

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4874.2010-01.017

## 单向流作用下近壁面圆柱的流向振动\*

杨兵, 高福平

(中国科学院力学研究所 水动力学与海洋工程重点实验室, 北京 100190,  
Email: byang@imech.ac.cn)

**摘要:** 在单向流水槽中对近壁面圆柱体的流向振动进行了实验模拟。分析了圆柱流向振动位移时程曲线, 探讨了圆柱振动频率随水流速度的变化特征。研究了圆柱振动幅值和频率的变化特性, 结合圆柱尾迹涡的变化规律, 分析了流向振动的起因。实验结果表明: 随着流速的增加, 圆柱流向振动经历了发生、发展和消失的变化过程, 振动频率呈现出缓慢增长的趋势; 在流向振动触发初期和后期衰退时, 流向振动频率存在多值现象, 频谱中呈现多个谱峰; 圆柱流向振动所对应的约减速度范围明显小于横向涡激振动所对应的范围。

**关键词:** 流向振动; 近壁面圆柱; 单向流; 约减速度

**中图分类号:** TV132, TV139.2

**文献标识符:** A

## Streamwise vibration of a near-wall cylinder exposed to unidirectional flow

YANG Bing, GAO Fu-ping

(Key Laboratory for Hydrodynamics and Ocean Engineering, Institute of Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The streamwise vibration of a cylinder near a plane boundary under the action of unidirectional flow was modelled experimentally in a flume. The time history curve of the cylinder vibration displacement was measured, and the variation of vibration frequency with flow velocity was examined. The characteristic of vibration amplitude and frequency of the cylinder was analyzed. The causes for the occurrence of streamwise vibration were discussed, in correlation with the characteristic of wake vortex. The experimental results indicate that the streamwise vibration experiences an occurrence-evolution-disappearance process with the increasing flow velocity. At the initiation and decay stages of the streamwise vibration, there exist multiple values of vibration frequency, i.e. multiple spectrum peaks appear at the frequency

\* 收稿日期: 2009-08-18(2009-09-10 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(10902112, 10872198)及中国科学院“十一五”知识创新工程重要方向项目(KJ CX2-YW-L02)资助

作者简介: 杨兵(1976—), 男, 四川遂宁人, 助理研究员, 博士.

spectrum. The range of reduced velocity ( $V/r$ ) corresponding to streamwise vibration is much less than that for transverse vibration.

**Key words:** Streamwise vibration; Near-wall cylinder; Unidirectional flow; Reduced velocity

## 1 引言

结构涡激振动是流体与结构之间的强相互作用,它广泛存在于各行业之中,例如海流作用下海底管线和水中悬浮隧道的振动,热能行业中热交换器在热流体作用下的振动,电力工业中输电电缆在风载下的振动,等等。结构涡激振动是一个复杂的流固耦合问题,涉及流体力学、结构动力学等力学分支学科的交叉。

柱体结构涡激振动一直受到结构设计师和科研工作者的广泛关注。Feng (1968)<sup>[1]</sup>实验模拟了弹性支撑刚性圆柱在空气中的横向涡激振动,分析了大质量比条件下圆柱横向振动幅值和振动频率的变化规律。Anand (1985)<sup>[2]</sup>在水槽中进行实验模拟,结果表明圆柱横向涡激振动频率大于其在水中的固有频率,且随着约减速度的增大呈单调缓慢增长的趋势。Williamson et al.<sup>[3-7]</sup>对无壁面条件下的圆柱涡激振动进行了一系列的实验研究,包括圆柱涡激振动振幅的描述、振动频率特性、尾迹涡演化等内容。我国学者孟昭英等人(1994)<sup>[8]</sup>开展了水下管道涡激振动的实验研究,探讨了管径、管跨和边界条件等因素对管道涡激振动响应的影响。余建星等人(2001)<sup>[9]</sup>实验模拟了海底管线管跨段的涡激振动响应。曹丰产<sup>[10]</sup>对圆柱涡激振动进行了数值模拟,探讨了圆柱振动位移和尾流的变化特性。近年来,娄敏等人(2007)<sup>[11]</sup>,Sha & Wang(2008)<sup>[12]</sup>,Yang et al.(2009)<sup>[13]</sup>分别对涡激振动抑制、鳍形管道流激振动、近壁面管道涡激振动进行了研究。上述研究主要集中在圆柱横向涡激振动,而对流向振动关注较少。而已有关于流向振动的研究,如 King (1973)<sup>[14]</sup>,King et al.(1974)<sup>[15]</sup>,Griffin & Ramberg (1976)<sup>[16]</sup>,Okajima et al.(2004)<sup>[17]</sup>的工作,主要探讨了圆柱振幅特性和圆柱尾迹涡模式,而对圆柱流向振动频率、涡脱落频率特性以及边壁的影响涉及不多,目前关于流向振动的机制尚需深入分析。

