

柔性输流管泄流效应实验研究*

郭世豪, 李 晔

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 基于模型试验研究了柔性输流管在恒定内流速度下由泄漏孔引入的泄流效应.研究发现:泄流效应可改变临界值,使得形变随流速增大近似线性增大;增加管道失稳时的形变幅值,可激发不同输流管的系统模态,引起管道多个频率的振动响应.研究结果为管道运输泄漏点定位提供了支撑,为数值模拟提供了实验参照.

关键词: 输流管; 流固耦合; 泄流效应; 泄漏

中图分类号: O368

文献标志码: A

DOI: 10.21656/1000-0887.390296

引 言

由于海洋环境复杂多变,海洋输流管道泄漏事故屡见不鲜.海洋输流管道投资大、风险高,一旦出现管道泄漏事故,会造成严重的环境污染与经济损失.例如2010年发生在美国墨西哥湾的石油泄漏事件,造成了490万桶原油泄漏,2000平方英里的范围污染,以及数以亿计的经济损失.故此,科学认识泄漏对海洋输流管道造成的动力学影响,对于海洋输流管道的设计与防泄漏措施有显著的指导意义.

输流管在两端简支或固定边界条件下的内流效应是保守的,Feodos'ev^[1]、Holt等^[2]和Niordson^[3]推导出了两端简支管道的线性运动方程.Gregory等^[4]通过理论推导,探究了从稳定性到不稳定性过渡的发生过程.对于管道振动的分析,还可以运用更加符合实际情况的非线性方法.非线性动力学主要涉及的研究重点是输流管的分岔和混沌现象,以及输流管的稳定性分析.Paidoussis等^[5]、Thurman等^[6]、Holmes^[7]推导出两端简支输流管振动的非线性方程.Nikolić和Rajković^[8]根据Lyapunov-Schmidt的简化和奇异性理论,分析了两端固定的流体输送管道的几种非线性模型中的固定分岔.Gregory等^[4]对输送水或空气的橡胶管和输送油的金属管进行实验,考虑管材料中的内部阻尼与周围流体相关联的黏性阻尼力对输流管稳定性的影响,证明了阻尼可以使系统不稳定.Karagiozis等^[9]通过一套固定支持的薄壁圆柱壳实验系统,观察了输流管的非线性振动和稳定性的实验结果.对于悬臂管道系统,内流效应是非保守的,因为它可以从排出的流体中获得或损失能量.Benjamin^[10]通过理论推导和试验验证的方法,将Lagrange方程运用到非保守的悬臂梁系统中,并得出了管内黏性项与管道振动无关的结论.Moddarres-Sadeghi等^[11]研究了悬臂管的二维和三维颤振,以及水平和垂直放置的输流管的分岔行

* 收稿日期: 2018-11-20; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(面上项目)(51479114;11742021;51761135012)

作者简介: 郭世豪(1994—),男,硕士生(E-mail: guoshihao1994@foxmail.com);

李晔(1977—),男,教授,博士生导师(通讯作者. E-mail: ye.li@sjtu.edu.cn).

为的差异性.张凯凯等^[12]运用直接多尺度法,研究了3:1内共振下输流管道在超临界领域的参激稳态响应,分析得到输流管道参激振动响应的近似解析解,并用 Galerkin 截断法数值验证了近似解析结果的可靠性.王忠民等^[13]根据变质量弹性系统 Hamilton 原理,用变分法建立了输流黏弹性曲管的运动微分方程,并用归一化幂级数法导出了输流黏弹性曲管的复特征方程组.

输流管一旦发生泄漏,泄流必然引入非保守内流效应.此时,管道系统在内部保守内流效应和泄漏流非保守内流效应耦合作用下,其响应特征更加复杂.目前对于管道泄漏的研究主要集中在管道泄漏检测技术方面,对管道性能的评测可分为外部检测法和内部检测法,该项技术已形成相当规模的成熟体系^[14].郎究明等^[15]提出了一种基于非平衡数据的管道泄漏检测与定位的方法.韩宝坤等^[16]采用多软件联合仿真并结合实验研究的方法,探究一条低成本检测与定位天然气管道泄漏的新途径.Murway 等^[17]介绍了几种应用于管道泄漏检测和定位方法的最新技术,并评估了这些技术的优缺点.而针对泄漏情况下输流管的振动响应的研究则比较匮乏.在理论方面,Zhang 等^[18]建立了泄漏振动管的简单力学模型,通过理论分析对不同参数下的管道分析泄漏对管道的影响.Meng 等^[19]探讨了非保守泄漏流对简支输流管稳定性的影响.在实验方面,泄漏对输流管振动响应的影响的探究则更为匮乏.

本文对两端固定支持的输流管道进行实验研究,通过无泄漏管道与泄漏管道比较,探究泄流非保守效应.第一节介绍实验平台的搭建;第二节对无泄漏情况下的管道模型进行实验,并通过对比实验结果与文献结果以验证实验;第三节通过分析管道采样点的应变特征以及频谱特征以探究泄流效应.

1 实验平台搭建

1.1 实验平台

用一根柔软硅胶管作为管道模型管,物理参数值见表 1.硅胶管的两端固定,垂直于地面放置,实验平台见图 1,坐标系如图 2(a)所示,符合右手定则, x 轴垂直向下;一台变频抽水泵用来提供内部水流,水流方向从上往下.管道内部实时流量与流速由流量计测量.表 2 列出所采用的各个仪器.实验系统设置一个采样点,由于端点应变最大,所以位置在管道的上端点处,采样点设置两组应变片,每组由半桥连接的两片应变片组成,两组应变片在管道横截面方向相互垂直分布.该点的总应变由两个相互垂直方向的应变的平均平方数获得,应变片分布情况如图 2(b)所示.

