

Study on Feature Extraction Method for Typical Abnormal Events of Buried Pipelines*

LI Jian*, LAI Ping

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instrument, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: The destroying action of third-party will cause serious effect on the safety of buried pipelines. A pipeline pre-warning system was designed to detect the abnormal events. The vibration sensor was used to detect the vibration signal which was caused by different typical abnormal events. Based on the wavelet package decomposition, the "energy-pattern" signal feature method was applied to analyze the signals caused by the four typical abnormal events such as digging, drilling, sawing and hitting. The experiments proved the feature extraction method could be used to detect the different typical abnormal events of buried pipelines effectively.

Key words: vibration sensor; pipeline pre-warning; DSP; wavelet package decomposition

EEACC: 7220

埋地管道典型异常事件信号特征提取方法研究*

李健*, 赖平

(天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 埋地管道受到第三方的破坏会对管道安全造成严重影响。针对影响管道安全的典型异常事件,设计了一种管道安全预警系统。该系统采用振动传感器拾取不同的典型异常事件所产生的振动信号,采用基于小波包分解的“能量-模式”信号特征提取方法对挖掘管道、钻管道、锯管道、敲击管道等典型异常事件的信号进行分析。通过试验表明,该方法可以实现埋地管道典型异常事件的识别。

关键词: 振动传感器;管道安全预警;DSP;小波包分解

中图分类号: TN247; TP216

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)07-0968-05

管道运输是与铁路、公路、航空、水运并驾齐驱的五大运输业之一,埋地管道在输送各种油品和气体等方面具有独特优势,但由于种种原因,管道经常会受到第三方破坏,从而造成管道泄漏等事故的发生,有时会伴有巨大的生命财产损失和环境污染。对各种威胁管道安全的典型异常事件进行监测和及时识别可以有效预防管道事故的发生。

目前,对于埋地油气管道普遍安装了基于负压波等原理的管道泄漏检测系统来及时发现管道的泄漏事故以减少污染和经济损失^[1-5]。该系统主要通过管道输送压力和流量等参数的变化来判断是否发生泄漏,该方法受输送物质特性及输送工况等因素影响;另外,该系统只能在管道泄漏发生后才能对管道事故进行报警和定位。如果能对可能威胁管道安全的异常事件进行检测和分析,则可以对管道进行安全预警,有效地避免恶性事故的发生。

基于分布式光纤的管道安全预警系统可以对影

响管道安全的事故进行识别和定位,该系统利用与管道同沟铺设的光纤作为分布式振动测试传感器,实时检测管道沿途发生的泄漏及其它异常事件,可有效地对威胁管道安全的事件进行预警^[6-7]。该系统特别适用于新建的各类管道,但对于大量的老管道,由于管道铺设时没有同沟铺设的光纤,这种方法的应用受到限制。

本文依据声学法的原理,采用在埋地管道上安装振动传感器,采集记录由振动传感器输出的振动信号并对其进行分析和识别可以实现对埋地管道的安全预警。

1 系统的原理

第三方破坏是影响管道安全的重要原因。埋地管道典型异常事件主要指会导致管道发生破坏的事件。目前,管道的人为破坏主要是由一些不法分子的打孔盗油所致。对于埋地管道,不法分子会首先进行挖掘

使埋地管道露出, 然后采用不同的工具如电钻、手工钻、电锯、手工锯等在管道上切割、打孔、安装阀门达到长期盗油的目的。因此, 挖掘管道、钻管道、锯管道、敲击管道是常见的严重威胁管道安全的典型异常事件。挖掘管道等典型异常事件发生时会产生振动信号, 振动信号会通过管壁沿着管道向异常事件发生点两边传播。管道不管发生了何种破坏, 都会产生振动信号, 但是, 各种破坏引起的振动信号在时域上和频域上都有一定的差别。本文通过在埋地管道上安装振动传感器, 采集记录由振动传感器输出的振动信号; 采用基于小波分解的“能量 - 模式”信号特征提取方法对采集的振动信号进行分析和识别来实现对埋地管道典型异常事件的识别; 在管道发生典型异常事件时, 检测与识别异常事件的类型, 并发出警报及识别结果, 通知工作人员管道发生异常情况, 以防止管道发生泄漏, 造成重大的经济损失或人员伤亡。

