

半潜式海上浮式风力机平台设计及水动力响应

吴海涛¹, 张亮¹, 马勇¹, 赵静², 荆丰梅¹

1. 哈尔滨工程大学海洋可再生能源研究所, 哈尔滨 150001

2. 大连船舶重工集团有限公司设计研究所, 大连 116021

摘要 为了开发海上风能资源, 探索浮式风力机平台响应特性, 设计了一种半潜式海上浮式风力机平台样机。利用风压模型模拟风力机气动载荷, 基于势流理论和 Morison 方程计算水动力载荷, 并根据阻尼矩阵计算阻尼力和系泊线载荷, 建立了海上浮式风力机运动响应数值模型。制作了 1/50 的试验模型, 并在水池进行水动力实验, 对垂荡板在设计中的作用进行了验证, 测量了模型的固有周期、衰减系数以及规则波条件下的响应等, 对比发现数值模型结果与实验结果吻合较好。在无风和额定工况下进行系统随机响应特性数值分析, 通过统计数据和响应频谱研究了风力机气动载荷对风力机平台运动特性的影响。发现该系统数值模型时效性好并可以真实反映浮式风力机平台的运动特性, 平台垂荡、纵摇、横荡的响应结果满足海上浮式风力机系统对平台的性能要求。设计中加入垂荡板使平台垂荡和纵摇的固有周期和衰减系数增加, 提高了系统的稳定性。风力机气动载荷对纵摇传递函数产生有益的抑制, 但会放大纵摇和横荡在共振区的响应。

关键词 海上浮式风力机; 半潜式平台; 模型试验; 响应特性

中图分类号 TK89,P752

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.2.001

Design and Response Characteristics of a Semi-submersible Platform for Floating Offshore Wind Turbine

WU Haitao¹, ZHANG Liang¹, MA Yong¹, ZHAO Jing², JING Fengmei¹

1. Institute of Ocean Renewable Energy System, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. Research Institute, Dalian Shipbuilding Industry Co., Ltd., Dalian 116021, China

Abstract A semi-submersible platform was designed for wind energy exploration and response characteristics comprehension. In numerical simulation, the whole numerical model of motion response for floating offshore wind turbine was established by three parts: the aerodynamic load simulated through the wind pressure model as which the wind turbine was simplified; the hydrodynamic load calculated by potential theory and Morison equation; the damping force and mooring load gained by damping matrix. A 1/50 scale model was made for hydrodynamic test, in which the effect of heave plate is verified. Meanwhile, natural frequencies, damping coefficients and RAOs of the models in regular waves were obtained and the numerical results match well with the test data. The influences on the platform response characteristics by the aerodynamic load were studied numerically through statistic data and response spectrums under no wind condition and operation condition. The results have shown that the numerical model is efficient and is able to reflect the motion behavior of the platform; heave, pitch and surge RAOs can meet the requirements of platform design. Both the natural periods and the attenuation coefficients of heave and pitch were increased by heave plate, and the stability of system is improved as a result. The aerodynamic load has beneficial effects on reducing the pitch response amplitude operator, though, will amplify pitch and surge response in resonance zone.

Keywords floating offshore wind turbine; semi-submersible platform; model test; response characteristics

收稿日期: 2013-10-21; 收回日期: 2013-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51309069; 50979020); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(HEUCF110132; HEUCF130105); 哈尔滨市科技创新人才研究专项项目(RC2013QN008014)

作者简介: 吴海涛, 博士研究生, 研究方向为海上风力机流体动力, 电子邮箱: wuhaitao@hrbeu.edu.cn

引用格式: 吴海涛, 张亮, 马勇, 等. 半潜式海上浮式风力机平台设计及水动力响应[J]. 科技导报, 2014, 32(2): 15-20.

