



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

风能气象学

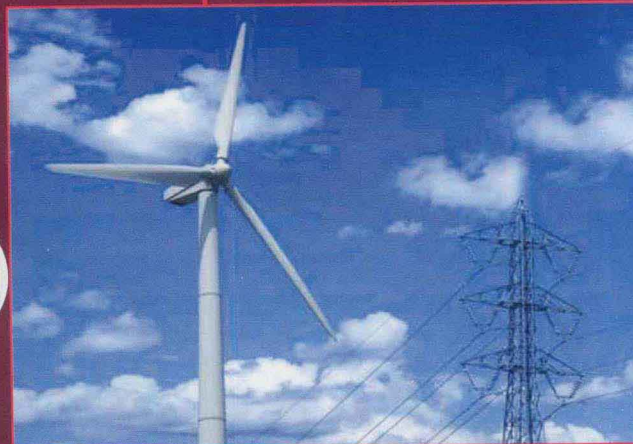
Wind Energy Meteorology

(德) Stefan Emeis 著

张怀全 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风能气象学

Wind Energy Meteorology

(德) Stefan Emeis 著

张怀全 译



机械工业出版社

本书意在介绍陆上和海上风力发电的气象学边界层条件,为这一重要的可再生能源形式的规划和运营提供可靠的气象学信息,包括风法则的推导和对风轮廓线的描述等;同时论述了复杂地形和海上风场的风况研究,以及夜晚低空急流;还有一章专门讲述了大型风电场和效率及其尾流问题。

本书的理论性很强,具有一定的开创性和总结性,参考价值很高。本书适合对风资源评估的气象学理论感兴趣的读者,是风资源评估知识体系的重要组成部分。

Translation from English language edition: "Wind Energy Meteorology" by Stefan Emeis.

Copyright © 2013, Springer Berlin Heidelberg.

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2013-4240 号

图书在版编目(CIP)数据

风能气象学/(德)艾梅斯(Emeis, S.)著;张怀全译. —北京:机械工业出版社, 2013. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Wind Energy Meteorology

ISBN 978-7-111-44668-2

I. ①风… II. ①艾… ②张… III. ①风力能源—气象学
IV. ①P442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 261525 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:张俊红 责任编辑:吕 潇

版式设计:常天培 责任校对:闫玥红

封面设计:赵颖喆 责任印制:李 洋

北京华正印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 10.25 印张 · 209 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44668-2

定价: 49.80 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066 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

风能无疑是 21 世纪解决人类能源需求的重要途径之一，尤其对人口众多且正处在发展中的中国，意义更是非比寻常。风能是可再生的清洁能源，对改善我国的能源结构，满足日益增长的能源需求都意义重大。风是大气流动的产物，因此也是一个气象参数。那么为了更好地利用风能，就必须研究气象学。

气象学在风能领域的应用有其独特性，有些大气特征变得更为重要，因此与传统的气象学有一定的差别。同时，风力发电机的大型化和风电场的复杂化，使得风力发电机所承受的风况条件更加复杂，对气象学的研究也就因此变得更加重要。正是出于实际应用的需要，风能气象学在近些年逐渐发展成为了气象学的一个独立的分支。风能气象学是风资源评估与微观选址的理论基础，具有十分重要的实用价值。

本书从简单地形开始，拓展到复杂地形以及海上风场，非常系统地论述了风能气象学这一学科体系，是作者 Stefan Emeis 多年的气象学研究和风能应用经验的结晶。译者有幸接触了这本书，并将这本书的译本展示给国内广大读者，期望对我国风能的更合理和有效的利用有积极的促进作用。本书比译者编著的《风资源与微观选址：理论基础与工程应用》更好地阐述了气象学在风资源与微观选址领域的应用。

鉴于译者能力有限，也许会有文不达意之处，请读者见谅。译者想感谢机械工业出版社对风电领域专业书籍的一贯支持，为促进我国风电开发的技术进步做出了重大贡献。译者也真心希望本书能丰富国内风资源评估领域的参考文献。

