

大柔性圆柱体两自由度涡激振动试验研究¹⁾

黄维平^{*,2)} 曹 静[†] 张恩勇[†] 唐世振^{*}

^{*}(中国海洋大学山东省海洋工程重点实验室, 青岛 266100)

[†](中海油研究总院深水工程重点实验室, 北京 100027)

摘要 基于模型试验研究了柔性圆柱体两自由度涡激振动问题, 研究了顺流向涡激振动和横向涡激振动的频率与振幅关系, 提出了考虑流固耦合的两自由度涡激振动非线性分析模型. 研究表明, 在不同的流速(雷诺数)范围, 柔性圆柱体顺流向涡激振动与横向涡激振动的频率比和幅值比是不同的; 在非锁定区, 圆柱体的顺流向振动频率与横向振动频率相同, 在锁定区, 圆柱体的顺流向振动频率是横向振动频率的两倍; 在非锁定区, 顺流向振幅与横向振幅比约为 1, 而在锁定区, 顺流向振幅与横向振幅比约为 1/3~2/3.

关键词 涡激振动, 流固耦合, 顺流向振动, 脉动拖曳力, 模型试验

中图分类号: TU311.3 文献标识码: A 文章编号: 0459-1879(2011)02-0436-05

引 言

传统的涡激振动理论是建立在小位移基础上的, 因此, 可以把尾流处的流体看作固体, 如尾流振子模型. 此外, 传统涡激振动主要关注的是横向的振动, 顺流向振动被认为可以忽略. 近年来, 随着海洋油气开发不断向深水发展, 深水立管的涡激振动受到越来越多的关注, 有关深水立管的涡激振动研究十分活跃^[1-6]. 随着水深的增加, 深水立管的柔性越来越大, 已远远超出传统涡激振动(vortex induced vibration, VIV)研究所涉及的范围. 因此, 深水立管的 VIV 问题向圆柱体的 VIV 理论提出了新的挑战. 前所未有的细长比导致了前所未有的大柔性, 这是传统圆柱体 VIV 研究不曾涉及的领域.

此外, 传统的 VIV 理论认为, 顺流向 VIV 频率高, 是横向 VIV 频率的两倍, 且振幅较小, 可以忽略. 因此, 传统的 VIV 仅仅指的是涡旋泄放引起的横向振动. 但深水立管的研究已经突破了传统 VIV 的研究局限, 越来越多的研究开始关注顺流向的 VIV^[7-11].

本文基于模型试验研究了大柔性圆柱体的两向自由度 VIV 现象, 研究了顺流向 VIV 和横向 VIV 的频率与振幅关系, 提出了考虑流固耦合的大柔性圆柱体 VIV 非线性分析模型.

1 试验概况

试验模型采用 20mm 直径的有机玻璃管制作, 为了避免传感器质量对动力特性的影响, 模型的振动采用应变片测量. 应变片布置在模型的跨中截面, 为了同步测量顺流向和横向振动, 在同一截面分别沿水平直径和竖向直径布置了 4 个应变片. 为了研究圆柱体固有频率对涡激振动的影响, 试验采用改变模型长度改变圆柱体的固有频率.

试验在平面风、浪、流水池中进行. 模型管的振动响应采用 DY-28A 动态应变仪测量, 而流速采用 OA 直读型多功能测速仪测量. 试验数据采用 DASP 多功能数据采集分析系统 INV306G 对模型的动水压力和振动响应进行数据的采集分析.

2 试验结果分析

图 1~ 图 8 分别给出了不同频率比 f_n/f_s (f_n 为模型固有频率; f_s 为 Strouhal 频率) 时的模型顺流向和横向涡激振动时程曲线及幅值谱曲线, 从图 3 和图 4 中可以看出, 当模型的固有频率与斯托哈尔频率之比 $f_n/f_s = 0.86$ 时, 顺流向与横向 VIV 响应谱中均有两个峰值频率, 且对应的频率值相同, 分别为 2.9297 Hz 和 5.8594 Hz. 它们分别代表横向和顺流向的响应频率, 顺流向 VIV 响应谱的主峰频率为

2010-08-02 收到第 1 稿, 2011-01-24 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目(51079136, 50639030).

