

风波流多环境海上漂浮式风力机张力腿平台动态特性

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: 平台结构是漂浮式海上风力机安全运行的基础保障。采用边界元并结合多体动力学方法, 分析了张力腿 (Tension Leg Platform, TLP) 漂浮式风力机平台结构, 研究了平台结构在频域和时域运动响应变化及漂浮式平台在多种不同海洋环境条件下风、波、流联合作用, 与波浪载荷独立作用时的运动响应进行了比较, 得出平台结构在时域中的动力响应及张力腿结构张力变化情况。结果表明: 漂浮式平台在频域变化范围内, 运动响应主要集中在低频部分, 绕射力对漂浮式海上风力机 TLP 平台的作用力不能忽略; 海洋环境载荷较小时, 风、波、流联合作用比只有波浪运动响应强烈, 而随着海洋环境载荷增强, 波浪作用越来越大, 对漂浮式平台运动有着重要影响; 风、波、流联合作用运动响应标准差大于只有波浪作用, 平台偏离平衡位置更加剧烈; 张力腿最大张力随着海洋环境载荷增强逐渐增大, 每根张力腿张力标准差都是以相同的趋势递增。研究结果对海上张力腿平台结构设计与优化具有很高的参考价值。

关键词: 海上风力机; 平台; 运动响应; 环境条件; 风、波和流

中图分类号: TV31, TK83

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2014)02-0091-07

Dynamic characteristics of wind turbine tension leg platform for multi-environment of wind wave current above sea

GAO Yuewen, LI Chun, YE Zhou, CHENG Xin

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

Abstract: Platform structure is the basic guarantee for safety operation of offshore wind turbine. Based on the finite element method and combined with multi-body dynamics, the paper analyzed the platform structure of offshore wind turbine of tension leg platform, and analyzed the combined action of wind and wave current of tension leg platform in different sea states in the motion response of frequency domain and time domain. Through the comparison of motion response in only role of wave load, it obtained the situation of tension change of TLP in time domain. The results show that the motion response of TLP in frequency domain focuses on low frequency, the effect of diffraction force on offshore wind turbine tension leg platform is not ignored; when ocean environment load is small, response in combined wind and wave current is greater than that in only wave; but along with the increase of environment load, the role of wave force is greater; the maximum tension of TLP increases with the increase of ocean environment load, and the standard deviation of tensile force every TLP also increases with the same trend. The result has high reference value for design and optimization of offshore tension leg platform structural.

Key words: offshore wind turbine; platform; motion response; environment condition; wind, wave and current

由陆地向海洋业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]。支撑结构是保证海上风力机安全运行的基础。因此, 对支撑结构的形式及其特点研究自然成为海上

风力机设计的重要组成部分。张力腿(TLP)浮式风力机是由垂直系泊的顺立式浮式平台结构支撑的风力发电机, 能够在陆上安装和调试, 从而避免了海上安装的各种难题, 其最显著的特点是运动性能好, 抗

收稿日期: 2013-09-29; 修回日期: 2013-10-06

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

作者简介: 高月文(1989-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向: 海上漂浮式风力机。

恶劣环境能力强,且造价低。国内外众多学者也对 TLP 开展了大量的研究,主要集中在 TLP 环境载荷及其耦合作用、平台结构形式和平台动力响应等方面。Donley 等^[2]对受到波浪、海流共同作用的 TLP 进行了随机响应分析。Ahmad S 等^[3]研究了 TLP 在随机波浪谱下的耦合响应,考虑了水动拖曳力,可变张力,可变浸水、长期偏移和波动风载荷耦合效果引起的各种非线性效应。Vickery^[4]从理论和实验两方面研究了风和波浪对 TLP 的耦合作用。Tabeshpour 等^[5]在时域和频域中对 TLP 进行了非线性动态分析,随机波的时间历程基于 PM 谱,随机波以任意浪向角作用在结构上。Jain A K^[6]采用确定性的一阶波浪力来分析 TLP 的动态响应,考虑 6 自由度的耦合、非线性的张力变化及水动力的影响。胡志敏等^[7]对波浪载荷的辐射效应进行了深入研究,并以附加质量、附加阻尼等水动力参数的形式计算了辐射效应对 TLP 的载荷影响。曾晓辉等^[8-9]考虑了多种非线性因素对 TLP 动力响应的影响,推导了 TLP 的 6 自由度非线性运动方程,并对平台在有限振幅和有限位移条件下的动力响应分别进行了研究。Yang 等^[10]对位于墨西哥湾的延伸式 TLP 平台在极端海况下张力腿断开时瞬态效应进行了数值模拟。由此可见,对张力腿平台的运动响应大部分研究都是基于时域分析,不仅如此,上述研究中的波浪荷载均采用改进的 Morison 公式,而 TLP 立柱属于大直径结构,因此采用简化 Morison 公式处理必然会引起张力腿平台外部波浪荷载的计算误差,且大部分的 TLP 平台研究都集中在海洋船舶的海工平台上,而风力机的 TLP 平台研究甚少。因此本文基于多体动力学和边界元理论,研究辐射和绕射作用下波浪对漂浮式风力机平台的运动响应和系泊的作用力。

