

文章编号:1005-9865(2015)02-0021-11

内孤立波作用下 Spar 平台动力响应特性

黄文昊¹, 林忠义², 尤云祥¹

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 嘉兴南洋职业技术学院, 浙江 嘉兴 314003)

摘 要:以三类内孤立波理论(KdV、eKdV 和 MCC)的适用性条件为依据,采用 Morison 和傅汝德-克雷洛夫公式分别计算 Spar 平台内孤立波水平力和垂向力,结合时域有限位移运动方程,建立了有限深两层流体中内孤立波与带分段式系泊索 Spar 平台相互作用的理论模型。以东沙群岛某海域实测内孤立波为对象,数值分析了在内孤立波作用下某经典式 Spar 平台的内孤立波动态载荷、运动响应及其系泊张力的变化特性。研究表明,内孤立波不仅会对 Spar 平台产生突发性冲击载荷,使其产生大幅度水平漂移运动,而且还会使其系泊张力显著增大。因此,在 Spar 平台等深海平台的设计应用中,内孤立波的影响不可忽视。

关键词:两层流体; Spar 平台; 内孤立波; 动力响应

中图分类号:P751 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2015.02.003

Dynamic response characteristics of a spar platform under internal solitary waves

HUANG Wenhao¹, LIN Zhongyi², YOU Yunxiang¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Jiaxing Nanyang Profession and Technology, Jiaxing 314003, China)

Abstract: Based on the applicability conditions of three internal solitary wave theories (KdV, eKdV and MCC), a theoretical model for analyzing the interaction characteristics of internal solitary waves with the spar platform is presented by using coupled motion equations of the floating body in time domain, while the horizontal and vertical forces on spar platform due to internal solitary waves are calculated with Morison and Froude-Krylov formulas. The observed data near Dongsha Island is used as the characteristic parameters of internal solitary waves to simulate the variation characteristics of the dynamic loads, motion response and mooring tension for a classical spar platform. It is showed that internal solitary waves will give rise to the sudden impact loads and motion responses for spar platform, as well as remarkable tension increase in catenary mooring lines. Therefore, the influence of internal solitary waves on the dynamic behaviors of deep-sea floating structures including spar platforms cannot be neglected in their design and applications.

Keywords: two-layer fluid; spar platform; internal solitary wave; dynamic response

对深海油气资源的开发,传统的固定式平台已经不能满足工程要求,取而代之的是深水浮式平台,包括 Spar 平台、半潜式平台、张力腿平台和 FPSO 等^[1]。由于深水浮式平台系统通常永久系泊于特定海域进行作业,其规避恶劣海洋条件的能力较差,海洋环境条件对其安全性和作业效率的影响很大。因此,研究其在各种海洋环境条件下的载荷及其动力响应等问题,对保证其安全性有重要的工程实践意义。

大量海上测量和海洋遥感观测已经表明,南海内孤立波活动频繁,具有分布范围广、振幅大、持续时间长短、所诱导流场水平速度大等特点^[2-3]。南海频繁的内孤立波现象,已成为影响其深海油气资源开发中的一

收稿日期:2013-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11372184);高等学校博士点基金资助项目(20110073130003);国家重大基础研究计划 973 课题资助项目(2013CB036103)

作者简介:黄文昊(1985-),男,甘肃嘉峪关人,博士,研究方向为海洋工程水动力学。

通讯作者:尤云祥。E-mail:youyx@sjtu.edu.cn

类灾害性海洋环境因素。在南海流花油田的早期延长测试期间,就曾发生过因内孤立波产生的突发性强流而导致缆绳拉断、船体碰撞,甚至拉断和挤破漂浮软管等事故^[4]。在南海陆丰油田的早期延长测试期间,也曾发生过内孤立波产生的突发性强流使半潜式钻井船与锚定油轮在连接输油管道时发生困难等问题^[5]。

内孤立波是一种最大振幅发生在密度稳定层化海洋内部的波动,其来源可能包括以下几类:Lee 波激发机制、正压潮流激发机制、内潮波裂变激发机制、背景流场剪切不稳定性、背景涡场的变化以及锋面地区的波流相互作用等。简单来说,不同激发机制的区别在于扰动源不同。

对密度层化海洋的处理,最简单的是两层模式,即把流体看作是密度均匀的两层,两层之间存在密度突变。常见的两层流体内孤立波理论有 KdV (Korteweg-de Vries)、eKdV (extended KdV) 和 MCC (Miyata-Choi-Camassa) 理论等^[6]。但在这三类理论中弱非线性和弱色散这两个条件均只是定性描述,为此黄文昊等以系列实验为依据给出了这两个条件的定量表征方法^[7]。

在风浪流环境下,各类深水浮式平台的载荷及其动力响应问题,目前已经有较为成熟的理论方法^[8]。但在内孤立波环境下,各类深水浮式平台载荷及其动力响应等问题,目前仍是海洋工程中面临的挑战性课题之一。程友良等^[9]和蔡树群等^[10-11]将 Morison 公式与 KdV 理论结合,而 XIE 等^[12-13]则将 Morison 公式分别与 MCC 理论结合,研究了内孤立波作用在小尺度杆件的载荷特性问题。最近,宋志军等^[14]将 Morison 公式与 KdV 理论结合,研究了内孤立波作用下经典 Spar 平台的运动响应问题,尤云祥^[15-16]等将 Morison 公式与 mKdV 理论结合,研究了内孤立波作用下半潜和张力腿平台的动力响应问题。

需要指出的是,在这些文献中,关于 Morison 公式中惯性力和拖曳力系数都是参照表面波的方法选取的,但这种选取方法缺乏理论和实验依据。为此,黄文昊等以系列实验为依据对圆柱型结构给出了这两个系数的选取方法^[17]。结果表明,这两个系数的选取方法与表面周期波的情况是不同的。由于深水浮式平台内孤立波载荷的计算方法还不完善,致使目前对内孤立波作用下深水浮式平台运动响应及其系泊动力特性的认识尚不十分清楚。

有鉴于此,本文以三类内孤立波理论适用性条件的实验结果为依据^[7],结合系列实验获得的 Morison 公式中的惯性力和拖曳力系数选取方法^[17],建立内孤立波与 Spar 平台相互作用的理论模型。在此基础上,参照东沙群岛南部海域的内孤立波实测结果,研究分析了在内孤立波作用下某经典式 Spar 平台的动态载荷、运动响应及其系泊张力变化特性等问题。

