



第九届全国流体力学学术会议

2016年10月20~23日 江苏南京

文章编号: CSTAM 2016-A56-Bxxxx

标题: 长细比 500 的柔性立管涡激振动时域响应的数值计算分析

作者: 端木玉, 付博文, 万德成

单位: 上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室, 船舶海洋与建筑工程学院, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心

长细比 500 的柔性立管涡激振动时域响应的数值计算分析

端木玉^{1,2}, 付博文¹, 万德成^{1,*}

1 (上海交通大学, 海洋工程国家重点实验室, 船舶海洋与建筑工程学院, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海, 200240)

2 (江苏海事职业技术学院船舶与海洋工程学院, 南京, 212003)

摘要 本文以开源程序库 OpenFOAM 为平台, 自主开发了用于细长柔性立管涡激振动时域响应预报的求解器 VIVFOAM-SJTU。运用该求解器数值模拟了长细比 $L/D=500$ 的细长柔性立管分别在均匀流和剪切流中的涡激振动问题。数值结果显示, 立管的横向振动为单一的 3 阶驻波, 而流向振动则表现为多模态的行波, 主控模态为 6 阶。均匀流和剪切流中的立管的振动模态相似, 但是各阶模态的权重不同。流场剖面对立管流向振动的平衡位置和横向振型有一定影响, 均匀流中立管流向平衡位置和横向振型呈对称分布, 剪切流中则往立管的底端略微偏离。

关键词 VIVFOAM-SJTU, 柔性立管, 涡激振动, 多模态

引言

涡激振动是深海立管设计的关键问题。随着深海开发向 3000 米水深推进, 为了开采深海海床下的石油资源, 海洋平台的立管长度也越来越长。在来流的作用下, 由于立管的交替泻涡现象而产生振荡的流体力, 会引发结构的涡激振动。有关深海细长柔性立管的设计一直是工程领域的挑战, 如何能够精确的预报出细长柔性立管涡激振动的时域响应并从机理上加深对立管涡激响应模态的理解已成为亟待解决的问题。

模型试验是研究柔性立管涡激振动问题最可靠的手段, 但受水池限制的影响很大, 在实验值也很难达到实际的雷诺数, 此外试验也有很多关键的技术问题有待克服。这些都对试验的开展带来了很大的挑战。有关试验的研究可以参考 J.R. Chaplin (2005a, 2005b), F.J. Huera Huarte (2006, 2009a, 2009b)。

CFD 方法也是预报立管涡激振动模态的有效手段。由于深海立管的长细比非常大, 可达到 10^2 甚至 10^3 。如果整体采用三维数值模拟, 网格量是相当惊人的。而切片法是求解这类大计算域问题的一种折中的方法。沿立管长度方向分布好切片, 通过不可压 Navier-Stokes 方程求解

出切片处的流体力并加载到立管的结构场, 每个时间步更新流体力, 采用有限元整体求解整体结构场的各节点位移, 并将位移反馈给流体场的网格运动。对以上流程, 通常的做法是结构场依托 ANSYS 软件或 ABAQUS 软件, 流体场依托 FLUENT 软件或 CFX 软件, 基于两者之间已有的数据交互界面 ANSYS workbench 或是自己编程实现数据交互来实现流固耦合功能。这种方法实现起来较为方便, 但是商业软件的封装性会降低其二次开发的可靠性。开源软件 OpenFOAM 基于有限体积开发, 采用 C++ 语言和面向对象的方法编程, 便于二次开发, 使之成为优秀的开发平台。相关基于 OpenFOAM 的 VIV 的研究有 Weiwon Zhao (2016a, 2016b)。

影响涡激振动的因素众多, 立管的涡激振动是由流场的漩涡脱落引发的, 所以流场是一个关键因素。很多学者分别在均匀流和剪切流中对细长立管的涡激振动问题进行过研究。Kart W.Schulz (2004) 对长细比为 627 的立管在剪切率分别为 0.1 和 0.67 的剪切流中的涡激振动问题进行了研究。Willden (2004) 利用 VIVIC 程序研究了均匀流中立管的横向涡激振动。Trim (2005) 通过试验研究了均匀流和剪切流中的立管横向振动响应, 同时对带螺旋侧板的覆盖率的抑涡效应进行了研究。已有的研究中, 很多是

1) 基金资助项目: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51379125, 51490675, 11432009, 51579145, 11272120), the Chang Jiang Scholars Program (T2014099) and the Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

2) Email: dcwan@sytu.edu.

