

剪切流场中含内流立管横向涡激振动特性¹⁾

段金龙* 周济福*,†,2) 王旭* 陈科**

* (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)

** (上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海交通大学, 上海 200240)

摘要 立管是海洋工程中输送油气或其他矿产资源的必备结构, 外部洋流引起的立管涡激振动影响着立管的疲劳寿命, 危害深海资源开发. 本文基于欧拉-伯努利梁方程, 结合半经验时域水动力模型, 建立剪切流与内流耦合作用下海洋立管涡激振动预报模型, 运用有限元方法和 Newmark- β 逐步积分法求解方程, 首先将数值模拟结果与实验数据进行对比, 验证模型正确性. 然后, 运用此模型, 对剪切流作用下含内流的顶张立管在不同内流速度和密度下的横向涡激振动响应特性进行研究, 主要分析了立管的横向振动模态、振动频率以及均方根位移等涡激振动参数随内流速度和密度等参数的变化规律. 结果表明, 在剪切流场中, 含内流海洋立管在横向上表现出多模态多频率的涡激振动; 立管横向振动的最大均方根位移随内流速度和密度的增大而增大, 特别是当内流速度较大时, 横向最大均方根位移增大明显; 立管横向振动的主导频率随内流速度和密度的增大而减小, 并且内流密度的增大同样会引起模态转换和频率转换.

关键词 横向涡激振动, 内流, 剪切流, 半经验水动力模型

中图分类号: TE53 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-171

CROSS-FLOW VORTEX-INDUCED VIBRATION OF A FLEXIBLE RISER WITH INTERNAL FLOW IN SHEAR CURRENT¹⁾

Duan Jinlong* Zhou Jifu*,†,2) Wang Xu* Chen Ke**

* (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)

** (State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract As an important component transporting resources such as oil and mineral ores mixture from the seabed to the surface in ocean engineering, vortex-induced vibration (VIV) of flexible risers can be encountered when the risers are subjected to the external environmental conditions. As VIV can lead to structural fatigue for the riser system, which threatens to the facility safety during deepsea resource exploitation, it is of great significance to investigate VIV mechanism and dynamics. Therefore, VIV dynamics of a flexible fluid-conveying riser undergoing external shear current is studied based on the combination of the Euler-Bernoulli beam theory and the semi-empirical hydrodynamic model. The finite element method and Newmark- β method are adopted to discretize and solve the governing equation. The

2021-04-25 收稿, 2021-06-10 录用, 2021-06-13 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (11972352) 和中国科学院战略性先导科技专项 (XDB22040203, XDA22000000) 资助项目.

2) 周济福, 研究员, 主要研究方向: 环境流体力学和流固耦合动力学. E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

引用格式: 段金龙, 周济福, 王旭, 陈科. 剪切流场中含内流立管横向涡激振动特性. 力学学报, 2021, 53(7): 1876-1884

Duan Jinlong, Zhou Jifu, Wang Xu, Chen Ke. Cross-flow vortex-induced vibration of a flexible riser with internal flow in shear current. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2021, 53(7): 1876-1884

model is firstly validated by comparing with the experimental data in order to examine the accuracy of the present model. Subsequently, cross-flow (CF) VIV response of the fluid-conveying riser is mainly examined and analyzed while various internal flow velocity and fluid density are considered and changed. The results show that when the flexible riser is subjected to both internal flow and shear current, there appears multi-frequency response for CF VIV. And the CF vibrating frequency and the CF root mean square (RMS) displacement are evidently influenced by the internal flow velocity and fluid density. With the increase of the internal flow velocity and fluid density, the CF vibrating frequency decreases while the RMS displacement shows an increasing trend in CF direction. Furthermore, in addition to the variation of the CF vibrating frequency and RMS displacement, the change of internal flow densities can cause notable mode and frequency transitions.

Key words CF vortex-induced vibration, internal flow, shear current, semi-empirical hydrodynamic model

引言

海洋立管作为深海资源开发中输送海底油气或其他矿产混合物的重要部件,一旦在海洋波浪和洋流的作用下发生涡激振动,则极易引起立管的疲劳破坏.因此海洋立管的涡激振动响应得到国内外学者的持续关注,对海洋立管在外部环境荷载作用下产生的涡激振动的机理和响应已有大量的研究,特别是针对大长细比的柔性立管^[1-3].这些研究主要运用实验和数值模拟方法,针对均匀流和剪切流中的柔性立管,分析了涡激振动的模态、频率以及驻波和行波响应等,为深入理解涡激振动机理和响应规律奠定了基础^[1-3].在这些研究中,一些学者关注了外部条件对立管涡激振动响应的影响规律,如来流角度和边界条件等,其中,Chaplin等^[4]研究了不同来流流向对悬链线立管水动力系数以及振动响应的影响机理;Xu等^[5]、高云等^[6]和徐万海等^[7]则通过实验和数值的方法研究分析了不同来流角度和不同剪切流中柔性圆柱体流体力特性及其系数的变化规律,并且对结构的能量输入区域和输出区域进行了划分;Chen等^[8]关注了三角形刚性柱体在不同来流流场中的振动响应和流场特性,分析了不同来流角度下柱体在不同约化速度下的振动响应,并且着重关注了随着约化速度增加产生的驰振现象;李非凡等^[9]和及春宁等^[10-11]采用浸入边界法对细长柔性圆柱在均匀流、剪切流以及倾斜流条件下的涡激振动进行三维数值模拟,主要研究了涡激振动的频率、阻力系数、能量传递以及主波和行波响应等;同时,Seyed-Aghazadeh等^[12]研究分析了不同边界条件对涡激振动响应的影响机理和规律.除此之外,Song等^[13]通过实验发现立管顺流向和横向的多模态响应并且立管振动频率与涡泻脱落频率一致,Hu等^[14]

