

内孤立波作用下 Spar 平台的运动响应

宋志军¹, 勾莹¹, 滕斌¹, 时忠民², 屈衍², 肖越²

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘要: 建立了内孤立波作用下 Spar 平台运动响应的时域数值模型, 并利用这一模型计算了内孤立波作用下 Spar 平台的运动响应。其中根据 K-dv 方程解出内孤立波的波面及水质点速度表达式, 应用 Morison 公式求出内孤立波对 Spar 平台的水平作用力; 由伯努力方程求解压强, 通过在平台底面积分求出内孤立波对 Spar 平台的垂向作用力; 在悬链线理论的基础上, 分析锚链对平台的作用力, 采用四阶 Runge-Kutta 方法求解运动方程。数值结果表明, 当内孤立波不断接近海洋平台时, Spar 平台受到的作用力随之增大, 海洋平台会产生远大于表面波作用下的水平位移, 从而证实了内孤立波是影响海洋平台稳定的重要因素, 在海洋平台的设计和评估中内孤立波的作用是不可忽略的。

关键词: 内孤立波; Spar 平台; Morison 公式; 悬链线理论; 运动响应

中图分类号: P722 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-4193(2010)02-0012-08

1 引言

海洋中蕴藏着丰富的矿物、油气、水产和空间等资源^[1]。随着人口的增长和经济发展, 陆上资源日渐枯竭, 因此世界各国越来越关注海洋资源的开发。海洋中复杂的环境灾害是影响海洋开发的主要因素, 海洋内波就是其中之一。

海洋内波发生在水体内部, 在水面上往往不易觉察到内波的存在和活动。1893—1896 年, 挪威“弗雷姆”号考查船在北极探险过程中, F. 南森发觉船只驶入上层有冰融化淡水区域时突然减速, 并将其称为“Dead water”。经研究知道, “Dead water”现象是由于船舶航行在密度跃层上, 产生内波而做功耗费能量, 所以船舶难于前进, 这是海洋内波的早期发现^[2]。

南海水深、风大、浪高, 海水密度层化现象严重, 海洋内波活动频繁^[3]。1990 年, 在南海流花油田的早期延长测试期间, 就曾发生过因内波产生的突发

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事故^[4]。1990 年 7 月 14 日, 在南海陆丰油田, 内波产生的突发性强流使半潜式钻井船“南海 VI”号与锚定的油轮“Ayer Biru”在连接油管时发生困难; 继之, 在 8 月 12 日, 在不到 5 min 时间内, 强流又使该油轮摆动 110°角^[5]。

可见, 海洋内波是深海油气资源开发的灾害性海洋环境因素之一。内孤立波的波幅比较大, 而且对结构物作用力的方向始终不变, 所以内孤立波对结构物稳定性的影响更大。但迄今所见报道仅局限于一些内孤立波作用下结构物上的受力等, 如程友良^[6]、蔡树群^[7-8]和沈国光^[9]等, 采用 Morison 公式, 研究了分层流体中内孤立波对小尺度杆件的载荷特性问题, Jeffery 等^[10]采用渐近匹配方法, 研究了内孤立波在薄板和台阶上的反射与透射规律。而对内孤立波作用下实际海洋平台运动响应和系泊系统受力的研究却很少。

本文采用 K-dv 方程的内孤立波解, 采用 Mor-

收稿日期: 2009-12-11; 修订日期: 2010-04-22。

基金项目: 国家自然科学基金(10772040; 50639030; 50921001); 国家科技重大专项(2008ZX05026-02-02)。

作者简介: 宋志军(1983—), 男, 吉林省辽源市人, 硕士研究生, 从事波浪与海上建筑物作用研究。E-mail: songzj1026@126.com

ison 公式建立了时域模拟内孤立波作用下 Spar 平台运动响应的数值模型。其中锚链对 Spar 平台的作用力采用悬链线理论, 4 阶 Runge-Kutta 方法求解平台运动方程。通过计算得出内孤立波作用下 Spar 平台会产生很大的水平位移, 因此内孤立波的作用不可忽略。本文第 2 部分主要介绍本数值模型的理论基础, 第 3 部分计算了 Spar 平台在内孤立波作用下的运动响应, 并对数值结果进行了分析, 第 4 部分对数值结果进行总结, 并得到一些有意义的结论。

2 数值方法

在 Spar 平台转角很小的假定下, 运动的 Spar 平台在任意时刻受到的波浪水平力和垂向力分别是内孤立波产生的水平激振力和垂向波浪力。

2.1 用 Morison 公式求内孤立波的水平激振力

在密度分层海洋中, 内孤立波大多是在内潮的传播过程中生成的, 在陆坡和海槛区域大多是潮流经海底地形影响直接生成或者是斜向传播的内潮波与海底和跃层相互作用产生^[11]。内孤立波的稳定传播是频散效应和非线性效应动力学平衡的结果, 可以用 K-dv 方程、KP 方程或 BO 方程等描述^[12-13]。在两层模式下, 忽略浅水项和耗散项, 非线性自由长内波在水平方向(X 方向)的传播过程可用 K-dv 方程描述^[14]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (C_0 + \alpha \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

