

文章编号:1007-6735(2013)06-0591-05

海上风力机桩柱式结构动力响应分析

高月文, 李 春, 叶 舟, 成 欣

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 采用有限元方法, 分析了桩柱式结构模态, 得到结构振型变化, 且研究了桩柱式平台结构的波浪力载荷作用机理, 得到平台结构在时域中桩柱结构所受波浪力变化情况. 同时分析了不同桩柱形式结构纵荡、横荡和垂荡以及横摇、纵摇和首摇方向波浪力变化. 结果表明: 多桩柱平台结构频率变化范围集中、振型变化较小; 横荡方向波浪作用力小, 纵摇方向波浪作用力大.

关键词: 海上风力机; 波浪力; 运动响应; 桩柱式结构

中图分类号: TK 83 **文献标志码:** A

Dynamic Response Analysis of Pile Type Structure Offshore Wind Turbine

GAO Yue-wen, LI Chun, YE Zhou, CHEN Xin

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Based on the finite element method, the wave force mechanism on a platform structure of offshore wind turbine was analysed and the dynamic response and wave force variation on the platform structures were obtained in time domain. The wave force variations on platforms with different pile structure types in the directions of surge, sway and heave as well as of roll, pitch and yaw were investigated. The results show that for multi-pile structure platforms, the frequency changes only in an arrow band and the vibration mode has only a little change; in sway direction the wave force is minimum and in pitch direction the wave force is maximum.

Key words: offshore wind turbine; wave force; motion response; pipe type structure

由陆地向海洋已成为风电发展的主要趋势, 海上风力机的研究逐渐成为风电研究领域重点与热点^[1-2]. 与陆上风电相比, 海上风电具有风能资源储量大、开发效率高和环境污染小等优点; 海上风电不占用陆上土地, 受环境制约少, 而且海上平均风速高,

离岸 10 km 处海上风速比陆地风速高约 25%^[3]. 此外, 我国拥有漫长海岸线, 近海风能资源丰富, 用电负荷中心大多集中于东部沿海地区, 海上风电具有广阔的发展前景^[4].

支撑结构是保证海上风力机安全运行的基础.

收稿日期: 2012-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176129); 上海市教委科研创新(重点)资助项目(13ZZ120); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)资助项目(20123120110008)

第一作者: 高月文(1989-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 海上漂浮式风力机. E-mail: yuewengao@163.com

通讯作者: 李 春(1963-), 男, 教授. 研究方向: 动力机械及工程. E-mail: lichunusst@163.com

因此,对其基础结构形式及其特点的研究自然成为海上风力机设计的重要组成部分.海上风力机支撑结构不仅承受来自风轮的风载荷及基础的水动力载荷,且还通过基础与土壤的作用将载荷传递至海床,其间存在的相互作用和影响,增加了设计和分析的难度.正是由于支撑结构对海上风力机安全运行的重要性,海上风力机支撑结构研究引起国内外学者的广泛重视. Bush 等^[5]采用非线性弹簧模型模拟了土壤对单桩式基础侧向约束的影响,结果表明分布式弹簧约束形式的计算载荷更接近实际情况. Bir 等^[6]对不同基础类型的海上风力机进行了模态动力学分析,得出了分布式弹簧模型计算高阶模态较准确的结论.

但上述研究均未考虑波浪载荷的作用及平台结构的运动响应,而两者均是影响海上风力机平台安全性的重要因素.因此,研究桩柱式平台结构运动响应和波浪力载荷作用机理,最终得到平台结构在时域中的动力响应及桩柱结构波浪力成为本文的重要目的与内容.基于有限元模型,分析了不同桩柱式结构形式的模态变化及在 AIRY 线性波载荷作用下的运动响应,分析了 3 种不同形式桩柱式结构的动力响应,并对桩柱式波浪力特性进行分析.

