

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106843

压力气体管道泄漏孔径当量估算方法研究

李 兵¹ 王浩全¹ 鹿国培¹ 王兆旭¹ 汤振鹤²

(1. 中北大学 信息与通信工程学院 太原 030051; 2. 山东非金属材料研究所 济南 250031)

摘要: 针对压力气体管道泄漏孔径大小难以定量检测的问题,提出了基于特征函数的孔径当量估算方法。该方法研究了在定压定温条件下压力气体管道微孔泄漏噪声作为泄漏信号源在 40 kHz 超声频段的数据特征,并提取泄漏信号时域与频域的特征参数,建立各特征参数与泄漏孔径之间的函数关系,通过误差分析选取最优特征函数,结合 MATLAB 信号处理进而估算出微泄漏孔径大小。实验结果表明,泄漏信号希尔伯特相对能量与孔径大小三阶拟合所得特征函数,泄漏孔径估算值与泄漏孔径实际值误差在 0.05 mm,在误差范围内验证孔径识别率为 100%,达到了研究对泄漏孔径当量估算的目的,对定量分析气体管道微小泄漏孔当量具有一定的借鉴意义。

关键词: 气体泄漏;特征参数;特征函数;漏孔当量

中图分类号: TN98;TE89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Research on estimation method of leakage aperture size of pressure gas pipeline

Li Bing¹ Wang Haoquan¹ Lu Guopci¹ Wang Zhaoxu¹ Tang Zhenhe²

(1. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Shandong Institute of Non-metallic Materials, Jinan 250031, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to quantitatively detect the leakage pore size of pressure gas pipelines, a method for estimating pore size equivalent based on characteristic function is proposed. This method studies the data characteristics of the micro-hole leakage noise of the pressure gas pipeline under constant pressure and temperature conditions as the leakage signal source in the 40 kHz ultrasonic frequency band, and extracts the characteristic parameters of the leakage signal in the time domain and frequency domain, established the functional relationship between each characteristic parameter and the leakage aperture, and selected the optimal characteristic function through error analysis, combined with MATLAB signal processing, the aperture size of micro-leakage is estimated. The experimental results show that the Hilbert relative energy of the leakage signal and the aperture size are fitted to the characteristic function of the third order, and the error between the estimated value of the leakage aperture and the actual value of the leakage aperture is within 0.05 mm. And the aperture recognition rate is 100% within the error range. The purpose of the study on the estimation of the leakage aperture equivalent is provided, and it can be used for reference in quantitative analysis of the equivalent of micro leakage holes in gas pipelines.

Keywords: gas leakage; characteristic parameter; characteristic function; leakage equivalent

0 引 言

气体管道广泛存在于工业生产和日常生活中,因管道老化、人为损伤等原因造成的气体泄漏所带来的危害严重威胁着人们的生命财产安全,因此对管道泄漏的研究变得尤为重要^[1-3]。利用泄漏产生连续型超声信号的原理是目前研究泄漏最常用最有效的手段之一,其大多用于研究泄漏的发生以及泄漏的定位等,对缺陷大小进行定量估计的

方法研究仍然没有得到很好地解决,而泄漏孔径对分析泄漏有着重要影响。

国内外学者对气体管道泄漏进行了大量研究,研究主要集中在对泄漏的发生、泄漏的定位以及通过软件仿真分析泄漏的某些声源特性等方面,泄漏孔径当量对泄漏影响的研究十分缺少。郑晓亮等^[4]基于除白谱的互功率波速形成法提出输气管道泄漏的线性阵列两步定位法,得出 7 元阵列对泄漏定位误差率小于 1% 的结果;孙洁娣等^[5]利用

压缩感知技术在压缩感知域进行特征提取,对天然气泄漏识别优于传统方法;Sun 等^[6]利用局部平均沉积均方根熵和 Wigner-Ville 时频分析实现了对不同泄漏孔径的识别;王辉等^[7]通过提出利用三元线性回归模型实现了对输水管道泄漏孔径大小的测量,并可以预测泄漏事故损失。