张怀全

原 书 序

目前,已有很多关于如何将风的动能转化成电能的书籍上市。本书由气象学家撰写,将完全专注于影响风力发电的大气特征和现象。据我所知,这样的书尚不存在。本书展示当今被称为“能源气象学”的一部分,为气象学领域的一个新兴的分支学科。

感谢 Springer Science Media 邀请我撰写此书,作为触及可再生能源方方面面的“绿色能源与技术”系列丛书的组成部分。该系列已经包含了风能领域的多个主题。这些主题多从技术角度出发,但是没有专注于风能转化的气象边界条件的。尤其感谢 Springer 的 Claus Ascheron,他伴随了稿件的准备过程,并提供了宝贵的意见。

我本人从 20 世纪 80 年代起,就一直是气象学领域的科学家。能源气象学领域在 20 多年前就引起了我的注意,虽然“能源气象学”的名词并不那么久远。我对这一学科的兴趣起始于丹麦 Roskilde 附近的 Risø 丹麦国家实验室风能学会[今天是丹麦理工大学(DTU)的一部分]的一个公休假,期间我幸会了边界层气象学专家,并看到了最早的风力发电机测试场之一。我至今仍然保持着与该知名的丹麦研究机构的富有成果和友好的联系。1991 年,我还第一次在 Risø 见到了晚年的 Sten Frandsen,与他的对话激起了我对风场问题的关注。本书第 6 章展示的内容就是那次在 Risø 停留期间产生的想法,不过是更加详述的版本。因此,我将第 6 章献予他。

后来,我从事了多年用 SODAR 仪器分析大气边界层声谱轮廓的工作。这些仪器基于对背散射信号的多普勒频移的分析,让我们能在地面对边界层风轮廓进行探测。这一技术在 20 世纪 90 年代引起了风能领域的注意。近些年,对云幕仪(RASS 和风激光雷达)的操作补充了我的实验和专业知识。另外,我在多个研究项目中,用德国海上测量平台 FINO1 的数据研究了海洋边界层的独特性。我是南德国风能研究联合会 WindForS 的成员。

这些海洋边界层的研究项目由德国环境部、自然保护和核安全(BMU, FKZ 032 99 61, 032 50 50, 032 53 04)多次授予资金支持。RAVE 计划(在 Alpha Ventus 的研究)内的项目的初衷是为了德国第一个海上风场 Alpha Ventus 的科学建立。该风场坐落于德国湾(German Bight),距离海岸线最短距离 45km,水深约 30m。第一台风力发电机开始吊装的 6 年前,在 Alpha Ventus 建设了 100m 高的气象测量塔(FINO1),用以帮助研究海洋边界层。本书中关于海洋边界层的很多信息都是基于该塔。该塔从 30m 到 100m 有 8 个测量平台。对该塔数据的评估主要由

我的两名 PhD 学生——Matthias Türk 和 Richard Foreman 完成。更多的资金支持通过丹麦理工大学 Risø 实验室的 Sven-Erik Gryning 带领的项目获得，该项目目前由 Forsknings 和丹麦科学技术发展部创新局（Sagsnr 2104-08-0025）对“大型风力发电机——高达 400m 的风轮廓”项目内支持。城市边界层则部分基于由德国教育与研究部（BMBF）在 AFO2000 计划框架内资助的研究成果。附录 A 的图 A.1 和 A.2 中的来自 Graswang 的数据，通过由 BMBF 资助的 Helmholtz 社团的 TERENO 项目框架获得。对复杂地形的风流研究则在一定程度上由于多个私营公司的资助才成为可能。

