

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108428

供水管道泄漏信号检测系统设计

肖梓铭¹ 赵文龙¹ 娄嘉骏²

(1.南昌航空大学信息工程学院 南昌 330063; 2.宁波水表(集团)股份有限公司 宁波 315032)

摘要: 针对供水管道泄漏信号检测与泄漏点定位问题,设计了一种基于压电加速度传感器的供水管道泄漏信号检测系统。检测系统由两个振动信号采集终端和基于 MATLAB 的上位机软件组成。从泄漏信号特点出发,对振动信号采集终端的前置信号转换电路、带通滤波电路和 ADC 数据采集电路进行了分析和设计。同时,对单片机程序和上位机软件的设计原理和功能进行了分析说明。采用 VC-02 振动校准仪和模拟供水管网,对系统的微弱振动信号采集功能和泄漏点定位功能进行了测试。测试结果表明,系统能准确采集加速度不低于 0.01 g ($1\text{ g}=9.80\text{ m/s}^2$) 的微弱振动信号,对 10 m 长的 UPVC 管道进行泄漏点定位的最大相对误差为 3.97% ,平均相对误差为 3.51% 。

关键词: 管道泄漏;振动信号采集;压电加速度传感器;单片机;泄漏点定位

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Design of leakage signal detection system for water supply pipeline

Xiao Ziming¹ Zhao Wenlong¹ Lou Jiajun²(1. College of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
2. Ningbo Water Meter(Group) Co., Ltd., Ningbo 315032, China)

Abstract: Aiming at the problem of water supply pipeline leakage signal detection and leakage point location, a leakage signal detection system for water supply pipeline is designed. The system is composed of two vibration signal acquisition terminals and upper computer software based on MATLAB. Based on the characteristics of leakage signal, the pre signal conversion circuit, band-pass filter circuit and ADC data acquisition circuit of vibration signal acquisition terminal are analyzed and designed. At the same time, the design principle and function of MCU program and upper computer software are analyzed and explained. VC-02 vibration calibrator and simulated water supply network are used to test the system functions of weak vibration signal acquisition and leakage point location. The test results show that the system can accurately collect the weak vibration signal with acceleration not less than 0.01 g ($1\text{ g}=9.80\text{ m/s}^2$). The maximum relative error of locating the leakage point of 10 m UPVC pipeline is 3.97% , and the average relative error is 3.51% .

Keywords: pipeline leakage; vibration signal acquisition; piezoelectric acceleration sensor; single-chip microcomputer; leak point location

0 引言

供水管道是城市供水网络的基本组成部分,受外界环境及水质影响,管道外部容易出现锈蚀,管道内部容易形成水垢^[1]。在外界物体冲击下,管道损伤部位极易出现管道泄漏,造成水资源浪费。当前,供水管道泄漏信号检测方法主要包括负压梯度检测法、声波检测法、光纤传感检测法和质量平衡法^[2]。

王冬祥^[3]基于电磁原理为管道内球形泄漏检测器设计了示踪定位系统,在管外根据检测器发出的电磁信号强度

确定检测器的运动位置,并结合检测器记录的管道内部声学信息,实现了 130 m 供水管道的微小泄漏检测,但该检测器在多支路管道中容易丢失,存在堵塞供水管道、供水管网停运的风险。贺帆^[4]基于无线组网技术设计了供水管道泄漏检测定位系统,使用多个节点模块在线检测分析供水管网的泄漏振动信号,通过 WiFi 网络将检测结果上传至集中器模块,集中器模块再通过无线通信网络将泄漏信息上报至上位机软件平台,该系统实现了供水管网泄漏长期在线监测,但受限于节点模块的数据处理能力,管道泄漏误报率较高,并且要求安装区域具有良好的无线通信网络。王

硕^[5]将分布式振动光纤传感系统应用于供水管道泄漏监测,通过对压力供水管道的泄漏进行数值分析,改变管道漏孔尺寸和材质等条件,并结合 Φ -OTDR 检测技术验证了振动光纤传感器安装在管道内外均能有效监测管道泄漏,并且安装在管壁外侧中央位置时的泄漏监测效果最优,但该泄漏监测方法需要大范围铺设光纤传感器,成本较高,且不便于已铺设供水管网的泄漏监测。

