

# 土基海流耦合条件下海上风电场塔架支撑结构动力特性初探

严根华<sup>1</sup>, 古 华<sup>1</sup>, 陆忠民<sup>2</sup>, 林毅峰<sup>2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 南京 210029; 2. 上海勘测设计院, 上海 200434)

[摘要] 针对海上风力机塔柱支撑结构受到土基、海洋流体作用的复杂特点,开展多介质耦合条件下塔柱支撑结构动力特性研究。在考虑流固耦合基础上,进一步考虑海床土基弹性条件对塔柱结构动力特性的影响。最后得出了水流、土基与塔柱结构三合一综合动力特性分析结果,初步取得了变化规律。研究结果对海上风电场塔架支撑结构的抗振设计及进一步的研究提供了重要基础性参考依据。

[关键词] 海上风电场;支撑结构;动力特性;土基海流耦合

[中图分类号] TM315 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0047-06

## 1 前言

海上风电场所处环境比陆地环境更加恶劣,涉及到的荷载源多,而且量级更大,对风力机支撑系统的动力作用更加复杂,深入认识结构动力特性,有助于为工程抗振减振措施设计提供科学依据。海上风力机塔柱结构一般位于近海地区,受到土基、海洋流体的作用(见图1),其结构的动力特性将有别于一般的陆上建筑物结构,具有流体、结构固体和土体三者的耦合作用,动力特性异常复杂,需要认真研究和探索,揭示其自身特点<sup>[1]</sup>。海上风电场塔柱支撑系统振动特性随基础冲刷深度产生显著影响<sup>[2]</sup>,文章对塔柱支承系统结构流固耦合动力特性、考虑海床土基弹性条件的塔柱结构动力特性,及其水流、土体与塔柱结构三合一综合动力特性进行数值分析研究,取得其变化规律。

## 2 流固耦合塔架支撑系统动力特性分析

本项研究的依托工程为上海东海大桥海上风电场。风力机塔架支撑系统的动力分析研究通过三维有限元法进行,分析软件为 ANSYS11.0。研究时暂

将风轮及机组简化为集中质量进行处理,以重点考察支撑塔架结构的动力特性,为结构振动分析提供依据。

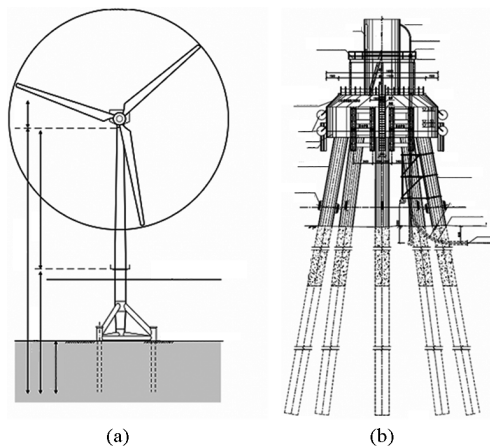


图1 海上风力机支撑系统结构示意图

Fig.1 Offshore wind turbine supporting system schematic figure

### 2.1 流固耦合数学模型

考虑塔柱基础流固耦合动力特性分析时,塔柱

[收稿日期] 2010-07-29

[作者简介] 严根华(1956—),男,上海市人,教授级高级工程师,研究方向为水工水力学、金属结构、水工结构激流振动问题及其优化设计研究;E-mail:ghyan@nhri.cn

桩基按不同海床冲刷深度条件(分别为无冲刷、冲刷 5 m、冲刷 10 m、冲刷 15 m)进行结构模态分析,计算时下部钢管桩的底端固结。支撑系统几何模型和有限元模型见图 2。



图 2 不同冲刷深度条件下的结构几何模型(流固耦合)

Fig. 2 Tower's structural finite element models of different scour depth (fluid - solid coupling)

流固耦合动力特性控制方程可利用耦合系统第二类 Lagrange 方程得到,设  $\{\delta\}$ ,  $\{\dot{\delta}\}$  分别代表整个结构的节点位移向量和节点速度向量,  $\{\delta_f\}$  代表结构流体接触面处的结构位移,以  $\{p\}$  表示流体作用于结构面有关节点的动水压力向量,若  $T, U$  表示结构的动能和势能,则有

