

两端固定输流管振动实验研究*

程鹏¹ 石兴东¹ 张宇飞^{1,2†}

(1. 沈阳航空航天大学 航空宇航学院, 沈阳 110136)

(2. 广西大学 土木建筑工程学院工程力学系, 南宁 530004)

摘要 通过实验的方法对简谐激励和脉动流作用下的两端固定输流管的动力学行为进行振动测试分析. 设计并制作了两端固定输流管的振动实验装置, 为确保实验结果翔实可靠, 选取三种不同材料的管分别进行了三次实验, 研究了管内流体流速、激振力振幅和脉动流频率对两端固定输流管振动特性的影响. 结果表明, 流体流速和激振力幅值对两端固定输流管的一阶共振特性和振动幅值有着显著影响, 在脉动流作用下, 两端固定输流管存在混沌运动, 并且随着脉动频率的增大, 管道平均振幅减小.

关键词 输流管, 简谐激励, 脉动流, 混沌运动, 振动实验

中图分类号: TH113.1

文献标志码: A

Experimental Study on Vibration of Clamped-Clamped Pipe Conveying Fluid*

Cheng Peng¹ Shi Xingdong¹ Zhang Yufei^{1,2†}

(1. College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, China)

(2. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract The dynamic behaviors of the clamped-clamped pipe conveying fluid under the harmonic excitation and pulsating flow are investigated by using the experimental method. The vibration experimental equipment of the clamped-clamped pipe conveying fluid is designed and made. In order to ensure that the experimental results are accurate and reliable, three pipes of different materials are selected for the experiments. The influences of the fluid velocity, excitation amplitude and pulsating flow frequency on the vibration characteristics of the clamped-clamped pipe conveying fluid are studied. The results show that the fluid velocity and excitation amplitude have a significant impact on the first-order resonant characteristics and vibration amplitude of the clamped-clamped pipe conveying fluid. There are the chaotic vibrations in the clamped-clamped pipe conveying fluid under pulsating flow. The average amplitude of the pipes decreases with the increase of the pulsation frequency.

Key words pipe conveying fluid, harmonic excitation, pulsating flow, chaotic vibrations, vibration experiment

引言

输流管道是一种应用广泛的运输方式, 实际应

用中管内流体多有脉动流出现, 外激励以及流体与管道的流固耦合作用会引起管道的振动, 可能造成管道的失稳, 严重时引发管道泄露等重大事故, 因

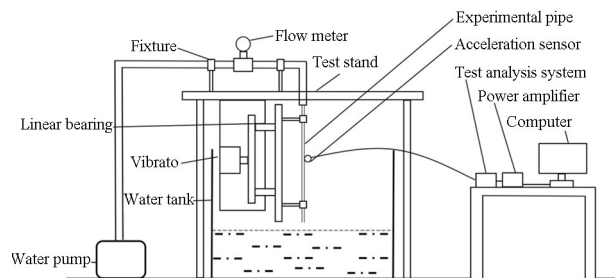
此不同工况下输流管的动力学特性具有重要的研究意义。

国内外学者关于输流管振动问题开展了很多有意义的工作。Paidoussis^[1]围绕输流管道振动作了精辟的综述,阐述了输流管存在颤振失稳和发散失稳两种失稳类型,指出两端支承管在定常流作用下不会发生动态失稳。Holmes等^[2-8]众多学者在输流管非线性振动方面,分析了两端支承管脉动内流引起的参数共振和非线性振动的稳定性。Yuan等^[9]首次基于Timoshenko梁理论建立了微弯输流管的动力学模型,研究了两端固定管道的两种初始构型。Shao等^[10]采用解析法和数值法研究了两端固定输流管道的自由振动特性,包括固有频率、模态、临界速度、静力平衡构形分岔等。王琳^[11]对输流管稳定性、分岔以及混沌运动的产生进行了详细阐述,深入研究了脉动流作用下两端铰支管的动力学行为。Zhu等^[12]研究了管内为粘弹性流体且管道受横向激励作用下输流管的非线性振动。Guo等^[13]搭建了管道系统模态试验台,分析了不同激励和阻尼对复杂输流管道系统动态特性的影响。Liang等^[14]将工作钻柱建模为旋转的输流管道,采用解析和数值方法研究了该系统在横向激励下的受迫振动特性。Wasiu等^[15]对内表面不连续的复合管进行了动力响应分析,论证了内表面缺陷对复合管动态响应的影响。Dana等^[16]建立了管内流体密度沿管长变化输流管的动力学模型,对两端固定管道的动力学行为进行了解析和数值研究。邹光胜等^[17]对两端支承管约束附加扭转弹簧,对此种约束下管道的振动特性进行了实验研究。梁峰^[18]建立了输流管道实验系统,对脉动流作用下输流管道的动态稳定性进行了实验研究。随岁寒和李成^[19]计算了两端简支管道在重力和流体作用下的挠度与转角,分析了管道轴向预应力对固有频率的影响。

