

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.006

阶梯来流下流速对细长柔性立管涡激振动的参数分析

端木玉^{1,2}, 付博文^{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: 涡激振动是深海立管结构设计的关键, 基于开源 OpenFOAM 平台自主开发出细长柔性立管涡激振动流固耦合的求解器 viv-FOAM-SJTU. 以标准算例为基础, 研究在阶梯状来流作用下, 不同来流流速对细长柔性立管涡激振动的影响. 数值模拟的立管长细比 $L/D=469$, 质量比为 3.0, 立管的下端 45% 的长度被置于均匀来流中, 剩余部分被置于静水中. 考察的均匀来流的有 3 种, 分别为 $U=0.2, 0.4, 0.6$ m/s, 其中流速为 0.6 m/s 的情况与 Francisco 的标准实验一致. 数值计算结果显示流速的变化会导致立管的涡激频率发生变化, 进而影响立管的振动频率, 流速越高立管振动模态也越高.

关键词: 溃坝柔性立管; 涡激振动; 流速影响; 切片法; viv-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O327

文献标志码: A

文章编号: 1673-4807(2017)03-0586-06

Parametric analysis of flow velocity for vortex-induced vibration of a long flexible riser subjected to a step flow

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

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering School of Naval Architect and Ocean Engineering, Shanghai

Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

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

Abstract: Vortex-induced vibration (VIV) is a key issue in deep water riser design. Using open source library OpenFOAM as the development platform, and based on the self-developed solver viv-FOAM-SJTU, the time-domain VIV response of a long flexible riser is predicted. After the validation of benchmark case, the effects of inlet flow velocity are investigated. The aspect ratio of the riser model is $L/D=469$, with a mass ratio of 3.0. The lower 45% of its length is subject to a uniform current, the rest is in still water. Three kinds of uniform current velocity, namely $U=0.2, 0.4, 0.6$ m/s, are studied in this paper. And one of the flow velocities $U=0.6$ m/s is the same as that in the benchmark test of Francisco (2006). The change of flow rate leads to the change of vortex frequency, which influences the vibration frequency of the riser. The higher the flow velocity, the higher the vibration mode of the riser.

Key words: flexible cylinder, vortex-induced vibration, effect of flow velocity, strip method, viv-FOAM-SJTU solver

涡激振动问题是很多离岸工程关注的焦点, 随着海洋油气资源向深海开发, 迫切需要解决细长柔

收稿日期: 2017-05-24

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: 端木玉(1981-), 女, 博士研究生

* 通信作者: 万德成(1967-), 男, 教授, 研究方向为船舶水动力学. E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

引文格式: 端木玉, 付博文, 万德成. 阶梯来流下流速对细长柔性立管涡激振动的参数分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 586-591. DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.006.

性立管的涡激振动问题. 只有对涡激振动的位移响应和激励模态正确预报,才能为立管的疲劳损伤提供可靠的评估.

细长柔性立管的涡激振动响应的影响因素很多,立管的涡激振动是流固耦合相互作用的结果. 因此其既受到立管自身不同结构参数的影响,如立管的长细比、质量比、顶端预张力、弯曲刚度等;也受到外部流场的影响,如流场的流速分布、流速大小等.

通过试验、经验模型和数值模拟的方式对立管涡激振动的参数化研究正在开展^[1]. 文献[2]对长细比为 1 544 的柔性立管在均匀流中的立管涡激振动进行了数值研究,考察了质量比从 1.0 变化到 3.0 情况下对涡激振动的影响. 文献[3]通过试验研究的方式考察了顶端预张力、内流作用、质量比对深海输液立管涡激振动影响. 文献[4]通过在试验中往立管模型内部分别充空气、水和沙来改变立管的质量比,研究了质量比对立管涡激振动的影响. 文献[5]采用数值模拟的方式研究长细比为 500 的隔水管在不同均匀流场下的涡激振动响应. 文献[6]研究加装螺旋侧板的 Spar 平台的涡激运动.