1 海洋结构水动力载荷

漂浮式动力平台在规则波的运动方程可以表示为:

$$(M + A)\ddot{x} + (B_w + B_m)\dot{x} + (K_w + K_t + K_m)x = F_{hys} + F_{wavel} + F_{waveD} + F_{wavedift} + F_{wind} + F_{current} \quad (1)$$

式中: M 和 A 分别为结构质量和附加质量矩阵; B_w 和 B_m 分别为阻尼和系泊系统矩阵; K_w 为水动力回复刚度; K_t 和 K_m 分别为张力腿刚度和锚缆刚度矩阵; F_{hys} 和 F_{wind} 分别为静水力和风载荷力; F_{wavel} 和 F_{waveD} 分别为入射波佛劳得 - 克利洛夫力 (Froude-Krylov Force, 简称 F-K 力) 和绕射波浪力; $F_{wavedift}$ 和 $F_{current}$ 分别为波浪慢漂力和海流作用力。

动力方程的求解过程见图 1。

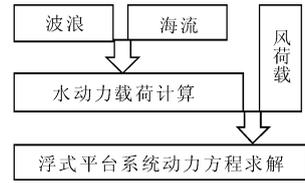


图 1 计算程序示意图

1.1 波浪载荷

主要波浪载荷积分表达式:

$$F_{hys} = - \int_S P \vec{N} dS \quad (2)$$

$$F_{wavelj} + F_{waveDj} = - \int_S i\omega\rho q_l n_j dS - \int_S i\omega\rho q_D n_j dS \quad (3)$$

$$F_{wavedift} = - \oint_{WL} 0.5\rho g \zeta_r^2 \vec{n} dl + \iint_{S_0} 0.5\rho |\nabla\varphi|^2 \vec{n} dS + \iint_{S_0} \rho \left| X \nabla \frac{\partial\varphi}{\partial t} \right|^2 \vec{n} dS + M_g R \ddot{X}_g \quad (4)$$

式中: P 为静水压力; ω 为波浪频率; \vec{N} 和 S 分别为表面外法线方向和湿表面面积; q_l 和 q_D 分别为入射波势和绕射波势; ρ 和 n_j 分别为水密度和法向; WL 为水线面; ζ_r 和 S_0 分别为相对波表面和结构湿表面; M_g 和 R 分别为结构质量和结构旋转矩阵; \ddot{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对数分布。

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,并认为其对平台的作用力仅为拖曳力:

$$f = \frac{1}{2} \rho C_D A U_0^2 \quad (5)$$

式中: ρ 为海水密度 (1025 kg/m³); A 为结构物的等效面积, m²; U_0 为海流的速度, m/s; C_D 为阻力系数。

1.3 风载荷

对于海上浮式结构物,风速的变化值对其产生重要影响,一般不能忽略,甚至有时风速引起的波浪自由表面的起伏变化也需计入。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 平均风速,重现期为 100 年,参考高度为海平面以上 10 m 处。其他高度处的平均风速通过修正参考点的风速获得,具体计算式如下:

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

式中: z 为静水面以上的垂向高度, m ; z_R 为平均风速的参考点, 10 m ; $U_w(h, z_R)$ 为参考点处的平均风速, m/s ; $U_w(h, z)$ 为静水面高度为 z 处的平均风速, m/s 。

