

# 海上风电场单桩基础施工关键技术研究

施吉林

(中交第三航务工程局有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361006)

**摘要:** 近些年, 随着海上风电场的不断增大, 单机容量不断增大, 在这种情况下, 单桩技术施工存在的难度越来越大, 单桩施工技术需要不断进行更新。本文在研究过程中, 结合某海上风电场项目, 对海上风电场单桩施工难点与关键技术进行深入的研究, 首先简单概述工程案例概况, 其次分析海上风电场单桩基础施工中的重点与难点, 最后探索其施工中一些关键技术。

**关键词:** 海上风电场; 单桩基础施工; 关键技术

**中图分类号:** TM614 **文献标志码:** A



## 1 工程概况

某海上风电场项目涉海面积约80 km<sup>2</sup>, 场址中心离岸距离约12 km, 水深在23~30 m, 规划装机容量为500 MW, 共布置91台单机容量为5.5 MW的风电机组(基础形式为83套单桩+8套导管架), 同时配套建设两座220 kV海上升压站。

工程单桩基础施工包含:(1)单桩预制。合同范围内所使用的钢材、基础顶法兰的采购、单桩基础的加工制作等全部工作应由供应方负责。(2)单桩施工。承包人应负责合同范围内单桩从预制厂至施工机位的运输, 完成合同范围内单桩现场沉桩、防腐涂层补涂、基础防冲刷保护、检测检验等全部工作<sup>[1]</sup>。合同范围内, 从预制厂码头进行单桩预制运输也由承包人负责。

## 2 海上风电场单桩基础施工关键技术

### 2.1 单桩翻桩技术

该技术包含的类型较多, 单桩翻桩技术主要基于起重作业船形式, 通常包含两大类, 分别为单钩借助泥面翻桩技术和双钩合抬翻桩技术。

(1)单钩借助泥面翻桩技术。单钩通常利用泥面翻桩技术, 采用全回转起重船, 将溜尾吊点及主吊点进行同时挂钩, 保证钢桩呈倾斜状态, 然后将其吊离运桩船放入水中, 之后利用泥面支反力, 让溜尾吊点达不到受力状态, 将桩底溜尾钳移除, 保证单桩处于

翻身竖直状态。该技术优势为不会占用较多的资源, 同时大臂和桩顶之间不易产生干涉, 可以有效利用吊机的能力; 劣势为对海床地质的要求比较高, 且船机装备方面的要求比较特殊, 要配别专门的液压卸扣或者溜尾钳, 同时要精准的施工设计, 保障起桩角度, 因此, 该技术对操作要求比较高。

(2)双钩合抬翻桩技术。由于单桩翻身过程中, 应用的起重船是不同的, 一般双钩合抬翻桩形式有两种, 分别为主副以及双主钩翻桩。双主钩翻桩还可以分为一船和两船钩翻桩形式。其中, 主副钩翻桩技术, 主吊钩一般为主钩, 溜尾辅助吊钩为副钩, 将单桩水平翻转为竖直时, 可以通过将主钩提升, 或者对溜尾副钩进行下放。该技术的优势为可以有效借助主副钩的吊重能力; 劣势为在使用过程中, 对单桩吊点位置和长度的要求比较严格。特别是近两年, 在单桩的不断发展下, 其上部吊点和桩顶法兰之间的距离越来越大, 主副钩翻桩方式会导致桩顶法兰和起重船大臂间的干涉。如果应用主副钩翻桩方式, 在初期设计过程中, 需要对翻桩的安全余量进行有效的论证。两船主钩翻桩和双主钩翻桩的方式比较相似, 主要区别是船舶就位方向不同。当前海上风电施工过程中, 一般用船为锚泊型船舶, 而且风、浪等方向不同, 多船就位时, 要对出缆的方式以及船舶的站位方向等加以重视。

## 2.2 单桩沉桩技术

目前,在我国海上风电单桩通常采用的形式是无过渡段单桩形式,在沉桩过程中,这种形式对垂直度的要求比较高。本工程海上风电场范围为34根单桩,均为非嵌岩单桩,风场钢管桩径为7500~8600 mm;壁厚为70~90 mm;桩长为87.62~102.05 m;单台质量为1264.949~1572.575 t。钢管桩壁厚、桩质量大、桩长,属超大型管桩基础,给整个钢管桩沉桩施工带来不小挑战。单桩沉桩技术施工存在一些重点与难点:

### (1) 防溜桩隐患

本工程现场机位多,涉及海域广。施工现场地质复杂,覆盖层厚,软弱土层分布不均匀,土层变化大,标贯变化大,并包含许多夹层。在沉桩过程中有可能发生溜桩,存在较大安全隐患。

应对措施:钢管桩沉桩前应将钢管桩位画在地质纵断面图上(准确位置)及地质钻孔柱图上,进行相应地质层沉桩情况预判,同时对桩在软土地层中侧摩阻力及桩端净土阻力进行计算,与桩质量、液压(考虑动载系数)进行比较,避免钢管桩在淤泥质土层及淤泥质粉质黏土层等软土地层中发生溜桩问题,同时再预判溜桩地层中压桩下沉,采用点动液压锤的方式,同时控制起重船吊钩钢丝绳的松放长度,预留钢丝绳的长度为15~20 m,确保液压锤的安全。