近年来,由于近海浅水水域的船舶航道、渔业开发、噪音污染和视觉影响等因素的影响,固定式海上风力机的开发受到一定限制。相对于近海浅水水域,近海深水区域具有风力稳定、强劲,受限因素少,风能储量大等优势。1972年,Heronemus首次提出具有浮式基础的海上浮式风力机(floating offshore wind turbine, FOWT)概念^[1],并在近些年获得了快速发展^[2]。而半潜式浮式风力机由于具有适用水深范围广、海上安装工作量少、总成本低等优点,逐渐受到世界各国研究人员的关注。美国开发了一种支撑3个风力机的半潜式平台 MiniFloat^[3],基于墨西哥湾的风暴环境条件,模拟了该基础的结构及水动力响应。此后,美国又开发了一种支撑一个风力机的半潜式平台 WindFloat^[4-6],设计了此种风力机系统的详细参数,并针对系统的流体和结构动力特性分别展开研究。唐友刚^[7]针对所设计的水深为60 m的600 kW水平轴半潜式海上风力机,使用有限元方法建立了包括风机、塔架、浮式基础和系泊系统在内的数学模型,对波浪载荷作用下的浮式基础动力响应进行了频域分析。研究发现,平台的运动会引起风力机功率的波动,引起电力输出的不稳定性^[8]。因此,在海上浮式风力机的设计中,平台的运动特性应作为主导因素考虑。本文设计一种半潜式海上浮式风力机系统,建立海上浮式风力机运动响应数值模型,对半潜式平台的运动特性进行研究,并通过模型的水动力实验对数值模拟结果进行验证,以指出风载荷对平台特性的影响。

1 半潜式海上浮式风力机设计

图1为自主设计的半潜式海上浮式风力机系统,风力机选用NREL 5 MW水平轴三叶片变速变桨海上风力机^[9],图1中Line表示系泊线的位置。风力机直径126 m,轮毂高度距离海平面90 m,切入风速、额定风速和切出风速分别为3.0 m/s、11.4 m/s和25 m/s,图2给出了该风力机的稳态推力曲线,横坐标 V 为风速,纵坐标 T 为风力机受到的推力。平台设计水深175 m,采用悬链线系泊方式。

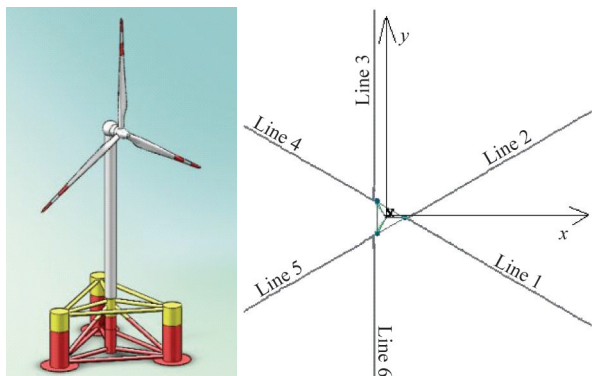


图1 半潜式海上风力机及系泊布置

Fig. 1 Concept and mooring system arrangement of the semi-submersible FOWT

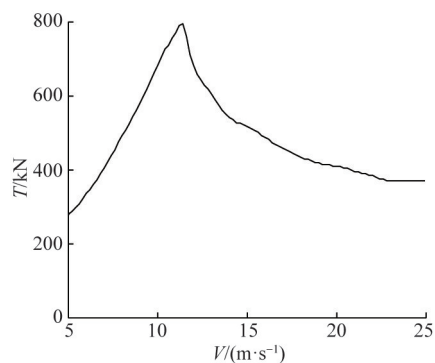


图2 5 MW海上风力机推力曲线

Fig. 2 Thrust curve of the 5 MW wind turbine

组装完成的半潜式平台(包含垂荡板)及系泊系统中,侧浮筒直径10 m,中浮筒直径5.5 m,横(斜)撑直径2 m,浮筒圆心距离60 m,垂荡板直径20 m,型深30 m,吃水20 m,排水量6542 t,重心高16.79 m,锚链线数量6根,锚链线长度600 m,水平方向分布角度60°,锚链线单位长度重量442 kg·m⁻¹,锚链顶部预张力1278.08 kN。

