



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 海上风电场 设计与运行

Offshore Wind Farms

[马来西亚]Chong Ng, [英]Li Ran 著  
《海上风电场设计与运行》翻译组 译



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五” “十三五” 国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 海上风电场 设计与运行

Offshore Wind Farms

[马来西亚] Chong Ng, [英] Li Ran 著  
《海上风电场设计与运行》翻译组 译



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，主要包括海上风能和海上风电场选址介绍、海上风电机组主要组件和设计、海上风电场并网、海上风电场的安装和运营等内容。

本书可作为海上风电的工程技术人员学习、培训用书，也可作为风电工程领域研发人员和高等院校研究人员参考。

This edition of *Offshore Wind Farms* by **Chong Ng, Li Ran** is published by arrangement with ELSEVIER Ltd. of the Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1GB, UK.

This translation was undertaken by China Water & Power Press.

This edition is published for sale in China only.

北京市版权局著作权合同登记号为：图字 01-2017-0713

### 图书在版编目 (C I P) 数据

海上风电场设计与运行 / (马来) 吴崇, (英) 冉李  
著; 《海上风电场设计与运行》翻译组译. — 北京:  
中国水利水电出版社, 2017. 3  
(风力发电工程技术丛书)  
书名原文: Offshore Wind Farms  
ISBN 978-7-5170-5544-0

I. ①海… II. ①吴… ②冉… ③海… III. ①海上一  
风力发电—发电厂—研究 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第126922号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>海上风电场设计与运行</b> HAISHANG FENGDIANCHANG SHEJI YU YUNXING
作 者	[马来西亚] Chong Ng (吴崇), [英] Li Ran (冉李)
译 者	《海上风电场设计与运行》翻译组
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 30.5印张 720千字
版 次	2017年3月第1版 2017年3月第1次印刷
定 价	<b>120.00元</b>

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 《风力发电工程技术丛书》

## 编委会

顾问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主任 徐辉 毕亚雄

副主任 汤鑫华 陈星莺 李靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘丰

刘玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙强 孙志禹

李一炜 李莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈刚 陈澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施蓓 洪树蒙

祝立群 袁越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡新 糜又晚

丛书主编 郑源 张燎军

丛书总策划 李莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国能源建设集团有限公司广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团有限公司安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司

# 《海上风电场设计与运行》

## 翻 译 组

主 译 蔡国军 杨新奇

翻译人员 巩 磊 徐 彬 李钢慕 李茂果 郭国勇 刘明晨  
丁环宇 夏 莲 张 健 陈良勇 王 侠 郭 楼  
李付新 吴传侦 房玉昌 黄延东 孙文龙 宋 双  
杨 振 张小川 刘作鹏 李 振 高运航

校核人员 张少华 郭长伟 杜雪峰 张新国 李文岭 吕玉善  
赵 峰 付贵雨



## 前 言

自 20 世纪 90 年代早期，全球第一座海上风电场在丹麦投入运行以来，利用更强劲、更稳定的海上风能发电就一直被列入风电产业发展的日程之中。随着陆上风电发展实践所积累的信心和技术的提高，在 2005 年前后，海上风电产业开始迅猛发展。海上风电成为一个新的焦点，欧洲则一直是海上风电领域发展的引领者。

海上风电场因基础设施建设、施工、安装和风电机组并网难度高，因此海上风电场费用通常高于陆上风电场。但海上风电场比陆上风电场的平均风速更高，稳定性也更高。这在某种程度上会弥补海上风电场建设产生的额外费用。

本书主要介绍了海上风能和海上风电场选址介绍、海上风电机组主要组件和设计、海上风电场并网、海上风电场的安装和运营等内容，可作为海上风电的工程技术人员学习、培训用书，也可作为风电工程领域研发人员和高等院校研究人员参考。全书共包含 20 章。第 1 章简要介绍海上风能与争议问题；第 2 章介绍海上风电场建设和运行的经济学研究；第 3 章介绍海上风电场风资源的特点与未来趋势；第 4 章介绍测量海上风况的遥感技术；第 5 章和第 6 章分别讨论转子叶片、制作材质以及风电机组的一些重量最大的部件；第 7 章介绍海上风电机组齿轮箱设计及传动系动力学分析；第 8 章介绍海上风电机组发电机的设计；第 9 章介绍电力电子部件建模；第 10 章介绍海上风电机组塔架的设计；第 11 章介绍漂浮式海上风电机组的设计；第 12 章介绍海上风电场阵列；第 13 章介绍连接海上风电机组和陆上设施的电缆的安装、保护及海底电缆的特性；第 14 章介绍海上风电机组与陆上电网的并网；第 15 章介绍海

