



“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

# 海上测风塔 基础设计

HAISHANG CEFENGTA  
JICHU SHEJI

王伟 刘蔚 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” “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

# 海上测风塔 基础设计

王伟 刘蔚 编著



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，主要以海上测风塔地基基础与基础结构设计为主题，系统阐述了海上测风塔基础设计中涉及的相关分析原理、设计体系和计算方法，包括海上测风塔与工程实施、海洋工程环境、波浪理论与分析、海上测风塔基础设计体系、桩基设计与计算、基础结构分析与计算、防冲刷与防腐蚀设计等，最后给出了测风塔桩基混凝土承台和测风塔桩基钢平台两种典型基础类型的海上测风塔基础设计实例。

本书可供海上风电领域以及岩土工程、结构工程和近海工程等相关领域的工程技术人员、科研人员使用，也可作为高等院校、科研院所相关专业本科高年级学生、研究生的参考书。

### 图书在版编目 (C I P) 数据

海上测风塔基础设计 / 王伟, 刘蔚编著. -- 北京 :  
中国水利水电出版社, 2016. 12  
(风力发电工程技术丛书)  
ISBN 978-7-5170-4923-4

I. ①海… II. ①王… ②刘… III. ①海上测量—风力—海洋观测塔—建筑设计 IV. ①P715.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第294124号

书 名	风力发电工程技术丛书 <b>海上测风塔基础设计</b>
作 者	HAISHANG CEFENGTA JICHU SHEJI 王伟 刘蔚 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 (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	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 19.25印张 456千字
版 次	2016年12月第1版 2016年12月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	<b>80.00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 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  
中国三峡新能源有限公司

**丛书总策划** 李 莉

**编委会办公室**

主	任	胡昌支	陈东明				
副	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			



# 前 言

冬季冰封大地的时候，肆虐的雾霾再一次持续笼罩着九州大地，人们的心肺被动地与其亲密接触，对清洁能源的期盼望眼欲穿。我国也提出了积极发展可再生清洁能源，降低煤炭消费比重，推动能源结构持续优化的能源发展战略。风能是一种重要的可再生能源，我国具有丰富的海上风能资源，国内海上风电规划初步确定了43GW的海上风能资源开发潜力，目前已有38个项目、共16.5GW的项目在开展各项前期工作。国家能源局发布的《2020年我国电力发展规划》中指出，2015年风电装机容量目标为1亿kW，2020年为2亿kW，可以预期“十三五”将是我国海上风电建设飞速发展的阶段。

海上测风塔工程是海上风电场开发建设的先行，对海上风电场的规划、评估和后续建设具有重要的价值和指导意义。但纵观国内外在海上测风塔基础设计方面的相关标准和专著仍为空白。海上测风塔基础设计与海上风力发电机组基础设计既有相同点，又有很大的差异性，为了确保海上测风塔基础工程的安全性、技术性、先进性和经济性，针对海上测风塔基础设计进行系统论述实为必要。

海上测风塔基础工程涉及岩土工程、结构工程和海洋工程等多个学科，考虑到读者不同的专业技术背景，本着以技术应用为主的大原则，本书编纂中力求阐明基础设计中的基本概念、完整的设计项目和内容、实施的技术方法和原理，尽量减少繁琐的理论推导，也省却了对各分析方法渊源的相应介绍。

全书共包含10章。第1章简要介绍海上测风塔测风与风能资源评估；第2章介绍测风塔基础类型和测风塔基础工程实施概况；第3章和第4章分别介

绍测风塔所处的海洋工程环境和波浪理论与分析；第5章介绍测风塔基础设计体系；第6章和第7章分别介绍测风塔桩基设计和基础结构与计算；第8章介绍基础防冲刷与防腐蚀设计；最后两章分别给出桩基混凝土承台和桩基钢平台两类典型的海上测风塔基础设计实例。

同济大学的杨敏教授对全书进行了审阅并提出了宝贵的指导意见；中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司的刘玮和董德兰两位教授级高工审阅了测风与风能资源评估相关章节内容；同济大学博士生罗如平参与了本书一部分内容的整理工作，在此一并向他们表示衷心的感谢。

