

深水模块化多用途稳桩平台研究与应用

赵冬雷, 田博宇

(中交第一航务工程局有限公司总承包工程分公司)

摘 要:在复杂地质环境下大直径单桩风机基础及四桩导管架基础沉桩施工过程中,为减少成本投入,提高工效,依托模块化设计,研发了可用于多种工况条件下的深水模块化多用途稳桩平台。通过模块化设计将平台结构分为 5 段,根据水深调节平台结构段,拼接成不同高度的稳桩平台以适用 10~50 m 水深,适用海域水深范围较大;4 根定位桩沉入泥,提高了平台自身的稳定性,保证了施工安全;通过起重船整体吊装,减少了安拆时间,实现施工中沉桩数字化控制,极大地提高了施工效率,应用前景广泛。

关键词:海上风电;稳桩平台;模块化;多用途

0 引言

随着“双碳”目标的提出,风电行业作为实现此目标的重要方法之一得到迅速发展,装机数量逐年上升,海上风电迎来新的机遇。但是随着风力发电机组单机容量、单个风场规模不断增大,风场离岸距离越来越远、水深越来越深,风机基础钢管桩直径、长度均有所增大。

目前国内外稳桩平台多为坐底式及吸力筒式,大多只能进行单桩基础施工或四桩导管架基础施工,施工工况较为单一,且往往根据项目特定水深设计,适用的水深范围较小,平台的综合利用率较低^[1]。

深水模块化多用途稳桩平台采用防沉板式和悬挂式导向架结构形式,可用于单桩和导管架桩施工。稳桩平台整体自上而下分为 5 部分,各段间通过相同的法兰等结构连接,方便装拆组合,适用于 10~45 m 水深作业。顶段包括桁架结构及布置于其侧面的上下层抱桩器,该段既可以与下续几段组合使用,也可以作为一个独立设备安装于船侧使用。

1 工程概况

华能汕头勒门(二)海上风电场项目风机基础及风机安装工程一标段项目位于汕头市东部、南澳县南部海域的勒门列岛附近,距离北侧南澳岛最近距离约 18.5 km,距离西侧汕头市陆地最近距离约 14 km。共包含 27 台单桩基础(直径 8~9.3 m,桩长 93~101 m,最大桩重 1970 t)制作、沉桩施工、附属安装;27 台 11 MW 风机安装;1 座海上升压站下部基础施工以及其它的安全监测等工作。

2 技术研发内容

2.1 平台整体结构

稳桩平台整体分 5 部分,依次为基础段。2、3、4 段和顶段,各段高度分别为 19 m、11 m、20 m、15.5 m 和 3.6 m,各段间通过相同的法兰等结构连接,方便装拆组合。该平台可通过不同段的组合来进行不同水深、不同地址及不同风机基础的沉桩施工。

稳桩平台顶段包括桁架结构及布置于其侧面的上下 2 层抱桩器,该段既可以与下续几段组合使用,也可以作为一个独立设备安装于施工船舶船侧使用^[2]。2 层抱桩器上下间距为 15 m。第 2—4 段也为桁架结构,通过法兰等形式连接,便于与顶段及基础段组合使用。基础段采用防沉板式结构,防沉板尺寸为 38 m×36 m,采用钢板+加劲肋的结构形式。稳桩平台如图 1 所示。



图 1 稳桩平台

平台可施工单桩直径设计为 7~11 m,高度 54.44 m,长 32 m,宽 22 m,辅助桩直径 2.5 m,

长 80 m, 总重 2 034 t(含 4 根辅助桩总重 484 t)。配置无线传输倾角仪、钢桩垂直度测量仪器及顶推油缸压力和行程监测等, 并可实时传送至集控室。配备图形化显示系统, 根据采集的数据显示稳桩平台 3D 模型姿态及各项参数。稳桩平台分解图如图 2 所示。

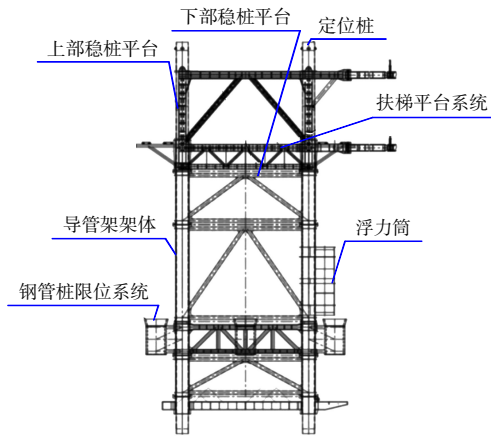


图 2 稳桩平台分解图

其中, 上部稳桩平台的底端与下部稳桩平台的顶端通过法兰连接; 导管架架体的顶端与下部稳桩平台的底端通过法兰连接; 导管架架体与扶梯平台系统通过法兰连接; 浮力筒的两端密闭, 整体与导管架架体通过法兰连接; 导管架钢管桩限位系统安装于导管架架体的侧面, 用于导管架基础施工。