2) E-mail: wphuang@ouc.edu.cn

5.8594 Hz, 表明顺流向 VIV 响应频率为 5.8594 Hz. 横流向 VIV 响应谱的主峰频率为 2.9297 Hz, 表明横流向 VIV 响应频率为 2.9297 Hz. 因此, 顺流向与横流向 VIV 响应频率之比 $f_{il}/f_{cf} = 2.0$ (f_{il} 代表顺流向响应频率, f_{cf} 代表横流向响应频率), 与传统的涡激振动理论一致. 此时, 模型的横流向 VIV 近似于简谐振动, 表明涡旋脱落接近规则的交替涡泄. 比较图 1 和图 2 可知, 当顺流向与横流向 VIV 响应频率之比

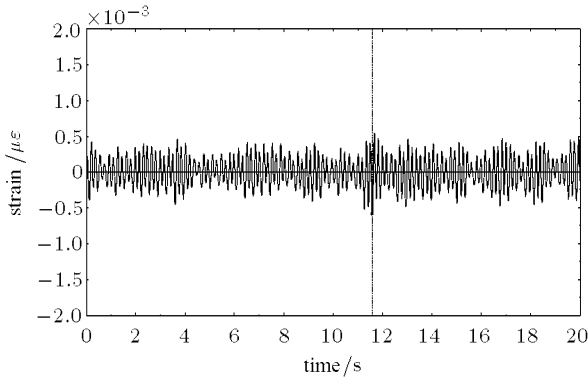


图 1 顺流向 VIV 时程曲线 ($f_n/f_s = 0.86$)
Fig.1 Time history of in-line VIV ($f_n/f_s = 0.86$)

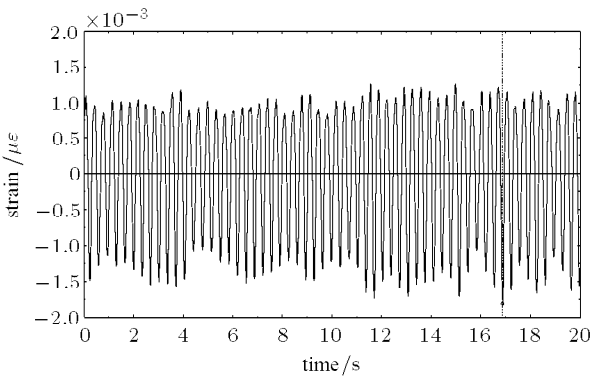


图 2 横流向 VIV 时程曲线 ($f_n/f_s = 0.86$)
Fig.2 Time history of cross-flow VIV ($f_n/f_s = 0.86$)

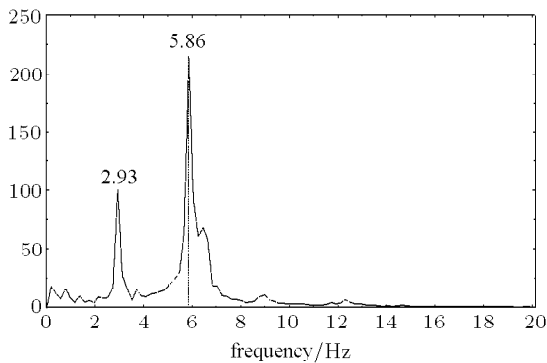


图 3 顺流向 VIV 功率谱曲线 ($f_n/f_s = 0.86$)
Fig.3 Spectrum of in-line VIV ($f_n/f_s = 0.86$)

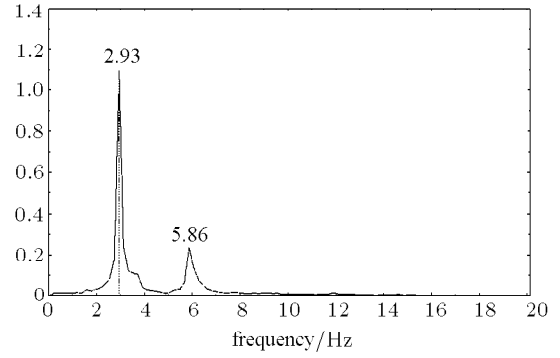


图 4 横流向 VIV 功率谱曲线 ($f_n/f_s = 0.86$)
Fig.4 Spectrum of cross-flow VIV ($f_n/f_s = 0.86$)

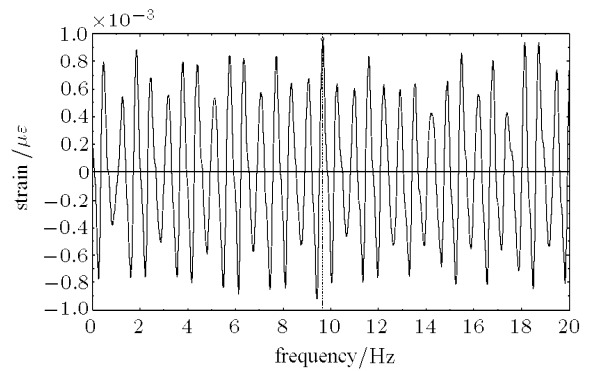


图 5 模型顺流向振动时程曲线 ($f_n/f_s = 0.75$)
Fig.5 Time history of in-line VIV ($f_n/f_s = 0.75$)

