DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.02.003
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 Ming-jie, HU Dan-ni. Dynamic response analysis of tripod pile foundation and superstructure of offshore wind turbine[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(2): 17-23.)

海上风机三桩基础与上部结构动力响应分析

何 叶[1,2], 赵明阶[1], 胡丹妮[3]

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室 重庆 400074; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000; 3. 广东海洋大学 广东 湛江 524088)

摘要: 基于ANSYS有限元平台,建立了海上风机三桩基础与上部结构一体的三维模型;采用Block Lanzcos法进行模态分析,得到风机结构的各阶模态振型,确定了结构的振动特性;并结合模态分析结果,考虑周期性波浪荷载的作用,对结构模型进行了瞬态动力分析。结果表明:海上风机三桩基础与上部结构模态振型较容易表现为弯曲形式,结构的抗弯性能要求较高。在波浪荷载作用下各关键部位的位移与应力时程曲线随时间的变化规律都表现为周期性波动,但又存在差异。对于位移时程曲线,离基础越远的部位,其位移幅值越大,波动非线性特性也越明显;对于应力时程曲线,应力幅值主要位于立柱顶端,即立柱与塔筒连接部位。波浪荷载对结构的受力和变形影响较大,不容忽视。

关 键 词: 海上风机; 三桩基础; 模态分析; 动力响应; 波浪荷载

中图分类号: TK83;TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)02-0017-07

随着风电技术由陆地延伸到海洋,海上风力发电作为风能开发利用的新生方式,在能源战略中的地位日渐提升,我国作为一个能源消耗大国,更应该认识海上风电开发的重要性[1]。国外学者对风机动力特性研究较多:S. L. J. Hu等[2]应用Monte Carlo模拟和时域分析方法,对非线性程度和自由表面效应对总波浪力和结构的动力响应的影响进行了研究;C. C. Tung等[3-4]分析了波浪非线性和自由表面效应对波浪力的影响;M. Mardfekri等[5]对海上风机支撑体系所承受风荷载进行了模拟分析;V. Martinez-Chaluisant等[6]应用缩尺模型测试与理论计算相结合的手段对风机整体动力响应特性进行了研究。我国海上风电研究起步较晚,聂武等[7]提出对于风电这种多自由度结构的动力分析,可以用有限元方法,将结构离散成一个多自由度体系;林毅峰等[8]分析了东海大桥海上风机基础与地基非线性动力相互作用、风机-塔架-地基-基础系统动力模拟分析方法和基础结构疲劳分析方法等关键技术问题;孟珣等[9]考虑动荷载结构的动力放大效应,采用数值模拟的手段对作用于海上风机单桩基础上的波浪荷载等动力荷载进行了拟静力分析;王湘明[10]等在研究海波性能和运动规律的基础上,给出了海水中塔架荷载的计算公式;李利飞[11]分析了波浪动力响应对风机基础的影响;盛振国等[12]基于风机基础结构动力学响应模型,分析了主要桩土参数对基础结构动力响应的敏感程度;康海贵等[13]对三桩基础的简化及荷载响应进行了对比分析。

在恶劣的海洋环境中,海上风机基础与上部结构的受荷情况相当复杂,在离岸工程结构设计中,首先要确定其工作海域的风浪及海流大小,其中最重要的是波浪条件[14],波浪荷载对结构安全性具有重要意义。基于此,本文考虑周期性波浪荷载的作用,结合ANSYS数值模拟,对海上风机三桩基础与上部结构的动力响应进行了分析。

收稿日期: 2015-05-04

基金项目: 重庆市自然科学基金重点资助项目(cstc2013jjB0003);高等学校博士点基金资助项目(20125522110004)

作者简介: 何 叶(1984—),女,湖南益阳人,博士研究生,主要从事水工结构与岩土基础研究。

E-mail: heye.1984@163.com

1 模型建立

1.1 模型等效处理

对于海上风机基础与上部结构的动力响应分析,目前仍以有限元分析为主,有限元分析首先要将实际工程系统描述为相应的数学模型,本文研究中对结构原型做了如下假设与等效处理:

