

漂浮式风力机平台在不同水深下的响应特性分析

成欣, 叶舟, 周国龙, 李春

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要: 建立基于 Spar 平台的 5MW 漂浮式风力机整机模型, 旨在探讨结构的动态响应和所受波浪力以及它们随水深的变化情况。考虑海风、海浪和海流载荷的作用, 借助有限元软件对结构进行水动力计算, 得到结构的频域特性和位置响应的时间历程, 并进一步分析不同水深条件对响应特性的影响。结果表明: 水深条件对 Spar 型漂浮式风力机在外界载荷作用下的动态响应和所受波浪力情况有着显著影响。

关键词: 漂浮式风力机; Spar 平台; 水动力计算; 动态响应; 波浪力

中图分类号: TK83 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2014)04-0097-07

Analysis on response performance for floating wind turbine platforms under different water depth

CHENG Xin, YE Zhou, ZHOU Guolong, LI Chun

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

Abstract: The whole machine models for Spar platform supported offshore wind turbines were built to research the dynamic response and wave force components and their variation trend with water depth. Hydrodynamic calculations were carried out considering wind, wave and current load to obtain the frequency-domain performance and time-domain responses and further the study of researching the impacts of water depth on the dynamic performance. The results show that dynamic responses of Spar supported offshore wind turbines are apparently influenced by water depth.

Key words: floating wind turbine; Spar platform; hydrodynamic calculation; dynamic response; wave force

风能是一种洁净的、储量极为丰富的可再生能源^[1]。海上具有丰富的风能资源,我国海上可利用的风能是陆上的3倍,近海可开发利用的风能储量约为7.5亿kW,远海风能储量则更多^[2]。海上风电场风速高且稳定,是国际风电发展的新领域^[3]。随着风能技术的不断进步发展以及陆上风电场和土地资源有限的矛盾,转向海上风电场和开发海上风电机组将成为必然趋势^[4]。但海上风电有其特殊的技术难点,海上风能开发面临的环境条件十分复杂,必须要考虑风、浪、流等主要气象、水文要素对风电设施的作用和载荷,对漂浮式风力机系统还必须考虑其运动性能和定位要求^[5]。漂浮式风力机是海上风力机基础结构的深水结构形式,主要应用于50m以上水深^[6]。与海上石油平台不同的是,除

基础平台上的载荷冲击外,作用于风力机上的风载荷引发的翻转运动同样是漂浮式风力机设计中需要考虑的问题^[7]。由于漂浮式风力机结构所处复杂特殊的环境,受海风、海浪、海流、海冰及地震等载荷的影响,存在倾覆风险,因此基于一定海况和水深的载荷分析具有重要研究意义。目前尚缺乏有关漂浮式风力机平台所受载荷及稳定性的设计标准,主要根据海洋石油平台的相关规范和设计者的经验进行研究^[8]。自1991年英国贸易工业部研发出浮柱式(Spar)海上漂浮式风力机FLOAT后,很多国家也相继开始了海上漂浮式风力机方面的研究并开发出多种漂浮式风力机系统,除Spar平台之外还有浅水泊船式、三浮体式、张力腿式等^[9]。张智^[10]深入研究了Spar平台系泊系统和二阶绕射问题,并编制计算

收稿日期:2014-03-20; 修回日期:2014-07-17

基金项目:上海市教育委员会科研创新项目(13YZ066);国家自然科学基金项目(51176129);上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1302)

作者简介:成欣(1990-),男,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事深海漂浮式风力机平台研究。

通讯作者:叶舟(1973-),男,河南信阳人,副研究员,硕士生导师,主要从事海上漂浮式风力机研究。

程序求解了平台的系泊刚度矩阵和二阶差频波浪载荷。单鹏昊等^[11]分析了在极限海况下一根或多根系泊缆断裂时平台运动和缆索张力动力响应的统计特性。Jonkman J^[12]介绍了一种 OC3 Spar 风力机平台并通过定性的假设分析得到了其系泊特性。现阶段对于 Spar 平台与风力机的相关研究并不多,动态响应研究多为时域分析,且漂浮式风力机平台整机动态响应研究较少,多为石油平台和船舶工程。

本文在前人的理论和分析研究基础上,借助有限元软件对 Spar 平台承载风力机进行建模和水动力分析,通过研究结构的频域和时域动态响应,探讨并对比在不同水深下结构的响应特性和系泊稳定性,以期海上漂浮式风力机的设计和选址提供理论参考。