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \{\dot{\delta}\}^T [M] \{\dot{\delta}\} \\ U &= \frac{1}{2} \{\delta\}^T [K] \{\delta_f\} + \{\delta\} \{p\} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中第二式代表动水压力对流体作用面做的功。将  $T, U$  代入式(2)——第二类 Lagrange 方程

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \{\dot{\delta}\}} - \frac{\partial T}{\partial \{\delta\}} + \frac{\partial U}{\partial \{\delta\}} = 0 \quad (2)$$

可得

$$[M] \{\ddot{\delta}\} + [K] \{\delta_f\} = -\{p\} \quad (3)$$

式(3)即为流固耦合振动方程,其中动水压力向量  $\{p\}$  可由无黏性不可压缩的微幅流体运动拉普拉斯方程表示:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

再利用水流扰动速度势  $\Phi(x, y, z, t)$ , 流体连续性方程,再考虑流体作用面与水接触面等边界条件取得流体作用面与水接触节点上的动力压力向量  $\{p_f\}$ , 经推导整理后得到如下流固耦合自振特性控制方程:

$$([M] + [M_p]) \{\ddot{\delta}\} + [K] \{\delta_f\} = \{0\} \quad (5)$$

其中  $[M_p] = [S][D][T]$ , 为流体附加质量矩阵。

式(5)可转化为如下形式的特征值问题:

$$[K] \{\Phi_i\} = \lambda_i [M_p] \{\Phi_i\} \quad (6)$$

式(5)中  $[M_p]$  是非对称矩阵,因此不能将其转化为标准特征值问题,可用求解非对称特征值问题的 Lanczos 法求解<sup>[3]</sup>。

## 2.2 流固耦合对塔柱结构动力特性的影响

计算结果显示,考虑流固耦合时,结构固有频率值较无水时呈现下降趋势(见表 1),基础在无冲刷时,结构的振动频率值比无水时有所降低,最大降幅为 14.40%。当冲刷深度 5 m 时,振动频率值最大降幅为 17.42%。在冲刷 10 m 时,频率值的最大降幅为 17.75%;在冲刷 15 m 时,频率值的最大降幅为 21.89%。后面多阶为上部塔筒局部鼓胀振型,与是否施加水体无关,所以其频率值保持不变。由此可见,施加水体对于结构模态计算的影响不可忽视。

## 3 考虑海床土基条件的塔柱结构动力特性

对于海上风力机塔架支撑系统而言,下部钢管桩插入海底,而海底的地基是具有弹性特征的,并不能考虑成理想的固结状态<sup>[4]</sup>。因此,考虑海床土基为弹性条件是必要的。

计算时土体考虑 Drucker - Prager 模型的屈服准则。该准则通过假定抗剪强度与静压力线性相关而得到,形式如下:

$$F(I_1, J_2) = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (7)$$

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (8)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (9)$$

式(7)~式(9)中,  $\alpha$  和  $k$  为材料参数;  $I_1$  为第一主应力张量不变量;  $J_2$  为第二偏应力张量不变量。

三轴压缩条件下它们的屈服面为一圆锥面,此圆锥面是六角形的摩尔 - 库仑屈服面的外切锥面,如图 3 所示。

在桩土间相互作用的建模过程中,按照港工现行规范采用了  $m$  值法。即把基桩的入土部分视为竖放于弹性地基中的基础梁,把地基土近似地看作彼此互不联系的弹簧,弹簧压缩系数就是地基系数或称为土抗力系数。土抗力系数往往与土的性质和土层的深度有关,其关系式可表示为:

表 1 未考虑流体和流固耦合时第 3、4 阶结构振动模态频率值比较表

Table 1 Correlation table of the frequency values of the third and fourth order (without fluid and fluid - solid coupling)

冲刷深度	Mode3			Mode4		
	未考虑水体	考虑流固耦合		未考虑水体	考虑流固耦合	
	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%
无冲刷	2.97	2.97	-0.03	2.98	2.98	-0.04
冲刷 5 m	3.04	2.52	-17.37	3.05	2.52	-17.42
冲刷 10 m	2.10	1.74	-17.19	2.10	1.74	-17.19
冲刷 15 m	1.61	1.27	-20.85	1.61	1.27	-20.85