目前关于输流管振动问题的理论分析和数值模拟工作开展的较多,由于实验管选材及实验设备研制比较困难等原因,实验研究相对开展的很少。目前关于两端支承输流管的实验,仅研究了支承方式为弹性支承时支承运动频率对输流管振动特性的影响,以及脉动流作用下的参数共振等问题。本文用实验的方法研究了支承方式为刚性支承时管内流体流动方式以及外激励对两端固定输流管振动特性的影响。

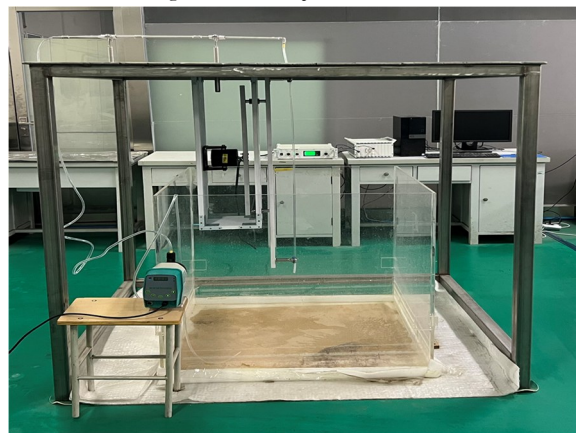
1 实验系统及方案

两端固定输流管的振动实验系统如图1所示,由实验台、激振器、循环管道、信号采集四个部分组成,其中实验台包括台架主体、管道支承、水箱、激振器支架等部分。实验中水的流动方式有两种,分别由两个水泵提供:脉动泵提供不同脉动频率的水流,恒压泵提供不同流速的定常流。管路中安装的流量计可以实时监测水流流速。采用微型加速度传感器拾取实验信号,其具有重量轻、体积小的优点,有效避免了使用应变片会引起管道附加刚度的问题,从而使测量精度得以保证。振动信号采集由DH5922D动态信号测试分析系统完成,加速度传感器连接测试系统将振动信号传输到电脑,通过DHDAS软件可以实时监测并记录加速度信号。



(a) 实验结构简图

(a) Diagram of the experimental structure



(b) 实验装置

(b) Experimental equipment

图1 实验系统

Fig. 1 Experimental system

实验管选用了PVC、PA6和硅橡胶三种不同材料管,分别记作管1、管2及管3,各管的物理参数如表1所示。两端固定输流管模型如图2所示,其中 U 为管内流体流速, L 为两端支承输流管长度, F 为激振器提供的激振力, X 为管纵向坐标, Y 为管横向坐标。实验步骤如下:

- (1) 测量实验管物理参数并记录,并以两端固定的方式安装到实验台;
- (2) 加速度传感器固定在实验管中间位置,实验管静止后启动信号分析软件;
- (3) 选定一种实验水流,调整实验装置里的阀门使其成为稳定循环水流;
- (4) 固定激振器的振动幅值,启动激振器;
- (5) 激振频率从 1 开始逐渐增加,测试软件记录完整的实验数据;
- (6) 改变水流流速,重复实验过程(3)~(5);
- (7) 改变激振幅值,重复实验过程(3)~(5);
- (8) 更换实验管,重复实验过程(1)~(7).

