

不同措施对倾斜柔性圆柱结构涡激振动抑制研究

徐万海¹, 覃雯琪¹, 栾英森¹, 许晶禹²

(1.天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津, 300072, Email: xuwanhai@tju.edu.cn; 2.中国科学院力学研究所 流固耦合重点实验室, 北京 100190)

摘要: 海洋工程中的立管和系泊缆线等柔性圆柱结构轴线与来流常存在一定倾斜角度。由于轴向二次流的存在, 倾斜圆柱涡激振动(VIV)相比于垂直圆柱更为复杂。如何对 VIV 有效抑制一直是工程界和学术界关注的焦点问题之一。本研究设计了室内拖曳水池模型实验, 拖曳速度间隔为 0.05m/s, 范围为 0.05~1.0m/s。观测了螺旋列板和控制杆对大长径比 ($L/D=350$, L 为圆柱长度, D 为圆柱外直径) 柔性圆柱横流向 VIV 的抑制效果, 对比了垂直状态($\alpha=0^\circ$, 其中 α 为倾角)和倾斜状态($\alpha=45^\circ$)附带抑制装置的圆柱模型振动特性。实验中采用方形截面、螺距/螺高组合为 $17.5D/0.25D$ 的螺旋列板。控制杆则选取了四根环向均布于圆柱外周的排布方式, 控制杆直径比为 $0.25D$, 距主体圆柱 $0.5D$ 。通过在圆柱模型不同空间位置粘贴应变片, 获取随时间变化的弯曲应变数据, 并运用模态法对位移进行重构。重点分析了横流向应变变化、位移和 VIV 抑制效率。研究发现: 螺旋列板对 45° 柔性倾斜圆柱涡激振动抑制效果较垂直状态下明显降低, 甚至会增大圆柱的振动响应。而四根的多控制杆排列方式在 45° 倾斜圆柱上仍能保持较好的抑制涡激振动。

关键词: 涡激振动; 倾斜圆柱; 振动抑制; 螺旋列板; 控制杆

1 引言

海洋工程中的柔性圆柱结构(如海洋立管、悬跨管道和系泊缆线等)在使用过程中会出现涡激振动现象(Vortex-induced vibration, VIV)。为了合理减轻、控制这种流-固耦合现象带来的工程结构破坏及经济损失, 业界在探讨涡激振动机理的同时, 亦长期致力于各种 VIV 控制方法的研究。其中, 被动控制方法(即不借助外界能量的控制方法)已凭借成本低、易实施的特点被实际工程广泛采用。

螺旋列板(helical strakes)与控制杆(control rods)是工程中常采用的两种 VIV 被动抑制装置。它们的工作原理都是通过改变结构几何特性影响主体圆柱周围流场, 干扰旋涡

的规则脱落,以减轻主体圆柱结构所受周期脱落的漩涡作用。Trim 等^[1]在长柔性圆柱上安装不同的螺旋列板,发现螺距和螺高为 $17.5D/0.25D$ (D 为圆柱直径) 的组合可高效地抑制柔性圆柱横流向与顺流向的涡激振动响应。高云等^[2]通过实验发现螺旋列板对柔性立管横流向振动位移的抑制效率与列板覆盖率成正比。Quen 等^[3]对不同几何形状的螺旋列板进行了实验研究,发现螺高与 VIV 抑制效果正相关。而对于控制杆,很多学者也开展了系列研究。Lee 等^[4]的实验研究发现在模型圆柱上游安装另一小直径圆柱体可有效抑制下游圆柱 VIV。吴浩等^[5]观测了四根控制杆环向均布形式对主体柔性立管 VIV 抑制效果,发现在 0° , 22.5° 及 45° 的流向角下,四根控制杆的形式均可很好地抑制主体圆柱 VIV。

已有柔性圆柱涡激振动抑制的研究成果,大多是针对结构轴向与来流方向垂直的特殊工况开展。而在实际工程中,海洋立管等细长柔性结构常常与来流方向存在一定倾角 α ,即结构轴线与来流方向不再垂直,轴向二次流的影响不可忽略。我们将来流方向所在平面与圆柱轴线交角称为圆柱倾斜角,徐万海等^[6]实验研究发现 45° 倾角的柔性圆柱 VIV 不满足“不相关原则 (Independence Principle, IP)”即假定来流速度为 U , 倾斜角为 α 的工况下的倾斜柱体 VIV 与来流速度为 $U\cos\alpha$ 的垂直柱体 VIV 等价^[7]。且至今为止,对倾斜柔性圆柱涡激振动抑制的研究仍十分有限。基于此方面研究空缺,本文开展了 45° 倾角条件下带螺旋列板和四根控制杆装置的圆柱 VIV 抑制实验,并对比两种抑制装置在垂直和倾斜状态下对柔性圆柱的 VIV 抑制效果。

