

一种用于高压输气管道泄漏检测的 次声传感器的研究*

崔丽娟^{1,2} 高文华¹ 杨亦春^{2†} 刘相龙^{1,2} 冯浩楠²

(1 太原科技大学电子信息工程学院 太原 030024)
(2 中国科学院声学研究所噪声与振动重点实验室 北京 100190)

摘要 研究了一种用于检测高压输气管道泄漏次声波的次声传感器。针对管道泄漏频带宽, 频率低的特点, 该次声传感器换能元件选用电容式传声器, 设计了一个前端耐压壳, 将前端敏感单元与前置放大器隔离, 可耐 12 MPa 静态压力; 通过对比信号放大电路, 实现了对调制电路优化设计, 使得在 1 Hz 以下频段仍有较高灵敏度, 传感器自噪声降低; 该传感器只对声波敏感, 对振动的灵敏度平均值 1 mV/g, 具有很好的抗振动干扰性能。测试结果表明: 该传感器能有效地检测到声波信号, 频率响应范围 0.5 Hz 至 300 Hz, 覆盖了管道泄漏次声频带和低频可听声频段, 不放大的 I 档灵敏度 200 mV/Pa, II 档和 III 档分别将信号放大 5 倍和 20 倍, 输出信号的自噪声小于 15 mV, 该传感器可适用于天然气输气管道的泄漏监测。

关键词 次声传感器, 气体管道泄漏

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2013)02-0144-08

An infrasonic sensor for high pressure gas pipeline leakage detection

CUI Lijuan^{1,2} GAO Wenhua¹ YANG Yichun² LIU Xianglong^{1,2} FENG Haonan²

(1 College of Information and Electrical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)
(2 Key Laboratory of Noise and Vibration Research, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A new infrasonic sensor is studied in this paper, which can be used to detect noise caused by gas pipe leakage, particularly developed for high pressure gas pipeline monitoring. In allusion to the characteristics of wide frequency bandwidth and low frequency, its sensitive element is a kind of condenser microphone. The front sensing unit is isolated from the preamplifier under a 12 MPa withstand static pressure. By comparing properties of different signal amplifier circuits, one optimization design has been developed, in order to obtain a high sensitivity under 1 Hz, and reduce the sensor's self-noise. The sensor is only sensitive to sound wave and has good anti-interference performance of vibration (vibration sensitivity on average is 1 mV/g). The test result shows that: this infrasound sensor can effectively detect the acoustic signals; the

2012-09-14 收稿; 2013-01-12 定稿

*国家自然科学基金面上项目(11074278, 11174320)资助

作者简介: 崔丽娟 (1988-), 女, 山西榆次人, 硕士研究生, 主要研究方向为智能信号处理。

高文华 (1967-), 女, 教授, 研究生导师。

杨亦春 (1966-), 男, 研究员, 博士后, 研究生导师。刘相龙 (1989-), 男, 硕士研究生。冯浩楠 (1984-), 男, 博士研究生。

†通讯作者: 杨亦春, E-mail: yychun@mail.ioa.ac.cn

frequency band is from 0.5 Hz to 300 Hz, covering infrasonic frequency and low frequency audio range normally generated by pipeline leakage. The sensitivity to sound wave is about 200 mV/Pa when at position (not amplifying), position II and position III indicate 5 times and 20 times amplifying respectively. The whole noise from the output point is less than 15 mV. The sensor can be applied in natural gas & oil-gas pipeline leakage monitoring.

Key words Infrasonic sensor, Gas pipeline leakage

1 引言

输气管道泄漏发生时, 高压气体高速释放, 会在泄漏处形成振动并以声波的形式向两端传播; 泄漏形成后, 在泄漏孔处会有气体持续地喷出, 产生振动, 形成声源。该声波携带着关于管道泄漏的许多丰富的信息, 包含了次声波、超声波、负压波等^[1], 其中低频部分的声波成分较强^[2]。另一方面输气管道中介质的可压缩性使得只有声波能在气体管道中远距离传播并能被传感器接收。次声波具有频率低、波长长、能量衰减慢的传播特性^[3], 因而次声波一般能够传播上千米的距离。因此, 只要在一定距离的管道范围内安装检测次声信号的次声波传感器就可以实现对管道泄漏信号的实时监测^[4-5]。

