



国际电气工程先进技术译丛



CENGAGE
Learning

风力发电机组技术与应用

Wind Turbine Technology

(美) Ahmad Hemami 编著
张春朋 戚庆茹 等译



本书配学习课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

风力发电机组技术与应用

(美) Ahmad Hemami 编著
张春朋 戚庆茹 等译



机械工业出版社

[Wind Turbine Technology]

[Ahmad Hemami]

张春朋 戚庆茹 等译

Copyright ©2012 by Delmar, a part of Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All Rights reserved. 本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有，盗印必究。

China Machine Press is authorized by Cengage Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司授权机械工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内（不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾）销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

978-7-111-42396-6

Cengage Learning Asia Pte. Ltd.

5 Shenton Way, # 01-01 UIC Building, Singapore 068808

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签，无标签者不得销售。

本书版权登记号：图字：01-2012-0577 号

图书在版编目（CIP）数据

风力发电机组技术与应用 / (美) 荷玛密 (Hemami, A.) 编著；张春朋等译. —北京：机械工业出版社，2013. 6

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文：Wind Turbine Technology

ISBN 978-7-111-42396-6

I. ①风… II. ①荷… ②张… III. ①风力发电机—发电机组 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 093002 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：顾 谦

版式设计：常天培 责任校对：闫玥红

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)

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 25 印张 · 516 千字

0 001—4 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-42396-6

定价：68.00 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



本书讲述了风力发电机的基本概念，解释了风中蕴含的能量以及风力机如何捕获这些能量，从而推动发电机产生电能。然后，详细介绍了风力发电机的关键零部件，分为机械部分和电气部分两类，分别包括基础、塔架、机舱、叶片、轮毂、齿轮箱和发电机、变压器、换流器等。在此基础上，又重点讲述了风力发电机的控制技术。除了介绍技术内容外，本书还讨论了风力发电项目的经济性和基本的财务评估方法。

本书没有深奥的理论内容，而是偏重于实际应用的介绍。因此，既可以为专业技术人员提供一定的参考，又可以作为非专业人员的入门性读物，尤其适用于正在从事或打算从事风力发电方面工作的读者。

译 者 序

您对风力发电感兴趣吗？您考虑找一份风力发电行业的工作吗？其实，风力发电机虽然不像家电那么简单，但也并没有那么神秘，风力发电正在深入到我们每个人的生活中。随着电网的不断智能化，以及绿色建筑理念的不断普及，在不久的将来，风力发电系统会成为我们生活中的重要元素。近年来，已经有不少企业或者个人专门从事这个领域的经营、安装、服务、咨询等业务。

然而，风力发电机方面的入门书籍非常少。因此，机械工业出版社与圣智学习出版（CENGAGE Learning）公司联系，决定引进本书，希望将本书翻译成中文后出版，便于大众能够对风力发电机有基本的了解。本书译者多年来从事电力系统和电力电子相关领域的研究工作，对可再生能源发电技术非常感兴趣，也希望推动可再生能源发电在配电网的普及应用，因此很愉快地承担了本书的翻译工作。由于本书没有深奥的技术理论，而是偏重于实际应用的介绍，所以是非专业人员不可多得的入门性读物。衷心希望本书能够为国内可再生能源技术的推广贡献一份绵力。

本书第1~7章和第16~17章由张春朋翻译，第8~15章由戚庆茹翻译。另外姜齐荣、刘阅春、魏应冬、王亮、洪芦诚、杜威、田钰笙、刘国伟、张曼、王成福、林飞、马莉、莫昕、魏鹏环、吕恭祥、戚广艳、李宁波、黄慧明等人也参与了部分翻译与修改整理工作，在此一并表示感谢！为了尽量保持原书的风格，书中部分文字符号和图形符号并未完全按照国家标准统一，这点请广大读者注意。同时，需要特别指出的是，译者严格遵照原书展开翻译工作，书中内容并不代表译者及其所在单位的观点。另外，正如原书前言所说，本书配有教师资源光盘，有需要的老师可与我们联系，联系的E-mail地址是 buptzjh@163.com 或 43737605@qq.com。

