

# 基于 AQWA 的漂浮式风力机驳船式平台的动态响应

丁勤卫<sup>1</sup>, 李春<sup>1,2</sup>, 周国龙<sup>1</sup>, 叶舟<sup>1,2</sup>

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

**摘要:** 为研究漂浮式风力机驳船式平台的动态响应, 建立基于 ITI Energy Barge 平台的 NREL 5MW 漂浮式风力机模型。通过辐射/衍射理论并结合有限元方法, 调用水动力学软件 AQWA, 考虑风、浪、流环境的联合作用, 对平台的动态响应进行数值模拟分析, 得到了各波浪力随波浪频率的变化及平台在纵荡、垂荡和纵摇方向上的动态响应。结果表明: 平台在低频波浪时容易出现较大响应; 随着海洋环境恶劣程度的增加, 平台的动态响应增大; 平台在垂荡方向 RAOs 要大于纵荡方向。

**关键词:** 漂浮式风力机; 驳船式平台; 动态响应; 波浪力; 风浪流联合作用

中图分类号: TK81 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)02-0150-06

## Dynamic response of barge platform of floating wind turbine based on AQWA

DING Qinwei<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1,2</sup>, ZHOU Guolong<sup>1</sup>, YE Zhou<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** To research the dynamic response of barge of platform floating wind turbine, the paper built the machine models of NREL 5MW wind turbine based on ITI Energy Barge platform. Through radiation/diffraction theory and combining with the finite element method, using water dynamics software AQWA, considering the joint action of wind, wave and flow, it carried out numerical simulation analysis on the dynamic response of platform. The paper also got the change of wave forces along with wave frequency and the dynamic response acting on the platform in the surge, heave and pitch direction. The results show that the platform is easy to appear larger response when it is in low frequency waves; When the marine environment becomes worse, the dynamic response of the platform increases; RAOs of the platform in the direction of heave is bigger than that in surge direction.

**Key words:** floating wind turbine; barge platform; dynamic response; wave force; joint action of wind, wave and flow

在煤、石油等常规能源日益短缺的当今世界, 风能由于其安全、无污染和可再生等特点逐渐成为诸多国家和地区关注的焦点<sup>[1]</sup>。与陆上风能相比, 海上风能具有储量大、分布广和不占用土地等优点<sup>[2-3]</sup>。据统计, 截止到 2012 年底, 全球海上风电累计装机容量达到 5111MW, 其中中国海上风电新增装机 46 台, 容量达到 127MW<sup>[4]</sup>。因此, “由陆向

海、由浅向深、由固定基础向漂浮式平台”是未来风电场建设的必然趋势<sup>[5]</sup>。海上风力机普遍采用固定式基础, 大多数只能布置在水深小于 30m 的浅海地区, 对于水深超过 60m 的深海, 经济性分析表明必须采用漂浮式<sup>[6]</sup>。平台结构的稳定是漂浮式风力机安全运行的基础保障, 漂浮式平台不仅受到风、浪、流等环境载荷的作用, 更需考虑由于风轮转动产

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(E51176129); 上海市教育委员会科研创新(重点)项目(13ZZ120、13YZ066); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(博导)项目(20123120110008); 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室开放基金(13DZ2260900)

作者简介: 丁勤卫(1990-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 研究方向: 风力发电。

通讯作者: 李春(1963-), 男, 北京人, 教授, 博导, 主要从事计算流体力学、叶轮机械气动力学、能源规划及风能利用等方面教学研究工作。

生的气动特性对水动力载荷产生的诱导作用,因此,研究漂浮式平台在海洋环境载荷作用下的动态响应是非常必要的。驳船式平台(Barge)是漂浮式风力机平台的一种,理想化的 Barge 平台被简化为没有重量的浮箱,其系泊系统仅仅防止漂流,其较大的水线面的面积矩足以保证整个平台在各种海况条件下不致倾覆<sup>[7]</sup>。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经验进行研究<sup>[8]</sup>,国内对漂浮式风力机平台研究的主要方向集中于理论与水池实验阶段。文献[9]中设计了一个基于 Barge 平台的 5MW 的风力发电系统,特点是可以结合其他形式海洋能源共同进行发电。文献[10]从经济性和动力学两方面因素出发,对比了张力腿平台和 Barge 平台的 5MW 漂浮式风力机在 3 种不同海洋环境的作用下整个系统的发电量。文献[11]对浅水 Barge 平台和张力腿平台风力机性能进行水动力学对比。文献[12]利用 FAST 全耦合软件分析对比张力腿平台、Barge 平台和桅杆式平台动力学特性。由此可见,对 Barge 平台的研究尚处于起步阶段,且大部分研究都是基于时域分析。

