

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.018

# 海上风电导管架群桩施工技术的研究应用

张青海, 李陕锋, 王书稳

(广东华尔辰海上风电工程有限责任公司, 中山 528400)

**摘要:** [目的] 由于目前我国海上风电工程尚未推广应用导管架群桩结构形式基础, 还没有导管架群桩基础施工的成熟技术, 为了填补该项施工技术空白, 也为了解决国内首例导管架四桩型式基础在珠海桂山风电项目的桩基定位控制难题和倾斜度控制难题, 特对该项工艺技术进行了探索研究。[方法] 针对珠海桂山海上风电项目的特殊水文、地质和风浪等海况进行了分析, 反复推敲国际案例, 研究定位测量技术, 邀请行业专家论证, 最终设计出的一套导管架四桩基础空间位置精确定位、倾斜度精确控制、水下多点对接安装的关键成套技术, 并设计了一套桩基施工工装用以辅助群桩施工。[结果] 该套技术方案功能包括双层导向架着床精确定位调平、下层导向架插桩限位、双层液压千斤顶联动调整钢桩倾斜度和 RTK GPS 搭配全站仪测控系统实时追踪指引导管架与水下桩基多点对接安装, 已成功地应用于广东珠海桂山海上风电示范项目, 优化了设计工序, 高效率、高质量、高精度地完成了全部导管架四桩基础的施工, 为整个风电场项目的快速推进争取了更多的宝贵时间, 为项目后续风机安装、海缆敷设和并网发电等工作的快速展开做好了准备。[结论] 该套技术实现了海上风电导管架群桩型式基础在国内由理论研究转换为工程实践的重大突破, 解决了导管架群桩型式基础在海上风电工程的精确成桩技术难题, 为后续海上风电场导管架群桩基础技术的推广应用作了技术储备和经验推广。

**关键词:** 海上风电; 导管架; 群桩; 成套技术

**中图分类号:** TM614; TU473.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2018)02-0126-07

## Research and Application of Jacket Multi-pile Structure Foundation Installation for Offshore Wind Power Engineering

ZHANG Qinghai, LI Shanfeng, WANG Shuwen

(Guangdong Waltchen Offshore Wind Power Engineering Co., Ltd., Zhongshan, China. 528400)

**Abstract:** [Introduction] Due to the jacket multi-pile structure-foundation has not been widely used in our country up to now, there is no mature technology for using. In order to solve the difficult problem of jack four-pile foundation positioning accuracy control and tilt control for Zhuhai Gui Shan Offshore Wind Power Engineering, we explored a new technology, which fills a domestic gap. [Method] According to carefully analyzed the special hydrology, geology, wind, waves and other sea conditions, combined with international cases, repeated investigation and research, and invite expert argumentation, We finally proposed a new method to control the positional accuracy and tilt accuracy of multi-pile connection, and designed a set equipment to assist jacket installation. [Result] The set of techniques' function include double-deck guide frame for accurate positioning and leveling, lower guide frame for limiting pile inserting, double hydraulic jack is used to adjust the inclination of steel pile, RTK GPS total station real-time tracking and guide jacket connect to multi-pile underwater. The method was successfully used in Zhuhai Gui Shan Offshore Wind Power Engineering, it optimized the design process, made the jacket four-pile foundation installation project completed efficiently, high quality and accurately. The application in the ZhuHai project saved much valuable time, it made a good preparation for wind-turbine installation, sea cable laying and combining to grid. [Conclusion] The application of the techniques promoted the jacket multi-pile theoretical research to engineering practice, solved the difficult problem of jacket multi-pile installation accuracy controlling for offshore wind powering engineering, made a good technical reserve for wide use of jacket multi-pile platform in offshore wind powering engineering.