已有压电类传感器^[6] (俗称压力变送器) 的问题是, 管道内的静态压力直接作用于敏感器件, 导致其动态范围受限制, 进而对压力的分辨率低, 对声波产生的交变压力的响应灵敏度低。国外相关类型的传感器如德国 BD 公司的 DMP343 对压力分辨率为 1.75 Pa; 美国 Rosemount 3051CD 对压力分辨率能够达到 0.025 Pa。国内在这方面的研究较少, 中山广仪有限公司的管道压力变送器 PTG501 对压力的分辨率只到 1 kPa, 远远不能满足测量次声的需求。北京科创三思科技发展有限公司研发的用于管道泄漏检测的次声传感器频带范围窄, 仅限于次声频段, 并且灵敏度也很低。

本文采用电容式传感器原理设计了一种用于高压输气管道泄漏检测的新型次声传感器, 可以实现对泄漏次声信号的采集, 并具灵敏度 200 mV/Pa、频带 0.5 Hz~300 Hz, 对压力的分辨率 0.0001 Pa, 具有很好的信噪比。

2 传感器原理及电路结构

2.1 基本原理

该次声传感器选用变极距型电容式传感器作为换能元件。其基本原理是: 金属薄膜与后极板构成一个平行板电容器, 当金属薄膜接收到次声信号时, 会产生微小的位移, 膜片与后极板之间的距离也随之改变, 从而平行板电容器的电容发生改变; 再通过测量电路将电容变化量转换成可以应用的电量。传感器接收到的信号十分微弱, 并伴有其他的噪声信号, 因此必须经过信号调理电路对其进行放大滤波。此时得到的信号就是传感器的输出信号。其整体原理框图如图 1 所示。

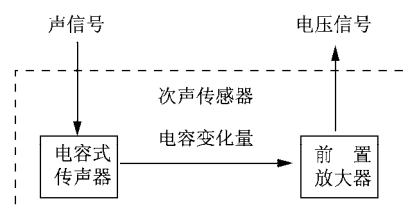


图 1 次声传感器组成框图

电容式次声传感器的频率响应^[7]由金属薄膜的劲度来控制。对于劲度系统, 在第一共振频率以下有平直的灵敏度响应, 这个平直的频响曲线的下限频率可以到很低, 最低可以低至 0.001 Hz。另一方面, 根据圆形膜对称自由振动^[8]的规律, 当圆形膜周界固定的条件下, 其基频方程

$$f_1 = \frac{2.045}{2\pi a} \sqrt{\frac{T}{\sigma}}, \quad (1)$$

其中 a 为半径, T 为膜片的张力, σ 为膜片的面密度。由式可以看出, 圆膜振动的基频与半径 a 成反比, 在相同张力和面密度下, 膜的半径愈大, 相应的基频, 即固有频率愈低。因此要检测次声频段的声波, 需选用较大半径的膜片做为敏感薄膜。

系统的高频限由系统的劲度,即弹性劲度系数的倒数来控制。电容式次声传感器的第一共振频率,在膜片的最低撑平张力时,已经远远高于系统的上限频率,因此,对于次声传感器,高频响应没有问题,我们可以通过信号调理电路设计低通滤波器来滤除高频响应。

电容式次声传感器的输出不是与膜片的振幅成比例,而是与膜片的平均位移成比例。圆膜受声波强迫振动平均位移为

$$\bar{\eta} = \frac{p_a}{k^2 T} \cdot \frac{J_2(ka)}{J_0(ka)}, \quad (2)$$

其中 p_a 为声压的振幅, $ka = \frac{2\pi f}{21300}$, f 为声波的频率。可以看出,当频率较低时,满足 $ka < 0.5$, 此时可得近似 $\bar{\eta} \approx \frac{p_a a^2}{8T}$ 。

次声传感器的灵敏度为

$$S = \bar{\eta} / D = \frac{p_a a^2}{8TD}. \quad (3)$$

可以看出,在满足一定低频的条件下,次声传感器的灵敏度与频率无关,与声压和膜片半径成正比,与膜片张力和极间距成反比。因此在一定的低频情况下,其频响曲线应该是平直的。