表 1 实验管参数
Table 1 Pipe parameter

Parameter	Pipe1	Pipe2	Pipe3
Material quality	PVC	PA6	Silicon rubber
Internal diameter d (mm)	6	6	6
External diameter D (mm)	8	8	8
Length L (m)	1	1	1
Mass per unit length M (kg/m)	0.025	0.050	0.025
Bending rigidity EI (N/m ²)	0.710	0.324	—
Number of experiments	3	3	3

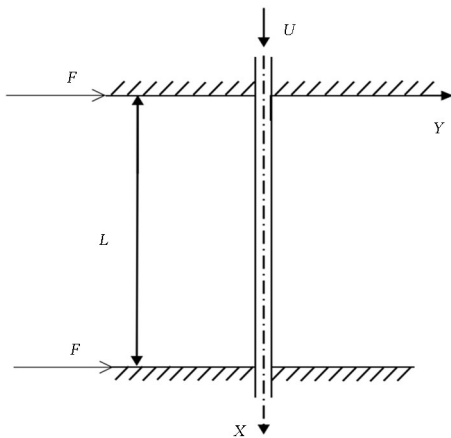


图 2 两端固定输流管模型

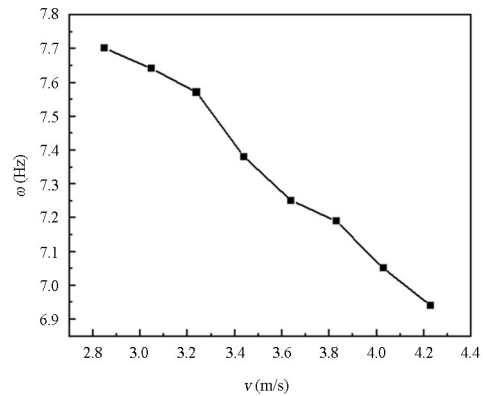
Fig. 2 Clamped-clamped pipe conveying fluid model

2 实验结果及数据分析

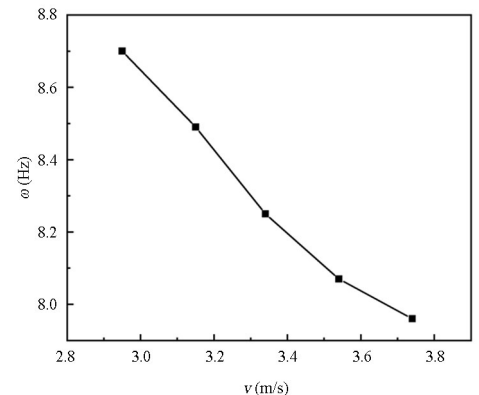
2.1 流体流速变化对输流管振动的影响

在简谐激励力的作用下,测试管内流体流速的改变对两端固定输流管振动特性的影响.实验水泵为恒压泵,简谐激励力由激振器提供.实验时通过DHDAS软件控制激振器产生 1Hz~50Hz 的扫频

振动,通过观测管道运动、波形图以及 DHDAS 软件中的信号来确定一阶共振频率和分析管道振幅的变化.改变管内流体的流速,分别测试三种管的共振频率和最大振幅,为避免实验结果偶然性,每种管重复三次实验,以管 1、管 3 为例进行说明,实验结果如图 3、图 4 所示.其中图 3 为逐渐增大流体流速时,管道一阶共振频率的变化情况,管 1 流速从 2.9m/s 逐渐增大到 3.75m/s,产生共振的频率从 7.7Hz 降低到 7.2Hz,管 3 流速从 2.9m/s 逐渐增大到 3.75m/s,产生共振的频率从 8.7Hz 降低到 7.9Hz,随着流速的增加管道一阶共振频率会随之降低,这说明流速的改变会影响管道的共振频率.图 4 为逐渐增大流体流速时管道一阶共振振幅的变化情况,管 1 流速从 2.9m/s 逐渐增大到 3.8m/s,共振幅值 27.6mm 降低到 22.3mm,管 3 流速从 2.9m/s 逐渐增大到 3.75m/s,共振幅值 19.6mm 降低到 7.3mm,管的材料不同,但测试结果在定性上是一致的,随着管内流速的增大,管道一阶共振频率与一阶共振振幅都会随之降低.对应相同的流速改变量,在管 1 与管 3 的尺寸与单位长度质量均



