



国际电气工程先进技术译丛

Mc
Graw
Hill Education

风力发电工程指南

Wind Energy Engineering

(美) Pramod Jain 著
李延峰 谢冬梅 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

风力发电工程指南

(美) Pramod Jain 著
李延峰 谢冬梅 译



机械工业出版社

本书全面介绍风力发电的项目开发和工程建设,讨论了项目规划、选址、成本评估、环境影响及项目管理等内容。本书体现了多学科综合的特点,涵盖物理学、气象学、空气动力学、风力测量、风机特性、电力系统及其接入。本书内容十分广泛,包括大量的图片、表格、曲线和统计数据,涉及众多实际问题。

本书对当前和未来的风电开发提供了完整可靠的综合性介绍,适用于风电行业的工程师和项目经理,以及渴望了解风电工程全貌的相关领域人士及工科类高校学生。

ISBN: 978-0-07-171477-8

Copyright © 2011 by The McGraw - Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed in any form or by any means, or stored in a data base or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw - Hill Education (Asia) Co. and Chinese Machine Press.

All rights reserved.

本书中文简体字翻译版由机械工业出版社和美国麦格劳 - 希尔教育(亚洲)出版公司联合出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,侵权必究。

本书封底贴有 McGraw - Hill 公司防伪标签,无标签者不得出售。

本书版权登记号:图字 01-2011-2078 号

图书在版编目(CIP)数据

风力发电工程指南/(美)杰恩(Jain, P.)著;李延峰,谢冬梅译.
—北京:机械工业出版社,2012.10
(国际电气工程先进技术译丛)
书名原文:Wind Energy Engineering
ISBN 978-7-111-39725-0

I. ①风… II. ①杰…②李…③谢… III. ①风力发电—指南
IV. ①TM614-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215234 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:林 楨

版式设计:姜 婷 责任校对:卢惠英

封面设计:马精明 责任印制:李 妍

中国农业出版社印刷厂印刷

2012 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·16.5 印张·340 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-39725-0

定价:78.00 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

在过去十几年中，由于风机技术的进步，加之众多发达国家纷纷出台各种有针对性的激励扶持政策，全球风电行业获得了极为迅猛的发展。我国也经历了风电行业的持续高增长，风电装机容量快速增加，电源结构更趋合理，发电产业得到优化。但是，在欣喜的同时，有识之士已经指出，时至今日，在宏观经济走势发生变化的情况下，风电开发和运营的风险也在逐渐积聚。风电核心技术短板问题、在役机组的可利用率和涉网性能方面的不足、电网输电瓶颈和限出力问题，都需要全行业着力解决。更为重要的是，业内人员的技术和经验——可以说是整个行业的“内力”——要通过学习训练、反思总结练“内功”实现持续提升。几十年前，人们耳熟能详的一句话是“哲学家们只是用不同的方式解释世界，而问题在于改变世界”。我国风电行业经历过“井喷式”增长，“改变”的着实太多，只不过“改变”的主要是硬件（设备），而软件（技术和管理）方面还有欠缺。这就是我们“改变”有余而“解释”不足的原因。只看到硬件是短视的，“解释”不清楚意味着“改变”是要打折扣的。为了更好地应对行业面临的问题和挑战，需要借鉴他国工程经验和做法、反思并改进我们的工作方式和手段。这也是翻译此书的愿望所在。

原书作者 Pramod Jain 在风电领域从业多年、具有多方面的经验。本书针对风电开发利用全过程，在风电基础理论、风机结构及接网特性、风电项目规划选址、成本评估、环境影响和项目管理等方面均给出完整、客观的综合性介绍，并引用大量的美国和欧洲风电工程实际资料，适合于风电前期开发、工程建设和生产运行有关专业的技术人员和管理人员阅读。

本书主要由辽宁龙源风力发电有限公司生技部李延峰博士和沈阳工程学院电力系谢冬梅副教授在繁忙工作之外利用业余时间翻译。其中，第7~11章由李延峰翻译，第12~14章由谢冬梅翻译。另外，其他参与翻译的人员情况如下：曹福毅翻译第1、2章，张爱军翻译第4章，高馨翻译第3章，赵君有、王东瑞翻译第5章，衣丽葵、王秀平翻译第6章。最后，谢冬梅负责全书统稿，李延峰对全书所有章节进行了校读和大量的修改工作。

