

深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析

金国庆, 邹丽, 宗智, 孙哲, 王浩

ANALYSIS OF VORTEX-INDUCED VIBRATION FOR A CANTILEVER RISER IN A DEEP-SEA MINING SYSTEM

Jin Guoqing, Zou Li, Zong Zhi, Sun Zhe, and Wang Hao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-21-679>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

海洋热塑性增强管(RTP)涡激振动数值计算

NUMERICAL CALCULATION OF VORTEX-INDUCED VIBRATION OF REINFORCED THERMOPLASTIC PIPE

力学学报. 2020, 52(1): 235-246

剪切流场中含内流立管横向涡激振动特性

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

力学学报. 2021, 53(7): 1876-1884

涡激诱导并列双圆柱碰撞数值模拟研究

NUMERICAL SIMULATION ON THE VORTEX-INDUCED COLLISION OF TWO SIDE-BY-SIDE CYLINDERS

力学学报. 2019, 51(6): 1785-1796

不同剪切率来流作用下柔性圆柱涡激振动数值模拟

Numerical simulation of vortex-induced vibration of a flexible cylinder exposed to shear flow at different shear rates

力学学报. 2018, 50(1): 21-31

错列角度对双圆柱涡激振动影响的数值模拟研究

NUMERICAL STUDY OF STAGGERED ANGLE ON THE VORTEX-INDUCED VIBRATION OF TWO CYLINDERS

力学学报. 2018, 50(2): 244-253

柔性圆柱涡激振动流体力系数识别及其特性

IDENTIFICATION AND CHARACTERISTICS OF HYDRODYNAMIC COEFFICIENTS FOR A FLEXIBLE CYLINDER UNDERGOING VORTEX-INDUCED VIBRATION

力学学报. 2017, 49(4): 818-827



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析¹⁾

金国庆* 邹丽*,†,2) 宗智*,† 孙哲* 王浩**

*(大连理工大学船舶工程学院, 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

†(高技术船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

**(中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要 不同于传统的海洋立管, 深海采矿系统中的垂直提升管道可以被视为一个底部无约束的柔性悬臂式立管, 工作过程中同样面临涡激振动和柔性变形问题. 本文采用一种无网格离散涡方法和有限元耦合的准三维时域求解数值模型, 系统地研究了不同流速下悬臂式立管的涡激振动问题. 结果表明: 悬臂式立管的横向振动模态阶数随折合速度增加而增大, 在一定折合速度范围内主导振动模态保持不变; 当主导模态转变时, 对应的横向振幅会发生突降, 但是当新的高阶模态被激发后, 立管振幅随来流速度增加而再次逐渐增大; 在相同的振动模态下, 立管底部位移均方根值随折合速度线性增加, 主导振动频率在模态转变时会出现跳跃现象; 特别地, 本文讨论了三阶主导模态下悬臂式立管的振动响应, 无约束的立管底部呈现出较大的振动能量, 且振幅的驻波特征随折合速度增加而逐渐增强; 本文比较了两端铰支立管与悬臂式立管的涡激振动响应特征, 两者在振幅和主导振动频率两方面均表现出了相同的变化趋势.

关键词 悬臂式立管, 涡激振动, 均匀流, 折合速度, 离散涡, 有限元

中图分类号: P751 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-21-679

ANALYSIS OF VORTEX-INDUCED VIBRATION FOR A CANTILEVER RISER IN A DEEP-SEA MINING SYSTEM¹⁾

Jin Guoqing* Zou Li*,†,2) Zong Zhi*,† Sun Zhe* Wang Hao**

*(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

†(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

**(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract Different from the traditional marine riser, the vertical lifting pipeline in the deep-sea mining system can be regarded as a flexible cantilever riser with an unconstrained bottom end. Likewise, problems in terms of vortex-induced vibrations (VIVs) and flexible deformations can be encountered during operation. In this paper, a quasi-three-dimensional time-domain numerical model coupled with the discrete vortex method (DVM) and finite element method (FEM) is employed in the time domain. Systematic simulations have been carried out to investigate the VIVs of a cantilever riser under different current speeds. The results indicate that, for a cantilever riser, the transverse vibration mode number rises with increasing the reduced velocity. In a certain range of reduced velocities, the dominant vibration modes remain

2021-12-20 收稿, 2022-03-29 录用, 2022-03-30 网络版发表.

1) 国家自然科学基金 (52071056, 52171295) 和基本科研业务专项 (DUT20GF107) 资助项目.

2) 邹丽, 教授, 主要研究方向: 船舶与海洋工程高端装备、海洋工程环境、非线性水动力学. E-mail: lizou@dlut.edu.cn

引用格式: 金国庆, 邹丽, 宗智, 孙哲, 王浩. 深海采矿系统中悬臂式立管涡激振动分析. 力学学报, 2022, 54(6): 1741-1754

Jin Guoqing, Zou Li, Zong Zhi, Sun Zhe, Wang Hao. Analysis of vortex-induced vibration for a cantilever riser in a deep-sea mining system. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(6): 1741-1754

unchanged. When the modal transition occurs, the corresponding vibration amplitudes can abruptly drop. However, when the new high-order mode is excited, vibration amplitudes of the riser again gradually increase with increasing the incoming velocities. In the same vibration mode, the root-mean-squared values for the bottom displacements of the riser linearly rise with the reduced velocities. When vibration mode changes, a jump phenomenon for the dominant vibration frequencies can be observed. Especially, the present work discusses the vibration responses of the cantilever riser in the three-order dominant mode. It can be found that the unconstrained bottom end of the riser exhibits relatively large vibration energy. The standing wave characteristics of the vibration amplitudes gradually enhance with the increase of the reduced velocities. The VIV response characteristics of a two-ends hinged riser and a cantilever riser are compared in this investigation, both of which exhibit the same variation tendency in terms of amplitude and dominant vibration frequency.

Key words cantilever riser, vortex-induced vibration, uniform flow, reduced velocity, discrete vortex method, finite element method

引言

海底蕴藏着丰富的矿产资源, 目前已知的包括多金属结核物、多金属硫化物、富钴结壳和深海稀土资源等, 具有重要战略意义与商业开采价值^[1-2]. 这类矿产资源大多富含于数千米水深的深远海底部, 赋存状态的特殊性和周围环境的复杂性导致开采难度较大^[3-4]. 目前主流的深海采矿方式为垂直管道混输系统, 即采用水力提升的方式将矿物通过长距离的管道输送至水面采矿船. 该系统主要由海底采矿系统、垂直输运系统和水面支持系统三部分组成^[3]. 如图 1 所示, 海底采矿车收集矿物并通过软管输送到中间仓(缓冲仓), 之后利用水力提升泵将矿物通过垂直提升管道输送至水面母船^[5-9].

矿产混输系统中的关键装备之一为具有大长细比特征的垂直提升管道. 不同于传统的海洋立管, 垂直提升管道底部与中间仓相连接, 其底部是自由运

动的状态, 因此该输运管道通常被称为悬臂式或自由悬挂式立管. 类似的立管形式在油气资源开采系统中也会遇到, 当遭遇极端海况或者回收输油管道时, 输油管道底部脱离井口, 呈现自由悬挂式状态^[10-12]. 在深海采矿垂直提升管道的研究中, 底部中间仓重量可简化为一个垂直向下的作用力, 立管底部可视作弱约束状态. 然而, 目前对此类立管的研究主要集中在结构动力学行为分析^[11-15], 缺乏对其水动力学性能的研究.

与传统立管类似的是, 悬臂式立管在作业过程中也面临着涡激振动(VIV)等水动力学问题. 涡激振动指的是流体经过钝体结构物, 从物体表面分离后在尾部交替地产生旋涡, 进而产生周期性的外力和振动. 在一个质量-弹簧-阻尼系统中, 当振动频率和涡流频率一致时, 出现锁定共振现象, 此时结构物会产生大幅度的振动, 严重危害作业安全. 此外, 长期的立管振动会导致结构出现疲劳损伤. 因此, 立管的涡激振动研究是立管水动力性能分析的重要组成部分. 对于立管的涡激振动特性的测量, 传统的做法是采用缩尺模型进行水池试验. Chaplin 等^[16]针对一根长 13.12 m 的柔性立管, 进行了阶梯流作用下的 VIV 试验研究, 观察到了立管在一定流速下被激发出高阶模态振动. Trim 等^[17]开展了水平布置的 38 m 长的立管分别在均匀流和剪切流作用下的试验, 分析了不同拖曳速度下的振动模态和频率等特征. Song 等^[18-19]和高云等^[20]研究了 7.9 m 长立管在不同流速的均匀流作用下的非均匀分布的水动力载荷、立管截面运动轨迹和疲劳损伤等问题. 此外, 王俊高等^[21]研究了正弦振荡来流下小尺度模型立管的 VIV 特性. 徐万海等^[22]则结合拖曳水池试验和数

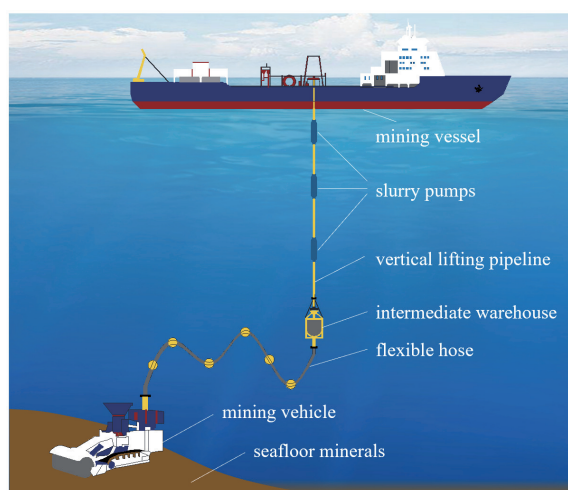


图 1 深海采矿系统示意图

Fig. 1 Sketch of the deep-sea mining system

值模型分析了立管的流体力系数特性. 在悬臂式立管模型试验方面, 文献 [10] 研究了水面母船运动对立管动力行为的影响. Fajarra 等 [23] 研究了悬臂式管道在一阶振动模态下的锁定问题. Wang 等 [24] 分析了船舶周期性运动对自由悬挂式立管运动响应的影响. Mao 等 [25] 测量了悬挂式排空采油管道在不同流速下的振动模态和振幅. 然而, 模型试验成本高且周期较长, 此外, 缩尺模型需要改变立管的材料属性, 产生难以避免的误差.