稿件的草稿版本由 Beatriz Cañadillas、Richard Foreman、Tom Neumann 和 Matthias Türk 阅读。我感谢他们的宝贵意见、建议和帮助。但是，对于任何错误或不一致性则由我个人承担。我希望这本书能够促使风能转化的气象学部分变得更加清晰。我们迫切需要可再生能源生产的有效策略，来应对人类对能源的需求，更好地理解风力发电的气象前提则应该是这一策略的组成部分。

Stefan Emeis

变 量 表

a	消减因子	u_{gust}	阵风风速
	稳定度修正方程中的常数	u_*	摩擦速率
	指数函数系数	u_∞	上风向风速（过山气流）
b	稳定度修正方程中的常数	v	南北风分量
c	波龄	v_1	1 年 1 遇最大风速
c_p	比热	v_{50}	50 年 1 遇最大风速
c_{ph}	相速度	v_{e1}	1 年 1 遇 10min 极端风速
c_2	式 (3.91) 中的因子	v_{e50}	50 年 1 遇 10min 极端风速
c_s	表面拖曳系数	v_g	地转风的南北风分量
c_{teff}	有效拖曳系数	w	垂直风分量
d	置换高度	w_*	对流速率尺度
f	水平科罗拉力	x	东向坐标
f^*	垂直科罗拉力		稳定度修正方程中的缩写
$f(x)$	威布尔方程	y	北向坐标
g	重力	z	垂直坐标
h	大气层高度	z_0	粗糙度长度
k	尾流衰减系数	z_i	边界层高度
k_{max}	频谱的最大波数	z_r	参考高度
l	混合长度	z_g	艾克曼层高度
	内部层高度（山上气流）	z_p	Prandtl 层高度
m	质量特定的动量	z_m	形状方程中的高度变量
n	频率	z_A	形状方程中的高度变量
p	空气压力	A	威布尔分布的尺度参数
q	比湿	A_g	威布尔分布的地转风尺度参数
r	曲率半径	A_r	风力发电机的扫风面积
s	距离	B	Bowen 比
t	时间	B_i	背散射轮廓
u	西向东的风速分量	BR	浮力比例
u_{10}	10m 平均风速	C_D	拖曳系数
u_g	西向东的地转风速分量	C_{DN10}	10m 高中性拖曳系数
u_h	轮毂高度风速		
u_{pot}	位势流理论的风速		

C_T	推力系数	T	波龄
D	距离		温度
D_u	非地转风分量		时间尺度
D_v	非地转风分量	T_m	平均温度
D_w	尾流宽度	T_v	虚温
E_{wind}	风能	α	指数因子 (幂)
F	威布尔分布方程		Charnock 参数
$F_{x,y,z}$	湍流摩擦的分量	α_0	地转风与表面风的夹角
G	阵风因子	η	混合长度的限值
$G(p)$	百分位方程	φ	纬度
H	山高		风转向角
H_s	有效浪高	φ_ε	动能的耗散率
I_u	湍流强度	ϕ	微分稳定性修正方程
K_M	湍流交换系数/湍流黏性	γ	艾克曼层风轮廓的长度尺度的 倒数
L	山的半高	κ	卡曼常数
L_v	冷凝的潜热	ρ	空气密度
L_x	积分长度尺度	σ	山体的形状方程
$L_{L,M,U}$	风轮廓线法则的长度尺度	$\sigma_{u,v,w}$	风分量的标准偏差
$L_{u,v,w}$	频谱的长度尺度	σ_{u90}	标准偏差 σ_u 的 90 百分位
L_*	Obukhov 长度	τ	湍流动量通量
M_n	威布尔分布的高阶矩	Δs	分数风加速 (过山气流)
P_o	压力方程 (过山气流)	Θ	位温
P_δ	压力方程 (过山气流)	Θ_v	虚位温
R	气体常数	Ω	地球的自转速率
R_u	缩减因子	Ψ_m	积分稳定度修正方程
R_t	缩减因子	Λ_1	长度尺度
R_n	缩减因子	Λ_u	长度尺度
$S_{u,v,w}$	频谱	Λ_{smax}	频谱长度尺度
Sf	结构方程	∇	nabla (微分算符)