2 数值计算方法

2.1 动力学方程

半潜式平台在各种载荷下的动力学方程可以表示为

$$(M+A)\ddot{x}+C\dot{x}+D_1\dot{x}+D_2f(\dot{x})+Kx=q(t, x, \dot{x}) \quad (1)$$

式中, M 和 A 分别为浮体广义质量矩阵和附加质量矩阵, C 、 D_1 、 D_2 和 K 分别为势流阻尼矩阵、线性阻尼矩阵及二次阻尼矩阵和静水力刚度矩阵; x 、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ 、 q 分别为位置矢量,速度矢量,加速度矢量和激振力矢量; $f(\dot{x})=\dot{x}|\dot{x}|$ 为单元矢量函数。激振力表达如下:

$$q(t, x, \dot{x})=q_{w1}+q_{wa}^{(1)}+q_{wa}^{(2)}+q_{cu} \quad (2)$$

等式右端依次为风力 q_{w1} ,一阶波浪激振力 $q_{wa}^{(1)}$,二阶波浪激振力 $q_{wa}^{(2)}$,海流 q_{cu} 。

采用间接时域分析法,即先求出频域水动力参数,如附加质量、阻尼以及一阶波浪力,通过IFFT方法将计算结果从频域变为时域。运动方程为

$$(M+A_\infty)\ddot{x}+D_1\dot{x}+D_2f(\dot{x})+Kx+\int_0^t h(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau=q(t, x, \dot{x}) \quad (3)$$

式中, $A_\infty=A(\omega=+\infty)$,为 $\omega=+\infty$ 时的附加质量矩阵, ω 为入射波浪频率; $h(t-\tau)$ 为系统的延迟函数。

2.2 载荷计算方法

2.2.1 风载荷

虽然基于叶素动量理论或N-S方程进行模拟^[10]可以得到较精确的风轮风载荷,但是,这样模拟需要风力机叶片的详细翼型数据,并在时域内进行大量的计算,初始设计效率太低。为保障风力机正常运转,将其纵摇运动限定在10°以内^[11],在此范围内入射风速变化不太明显,并且风力机的变速变桨

控制策略可以实现风力机推力最小化^[12]。因此,在确保计算精度前提下,为提高初始设计效率,采用固定推力系数的风压模型对风载荷进行保守模拟,风载荷计算公式为

$$F_{wj} = C_{wj}(\alpha_{w1}) v_{w1}^2 \quad (4)$$

式中, j 为运动自由度; C_{wj} 为瞬时相应方向的风力系数; v_{w1} 为物体和风的相对速度; α_{w1} 为相对于局部坐标系的风速度方向。工作工况下风轮的风力系数由稳态风力机推力载荷曲线反推获得。

2.2.2 水动力载荷

对于大尺度构件($D/\lambda > 0.2$, D 为构件直径, λ 为波长),基于三维线性势流理论计算水动力载荷^[13]。浮体摇荡的速度势可设为 $\Phi = \text{Re}\{\phi e^{-i\omega t}\}$, ω 为入射波浪频率, t 为时间, ϕ 为复数形式的空间速度势,与时间无关。在现行假定下,总的复速度势(ϕ)可分解为辐射势(ϕ_R)和绕射势(ϕ_D),绕射势(ϕ_D)包括入射势(ϕ_I)和散射势(ϕ_S)。

$$\begin{cases} \phi = \phi_R + \phi_D \\ \phi_R = -i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j \phi_j \\ \phi_D = \phi_I + \phi_S \end{cases} \quad (5)$$