1 数值方法

经典 Spar 平台由上层建筑、平台主体和系泊系统等组成。设浮筒直径为 D ,吃水为 d 。系泊系统采用三段式悬链系泊索,首尾两段为钢质缆,中间为重力压载链。为便于描述平台运动响应,记 $OXYZ$ 为一个空间固定的坐标系,如图 1 所示。其中,坐标原点 O 位于平台静平衡时的重心 G 处, OXY 平面与静水面平行, OZ 轴铅直向上为正, OX 轴正方向与内孤立波传播方向相同。记 $G\xi\eta\delta$ 是固定在 Spar 平台上的随体坐标系,当平台处于静平衡状态时,两个坐标系 $OXYZ$ 与 $G\xi\eta\delta$ 是重合的。

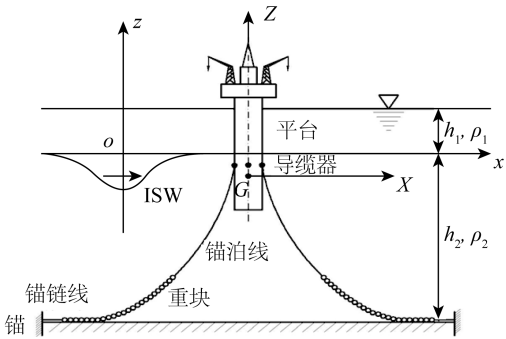


图 1 经典式 Spar 平台及其坐标系

Fig. 1 The sketch of a classical spar platform and its coordinate system

考虑内孤立波作用下 Spar 平台在 OXZ 平面内的运动响应,其纵荡和垂荡位移分别用 X_1 和 X_2 表示,纵摇位移用 X_3 表示。其中, X_1 和 X_2 是重心 G 在 $OXYZ$ 中的坐标, X_3 是 $G\xi\eta\delta$ 相对于 $OXYZ$ 的转角。

随体坐标系 $G\xi\eta\delta$ 与固定坐标系 $OXYZ$ 之间的坐标转换关系为

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(X_3) & \sin(X_3) \\ -\sin(X_3) & \cos(X_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Spar 平台 3 个自由度的运动方程为

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X}_1 \\ \ddot{X}_2 \\ \ddot{X}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(X_i, \dot{X}_i, X_i) \\ F_2(X_i, \dot{X}_i, X_i) \\ F_3(X_i, \dot{X}_i, X_i) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: M 为 Spar 平台质量, I 为 Spar 平台纵摇惯性矩, F_1 为水平外载荷, F_2 为垂向外载荷, F_3 为外载荷力矩,变量上方的点表示对时间的导数。

Spar 平台的外载荷包括内孤立波载荷 F_w 及其力矩 M_w 、浮力 F_B 及其力矩 M_B 、系泊传递力 F_{ot} 及其力矩 M_{ot} ,以及平台自身重力。在求得这些力及其力矩之后,即可确定外载荷矢量 F 如下

$$F = F_1 i + F_2 k = F_w + F_B + F_{ot} - Mgk \quad (3)$$

$$M = F_3 e_3 = M_w + M_B + M_{ot} \quad (4)$$

式中: i, j, k 是固定坐标系 $OXYZ$ 的单位矢量; e_1, e_2, e_3 为随体坐标系 $G\xi\eta\delta$ 的单位矢量; g 为重力加速度。

1.1 平台外载荷

首先给出 Spar 平台内孤立波载荷的计算方法。设两层流体均为理想不可压缩而且是无旋的,在流体处于静平衡状态时,上层流体深度与密度分别为 h_1 和 ρ_1 ,下层流体深度与密度分别为 h_2 和 ρ_2 ,总水深为 $h = h_1 + h_2$ 。建立直角坐标系记 $oxyz$ 如图 1 所示,其中 oxy 平面位于流体静止时两层流体的界面上, oz 轴位于内孤立波波谷处,且以垂直向上为正。坐标系 $OXYZ$ 与 $oxyz$ 之间的坐标转换关系为

$$x = X + x_d, z = Z - (d - h_c - h_1) \quad (5)$$

式中: x_d 为波谷到平台中心轴的水平距离, h_c 为重心 G 到 Spar 平台浮桶底部的距离。

设内孤立波为沿 ox 正方向传播的永形波,振幅为 a ,相速度为 c ,界面位移为 ζ 。记 (u_i, w_i) 为内孤立波在垂直断面 oxz 中诱导水质点运动的速度矢量, $\bar{u}_1$ 和 $\bar{u}_2$ 分别为上下层流体平均水平速度 ($i = 1$ 和 2 分别表示上下层流体),则内孤立波诱导的瞬时水平和垂向速度可由下式确定^[18]

$$u_i(x, z, t) = \bar{u}_i(x, t) + \left(\frac{\bar{h}_i^2}{6} - \frac{(z + (-1)^i h_i)^2}{2} \right) \bar{u}_{ix}(x, t) \quad (6)$$

$$w_i(x, z, t) = (-1)^{i+1} (h_i + (-1)^i z) \bar{u}_{ix}(x, t) \quad (7)$$

式中:

$$\bar{u}_1 = -c \frac{\zeta}{h_1 - \zeta}, \bar{u}_2 = c \frac{\zeta}{h_2 + \zeta}, \bar{h}_i = h_i + (-1)^i \zeta \quad (8)$$

由伯努利方程可得,内孤立波在上下层流体中诱导的动压力为

$$p_i = \rho_i \left(cu_i - \frac{1}{2}(u_i^2 + w_i^2) \right) \quad (9)$$

为便于陈述,将上下层流体中的速度、动压力及密度统一写为如下形式

$$u = \begin{cases} u_1 \zeta < z < h_1 \\ u_2 - h_2 < z < \zeta \end{cases}, w = \begin{cases} w_1 \zeta < z < h_1 \\ w_2 - h_2 < z < \zeta \end{cases}, p = \begin{cases} p_1 \zeta < z < h_1 \\ p_2 - h_2 < z < \zeta \end{cases}, \rho = \begin{cases} \rho_1 \zeta < z < h_1 \\ \rho_2 - h_2 < z < \zeta \end{cases} \quad (10)$$

在利用式(6)~式(9)计算内孤立波诱导速度场及其压力场时,内孤立波界面位移 ζ 可以采用 KdV、eKdV 和 MCC 理论进行计算,其中如何选择合适的内孤立波理论是一个需要解决的关键问题。为此,定义非线性参数, $\varepsilon = |a|/h$ 和色散参数 $\mu = (h/\lambda)^2$,其中 λ 为内孤立波特征宽度。那么,根据上下层流体深度、密度及内孤立波振幅等条件,首先利用 KdV、eKdV 和 MCC 理论解,分别计算相应的内孤立波非线性参数 ε 和色散参