目 录

译者序

原书序

变量表

第1章 内容介绍	1
1.1 本书讨论的范围	1
1.2 现存文献的总览	2
1.3 风力发电的历史	2
1.4 风力发电的潜力	3
1.5 风力发电的现状	4
1.6 本书的结构	5
参考文献	6
第2章 风况	7
2.1 全球循环	7
2.2 驱动力	8
2.2.1 静力方程	8
2.2.2 风的动量收支方程	9
2.3 地转风和梯度风	11
2.4 热成风	12
2.5 边界层的风	13
2.6 雷暴阵风和龙卷风	14
2.7 空气密度	14
参考文献	16
第3章 平原地形上的垂直轮廓	17
3.1 表面层 (Prandtl 层)	19
3.1.1 对数风轮廓	21
3.1.2 指数风轮廓	25
3.1.3 对数法则与指数法则对比	25
3.1.4 大风速下时的垂直风轮廓	31

3.2 表面层之上的轮廓线法则	31
3.2.1 艾克曼层方程	31
3.2.2 艾克曼层内的惯性震荡	32
3.2.3 艾克曼层内的垂直风轮廓	33
3.2.4 边界层内风轮廓线的统一描述	33
3.3 频谱	37
3.4 风轮廓的日变化	39
3.4.1 威布尔参数的垂直轮廓	40
3.4.2 低空射流	42
3.5 内部边界层	46
3.6 森林之上的风和湍流轮廓	49
3.7 城镇里的风	50
3.7.1 城镇边界层的特点	50
3.7.2 风和湍流的垂直轮廓线	52
3.7.3 城市冠层的空间流现象	55
3.8 平原地形总结	55
参考文献	56
第4章 复杂地形的风	60
4.1 复杂地形上的边界层特征	60
4.1.1 山风和谷风	61
4.1.2 重力风	64
4.2 孤山上的风轮廓	64
4.2.1 位势流	64
4.2.2 位势流的修正: 内层的附加项	66
4.2.3 位势流的修正: 考虑热稳定性	69
4.2.4 山上的威布尔参数	69
4.3 悬崖上的风轮廓	70
4.4 频谱	73
4.5 日变化	73
4.6 复杂地形总结	73
参考文献	74
第5章 海洋风	76
5.1 海洋边界层的特征	76
5.1.1 海洋表面粗糙度和拖曳系数	77

5.1.2 风浪区和与稳定性相关的波浪形成	80
5.1.3 极端浪高	85
5.1.4 波龄	86
5.1.5 水汽垂直轮廓的影响	87
5.1.6 年波动和日波动	88
5.2 垂直轮廓	88
5.3 极端风速	91
5.4 湍流	92
5.4.1 湍流强度	92
5.4.2 风速方差	96
5.4.3 湍流长度尺度和倾角	98
5.4.4 阵风事件	99
5.5 威布尔参数	102
5.6 海岸效应	103
5.6.1 海陆风	104
5.6.2 低空急流	105
5.7 海洋边界层总结	105
参考文献	106
第6章 风场物理	109
6.1 风力发电机尾流	109
6.2 风场平均风速分析模型	111
6.3 风场尾流分析模型	117
6.4 分析模型对 FINO1 稳定性数据的应用	119
6.5 龙卷风袭击风场的风险	121
6.6 风场总结	121
参考文献	122
第7章 展望	125
7.1 风力发电机的尺寸	125
7.2 海上风电场的大小	125
7.3 其他风能转换技术	126
7.4 评估风条件的新型测量和模型工具	126
7.5 风资源和气候变化	126
7.6 大规模风能提取对天气和气候的反馈	127
参考文献	128

