

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.014

大长细比柔性立管涡激振动数值模拟

付博文^{1,2}, 端木玉^{1,2}, 万德成^{1,2*}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240)

(2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘要: 近年来,随着油气开发逐步向深海发展,立管的长细比可以达到 1 000 甚至更高. 大长细比的立管的振动形态与短的刚性圆柱的振动具有较大的差异,这使得对大长细比立管涡激振动预测的需求较为迫切. 文中基于切片理论,通过使用径向基函数法作为 OpenFOAM 中的动网格策略,模拟了长细比为 1 000 的柔性立管在横流向和顺流向的振动,其顺流向最大时均偏移量达 8 个立管直径. 数值模拟重现了高阶主控模态及主控模态的频繁变换等大长细比柔性立管的涡激振动特性;文中还将所得结果与长细比为 500, 750 的结果进行了比较,就长细比对立管涡激振动的影响进行了分析.

关键词: 立管; 涡激振动; 计算流体力学; 多模态振动; 切片理论; viv-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O35

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2013)02-0640-06

Simulation of vortex-induced vibrations of a long flexible riser

FU Bowen^{1,2}, DUANMU Yu^{1,2}, WAN Decheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

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

Abstract: As oil exploration moves increasingly to deeper waters, aspect ratios of risers can be of order 1 000 or even higher. Long flexible risers tend to vibrate at high mode numbers and the complex added mass distributions add extra complexity. As a result, the need to develop a reliable numerical method for prediction of VIV response of long flexible risers arises. Based on strip theory, the solver viv-FOAM-SJTU is developed on the open source code package, OpenFOAM. Radial Basis Function Method is applied to handle the dynamic mesh, which makes it possible to simulate the vibrations of a flexible riser of aspect ratio 1 000, with maximum time-averaged in-line displacement reaching 8 times riser diameters. The vibration features of extreme long risers such as mode transition have been reproduced. The result has been compared with cases with aspect ratios of 500 and 750, also the effects of aspect ratio upon the vibration responses of risers have been studied.

Key words: riser, vortex-induced vibration, CFD; multi-modal vibration, strip theory, viv-FOAM-SJTU solver

涡激振动是海洋工程中值得关注的一个问题, 管线、spar 平台及立管等均有涉及. 作为平台结构

中最薄弱的环节, 立管不仅要承受自重和顶张力, 在海流的作用下还会发生涡激振动现象. 随着近些

收稿日期: 2017-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145); 长江学者奖励计划(T2014099); 上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022); 上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300); 上海市船舶工程重点实验室基金(K2015-11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)

作者简介: 付博文(1993-), 男, 硕士研究生

* **通信作者:** 万德成(1967-), 男, 教授, 研究方向为船舶与海洋工程水动力学与计算流体力学的基础理论及应用.

E-mail: dewan@sjtu.edu.cn.

引文格式: 付博文, 端木玉, 万德成. 大长细比柔性立管涡激振动数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 640-645.

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.014.

年油气开发逐步向深海发展,立管的长细比已达到1 000^[1].细长柔性立管的一个特点是其涡激振动呈现出高模态,且沿着其展向附加质量分布较为复杂.

近些年,对细长柔性立管的涡激振动已有了较为广泛的研究^[2-6].通过这些研究发现,当约化速度达到一定程度后,可以观察到涡激振动的多模态性和模态转换现象.而数值方法方面也引起不少研究人员的关注.经验模型和计算流体力学方法是预报立管涡激振动的两种主要数值方法.与经验模型相比,近年来计算流体力学方法发展得非常迅速,它直接将连续的N-S方程进行离散,借助计算机计算达到分析流体流动的目的,并在时域内预报涡激振动响应.大长细比柔性立管需要应对的一个问题是立管最大偏移量较大,对流体场的动网格要求较高.有研究者基于切片理论求解流场时在每一切片上使用重叠网格技术来实现^[7-8].也有研究者通过在N-S方程中添加源项进行惯性系变换,并在流场中使用等效流速来实现静网格中流体场的求解,避免了网格的大变形问题^[2].

