

本文引用格式: 洗志濠,刘诚,赖源平,等.供水管道声学采集探头的模态分析[J].自动化与信息工程,2024,45(3):11-15.

XIAN Zhihao, LIU Cheng, LAI Yuanping, et al. Modal analysis of acoustic acquisition probe for water supply pipeline[J]. Automation & Information Engineering, 2024,45(3):11-15.

# 供水管道声学采集探头的模态分析\*

洗志濠<sup>1</sup> 刘诚<sup>2</sup> 赖源平<sup>1</sup> 李昌<sup>2</sup>

(1.广州市自来水有限公司北部水厂, 广东 广州 510000

2.广东省科学院智能制造研究所, 广东 广州 510070)

**摘要:** 为了提升供水管道声音信号采集的可靠性, 基于模态分析技术对声学采集探头进行研究。首先, 利用三轴加速度传感器采集供水管道的振动信号, 以评估声学采集探头的振动激励情况; 然后, 利用 SolidWorks 和 ANSYS Workbench 软件建立声学采集探头的动力学模型, 获取其振动模态; 最后, 根据声学采集探头的振动激励情况和振动模态分析结果, 对其结构进行优化, 通过增加声学采集探头内腔体底部的厚度, 提高其固有频率, 避免声学采集探头与供水管道共振, 提升声音信号采集的可靠性。

**关键词:** 声学采集探头; 模态分析; 振动激励; 振动模态; 供水管道

中图分类号: TH128

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2024)03-0002-05

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2024.03.002

## Modal Analysis of Acoustic Acquisition Probe for Water Supply Pipeline

XIAN Zhihao<sup>1</sup> LIU Cheng<sup>2</sup> LAI Yuanping<sup>1</sup> LI Chang<sup>2</sup>

(1.Northern Waterworks, Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou 510000, China

2.Institute of Intelligent Manufacturing, Guangdong Academy of Science, Guangzhou 510070, China)

**Abstract:** In order to improve the reliability of sound signal acquisition in water supply pipelines, research was conducted on acoustic acquisition probes based on modal analysis technology. Firstly, the vibration signal of the water supply pipeline is collected using a three-axis accelerometer to evaluate the vibration excitation of the acoustic acquisition probe; Then, using SolidWorks and ANSYS Workbench software, establish a dynamic model of the acoustic acquisition probe and obtain its vibration mode; Finally, based on the vibration excitation and modal analysis results of the acoustic acquisition probe, its structure is optimized by increasing the bottom thickness of the cavity inside the acoustic acquisition probe, improving its natural frequency, avoiding resonance between the acoustic acquisition probe and the water supply pipeline, and ensuring the reliability of sound signal acquisition.

**Keywords:** acoustic acquisition probe; modal analysis; vibration excitation; vibration mode; water supply pipeline

## 0 引言

水厂通过供水管网将自来水输送到城市的每个角落。供水管道由于长期使用可能出现各种故障, 需要更新和改造。在供水管道更新和改造过程中, 为了缩小停水范围, 需要在供水管网内安装控制阀门<sup>[1]</sup>, 且要求控制阀门能迅速关闭, 可靠地截断水流<sup>[2]</sup>。然而控制阀门因长时间使用, 不可避免地会出现磨损等故障, 导致无法完全开启或闭合, 出现漏水等问题,

影响供水管网的正常运行和日常维护<sup>[3]</sup>。因此, 需要对控制阀门的开闭状态进行检测<sup>[4]</sup>, 避免控制阀门开闭不完全而造成潜在的安全隐患或经济损失<sup>[5]</sup>。在控制阀门开闭的过程中, 水流量流速的变化使供水管道内水流声也出现相应的变化, 因此通过供水管道声音信号的变化可判断阀门的开闭状态。供水管网环境复杂, 通常需要利用相应的声学采集探头来采集供水管道的声音信号, 并从物理上对环境噪声进行有效隔离。

