

# 海上风电场基础形式及配套施工技术

秦顺全, 张瑞霞, 李军堂

(中铁大桥局集团有限公司, 武汉 430050)

[摘要] 根据不同的水深及地质条件,结合已建成的海上风电场基础形式及施工方法,介绍和研究了重力式、单桩、群桩、设置沉箱、沉井及吸力式筒形基础等几种形式。对不同的基础形式,分别提出了自升式平台、浅吃水半潜驳、打桩船及整体浮运吊装等相应的基础施工方法。根据风机机组类型,对塔筒和风机的安装也做了介绍。

[关键词] 海上风电场;基础形式;桩基础;导管架基础;吸力式筒形基础;设置沉箱;风机安装

[中图分类号] TU476;TU745.7 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0035-05

## 1 前言

利用清洁的风能资源是全球能源开发的战略方针<sup>[1]</sup>。2010年,欧洲海上风电场的开发已步入快速发展期,丹麦、英国、瑞典、德国等主要的海上风电场国家都制定了相应的海上风能发展战略规划,世界海上风电装机容量已经达到了100万kW,其中大约40%在丹麦。我国首个100MW东海海上风电场也已在7月份建成并正式并网发电。由于海上风能具有风速高、风速稳定、不占用土地等优点,已成为目前风能发展的趋势和重点,而在海上建立风电场除了其明显的优势外也带来一些不可避免的问题,其中之一就是其基础工程的建设成本远远高于陆地风机。因此,寻找各个途径来降低海上风电场建设的成本是海上风机发展的关键所在。

## 2 海上风电场的特点及基础形式

海上风机基础与陆地风机基础相比有以下特点:

- 1) 荷载:有强风、海浪、冰载和腐蚀的作用。
- 2) 地质条件:覆盖层多为淤泥质土、沙土或无覆盖层的裸岩,差异性大,施工条件差。
- 3) 运输条件:只能水运,在滩涂或潮间带运输

必须采用特制设备。

4) 安装方式:受海浪、强风影响,结构的运输与安装需投入大型水上设备,设备调遣使用费高。

就受力而言,海上风电场的基础与桥梁基础是大同小异的,因而可以借鉴桥梁基础的形式,同时海上石油平台的设计施工理念也值得借鉴。

海上风电场基础除满足自身结构的强度、刚度及稳定性外,还要进行动力模态及疲劳分析,以满足基础结构在海洋环境中安全可靠的要求。根据海上风机的布局特点和海上施工的具体条件,设计出针对海上风电场的基础形式,主要有重力式基础、单桩基础、群桩基础、导管架基础、设置沉箱基础、沉井基础及吸力式筒形基础。

1) 单桩基础:又分钢桩和钢筋混凝土管桩两种基础形式。钢桩为 $\phi 3 \sim \phi 7$  m的钢管,板厚30~60 mm,打入深度在15~50 m,单桩承载力达500~2 600 t,适应于覆盖层地质及水深在30 m以下区域。其优点:不要求对海床做预先的准备,制造简单,施工快速,但相对海水较深时柔性大,如图1所示。钢筋混凝土管桩直径5~6 m,壁厚50~100 cm,钻孔深度20~50 m,单桩承载力达1 500~3 000 t,优点:不需要海床的预处理,工厂预制,现场安装,缺点:需大直径钻孔设备,大吨位浮吊吊装,如

[收稿日期] 2010-07-28

[作者简介] 秦顺全(1963—),男,四川绵竹市人,中国工程院院士,长期从事大型桥梁的设计、施工工作;E-mail:qsq@zmbec.com

图2所示。

2)群桩基础:采用小直径斜钢管,单钢管直径1.5~1.6 m,承台为钢筋混凝土结构,具有承载力大,抗水平载荷强的特点,适合有厚覆盖层、水域较深的区域,水深不大于30 m,缺点是现场作业时间较长,工作量大。如图3所示。