针对当前供水管道泄漏检测系统的不足之处,本文基于压电加速度传感器设计了一种泄漏信号检测系统,该系统由两个振动信号采集终端和基于 MATLAB 的上位机软件组成。本文以 STM32 单片机为主控芯片,针对供水管道泄漏声信号的特点,分析设计了振动信号采集终端的主要电路部分,如前置信号转换电路、带通滤波电路和 ADC 数据采集电路。同时,对振动信号采集终端的单片机程序和基于 MATLAB 的上位机软件进行了设计。最后,以 VC-02 振动校准仪和模拟漏水管网为测试条件,对系统的振动信号采集功能和漏点定位功能进行了测试。本文设计的供水管道泄漏信号检测系统,在性能满足设计要求的情况下,相比相关定位仪等电子设备具有低复杂度、低成本、操作方便等特点。同时,基于 MATLAB 的上位机软件为系统的泄漏信号检测分析、泄漏点定位等功能,提供了更强的信号处理能力。

1 泄漏信号检测与泄漏点定位原理

当供水管道发生泄漏,水流在管道内外压力差的作用下从泄漏点向外喷射,对管壁和漏点周围的沙石形成冲击,产生从泄漏点向管道两端传播的振动信号^[6]。将两个压电加速度传感器安装在供水管道两端的外表面,对管壁振动信号进行同步采集,通过计算两路振动信号的传播时间差,便可实现供水管道泄漏点定位^[7-8]。

泄漏点定位原理如图 1 所示,图中点 O 为供水管道泄漏点,点 A 与点 B 分别为压电加速度传感器,以 A 为参考点,传感器 B 相对传感器 A 的距离为 l ,漏点 O 相对传感器 A 的距离为 l_a 。泄漏点 O 产生的振动信号沿管壁以固定波速 V 向管道两端传播,经过时间 t_a 到达传感器 A ,经过时间 t_b 到达传感器 B 。

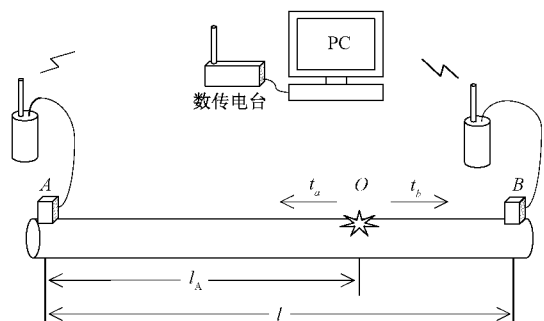


图 1 泄漏信号检测与漏点定位原理

故存在式(1)和(2):

$$l_a = V \times t_a \quad (1)$$

$$l - l_a = V \times t_b \quad (2)$$

根据算式(1)和(2),可计算得到漏点 O 相对传感器 A 的距离为:

$$l_a = \frac{V \times (t_a - t_b) + l}{2} \quad (3)$$

传感器 A 和 B 同步采集的离散时间信号 $X_a(n)$ 和 $X_b(n)$ 为随机信号,通过计算互相关函数可得到两路振动信号的传播时间差 Δt 。互相关函数 $R(m)$ 用于描述 $X_a(n)$ 与 $X_b(n)$ 间的相关性, $R(m)$ 如式(4)所示。

$$R(m) = \sum_{n=1}^N X_a(n) X_b(n-m) \quad (4)$$

式中: n 为 $X_a(n)$ 和 $X_b(n)$ 的序列长度, m 为 $X_a(n)$ 和 $X_b(n)$ 的相对偏移量。根据 $R(m)$ 最大值点的偏移量 M 和传感器信号采集频率 F_s ,可计算得到 $X_a(n)$ 和 $X_b(n)$ 间的信号传播时间差为:

$$\Delta t = t_a - t_b = \frac{M}{F_s} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

$$l_a = \frac{V \times M}{2 \times F_s} + \frac{l}{2} \quad (6)$$

由式(6)可知,在已知管壁波速 V ,两传感器相对距离 l 和信号采集频率 F_s 的条件下,先对管道两端的振动信号进行同步采集,再对采集结果作互相关计算,得到互相关函数最大值点的偏移量 M 后,便可计算出泄漏点 O 相对传感器 A 的距离 l_a 。