式中, η 为内波界面位移; t 为时间; C_0, α, β 分别为线性波速、一阶非线性项和频散项的系数。 C_0, α, β 分别表示为:

$$C_0 = \left[\frac{g \Delta \rho h_1 h_2}{\rho (h_1 + h_2)} \right]^{1/2}, \quad \alpha = \frac{3C_0 (h_1 - h_2)}{2h_1 h_2}, \quad \beta = \frac{C_0 h_1 h_2}{6}, \quad (2)$$

式中, $\Delta \rho = \rho_2 - \rho_1, \rho = \frac{\rho_2 + \rho_1}{2}$; ρ_1, ρ_2 是上、下层流体的密度; h_1 和 h_2 是未经扰动时上、下层流体的深度(如图 1)。

方程(1)的解如下:

$$\eta = -\eta_0 \operatorname{sech}^2 \left(\frac{x - C_p t}{l} \right), \quad (3)$$

式中, η_0 是内孤立波的波幅, C_p 是内孤立波的相速度, l 定义为内孤立波的半波宽度。 C_p 和 l 分别表

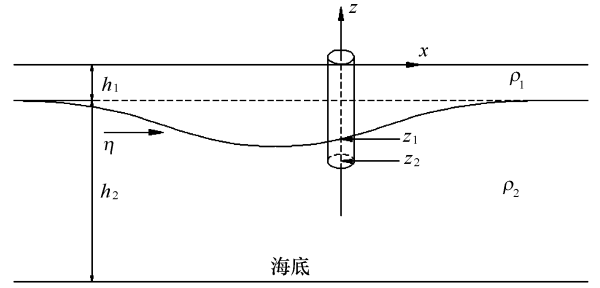


图 1 内孤立波示意图

示为:

$$C_p = C_0 \left[1 - \frac{\eta_0 (h_1 - h_2)}{2h_1 h_2} \right], \quad l = (2h_1 h_2) / \sqrt{3\eta_0 (h_2 - h_1)}; \quad (4)$$

上、下两层水体中水质点的水平速度为:

$$u_j(x, t) = (-1)^{(j+1)} \frac{C_0 \eta_0}{h_j} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{x - C_p t}{l} \right) \quad j = 1, 2. \quad (5)$$

内孤立波的等效波长远大于 Spar 平台的特征长度, 每层流体中单位长结构上的水平内波作用力可用 Morison 公式^[15]计算为:

$$f_j = \rho_j A a + \rho_j (C_m - 1.0) A a_{rj} + \frac{1}{2} \rho_j C_d D u_{rj} |u_{rj}| \quad j = 1, 2, \quad (6)$$

式中, $u_{rj} = u_j - \dot{x}$ 是流体相对于结构的速度, u_j 是内孤立波引起的上、下层水质点速度, \dot{x} 是垂直于物体轴线方向的物体运动速度, $a_j = \dot{u}_j$ 是流体的加速度, $a_{rj} = \dot{u}_j - \ddot{x}$ 是流体相对于结构的加速度, \ddot{x} 是垂直于物体轴线方向的物体运动加速度, A 是结构物的横截面积, D 是结构的水平尺度(对于圆柱为直径), C_d 是速度力系数, C_m 是惯性力系数。对于 Spar 平台, 取 $C_d = 1.0, C_m = 2.0$ 。当用相对速度公式求拖曳力时, 一般不应再计算附加的水动力阻尼。

对于如图 1 所示的 Spar 平台, 物体上的内波总水平力可写为:

$$F_x(t) = \int_{z_2}^{z_1} f_2(z, t) dz + \int_{z_1}^0 f_1(z, t) dz, \quad (7)$$

2.2 内孤立波对平台的垂向波浪力

内孤立波作用下流场中任一点的压强 p 可由伯努利方程求得为:

$$p = \begin{cases} -\rho_1 \left(gz + \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + \frac{1}{2} (u_1^2 + w_1^2) \right) & \text{在上层流体中,} \\ -\rho_2 \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} g(-h_1) + g(z+h_1) + \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} (u_2^2 + w_2^2) \right) & \text{在下层流体中,} \end{cases} \quad (8)$$

式中, g 是重力加速度, u 和 w 分别是流体质点的水平速度和垂向速度, Φ 是速度势, t 是时间。

动压强产生的内孤立波对平台的垂向波浪力为:

$$F_z = \begin{cases} \iint_{S_{\text{底}}} \left\{ -\rho_1 \left[\frac{\partial \Phi_1}{\partial t} + \frac{1}{2} (u_1^2 + w_1^2) \right] \right\} ds & \text{当柱底面在上层流体中,} \\ \iint_{S_{\text{底}}} \left\{ -\rho_2 \left[\frac{\partial \Phi_2}{\partial t} + \frac{1}{2} (u_2^2 + w_2^2) \right] \right\} ds & \text{当柱底面在下层流体中.} \end{cases} \quad (9)$$