数 μ , 然后根据文献[7]的实验结果, 可得内孤立波诱导速度场及其压力场的具体计算方法。

对弱非线性和弱色散内孤立波, 即 $\varepsilon \leq \mu$ 和 $\mu < \mu_0$ 的情况, 则选择 KdV 理论计算内孤立波诱导速度场及其压力场; 对中等非线性和弱色散内孤立波, 即 $\mu < \varepsilon \leq \sqrt{\mu}$ 和 $\mu < \mu_0$ 的情况, 则采用 eKdV 理论计算内孤立波诱导速度场及其压力场; 对强非线性和弱色散或强色散内孤立波, 即 $\varepsilon > \sqrt{\mu}$ 和 $\mu < \mu_0$ 或 $\mu \geq \mu_0$ 的情况, 则采用 MCC 理论计算内孤立波诱导速度场及其压力场。其中, $\mu_0 = 0.1$ 为由文献[7]系列实验所得内孤立波临界色散参数。

在实际海洋中, 内孤立波特征波长通常可达几百米甚至几千米, 要远大于 Spar 平台的浮桶直径, 这意味着 Spar 平台的存在对内孤立波特征的影响可以忽略。对作用在 Spar 平台浮筒底部的载荷, 可以采用傅汝德-克雷洛夫公式计算^[17]

$$F_{wB} = \iint_S p n_B ds \quad (11)$$

式中: S 为 Spar 平台浮筒底部面积; n_B 为底部单位法线矢量, 方向指向平台内部。

对作用在 Spar 平台浮筒侧表面上的内孤立波载荷, 包含惯性力和拖曳力两个成分, 可以采用 Morison 公式进行计算。利用式(6)和式(7), 可得垂直于单位长度 Spar 平台浮筒侧表面上的内孤立波载荷为^[17]

$$f_{wc} = \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{V}_n + C_a \rho \frac{\pi D^2}{4} \dot{V}_m + C_d \rho \frac{D}{2} |V_m| V_m \quad (12)$$

式中: C_a 为附加质量系数, C_d 为拖曳力系数, $V = (u, 0, w)$ 为水质点速度, $\dot{V}_n$ 为水质点加速度矢量垂直于柱体的分量, $\dot{V}_m$ 和 V_m 分别为水质点相对于柱体的加速度和速度垂直于柱体的分量。

由此可得, 作用在 Spar 平台浮筒上的内孤立波载荷及其力矩分别为:

$$F_{wc} = \int_{-h_G}^{h_l-h_G} f_{Gn} d\zeta, M_w = \int_{-h_G}^{h_l-h_G} (r_{G\zeta} \times f_{Gn}) d\zeta \quad (13)$$

式中: f_{Gn} 为 f_{wc} 在随体坐标系中的相应矢量; $r_{G\zeta}$ 是在随体坐标系中浮筒中心线上点 $(0, 0, \zeta)$ 相对于重心 G 的位置矢量; h_l 为浮筒在流体中的瞬时浸没深度, h_l 的表达式为:

$$h_l = \frac{d - h_G - X_2}{\cos X_3} + h_G \quad (14)$$

在利用式(12)计算 Spar 平台浮筒内孤立波载荷时, Morison 公式中两个经验系数的合理选取是关键。为此, 设 $U_{\max}$ 为内孤立波诱导的最大水平速度, 定义雷诺数 $Re (= U_{\max} D / \nu)$, 则根据文献[17]的系列实验结果, 这两个经验系数可表示为

$$C_a = 1.0, C_d = 2.3 \times \exp(-10^{-4} Re) + 1 \quad (15)$$

在 Spar 平台发生纵摇时, 其浮筒的浮力都会对平台重心产生力矩, 而且在平台运动过程中, 由于浮筒排水体积及其形状都将发生改变, 因此其浮心位置将会发生偏移现象。当浮筒的浮心位置发生偏移后, 它在随体坐标系中的坐标变为

$$B_\xi = -\frac{D^2}{h_l} \tan X_3, B_\zeta = \frac{D^2}{2h_l} \tan^2 X_3 + \frac{h_l}{2} - h_G \quad (16)$$

浮桶的浮力为 $F_B = \rho g \pi D^2 h_l / 4$, 当它的浮心发生偏移后, 浮力对重心的力矩矢量为

$$M_{GB} = r_{GB} \times F_{GB} \quad (17)$$

式中: r_{GB} 为浮心 B 相对于半潜平台重心 G 的位置矢量, F_{GB} 为 F_B 在随体坐标系中的相应矢量。

1.2 系泊传递力

图 2 为本文采用的三段式悬链系泊索示意图。其中, W_c, W_{cl} 和 W_a 分别为它们的单位长度重量, A_c, A_{cl} 和 A_a 分别为它们的等效截面积, E_c, E_{cl} 和 E_a 分别为它们的杨氏模量, H_0 和 V_0 分别为系泊索顶部的初始水平与垂向预张力, θ_0 为系泊索的初始顶倾角, h_0 为系泊索顶部导缆器到海底的距离。

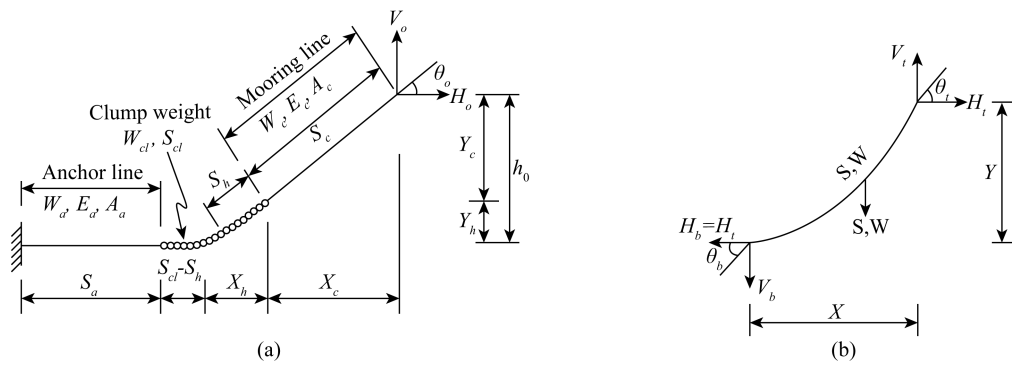


图 2 分段式悬链系泊索

Fig. 2 Multi-component mooring line

设 H_t 和 V_t 分别为某一段系泊索顶部的水平与垂向张力, H_b 和 V_b 分别为其底部的水平与垂向张力, θ_t 与 θ_b 分别为其顶倾角和底倾角, W 与 S 分别为其拉伸后的单位长度的重量和长度,如图 2(b) 所示,那么其水平和垂向投影的悬链线方程为^[19]

$$X = (H_t/W) [\sinh^{-1}(\tan(\theta_t)) - \sinh^{-1}(\tan(\theta_b))] \quad (18)$$

$$Y = (H_t/W) [\cosh\{\sinh^{-1}(\tan(\theta_t))\} - \cosh\{\sinh^{-1}(\tan(\theta_b))\}] \quad (19)$$

