



“十二五”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 防腐工程

HAISHANG FENGDIANCHANG  
FANGFU GONGCHENG

马爱斌 江静华 等 编著



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”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 防腐工程

马爱斌 江静华 等 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,详细介绍了海上风电场运行环境的腐蚀特点、防护措施及相关标准,综合了作者近10年来在海洋工程结构腐蚀与防护方面的研究。全书共分8章,分别介绍了绪论、海洋环境中的腐蚀与防护、海上风电场的涂装防护与防腐涂料、海上风机塔架的腐蚀与防护、海上风机基础的腐蚀与防护、海上风机其他关键部件的腐蚀与防护、海上风电场的维修保养及防腐案例、海上风电场防腐系统的发展及展望等内容。

本书可供从事风力发电技术领域科研、设计、施工及运行管理的工程技术人员阅读参考,也可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

海上风电场防腐工程 / 马爱斌等编著. -- 北京 :  
中国水利水电出版社, 2015. 8  
(风力发电工程技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-3553-4

I. ①海… II. ①马… III. ①海上一风力发电—发电厂—电厂设备防腐 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第201957号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>海上风电场防腐工程</b>
作 者	马爱斌 江静华 等 编著
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 (发行部)
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	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 10.75印张 255千字
版 次	2015年8月第1版 2015年8月第1次印刷
定 价	0001—3000册 <b>42.00元</b>

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

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

## 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  
华北电力大学  
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  
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  
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  
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司  
中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司  
同济大学  
华南理工大学

丛书总策划 李 莉

## 编委会办公室

主 任 胡昌支 陈东明  
副 主 任 王春学 李 莉  
成 员 殷海军 丁 琪 高丽霄 王 梅 邹 昱  
张秀娟 汤何美子 王 惠

## 本书编委会

主 编 马爱斌 江静华

副主编 罗金平 林毅峰 张 芹

参编人员 宋 丹 陈建清 张留艳 倪世展 胡中芸 邱 超

郭光辉 庄丽娟 杨东辉

参编单位 河海大学

中国水电顾问集团华东勘测设计研究院有限公司

上海勘测设计研究院

华锐风电科技（集团）股份有限公司



## 前 言

当前,世界海上风电技术日趋成熟,我国海上风电发展的帷幕也正式拉开。中国拥有十分丰富的近海风能资源,开发海上风能资源将有效改善东部沿海经济发达地区的能源供应情况。因此,开发海上风电已经成为我国能源战略的一个重要内容。

我国尚缺乏海上风电场建设经验,海上风能资源测量与评估以及海上风电机组国产化刚刚起步,海上风电建设技术规范体系也亟须建立。其中,海上风电防腐技术相关标准的匮乏就是一个严重问题。由于海水含盐分比较高,对设备腐蚀相当严重。而风电机组不同于海上钻井平台,受到腐蚀时可以随时修补,海上风电机组由于其特殊的地理环境和技术要求,需要分部分、有针对性地进行防腐,且维修费用极高,这些技术上的困难只能在实践中解决。从单项的防腐技术来看,我国的研发水平与国际水平是基本同步的,目前所欠缺的是技术的整合,即如何把各种防腐技术整合到海上风电机组上。

为让更多的风电科技工作者、管理者了解海上风机防腐的重要性,普及海洋构筑物防腐知识,针对海上风电机组防腐的复杂性,尽量合理地选择防腐技术,减少腐蚀造成的损失,编者查阅、收集了大量国内外资料,总结了多年从事教学、科研和生产的经验,遵循科学性、先进性和实用性的原则,编写了本书。

当前国内外防腐技术的发展日新月异,本书仅围绕适用于海上风电机组防腐的特殊要求,就国内外应用较广泛、发展较成熟的技术加以介绍,并侧重于技术的性能特点、工艺过程、施工过程及其实际应用。本书部分内容为作者及同事多年科研与实际工作的经验总结。

本书由马爱斌组织编撰，由河海大学江静华、宋丹、陈建清、张留艳等共同编写完成，倪世展、胡中芸、邱超、郭光辉、庄丽娟等协助了数据、资料整理等工作，杨东辉参与了部分修图工作。本书在编著过程中，得到中国水电顾问集团华东勘测设计研究院罗金平、上海勘测设计研究院林毅峰和华锐风电科技（集团）股份有限公司张芹等提供的宝贵资料，引用了参考文献中的相关内容，并得到可再生能源界许多同仁的大力支持和帮助，在此谨向他们表示谢忱。