2 风力机参数及 TLP 参数

本文采用传统的张力腿平台结构形式, 平台结构呈对称分布, 风力机采用 NREL 5MW 风力机设计参数, 主要参数见表 1 及图 2^[11]。

表 1 张力腿平台基本参数

$m, MW, m/s, kg, r/min, kg \cdot m^2, N$

参数	数值	参数	数值
叶片数	3	切入风速	3
叶片长度	61.5	切出风速	25
风轮直径	126	额定转速	12.1
额定功率	5	切入转速	6.9
额定风速	11.4	传动方式	多级齿轮箱
水深	200	横摇转动惯量	5.716×10^8
直径	18	纵摇转动惯量	5.716×10^8
吃水	47.89	首摇转动惯量	3.614×10^8
质量	8.6×10^6	系泊数目	4
质心位置	40.61	导缆孔和锚的深度	47.89, 200
系泊长度	151.7	刚度	1.5×10^9

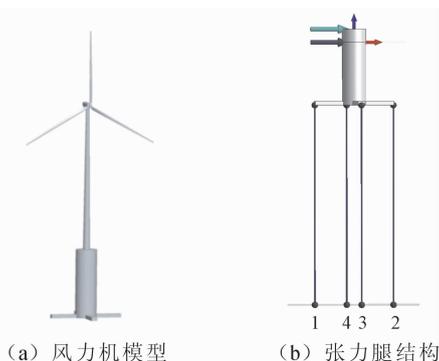


图 2 漂浮式风力机模型及张力腿结构

3 模型水动力参数计算

3.1 漂浮式风力机 TLP 平台频域运动响应

波浪作用下平台 6 自由度方向的运动响应可由幅值响应算子 (Response Amplitude Operator, RAO) 描述, 其本质是一个由波浪激励到浮体运动的传递函数, 定义为:

$$RAO = \eta_i / \xi \quad (6)$$

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

一般认为海洋中波浪变化是一个具有零均值、

各态历经的高斯随机过程, 平台对任何波浪的响应是这个波浪波幅的线性函数并与它对其他波浪成分的响应独立无关^[12], 因此, 利用平台各自由度的运动 RAO 得到在每一波浪频率下的平台响应, 然后再叠加求和, 最终可得到在多个波浪作用下平台运动方程的解。在波浪作用下, 平台运动响应见图 3。纵荡、垂荡和纵摇方向, 其运动响应均随频率变化, 且存在峰值频率, 其中平动的纵荡、垂荡方向的响应峰值量级大致相同, 但峰值频率差异较大, 两者在高频时 (纵荡 $f > 1.0\text{ rad/s}$; 垂荡 $f > 0.75\text{ rad/s}$) 响应趋于零, 响应主要集中于低频区。对于纵摇运动响应主要集中于 $0.5 \sim 0.75\text{ rad/s}$, 且存在峰值频率, 在低频 ($f < 0.5\text{ rad/s}$) 和低频 ($f > 1.0\text{ rad/s}$) 运动响应趋于零。

F-K 力由未扰动波浪下的动态压力场引起, 为主要的波浪载荷。它和绕射力共同组成了在规则波下作用在浮体上的非粘性力。在波浪作用下, 平台受到的 K-F 力见图 4。纵荡和纵摇方向, F-K 力作用强度随频率变化十分相似, 呈现出近抛物线变化: 随频率增加 F-K 力作用逐渐增强, 达到峰值后, 又随频率增加逐渐下降。对于垂荡 F-K 力作用随频率增加逐渐减弱, 当 $f > 0.75\text{ rad/s}$ 作用力趋于 0。

当浮体尺度与波浪波长相比较小时 (物体特征尺寸大于波长的 20%), 入射波浪在遇到静止浮体时, 在其表面产生一个向外散射的波浪, 从而与入射波浪叠加形成新的波浪场, 这种现象称之为浮体的绕射现象, 而静止浮体受到绕射波浪场的作用称之为绕射力。它实际上是对“佛劳得-克利洛夫”假定的修正, 当物体的尺寸相对于波长较小时 (物体特征尺寸小于波长的 20%), 绕射力可忽略不计。波浪作用下 TLP 平台受到的绕射力见图 5。纵荡和纵摇方向, 运动响应在 0.75 rad/s 附近时达到最大值, 而垂荡运动响应在 0.5 rad/s 附近取得最大值, 从图 5 可以看出, 绕射力对漂浮式海上风力机 TLP 平台的作用力不可以忽略, 其数量级与 F-K 力作用相同, 因此在计算中必须考虑。

3.2 漂浮式风力机 TLP 平台时域运动响应

3.2.1 不同海洋环境张力腿平台运动响应 比较漂浮式海上风力机平台在仅考虑波浪载荷作用与风波浪复杂载荷联合作用下运动响应变化与区别情况, 本文采用了见表 2 中的 5 种海洋环境。

