

海洋可再生能源工程规划丛书



海上风力发电技术

OFFSHORE WIND POWER GENERATION TECHNOLOGY

主编 曹宇 王世明

副主编 田卡 李淼淼

上海科学技术出版社

海洋可再生能源工程规划丛书

海上风力发电技术

——主编——

曹 宇 王世明

——副主编——

田 卡 李淼淼

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电技术 / 曹宇,王世明主编. —上海:
上海科学技术出版社, 2020. 5
(海洋可再生能源工程规划丛书)
ISBN 978-7-5478-4808-1

I. ①海… II. ①曹…②王… III. ①海洋发电-风
力发电 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 043422 号

海上风力发电技术

主 编 曹 宇 王世明
副主编 田 卡 李森森

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路71号 邮政编码 200235 www.sstp.cn)

当纳利(上海)信息技术有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.5

字数: 150千字

2020年5月第1版 2020年5月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4808-1/TK·22

定价: 48.00元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

根据我国对海上风电领域研究的迫切需求,本书着重介绍了现有的海上风力发电机组的设计、安装、维护等技术的相关理论及工程应用。本书共分为10章,其中第1章根据调研资料阐述了海上风力发电技术的国内外发展现状、优势和前景;第2章介绍了海上风机系统的构成,并主要对风电机组、海上支撑结构、海床地基基础等装置进行了详细介绍;第3章从设计方面归纳了海上风机基础支撑结构常用的设计技术;第4章给出了海上风机叶轮发电系统的设计技术;第5章介绍了海上风机基础的防腐保护技术;第6章介绍了海上风电分布式微电网技术;第7章通过工程实例介绍了海上风电场的安装和维护技术;第8章介绍了海上风电场资源评估及选址技术;第9章通过分析台风易发地区风电机组遭遇台风的主要问题,论述了海上风电机组的防台风技术与控制措施;第10章基于多年来国内外院校和科研机构的研究成果,对海上风电技术的未来进行了展望。

本书主要面向船舶与海洋工程、机械自动化及海洋科学专业的学生和科研人员,以及从事可再生能源利用产业的专业人士和技术人员。

前 言

风能是可再生能源重要的组成部分,积极开发利用风电对于改善能源系统结构、保护生态环境具有深远意义。由于海上风电市场规模极大且风险极高,对设备的设计、安装、维护等高难度技术的掌握程度代表了当今风电技术的开发水平。

在过去的10年中,海上风力发电机组在安装和运营方面积累了很多经验,但仍然存在着需要解决的技术难题,以达到所需的海上安装能力。与陆基风能相比,海上风电的高成本一直是困扰运营商的问题,海上风电机组基础结构设计和电网并网连接仍然是制约产业化的技术瓶颈,海上风电规划和建设过程需要更多的时间和精力。另一个技术挑战是资源管理,即在前期制造或气候窗口期,如何高效合理安排需要安装的零部件到货及海上安装维护。目前,海上风力发电的投资成本大约在2500美元/(MW·h),是陆上风力发电行业的两倍。在海上风力发电机运行期间,由于只能通过船只或直升机运输,所以维护费用比在陆地上要高,这种限制要求海上风力发电机的状态监测系统具有更高的可靠性。同时将现有的陆基风力发电机海洋化也会产生问题,如发动机舱内腐蚀加剧等问题。

风力发电是世界上发展最快的绿色能源技术,在陆地风电场建设快速发展的同时,人们已经注意到陆地风能利用所受到的一些限制,如占地面积大、噪声污染等。由于海上丰富的风能资源和当今技术的可行性,海洋将成为一个迅速发展的风电市场,当前欧美海上风电场已处于大规模开发的前夕。我国东部沿海水深50m以内的海域辽阔,而且距离电力负荷中心(沿海经济发达电力紧缺区)很近,随着海上风电场技术的发展成熟,风电必将会成为我国东部沿海地区可持续发展能源的重要来源。因此,利用风电来改变能源结构并改善环境,不失为能源开发领域中重要的策略之一。目前,我国风电技术的开发利用取得了巨大进步,风电开发和利用技术已位居世界前列。

本书是由王世明教授、曹宇博士根据国内外院校和科研机构的成果进行归纳编写而成,田卡工程师、李淼森研究生完成了资料收集及数据整理工作。同时感谢李泽宇、于涛、骆锐东、龚芳芳、刘安东、王家之、葛玲、冯凯亮、刘汇、方会凌、刘宇、丁成林、兰高丰、潘健等研究生为本书的编写工作提供的帮助。同时在出版过程中得到了上海科学技术出版社的大力支持,值此表示由衷的感谢!