电容式传声器一个最大的优点^[8]在于其换能元件选用质量很小的膜片。换能元件的轻薄可以对外界次声波引起的空气扰动的灵敏度非常高。而且由于膜片质量很小,即膜片的惯性很小,使得电容膜片只对声波敏感,而对振动加速度不敏感,从而使传感器对外界的低频振动不敏感。初步试验结果测得,传感器对振动加速度的灵敏度平均值 1 mV/g 。因此,传感器有很好的抗干扰性能。

该电容式传感器针对于普通电容式传感器主要在前置放大器的电路结构以及传感器整体结构设计部分做了改进,保证其能够适用于高压输气管道:

(1) 在工艺结构设计方面,一方面采用前后腔隔离的技术,增强了传感器耐压、防爆功能,并且保证了信号的良好传输;另一方面在传感器敏感底座上设计均压孔,使得传感器在高压气体的环境中能够迅速的实现均压,在理论上保证了传感器能够在高压输气管道中使用。

(2) 采用加低偏压的方式提取电容变化量,保

证足够线性度的前提下能够防止出现打火现象,使其适用于管道中的不同气体介质泄漏检测。

(3) 增加了一种宽线性范围的场效应管,特别是采用高阻方法提高了对低频次声波激发出的电荷的拾取能力,对微弱的次声信号,在不放大噪声信号的前提下保证了传感器的高灵敏度。

2.2 电路结构

管道泄漏产生的次声波信号十分微弱,传声器输出的电信号也往往被淹没在噪声中,要不失真地利用这种信号就必须对其进行放大滤波。因此必须对传声器检测到的信号进一步调理^[9],即在传声器输出端连接一个前置放大器。前置放大器主要作用有:

- (1) 匹配传声器与后置处理电路之间的阻抗,将传声器的高输出阻抗转换为低阻抗输出;
- (2) 放大传声器输出的微弱电信号;
- (3) 滤除传声器采集到的其它干扰信号以及电路自身的噪声信号。

为了获得传感器电容量的缓慢变化信号,进行了前置放大器(信号调理电路)的设计。共提出了三种方案,实现了对调制电路优化设计。标定其对应三个型号的传感器:气体传感器 CASI-GCM-2011-A、气体传感器 CASI-GCM-2011-B、气体传感器 CASI-GCM-2011-D。气体传感器 CASI-GCM-2011-A 信号调理电路整体框图如图 2 所示。

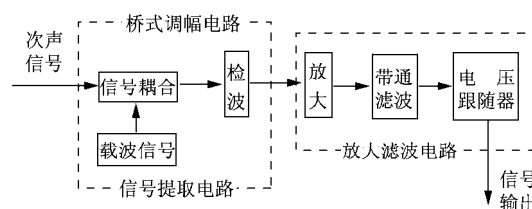


图2 CASI-GCM-2011-A 次声传感器信号调理电路

前置放大器的重点设计硬件电路有两部分:信号提取电路以及放大滤波电路。三种方案主要在信号提取电路部分做了改进。

气体传感器 CASI-GCM-2011-A 信号提取电路主要由载波信号电路、桥式调幅电路以及检波电路三部分组成。载波信号产生电路由 SN74LS161AD 及相应外围电路组成,输出频率为 96 kHz 、峰峰值为 12 Vpp 的正弦波。桥式调幅电路中,传声器电容变化量作为其中电桥的一个桥臂,当传感器接收到次声信号时,电桥失衡产生相应变动的调幅波,

此调幅波与载波信号耦合后输出。检波电路采用二极管检波, 桥式调幅电路输出的信号经二极管检波后, 高频信号对地短路, 输出信号基本上就是次声信号包络线。采用载波信号与次声信号耦合的方法将敏感单元输出的微弱信号调制输出, 可以实现在 1 mV 级信号下的线性放大, 消除放大器对微弱信号的非线性效应。