拉伸后分段系泊索的长度和单位重量可按式近似计算

$$S = S_0 [1 + (T - T_0)/EA], W = S_0 W_0/S \quad (20)$$

$$T = \frac{\sqrt{V_t^2 + H_t^2} + \sqrt{V_b^2 + H_b^2}}{2} \quad (21)$$

式中: S_0 为拉伸前分段系泊索的长度, T_0 和 T 分别为拉伸前后分段系泊索的平均张力, E 和 A 分别为分段系泊索的杨氏模量和等效截面积。

设 Spar 平台的初始排水量为 V , 系泊索顶部初始倾角为 θ_0 , 那么在静平衡时每根系泊索的初始水平顶张力 H_0 与垂向顶张力 V_0 可表示为

$$V_0 = (V - M)g/2, H_0 = \tan(\pi/2 - \theta_0) V_0 \quad (22)$$

由式(18)~式(22), 采用迭代的方法, 即可确定每根系泊索的初始状态, 之后通过改变系泊索垂向顶张力, 可获得系泊索水平与垂向顶张力与其顶部水平及垂向位移之间的响应曲面^[19]。在此基础上, 采用二维样条插值的方法, 由系泊索的顶部位移即可确定其顶部张力的水平与垂向分量, 从而可得在任意瞬时系泊索对平台的传递力及其力矩。

设 δ_j 和 λ_j 分别为在时刻 t 时第 j 根系泊索导缆器 A_j 的水平及垂向位移, $H(\delta_j, \lambda_j)$ 和 $V(\delta_j, \lambda_j)$ 分别为相应的顶部水平与垂向张力, 那么在时刻 t 时两根系泊索对 Spar 平台的传递力为

$$F_{ot} = \sum_{j=1}^2 F_{ot}^j, F_{ot}^j = (-1)^j H(\delta_j, \lambda_j) \vec{i} - V(\delta_j, \lambda_j) \vec{k} \quad (23)$$

式中: $j = 1, 2$ 分别表示左和右两根系泊索。

由此可得, 系泊传递力矩 $\vec{M}_{ot}$ 为

$$M_{ot} = \sum_{j=1}^2 r_{GA}^j \times F_{ot}^j \quad (24)$$

式中: r_{GA}^j 是 A_j 点相对于重心 G 的位置矢量, F_{ot}^j 为 F_{ot}^j 在随体坐标系中的相应矢量。

在式(23)中, $H(\delta_j, \lambda_j)$ 和 $V(\delta_j, \lambda_j)$ 可分别由第 j 根系泊索水平与垂向顶张力与其顶部水平及垂向位移之间的响应面通过插值获得。设 Spar 平台处于静平衡状态时, 第 j 根系泊索导缆器 A_j 在固定坐标系中的坐标为 $(a_j, 0, b_j)$, 则在时刻 t 时其水平和垂向位移为

$$\delta_j = (-1)^{j-1} [X_1 + a_j \cos(X_3) + b_j \sin(X_3)] \quad (25)$$

$$\lambda_j = X_2 - a_j \sin X_3 + b_j \cos X_3 \quad (26)$$

2 数值结果

根据 Chang^[20] 等在东沙群岛南部海域的现场观测可知,上层流体深度 $h_1 = 60\text{ m}$, 密度 $\rho_1 = 1\,022\text{ kg/m}^3$; 下层流体深度 $h_2 = 550\text{ m}$, 密度 $\rho_2 = 1\,025.5\text{ kg/m}^3$; 观测到的内孤立波为下凹型波, 最大振幅为 $a = -170\text{ m}$ 。由文献[18]可知,eKdV 理论有极限振幅为 $a_{\max} = -128.3\text{ m}$, 因此所观测到的内孤立波振幅已超出该极限振幅,即 eKdV 理论不适用。分别采用 KdV 和 MCC 理论计算振幅 $a = -170\text{ m}$ 下内孤立波的色散参数 μ , 对于 KdV 理论可得 $\mu = 1.125 > \mu_0$, 由于 KdV 理论只适用于弱色散的情况, 因此不适用于表征本内孤立波。对于 MCC 理论可得 $\mu = 0.11 > \mu_0$, 由于 MCC 理论适用于强色散的情况, 因此适用于表征内孤立波。

在表 1 和表 2 中,给出了 Spar 平台及其系泊索的主要参数,这些参数取自文献[19]。其中,平台吃水深度的计算方法为:根据系泊索顶端水平预张力及其张角,计算顶端垂向预张力,此垂向预张力由 Spar 平台浮力和重力间的差值提供,由此计算平台浮力,继而得到平台吃水深度。

表 1 Spar 平台主要参数		表 2 系泊索主要参数	
Tab. 1	Dimensions of the spar platform	Tab. 2	Multi-component catenary mooring line data
参数	数值	参数	数值
重量/t	2.6×10^5	锚泊线和锚链线等效面积/ m^2	0.003 2
浮桶直径/m	40.52	锚泊线和锚链线杨氏模量/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	2.1×10^{10}
吃水深度/m	197	重块线等效面积/ m^2	0.874 2
重心到浮心距离/m	6.67	锚泊线和锚链线单位长度重量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	293.2
重心到底面距离/m	92.4	重块线单位长度重量/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	25 000
重心到导缆孔距离/m	0.2	重块线长度/m	40
纵摇惯性矩/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	8.237×10^{10}	锚链线长度/m	800
		顶端夹角/ $(^\circ)$	30
		顶端水平预张力/kN	2 000

针对东沙群岛海域该实测内孤立波,对平台运动响应及其系泊张力变化特性进行了计算分析。结果表明,在该内孤立波作用下,平台纵荡幅值可达 53 m 左右,此时受拉侧系泊索已经完全被拉起,处于完全张紧状态,系泊张力增加幅值可达 4 092 t,可能会因超过其极限张力而被拉断。在文献[19]中所给悬链线系泊参数是针对表面波给出的,这意味着表 2 中的系泊设计参数对本文内孤立波工况并不合适,其原因在于悬链线系泊重块段的长度太短。进一步研究结果表明,增加悬链线系泊中重块段的长度 S_{cl} ,能够有效地约束 Spar 平台的纵荡运动响应,减小悬链线系泊顶张力。为此,设 α_a 为重块段恰好被全部拉起时系泊顶端的水平位移,而 α_b 为三段式系泊整体被恰好全部拉起时系泊顶端的水平位移。在图 3 中,给出了当 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1:h_2 = 6:55$ 时, α_a 和 α_b 与 S_{cl} 之间相关关系的计算结果。