近年来, 数值手段成为研究立管涡激振动的主要方式. 常见的立管振动预报数值方法主要分为三类: 经验模型、参数化模型和 CFD 模型 [26]. 其中, 经验模型常采用尾流振子模型获得作用在结构上的流体力, 进一步通过梁模型求解立管变形 [27-29]. 参数化模型则是基于一系列的刚性圆柱涡激振动试验结果来确定立管运动幅值 [30], 该方法已形成相关的计算软件, 例如 Shear 7 和 VIVANA 等. 可以看出, 前两者分别属于经验和半经验方式, 因此其计算成本相对较低. 计算流体力学方法则是通过求解 Navier-Stokes (N-S) 方程, 获得立管尾流场的非定常流动特征和时域内变化的水动力载荷. 常见的方法是基于切片法的思想, 采用 CFD 模型求解立管若干节点的受力, 通过有限元方法求解柔性立管变形和振动 [31-34], 这类准三维的数值模拟手段可兼顾计算效率和精度. 此外, 部分研究采用高精度的大涡模拟 LES 方法 [35] 和直接数值模拟 DNS 方法研究低雷诺数下柔性立管的涡激振动 [36-37], 但该方法目前所需计算资源较大, 难以求解高雷诺数下大长细比立管的水动力问题.

综上所述, 基于 CFD 模型和有限元的耦合求解算法, 可有效求解具有大长细比特征的海洋立管的涡激振动问题. 其中, 离散涡方法 (DVM) [38] 作为一种无网格的纯拉格朗日的流体计算方法, 可以高效率地求解高雷诺数下的圆柱绕流问题, 通过与有限元方法 (FEM) 结合, 近年来被发展用于研究立管的 VIV 问题 [31-32, 39-40]. 此外, 目前海洋立管研究主要集中于传统的两端铰支的立管形式, 缺乏对深海采矿系统中采用的悬臂式立管水动力性能的研究. 本文基于准三维的 DVM-FEM 耦合算法, 建立悬臂式立管涡激振动的计算模型, 即立管上端固定, 底部无约束且承受一定的向下的拉力. 主要目的是系统性地研究不同流速下悬臂式立管的振动响应, 分析其振

动模态、频率和振幅等主要特征. 本文首先分别介绍了二维离散涡算法和有限元模型. 其次, 通过数值预报与经典的 9.63 m 长立管在均匀流作用下的试验结果 [41] 的对比, 验证了本文采用的耦合算法可以较好地预报柔性立管的振动响应. 最后, 研究不同折合速度下悬臂式立管的 VIV 特征, 分析其与两端铰支立管的异同. 本工作可为深海采矿混输提升系统的设计和振动行为分析提供参考.

1 DVM-FEM 耦合算法

本文所采用的耦合算法基于切片法的思想, 将立管沿垂向划分成若干切片, 在每个切片上通过二维离散涡算法求解弹性圆柱涡激振动问题, 并获得该切片所对应的节点的水动力载荷. 此外, 基于有限元方法建立柔性立管振动求解的控制方程, 通过迭代求解获得立管振动的时域解. 综上, 该耦合算法主要包括流体求解器和结构求解器两部分, 所对应的算法分别为离散涡和有限元方法.

1.1 流体求解器: 离散涡方法

离散涡算法是一种纯拉格朗日粒子算法, 不需要进行复杂的网格划分, 涡元在物面上生成, 运动后的涡元主要集中在边界层和尾流区域, 因此具有较低的计算成本 [38, 42]. 根据质量守恒和动量守恒定律, 离散涡算法的控制方程为连续性方程和 N-S 方程, 即

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}$ 为速度矢量, D/Dt 为物质导数, $\mathbf{f}$ 为质量力, ρ 为流体密度, ν 为运动黏度. 对式 (2) 两侧取旋度, 可得到二维涡量输运方程

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \omega = \nu \nabla^2 \omega \quad (3)$$

式中, ω 是垂直于二维水平面方向上的涡量分量

$$\omega = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

式中, u 和 v 分别是速度在 x 和 y 方向上的分量. 离散涡方法引入流函数 ψ , 速度分量可表示为

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad v = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (5)$$

将方程 (5) 代入式 (4) 中可得 Poisson 方程

$$\nabla^2 \psi = -\omega \quad (6)$$

Chorin^[38] 采用算子分裂法的思想, 将涡量输运方程分解为两部分求解, 分别为对流和扩散方程

对流项

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} &= -\mathbf{u} \cdot \nabla \omega \\ \nabla^2 \psi &= -\omega \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

扩散项

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nu \nabla^2 \omega \quad (8)$$

通过 Biot-Savart 定律可求解对流项方程, 涡元对流速度由涡元之间的诱导速度和来流速度两部分组成, 基于 Spalart 等^[42] 提出的涡核模型, 数值计算过程中的对流速度可表示为

$$\mathbf{u}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{u}_\infty - \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^{N_V} \Gamma_j \frac{(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \times \mathbf{k}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^2 + \sigma^2} \quad (9)$$

式中, $\mathbf{u}_\infty = (u_\infty, 0)$ 为来流速度, $\mathbf{r} = (x, y)$ 为涡元位置坐标, Γ 为涡元强度, σ 为涡元半径, $\mathbf{k}$ 为二维平面垂直单位矢量. 对于扩散项, 基于 Chorin^[38] 提出的随机扩散法求解扩散方程, 即

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_i &= \sqrt{4\nu\Delta t \cdot \ln(1/P_i)} \cos Q_i \\ \Delta y_i &= \sqrt{4\nu\Delta t \cdot \ln(1/P_i)} \sin Q_i \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, Δx_i 和 Δy_i 分别为第 i 个涡元在两个方向的随机步长, Δt 为迭代时间步, P_i 和 Q 分别为介于 $(0, 1)$ 和 $(0, 2\pi)$ 的随机数. 采用二阶 Runge-Kutta 法进行时间积分, 涡元 i 在 $t + \Delta t$ 时刻的新位置为

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\mathbf{r}}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{r}_i(t) + \Delta t \cdot \mathbf{u}_i(t) \\ \mathbf{r}_i(t + \Delta t) &= \mathbf{r}_i(t) + 0.5\Delta t \cdot [\mathbf{u}_i(t) + \mathbf{u}_i(\tilde{\mathbf{r}}_i(t + \Delta t))] + \Delta \mathbf{r}_i \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

求解物面压力分布时, 由于物体是运动的, 因此需在压力求解中考虑加速度项, 即

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial s \partial t} - a_b \quad (12)$$

式中, p 为物面压力, s 表示物面切向, a_b 为物体运动加速度.

离散涡算法具体的实现过程可参考文献 [43-44]. 需要注意的是, 涡元在运动过程中会进入物体内部, 本文采用瞬态涡量守恒方法, 将进入圆柱内部的涡

元基于圆周定理映射到物体外部, 保证单个时间步内流场涡量是守恒的, 具体实现步骤可参考文献 [44-45].

1.2 结构求解器: 有限元方法

海洋柔性立管具有大长细比的特征, 可简化为一根垂直的 Euler-Bernoulli 梁模型. 通过 Galerkin 方法, 可获得立管结构动力响应计算的有限元控制方程^[31-32], 即

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F} \quad (13)$$

式中, $\mathbf{M}$, $\mathbf{C}$, $\mathbf{K}$ 分别为质量、阻尼和刚度阵, $\mathbf{F}$ 为外力矢量, $\mathbf{x}$ 为立管各节点组成的位移矢量. 其中外力矢量由离散涡算法提供, 阻尼采用 Rayleigh 阻尼模型, 即

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (14)$$

式中, α 和 β 为瑞利阻尼系数, 计算方式为

$$\left\{ \begin{array}{c} \alpha \\ \beta \end{array} \right\} = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \left\{ \begin{array}{c} \omega_1 \omega_2 \\ 1 \end{array} \right\} \quad (15)$$

式中, ξ 为阻尼比, ω_1 和 ω_2 分别为立管的前两阶固有角频率, 可通过模态分析获得, 本次计算模态分析采用子空间迭代法^[46].