进一步研究了不同质量比和阻尼比下的串列立管涡激振动响应,并且发现质量比小的情况下立管涡激振动迟滞现象明显.在柔性立管涡激振动数值模拟研究中,Bao等^[15]运用厚切片理论预报了涡激振动的结构响应、水动力系数以及涡泻脱落形态等;Qu等^[16-17]则改进了尾流振子模型,数值预报了柔性圆柱体的锁频现象和相位角变化;Yuan等^[18]和Zhang等^[19]基于半经验时域模型研究了立管在稳定流和振荡流中的涡激振动响应,主要分析其振动、频率和模态随不同参数的变化规律,Lin等^[20]运用SDVM-FEM耦合方法研究了柔性立管产生的驻波和行波响应,并且分析了其相应的流场特性,这些研究为海洋工程界深入理解和认识立管涡激振动机理和响应规律奠定了坚实的基础.然而,这些研究主要考虑外流的作用,海洋立管输送海底油气或其他矿产资源时,内流对立管水动力响应的影响不可忽视,因此,研究含内流立管的涡激振动具有重要意义.

当介质在立管内部流动时,立管受到流动介质产生的内部作用力,可导致海洋立管复杂的涡激振动响应.近几年,越来越多的学者开始对考虑内外流共同影响下海洋立管的涡激振动进行探究.研究证明,在一定的内流速度下,管道结构发生失稳现象^[21].同时,一些学者通过实验和数值模拟方法研究了含内流海洋立管涡激振动响应,Guo等^[22]、李朋^[23]和吴天昊^[24]通过模型试验,研究了含内流顶张立管和悬臂立管的动力响应,主要关注立管振动频率和位移变化规律.Jiang等^[25]、Duan等^[26-27]、Thorsen等^[28]、Wang等^[29]和李艳等^[30]则运用数值手段研究了含稳定内流海洋立管的涡激振动响应,分析了内流速度和密度对立管涡激振动模态、频率和位移的影响机理.然而在实际海洋工程中,海洋立管输送的物质

存在多相流动,因此,Zhu 等^[31]、Meng 等^[32]和 Li 等^[33]关注了含气液两相内流立管振动响应,主要研究了不同的气液两相内流作用下立管对外流的动力响应.这些研究证明,在内流的影响下,海洋立管涡激振动特性更加复杂,涡激振动的频率和主导模态等都会发生变化.

虽然含内流海洋立管涡激振动特性研究已经引起国内外学者的广泛关注,但是目前对含内流海洋立管涡激振动响应的研究刚刚起步,相关的文献报道并不多见,特别是剪切流作用的情况更是鲜有报道.鉴于此,本文旨在研究含内流海洋立管在剪切流作用下的横向涡激振动响应,分析内流对立管在剪切流中涡激振动响应机理和特性的影响.

1 立管涡激振动数学模型

本研究主要针对两端简支立管(如图 1 所示),研究其横向涡激振动响应,立管被施以预张力 T ,并且含有速度为 U_i 的内流.含内流立管横向涡激振动控制方程可表示为^[21]

$$(m_r + m_f) \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} + c \frac{\partial y(z,t)}{\partial t} + 2m_f U_i \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial z \partial t} + (m_f U_i^2 - T) \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial z^2} + EI \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} = F_{CF}(z,t) \quad (1)$$

其中, m_r 和 m_f 为单位长度立管和内流的质量, c 为立管的阻尼系数, U_i 为内流速度, EI 为弯曲刚度, F_{CF} 为外部流体力.方程中第 3 项和第 4 项表示立管内流对立管涡激振动响应的影响,其中第 3 项为内流对立管所施加的科氏力,而第 4 项则表示内流流动

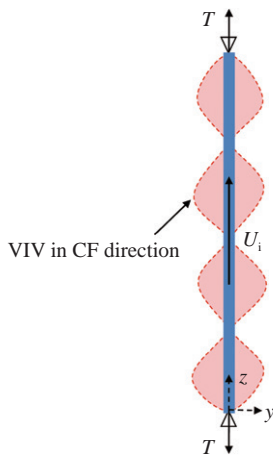


图 1 含内流立管横向涡激振动示意图

Fig. 1 Schematic of vortex-induced vibration (VIV) for a riser considering internal flow. CF stands for cross-flow

所产生的离心力对立管涡激振动的影响. F_{CF} 包含附加质量力和涡激力

$$F_{CF} = -m_a \ddot{y} + F_{ex,CF} \quad (2)$$

其中,附加质量 $m_a = C_a m_e$,附加质量系数 m_a 取为 1.0, m_e 为立管排开水单位长度质量.

为了确定外部涡激力,需要首先对立管在横向上的激励区和阻尼区进行判定,可通过确定立管上无因次激励频率来判断激励区和阻尼区(如图 2).

