

管壁振动声源传播特性及管内声场分布研究

敦世钊

华北电力大学, 北京
Email: 690089463@qq.com

收稿日期: 2021年5月15日; 录用日期: 2021年6月11日; 发布日期: 2021年6月18日

摘要

本文对管壁振动声源在管壁上传播特性及管内声场分布进行了研究。建立了有限长圆柱管道壁上振动声源传播模型, 采用有限元方法计算振动声源在管壁上传播。分析了不同频率振动声源、声源尺寸、管内压力对管壁声传播的影响。并进行管道振动实验, 分析了管道内不同背景流作用下管壁振动特性及管壁上脉冲振动传播特性。本文采用Comsol多物理场有限元软件计算, 得到了管壁上声传播特性及轴向、周向、壁厚方向的振动特性, 管内声传播情况及声场分布情况。

关键词

管内声场, 管壁振动, 振动实验

Study on Propagation Characteristics of Sound Source and Distribution of Sound Field in Pipe Wall Vibration

Shizhao Dun

North China Electric Power University, Beijing
Email: 690089463@qq.com

Received: May 15th, 2021; accepted: Jun. 11th, 2021; published: Jun. 18th, 2021

Abstract

In this paper, the propagation characteristics of the vibration sound source on the pipe wall and the distribution of the sound field in the pipe are studied. The vibration propagation model on the wall of a finite length cylindrical pipe is established, and the finite element method is used to calculate the vibration propagation on the wall. The influence of different frequency vibration sound

source, sound source size and pressure on the sound propagation of pipe wall is analyzed. The vibration characteristics of the pipe wall under the action of different background flow and the propagation characteristics of pulse vibration on the pipe wall are analyzed. In this paper, the multi-physical finite element software COMSOL is used to calculate the sound propagation characteristics on the pipe wall and vibration characteristics in axial, circumferential and wall thickness directions, as well as the sound propagation and sound field distribution in the pipe.

Keywords

Sound Field in Tube, Tube Wall Vibration, Vibration Experiment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代文明的不断发展,管道行业也蓬勃发展。但随着时间推移,管道使用量的不断增加,管道使用年限的不断延长,加上管道的磨损、老化、自然腐蚀、机械外力、人为打孔等因素的影响,管道泄漏事故时有发生。管道泄漏严重危害了国家经济建设和居民生活[1] [2]。声发射[3]检测技术作为一种具有在线、动态、快速及经济特性的新型检测技术,可以进行实时管道动态监测。目前在 20 世纪英国就开始研究管道泄漏振动声学检测, Muggleton 等[4] [5]对充满液体的圆柱形长输管道的泄漏进行了研究,对与管道泄漏造成的声音以及振动波的传播做了比较系统的分析,并提出了在介质中充满液体的长输管道中的声振耦合系统存在频散效应。国内,唐秀家等[6]研究了城市供水管道泄漏形成多相湍射流引发应力波在管壁中传播机理,分析了泄漏引发的管道横振、纵振和圆环振动,提出了一系列应力波特征提取指标及其离散数据算法。

管道发生泄漏时,管道内部流体、管道结构固体以及管道外部流体都是泄漏声波传播的媒介[7]。因此研究管壁声传播特性及其声场分布十分必要。构建管壁中声传播特性就要建立固体中声波方程,首先必须了解固体的基本弹性性质。一般固体媒质除了仍能产生体积形变外,还会产生切形变,它除了体弹性外还有切边弹性,因此在固体中一般除了能传播压缩与膨胀的纵波外,同时还能传播切变波,也就是横波。除此之外,在固体的自由表面会产生振幅随表面深度而衰减的表面波[8],由此可见,固体中声波的传播要比流体中复杂得多[9] [10]。本文研究管壁上振动声源在管壁的传播特性及管内声场分布,分析管壁中声传播特性。进行管壁振动实验。

2. 仿真模型及参数设置

仿真模型如图 1 所示,管道材料属性设置为密度为 $7850 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ 、杨氏模量为 205 Gpa 、泊松比为 0.28 、长度为 6 m 、壁厚为 0.01 m 、外径 0.114 m 。忽略管道阻尼影响。管壁外设置为空气域,温度为 20°C ,压力为标准大气压,流体为不可压缩。在管壁上 1 m 处设置声源。采用四面体网格进行网格划分,如图 2 所示。

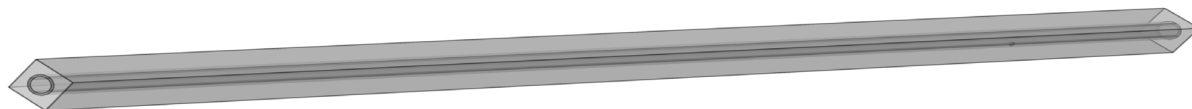


Figure 1. Pipeline model established in COMSOL

图 1. COMSOL 中建立的管道模型

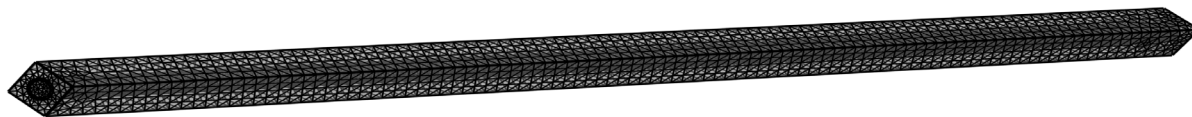


Figure 2. Grid in COMSOL
图 2. COMSOL 中划分的网格

3. 仿真分析

3.1. 管壁上声传播特性

在 Comsol 软件中设置好参数后进行频域计算，起始频率设为 100 Hz，步长为 100 Hz，计算到 10,000 Hz 停止。分析不同频率振动声源、声源尺寸、管内压力对管壁声传播的影响。计算声源尺寸为 $r = 10$ mm，管内压力为 0.1 Mpa，分析不同声源频率管壁上振动情况及管内声传播特性。