1 桩柱式平台动力载荷

桩柱式平台在规则波作用下运动方程可以表示为

$$(\mathbf{M} + \mathbf{A}) \ddot{\mathbf{x}} + (\mathbf{B}_w + \mathbf{B}_m) \dot{\mathbf{x}} + (\mathbf{K}_w + \mathbf{K}_t + \mathbf{K}_m) \mathbf{x} = \mathbf{F}_h + \mathbf{F}_l + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_w + \mathbf{F}_c \quad (1)$$

式中, $\mathbf{M}$, $\mathbf{A}$ 为结构质量和附加质量矩阵; $\mathbf{B}_w$, $\mathbf{B}_m$ 为阻尼和系泊系统矩阵; $\mathbf{K}_w$, $\mathbf{K}_t$ 和 $\mathbf{K}_m$ 为水动力回复刚度、张力腿刚度和锚缆刚度矩阵; $\mathbf{x}$, $\dot{\mathbf{x}}$ 和 $\ddot{\mathbf{x}}$ 为运动的位移、速度和加速度; $\mathbf{F}_h$, $\mathbf{F}_w$ 为静水力和风载荷力; $\mathbf{F}_l$, $\mathbf{F}_D$ 为入射波佛劳得-克利洛夫力 (Froude-Krylov Force, F-K) 和绕射波浪力; $\mathbf{F}_d$, $\mathbf{F}_c$ 为波浪慢漂力和海流作用力.

1.1 波浪载荷

静水压力和波浪载荷积分表达式为

$$\mathbf{F}_h = - \int_S \mathbf{P} \mathbf{n} dS \quad (2)$$

$$\mathbf{F}_{lj} + \mathbf{F}_{Dj} = - \int_S i\omega \rho q_l \mathbf{n}_j dS - \int_S i\omega \rho q_D \mathbf{n}_j dS \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_d = - \oint_{WL} 0.5 \rho g \zeta_r^2 \mathbf{n} dl + \iint_{S_0} 0.5 \rho |\nabla \varphi|^2 \mathbf{n} dS +$$

$$\iint_{S_0} \rho \left| X \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right|^2 \mathbf{n} dS + M_g \mathbf{R} \ddot{\mathbf{X}}_g \quad (4)$$

式中, $\mathbf{P}$, $\mathbf{N}$ 和 S 为静水压力、表面外法线方向向量和湿表面面积; ω 为波浪频率; ρ , $\mathbf{n}_j$ 为水密度和法向方向向量; q_l , q_D 为入射波势和绕射波势; WL 为水线面; ζ_r , S_0 为相对波表面和结构湿表面; φ 为波浪势函数; t 为运动时间; X 为运动位移; ∇ 为拉普拉斯算子; $\mathbf{n}$ 为曲面法线方向向量; M_g , $\mathbf{R}$ 为结构质量和结构旋转矩阵; $\ddot{\mathbf{X}}_g$ 为质心加速度.

1.2 海流载荷

海流的大小随水深变化,故海流可简化为剪切流.一般情况下,假设流速沿水深呈线性变化或二次曲线变化.在水深较大的海域,海底流速几乎为零,浅水水域流速常常被处理为二次曲线变化.

在工程设计中,为了简单起见,常将海流和潮流看作是稳定的,并认为它们对平台的作用力仅为拖曳力,即

$$\mathbf{F} = 1/2 \rho C_D A U_0^2 \quad (5)$$

式中, A 为结构物的等效面积, m^2 ; U_0 为海流的速度, m/s ; C_D 为阻力系数.

1.3 风载荷

对于海上结构,风速的变化对其产生重要影响,一般不能忽略.风速的计算在不同的设计规范中所采用的方法也不尽相同.本文按 API-RP2A 计算风速与风载荷,平均风速一般取 1 h 的平均风速,重现期为 100 a,参考高度为海平面以上 10 m 处.其它高度处的平均风速通过修正参考点的风速获得,具体计算式为

$$U_w(h, z) = U_w(h, z_R) (z/z_R)^{0.125} \quad (6)$$

式中, $U_w(h, z)$ 为静水面高度为 z 处的水平方向 h 处平均风速, m/s ; $U_w(h, z_R)$ 为参考点处的水平方向 h 处平均风速, m/s ; z_R 为平均风速的参考点 (10 m).

