



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

风能转换技术进展

Advances in Wind Energy Conversion Technology

Sathyajith Mathew

(印度)

等著

Geeta Susan Philip

金鑫 李军超 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风能转换技术进展

(印度) Sathyajith Mathew 等著
Geeta Susan Philip
金鑫 李军超 杜静 等译



机械工业出版社

本书介绍了风能转换技术的相关进展,覆盖了空气动力学、风能资源分析、离岸风能资源评价、短期预测风能方法、风力发电机载荷计算、风力发电机控制系统策略、离岸型风电场产生的大规模电力并网以及小型风力发电机的发电原理。本书引用了大量的参考书籍和文献,便于读者的学习和使用。本书不仅对从事风电技术研究的工作者和相关设备开发的研究者来说是非常实用和方便的参考书,而且对于高校相关领域的学生也是很有学习价值的。

Translation from English language edition:

Advances in Wind Energy Conversion Technology

by Sathyajith Mathew and Geeta Susan Philip

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011

Springer 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出版, 未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有, 翻印必究。

本书版权登记号: 图字 01-2012-0582 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

风能转换技术进展/(印度) 马修 (Mathew, S.) 等著; 金鑫等译. —北京: 机械工业出版社, 2013. 10

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Advances in Wind Energy Conversion Technology

ISBN 978-7-111-44134-2

I. ①风… II. ①马…②金… III. ①风力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 223508 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: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 11.75 印张 · 224 千字

0 001—3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44134-2

定价: 58.00 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

近年来风能发展非常引人注目。在过去 10 年,风电装机容量平均以每 3 年翻一番的速度增长。2009 年风电装机容量为 38GW,全球总的风电装机容量达到 158.5GW,年增长率达到 31.7%。由此,风能成为当今世界发展最快的能源。据全球风能理事会(GWEC)预测,在未来 10 年这个增长趋势仍将继续保持,即使保持中等增长速度,在 2020 年全球风电装机容量也将达到 709 GW,贡献全球电力需求的 8.2%。

风力发电技术是涉及空气动力学、自动控制、机械传动、电机学等多学科的综合性高技术系统工程。由于所受工况瞬态多变且工作环境恶劣,所以风力发电机组是一个复杂、多变量、非线性的不确定系统,因此,对于风力发电设计工程师来说,需要对风力发电设计的各个方面都有所考虑。Sathya-jith Mathew 等所著的《风能转换技术进展》是一本兼具索引、汇编和综论的好书。书中每一章节的作者都是风力发电技术各方面的权威专家,在风能转换技术上具有深厚的造诣和国际声望。本书不仅对从事风电技术研究的工作者和相关设备开发的研究者来说是非常实用和方便的参考书,而且对于高校相关领域的学生也是很有学习价值的。

本书第 1 章介绍风力发电机的空气动力学,为水平轴风力发电机设计服务;第 2 章重点介绍风能资源分析,讲解确定风环境特征的方法并介绍风能转换系统的运行模型;第 3 章主要介绍离岸风能资源评价;第 4 章论述了短期预测风能的方法;第 5 章分析了在不同工况下作用在风力发电机上的载荷;第 6 章介绍风力发电机控制系统的主要特征、目标和策略;第 7 章论述了离岸型风电场产生的大规模电力并网的基本问题;第 8 章介绍了小型风力发电机的起动运行、偏航行为、陀螺负载、过速保护以及控制要求。本书全面而系统地介绍了风力发电技术的进展,各章节由风能转换技术各个方面的专家撰写,并引用了大量的参考书籍和文献,有利于读者学习和参考。

本书由重庆大学机械工程学院金鑫、李军超(重庆大学材料工程学院)、杜静等翻译。其中第 1 章由金鑫和夏宗朝翻译;第 2 章由巨文斌和李浪翻译;第 3 章由杜静和熊海洋译;第 4 章由金鑫和胡雁东翻译;第 5 章由李军超和周同贵翻译;第 6 章由李军超、王宾和夏宗朝翻译;第 7 章由沈军舰和白婷婷翻译;第 8 章由杨芬芬和胡雁东翻译。全书由金鑫、李军超统稿、审阅和