由于译者水平有限，翻译中错误之处在所难免，希望读者批评指正。

原 书 前 言

本书介绍了风能和风力发电机，旨在为四年制或两年制的大一学生提供一本通俗易懂的教科书，他们通常尚未学习相关的电气和机械的基础课程，而这些课程却是学习后续新课程所必需的。本书也会成为那些意欲丰富本课程知识的人们的基本自学材料。在假定本书的读者之前没有接触相关课程的情况下，本书阐述了风能技术和风力发电机工作的原理。

风力发电机是一种复杂的机电系统。为了理解其运行的基本原理，读者应当了解一些机械和电力方面的内容。考虑到不具备这些知识的高中毕业生或者热衷于风能的人，有关的内容会在各章独立阐述。与机组技术相关的较新知识将作为主要内容来讲，具有预备知识的读者无需一字不落地阅读每章的全部内容，而对于需要巩固和温习前期知识的读者，则可以通读每章而无需再去找其他学习资料。这样，便于学生对相关内容获得充足的背景知识，从而很好地理解本书的主题。

要较好地了解风力发电机技术，需要熟悉很多内容，比如电力和电气元部件、机械学和动力学、液力学以及控制系统，本书避免涵盖所有这些内容而变成一本过多主题的合集。

尽管在本书的开头部分采用了较为简单的方式涉及了所需的最少的数学知识，不过相关的数学公式还是在所难免的。随着本书的逐步进展，希望读者具有更强的适应能力，尤其是学生读者，因为本书与其他的教程将同步开展。在很多章的末尾部分，会有标着“进阶学习”的单独一节，这是面向那些想更深入地了解该章内容或者选题的读者的。

虽然公制测量系统是风力发电机技术所选用的，但美制测量系统也总是与公制系统一起使用的。

补充

本书配有教师资源光盘。光盘中的内容包含每章后面复习题的答案要点，标出各章重点内容的 PowerPoint™ 讲稿幻灯片，有 ExamView® 计算机测试题库，以及含有本书图片电子版的图库。

原书致谢

作者和出版者要感谢以下教育工作者，在改善本书内容的过程中，他们给予了有益的和建设性的评论与建议：

Craig Evert，艾奥瓦社区学院

Donnin Custer，西艾奥瓦技术社区学院

George Lister，德克萨斯州州立技术学院西德克萨斯分校

Chad Kurdi，邓沃迪技术学院

Lucas J. Chavey，克劳德郡社区学院

作者特向 Craig Evert、Lucas J. Chavey 表示感谢，他们为本书提供了图片；同时也要向为本书提供照片的个人、公司和研究所表示衷心的感谢。另外，我要感谢手稿的编辑们，他们做出了高品质、专业的工作。特别感谢我的妻子，她给予我一贯的、切实的支持。

