



中国教师发展基金会教师出版专项基金资助
哈尔滨工程大学深海工程技术研究中心“111”基金资助

Offshore Wind Power

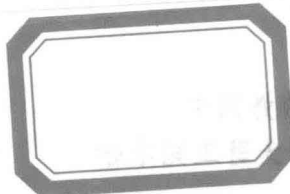
海上风力发电

John Twidell 主编
Gaetano Gaudiosi

张亮 白勇 译



海洋出版社



行发展基金会教师出版专项基金
学深海工程技术研究中心“111”基金资助

海上风力发电

John Twidell 主编

Gaetano Gaudiosi

张亮白勇译



海洋出版社

2012年·北京

内 容 提 要

本书系统介绍了海上风电的发展,翔实地论述了风力机原理、海上风力机电力技术、海上风场电力连接、海上风力机疲劳与载荷、深水海上风力机基础设计及海上风力机材料等,描述了地中海的风浪条件、海洋风能气候和气象预测、并网接入和市场机制的监管框架、海上风电场的可达性、风力机标准与认证等。本书涵盖了国外海上风电研究的最新成果,注重理论与实际工程相联系,剖析了国外海上大型风电场的建设经验。译者把它介绍给国内读者,以期成为海上风电发展的指导书,对海上风电开发的研发人员和工程设计人员有一定的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电/(英)泰威德尔(Twidell, J.), (英)高迪(Gaudiosi, G.)主编;
张亮,白勇译.—北京:海洋出版社,2012.12

书名原文:Offshore Wind Power

ISBN 978-7-5027-8433-1

I. ①海… II. ①泰… ②高… ③张… ④白… III. ①海洋发电—风力发电
IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第249993号

责任编辑:高朝君

责任印制:赵麟苏

海洋出版社 出版发行

http://www.oceanpress.com.cn

北京市海淀区大慧寺路8号 邮编:100081

北京旺都印务有限公司印刷 新华书店发行所经销

2012年12月第1版 2012年12月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:20

字数:499千字 定价:68.00元

发行部:62132549 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

译者序

风能作为一种清洁的可再生能源，备受世界各国的重视。与陆上风速相比，海上风速大且稳定，年利用小时数可达3 000小时以上，且海上风力机不占用土地资源，因而海上风力发电成为风电发展的重点。随着上海东海大桥风电场的建成并投入使用，中国拉开了海上风电开发利用的序幕。国家近年来对风力发电给予了大力支持，在“863”计划及“十一五”科技支撑计划项目的推动下，国内的一些科研机构 and 风电设备制造公司已展开对海上风力发电相关技术的研究，各大风电公司也纷纷规划建设大型海上风电场，进一步推动了我国海上风电事业的发展。

我国海上风电发展相对国外较晚，海上风电领域的技术相对薄弱，可供参考的相关工程、图书资料很少。译者初次研读本书，即萌发翻译此书的念头。本书系统介绍了海上风电相关的结构、机械、材料、环境载荷、电力并网、施工和维护等设计理论和关键技术，涵盖了国外海上风电研究的最新成果，并注重理论联系工程实践，剖析了国外大型海上风电场的建设经验。译者把它介绍给国内读者，以期成为海上风电发展的指导书，对海上风电开发的研发人员和工程设计人员有一定的帮助。

本书分工：哈尔滨工程大学张亮教授翻译本书的前言、第1章和第3章，并负责全书主审，张建华翻译第12章，并负责全书的统稿，荆丰梅翻译第2、8、10、11章，张学伟翻译第4、5、6、7、9章，王玮翻译第13章。哈尔滨工程大学深海工程技术研究中心的研究生赵静、吴海涛等参与了书稿的初译工作，在此一并表示感谢。白勇教授引进本书，负责统稿并校对本书的数学公式和参考文献等，白勇教授自始至终关注本书的翻译工作，在此表示衷心感谢！

本书翻译尽可能尊重原文语言表达的风格，力求含义准确，但由于水平有限，难免有不妥之处，敬请各位读者批评指正！

译者

2012年10月

于哈尔滨工程大学

前言

对于沿海国家来说，利用海上风能发电已经是发电的一个主要发展方向。同时也存在很大的挑战，而且最终状态也未知。本书由“地中海和欧洲海域的海上风能及其他可再生能源（OWEMES）”国际会议的参与者编写，他们受邀撰写了各个章节，由我们总编统稿。主要涉及了工程、制造、维修以及气候等方面，并介绍了在西欧的应用，当然，用一本书来阐明这些方面的知识远远不够。我们已经意识到很多内容本书没有囊括在内，比如国家法律法规、融资、保险、环境及生态影响等许多方面。

