DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2019.04.003

振荡流下细长柔性圆柱涡激振动数值分析*

邓迪, 付博文, 万德成

(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高新船舶与深海开发 装备协同创新中心,上海 200240, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘 要: 涡激振动是造成立管疲劳破坏的最主要原因之一。目前,多数柔性圆柱涡激振动的数值模拟与模型试验, 都是基于均匀流、剪切流和阶梯流等稳定流作用下,而振荡流作用下的柔性圆柱涡激振动研究相对较少。实际远洋深海 情况下,细长柔性立管所处的海洋环境更为复杂,因而有必要深入研究复杂流场作用下的柔性圆柱涡激振动现象。该文 采用切片法并基于开源 OpenFOAM 平台开发的细长柔性立管流固耦合求解器 viv-FOAM-SJTU,进行振荡流作用下细长 柔性圆柱的涡激振动数值模拟。该文主要研究不同振荡流周期对细长柔性圆柱涡激振动的影响。数值模拟结果表明振荡 周期与柔性圆柱涡激振动半振荡周期内的"锁定"区域大小密切相关,同时也观察到了间歇性涡激振动,模态跃迁等现象 以及涡激振动的产生、锁定和消亡过程。

 关键:
 词:
 涡激振动;振荡流;KC数;柔性圆柱;viv-FOAM-SJTU求解器

 中图分类号:
 U661.1
 文献标志码: A

Vortex-induced vibration of a flexible cylinder in an oscillatory flow

DENG Di, FU Bo-wen, WAN De-cheng

(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)

Abstract: Vortex-induced vibration (VIV) is the main source of riser's fatigue damage. At present, most numerical simulations and experiments of flexible cylinder are focusing on VIV in a steady flow, including uniform, linearly sheared and stepped currents. However, investigations on VIV of flexible cylinder in an oscillatory flow are relatively less. In actual deep sea condition, flexible risers are always located in complicated flow circumstance. Hence, it is necessary to study VIV of flexible cylinder in complicated flow condition. In this paper, numerical simulations on VIV of a flexible cylinder experiencing an oscil-

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159, 51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022).

Biography: DENG Di (1994–), Male, Ph. D. Candidate. **Corresponding author:** WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

^{*} 收稿日期: 2019-04-15(2019-06-10 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879159, 51490675, 11432009, 51579145),长江学者奖励计划(T2014099)和上海高校 特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

作者简介:邓迪(1994-),男,湖北武汉人,博士研究生.

通讯作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: April 15, 2019 (Revised June 10, 2019)

latory flow is carried out by the in-house viv-FOAM-SJTU solver, which is developed based on the open source code OpenFOAM and the strip theory CFD model. Effects of the oscillatory period to VIV response of a flexible cylinder in oscillatory flow are mainly studied. Results show that the oscillatory period is relevant to the width of 'lock-in' in half period. Vibration features such as 'intermittent VIV', mode transition and the VIV developing process of 'building-up', 'lock-in' and 'dying-out' are observed.

Key words: VIV; oscillatory flow; KC number; flexible cylinder; viv-FOAM-SJTUsolver

引言

随着海洋油气资源向深海开发推进,与海洋平台相连的立管也越来越长,以满足实际生产的需求。 在来流作用下,由于立管的交替泄涡现象产生的振荡的流体力,会引起结构的涡激振动。在过去的数 十年中,研究人员^[1,2]已经开展了大量的均匀流作用 下细长柔性立管的涡激振动研究,振荡流等复杂流 动下柔性立管的涡激振动研究相对较少。

Fu等^[3]进行了一系列振荡流下柔性圆柱的涡激 振动试验,主要分析了相同KC数,不同振荡流周期 下的柔性圆柱涡激振动。试验结果表明,振荡流下 的涡激振动过程可以分为三部分:产生、锁定和消 亡。随着振荡周期的减小,半周期范围内的锁定区 域比例增大;不同于均匀流中的立管涡激振动,振 荡流下的立管涡激振动会产生迟滞现象。

Zhao等^[4]进行了振荡流下刚性圆柱横流向涡激 振动的数值模拟研究,数值模拟中采用RANS方法 和*k-ω*湍流模式,KC数取10-20,折合速度取1-36。 数值模拟结果表明,在低折合速度Vr<8时,振动呈 现单一模态,当折合速度超过8后,多模态振动现 象明显。涡激振动的振动周期,受到一个振荡周期 内从圆柱泄放的旋涡数目和振荡流反向时圆柱表 面附着涡的返向的影响。

