

引用格式:王耀武,郑康胜,张吉海,等.海上风机单桩基础沉桩施工工艺与应用[J].南方能源建设,2024,11(4):180-189. WANG Yaowu, ZHENG Kangsheng, ZHANG Jihai, et al. Pile driving construction process and application of offshore wind turbine monopile foundation [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 180-189. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.19.

海上风机单桩基础沉桩施工工艺与应用

王耀武¹, 郑康胜², 张吉海¹, 朱挺进³, 李大超³, 罗必雄⁴, 范永春⁵, 赵大文⁶, 池元清²,
刘东华⁵, 张永康^{2,✉}

1. 中国铁建港航局集团有限公司 广东省海洋能源装备先进技术重点实验室, 广东 珠海 511400;
2. 广东工业大学 机电工程学院 广东省海洋能源装备先进技术重点实验室, 广东 广州 510006;
3. 华能(庄河)风力发电有限责任公司, 辽宁 大连 116400;
4. 中国电力工程顾问集团有限公司, 北京 100120;
5. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
6. 上海电气风电集团股份有限公司, 上海 200233)

摘要: [目的]海上风力发电因其年均发电量大和发电稳定等优势,逐渐在全球能源结构转型中得到广泛应用。然而,由于海上风机建设在复杂多变的海洋环境中,这给海上风机基础的施工工艺和技术方案带来了巨大的障碍。[方法]文章以某海上风电场的建设项目为背景,具体分析了沉桩施工船舶、稳桩平台和液压打桩锤的选型标准与可行性。同时依据风机基础沉桩的施工要求,重点阐述了作业前的准备工作、稳桩平台的施工方案以及主-副吊船协同配合的风机基础沉桩作业,并进一步分析了风机基础沉桩中垂直度的控制与纠偏措施。[结果]钢管桩沉桩施工工艺可以有效地保障工程质量和进度预期,经济效益明显且安全可靠。在沉桩过程中,需对垂直度精度控制完成初调和终调。[结论]对海上风机基础沉桩施工技术的研究,将为类似的海上风机工程提供有益的参考和借鉴。

关键词: 海上风电; 风机基础; 沉桩施工; 稳桩平台; 垂直度

中图分类号: TK89; P752

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0180-10

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.19

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Pile Driving Construction Process and Application of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation

WANG Yaowu¹, ZHENG Kangsheng², ZHANG Jihai¹, ZHU Tingjin³, LI Dachao³, LUO Bixiong⁴, FAN Yongchun⁵, ZHAO Dawen⁶,
CHI Yuanqing², LIU Donghua⁵, ZHANG Yongkang^{2,✉}

1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Marine Energy Facilities, CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Co., Ltd., Zhuhai 511400, Guangdong, China;
2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Marine Energy Facilities, School of Electro-Mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China;
3. Huaneng (Zhuanghe) Wind Power Generation Co., Ltd., Dalian 116400, Liaoning, China;
4. China Power Engineering Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100120, China;
5. China Energy Construction Group Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
6. Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

收稿日期: 2024-07-12 修回日期: 2024-07-17

基金项目: 广东省科技计划项目“广东省海洋能源装备先进制造技术重点实验室(2023年度)”(2023B1212010012)

Abstract: [Introduction] Offshore wind power generation is gradually being widely applied in the global energy structure transformation due to its advantages of high annual power generation and stable power generation. However, due to the complex and ever-changing marine environment for offshore wind turbine construction, this poses significant obstacles to the construction process and technical solutions of offshore wind turbine foundations. [Method] In the context of the construction project of a certain offshore wind farm, this paper analyzed the type selection criteria and feasibility of pile driving construction ships, pile stabilizing platforms and hydraulic pile hammers. At the same time, in response to the construction requirements for wind turbine foundation pile driving, the preparation work before the operation, the construction plan for the pile stabilizing platform, and the wind turbine foundation pile driving operation with the cooperation of the main-auxiliary crane ships were emphasized. Furthermore, the control and correction measures for verticality in wind turbine foundation pile driving were analyzed. [Result] Steel pipe pile driving construction process can effectively ensure the project quality and expected progress, and has significant economic benefits, safety and reliability. During the pile driving process, it's necessary to complete preliminary and final adjustments to the verticality accurat control. [Conclusion] Through the study of pile driving construction technology for offshore wind turbine foundations, it will provide useful reference and inspiration for similar offshore wind turbine projects.

Key words: offshore wind power; wind turbine foundation; pile driving construction; pile stabilizing platform; verticality

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

海上风力发电在环境效益、资源丰富和商业前景等方面优势显著, 逐渐成为了全球风电领域的新兴战略型产业^[1]。在全球风能理事会发布的《2023年全球风能报告》中, 截至2022年, 全球海上风电机组累计装机总容量为64 GW^[2]。其中海上风机基础作为固定和承载风机、塔筒等核心组件的重要平台, 其施工作业是海上风电产业建设的首要环节之一^[3-4]。现阶段, 海上风机基础的主要类型有桩承台基础、单桩基础、导管架基础和漂浮式基础等不同结构^[5-6]。然而, 在已运行的海上风电场中, 海上风机基础采用单桩基础结构的比例接近75%^[7], 单桩基础结构成为了主流的海上风机基础结构形式^[8]。随着风机单机容量和单桩基础长度与直径等技术的不断提升, 将对单桩基础的施工设备、沉桩垂直度控制、安全隐患和施工工艺等相关问题提出了更高的要求与挑战, 其解决方案也对海上风电产业的发展至关重要^[9-10]。