很明显，目前大部分全尺度风力机的数据及经验来源于陆地风场。同样地，海上结构物的设计、安装和操作经验来源于海上油气工业；海风的知识来源于船舶的要求。但是这些已有的知识对海上风场的建设来说远远不够，许多海上风场的研究和开发工作正在进行。

欧洲将会保持其在海上风场安装的主导地位，大部分制造业在欧洲进行，如图 1 所示。这样的主导地位意味着欧洲的出口和专业技术仍然非常重要。

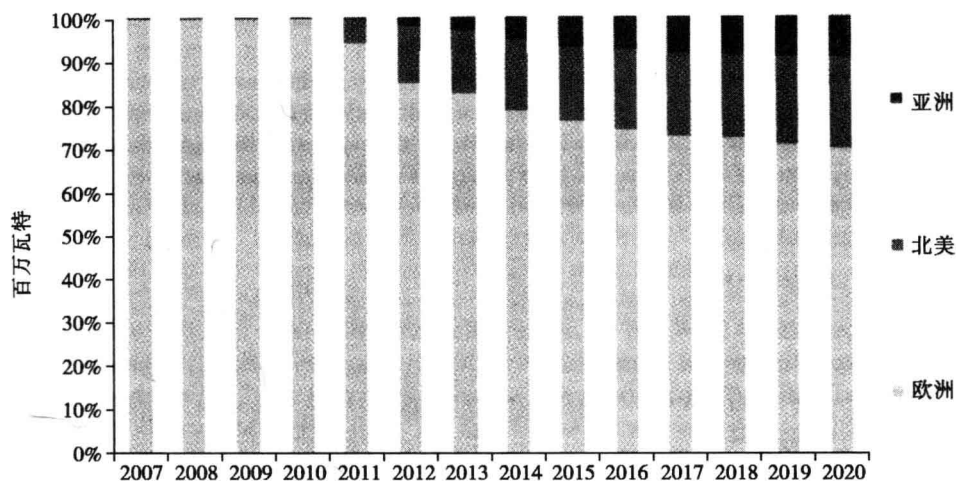


图 1 各大洲海上风力机装机容量比例预测（2007—2020）

（以上数据经允许引自“全球海上风能市场和战略（2008—2020）”，新能源调查，2008年3月）

图 2 所示为预计 2007—2020 年各年欧洲各国海上风力机的装机容量。

我们可以清楚地看到，海上风能利用将是人类历史上一个主要的新发展。工程结构如此规模地安装在海上还是首次。另外，这都是些自动运转的动力机器，期望它们 97% 以上可以维持至少 20 年的工作寿命，这是非常艰巨的挑战。

本书的章节由相应学科的专家撰写。我们的角色就是与这些作者一起将书中的文本连

放的提案。

Jørgen Lemming 是丹麦技术大学 Risø 国家可持续能源实验室的首席顾问，多年来一直是丹麦能源当局的风力能源专家。Lemming 博士于 2005 年加入了位于 Risø 的风力能源系，拥有国内和国际风能领域丰富的合作经验，并且频繁参与了国际能源署风能附属部门的工作。

Niels-Erik Clausen 是丹麦技术大学 Risø 国家可持续能源实验室的高级顾问。Clausen 博士于 2000 年加入丹麦技术大学 Risø 国家可持续能源实验室，在那里他从事研究以及作为个人和机构客户在风能应用中的顾问。他的研究范围包括气候变化和可再生能源潜力、热带气旋区域风力机的设计、风能项目的发展、风能项目对环境影响的评估。现在他负责风场规划和发展的课程，这是挪威技术大学硕士学位风能方面的课程。

第二章 John Twidell

参见以上介绍

第三章 Luigi Cavaleri

Luigi Cavaleri 于 1965 年在意大利帕多瓦大学获得机械工程师学位，1969 年在美国加利福尼亚理工学院获得航空学硕士学位。Cavaleri 自从 1969 年在意大利威尼斯 CNR 海洋科技研究院工作以来一直担任研究员，1992 年成为研究主任，并于 2006 年成为校长。现在 Cavaleri 虽然已经退休，但是还在该院继续做高级科研人员。他的主要专业兴趣一直是风浪，也包括与之相关的建立风模型和空气—海水相互作用处理方面。Cavaleri 已发表近 100 篇论文并出版了 3 本专著。

