



国际电气工程先进技术译丛

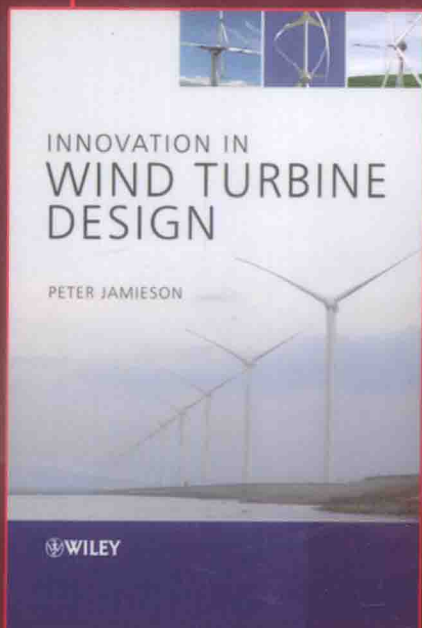
WILEY

风力发电机组的 创新设计

Innovation in Wind Turbine Design

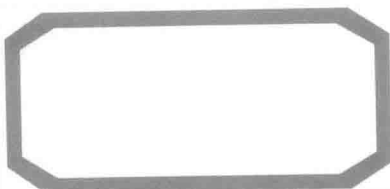
[英] 皮特·贾米森 (Peter Jamieson) 著

王晓辉 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技



风力发电机组的创新设计

[英] 皮特·贾米森 (Peter Jamieson) 著

王晓辉 等译

机械工业出版社

Copyright © 2011 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from English language edition, entitled Innovation in Wind Turbine Design, ISBN: 978-0-470-69981-2, by Peter Jamieson, 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: 01-2012-1894 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

风力发电机组的创新设计/(英) 贾米森 (Jamieson, P.) 著; 王晓辉等译. —北京: 机械工业出版社, 2016.5

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Innovation in Wind Turbine Design

ISBN 978-7-111-53661-1

I. ①风… II. ①贾…②王… III. ①风力发电机-发电机组-设计
IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 088374 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: 顾 谦 责任编辑: 顾 谦

责任校对: 陈 越 封面设计: 马精明

责任印制: 乔 宇

北京鑫海金澳胶印有限公司印刷

2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18 印张 · 345 千字

0001—2600 册

标准书号: ISBN 978-7-111-53661-1

定价: 89.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

本书分为4篇，包括设计背景、技术评估、设计主题和创新示例。第1篇概述了空气动力学理论和优化设计，讨论了风能转换系统、传动系统、缩放问题、海上风力发电机，并通过对未来技术的一瞥，总结了其技术发展趋势；第2篇介绍了关于风力发电系统大量设计方案的全局性观点，开发了相应的评估方法，其中包括带有一些能源成本评估的具体实例；第3篇讨论了经常出现的一些设计主题，如叶片数、变桨距或失速、水平或垂直轴；第4篇用现实生活中商业客户的案例研究了创新技术的一些实例。

本书的读者对象是专业风能工程师、电力工程师和风机的设计师以及在可再生能源领域工作的顾问、研究人员和学者们。

译 者 序

目前,国家大力发展可再生能源,而风力发电是新能源发电中最成熟的技术形式,也是最具发展前景的发电形式。我国风力资源丰富,风力发电潜力巨大。因此,如何改进设计方案,设计出性能优越、结构简单、维护方便、价格低廉的风力发电机组,成为风能工程师和相关设计人员面临的一大问题。本书的主要目的正是为了解决上述问题。

本书共4篇,25章。第1~8章为第1篇,介绍了旋翼气动理论和气动设计的原理及叶轮的结构和设计参数等相关的技术,从而为后续所介绍的创新设计奠定知识基础。第9章和第10章为第2篇,对能源成本的组成及对创新技术进行评估的关键问题做了分析。第11~16章为第3篇,对最佳叶片数、变桨距与失速调节策略、水平与垂直轴风机的形式、自由偏航系统、多叶轮系统等设计方案进行了全方位的深入分析和比较。第17~25章为第4篇,列举了各种技术创新的方案,并从可行性、成本、负荷水平、能量捕获等角度进行了详细的评价。