近年来, 随着海上风电项目建设的持续推进, 对海上风机基础沉桩技术的研究, 尤其是单桩基础的施工工艺方面, 引起了海上风电行业的高度关注与探讨^[11-12]。樊长辉^[3]比较了国内外单桩基础的施工技术, 并以某项目风机基础施工为背景, 阐述了安装船的选择原则、液压打桩锤的可打性, 稳桩平台的校核等单桩基础沉桩的施工作业要点, 为海上风机单

桩基础的施工工艺提供了参考意义。袁汝华等^[4]探讨了国内外海上风电场的风机基础结构形式, 同时介绍了采用单桩基础形式的优势, 并表明了风机基础施工技术是海上风电场建设的关键技术之一。刘晋超^[5]以采用了大直径单桩基础的广东某海上风电工程项目为例, 提出了解决海上大直径无过渡段风机单桩基础沉桩的施工难点和关键技术。杜志强和张跃辉^[8]以采用了单桩基础形式的风电机组为背景, 比较了独立式与自升式支腿船两种稳桩平台, 并探索了一种移动式稳桩平台装备, 加快了辅助沉桩的施工效率。陈进^[13]针对海上风机基础沉桩施工环境恶劣和安全隐患大等作业难点, 结合了某海上风电项目, 提出合理的风机基础沉桩的施工工艺, 推进了沉桩作业的顺利完成。靳华伟^[14]以汕头某海上风电场风机单桩基础施工项目为例, 对超大直径钢管桩的单桩基础工程施工测量特点进行了分析, 提出了单桩基础桩位定位和施工测量等技术方案。郑洪刚^[15]据华能山东海上风电工程的实际经验, 提出了在基础沉桩施工中船舶、稳桩架的定位速度和桩身垂直度的控制等技术方案, 为后续海上风电场的建设施工与质控等方面提供了技术保障。钮国平^[16]结合了某公司海上风电项目的沉桩施工方案, 通过介绍了风机单桩基础的垂直度控制, 并从测量方法和步骤顺序的角度出发, 提出了沉桩垂直度控制的解决方案。虽然海上风机基础沉桩的工艺技术已经取

得了一定的进展与成就,但是在不同场区的海况下,仍面临着沉桩垂直度控制困难和施工安全隐患大等技术挑战。因此,有必要进一步对在某海域下,海上风机基础沉桩的工艺方法与技术进行研究,以促进海上风电产业快速发展^[7]。

本文是基于江苏启东某海上风电项目,对海上风机基础沉桩施工技术进行探讨。因本工程风电场位于开阔海域,风机基础沉桩施工作业受环境因素影响较大。这对风机基础的工艺要求、施工船舶设备、沉桩垂直度控制与纠偏等技术难点提出了很大的挑战。接下来将对本项目风机基础的工艺技术、沉桩技术方法和施工装备选定等方面进行探讨,主要介绍海上风机单桩基础沉桩的施工工艺,包括竖桩、翻桩等作业,为后续海上风电项目的建设提供参考。

1 工程概况

本项目选择江苏启东某处近海海域,场区中心距海岸约 37 km,水深 10~16 m,海床起伏较平缓,是南黄海滨海相沉积地貌的典型代表,场区地基的土表层主要由粉砂组成。施工海域的潮汐特性属正规半日潮海区,值得注意的是,冬季潮流最大流速在 0.67~1.09 m/s 之间和夏季潮流最大流速在 0.91~1.33 m/s 之间,且潮流为往复式,主要沿着东南向和西北向往复流动。场区全年以轻浪为主,出现频率共占 58.95%,全年的常浪向介于 NNE~NE~E~SE,出现频率共占 89.51%。场区地层自上而下①~③层为粉砂、淤泥质粉质粘土、粉质粘土,最小覆盖层厚度为 2.40 m。施工海域虽然其位于中强地震带,周边区域性断裂表现较活跃,但是本场区 5 km 范围内无活动性区域断裂,区域构造稳定性表现较好。

本项目钢管桩共计 50 根,为保证项目的顺利实施,选用 S-2000 液压锤投入本项目的施工中,起重设备选用“1500 t 大申号”进行沉桩施工,对钢管桩单根沉桩工效分析,单桩施工耗时约 4 d,满足进度要求。

目前,国内对于单桩基础沉桩的施工方式各有不同。本文以江苏某海上风电场项目的实际施工情况为例进行分析,该项目规划装机规模为 304.2 MW,采用了“双船抬吊翻桩与沉桩”方式进行作业。其

海上风电场相关基本参数与沉桩施工要求如下:

1)场区中心离岸距离 37 km,水深在 10~16 m。场区呈梯形,东西长 16 km,南北宽 2.7 km,规划海域面积 43 km²。

2)钢管桩桩径 6.0~7.5 m,桩长 64~84.975 m,壁厚 55~98 mm,桩重 641.83~1 129.43 t,整体套笼重量约 65 t。

3)单桩沉桩的设计及施工精度要求:钢管桩沉桩以标高控制,按贯入度进行校核。绝对位置(WGS1984 或 1954 北京坐标系)允许偏差在 500 mm 以内,高程允许偏差在 50 mm 以内。沉桩完成后的基础顶水平度(桩轴线倾斜度)偏差 $\leq 3\%$ 。值得注意的是,当桩顶达到设计标高,且最后 20 cm,平均贯入度超过 20 mm 以及桩身出现严重偏移、倾斜时,应立即停止沉桩。

1.1 沉桩施工船舶

对于施工船舶的初步选定,主要综合考虑单桩基础的参数、海域水深和单桩自沉入泥深度等条件。保证工程满足以下几点:(1)船舶吊机起重能力完全覆盖单桩重量、吊索具重量和一定的安全裕度;(2)对于浮吊的吊高要满足单桩基础翻桩和沉桩施工要求;(3)从船舶工期和经济性的角度,对船舶类型进行选择;(4)校核船舶的符合性,即校核船舶适应海域状况、吊高和吊重等。