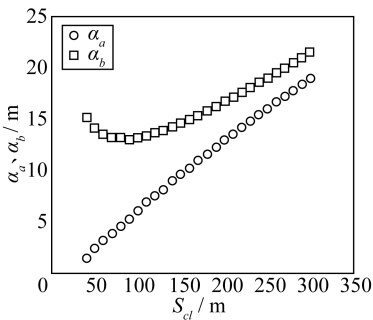


图 3 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1:h_2 = 6:55$ 时, α_a 和 α_b 与 S_{cl} 之间的相关关系

Fig. 3 Relationships between α_a , α_b and S_{cl} , when $a = -170\text{ m}$ and $h_1:h_2 = 6:55$

由图可知,随着重块段长度 S_{cl} 的增大, α_a 逐渐增大, α_b 则先减小后增大,即 α_b 存在一个极小值;在相同重块段长度 S_{cl} 下, α_a 要小于 α_b 。由此可见,可以采用增加重块段长度的方法,避免出现重块段恰好被全部拉起或三段式系泊整体被恰好全部拉起的极端情况,从而减小平台的纵荡运动响应,进而提高悬链线系泊的安全性。

2.1 载荷与动力响应时历变化特性

在本小节中,以重块段长度 $S_{cl} = 240\text{ m}$ 为例,对内孤立波作用下 Spar 平台载荷及其动力响应时历特性进行分析。在图 4 中,给出了当 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时,在内孤立波作用下 Spar 平台载荷时历特性的数值结果,其中 F_{wh} 、 F_{wv} 和 M_w 分别为内孤立波水平力、垂向力及其力矩。由图可知,在东沙群岛海域实测大振幅内孤立波作用下,Spar 平台的水平力很大,最大可达 $1\,150\text{ t}$;垂向力相对较小,最大值正值约为 302 t ,最大负值约为 -287 t ;力矩的最大正值约为 $24\,184\text{ t} \cdot \text{m}$ 。

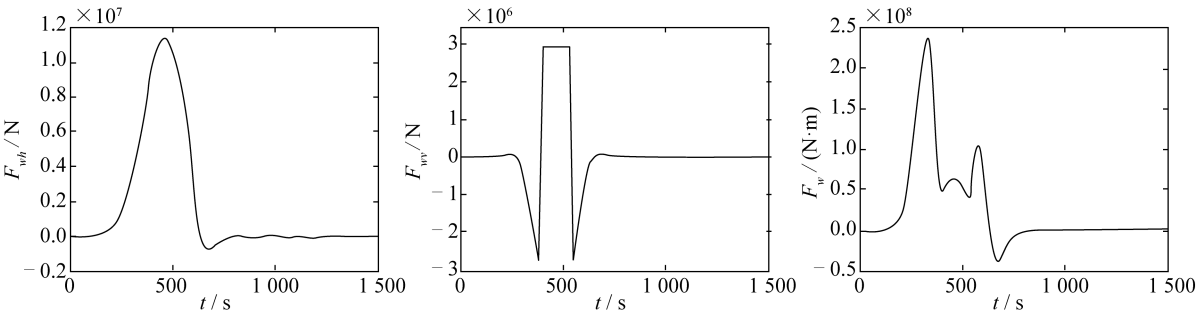


图 4 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时 Spar 平台载荷时历特性

Fig. 4 Load characteristic on spar platform when $a = -170\text{ m}$ and $h_1 : h_2 = 6 : 55$

需要注意的是,垂向力在整个时历过程中连续两次突然改变方向,其原因如下:在内孤立波开始向平台传播过程的某个时刻之前,浮筒底部位于内孤立波的波面下方,由伯努利公式可知浮筒底部动压力为负值,这时浮筒受到的垂向力方向向下;在该时刻之后,波面低于浮筒底部,由于波面上方水平流速方向与波传播方向相同,因此浮筒底部动压力为正值,这时浮筒底部内孤立波垂向力的方向向上;在某个时刻后,浮筒底部又恢复到位于内孤立波波面下方的情况,此时内孤立波垂向力再次突然改变方向。

图 5 给出了当 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时,在内孤立波作用下 Spar 平台运动响应时历特性的数值结果。由图可知,在东沙群岛海域实测大振幅内孤立波作用下,Spar 平台的纵摇响应很小,可以忽略;Spar 平台的垂荡响应主要表现为下沉运动,运动幅值较小,最大下沉量约为 0.4 m ;内孤立波对 Spar 平台纵荡响应的影响最为显著,最大纵荡位移可达 14 m 。

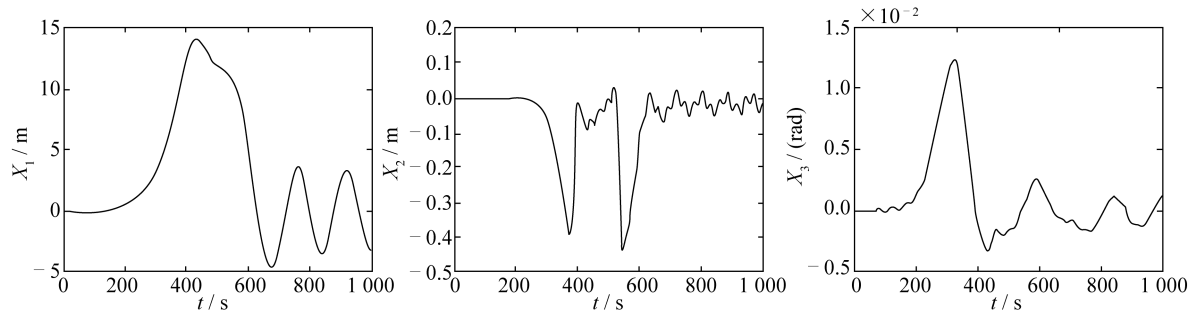


图 5 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时 Spar 平台运动响应时历特性

Fig. 5 Motion response of spar platform when $a = -170\text{ m}$ and $h_1 : h_2 = 6 : 55$

图 6 给出了当 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时,在内孤立波作用下 Spar 平台系泊索顶端张力增量时历特性的数值结果。其中, ΔT_{a-1} 和 ΔT_{a-2} 分别为 Spar 平台迎波和背波方向系泊索顶端张力增量。由图可知,在东沙群岛海域实测大振幅内孤立波作用下,Spar 平台迎波方向系泊索的张力急剧增加,最大张力增加幅度将近 $1\,200\text{ t}$,而背波方向系泊索的张力则急剧减小,最大张力减小幅度可达将近 167 t ;在内孤立波经过平台之后还会出现小幅度的震荡现象,迎波方向系泊顶张力震荡幅值可达 348 t ,而背波方向系泊顶张力震荡幅值可达 413 t 。在内孤立波作用下 Spar 平台系泊索顶张力的这种大幅度突然增大和减小现象,会导致迎波和背波面系泊索突然张紧和松弛的问题,从而对其系泊系统的安全性产生严重的影响。