本文中,数值模拟采用自研发的viv-FOAM-SJTU求解器进行,该求解器是基于开源平台 OpenFOAM自带的pimpleDyMFOAM求解器,并结 合切片理论开发的。求解器采用基于切片理论的 CFD模型结合RANS方法来求解黏性不可压流场; 应用Bernoulli-Euler弯曲梁理论结合有限元法来获 取结构动力响应;流固耦合部分采用自编译的耦合 松弛迭代程序。为了验证viv-FOAM-SJTU求解器的 有效性, Duan等^[5]进行了单根立管的数值模拟研究, 并与Chaplin等^[1]的试验进行了详细地对比验证。本 文的数值模拟研究参照Fu等^[3]的试验进行,柔性圆 柱相关参数与试验相同,其中KC=178,振荡周期 分别为16.5 s, 10.2 s和8.45 s。本文第二部分是对所 分析问题的描述, 第三部分是对数值方法的介绍, 第四部分是数值模拟结果的分析, 第五部分总结全 文。

1 问题描述

本文主要研究振荡流振动周期对细长柔性立 管的涡激振动的影响。数值模拟参考Fu等^[3]的试验, 试验中柔性圆柱的主要参数如表1所示。该试验在 上海交通大学海洋水池进行,模型试验示意图如图 1所示。试验过程中,柔性圆柱水平放置且两端简 支在支座上,随支座周期性振荡,流场保持静止状 态,其中x代表顺流向,y代表横流向,z代表垂向, 支座的振荡运动可用方程(1)和方程(2)表示

$$X = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \tag{1}$$

$$U = \frac{2\pi A}{T} \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \tag{2}$$

式中: *X*为振荡位移, *U*为振荡流速度, *A*为振荡流振幅, *T*为振荡流振荡周期。

表1 柔性圆柱主要结构参数

Table 1. Main parameters of the flexible cylinder			
项目	符号	数值	单位
质量比	m [*]	1.53	
圆柱直径	D	0.024	m
圆柱长度	L	4	m
弯曲刚度	EI	10.5	Nm ²
预张力	Tt	500	Ν
一阶自然频率	fn^1	2.68	Hz
二阶自然频率	fn^2	5.46	Hz



Fig.1 Schematic diagram of the model experiments

2 数值方法

本文采用viv-FOAM-SJTU求解器进行数值计算。Fu等^[6]使用该求解器研究不同质量比对顶张立 管的涡激振动影响,他发现当质量比增加时,顺流 向和横流向振动的主振模态也会增加,这与Willden 等^[2]的数值模拟结果相似。

2.1 流体动力学控制方程

本文中,假定流场为不可压,运动黏度μ和密 度ρ均为常数,采用RANS方法结合SST K-ω湍流模 型进行流场的求解。基于RANS方法的连续性方程 和动量方程如公式(3)和公式(4)所示

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{u}_i \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j \right) = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(2\mu \overline{S}_{ij} - \rho \overline{u_j u_i} \right)$$
(4)

式中: $\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 平均应变率张量, $-\rho \overline{u_j u_i}$ 代表 雷诺应力 τ_{ij} , 雷诺应力计算公式为 $\tau_{ij} = -\rho \overline{u_j u_i'} = 2\mu_t \overline{S_{ij}} - \frac{2}{3}\rho k \delta_{ij}$, 式中 μ_t 为湍流黏性, $k = (1/2) \overline{u_i' u_i'}$ 为湍动能, 从振荡的速度场中计算得 到。

2.2 结构动力学控制方程

应用Bernoulli–Euler弯曲梁理论,参考Fu等^[7]的研究,并结合有限元方法进行结构场的数值模拟。 为了模拟支座的振荡运动,圆柱的顺流向位移可用 方程(5)表示

$$x_t = x_s + x \tag{5}$$

式中: x_t为顺流向总位移, x_s为支座位移, x为柔 性圆柱顺流向振动位移。

数值模拟中,柔性圆柱有限单元的力平衡方程 可用方程(6)表示

$$f_I + f_D + f_S = f_H \tag{6}$$

式中: f_I 为惯性力, f_D 为阻尼力, f_s 为弹性力, f_u 为水动力。

因此,柔性圆柱有限单元的顺流向结构动力学 方程为

$$m\ddot{x}_t + c\dot{x} + kx = f_H \tag{7}$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_H - m\ddot{x}_s \tag{8}$$