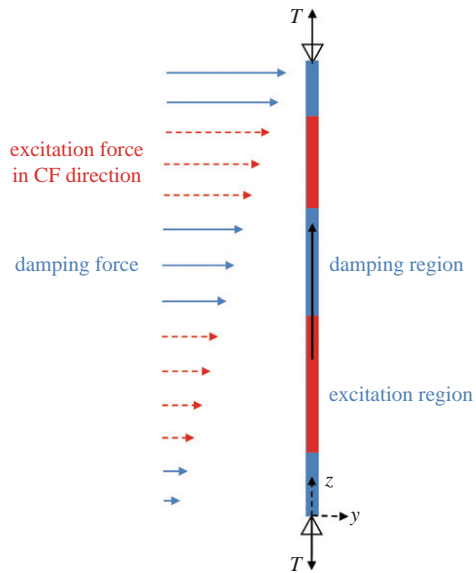


图 2 含内流立管横向激励区和阻尼区示意图

Fig. 2 Identification of excitation and damping regions of a fluid-conveying riser

由模态分析可得到立管的各阶固有频率,再结合流场并基于方程(2)获得立管各节点在每阶固有频率下的无因次频率

$$f_{CF,i}^*(z) = \frac{\omega_{CF,i}}{2\pi} \frac{D_e}{U_e(z)} \quad (3)$$

其中, $f_{CF,i}^*(z)$ 表示第 i 阶固有频率下节点 z 的无因次频率, D_e 为立管的直径, $U_e(z)$ 为外部剪切流在节点 z 处流速, $\omega_{CF,i}$ 表示第 i 阶固有圆频率.由于模型中的斯托哈尔数并不是恒定的,根据实际雷诺数对节点 z 的斯托哈尔数进行修正^[34].

剪切流中,沿立管轴向都存在激励区和阻尼区.基于涡激振动的半经验频域预报模型 VIVANA,可根据以下标准来判定立管的激励区和阻尼区

$$0.125 \leq f_{CF,i}^*(z) \leq 0.2 \quad (4)$$

当立管在节点 z 处第 i 阶无因次激励频率在 0.125 ~ 0.2 区间内时,则该节点处于第 i 阶激励频率

下的激励区内, 相反该节点则位于该阶激励频率的阻尼区内. 然而, 在多频响应下, 直接通过该标准得到的各激励频率的激励区可能发生重叠. 针对发生重叠的激励区, 本文采用等长度退让的方法处理多频响应下激励区发生重叠的问题^[34].

确定立管横向上的激励区后, 激励区内节点 z 处的第 i 阶激励力可以表示为

$$F_{ex,CF}(z) = \frac{1}{2} \rho_e D_e U(z)^2 C_{L,CF,i}(z) \cos(\omega_{CF,i} \cdot t + \varphi_{CF,i}) \quad (5)$$

其中, ρ_e 为外部流体密度, $C_{L,CF,i}(z)$ 为节点 z 处激励力系数, $\varphi_{CF,i}$ 为相位角. 基于 Gopalkrishnan^[35] 刚性圆柱体强迫振荡试验结果 (图 3), 根据同一无因次频率下的激励力系数 C_L 与无因次幅值之间的关系曲线 (图 4) 可确定 $C_{L,CF,i}(z)$.

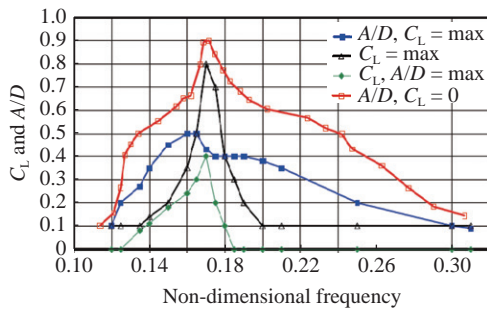


图 3 横向激励力系数模型参数^[34]

Fig. 3 Excitation coefficient for CF VIV^[34]

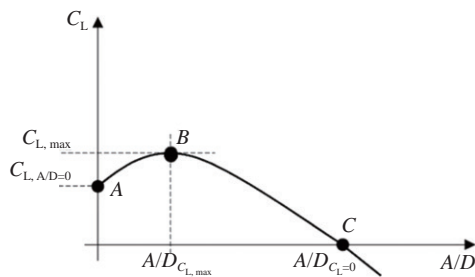


图 4 激励力系数与无因次幅值的函数曲线^[34]

Fig. 4 Function of excitation coefficient and non-dimensional amplitude^[34]

相位角 $\varphi_{CF,i}$ 则是根据 Zhang 等^[19] 提出的方法确定, 依不同的振型, 可以分别设为 0 和 π .

在阻尼区节点 z 处的阻尼力则采用 VIVANA 中水动力阻力模型^[35]

$$F_{damp,CF}(z) = -C_{damp}(z) \frac{\partial y(z,t)}{\partial t} \quad (6)$$

其中, $F_{damp,CF}(z)$ 为节点 z 处第 i 阶激励频率的水动力阻力, $C_{damp}(z)$ 为阻尼区内阻尼系数.

采用有限单元法对立管横向振动控制方程进行离散, 运用 Newmark- β 逐步积分方法求解方程, 进而研究含内流海洋立管横向涡激振动特性.

2 模型验证

运用有限元方法将模型进行离散, 将模型离散为 100 个单元, 如图 5 所示, 之后运用 Newmark- β 法求解离散方程.

