

海洋油气开采张力腿平台的水动力性能

郭霆¹, 秦洪德¹, 李晓勇², 王翀¹

1. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001
2. 中国明阳风电集团有限公司, 中山 528400

摘要 基于三维势流理论, 在 API 风谱及 JONSWAP 波浪谱环境条件下, 通过计算分析, 研究了海洋油气开采张力腿平台的水动力性能。结果表明, 张力腿平台的水平面外运动受到的波浪载荷, 随着波浪频率的增大呈现快速下降趋势; 垂荡、横摇及纵摇运动响应在波浪频率为 0.4 rad/s 时达到峰值, 且垂荡运动位移不超过工作水深的 5%, 摇角不超过 5°, 体现了张力腿平台半刚性的运动特点; 二阶差频波浪载荷作用于张力腿平台的 y 方向力约为 x 方向力的 4 倍, 与一阶波浪载荷相比, 二阶差频波浪载荷相对较小, 但对张力腿平台的水平面内运动影响不容忽视。

关键词 海洋油气开采张力腿平台; 一阶波浪载荷; 一阶运动响应; 二阶差频波浪载荷

张力腿平台 (tension leg platform, TLP) 具有半刚性、半顺应性的特点, 运动响应性能优良、操作简易、经济性好, 在深海油气田开发中扮演重要角色。TLP 受到的动力响应分为波频响应、低频响应和高频响应三类^[1-3], 目前, 一阶波频响应^[4,5]研究已较为成熟, 理论研究与实际情况相吻合^[6,7]。在一阶波频响应研究的基础上, Taylor 等^[8]、Huang 等^[9]、Teng 等^[10]基于势流理论及摄动展开原理对二阶绕射问题进行了分析研究; 邹志利等^[11]对二阶自由表面非齐次项的表达式进行简化, 通过求解二阶速度势的傅里叶分量, 给出易于计算的二阶波浪载荷的精确公式; Adrezn 等^[12]、Chandrasekaran 等^[13,14]基于波浪谱法对随机波浪环境进行统计分析, 讨论了非线性耦合问题对 TLP 水动力的影响; Garrett^[15]运用细长杆理论结合纽曼方法对运动方程进行求解, 研究了细长杆的静水力和水动力问题; 刘玉标等^[16]通过 WAMIT 程序和编写数据处理程序, 研究了不同浪向角、不同波浪周期情况下平台的船摇问题; 吴应湘等^[17,18]研究了平台的流体动力学、结构力学问题。

本文根据一阶速度势对二阶波浪载荷的影响, 对张力腿平台进行表面压力积分, 同时以动量守恒定理作为边界条件进行二阶差频波浪载荷的求解, 运用频域计算程序分析张力腿附加刚度情况下张力腿平台的水动力响应。

1 自由表面波理论

假设流体为无黏性、无旋、不可压缩的理想流体, 将流场的分析求解转化为基于边界值对速度势的求解问题。

1.1 势流理论

计算坐标系 (x, y, z) 建立在静水面上, z 轴垂直向上。根据理想流体假设可知

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

式中, Φ 为速度势。

根据自由表面的流体动力学边界条件和运动学边界条件, 可得

$$\left\{ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} + 2 \nabla \Phi \nabla \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \right\}_{z=\eta} \quad (2)$$

$$\eta = \left\{ -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla \Phi \cdot \nabla \Phi \right) \right\}_{z=\eta} \quad (3)$$

式中, η 为自由表面波函数; g 为重力加速度; t 为时间。

速度势满足的海底边界条件为

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad z = -h \quad (4)$$

式中, h 为水深。

基于微幅波假设, 通过摄动展开法保留到二阶项, 则

$$\Phi = \varepsilon \phi^{(1)} + \varepsilon^2 \phi^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (5)$$

$$\eta = \varepsilon \eta^{(1)} + \varepsilon^2 \eta^{(2)} + O(\varepsilon^3) \quad (6)$$

式中, $\varepsilon = kA$ 为摄动系数, k 为波数, A 为波幅。

采用速度势来描述理想流体, 其满足 Laplace 方程以及各边界条件。入射波的速度势 Φ_i 和绕射势 Φ_r 可通过满足边界条件的拉普拉斯方程求得, 即

收稿日期: 2015-09-30; 修回日期: 2016-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51009037)

作者简介: 郭霆, 博士研究生, 研究方向为海洋工程领域浮式结构物水动力性能, 电子信箱: guoting@hrbeu.edu.cn; 秦洪德 (通信作者), 教授, 研究方向为浮式结构物水动力性能, 电子信箱: hongde.qin@outlook.com

引用格式: 郭霆, 秦洪德, 李晓勇, 等. 海洋油气开采张力腿平台的水动力性能[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 251-257; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.034