图 6 为 H3 和 H9 海洋环境下纵荡、垂荡和纵摇方向运动响应在仅有波浪和风、波、流联合作用下运

动响应对比情况,因横荡、横摇和首摇作用很小,可以忽略不计,图表中没有列举。从图中可以看出,在H3海洋环境条件下,风浪流联合作用明显比只有波浪作用强烈,尤其在纵荡和垂荡方向。而随着海洋环境载荷的增强,如在H9海洋环境下,风、波、流联合作用与仅有波浪作用相比,漂浮式平台运动响应两者之间变化微弱,表明在恶劣海洋环境下,波浪作用在漂浮式平台中是主要作用。

表3为不同海洋环境下漂浮式平台运动响应,从表中可以看出,在仅有波浪作用和风波流联合作用下,平台运动响应都随着海洋环境载荷增强而增

大,且运动响应值的标准差也增大。在风波流联合作用下,平台运动响应标准差比只有波浪作用大,说明平台运动偏离平衡位置明显。

表2 不同海洋环境参数

海洋环境	m, s, m/s				
	H3	H4	H5	H7	H9
有义波高	3.00	4.00	5.00	6.90	8.80
波峰周期	8.30	9.60	10.70	12.6	14.20
水平面处海流速度	1.08	1.27	1.46	1.82	2.18
100m水深处海流速度	0.96	1.13	1.31	1.63	1.95
水平面上10m处风速	12.60	15.40	18.30	23.70	29.10