由于目前国内对于海上风电机组的腐蚀防护并无相关标准或规定，编写人员水平有限，问题和缺点在所难免，请广大读者提出宝贵意见。

**编者**

2015年6月





# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 海上风电的意义 .....	1
1.2 海上风电发展现状.....	2
1.2.1 世界发展现状 .....	2
1.2.2 我国发展现状 .....	4
1.3 海上风电场的构成.....	5
1.3.1 叶片 .....	6
1.3.2 机舱/轮毂 .....	10
1.3.3 塔架 .....	10
1.3.4 基础 .....	11
1.3.5 海底电缆及电力传输设备 .....	13
1.4 海上风电行业所面临的挑战 .....	13
1.5 海上风电场的腐蚀与防护 .....	14
1.5.1 海上风电场面临的腐蚀问题 .....	14
1.5.2 海上风电场防腐的重要性 .....	15
参考文献 .....	16
<b>第 2 章 海洋环境中的腐蚀与防护</b> .....	17
2.1 海洋环境不同区带的腐蚀特征 .....	17
2.1.1 海洋大气区的腐蚀 .....	18
2.1.2 浪溅区的腐蚀 .....	18
2.1.3 潮汐区的腐蚀 .....	18
2.1.4 全浸区的腐蚀 .....	19
2.1.5 海泥区的腐蚀 .....	19
2.1.6 腐蚀环境的分类标准 .....	19
2.2 海洋环境中金属的腐蚀特征 .....	21

2.2.1	电化学腐蚀机理	21
2.2.2	腐蚀破坏形式	22
2.2.3	腐蚀过程的影响因素	23
2.3	海洋环境中混凝土结构的破坏	24
2.3.1	氯离子侵蚀	24
2.3.2	碳化作用	26
2.3.3	冻融破坏	29
2.4	海洋环境中金属材料的防护措施	30
2.4.1	涂层法	30
2.4.2	镀层法	30
2.4.3	阴极保护法	31
2.4.4	预留腐蚀余量法	31
2.4.5	选用耐腐蚀的材料	31
2.5	海洋环境中钢筋混凝土结构的防腐方法	31
2.5.1	环氧涂层钢筋	32
2.5.2	钢筋阻锈剂	32
2.5.3	阴极保护	32
2.5.4	混凝土表面涂层防护	33
	参考文献	35
<b>第3章</b>	<b>海上风电场的涂装防护与防腐涂料</b>	<b>37</b>
3.1	防腐涂料的选择依据	37
3.2	涂层防腐性能的影响因素	37
3.2.1	水、氧和离子对漆膜的透过速度的影响	37
3.2.2	涂料成膜物质的影响	38
3.2.3	颜料的影响	38
3.3	涂装工艺	38
3.3.1	前处理	38
3.3.2	涂覆工艺	39
3.4	电弧喷涂技术及其应用	39
3.4.1	电弧喷涂的技术优势	40
3.4.2	电弧喷涂的原理及特点	40
3.4.3	电弧喷涂的应用	41
3.5	重防腐涂料涂装技术	42
3.5.1	重防腐涂料的特点	42
3.5.2	重防腐涂料防护机理	43
3.5.3	重防腐涂料的种类	44
3.5.4	重防腐涂料失效原理	47

3.6 海上风电机组防腐涂料的开发重点 .....	47
参考文献 .....	48
<b>第4章 海上风机塔架的腐蚀与防护 .....</b>	<b>50</b>
4.1 风机塔架的腐蚀 .....	50
4.2 风机塔架防腐涂料体系设计 .....	51
4.2.1 设计标准 .....	51
4.2.2 防腐涂料选择原则 .....	51
4.2.3 防腐涂装方案 .....	51
4.3 风机塔架防腐涂料研究现状 .....	54
4.3.1 富锌涂料 .....	54
4.3.2 聚氨酯涂料 .....	54
4.3.3 其他涂料 .....	55
4.4 风机钢质塔筒的防腐复合涂装方案 .....	55
4.4.1 金属底漆基本性能 .....	56
4.4.2 金属底漆形貌 .....	58
4.4.3 金属底漆的电化学特性 .....	60
4.4.4 复合涂层的配套性和耐蚀性研究 .....	61
参考文献 .....	63
<b>第5章 海上风机基础的腐蚀与防护 .....</b>	<b>65</b>
5.1 风机基础的主要型式 .....	65
5.2 风机基础的选择 .....	66
5.2.1 成本 .....	66
5.2.2 水深 .....	66
5.2.3 地质、海床条件 .....	66
5.2.4 安装方式 .....	67
5.3 风机基础的适用性分析 .....	67
5.3.1 我国沿海水域地质条件 .....	67
5.3.2 海上安装能力 .....	68
5.4 风机基础钢筋混凝土的腐蚀防护 .....	68
5.4.1 沿海地区钢筋混凝土结构腐蚀机理 .....	68
5.4.2 海上风机基础钢筋混凝土防腐措施 .....	69
5.4.3 海上风机基础钢结构腐蚀防护 .....	72
5.4.4 防腐设计方案 .....	73
参考文献 .....	74
<b>第6章 海上风机其他关键部件的腐蚀与防护 .....</b>	<b>76</b>
6.1 机舱/轮毂的腐蚀与防护 .....	76
6.1.1 机舱/轮毂的工作环境 .....	76