随着新材料、新工艺和新基础形式的不断涌现，海上测风塔基础设计领域的相关技术也在逐步发展，部分相关技术尚处于探索阶段，加上作者水平有限，本书虽经多次修改和一再校阅，不妥和疏漏之处在所难免，祈请读者批评指正。

关于海上测风塔基础设计领域相关问题的讨论和交流可通过以下电子邮箱联系：waye\_wang@163.com 或 wayne\_wang@tongji.edu.cn。

**编著者**

2016年6月于同济苑



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 海上风电场与海上测风塔 .....	1
1.2 海风特性与测风要求 .....	7
1.3 测风数据处理与风能资源评估 .....	18
参考文献 .....	27
<b>第 2 章 海上测风塔与工程实施</b> .....	29
2.1 海上测风塔与结构类型 .....	29
2.2 测风仪器与布置 .....	37
2.3 海上测风塔工程实施 .....	39
参考文献 .....	46
<b>第 3 章 海洋工程环境</b> .....	48
3.1 海水 .....	48
3.2 潮汐 .....	51
3.3 海流 .....	56
3.4 海冰 .....	59
3.5 波浪 .....	64
参考文献 .....	69
<b>第 4 章 波浪理论与分析</b> .....	71
4.1 线性波 (Airy 波) .....	71
4.2 斯托克斯波 (Stokes 波) .....	76
4.3 椭圆余弦波 (Cnoidal 波) .....	81
4.4 孤立波 (Solitary 波) .....	84
4.5 流函数方法 (Stream Function) .....	85



4.6	波浪理论的适用范围 .....	91
	参考文献 .....	95
<b>第5章</b>	<b>海上测风塔基础设计体系 .....</b>	<b>97</b>
5.1	极限状态分析 .....	97
5.2	设计荷载 .....	106
5.3	设计类项与荷载组合 .....	126
	参考文献 .....	135
<b>第6章</b>	<b>桩基设计与计算 .....</b>	<b>137</b>
6.1	测风塔桩基设计原则 .....	137
6.2	桩基承载力计算 .....	141
6.3	桩基竖向受力与沉降分析 .....	155
6.4	桩基水平受力与变形分析 .....	165
	参考文献 .....	176
<b>第7章</b>	<b>基础结构分析与计算 .....</b>	<b>178</b>
7.1	结构布置与计算规定 .....	178
7.2	有限元分析与计算 .....	183
7.3	基础结构与节点验算 .....	193
7.4	基础结构模态分析 .....	218
	参考文献 .....	223
<b>第8章</b>	<b>防冲刷与防腐蚀设计 .....</b>	<b>225</b>
8.1	基础冲刷机理 .....	225
8.2	冲坑计算与防冲刷措施 .....	230
8.3	基础结构腐蚀与防护机理 .....	238
8.4	基础结构防腐蚀设计 .....	247
	参考文献 .....	252
<b>第9章</b>	<b>测风塔桩基混凝土承台基础设计实例 .....</b>	<b>254</b>
9.1	工程概况 .....	254
9.2	测风塔基础设计 .....	259
9.3	基础设计计算 .....	263
<b>第10章</b>	<b>测风塔桩基钢平台基础设计实例 .....</b>	<b>272</b>
10.1	工程概况 .....	272
10.2	测风塔基础设计 .....	273
10.3	基础设计计算 .....	278

附录.....	291
附录 A 测风塔桩基混凝土承台基础设计图纸 .....	291
附录 B 测风塔桩基钢平台基础设计图纸 .....	294

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 海上风电场与海上测风塔

风能与太阳能、潮汐能、生物质能、核能和地热能等组成了新能源，是常规能源之外的能源形式，也称作非常规能源。对人类而言风能是一种清洁能源，它的利用方式有很多种，以风电为主。风力发电是借助一定的工具、媒介或设备将风能转化为机械能，而后再将机械能转化为电能的过程，这些设备与工具统称为风力发电机组。由风力发电机组、塔架、塔架基础、输变电设备、附属建（构）筑物等组成了风电场。风电场的规划、设计和建设离不开测风塔，二者相互联系密不可分。