**Key words:** offshore wind farm; group piles; jacket platform; packaged technology

随着我国新型清洁能源项目的大力开发建设, 海上风力发电项目也在如火如荼地开展起来, 尤其十九

大对新能源产业“十三五”规划宏伟蓝图的提出,迎来了海上风电产业蓬勃发展的机遇,广东省海上风电规划更是大手笔,到2030年底建成投产海上风电装机容量约30 GW<sup>[1]</sup>。海上风湍流强度小,具有稳定的主导风向,风能资源丰富、区域广阔平坦,是陆上风力资源的3倍,将成为未来风电发展的重点<sup>[2]</sup>。

我国近海拥有约 $1.8 \times 10^4$  km长的大陆海岸线,风电可利用海域主要分布在华东、华南的黄海、东海和南海<sup>[3]</sup>。海上风电场的风机基础型式按结构及其安装方法分为桩式基础、重力式基础、吸力式筒基础和浮式基础等。桩基础是最常用的基础,适用于我国近海风电场,其又分为单桩基础、群桩导管架基础、高桩承台基础等<sup>[4-5]</sup>。因其所处的海域、海况、海床地质的不同,各类型基础适用的海域也不同,导管架群桩基础(以导管架四桩为典型)具有结构刚度大、动力响应弱,可避免发生共振,迎流面积分散、设备荷载与风载及波浪力作用下挠度变形小、基础稳固等优势,用于60 m以内水深的海上风电项目更为安全经济<sup>[6]</sup>,导管架四桩基础与其他几种代表类型的比较如图1所示。

海上风电场以四桩与导管架结合作为基础的施工技术在我国仍处于探索阶段,此前国内没有施工经验和实操案例,再加之四桩基础对插桩相对位置与打桩倾斜度的要求较单桩和三桩更高,施工控制难度更大,尤其在受风、浪、流影响的波涛汹涌的

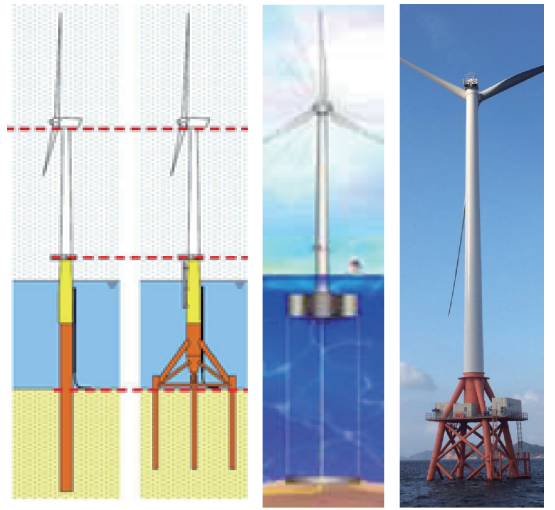


图1 海上风机基础结构型式

Fig. 1 Offshore wind turbine base structure type

海面上实现高质量、高效率沉桩和导管架安装作业具有极大的挑战性。珠海桂山海上风电场是国内第一次采用导管架四桩做基础的海上风电项目,该项目综合分析了风电场的地质、海况等相关资料,参考国内外已有的风机基础结构型式,通过安全、造价等多专业比选最终确定为四桩导管架基础方案<sup>[7]</sup>,本文以该项目为载体,对导管架四桩基础的插桩位置精确控制、倾斜度精确控制、水下多点对接精确控制等关键技术进行了研究论证,并在项目实施过程中进行检验。



图2 风电场平面布置图

Fig. 2 Plan of wind farm layout

## 1 桂山项目简介

珠海桂山海上风电场首批建设 34 台 3 MW 风机, 场址位于珠江河口的伶仃洋水域, 水下地形较平坦, 海底泥面标高一般为  $-6 \sim -11$  m, 属于近海风电场, 如图 2 所示。

## 2 技术方案研究

珠海桂山海上风电场的风机采用四桩导管架基础结构, 是由四根沉至硬质岩层的钢管桩与露出水面的导管架组成, 在导管架顶部设过渡段塔筒和连接法兰, 与风机塔筒对接。风机单机施工顺序为 (1) 打桩 (四桩); (2) 导管架水下对接安装; (3) 风机整体吊装 (或风机现场拼装)。