6.1.2	机舱/轮毂常用防腐方法	77
6.1.3	机舱/轮毂防腐设计	79
6.2	电气部分的腐蚀与防护	82
6.2.1	发电机定子的防腐	82
6.2.2	变压器的防腐	84
6.3	叶片的防腐	85
6.3.1	叶片保护涂层要求	85
6.3.2	叶片保护涂层体系	86
6.3.3	叶片防腐措施	89
	参考文献	91
<b>第7章</b>	<b>海上风电场的维修保养及防腐案例</b>	<b>93</b>
7.1	丹麦 Horns Rev 海上风电场	94
7.1.1	建设过程	94
7.1.2	故障分析	94
7.2	英国 North Hoyle 海上风电场	94
7.2.1	运行概况	95
7.2.2	实际运营的教训	95
7.3	东海大桥海上风电场防腐方案分析	95
7.3.1	工程概况	95
7.3.2	风机基础防腐方案	96
7.3.3	钢管桩防腐方案	97
7.3.4	机组防腐方案	99
7.3.5	部件的防腐措施	100
7.3.6	参考标准	101
7.4	东海大桥风电二期钢管桩防腐方案分析	102
7.4.1	背景介绍	102
7.4.2	玻璃纤维复合包覆技术方案	103
7.4.3	包覆工程应用	106
7.4.4	包覆层的耐候性研究	108
7.4.5	玻璃纤维增强复合包覆层抵抗氯离子侵蚀的特性研究	111
7.4.6	玻璃纤维增强复合包覆层的寿命推算	112
7.5	SL3000 风机塔架与基础的防腐涂漆技术	114
7.5.1	防腐涂层质量控制	114
7.5.2	涂漆前表面准备	116
7.5.3	防腐涂层系统	116
7.5.4	运输、搬运和存储	117
7.6	如东海上示范风电场风机基础防腐方案分析	118

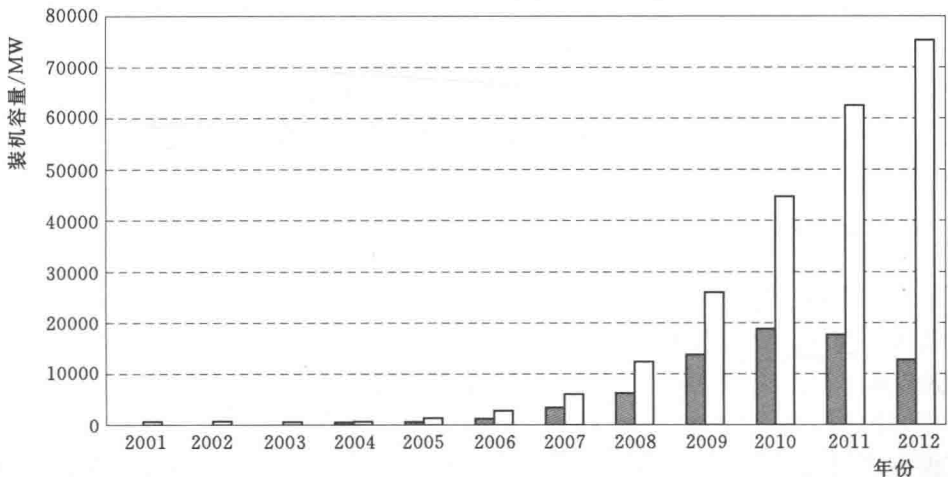
7.6.1	项目背景	118
7.6.2	防腐方案	118
7.6.3	阴极保护方法分析	119
	参考文献	120
<b>第8章</b>	<b>海上风电场防腐系统的发展及展望</b>	<b>121</b>
8.1	防腐涂料系统的发展	121
8.1.1	防腐涂料的应用现状及问题	121
8.1.2	海洋防腐涂料研发重点	122
8.1.3	新型 ECO-ZA 系列重防腐涂料	124
8.2	耐蚀高强海洋工程用钢的研发	128
8.2.1	海洋工程用钢发展现状及趋势	128
8.2.2	新型高强耐磨铸钢 (NMZ1)	129
8.3	海上风电场防腐的展望	131
	参考文献	131
附录一	部分有关防腐的国际、国家、行业标准	133
附录二	海上风电场钢结构防腐蚀技术标准	135