2 振动信号采集终端设计

系统包含两个管壁振动信号采集终端,振动信号采集终端硬件结构如图 2 所示。振动信号采集终端采用 7.4 V 可充电锂电池供电,STM32L051C8T6 作为主控芯片,由压电加速度传感器、前置信号转换电路、输入缓冲电路、带通滤波电路、ADC 数据采集电路、SRAM 存储电路、433 MHz 通信模块电路、电源电路等组成^[9-10]。安装于管壁外表面的压电加速度传感器将振动信号转换为电荷信号输出;前置信号转换电路对电荷信号进行放大和 V/I 转换,输出电流信号;电流信号经输入缓冲电路进行 I/V 转换后,由带通滤波电路滤除低频和高频噪声信号;最后,单片机控制 ADC 数据采集电路对滤波后的信号进行采样,并通过 433 MHz 通信模块将采样结果传输至上位机。

2.1 前置信号转换电路

压电加速度传感器输出阻抗大,输出电荷微弱,需先进行电荷放大才能进行信号采集。前置信号转换电路由电荷放大电路和 V/I 转换电路组成,电荷放大电路将电荷信号放大并转换为电压信号, V/I 转换电路将电压信号转换为电流信号输出,以提高传感器输出信号的抗环境干扰能力^[11]。前置信号转换电路采用低噪声、低偏置电流和高输入阻抗的

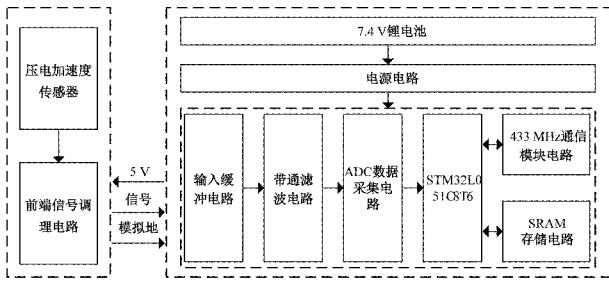


图2 振动信号采集终端硬件结构

TLV9064 运算放大器进行设计,电路如图3所示。

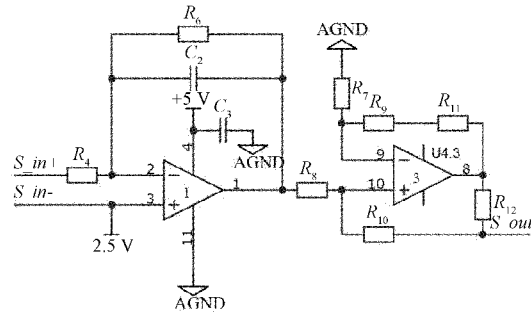


图3 前置信号转换电路

当压电加速度传感器受加速度 a 作用,电荷放大电路的输出电压为:

$$V_o = V_{ref} + \frac{S_a}{C_2} \times a \quad (7)$$

式中: S_a 为传感器的电荷灵敏度, V_{ref} 为同相输入端的参考电压。电荷放大电路的低频截止频率 f_{cl} 和 高频截止频率 f_{ch} 分别为:

$$f_{cl} = \frac{1}{2\pi \times R_6 \times C_2} \quad (8)$$

$$f_{ch} = \frac{1}{2\pi \times R_4 \times C_s} \quad (9)$$

其中,电阻 R_4 和 R_6 分别为 TLV9064 提供直流反馈通道和输入过流保护, C_s 为传感器的电容。转换电路为 Howland 电流泵电路,其电阻 R_7 、 R_9 和 R_{11} 分别等于 R_8 、 R_{10} 和 R_{12} , 该电路输出电流 I_o 仅随输入电压变化, I_o 与传感器所受加速度 a 的关系为:

$$I_o = \frac{(V_{ref} \times C_2 + S_a \times a) \times (R_9 + R_{11})}{C_2 \times R_{11} \times R_7} \quad (10)$$

