管细节不同，但是所有主要程序都使用称为“加速比”的概念，它是对于特定方向，某一点预测风速与测风塔处风速的比值。使用 WRG 和点 WRG 文件包含的信息可以计算该比率。每个方向的加速比乘以每个测风塔的观测风速就可以估算某点的对应风速。

$$v_{pi} = R_{pmi} v_{mi} \quad (16-5)$$

式中  $v_{pi}$ —— $p$  点  $i$  方向的预测风速；

$v_{mi}$ ——测风塔  $m$  处的对应风速；

$R_{pmi}$ ——同一方向上从测风塔到该点的加速比。

通常假设给定方向上的加速比不随风速变化。因而，测风塔处观测风速频率的分布仅仅是以同样的因子按比例增减，而没有其他改变。实际上，点与点之间的风速频率分布是不同的。一些程序使用 WRG 文件中预测的威布尔参数  $k$  的变化，尝试估算观测频率分布的改变。然而，没有实际数据能够确认这种操作能否提高准确性。

方向性加速方法一般还假设项目区域内的风向频率不变。在软件中，实现这个假设的方法是设置所有点的风向频率等于测风塔处的频率。尽管该方法在很多情况下表现相当好，但当风况受地形和地表特性严重影响时，就会出现问题。例如，风通过山口时，其方向与山口内外的不同点截然不同。同样，当风从海上过渡到陆上时，热属性和陆地海洋表面粗糙度的明显差异会引起风向频繁改变，反之亦然。

为处理这种情况，多数程序都包含“风向偏移”或类似选项，根据风向频率



模拟的测风塔与给定点观测频率的变化进行猜测。此外，没有证据说明这种调整能否提高准确率，或者能提高多少，它的效果可能因场站而异。

### 16.7.2 使用多个测风塔

如第 13 章所述，多数风电项目会使用多个测风塔。这给发电量估算带来组合多个测风塔信息的挑战。

一种常用方法是将项目区域分为多个区段，每个区段使用一个测风塔。可以用距离（例如，假设最近的测风塔“控制”该区域）定义区段，或者用其他标准，例如地形相似度（例如，让山脊顶区段属于山脊顶测风塔）。每个测风塔的模拟是分别独立进行的，某区段内所有风力机的风资源使用该区段分配的测风塔外推。

这种方法很实用，但有时也存在问题，比如经常发生两个区段交界处的预测风资源不连续。当风力机从分界线的一侧移至另一侧时，发电量估算结果会突然变化（这当然是不符合实际的）。这个问题是风流场建模不准确的一个反映，因为如果模型很完美，那么不管使用哪基测风塔初始化或调整模型，某一点的预测风资源都应该是一样的（在测风塔的测量不确定性之内）。

虽然不一定更准确，但一种更好的方法是对不同测风塔得到的预测风资源进行合成。该方法采用以下假设：每个测风塔给任意点的风资源至少提供一些有用信息，一些估算值的加权平均应该比单独估算值更可靠。其挑战是确定权重的合适方法。一个相对简单的合成技术是根据与测风塔距离的平方根倒数给每个测风塔的预测值赋以权重。下式是式（16-1）的扩展：

$$\bar{v}_{pij} = \frac{\sum_{j=1}^M \frac{v_{pij}}{d_{pj}^2 + C}}{\sum_{j=1}^M \frac{1}{d_{pj}^2 + C}} \quad (16-6)$$

式中  $M$ ——求和范围是测风塔的数量；

$v_{pij}$ ——根据  $j$  测风塔所得  $p$  点  $i$  方向的预测风速；

$d_{pj}$ ——该点与同一测风塔之间的距离；

$C$ ——平滑常数，以避免方程式在非常靠近某一测风塔时无定义。

因为多数风流场模型没有采用这种合成，所以通常有必要编写一个这种软件进行操作。一些分析人员使用的另一种方法是用一基测风塔某段时间的数据估算每台风力机的发电量，然后在电子表格程序中“离线”合成这些估算值。

距离加权合成相对容易，但它是最好的方法吗？不一定。它的隐含假设是，与某个测风塔有关的预测不确定性完全取决于与该测风塔的距离<sup>①</sup>。然而如第 13 章

① 用统计理论来表示距离和不确定性的关系，将同样数量的独立测量值用加权平均组合起来，每个测量值的权重与其不确定性的平方根成反比。结果表明，用这种方法得到的新估算值可能不确定性最低。用距离替代不确定性，可以得到标准距离加权组合方法。

所述，距离只是影响风流场建模准确性的因素之一。模型不确定性以及合适的组合权重还取决于该点与测风塔之间地形的相似性和其他条件。例如，如果该点位于山脊顶，可能给山脊顶测风塔的权重大于山坡下测风塔的权重，其效果会更好，即使后者距离更近。尽管基于地形相似性和其他因素的方法更有说服力，但在实践中应用更困难，因为它需要理解建模不确定性如何随这些因素而变化<sup>[3]</sup>。