本节首先介绍风力发电特别是海上风力发电的特点和总体情况，然后介绍利用海上风能发电的海上风电场，最后介绍海上测风塔和其主要作用。

### 1.1.1 海上风力发电概述及特点

#### 1. 我国海上风能状况

从 20 世纪 70 年代至 2006 年期间，我国先后组织开展了三次全国风能资源普查。在此基础上，于 2008 年由中国气象局牵头正式启动了“全国风能详查与评价”项目。评价结果显示，我国风能资源丰富，陆上 50m 高度层年平均风功率密度大于等于  $300\text{W}/\text{m}^2$  的风能资源理论储量约 73 亿 kW。具体而言，我国陆上 50m、70m、100m 高度层年平均风功率密度大于等于  $300\text{W}/\text{m}^2$  的风能资源技术开发量分别为 20 亿 kW、26 亿 kW 和 34 亿 kW<sup>[1]</sup>。

详查和评价结果进一步表明，我国山东省、江苏省和福建省等地沿海分布有风能资源丰富的广阔区域，适宜规划建设大型风电基地。台湾海峡风能资源最丰富，其次是广东省东部、浙江省近海和渤海湾中北部，相对而言近海风能资源较少的区域分布在北部湾、海南岛西北、南部和东南的近海海域。若从总体上了解我国海上风能概况，一方面应关注我国海上风能的总储量与总开发量，另一方面还应考量我国毗邻海区风能的时空分布和变化。

我国毗邻海域的多年平均风速整体上显示为东海和南海平均风速大于黄海和渤海平均风速。台湾海峡由于具有狭管效应及海陆分布的局部特点，在中国毗邻海域中为大风速海区，平均风速在  $10\text{m}/\text{s}$  左右。在黑潮主轴海域、吕宋海峡和对马海峡海域风速也较大，平均风速在  $8\text{m}/\text{s}$  以上。黄海和渤海沿岸的平均风速约为  $6\text{m}/\text{s}$ ，而东海和南海沿岸的多年平均风速在  $7.5\text{m}/\text{s}$  以上。渤海北部辽东湾海域的平均风速在  $6.7\text{m}/\text{s}$  左右，为渤海的大风速海域。长江口沿岸的舟山海域，风速平均值较外海更大，约为  $8\text{m}/\text{s}$ <sup>[2]</sup>。

我国近海浅水区域海面风能密度具有明显的季节变化，12 月我国近海平均风速达到



最大,其中水深小于 60m 的海域平均风能密度为  $434\text{W}/\text{m}^2$ ,11 月和翌年 1 月各浅水区域平均风能密度相当。我国近海浅水区域冬季(11 月、12 月、翌年 1 月)风能密度较大,主要由于冬季在欧亚大陆高压的作用下,我国沿海浅水区域的局地风速由西伯利亚高压和阿留申低压作用而形成的强劲冬季风而决定。夏季(5 月、6 月、7 月)风能密度较小,5 月风能密度在我国近海浅水各区域达到最小值,其中水深小于 30m 的海域平均风能密度为  $101\text{W}/\text{m}^2$ ,为各区域各月份最小值,但仍大于  $100\text{W}/\text{m}^2$  [2]。

### 2. 海上风力发电概述

根据我国《可再生能源发展“十二五”规划》,到 2015 年,累计并网风电装机容量达到 1 亿 kW,年发电量超过 1900 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,其中海上风电装机容量达到 500 万 kW。截至 2015 年年底,已建成投产海上风电场约 66 万 kW,“十二五”期间海上风电实际完成量约占规划目标的 15%。2014 年 12 月,国家能源局出台了《全国海上风电开发建设方案(2014—2016 年)》,该方案包含 8 个沿海省(自治区、直辖市)44 个项目,总容量 1053 万 kW。目前已有 14 个项目核准,总装机容量约 291 万 kW,30 个项目正在开展前期工作,总装机容量约 762 万 kW。根据《国家应对气候变化规划(2014—2020 年)》,到 2020 年,我国累计并网风电装机容量达到 2 亿 kW,年发电量超过 3900 亿  $\text{kW}\cdot\text{h}$ ,其中海上风电装机容量达到 3000 万 kW。