图 3 给出了声源尺寸为 $r = 10$ mm，管内压力为 0.1 Mpa 下不同频率的管壁振动模式。

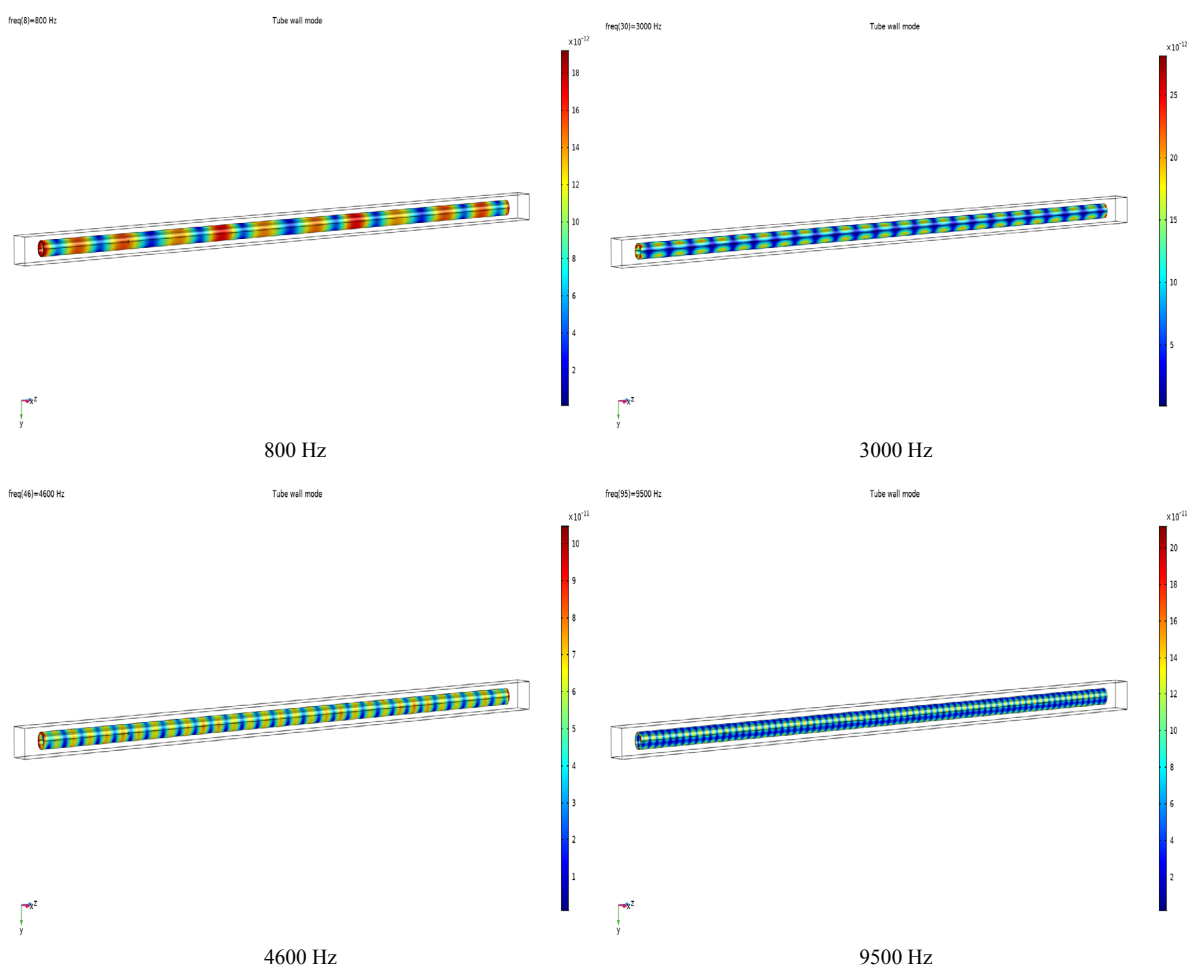


Figure 3. The vibration modes of the pipe wall at different frequencies when the size of sound source is 10 mm
图 3. 声源尺寸为 10 mm 时不同频率下管壁振动模式

在管壁 3 m 处做切面，得到管壁周向振动模式[11]。图 4 给出了声源尺寸为 $r = 10$ mm，管内压力为 0.1 Mpa 下不同频率的管壁周向振动位移。

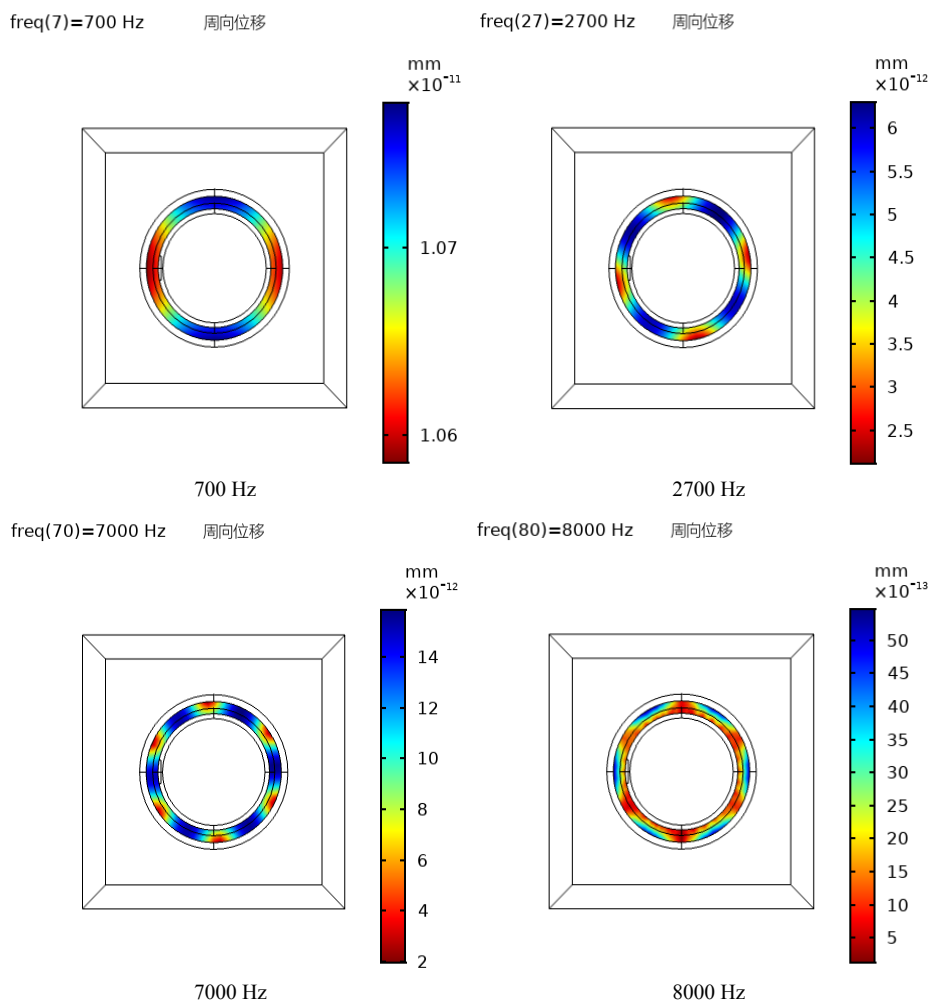


Figure 4. The circumferential vibration modes of the pipe wall at different frequencies when the size of the sound source is 10 mm
图 4. 声源尺寸为 10 mm 时不同频率下管壁周向振动模式

对比图 3 可知当声源尺寸和管内压力一定时，管壁振动随声源频率变化而发生变化，并在某些频率下，管壁轴向振动模式沿着管轴方向成驻波形式。当频率越高时，产生的驻波数越多。对比图 4 可知，当声源尺寸和管内压力一定时，管壁振动沿着管周方向也呈现驻波形式，并在 7000 Hz 时出现 6 个波节。为了得到不同条件下管壁振动情况，改变声源尺寸和管内压力，分析其对管壁振动的影响。

计算声源尺寸为 $r = 25\text{ mm}$ ，管内压力为 0.1 Mpa,为了与声源尺寸为 $r = 10\text{ mm}$ 进行对比，分析相同频率下管壁振动模式。图 5 给出了声源尺寸 $r = 25\text{ mm}$ ，相同频率和管内压力下管壁振动模式。

