

DOI: 10.3969/j.issn1000-4874.2013.02.001

圆柱结构顺流向第一不稳定区内 涡激振动的研究*

徐万海¹, 许晶禹², 吴应湘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,
E-mail: wanhaixu@hotmail.com;

2. 中国科学院力学研究所 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190)

摘要: 在实际工程中圆柱结构顺流向的涡激振动比较常见, 其对结构的疲劳破坏影响也十分显著。该文分析了弹性支承圆柱在顺流向第一不稳定区内的涡激振动, 运用 Van der Pol 方程描述对称旋涡脱落的尾迹特性, 采用尾流振子模型计算结构响应, 并研究了质量-阻尼参数和质量率对顺流向涡激振动的影响机理。数值计算结果表明, 在第一不稳定区内, 弹性支承圆柱顺流向涡激振动存在临界质量率。

关键词: 顺流向涡激振动; 圆柱结构; 质量-阻尼参数; 第一不稳定区;

中图分类号: TV312

文献标识码: A

In-line vortex-induced vibration of a circular cylinder in the first instability range

XU Wan-hai¹, XU Jing-yu², WU Ying-xiang²

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

2. Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy
of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: The phenomena of In-line vortex-induced vibrations appear commonly in industry, and it has an obvious effect on structural fatigue and failure. In this paper, the in-line vortex-induced vibration (VIV) characteristics of a circular cylinder in the first instability range are investigated; the near wake dynamics related with the fluctuating nature of symmetric vortex shedding is described using the van der Pol equation. The influences of mass-damping parameter, mass ratio and structural damping on cylinder in-line VIV are discussed. It can be found that a critical mass ratio exists.

Keywords: In-Line Vortex-Induced Vibration; Circular Cylinder; Mass-damping parameter; First Instability Range

* **收稿日期:** 2012-08-01(2012-11-28 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金(51209161, 51239008)和高等学校博士学科点专项科研基金-新教师基金课题(20100032120047)

作者简介: 徐万海(1981 -), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 讲师, 博士。

Received: August 1, 2012 (**Revised** November 28, 2012)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51209161, 51239008) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (SRFDP, 20100032120047)

Biography: XU Wan-hai (1981-), Male, Lecturer, Ph. D.

1 引言

涡激振动现象在海洋、核反应堆与桥梁工程等领域经常发生。由于涡激振动现象的复杂性和重要性,学术界已对其进行了许多研究,取得了大量有价值的成果,但主要都集中在横流向涡激振动方面^[1-3]。传统观点大多认为:顺流向的涡激振动幅值比横流向的幅值小一个数量级,且对结构的疲劳破坏贡献较小,可以忽略不计。但近年来,日本发生的几起重水反应堆温度计折断事故表明,顺流向的涡激振动是导致结构破坏的主要原因^[4]。自此,顺流向涡激振动开始得到部分学者的关注。King等^[5]通过实验证明,较小约化速度 V_r 时($V_r = U/f_n D$,其中 U 为来流流速, f_n 为圆柱的固有频率, D 为圆柱直径),圆柱结构会发生顺流向涡激振动。并发现弹性支承圆柱的顺流向的涡激振动一般存在三个不稳定区:第一个不稳定区处于 $1.0 < V_r < 2.3$,此时旋涡脱落尾迹为两个对称涡;第二个不稳定区的范围为 $2.3 < V_r < 3.8$,此时尾迹为两个交替旋涡;第三个不稳定区则伴随横流向涡激振动共同出现。Naudascher^[6]系统地深入综述了圆柱结构及其他轴对称结构顺流向的涡激振动特性。Okajima等^[4]在水槽中实验观测了弹性支承圆柱的顺流向的涡激振动,结果表明:在约化质量-阻尼系数 C_n 较低时($C_n = 4\pi\mu\xi$,其中 ξ 为结构的阻尼比, $\mu = m/\rho D^2$ 为质量率, m 是单位长度结构质量, ρ 是流体密度),很容易发生顺流向的涡激振动,并且涡激振动特性会随着 C_n 数的不同产生明显的变化。

为了满足工程设计的需要,实际中更多采用尾流振子模型来预测圆柱顺流向涡激振动。Currie等^[7]将横流向涡激振动的尾流振子模型应用到顺流向涡激振动预测,认为在第一不稳定区旋涡脱落尾迹与结构振动速度有关,在第二不稳定区内则与结构位移有关,并且尾流振子的经验参数取为常数时,预测结果与实验结果之间较大的差异。徐万海等^[8,9]提出了适用于顺流向第一不稳定区和第二不稳定区的加速度耦合尾流振子模型,给出了模型参数的确定方法。经研究表明,该模型不仅可以定性,而且可以定量的描述圆柱结构顺流向涡激振动特性,并分析了第二不稳定区内质量-阻尼参数、质量率和结构阻尼对顺流向涡激振动的影响机理,发现在第二不稳定区内存在临界质量率^[10]。