1 环境载荷

环境载荷指直接或间接由环境作用引起的载荷,包括由环境载荷引起的所有外力,如系泊力、运动惯性力、液舱晃荡力等。漂浮式风力机所受到的环境载荷主要来自风、浪、流,还有内波、地震和海冰(大块浮冰或冰山),此处仅涉及前三种载荷。

1.1 风载荷

漂浮式风力机组上部受风面积很大,且对风载荷作用非常敏感,风产生具有重要影响的平均作用力(对于固定式结构物是横倾力矩,对于漂浮式结构物是平均锚泊力),同时引起很大动载荷。在作业工况下,漂浮式风力机的风轮正常运转,整个风轮圆盘的面积全部计入风压面积;在极限工况下,风轮处于顺桨停转工况,风轮上的风压面不再是圆盘面积,而是叶片的迎风面积^[13],浮式风力机的风力及风力矩计算公式为:

$$F_i = C_F C_h S_i P \quad (1)$$

$$M = \sum_{i=1}^n F_i H_i \quad (2)$$

浮式风机总风力为:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \quad (3)$$

式中: i 为受风结构的序号; n 为受风结构; C_F 为考虑受风构件形状影响系数; C_h 为考虑风压沿高度变化的高度系数; S_i 为受风结构在风向上的投影面积; P 为受风构件表面上的风压; H_i 为受风结构在风向上投影面积形心距水下侧向阻力中心高度。

1.2 波浪载荷

波浪载荷是漂浮式风力机平台所受到的主要环

境载荷,且较之风载荷更为复杂,这也是与陆上风力机最大不同之处。作用在漂浮式平台上的水动力包括波浪激振力、由结构运动产生的辐射力和考虑波浪高阶效应的漂移力,其中波浪激振力还包括由入射波形成不稳定压力引起的 F-K 力(佛汝德-克雷洛夫力)和由于结构存在影响波浪密度分布产生压差而引起的绕射力。对于大尺度结构,一般采用绕射理论对作用于物体表面上整个水动压力的积分来计算波浪载荷。在绕射理论中,流场用速度势函数来描述,该速度势在流体各处应满足拉普拉斯方程,并满足物体表面、自由表面、海底及无穷远处的边界条件。通常总速度势由入射势、绕射势(假定物体固定)和运动着的物体在静水中产生的辐射势组成,从而得到结构物的运动与作用力。

描述波浪运动的理论有许多,根据不同要素可分为:线性和非线性、有旋和无旋、规则和不规则、单向和多向、浅水和深水等。漂浮式风力机平台一般远离海岸,局部水深几乎不变,与波长相比水深相对较大。通常用无旋模型来描述一个波浪在其生成区域外的传播或在水池内造波机产生的波浪传播。理想流体和无旋流动的假设可使问题大大简化,其方法是引入速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 函数,利用速度势给出速度场: $V(x, y, z, t) = \nabla \Phi(x, y, z, t)$, 于是流动的无旋性自动得到保证。在流域内质量守恒(对于不可压缩流体, $\text{div} V = 0$) 可表示为速度势函数的拉普拉斯方程^[14]:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

通过伯努利-拉格朗日关系式可得到流域内的压力:

$$p = p_0 - \rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi)^2 \quad (5)$$

式中: p_0 为参考压力,为大气压力。

波浪理论的分类与3个几何参数有关:波高 H 、波长 L 、水深 h 。浅水理论与深水(或中等水深)理论之间的区分取决于厄塞尔(Ursell)参数:

$$U_r = \frac{kA}{(kh)^3} = \frac{HL^3}{8\pi h^3} = \frac{\varepsilon}{\mu} \quad (6)$$

式中: ε 为非线性参数, $\varepsilon = A/h$; μ 为色散参数, $\mu = kh$ 。 $U_r < 1$ 意味着色散效应较非线性效应占优,用参数 $kA \equiv \varepsilon$ 来对势函数 Φ 进行展开,可实现对问题的求解:

$$\Phi = \varepsilon \phi^{(1)} + \varepsilon^2 \phi^{(2)} + \varepsilon^3 \phi^{(3)} + \dots \quad (7)$$

