

海洋钻井隔水管系统动力学行为研究

李 旭¹, 朱志强², 冯颖韬¹, 赵 琥¹, 温达洋¹, 山永林¹, 林黎明³

1 中海油田服务股份有限公司 2 北京科技大学机械工程学院

3 中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室

摘 要: 准确把握隔水管系统的动力学行为特征是保障海洋钻井管柱系统安全性的基础。文章通过 Hamilton 原理建立了海洋钻井隔水管的动力学模型, 通过引入弯曲梁单元的 Hermite 三次插值函数作为形函数将动力学模型进行离散化, 并进一步通过对质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵以及外力列向量的分类整合, 最终形成了隔水管系统的整体有限元模型。在此基础上, 通过 Newmark 积分法对隔水管系统的动力学响应进行数值求解, 并进一步探讨了不同参数对隔水管系统动力学行为的影响。通过数值模拟结果的对比发现, 对于海洋环境载荷而言, 海流力对隔水管偏移的影响要大于波浪力; 隔水管的加厚和顶张力的提升都是控制隔水管振动和偏移的有效手段; 此外, 浮力块提供的浮力越大, 隔水管的弯曲应力和横向偏移也越大。因此, 在确保满足海洋钻井平台提升能力的前提下, 应尽量减少浮力块的使用数量。

关键词: 海洋钻井; 隔水管; 动力学行为; 形函数; 数值模拟

DOI: 10.3969/J. ISSN. 1006-768X. 2022. 03. 06

引用格式: 李旭, 朱志强, 冯颖韬, 等. 海洋钻井隔水管系统动力学行为研究 [J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 31-36

LI Xu, ZHU Zhiqiang, FENG Yingtao, et al. Dynamics of an Offshore Drilling Riser [J]. Drilling and Production Technology, 2022, 45(3): 31-36

Dynamics of an Offshore Drilling Riser

LI Xu¹, ZHU Zhiqiang², FENG Yingtao¹, ZHAO Hu¹, WEN Dayang¹, SHAN Yonglin¹, LIN Liming³

1. Oilfield Chemistry Department, China Oilfield Services Limited, Sanhe, Hebei 065601, China; 2. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

Abstract: To accurately predict the dynamic behaviors of a riser system is the foundation to secure the safety of an offshore drill string system. Based on the Hamilton principle, the dynamic model of an offshore drilling riser system is developed. The Hermite cubic interpolation function about the bent beam element is applied as the shape function to discretize the dynamic model. The mass matrix, damping matrix, stiffness matrix and external force column vector are then integrated, respectively, thus, the whole finite element model about the drilling riser system can be developed. Subsequently, the dynamic responses of the drilling riser system are obtained by numerical simulations via Newmark integral method, and thus the influences of different parameters on the dynamic behaviors of the riser system are further discussed. According to the comparisons of numerical results, for sea environmental loads, the effect of sea current is stronger than that of sea wave on the dynamic responses of the riser; hence, in order to control the vibration and deflection of the riser, the increase of the thickness or the top tension of the riser are verified as the effective ways. In addition, the greater the buoyancy is, the larger the bending stress and the lateral deflection of the riser are. Therefore, within the lifting capacity of the offshore drilling platform, the number of buoyancy block is suggested to be decreased.

Key words: offshore drilling; riser; dynamic behavior; shape function; numerical simulation

基金项目: 国家自然科学基金“深水钻井隔水管—钻柱耦合系统的双重非线性动力学行为研究”(编号: 51904018)。

作者简介: 李旭(1985-) 工程师, 2008年毕业于中国石油大学(北京), 现在中海油田服务股份有限公司从事海洋油气开发相关研究。地址: (065201) 河北省廊坊市三河市燕郊经济技术开发区行宫西大街中海油燕郊基地, 电话: 18630966595, E-mail: lixu8@cosl.com.cn