海洋是一个非常复杂的环境,工作中的海洋平台立管所遭受的洋流流速也时刻发生着变化,因此考察流速对立管涡激振动的影响显得非常重要. 文中以 OpenFOAM 的求解器 pimpleDyMFoam 为基础开发新的求解器 viv - FOAM - SJTU,使其能够完成流固耦合问题的求解. 求解器经过标准算例的考察验证^[7],并针对不同参数的影响(质量比、顶端预张力、流速大小、流场剖面)及串列双立管开展了深入的应用研究^[8-10].

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:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

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

式中: $\boldsymbol{u}$ 为流速, ρ 为流体密度, p 为压力, ν 为流体的运动粘体系数, $\boldsymbol{f}$ 为质量力.

1.2 结构控制方程

结构域的控制方程为结构动力学方程:

$$\boldsymbol{M} \ddot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{C} \dot{\boldsymbol{u}} + \boldsymbol{K} \boldsymbol{u} = \boldsymbol{F} \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{M}$ 为质量矩阵, $\boldsymbol{C}$ 为阻尼矩阵, $\boldsymbol{K}$ 为刚度矩阵, $\boldsymbol{F}$ 为载荷矩阵; $\boldsymbol{u}$ 、 $\dot{\boldsymbol{u}}$ 、 $\ddot{\boldsymbol{u}}$ 分别为结构位移、速度和加速度.

1.3 柔性立管的流固耦合求解

采用切片法求解细长柔性立管涡激振动响应,是数值求解这类超大计算域问题的一种简化模型. 该方法相比半经验模型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. 文中基于 OpenFOAM 的求解器 pimpleDyMFoam (湍流不可压缩动网格 RANS 求解器) 开发新的求解器,使其能够完成流固耦合问题的求解,以流固耦合的强耦合作为程序设计思想,程序流程如图 1.

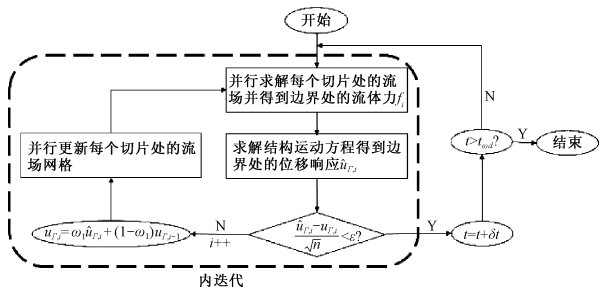


图 1 欠松弛强耦合的流固耦合迭代
Fig. 1 FSI iteration with under-relaxation for strong coupling solution

2 计算模型

文中基于文献[11]的标准实验建立模型. 立管的直径是 28 mm,长度为 13.12 m,对应的长细比 $L/D = 469$. 立管被置于阶梯流中,底端 45% 的立管长度被置于均匀流中,剩余 55% 的立管长度置于静水中. 立管两端固定,顶端施加上有预张力,试验的立管的主要参数见表 1.

表 1 立管模型的主要结构参数
Table 1 Summary of main parameter of the model riser

参数	变量	数值	单位
外径	D	0.028	m
长度	L	13.12	m
长细比	L/D	469	-
浸没长度	L_s	5.94	m
弯曲刚度	EI	29.88	$\text{N} \cdot \text{m}^2$
顶张力	T_t	1 610	N
流速	U	0.2/0.4/0.6	m/s
质量比	m^*	3	-
质量比(有凸起的圆柱)	m_b^*	3.1	-

立管的结构场被均匀划分成 91 个节点,共 90 个单元. 其中有 40 个单元处于立管下端的均匀流场中,50 个单元处于静止流场中. 均匀流场区域被划分了 20 个切片,立管切片划分的计算模型如图 2. 一个切片对应两个结构单元,节点 0 位于底端,

因为简支位移始终为 0,因此无需布置流体切片.从下一个节点(节点 1)开始布置流体切片,每隔一个结构节点布置一个流体切片,一直布置到节点 39.通过数值模拟得到切片处的受力换算成均布载荷以后,施加到相邻两个结构单元上.