导管架四根腿与四根桩的连接为内插式, 中对中时桩腿外壁与钢管桩内壁间距理论仅为 95 mm, 其中导管架腿加工存在误差、钢管桩插桩位置存在偏差、插桩倾斜度存在偏差, 各种偏差累计若超出 95 mm, 将发生导管架与钢管桩无法对接的风险。由此可见, 四桩导管架基础的插桩位置控制技术、倾斜度控制技术、水下多点对接控制技术等决定着项目的成败, 对该套技术的研究、论证、应用是整个海上风电项目建设的关键。

### 2.1 定位要求

该风电场风机的四桩导管架基础结构, 桩号分别编号为 01#、02#、03#、04#, 导管架腿对应编号为 01#、02#、03#、04#, 其中导管架 02#、03# 腿设靠船桩, 且导管架该边方向位于西北, 如图 3 所示。钢管桩沉桩设计要求桩顶标高  $-7$  m、桩顶偏位  $< 50$  mm、高程偏差  $< 50$  mm、纵轴线倾斜度偏差  $\leq 3\%$ 。

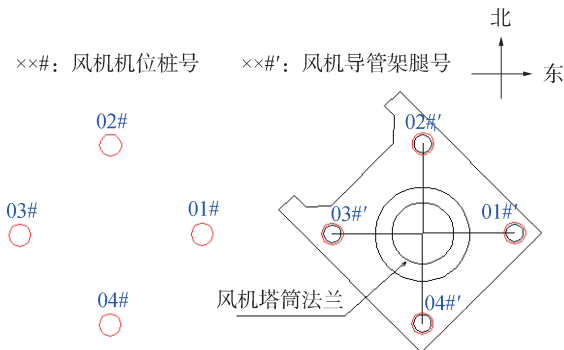


图 3 风机基础方位

Fig. 3 Wind turbine base bearing

### 2.2 测量方案设计

该风电场各机位至桂山岛海岸线最远距离约 12 km, 距离珠海吉大海岸线距离约 23 km, 综合考虑采用于桂山岛建立基准站的卫星定位 GPS-RTK 相位差分技术作为测量方案, 风电场各机位的平面位置和垂向位置测量偏差均满足设计要求<sup>[8-9]</sup>, 以连续运行发布差分服务的单基站 CORS 测量系统作为应急方案<sup>[10]</sup>。在该测控网内, 主要施工船舶安设流动站 GPS 和倾斜仪作为实时定位系统, 可在施工区实现风机基础位置和方位的测量定位作业, 工作演示如图 4 所示。

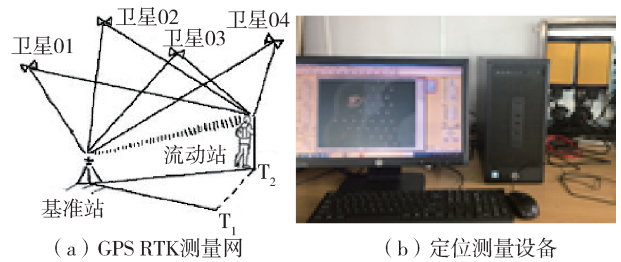


图 4 测量定位

Fig. 4 Surveying and positioning

### 2.3 桩基定位

四桩导管架基础结构的风机施工, 因要进行桩基与导管架结构的对接拼装, 所以对桩基的平面位置和相对位置的控制要求特别高, 如果发生相对位置偏差超限, 就会发生无法对接的风险。因此, 为了控制四桩间的相对位置, 保障桩间距控制在要求范围内, 研究设计了一套用于沉桩定位及插桩导向的双层钢结构专用装置。