本课题组在OpenFOAM这一开源代码包基础上,基于切片理论自主开发了求解器viv-FOAM-SJTU,有关其有效性验证详见文献[9-11].文中该求解器计算了长细比 $L/D=1\ 000$ 的柔性立管在均匀流中的涡激振动响应.

1 涡激振动数值模拟的方法

深海立管涡激振动数值模拟涉及到的问题是相对于剖面其轴向尺度非常大,因此,要实现整个流场的三维时域求解较为困难.一个比较折中的方法是沿立管轴向选取若干切片,在各个切片上局部应用计算流体力学方法求解水动力,假设在截面附近一定范围内,立管所受的流体力渐变,可由计算切片处的流体力插值得到.每一层切片上水动力的计算是通过对非定常不可压雷诺平均纳维斯托克斯(RANS)方程进行求解,求解中采用SST $k-\omega$ 湍流模型.使用的算法是OpenFOAM中的PIMPLE算法,该算法在每个时间步内采用SIMPLE算法,时间步的步进采用PISO算法,适合求解瞬态不可压流体问题.

结构动力学计算部分使用小位移Bernoulli-Euler弯曲梁模型.立管两端边界条件为简支,立管轴向张力 T_z 受重力影响而沿着展向变化, $T_z = T_0 - wz$, w 为立管单位长度重力减去浮力.不考虑

张力随时间变化,有限元中求解将方程离散作

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_x,$$

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_y,$$

式中 x 和 y 是节点的横流向和顺流向位移向量, $\dot{}$ 和 $\ddot{}$ 分别表示对时间的一阶导数和二阶导数,而 M , C , K 分别是质量、阻尼和刚度矩阵, F_x 及 F_y 分别是横流向和顺流向流体力向量.该控制方程使用Newmark-beta法^[12]进行求解.

每一时间步开始时将流体场求解得到的流体力映射到结构模型的节点上,并依此计算立管的运动,从而在流体场中进行网格变形操作并求得新的流体场.由此就完成了时间步的向前推进,见图1(图中流体和固体通过流体力和结构位移进行耦合).

如前所述,由于大长细比柔性立管(如文中长细比 $L/D=1\ 000$)偏离平衡位置较远,则由此引起的网格变形用OpenFOAM中求解拉普拉斯方程的方法已经难以很好地处理,因此,文中引入了径向基函数法^[13]来处理动网格问题.径向基函数法相对于惯性系变化法更为直接,计算量较重叠网格法小,是一种较为实用的动网格策略.文中采用的径向基函数是IMQB(inverse multi-quadric biharmonics),其公式为 $\sqrt{1/(a^2+r^2)}$.在使用径向基函数动网格策略进行网格变形时,先在每一个切片中判断立管所处位置,然后根据立管截面圆心在每个切片中确定3个区域.

(1) 以立管截面圆心为圆心指定的内半径(文中取为1个立管直径)为半径得到一个内圆,内圆以内区域中的网格随立管沿横流向和顺流向整体移动,无网格变形(这一步保证了立管周围的网格质量);

(2) 以立管截面圆心为圆心指定的外半径(文中取为28个立管直径)为半径得到一个外圆,外圆以外区域中的网格不移动,无任何变形(减少了网格变形的计算量);

(3) 外圆以内、内圆以外的部分,根据选定的径向基函数就立管的位移量进行插值得到各网格的位移,从而实现网格的变形.

模态振型及自然频率的计算由有限元求解特征方程得到.进行模态分解时有些模态的权重是非物理性的,这部分模态应该在模态分解前排除,而不是在模态分解后再弃用^[6].基于此,文中在模态分解时采用最小二乘法直接根据预先指定所需的模态进行分解.