### (2) 单桩垂直度控制

根据技术规范要求“基础顶法兰水平度(桩轴线倾斜度)偏差 $\leq 3\%$ ”,为满足风机的安装要求,单桩垂直度控制是本工程的重点。

应对措施:本风场单桩基础壁厚、桩质量大,属超大型管桩基础。沉桩精度要求高,垂直度控制难度大<sup>[2]</sup>。拟采用我公司在海上风电场工程中成功应用的超大型管桩基础高精度沉桩技术。采用定位稳桩平台技术,利用平台调整装置和高精度测量技术,在沉桩过程中进行实时监控控制,确保高质量完成沉桩施工任务,满足设计要求。在定位稳桩平台上下两层桁架上均安装定位架及导向轮,定位架上配备液压油缸,在平台上下位置,还要分别设置四个160 t的顶推液压缸,绕桩圆心水平呈45°布置,液压缸端部设滑轮,同时要使用螺栓将其固定在底座上。以此控制好桩的垂直度,对下桩过程中的垂直度偏移超限进行调整。

## 3 单桩基础施工工艺流程及施工方案

### 3.1 单桩基础施工工艺流程(图1)

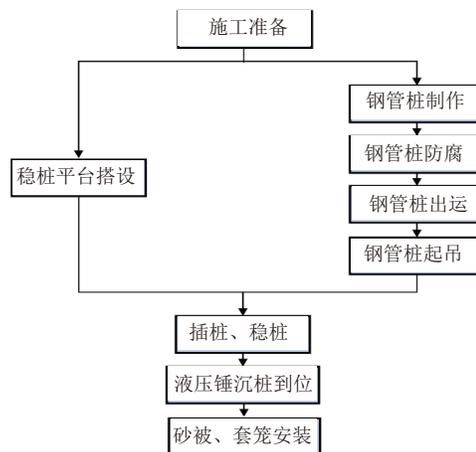


图1 单桩基础施工工艺流程

### 3.2 非嵌岩单桩沉桩施工

沉桩施工一般要求如下:

(1) 施工前制定单桩沉桩主要施工方法、工程措施、施工进度安排、施工程序、主要施工船机设备、材料计划、主要技术人员配置和劳动力计划以及海上施工作业应急方案、安全防护和环保措施等。

(2) 水上沉桩应根据所在水域水深和流急的特点及设计桩径、桩质量、桩长合理选择打桩船,充分利用有利条件,使沉桩工作正常进行。锤击沉放钢管桩时,在选择锤的过程中,要结合桩身结构、承载力以及地质情况等因素,同时根据沉桩实际情况合理选择。此外,还要对钢管桩尖进行考虑,沉桩锤宜选用高能量、高效率的S3000及以上液压锤,同时有备用锤;具体锤型的选择须征得监理和业主认可。(3) 打桩船的锚缆布置应充分考虑风电场水域水流急的特点,确保沉桩安全。通常情况下,船的两侧位置要抛八字锚,而且还要将中线锚缆设置在前后位置,保证船身处于平稳状态,同时使操作方便;锚型及缆绳的选择应适应海域的水文和地质条件,避免沉桩发生走锚现象,斜桩沉放过程中,要对前后锚缆进行加强,必要时可以使用双缆;根据抛锚区的土质、水深等,对抛锚的距离等进行明确;锚缆布置应充分考虑对海底电(光)缆、建筑物、构筑物影响。(4) 在驳船停泊的位置,要保证该位置方便沉桩船进行作业,防止各船之间出现干扰问题。驳船锚型和缆绳的选择也要适应工程海域的地质条件和流速大的特点,不得走锚。同时还要保证驳船与桩保持一定距离,避免出现碰桩现象。当船只遇到抛锚情况时,要注意其对通航所造成的影响,同时要在锚缆位置设置明显标志,也可以采用其他安全措施。(5) 施工过程中应经常检查桩的贯入度、桩体倾斜度、桩身完整状况等项目,同时做

好施工记录。在对相关内容进行记录的过程中,通常包含打桩船(机)名、打桩锤型号、沉桩结束时间、前一半桩长时的锤击数、打桩完成后桩顶偏位、桩顶标高、桩身最终倾斜度、桩内及外部的泥面高度等。

(6)在启动液压打桩锤过程中,要由小到大进行启动,当桩进入一定深度同时桩身稳定时,再提高打桩的能量。如果为软土层,则要适当降低打击量;土层如果比较硬,打桩过程中要加大功率。一根桩原则上应一次打入,中途不得人为停锤,如需停锤,应尽量缩短停锤时间。(7)本工程地质条件比较复杂,应采用合适的桩锤和能量沉桩至设计标高,也可以采用边掏边钻边打的辅助施工工艺或其他辅助方法进行沉桩。(8)沉桩时,需确保桩头不受损,桩顶不得有损坏或局部压屈。打桩过程中需设置可靠的替打或其他有效保护措施,桩锤不应直接接触到桩顶法兰,确保打桩过程中对桩顶法兰平整度、强度、疲劳等不产生任何损伤。确保现有的施工船机设备能满足发包单位提供的钢管桩运输、吊插、连接、夹桩、吊桩、翻桩、送桩、沉桩等工艺要求。若现有施工船机设备尚不能满足以上施工要求,需对施工设备进行改造以满足要求。(9)在施工前根据发包人提供的地勘资料及图纸进行沉桩分析,防止沉桩至断面层时发生溜桩,同时施工过程中及时调整锤击能量,保证沉桩质量。