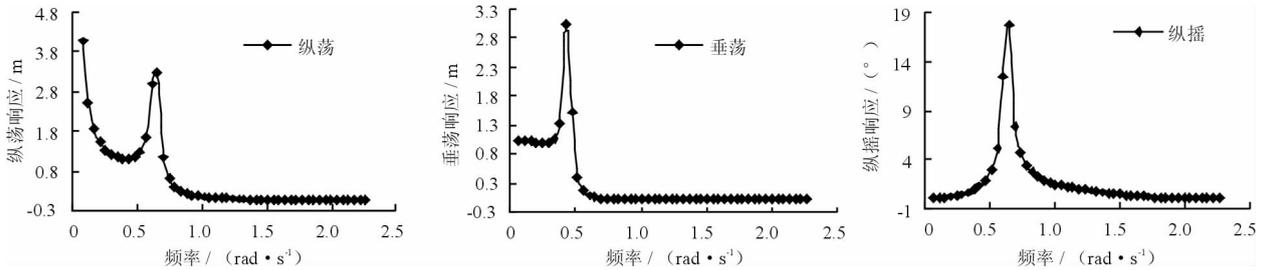


图3 TLP平台频域运动响应

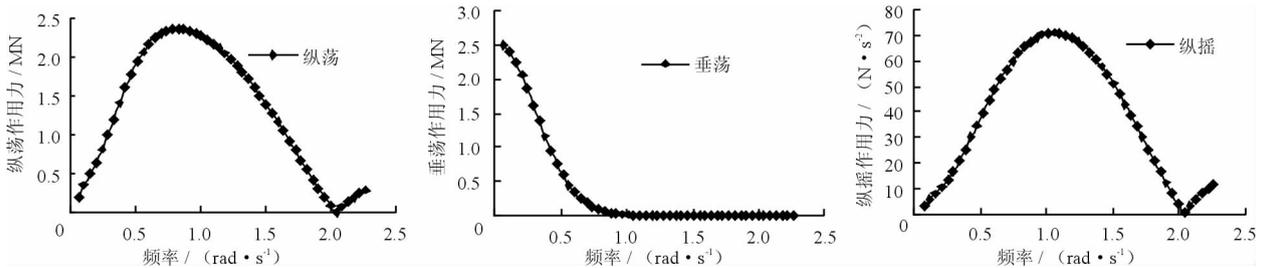


图4 TLP平台运动F-K力

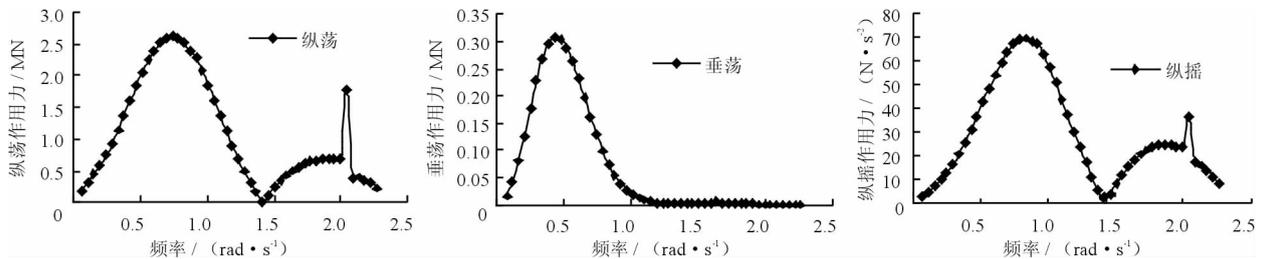


图5 TLP平台运动绕射力

3.2.2 不同入射方向张力腿平台运动响应 图7为45°入射时张力腿平台在H9海洋环境下的纵荡、横荡、垂荡及横摇、纵摇和首摇方向运动响应在仅有波浪和风波流联合作用下运动响应对比情况,45°时平台在横荡方向拥有和纵荡方向相同数量级的运动响应,且波浪作用力在风波流作用中很明显;45°时平台在横摇方向拥有和纵摇方向相同数量级的运动响应,且波浪作用力在风波流作用中很明显,而首摇方向作用力依然很小,可以忽略不计。

表4为不同入射方向下漂浮式平台运动响应,从表中可以看出,在仅有波浪作用和风波流联合作用下,平台垂荡方向的最小、最大、平均响应及标准差在0°,22.5°和45°时相差微小,首摇方向几乎都为0,纵荡方向运动响应随着角度增加而减小,但相应的横荡方向响应在逐渐增大,相似地,纵摇方向运动响应随着角度增加而减小,但相应的横摇方向响应在逐渐增大。

表 3 不同海洋环境下漂浮式平台运动响应

m, (°)

海洋环境	自由度方向	波浪单独作用				风、波、流联合作用			
		最小响应	最大响应	平均响应	标准差	最小响应	最大响应	平均响应	标准差
H3	纵荡	-2.732	2.990	0.0026	1.104	-4.800	4.567	0.0023	1.089
	垂荡	-1.473	1.469	0.0016	0.501	-2.376	2.266	0.0006	0.406
	纵摇	-13.669	13.640	-0.0097	5.009	-13.889	13.594	-0.0085	5.038
H4	纵荡	-4.120	4.197	-0.0010	1.456	-4.8000	4.576	0.0045	1.389
	垂荡	-2.513	2.557	-0.0031	0.994	-2.376	2.266	-0.0006	0.845
	纵摇	-18.020	18.342	-0.0078	6.111	-20.832	20.918	-0.0125	-0.0125
H5	纵荡	-5.405	4.794	0.0002	1.661	-5.021	4.729	0.0056	1.733
	垂荡	-5.674	5.897	-0.0023	1.504	-4.890	4.816	-0.0035	1.332
	纵摇	-16.385	16.176	0.0121	6.252	-20.324	20.936	-0.0140	7.005
H7	纵荡	-7.106	6.76	0.0086	2.190	-6.839	6.798	0.0024	2.248
	垂荡	-5.554	5.839	-0.0030	2.172	-4.911	5.194	-0.0039	2.134
	纵摇	-20.296	21.386	-0.0153	6.751	-21.512	21.721	-0.0137	7.776
H9	纵荡	-7.166	8.636	0.0073	2.759	-8.799	8.700	0.0022	2.719
	垂荡	-7.567	7.486	-0.0092	2.653	-7.054	7.188	-0.0226	2.772
	纵摇	-20.950	19.077	-0.0102	6.908	-24.223	24.875	-0.0172	7.946