(1)假设结构材料为线弹性,单元节点力和节点位移之间保持线性关系。

(2)受波浪荷载作用的海上风机桩基础属于横向受荷桩的范畴,必须要考虑地基土壤和桩基结构之间的相互作用。采用集总参数法将桩土系统离散为一组质量-弹簧-阻尼器模型,利用 Combin39 单元来模拟,用 P-y 曲线来反映桩土之间的相互作用关系;假设桩基底端为竖向约束,但可自由转动和平移。

(3)为了简化计算,将机舱与塔筒的连接以及塔筒与基础的连接设置为刚性连接,略去了风机叶片,塔筒顶部机舱荷载简化成质点作用于塔筒顶端。

1.2 材料与尺寸

风机模型三桩基础采用钢管桩,钢材料为 Q345;塔筒采用变截面的锥形筒体,建模时分成 4 段,钢材亦为 Q345。具体尺寸如表 1 所示。

表 1 模型尺寸

Tab. 1 Design parameters of an offshore wind turbine

构件		直径 D/m	壁厚 T/m	长度 L/m	构件		直径 D/m	壁厚 T/m	长度 L/m
三桩基础	立柱	4.5	0.045	22	风机塔筒	上段	3.07	0.055	24
	上部斜撑	2.2	0.025	10.60		中上段	3.8	0.045	22
	下部斜撑	2	0.025	9.452		中下段	4.23	0.045	17
	水平横撑	1.5	0.02	16		下段	4.23	0.045	15
	桩基加强段	2.5	0.04	9.2					
	桩基	2.2	0.04	43					

1.3 荷载条件

静强度分析时,考虑风机气动荷载、风荷载、波浪荷载与波流荷载共同作用时的工况,荷载的极限值均按海上风机基础与上部结构承载能力极限状态进行计算。组合工况的具体计算式为:

$$S_d = S_G + 1.35S_1 + 1.35S_2 + 1.35S_3 + 1.35S_4$$

其中:S_d为极限荷载效应组合的设计值;S_G为恒荷载(即结构自重);S_1 为风荷载的极限值;S_2 为波浪荷载极限值;S_3 为海流荷载极限值;S_4 为风机在运行过程中所产生的荷载。

动力分析时,考虑波浪荷载的周期性作用。参照江苏省如东县近海区的海洋环境资料,设计水深取 h = 15 m,工程海域形成大浪的主要天气过程为寒潮和台风,大浪过程参数如表 2 所示。根据波浪资料,大浪过程侵袭海上风机结构时对结构造成的危害最大,选取有效波高 H = 4.2 m,周期 T = 6.2 s为特征波要素对海上风机基础结构承受波浪荷载进行分析计算。

表 2 大浪过程参数

Tab. 2 Parameters during surge

波浪形成原因	波向	最大波高/m	有效波高/m	平均周期/s	持续时间
寒潮	NE	3.3	2.0	5.1	2~3 d
	NNE	3.7	2.3	4.8	
台风	NE	6.9	4.2	6.2	约 12 h
	E	6.9	3.2	6.2	约 24 h

2 瞬态动力响应分析

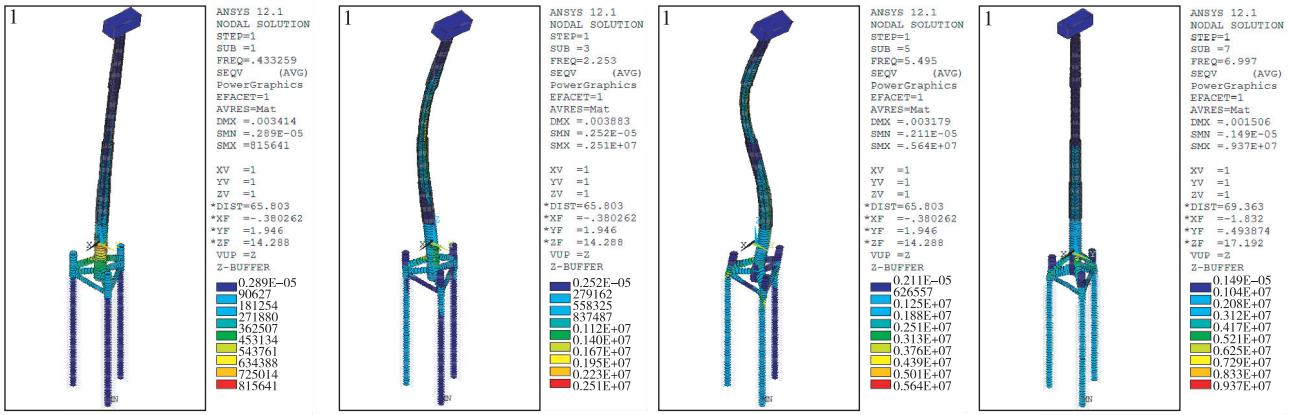
在结构模型基础上,考虑波浪荷载对海上风机结构的作用,按 Morison 方程求解的波浪荷载加载到海上风机模型上,对海上风机三桩基础与上部结构进行瞬态动力反应分析。

