

文章编号:1673-5005(2014)06-0153-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.06.023

基于特征量提取的输气管道微泄漏检测

孟令雅¹, 刘翠伟², 刘超³, 李玉星², 刘光晓²

(1. 中国石油大学信息与控制工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油大学储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580;
3. 中石化冠德控股有限公司, 香港)

摘要:输气管道音波法泄漏检测采集得到的信号不仅包含有用的泄漏信号, 而且包含背景噪声和各种干扰信号, 因此信号的识别和特征量提取尤为重要。基于此情况, 采用相关性分析的方法对传感器采集的信号进行处理并得到有效特征量, 传感器采集得到的信号包括泄漏信号、敲击信号、压缩机启停信号、减压阀开关信号。相关性分析采用相关函数和协方差函数实现, 相关函数可以得到各种信号的自相关和互相关特征, 协方差函数可以得到各种信号的自协方差和互协方差特征。同时对信号进行整体峰度计算, 并设置整体峰度阈值。研究结果表明: 信号的相关性分析可以对输气管道微泄漏进行检测, 同时对诸如减压阀操作、压缩机启停、敲击等干扰因素可以通过相关函数数值从背景噪声中识别; 在不确定是否存在干扰信号的前提下, 通过相关分析从背景噪声中提取泄漏信号或干扰信号, 并对信号进行整体峰度值计算, 若整体峰度值高于阈值, 则认为泄漏发生, 提高了音波泄漏检测的准确性。

关键词:输气管道; 泄漏信号; 干扰信号; 相关性分析

中图分类号:TE 973.6

文献标志码:A

引用格式:孟令雅, 刘翠伟, 刘超, 等. 基于特征量提取的输气管道微泄漏检测[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2014, 38(6): 153-160.

MENG Lingya, LIU Cuiwei, LIU Chao, et al. Characteristics extraction of acoustic leakage signal for natural gas pipelines [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014, 38(6): 153-160.

Characteristics extraction of acoustic leakage signal for natural gas pipelines

MENG Lingya¹, LIU Cuiwei², LIU Chao³, LI Yuxing², LIU Guangxiao²

(1. College of Information and Control Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
3. SINOPEC Kantons Holdings Limited, Hong Kong, China)

Abstract: The signals acquired by acoustic leak detection method for natural gas pipelines include useful leakage signal, background noises and interference signals. Therefore, the recognition and characteristics extraction of leakage signal are getting more and more important. The measured signals including leakage signal, knocking signal, compressor shutoff signal, compressor starting signal, regulator closing signal and regulator opening signal were processed by correlation analyses method based on correlation and covariance function. The characteristics of auto-correlation and cross-correlation were extracted. The results show that the correlation analyses can extract the characteristics of leakage signals and other interference signals from the background noises. Then the overall kurtosis can be applied to distinguish the leakage signals from the interference signals. The characteristics extracted by correlation analyses are effective for recognizing leakage signal among the noises and the characteristics of the overall kurtosis can be used to detect leakage signals among all acquired signals if the threshold value of the overall kurtosis is set, which has a strong impetus to the improvement and application of acoustic leak detection

收稿日期: 2014-03-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51104175, 51074175); 中央高校基本科研业务费专项(14CX06068A); 中国石油大学(华东)研究生创新工程项目(YCX2014062)

作者简介:孟令雅(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事天然气管道输送泄漏检测技术研究工作。E-mail: chuyunlew@163.com。

technology.

Key words: natural gas pipeline; acoustic leakage signal; interference signals; correlation analysis

当输气管线发生泄漏时,泄漏音波通过管内介质以声速向管线上下游传递,同时伴随泄漏音波的还有背景噪声^[14]。Watanabe 等^[5]介绍了一种用于两座压气站的气体长输管线的新的泄漏和定位方法。Kim 等^[6]对埋地分支输气管道的音波泄漏信号进行了时域分析,这种方法可以在窄带和低频下定位钢管的泄漏点。夏海波等^[7]将管道泄漏产生的负压波进行多尺度小波变换,来识别管道的泄漏特征。李健等^[8]设计了一种管道安全预警系统,研制的系统对管道破坏信号的检测不会受该管道输送介质的影响。李伟国等^[9]以压电式动态压力传感器采集到的管道泄漏信号为研究对象,研究了在不同工况下首末站泄漏信号的差别,选取相邻区间信号数据的累加值差分、均值差分以及峰值差分作为泄漏信号的特征量,并在获得的泄漏信号上对这些特征量进行了验证,这些特征量具备很好的适用性。杨进等^[10]分析了泄漏信号的频率分布特征以及泄漏量对频率分布特征的影响,并利用互相关分析实现了泄漏点的定位,其中互相关分析主要计算泄漏信号到达上下游传感器的时间差。虽然国内外学者对泄漏音波信号的产生及处理^[11-12]进行了很多研究,但并未对泄漏音波及干扰信号进行系统研究,尤其是对微小泄漏和缓慢泄漏研究甚少。笔者研究泄漏信号的处理方法,得到管道运行中干扰信号与泄漏信号的区别特征量,以提高检测准确度。