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi_j}{\partial t} \quad j=1,7 \quad (7)$$

式中, P 为流体动压力; ρ 为流体密度。

只考虑流体压力, 沿平均湿表面进行压力积分, 有

$$F_j = \iint_{S_0} P n_j dS = -\iint_{S_0} \frac{\partial \Phi}{\partial t} n_j dS \quad k=1,7 \quad (8)$$

式中, F 为一阶波浪载荷; n 为张力腿平台运动方向的法向分量。

根据张力腿平台浮体结构的运动平衡条件, 建立频域运动控制方程, 即

$$[M(\omega) + A(\omega)]\ddot{x} + [B(\omega) + B_v]\dot{x} + (K + C)x = F \quad (9)$$

式中, $M(\omega)$ 为浮体结构本身的质量矩阵; $A(\omega)$ 为附加质量矩阵; $B(\omega)$ 为阻尼矩阵; B_v 为黏性阻尼矩阵; C 为静水回复力刚度矩阵; K 为张力腿刚度矩阵; F 为浮体结构受到的波浪扰动载荷; x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} 分别为浮体结构六自由度频域运动响应的位移、速度和加速度。

当入射波为正弦或余弦波且波幅为 A 时产生的波浪绕动力的复数形式 $F_0(\omega)$ 为

$$F = AF_0(\omega)e^{-i\omega t} \quad (10)$$

其位移响应为

$$x = x_0(\omega)e^{-i\omega t} \quad (11)$$

由式(9)、式(10)和式(11)可得

$$\frac{x_0(\omega)}{A} = \frac{F_0(\omega)}{(K + C) - \omega^2(M(\omega) + A(\omega)) - i\omega(B(\omega) + B_v)} = H(\omega) \quad (12)$$

式中, $H(\omega)$ 为传递函数; ω 为波浪频率。

因此, 位移响应幅值算子可表示为

$$RAO(\omega) = |H(\omega)| = \frac{|x_0(\omega)|}{A} \quad (13)$$

1.2 二阶差频波浪载荷

浮体在波浪环境中的运动问题分为绕射和辐射问题。速度势的表达式又可改写为

$$\Phi = \Phi_i + \Phi_D + \Phi_R \quad (14)$$

式中, Φ_i 为入射波速度势; Φ_D 为绕射波速度势; Φ_R 为辐射波速度势。

对一阶、二阶速度势进行空间变量分离, 可得

$$\phi^{(1)} = \text{Re}[\phi^{(1)} e^{-i\omega t}] = \text{Re}[\phi_i^{(1)}(x, y, z)e^{-i\omega t} + \phi_D^{(1)}(x, y, z)e^{-i\omega t}] \quad (15)$$

$$\phi^{(2)} = \text{Re}[\phi^{(2)} e^{-2i\omega t}] + \bar{\phi}^{(2)} = \text{Re}[\phi_i^{(2)}(x, y, z)e^{-2i\omega t} + \phi_D^{(2)}(x, y, z)e^{-2i\omega t}] + \bar{\phi}^{(2)} \quad (16)$$

式中, Re 表示函数的实部; i 为虚数; $\bar{\phi}^{(2)}$ 为定常速度势; x, y, z 为对应的空间变量。

二阶入射波速度势的自由表面条件方程为

$$-4 \frac{\omega^2}{g} \phi^{(2)} + \frac{\partial \phi^{(2)}}{\partial z} = \frac{i\omega}{g} \left[\nabla \phi^{(1)} \nabla \phi^{(1)} + \frac{1}{2} \phi^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z} \right) \right] \quad (17)$$

对满足拉普拉斯方程的速度势表达式, 采用分离变数法得到二阶入射波速度势表达式

$$\phi_1^{(2)} = -\frac{3i\omega A^2 \text{ch}[2k(z+h)]}{8 \text{sh}^4(kh)} e^{2ikx} \quad (18)$$

二阶绕射波速度势的非线性自由面条件方程为

$$-4 \frac{\omega^2}{g} \phi_D^{(2)} + \frac{\partial \phi_D^{(2)}}{\partial z} xyz = q(x, y, z) - q_1(x, y, z) \quad (19)$$

式中

$$q(x, y, z) = \frac{i\omega}{g} \left[\nabla \phi^{(1)} \nabla \phi^{(1)} + \frac{1}{2} \phi^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \phi^{(1)}}{\partial z} \right) \right]$$

$$q_1(x, y, z) = \frac{i\omega}{g} \left[\nabla \phi_1^{(1)} \nabla \phi_1^{(1)} + \frac{1}{2} \phi_1^{(1)} \left(\frac{\partial^2 \phi_1^{(1)}}{\partial z^2} - \frac{\omega^2}{g} \frac{\partial \phi_1^{(1)}}{\partial z} \right) \right]$$