2 桩柱式平台几何模型

桩柱式基础分为单桩柱基础和多桩柱基础.多桩柱基础又分为 3 桩柱基础、4 桩柱基础和普通多桩柱基础等^[7].在计算过程中,设定风速为 38 m/s ,波浪有效波高为 8 m,有效波周期为 7.4 s,海面流速为 1.93 m/s ,中部流速为 1.47 m/s ,底部流速为 0.96 m/s ^[8].图 1 为对应的桩柱式结构载荷分布,海风、波浪和海流都沿着 x 轴正向作用在平台上.表 1 为不同桩柱基础几何建模参数^[4,9].

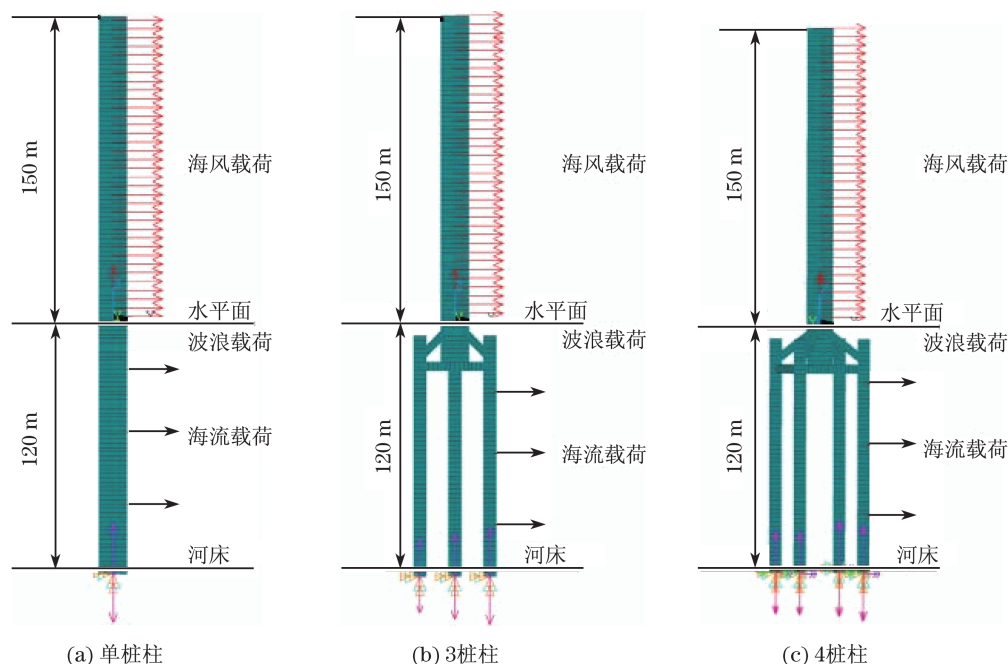


图 1 桩柱式结构载荷分布

Fig.1 Load distribution on pile type structure

表 1 桩柱式结构主要几何设计参数

Tab.1 Main design geometrical parameters of the pile structure for floating wind turbine (mm)

结构类型	结构	单桩柱	3 桩柱	4 桩柱
桩柱尺寸	直径	6 500	6 500	6 500
	厚度	50	50	50
脚架结构	直径	—	3 000×3	3 000×4
	厚度	—	30×3	30×4
桁架结构	直径	—	2 000×9	2 000×12
	厚度	—	10×9	10×12