本书的翻译出版得到了国家863计划课题“2011AA05A112”的资助，在此深表谢意。

由于译者水平有限，难免有错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。

原书前言

从读研究生开始，我一直对写篇幅不大的技术论文很感兴趣，但从未对此得心应手过。那时候，我也试着撰写内容很深的文章，我心目中的读者也都是领域内的专业人士。后来，当我为工业界写作时，情况改变了。进入风电行业后，我定期写作白皮书和博客文章，但是绝对没有想过要写一本书。写此书的想法是来自我的一位好友 Satya Komatineni，他写过几本关于 Android 的书。他鼓励我向 McGraw - Hill 出版社提交一份写书的计划。由此我开始了一段 9 个月的冒险之旅。能够描述这个冒险的最好的比喻是，写一本书就像是初次的九月怀胎一朝分娩。尽管我自己不可能有这种经历，可我与这样经历过的人一起生活着。这种过程是让人兴奋的、不舒服的、痛苦的，有时甚至是相当痛苦的。然而到了最后，最终的结果令你忘记了所有的痛苦。

写这本书的动力是因为目前市场上缺少面向工程师群体的书。特别是，我想写的是这样一本书，它能够 为任何学科专业的工程师提供足够的具有多学科性质的风电工程知识。本书将涵盖至少五门学科，目的是达到对风电领域恰当全面的理解。这五门学科是：气象学、机械与航空工程、土木工程、电气工程以及环境工程。除了这些核心的工程学科外，本书还有涉及财务和项目管理的章节，这两门商业类学科对风电领域也是十分重要的。

写作本书时，我心中的读者群是这样的一些人。首先，是风电行业的工程师和研究人员，他们在这个行业的某些狭小范围内从事与其具体专业相关的工作；其次，是那些希望进入风电行业的工程师和研究人员；第三，就是那些想学到风电工程涉及的各种专门知识的工科类本科生和专科生；最后的目标读者是风电行业的商务人员和项目经理。

工程师能够从本书找到关于每个题目的充分的细节内容。我控制了本书涉及的数学内容，不让从业工程师们感觉吃力。在需要较深的数学知识的地方，则尽力给出对数学关系的直观理解。

在内容取舍方面，我不得不花费很多心思去做抉择。本书避开了关于气候变化和能源政策方面的讨论和争议。尽管这方面的内容对于理解行业整体走向是必不可少的，我不具备足够的资格就这方面的议题进行讨论，只是在适当之处对这两个题目做了简要的论述。本书不是风机的工程设计手册，对于风机的阐述仅局限于对主要部件及其功能的说明，既不包括那些力和位移的复杂计算，也不包括各个部件的设计和工艺。

本书一开始对风电产业进行了简略概括，着重强调风电行业进程中出现的爆炸

性的增长。尽管这种爆炸性的增长速度不大可能维持太久，但我相信在下一个10年风电行业仍将保持15%~20%的增速。基于这种保守的估计，在未来的很多年内，这一行业对于工程师、技术人员、研究人员、项目经理和财务人员将会有稳健的需求。

第2章向读者介绍能量和功率的概念，风力所携带的能量的种类和数量大小，以及其中有多少能够被风机吸收转化。

第3章从气象学角度阐述风的属性。这章内容从介绍风如何产生开始；之后，描述了风速的统计学性质，以及高度对风速的影响；最后说明风能量受制于空气密度大小，而空气密度又由温度、压力和湿度决定。

第4章根据桨叶的空气动力学特性描述了风能转化为机械能的机械学关系。这对于理解风机运行原理是非常重要的。第5章给出了关于桨叶空气动力学的更详细解释，并且介绍了获得风机功率特性曲线的方法。

第6章将着眼点从能量和气流知识转向测量技术。风速测量是风力项目的一个关键步骤，是任何一个并网项目的要求，并且在大多数情况下是一项耗时最长的任务。在降低风电项目的财务不确定性上，测量技术起着关键的作用。

第7章讨论了风资源评估问题。在风电项目开发阶段，这是又一个关键步骤。这章介绍了不同的评估方法，从在没有现场测量数据情况下利用公开公布的风况数据的方法，到对观测数据沿三个空间坐标和时间坐标进行外推的方法。第8章叙述了风资源高级评估方法，例如极大风速计算、粗糙地形建模及尾流分析。这章还讨论了与风资源不同组成部分相关的损失问题和不确定性问题。