此即为斯托克斯方法,由此可得到斯托克斯规

则波模型。相反,当厄塞尔数大于1, h/L 为小参数,从而得到椭圆余弦波模型和孤立波模型。在大部分海洋工程模型中,水深足够大,故可应用斯托克斯模型^[15]。

1.3 海流载荷

海流载荷是由海流作用在海洋工程结构物上所产生的载荷,海流力是作用在海洋结构物上的一种流动阻力,根据水下结构物上的阻力是流体动能函数的原理,可以按照稳定流动条件下的阻力的数学表达式得到海流力,其计算需合理确定海平面以下某深度的海流速度、阻力系数和惯性力系数。

其中,海流设计流速应取为在平台作业海区范围内可能出现的最大流速值,包括潮流流速、风暴涌流速和风成流流速,还应考虑作业海区流速的垂向分布。当波浪存在时,还应对无波浪时的流速垂向分布进行修正,以使瞬时波面处的流速保持不变。

当只考虑海流作用时,作用在平台水下部分构件的海流载荷可按下式计算:

$$F_c = \frac{1}{2} C_D \rho_w V^2 A \quad (8)$$

式中: C_D 为曳力系数; ρ_w 为海水密度, t/m^3 ; V 为设计海流流速, m/s ; A 为构件在与流速垂直平面上的投影面积。应注意海流与波浪的相互作用,当采取

Morison 公式计算波浪载荷时,应将波浪水质点速度与海流速度矢量相加;当采用绕射理论计算波浪载荷时,海流载荷应按上式计算,并与波浪载荷矢量相加。

2 漂浮式风力机平台建模与计算

2.1 模型与参数

漂浮式风力机主要包括两部分^[16]:发电机组系统和支撑体系。发电机组系统包括发电机组、轮毂、叶片等;支撑体系包括上部的塔架和下部的基础。此处研究对象为 Umaine - Hywind Spar 平台承载的 5 MW 风力机,平台主体为一深吃水的细长浮筒,周身附连三根悬链线缆索并通过三脚架连接,以期增加平台系泊的抗偏刚度,俯视图中相邻缆索夹角为 120° ,且在一定预张力作用下处于半张紧半松弛状态。平台的详细参数见表 1,风力机参数见表 2,根据对应参数建立基于 Spar 平台的漂浮式风力机整机模型见图 1。

2.2 响应算子与波浪谱

浮体波频运动六个自由度响应的稳态幅值,称为幅值运动响应算子(RAO)。该算子是由波浪激励到船体或浮体运动的传递函数,为船体或浮体运动谱与波浪谱的比值,表征单位波幅的特征响应。

表 1 Umaine - Hywind Spar 平台参数^[17]

m, m³, kg, kg · m³, kg/m, N

直径	吃水	排水量	平台总质量重心位置	横摇惯量	纵摇惯量	首摇惯量	系泊缆数目	导缆孔/锚至平台中心线间距	导缆孔/锚未张紧缆索直径	导缆孔/锚未张紧缆索长度	缆索直径	缆索质量	缆索拉伸刚度
6.5 ~ 9.4	120	8029	89.92	4.229×10^6	4.229×10^6	1.642×10^6	3	70/200	5.2/445	468	0.09	145	1.642×10^8

表 2 风力机参数^[18]

m, rpm, m/s, kg

功率	风轮直径	风轮转速	来流风速	叶尖线速度	塔架直径	塔架高度	风轮质量	机舱质量	塔架质量
5 MW	126	12.1	11.4	80	3	90	110000	240000	347500

$$\text{对于平动有: } Y_{y\zeta}^2(\omega) = \frac{S_{y\zeta}(\omega)}{S_{\zeta}(\omega)} \quad (9)$$

$$\text{对于转动有: } Y_{\alpha\zeta}^2(\omega) = \frac{S_{\alpha\zeta}(\omega)}{S_{\zeta}(\omega)} \quad (10)$$

式中: $S_{y\zeta}(\omega)$ 和 $S_{\alpha\zeta}(\omega)$ 分别为海上结构物的平动运动谱和转动运动谱; $S_{\zeta}(\omega)$ 为波浪谱, $Y_{y\zeta}^2$ 和 $Y_{\alpha\zeta}^2$ 即为平动和转动的幅值响应算子。

