单向流作用下近壁面管道流向涡激振动*

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)

摘要: 对单向流作用下近壁面管道流向涡激振动进行了水槽实验模拟。分析了管道涡激振动 位移时程曲线,研究了管道振动频率随水流速度的变化特征。探讨了管道振动幅值和频率的 变化特性,结合管道尾迹涡的变化规律,分析了流向涡激振动的起因。结果表明:随着流速 的增加,管道流向涡激振动经历了发生、发展和消失的变化过程。对于较小振幅情形(主要 指在锁频初期和后期)振动频率存在多值现象,即在频谱中存在多个谱峰。管道流向涡激振 动所对应的约减速度范围明显小于横向涡激振动所对应范围。

关键词:流向涡激振动;近壁面管道;锁频;单向流

1 引言

结构涡激振动涉及流体与结构之间的强相互作用,它存在于众多行业之中,如海流作用 下海底管线和水中悬浮隧道的涡激振动,热能行业中热交换器在热流体作用下的涡激振动, 电力工业中输电电缆在风载下的涡激振动,等等。圆柱型管道是采用最多的结构形式之一, 并且很多结构也可以简化为圆柱型管道,涡激振动是一个复杂的流固耦合问题,管道涡激振 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。

多年来,管道涡激振动引起了国内外广大科研工作者的研究兴趣^[1-9]。已有研究主要集中 于研究管道横向涡激振动,而对流向涡激振动关注较少。而已有关于流向涡激振动的研究主 要探讨了管道振幅特性和管道尾迹涡模式^[10-13],而对管道振动频率特性、涡脱落频率特性、 边壁的影响等涉及不多,目前关于流向涡激振动的一些问题尚需深入分析。

本研究将对单向流作用下近壁面管道流向涡激振动进行实验研究,探讨近壁面管道流向 涡激振动响应的典型特征,详细分析管道流向涡激振动幅值和频率特性,并分析流向涡激振 动的起因。研究仅存在流向涡激振动的情况,而关于于流向和横向涡激振动共存的状况,可 参考我们以前的工作^[14]。

^{*}国家自然科学基金重点项目(批准号: 10872198)、中科院"十一五"知识创新工程项目(批准号: KJCX2-YW-L02)资助.

2 实验装置及实验条件

用于研究管道流向涡激振动的实验装置^[15]如图 1 所示。水槽长 19m, 宽 0.5m, 高 0.6m, 在 0.4 m水深的条件下能产生 0.6m/s的最大流速,水槽底为光滑的花岗石铺砌而成。实验管道由摆杆和弹簧支撑,管道与摆杆一起绕铰链摆动以实现管道的水平运动。实验所用管道直径D分别为 0.032m、0.040m和 0.050m,管道表面光滑,即表面相对粗糙度 $k \approx 0$ 。管道长*L*=0.48m. 实验 水深为 0.4m。实验所用激光位移传感器分辨率为 0.025mm,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,然后依据测量点与管道中心间的几何关系,可获得管道的振动位移。采用旋浆式流速仪测量水流速度。管道在静水中的固有频率(f_n)采用 自由振动衰减法进行测量。管道的结构阻尼系数(置于静水中)用对数衰减法进行测量,即 首先给管道一初始位移,然后使其自由振动,根据 $\varsigma = 1/(2\pi n) \ln(y_t / y_{t+nT})$ 计算阻尼因子 (ς),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。



3 量纲分析

单向流作用下近壁面管道流向涡激振动是一个流体-管道-壁面动力相互作用问题,影响管 道流向涡激振动特性的物理参量如表1所示。

表 1 影响单向流作用下近壁面管道流向涡激振动的物理量

物理量	符号	量纲
与流动相关的量		
流体质量密度	ho	ML ⁻³
流体动力黏性系数	μ	$ML^{-1}T^{-1}$
来流速度	U	LT ⁻¹
与管道相关的量		
管道直径	D	L
管道表面相对粗糙度	К	1
管道单位长度质量	т	М
管道的固有频率(在静水中)	f_n	T^{-1}
管道结构阻尼系数	ς	1
管道与壁面间初始间隙	e_0	L

根据 π 定理,表 1 中的各物理量可组合成 6 个独立的无量纲量,如表 2 所示。表 2 中变量 m_a 为单位长度管道附加质量, $m_a = C_A m_d$, C_A 为附加质量系数, $C_A \approx 1$,对于管道而言, $m_d = (\pi \rho D^2)/4$ 。表 2 中的各无量纲量具有明确的物理意义,利用它们整理分析实验数据,可 使分析结果易于理解,同时也便于与他人数据进行比较。

表 2 与单向流作用下近壁面管道流向涡激振动相关的无量纲量

无量纲量	符号	定义
质量参数	<i>m</i> *	$4m/\pi\rho D^2$
减缩速度	Vr	$U / f_n D$
管道表面相对粗糙度	K	
稳定性参数	K _s	$4(m+m_a)\varsigma/\pi\rho D^2$
雷诺数	Re	UD/v
间隙比	e_0/D	

