

输气管道泄漏音波传播特性及监测定位

孟令雅¹ 李玉星² 宋立群² 赵方生² 付俊涛²

1. 中国石油大学(华东)信控学院 2. 中国石油大学(华东)储建学院

孟令雅等. 输气管道泄漏音波传播特性及监测定位. 天然气工业, 2010, 30(11): 74-79.

摘要 在天然气管道泄漏检测领域, 基于音波法的输气管道泄漏检测及定位技术逐渐受到重视。为了促进该方法的快速应用, 利用高压输气管道泄漏检测平台进行了不同输气压力下不同泄漏量、泄漏位置的泄漏检测和泄漏定位试验。根据泄漏信号的特征量, 分析了管道压力、泄漏量及泄漏位置对泄漏检测的影响。试验结果表明: ①所采用泄漏信号的特征量能满足泄漏判断的需要; ②随着管道压力的提高和泄漏孔径的增大, 泄漏检测更容易进行; ③泄漏位置越靠近管道终点, 泄漏信号特征量与阈值相差越大, 泄漏越容易判断; ④所设计的泄漏定位系统定位误差小, 试验中的定位误差最大为 1.37%; ⑤管道中段若发生泄漏, 其定位误差大于管线两端。该研究结果验证了音波法泄漏检测技术具有灵敏性好、定位精度高的特点, 为音波法在输气管道泄漏检测和泄漏定位中的广泛应用提供了依据。

关键词 输气管道 音波 泄漏检测 泄漏定位 监测效果 误差 精度

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2010.11.020

1 问题的提出

随着天然气管网建设的快速发展, 天然气管道泄漏时有发生, 不仅带来巨大的经济损失和环境污染, 还可能带来重大的人员伤亡事故。因此, 天然气管道泄漏检测作为保障管道安全、减小事故危害的重要手段, 越来越受到广泛的关注。

目前, 天然气管道泄漏检测方法很多, 主要有负压波法、分布式光纤法、音波法以及瞬态模型法等, 其中音波法以灵敏性好、误报率低、定位精度高等优点日益受到青睐。

国外对音波法的研究已有近 30 a 的历史, 目前, 老牌工业化国家对音波法的应用已不仅仅局限于油气管道的泄漏检测。Muggleton J M 等人通过在埋地试验管道上安装传感器, 将检测到的音波信号进行了幅值分析和相位分析, 对城市埋地塑料水管发生泄漏时产生的音波信号进行了试验研究^[1]。Kim Min-Soo 等人通过理论推导、试验研究和软件模拟 3 种方式对钢管中的音波进行了时频分析, 得出了音波在钢管中的截止频率, 为泄漏检测时滤波器带宽的选择提供了帮

助^[2]。Tolstoy A 等人采用音波分别对含有杂物的管道和不含杂物的管道进行了检测和对比, 将检测到的音波信号进行了时域分析和频域分析, 得出了 1 种新的匹配场方法, 可以对管道中是否含有杂质进行检测判别^[3]。

相对于管道输送业发达的欧美国家, 我国在 1958 年才建成第一条长距离油气管道, 管道泄漏检测技术也相对落后, 对音波泄漏检测技术的研究也是近几年才开始的, 且主要应用于油气管道的泄漏检测^[4-14]。当前研究音波泄漏检测技术的力量主要集中在各高校和科研院所, 如清华大学、沈阳工业大学、北京化工大学、浙江大学以及中科院声学研究所等, 但他们的研究都还处于起步阶段, 尚未取得系统性成果。沈阳工业大学应用音波法对输气管道的泄漏检测进行了研究, 设计了泄漏音波信号采集的硬件电路, 并进行了试验。北京化工大学提出了用基于区间信号平均能量平方的顺序能量比率法进行管道音波泄漏信号识别的方法, 提高了泄漏信号的信噪比和可靠性^[15-17]。

但大多数文献中音波法试验研究所用的试验管道压力只有几个大气压, 管道长度多为几十米, 这与实际

基金项目 国家自然科学基金项目(批准号: 51074175)和教育部新世纪人才支持计划项目(编号: NCET-07-0847)。

作者简介 孟令雅, 女, 1973 年生, 副教授, 硕士生导师; 主要从事天然气管道输送泄漏检测的技术研究工作。地址: (266555) 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号。电话: (0532) 86981821。E-mail: lyxdream@126.com

