

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.015

管友海, 西文喜, 唐兴亮, 等. 基于桩筒复合基础海上风机振动特性分析[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 103-108. (GUAN Youhai, XI Wenxi, TANG Xingliang, et al. Analysis of vibration characteristics of offshore wind turbine with pile-tube composite foundation[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 103-108. (in Chinese))

# 基于桩筒复合基础海上风机振动特性分析

管友海<sup>1</sup>, 西文喜<sup>1</sup>, 唐兴亮<sup>1</sup>, 甘毅<sup>2</sup>, 张如林<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580; 2. 福建省水利水电勘测设计研究院, 福建 福州 350001)

**摘要:** 海上风机所处环境复杂, 在风、波浪等随机动载作用下易发生共振破坏。为研究采用桩筒复合基础海上风机的振动特性, 选择合理的基础设计参数, 利用有限元软件 ABAQUS 进行海上风机整体建模, 采用 Block Lanczos 方法进行模态分析, 同时将所得自振频率与外荷载频率进行对比研究, 并分析不同基础形式与不同基础约束条件下的风机整体振动特性。研究发现: 前 2 阶水平弯曲频率与第 3 阶扭转频率为判断风机整体共振的主要频率; 与单桩基础相比, 桩筒复合基础能够有效增加风机抵抗水平荷载的能力, 且在该设计参数条件下风机能够避免共振的发生; 在基础设计时, 应考虑桩土相互作用(PSI)的影响。

**关键词:** 桩筒复合基础; 海上风机; 模态分析; 桩土相互作用

**中图分类号:** TK83; TU473      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-640X(2017)05-0103-06

随着能源危机和环境污染问题的加剧, 海上风电开发和利用受到世界各国的广泛关注。按照国家能源局“十二五”规划, 到 2015 年底, 海上风电装机容量不低于 500 万 kW, 2020 年将不低于 3 000 万 kW<sup>[1]</sup>。与常规海洋平台、桥梁等不同, 海上风机整体结构的允许频率偏低, 往往因与风机叶片振动频率一致, 引发共振现象<sup>[2]</sup>。在风、波浪、地震等随机动载作用下, 为避免风电基础发生脆性破坏, 除了满足静力承载要求, 还需要考虑动力方面的影响。早期国内外学者对陆上风机的振动特性进行了研究, 近几年开始逐步转向海上风电领域。郇彩云等<sup>[3]</sup>采用土弹簧考虑桩土相互作用对塔筒和基础振动的影响; 胡国玉等<sup>[4]</sup>研究海上风电桨叶的振动特性; 何叶等<sup>[5]</sup>考虑周期性波浪荷载作用研究塔筒与基础的动力响应。上述研究均具有局限性, 海上风电的桨叶、塔筒与基础的尺寸较大, 所处环境复杂且基础形式多样化, 简化的方式不利于风机振动特性的准确评估。本文在前人研究的基础上, 建立海上风电“地基-基础-塔筒-机舱-桨叶”整体耦联结构有限元模型, 研究风机整体振动特性, 同时考虑不同基础形式与不同基础约束方式的影响, 为桩筒复合基础的设计与后期的动力分析提供借鉴。

## 1 海上风电有限元模型

### 1.1 模型及材料参数

风机塔筒高 75 m, 直径为 2.7~5.0 m; 桨叶选用玻璃钢材料, 长 50 m, 宽 3.6~2.2 m。本文选取天津大学近几年研发的新型基础形式——桩筒复合基础<sup>[6]</sup>, 该基础由桩、筒、支撑板、混凝土灌浆四部分组成, 尺寸如下: 桩基础直径 5 m, 总长度 45 m, 厚度 60 mm, 其中泥面以下长 30 m, 桩顶部通过法兰环与上部结构连接; 筒基础直径 16 m, 内部开洞直径 5.2 m, 筒壁高度为 3 m, 顶盖和筒裙所用钢板厚度为 60 mm; 在筒基础顶盖

收稿日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51408609); 中央高校基本科研业务费专项资金(15CX02044A)

作者简介: 管友海(1975—), 男, 山东临沂人, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震与城市防灾信息化研究。

E-mail: guanyouhai@upc.edu.cn 通信作者: 唐兴亮(E-mail: 18765921836@163.com)

均匀布置 6 个横向肋板,肋板在筒体内侧高度为 3 m,外侧高度为 0.5 m,肋板厚度为 30 mm;单桩基础和筒型基础之间灌注厚度为 10 cm 的高强灌浆材料。所用材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