本书各章结构上科学合理、层次分明、逻辑性强,内容上循序渐进、深入浅出、形式多样。作者以其广博的知识、详尽的数据、独到的见解、严谨的论证为读者呈现了一本关于风力发电机组创新设计的著作。本书可以说是一本风力发电机组设计的基础知识手册,也可以说是一本风力发电机组专业设计的具体方案指导手册。本书适合于专业的风能工程师、电力工程师和风机的设计师以及在可再生能源领域工作的顾问、研究人员和学者们参考或学习。

在本书的翻译过程中,赵士元、邓亚、钟滨、沈小云、王竹颖、郝玉娟、程海新、崔成、陈帅、王冰杨、刘牛、张培、金兆栋、杨乾俊、王勇、杨堃、郭祥峰、郭海法、马晓、戴龙等同志参与了部分内容的翻译,并对书稿中的图表和公式做了大量的整理工作,刘腾超同学也对本书的翻译提出了很多宝贵的建议,在此表示由衷的感谢。

由于时间紧迫,译者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,欢迎广大读者批评指正。

译 者

原 书 序

像我们这些在过去几十年里活跃在风能行业当中的人是十分幸运的，因为这是一个技术上吸引人、商业上令人振奋的值得为之一搏的行业。我们见证了风机的直径从10m增加到了120m，功率从10kW增至10000kW，这是一段多么美妙的旅程！

风机尺寸的变化是其最明显的特征。因为它是显而易见的，风机是迄今为止世界上最大的旋转机械。不太明显的是其设计的独创性。回首过去的几十年间，许多“怪诞”的想法涌现出来并在商业上取得应用，其中有的甚至成为了一种传统。表面上来看，最近一代风机看起来可能差不多，但实质上，机舱下面和叶片内部却有着让人意想不到的差异。很长时间以来，风机行业中了“越来越大”的魔咒。但现在，该行业已经走上了越来越好的轨道，这标志着该领域革新的开始。

Peter Jamieson 是风机行业中思路最清晰的思想家之一，所以我很开心也很荣幸能跟他合作长达20年之久。他是一个真正的天马行空的思想家，从不被传统所束缚，并一直以严苛的标准要求自己。最近30年，Peter 一直致力于风机的革新，的确是时候写一本关于这方面的书了。我十分支持 Peter 关于要把专业的想法落实到笔头上的观点，并且他现在真的这样做了。

任何一个对于风机过去的发展以及它未来的前景在技术方面感兴趣的人都应该认真读一下本书，你一定会深受启发的。这绝不是一本充斥着枯燥的术语或者历史的书，这是一本真正的关于智力资本和创新的力作。

Andrew Garrad

原书前言

本书着眼于风机设计的革新——更具体地说是关于对革新的评估——评估一个概念或者系统能否改进设计、提高性能或降低成本。

本书作者的风能生涯开始于1980年，从业以来，在商业客户和公众权威人物的要求下，他就不断地在给有相关报告的创新系统做评估，不管这评估能否增进投资或促进发展。有些情况下，客户是有着宝贵思想的民间发明家。而有的时候，客户是一些战略上能实现技术创新的小公司，一些希望能跨入风机行业的大公司或者期待能跨入下一代风能技术的现存的风机公司。

正如大部分人设想的那样，在风能行业中一直存在着一种实质保守主义。因为产品都必须经过彻底地检查并确认完好无损，所以就算是该产品未来的利润有很好的前景，改变通常还是太过冒险并且昂贵。从某种程度上说，随着对更大的风机及相关零件的需求的逐年增长，产品的改变也加快了步伐，但这种需求的变化才刚刚开始。实际上，现在人们对产品的主流设计的几种方法正在渐渐融合。然而，随着更多新鲜血液的注入和更多国家加入风能行业，对于风能技术的观念以及对新设计的需求又在渐渐增多。风能行业世界范围内的扩张更是成了一种动力，它使本书完完全全成为了一个充满不同创新设计和组件的书。

可能有的读者会感到很奇怪，认为本书中关于技术背景怎么可以和一些特定的创新概念的讨论占有相同的分量。但是创新绝不是为了建立一个怪诞的概念来娱乐一下无聊的工程师们，而是提高技术的发展，解决实际问题而不仅仅是建立概念本身。所以，为了实现这种创新，很好地理解潜在的技术要求是至关重要的，这样这种创新才能被很好地利用于本领域，使得投入实现最大的回报。除此之外，才是要对一些常规的技术背景加以重视。在这种背景下，一些长期建立的理论被重新审视（激励器盘和叶素动量），除此之外一些新的相关公式也不断涌现出来。