内孤立波在传播过程中波形是稳定的, 所以速度势对时间的导数满足以下关系:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -C_p \frac{\partial \Phi}{\partial x} = -C_p u. \quad (10)$$

流体质点满足拉普拉斯方程 $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$, 质点垂向速度 w 可表达为:

$$w = \begin{cases} \frac{2C_0 \eta_0 z}{h_1 l} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{x - C_p t}{l} \right) \tanh \left(\frac{x - C_p t}{l} \right) & \text{在上层流体中,} \\ -\frac{2C_0 \eta_0 (z + h_1 + h_2)}{h_2 l} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{x - C_p t}{l} \right) \cdot \tanh \left(\frac{x - C_p t}{l} \right) & \text{在下层流体中,} \end{cases} \quad (11)$$

由式(5)、式(10)和式(11)代入式(9)即可求出内波对 Spar 平台的垂向波浪力。

2.3 计算锚链力

在本模型中, 锚链由锚泊链、配重链和锚定链三部分组成(如图 2)。在计算锚链力过程中存在以下基本假定: 海底面是水平、刚性、无摩擦; 锚链的各部分在水中的运动很缓慢, 锚链的惯性力忽略不计; 锚泊线和锚链线的初始长度包含初始张力产生的伸长; 重块部分不可伸长; 锚定点不能移动。

2.3.1 悬链线理论

力与位移的关系是非线性的, 锚链力的求解需要用迭代的方法。悬链线方程^[16]可用于计算锚链力与位移之间的关系。对于任何自由悬起的部分, 水平投影和垂向投影(如图 3)可以表示为:

$$Y = (H_t/W) \{ \cosh[\sinh^{-1}(\tan\theta_t)] - \cosh[\sinh^{-1}(\tan\theta_b)] \}, \quad (12)$$

$$X = (H_t/W) [\sinh^{-1}(\tan\theta_t) - \sinh^{-1}(\tan\theta_b)], \quad (13)$$

$$\tan\theta_b = (V_t - WS)/H_t, \quad (14)$$

$$V_t = H_t \tan\theta_t, \quad (15)$$

如果 H_t, Y, W, θ_t 已知, 那么:

$$\tan\theta_b = \sinh \{ \cosh^{-1} [\cosh(\sinh^{-1}(\tan\theta_t)) - (YW/H_t)] \}, \quad (16)$$

$$S = H_t (\tan\theta_t - \tan\theta_b) / W, \quad (17)$$

由方程(13)可计算锚链的水平投影 X 。

设某一段的初始张力为 T_0 , 相应的初始长度为 S_0 , 当张力为 T 时, 该段锚链的长度可表达为:

$$S = S_0 [1 + (T - T_0) / EA], \quad (18)$$

式中, E 和 A 分别是杨氏模量和有效面积, T 和 T_0 分别是当时时刻和初始时刻两端张力的平均值。

该段锚链的总重量保持不变, 单位长度的重量可以表达为:

$$W = (S_0 W_0) / S, \quad (19)$$

式中, W_0 是该段锚链的初始单位长度重量。

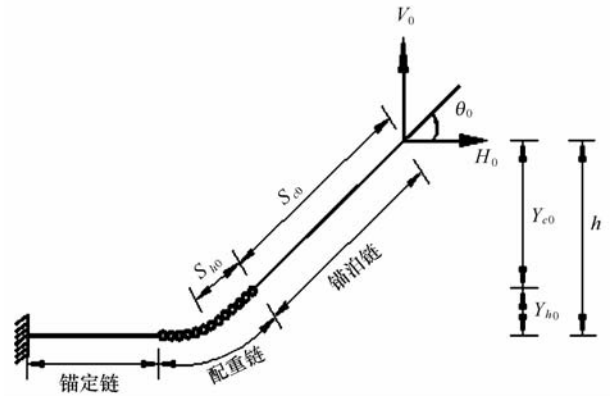


图 2 初始时刻锚链示意图

2.3.2 应用悬链线理论求瞬时位置单根锚链力

对单根锚链在某一瞬时位置处拉力的计算步骤如下:

步骤 1: 计算结构初始状态。调整配重链的悬起长度 S_{h0} , 使锚泊链的垂向投影 Y_{e0} 与重块的垂向投影 Y_{h0} 之和等于锚链的垂向投影 h 。当 S_{h0} 的值确