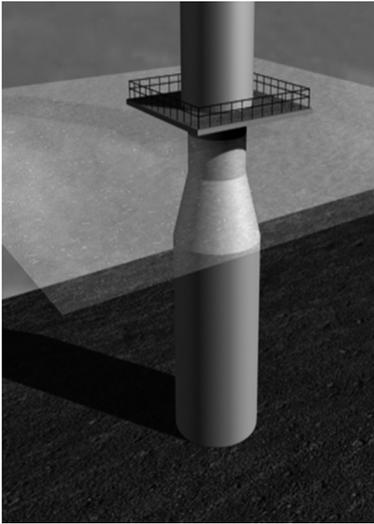


图1 钢管桩基础

Fig.1 Steel tube pile foundation

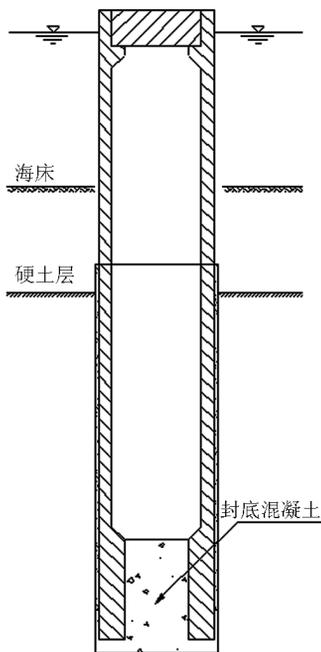


图2 钢筋混凝土管桩基础

Fig.2 RC tube pile foundation

3)重力式基础:可采用混凝土空心结构,依靠基础的重力抵抗倾覆力矩,中间填充沙或碎石,适用

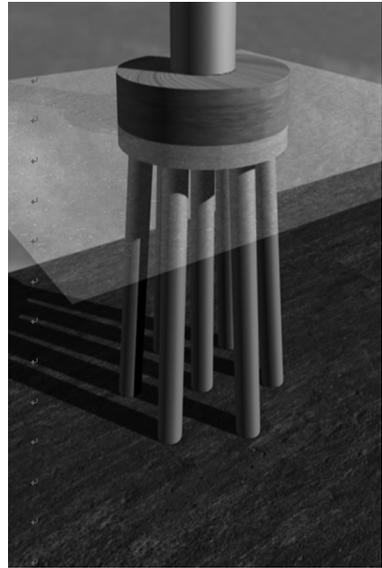


图3 群桩基础

Fig.3 Group pile foundation

于硬质地层,水深不大于10 m,其优点是承载力大,稳定性好,如图4所示,缺点:对海浪的冲刷较敏感,适用于水深较浅、地质条件好的区域,运输安装困难。

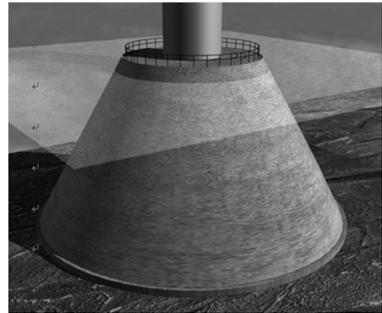


图4 重力式基础

Fig.4 Gravity foundation

4)导管架基础:采用小直径钢管打入,端部堵塞或成型连接,适合较深的水域,且覆盖层承载力高,如图5所示,其优点:对打桩设备要求较低,导管架采用工厂加工,整体运输安装,缺点:现场作业时间相对较长。

5)吸力式筒形基础:钢箱或钢筋混凝土结构,基础浮式运输,注水下沉,筒内抽水,利用筒内外水头差产生压力将基础下压入土至设计位置,如图6所示,适用于水深、砂质性土层,其原理图式见图7。已成功应用于海上石油平台,尚未应用于海上风机基础。