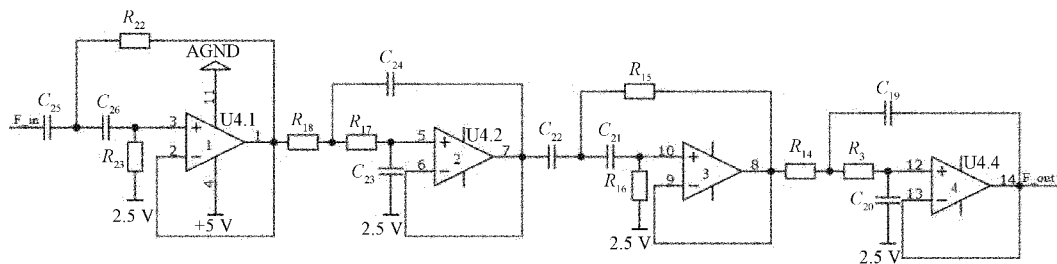


图5 带通滤波电路

本设计所用压电加速度传感器的电荷灵敏度 $S_a = 105 \text{ pC/g}$, 最大可测量加速度为 10 g , 有效信号测量带宽为 3 kHz 。测量 5 g 以内加速度作用时,前置信号转换电路的最大输出电流为 2.5 mA 。经实测,电路的高频截止频率为 11.7 kHz , 低频截止频率为 2 Hz 。

2.2 带通滤波电路

不同材质的供水管道发生泄漏时,管壁振动信号的频率主要分布在 $100 \text{ Hz} \sim 2 \text{ kHz}$ 范围内,为保证完整采集泄漏信号,避免信号采集结果失真,本设计将滤除 5 kHz 以上的噪声信号^[12-14]。同时,为减小经空间电容耦合输入的 50 Hz 工频干扰,本设计还将滤除 60 Hz 以下的噪声信号^[15]。巴特沃斯滤波器的频率响应曲线在通带内平稳,但对高频和低频干扰信号的衰减较慢^[16]。提高滤波器的阶数可有效提高衰减速率,根据设计性能要求,本设计的带通滤波器为八阶有源巴特沃斯滤波器。

带通滤波电路由 2 个二阶低通滤波电路和 2 个二阶高通滤波电路级联而成,各级滤波电路均采用单位增益 Sallen-Key 电路拓扑。单位增益 Sallen-Key 电路如图 4 所示。

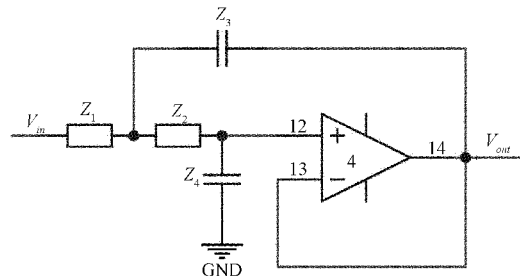


图4 单位增益 Sallen-Key 电路

图4中电路的传递函数为:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_3 \times Z_4}{Z_1 \times Z_2 + Z_2 \times Z_3 + Z_3 \times Z_4 + Z_1 \times Z_3} \quad (11)$$

考虑到电路元器件容易引入噪声,带通滤波电路采用低噪声、增益宽带积为 10 MHz 的 TL9064 运算放大器进行设计,电路如图 5 所示。TL9064 采用 5 V 单电源供电,每级滤波电路加上 2.5 V 直流偏置电压。经实测,电路的高频截止频率为 5.1 kHz , 低频截止频率为 63 Hz , 通带增益为 0 dB , 通带纹波小于 1 dB 。

2.3 ADC 数据采集电路

带通滤波器输出电压信号的频率范围为 60 Hz ~ 5 kHz, 根据奈奎斯特采样定理, ADC 数据采集电路的采样频率至少为信号频率的两倍。本系统采用 ADS1259 芯片设计 ADC 数据采集电路, 该芯片采用单通道差分输入, 模拟信号输入引脚的输入电压范围为 0~5 V, 转换结果最高具有 24 位分辨率, 可编程输出数据速率高达 14.4 KSPS。ADS1259 内部的模拟电路和数字电路分别采用 5 V 和 3.3 V 电压供电, 通过 4 MHz 传输速率的 SPI 接口与 MCU 连接, ADC 数据采集电路如图 6 所示。根据芯片手册, ADS1259 内部提供 2.5 V 参考电压, 差分输入通道的输入电压范围为 -2.5~2.5 V, 考虑到 AINP 引脚的输入电压为 0~5 V, 故向 AINN 引脚提供 2.5 V 基准电压 VREF, 使差分输入通道的输入电压满足设计要求。

