



“十四五”时期水利类专业重点建设教材

“十三五”江苏省高等学校重点教材

# 海上风电机组 基础结构 (第2版)

HAISHANG FENGDIAN JIZU  
JICHU JIEGOU

主 编 陈 达  
副主编 欧阳峰 廖迎娣  
主 审 林毅峰



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

“十四五”时期水利类专业重点建设教材

“十三五”江苏省高等学校重点教材 (编号 2020-1-105)

# 海上风电机组 基础结构 (第2版)

主 编 陈 达  
副主编 欧阳峰 廖迎娣  
主 审 林毅峰



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

## 内 容 提 要

本书系统讲述海上风电机组基础结构设计及其防腐防护等相关问题。全书共分7章, 主要内容包括绪论、海上风电机组基础结构设计原理及作用效应组合、桩承式基础、重力式基础、筒式基础、漂浮式基础以及海上风电机组基础防腐等。

本书可作为新能源科学与工程专业、风能与动力工程专业、港口航道与海岸工程专业及相关专业本科生的通用教材, 也可供从事海上风电领域, 尤其是海上风电机组基础建设的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

海上风电机组基础结构 / 陈达主编. -- 2版. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2023. 8  
“十四五”时期水利类专业重点建设教材 “十三五”  
江苏省高等学校重点教材  
ISBN 978-7-5226-1041-2

I. ①海… II. ①陈… III. ①海风—风力发电机—发电机组—结构—高等学校—教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2022)第190371号

书 名	“十四五”时期水利类专业重点建设教材 “十三五”江苏省高等学校重点教材 <b>海上风电机组基础结构 (第2版)</b> HAISHANG FENGDIAN JIZU JICHU JIEGOU
作 者	主 编 陈 达 副主编 欧阳峰 廖迎娣 主 审 林毅峰
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@mwr.gov.cn 电话: (010) 68545888 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售有限公司 电话: (010) 68545874、63202643 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	北京印匠彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 17.5印张 426千字
版 次	2014年8月第1版第1次印刷 2023年8月第2版 2023年8月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	<b>52.00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

## 本书编委会

主 编：陈 达

副 主 编：欧阳峰 廖迎娣

主 审：林毅峰

参编人员：侯利军 达 波 俞小彤 张 研



## 第2版前言

风能是一种绿色清洁的可再生能源，利用风能发电是碳减排的有效途径之一，在减缓全球气候变化、确保能源安全等方面发挥着重要作用。海上风资源丰富，开发潜力巨大，海上风电开发已成为沿海国家风电发展的主要方向，但同时也面临诸多的挑战。欧洲是海上风电发展的先驱，在世界海上风电已进入大规模开发阶段的背景下，我国海上风电建设也拉开了序幕。2010年，上海东海大桥102MW海上风电场投产运行，标志着我国首个真正意义上的海上风电场正式建成。截至2013年底，我国海上风电建设技术整体还处于起步阶段，既无成熟经验也无相关的建设标准和规范，基础结构设计尚处于边建设边探索阶段。与此同时，教育部根据社会经济发展的需要，于2010年批准成立了新能源科学与工程本科专业，而涉及风电专业的核心课程“近海风电场”的教材却严重缺乏。在此背景下，河海大学联合国内相关设计单位于2014年编写出版了《海上风电机组基础结构》，并得到教育部高等学校水利类专业教学指导委员会支持和国家出版基金资助，入选了全国水利行业规划教材和国家重点图书出版规划项目。

近年来，随着我国海上风电开发的迅猛发展，海上风电机组基础结构型式也逐渐从最初的群桩基础向单桩基础和导管架基础发展，各种基础结构型式的计算方法及其建设技术也逐步在工程实践中得到更新和调整。2018年，国家能源局在总结工程实践经验的基础上，参考国内外先进标准，编制发布了《海上风电场工程风电机组基础设计规范》(NB/T 10105—2018)，规范我国海上风电场工程风电机组的基础结构设计工作。为适应当前海上风电场建设和发展的需要，让学生和相关工程设计人员及时了解和掌握当前不断发展的海上风电基础新结构、设计理论和方法，笔者结合现行国家行业标准，对原教材重新进行了修编并作为第2版正式出版。