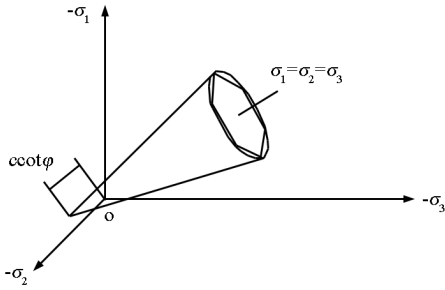


图 3 D - P 屈服面和 M - C 屈服面

Fig. 3 D - P yield surface and M - C yield surface

$$k = myb_0h_0 \quad (10)$$

式(10)中,  $m$  为随深度变化的比例系数;  $y$  为自地面算起的土层深度;  $b_0$  为桩的等效宽度。

将基桩沿深度方向划分为若干个单元, 把基桩桩体与地基土的连续接触置换为一系列的弹簧作用于梁单元节点上, 即以一系列的弹簧约束来表征土抗力的作用。基桩结构的有限元基本方程的矩阵表达式为:

$$[K]_{pile} \{ \delta \} = \{ P \} \quad (11)$$

式(11)中,  $[K]_{pile}$  为基桩结构的整体刚度矩阵;  $\{ \delta \}$  为基桩结构节点的位移向量;  $\{ P \}$  为作用在基桩结构节点上的荷载向量。

在考虑土基时对塔柱结构进行动力特性分析时, 为了使问题既得以简化又能反映问题的主要特征, 作如下假设: a. 将土体看作是由若干材料性质各不相同的土层组成, 土体为理想弹塑性体; b. 不考虑外力的影响; c. 桩竖向摩擦阻力的影响不予考虑; d. 在竖直荷载作用下, 荷载面与土基之间、桩与桩周土之间不产生相对滑移, 其接触面上的结点在变形过程中始终保持接触; e. 假定桩、土都为均质、各项同性。

计算时考虑上部叶轮及机组质量, 不同冲刷深度条件下海床土基弹性影响的有限元模型见图 4, 计算结果见表 2。



图 4 不同冲刷深度条件下的结构有限元模型(考虑土基)

Fig. 4 Structure finite element models of different scour depth(soil - solid coupling)

计算结果指出, 考虑土基弹性特性时计算的频率值较未考虑时(采用固结方式)有所降低(见表 2 和表 3)。在无冲刷条件下, 结构前三阶振动模态振动频率值在考虑土基弹性时分别降低 36.4%、31.8% 及 64.9%; 在冲刷 5 m 时, 结构前三阶振动模态振动频率值在考虑土基弹性时分别降低 36.4%、32.98% 及 68.9%; 在冲刷 10 m 时, 前三阶模态频率值的最大降幅为 62.3%; 在冲刷 15 m 时, 频率值的最大降幅为 58.6%。由此可见, 考虑土基弹性时前若干结构低阶模态振动频率下降值一般在 30% ~ 70% 范围内变化。

#### 4 考虑水流、土基弹性与塔柱结构耦合的动力特性

为完整模拟塔柱系统真实的约束和受力状况, 同时考虑水流、土基弹性与塔柱结构三者耦合进行塔柱结构动力特性研究。计算时塔柱顶部考虑叶轮结构和机组质量, 下部施加水体和土基弹性, 桩基冲刷深度分别为无冲刷、冲刷 5 m、冲刷 10 m、冲刷 15 m, 相应有限元模型见图 5。

表2 未考虑与考虑土基弹性时第1、2阶结构振动模态频率值比较表

Table 2 Correlation table of the frequency values of the first and second order (soil – solid and soil – fluid – solid coupling)

冲刷深度	Model1			Mode2		
	未考虑土基弹性	考虑土基弹性		未考虑土基弹性	考虑土基弹性	
	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%
无冲刷	0.57	0.36	-36.4	0.63	0.43	-31.8
冲刷 5 m	0.57	0.36	-37.2	0.58	0.39	-32.98
冲刷 10 m	0.57	0.30	-46.9	0.58	0.35	-40.5
冲刷 15 m	0.57	0.23	-59.1	0.58	0.27	-53.5

表3 未考虑与考虑土基弹性时第3阶结构振动模态频率值比较表

Table 3 Correlation table of the frequency values of the third order (without soil and soil – solid coupling)