在某一种流场中，通过改变立管的结构参数来研究这些参数对涡激振动的影响。而关于不同流场剖面（均匀流和剪切流）对立管的两向（横向和流向）的涡激响应的影响并不多。

本文以开源软件 OpenFOAM 为平台，自主开发了细长柔性立管涡激振动的求解器 VIVFOAM-SJTU，并运用该求解器对长细比 $L/D=500$ 的细长柔性立管的涡激振动问题进行数值模拟，研究其在均匀流和剪切流中不同的振动模态和响应特性。

1 控制方程

1.1 流体控制方程

流体域的控制方程为粘性不可压 Navier-Stokes 方程：

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

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

1.2 结构控制方程

结构域的控制方程为结构动力学方程：

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F} \quad (3)$$

1.3 流固耦合的求解方法

本文采用切片法求解细长柔性立管涡激振动响应，该方法可以有效求解这类超大计算域问题。与半经验模型相比，切片法能够获得更加精确的流体力，也可以反馈立管的运动对流场的影响，进一步对流场的变量加以分析。

流固耦合问题的计算域包含了没有重叠区域的流体域 Ω^f 和固体域 Ω^s 。两者计算域之间有着公共的边界 Γ 。对于不可压缩流体与弹性结构的相互作用问题，流速 \mathbf{u} 和压力 p 一般作为求解流体场的未知变量，位移 \mathbf{d} 作为求解结构场的未知变量。

本文基于 OpenFOAM 的湍流不可压缩动网格 RANS 求解器，进行开发新的求解器 VIVFOAM-SJTU，在 OpenFOAM 的基本框架上编程实现结构动力学分析模块，求解流体场与结构场之间的耦合作用。求解器基于固定点迭代法，以流固耦合的强耦合作为程序设计思想，程序流程的设计思想如图 1 所示。我们已经运用该求解器已完成过相关标准问题的验证，可参考 Mury Duan (2016)。

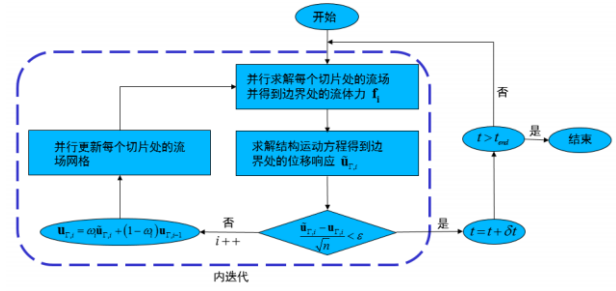


图 1 欠松弛强耦合的流固耦合迭代

2 数值模型

数值模拟中立管的主要结构参数列于表 1 所示。

表 1 立管模型的主要结构参数

参数	符号	数值	单位
External diameter	D	0.028	m
Length	L	14	m
Aspect ratio	L/D	500	-
Submerged Length	L_s	5.94	m
Flexural Stiffness	EI	29.88	Nm ²
Top Tension	T_t	1610	N
Mass ratio	m^*	3	-
Reynolds number	Re	16940	-

均匀流的流速 $U = 0.4 \text{ m/s}$ ，剪切流的平均流速 $U_{mean} = 0.4 \text{ m/s}$ ，使得均匀流与剪切率的流速剖面的面积相等。剪切率 $s = 0.5$ ，有关剪切率的定义如下：

$$s = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_{mean}} \quad (4)$$

立管两端铰支，沿立管长度方向共划分 80 个结构单元，流体场共划分 20 个切片，切片沿立管长度方向均匀分布，即将每个切片处计算所得的流体力加载到与其相邻的 4 个结构单元上。每个切片处的计算域和网格划分如图 2 所示。单个切片的网格量为 46820，第一层网格的 $y+$ 为 3。