附录	129
附录 A 统计工具	129
A. 1 时间序列分析	129
A. 2 平均风速频谱和威布尔分布	133
A. 3 极端平均风速和 Gumble 分布	137
A. 4 极大阵风	138
A. 5 阵风持续时间和阵风内的风加速	139
A. 6 湍流元素的大小	140
附录 B 边界层结构和高度的遥感	141
B. 1 声学检测方法	143
B. 1. 1 回声接收法	143
B. 1. 2 水平风速法	143
B. 1. 3 垂直风方差法	143
B. 1. 4 加强回声接收法	144
B. 2 光学探测法	145
B. 2. 1 阈值法	145
B. 2. 2 梯度法或微分法	146
B. 2. 3 理想化背散射法	147
B. 2. 4 小波法	147
B. 2. 5 方差法	148
B. 3 RASS	148
B. 3. 1 两种不同 RASS 的结合使用	148
B. 3. 2 应用 RASS 的进一步算法	149
B. 4 应用多个仪器的其他算法	149
B. 4. 1 SODAR 和剖风仪结合使用	149
B. 4. 2 SODAR 和云高计结合使用	149
参考文献	150

第1章 内容介绍

大气流中可获取的风能 E_{wind} ，即空气的动能 $0.5\rho u^2$ ，随着风速 u 的平流输送，可依照下式进行量化：

$$E_{\text{wind}} = 0.5\rho A_r u^2 u = 0.5\rho A_r u^3 \quad (1.1)$$

式中 ρ ——空气密度；

A_r ——风力发电机的扫风面积；

u ——叶轮面上的平均风速。

式 (1.1) 给出了叶轮盘上可获得的风能，单位为 W，此处的空气密度单位为 kg/m^3 ，叶轮面积单位为 m^2 ，平均风速单位为 m/s 。理论上，风力发电机最多可提取该能量的 16/27 (Betz 1926)。究竟能在多大程度上接近这个理论极限，则是一个工程问题，本书不对此展开讨论。另外的挑战是风速和空气密度并非恒定。本书主要讨论风速在大气边界层内是如何随着空间（尤其垂直方向）和时间变化的。空气密度将在 2.7 节进行阐述。气象学中的这一部分如今被称做“风能气象学”。在内容介绍中，我们以对风能的一些基本思考和对本书结构的描述开始，然后将在第 2 章研究风速和空气密度及其变化。

1.1 本书讨论的范围

在可预见的未来，人类对能源的需求将持续甚至增长。从长期来看，只有可再生能源才可能提供可持续的供给。目前应用的化石能源资源是有限的，燃烧时产生空气污染，威胁地球气候。可再生能源包括水能、浪和潮汐能、地热能、生物质、太阳能和风能等。本书专注于允许风力发电机将风能转化成电能的大气条件。本书以气象学家的视角出发，作者拥有风力发电领域的多年经验。

用风能系统发电已经进行了 20 多年。最初的几年中，风力发电机较小，叶轮直径比大气表面层的垂直高度小得多。那时，评估局地风气候，进而计算风力发电机荷载和能量产出是相对容易的。了解轮毂高度平均风速的风频分布和总体湍流强度就足以提供单台风力发电机和小型风电场选址所必要的背景信息了。

与此同时，风力发电机的尺寸不断增大。多兆瓦级风力发电机的轮毂高度经常高出大气表面层，还会频繁遇到大于 100m 的叶轮直径。叶轮直径超过 160m，功率为 7MW 的海上风力发电机已经被设计出来，并会在不久的将来用于实践。这导致风力发电机与低空大气的交互作用变得复杂得多。长期以来被认为无关的气象特

征,正在变成规划和运行单台大型风力发电机和越来越大的风电场的决定性因素,尤其是必须知道平均风速和湍流强度的垂直梯度。此外,这些必要的风参数的垂直范围已经达到很难由测风塔测量的高度,因此需要新的测量技术来采集这些必要的风的信息。这导致了地基远程传感技术的繁荣(见 Emeis 2011)。风力发电机的经济性取决于建造和运维成本与风能产出间精确判断的权衡。只有当更高的产出可以支付额外成本时,塔筒高度增加的每一米才是有意义的。