量纲转换

长度

$$1\text{ ft} = 0.3048\text{ m}$$

$$1\text{ in} = 0.0254\text{ m}$$

$$1\text{ m} = 3.28084\text{ ft}$$

$$1\text{ m} = 39.37\text{ in}$$

$$1\text{ mile} = 5280\text{ ft}$$

$$1\text{ mile} = 1609.34\text{ m}$$

$$1\text{ m} = 1000\text{ mm}$$

$$1\text{ ft} = 304.80\text{ mm}$$

面积

$$1\text{ ft}^2 = 0.0929\text{ m}^2$$

$$1\text{ m}^2 = 10.764\text{ ft}^2$$

体积

$$1\text{ ft}^3 = 0.02832\text{ m}^3$$

$$1\text{ m}^3 = 35.3174\text{ ft}^3$$

质量

$$1\text{ lb} = 0.453\text{ kg}$$

$$1\text{ kg} = 2.208\text{ lb}$$

力

$$1\text{ lbf} = 4.444\text{ N}^{\ominus}$$

$$1\text{ N} = 0.2250\text{ lbf}^{\ominus}$$

速度

$$1\text{ mile/h (mph)} = 1.4667\text{ ft/s}$$

$$1\text{ mile/h (mph)} = 0.4470\text{ m/s}$$

$$1\text{ ft/s} = 0.682\text{ mile/h (mph)}$$

$$1\text{ m/s} = 2.237\text{ mile/h (mph)}$$

$$1\text{ km/h} = 0.27778\text{ m/s}$$

$$1\text{ km/h} = 0.6214\text{ mile/h (mph)}$$

密度

$$1\text{ lb/ft}^3 = 16.0185\text{ kg/m}^3$$

$$1\text{ kg/m}^3 = 0.06243\text{ lb/ft}^3$$

压强

$$1\text{ lbf/in}^2 (\text{psi}) = 6888 \text{ 帕} = 6.888\text{ kPa}^{\ominus}$$

$$1\text{ Pa} = 0.000145\text{ lbf/in}^2 (\text{psi})$$

力矩

$$1\text{ lbf} \cdot \text{ft} = 1.3545\text{ N} \cdot \text{m}^{\oplus}$$

$$1\text{ N} \cdot \text{m} = 0.73827\text{ lbf} \cdot \text{ft}^{\oplus}$$

功率

$$1\text{ ft} \cdot \text{lbf/s} = 1.3545\text{ W}^{\oplus}$$

$$1\text{ W} = 0.73827\text{ ft} \cdot \text{lbf/s}^{\oplus}$$

$$1\text{ W} = 1\text{ N} \cdot \text{m}$$

$$1\text{ hp} = 550\text{ ft} \cdot \text{lbf/s}$$

$$1\text{ hp} = 746\text{ W}$$

$\ominus$ 原书有误, $1\text{ lbf} = 4.44822\text{ N}$ 。——译者注

$\ominus$ 原书有误, $1\text{ N} = 0.2248\text{ lbf}$ 。——译者注

$\ominus$ 原书有误, $1\text{ lbf/in}^2 = 6894.76\text{ Pa} = 6.89476\text{ kPa}$ 。——译者注

$\oplus$ 原书有误, $1\text{ lbf} \cdot \text{ft} = 1.35582\text{ N} \cdot \text{m}$ 。——译者注

$\oplus$ 原书有误, $1\text{ N} \cdot \text{m} = 0.73756\text{ lbf} \cdot \text{ft}$ 。——译者注

$\oplus$ 原书有误, $1\text{ ft} \cdot \text{lbf/s} = 1.35582\text{ W}$ 。——译者注

$\oplus$ 原书有误, $1\text{ W} = 0.73756\text{ ft} \cdot \text{lbf/s}$ 。——译者注

目 录

译者序

原书前言

原书致谢

量纲转换

第1章 简介	1
1.0 引言	2
1.1 历史背景	2
1.2 可再生能源的重要性	3
1.3 技术问题	4
1.4 风电场开发	6
1.5 风力发电机的选址	7
1.6 新技术与未来技术	8
1.7 本书的内容安排	9
1.8 本章小结	11
复习题	12
应用题	12
项目	13
参考文献	13
第2章 风中的能量	14
2.0 引言	15
2.1 运动物体中的能量	15
2.2 运动流体中的能量	16
2.2.1 在管道中运动的流体	16
2.2.2 无界限运动的流体	17
2.3 风的功率	18
2.4 风力机吸收的功率	19
2.5 风速的变化	19
2.5.1 风速随时间的变化	20
2.5.2 风速随高度的变化	22
2.5.3 风速随地形的变化	23
2.5.4 风速随地域的变化	24
2.6 本章小结	25

进阶学习	26
复习题	27
应用题	28
项目	28
第3章 基本知识	29
3.0 引言	30
3.1 来自于风的力	30
3.2 空气动力	33
3.3 升力系数和阻力系数	34
3.4 翼型	35
3.5 本章小结	39
进阶学习	40
复习题	41
应用题	42
项目	43
第4章 风力机的基本类型：分析和特点	44
4.0 引言	45
4.1 风力机分类	45
4.2 螺旋桨型风力机	46
4.2.1 螺旋桨型风力机叶片和风力	47
4.2.2 叶片的扭转	50
4.2.3 偏航进风或偏航出风	51
4.3 H 风轮	53
4.4 达里厄风力机	54
4.5 萨伏纽斯风轮	55
4.6 本章小结	58
进阶学习	58
复习题	59
项目	60
第5章 三叶片螺旋桨型风力机及其零部件	61
5.0 引言	62
5.1 机械部件	63
5.1.1 塔架	64
5.1.2 基础	66
5.1.3 风轮（叶片和轮毂）	68
5.1.4 机舱	71
5.1.5 齿轮箱	73
5.1.6 风力机制动	76