本项目共规划建设 50 个单桩基础,根据船舶的综合性能和总体部署要求。在单桩基础沉桩方面,选择了“双船抬吊翻桩沉桩”模式作业。采用了 1 500 t“大申号”起重船来完成钢管桩起吊作业。同时利用 600 t 起重船来配合“大申号”起重船协同完成钢管桩的竖桩和翻桩等作业,“大申号”起重船的技术性能如表 1 所示。

表 1 “大申号”起重船技术性能表
Tab. 1 Technical performance of the "Dashen" crane ship

参数	数值	参数	数值
船长/m	114	主钩最大吊重/t	1 500
型宽/m	32.2	副钩最大吊重/t	650
型深/m	8	主钩吊高/m	90
设计吃水/m	6.5	副钩吊高/m	108

首先,对吊高进行验算,以最大桩长 85 m 为例,水深按最小 10 m 计算。其中,主吊耳下口距桩顶高

度 27 m, 安全吊高 2 m, 主吊的钢丝绳计划选用 30 m 工作长度的无接头高性能钢丝绳圈。钩头标高=桩长+钢丝绳工作长度-主吊耳下口距桩顶高度-水深+安全吊高, 计算钩头标高为 80 m。当“大申号”起重船作业半径为 35 m 时, 起重重量达到 1 200 t, 符合钢管桩最大重量 1 129.43 t, 且吊高距水面 92 m, 80 m<92 m。因此, 能满足吊高要求。

其次, 对吊重进行分析验算。在钢管桩起吊过程中, 当桩身水平起吊时, 主吊耳与翻身吊耳同时受力, 应验算两者的受力大小。而当桩身竖直起吊时, 主吊点受力最大, 则主要分析主吊点的受力大小。当桩身水平起吊时, 受力情况如图 1 所示。

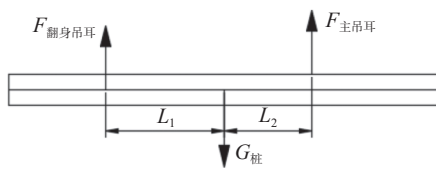


图 1 受力简图
Fig. 1 Force diagram

当水平起吊时, 由受力平衡得:

$$F_{\text{主吊耳}} + F_{\text{翻身吊耳}} = G_{\text{桩}} \quad (1)$$

$$F_{\text{主吊耳}} \times L_1 = F_{\text{翻身吊耳}} \times L_2 \quad (2)$$

式中:

- $F_{\text{主吊耳}}$ ——主吊点所受力的力(kN);
- $F_{\text{翻身吊耳}}$ ——翻身吊点所受到的力(kN);
- $G_{\text{桩}}$ ——桩重(t);
- L_1 ——主吊点与钢管桩重心的距离(m);
- L_2 ——翻身吊点与钢管桩重心的距离(m)。

根据初步设计的计算, 当钢管桩重心距桩头 38.474 m 处, 桩重按 1 400 t 代入。已知 $L_1=12$ m 和 $L_2=37$ m, 代入式(1)~式(2)中, 得 $F_{\text{翻身吊耳}}=3.428 571$ MN, $F_{\text{主吊耳}}=10.571 429$ MN。当桩身竖直起吊时, $F_{\text{主吊耳}}=1.4 \times 10^4$ kN。因此, 由表 1 起重船的性能参数可知, “大申号”起重船吊重能满足工程要求。

1.2 钢丝绳验算

主吊的钢丝绳计划选用 30 m 工作长度的无接头高性能钢丝绳圈。当桩体竖直时, 桩重全部由钢丝绳承受, 此时钢丝绳拉力最大, 主吊钢丝绳受力情况如图 2 所示。

按设计时钢管桩重量 1 400 t 进行验算, 单个主

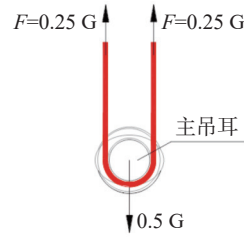


图 2 主吊钢丝绳的受力情况

Fig. 2 Force situation of the main suspension steel wire rope

吊耳受重力为 0.5 g, 则单边钢丝绳受拉力为 3.50 MN。同理, 当桩体水平时, 主要校核翻身吊耳钢丝绳的受力大小, 得到钢丝绳受拉力为 1.96 MN。钢丝绳型号参数如表 2 所示。

表 2 钢丝绳型号参数表
Tab. 2 Model and parameters of steel wire rope

规格	结构(股丝)	抗拉强度/ (N·mm ⁻²)	拉力试验负荷 (破断)/MN	备注
φ144 mm	6×36WS+1WR	1 770	15.660	翻身吊110 m×1根
φ210 mm	6×55SWS+1WR	1 770	31.493	主吊钢30 m×2根

对主吊钢丝绳 φ210 mm 安全系数进行验算, 钢丝绳破断拉力为 31.493 MN, 安全系数 $k=31 493/3 500=9>5$, 满足要求。而副吊钢丝绳 φ144 m 破断拉力为 15.66 MN, 安全系数 $k=15 660/1 960=7.99>5$, 满足要求。

1.3 液压打桩锤

对于液压打桩锤的选定, 首先需根据场区地质报告分析本场区桩基土壤持力层, 并结合海利公式得到液压打桩锤的打桩能力; 其次分析液压打桩锤最小锤击的能量值; 最后进行液压打桩锤的初步选型。完成液压打桩锤的初步选定后, 需进行“持续性锤击单桩”和“间断性锤击单桩”的桩锤可打性分析。