式中: *m*为梁单元质量, *c*为梁单元阻尼, *k*为梁单 元结构刚度。

在支座的垂直方向(y方向)无附加的惯性力 作用,因此系统的结构动力学控制方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_{\rm Hx} - M\ddot{x}_{\rm s} \tag{9}$$

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_{\rm Hv} \tag{10}$$

式中: x为顺流向振动位移, x_s 为支座位移, y为横 流向振动位移, M是结构的质量矩阵, C是结构的 阻尼矩阵, K是结构的刚度矩阵, F_{Hx} 为顺流向水 动力, F_{Hy} 为横流向水动力。方程的求解采用 Newmark- β 方法。

2.3 切片理论

对于细长柔性圆柱,三维流场的直接计算将会 消耗大量的计算资源。应用切片理论将三维流场简 化为多个均布于柔性圆柱展向的二维流场切片,在 各切片上进行水动力的求解。并且将所求得的水动 力转化为切片所控制的结构有限元区间上的均布 载荷,进行柔性圆柱结构场的振动求解。流场与结 构场的信息交换通过水动力的插值和结构位移引 发的网格更新实现,切片理论示意图如图2所示。



本文采用的计算模型中,20个切片均布于整根

柔性圆柱上,图3为计算模型示意图,图4为各切片 中圆柱周围的网格分布。本文采用的切片法特别适 用于超大计算域的CFD计算。切片法计算效率高, 经己有的研究,如Meneghini等^[8]和Yamamoto等^[9] 也证实了该方法的精度可靠。viv-FOAM-SJTU求解 器的可靠性已经被Duan等^[5]证实,并且对标准问题 进行了详细地验证。



图 3 计算模型示意图 Fig.3 Schematic diagram of the computational model



图 4 切片中圆柱周围的网格分布 Fig.4 Meshes around the cylinder in each strip

3 结果分析

3.1 T=16.5 s

图5为数值模拟中柔性圆柱中间节点的横流向 无量纲化的时历振动曲线,从图中可以看到明显的 间歇涡激振动现象,这与试验中观察到的现象相吻 合。在振动周期内,圆柱涡激振动的幅值逐渐增大, 并达到最大值0.45 D,随后逐渐减小,并重复这一 现象。为了更好地研究横向振动,取半周期内的涡 激振动进行研究,图6和图7分别为试验和数值模拟 所得半周期振动曲线。



图 5 中间节点横流向无量纲化的时历振动曲线 Fig.5 Non-dimensional crossflow time history vibration amplitude at the mid-span cylinder

从图6和图7可以看出半周期内的涡激振动现 象并不是稳定的。根据Fu等^[3]的模型试验,定义当 振动位移大于 $\frac{\sqrt{2}}{2}(y/D)_{max}$ 时,圆柱的振动处于"锁 定"区间,并且认为此时存在稳定的涡激振动现象。 因此,我们可以将振荡半周期划分为三部分,并用 来描述振荡流中柔性圆柱涡激振动的发展过程: "产生","锁定和"消亡"。对比图6和图7,可以看出 数值模拟趋势与试验所得的趋势相吻合。从图7可 计算得到,本算例(KC=178,*T*=16.5 s)中锁定区 间约占振荡半周期的15.5%,这与试验中计算得到 的占半周期17%的锁定区间基本吻合。

对计算所得的横流向无量纲化振动时历曲线 进行模态分解,得到柔性圆柱多模态振动时对应模 态的模态权重图,如图8所示,图9为圆柱横流向振 动的振型图。综合图8和图9可知,圆柱的主振模态 为一阶模态,且二阶及以上模态的影响极小。对比 图7和图8,发现当圆柱振动处于"产生"和"消亡"区 间时,其一阶模态振动的权重较小,而当圆柱振动 处于"锁定"区间时,其一阶模态振动的权重明显增 大。由此也可看出振荡流中的涡激振动是间歇性发 生的。图10为频域下的振动功率谱密度曲线图,可 知本工况(KC=178, *T*=16.5 s)中,圆柱的一阶主 振频率在2.2 Hz附近,振动频率接近圆柱的一阶自 然频率2.68 Hz,二阶及高阶扰动的影响可忽略。



Fig.6 Non-dimensional crossflow time history vibration amplitude at the mid-span cylinder in half an oscillatory period in the experiment.