0 引言

隔水管系统作为深水油气开采装备的重要组成部分,需要面对复杂海洋环境和气候条件的挑战。关于海洋隔水管动力学行为的理论研究最早始于1970年代,国外学者们通过 Euler-Bernoulli 梁的四阶微分方程来描述隔水管微元体的受力状态,建立了海洋隔水管的力学模型^[1-2],也有学者将隔水管系统分成若干个部分,并通过一系列弹簧阻尼单元来连接模拟^[3]。基于建立的力学模型,分析了隔水管轴向载荷和横向载荷的非线性耦合^[4],提出了一种考虑流体和结构不确定性的海洋结构响应统计特性评价方法^[5]。国内学者们则对影响隔水管振动的各种因素进行了探讨^[6],建立了基于海洋环境和钻井工况耦合作用下的隔水管系统动力学控制方程^[7-8],并基于隔水管力学性能实验,提出了深水钻井隔水管的“三分之一效应”^[9]。还有部分学者分析了隔水管系统的固有频率^[10]以及主共振的稳定性^[11],并利用接触单元模拟内外管接触的约束条件^[12]。此外, Abaqus 及其海洋环境模块 Aqua 被采用来对建立的隔水管-钻柱的管中管模型进行了动态响应分析,并将模型导入 Isight 优化软件,进行了基于可靠度分析的多目标优化设计^[13]。

基于上述文献调研可知,对于海洋钻井隔水管系统动态响应的研究一直属于本领域的热点问题,而对于管柱系统这种连续体的振动问题,有限元分析又是最为有效的手段。然而,在已发表的论文中,关于隔水管系统动力学建模以及有限元分析的求解过程都未见详尽说明,容易引起困惑。因此,本文旨在详细介绍海洋钻井隔水管有限元建模及其求解流程,并进行隔水管单管的动力学行为研究。

1 海洋钻井隔水管系统的动力学建模

海洋钻井隔水管系统动力学建模是在所提出的基本假设的基础上,通过开展对隔水管系统动能、势能、外力做功三方面的数学描述,并最终基于 Hamilton 原理整合成为一个完整的动力学模型。

1.1 基本假设

- (1) 假设隔水管变形均在弹性范围内。
- (2) 假设隔水管是由均质、各向同性、线弹性的材料制成。
- (3) 假设隔水管变形和变形角是小量的,属于大应变小变形。
- (4) 暂不考虑钻柱对隔水管的碰撞影响。

1.2 隔水管系统动能

海洋钻井隔水管可以简化为弹性梁,其在海洋环境载荷的作用下将发生横向变形,从隔水管中取出一个单元体,其物理模型如图1。

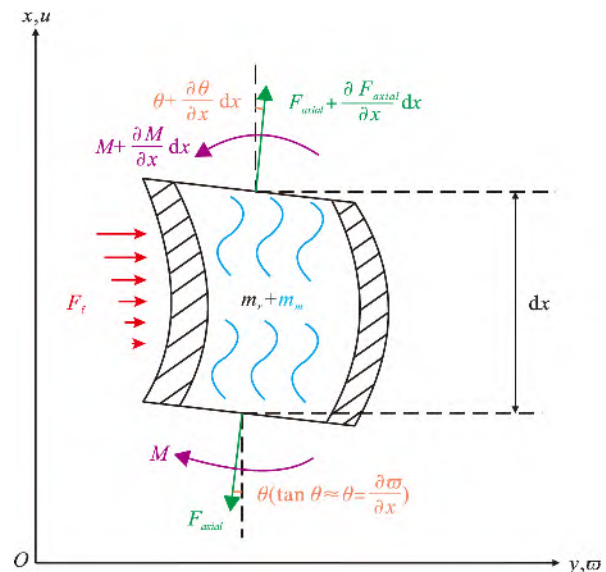


图1 隔水管单元受力分析图

根据动能定理 $T = \frac{1}{2}mv^2$ 得:

$$T(x, t) = \frac{1}{2} \int_0^L (m_r + m_t) \left(\frac{\partial \varpi(x, t)}{\partial t} \right)^2 dx \quad (1)$$

式中: m_r —单位长度隔水管质量, kg; m_t —单位长度的环空钻井液质量, kg; $\varpi(x, t)$ —隔水管单元的横向偏移, m。

1.3 隔水管系统势能

势能包括应变能和任何保守外力的势能。根据应变应力关系得应变能为:

$$V_1(x, t) = \frac{1}{2} EI_x \left[\frac{\partial^2 \varpi(x, t)}{\partial x^2} \right]^2 \quad (2)$$

式中: E —隔水管的弹性模量, MPa。

另一方面,作为隔水管的内力,其轴向力是由隔水管的顶张力以及浮力共同决定的,可表示为:

$$F_{axial}(x) = R_{top} (m_r + m_t) gL - \int_x^L (1 - f_b) (m_r + m_t) g dx \quad (3)$$