2.1　静强度分析

对结构进行瞬态动力响应之前，先按承载能力极限状况，对海上风机三桩基础及其上部结构进行静力强度分析。将海上风机所承受的极限工况荷载 S_d 施加到模型上，运行求解得到结构关键部位的位移值及结构内部的最大等效 Von Mises 应力值。计算结果表明：结构最大位移出现在上部结构顶端，结构最大等效 Von Mises 应力值出现在三脚架与立柱连接处，在背浪方向的上下斜撑上也出现了较大的应力分布情况，但是均没有超出结构屈服极限；在风机运行荷载、风荷载、海流荷载以及波浪荷载共同作用时，结构顶部最大位移为 54.776 mm，而模型泥面以上的悬臂长度为 105 m，所以最大位移为悬臂长的 0.522%，均小于 1%；结构本身最大等效应力均远小于所选用钢材的屈服强度。因此，按照《浅海钢质固定平台结构设计与建造技术规范》，静载作用下三桩模型满足刚度和强度要求。

2.2　模态分析

海上风机基础与上部结构的动力响应研究需要考虑外荷载作用下结构系统的共振和稳定性问题，如果外界激励荷载的频率与系统的固有频率相同，系统就会发生共振。为了排除共振，要使系统的固有频率避开外界激振力的频率。基于海上风机三桩基础与上部结构的三维有限元模型，考虑周期性波浪荷载的作用，采用 Block Lanzcos 法对海上风机基础与上部结构整体进行模态分析，计算其自振频率及振型，典型阶段的模态分析结果如图 1 所示。从图 1 可见，结构前 5 阶模态主要表现为 *XZ* 或 *YZ* 平面的弯曲，第 7 阶模态主要表现为 *XY* 平面上的扭曲，扭曲部位主要在塔筒上部以及三桩基础加强段上部。总体来看，三桩式海上风机基础与上部结构整体在低阶频率以及高阶频率情况下，其模态振型均较容易表现为弯曲形式，因此对结构的抗弯性能要求较高。统计分析数值计算得到的三桩式海上风机前 8 阶自振频率和自振周期如表 3 所示。



(a) 第1阶模态　　(b) 第3阶模态　　(c) 第5阶模态　　(d) 第7阶模态

图 1　结构模态振型及 Von Mises 应力分布

Fig. 1　Modal shapes and Von Mises stress distribution of structure

由于三桩基础在 *XY* 平面上的对称性，致使它们的主振方向与单桩基础类似，如第 1 阶模态的主振方向在 *YZ* 平面内，第 2 阶模态的主振方向在 *XZ* 平面内，这两阶模态表现为互成 90°的变形，故可将其两两视为一个模态[15]，余下的几阶振动模态也具有类似性质。根据模态分析所得到前 2 个模态的自振频率，可计算得到应用于结构动力分析的瑞利阻尼系数 α 和 β，其中 $\alpha = 0.094\ 147\ 58$，$\beta = 0.002\ 289\ 423$。但是实际工程中会有上部机舱和轮毂及叶片的偏心，结构 *XZ* 平面与 *YZ* 平面稍有差异，从而导致模态振型及结构自振频率稍有变化，为了简化计算，本研究没有考虑偏心的影响。