本书针对海上风电机组基础结构设计相关问题进行阐述，目标明确，重点突出。在内容上尽可能反映海上风电机组基础的新结构、新方法和新技术，并与现行国家和行业标准相一致。全书共分7章，主要内容包括绪论、海上风电机组基础结构设计原理及作用效应组合、桩承式基础、重力式基础、筒式基础、漂浮式基础以及海上风电机组基础防腐蚀等。

本书由河海大学陈达教授担任主编，并负责全书总体审阅与校核，河海大学欧阳峰、廖迎娣、侯利军、达波、俞小彤、张研等共同完成各章节的编写。上海勘测设计研究院有限公司林毅峰总工程师对本书进行了审阅，并提出了有益的建议和修改意见。

海上风电机组基础结构设计领域的相关技术仍处于探索阶段，同时限于作者的水平，书中难免尚有不妥和疏漏之处，希请读者批评指正，以便再版时加以订正。

作者

2022年6月



## 第1版前言

海上风资源丰富、开发潜力巨大，但受海浪、水流、泥沙输运等动力因素的影响，较之于陆上风电场，海上风电场建设所面临的工程技术和科学问题更为复杂。海上风电的开发与发展，急需大批专业技术人才，另一方面，相关结构设计等问题也亟待开展系统深入的研究和探索。笔者根据近年来的研究成果和工程实践经验，结合港口工程、陆上风电工程的相关技术以及国外相关标准编写了本书，充分考虑了学生的教学要求，风力发电专业和土建类、水利类专业本科生可根据不同的教学要求，修读全部内容或其中的部分内容。同时，本书也可供相关专业工程技术人员参考。

本书是《风力发电工程技术丛书》之一，针对海上风力发电机组（简称风电机组）基础结构设计相关问题进行阐述，目标明确，重点突出。本书在内容上尽可能反映海上风电机组基础的新结构、新方法和新技术，并与现行的国家标准和行业标准相一致。全书内容包括绪论、海上风电机组基础结构环境荷载、桩承式基础、重力式基础、浮式基础，以及海上风电机组基础防腐蚀等，共6章。

参编单位的王淡善、罗金平、蒋欣慰、邝彩云、宋础、刘蔚、刘玮、吉超盈、刘小松、钟耀、谢跃飞、李图强等同志对本书提出了许多宝贵意见，使其内容有了较大改进，特此致谢。本书的编写参阅了大量的参考文献，在此对其作者一并表示感谢。

希望本书能为读者的学习和工作提供帮助。限于作者的水平，书中难免有不妥之处，尚希读者批评指正。

作者

2013年10月



# 目 录

第 2 版前言

第 1 版前言

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 风能利用背景及意义 .....	1
1.1.1 能源与需求 .....	1
1.1.2 风能资源利用 .....	2
1.2 海上风电发展概况 .....	3
1.2.1 国际海上风电发展概况 .....	3
1.2.2 中国海上风电发展概况 .....	5
1.3 海上风电机组系统组成 .....	8
1.4 海上风电机组基础分类 .....	9
1.4.1 桩承式基础 .....	9
1.4.2 重力式基础 .....	11
1.4.3 筒式基础 .....	12
1.4.4 漂浮式基础 .....	13
思考题 .....	14
参考文献 .....	14
第 2 章 海上风电机组基础结构设计原理及作用效应组合 .....	15
2.1 极限状态和设计状况 .....	15
2.1.1 极限状态 .....	15
2.1.2 设计状况 .....	15
2.1.3 设计安全等级 .....	16
2.2 作用及其效应组合 .....	16
2.2.1 作用的分类 .....	16
2.2.2 作用的代表值 .....	17
2.2.3 作用效应及其组合 .....	18
2.2.4 极限状态设计表达式 .....	19