动态响应特性是 Barge 平台相关研究中的重点和难点,它不仅是结构形式创新及优化设计的重要内容,同时也为平台的施工、安装及检测提供了支持。本文结合水动力学计算软件 AQWA,考虑风、浪、流载荷的联合作用,对漂浮式风力机 Barge 平台进行频域和时域动态分析。计算主要用到 AQWA-LINE 和 AQWA-NAUT 模块: AQWA-LINE 主要利用波的辐射和衍射理论计算附体结构的一阶或二阶波浪力以及附体的附加质量和辐射阻尼; AQWA-NAUT 主要利用 STOKES 二阶波浪理论计算附体表面波浪力和运动响应时间历程。

## 1 环境载荷

环境载荷是指直接(风、浪、流、冰、地震等)或者间接(锚泊力、系泊力、运动惯性力等)由环境作用引起的载荷。漂浮式风力机所受的环境载荷源自风、浪、流、地震等许多因素的作用<sup>[13]</sup>。本文仅考虑风、浪、流载荷的作用。

### 1.1 风载荷

漂浮式风力机组上部受风面积很大,对风载荷作用非常敏感,风速的变化值对其产生重要影响,甚至风速引起的波浪自由表面的起伏变化也需计入。在海洋工程设计过程中,风速和方向通常是随时间

不断变化而变化,但一般情况下,在很长的一段持续时间内,风速当作固定不变值,本文假定风速不变且垂直入射风力机迎风面。在实际工程中,根据我国海上移动平台入级规范<sup>[14]</sup>,作用于构件上的风力  $F_w$  可按下式计算:

$$P = 0.613 \times 10^{-3} V^2 \quad (1)$$

$$F_w = C_1 C_2 S P \quad (2)$$

式中:  $P$  为风压, kPa;  $V$  为设计风速, m/s;  $S$  为平台受风构件的正投影面积,  $m^2$ ;  $C_1$  为受风构件的高度系数;  $C_2$  为受风构件的形状系数。

### 1.2 波浪载荷

漂浮式风力机的环境载荷条件比陆上的风力机更加复杂,除了受到通常的风载荷外,更主要的是受到波浪影响,这也是与陆上风力机的最大不同之处。漂浮式风力机平台在海风、海浪和海流等外界环境载荷作用下的运动方程为:

$$(M + A)\ddot{x} + (B_w + B_m)\dot{x} + (K_w + K_t + K_m)x = F_s + F_i + F_d + F_m + F_w + F_c \quad (3)$$

式中:  $M$  为结构质量矩阵;  $A$  为附加质量矩阵;  $B_w$  为波阻尼矩阵;  $B_m$  为系泊系统阻尼矩阵;  $K_w$  为水动力恢复刚度矩阵;  $K_t$  为张力腿刚度矩阵;  $K_m$  为锚缆贡献刚度矩阵;  $F_s$  为静水力, N;  $F_i$  为入射波浪力(Froude-Krylov 力, 简称 F-K 力), N;  $F_d$  为绕射波浪力, N;  $F_m$  为波浪慢漂力, N;  $F_w$  为风载荷力, N;  $F_c$  为海流作用力, N;  $x$  为平台位移, m;  $\dot{x}$  为速度, m/s;  $\ddot{x}$  为加速度,  $m/s^2$ 。

基于势流理论的边界元方法,主要波浪载荷的积分表达式为:

$$F_s = - \int_S P \bar{n} dS \quad (4)$$

$$F_{ij} + F_{dj} = - \int_S i\omega \rho_s q_i n_j dS - \int_S i\omega \rho_s q_d n_j dS \quad (5)$$

$$F_m = - \oint_{WL} 0.5 \rho_s g \zeta_r^2 \bar{n} dl + \iint_{S_0} 0.5 \rho_s |\nabla \varphi|^2 \bar{n} dS + \iint_{S_0} \left[ X \nabla \frac{\partial \varphi}{\partial t} \right]^2 \bar{n} dS + MR \ddot{X}_g S_0 \quad (6)$$

式中:  $P$  为静水压力, Pa;  $S$  为湿表面面积,  $m^2$ ;  $\bar{n}$  为表面外法线方向;  $F_{ij}$  为  $j$  法向入射波浪力, N;  $F_{dj}$  为  $j$  法向绕射波浪力, N;  $q_i$  为入射波势;  $q_d$  为辐射波势;  $\omega$  为波浪频率;  $\rho_s$  为海水密度,  $kg/m^3$ ;  $n_j$  为  $j$  法向;  $WL$  为水线面;  $\zeta_r$  为相对波表面;  $S_0$  为结构波表面;  $l$  为水线长度, m;  $\varphi$  为速度势;  $t$  为时间, s;  $n$  为法线方向;  $X$  为浮体  $x$  方向坐标值。