管道的压力、长度是不相符的^[18-19]。由于管道中流体压力不同、管道长度不同,管道发生泄漏时泄漏点处产生的音波信号及信号在管道中的传播特性就会不同。因此,为了使试验工况更进一步接近现场的泄漏工况,在实验室中建立了 1 套高压长输管道泄漏检测装置,并对试验装置和实际管道进行了相似性分析,在大量音波泄漏检测试验的基础上,对采集的音波数据进行了信号处理及特性分析,以期为音波法在输气管道泄漏检测和泄漏定位中的广泛应用提供依据和指导。

2 基于音波法的输气管道泄漏检测及定位方法

当管道发生破裂时,管道中的压力平衡受到破坏,输送介质从泄漏点流出,与管壁摩擦产生音波震荡,音波信号沿着管道内流体分别向管道上下游高速传播。在音波传播过程中,音波信号的高频成分迅速衰减,只有低频成分能传播较远的距离^[20-21]。此时产生声压,安装在管段两端的音波传感器能监听并捕捉传到的音波波形(即声压信号),通过提取信号的特征量来确定管道是否发生了泄漏,同时根据在管道两端捕捉到同一泄漏信号的时间差和音波的传播速度计算管道的泄漏位置。音波泄漏检测示意图如图 1 所示。

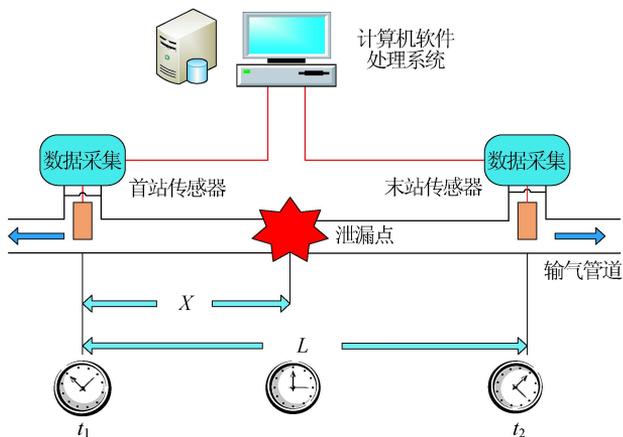


图 1 音波泄漏检测示意图

注: X 表示泄漏点的位置, L 表示管线长度, t₁、t₂ 表示时间

2.1 泄漏检测方法

对输气管道进行泄漏检测,主要是通过提取管道泄漏所发出信号的特征量,并与设定好的特征量阈值相比较,从而确定管道是否发生了泄漏。目前常用的特征量有 3 种:时频域的幅值特征、小波分析的奇异性特征和相邻区间信号的累加差分(sum AD)、均值差分(mean AD)、峰值差分(PD)特征。

上述 3 个特征量中,信号峰值反映的是信号的强度,信号均值反映的是信号的平均强度,信号累加值反映的是信号的总体特征。3 者可以有效地反映信号的特点。通过研究,决定选取第 3 种方法作为泄漏检测的特征量。

2.2 泄漏定位方法

当管道发生泄漏,在管道首末端的音波传感器检测到 2 个音波泄漏的尖峰信号时,意味着泄漏音波信号到达了管道首末端,可用相关分析确定 2 个尖峰信号对应的时间差。因为泄漏发生时上下游泄漏音波信号波形相似,只不过有个时间差。因此移动一端的音波信号与另一端音波信号做相关分析时,一定会有 1 个极大值点,找到这个极大值点就找到了音波到达上下游的时间差。

互相关公式如下所示:

$$r_{12}(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} q_1(t)q_2(t + \tau)dt \quad (1)$$