2 实验设计

实验在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内开展。分别进行了垂直($\alpha=0^\circ$)和倾斜状态($\alpha=45^\circ$)下光滑圆柱及带抑制装置圆柱 VIV 实验。实验中所采用的圆柱模型长径比 $L/D=350$ 。圆柱外层为硅胶材质,内包铜制管芯,铜管外壁顺流向与横流向各粘有一组应变片,用来测量实验中圆柱结构的应变响应,共有 7 个测点 (G1-G7)。关于圆柱模型的更多物理特性可参见表 1。

表 1 实验光滑圆柱模型参数

物理参数	参数值
圆柱外径, D	0.016m
结构总长, L	5.60m
弯曲刚度, EI	17.45Nm^2
单位长度质量, m_s	0.3821kg/m
质量比, m^*	1.90

实验中采用方形截面的三头螺旋列板,螺距和螺高组合为 $17.5D$ 和 $0.25D$ 。4 个直径为

0.25D 的小圆柱环向均布于主体圆柱四周, 控制杆与主体圆柱间距比为 0.5D。控制杆与螺旋列板这两种布形均可有效抑制垂直柔性圆柱 VIV^[1,8-9]。圆柱模型一端通过铰接方式安装在支撑结构上, 另一端施以 450N 轴向力。支撑钢架结构图及详细工作原理可参见作者其他文章^[10]。拖车拖动整个支撑结构, 使圆柱模型在浸没在自由表面 1.0m 水深的均匀来流中。实验中来流速度范围为 0.05~0.1m/s, 间隔为 0.05m/s。

实验首先通过滤波得到排除噪声干扰的应变信息, 然后运用模态分解法重构圆柱模型的位移响应。在此方法中, 结构位移以多模态振型以不同权重叠加的形式给出:

$$y(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(t) \varphi_n(z), z \in [0, L] \quad (1)$$

其中, $y(z,t)$ 为圆柱结构横流向位移, $w_n(t)$ 为不同模态的权重系数, $\varphi_n(z)$ 为结构的振型函数, 由于圆柱模型两端为铰支边界, 所以结构振型函数可写为:

$$\varphi_n(z) = \sin \frac{n\pi z}{L}, z \in [0, L] \quad (2)$$

根据应变与结构曲率 $k(z,t)$ 的关系, 可得到:

$$k(z,t) = \frac{\varepsilon(z,t)}{R} = \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial z^2} = -\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 w_n(t) \sin\left(\frac{n\pi z}{L}\right) \quad (3)$$

通过求解式 (3), 可得到不同阶次模态权重函数 $w_n(t)$ 的值, 进而获得柔性圆柱的位移。

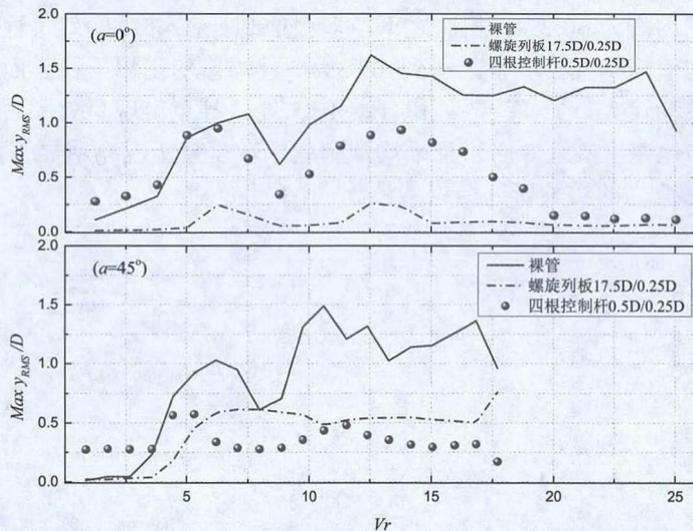


图 1 横流向无量纲位移最大均方根随约化速度变化关系

3 实验结果分析

图 1 绘制了带有螺旋列板和控制杆装置的抑制圆柱模型在垂直工况和 45° 倾斜状态下的横流向最大位移均方根随约化速度变化关系, 并与同工况光滑圆柱进行了对比。约化速