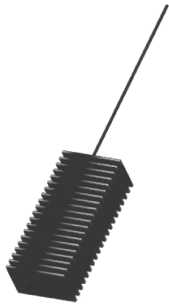


图 2 立管切片划分的计算模型
Fig.2 Computational modal of strip

3 计算结果及讨论

考虑 3 种流速对细长柔性立管涡激振动的影响,流场仍是阶梯流,下半段均匀流场的流速分别是 $U=0.2、0.4、0.6\text{ m/s}$,其中流速为 0.6 m/s 的与上面的标准试验一致.改变流速时,顶端预张力不变,都与标准实验一致,为 $T=1\ 610\text{ N}$.

3.1 $U=0.2\text{ m/s}$

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,得到流向的平衡状态,立管围绕平衡状态做瞬时微幅振动.对立管的流向位移求平均值即可得到立管流向的平衡位置.

图 3 为立管流向振动的包络线、位移的平均值和均方根值.从图中可见,立管流向位移的最大值不在立管长度的中间,因为立管上部 55% 的长度是置于静水之中,只有剩下的部分才受到来流的作用.所以立管流向的平衡位置最大值位于距离底端的 $0.36L$ 处.当流速为 $U=0.2\text{ m/s}$,立管在很低的流速下振动的模态也很低.从图中可见立管的流向振动仅为 2 阶,流向振动 2 阶振型的鞍点位于立管长度方向的中点.立管的流向平衡位置偏离量仅有 $0.389D$.

图 4 给出了立管横向振动的包络线和位移的均方根值.当流速很低时,立管的横向振动表现为非常简单的来回振动,振动模态仅为 1 阶,横向振动的最大位移位于立管长度的中点.这种振动形式与简支梁受周期性的均布载荷很相似.

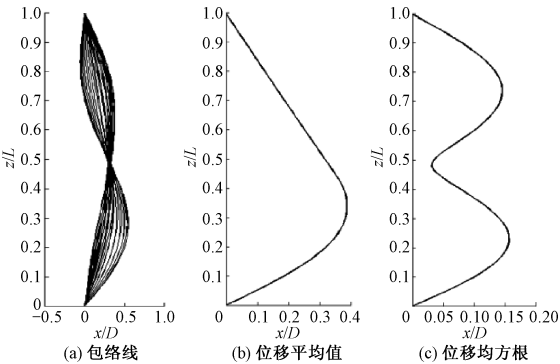


图 3 立管流向振动的包络线、位移的平均值和均方根
($U=0.2\text{ m/s}$)

Fig.3 Instantaneous deflected shapes, the mean and the RMS in-line displacement($U=0.2\text{ m/s}$)

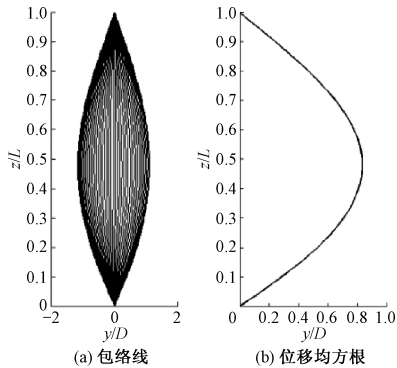


图 4 立管横向振动的包络线和位移均方根($U=0.2\text{ m/s}$)
Fig.4 Instantaneous deflected shapes and the RMS cross-flow displacement($U=0.2\text{ m/s}$)

3.2 $U=0.4\text{ m/s}$

当流速增加之后,立管的振动模态也随之增高.流速增加之后,立管的流向平衡位置的最大值也增大了,为 $0.91D$,但是流向平衡位置最大值的位置不变,依然是在距离立管底端的 $0.36L$ 处,因为阶梯流的分布没变.

