

倾角来流条件下柔性圆柱结构涡激振动*

徐万海^{1,2}, 许晶禹², 吴应湘², 于鑫平³,

(1 天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津, 300072, E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn

2 中国科学院力学研究所, 北京, 100190

3 天津大学建筑工程学院, 天津, 300072)

摘要: 涡激振动是引起海洋立管、海底管道等细长柔性圆柱结构疲劳损伤的重要因素。学术界对涡激振动的研究更多关注结构轴向与来流垂直的情况, 实际在海洋工程中, 圆柱结构轴向与来流并不完全垂直, 存在一定倾斜角度。本文采用实验的方法, 在拖曳水池里开展了相关实验研究, 通过拖车的拖动模拟来流, 设计了可以转动角度的试验装置, 最终实现倾角来流条件。观测了倾斜柔性圆柱涡激振动特性, 力图为海洋圆柱结构涡激振动的分析和设计提供必要的技术保障。

关键词: 倾角; 涡激振动; 柔性圆柱; 模型实验

1 引言

海洋立管、海底管道和浮式平台的系泊系统等细长柱状柔性结构在深海油气开采过程中扮演十分重要的角色。在一定流速的洋流作用下, 细长柔性圆柱会发生涡激振动, 加速结构的疲劳损伤, 涡激振动一直是人们在设计细长柔性的海洋结构物时关注的核心问题^[1-4]。

实际海洋工程中的圆柱轴向与来流存在一定倾角, 为了简化问题的研究, 学术界常采用不相关原则处理该问题, 把倾斜圆柱涡激振动问题等效为与圆柱轴向垂直的来流速度分量引起的涡激振动, 这即为倾斜圆柱涡激振动的不相关原则^[5]。有关倾角来流条件下圆柱结构涡激振动研究仍处于起步阶段。Bourguet 等^[5]采用直接数值方法, 模拟了长细比为 50, 倾角为 60° 的柔性圆柱涡激振动, 结果表明低轴向力条件时倾斜圆柱涡激振动特性与垂直圆柱差异较大, 不相关原则不合理, 高轴向力时不相关原则合理。Bourguet 和 Triantafyllou^[6]分析了 80° 大倾角柔性圆柱涡激振动, 发现大倾斜角度的倾斜圆柱存在规律的顺流向和横

* 作者简介: 徐万海(1981-), 男, 天津大学副教授, 硕士生导师, E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51209161、51379144、51479135); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51321065); 国家重点基础研究计划-973计划(2014CB046801).

流向涡激振动特性，倾斜圆柱的升力和阻力系数相比于垂直状况有所变大。

本文通过室内模型实验，开展了倾角来流条件下柔性圆柱涡激振动特性研究工作，观测 15° 倾角的柔性圆柱涡激振动，力图为理论分析和数值模拟提供标准的验证数据。

2 模型实验

实验在如图 1 所示的天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室的拖曳水池完成，通过拖车拖动模拟均匀外部来流。拖曳水池规格参数为 137m 长、7.0m 宽、3.3m 深。实验中拖车速度间隔 0.05m/s，速度范围为 0.05~1.0m/s，实验雷诺数范围近似为 800~16000。实验柔性圆柱模型内芯材质为铜管，应变片粘贴于铜管表面，均分管道为 8 等份，沿轴线方向七个截面的横流向和顺流向粘贴应变片，采集结构振动信息，采样时间为 50s，采样频率为 100Hz。铜管外表面包裹硅胶管，目的是提供光滑规则的外表面以及圆形截面，同时将应变片和测量导线埋于硅胶管内部，起到防水和绝缘作用。圆柱模型两端通过万向节与钢架相连，轴向力为 400N，钢架通过螺栓固定于拖车之上。共完成了两个工况的试验，一为圆柱轴向与来流方向垂直（即倾角为 0° ），另一为圆柱模型倾角为 15° ，详细的结构参数如表 1 所示。



图 1 实验拖曳水池

表1 实验圆柱模型参数

| | |
|----------------------------------|-----------------------|
| Total length, L | 5.60 m |
| Outer diameter, D_o | 0.016 m |
| Inner diameter, D_i | 0.004 m |
| Bending stiffness, EI | 17.45 Nm ² |
| Axial tension, T | 450N |
| Mass(air filled), m_s | 0.3821 kg/m |
| Mass ratio, $4m/(\pi\rho D_o^2)$ | 1.90 |
| Aspect ratio, L/D_o | 350 |

3 实验结果

本文运用模态法将应变信号进行处理，最终获得柔性圆柱的整体振动信息，有关模态法的基本理论及对实验数据的处理方法，可参考文献[7][8]。实验的目的是通过对比垂直与倾斜情况下的结构振动整体信息，最终获得在较小的倾角条件下，不相关原则是否成立。本文的实验数据对比仅以横流向涡激振动为例。

