

# 基础冲刷对海上风电场塔架支撑系统动力特性的影响分析

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、海洋流体的复杂作用的特点, 建立三维有限元数值模型, 开展不同海床冲刷深度条件下支撑系统结构的动态特性, 探讨其变化规律, 为海上风力机支撑系统的动力稳定设计提供科学依据。

[关键词] 冲刷; 海上风电场; 支撑系统; 动力特性; 三维有限元

[中图分类号] TK83 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)01-0069-05

## 1 前言

风能利用是目前国内外新能源开发的热点。国际上陆地风电场经过多年发展已进入产业化建设阶段, 海上风能利用是近年发展起来的具有巨大开发潜力的绿色可再生能源<sup>[1]</sup>。虽然陆上风电场的制造、施工等技术难点已基本解决, 但其风轮和机组的支撑结构动力稳定和抗振安全问题仍然十分严峻, 我国已有多个陆上风电场因遭遇强台风而出现毁灭性损坏, 遭受重大经济损失。海上风电场所处环境比陆地环境更加恶劣, 涉及因素多, 受到的荷载源复杂, 而且量级更大, 对风力机支撑系统的动力作用将更加复杂。国内海上风电场建设尚在起步阶段, 这方面的研究目前尚处空白, 国际上可以借鉴的经验也不多。确保海上风电场安全的首要条件是确保风力机支撑系统的动力稳定与安全, 其中海流对塔柱支撑结构桩基的冲刷作用也是需要高度重视的问题。

海上风力机塔架支撑系统的建立改变了周围的水流条件, 桩柱周围也会因水流运动出现不同程度的冲刷现象。在潮流和风浪流冲刷作用下, 塔架支撑系统的桩基外露长度增大, 因而使塔架桩基承受

的波浪与海流作用力增大。塔架嵌固长度变短, 而上部自由长度变大, 结构系统的动力特性发生变化, 导致塔架稳定性及安全度降低。

文章采用数值分析方法研究塔柱支撑系统基础冲刷对海上风电场塔架支撑系统动力特性的影响, 揭示塔柱支撑系统动力特性随桩基冲刷深度的变化规律。深入认识基础冲刷对支撑系统结构动力特性的影响, 对其进行定量评价, 对实际工程应用有较强指导意义, 并可为工程抗振减振措施设计提供科学依据。

## 2 塔架支撑系统数值计算模型

文章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。计算分析下部桩基不同冲刷深度条件下(分别为无冲刷、冲刷 5 m、冲刷 10 m、冲刷 15 m)的结构模态特性。研究时暂将风轮及机组简化为集中质量进行处理, 并忽略土基的弹性特性、下部钢管桩的底端与土基固结。支撑系统的几何模型和有限元模型见图 1。重点考察支撑塔架结构的动力特性包括承台以及下部钢管桩的动力特性, 为结构振动分析提供依据。

[收稿日期] 2010-07-23

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

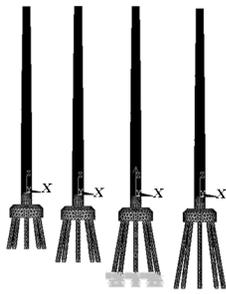


图1 不同冲刷深度条件下的塔柱结构有限元模型

Fig.1 The tower structural finite element models of different scour depths

### 3 不同冲刷深度条件下支撑系统结构的动态特性

不同海床冲刷深度下的塔柱支撑系统振动模态频率列于表1,前8阶振型见图2~图5。计算结果显示,在无冲刷状态下,塔柱结构1阶振动模态反映承台以上塔柱结构的弯曲振动变形,相应频率为0.57 Hz;2阶

频率为0.63 Hz,其振型仍为上部结构弯曲变形振动;3阶、4阶振型频率明显上升,为2.97 Hz和2.98 Hz,反映上部塔柱结构二阶弯曲与承台下部钢管桩的组合变形振动;5阶、6阶振型频率都为4.74 Hz,反映上部塔柱结构高阶弯曲变形振动;7阶振型频率为5.52 Hz,反映承台及钢管桩和上部塔柱结构扭转变形振动;8阶振型频率为5.67 Hz,反映塔柱上部塔筒的鼓胀变形振动。