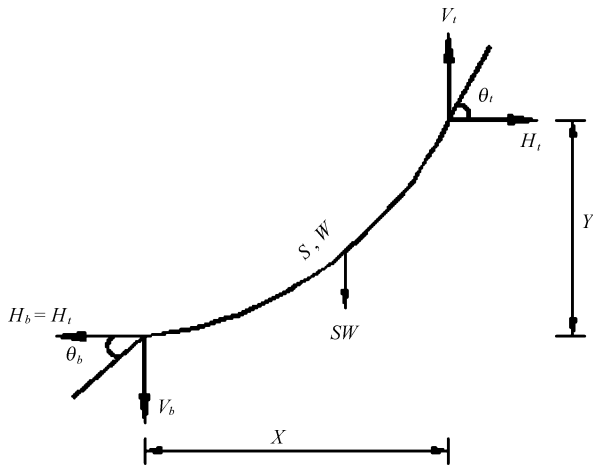


图3 锚链自由悬起部分受力示意图

定后,计算锚泊线的长度 S_{00} 和锚链初始总悬起长度及其水平投影。

步骤2:给定锚链顶端的水平和垂向位移,计算锚链形状和拉力。通过调整锚链顶端水平力的值,使锚链各部分垂向投影之和等于锚链的垂向投影,然后计算锚链的水平投影及锚链顶端的水平偏移量。

步骤3:计算瞬时位置的单根锚链力。为了提高效率,本文先求出在一定位移范围内的锚链力,然后用插值法求出瞬时位置的锚链力,具体步骤如下:

(1)估计锚链垂向位移的范围及锚链垂向力的范围(锚链垂向力的范围决定锚链水平位移的范围);

(2)求不同的锚链顶端水平和垂向位移,计算锚链拉力,构建数据库;

(3)应用插值法,求出单根锚链在瞬时位置的锚链力。

2.4 运动方程

物体运动响应幅值需要通过刚体运动方程确定:

$$[M][\ddot{X}] + [C][X] = [f] + [f_e], \quad (20)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵; $[X]$ 为广义位移, 变量上方的点表示对时间的导数; $[C]$ 为恢复力矩阵, 两层流体之间的密度差很小, 因此恢复力矩阵近似为单层流体的恢复力矩阵; $[f]$ 为流体对平台作用力, $[f]$ 包括内孤立波产生的水平激振力 F_x 和垂向波浪力 F_z , 重力与浮力已相抵消; $[f_e]$ 为锚链力。其中,

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & m(z_c - z_0) \\ 0 & m & -m(x_c - x_0) \\ m(z_c - z_0) & -m(x_c - x_0) & I \end{bmatrix},$$

式中 (x_c, y_c, z_c) 为质心, (x_0, y_0, z_0) 为转动中心, m

是 Spar 平台的质量, I 是 Spar 平台绕 y 轴的惯性矩; 当转动中心取为质心时,

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \quad [X] = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \omega \end{bmatrix},$$

式中 X_1 和 X_2 分别是沿 x 轴和 z 轴方向的位移, ω 是绕 y 轴转动的角速度。

这3个耦合的二阶微分方程可采用数值积分的方法求解, 本模型采用4阶 Runge-Kutta 方法^[17]求解运动方程。

3 数值计算

采用上述数值模型, 计算内孤立波作用下 Spar 平台的运动响应。

3.1 模型结构

经典 Spar 平台主要由平台上层建筑、平台主体和系泊系统组成, 其简化模型如图4所示, 主要参数^[16]见表1。该平台由四条分段式系泊索锚泊于海底, 锚链分布如图5所示。锚链初始水平张力为2000 kN, 其他参数见表2。

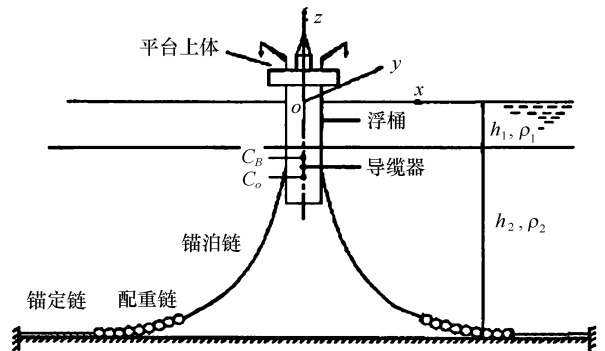


图4 Spar 平台结构示意图

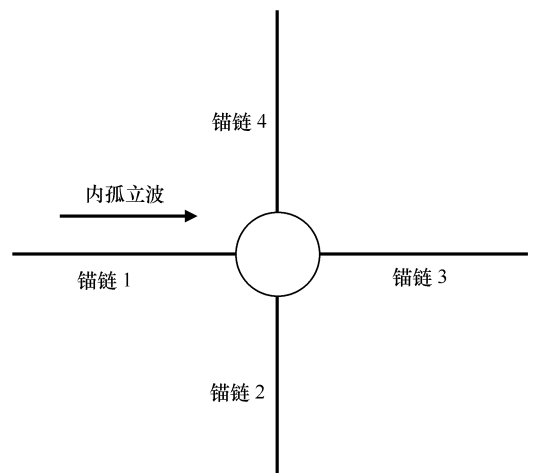


图5 Spar 平台锚链分布图

表 1 Spar 平台的参数

参数	取值
Spar 平台的重量	2.6×10^6 kN
Spar 平台浮筒直径	40.52 m
Spar 平台吃水	198.2 m
重心至浮心的距离	6.67 m
底面至重心的距离	92.4 m
重心至导缆孔的距离	0.2 m