浮体结构受到的二阶差频波浪载荷为

$$F_{\text{wd}}^{(2-)}(t) = \sum_{i=1}^n A_i A_j \{ P_{ij}^{(2-)}(\omega_i, \omega_j) \cos[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] + Q_{ij}^{(2-)}(\omega_i, \omega_j) \sin[(\omega_i - \omega_j)t + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \} \quad (20)$$

式中, $F_{\text{wd}}^{(2-)}(t)$ 为二阶差频波浪载荷; $P_{ij}^{(2-)}(\omega_i, \omega_j)$ 为双色波中二阶差频二次传递函数的实部; $Q_{ij}^{(2-)}(\omega_i, \omega_j)$ 为双色波中二阶差频二次传递函数的虚部; A_i 和 A_j 分别为 2 个入射波的波幅。

2 张力腿平台水动力分析

由于张力腿为张力腿平台提供剩余浮力, 并为张力腿平台的轴向运动提供附加刚度, 因此 TLP 的垂荡运动(升沉运动)、摇荡运动(横摇和纵摇)受到张力腿附加刚度的影响, 呈现出刚性状态, 能够在采油工作进行时提供良好的稳定性。张力腿对于张力腿平台的水平面内漂移运动不提供附加刚度, 使得 TLP 的水平面内运动(横荡、纵荡和艏摇)呈现出顺应性的特点。相比于一阶波浪载荷而言, 二阶差频波浪载荷属于高阶小量, 但二阶差频波浪载荷可能导致张力腿平台在水平面内产生较大幅度的位移, 所以对于 TLP 受到的二阶差频波浪载荷的研究不容忽视。

2.1 主要参数及模型

选用一般型式的张力腿平台, 工作水深为 1500 m, 主要参数如表 1 所示。

表 1 张力腿平台主要参数

Table 1 Main parameters of tension leg platform

平台质量/t	张力腿预张力/kN	平均吃水深度/m	重心坐标(x, y, z)/m	浮心坐标(x, y, z)/m	惯性半径/m
26019.00	8142.80	22.00	x=0.43	x=0	28.00
			y=-0.26	y=0	28.00
			z=13.50	z=-13.30	11.00

通过商业软件建立张力腿平台模型,进行水动力计算。通过对张力腿平台模型平均湿表面进行压力积分,求解TLP的水动力系数、一阶波浪载荷、一阶运动响应和二阶差频波浪载荷。TLP下浮体尺寸:立柱的圆心距为50 m,平均吃水深度为22 m,立柱直径为14 m。对TLP下浮体结构进行网格划分,共3238个网格,如图1所示。TLP受到入射波的作用,产生6个自由度的运动,分别为沿 x 、 y 、 z 轴平动的纵荡、横荡和垂荡,以及绕 x 、 y 、 z 轴转动的横摇、纵摇和艏摇,如图2所示。

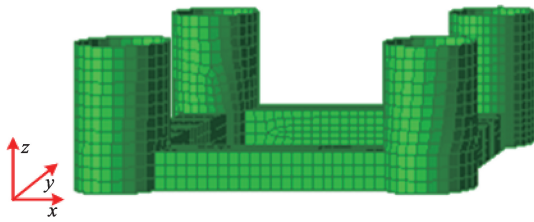


图1 张力腿平台网格模型

Fig.1 Grid model of tension leg platform

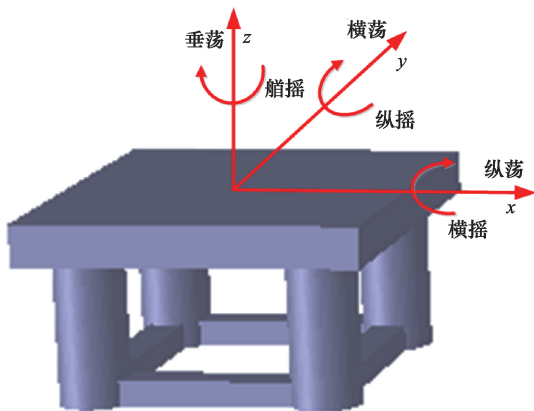


图2 张力腿平台六自由度运动示意

Fig.2 Six degrees of freedom of tension leg platform

2.2 水动力计算分析

2.2.1 一阶波浪载荷

假设张力腿平台不动,并考虑波浪的绕射问题。计算选取波浪频率区间为0.1~2.0 rad/s,步长为0.1 rad/s;考虑TLP的轴对称特性,选取波浪入射角区间为 $0^\circ\sim 90^\circ$,步长为 15° ,共7个入射角。计算结果以波浪载荷幅值-频率响应函数的形式给出,如图3所示。 f_x^1 、 f_y^1 、 f_z^1 分别表示 x 、 y 、 z 方向的一阶波浪力幅值(1 m波幅下的波浪力),单位为N/m; m_x^1 、 m_y^1 、 m_z^1 分别为 x 、 y 、 z 方向的一阶波浪力矩幅值(1 m波幅下的波浪力矩),单位为(N·m)。