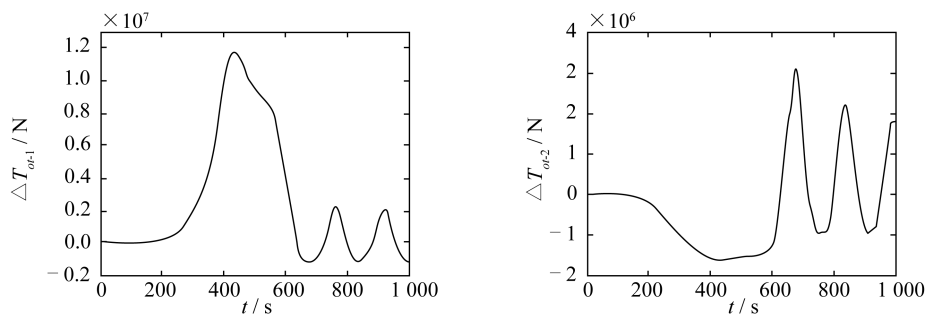


图 6 $a = -170\text{ m}$ 和 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时 Spar 平台系泊顶张力增量时历特性

Fig. 6 Top-tension increment of mooring lines when $a = -170\text{ m}$ and $h_1 : h_2 = 6 : 55$

2.2 载荷与动力响应幅值变化特性

以重块段长度 $S_{cl} = 240\text{ m}$ 为例,对内孤立波作用下 Spar 平台载荷及其动力响应幅值变化特性进行分析。图 7 给出了当 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时,Spar 平台载荷幅值随内孤立波振幅变化特性的数值结果,其中 $\bar{F}_{wh}^{\max}$ 和 $\bar{M}_w^{\max}$ 分别为内孤立波水平力和力矩最大值, $\bar{F}_{wv}^{\max}$ 和 $\bar{F}_{wv}^{\min}$ 分别为内孤立波垂向力最大和最小值。

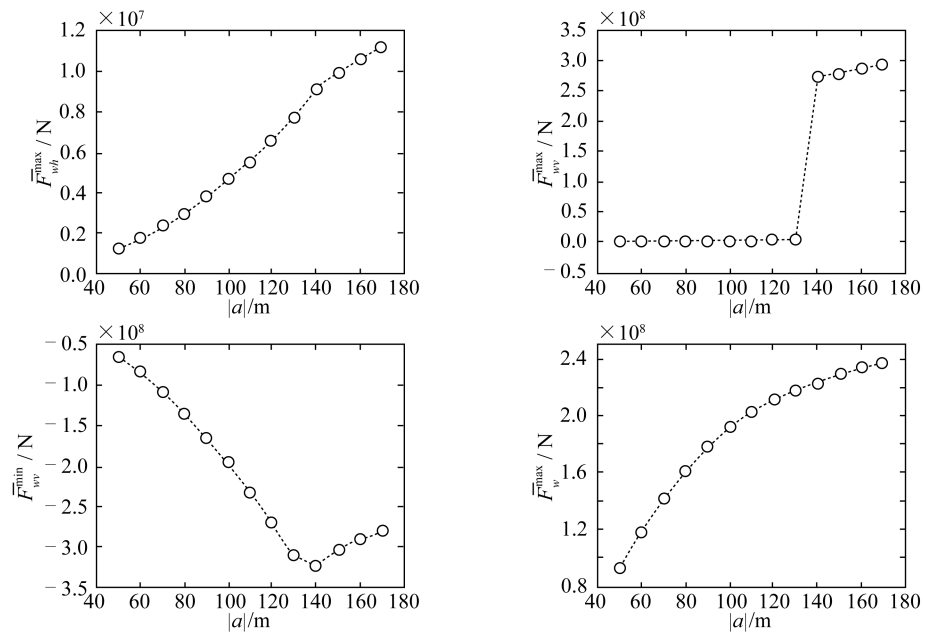


图 7 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时 Spar 平台载荷幅值变化特性

Fig. 7 Characteristic of load amplitudes on spar platform when $h_1 : h_2 = 6 : 55$

结果表明,随着内孤立波振幅的增大,Spar 平台内孤立波水平力和力矩最大值也随着增大;当 $a > -140\text{ m}$ 时,由于 $h_1 + |a| < d$,因此 Spar 平台底部始终位于波面下方,此时垂向力始终为负,且垂向力最小值随内孤立波振幅增大而减小;当 $a < -140\text{ m}$ 时,由于 $h_1 + |a| > d$,在内孤立波波谷到达平台浮筒中心轴之前的某个时刻,垂向力为负,当波面低于平台底部时,垂向力改变方向变为正值,在一段时间之后垂向力重新变回负值,而且垂向力最大值和最小值均随内孤立波振幅增大而增大。

图 8 给出了当 $a = -170\text{ m}$ 时,Spar 平台载荷幅值随上层流体厚度变化特性的数值结果。结果表明,随着上层流体厚度的增大,Spar 平台内孤立波水平力和力矩最大值随之减小,而垂向力最小值则随之增大;当上层流体厚度小于某个临界值时,垂向力最大值随着上层流体厚度的增大而增大,在该临界值处达到最大值,之后则随着上层流体厚度的增大而减小。

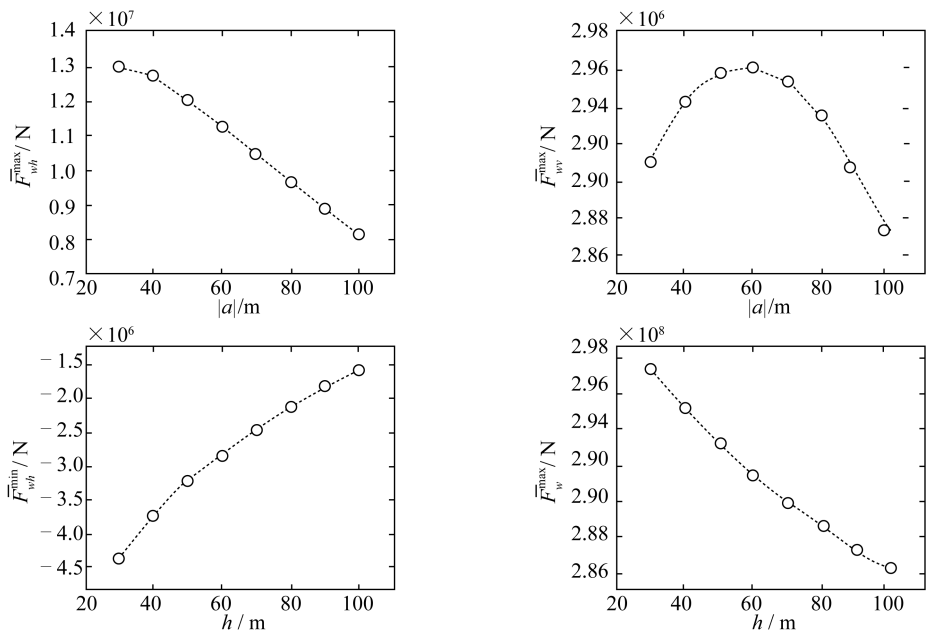


图 8 $a = -170$ m 时 Spar 平台载荷幅值变化特性

Fig. 8 Characteristic of load amplitudes on spar platform when $a = -170$ m

图 9 给出了当 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时, Spar 平台运动响应幅值随内孤立波振幅变化特性的数值结果, 其中 $\bar{X}_1^{\max}$ 为 Spar 平台纵荡位移最大值, $\bar{X}_2^{\min}$ 为 Spar 平台垂荡位移最小值。由于 Spar 平台垂荡运动主要为下沉运动, 而 Spar 平台纵摇响应幅值很小, 因此略去了其垂荡位移最大值和纵摇响应幅值的结果。