对于海洋工程领域的立管和核反应堆的温度测量探针而言,小质量率是结构的一个重要特性,而该特性可致使在第一不稳定区内的顺流向涡激振动很容易发生,因此分析圆柱结构的质量-阻尼参

数和质量率对涡激振动的影响机理具有重要意义。现阶段这方面研究还存在诸多不足,特别是第一不稳定区临界质量率是否存在,还未有定论。因此,本文主要研究质量-阻尼参数和质量率对第一不稳定区内的圆柱结构顺流向涡激振动影响机理,并对临界质量率是否存在展开探讨。

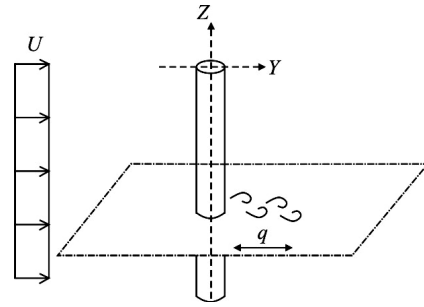


图1 圆柱结构顺流向涡激振动的流-固耦合模型示意图
Fig.1. Model of coupled cylinder structure and wake oscillator for in-line vortex-induced vibration

2 流-固耦合模型

如图1所示的弹性支承圆柱,结构方程可以表示为

$$m_s \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + c_s \frac{\partial Y}{\partial T} + kY = F_d \quad (1)$$

式中: m_s 代表结构质量; c_s 为结构阻尼; k 是弹性力回复系数; Y 为结构位移坐标; F_d 为流体载荷; T 代表时间。流体载荷采用 Morison 方程计算

$$F_d = -m_A \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + \frac{1}{2} C_D \rho D \left(U - \frac{\partial Y}{\partial T} \right) \left| U - \frac{\partial Y}{\partial T} \right| \quad (2)$$

式中: m_A 为附加质量; C_D 为水动力阻尼系数。由于 $U \gg \frac{\partial Y}{\partial T}$,式(2)可化简为:

$$F_d = -m_A \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + \frac{1}{2} C_D \rho D \left[U^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right)^2 - 2U \frac{\partial Y}{\partial T} \right] \quad (3)$$

省略高阶项 $\left(\frac{\partial Y}{\partial T} \right)^2$,将式(3)代入式(1)整理可得

$$m \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + (c_s + C_D U \rho D) \frac{\partial Y}{\partial T} + kY = \frac{1}{2} \rho D C_D U^2 \quad (4)$$

式中: $m = m_A + m_s$; C_D 为水动力阻尼系数, 是不随时间变化的平均阻力系数和随时间变化的脉动阻力系数的叠加^[7], 即为

$$C_D = \overline{C_D} + C_D' \quad (5)$$

式(4)最后一项会同时出现平均阻力引起的静力载荷和脉动阻力引起的脉动载荷, 但由于平均静力载荷仅会引起结构的静位移, 不会对结构的整体动力响应特性产生影响, 所以可以仅考虑脉动载荷^[8]。将式(5)代入式(4), 可得

$$m \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + (c_s + \overline{C_D} U \rho D) \frac{\partial Y}{\partial T} + kY = \frac{1}{2} \rho D C_D' U^2 \quad (6)$$

将其化简为

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} + \left(2\xi + \frac{\gamma}{\mu} \Omega_f \right) \frac{\partial Y}{\partial T} + \Omega_s^2 Y = \frac{1}{2} \frac{\rho D C_D' U^2}{m} \quad (7)$$

式中: ξ 为结构阻尼因子; γ 为迟滞因子, $\gamma = \overline{C_D} / 2\pi St$; μ 为质量率, $\mu = m / \rho D^2$; Ω_f 为顺流向的旋涡脱落的频率, $\Omega_f = 2\pi St U / D$; Ω_s 为结构固有频率。

圆柱结构后缘的旋涡脱落尾迹采用经典的 Van der Pol 方程描述。由于第一不稳定区内旋涡脱落是对称的, 其脱落频率是 Strouhal 频率的 3 倍, 所以

$$\frac{\partial^2 q}{\partial T^2} + \varepsilon \Omega_f (q^2 - 1) \frac{\partial q}{\partial T} + (3\Omega_f)^2 q = F_s \quad (8)$$