1 试验装置

采用高压输气管道泄漏检测装置^[13],装置总长 251.5 m,测试管段全长 199.85 m,最高承压 8 MPa,设计运行最高压力 6.4 MPa,管径为 $\Phi 14$ mm $\times$ 2 mm,设计流量为 60 m³/h,沿线共设有 3 个泄漏点,分别距起点音波传感器 40.34、88.33 和 149.02 m,泄漏点由内置孔板的法兰和球阀构成,可以根据试验要求改变泄漏孔径,通过迅速开关阀门模拟泄漏发生。在 3 个泄漏点处及管线起、终点处分别安装音波传感器,实时采集泄漏动态压力信号,从而保证在一个泄漏点模拟泄漏时能够同时检测到泄漏点音波信号及经过传播后的泄漏音波信号,从而研究不同泄漏位置、不同泄漏量等工况下音波信号的衰减情况。音波数据的采样率为 30 kHz,试验装置流程如图 1 所示。干扰信号是指由正常管道操作及外界活动引起

的声音信号。所用到的干扰信号包括压缩机开启与关闭信号、减压阀开启与关闭信号、敲击信号等。

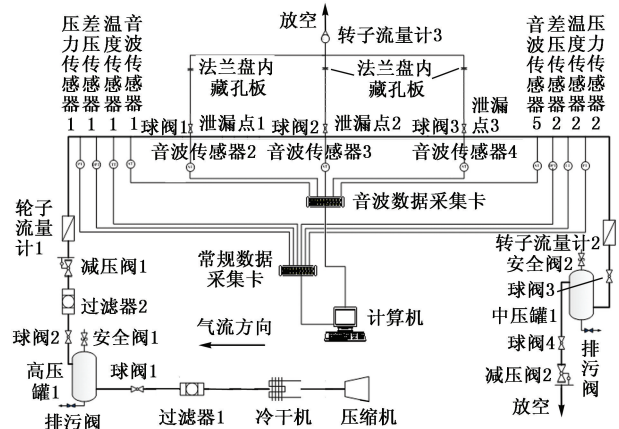


图 1 高压输气管道音波泄漏检测装置

Fig. 1 Ultrasonic leak detection devices for high pressure gas pipeline

试验完成后,分别得到了泄漏信号、压缩机启停信号、调压阀开关信号和敲击信号,这些信号的波形见图 2。

2 信号相关函数分析

2.1 相关函数

相关函数也称作相关积分,能够描述某个信号与另一个延时信号之间的相似程度,是信号鉴别的有效工具。

如果有两个信号 $x(t)$ 、 $y(t)$,则其互相关函数 $R_{xy}(\tau)$ 的定义为

$$R_{xy}(\tau) = E[x(t)y(t - \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t - \tau) dt. \quad (1)$$

互相关函数表征了两个不同的随机过程在相隔时间 τ 的两个不同时刻取值的相关程度。

当 $x(t)$ 、 $y(t)$ 是同一个信号时, $R_{xy}(\tau) = R_{yx}(\tau) = R_{xx}(\tau)$,称作信号 $x(t)$ 的自相关函数,可计算为

$$R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t - \tau)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau) dt. \quad (2)$$