第四章 Rebecca Barthelmie

Rebecca Barthelmie 是爱丁堡大学能源系统 Ewart Farvis 主席，也是印第安纳大学大气科学和可持续性专业的教授。在此之前，她在丹麦里瑟国家实验室海上风能方面做顾问和研究员。她在欧盟创办的两个项目——迎风流和 POWWOW 尾流中担任工作组领导。她在国际期刊发表/共同发表 80 多篇文章及 200 多篇会议论文。她是欧盟风能技术平台的选任成员，也是《Wind Energy》期刊的编辑。

第五章 Zhe Chen 和 Frede Blaabjerg

Zhe Chen 在中国东北电力大学获得了工学学士和工学硕士学位，在英国达拉谟大学获得了博士学位。他曾是英国 De Montfort 大学的讲师和高级讲师。2002 年，他成为了研究教授。现在，他是丹麦奥尔堡大学能源技术学院的教授，协调风能系统研究计划。他的学历背景领域是电力系统、电力电子学和电力机械，现在他的主要研究领域是风能和现代动力系统，他在这一领域内发表了 170 多篇文章。他是 IEEE 电力电子学会报的副编辑（可再生能源），英国伦敦工程技术研究院成员，也是英国特许资格工程师。

Frede Blaabjerg 于 1987 年在丹麦奥尔堡大学获得了能源工程硕士学位，1995 年在奥尔堡大学能源技术学院获得博士学位。他在 1987—1988 年受聘于 ABB-Scandia Randers。1988—1992 年在奥尔堡大学攻读博士学位，1992 年担任助理教授，1996 年晋升副教授，1998 年晋升为电力电子与驱动学教授。他在很多方面有独特的研究专长，例如电力电子学、静态电力转换器、交流驱动装置、开关磁阻驱动装置、建模、半导体设备特性表征和模拟、风力机和绿色能源变换器。他在其研究领域内编写或合作发表了 300 多篇文章，包括 2002 年 Academic Press 出版的丛书《Control in Power Electronics》（作者：M. P.

Kazmierkowski, R. Krishnan, F. Blaabjerg)。

第六章 Thomas Ackermann

Thomas Ackermann 拥有德国柏林技术大学的 Diplom Wirtschaftsingenieur 学位 (兼具 MBA 的机械工程硕士), 新西兰达尼丁大学物理学硕士学位及瑞典斯德哥尔摩皇家技术大学的博士学位。他是《Wind Power in Power Systems》这本书的编辑。除了风能之外, 他的主要兴趣还涉及分布式发电和市场规章对无限制市场中分布式发电发展的影响。他曾在德国、瑞典、中国、美国、新西兰、澳大利亚和印度的风能工业系统工作。他是从事可持续能源供应领域研究和咨询的 Energynautics 公司的首席执行官。同时, 他也是瑞典斯德哥尔摩皇家技术大学 (KTH) 的讲师。

第七章 Carlo Degli Esposti

Carlo Degli Esposti 于 1999 年在博洛尼亚大学获得电力工程硕士学位。现在他是欧洲传输系统组织 ETSO 的项目经理和技术经济顾问。

第八章 Jan van der Tempel

Jan van der Tempel 于 2000 年在荷兰代夫特技术大学获得海上部门土木工程硕士学位。毕业后在 Royal Boskalis Westminster 从事 Horns Rev 的安装方法和海底电缆的安装和保护工作。后来回到代夫特技术大学攻读博士学位, 研究海上风力机支持结构的设计并确定了一种时域疲劳计算方法 (2006 年 4 月)。他设计了 Ampelmann, 这是一种甚至在大波高的情况下都可以安全进入海上结构的系统。现在他是一个项目经理, 并在代夫特技术大学做助理教授, 主管海上风能课程教学。此外, 他还是 Ampelmann 公司下属子公司的首席执行官。

第九章 Adrew Henderson

Adrew Henderson 是 Garrad Hassan 的海上风能工程师, 负责海上风能技术 Due Diligence。之前, 他为西班牙海上风场开发公司工作, 领导浅水和深水的技术开发。他曾在代夫特技术大学做助理教授研究海上风能, 并在那里参与了欧洲和荷兰大部分的研究项目, 这些项目包括“无遮蔽地点海上风力机的设计方法”和“CA—海上风能”信息推广项目。作为伦敦学院大学的研究员, 他负责“海上风场实施研究工具的开发”这一研究项目, 其中包括海上风力机性能以及浮式支撑结构的细节建模。