以本工程勘测的地质资料为参考, 结合可打性分析, 本项目采用了 IHC S-2000 液压打桩锤, 其符合钢管桩沉桩作业的要求。根据现有的桩参数、钻孔柱状图和桩锤性能等做出的液压打桩锤可打性分析, 如图 3 所示。最终结果表明了, IHC S-2000 液压锤的总锤击数为 1 722, 桩身最大拉力为 95.590 MPa, 最大压力为 118.464 MPa, 终锤的贯入度为 10.36 mm, 满足本项目施工要求。

1.4 稳桩平台

根据本项目作业的要求, 在单桩基础沉桩方面,

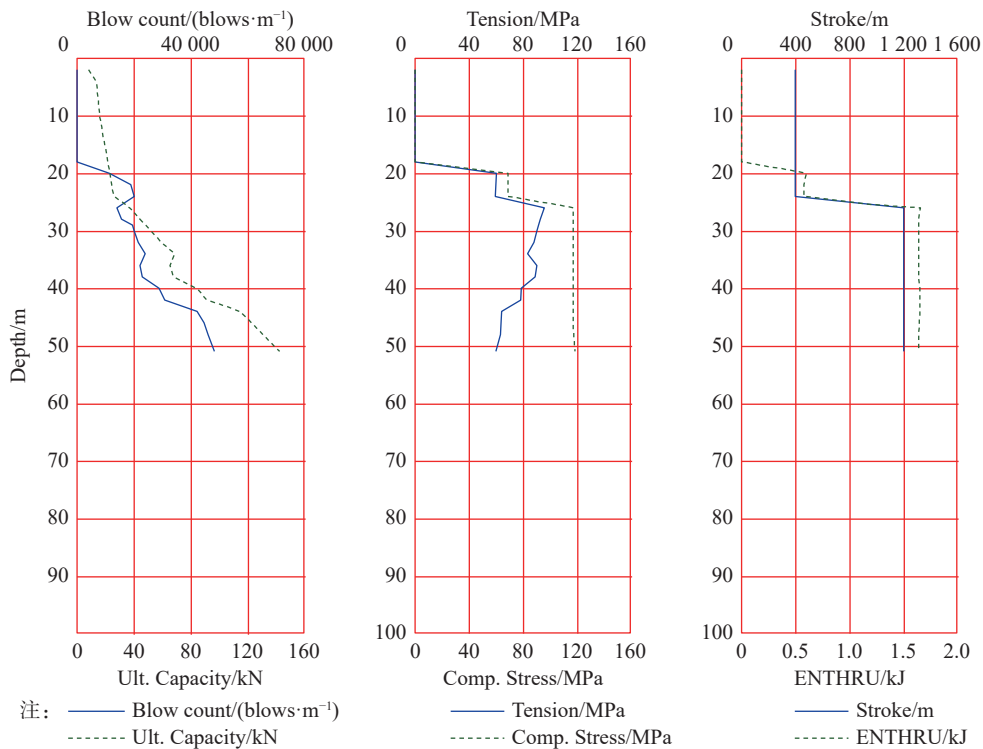


图 3 液压锤的可打性分析结果

Fig. 3 Results of hydraulic hammer driveability analysis

选择“双船抬吊翻桩沉桩”模式施工。利用 600 t 辅吊船来配合“大申号”主吊船完成钢管桩翻桩和沉桩等作业。首先需等待辅吊船把溜尾钳拆除后,其次主吊船将竖立的单桩吊运至稳桩平台的抱桩器内,完成单桩直立状态调整及自沉。同时依靠稳桩平台的结构来控制沉桩精度,保证了单桩基础沉桩定位的准确度。结合了海上场区地质、海况和单桩参数等数据分析,确定了稳桩平台的主要参数,定位桩和悬挂系统: 300 t, 稳桩平台重量: 370 t, 抱箍有效作业直径: 6.5~8 m。

2 单桩沉桩施工技术

首先,根据本工程总体部署,严格做好单桩基础沉桩作业前的准备工作。其中包括稳桩平台船就位、安装定位平台和辅桩沉设等准备作业。其次将起吊钢管桩,利用 1 500 t“大申号”起重船与 600 t 起重船协同配合,完成竖桩和翻桩等作业。在竖桩完成后,将钢管桩送入稳桩平台的定位位置,借助 IHC S-2000 液压打桩锤进行沉桩作业。最后拆除定位平台等作业。单桩基础沉桩作业流程如图 4 所示。

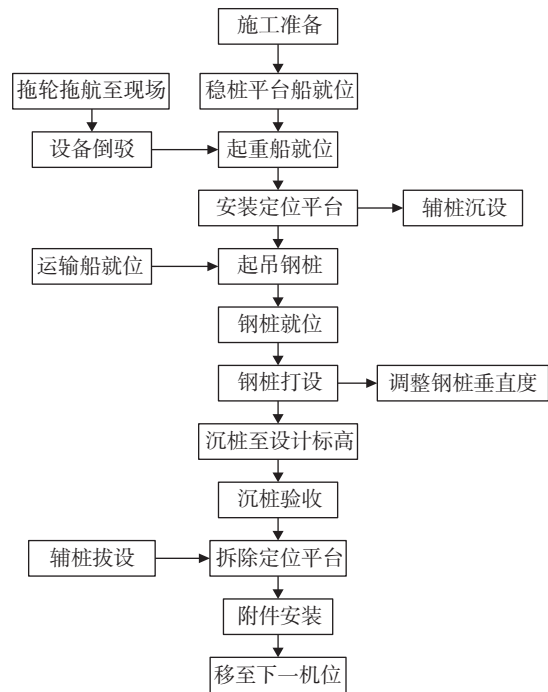


图 4 沉桩施工工艺流程图

Fig. 4 Construction process flow diagram of pile driving

2.1 稳桩平台船就位

根据钢管桩的设计坐标,由 GPS 定位系统导航

稳桩平台船航行至钢管桩沉桩位置的上游方向附近停船。与此同时,将艏部2个锚和艉部4个锚分别按设计坐标抛出,由4个定位锚将稳桩平台船稳住。稳桩平台船抛锚就位如图5所示。