2 试验系统

本文采用 DSP 构建了一套试验系统, 通过等间隔的在管道表面安装振动传感器, 感应管道的振动, 对传感器输出的信号进行信号调理, 并将调理后的信号输入至 DSP 系统, DSP 系统对输入的振动信号进行采集、处理、检测与识别等操作, 最后将结果通过无线传输的方式传输至管道运营控制中心, 以实现管道的远程实时监测。系统的示意图如图 1 所示。

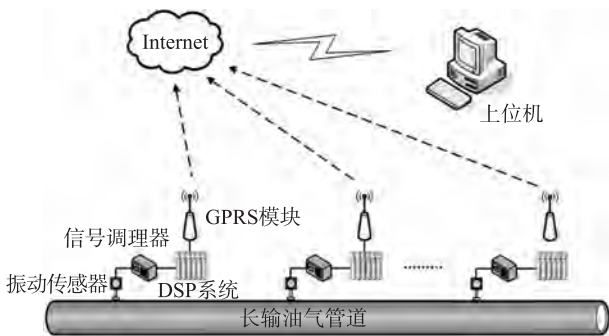


图 1 埋地管道异常事件监测系统组成示意图

该系统由振动传感器、信号调理器、DSP 系统、GPRS 数据通信模块和上位机构成。系统的总体功能是: 信号调理器为振动传感器提供恒流驱动, 并对振动传感器感应输出的信号进行前置滤波、放大和极性转换; DSP 系统实时采集信号调理器输出的振动信号, 并对信号进行处理, 当管道发生异常事件时, 检测与识别管道异常事件, 将处理结果通过串口发送到 GPRS 模块; GPRS 模块以无线传输的方式将结果发送到 Internet; LabVIEW 编写的上位机程序读取映射端口的数据, 显示管道运行状态, 管道发生异常事件时, 报警和定位异常事件。

2.1 振动传感器

振动传感器按其被测物理量的不同可分为: 振动加速度传感器、振动位移传感器、振动速度传感器。根据本文对被测振动量, 被测振动信号的频率范围的估算, 综合考虑传感器的灵敏度与量程范围, 传感器的测量频率范围, 外界环境对测量传感器的影响, 以及埋地管道的环境, 本文选用的振动传感器为内装 IC 压电加速度传感器。它将传统的压电加速度传感器与电荷放大器集于一体, 简化了测试系统, 提高了测试精度和可靠性。该传感器的具体性能指标如下:

- 灵敏度 5 000 mV/ g_n
- 量程 1 g_n
- 分辨率 0.000 004 g_n
- 频率范围 0.1 ~ 1 500 Hz (± 10 %)
- 使用温度范围 - 30 °C ~ 80 °C
- 恒定电流 2 ~ 20 mA, 典型值: 4 mA

2.2 信号调理器

固定安装在埋地管道表面的振动传感器, 由于管道不同地点, 不同事件的发生, 检测出的管道振动信号强度不一; 另外, 管道中本身振动源较多, 可以是泵、压缩机、减压阀门、弯头和变截面管等, 信号在输液管道表面传播时, 因管道内液体作用、多种振动源干扰及现场环境等多方面的影响, 极易造成频率混叠及夹带高频噪声。因此在信号 AD 转换前, 对信号进行前置调理。信号调理器的主要工作: 为前端振动传感器提供恒定电流, 驱动传感器工作; 对传感器输出的信号进行抗混叠低通滤波, 把一些不必要的高频噪声滤除; 对信号进行程控放大或程控缩小, 放大倍数由采集系统控制^[8]。另外, 针对采集系统的输入范围以及信号输入极性限制问题, 信号调理器可实现信号的双极性转换和信号限幅。

2.3 DSP 系统

本文采用 TMS320F2812 片内 AD 转换模块实现振动信号的采集, 通过串口 A 实现数据通信, 由于信号处理的需要, 扩展外部存储器 (SRAM) 256 k × 16 bit。系统电路的结构框图如图 2 所示。

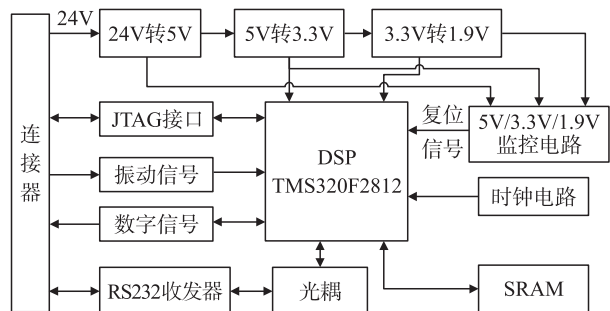


图 2 DSP 系统框图

3 试验及结果分析

3.1 典型异常事件引发的振动信号分析

利用研制的试验系统对四种典型异常事件:人工挖掘管道、钻管道、锯管道、敲击管道的信号进行采集。实验中,将振动传感器安装在壁厚为 10 mm 的铁质埋地充水管道表面,埋地深度为 1 米,在离传感器 100 米处,对管道实施四种典型破坏动作,系统采样速率设置为 10 000 Hz,采集多组此四种典型异常事件信号。用 Matlab 对这些信号作幅值谱和自功率谱分析,结果如图 3 所示。