2.2 模型计算

采用 ANSYS 建立模型。稳桩平台及定位桩采用梁单元 Beam188 整体建模, 稳桩平台与定位桩通过节点刚性区域的方式连接, 上层油缸平台仅连接 UX、UY、UZ 三个方向自由度, 下层油缸平台仅连接 UX、UY 两个方向自由度。导向油缸用质量单元 MASS21 模拟, 与相应梁结构区域建立刚性区域。对不同工况下结构受力和位移进行有限元分析^[3-5]。稳桩平台各工况下各结构计算结果汇总见表 1, 表中分别列出各构件的最大组合应力、按整体稳定性计算得出的折算应力及许用应力。

表 1 稳桩平台结构计算结果汇总表

| 工况 | 立柱应力 | | | 联结系应力 | | | 平台应力 | | |
|-------------------|-------|-------|------|-------|-------|------|-------|-------|------|
| | 组合应力 | 折算应力 | 许用应力 | 组合应力 | 折算应力 | 许用应力 | 组合应力 | 折算应力 | 许用应力 |
| 工况 1(定位桩未安装) | 32.5 | 41.4 | 252 | 55.4 | 57.5 | 254 | 80.0 | 80.0 | 252 |
| 工况 2(定位桩插入未振沉) | 27.1 | 34.7 | 252 | 54.2 | 61.1 | 254 | 80.9 | 80.9 | 252 |
| 工况 3-单桩下放阶段(无风) | 46.6 | 61.2 | 223 | 88.7 | 90.5 | 226 | 210.9 | 211.0 | 223 |
| 工况 3-单桩下放阶段(有风) | 49.3 | 65.1 | 252 | 89.5 | 91.3 | 254 | 216.6 | 218.7 | 252 |
| 工况 3-单桩打入海床阶段(无风) | 70.7 | 92.6 | 223 | 157.4 | 162.0 | 226 | 209.0 | 209.1 | 223 |
| 工况 3-单桩打入海床阶段(有风) | 77.4 | 102.2 | 252 | 166.4 | 182.9 | 254 | 214.7 | 216.8 | 252 |
| 工况 4(定位桩挂在稳桩平台上) | 109.0 | 109.0 | 291 | 78.7 | 169.6 | 294 | 222.3 | 222.3 | 291 |
| 工况 5(定位桩插打后抗台风) | 37.2 | 47.0 | 291 | 55.5 | 123.6 | 294 | 81.5 | 82.0 | 291 |
| 工况 6(稳桩平台吊装翻身) | 116.1 | 164.3 | 291 | 90.6 | 210.9 | 294 | 214.4 | 214.4 | 291 |

通过 ANSYS 对深水模块化多用途稳桩平台在各种工作状态下的受力进行分析, 从结果可以看出深水模块化多用途稳桩平台完全满足各类工作状态下的安全要求。同时这些数据完全可以为后续稳桩平台的改进和调整提供参考, 基于模型的模块化结构结合数据管理系统的应用, 能够有效地缩短深水模块化多用途稳桩平台的改造周期, 使其更快地投入到不同的工作环境中, 适应不同的工程项目, 提高稳桩平台的重复利用率, 创造更多价值。

2.3 技术创新点

收集整理现有成熟悬挂式、船载式不同工况

稳桩平台技术要点及要求, 进行分析整合, 并应用模块化设计, 首次提出适用于不同基础、不同水深、不同工况的稳桩平台; 结合实际需求, 优化单桩稳桩平台垂直度调节及控制系统, 提高系统集成程度, 在有线传输控制基础上增加无线传输控制, 加大垂直度的调直力矩及可适用的单桩直径范围。

稳桩平台上下层抱桩器各安装 4 个液压千斤顶, 平台上安装水平度自动监测设备, 通过无线传输, 可实时监测顶推油缸相对位置及平台水平度, 结合上下层抱桩器相对位置, 可直接计算出单桩倾斜度, 实现单桩施工全过程桩身垂直度监控。