随机波浪可视为无数个振幅不等、频率不等、初相位随机并沿与 x 轴成不同角度的方向传播的简单余弦波的叠加,通常把风浪和由此引起的摇荡运动都看成是具备各态历经性的平稳随机过程,平台对

任一波浪成分响应是该成分波波幅的线性函数并与它对其他波浪成分的响应独立无关,利用平台各自由度的运动 RAOs 给出在每一个波浪频率下的平台响应并叠加求和,可以得到在多个波浪作用下的平台运动方程^[19]。

海浪运动是一种复杂的随机过程,在海洋学中,利用谱以随机过程来描述海浪是进行海浪研究的主要途径之一^[20]。谱分析是阐明海浪的能量相对于波浪频率、传播方向或其他独立变量的分布规律并建立其函数关系。常用的波浪谱形式有 Pierson - Moskowitz 谱、JONSWAP 谱、文圣常谱等,此处选择

P-M谱用于计算。

2.3 计算工况与处理步骤

由于风浪流均为 -180° 入射,因此主要分析沿 x 轴的平动(纵荡)和绕 y 轴的转动(纵摇)上的各种响应,图2为浮体在六个自由度上的运动简图。

取相同环境参数,采用有限元分析软件 ANSYS 中的水动力计算模块进行网格划分和平台频域、时域响应对比分析,计算时长 1000 秒,时间步长 0.02 秒,具体计算工况如下:(1)风、浪、流均为 -180° 入射;

(2)风速谱选用 Ochi & Shin 谱,风轮中心高度参考风速为 11.4 m/s;

(3)随机波浪谱选择 P-M 谱,频率范围为 0.1~3.5 rad/s,对应谱峰周期为 12.5 s,有义波高 10 m;

(4)海流速度从海平面到海底水平面由 0.95

m/s 线性减至 0;

(5)对系泊系统进行了适当简化,忽略了系泊系统阻力。

根据以上工况和风力机及平台参数,主要计算和处理分析步骤如下:

(1)根据已有参数对风力机及平台进行建模和网格划分;

(2)对模型进行频域计算,得到 RAO 和各波浪力成分随频率的变化;

(3)确定风、浪、流等外界载荷条件以及结构系泊情况,对结构进行时域计算,得到在外界载荷作用下 RAO 随时间的变化情况;

(4)改变水深条件,分别得到结构在 150、200 和 320 m 水深情况下的计算结果;

(5)数据处理、生成变化曲线和相关参数分析。

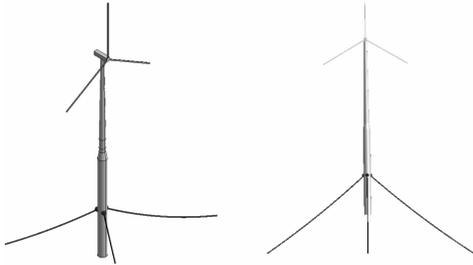


图1 风力机整机模型



图2 部分结构风格生成图

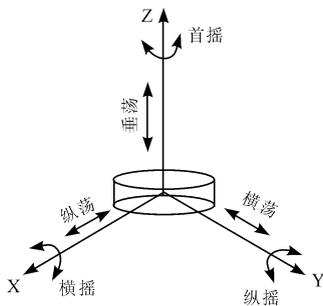


图3 海洋结构物在六个自由度上的运动示意

3 结果与分析

3.1 频域特性分析

此处分别研究纵荡、垂荡和纵摇自由度上幅值响应算子和各波浪力成分即绕射力、 $F-K$ 力、辐射阻尼力和附加质量力随频率的变化以及峰值范围,以及各参数随水深的变化情况。

3.1.1 幅值响应算子随波浪频率的变化 图4为在3种水深条件下的频域 RAO 对比情况,其中纵轴表示对应单位波幅的位移或偏转角。可以看出随着

水深增加,结构的垂荡和纵摇 RAO 呈增大趋势,但各自由度上 RAO 达到峰值的频率基本接近,可以看出在低频波浪作用下结构在各自由度上的运动都很剧烈,其中垂荡方向约在 0.2 rad/s 的波浪作用下达到峰值,纵摇方向的 RAO 约在 0.3 rad/s 的波浪作用下达到峰值,说明结构在垂荡的固有频率约为 0.2 rad/s 左右,纵摇的固有频率约为 0.3 rad/s 左右,由于纵荡方向为浮柱平台的径向,沿此方向没有刚度,所以没有自然周期。当波浪频率接近固有频率时,结构的运动非常剧烈;波浪频率远离固有频率时,结构运动相对平缓。

