

# 海上风机单桩基础选型设计方法

毕明君

(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:** 海上风电资源的开发为中国可再生能源的发展提供了巨大的潜能。寻求一种经济和技术方面的最优解决方案,对基础设计和建造工艺提出了很高的要求。超大直径单桩基础具有显著优势,正被越来越多地应用于海上风电大容量机组。整机固有频率、基础水平变形以及大直径桩的可打入性等多个因素决定着单桩基础的可用性,因此,能够快速判别风电场址对于单桩基础的可用性就显得非常重要。基于广东省多个海上风电场设计实践和经验,归纳了海上风机单桩基础设计的流程和要点,可为海上风电机组桩基设计提供参考。

**关键词:** 大直径单桩; 基础选型; 设计流程

**中图分类号:** TU473

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-8676(2017)S1-0056-06

## Design Flow of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbine

BI Mingjun

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

**Abstract:** Offshore wind energy offers a huge potential for the expansion of renewable energies in China. High demands have to be made concerning foundation design and construction methods to find an economically and technically optimal solution. A promising foundation concept which can be more and more widely used in large capacity offshore wind turbines is the super monopile. It is important to quickly find out the availability of monopile, which is determined by factors such as the natural frequency of the turbine-foundation system, the horizontal displacement and the drivability of large-diameter steel piles. Based on the design practice and experience of some offshore wind farms in Guangdong Province, the flow chart and key points were summarized, which can be applied to the design of pile foundation offshore wind turbines.

**Key words:** super monopile; foundation lectotype; design flow

海上风电场具有风能资源丰富、平均风速较高且发电利用小时数相对较长、技术相对高端的特点。截止2016年,全世界建成海上风电装机容量14.38 GW,其中英国5.16 GW,德国4.11 GW,中国1.48 GW,逐步形成了以欧洲为中心、亚洲和北美快速跟进的格局。预计到2020年底,全球海上风电装机容量可达40 GW。对于海上风电,降低建造成本,是行业发展的关键。

大直径单桩基础具有承载力高、沉降量小且均

匀等特点,其建造及施工工艺较为简单、施工周期短且造价相对较低,且风机建成后占海面积较小、对海洋环境影响较少。目前,欧洲规划、在建和建成的海上风电机组,60%以上的基础都是采用大直径单桩型式;在国内江苏地区,部分4 MW级别以下的风机也有应用。广东沿海多数区域表层地质较差,对于大容量机组(单机容量>5.0 MW)单桩型式基础难以应用,笔者通过试算分析发现,湛江和汕头的部分近海区域,大直径单桩基础存在广泛的应用空间。

国内外许多学者已经对海上风电大直径单桩基础的振动特性、变形、承载力、地震作用等课题展开了一系列的研究并取得了丰富的成果。Bhattacharya<sup>[1]</sup>等对风机-单桩基础模型进行振动特性分

收稿日期: 2017-11-27

作者简介: 毕明君(1986),男,山东荣成人,工程师,硕士,主要从事海上风电场风机基础结构设计工作(e-mail) bimingjun@gedi.com.cn。

析, 比较了 17 组物理实验、有限元数值分析以及理论分析的结果, 发现不同类型的地基土对风机自振频率和阻尼因子影响显著; 朱斌<sup>[2-4]</sup>等通过系统的离心模型试验、有限元分析、现场试验等手段研究了大直径单桩分别在水平静力和循环荷载作用下的受力和变形特性, 发现国际上常用的 API 法  $p-y$  曲线不适用于大直径单桩基础, 建议大直径单桩基础设计采用修正的  $p-y$  曲线, 与 KIM B T<sup>[5]</sup> 等, ASHOUR M<sup>[6]</sup> 等, YAN L<sup>[7]</sup> 等学者的研究成果一致; 荣维栋<sup>[8]</sup> 等, 刘红军<sup>[9]</sup> 等, Anastasopoulos I<sup>[10]</sup> 等分别研究了大直径单桩基础在波浪地震联合作用下的动力特性分析, 地震作用下桩周土液化情况, 以及不同深度的单桩基础的动力响应的区别。