针对目前对于气体泄漏的研究主要集中在定性分析上,而对泄漏孔径定量的研究尚待深入。本文利用泄漏产生连续性超声波的原理,分析研究了管道内部压力 5 spi 下 6 种泄漏孔径(0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mm)的信号特征与泄漏孔径当量的关系。由于气体发生泄漏,不同泄漏孔径在其他相同工况下,泄漏孔处的压力、频率等都会产生变化,利用信号分析手段,分析不同泄漏孔的声波信息,研究泄漏声源信号的时域和频域性质,并考查了相同压力下不同孔径大小均值滤波之后泄漏声源均方根值,均方幅值和均方均值、希尔伯特相对能量等特征参数的影响,经过分析处理找到某一特征量与孔径当量之间的函数关系,通过评估实验进行误差分析,进一步确定特征函数,以此特征函数结合 MATLAB 分析在误差范围内达到对泄漏孔径当量的估计^[8]。此方法弥补了只对管道气体泄漏定性分析的不足,对研究气体泄漏的定量问题提供了参考依据。

1 理论分析

1.1 泄漏源声波分析

气体管道泄漏声源的产生过程十分复杂,运用气动声学理论分析泄漏产生的主要声源并分析了其泄漏形式和泄漏频率。由流体力学基本方程出发经过历代数学家推导并最终由福茨·威廉姆(Ffowcs Williams)和霍金斯(Hawkings)应用广义函数法综合考虑运动固体边界对声音的影响,最终得到福茨·威廉姆-霍金斯方程(FW-H 方程)^[9],方程如下:

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 \rho' = \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho_0 u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} \delta(f) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left[p' \delta_{ij} \frac{\partial f}{\partial x_j} \delta(f) \right] + \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

式中: $\delta(f)$ 表示狄拉克函数。

式(1)的右 3 项可作为声源项:依次为单极子声源、偶极子声源、四极子声源。单极子声源由表面加速度效应引起;偶极子声源由表面脉动压力引起,四极子声源由流体紊流所引起。对管道泄漏进行理想化假设,忽略泄漏过程管内气体复杂变化过程,将气动声学理论运用到气体管道泄漏声源分析上,由于泄漏产生的超声主要是由湍流造成的气体漩涡急速破裂和气体分子相互撞击所产生,则泄漏的主要声源形式为四级子声源,其微孔气体泄漏简图如图 1 所示。根据国内外学者对泄漏声源产生的超声波大量研究可知,一般泄漏产生的频率在 10~100 kHz 之间,并且泄漏的能量主要分布在 10~50 kHz 之间。泄漏声源与背景噪声的声波关系以及频谱分布如图 2 所示。由图 2 可以看出

频率在 20 kHz 之后,噪声声压变化较快而泄漏声源声压变化缓慢,为了尽可能的减少有用声信号被噪声信号淹没,一般在检测超声信号时选择大于 20 kHz 的超声信号,而因为在 40 kHz 左右两者的声压差相对最大,所以多数研究以 40 kHz 作为检测中心频率^[10-11]。本文研究的中心频率也选择了 40 kHz。

