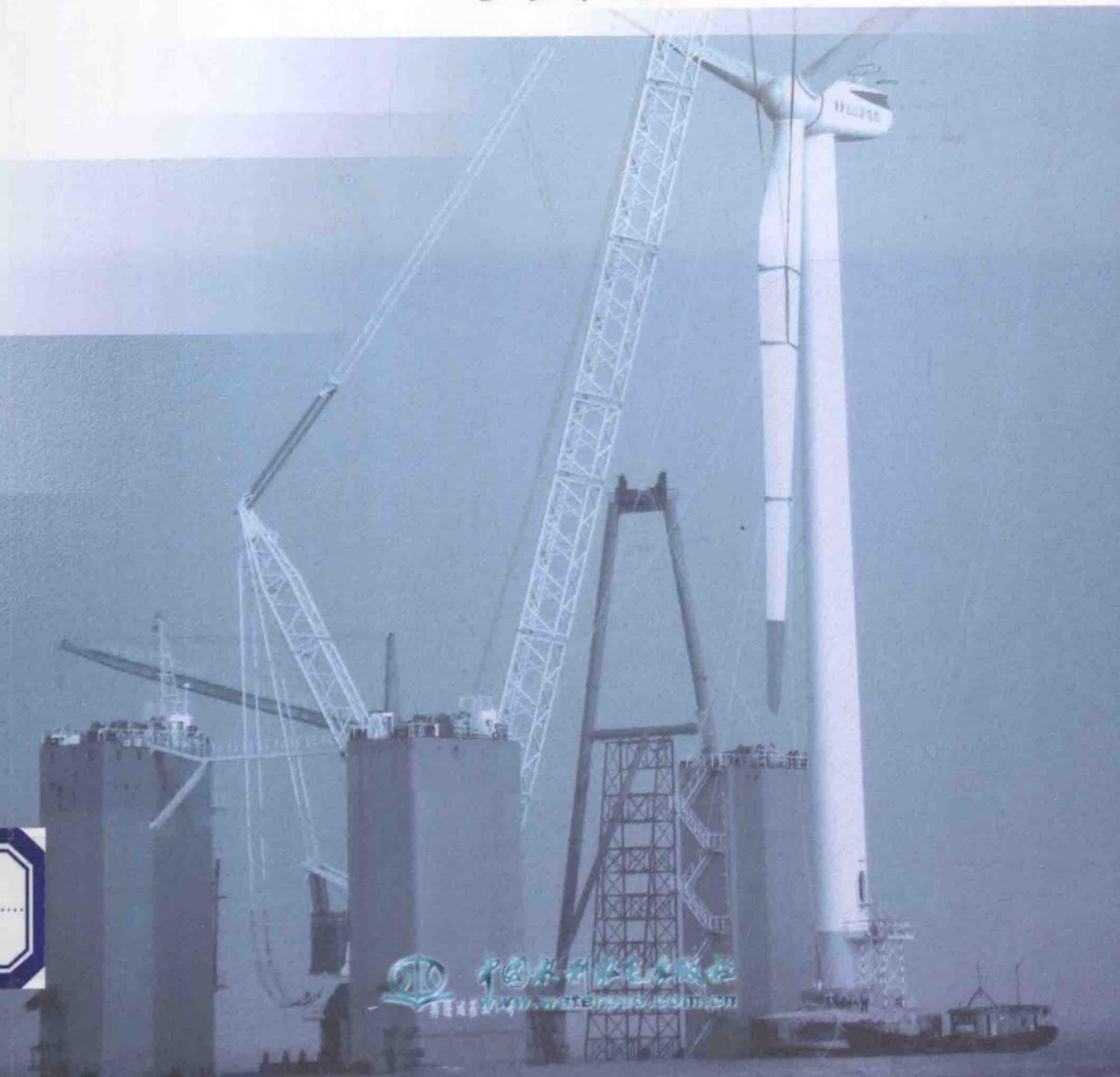


张金接 符平 凌永玉 编著

海上风电场建设技术与实践



中国水利水电出版社
CHINA WATER & POWER PRESS

海上风电场建设技术与实践

张金接 符平 凌永玉 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

风能是清洁的可再生能源,海上风力发电具有环境污染小、风况优于陆地、风湍流强度小、风切变小、各种干扰限制少及不占土地等优点。我国沿岸 0~20m 等深线的近海风电装机容量为 1 亿~2 亿 kW,风电的大规模开发潜力在海上。本书针对海上风机结构设计及施工中的技术难题,在海上测风塔设计及建设、近海风资源评估、海上风机基础结构、海上环境荷载的影响、近海风机桩基检测与评价、海上风机建设运输与安装、潮间带风机基础结构型式等方面进行了详细的介绍。本书可以为从事海上风电场建设和类似工程的相关人员提供参考和借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

海上风电场建设技术与实践 / 张金接, 符平, 凌永玉编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5170-1514-7

I. ①海… II. ①张… ②符… ③凌… III. ①风力发电—发电厂—电力工程—海上工程 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第307117号

审图号: GS (2013) 2320 号

书 名	海上风电场建设技术与实践
作 者	张金接 符平 凌永玉 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	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 19.25 印张 494 千字 14 插页
版 次	2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	86.00 元

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

前言