2.3	海上风电机组基础作用荷载	22
2.3.1	风电机组荷载	22
2.3.2	风荷载	22
2.3.3	波浪荷载	27
2.3.4	海流荷载	37
2.3.5	海冰荷载	39
2.3.6	地震作用	43
2.3.7	船舶荷载	48
2.3.8	其他荷载	51
2.4	设计环境工况作用效应组合	53
2.5	荷载的动态特性	53
2.5.1	风荷载	54
2.5.2	气动荷载	55
2.5.3	波浪荷载	58
2.5.4	地震作用	61
	思考题	61
	参考文献	62
<b>第3章</b>	<b>桩承式基础</b>	<b>63</b>
3.1	桩承式基础的结构型式及其特点	63
3.1.1	单桩基础	64
3.1.2	三脚架基础	64
3.1.3	导管架基础	67
3.1.4	高桩承台基础	68
3.2	桩承式基础的一般构造	69
3.2.1	桩	69
3.2.2	导管架(三脚架)	72
3.2.3	承台	77
3.2.4	附属结构	78
3.3	桩基布置	81
3.3.1	导管架(三脚架)基础桩基布置	81
3.3.2	高桩承台基础桩基布置	81
3.4	桩承式基础的计算	82
3.4.1	桩承式基础的计算内容	82
3.4.2	桩基础轴向承载力	82
3.4.3	桩基础竖向变形计算	91
3.4.4	桩基础水平承载力及变形计算	92
3.4.5	桩体结构设计	100
3.4.6	桩基础防冲刷设计	105

3.5	桩基础的变形控制标准 .....	110
3.5.1	桩基础的竖向沉降和倾斜率控制标准 .....	110
3.5.2	桩基础的水平变位控制标准 .....	111
3.6	承台结构计算 .....	111
3.6.1	承台受弯计算 .....	111
3.6.2	承台受冲切计算 .....	113
3.6.3	受剪切计算 .....	114
3.6.4	局部受压计算 .....	116
3.7	导管架结构计算 .....	118
3.7.1	导管架结构分析 .....	118
3.7.2	圆管构件强度计算 .....	119
3.7.3	圆管构件稳定计算 .....	120
3.7.4	圆锥过渡段强度和稳定计算 .....	124
3.7.5	管节点设计 .....	126
3.7.6	管节点疲劳分析 .....	130
3.8	连接设计 .....	139
3.8.1	锚栓笼连接 .....	139
3.8.2	基础环连接 .....	143
3.8.3	灌浆连接 .....	143
	思考题 .....	150
	参考文献 .....	150
<b>第4章</b>	<b>重力式基础 .....</b>	<b>152</b>
4.1	重力式基础的结构型式和特点 .....	152
4.1.1	混凝土沉箱基础 .....	152
4.1.2	沉箱-钢管组合基础 .....	153
4.2	重力式基础的一般构造 .....	155
4.2.1	基床 .....	155
4.2.2	沉箱 .....	157
4.2.3	基底允许脱开面积 .....	158
4.3	重力式基础计算 .....	158
4.3.1	重力式基础设计状况和计算内容 .....	158
4.3.2	地基承载力和基础水平承载力计算 .....	159
4.3.3	基床与地基承载力验算 .....	163
4.3.4	基础稳定性验算 .....	167
4.3.5	地基沉降验算 .....	170
4.3.6	重力式基础结构强度验算 .....	172
4.3.7	重力式沉箱基础浮运验算 .....	175
4.4	重力式基础与塔筒的连接 .....	177