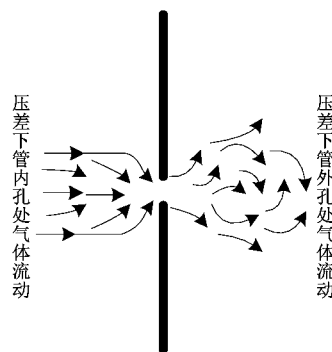


图 1 微孔泄漏示意简图

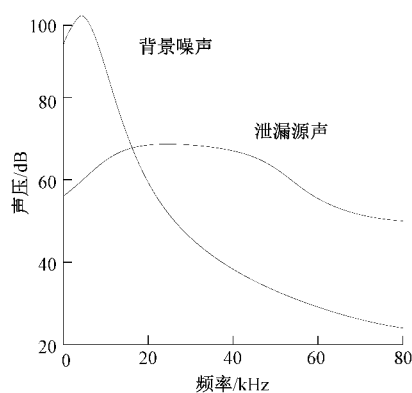


图 2 声源与噪声声波及频谱分布

1.2 孔径与气压的关系

气体泄漏的主要声源是泄漏孔处气体喷射中湍流脉动四级子声源所引起,产生的超声频率与湍流作用产生的声压密切相关,受泄漏孔径尺寸的影响在漏孔内外压力差较大,漏孔尺寸较小且雷诺数较高时,泄漏口湍流作用产生超声波声压区,当泄漏孔径大小发生变化时,泄漏孔处声压会发生变化,进而影响声波频率。泄漏声源的声压级如下^[12]:

$$L_p = 20 \lg \frac{p e^{-\alpha x}}{p_0} = A + 20 \lg \frac{D}{D_0} + 80 \lg \frac{v}{v_0} - 8.6 \alpha x \quad (2)$$

$$p = N \frac{D \rho_0 v^4}{r c_0^2} \quad (3)$$

式中: p 为泄漏出口压力,单位 Pa; D 为漏孔直径,单位 m; A 为修正因子,单位 dB; p_0 为基准声压的等效泄漏出口压力,单位 Pa; D_0 为基准声压的等效漏孔直径,单位 m; x 为泄漏超声的传播距离,单位 m。由式(2)、(3)可知在距离等因素一定时,泄漏产生声压级受泄漏孔径影响。

1.3 数据采集原理

本文在进行气体泄漏数据采集时,利用非接触超声设备,使用 40 kHz 频率采集探头进行泄漏数据采集,传感器与泄漏孔位置固定不变,设置为 20 cm,采集过程中,保持管道内部压力基本稳定在 5 psi,不考虑温度等因素的影响,泄漏孔为单孔且孔口截面为圆形。本文主要研究泄漏孔径当量估算的方法,因此选择固定距离和固定压力下选取 6 种泄漏孔径进行数据分析,分别为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mm,每次采集孔径递增 0.1 mm。实物数据采集装置图及各泄漏孔径图分别如图 3 和 4 所示。



图 3 数据采集实物设备图

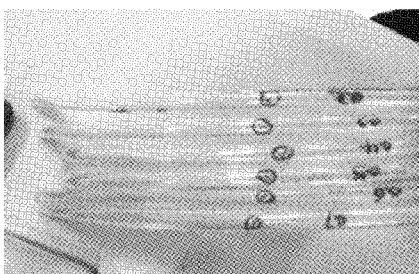


图 4 不同泄漏孔径图

由于在数据采集过程中,整个泄漏过程会持续接收泄漏信号,因此数据采集是在接收波形信号稳定之后进行,同时为尽可能的减小实验数据带来的误差,每组采集重复 5 次。由于硬件设备的缺陷,为更好地分析气体泄漏信号所反映的特征,分析不同孔径下的时频域特性,避免实验数据存在长度不一致性,对所取数据逐个进行统一截取,即每组需要分析的数据具有相同起始位置和相同的距长,每个孔径下的数据点取 4 为起始至 20 000 结束,保证了各截取数据分析相对相同。

2 结果分析

2.1 不同孔径下泄漏声波时频特性分析

泄漏信号原始数据是按时间顺序排列且相互关联的时间序列,既采集的原始数据是时域信号。在时域上对不同孔径数据经过分析处理得到泄漏信号的波形图,不同孔径下泄漏信号时域波形图如图 5 所示,从图 5 可以看出距离一定,相同管内外压差下,泄漏声源产生的是连续性信号,在一定范围内信号幅值逐渐递增的趋势。

