

内外流作用下悬链线立管动力响应分析

邹艳荣^{1*}, 周济福^{2*,†}, 王旭^{*}

^{*}(中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

[†](中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要: 针对深海采矿系统上部悬链线立管, 基于有限元计算平台分析悬链线立管在内流、海流和水面船作用下的动力响应。管内流体对立管的作用力采用动量定理计算, 海流对立管的作用力采用 Morison 公式计算。分析表明: 水面船作用下, 悬链线立管的等效应力和水平位移随时间均呈周期性变化, 且随水面船运动位移幅值的增加而增加, 增加速率逐渐增大; 悬链线立管的等效应力和水平位移随水面船运动周期的增加而减小, 降低速率逐渐减小。此外, 悬链线立管的最大等效应力和水平位移随管内流体密度和速度的增加而减小。

关键词: 悬链线立管; 内流; 海流; 水面船; 动力响应

1 引言

深海采矿系统由水面船、自航浮体、海底集矿机、输送站及连接各部分的管道组成^[1], 如图 1 所示, 通常采用柔性立管将矿产资源从海底输运到水面船上。立管在海洋中受到内流、海流、波浪及水面船运动等的影响, 其动力响应是人们热切关注的重要问题之一, 影响立管的安全与稳定。

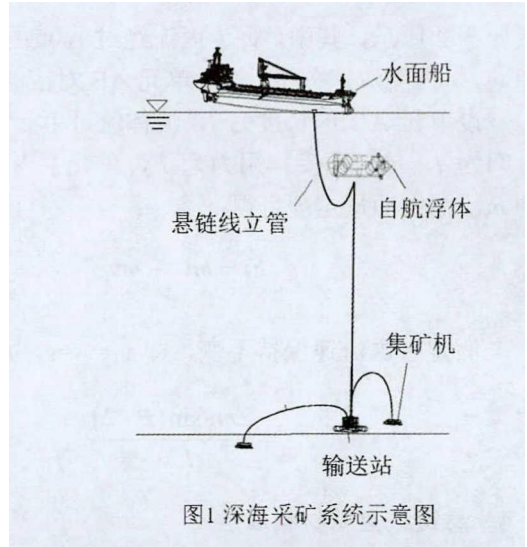
深海采矿系统上部悬链线立管顶端与水面船相连, 水面船在海洋环境下的运动对立管产生的影响是动力分析中需要考虑的关键因素, 对此国内外学者进行了大量的研究^[2], 表明水面船运动位移和周期对立管的动力响应均可产生显著影响^[3], 且有研究表明立管的水平位移增加幅度可达到水面船运动位移幅值^[4]。因此, 立管顶部水面船的运动可增加立管在动荷载作用下的偏移, 引起立管失稳, 但水面船的运动对立管动力特性的影响规律尚待更深入的研究。

资金资助项目: 国家重点基础研究发展规划 (编号: 2017YFC1404200)、国家自然科学基金 (编号: 11972352) 和中国科学院战略性先导科技专项 (编号: XDB22040203, XDA22000000)

海流作为海洋立管经受的主要荷载,很多学者对此进行了不同程度的研究^[5],但研究对象往往是结构形式简单的竖立管^[4]。而悬链线立管几何外形复杂,其动力响应计算更加困难。除海流作用外,管内流体性质也可对立管动力特性产生影响,有研究表明立管固有频率随管内流体密度的增大而降低^[6],扬矿硬管的最大侧向位移和最大主应力受到内流速度和密度的影响较大^[7]。虽然已有研究考虑了多因素共同作用下立管的动力响应问题^[8],但较少同时考虑内流、海流和水面船运动影响下悬链线立管的动力响应。

