

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.015

# 海上风机单桩基础桩形影响因素分析

李聪, 刘东华, 王洪庆

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** [目的]随着大直径单桩基础建造与施工能力的日益进步,单桩基础型式的应用正向更大水深发展,需要研究深水海域单桩基础不同桩形的优缺点,为同类工程提供参考。[方法]按高中低三种锥段位置,对广东阳江某海上风电场的单桩基础机位参数进行分组统计,分析其中的桩形选用规律。[结果]分析表明:高锥段大桩径设计会导致风机疲劳荷载偏高,机位浅层土中砂土和黏土的比例及具体力学指标决定了最佳桩形的锥段位置。[结论]通过对比研究:发现降低锥段是降低大桩径机位疲劳荷载的最佳方法,砂土含量高且内摩擦角较大的机位可通过提高锥段减小桩径,而黏土含量高地质偏软的机位则适用较低锥段的桩形。提出用单桩最优解的泥面刚度矩阵行列式大小来衡量机位的地基刚度水平,并分析了地基刚度水平与基础钢料量的关系。

**关键词:** 海上风机;单桩基础;浅层土;泥面刚度矩阵

**中图分类号:** TK89; TK81

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2019)04-0093-08

## Configurational Influence Factor Analysis of Offshore Wind Turbine Monopile Foundation

LI Cong, LIU Donghua, WANG Hongqing

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** [Introduction] Facilitated by the advancement of large diameter monopile fabrication and installation capacity, the application of monopile foundation is expanding into deeper water, a study on properties of deep water monopile foundation with different pile shape can provide reference for similar projects. [Method] In this paper, parameters of monopile foundations in a Guangdong-Yangjiang offshore wind farm were grouped according to cone location-high, medium and low, followed by a statistical analysis for pile shape selection regularity. [Result] It was found that large diameter high cone configuration may lead to high fatigue load, optimum cone position is determined by sand and clay content of upper layer soil, as well as mechanical properties of these stratum. [Conclusion] Through comparative analysis, lower cone configuration was suggested to be the best countermeasure for high fatigue load, sites with high sand content with relatively large angle of internal friction can reduce pile diameter by raising the cone section, while low cone section is suitable for sites with high content of soft clay. The mudline stiffness matrix determinant of optimized pile configuration was proposed to be an evaluation indicator of foundation stiffness, then the relationship between foundation stiffness and steel weight was studied.

**Key words:** offshore wind turbine; monopile foundation; upper layer soil; mudline stiffness matrix

海上风电由于风速较高且稳定、基本不占用陆上土地资源、靠近用电负荷中心,近年来受到国家

政策的大力支持,取得了长足发展。

海上风机基础是为风机提供支撑和输电线路敷设通道,并为运维作业提供船舶靠泊、备件转运条件的海工结构物。基于国内海上风电场的水文、地质条件,以及国内施工船机设备的技术特点,主要采用的风机基础型式包括大直径单桩、高桩承台、导管架和潮间带水下多桩基础等。其中单桩基础具

收稿日期: 2019-04-03 修回日期: 2019-04-15

基金项目: 中国能建广东院科技项目“海上风电吸力桶基础受力机理与变形控制关键技术研究”(EV04631W)

有结构形式简单、受力明确、所需海上作业时间最短的优势,在国内外已建海上风电场中所占比例超过65%<sup>[1]</sup>。基于工程实践,国内设计单位对单桩基础的选型方法,以及设计过程中的结构疲劳分析等进行了相关研究<sup>[2-3]</sup>。

随着海上风电向大单机容量、大水深、远离岸距离的趋势发展,海上作业窗口相对于近岸作业时有所减少,对风机基础施工便捷性的要求更高。同时近年来大直径单桩建造厂的生产能力不断提升,可卷制的最大桩径达到9 m,最大壁厚可达100 mm,最大单桩运出能力达到2 000 t;国内3 MJ及以上的液压打桩锤和2 500 t以上起重能力的起重船逐渐增多,都为深远海域采用大直径单桩提供了条件。设计标准方面, DNVGL-ST-0126 规范建议单桩基础安装及运行过程中受荷变形后产生的永久倾斜度应不大于 $0.5^\circ$ ,即约8.726/1 000 倾斜度<sup>[4]</sup>。由于单桩建造与施工技术的进步,沉桩精度可以控制在3/1 000 以内,为在深水场址中放宽单桩泥面转角限制提供了条件。

靳军伟等<sup>[5]</sup>以乐亭风某电场为例,调整单桩基础的土层参数和桩壁厚、整体桩径、泥下桩长等桩形参数,研究1、2 阶频率的敏感性。盛振国<sup>[6]</sup>等对某风电场给定机位的土层类型进行变换,构造出全砂土、全黏土和下砂土上黏土的虚拟地质,分别在一定幅度内调整土层容重、内摩擦角、粘聚力、桩径、壁厚等参数,对比不同地质构成时整机频率对各参数的敏感度差异。许成顺<sup>[7]</sup>等通过类似的输入参数调整方式,研究单桩桩顶水平位移的敏感性,认为砂土地基中内摩擦角影响最大,黏土地基中桩径影响最大。