此外,尤其是与北海和波罗的海接壤的国家,风电场的主要开发区域已经从陆地移向了海洋。这里,在未来可能由海上风电场来提供多数的风能。这意味着风电场正被建造在对大气边界层垂直结构的诸多细节并不足够清楚的区域。如果说有一些海洋边界层的实验数据,也仅是之前由浮标、船舶和油井获取的浅层数据。近几年在德国湾和波罗的海建设了几个气象塔,如德国的3个100m高的FINO塔,目前正在首次对海洋边界层的较深层提供长期数据。

该书试图分析和总结关于风力发电现存的大气边界层的信息(陆上和海上),将专注于风和湍流的垂直轮廓,并尽量解释观察到的垂直轮廓背后的物理过程。本书将不展现地球的某些特定区域的风气候学。分析的内容将包括:指数法则以外的垂直轮廓法则特征、非稳态现象,如夜晚低空急流、海洋边界层中,取决于风速的粗糙度和湍流条件,以及大型风电场中,风尾流的复杂的交互作用。

1.2 现存文献的总览

据作者所知,除了WMO的技术说明《Meteorological Aspects of the Utilization of Wind as an Energy Source》外,不存在单独致力于风力发电的气象学基础的专著。该技术说明发表于1981年,没有对当今的风力发电机尺寸进行预期。尽管目前在专著和杂志中出现了大量的关于大气边界层中的风和湍流的文献,但是仅有其中少数文献提及风力发电(如 Petersen 1998a, b)。另外,已有的很多关于风力发电本身的书籍和论文,主要专注于技术和工程问题,并仅在一个或几个章节内涵盖风资源。最近的一个例子是由 Burton 等人于2011编著的《Wind Energy Handbook》的第2版。该书的第2章用了30页总结了风速变化、阵风 and 极端风速、风速预测和湍流。同样, Hau 在他的书《Wind Turbines》(由 Springer 于2006年出版发行)中,在第13章用34页总结了风资源内容。Lange 和 Focken 编著的,由 Springer 于2006年出版的《Physical Approach to Short-term Wind Power Prediction》一书是风速预测领域的专著。

1.3 风力发电的历史

人类为各种目的利用风能的历史由来已久。风能的利用起始于对小麦和其他谷

物的脱壳和亚热带、热带地区建筑的空气调节。风曾被用于维持火力和熔化金属。帆船的发明是为了大洋旅行和在遥远海岸间建立贸易联系。地球亚热带几乎持续不断刮的风至今仍被命名为“信风”。

风车的历史可以追溯到2000年前。生活在公元1世纪亚历山大的Heron,被认为是第一个发明风力驱动转轮的人。他的机器仅被用做驱动风琴管(Brockhaus, Vol. 24, 2001)。波斯的风车据说从公元7世纪(Neumann 1907)或10世纪(Brockhaus 2001)就已经存在了,为垂直轴的谷物研磨机(Hau 2000)。法国的第一个风车在1105年被提及(Neumann 1907)。此后,该技术传播到英格兰,在那里第一个风车出现于1140年(Neumann 1907)。在13世纪的英格兰东部和北欧,风车的数量出现增长,如1235年的丹麦。这一发展的高潮出现在1500到1650年间,此时由于风力驱动排水泵的使用,荷兰的可耕种面积可能增加了40%(DeBlieu 2000)。据说在1393年,德国就已经在Speyer建设了第一个风车(Neumann 1907)。在18和19世纪,在欧洲运行着约100 000台以抽水和生产面粉为目的的风车。但是这一时代由于蒸汽机和电力的出现而终结。更多历史记录请参考Ackermann和Söder(2000)。