风能是清洁的可再生能源，与传统能源相比，风力发电不依赖矿物能源，没有燃料价格风险，发电成本稳定，没有碳排放等环境问题。可利用的风能在全世界范围内分布广泛，截至 2012 年底，全球风电装机容量达到 2.82 亿 kW，风力发电在节能减排、应对气候变化等方面越来越重要，逐渐成为许多国家可持续发展战略的重要组成部分，发展迅速。

我国幅员辽阔，风能资源丰富。根据第三次风能资源普查结果，陆上技术可开发量为 6 亿~10 亿 kW，可开发的风能潜力巨大。我国政府将风力发电作为改善能源结构、应对气候变化和能源安全问题的主要替代能源技术之一，给予有力的扶持，确定了 2020 年风电装机容量达到 3000 万 kW（2011 年已经提前实现）的目标，制定了风电设备国产化相关政策，并辅以“风电特许权招标”等措施，推动技术创新、市场培育和产业化发展。到 2012 年底，中国累计风电装机容量达到约 6300 万 kW，过去 10 年的年平均增长速度达到 46%；中国在风电装机容量的世界排名，于 2010 年跃居世界第 1 位，并连续 4 年成为世界最大的风电市场。风电已经在节约能源、缓解中国电力供应紧张的形势、降低长期发电成本、减少能源利用造成的大气污染和温室气体减排等方面作出贡献，开始有所作为。

与陆地相比，海上风力发电具有环境污染小、风况优于陆地、风湍流强度小、风切变小、各种干扰限制少及不占土地等优点，根据《全国海岸带和海涂资源综合调查报告》，中国大陆沿岸浅海 0~20m 等深线的海域面积为 15.7 万 km²，近海风电装机容量为 1 亿~2 亿 kW，因此风电的大规模开发潜力在海上，特别是水深小于 15m 的浅海，海上风力发电更是今后几十年我国风电发展的方向。

欧美发达国家从上世纪 90 年代开始发展海上风电，大量海上风电场的建成投运提供了在建造、安装、成本和能源生产等方面有价值的信息和经验，直接推动了近海海上风电技术的发展。在海上风机基础的总体设计理论与方法、海上风机的运行和维护等方面都形成了比较完善的系统，具备了在近海不同地质条件、不同气象条件下进行海上风电场建设的技术和能力。海上风电场的建设虽然在 2008 年遭受金融危机打击，但随着全球化石能源的枯竭和

对碳排放的限制，欧洲海上风电仍加速发展，目前正进入规模化发展阶段。

我国海上风电建设尚处于探索阶段，大功率海上风机制造、海上测风、近海风资源评估、海上风电场的设计理论和方法、海上风电场的建设与运行等方面，在2006年刚刚起步，许多关键技术问题仍未得到很好的解决。截至2012年底，也只建成上海东海大桥海上风电场和江苏近海少量的试验风机，装机容量约34万kW。我国海上风电开发利用起步较晚，且与国外海上风电开发利用存在较大差异，主要体现在以下两方面。