度可由以下公式计算：

$$V_r = \frac{U \cos \alpha}{f_1 D} \quad (4)$$

其中 f_1 为主体圆柱一阶固有频率。从图中可看出，垂直工况时，螺旋列板较四根控制杆表现出更好的抑制效果，螺旋列板较好地抑制了柔性圆柱横流向位移幅值，与 Trim 等^[1]和高云等^[8]的实验结果一致。而带控制杆抑制圆柱模型的位移幅值则与光滑圆柱相差较小，在约化速度 $V_r > 15$ 后，控制杆的 VIV 抑制能力逐步增强，在约化速度大于 20 时，控制杆的抑制效果基本与螺旋列板相一致。倾斜工况时，出现了相反的情况，当 $V_r > 5$ 时，带控制杆的抑制圆柱模型位移一直小于带螺旋列板抑制圆柱模型位移幅值。

图 2 绘制了两种抑制装置的横流向 VIV 抑制效率随约化速度变化关系，以此直观反映控制杆和螺旋列板的 VIV 抑制效果差异。此处的抑制效率由以下公式给出：

$$\eta = \frac{(y - y_s)}{y} \times 100\% \quad (5)$$

其中， y 为光滑圆柱横流向位移幅值， y_s 为对应同工况下带有抑制装置圆柱的位移幅值，效率表示两者间的差异的相对大小。可发现：本实验所选取的螺旋列板在垂直圆柱模型上的抑制效率基本保持在 90%，随流速变化较小。而控制杆在同一圆柱模型上的 VIV 抑制效率，在 $V_r = 7.5-16$ 的区间内只在 40% 上下波动，直到约化速度达到 20 后，抑制效率才稳定在 90% 附近，抑制效率平均值为 60.2%。相比之下，多根控制杆在 45° 倾斜柔性圆柱上的抑制效果表现更佳，平均值较垂直工况下上涨到 67.3%，且幅值变化较平稳。而螺旋列板在模态转换区抑制效率波动较大，如 $V_r = 7.5$ 和 $V_r = 17.5$ 处，甚至出现负效率，反向强化了圆柱模型的振动，如约化速度接近 8 时。且平均抑制效率较垂直工况有明显下降，仅为 45.3%，这一结果与徐万海等^[10]的实验研究结果一致。

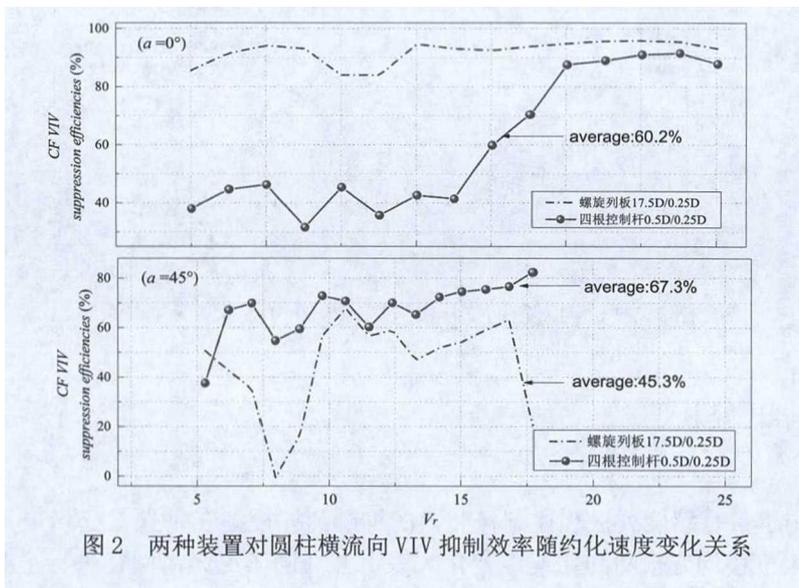


图 2 两种装置对圆柱横流向 VIV 抑制效率随约化速度变化关系

圆柱结构横流向应变是引起疲劳破坏的主要因素。图3与图4分别给出了垂直工况及倾斜角为 45° 工况下的测点应变时程曲线。从图3可以看到,流速为 0.6m/s 时,垂直圆柱模型7个测点处应变随时间变化关系都呈现出不规则的特点,圆柱模型两端4个测点应变幅值较大,中部幅值较小,总体最大应变幅值可达200左右。相比之下,带控制杆圆柱7个测点的应变响应都被较好地控制,总体最大应变幅值接近60,圆柱结构中点应变最大幅值仅为30左右。第三列给出了带螺旋列板的结构横流向应变信息,与位移变化相对应,螺旋列板在抑制垂直柱体横流向应变上的表现也十分出色,除G1测点应变幅值在8左右波动以外,其余测点的位移都较稳定地被抑制在4以下,较裸管降低了两个量级,较带控制杆圆柱降低一个量级。