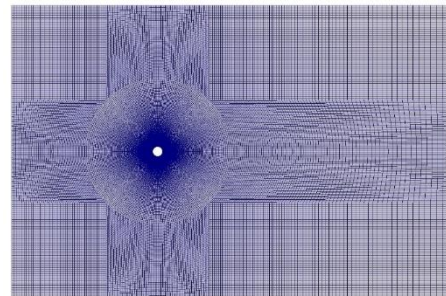


图 2 单个切片的计算域和网格划分

3 计算结果

在来流作用下立管各节点的流向位移从 0 开始逐渐增加，经过一段时间后会达到各自的平衡位置。将各节点所对应的平衡位置连接起来，就得到流向的平衡状态，立管围绕平衡状态做瞬时微幅振动。稳定后将所有节点位移对时间平均后并连接起来可得到如图 3 所示的立管流向位移的平衡位置，红线是均匀流，蓝线是剪切流。在均匀流的作用下，立管流向的平衡位置关于长度方向呈对称分布，位移的最大值在长度方向的中心。而剪切流中立管流向的平衡位置不再沿长度方向对称，而是往立管底端偏离，这是因为剪切流的流速分布是下端流速大，上端流速小。剪切流中立管流向位移的最大值位于距离底端 $0.45L$ 处。由于流速剖面的面积相等，所以两种流场中流向平衡位置的最大值很相近。均匀流的作用下立管最大位移为 $3.155D$ ，剪切流稍小，为 $3.091D$ ，如表 2 所示。

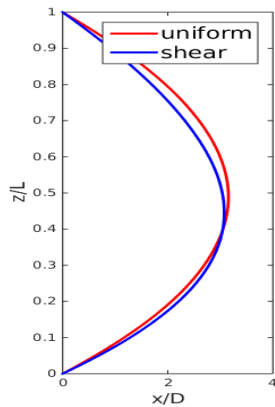


图 3 均匀流与剪切流中立管流向位移的平均值

表 2 流向位移的平均值及其对应的位置

ρ	\bar{x}_{\max} / D	Location of \bar{x}_{\max}
Uniform	3.155	0.5L
Shear	3.091	0.45L

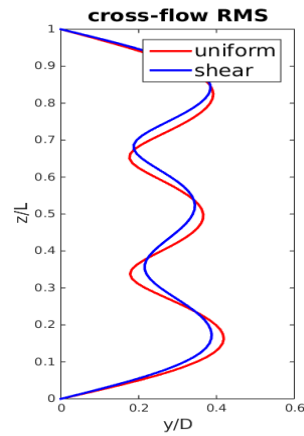


图 4 均匀流和剪切流中横向位移的均方根值

图 4 是均匀流与剪切率作用下立管横向位移的均方根值。从图中可见，在两种流场中，立管横向振动的主控模态都同为三阶，均匀流（红线）中立管横向振动的对称性更好。

采用结构动力学的分析方法，通过式 (5) 可得每阶模态的幅值随时间的变化。

$$A_x(t) = \Phi^{-1}(z)U(z,t) \quad (5)$$

式中 $\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n]$ 是振型矩阵，每一列代表每一阶归一化后的振型。 $U(z,t)$ 是节点位移矩阵， $U(z,t) = [u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t)]$ 中每一行表示某个节点的位移随时间的变化。 $A_x(t)$ 为瞬时模态幅值矩阵，其大小可以反映每一阶模态所占的比重。

对于横向振动，我们给出前 6 阶的振动模态分析，并对模态幅值随时间的变化做快速傅立叶变换来考察模态的能量谱。从均匀流和剪切流场中立管模态及能量谱分析（图 5，图 6）的结果来看，3 阶模态的权重和能量谱都很大，其余模态的权重都非常小。说明长细比为 500 的立管振动形式为单模态振动，不论在均匀流还是剪切流中都是 3 阶驻波形式的振动。这一点从图 7 的立管横向振动响应的时空云图反映得更加直接。