需要注意的是, 传统的两侧铰支立管高度为 2 处的张力 $T(z)$ 由顶部张力、包含管内流体重量的立管结构自重和浮力项三部分组成, 即

$$T(z) = T_{\text{top}} - w_s(z_{\text{top}} - z) + w_b(z_{\text{top}} - z) \quad (16)$$

式中, T_{top} 为顶部张力, z_{top} 为立管顶端高度, w_s 和 w_b 分别为单位长度立管的自重和所受到的浮力. 对于底部有附加重量的悬臂式立管, 其所受张力由参考文献 [25-47] 给出

$$T(z) = W_b + w_s z - w_b z \quad (17)$$

式中, W_b 为立管底部承受的向下的拉力, 即深海采矿系统中中间仓的重量.

如图 2 所示, 悬臂式立管可简化为一个柔性悬臂式模型, 其底部连接的中间仓可简化为一个垂直向下的力 W_b , 需要注意的是该力学模型忽略了中间仓惯性力的影响. 未来工作中可以将中间仓简化为一个集中质量节点进行结构动力响应分析, 并且可以研究这两种力学模型的异同.

综上所述, 基于切片法的思想, 立管被划分成一系列的梁单元, 基于离散涡方法求解立管各单元节

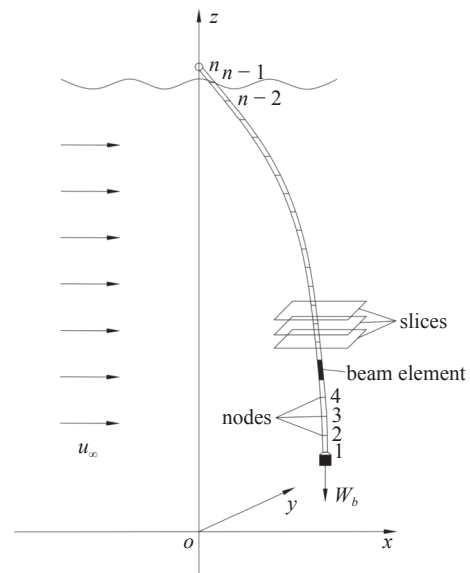


图 2 垂直提升管道简化模型
Fig. 2 Simplified model of the vertical lifting pipeline

点所受的外力, 采用有限元方程求解柔性立管结构变形, 本文采用 Newmark 方法^[46] 迭代求解每个时间步内的立管振动位移、速度和加速度, 采用弱耦合的形式实现流体和结构求解器之间的数据交换. 在接下来的内容中, 本文首先通过与经典的立管模型对比来验证该耦合算法的有效性, 进一步分析悬臂式立管的 VIV 特性.

2 数值模型验证

由于悬臂式立管的模型试验基准算例较少, 在这一节中仍采用顶端和底部均为固定边界条件的模型试验进行数值验证. 基于 DVM-FEM 耦合算法的计算程序由本文作者自主开发, 采用 Fortran 语言编写. 如表 1 所示, 物理模型试验^[41] 中的立管总长度为 9.63 m, 立管外部直径为 20 mm, 厚度为 0.45 mm, 顶部张力为 817 N, 分别计算均匀流速 0.42 m/s 和 0.84 m/s 两个流速下的立管振动响应.

本文的耦合算法基于切片法, 切片数量对计算成本有重要影响, 选取合适的立管单元数 N 可在保证计算精度的基础上提高求解效率. 本次研究选择了 4 套立管单元数进行敏感性分析, 数量分别为 30, 60, 90 和 120. 在 0.42 m/s 来流速度作用下, 不同单元数计算得到的立管横向振动位移均方根值如图 3 所示. 可以看出, 立管单元数量变化对其振幅和模态的影响均较小, 选取 $N = 60$ 时即可满足立管单元数量收敛性要求, 因此本文所有模拟采用的立管

表 1 柔性立管参数^[32,41]

Table 1 Parameters of a flexible riser^[32,41]

Parameters	Values	Units
length L	9.63	m
external diameter D	0.02	m
internal diameter d	0.019 1	m
mass per unit length m	0.7	kg
mass ratio m^*	2.23	—
aspect ratio L/D	481.5	—
Young modulus E	102.5	GPa
top tension T_{top}	817	N
structural damping ratio ξ	0.003	—
current speed u_∞	0.42, 0.84	m/s
Reynolds number Re	8400, 16 800	—
fluid density ρ	1000	kg/m ³
kinematic viscosity ν	1×10^{-6}	m ² /s

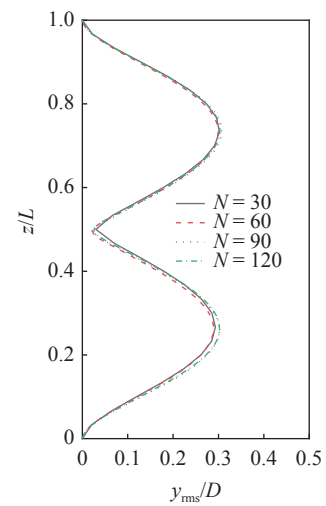


图 3 不同单元数立管的横向位移均方根值
Fig. 3 RMS amplitudes of the transverse displacements for the riser models with various element numbers

单元数均为 60.

两个来流速度下的立管在不同时刻的横向振动位移包络线和对应的均方根值如图 4 所示. 可以看出, 在 0.42 m/s 流速下, 立管横向呈现出 2 阶振动模态. 高流速下激发了更高阶的振动模态, 在 0.84 m/s 流速作用下, 立管横向振动呈现出 4 阶模态. 进一步对比横向振动位移的均方根值, 如图 4(b) 和 4(d) 所示, 图中同时给出了文献 [32, 48-49] 的数值模拟结果. 结果表明: 数值预报的振动模态阶数与试验和其他数值模拟结果均是一致的, 但振动幅值

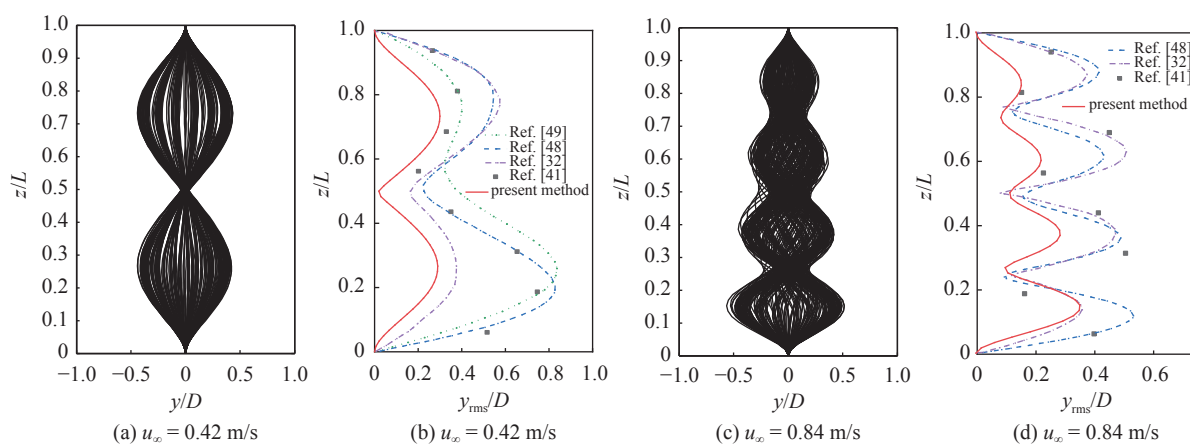


图 4 不同流速下的柔性立管横向振动响应 ((a), (c) 振动位移包络线; (b), (d) 位移均方根值)

Fig. 4 Vibration response envelopes of a flexible riser under different current speeds ((a), (c) vibration amplitude envelopes; (b), (d) RMS displacements)

相比试验结果是偏小的, 目前算法在准确预报柔性立管振动幅值方面仍有待改进. 本文数值模型预报立管振幅偏小的原因可能是多方面的, 首先, DVM-FEM 耦合算法基于切片法的思想, 将立管简化为梁模型进行结构动力响应求解, 忽略了立管本身三维效应的影响以及尾流中三维涡结构的影响, Huang 等^[48]和 Wang 和 Xiao^[49]则是采用完全三维网格的方法求解流场和立管变形; 其次, Wu 等^[50]的研究表明立管流向和横向运动之间存在相互作用, 本文采用的耦合算法则是单独求解每个方向的立管结构动力响应; 此外, 离散涡方法本身及其与有限元方法的耦合方式仍有待进一步的研究与改进.