IV 风能转换技术进展

校对。本书中介绍的风力发电设计技术，涉及的相关知识范围很广。由于我们能力有限，可能存在翻译不准确、甚至不正确的地方，欢迎读者随时提出宝贵意见和建议，在此表示诚挚的谢意。

译 者

2013 年 9 月 13 日

前 言

近年来风能发展非常引人注目。在过去 10 年，风电装机容量平均以每 3 年翻一番的速度增长。2009 年风电装机容量为 38GW，全球总的风电装机容量达到 158.5GW，年增长率达到 31.7%。由此，风能成为当今世界发展最快的能源。据全球风能理事会（GWEC）预测，在未来 10 年这个增长趋势仍将保持，即使保持中等增长速度，在 2020 年全球风电装机容量也将达到 709GW，贡献全球电力需求的 8.2%。

近年来，风能快速发展的主要动力之一源于风能转换技术的发展和进步。这使得风力发电机的尺寸越做越大，同时转换效率也得以保证，并能够安全可靠地运行在恶劣的工作环境中。举例来说，先进的流体力学工具的应用使我们能够较为容易地理解风力发电机的空气动力学特性，从而提高风能转换系统的效率和可靠性。通过对风环境的深入分析，我们能够为风电机组找到较好的安装位置，从而提高风电场的发电量。先进的预测方法使我们能够预测短时间跨度内风电的可利用性，从而增加风能的可靠性及可调度性。同样，电工电子技术的发展能够为风力发电机提供更好的发电机和控制系统。本书的目的就是同风能专业的学生及研究者分享这些技术的发展。

本书分为 8 章。第 1 章介绍风力发电机的空气动力学，可为水平轴风力发电机设计服务。本章刚开始介绍基本的空气动力学问题，并基于动量理论分析这些问题。在水平轴风力发电机的涡流尾流模型中介绍了叶素理论及叶素动量理论。本章结尾对先进空气动力学技术做了简单介绍，包括 Navier-Stokes、Euler 和混合的 CFD 方法。

第 2 章重点介绍风能资源分析，讲解确定风环境特征的方法并介绍风能转换系统的运行模型；接下来是第 3 章，主要介绍离岸风能资源评价。首先介绍离岸风能资源的显著特征，然后进一步以案例的形式展示了应用 LiDAR、SoDAR、SAR 和 Scattometers 评价离岸风能的潜力。

第 4 章论述了短期预测风能的方法。首先，介绍了不同的预测技术，然后详述各自形成的模型以用于点预测。一些概率预测模型被纳入考虑范围，最后论述了预测的放大和预测质量的评定。

第 5 章分析了在不同工况下作用在风力发电机上的载荷。首先总体介绍了载荷产生的成因，作为接下来载荷评估方法和步骤的基础。风力发电机设

VI 风能转换技术进展

设计和认证因素是载荷分析过程中考虑的重点。

风力发电机控制系统的主要特征、目标和策略在第6章中进行介绍。主要讲述保证效率的控制策略，现代风力发电机稳定可靠的运行。分析了风力发电机系统控制的经典控制环的关键运行参数。介绍了描述风力发电机主要特征的动态分析模型。

第7章论述了离岸型风电场产生的大规模电力并网的基本问题。首先解释了并网的基本要求，并介绍了不同的并网方法，诸如HVAC、LCC HVDC和VSC HVDC。最后探索了交替的并网策略，并比较了不同的并网方法。