自相关函数表征了一个随机性信号在相隔 τ 的两个不同时刻取值的相关程度。

2.2 泄漏及干扰信号相关函数分析

利用相关函数定义式对泄漏信号及干扰信号的相关性进行计算。

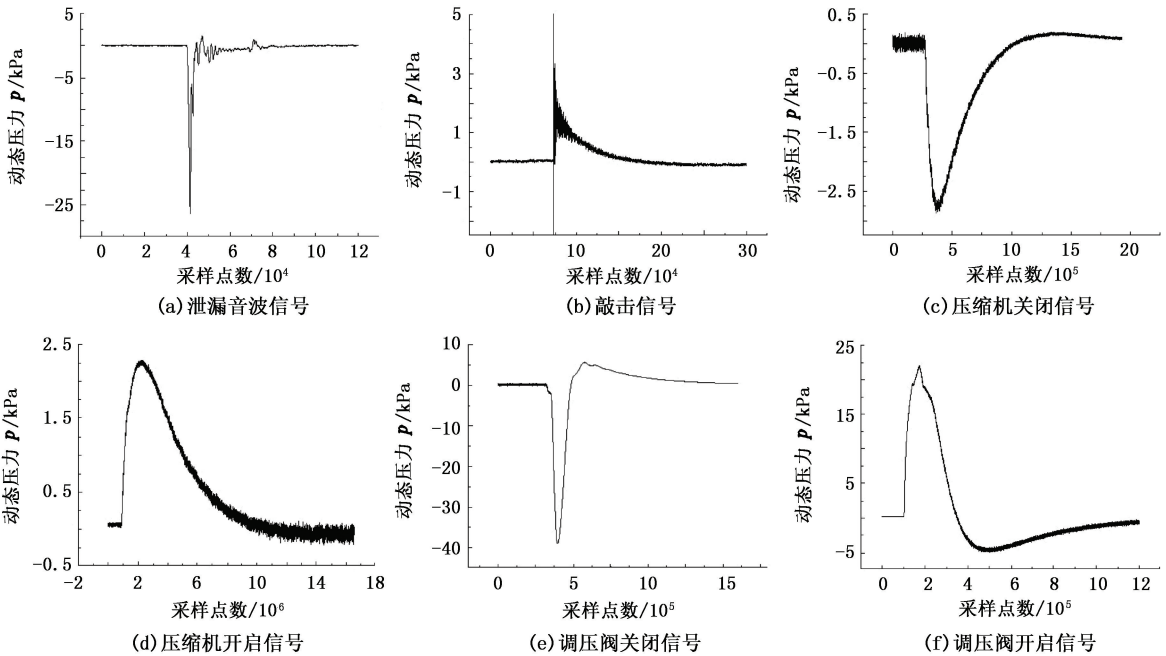


图 2 不同信号波形

Fig. 2 Waveforms of different signals

2. 2. 1 泄漏信号

以压力为 1.5 MPa 时打开泄漏点 1 为例,取 80 万点数据。起点传感器(音波传感器 1)采集的原始

信号和终点传感器(音波传感器 5)采集的原始信号见图 3。求得该样本的起、终点自相关函数与起、终点互相关函数见图 4、5。

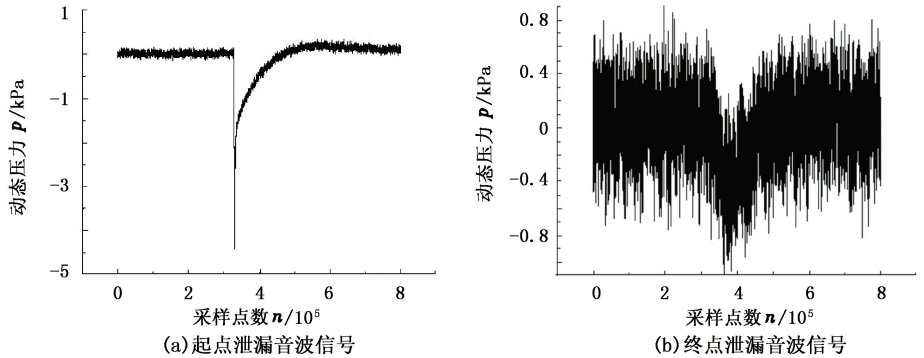


图 3 泄漏音波信号

Fig. 3 Figures of leak signals

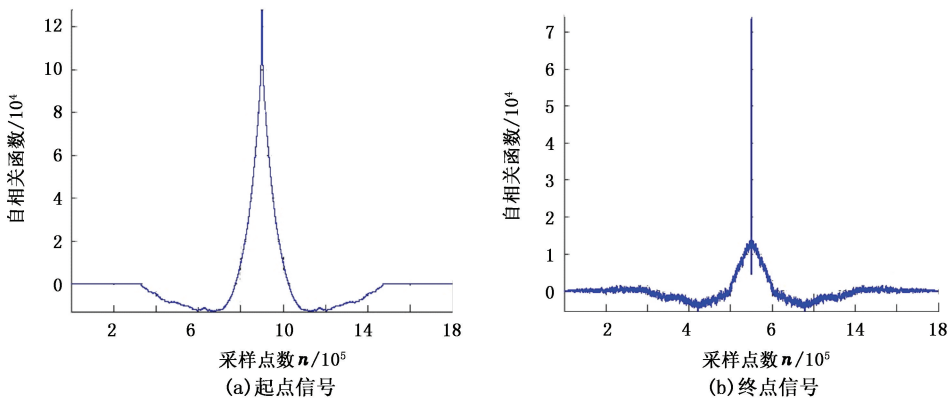


图 4 泄漏音波信号自相关函数

Fig. 4 Auto-correlation functions of leak signals

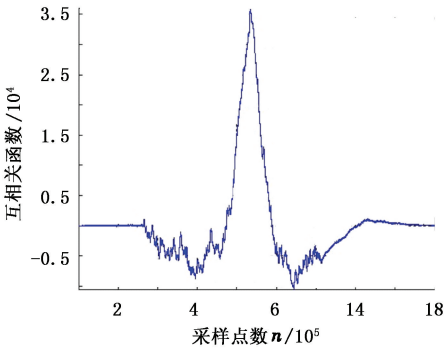


图 5 起、终点泄漏信号互相关函数

Fig. 5 Cross-correlation function of starting and terminal leak signals