对比图 5 和图 3 可知，当管内压力与频率相同、声源尺寸不同时，相同频率时，管壁轴向振动趋势基本一致，在相同频率时，管壁轴向振动模式沿管轴方向呈驻波形式。声源尺寸 $r = 25\text{ mm}$ ，相同频率时，引起的振动位移大于声源尺寸 $r = 10\text{ mm}$ 。对比图 5 和图 4 可知管壁振动模式沿管周方向趋势基本一致，也有驻波产生，同样的声源尺寸变大，管壁振动位移变大。

计算声源尺寸为 $r = 10\text{ mm}$ ，管内压力为 0.3 Mpa，分析不同声源频率管壁上振动模式，与声源尺寸为 $r = 10\text{ mm}$ ，管内压力为 0.1 Mpa 进行对比。图 6 给出了管内压力为 0.3 Mpa 相同频率和声源尺寸下管壁振动模式。

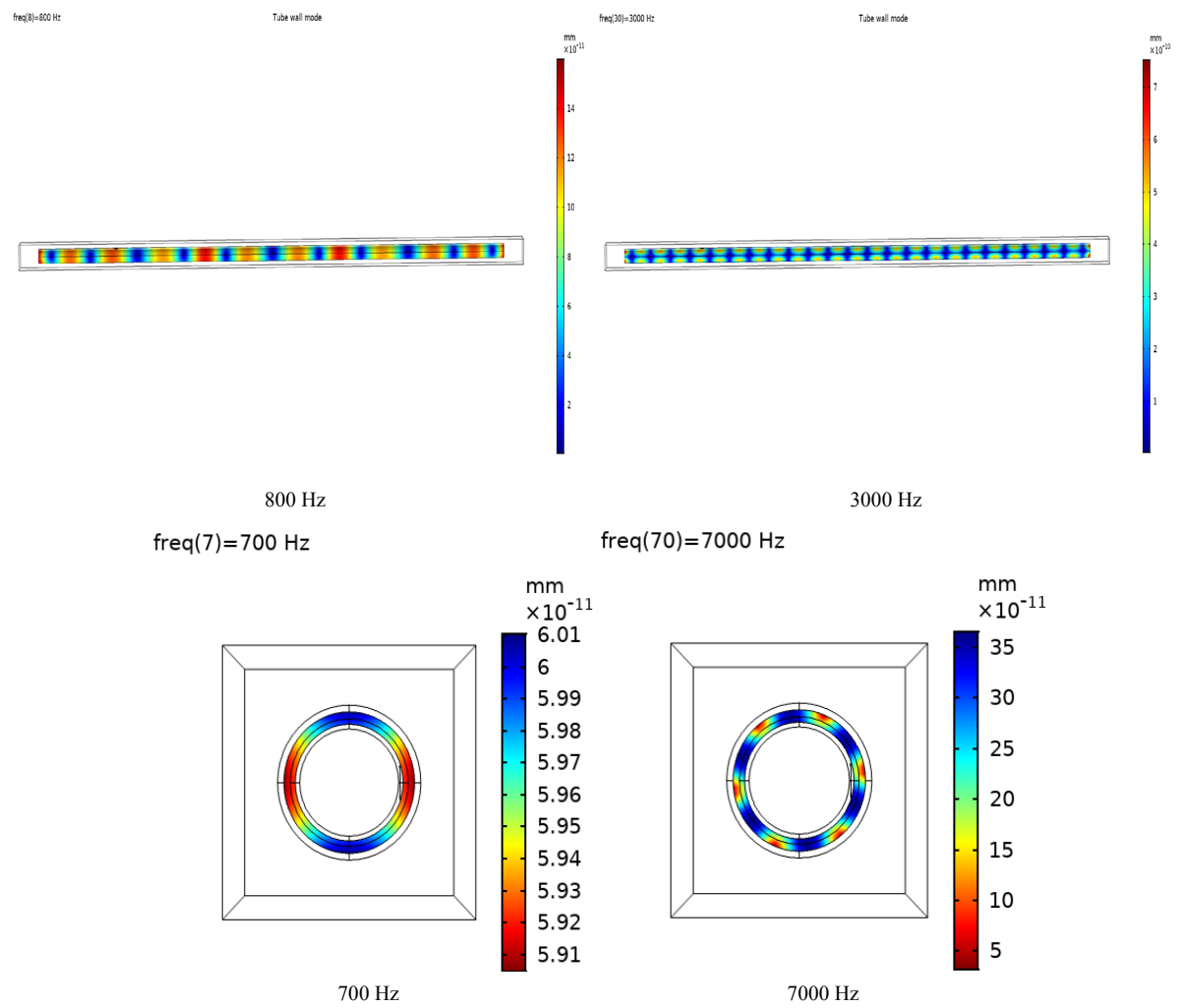
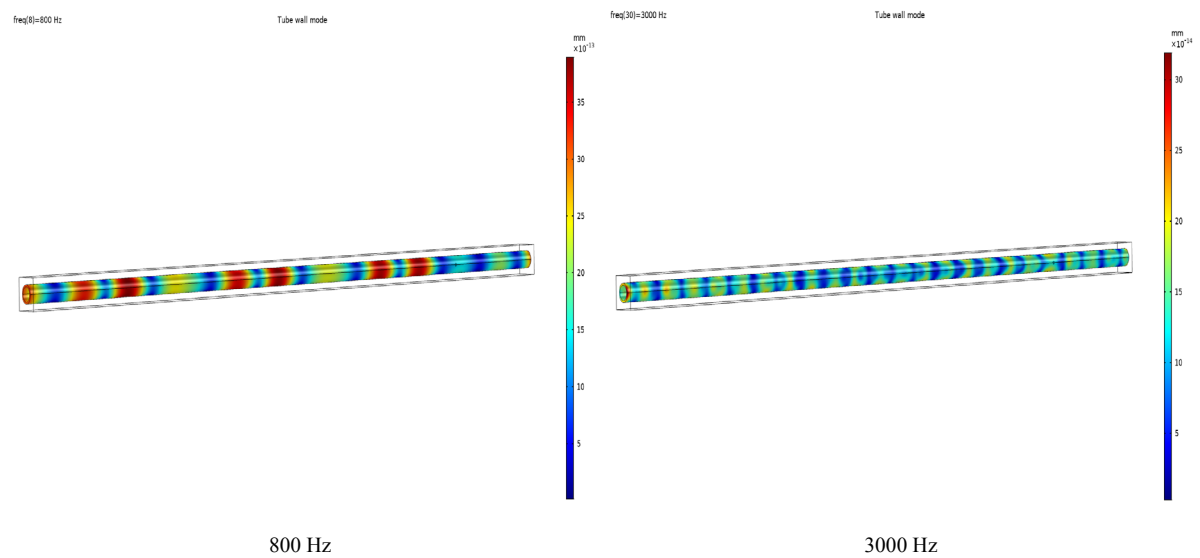


Figure 5. The vibration modes of the pipe wall at different frequencies when the size of the sound source is 25 mm
图 5. 声源尺寸为 25 mm 时不同频率下管壁振动模式