### 1.3 海流载荷

海流通常是海洋环境下各种水流动的集合,因此其变化过程非常复杂。为了计算方便和简洁,考虑到海流的大小随水深变化,海流可简化为剪切流。一般情况下,假设流速沿着水深方向呈线性变化或者二次曲线变化,海底流速几乎为零。浅水域流速通常处理为二次曲线变化,深水域流速通常处理为线性变化。本文简化为线性变化。与海浪相比,海流水质点运动速度与周期随时间变化缓慢的多。因此,在计算海流载荷时,可把海流作为稳定流动,认为海流对结构物的作用力只有拖曳力  $F_c$ :

$$F_c = \frac{1}{2} \rho_s C_D A U_c^2 \quad (7)$$

式中:  $A$  为结构物受力部分等效面积,  $\text{m}^2$ ;  $U_c$  为海流的速度,  $\text{m/s}$ ;  $C_D$  为阻力系数;  $\rho_s$  为海水密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

## 2 漂浮式平台及风力机参数

本文选取目前具有代表性的漂浮式风力机平台: ITI Energy Barge<sup>[15]</sup>, 风力机模型选取 NREL 5MW 风力机<sup>[16]</sup>, 风力机详细参数见表 1, Barge 平台详细参数见表 2。平台主体为有一定吃水深度的方形平台, 平台四顶角处各附连两根未张紧的悬链线以限制平台的运动, 设计水深为 150 m。

表 1 NREL 5MW 风力机参数

叶片数目	风轮直径/ m	风轮转速/ rpm	叶尖速度/ ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	塔架直径/ m	塔架高度/ m	风轮质量/ kg	塔架质量/ kg	机舱质量/ kg
3	126	12.1	80	3	90	$1.1 \times 10^5$	$3.475 \times 10^5$	$2.4 \times 10^5$

表 2 ITI Energy Barge 平台参数

平台参数	参数值
长 × 宽/m	40 × 40
吃水/m	4
排水量/ $\text{m}^3$	$6 \times 10^3$
平台总质量/kg	$5.452 \times 10^6$
质心/m	0.2818
横摇惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$7.269 \times 10^8$
纵摇惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$7.269 \times 10^8$
首摇惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$1.454 \times 10^9$
系泊缆数目	8
导缆孔/锚深度/m	4/200
导缆孔/锚至平台中心线间距/m	28.28/564.5
缆索长度/m	564.5
缆索直径/m	0.0809
缆索质量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	130.4
缆索拉伸刚度/N	$5.89 \times 108$

网格划分要求一个波长至少要覆盖 7 个最大单元尺寸, 划分网格时根据需要的最大波浪频率设定网格的控制尺寸。网格越细, 可计算波浪频率越大, 计算耗时越大。

## 3 模拟结果及分析

### 3.1 Barge 平台频域运动响应

3.1.1 RAOs 频域运动响应 漂浮式风力机 Barge 平台六自由度上的运动包括沿  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的平动及绕各轴的转动。平动包括纵荡 (Surge)、横荡 (Sway) 和垂荡 (Heave), 其大小由长度单位表示; 转动包括横摇 (Roll)、纵摇 (Pitch) 和首摇 (Yaw), 其强弱由角度单位表示。Barge 平台在六自由度上的运动如图 3 所示。

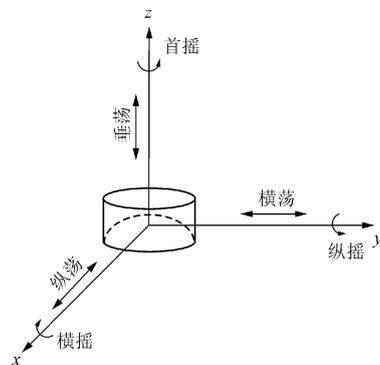


图 3 平台六自由度运动

基于 NREL 5MW 风力机参数和 ITI Energy Barge 参数建立漂浮式风力机模型如图 1 所示。对所建模型进行网格划分, 如图 2 所示。



图 1 风力机模型



图 2 网格划分

波浪作用下 Barge 平台的运动响应可由幅值响应算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 描述, 该算子是波浪波幅到平台各位置参数的传递函数<sup>[17]</sup>, 即:

$$RAO = \eta_i / \xi \quad (8)$$

式中:  $\eta_i$  为平台运动第  $i$  个自由度的值;  $\xi$  为某一频率波浪高度的幅值。

一般认为波浪高度是一个具有零均值、各态历经的高斯随机过程,平台对任一波浪成分响应是这个成分波波幅的线性函数并且与它对其他波浪成分的响应独立无关<sup>[18]</sup>,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,再叠加求和,得到在多个波浪作用下的平台运动方程。因此,可用平台位置 RAOs 来反应在外界环境载荷激励下平台在六自由度上的运动情况。因假定风、浪、流均垂直入射风力机迎风面,故只需分析平台在纵荡、垂荡和纵摇方向的运动响应及各波浪力随波浪频率的变化。波浪作用下,Barge 平台运动响应如图 4 所示,纵坐标表示单位波幅的位移或者偏转角。由图可知,纵荡、垂荡和纵摇方向,RAOs 均随波浪频率变化,且都存在峰值频率,但峰值频率不同。纵荡方向,RAOs 随着波浪频率的增大逐渐减小,当  $f > 1.0 \text{ rad/s}$  时( $f$  为波浪频率,  $\text{rad/s}$ ),RAOs 逐渐趋于零。垂荡方向,当  $f < 1.0 \text{ rad/s}$  时,RAOs 几乎不随波浪频率变化,当  $f > 1.0 \text{ rad/s}$  时,RAOs 迅速减小,及至  $1.25 \text{ rad/s}$  时趋于零,之后几乎不再随波浪频率变化。垂荡方向,RAOs 随着波浪频率的增大先增大后减小,响应主要集中在  $0.5 \sim 1.25 \text{ rad/s}$  附近。对比纵荡、垂荡方向

可知,垂荡方向 RAOs 小于纵荡方向,说明纵荡方向响应较剧烈。运动响应 RAOs 幅值,纵荡方向约为  $3.2 \text{ m}$ ,垂荡方向约为  $1.15 \text{ m}$ ,纵摇方向约为  $6^\circ$ 。

3.1.2 各波浪力频域响应 绕射力由结构物本身对入射波的绕射作用产生,F-K 力由未扰动波浪的动态压力场引起,F-K 力和绕射力共同组成了作用在浮式平台上的非粘性力,为主要的波浪载荷。静水中的运动浮体会产生一个向外辐射的波动场,波动场中的结构会受到辐射力作用,辐射力又包括辐射阻尼力和附加质量力,分别对应波浪作用下结构运动方程中的惯性项和阻尼项。F-K 力、绕射力、辐射阻尼力和附加质量力随波浪频率的变化如图 5 所示。由图 5 可知,纵荡、垂荡和纵摇方向,4 种波浪力均随波浪频率变化,整体趋势都是随着波浪频率的增大而减小,且都存在峰值频率。纵荡方向,辐射阻尼力和附加质量力变化趋势大致相同,随着波浪频率的增大先增大后减小;绕射力和 F-K 力随着波浪趋势大致相同,随着波浪频率的增大非周期性的增大减小;纵荡方向峰值均在  $0.9 \text{ rad/s}$  附近取得;峰值大小,F-K 力最大,辐射阻尼力最小,附加质量力和绕射力较接近。垂荡方向,F-K 力和附加质量力变化趋势较接近,先减小后增大,但增大阶段增大幅度很小;绕射力和辐射阻尼力变化趋势相似,随着波浪频率的增大先增大后减小,二者均在  $0.8 \text{ rad/s}$  附近取得峰值;附加质量力大小远大于其他