海上风电相对于陆上风电而言优势非常明显,但当前阶段我国海上风电发展也面临着许多问题。首先,海上风电规划海域与其他部门的海域规划存在重叠冲突,导致风电场用海面积减小、选址变化、海缆路线变动、成本增加等情况时有发生。海上风电发展除应注意海洋局和地方规划部门对于海洋及近海区域发展规划的协调之外,还需注意与军事用海的协调 [3]。其次,海上风电设计技术尚未成熟、施工装备水平低、安装能力弱,无论是相关设计技术方面还是海上安装设备、风机制造技术等方面均处于起步阶段,且我国具有特殊的地质条件和建设工程特点,不宜直接照搬国外海上风电建设技术。再次,海上风电的建设维护成本高、不可控的影响因素多,相对于陆上风电开发而言风险性较大。国家发改委于 2014 年下发关于海上风电电价政策的文件,规定 2017 年以前,投运的近海海上风电项目上网电价为  $0.85\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,潮间带风电项目上网电价为  $0.75\text{元}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,这对于合理的评估海上风电开发项目的投资风险具有重要的指导意义。

### 3. 海上风力发电特点

随着陆上风电场开发经验的积累和大型风力发电机组生厂商技术的进步,风电行业的开发逐步由陆上过渡到海上。由于海上风电所特有的相对优势,进而得到了各国政府的大力支持和推进,全球范围内海上风电事业正在蓬勃发展。

相对于陆上风电而言,单从电量产出角度来看海上风力发电的优势非常明显,主要包括以下方面:

(1) 表面粗糙度小。国家标准《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中指出,近海海面和海岛、海岸、湖岸等地区为 A 类粗糙度,田野、乡村、丛林、丘陵等地区为 B 类粗糙度。由此可知海上的粗糙度远小于陆上,海上风切变小,风速沿竖向分布变化较小,可在较低的高度上获得等量的风速,或在同样的高度上获得更大的风速。这就使得海上风力发电机组的塔筒高度相对陆上而言要低一些,可节省其造价和安装费用。



(2) 湍流强度小。海上的昼夜温差和季度温差相对于陆上要小得多, 这便使得海上空气的湍流强度相对比较小。针对风力发电机组而言, 湍流为风力发电机组叶轮扫略面范围内风速分布和风向改变的量值表征, 湍流强度小使得风力发电机组受力变异性小, 对于风力发电机组的叶片、塔筒和其基础结构的疲劳寿命较为有利。

(3) 阴影效应小。风力发电机组阴影区的风能较小, 湍流较大, 风电建设时风力发电机组平均分布距离为 3~9 倍转轮直径。由于海面相对高的光滑性, 海面上风速切变也相应很低, 风速在垂直方向上变化并不是很大, 因此在海上可以建设大约为转轮直径 0.75 倍的较低风塔, 而陆上风塔的高度通常接近于转轮直径或更高一些, 这样海上风力发电机组平均分布间隔也比陆上风力发电机组要小一些<sup>[4]</sup>。

(4) 经济效益高。研究资料表明, 相对于陆上风场, 离岸 10km 的海上风速通常比沿岸陆上高 25%<sup>[5]</sup>。海上风速高, 且静风期短, 风力发电机组发电的利用小时数高。海上风电场更适合建设大型单机容量的机组, 目前主流为 5MW 机组, 因此海上风能的利用效率更高, 对降低单位千瓦的投资非常有利, 海上风电具有明显的经济优势。此外, 海上风电场位于我国沿海发达地区, 电量可以就近消纳, 而不需要额外的高电压输电线路投资。