思考题 .....	177
参考文献 .....	177
<b>第 5 章 筒式基础 .....</b>	<b>179</b>
5.1 筒式基础的结构型式及特点 .....	179
5.1.1 单筒基础 .....	180
5.1.2 多筒基础 .....	181
5.1.3 复合筒式基础 .....	183
5.2 筒式基础的一般构造 .....	184
5.2.1 筒体 .....	184
5.2.2 筒体与塔筒连接 .....	185
5.3 筒式基础计算 .....	186
5.3.1 设计状况和验算内容 .....	186
5.3.2 地基承载力计算 .....	186
5.3.3 基础稳定性验算 .....	190
5.3.4 筒式基础结构强度验算 .....	195
5.3.5 浮运稳定性计算 .....	197
5.3.6 筒式基础下沉计算 .....	198
5.3.7 多筒基础受力特性简化分析 .....	199
思考题 .....	201
参考文献 .....	201
<b>第 6 章 漂浮式基础 .....</b>	<b>203</b>
6.1 漂浮式基础结构型式及其特点 .....	204
6.1.1 单立柱式 (spar) 基础 .....	204
6.1.2 半潜式 (semi) 基础 .....	205
6.1.3 张力腿式 (TLP) 基础 .....	206
6.1.4 其他型式基础 .....	206
6.2 漂浮式基础的一般构造 .....	208
6.2.1 浮体结构 .....	208
6.2.2 锚定系统 .....	209
6.3 漂浮式基础计算 .....	211
6.3.1 漂浮式基础的计算内容 .....	211
6.3.2 漂浮式基础的稳性 .....	211
6.3.3 漂浮式基础的水动力性能 .....	214
6.3.4 漂浮式基础的结构计算 .....	217
6.3.5 锚定分析 .....	218
思考题 .....	222
参考文献 .....	222

第 7 章 海上风电机组基础防腐蚀 .....	224
7.1 海上风电机组基础的腐蚀分区及特点 .....	224
7.1.1 海水的性质 .....	224
7.1.2 腐蚀分区 .....	225
7.1.3 腐蚀特点及机理 .....	226
7.2 海上风电机组基础的腐蚀类型及影响因素 .....	227
7.2.1 腐蚀类型 .....	227
7.2.2 腐蚀影响因素 .....	231
7.3 海上风电机组基础的防腐蚀措施及要求 .....	234
7.3.1 防腐蚀措施 .....	234
7.3.2 防腐蚀要求 .....	248
7.4 海上风电机组基础的防腐蚀性能试验 .....	249
7.4.1 钢结构 .....	249
7.4.2 混凝土结构 .....	252
思考题 .....	259
参考文献 .....	259
附录 海上风电机组基础结构设计常用标准规范清单 .....	261

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 风能利用背景及意义

### 1.1.1 能源与需求

能源是经济和社会发展的重要物质基础。最新统计表明，我国 2021 年全年能源消费总量为 42.6 万亿 kW·h，其中煤炭消费量占能源消费总量的 56%，约合 29.3 亿 t 标准煤。随着煤炭、油、气等能源资源长期大规模的开采，造成资源短缺以及能源开发过程中伴生物对生态环境的影响破坏。煤炭大规模开采用来发电，其过程会产生大量二氧化碳，我国 2021 年因火力发电产生超过 70 亿 t 的二氧化碳排放。此外，作为动力燃料和化工原料的石油和天然气在使用过程中也产生了二氧化碳的排放。统计表明，我国 2021 年二氧化碳排放量超过 120 亿 t，占全球总量的 33%，是全球最大的二氧化碳排放国。二氧化碳可吸收长波热辐射线，使地表与低层大气温度增高。二氧化碳的大量排放会引起全球迅速变暖，是造成温室效应的主要因素，引发海平面上升、极端天气加剧、淡水资源缺乏等一系列环境问题。

控制碳排放是控制全球变暖以实现世界免遭灾难性气候变化的共识。1992 年，在里约举行的联合国环境与发展大会通过了《联合国气候变化框架公约》。这是世界上第一个应对全球气候变暖的国际公约，是国际社会在应对全球气候变化问题上进行国际合作的一个基本框架，同时明确二氧化碳减排行动的重要意义。此后，联合国环境与发展大会先后通过《京都议定书》《马拉喀什协定》《哥本哈根协议》《多哈修正》等多项协议，在国家层面设定强制性减排措施，促进全球范围碳减排的有效长期实施。2015 年，《联合国气候变化框架公约》近 200 个缔约方一致同意通过《巴黎协定》，达成一项“具有法律约束力的并适用于各方的”全球减排新协议，其中“国家自主贡献”取代了之前“摊牌式”的强制减排，全球应对气候变化进程迈出了重要一步。开发利用可再生清洁能源替代传统不可再生能源资源是有效降低和控制碳排放的重要手段，已经成为全人类共同关注的焦点。