随着海床冲刷深度的加深,振动模态频率开始下降。冲刷深度5 m时,塔柱支撑系统结构的1阶、2阶模态频率分别为0.57 Hz和0.58 Hz,仍然反映承台以上塔柱结构的弯曲振动变形;3阶、4阶振型频率都下降为2.90 Hz,其振型演变为承台以下钢管桩以及上部塔筒的横向弯曲变形振动;5阶振型频率为3.03 Hz,反映承台及钢管桩和上部塔柱结构扭转变形振动;6阶、7阶频率分别为3.04 Hz和3.63 Hz,反映上部塔柱结构高阶弯曲变形振动;8阶振型频率为5.67 Hz,反映塔柱上部塔筒的鼓胀变形振动。

表1 桩基不同冲刷深度条件下振动模态频率对比表

Table 1 Contrasting table of vibration mode frequency values of different scour depths

冲刷深度	无冲刷			冲刷 5 m		冲刷 10 m		冲刷 15 m	
模态阶次	频率值/Hz	频率值/Hz	降幅/%	频率值/Hz	降幅/%	频率值/Hz	降幅/%	频率值/Hz	降幅/%
1	0.57	0.57	-0.50	0.57	-0.67	0.57	0.22		
2	0.63	0.58	-7.60	0.58	-7.27	0.58	-7.59		
3	2.97	2.90	-2.61	2.10	-29.28	1.61	-45.93		
4	2.98	2.90	-2.70	2.10	-29.38	1.61	-46.02		
5	4.74	3.03	-35.96	2.72	-42.66	2.18	-54.09		
6	4.74	3.04	-35.94	2.95	-37.78	2.93	-38.16		
7	5.52	3.63	-34.13	2.96	-46.44	2.94	-46.76		
8	5.67	5.67	0.00	5.67	0.00	5.67	0.00		
9	6.41	6.41	0.00	6.41	0.00	6.41	0.00		
10	7.16	7.16	0.00	7.16	0.00	7.16	0.00		
11	7.47	7.47	0.00	7.47	0.00	7.47	0.00		
12	8.13	8.03	-1.19	7.93	-2.50	7.70	-5.32		
13	8.13	8.04	-1.19	7.93	-2.50	7.70	-5.31		
14	11.88	11.88	0.00	11.88	0.00	8.80	-25.90		
15	11.88	11.88	0.00	11.88	0.00	8.81	-25.85		
16	12.54	12.54	0.00	12.54	0.00	8.82	-29.69		
17	12.55	12.55	0.00	12.55	0.00	8.85	-29.47		
18	12.59	12.59	0.00	12.59	-0.03	8.85	-29.71		
19	12.98	12.87	-0.82	12.59	-3.02	8.87	-31.70		
20	13.89	13.89	-0.01	12.60	-9.34	8.89	-35.98		