第9章介绍了风电机组的各个部件。其中，对叶轮系统、机舱、塔架和基础系统均进行了阐述。针对不同类型的并网型风机，对上述三个系统的构成均有介绍。

第10章涉及的是风电的电气方面知识。介绍了电和磁的基本概念，然后说明用在风机上的不同类型的发电机。第11章介绍了电网接入方面的内容。它涵盖了怎样将不稳定的风电送至电网、电网接入标准及风电场需要的继电保护系统。此外，还介绍了几种风场电气拓扑结构。

第12章的内容是风电项目的环境影响。这章开始先比照化石燃料发电，设定了风电环境影响的讨论背景。其中，对每一种影响环境的情况都有阐述：野生动物、噪声、景观、塔影闪变等。另外，还介绍了对飞行安全、雷达及通信的干扰问题。

第13章介绍了评估风电项目的财务模型。这章讨论了收入、资金成本和续生成本的各种组成内容。其中，详细介绍了激励机制，尤其是美国的税收激励机制，对财务执行情况的影响。最后，对评估风电项目财务执行情况的测评方法进行了介绍。

第14章是最后一章，介绍风电项目的规划和执行。这章可以作为风电工程项目经理在项目开发、建设、调试和运行阶段的指南。

VI 风力发电工程指南

写作本书让我获益匪浅。有不少我原本确信无疑的东西，后来发现不是很准确。还有更多的东西曾经被我信心满满地介绍给同事和客户，后来却被发现是肤浅的、漏洞很多的。我希望，本书对读者也能起到类似的作用，帮助读者更好地理解风力发电。

Pramod Jain

编著图书推荐表

姓 名		出生年月		职称/职务		专 业	
单 位				E-mail			
通信地址						邮政编码	
联系电话				研究方向及教学科目			
个人简历（毕业院校、专业、从事过的以及正在从事的项目、发表过的论文）							
您近期的写作计划有：							
您推荐的国外原版图书有：							
您认为目前市场上最缺乏的图书及类型有：							

地 址：北京市西城区百万庄大街 22 号 机械工业出版社电工电子分社
 邮 编：100037 网 址：www.cmpbook.com
 联系人：张俊红 电话：13520543780 010-68326336（传真）
 E-mail：esmag@163.com（可来信索取本表电子版）

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 风电行业概述	1
1.1 概述	1
1.2 全球风电产业	1
1.3 风电成本	3
1.4 风力发电的诸多优点	5
1.5 风能并不万能	5
参考文献	6
第 2 章 风能与风功率基础	7
2.1 概述	7
2.2 风中的动能	7
2.3 风速和叶轮半径变化对风轮功率的影响	8
2.4 基本概念和方程	8
2.5 质量守恒	10
2.6 能量守恒	10
2.7 动量守恒	11
2.8 推导贝兹极限	13
2.9 贝兹极限的含义	16
2.10 风能与水能的对比	18
参考文献	19
第 3 章 风的属性	20
3.1 概述	20
3.2 风是怎样形成的	20
3.3 风速的统计分布	21
3.3.1 风速威布尔分布的均值和众数	23
3.4 功率密度	24
3.5 风力等级	26

VIII 风力发电工程指南

3.6 风切变	27
3.6.1 理解风切变	29
3.7 空气密度与高度的函数关系	30
3.8 空气密度与湿度的函数关系	31
参考文献	33
第4章 叶片的气动特性	34
4.1 概述	34
4.2 翼型	34
4.3 相对风速	36
4.4 转子盘理论	39
4.5 升力	42
4.5.1 相等通过时间谬论	42
4.5.2 旋转流体、环流和漩涡	42
4.5.3 实际流体	45
4.5.4 流过翼型的流体	46
4.5.5 雷诺数对升力系数和阻力系数的影响	47
4.6 阻力型风机	48
参考文献	51
第5章 叶片气动特性的高等内容	52
5.1 概述	52
5.2 叶素模型	52
5.3 定速风机：失速调节与桨距调节	56
5.4 变速型风机	57
5.5 功率曲线	58
5.6 垂直轴风机	59
参考文献	60
第6章 风力测量	61
6.1 概述	61
6.2 风速的定义	61
6.3 风速测量的方式	62
6.3.1 风速计	62
6.3.2 风速计的标定	65
6.3.3 风向标	65