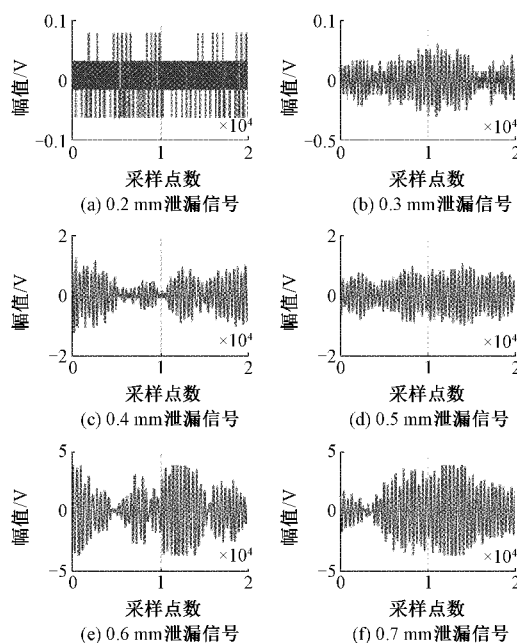


图 5 不同孔径原始信号时域图

进一步分析在相同压力差下泄漏信号所蕴含的更多信息,找出相关特征参数以塑造理想特征函数,达到对泄漏孔径当量的估计,对原始泄漏信号分别进行傅里叶变换和希尔伯特变换并提取包络^[13-14],得到信号频率谱图和信号希尔伯特包络图,如图 6 和 7 所示。从图 6 可以看出不同泄漏孔的频谱在 40 kHz 附近均存在相对突出的频响,并且孔径不同幅值也不同。由图 7 可知经过希尔伯特变换之后不同孔径泄漏产生的频率脉冲变化,幅值逐渐呈现逐渐增加趋势。出现以上现象的原因在于,当泄漏孔径发生变化时导致泄漏口处压力区气体动量产生变化,引起信号频率脉冲等强度跟随变化^[15-16],呈现图形结果。

通过傅里叶变换将时域信号转换至频域,其数学表达式如下所示:

$$F(\omega) = \mathcal{F}[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (4)$$

式中: ω 表示频率; t 表示时间; $e^{-i\omega t}$ 表示复变函数。

信号希尔伯特变换数学表达式如下所示:

$$\hat{s}(t) = h(t) * s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)h(t-\tau)d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (5)$$

式中: $s(t)$ 为输入信号, $h(t) = \frac{1}{\pi t}$ 。

希尔伯特变换后取包络表达式如下:

$$e(t) = \sqrt{s_o^2 + \hat{s}_o^2} \quad (6)$$

2.2 泄漏信号的特征提取与结果分析

泄漏信号中一般含有较多的泄漏信息,为了充分挖掘数据的隐藏信息,以达到对泄漏信号的识别,提取具有一定意义的时域参数和频域参数作为特征参数,以考察孔径当

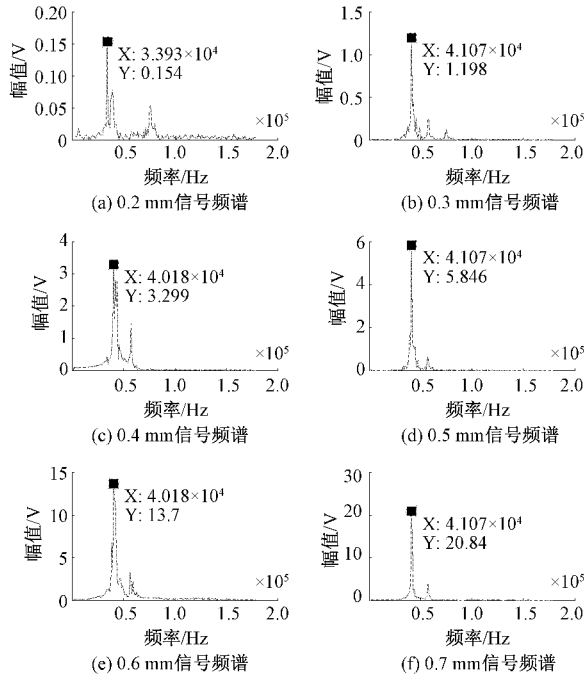


图 6 不同孔径频谱图

量。特征参数包括时域信号均方根值、信号方根幅值、傅里叶方差、傅里叶幅值、时域分组均方均值、希尔伯特相对能量值。其中时域分组均方均值表示为对截取的数据段平均分成 10 组取各组均方根再对 10 组均方根取均值得到，希尔伯特相对能量表示式如下：