本文基于有限元方法,针对深海采矿系统

上部悬链线立管所遭遇的内流、海流和水面船运动特性,如内流密度和速度、水面船运动位移幅值和周期,研究悬链线立管在内流、海流和水面船运动共同影响下的动力响应。



2 数值模型

2.1 控制方程

采用有限元方法计算,结构运动控制方程如下:

$$[M][\ddot{X}] + [C][\dot{X}] + [K][X] = [F] \quad (1)$$

式中, $[M]$ 为质量矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; $[F]$ 为外荷载; $[X]$ 为结构位移; $[\dot{X}]$ 为结构运动速度; $[\ddot{X}]$ 为结构运动加速度。采用隐式 Newmark 法来求解式(1)。

2.2 外流载荷

采用 Morison 公式计算波流载荷^[9],则水平载荷 F_c 由拖曳力 F_D 和惯性力 F_I 组成。同时考虑结构运动的影响,则结构所受波流载荷的计算公式如下:

$$F_c = C_D \rho_w \frac{D}{2} \left(u - \frac{\partial x}{\partial t} \right) \left| u - \frac{\partial x}{\partial t} \right| + C_A \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \left(\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \right) + \rho_w \frac{\pi D^2}{4} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

式中, ρ_w 为海水密度,取值 1022 kg/m^3 ; u 为海流或波浪速度; C_D 和 C_M 分别为拖曳力系数和惯性力系数,分别取值为 1.2 和 2.0。 C_A 为附加质量力系数,惯性力系数 C_M 满足 $C_M = C_A + 1$; $\partial x / \partial t$ 和 $\partial^2 x / \partial t^2$ 分别为结构的水平运动速度和加速度。

2.3 内流载荷

采用动量定理推导得到管内流体对悬链线立管的作用力,单元 AB 在内流作用下示意

图如图 2 所示, 其中, v_1 为内流经过 A 点的速度, v_2 为内流经过 B 点的速度, v_{11} 、 v_{12} 、 v_{21} 和 v_{22} 是内流流速分量, θ 为单元 AB 对应的圆心角。

设单元 AB 的长度为 l , 流体流过单元 AB 所需时间为 t , 单元所受作用力为 F , 单元中内流的质量为 m , 则由动量定理可得:

$$Ft = mv_2 - mv_1 \quad (3)$$

假定管内流速保持不变, 即 $v_1=v_2=v$, $t = \frac{l}{v}$, 则

$$F = \frac{2mvsin(\theta/2)}{l/v} \quad (4)$$

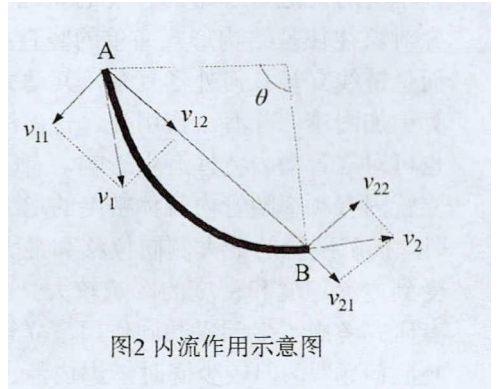


图2 内流作用示意图

2.4 悬链线立管材料属性

悬链线立管在海水中受重力和浮力作用处于静止状态时, 根据其总长和两端点之间的相对位置, 可得到悬链线立管的初始形态。文中采用的悬链线立管总长为 400 m, 两端点垂向间距为 200 m^[1], 水平间距为 100 m, 数值计算中采用二维二阶梁单元, 将悬链线立管离散为 400 个单元。悬链线立管物理参数如表 1 所示。

表 1 悬链线立管参数

参数	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	立管密度/(kg/m ³)	外径/m	壁厚/m	管长/m
取值	210	81	7850	0.3232	0.06	400

2.5 边界条件

为了便于研究, 我们将位于悬链线立管顶部水面船的运动响应简化为竖直平面内 (即 x - y 平面) 随自由表面水质点的椭圆运动。悬链线立管的另一端连接自航浮体, 自航浮体具有自动定位功能, 保持静止状态, 与立管连接处采用铰接连接。