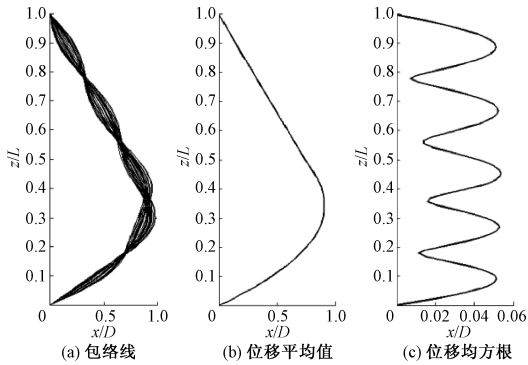


图 5 立管流向振动的包络线、位移的平均值和均方根值
($U=0.4\text{ m/s}$)

Fig.5 Instantaneous deflected shapes, the mean and the RMS in-line displacement($U=0.4\text{ m/s}$)

当流速增加为 0.4 m/s 时,立管的流向振动模

态为 5 阶. 立管的横向振动模态为 3 阶. 图 5 为流速为 0.4 m/s 时,立管流向振动的包络线、立管位移的平均值和均方根值. 图 6 为立管横向振动的包络线和位移均方根.

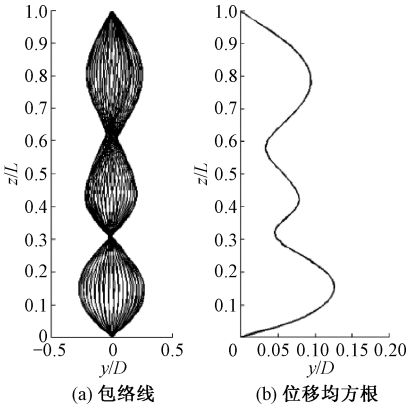


图 6 立管横向振动的包络线和位移均方根 ($U=0.4\text{ m/s}$)
Fig. 6 Instantaneous deflected shapes and the RMS cross-flow displacement ($U=0.4\text{ m/s}$)

3.3 $U=0.6\text{ m/s}$

当流速增加至 0.6 m/s 时,这个流速工况与标准试验文献[11]一致,所以给出数值模拟结果的同时,补充与试验结果比较,以验证求解器 viv-FOAM-SJTU 的可靠性和精度,图 7 为流向平衡位置.

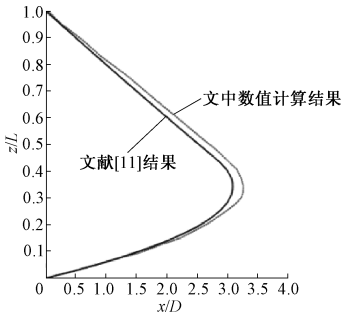


图 7 流向位移的平均值 ($U=0.6\text{ m/s}$)
Fig. 7 Mean in-line displacement ($U=0.6\text{ m/s}$)

表 2 给出了图 7 中对应的流向位移的最大值及最大值所对应的位置及与实验值的比较. 流向位移的最大处所对应的位置为 $z/L=0.367$,与实验结果相比,文中精确预报出了流向位移最大处所对应的位置,误差仅为 1.1%. 流向位移的最大值为 $3.072D$,与实验值相比误差为 6.7%.

表 2 流向位置最大值及其所对应的位置 Table 2 Maximum IL mean displacement and its location		
	流向位移最大值(x/D)	最大值对应位置(z/L)
实验结果	3.292	0.371
文中结果	3.072	0.367
误差/%	6.7	1.1

图 8 给出了流速为 0.6 m/s 时立管横向第 2 阶至第 7 阶的模态幅值随时间的变化,图 9 是对应的文献[11]的试验结果. 数值计算结果与试验结果吻合较好,都是出横向振动中第 4 阶模态的幅值及能量谱最高,因为 4 阶模态是横向振动的主控模态. 与 4 阶模态相邻的 3 阶及 5 阶模态相比剩余的其他各阶模态,其模态幅值也较高,但不是主控模态.