(a) 管 1
(a) Pipe1



(b) 管 3
(b) Pipe3

图 3 共振频率变化图

Fig. 3 Resonance frequency variation diagram

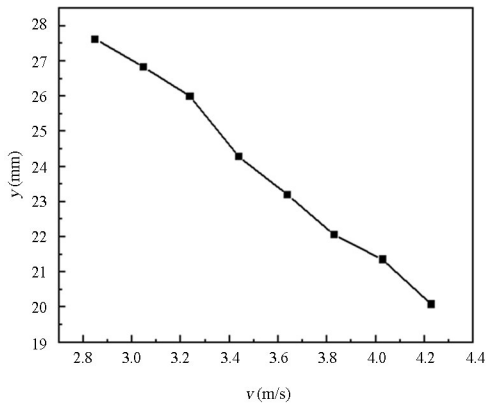
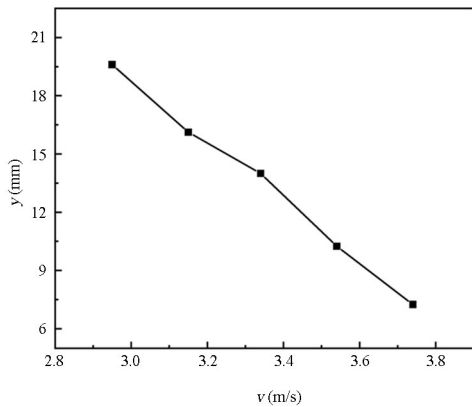
(a) 管 1
(a) Pipe1(b) 管 3
(b) Pipe3

图 4 振动幅值变化图

Fig. 4 Vibration amplitude variation diagram

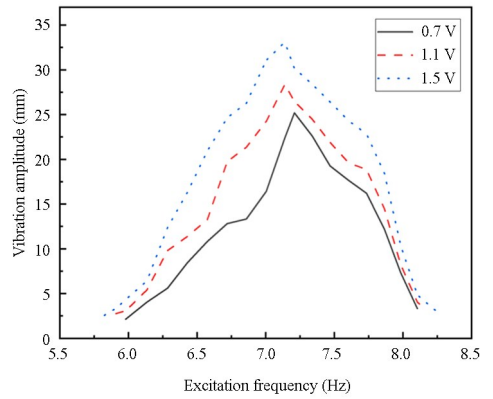
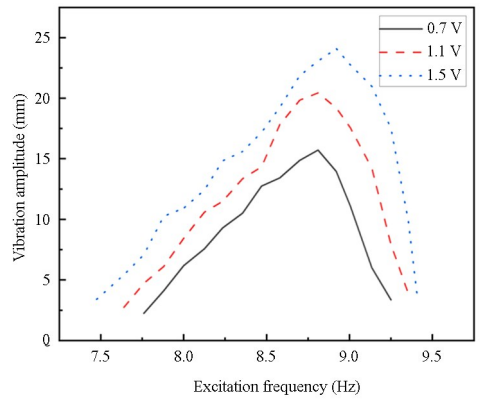
(a) 管 1
(a) Pipe1(b) 管 2
(b) Pipe2

图 5 不同激励力幅值作用下的输流管振幅

Fig. 5 Amplitude of pipe conveying fluid under different excitation amplitudes

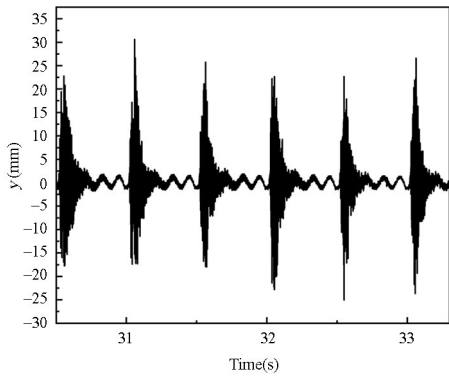
相同的情况下,管 3 一阶共振频率与振动幅值的数值改变量更大,管 3 的材质为硅橡胶,其抗弯刚度远低于 PVC 材质的管 1,这说明,流速变化对抗弯刚度低的输流管影响更大。