首先，我国海床条件特殊，东部沿海的海底多是淤泥（深度不小于10m），大大增加了基础结构成本和施工安装难度，且不能照搬欧洲支撑腿海上安装船的相关技术。

其次，我国东南部沿海每年均会出现多次台风，海上风况复杂，风机机组及整体支撑结构均需考虑台风的影响，大大增加了海上风电场的建设难度和成本。

基于以上情况和我国海上风电开发利用现状，中国水利水电科学研究院在国家科技部、水利部、长江三峡集团公司等有关部门和单位的支持下，结合国家“十一五”支撑科技计划“近海风电场选址及风电机组运行、维护技术开发”课题的研究，对海上风电建设的一些关键技术进行了探讨，并在江苏响水县近海海域参与建设了2座海上测风塔和1座海上风机。本书总结了这些研究成果和施工经验，希望能为海上风电开发的技术人员提供参考和借鉴。

为印刷方便，本书中部分彩色图片（图名带*号者）在正文中采用单色印刷，而在正文后附上了四色印刷图片。

本书由张金接、符平统稿，赵卫全、杨锋、邢占清、王春、莫为泽、黄立维、周建华、冯宾春等参与了相应的研究工作，并编写了部分章节。

囿于作者的学识和水平，书中不当或错误之处，敬读同业人员和专家不吝批评指正。

作者

2013年5月

于北京

目 录

前言

第1篇 海上测风

第1章 海上测风选址	3
1.1 海上测风要求	3
1.2 海上风资源评估规划	3
1.3 海上测风塔选址	4
第2章 海域工程水文地质	7
2.1 近海海域地理气候环境	7
2.1.1 水下地形	8
2.1.2 气候环境	9
2.2 海况条件	10
2.3 测风塔位置的海况条件	18
2.4 海域工程地质	22
2.4.1 地质演化	22
2.4.2 海岸演变	23
2.4.3 区域地质	23
2.4.4 工程地质	24
2.4.5 地质条件评价	25
2.5 对施工的影响分析	26
第3章 海上测风塔基础及塔架设计	28
3.1 设计荷载和工况	28
3.2 测风塔型式选择	29
3.2.1 可移动式测风塔	30
3.2.2 固定式测风塔	31
3.2.3 方案比选	33
3.3 塔架结构设计	33
3.3.1 海上测风塔的塔架结构特点	33
3.3.2 塔架结构的选型与构造	34
3.3.3 塔架的设计计算	36
3.4 测风塔基础结构设计	39
3.4.1 基础型式的选择	39

3.4.2 四桩基础的设计	40
3.5 塔架防腐设计	43
3.6 助航标志设计	43
第4章 海上测风塔施工	45
4.1 前期准备	45
4.2 基础施工	45
4.3 钢管桩加固围圈	49
4.4 斜支撑焊接	50
4.5 钢承台吊装	50
4.6 桩与承台的连接灌浆	51
4.7 塔架施工	51
第5章 运行与维护	53
5.1 可进入性分析	53
5.2 运行维护内容	55
5.3 运行维护	56
5.3.1 定期维护	56
5.3.2 故障维护	57
5.4 数据管理	57
5.5 设计复核	58
第6章 近海风资源评估	60
6.1 近海风资源评估方法	60
6.1.1 评估方法及内容	60
6.1.2 测风数据基本要求	61
6.1.3 测风数据处理	61
6.1.4 风能资源评估主要参数及依据	63
6.1.5 风电场开发可行性评估	64
6.2 测风塔信息	64
6.3 数据验证	65
6.4 数据统计分析	68

第2篇 海上风电场建设

第7章 近海风电场选址与风机选型	81
7.1 近海风电场选址	81
7.1.1 近海风电场的宏观选址	81
7.1.2 近海风电场的微观选址	82
7.2 近海风机选型	83
7.2.1 近海风机的现状	83