### 16.7.3 尾流建模

由于风力机-大气互作用的高度复杂性，且尺度范围很广，所以尾流建模仍然是一个很活跃的研究领域。尽管人们可以很好地理解基本物理方程，但对尾流问题的完整数值求解仍在如今计算机的能力范围之外。

前两代模型目前还在广泛使用，包括 Park 模型和 EV 模型，而第三代模型最近也已经出现，也就是为大型项目设计的所谓深阵列模型。

#### 1. Park 模型和修正 Park 模型

Park 模型是在 20 世纪 80 年代中期开发出来的<sup>[4]</sup>，已经应用于 WAsP 软件和多数风电场设计程序。它采用两个参数定义风力机尾流：宽度和相对于自由流速度的风速亏损。假设宽度  $D$  最初等于风轮直径，并随下游距离线性增加：

$$D(x) = D_0(1 + 2kx) \quad (16-7)$$

式中  $D_0$ ——风轮直径 (m)；

$k$ ——衰减常数；

$x$ ——距风轮的下游距离 (用风轮直径表示)。

假设风速亏损  $\delta v$  (是自由流风速的一部分) 在宽度内不变，用下式表示：

$$\delta v(x) = (1 - \sqrt{1 - C_t}) \left( \frac{D_0}{D(x)} \right)^2 \quad (16-8)$$

式中  $C_t$ ——风力机的推力系数，该参数代表风轮产生的抵抗风的力量。

与风力机功率曲线一样， $C_t$  由制造商确定，并随风速变化。

尾流建模中的一个关键问题是下游各台风力机的尾流如何相互组合。Park 模型中，下风向风力机的进入风速等于自由流风速减去由式 (16-8) 计算的尾流损耗，乘以下风向风力机的风轮与上风向风力机尾流相交重叠部分 (见图 16-7)。当有几个上游风力机存在尾流重叠时，假设进入风速等于自由流风速减去最大的单个尾流亏损。

修正 Park 模型与 Park 模型有两方面不同。一个是如何计算与上风向尾流的重叠：修正 Park 模型中，重叠区域用矩形代表；另一个是受尾流影响的风力机产生的尾流不变，就好像风力机位于自由流中一样，但它的推力系数  $C_t$  使用该台风力机的进入风速计算。一般来说，这些修正产生的尾流损耗比用 Park 估算的更小。如果可以选择，一般使用修正 Park 模型。

运行 Park 或修正 Park 模型时需要定义的唯一参数是尾流衰减常数。这个值一

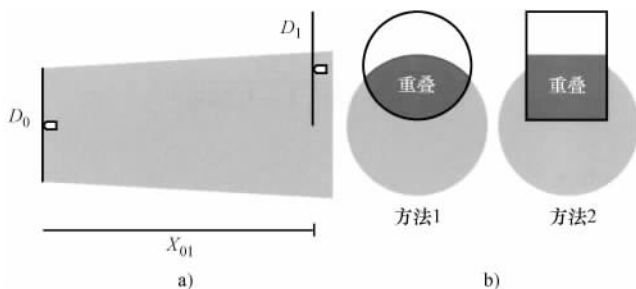


图 16-7 a) 风力机尾流俯视图, 其初始宽度  $D_0$  随着下游距离增加, 并与第二台风力机风轮相交; b) 计算尾流和第二台风力机之间重叠区域的两种方法; Park 模型使用第一种, 修正 Park 模型使用第二种。(来源: AWS Truepower)

般介于 0.04 ~ 0.075。它的值越低则尾流持续更长, 这是在海上常见的情况。值越高则尾流衰减越快。

## 2. 涡黏性 (Eddy Viscosity, EV) 模型

EV 模型是 20 世纪 80 年代后期开发出来的, 与 Park 模型几乎同时<sup>[5]</sup>。与完全使用经验方法的 Park 模型不同, EV 模型是一种 CFD 模型, 它求解下面简化形式的纳维叶-斯托克斯 (Navier-Stokes) 方程 (该方程使用柱坐标):

$$U \frac{\delta U}{\delta x} + V \frac{\delta U}{\delta r} = \frac{\varepsilon}{r} \frac{\delta(r \delta U / \delta r)}{\delta r} \quad (16-9)$$

式中  $r$ ——距风轮中心线的半径;

$x$ ——下游距离;

$U$ ——下风向风速;

$V$ ——径向风速;