为了合理开发利用可再生能源资源，促进能源资源节约和环境保护，应对全球气候变化，我国于 2007 年发布了《可再生能源中长期发展规划》。规划首次明确提出了可再生能源发展目标，主要包括水能的充分利用和风能、太阳能、生物质能利用的加快推进，逐步提高优质清洁可再生能源在能源结构中的比例。2022 年发布的《“十四五”现代能源体系规划》进一步明确了能源发展战略目标，非化石能源消费比重在 2025 年提升到 20%。展望 2035 年，非化石能源消费比重在 2030 年达到 25% 的基础上进一步大幅提高，可再生能源发电成为主体电源，碳排放总量达峰后稳中有降。作为一个负责任的大国，我国在国际



上多次做出了低碳减排的郑重承诺。2015 年举行的气候变化巴黎大会上，我国承诺将于 2030 年左右使二氧化碳排放达到峰值并争取尽早实现，2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%，非化石能源占一次能源消费比重达到 20%左右，森林蓄积量比 2005 年增加 45 亿  $\text{m}^3$  左右。在 2020 年举行的联合国生物多样性峰会上，习近平总书记宣布，中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。为了落实习近平总书记提出的“四个革命、一个合作”能源发展战略，力争实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和，加快清洁能源开发利用，构建以新能源为主体的新型电力系统是国家深思熟虑做出的重大战略决策。在可再生清洁能源中，风能是应用技术成熟同时具备大规模推广前景的一种能源。

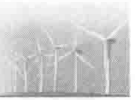
### 1.1.2 风能资源利用

风能是由地球表面大量空气流动所产生的动能，其能量大小取决于风速和空气的密度，尽管风能仅为太阳能的 2%，但其总量仍是十分可观的。全球的风能约为 27.4 万 GW，其中可利用的风能超过风能总量的 10%，比地球上可开发利用的水能总量还要大 20 倍。自 20 世纪 70 年代初第一次世界石油危机以来，传统不可再生能源日趋紧张，各国相继制定法律，以促进利用可再生能源来代替高污染的能源。从世界各国可再生能源的利用与发展趋势看，风能、太阳能和生物质能发展速度最快，产业前景也最好。风力发电相对于太阳能、生物质能等新能源技术更为成熟、成本更低、对环境破坏更小，被称为最接近常规能源的新能源，因而成为产业化发展最快的清洁能源。

进入 21 世纪，全球可再生能源不断发展，其中风能始终保持最快的增长态势，并成为继石油燃料、化工燃料之后的核心能源。全球风电累计装机容量从 2001 年的不足 3GW、2006 年的 7GW、2011 年的 24GW、2016 年的 487GW，至 2021 年底增长到 837GW，年均复合增长率超过 10%，风电正在以超出预期的发展速度不断增长。截至 2020 年，丹麦用电量的 46%来自风电，英国用电量的 32%来自风电，西班牙用电量的 31%来自风电，德国用电量的 27%来自风电，风电已成为欧洲国家能源转型的重要支撑，这为全球能源结构转型树立了榜样。欧洲风能利用协会已在欧洲建成大量的陆上风电机组，并自 1991 年在丹麦安装了世界上第一台海上风电机组以来持续开展了海上风能的开发利用，以期最终实现风电满足欧洲居民的全部用电需求。

我国风力发电始于 20 世纪 80 年代，虽然开发应用时间较短，但起点较高。自从 2006 年 1 月 1 日开始实施《中华人民共和国可再生能源法》后，我国风电市场前期稳步发展、后期迅猛发展。如今在全球的风能发展中，我国风力发电的发展速度最快，至 2022 年 2 月，我国并网风电机组总装机容量达到 330GW，稳居世界第一，预计到“十四五”末可再生能源的发电装机占我国电力总装机的比例将超过 50%。但我国风电发展也存在着诸多制约因素，如风能资源与用电市场分布不一致导致严重弃风问题、风电上网电价补贴方式问题、风力发电税收政策转型问题等。