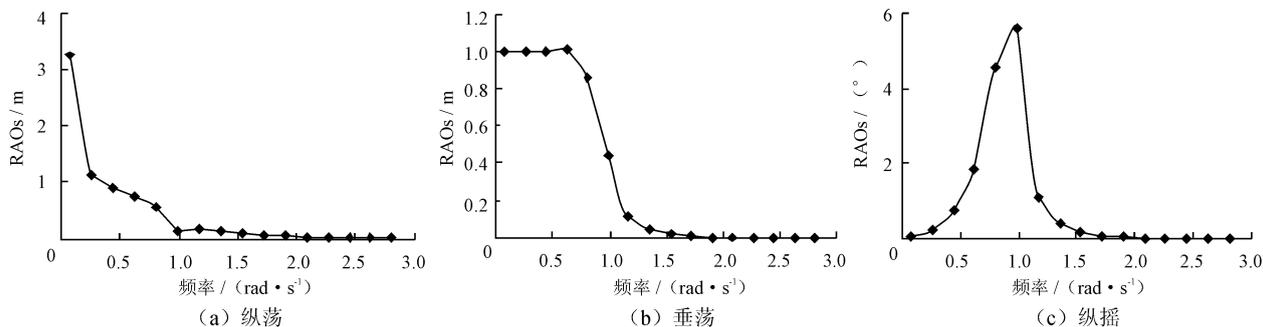


图 4 频域 RAOs

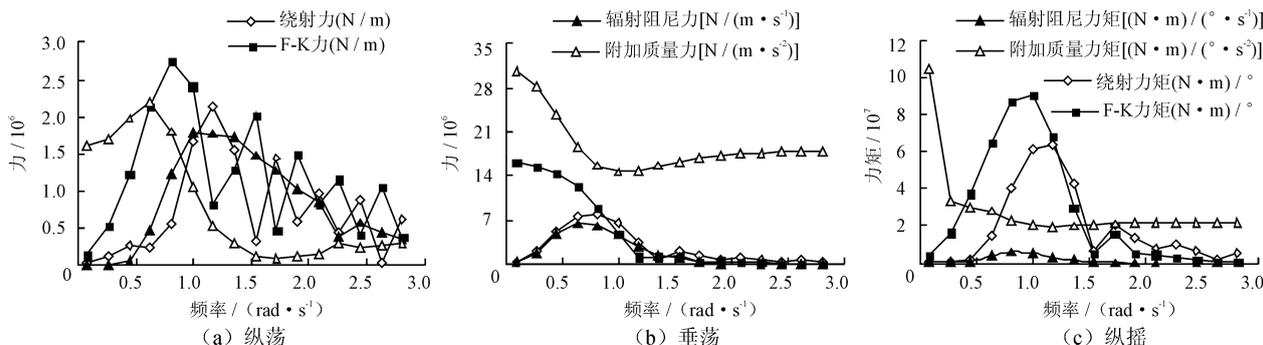


图 5 频域波浪力

3种波浪力。纵摇方向, F-K力矩和绕射力矩变化趋势相同, 随着波浪频率的增大先增大后减小, 二者均在1.0 rad/s附近取得峰值;  $f < 0.25$  rad/s时, 附加质量力矩随着频率增大迅速减小, 当 $f > 0.25$  rad/s时, 波浪频率对其影响很小; 与其他3种波浪力矩相比, 辐射阻尼力矩数值较小, 可以忽略不计。

### 3.2 Barge平台时域运动响应

3.2.1 RAOs时域运动响应 为对比漂浮式风力机Barge平台在仅考虑波浪载荷作用和风、浪、流载荷联合作用下RAOs运动响应, 本文列举了3种海况, 海况具体条件见表3。

Barge平台在仅考虑波浪载荷作用和风、浪、流载荷联合作用下的响应如图6所示, 本文仅列举Y3较恶劣海况下的时域运动响应。3种不同海况下Barge平台在纵荡、垂荡和纵摇方向运动峰值见表4。由图

6可知, 在纵荡、垂荡和纵摇方向, 不论是波浪单独作用还是风、浪、流联合作用, Barge平台均作往复运动, 且存在RAOs峰值。由表4可知, 随着海洋环境恶劣程度的加剧, Barge平台在纵荡、垂荡和纵摇方向上RAOs均增大, 即平台运动响应增大; 对比3种不同海况下纵荡、垂荡方向峰值可知, Barge平台纵荡方向RAOs均小于垂荡方向, 表明Barge平台在垂荡方向运动剧烈程度要大于纵荡方向。

表3 海况

海况	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
有义波高/m	3.2	8.0	11.2
跨零周期/s	6.35	10	11.9
海流速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	1	1.8	2.0
风速/( $m \cdot s^{-1}$ )	12	24	30