最后一章关于小型风力发电机。从设计和运行要求上说，大型风力发电机和小型风力发电机是不同的。本章重点主要讲述起动运行、偏航行为、陀螺负载、过速保护和控制要求。

本书各章节由风能转换技术各个方面的专家撰写，在此感谢他们将自己的专业知识同读者共享。

Sathyajith Mathew
Geeta Susan Philip

目 录

译者序

前言

第 1 章 水平轴风力发电机空气动力学	1
1.1 空气动力学的基本问题	5
1.1.1 风功率密度	6
1.1.2 风速随机性和平均功率	7
1.1.3 风速沿地面高度分布	8
1.1.4 尾流阵影响	9
1.1.5 湍流风对功率影响	10
1.1.6 容量系数和具体产量	11
1.2 无偏航情况的动量理论分析	11
1.2.1 入流模型和分析	12
1.2.2 推力和功率系数	13
1.2.3 尾流扩张	14
1.2.4 湍流尾流和涡环状态	15
1.3 存在偏航误差的动量理论分析	15
1.4 最大风能转换效率	18
1.5 水平轴风力发电机典型功率曲线	19
1.6 水平轴风力发电机的叶素模型	21
1.6.1 入流模型与分析	21
1.6.2 求解 C_T 和 C_p	23
1.7 水平轴风力发电机的叶素动量理论	24
1.7.1 叶素动量理论入流模型及分析	24
1.7.2 最佳的水平轴风力发电机：理想的叶片扭角和锥度设计	26
1.8 理解运行参数相互依存的关系	28
1.9 非理想因素和叶尖损失	31
1.10 偏航情况下的诱导因素	33
1.11 水平轴风力发电机翼型	35
1.12 水平轴风力发电机涡旋尾流模型	38
1.12.1 控制方程	40
1.12.2 关联叶片求解	40
1.12.3 自由涡流模型计算结果	41
1.13 非稳态气动特性对水平轴风力发电机的影响	44

VIII 风能转换技术进展

1. 13. 1 衰减频率	45
1. 13. 2 非稳态翼形理论	45
1. 13. 3 动态失速	45
1. 14 瞬态偏航效应	48
1. 15 塔架干扰效应	49
1. 16 先进的空气动力学模型	51
1. 16. 1 Navier-Stokes 方程	51
1. 16. 2 Euler 与混合 CFD 方法	52
1. 17 本章回顾	53
参考文献	54
作者简介	58
第 2 章 风环境分析及风力发电机运行	59
2. 1 风况特性	59
2. 1. 1 边界层效应	59
2. 1. 2 风速分布	60
2. 1. 3 能量密度	62
2. 2 风力发电机的速度-功率响应	62
2. 3 能量模型	64
2. 4 结论	67
参考文献	68
作者简介	68
第 3 章 海上风资源评估进展	69
3. 1 高级海上风资源观测	69
3. 1. 1 Høvsøre 测试结果	70
3. 1. 2 Horns Rev 测试结果	72
3. 1. 3 Nysted 海上测试结果	73
3. 2 海上风资源空间观测	75
3. 2. 1 合成孔径雷达	75
3. 2. 2 散射仪	78
3. 2. 3 中尺度模拟	80
3. 3 讨论和结论	82
参考文献	84
作者简介	86
第 4 章 短期风能预测	87
4. 1 预测的类型	87
4. 2 点预测模型	89
4. 2. 1 仅基于发电测量的模型	89
4. 2. 2 基于物理关系的模型	91

4.2.3 同时运用检测量和物理信息的模型	93
4.3 概率预测模型	95
4.3.1 百分位数回归	96
4.3.2 气象集成预报	97
4.3.3 方案的产生	99
4.4 升尺度方法	100
4.5 评估	100
4.5.1 点预测	101
4.5.2 概率预报	102
4.6 文献参考	104
参考文献	105
作者简介	107
第5章 风力发电机载荷分析	108
5.1 风力发电机载荷起源	108
5.2 平均风速的影响	109
5.3 风切变载荷	110
5.4 叶片经过塔架引起的载荷	112
5.5 尾流引起的载荷	114
5.6 湍流引起的载荷	116
5.7 波浪载荷	118
5.8 载荷设计认证	119
5.9 认证标准	119
5.10 疲劳载荷分析	124
5.11 极限载荷分析	127
5.12 典型的设计条件	128
参考文献	130
作者简介	131
第6章 风力发电机功率控制策略	132
6.1 控制策略	133
6.1.1 恒速风力发电机	133
6.1.2 变速风力发电机	133
6.1.3 被动失速控制	134
6.1.4 变桨控制	135
6.1.5 主动失速控制	135
6.2 控制系统	136
6.2.1 传感器	137
6.2.2 控制器	138
6.2.3 执行器	138
6.2.4 安全系统	138