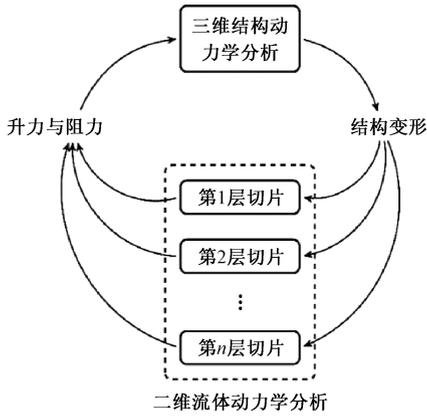


图1 流固耦合框图

Fig. 1 Fluid - structure interaction

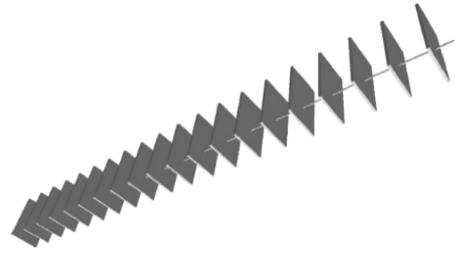


图2 沿着立管展向均匀分布20个切片

Fig. 2 Twenty strips located equidistantly along the riser

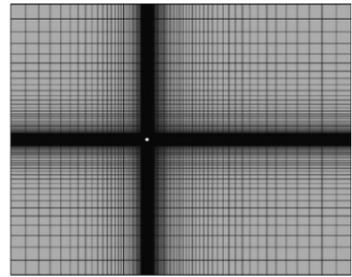
2 数值模拟的主要参数

文中数值模拟的对象是文献[5]中的立管模型,其主要参数见表1.文献[9]针对该立管模型,就viv-FOAM-SJTU数值模拟结果和试验结果进行了对比验证.文中立管模型处于均匀流中,计算时沿着立管展向等距取了20个二维切片,其分布情况如图2.图3(a)给出了每一切片的流体计算域及初始时刻网格,其中入口(左)距离立管截面圆心30个直径,出口(右)距离立管截面圆心45个直径,横流向两侧皆距离立管截面圆心30个直径;计算过程中,立管向出口方向最大偏移8个直径,如图3(b).立管表面施加的是无滑移边界条件.入口边界条件为速度入口,指定垂直于边界方向的速度为来流的速度,平行于边界方向的速度为0,压强梯度为0.出口边界条件为压力出口,压强相对值设为0,两个方向速度梯度为0.两个侧面边界条件为对称边界,压强梯度为0,垂直于边界的速度为0,平行于边界方向的速度梯度为0.立管结构模型离散为80个单元,对每一单元施加均布载荷.

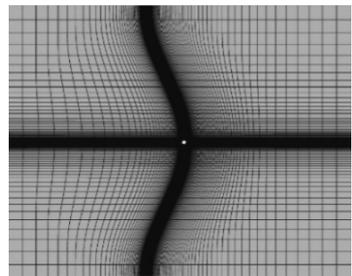
表1 立管模型的主要参数

Table 1 Main parameters of the riser

参数	符号	数值	单位
质量比	m^*	3	-
来流均速	\bar{V}	0.4	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
直径	D	0.028	m
管长	L	28	m
弯曲刚度	EI	29.88	$\text{N} \cdot \text{m}^2$
顶端预张力	T_t	1 610	N
雷诺数	Re	11 200	-



(a) 所有切片初始时刻网格



(b) 某一切片发生变形后的网格

图3 切片上的网格划分

Fig. 3 Meshes on strips

3 结果与分析

3.1 长细比 $L/D = 1\ 000$ 的立管响应分析

通过有限元求得针对位移的前五阶振型见图4.振型与三角函数图像并不完全吻合,这是重力与浮力使得立管中所受张力沿着展向变化引起的.表2给出了由有限元求解得到的3到13阶模态对应的自然频率 f_n^m ,附加质量系数取为1.