4 结果分析与讨论

图 2 给出了一组典型的管道流向涡激振动时程曲线及相应的频谱图。其实验参数为: D=0.032m, $f_n = 1.02H_Z$, $\varsigma = 0.0301$, $m^* = 2.05$, $e_0/D = 2.58$, 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 2 可见,随着流速的增加,管道流向涡激振动经历了发生、发展和消失的过程。流速在 0.041~ 0.077m/s范围内可观察到明显的振动现象,当流速U约在 0.052m/s时管道振动幅值达到最大值,约为 2mm。而管道振动频率随流速的增加呈现出缓慢 增长趋势,当U=0.052m/s,0.067m/s时,振动频率成分比较单一,此时,涡脱落频率与管道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=0.077m/s时,此时振动处于锁频后期,振动频率存在多值现象,由于非线性效应,涡脱落频 率与管道振动频率相互作用,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(图 2e)。



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,管道的

无量纲振动幅值(A/D)随Vr数的增加而经历逐步增大直到最大值,然后逐步减小直至消失的变化过程。图 3(a)表明管道振动所对应的Vr数在 0.82~2.79 范围内变化,此范围即为所谓的"锁频(lock-in)"区,而振动的最大幅值约为 0.07D。图 3(b)给出了管道流向振动的无量纲振动频率(*ff*_n)随Vr数的变化关系曲线。从图中可知,在锁频区内,*ff*_n 随Vr数增加而缓慢增长,在此范围内,*ff*_n的最大值为 1.09,可见,*f*与*f*_n两者间的取值很接近。



($f_n = 1.02 \text{ Hz}$, $\zeta = 0.0301$, $m^* = 2.05$, $e_0 / D = 2.58$, Re 在 $0.85 \times 10^3 \sim 2.91 \times 10^3$ 范围)

图 3 管道流向涡激振动的幅值和频率响应

图 4 给出了一组管道流向涡激振动响应曲线,实验参数如下: *D*=0.032m, *e*₀/*D*=2.68、1.47、 0.94, *m**=2.05、2.33, *ç* = 0.0431、0.0444; *D*=0.040m, *e*₀/*D*=1.08、1.00, *m**=1.23、1.73, *ç* = 0.0436、 0.0399; *D*=0.050m, *e*₀/*D*=0.94、1.02, *m**=1.15、1.88, *ç* = 0.0283、0.0205; 雷诺数 (*Re*) 在 1.4×10³~5.8×10³范围。从图 4(a)中可看出,在本研究所讨论的实验参数条件下,管道流向 涡激振动所对应的Vr数在 0.82~3.5 范围内变化,其中大部分集中在 1.26~2.72 范围; 而振动 的最大幅值一般均小于 0.1*D*。由管道横向涡激振动结果 (Yang *et al.*(2009))^[9]可知,横向涡激 振动所对应的Vr数约在 3.8-12 范围内,横向最大振动幅值一般在(0.6~1.1)*D*,可见本研究所讨论的流向涡激振动所对应的Vr数范围约为管道横向振动Vr数范围的 30%,而最大振幅约为其最 大振幅的 10%。图 4(b)表明各实验参数对应的管道无量纲振动频率(*ff*_n)随Vr数的变化规律吻合 很好,且管道振动频率均在管道固有频率。



图 4 不同参数条件下管道流向涡激振动幅值和频率响应

从图 5 所示的涡脱落频率变化曲线可看出,管道发生流向涡激振动之前,管道尾迹涡脱 落频率约为管道固有频率的 1/5。由图 5 可知,管道开始产生流向涡激振动的Vr数约为 1.6,此 时的来流速度约为 0.052m/s,雷诺数*Re*为 1.67×10³。已有研究结果表明^[16-18],在此雷诺数下 管道表面的平均阻力系数(*C_D*)约为 1.0,而管道表面的波动阻力系数(*C_D*)约为 0.1,根据阻力公 式*F_D* = 0.5*C_DPU*²*DL*可粗略估算出此时管道所受阻力约为 0.02N,而所受波动阻力约为 0.002N. 根据管道固有频率和管道质量,可推算出管道的弹性常数约为 30.56 N/m,此时可估算出波动阻 力引起的管道波动幅值约为 0.065mm。在*U*=0.052m/s的流速下,根据Strouhal定律,静止管道 尾迹涡脱落频率*f*,约为 0.33Hz,根据已有研究表明^[19-20],此时波动阻力频率为涡脱落频率的 2 倍,即为 0.66Hz。相比较而言,此时阻力的波动频率比涡脱落频率更接近于管道的固有频率。 可见,在 0.052m/s的流速下,波动阻力可使管道产生明显的振动位移,因此该流向涡激振动是 由波动阻力引起的。



图 5 管道尾迹涡脱落频率随 Vr 数的变化

5 结论

实验模拟了单向流作用下近壁面管道流向涡激振动行为,分析了近壁面管道流向涡激振动的幅值和频率特性,主要结论如下:

