

为海洋清洁能源事业发展服务

海上风电场建设指南

主编 李晓霞 刘蕴博



长江出版传媒
湖北科学技术出版社

海上风电场建设指南

主 编 李晓霞 刘蕴博

 长江出版传媒

 湖北科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

海上风电场建设指南/李晓霞,刘蕴博编著.

—武汉:湖北科学技术出版社,2016.4

ISBN 978-7-5352-8567-6

I. ①海… II. ①李… ②刘… III. ①海上—风力发电—发电场—建设—指南 IV. ①TM62-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 064137 号

策 划:田立群

校 对:徐 斌 施 璟

责任编辑:周佩芳

封面设计:蒋水霞 王 梅

出版发行:湖北科学技术出版社

电 话:027-87679468

地 址:武汉市雄楚大街 268 号

(湖北出版文化城 B 座 13-14 层)

邮 编:430070

网 址:<http://www.hbstp.com.cn>

印 刷:山东临沂新华印刷物流集团有限责任公司

邮 编:276017

开本:700×1000

1/16

18 印张 4 插页 300 千字

2016 年 4 月第 1 版

2016 年 4 月第 1 次印刷

定价:285.00 元

版权所有 侵权必究

如发现本书有质量问题请与中国海洋工程网会员服务中心联系调换

服务热线:4008670886

编审委员会

主 任

杨本新

副主任委员(按姓氏笔画为序)

毛经宇 孙 文 刘 河 刘齐辉 李 智 张其智
金宝年 赵生校 柳志成 高险峰 郭树旺 潘基书

委员(按姓氏笔画为序)

于绍奉 王斯伟 叶银灿 冯伟光 许秋声 向 阳
齐志诚 朱海飞 刘志欣 宋永乐 李 泽 汤东升
张海亚 张 钢 陈 强 罗金平 陆书建 俞华锋
徐 林 秦初升 袁新勇 黄守道 陶友传 董 健

特 别 鸣 谢

(以下单位排名不分先后)

北京国电思达科技有限公司
福建省水利水电勘测设计研究院
福建一帆新能源装备制造有限公司
福建永福电力股份有限公司
国家海洋局第二海洋研究所
浙江胄天科技股份有限公司
河北省电力勘测设计研究院
湖南大学
华电重工股份有限公司
华锐风电科技(集团)股份有限公司
惠柏新材料科技(上海)有限公司
江苏奥德盛海洋装备有限公司
江苏龙源振华海洋工程有限公司
江阴兴澄特种钢铁有限公司
洛阳双瑞风电叶片有限公司
南通蓝岛海洋工程有限公司
青岛汉缆股份有限公司
山东瑞其能电气有限公司
山东省电力咨询院有限公司
上海上缆藤仓电缆有限公司
上海泰胜风能装备股份有限公司
上海振华重工(集团)股份有限公司
武昌船舶重工集团有限公司
新疆金风科技股份有限公司

盐城市产品质量监督检验所、国家风电质检中心(江苏)

中船重工(重庆)海装风电设备有限公司

中船重工电机科技有限公司

中国船舶重工集团公司第 713 研究所

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团云南省电力设计研究院有限公司

中国铁建港航局集团有限公司

中际联合(北京)科技股份有限公司

重庆望江工业有限公司

重庆重齿风力发电齿轮箱有限责任公司

舟山正源标准件有限公司

前 言

你为什么需要本书？

十几年前,世界上还没有建成过任何商业化的海上风电场。当时已经建成或正在建设的实验性风电场主要集中在丹麦,其风力涡轮机最大功率只有 600 千瓦,且数量有限。2001 年,世界上首个半商业化的海上风电场在哥本哈根港入口处的米德尔格伦登(Middelgrunden)竣工,该风电场共有 20 台 Bonus(现 Siemens)2.0-MW 风力涡轮机。这些风力涡轮机归哥本哈根当地居民私人所有,他们还组成了“米德尔格伦登风力涡轮机合作社”(Middelgrundens Vindm · llelaug)。合作社获得了当地市政机构“哥本哈根能源公司”的支持,并与其签署了购电协议,销售 20 台风力涡轮机产出的电能。这促成了该风电场的建设,施工于 2000 年正式开始。