图5绘制了立管多个瞬时位移的叠加图(顺流向位移减去了平均位移).其中顺流向模态数约为横流向的两倍,且顺流向振动幅值远小于横流向振动幅值.图6给出的时空云图描述了涡激振动相应的时空变化,图中实线和虚线对应于平衡位置的两侧.从顺流向和横流向的时空云图中都可以比较明显地看到主控模态转变的过程,顺流向是11阶和12阶,横流向是5阶和6阶,另外在顺流向图中还可以比较明显地观察到行波及其反射现象.

表 2 计算所得自然频率

Table 2 Calculated natural frequencies

模态数 m	自然频率 f_n^m/Hz
3	1.39
4	1.85
5	2.32
6	2.78
7	3.25
8	3.72
9	4.20
10	4.68
11	5.16
12	5.65
13	6.14

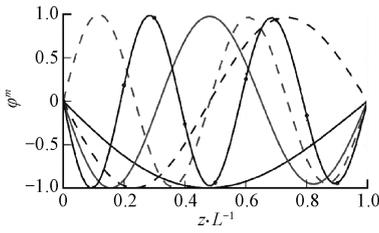
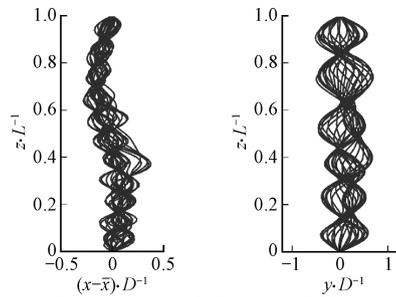


图 4 前五阶模态振型
Fig. 4 First 5 mode shapes



(a) 顺流向位移(已减去均值) (b) 横流向位移

图 5 瞬态位移叠加图

Fig. 5 Displacements at selected instances

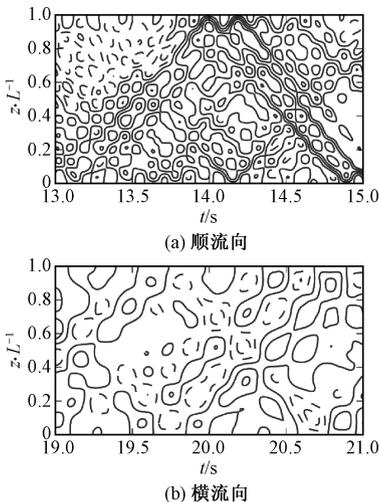


图 6 位移时空云图

Fig. 6 Spatio-temporal contour plots of displacements

就两个方向的位移进行模态分解可得到位移各阶模态的权重,见图 7,8 左列,两图右列为其各阶模态权重对应的功率谱密度.图 7 中模态 8 到模态 13 的主控振动频率依次为 4.46,4.94,5.19,5.55,5.98 和 6.41 Hz.图 8 中模态 3 到模态 8 的主控振动频率依次为 1.34,2.14,2.56,2.87,3.30 和 3.85 Hz.顺流向和横流向的模态权重都出现了明显的拍频现象,或称作幅值调制,期间存在多次的主控模态转变过程,实际上大部分时刻至少有 3 个模态参与振动.横流向的 5 阶和 6 阶权重基本相当,可以理解为其各自作为主控模态的时间相当,即所谓的“分时特性”^[14-15].横流向的主控频率覆盖范围似乎比顺流向更宽,因其处于更明显的过渡态,相邻模态的权重频率重叠区域较大,而顺流向处于“锁定状态”.可以想象,附加质量在这个过程中的频繁升降会改变其真实的固有频率,从而引起主控振动频率的明显变化.高阶主控模态及主控模态的频繁变换正是大长细比柔性立管涡激振动的特性.