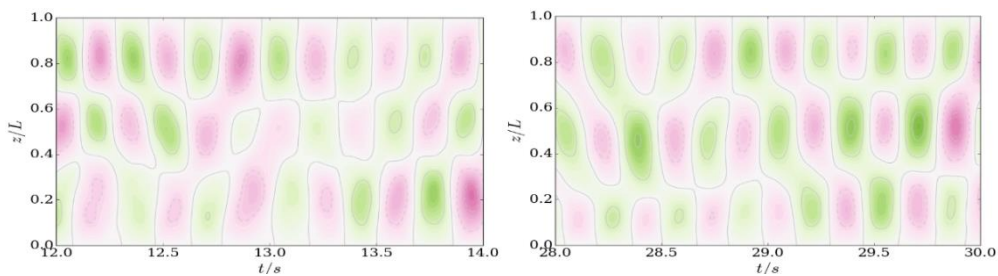


图 7 横向振动响应的时空云图（左：均匀流，右：剪切率）

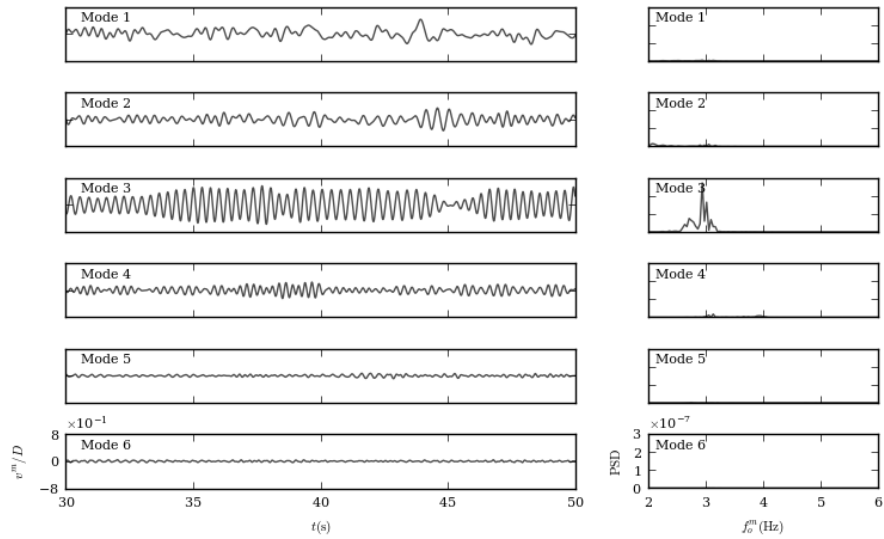


图 5 均匀流中立管横向各阶的模态幅值及能量谱分析

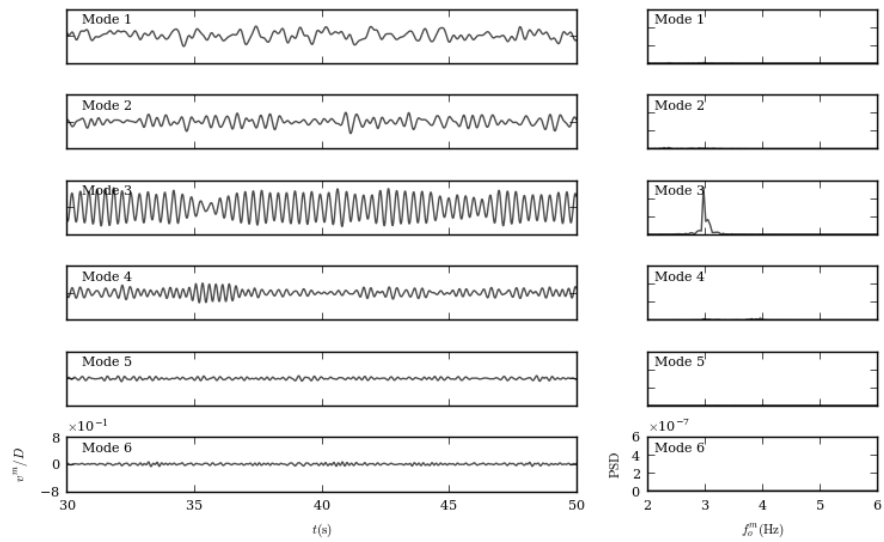


图 6 剪切流中立管横向各阶模态的幅值及能量谱分析

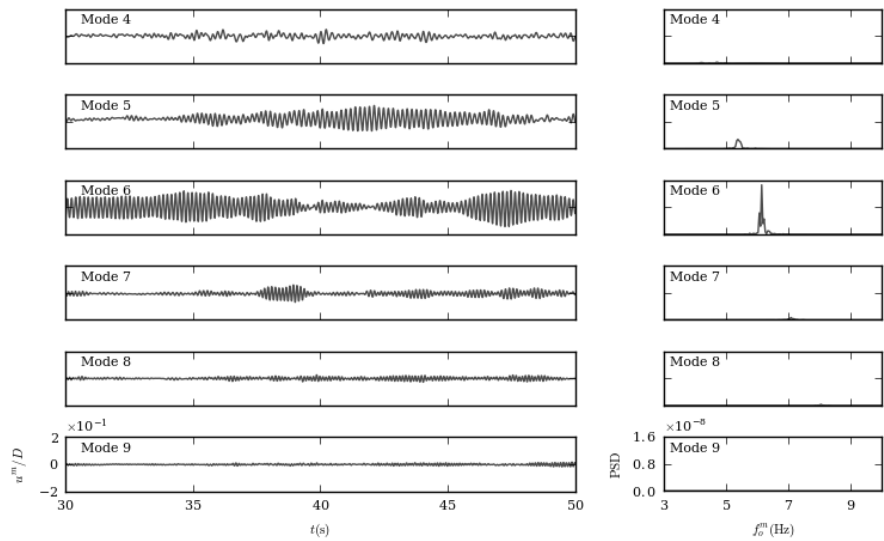


图 8 均匀流中立管流向各阶的模态幅值及能量谱分析

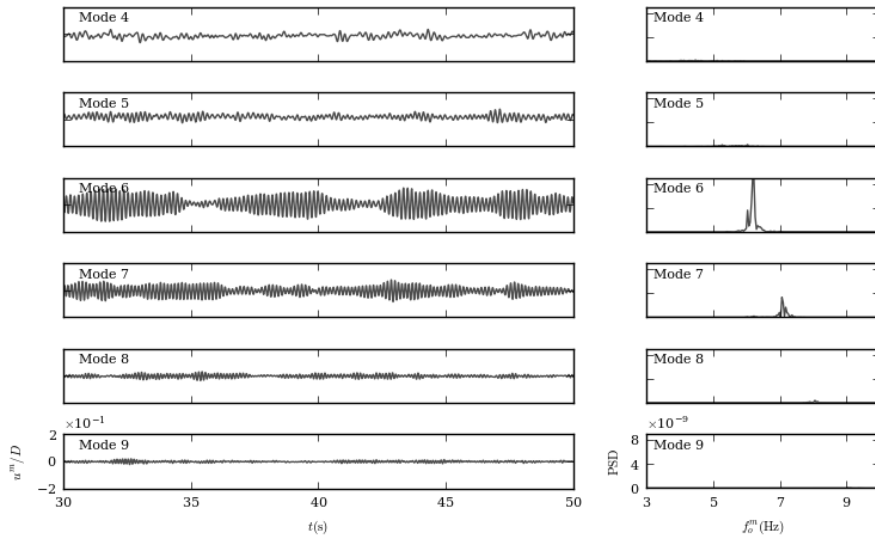


图9 剪切流中立管流向各阶模态的幅值及能量谱分析

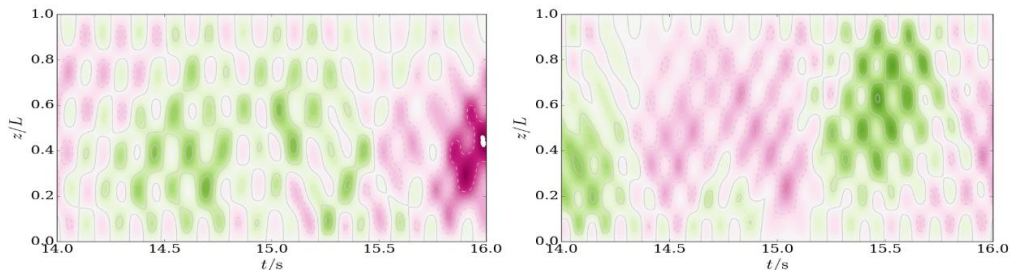


图10 流向振动响应的时空云图 (左: 均匀流, 右: 剪切率)

对流向振动我们给出4阶到9阶的模态幅值随时间的变化和能量谱分析,如图8和图9所示。从图中可见,在均匀流场中,随着时间的演化,在某些时刻5阶的模态幅值较大,而有些时间6阶的模态幅值较大。因此立管的流向振动会在5阶振型和6阶振型之间变化。对比能力谱的分析来看,6阶模态是振型的主控模态,即立管流向主要是以6阶模态振动。在剪切流场中,随着时间的演化,6阶和7阶振型会在立管振动中表达,而5阶振型不再是立管振动的振型。同样,剪切流中立管流向的主控模态仍为6阶。与横向单一振动模态相比,立管的流向表现为多模态振动的行波。综上所述,在本文的工况下,流场的剖面(均匀流和剪切流)会影响立管流向的平衡位置及流向振动中各阶模态的权重,并且在剪切流中激发出的模态比均匀流中要更高一些。图10分别为均匀流与剪切流中流向位移响应的时空云图。

4 结论

本文基于自主开发的求解器 VIVFOAM-SJTU 对细长柔性立管的振动模态进行了数值预报。针对长细比 (L/D) 为 500 的立管分别在均匀流和剪切流中的涡激振动问题开展了研究。