$\varepsilon$ ——涡黏性, 代表邻近湍流涡旋产生的摩擦力。

假设最初尾流引起的风速亏损是高斯曲线 (钟形), 从风力机下游两倍风轮直径处开始。中心点的风速亏损 (再次说明, 它是自由流风速的一部分) 是

$$\delta v_c = C_t - 0.05 - [16C_t - 0.5] \frac{I_0}{1000} \quad (16-10)$$

式中  $I_0$ ——环境湍流强度。

亏损曲线的形状用高斯方程表示:

$$\delta v(r) = \delta v_c e^{-\frac{r^2}{w^2}} \quad (16-11)$$

式中  $w$ ——有效尾流宽度, 用下式定义:

$$w = R \sqrt{\frac{C_t}{8\delta v_c (1 - 0.5\delta v_c)}} \quad (16-12)$$

式中  $R$ ——风轮半径。

完成初始化之后, 尾流向下游传播, 随着内部空气与周围自由流空气混合, 不

断扩大并消散。混合速率由涡黏性决定，它是环境湍流的函数——湍流越大，混合速率越大，尾流亏损衰变越快。因而，EV 模型不包含经验尾流衰减常数：衰减率由模型方程决定，除了风力机特性，唯一输入是环境风速和湍流强度。

因为式 (16-9) 没有解析解，所以它采用有限差分技术，也就是标准的 CFD 方法进行数值求解。

### 3. 深阵列尾流模型

过去几年，研究人员逐渐发现目前的尾流模型可能低估了有多行风力机的大型风电项目的尾流损失。问题的关键似乎在于主要的尾流模型，包括 Park、修正 Park 和 EV 模型，它们忽略了大气和风力机之间的相互作用<sup>[6]</sup>。每台风力机从经过其风轮扫掠面的风中吸取能量，在下游一段距离内产生风速减小区域。对于上游和该影响区以外，假设环境风不受影响。

理论和试验都表明，对于大规模风力机排布，这个假设站不住脚。一定区域内大范围存在风力机会改变风力机阵列之内和附近的地表边界层（Planetary Boundary Layer, PBL）的风廓线，从而减少了可用于风力机发电的能量。支持这个假设的试验数据主要来自海上风电项目，那里风力机产生的拖曳力与较低的海平面粗糙度形成鲜明对照，使得所谓的深阵列效应尤其明显。在陆上，该影响减小，但理论认为在大型项目中仍然很明显。

对能够相当准确模拟深阵列尾流效应的新模型的需求越来越明确。预测大型风力机阵列的全部影响是一个复杂问题，包含风力机和大气多变特性之间的动态相互作用，如气温、气压、风速以及湍流的垂直和水平梯度。只有通过需要超高速计算机的复杂数值模型才能完全求解。然而，人们希望，对于近几年可能要开发的风电项目，采用简化方法的效果也足够好。

使用最广泛的深阵列尾流模型基于 Sten Frandsen 提出的理论<sup>[7]</sup>，其中无穷大风力机阵列用同样的高表面粗糙度代表。粗糙度对大气产生拖曳力，引起下游 PBL 结构变化，尤其使风力机轮毂高度处的自由流风速减小。根据这个理论，风电场等效粗糙度  $z_{00}$  用下式表示：

$$z_{00} = h_h \exp \left( - \frac{\kappa}{\sqrt{c_t + (\kappa / \ln(h_h / z_0))^2}} \right) \quad (16-13)$$

式中  $h_h$ ——轮毂高度；

$\kappa$ ——von Karman 常数（大约为 0.4）；

$z_0$ ——风力机之间的背景粗糙度；

$c_t$ ——分布式推力系数，用下式定义：

$$c_t = \frac{\pi}{8s_d s_c} C_t$$

式中  $C_t$ ——风力机推力系数；

$s_d$ 、 $s_c$ ——分别是下风向和垂直风向上的平均距离，用风轮直径表示。

图 16-8a 表示一定范围的  $C_t$  和阵列平均间距  $(s_d s_c)^{0.5}$  对应的  $z_{00}$ 。粗糙度与间距强相关，而与背景或周围粗糙度的相关性则低得多（此处假设海上阵列是 0.001，陆上阵列是 0.03）。