气体传感器 CASI-GCM-2011-B 信号提取电路保留了气体传感器 CASI-GCM-2011-A 信号提取电路, 在检波电路之后增加场效应管, 利用场效应晶体管输入阻抗极高的特点来实现阻抗变换。敏感元件电容式传声器受声波作用输出电容量比较小, 一般为几十 pF , 经信号提取电路后相应的输出电信号幅度很弱, 阻抗很高。因此不能将传声器的输出直接与放大电路相接, 通过增加场效应管将传声器的高输出阻抗转换为低阻抗输出, 一方面提高了次声传感器的灵敏度, 另一方面降低检测信号的传输损耗, 将管道次声波信号输送到较远距离的检测仪器中。但是其缺点在于在提高灵敏度的同时也放大了电路的自噪声。

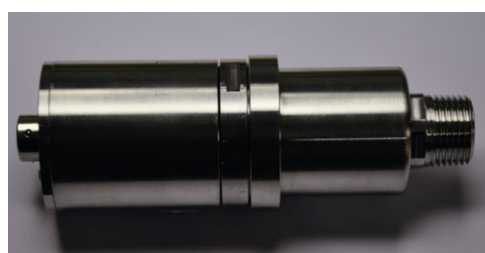
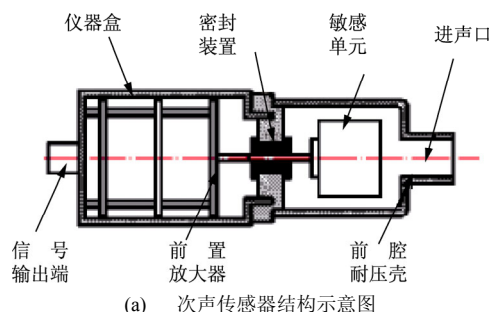
气体传感器 CASI-GCM-2011-D 在气体传感器 CASI-GCM-2011-B 的基础上做了大幅度的改进, 在信号提取电路部分将载波信号完全用加偏置电压的方法代替。由于载波信号电路的输出并不是标准的正弦波, 导致电路本身会带来一定的噪声信号。采用加偏置电压的方法不仅进一步简化了电路, 也降低了电路的自噪声, 提高了次声传感器的灵敏度。

放大滤波电路实现三个功能: 对次声传感器检测到得微弱信号进行放大, 提高传感器的灵敏度, 并且该传感器设置了三档放大器增益, I 档 1 倍、II 档 5 倍、III 档 20 倍; 滤除传感器接收到的噪声信号以及放大电路自身产生的噪声; 采用滤波方法控制检测到信号的频率范围, 将膜片共振频率设置在较高处, 确保频响范围在 $0.5\sim 300\text{ Hz}$ 范围内。

2.3 次声传感器整体结构

管道次声传感器内部整体结构示意图及实物图如图 3 所示。该次声与低频声传感器的敏感单元电容式传声器通过敏感器底座设置于耐压前腔内, 耐压前腔经密封装置与敏感器底座之间形成一个高压环境; 敏感器底座上设有均压孔, 以使电容式传感器工作在均压环境中。敏感器底座上密封穿设

信号导体, 用于将电容传声器产生的信号通过该信号导体输出, 连接前置放大器。前置放大器和敏感单元隔离, 置于仪器盒内, 通过增加密封固定装置可以进一步增强传感器耐压、防爆性能。



(b) 实物
图 3 次声传感器结构示意图及实物

3 传感器设计理论仿真结果

根据次声传感器实物参数, 建立电容式传声器的模型如图 4 所示, 由输入口、前腔、膜片、通孔和后腔组成。当声波作用时, 膜片振动使得其发生形变, 从而导致前腔和后腔的压强发生变化。

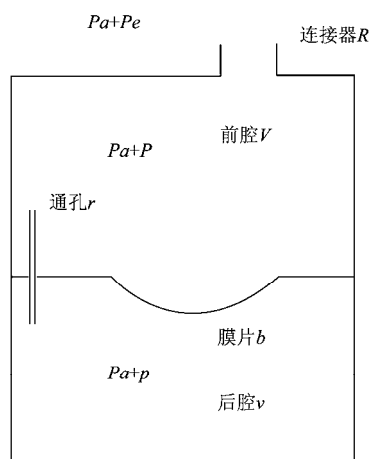


图 4 传声器的原理结构图

前腔和后腔压强随时间变化率分别为等式(4)和(5)所示。

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\gamma P_a}{V} \left[\frac{P_\varepsilon - P}{R} + \frac{p - P}{r} + b \frac{d(p - P)}{dt} \right], \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\gamma P_a}{v} \left[\frac{p - P}{r} + b \frac{d(P - p)}{dt} \right], \quad (5)$$