3.1.2 绕射力随波浪频率的变化 图5分别为3种水深条件下结构所受绕射力(平动单位为 N/m,转动单位为 $N \cdot m/m$)随波浪频率的变化情况对比,可以看出纵荡自由度上3种水深条件下绕射力均在 0.5~0.6 rad/s 达到峰值且峰值基本接近;垂荡自由度上均约在 2 rad/s 左右达到峰值,但 150 m 水深下的峰值最大,320 m 水深下的峰值最小,且数值比纵荡绕射力小一个数量级;纵摇自由度上均在 0.9 rad/s 左右达到峰值,320 m 和 200 m 水深下的纵摇绕射力峰

值接近,150 m水深的峰值略小。此外,3种水深条件各个自由度下的绕射力变化趋势基本接近。

3.1.3 F-K力随波浪频率的变化 图6分别为3种水深条件下结构所受F-K力(平动单位为N/m,转动单位为 $N \cdot m/m$)随波浪频率的变化情况对比,可以看出结构在3种水深条件下的纵荡、垂荡和纵摇上的峰值及对应频率基本相等,当波浪频率低于峰值频率时,RAO随频率的变化情况略有不同;波浪频率高于峰值频率时,RAO随频率的变化曲线基本重合;纵荡和垂荡上F-K力约在0.5 rad/s的波浪频率下达到峰值,而纵摇的峰值约在0.8 rad/s左

右。另能看出纵荡自由度上的F-K力要比垂荡大一个数量级。

3.1.4 辐射阻尼力随波浪频率的变化 图7分别为3种水深条件下结构所受辐射阻尼力(平动单位为 $N/(m/s)$,转动单位为 $N \cdot m/(\circ/s)$)随波浪频率的变化情况对比,与绕射力和F-K力不同的是,结构在3种水深条件下各自由度上辐射阻尼力随波浪频率的变化情况基本一致,其中纵荡的辐射阻尼力峰值比垂荡大一个数量级;在0.7 rad/s的波浪作用下垂荡F-K力达到峰值,而纵荡和纵摇的峰值约在1.2 rad/s左右。