冲刷深度	未考虑土基弹性	考虑土基弹性	
	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%
无冲刷	2.97	1.04	-64.9
冲刷 5 m	2.90	0.90	-68.9
冲刷 10 m	2.10	0.79	-62.3
冲刷 15 m	1.61	0.67	-58.6



图5 不同冲刷深度条件下的结构有限元模型 (考虑土水耦合)

Fig.5 Structure finite element models of different scour depth (soil – fluid – solid coupling)

计算结果显示,考虑土水耦合时结构频率值较未考虑时降低,相应基础冲刷深度的前五阶低阶模

态频率值计算结果见表3。由表3可见,在基础无冲刷时,考虑土水时结构的振动频率值最大降幅为65.2%;冲刷深度5 m时,频率值的最大降幅为70.0%。不同的冲刷深度土水耦合产生的结构振动频率降幅有所不同,冲刷深度10 m时,频率值的最大降幅为63.7%;而冲刷深度15 m时,频率值的最大降幅为60.8%。图6绘出考虑水土耦合条件下第3、4阶结构振动模态随基础冲刷深度的变化关系。显然结构振动特性分析时,土水与结构耦合作用影响需要关注与重视。

表4 只考虑土基时和考虑土水时第1、2阶结构振动模态频率值比较表

Table 4 Correlation table of the frequency values of the first and second order (soil – solid and soil – fluid – solid coupling)

冲刷深度	Model1			Mode2		
	只考虑土基弹性	考虑土水耦合		只考虑土基弹性	考虑土水耦合	
	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%	振动频率/Hz	振动频率/Hz	降幅/%
无冲刷	0.57	0.36	-36.6	0.63	0.43	-32.0
冲刷 5 m	0.57	0.32	-44.3	0.58	0.37	-35.6
冲刷 10 m	0.57	0.30	-46.6	0.58	0.32	-45.2
冲刷 15 m	0.57	0.23	-60.7	0.58	0.26	-55.4

若考虑塔柱支撑系统整体弯曲的振动模态,则随基础不同冲刷深度下水体耦合时的振动频率变化关系分别见图7和图8。上述变化关系显示了海上风电场塔柱支撑系统结构振动特性不仅受到基础冲刷深度的影响,而且还受到水流和土基特性的耦合

影响。这种变化趋势对结构抗振将产生不利影响,因此,振动分析时需要认真考虑和对待。

## 5 结语

计算结果显示,在近海环境中,塔架支撑系统结

构的固有振动特性不仅受到基础冲刷深度的显著影响,同时也受到流固耦合和地基弹性的影响。从总体上看,结构的模态频率呈现下降趋势,并获得如下变化规律:

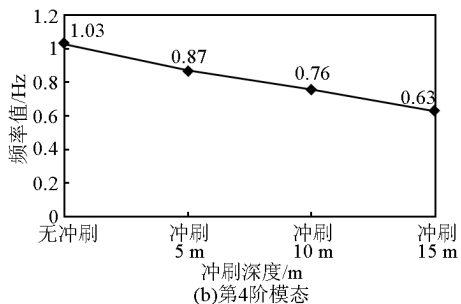
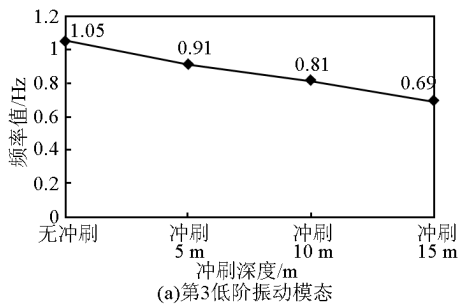


图6 第3、4阶结构振动频率值随冲刷深度变化规律图

Fig. 6 Structural vibration frequency law graphs with the changes in scour depth of the third and fourth order

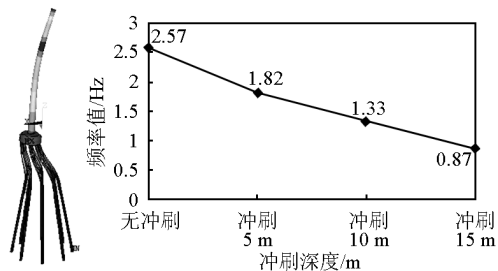


图7 结构整体弯曲的振动频率值随冲刷深度的变化关系

Fig. 7 Structural vibration frequency law graphs with the changes in scour depth of structure overall bending mode