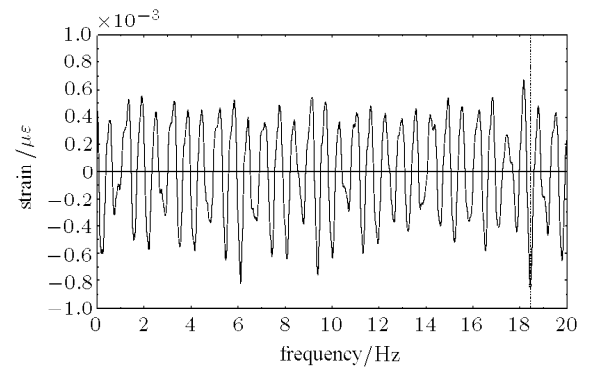


图 6 模型横流向振动时程曲线 ($f_n/f_s = 0.75$)
Fig.6 Time history of cross-flow VIV ($f_n/f_s = 0.75$)

为 2.0 时, 顺流向 VIV 幅值小于横流向 VIV 幅值, 其最大幅值比 (顺流向振幅与横向振幅之比) 为 0.32.

比较图 7 和图 8 可以看出, 当模型的固有频率与斯托哈尔频率之比 $f_n/f_s = 0.75$ 时, 顺流向与横流向 VIV 响应谱中只有一个相同的峰值频率 1.5625 Hz, 这表明, 此时的模型顺流向和横流向 VIV 频率相同.

比较图 5 和图 6 可知, 当顺流向与横向 VIV 频率相同时, 顺流向的 VIV 振幅与横向振幅基本相同, 对于 $f_n/f_s = 0.75$, 其最大幅值比为 1.15.

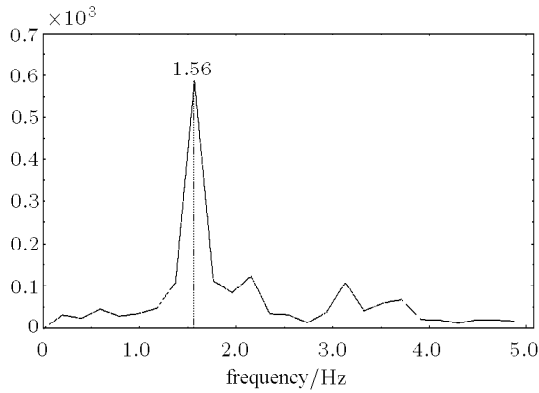


图 7 顺流向 VIV 功率谱曲线 ($f_n/f_s = 0.75$)
Fig.7 Spectrum of in-line VIV ($f_n/f_s = 0.75$)

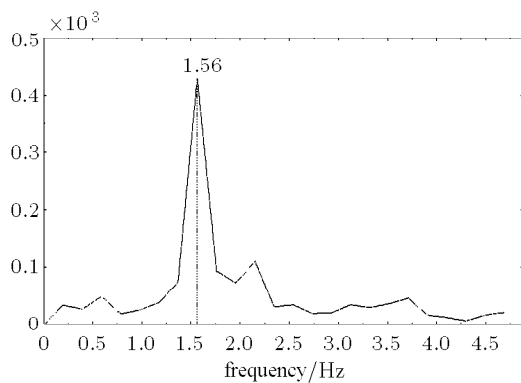


图 8 横向 VIV 功率谱曲线 ($f_n/f_s = 0.75$)
Fig.8 Spectrum of cross-flow VIV ($f_n/f_s = 0.75$)

试验结果表明, 模型的顺流向涡激振动频率与横向涡激振动频率的比值不仅与流速有关, 而且与模型的固有频率有关. 相同流速下, 3.0m 模型 ($f_n = 2.76$ Hz) 的横向 VIV 频率高于 4.0m 模型 ($f_n = 1.43$) 的横向 VIV 频率, 即涡泄频率随圆柱体固有频率的降低而减小. 这是显而易见的, 因为, 结构频率降低, 则流体与结构的相对速度降低, 而涡旋泄放取决于流体与结构的相对速度, 如果结构与流体同步运动, 则不会产生涡旋脱落. 因此, 斯托哈尔频率 $f_s = St \cdot U/D$ 表示刚性固定圆柱体的涡泄频率, 对于弹性圆柱体, 其涡泄频率可表示为

$$f'_s = \frac{St \cdot (U - \dot{x})}{D} \quad (1)$$

其中, U 为流速, \dot{x} 为圆柱体顺流向速度, D 为圆柱体直径.