表 1 管道模型的参数

Table 1 Pipeline model parameters

quantity	value
pipe length L / m	1
pipe inner diameter D_i / mm	10
pipe outer diameter D_o / mm	14
fluid mass per unit length M / (kg/m)	0.078 540
pipe mass per unit length m / (kg/m)	0.090 478
bending rigidity EI / (N·m ²)	0.007 532
fluid density ρ_f / (kg/m ³)	1 000
pipe density ρ_p / (kg/m ³)	1 200
fluid pressure p / Pa	1.5×10^5

表 2 管道系统仪器

Table 2 Pipeline system instruments

instrument name	No.
inverter water pump	1
float flowmeter	3
dynamic strain gauge bridge box	4
dynamic resistance strain gauge	5
DHDAS dynamic signal acquisition system	6

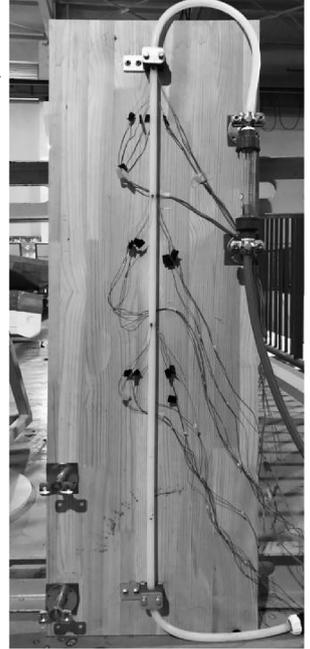
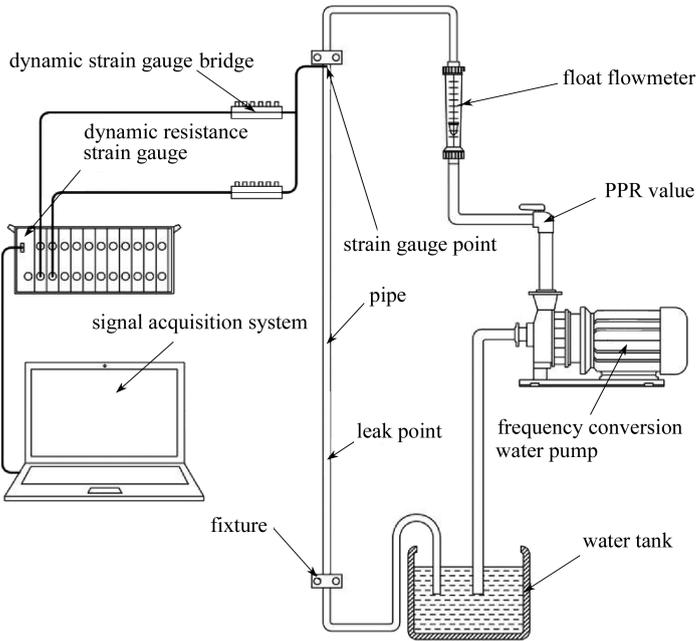


图 1 管道系统的整体示意图及实物图

Fig. 1 The overall schematic and the photo of the pipe system

1.2 实验设计

基于在 1.1 小节中介绍的实验所用器材,设计无泄漏情况下的实验步骤如下。

1) 依照 1.1 小节所描述,正确安装布置实验器材.本实验系统的数据采集点包含相互垂直的两个通道:管道上端点的 y 方向应变由动态电阻应变仪的 CH3 通道负责监控,管道上端点的 z 方向应变由动态电阻仪的 CH4 通道负责监控。

2) 无泄漏实验中,实验所用管道为完整的管道;泄漏实验中,所用管道为有一个泄漏口的管道,泄漏口的位置见图 1,位于距管道下端点 $1/4$ 管长处,泄漏水流方向为 z 轴正向.实验开始前,在管道静止的情况下,记录并观察一段时间里的应变-时间曲线,得出各通道的初始应变,用于后期数据处理时归零。

3) 启动变频泵,通过精确调节 PPR 阀门,使得流量计读数稳定在 200 L/h ,并维持数分钟,等到整个系统趋于稳定,截取稳定后的各通道应变-时间曲线。

4) 完成 200 L/h 流量的数据采集后,重复精准调节 PPR 阀门,每隔 50 L/h ,重复第 3) 步所进行的步骤,完成该流量下的数据采集。

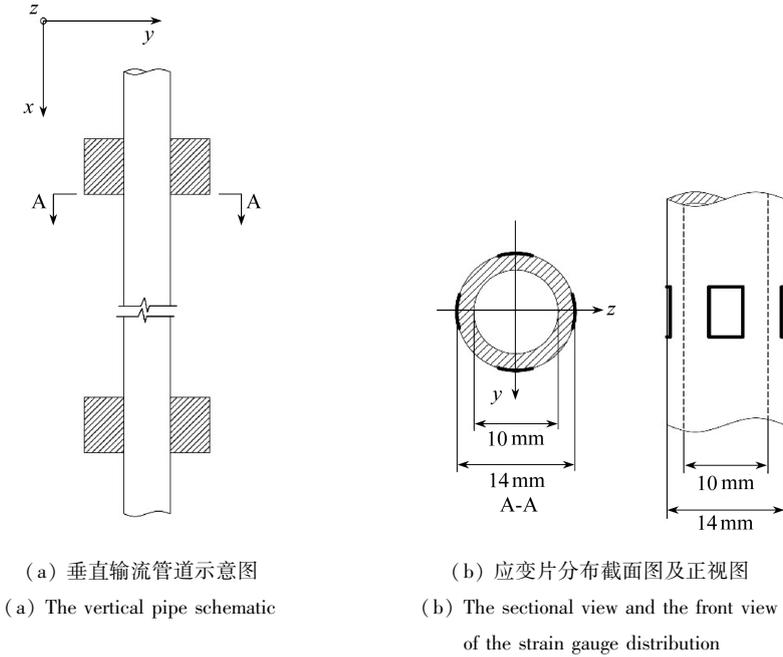


图2 管道坐标系及应变片分布

Fig. 2 The pipe coordinate system and the strain gauge distribution

2 无泄漏输流管实验结果分析

2.1 无泄漏输流管理论分析

根据图 2(a) 的坐标系, 建立管道模型. 对于均质管道模型, 采用 Euler-Bernoulli 梁理论, 通过 Hamilton 法, 从能量的角度推导管道微分方程^[5]:

$$\left(E + E^* \frac{\partial}{\partial t}\right) I \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} - \left[(m + M)g(L - x) + MU^2 + \frac{EA}{2L} \int_0^L \left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)^2 dx\right] \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + (m + M)g \frac{\partial \omega}{\partial x} + (m + M) \frac{\partial^2 \omega}{\partial t^2} + 2MU \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial t} = 0, \quad (1)$$