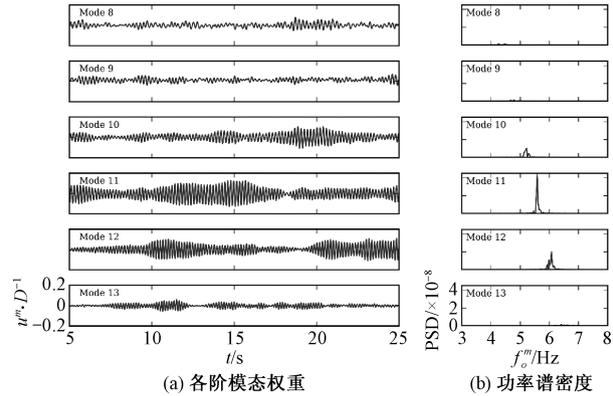


图 7 顺流向各阶模态权重及其功率谱密度

Fig. 7 In-line modal weights, and power spectral densities

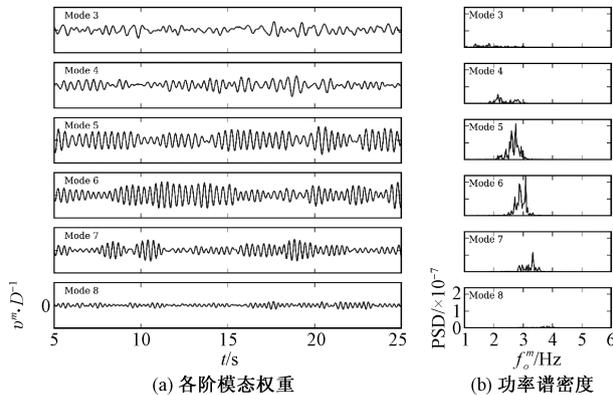


图 8 横流向各阶模态权重及其功率谱密度

Fig. 8 Cross-flow modal weights, and power spectral densities

图 9 给出了若干时刻立管展向 0、0.2、0.4、0.6、0.8 处尾流中的涡量等值线图,图中的实线和虚线分别表示两个方向的涡量,每个切片中立管后

部泻涡形成交替错开的冯卡门型涡道. 本算例中 Re 数为 11 200, 处于亚临界 Re 数范围, 旋涡以一个相对明确的频率周期性地脱落^[16]. 图中呈现的是明显的 2S 模式, 即每个振动周期泻出两个符号相反的尾涡. 立管的横流向振动增加了尾涡的横流向距离, 这使得尾流较远处交替的尾涡变得不稳定^[17]. 部分切片出现明显的同方向的涡粘合的情况, 极少部分切片出现了反方向涡粘合的情况. 立管顺流向的运动使得尾涡顺流向间距时大时小.

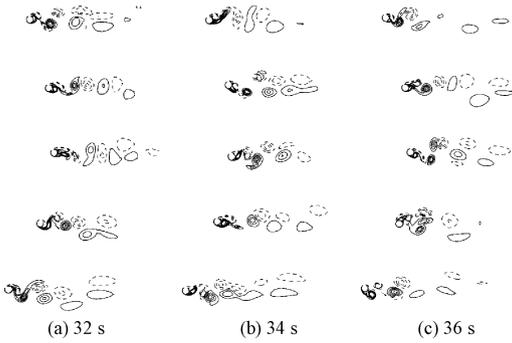


图 9 立管展向 $z/L=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ 处的涡量等值线图
Fig. 9 Vorticity contours on strips of $z/L=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$

3.2 长细比对涡激振动的影响

图 10(a) 为长细比 $L/D = 500, 750, 1\ 000$ 时, 顺流向时均位移沿着展向 z/L 的变化, 这是来流的阻力引起的立管沿着流向的弯曲. 从图中可以看出, 弯曲近似于上下对称的状态, 偏移最大的位置偏于下侧, 这是张力沿着展向变化的影响. 图 10(c) 绘制的是顺流向时均曲率. 图中所示立管下半部分曲率整体大于上半部分. 顺流向位移和曲率对时间取标准差的结果如图 10(b)、(d). 仅从图 10(b) 已经难以看出主要的振动模态, 低阶的振动干扰较为明显. 从图 10(d) 大致可以看出其高阶模态的振动特性. 对比图 10(b)、(d) 可发现, 下半部分低阶振幅和高阶振幅都较上部大一些.