其中, γ 为气体绝热系数。

定义 Q 为传感器的响应函数, 其式子如下:

$$Q = \langle P - p \rangle / \langle Pe \rangle. \quad (6)$$

为了计算响应函数 Q , 我们定义 $Pe(t)$, $P(t)$, $p(t)$ 如下:

$$Pe = e^{i\omega t}, \quad P = me^{i\omega t}, \quad p = ne^{i\omega t}.$$

经计算得到传声器最终响应公式如下:

$$Q = m - n = \frac{a}{F} \left(1 - \frac{aq}{i\omega v + aq} \right), \quad (7)$$

其中 m 和 n 分别是前腔和后腔幅度衰减系数,

$$F = i\omega VR + a + aqR - \frac{a^2 q^2 R}{i\omega v + aq}.$$

传声器归一化后的理论频率响应仿真结果如图 5 所示。

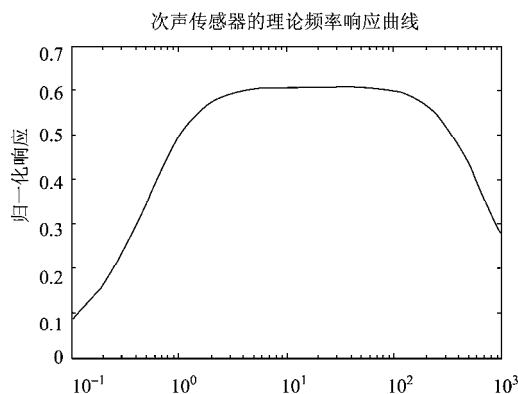


图 5 传声器的归一化频率响应图

从图 5 可以看出, 其理论仿真结果 3 dB 带宽大致为 0.5 Hz~300 Hz, 并且在 1 Hz~100 Hz 的范围内频率响应曲线平坦。理论仿真结果表明, 此传声器频响范围满足要求。

4 传感器性能测试结果

为验证次声传感器的设计性能, 分别对传感器在气体中的耐压性能以及其对次声波信号的响应

进行了测试。

4.1 传感器频率响应性能测试

4.1.1 传感器频率响应性能测试实验

为测试传感器对次声信号的响应, 在中科院声学所香山高声强实验室的次声压力舱内, 测试^[10]了传感器的几组性能指标: 上限频率和下限频率、灵敏度以及传感器抗噪性能。

实验由信号发生器作为信号源经过功率放大器推动次声压力舱产生相应频率的次声信号。参考传声器选用 B&K 公司研制的 B&K4193, 将其放置于次声压力舱内, 用于监测次声压力舱内的次声信号情况。待测次声传感器放置于参考传声器附近, 其采集到的信号经中科院声学所自行研制的数字化网络传输仪 InSAS2008 实现 A/D 转换并传输到计算机内, 计算机经过一定的软件处理得到传感器采集到的声波信号。图 6 为次声压力舱现场图, 图 7 为参考传声器以及次声传感器实验现场放置图。



图 6 次声压力舱现场图

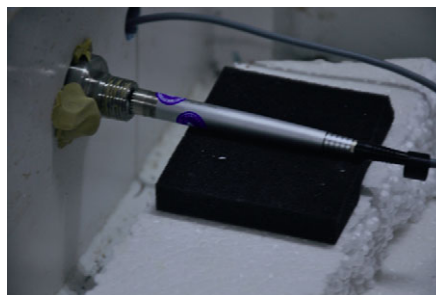


图 7 参考传声器以及次声传感器实验现场放置图

实验分别对三个型号的传感器在输入信号频率分别为 3 Hz、7 Hz、10 Hz、12 Hz、14 Hz、16 Hz、20 Hz、63 Hz、100 Hz、200 Hz、300 Hz 的情况下进行测试, 均准确测得了各个频率点的次声信号, 且有着极高的信噪比。以下是各个传感器分别在 10 Hz 频率点采集到的信号。