(5) 对人居环境的影响相对较小。随着社会人口的增多、人类居住面积的改善和工业化的发展, 土地资源变得更为稀缺, 而海上风电建设不需要占用陆地面积, 可节省土地资源。对人类居住的陆上生态和自然环境的影响也不存在, 从而不会产生视线影响和噪声污染等问题。

客观整体上来看, 海上风电场的投资成本要远远高于陆上风电场的, 其维护费用也远远高于陆上风电场的。将风电场作为一个整体按照投资风险分析和评估后方能得出孰优孰劣的经济性评价。

#### 4. 海上风力发电的环境问题

尽管海上风电的建设避开了陆上环境和人类居住环境的影响, 但也会带来新的关于海洋环境、生态和海洋产业等方面的影响。

(1) 对通航的影响。海上风电场的规划选址中一般都尽可能避开已有航线, 但避开的距离大小各不相同。在正常的通航条件下, 航线附近存在风电场并不会对通航产生较大影响, 因为船舶的雷达系统和风力发电机组的报警装置将起到相应的预防作用。但在大雾等恶劣天气以及船舶失控状态下其碰撞的概率将会大幅提高。

(2) 对海洋生态的影响。海上风电对海洋生物的影响主要指其对鱼类和鸟类等海生物的影响。至于海上风电场是否会对该海域的鱼类产生影响, 例如是否会影响鱼群的数量、洄游、产卵、生长等, 目前的研究还缺乏足够的结论, 但一般倾向于对鱼类的生存和数量无关键性的影响<sup>[6]</sup>。但部分情况下产生的影响可能远大于人们的直观想象, 如我国珠海桂山海上风电场, 距离中华白海豚国家级自然保护区只有 2.5km, 目前由于海洋环评的问题而导致项目停滞。环评显示, 风力发电机组桩基施工产生的高频噪声会影响中华白海豚的听觉, 导致其觅食和社交活动受到干扰, 水质污染会通过食物链影响白海豚的健康, 还容易使其皮肤受感染<sup>[7]</sup>。此外, 风力发电产生的噪声和电磁场会干扰鸟类的飞行路线。

(3) 对原海床的影响。海上风电建设会改变风力发电机组基础结构附近的海流流态, 在基础结构前后位置产生尾涡和马蹄涡, 涡旋使得海床面产生冲刷, 部分海床颗粒会被带

走。当原始海床面存在一定坡度情况下,严重时会影响整个海底岸坡的滑动稳定性,从而导致海床面的大范围改变。

### 1.1.2 海上风电场

与陆地风电场相对应,处于海洋环境条件下,受到海风、波浪、潮汐、水流、海冰等综合影响下,由一批风力发电机组或风力发电机组群组成的电站称为海上风电场。海上风电场也指在沿海多年平均大潮高潮线以下海域开发建设的风电场,包括在相应开发海域内无居民海岛上开发建设的风电场。

根据2009年我国颁布的《海上风电场工程前期工作管理办法》,海上风电场工程前期工作管理包括海上风电场工程规划、预可行性研究和可行性研究阶段工作的行政组织管理和技术质量管理。海上风电场工程建设项目应坚持先规划、再前期、后建设的原则。

在介绍海上风电场类型之前首先需要明确海岸带的组成。海岸带是陆地与海洋相互作用最活跃的地带,它将陆地与海洋分开,又将陆地与海洋连接起来,对它的理解和划分有许多不同的观点。一般将其定义为特大风暴潮增水等使海水作用能抵达的陆地最高处至海底波浪作用能到达的近海海域之间的带状地带,由海岸、海滩和 underwater 岸坡等3部分组成,如图1-1所示<sup>[8]</sup>。