其中 ω 为横向位移, x 为管道轴向, t 为时间, A 为管道横截面积, U 为管内流速, E^* 为考虑材料黏弹性时附加的黏弹性项, 其余各项意义见表 1.

将方程进行无量纲处理, 由下列参数替换:

$$\xi = \frac{x}{L}, \quad \eta = \frac{\omega}{L}, \quad \tau = \left(\frac{EI}{M + m}\right)^{1/2} \frac{t}{L^2}, \quad (2)$$

$$\alpha \dot{\eta}'''' + \eta'''' + \left[u^2 - \Gamma - \gamma(1 - \xi) - \frac{1}{2} \mathcal{A} \int_0^1 (\eta')^2 d\xi - \alpha \mathcal{A} \int_0^1 \eta' \dot{\eta}' d\xi\right] \eta'' + 2\beta^{1/2} u \dot{\eta}' + \gamma \eta' + \ddot{\eta} = 0, \quad (3)$$

无量纲参数表达式如下:

$$\begin{cases} \alpha = \left(\frac{I}{E(M + m)}\right)^{1/2} \frac{E^*}{L^2}, \quad u = \left(\frac{M}{EI}\right)^{1/2} UL, \quad \gamma = \frac{M + m}{EI} L^3 g, \\ \mathcal{A} = \frac{AL^2}{I}, \quad \beta = \frac{M}{M + m}, \quad \Gamma = \frac{AL}{2I} \int_0^L \left(\frac{\partial \omega}{\partial x}\right)^2 dx. \end{cases} \quad (4)$$

管道两端的边界条件为

$$\omega(x) = 0, \omega'(x) = 0. \quad (5)$$

利用 Litz-Galerkin 方法,将时间与空间进行变量分离,使微分方程离散化,采用 Houbolt 法将微分方程化为非线性方程组,使用 Newton-Raphson 法求解非线性方程组,绘制出两端固定管道的发散曲线如图 3 所示。

2.2 无泄漏输流管实验结果分析

对实验数据进行处理,根据式(6)将流量换算为无量纲流速,在某一指定无量纲流速下,将上端点的两个应变通道 CH3 与 CH4 的数值平方相加再开根号,可以得到该采样点在该指定无量纲流速下的总应变曲线。对稳定时间段的总应变曲线求平均值,可以得到指定无量纲流速下的总应变。借此可以绘制出总应变-无量纲流速曲线,如图 4 所示。

$$U = \frac{Q}{\pi d^2/4}, u = \left(\frac{M}{EI}\right)^{1/2} UL, \quad (6)$$

其中 Q 为流量, u 为无量纲流速。

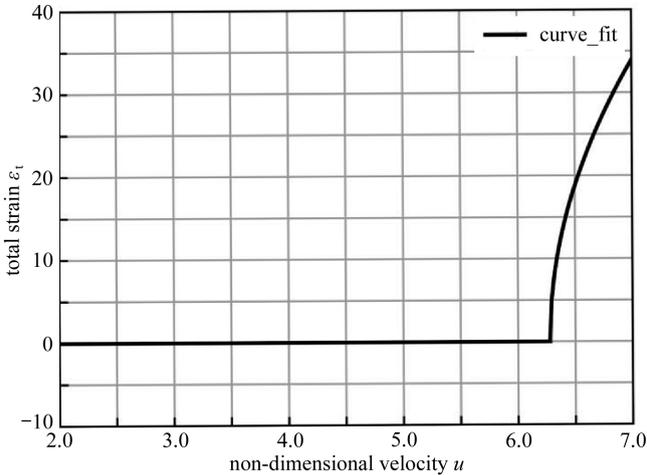


图 3 两端固定支持发散曲线

Fig. 3 The clamped-clamped-support bifurcation curve

根据图 4 可知, $u < 5.2$ 时,管道总应变稳定在 0 左右;在 u 增加到 5.2 时,管道总应变开始增大,管道开始发生弯曲,此时,无量纲流速等于临界无量纲流速,即 $u = u_{cd}$;在 $u > 5.2$ 时,随着 u 的增加,总应变也逐步增大。

对于没有泄漏发生的输流管道,通过非线性的运动方程已经证明,随着 u 的增大,管道存在一个临界无量纲流速 u_{cd} 。当 $u < u_{cd}$ 时,管道在其初始静态平衡位置处稳定,没有发生明显的形变,此时管道上各点位移为 0;当 $u = u_{cd}$ 时,管道位于临界点,此时管道依旧没有发生形变,各点位移为 0,但即将通过超临界叉式发散(supercritical pitchfork bifurcation)失去稳定;当 $u > u_{cd}$ 时,管道呈现一阶模态的失稳,所产生的屈曲幅度随着内部流速的增加而增加,并且一阶模态幅值随着内流速度的增大逐渐增大^[20]。理论分析的正确性在以往学者们所做的输流管实验中已经得到验证。

对于两端固定支持的输流管, $u_{cd} = 2\pi$, 本实验所得到的结果为 $u_{cd, test} = 5.2$ 。考虑到实验环境无法达到理论中的理想环境(例如管道受到重力影响,变频泵提供的水流不是理想平推流

等),所以在误差允许的范围内,实验中得到的临界无量纲流速与理论的临界无量纲流速近似相等.由实验与理论的一致性,验证了实验系统的准确性.