该装置采用钢结构制造, 为空间结构, 具有足够的刚度, 本文称为导向定位架系统 (即导向架)。导向架坐落于海床后会发生不均匀沉降或倾斜滑移, 需另设四根临时定位桩 (即临时桩), 将导向架定于海床。同时, 加设临时桩与导向架固定装置, 将上层导向架提起悬吊在临时桩上, 调平导向架倾斜度至满足施工要求, 且防止导向架发生较大倾斜影响钢桩插桩精度。

#### 2.3.1 导向架的结构设计

导向架的设计需要满足精确控制钢桩的平面相对位置和倾斜度, 且需要为钢桩沉桩施工提供稳固的导向能力 (即在沉桩过程中不能发生平移或歪斜)。同时, 为保护国家一级保护动物白海豚, 需要在导向架下层结构上设置削弱打桩噪音的装置



(即空气帷幕)。导向架结构设计及结构功能如下:

1) 导向架设计为两层套插结构, 考虑风场区各机位水深, 取单层高度 6 m, 共 12 m 高整体使用可满足施工要求。

2) 四角设置钢桩定位套管, 在其顶部设置钢桩调位系统, 底部为不可调限位, 限位在桩顶标高上。

3) 在导向架平台内设置 4 个临时桩定位套管及其与临时桩连接固定装置。

4) 设 4 个空气帷幕固定于下层导向架四角定位套管下部, 以空压机为气源制作空气帷幕。

5) 导向架下层结构的底部设置防沉板, 避免导向架坐落于海床时过多沉陷。

6) 增设送桩替打结构(即送桩器), 实现钢桩桩头穿越导向架套筒沉至设计标高位置。

7) 导向架钢桩导向套管的直径和间距根据四桩基础的参数调整, 如桂山风电桩间距 15 m, 导向套管间距也需 15 m。

向上层结构包含了钢桩导向套管、临时桩导向套管、钢桩调位系统、临时桩连接固定装置和工作平台等, 如图 5 所示。

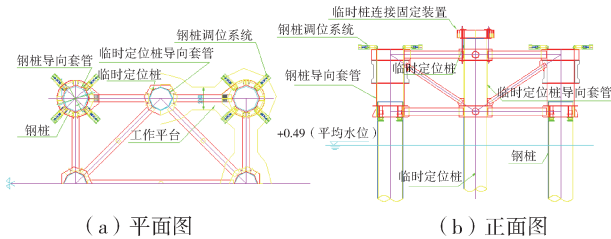


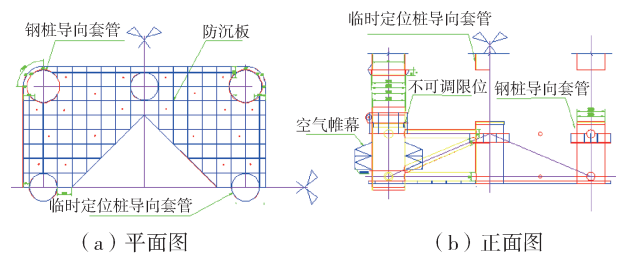
图 5 导向架上层结构

Fig. 5 Guide frame super-structure

导向架下层结构包含了钢桩定位套管、临时定位桩导向套管、防沉板、不可调限位、空气帷幕等, 如图 6 所示。

### 2.3.2 桩基借助导向架定位

导向架由全回转吊船安装, 借助船上设置的 RTK GPS 平面定位系统与激光测距仪实现精确定位。在定位过程中, RTK GPS 定位系统的显示器实时显示导向架位置与目标桩基位置, 并标示相对距离, 通过绞移吊船引导导向架与桩基机位初始对位, 位置控制在中心偏差小于 30 cm, 转角偏差小于  $1.0^\circ$  范围内, 实现初步定位如图 4 所示。导向架借助吊船落钩下放至接触海床, 达到初始稳定状态, 测量人员登上导向架采用 GPS RTK 流动站复