6.3 主控制回路	139
6.3.1 转矩控制	139
6.3.2 变桨控制	140
6.3.3 偏航控制	140
6.3.4 外部电网	140
6.3.5 SCADA	140
6.4 风力发电机建模	140
6.5 结论和未来研究	144
参考文献	145
作者简介	146
第7章 海上风电场并网技术	147
7.1 并网要求	147
7.1.1 低电压穿越	147
7.1.2 频率范围和频率控制	147
7.1.3 无功能力和电压控制	147
7.2 并网方法	148
7.2.1 HVAC 连接	149
7.2.2 LCC HVDC 连接	149
7.2.3 VSC HVDC 连接	153
7.2.4 供选择的方案	155
7.3 案例研究	156
7.4 连接选择方式的对比	157
7.4.1 输电网标准适应性	158
7.4.2 功率损失	158
7.4.3 总体成本	158
7.5 结论	159
参考文献	159
作者简介	160
第8章 小型风力发电机	161
8.1 基本性能参数	163
8.2 起动性能	165
8.3 偏航行为和陀螺载荷	167
8.4 超速保护	170
8.5 控制系统	171
8.6 塔架及其安装	172
参考文献	174
作者简介	175

第 1 章 水平轴风力发电机空气动力学

J. Gordon Leishman

符号表

A	风轮盘面积, m^2
a	轴向诱导因子, v_i/V_∞
C_d	翼型剖面阻力系数
C_{d_0}	翼型剖面零升力阻尼系数
C_l	翼型剖面升力系数
C_{l_α}	翼型剖面升力曲线斜率, rad^{-1}
C_P	功率系数, $P/0.5\rho AV_\infty^3$
C_T	推力系数, $T/0.5\rho AV_\infty^3$
c	翼型弦长, m
F	Prandtl 叶尖损失因子
k	折合频率, $\omega c/2V_\infty$
k_x	纵向入流权重因子
k_y	侧向入流权重因子
N_b	叶片数目
P_w	输出功率, kW
R	风轮半径, m
Re	雷诺数, $\rho V_\infty c/\mu$
r	旋涡方位矢量, m
r	叶片无因次径向位置
r_0	无因次叶根位置
T	风轮推力, N
t	时间, s
V	速度矢量, ms^{-1}
V_{ex}	扰流速度矢量, ms^{-1}
V_{ind}	诱导速度因子, ms^{-1}
V_∞	自由流速度矢量, ms^{-1}
X_{TSR}	叶尖速度比
x, y, z	笛卡儿坐标直角坐标, $(\text{m}, \text{m}, \text{m})$

α	攻角, rad
γ	偏航角, ($^{\circ}$)
Γ_v	涡流强度, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ζ	尾涡寿命, rad
θ_{tip}	叶尖变桨角度, ($^{\circ}$)
θ_{tw}	叶片扭角, ($^{\circ}$)
κ	诱导损失因子
λ	叶尖速比, $\Omega R/V_{\infty}$
μ	黏度, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
ν	运动黏度, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
ρ	空气密度, kg m^{-3}
σ	实度, $N_b c/\pi R$
φ	诱导攻角, rad
ψ	方位角, rad
Ω	旋转速度, rad s^{-1}