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 海上风电的意义

根据联合国气候变化政府间委员会发布的气候变化评估报告，人类活动是过去半个世纪气候变暖的主因（这种可能性超过 90%）。气候变化的罪魁祸首就是人类燃烧化石能源释放的以 CO<sub>2</sub> 为代表的温室气体。风能作为一种可再生能源，能够在提供能源的同时，减少 CO<sub>2</sub> 的排放。根据世界能源委员会的计算，每提供 100 万 kW·h 的电量，使用风电可以减少 600t CO<sub>2</sub> 的排放。大规模地使用风电，将有利于减缓气候变化。同时，使用风电还可以减少传统能源的使用，缓解燃煤等带来的区域性环境问题。国家发展和改革委员会发布的数据表明，因燃煤造成的 SO<sub>2</sub> 和烟尘排放量占我国排放总量的 70%~80%，SO<sub>2</sub> 排放形成的酸雨面积已占国土面积的 1/3。环境污染给我国社会经济发展和人民健康带来了严重影响。世界银行估计到 2020 年我国由于空气污染造成的环境和健康损失将达到 GDP 总量的 13%。

在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下，风能作为一种可再生的清洁能源正日益得到世界各国政府的重视并得到了快速的发展。美国早在 1974 年就开始实行联邦风能计划，丹麦在 1978 年即建成日德兰风力发电站，瑞士 1990 年风电装机容量已达 350MW，亚洲的风电也保持了较快的发展势头。图 1-1 显示出近年来我国风电装机规模的增长情况。1997—2006 年，世界风电装机规模增长了近 9 倍，有 5 个国家新增装机容量



■ 新增装机/MW	42	66	98	197	507	1288	3311	6154	13803	18928	17631	12960
□ 累计装机/MW	381	448	546	743	1250	2537	5848	12002	25805	44733	62364	75324

图 1-1 我国风电装机规模增长情况（数据来源：中国风电协会 CWEA）

量超过 1000MW,我国在新增装机容量方面居世界第五位。在累计装机容量方面,我国居世界第六位,但是与德国、西班牙、美国等发达国家相比差距明显,与同为发展中国家的印度相比也较为落后。2006 年全球风电新增装机容量达 14900MW,同比增长 25%。到 2008 年末全球累计装机容量达到了 120.8GW,增长幅度为 28.8%。从近年来我国风电发展形势判断,原来设定的 2010 年风电装机容量 500 万 kW 的目标到 2008 年年底已经实现,即提前两年完成,2020 年实现装机容量 3000 万 kW 目标的实现前景良好。长期目标是经过 10~15 年的准备,在 2020 年前后风电能够与其他常规能源发电技术相竞争,成为火电、水电之后的第三大常规发电电源,至少达到装机容量 3000 万 kW,积极创造条件实现 1 亿 kW,届时占总发电装机容量的 8%~10%,2040 年或 2050 年实现 5 亿 kW 乃至 8 亿 kW,在发电装机和发电量中占据 20%以上。我国在 2050 年的风电装机预计可以达到 4 亿~6 亿 kW,届时风电将成为继火电、水电之后的第三大发电电源。