3 悬臂式立管计算结果与分析

本节主要关注不同流速下的悬臂式立管的涡激振动响应特征, 同样选用上述 9.63 m 长的立管, 其底部承受的向下的拉力设定为 $W_b = 817$ N, 这与原来两端铰支的立管试验中所选择的顶部张力在数值上是相同的, 其他物理参数保持不变. 因此, 不同流速作用下的柔性立管的固有频率是一致的. 基于子空间迭代法可获得立管湿模态下的前 8 阶固有频率及其对应的归一化的振型, 如图 5 所示. 立管的固有频率随模态阶数的增加而增大, 本文以 1 阶固有频率 $f_1 = 0.78$ Hz 为参考值, 取折合速度 U_r 从 4 到 46, 间隔为 2, 计算得到的实际流速区间为 $u_\infty = 0.0626 \sim 0.6884$, 对应的雷诺数区间为 $Re = 1252 \sim 13768$. 折合速度计算公式为

$$U_r = \frac{u_\infty}{f_1 D} \quad (18)$$

雷诺数计算公式为

$$Re = \frac{u_\infty D}{\nu} \quad (19)$$

基于结构物绕流的升力时历曲线, 采用快速傅里叶变换 (FFT), 可得到漩涡频率 f_s , 进一步可计算斯特劳哈尔数

$$St = \frac{f_s D}{u_\infty} \quad (20)$$

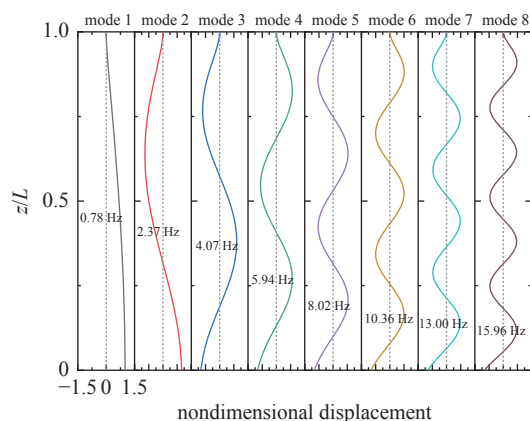


图 5 悬臂式立管前 8 阶固有频率和振型

Fig. 5 First eight-order natural frequencies and modal shapes for a cantilever riser

3.1 振动响应分析

首先, 本文计算了不同折合速度下的柔性悬臂式立管的横向振动, 振幅均方根值随 U_r 和 z/L 的变化情况如图 6 所示. 可以看出, 随着折合速度的增加, 立管振动模态逐渐增加, 在较高折合速度下高阶模态被激发. 在 $U_r = 4 \sim 46$ 范围内, 横向振动逐渐由 1 阶模态向 4 阶模态过渡. 立管振幅则呈现出波浪式的变化特征, 即在一定的折合速度范围内, 立管的

振动模态是相同的, 这与 Fan 等^[35] 对两端铰支柔性立管 VIV 的研究结果类似. 当立管呈现出相同模态时, 随着 U_r 的增加, 立管振幅逐渐增加, 同时在少数折合速度下振幅没有呈现出线性增长的特征. 当振动从低阶模态向高阶模态转变时, 模态阶数的跃迁过程中会伴随着振幅的突然降低. 此外, 可以很明显地观察到无约束的立管底部表现出较大幅度的位移.

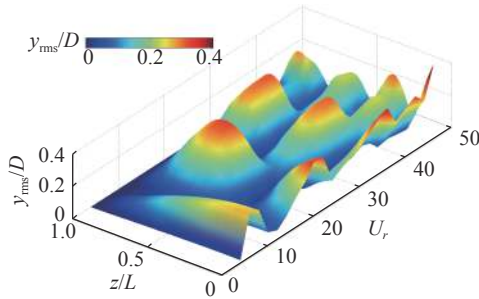


图 6 不同折合速度下的横向振幅均方根值

Fig. 6 RMS vibration amplitudes in the transverse direction under a wide range of reduced velocities

针对不同振动模态下立管的变形特征, 本文分别将 1 阶到 4 阶模态下立管横向振动的位移均方根值进行了比较分析, 如图 7(a) 到图 7(d) 所示. 并且列举了四种振动模态下某一折合速度对应的立管瞬态振动包络线图, 如图 7(e) 到图 7(h) 所示. 同样可以看出, 大部分情况下, 沿立管展向各位置处的横向位移随折合速度增加而逐渐增大, 该变化特征在 3 阶模态情况下最为明显, 如图 7(c) 所示. 此外, 在同一振动模态下, 振幅最小处所对应的立管展向位置基本上是相同的, 与来流速度关系较小.

在深海采矿系统中, 悬臂式立管底部与中间仓相连接, 矿物经输料软管到达中间仓, 再通过垂直提升硬管输送到水面母船. 因此, 立管底部的振动对矿物运输的稳定性有较大的影响. 本文将中间仓简化为有一个作用在立管底部的垂直向下的作用力进行研究, 如图 2 所示. 由上述分析可知, 悬臂式立管底部位置有较大幅度的位移, 不同折合速度下的立管

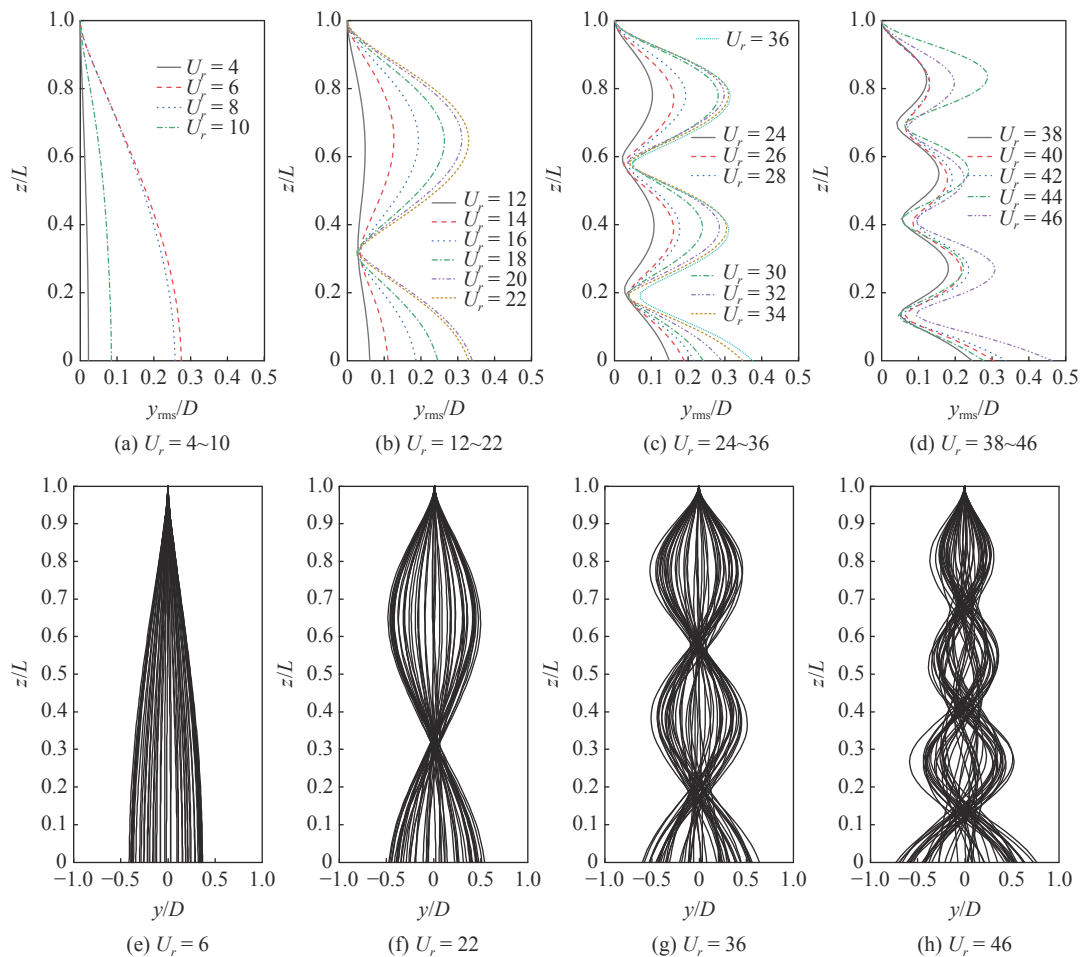


图 7 不同折合速度下的柔性立管横向振动响应 ((a)~(d) 位移均方根值; (e)~(h) 振动位移包络线)

Fig. 7 Vibration response envelopes of a flexible riser under different reduced velocities ((a)~(d) RMS amplitudes; (e)~(h) vibration amplitude envelopes)

底部位移均方根值如图 8 所示. 可以看出, 不同模态下振幅的增长速率是不同的. 在同一振动模态下, 立管底部振幅与折合速度基本上呈现出线性关系.

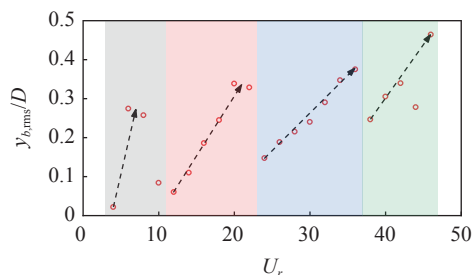


图 8 立管底部横向位移均方根值

Fig. 8 RMS amplitude of the transverse displacement at the bottom for the riser

不同折合速度下立管振动的主导频率 f_v 如图 9 所示. 图中 $St = 0.2$ 这条线表示当圆柱在亚临界雷诺数范围内振动时, 其对应的斯特劳哈尔数位于 0.2 附近^[51]. 整体上, 振动频率随着折合速度的增加而逐渐增大. 当振动模态发生转换时, 振动频率会发生突然的跳跃. 在同一振动模态内, 振动主导频率在低折合速度下沿着 $St = 0.2$ 增加, 且频率值低于所对应振动模态下的固有频率. 随着折合速度进一步增加, 当振动频率超过固有频率后, 主导频率逐渐偏离 $St = 0.2$ 所对应的频率值, 该现象与刚性圆柱涡激振动是类似的^[52].