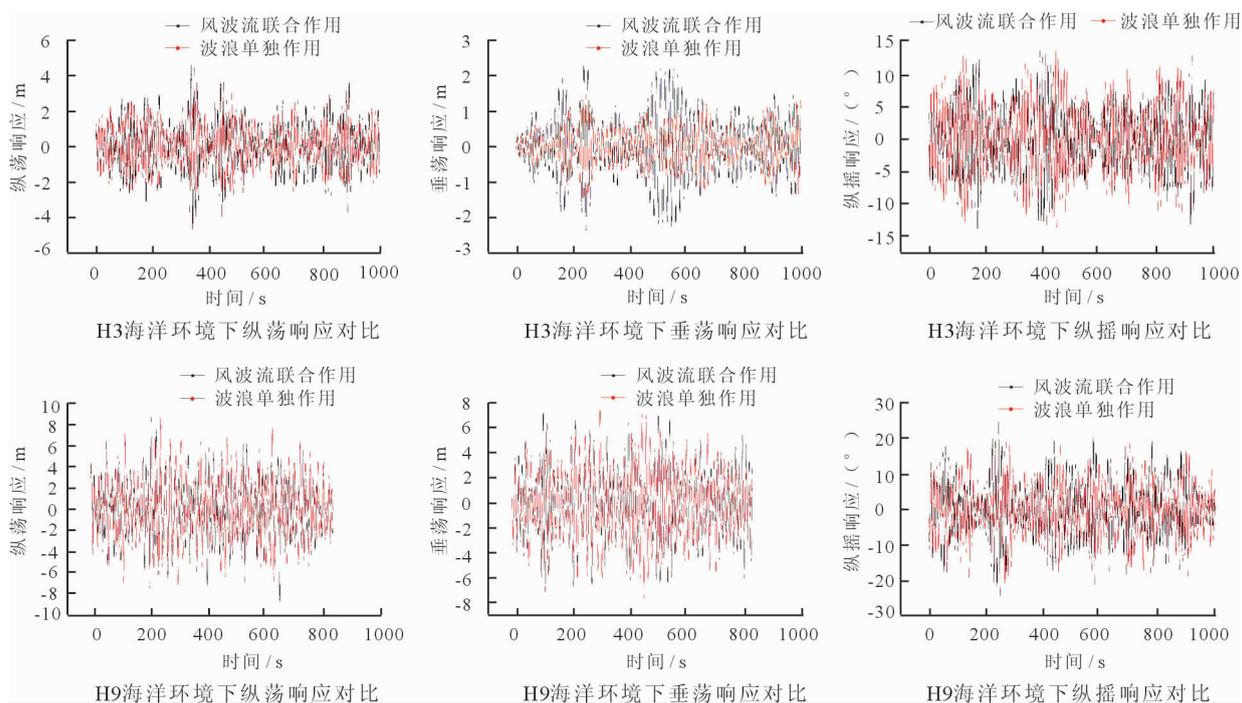


图 6 H3 和 H9 海洋环境条件下平台时域运动响应

3.2.3 张力腿平台系泊张力运动响应 图 8 为张力腿平台 1 和 3 号张力腿张力随时间变化图,因波浪流以 0°方向入射,1、2 号张力腿作用相似,3、4 号张力腿作用相似。从图中可以看出,H9 海洋环境下,张力腿作用明显强于 H3 海洋环境,1 号张力腿(即沿着入射方向)因其受到风波流载荷作用强烈,所以张力腿张力值变化剧烈,而 3 号张力腿(即垂直入射方向),张力值变化缓慢。

张力腿结构在不同海洋环境下的动力响应见图

9,在荷载较小时(如 H3、H4),张力腿张力作用相近,图中显示为重合在一起。图 9(a)为平台运动时的最大张力,受力远小于设计允许张力 8MN。随着海洋环境载荷增强,最大张力逐渐增大,但在 H7 环境下最大张力值比 H9 环境强烈。图 9(b)为平台受到张力值的标准差,从图中可以看出,5 中海洋环境条件下,每根张力腿张力标准差都是以相同的趋势递增。