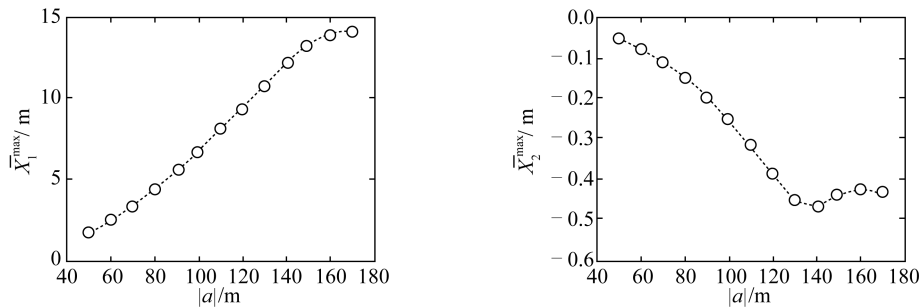


图 9 $h_1 : h_2 = 6 : 55$ 时 Spar 平台运动响应幅值变化特性

Fig. 9 Characteristic of motion amplitudes of spar platform when $h_1 : h_2 = 6 : 55$

图 10 给出了当 $a = -170$ m 时, Spar 平台运动响应幅值随上层流体厚度变化特性的数值结果。结果表明, 随着上层流体厚度的增大, Spar 平台水平力最大值随之减小, 因此其纵荡位移最大值也随之增大, 而 Spar 平台垂向力最小值随之增大, 因此其垂荡位移最小值也随之增大。

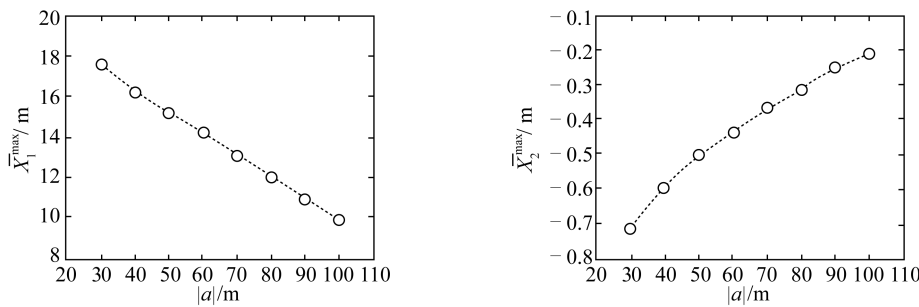


图 10 $a = -170$ m 时 Spar 平台运动响应幅值变化特性

Fig. 10 Characteristic of motion amplitudes of spar platform when $a = -170$ m

图 11 给出了当 $h_1:h_2=6:55$ 时, Spar 平台系泊索顶端张力增量幅值随内孤立波振幅变化特性的数值结果。其中, $\Delta T_{ot-1}^{\max}$ 为 Spar 平台迎波方向系泊索顶端张力增量的最大值, 而 $\Delta T_{ot-2}^{\max}$ 为 Spar 平台背波方向系泊索顶端张力增量的最小值。结果表明, 由于随着内孤立波振幅的增大, Spar 平台水平力最大值随之增大, 因此迎波方向系泊索顶端张力增量的最大值随之增大, 而背波方向系泊索顶端张力增量的最小值则随之减小。

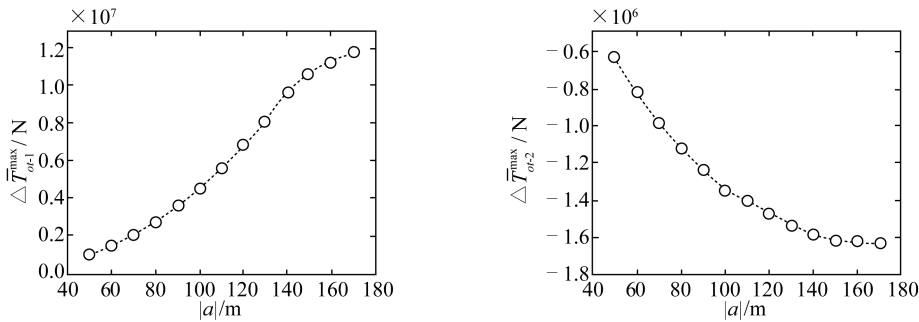


图 11 $h_1:h_2=6:55$ 时 Spar 平台系泊索顶端张力增量幅值变化特性

Fig. 11 Top-tension increment amplitudes of mooring lines when $h_1:h_2=6:55$

图 12 给出了当 $a=-170\text{ m}$ 时, Spar 平台系泊索顶端张力增量幅值随上层流体厚度变化特性的数值结果。结果表明, 由于随着上层流体厚度的增大, Spar 平台纵荡位移最大值随之减小, 因此迎波方向系泊索顶端张力增量的最大值随之减小, 而背波方向系泊索顶端张力增量的最小值则随之增大。