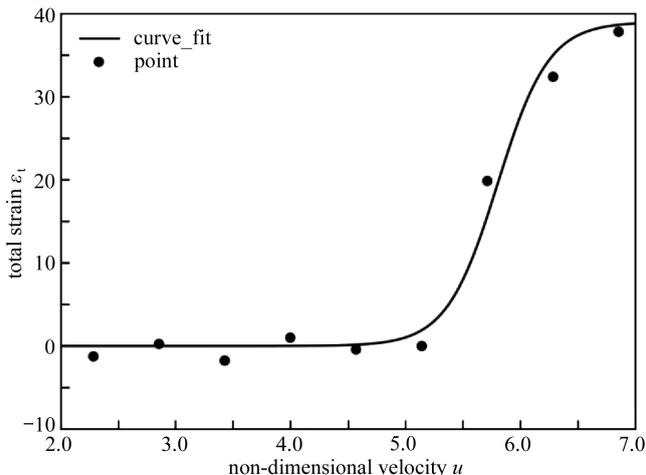


图 4 无泄漏状态下管道上端点总应变-无量纲流速曲线

Fig. 4 The total strain value-dimensionless flow rate curve at the end point without leakage

3 泄漏管道实验

3.1 实验数据分析

参考第 2 节的方法,绘制出泄漏情况下上端点的总应变-无量纲流速曲线,如图 5 所示.

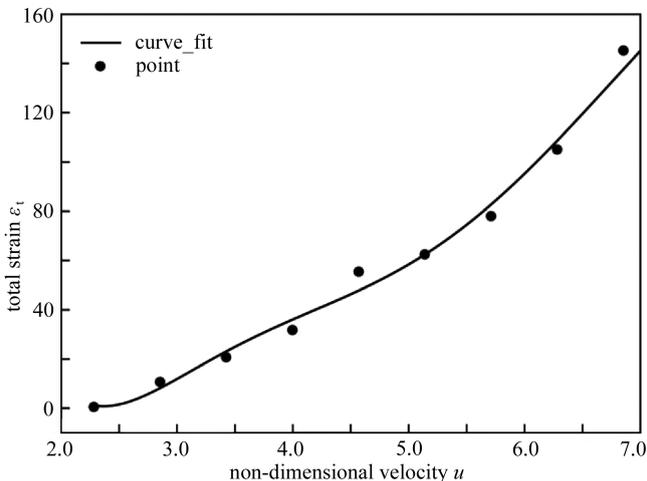


图 5 泄漏状态下管道上端点总应变-无量纲流速曲线

Fig. 5 The total strain value-dimensionless flow rate curve at the end point with leakage

根据图 5 可知,随着 u 的增加,管道总应变随之增加,呈现近似线性增加的趋势.在 $u > 5.2$ 时,曲线的斜率有小幅度的增加.截止到 $u = 6.85$ 时,总应变达到 145.23.

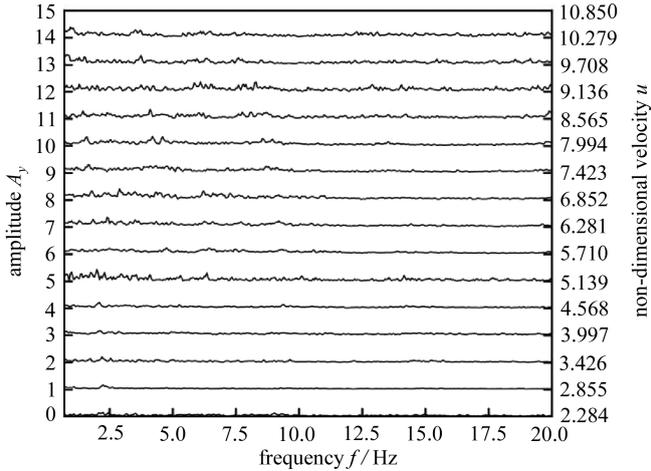
3.2 无泄漏与泄漏情况总应变对比

无泄漏和泄漏的情况下,管道的总应变-无量纲流速曲线呈现出不同的特征:无泄漏的管道在低流速时稳定并处于其原始的静态平衡位置,达到临界流速后开始发生叉式发散;而泄漏

情况下的管道从一开始就有位移产生,并随着 u 的增加而增加,呈现线性趋势.另外,泄漏情况下的管道在 $u = 4.2$ 时,管道的总应变就达到了无泄漏状态下的最大值 39,并且随着 u 的增大而继续增加,截止到 $u = 6.85$ 的总应变已经达到 145.23,远远超过无泄漏情况下所达到的最大值.

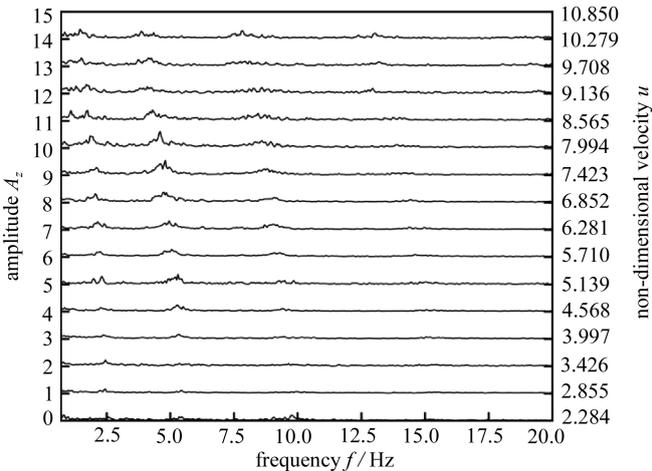
3.3 无泄漏与泄漏情况频谱分析对比

频谱分析是一种将复杂讯号分解为较简单讯号的技术.许多物理讯号均可以表示为许多不同频率简单讯号的累加.找出一个讯号在不同频率下资讯(可能是振幅、功率、强度或相位等)的做法就是频谱分析.