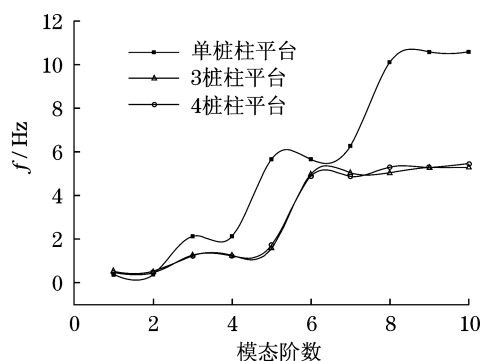


图 2 不同桩柱式结构平台模态计算结果

Fig.2 Calculation results of vibration modes of different pile type structures

3 计算结果及分析

3.1 桩柱式结构模态分析

采用有限元方法对上述结构做模态分析,确定结构的振动特性,如固有频率和振型.无阻尼模态方程为

$$\mathbf{K}\Phi_i = f_i^2 \mathbf{M}\Phi_i \quad (7)$$

式中, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵; Φ_i 为第*i*阶模态特征向量; f_i 为第*i*阶模态固有频率.对于以上模态方程采用分块 Lanczos 法求解.图 2 为不同平台结构 1~10 阶振动响应频率.由图可看出不同结构的桩柱式平台模态分析结果:单桩柱平台频率变化不仅范围较大且数值也高,而多桩柱平台模态变化比较集中且数值小于单柱式,模态阶数越大两者频率数值差异也越大.

3.2 桩柱式结构平台波浪动力响应

图 3(见下页)为 3 桩柱平台结构示意图,运动的 6 个自由度分别为绕 x, y, z 轴转动的横摇,纵摇和首摇运动及沿 x, y, z 轴平动的纵荡,横荡和垂荡,本文只考虑海风、波浪和海流同时沿着 x 轴正方向作用时的情况.

3.2.1 单桩柱结构平台运动响应

图 4(见下页)为单桩柱波浪力在 6 个自由度方向随时间的变化.在平动方向上,纵荡和垂荡上波浪力数值较大,且都是在 40 s 附近出现峰值,然后随着时间而发生衰减,但有的在零附近,有的保持一定值.在转动方向上,纵摇上波浪力数值较大,峰值也在 40 s 附近,然后随时间振荡很小但仍然存在

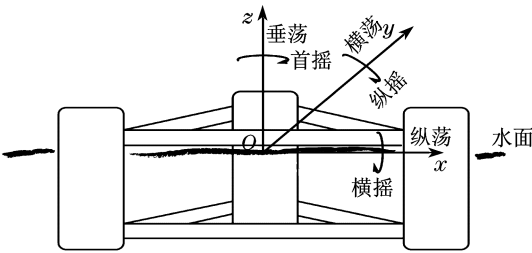


图3 平台坐标系及自由度定义

Fig.3 Platform coordinate system and the definition of DOF

周期.

3.2.2 3 桩柱结构平台运动响应

图5为3桩柱波浪力变化.波浪力比较集中,数量级相近,说明3桩柱各方向受力比较均匀,不会在某一方向出现极大值而影响结构稳定性.各个方向上,波浪力随时间变化会出现一个极值,之后波浪力逐渐减小.但横摇方向波浪力极大值出现时间推迟且持续时间长,而其它方向波浪力大都集中在30~60 s时间范围内.