式中, ξ_j 为物体辐射运动在6个自由度上的辐射振幅, ϕ_j 为单位振幅辐射势。

对于小尺度构件($D/\lambda \leq 0.2$),基于Morison公式计算水动力载荷。单位长度的水动力载荷可以表示为^[14]

$$dF = \frac{\rho}{2} C_d D |u_r| u_r + \rho \frac{\pi D^2}{4} C_a \dot{u}_r + \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{u}_w \quad (6)$$

式中, ρ 为水密度, D 为圆柱直径, $\dot{u}_r$ 和 u_r 分别为流体质点相对于物体运动的加速度和速度, $\dot{u}_w$ 为波浪水质点加速度, C_d 和 C_a 分别为阻力系数和附加质量系数。

2.3 求解流程

首先对平台进行频域水动力分析,得到运动传递函数(RAO)和相关水动力系数,然后对方程进行求解。对任意 t 时刻,方程求解流程见图3。

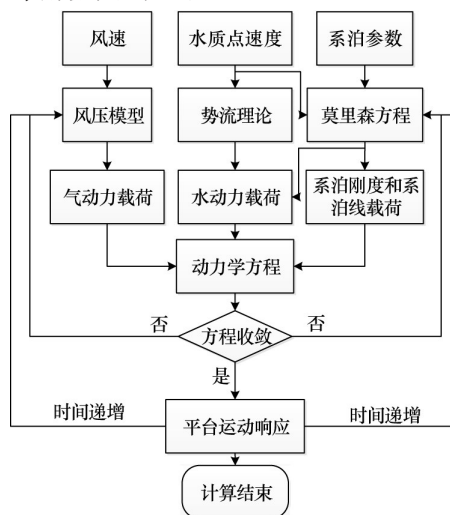


图3 动力学方程求解流程

Fig. 3 Flow chart for dynamic equation solution

1) 根据 t 时刻环境参数和上一时刻的平台响应参数计算得出 t 时刻轮毂处的相对风速、浮体表面波浪质点速度和系泊刚度。

2) 根据式(4)计算风力机气动力载荷,根据势流理论和莫里森方程得出水动力载荷,根据阻尼矩阵和系泊参数计算阻尼力、系泊刚度和系泊线载荷。

3) 将获得的水动力系数和各项载荷集中于式(3)进行迭代求解,如果方程不收敛则将本次迭代结果返回重新计算相对风速和系泊位置等参数,进行下一次迭代,直到迭代收敛。

4) 将平台运动响应作为结果输出,并将平台响应参数作为下一时刻的输入进行下一时刻的迭代,如此直到时间结束。

3 模型实验及对比

3.1 实验模型

为了验证该设计的合理性及数值结果的准确性,制作了比例为1:50的实验模型,并在水池进行了模型实验。模型中包含可拆卸垂荡板以验证垂荡板在半潜式平台设计中的作用。由于数值模拟中采用了固定推力系数的风压模型对风载荷进行保守模拟,实验中风力机气动载荷以等量砝码模拟,系泊系统利用等刚度弹簧模拟,数量和布置与原型相同,模型的运动由置于塔架上的加速度传感器测量(图4)。