式中: R_{top} —顶张力与隔水管与钻井液重量之和的比值, $N/(m \cdot kg)$; L —代表隔水管的总长, m; f_b —代表浮力因子, 无量纲; g —重力加速度, $9.8 N/kg$ 。

而当隔水管发生弯曲时,其轴向力将在横向上做功,当引入小应变大变形假设时,该轴向力做功可表示如下:

$$V_2(x, t) = \frac{1}{2} F_{axial}(x) \left[\frac{\partial \varpi(x, t)}{\partial x} \right]^2 \quad (4)$$

所以,总的势能可表示为:

$$V(x,t) = V_1(x,t) + V_2(x,t) \quad (5)$$

1.4 外力做功

在不考虑钻柱的情况下,隔水管所受的外力主要来源于海洋环境载荷,根据莫里森方程可知海洋环境载荷 $F_f(x,t)$ 包括拖曳力 $F_D(x,t)$ 和惯性力 $F_I(x,t)$ 两部分,即:

$$F_f(x,t) = F_D(x,t) + F_I(x,t) \quad (6)$$

$$F_D(x,t) = \frac{1}{2} C_d D \rho_w [u_w(x,t) + u_c(x) - \frac{\partial \varpi(x,t)}{\partial t}] \times \left| u_w(x,t) + u_c(x) - \frac{\partial \varpi(x,t)}{\partial t} \right| \quad (7)$$

$$F_I(x,t) = \frac{1}{4} \pi D^2 \rho_w C_i a_w(x,t) - \frac{1}{4} \pi D^2 \rho_w (C_i - 1) \frac{d^2 \varpi(x,t)}{dt^2} \quad (8)$$

式中: C_d 、 C_i 分别为阻力系数、惯性系数; ρ_w —海水密度 kg/m^3 。此外,为了对所建立的模型进行数值求解,引入了一个线性因子 B 来代替 $\left| u_w + u_c - \frac{\partial \varpi}{\partial t} \right|^{[11]}$ 。

1.5 海洋钻井隔水管动力学模型整合

根据 Hamilton 原理的数学表达式:

$$S = \int_0^T (T - V + W) dt \quad (9)$$

在一个海浪周期内,该隔水管系统的总能量可以描述为:

$$\Pi_s = \int_0^T \int_0^L [T(x,t) - V(x,t) + W(x,t)] dx dt \quad (10)$$

此外,隔水管系统的顶部通过转动刚度为 K_t 的挠性接头与平台连接,因此会随平台发生漂移;而隔水管系统底部则通过另一个挠性刚度为 K_b 的柔性接头固定在井口;因此,隔水管系统的顶、底处的初始条件和边界条件可分别表示为:

$$\begin{cases} \varpi(L,t) = C_{\text{drifting}} \\ EI_x \frac{\partial^2 \varpi(L,t)}{\partial x^2} = K_t \frac{\partial \varpi(L,t)}{\partial x} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \varpi(0,t) = 0 \\ EI_x \frac{\partial^2 \varpi(0,t)}{\partial x^2} = K_b \frac{\partial \varpi(0,t)}{\partial x} \end{cases} \quad (12)$$

2 海洋钻井隔水管系统的有限元模型

首先,作为有限元分析的第一步,所建立的动力学模型需要被离散化。为了实现离散化模型的目的,采用弯曲梁单元的 Hermite 三次插值函数作为

形函数,将包含形函数的位移近似解代入式(11)的动力学运动方程并化简得:

$$\int_0^T \int_0^L \left\{ -(m_r + m_m) [N(x)]^2 \frac{\partial^2 [S(t)]}{\partial t^2} - EI_x \left(\frac{\partial^2 [N(x)]}{\partial x^2} \right)^2 [S(t)] - F_c(x) \left(\frac{\partial^2 [N(x)]}{\partial x^2} \right)^2 [S(t)] + F_f(x,t) \cdot [N(x)] \right\} dx dt = 0 \quad (13)$$

海洋隔水管系统的有限元模型表示为:

$$([M_m] + [M_n]) \{ \ddot{S} \} + [C_{fd}] \{ \dot{S} \} + ([K_{EI}] + [K_{Fa}]) \{ S \} = \{ f \} \quad (15)$$

式中: $[M_m]$ —隔水管自身质量以及钻井液附加质量引起的质量矩阵; $[M_n]$ —惯性力衍生的质量矩阵; $[C_{fd}]$ —拖曳力衍生的阻尼矩阵; $[K_{EI}]$ —弯曲应力引起的刚度矩阵; $[K_{Fa}]$ —轴向力引起的刚度矩阵; $[S]$ —位移列向量; $\{ f \}$ —外力列向量。