(a) 上端点 y 轴

(a) The upper-point y -axis



(b) 上端点 z 轴

(b) The upper-point z -axis

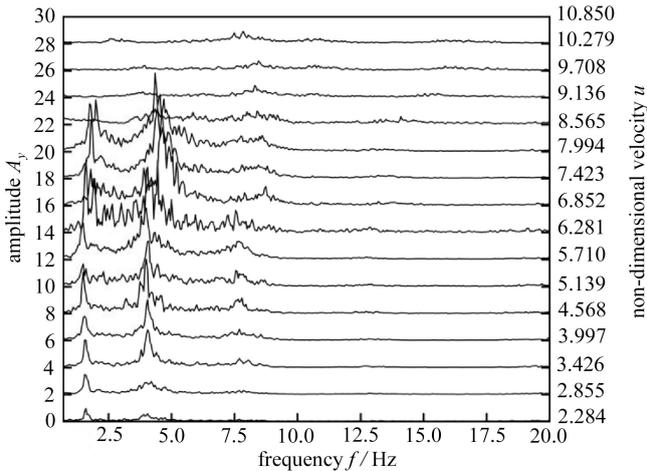
图 6 无泄漏情况下应变响应的谱阵图

Fig. 6 The waterfall plots of strain responses without leakage

分别对每个固定流速下,管道各个通道的动力响应曲线作快速 Fourier 变换(FFT),可以得到在该流速下管道的振动频谱.将不同无量纲流速下对应的振动频谱图整合到一起,可以得

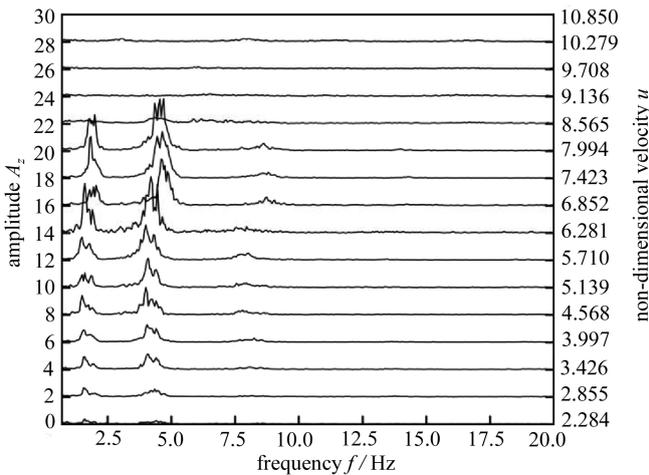
到谱阵图(频谱瀑布图).谱阵图是将振动信号的幅值随第三坐标变化叠置而成的三维谱图,本文的分析中第三坐标选取为无量纲流速 u .谱阵图的横坐标为频率;谱阵图的左纵坐标为幅值,右纵坐标为无量纲流速.

分析图 6 无泄漏情况下管道两个应变通道的应变响应的谱阵图,随着 u 的增加,各个通道频谱图的特征变化并不明显.图 6(b) 所对应的上端点 z 轴方向在 $2 \sim 2.5$ Hz, $8 \sim 10$ Hz 频段出现峰值,峰值非常小.在正式实验前所做的预实验中,测得整个管道系统存在 2.5 Hz 和 9.3 Hz 的固有频率,频谱中出现的峰值所对应的频率与整个管道系统的固有频率高度吻合.考虑到变频水泵不能提供完全均匀流速的流体固有频率,高度吻合的峰值出现的原因是水流或者外界振动激发了管道的固有频率振动.所以,在管道无泄漏时,管道没有明显的振动效应.



(a) 上端点 y 轴

(a) The upper-point y -axis



(b) 上端点 z 轴

(b) The upper-point z -axis

图 7 泄漏情况下应变响应的谱阵图

Fig. 7 The waterfall plots of strain responses with leakage

分析图 7 的两个应变通道应变响应的谱阵图,泄漏情况的谱阵图呈现出与无泄漏情况下

的谱阵图完全不同的特征。

图 7(a) 对应管道上端点 y 方向应变片通道, 首先分析各个无量纲流速下的频谱曲线, 各个无量纲流速下的频谱曲线在 1.5~1.7 Hz, 3.9~4.3 Hz, 7.5~8.7 Hz 频率段出现峰值。从峰值的大小来看, 当流速较低时, 1.5~1.7 Hz 频率段峰值较大; 当流速在中段时, 3.9~4.3 Hz 出现的峰值在大小上占主导地位; 当 u 较高时, 整个频段幅值都普遍偏小, 其中 7.5~8.7 Hz 频率段峰值较大。然后对比不同流速下的情况, 不同流速下峰值所对应的频率略有差异, 峰值的大小随着 u 的变化呈现出很强的规律性。将在 3.9~4.3 Hz 频率段的峰值大小提取出来, 可以发现, 随着 u 的增大, 频谱峰值逐渐增大, $u = 6.85$ 时达到最大值, 极值为 6.67; 经过极值点后, 随着 u 继续增大, 频谱峰值逐渐减小。1.5~1.7 Hz 和 7.5~8.7 Hz 频率段也呈现了相同的特征, 在 $u = 6.28$ 时, 1.5~1.7 Hz 和 7.5~8.7 Hz 频率段均达到了极值, 分别为 5.35 和 1.66。图 7(b) 对应管道上端点 z 方向应变片通道, 频谱特征与上端点 y 方向的特征基本一致, 各个无量纲流速下的频谱曲线在 1.5~1.7 Hz, 3.9~4.3 Hz, 7.5~8.7 Hz 频率段出现峰值。峰值的大小随着 u 的变化同样呈现出很强的规律性: 在 3.9~4.3 Hz 频率段, 随着 u 的增大, 频谱峰值逐渐增大, 在 $u = 6.28$ 时达到最大值, 极值为 4.1, 经过极值点后, 随着 u 继续增大, 频谱峰值逐渐减小; 在 1.5~1.7 Hz 和 7.5~8.7 Hz 频率段也呈现了相同的特征, 1.5~1.7 Hz 频率段在 $u = 6.28$ 时达到了极值 3.62, 7.5~8.7 Hz 频率段在 $u = 6.85$ 时达到了极值 0.61。