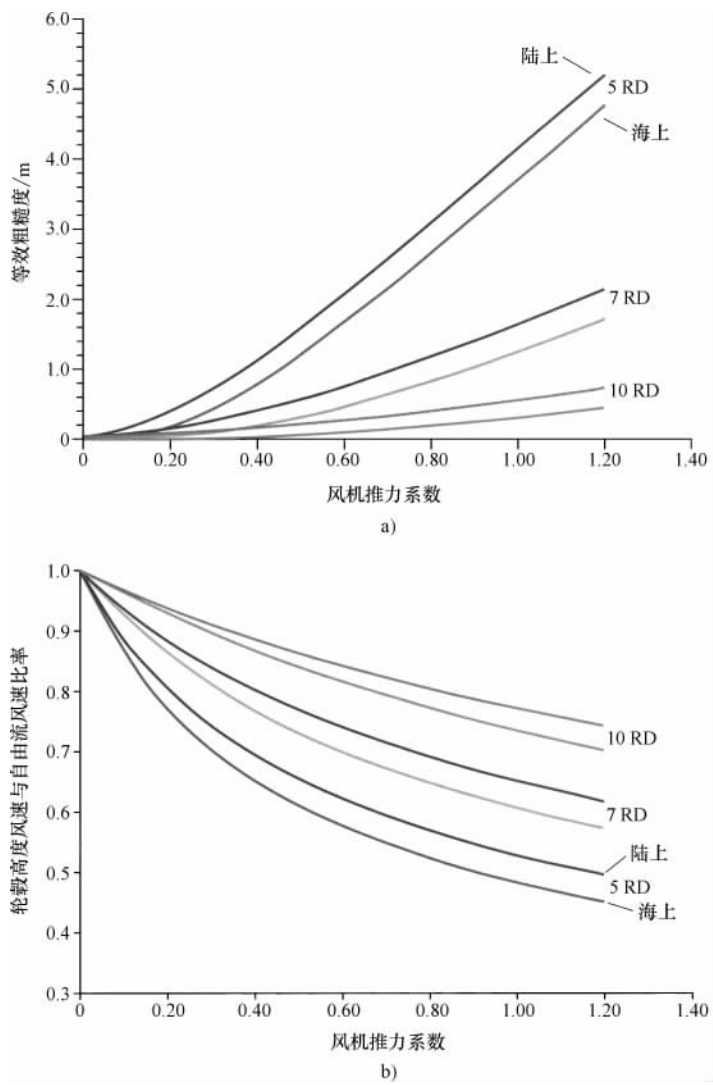


图 16-8 a) 对于海上（背景  $z_0 = 0.001\text{m}$ ）和陆上（背景  $z_0 = 0.03\text{m}$ ）风电场项目，无穷大风力机阵列的风电场等效粗糙度  $z_{00}$  是推力系数和阵列间距（以风轮直径 RD 表示）的函数；b) 同样案例，渐进的轮毂高度风速是自由流风速的一部分。

（来源：AWS Truepower，根据 Frandsen 提出的方程式（2007））

定义等效粗糙度之后，根据气象理论估算对阵列内（例如，此处 PBL 已经与阵列粗糙度平衡）轮毂高度风速的影响，假设 PBL 内的地转风速  $G$  是常数，而且

是中性对数风廓线。结果用下式近似。

$$\frac{v'_h}{v_h} = \left( \frac{z_{00}}{z_0} \right)^{0.07} \frac{\ln(h_h/z_{00})}{\ln(h_h/z_0)} \tag{16-14}$$

式中  $v'_h$ 、 $v_h$ ——分别是阵列内部深处和上游远处的轮毂高度风速。

结果如图 16-8b 所示。

Frandsen 理论的一个重要内涵是它不关注单台风力机的尾流影响。相反，它将阵列当作表面拖曳力均一的无穷大海洋。这意味着特定点的预测风资源不由上风向是否直接有任何风力机决定，但这是不现实的。此外，粗糙度取决于阵列密度，这意味着在实际应用中每次修改布局后都要重新计算。因此，要想对风电项目设计和最优化有用，必须要么修改 Frandsen 理论，要么与其他方法以某种方式结合。

解决这个问题的一种方法是将风力机按离散粗糙度元素建模。每台风力机被一个表面粗糙度增加的区域包围。当自由流风经过该区域的前缘，会产生内边界层 (Internal Boundary Layer, IBL)，且该 IBL 随下游距离增加而增长，它内部的风切变也增加。当风经过粗糙区域的后缘，会产生另外的 IBL，它以不同的（通常更慢）速率增长，它内部的风切变恢复到正常背景值。总的影响是减少第一个 IBL 顶部以下高度的风速。

图 16-9 说明了这种效应，显示了第一台风力机产生的两个 IBL。上面曲线代表由风力机的高粗糙度产生的 IBL，下面曲线代表由返回到风力机之间的低背景粗糙度产生的 IBL。右侧两条曲线分别是受扰和自由流风速的廓线；它们的区别在于风速亏损。