7.2.2 近海风机选型的影响因素	83
第8章 近海风电场基础设计	85
8.1 概述	85
8.2 风机基础结构型式	85
8.2.1 海上建筑物基础型式	86
8.2.2 桩基结构型式	90
8.2.3 桩型选择	94
8.3 近海风机基础结构设计	95
8.3.1 地质条件	96
8.3.2 气象与水位条件	97
8.3.3 设计荷载及工况	98
8.3.4 基础结构设计	99
8.3.5 代表机型相适应的风机基础设计方案比较	109
8.4 循环荷载作用下风机基础应力—变形动力分析	111
第9章 基础—塔架结构的动力响应	115
9.1 模型建立与模态分析	115
9.1.1 水平抗力系数的比例系数 m	115
9.1.2 模型建立	116
9.1.3 模态分析	117
9.2 现场监测	118
9.2.1 风速监测	118
9.2.2 波浪与流速监测	119
9.2.3 风机振动监测	120
9.3 各种动荷载的时程曲线	122
9.3.1 风荷载	122
9.3.2 波浪荷载	125
9.3.3 地震荷载	127
9.4 单独荷载下的结构体系响应分析	129
9.4.1 风荷载作用下的动力响应	129
9.4.2 波浪荷载作用下的动力响应	130
9.5 风与波浪联合作用下的结构响应分析	131
9.5.1 风与波浪荷载工况选择	131
9.5.2 结构响应分析	131
9.5.3 对比分析	134
9.6 风与波浪及地震联合作用下的响应分析	135
9.6.1 风与波浪及地震荷载组合工况	135
9.6.2 结构动力响应分析	135

第 10 章 近海风机桩基础施工技术	138
10.1 液压锤击沉桩	138
10.1.1 桩锤的选择	138
10.1.2 液压打桩锤的沉桩工艺	139
10.2 液压振动锤联动沉桩	141
10.2.1 振动沉桩理论计算	141
10.2.2 液压振动锤沉桩工艺	142
10.3 钻孔灌注成桩	144
10.3.1 工艺流程	144
10.3.2 关键技术及工艺	144
10.3.3 施工中容易出现的问题及解决方法	146
第 11 章 国内近海风机运输安装技术	148
11.1 海上风机运输	148
11.1.1 运输要求	148
11.1.2 陆上运输	149
11.1.3 海上运输	149
11.2 海上风机安装	154
11.2.1 海上风机整体吊装	154
11.2.2 海上风机分体安装	155
11.3 大吨位起重船用于风机安装	157
11.3.1 国内外海上起重船现状	157
11.3.2 国内起重船安装风机方案与船舶改装分析	159
11.3.3 起重船安装的关键技术	161
11.4 海上浮坞用于风机安装	162
11.4.1 国内主要浮坞性能参数及吊装风机流程	162
11.4.2 浅海浮坞坐底作业影响与浮坞起浮分析	163
11.4.3 浮坞安装海上风机实例	165
11.5 海上风电场运行维护	165
11.5.1 海上可进入性分析	167
11.5.2 运行维护策略	169
第 12 章 海上风机建设实例	170
12.1 工程概况	170
12.1.1 地质条件	170
12.1.2 风机及基础结构	171
12.1.3 荷载参数及荷载组合	172
12.2 基础应力变形分析	173
12.3 桩基抗震性能分析	175

12.4 现场施工	181
12.4.1 施工布置	181
12.4.2 桩基施工	181
12.4.3 桩基高应变检测	183
12.4.4 承台浇筑	184
12.4.5 风机安装	184
12.4.6 海底电缆施工	186
 第3篇 海上风电场开发专项技术	
第13章 近海风资源评估	189
13.1 国内外风资源评估现状	189
13.1.1 国外风资源评估现状	189
13.1.2 国内风资源评估现状	191
13.2 海陆风资料对比分析	192
13.2.1 测风塔信息	192
13.2.2 海陆风资源风速对比	192
13.2.3 风向对比分析	205
13.2.4 相关性分析	208
13.2.5 差异分析	214
13.3 近海风资源特点	214
13.3.1 塔影影响分析	214
13.3.2 风切变指数	217
13.3.3 海上测风塔代表距离	218
13.3.4 海面上测风仪处风速与潮位的对应关系	221
第14章 可移动式测风塔	224
14.1 可移动式测风塔设计	224
14.2 设计计算	228
14.2.1 计算条件	228
14.2.2 结构的抗剪与抗弯验算	228
14.2.3 不同工况下的最大位移计算	231
14.2.4 塔架空间结构分析	231
14.2.5 抗倾覆计算	234
14.2.6 抗震计算	234
14.2.7 计算结果分析	235
第15章 海上风机桩基础与结构的连接技术	236
15.1 海上风机桩基础与结构的连接型式	236
15.1.1 海上风机桩基础与导管架连接型式	236