3.4 振动频谱理论推导分析

当输流管发生泄漏时, 泄漏的流体对管道振动所产生的影响与悬臂梁的非保守项非常相似, 可以简化为作用在管道上的力对管道的振动做出贡献。所以微分方程中的泄漏项可以由以下公式进行计算^[18]:

$$W = \sum_{i=1}^N (M_{is} U_{is} \dot{\omega} + M_{is} U_{is}^2 \omega') \delta(x - x_i), \quad (7)$$

式中 N 为泄漏口的数量, 下标 i 为计数单位, M_{is} 和 U_{is} 分别表示泄漏流体的质量和速度, 采用含有位置参数 x_i 的 δ 函数来表达力作用的位置。将泄漏项无量纲化并和无泄漏状态下的无量纲微分方程(3)整合, 可以得到输流管在泄漏状态下的无量纲微分方程:

$$\alpha \dot{\eta}'''' + \eta'''' + \left[u^2 - \Gamma - \gamma(1 - \xi) - \frac{1}{2} \mathcal{A} \int_0^1 (\eta')^2 d\xi - \alpha \mathcal{A} \int_0^1 \eta' \dot{\eta}' d\xi \right] \eta'' + 2\beta^{1/2} u \dot{\eta}' + \gamma \eta' + \ddot{\eta} + W^* = 0, \quad (8)$$

其中无量纲的泄漏项为

$$\begin{cases} W^* = \sum_{i=1}^N (\beta_i^* u_i^* \dot{\eta} + \beta_i^* u_i^{*2} \eta') \delta(\xi - \xi_i), \\ \beta_i^* = \frac{M_{is}}{M + m}, u_i^* = \left(\frac{M + m}{EI} \right)^{1/2} U_{is} L. \end{cases} \quad (9)$$

一般对于泄漏问题的处理, 将泄漏口看作是喷嘴或者毛细管, 从尺度上来讲对于输流管来说很小, 满足壅塞流条件, 可以运用非定常的 Bernoulli 方程:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + gz + \frac{p}{\rho} = f(t). \quad (10)$$

通过分析流体开始进入管道部分和泄漏位置的参数, 利用 Bernoulli 方程获得泄漏速度:

$$U_s = \sqrt{2gh + U^2 + 2 \frac{p_{in} - p_{out}}{\rho_f} \tanh \left(\frac{\sqrt{2gh + U^2 + 2((p_{in} - p_{out})/\rho_f)} t}{D_o - D_i} \right)}, \quad (11)$$

其中 p_{in} 代表压力在 $x = 0$ 处的数值, p_{out} 代表压力在 $x = L$ 处的数值. 泄漏速度在开始时迅速增加, 然后保持稳定.

和处理无泄漏时的微分方程一致, 利用 Litz-Galerkin 方法, 将时间与空间进行变量分离, 使微分方程离散化. 采用 Houbolt 法将微分方程化为非线性方程组, 使用 Newton-Raphson 法求解非线性方程组, 可以计算出当与实验相同位置发生泄漏时, 管道上端点的动力响应曲线, 对其作快速 Fourier 变换, 绘制出基于理论计算的谱阵图.

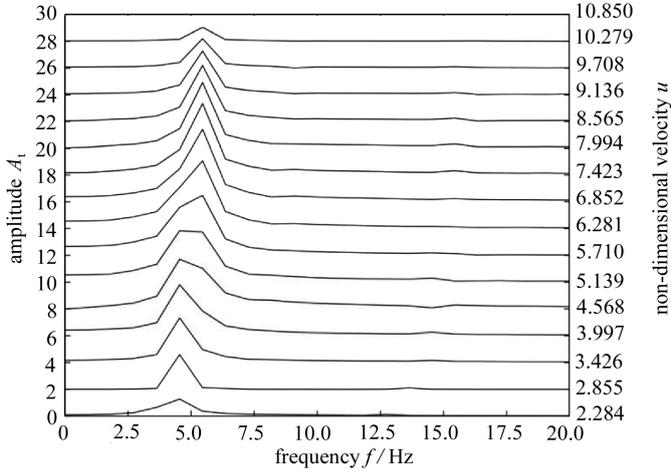


图 8 不同流速泄漏情况下应变响应的谱阵图

Fig. 8 The waterfall plots of strain responses with leakage

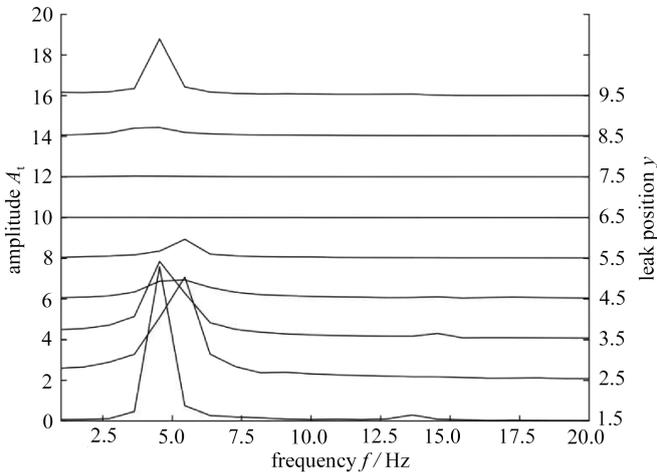


图 9 不同泄漏点泄漏情况下应变响应的谱阵图

Fig. 9 The waterfall plots of strain responses with leakage

分析图 8, 理论计算得到的谱阵图与实验所得谱阵图的特征极其相似, 均在 5 Hz 左右出现峰值, 并且峰值随 u 的增大呈现明显的规律性, 随着 u 的增大, 频谱曲线的峰值先增大再减小, 在 $u = 6.28$ 左右时达到最大. 与实验不同的是, 理论计算只存在一个峰值频率, 探究其原因, 由于实验环境无法达到理想环境, 所以推断泄漏时, 外界的扰动激发了管道 2.5 Hz 的第一阶固有频率, 而 5 Hz 左右的频率则与理论计算结果吻合, 是泄漏效应所带来的影响.