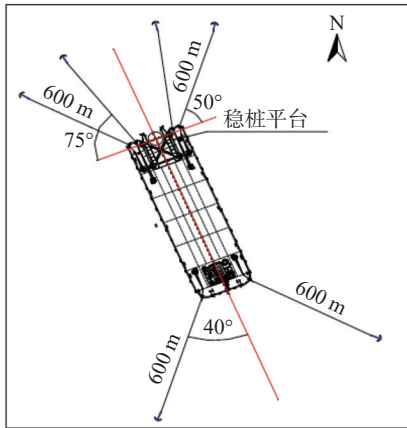


图5 稳桩平台就位示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the positioning of the pile stabilizing platform

2.2 施工船舶就位

将两艘起重船拖航至施工海域,航行至稳桩平台船的对面方位。根据流向确定起重船的初始就位位置,按计划抛出第一口锚。当起重船定位时,艏部朝向稳桩平台船,并留有足够的安全距离。当起重船就位时,利用锚艇在艏部和艉部抛“八”字锚,同时在艏部和艉部各增加一个牵引锚,抛锚后可以通过绞锚,将起重船艏部舷边与稳桩平台船船边距离调整到100 m左右。当运桩驳顶流进挡抛锚就位时,其摆向需与起重船轴线呈垂直状态。稳桩平台就位如图6所示。

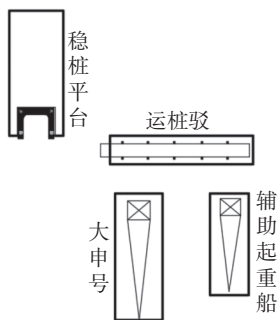


图6 稳桩平台就位示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the positioning of the pile stabilizing platform

2.3 稳桩平台作业步骤

1) 稳桩平台被拖航至桩基坐标点抛锚,通过操控锚泊系统,实现稳桩平台精确就位。

2) 在稳桩平台四角的导向管内,插入临时支撑桩,稳桩平台临时支撑桩沉桩如图7所示,并采用振动锤沉桩至施工的设计标高。

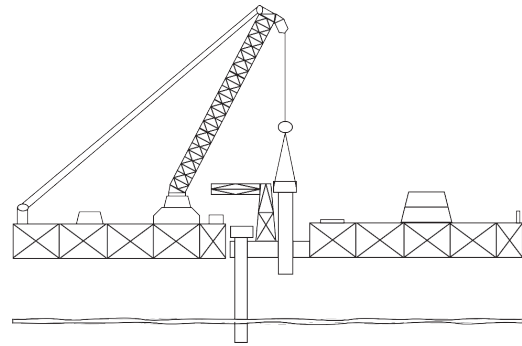


图7 稳桩平台临时支撑钢管桩沉桩示意图

Fig. 7 Schematic diagram of temporary support steel pipe pile sinking on the pile stabilizing platform

3) 将稳桩平台整体提升后,其需离开船体,平台整体提升如图8所示。

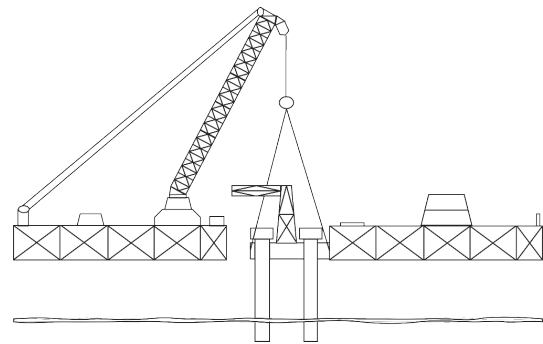


图8 稳桩平台整体提升示意图

Fig. 8 Schematic diagram of overall rise of the pile stabilizing platform

4) 利用悬挂系统将其置于临时支撑桩上,经调平后,再与临时支撑桩锁紧,构成了一个稳定可靠的海上稳桩平台。稳桩平台作业状态如图9所示。

2.4 单桩沉桩施工

1) 抬吊、竖桩

首先主吊船与辅吊船开始同步起吊,当钢管桩完全离开运桩驳甲板大约0.5 m时,暂停起吊。再次检查钢丝绳受力情况,确认无异常后继续起吊。当钢管桩距离运桩驳甲板6~7 m时,运桩驳退出施工

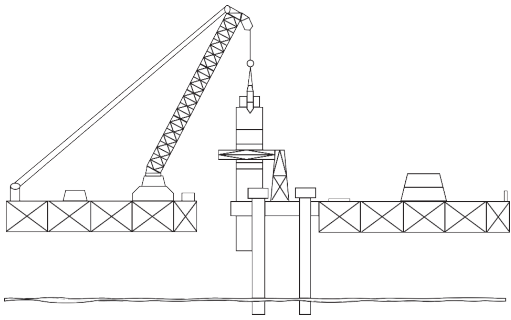


图 9 稳桩平台工作状态示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the working status of the pile stabilizing platform