表 3　各阶模态的自振频率和周期

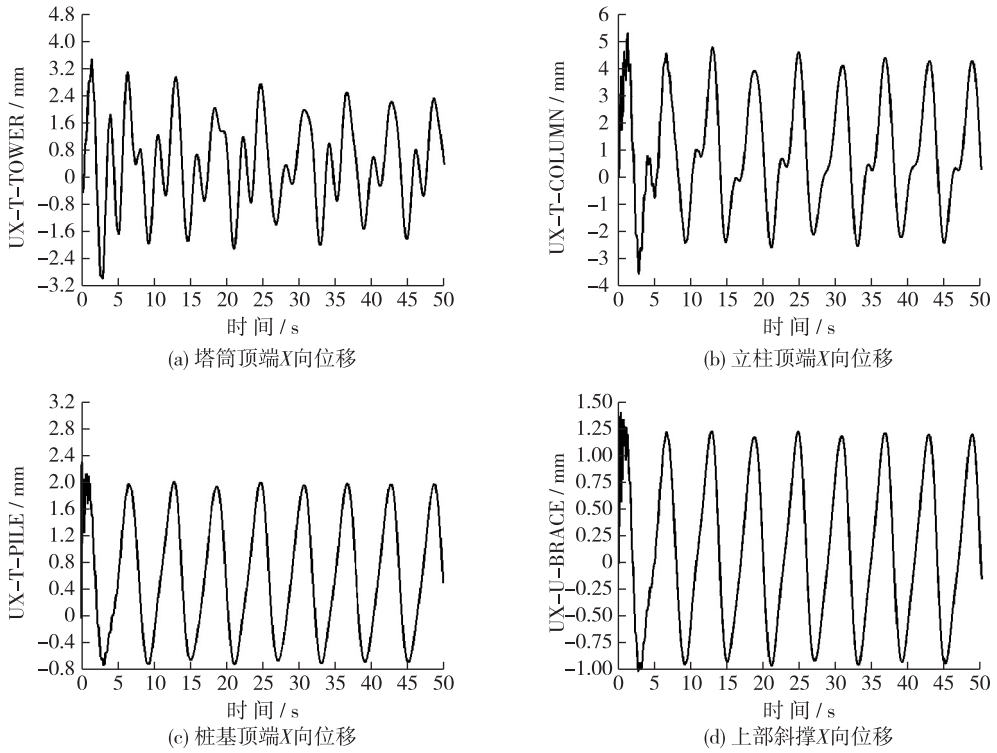
Tab. 3　Natural frequencies and periods of vibration in each mode

模态阶数	频率/Hz	周期/s	模态阶数	频率/Hz	周期/s
1	0.433 26	2.308 1	5	5.494 8	0.182 0
2	0.433 26	2.308 1	6	5.494 8	0.182 0
3	2.252 8	0.443 9	7	6.997 4	0.142 9
4	2.252 8	0.443 9	8	8.099 9	0.123 5

目前大型风力发电机组的叶轮多为三叶片式,风机偏航的角速度很小,远低于结构的一阶频率。因此,结构设计需考虑叶轮转动的荷载频率[16],结构的固有频率必须在一定范围内避开这个值,工程上一般要求在±10%左右。依托工程选用华锐 3 MW 机组作为主选机型,风机叶轮为三叶片式,共振的激励源频率是 1*P* 和 3*P*,华锐 3 MW 叶轮转速变速范围为 6.2~13.8 rpm,则 1*P* 频率变化范围为 0.103~0.230 Hz,3*P* 频率变化范围为 0.31~0.69 Hz,所以风机自振频率应避开 0.093~0.253 Hz 与 0.279~0.759 Hz。从表 3 中可以看出结构的第 1 阶自振频率比较接近叶轮的 3*P* 频率,高阶固有频率远远大于叶轮 3*P* 频率,不会发生高阶共振。因此,风电基础要通过结构的固有特性分析,合理控制结构的前 5 阶固有频率,使其避开风机共振频率。

2.3 位移动力响应分析

分析时利用模态分析所得到的瑞利阻尼系数,时程分析时间取 50 s,时间间隔为 0.2 s。经过瞬态分析,可以获得三桩式海上风机基础与上部结构关键部位位移的动力响应时程曲线,如图 2 所示。