下面探究泄漏位置对输流管振动响应情况的影响. 维持 $u = 6.28$, 改变泄漏点的位置, 可以

计算管道上端点的动力响应曲线,对其作快速 Fourier 变换,绘制出以泄漏位置为第三坐标的谱阵图,如图 9 所示。

分析图 9,频谱图的第三坐标即右侧的 y 坐标为泄漏位置,0 代表管道最下端,10 代表管道最上端,其余以此类推,例如实验环境时泄漏口在距下端点 $1/4$ 的位置,即泄漏位置为 $y = 2.5$ 。当泄漏点越靠近两端时,泄漏引发的管道振动幅度越大,而泄漏点靠近中部时,管道没有明显的振动特征出现。振动幅度随泄漏位置成不均匀对称的特征,对称点为 midpoint 偏上端点。究其原因是因为管道系统并非对称的系统,内部流体的流向决定了谱阵图非均匀对称的特征。泄漏点的变化对管道振动的频率几乎没有影响,谱阵图中所有的幅值均出现在 5 Hz 左右。

3.5 讨论

对无泄漏验证性实验、泄漏情况实验所得的结果以及理论计算结果进行分析,可以发现泄漏这一状况对管道产生了几种影响,泄流效应具体表现在以下几个方面。

1) 管道系统稳定性。管道无泄漏发生时,上端点的总应变-无量纲流速曲线有以下特征:在小流速段应变保持稳定,达到无量纲临界流速时,总应变开始随着 u 的增大而增大,而在泄漏时,情况发生改变。泄流效应主要造成两方面的影响:第一,相较于无泄漏的情况,泄流效应导致应变值更大;第二,由于泄流效应的影响,无量纲流速与总应变存在近似线性的关系,曲线是一条近似的直线,而不再存在明显的临界流速,不过可以看到,当接近临界流速时,曲线的斜率有略微的增大。分析其原因,由于泄漏孔的存在,在泄漏时,泄漏孔冲出的水流提供了作用在管道上的径向反冲力,导致从泄漏一开始便会有应变产生,并且随着流速的增加逐渐增大,而达到临界流速时,超临界叉式发散所造成的影响也会叠加在反冲力所造成的影响上。

2) 失稳响应特征。通过频谱分析,管道无泄漏发生时,两个通道的频谱在两个频率段出现了峰值,峰值很小,无泄漏情况下的管道并未发生明显的振动响应。存在泄漏孔的情况下,管道的频谱特征与无泄漏时有很大区别,泄流效应主要造成了以下两方面的影响:

第一,泄流效应产生并加剧了管道的振动效应,管道发生泄漏时,在某个特定频率段出现较大的峰值,泄流效应所造成的峰值与无泄漏情况下相比大了一个数量级,最大峰值为 6.67。对于这一现象,可以给出如下物理解释:在不考虑泄漏时,两端固定支持的输流管是保守系统,即使受到外界的扰动,也会由于阻尼回复到静止状态,管内流体带来的影响只造成输流管的形变,不会引起振动响应,所以图 6 的谱阵图上没有明显的振动特征;在泄漏发生时,从泄漏处流出的流体对管道振动的效果类似非保守项,管道是非保守系统,泄漏引发了管道的振动,所以图 7 的谱阵图上出现明显的振动特征。

第二,两个通道的各个频率段,随着 u 的变化,几乎都出现了这样的特征:对于同一频率段,首先频谱峰值随着 u 的增大而增大,在 $u = 6.28$ 或 $u = 6.85$ 左右时达到最大,越过极值点后,随着 u 的增大,频谱峰值反而减小。对于这一现象,可以利用经典线性理论推导出的管道运动方程(1)来解释,管道内部流体流过等效于对管道施加了一个大小为 MU^2 的离心力,效果等效于压缩管道。而管道自身的重力作用为拉伸管道。当管内没有流体流过时,管道在自身重力的作用下处于拉伸状态,此时管道的稳定性较强;随着 u 越来越大,管道的自身重力影响逐渐被离心力抵消,管道稳定性逐渐反映在振动响应上,泄漏诱导出的振动响应在幅值上逐渐增大;随着 u 继续增大,离心力占主导地位,管道呈现压缩状态,泄漏所诱导出的振动响应在幅值上反而越来越小。另外通过理论计算,泄漏口的分布位置也会对泄漏导致的管道振动特征造成影响,泄漏口越靠近两端,引发的管道振动幅值越大,而泄漏口位置与管道振动频率没有直接

的关系。

4 结 论

本文通过经典线性理论与实验相结合的方法,分析了管道在无泄漏和泄漏情况下的应变响应和振动响应。通过比较无泄漏和泄漏情况下管道动力响应情况的区别,归纳总结出管道的“泄流效应”。基于泄漏试验发现,泄漏会加剧管道的应变,使管道在实际工程应用中有可能因为泄漏的应变达到最大强度而遭到破坏;泄流效应还会诱发特定频率段的振动响应,并且随着泄漏速度的增大,振动的幅值会随之增大,强烈的振动可能引发更严重的泄漏。