本文将对单向流作用下圆柱的流向振动进行实验研究,分析近壁面圆柱流向振动的幅值和频率特性,探讨流向振动的起因。

## 2 实验装置及实验条件

用于研究圆柱流向振动的实验模拟装置<sup>[18,19]</sup>

如图1所示。水槽长19 m,宽0.5 m,高0.6 m,在0.4 m水深的条件下能产生0.6 m/s的最大流速,水槽底为光滑的花岗石铺砌而成。实验圆柱由摆杆和弹簧支撑,圆柱与摆杆一起绕铰链摆动以实现圆柱的水平运动。实验所用圆柱直径 $D$ 分别为0.032 m、0.040 m和0.050 m,圆柱表面光滑,即表面相对粗糙度 $\kappa \approx 0$ 。圆柱长 $L=0.48$  m,实验水深为0.4 m。实验所用激光位移传感器分辨率为0.025 mm,激光位移传感器置于水面以上一定高度,通过测量摆杆在水面以上某点的位移,然后依据测量点与圆柱中心间的几何关系,可获得圆柱的振动位移。采用旋浆式流速仪测量水流速度,流速仪距离水槽底面20 cm。圆柱在静水中的固有频率( $f_n$ )采用自由振动衰减法进行测量。圆柱的结构阻尼因子(置于静水中)用对数衰减法进行测量,即首先给圆柱一初始水平位移,然后使其自由振动,根据 $\zeta = 1/(2\pi n) \ln(y_t/y_{t+nT})$ 计算阻尼因子( $\zeta$ ),其中, $y_t$ 为 $t$ 时刻对应的振动位移, $y_{t+nT}$ 为 $t+nT$ 时刻对应的振动位移, $T$ 为振动周期。

**表1 影响单向流作用下近壁面圆柱流向振动的主要物理量**

物理量	符号	量纲
与流体相关的参量:		
流体质量密度	$\rho$	$ML^{-3}$
流体动力粘性系数	$\mu$	$ML^{-1}T^{-1}$
来流速度	$U$	$LT^{-1}$
与圆柱相关的参量:		
圆柱直径	$D$	L
圆柱表面相对粗糙度	$\kappa$	1
圆柱单位长度质量	$m$	M
圆柱的固有频率(在静水中)	$f_n$	$T^{-1}$
圆柱结构阻尼系数	$\zeta$	1
圆柱与壁面间初始间隙	$e_0$	L

