



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



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, 也可供风电投资者参考。

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; 刘长浥, 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

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

0 001—2 500 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%^①，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 and 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

^① 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）。

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
第3章 风电工程选址	19
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
第4章 监测站仪表及测量	30
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
第5章 监测站安装	48
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
第 6 章	监测站运行和维护	69
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
第 7 章	数据采集和处理	78
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
第 8 章	陆基遥感系统	83
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
第 11 章	轮毂高度的风资源评估	114
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
第 12 章	气候修正过程	124
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

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
第 13 章	风流场建模	142
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
第 14 章	海上风资源评估	156
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
第 15 章 风资源评估中的不确定性	176
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
第 16 章 风电场设计和发电量估算	186
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

XIV 风资源评估：风电项目开发实用导则

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^①（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。

① 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。^①

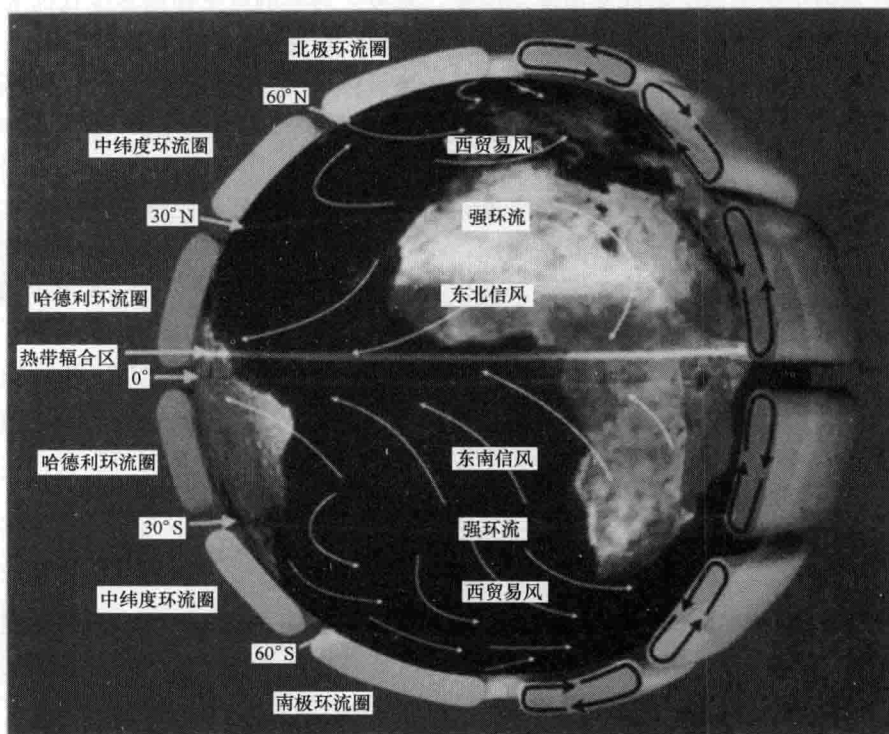


图 1-1 主要全球性大气循环（来源：NASA/JPL-Caltech）

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

① 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。