3 稳桩平台施工工艺

3.1 单桩施工工艺流程

单桩施工前首先进行扫海及清障等施工准备工作,完成前序工作后起重船及稳桩平台运输船进场驻位,起重船进行稳桩平台安装、调平,然后起重船开始进行单桩起吊、翻桩、立桩起吊钢管桩进入稳桩平台龙口,最后进行沉桩作业。单桩施工工艺流程图如图 3 所示。

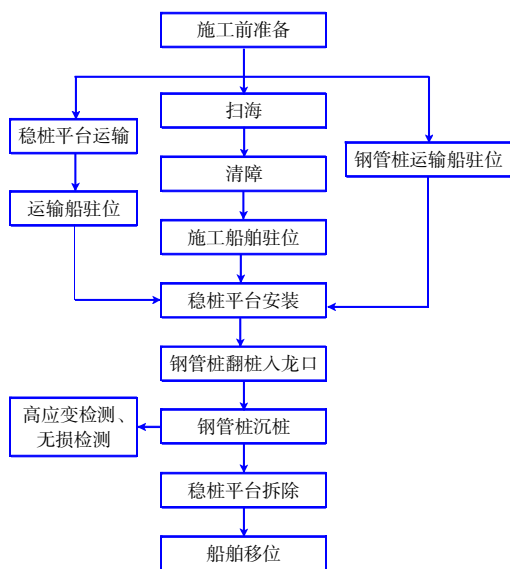


图 3 单桩施工工艺流程图

3.2 平台搭设施工

1) 船舶驻位

船舶驻位采用 GPS 及北斗精确定位,起重船先驻位,船首抛 3 口锚,船尾抛 3 口锚,抛锚长度 800 m,起重船船首向 45°驻位。

2) 稳桩平台搭设

稳桩平台首次搭设时,由运输船竖向运至施工现场。运输船靠主施工船左舷,抱桩器朝向起重船船首方向。主施工船主钩挂钩完成后,钢丝绳带紧,解除平台底部约束。继续提升,待稳桩平台完全离开运输船后,运输船绞离、起锚离开机位^[6]。

根据卫星定位数据,通过绞锚将平台移至设计位置,缓慢下降主钩,完成稳桩平台的自沉,最后完成 4 根辅助桩的沉桩。

从起重船上吊 YZ-400 双锤联动振动锤组振沉辅助桩,振沉顺序按照对角顺序进行,振沉期间进行稳桩平台水平度调平,振沉完成后稳桩平

台与辅助桩固定,后续进行单桩的沉桩作业。

3) 沉桩施工

稳桩平台搭设完成后进行沉桩施工,钢管桩运输船驻位前,起重船向外绞锚 150 m,钢管桩运输船侧靠起重船左舷驻位,钢管桩重心位置与吊机中心对齐,桩顶朝向船尾,运输船后锚提前抛出,方便吊桩时调整运输船位置。

运输船驻位完成后,起重船进行单桩的起吊翻桩工作,起重船起吊钢管桩向稳桩平台龙口处绞锚,绞锚过程中钢管桩与稳桩平台抱桩器保持安全距离,然后将钢管桩送入稳桩平台龙口中心位置。钢管桩入龙口后缓慢下放,钢管桩依靠自身重力入土,过程中每自沉 2 m 观测一次,测量人员位于龙口底边两端约呈 90°观测钢管桩垂直度,并反馈于千斤顶操作人员,通过操控室内集控系统完成千斤顶伸缩,从而调整钢管桩垂直度。前期需严格控制垂直度,确保钢管桩垂直度偏差小于 0.1%,持续调控垂直度至钢管桩初沉结束。待钢管桩自重下沉稳定后,复测钢管桩的垂直度及平面位置偏差,若不满足要求,则通过起吊钢管桩脱离海床重新入土,确保钢管桩初始垂直度和平面位置偏差满足设计要求后方可摘钩。自沉结束后,高应变检测人员提前至平台,安装高应变检测仪器。

钢管桩自沉完成后进行送桩器安装。准备工作完成后,吊锤至桩顶,双主钩缓慢下落压锤沉桩。压锤过程中持续观察垂直度,如有偏差可调节主起重船钩头摆位或微调顶推油缸。首次压锤后,钢管桩可能会发生自沉,若产生自沉则在自沉结束后再观察 10 min 后继续施工。