从图3可以看出,张力腿平台受到的 x 方向力与 y 方向力

变化趋势相似,只是相差 90° 的相位角,这与TLP的双对称结构有关。 x 方向受到迎浪影响较大,而 y 方向受到横浪影响较大,即当浪向与波浪力的方向相同时,各个波浪频率下的波浪力相对较大,在波浪频率1.0 rad/s处达到峰值。从 z 方向受力情况来看,张力腿平台受到的波浪力随波浪频率的增加呈下降趋势,并且浪向对于 z 方向力的影响很小。

在波浪频率0.1~0.4 rad/s区间,张力腿平台的 x 方向力矩与 y 方向力矩均不受浪向角的影响,呈现出快速下降趋势,降幅约为70%。随着波浪频率的增加,浪向角对TLP的影响逐步显现,其作用形式与一阶波浪力恰好相反。从 z 方向力矩变化情况来看,迎浪和横浪影响较大,均在波浪频率1.0 rad/s附近达到峰值。

2.2.2 一阶运动响应

根据牛顿第二定律,在得到张力腿平台一阶波浪载荷的基础上,计算TLP各个模态的运动响应,并以响应幅值算子(RAO)的形式给出计算结果,如图4所示。 RAO_{sw} 、 RAO_{sw} 、 RAO_{hw} 分别表示纵荡、横荡和垂荡的运动响应幅值(1 m波幅下的平动位移),单位为m/m; RAO_{ro} 、 RAO_{pi} 、 RAO_{ya} 分别表示横摇、纵摇和艏摇的运动响应幅值(1 m波幅下的转动位移),单位为 $(^\circ)/m$ 。

从图4可以看出,张力腿平台的水平面内运动规律与一阶波浪力规律相似。当波浪力方向与TLP运动方向一致时,TLP位移较大,波浪频率为0.5 rad/s时,迎浪的纵荡运动响应与横浪的横荡运动响应达到峰值,随后趋近于零。当波浪力方向与TLP运动方向垂直(横浪时的纵荡和迎浪时的横荡),波浪频率高于0.6 rad/s时,TLP位移快速趋近于零。横摇、纵摇运动响应与横荡、纵荡相似,对横摇、纵摇影响较大的浪向角分别为 75° 和 15° ,均在波浪频率0.4 rad/s时达到峰值,随后呈下降趋势且趋近于零。浪向角为 45° 的斜浪引起的垂荡振幅较大,浪向角为 30° 、 60° 的斜浪对艏摇运动响应影响较大。由于TLP的双对称结构, 45° 斜浪对TLP的艏摇运动响应影响很小,相比于 30° 和 60° 的斜浪影响可以忽略不计。当波浪频率约为1.2 rad/s时, 60° 斜浪引起的TLP艏摇运动响应幅值达到峰值。

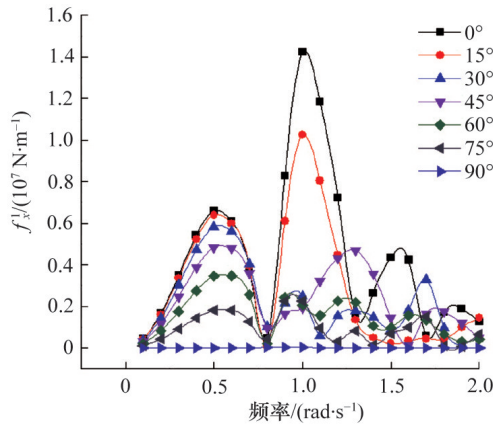
不难发现,当波浪频率高于1.0 rad/s时,张力腿平台的垂荡、横摇和纵摇运动响应幅值趋近于零。从数值来看,单位波幅下TLP的垂荡运动位移峰值不超过2 m,工作水深1500 m的TLP在有义波高(平均波高的1.6倍)为20 m情况下,最大垂荡位移不到工作水深的5%,表明TLP能够安全地进行油气的开采工作。从横荡、纵荡和艏摇运动情况来看,由于张力腿的轴向附加刚度对于TLP的横荡、纵荡和艏摇运动影响很小,因此TLP的横荡、纵荡和艏摇运动响应幅值较大。