目前已有的对海上风机单桩基础的研究大都集中在其固有频率、桩身水平变形、结构内力、基础承载力等某一方面的分析方法或者控制原则上, 对于单桩基础的选型设计流程的研究尚不多见。由于, 单桩基础对整机固有频率、场地地质条件、基础水平变形等要求极为苛刻, 能够快速判别场址对于单桩基础可用性非常重要。本文总结了多个工程的设计经验, 形成了一套完整的单桩基础选型设计流程, 包括设计输入、控制标准、计算要求和参数调整等, 研究成果可以为海上风电场单桩基础选型、设计提供参考。

## 1 基础选型设计流程

海上风电机组基础选型设计的原则是“先主体结构, 后附属结构”。对于单桩基础, 其主体结构一般指大直径钢管桩部分; 附属结构则包括靠船防撞结构、登陆爬梯、桩内平台、外部平台、海缆保护结构及冲刷防护结构等。基础选型设计流程如图 1 所示, 关键技术路线如下:

1) 针对①设计输入资料, 判断整机固有频率是否满足风机运行要求。如果满足要求, 继续后续判断; 如果不满足要求, 则进行②参数调整; 当充分进行参数后, 仍不满足要求, 则认为⑧大直径单桩基础不适用于本场址, 选择其他基础形式。

2) 针对整机固有频率满足风机运行要求的情况, 进行③ SLS 工况计算, 判断基础变形是否满足风机运行要求。如果满足要求, 继续后续判断; 如果不满足要求, 则进行④参数调整; 当充分进行参数后, 仍不满足要求, 则认为⑧大直径单桩基础不

适用于本场址, 选择其他基础形式。

3) 针对整机固有频率和基础变形均满足风机运行要求的情况, 进行⑤ ULS、FLS、ALS 工况计算, 判断结构应力、强度是否满足设计要求。如果满足要求, 继续后续判断; 如果不满足要求, 则进行⑥参数调整; 当充分进行参数后, 仍不满足要求, 则认为⑧大直径单桩基础不适用于本场址, 选择其他基础形式。

4) 针对风机基础结构设计完全满足风机运行要求的情况, 进行⑦桩基可打性分析, 判断现有施工设备、施工工艺是否满足沉桩等施工要求。如果满足要求, 则认为大直径单桩基础适用于本场址; 如果不满足要求, 且没有更先进的施工设备和施工工艺的情况下, 则认为⑧大直径单桩基础不适用于本场址, 选择其他基础形式。

5) 确认大直径单桩基础适用于本场址后, 下一步继续进行⑨主体结构优化设计、主体结构细部构造设计、附属结构设计和防腐蚀设计等。

根据上述流程, 下文分别对设计输入、控制标准、计算要求与参数调整等内容分别进行论述。

## 2 设计输入

### 2.1 设计输入荷载

作用在单桩基础上的极端荷载主要包括风机荷载、风荷载、波流荷载、船舶撞击荷载等, 此外还受到其他永久性荷载、可变功能荷载(吊机荷载、平台活荷载、轨道荷载、静水压力等)、偶然性荷载(落物、事故碰撞冲击、爆炸、火灾、地震作用等)和变形荷载(温度荷载、沉降)的作用等。

#### 2.1.1 风机荷载

风机荷载一般是指塔筒底部法兰面的荷载, 即海上风力发电机风轮气动荷载传递至塔筒底部与基础法兰交界面的荷载。风机荷载一般由风机制造商提供, 荷载计算时应建立包含风机-塔筒-下部基础的水动力-气动力-伺服控制-弹性基础的整体模型, 同时考虑风浪的耦合效应。海上风力发电机组荷载计算包括发电、发电兼有故障、启动、正常关机、紧急关机、停机(静止或空转)、停机兼有故障、运输-安装-维护-修理等 8 个设计状态, 每个设计状态下又包含不同的设计荷载工况。