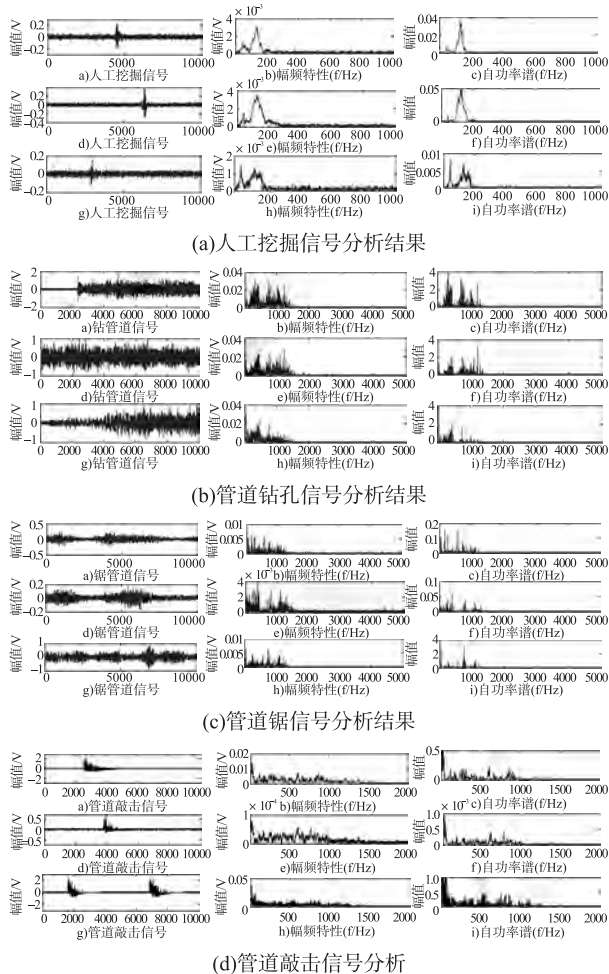


图 3 几种典型异常事件的振动信号及其幅频特性

通过以上四种典型异常事件振动信号的幅频特性可以看出:钻管道信号、锯管道、敲击管道信号较为丰富;对于人工挖掘信号较为单一,信号主要分布在 200 Hz 以下,能量也主要集中在 200 Hz 以下;对于管道钻孔信号,其频率成分相对于人工挖掘信号较为丰富,分布在 0 ~ 1 000 Hz,能量分布平均;对于管道锯信号,其幅频特性与管道钻孔信号非常相似;管道敲击信号在 0 ~ 40 Hz 之间信号最强,而在 40 ~ 1 000 Hz 之间分布较为平均。

3.2 基于小波包分解的“能量—模式”信号特征提取方法

(1) 原理分析

基于小波包分解的“能量—模式”信号特征提取方法的原理是:通过求取信号各频带的能量,构成信号的能量特征向量,以此区别其它信号。小波包分解不仅对上一层的低频部分进行分解,对上一层的高频部分一样进行分解,小波包分解对信号的各频带划分得更为细致。对于每一层的小波包分解,它借助于小波分解滤波器把所有上一层的子带都进行了划分,从而得到比二进离散小波变换更精细的信号分解^[9,11-12]。

信号的小波包分解是将信号投影到小波包基上,获得一系列系数,通过这一系列系数刻画信号的特征。用小波包对信号做 J 层分解,信号在第 J 层所形成的频带分为 $0 \sim \frac{1}{2^J}f_n, \frac{1}{2^J}f_n \sim \frac{2}{2^J}f_n, \dots, \frac{2^{J-1}}{2^J}f_n \sim f_n$, 共 2^J 份。例如,采用 db4 小波包,使用 Shannon 熵对管道敲击信号进行 3 层分解,得到小波包树如图 4 所示,并对各末节点进行重构,得到小波包重构系数以及各重构系数的幅频特性如图 5 所示。