控制模态是涡激振动的一个重要信息，图 2 给出了控制模态随来流变化的图像，可以发现在流速小于 0.7m/s 时，倾角为 15° 的倾斜圆柱涡激振动的控制模态信息与垂直圆柱完全重合，但当振动处于不同模态转换的临界区时，如来流速度为 0.70m/s, 0.75m/s 和 0.95m/s 时，倾斜圆柱更容易被激发较高模态。

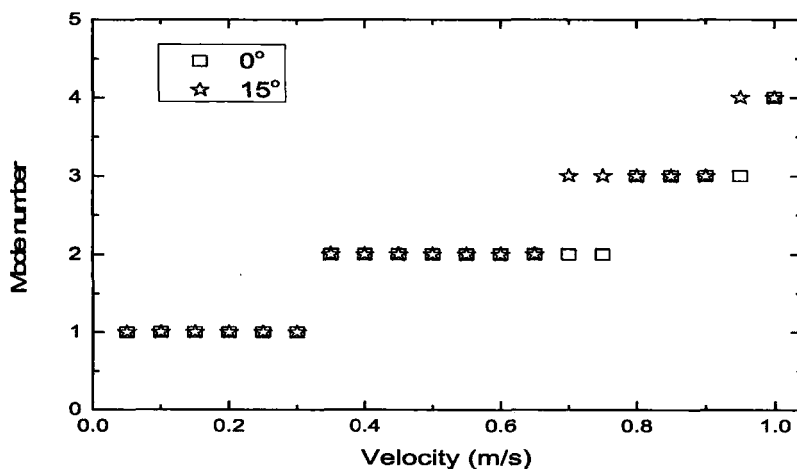


图 2 控制模态随来流速度变化图像

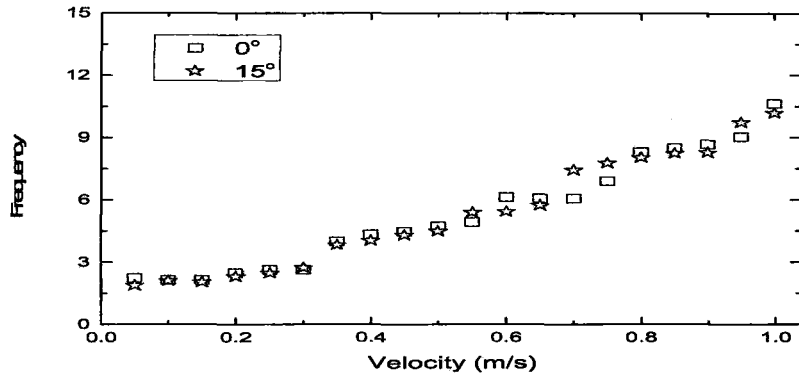


图3 振动频率随来流速度变化图像

涡激振动的控制频率是分析结构疲劳损伤的重要参数，图3绘出了振动频率随来流速度变化的图像，可以发现，无论是垂直圆柱还是倾斜圆柱，涡激振动的频率与来流速度近似成线性增长的关系，同时，倾斜圆柱的振动频率与垂直圆柱几乎重合，差异不大，仅在不同模态转化临界区域，如来流速度为0.70m/s、0.75m/s和0.95m/s时，差异才变得较为明显。

结构的响应幅值也是刻画涡激振动的一个重要特征指标。为了减少实验过程中的随机误差，我们讨论均方根的最大响应幅值随来流速度变化情况，同时位移除以结构的外直径，获得一个无量纲的均方根最大响应幅值，变化趋势如图4所示，可以发现在较小来流速度时，最大响应幅值较小，随着来流速度的增加，最大响应幅值有进一步增加的趋势，当来流速度稳定在较大的值时，最大响应幅值出现了略微下降趋势，整体而言，倾斜圆柱与垂直圆柱得到的最大位移响应幅值差异不大。

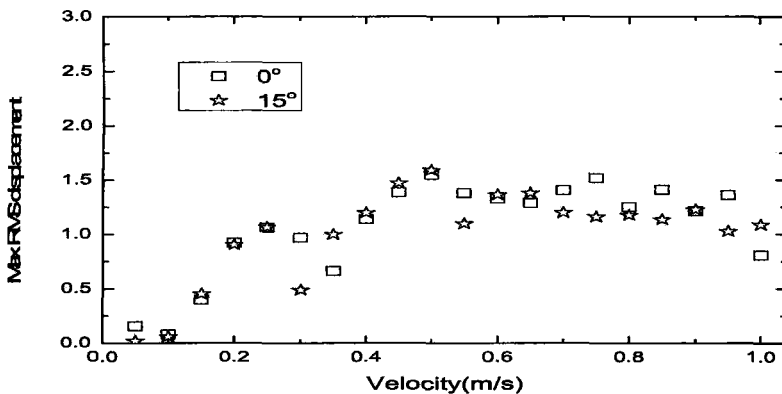


图4 响应幅值随来流速度变化图像

图 5 进一步给出了 7 个测点处应变的最大均方根值随来流速度变化的情况，可以发现应变与来流速度整体也近似呈线性关系，来流速度增加，应变随之线性增大，倾斜圆柱与垂直圆柱之间的结果差异也较小。