(c) 实物结构

图 6 导向架下层结构

Fig. 6 Guide frame lower-structure

测导向架的转角、平面倾斜度和各导向套管的位置, 如果偏差超过设计要求则起吊调整再沉放、再复测直至达到设计要求, 一般导向架沉放微调需要反复 2~3 次方能完成, 如图 7 所示。

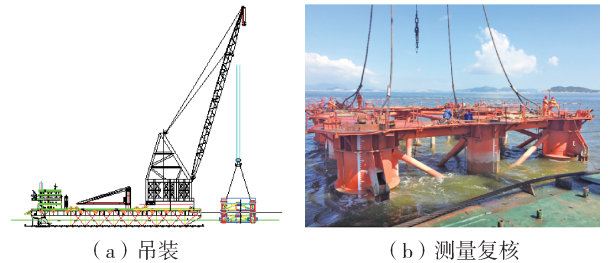


图 7 导向架安装微调

Fig. 7 Guide frame mounting title tuning

导向架经初步定位、复测微调最终达到安装要求, 同时四桩导管架基础的桩基也同步完成了精确定位。

安装好的导向架, 由临时定位桩导向套管内插入四根临时桩被固定在海床上。临时桩采用直径为 2.0 m, 壁厚 20 mm 钢管桩四根, 单桩长约 50 m, 采用 YZ230 振动打桩锤插打。临时桩单桩极限承载力范围按 150~250 t 复核计算, 施工前根据深度范围进行每个机位的桩长计算, 以承载力控制入泥深度。

临时桩插打到位后, 在定位桩顶部安装锚固横梁, 如图 8 所示, 共计四个, 利用精轧螺纹钢将导向架四个边同步悬挂于临时桩的锚固横梁上, 调整精轧螺纹钢悬挂长度, 使导向架精确调平, 平



面倾斜度控制在 1.5‰ 以内, 平面高差小于 30 mm。导向架标高及水平调整到位后, 将导向架与临时钢桩锁定, 形成施工固定平台。



(a) 临时桩插打 (b) 安装锚固导梁

图 8 导向架固定

Fig. 8 Guide frame fixation

## 2.4 倾斜度控制

导管架四桩的桩基施工是借助工装导向架来控制倾斜度, 如图 5 所示, 上层导向架每个钢桩套筒均布安设四个水平千斤顶; 如图 6 所示, 下层导向架每个钢桩套筒安设不可调限位, 在插桩过程中测量人员从成 90° 角的两个方向采用全站仪切线测量钢桩的倾斜度, 在某个方向倾斜度超标就顶出对应的千斤顶调直钢桩, 直至完成自重插桩。导向架影响插桩精度结构的尺寸设计是该项技术的关键, 包含导向架钢桩套筒的直径取值(即套筒内径与钢桩外径间隙设计)、不可调导向的限位高度和布设位置等, 如图 9 所示。

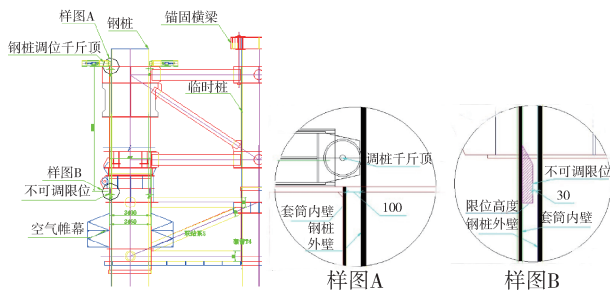


图 9 调整倾斜度结构

Fig. 9 Adjust the gradient structure

### 2.4.1 钢桩套筒内径设计

钢桩套筒内径的大小直接影响到插桩的施工效率和插桩的倾斜度。内径偏大, 插桩时的倾斜度就会偏大, 插桩倾斜度难以控制; 内径偏小, 则插桩对孔困难, 会大大降低插桩施工效率, 增大施工成本, 可见, 内径的取值十分关键。吸取多项类似工