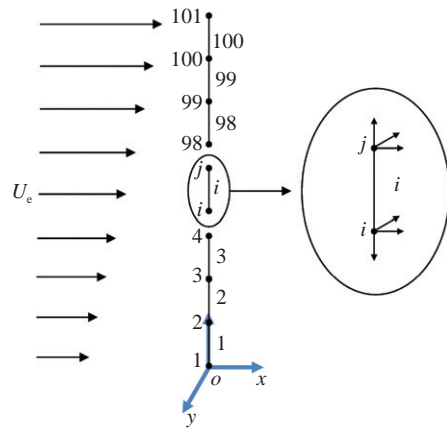


图 5 立管离散单元示意图

Fig. 5 Schematic of discretized elements of the fluid-conveying riser

首先, 通过将数值计算结果与实验结果进行对比, 验证模型的准确性, 本文中选用的对比数据为宋磊建的模型实验数据^[36], 该模型实验的具体参数如表 1.

表 1 模型实验立管参数^[36]

Table 1 Parameters of the experimental riser model^[36]

Parameter	Value
length L/m	6.75
outer diameter D_o/m	0.031
inner diameter d_i/m	0.027
bending stiffness $EI/N \cdot m^2$	1476.76
pretension T/N	3000
mass per unit m_t/kg	1.768
damping ratio $c/\%$	0.3

如图 6 所示, 在外部剪切流流速为 1.5 m/s (线性剪切流中最大流速为 1.5 m/s, 最小流速为 0) 情况下, 不含内流的立管在横向上的位移均方根与实验结果吻合较好, 数值模拟和实验中立管涡激振动的主导振动模态都为二阶模态. 同时, 数值模拟中立管节点

25 在横向上的主导振动频率为 6.1 Hz (图 7), 而实验中立管在横向上的主导振动频率为 5.4 Hz. 值得注意的是立管在剪切流作用下会产生多频率涡激振动, 从图 7 中可以看出, 立管在横向上存在另一个振动频率 2.7 Hz, 这是由于外部剪切流流速沿立管轴向变化, 导致立管不同位置产生不同的模态响应, 从而引起立管整体发生多模态多频率涡激振动响应. 然而, 由于数值模拟中所选取的附加质量系数和激励系数等原因, 数值模拟结果与实验结果存在一定的误差, 但是误差都较小.

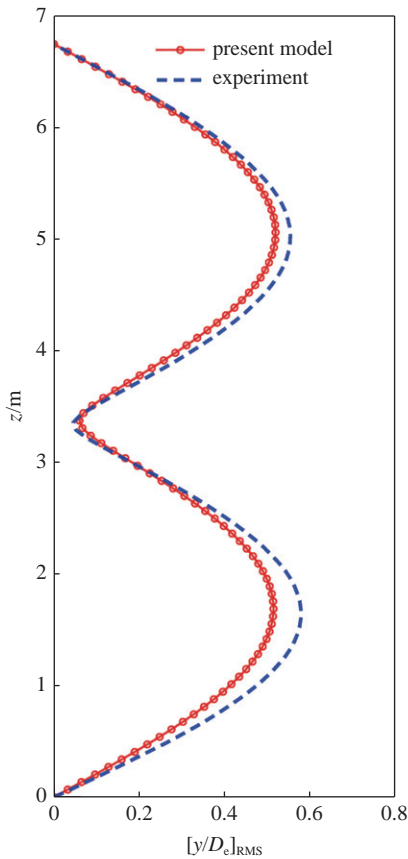


图 6 横向均方根位移对比

Fig. 6 Comparison of CF RMS between numerical and experiment results

3 含内流海洋立管横向涡激振动特性

3.1 内流对立管固有频率的影响

立管结构的固有频率可以依据下式求得^[37]

$$[\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}] = 0 \tag{7}$$

式中, ω 表示立管各阶圆频率, \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 分别为立管的刚度矩阵和质量矩阵, 中立管的刚度矩阵受内流速度和密度的影响. 含内流立管的固有频率随着内流速度和密度变化规律如图 8 和图 9 所示.

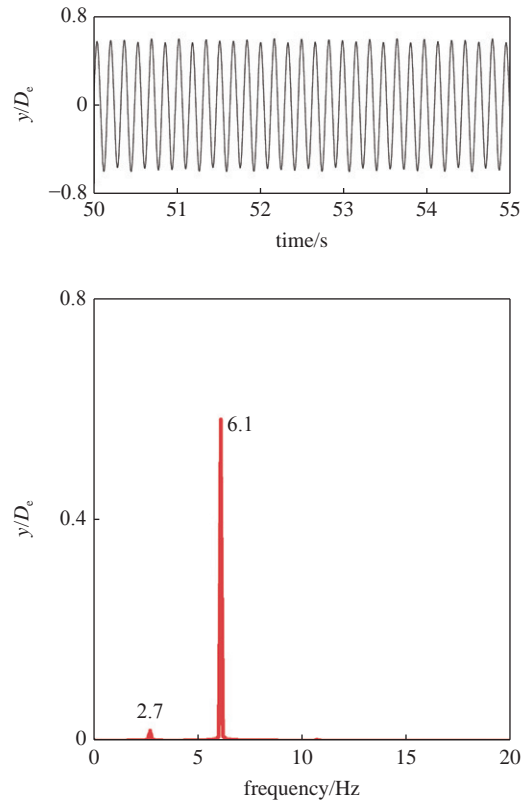


图 7 横向振动时历曲线和振动频率

Fig. 7 Time history of vibration and vibrating frequency in CF direction

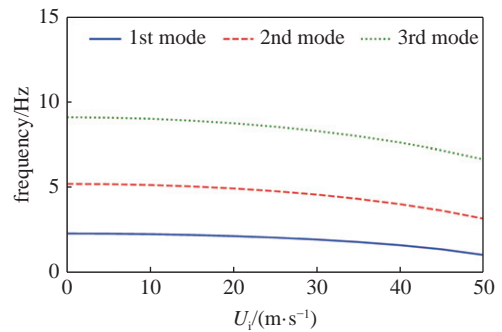


图 8 立管固有频率随着内流速度变化规律

Fig. 8 Variation of natural frequency with the increase of the internal flow velocity