气体传感器 CASI-GCM-2011-A 在未输入任何

信号的情况下,传感器采集到得噪声信号为 15 mV; 输入信号频率为 10 Hz、声压级 131 dB 时,其采集的信号波形和频谱图如图 8、图 9 所示。

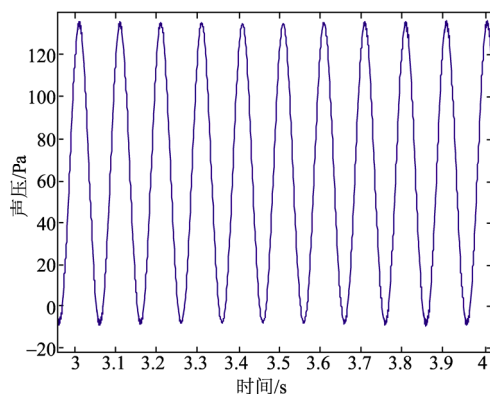


图 8 CASI-GCM-2011-A 检测到的信号波形

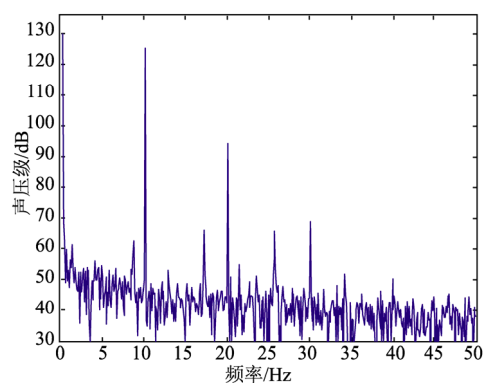


图 9 CASI-GCM-2011-A 检测到的信号频谱, 信噪比约 70 dB

气体传感器 CASI-GCM-2011-B 未输入任何信号的情况下,传感器采集到的噪声信号为 300 mV; 在输入信号频率为 10 Hz、声压级 92 dB 时,其采集到的信号波形和频谱图如图 10、图 11 所示。

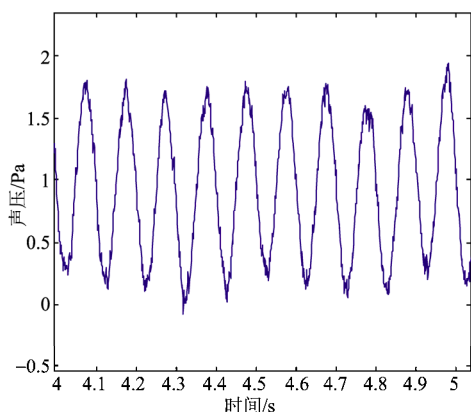


图 10 CASI-GCM-2011-B 检测到的信号波形

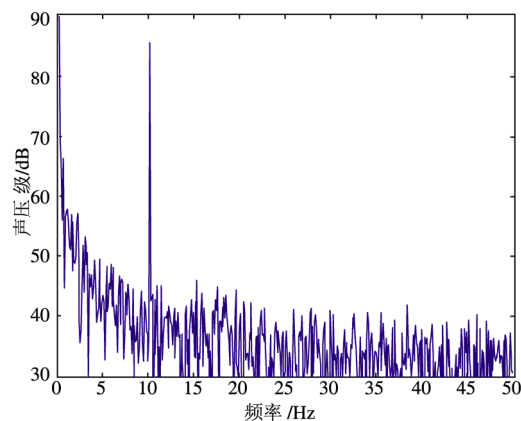


图 11 CASI-GCM-2011-B 检测到的信号频谱, 信噪比约 40 dB

气体传感器 CASI-GCM-2011-D 在未输入任何信号的情况下,传感器采集到得噪声信号为 20 mV; 在输入信号频率为 10 Hz、声压级 96 dB 时,其采集信号波形和频谱图如图 12、图 13 所示。