图 11 为长细比 $L/D = 500, 750, 1\ 000$ 时, 横流向位移和曲率相对于时间的标准差. 从图中可以看

出, 曲率标准差较位移存在更多锯齿状变化, 这是曲率对高模态的敏感性引起的, 高模态引起的位移变化不大, 引起的曲率变化则颇为明显^[9]. 随着长细比从 500 到 1 000, 沿着整个展向基本上不存在位移标准差接近于 0 的“节点”, 这表明大长细比中行波较驻波权重增大.

图 12 为横流向位移功率谱密度等值线图, 横轴是振动频率, 纵轴是立管展向. 从图中可大致看出, 其主控振动模态依次为 3、5、6, 即主控模态数随着长细比而增长; 另一个很明显的现象是长细比越大, 参与振动的频率越多, 表现在图中即为等值线的频域(图中横轴区间)越宽.

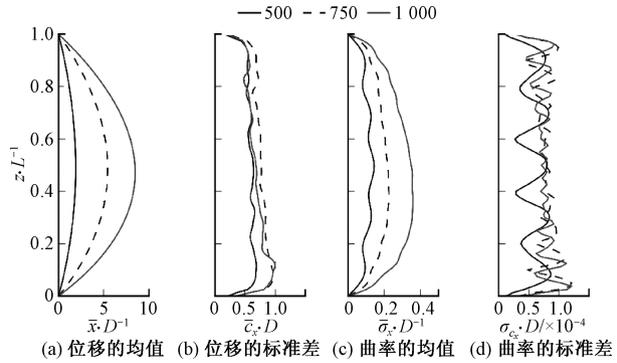


图 10 顺流向位移和曲率的均值与标准差
Fig. 10 Time-averaged values and standard deviations of in-line displacements and curvatures

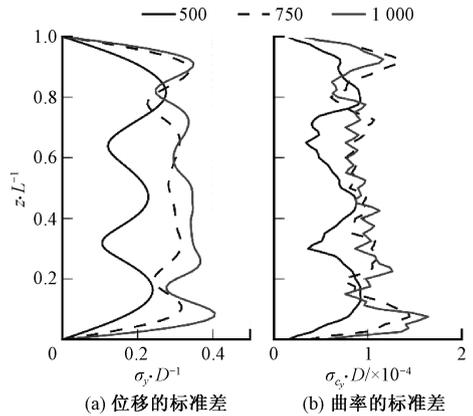


图 11 横流向位移和曲率的标准差
Fig. 11 Standard deviations of cross-flow displacements and curvatures

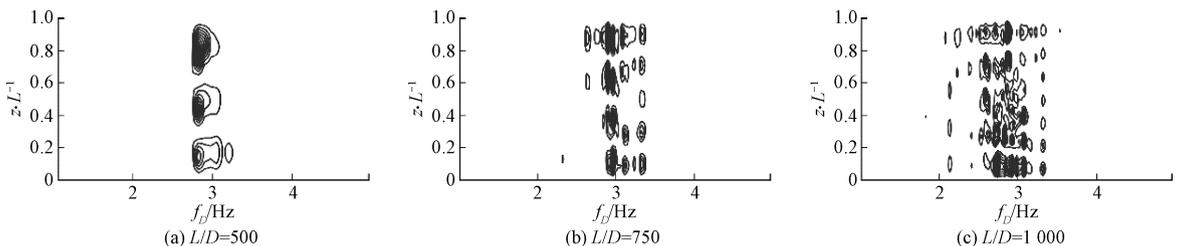


图 12 横流向位移功率谱密度云图
Fig. 12 Power spectral density contours of cross-flow displacements