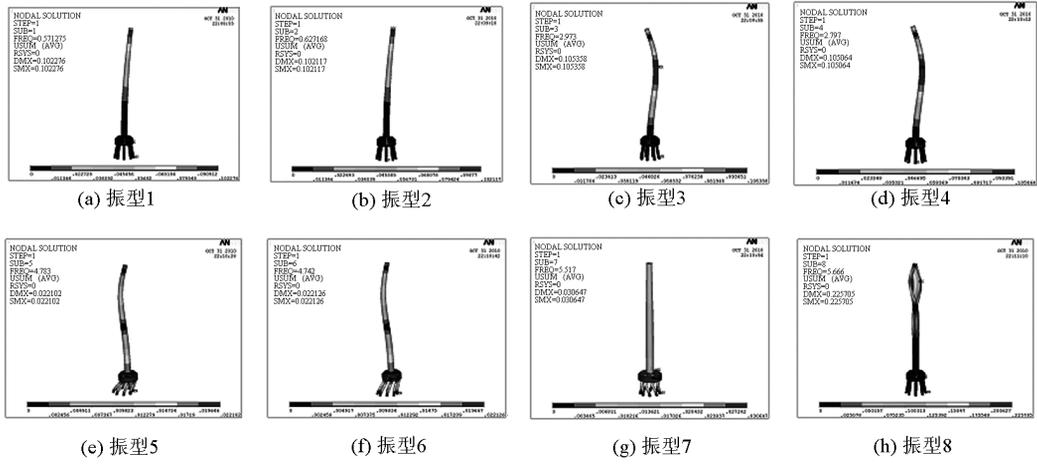


图2 支撑系统无冲刷时结构模态图

Fig. 2 Structure mode graphs of supporting system without scouring

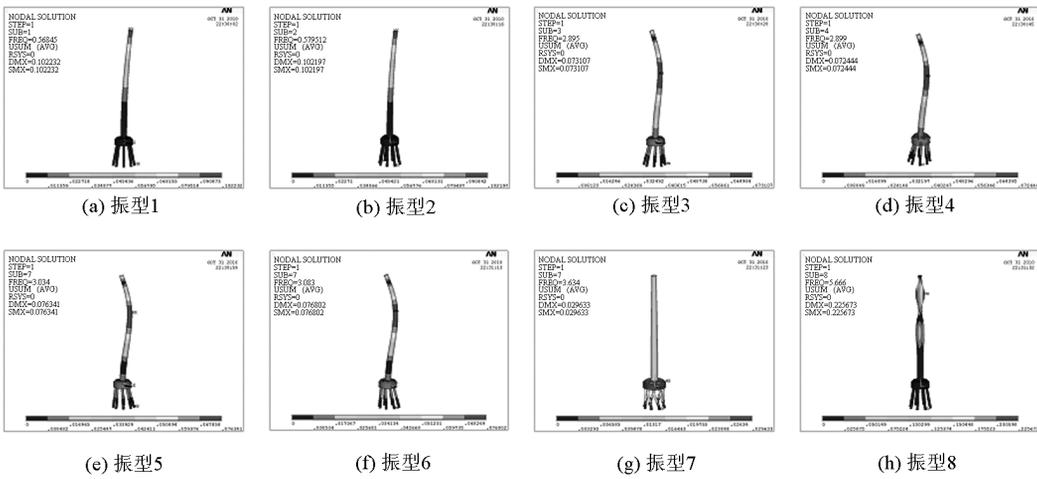


图3 支撑系统冲刷 5 m 时结构模态图

Fig. 3 Structure mode graphs of supporting system with 5 m scouring

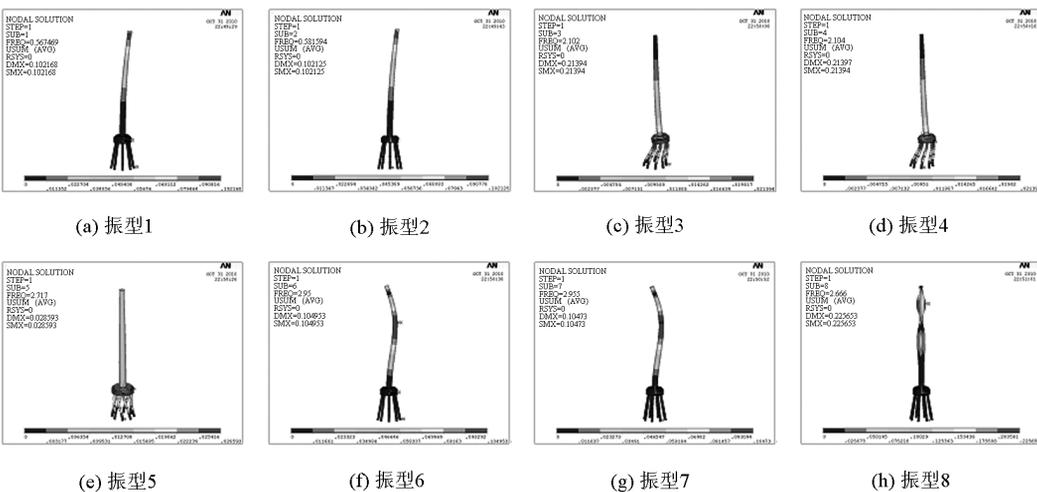


图4 支撑系统冲刷 10 m 时结构模态图

Fig. 4 Structure mode graphs of supporting system with 10 m scouring

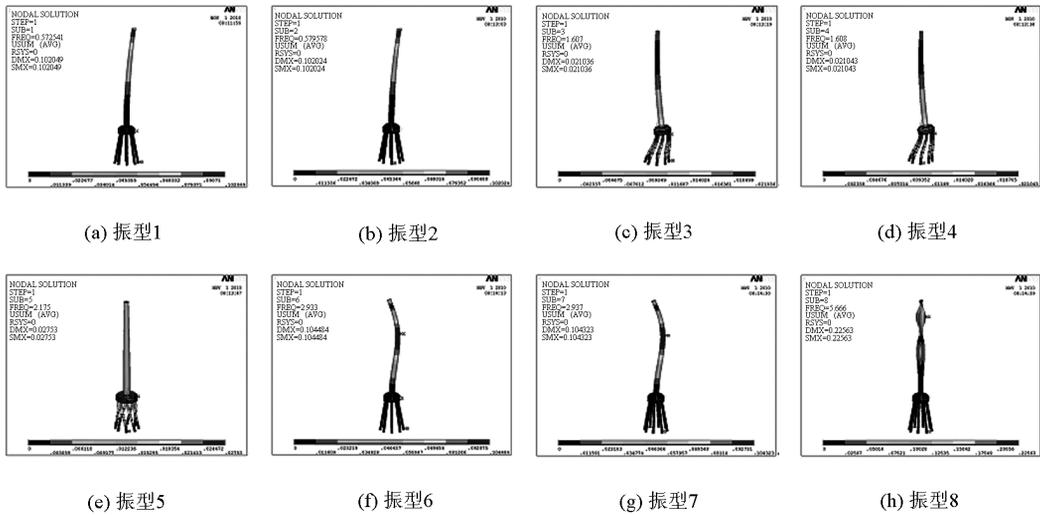


图5 支撑系统冲刷15 m时结构模态图

Fig. 5 Structure mode graphs of supporting system with 15 m scouring

冲刷深度10 m时,塔柱支撑系统结构的1阶、2阶模态振型仍反映承台以上塔柱结构的弯曲振动变形,频率下降幅度不大;3阶、4阶振型频率都下降至2.10 Hz,其振型为承台以下钢管桩以及上部塔筒的横向弯曲变形振动;5阶振型频率为2.72 Hz,亦为承台及钢管桩和上部塔柱结构扭转变形振动;6阶、7阶频率分别为2.95 Hz和2.96 Hz,反映上部塔柱结构高阶弯曲变形振动;8阶振型频率为5.67 Hz,反映塔柱上部塔筒的鼓胀变形振动,该阶振型不随桩基冲刷深度的变化而变化,仅与塔筒本身的结构构造有关。