式中 T 为泄漏音波在 2 个传感器之间传播的周期, $T = \frac{L}{v}$; τ 为时间差, $\tau \in \left(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right)$; $q_1(t)$ 、 $q_2(t)$ 表示音波传感器的压力信号随时间变化; t 为时间。未发生泄漏时,相关函数将维持在某一值附近,发生泄漏后,理论上,当 $\tau = \tau_0$ 时, $r_{12}(\tau)$ 将达到最大值,即:

$$r_{12}(\tau_0) = \max r_{12}(\tau) \quad (2)$$

通过求相关函数 $r_{12}(\tau)$ 的极大值和极大值对应的 τ_0 , 即可进行泄漏检测和定位。互相关定位原理图如图 2 所示。

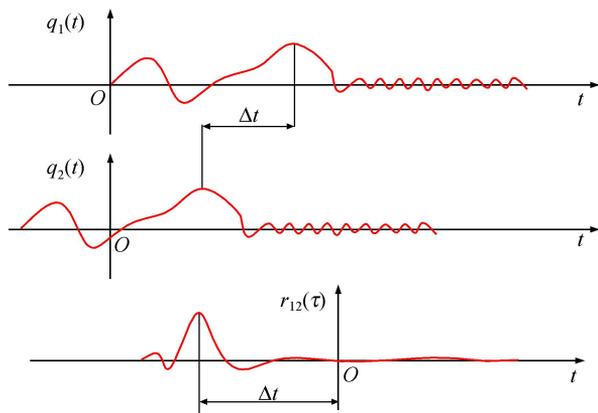


图 2 互相关定位原理图

3 输气管道泄漏检测及定位试验装置

3.1 试验装置

试验采用压缩空气作为气源,气体经压缩机加压

后,通过冷干机和过滤器除去水分和油滴,经过高压缓冲罐后进入测试管段,最后进入中压缓冲罐放空。测试管段的起点和终点处设置压力变送器、差压变送器、流量变送器、音波变送器和温度变送器等,中间位置设有3个泄漏点,分别位于距离测试管段起点39.8 m、88.8 m和149.6 m位置处,泄漏点处装有球阀和法兰,法兰内藏孔板以代替泄漏孔,可根据试验要求变换

泄漏孔径大小。试验管道全长251.5 m,测试管段长200.8 m,管道内径为10 mm,可承压8 MPa。

试验装置的起点和终点处分别安装1个音波传感器,编制数据采集程序采集传到管道首末两端的音波信号。数据采集系统主要由音波传感器、前置放大器、信号调理器、数据采集卡和计算机等组成。高压输气管线泄漏检测装置流程图如图3所示。