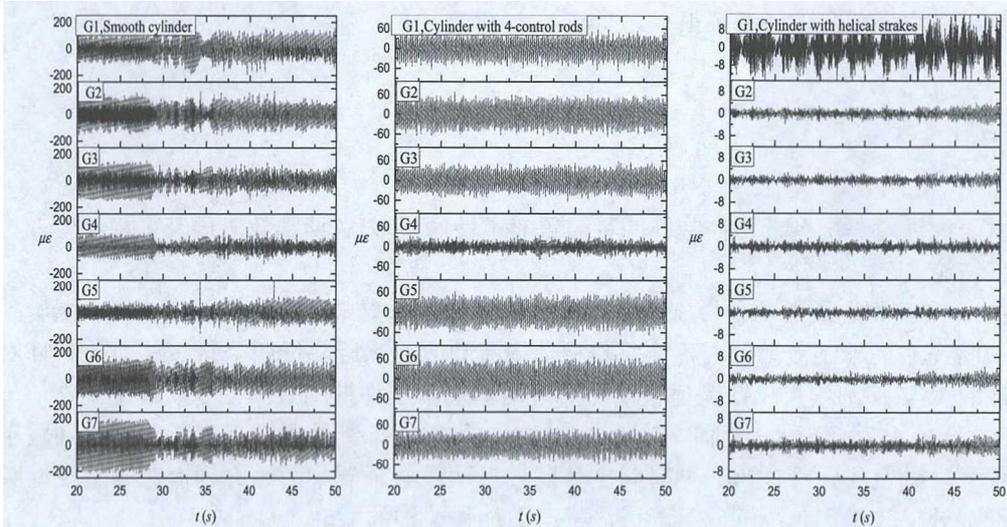


图3 垂直圆柱横流向测点应变时程曲线($U=0.6\text{m/s}$)

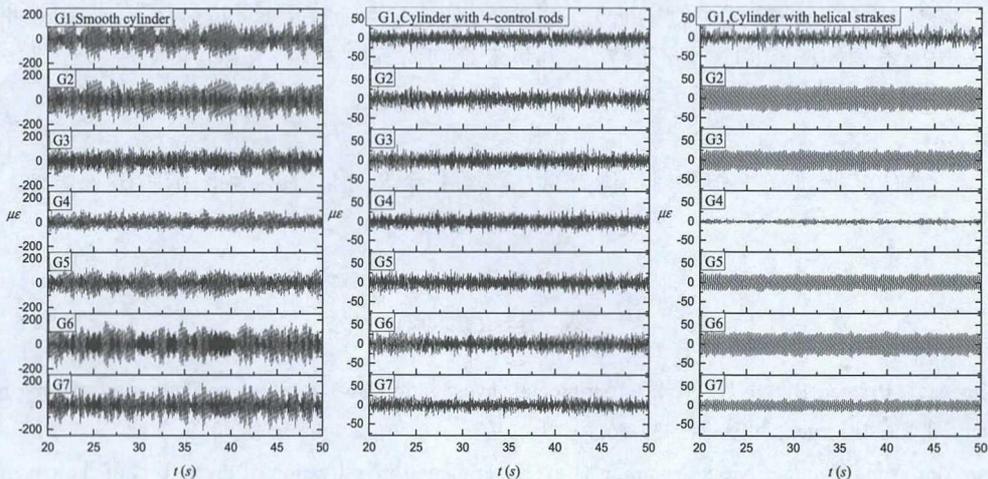


图4 45° 倾斜圆柱横流向测点应变时程曲线($U=0.85\text{m/s}$)

在图 4 给出的 45° 倾斜工况下不同圆柱模型应变时程曲线中, 两种抑制装置对柔性圆柱应变的影响发生了改变。倾斜光滑圆柱 7 个测点的最大应变幅值仍保持在 200 左右, G3、G4 及 G5 的响应幅值较圆柱两端另外 4 个测点幅值偏低。而在装有控制杆的倾斜圆柱上, 7 个测点的应变幅值都被抑制到 50 以下, 基本稳定在 25 左右, 较垂直工况下, 抑制效果更佳。且 7 个测点之间幅值差异很小, 基本相同, 说明此时应变随柱体轴线方向分布的形式接近一次曲线, 振动模态为一阶。以上现象表明控制杆在倾斜柔性圆柱上仍能保持很好的横流向应变抑制效果, 甚至优于垂直工况。而带有螺旋列板的主体圆柱中点 G4 的应变幅值最小, 量级在个位数。两端测点 G1、G7 的幅值次之, 而中点两侧对称测点 G2、G3 和 G5、G6 的应变幅值最大, 最值基本稳定在 25 左右, 个别峰值在 50 以下, 整体应变抑制效果比在垂直工况下降低了很多。