(10)在锤击沉桩时,需要满足以下要求:在对沉桩进行锤击的过程中,要保障桩锤、送桩等保持在同一条轴线上,在替打过程中,要保证平整性,防止锤击出现偏移;在沉桩稳定受到船行波影响时,要立即停止锤击,防止背板整桩;当桩身突然下降,或者贯入度出现异常等现象时,要马上停止锤击,同时查明不良现象出现的原因,并采取针对性措施解决问题;桩位纠正过程中,不可以采用移船的方式进行纠正;沉桩船进退作业,应注意锚缆位置,防止缆绳绊桩。如桩顶被水淹没,应设置标志。沉放桩上严禁进行系缆,同时还要将相应的标志设置在沉桩区域两端位置,夜间时要设置红灯。

记录锤击沉桩过程中,还要保证符合以下规定:

(1)在记录锤击的过程中,要分阵次进行,同时以桩身下沉1 m划分,在桩端的硬土或者硬夹层要取0.1~0.5 m为一阵,在靠近控制高度时,要取0.1 m为一阵。(2)在硬土层桩打入后,取值贯入度时,可以取0.1 m为最后10击平均每击的下沉量。(3)进行沉桩时,容易出现断桩、溜桩、贯入度反常、桩周冒泡、桩位异常和设备损坏等异常现象,均应记录。

### 3.3 进单桩沉桩的防溜桩措施

为防止发生溜桩,需以“安全第一”为首要原则,同时还要制定有效措施,避免发生安全质量问题。针对每个机位,“一桩一议”,采取相应的技术措施:(1)根据风电场钻孔柱状图,对每个桩位的地

质进行分析(结合静力触探图),充分认识每层土质的软硬程度。正式施工前,掌握准确的地勘资料,认真研究项目各个风机机位地勘报告,利用GRLWEAP软件进行打桩计算,对可能出现“溜桩”的机位进行提前预警。(2)对可能发生溜桩机位上覆硬土层所能提供的动态侧摩阻力进行计算,当钢管桩沉到接近软弱土层顶部时,根据计算结果调低液压锤打击能量,必要时采用单击锤击的方法进行沉桩。钢管桩自沉时,及时调整桩身垂直度;钢管桩自沉后,根据入泥深度并对比钻孔柱状图,对溜桩发生的可能性以及溜桩的位置进行预判。(3)若自沉入泥深度未穿透软土层,发生溜桩的可能性很大,就应增加液压锤的能量,使钢管桩穿透软土层。(4)以最小能量开锤,前期单击轻打,每击一锤后停锤进行观察,随后逐步增大能量,严禁直接满能量锤击。在开始阶段,多阵少击,控制锤击频率;锤击过程中,密切观察贯入度变化。贯入度突然增大、有溜桩趋势时,应停锤等待一定时间,稳定后再开始锤击。(5)采用吊打的施工工艺,起重机始终吊着打桩锤,使液压打桩锤卸扣基本呈45°状态,钢丝绳处于半松弛状态,当出现溜桩时,防止打桩锤重力也压在单桩基础上,减少溜桩产生的危害。(6)对不可避免发生溜桩的机位可能发生的溜桩深度进行估算,适当加长液压锤吊装钢丝绳的松弛量,避免发生溜桩时液压锤下落对吊机造成冲击。加长吊锤钢丝绳长度,确保留有富余的安全长度。

(7)对不可避免发生溜桩的机位适当加大稳桩平台对桩的抱裹力,确保溜桩发生后单桩的垂直度符合设计要求。同时选择抗风、抗涌大的起重船,吃水深度要足够深,确保在套锤过程中不发生左右较大晃动<sup>[3]</sup>。

## 4 结语

综上所述,海上风电建设周期时间不长,而单桩基础结构相对简单,施工较为方便,因此在施工中具有一定优势,因此,适合在大型船机中进行单桩基础施工作业,但随着船机类型越来越多样化,其施工技术和工艺也相对越来越重要。因此,需要对海上风电桩基础施工重视起来,为海上风险项目提供良好的技术与装备支撑。

### 参考文献

- [1] 熊必康, 江海涛, 冀昊. 海上风电场项目单桩基础设计后评估分析[J]. 水力发电, 2021, 47(8): 115-119.
- [2] 李存义, 韩毅平, 张晗, 等. 海上风电机组植入式单桩基础灌浆施工工艺及质量检测技术研究[J]. 能源科技, 2020, 18(10): 49-54.
- [3] 宋云峰, 王小合, 逯鹏, 等. 海上风电场单桩基础施工关键技术研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(23): 24-26.