整个项目设计和实施的过程中,没有固定的海上作业标准,没有施工方案,没有法律条款。可能危害健康、安全 and 环境(HSE)的行为没有法律约束,项目能否获批也没有法律依据。所有这些都是项目进行的过程中不断摸索出来的。本书正是为了记录下这些发现、经历和方法。过去十年的海上作业已经验证了它们的可靠性,它们也因而成为海上风电行业制定法律法规、树立示范标准和 HSE 管理工作的依据。

海上风电行业是一项发展中的事业。也就是说,书中呈现给读者的数据、陈述和发现都只是此时我能提供的最实用的信息。因此,数年后本书将会重新修订,会有更多作者提供最新的信息和数据,以供建设海上风电场参考。

本书旨在使读者了解海上风电行业的基础知识。当然,书中也记录了多年来行业中发生的一些轶事,希望本书能够引发读者的思考。

谁应该阅读本书?

本书适合海上风电行业内的所有人阅读,无论是已经或即将进入本行业的人,无论是咨询师、投资者、工程师或是技术人员。从风电场安装项目开始到中期直至项目完成,这一过程中可能出现的常见问题本书都能一一解答。

书中记录的过去十年的项目经历对专业人士有指导作用。对金融从业者来说,要判断项目设计、实施是否合理,是否经过深思熟虑,本书将教你提出关键的技术性问题。工程师则可以根据本书制定风力涡轮机安装计划,避免走进死胡同。

健康、安全 and 环境(HSE)专家将能够从书中找到确保安全的方法,建立并执行设计、监管流程。投资者则可以更深入地咨询,从而更加了解项目流程、潜在风险及其对世界的意义。

本书的目的并不是展示所有的资料,而是向读者介绍了一些海上风电行业的知识,作为他们事业的起步。为了能够运用大量数据、提示和建议,读者急需掌握更多深入的专业知识和信息。这就是为什么需要阅读本书、学习书中的知识。尽管这些知识就包含在每一个项目中,但却不幸地分布在世界各地。读者需要寻找这些信息并将其归类,才能够开展专业工作。读完本书后,你对海上风电场的了解将会令你充满信心。

你能从本书中获得什么?

希望读者能够在读完本书之后,对海上风电行业有一个深入的了解。对于正参与海上风电场项目的读者来说,应该能够在主要设计和施工方案问题上做出抉择。读者应该知道什么是最好的选择及这些选择会带来什么结果。这一点尤其重要,因为每当海上环境出现任何变化,其带来的影响可能远超过被改变的那部分。

就其本身而言,海上环境带来的挑战与陆地环境完全不同。为什么?举一个简单的例子,如果由于土壤条件较差,你要更改风力涡轮机基础的尺寸。在陆地上,你可以问地质工程师需要增加多少材料才能确保地基

坚固、稳定。一旦确定了这个,你就可以估计需要多少额外的混凝土才能建造一个适当的风力涡轮机基础。这是非常直接的工程学,也并不复杂。无非就是一些数字计算,一台挖掘机和一些额外的工作时间。

但对海上风电场来说,这是完全不同的一道难题。第一件事情就是找一套新的岩心钻机以确定海床结构的区别和深度。结果可能直接影响整个基础系统的选择。例如,波罗的海 2 号(Baltic 2)风电场项目就遭遇了这种土壤条件的问题,最终不得不安装了两种完全不同的基础形式:单桩式和导管架式。这是该区域海床条件造成的问题。但问题还不止这些。

如果风力涡轮机基础或土壤结构与基准值不同,则计算风力涡轮机与基础相互作用的迭代计算方式也完全不同,所以每个基础形式都不相同。此外,如果同一个海上风电场选用不同的基础形式,比如一个导管架式,一个单桩式,那安装船上就需要有两套紧固装置、两种打桩锤等等。与陆地相比,如果海床结构差别巨大,将会对项目造成非常大的影响。

这就是阅读并理解海上风电场项目所涉及的各种要素和学科的重要之处。如果足够重要的话,即使最小的要素也会影响大的系统。读完本书,读者应该能够做出详细的项目设计,还应该能够理解并解释从项目开始到结束过程中可能影响项目的众多变量。