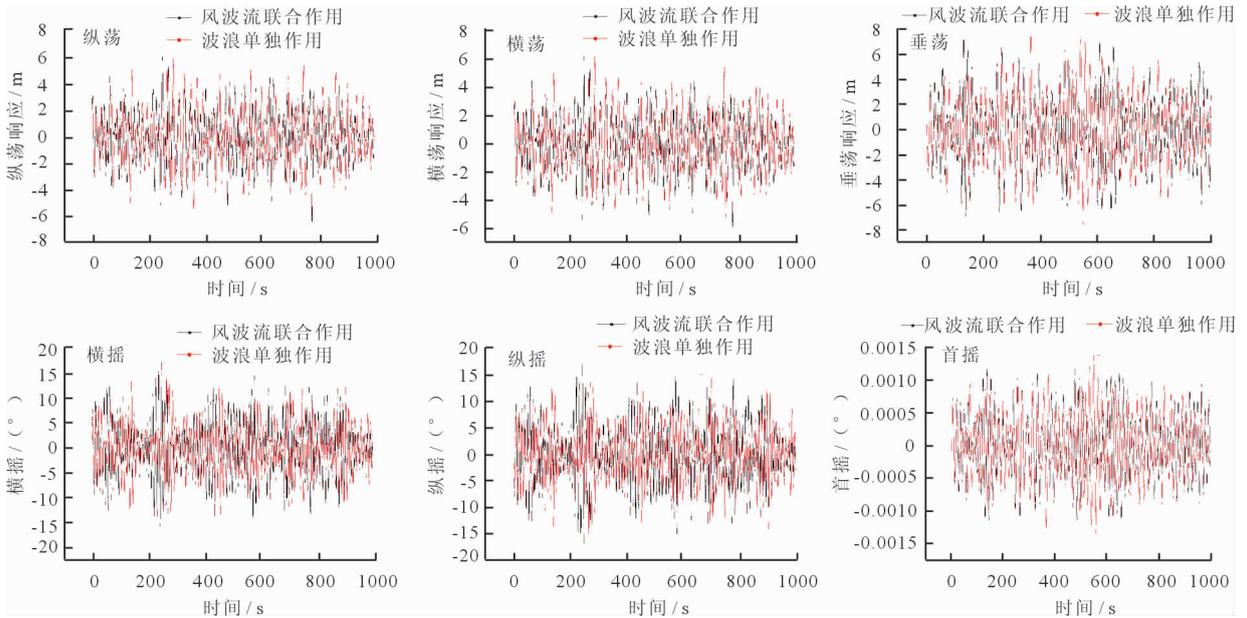


图7 45°入射平台时域运动响应

表4 不同入射方向下漂浮式平台运动响应

m, (°)

载荷方向	自由度方向	波浪单独作用				风、波、流联合作用			
		最小响应	最大响应	平均响应	标准差	最小响应	最大响应	平均响应	标准差
0°	纵荡	-7.166	8.636	0.0073	2.759	-8.799	8.700	0.0022	2.719
	横荡	-0.062	0.078	0.0000	0.019	-0.061	0.075	0.0000	0.016
	垂荡	-7.567	7.486	-0.0092	2.653	-7.054	7.188	-0.0226	2.772
	横摇	-0.261	0.191	0.0000	0.051	-0.191	0.227	0.0000	0.047
	纵摇	-20.950	19.077	-0.0102	6.908	-24.223	24.875	-0.0172	7.946
	首摇	0.000	0.000	0.0000	0.000	-0.001	0.001	0.0000	0.000
22.5°	纵荡	-6.202	7.340	0.0061	2.360	-7.577	7.387	0.0017	2.324
	横荡	-2.583	3.127	0.0026	0.965	-2.943	3.116	0.0008	0.955
	垂荡	-7.566	7.486	-0.0089	2.653	-7.053	7.193	-0.0222	2.773
	横摇	-6.690	7.085	0.0036	2.408	-8.931	8.622	0.0060	2.785
	纵摇	-18.013	16.376	-0.0083	5.911	-20.553	21.219	-0.0147	6.791
	首摇	-0.001	0.001	0.0000	0.000	-0.001	0.001	0.0000	0.000
45°	纵荡	-5.444	5.889	0.0054	1.957	-6.467	6.024	0.0015	1.924
	横荡	-5.204	6.196	0.0056	1.920	-5.958	6.210	0.0015	1.911
	垂荡	-7.570	7.487	-0.0091	2.653	-7.056	7.189	-0.0226	2.772
	横摇	-13.336	14.391	0.0082	4.805	-17.865	17.254	0.0118	5.572
	纵摇	-15.101	14.497	-0.0081	4.908	-16.798	17.031	-0.0122	5.632
	首摇	-0.001	0.001	0.0000	0.0000	-0.0010	0.001	0.0000	0.000

4 结 语

本文通过辐射和绕射理论,结合边界元方法,研究不同海洋环境条件下,分析了漂浮式风力机张力腿型平台在风波流联合作用下的运动响应和张力的变化,由以上分析,可得出以下结论:

(1) 漂浮式平台在频域变化范围内,运动响应

主要集中在低频部分,F-K力在垂荡和纵摇方向集中在0.5~1.5 rad/s之间,垂荡方向在低频下F-K力作用明显,绕射力对漂浮式海上风力机TLP平台的作用力不可以忽略。