由于笔者水平有限、时间仓促,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作者

目 录

1	绪论	1
1.1	海上风力发电概况	3
1.2	海上风力发电技术国内外现状	4
1.2.1	国外发展现状	4
1.2.2	我国发展现状	6
1.3	海上风电的发展优势及前景	6
1.4	海上风力发电技术面临的挑战	8
2	海上风机系统	9
2.1	海上风机系统的构成	11
2.2	风机	11
2.2.1	叶片	11
2.2.2	风机舱	12
2.3	海上支撑结构	18
2.3.1	塔筒	18
2.3.2	下部支撑结构	18
2.4	控制器	20
2.5	控制和保护系统	21
2.6	电力电子系统	21

3 海上风机基础支撑结构设计技术

23

3.1	海上风电场风机基础选型技术	25
3.1.1	海上风机基础支撑结构形式	25
3.1.2	各种基础形式的比较	28
3.2	固定基础支撑结构分类与特点	29
3.3	海上风电基础支撑结构设计准则	37
3.3.1	基础支撑结构形式	38
3.3.2	基础支撑钢结构设计	38
3.3.3	桩基础设计	40
3.3.4	桩的轴向承载力	41

4 风机叶轮发电系统设计技术

43

4.1	风机叶片的基本理论	45
4.1.1	叶片设计的动力学理论	45
4.1.2	风机的获能特性系数估算公式	47
4.2	风机叶片材料选型与加工工艺	48
4.2.1	材料选型	48
4.2.2	材料选型技术的发展	48
4.2.3	风机叶片的加工工艺	49
4.3	风机主传动发电系统设计技术	50
4.3.1	系统组成与工作原理	50
4.3.2	系统布置形式	51
4.3.3	系统主要部件设计技术	52
4.4	液压变桨距控制系统设计技术	59
4.4.1	液压变桨距控制系统介绍	59
4.4.2	变桨距风力发电机组的运行状态设计	60
4.4.3	液压控制变桨系统设计	61

5 海上风机基础防腐保护技术

63

5.1	海上风电机组基础的腐蚀发生机理	65
5.1.1	海上风机结构腐蚀特点	65
5.1.2	海上风机基础腐蚀分区	66
5.2	海上风电机组基础的腐蚀类型及影响因素	67
5.2.1	钢结构基础	67

5.2.2	混凝土结构基础	69
5.3	海上风电机组基础的防腐措施	70
5.3.1	钢结构基础的防腐措施	70
5.3.2	混凝土结构基础的防腐措施	74
6	海上风电分布式微电网技术	75
6.1	分布式微电网技术	77
6.1.1	微电网概述	77
6.1.2	微电网系统结构组成	78
6.2	海上风电微电网的建设规划技术	79
6.3	海上风电场电力系统模型架构	79
6.4	海上风电场并网接入方案及技术要求	81
6.4.1	海上风电场并网接入	81
6.4.2	并网接入方案优化	82
6.4.3	海上风电场并网技术要求	82
6.5	海上风电并网经济调度技术	83
6.5.1	静态经济调度	83
6.5.2	动态经济调度	84
6.5.3	安全约束经济调度	85
6.6	典型微电网技术实例	85
6.6.1	江苏大丰智能微电网建设规划	85
6.6.2	广东珠海桂山海上风电场示范项目	86
7	海上风电场的安装和维护技术	89
7.1	海上风电场安装与维护技术发展现状	91
7.1.1	国外发展现状	91
7.1.2	我国发展现状	93
7.2	海上风电机组的安装技术	93
7.2.1	整体安装技术	94
7.2.2	分体安装技术	95
7.3	典型的风电机组安装船	97
7.3.1	非自航自升式平台	97
7.3.2	自升自航式平台	98
7.3.3	带定位桩腿的自航船	98
7.3.4	海上风电机组安装船特点	99

7.4	海上风电机组的维护技术	100
7.5	海上风电场的运维安全性分析技术	101
7.5.1	海上风电机组基础的分类	101
7.5.2	主要部件的共振分析	101
7.5.3	极端恶劣环境分析	102
7.5.4	海上作业安全的影响分析	102
7.5.5	风电机组的防火技术分析	103