4 结论

本研究针对螺旋列板及控制杆两种装置对柔性圆柱 VIV 抑制效果展开了模型实验, 得到如下结论。

(1) 实验中选取的两种控制装置均可较好地抑制垂直柔性圆柱横流向 VIV。螺旋列板保持 90%左右的抑制效率, 并可将垂直柱体横流向应变响应降低两个量级; 而控制杆对垂直圆柱的 VIV 抑制效果仅在流速较高时才逐渐体现, 平均抑制效率在 60%左右。

(2) 在 45° 倾斜柔性圆柱模型上, 控制杆的 VIV 抑制效果较垂直工况下差别较小, 平均效率略微上涨到 67.3%, 同时将主体圆柱振动模态降低。而螺旋列板对倾斜柔性圆柱 VIV 抑制效果较垂直工况下明显降低, 甚至会加强结构的振动。

由于本研究仅针对螺距/螺高组合为 $17.5D/0.25D$ 的螺旋列板以及直径比为 $0.25D$, 间距 $0.5D$ 的四根控制杆装置进行了研究。若探究倾斜柔性圆柱上抑制装置最佳抑制效果, 需更深入开展系列实验观测及理论研究, 也是未来的研究侧重点。

致谢

本项目的实验研究工作得到了国家自然科学基金 (51479135 和 51679167) 资助, 在此表示感谢。

参考文献

- 1 Trim A D, Braaten H, Lie H, et al. Experimental investigation of vortex-induced vibration of long marine risers . J. Fluids Struct., 2005, 21: 335-361.
- 2 Gao Yun, Yang Jiadong, Xiong Youming et al. Experimental investigation of the effects of the coverage of helical strakes on the vortex-induced vibration response of a flexible riser . Appl Ocean Res., 2016, 59: 53-64.

- 3 Quen L K, Abu A, Kato N, et al. Investigation on the effectiveness of helical strakes in suppressing VIV of flexible riser . Appl Ocean Res., 2014, 44(3): 82-91.
- 4 Lee S J, Lee S I, Park C W. Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod . Fluid Dyn Res., 2004, 34 (4): 233-250.
- 5 Wu Hao, Sun Dapeng, Lu Lin et al. Influence of attack angle on VIV suppression by multiple control rods for long flexible riser model . Hawaii, International Offshore and Polar Engineering Conference, 2011.
- 6 徐万海, 马焯璇, 杜杰,等. 45° 大倾角倾斜柔性圆柱涡激振动不相关原则实验验证. 振动与冲击, 2017, 36(7): 177-183.
- 7 Va C C W. Experiments on vortex shedding from yawed circular cylinders . J. AIAA, 2012, 6(5): 931-933.
- 8 高云, 付世晓, 宋磊建. 柔性立管涡激振动抑制装置试验研究. 振动与冲击, 2014, 33(14): 77-83.
- 9 吴浩. 多根控制杆对细长柔性立管涡激振动抑制作用的实验及数值研究. 大连理工大学, 2013.
- 10 Xu Wanhai, Luan Yingsen, Han Qinghua et al. The effect of yaw angle on VIV suppression for an inclined flexible cylinder fitted with helical strakes. Appl Ocean Res., 2017, 67: 263-276.

Comparative study of different VIV suppression devices on inclined flexible cylinder

XU Wan-hai¹, QIN Wen-qi¹, LUAN Ying-sen¹, XU Jing-yu²

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

Email: xuwanhai@tju.edu.cn; 2.Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

Abstract: In this paper, laboratory experiments were carried out to investigate and compare the VIV suppressing effect of helical strakes and multiple control rods on 45° inclined cylinder. Square-sectioned helical strakes with 17.5*D* pitch and 0.25*D* height and circular array of four control rods with 0.25*D* diameter were applied on the model respectively. During the test, the model with *L/D* of 350 was towed in water basin to generate uniform current, the corresponding flow velocity is ranged from 0.05m/s-0.1m/s with an interval of 0.05m/s, and the VIV response in CF direction such as strain, displacement and suppressing efficiency were attained through collection strain gauge and model analysis method. At the same time, the data on bare cylinder and vertical cylinder was also presented for benchmarking. The results indicates that the suppress effect of helical strakes deteriorates when the model 45° inclined, and it can even enhance the vibration on yawed main cylinder. In contrast, the multiple control rods shows good VIV mitigating results on both vertical and inclined cylinders.

Key words: VIV; Inclined cylinder; Vibration suppression; Control rods; Helical strakes.