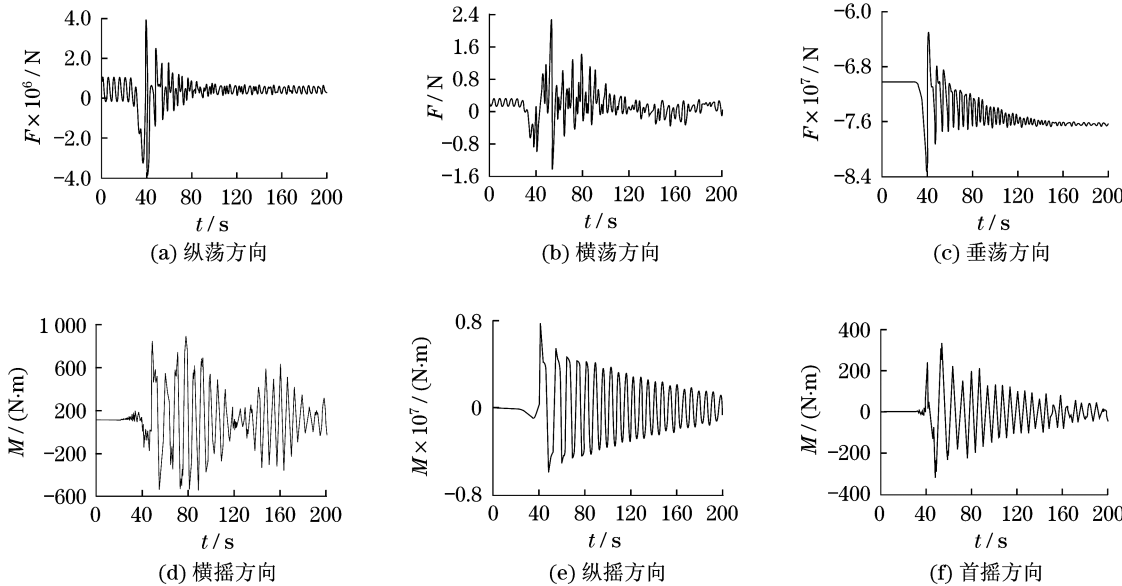


图4 单桩柱结构波浪力时域响应

Fig.4 Wave force response of single pile structure

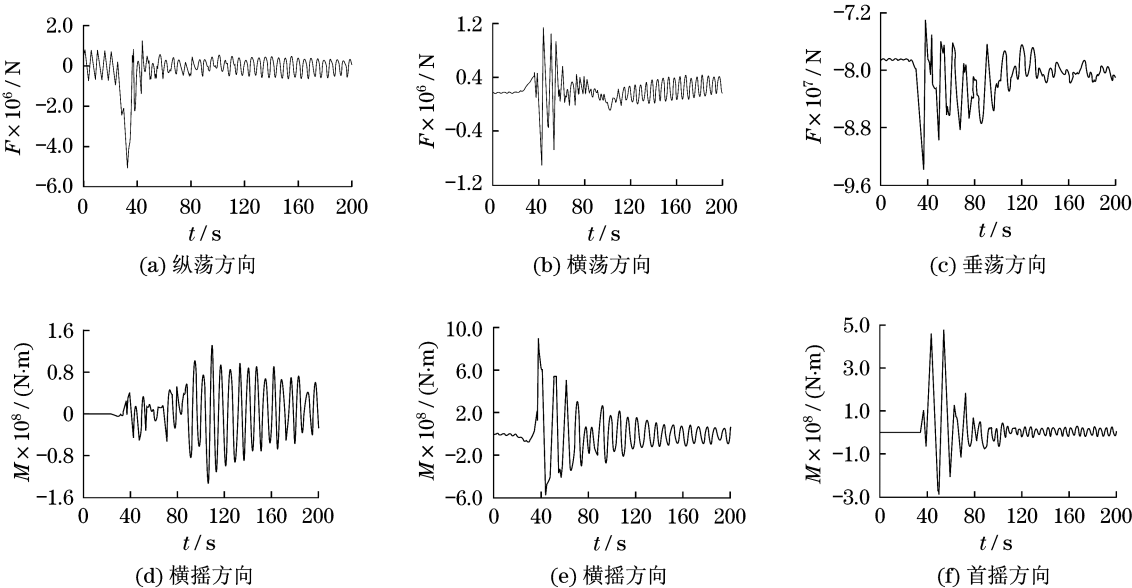


图5 3 桩柱结构波浪力时域响应

Fig.5 Wave force response of three piles structure

3.2.3 4 桩柱结构平台运动响应

图6为4桩柱在不同自由度下波浪力变化情况,垂荡和纵摇方向波浪力较大,且都是在40 s附近出现

峰值,然后随着时间而发生衰减.但横荡、横摇和首摇方向波浪力极大值出现时间明显推迟,且其它方向波浪力大部分集中在30~60 s时间范围内.