(a) 塔筒顶端*X*向位移 (b) 立柱顶端*X*向位移

(c) 桩基顶端*X*向位移 (d) 上部斜撑*X*向位移

图 2 位移时程曲线

Fig. 2 Time-history curves of displacement

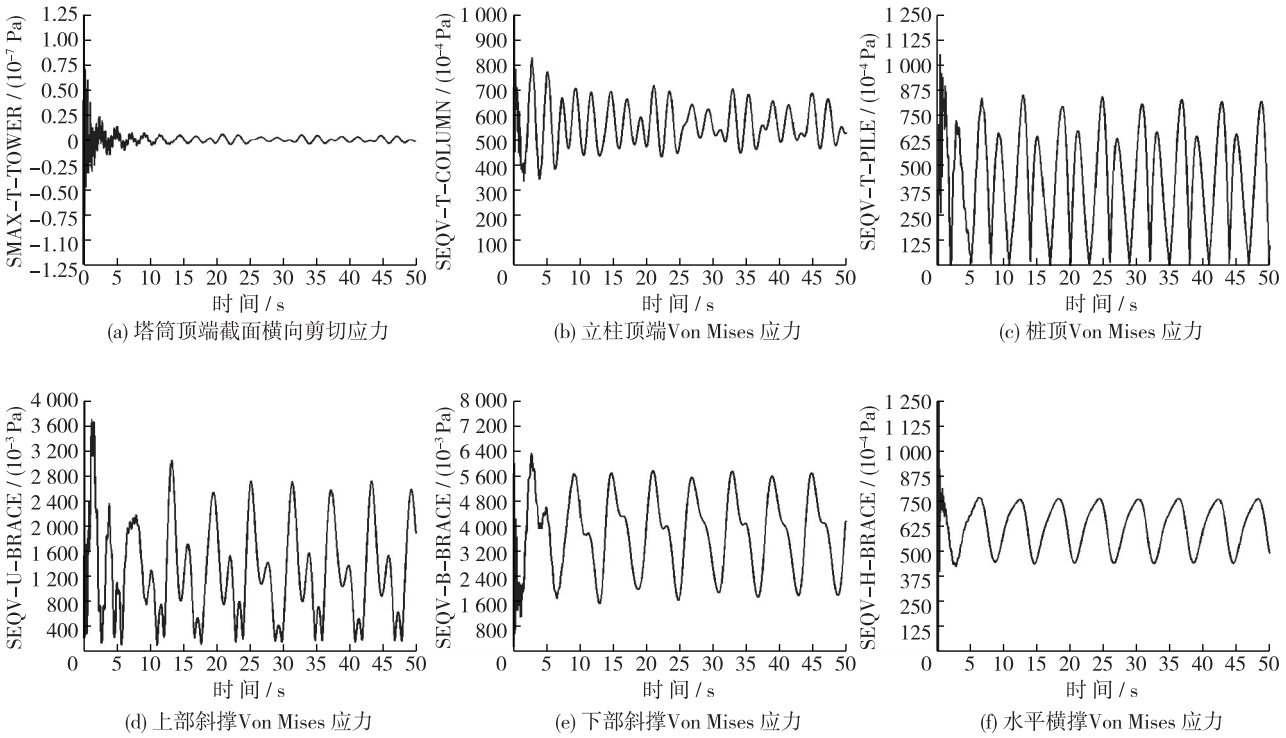
图 2 列出结构关键部位(塔筒顶端、立柱顶端、桩基顶端与上部斜撑)*X* 向位移的动力响应时程曲线。通过直观分析可知,海上风机三桩基础与上部结构各个关键部位的位移随时间的变化规律均表现为周期性振荡运动。其中,桩基顶端与上部斜撑位于基础上,波动较小,且接近于线性波动,而立柱顶端与塔筒顶端离基础部位越远波动越强,且非线性特性非常明显。从数值上看,塔筒顶端 *X* 向最大位移值达到了 34.8 mm,立柱顶端 *X* 向最大位移值达到了 5.34 mm,桩基顶端 *X* 向位移值达到了 2.34 mm,上部斜撑 *X* 向最大位移值达到了 1.42 mm。可见波浪荷载对结构振动幅度的影响较大,不容忽视。

2.4 应力动力响应分析

经数值计算得到了海上风机三桩基础与上部结构的应力动力响应时程曲线,如图 3 所示。

分析图 3 的应力时程曲线发现:在波浪荷载加载初期由于海上风机结构自身的刚度与强度特性,各关键部位的动力响应曲线均表现出较大波动。随着时间的推移,海上风机结构与波浪荷载通过振动相互影响,最