2.2.2 背景噪音信号

取一部分噪音信号进行分析,数据取 20 万个点,求得起、终点背景噪音的自相关函数与互相关函数见图 6、7。

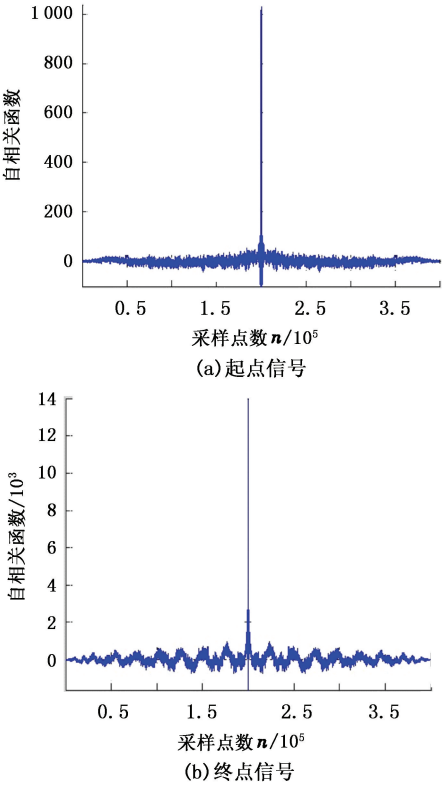


图 6 背景噪音信号自相关函数

Fig. 6 Autocorrelation functions of background noise signals

综合分析起、终点泄漏信号及相应的背景噪音相关函数图形,可以读出起、终点泄漏信号的自相关函数最大值分别为 123 606、47 345,起、终点信号的互相关函数最大值为 35 810。起、终点背景噪音自相关函数最大值分别为 310.6、8 815,起、终点背景噪音互相关函数最大值为 126.2。

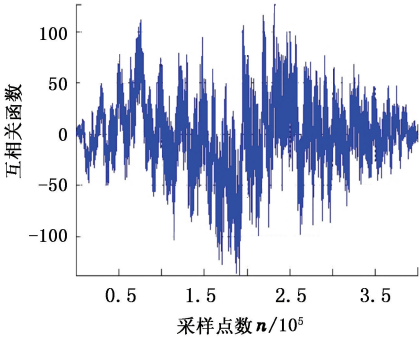


图 7 起终点背景噪音互相关函数

Fig. 7 Cross-correlation function of starting and terminal background noise signals

泄漏音波信号的自相关函数远远高于周围背景噪音的自相关分析,对于较弱的终点泄漏信号,其自相关性数值也非常可观,可以根据泄漏信号的自相关函数检测泄漏的发生。另外,起、终点的噪声信号随机性大,信号相关度很小,远远小于起、终点泄漏信号的互相关函数。