$$S = \frac{\text{sum}(\text{abs}(x)^2)}{\text{length}(x)} \quad (7)$$

表 1 特征参数分析结果

孔径大小/mm	信号均方根	信号方根幅值	傅里叶方差	傅里叶幅值	时域相对能量	均方均值
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0.004 7	0.004 7	0.003 7	0.176 5	0.000 6	0.001 2
0.2	0.032 8	0.032 1	0.029 5	0.454 2	0.001 3	0.028 6
0.3	0.176 2	0.147 2	0.187 7	2.545 0	0.032 7	0.105 6
0.4	0.798 6	0.695 8	0.874 4	12.530 0	0.508 5	0.426 1
0.5	0.651 9	0.548 3	0.705 3	20.853 0	1.383 6	0.469 3
0.6	0.771 5	1.608 3	2.900 0	30.880 0	3.358 1	1.646 6
0.7	1.989 0	2.307 4	2.167 0	28.660 0	5.405 9	1.728 1

为最终取得理想的孔径与特征量关系，采用优化的最小二乘法对表 1 数据拟合，拟合结果如图 8 所示。

图 8 中实线为数据曲线，虚线为拟合曲线，通过直观观察曲线变化，舍弃相对拟合效果较差的取拟合较好的考察曲线有均方根三阶、方根幅值三阶、傅里叶幅值二阶、傅里叶幅值三阶、相对能量三阶、分组均方均值二阶、分组均方均值三阶，对应的多项式系数如表 2 所示。并选取了拟

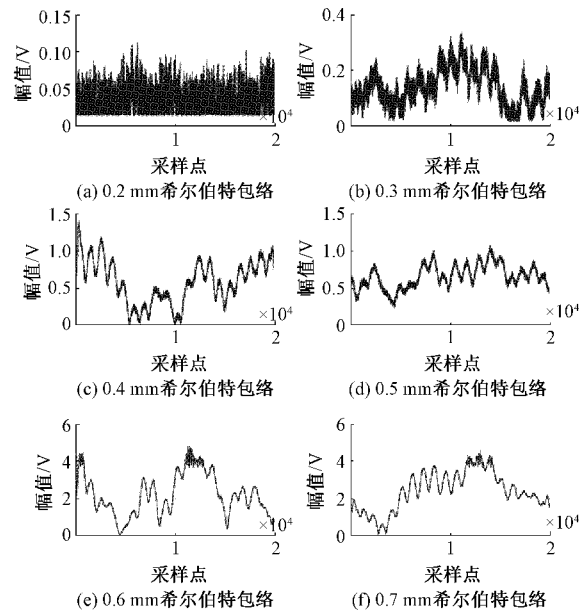


图 7 不同孔径希尔伯特变换图

式中： x 为希尔伯特变换后的信号。

如表 1 所示，为数据接收距离 20 cm，内外压差为 5 psi 下选取的各特征参数数据分析结果，由于受到硬件采集设备的限制，在进行时域和频域时未对无泄漏和 0.1 mm 泄漏做出分析，但在此数据分析表中，为方便分析数据，期望后续取得较好拟合效果，本次特征参数值分析增加了无泄漏和 0.1 mm 泄漏孔径数据用来辅助数据拟合。同时管道无泄漏时数据分析之后各幅值量较存在泄漏时小，同一标定为 0。