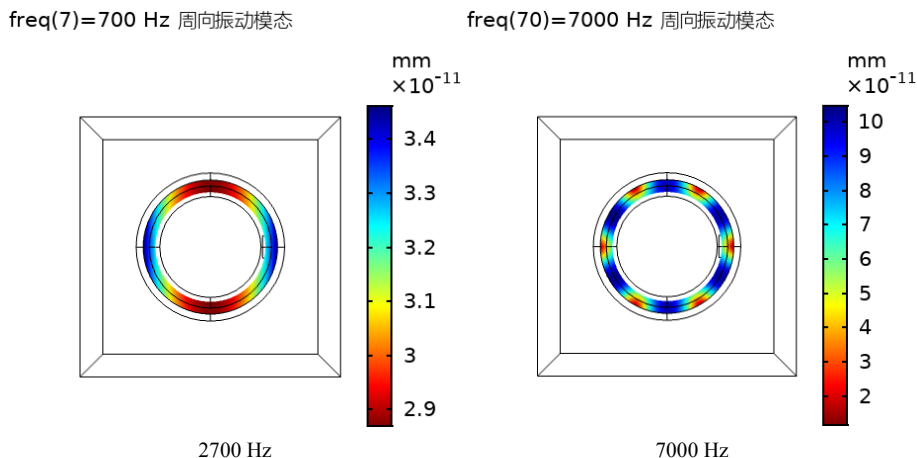


Figure 6. The vibration modes of the pipe wall at different frequencies when the size of the sound source is 10 mm and the pressure is 0.3 MPa

图 6. 声源尺寸为 10 mm 压力为 0.3 Mpa 时不同频率下管壁振动模式

对比图 6 和图 3 可知，当频率与声源尺寸相同，管内压力不同的管壁而言，管内压力越大，管壁振动位移越大。在相同频率下，管壁振动沿管轴方向也呈驻波形式，形成振动趋势基本一致。对比图 6 和图 4 可知管壁振动沿管周方向趋势一致，也产生驻波。由此可知声源尺寸和管内压力主要影响管壁振动位移，声源频率主要影响管壁模态，不同声源频率决定管壁驻波数目。

3.2. 管内的声场分布

管壁上振动声源除了会引起管壁振动外，还会沿着管内传播，研究不同频率下管内声传播[12]。图 7 给出了声源尺寸为 $r = 10 \text{ mm}$ ，管内压力为 0.1 Mpa 下不同频率的管内声传播情况。从图中得出声源频率为 1100 Hz 时管内声传播满足声波导传播规律，声源频率为 3200 Hz 时管内声传播混乱。

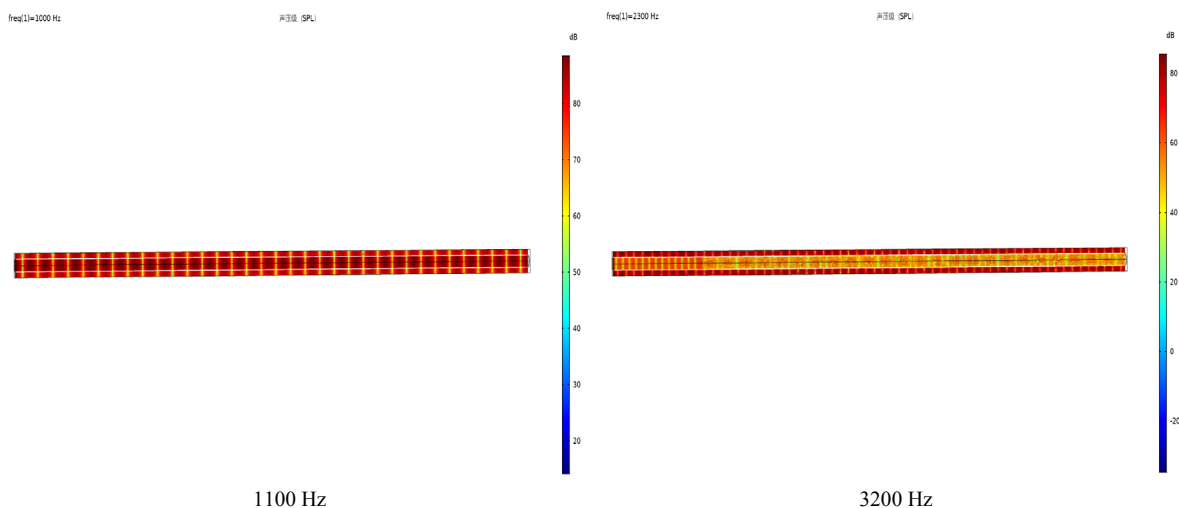


Figure 7. Sound propagation in the tube when the size of sound source is $r = 10 \text{ mm}$

图 7. 声源尺寸为 $r = 10 \text{ mm}$ 时管内声传播情况

为了更好分析管内声传播特性，图 8 给出了声源尺寸 $r = 10 \text{ mm}$ 时管内声压分布线图。从图中可知管内声传播仍然服从声波导传播的规律，由方程可知圆柱形管内声波导的截止频率为 $f_s = 1.84c/2\pi a$ [8]。

计算得仿真管道截止频率为 2120 Hz。从图 8 中明显可得,当声源频率低于截止频率 2120 Hz 时,声源频率为 1000 Hz 和 1200 Hz 管内声压分布呈现出驻波形式并随着频率增大驻波个数也增大。而当声源频率高于截止频率时,声源频率为 2300 Hz, 5000 Hz 随着声源频率增大呈现驻波现象逐渐消失,管内声传播以高模态为主。声源位置在 1 m 处,管道为有限长度,声源频率高于截止频率时,其沿着管道距离发生衰减,才会出现 2300 Hz 和 5000 Hz 管内声压衰减现象。