以往的研究多是基于单一机位的土层分布,对感兴趣的参数人为地进行一定范围的调整,并结合桩径、壁厚和桩长的调整来研究频率或桩身变形对以上参数变化的敏感性,对单桩基础设计过程中的优化方向具有指导意义。实际工程中,单桩基础主体结构要求一机一设,在文献[4]给出的变形限值和风机厂家提出的频率窗口限制下,机位处具体的土层分布与力学参数对最佳桩形的影响是值得研究的课题。本文依托广东阳江某海上风电场,在场内36 个采用大直径单桩基础的机位均求出基础主体钢料量最优解的基础上,分析:(1)大直径高锥段机位疲劳荷载过高的应对策略;(2)浅层土性质对最

优桩形水中部分锥段位置的影响;(3)泥面刚度矩阵对桩形选择及主体钢料量的影响。

## 1 工程概况

### 1.1 海洋水文条件

工程海区平均海平面高程0.52 m,50 年重现期极端高水位3.54 m,极端低水位-1.56 m,均以国家85 高程计。根据详勘结果,各机位泥面高程在-26.17 m 到-30.28 m 之间,平潮水深在26.69 m 到30.80 m 之间。

常浪向为东南,浪向主要分布在东南东~南之间,50 年一遇累积频率为1%的波高可达13.90 m。场址海区海流主流方向为西南西,50 年一遇流速表层为209.1 cm/s,中层为140.2 cm/s,底层为99.4 cm/s。

工程海区年盛行风向以东北至东南风为主。秋冬季主导风向为东北风,春季主导风向为东南风,夏季主导风向为偏南风。10 m 高度50 年一遇10 min 平均风速与3 s 风速分别为48.1 m/s 和62.5 m/s。

场址内水深较大且海床表层土为淤泥质土,冲刷物模试验结果表明大直径单桩基础在50 年一遇海况下的最大冲刷深度约为桩基直径的0.5 倍。

### 1.2 工程地质

风电场场区离岸约25 km,约为7 km×7 km 的正方形,海域宽阔,场区内未见岛屿、礁石分布。水下地形较为平坦,属海积地貌单元。根据区域地质及钻孔资料,风电场地层覆盖层主要四个大层,即全新统海相沉积、全新统海陆过渡相沉积层、晚更新统海陆交互相沉积层和第四系残积黏性土层,下伏基岩为寒武系花岗片麻岩和晚白垩统泥质砂岩;场区覆盖层厚度自北向南逐渐增大,场区西北角覆盖层厚度约为34 m,场区东南角及西南角钻孔揭露覆盖层厚度大于85 m。通过对所有详勘钻孔的分析,发现场址内的地层情况非常复杂,土层级配较差,整体缺乏规律性。

### 1.3 风机概况

该海上风电场采用单机额定容量为5.5 MW 的海上风力发电机组,钢制锥筒式塔架,叶片长度76.6 m,叶轮直径157.738 m,轮毂中心标高103.3 m,风机设计寿命25 年,安全等级为IEC IB 类。风机切入风速为3 m/s,切出风速为25 m/s,

额定风速为 10.1 m/s, 叶轮扫风面积为 19 531.8 m<sup>2</sup>。风轮转速范围 4.3 ~ 13.44 rpm(采用共振穿越策略后允许的整机一阶频率范围 0.264 ~ 0.480 Hz), 叶片、轮毂和机舱总质量为 445 t, 重心位于塔筒顶法兰以上 3.195 m, 塔筒轴向向轮毂方向 5.005 m。塔筒自上而下分为 4 节, 外径从 4.05 m 变化到 7.5 m, 壁厚 22 ~ 50 mm, 塔筒高度 82.73 m。

## 2 单桩结构设计

### 2.1 整体布置

根据场内极端高水位、最大波高信息确定外平台底高程, 考虑外平台梁高空间, 确定基础顶法兰高程为 17 m。考虑到工程海区施工条件差, 施工窗口少, 靠船件、爬梯、外平台等结构集成到底层圈梁中心高程为 -0.6 m 的短套笼上, 沉桩后一次性吊装。牺牲阳极预焊于桩体内外侧水中部分, 电缆从桩体上靠近泥面处的开孔引入, 锚固于沉桩后整体吊装的内平台。

### 2.2 桩形设计

海上单桩风机基础设计的关键点在于分析地质参数对桩形的影响规律, 同时使风机能以设计得到的基础结构为约束边界, 计算得出不超出基础设计所依据的极端荷载和疲劳荷载, 实现荷载迭代闭环。