\* 基金项目: 广东省重点领域研发计划 (2019B010154002)

声学采集探头需要紧密地贴合在供水管道上,采集声音信号时会受到供水管道振动的影响。若声学采集探头与供水管道发生共振,会对声音信号的采集产生严重干扰<sup>[6]</sup>,导致控制阀门开闭状态检测失败。为此,本文基于模态分析技术对声学采集探头进行研究。首先,利用三轴加速度传感器采集供水管道的振动信号,以确定振动激励的频率范围;然后,基于SolidWorks软件建立声学采集探头的三维模型,并利用ANSYS Workbench软件对声学采集探头的内腔体进行模态分析,以确定其固有频率;最后,通过优化声学采集探头内腔体底部的厚度,以提高声学采集探头的固有频率,避免与供水管道产生共振,提升声音信号采集的可靠性。

## 1 结构动力学概述

### 1.1 振动测量原理

振动的速度 $v(t)$ 、位移 $x(t)$ 和加速度 $a(t)$ 之间存在如下关系:

$$v(t) = \int a(t) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int v(t) dt = \iint a(t) dt \quad (2)$$

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (3)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (4)$$

因此,仅需要确定速度、位移或加速度中的1个信号,通过计算,便可以得到另外2个信号。

假设测得振动加速度为谐波信号 $a(t) = A \sin \omega t$ ,其中, $A$ 为振幅, $\omega$ 为频率, $t$ 为时间,则该谐波信号代入公式(1)和(2),即可求出速度和位移为

$$v(t) = \int a(t) dt = -\frac{A}{\omega} \cos(\omega t) + C_1 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} x(t) &= \int v(t) dt = \int \left( -\left(\frac{A}{\omega}\right) \cos(\omega t) + C_1 \right) dt \\ &= -\frac{A}{\omega^2} \sin(\omega t) + C_1 \cdot t + C_2 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $C_1$ 为初始速度, $C_2$ 为初始位移。

因此,当确定了振动加速度,即可通过公式(5)和(6)计算得到速度和位移。

振动加速度传感器具有检测频率范围广、体积小、便捷易用等特点。为了全面获取供水管道的振动信息,使采集的声音信号尽可能地覆盖振动频率范围,本文选择三轴加速传感器来采集控制阀门的振动数据<sup>[7]</sup>。

### 1.2 模态分析原理

模态分析是一种研究结构动力特性的方法,可得到结构的固有频率、振型和阻尼比<sup>[8]</sup>。物体动力学通用方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (7)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵, $\{\ddot{x}\}$ 为加速度向量, $[C]$ 为阻尼矩阵, $\{\dot{x}\}$ 为速度向量, $[K]$ 为刚度矩阵, $\{x\}$ 为位移向量, $\{F(t)\}$ 为力向量。

模态分析实际上就是进行特征值和特征向量的求解。物体无阻尼情况下的运动方程为

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (8)$$

若声学采集探头各质点按同一频率作简谐运动,则有

$$x(t) = A \sin(\omega t + \theta) \quad (9)$$

式中: $\theta$ 为初相位。

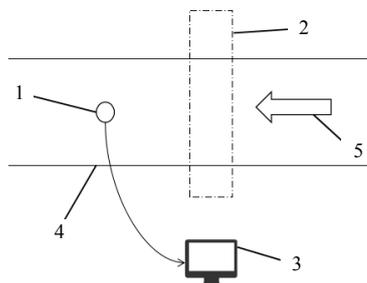
将公式(9)代入公式(8),可得

$$\{[K] - \omega^2 [M]\}\{A\} = \{0\} \quad (10)$$

求解公式(10)可得到多个特征解 $(\omega_i^2, \{A\}_i)$ ,其中, $\omega_i$ 为第 $i$ 阶固有频率, $\{A\}_i$ 为对应 $\omega_i$ 的振型。当激励频率与声学采集探头的固有频率接近时,会产生共振现象,影响声音信号的采集<sup>[9]</sup>。