被重新定义的创新观念要打破常规的束缚，需要一些新的分析方式或现存理论的进一步发展，总之要有新的思维。在分析评估的过程中一定不要陷入一种体系化常规化的思维方式。评估创新跟设计本身一样，是一个积极的动态过程，是不断改革的，而不是一个最终的方法论。但从另一方面讲，有一些基本准则和基本结构当然也可以被引入到评估的这个过程中。

在纠缠上面的这些情况的过程中会发现，宽泛的概念和具体的设计之间的差距其实是十分明显的。在这个领域中，既要头脑风暴，又要参数分析。单纯地判

VI 风力发电机组的创新设计

断就过于受限制，而繁重的计算既耗时又耗钱而且还不能确定方向是否正确。这就是为什么细节的设计总是不能很好地实施。这又应该是另一本书的主题了。本书主要是给评估创新性的概念搭桥引线，并指出在细节设计上投资是值得的。

风能行业的创新是设计者在对未来一种可持续发展技术中展现出来的理想主义，这绝对是对地球的恩惠。

原书致谢

我从事风能技术的职业生涯开始于1980年，当时我在格拉斯哥杰姆斯豪顿（James Howden）公司工作。在这里，我要特别感谢我的同事们，是他们跟我分享了那些早期的发现。虽然，遗憾的是1988年豪顿公司退出了涡轮制造业，但是正是那个时候我对风能却出奇地着迷，几乎着迷到了无药可救的地步。

在那段时间里，我对一个事业蓬勃发展的风能咨询公司十分钦佩，也就是现在的GL Garrad Hassan公司。所以，1991年我十分开心地加入了他们，并成立了在苏格兰的办事处。当时，我就想，跟这么一群才华横溢的人一起工作肯定会很棒，工作中会一直充满挑战。从那之后，我对这份工作的态度就从未改变过。

特别的，我要非常感谢Andrew Garrad和Dave Quarton，感谢他们在过去的几年里在我编写本书的过程中给予的精神上的鼓励、实践方面的支持，还有莫大的包容。

最近几年，也就是2009年以来，我还在斯凯莱德大学的博士培训中心从事风能方面的工作，我要感谢那里的Bill Leithead这些年来对本书的支持以及许多关于风能技术的头脑风暴方面的帮助。

与此同时，我还要特别感谢一下Woody Stoddard。尽管我们只见过几面，但作为朋友，他给了我很多的灵感和启发，并给予我巨大的支持。

在这里，我同样还要感谢Mike Graham在许多项目中给予我的无私帮助，他善良的天性让我对他印象颇深。尽管他不是一名正式的导师，但对我来说他却是一位非常优秀的空气动力学导师。当然，我还要十分感谢Henrik Stiesdal。他作为一个大型风机制造公司的技术主管，工作十分繁忙，但还是从百忙之中抽出时间帮我完成了本书的一章。

最后，我还要特别感谢许多对本书做出了宝贵贡献的其他同事和朋友，他们是Albert Su、Alena Bach、Alexander Ovchinnikov、Andrew Latham、Anne Telfer、Ben Hendriks、Bob Thresher、Chai Toren、Charles Gamble、Chris Hornzee - Jones、Chris Kirby、Christine Sams、David Banks、David Milborrow、David Sharpe、Ed Spooner、Emil Moroz、Ervin Bossanyi、Fabio Spinato、Fatma Murray、Jan Rens、Geir Moe、Georg Böhmeke、Gerard van Bussel、Herman Snel、Irina Dyukova、Jega Jegatheeson、Jim Platts、John Armstrong、Leong Teh、Lois Connell、Magnus Kristbergsson、Marcia Heronemus、Mark Hancock、Martin Hansen、Masaaki Shibata、Mauro Villanueva - Monzón、Mike Anderson、Mike Smith、Nick Jenkins、Nils

VIII 风力发电机组的创新设计

Gislason、Patrick Rainey、Paul Gardner、Paul Gipe、Paul Newton、Paul Veers、Peter Musgrove、Rob Rawlinson – Smith、Roger Haines、Roland Stoer、Ross Walker、Ross Wilson、Ruud van Rooij、Sandy Butterfield、Stephen Salter、Steve Gilkes、Tim Camp、Takis Chaviaropoulos、Trevor Nash、Unsal Hassan、Varan Sureshan、Vidar Holmøy、Win Rampen 和 Wouter Haans。