2.2.3 干扰信号

计算得到压缩机开启和关闭时的相关函数,以压缩机关闭为例作出图 8、9。

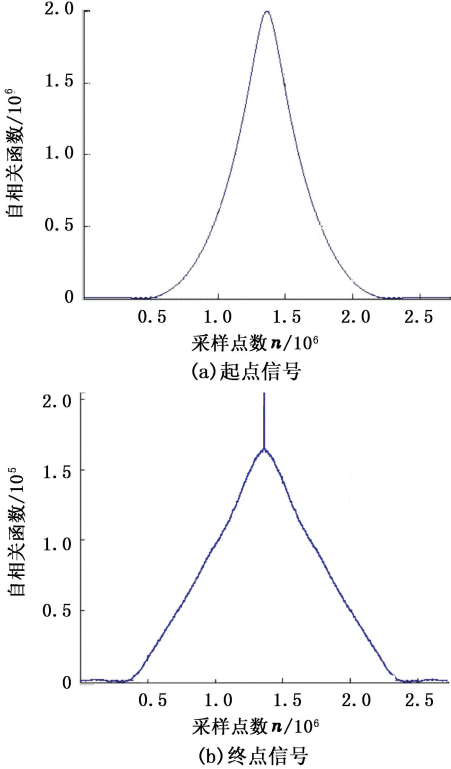


图 8 压缩机关闭信号自相关函数

Fig. 8 Autocorrelation functions of compressor shutoff signals

综合分析干扰信号的相关函数图形,可以知道干扰信号自身相关性很强,起、终点信号的互相关性

很强。利用相关函数可以将强干扰信号从背景噪音中区分出来。在这些干扰信号中,压缩机和减压阀信号最大相关函数值远远高于敲击信号相关函数最大值。相对来说,敲击信号发生瞬间幅值较大,但信号相关性较弱,尤其是互相关性更弱,这是由于敲击信号传至终点音波传感器时,衰减很大,几乎湮没在背景噪音中,因此与起点的敲击信号互相关性较弱。各种信号的相关函数图图形各有特点,因此相关函数可以作为区分干扰信号的一个特征量。