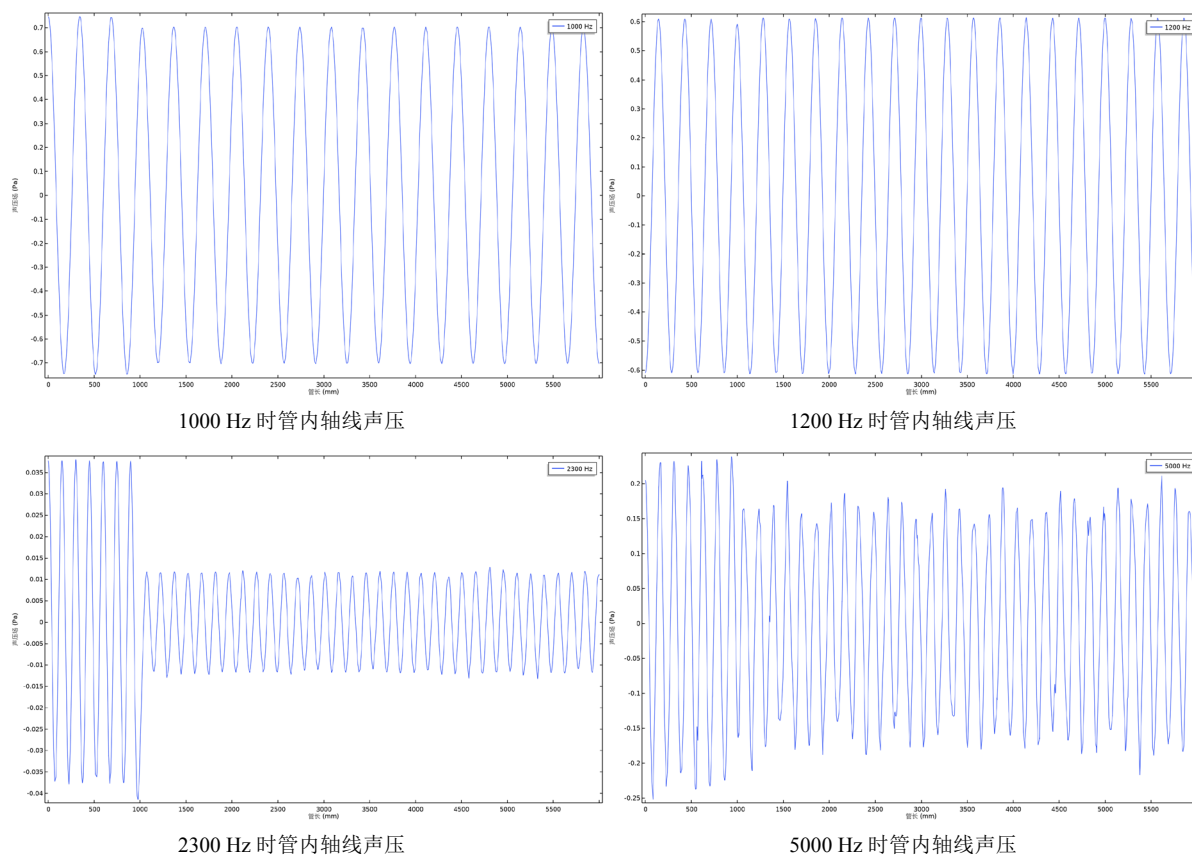


Figure 8. Sound pressure distribution in tubes with different frequencies with sound source size $r = 10$ mm
图 8. 声源尺寸 $r = 10$ mm 不同频率管内声压分布

4. 实验研究

4.1. 实验方案

本文实验设计图如图 9 所示,搭建管长为 6 m, 114*10, 材质为 316 L 钢管。将实验探头贴在 2 m 和 5 m 处。实验探头为三相振动探头和单相振动探头。采集仪器为 NIPX1-103320 通道声谱分析仪。同步采样,采样率为 51,200 Hz,采样点数为 10,240。考虑到管内流体流速可能会影响管壁振动情况。在管道右侧接风机,探究管内流速不同时,管壁振动的情况。在管壁上 2 m、4 m 处,施加一个脉冲振动,分析管壁振动情况。实验装置图如图 10 所示。

4.2. 实验步骤

- 1) 实验开始前检查装置仪器,对管壁振动探头进行校准。
- 2) 启动风机,改变风机转速,待流场稳定后,用流量计测定管道入口及出口处流速。

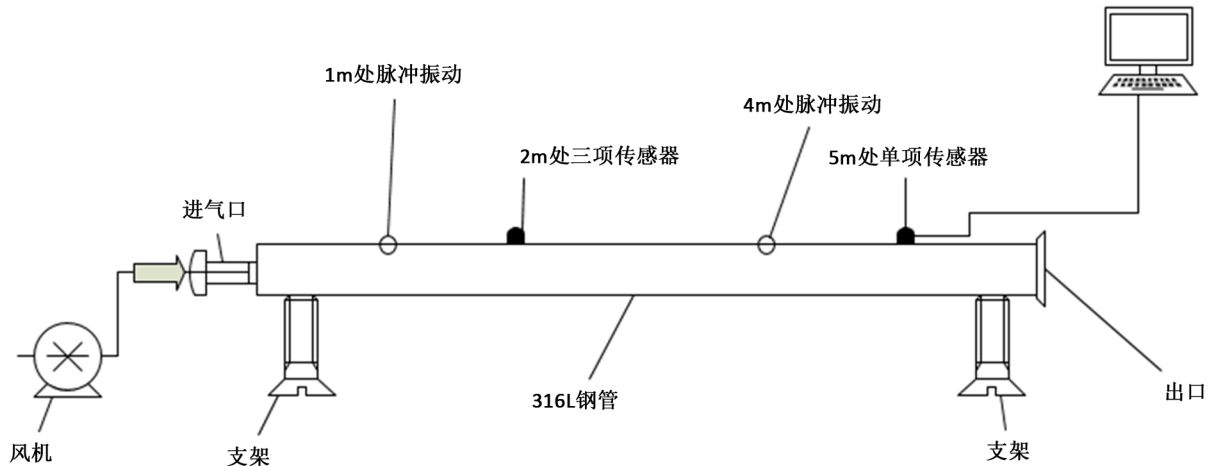


Figure 9. Design of pipe wall vibration experiment
图 9. 管壁振动实验设计图



Figure 10. Pipe wall vibration test site drawing
图 10. 管壁振动实验现场图

3) 启动声谱分析仪，改变风机转速为 20、25、30、35，记录不同流速管壁振动数据。在管壁上 1 m 和 4 m 处添加一次脉冲振动，记录管壁振动数据并分析。

4.3. 实验结果

Table 1. Inlet and outlet flow rates at different fan speeds
表 1. 不同风机转速下入口和出口流速

风机转速	入口流速(m/s)	出口流速(m/s)
20	18.1	11.11
25	20.65	14.2
30	23.4	17.3
35	29.2	19.6

表 1 给出了不同风机转速下，管道入口和出口处流速。图 11 给出了 4 个通道测得管内不同流场影响下管壁振动时域变化。从图中可以看到管道在相同温度、相同压力参数下，管道流体流速越大，管壁振动峰值越大。图 12 给出了入口流速为 18.1 m/s 时，管壁振动做 FFT 分析后振动分布情况。横坐标为频率，纵坐标为振幅。从图中可知管内背景流体流动造成的管壁振动主要集中在低频，在 100 Hz 左右出现振动峰值。