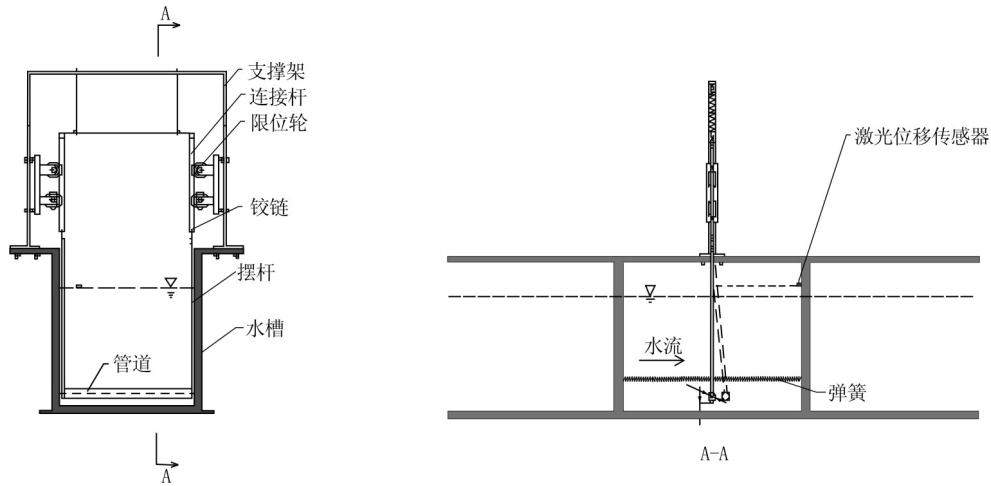


图1 流向振动实验装置示意图

### 3 量纲分析

单向流作用下近壁面圆柱流向振动是一个流体-圆柱-壁面动力相互作用问题, 其中影响圆柱流向振动特性的物理参量如表1所示。

则圆柱振动幅值和振动频率可表示为

$$A = \phi(\rho, U, \mu, D, m, \kappa, f_n, \zeta, e_0) \quad (1)$$

$$f = \phi(\rho, U, \mu, D, m, \kappa, f_n, \zeta, e_0) \quad (2)$$

根据 $\pi$ 定理, 表1中各物理量可组合成6个独立的无量纲量, 如表2所示。因此, 式(1),(2)可改写为

$$A/D = \phi(m^*, Vr, \kappa, Re, K_s, e_0/D) \quad (3)$$

$$f/f_n = \phi(m^*, Vr, \kappa, Re, K_s, e_0/D) \quad (4)$$

### 4 结果分析与讨论

图2给出了一组典型的圆柱流向振动时程曲线及相应的频谱图, 其实验参数为:  $D=0.032\text{m}$ ,  $f_n=1.02\text{Hz}$ ,  $\zeta=0.0301$ ,  $m^*=2.05$ ,  $e_0/D=2.58$ , 雷诺数  $Re$  在  $0.85 \times 10^3 \sim 2.91 \times 10^3$  范围,  $x_t$  为流向振动位移。由图可见, 随着流速的增加, 圆柱流向振动经历了发生、发展和消失的过程。流速在  $0.041 \text{ m/s} \sim 0.077 \text{ m/s}$  范围内可观察到明显的

振动现象, 当流速  $U$  约在  $0.052 \text{ m/s}$  时圆柱振动幅值达到最大值, 约为  $2 \text{ mm}$ 。而圆柱振动频率随流速的增加呈现出缓慢增长趋势, 当  $U=0.052 \text{ m/s}$ ,  $0.067 \text{ m/s}$  时, 振动频率成分比较单一, 此时, 涡脱落频率与圆柱振动频率耦合为同一频率, 从振动位移曲线的频谱中可看到只存在一个突出的谱峰。而当  $U=0.077 \text{ m/s}$  时, 此时振动处于衰退期, 振动频率存在多值现象, 由于非线性效应, 涡脱落频率与圆柱振动频率相互作用, 构成几种能量相近且相互竞争的频率, 在频谱中可看到多个谱峰存在(如图2(c)所示)。

表2 与单向流作用下近壁面圆柱流向振动相关的无量纲量

无量纲量	符号	定义
质量比	$m^*$	$4m/\pi\rho D^2$
约减速度	$Vr$	$U/f_n D$
圆柱表面相对粗糙度	$\kappa$	
稳定性参数	$K_s$	$4(m+m_a)\zeta/\pi\rho D^2$
雷诺数	$Re$	$UD/\nu$
间隙比	$e_0/D$	