6)设置沉箱基础:钢箱或混凝土结构,陆上预

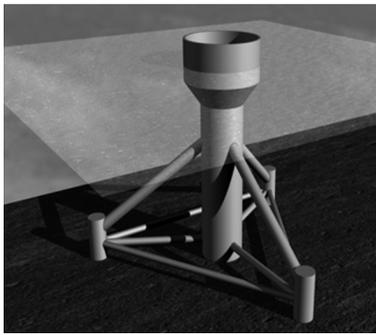


图5 导管架基础  
Fig.5 Jacket base

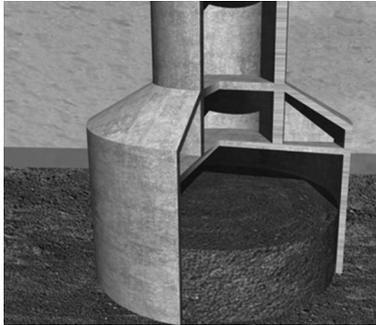


图6 吸力式桶形基础  
Fig.6 Suction barrel base

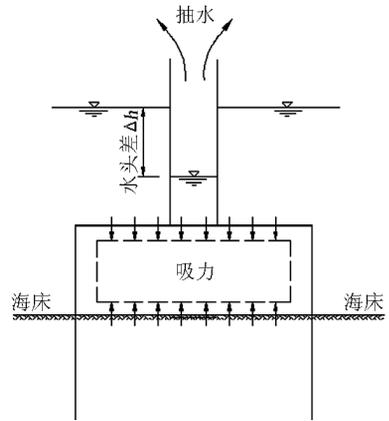


图7 吸力式基础原理图式  
Fig.7 Schematic of suction base principle

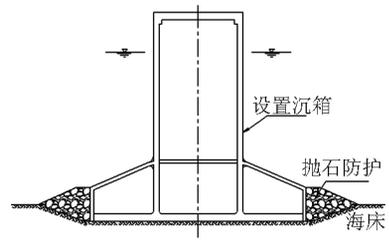


图8 设置沉箱基础  
Fig.8 Set of caisson foundation

制好后,浮式运输到位,定位后注水着床,底部填沙石压重,适用于深水基础,其优点是承载力大,抗水平荷载强,施工快速,缺点:需要地基处理(基底开挖或爆破整平),需大型浮吊吊装,配备水运和定位设施。如图8所示。

7)沉井基础:钢筋混凝土沉井结构,优点:承载力大,刚度大,稳定性好,适用于深水,沙质性的覆盖层地质,缺点:需吸泥下沉设施,如图9所示。

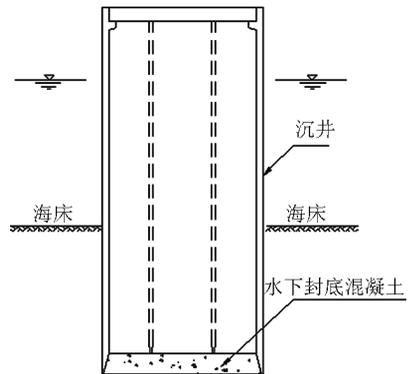


图9 沉井基础  
Fig.9 Open caisson foundation

### 3 基础施工

#### 3.1 潮间带水域(高潮位水深不小于2 m)

潮间带位于高低潮水位线之间,海滩较平,区域广阔,在此建设风电场既不影响海滩,又不影响深水区域海上交通和养殖,但在潮间带建设风电场世界上尚无先例。此水域水流较小,高潮位有水,水较浅,在低潮位露滩,既不能按陆上法施工,又不能按常规的水上法施工,针对此水域的特殊情况,经多方案的比选研究,拟采用水上自升平台和浅吃水半潜驳两种专制设备的施工方案。

1)自升式平台施工法:自升式平台分单、双船体两种形式,由标准的集装箱拼接而成,能组成多种

尺寸的工作平台,适应不同的基础形式,平台上带有起重、发电及生产生活的必备设施,图10为单船体作业图,图11为双船体作业图。在高潮位平台进入墩位处,平台桩腿插入土中,平台升出海面,平台上的履带吊机配合移动导向架进行单桩基础、群桩基础施工以及风机的安装等。高潮位时升起平台桩腿,平台降至海面上,拖至下一风机处施工。