缩略语

BEM	叶素动量理论
CFD	计算流体力学
FVM	自由涡方法
NWS	正常工作状态
TSR	叶尖速度比
TWS	湍流
VRS	涡环
WBS	风机制动状态

本章回顾了水平轴风力发电机的空气动力学特性。风力发电机的空气动力学相当复杂,其基本运行原理是通过风在叶片上产生气动力使其旋转从而捕获风能,并将这一能量转化为风力发电机主轴的转动能量。被捕获的能量通过齿轮箱传递到发电机,通过电网系统最终输送到用户。

水平轴风力发电机有一水平的旋转轴和两片或三片定向安装在塔架上风向或下风向的叶片。一台现代兆瓦级的商业水平轴风力发电机如图 1-1 所示,它同数百台其他风力发电机安装在一个风电场中。一般来说,现代水平轴风力发电机的发电量在 1~5MW 之间。其他类型的风力发电机,如垂直轴风力发电机,最常见的是 Darrieus 风力发电机^[1,2],细长弯曲的叶片与旋转轴连接,旋转轴与地面垂直。本章不对垂直轴风力发电机空气动力学作讨论(尽管垂直轴风力发电机也有一些优点),原因主要在于这类风力发电机的空气动力学效率较低,当

面对商业风力发电机发电要求越来越大的尺寸规模时其缺乏足够的吸引力。



图 1-1 现代三叶片上风向水平轴风力发电机（图中风向由右向左）

本章的主要目的是从空气动力学角度来描述水平轴风力发电机的运行性能特征，概述空气动力学分析方法的基本原理，讨论关键设计参数对性能的影响，并展示典型的空气动力学载荷和功率输出的特性。新兴的空气动力学预测方法，如计算流体动力学（CFD），使空气动力学预测能力得到了重大提升，本章对此作了简要的讨论。本章的基本目标是展示水平轴风力发电机特有的空气动力学问题，并以此解释在精确预测空气动力学载荷和评估功率输出特性时仍存在的许多困难。特别地，理解和预测湍流风的影响、变化的边界层、偏航的气流影响、塔架（塔影）的干扰及风力发电机下游方向不稳定涡流的影响都是空气动力学技术挑战的一部分。

为了高效地捕获更多风能，现代水平轴风力发电机的规模也变得更大（通常直径超过 50m）。这使得风力发电机叶片变得更长、更柔性，在空气动力学和惯性载荷的作用下可发生弯曲和扭转。因此，完善空气动力学与结构动力学的耦合方法成为越来越重要的工程目标。在这方面，眼前的问题是开发出合理的空气动力学模型，以此满足在附着流和失速条件下预测不稳定的叶片气动载荷，并紧密地把空气动力学模型和结构动力学（如有限元）耦合起来，以及用风模型对旋转叶片的载荷和气弹响应给出更准确的预测。只有这样，水平轴风力发电机的性能特征才可以达到所需准确度的预测。

总之，耦合和合理整合有效的空气动力学模型到设计问题（即旋转叶片的结构动力学、风模型、叶片变桨和偏航控制器、传动力、发电机等）的各方面

成为改进水平轴风力发电机设计的基础。为此,已经开发了几种综合的计算机模型(或叫设计代码)——见 Manwell 等^[3], 其对这些方法进行综合概述。然而, 这些代码对水平轴风力发电机叶片载荷和功率输出的预测不如期待的效果好。这一问题在最近对一台已经在大风洞测试过的综合性风力发电机的叶片载荷和性能特性预测中得到了反应——见 Fingersh 等^[4]。这一实验提供了一个获得叶片载荷和功率输出测量的方法, 该方法避免了通常在风电场实验中测量结果存在的不确定性的问题。同时, 该实验为最终解决典型的模型问题提供了特有的数据库。在盲研究中, 来自 8 种不同预测方法(其中包括几种被称为“先进的”空气动力学方法)的结果如图 1-2 所示——详细介绍见 Simms 等^[5]和 Coton 等^[6]。通过图 1-2 可以看出, 尽管在最简单稳态风没有偏航的工况下, 各预测方法结果仍存在较大差异, 这也表明了当前各种建模方法存在的重大缺陷。