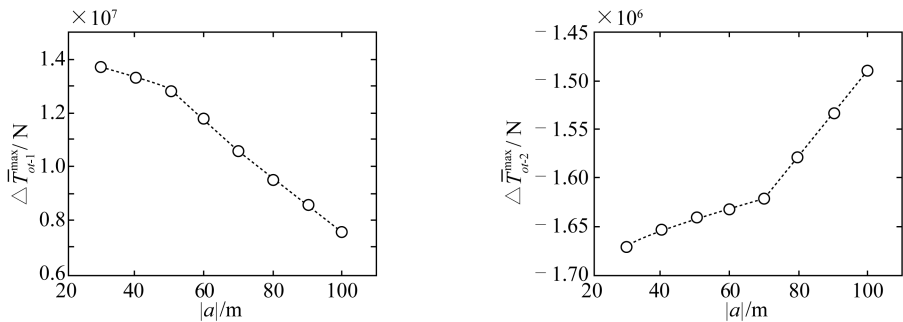


图 12 $a=-170\text{ m}$ 时 Spar 平台系泊索顶端张力增量幅值变化特性

Fig. 12 Top-tension increment amplitudes of mooring lines when $a=-170\text{ m}$

3 结 语

基于两层流体 KdV、eKdV 和 MCC 理论解的适用性条件, 以惯性力和拖曳力系数系列实验结果为依据, 分别采用 Morison 和傅汝德-克雷洛夫公式计算 Spar 平台浮筒侧表面和底部的内孤立波动态载荷, 结合浮体有限位移时域运动方程和悬链线系泊理论, 建立了内孤立波与带悬链线系泊 Spar 平台相互作用的理论模型。对东沙群岛附近海域某实测内孤立波与经典式 Spar 平台的相互作用特性问题进行了数值计算, 分析了其内孤立波的动态载荷、运动响应及其系泊索张力的变化特性。主要结果如下:

悬链线系泊重块段长度对内孤立波作用下 Spar 平台运动响应及其系泊张力会产生显著影响, 增加重块段长度可显著减小平台纵荡位移和系泊顶端张力增量幅值; 内孤立波对 Spar 平台运动响应的影响主要表现为大幅度的水平面运动, 当重块段长度为 240 m, 而内孤立波振幅为 -170 m 时, 平台最大水平位移可达 14 m, 此时系泊顶端张力增加幅值将近 1 150 t; 随着内孤立波振幅的增大, Spar 平台纵荡响应及其系泊张力幅值也随之增大; 而随着上层流体厚度的增加, 平台纵荡响应及其系泊张力幅值则随之减小。

研究表明, 在我国南海深海油气资源开发中, 将内孤立波作为深水浮式平台水动力性能分析与评估的一种重要因素有现实工程需要, 本文为分析与评估内孤立波与 Spar 平台相互作用特性提供了一种切实可行的方法。

参考文献:

- [1] 董艳秋.深海采油平台波浪载荷及响应[M].天津:天津大学出版社,2005. DONG Yanqiu. Wave loads and response of the oil-extraction platform in deep ocean[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 方欣华,杜涛.海洋内波基础和中国海内波[M].青岛:中国海洋大学出版社,2005.(FANG Xinhua, DU Tao. Fundamentals of oceanic internal waves and internal waves in the China Seas[M]. Qingdao: Ocean University of China Press, 2005. (in Chinese))
- [3] V VLASENKO, N STASHCHUK, C GUO, et al. Multimodal structure of baroclinic tides in the South China Sea[J]. Nonlin. Processes Geophys., 2010,17:529-543.
- [4] 陈景辉.南海流花 11-1 深海油田开发工程[J].中国海洋平台, 1996, 11:43-45.(CHEN Jinghui. Liuhua 11-1 deep sea oil-field development project in South China Sea[J]. Chin. Off. Plat., 1996, 11:43-45. (in Chinese))
- [5] BOLE J B, EBBESMEYER C C, ROMEA R D. Soliton currents in the South China Sea;measurements and theoretical modeling [C]// The 16th Offshore Technology Conference in Houston. Texas, USA, 1994: 367-376.
- [6] HELFRICH K R, MELVILLE W K. Long nonlinear internal waves[J]. Ann. Rev. Fluid Mech., 2006,38:395-425.
- [7] 黄文昊,尤云祥,王旭,等. 有限深两层流体中内孤立波造波实验及其理论模型[J].物理学报,2013,62(8):084705. (HUANG Wenhao, YOU Yunxiang, WANG Xu, et al. Wave-making experiments and theoretical models for internal solitary waves in a two-layer fluid of finite depth[J]. Acta Phys. Sin., 2013,62(8):084705. (in Chinese))
- [8] FALTINSEN OM.Sea loads on ships and offshore structures[M]. London:Cambridge University Press,1993.
- [9] CHENG Y L, LI J C, LIU Y F. The induced flow field by internal solitary wave and its action on cylindrical piles in the stratified ocean[J]. Recent Advances in Fluid Mechanics, Qinghua-Springer, 2004,296-299.
- [10] CAI S Q, LONG X M, GAN Z J. A method to estimate the forces exerted by internal solitons on cylinder piles[J]. Ocean Engineering, 2003, 30:673-689.
- [11] CAI S Q, LONG X M, WANG S G. Force and torques exerted by internal solitons in shear flows on cylinder piles[J]. Applied Ocean Research, 2008, 30:72-77.
- [12] XIE J S, JIANG Y J, YANG L G. Strongly nonlinear internal solution load on a small vertical circular cylinder in two-layer fluids [J]. Applied Mathematical Modelling, 2010, 34:2089-2101.
- [13] XIE J S, XU J X, CAI S Q. A numerical study of the load on cylindrical piles exerted by internal solitary waves[J]. Journal of Fluids and Structures, 2011, 27:1252-1261.
- [14] 宋志军,勾莹,滕斌,等.内孤立波作用下 Spar 平台的运动响应[J].海洋学报,2010,32:12-19. (SONG Zhijun, GOU Ying, TENG Bin, et al. The motion response of a spar platform under internal solitary wave[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010,32: 12-19. (in Chinese))
- [15] 尤云祥,李巍,胡天群,等.内孤立波中半潜平台动力响应特性[J].海洋工程,2012,30(2):1-7. (YOU Yunxiang, LI Wei, HU Tianqun, et al. Dynamic responses of a semi-submersible platform in internal solitary waves[J]. The Ocean Engineering, 2012,30(2)1-7. (in Chinese))
- [16] 尤云祥,李巍,何景异.海洋内孤立波中张力腿平台的水动力特性[J].上海交通大学学报,2010,44(1):12-17. (YOU Yunxiang, LI Wei, HE Jingyi. Hydrodynamic characteristics of tension leg platforms in ocean internal solitary waves[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong Univ., 2010, 44(1):12-17. (in Chinese))
- [17] 黄文昊,尤云祥,王旭,等.圆柱型结构内孤立波载荷实验及其理论模型[J].力学学报,2013,45(5):1-13. (HUANG Wenhao, YOU Yunxiang, WANG Xu, et al. Internal solitary wave loads experiments and its theoretical model for a cylindrical structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2013,45(5):1-13. (in Chinese))
- [18] CAMASSA R, CHOI W, MICHALLET H, et al. On the realm of validity of strongly nonlinear asymptotic approximations for internal waves[J]. J. Fluid Mech., 2006,549:1-23.
- [19] AGARWAL A K, JAIN A K. Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves[J]. Ocean Engineering, 2003,30(4):487-516.
- [20] CHANG M H, LLEN R C, et al. Nonlinear internal wave properties estimated with moored ADCP measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2011,28(6):802-815.