上风电场储能；第16章介绍水电的灵活性与输电网络拓展以支持海上风电的并网；第17章介绍海上风电场的装配、运输、安装和调试；第18章和第19章分别介绍海上风电机组的状态监控和海上风电场的健康和安​​全；第20章介绍海上风电机组基础分析和设计及未来展望和研究需要。

本书由中国电建集团核电工程公司新能源分公司组织翻译，翻译过程中参阅了国内外大量优秀的风电技术资料，同时得到相关单位的大力支持，译者在此表示由衷的感谢！

由于译者水平有限，书中难免会有不妥和疏漏之处，敬请读者给予批评指正。

译者

2017年3月



# 目 录

## 前言

### 第一部分 海上风能和海上风电场选址介绍

第 1 章 海上风能介绍	3
1.1 风能	3
1.2 海上风电场	4
1.3 能量成本	4
1.4 风电机组	5
1.5 争议问题	6
缩略语	6
参考文献	7
第 2 章 海上风电场建设和运行的经济学研究	8
2.1 引言	8
2.2 投资成本	9
2.3 运行费用	13
2.4 海上风电场的主要经济驱动因素	14
2.5 单位电量成本	17
2.6 未来海上风电的成本	19
2.7 结论	20
缩略语	21
参考文献	22
第 3 章 海上风电场的风资源：特点与评估	23
3.1 风资源评估的关键事项	23
3.2 海上风资源环境的性质	24
3.3 重要数据参数	27
3.4 观测方法	30

3.5 建模方法	35
3.6 未来趋势	40
缩略语	40
参考文献	43
<b>第4章 测量海上风况的遥感技术</b>	<b>47</b>
4.1 引言	47
4.2 传统方法	48
4.3 基于表面的遥感技术	50
4.4 星载RS	60
4.5 案例研究——近海风电场项目	61
4.6 未来趋势	63
缩略语	63
参考文献	65

## 第二部分 海上风电机组主要组件和设计

<b>第5章 海上风电机组叶片材质的研发</b>	<b>69</b>
5.1 对叶片材质的主要要求	69
5.2 叶片设计过程中测试材料和结构的作用	73
5.3 关于材料选择和叶片设计的案例研究	74
5.4 未来趋势	79
缩略语	82
变量	82
参考文献	83
<b>第6章 海上风电机组叶片的设计</b>	<b>85</b>
6.1 引言	85
6.2 空气动力学	86
6.3 材料	91
6.4 结构设计	98
6.5 制造	104
缩略语	105
变量	106
参考文献	109
<b>第7章 海上风电机组齿轮箱设计及传动系动力学分析</b>	<b>110</b>
7.1 引言	110
7.2 WTGS 齿轮箱设计——概念阶段	112
7.3 WTGS 齿轮箱设计——研发阶段	117
7.4 WTGS 齿轮箱设计——生产阶段	119

7.5	动力传动系统动态分析 .....	121
7.6	总结 .....	125
	缩略语 .....	125
	参考文献 .....	127
<b>第 8 章</b>	<b>海上风电机组发电机的设计</b> .....	<b>129</b>
8.1	发电机设计的关键问题 .....	129
8.2	电机的类型和操作原理 .....	133
8.3	发电机的实际设计与制造 .....	142
8.4	海上风电机组发电机的选择 .....	145
8.5	海上风力发电机的未来趋势 .....	149
	缩略语 .....	151
	参考文献 .....	153
<b>第 9 章</b>	<b>电力电子部件建模</b> .....	<b>155</b>
9.1	概况 .....	155
9.2	半导体元件和开关电子管 .....	156
9.3	滤波电感器 .....	166
9.4	滤波电容器 .....	171
9.5	评价手段和设计方法 .....	175
9.6	1MW 的 2L-VSC 的计算案例 .....	188
	缩略语 .....	199
	变量 .....	199
	参考文献 .....	204
<b>第 10 章</b>	<b>海上风电机组塔架的设计</b> .....	<b>206</b>
10.1	简介 .....	206
10.2	塔架功能及类型 .....	207
10.3	参考标准 .....	213
10.4	螺旋设计过程和负荷分析 .....	218
10.5	壳体和法兰尺寸 .....	232
10.6	辅材、其他结构细节和涂层 .....	243
10.7	优化考虑 .....	250
10.8	结束语 .....	260
	缩略语 .....	261
	变量 .....	264
	希腊符号列表 .....	268
	参考文献 .....	270
<b>第 11 章</b>	<b>漂浮式海上风电机组的设计</b> .....	<b>277</b>
11.1	介绍 .....	277