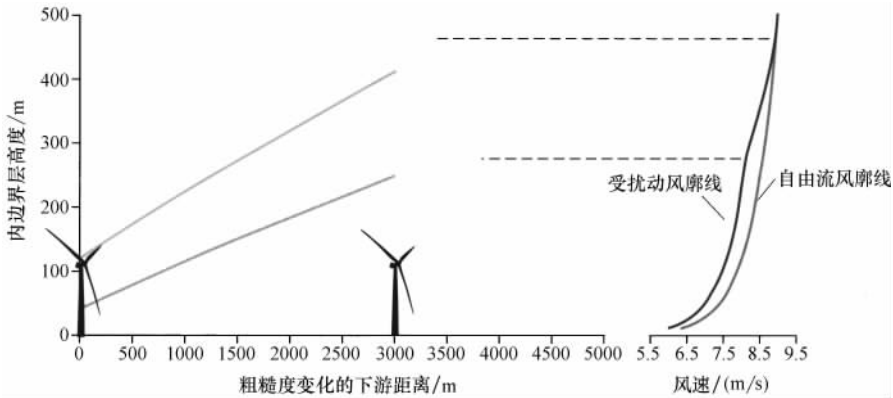


图 16-9 由左侧风力机产生的两个 IBL 的增长图示，以表面粗糙度的变化建模。上下曲线之间，风切变由风力机的高粗糙度决定；上面曲线以上和下面曲线以下，恢复到与背景粗糙度有关的风切变。右侧两条曲线表明这台风力机对第四台风力机处自由流风速的影响，它正好在第一台下风向 3000m 处。其他风力机（图中没有显示）也会产生各自的 IBL，并以类似方式进一步改变风廓线。图中曲线只是示例，并不代表任何特定模型或风电场。（来源：AWS Truepower）

这种方法已经用于很多程序，包括 WindFarmer 和 openWind。已发布的报告表明它们能相当准确地匹配海上项目观察到的“深阵列”尾流效应。而来自陆上项目的证据却存在很多争议<sup>[8,9]</sup>。不管怎样，可用于验证该模型的数据量非常少，因此应该说它们还处于发展阶段，而且它们将来在更大的陆上或海上项目中的表现如何仍然未知。目前，一般赞成在分析至少四排风力机的大型项目中，才使用一种可用的深阵列尾流模型。

16.8 讨论题

- 1. 假设风电项目场址中资源丰富点的平均风速是 8.6m/s，估计年平均空气密度是 1.125kg/m<sup>3</sup>。15 m/s 时平均湍流强度是 15%。适合该场址的风力机类型是什么？使用互联网，找出三种这类商业兆瓦级风力机，并列出它们的主要特性（额定功率、风轮直径和轮毂高度）。
- 2. 参考图 16-2 所示地形图。在布局中找出搁浅风力机，并解释为什么建设它们可能比布局中其他风力机的花费更高。
- 3. 参考图 16-5 所示功率曲线族。假设只给出了空气密度 1.125kg/m<sup>3</sup> 时的功率曲线（右侧最后一列）。假设该站点的估计空气密度是 1.14kg/m<sup>3</sup>。使用式（16-1）计算该场址新的功率曲线，然后与表中同样空气密度下的真实功率曲线比较。任意给定风速时的最大差异是多少？这个近似值合理吗？[计算功率曲线的过程：根据式（16-1）调整已有功率曲线的标准风速，将 1.125kg/m<sup>3</sup> 时的功率插值到调整后风速，再将新的功率值赋予原始未调整的风速。]
- 4. 假设一个风电项目的损耗如下：尾流，7.2%；可用率，4.6%；电气，2.5%；其他 2%。那么总损耗是多少？
- 5. 使用式（16-3）、下表的风速频率分布和图 16-5 的功率曲线，并假设空气密度是 1.20kg/m<sup>3</sup>，估算含 20 台风力机（40MW）的风电项目的年平均总发电量，单位是 GW·h。使用表 16-2 所示的“典型”损耗，估算净年发电量输出。这台风力机的预期年平均总容量系数和净容量系数分别是多少？

风速/(m/s)(分区上限)	频率(%)
1	0.06
2	1.06
3	4.06
4	10.09
5	17.29
6	18.42
7	14.35
8	11.92
9	9.66
10	5.92
11	3.44

(续)

风速/(m/s) (分区上限)	频率(%)
12	2.34
13	1.65
14	1.09
15	0.75
16	0.51
17	0.30
18	0.19
19	0.13
20	0.07
21	0.04
22	0.03
23	0.02
24	0.01
25	0.00

6. 下载并安装 openWind 程序的开放源（共享）版本（[www.awsopenwind.org](http://www.awsopenwind.org)），或者其他可用的风电场设计程序的演示版。下载并按照教程逐步操作。

参 考 文 献

1. White E. Closing the gap on plant underperformance: A Review and calibration of AWS Truewind’s energy estimation methods,” USA: AWS Truepower; July 2009.

2. Johnson C, Tindal A, Harman K, Graves A, Hassan G, Validation of energy predictions by comparison to actual production. In: AWEA Windpower 2008 Conference, June 2008, Houston, Texas.

3. Brower MC, Robinson NM, Hale E. Wind flow modeling uncertainty: quantification and application to monitoring strategies and project design. USA: AWS Truepower; 2010. Available at <http://www.awsopenwind.org/downloads/documentation/ModelingUncertaintyPublic.pdf>. (Accessed 2012).

4. Katic I, Højstrup J, Jensen NO. A simple model for cluster efficiency. In: Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition; Rome; 1986. pp. 407–410.