单桩基础设计中通常以泥下关键点位移和整机频率作为控制变量, 桩顶到泥面部分的壁厚、直径分布对风机荷载、波浪荷载以及桩体变形的传递有影响, 且与地基刚度、机舱叶片质量属性、塔筒结构特性一同决定整机频率。对于一定的机位地质参数, 单桩基础的地基刚度特性由泥下桩径、壁厚分布和入土桩长这三个桩形参数决定<sup>[8]</sup>。一般对于水深、水文和地质条件场内差异不特别大的场址, 为有利于塔筒内机电设备的布置设计以及基础附属构件的设计, 基础顶法兰高程和直径是统一的, 塔筒壁厚分布也保持一定。在基础设计过程中, 根据每个机位具体的地质条件, 选择最佳的桩形参数组合, 得到桩体的变形和整机频率符合要求, 且整体工程量最优的结构方案。

基础顶法兰与桩身上段的外径为 7.5 m, 与前期根据场址条件确定的塔筒底部直径保持一致。文献[1]指出, 桩身刚度可以通过调整桩径和壁厚来

改变, 从而改变整机频率。其中桩径的改变对于频率的调整更为有效, 但桩径的变化又会导致环境荷载的变化, 从而影响桩体变形指标。为与固定外径的基础顶法兰连接, 并在地基土中获得足够的承载力, 泥下桩径通常大于顶部桩径, 两个外径不同的部分通过锥段连接, 下文中桩径均指各机位之间不同的泥下桩径。所依托工程水深较大, 造成波浪荷载对整机的荷载影响较大, 因此锥段位置靠下, 水面附近波浪主要作用部分的桩径较小, 可减小波浪力, 对降低疲劳荷载和泥下桩变形量有利, 但在同等壁厚分布条件下整机频率会降低。可见锥段位置对变形和频率这两个控制因素的影响方向相反, 对特定的地质条件可求出对应的最优解。由于该工程地质情况复杂, 在桩形设计中构造如图 1 所示的三种桩形。

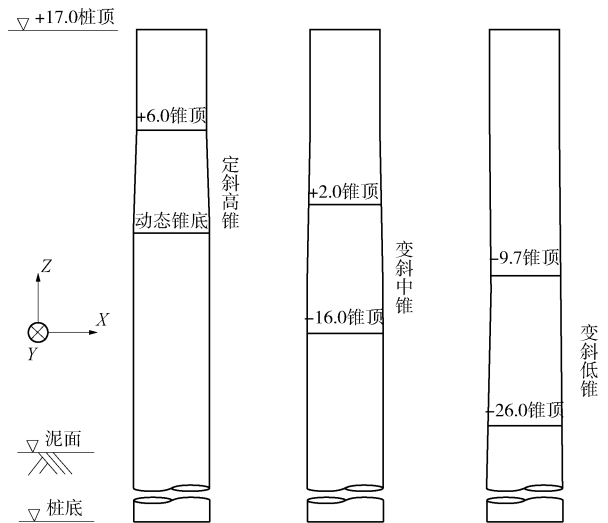


图 1 桩形简图

Fig. 1 Pile shape diagram

高锥段桩形桩顶高程 +6.0 m, 假定桩径为 8.5 m 时锥底高程 -10 m, 当桩径发生变化时锥底上下调整, 保持锥段斜度不变, 以统一套笼型号, 便于批量建造。由于需要保证套笼底部支撑牛腿位于锥段上, 锥段底部需低于 -2.0 m, 故桩径至少为 8 m。

中锥段和低锥段桩形锥顶高程/锥底高程分别为 -2.0 m/-16.0 m 和 -9.7 m/-26.0 m, 当桩径变化时锥段高程范围不变, 桩径 7.5 m 或以上。

## 3 桩形对疲劳荷载的影响

在风机荷载计算中, 风机厂家的计算输入通常

是基础结构图和泥面刚度矩阵。对于确定的机位，调整泥下桩形参数以改变泥面刚度矩阵，或改变水中部分桩形以改变波浪荷载，都可以对疲劳荷载产生影响。以某基础主体钢料量最优解为高锥段的机位为例，开展对比分析。

### 3.1 调整桩形参数

在地质确定的情况下，一定的泥下桩径、壁厚分布和入土桩长，将对应一定的桩身泥面刚度，对泥面以上部分形成约束。该机位采用高锥段桩形时，泥面刚度在各自由度上的分量如表1中的泥面刚度矩阵所示。