Tab. 1 Material parameters

材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比	黏聚力/ Pa	内摩 擦角/ $^{\circ}$	膨胀 角/ $^{\circ}$	材料	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )	泊松比	黏聚力/ Pa	内摩 擦角/ $^{\circ}$	膨胀 角/ $^{\circ}$
混凝土(C50)	2 400	$3.45 \times 10^{10}$	0.20	/	/	/	玻璃钢	1 950	$2 \times 10^{10}$	0.26	/	/	/
钢	7 850	$2.1 \times 10^{11}$	0.27	/	/	/	土层	1 850	$3 \times 10^6$	0.30	4 000	33	5

采用湘电 XE128-5000 型风机,切入风速 3 m/s,切出风速 25 m/s,风机转速范围为 8.5~16.5 rpm,对应的 1P(马达转动频率)范围为 0.142~0.275 Hz,3P(风机叶轮扫掠频率)范围为 0.425~0.825 Hz<sup>[7]</sup>。基于现有的波浪资料,本工程重现期 2 年一遇至 100 年一遇的波浪周期为 6.0~11.4 s,相应的波浪波动频率为 0.088~0.167 Hz。风、地震主频频率为 0.01~0.10 Hz 和 1.00~10.00 Hz<sup>[8]</sup>。

## 1.2 模型建立

在进行网格划分时,上部结构、土体与基础统一采用 C3D8R 单元。上部结构连接处采用 tie 连接。为了消除土体有限边界对模型计算的不利影响,本文选用圆柱形土体,土体直径为 100 m,高度为 80 m,土体尺寸足够大,可忽略边界效应的影响。土体底部进行固结约束,侧面约束径向位移与转角,风机整体模型如图 1 所示。



图 1 风机整体有限元模型

## 2 相关振动理论

### 2.1 模态理论

模态分析用于分析结构固有特性,确定结构的自振频率和固有振型。假设风电整体为线弹性体,并处于小变形范围内。由平衡方程、物理方程和几何方程可导出结构的有限元基本方程<sup>[7-8]</sup>:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) \quad (1)$$

式中: $M$ 为总体质量矩阵; $C$ 为总体阻尼矩阵; $K$ 为总体刚度矩阵; $F(t)$ 为结构所受外力矩阵; $\ddot{u}, \dot{u}, u$ 分别表示节点加速度矩阵、速度矩阵、位移矩阵。

求解时忽略阻尼的影响,结构有限元离散化处理后,应用瞬时最小势能原理,可得到结构的无阻尼自由振动方程:

$$M\ddot{u} + Ku = 0 \quad (2)$$

无阻尼模态分析求解基本方程是经典的特征值问题:

$$K\varphi_i = \omega_i^2 M\varphi_i \quad (3)$$

式中: $\varphi_i$ 为第  $i$  阶模态振型向量; $\omega_i$ 为第  $i$  阶模态的固有频率。

### 2.2 基础类型与共振约束

由风引起的海上风电机组所受动力荷载的激励频率,通过风机转速来体现,即常说的 1P(马达转动频率)和 3P(风机叶轮扫掠频率)。由于风机的启动转速和退出转速存在转速分布范围,即 1P 和 3P 存在分布范围,因此风机基础设计应进行模态分析,使得风机体系的自振频率避开 1P 和 3P 的频率分布带。根据自振频率与 1P 和 3P 的分布关系,存在 3 种设计形式:“柔-柔”(频率小于 1P)、“柔-刚”(频率大于 1P 且小于 3P)、“刚-刚”(频率大于 3P),柔-柔基础如悬浮式基础,易出现严重的疲劳损伤,柔-刚基础如三脚架、导管

架等基础,刚-刚基础如重力式基础等。基础整体刚度越大,工程量越大,工程造价也增大<sup>[9]</sup>。

为避免风电机组整体结构共振,根据德国GL规范要求,激励荷载的频率与风机整体结构的自振频率差别应在5%以上<sup>[10]</sup>。

$$\frac{f_R}{f_{0,n}} \leq 0.95 \text{ 或 } \frac{f_R}{f_{0,n}} \geq 1.05 \quad (4)$$

式中: $f_R$ 为激励荷载频率; $f_{0,n}$ 为第 $n$ 阶结构固有频率。

当不满足要求时,一方面调整基础设计方案,另一方面在风电机组中装配振动监控设备。

### 2.3 动力分析判别

假设风机结构为线弹性单自由度体系,在外激励作用下做简谐振动,通过研究谐振反应振幅与静位移比值,即可得出所研究体系是否需要进行动力分析<sup>[11]</sup>。

$$D = \frac{\rho}{p_0/k} = [(1 - \beta^2)^2 + (2\varepsilon\beta)^2]^{-1/2} \quad (5)$$