后形成一种耦合体系，各关键部位的动力响应时程曲线逐渐表现出较为规律的周期性波动，但又各不相同。塔筒顶端离波浪荷载作用位置最远，因此其应力随时间的波动幅度较弱（图 3（a）），塔筒顶端与机舱之间的刚性连接采用的点面接触模拟，只能提取出横向剪切应力，且应力值较小；立柱位于水中且高出泥面以上，波浪力作用于基础后产生连带作用，其应力随时间变化幅度较小（图 3（b）），应力最大值 10.6 MPa；桩基分为水面以下和水面以上两部分，受波浪作用影响明显，其中桩顶应力值表现出大幅变化（图 3（c）），应力最大值为 10.4 MPa；上部斜撑与下部斜撑的应力时程曲线都表现出很强的非线性波动，且上部斜撑的尤为突出，于是可以推测倾斜的管桩结构的布置方向对结构的动力响应有一定的影响（图 3（d）和（e））；水平横撑呈水平布置，壁厚较小，其轴向与波浪波峰线几乎平行，因此其应力值在时程上变化较为规律，周期特征明显（图 3（f））。由于本文只分析了波浪荷载的作用，所以结构的应力值不足以大到超越其强度允许的范围。但对于结构内部而言，周期性荷载的作用不可小觑，波浪荷载对结构尤其是桩基部分的受力有着重要的影响。



(a) 塔筒顶端截面横向剪切应力　(b) 立柱顶端Von Mises 应力　(c) 桩顶Von Mises 应力

(d) 上部斜撑Von Mises 应力　(e) 下部斜撑Von Mises 应力　(f) 水平横撑Von Mises 应力

图 3　应力时程曲线

Fig. 3　Time-history curves of stress

3　结　语

海上风机基础与上部结构整体组成的直立式柱体结构，其纵向尺寸远大于横向，使得结构呈现出一定的柔性，当它的自振频率与波浪荷载频率相接近时，动力荷载对位移的放大作用就会非常显著，分析时必须考虑到动力放大作用，进行动力分析。基于三维有限元模型，对海上风机三桩基础与上部结构进行动力响应分析得出以下结论：

（1）在承载能力极限状况下，海上风机三桩基础及其上部结构的静力强度满足要求。

（2）通过模态分析，得出了结构的各阶模态振型，确定了结构的振动特性。结构的模态振型主要表现为 *XZ* 或 *YZ* 平面的弯曲以及 *XY* 平面上的扭曲，在低阶频率以及高阶频率情况下，其模态振型均较容易表现为弯曲形式，因此对结构的抗弯性能要求较高。

（3）考虑波浪荷载的作用，进行了瞬态动力分析，获得了海上风机结构关键部位的位移与应力时程曲

线,结合时程曲线确定了动力响应过程中结构塔筒顶、立柱顶和桩基顶的位移与应力极值。根据各关键部位的位移与应力的动力响应时程曲线及相应极值,可以确定波浪荷载对结构的受力与变形有着重要的影响。

(4)实际工程中,风荷载对结构位移和应力的影响不容忽视,本文只在静强度计算时考虑了风荷载,得到的动力分析结果比实际情况的小,后期可以继续进行风浪荷载下海上风机结构的动力分析。

参 考 文 献:

[1] 张秀芝, 朱蓉. 中国近海风电场开发指南[M]. 北京: 气象信息出版社, 2010. (ZHANG Xiu-zhi, ZHU Rong. Guide of Chinese offshore wind farm development[M]. Beijing: Meteorological Information Press, 2010. (in Chinese))

[2] HU S L J, GUPTA M, ZHAO D. Effects of wave intermittency/nonlinearity on forces and responses[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(7): 819-827.

[3] TUNG C C. Total wave force on cylinder considering free surface fluctuation[J]. Applied Ocean Research, 1996, 18(1): 37-43.

[4] YEH S C, TUNG C C. Effects of free surface fluctuation on total wave force on structures[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1996, 6(1): 75-86.

[5] MARDFEKRI M, GARDONI P, ROESSET J M. Probabilistic demand models and fragility estimates for offshore wind turbine support structures[J]. Engineering Structures, 2013, 52: 478-487.