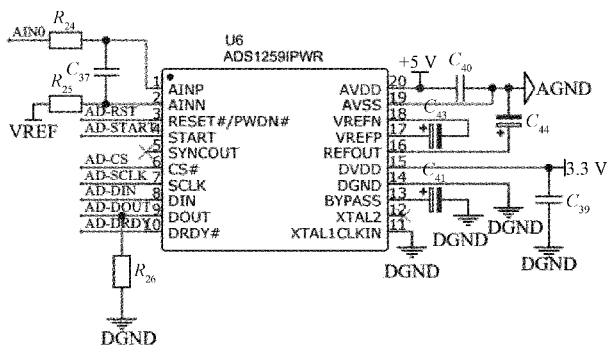


图 6 ADC 数据采集电路

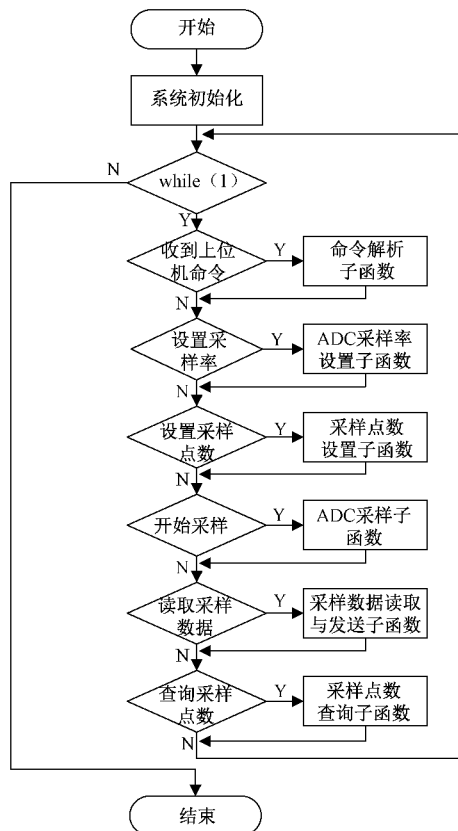


图 7 单片机程序流程

3 系统软件设计

3.1 单片机程序设计

单片机控制程序采用前后台程序设计方法, 将事件响应和事件处理环节分开, 单片机控制程序流程如图 7 所示。前台程序主要为串口中断服务程序, 实时解析串口接收的控制指令, 进行事件响应, 并置位相应的事件标志位。后台程序为一个检测事件标志位的 while 循环, 当检测到事件标志位后, 程序将跳转到对应分支, 执行相应的事件处理子程序。事件处理子程序主要包括信号采集与存储、采样数据读取、采样参数设置、采样参数查询等。

3.2 上位机软件设计

上位机软件采用 MATLAB 的 GUI 进行设计, 上位机软件界面如图 8 所示, 主要包括信号波形展示、信号检测结果、系统参数设置、管道参数设置、串口设置和控制命令下发界面。上位机软件通过串口接收中断函数接收采样数据后, 由各控件的回调函数进行数字信号处理和界面绘图。信号波形展示界面由两个 Axes 控件构成, 用于显示两路采集数据的时域波形、互相关函数图形、FFT 频谱、功率谱密度图。信号检测结果界面用于计算和显示单路采集数据的特征参数, 如表征信号时间序列复杂度的排列熵。参数设置界面用于设置采样点数、系统采样率、FFT 计算点数和管道参数。