(2) 海洋环境载荷较小时,风波流联合作用比只有波浪运动响应强烈,而随着海洋环境载荷增强,波浪作用越来越大,对漂浮式平台运动有着重要影响。

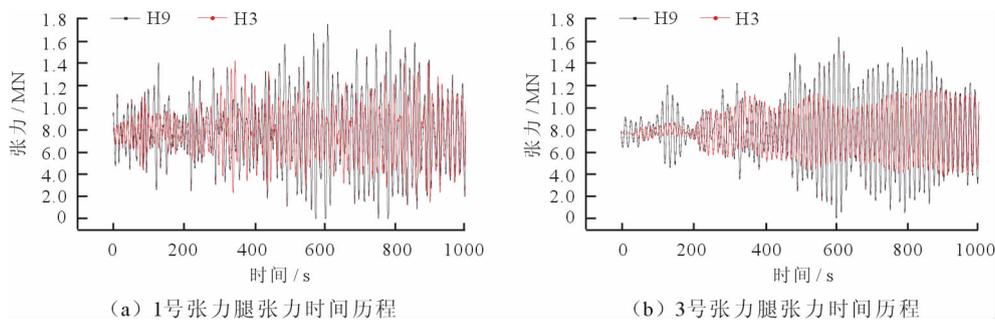


图8 张力腿张力变化

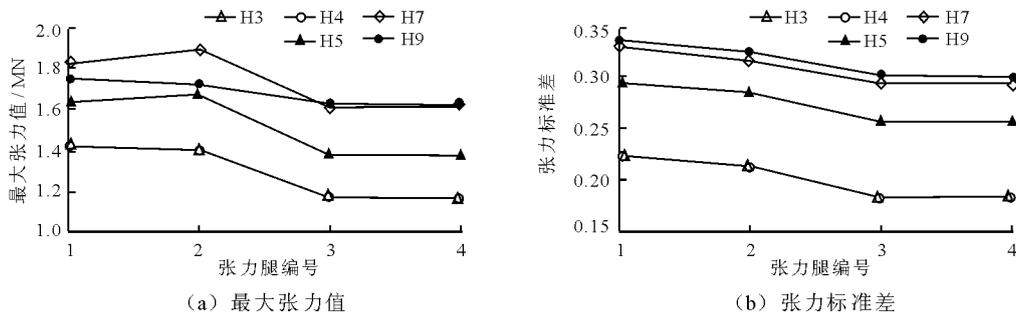


图9 不同海洋环境下平台张力比较

(3) 运动响应随着海洋环境载荷增强而增加,且运动响应标准差也增加。风波浪联合作用运动响应标准差大于只有波浪作用,平台偏离平衡位置运动更加剧烈。

(4) 在仅有波浪和风波浪联合作用下,平台垂荡方向的最小、最大、平均响应及标准差在 0° , 22.5° 和 45° 时相差微小,首摇方向几乎都为 0 ,纵荡和纵摇方向运动响应随着角度增加而减小,但相应的横荡和横摇方向响应在逐渐增大,

(5) 张力腿最大张力随着海洋环境载荷增强逐渐增大,每根张力腿张力标准差都是以相同的趋势递增。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Donley M G, Spanos P D. Stochastic response of a tension leg platform to viscous drift forces[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering,1991,133(2):148-155.
- [3] Ahmad S, Islam N, Ali A. Wind-induced response of a tension leg platform[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,1997,72:225-240.
- [4] Vickery P J. Wind-induced response of tension leg plat-

form; theory and experiment[J]. Journal of Structural Engineering,1995,121(4):651-663.

- [5] Tabeshpour M R, Golafshani A A, Seif M S. Comprehensive study on the result of tension leg platform response in random sea[J]. Journal of Zhejiang University: SCIENCE A,2006,7(8):1305-1317.
- [6] Jain A K. Nonlinear coupled response of offshore tension leg platforms to regular wave forces[J]. Ocean Engineering,1997,24(7):557-592.
- [7] 胡志敏,董艳秋,张建民. 张力腿平台水动力参数计算[J]. 海洋工程,2002,20(3):14-22.
- [8] 曾晓辉,沈晓鹏,刘洋,等. 考虑多种非线性因素的张力腿平台动力响应[J]. 海洋工程,2006,24(2):82-88.
- [9] 曾晓辉,刘洋,沈晓鹏,等. 有限位移下张力腿平台的非线性动力响应[J]. 工程力学,2007,24(3):179-184+53.
- [10] Chan K Yang, Kim M H. Transient effects of tendon disconnection of a TLP by hull-tendon-riser coupled dynamic analysis[J]. Ocean Engineering,2010,37(8-9):667-677.
- [11] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5 MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, 2009.
- [12] 江红,赵忠华,张华. 船舶振荡运动仿真[J]. 上海交通大学学报,2001,35(10):1569-1572.