第十章 Göran Dalén

Göran Dalén 于 1978 年在瑞典 Gothenburg 的 Chalmers 技术大学获得船舶与海洋工程硕士学位。他在制造业以及像 Vattenfall 和 E. ON 这样的公司和团体中从事风能领域工作数年之久。他也参加了欧盟各种项目, 其中包括顺风项目中 R&D 部分的协调。他是 IEC TC 88 瑞典首席代表和瑞典能源委员会许多筹划委员会的代表。同时, 他也是欧洲代理的各种工作组下的许多筹划委员会的代表, 例如海上风能技术平台。现在他是 wpd Scandinavia 的一个项目经理, 负责在德国和欧洲其他国家开发海上项目。

第十一章 Christian Nath, Axel Andrea, Kimon Argyriadis, Peter Dalhoff, Silke Schwartz

Christian Nath 于 1976 年在德国 Hannover 技术大学获得造船学工程师学位。毕业后, 在伯克利加利福尼亚大学做一年的研究员, 并在那里做访问学者研究有限元分析。回来之后, 他在 Germanischer Lloyd 结构分析小组工作。在 GL 的工作被在汉堡大学的一项 2 年的研究打断。在 20 世纪 80 年代初期, 他在风能批准部门做结构工程师。1989—1992

年，他作为联邦研究部的项目经理去中国一个试验地点安装风力机。自1993年开始，他已经在GL负责风能领域工作。1993年，他成为了德国风能实验室的主席，而且也是IEC工作组的成员。他致力于几个国内外的研究工程，也是欧洲风能科技行政委员会的成员。他的首次海洋风能投资被Germanischer Lloyd结构分析小组和Garrad Hassan执行。

Axel Andreä 1989年获得了德国汉堡大学的学位。他在测量领域工作长达两年时间。在此之后，他受聘到Energiesysteme GmbH工作，进行荷载分析、部件以及塔架结构的设计。1995—2008年在Germanischer Lloyd的风能部门工作。在GL这段时间里，他离开了一年为REpower Systems AG工作，并担任荷载部门的主任。在2008年离开了GL，为南美的发展中国家支持的项目工作。

Kimon Argyriadis 获得了汉堡大学船舶建造学位。Argyriadis开始的工作是海洋工程顾问，1994年参加了GL。他研究的领域涵盖了海上和陆上风力机的载荷分析，也负责海上能源设备的认证。他是计算假定载荷的专家，且致力于软件和发展方针。他多次参加国内外的会议，并且是IEC科技协会的成员，现在第三组工作，致力于海上风力机标准和一些国内外的研究项目，也是欧洲风能科技组的成员。

Peter Dalhoff 是Germanischer Lloyd工程部和商业部门的主席。1996年他担任GL机械工程师，从此踏入风能研究领域。他实地对风力机进行了设计的检查和复查，主要集中在机械装置和驱动设备上。作为一个工程管理员，Peter负责对不同风力机计算和风电场的校对。2000年，他被聘用到海洋风能工作，负责了很多海上风能工程，例如工程的认证、发展以及风电场的维护。并且参加了国外的研究工程。他组建了风能专题讨论会，也是HOW的投资者。

Silke Schwartz 在汉堡大学获得海洋工程学位。从2001年起，她在Germanischer Lloyd的工程经验使自己成为了海上陆地风力机载荷的专家。2004年担任荷载部门的副主任，她致力于载荷确定和海洋能、风能的研究，是有关海洋环境荷载硕士论文的主审。2006年她在澳大利亚工作，担任可持续能源领域的咨询顾问。

第十二章 原文无（译者注）。

第十三章 Lorenzo Battisti

Lorenzo Battisti 是意大利特兰托机械与力学工程学院流体机械专业副教授，涡轮机实验室主任。他于1988年毕业于机械工程本科，在比利时布鲁塞尔卡门研究所研究生毕业。他主要研究风能风力机、汽轮机的热能源转换，在高温热转换机理领域进行了大量的理论和试验研究，他是制冷、空调、热泵国家环境技术委员会的会员。他参与编写了《Wind Energy in Cold Climate》一书，且是欧洲轮机ETN的前任会员。他发表了多篇论文并申请了多项关于风力机冷却系统的国际专利。