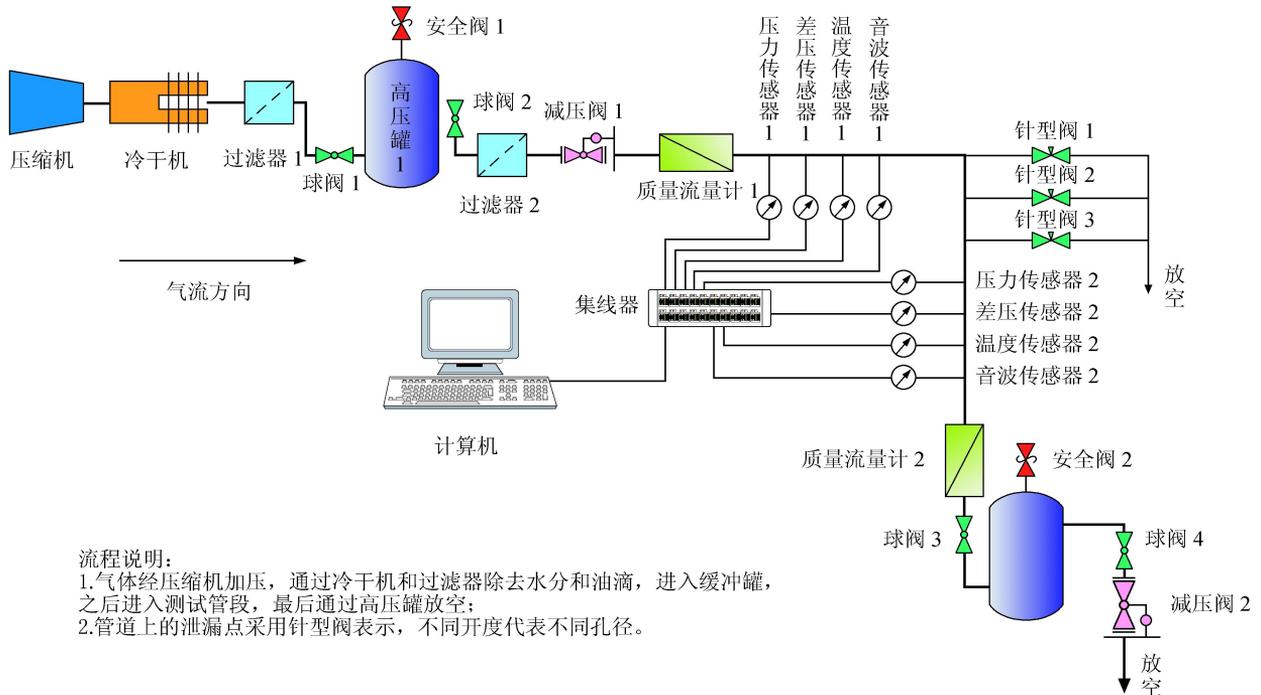


图3 高压输气管线泄漏检测装置流程图

3.2 泄漏信号传播特性分析

通过信号幅值可以较容易地判断管道的泄漏,这是因为音波信号是声压信号,而声压信号与一般的压力信号有明显的不同。管道没有发生泄漏时,声压信号处于零值附近,并上下波动;当管道发生泄漏时,声压信号有一个很快下降的过程,之后又归于零值附近。这种音波传感器仅仅检测压力变化部分,通过合理的信号调理,使正常的压力波动信号仅为A/D输入信号量程的一部分,而泄漏引起的压力变化范围为A/D的满量程,这样便提高了信号的信噪比。同时,笔者认为这也是泄漏孔的孔径相对于管道内径较大造成的,二者之比为0.045。若在实际的输气管道上,发生更小的泄漏,加上现场的各种噪声,管道的泄漏就不容易辨识了。

将音波信号进行时频转换,分析其频域上的特性。由于随机信号无法用时间函数表示,在数学上不能用频谱表示,一般用功率谱描述它的频域特性。将小波

预处理后的音波信号进行时频转换,得到不同工况下的功率谱密度图如图4所示。

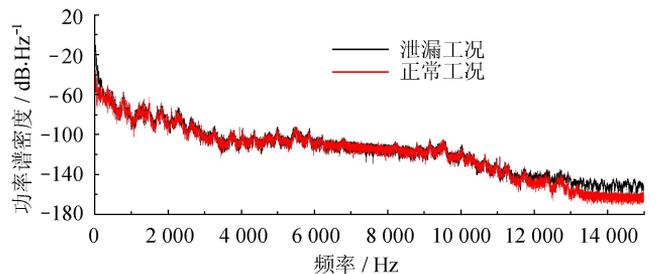


图4 不同工况下的功率谱密度图

从图4可以看出,泄漏工况的功率谱和正常工况的功率谱在很长的频率段上是基本重合的,只是在起点附近两者有所不同。随着频率的增大,不论是泄漏工况还是正常工况,其功率谱密度都逐渐减小,最终逐渐趋于稳定,即高频部分基本为白噪声部分。

图 5 为泄漏工况与正常工况的功率谱密度比值随频率的变化图,其中纵轴选取比值的对数。

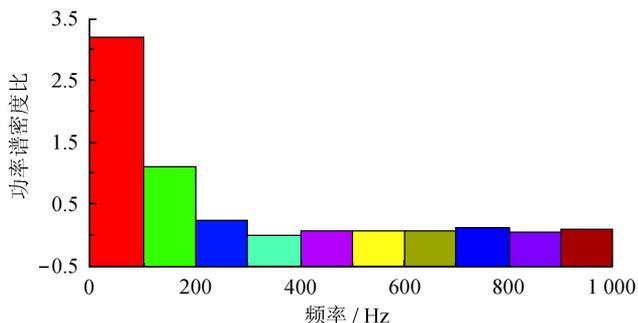


图 5 泄漏工况与正常工况的功率谱密度比图

分析可知对泄漏检测有用的信号主要处于 0~300 Hz 的频段内,其中大部分能量处于 0~100 Hz 频段内。

3.3 泄漏检测及定位特性分析

3.3.1 泄漏判断的特征量分析

从上面对于音波信号的时域和频域分析中可以看出,信号的幅值和功率谱密度是可以作为泄漏判断的特征量的,这验证了1.1节的分析结果。除此之外,1.1节提出的相邻区间信号累加差分、均值差分、峰值差分的特征识别方法,也可以作为泄漏检测的判断依据。当管道起点压力为 4.6 MPa 左右,泄漏孔径为 0.45 mm 时,将泄漏点 1 发生泄漏时采集到的测试管段终点的声压进行去噪,根据提出的相邻区间信号累加差分、均值差分、峰值差分的算法,可分别得到终点信号累加差分结果如图 6 所示,终点信号均值差分结果如图 7 所示,终点信号峰值差分结果如图 8 所示。