[6] MARTINEZ-CHALUISANT V, SCHNEIDER J A, FRATTA D. Physical modeling of the dynamic response of offshore wind turbines founded on monopiles[C]// Earth and Space 2010 @ Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments, 2010: 2079-2086.

[7] 聂武, 刘玉秋. 海洋工程结构物动力学分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002. (NIE Wu, LIU Yu-qiu. Kinetic analysis of marine engineering structures[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002. (in Chinese))

[8] 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, 20(2): 153-157. (LIN Yi-feng, LI Jian-ying, SHEN Da, et al. Structure characteristics and design technique keys of wind turbine foundation in Shanghai Donghai-bridge offshore wind farm[J]. Shanghai Electric Power, 2007, 20(2): 153-157. (in Chinese))

[9] 孟珣, 侯金林, 于春洁, 等. 海上风力发电单立柱支撑结构拟静力分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010(2): 89-94. (MENG Xun, HOU Jin-lin, YU Chun-jie, et al. Quasi-static analysis of a monopole supported OWT structure[J]. Periodical of Ocean University of China(Natural Science Edition), 2010(2): 89-94. (in Chinese))

[10] 王湘明, 陈亮, 邓英, 等. 海上风力发电机组塔架海波载荷的分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(1): 42-45. (WANG Xiang-ming, CHEN Liang, DENG Ying, et al. Analysis of wave loads of offshore wind turbine[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(1): 42-45. (in Chinese))

[11] 李利飞. 波浪运动对风机基础结构的动力响应影响[J]. 港工技术, 2014, 51(2): 29-31. (LI Li-fei. Impact of wave dynamic response on wind turbine foundation[J]. Port Engineering Technology, 2014, 51(2): 29-31. (in Chinese))

[12] 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 Zhen-guo, REN Hui-long, ZHEN Chun-bo, et al. Impact research of soil structural parameters on dynamic response of offshore wind turbine foundation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4): 73-79. (in Chinese))

[13] 康海贵, 莫仁杰, 龙丽吉, 等. 海上三桩风机基础简化及荷载响应对比分析[J]. 可再生能源, 2014, 32(5): 609-618. (KANG Hai-gui, MO Ren-jie, LONG Li-ji, et al. Simplification and load response analysis of offshore wind turbine tri-pile foundation[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(5): 609-618. (in Chinese))

[14] 杜鹏飞. 3MW 单桩式风电塔架结构设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2010. (DU Peng-fei. Design scheme of the supporting structure of 3MW monopile wind turbine[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese))

[15] 董艳秋. 深海采油平台波浪荷载及响应[M]. 天津: 天津大学出版社, 2005. (DONG Yan-qiu. Deepwater oil platform wave load and response[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005. (in Chinese))

[16] 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): 278-279. (SHAN Guang-kun, YAO Xing-jia. Mode analisis of MW grade wind turbine[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(3): 278-279. (in Chinese))

Dynamic response analysis of tripod pile foundation and superstructure of offshore wind turbine

HE Ye[1, 2], ZHAO Ming-jie[1], HU Dan-ni[3]

(1. *Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing* 400074, *China*; 2. *School of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang* 413000, *China*; 3. *Guangdong Ocean University, Zhanjiang* 524088, *China*)

Abstract: A 3D numerical model for tripod pile foundation and superstructure of an offshore wind turbine was established based on ANSYS finite element platform. The modal shapes and vibration characteristics of the FEM were determined through the modal analysis by using Block Lanzcos method. Considering the effect of periodic wave loads, the dynamic response characteristics of the FEM were respectively calculated through the transient analysis. Therefore, the time-history curves of displacement and stress in the key parts of the structure were obtained. The analysis results show that: the tripod pile foundation and superstructure of the offshore wind turbine were easy to show as the bending form, indicating the higher bending performance of the structure. Under wave loading, the time-history curves of displacement and stress showed a periodic oscillatory motion with the change of time, but there were also differences. As to the time-history curves of displacement, the far the key parts away from the foundation, the larger the displacement amplitude, and the more remarkable the nonlinear characteristics of the curves. As to the time-history curves of stress, the stress amplitude appeared at the top of the column, which is the connecting part between the column and the tower. The wave loads cannot be ignored, which have important influences on the stress state and deformation of the offshore wind turbine structure.

Key words: offshore wind turbine; tripod pile foundation; modal analysis; dynamic response; wave load