目 录

第 1 章 海上风力发电：发展现状与展望	1
1.1 引言	1
1.2 海上风电的发展和投资成本	1
1.3 海上风力发电成本	4
1.4 在建和计划中的海上风场	5
1.5 未来技术发展	6
1.6 未来海上风电发展展望	7
1.7 海上风力机长期成本前景	8
1.8 新的离岸概念	9
1.9 结论	11
第 2 章 风力机原理	13
2.1 引言	13
2.2 风电发展	13
2.3 风力机如何运行	13
2.3.1 叶片旋转	13
2.3.2 旋转速度：叶尖速比 λ	14
2.3.3 风速变化时的叶轮转动速度	15
2.3.4 叶片数量	17
2.3.5 从风中获取的能量	17
2.3.6 风能	17
2.3.7 功率曲线	18
2.3.8 设计尺寸	18
2.4 海上还是陆上	19
2.5 环境影响	20
2.5.1 场区域和利用	20
2.5.2 视觉影响	20
2.5.3 听觉噪声	20
2.5.4 飞鸟撞击	21
2.5.5 电磁干扰	21
2.5.6 可持续性	21

第 3 章 地中海的风浪条件	22
3.1 地中海海洋特征	22
3.2 地中海风浪数据资料	22
3.2.1 观测	23
3.2.2 数学模型	24
3.3 综合不同数据得到相容的数据集	27
3.4 结论	28
3.4.1 Medatlas 工程	28
3.4.2 地中海海盆海洋风统计	30
3.4.3 意大利海岸沿线风能估计	31
3.4.4 各评估结果的比较	32
3.5 致谢	33
第 4 章 海洋风能气候和气象预测	35
4.1 引言	35
4.1.1 本章目的与结构	35
4.1.2 大气变化尺度	35
4.1.3 大气稳定度	35
4.1.4 风速分布及其对能量密度和电力生产的影响	39
4.1.5 丹麦现有的海上风力发电场	40
4.2 资源评估	41
4.2.1 长期风能资源预测: 气候变化的影响	41
4.2.2 在稳定气候下预测风力发电场在寿命期的风力资源观测风速来源	46
4.2.3 风速和能量密度的气候鲁棒性估计	46
4.2.4 外推垂直风速剖面	47
4.3 从风资源到风能: 尾流的影响	49
4.3.1 风力机尾流	49
4.3.2 尾流模型简介	49
4.3.3 尾流尺度评估和单尾流中的尾流模式	50
4.3.4 多尾流中的尾流模式	52
4.4 风场短期功率输出: 海上有什么不同吗	53
4.5 小结	53
4.6 致谢	54
第 5 章 风力机的电力技术	60
5.1 引言	60

5.2 风力机的能量控制	61
5.3 风力发电机	62
5.3.1 感应发电机	62
5.3.2 同步发电机	62
5.3.3 直接驱动发电机	63
5.4 现代电力电子变换技术与系统	63
5.5 风力发电机组的电力变换系统	66
5.5.1 恒定速度的风力发电机组	66
5.5.2 变速风力发电机组	69
5.5.3 风力发电机系统的总结	74
5.6 风力发电机组的控制	75
5.6.1 带有鼠笼型转子感应发电机的主动失速风力发电系统	75
5.6.2 带有双馈发电机的变桨距控制	76
5.6.3 具有全额定功率电力电子装置的风力发电机系统	77
5.7 风场电网的结构布局	78
5.8 风力机与电网并车运行	80
5.8.1 风力机并网运行的条件	80
5.8.2 电压质量评定	82
5.9 电力系统中风力机性能的改进	84
5.9.1 电压闪变最小化	84
5.9.2 提高电力系统的稳定性	87
5.10 结论	91
第6章 风场电力连接	95
6.1 介绍	95
6.2 海上集电系统	96
6.2.1 电力集电系统的布局	98
6.2.2 直流集电系统	100
6.2.3 变频交流集电系统	101
6.2.4 集电系统的最优化	101
6.3 海上变电站	102
6.4 海上输电系统	103
6.4.1 高压交流传输	104
6.4.2 高压交流输电能力	105
6.4.3 具有电网换相换流器的高压直流传输	108
6.4.4 使用自换相电压源换流器的高压直流传输	112