从风中生产电能的历史则要短得多。Dane Poul la Cour(1846~1908)在丹麦的Askov建造了第一台风力发电机。德国工程师Betz于1926年首次描述了风力发电机的空气动力学理论(Betz 1926)。Betz因子(16/27)至今仍被看做风力发电机可从风中提取能量的极限。

但是,直到20世纪的最后20年,风力发电机才被大规模建设,且尺寸不断增大。初期失败的尝试是德国1983年建设的3MW风力发电机Growian(große Windenergieanlage)。那是一个两叶片的风力发电机,叶轮直径100m。由于很多的技术问题,它仅发电了17天,并于1988年被拆除。从此,又开始了小型风力发电机的发展。这一“革命性”的措施是成功的,以至于比Growian更大的风力发电机成为了当今的标准,尤其是海上风场。

1.4 风力发电的潜力

风能是一种可再生的能源形式。世界上几乎每个角落都有风能,虽然局域差别是显著的。风能由太阳能产生,并不断补充。太阳能实际上是无限的。除了风力发电机的生产、运输、吊装和维护外,太阳能转化成风能的过程也不存在碳循环。由水平空气压力差产生的风能则主要由太阳辐射的纬度差别而引起。在自然界的行星大气能量循环中,风能主要通过发生在地表的摩擦而耗散,因此转化成最终的和行星能量链条中最低等级的成员——热。用风能发电不一定会扰动行星能量循环,而只是在地表附近增加了额外的摩擦力,使一部分转化成高价值的电能,而仅一部分转化成热能。这些电能被人类利用时,也将转化成熟,行星能量循环就再次闭合

了。由于电能的使用几乎不存在延迟,且不违反能量守恒定律,全球行星能量循环似乎不会由于风能的产生而被扰动。因此,可以把风能看做可持续的可再生能源形式。但是熵的收支也被影响了。从风中大规模的生产能量增加了地球系统的熵,可能减缓大气循环。关于风力发电和气候之间的相互作用详见第 7.4 节。

全球可获取的风能可以通过地球大气能量转化链条进行估计 [这里给出的数字基于 Lorenz (1995) 与 Peixoto 和 Oort (1992) 早期开创性的著作]。大气层顶部输入的太阳能约为 $174\ 300\text{TW}$ ($\sim 342\text{W}/\text{m}^2$)。其中, 1743TW ($\sim 3.5\text{W}/\text{m}^2$ 或 $55\ 000\text{EJ}/\text{年}$) 可以动能形式获取,并最终在大气中耗散。而约一半的耗散发生在边界层内 (871TW 或 $1.75\text{W}/\text{m}^2$)。假设地球 $1/4$ 的表面可用来风力发电,且风力发电机理论上可以最多提取 56% (Betz 极限) 的风能,那么就得到 122TW 的潜在风能。实际上,这个值的 50% 可能是现实的,意味着风力发电的潜能约为 61TW ($1925\text{EJ}/\text{年}$)。应用类似方法的其他估计值得到相同数级的结果 [如 Miller 等 (2011), 他得出 $18\sim 68\text{TW}$]。Castro 等 (2011) 做了更为悲观的评估,用 1200TW 作为地球大气的全球动能,其中 8.3% 可在 200m 高的表面层获得,得到 100TW 。20% 的陆地表面适用于提取这部分表面层的能量,得到 20TW 。把风电场限定在风资源合理的区域,则进一步把这个值减半为 10TW 。然后 Castro 等估计,这部分能量中仅 10% 可由风力发电机提取。因此,他们估计仅有 1TW ($32\text{EJ}/\text{年}$) 的能量可以从风中被提取。

虽然对大气中全球动能的评估非常粗糙,结果可能超过 1000TW ,但这些计算中都做了两个关键假设,即地表上动能耗散的比例 (在 8% ~ 50% 之间变化) 和由于风力发电机的技术问题导致的从这个近地层中可以提取动能的比例 (在 10% ~ 50% 之间)。以 TW 为单位的个位数可能是对地球大气中可获取风能的现实的估计。