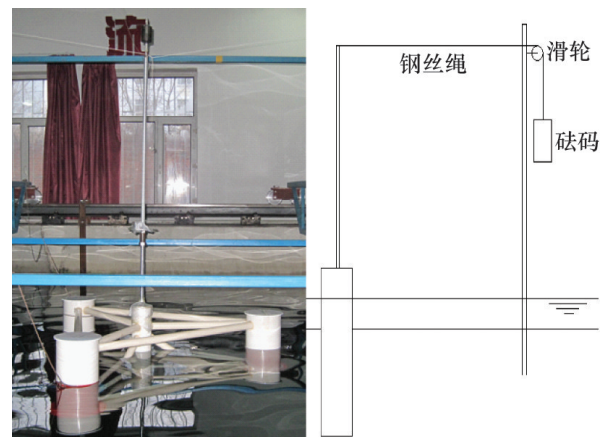


图4 FOWT实验模型

Fig. 4 FOWT test model

3.2 数值模型

按照水动力特性的不同,在GeniE模块中建立平台的有限元模型。浮筒以面元模型建模,基于势流理论计算水动力;撑杆以Morison模型建模,基于Morison方程计算水动力,两种模型组合成复合模型(图5)。此处设计垂荡板的作用是增加平台的附加质量和阻尼,以便有效地抑制系统运动,将实验获得的衰减系数转化为阻尼系数加入动力学方程中即可在数值模拟中准确计入垂荡板的影响。

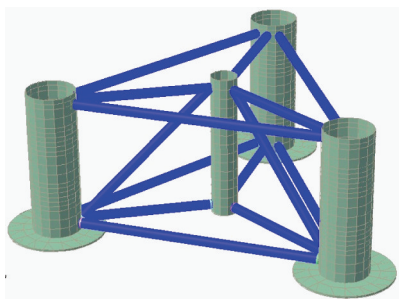


图5 半潜式平台水动力模型

Fig. 5 Platform hydrodynamic model

根据NREL-5 MW海上风力机的推力曲线(图2),利用式(4),考虑0度风向角情况,计算得到的风力(矩)系数 $C_{W11}=5999$, $C_{W15}=497904$, C_{W12} 、 C_{W13} 、 C_{W14} 和 C_{W16} 都为0,可见,风力机工作时,纵摇风力系数具有很大的量级,绝对不可忽略。

将图5所示的水动力模型导入DeepC模块,建立由风力机、半潜平台和系泊系统组成的海上风力机系统的非线性时域耦合动力模型。

3.3 实验结果及对比

在水池中进行垂荡和纵摇的自由衰减实验以及规则波作用下的运动响应实验,分别测量了平台在无垂荡板和有垂荡板两种情况下的固有周期、衰减系数以及有垂荡板模型在无风工况和额定工况(风速为额定风速11.4 m/s)情况下的RAO。

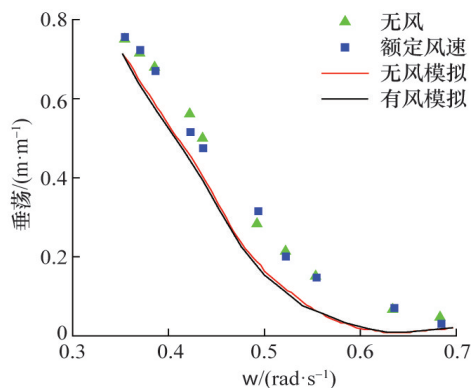
由表1可见,垂荡板大幅增加了平台垂荡和纵摇的固有周期,尤其使垂荡固有周期增加到了20 s以上,避免了与波浪的共振。此外,垂荡板也使得垂荡和纵摇的衰减系数增加了1倍以上,增加了系统阻尼,提高了系统的稳定性。结果表明,在半潜式海上浮式风力机系统中加入垂荡板这一设计是合理的。

表1 模型固有周期和衰减系数

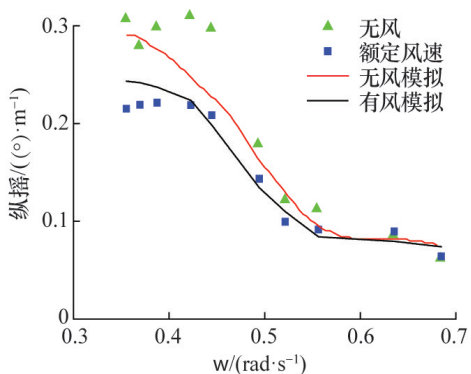
Table 1 Model natural frequencies and damping coefficients

项目	无垂荡板		有垂荡板	
	固有周期/s	衰减系数	固有周期/s	衰减系数
垂荡	14.14	0.1064	20.48	0.3695
纵摇	20.19	0.099	24.31	0.189