Peter Jamieson

目 录

译者序

原书序

原书前言

原书致谢

引言	1
0.1 为什么要创新	1
0.2 风能所面临的挑战	2
0.3 现代风机的规范	2
0.4 风能的变化	4
0.5 商业风力发电技术	4
0.6 风能技术评价的基础	6
0.6.1 作为基线的标准设计	6
0.6.2 技术优势的基础	6
0.6.3 所宣称的功率性能的安全性	6
0.6.4 所提出的创新的影响	6
参考文献	7
第1篇 设计背景	9
第1章 旋翼气动理论	9
1.1 简介	9
1.2 气动升力	10
1.3 激励盘	12
1.4 开流激励盘	13
1.4.1 轴向感应	13
1.4.2 动量	14
1.5 广义激励盘理论	15
1.6 扩散器的受力	21
1.7 广义激励盘理论和实际扩散器设计	22
1.8 为什么只有一个叶轮?	22
1.9 叶轮的基本运行	23
1.10 叶素动量理论	25
1.10.1 动量方程	25
1.10.2 叶素方程	26

X 风力发电机组的创新设计

1.11 最佳叶轮理论	28
1.11.1 功率系数 C_p	31
1.11.2 正压力系数	34
1.11.3 面外弯矩系数	34
1.12 广义叶素动量理论	36
1.13 激励盘和叶素动量理论的局限性	39
1.13.1 激励盘的局限性	39
1.13.2 尾翼旋转和尖端效应	39
1.13.3 最佳叶轮理论	40
1.13.4 偏流	40
1.13.5 小结	41
参考文献	41
第2章 旋翼气动设计	44
2.1 最佳叶轮和硬度	44
2.2 叶轮硬度和理想的变速运行	45
2.3 硬度和负荷	47
2.4 翼型设计开发	47
2.5 气动性能对平面形状的敏感性	52
2.6 翼型设计规范	53
参考文献	54
第3章 叶轮结构的相互作用	56
3.1 叶片大体设计	56
3.2 叶片结构基础	57
3.3 简化的盖梁分析	59
3.3.1 规定挠度的最小质量设计	59
3.3.2 疲劳强度设计: 无挠度限制	60
3.4 翼型剖面的有效 t/c 比	61
3.5 叶片设计研究: 参数化分析实例	63
3.6 工业叶片技术	68
3.6.1 设计	68
3.6.2 制造	68
3.6.3 设计开发	69
参考文献	71
第4章 风力发电机组的尺度升级	72
4.1 简介: 尺寸和尺寸限制	72
4.2 二次方—三次方定律	75
4.3 缩放基础	75
4.4 风力发电机组的相似律	77

4.4.1	叶尖速度	77
4.4.2	气动力矩的缩放	77
4.4.3	弯曲剖面模量的缩放	78
4.4.4	张力剖面的缩放	78
4.4.5	气动弹性稳定性	78
4.4.6	自重载荷的缩放	78
4.4.7	叶片(叶尖)挠度缩放	78
4.4.8	更微妙的缩放效果及影响	79
4.4.9	变速器缩放	80
4.4.10	支撑结构缩放	80
4.4.11	功率/能量缩放	80
4.4.12	电气系统缩放	80
4.4.13	控制系统缩放	81
4.4.14	缩放小结	81
4.5	商业数据分析	82
4.5.1	叶片质量缩放	83
4.5.2	轴质量缩放	86
4.5.3	机舱质量和塔顶质量的缩放	87
4.5.4	塔顶质量	88
4.5.5	塔架缩放	89
4.5.6	变速器缩放	93
4.6	垂直轴风机的尺度升级	94
4.7	额定叶尖速度	94
4.8	载荷升级	96
4.9	违反相似性	98
4.10	成本模型	99
4.11	缩放的结论	100
	参考文献	101
第5章	风能转换的概念	102
	参考文献	104
第6章	传动系统设计	105
6.1	简介	105
6.2	定义	105
6.3	传动系统创新的目的	106
6.4	传动系统技术图	106
6.5	直驱系统	110
6.6	混合型系统	113
6.7	液压传动装置	114