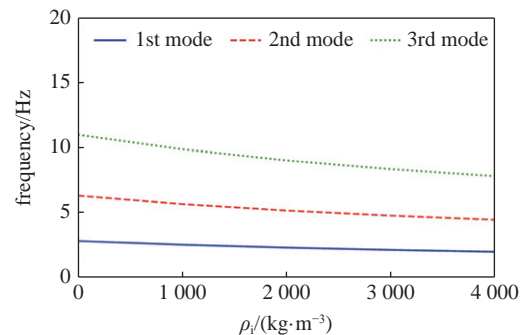


图 9 立管固有频率随着内流密度变化规律

Fig. 9 Variation of natural frequency with the increase of the internal fluid density

从图中可以看出内流的速度和密度影响立管固有频率, 随着内流密度和速度增大, 立管的前 3 阶固有频率降低. 若内流密度设为 2000 kg/m^3 , 当内流速度从 0 m/s 增大到 50 m/s 时, 立管的前 3 阶固有频率分别从 2.33 Hz , 5.23 Hz 和 9.12 Hz 减小到 1.06 Hz , 3.2 Hz 和 6.68 Hz ; 若内流速度设为 10 m/s , 当内流密度从 1000 kg/m^3 增大到 4000 kg/m^3 , 立管的前 3 阶固有频率分别从 2.51 Hz , 5.66 Hz 和 9.88 Hz 减小到 1.96 Hz , 4.45 Hz 和 7.81 Hz . 从式 (7) 看出, 立管内流的速度和密度增大可导致立管刚度减小, 从而减小立管固有频率.

3.2 横向振动频率

3.2.1 内流速度的影响

将立管内流密度设为 2000 kg/m^3 , 立管外部剪切流速度为 1.5 m/s , 图 10 展示了随着内流速度的增大, 立管节点 50 处横向振动频率的变化规律. 由于剪切流的作用, 立管在横向上出现多频率多模态涡激振动现象.

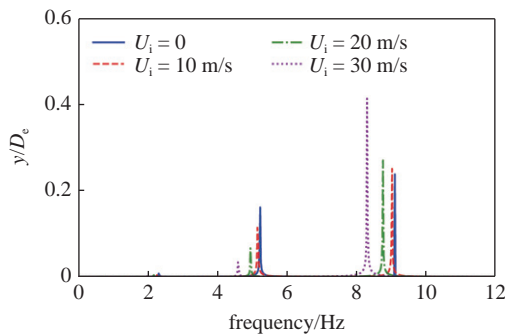


图 10 横向振动频率随着内流速度的变化趋势
Fig. 10 Variation of CF vibrating frequency with the increase of the internal flow velocity

从图 10 可以看出, 立管横向振动的主导频率随着内流速度的增大而减小. 当立管内流速度从 0 增大到 10 m/s 时, 横向主导振动频率减小的幅度较小, 大约从 9.15 Hz 减小到 9.08 Hz ; 而当内流速度增大到 20 m/s 和 30 m/s 时, 横向主导振动频率随着内流速度的增大明显降低, 大约分别降低到 8.8 Hz 和 8.2 Hz . 出现这种现象的原因是, 当存在内流时, 立管的固有频率随着内流速度的增大而降低, 立管涡泻频率在特定的内流速度下锁定到新的较低的固有频率, 从而引起在此频率下的涡激振动响应.

3.2.2 内流密度的影响

由于立管系统在深海资源开发中输送油气混合

物以及固液矿产混合物, 所以需要研究不同内流密度对立管涡激振动的影响规律. 同样在立管外部剪切流速度为 1.5 m/s , 将立管内流速度设为 10 m/s , 分别研究内流密度 1000 kg/m^3 , 2000 kg/m^3 和 3000 kg/m^3 对立管横着涡激振动参数的影响规律, 其中密度 1000 kg/m^3 接近油气混合物密度, 而密度 2000 kg/m^3 和 3000 kg/m^3 则接近固液矿产混合物密度. 内流密度的变化对立管横向涡激振动频率影响规律如图 11 所示. 从图 11 可以看出, 当立管内流密度为 1000 kg/m^3 时, 立管横向振动的主导频率约为 5.6 Hz , 当内流密度增大到 2000 kg/m^3 时, 其主导频率转换到 9.08 Hz . 出现这种现象的原因与新的主导模态响应激发以及固有频率的降低有关, 当内流速度从 1000 kg/m^3 增大到 2000 kg/m^3 时, 立管横向涡激振动的主导模态从二阶响应变换到 3 阶模态响应, 从而导致立管在横向上的主导振动频率从 5.6 Hz 跳跃到 9.08 Hz ; 而随着内流密度的继续增大, 立管固有频率降低并且没有发生模态响应转换, 从而导致立管横向涡激振动响应与新的固有频率锁定, 因此当内流密度增大到 3000 kg/m^3 时, 立管横向上的主导振动频率降为 8.4 Hz . 值得注意的是, 立管涡激振动的频率转换与模态转换同时发生.