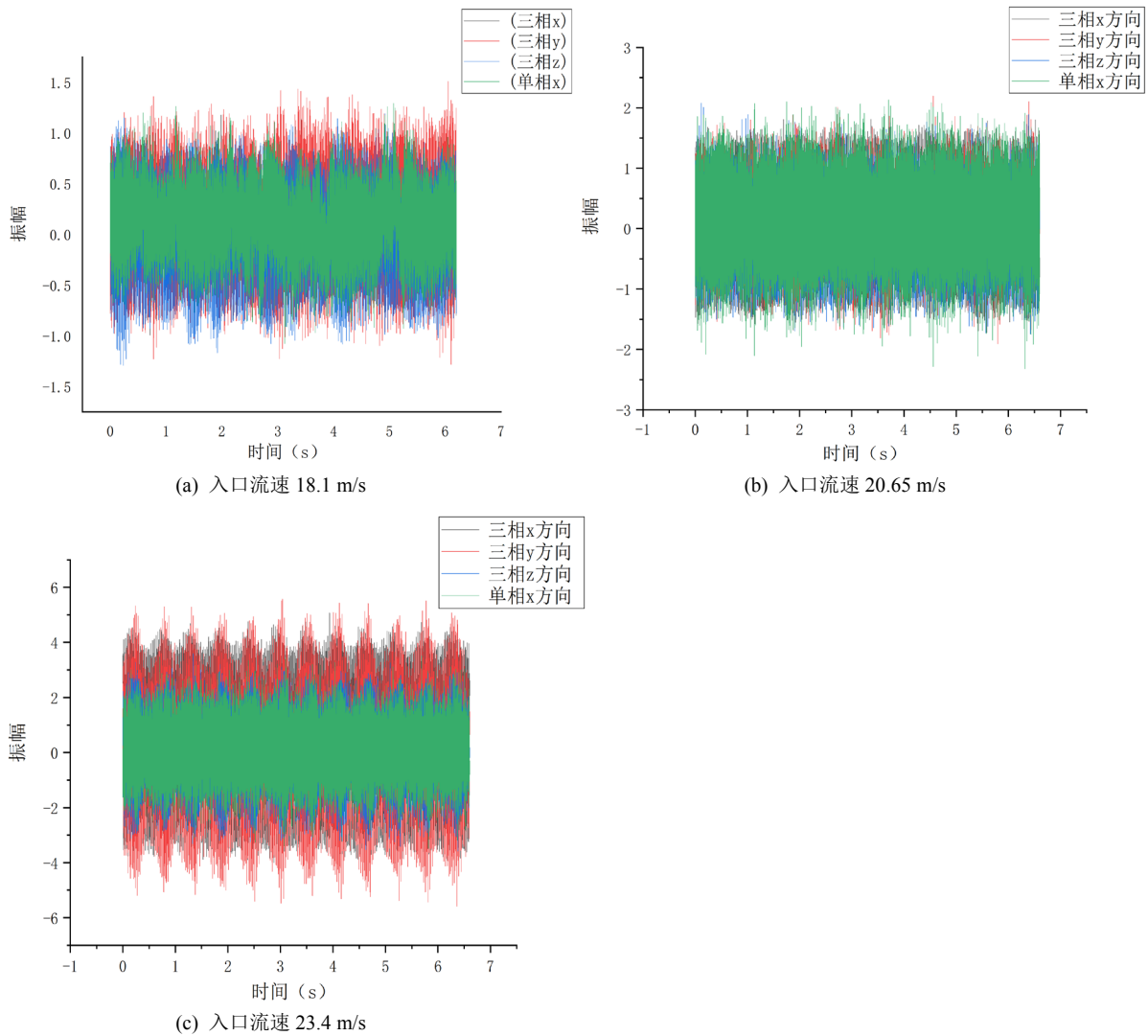
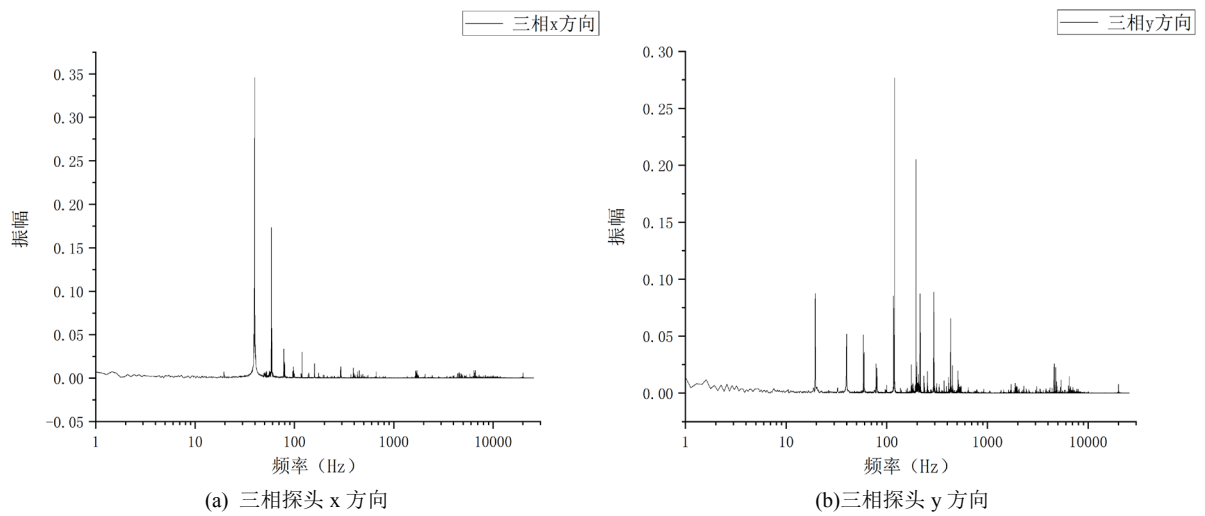


Figure 11. Pipe wall vibration under the action of flow field in four-channel pipe
 图 11. 四通道管内流场作用下管壁振动情况



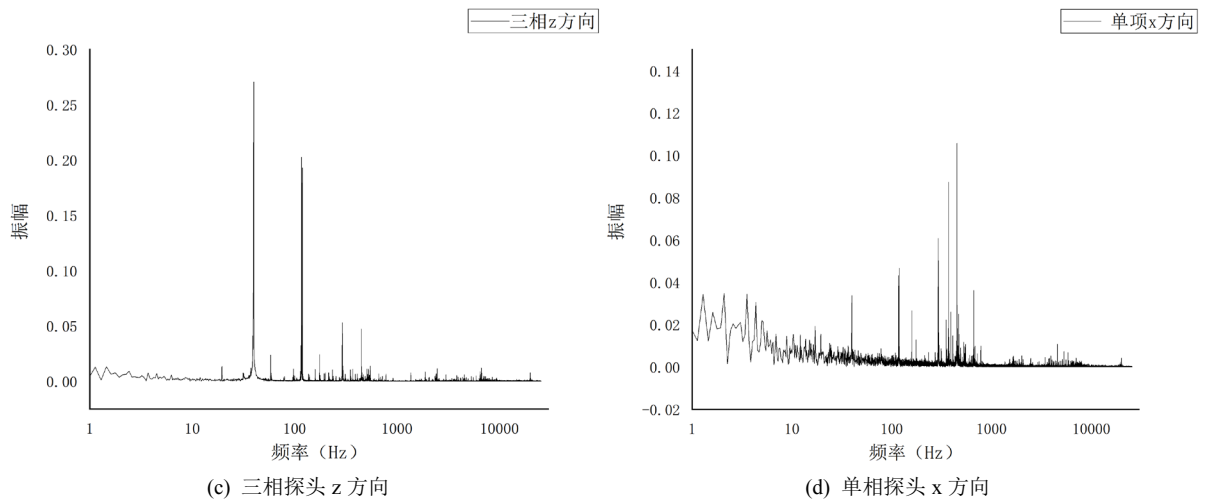


Figure 12. Frequency domain diagram of tube wall vibration when inlet flow rate is 18.1 m/s