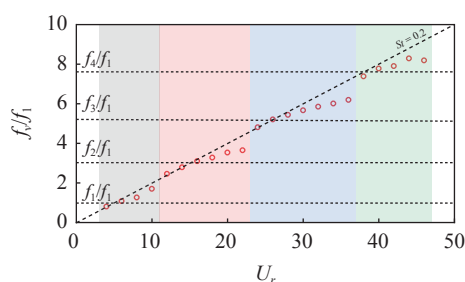


图 9 横向振动的主导频率比

Fig. 9 Dominant frequency ratio of the transverse vibration

3.2 三阶模态下横向振动响应分析

由上文分析可知, 悬臂式立管发生涡激振动时, 其振动模态在一定折合速度范围内是相同的, 因此本节选取典型的 3 阶振动模态进行讨论. 本文中立管以 3 阶模态振动时所对应的折合速度 $U_r = 24 \sim 36$, 间隔为 2, 共 7 个工况, 所对应的横向振幅均方根值如图 7(c) 所示. 基于立管垂向不同位置振动时历曲线, 采用快速傅里叶变换 (FFT) 方法对时历数据进行频谱分析, 可得到振动频率的空间分布特征, 如图 10 所示. 其中颜色条为归一化的振动能量谱密度

(PSD), 白虚线表示 3 阶振型所对应的固有频率, $f_3 = 4.07$ Hz. 可以看出, 7 种折合速度对应的振动频率均由 3 阶模态主导, 且不同折合速度下立管底部均呈现出较高能量的振动. 此外, 随着折合速度增加, 振动频率逐渐远离 3 阶固有频率.

同样采用 FFT 方法, 可得到不同折合速度下的立管展向各位置处的泄涡频率空间分布, 如图 11 所示, 其中白虚线均表示 $St = 0.2$ 所对应的频率值. 与图 10 相比, 不同折合速度下泄涡频率与振动频率基本上是一致的. 在低折合速度下, 立管各位置处的泄涡频率均集中在 $St = 0.2$ 附近, 随着速度增加, 立管展向大部分位置所对应的泄涡频率逐渐低于 $St = 0.2$ 所对应的频率值, 尽管仍有较少位置的泄涡频率集中在 $St = 0.2$ 附近. 不同折合速度下的泄涡频率在立管展长方向上并未呈现出明显的分布特征, 这与振动频率空间分布图中呈现出的 3 阶分布特征是不同的.

3 阶振动模态下不同折合速度所对应的立管横向振幅时空演化特征如图 12 所示, 所有时空演化图选择的时间段均为 6~8 s, 其中红色和蓝色表示相反的振动方向. 可以看出, 随着折合速度的增加, 立管展向不同位置处的振幅增加, 且在该时间段内驻波特征逐渐增强. 由上文分析可知, 同一振动模态下, 振动频率随折合速度的增加而增大, 因此相同时间段内红蓝单元交替的周期逐渐减小.

本文工作基于切片法的思想, 在切片上采用无网格的二维离散涡算法计算流体力, 四种折合速度下 ($U_r = 24, 28, 32, 36$) 的立管若干截面处的瞬态涡量场如图 13 所示. 可以看出, 随着折合速度的增加, 立管底部的流向位移逐渐增大. 立管不同高度截面涡量场中红色和蓝色粒子分别表示涡元具有正向和负向的涡量. 立管不同截面处的尾流场中的涡结构具有不同的模式^[53], 其中大部分截面呈现出 2 S 的尾涡模式. 此外, 近尾流场涡结构比较清晰, 而远尾流场则演化出更为复杂的涡结构特征.

3.3 两端铰支与悬臂式立管的涡激振动特征比较

为了比较传统的两端铰支立管 (对应海洋工程中的采油管道) 与悬臂式立管 (对应深海采矿的提升管道) 涡激振动特征的异同, 本文计算了一系列均匀流速作用下的两端铰支的 9.63 m 长立管的涡激振动响应. 立管顶部张力与试验保持一致, 取为 $T_{top} = 817$ N. 立管湿模态下的前 8 阶固有频率及其对应的归一化的振型, 如图 14 所示. 可以看出, 两端铰支立

管的各阶固有频率均大于对应的底部拉力为 817 N 的悬臂式立管的固有频率. 两端铰支立管的 1 阶固有频率 $f_1 = 1.61$ Hz, 本次计算取折合速度

$U_r = 4 \sim 44$, 间隔为 2. 计算得到的不同来流速度作用下立管最大的横向位移均方根值如图 15 所示, 图中不同颜色块表示不同的振动模态. 可以发现, 横向振

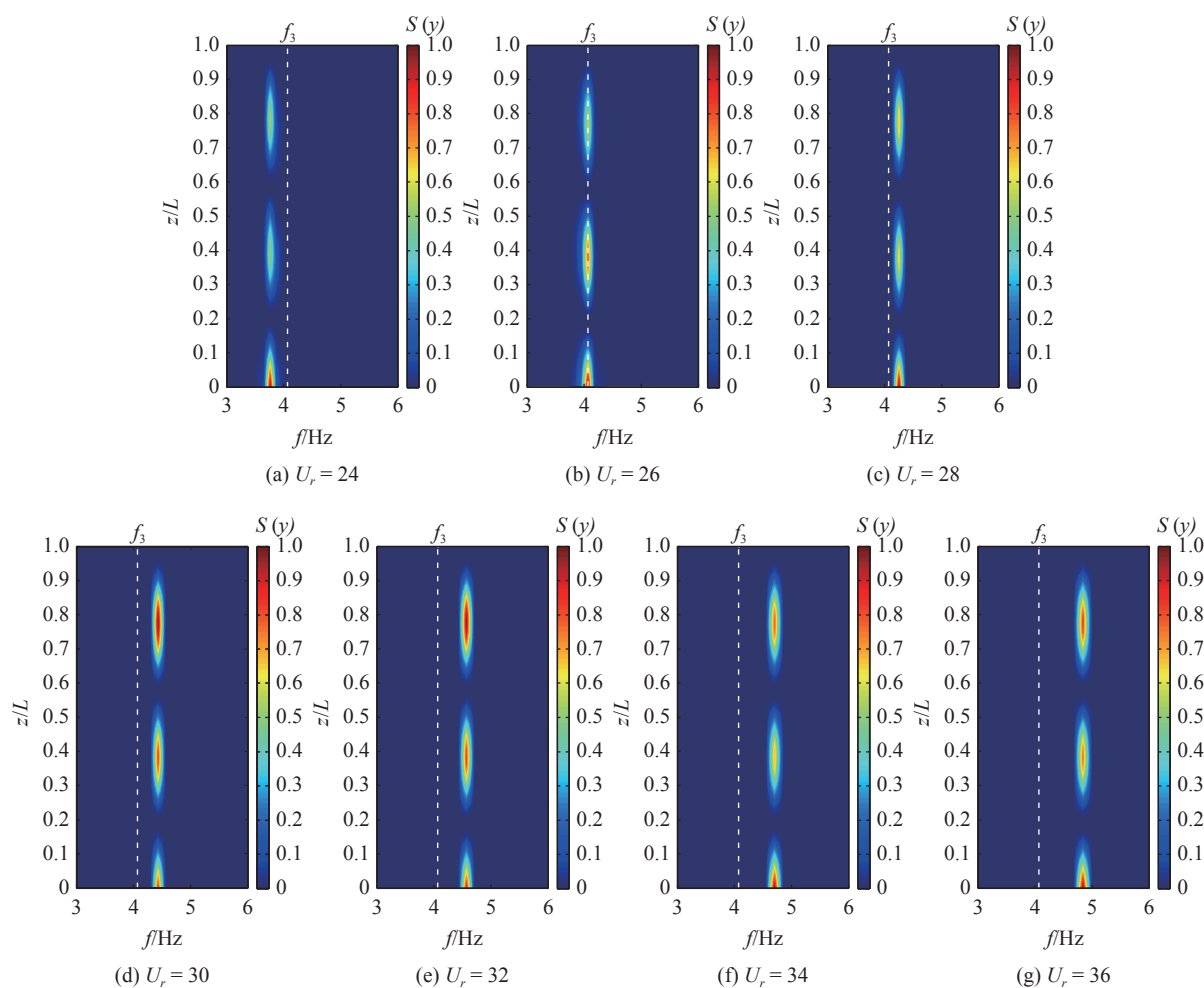


图 10 立管横向振动频率空间分布 ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)

Fig. 10 Spatial distribution of transverse vibration frequency for the riser ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)