3 海洋钻井隔水管系统的动力学行为研究

采用 Newmark 积分法对建立的有限元模型进行求解,得到海洋钻井隔水管系统的动态响应。为研究钻井隔水管系统在海洋环境载荷作用下的动态响应,基于所建立的有限元模型,通过 MATLAB 编程对水深 500 m 的隔水管系统进行数值模拟研究。具体参数如表 1 所示。

表 1 隔水管具体参数表

参数	数值
隔水管长度/m	500
隔水管外径/cm	53.34
隔水管壁厚/cm	2.54
隔水管横向漂移/m	0
隔水管密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850
波浪周期/s	8
波高/m	6.5
钻井液密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1200
拖曳力系数	0.7
惯性力系数	2
海面风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	5
风速因子	0.03
上挠性接头的旋转刚度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	1.1×10^8
下挠性接头的旋转刚度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	1.1×10^8

对于一个水深为 500 m 的海域,海浪的影响主要集中于靠近海面的区域,且呈周期性变化;而海流的速度分布与时间无关,但在海洋中上部摩擦深度所对应的位置发生一个突变^[16]。

由于本文考虑的海洋环境载荷具有周期性,因而在其影响下的隔水管系统的动态响应最终也将达到动态稳定状态,而其判断标准是上、下挠性接头的转动均满足稳定的周期性特征。

随后,在确保隔水管系统的上、下挠性接头的转动达到其动态稳定状态下对隔水管壁厚、顶张力、浮力因子、海流流速、海浪波高等关键因素进行分析。

3.1 隔水管壁厚的影响

在实际应用中隔水管的标准壁厚大多为 2.54 cm,因此分别选取标准壁厚、标准壁厚的 2 倍和 3 倍进行对比。从图 2 可以看出,隔水管壁厚对隔水管的动态响应有着显著影响。从左侧子图可以看出当隔水管壁厚增加时,隔水管的横向偏移和振动幅度都得到了有效抑制,从中间子图和右侧子图也可

以发现随着壁厚的增加,弯曲应力和偏移挠度角都逐步减小。

3.2 顶张力的影响

比较顶张力比分别为 1.1、1.3 和 1.5 的三种情况。从图 3(a) 子图和(c) 子图可以明显看出,一旦施加较高的顶张力,隔水管的横向偏移和偏转角度都可以得到有效控制。但是犹如图 3(b) 所示,增大顶张力会导致弯曲应力增加,所以预设顶张力也不是越大越好。

3.3 浮力因子的影响

浮力系数主要取决于隔水管外挂浮力块的设计策略。比较了浮力因子为 0.5、0.7 和 0.9 三种不同的方案。由图 4 可知,为降低对钻井平台的升力要求,在隔水管外部增加浮力块时,隔水管的横向偏