注: 表2中变量  $m_a$  为单位长度圆柱附加质量,  $m_a=C_A m_d$ ,  $C_A$  为附加质量系数,  $C_A \approx 1$ , 对于圆柱而言,  $m_d=(\pi\rho D^2)/4$

图2中的数据经过无量纲化后并重新整理所得结果如图3所示。从图3(a)可看出, 圆柱的无量纲振动幅值 ( $A/D$ ) 随  $Vr$  数的增加而经历逐步增大直至

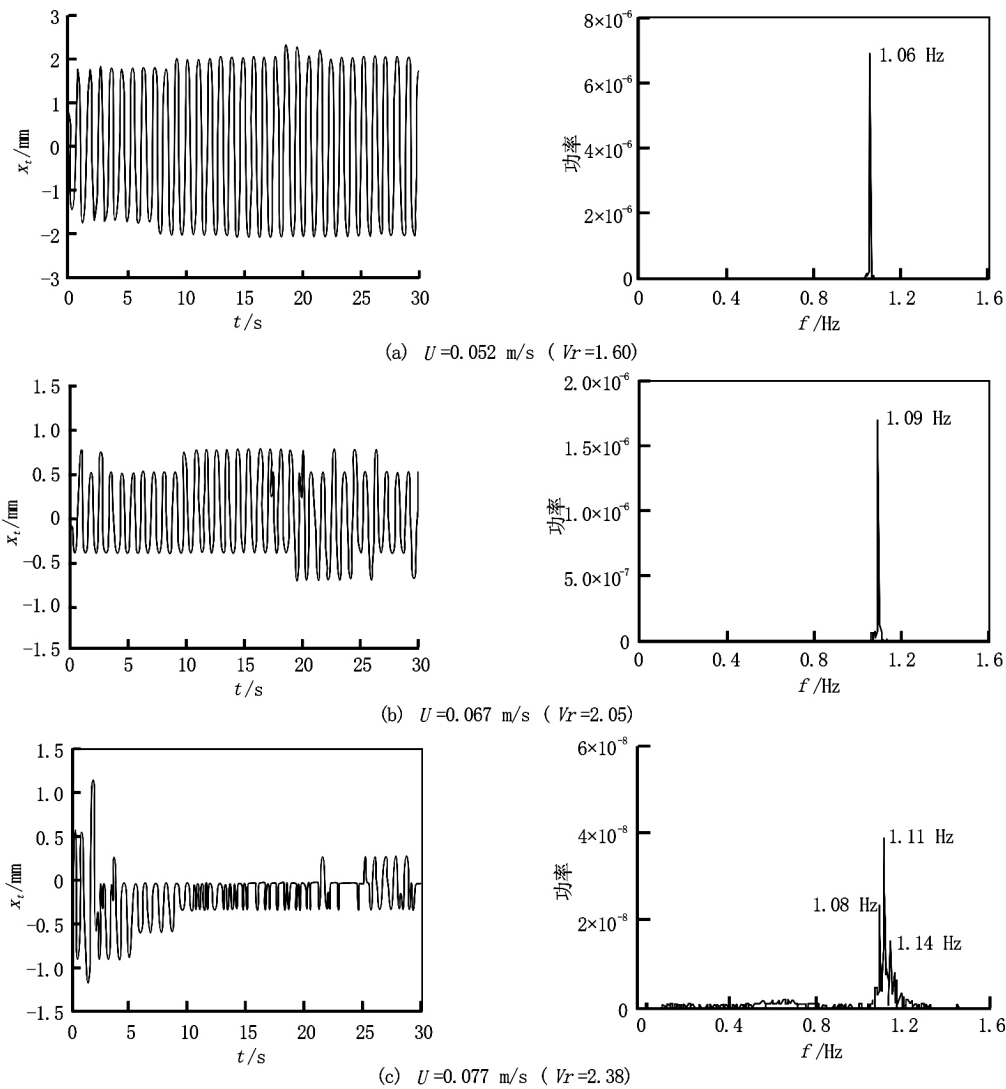


图2 圆柱流向振动位移的时程曲线  
 ( $D=0.032\text{m}$ ,  $f_n=1.02\text{Hz}$ ,  $\zeta=0.0301$ ,  $m^*=2.05$ ,  $e_0/D=2.58$ ,  $Re$  在  $0.85\times 10^3\sim 2.91\times 10^3$  范围)

到最大值然后逐步减小直至消失的变化过程。图3(a)表明圆柱流向振动所对应的  $V_r$  数在  $0.82\sim 2.79$  范围内变化, 振动的最大幅值约为  $0.07D$ 。图3(b)给出了圆柱流向振动的无量纲振动频率( $ff_n$ )随  $V_r$  数的变化关系曲线。从图中可知, 在振动期间,  $ff_n$  随  $V_r$  数增加而缓慢增长, 在此范围内,  $ff_n$  的最大值为  $1.09$ , 可见流向振动频率与柱体在水中的固有频率较为接近。

图4给出了一组圆柱流向振动响应曲线, 实验参数如下:  $D=0.032\text{m}$ ,  $e_0/D=2.68$ 、 $1.47$ 、 $0.94$ ,  $m^*=2.05$ 、 $2.33$ ,  $\zeta=0.0431$ 、 $0.0444$ ;  $D=0.040\text{m}$ ,  $e_0/D=1.08$ 、 $1.00$ ,  $m^*=1.23$ 、 $1.73$ ,  $\zeta=0.0436$ 、 $0.0399$ ;  $D=0.050\text{m}$ ,  $e_0/D=0.94$ 、 $1.02$ ,  $m^*=1.15$ 、 $1.88$ ,  $\zeta=0.0283$ 、 $0.0205$ ; 雷诺数( $Re$ )在  $1.4\times 10^3\sim 5.8\times 10^3$  范围。从图4(a)可看出, 在本文所讨论的实

条件下, 圆柱流向振动所对应的  $V_r$  数在  $0.82\sim 3.5$  范围内变化, 其中大部分集中在  $1.26\sim 2.72$  范围; 而振动的最大幅值一般均小于  $0.1D$ 。由圆柱横向涡激振动结果 (Yang et al., 2009) [13]可知, 横向涡激振动所对应的  $V_r$  数约在  $3.8\sim 12$  范围内, 横向最大振动幅值一般在  $(0.6\sim 1.1)D$ , 可见, 圆柱流向振动所对应的  $V_r$  数范围明显低于横向振动的  $V_r$  数范围, 而其最大振幅约为横向振动的  $10\%$ 左右。图4(b)表明, 在所研究的各实验参数下, 圆柱无量纲振动频率( $ff_n$ )随  $V_r$  数变化规律基本一致, 流向振动频率均在圆柱固有频率附近变化。

从图5所示的涡脱落频率随  $V_r$  变化曲线可看出, 圆柱发生流向振动之前, 圆柱尾迹涡脱落频率约为圆柱固有频率的  $1/5$ 。由图5可知, 圆柱开始产生流向振动的  $V_r$  数约为  $1.6$ , 此时的来流速度约