立管在流体阻力的作用下,沿来流的方向逐渐偏离原来的初始位置,并最终到达流向的平衡位置。立管的流向振动就是围绕该平衡位置的微幅振动。数值模拟给出了立管在不同流场中的平衡位置,均匀流场中立管流向的平衡位置对称分布,流向的最大位移位于立管的中央。剪切流中流向平衡位置不再对称分布,流向位移的最大值位于距离立管底端的 $0.45L$ 处。对长细比 $L/D=500$ 的立管在文中给定的参数工况下,其横向振动表现为单一模态的驻波形式,振动模态为3阶。而流向振动则表现为多模态振动的行波,均匀流中为5阶和6阶,剪切流中为6阶和7阶,但流向振动的主控模态都是6阶。流向振动模态与横向振动模态呈2倍关系,这是因为流向振动是有立管所受的脉动阻力引起,横向振动是有漩涡脱落的脉动升力引起。我们知道通常阻力的变化频率是升力的2倍,所以流向激发出的模态与横向模态也呈2倍关系。

参考文献

- 1 F.J. Huera Huarte, P.W. Bearman, J.R. Chaplin. On the force distribution along the axis of a flexible circular cylinder undergoing multi-mode vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22:897-903.

- 2 F.J. Huera Huarte, P.W. Bearman. Wake structures and vortex-induced vibrations of a long flexible cylinder—Part 1: Dynamic response. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25:969-990.
- 3 F.J. Huera Huarte, P.W. Bearman. Wake structures and vortex-induced vibrations of a long flexible cylinder—Part 2: Drag coefficients and vortex modes. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, 25:991-1006.
- 4 J.R. Chaplin, P.W. Bearman, et al. Blind predictions of laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a tension riser. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21:25-40.
- 5 J.R. Chaplin, P.W. Bearman, et al. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21:3-24.
- 6 Karl W. Schulz, Trond S. Meling. Multi-strip numerical analysis for flexible riser response. Proceedings of 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, British Columbia, Canada, June 20-25, 2004:1-6.
- 7 Muyu Duan, Decheng Wan. Prediction of Response for Vortex-induced Vibrations of a Flexible Riser Pipe by Using Multi-strip Method. The twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. June 26 – July 1, 2016:1065-1073
- 8 Weiwen Zhao, Decheng Wan, Ren Sun. Detached-Eddy simulation of flows over a circular cylinder at high Reynolds number. Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016: 1074-1079.
- 9 Weiwen Zhao, Decheng Wan. Numerical computations of spar vortex-induced motions at different current headings. Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 26-July 1, 2016: 1122-1127.
- 10 Willden, R.H.J., Graham, J.M.R. Multi-modal vortex-induced vibrations of a vertical riser pipe subject to a uniform current profile. *European Journal of Mechanics B/Fluids*, 2004, 23:209-218.
- 11 Trim, A. D., Braaten, H., Lie, H., Tognarelli, M. A. Experimental investigation of vortex-induced vibrations of long marine risers. *Journal of Fluids and Structures*. 2005, 21(3):335-361.

NUMERICAL RESEARCH ON VORTEX-INDUCED VIBRATIONS OF A LONG FLEXIBLE RISER PIPE WITH ASPECT RATIO OF 500 IN TIME DOMAIN

Muyu Duan^{1,2} Bowen Fu¹ Decheng Wan^{1*}

(1 State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)
(2 Department of Ship and Port Engineering, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 212003, Jiangsu, China)

Abstract The VIVFOAM-SJTU solver used to prediction the VIV responses of long flexible riser pipe in time domain, is self-developed based on the open source code OpenFOAM. The vortex-induced vibration responses of the vertical riser with aspect ratio of 500 in the uniform flow and shear flow is investigated by using the VIVFOAM-SJTU solver. The numerical results show that the cross-flow vibration is shown as a standing wave with a 3rd order single mode. The in-line vibration is shown as a multi-mode travelling wave. And the dominant mode is 6th mode. The vibration mode is similar in both uniform flow and shear flow. But every mode amplitude is different. The cross section of flow has influence on the equilibrium position of the in-line direction and the vibration mode, which is symmetric in uniform flow, and which is inclined to the bottom of riser in shear flow

Key words VIVFOAM-SJTU, flexible riser, vortex-induced vibrations, multi-mode