同时,本书也给了读者提问的空间。书读得越多,对这个行业的理解就越透彻,不断吸收的知识将帮助你形成自己的观点。这就是本书的目标:传授知识、促进讨论。

本书不是一本秘籍,读者无法简单地从书中找到所有问题的答案。本书为读者提供了一把钥匙,开启自我思考的大门,自己探索方法和答案。在书中,你可以找到各种提示、建议、故事甚至是一张通往捷径的地图,帮助你成功建成一个海上风电场。因此,我建议你继续读下去并进行自学。你可以嘲笑一下我们之前做的傻事,抑或是思考一些行业中流传的理念。书中的内容将会给读者打下最扎实的基础,并帮助你们自学成为行业专家。

最后是一些建议:当海上风电场创始人库尔特·汤姆森开始从事海

上风电行业的时候,没有人知道他在做什么。很幸运,在做重大决定时他都做出了正确的选择。他的一位好友兼同事曾说:“完善的计划加上最好的运气,我们不该对此不屑一顾。”

读到这里,你应该明白了此书的意义所在。只要我们抱以开放的思想、乐于接受新知识、愿意听取建议,我们就能做好所有想做的事。不必害怕成为这个行业的新人。你可以学习——从这本书中学习。泰坦尼克号是由最有经验的工程师团队建造的,而诺亚方舟则是由一个门外汉建成的。所以,好消息是我们每个人都有机会。我们只需要开放思想并且、接受机会——正如库尔特·汤姆森所做的。

出版者的话

在本书的出版过程中,我们得到了众多行业专家的大力支持,其中包括中船重工七一五研究所程千流研究员、杭州瑞利科技有限公司陈立新研究员、西北工业大学李晓霞教授以及加拿大 Curtiss-Wright and Alcatel-Lucent 公司刘蕴博先生的大力支持,在此特别表示感谢,同时也感谢广大编委及支持单位在出版过程中提出的宝贵建议。由于专业审校工作量巨大,导致出版周期有所增加,对各位读者给予的耐心等待表示感谢,希望各位读者多提宝贵意见。

编者

2015 年 12 月

目 录

前言

第一章 什么是海上风电场?	1
第二章 获得风电场许可证	9
第三章 项目规划	24
第四章 公司基本组织结构	45
第五章 项目准备	64
第六章 项目执行	82
第七章 接口管理	96
第八章 健康安全环境管理	120
第九章 协调工作船	128
第十章 物流解决方案	134
第十一章 常用安装方法	139
第十二章 通往海上设施的船舶和运输	164
第十三章 有关港口的基本资料	199
第十四章 项目准则	207
第十五章 运输风力涡轮机	214
第十六章 调配策略	231
第十七章 修理海上风电场	247
第十八章 环境和其他问题	251

第一章

什么是海上风电场？

在我们要进一步阅读本书前,最好先说明一下一个海上风电场的组成部分。这也将有助于对书中使用的许多,即使不是全部,技术术语有一个快速了解,便于较容易地明白书中的内容。

一些人可能认为此举是多余的;然而, Kentish Flats 安装后一年,时代杂志收到一对老夫妇给编辑的信,十分清楚地对我表明不是人人都懂得此概念。这对夫妇也许有点极端,但是实质上他们抱怨他们无法继续在海滩散步,只是因为风力涡轮机产生的风使他们无法保持平衡。所以,这就要搞清楚,风力涡轮机不是通过使用电力产生风,相反它是通过使用风作为能源转动转子而发电。这就是编辑尽可能亲切地对这对夫妇作的大体上的回复。