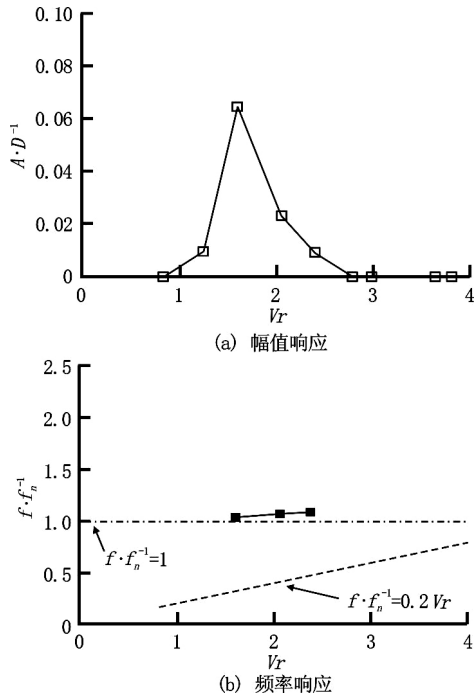


图 3 圆柱流向振动的幅值和频率响应 (实验条件同图 2)

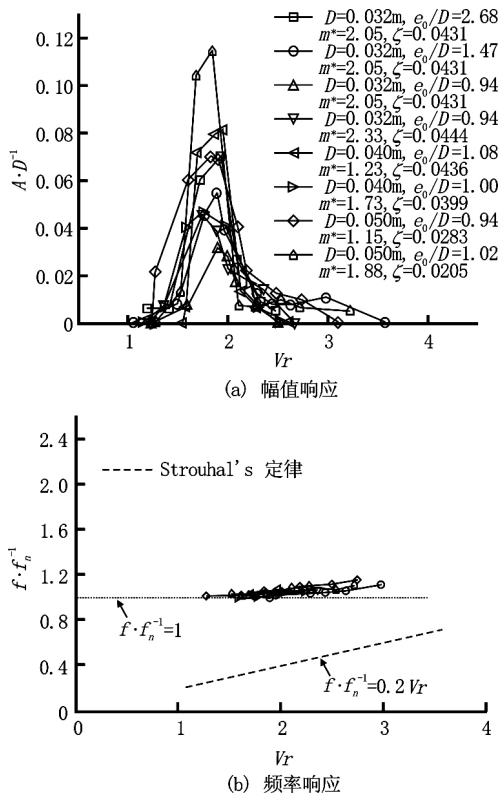


图 4 不同参数条件下圆柱流向振动幅值和频率响应

为 0.052 m/s, 雷诺数  $Re$  为  $1.67 \times 10^3$ 。已有研究结果

表明<sup>[20-22]</sup>, 在此雷诺数下圆柱表面的平均拖曳力系数( $C_D$ )约为 1.0, 而圆柱表面拖曳力系数的脉动量( $C'_D$ )约为 0.1, 根据 Morison 公式  $F_D = 0.5C_D\rho U^2 DL$ , 可估算出此时圆柱所受拖曳力约为 0.02 N, 而所受拖曳力的脉动量约为 0.002 N。根据圆柱固有频率和圆柱质量, 可推算出圆柱的弹性常数约为 30.56 N/m, 由此可估算出拖曳力的脉动量引起的圆柱波动幅值约为 0.065 mm。在  $U=0.052$  m/s 的流速下, 根据 Strouhal 定律, 静止圆柱尾迹涡脱落频率  $f_v$  约为 0.33 Hz。根据已有研究表明<sup>[23-24]</sup>, 此时拖曳力的脉动频率为涡脱落频率的 2 倍, 即为 0.66 Hz。相比较而言, 此时拖曳力的脉动频率比涡脱落频率更接近于圆柱的固有频率。可见, 在 0.052 m/s 的流速下, 拖曳力的脉动量可使圆柱产生明显的振动位移, 并可引发此类流向振动。

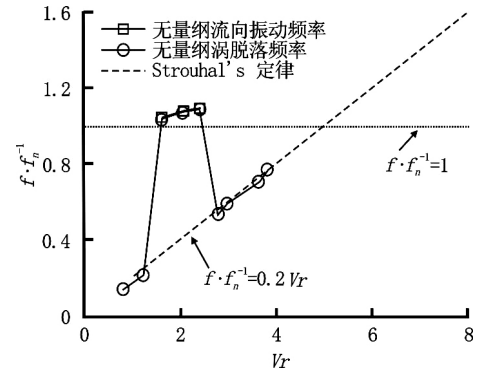


图 5 圆柱尾迹涡脱落频率随  $Vᵣ$  数的变化 (实验参数同图 3)