陆上风电和海上风电各有优缺点。在我国，陆地上风能储量约  $2.38 \times 10^3$  GW，风电场主要集中在内蒙古、新疆、河北等地区，电机设备维护保养方便，但占用土地资源，受



环境制约较多，需要建设远距离高压输电线路实现西电东送。同时陆上风电设施受运输条件制约，使得叶片尺寸受到限制，限制了大功率陆上风电机组的应用。与此同时，我国5~50m水深海上可开发和利用的风能储量约500GW，有广阔的发展前景，特别是东部沿海水深50m内的海域面积辽阔，海上风能资源丰富，距电力负荷中心很近。尽管海上风电场建设与运行维护成本较陆上高，但海上风电具有不占用土地资源、受环境制约少、风电机组容量更大、年利用小时数更高、更具规模化开发的特点，使得近海风力发电技术成为近年来研究和应用的热点。2020年，全球新增海上风电机组的平均单机容量已经突破6MW，而新增陆上风电机组的平均单机容量仅达到2.9MW。随着海上风电技术不断完善，投资成本的不断下降，国内海上风电正进入加速发展阶段，必将成为我国东部沿海地区可持续发展的重要能源来源。

## 1.2 海上风电发展概况

### 1.2.1 国际海上风电发展概况

欧洲在风能利用方面处于全球领先地位，其中丹麦又远远领先其他欧洲各国。截至2020年，丹麦全国近一半的电力消耗来自风力发电，其中约40%的风电又来自海上风电，海上风电使用占比远高于其他国家。丹麦也是最早从事海上风电开发的国家，世界上第一个真正意义上的海上风电场 Vindeby 建于丹麦洛兰岛西北沿海，从1991年开始投入商业运营，直至2017年停运并拆除。该海上风电场初始安装了11台450kW风电机组，1995年又建成10台500kW风电机组。2003年还建成了当时世界上最大的近海风电场，共安装80台2MW风电机组。2021年底，全球最大14MW海上风电机组样机在丹麦国家风能测试中心正式投运发电。近年来，在满足电力需求的基础上，丹麦进一步扩张海上风力发电能力，加速推进 Power-to-X 战略，利用风电电解制备绿氢，替代化石燃料以减少碳排放量。根据丹麦政府《能源发展战略》，预计到2030年丹麦实现绿电100%覆盖各个能耗领域，2050年全部摆脱对化石能源的依赖，实现碳零排放。丹麦的海上风电场主要处于水深5~25m之间的近海海域，一般采用单桩基础。与此同时，丹麦也是风力涡轮机巨头维斯塔斯和全球最大的海上风能开发商沃旭能源的所在地。

英国是海上风电累计装机容量最多的欧洲国家。截至2020年底，欧洲海上风电累计装机容量为25GW，其中英国占比42%，远高于欧洲其他国家。其中，德国占比31%，荷兰占比10%，比利时占比9%，丹麦占比7%，其余欧洲国家总和小于1%。英国海上风力资源优渥，四面被北大西洋围绕，海域面积广阔，大风天气频繁，海上风能资源欧洲第一，约占欧洲总量的1/3。英国的第一座海上风电场 Blyth 于2000年建成，这是全球第三座海上风电场。Blyth 海上风电场安装了2台单机容量为2MW的风电机组，它们是当时世界上最大的海上风电机组。Blyth 海上风电场于2019年停运并拆除。英国通过政策引导，不断加大海上风电场建设。2008年，英国海上风电装机容量超过丹麦，跃居世界第一。目前全球最大的海上风电场 Hornsea Project One 位于英国约克郡外海120km处，2020年开始投入商业运营，装机容量达1.2GW，为全球第一个突破1GW的海上风电场。