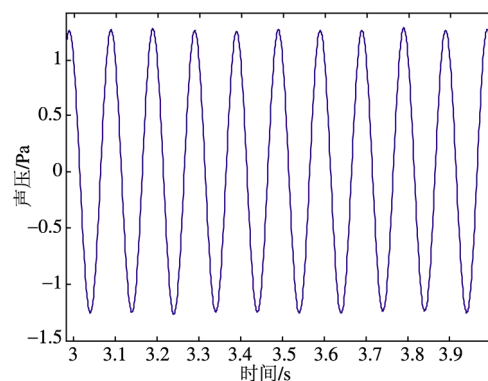


图 12 CASI-GCM-2011-D 检测到的信号波形

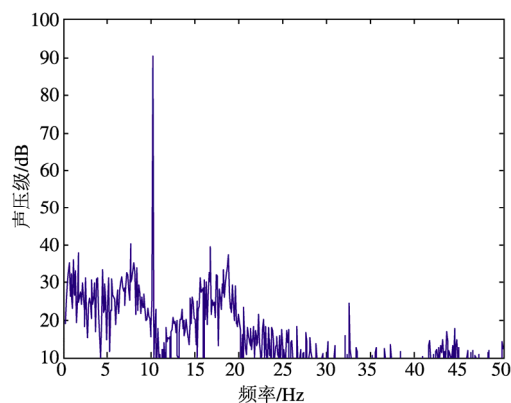


图 13 CASI-GCM-2011-D 检测到的信号频谱, 信噪比约 55 dB

可以看到,三个型号的次声传感器都很清晰的采集到了次声信号,并且信噪比很高。气体传感器

CASI-GCM-2011-B 波形最差, 信噪比最低, 因此其采集到的信号波形最差。

4.1.2 频率响应及其灵敏度

根据实验所测得的数据结果, 结合参考传声器自身的性能参数, 经计算即可得到被测试传感器的频率响应曲线, 即其灵敏度曲线图。

理论上来说, 由于两个传感器置于同一声场中, 参考传声器与被测传感器采集到的信号是同一信号, 即 $s_0(t) = s_1(t)$, 实际由于参考传声器与被测传感器的性能不同, 采集到的信号并不完全相同, 即传感器自身的传递函数不同, 记 $H_0(j\omega)$ 和 $H_1(j\omega)$ 分别为参考传声器和被测传感器的传递函数。对于理想的参考传声器, $H_0(j\omega) = 1$ 。