(1)随着流速的增加,管道流向涡激振动经历了发生、发展和消失的变化过程。

(2)管道振动频率随流速的增加呈现出缓慢增长趋势,对于较小振幅情形(主要指在锁频初期和后期的状况)振动频率存在多值现象,由于非线性效应,涡脱落频率与管道振动频率相互作用,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。在锁频区内,管道流向振动频率f与管道固有频率f,两者间的取值接近。

(3)管道流向涡激振动的约减速度(Vr)范围明显小于横向涡激振动所对应的 Vr 范围,而流向振动幅值也明显小于横向振动幅值。

参考文献

- Feng C C. The measurement of vortex-induced effects on flow past stationary and oscillating circular and D-section cylinders. M.Sc. Thesis. The university of British Columbia, Columbia. 1968.
- 2 Anand N M. Free span vibrations of submarine pipelines in steady and wave flows. Ph.D Thesis, The Norwegian Institue of Technology, Trondheim, Norway. 1985
- 3 Brika D, Laneville A.Vortex-induced vibrations of a long flexible circular cylinder. Journal of Fluid Mechanics , 1993,250:481–508.
- 4 孟昭英,杨树耕,王仲捷.水下管道涡激振动的实验研究.水利学报,1994,7:43-50.
- 5 Govardhan R, Williamson C H K. Modes of vortex formation and frequency response for a freely-vibrating cylinder. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 420, 85–130.
- 6 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.
- 7 Williamson C H K, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. Annual Review of Fluid Mechanics, 2004,36: 413-455.
- 8 郭海燕,傅强,娄敏.海洋输液立管涡激振动响应及其疲劳寿命研究.工程力学, 2005, 22(4): 220-224.
- 9 Yang B, Gao F P, Jeng DS, et al. Experimental study of vortex-induced vibrations of a cylinder near a rigid plane boundary in steady flow. Acta Mechanica Sinica. 2009, 25:51-63.
- 10 King R, Prosser M J, Johns D J. On vortex excitation of model piles in water. J Sound and Vibration, 1973, 29(2): 169-188.
- 11 King R. Vortex-excited structural oscillations of a circular cylinder in steady currents[A]. The 6th annual offshore technology conference[C]. Houston:Paper 1948. 1974b. 143–154.
- 12 Griffin O M and Ramberg S E. Vortex shedding from a cylinder vibrating in line with an incident uniform flow. Journal of Fluid Mechanics, 1976, 75: 257–271.
- 13 Okajima A, Nakamura A, Kosugi T, et al. Flow-induced in-line oscillation of a circular cylinder. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2004, 23:115-125.
- 14 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. China Ocean Engineering, 2009, 23(1): 119-132.
- 15 Yang B, Gao F P, Wu YX. Dimensional Analysis and Experimental Apparatus on Interaction between Ocean Current-Pipeline and Seabed. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(3): 130-141.
- 16 Schewe G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in cross-flow from subcritical up to transcritical Reynoldes numbers. Journal of Fluid Mechanics, 1983,133: 265-285.

- 17 Taniguchi S, Miyakoshi K. Fluctuating fluid forces acting on a circular cylinder and interference with a plane wall. Experiments in Fluids, 1990,9: 197-204.
- 18 Hallam M G, Heaf N J, Wootton L R. Dynamics of Marine Structures. CIRIA Underwater Engineering Group, Report UR8, Atkins Research and Development, London, U.K. 1997.
- 19 Drescher H. Messung der auf querangestromte zylinder ausgeubten zeitlich veranderten drucke. Z.f. Flugwiss, 1956, 4(112): 17-21.
- 20 Sumer BM. Fredsoe J. Hydrodynamics around cylindrical structures. Singapore: World Scientific, 1997.

Vortex-induced streamwise vibration of a cylinder near a plane boundary under the action of unidirectional flow

YANG Bing, GAO Fu-ping

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

Abstract: The vortex-induced streamwise vibration of a cylinder (pipe) near a plane boundary under the action of unidirectional flow was modelled experimentally in a flume. Analysing the variation of time history curve of the pipe vibration displacement, the vibration frequency with the flow velocity was examined. The vibration amplitude and frequency of the pipe were investigated. The cause for the occurrence of vortex-induced streamwise vibration was discussed, correlating to the variation of wake vortex. The experimental results indicate that the vortex-induced streamwise vibration experiences an occurrence-evolution-disappearance process with the increasing flow velocity. For the case of smaller vibration amplitudes (mainly for the initial and last stage of the lock-in) there exist multiple values of vibration frequency, i.e. multiple spectrum peaks appearing at the spectrum of vibration frequency. The range of reduced velocity (Vr) for the streamwise vibration is much less than that for the transverse vibration.

Key words: Vortex-induced streamwise vibration; Pipe near a plane boundary; Lock-in; Unidirectional flow