2.6 模型验证

本文采用海洋钻井隔水导管在波浪、剪切流及管顶运动共同作用下的动力响应进行有限元模型验证, 各参数设置如表 2 所示。静水深 448.1 m, 海流在海平面流速为 0.257 m/s, 底部流速为 0。线性波波幅为 3.048 m, 波浪周期为 9 s, 在管道顶点施加大小为 2.224 MN 的拉伸力, 并指定管道顶点以正弦函数的形式运动。

表 2 钻井隔水导管与水动力参数

参数	弹性模量/GPa	剪切模量/GPa	管道密度/(kg/m ³)	外径/m	壁厚/m	管长/m
取值	206.8	103.4	7850	0.405	0.0158	463.3

在波流和顶部正弦运动联合作用下,隔水管各节点的运动周期基本和顶点一致,整个运动过程的水平位移包络线如图3所示,通过对比可以发现本文模型的动力分析过程与ABAQUS标准算例的结果较为一致。因此,本文模型可正确计算立管的动力响应。

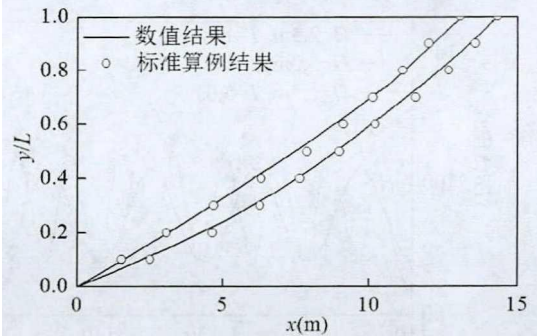


图3 水平位移包络线

3 计算及结果分析

3.1 计算条件

本文主要关注管内流体和水面船运动特性对悬链线立管动力响应的影响,海流与悬链线立管位于同一平面内,海流流速 $u=1.7\text{m/s}$,水面船运动位移幅值 H 的取值范围为 $1\sim 5\text{ m}$,水面船运动周期 T 的取值范围为 $3\sim 10\text{ s}$,管内流体密度 ρ 的取值范围为 $0\sim 3000\text{ kg/m}^3$,管内流体速度 v 的取值范围为 $0\sim 30\text{ m/s}$ 。

3.2 悬链线立管初始及变形后形态

本文主要从悬链线立管的整体变形形态、等效应力 STR 、水平位移 U 三方面分析悬链线立管的水动力响应及强度,其中,最大等效应力定义为 STR_{\max} ,最大水平位移定义为 U_{\max} 。

当悬链线立管在内流、海流和水面船作用下达到动态稳定状态后,提取 $H=2.5\text{ m}$, $T=10\text{ s}$, $\rho=2000\text{ kg/m}^3$, $v=3\text{ m/s}$ 条件下, $t=250\text{ s}$ 时刻悬链线立管变形后的形态,并与初始形态进行对比(图4)。从图4中可以看出,在海流作用下,悬链线立管产生较大的水平偏移,最大水平位移位于立管的右侧。