5. Ainslie JF. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. J Wind Eng Ind Aerodyn 1988;27:213–224.

6. Frandsen ST, Barthelmie RJ, Pryor SC, Rathmann O, Larsen S, Højstrup J, Thøgersen M. Analytical modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms. Wind Energy 2006;9:39–53.

7. Frandsen ST. Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters. Report Risø-R-1188(EN). Risø National Laboratory; Jan 2007.

8. Wolfe J. Deep array wake loss in large onshore wind farms (a model validation). Oklahoma City, Oklahoma, USA: AWEA Wind Resource Assessment Workshop 2010. Available at <http://www.ramwind.com/publications/20100818.AWEA.DeepArray.Wolfe.pdf>. (Accessed 2012).

9. Brower MC, Robinson NM. The openWind deep-array wake model: development and validation. USA: AWS Truepower; 2010. Available at [http://www.awsopenwind.org/downloads/documentation/DAWM\\_WhitePaper.pdf](http://www.awsopenwind.org/downloads/documentation/DAWM_WhitePaper.pdf). (Accessed 2012).

10. Bernadett DW, Backcast KB. Verifying the accuracy of energy and uncertainty estimates. USA: AWS Truepower; May 2012.



## 深入阅读建议

- Ainslie JF. Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 1988;27:213–224.
- Frandsen ST, Barthelmie RJ, Pryor SC, Rathmann O, Larsen S, Højstrup J, Thøgersen M. Analytical modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy* 2006;9:39–53.
- International Electrotechnical Commission (IEC) 61400-1, Wind turbines—Part 1: Design Requirements (Third Edition: 2005–08). (IEC publications can be purchased or downloaded from <http://webstore.iec.ch/>.)
- Katic I, Højstrup J, Jensen NO. A simple model for cluster efficiency. In: *Proceedings of European Wind Energy Conference and Exhibition*; Rome; 1986. pp. 407–410.
- Robinson NM. openWind theoretical basis and validation, AWS Truepower; 2010. Available at <http://www.awsopenwind.org/downloads/documentation/OpenWindTheoryAndValidation.pdf>. (Accessed 2012).
- Wind Farm Design: Planning, Research, and Commissioning. *Renewable Energy World*; April 2009. Available at <http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2009/04/wind-farm-design-planning-research-and-commissioning>. (Accessed 2012).
- Wind Turbine Wake Aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences* (39), Vermeer, Sorensen, and Crespo; 2003. Available at <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.132.6485&rep=rep1&type=pdf>. (Accessed 2012).

# 附录

## 附录 A 风资源评估设备销售商

仪器和测风塔供应商

All Weather, Inc.

[www.allweatherinc.com](http://www.allweatherinc.com)

Belfort Instrument

[www.digiwx.com](http://www.digiwx.com)

Campbell Scientific, Inc.

[www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com)

Climatronics Corporation

[www.climatronics.com](http://www.climatronics.com)

Coastal Environmental

Systems

[www.coastalenvironmeatal.com](http://www.coastalenvironmeatal.com)

Geotech Instruments

[www.geoinstr.com](http://www.geoinstr.com)

Kipp & Zonen

[www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com)

LI-COR, Inc.

[www.licor.com](http://www.licor.com)

Met One Instruments

[www.metone.com](http://www.metone.com)

NovaLynx Corporation

[www.novalynx.com](http://www.novalynx.com)

NRG Systems, Inc.

[www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com)

Radian Corporation

[www.radiancorp.com](http://www.radiancorp.com)

M. Young

[www.youngusa.com](http://www.youngusa.com)

Rohn Products

[www.rohnnet.com](http://www.rohnnet.com)

Sabre Industries

[www.sabreindustriesinc.com](http://www.sabreindustriesinc.com)

Scientific Sales

[www.scientificsales.com](http://www.scientificsales.com)

Second Wind Inc.

[www.secondwind.com](http://www.secondwind.com)

Thies Clima

[www.ThiesClima.com](http://www.ThiesClima.com)

Tower Systems

[www.towersystems.com](http://www.towersystems.com)

Vaisala Inc.

[www.vaisala.com](http://www.vaisala.com)

Vector Instruments

[www.windspeed.co.uk](http://www.windspeed.co.uk)

Yankee Environmental Systems

[www.yesinc.com](http://www.yesinc.com)

WindSensor

[www.windsensor.dk](http://www.windsensor.dk)

LIDAR 设备供应商

Catch the Wind Ltd,

[www.catchthewindinc.com](http://www.catchthewindinc.com)

Leosphere

[www.lidarwindtechnologies.com](http://www.lidarwindtechnologies.com)

NRG Systems

[www.nrgsystems.com](http://www.nrgsystems.com)

Lockheed Martin

www, lockheedmartin. com	AQSystem
Natural Power	www. aqs. se
www. naturalpower. com	Metek GmbH
SgurrEnergy Ltd.	www. metek. de
www. sgurrenergy. com	Remtech
SODAR 设备供应商	www. remtechinc. com
Atmospheric Research & Technology (ART)	Scintec Corporation
www. sodar. com	www. scintec. com
Atmospheric Systems Corporation (ASC)	Second Wind Inc.
www. minisodar. com	www. secondwind. com