钢管桩待压锤沉桩完成后,主起重船主钩下落 0.3 m 并保持吊带与拉直状态相比存在 0.3 m 左右松动量,启动液压冲击锤,先以最小能量单击,随后根据进尺逐渐调整锤击能量;在钢管桩进入易溜桩段前改为手动单击,待桩体相对稳定后再次锤击。遇到不可避免发生溜桩的情况,对可能发生的溜桩深度进行估算,如果溜桩长度可控且较短,则适当加长液压锤吊装钢丝绳的松弛量,避免溜桩时液压锤下落对吊机造成冲击。如果溜桩长度不可控,长距离溜桩风险高则适当缩短液压锤吊装钢丝绳的松弛量,使得发生长距离溜桩后液压锤与钢桩快速脱离,避免因液压锤长距离自由落体产生的巨大惯性力损害索具和吊机。

沉桩过程中钢管桩每次贯入 0.3~0.5 m 时进行一测一纠偏,随着钢管桩入泥深度的增加,逐渐增大测量的贯入度,每贯入 1~2 m 时进行一测一纠偏。

4) 稳桩平台拆除

单桩沉桩完成后安装内平台,打开外侧抱桩器。使用振动锤依次完成辅助桩拔桩并固定插销(优先对角),将稳桩平台起吊回收,至此完成单个机位基础沉桩施工内容,移船至下一机位。

3.3 平台沉桩控制

单桩在沉桩过程中通过安装在抱桩器内侧、分布于不同方位的 8 个千斤顶可以调整钢管桩垂直度。在打桩过程中,实时测量钢管桩垂直度,依据其偏斜程度不断调整。保证钢管桩始终竖直,使垂直度始终维持在设计偏差范围内沉贯入海。通过实时测量、实时调整钢管桩垂直度的方法控制单桩垂直度偏差小于 0.3%。

4 实施效果

在华能汕头勒门(二)海上风电项目工程建设过程中,通过采用深水模块化多用途稳桩平台,切实保障超大直径单桩沉桩作业顺利完成,有效保障 27 台钢管桩基础施工垂直度偏差低于 0.3% 的高标准。同时,根据施工需要,配合深水模块化稳桩平台大力开展技术创新和工艺优化,提高沉桩效率,超大直径单桩沉桩施工效率达到国内顶尖水平。

同时,在深水模块化多用途稳桩平台的协助下,钢管桩基础沉贯作业进度相较于传统作业更快更稳。在合适的情况下 23 h 便能高质量完成一个单桩基础沉贯工作;在较差的海况下,也能顺利完成沉桩任务。为后续施工争取到了更多窗口期,为项目按期完工奠定了坚实的基础。

5 平台优势

对比国内外同类稳桩平台,该平台优势包括:

1) 能够实现单桩直径 7~11 m 及桩间距 26~32 m 的四桩导管架基础施工;2) 能适用 10~50 m 水深

单桩基础施工及 60 m 水深内四桩导管架基础施工;3) 可针对不同海域、海况、地质、水深,改变使用模态,提高适用性;4) 模块化装配,转场速度快、提高工效;5) 模块易替换,维修效率高,成本低;6) 远程操控,实现作业面无人化,安全有保障;7) 应用遥感无线传输,实时监测顶推油缸相对位置,实现桩身垂直度监测数字化。

6 经济效益

目前市场上常规稳桩平台适用水深变化范围仅在 15 m 左右,且适用性较为单一,本多用途平台通过法兰化拼接设计,可通过各段调整平台高度适用水深变化范围为 40 m,且可通过调整组块兼顾四桩导管架基础施工,水深及基础形式改变时,无需重新制作,至少可减少 1 台稳桩平台的投入,节约成本约 3 000 万元。

7 结语

通过分析国内外现有稳桩平台现状及目前国内海上风电基础发展形式,依托于华能汕头勒门(二)海上风电项目,采用模块化及智能化理念,研发了国内最大深水模块化多用途稳桩平台,并在项目大直径单桩沉桩施工中现场应用,切实保障了项目超大直径单桩沉桩作业顺利完成。项目实施过程依托深水模块化稳桩平台大力开展技术创新和工艺优化,提高沉桩效率,平均 3 d 完成 2 根、最快 23 h 完成 1 根单桩沉桩,超大直径单桩沉桩施工效率达到国内顶尖水平,可持续用于后续海上风电基础施工,未来应用前景广泛。

参考文献:

- [1] 方如意. 超大型变直径单桩稳桩平台设计浅谈[J]. 科技创新导报, 2021, 18(23): 3.
- [2] 罗翔. 海上风电单桩稳桩平台施工技术研究[J]. 数字化用户, 2022(47): 98-100.
- [3] JTJ 145—2015, 港口与航道水文规范[S].
- [4] JTS 144—1—2010, 港口工程荷载规范[S].
- [5] 中国船级社. 材料与焊接规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [6] 中国船级社. 船舶与海上设施起重设备规范[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.