式中: $D$ 为动力放大系数; $\rho$ 为谐振反应振幅; $p_0$ 为外部激励荷载; $k$ 为结构刚度; $\beta = \varpi / \omega$ ,  $\varpi$ 为荷载频率; $\omega$ 为固有自由振动频率; $\varepsilon$ 为阻尼比,取0.05。

## 3 计算结果及分析

### 3.1 频率与振型

选用ABAQUS中Block Lanczos方法对风电整体进行模态分析。前10阶模态振型如图2所示,前10阶模态频率与振型特征如表2所示。

本模型在 $x, y, z$ 三个方向的振型参与质量分别为98.6%, 98.3%, 95.5%,符合《公路桥梁抗震设计细则》(JTG/TB02-01-2008)<sup>[12]</sup>规定振型参与质量要达到结构总质量90%的要求,所提取的模态阶数能够充分表现风机整体振动特征。

表2 前10阶模态分析结果

Tab. 2 Modal analysis of top 10 orders

阶数	频率/Hz	周期/s	振型特点	阶数	频率/Hz	周期/s	振型特点
1	0.312 5	3.200 0	塔筒上部、桨叶和机舱沿 $y$ 轴摆动	6	2.509 7	0.398 5	塔架、基础与上部桨叶沿 $x$ 轴扭转,下部桨叶沿 $y$ 轴摆动
2	0.313 7	3.187 8	塔筒上部、桨叶和机舱沿 $x$ 轴摆动	7	2.755 6	0.362 9	塔架、基础与上部桨叶沿 $y$ 轴扭转
3	1.025 0	0.975 6	桨叶沿 $z$ 轴扭转	8	2.992 8	0.334 1	桨叶沿 $y$ 轴摆动,塔筒沿 $x$ 轴二阶轻微扭转
4	1.541 0	0.648 9	塔筒与桨叶沿 $y$ 轴扭转	9	3.107 9	0.321 8	塔筒沿四周一阶受拉
5	2.341 8	0.427 0	塔筒与桨叶沿 $x$ 轴扭转	10	3.291 5	0.303 8	塔架与上部桨叶沿 $x$ 轴二阶扭转,下部桨叶沿 $y$ 轴摆动

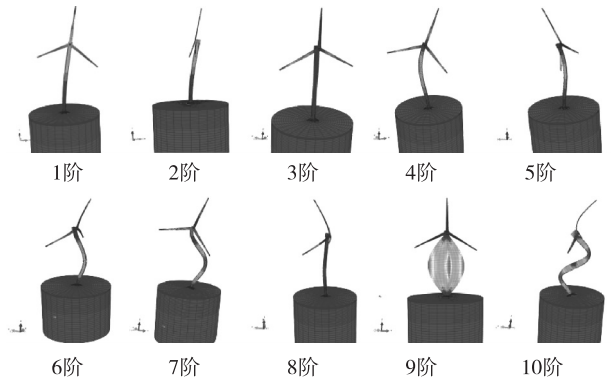


图2 前10阶模态振型

Fig. 2 Modal shapes of top 10 orders

从表2可见前2阶频率位于1P和3P范围之间,该基础属于柔-刚基础。风机整体振型前3阶主要是桨叶和机舱的振动,第4阶开始塔筒出现明显的振动,基础振动从第6阶开始,因此,机舱与桨叶的振动是海上风机系统的主要低阶振动,也是造成风机疲劳损伤的主要原因之一<sup>[13-14]</sup>。同时,桩筒复合基础对风机整体的振动影响不可忽略。

### 3.2 共振与动力分析判别

为验证风机整体是否满足避免共振的条件,计算前3阶频率与激励频率的比值,结果如表3所示。

表 3 风机频率与激励频率的对比

Tab. 3 Comparison of turbine frequency and excitation frequency

阶数	系统 频率/Hz	风机频率与激励频率比值		
		风机转动频率 1P(0.142~0.257)	风机转动频率 1P(0.425~0.825)	波浪频率(0.088~0.167)
1	0.312 5	0.454 4~0.822 4	1.360 0~2.640 0	0.281 6~0.534 4
2	0.313 7	0.452 7~0.819 3	1.354 8~2.629 9	0.280 5~0.532 4
3	1.025 0	0.138 5~0.250 7	0.414 6~0.804 9	0.085 9~0.162 9