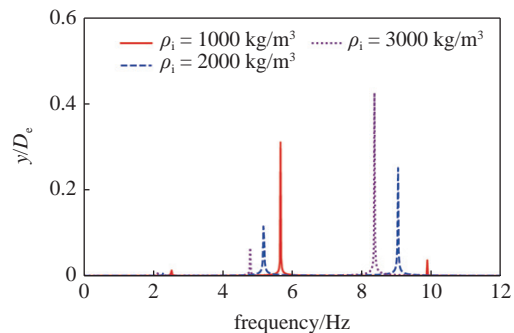


图 11 横向振动频率随着内流密度的变化趋势
Fig. 11 Variation of CF vibrating frequency with the increase of the internal fluid density

3.3 横向均方根位移

3.3.1 内流速度的影响

立管横向均方根位移随着内流速度的变化规律如图 12 所示. 从图 12 中可以看出, 随着内流速度的增大, 立管在横向上的最大均方根位移是不断增大的, 值得注意的是, 均方根位移的增大在内流速度较大的时候比较明显, 而内流速度较小时, 增大较慢. 当内流速度从 0 增大到 10 m/s 的时候, 立管横向的

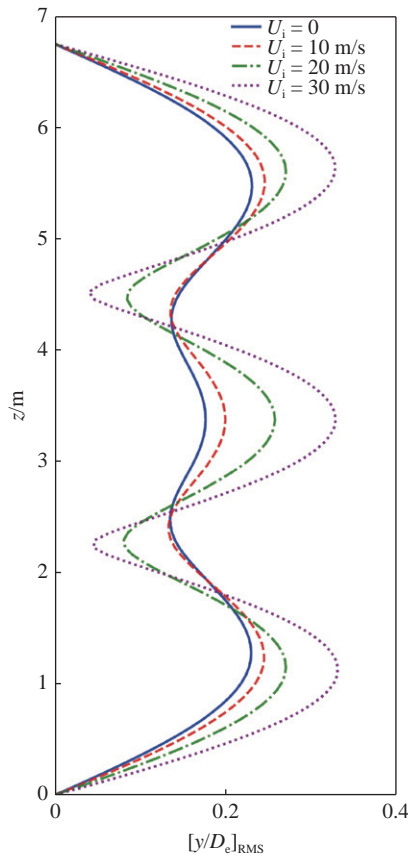


图 12 横向均方根位移随着内流速度变化趋势

Fig. 12 Variation of CF RMS with the increase of the internal flow velocity

最大均方根位移几乎不变, 大约为 0.24; 而当内流速度增大到 20 m/s 和 30 m/s 时, 立管横向的最大均方根位移显著增大, 大约为 0.27 和 0.33. 立管横向最大均方根位移的增大是由于内流对立管涡激振动产生影响.

约化速度是研究立管涡激振动特性的一个重要参数, 有如下表达形式

$$U_r = \frac{U_e}{f_n D_e} \tag{8}$$

其中, f_n 是立管的第 n 阶固有频率. 立管横向涡激振动振幅随着约化速度 U_r 先增大后减小, 并且一般在约化速度为 6 时达到最大值^[38]. 当立管内流速度从 0 增大到 10 m/s, 约化速度大约从 4.3 增大到 4.45, 进而导致立管横着涡激振动振幅增大, 随着内流速度继续增大到 20 m/s 和 30 m/s, 约化速度大约增大到 4.6 和 4.8, 相应地, 立管在横向上的涡激振动振幅增大. 由此可见, 内流流速通过影响约化速度, 进而改变立管横向涡激振动振幅. 值得注意的是, 剪切流引起的立管横向涡激振动响应沿轴向一般应该是不

对称的, 但本研究中立管的长度较短, 这种不对称特征未能充分体现.

3.3.2 内流密度的影响

而立管横向均方根位移随内流密度的变化如图 13 所示. 从图 13 中可以看出, 当不发生模态转换时, 立管在横向上的最大均方根位移随内流密度的增大而增大, 当内流密度为 2000 kg/m³ 时, 立管在横向上的最大均方根位移大约为 0.24, 当内流密度增大到 3000 kg/m³ 时, 其值约为 0.35. 值得注意的是, 当立管在横向上发现模态转换时, 横向最大均方根位移值发生跳跃现象, 如当立管由二阶模态响应变为 3 阶模态响应, 其横向均方根位移最大值约从 0.3 (1000 kg/m³) 跳跃到 0.24 (2000 kg/m³). 横向最大均方根位移随内流密度的增大而增大同样是由于密度变化引起约化速度变化, 从而导致立管横向涡激振动振幅改变. 当内流密度从 1000 kg/m³ 增大到 2000 kg/m³ 时, 其约化速度大约从 4.8 减小到 4.45, 进而导致立管在横向上的涡激振动振幅减小, 而当内流密度继续增大到 3000 kg/m³, 约化速度跳跃到接近 5, 立管振动振幅相应增大.