由于实验场地和器材的限制,本次实验选取的管道材质弹性模量较小,相对来说更容易受到外界干扰因素的影响,对实验结果的准确性有一定程度的影响;由于实验材料的限制,导致采样点和泄漏点的选取较少,未能考察多个采样点和不同泄漏点发生泄漏的情况,频谱分析也由于实验设备的限制导致频域较窄,未能分析高频振动。今后若开展更深入的实验,首先可以更换管道材质和尺度,使得实验可以设置更多的采样点,并提高系统抗外界干扰因素的能力;另外可以更改提供水流的设备为重力水箱,这样可以改善变频泵提供水流时产生的水流不稳定的情况;最后可以多设置几个泄漏点来进行实验,用来与理论计算结果对比,以探究不同位置产生泄漏对管道产生的影响。

参考文献(References):

- [1] FEODOS'EV V P. Vibrations and stability of a pipe when liquid flows through it[J]. *Inzhenernyi Sbornik*, 1951, **10**: 169-170.
- [2] HOLT A, GEORGE H. Bending vibrations of a pipe line containing flowing fluid[J]. *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 1950, **17**: 229-232.
- [3] NIORPSON I N. Vibrations of a cylindrical tube containing flowing fluid[M]//*Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden*. Elanders Boktr, 1953.
- [4] GREGORY R W, PAÏDOUSSIS M P. Unstable oscillation of tubular cantilevers conveying fluid II: experiments[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1966, **293**(1435): 528-542.
- [5] PAÏDOUSSIS M P. *Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*[M]. Academic Press, 1998.
- [6] THURMAN A L, MOTE C D. Nonlinear oscillation of a cylinder containing a flowing fluid[J]. *Journal of Engineering for Industry*, 1969, **91**(4): 1147-1155.
- [7] HOLMES P J. Bifurcations to divergence and flutter in flow-induced oscillations: a finite dimensional analysis[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, **53**(4): 471-503.
- [8] NIKOLIĆ M, RAJKOVIĆ M. Bifurcations in nonlinear models of fluid-conveying pipes supported at both ends[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2006, **22**(2): 173-195.
- [9] KARAGIOZIS K N, PAÏDOUSSIS M P, MISRA A K E, et al. An experimental study of the nonlinear dynamics of cylindrical shells with clamped ends subjected to axial flow[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, **20**(6): 801-816.
- [10] BENJAMIN T B. Dynamics of a system of articulated pipes conveying fluid I: theory[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1962, **261**(1307): 457-486.

- [11] MODARRES-SADEGHI Y, PAÏDOUSSIS M P, SEMLER C, et al. Three-dimensional oscillations of a cantilever pipe conveying fluid[J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2008, **43**(1): 18-25.
- [12] 张凯凯, 谭霞, 丁虎, 等. 超临界输流管道 3:1 内共振下参激振动响应[J]. *应用数学和力学*, 2018, **39**(11): 1227-1235. (ZHANG Kaikai, TAN Xia, DING Hu, et al. Parametric vibration responses of supercritical fluid-conveying pipes in 3:1 internal resonance[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, **39**(11): 1227-1235. (in Chinese))
- [13] 王忠民, 张战午, 赵凤群. 输流粘弹性曲管的稳定性分析[J]. *应用数学和力学*, 2005, **26**(6): 743-748. (WANG Zhongmin, ZHANG Zhanwu, ZHAO Fengqun. Stability analysis of viscoelastic curved pipes conveying fluid[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2005, **26**(6): 743-748. (in Chinese))
- [14] 王小丹. 输油管道动态模型泄漏检测技术研究[D]. 硕士学位论文. 西安: 西安石油大学, 2018. (WANG Xiaodan. Research on oil pipeline leak detection technology based on real time model [D]. Master Thesis. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2018. (in Chinese))
- [15] 郎宪明, 李平, 曹江涛, 等. 基于非平衡数据处理的管道泄漏检测与定位研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2018, **45**(2): 110-118. (LANG Xianming, LI Pin, CAO Jiangtao, et al. Study on pipeline leak detection and location based on imbalance data processing[J]. *Journal of Hunan University(Natural Sciences)*, 2018, **45**(2): 110-118. (in Chinese))
- [16] 韩宝坤, 蒋相广, 刘西洋, 等. 基于声波法的天然气管道泄漏检测与定位系统研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2018, **37**(4): 102-110. (HAN Baokun, JIANG Xiangguang, LIU Xiyang, et al. Natural gas pipeline leakage detection and location system based on acoustic wave method[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2018, **37**(4): 102-110. (in Chinese))
- [17] MURVAY P S, SILEA I. A survey on gas leak detection and localization techniques[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, **25**(6): 966-973.
- [18] ZHANG W, MENG S, LI Y. Numerical analysis of the leaking pipe vibration: applications in the oil spill problem[C]//OCEANS 2016. Shanghai, 2016.
- [19] MENG S, LI Y, WANG X F. A simulation study on the dynamic stability of a fluid-conveying pipe with a constant velocity leakage[J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 2017, **139**(4): 041303.
- [20] MODARRES-SADEGHI Y, PAÏDOUSSIS M P. Nonlinear dynamics of extensible fluid-conveying pipes, supported at both ends[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2009, **25**(3): 535-543.

An Experimental Study of Leakage Effects on Flexible Pipelines

GUO Shihao, LI Ye

(*School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P.R.China*)

Abstract: Based on the model experiment, the leakage effects introduced by the leaking hole on the flexible pipeline with a constant internal flow velocity were studied. It is found that the leakage effect can change the critical value, so that the deformation increases linearly with the flow velocity. The leakage effect can also increase the deformation amplitude, and at the same time excite different vibration modes of the pipeline system, causing the vibration responses of multiple frequencies. The research provides a basis for the leakage location in pipelines and an experimental reference for numerical simulation.

Key words: pipeline; fluid-structure coupling; leakage effect; leakage

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China (General Program)
(51479114;11742021;51761135012)

引用本文/Cite this paper:

郭世豪, 李晔. 柔性输流管泄流效应实验研究[J]. 应用数学和力学, 2019, **40**(8): 866-879.

GUO Shihao, LI Ye. An experimental study of leakage effects on flexible pipelines[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2019, **40**(8): 866-879.