表 2 锚链的主要参数

参数	取值
锚泊线和锚定线的杨氏模量	2.1×10^{10} kN/m
锚泊线和锚定线有效截面积	0.003 2 m ²
锚泊线和锚定线单位重量	293.2 N/m
重块单位重量	25 000 N/m
锚泊线顶端倾角	30°
配重链总长	40 m
锚泊线总长	800 m

3.2 内波参数

参照蔡树群等人^[8]在南海的东沙群岛南部海域附近观察到的数据,本数值模型的内波参数如下:上层水深 $h_1 = 70$ m,密度 $\rho_1 = 1\ 025$ kg/m³;下层水深 $h_2 = 844.4$ m,密度 $\rho_2 = 1\ 028$ kg/m³;波幅 $\eta_0 = 75$ m;内孤立波为下凹型;在计算的初始时刻,内孤立波波峰离平台中心轴的距离为 2 000 m。

3.3 数值结果分析

根据悬链线理论,我们可以得到位移与单根锚链力之间的关系曲线(如图 6)。由图 6 可知,单根锚链力与位移呈非线性关系,单根锚链力随着水平位移的增大而增大,当水平位移达到某一定值(锚链全部悬起时)以后,锚链拉力曲线变化关系发生变化,开始增长缓慢,然后快速增大。

图 7 是 Spar 平台初始位置中轴线处内孤立波波面历程图,随着内孤立波不断向 X 轴正方向传播,Spar 平台初始位置中轴线处的内波界面逐渐下凹,下凹的最大值为内孤立波的幅值;达到最大值后,该处内波界面的下凹幅度开始减小,最终恢复到初始时的位置。从数值计算的结果看,内孤立波作用的时间超过了 10 min。

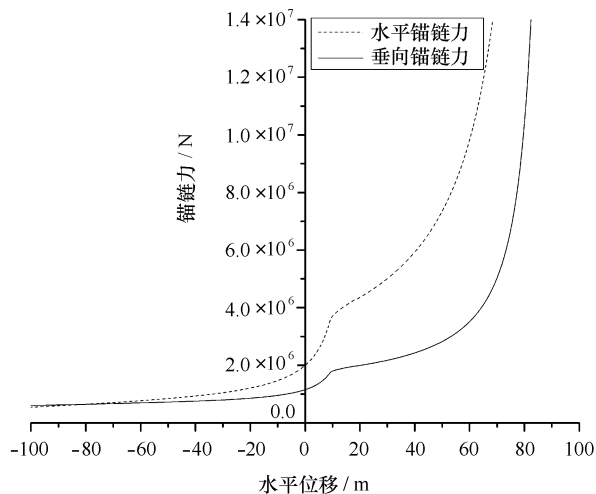


图 6 垂向位移为 0 时水平位移与锚链力之间关系

图 8 是 Spar 平台受到内孤立波作用的时间过程图。图 8a 是 Spar 平台受到的内孤立波水平力历程图,水平力是应用 Morison 公式求得的;图 8b 是 Spar 平台受到的内孤立波垂向力历程图,垂向力是由动压强在 Spar 平台底面积分求得的;图 8c 是 Spar 平台受到的内孤立波转动动力矩历程图。随着内孤立波向 X 轴正方向传播,Spar 平台受到的内孤立波水平力、垂向力和转动动力矩都是先逐渐增大,然后在达到最大值后逐渐减小,最终恢复到零。

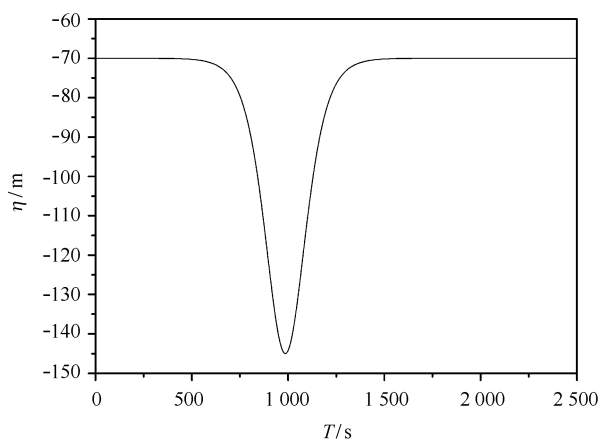


图 7 Spar 平台初始位置中轴线处内波波面时间过程图

图 9 是 Spar 平台位移的时间过程图。在水平张力为 2 000 kN、顶端倾角为 30°时,Spar 平台在垂向并没有达到平衡,根据静力平衡求出垂向平衡位置在静水面上 1.50 m 处,图 9b 中的零点为静平衡位置。图 9a 是 Spar 平台的纵荡历程图,随着内孤立波不断向 X 轴正方向传播,Spar 平台的水平位移