程的施工经验, 总结归纳出如下经验公式:

$$P = (D - d) / d \quad (1)$$

式中:  $P$  为间隙与钢桩直径比率, 考虑倾斜度控制和施工效率成本控制, 根据经验一般取 10% 较合理;  $d$  为钢桩外径, 珠海桂山项目为 2.2 m;  $D$  为钢桩套筒内径。将  $P$ 、 $d$  代入上式, 求得  $D = 2.42$  m, 综合考虑结构制作和施工方便, 取钢桩套筒内径  $D$  为 2.4 m。如图 9 的样图 A 所示, 钢桩与套筒对中时单边空隙间距为 0.1 m。

### 2.4.2 不可调导向设计

下层导向架不可调导向, 是导向架平台上水平千斤顶调整钢桩倾斜度时钢桩的下部支点。首先, 如图 9 样图 B 所示, 不可调限位高度越大, 调整效果越佳, 但应预留足够的插桩间隙; 其次, 不可调限位需做坡口, 起到引导钢桩通过不可调限位的作用; 其三, 不可调导向距离水平千斤顶距离越大, 调桩效果越佳; 其四, 不可调限位应高于桩顶设计标高, 否则与钢桩卡靠贴近, 将增大吊除下层导向架的困难。

综上所述, 不可调限位高度取 7 cm、长度取 37 cm, 留 3 cm 插桩间隙, 顶部开 1:1.73 的顺坡用作插桩导向, 设于距顶平台 7.5 m 处、且高出桩顶位置, 如图 9 所示。

### 2.4.3 插桩监控及调整

导向架按要求安装后, 吊机开始插桩作业。插桩初始时, 钢桩在重力作用下贯通上层导向架、下层导向架及不可调限位, 自沉入泥直至稳定, 在钢桩接近稳定前需要量测、监控倾斜度, 倾斜度超限就需要调桩, 插桩过程如图 10 所示。

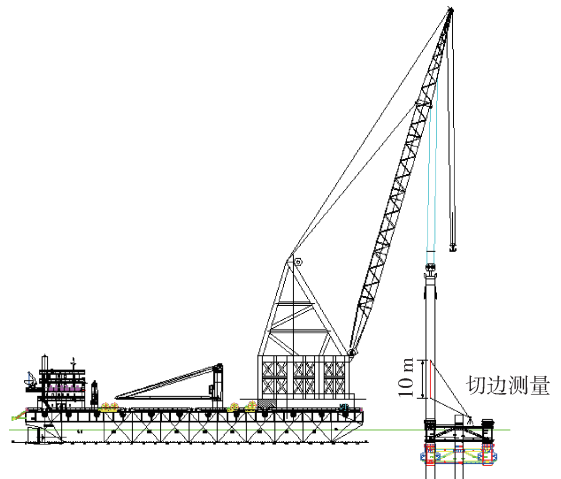


图 10 插桩施工

Fig. 10 Insert pile construction

插桩前测量人员在导向架平台上成 $90^\circ$ 角架设两台全站仪,用于插桩时从两个垂直方向切边测量倾斜度,如图11所示。切边测量借助全站仪监控钢桩南北、东西竖向十米范围的偏距,以不可调限位为支点推算桩顶偏离,借助导向架平台上水平调位千斤顶A、B、C、D来调正钢桩,使其在允许的倾斜度范围内继续自沉,每沉入 $3\sim 5\text{ m}$ 进行一次监控测量,直至自沉停止,完成了插桩作业。此法可在插桩过程中监控调整钢桩的倾斜度。