从图 6~8 可以看出,经过提取之后,信号的特征量比之前的幅值特征量更加容易辨识,变化范围更大。因此,泄漏信号的累加值差分、均值差分、峰值差分都可以作为泄漏判断的特征量。

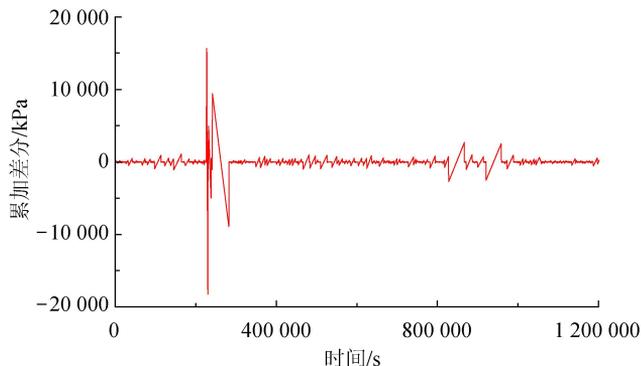


图 6 终点信号累加差分结果图

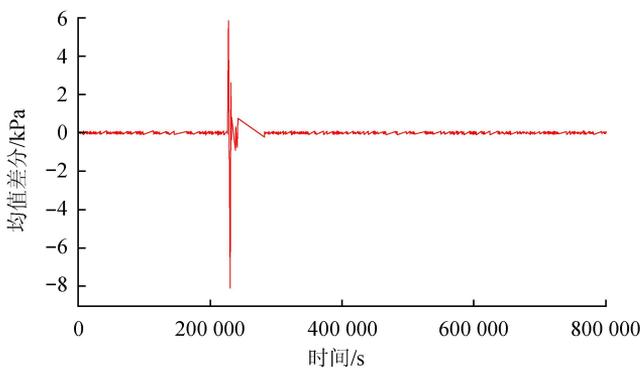


图 7 终点信号均值差分结果图

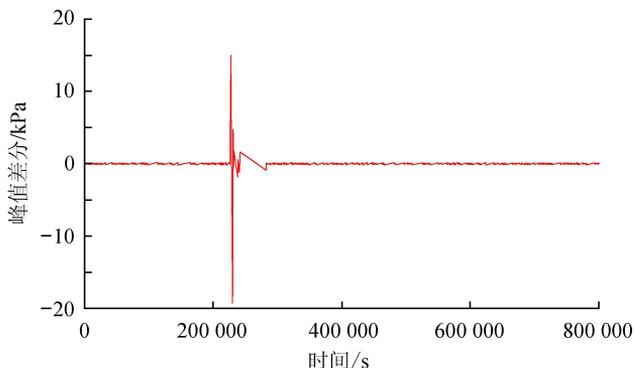


图 8 终点信号峰值差分结果图

3.3.2 不同工况的泄漏分析

选取信号的累加差分和均值差分作为不同工况下泄漏判断的特征量,以检验泄漏检测的可靠性,每个特征量的阈值选用泄漏前正常工况下特征量的最大值,以终点音波传感器接收到的信号作为检测对象。若采集信号的实际值大于阈值,则认定管道发生泄漏,否则认定管道处于正常状态。不同影响因素下泄漏判断结果如表 1 所示。

表 1 中,在泄漏孔径为 0.45 mm,压力等级为 1.6 MPa 时,泄漏信号特征量判断失误,此判断失误处于泄漏孔径较小,压力等级较低的工况,通过调节动态阈值及其权值,可以防止此类事情的发生。

3.3.3 不同工况的定位分析

泄漏定位试验是与泄漏检测试验一起进行的,运用泄漏检测采集到的数据,分析在不同泄漏工况下音波法泄漏定位的适用性及定位误差。不同影响因素下泄漏定位结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出,处于管道中间位置处的泄漏,其定位误差要大于管道两端的定位误差;靠近管道终点处的泄漏,其定位误差要小于管道起点处的定位误差。在不同工况下,泄漏定位误差都较小,最大误差为