从表 3 可见:风机整体前 3 阶频率满足式(4)的要求,在该设计条件下,风电机组能够避免共振的发生。在此条件下,对风叶旋转、波浪、风、地震作用下的动力放大系数计算,结果如表 4 所示。从表 4 可见:当叶片旋转、风荷载波浪达到上限频率与下限频率时,风机整体的动力放大系数均大于 1,须进行动力计算;在地震作用下,动力放大系数均小于 1,可以对风机作拟静力计算<sup>[10]</sup>。

表 4 动力放大系数计算结果

Tab. 4 Calculation results of dynamic magnification factor

外部荷载	极限频率/Hz	风机整体		外部荷载	极限频率/Hz	风机整体	
		频率/Hz	放大系数 <i>D</i>			频率/Hz	放大系数 <i>D</i>
叶片旋转	上限 0.275	0.312 5	4.13	波浪	上限 0.167	0.312 5	1.40
	下限 0.142	0.312 5	1.26		下限 0.088	0.312 5	1.09
风	上限 0.10	0.312 5	1.11	地震	上限 10.00	0.312 5	0.001
	下限 0.01	0.312 5	1.00		下限 1.00	0.312 5	0.11

3.3 基础形式与约束影响

为研究基础类型与不同约束条件对风电整体振动的影响,分别在单桩基础与桩筒复合基础两种基础形式下,取不同约束条件下的前 30 阶频率进行研究。不同基础和约束条件下风机整体频率见图 3,不同土体弹性模量下风机整体频率见图 4。

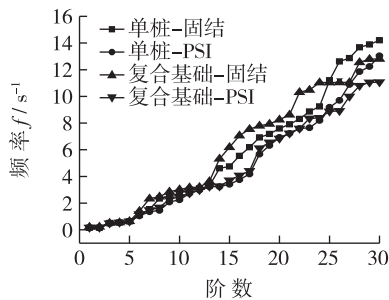


图 3 不同基础与约束条件下风机整体频率

Fig. 3 Frequency of overall turbines in different bases and constraint conditions

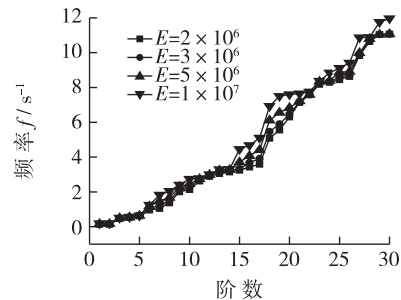


图 4 不同土体弹性模量下风机整体频率

Fig. 4 Frequency of overall turbines in different elastic modulus

由图 3 可见,当风机采用复合基础时,整体频率高于采用单桩基础的频率,平均高出 27.8%,这是因为筒型基础的存在增加了基础的横向约束,进而增大了基础刚度,提高了海上风机承受水平荷载的能力。无论是复合基础还是单桩基础,考虑 PSI 效应的整体频率要比常规基础底部固结低,说明 PSI 效应增加了基础约束的柔度,在实际动态分析中需要加以考虑土的作用。

由图 4 可以看出不同土体弹性模量的条件下,风机整体的前 5 阶频率相差不大,随着阶数的增加,频率差距逐步增大,第 20 阶频率最大相差 17.3%。在考虑 PSI 情况下,随着地基弹性模量的增加,土体刚度增