先增大后减小,最终在平衡位置振荡,最大值已接近 50 m。图 9b 是 Spar 平台的垂荡历程图,随着 Spar 平台水平位移的增大,锚链总力的垂向分量逐渐增大,Spar 平台随之下沉;当内孤立波传过后,Spar 平台向初始位置移动,锚链总力的垂向分量逐渐减小,Spar 平台随之上升,最终恢复到初始平衡位置。Spar 平台的垂向位移比较小,最大垂向位移接近 0.12 m,仅是 Spar 平台吃水的 0.013%。图 9c 是 Spar 平台的纵摇历程图,最大值是 1.0×10^{-2} rad,纵摇的幅度很小,满足小转角的假定。

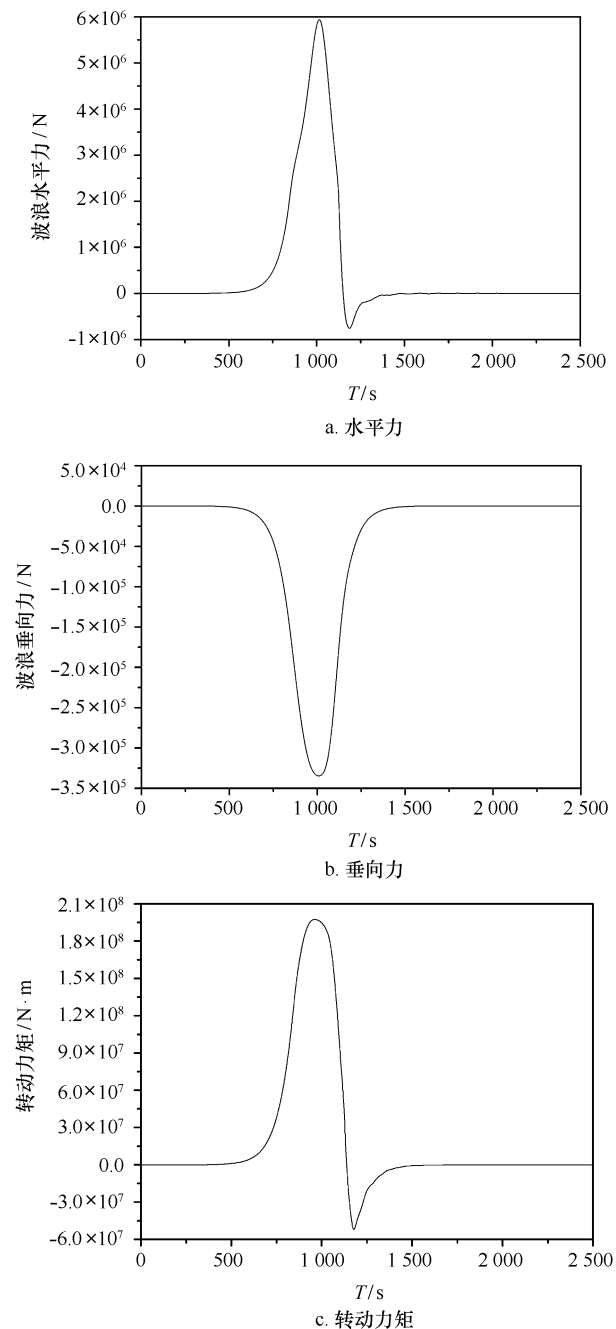


图 8 Spar 平台上内孤立波作用力时间过程图

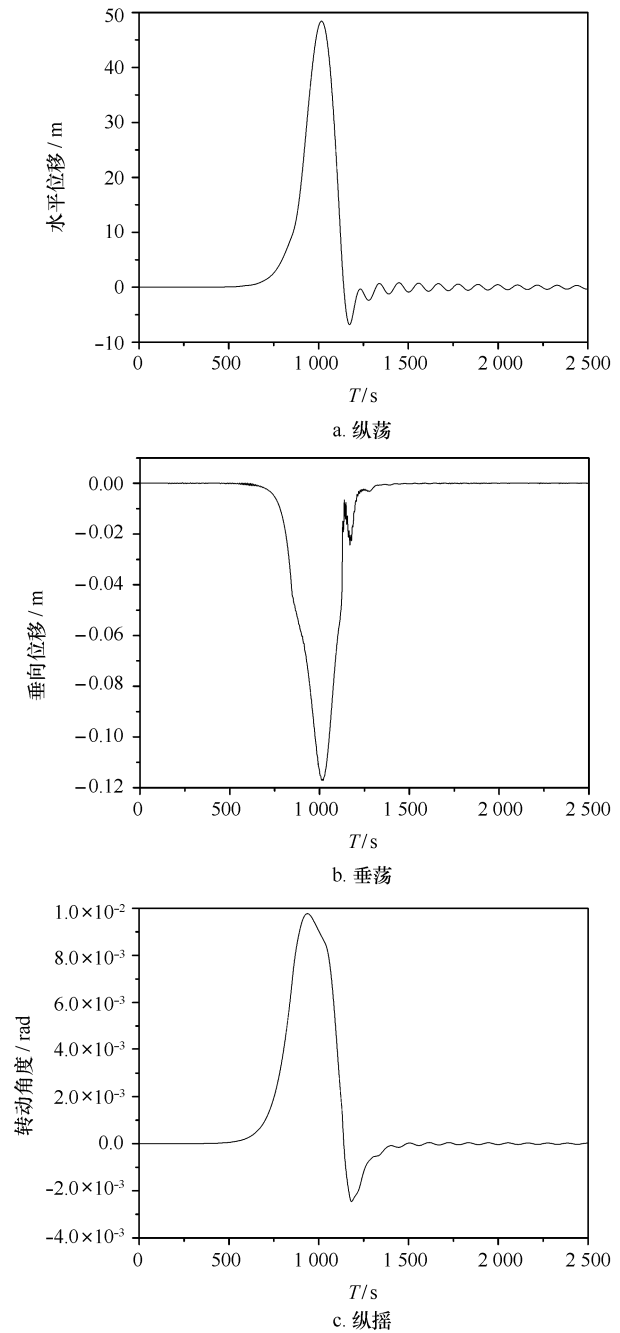


图 9 Spar 平台位移时间过程图

图 10 是 Spar 平台锚链力变化的时间过程图。随着 Spar 平台向 X 轴正方向移动,锚链 1 悬起的长度逐渐增大,而锚链 3 悬起的长度逐渐减小。在 845 s 时,锚链 1 的重块部分刚好全部悬起,在图 10a 中相应时刻存在一个拐点。当 Spar 平台向平衡位置移动时,锚链 1 悬起的长度逐渐减小,而锚链 3 悬起的长度逐渐增加。在 1 140 s 时,锚链 1 的重块部分开始与海底接触,在图 10a 中相应时刻也存

在一个拐点。当 Spar 平台在平衡位置振荡时,锚链力的大小也随之振荡。

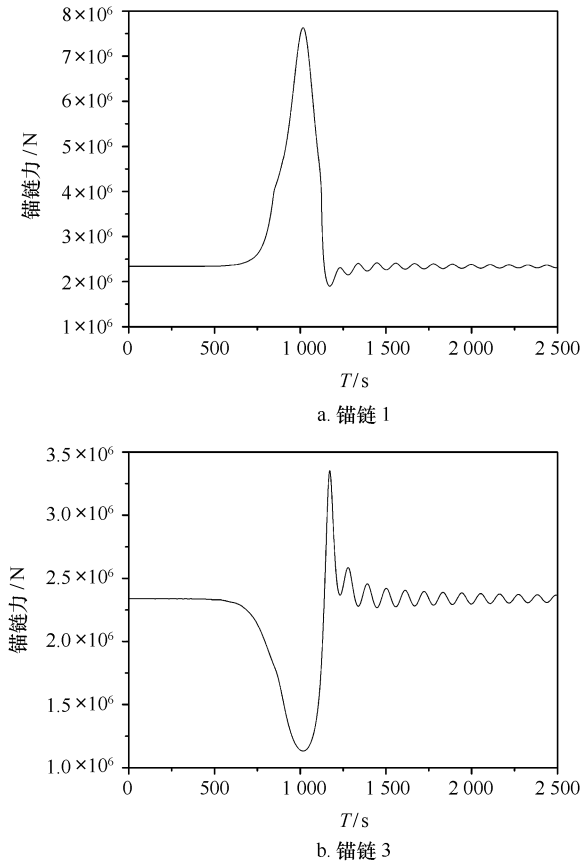


图 10 锚链力变化时间过程图