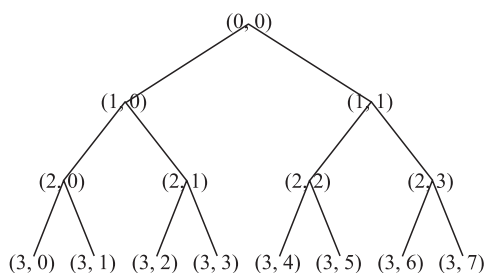


图 4 小波包树

图 5 中,左边一列为各节点重构系数,右边一列为对应重构系数的幅频特性,信号原始波形居上。由图可知,节点 C30 的重构系数幅值与原始信号幅值区间相同,为 $[-1, 1]$,而且该重构系数的频率成

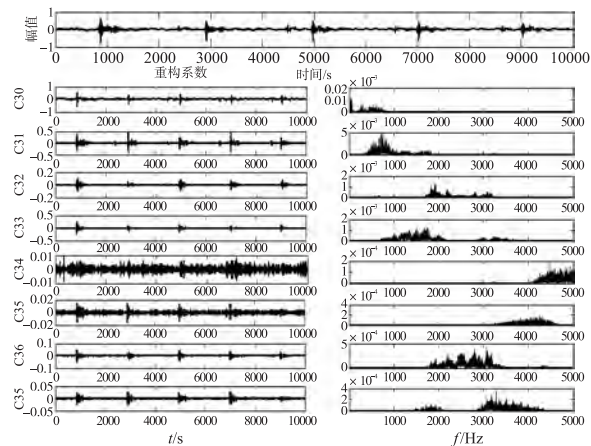


图 5 小波包分解各节点重构系数及对应幅频特性

分在 625 Hz 以下, 其余各节点重构系数幅值区间较小, 因此, 该振动信号的最主要频率成分为低于 625 Hz 的信号。图 5 中各节点重构系数, C30 为 C20 的低频成分, C31 为 C20 的高频成分, C32 为 C21 的高频成分, C33 为 C21 的低频成分, 根据各节点重构系数对应的幅频特性可知, 小波包分解的各末节点重构系数的频带与小波包树的频带划分一致, 各节点信号频段等间隔相差 625 Hz。

基于小波包的能量特征向量求取步骤如下^[9-12]:

(1) 对信号进行 J 层小波包分解, 得小波包系数 $C_{J,k}$ 。

(2) 选取 n 个信号能量最为敏感的频带 (依据不同事件信号的幅频特性, 信号在同一频率段, 幅值差异较大, 该频率段即为能量敏感频带), 求取能量 $E_{J,k}$, 并归一化处理即:

$$E_{J,k} = \sum_m |C_{J,k}^m|^2 \quad (1)$$

$$E'_{J,k} = \frac{E_{J,k}}{\sum_m E_{J,k}} \quad (2)$$

(3) 将上述归一化能量作为振动信号特征向量, 即

$$E = [E'_1, E'_2, \dots, E'_n] \quad (3)$$

采用 db4 小波包, 以 Shannon 熵准则对四种典型异常事件信号进行 4 层小波包分解, 得到 16 个末节点, 选取 7 个能量敏感带, 对此 7 个频率带求取能量, 并对能量进行归一化处理, 结果如图 6 所示。

表 1 挖掘信号能量频带分布值

频带	能量分布								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0.783	0.755	0.797	0.788	0.810	0.709	0.732	0.726	0.795
2	0.021	0.025	0.027	0.025	0.030	0.028	0.021	0.022	0.022
3	0.017	0.019	0.012	0.017	0.011	0.025	0.021	0.017	0.018
4	0.016	0.019	0.013	0.014	0.013	0.018	0.019	0.018	0.014
5	0.015	0.014	0.018	0.015	0.018	0.015	0.012	0.018	0.016
6	0.017	0.017	0.012	0.017	0.014	0.018	0.016	0.019	0.014
7	0.019	0.013	0.010	0.012	0.014	0.015	0.013	0.013	0.017

由表 1 中数据可知, 挖掘信号的能量频带分布与图 6 结果所示一致, 文中再对其余三种事件的多组信号进行信号特征提取, 结果仍与图 6 结果相符, 因此, 小波包分解可以有效提取管道典型破坏事件的振动信号特征。通过对此四种典型事件信号的 7 个频带能量进行特征提取, 信号特征提取结果可以为信号识别提供有效依据。