4 结论

文中基于切片理论,使用径向基函数法作为 OpenFOAM 中的动网格策略,对长细比 L/D 为 1 000 的立管进行了均匀来流中涡激振动的数值模拟,其顺流方向最大时均偏移量达八个立管直径.数值模拟重现了高阶主控模态及主控模态的频繁变换等大长细比柔性立管的涡激振动特性.尾流中泻涡呈现的是 2S 模式,即每个振动周期泻出两个符号相反的尾涡.部分切片上出现明显的同方向的涡粘合的情况,少部分切片出现了反方向涡粘合的情况.立管顺流向的运动使得尾涡顺流向间距时大时小.文中将结果与长细比为 500 和 750 的涡激振动响应进行比较,观察到长细比越大,参与振动的模态越多,振动涉及的频谱越宽,模态转换现象(分时现象)及行波特性更为明显.

参考文献 (References)

- [1] WILLDEN R H J, GRAHAM J M R. Numerical prediction of viv on long flexible circular cylinders [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15(3): 659 – 669. DOI:10.1006/jfls.2000.0359.
- [2] WILLDEN R H J, GRAHAM J M. Multi-modal Vortex-Induced Vibrations of a vertical riser pipe subject to a uniform current profile [J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2004, 23(1): 209 – 218. DOI: 10.1016/j.euromechflu.2003.09.011.
- [3] CHAPLIN J R, BEARMAN P W, CHENG Y, et al. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(1): 25 – 40. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.016.
- [4] CHAPLIN J R, BEARMAN P W, HUERA HUARTE F J, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21(1): 3 – 24. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.010.
- [5] HUARTE F J H. Multi-mode vortex-induced vibrations of a flexible circular cylinder [J]. *Imperial College London*, 2006.
- [6] LIE H, KAASEN K E. Modal analysis of measurements from a large-scale VIV model test of a riser in linearly sheared flow [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(4): 557 – 575. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2006.01.002.
- [7] KAMBLE C, CHEN H. 3D VIV fatigue analysis using CFD simulation for long marine risers [C]//Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece; 2016: 1094 – 1100.
- [8] HUANG K, CHEN H C, CHEN C R. Vertical riser VIV simulation in uniform current [J]. *Polar and Arctic Sciences and Technology; CFD and VIV*, 2009, 5:.. DOI:10.1115/omae2009 – 79349.
- [9] DUAN M, WAN DC, XUE H. Prediction of response for vortex – induced vibrations of a flexible riser pipe by using multi – strip method [C]//Proceedings of the Twenty – sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece; 2016: 1065 – 1073.
- [10] FU B, DUAN M, WAN DC. Effect of mass ratio on the vortex – induced vibrations of a top tensioned riser [C]//The Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics Effect. Wuxi, China; 2016: 431 – 435.
- [11] DUAN M, FU B, WAN DC. The effect of top tension on VIV model analysis of a vertical flexible riser [C]//The Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. Wuxi, China; 2016: 455 – 460.
- [12] CLOUGH RW, PENZIEN J. Dynamics of Structures [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2001, 44(2): 366.
- [13] JASAK H. Dynamic Mesh Handling in OpenFOAM [C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2009. DOI:10.2514/6.2009 – 341.
- [14] SRINIL N. Multi-mode interactions in vortex-induced vibrations of flexible curved/straight structures with geometric nonlinearities [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2010, 26(7): 1098 – 1122. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2010.08.005.
- [15] JAISWAL V, VANDIVER JK. VIV Response Prediction for Long Risers With Variable Damping [C]//Asme International Conference on Offshore Mechanics & Arctic Engineering. Volume 3. Pipeline and Riser Technology; CFD and VIV. San Diego, California, USA; 2007: 901 – 909. DOI:10.1115/omae2007 – 29353.
- [16] BLEVINS R. Flow-induced vibration [M]. 2nd ed. Malabar, Florida; Krieger Publishing Company, 2001.
- [17] WILLDEN R H J, GRAHAM J M R. Three distinct response regimes for the transverse Vortex-Induced Vibrations of circular cylinders at low Reynolds numbers [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(6): 885 – 895. DOI:10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.005.