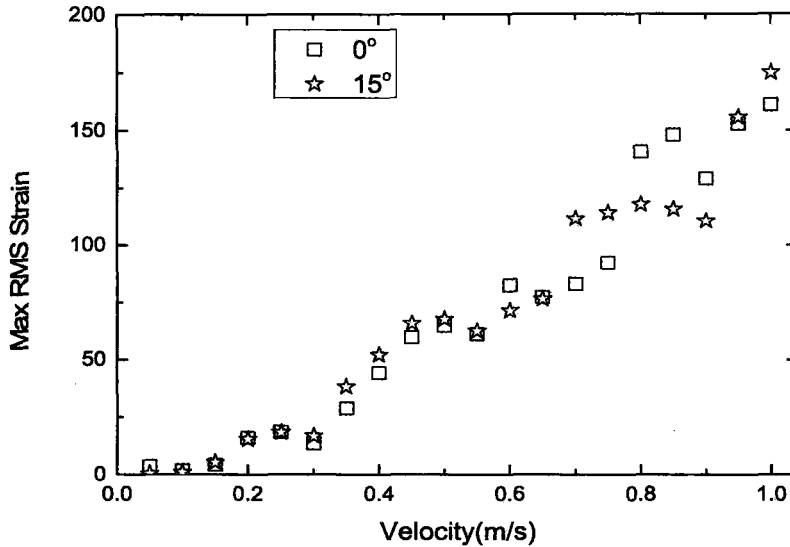


图 5 应变随来流速度变化图像

4 结论

本文实验研观测了 15° 倾角来流条件下，柔性圆柱结构的涡激振动特性，通过与垂直圆柱的情况对比，可以得到如下结论：① 涡激振动处于模态转换的临界区域时，倾斜圆柱更容易被激发高模态，其他情况倾斜圆柱与垂直圆柱的控制模态几乎一致；② 除了在模态转换临界区域外，倾斜圆柱与垂直圆柱的振动控制频率也十分一致；③ 最大响应幅值和最大应变结果，倾斜圆柱与垂直圆柱吻合的也较好。综上，可近似认为在较小的倾角条件下，倾斜柔性圆柱涡激振动的不相关原则成立。

参考文献

- [1] Blevins, R.D. Flow Induced Vibrations. Van Nostrand Reinhold, New York, 1990.
- [2] Sarpkaya, T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19: 389-447.
- [3] Gabbai, R.D., Benaroya, H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of

- circular cylinders, *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282:575-616.
- [4] Williamson, CHK and Govardhan, R. A brief review of recent results in vortex-induced vibrations. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96 (6-7):713-735.
- [5] Bourgueta,R. Karniadakis,G.E., Triantafyllou. M.S. On the validity of the independence principle applied to the vortex-induced vibrations of a flexible cylinder inclined at 60°. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 53:58-69.
- [6] Bourguet,R., Triantafyllou,M.S. Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder at large inclination angle. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015, 373: 20140108.
- [7] Chaplin, J. R., Bearman, P. W., Huera Huarte, F. J., Pattenden, R. J. Laboratory measurements of vortex-induced vibrations of a vertical tension riser in a stepped current. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21: 3-24.
- [8] Trim, A.D., Braaten, H., Lie, H., Tognarelli, M.A., Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 21: 335-361.

Vortex-induced vibrations of a flexible cylinder at inclination angle

XU Wan-hai^{1,2}, XU Jing-yu², WU Ying-xiang², YU Xin-ping³,

(1 State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin, 300072,

E-mail: xuwanhai@tju.edu.cn;

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing,100190;

3 School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300072)

Abstract: Vortex-induced vibrations (VIV) could cause fatigue damage of risers, pipelines and mooring lines. VIV have been extensively studied through the canonical problem of a circular cylinder free to oscillate within a flow perpendicular to the body axis. In practical applications, the cylinder structures are often inclined with respect to the direction of the oncoming flow. A model experiment was designed in order to investigate VIV of inclined flexible cylinder and provide necessary technical support for the analysis and design of the vortex induced vibration of marine circular structures.

Key words: Inclination angle; Vortex-induced Vibrations(VIV); Flexible cylinder; Model experiment;