大,风机整体频率增加,因此对于不同土质条件下风机整体振动特性,必要时具体分析。

## 4 结 语

(1)海上风机进行模态分析时,前2阶水平弯曲频率与第3阶扭转频率为判断风机整体共振的主要频率。

(2)风机振动形式主要为上部结构的振动,叶片以摆动和扭动为主,塔筒以摆动为主,下部基础的振动在前6阶不明显。

(3)桩筒复合基础属于柔-刚基础,所用设计尺寸能够避免风机共振的发生,且与单桩基础相比,采用桩筒复合基础的海上风电整体刚度更大。

(4)桩土相互作用会使风机整体柔度增加,振动频率降低,基础设计时需考虑桩土相互作用的影响。

(5)除地震之外的动载作用下,风机整体均需进行动力计算。

## 参 考 文 献:

- [1] 周光召. 2020年中国科学和技术发展研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,2004. (ZHOU Guangzhao. Research on the development of science and technology in China in 2020[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 单光坤,姚兴佳. 兆瓦级风力发电机组的模态分析[J]. 沈阳工业大学学报,2008,30(3):276-279. (SHAN Guangkun, YAO Xingjia. Mode analysis on MW grade wind turbine[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(3): 276-279. (in Chinese))
- [3] 郁彩云,姜贞强,罗金平. 桩土相互作用模拟方法对海上风机整体结构模态分析的影响[J]. 水电能源科学,2013,31(1):236-239. (XUN Caiyun, JIANG Zhenqiang, LUO Jinping. Influence of interaction between pile and soil on the model analysis of offshore wind turbine[J]. Hydropower and Energy Science, 2013, 31(1): 236-239. (in Chinese))
- [4] 胡国玉,孙文磊,金阿芳. 大型风力发电机旋转叶片结构动力特性分析[J]. 可再生能源,2015,33(11):1652-1657. (HU Guoyu, SUN Wenlei, JIN Afang. The structural dynamic behavior analysis of large scale wind turbine rotational blade[J]. Renewable Energy Resource, 2015, 33(11): 1652-1657. (in Chinese))
- [5] 何叶,赵明阶,胡丹妮. 海上风机三桩基础与上部结构动力响应分析[J]. 水利水运工程学报,2016(2):17-23. (HE Ye, ZHAO Mingjie, HU Danni. Dynamic response analysis of tripod pile foundation and superstructure of offshore wind turbine[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 17-23. (in Chinese))
- [6] 天津大学. 一种海上风电机组地基组合基础:201110324026.8[P]. 2012-05-09. (Tianjin University. A foundation for offshore wind turbines; 201110324026.8[P]. 2012-05-09. (in Chinese))
- [7] 朱东剑. 筒型基础与单桩相结合的新型复合风电基础研究[D]. 天津:天津大学,2012. (ZHU Dongjian. Study on a new composite wind power base combined with single pile foundation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese))
- [8] 王伟,杨敏. 海上风电机组地基基础设计理论与工程应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014. (WANG Wei, YANG Min. Design theory and engineering application of offshore wind turbine foundation[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2014. (in Chinese))
- [9] 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):386-372. (JIN Junwei, YANG Min, WANG Wei, et al. Offshore wind turbine monopile foundation modal and parameter sensitivity analysis[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2014, 42(3): 386-372. (in Chinese))
- [10] GL 2005 Guideline for the certification of offshore wind turbines[S].
- [11] 丁明华,李昕. 海上风机结构不同计算模型的比较研究[J]. 水电能源科学,2011,29(10):49-52. (DING Minghua, LI Xin. Comparative study on different models of offshore wind turbine structure[J]. Hydropower and Energy Science, 2011, 29(10): 49-52. (in Chinese))
- [12] JTG/T B02-01—2008 公路桥梁抗震设计细则[S]. (JTG/T B02-01—2008 Guidelines for seismic design of highway bridges [S]. (in Chinese))
- [13] 刘香,高振宁,李海. 兆瓦级风力发电机塔架的模态分析[J]. 工业建筑,2012,42(2):62-65. (LIU Xiang, GAO

- Zhenning, LI Hai. Modal analysis of megawatt wind generator tower[J]. Industrial Construction, 2012, 42(2): 62-65. (in Chinese))
- [14] 赵荣珍, 吕刚. 水平轴风力发电机塔架的振动模态分析[J]. 兰州理工大学学报, 2000, 35(2): 33-36. (ZHAO Rongzhen, LYU Gang. Vibration modal analysis of horizontal axis wind turbine tower[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2000, 35(2): 33-36. (in Chinese))

## Analysis of vibration characteristics of offshore wind turbine with pile-tube composite foundation

GUAN Youhai<sup>1</sup>, XI Wenxi<sup>1</sup>, TANG Xingliang<sup>1</sup>, GAN Yi<sup>2</sup>, ZHANG Rulin<sup>1</sup>

(1. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266580, China; 2. Fujian Provincial Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute, Fuzhou 350001, China)

**Abstract:** The offshore wind turbines are prone to resonance damage under the random dynamic loads, such as the wind and waves, due to their complex environment. In order to study the vibration characteristics of the offshore wind turbine, the reasonable design parameters are selected; and the whole model is built by use of ABAQUS software, considering offshore wind turbine and pile-cylinder composite foundation. The modal analysis is carried out by Block Lanczos method. The self-vibration frequency of the wind turbine system and the external load frequency are compared with each other. The influencing factors of the whole vibration characteristics of the wind turbine are analyzed, including the foundation type and the restraint conditions. The results show that the first and second order bending vibration frequency and the third order torsional vibration frequency are the main resonance frequency of the wind turbine. Compared with the single pile foundation, the pile-cylinder composite foundation can effectively improve the ability to resist horizontal loads. With the design parameters in this paper, the wind turbine can avoid the occurrence of resonance. The influence of pile-soil interaction (PSI) should be considered in the pile foundation design of wind turbines.

**Key words:** pile-tube composite foundation; offshore wind turbine; modal analysis; pile-soil interaction