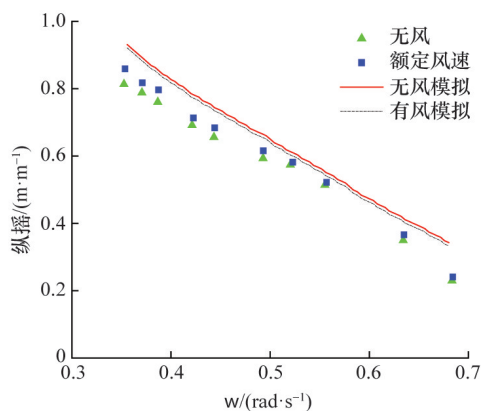
图6表示在无风和额定风速情况下,针对本文设计的半潜式海上浮式风力机平台通过实验和数值模拟得到的垂荡、纵摇和纵荡RAO值。由图6可见,相对于无风情况,额定风速工况下半潜式平台具有较小的纵摇RAO,而额定工况下半潜式平台的垂荡和纵荡RAO与无风工况下差异不大,说明风载荷对平台的纵摇产生了有益的抑制作用。数值模拟结果与实验结果吻合较好,数值模型的准确性得到验证。



(a) 垂荡RAO



(b) 纵摇RAO



(c) 纵荡RAO

图6 模型各自由度RAO

Fig. 6 RAOs of the model

半潜式平台在额定风速下纵摇RAO得到有效减小,充分体现了本设计的优势,其原因可以解释为:迎风运动会使相对风速增加,增大与运动方向相反的风载荷;顺风运动会使相对风速减小,减小与运动方向相同的风载荷,故风载荷对运动RAO的影响可以归纳为一种正阻尼。由于浮体运动速度较小,该影响对纵荡影响不大;而风力作用力臂较大,对纵摇影响较明显。

4 水动力响应分析

4.1 环境条件

为研究风载荷对平台运动特性的影响,选择无风工况、额定工况作为典型的分析工况,参考中国近海环境条件,分别采用NPD风谱和Jonswap波浪谱对风浪进行描述,风浪入射角均为 0° ,波浪有义波高2.1 m,谱峰周期6.95 s,额定工况的风速11.4 m/s。

4.2 计算结果分析

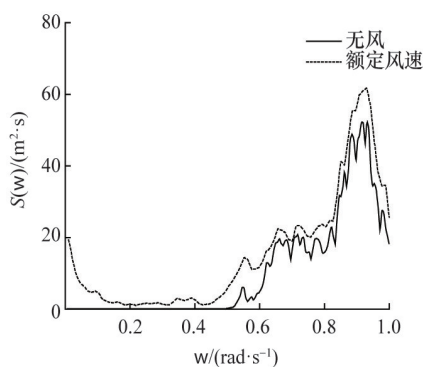
对两种工况的谱参数进行时域转换,产生3小时风浪时历曲线并分别对平台进行动力分析,获得系统各自由度下的响应时历,通过统计和频谱转换得出系统在垂荡、纵摇和纵荡的响应统计(表2)和响应谱(图7),图7中纵坐标表示响应谱密度。