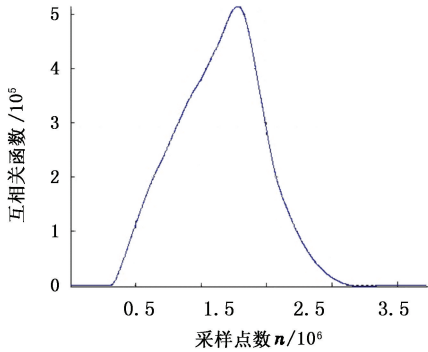


图 9 压缩机关闭信号互相关函数

Fig. 9 Cross-correlation function of compressor shutoff signals

计算得到减压阀关闭和开启信号的相关函数图,以减压阀关闭为例作出图 10、11。

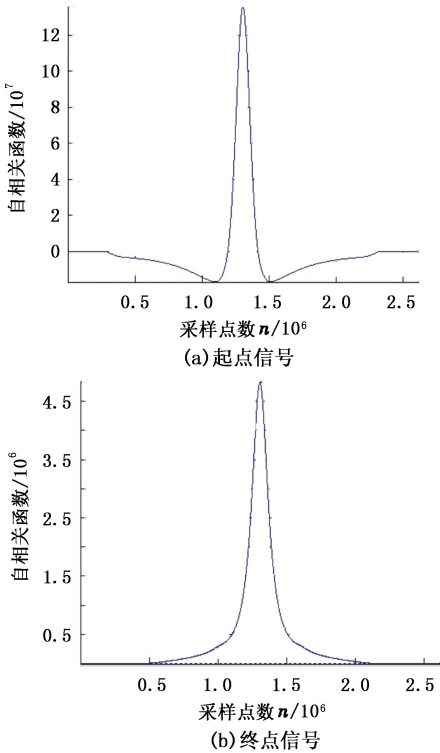


图 10 减压阀关闭信号自相关函数

Fig. 10 Autocorrelation functions of regulator close signals

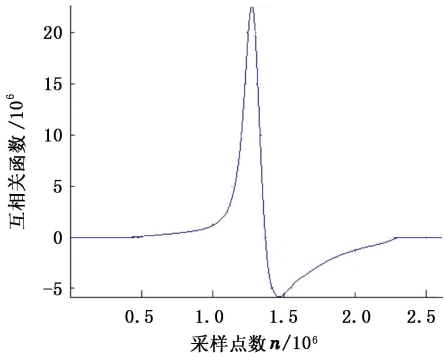


图 11 减压阀关闭信号互相关函数

Fig. 11 Cross-correlation functions of regulator close signals

敲击信号的相关函数见图 12、13。

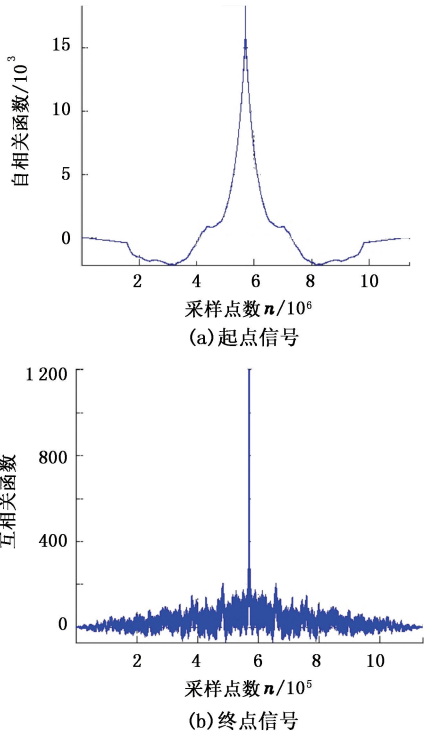


图 12 敲击信号自相关函数

Fig. 12 Autocorrelation functions of knock signals

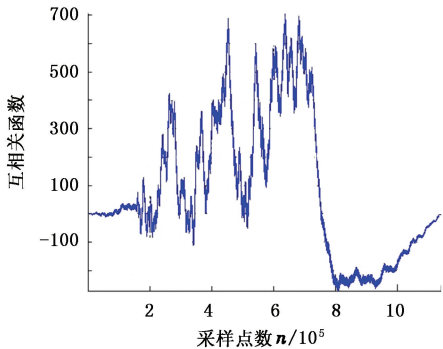


图 13 敲击起终点信号互相关函数

Fig. 13 Cross-correlation function of knock signals

3 泄漏及干扰信号协方差函数分析

3.1 协方差函数

设有两个离散随机信号为 $X = \{x(n)\}$, $Y = \{y(n)\}$, $n=0,1,\cdots,N-1$, 则两信号互协方差函数的定义^[14]为

$$C_X(m) = E\{[X(n) - \mu_X][X(n) - \mu_X]^*\}, m=0,1,\cdots,N-1.$$
 (3)

如果信号 X 与信号 Y 为同一个信号, 则这个信号的自协方差函数定义为

$$C_{XY}(m) = E\{[X(n) - \mu_X][X(n+m) - \mu_X]^*\}, m=0,1,\cdots,N-1.$$
 (4)

可以看出, 自协方差与自相关函数偏移了一个平均值, 推出相关函数与协方差关系为

$$C_X(m) = R_X(m) - \mu_X^2 \text{ 或 } C_{XY}(m) = R_{XY}(m) - \mu_X\mu_Y.$$
 (5)

3.2 泄漏及干扰信号

根据协方差的定义式计算泄漏信号、背景噪音及干扰信号的协方差函数。

以压力为 1.5 MPa 时打开泄漏点 1 为例, 取 80 万点数据。先求得该样本的起、终点自协方差函数与互协方差函数; 再取 20 万点, 求得起、终点背景噪音的自协方差函数与互协方差函数。计算结果见表 1。

通过泄漏信号与背景噪音的协方差函数最大值对比, 可以知道, 泄漏信号的自协方差与互协方差远远大于背景噪音的自协方差与互协方差, 因此协方差函数也可以作为泄漏判断的标志。

协方差函数比相关函数略显平滑, 但综合比较来看, 两者都可以判别泄漏, 其最大值相差并不大(表 1)。

表 1 泄漏信号相关函数与协方差函数对比

Table 1 Correlation and covariance functions of leak signals

信号	位置	相关函数	协方差函数
泄漏信号	起点	127 800	125 400
	终点	74 600	74 520
	起、终点	36 080	35 500
背景噪音	起点	1 038	1 038
	终点	14 000	13 940
	起、终点	126. 70	135. 30
泄漏信号与背景噪音函数最大值比值	起点	123. 12	120. 81
	终点	5. 32	5. 35
	起、终点	284. 77	262. 38

由表 1 可以看出, 泄漏信号的相关系数和协方差系数都分别比其背景噪音的高很多。本试验数据

采用的是泄漏点 1 的数据, 由于泄漏点 1 距离起点音波传感器近, 离终点音波传感器远, 所以终点的音波衰减严重, 波形不明显, 故终点音波信号的自相关程度不如起点音波的自相关程度高。尽管终点音波比较微弱, 但其自身相关性仍然是周围背景噪音自相关性的 5 倍多, 所以通过相关函数和协方差函数可以检测微弱信号。从表 1 中也可以看到, 起、终点泄漏信号之间的互相关程度远远高于背景噪音之间的互相关程度, 所以相关函数及协方差函数可以作为检测微弱信号的一种判断方法。利用此方法检测微弱信号, 简单易行, 效果较好。

对于压缩机开启和关闭信号, 求解其自协方差函数及互协方差函数, 并以压缩机关闭为例进行计算得到压缩机关闭信号相关函数的最大值, 见表 2。

表 2 压缩机关闭信号相关函数与协方差函数对比

Table 2 Correlation and covariance functions of compressor shutoff signals

信号	位置	相关函数	协方差函数
压缩机关闭信号	起点	2. 012×10 ⁶	1. 19×10 ⁶
	终点	2. 053×10 ⁵	9. 342×10 ⁴
	起、终点	5. 143×10 ⁵	1. 95×10 ⁵
背景噪音	起点	862. 4	835. 5
	终点	9 316	9 288
	起、终点	229. 7	237. 5
压缩机关闭信号与背景噪音函数最大值比值	起点	2 333	1 424
	终点	22. 0	10. 1
	起、终点	2 239	821