6.3.4	传感器的放置	66
6.3.5	入流角的影响	69
6.3.6	温度的影响	69
6.3.7	风速计测风的不确定性	69
6.3.8	偏差估计的例子	71
6.3.9	其他种类的传感器	72
6.3.10	数据记录及传输设备	72
6.4	测量风速方案的制定	73
6.5	测风塔安装	75
6.6	测风塔安装示例	75
6.7	数据管理	76
6.8	数据处理	80
6.9	各量的计算	83
6.9.1	湍流	83
6.9.2	风切变	83
6.9.3	空气密度	85
6.9.4	功率密度	85
6.10	测量风速的遥感技术	85
6.10.1	遥感测风的优缺点	86
	参考文献	87
第7章	风资源评估	89
7.1	概述	89
7.2	风资源评估概述	89
7.3	风速数据来源	90
7.4	资源评价模型	91
7.4.1	中尺度模型	91
7.4.2	计算流体力学模型	92
7.4.3	微尺度模型 WAsP	92
7.5	资源评估的5个阶段	98
7.6	风资源预评估	99
7.6.1	查询风资源图	99
7.6.2	根据附近机场或测风塔的数据进行初步分析	99
7.6.3	根据附近机场或测风塔的数据进行详细分析	101
7.7	本地测风	101
7.8	将观测点风资源数据外推至规划的风机安装处	102

X 风力发电工程指南

7.9 风速后报/对观测数据的 MCP 处理	102
7.9.1 相关	103
7.9.2 预测	107
7.9.3 回归法	109
7.9.4 威布尔参数调整法	110
7.9.5 矩阵法	114
7.9.6 对预测方法的选取	118
7.10 年发电量的计算	118
参考文献	119
第 8 章 风资源评估高级内容	120
8.1 概述	120
8.2 极大风速	120
8.3 粗糙地形下的 WAsP 模型	123
8.4 风机尾流	125
8.4.1 N. O. Jensen 的尾流线性模型	126
8.4.2 Ainslie 的涡流黏度模型	126
8.4.3 多台风机引起风速损失的合成	127
8.4.4 湍流模型	127
8.5 风电场风机布置的优化	127
8.6 风机等级的选择	129
8.7 对损失的估计	130
8.8 不确定性分析	132
8.9 估计年发电量的不确定性: 合并不确定性的基准方法	134
8.10 是否反映可盈利性的两类资源评估	135
参考文献	136
第 9 章 风力发电机的构成	137
9.1 概述	137
9.2 叶轮部分	137
9.2.1 叶片	137
9.2.2 力和转矩	139
9.2.3 轮毂	139
9.3 风机的其他构成形式	140
9.4 变桨	143
9.5 机舱	143

9.6 齿轮箱	143
9.7 偏航驱动	144
9.8 机舱罩和机架	145
9.9 升降机构	145
9.10 塔筒	146
9.11 基础	147
9.11.1 扩展式基础	147
9.11.2 深层基础	148
9.12 风机的载荷设计	150
9.13 设计风力条件	151
9.13.1 普通风力分布模型	151
9.13.2 极限风速模型	152
9.14 风机认证	152
参考文献	158
第10章 电磁学基础和发电机	159
10.1 概述	159
10.2 基本电磁学定律	159
10.2.1 法拉第感应定律	160
10.2.2 楞次定律	160
10.2.3 洛伦兹定律	160
10.3 交流电的基本关系	160
10.4 电机的基本原理	161
10.4.1 机械功率转换为电功率	162
10.5 同步发电机	163
10.6 对同步发电机的分析	165
10.6.1 变速永磁同步发电机	167
10.6.2 直驱型同步发电机	169
10.7 异步发电机	170
10.7.1 变速运行	174
参考文献	175
第11章 风机接入电网	176
11.1 概述	176
11.2 风停时, 电网受何影响?	176

11.3	风资源的“计划”和调度	178
11.4	单线图	178
11.5	输配电	181
11.6	接入电网的标准	182
11.6.1	功率因数和无功功率	182
11.6.2	低电压穿越	184
11.7	电能质量：闪变和谐波	184
11.8	风电场的电气结构	185
11.9	保护系统	188
11.10	过电压和防雷保护的接地	189
11.10.1	防雷保护	190
11.11	风电场的变压器	190
11.12	风电场并网及输电研究	191
11.13	输电瓶颈	192
11.14	SCADA 系统	192
11.14.1	数据采集	193
11.14.2	报告生成	193
11.14.3	控制	193
	参考文献	194
第 12 章	风电项目的环境影响	196
12.1	概述	196
12.2	分析环境影响的基准框架	196
12.2.1	环境影响的背景情况	197
12.2.2	时间、空间尺度范围	197
12.2.3	影响效应的累积	197
12.3	风电与化石燃料发电的快速对比	197
12.4	风电场对野生动物的影响	198
12.5	风机的噪声	201
12.5.1	降低噪声	203
12.5.2	低频噪声	203
12.6	塔影闪变	204
12.7	景观影响	204
12.8	是否危害飞行安全	205
12.9	电磁干扰	206