### 风资源评估设备

下面是目前行业内最常使用的某些风资源评估设备单。但它不应视为包罗万象的。

#### 转杯风速计

- 1) Climatr-onics; F460 Wind Speed Sensor
- 2) Met One; 010C
- 3) Second Wind; C3
- 4) NRG Systems; Maximum #40
- 5) Thies; First Class Advanced
- 6) Vaisala; WA 15
- 7) Vector; A 100LK
- 8) WindSensor; P2546A

#### 风向标

- 1) Climatronics; F460 Wind Direction Sensor
- 2) Met One; 020C
- 3) NRG Systems; 200P
- 4) Thies Clima; First Class
- 5) Vaisala; WA 15
- 6) Vector; W200P

#### 垂直螺旋桨风速计

- 1) Climatronics; M 102236 Vertical Propeller Anemometer
- 2) R. M. Young; 27106 Vertical Propeller Anemometer

#### 声学风速计

- 1) Applied Technologies; CATI/2
- 2) Campbell Scientific; CSAT3
- 3) Climatronics; 102642 Sonic Wind Sensor

- 4) Gill Instruments: WindSonic 2-D Ultrasonic Anemometer
- 5) Met One: Model 50.5 Solid State Wind Sensor
- 6) Metek: Ultrasonic Anemometer USA-1
- 7) R. M. Young: Model 81000 Ultrasonic Anemometer
- 8) Thies Clima: Ultrasonic Anemometer 3D
- 9) Vaisala: WS425

SODAR 装置

- 1) ART: Model VT-1 SODAR System
- 2) ASC: Models 4000, 3000, and 2000
- 3) Metek: Phased Array SODAR
- 4) Remtech: PA0
- 5) Second Wind: TRITON Sonic Wind Profiler
- 6) Scintec Corporation: Flat Array Sodar Acoustic Proiller

LIDAR 装置

- 1) Catch the Wind: Vindicator
- 2) Lockheed Martin: WindTracer
- 3) Natural Power: ZephIR Laser Anemometer
- 4) NRG Systems/Leosphere: Windcube
- 5) SgurrEnergy: Galion

附录 B 部分 GIS 数据源

与风资源评估有关的 GIS 数据源

区域和数据类型	互联网地址
美国	
联邦： USGS Seamless Data Server (USGS 无缝数据服务器)	<a href="http://seamless.usgs.gov/index.php">http://seamless.usgs.gov/index.php</a>
州： State GIS Clearinghouses (州 GIS 数据交换中心) State & Federal GIS Clearinghouses (州及联邦 GIS 数据交换中心)	<a href="http://web.mit.edu/dtfg/www/data_gis_us_state.htm">http://web.mit.edu/dtfg/www/data_gis_us_state.htm</a> <a href="http://ncl.sbs.ohio-state.edu/5_sdata.html">http://ncl.sbs.ohio-state.edu/5_sdata.html</a>
特定 GIS 数据网站： National Wetlands Inventory (国家湿地清单) Free Orthoimagery Sources (免费正射影像源) Great Lake Information Network (大湖区信息网) FCC Data (FCC 数据网)	<a href="http://www.fws.gov/wetlands/Data/mapper.html">http://www.fws.gov/wetlands/Data/mapper.html</a> <a href="http://worldwindcentral.com/wiki/Sources_of_free_orthoimagery">http://worldwindcentral.com/wiki/Sources_of_free_orthoimagery</a> <a href="http://gis.glin.net/ogc/services.php?by=topic">http://gis.glin.net/ogc/services.php?by=topic</a> <a href="http://wireless.fcc.gov/geographic/index.htm?job=home">http://wireless.fcc.gov/geographic/index.htm?job=home</a>

(续)