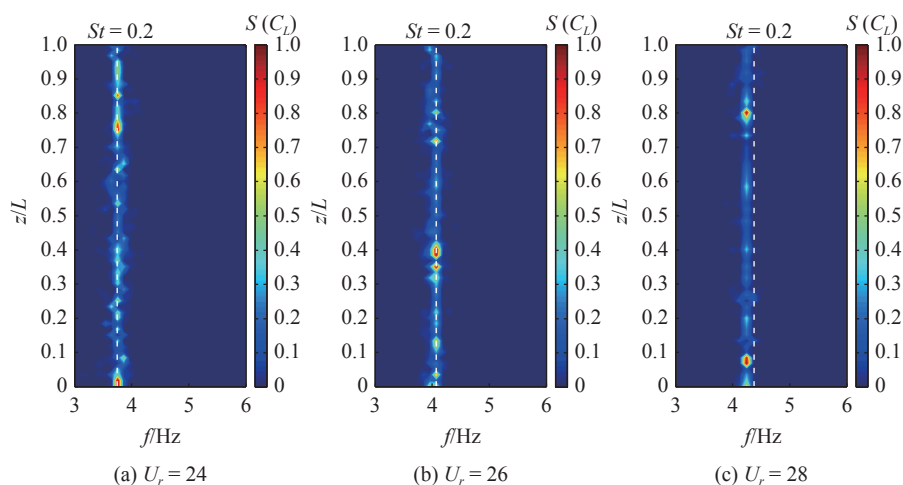
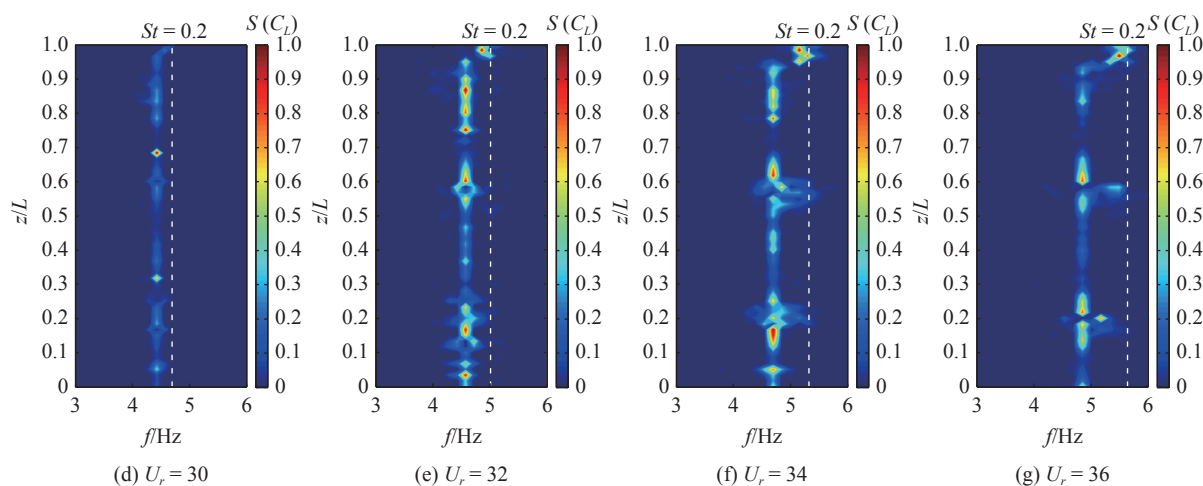
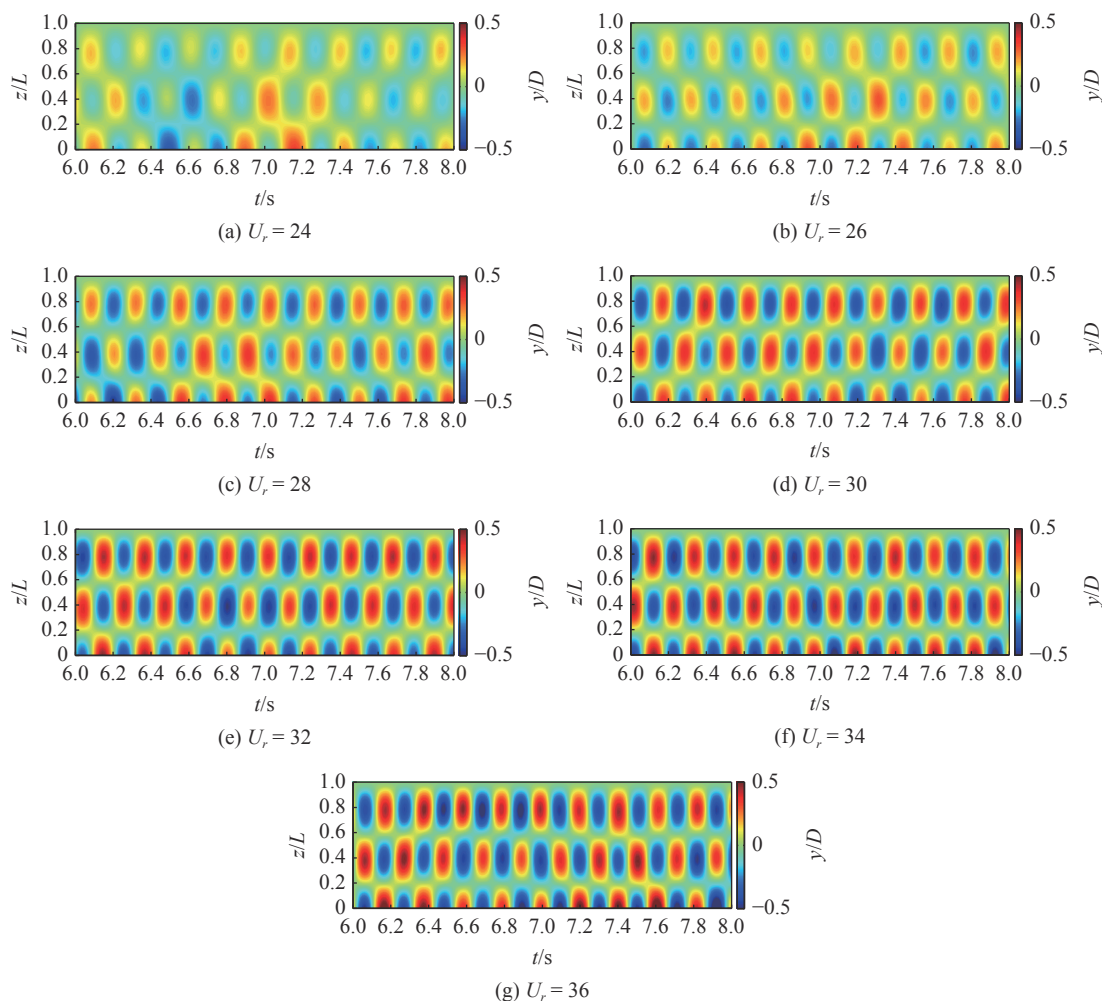


图 11 立管泄涡频率空间分布 ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)

Fig. 11 Spatial distribution of vortex shedding frequency for the riser ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)

图 11 立管泄涡频率空间分布 ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$) (续)Fig. 11 Spatial distribution of vortex shedding frequency for the riser ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$) (continued)图 12 立管不同位置的振幅时空演化 ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)Fig. 12 Temporal-spatial evolution of transverse vibration amplitude along the riser span ((a)~(g) $U_r = 24 \sim 36$)

幅的变化规律与悬臂式立管是一致的, 即在同一振动模式下, 立管振幅与折合速度基本上呈现出线性关系. 此外, 当模态转变发生时, 振幅会突然降低, 并

随着折合速度增加, 振幅再一次逐渐增大, 这与悬臂式立管的 VIV 特征也是相同的.

横向振动的主导频率与 1 阶固有频率的比值如

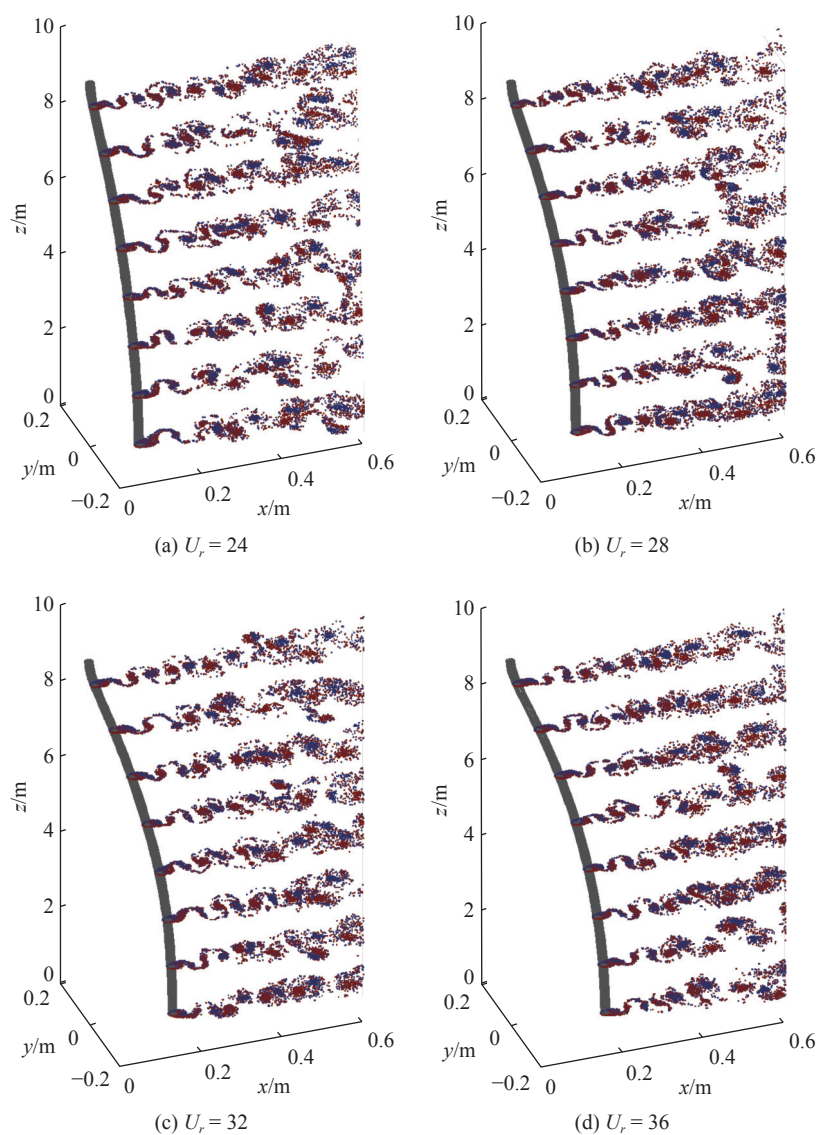
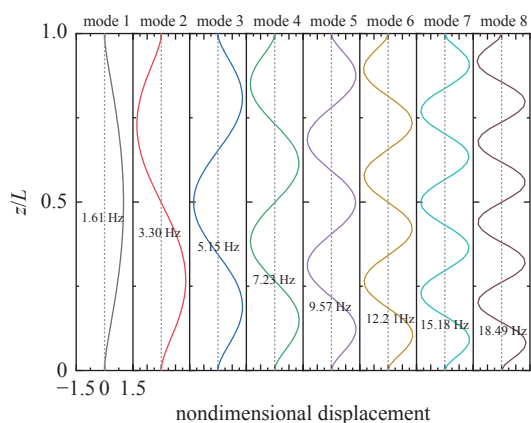
图 13 瞬态涡量场 ((a)~(d) $U_r = 24 \sim 30$)Fig. 13 Instantaneous vorticity field ((a)~(d) $U_r = 24 \sim 36$)