合评定指标 SSE、RMSE、R-square 三者辅助对拟合误差进行分析，以初步选出最佳特征方程，拟合误差分析结果如表 3 所示。

其中参数指标和方差 SSE 表示拟合数据和原始数据对应点的误差平方和，其公式如下：

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

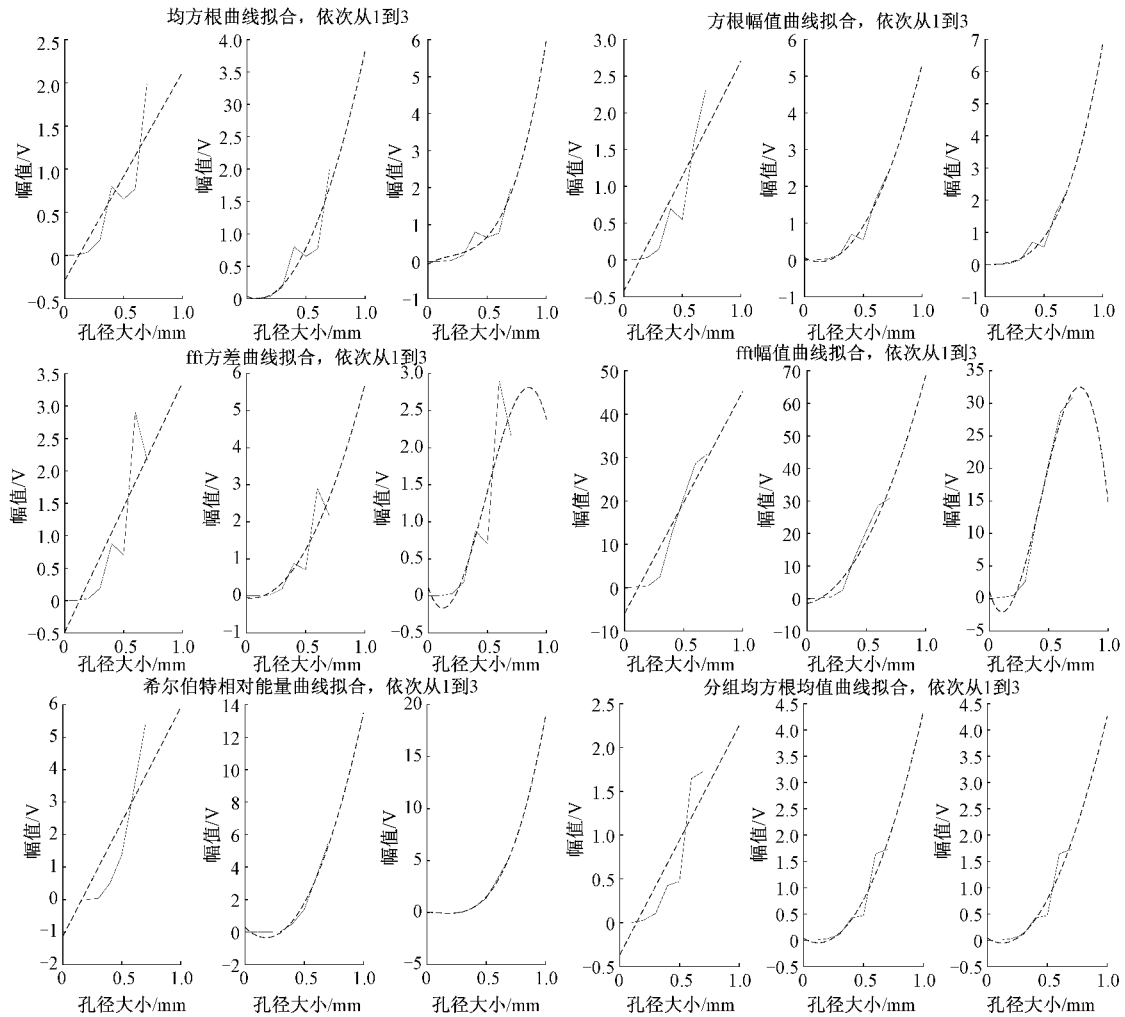


图 8 特征量与孔径拟合图

表 2 不同特征量所得多项式系数

有选择的拟合特征曲线项	多项式系数			
	三次项 $\times x^3$	二次项 $\times x^2$	一次项 $\times x$	常数 C
均方根三阶	9.950 5	-5.830 3	1.909 4	-0.069 0
方根幅值三阶	7.259 1	-0.593 1	0.203 0	-0.010 7
傅里叶幅值二阶	0	62.920 0	7.120 0	1.490 0
傅里叶幅值三阶	-250.010 0	325.427 5	-61.632 7	1.135 0
相对能量三阶	25.127 0	-5.943 3	-0.344 4	0.034 5
分组均方均值二阶	0	5.709 7	-1.381 8	0.035 1
分组均方均值三阶	-0.446 2	6.178 2	-1.504 5	0.039 8

SSE 越接近于 0,说明模型选择和拟合更好,数据预测也越成功;参数指标均方根 RMSE 表示拟合标准差,其公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (9)$$

RMSE 功能和 SSE 类似,其值越接近于 0,则说明模型和拟合更好;参数指标确定系数 R-square 通过数据变化表征一个拟合的好坏,其公式如下:

$$R - square = \frac{\sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

表 3 拟合误差分析结果

特征参数	拟合指标		
	SSE	RMSE	R-square
信号均方根三阶	0.342 9	0.292 8	0.811 9
信号方根幅值三阶	0.180 5	0.212 4	0.938 7
傅里叶幅值二阶	53.300 0	3.265 0	0.938 8
傅里叶幅值三阶	16.170 0	0.976 8	2.011 0
相对能量三阶	0.096 93	0.994 0	0.155 7
分组取均值二阶	0.265 5	0.230 4	0.899 1
分组取均值三阶	0.265 4	0.257 6	0.874 0