我国海上具有丰富的风能资源,有数据显示,近海 10m 水深的风能资源约 1 亿 kW,近海 20m 水深的风能资源约 3 亿 kW,近海 30m 水深的风能资源约 4.9 亿 kW。尽管海上风电一直都是关注的焦点,但时至今日海上风电占全球装机容量的比例仍很低(2011 年的装机容量为 1000MW,约占年度市场的 2.5%),到 2020 年,即便是根据最为乐观的预期,海上风电占全球的装机容量不超过 10%。不过,海上风电作为未来可再生能源的重要发展方向,的确具有诸多优势:①资源丰富、风速稳定,平均风速多在 8m/s 以上,比平原高 20%,发电量可增加 70%;②节省土地资源,人类生活和环境方面的负面影响较少;③大型海上风电场普遍离海岸 20km 以上,可开发海域大,适合大规模开发;④海上风电可以允许的风电机组的容量更大,组件运输相对方便,单位造价有优势;⑤海上风湍流强度小,具有稳定的主导风向,机组承受的疲劳负荷较低,风机寿命延长。因此,世界各国出台了各种利好政策,海上风电迅速成为世界上发展最快的绿色能源技术,在世界各国掀起了建设高潮。欧洲风能协会的目标是到 2020 年实现海上风电场占现有风电总装机容量的 39%,总容量达到 70GW。在中国,发展海上风电也已成为能源战略的一个重要内容。

## 1.2 海上风电发展现状

### 1.2.1 世界发展现状

目前,世界上超过 90% 的海上风电分布在北欧沿岸,如北海、波罗的海、爱尔兰海以及英吉利海峡。还有两个试验项目分布在中国的东海沿岸。海上风电是欧洲实现从可再生能源获取 20% 最终能耗这一既定目标的主要组成部分。我国则制定了到 2020 年要在沿海海岸装机 30GW 的目标。海上风电是一项激动人心的新科技,与此同时也是一项新业务。世界各国政府以及来自日本、韩国、美国、加拿大、印度的企业都对此表现出极大的兴致。到 2020 年,除北欧和我国之外,对海上风电的开发可能会有一个更加美好的长期展望。

2012 年全球风能协会 (GWEC) 发布的全球风电市场报告显示,2011 年共有 235 台



涡轮机组在欧洲 9 个风电场实现了并网，总容量达 866.4MW，为欧洲累计输送了 3813MW 的海上风电，其中，87% 的新增容量来自英国海域。德国安装了 108MW，随后是丹麦 3.6MW 以及葡萄牙 2MW 的实体漂浮式风电机组原型，另有两个低端漂浮式风电机组原型在挪威和瑞典进行了试验。

表 1-1 2011 年世界海上风电新增及累计装机容量

单位：MW

国家	2011 年新增	累计	国家	2011 年新增	累计
比利时	0	195.0	挪威	0	2.3
丹麦	3.6	857.28	葡萄牙	2.0	2.0
芬兰	0	26.3	瑞典	0	163.7
德国	108.03	200.3	英国	752.4	2093.7
爱尔兰	0	25.2	中国	99.3	258.4
荷兰	0	246.8	日本	0	25.0

注 2011 年全球海上风电装机新增容量 965.6MW，累计 4096MW。

表 1-1 给出了 2011 年世界海上风电新增及累计装机容量。英国 (2093.7MW) 和丹麦 (857.28MW) 仍然是欧洲最大的两个海上风电市场，紧随其后的是荷兰 (246.8MW)、德国 (200.3MW)、比利时 (195.0MW)、瑞典 (163.7MW)、芬兰 (26.3MW) 和爱尔兰 (25.2MW)。挪威和葡萄牙各自拥有一个实体漂浮式涡轮机组。

目前，欧洲正在建设近 6000MW 装机容量的海上风电。有 17MW 的装机容量建设已经获批，另有 114MW 的扩充计划。预期在未来 10 年欧洲的海上风电装机容量将增加 10 倍。欧洲风能协会 (EWEA) 估计到 2020 年 60000MW 的海上风电每年可供电 148TW·h，足以满足超过欧洲电量总需求的 4%，可减少 CO<sub>2</sub> 排放 8700 万 t。在整机制造方面，西门子 (Siemens) 是 2011 年海上风电市场的最大供应商，包揽了近 693MW 的并网容量，紧随其后的是瑞能 (Repower) (111.7MW) 和巴德 (BARD) (60MW)。维斯塔斯 (Vestas) 在葡萄牙接通了 2MW 的浮式海上风电机组。

英国拥有全球最大的海上风电装机容量，超过 200 万 kW，已经占电力总量的 2%。还将在 2016 年之前设置 600 万 kW，在 2020 年之前设置 1000 万 kW，在 10 年时间内，海上风力发电将占电力总量的 17%~20%。根据该国 2011 年制定的可再生能源发展蓝图，在 2020 年之前，将使可再生能源达到能源总量的 15%，作为主角的海上风电达到 1800 万 kW。根据剑桥大学推算，相关产业的就业人数将达到 3100 人，共产生 4.7 万个直接及间接就业岗位。