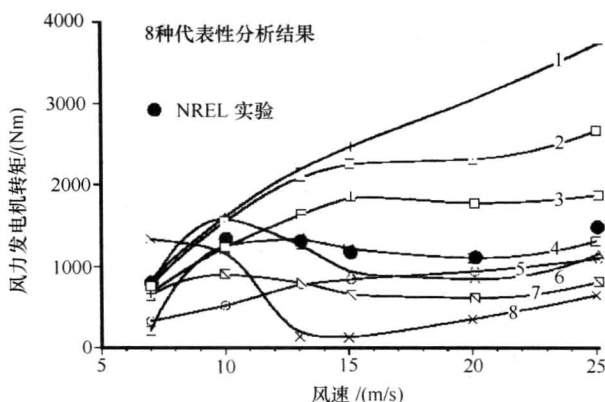


图 1-2 通过几种预测方法与实测值比较, 预测水平轴风力发电机的整体性能仍然需要改进 (实验条件是 5m 长风力发电机在非偏航状态下, 在大型风洞下测试)

让人意想不到的是, 这些预测方法在风电场测试中的结果与风洞实验结果相比同样令人失望甚至更糟。这样导致的后果就是风力发电机在特定的运行环境中, 有不可预期的载荷产生, 随之导致结构的疲劳问题, 降低机械的可靠性, 减小功率输出, 以及更高的运行费用。因此, 水平轴风力发电机被证明很难与其他类型能源竞争, 尤其是化石燃料资源, 如煤、碳、气。要将模拟预测能力提升到与风电场运行测试的真实载荷更吻合的水平, 仍需对水平轴风力发电机空气动力学子系统(相互依赖的耦合作用)进行更多的基础研究。

然而, 最近 10 年, 随着对风力发电机叶片上空气动力学的基本理解和风特征研究的一些进展, 我们目睹了风力发电机技术许多新的发展。正因为如此, 如今工程领域对叶片载荷和功率输出特征的预测能力得到了重大提高, 这也为

设计先进的拥有更高空气动力学效率、可靠性更好的风力发电机增加了自信,同时这一过程也伴随(甚至是减少)费用的产生。社会越来越意识到能源的有限性和化石燃料的燃烧将对环境持续影响(包括环境污染和气候变暖),这就要求开发出更好的用于工程应用的风力发电机。因此,风力发电机在净电功率生产中发挥着越来越重要的作用,当前发电能力以平均每年 20% 的速度增长^[7-9]。在美国、德国、西班牙、印度,风能利用的增长尤其显著。然而,风能仍然仅仅是世界总能源需求的很少一部分。这一情况也将在未来随着社会逐渐注意化石燃料的局限性而得到改变。

1.1 空气动力学的基本问题

如本书所讨论,水平轴风力发电机设计是一门多学科综合技术,涉及空气动力学、结构动力学、材料分析学、材料学、气象学,这些专业学科需要控制系统分析人员、电气工程师和土木工程师的参与。然而,水平轴风力发电机性能好坏的关键在于空气动力学设计,如风力发电机的整体尺寸,叶片扭曲的大小和形状,弦长的分布,需要使用的翼型剖面,预期的载荷和效率的高低,所需的最大功率输出等。在这方面,风力发电机空气动力学的模拟已经覆盖整个传统的旋转翼型分析范围,这些理论很多来自于直升机领域^[10]。

水平轴风力发电机空气动力学建模的一般方法是综合法,以最合理的数学模型表示各构成要素的空气动力学问题。分析类型经过从经典动量理论到叶素模型(BE)和叶素动量(BEM)理论,通过叶素模型与非定常空气动力学模型和预定尾迹或涡流理论(FVM)相结合。所得到的各叶素模型整合到一起,作为整体载荷和风力发电机的性能预测。因此,这需要所有的这些子模型能有效耦合,而由于耦合过程无法唯一定义,即使使用相同的叶素模型也会表现出不同的预测结果(见图 1-2)。显然,这一问题应当受到设计团队的重点关注。