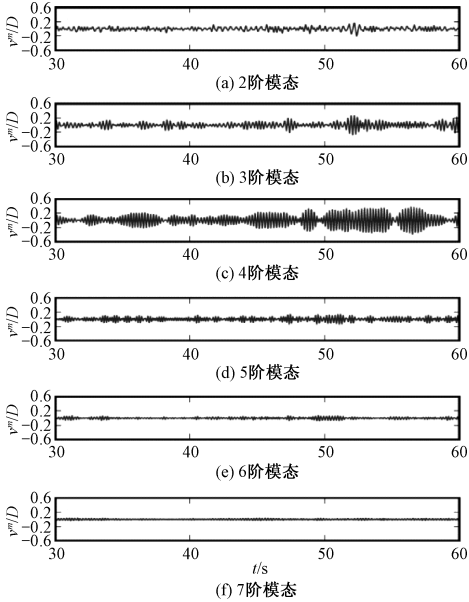


图 8 数值计算得到的立管横向第 2 至 7 阶模态的幅值及能量谱 ($U=0.6\text{ m/s}$)
Fig. 8 Computational cross-flow displacement modal amplitudes and power density ($U=0.6\text{ m/s}$)

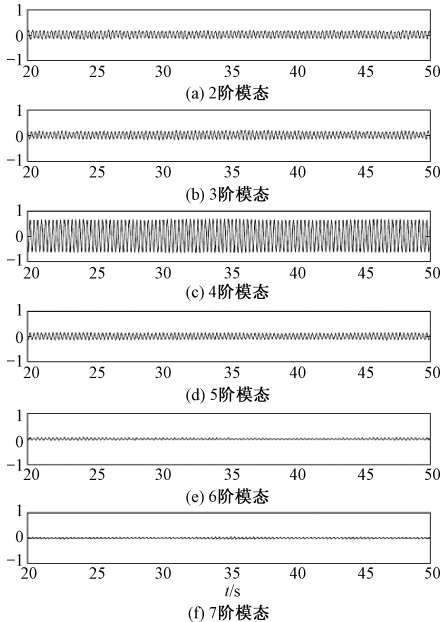


图 9 文献[11]试验得到的立管横向第 2 至 7 阶模态的幅值及能量谱
Fig. 9 Ross-flow displacement modal amplitudes from the experimental results of reference[11]

但是试验测量的各阶模态幅值都非常恒定,几乎不随时间变化.而数值计算结果中各阶模态随时间无规律的变化.在 $U = 0.6 \text{ m/s}$ 时,雷诺数达到 1.69×10^4 的量级,流场处于湍流状态,湍流的无规律性及脉动性使得升力系数不再像层流时保持不变.由升力所激发出的立管横向振动的各阶模态幅值也呈现出脉动特性.

图 10 是横向振动的包络线,与上文分析吻合的是,横向振动呈现出明显的四阶振型.数值结果与试验值相比,无论是从横向振幅还是振动鞍点的位置都吻合很好.图 11 是沿立管长度方向的横向振动位置随时间变化的时空云图,在任何时刻立管的振动都是 4 阶振型,不存在振型的转变.但是试验中每个瞬时的时空云图颜色分布深浅一致,不随时间变化,数值结果则不同.从图 8,9 给出的各阶模态幅值随时间的变化中可见,试验的幅值恒定,因此时空云图也不随时间不变,可能是试验为了测量方便,加装了一些使得振动稳定的设施.