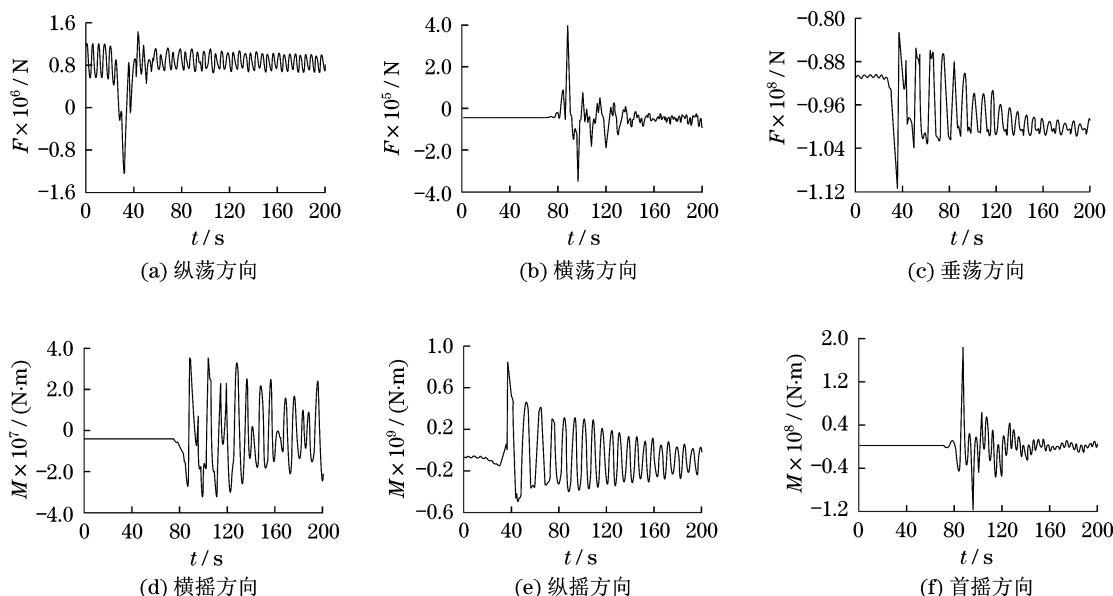


图6 4 桩柱结构波浪力时域响应

Fig6 Wave force response of four piles structure

4 结 论

a. 多桩柱平台结构频率变化范围集中,与海洋波浪力、海流和海风频率范围距离甚远,不容易共振而发生损坏.

b. 桩柱横荡、垂荡和首摇方向运动响应最小,纵摇方向运动响应最大,纵荡和垂荡运动响应对波浪具有周期性,横荡方向波浪作用力小,纵摇方向波浪作用力大.

c. 4 桩柱与 3 桩柱相比,桩柱在纵荡、垂荡和纵摇方向位移变化较小,且在垂荡和纵摇方向明显小于 3 桩柱结构.

参考文献:

- [1] 高坤. 海上漂浮式风力机的概念设计与仿真研究[D]. 上海:上海理工大学,2010.
- [2] 李春,叶舟,高伟,等. 现代陆海风力机计算与仿真[M]. 上海:上海科学技术出版社,2012.
- [3] 张亮,邓慧静. 浮式风机半潜平台稳性数值分析[J]. 应

用科技,2011,38(10):13-17.

- [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.
- [5] Bush E, Manuel L. Foundation models for offshore wind turbines[C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, 2009: 1-7.
- [6] Bir G, Jonkman J. Modal dynamics of large wind turbines with different support structures [C] // Proceeding of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE. Berlin, 2008: 669-679.
- [7] 李静,孙亚胜. 海上风力机发电机组的基础形式[J]. 上海电力,2008(3):314-317.
- [8] 杨进,刘书杰,姜伟,等. ANSYS 在海洋石油工程中的应用[M]. 北京:石油工业出版社,2010.
- [9] Thomas S. Dynamic response analysis of a spar type floating wind turbine [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology Marine Technology, 2011.

(编辑:金虹)