4 系统测试

4.1 振动信号采集

供水管道泄漏引起的管壁振动信号十分微弱, 信号采集点距离泄漏点越远, 采集到的泄漏信号强度越低, 管道泄漏信号检测系统需具有较高测量精度。本设计采用 VC-02 振动校准仪进行振动信号采集功能测试, 振动校准仪用于向传感器提供正弦激励信号。在 0~2 kHz 的供水管道泄漏信号频率范围内, 选取 4 个频率点, 通过 VC-02 振动校准仪输出振动信号进行信号采集测试, 测试条件如表 1 所示。系统信号采集结果的时域波形及其频谱如图 9 所示。由测试结果可知, 系统采集结果的时域波形准确, 频谱清晰, 可用于检测供水管道管壁上加速度不小于 0.01 g 的微弱振动信号。

4.2 泄漏点定位

按图 1 所示, 在供水管道两端的外表面间隔一定距离安装两个振动信号采集终端, 配合 MATLAB 上位机软件, 可实现基于互相关算法的供水管道泄漏点定位。泄漏点定位测试在模拟供水管网中进行, 测试环境如图 10 所示。测试管道为 UPVC 管道, 管道内径为 63 mm, 管壁厚度为 4.7 mm; 传感器采用胶粘方式安装在管壁外表面; 信号采集点 A、B 位于测试管道两端, 相对距离 $l=10$ m; 振动信

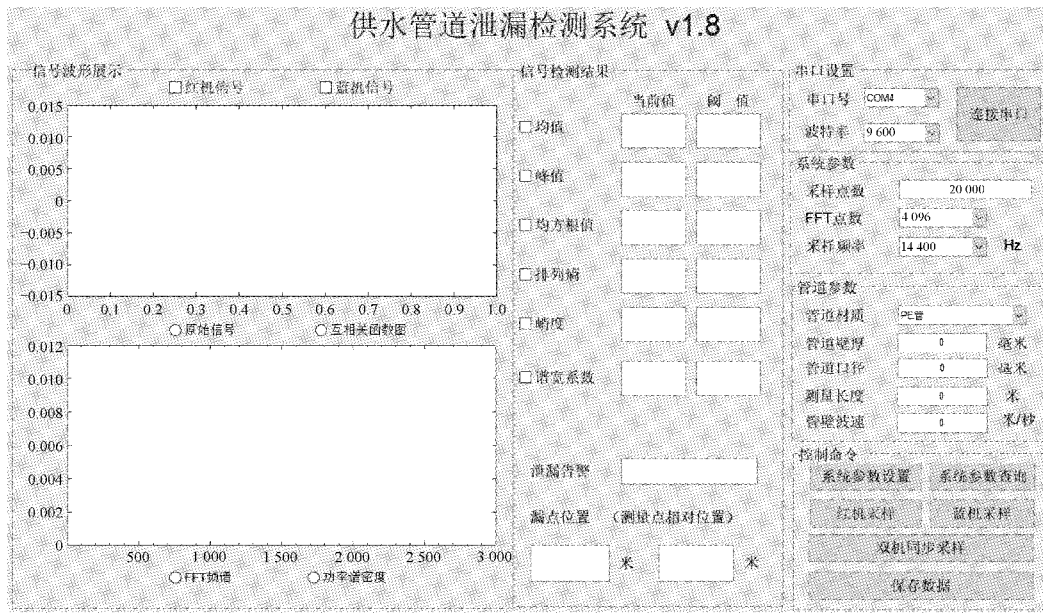


图8 上位机软件界面

表1 振动信号采集测试条件

测试次数	给定加速度/g	采样率/SPS	采样点个数	FFT点个数	频率/kHz
1	0.01	14.4 K	1 000	512	0.1
2	0.01	14.4 K	1 000	512	2