由实验结果可知, 在圆柱开始产生流向振动前, 雷诺数已达  $10^3$  量级; 已有研究表明<sup>[21]</sup>, 此时静止圆柱尾迹涡的脱落模式是交替模式。而当圆柱发生流向振动后, 圆柱尾迹涡的脱落模式发生了改变, 从交替模式变成对称模式, 参见图 6。这种对称模式的涡脱落, 主要是由于圆柱流向振动造成的: 流向振动加速了圆柱上下表面边界层的分离, 促使上下表面分离涡的产生、形成、脱落步调趋于一致。

### 5 结论

实验模拟了单向流作用下近壁面圆柱的流向振动, 分析了近壁面圆柱流向振动的幅值和频率特性, 主要结论如下:

- (1) 随着流速的增加, 圆柱流向振动经历了发生、发展和消失的变化过程, 振动频率呈现出缓慢增长的趋势。在流向振动触发初期和衰退时(随着约减

速度的增大), 流向振动频率存在多值现象, 即能量相近的多个振动频率相互竞争, 频谱中呈现多个谱峰。

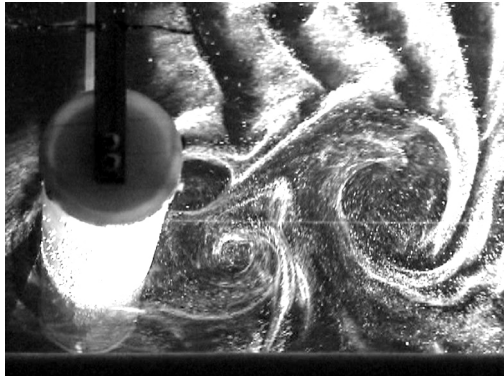


图 6 圆柱流向振动时的尾迹涡  
( $A=0.02D$ ,  $Vr=1.4$ ,  $e_0/D=1.02$ )

(2) 在圆柱间隙比  $e_0/D=0.9\sim 2.7$  范围内, 以及本文研究的质量比 ( $m^*=1.1\sim 2.4$ ) 和阻尼比 ( $\zeta=0.02\sim 0.05$ ) 等参数条件下, 圆柱流向振动的约减速度( $Vr$ )范围明显小于横向涡激振动的  $Vr$  范围; 流向振动幅值也明显小于横向振动幅值, 间隙比对流向振动频率的影响不明显。

本文重点分析了约减速度较小时柱体仅发生流向振动的响应机制。值得注意的是, 随着约减速度的增大, 柱体的横向振动可被激发, 并同时伴有流向振动<sup>[18,25]</sup>; 而对于海底管线而言, 涡激振动常常与海床土体的局部冲刷发生强烈的动力相互作用<sup>[26]</sup>。