8 海上风电场资源评估及选址技术 105

8.1	海上风电资源评估	107
8.1.1	风能资源评估技术	107
8.1.2	国外海上风电场资源评估	107
8.1.3	我国近海风电场资源评估	110
8.2	海上风电场选址技术	112
8.2.1	场址勘测技术	112
8.2.2	选址准则及方法	113
8.2.3	选址案例	114

9 海上风电机组防台风技术与控制措施 117

9.1	台风对海上风电机组的危害	119
9.1.1	台风易发地区风电机组遭遇台风的主要问题	119
9.1.2	台风对海上风电机组结构的破坏机理与影响	120
9.2	海上风电机组防台风措施	121
9.2.1	海上风电机组防控设计	121
9.2.2	海上风电机组抗台风控制策略	124

10 海上风电技术展望 125

10.1	海上风电技术发展预期	127
10.2	我国海上风电技术发展分析	129
10.2.1	已有相关鼓励政策	129
10.2.2	面临的问题与机遇	135

参考文献		139
------	--	-----

1

绪 论

海上风力发电概况

海上风力发电技术国内外现状

海上风电的发展优势及前景

海上风力发电技术面临的挑战

本章主要介绍了海上风力发电概况、国内外风力发电技术的研究和应用现状,以及海上风力发电的优势和前景,同时分析了现在海上风力发电技术存在的问题。

1.1 海上风力发电概况

海上风电具有资源丰富、风能资源稳定、发电利用率高、不占用土地面积、对生态环境影响小、不消耗水资源和适宜大规模开发等优点,且靠近传统电力负荷中心,便于电网消纳,免去了长距离输电的问题。因此,海上风电的开发与利用越来越为全球所关注,如英国、德国、爱尔兰、丹麦、比利时、荷兰、瑞典等欧洲国家都纷纷加快了海上风电的开发力度。另一方面,相对于陆上风电,海上风电还面临浮冰、台风、盐雾等复杂的自然条件,对海上风电机组相关技术要求更高,海上风电场建设难度更大、成本更高、建设环境更复杂。例如,欧洲某知名风电机组生产厂商的2 MW海上风电机组在运行了一段时间后,发电机组因出现绝缘故障,而被迫维修更换。除了发电机组设计技术因素外,海上风电开发还要考虑电缆铺设、船舶航运、滩涂围垦及珍稀禽类保护等多方面的运行、维护因素。出于保护沿海浅滩区生态和避免影响旅游业的考虑,德国政府要求海上风电场至少距离海岸30 km。阿尔法·文图斯海上风电场离海岸超过40 km,由于建设地点离岸远、水深、风电机组尺寸大等因素,最终导致该项目耗资大大超过预算,达到2.5亿欧元,每千瓦造价超过3.5万元人民币。海上风电场的发电成本与经济规模有关,包括海上风电机组单机容量和每个风电场风电机组台数,每个海上风电场最佳容量为120~150 MW。其中,海上风电场投资分配比例一般为:风电机组51%、基础19%、海上电气系统9%、风电机组和基础安装9%、海上电气系统安装6%、管理4%、保险2%。相对而言,陆上风电场投资分配比例分别为:风电机组70%、其他30%。海上风电场如图1-1所示。

由于海上风电开发与利用具有广阔的发展前景,全球风电机组制造企业也纷纷加大了海上大型风电机组的研发和产业化力度。截至2019年年底,能够在海上风电场批量应用的风电机组主要有:法国Areva-Multibrid公司的5 MW半直驱风电机组、

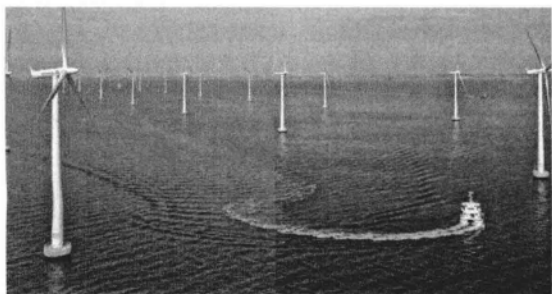


图1-1 海上风电场

德国 Repower 公司的 5 MW 风电机组、丹麦 Vestas 公司的 2 MW 和 3 MW 双馈异步风电机组、德国 Siemens 公司的 2.3 MW 和 3.6 MW 风电机组、德国 Bard 公司的 5 MW 风电机组、芬兰 Winwind 公司的 3 MW 半直驱风电机组等。GE 公司计划研发的新一代 10~15 MW 级大容量风电机组,采用 GE 磁共振成像系统超导体磁体技术,淘汰了变速箱,由于超导线圈能够产生强磁场,超导发电机的转矩密度是常规发电机的两倍,该技术降低了制造中对稀土的依赖,减少了发电机中铁的使用量,减轻了发电机的重量。