## 2 振动检测

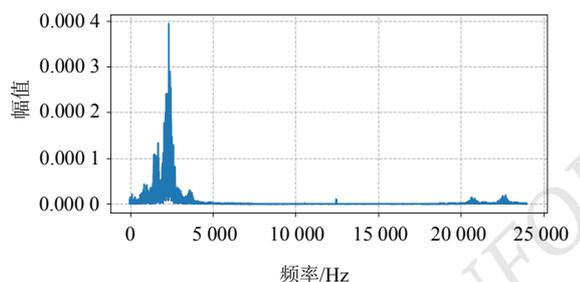
供水管道振动检测位置如图 1 所示。



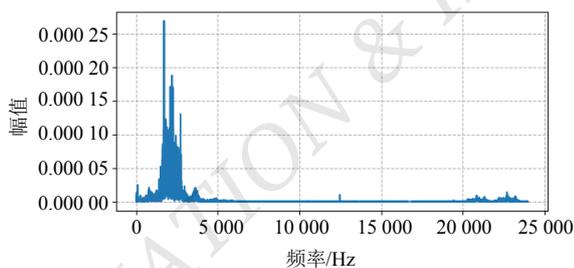
1—三轴加速度传感器；2—控制阀门；3—计算机；  
4—供水管道；5—水流方向。

图 1 供水管道振动检测位置

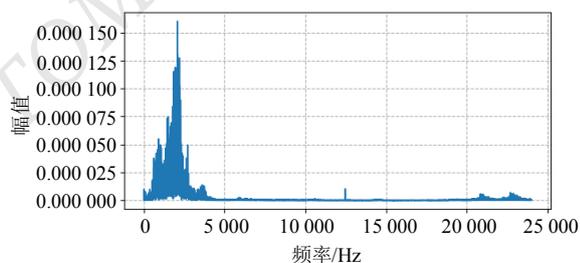
振动主要来源于供水管道的管壁。通过磁吸在供水管道管壁上的三轴加速度传感器采集振动信号，并通过傅里叶变换获取振动信号的频谱，如图 2 所示。



(a) X轴振动信号



(b) Y轴振动信号



(c) Z轴振动信号

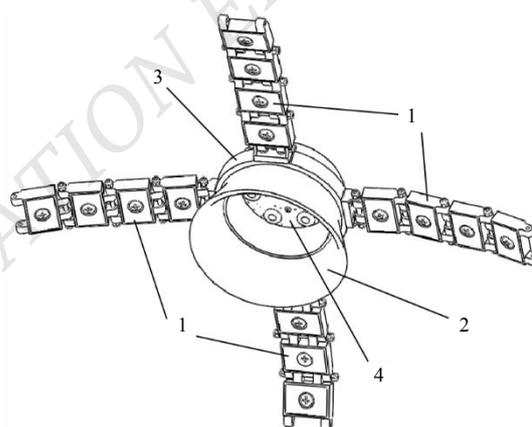
图 2 三轴振动信号的频谱图

由图 2 可知，供水管道管壁的振动频率在 0 ~ 5 000 Hz 的范围内。

## 3 声学采集探头模型建立和模态分析

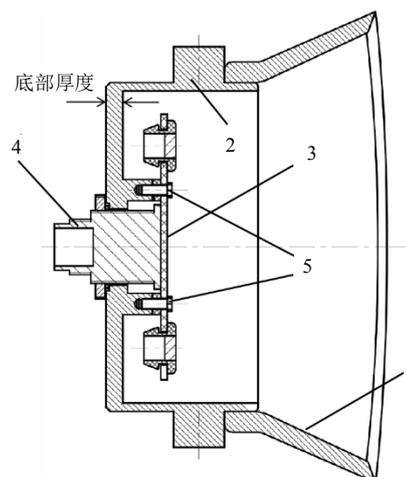
### 3.1 声学采集探头模型建立

声学采集探头主要由磁链、压盘和内腔体等组件构成。其中，磁链连接声学采集探头与供水管道；压盘确保声学采集探头与供水管道管壁紧密贴合，避免缝隙对声音信号采集的影响；电路板固定于内腔体中。本文采用 SolidWorks 软件对声学采集探头进行三维建模，并对磁链、压盘等组件进行简化处理，结构示意图如图 3 所示，半剖视图如图 4 所示。