风机荷载可分为正常运行荷载、极端荷载和疲劳荷载三类。正常运行荷载为风力发电机组正常运

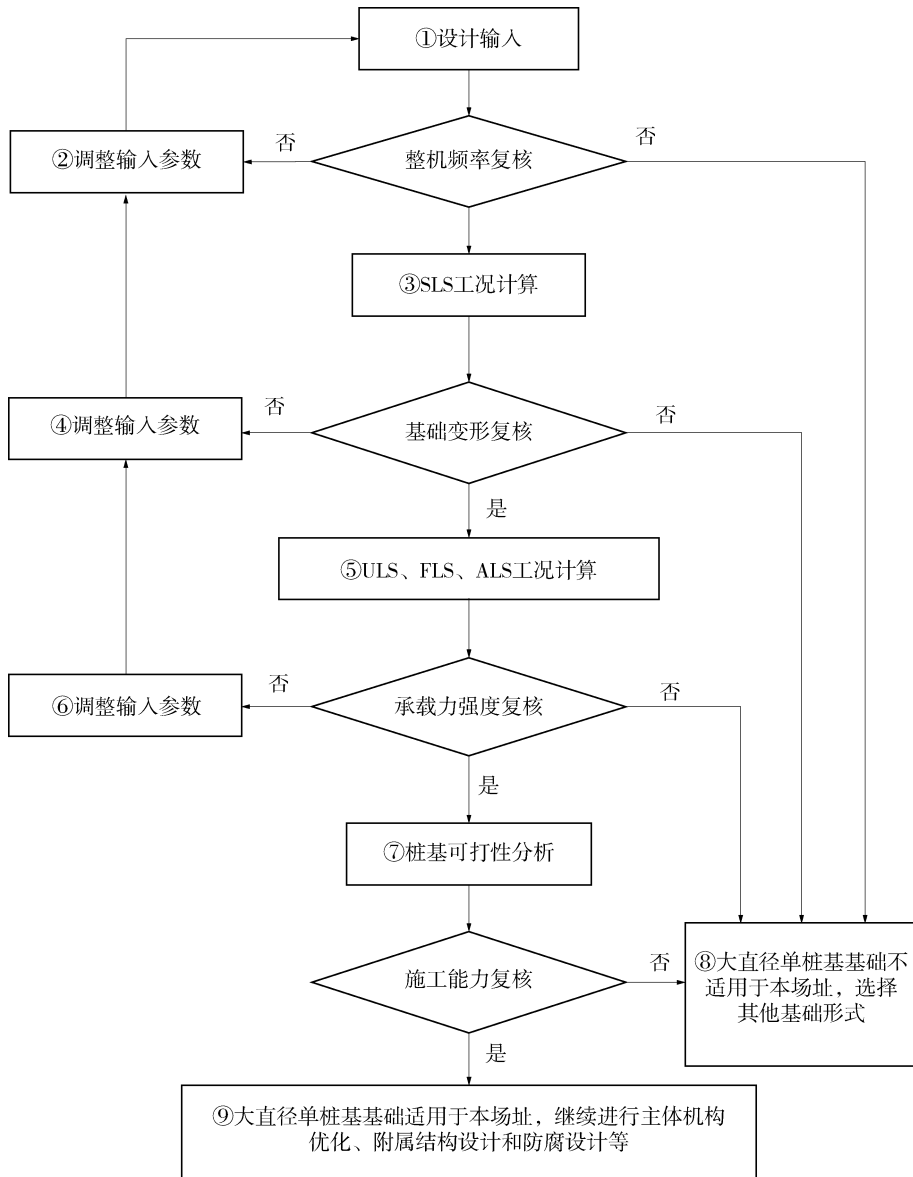


图1 单桩基础选型设计流程图

Fig. 1 Design flow of monopile foundation

行时的最不利荷载效应；极端荷载为除运输安装外的所有设计荷载工况中的最不利荷载效应；疲劳荷载为海上风机整个生命周期内所有疲劳极限状态对应设计荷载状况中的荷载总体效应。