由表 2 可以看出, 无论是起点信号还是终点信号, 压缩机关闭信号的自相关性和互相关性都很高, 远远高于周围背景噪音的相关性。与压缩机开启时的信号相关函数与协方差函数对比, 两者的相关函数与协方差函数图形和数值很相似, 说明压缩机开启和关闭信号具有很强的相似性。利用协方差函数可以在强背景噪音中将压缩机信号区分出来。

对于减压阀开启和关闭信号, 求解信号的自协方差函数以及互协方差函数, 并以减压阀关闭为例计算得到减压阀关闭信号的协方差函数的最大值, 并与对应的相关函数比较, 见表 3。由表 3 可以看出, 无论是起点信号还是终点信号, 减压阀关闭信号的自相关性和互相关性都很高, 远远高于周围背景噪音的相关性, 说明减压阀关闭信号并非杂乱无章, 而是存在很强的相关性。由于减压阀安装在管道试验区域的进口侧, 所以起点音波传感器的音波信号较强, 相关性也很强, 经过一段距离的传播, 信号衰减较大, 致使信号相关性减弱。

表 3 减压阀关闭信号相关函数与
协方差函数对比

Table 3 Correlation and covariance functions of regulator close signals			
信号	位置	相关函数	协方差函数
减压阀关闭信号	起点	1.365×10^8	1.357×10^8
	终点	4.837×10^6	4.058×10^6
	起、终点	2.265×10^7	2.183×10^7
背景噪音	起点	2 966	2 058
	终点	4 571	4 338
	起、终点	589. 6	113
减压阀关闭信号 与背景噪音函数 最大值比值	起点	46 022	65 938
	终点	1 058	935
	起、终点	38 416	193 186

读取减压阀关闭信号的协方差函数的最大值,并与对应的相关函数进行比较,减压阀关闭信号的自相关性和互相关性程度都非常高。减压阀信号的相关性一般比泄漏信号及其他干扰信号都高,这与减压阀信号变化剧烈,最高幅值远高于其他信号等因素有关。

对敲击音波信号,求解其自协方差函数及互协方差函数图,得到敲击信号协方差函数的最大值与相应相关函数最大值,进行对比见表 4。

表 4 敲击信号相关函数与协方差函数对比

Table 4 Correlation and covariance of knock signals			
信号	位置	相关函数	协方差函数
敲击信号	起点	18 440	17 950
	终点	1 207	1 153
	起、终点	711	573
背景噪音	起点	308	27. 03
	终点	229	183
	起、终点	122	11. 87
敲击信号与背景 噪音函数最大值 比值	起点	59. 9	664
	终点	5. 27	6. 30
	起、终点	5. 83	48. 3

由表 4 可知,敲击信号相关程度高于周围噪声信号相关程度,但与其他干扰信号相比,其相关程度显得较低,这表明敲击信号随机性较高,而且经过一段距离的传播之后,衰减非常迅速。终点信号自相关函数及自协方差数值偏小,与周围背景噪音的绝对差值不大,如果背景噪音稍强,则很容易被湮没在噪音中。起、终点信号相关性很低,这也表明了敲击信号在传播过程中容易衰减,信号强度不断降低,不宜远传。相关函数和协方差函数可以将泄漏与干扰信号从强背景噪音信号中辨别出来,两者也可以用于检测微弱的有用信号。此外,各种信号的相关性分析图各有特点,可以作为区分信号的辅助参考量。

泄漏与干扰信号之间、各种干扰信号之间的特

征量既有相似点又有差异,而某些信号的个别特征量明显异于其他信号,这使得这些信号能够跟其他信号区别开。

对于泄漏信号,由于泄漏信号强度随着压力等级的变化而变化,因此幅值不能作为判断泄漏信号的依据。对于减压阀开闭信号,除了信号幅值一般非常大外,其各项统计特征量均没有非常独特的特点,但是其相关函数与协方差函数的自相关性和互相关性的相关性均最好,相应值最高。对于敲击信号,其波形与泄漏信号类似,但是其相关性很差,明显低于泄漏及其他干扰信号。此外,就信号从极值逐渐恢复变为 0 的时间来说,压缩机与减压阀信号恢复时间最长,泄漏信号次之,敲击信号最短。

4 结 论

(1) 泄漏音波信号的自相关性和互相关性都很强,背景噪音信号相关性很差。终点微弱信号的相关性最大值远高于周围背景噪音的相关性,信号的相关函数与协方差函数可以作为检测微弱信号的一种手段。对于干扰信号,其相关性也较强,尤其是压缩机信号及减压阀信号,相关性数值非常大,而相比之下敲击信号相关性较差。

(2) 信号的相关性分析可以对输气管道微泄漏进行检测,即通过相关函数数值可以将泄漏信号和背景噪声区分开;同时对诸如减压阀操作、压缩机启停、敲击等干扰因素也可以通过相关函数数值从背景噪声中识别。