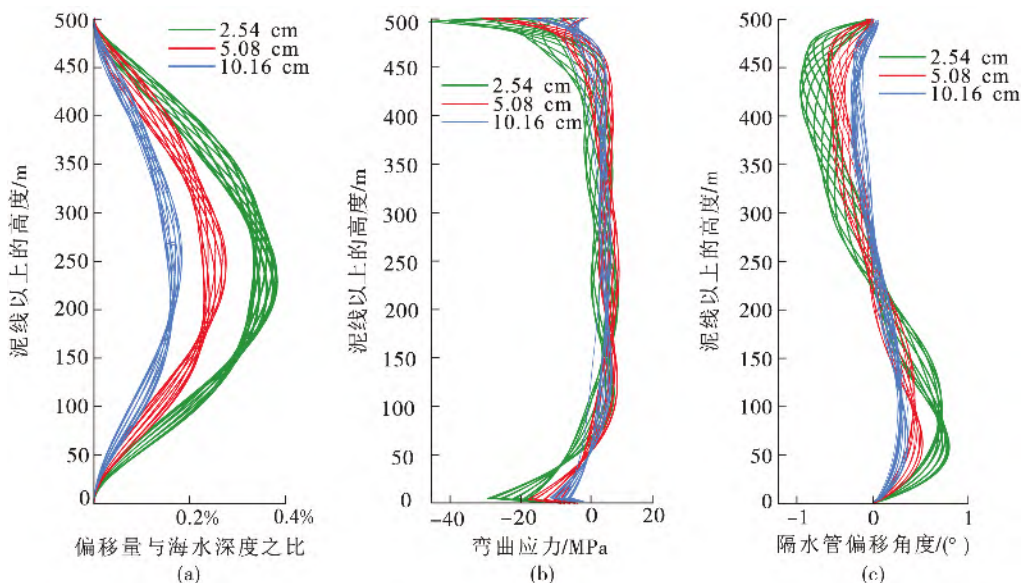


图 2 隔水管壁厚的影响

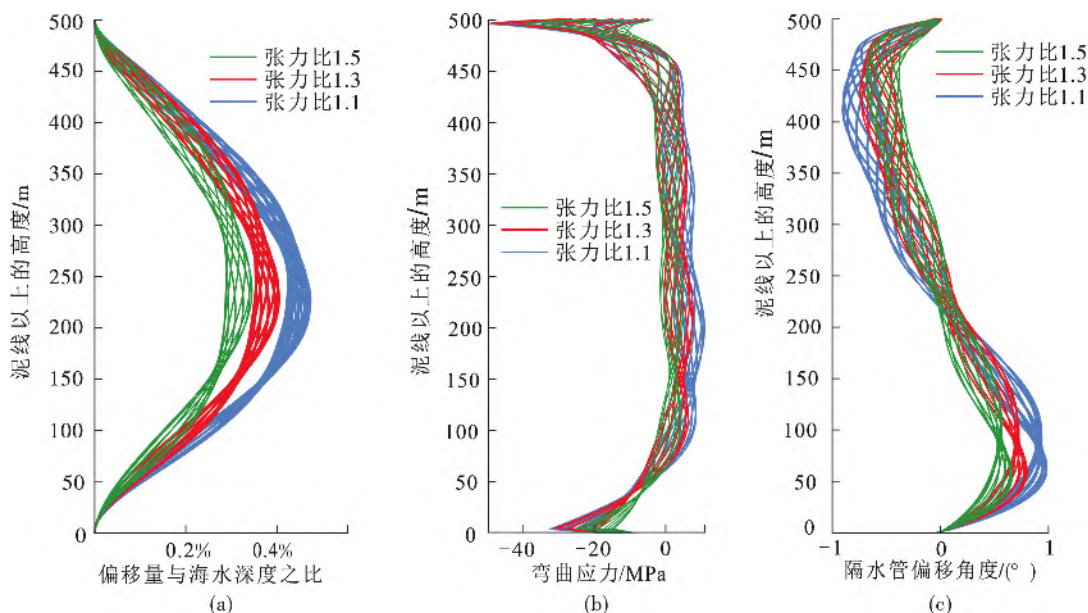


图 3 顶张力的影响

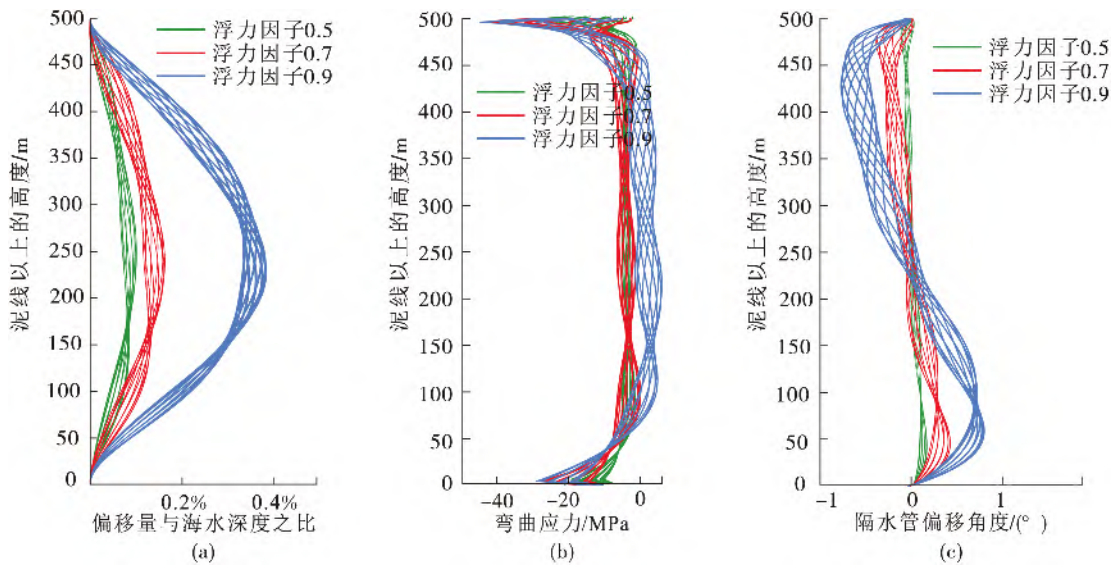


图 4 浮力因子的影响

移、弯曲应力以及偏移角度都明显增大。因此,为了有效控制隔水管的偏转,在钻井平台提升能力的允许范围内,建议选取浮力系数较小的浮力块设计策略。

3.4 海洋环境载荷的影响

根据莫里森方程求解出海流水平运动速度 V_c , 分别比较 $0.5 V_c$, $1.0 V_c$, $1.5 V_c$ 三种不同海流速度下隔水管系统的动态响应情况,如图 5 所示。海流流速不仅影响隔水管顶部和底部的弯矩,对隔水管整体的振动也有着显著影响,虽然海流的速度会随