### 2.1.2 风荷载

对于风机基础结构设计，作用在基础上的风荷载可以按文献[11]进行计算，作用在平台上的风荷载  $F$  可按下式进行计算：

$$F = K K_z P_0 A \quad (1)$$

式中： $F$  为风荷载，N； $K$  为风荷载形状系数，对圆柱体侧壁取 0.5； $K_z$  为海上风压高度变化系数；

$P_0$  为基本风压，Pa； $A$  为受压面积，即垂直于风向的轮廓投影面积， $m^2$ 。

基本风压按照公式(2)进行计算：

$$P_0 = \alpha v_t^2 \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为风压系数，取 0.613； $v_t$  为平均海平面以上 10 m 处时距为  $t$  min 的设计风速，用于单独构件基本风压计算时，采用时距为 3 s 的最大阵风风速  $v_{3s}$ ；用于结构总体基本风压计算时，采用时距为 10 min 的平均风速  $v_{10 \text{ min}}$ 。

### 2.1.3 波流荷载

波流荷载是海上风机基础结构承受的主要荷载

之一，它直接影响着风机基础结构的整体极限强度、局部构件强度和疲劳寿命。风机基础结构分析时，应同时考虑波浪和水流的相互作用效应。例如，对于细长构件，在进行水动力荷载分析时通常将波浪和水流共同施加在结构上，计算水质点速度和加速度的矢量和，然后利用 Morison 方程进行求解。

Morison 方程是一个半经验公式，可以很好的描述作用在柱体上的波流力大小，认为波流力是水流经过物体时速度引起的阻力和水体加速度引起的惯性力的线性叠加。阻力是绕流时水质点运动速度突然变化而形成，与速度平方和阻水面积成正比；惯性力与水质点原有轨迹运动的加速度和被物体排开水体的质量成正比。作用在单位长度桩柱上波流力的计算公式如下：

$$f(t) = f_D(t) + f_I(t) = \frac{1}{2}\rho_w C_D D u(t) |u(t)| + C_M \rho_w \frac{\pi}{4} D^2 a(t) \quad (3)$$

式中： $C_D$  为拖曳力系数； $C_M$  为惯性力系数； $\rho_w$  为海水密度； $D$  为桩柱等效直径。为获得整根桩的波流力，需要沿着桩柱长度方向进行积分。水下构件的单元波流力积分公式为：

$$F(t) = \int_0^L \left[ \frac{1}{2}\rho_w C_D D u(t) |u(t)| + C_M \rho_w \frac{\pi}{4} D^2 a(t) \right] dl \quad (4)$$

式中： $L$  为单元长度。若杆件为倾斜的，通常忽略切向速度力和惯性力。

应用 Morison 方程中的一个关键问题是拖曳力系数  $C_D$  和惯性力系数  $C_M$  的确定，国内外相关规范都对不同类型结构物的 Morison 方程系数取值进行了规定，对于圆柱体来说，可取  $C_D = 1.2$ ； $C_M = 2.0$ 。

#### 2.1.4 撞击荷载

撞击过程是船舶动能转化为应变能的过程。海上风机基础船舶撞击分析应同时考虑运维船舶撞击力和允许的最严苛风浪流海洋环境条件，船舶撞击力计算时应包括附加质量的影响。海上风机基础的船舶撞击分析主要包括两类，一是运维船舶正常操作碰撞分析，二是运维船舶事故碰撞分析。作用在风机基础上的船舶撞击荷载近似等于：

$$F_{bi} = \gamma V s \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (5)$$

式中： $F_{bi}$  为撞击力，kN； $\gamma$  为动能折减系数，s/ $m^{0.5}$ 。当船只斜向撞击时可取 0.2，正向撞击时可取 0.3； $V$  为船只撞击时的速度，m/s； $\alpha$  为船只驶近方向与撞击点处切线所成的夹角，缺乏资料时可采用  $\alpha = 20^\circ$ ； $W$  为船只重量，kN； $C_1$ 、 $C_2$  为船只弹性变形系数和基础的弹性变形系数，缺乏资料时，假定  $C_1 + C_2 = 0.5 \text{ mm/kN}$ 。