2.2 激振力振幅变化对输流管振动的影响

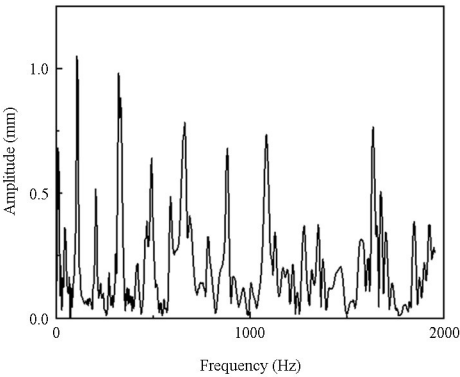
通过调节功率放大器的电压值改变激振器的振幅,测试激振力振幅的改变对两端固定输流管道振动特性的影响.本次实验由恒压泵提供循环水流,保持水流速度为 2.95m/s,改变激振力振幅对三种管分别进行三次重复实验,实验结果在定性上都是一致的,以管 1、管 2 为例进行说明,结果如图 5 所示.图中三条折线分别为电压值是 0.7V、1.1V、1.5V 时输流管产生共振的区域,其中横坐标表示发生共振的频率值,纵坐标表示共振发生时的管道最大振幅.从图中可以看出,当共振发生时,管道振幅会增大至峰值,然后逐渐降低,随着激振力振幅的增大,管道发生共振的频率范围增大,管道共振的振幅也同时增大。

2.3 脉动流对输流管振动的影响

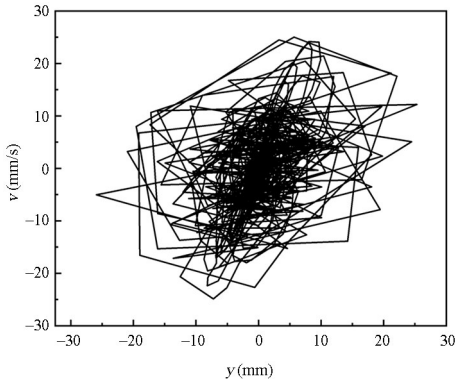
将水泵更换为脉动泵,测试脉动流频率对两端固定输流管振动状态的影响,为避免外激励的影响,将支撑板固定,本次实验对象为 PVC 材料的管 1,实验中水流的脉动频率为 0.1Hz~4Hz,实验次数为三次.如图 6 所示,为水流脉动频率 $f=2\text{Hz}$ 时管 1 的振动情况,其中图 6(a) 是输流管的振动波形图,图 6(b) 为波形图达到波峰时刻的幅值谱图,图 6(c) 为相平面图.从图 6 可以看到,在脉动水流的作用下,管道发生了混沌运动.由于实验条件的限制,脉动泵给出的脉动流具有脉冲的特征,这导致输流管运动状态为脉冲混沌,其振动峰值出现的频率与水流的脉动频率基本一致.当波形图中振幅由波峰向波谷过渡时,管道的振动幅值逐渐降低,运动状态趋向于周期一运动.图 7 为流体脉动频率 $f=4\text{Hz}$ 时输流管的振动情况,运动波形如图 7(a) 所示,与 $f=2\text{Hz}$ 相比在相同时间段内波形图中出现 2 倍数量的波峰波谷,图 7(b) 与