图 14 两端铰支立管前 8 阶固有频率和振型

Fig. 14 First eight-order natural frequencies and modal shapes for a riser hinged at both ends

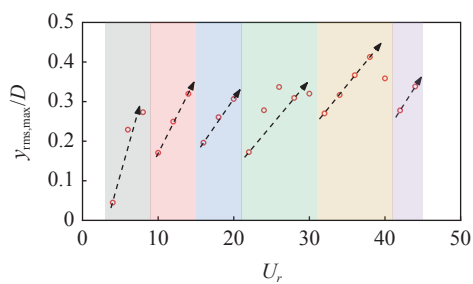


图 15 沿立管展向最大的横向位移均方根值

Fig. 15 Maximum RMS amplitude of the transverse displacement along the riser span

图 16 所示. 同样地, 振动频率的变化趋势与悬臂式立管也是一致的, 即振动频率随着折合速度的增加而逐渐增大, 并且当振动模态改变时, 振动频率会出

现较大幅度的增加. 不同的是, 在相同的折合速度区间内, 两端铰支立管存在 6 阶振动模态, 而悬臂式立管只存在 4 阶模态. 这是由于两端铰支立管的 1 阶固有频率较大, 相同折合速度下其对应的真实来流速度更大, 这导致两端铰支立管被激发出高阶模态响应. 本文选取两端铰支立管的 3 阶振动模态进行分析, 该模态下 3 个不同折合速度作用下的立管不同位置的振幅时空演化如图 17 所示, 选择的时间段均为 5~7 s. 可以发现, 两端铰支的立管展向不同位置处的振幅均随折合速度增加而增大. 在低阶模态响应下, 随折合速度增加, 该时间段内驻波特征逐渐增强. 这两个特征与悬臂式立管是一致的.

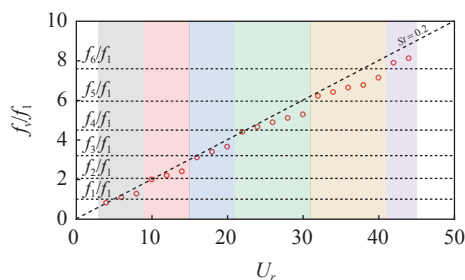


图 16 立管横向振动的主导频率比

Fig. 16 Dominant frequency ratio of the transverse vibration for the riser

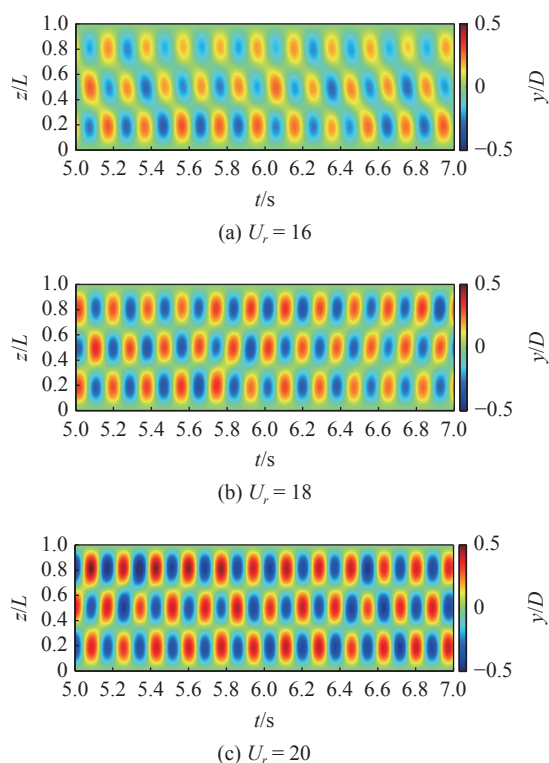


图 17 立管不同位置的振幅时空演化 ((a)~(c) $U_r = 16 \sim 20$)

Fig. 17 Temporal-spatial evolution of transverse vibration amplitude along the riser span ((a)~(c) $U_r = 16 \sim 20$)

4 结论

矿产混输垂直提升管道是深海采矿集成系统中十分重要的装备, 其悬臂式的结构面临复杂海洋环境时的振动特征不同于传统海洋立管, 目前文献仍缺乏对该类型立管的讨论. 本文的主要目的便是分析具有一定底部重量的悬臂式立管在不同来流速度下的涡激振动响应. 为此, 本文首先建立了基于切片法思想的 DVM-FEM 耦合模型, 通过数值计算两端铰支立管的振动响应并与模型试验结果对比, 验证了该耦合模型的有效性. 最后, 系统性地分析了不同速度的均匀来流作用下悬臂式立管的横向振动响应特征, 主要结论如下.

(1) 本文采用的 DVM-FEM 耦合算法可以准确预报柔性立管在不同速度下的振动模态, 但振幅相比试验结果要小, 该问题同样出现在前人的研究工作中^[39]. 由于本文目的是研究深海采矿系统中存在的悬臂式立管的涡激振动特征, 因此目前工作主要分析不同来流速度对这类特殊立管的影响规律, 如何实现对立管实际振幅的准确预报仍有待进一步的研究.

(2) 对于悬臂式立管, 随着折合速度的增加, 立管的振动模态阶数逐渐增加. 同时, 振动模态在一定的折合速度范围内是相同的. 在同一模态下, 立管不同位置的振幅随着速度增加而增大, 尤其是无约束的立管底部会发生较大的位移. 此外, 当模态发生转换时, 振幅会发生突降, 并随着速度的增加振幅再一次逐渐增大. 振幅随 U_r 和 z/L 的改变整体上呈现出波浪式的变化特征.

(3) 深海采矿垂直提升立管底部与中间仓及输送软管相连接, 因此底部位移对采矿系统整体稳定性有重要影响. 本文结果表明, 在同一振动模态下, 悬臂式立管底部位移呈现出随折合速度线性变化的特征. 当振动模态发生转变时, 振动主导频率存在突然跳跃的特征.

(4) 本文重点分析了 3 阶振动模态下的悬臂式立管的振动响应. 可以看出, 振动主导频率在低折合速度下低于 3 阶固有频率, 随着速度增加, 振动频率逐渐增大并远离 3 阶固有频率. 此外, 无约束的立管底部的振动能量较大. 对于本次研究中 3 阶模态振动下的悬臂式立管, 其驻波特征随着折合速度增加而逐渐加强, 需要注意的是, 本文关注的立管模型的

长径比较小且为低阶模态响应, 对于实尺度深海采矿立管以及高阶振动模态响应下的立管, 其振动特征仍需进一步研究。

(5) 本文对比了悬臂式立管与两端铰支立管的异同。可以发现, 悬臂式立管的各阶固有频率均小于对应的两端铰支立管的固有频率。在相同折合速度区间内, 两端铰支立管被激发出更高阶的振动模态响应。此外, 两种类型立管的 VIV 振幅和频率随折合速度的变化规律是相同的。

(6) 垂直管道水力提升系统是深海采矿的主流方式, 但目前仍缺乏对这类特殊的底部弱约束立管的数值与试验研究工作。未来研究工作可以考虑以下几方面: 母船运动对悬臂式立管涡激振动和水动力性能的影响; 中间仓重量改变的影响; 考虑中间仓惯性力作用下的深海采矿立管模型的结构动力响应; 海洋剪切流动等变化的影响; 考虑内部流动的立管振动特征; 采矿立管涡激振动抑制措施等。