表 1 不同影响因素下泄漏判断表

压力/泄漏 MPa 点	泄漏孔 径/mm	累计流量差/L		均 差		是否 泄漏	
		阈值	实测值	阈值	实测值		
1.6	/	0.50	5 866.3	1 294.4	0.23	0.07	否
	1	0.50	4 451.8	71 199.6	0.30	0.53	是
	2	0.50	5 479.2	104 322.0	0.25	0.73	是
	3	0.50	8 476.1	130 610.0	0.24	0.99	是
	/	0.45	9 551.4	1 254.4	0.32	0.08	否
	1	0.45	12 032.9	9 070.2	0.19	0.13	否
	2	0.45	5 396.2	31 684.6	0.23	1.31	是
	3	0.45	4 635.5	66 093.3	0.22	3.27	是
	2.6	/	0.50	3 737.1	1 117.8	0.45	0.11
1		0.50	4 723.2	66 740.0	0.39	0.46	是
2		0.50	4 696.2	140 490.0	0.37	3.86	是
3		0.50	5 111.5	157 317.0	0.36	5.58	是
/		0.45	3 011.0	937.3	0.24	0.13	否
1		0.45	5 643.6	12 711.6	0.43	2.00	是
2		0.45	11 556.7	49 079.9	0.40	3.68	是
3		0.45	4 610.2	89 766.3	0.44	5.02	是
3.6		/	0.50	9 913.8	2 561.3	0.53	0.16
	1	0.50	8 200.1	115 493.0	0.45	3.47	是
	2	0.50	10 809.7	169 041.0	0.50	6.17	是
	3	0.50	4 780.9	198 075.0	0.52	9.67	是
	/	0.45	3 652.0	546.1	0.57	0.19	否
	1	0.45	3 735.7	10 118.4	0.65	3.68	是
	2	0.45	3 997.5	70 072.1	0.88	6.90	是
	3	0.45	3 076.6	115 242.0	0.94	13.12	是
	4.6	/	0.50	12 034.9	1 742.0	0.38	0.13
1		0.50	10 087.9	133 303.0	0.55	5.37	是
2		0.50	4 853.4	188 968.0	0.46	9.93	是
3		0.50	6 645.3	215 755.0	0.54	15.38	是
/		0.45	12 056.4	1 776.1	0.35	0.11	否
1		0.45	4 900.7	18 249.3	0.34	8.08	是
2		0.45	7 745.9	64 631.8	0.37	12.04	是
3		0.45	3 105.2	112 392.0	0.41	17.39	是

表 2 不同影响因素下泄漏定位结果表

压力/ MPa	泄漏 点	泄漏孔径/ mm	位置/ m	时间差/ s	定位 误差	
1.6	1	0.50	39.54	0.35	0.65%	
	2	0.50	87.58	0.07	1.37%	
	3	0.50	149.7	-0.29	0.07%	
	1	0.45	39.5	0.35	0.75%	
	2	0.45	89.07	0.06	0.31%	
	3	0.45	149.75	-0.29	0.10%	
	2.6	1	0.50	39.93	0.34	0.33%
		2	0.50	88.28	0.06	0.58%
		3	0.50	150.03	-0.29	0.29%
1		0.45	39.92	0.34	0.29%	
2		0.45	88.21	0.06	0.67%	
3		0.45	149.92	-0.29	0.22%	
3.6	1	0.50	40.00	0.34	0.53%	
	2	0.50	88.31	0.064	0.55%	
	3	0.50	149.61	-0.29	0.01%	
	1	0.45	39.80	0.34	0.01%	
	2	0.45	88.37	0.06	0.48%	
	3	0.45	149.73	-0.29	0.09%	
4.6	1	0.50	39.97	0.34	0.44%	
	2	0.50	88.42	0.06	0.42%	
	3	0.50	149.77	-0.29	0.11%	
	1	0.45	39.94	0.34	0.35%	
	2	0.45	88.32	0.06	0.54%	
	3	0.45	149.85	-0.29	0.17%	