从图 4 和图 8 可以看出, 当 $f_n/f_s = 0.86$ 时, VIV 的频率成分较少, 呈现窄带随机的特征, 其横向 VIV 近似一简谐振动. 而当 $f_n/f_s = 0.75$ 时, VIV 的频率成分增多, 响应的带宽增大, 随机特征更加明显.

试验结果表明, 由于结构振动产生的流固耦合作用使 VIV 成为一个变频和变幅的振动. 因此, 涡旋泄放引起的脉动拖曳力和升力可表示为

$$f_D(z, t) = \frac{1}{2} C_D \rho D (U - \dot{x})^2 \cos 4\pi f'_s t \quad (2)$$

或

$$f_D(z, t) = \frac{1}{2} C_D \rho D (U - \dot{x})^2 \cos 2\pi f'_s t \quad (3)$$

$$f_L(z, t) = \frac{1}{2} C_L \rho D (U - \dot{x})^2 \cos 2\pi f'_s t \quad (4)$$

其中, C_D 为拖曳力系数, ρ 为流体密度, C_L 为升力系数. 式 (2) 用于共振条件下的涡激振动分析, 式 (3) 用于非共振涡激振动分析.

3 涡激振动模型

试验表明, 对于大柔性圆柱体, 流固耦合作用较强, 因此, 圆柱体运动对流场的扰动较大. 由于圆柱体顺流向和横向振动的相互影响, 使得流固耦合作用更加复杂. 在圆柱体的一个运动周期内, 流体与圆柱体的相对速度大小和方向都在不断变化, 导致流动分离点变化, 从而造成涡旋脱落模式变化. 而涡旋脱落模式的变化将改变涡激升力和脉动拖曳力的动力特性, 从而改变圆柱体的运动特性.

基于上述分析, 本文提出了一个考虑两个自由度流固耦合的大柔性圆柱体复杂弯曲振动的 VIV 分析模型

$$(m + m_a)\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f_D(z, t) + \frac{1}{2} C_D \rho D (U - \dot{x}) |U - \dot{x}| \quad (5)$$

$$(m + m_a)\ddot{y} + (c + c_d)\dot{y} + ky = f_L(z, t) \quad (6)$$

式中, x 为圆柱体顺流向弯曲挠度, y 为圆柱体横向弯曲挠度, z 为圆柱体轴向坐标. m_a 为流体的附加质量, $m_a = C_a \pi \rho D^2/4$, C_a 为附加质量系数, c_d 为流体的附加阻尼, $c_d = C_D \rho D |\dot{y}|/2$, \dot{y} 为圆柱体横向振动速度.

图 9 给出了采用该模型计算得到的横向振动与约化速度的关系曲线, 计算时, 分别取 $C_L = 0.7$ 和 $C_D = 1.2$, 同时给出了文献 [12] 的试验结果. 可以看出, 本文提出的模型与试验结果在约化速度小于

12 的范围内吻合较好,而在约化速度大于 12 的范围内,本文模型偏于保守。

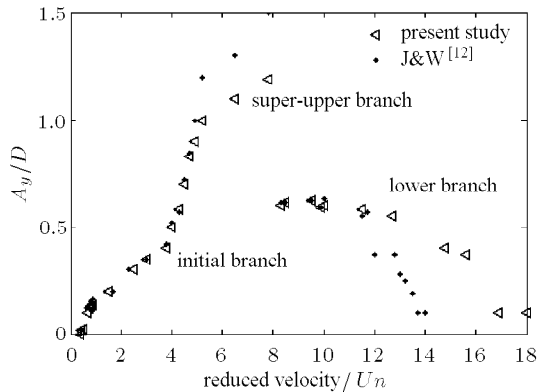


图 9 横向 VIV 与约化速度关系

Fig.9 Cross flow VIV vs. reduced velocity

4 结束语

随着海洋油气开发不断向深水发展,深水立管的涡激振动问题越来越引起学术界和工程界的关注。随着深水立管涡激振动研究工作的不断深入,现有的涡激振动分析方法逐渐显露出它的局限性,已不能适应大柔性深水立管涡激振动分析的需要。本文基于试验研究了大柔性圆柱体两自由度涡激振动问题,探讨了大柔性圆柱体固有频率对涡旋脱落和涡激振动的影响,分析了顺流向 VIV 与横向 VIV 的频率与幅值关系。