区域。待运桩驳退出后,两艘起重船开始相互协同配合完成竖桩作业。竖桩施工完成后辅吊船继续下放吊钩,使钢丝绳不受力。同时主吊船继续上升吊钩,使单桩翻身吊耳处在水面上 2~3 m 位置时,安排交通船将单桩翻身卸扣抽出。

“大申号”主钩缓慢上升,同时翻身主钩逐渐下降至无负载状态。在整个翻桩过程中,确保索具始终保持垂直受力。同时,需预留桩底与海床面之间约 2m 的安全间距,以防单桩因意外触底,从而导致脱钩等安全事故。待单桩位于垂直状态后,便可缓慢解除翻身吊起重索具的约束。

2) 吊桩入龙口

钢管桩翻身直立状态后,起重船通过自抛钩系统,使得副钩吊运的设备与桩管吊耳分离,接着通过执行船尾八字锚的绞锚作业,以此确保起重船退至预定安全距离之外。随后,起重船利用横向绞锚进行横向移动,直至其与稳桩平台的中心线对齐,继而利用船首的八字锚绞锚操作,来精确调整起重船与稳桩平台间的相对位置,以便将钢管桩准确放入稳桩平台上。

在稳桩定位平台上的全站仪观测架立点处各配置一台全站仪。分别位于大致呈直角关系的两个方向上,保持对钢管桩的桩身垂直度进行精确测量。利用调节千斤顶、升降主钩以及扒杆转动等方式,来确保钢管桩的垂直度误差不超过 3%。随后,通过精确调控千斤顶的伸缩程度来实现钢管桩的预抱紧作业。

3) 钢管桩自沉

钢管桩自沉现象是指单桩基础仅靠自重深入海床土层的深度。需待垂直度控制至设计要求范围内

时,“大申号”起重船的主钩缓慢下降,此时钢管桩开始下沉。值得注意的是,在钢管桩触底的过程中,若下沉速度过快,则可能导致钢管桩因受到土壤阻力而发生过早脱钩。因此,在下沉过程中,必须密切关注起重船的负载变化,确保其不应过快^[18]。

在进行自沉作业时,需持续使用两套全站仪对钢管桩的垂直度实施即时监控。如果在下沉阶段,观察到桩体垂直度偏离了预定标准,应立即通过调节主钩的高度或改动千斤顶的工作状态,来纠正钢管桩的垂直度,使其回归至设计参数范围内。待垂直度满足规定条件后,方可继续执行下沉操作。如偏差过大,则将钢管桩抬离泥面^[19]。需待钢管桩桩身处于自由垂直状态后,再重新下放。待钢管桩自沉无进尺后,需静置观察 5 min 以上。确认无异常情况,“大申号”起重船下放主钩并解除索具约束。

4) 锤击沉桩

当桩基停止沉降时,先检查桩基垂直度是否满足要求。如果不满足则使用抱桩架的液压系统进行纠偏,同时测量人员需借助经纬仪来测量钢管桩垂直度,直到垂直度满足要求。待桩基可以自由站立不再下沉,且稳定 15 min 后,起重船主钩松钩。主钩开始将液压打桩锤从甲板吊至钢管桩顶部上方,小钩抬吊打桩锤的液压油管,配合主钩施工。

起重船将液压锤桩帽套入钢管桩顶部。由于锤的重量还会使桩基继续下沉一定深度,当桩基沉降停止时,需再次检查桩基的垂直度是否满足要求。如果不满足则采取上述措施进行纠偏。

当锤击开始时,需先使用低能量级别进行作业。在钢管桩沉桩过程中,测量人员监测钢管桩的垂直度是否满足设计要求。如出现偏差应及时通知抱桩系统操作人员,对钢管桩垂直度进行纠偏,直到垂直度满足要求。当桩基入土达到一定深度,桩基与土壤之间的摩擦力足够大时,桩基便会牢牢嵌固在土壤里。此时,液压锤可以逐步提高打击能量,进行正常沉桩作用。测量人员需时刻监测钢管桩的沉桩过程,记录贯入度、锤击数和施打时间。当液压锤桩帽接近抱桩器时,松开抱桩器。继续沉桩至设计标高时,检查无误后停锤,沉桩作业完成。待沉桩完成后,将液压锤吊至甲板,起重船移至下一机位^[20]。

3 单桩基础沉桩垂直度控制与纠偏措施

3.1 钢管桩竖桩垂直度控制

稳桩平台上的上下抱箍间距大约为11米,每层抱箍沿着圆周均匀分布了四个液压缸推杆,用于调整钢管桩的垂直状态。为了保护钢管桩的涂层不受损坏,所有液压缸推杆的末端都装配了橡胶滚轮。

在进行垂直度调整时,需按照从顶部到底部的顺序操作:先利用上方抱箍中的千斤顶使钢管桩保持竖直,并确保橡胶轮紧密接触桩身。接下来,调整下方抱箍中液压缸推杆的位置,仅需让橡胶轮轻轻触及桩体即可。上下抱箍各配有一个独立的液压泵站,并且每个液压缸的油路都是封闭循环的。

初次校正钢管桩的垂直度应当在钢管桩就位的同时进行,而首次校正尤为重要。考虑到钢管桩质量巨大,纠正偏差较为复杂,因此,在钢管桩插入并自然下沉的过程中,应及时进行垂直度的调整。为了防止后续施工影响垂直度,该阶段对钢管桩的倾斜度控制更加严格,要求垂直度的预设控制值不大于1%。