3.2 T=10.2 s

图11为半振荡周期内的横流向涡激振动的无 量纲化时历曲线。从图11中可以观察到明显的涡激 振动发展过程,经过计算发现,此时的锁定区间约 占振荡半周期的32%,锁定区间内横向振动位移的 最大值约为0.75 D。对比图7,发现锁定区间明显增



Fig.11 (*T*=10.2 s) Non-dimensional crossflow time history vibration amplitude at the mid-span cylinder in half an oscillatory period

大,并且半周期内存在更多稳定的涡激振动现象。 对比图7和图11,可以发现半周期内涡激振动的"产 生"区间所占比例明显减小,而"消亡"区间所占比重 有所增大。

图12为柔性圆柱多模态振动时对应模态的模态权重图,图13为对应的横流向振型图。对比图11和图12,发现振动曲线与一阶模态权重曲线的变化趋势相同,此时(*T*=10.2 s)圆柱的主振模态仍为一阶,同时也存在着二阶扰动,但不足以改变主振模态, 三阶扰动则相对微小。图14为频域下的振动功率谱密度曲线,发现此时圆柱一阶模态的主振频率约为3Hz,处于圆柱一阶自然频率与二阶自然频率之间, 二阶模态的主振频率也在3Hz附近,由于对应的模态权重明显小于一阶,因此对振型的影响极小。

3.3 T=8.45 s

图15为半振荡周期内的横流向涡激振动的无 量纲化时历曲线。从图15中能够观察到涡激振动的









in half an oscillatory period

图16为横流向振动模态权重图,图17为对应的 振型图。从图16和图17可以看出,圆柱存在一阶与 二阶主振模态,"模态跃迁"现象十分明显。当圆柱 以二阶模态振动时,则圆柱中间点切好位于二阶振 型的节点,是幅值为0的不动点,所以会对圆柱中间 点的横向振动影响。对比图11与图17,发现*T*=8.45 s 时,锁定区间下的振动幅值的平均值明显减小。



图18为频域下的振动功率谱密度曲线,发现一阶模态主振频率为3 Hz,二阶模态主振频率为4.5 Hz。 这也证明了圆柱在周期为8.45 s的振荡流作用下,"模态跃迁"现象确实发生了。



图 18 (T=8.45 s) 横流同振动模态谱密度曲线 Fig.18 (T=8.45 s) Power spectral density (PSD) of each crossflow vibration mode

4 结论

本文根据Fu等^[3]的振荡流中柔性圆柱涡激振动 试验,并应用viv-FOAM-SJTU求解器进行数值模拟。 通过数值模拟及实验对比,观察到振荡流作用下的 柔性圆柱存在着明显的"间歇性振动"现象,同时也 模拟出了涡激振动的"产生"、"锁定"和"消亡"的发 展过程。当KC数相同时,半周期内的涡激振动锁定 区间的大小随着振荡流周期的减小而增大,这与实 验中所得的结果相吻合。随着振荡流周期的减小, 观察到了明显的模态跃迁现象。

致谢

本文工作还得到了上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)和工信部数值水池创新专项 VIV/VIM项目(2016-23/09)的资助。在此一并表示 衷心感谢。

参考文献:

- 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 Structures, 2005, 21(1): 3-24.
- [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, 2004, 23(1): 209-218.
- [3] FU S X, BAARHOLM R, LARSEN C M, et al. VIV of flexible cylinder in oscillatory flow[C]. International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE, Nantes, France, 2013.
- [4] ZHAO M, CHENG L, AN H W. Numerical investigation of vortex-induced vibration of a circular cylinder in transverse direction in oscillatory flow[J]. Ocean Engineering, 2012, 41: 39–52.
- [5] DUAN M Y, WAN D C, XUE H X. Prediction of response for Vortex-induced vibrations of a flexible riser pipe by using multi-strip method[C]. Proceeding 26th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE, Rhodes, Greece, 2016.
- [6] FU B W, DUAN M Y, WAN D C. Effect of mass ratio on the vortex-induced vibrations of a top tensioned riser[C]. Proceeding of 2nd Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Wuxi, China, 2016.
- [7] FU B W, DUAN M Y, WAN D C. Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder experiencing an oscillatory flow[C]. Proceedings of the Twenty-seven (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference San Francisco, California, USA, 2017.
- [8] MENEGHINI J R, SALTARA F, FREGONESI R A, et al. Numerical simulation of VIV on long flexible cylinders immersed in complex flow fields[J]. European Journal of Mechanics, 2004, 23: 51-63.
- [9] YAMAMOTO C T, MENEGHINI J R, SALTARA F, et al. Numerical simulations of vortex-induced vibration on flexible cylinders[J]. Journal of Fluids Structures, 2004, 19: 467-489.