2.2.3 二阶差频波浪载荷

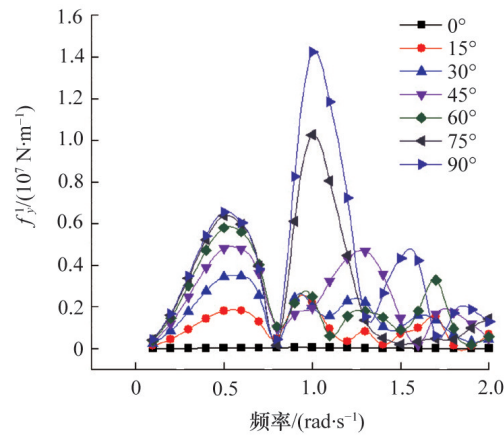
假设入射波是单频波,那么张力腿平台的二阶差频波浪载荷,由与时间不相关的定常项以及波浪频率为 2ω 的倍频非定常项两部分组成。运用中场公式计算得到TLP的二阶差

频波浪载荷,如图5所示。 f_x^2 、 f_y^2 、 f_z^2 分别表示 x 、 y 、 z 方向的二阶波浪力幅值(1 m²波幅下的波浪力),单位为N/m²; m_x^2 、 m_y^2 、

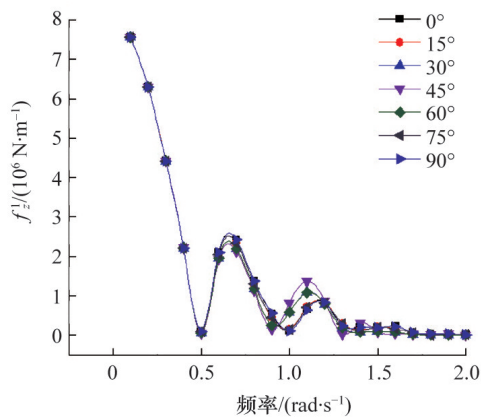
m_z^2 分别表示 x 、 y 、 z 方向的二阶波浪力矩幅值(1 m²波幅下的波浪力矩),单位为(N·m)/m²。



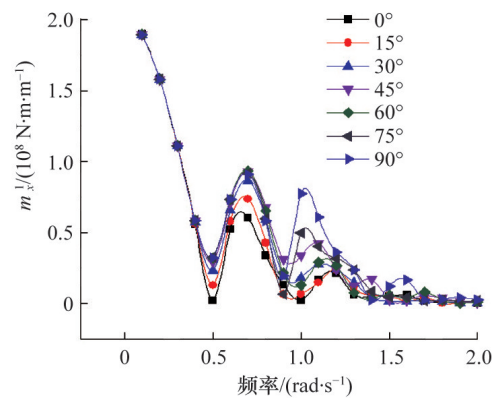
(a) 一阶 x 方向力



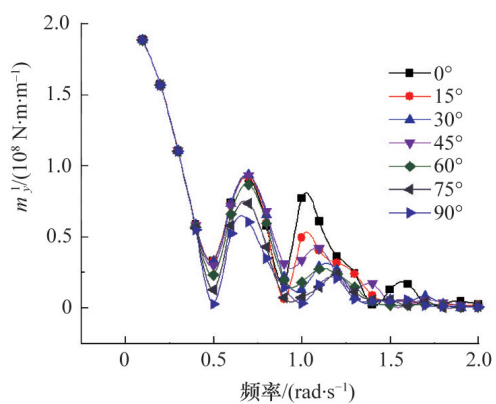
(b) 一阶 y 方向力



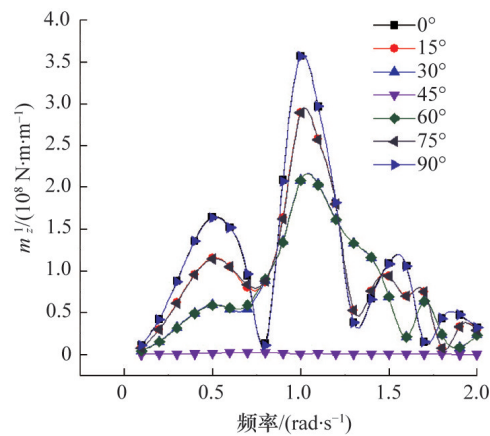
(c) 一阶 z 方向力



(d) 一阶 x 方向力矩



(e) 一阶 y 方向力矩



(f) 一阶 z 方向力矩

图3 张力腿平台一阶波浪载荷幅值-频率曲线

Fig. 3 Amplitude-frequency curves of first-order wave load of tension leg platform