根据英国政府《能源发展战略》，预计到 2030 年海上风电装机容量将提升到 40GW，实现对所有英国家庭的电力供应。英国海域地形条件相对复杂，小于 25m 水深的风电场一般采用单桩基础，超过 25m 水深的风电场多采用导管架基础。

德国是欧洲地区风力发电的主要国家。由于缺乏合适的陆地，德国陆上风电场的新建工作逐渐减缓，进而转向海上风电场的建设。德国首座海上风电场 Alpha Ventus 位于 Borkum 岛西北 45km 处的北海，于 2010 年全部投运并网发电，是世界上第一个使用 5MW 风电机组的海上风电场。截至 2020 年底，德国海上风电累计装机容量达 8GW，仅次于中国和英国，位居世界第三。根据德国政府《能源发展战略》，预计到 2030 年海上风电装机容量将提升到 30GW，满足至少 2000 万户家庭的用电需求。德国并网海上风电机组大部分位于北海，其余位于波罗的海。海上风电机组的平均离岸距离为 64km，平均安装水深为 30m，超过 7 成的基础型式为单桩基础，剩余为导管架基础和其他基础结构型式。

经过十多年的海上风电场建设，荷兰和比利时海上风电装机总量在 2020 年先后突破 2GW。截至 2020 年，英国、德国、荷兰、比利时和丹麦 5 国的海上风电装机容量占欧洲海上风电总装机容量的 99%，这些国家将持续扩大海上风电场建设规模。随着全球各国提高可再生能源发展目标，除上述 5 国外，法国、葡萄牙、挪威、爱尔兰、西班牙、意大利和希腊等欧洲各国近年来也积极开展海上风电场的建设与规划。根据 2020 年生效的《法国多年能源计划》，法国每年将进行 1GW 海上风电项目的建设。葡萄牙 Windfloat Atlantic 漂浮式风电场的 2 台 8.5MW 漂浮式风电机组于 2020 年并网发电，把漂浮式风电向商业化又推进了一步。作为油气大国，挪威政府在 2021 年颁布了《海上风电发展指导方针》，开启能源转型升级发展新篇章。挪威首个商业漂浮式海上风电项目 Hywind Tampen 已于 2020 年底动工建设，2022 年投产，它是目前世界上最大的漂浮式海上风电场。爱尔兰《气候行动计划》承诺，到 2030 年将其海上风电装机量提高至 3.5GW。

综上所述，海上风电的开发利用在欧洲已较为成熟。截至 2020 年底，欧洲海上风电累计装机容量为 25GW，累计 5402 台并网风电机组，分布于英国、德国、荷兰、比利时、丹麦、瑞典、芬兰、爱尔兰、葡萄牙、西班牙、挪威和法国 12 个国家的 116 座海上风电场。相比 2010 年安装的海上风电机组平均单机容量 3MW，2020 年欧洲新安装的海上风电机组平均单机容量达到 8.2MW，2022 年欧洲新安装的风电机组单机容量达到 10~12MW。目前，单桩基础结构仍然独步欧洲海上风电市场，而水深超过 25m 的风电场部分选用导管架基础和其他基础结构型式。随着超过 100m 水深的漂浮式风电场项目的不断出现，漂浮式基础的应用也不断增加。截至 2021 年底，欧洲地区已建最大的海上风电场是 2020 年正式投运的装机总容量为 1.2GW 的英国 Hornsea Project One 风电场，其所占海域达 630km<sup>2</sup>，平均水深 28m，主要基础结构为单桩基础。当前在建的世界上最大海上风电场是 2020 年开工建设的英国 Dogger Bank 海上风电场，共安装 300 台 12MW 风电机组，装机总容量 3.6GW，预计 2023 年开始发电投运。按照欧洲风能协会（Wind Europe）《欧洲海上风电报告 2020》分析统计，欧洲未来一段时间海上风电机组将保持持续高速建设势头，预计到 2030 年欧洲海上风电累计装机量将达到 111GW。