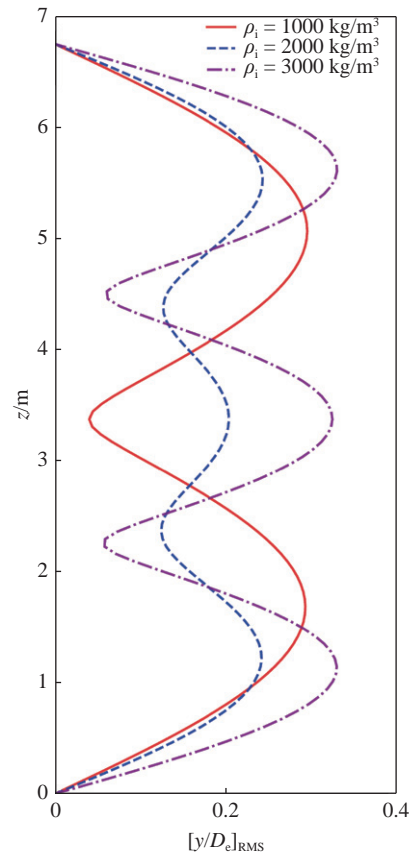


图 13 横向均方根位移随着内流密度变化趋势

Fig. 13 Variation of CF RMS with the increase of the internal fluid density

值得注意的是, 本研究中, 立管的主导振动模态在内流速度的影响下并没有改变, Duan 等^[26-27] 证明了随着内流速度的增大, 立管在横向上的主导模态是增大的, 但是这种模态转换只是在内流速度较大时才发生. 显然, 本研究中内流速度还没有引起立管在横向上振动的模态转换. 而内流密度的增大对立管横向振动的主导模态影响明显, 如图 13 所示. 当内流密度为 1000 kg/m^3 时, 立管横向振动的主导模态为二阶振动响应; 当内流密度增大到 2000 kg/m^3 和 3000 kg/m^3 时, 立管横向振动发生模态转化, 变为 3 阶模态主导响应. 发生模态转换的原因同样是由于内流密度增大降低立管固有频率, 从而激发新的涡激振动模态响应, 进而发生模态转换.

4 结论

本文基于欧拉-伯努利梁理论和半经验时域水动力模型, 研究了内外流耦合作用下海洋立管在剪切流场中的横向涡激振动响应, 分析和讨论了立管在横向上的均方根位移、主导振动模态和频率等随内流速度和密度的变化规律.

海洋立管在剪切流作用下发生多模态多频率涡激振动响应, 深水立管在剪切流作用下的横向涡激振动响应沿立管轴向一般是不对称的, 立管较短时, 这种不对称特征不明显. 内流速度和密度的增大, 导致立管固有频率降低, 因此涡激力频率锁定在新的较低固有频率上, 激发新的横向涡激振动模态响应, 进而改变立管横向涡激振动频率, 导致立管在横向上的主导振动频率随内流速度和密度的增大而减小. 并且, 内流密度的增大可引起立管发生模态转换和频率转换. 同时, 立管固有频率的变化影响约化速度, 进而改变立管横向涡激振动均方根位移, 因此, 立管横向最大均方根位移随内流速度和密度的增大而增大, 特别是当内流速度和密度较大时, 横向最大均方根位移增大明显.

参 考 文 献

- 1 Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19: 389-447
- 2 Williamson CHK, Govardhan R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96: 713-735
- 3 Bearman PW. Circular cylinder wakes and vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27: 648-658

- 4 Chaplin JR, King R. Laboratory measurements of the vortex-induced vibrations of an untensioned catenary riser with high curvature. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 79: 26-38
- 5 Xu WH, Ma YX, Ji CN, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a yawed flexible cylinder at different yaw angles. *Ocean Engineering*, 2018, 154: 27-42
- 6 高云, 邹丽, 宗智. 两端铰接的细长柔性圆柱体涡激振动响应特性数值研究. *力学学报*, 2018, 50(1): 9-20 (Gao Yun, Zou Li, Zong Zhi. Numerical study of response performance of vortex-induced vibration on a flexible cylinder with pinned-pinned boundary condition. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 9-20 (in Chinese))
- 7 徐万海, 马烨璇, 罗浩等. 柔性圆柱涡激振动流体力学系数识别及其特性. *力学学报*, 2017, 49(4): 818-827 (Xu Wanhai, Ma Yexuan, Luo Hao, et al. Identification and characteristics of hydrodynamic coefficients for a flexible cylinder undergoing vortex-induced vibration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(4): 818-827 (in Chinese))
- 8 Chen WL, Ji CN, Xu D, et al. Flow-induced vibrations of an equilateral triangular prism at various angles of attack. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 97: 103099
- 9 李非凡, 及春宁, 许栋等. 细长柔性立管涡激振动的数值模拟研究. *工程力学*, 2017, 34(4): 221-230 (Li Feifan, Ji Chunming, Xu Dong, et al. Numerical investigation on the vortex-induced vibration of a flexible slender riser. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(4): 221-230 (in Chinese))
- 10 及春宁, 花阳, 许栋等. 不同剪切率来流作用下柔性圆柱涡激振动数值模拟. *力学学报*, 2018, 50(1): 21-31 (Ji Chunming, Hua Yang, Xu Dong, et al. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a flexible cylinder exposed to shear flow at different shear rates. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 21-31 (in Chinese))
- 11 及春宁, 邢国源, 张力等. 倾斜流作用下柔性立管涡激振动的数值模拟. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(2): 324-331 (Ji Chunming, Xing Guoyuan, Zhang Li, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration of flexible riser subjected to inclined flow. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(2): 324-331 (in Chinese))
- 12 Seyed-Aghazadeh B, Edraki M, Modarres-Sadeghi Y. Effects of boundary conditions on vortex-induced vibration of a fully submerged flexible cylinder. *Experiments in Fluids*, 2019, 60: 38
- 13 Song JN, Lu L, Teng B, et al. Laboratory tests of vortex-induced vibrations of a long flexible riser pipe subjected to uniform flow. *Ocean Engineering*, 2011, 38: 1308-1322
- 14 Hu Z, Wang J, Sun Y. Flow-induced vibration of one-fixed-one-free tandem arrangement cylinders with different mass-damping ratios using wind tunnel experiment. *Journal of Fluids and Structures*, 2020, 96: 103019
- 15 Bao Y, Zhu HB, Huan P, et al. Numerical prediction of vortex-induced vibration of flexible riser with thick strip method. *Journal of Fluids and Structures*, 2019, 89: 166-173
- 16 Qu Y, Metrikine AV. A single van der pol wake oscillator model for coupled cross-flow and in-line vortex-induced vibrations. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106732
- 17 Qu Y, Metrikine AV. A wake oscillator model with nonlinear coupling for the vortex-induced vibration of a rigid cylinder constrained to vibrate in the cross-flow direction. *Journal of Sound and Vibration*