15.1.2 灌浆连接型式	238
15.2 灌浆材料	239
15.2.1 材料性能影响分析	240
15.2.2 灌浆材料要求	240
15.2.3 灌浆材料比选	240
15.3 连接段结构设计	242
15.3.1 模型力学试验	242
15.3.2 连接段环形空间结构优化	247
15.4 海上风机桩基与导管架灌浆连接方案设计	253
第 16 章 海上桩基承载力检测分析与评价	259
16.1 概述	259
16.2 打桩引起的最大超静孔隙水压力及其消散过程	259
16.2.1 打桩引起的最大超静孔隙水压力	259
16.2.2 超静孔隙水压力的消散过程分析	261
16.2.3 桩基极限承载力增量与超静孔隙水压力的关系	261
16.3 承载力高应变检测与超静孔隙水压力现场试验	262
16.3.1 试验概况	262
16.3.2 试验桩桩基承载力的动静对比分析	263
16.3.3 桩基承载力与超静孔隙水压力的关系	267
16.4 考虑超静孔隙水压力消散的桩基承载力	270
16.4.1 有限元法计算超静孔隙水压力的理论	270
16.4.2 考虑超静孔隙水压力消散的桩基承载力计算值	272
16.5 海上桩基单桩极限承载力计算实例	275
16.5.1 海上测风塔桩基承载力计算	275
16.5.2 近海试验风机桩基承载力计算	276
第 17 章 潮间带风机桩基型式与交通运输	278
17.1 工程地质条件	278
17.2 潮间带风机基础施工及交通运输	279
17.3 潮间带可用基础型式	281
17.3.1 分区	281
17.3.2 基础选型	283
17.3.3 基础设计	283
17.4 交通运输方案对比分析	290
17.4.1 交通运输方案	290
17.4.2 不同基础型式运输方案的对比分析	290
17.4.3 基础的适用性及交通运输	294
参考文献	295

第 1 篇 海 上 测 风

第1章 海上测风选址

1.1 海上测风要求

风是风力发电的源动力,风况资料是风力发电场设计的第一要素。海上风力资源评估所需的基本资料,即海上测风的基本要求包括以下三方面。

(1) 实测资料。在候选风电场有代表性的位置上,安装若干测风仪,以查明风电场风况的时空分布情况,其数量应根据风电场大小和地形复杂程度来确定。测风仪器高度一般布置在10m、25m、45m、60m、70m、85m、100m位置处,实测1年以上,就具有了进行可行性研究所需的风况资料。

(2) 相关分析。风速资料与其他气象资料一样,具有随机性,为避免风能计算时出现较大的偏差,风电场实测资料应与附近气象台站同期实测资料进行相关分析以修正并延长风电场的测风资料,使短期资料具有代表性。风具有方向性,在进行风速相关分析时,应分不同方向进行风速相关。

(3) 连续性要求。设计规程对风况资料要求高,应收集有关气象站风速风向30年系列资料,实测的风速风向资料应至少连续1年。对于风资源丰富地区,特别是近海地区需要更全面的资源评估。

1.2 海上风资源评估规划

1. 主要特征参数

为获得拟建海域的风资源和风能分布资料,应进行海上测风工作。由于风力分布具有时空性和随机性,应做好海上测风的规划工作,尽早进行海上测风工作,通过建设测风塔对海上风电场的风资源进行实地测量、分析,对风电场的风资源进行详细评估。海上风资源的主要特征参数有:①年平均风速、风功率密度、有效风速小时数;②风向、风能分布;③风速年内变化;④代表日风速、风功率密度;⑤风速频率分布。