5.2 电气部件	77
5.2.1 发电机	77
5.2.2 变压器	79
5.3 其他部件	80
5.4 本章小结	81
复习题	82
第6章 电力和发电	83
6.0 引言	84
6.1 交流和直流	85
6.2 电气参数	86
6.2.1 电流、电流方向和频率	86
6.2.2 电压和功率	88
6.3 电机	89
6.3.1 电动机	90
6.3.2 发电机	92
6.4 直流电机	93
6.4.1 一般性知识	93
6.4.2 直流电机的实际问题	94
6.5 交流电机	95
6.5.1 一般性知识	95
6.5.2 交流电机的实际问题	96
6.6 电路中的电源和负载	97
6.6.1 将负载接至电源	97
6.6.2 发电机并联	99
6.6.3 风力机并联	100
6.7 本章小结	104
进阶学习	105
思考题	106
应用题	108
项目	108
第7章 螺旋桨型风力机的特性	110
7.0 引言	111
7.1 机械功率	111
7.1.1 直线运动的功率	112
7.1.2 旋转运动的功率	113
7.2 图	114
7.2.1 第一个例子	114
7.2.2 第二个例子	116

7.3 风力机的机械功率	116
7.3.1 改变风力机角速度和叶尖速比的作用	118
7.3.2 改变叶片桨距角的作用	121
7.4 风力机功率随角速度的变化	122
7.5 风力机的日发电量	124
7.5.1 问题的提出	124
7.5.2 解答	125
7.5.3 变桨距风力机	127
7.6 年发电量	129
7.7 本章小结	130
进阶学习	131
复习题	132
应用题	133
项目	134
第8章 并网	136
8.0 引言	137
8.1 电功率	137
8.1.1 直流电功率	138
8.1.2 交流电功率	139
8.2 并网功率需求	156
8.3 谐波和电能质量	158
8.4 风力机作为分立发电机	159
8.5 孤岛效应	160
8.6 本章小结	161
进阶学习	163
复习题	164
应用题	165
项目	166
第9章 风力机的机械系统	167
9.0 引言	168
9.1 齿轮箱的基本知识	168
9.1.1 根据齿轮轴线的齿轮分类	170
9.1.2 根据齿形的齿轮分类	171
9.1.3 其他齿轮类型	171
9.1.4 行星齿轮	171
9.2 传动比	173
9.2.1 两个齿轮的传动比和速度比	173
9.2.2 齿轮系的传动比和速度比	175

9.2.3 行星齿轮的速度比	178
9.3 速度和力矩的关系	179
9.4 齿轮上的机械负载	180
9.5 摩擦和耗损	181
9.6 润滑和冷却	182
9.7 效率	182
9.8 齿轮的游移	184
9.9 齿轮的一般性问题和齿轮失效	185
9.10 本章小结	189
进阶学习	190
复习题	192
应用题	193
项目	194
第10章 风力机的控制 第1部分：机械侧	195
10.0 引言	196
10.1 功率与风速相一致	196
10.2 风速测量	198
10.3 功率计算	198
10.4 输出功率的质量与要求	200
10.5 叶片的桨距控制	201
10.6 风力机的运行功率曲线	204
10.7 偏航控制	205
10.8 停车制动	206
10.9 故障控制	207
10.10 本章小结	209
进阶学习	209
复习题	211
项目	211
第11章 风力机的控制 第2部分：电气侧	213
11.0 引言	214
11.1 直流发电机	214
11.2 同步发电机	216
11.3 异步或感应发电机	217
11.3.1 感应发电机特性	218
11.3.2 双馈感应发电机	220
11.4 风力机的运行模式	231
11.4.1 直驱模式	232
11.4.2 定速模式	232