着海深深度的增加逐步降低,但海流流速增加仍然会导致隔水管的横向偏移和偏转角度的增大。此外,海浪波高的增加对隔水管横向偏移的影响不明显,主要影响隔水管顶部,波高的增大将使得其弯曲应力和偏转角度增大,但海浪波高对隔水管动态响应的影响程度低于海流流速的影响。整体而言,为了保证隔水管的使用安全,针对不同的海洋环境进行隔水管系统设计时,要注意调整顶张力、浮力块配置等可控参数,来加强对隔水管系统横向偏移的抑制。

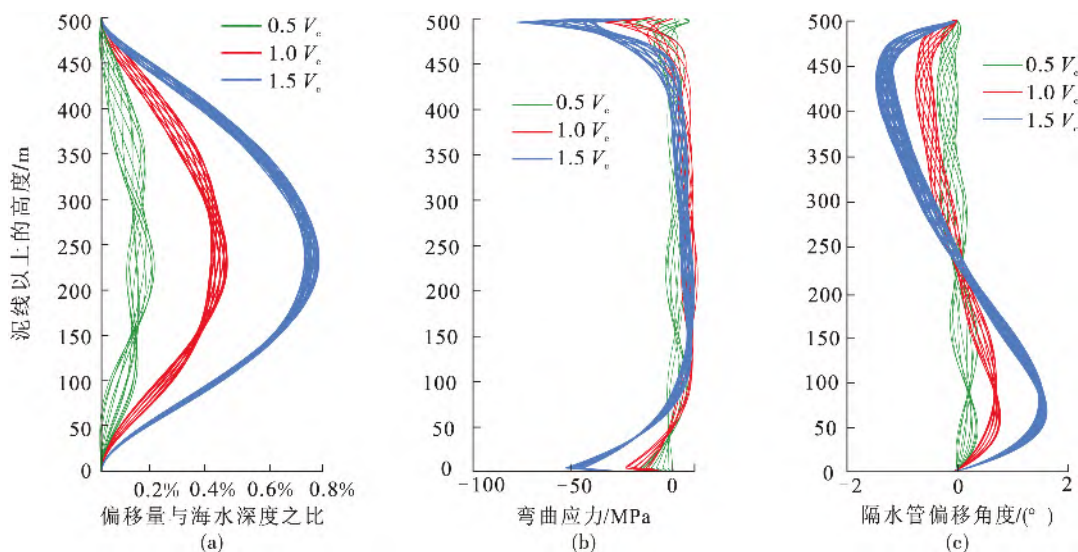


图 5 海流流速的影响

5 结论

(1) 本文利用 Hamilton 原理推导了隔水管系统在海洋环境载荷作用下的动力学模型,利用 Hermite

三次插值函数作为形函数,将动力学模型转化成有限元模型,并采用 Newmark 积分法对有限元模型进行了数值求解,分析了不同参数对隔水管系统动态响应的影响。

(2) 波浪的影响集中在靠近海面的区域,波高对隔水管动态响应的影响不明显,但波高的增加会导致隔水管顶部弯曲应力和偏转角度的增加。海流流速的增加会加剧隔水管的横向偏移,其对隔水管动态响应的影响显著强于波浪的影响。