(a) 波形图
(a) Waveform diagram

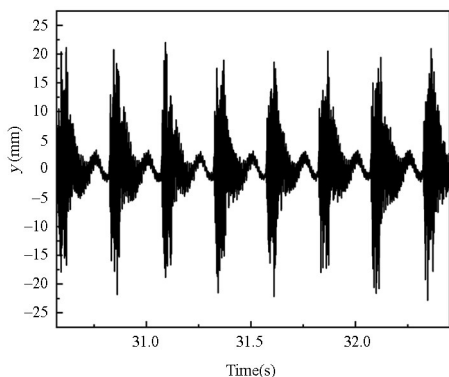


(b) 幅值谱
(b) Amplitude spectrum

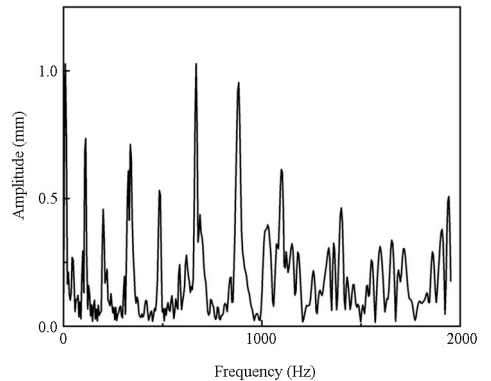


(c) 相图
(c) Phase portrait

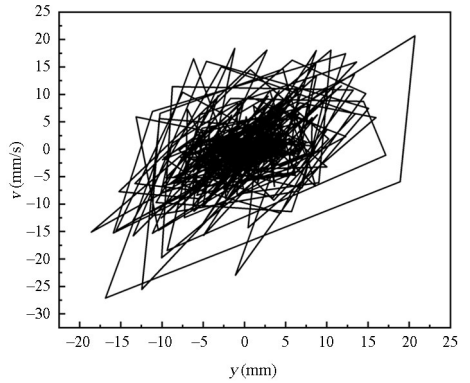
图6 脉动频率为2Hz时的波形图、幅值谱和相图
Fig. 6 Waveform diagram, amplitude spectrum and phase portrait are given when pulsating frequency is 2Hz



(a) 波形图
(a) Waveform diagram



(b) 幅值谱
(b) Amplitude spectrum



(c) 相图
(c) Phase portrait

图7 脉动流频率为4Hz时的波形图、幅值谱和相图
Fig. 7 Waveform diagram, amplitude spectrum and phase portrait are given when pulsating frequency is 4Hz

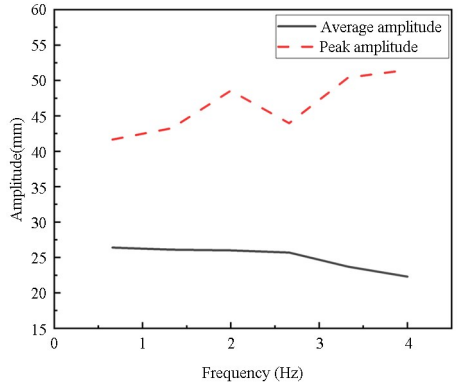


图8 脉动流作用下的平均振幅和最大振幅
Fig. 8 Average and maximum amplitude under pulsating flow

图7(c)分别为幅值谱与相图,由于脉动频率升高,波峰之间的时间间隔缩短,管道振动幅值降低时的运动状态不再趋向周期一,此时管道为混沌运动。

接下来测试脉动频率变化对输流管振动幅值的影响.在0.1Hz~4Hz之间选取不同脉动频率进行多次实验,实验中,为了得到稳定实验数据,对每一频率的测试时长为60秒,实验结果如图8所示.结果表明,输流管的最大振幅具有较强的随机性,与脉动频率的大小无明显关联;平均振幅取值

为连续 20 个波峰峰值点的平均值,随着脉动频率的增大,输流管平均振幅会随之减小。

3 结论

在简谐激励力的作用下,管内流体流速大小对管道一阶共振的影响显著,流速的改变会影响管道的共振频率,流体流速增大,管道发生一阶共振的频率降低,振动幅值降低,实验数据表明流速的变化对抗弯刚度低的输流管影响更大。

激振力振幅的改变会显著影响输流管共振的频率范围,随着激振力幅值增大,发生共振的频率范围增大,管道振幅也增大。管道在外激励作用下发生共振时,管道振幅逐渐增大至峰值后逐渐降低,振幅到达峰值的时间较长,从峰值到共振结束的时间较短。