海上风电场的开发主要集中在欧美地区,其发展大致可分为五个不同阶段:①1977—1988年,欧洲对国家级海上风电场的资源和技术进行研究;②1990—1998年,进行欧洲级海上风电场研究,并开始实施第一批示范计划;③1991—1998年,开发中型海上风电场;④1999—2005年,开发大型海上风电场和研制大型风力机;⑤2005年以后,开发大型风力机海上风电场。

1.2 海上风力发电技术国内外现状

1.2.1 国外发展现状

数千年前就出现了利用风能带动风帆航行的船舶,随着风力机的出现,人们开始利用风能来碾米和提水。虽然人类利用风能在历史上很早就出现,但是风力发电技术发展却只有不到 200 年的历史。19 世纪 80 年代末期,第一台风力发电机由美国研制成功,但功率仅有 12 kW。1939—1945 年期间,丹麦首次投入使用少叶片风力发电机。20 世纪 50 年代初期,丹麦制造出第一台交流风力发电机。1930—1960 年,丹麦、美国等欧美国家开始研发更大功率的风力发电机。20 世纪 80 年代,630 kW 的风力发电机研制成功,设计制造相关研究已突破风力发电技术瓶颈,大幅降低了风力发电成本。

1990 年开始,新一代风力发电机的设计理念已形成。1990 年,世界上第一台海上风电机组(Wind World 25)设计研发成功,并安装试运营于瑞典 Noger-sund 海上风电场,容量为 220 kW。1991 年,Vindeby 海上风电场建于丹麦波罗的海洛兰岛西北沿海,安装了 11 台风电组合机组(Bonus 机组),总装机容量为 5 MW。随后,荷兰、丹麦和瑞典等国家陆续建成了一批海上风电场示范工程项目,装机规模为 2~10 MW,风电机组的单机容量为 500~600 kW,这些早期的风电场多建于浅水海域或带有保护设施的水域。

自 2000 年起,兆瓦级风电机组发电技术研制成功,开始用于海上风电项目。例如,瑞典 Utgrunden 风电场开始尝试安装单机容量为 1.5 MW 的海上风电机组;英国 Iyth 风电场通过技术攻关,成功在海上安装了 2 台单机容量为 2 MW 的海上风电机组。

2001 年,全球第一个具有商业化应用价值的 Middelgrunden 海上风电场在丹麦哥本哈根附近的海域建成,总设计装机容量为 40 MW,共安装了 20 台单机容量为 2 MW 的风电机组,年发电量达到 1.04 亿 kW·h。

2002年,世界上第一个大型海上风电场 Horns Rev 在丹麦北海海域建成,总装机容量为 160 MW,共安装了 80 台单机容量为 2 MW 的海上风电机组,占用海域面积约为 20 km^2 ,年发电量为 6 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。随后,丹麦的 Frederikshaven、Ronland 和 Samsø 等大中型海上风电场相继建成。

2003年,Nysted 海上风电场在丹麦建成,总装机容量为 165.6 MW,共安装了 72 台单机容量为 2.3 MW 的海上风电机组。

2007年,苏格兰东海岸的 Beatrice 海上示范风电场成功地安装了单机容量为 5 MW 的海上风电机组,装机规模为 10 MW。

2008年,海上风力发电的总装机容量为 1 485.2 MW,丹麦、英国、瑞典、德国、爱尔兰、荷兰、中国、日本和比利时等 9 个国家发展较快,其中英国累计装机容量达到 598.4 MW,超过丹麦的 415.7 MW,成为海上风电装机容量最大的国家。