表1 高锥段泥面刚度矩阵

Tab. 1 Mudline stiffness matrix-high cone section kN · m

元素	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$
$R_x$	3.59 E+8	4.44 E+5	0.00 E+0	-2.24 E+4	1.50 E+7	0.00 E+0
$R_y$	4.44 E+5	3.60 E+8	0.00 E+0	-1.50 E+7	2.24 E+4	0.00 E+0
$R_z$	0.00 E+0	0.00 E+0	2.78 E+7	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0
$D_x$	-2.24 E+4	-1.50 E+7	0.00 E+0	9.99 E+5	-1.29 E+3	0.00 E+0
$D_y$	1.50 E+7	2.24 E+4	0.00 E+0	-1.29 E+3	9.98 E+5	0.00 E+0
$D_z$	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	1.70 E+6

泥面刚度矩阵为  $6 \times 6$  对称方阵，元素对应位移单位为 m，转角单位为 rad，力单位为 kN，力矩单位为  $kN \cdot m$ 。泥面刚度矩阵对应的坐标系为图1中的右手系， $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  分别代表桩头节点绕 X、Y、Z 轴方向的转角 ( $i, j=1, 2, 3$ )，类似地  $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_z$  分别为桩头节点绕对应轴的位移 ( $i, j=4, 5, 6$ )。第  $i$  行第  $j$  列的数值表示当桩头节点在第  $i$  个自由度上发生一个单位的位移或转角，在第  $j$  个自由度上产生的反力或反力矩。据风机厂家评估，在水中桩形一定的条件下，刚度矩阵中的主对角线元素增大、位移-转角耦合项  $R_x - D_y$  减小对降低疲劳荷载有利，且影响较为显著。

原最优解对应的泥下桩体采用中等水平壁厚，称之为第2组壁厚，在壁厚策略恒定的情况下，在一定范围内调整泥下桩径和入土桩长，泥面刚度矩阵  $R_x - D_y$  元素的等值线图如图2所示。

由图2中可见当入土桩长小于 59 m 时， $R_x - D_y$  基本不受桩长影响，而当入土桩长超过 59 m 时，桩端持力层由软塑黏土变为密实中砂，同样桩径和壁厚的  $R_x - D_y$  会显著增大。

风机厂家计算得出的荷载方向如图3所示。

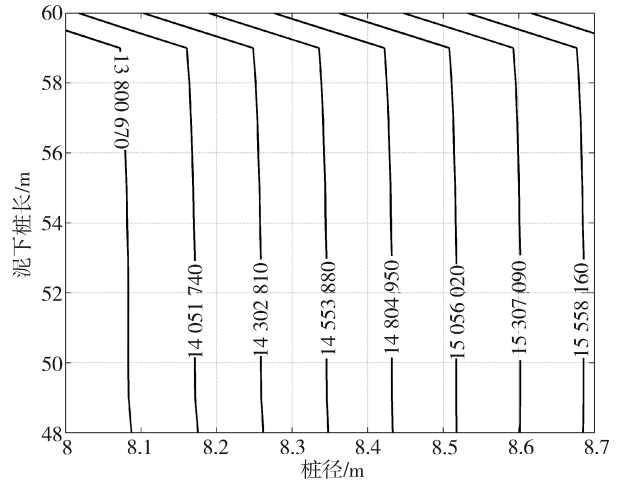


图2 第2组壁厚 RX-DY 等值线图 (kN/rad)

Fig. 2 Contour of RX-DY with thickness group 2 (kN/rad)

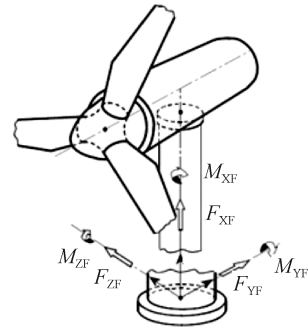


图3 风机荷载坐标系

Fig. 3 Coordinate system of turbine load

疲劳荷载评估采用等效疲劳荷载，25 年应力循环次数  $1.0 E + 08$ 。该项目侧向波浪对单桩基础疲劳荷载影响较为显著，疲劳荷载中侧向弯矩  $M_y$  影响较为突出，将其作为疲劳荷载大小的评估变量。

原最优解桩径 8.5 m，入土深度 51 m， $R_x - D_y$  为  $1.50 E + 7$  kN/rad，计算出的疲劳荷载幅  $M_y = 54 280$  kNm ( $m = 5$ )，超出塔筒所能承受的疲劳荷载水平。

据风机厂家估计，若不改变水中部分桩形，该机位的  $R_x - D_y$  需降低到  $1.43 E + 7$  kN/rad 的量级，疲劳荷载才可能满足要求。从图2中看，只调整桩径，需要将桩径缩小到约 8.2 m，但桩径为 8.2 m 时，整机一阶频率为 0.263 Hz，不能满足风机厂家要求的 0.264 Hz 要求，故不能通过改变桩径降低疲劳荷载。继而尝试通过调整壁厚来调整  $R_x - D_y$ ，采用较小的第1组壁厚的泥面刚度矩阵  $R_x - D_y$  元素等值线图如图4所示。