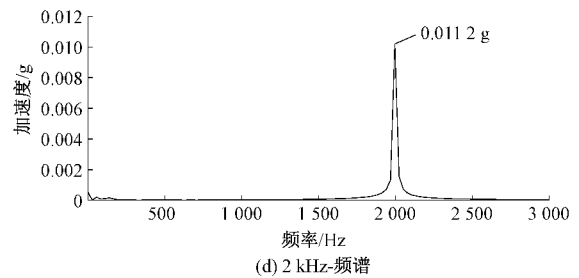
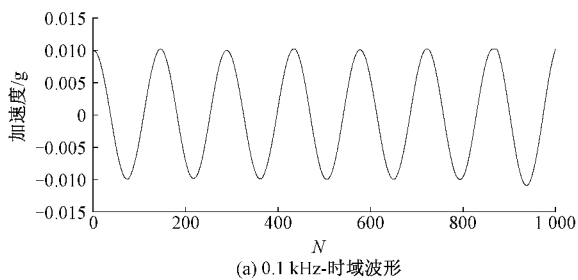
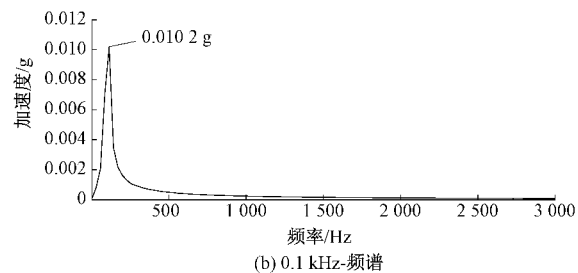


图9 振动信号采集测试结果

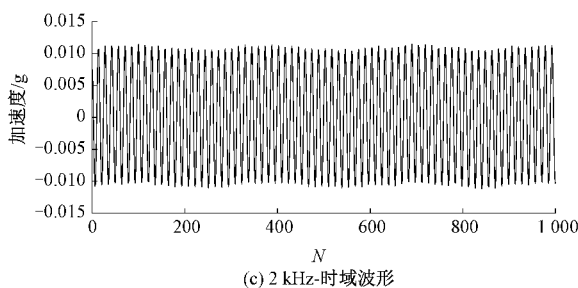
号采集终端的采样率 F_s 设为 14.4 KSPS, 采样点数为 10 000 点; 模拟泄漏点为直径 5 mm 的圆形开孔, 管道内水压为 0.35 MPa。为保证测试的合理性, 进行了 5 次漏点定位测试, 每次测试时的管道漏点位置均不同。



(a) 0.1 kHz-时域波形



(b) 0.1 kHz-频谱



(c) 2 kHz-时域波形

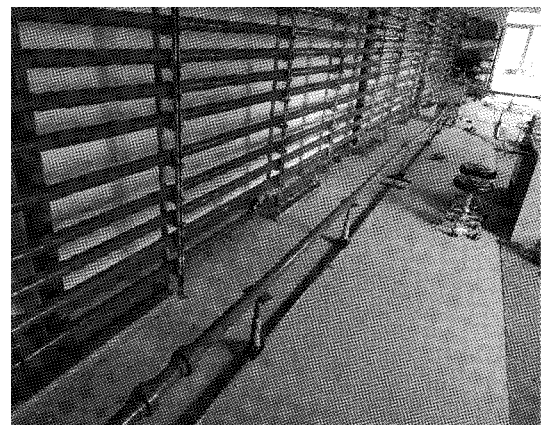


图10 测试环境

测试时, 本系统先同步采集 A、B 两点的管壁振动信号; 再由 MATLAB 上位机软件对两路采集数据进行互相

关计算,得到互相关函数 $R(m)$ 最大值点的偏移量 M ; 最后根据式(6),计算泄漏点与点 A 的相对距离 l_a 。式(6)中的管壁波速 V 采用三传感器测量法测定,测量结果为 $V=4\,089\text{ m/s}^{[17]}$ 。第 1 次漏点定位测试得到的互相关计算结果如图 11 所示。

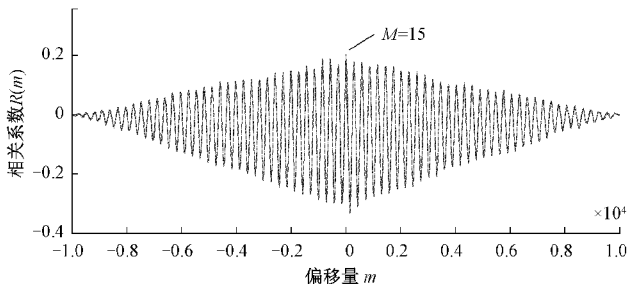


图 11 第 1 次测试的互相关计算结果

根据式(6)计算可得泄漏点与点 A 相对距离为:

$$l_a = \frac{V \times M}{2 \times F_s} + \frac{l}{2} = \frac{4\,089 \times 15}{2 \times 14\,400} + \frac{10}{2} \approx 7.13\text{ m} \quad (12)$$