(3) 对采用相关函数数值提取出的泄漏信号、减压阀操作信号、压缩机启停信号、敲击信号可以通过整体峰度值进行区分。

(4) 在不确定是否存在干扰信号的前提下,通过相关分析可以从背景噪声中提取泄漏信号或干扰信号,进而对信号进行整体峰度值计算,若整体峰度值高于阈值,则认为泄漏发生。

参考文献:

[1] 孟令雅,李玉星,宋立群,等. 输气管道泄漏音波传播特性及检测定位[J]. 天然气工业,2010,30(11):1-6.
MENG Lingya, LI Yuxing, SONG Liqun, et al. Acoustic propagation characteristics, position monitoring and locating of gas transmission pipeline leakage[J]. Natural Gas Industry, 2010,30(11):1-6.

[2] MENG Lingya, LI Yuxing, WANG Wuchang, et al. Experimental study on leak detection and location for gas pipeline based on acoustic method[J]. Journal of Loss

- Prevention in the Process Industries, 2012, 25(1): 90-102.
- [3] 付俊涛, 李玉星, 孟令雅, 等. 输气管道泄漏音波与干扰信号特征提取[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25(2): 1-8.
- FU Juntao, LI Yuxing, MENG Lingya, et al. Characteristic extraction of acoustic leak signals and interfering signals for natural gas pipeline[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, 25(2): 1-8.
- [4] 孟令雅, 付俊涛, 李玉星, 等. 输气管道泄漏音波信号传播特性及预测模型[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2): 124-129.
- MENG Lingya, FU Juntao, LI Yuxing, et al. Study on the propagating characteristics of acoustic leakage signal and the establishment of propagating prediction model[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2013, 37(2): 124-129.
- [5] WATANABE K, MATSUKAWA S, YUKAWA H, et al. Detection and location of a leak in a gas-transport pipeline by a new acoustic method[J]. AIChE Journal, 1986(32): 1690-1702.
- [6] KIM M S, LEE S K. Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008: 1-5.
- [7] 夏海波, 张来斌, 王朝晖, 等. 小波分析在管道泄漏信号识别中的应用[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2003, 27(2): 78-86.
- XIA Haibo, ZHANG Laibin, WANG Zhaohui, et al. Application of wavelet transform to signal detection of pipeline leakage[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2003, 27(2): 78-86.
- [8] 李健, 赖平. 埋地管道典型异常事件信号特征提取方法研究[J]. 传感技术学报, 2010, 23(7): 967-972.
- LI Jian, LAI Ping. Study on feature extraction method for typical abnormal events of buried pipelines[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2010, 23(7): 967-972.
- [9] 林伟国, 陈萍, 孙剑. 具有工况适应性的管道泄漏信号特征提取[J]. 化工学报, 2008, 59(7): 1715-1719.
- LIN Weiguo, CHEN Ping, SUN Jian. Features extraction of pipeline leak signal with operational conditions adaptability[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(7): 1715-1719.
- [10] 杨进, 文玉梅, 李平. 自来水铸铁管道泄漏声信号频率特征研究[J]. 应用声学, 2006, 25(1): 30-37.
- YANG Jin, WEN Yumei, LI Ping. Study on the frequency feature of acoustic leak signal in cast iron water distribution pipes[J]. Applied Acoustics, 2006, 25(1): 30-37.
- [11] 丁延鹏, 李玉星, 郝红娜, 等. 地层蓄热效应对输气管道数值模拟精度的影响[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2011, 35(3): 124-128.
- DING Yanpeng, LI Yuxing, HAO Hongna, et al. Effect of underground heat capacity on numerical simulation accuracy of transient flow in natural gas pipelines[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2011, 35(3): 124-128.
- [12] 孟令雅, 刘翠伟, 李玉星, 等. 输气管道气动噪声产生机制及其分析方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 128-136.
- MENG Lingya, LIU Cuiwei, LI Yuxing, et al. Aero-acoustics generation mechanism and analysis methods for natural gas pipelines[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2012, 36(6): 128-136.
- [13] 李玉星, 唐建峰, 王武昌, 等. 输气管道声波泄漏漏测试验装置的设计与构建[J]. 试验技术与管理, 2010, 27(8): 63-67.
- LI Yuxing, TANG Jianfeng, WANG Wuchang, et al. Design and construction of an experimental device for acoustic leak detection in gas pipelines[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(8): 63-67.
- [14] DEAN S O. Gaussian cosimulation: modelling of the cross-covariance[J]. Mathematical Geology, 2003, 35(6): 681-698.

(编辑 沈玉英)