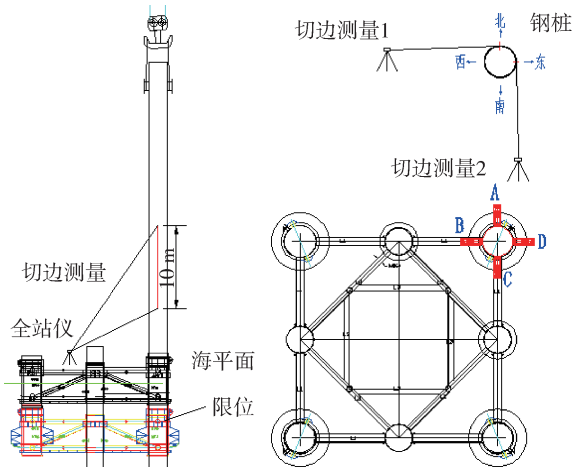


图11 钢桩倾斜度监控

Fig. 11 Steel pile inclination monitoring

钢桩自沉终止,将导向架平台上四个方向的千斤顶顶紧钢桩(千斤顶顶杆设滚轮),限制钢桩在初始振沉过程中发生倾斜,直至其沉入地层足够深度,镶嵌至地层中将不再发生倾斜,此时可撤掉千斤顶,继续打桩直至桩顶达到设计标高。

## 2.5 水下多点对接

风机钢桩基础完成后,需水下对接安装导管架,导管架内插于钢管桩,重约 $450\text{ t}$ ,为四腿钢结构,两个腿设有靠船柱,且靠船柱在西北方向,即导管架安装有方向要求。导管架结构如图12所示。

导管架四腿与四桩对接是在水下进行的,需借助着床测量平台,在平台上采用GPS RTK流动站测定两个坐标点,在两个坐标点上架设全站仪实时测量导管架桩腿的位置,将其引导定位至已知坐标的桩头位置,来实现对接安装,施工过程如图13所示。

因单个风机机位四根钢桩桩顶高程相同,若想将导管架四腿同时插入钢桩非常困难,所以,将导



(a) 导管架安装前

(b) 导管架安装后

图12 导管架结构图

Fig. 12 Jacket structure



(a) 船舶定位

(b) 导管架吊装

图13 导管架安装过程

Fig. 13 Jacket installation process

管架腿设计成三种长度规格,即一组对角两根腿长分别为 $5.9\text{ m}$ 、 $5.2\text{ m}$ ,另一组对角两根腿长均为 $4.5\text{ m}$ ,对接安装时先安装最长腿、再安对角次长腿,两根长腿插入后直接下落,两根短腿就会顺利对接,安装过程如图14所示。

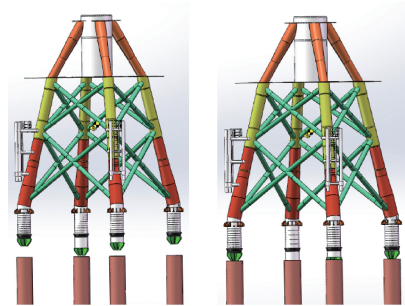


图14 导管架与钢桩对接示意

Fig. 14 The jacket is connected with the steel pile

## 2.6 技术成果

珠海桂山风电试验项目采用该套四桩导管架基础精确施工的成套技术,高标准地完成了全部机位的沉桩和导管架安装施工,且各机位四桩的平面位置、标高和倾斜度均得到了精确控制。原设计方案考虑钢桩相对偏位控制难度大,避免导管架腿与钢

桩对接偏差,要求导管架腿待钢桩打完按桩顶测量成果进行调位,以保障对接顺利。在实际施工中,因采用该套技术实现了钢桩间的精确定位,省去了导管架腿待成桩调位的工序,大大提高了导管架的生产工效和供货速度,为整个风电场项目的快速推进争取到了更多的宝贵时间。

### 3 结论

本文主要以海上风电项目导管架四桩基础施工来作为究研对象,结合珠海桂山海上风电试验项目特定情况,对群桩基础平面位置、高程和倾斜度精确控制施工技术,对导管架水下与钢桩多点对接施工技术进行了分析研究,探索出了一套适用可靠的海上风电群桩导管架基础施工的先进技术,并在珠海桂山海上风电试验项目中为四桩导管架基础的施工解决了精确定位控制难题,实现了钢桩倾斜度的精确控制。项目的导管架四桩基础施工的顺利实施,也验证了该套技术的优越性和先进性,但该套技术也不具备海上风电项目的普遍适用性,受水深和桩基形式的限制较大,在20 m以浅导管架群桩基础的海上风电项目中可推广借鉴,本文希望为后续类似海上风电群桩基础施工提供技术参考和施工经验,希望为我国风电可再生清洁能源事业的发展贡献一份力量。