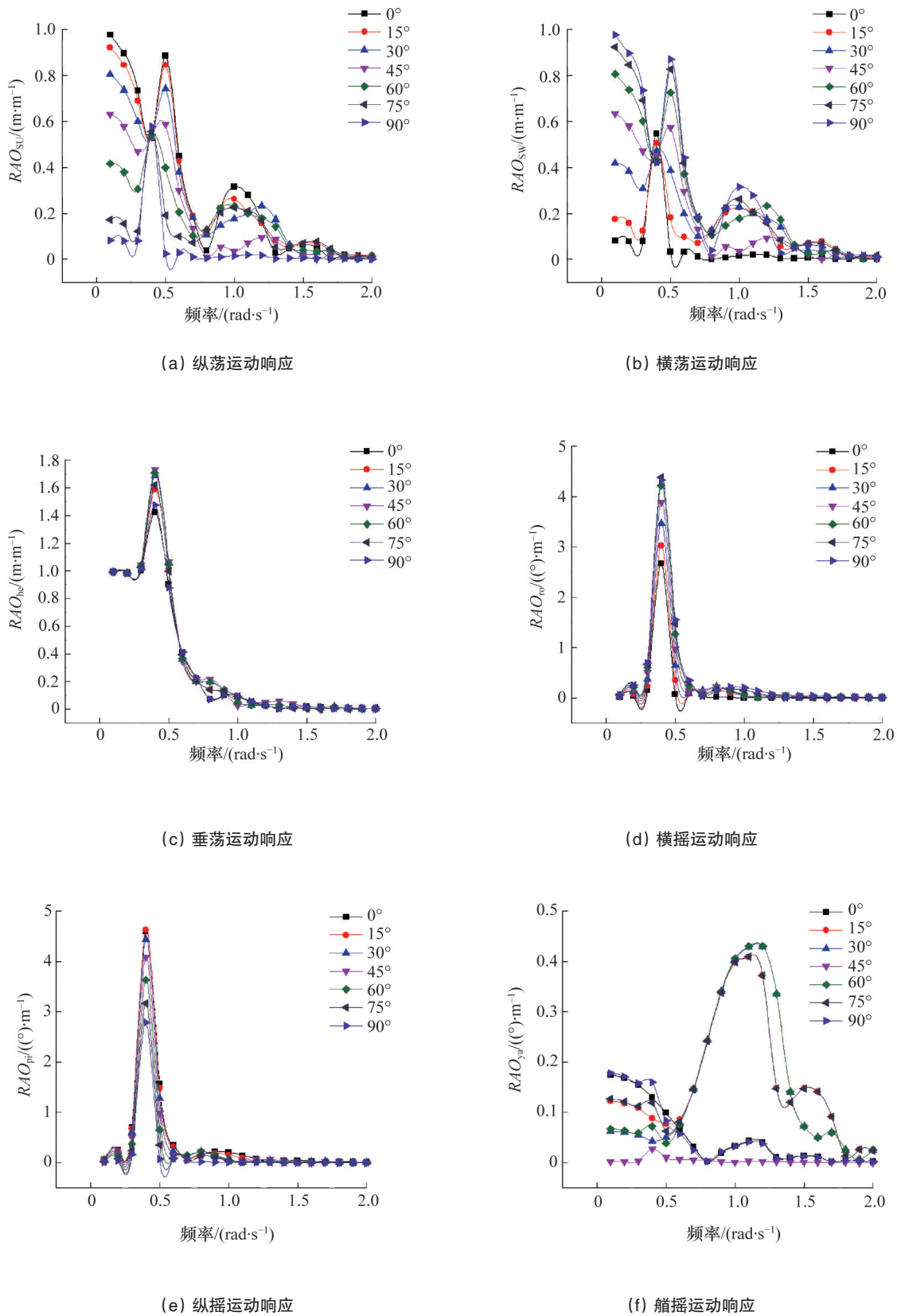


图4 张力腿平台一阶运动响应-频率曲线

Fig.4 Amplitude-frequency curves of first-order motion response of tension leg platform