从图 7—图 10 的分析可知:在初始时刻,内孤立波与海洋平台之间的距离很远,平台初始位置中轴线处内波界面没有任何扰动,内孤立波对海洋平台没有任何影响。随着内孤立波不断向 X 轴正方向传播,平台初始位置中轴线处内波界面开始逐渐下凹(如图 7);随着内孤立波波峰与海洋平台之间的距离逐渐减小,内孤立波对海洋平台的作用越来越明显,内孤立波对海洋平台的水平力、垂向力和转动力矩都在增大(如图 8),进而导致海洋平台的水平位移、垂向位移和转动角度不断增大(如图 9)。当内孤立波波峰到达 Spar 平台中心轴时,内孤立波对平台的作用力达到最大;几乎在同一时刻,平台的位移达到最大。随着内孤立波继续向 X 轴正方向传播,内孤立波对平台的作用力越来越小,这时由于受锚链的作用,平台向初始平衡位置运动;当内孤立波对平台的作用力很小时,平台在自振频率下进行振荡(如图 9)。平台的运动带动锚泊系统,在悬链线理论上锚链力的大小只与平台位置有关,锚链力

达到极值的时刻与 Spar 平台达到最大位移的时刻是一致的(如图 10)。

为了比较内孤立波作用与表面波作用的大小关系,本文将本模型的计算结果与 Agarwal 等人^[16]计算的表面波结果进行了对比(如表 3)。Agarwal 等人计算的海洋平台模型、锚泊系统和水深皆与本文模型相同,表面波的波高为 7.0 m,周期为 12.5 s。从二者的比较中可知,Spar 平台在内孤立波的作用下产生的水平位移为 48.44 m,而表面波作用下产生的水平位移为 13.47 m,即内孤立波作用下产生了很大的位移。在内孤立波模型中,每层流体水质点的运动方向始终是不变的,海洋平台受到内孤立波作用力的方向是不变的,而 Spar 平台的水平自振频率很低,这样在内孤立波的作用下,Spar 平台会产生很大的位移,这对海洋平台的设计和评估有重要的影响。