丹麦的海上风电装机容量为 86 万 kW，仅次于英国，并且还将继续进行高水平投资。2012 年将建成 40 万 kW 的“Anholt 发电站”以及“Frederikshavn 发电站”（规模未公布）。并且，预计在 2020 年之前建成“KriegersFlak”（60 万 kW）以及“HornsReef”（60 万 kW）等。该国是先由国家进行事前调查，然后进行开发水域招投标，规定供电公司 (Transmission System Operator, TSO) 负责铺设相关电缆。虽然在较远的海域开展业务的成本会上升，但预计随着技术的进步以及新一代产品工业化的实现，成本有望得到降低。力争在 2020 年之前开发的下一轮招投标中，使成本削减 50%。



德国截至 2011 年年底的海上风电装机容量为 20 万 kW，但目前有 200 万 kW 正在进行建设，预计 2012 年追加 20 万 kW。另外，目前已经有 25 项业务从联邦港湾管理部门及州政府获得了许可，总输出高达 850 万 kW。该国的陆地输电线建设成本也由 TSO 负责，目前已经建成 3 条 40 万 kW 的直流高压线。虽然海底电缆的建设较为迟缓，但目前已确定了政策方案，将为随之产生的 TSO 及开发运营商的负担提供补贴。德国已将海上风电定位为在 2022 年之前实现去核，使可再生能源成为主要电源的“能源改革”的主角。将在 2030 年之前开发 25000MW，其中，在 2020 年之前开发 10000MW。

按累计安装的海上风电容量计算，西门子（53%）和维斯塔斯（36%）占据了欧洲绝大部分的市场份额，瑞能（5%）位居其后。

### 1.2.2 我国发展现状

我国开发海上风电具有更大的优势和动力。我国拥有海岸线总长约 3.2 万 km，其中大陆海岸线长为 1.8 万 km，岛屿海岸线长为 1.4 万 km，辽阔的海域蕴藏着丰富的风能，同时中国沿海地区拥有最雄厚的经济发展基础和能源市场，迫切的需求促进了近海风能的开发。海上风电必然是我国实现风力发电长远目标的必然要求。2002 年我国颁布了《全国海洋功能区划》，对港口航运、渔业开发、旅游以及工程用海区等作了详细规划，如果避开上述这些区域，考虑其总量 10%~20% 的海面可以利用，风电机组的实际布置按照 5MW/km<sup>2</sup> 计算，则近海风电装机容量可达 1 亿~2 亿 kW。随着海上风电场技术发展成熟、经济上可行，海上风电必然会成为重要的可持续能源。随着国家有关部门对海上风电规划、建设工作部署的展开，我国海上风电发展的帷幕已正式拉开。

尽管世界海上风电技术经过 10 多年的发展已日趋成熟，并进入大规模开发阶段，但我国仍处于起步阶段。与丹麦、德国、西班牙、美国和印度等国相比，我国海上风电场建设经验缺乏，海上风电机组国产化也才刚刚起步。同时，我国自主研发力量严重不足，由于国家和企业投入的资金较少，缺乏基础研究的积累和人才，我国在风电机组的研发能力上还很薄弱，总体来说还处于跟踪和引进国外先进技术的阶段。目前国内引进的许可证，有的是国外淘汰的技术，有的图纸虽然先进，但受限于国内配套厂的技术、工艺、材料等原因，导致国产化的零部件质量、性能达不到国际水平。另外购买生产许可证技术的国内厂商要支付昂贵的技术使用费。

目前，我国近海风场的可开发风能资源是陆上实际可开发风能资源储量的 3 倍，其风能储量远高于陆上，未来发展空间巨大。

我国主要风电整机企业争先“下海”。在我国陆上风机日趋饱和的情况下，进军海上风电市场成为中国主要整机企业的共同选择。华锐风电成功获得我国第一个海上风电示范项目——上海东海大桥项目。2010 年 2 月 27 日，34 台 3MW 机组（共计 102MW）海上风电项目全部整体安装成功，并于 6 月 8 日调试完毕，并网投入运行。我国第二大风电整机企业——金风科技已于 2007 年在渤海湾中海油的钻井平台试水了海上风机的所有工序。截至 2009 年 6 月，该海上风机已累计发电 500 万 kW·h。2009 年 11 月 18 日金风科技投资 30 亿元在江苏大丰经济开发区建设海上风电产业基地项目，并计划将其建设成为国内最大、世界领先的海上风电装备制造基地。华仪电气宣布再融资 11.46 亿元，其中超过