2. 主要工作

海上测风规划的主要工作主要包括测风塔选址、测风塔设计施工、测风设备采购及安装、数据采集及运行维护和风资源评估等内容。

(1) 选址。收集海上风电场周围地形图、地貌条件、港口、航线、海域规划及场址范围,确定风电场测风塔位置、数量、高度以及测风仪器设备配置。为获取相关区域的地质资料,应在场址处进行海上勘探作业,分析该海域的地质情况、岩土分布和相应物理力学性质并评价其对基础的影响等。



(2) 测风塔设计和施工。包括测风塔基础型式方案设计、塔架型式方案设计和测风塔施工等,通过对测风仪有关技术标准、技术性能、可靠性等分析,确定风电场测风仪设备清单,安装测风仪器。

(3) 数据采集及维护。定期采集测风数据,及时分析数据的合理性和完整性,出现问题及时解决;对测风塔及设备进行定期维护,保持测风塔结构和设备的完好性和可靠性。

(4) 风资源评估。根据海上测风塔所收集的风资料,通过与周边气象站资料进行逐时风速相关性综合分析,对海上测风塔资料进行合理性分析,作为海上风电场风资源分析的基本资料;绘制相关海域的风速及风功率密度等值线,为规划选址提供依据。根据相关海域的波浪、潮流等资料,分析其对海上风资源的影响。

1.3 海上测风塔选址

对海上风资源评估的正确与否对衡量风电场开发的商业价值非常重要,常常是一个风电项目投资成败的关键,因此在进行风电场建设之前必须对风电场风资源进行客观、可靠、科学的评估,对风电场建成后年发电量进行较为准确的预测并对风电场经济性进行综合评价。已有的研究分析证明,工程投资的经济性对平均风速非常敏感,现场风速测量的准确与否及代表性如何直接影响对风电场所在地风资源的评价,因此在经济和技术条件许可的情况下应尽量收集测风时间长、可靠性高、地理范围广的风资源数据。

1. 海上测风需考虑的因素

海上风的测量与陆上风的测量在原理和方法上有很大的相似性,但海上环境与陆上在地貌、粗糙度以及海面热效应方面存在较大差别,海上测风有其自身的特点,测量时需要考虑以下因素。

(1) 海上测风塔的建造成本远远高于陆上,建设海上测风塔实地测量费用非常高昂,因此要求在能够满足海上风电场风资源评估基本要求的情况下尽可能减少海上测风塔建设数量。

(2) 海面比较平坦,海上风不受地形的影响,风的分布情况随空间变化较小,可以适当增加海上风资源的代表距离。

(3) 海上环境恶劣,仪器长期处于潮湿、盐雾的环境下,且海上出现极端气候条件(如台风等)的几率大,维护困难,要求所有传感器和设备具备高可靠性,海上测试仪器必须专门设计。

(4) 海上数据采集比陆上更加困难,要求所有测量参数能够长距离无线传输。

(5) 海上测风塔多为自立式塔架,断面尺寸通常较大,需要消除塔影效应对测量结果的影响。

(6) 海平面受潮位、波浪的影响,应分析不同高度处的测风数据与潮位、波浪的关系。

2. 海上风资源评估需考虑的因素

海上风资源评估在形式上与陆上风资源评估类似,在地貌、粗糙度和热效应方面有较大差别并且存在潮汐、波浪和水深分布等因素,因此海上风资源评估比陆上复杂,除了需



要考虑陆上风电场风资源评估因素外,还需要考虑以下因素。

(1) 尾迹影响。对于大型海上风电场,尾迹损失可能比陆上风电场大,主要原因是海风环境湍流度比较低,气流经过风机后空气的掺混强度更小,使得低速运动空气重新获得能量的速度更慢,尾迹影响距离更远。

(2) 潮位变化。涨潮和落潮会改变风机在边界层中的位置,在 12h 海潮变化周期里,会引起平均风速的变化,也会影响风轮自身的切变,从而影响风机的功率输出。

(3) 海上风的变化规律。海上温度升高和降低比陆上所需时间长,将会出现由温差引起的海岸区域的局部风。白天随着陆上温度升高,暖空气上升并由海上冷空气补充,形成向岸风。在夜晚,情况正好相反,产生离岸风。海陆风的强度和方向由当地温度梯度决定。