1—磁链；2—压盘；3—内腔体；4—电路板。

图 3 声学采集探头模型的结构示意图



1—压盘；2—内腔体；3—电路板；4—插头；5—螺钉。

图 4 声学采集探头的半剖视图

### 3.2 内腔体的有限元模态分析

首先,将 SolidWorks 软件建模的声学采集探头模型导入 ANSYS Workbench 中,对声学采集探头的内腔体进行材料定义,材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性表

材料	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比
6061	2.7	6 890	0.33

然后,利用 ANSYS Workbench 对声学采集探头的内腔体模型进行网格划分。本文采用 5 mm 网格大小的四节点矩形单元划分方法,自动划分内腔体模型的网格,如图 5 所示。

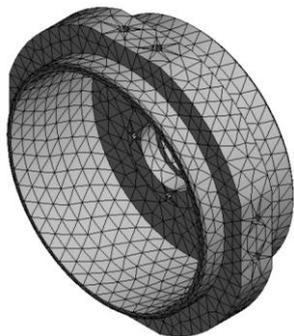


图 5 内腔体模型的网格划分

由于供水管道振动激励频率范围为 0~5 000 Hz,只要保证声学采集探头第一阶固有频率高于 5 000 Hz,即可避免出现共振现象。通过改变内腔体的底部厚度可改变内腔体的固有频率。对不同底部厚度的内腔体进行模态分析,其第一阶固有频率如表 2 所示。

表 2 不同底部厚度内腔体的第一阶固有频率

底部厚度/mm	固有频率/Hz
1	2 345.6
2	3 450.5
3	4 382.3
4	5 160.5

由表 2 可知,当内腔体底部厚度为 4 mm 时,其第一阶固有频率高于 5 000 Hz。因此,选用底部厚度为 4 mm 的内腔体结构,对其前 6 阶的模态进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 底部厚度为 4 mm 的内腔体前 6 阶的固有频率