图 12. 入口流速为 18.1 m/s 时管壁振动频域图

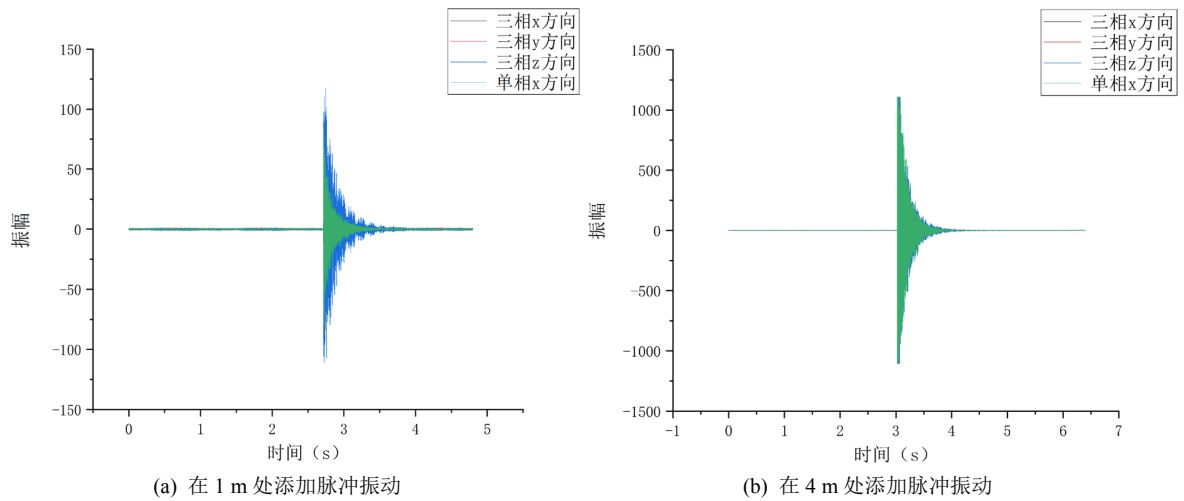
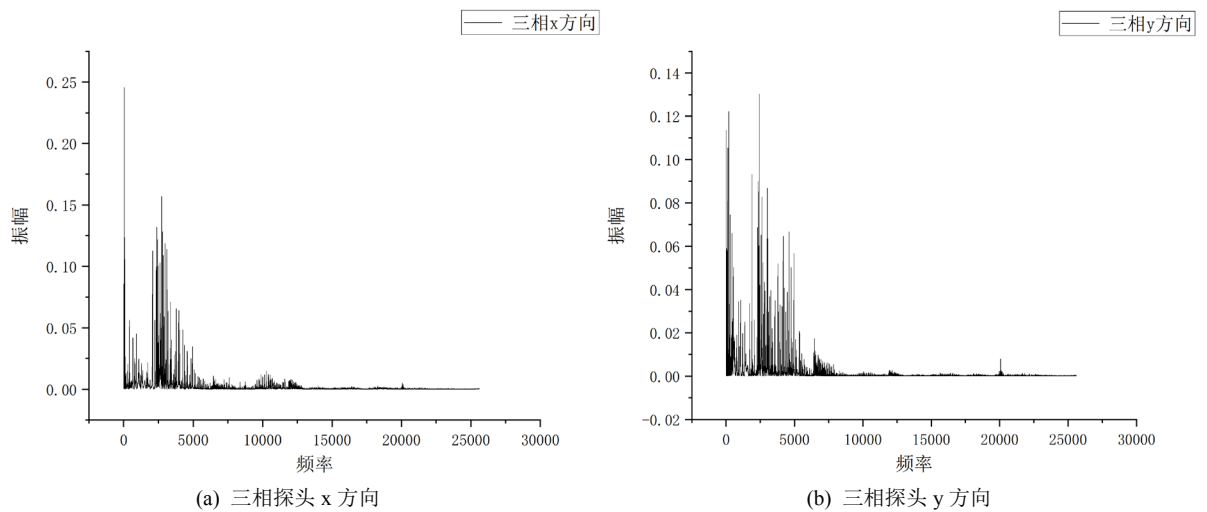


Figure 13. Variation of vibration at different pulse vibration positions when the flow rate in the tube was 18.1 m/s

图 13. 管内流速为 18.1 m/s 时不同脉冲振动位置的振动变化情况图



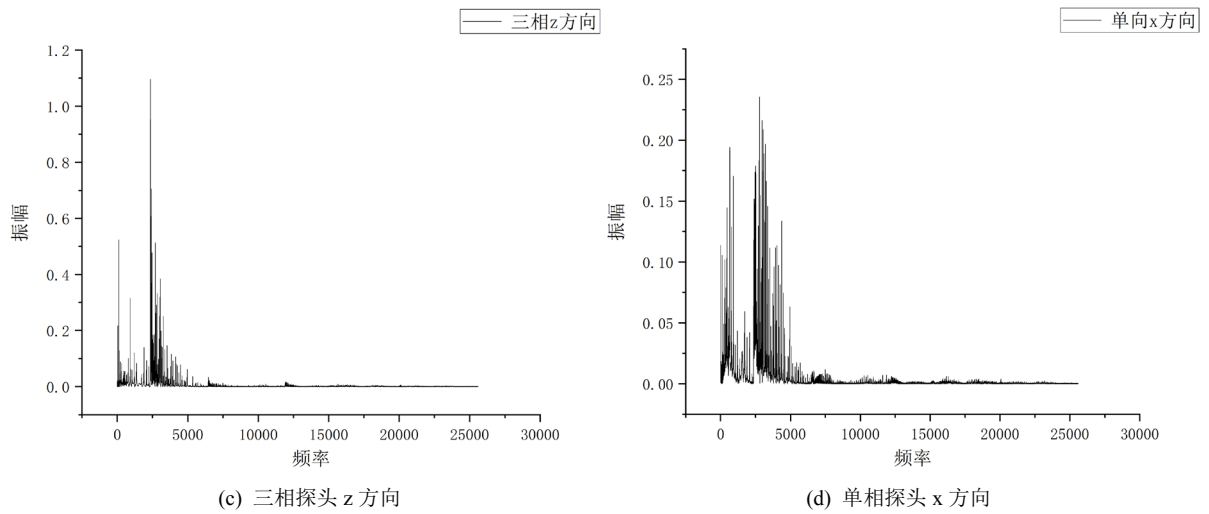


Figure 14. Frequency domain diagram of vibration at different positions after pulse vibration is added at 1 m
图 14. 在 1 m 处添加脉冲振动后不同位置振动情况的频域图