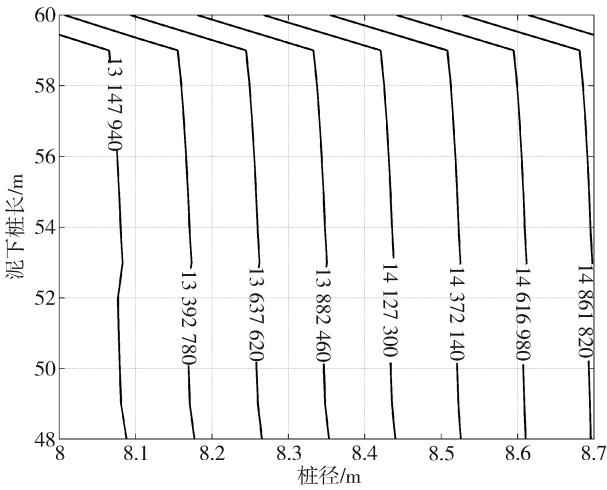


图 4 第 1 组壁厚  $R_x - D_y$  等值线图 (kN/rad)

Fig. 4 Contour of  $R_x - D_y$  with thickness group 1 (kN/rad)

可见减小壁厚后无需调整桩径和桩长,  $R_x - D_y$  基本达到要求, 但桩的泥面倾斜度达到 5.82/1 000, 超出设计限值, 仍旧不可行。

### 3.2 调整锥段位置

在明确调整桩径、壁厚或桩长对降低疲劳荷载并保持单桩整体在设计可行域内不可行后, 根据前文对锥段位置影响波浪荷载的分析, 在不改变桩形参数的情况下将锥段整体下移, 重新计算疲劳荷载进行对比。调整前与调整后的水中桩形对比如图 5 所示。

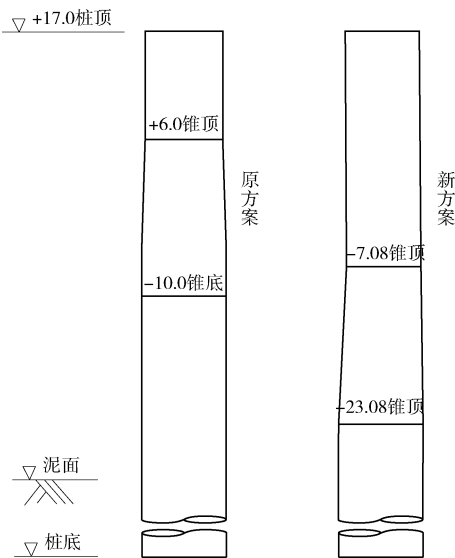


图 5 锥段调整前后对比

Fig. 5 Contrast of high and low cone section

达到 0.265 Hz, 满足风机厂家要求。泥下的桩形参数完全不变, 但由于上部所受波浪力有所减小, 泥面刚度是割线刚度, 按  $P - y$  曲线的形态, 泥面刚度应趋于增大。低锥段桩形对应的泥面刚度矩阵如表 2 所示。

表 2 低锥段泥面刚度矩阵

Tab. 2 Mudline stiffness matrix-low cone section kN · m						
元素	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$
$R_x$	3.61 E+8	3.09 E+5	0.00 E+0	-1.43 E+4	1.51 E+7	0.00 E+0
$R_y$	3.09 E+5	3.61 E+8	0.00 E+0	-1.51 E+7	1.43 E+4	0.00 E+0
$R_z$	0.00 E+0	0.00 E+0	2.78 E+7	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0
$D_x$	-1.43 E+4	-1.51 E+7	0.00 E+0	1.00 E+6	-7.43 E+2	0.00 E+0
$D_y$	1.51 E+7	1.43 E+4	0.00 E+0	-7.43 E+2	1.00 E+6	0.00 E+0
$D_z$	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	0.00 E+0	1.73 E+6

低锥段泥面刚度矩阵各元素相对高锥段对应元素变化的百分比如表 3 所示。

表 3 低锥段泥面刚度矩阵相对高锥段的变化率

Tab. 3 Mudline stiffness matrix change-low VS high cone %						
元素	$R_x$	$R_y$	$R_z$	$D_x$	$D_y$	$D_z$
$R_x$	0.4	-30.5	0.0	-36.4	0.6	0.0
$R_y$	-30.5	0.4	0.0	0.6	-36.4	0.0
$R_z$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$D_x$	-36.4	0.6	0.0	0.6	-42.4	0.0
$D_y$	0.6	-36.4	0.0	-42.4	0.6	0.0
$D_z$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0

可见主对角线元素与  $R_x - D_y$  均小幅增加, 不同自由度之间的转角耦合项有较大幅度减小, 但相应元素本身量值较小, 因此刚度矩阵本身的变化对荷载计算的影响不大。