式中: 无量纲尾流振子变量 q 可以表示为 $q = 2C_D / C_{D0}$, C_{D0} 为固定圆柱脉动阻力系数常量; F_s 是结构对尾迹的作用力项, 假定其与结构的加速度成正比, 即可表达为

$$F_s = \frac{A}{D} \frac{\partial^2 Y}{\partial T^2} \quad (9)$$

式中 A 和 ε 是尾流振子模型的经验参数。

对方程(7)和方程(8)无量纲化, 并引入无量纲的时间变量 $t = T \Omega_f$ 和空间变量 $y = Y / D$, 化简整理可得:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \left(2\xi \delta + \frac{\gamma}{\mu} \right) \frac{\partial y}{\partial t} + \delta^2 y = s \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 q}{\partial t^2} + \varepsilon (q^2 - 1) \frac{\partial q}{\partial t} + 9q = f \quad (11)$$

$$\text{其中: } \delta = \Omega_s / \Omega_f; s = \frac{C_{D0}}{16\pi^2 St^2 \mu} q; f = A \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}。$$

3 模型参数选取

顺流向第一不稳定区发生涡激振动的范围是 $1.0 \leq V_r \leq 2.3$ 。模型参数选取为: 斯特劳哈尔数 $St = 0.17$ ^[11], 平均水动力阻尼系数 $\overline{C_D} = 1.2$, 固定圆柱脉动阻力系数常量 $C_{D0} = 0.2$ ^[5], 尾流振子经验参数 A 和 ε 可根据顺流向涡激振动实验确定。即根据第一不稳定区顺流向涡激振动“频锁”的范围, 可确定经验参数 A 为

$$A = 20 \quad (12)$$

弹性支承圆柱结构顺流向涡激振动的最大响应幅值一般与结构的质量率、阻尼比和质量-阻尼参数等有关。Okajima 等^[12]的实验研究表明: 顺流向涡激振动最大响应幅值与质量-阻尼参数 C_n 关系最大。徐万海等^[8]运用相关的实验数据, 拟合了最大响应幅值与质量-阻尼参数 C_n 的函数关系式, 如图 2 所示。

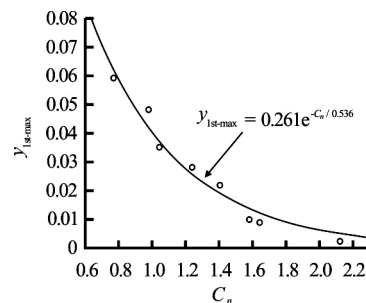


图 2 无量纲结构响应幅值与质量-阻尼参数 C_n 的函数关系

Fig.2. Normalized in-line maximum amplitude versus the mass-damping parameter C_n

假设理论分析的最大响应幅值与实验结果相吻合, 则有

$$\frac{C_{D0}}{24\pi^2 St^2 \left(3 \frac{C_n}{2\pi} + \gamma \right)} \sqrt{1 + \frac{A}{\varepsilon} \frac{C_{D0}}{16\pi^2 St^2 \left(3 \frac{C_n}{2\pi} + \gamma \right)}} = 0.216e^{-C_n/0.536} \quad (13)$$

联立式(12)和式(13)即可获得尾流振子经验参数 A 和 ε , 且可发现 A 和 ε 不再是一常量, 而是与

结构固有特性有关的变量。有关模型参数确定的细节,可参考文献[8]。

4 结果分析

本文采用四阶Runge-Kutta法数值求解无量纲耦合方程(10)和方程(11),分析质量-阻尼参数和质量率对顺流向涡激振动的影响机理。

质量-阻尼参数 C_n 是研究顺流向第一不稳定区涡激振动的重要参数之一。讨论 C_n 对结构顺流向涡激振动响应幅值的影响,需先保持质量率 $\mu = 10.5^{[12]}$ 不变,变化质量-阻尼参数 $C_n = 0.2, 0.4, 0.6$ 。图3给出不同质量-阻尼参数 C_n 时,圆柱结构的响应幅值均方根变化情况。由图中可以发现,随着质量-阻尼参数的增大,圆柱结构顺流向涡激振动最大响应幅值逐渐减小,但是不同的质量-阻尼参数条件下,获取结构最大响应幅值对应的约化速度近似相同,即均在 $V_r = 2.0$ 附近。

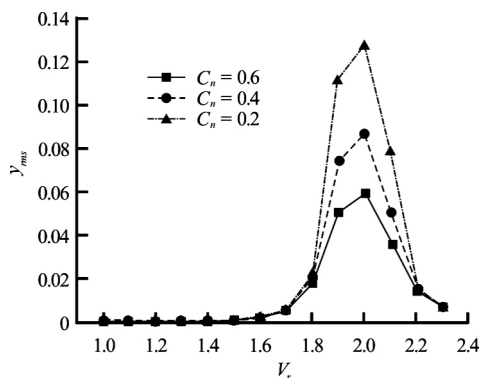


图3 不同质量-阻尼参数 C_n 时圆柱结构顺流向涡激振动的响应幅值
Fig.3. IL VIV response amplitude of a cylinder with different values of C_n