XII 风力发电机组的创新设计

6.8 直驱组件效率	116
6.8.1 简介	116
6.8.2 运行范围内的效率	118
6.8.3 变速器效率	118
6.8.4 发电机效率	119
6.8.5 变换器效率	119
6.8.6 变压器效率	121
6.8.7 液力耦合器效率	121
6.9 最佳传动系统	121
6.10 动力输出装置的创新概念	123
参考文献	126
第7章 海上风机	127
7.1 海上风机设计	127
7.2 高速叶轮	127
7.2.1 设计逻辑	127
7.2.2 速度限制	128
7.2.3 叶轮结构	129
7.2.4 设计比较	130
7.3 “更简单的”海上风机	133
7.4 海上漂浮风机系统	135
参考文献	137
第8章 技术发展趋势总结	139
8.1 演变过程	139
8.2 叶片数量和经营理念的共识	141
8.3 传动系统概念的分歧	141
8.4 未来的风力发电技术	142
8.4.1 简介	142
8.4.2 机载系统	142
8.4.3 新型系统的概念	144
参考文献	146
第2篇 技术评估	147
第9章 能源成本	147
9.1 能源成本的计算方法	147
9.2 能源:功率曲线	150
9.3 能源:有效性、可靠性、可用性	155
9.3.1 有效性	155
9.3.2 可靠性	155

9.3.3 实用性	156
9.4 资本成本	157
9.5 运维	158
9.6 总成本分摊	158
9.7 缩放成本影响	160
9.8 负荷影响 (场所类型)	161
参考文献	164
第 10 章 评估方法	166
10.1 主要的评估问题	166
10.2 致命缺陷分析	166
10.3 功率性能	167
10.3.1 贝兹极限	167
10.3.2 风机的压差	169
10.3.3 气流中的总能量	169
10.4 传动系统转矩	171
10.5 典型的基准	171
10.6 设计负荷的比较	172
10.7 评估举例: 风机的最佳额定功率	173
10.8 评估举例: Carter 风机和结构的灵活性	176
10.9 评估举例: 概念设计优化研究	178
参考文献	180
第 3 篇 设计主题	183
第 11 章 最佳叶片数	183
11.1 能源捕获比较	183
11.2 叶片设计问题	184
11.3 运行和系统设计问题	186
11.4 多叶片叶轮	191
参考文献	191
第 12 章 变桨距与失速	192
12.1 失速调节	192
12.2 变桨距调节	194
12.3 疲劳载荷问题	195
12.4 电能质量和网络需求	197
12.4.1 风机设计的并网导则要求和意义	197
参考文献	199
第 13 章 水平轴风机还是垂直轴风机	200
13.1 简介	200

XIV 风力发电机组的创新设计

13.2 垂直轴风机的空气动力学	201
13.3 功率特性和能量捕获	206
13.4 传动系统转矩	207
13.5 垂直轴风机的适当应用	209
13.6 垂直轴风机设计现状	209
13.6.1 问题	209
13.6.2 解决方法	210
参考文献	211
第14章 自由偏航	212
14.1 偏航系统的能源成本价值	212
14.2 偏航动力学	212
14.3 偏航阻尼	214
14.4 主传动	214
14.5 自由偏航风机的运行经验	214
14.6 小结	216
参考文献	216
第15章 多叶轮系统	217
15.1 简介	217
15.2 标准化效益和概念的发展	217
15.3 运行机制	218
15.4 缩放比例经济学	218
15.5 历史回顾	220
15.6 多叶轮阵列的气动性能	220
15.7 最近的多叶轮理念	221
15.8 多叶轮的结论	225
参考文献	226
第16章 设计主题概述	227
第4篇 创新示例	229
第17章 强适应性叶轮的概念	229
17.1 叶轮运行的要求	229
17.2 风机的控制	231
17.3 适应性强的叶轮	232
17.4 锥形叶轮	234
17.4.1 概念	234
17.4.2 锥形叶轮: 总体评价—能量捕获	236
17.4.3 锥形叶轮: 总体评价—负载	237
17.4.4 概念综述	238

17.5 变直径叶轮	238
参考文献	240
第 18 章 覆盖式叶轮	241
参考文献	244
第 19 章 Gamesa G10X 型传动系统	245
第 20 章 陀螺转矩传递	247
参考文献	252
第 21 章 Norsetek 叶轮设计	253
参考文献	255
第 22 章 西门子叶片技术	256
第 23 章 摆振	259
参考文献	262
第 24 章 磁性齿轮传动和准直驱	263
24.1 磁性齿轮传动技术	263
24.2 准直驱技术	265
参考文献	267
第 25 章 总结和评论	268