风机荷载计算输出的疲劳荷载幅  $M_y = 37\ 791$  kN · m ( $m = 5$ ), 比高锥段方案减小 30.4%, 在塔筒可承受水平以内。

本文依托的工程 36 台单桩基础中有 8 台对基础钢料量求最优解会得出桩径 8.5 m 或以上的高锥段桩形, 其中高锥段的基础钢料量比低锥段小数千吨到 40 余吨不等。但由于深水大直径单桩基础的疲劳荷载对水中桩形高度敏感, 高锥段方案的疲劳荷载显著大于低锥段, 塔筒需加重 80 ~ 130 t 以通过疲劳验算, 基础的部分焊缝需要磨平以提高疲劳寿命, 反而对整体经济性和安全性不利。

考虑到泥面刚度对疲劳荷载也有一定影响, 该

锥段位置调整后整机一阶频率有所下降, 但仍

工程在对最优桩形进行选择时,凡是基础钢料量最优解为桩径大于8.2 m的高锥段桩,均将该机位的最优解调整为低锥段。

#### 4 浅层土性质对最优桩形的影响

高锥段桩形由于桩径较大部分延伸高度较高,对提高整机刚度有利;低锥段桩形由于水面附近桩径更小,可减少桩体所受波浪力,且桩身变形较多地分布在水中部分,有利于减少泥面转角。最优桩形在机位处特定的地质条件下可同时满足频率和变形指标,反映了机位地质特征对桩形的需求。文献[8]指出,浅层土的性质对于单桩基础的变形与刚度具有决定性作用。因此,可根据各机位的最优桩形进行分组,对浅层土性质作定量统计分析。在36个分析机位中,最小入土桩长为47 m,将浅层土分析范围划定至冲刷坑底部到原始泥面以下47 m。

##### 4.1 分析变量定义

单桩基础设计中主要控制的是水平刚度,桩土之间的侧向位移与反力关系可用 $P-y$ 曲线表达<sup>[9]</sup>,而砂土与黏土的 $P-y$ 曲线在计算方法上是分别定义的,相同侧向位移所产生的单位桩长反力相差也比较大。因此应将土层分为砂土和黏土分别统计,定义砂土层厚比例变量:

$$P_{\text{Sand}} = \frac{\text{砂土层总厚度}}{\text{分析土层总厚度}} \quad (1)$$

相应地,定义黏土层厚比例变量:

$$P_{\text{Clay}} = \frac{\text{黏土层总厚度}}{\text{分析土层总厚度}} \quad (2)$$

该设计中的单桩均为直接打入桩,认为桩端最多可进入强风化岩。其中对于全风化岩,在计算中模拟为黏土;对于强风化岩,在计算中模拟为砂土。

在 $P-y$ 曲线计算中,砂土的关键参数是内摩擦角 $\Phi$ ,黏土的关键参数是不排水抗剪强度 $C$ ,且土层所处深度越浅,对桩体的侧向刚度影响越大,定义砂土内摩擦角对分析深度底部的比例矩:

$$\Phi_{\text{TL}} = \sum \Phi_i \frac{\text{层厚}_i \times \text{层中心距分析底部}_i}{\text{分析土层总厚度}^2} \quad (3)$$

相应地,定义黏土不排水抗剪强度对分析深度底部的比例矩:

$$C_{\text{TL}} = \sum C_i \frac{\text{层厚}_i \times \text{层中心距分析底部}_i}{\text{分析土层总厚度}^2} \quad (4)$$

为消除各机位砂土和黏土层厚比例对(3)、(4)两式中定义的比例矩的影响,仅对比土层本身性质和深度位置对桩体侧向约束的效果,将 $\Phi_{\text{TL}}$ 和 $C_{\text{TL}}$ 单位化:

$$\overline{\Phi_{\text{TL}}} = \frac{\Phi_{\text{TL}}}{P_{\text{Sand}}} \quad (5)$$

$$\overline{C_{\text{TL}}} = \frac{C_{\text{TL}}}{P_{\text{Clay}}} \quad (6)$$

##### 4.2 统计结果与分析

将36个机位的地质参数按最优解分别为高、中、低锥段分别进行统计,各桩形对应的机位数 $N$ 、平均层厚比例、平均单位化比例矩、平均主体钢料量 $W$ 如表4所示。

表4 浅层土性质与最佳桩形

Tab. 4 Upper layer soil property and optimum pile shape

最佳桩形	$N$	$P_{\text{Sand}}$	$P_{\text{Clay}}$	$\overline{\Phi_{\text{TL}}}/(^{\circ})$	$\overline{C_{\text{TL}}}/\text{kPa}$	$W/t$
高锥段	7	0.43	0.57	16.87	10.58	1426
中锥段	11	0.44	0.56	14.31	11.99	1417
低锥段	18	0.30	0.70	13.83	10.97	1604