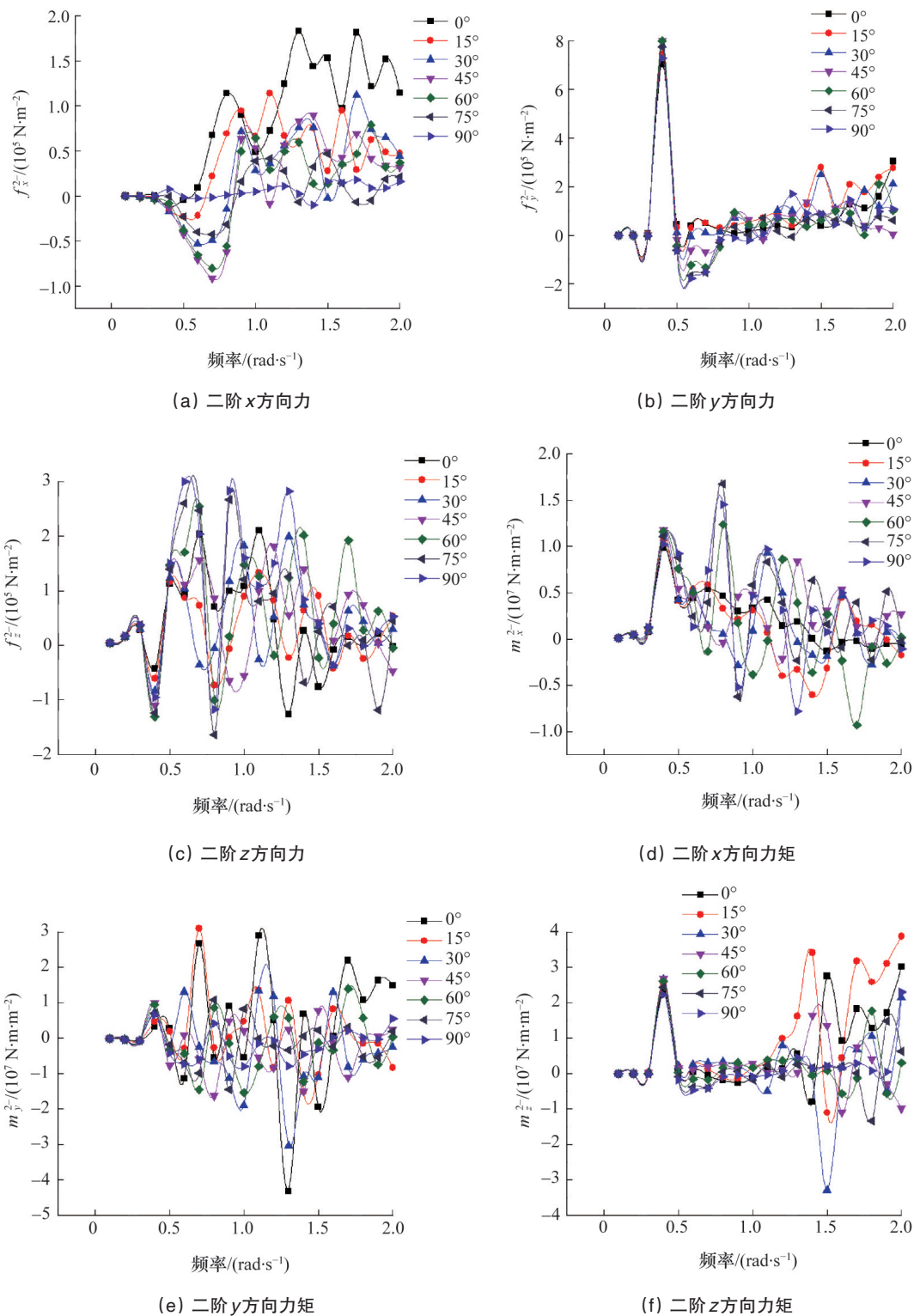


图5 张力腿平台二阶差频波浪载荷幅值-频率曲线

Fig.5 Amplitude-frequency curves of second-order wave drift of tension leg platform

3 结论

对水深 1500 m 的传统张力腿平台的水动力进行了计算分析,给出 7 个浪向角情况下 20 个波浪频率的一阶波浪载荷、一阶运动响应和二阶差频波浪载荷的计算结果。一阶波浪载荷显示,由于 TLP 的双对称结构,TLP 受到的 x 方向力和

y 方向力具有相似的变化趋势,且相差 90° 的相位角。一阶运动响应显示,TLP 垂荡运动响应良好,在极端海况下其最大垂荡位移不超过工作水深的 5%,而水平面内运动则呈现顺应性特点。二阶差频波浪载荷显示,TLP 受到的二阶差频波浪载荷在低频区影响较大,而 TLP 的垂荡固有周期约为 3 s,水

平面内运动固有周期约为 75 s, 能够有效地避开峰值波浪频率, 进行海洋石油天然气的开采。

参考文献 (References)