1.37% ,由此可以认为,基于音波法的泄漏定位方法是一种非常好的漏定定位方法,定位精度高,定位误差小,能较好地满足实际应用。

4 结束语

在分析音波法泄漏检测及泄漏定位基本原理的基础上,确定了反映泄漏检测的信号特征量和泄漏定位方法,设计了音波数据采集系统和泄漏检测系统,利用实验室中的高压输气管道泄漏检测平台进行了不同输气压力下不同泄漏量、泄漏位置的泄漏检测和定位试

验。试验结果表明:①所采用的泄漏信号的特征量能满足泄漏判断的需要;②随着管道压力的提高和泄漏孔径的增大,泄漏检测更容易进行;③泄漏位置越靠近管道终点,泄漏信号特征量与阈值相差越大,泄漏越容易判断;④所设计的泄漏定位系统定位误差小,试验中的定位误差最大为 1.37%;⑤管道中段若发生泄漏,其定位误差大于管道两端。

参 考 文 献

[1] MUGGLETON J M , BRENNAN M J .The design and instrumentation of an experimental rig to investigate acoustic methods for the detection and location of underground piping systems [J]. Applied Acoustics ,2008 ,69 (11) : 1101-1107 .
 [2] KIM MIN-SOO ,LEE SANG-KWON .Detection of leak acoustic signal in buried gas pipe based on the time-frequency analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries ,2009 ,22 (6) :990-994 .

- [3] TOLSTOY A, HOROSHENKOV K V, BIN ALI M T. Detection pipe changes via acoustic matched field processing[J]. *Applied Acoustics*, 2009, 70(5):695-702.
- [4] 杨理践, 景晓斐, 宫照广. 输气管道声波泄漏检测技术的研究[J]. *沈阳工业大学学报*, 2007, 29(1):70-73.
- [5] 郑志受, 林伟国. 基于压电传感器的管道泄漏信号可靠性识别技术研究[J]. *计量学报*, 2006, 27(4):343-346.
- [6] 刘占辉. 基于音波信号的泄漏检测技术[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [7] 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):1716-1719.
- [8] 李玉星, 彭红伟, 唐建峰, 等. 天然气长输管道泄漏检测方案对比[J]. *天然气工业*, 2009, 29(8):101-104.
- [9] 陈志刚, 张来斌, 王朝晖, 等. 应用微波技术检测天然气管道泄漏[J]. *天然气工业*, 2008, 28(1):119-121.
- [10] 张丽娟, 李帆, 王文龙. 两种基于模式识别的枝状燃气管网泄漏定位方法[J]. *天然气工业*, 2007, 27(8):106-108.
- [11] 向素平, 冯良, 周义超. 天然气管道泄漏模型[J]. *天然气工业*, 2007, 27(7):100-102.
- [12] 张红兵, 李长俊. 长距离输气管线泄漏监测技术研究[J]. *石油与天然气化工*, 2005, 34(2):146-148.
- [13] 沈淑杰. 浅谈输油管线检漏系统在清洁生产中的应用及效益[J]. *石油与天然气化工*, 2005, 34(4):339-341.
- [14] 张红兵, 李长俊, 罗刚强, 等. 管道泄漏实时检测和定位系统[J]. *石油与天然气化工*, 2004, 23(3):214-216.
- [15] 毛海杰. 天然气长输管道泄漏点的检测与定位方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2004.
- [16] 牛树伟. 声波测漏技术在长输管道上的实现[J]. *科技创新导报*, 2008(15):84-85.
- [17] 谭兴强. 管道泄漏声发射检测系统的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [18] MIN RAE, LEE JOORR-HYUM. Acoustic emission technique for pipeline leak detection[J]. *Key Engineering Materials*, 2000, 186(4):888-892.
- [19] MILLER R K, POLLOCK A A, FINKD P, et al. The development of acoustic emission for leak detection and location in liquid-filled, buried pipelines[J]. *Journal of Acoustic Emission*, 2001, 32(2):245-256.
- [20] MILLER R K, POLLOCK A A, FINKEL P. A reference for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques[J]. *NDT & E*, 1999, 32(1):1-8.
- [21] MUGGLETON J M, BRENNAN M J. Leak noise propagation and attenuation in submerged plastic water pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004, 278(3):527-537.

(修改回稿日期 2010-09-09 编辑 何 明)