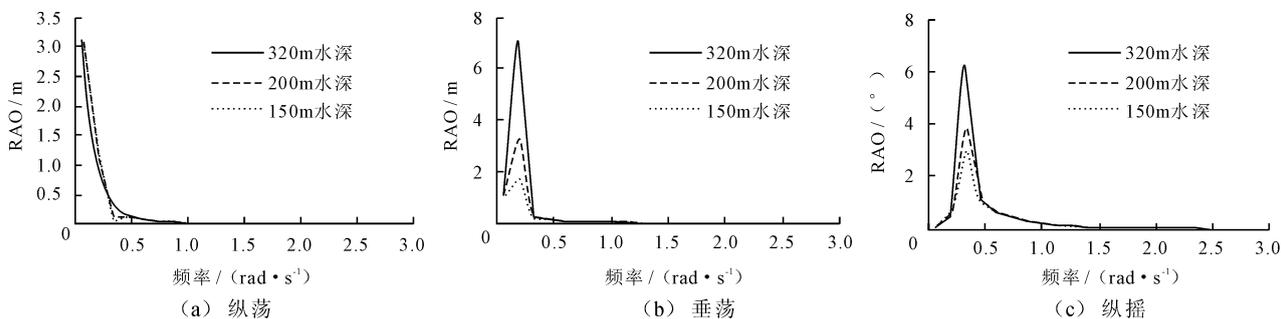


图4 3种水深下频域RAO对比

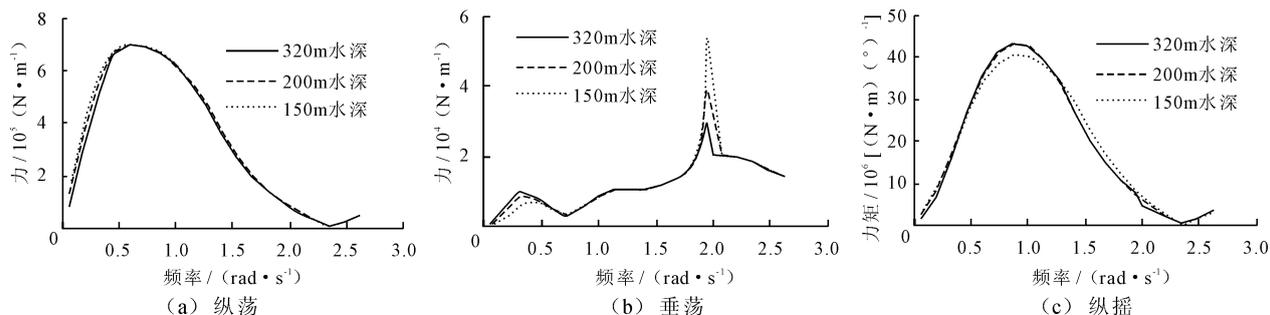


图5 3种水深下频域绕射力对比

3.1.5 附加质量力随波浪频率的变化 图8分别为3种水深条件下结构所受附加质量力(平动单位为 $N/(m/s^2)$,转动单位为 $N \cdot m/(\circ \cdot s^{-2})$)随波浪频率的变化情况对比,从图中可知3种水深下结构在纵荡和纵摇自由度上所受附加质量力随波浪频率的变化很接近,而垂荡自由度上的附加质量力峰值随水深增加而降低,且纵荡和垂荡的峰值出现在0.5 rad/s的波浪作用下,纵摇的峰值约出现在0.7 rad/s的波浪作用下;纵荡的附加质量力峰值比垂荡大一个数量级。

3.2 时域特性分析

此处主要分析在3种水深条件下结构的RAO随时间的变化情况,图9为结构分别在150、200和320 m水深下的RAO随时间变化的曲线,纵轴表示

对应单位波幅的位移或偏转角。从中可以看出结构在外界载荷作用下作往复运动,150 m水深下纵荡RAO峰值约为1.2 m左右,垂荡RAO峰值接近2 m,纵摇RAO峰值约为 13° ;200 m水深下纵荡RAO峰值略小,约为1 m左右,垂荡RAO峰值接近3 m,纵摇RAO峰值大概为 15° ;320 m水深下纵荡RAO峰值接近2 m,垂荡RAO峰值为5 m左右,纵荡RAO峰值超过 20° 。根据以上峰值情况可知,结构垂荡和纵摇的RAO峰值有随水深的增加而变大的趋势,纵荡上没有明显呈现该趋势,但320 m水深下的RAO均较150和200 m水深下的RAO大;垂荡自由度上结构的往复运动规律性相对明显,而纵荡和纵摇随着时间的推移往复运动愈加紧凑。