表2的统计结果说明风力机的气动载荷对垂荡的影响较

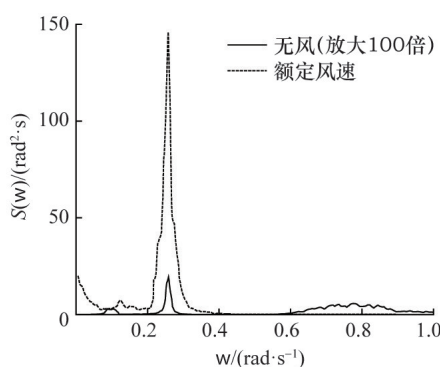
表2 系统响应统计值

Table 2 Statistic data of the system response

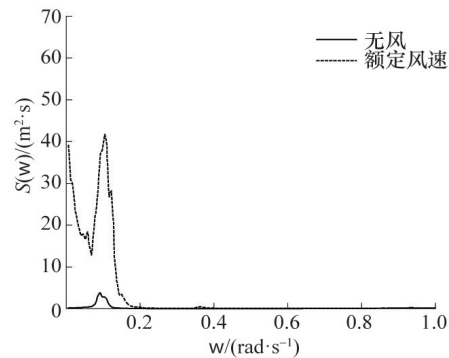
工况	垂荡/m			纵摇/ $(^\circ)$			纵荡/m		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
无风	-0.06	-0.38	-0.29	0.18	-0.32	-0.09	2.08	-1.03	0.49
额定	-0.09	-0.30	-0.20	7.01	-0.61	3.80	18.89	-2.41	3.37



(a) 垂荡响应谱



(b) 纵摇响应谱



(c) 纵荡响应谱

图7 各自由度响应谱

Fig. 7 Sresponse spectrums

小,但却会使平台的纵摇和纵荡幅值成倍增加并使纵摇和纵荡的平衡位置产生很大的偏移,这是由风力机产生的推力和力矩对平台的直接影响。平台纵摇平衡位置为 3.8° ,幅值为 7.61° ,小于文献[11]的建议值,说明所设计的风力机系统能够抑制平台的纵摇运动,有效地减小纵摇响应。由于悬链线系统的特性,风力机的水平推力会使平台产生近20 m的纵荡,已经超过海洋平台所能接受的范围。因此,风力机系统中对系泊系统的设计可以进一步优化。

由图7(a)可以看出,由于风力机气动载荷没有垂荡方向的分量,平台垂荡响应依然为波频主导,低频载荷对其影响很小;由于系统惯量较大,且相对于纵向载荷,垂向载荷很小,因此响应谱数值较小,在垂荡方向非常安全。由图7(b)可以看出,平台纵摇依然为波频主导的响应,风的低频影响所占比例有限;由于共振效应,不管风力机是否工作,在平台纵摇固有频率(0.258 rad/s)时,响应均会产生峰值,但风力机工作时的气动载荷会极大地(超过百倍)放大平台共振效应的作用。由图7(c)可以看出,纵荡响应为低频响应,与纵摇

响应的影响类似,风力机气动载荷会放大平台在共振区的响应,不同的是,风力机气动载荷会起到和共振区低频波浪载荷地位相当的主导作用。

5 结论

设计了一种半潜式海上浮式风力机,利用风压模型模拟风力机建立了海上浮式风力机的数值模型,制作了1:50的实验模型并进行了实验,对所设计的半潜式浮式风力机平台进行了响应特性分析,结果显示:

由于产生的附加质量和阻尼,垂荡板不仅可以降低垂荡响应幅值增大垂荡固有周期,也会对纵摇产生有益影响,说明风力机系统中加入垂荡板这一设计,可以有效地提高系统稳定性。对于平台在无风工况和额定工况下的RAO响应,数值模拟结果与实验结果吻合良好,本文数值模型模拟海上浮式风力机动力特性的有效性得到了验证。风力机气动载荷的阻尼作用会对平台纵摇RAO产生抑制作用,通过数值模拟得出的平台纵摇幅值小于文献[11]的建议值。平台垂荡、纵

摇、纵荡的响应结果基本满足海上浮式风力机系统对平台的性能要求,并且纵摇RAO得到了有效减小,性能较好。

通过数值模拟结果,分析了风载荷对平台特性的影响,在迎浪状态下,风力机的气动载荷所产生的推力和力矩会使平台产生较大的纵摇和纵荡偏移,是平台运动的主要影响因素。气动载荷会对纵摇和纵荡在共振区的响应产生放大作用,且会对纵荡响应产生与共振区响应相当的影响,而气动载荷基本不对垂荡响应产生影响。