不管怎样,现在言归正传,来认真地说明风能的主要特点。本书中,我们着眼于海上风电场安装和海上风电场—或通常的风电场;可用下列方式描述。

一风电场由若干风力涡轮机组成。任何风电场看上去或多或少与另一个风电场相似;图 1.1 显示的是一个典型的风电场。

- 塔架,是用螺栓将两根或更多的钢管连接在一起
- 机舱,或发电机室,安装在塔架顶部
- 转子,由三片连接到机舱上轮毂的叶片组成

当然,风力涡轮机无法站在水上(或地面上,就海上而言))。它们需要有一个基础,如图 1.2 所示。仅仅可勉强看见从水中伸出。

当风力涡轮机在陆上时,这是很容易的,因为基础是由很重的混凝土板做成,所以足以产生足够力矩和夹持力,以抵抗作用于风力涡轮机的风的移动和弯矩。

当风力涡轮机在海上时,结果是相同的,但是在基础设计时应考虑四



图 1.1 一台风力涡轮机由三大主要部件组成,从外部就能看见

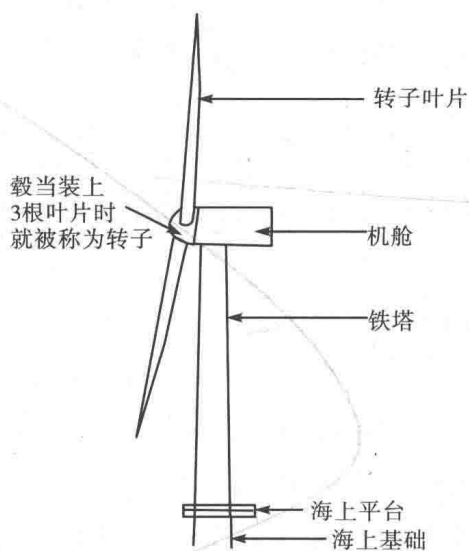


图 1.2 风力涡轮机部件

个附加因素:

- 水的深度:基础必须要与独立桩体连接。
- 波浪载荷:波浪在基础引起比风机本身更大的负载和弯矩。地面条件:基础不必马上固定到海底,但是由于海底的构成在地面有支承力之

前很可能需要增加深度。

· 风机感应频率: 风力涡轮机作用于反作用波浪荷载, 当波浪加强时, 基础会承受可能更大的负载, 这一点必须考虑。

风力涡轮机海上基础的设计其本身是门整体的学科, 在本书中并未包含。然而, 在以下章节中描述了四种最常用的海上风力涡轮机基础的四种类型, 并列举了每一类型的利弊。

单桩基础

用大型液压锤打入海底的大直径的钢管(4~8 m)被称为单桩。能直立, 因为海底两侧的摩擦力, 以及在其上面没有任何垂直的地面压力。单桩通常被用在半坚硬到坚硬的海底条件下, 一直可到25 m左右的水深处(图1.3)。

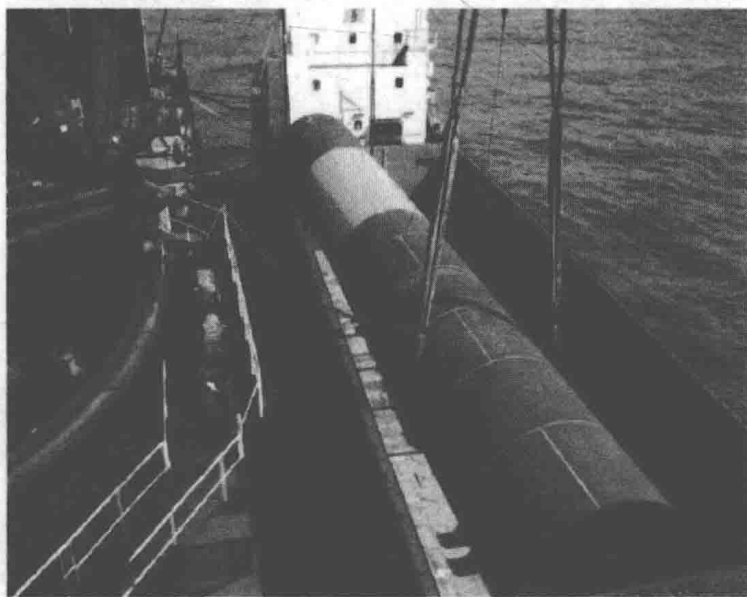


图 1.3 单桩正在从运输船上吊起(A2SEA 提供)

重力式基础

重力式基础是非常重的位移结构, 通常由混凝土制成(图1.4)。重力式基础利用作用于地面的垂直压力, 矗立在海底。基础的直径通常为

15 ~ 25 m,所有的力和弯矩通过基础底座传递。通常情况下,重力式基础用于半坚硬的海底和水深较浅处,不过有几个项目(例如 Thornton Bank)已经用重力式基础安装在很深的海水中。