11.2	漂浮式海上风电机组设计：主要预备步骤	279
11.3	漂浮式海上风电机组设计的关键问题	284
11.4	总结：案例研究	288
11.5	未来趋势	290
	缩略语	291
	变量	292
	参考文献	294

### 第三部分 海上风电场并网

<b>第 12 章</b>	<b>海上风电场阵列</b>	299
12.1	海上风电场阵列的基础	299
12.2	设计原则	299
12.3	主要内容	300
12.4	拓扑结构	305
12.5	变流器连接方式和集电装置设计	306
12.6	风电场尾流布局——尾流效应	313
12.7	控制目标	314
12.8	集电装置的设计过程	314
	缩略语	316
	参考文献	318
<b>第 13 章</b>	<b>连接海上风电机组和陆上设施的电缆</b>	320
13.1	介绍	320
13.2	海上风电场电缆	320
13.3	海上电缆的安装、保护和挑战	325
13.4	悬浮风电机组和变电所的动态电缆	329
13.5	海底电缆的机械特性	330
13.6	海上风电场展望	333
	缩略语	334
	参考文献	336
<b>第 14 章</b>	<b>海上风电机组与陆上电网的并网</b>	338
14.1	介绍	338
14.2	风电场集电系统	338
14.3	海上风电输电系统	340
14.4	电压源换流器	342
14.5	未来海上风力发电输电计划的发展	347
14.6	总结	349
	缩略语	349

参考文献	351
<b>第 15 章 海上风电场储能</b>	354
15.1 介绍	354
15.2 储能技术	356
15.3 展示性案例研究：位于澳大利亚 Rhodes 岛和希腊 Astypalaia 岛的 S-PSS	363
15.4 结论	375
缩略语	376
参考文献	377
<b>第 16 章 水电的灵活性与输电网络拓展以支持海上风电的并网</b>	380
16.1 介绍	380
16.2 技术	381
16.3 总结案例学习	384
16.4 具体情况	385
16.5 总结	390
16.6 结论	398
缩略语	399
参考文献	401

#### 第四部分 海上风电场的安装和运营

<b>第 17 章 海上风电场的装配、运输、安装和调试</b>	405
17.1 引言	405
17.2 部件交付	405
17.3 陆上装配	406
17.4 海上运输	407
17.5 海上安装	408
17.6 测试和调试	412
17.7 结论和展望	414
缩略语	416
参考文献	417
<b>第 18 章 海上风电机组的状态监控</b>	418
18.1 海上风电机组可靠性	418
18.2 海上风电机组运营和维护所面临的挑战	420
18.3 海上风电机组状态监控技术	421
18.4 海上风电机组状态监控系统	424
18.5 用于风电机组状态监控的信号处理技术	432
18.6 风电机组状态监控的现有问题和未来趋势	434

缩略语	435
参考文献	437
<b>第 19 章 海上风电场的健康和安</b>	<b>441</b>
19.1 介绍	441
19.2 法律框架	441
19.3 安全管理系统	442
19.4 计划、执行、检查、处理	442
19.5 海上可再生能源产业	443
19.6 计划	443
19.7 执行	445
19.8 检查	449
19.9 处理	450
19.10 展望	450
19.11 结论	451
缩略语	451
<b>第 20 章 海上风电机组基础分析和设计</b>	<b>453</b>
20.1 海上风电机组结构体的基础选择	453
20.2 海上基础的载荷系统	454
20.3 海上风电机组单桩基础的一般情况	456
20.4 海上设计规范和方	457
20.5 单桩—土壤性能调查	457
20.6 海上风电机组基础设计	460
20.7 未来展望和研究需要	462
缩略语	463
变量	463
参考文献	465