#### 2.1.5 地震作用

根据提供的场地类型及对应的 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度，利用地震加速度反应谱进行地震谱分析，考虑到地震的随机性和方向的不确定性，分析中地震输入考虑按  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个输入方向，各方向的组合系数取值： $X$  和  $Y$  方向取 1.0， $Z$  方向取 0.5。

#### 2.2 工程地质

某海上风电场区位于水下岸坡地貌单元，场区内地势相对平坦，海底标高在  $-8.0 \sim -10.0 \text{ m}$ 。场区内自上而下地层为第四系全新统海陆交互相和冲洪积相的砂土及粘性土层、第四系中更新统石卯岭组玄武岩层、第四系中更新统—早更新统北海组的粘性土及砂土层、第四系早更新统湛江组的粘土和砂土层。

根据勘察取得的室内土工试验成果、原位测试指标和土层埋深，提供土壤类型、浮重度、度桩—土摩擦角、无量纲支撑能力系数、地基反力初始模量等参数。

工程所在区域属抗震设防烈度为 7 度区，Ⅲ类场地 50 年超越概率 10% 的地震动峰值加速度为  $0.15 \text{ g}$ ；当发生烈度为 7 度的地震时，风电场区在 20 m 深度内的砂层中，部分区域砂土会发生轻微液化，软土不存在震陷灾害。

#### 2.3 水文地质

取场区内海水水样进行水质简分析，对海水腐蚀性评价如下：海水对混凝土结构具强腐蚀性，腐蚀介质为  $\text{SO}_4^{2-}$ ；对钢筋混凝土结构中钢筋在长期浸水环境下具微腐蚀性，在干湿交替环境下具强腐蚀性，腐蚀介质为  $\text{Cl}^-$ 。海水对钢结构具中等腐蚀性。

对钻孔进行了电阻率测试，岩土层视电阻率平均值小于  $20 \Omega \cdot \text{m}$ ，岩土层对钢结构腐蚀等级整体

评价为中等~强,综合判定为强腐蚀性。

### 3 控制标准

#### 3.1 整机固有频率控制标准

海上风电整机结构(风机+塔筒+基础+地基整体结构)固有频率需要避开风轮转动频率( $1P$ )和叶片通过频率( $nP$ )范围,并考虑一定的安全裕量。

根据文献[12]的要求,整机结构固有频率与风轮激励频率的比值 $f_R/f_{0,n}$ 应该满足如下要求:

$$f_R/f_{0,n} \leq 0.95 \text{ or } f_R/f_{0,n} \geq 1.05 \quad (6)$$

式中: $f_R$ 为风轮转动激励频率,包括风轮转动频率与叶片通过频率范围, $f_{0,n}$ 为整机结构 $n$ 阶自振频率。

#### 3.2 基础变形控制标准

海上风机基础的变形控制,以风机制造商提供的关于风机正常运行的变形要求为准,如风机制造商无法提供,则按文献[13]执行。综合考虑,大直径单桩基础的变形控制标准如下:

- 1) 桩身泥面处的水平位移不超过 $L/500$ 。
- 2) 桩身泥面处的桩体转角不超过 $0.25$ ,即 $4.36\%$ 弧度。

- 3) 桩体端部的位移不超过 $\min\{10 \text{ mm}, L/5000\}$ 。

上述 $L$ 为桩体入土深度, m。

#### 3.3 基础结构材料及应力控制标准

海上风电机组基础结构主要包括主体结构、特殊结构和次要结构,主体结构采用DH36型钢板;特殊结构为主体结构节点、变直径位置等,采用抗层状撕裂的Z向钢板DH36-Z35型钢板;次要结构为靠船结构、爬梯、平台、栏杆等,采用Q345C、Q235B等型号钢材。选用钢材的材料属性如表1所示。