6.4.5	不同输电技术的并网运行	114
6.5	传输技术的总结	115
6.6	可靠性评估	115
6.6.1	基于电网换相换流器的高压直流传输系统的可靠性	116
6.6.2	“缺供电量”的计算方法	117
6.6.3	结果	120
6.7	输电系统的经济性评估	120
6.8	结论	121
6.9	致谢	121
第7章	监管框架：并网接入和市场机制	126
7.1	引言	126
7.2	可再生能源规范	126
7.3	风力发电的促进方案	127
7.3.1	市场一体化	127
7.3.2	现行促进措施	127
7.4	可再生能源融入电力市场	128
7.4.1	电力市场的价格与成本	128
7.4.2	供电的安全性	129
7.4.3	配电优先权	129
7.4.4	可再生能源的跨界传输	129
7.5	系统成本	130
7.5.1	网络连接成本	130
7.5.2	系统运营成本	130
7.6	可再生能源技术整合	131
7.6.1	电网扩展	132
7.6.2	系统稳定性	132
7.6.3	风场管理失衡成本	132
7.6.4	跨界输电的不利影响	132
第8章	海上风力机：动力学和疲劳	134
8.1	引言	134
8.2	主要术语	134
8.3	随机过程	134
8.4	波浪和海流	135
8.4.1	波浪的描述	135

8.4.2	随机波浪的描述	137
8.4.3	作用于结构物上的波浪载荷	139
8.4.4	极限波、非线性波理论以及破碎波	141
8.4.5	长期波的描述	142
8.4.6	海面升高: 潮汐	143
8.4.7	海流	143
8.5	风	144
8.5.1	风速	144
8.5.2	风切变和湍流	144
8.5.3	极限风速和阵风	146
8.5.4	长期风速分布	147
8.6	风轮	148
8.6.1	概要	148
8.6.2	风能捕获	151
8.6.3	湍流中的风力机	153
8.7	海上风力机动力学	154
8.7.1	动力学基础	154
8.7.2	柔性和刚性风力机系统	156
8.7.3	支撑结构动力学设计选项	157
8.7.4	环境补偿	158
8.8	疲劳基本考虑	159
8.8.1	概要	159
8.8.2	疲劳范例	159
8.8.3	S-N 曲线和 Miner 法则	160
8.8.4	计数方法	161
8.9	基础	162
8.9.1	土壤性质	162
8.9.2	模型基础	163
第 9 章	深水海上风能	168
9.1	引言	168
9.2	历史	168
9.3	深海风电场的效益	170
9.4	概念设计要求	172
9.4.1	风力机配置	173
9.4.2	原料和成组技术	174

9.5 备选概念设计方案	175
9.5.1 松弛式系泊系统	175
9.5.2 张紧式系泊	178
9.5.3 深水座底式支撑结构	179
9.6 结论和挑战	179
第 10 章 海上风电场的可达性	182
10.1 引言	182
10.1.1 安全性	182
10.1.2 经济性	182
10.1.3 增加复杂性的其他因素	182
10.1.4 提高实用性的需要	183
10.2 良好可达性要求	183
10.2.1 环境条件	183
10.2.2 技术要求	184
10.2.3 可达性系统的成本	184
10.3 可达性系统构成	185
10.3.1 现有船舶和运载工具	185
10.3.2 船舶入坞风力机	187
10.3.3 人员运送	188
10.4 经验及系统分析	188
10.4.1 瑞典/丹麦/英国	188
10.4.2 基础类型的影响	190
10.4.3 以上两个系统相结合的技术	192
10.4.4 正常可达和紧急救助	193
10.5 未来技术	193
10.5.1 OAS	193
10.5.2 Ampelmann	193
10.6 结论	193
第 11 章 标准与认证	194
11.1 引言	194
11.2 标准	194
11.2.1 总述与比较	194
11.2.2 未来发展	196
11.3 风力机和风电场认证	198