参考文献 (References)

- [1] Heronemus W E. Pollution-free energy from offshore winds[C]// Proceedings of Annual Conference and Exposition Marine Technology Society. Washington DC: Marine Technology Society, 1972: 21-25.
- [2] 张亮, 吴海涛, 荆丰梅, 等. 海上漂浮式风力机研究进展及发展趋势[J]. 海洋技术, 2010, 29(4): 122-126.
Zang Liang, Wu Haitao, Jing Fengmei, et al. Study on offshore floating wind turbine and its development[J]. Ocean Technology, 2010, 29(4): 122-126.
- [3] Zambrano T, MacCready T, Kiceniuk T, Jr, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions[C]. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006: 1-6.
- [4] Bye A, Erbrich C, Rognlien B, et al. Geotechnical design of bucket foundations[C]. Offshore Technology Conference, Houston TX, US, May 1-4, 1995.
- [5] Rasmussen J L, Feld T, Sørensen P H. Bucket Foundation for Offshore Wind Farms Comparison of Simplified Model and FE-Calculations[C]. OWEMES 2000, Sicilia, Italy, April 13-15, 2000.
- [6] Feld T. Design procedures for bucket foundations—a new innovative foundation concept applied to offshore wind turbines[C]. Offshore Wind Energy Conference, Brussels, Belgium, December 10-12, 2001.

- [7] Tang Yougang, Hu Jun, Liu Liqin. Study on the dynamic response for floating foundation of offshore wind turbine[C]. The ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, June 19-24, 2011.
- [8] 叶小嵘, 张亮, 吴海涛, 等. 平台运动对海上浮式风机的气动性能影响研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(3): 123-126.
Ye Xiaorong, Zhang Liang, Wu Haitao, et al. Influence of platform motion response on aerodynamic performance of floating offshore wind turbine[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2012, 40(3): 123-126.
- [9] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, NREL/TP-500-38060[R]. Golden: NREL, 2009.
- [10] Martin O L Hansen. 风力机空气动力学[M]. 肖劲松, 译. 北京: 中国电力出版社, 2009.
Martin O L Hansen. Aerodynamics of wind turbines[M]. Xiao Jinsong, trans. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [11] Zambrano T, Cready T M, Kiceniuk T, et al. Dynamic modeling of deepwater offshore wind turbine structures in Gulf of Mexico storm conditions[C]. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburg, Germany, June 4-9, 2006.
- [12] 鲁效平, 李伟, 林勇刚, 等. 漂浮式海上风力发电机组独立变桨距控制技术[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 600-608.
Lu Xiaoping, Li Wei, Lin Yonggang, et al. Research on the individual pitch control of floating offshore wind turbines[J]. Acta Energiae Solaris Sinica. 2012, 33(4): 600-608.
- [13] 戴遗山, 段文洋. 船舶在波浪中运动的势流理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
Dai Yishan, Duan Wenyang. Potential flow theory of ship motions in waves[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [14] Faltinsen O M. Sea loads on ships and offshore structures[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.

(责任编辑 侯澄芝)

·学术动态·



中国科学技术协会

中国科协与河南省签署

《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》

2013年12月8日,中国科协与河南省人民政府在郑州签署《落实全民科学素质行动计划纲要共建协议》。中国科协常务副主席、党组书记、书记处第一书记申维辰,河南省省长谢伏瞻代表双方签约。河南省副省长徐济超主持仪式。

根据共建协议,双方通过开展公民科学素质建设共建工作,使河南省到2015年实现本辖区公民具备基本科学素质比例超过3.78%,为实现到2015年中国公民具备基本科学素质的比例超过5%的目标提供支撑。中国科协将加强对河南省全民科学素质工作的政策引导和指导督促,在推动重点人群科学素质行动、提升公共服务能力、建设长效机制等方面给予帮助和支持。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35096/n10225918/15270840.html>。