表1 钢材的材料属性  
Tab. 1 Parameters of steel

材料属性	数值
密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 850
弹性模量/(GPa)	206
剪切模量/(GPa)	79
泊松比	0.3

#### 3.4 基桩承载力控制标准

按照承载能力极限状态进行结构分析计算,能

够获得极端海洋环境作用下桩顶最大轴向荷载和水平荷载设计值,按照文献[14]的方法计算大直径钢管桩的承载力设计值,最大荷载作用设计值应小于单桩承载力设计值。

### 4 计算要求与参数调整

海上风机基础钢结构通常是按照荷载与抗力分项系数方法(LRFD)进行分析与设计,分析时,除了进行整机固有频率复核外,主要考虑四种极限状况分析:正常使用极限状况(SLS)、承载能力极限状况(ULS)、疲劳极限状况(FLS)和偶然(事故)极限状况(ALS),以及施工可行性分析等。

#### 4.1 整机固有频率复核

对本文选定的研究对象进行整机固有频率复核,分析过程应考虑水深、冲刷深度、海生物附着厚度、结构腐蚀、阻尼、附属结构质量和海水附加质量等因素变化的影响,确定整机固有频率的上限和下限,确保其上、下限符合式(6)的规定。表2列出了各因素变化对整机固有频率影响的趋势。

表2 各因素变化对固有频率影响

Tab. 2 Natural frequency changed by various factors

频率	地质	水位	冲刷	海生物	腐蚀	阻尼
下限	差	最高	最深	最厚	严重	大
上限	好	最低	淤积	无	无	无

通过试算分析,整机固有频率不能满足风机正常运行的频率窗口要求时,进行②参数调整,在保证钢管桩的入土深度( $L=52 \text{ m}$ )前提下,直径调整对频率的影响最为显著。试算表明,当单桩基础直径 $D$ 处于 $6.25 \text{ m} \leq D \leq 9.60 \text{ m}$ 范围内时,整机固有频率的上下限均满足要求;且其他条件不变的前提下增加钢管桩直径,基础固有频率呈增大趋势;反之亦然。

#### 4.2 基础变形复核

对选定机位进行基础变形复核,主要验算基础水平方向上的变形,关键控制指标是桩身泥面处水平位移、桩底端水平位移以及桩身泥面处水平转角等,确保上述指标满足3.2节要求。风机对基础的水平变形要求主要分为两种情况:一是风机正常运行状态下,变形可恢复,不会产生累积变形;二是极端条件下,变形不超过风电机组机舱的偏航要求。

通过试算分析, 基础变形不能满足风机运行的要求时, 进行④参数调整, 钢管桩的入土深度和直径调整对水平方向变形的影响较为显著。试算表明, 当入土深度大于 51.50 m 时, 且直径  $D$  处于  $6.50\text{ m} \leq D \leq 9.60\text{ m}$  范围内时, 基础水平变形满足 3.2 节要求; 且在其他条件不变的前提下增加钢管桩直径, 基础水平变形呈减小趋势; 而当入土深度大于 51.50 m 时, 继续增加埋深, 基础水平变形虽也减小但不明显。

#### 4.3 基础承载能力和结构强度复核

对选定机位进行基础承载能力和结构强度复核, 进行⑤ULS、FLS、ALS 工况计算, 主要确保基础承载能力和钢管桩构件及节点的极限强度、疲劳强度以及地震作用下结构强度满足 3.3 和 3.4 节的要求。