(4) 水深分布对风速分布的影响。已有研究表明,水深的不同对海上风速分布有一定的影响,如需准确评估海上风电场的风资源情况,需要对风电场所在处的水深分布进行测量。

(5) 气候对维护影响。受海上波浪、气象等恶劣环境影响,海上交通不便,海上机组故障后的停机时间可能会比陆上长。如果风机需要停机维修,必须等到有合适的天气条件才能进行,从而影响风电机组的实际可利用率。这些因素可能是决定海上风力发电实际成本的最重要因素,在进行海上风资源评估时,需要对维护可进入性进行分析。

3. 江苏响水县近海测风塔选址

响水县近海测风塔选址考虑的因素有以下几点。

(1) 海上风电场规划与以后风电场开发的连续性,缩短海上风电场建设的前期准备时间和避免重复测量带来的人力和物力的浪费。

(2) 目前国内外还没有海上测风塔分布间距的研究资料可供参考,考虑海上风资源分布特点,初步分析认为:海上测风塔测风速数据可以较好地代表其周围 20~30km 海域的风资源情况。

(3) 响水县边界海域范围内布置 2 座测风塔既可充分反映响水近海海域的风资源情况,又可掌握响水边界海域的风资源情况,为将来大面积的风电场规划提供基础条件。

(4) 响水县海岸滩涂上已设立了 4 座测风塔,为整体掌握响水海岸滩涂的风资源分布情况,比较海岸滩涂测风塔与海上测风塔资料的关系,弄清响水近海风资源的衰减规律,在滩涂上再建立 1 座测风塔。

基于上述原因,结合响水县沿海的海岸线走势和水深条件,经过分析确定在江苏近海海域建立 2 座测风塔,在滩涂上建立 1 座测风塔,具体分布见图 1-1、表 1-1。

表 1-1 江苏响水县近海测风塔位置表

名 称	位 置	
	东 经	北 纬
滩涂测风塔	120°03′	34°24′
海上测风塔 1	119°54′	34°36′
海上测风塔 2	120°10′	34°28′

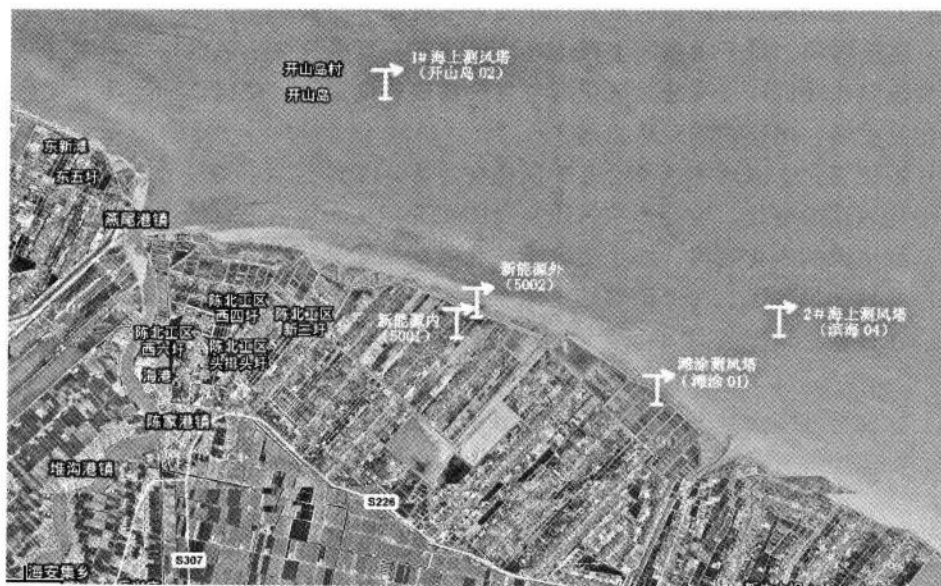


图 1-1 江苏响水县近海测风塔布置示意图