当冲刷深度进一步增加至15 m时,塔柱支撑系统结构的1阶、2阶模态振型仍反映承台以上塔柱结构的弯曲振动变形,频率下降幅度仍不太显著;3阶、4阶振型频率都下降为1.61 Hz,其振型为承台以下钢管桩以及上部塔筒的横向弯曲变形振动;5阶振型频率为2.18 Hz,亦为承台及钢管桩和上部塔柱结构扭转变形振动;6阶、7阶频率分别为2.93 Hz和2.94 Hz,反映上部塔柱结构高阶弯曲变形振动;8阶振型频率仍为5.67 Hz,反映塔柱上部塔筒的鼓胀变形振动。

#### 4 基础冲刷对海上风电场塔架支撑系统动力特性的影响分析

计算结果显示,随着海床基础冲刷深度的增加,塔柱结构的振动频率值不断降低。第1阶、2阶模态频率随着冲刷深度的增加,频率值有所降低,但降幅不大。这是因为前两阶振型主要反映上部塔筒的弯曲振型,下部冲刷深度对其影响有限。从第3阶

开始,结构振动频率值降幅明显。在冲刷5 m时,频率值相对于无冲刷时的最大降幅为35.96%;在冲刷10 m时,频率值的最大降幅为46.44%;当冲刷深度15 m时,最大降幅亦达到54.09%。后面多阶振动模态为上部塔筒局部鼓胀振型,与下部冲刷深度无关,所以其频率值保持不变。一旦结构振型表现承台和钢管桩联合扭转变形或弯曲变形时,振动模态频率随海床冲刷深度的加深,固有振动模态频率将大幅度下降。

为考查塔柱结构振动频率值随海床冲刷深度的变化规律,取前几阶典型振动模态进行分析对比。考虑钢管桩对冲刷深度的敏感性,绘出塔柱支撑结构3阶~6阶振动模态频率随冲刷深度的变化规律(见图6)。其中3阶和4阶振动模态反映钢管桩、承台与上部塔筒的联合弯曲变形振动,5阶为支撑结构扭转振动,6阶为上部塔柱结构高阶弯曲变形振动。若考察支撑系统上部塔筒的鼓胀振型,因主要反映塔筒本身的横断面变形(见图7)。因此该类振动变形受下部冲刷影响较小,从而海床冲刷对其振动模态频率影响不大。