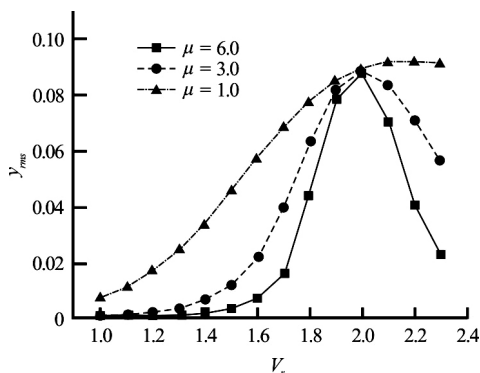


图4 不同质量率 μ 时圆柱结构顺流向涡激振动的响应幅值
Fig.4. IL VIV response amplitude of a cylinder with different values of μ

质量率参数对结构横流向涡激振动特性的影响较为显著。Govardhan 等^[13]对低质量率的弹性支承圆柱横流向涡激振动进行了实验和理论研究,发现横流向涡激振动存在临界质量率,当结构实际质量率小于临界质量率时,无论约化速度 V_r 如何变化,涡激振动的“频锁”现象会一直持续,响应幅值维持一个较高水平。本文分析了第一不稳定区内顺流向涡激振动质量率对响应幅值的影响,即保持质量-阻尼参数 $C_n = 0.4$ 不变,质量率 μ 分别取 1.0、3.0 和 6.0。不同质量率时,圆柱结构顺流向涡激振动的响应幅值如图 4 所示。从图中可以看出,当质量率较大时,顺流向涡激振动第一不稳定区的界限明显,质量率较小时,结构响应幅值持续增大,并延续到顺流向涡激振动的第二不稳定区,由此可以判定在第一不稳定区顺流向涡激振动中存在临界质量率。

5 结论

本文分析了在第一不稳定区内,质量-阻尼参数和质量率这两个参数对弹性支承圆柱的顺流向涡激振动的影响机理,得到如下结论:

(1) 质量-阻尼参数的大小直接决定圆柱结构响应幅值的大小。具体表现为:质量-阻尼参数的增大会导致结构响应幅值减小,反之质量-阻尼参数的减小会导致结构响应幅值增大,两者呈反比关系。

(2) 通过数值计算结果表明,在第一不稳定区内,圆柱顺流向涡激振动存在临界质量率。

致谢

本文工作得到了上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放课题(No.1104)的大力资助,特此致谢。

参 考 文 献:

- [1] WILLIAMSON, C H K, GOVARDHAN R. A brief review of recent results in vortex induced vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96(6-7): 713-735.
- [2] SARPKEYA T. A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations[J]. Journal of Fluids and Structures, 2004, 19(4): 389-447.

- [3] GABBAI R D, BENAROYA H. An overview of modeling and experiments of vortex-induced vibration of circular cylinders[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 282(3): 575-616.
- [4] OKAJIMA A, NAKAMURA A, KOSUGI T, et al. Flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2004, 23(1): 115-125.
- [5] KING R, PROSSER M, JOHNS D J. On vortex excitation of model piles in water[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1973, 29(2): 169-188.
- [6] NAUDASCHER E. Flow-induced streamwise vibrations of structures[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1987, 1(3): 265-298.
- [7] CURRIE I G, TURNBULL D H. Streamwise oscillations of cylinders near the critical Reynolds number[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1987, 1(2): 185-196.
- [8] XU Wan-hai, YU Jian-xing, DU Jie. The prediction of streamwise flow-induced vibration of a circular cylinder in the first instability range[J]. *China Ocean Engineering*, 2012, 26(4): 555-564.
- [9] XU Wan-hai, DU jie, YU Jian-xing, et al. Wake oscillator model proposed for the stream-wise vortex-induced vibration of a circular cylinder in the second excitation region[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(12): 124704.
- [10] XU Wan-hai, WU Ying-xiang, HU Song-tao, et al. The in-line dynamic characteristic of a circular cylinder under vortex-induced vibration[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(9): 1035-1040.
- [11] FINN L, LAMBRAKOS K, MAHER J. Time domain prediction of riser VIV[C]. *Proceedings of the Fourth International Conference on Advances in Riser Technologies*, Aberdeen, Scotland, UK, 1999.
- [12] OKAJIMA A, KOSUGI T, NAKAMURA A. Experiments on flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder in a water tunnel[J]. *JSME International Journal B*, 2001, 44(4): 695-704.
- [13] GOVARDHAN R, WILLIAMSON C H K. Critical mass in vortex-induced vibration of a cylinder[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2004, 23(1): 17-27.