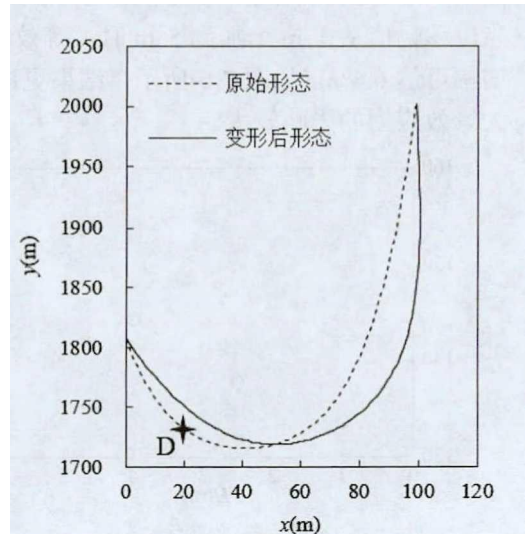


图4 悬链线初始和变形后形态

3.3 等效应力和水平位移随时间变化

由于悬链线立管顶部的水面船在波浪作用下作周期性运动,故悬链线立管各节点的等效应力和水平位移随时间发生变化。图5和图6分别为节点21(如图4中D位置)的等效应力和水平位移随时间变化规律。由图可见,在水面船作周期性的椭圆运动过程中,悬链线立管等效应力和水平位移均随时间呈周期性变化,且二者的变化周期与水面船运动周期相同,但等效应力和水平位移的极值点到达时间存在约 $T/2$ 的相位差。

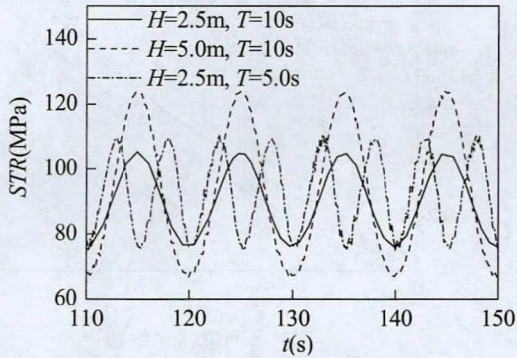


图5 等效应力时程曲线

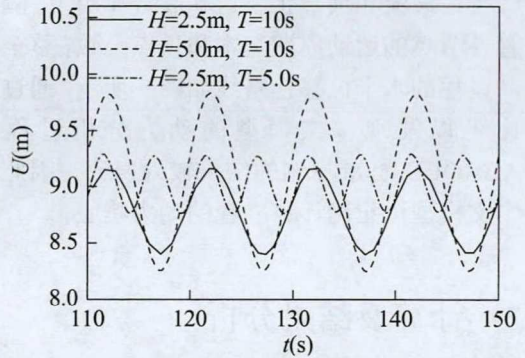
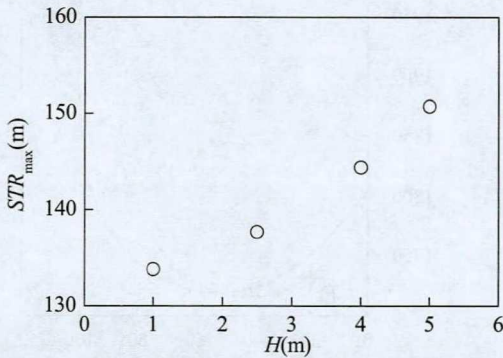


图6 水平位移时程曲线

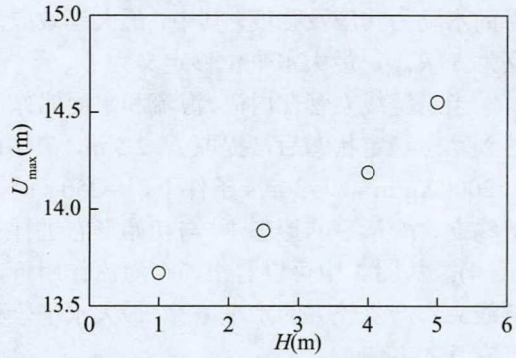
3.4 影响因素分析

3.4.1 水面船运动的影响

水面船运动位移幅值 H 表征水面船运动垂向最低点和最高点之间的最大距离，与水面波浪特性有关。在本文计算条件下，悬链线立管的最大等效应力和水平位移与 H 的关系如图 7 所示。由图可见，最大等效应力和水平位移随 H 增加而增加，且增长速率逐渐增加。当位移幅值从 1 m 增加到 5 m 时，等效应力最大增幅为 12.6%，如图 7(a)所示；水平位移增幅可达 6.4%，如图 7(b)所示。结果更进一步说明，水面船运动位移幅值对悬链线立管最大等效应力的影响较大。