11.3.1	概要	198
11.3.2	设计要求	199
11.3.3	型式认证	206
11.3.4	项目或风电场认证	213
11.3.5	有效性与重新认证	219
11.4	风险评估	220
11.4.1	概要	220
11.4.2	风险分析	220
11.4.3	尽职调查	226
11.4.4	状态监控	228
11.4.5	其他要求	229
11.5	小结	229
第 12 章	深水海上风力机基础	233
12.1	引言	233
12.2	结构解决方案	233
12.2.1	选择基础	233
12.2.2	海上风力机和深水基础的数据	235
12.2.3	中高功率风力机的金属支撑结构	237
12.2.4	2 MW 海上风力机的支撑结构	240
12.2.5	4 MW 和 6 MW 海上风力机的支撑结构	242
12.2.6	浮式和非浮式基础结构	244
12.3	基础结构设计	245
12.3.1	设计数据	245
12.3.2	设计分析	247
12.4	建造和运输	249
12.4.1	建造	249
12.4.2	运输	250
12.5	安装和拆除	250
12.5.1	单桩	250
12.5.2	三脚桩	251
12.5.3	三腿或四腿导管架	251
12.5.4	风力机	252
12.5.5	使用寿命结束后拆除	253
12.6	重量和费用评估	254
12.6.1	重量对比	254

12.6.2 费用对比	255
12.7 结论	259
第13章 海上风力机材料	262
13.1 引言	262
13.2 叶轮部件	264
13.2.1 叶片	265
13.2.2 螺栓连接	275
13.2.3 变桨驱动	275
13.2.4 轮毂和轮毂外壳	275
13.3 机舱部件材料	277
13.3.1 主轴	278
13.3.2 齿轮箱	278
13.3.3 发电机	279
13.3.4 偏航驱动	280
13.3.5 轴承	281
13.3.6 联轴器	281
13.3.7 机械制动	281
13.3.8 机舱罩	282
13.4 支撑结构材料	283
13.4.1 塔架	283
13.4.2 基础	284
13.5 寒冷气候问题	287
13.5.1 复合材料	288
13.5.2 金属材料	289
13.5.3 其他材料	290
13.6 海上风力机材料的选择过程	290
13.6.1 管状塔架材料设计	291
13.6.2 叶片材料设计	296
13.7 结论	299
词汇表	302

第 1 章 海上风力发电：发展现状与展望

1.1 引言

目前，海上风电装机容量在世界风电总装机容量中占很小的比重，大约只有 1%，并且主要集中在北欧的几个国家，大部分围绕在北海和波罗的海，约有 20 多个项目已完成。截至 2007 年年底，瑞典、丹麦、爱尔兰、荷兰和英国 5 个国家海上的装机总量已经将近 1 100 MW（参见表 1-1）。为了尽量减少基础和海底电缆的额外成本，大部分风力机装在相对浅水（水深小于 20 m）和离岸不超过 20 km 的地方。2000 年，在瑞典水域进行了一次最大规模的安装，即额定容量为 110 MW 的 Lillgrunden 风场，因此，瑞典的海上风电容量增长到了 133 MW。英国海上风力机安装经历了一个持续扩张的过程，2000 年 4 MW 的 Blyth Offshore 风场，2006 年 90 MW 的 Barrow 风场，2007 年 90 MW 的 Burbo Bank 风场以及 10 MW 的 Beatrice 风场，此外还有 2008 年 629 MW 风场在建设中（BWEA 统计）。

虽然海上风电开发成本比陆上的高出 50%，但是由于海上风力机可以获取较大风能且可产生较小的视觉影响，因此人们对海上风力机仍存有期望，也使得一些国家在海上风电开发上雄心勃勃。

表 1-1 海上风能国家的装机容量 (MW) (源于 BTM 咨询公司)

国家	2006 年安装	2006 年年底累计安装	2007 年安装	2007 年年底累计安装
丹麦	0	398	0	398
爱尔兰	0	25	0	25
荷兰	108	127	0	127
瑞典	0	23	110	133
英国	90	304	90	394
世界总量	198	877	200	1 077

1.2 海上风电的发展和投资成本

海上风电的总装机容量仍然有限，但是其增长率非常高。海上风场以大容量安装，通常总体装机容量是 100~200 MW，一年安装两个风场就可以保持年增长率 20%~40%。但是制造阶段的高成本、暂时的装机容量问题以及安装船的可行性，导致海上风电发展延缓。

海上风电成本很大程度上依赖于天气和波浪、水深、离岸距离。目前，最详细的海上安装成本信息来自于英国和瑞典。2006 年和 2007 年英国的装机容量每年都增加 90 MW，其中瑞典 2007 年安装了 Lillgrunden。表 1-2 给出了一些近期建成的海上风场的信息。

如表 1-2 所示，海上风场所选择的风力机单机容量范围为 2~3.6 MW，较新的风场装备较大的风力机。规模相当小的 23 MW Samsø 风场与将会成为世界上最大风场额定容