通过试算分析, 直径  $D = 6.50\text{ m}$  时, 基础承载能力设计值约为最大荷载作用设计值的 4.3 倍, 远超过文献[14]的最低要求, 且基础的承载能力随直径的增加而增大。钢管桩构件及节点的应力强度不满足设计要求时, 进行⑥参数调整, 钢管桩的壁厚和直径调整对其影响较为显著。试算表明, 直径  $D$  处于  $6.50\text{ m} \leq D \leq 8.20\text{ m}$  范围内且壁厚  $t \geq 78.50\text{ mm}$  时; 或者直径  $D$  处于  $8.20\text{ m} < D \leq 9.60\text{ m}$  范围内且壁厚  $t \geq 71.50\text{ mm}$  时, 基础结构强度均满足 3.3 节要求。

#### 4.4 基础施工能力复核

对上述设计成果进行基础施工可行性复核, 主要进行⑦桩基可打性分析, 确保现有的施工设备能够满足工程施工的要求。通过试算分析, 钢管桩直径  $D$  大于 8.00 m 后, 选定的 IHC S2000 液压冲击锤(最大冲击能量 2 MJ), 沉桩效率明显降低。因此, 从施工的可行性角度, 钢管桩直径选择宜不大于 8.00 m。

#### 4.5 小结

综上所述, 对于上文所列的特定场址条件和控制标准, 经初步分析, 风机基础钢管桩直径  $D$  处于  $6.50\text{ m} \leq D \leq 8.00\text{ m}$ , 壁厚  $t \geq 78.50\text{ mm}$ , 入土深度  $L \geq 51.50\text{ m}$  时, 其整机固有频率、基础变形、承载能力、结构强度以及施工可行性均满足要求, 初步判定大直径单桩基础适用于本工程。

## 5 结论

文章以某实际工程为例, 阐述了海上风机基础

设计的关键技术路线, 对选定的场址和风电机组进行基础选型设计时, 按照整机固有频率复核、基础结构变形复核、基础承载能力复核、结构强度复核以及施工可行性复核的顺序进行分析是合理的。

1) 风电机组 - 基础整体结构的固有频率上下限的确定, 应充分考虑水深、冲刷深度、海生物附着厚度、结构腐蚀、阻尼、附属结构质量和海水附加质量等因素造成的有利和不利影响。

2) 对于大直径单桩基础, 整机固有频率、基础结构变形和施工可行性是决定基础选型的决定性条件; 而基础的承载能力和结构强度条件, 可通过钢管桩的长度和壁厚进行调整, 不是基础选型的控制条件。

3) 选择大直径单桩结构作为风机基础, 其主体结构设计和施工可行性均满足相应要求后, 下一步需进行主体结构优化设计、附属结构(靠船防撞、内外平台、登陆爬梯、海缆保护结构等)详细设计和钢结构防腐设计等。

#### 参考文献:

- [1] BHATTACHARYA S, ADHIKARI S. Experimental validation of soil-structure interaction of offshore wind turbines [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31 (5): 805-816.
- [2] 朱斌, 熊根, 刘晋超, 等. 砂土中大直径单桩水平受荷离心模型试验 [J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(10): 1807-1815.  
ZHU B, XIONG G, LIU J C, et al. Centrifuge modelling of a large-diameter single pile under lateral loads in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35 (10): 1807-1815.
- [3] 刘晋超, 熊根, 朱斌, 等. 砂土海床中大直径单桩水平承载与变形特性 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 591-599.  
LIU J C, XIONG G, ZHU B, et al. Bearing capacity and deflection behaviors of large diameter monopile foundations in sand seabed [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36 (2): 591-599.
- [4] 朱斌, 李涛, 毕明君. 海上四桩导管架基础水平受荷离心模型试验 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(10): 1822-1829.  
ZHU B, LI T, BI M J. Centrifuge modelling on tetrapod jacket foundation subjected to lateral loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(10): 1822-1829.
- [5] KIM B T, KIM N K, LEE W J, et al. Experimental load-transfer curves of laterally loaded piles in Nak-dong river sand [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(4): 416-425.