#### 参考文献:

- [1] 文锋. 我国海上风电现状及分析 [J]. 新能源进展, 2016, 4(2): 152-158.  
WEN F. Developments and characteristics of offshore wind farms in China [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2016, 4(2): 152-158.
- [2] 黄维平, 刘建军, 赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势 [J]. 海洋工程, 2009, 27(2): 130-134.  
HUANG W P, LIU J J, ZHAO Z H. The state of the art of study on offshore wind turbine structures and its development [J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(2): 130-134.
- [3] 杨玉龙, 王化明, 詹毅, 等. 我国海上风电开发现状分析 [J]. 中国水运, 2012, 12(12): 45-46.  
YANG Y L, WANG H M, ZHAN Y, et al. The development analysis of China [J]. China Water Transport, 2012, 12(12): 45-46.
- [4] 元国凯, 汤东升, 刘晋超, 等. 海上风电机组基础灌浆技术应用与发展 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1): 10-17.  
YUAN G K, TANG D S, LIU J C, et al. Grouting technology application and development in offshore wind farm [J]. Southern

Energy Construction, 2017, 4(1): 10-17.

- [5] 姜楠. 深海风力发电技术的发展现状与前景分析 [J]. 新能源进展, 2015, 3(1): 21-24.  
JIANG N. Analysis on status and prospect of wind power generation in deep sea [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2015, 3(1): 21-24.
- [6] 李炜, 郑永明, 陆飞, 等. 海上风电基础结构动力分析 [J]. 海洋通报, 2012, 31(1): 67-73.  
LI W, ZHENG Y M, LU F, et al. Dynamic analysis of foundational structure for offshore wind turbine [J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(1): 67-73.
- [7] 马兆荣, 刘晋超, 元国凯. 珠海桂山海上风电场风电机组基础设计 [J]. 南方能源建设, 2015, 2(3): 72-75.  
MA Z R, LIU J C, YUAN G K. Design of wind turbine supporting structure in zhuhai guishan offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2015, 2(3): 72-75.
- [8] 杨文志, 李英鸽. GPS-RTK 技术在港口水下工程的应用 [J]. 中国水运, 2010(7): 40-41.  
YANG W Z, LI Y G. Application of GPS-RTK of in the underwater port projects [J]. China Water Transport, 2010(7): 40-41.
- [9] 邵明敏. 浅谈 GPS RTK 技术在工程测量中的应用 [J]. 科技视界, 2016(6): 130.  
HAO M M. Introduction to GPS RTK technology in the application of the engineering survey [J]. Science & Technology Vision, 2016(6): 130.
- [10] 郑海波. 单基站 CORS 技术在土地勘测定界中的应用研究 [D]. 吉林大学, 2016.

#### 作者简介:



ZHANG Q H

张青海 (通信作者)

1981-, 男, 蒙古族, 内蒙古通辽人, 港口与航道工程中级工程师, 工程硕士, 主要从事海上风电工程、港航工程、土建工程等的施工管理和技术方案研究工作 (e-mail) 409664719@qq.com。

李陕锋

1983-, 男, 广东梅州人, 中铁大桥局中级工程师, 南昌航空大学飞行器设计与工程学士, 主要从事钢结构安装工程、风电工程、工程施工设备等技术方案研究工作 (e-mail) leeshinke@163.com。

王书稳

1991-, 男, 安徽芜湖人, 助理工程师, 机电一体化专业, 大专, 主要从事海上基础沉桩施工和嵌岩桩施工等工作 (e-mail) 1136828090@qq.com。

(责任编辑 高春萌)