5 次泄漏点定位测试结果如表 2 所示,由测试结果可知,采用本系统对 10 m 长的 UPVC 管道进行泄漏点定位的最大相对误差为 3.94%,平均相对误差为 3.50%。

表 2 泄漏点定位测试结果

测试次数	实际漏点距点 A/m	$R_{ab}(m)$ 最大值点偏移量 M	计算漏点距点 A/m	相对误差 (距点 A)/%
1	6.89	15	7.13	3.48
2	6.04	9	6.28	3.97
3	5.11	2	5.28	3.33
4	4.01	-6	4.15	3.49
5	3.33	-11	3.44	3.30

5 结 论

本文设计的供水管道泄漏信号检测系统可用于检测管道外壁上加速度不小于 0.01 g 的微弱振动信号,能实现对 UPVC 供水管道 10 m 范围内的泄漏点定位,定位结果的最大相对误差为 3.97%,平均相对误差为 3.51%。在漏点定位计算中,信号传播时延 Δt 的时间分辨率为系统采样率 F_s 的倒数, F_s 越大, Δt 的分辨率越高,漏点定位误差就越小。实际的模数转换芯片大多难以同时兼顾高分辨率和高采样率,故在不降低采样分辨率的条件下,应进一步研究如何通过插值算法提高 Δt 的时间分辨率,以提高漏点定位的准确度。

参考文献

- [1] 陈佳榕. 试论城市供水管网改造工程中的现状与问题[J]. 四川建材, 2018, 44(7): 178-179.
- [2] 独秀, 魏亚楠, 黄建成, 等. 基于虚拟仪器的管道泄漏监

测与定位系统设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(4): 129-134.

- [3] 王冬祥. 球形内检测器示踪定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [4] 贺帆. 基于无线组网的供水管道泄漏检测定位系统设计及实现[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [5] 王硕. 基于分布式振动光纤传感的管道泄漏监测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 刘浩, 谭亮, 程晶晶. 一种基于物联网技术的管道漏失检测电路设计[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(5): 94-98.
- [7] 张梅, 张双双, 袁宏永, 等. 燃气管道泄漏的次声源定位算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 187-194.
- [8] 李帅永, 夏传强, 程振华, 等. 基于 VMD 和互谱分析的供水管道泄漏定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(7): 195-205.
- [9] 郭思毅, 王黎明, 毕帅帅, 等. 基于混沌的近海测距系统的设计与研究[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(10): 128-132.
- [10] 于波, 韩玉斌. 基于 STM32 的振动信号采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2020, 43(4): 148-152.
- [11] 柏受军, 王鸣, 郎朗, 等. LVDT 位移传感器电压电流转换电路的设计[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(4): 113-115, 126.
- [12] 白永强. 供水管道泄漏的声波特征及定位检测的实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [13] 吴天豪. 一种基于相关测漏原理的地下供水管道漏点定位仪[J]. 科技与创新, 2018, (1): 59-60.
- [14] 张学军, 万东胜, 孙知信. 基于 LMD 和模糊熵融合 CSP 的脑电信号特征提取方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 226-234.
- [15] 熊伟, 徐科军, 于新龙, 等. 基于谐波分析的电磁流量计信号处理方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9): 154-160.
- [16] 郭庆明, 陈涛, 于华, 等. 基于井下仪器的工频噪声去除电路温度特性研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(8): 1-5.
- [17] 谭建勇. 供水管道泄漏检测与定位系统的设计与实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2018.

作者简介

肖梓铭, 硕士研究生, 主要研究方向为嵌入式技术及应用。

E-mail: 15970639236@163.com

赵文龙, 工学硕士, 教授, 主要研究方向为嵌入式技术及应用、智能控制。

E-mail: zhaowenlong@nchu.edu.cn

姜嘉骏, 工学博士, 主要研究方向为智能仪表、物联网技术及应用。

E-mail: jjlou@163.com