XII 风力发电机组技术与应用

11.4.3 变速模式·····	233
11.4.4 笼型发电机模式·····	234
11.4.5 变转差模式·····	234
11.4.6 变转差的双馈感应发电机·····	235
11.5 风力机的控制方案·····	237
11.6 本章小结·····	237
进阶学习·····	239
复习题·····	239
应用题·····	240
第12章 辅助电气设备 ·····	241
12.0 引言·····	242
12.1 变压器·····	242
12.1.1 电压关系·····	246
12.1.2 电流关系·····	247
12.1.3 变压器效率·····	247
12.1.4 变压器额定功率·····	248
12.1.5 其他关于变压器的有用知识·····	248
12.1.6 三相变压器·····	250
12.1.7 例题·····	251
12.2 整流器·····	253
12.3 逆变器·····	256
12.4 风速计和风向标·····	257
12.5 本章小结·····	260
进阶学习·····	260
复习题·····	261
应用题·····	262
项目·····	263
第13章 风力机的机械设计问题 ·····	264
13.0 引言·····	265
13.1 风力机的各种运行状态·····	265
13.2 风轮上的载荷·····	266
13.2.1 叶片上的空气动力载荷·····	267
13.2.2 其他的叶片载荷·····	269
13.2.3 振动·····	274
13.2.4 叶片疲劳·····	276
13.2.5 叶片的建造·····	277
13.3 齿轮箱·····	278
13.4 机舱·····	278

13.5 塔筒	281
13.6 本章小结	285
进阶学习	285
复习题	287
项目	287
第14章 风能的经济性	289
14.0 引言	290
14.1 经济学的基本知识	290
14.2 风能项目的初始成本	292
14.2.1 风力机成本	293
14.2.2 安装	293
14.2.3 运输	295
14.2.4 并网	295
14.2.5 法律和其他成本	296
14.3 运营成本	297
14.3.1 运行成本	297
14.3.2 维护成本	299
14.4 与其他能源的比较	300
14.5 单位成本	302
14.6 案例分析	302
14.7 本章小结	305
进阶学习	306
复习题	307
应用题	307
项目	308
第15章 环境问题	309
15.0 引言	310
15.1 岸上风电场	310
15.2 噪声	311
15.3 视野	312
15.3.1 闪烁和闪变	313
15.4 景观	314
15.5 对鸟类的影响	317
15.6 RF 干扰与对通信的影响	318
15.7 离岸风电场	319
15.8 对鸟类和海洋动物的影响	321
15.9 本章小结	322
进阶学习	323

复习题	325
第 16 章 安全及其他问题	327
16.0 引言	328
16.1 安全与从事风力机工作	328
16.2 温度效应与环境变化	329
16.3 闪电防护	330
16.4 叶片覆冰	331
16.5 城区的风能	333
16.5.1 安全	333
16.5.2 环境问题	335
16.5.3 经济性	335
16.5.4 技术可行性和实际可行性问题	336
进阶学习	337
16.6 本章小结	339
复习题	340
应用题	341
项目	341
第 17 章 从事风力机工作与运行人员的安全	343
17.0 引言	344
17.1 工作环境	344
17.2 可能的危害	346
17.3 常识性的安全守则	347
17.4 标准化的安全守则和官方条例	348
17.5 攀爬装置	349
17.6 风险最小化	354
进阶学习	355
17.7 本章小结	356
复习题	357
附录	358
附录 A 不同温度下的空气密度	358
附录 B 不同形状的阻力系数	361
附录 C 至 2010 年春美国和加拿大的装机容量	361
附录 D 术语表	363

第 1 章



关键术语

AWEA (American Wind Energy Association, 美国风能协会)

调度系统

分布式发电系统

EWEA (European Wind Energy Association, 欧洲风能协会)

水平轴

峰值小时数

发电厂

智能电网

垂直轴

风电场

目标

学过本章后，读者将能够：

- 更专业地谈论风能；
- 自信地使用一定数量的技术术语；
- 解释可再生能源为何是非常重要的；
- 明白在住宅照明时产生了多少温室气体；
- 了解过去 30 年中风力发电机技术的发展；
- 谈论风电场以及风电场是什么；
- 解释为何基于单个观测无法判断风能质量；
- 描述为何有了好风还不足以开发风电场；
- 了解风暴天气对风力发电机来说是不好的，它并不意味着更多的能量。