区域和数据类型	互联网地址
风资源数据： 当地大学 NOAA's National Climatic Data Left (NOAA 国家气候数据遗存) NREL Wind Power Data (NREL 风电数据网) State Climate Offices(州气象局) Wind Powering America (美国风电)	各种各样  <a href="http://gis.ncdc.noaa.gov/geoportal/catalog/main/home.page">http://gis.ncdc.noaa.gov/geoportal/catalog/main/home.page</a>  <a href="http://nrel.gov/gis">http://nrel.gov/gis</a>  <a href="http://www.stateclimate.org">http://www.stateclimate.org</a> <a href="http://windpoweringamerica.gov/wind_maps.asp">http://windpoweringamerica.gov/wind_maps.asp</a>
全球性	
GIS Data Clearinghouses (GIS 数据交换中心) Global Landcover Data (全球土地覆被数据) Corine Landcover Data (Europe) (Corine 土地覆被数据(欧洲)) CDED(Canadian Elevation Data) (CDED,加拿大海拔数据) ASTER Global Elevation Data (ASTER 全球海拔数据) SRTM Global Elevation Data (SRTM 全球海拔数据)	<a href="http://data.geocomm.com">http://data.geocomm.com</a>  <a href="http://www.mdafederal.com/home">http://www.mdafederal.com/home</a>  <a href="http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-1">http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/corine-land-cover-2006-raster-1</a> <a href="http://www.geobase.ca/geobase/en/data/cded/index.html">http://www.geobase.ca/geobase/en/data/cded/index.html</a>  <a href="http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp">http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp</a>  <a href="http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/">http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/</a>
风资源数据： AWS Truepower 3Tier Vortex	<a href="http://windnavigator.com">http://windnavigator.com</a> <a href="http://www.3tiergroup.com">http://www.3tiergroup.com</a> <a href="http://www.vortex.es">http://www.vortex.es</a>

## 关于本书

风电项目的成功开发取决于风在哪里、以何种频度与强度吹动。评估阶段产生错误会导致开发商、借贷方和投资商的重大经济损失。

《风资源评估：风电项目开发实用导则》一书向读者说明了如何实现高标准资源评估，如何降低与长期资源性能相关的不确定性，如何使他们的项目资产价值最大化。本书首先介绍高质量风电监测项目的选址、安装和运行，接着论述数据质量控制和验证，把测量结果从风速计高度外推至风力机高度，历史气象条件下短期观测结果的修正以及考虑地形和地表条件的风流场建模等方法。

此外，本书还论述了以下专题：

- 工作人员安全
- 数据安全
- 遥感技术（Sodar和Lidar）
- 海上风资源评估
- 气候变化的影响
- 不确定性估算
- 风电场设计及发电量估算

为中华崛起传播智慧

地址：北京市百万庄大街22号

邮政编码：100037

### 电话服务

社服务中心：010-88361066

销售一部：010-68326294

销售二部：010-88379649

读者购书热线：010-88379203

### 网络服务

教材网：<http://www.cmpedu.com>

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

机工微博：<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

策划编辑◎付承桂



## 国际电气工程先进技术译丛 传播国际最新技术成果 搭建电气工程技术平台

《风资源评估：风电项目开发实用导则》  
《风力发电技术与工程应用》  
《电池系统工程》  
《微电网和主动配电网》  
《双馈感应电机在风力发电中的建模与控制》  
《高性能交流传动系统——模型分析与控制》  
《光伏发电系统的优化——建模、仿真和控制》  
《覆冰与污秽绝缘子》  
《高压直流输电——功率变换在电力系统中的应用》  
《MATLAB数值分析方法在电气工程中的应用》  
《太阳能利用技术及工程应用》  
《超级电容器的应用》  
《小型风力机：分析、设计与应用》  
《太阳能电池、LED和二极管的原理：PN结的作用》  
《风力发电系统——技术与趋势》  
《电力系统高级预测技术和发电优化调度》  
《大规模储能技术》  
《风电系统电能质量和稳定性对策》  
《传热学：电力电子器件热管理》  
《现代电力电子学与交流传动》  
《功率半导体器件：原理、特性和可靠性》  
《风能系统——实现安全可靠运行的优化设计与建设》  
《储能技术》  
《光伏系统工程》（原书第3版）  
《光伏与风力发电系统并网变换器》  
《车辆能量管理：建模、控制与优化》  
《纯电动及混合动力汽车设计基础》（原书第2版）  
《电动汽车技术、政策与市场》  
《永磁无刷电机及其驱动技术》  
《先进电气驱动的分析、建模与控制》  
《智能电网可再生能源系统设计》  
《风力发电工程指南》  
《柔性交流输电系统在电网中的建模与仿真》  
《风电并网，联网与系统运行》  
《海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响》  
《光伏技术与工程手册》  
《风力发电的模拟与控制》  
《风电场并网稳定性技术》  
《智能电网中的电力电子技术》  
《高效可再生分布式发电系统》  
《分布式发电——感应和永磁发电机》  
《电力系统谐波》  
《风能与太阳能发电系统——设计、分析与运行》（原书第2版）  
《瞬时功率理论及其在电力调节中的应用》  
《风力机控制系统原理、建模及增益调度设计》  
《高压输电设备实用手册》  
《电力变流器电路》  
《电力系统中的电磁兼容》  
《超高压交流输电工程》（原书第3版）  
《高压直流输电与柔性交流输电控制装置——静止换流器在电力系统中的应用》  
《配电可靠性与电能质量》

WILEY

Copies of this book sold without  
a Wiley Sticker on the cover are  
unauthorized and illegal

上架指导 工业技术 / 新能源 / 风电

ISBN 978-7-111-47380-0

ISBN 978-7-111-47380-0



9 787111 473800 >

定价：59.00元