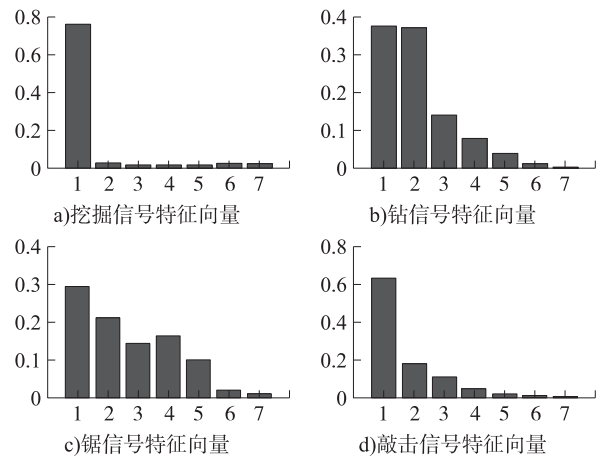


图 6 四种典型异常事件的特征向量

图 6 中, 1~7 段频带分别为: 0~312.5 Hz, 312.5~625 Hz, 625~937.5 Hz, 937.5~1250 Hz, 1250~1562.5 Hz, 1562.5~1875 Hz, 1875~2187.5 Hz。从各信号提取的能量特征向量可以看出, 四种典型异常事件的信号能量都主要分布在低频区。其中, 挖掘信号的能量主要分布在第一个频带, 其余频带对整个信号贡献最小; 而与挖掘信号能量分布较为相似的敲击信号, 其能量在第二频带与第三频带分布较敲击信号更为明显; 另外, 钻信号与锯信号在前 5 个频带信号能量都较为丰富, 锯信号前 5 个频带中, 分布更为均衡, 而钻信号在第一频带和第二频带信号能量最为丰富且分布相当。根据此特征, 对 10 组挖掘信号进行特征提取, 挖掘信号能量频带分布值如表 1。

4 结论

通过对埋地管道四种典型异常事件振动测试试验采集的大量信号分析结果表明, 基于小波包分解的能量-模式信号特征提取方法对人工挖掘、钻管道、锯管道、敲击管道引起的振动信号分析效果较好, 可以有效地提取信号的特征, 以便进一步识别判

断管道异常事件的种类。

依据声学法原理的埋地管道典型异常事件检测系统不受管道内输送介质的影响,可以有效地对影响管道安全的异常事件进行检测和报警,避免产生管道泄漏等恶性事故。另外,该系统成本较低,可广泛应用于各类新老管道,具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Billmann L, Isermann R. Leak Detection Methods for Pipelines [J]. Automatica, 1987, 23(3): 381-385.
- [2] Zhang Xue Jun. Statistical Leak Detection in Gas and Liquid Pipelines [J]. Pipes & Pipelines International, 1993, 38(4): 26-29.
- [3] 靳世久,王立宁,李健,等. 原油管道漏点定位技术[J]. 石油学报(自然科学版),1998,19(3):93-97.
- [4] 苏欣,袁宗明,范小霞,等. 油气长输管道检漏技术综述[J]. 石油化工安全技术,2005,21(4):14-17.
- [5] 张宇,陈世利,李健,等. 基于动态压力变送器的输油管道泄漏检测与定位系统[J]. 传感技术学报,2009,22(9):1347-1351.
- [6] 周琰,靳世久,张昫超,等. 分布式光纤管道泄漏检测与定位技术[J]. 石油学报,2006,27(2):121-124.
- [7] 曲志刚,李健,靳世久,等. 基于 EMD 的油气管道安全分布式光纤预警系统信号分析方法[J]. 天津大学学报,2007,40(1):73-77.
- [8] 赖平,李健,张宇,等. 油气管道 TPD 预警系统信号调理器的设计[J]. 现代科学仪器,2009,3:25-28.
- [9] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计-小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999,251-271.
- [10] 张立,侯迪波,张光新,等. 基于多声学传感器融合的管道泄漏检测方法研究[J]. 传感技术学报,2007,20(5),1176-1179.
- [11] 王潜龙,冯全科,屈展,等. 基于声发射与小波包理论的压力管道泄漏检测[J]. 西安交通大学学报,2003,37(5):515-517.
- [12] Wang Likun, Cai Yongjun, Li Jian, et al. Study on Method of Recognizing Characteristics of Pipeline Leakage Acoustic Signals [C]// Proceedings of the ASME International Pipeline Conference 2006, IPC 2006, Calgary, AB, Canada: ASME, 2006.



李 健(1973-),男,副教授,目前在天津大学精密仪器与光电子工程学院工作,主要研究方向为检测技术及仪器, tjupipe@tju.edu.cn。