3.2 钢管桩沉桩垂直度控制

在竖桩垂直度得到精确调控后,钢管桩以自重竖立于海床上,且由双层导向抱箍来确保其支撑稳定。下阶段要进行锤击过程中的垂直度调控。

本项目采用的沉桩装置为IHC S-2000型液压冲击锤。在吊装前,首先应将送桩器与冲击锤组装为一体。其次起吊已组装好的液压锤,并完成连接液压管。液压锤吊装时,关键在于调整锤体的中心位置,力求使其靠近桩中心。当锤体摇晃稳定后,需缓慢下落吊钩,使送桩器插入桩顶法兰的内孔中。

由于锤体重量大,必须利用稳桩平台船的稳锁卷扬机,设置缆风绳,采用钢丝绳直径不小于43 mm。在进行钢管桩顶压锤作业时,钢桩可能会进一步下沉,这会导致其垂直度发生变化。因此,在实施桩顶压锤前后,应重新测量桩身的倾斜度。一旦发现桩身倾斜度超过1%,就必须对其进行重新校正,确保倾斜度控制值以1%为准。

在沉桩作业期间,对垂直度的精度控制分为初调和终调两个阶段。初步校准阶段:将钢管桩移至稳桩平台的下层位置,确保钢管桩精确对准稳桩平台下层的中心。随后,稳桩平台的上下层同步紧固,

并均匀预紧所有千斤顶。首先,通过调节两个钩头高度来调整垂直吊耳方向上的“垂线”垂直度。另一方向则通过起重船的扒杆调整方位,使得单桩处于垂直状态,同时液压缸推杆顶滚轮轻触管桩外壁。接着,缓慢减轻吊荷并慢松钩头,从而使单桩能够沿着稳桩平台的上下层定向平稳地自沉。同时检查垂直度,如需调整则尽量用稳桩平台下层调整,直至单桩自沉稳定。最终校准阶段:将法兰水平度控制在1%以内松主钩。如有调整则调整校对垂线,找到垂线控制点。如果微调则以原状态新垂线控制调整,否则需重新挂双钩,将单桩拔起按照以上方法,使桩在垂直状态下以新的“垂线”为准重新调整桩的垂直度,直到垂直度符合要求。

4 结论

本文以江苏启东某海上风电项目为背景,对其海上风机基础形式及施工工艺进行分析阐述,来探索更安全可靠、更合理、更高效经济的施工方式。首先,根据钢管桩的典型特征以及施工海域海况等条件,选定了1500 t“大申号”起重船、液压打桩锤等船舶设备。其次,按照设计的单桩基础沉桩工艺流程进行作业,分析了稳桩平台船就位、安装定位平台和辅桩沉设等准备作业,同时探讨了液压打桩锤进行沉桩作业的可行性,以及1500 t“大申号”起重船与600 t起重船的协同配合来解决完成竖桩、翻桩等沉桩施工难点。最后,进一步探讨了钢管桩在竖桩、沉桩施工中垂直度的控制与纠偏方法。该施工工艺有效地保障了工程质量和进度预期,经济效益明显。

同时本文在现有的研究基础上还发现不足,本文仅选取了江苏启东某海上风电项目为背景进行阐述,对于不同的海域条件施工工艺存在一定局限性。钢管桩在竖桩、沉桩施工中垂直度调整至关重要。其成熟度、先进度同整个工程质量与效益紧密相连,工程设备与技术还需不断进行应用与分析。希望本文能够给海上风电大直径钢管桩沉桩施工工艺提供一些思路与借鉴。

参考文献:

- [1] 王诗超,刘嘉畅,刘展志,等.海上风电产业现状及未来发展分析[J].南方能源建设,2023,10(4):103-112. DOI:10.16516/j.

- gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
- WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
- [2] 付艳, 周晓风, 戴国安, 等. 海上风电直流耗能装置和保护配合策略研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 178-186. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201244.
- FU Y, ZHOU X F, DAI G A, et al. Research on coordination strategy for an offshore wind power DC chopper device and protection [J]. *Power system protection and control*, 2021, 49(15): 178-186. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201244.
- [3] 樊长辉. 海上风机单桩基础沉桩施工作业要点概述 [J]. *海洋工程装备与技术*, 2023, 10(2): 1-7. DOI: 10.12087/oect.2095-7297.2023.02.01.
- FAN C H. A brief summary of key points for the installation of offshore wind turbine monopile foundation [J]. *Ocean engineering equipment and technology*, 2023, 10(2): 1-7. DOI: 10.12087/oect.2095-7297.2023.02.01.
- [4] 袁汝华, 黄海龙, 孙道青, 等. 海上风电风机基础结构形式及安装技术研究 [J]. *能源与节能*, 2018(12): 59-61. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2018.12.023.
- YUAN R H, HUANG H L, SUN D Q, et al. Research on basic structure and installation technology of offshore wind turbine [J]. *Energy and energy conservation*, 2018(12): 59-61. DOI: 10.16643/j.cnki.14-1360/td.2018.12.023.
- [5] 刘晋超. 海上大直径单桩基础沉桩施工关键技术研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(1): 47-51. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.007.
- LIU J C. Research on key technologies of pile driving construction for monopile [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(1): 47-51. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.01.007.
- [6] 校建东. 海上风电单桩基础地基加固技术研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 184-192. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.019.
- XIAO J D. Research on ground reinforcement technology of offshore wind power monopile foundations [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 184-192. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.019.
- [7] 郑金海, 丁星宇, 管大为, 等. 循环荷载作用下海上风机单桩基础周围砂土沉降与对流特性 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(6): 552-561. DOI: 10.3876/j.issn.10001980.2020.06.010.
- ZHENG J H, DING X Y, GUAN D W, et al. Characteristics of soil subsidence and convective motion around offshore windfarm monopile foundations subjected to long-term cyclic loading [J]. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2020, 48(6): 552-561. DOI: 10.3876/j.issn.10001980.2020.06.010.
- [8] 杜志强, 张跃辉. 移动式稳桩平台在海上风电单桩基础沉桩中的应用 [J]. *江苏建材*, 2019(增刊2): 39-41.
- DU Z Q, ZHANG Y H. Application of mobile pile stabilizing platform in pile driving of single pile foundation of offshore wind power [J]. *Jiangsu building materials*, 2019(Suppl.2): 39-41.
- [9] 李文明, 张云. 基于风机塔筒倾覆监测系统的研究与应用 [J]. *电力大数据*, 2022, 25(1): 9-17. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2022.01.008.
- LI W M, ZHANG Y. Research and application based on overturning monitoring system of wind turbine tower [J]. *Power systems and big data*, 2022, 25(1): 9-17. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2022.01.008.
- [10] 马骏, 孙肖菲, 孙立强, 等. 海上风电超大直径单桩可打性与沉桩疲劳损伤分析 [J]. *船海工程*, 2022, 51(4): 105-109, 115. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2022.04.022.
- MA J, SUN X F, SUN L Q, et al. Drivability and driving fatigue damage analysis of super large diameter mono-pile for offshore wind farm [J]. *Ship & ocean engineering*, 2022, 51(4): 105-109, 115. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2022.04.022.
- [11] JIANG Z Y. Installation of offshore wind turbines: a technical review [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2021, 139(Apr.): 110576.1-110576.21. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110576.
- [12] 朱益华, 罗超, 余佳微, 等. 全功率直驱风机电网友好型控制策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(02): 177-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230594.
- ZHU Y H, LUO C, YU J W, et al. Grid-friendly control strategy of full power rated direct drive wind turbines [J]. *Power system protection and control*, 2024, 52(02): 177-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230594.
- [13] 陈进. 浅谈海上风电单桩基础沉桩施工技术 [C]//中国水运建设行业协会. 中国水运建设行业协会工程施工专业委员会 2020 年度技术交流会, 深圳, 2020-12-01. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020: 672-679.
- CHEN J. Discussion on the construction technology of single pile foundation sinking for offshore wind power [C]// China Water Transport Construction Industry Association. Collection of Papers from the 2020 Technical Exchange Conference of the Engineering Construction Professional Committee of the China

- Water Transport Construction Industry Association, Shenzhen, 2020-12-01. Beijing: China Communication Press House Co., Ltd., 2020: 672-679.
- [14] 靳华伟. 海上超大直径钢管桩单桩基础工程的施工测量控制 [J]. 测绘与空间地理信息, 2023, 46(6): 172-174. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2023.06.048.
- JIN H W. Construction control survey of single pile foundation engineering of offshore super-large diameter steel pipe piles [J]. *Geomatics & spatial information technology*, 2023, 46(6): 172-174. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2023.06.048.
- [15] 郑洪刚. 海上风电大直径单桩施工定位及桩身垂直度控制测量技术 [J]. 科技创新与生产力, 2022(5): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2022.05.043.
- ZHENG H G. Large-diameter single pile construction positioning and pile perpendicularity control measurement technology for offshore wind power [J]. *Sci-tech innovation and productivity*, 2022(5): 43-45. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9146.2022.05.043.
- [16] 钮国平. 海上风电基础单桩施工垂直度测量控制 [J]. 工程建设与设计, 2020(20): 27-28. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2020.10.212.
- NIU G P. Measurement and control of vertical degree of offshore wind power foundation single pile construction [J]. *Construction & design for engineering*, 2020(20): 27-28. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2020.10.212.
- [17] 苏惠杰. 海上风电风机基础结构形式及安装技术 [J]. 珠江水运, 2024(5): 111-113. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2024.05.013.
- SU H J. Basic structural form and installation technology of offshore wind turbines [J]. *Pearl river water transport*, 2024(5): 111-113. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2024.05.013.
- [18] 王洪庆, 孙伟, 刘东华, 等. 海上风电大直径单桩自沉与溜桩分析 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(1): 64-71.
- WANG H Q, SUN W, LIU D H, et al. Statistical analysis of self-weight penetration and pile running for large diameter monopiles in offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(1): 64-71.
- [19] 李照霞, 薛舜, 周微, 等. 全风况下双馈风电机组参与电网频率支撑研究 [J]. 机电工程技术, 2023, 52(5): 140-144. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.006.
- LI Z X, XUE S, ZHOU W, et al. Research on frequency support of doubly-fed wind turbine under full wind conditions [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2023, 52(5): 140-144. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.006.
- [20] 颜毅斌, 管俊杰, 吉天平. 基于 EB-1D-TP 编码算法的风电机组滚动轴承故障特征提取研究 [J]. 机电工程技术, 2024, 53(06): 227-230. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.06.052.
- YAN Y B, GUAN J J, JI T P. Research on fault feature extraction of wind turbine rolling bearings based on EB-1D-TP encoding algorithm [J]. *M&E engineering technology*, 2024, 53(06): 227-230. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2024.06.052.

作者简介:



王耀武

王耀武(第一作者)

1982-, 男, 高级工程师, 学士, 主要研究方向为大型海洋工程装备、海上风电等(e-mail) 174597526@qq.com。



张永康

张永康(通信作者)

1963-, 男, 博士生导师, 教授, 长期从事航空海工高端装备抗疲劳制造研究工作, 致力于深海石油钻井平台、超大型海上风电安装平台、深远海原油转驳装备的抗疲劳设计、低应力制造、激光锻造增材制造与修复等(e-mail)zykseu@163.com。

(编辑 孙舒)