表 3 比较海洋平台在内孤立波与表面波下的运动响应

	内孤立波计算结果	表面波计算结果
纵荡/m	48.44	13.47
垂荡/m	0.12	1.36
纵摇/rad	0.01	0.04

4 结论

本文在 K-dv 方程内波理论的基础上,应用 Morison 公式计算了内孤立波作用下 Spar 平台上的水平作用力,利用压强积分方法计算了内波产生的垂向作用力,使用悬链线理论计算锚链的力学特性,并用插值法求出瞬时位置的锚链力,利用时域分析方法模拟了 Spar 平台在内孤立波作用下的运动过程。计算表明:当内孤立波离 Spar 平台较远时,内孤立波对 Spar 平台几乎没有影响;当内孤立波波峰接近 Spar 平台时,Spar 平台受到的内波作用力不断增大,相应地 Spar 平台产生很大的水平位移,这对海洋平台和锚泊系统都有重要的影响。当取孤立波波幅为 75 m、锚链顶端初始水平张力为 2 000 kN 时,Spar 平台的水平位移可达到 48.44 m,单根锚链力最大可达 7.63×10^6 N,而表面波产生的水平位移仅达到 13.47 m,即内波对该 Spar 平台的作用远大于表面波的作用。由此可见,内孤立波是影响海洋平台稳定的重要因素之一,在海洋平台设计和稳定评估中,应充分考虑内孤立波对海洋平台的作用。

参考文献:

- [1] 李家春. 水面下的波浪——海洋内波[J]. 力学与实践, 2005, 27(2):1—5.
- [2] 富永政英. 海洋波动——基础理论和观测成果[M]. 北京:科学出版社, 1976:423—456.
- [3] 杜涛,吴巍,方欣华. 海洋内波的产生与分布[J]. 海洋科学, 2001, 25(4):25—28.
- [4] 陈景辉. 南海流花 11-1 深海油田开发工程[J]. 中国海洋 Spar 平台, 1996, 11(1):43—45.
- [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] CHENG Y L, LI J C, LIU Y F. The induced flow field by internal solitary wave and its action on cylindrical pipes in the stratified ocean [C]// ZHUANG F G, LI J C. Recent Advances in Fluid Mechanics. Qinghua-Aspringer, 2004:296—299.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 沈国光,叶春生. 内波孤立子的非波导载荷计算[J]. 天津大学学报, 2005, 38(12):1043—1050.
- [10] JEFFERY A, RAMOLLO M P. Reflection and transmission of internal solitary waves across a barrier[J]. Wave Motion, 1995, 22: 325—333.
- [11] MAXWORTH T. A note on the internal solitary waves produced by tidal flow over a three-dimensional ridge[J]. J Geophys Res, 1979, 84C:338—346.
- [12] MICHALLET M, BARTHELEMY E. Experimental study of interfacial solitary waves[J]. Journal of Fluid Mech, 1998, 336:159—177.
- [13] GEAR J A, GRIMSHAW R. A second-order theory for solitary waves in shallow fluids[J]. Phys. Fluids, 1983, 26(1):14—29.
- [14] OSBORNE A R, BURCH T L. Internal Solitons in the Andaman Sea[J]. Science, 1980, 208:451—460.
- [15] DNV-RP-C205, Environmental conditions and environmental loads[S].
- [16] AGARWAL A K, JAIN A K. Dynamic behavior of offshore spar platforms under regular sea waves [J]. Ocean Engineering, 2003, 30: 487—516.
- [17] 李玉成,滕斌. 波浪对海上建筑物的作用[M]. 北京:海洋出版社, 2002:94—95.

The motion responses of a Spar platform under internal solitary wave

SONG Zhi-jun¹, GOU Ying¹, TENG Bin¹, SHI Zhong-min², QU Yan², XIAO Yue²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. China Offshore Oil Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract: In this paper, a time-domain numerical model is established to consider the motion responses of a Spar platform induced by internal solitary wave which satisfies the K-dv equation. The horizontal force on the Spar is computed by Morison equation and the vertical force is computed by integration of the fluid pressure on the Spar bottom based on Bernoulli equation. The catenary theory is used to analyze the mooring force. The motion equation is solved by using fourth-order Runge-Kutta method. The numerical results show that when the internal solitary approaches to the Spar platform, the platform produces a much greater displacement comparing with the displacement induced by the surface waves. It is approved that internal solitary wave is one of the important effecting factors for the stability of offshore platform. Therefore the influence of internal solitary wave on the deep-sea platforms can not be neglected in design and estimation.

Key words: internal solitary wave; Spar platform; Morison equation; catenary theory; motion response