- tion, 2020, 469: 115161
- 18 Yuan YC, Xue HX, Tang WY. Numerical analysis of vortex-induced vibration for flexible risers under steady and oscillatory flows. *Ocean Engineering*, 2018, 148: 548-562
 - 19 Zhang MM, Fu SX, Song LJ, et al. A time domain prediction method for the vortex-induced vibrations of a flexible riser. *Marine Structures*, 2018, 59: 458-481
 - 20 Lin K, Wang J. Numerical simulation of vortex-induced vibration of long flexible risers using a SDVM-FEM coupled method. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 468-486
 - 21 Paidoussis MP. Fluid-structure Interactions, Slender Structures and Axial Flow. volume 1. second ed.. California: Academic Press, 2014
 - 22 Guo HY, Lou M. Effect on internal flow on vortex induced vibration of risers. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(4): 496-504
 - 23 李朋. 深水海洋输流立管涡激振动及干涉试验研究. [博士论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2012 (Li Peng. Experimental study on vortex-induced vibration and interference of deepwater marine risers transporting fluid. [PhD Thesis]. Qingdao: Ocean University of China, 2012 (in Chinese))
 - 24 吴天昊. 悬垂直管涡激振动响应特性研究. [硕士论文]. 上海: 上海交通大学, 2018 (Wu Tianhao. The study on VIV responses of a free-hang riser. [Master Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018 (in Chinese))
 - 25 Jiang TL, Dai HL, Wang L. Three-dimensional dynamics of fluid-conveying pipe simultaneously subjected to external axial flow. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107970
 - 26 Duan JL, Chen K, You YX, et al. Numerical investigation of vortex-induced vibration of a riser with internal flow. *Applied Ocean Research*, 2018, 72: 110-121
 - 27 Duan JL, Zhou JF, You YX, et al. Time-domain analysis of vortex-induced vibration of a flexible mining riser transporting flow with various velocities and densities. *Ocean Engineering*, 2021, 220: 108427
 - 28 Thorsen MJ, Challabotla NR, Sævik S, et al. A numerical study on vortex-induced vibrations and the effect of slurry density variations on fatigue of ocean mining risers. *Ocean Engineering*, 2019, 174: 1-13
 - 29 Wang L, Jiang TL, Dai HL, et al. Three-dimensional vortex-induced vibrations of supported pipes conveying fluid based on wake oscillator models. *Journal of Sound and Vibration*, 2018, 422: 590-612
 - 30 李艳, 成赟, 郭轶可等. 内外流共同作用下输流软管力学特性研究. 水资源与水工程学报, 2018, 29(3): 182-193 (Li Yan, Cheng Yun, Guo Yike, et al. Mechanical characteristics research on flexible hose under the influence of internal and external fluid. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 182-193 (in Chinese))
 - 31 Zhu HJ, Gao Y, Zhao H. Experimental investigation on the flow-induced vibration of a free-hanging flexible riser by internal unstable hydrodynamic slug flow. *Ocean Engineering*, 2018, 164: 488-507
 - 32 Meng S, Chen Y, Che C. Slug flow's intermittent feature affects VIV responses of flexible marine risers. *Ocean Engineering*, 2020, 205: 106883
 - 33 Li FQ, An C, Duan ML, et al. Combined damping model for dynamics and stability of a pipe conveying two-phase flow. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106683
 - 34 Passano E, Larsen CM, Lie H, et al. VIVANA—Theory Manual Version 4.8. Trondheim, Norway, 2016
 - 35 Gopalkrishnan R. Vortex-induced forces on oscillating bluff cylinders. [PhD Thesis]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1993
 - 36 宋磊建. 涡激振动状态下的柔性立管水动力特性研究. [博士论文]. 上海: 上海交通大学, 2016 (Song Leijian. Investigation on the hydrodynamics of a flexible riser under vortex-induced vibration. [PhD Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016 (in Chinese))
 - 37 唐友刚. 高等结构动力学. 天津: 天津大学出版社, 2000 (Tang Yougang. Advanced Structural Dynamics. Tianjin: Tianjin University Press, 2000 (in Chinese))
 - 38 Blevins RD, Coughran CS. Experimental investigation of vortex-induced vibration in one and two dimensions with variable mass, damping, and Reynolds number. *Journal of Fluids Engineering*, 2009, 131(10): 101202