在脉动流的作用下,输流管会出现混沌运动,管道振动峰值出现的频率与水流脉冲频率基本一致,管道最大振幅与脉动频率的大小无明显关联,随着脉动频率的增大,管道平均振幅随之减小。

参考文献

- [1] PAIDOUSSIS M P. Flow-induced instabilities of cylindrical structures [J]. *Applied Mechanics Reviews*, 1987, 40(2): 163—175.
- [2] HOLMES P J. Pipes supported at both ends cannot flutter [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1978, 45(3): 619—622.
- [3] THOMPSON J M T, LUNN T S. Resonance-sensitivity in dynamic Hopf bifurcations under fluid loading [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 1981, 5(3): 143—150.
- [4] SRI NAMCHCHIVAYA N. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid-I. Subharmonic resonance [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1989, 24(3): 185—196.
- [5] SRI NAMCHCHIVAYA N, TIEN W M. Non-linear dynamics of supported pipe conveying pulsating fluid-II. Combination resonance [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 1989, 24(3): 197—208.
- [6] SRI NAMACHCHIVAYA N, TIEN W M. Bifurcation behavior of nonlinear pipes conveying pulsating flow [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 1989, 3(6): 609—629.
- [7] NOAH S T, HOPKINS G R. Dynamic stability of elastically supported pipes conveying pulsating fluid [J]. *Journal of Sound Vibration*, 1980, 71(1): 103—116.
- [8] JIN J D, SONG Z Y. Parametric resonances of supported pipes conveying pulsating fluid [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005, 20(6): 763—783.
- [9] YUAN J R, FAN X, SHU S, et al. Free vibration analysis and numerical simulation of slightly curved pipe conveying fluid based on Timoshenko beam theory [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2022, 14(2): 2250014.
- [10] SHAO Y F, FAN X, SHU S, et al. Natural frequencies, critical velocity and equilibriums of fixed-fixed Timoshenko pipes conveying fluid [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2022, 10(5): 1623—1635.
- [11] 王琳. 输流管道的稳定性、分岔与混沌行为研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
WANG L. Stability, bifurcations and chaos in pipes conveying fluid [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [12] ZHU B, ZHANG X L, ZHAO T Y. Nonlinear planar and non-planar vibrations of viscoelastic fluid-conveying pipes with external and internal resonances [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2023, 548: 117558.
- [13] GUO X M, XIAO C L, GE H, et al. Dynamic modeling and experimental study of a complex fluid-conveying pipeline system with series and parallel structures [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 109: 186—208.
- [14] LIANG F, QIAN Y, CHEN Y, et al. Nonlinear forced vibration of spinning pipes conveying fluid under lateral harmonic excitation [J]. *International Journal of Applied Mechanics*, 2021, 13(9): 2150098.
- [15] OKE W A, KHULIEF Y A. Dynamic response analysis of composite pipes conveying fluid in the presence of internal wall thinning [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2020, 146(10): 4020118.
- [16] GIACOBBI D B, SEMLER C, PAÏDOUSSIS M P. Dynamics of pipes conveying fluid of axially varying density [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 473: 115202.
- [17] 邹光胜, 金基铎, 沙云东. 简谐激励下输流管动态响应特性的实验研究 [J]. *振动、测试与诊断*, 2001,

- 21(1): 28-31+73.
- ZOU G S, JIN J D, SHA Y D. Experimental study on vibration of pipes conveying fluid under harmonic excitation [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2001, 21(1): 28-31+73. (in Chinese)
- [18] 梁峰. 输流管道横向振动机理及其控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
- LIANG F. Study on the mechanism of transverse vibration and its control of pipes conveying fluid [D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. (in Chinese)
- [19] 随岁寒, 李成. 输流管道弯曲和振动的有限元分析 [J]. *动力学与控制学报*, 2022, 20(4): 83-90.
- SUI S H, LI C. The finite element analysis on bending and vibration of the fluid-conveying pipes [J]. *Journal of Dynamics and Control*, 2022, 20(4): 83-90. (in Chinese)