相对欧洲而言，其他地区和国家海上风电开发应用时间较短，但随着绿色能源意识的增加，各国政府也在大力推进能源结构转型。



美国海上风电资源丰富，主要集中在美国东北部，缅因州、马萨诸塞州、罗得岛州、纽约州、新泽西州、弗吉尼亚州等大西洋沿海地区具有最好的海上风电发展潜力。美国首个海上风电场是 30MW 的罗得岛州布洛克岛风电场，于 2016 年底开始才商业运营。截至 2021 年底，美国仅有两个海上风电场投运，即 12MW 的弗吉尼亚海岸风电场和罗得岛州布洛克岛风电场，总装机容量仅为 42MW。美国海上风电开发利用相对滞后，其中既有美国联邦政府审批海上风电项目的流程过于冗长复杂的原因，也受到了美国渔业和油气行业联合抵制的影响。如规划近 10 年、已经在建的美国 Cape Wind 海上风电场也因纠纷不断最终于 2017 年“夭折”。自 2021 年后，美国积极推动出台利好政策、加快项目审批进程，一批规划项目正在加快推进。如曾一度被推迟进程的 800MW 马萨诸塞州马沙文雅岛海上风电项目已于 2021 年 3 月通过环评审批。目前，美国除了已经投运的两个海上风电场，还有总规模超过 10GW 的 10 余个大型海上风电项目处于前期规划阶段。美国能源部 2021 年推出了能源发展战略，提出了推动美国成为全球海上风电领导者的可行性策略，将在未来加大海上风电投入，预计到 2030 年海上风电装机容量将提升到 30GW。

近年来，亚洲的主要国家及地区也加快了海上风电建设，积极探索清洁能源的可持续发展方向。日本和韩国分别于 2003 年和 2010 年建设了第一个海上风电示范项目。韩国 2008 年提出绿色发展战略以期推动其海上风电发展，2017 年进一步提出了“可再生能源 3020”目标，计划到 2040 年韩国海上风电的装机容量达到 12GW。截至 2020 年底，日本、韩国、越南、中国台湾都有一定数量的海上风电场并网发电，并有多座风电场在建或规划中。此外，南美的巴西和哥伦比亚也先后计划开展海上风电场的建设。

全球风能理事会（Global Wind Energy Council, GWEC）《全球海上风能报告 2021》指出，基于各国与地区政府对去碳化和能源转型的重视、海上风电度电成本的急剧下降、漂浮式风电的商业化和工业化的持续进展以及海上风电在促进跨行业合作方面发挥的独特作用，全球海上风电的发展前景愈发被看好并将保持持续快速增长，预计到 2030 年全球海上风电累计装机容量将达 270GW 以上。其中，亚洲和欧洲将继续保持高速增长，美国将于 2023 年后加快海上风电场建设，从 2025 年起市场将变得更加多样化，届时南美洲作为新兴市场也有可能实现较快增长。

### 1.2.2 中国海上风电发展概况

在世界海上风电开始进入大规模开发阶段的背景下，中国海上风电场建设也拉开了序幕。2007 年，中国第一台金风 1.5MW 海上风电机组样机在渤海湾建成发电。2010 年，江苏龙源如东 32MW 海上潮间带试验风电场建成，共安装了金风科技、上海电气、远景、明阳智能等 8 家海上风电机组制造商的单机容量为 1.5~3MW 的 16 台试验样机。同年，中国第一个大型海上风电场项目上海东海大桥 102MW 海上风电场建成，共计安装 34 台 3MW 风电机组，于 2010 年 6 月全部并网发电。2011 年，东海大桥海上风电二期项目单机容量 5MW 的样机并网运行，为当时中国并网运行的最大单机容量海上风电机组。上海东海大桥海上风电场的建成标志着中国大规模开发建设海上风电场拉开了序幕。

国内已建、在建和规划中的海上风电项目主要分布在江苏、福建、广东、浙江、河北、辽宁、上海、天津等沿海省（直辖市）。2012 年，150MW 的江苏龙源如东海上潮间带示范风