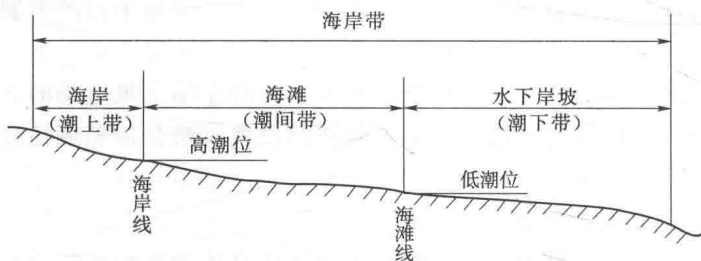


图1-1 海岸带示意图<sup>[8]</sup>

海岸又称潮上带,是指与海洋相邻接触的陆上岸带。海面与陆地接触的交界线就是海岸线,由于海洋动力的作用,海岸轮廓总是处在不断变化之中,海岸线不是固定不变的,它随水面高程、潮位升降、风引起的增减水等海水运动而发生移动。垂直方向的海面升降幅度能达到10m以上,水平方向的进退有时能达到数十千米。当取平均海面下的水陆分界线作为海岸线时会造成海岸线有一半时间被海水淹没,为此,一般取多年平均高潮位的水陆交界线为海岸线。这样,位于平均高潮线以上的海岸在平时的大部分时间都露出海面,不会受到风浪和潮波的作用,只有偶尔遇上特大风暴和特大高潮时才会被淹没<sup>[8]</sup>。

海滩又称潮间带,处于潮汐涨落的频繁作用之中,是平均低潮位到平均高潮位之间的地带。水下岸坡又称潮下带,是波浪作用开始处到平均低潮位之间的海底地带,波浪作用的下限水深在工程上一般取为波浪波长的一半。

国家能源局2009年颁布的《海上风电场工程规划工作大纲》将海上风电场细分为潮间带和潮下带滩涂风电场、近海风电场和深海风电场。

潮间带和潮下带滩涂风电场指在沿海多年平均大潮高潮以下至理论最低潮位以下5m



水深内的海域开发建设的风电场。近海风电场指在理论最低潮位以下 5~50m 水深的海域开发建设的风电场,包括在相应开发海域内无居民的海岛和海礁上开发建设的风电场。深海风电场指在大于理论最低潮位以下 50m 水深的海域开发建设的风电场,包括在相应开发海域内无居民的海岛和海礁上开发建设的风电场。

随着与陆地距离的逐步增大,海上风电场依次为滩涂风电场、近海风电场和深海风电场,风电场开发的难度也依次递增。就我国当前的风电技术水平,还难以开发深海风电场,因此一般提到的海上风电场均指潮间带和潮下带滩涂风电场或近海风电场。

我国已建成的海上风电场中,江苏如东 150MW 海上风电场示范工程属于潮间带风电场,如图 1-2 所示。我国第一个海上风电场——上海东海大桥 100MW 海上风电场属于近海风电场。

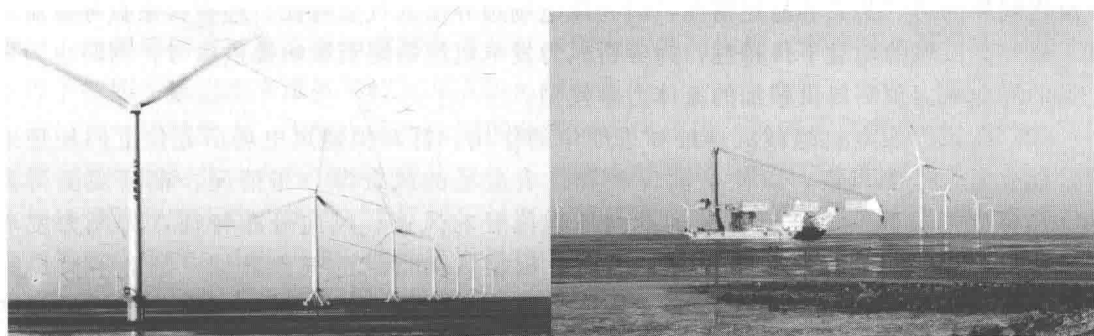


图 1-2 江苏如东海上风电场二期工程<sup>[9]</sup>

### 1.1.3 海上测风塔

海上测风塔与陆上测风塔相对应,目前尚无明确的划分标准,可参照 1.1.2 节中海上风电场的划分标准来定义。

基于海上风电场的类型划分标准,海上测风塔为处于海上风电场区域(非海岛)中安装风速、风向等传感器以及风数据记录仪,用以测量风能参数的高耸结构,如图 1-3 所示。海上风电场开发首先需要掌握海上风能资源的变化规律和特征,而陆上气象站的测风数据并不能代表海上风资源特性,因此海上风电场建设时需要设立海上测风塔。