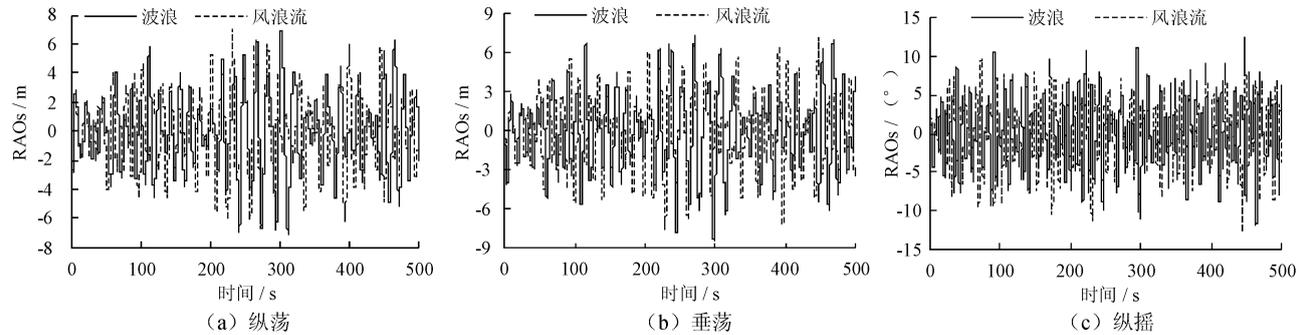


图6 时域RAOs

表4 不同海况下Barge平台时域运动响应幅值

海况方向	风、浪、流联合作用 RAOs			波浪单独作用 RAOs		
	最大值	最小值	方差	最大值	最小值	方差
$Y_1$ 纵荡	1.219	-1.272	1.55	1.229	-1.329	1.63
$Y_1$ 垂荡	1.828	-1.769	3.23	1.864	-1.719	3.21
$Y_1$ 纵摇	7.816	-8.333	65.20	7.809	-7.409	57.9
$Y_2$ 纵荡	4.357	-4.395	19.14	4.562	-4.483	20.45
$Y_2$ 垂荡	5.081	-5.43	27.62	5.132	-5.742	29.56
$Y_2$ 纵摇	10.552	-11.444	121.00	11.612	-11.064	128.6
$Y_3$ 纵荡	7.132	-6.704	47.86	6.927	-7.151	49.5
$Y_3$ 垂荡	7.304	-7.683	56.20	7.372	-8.523	63.2
$Y_3$ 纵摇	12.562	-12.677	159.20	11.105	-11.798	131.1

注: 纵荡、垂荡单位为m; 纵摇单位为( $^{\circ}$ )。

3.2.2 实际响应 漂浮式风力机最直观的动态响应是在外界环境载荷的作用下的位置变化, 即平动位移和转动偏转角。Barge平台在风、浪、流联合作用下的位移或偏转角如图7所示。环境条件: 风速为18 m/s, 波浪有义波高为11.2 m, 跨零周期为15.5 s。因假定风、浪、流均垂直入射风力机风轮迎

风面, 故只需考虑纵荡、垂荡和纵摇方向实际响应。由图7可知, Barge平台纵荡方向实际位移最大接近50 m, 且在35 m左右波动; 垂荡方向, 位移峰值为20 m, 且在平衡位置附近上下波动; 纵摇方向转动角度峰值为 $7^{\circ}$ 。

3.2.3 风对Barge平台作用 为研究风载荷对Barge平台作用, 环境条件设定如下: 波浪有义波高为5 m, 跨零周期为15.6 s, 对应风速分别为3、6、9、12、15、18、21、24 m/s, 海流速度为1 m/s, 且风、浪、流均垂直入射风力机风轮迎风面。图8为Barge平台纵荡位移随波浪的变化。其中, 纵荡位移取500 s内平均值。因Barge平台在垂荡、纵摇方向在平衡位置附近做往复运动, 故不作平均值讨论。由图8可知, Barge平台纵荡位移随着风速的增大先增大再减小, 在额定风速附近取得最大值, 峰值大小为33 m左右。

3.2.4 波浪对Barge平台作用 为研究波浪载荷对Barge平台作用, 环境条件设定如下: 风速为10 m/s, 海流速度为1 m/s, 对应波浪有义波高分别为

1、2、3、4、5、6、7、9、11.2 m,且风、浪、流均垂直入射风力机风轮迎风面。图 9 为 Barge 平台纵荡位移随波浪高度的变化,纵荡位移取 500 s 内平均值。由图 9 可知,Barge 平台纵荡位移几乎不随着波浪高度的变化而变化,且纵荡位移稳定在 36 m 左右。

3.2.5 海流对 Barge 平台作用 为研究海流载荷对 Barge 平台作用,环境条件设定如下:风速为 12

m/s,波浪有义波高为 9 m,谱峰周期为 14.5 s,对应海流速度分别为 0.5、0.8、1.1、1.4、1.7、2 m/s,且风、浪、流均垂直入射风力机风轮迎风面。图 10 为 Barge 平台纵荡位移随海流的变化,纵荡位移取 500 s 内平均值。由图 10 可知,纵荡位移随着海流速度的增大逐渐增大,且受海流影响较大。