从质量、进度、运行管理、主站系统、通信系统五个方面进行解决。

#### 参考文献:

- [1] 王士政. 电网调度自动化与配电自动化技术: 第2版 [M]. 北京: 水利水电出版社, 2006: 32-44.
- [2] 王海燕, 曾江, 刘刚. 国外配电自动化建设模式对我国配电网建设的启示 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 125-129.
- WANG H Y, ZENG J, LIU G. Enlightenment of DAS construction mode in foreign countries of China [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 125-129.
- [3] 李文伟, 邱利斌. 配电自动化及通信系统的规划建设 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(2): 5-7.
- LI W W, QIU L B. Planning and construction of power distribution network automation system [J]. Telecommunications for Electric Power System, 2009, 30(2): 5-7.
- [4] 赵晓慧, 梁标, 李海波, 等. 城市配电自动化可靠性评估与成本效益分析 [J]. 电力科学与技术学报, 2015(1): 73-79.
- ZHAO X H, LIANG B, LI H B, et al. Reliability assessment and cost-benefit analysis of urban distribution network automation [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015(1): 73-79.
- [5] 王宗耀, 苏浩益. 配电自动化系统可靠性成本效益分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 98-103.
- WANG Z Y, SU H Y. Cost-benefit analysis model for reliability of distribution network automation system [J]. Power System

- Protection and Control, 2014, 42(6): 98-103.
- [6] MADANI V, DAS R, AMINIFAR F, et al. Distribution automation strategies challenges and opportunities in a changing landscape [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2157-2165.
- [7] DAS R, MADANI V, AMINIFAR F, et al. Distribution automation strategies: Evolution of technologies and the business case [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 2166-2175.
- [8] HEIDARI S, FOTUHI-FIRUZABAD M, KAZEMI S. Power distribution network expansion planning considering distribution automation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1261-1269.
- [9] XU B, LI T, XUE Y. Smart distribution grid and distribution automation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41.
- [10] Brown R E. Impact of smart grid on distribution system design [C]//IEEE PES. Power and Energy Society General Meeting-conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, Pittsburgh, U. S., 2008. U. S.: IEEEExplore, 2008: 1-4.
- [11] 曾广辉. 珠海配电网自动化规划及其效益分析研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [12] 刘广宁. 广州配电自动化方案探讨及其经济效益分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

(责任编辑 高春萌)

(上接第61页 Continued from Page 61)

- [6] ASHOUR M, NORRIS G. Modeling lateral soil-pile response based on soil-pile interaction [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(5): 420-427.
- [7] YAN L, BYRNE P M. Lateral pile response to monotonic pile head loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29(6): 955-970.
- [8] 荣维栋, 李洪斌. 近海单桩风机在波浪地震联合作用下的动力特性分析 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2015, 29(1): 27-32.
- RONG W D, LI H B. Analysis on the dynamic response of offshore wind turbine under the joint action of wave and seismic [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 29(1): 27-32.
- [9] 刘红军, 王超. 海上风电单桩基础周围土体地震液化分析 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2017, 47(4): 093-099.
- LIU H J, WANG C. Study on seismic response and liquefaction of soil around pile foundation of offshore wind power [J]. Periodical of Ocean University of China, 2017, 47(4): 093-099.
- [10] ANASTASOPOULOS I, THEOFILOU M. Hybrid foundation

- for offshore wind turbines: environmental and seismic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 80(25): 192-209.
- [11] 国家能源局. 浅海钢质固定平台结构与建造技术规范: SY/T 4094—2012 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
- National Energy Administration. Technical specification for structure designing and constructing for fixed steel-platforms in shallow-sea: SY/T 4094—2012 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2013.
- [12] Germanischer Lloyd. Guideline for the Certification of offshore wind turbines: GL—2012 [S]. Hamburg: Germanischer Lloyd, 2012.
- [13] Det Norske Veritas AS. Design of offshore wind turbine structures: DNV-OS-J101 [S]. Oslo: Det Norske Veritas AS, 2013.
- [14] 交通运输部. 港口工程桩基规范: JTS 167-4—2012 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- Ministry of Transport. Code for pile foundation of harbor engineering: JTS 167-4—2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

(责任编辑 高春萌)