## 参 考 文 献:

- [1] FENG C C. The measurement of vortex-induced effects on flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders[D]. M.Sc. Thesis., The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1968.
- [2] ANAND N M. Free span vibrations of submarine pipelines in steady and wave flows[D]. Ph.D Thesis, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, 1985.
- [3] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping[J]. Journal of Fluids and Structures, 1996, 10: (5)455-472.
- [4] KHALAK A, WILLIAMSON C H K. Motions, forces and mode transitions in vortex-induced vibrations at low mass-damping[J]. Journal of Fluids and Structures, 1999, 13(7-8): 813-851.
- [5] GOVARDHAN R, WILLIAMSON C H K. Modes of vortex formation and frequency response for a freely-vibrating cylinder[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 420: 85-130.
- [6] JAUVTIS N, WILLIAMSON C H K. Vortex-induced vibration of a cylinder with two degrees of freedom[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003, 17(7): 1035-1042.
- [7] WILLIAMSON C H K, JAUVTIS N. A high-amplitude 2T mode of vortex-induced vibration for a light body in XY motion[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23(1):107-114.
- [8] 孟昭英, 杨树耕, 王仲捷. 水下管道涡激振动的实验研究[J]. 水利学报, 1994(7): 43-50.  
MENG Zhao-ying, YANG Shu-geng, WANG Zhong-jie. An experimental study on vortex-excited vibration of subwater pipeline[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994(7): 43-50.
- [9] 余建星, 罗延生, 方华灿. 海底管线管跨段涡激振动响应的实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(4): 93-97.  
YU Jian-xing, LUO Yan-sheng, FANG Hua-can. A test study on dynamic response of submarine pipeline spans[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2001, 21(4): 93-97.
- [10] 曹丰产, 项海帆. 圆柱非定常绕流及涡致振动的数值计算[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2001, 16(1): 111-118.  
CAO Feng-chan, XIANG Hai-fan. Calculation of unsteady flow around circular cylinder and vortex-induced vibration[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A., 2001, 16(1): 111-118.
- [11] 娄敏, 郭海燕, 董文乙. 敲击对海洋立管涡激振动抑制作用的试验研究[J]. 水动力学研究与进展, A 辑, 2007, 22(4): 508-511.  
LOU Min, GUO Hai-yan, DONG Wen-yi. Suppression of vortex-induced vibration by impact excitation[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. A., 2007, 22(4): 508-511.
- [12] SHA Y, WANG Y X. Vortex Induced Vibrations of Finned Cylinders[J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(2): 195-201.
- [13] YANG B, GAO F P, JENG D S, et al. Experimental study of vortex-induced vibrations of a cylinder near a rigid plane boundary in steady flow[J]. Acta Mechanica Sinica. 2009, 25(1): 51-63.
- [14] KING R, PROSSER M J, JOHNS D J. On vortex excitation of model piles in water[J]. Journal of Sound

- and Vibration, 1973, 29(2): 169-188.
- [15] KING R. Vortex-excited structural oscillations of a circular cylinder in steady currents[C]. The 6th annual offshore technology conference. Houston: Paper No. 1948, 1974. 143-154.
- [16] GRIFFIN O M, RAMBERG S E. Vortex shedding from a cylinder vibrating in line with an incident uniform flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1976, 75: 257-271.
- [17] 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.
- [18] YANG B, GAO F P, LI D H, et al. Physical modeling and parametric study on two-degree-of-freedom VIV of a cylinder near rigid wall[J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(1): 119-132.
- [19] YANG B, GAO F P, WU Y X. Dimensional analysis and experimental apparatus on interaction between ocean current-pipeline and seabed[J]. Journal of Ship Mechanics. 2006, 10(3): 130-141.
- [20] SCHEWE G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross-flow from subcritical up to transcritical Reynoldes numbers[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 133: 265-285.
- [21] TANIGUCHI S, MIYAKOSHI K. Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall[J]. Experiments in Fluids, 1990, 9(1): 197-204.
- [22] HALLAM M G, HEAT N J, WOOTTON L R. Dynamics of Marine Structures[R]. CIRIA Underwater Engineering Group, Report UR8, 1977, Atkins Research and Development, London, U.K.
- [23] DRESCHER H. Messung der auf querangestromte zylinder ausgeubten zeitlich veranderten drucke[J]. Z.f. Flugwiss, 1956, 4(112): 17-21.
- [24] SUMER B M, FREDSOE J. Hydrodynamics around cylindrical structures[M]. Singapore: World Scientific, 1997.
- [25] YANG B, GAO F P, WU Y X. Flow-induced vibrations of a cylinder with two degrees of freedom near rigid plane boundary[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2008, 18 (4): 302-307.
- [26] GAO F P, YANG B, WU Y X, et al. Steady currents induced seabed scour around a vibrating pipeline[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28(5): 291-298.