## 第1章 海上风能介绍

# 第一部分

# 海上风能和海上风电场选址介绍

随着全球对清洁能源的需求日益增长，海上风能作为一种重要的可再生能源，近年来得到了快速发展。海上风电场选址是海上风电项目开发的关键环节，直接影响到风电场的发电效率和经济效益。本章将介绍海上风能和海上风电场选址的基本概念、选址原则、选址流程以及选址评估方法。



图 1-1 全球海上风电装机容量（截至 2020 年）



# 第1章 海上风能介绍

C. Ng

海上可再生能源开发中心, 诺森伯兰郡, 英国 (Offshore Renewable Energy Catalyst, Northumberland, United Kingdom)

L. Ran

华威大学, 考文垂, 英国 (University of Warwick, Coventry, United Kingdom)

## 1.1 风能

几千年前, 人类就开启了采用风车的形式来利用风能的历史。在现代社会, 风力发电是一种利用风能产生电能的技术过程。风力发电机组 (本书可简称为风电机组) 用来将风能转化为机械能, 然后再通过风力发电机转化为电能。

自 20 世纪 90 年代早期, 全球第一座海上风电场在丹麦投入运行以来, 利用更强劲、更稳定的海上风能发电就一直被列入风电产业发展的日程之中。

随着陆上风电发展实践所积累的信心和技术的提高, 可以看到, 在 2005 年前后, 海上风电产业开始迅猛发展, 其总装机容量每 2~4 年便翻 1 倍。图 1.1 是欧洲风能协会 (EWEA) 所做的分析图, 图中分析了自 1993 年起, 欧洲的海上风电装机容量。基于《全球风能》(Global Wind) 2014 年统计, 全球 90% 以上的海上风电装机容量都位于欧洲海

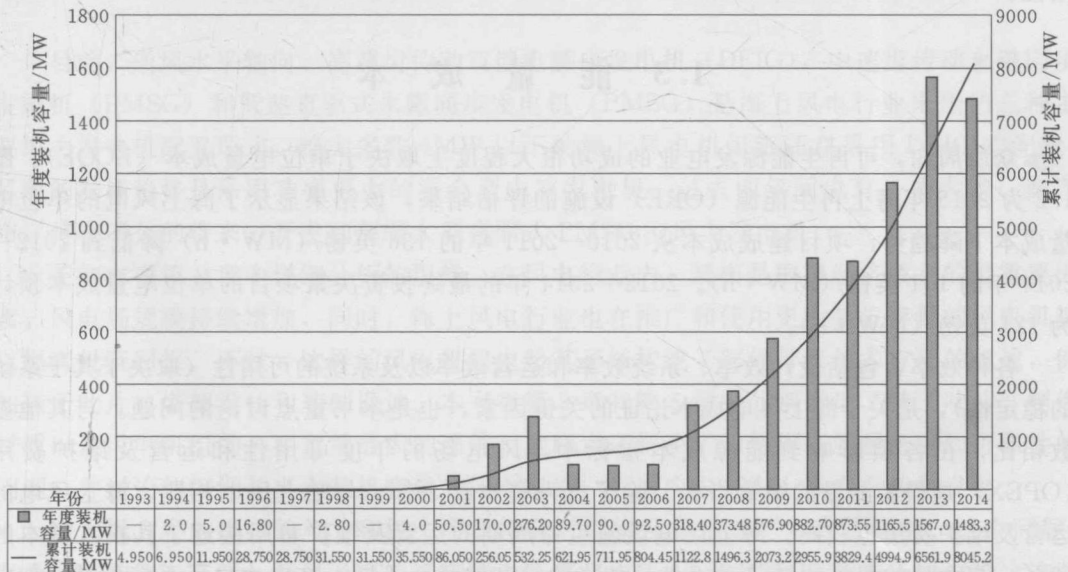


图 1.1 海上风能装机容量的年度数据和累计数据