2009年,欧洲建成 38 个海上风电场,总共安装了 828 套风电机组,海上风电总装机容量为 2 056 MW,占全球海上风电装机总量的 95% 以上。欧洲是海上风电发展最快的地区,根据欧洲风能协会的最新统计,2009 年欧洲水域的 8 个海上风电场总计安装了 205 台海上风电机组,其中,Siemens 机组 (2.3 MW 和 3.6 MW 两种机型) 146 台、Vestas 机组 (3 MW) 37 台、Winwind 机组 (3 MW) 10 台、Malibrid 机组 (5 MW) 6 台、Repower 机组 (5 MW) 6 台。另外,欧盟 15 个成员国和其他欧洲国家有超过 100 GW 的海上风电项目正在规划中。英国是最早进行海上风电开发的国家之一,目前已建成 12 个海上风电场,累计装机 280 余台,装机容量接近 900 MW,依然是全球海上风电装机容量最大的国家,其在海上风电场设计、基础施工、机组运输、安装、海底电缆铺设等方面积累了较为成熟的经验。

2010年,美国 Deepwater Wind 公司在美国海岸建造了当时全球最大的海上风电场,200 台 5 MW 风电机组安装在深海,风力机叶片仅高出平面 150 m。截至 2010 年年底,全球已建成 43 个海上风电场,安装了 1 339 台风电机组,总装机容量达到 3 554 MW。全球海上风电主要分布在欧洲的英国、丹麦、比利时和德国,其中英国 2010 年海上新增装机容量为 925 MW,依然是海上风电的全球领跑者;德国近两年采用 5 MW 和 6 MW 大型风电机组建设海上风电场,成为海上风电的后起之秀。

截至 2011 年,全球累计装机容量达到 4 954 MW,新增装机容量超过 1 400 MW,建有 80 个海上风电场。其中,欧洲新增并网海上风电机组 235 台,新增容量约为 866 MW (英国新增装机容量为 752.45 MW,占比 87%;其次为德国,新增装机容量为 108.3 MW;丹麦新增为 3.6 MW;葡萄牙新增为 2 MW)。德国海上风电发展在全球居领先地位,德国可以生产 5 MW 以上风电机组的厂家有 4 家,即 Repower、Mulibnid、Bard 和 Enercon。海上风电机组研发示范基地位于德国北海沿线最大的港口城市不来梅,当时不来梅港已安装 12 台不同类型的 5 MW 海上风电机组用于对比研究。为鼓励海上风电发展,德国制定了较优惠的风电上网电价 [15 欧分 / ($\text{kW} \cdot \text{h}$)], 该试验风电场已并网发电。最大的试验风电机组单机功率可以达到 7.5 MW,采用复合材料加铝合金的两节叶片结构,叶片长约 60 m。德国首个海上风电场(阿尔法·文图斯海上风电场)由德国政府和德国能源供应商联合投资,1999 年项目获批准,2006 年开工建设,并

于2010年并网发电。该海上风电场建在离海岸超过40 km的北海海域,12台5 MW机组,总装机容量为60 MW,风电机组高度分别为148 m、150 m两类,每个叶片长56 m,重16.5 t,基础都打在超过30 m深的海水中。到2030年,德国海上风电装机容量将达到25 GW。

1.2.2 我国发展现状

我国海岸线长1.8万多 km,岛屿6 000多个。近海风能资源主要集中在东南沿海及其附近岛屿,风能密度大多数在 300 W/m^2 以上,台山、平潭、大陈、嵊泗等沿海岛屿可达 500 W/m^2 以上,其中台山岛风能密度为 534 W/m^2 ,是我国平地上有记录的风能资源最大的地方。根据风能资源普查成果,我国5~25 m水深、50 m高度的海上风电开发潜力约为2亿 kW,5~50 m水深、70 m高度的海上风电开发潜力约为5亿 kW。

20世纪90年代以来,大型风力机开始在我国推广应用,取得了可喜的成就。截至2000年年底,全国建成陆地风电场27个,分布在10余个省区,安装机组800余台,最大容量为1 300 kW,总装机容量为400 MW,1996—2001年风电装机容量的平均年增长率为16%,我国已跻身风力发电行业快速发展的国家行列。2016年中国风电新增装机容量为2 337万 kW,累计装机量达到1.69亿 kW,其中海上风电新增装机容量为59万 kW,累计装机容量为163万 kW,由于海上大型风电机组的技术限制,我国海上风电装机量与西方国家仍有差距。

目前发达欧美国家大功率风力发电机制造水平远远领先我国。1980—1990年,我国尝试研制变桨距调节风力发电机,由于当时我国机械控制水平较低,研发的机组可靠性差,没有形成产业化,此技术并未发展起来。自2010年以来,通过引进发达国家先进的海上风力发电技术,我国已可以生产较高功率的海上风力发电机,并实现了产业化,2 000 kW及更高功率的大型风电机组正在研发中。