1) 考虑流固耦合时结构振动频率值较无水时降低,不同基础冲刷深度时,振动频率值最大降幅在

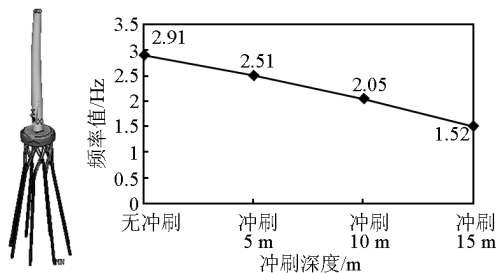


图8 整体以承台的中心扭转振动频率值随冲刷深度的变化关系

Fig. 8 Structural vibration frequency law graphs with the changes in scour depth of overall torsion mode

55 % 左右。由此可见,施加水体对于结构振动模式的影响不可忽视。

2) 考虑土基弹性特性时的振动频率值较未考虑时(采用固结方式)降低,不同基础冲刷深度下,结构固有振动频率值最大降幅在 58 % ~ 68 % 范围内变化。若土质条件差,结构固有频率将进一步降低。

3) 同时考虑流固耦合和土基弹性时,随不同冲刷深度,结构固有振动频率值最大降幅为 60 % ~ 70 %。因此塔架支撑系统结构抗振设计尤其是抗共振设计不仅需要考虑到基础冲刷的影响,还需考虑流固耦合和土基弹性的影响。

4) 流固、土固耦合是一个十分复杂的问题,目前虽然通过计算分析取得了一些变化规律,但其研究工作尚属初步,还需要进行更加细致的分析研究,并通过模型试验进行试验验证。

#### 参考文献

- [1] Schaumann P, Wilke F. Current development of support structures for wind turbines in offshore environment [C]//ICASS'05 Advances in Steel Structures. 2005, II: 1107 - 1114
- [2] 严根华,古 华,陆忠民,等. 基础冲刷对海上风电场塔架支撑系统动力特性影响初步分析[C]//中国工程院第91场工程技术论坛论文集. 大连, 2009
- [3] 古 华,严根华. 水工闸门流固耦合自振特性数值分析研究[J]. 振动测试与诊断, 2008, 28(3): 242 - 246
- [4] 林毅峰,李健英,沈 达,等. 东海大桥海上风电场风机地基基础特性及设计[J]. 上海电力, 2007, (2): 153 - 157

# Preliminary study on dynamic characteristics of the tower supporting structure with soil-fluid-solid coupling of offshore wind farm

Yan Genhua<sup>1</sup>, Gu Hua<sup>1</sup>, Lu Zhongmin<sup>2</sup>, Lin Yifeng<sup>2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

[ **Abstract** ] Based on the feature that offshore wind turbine tower supporting structures are affected by soil foundation and the ocean flow, the paper carries out research on supporting system structure with multi-medium coupling. Based on considering fluid-solid coupling, the paper discusses the effect of seabed soil foundation elastic conditions on tower's dynamic characteristics. The comprehensive analytical result of dynamic characteristics with soil-fluid-solid coupling is given in the end and the change law is got preliminary. The findings will provide an important fundamental basis on the anti-vibration design of offshore wind farms tower supporting structure and further research.

[ **Key words** ] offshore wind farm; supporting structure; dynamic characteristics; soil-fluid-solid coupling

---

(上接 39 页)

## Foundation form and supporting construction technique of offshore wind farm

Qin Shunquan, Zhang Ruixia, Li Juntang

(China Zhongtie Major Bridge Engineering Group Co., Ltd., Wuhan 430050, China)

[ **Abstract** ] According to the different of depths and geological conditions, and with the combining of the completed offshore wind farm base forms and construction methods, several forms of gravity, single pile, group piles, set of caisson, open caisson and suction barrel base were introduced. To the different foundation forms, the self-elevating platform, the semi-submersible barge shallow draft, piling barge, lifting the overall floating and other appropriate foundation construction methods were proposed, respectively. According to the types of fan unit, the tower tube and installation of the fans were also introduced.

[ **Key words** ] offshore wind farm; foundation form; pile foundation; jacket base; suction barrel base; set of caisson; fan installation