上表中的高锥段桩径均不大于8.2 m,即考虑到桩体波浪荷载引起的疲劳问题,高锥段桩形的应用仅限于砂土比例和内摩擦角较大,可使用较小桩径的机位。这个类型的机位地质对桩体泥下位移的约束能力较强,可通过提高锥段位置,以求在保证整机一阶频率的前提下减小桩径,减小基础钢料量。高锥段桩形平均桩径8.1 m。

中锥段桩形适用于砂土比例高且内摩擦角适中,且黏土不排水抗剪强度较高的机位。此类机位的砂土和黏土搭配较为均衡,对泥下桩的约束能力适中,通过采用中锥段平衡桩体变形与频率需求,可得到三种锥段位置中最小的平均钢料量。中锥段机位平均桩径为8.1 m,最大桩径8.7 m。按该项目的水中桩形设计,中锥段在桩径一定时锥段斜度最大,锥顶处的应力集中系数也最大,在桩径较大时疲劳校核较为不利。但由于锥顶高程-2.0 m已在较大程度上减小了水面附近波浪荷载的作用,8.7 m桩径的机位风机疲劳荷载仍在塔筒和基础的承受范围以内。

低锥段桩形适用于黏土比例高且砂土内摩擦角、黏土不排水抗剪强度均较低的机位。此类机位地质较差,对桩体变形的约束能力差,要达到风机

厂家要求的整机一阶频率只能通过增大桩径。由于该桩形水中部分刚度在三种桩形中最低, 基础顶法兰处的变形传递到泥面处的比例最小, 同时足够低的锥顶高程也在最大程度上减小了波浪荷载的作用, 有利于减小桩体整体受力并降低疲劳荷载水平, 是较软地质中的最佳选择。低锥段机位平均桩径 8.7 m, 平均基础钢料量在三种锥段位置中最大。

## 5 泥面刚度矩阵特征及影响分析

单桩基础的桩形直接取决于机位处的土层性质, 很大一部分风机厂家在风机荷载计算中采用泥面刚度矩阵作为基础结构的约束边界, 将非线性的桩土相互作用问题线性化。泥面刚度矩阵中蕴含了地基土性质和泥下桩的刚度特性, 是计算中连接地基与上部结构的纽带, 可对其物理及几何意义进行分析, 以求在上节对地基土性质与桩形定性关系的基础上, 探索更为定量的规律。

### 5.1 泥面刚度矩阵意义及分析变量选取

泥面刚度矩阵是  $6 \times 6$  方阵, 每一行中 6 个元素分别代表桩身泥面处在对应行所代表的自由度上发生一个单位位移, 在各列所对应自由度上所产生的反力。对于所有自由度组合的刚度, 都是刚度阵元素绝对值越大, 刚度越大。

由线性代数可知, 对于可计算行列式。而 3 阶以上行列式的几何意义是超平行多面体带符号的广义体积<sup>[10]</sup>, 对于泥面刚度矩阵而言, 6 个自由度上的刚度向量线性无关, 泥面刚度矩阵的行列式就是这 6 个线性无关的向量所张的广义体积。因此, 泥面刚度矩阵的行列式越大, 表示泥下桩在各自由度上获得的刚度越大, 可将其作为分析变量。

### 5.2 各锥段位置趋势分析

该工程整体水深变化不大, 当整机一阶频率要求一定时, 单桩基础泥面刚度越高, 所需要的桩径越小。由于单桩基础设计时对桩端位移有一定要求, 因此除非桩端处恰好处于软弱土层, 入土桩长不小于 6 倍泥下桩径即可满足变形条件, 故入土桩长与桩径也存在正相关关系。基于此原因, 可在剔除高锥段大桩径改为低锥段以及地质特殊的机位后, 对原有各锥段位置基础工程量最优解绘制泥面刚度矩阵行列式 - 基础钢料量关系图, 如图 6 所示。

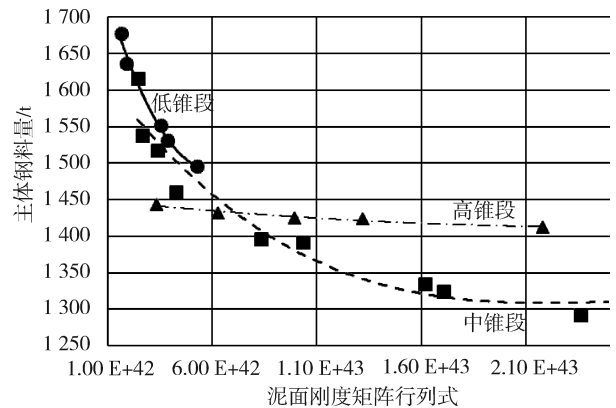


图 6 各锥段位置泥面刚度矩阵行列式 - 基础钢料量关系图

Fig. 6 Foundation weight vs mudline stiffness determinant

由图中可见三种锥段位置桩形的主体钢料量均随泥面刚度矩阵行列式值的增大而减小, 且基本可用曲线进行拟合。

当行列式值小于  $5 E + 42$  时, 低锥段、中锥段和小桩径高锥段根据地质成分不同, 均可成为最优解。同等地基刚度条件下, 锥段越高越有利于以较低钢料量获得足够的整体刚度。