查阅公开的风能资料显示,水平轴风力发电机的各种技术问题都已以某种方式得以解决,需要注意的是,如今工程设计使用的许多模型都基于经验假设而建立。不幸的是,基于经验的方法相较于预测方法来说是一种事后解释,通常这样的模型可能会被用到具体的风力发电机上。因为这一缺点,经验模型没有为工程师提供灵活的数学工具以辅助设计新的性能更好的风力发电机。新的研究工作正在研究更准确的、可应用于实际的分析模型,例如使用基于 Euler 和 Navier-Stokes 方程数值解法的涡尾流理论和 CFD 模型。然而,这些类型的模型对水平轴风力发电机设计的影响是有限的,部分原因是计算的复杂性和较长的设计周期,而且它们没有被接受作为验证或认证的设计工具。由于数值计算方法的迅速成熟,计算机的计算速度更快、内存更大,因此作为设计实践的组成

部分, 现代空气动力学方法最终将会得到认可。

同时, 在不久的将来, 首要目标必须是通过持续的基础研究逐步改善 (或消除) 当前各种形式预测模型存在的局限性, 并通过测试进行有效性论证, 使叶片载荷和风力发电机性能特性能够得到可信的预测。只有如此, 风能才能成为环境友好型能源生产的经济增长点。

1.1.1 风功率密度

为满足所需的能源生产要求, 在设计水平轴风力发电机之前, 首先要评估其安装场地的风能量。风能量取决于地理位置、四季风的特性、风力发电机离地面的高度、上游地形的类型和其他因素 (例如风力发电机相对其他风力发电机的位置)。因此, 必须提前 (多年) 在目标风电场测量得到详细的风数据, 以便收集足够的信息来对风力发电机的有关大小和配置做出合理的工程和经济决策。

可以很容易地评估稳定、均匀风速 V_∞ 中的风动能。每单位面积的质量入流率为 $\dot{m} = \rho V_\infty$, 单位时间面积风中包含的动能为

$$\frac{KE}{dt} = \frac{1}{2} \dot{m} |V_\infty|^2 = \frac{1}{2} \rho |V_\infty|^3 \quad (1-1)$$

以上结果被称为风功率密度, 它等于假设风力发电机可完全吸收风中所有可用能量时的功率。例如, 在标准海平面条件下对于典型的风速为 10m/s 的风力发电机, 风功率密度为

$$\frac{1}{2} \rho |V_\infty|^3 = 0.5 (1.225) (10)^3 \approx 0.6 \text{ kW/m}^2 \quad (1-2)$$

这一风功率密度显然相当温和。式 (1-2) 表明, 一台水平轴风力发电机必须增大直径以吸收足够的功率才能满足其经济成本。

作为一种可再生能源, 通常根据风功率级别对风进行分类, 级别的范围从 1 级 (最低) 到 7 级 (最高), 风功率级别基于平均风速和风功率密度而划分。大多数经济性好的风电场都为 4 级及 4 级以上风功率地区, 当在风电场距地面一固定位置处 (通常被定义为 50m 或约 164ft) 测量时, 其风功率密度范围为 0.4 ~ 0.5 kW/m²。

事实上, 即使风力发电机的空气动力学和机械效率都较高其也仅可能提取风中能量的一部分, 特别当风力发电机实际运行场地比考虑的理想场地差时情况更是如此。在风力发电机从风中提取功率的过程中也会消耗一部分能量, 如克服叶片诱导和旋转损失以及机械效率损失 (变速器、变速箱等)。这些损失可通过工程设计降到最低, 通常可达到最大理论提取功率的 20% ~ 30%。

从风中捕获的平均功率 $\bar{P}_w$ 可表示为

$$\bar{P}_w = \frac{1}{2} \rho A C_p \eta |\bar{V}_\infty|^3 \quad (1-3)$$