- [1] Natvig B J, Teigen P. Review of hydrodynamic challenges in TLP design [J]. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 1993, 3(4): 241-249.
- [2] Natvig B J, Vogel H. TLP design philosophy—past, present, future[C]// *International conference on Offshore and Polar Engineering*. California, USA: International Society of Offshore and Polar Engineers, 1995: 64-70.
- [3] Ahmad S K, Ahmad S. Active control of non-linearly coupled TLP response under wind and wave environments[J]. *Computers & Structures*, 1999, 72(6): 735-747.
- [4] 杨冠声. 张力腿平台非线性波浪载荷和运动响应研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
Yang Guansheng. TLP research of nonlinear wave force and response [D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [5] Fonseca N, Pessoa J, Mavrakos S, et al. Experimental and numerical investigation of the slowly varying wave exciting drift forces on a restrained body in bi-chromatic waves[J]. *Ocean Engineering*, 2013, 38(17): 2000-2014.
- [6] Breit S R, Slavounos P D, Newman J N. New generation of panel programs for radiation-diffraction problems[R]. Cambridge USA: Massachusetts Institute of Technology, 1985.
- [7] Korsmeyer F T, Lee C H, Newman J N, et al. The analysis of wave effects on tension leg platforms[C]// *7th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Houston, USA: American Society of Mechanical Engineering, 1988: 1-14.
- [8] Taylor R E, Huang J B. Second-order wave-diffraction by an axisymmetric body in monochromatic waves[J]. *Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 1997, 453(1962): 1515-1541.
- [9] Huang J B, Taylor R E. Second-order interaction of irregular waves with a truncated column[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 13(2): 130-142.
- [10] Teng B, Taylor R E. New higher-order boundary element methods for wave diffraction/radiation[J]. *Applied Ocean Research*, 1995, 17(95): 71-77.
- [11] 邹志利, 戴遗山. 直立圆柱二阶波浪力解析解[J]. *应用数学和力学*, 1994(9): 807-819.
Zhou Zhili, Dai Yishan. An analytical solution of the second-order wave force on a vertical circular cylinder[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1994(9): 807-819.
- [12] Adrezin R, Benaroya H. Response of a tension leg platform to stochastic wave forces[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1999, 14(1): 3-17.
- [13] Chandrasekaran S, Jain A K. Triangular configuration tension leg platform behaviour under random sea wave loads[J]. *Ocean Engineering*, 2002, 29(15): 1895-1928.
- [14] Chandrasekaran S, Jain A K, Chandak N R. Influence of hydrodynamic coefficients in the response behavior of triangular TLPs in regular waves[J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(17): 2319-2342.
- [15] Garrett D L. Dynamic analysis of slender rods[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1982, 104(4): 302-306.
- [16] 刘玉标, 袁文全, 申仲翰. 迎浪角及波浪周期对张力腿平台响应的影响分析[J]. *中国海洋平台*, 2008, 23(6): 21-25.
Liu Yubiao, Yuan Wenquan, Shen Zhonghan. Influence of wave approach angle and wave period on TLP's response[J]. *China Offshore Platform*, 2008, 23(6): 21-25.
- [17] 吴应湘, 郑之初, 李东晖, 等. 深水张力腿平台设计中的流体动力学问题[J]. *中国海洋平台*, 2000, 15(2): 12-15.
Wu Yingxiang, Zheng Zhichu, Li Donghui, et al. The hydrodynamic problems in the design of TLP[J]. *China Offshore Platform*, 2000, 15(2): 12-15.
- [18] 曾晓辉, 沈晓鹏, 徐本和等. 张力腿平台的水动力及结构力学问题[J]. *中国造船*, 2003, 44(3): 429-433.
Zeng Xiaohui, Xu Xiaopeng, Xu Benhe, et al. Hydrodynamic forces and structural mechanics of tension leg platform[J]. *Shipbuilding of China*, 2003, 44(3): 429-433.

Hydrodynamic performance research of offshore oil and gas exploitation TLP

GUO Ting¹, QIN Hongde¹, LI Xiaoyong², WANG Chong¹

1. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2. China Mingyang Wind Power Group Limited, Zhongshan 528400, China

Abstract The offshore oil and gas exploitation TLP's hydrodynamic performance is computed, and analyzed by using 3-D potential theory, API of wind and JONSWAP of wave in terms of hydrodynamic coefficients, 1st-order wave load, 1st-order motion response and 2nd-order difference frequency wave load. The results indicate that the 1st-order wave load on TLP of the out-of-plane presents a rapid decreasing trend with the increase of wave frequency. Heave/roll/pitch reach their peaks at the wave frequency 0.4 rad/s, the heave displacement is no more than 5% of water depth and the roll angle less than 5°. It is shown that TLP can effectively avoid wave/wind frequency concentrated areas, and safely work in variety of sea conditions. The 2nd-order difference frequency wave load in the y direction is about 4 times as large as the force in the x direction. Compared with the 1st-order wave loads, the 2nd-order difference frequency wave load is relatively small, but the damage for TLP can not be ignored.

Keywords offshore oil and gas exploitation tension leg platform (TLP); 1st-order wave load; 1st-order motion response; 2nd-order difference frequency wave load
(责任编辑 韩星明)