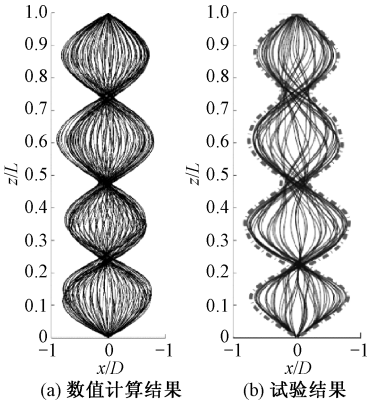


图 10 数值及试验得到的横向包络线
Fig. 10 Instantaneous deflected shapes

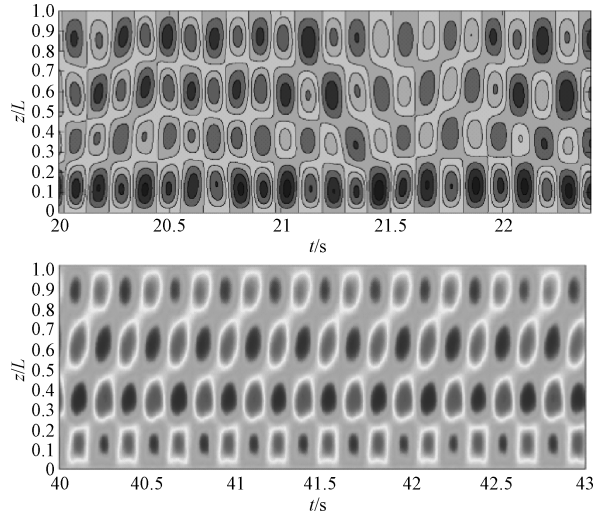


图 11 数值和试验得到的横向位置的时空云图
Fig. 11 Spatio-temporal plot of cross-flow response

对立管的流向振动进行分析,图 12 给出了流速为 0.6 m/s 时立管流向第 5 阶至第 10 阶的模态幅值随时间的变化,图 13 是对应的文献[11]的试验结果.数值与试验结果保持一致,均是 7 阶是主控模态,其他模态的幅值相比 7 阶模态都非常低,所以立管的流向表现为基于流向平衡位置下的 7 阶稳定振型.

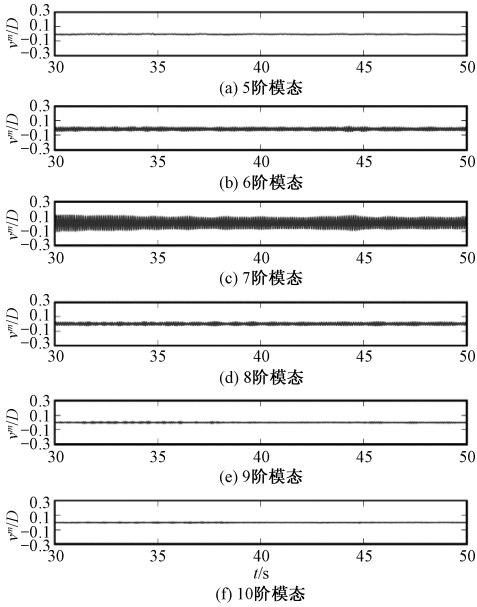


图 12 数值计算得到的立管流向第 5 至 10 阶模态的幅值及能量谱 ($U = 0.6 \text{ m/s}$)
Fig. 12 Computational in-line displacement modal amplitudes and power density ($U = 0.6 \text{ m/s}$)

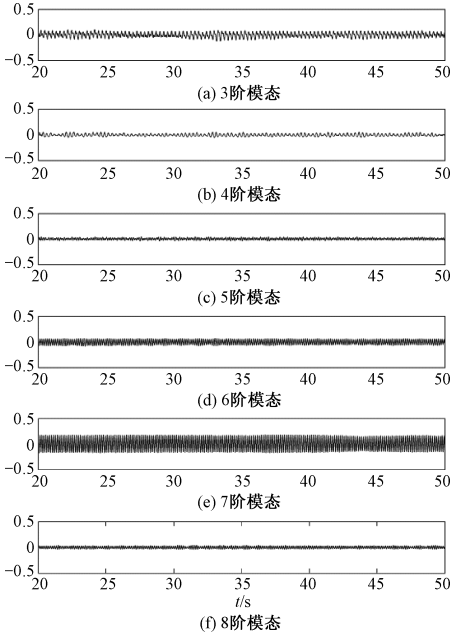


图 13 文献[11]试验得到的立管横向第 3 至 8 阶模态的幅值及能量谱 ($U = 0.6 \text{ m/s}$)
Fig. 13 In-line displacement modal amplitudes from the experimental results of reference [11]