当行列式值大于  $5 E + 42$  后, 低锥段桩形开始失去优势, 最优解从中锥段和高锥段小桩径当中产生。当行列式值大于  $7 E + 42$  后, 通过提高锥段来提高整体刚度的必要性逐渐消失, 中锥段桩形因为更能平衡整体刚度与桩体变形的需求而能获得钢料量更低的解。

## 6 结论

本文基于广东阳江地区某海上风电场内大直径单桩基础的设计成果以及各机位处的实际地质参数, 并结合风机荷载核算情况, 得到以下结论:

1) 当桩径较大且采用高锥段设计时, 易出现疲劳荷载过大的情况。适当降低锥段位置可减小波浪荷载对疲劳的影响, 基础钢料量有所增加但可有效控制塔筒钢料量和整体疲劳荷载水平。

2) 高锥段小桩径桩形适用于砂土比例较大且内摩擦角较大的机位, 钢料量适中。中锥段桩形适用于砂土比例较大且内摩擦角适中, 同时黏土不排水抗剪强度也较大的机位, 平均钢料量最小。低锥段桩形适用于软弱地质, 平均钢料量较大。

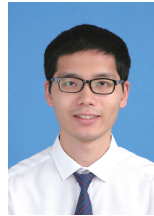
3) 泥面刚度矩阵的行列式值体现了单桩基础的地基刚度水平, 对于低刚度机位, 可根据砂土含量及质量选择适当提高锥段以降低钢料量, 高刚度机

位亦可根据实际情况采用中锥段桩形以优化基础结构。

#### 参考文献:

- [1] 王国粹, 王伟, 杨敏. 3.6 MW 海上风机单桩基础设计与分析 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊2): 95-100.  
WANG G C, WANG W, YANG M. Design and analysis of monopile foundation for 3.6 MW offshore wind turbine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33 (Supp. 2): 95-100.
- [2] 毕明君. 海上风机单桩基础选型设计方法 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(增刊1): 56-61+72.  
BI M J. Design flow of monopile foundation for offshore wind turbine [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4 (Supp. 1): 56-61+72.
- [3] 王洪庆, 刘旭东, 毕明君, 等. 海上风机单桩基础疲劳影响因素分析 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(4): 92-97.  
WANG H Q, LIU X D, BI M J, et al. Analysis of influencing factors on fatigue of offshore wind turbine monopile foundation [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(4): 92-97.
- [4] DNV. Support structures for wind turbines: DNVGL ST-0126 [S]. Oslo: DNV GL AS, 2016.
- [5] 靳军伟, 杨敏, 王伟, 等. 海上风电机组单桩基础模态及参数敏感性分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 386-392.  
JIN J W, YANG M, WANG W, et al. Offshore wind turbine monopile foundation modal and parameter sensitivity analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2014, 42(3): 386-392.
- [6] 盛振国, 任慧龙, 甄春博, 等. 桩土参数对海上风机基础结构动力特性的影响分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 73-79.  
SHENG Z G, REN H L, ZHEN C B, et al. Impact research of soil and structural parameters on dynamic response of offshore wind turbine foundation [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4): 73-79.
- [7] 许成顺, 孙毅龙, 张小玲, 等. 海上风机单桩基础水平位移敏感性分析 [J]. 海洋技术学报, 2018, 37(4): 82-88.  
XU C S, SUN Y L, ZHANG X L, et al. Sensitivity analysis of the horizontal displacement on offshore wind turbine monopile foundation [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(4): 82-88.
- [8] ARANY L, BHATTACHARYA S, MACDONALD J, et al. Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 92: 126-152.
- [9] API. Recommended practice for planning designing and constructing fixed offshore platforms—working stress design: API RP 2A-WSD [S]. Washington DC: API Publishing Services, 2014.
- [10] 杨先山. 行列式及其性质的几何解释 [J]. 赤峰学院学报: (自然科学版), 2017, 33(6): 9-11.  
YANG X S. Property and geometrical explanation of determinant [J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2017, 33(6): 9-11.

#### 作者简介:



LI C

李聪(通信作者)

1988-, 男, 广东汕头人, 工程师, 华南理工大学船舶与海洋结构物设计制造硕士, 主要从事海工结构物设计及制造研究(e-mail)licong@gedi.com.cn。

刘东华

1981-, 男, 蒙古族, 辽宁葫芦岛人, 高级工程师, 清华大学水工结构硕士, 主要从事海工结构物设计及制造研究(e-mail)liudonghua@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)