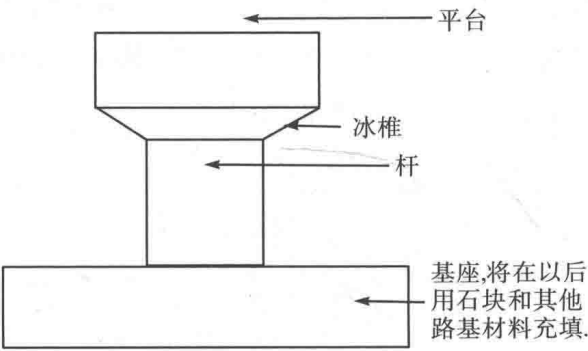
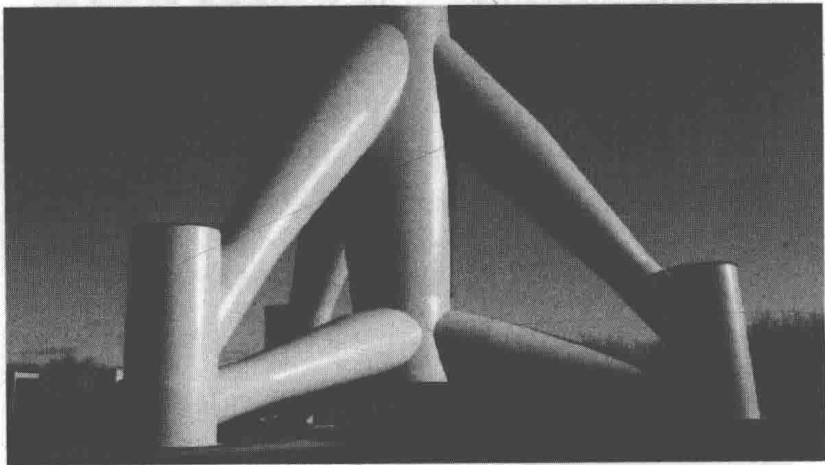


图 1.4 重力式基础原理

基础的大小和重量(1500 ~ 4500 吨)使运输和安装变得很麻烦,而且值得注意是,海底必须准备疏浚和回填材料以便于安装基础。所以,虽然混凝土建设较便宜,但安装却非常昂贵和耗时。因此,不是最好的解决方案。

三脚桩基础

三脚桩基础是突出在海洋表面上的钢管结构(图 1.5)。基础有三条支腿,每一条腿与桩套管连接,在与打入海底的锚桩灌浆固定。



三脚桩基础的优点是穿过波浪区的面积与单桩一样小,因为是一根单独的钢管,如同一架相机三脚架在海底展开。因此提供巨大的稳定性以防弯矩。

此外,锚桩,到基础中心距离很长,有能力抵抗由风机和海浪引起的十分强烈的垂直振动力和弯矩。特别是因为只有单独的钢管,有可能如计算单桩一样计算因海浪引起的负载。三脚桩基础通常用于水非常深的海上油气行业(25~50 m)并已经证明十分可靠。

三脚桩基础的缺点是对于一座合理尺寸的海上风力涡轮机而言,生产十分昂贵,一次很难大量加工,而且安装所花的时间比“标准的”单桩更长。

导管架基础

导管架基础是网格型钢结构,通常底部是方的并且由细钢管建造(图1.6)。导管架基础的优点是考虑尺寸和水深,它的重量较轻。你可以通过增大基础的底面积而不用显著增大尺寸而对力和弯矩产生巨大的阻力。专门用于水很深处,是首选方案。与三脚桩基础一样,通过桩套筒与锚桩相连从而固定于海床。

导管架基础的缺点通常是制造成本昂贵,结构中的许多结点必须都要人工做。

此外,该基础很难对由于较大面积而引起的冰负载有效预防。这使流冰保护变得很复杂,因此也就很昂贵。更有甚者,导管架基础与三脚桩基础同样昂贵,而目前风力涡轮机尚不够大以证明在很深的水域中能够使用。



图 1.6 导管架基础在比阿特丽斯试验风电场安装的场景