(a)最大等效应力



(b)最大位移

图7 水面船运动位移幅值的影响

水面船运动周期是与水面波浪特性相关的又一个重要参数，其对悬链线立管等效应力和水平位移的影响如图 8 所示。结果表明，最大等效应力和水平位移随水面船运动周期的增加而减小，且减小速率逐渐降低。当周期从 3 s 增加到 10 s 时，等效应力最大降低幅度为 23.9%，如图 8(a)所示，最大位移降低幅度为 9.5%，如图 8(b)所示，故水面船运动周期对悬链线立管等效应力的影响较大。

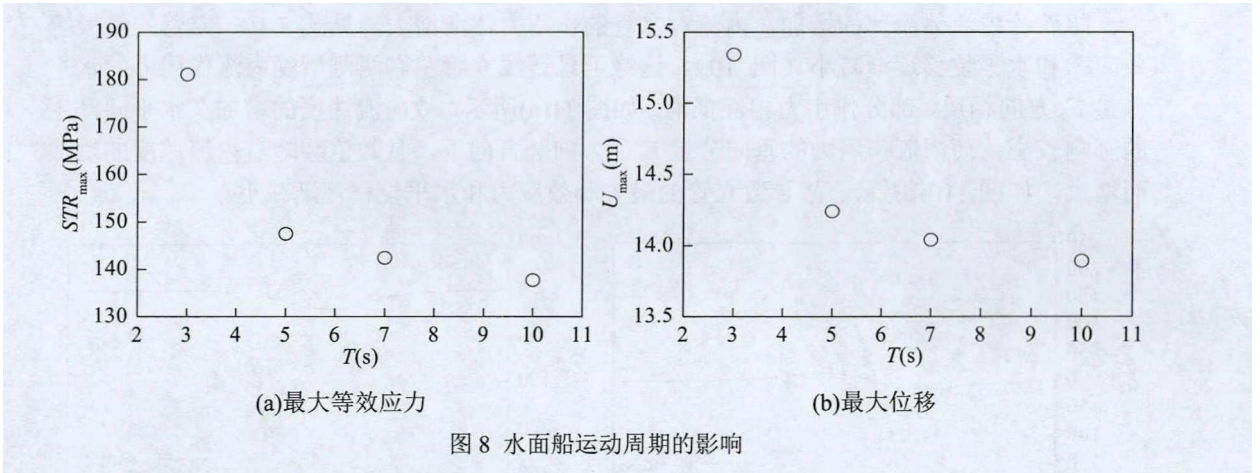


图8 水面船运动周期的影响

3.4.2 管内流体的影响

管内流体特性的变化不仅影响立管整体的质量，而且可对立管所受外力产生影响。图9和图10分别表示管内流体密度和速度对悬链线立管最大等效应力和水平位移的影响。图9表明，管内流体密度的增加导致立管质量增加，使得最大等效应力和水平位移逐渐减小。