这些数字必须与人类的能源总需求做对比。人类的能源总需求约为 15TW ($443\text{EJ}/\text{年}$),并预期将在 21 世纪中叶增加到 30TW ($947\text{EJ}/\text{年}$),21 世纪末达到 45TW ($1420\text{EJ}/\text{年}$) (CCSP 2007)。这一对比表明,风能仅能部分解决人类对可再生能源的需求,还要同时开发其他形式的可再生能源。此外,即使仅从可利用风能中提取 10%,就可以预期将对地球气候产生显著的影响 (见 7.4 节)。

1.5 风力发电的现状

截至 2011 年底,全世界风电装机达到了 215GW ,其中 18.4GW 为 2011 年前 6 个月的新增装机 (WWEA[⊖])。中国的装机总量 (52.8GW) 最大,其次为美国 (42.4GW) 和德国 (将近 28GW)。西班牙的装机总量为 21.1GW ,印度为 14.6GW 。

⊖ <http://www.indea.org/home/index.php?option=comcontent&task=view&id=317&Itemid=43> (2011 年 12 月 14 日阅读)

中国的风电装机从2009年底算起已经增长超过一倍。这些215GW的风电满足全球约2.5%的能源需求（GWEC Global Wind Energy Outlook 2010^①）。在欧洲，这一比例于2010年底达到5.3%（EWEA^②），并占德国的净电力消耗的9.5%（Ender 2011）。未来20年，这一比例规划有显著的提高。

虽然已经做了巨大的规划，但是海上风电仍然处于婴儿期。在德国，截至2011年6月底，共安装了0.21GW的海上风电（Ender 2011），小于总装机容量的1%。

215GW的全球风电装机容量已经占几个TW的可用风能的相当比例。通过对2011年上半年数据的外推，目前风电装机容量的年增长率约为15%。这一增长率可以导致风电装机容量6年内翻番，18年内增长约10倍。若以15%的年增长率稳定增长，可以在20~30年内达到1.4节中估计的极限。因此，不能预期目前的增长率会维持更长的时间。

因此，我们必须以最高效的方式提取可利用的风能。本书所汇集的风能转化的气象学基础知识可以帮助我们达到这一效率。

1.6 本书的结构

本书的组织方法如下。第2章解释大气中大尺度风的来源，并展示自由大气中大气运动的主要驱动力法则。另外，还将阐述空气密度的判定。第3~5章展现不同地表形态上，风和湍流的垂直轮廓。第3章回顾平原自然各向同性的陆地表面上经典的大气边界层气象学。重点强调风轮廓从表面层到艾克曼层以上的垂直扩展，因为如今的MW级风力发电机很容易达到这一层。这包括对使大型风力发电机夜晚风能转化出现极值的夜晚低空急流的描述。这章的最后还简短介绍了内部边界层随着地表特性的变化形成、森林边界层和城市边界层。第4章突出复杂地貌上的风流特性，尤其是复杂地形。基本的特征，如山上风流加速，用简单的分析模型予以推导。对风流在这种地表形态上的脱流的描述是重要的，则因为海岸附近平原地区的开发通常已经很充分，未来风力发电必须对更深入大陆的风场情况进行分析。在远离海岸的，接近城镇和工业区域的地方安装风力发电机，也可以减少电能生产和消费区域之间的大规模输电线路的建设。关于垂直风轮廓的最后一章，即第5章，应对现在变得越来越重要的地表形态类型——海洋表面的边界层，根据海上风电的巨大规划要求，用相当的篇幅专注于这一地表形态。第6章研究了在之前提到的各种地表形态下，由大型风电场带来的特征和问题。这已经不是纯气象学的课题了，

① <http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Publications/GWEO%202010%20final.pdf>（2011年12月14日阅读）

② http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/statistics/EWEA_Annual_Statistics_2010.pdf（2011年12月14日阅读）