阶数	固有频率/Hz
1	5 160.5
2	8 972.3
3	8 995.9
4	11 377.0
5	11 476.0
6	19 354.0

由表 3 可知,底部厚度为 4 mm 的内腔体前 6 阶的固有频率都高于 5 000 Hz,且逐渐增大,从而避开了共振激励的频率范围。

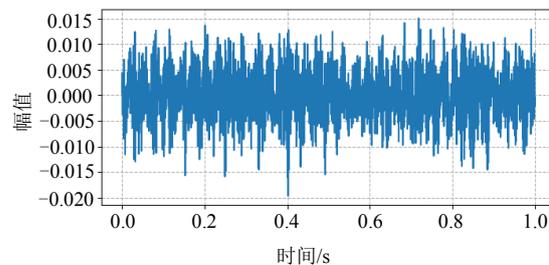
## 4 现场测试

在供水现场进行供水管道声音信号的采集测试。将声学采集探头通过磁吸的方式吸附在供水管道的管壁上,如图 6 所示。

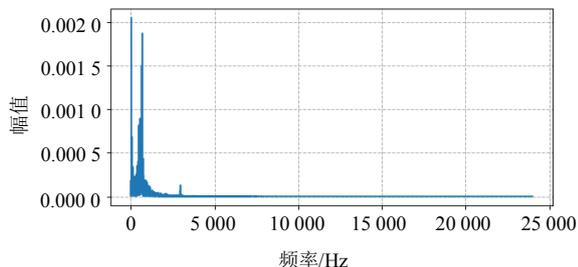


图 6 现场测试

声音信号采样频率设为 48 000 Hz,完全覆盖了麦克风的频响范围。采集的供水管道声音信号时域图、频域图如图 7 所示。



(a) 声音信号时域图



(b) 声音信号频域图

图7 现场采集的供水管道声音信号

由图7(b)声音信号频域图可知,供水管道声音振动信号频率出现在5000 Hz之前,有效地避免了声学采集探头与供水管道产生共振的问题。

## 5 结论

本文针对声学采集探头与供水管道的共振问题,基于模态分析技术研究了声学采集探头的优化设计方法。首先,采集供水管道的振动信号,以确定振动激励的频率范围;然后,利用SolidWorks构建声学采集探头模型,并利用ANSYS Workbench对声学采集探头的内腔体进行模态分析,发现底部厚度为4 mm的内腔体的第一阶固有频率能达到5000 Hz以上。

通过对声学采集探头进行现场测试与分析,验证

在声音检测频率范围内,未出现明显的共振现象,表明通过调整内腔体的底部厚度,提高了声学采集探头的第一阶固有频率,避免与供水管道产生共振,提升了声音信号采集的可靠性。

## 参考文献

- [1] 高云,王兴双,吴忠. 阀门管理系统在给水管网中的应用[J]. 供水技术,2023,17(3):56-59.
- [2] 牟凤燕. 市政给水管网的现状分析和优化设计改造措施[J]. 中国设备工程,2023(6):231-234.
- [3] 范培震,宋丽. 给水管网漏水问题分析及合理处理策略[J]. 中华建设,2022(10):123-125.
- [4] 李云飞,汪歆蕾,张飞,等. 基于水听器声波探测的供水管道泄漏检测系统[J]. 传感器与微系统,2023,42(5):83-86.
- [5] 刘海. 阀门调节在管网优化运行中的应用[J]. 城镇供水,2022(3):35-39;44.
- [6] 张枫苗,顾吉林,李欣阳,等. 固有频率与共振频率影响因素及实验研究[J]. 大学物理实验,2019,32(2):37-41.
- [7] 丁杰,李芳,肖文杰. 地铁车辆设备电气连接器的振动测试及故障分析[J]. 铁道车辆,2023,61(4):77-83.
- [8] 陈杰,刘超峰,黄鹏辉,等. 调压阀的模态分析和研究[J]. 农业装备与车辆工程,2023,61(3):151-154.
- [9] 杨思慧,陈建魁,尹周平. 机架固有频率优化的结构设计[J]. 机械设计与制造,2018,332(10):71-73;77.

### 作者简介:

洗志濠,男,1996年生,本科,主要研究方向:机械设计与制造。E-mail: 517611010@qq.com

刘诚,男,1998年生,硕士研究生,主要研究方向:复杂系统的集成与设计。E-mail: 805327372@qq.com

赖源平,男,1974年生,硕士研究生,主要研究方向:自动控制与系统集成。E-mail: 469741@qq.com

李昌(通信作者),男,1985年生,硕士研究生,主要研究方向:控制理论与控制工程。E-mail: lichang3.1415@126.com

(上接第10页)

[67] JIN Q, ZHANG Y. Parameter optimization of active

disturbance rejection controller using adaptive differential antlion optimizer[J]. Algorithms, 2022,15(1):19.

### 作者简介:

胡城,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向:控制与优化。E-mail: HB\_HuCheng@163.com

蔡延光,男,1963年生,博士研究生,教授,主要研究方向:网络控制与优化、组合优化、智能交通系统等。E-mail: caiyg99@163.com

黄嘉铖,男,1997年生,硕士研究生,主要研究方向:控制与优化。E-mail: jiachengh2021@163.com

曾庆丰,男,1998年生,硕士研究生,主要研究方向:控制与优化。E-mail: Z\_Q\_F\_7154@163.com