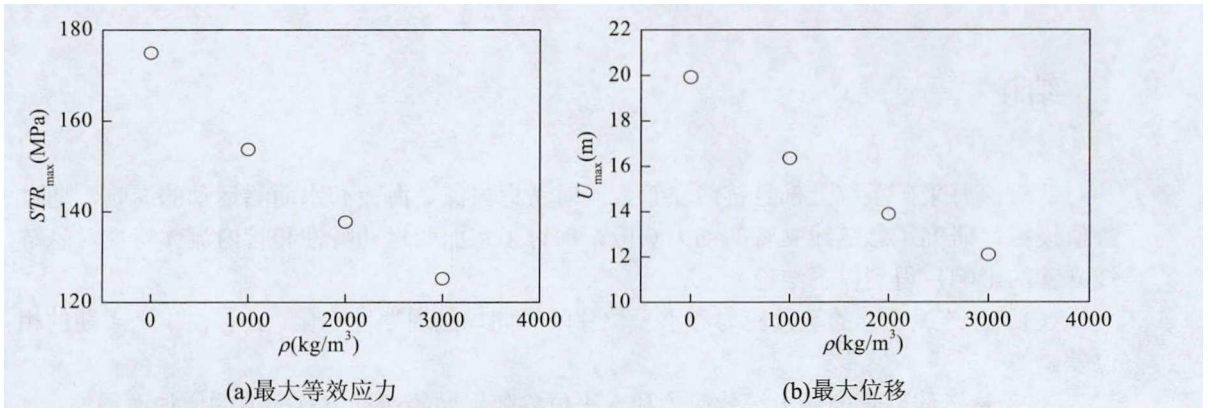


图9 管内流体密度的影响

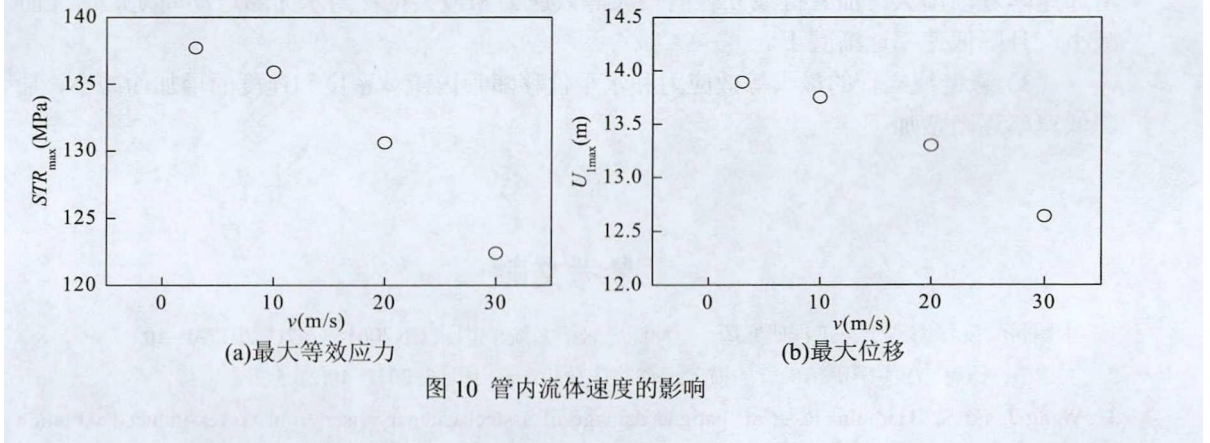


图10 管内流体速度的影响

随着管内流体流速的增加,内流对立管的作用力逐渐增大,见式(4),立管的最大等效应力和水平位移逐渐减小(图10)。这缘于悬链线立管左右两侧所受内流作用力的水平分量 F_x 方向相反,部分作用力相互抵消,如图11(a)所示,故内流速度的增加在水平向产生的影响较小;而内流作用力的垂向分量 F_y ,方向竖直向下,且数值会随着内流速度的增加而增大,如图11(b)所示,故导致立管的最大等效应力和水平位移逐渐减小。