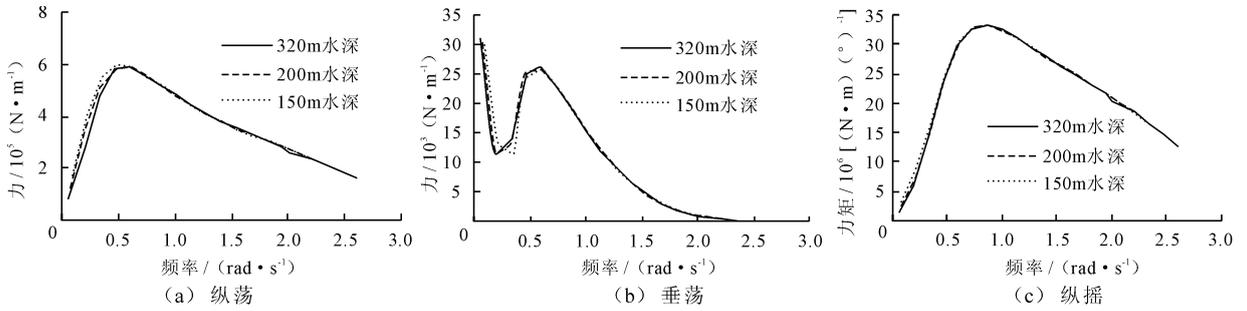


图6 3种水深下频域 F-K 力对比

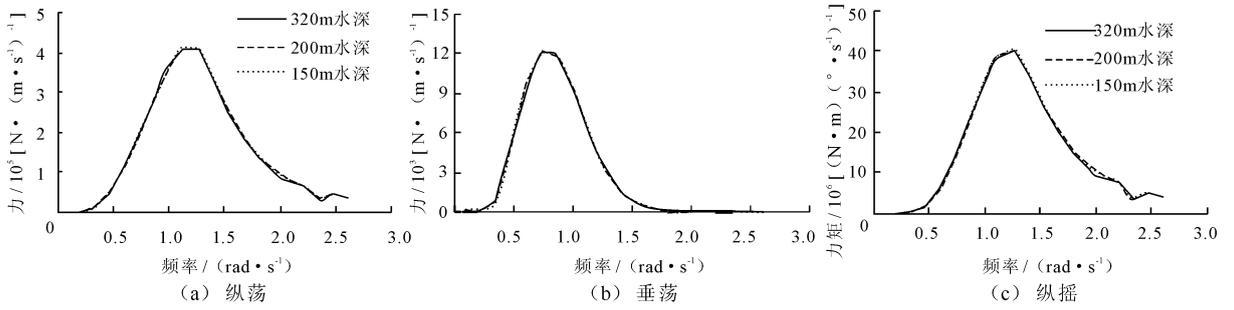


图7 3种水深下频域辐射阻尼力对比

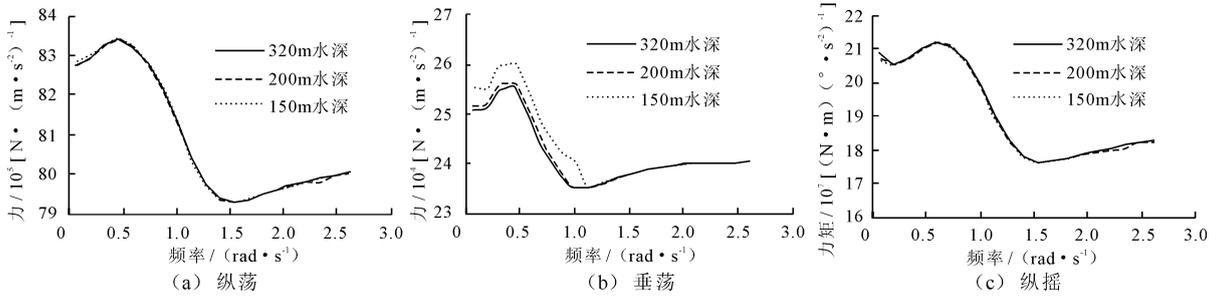


图8 3种水深下频域附加质量力对比

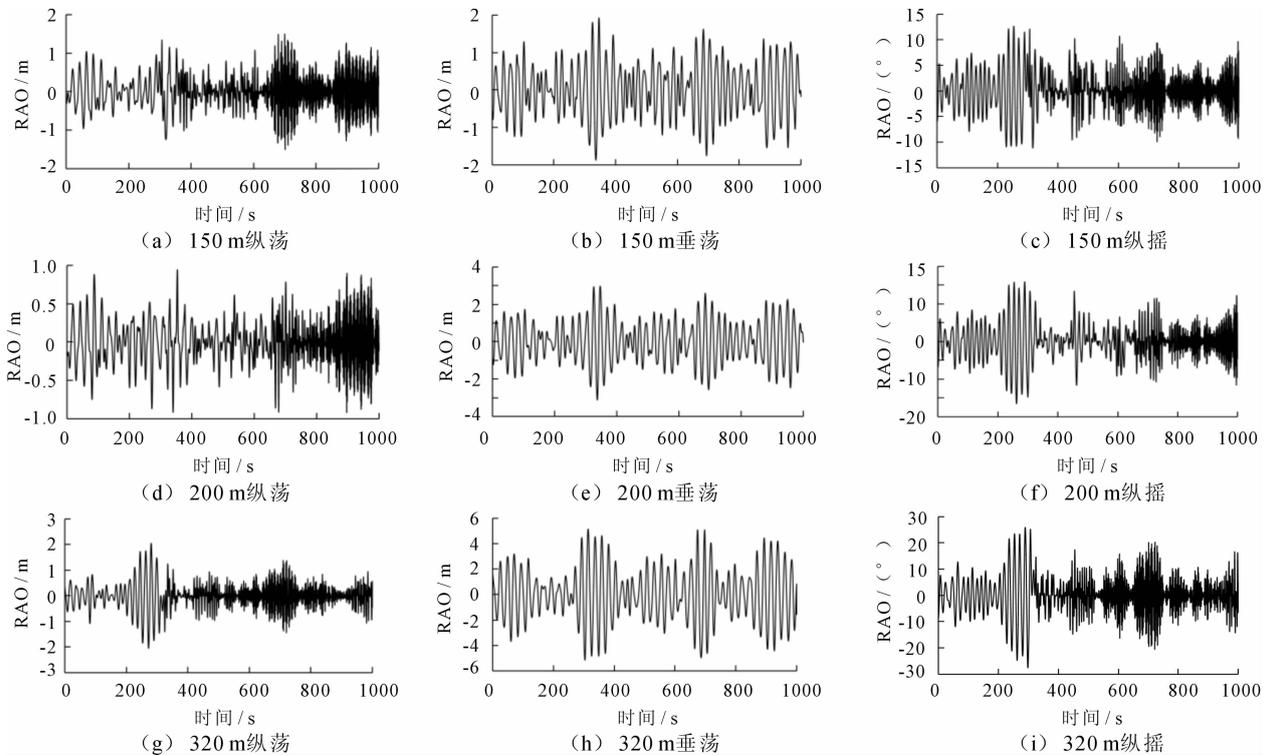


图9 3种水深下时域 RAO 对比

4 结 语

基于 Umaine - Hywind Spar 平台承载的 5MW 风力机整机模型,研究其在 150、200 和 320 m 水深下的位置动态响应和波浪载荷频域特性,通过对比在不同水深条件下的 RAO 和所受波浪力变化情况,得到如下结论:

(1) 结构在低频波浪(0.5 rad/s)作用下 RAO 达到峰值,且峰值随水深增大而增大;

(2) 在 4 种波浪力成分中,F-K 力和辐射阻尼力随频率的变化受水深影响较小,而绕射力和附加质量力在垂荡自由度上的峰值随水深增加而减小,纵荡和纵摇自由度上受力随频率的变化受水深影响不大;

(3) 对应相同水深,纵荡波浪力的峰值比垂荡大一个数量级;4 种波浪力成分中,附加质量力的数值最大;除垂荡绕射力之外,其他自由度上的各波浪力成分均在较小频率的波浪作用下达到峰值,因此该结构不宜工作于波浪频率较小的海域;

(4) 对比不同水深的 RAO 时间历程,三个自由度上的 RAO 峰值基本有随着水深增加而增大的趋势。

参考文献:

[1] 朱永强. 风电场电气工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2012.

[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: 1-3.

[3] 王林. 海上风电发展与风力机基础支撑技术[J]. 东方电机,2012,40(3):45-48.

[4] 邢作霞,陈雷,姚兴佳. 海上风力发电机组基础的选择[J]. 能源工程,2005(6):34-37.

[5] 朱仁传,缪国平,范菊,等. 海上浮式风力机及其动力学问题[J]. 应用数学和力学,2013, 34(10): 1110-1118.

[6] Henderson A R, Bulder B, Huijsmans R, et al. Feasibility study of floating wind farms in shallow offshore sites [J]. Wind Engineering, 2003, 27(5): 405-418.