截至2018年,我国海上风电开发已经进入了规模化、商业化发展阶段。根据各省海上风电规划,全国海上风电规划总量超过8 000万 kW,重点分布在江苏、浙江、福建、广东等省市,行业开发前景广阔。我国海上风电场的建设主要集中在浅海海域,且呈现由近海到远海、由浅水到深水、由小规模示范到大规模集中开发的特点。为获取更多的海上风能资源,海上风电项目将逐渐向深海、远海方向发展。随着场址离岸越来越远,在海上风电机组基础和送出工程成本等也逐步增大,另外对运维服务要求也更高,运维成本也会随之增大,故深海、远海的海上风电项目在经济性上仍存在较大风险,需要柔性直流输电技术、漂浮式基础、海上移动运维基地的快速发展,为我国远海风电的开发提供必要支撑。

1.3 海上风电的发展优势及前景

海上风电是未来清洁能源发展的新方向,由于陆地上经济可开发的风资源越来越少,全球风电场建设已出现从陆地向近海发展的趋势。与陆地风电相比,海上风能资源的能量效益比陆地风电场高20%~40%,还具有不占地、风速高、沙尘少、电量大、运行

稳定及粉尘零排放等优势,同时能够减少机组的磨损,延长风力发电机组的使用寿命,适合大规模开发。例如,浙江沿海设计安装的1.5 MW风机,每年陆上可发电1 800~2 000 h,海上则可以达到2 000~2 300 h,海上风电一年能多发电45万kW·h。另外,海上风电还能减少电力运输成本,由于海上风能资源最丰富的东南沿海地区,毗邻用电需求大的经济发达地区,可以实现就近消化,降低输送成本,所以发展潜力巨大。

风能是可再生能源,取之不尽,用之不竭。风力发电是技术成熟的可再生能源发电技术,加快风能资源开发利用是促进可再生能源发展的重要措施。以上海、江苏、浙江等东部沿海经济发达地区为例,常规能源资源匮乏,一次能源主要依赖外省输入或进口,但海上风能资源丰富,具有面积较大的湖间带、潮下带滩涂及近海、深海风电场场址,开发建设该地区海上风电并有效利用风能资源,是缓解能源、环境压力,促进地方经济社会可持续发展的有效措施。我国在华南地区已实现海上风电并网,如图1-2所示。

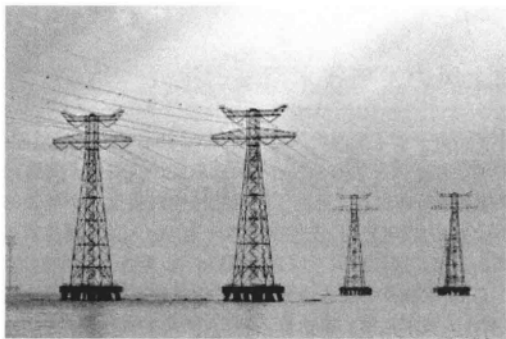


图1-2 海上风电并网

近年来,海上风电发展缓慢,一定程度上也影响了整机制造厂家的积极性。目前,我国大部分整机制造厂家研发的海上机组都没有长时间、大批量的运行经验,基本处于机组设计研发、样机试运行阶段。从陆上风电的发展历程可以看出,在巨大市场需求的带动下,海上机组也将逐步实现国产化。由于海上施工条件恶劣,单台机组的基础施工和吊装费用远远大于陆上机组的施工费用,大容量机组虽然在单机基础施工及吊装上的投资较高,但由于数量少,在降低风电场总投资上具有一定优势,因此各整机制造厂家均致力于海上大容量机组的研发。

海上风电场的运维内容包括风电机组、塔筒及基础、升压站、海缆等设备的预防性维护、故障维护和定检维护,是海上风电发展十分重要的产业链。近年来,欧洲基本垄断全球风电运维服务市场。相较于欧洲,国内海上风电起步晚,缺乏专业的配套装备,运维效率低、安全风险大。未来随着海上风电装机容量的增加,势必带动相关产业的快速发展。巨大的市场需求将带动海上风电机组的迅猛发展,随着大量海上风电机组的批量生产、吊装、并网运行,机组和配套零部件等的价格会呈现明显下降趋势。另