因为流向振动是由阻力激发的,而阻力系数一般是升力系数的两倍以上,所以流向激发出的振动模态更高。

4 结论

文中建立了基于切片法的数值计算模型,利用自主开发的求解器对不同阶梯流速下的细长柔性立管涡激振动响应进行了研究,参照标准试验选取了 $U=0.2、0.4、0.6$ m/s 3 种流速。

随着流速的增加,立管的涡激振动响应也发生了很大的变化,同时,立管流向平衡位置偏离原初始位置也越大,这是由于流速越大对立管的冲击力也越大,所以偏移量越大。但是流向最大位移所对应的立管长度位置没有改变,是由于流场分布没有变化。流速对立管模态的影响很明显,流速越高立管流向与横向振动的模态也越高。分析原因:雷诺数在 10^5 范围时,Strouhal 数都维持在 0.2 范围左右,因此涡频率随着流速线性增加。在锁定状态下立管的涡频率等于节点的振动频率。流速的改变不会影响立管的固有频率,所以与振动频率对应的固有频率阶数也逐渐增加。因此,流速的增大会导致立管振动模态的增加。其中流速为 0.6 m/s 工况下的立管涡激振动响应,补充了与试验结果的对比。

参考文献 (References)

- [1] 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.
- [2] WILLDEN R H J, GRAHAM J M R. 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] 张永波. 深海输液立管涡激振动预报及抑振技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2011. DOI:10.7666/

d.y1928396.

- [4] 张建桥. 细长柔性立管涡激振动的实验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2009. DOI:10.7666/d.y1480221.
- [5] 詹禄禄. 实尺度海洋钻井隔水管涡激振动及其抑制的数值模拟[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [6] 赵伟文, 万德成. 用大涡模拟方法数值模拟 Spar 平台涡激运动问题[J]. *水动力学研究与进展, A 辑*, 2015, 30(1): 40–46. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2015.01.006.
- ZHAO Weiwen, WAN Decheng. Numerical investigation of vortex-induced motions of spar platform based on large eddy simulation[J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2015, 30(1): 40–46. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2015.01.006. (in Chinese)
- [7] DUANMU Y, WAN D C. Prediction of response for vortex-induced Vibrations of a flexible riser pipe by using multi-strip method [C] // The twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016: 1065–1073.
- [8] 端木玉, 万德成. 长细比 500 柔性立管涡激振动时域响应数值计算分析[C]//全国流体力学学术会议, 中国, 南京, 2016:132–141.
- [9] 端木玉, 万德成. 不同长细比圆柱绕流的大涡模拟[J]. *水动力学研究与进展, A 辑*, 2016, 31(3): 295–302. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2016.03.005.
- DUANMU Yu, WAN Decheng. Large eddy simulation of flow around the cylinders with different aspects[J]. *Journal of Hydrodynamics, A*, 2016, 31(3): 295–302. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2016.03.005. (in Chinese)
- [10] DUANMU Y, FU B W, WAN D C. The Effect of Top Tension on VIV Model Analysis of a Vertical Flexible Riser [C] //The second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, CSH – 2016. Wuxi, Jiangsu, China. November 20–23, 2016: 455–460.
- [11] HUERTEP J H. Multi-mode vortex-included vibrations of a circular cylinder[D]. The University of London, 2006.

(责任编辑:曹 莉)