待测传感器的灵敏度计算方法为

$$H(j\omega) = H_1(j\omega) / H_0(j\omega),$$

则待测传感器灵敏度幅度为

$$H(j\omega)|_{dB} = H_1(j\omega)|_{dB} - H_0(j\omega)|_{dB}.$$

经计算得出的三种传感器频率响应曲线图分别如图 14、图 15、图 16 所示。

三个型号的次声传感器 3 dB 带宽基本接近理论仿真结果, 但由于信号调制电路的进一步滤波调

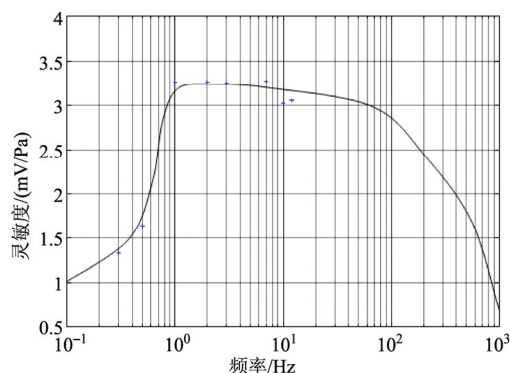


图 14 CASI-GCM-2011-A 频率响应图

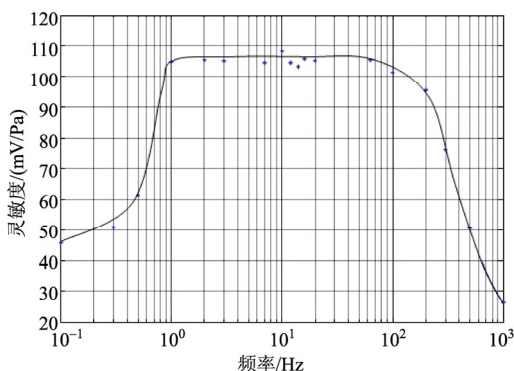


图 15 CASI-GCM-2011-B 频率响应图

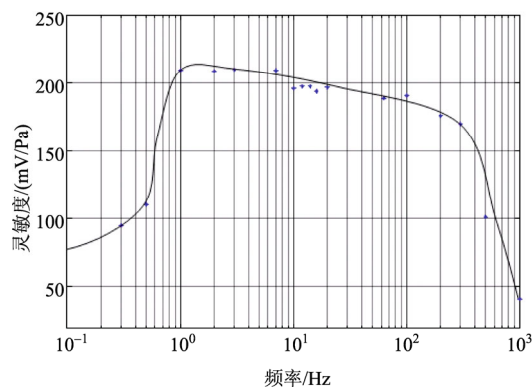


图 16 CASI-GCM-2011-D 频率响应图

整以及各个敏感元件的性能特性使得其频响范围有所改变。

结合次声传感器采集到的波形图及其频响曲线图得到三个型号的传感器的性能参数结果如表 1 所示。

表 1 传感器性能参数测试结果

传感器类别	灵敏度	3 dB 带宽	自噪声
CASI-GCM-2011-A	3 mV/Pa	0.6 Hz~300 Hz	15 mV
CASI-GCM-2011-B	105 mV/Pa	0.6 Hz~300 Hz	300 mV
CASI-GCM-2011-D	200 mV/Pa	0.5 Hz~300 Hz	15 mV

从表 1 可以看出, CASI-GCM-2011-D 型传感器性能最好, 既提高了灵敏度, 又解决了噪声大的问题, 并且其频响范围最宽, 最为接近理论仿真结果。

4.2 传感器耐压性能测试

为测试次声传感器的耐压性能, 采用高压氧气打压对其进行了测试。将次声传感器安装在气体管道末端, 并将传感器置于 20 L 盛水容器中。图 17 为实现现场照片。实验中连续的对其加压至 12 MPa, 并持续 4 个小时, 传感器未出现故障。



图 17 传感器打压实验照片

5 总结

本文详细地阐述了该电容式次声传感器的原理和设计理论,进而提出了传感器信号调理电路的三种设计方案,并且分别对三种方案的传感器在次声压力舱内进行测试,得到了传感器采集到的信号波形图及其灵敏度曲线图。最终通过对比信号放大电路测试结果,实现了对前置放大器的优化设计。并对传感器进行了打压试验,保证其能够适用于高压输气管道。

该传感器灵敏度 200 mV/Pa、频带 0.5 Hz~300 Hz,对压力的分辨率 0.0001 Pa,耐压 12 MPa,具有很好的信噪比。因而,该型传感器能够检测到微弱的次声信号,可以用于安装在高压输气管道上,通过对其采集到的次声信号处理分析,能够有效的检测到管道泄漏产生的次声波信号。

致谢 本项研究工作是在中科声相(天津)科技有限公司阮元实高工的悉心指导下以及实验室师兄和同学的帮助下共同努力完成的,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] SHIBATA A, KONISHI M, ABE Y, et al. Neuro based acoustic diagnosis of gas leakage in pipeline[J]. SICE Annual Conference, 2008: 283-287.
- [2] 王桂增, 叶昊. 流体输送管道的泄漏检测与定位[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 141-148.
- [3] 林琳, 杨亦春. 大气中一种低频次声波观测研究[J]. 声学学报, 2010, 35(2): 200-207.
- [4] BRODETSKY I, SAVIC M. Leak monitoring system for gas pipelines[J]. IEEE International Conference, 1993: III-17-III-19.
- [5] BYL M F, PAINTAL S K, GREEN B D, et al. Infrasonic frequency seismic system for pipeline integrity management[R]. Volpe National Transportation Systems Center, 2007.
- [6] 潘玉安, 曹荣祥, 曹良足, 等. 压电陶瓷传感器灵敏度的研究[J]. 压电与声光, 2005, 27(2): 128-130.
- [7] 谢金来, 陶中达, 谢照华. 高灵敏度宽频带电容次声传感器[J]. 核电子学与探测技术, 2003, 23(5): 428-432.
- [8] 马大猷. 现代声学理论基础[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [9] 李孟源, 尚振东, 蔡海潮, 等. 声发射检测及信号处理[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 130-133.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19800—2005/ISO 12713: 1998 无损检测声发射检测换能器的一级标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 4-9.