#### 5 结语

通过不同桩基冲刷深度的塔柱支撑系统动力特性分析,在不考虑流体和地基弹性影响条件下取得如下规律性成果。

1)海上风力机塔柱支撑系统振动模态频率较低,而且低频区比较密集,桩基冲刷使结构振动频率显著降低,对结构抗振不利。

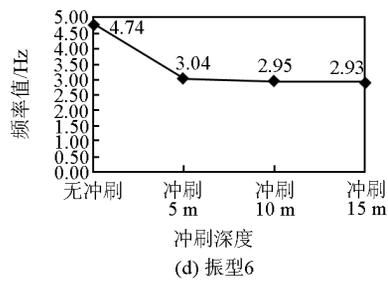
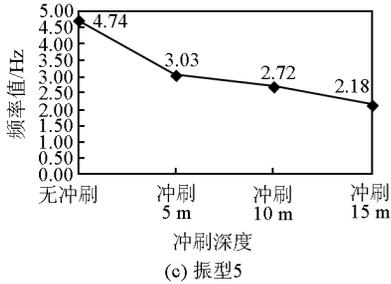
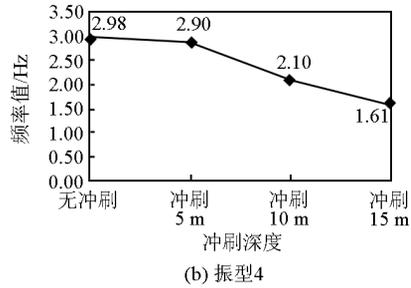
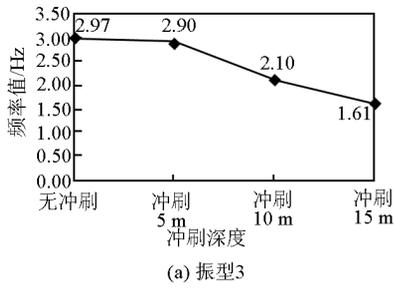


图6 第3阶~第6阶结构振动频率值随冲刷深度变化规律图  
Fig. 6 Structural vibration frequency law graphs with the changes in scour depth from the third to the sixth order

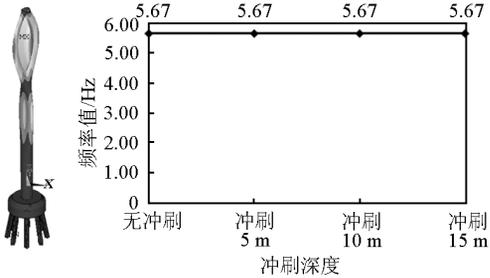


图7 上部塔筒鼓胀振型的频率值随冲刷深度的变化图  
Fig. 7 Structural vibration frequency law graphs with the changes in scour depth of timpanist mode of the upper tower tube

d. 塔筒上部结构鼓胀变形振动; e. 下部钢管桩单桩、多桩同步同向、反向弯曲组合变形, 显示出振型的多样性。

3) 风力机塔柱支撑系统前两个低阶结构振型主要反映承台以上塔筒结构弯曲振动变形, 因此海床冲刷深度对其振动频率的影响不太明显; 3阶、4阶振动模态反映钢管桩和承台及以上塔筒的整体变形特性, 冲刷深度对振动模态频率开始产生明显影响; 频率下降率随冲刷深度(5~15 m)在29%~46%范围内变化; 扭转变形的频率降幅也随冲刷深度的变化在34%~54%范围内变化。

4) 海床冲刷深度对塔柱支撑结构的振动特性产生显著影响, 振动分析时不可忽视。

#### 参考文献

[1] 林毅峰, 李健英, 沈达, 等. 东海大桥海上风电场风机地基础特性及设计[J]. 上海电力, 2007(2): 153-157.

(下转 92 页)

2) 塔柱支撑系统的模态振型具有如下几种表现形式: a. 承台以上塔筒结构弯曲变形; b. 支撑系统(包括承台和下部钢管桩)整体弯曲变形; c. 支撑系统整体扭转变形(主要反映承台和下部钢管桩扭转变形);