研究表明,大柔性圆柱体涡激振动在不同流速范围表现出不同的特性,由于流固耦合作用,大柔性圆柱体的固有频率对涡激振动有较大的影响,在确定的流速条件下,它决定了圆柱体的涡激振动模式(八字形或圆形)。研究认为,深水立管设计时,应考虑顺流向 VIV 对疲劳损伤的影响。

由于试验条件的限制,本文的研究会存在一些不完善的方面,研究结果也只是一些初步的认识,更深入地了解深水立管的涡激振动本质还有待进一步的研究。

参 考 文 献

1 Xu J, He M, Bose N. Vortex modes and vortex-induced vibration of a long, flexible riser. *Ocean Engineering*, 2009,

36(6-7): 456-467

- 2 Xue HG, Tang WY, Zhang SK. Simplified prediction model for vortex-induced vibrations of top tensioned risers. *China Ocean Engineering*, 2008, 22(2): 291-302
- 3 Josefsson Per M, Dalton C. Vortex-induced vibration of a variable tension riser. In: Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, ASME, 2007. 215-227
- 4 Srinil N, Wiercigroch M, O'Brien P. Nonlinear multi-mode interactions in subsea risers undergoing vortex-induced vibrations. In: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, ISOPF, 2009. 1329-1336
- 5 蔡杰, 尤云祥, 李巍等. 均匀来流中大长径比深海立管涡激振动特性. *水动力学研究与进展*, 2010, 25(1): 50-58 (Cai Jie, You Yunxiang, Li Wei, et al. The VIV characteristics of deep-sea risers with high aspect ratio in a uniform current profile. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2010, 25(1): 50-58 (in Chinese))
- 6 张建桥. 细长柔性立管涡激振动的实验研究. [硕士论文]. 大连: 大连理工大学, 2009 (Zhang Jianqiao. Experimental Investigation of Vortex-induced Vibration of Long-flexible Marine Risers. [Master Thesis]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009 (in Chinese))
- 7 Huse E, Nielsen FG, et al. Coupling between in-line and cross-flow VIV response. In: Proceedings of International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, ASME, 2002. 835-847
- 8 Hansen EA, Bryndum M, Mayer S. Interaction of in-line and cross-flow vortex induced vibrations in risers. In: Presented on 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, ASME, 2002. 551-557
- 9 Martin Søreide. Experimental investigation of in-line and cross-flow VIV. In: Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference, Honolulu, ISOPE, 2003. 585-592
- 10 Dahl JM, Hover FS, Triantafyllou MS. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations using a force assisted apparatus. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, 22(6-7): 807-818
- 11 Sanchis A, Sælevik G, Grue J. Two-degree-of-freedom vortex-induced vibrations of a spring-mounted rigid cylinder with low mass ratio. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(6): 907-919
- 12 Jautis N, Williamson CHK. The effect of two degrees of freedom on vortex-induced vibration at low mass and damping. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 509(6): 23-62

(责任编辑: 刘希国)

ON VORTEX INDUCED VIBRATION IN TWO-DEGREE-OF-FREEDOMS OF FLEXIBLE CYLINDERS¹⁾

Huang Weiping^{*,2)} Cao Jing[†] Zhang Enyong[†] Tang Shizhen^{*}

**(Shandong Key Lab. of Ocean Eng., Ocean Univ. of China, Qingdao 266100, China)*

†(Deepwater Eng. Key Lab., CNOOC Research Center, Beijing 100027, China)

Abstract In-line and cross-flow vortex-induced vibration (VIV) of flexible cylinders is studied based on the VIV experiment. The relationship of two-degree-of-freedom of vortex-induced vibration of flexible cylinders is also investigated. A nonlinear model, with fluid-structure interaction, of two-degree-of-freedom VIV of flexible cylinders is then proposed. It is shown that the ratio of the frequencies and amplitudes of in-line and cross flow VIV of the cylinders changes with current velocity/Reynolds number. The ratio of the VIV frequencies is 1.0 beyond the lock in district and 2.0 within the lock in district, respectively. And the ratio of the VIV amplitudes is 1.0 beyond the lock in district and 1/3 to 2/3 within the lock in district.

Key words vortex-induced vibration, fluid-structure interaction, vibration in line, oscillating drag force, model test

Received 2 August 2010, revised 24 January 2011.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (51079136, 50639030).

2) E-mail: wphuang@ouc.edu.cn