12.9.1 微波	207
12.9.2 电视和无线电信号传输	208
12.9.3 雷达	208
参考文献	210
第 13 章 风电项目的财务模型	212
13.1 概述	212
13.2 财务模型	212
13.2.1 营收模型	212
13.2.2 可再生能源额度与碳减排额度	215
13.2.3 营收计算	216
13.2.4 资金成本	216
13.2.5 机组成本	219
13.2.6 基础、吊装、进场道路及其他土建工程的成本	219
13.2.7 升压站、控制系统、电缆、安装及其他接网相关工程	220
13.2.8 其他成本	220
13.2.9 运营费用	220
13.3 折旧和税费	222
13.4 财务报表	223
13.4.1 风电项目的利润表和现金流量表	223
13.4.2 风电项目资产负债表	224
13.4.3 财务业绩	224
13.4.4 净现值	226
13.4.5 回收期	226
13.4.6 内部收益率	226
13.4.7 免征税额和加速折旧对财务业绩的影响	227
13.5 风电项目的资金筹措和融资结构	230
13.6 替代方案的财务评价	232
参考文献	234
第 14 章 风电项目的规划和执行	235
14.1 概述	235
14.2 顶层项目计划与时间表	235
14.2.1 开发	236
14.2.2 踏勘	236

XIV 风力发电工程指南

14.2.3	测风和风资源详细评估	237
14.2.4	项目选址、接网和 PPA	238
14.2.5	规划设计和采购	239
14.2.6	物流规划	242
14.2.7	投标与合同签订：设计采购施工（EPC）及其他形式的合同	242
14.2.8	项目融资	243
14.3	基建、安装和调试	243
14.4	运行	248
	参考文献	249

第 1 章 风电行业概述

首先，风的能量无处不在、从未停歇…这种能量取之不尽、用之不竭，然而对它的利用却少得可怜。

——亨利·戴维·梭罗 (H. D. Thoreau)，美国自然学者、作家 (1834)

1.1 概述

几千年来，人类一直在开发和利用风能。其中，最古老的方式包括汲取井水、将谷物磨成面粉及其他的农业方面应用。当前时期，对风能利用最主要的形式是风力发电。

20 世纪 70 年代石油危机后，在美国、丹麦和德国，为了寻找可替代能源投入了大量研发资金，随之而来的是风力发电领域显示出蓬勃发展的势头。到 20 世纪 80 年代早期，美国的可替代能源的研发热潮消退，导致风力发电领域出现了明显萎缩。在欧洲，对该领域的投资一直持续不减；迄今为止，欧洲的风电技术和风机装机容量均为世界首位。

1.2 全球风电产业

本节数据来源于世界风能组织的 2009 年世界风能报告^[1]。根据这一报告，风力发电产业的营业收入已达 500 亿欧元，在全世界范围内的从业人员超过 55 万人。

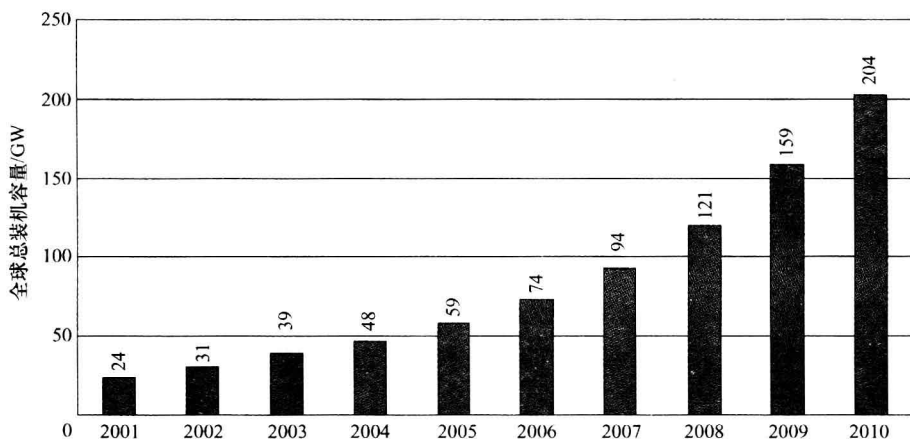


图 1-1 全球风力发电总装机容量^[1] (2010 年数据为预测值)