参 考 文 献

- 1 阳宁, 陈光国. 深海矿产资源开采技术的现状综述. 矿山机械, 2010, 38(10): 4-9 (Yang Ning, Cheng Guangguo. Status quo and development tendency of deep sea minerals mining technology. *Mining & Processing Equipment*, 2010, 38(10): 4-9 (in Chinese))
- 2 Sharma R. Deep-Sea Mining: Current Status and Future Considerations. Cham: Springer International Publishing, 2017: 3-21
- 3 刘少军, 刘畅, 戴瑜. 深海采矿装备研发的现状与进展. 机械工程学报, 2014, 50(2): 8-18 (Liu Shaojun, Liu Chang, Dai Yu. Status and progress on researches and developments of deep ocean mining equipments. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(2): 8-18 (in Chinese))
- 4 阳宁, 夏建新. 国际海底资源开发技术及其发展趋势. 矿冶工程, 2000, 20(1): 1-4 (Yang Ning, Xia Jianxin. Development techniques for international sea-floor resources and their future trend. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2000, 20(1): 1-4 (in Chinese))
- 5 Leng DX, Shao S, Xie YC, et al. A brief review of recent progress on deep sea mining vehicle. *Ocean Engineering*, 2021, 228: 108565
- 6 Chen W, Xu HL, Peng N, et al. Linkage characteristics of deep-sea mining lifting system. *Ocean Engineering*, 2021, 233: 109074
- 7 Xu HL. Research on the pump-vessel combined ore lifting equipment for deep-sea rigid pipe mining system. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, 130(1): 011010
- 8 Yang HL, Liu SJ. Heave compensation system of lifting pipeline for deep-sea mining based on combined action of vibration absorber and accumulator. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2019, 37(3): 393-401
- 9 Wu Q, Yang JM, Lu HN, et al. Effects of heave motion on the dynamic performance of vertical transport system for deep sea mining. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102188
- 10 Patel MH, Jesudasan AS. Theory and model tests for the dynamic response of free hanging risers. *Journal of Sound and Vibration*, 1987, 112(1): 149-166
- 11 Mao LJ, Zeng S, Liu QY. Dynamic mechanical behavior analysis of deep water drilling riser under hard hang-off evacuation conditions. *Ocean Engineering*, 2019, 183: 318-331
- 12 Mao LJ, Zeng S, Liu QY, et al. Dynamical mechanics behavior and safety analysis of deep water riser considering the normal drilling condition and hang-off condition. *Ocean Engineering*, 2020, 199: 106996
- 13 Wang YB, Gao DL, Fang J. Study on lateral vibration analysis of marine riser in installation-via variational approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 22: 523-529
- 14 Wang YB, Gao DL, Fang J. Mechanical behavior analysis for the determination of riser installation window in offshore drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 24: 317-323
- 15 Fan HH, Li CW, Wang ZM, et al. 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
- 16 Chaplin JR, Bearman PW, Huera Huarte FJ, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(1): 3-24
- 17 Trim AD, Braaten H, Lie H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(3): 335-361
- 18 Song LJ, Fu SX, Cao J, et al. An investigation into the hydrodynamics of a flexible riser undergoing vortex-induced vibration. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 63: 325-350
- 19 宋磊建, 付世晓, 于大鹏等. 剪切流下发生涡激振动的柔性立管阻力特性研究. 力学学报, 2016, 48(2): 300-306 (Song Leijian, Fu Shixiao, Yu Dapeng, et al. Investigation of drag forces for flexible risers undergoing vortex-induced vibration in sheared flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(2): 300-306 (in Chinese))
- 20 高云, 刘黎明, 付世晓等. 柔性立管涡激振动响应轨迹特性研究. 船舶力学, 2017, 21(5): 563-575 (Gao Yun, Liu Liming, Fu Shixiao et al. Study of the trajectory performance on the vortex-induced vibration response of a flexible riser. *Journal of Ship Mechanics*, 2017, 21(5): 563-575 (in Chinese))
- 21 王俊高, 付世晓, 许玉旺等. 正弦振荡来流下柔性立管涡激振动发展过程. 力学学报, 2014, 46(2): 173-182 (Wang Jungao, Fu Shixiao, Xu Yuwang, et al. VIV developing process of a flexible cylinder under oscillatory flow. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2014, 46(2): 173-182 (in Chinese))
- 22 徐万海, 马烨璇, 罗浩等. 柔性圆柱涡激振动流体力系数识别及其特性. 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))
- 23 Fujarra ALC, Pesce CP, Flemming F, et al. Vortex-induced vibration of a flexible cantilever. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(3): 651-658

- 24 Wang JG, Xiang S, Fu SX, et al. Experimental investigation on the dynamic responses of a free-hanging water intake riser under vessel motion. *Marine Structures*, 2016, 50: 1-19
- 25 Mao LJ, Zeng S, Liu QY. Experimental investigation on vortex-induced vibrations of a hang-off evacuated drilling riser. *Nonlinear Dynamics*, 2020, 102(3): 1499-1516
- 26 Pan ZY, Cui WC, Zhang XC. Overview on VIV of slender marine structures. *Journal of Ship Mechanics*, 2005, 9(6): 135-154
- 27 Bishop RED, Hassan AY. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 1964, 277(1368): 51-75
- 28 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))
- 29 宋芳, 凌国灿, 林黎明. 圆柱涡激振动的结构-尾流振子耦合模型研究. *力学学报*, 2010, 42(3): 357-365 (Song Fang, Ling Liming, Ling Guocan. The study of vortex-induced vibrations by computation using coupling model of structures and wake oscillator. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2010, 42(3): 357-365 (in Chinese))
- 30 段金龙, 周济福, 王旭等. 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. 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 (in Chinese))
- 31 Yamamoto CT, Meneghini JR, Saltara F, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19(4): 467-489
- 32 Lin K, Wang JS. Numerical simulation of vortex-induced vibration of long flexible risers using a SDVM-FEM coupled method. *Ocean Engineering*, 2019, 172: 468-486
- 33 Duanmu Y, Zou L, Wan DC. Numerical simulations of vortex-induced vibrations of a flexible riser with different aspect ratios in uniform and shear currents. *Journal of Hydrodynamics*, 2017, 29(6): 1010-1022
- 34 Huang ZY, Deng ZZ, Liu DH, et al. Numerical simulation for VIV of a long flexible cylinder in the time domain. *Ships and Offshore Structures*, 2018, 13(sup1): 214-227
- 35 Fan DX, Wang ZC, Triantafyllou MS, et al. Mapping the properties of the vortex-induced vibrations of flexible cylinders in uniform oncoming flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 881: 815-858
- 36 Bourguet R, Karniadakis GE, Triantafyllou MS. Phasing mechanisms between the in-line and cross-flow vortex-induced vibrations of a long tensioned beam in shear flow. *Computers & Structures*, 2013, 122: 155-163
- 37 Evangelinos C, Lucor D, Karniadakis GE. DNS-derived force distribution on flexible cylinders subject to vortex-induced vibration. *Journal of Fluids and Structures*, 2000, 14(3): 429-440
- 38 Chorin AJ. Numerical study of slightly viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 1973, 57(4): 785-796
- 39 Chaplin JR, Bearman PW, Cheng Y, et al. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(1): 25-40
- 40 Lin K, Wang JS, Fan DX, et al. Flow-induced cross-flow vibrations of long flexible cylinder with an upstream wake interference. *Physics of Fluids*, 2021, 33(6): 065104
- 41 Lehn E. VIV Suppression Tests on High L/D Flexible Cylinders. Trondheim, Norway: Norwegian Marine Technology Research Institute, 2003
- 42 Spalart PR, Leonard A, Baganoff D. Numerical simulation of separated flows. NASA Technical Memorandum 84328, Washington, DC: NASA, 1983
- 43 陈伟. 涡激振动的离散涡数值模拟. [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2009 (Chen Wei. Numerical simulation of vortex-induced vibration using discrete vortex method. [Master Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009 (in Chinese))
- 44 Jin GQ, Zou L, Jiang YC, et al. A circle theorem technique to handle 2-D flows around arbitrary cylinders in discrete vortex method. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2021, 209: 104496
- 45 Pang JH, Zong Z, Zou L, et al. A novel vortex scheme with instantaneous vorticity conserved boundary conditions. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2016, 59: 219-228
- 46 张亚辉, 林家浩. 结构动力学基础. 大连: 大连理工大学出版社, 2007 (Zhang Yahui, Lin Jiahao. Fundamentals of Structural Dynamics. Dalian: Dalian University of Technology Press, 2007 (in Chinese))
- 47 雷松, 郑向远, 张文首等. 海洋立管悬挂状态的固有频率和振型. *船舶力学*, 2015, 19(10): 1267-1274 (Lei Song, Zheng Xiangyuan, Zhang Wenshou et al. Natural frequencies and mode shapes of free-hanging risers. *Journal of Ship Mechanics*, 2015, 19(10): 1267-1274 (in Chinese))
- 48 Huang K, Chen HC, Chen CR. Numerical scheme for riser motion calculation during 3-D VIV simulation. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27(7): 947-961
- 49 Wang EH, Xiao Q. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a vertical riser in uniform and linearly sheared currents. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 492-515
- 50 Wu J, Lie H, Larsen CM, et al. Vortex-induced vibration of a flexible cylinder: Interaction of the in-line and cross-flow responses. *Journal of Fluids and Structures*, 2016, 63: 238-258
- 51 Blevins RD. Flow-induced Vibration. Malabar, Florida: Krieger, 2001
- 52 Assi GRS, Bearman PW, Tognarelli MA. On the stability of a free-to-rotate short-tail fairing and a splitter plate as suppressors of vortex-induced vibration. *Ocean Engineering*, 2014, 92: 234-244
- 53 Williamson CHK, Roshko A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 1988, 2(4): 355-381