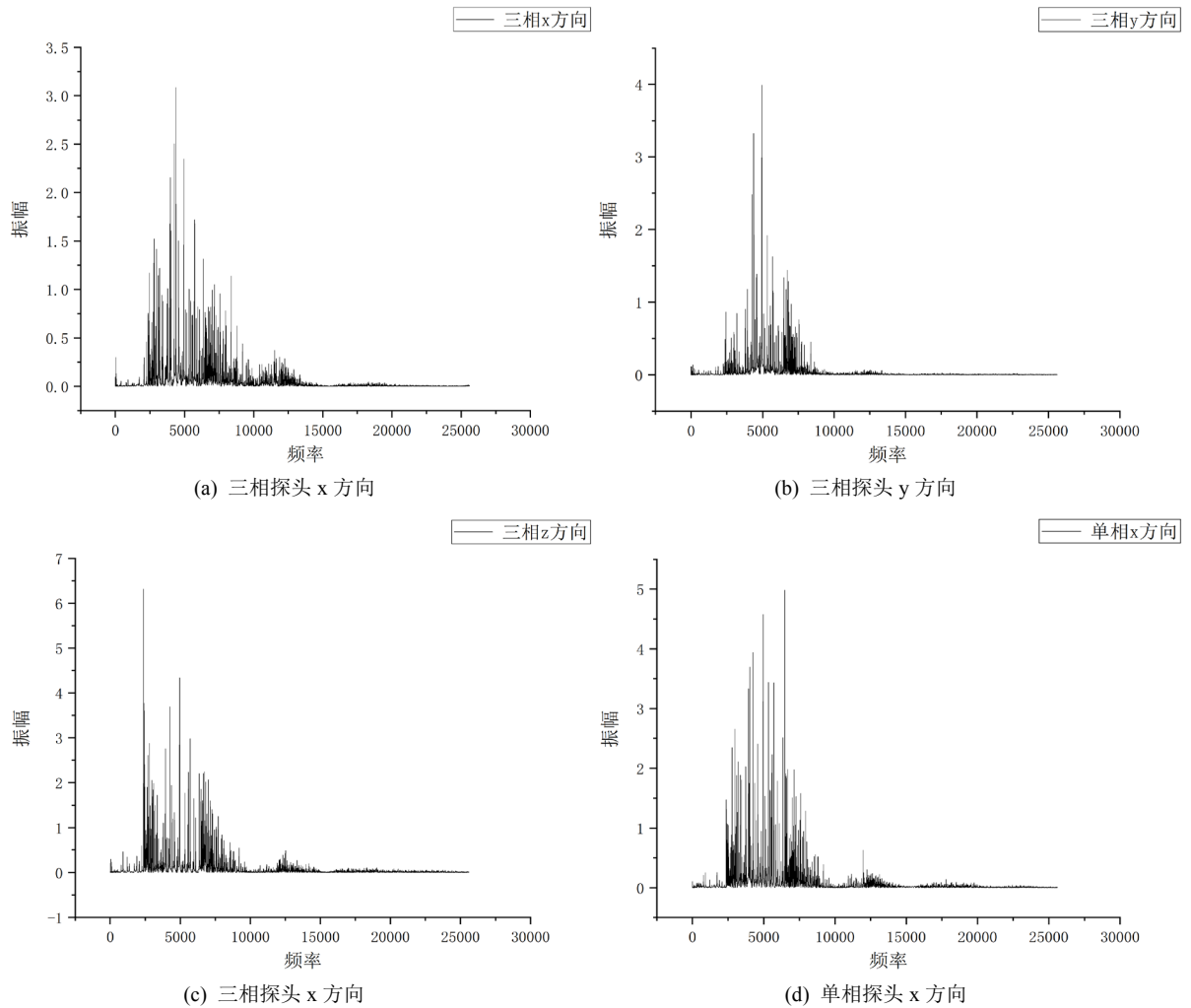


Figure 15. Frequency domain diagram of vibration conditions at different positions after pulse vibration was added at 4 m
图 15. 在 4 m 处添加脉冲振动后不同位置振动情况的频域图

图 13 给出了管壁上脉冲振动在不同位置时的管壁振动时域图像。其中横坐标为时间轴，纵坐标为振幅。很明显可以发现，在 3 s 左右在管壁上添加的一个迅速衰减的脉冲振动。图中记录了四个通道的变化情况。图 14、图 15 给出了管内流速为 18.1 m/s，对在 1 m 和 4 m 处添加脉冲振动后对不同方向做 FFT 分析后的频域图。从图中得到管壁振动峰值出现的频率基本一致，x 方向振动峰值出现的频率为 2736 Hz，这与管道背景流造成的管壁振动峰值频率 100 Hz 有所区别，可见不可忽略其影响。从图 14 和图 15 可知脉冲振动在管壁传播出现波峰和波谷，这与仿真中的驻波现象基本符合，对比仿真结果中驻波位置，实验基本符合。脉冲振动引起的管壁振动也集中在低频。

5. 结论

本文通过仿真管壁振动声源传播及管内声场分布，测量不同管内流速下，管壁振动数据，得到了如下结论：

- 1) 管壁振动声源沿管轴及管周振动位移出现驻波形式，声源频率、声源尺寸都会对管壁振动产生影响。
- 2) 当声源频率小于管道截止频率时，管内声传播及声场分布依然遵循声波导传播规律，管内声场分布呈驻波形式。而当声源频率高于截止频率时，以高阶模态为主。
- 3) 管道流体流速对管壁振动产生影响，管内流速越大，管壁振动幅值越大。管内背景流体流动造成的管壁振动主要集中在低频，脉冲振动引起的管壁振动也集中在低频，二者振动主频率有所区别。管壁上脉冲振动在管壁传播出现波峰和波谷，这与仿真结果基本符合。

参考文献

- [1] 陈敬和, 何悟忠, 郭莘. 埋地长输管道外检测技术现状及发展方向[J]. 管道技术与设备, 2011(4): 1-5.
- [2] 徐合力, 蒋炎坤. 弯曲输流管道流固耦合流动特性研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(2): 343-346.
- [3] 赵军伟, 李亚琼. 压力管道声发射检测试验[J]. 石化技术, 2018, 25(6): 42, 49.
- [4] Baik, K., Jiang, J. and Leighton, T.G. (2010) Acoustic Attenuation, Phase and Group Velocities in Liquid-Filled Pipes: Theory, Experiment, and Examples of Water and Mercury. *Journal of the Acoustical Society of America*, **128**, 2610-2624. <https://doi.org/10.1121/1.3495943>
- [5] Mazzotti, M., Miniaci, M. and Bartoli, I. (2018) A Numerical Method for Modeling Ultrasonic Guided Waves in Thin-Walled Waveguides Coupled to Fluids. *Computers & Structures*, **212**, 248-256. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2018.11.002>
- [6] 唐秀家. 供水管网泄漏检测定位方法及仪器[J]. 水利学报, 1997(9): 20-27.
- [7] 杜功焕, 朱哲民, 龚秀芬. 声学基础[M]. 第 3 版. 南京: 大学出版社, 2012.
- [8] 高广健, 邓明晰, 李明亮. 圆管结构中周向导波非线性效应的模式展开分析[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 357-365.
- [9] Lighthill, M.J. (1952) On Sound Generated Aerodynamically, Part I: General Theory. *Proceeding of Royal Society*, **A211**, 564-587. <https://doi.org/10.1098/rspa.1952.0060>
- [10] 徐合力, 蒋炎坤. 弯曲输流管道流固耦合流动特性研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2008, 32(2): 343-346.
- [11] 苏娜娜, 韩庆邦, 蒋睿. 无限流体中孔隙介质圆柱周向导波的传播特性简[J]. 物理学报, 2019, 68(8): 150-158.
- [12] 贾文强, 刘常春, 徐珺. 基于流管试验的管道声传播预测[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 173-179.