2)浅吃水半潜驳施工法:专制半潜水驳船,可乘潮进去,然后在舱内注水,船体座滩施工,完工后

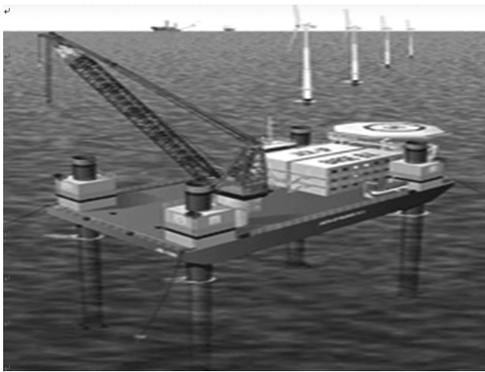


图 10 单船体作业图

Fig. 10 Drawing of the single - ship operation



图 11 双船体作业图

Fig. 11 Drawing of the double - ship operation

抽出舱内水,船体浮起拖至下一风机位置。船体长宽高尺寸为 70 m × 50 m × 3 m,上平台尺寸为 70 m × 70 m,全高 11 m,空载吃水为 0.8 m,满载吃水为 1.0 m,载重能力 1 000 t。船在高潮位时备足 1 至 2 个桩位的结构材料携起重设备进入墩位处座底施工,适用于沙质的覆盖层,但需要解决在浅吃水时的船体动力问题,如图 12 所示。



图 12 半潜驳作业图

Fig. 12 Drawing of the semisubmersible tug boat

### 3.2 深水区域(6 ~ 30 m)

6 ~ 30 m 深水水域的单桩、多桩及导管架基础一般采用打桩船或浮吊配合液压锤施工。打桩船的

选择由打桩能力和吊装能力来确定,一般多桩基础和导管架基础可采用打桩船直接插打,而对于大直径的单柱钢管桩基础,则需采用大浮吊配合液压锤进行施工作业。目前,国际上的单桩基础可做到  $\phi 6 \sim \phi 7$  m 直径,桩长达到 80 m 左右,入土深度超过 40 m,对于这种大桩径的单桩则一般需要用 S750 ~ S1800(锤击能量为 750 ~ 1 800 kN · m) 液压锤。现以 5 MW 机组为例,针对不同的基础形式,选取了不同的液压锤,计算的主要结果如表 1 所示。

表 1 钢管桩打桩参数对比表

Table 1 Parameters comparison table of the steel pipe pile

设计条件	单桩基础 (桩径 6 m)	三桩基础 (桩径 2.4 m)	四桩导管架 (桩径 2.2 m)	高桩承台 (桩径 2 m)
水深/m	30	20	30	20
入土深度/m	40	60	50	60
桩锤类型	S750	S400	S400	S400
用时/min	108	118	74	103
钢管应力 /MPa	67.5 / -35.8	190.2 / -49.8	201.7 / -63.7	201.3 / -53.9

对于重力式基础一般采用岸上预制,浮吊整体安装的方案。对于水较深、承载要求高的风机基础,可以采用沉井基础、吸力式筒形基础或设置沉箱基础,以设置沉箱基础为例,其施工流程为:干船坞基础预制→拖至注水坞浮运至墩位→海床开挖或爆破整平→沉箱注水下沉到位→基础外防护施工。其施工步骤如图 13 所示。

吸力式筒形基础的施工流程为:干船坞基础预制→拖至注水坞,浮运至墩位→安装系泊装置注水下沉至稳定深度→基础壁舱内抽水,裙板靠负压入土下沉至设计位置,其施工步骤如图 14 所示。

## 4 海上风机的安装技术

海上风机的安装根据风机类型、塔筒高度、重量等采用散装和整装两种方案。

对潮间带的海上风机采用散拼方案,利用水上平台或浅吃水半潜驳安装风机组。

对于深水区域的风机采用散拼或整装方案,且以大型浮吊安装为主。机组整体吊装涉及机械设备较多,首先在岸边码头上将机组散件拼成整体,然后由驳船将整体机组运送至待装位置,由大型浮吊将机组吊起安装在已成基础上。以 3.6 MW 机组为例,其施工步骤如下:

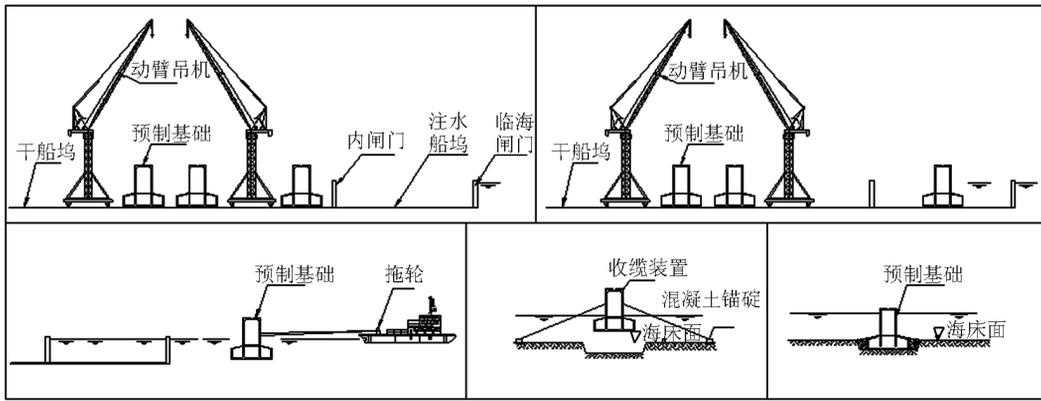


图 13 设置基础施工步骤图

Fig. 13 Drawing of the setting the foundation construction step

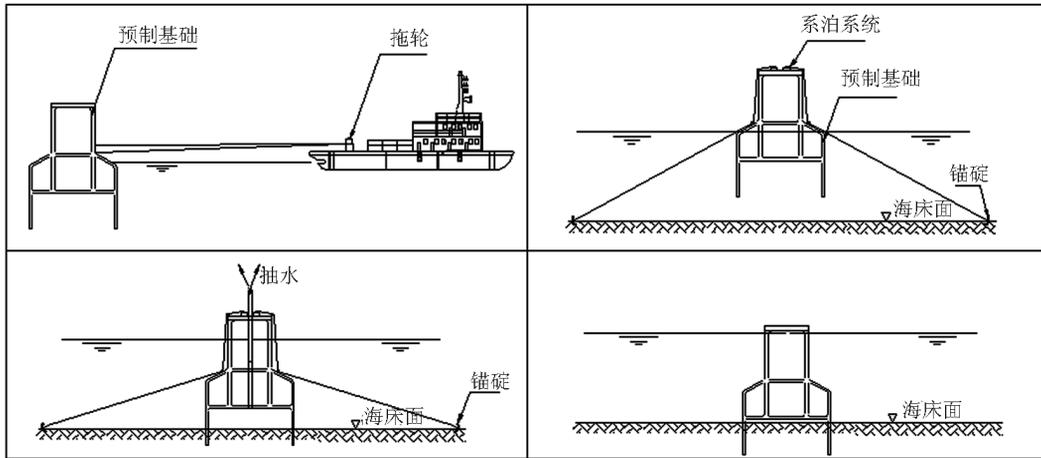


图 14 吸力式筒形基础施工步骤图

Fig. 14 Drawing of the suction barrel base construction step

1) 选择码头平台作为拼装场地,将临时吊装支架与码头平台临时固定。

2) 塔筒放入支架内并用螺栓临时连接,然后依次吊装(吊具采用柔性吊带)上部机舱和叶片。

3) 大型起重船机将风机整体吊到驳船上,风机与驳船设安全缆风,临时支架与船体连接固定。

4) 驳船将风机运输至安装位置,大型起重船将风机吊起安装到基础顶面,精确定位后将塔筒底部与基础顶面固定。

5) 拆除临时支架,进行下一个风机的安装。

对于 5 MW 以上的大型风机组,由于整体机组结构重、高度大,采用散拼或整体吊装等将会对浮吊的吊重、吊高提出更高的要求,相应也会加大施工成本的投入,因此,为减少海上高空作业风险、降低工程费用,风机组安装方法可采用转体法、爬升式或自升式的施工方案,这些方法目前还处于研究阶段。

## 5 结语

通过对海上风电场基础施工及风机安装技术的分析研究,需根据不同的水深、地质及环境情况设计不同的基础形式。基础尽可能采用工厂化生产、大单元运输安装的方式以减少海上作业时间。针对不同的施工环境需采用专门研制的安装设备,如浅吃水半潜驳、水上自升式平台或大型浮吊等专业设备进行快速施工,同时还要结合风机的高度和重量,选择不同的吊装方式。海上风机基础的设计和施工是海上风电场建设工程的关键点,同时也涉及多个技术领域的技术发展及创新,其技术研究成果对推动海上风电场的建设意义重大而深远。

### 参考文献

- [1] 秦海岩,庄岳兴,高辉,等.中国海上风电和大型风电基地发展战略研究[R].中国可再生能源规模化发展项目办公室,2009.

(下转 52 页)