在风能资源的开发和利用过程中,风资源的获取与评估是一项重要的工作,而风资源的评估和获取最常用的手段就是建立测风塔。在海上风力发电开发与利用过程中,测风塔处于十分重要的位置,主要表现在风电场前期的风资源评估、风电场规划设计、风电场风况实时监测、弃风限电影响评估、发电量考核和气象运行资料积累等方面<sup>[11]</sup>。

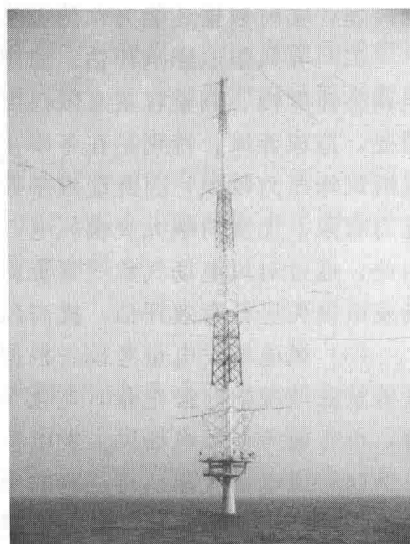


图 1-3 莱州湾海上测风塔<sup>[10]</sup>





## 1. 测风塔在风电场前期开发中的作用<sup>[1]</sup>

(1) 在风场风资源评估中的作用。风能密度是衡量一个地区风能大小,评价一个地区的风能潜力最方便最有价值的特征量。风能密度的大小主要取决于风速和空气密度。在风能资源储量丰富的地区选址建立风电场,其前提是精确掌握当地的风资源情况。为有效评价该地区是否有利于建立风电场,以便达到最佳的经济效益,必须建立测风塔对该地进行为期一年以上的不间断观测,收集当地最近时段的第一手气象信息。

对收集得到的测风塔气象观测资料,依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)和中华人民共和国国家发展和改革委员会(以下简称国家发改委)于2004年颁布的《风能资源评价技术规定》,进行数据分析,判定建立风电场的可行性和经济性。

此外,通过对测风塔不同高度的梯度气象测量数据,可以分析风电场区内不同高度上下层之间风的切变关系和稳定情况,研究风电场边界层的气象特征、理查森系数等湍流特性,研究高层风的动量下传特性,为分析风力发电机组的尾流影响提供参考,同时也为风电场的局地风力预测提供精细的流体力学模型。

(2) 在风力发电机组微观选址和选型中的作用。针对拟建风电场所处位置的地理地貌,建立若干个测风塔,以便全面反映和代表全场的风资源分布情况。根据观测得到的全场梯度气象数据,分析场区内不同地理位置的风速、风向分布特征,为风力发电机组机位的选点规划提供参考依据。同时,根据观测得到的气象数据,结合不同厂家不同型号的风力发电机组类型,确定最适合本地区的风力发电机组型号,达到风能利用的最优化。

## 2. 测风塔在风电场运营管理中的作用<sup>[1]</sup>

(1) 超短期风力预测。针对电力行业不同用户的业务需求,必须开展多种时间尺度的风电出力预测系统,超短期风电出力预测即为其中之一。超短期风力预测模型依靠测风塔的历史数据和实时数据。历史数据主要用于超短期风力预测模型的建模和率参,为超短期的率参提供数据积累;实时数据为超短期风力预测提供实时输入数据源,预测未来0~4h的风速,实时数据还能为预测模型提供实时校正。