[7] 尚景宏. 海上风力机基础结构设计选型研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 张智. Spar 平台系泊系统计算及波浪载荷研究[D]. 天津:天津大学,2005.

[11] 单鹏昊,任慧龙,李辉,等. 极限海况下 Spar 平台系泊系统耦合动力分析[J]. 海洋工程, 2013,31(2):35-40.

[12] Jonkman J. Definition of the floating system for phase IV of OC3 [R]. Colorado, National Renewable Energy Laboratory, 2010

[13] 赵静. 海上风力机流体载荷计算[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009:12-16.

[14] 唐友刚. 海洋工程结构动力学[M]. 天津:天津大学出版社,2008:19-20.

[15] Bernard MORLIN. 海洋工程水动力学[M]. 刘水庚. 北京:国防工业出版社,2012.

[16] 严磊. 风力发电机支撑体系结构设计研究[D]. 天津:天津大学,2008:9-10.

[17] Robertson A N, Jonkman J M. Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts [M]. National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2011.

[18] Jonkman J M, Matha D. A quantitative comparison of the responses of three floating platforms[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2010.

[19] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性[M]. 第二版. 北京:人民交通出版社,1999:180-183.

[20] 文圣常,余宙文. 海浪理论与计算原理[M]. 北京:科学出版社,1984.