(3) 对于隔水管本身而言,厚壁隔水管的动态稳定性更好。而顶张力越大,隔水管的横向偏移越小,但大的顶张力会引起弯曲应力和偏转角度的增大;此外,随着浮力的增大,隔水管的横向偏移、弯曲应力和偏转角度都会增大;因此,在确保海洋钻井平台提升能力的前提下,应尽量选取浮力系数较小的浮力块作为设计策略。

参考文献

- [1] BURKE B G. An analysis of marine risers for deep water [C]//Offshore Technology Conference, April 28-May 1, 1973, Houston, Texas. Richardson, Texas, USA: OnePetro, 1973.
- [2] ERTAS A, KOZIK T J. Numerical solution techniques for dynamic analysis of marine riser [J]. Journal of Energy Resources Technology, 1987, 109(1): 1-5.
- [3] RAMAN-NAIR W, BADDOUR R E. Three-dimensional dynamics of a flexible marine riser undergoing large elastic deformations [J]. Multibody System Dynamics, 2003, 10(4): 393-423.
- [4] LEI S, ZHENG X Y, KENNEDY D. Dynamic response of a deepwater riser subjected to combined axial and transverse excitation by the nonlinear coupled model [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2017, 97: 68-77.
- [5] NI Pinghe, LI Jun, HAO Hong, et al. Stochastic dynamic analysis of marine risers considering fluid-structure interaction and system uncertainties [J]. Engineering Structures, 2019, 198: 109507.
- [6] 畅元江. 深水钻井隔水管设计方法及其应用研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2008.
CHANG Yuanjiang. Design approach and its application for deepwater drilling risers [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.
- [7] 刘清友, 周守为, 姜伟, 等. 基于钻井工况和海洋环境耦合作用下的隔水管动力学模型 [J]. 天然气工业, 2013, 33(12): 6-12.
LIU Qingyou, ZHOU Shouwei, JIANG Wei, et al. A dynamic model of marine risers/pipes under the drilling operation condition and sea environment [J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(12): 6-12.
- [8] 祝效华, 李柯. 隔水管弯曲对钻柱振动影响的计算与分析 [J]. 应用力学学报, 2020, 37(1): 128-133.
ZHU Xiaohua, LI Ke. Effects of the bending of the riser on the vibration of the drill string [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2020, 37(1): 128-133.
- [9] 周守为, 刘清友, 姜伟, 等. 深水钻井隔水管“三分之一效应”的发现——基于海流作用下深水钻井隔水管变形特性理论及实验的研究 [J]. 中国海上油气, 2013, 25(6): 1-7.
ZHOU Shouwei, LIU Qingyou, JIANG Wei, et al. The discovery of "one third effect" for deep water drilling riser: based on the theoretical and experimental study of deformation characteristics of deep water drilling riser by ocean currents [J]. China Offshore Oil and Gas, 2013, 25(6): 1-7.
- [10] 韩春杰, 郭明, 王祥旭, 等. 海洋钻井隔水管横向振动机理的研究 [J]. 化工自动化及仪表, 2019, 46(12): 1028-1031.
HAN Chunjie, GUO Ming, WANG Xiangxu, et al. Research on lateral vibration mechanism of offshore drilling riser [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2019, 46(12): 1028-1031.
- [11] 吴鹏, 张彦秋, 庞世强, 等. 深水顶张力隔水管钻井作业时的非线性振动特性分析 [J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(2): 112-120.
WU Peng, ZHANG Yanqiu, PANG Shiqiang, et al. Non-linear vibration analysis of deepwater top tension riser under drilling condition [J]. Journal of Dynamics and Control, 2019, 17(2): 112-120.
- [12] 张俊斌, 金颢, 张鹏, 等. 深水管中管结构动态边界条件非线性时域分析 [J]. 船舶工程, 2019, 41(6): 129-134.
ZHANG Junbin, JIN Hao, ZHANG Peng, et al. Deep water pipe-in-pipe structural response analysis with dynamic boundary conditions in nonlinear time domain [J]. Ship Engineering, 2019, 41(6): 129-134.
- [13] 廖茂林, 周英操, 苏义脑, 等. 深水钻井管柱系统动力学分析与设计方法研究 [J]. 石油勘探技术, 2019, 47(2): 56-62.
LIAO Maolin, ZHOU Yingcao, SU Yinao, et al. A study of the dynamic analysis and design method of deepwater drilling string systems [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(2): 56-62.

(修改回稿日期 2022-03-08 编辑 丁浩)