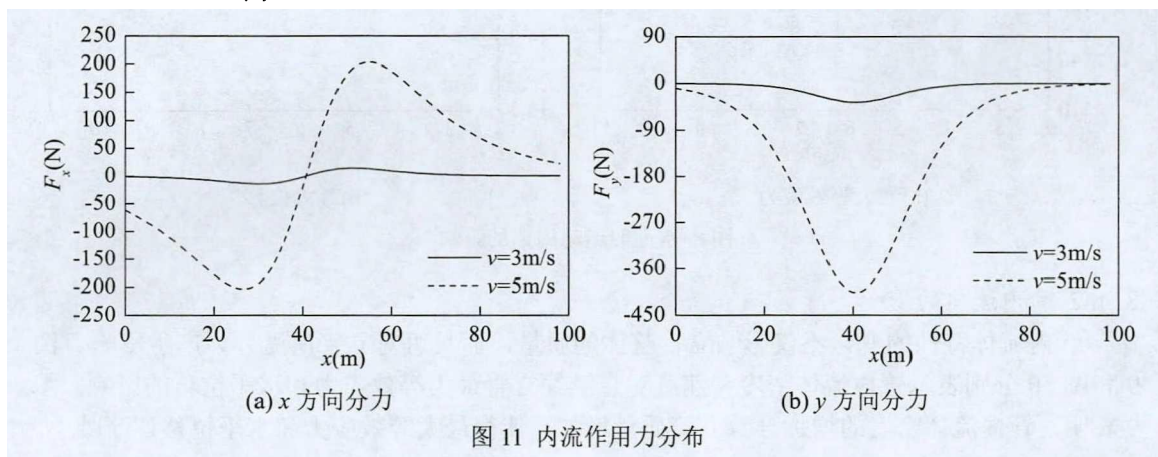


图 11 内流作用力分布

4 结论

针对深海采矿系统上部悬链线立管,同时考虑内流、海流和水面船运动的影响,通过数值模拟,研究了悬链线立管的动力响应,探讨了水面船运动特性和管内流体特性对悬链线立管的影响,得到以下结论:

(1) 悬链线立管的等效应力和水平位移随时间均呈周期性变化,且存在半个周期的相位差。

(2) 悬链线立管的最大等效应力和水平位移随水面船运动位移幅值的增加而增加,且增加速率逐渐增大;而悬链线立管的最大等效应力和最大位移随水面船运动周期的增加而减小,且降低速率逐渐减小。

(3) 悬链线立管的最大等效应力和水平位移随管内流体密度和速度的增加而减小,且降低速率逐渐增加。

参考文献

- 1 中国科学院深海科学与工程研究所. 一种深海采矿系统: 中国, CN206158747U. 2017-05-10.
- 2 刘建浩, 杨启. 深海采矿扬矿管的横向运动响应分析. 矿山机械, 2012, 40(2): 5-9.
- 3 Wang J, Fu S, Baarholm R, et al. Fatigue damage of a steel catenary riser from vortex-induced vibration

- caused by vessel motions. *Marine Structures*, 2014, 39: 131-56.
- 4 Fan H H, Li C W, Wang Z M. Dynamic analysis of a hang-off drilling riser considering internal solitary wave and vessel motion. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 37: 512-522.
 - 5 Gou R Y, Zhang X D, Yang W W, et al. Nonlinear Dynamics of Three-Dimensional Prediction Model for a Flexible Riser Under Linearly Sheared Currents. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2019, 44: 829-844.
 - 6 周知进, 卢浩, 王钊, 等. 垂直提升管道输送过程中的流固耦合效应分析. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(1): 87-92.
 - 7 李艳, 贾广成, 刘少军. 考虑流固耦合的深海采矿长输流硬管力学行为. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(11): 3670-3676.
 - 8 Wang T, Zhang X Z, Zhu W Q. Vessel Motion Effects on Nonlinear Dynamics of Deepwater Drilling Riser. *Journal of Ship Mechanics*, 2010, 14(6): 606-618.
 - 9 Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, et al. Force exerted by surface waves on piles. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, 2(5): 149-154.

Dynamic response analysis of the catenary riser due to internal flow and ocean current

KUAI Yan-rong^{*,1)}, ZHOU Ji-fu^{*,†,2)}, WANG Xu^{*}

^{*}(Key laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

[†](School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the finite element method, the dynamic response of the catenary riser under the action of internal flow, ocean current and vessel motion was simulated. The action of internal flow on the riser was calculated by the theorem of momentum and the action of ocean current on the riser was calculated by the Morison equation. The results show that the equivalent stress and horizontal displacement of catenary riser change periodically with time. The maximum equivalent stress and horizontal displacement increase with the displacement amplitude and decrease with the increase of motion period. Further, the maximum equivalent stress and horizontal displacement decrease with the density and velocity of the internal flow.

Key words: catenary riser; internal flow; ocean current; dynamic response