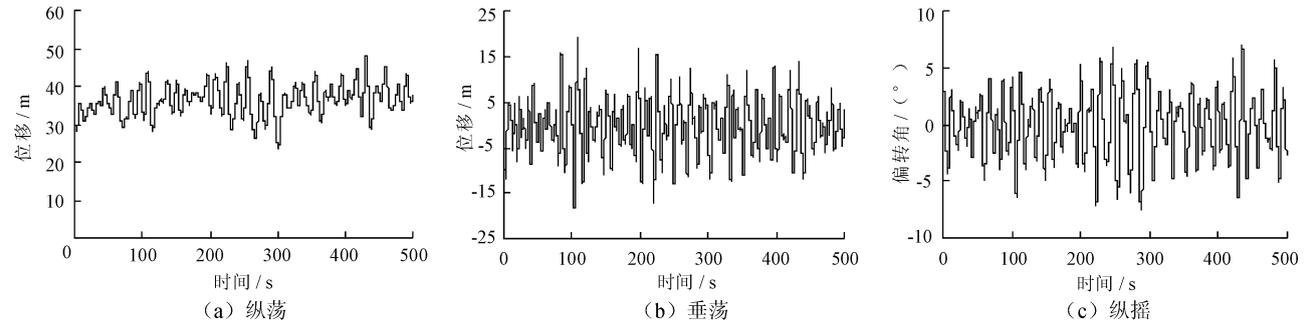


图 7 平台实际响应

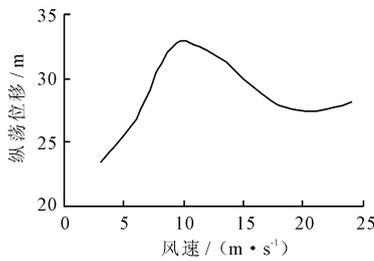


图 8 风作用

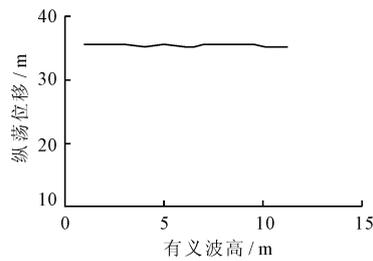


图 9 波浪作用

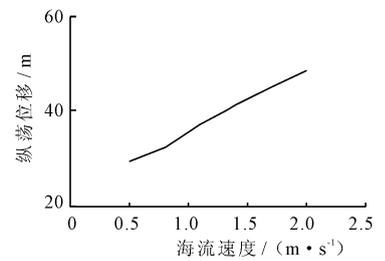


图 10 海流作用

## 4 结 语

本文通过调用 AQWA - LINE、AQWA - NAUT 模块,通过辐射和衍射理论,并结合有限元方法,对基于 ITI Energy Barge 平台的 NREL 5MW 风力机进行计算分析,得出结论如下:

(1)平台运动响应主要集中在低频波浪阶段,当  $f > 1.0$  rad/s 时,各自由度 RAOs 逐渐趋于零;

(2)平台在纵荡、垂荡和纵摇方向所受波浪力或力矩均随着波浪频率的增大呈现增体减小的趋势,不同自由度,各波浪力大小及变化趋势不同;

(3)随着海洋环境恶劣程度的加剧,平台 RAOs 也逐渐增大,即纵荡、垂荡方向上位移增大,纵摇方向上偏转角增大;

(4)Barge 平台 RAOs 垂荡方向剧烈程度大于纵荡方向;

(5)风、波浪对 Barge 平台纵荡位移影响远小于海流作用影响。

## 参考文献:

- [1] 郑崇伟,胡秋良,苏勤,等. 国内外海上风能资源研究进展[J]. 海洋开发与管理,2014(6):25-32.
- [2] Junginger M, Faaij A, Turkenburg W C. Cost reduction prospects for offshore wind farms[J]. Wind Engineering, 2004, 28(1): 97-118.
- [3] U. S. Department of Energy. 20% wind energy by 2030: Increasing wind energy's contribution to U. S. electricity supply[M]. Memphis: Books Limited Liability Company, 2008.
- [4] 苏晓. 2012 年全球海上风电发展统计与分析[J]. 风能,2013(6):30-35.
- [5] 高坤,李春,高伟,等. 新型海上风力发电及其关键技术研究[J]. 能源研究与信息,2010,26(2):110-116+105.
- [6] Musial W, Butterfield S, Boone A. Feasibility of floating platform systems for wind turbines [R]. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [7] 高伟,李春,刘全. 深海漂浮式风力机的概念设计与气动-水动力耦合特性评述[J]. 能源研究与信息,2011, 27(3):168-173.