(2) 弃风限电影响评估。我国电源整体上以火电为主,存在结构性矛盾。由于火电机组调整速度慢、调整容量有限,因此无法满足风电功率大幅波动情况下的电网调峰、调频需要,造成弃风。特别是在冬季夜间低负荷、大风时段,风电出力快速增加,其他非供热机组调峰压力较大,因此造成多数风电企业后夜弃风现象严重。当风电满发时,电网调节能力有限,无法消纳大规模风电,为保障电网的安全稳定,特定时候需要适当弃风限电。因此,通过对风电场气象要素资料,尤其是风速进行测量和收集,能够对弃风限电的风电场发电损失进行有效评估,提高风电场的运营管理水平。

(3) 风电场发电量考核。根据风电场的实际运行时段发电量,剔除其中限电、电网因素等特殊情况的时段电量,与实际风速情况下理论发电量进行比对,找出其中存在的偏差,可有效考核风电场风力发电机组的利用效率。

(4) 风电场气象运行资料的累积。对风电场进行长期有效的局地微尺度、高时空分辨率、不同高层、不间断的气象数据观测,能够积累风电场的长序列气象资料,该资料能够完善和丰富风电场的数据库,完善风电场的资料管理体系。多年风电场的气象累积资料,





不仅能够对风电场的扩容扩建提供参考依据，还能为风电场中长期发电量指标的制定和修订提供历史依据。

## 1.2 海风特性与测风要求

海风是海洋气候特征的组成部分之一，气候指地球上某一地区多年的天气和大气活动的综合状况，包括各气候要素的多年平均值、极值、变差与频率等。对于海上测风塔结构物而言，海风是气候特征中对其影响最显著的，其他的气候特征还包括气温、暴雨、雾和能见度等。

### 1.2.1 海风的成因

风是地球上空气运动的一种自然现象，不管在陆地还是海洋上，风的运动受到气压梯度力、地转偏向力、离心力和摩擦力等几种作用力的共同作用，在多种荷载作用达到平衡条件下按照牛顿定律来维持其特定时点的风速与风向。

(1) 气压梯度力。大气在重力作用下会产生大气压强，进而形成气压场。随着纬度、温度和高度的变化，大气气压在逐步变化，一般采用等压线来表征大气压强的分布。由于大气压强的分布不均，从而产生了气压梯度力，推动大气产生水平流动。气压梯度力的方向与等压线垂直，由压力高处指向压力低处<sup>[9]</sup>。

(2) 地转偏向力与地转风。地球上的大气运动还受到地转偏向力（柯氏力）的作用，地转偏向力垂直作用于气流的运动方向，因此它只改变气流运动的方向，不改变气流运动的速度。地转偏向力的大小与纬度和地球自转角速度有关。地转偏向力使得北半球的气流向右偏，故在北半球受地球自转偏向力的作用，北风变成东北风，南风变成西南风，热带气旋和龙卷风等大气涡旋总是沿逆时针方向旋转。在南半球的规律则相反<sup>[12]</sup>。

当仅考虑自由大气在水平气压梯度力和地转偏向力达到平衡状态时的空气运动时，则形成地转风。

(3) 离心力与梯度风。地转风适用于等压线为平直线的状态，当等压线弯曲时，气流在做曲线运动时将产生离心力，这种在气压梯度力、地转偏向力和离心力三者之间平衡运动的气流则形成梯度风。梯度风对应的是气旋效应显著的风场，中心气压对应低压系统时称为气旋，中心气压对应高压系统时称为反气旋。

(4) 摩擦力与地表风。对于贴近地表的气流，将受到地球表面的摩阻力作用，使得风速小于高空风速值。这种同时考虑气压梯度力、地转偏向力、离心力和摩擦力平衡条件下的气流运动称为地表风。海上测风塔结构所涉及的海风为地表风。

### 1.2.2 风向与风速

海风是一个矢量，应采用风向和风速来分别描述海风的方向与大小。

#### 1. 风向

风向指的是来风的方向，风向一般采用 16 个方位表示，即北东北（NNE）、东北（NE）、东东北（ENE）、东（E）、东东南（ESE）、东南（SE）、南东南（SSE）、南（S）、南西南（SSW）、西南（SW）、西西南（WSW）、西（W）、西西北（WNW）、西北