量减小的趋势,起到了作用。

通过 S1 和 S2 断面流量对比可知,南槽涨落潮分流比均大于北槽涨落潮分流比,且随着工程的实施,其差值越大。这与南导堤阻挡南槽张潮流的进入和工程减小了北槽容积不开。

## 5 结 语

本文建立了长江口深水航道模型,通过 1997、2001、2005、2009 年 4 个不同时间段典型断面涨落潮流量计算,分析了长江口深水航道工程实施期间涨落潮流量的变化情况,说明了工程实施的影响:

一期工程南导堤的建设减小了北槽中段的涨落潮量,起到阻挡九段沙进入北槽的涨落潮流的作用,且分流口的建设使航道上段落潮流量增大,落潮流进入航道更为顺畅。

二期工程使北槽航道落潮流量均减小,可能是导致航道出现回淤的水动力因素,且导堤延伸至北槽下段,对该段落潮流量产生了影响。

三期工程一定程度上减缓了北槽落潮流量减小的趋势。

深水航道工程的实施使北槽涨落潮分流比趋于减小,航道落潮流量的减小可能是出现严重回淤的水动力原因。

### 参考文献:

[1] 金 镠,谈泽炜,李文正,等. 长江口深水航道的回淤问题

[J]. 中国港湾建设,2003(3):5-9.

[2] 金 镠,虞志英,何 青. 深水航道的河势控制和航道回淤问题[J]. 中国港湾建设,2012(1):1-8.

[3] 金 镠,虞志英,何 青. 滩槽泥沙交换对长江口北槽深水航道回淤影响的分析[J]. 水运工程,2013(1):101-108.

[4] 刘 杰,徐志杨,赵德招,等. 长江口深水航道(一、二期工程)回淤变化[J]. 泥沙研究,2009(2):22-28.

[5] 刘 杰,程海峰,赵德招. 长江口 12.5m 深水航道回淤特征[J]. 水科学进展,2014,25(3):358-365.

[6] Ge Jianzhong. Multi-scale FVCOM model system for the East China Sea and Changjiang Estuary and its applications [D]. Shanghai:East China Normal University, 2010.

[7] 范中亚. 长江口深水航道整治工程对流场、盐度场影响的数值模拟研究[D]. 上海:华东师范大学,2011.

[8] Kuang Cuiping, Chen Wei, Gu Jie, et al. Comprehensive analysis on the sediment siltation in the upper reach of the deepwater navigation channel in the Yangtze Estuary [J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2014, 26(2):299-308.

[9] 白玉川,顾元棣,邢焕政. 水流泥沙水质数学模型理论及应用[M]. 天津:天津大学出版社,2005.

[10] 刘 杰. 长江口深水航道河床演变与航道回淤研究[D]. 上海:华东师范大学,2008.

[11] 李孟国,郑敬云. 中国海域潮汐预报软件 Chinatide 的应用[J]. 水道港口,2007,28(1):65-68.

[12] 冯凌旋. 长江口南北槽分流口演变及其对北槽深水航道整治工程的响应[D]. 上海:华东师范大学,2010.

(上接第 155 页)

[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] Vrijhuizen W J M J. Design of a wind and wave power barge [D]. Glasgow: Universities of Glasgow and Strathclyde, 2006.

[10] Wayman E N. Coupled dynamics and economic analysis of floating wind turbine systems [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2004.

[11] Wayman E N, Sclavounos P D, Butterfield S, et al. Coupled dynamic modeling of floating wind turbine systems [C]// Offshore Technology Conference, Houston, 2006.

[12] Matha D. Model development and loads analysis of an offshore wind turbine on a tension leg platform, with a comparison to other floating turbine concepts [R]. Golden, CO, USA: National Renewable Energy Laboratory, 2009.

[13] 唐友刚,沈国光,刘丽琴. 海洋工程结构动力学[M].

天津:天津大学出版社,2008:14-15.

[14] 中国船级社. 海上移动平台入级规范[S]. 北京:人民交通出版社,2012:24-25.

[15] Jonkman J M, Matha D. A quantitative comparison of the response of three floating platforms [C]// European Offshore Wind 2009 Conference and Exhibition, Stockholm, 2009.

[16] Robertson A N, Jonkman J M. Loads analysis of several offshore floating wind turbine concepts [C]// The International Society of Offshore and Polar Engineers 2011 Conference, Hawaii, 2011.

[17] 李文魁,张博,田蔚风,等. 一种波浪中的船舶动力定位运动建模方法研究[J]. 仪表机械学报,2007,28(6):1051-1054.

[18] 江 红,赵忠华,张炎华. 船舶振荡运动仿真[J]. 上海交通大学学报,2001,35(10):1566-1569.