从公式可以看出 $R-square$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 并且其值越接近于 1 表示方程变量对 y 的解释能力越强, 模型对数据的拟合越好。依据误差参数指标说明则从表 3 中可以得到拟合效果最好的为希尔伯特相对能量三阶特征函数, 其表达式为:

$$y = 25.127 0x^3 - 0.344x^2 + 0.034 5 \quad (11)$$

为确定此特征函数就是要寻找的特征函数, 依据参数指标选取表 3 中 5 个较好特征量进行误差回代验证分析, 得到回代误差分析如表 4 所示。依据表 4 做出各特征值验证孔径回归误差图如图 9 所示。

表 4 数据回归误差分析结果

孔径大小/ mm	信号均 方根三阶	估算值/ mm	误差/ mm	信号方根 幅值三阶	估算值/ mm	误差/ mm	傅里叶幅 值三阶
0	0	0.040 9	0.040 9	0	0.055 6	0.055 6	0
0.1	0.004 7	0.044 1	-0.055 9	0.004 7	0.076 9	-0.023 0	0.176 5
0.2	0.032 8	0.064 7	-0.135 3	0.032 1	0.152 3	-0.048 0	0.454 2
0.3	0.176 2	0.221 7	-0.078 3	0.147 2	0.272 3	-0.028 0	2.545 0
0.4	0.798 6	0.532 9	0.132 9	0.695 8	0.467 4	0.067 4	12.530 0
0.5	0.651 9	0.494 3	-0.005 7	0.548 3	0.431 1	-0.069 0	20.853 0
0.6	0.771 5	0.526 3	-0.073 7	1.608 3	0.618 9	0.018 9	28.660 0
0.7	1.989 0	0.719 1	0.019 1	2.307 4	0.697 7	0.002 3	30.880 0

估算值/ mm	误差/ mm	时域相对 能量三阶	估算值/ mm	误差/ mm	均方均值	估算值/ mm	误差/ mm
0.018 8	0.018 8	0	0.053 3	0.053 3	0	0.021 3	0.021 3
0.036 5	-0.063 5	0.000 6	0.100 1	0.001 0	0.001 2	0.162 3	0.062 3
0.216 6	0.016 6	0.001 3	0.201 8	0.001 8	0.028 6	0.243 1	0.043 1
0.263 2	0.036 8	0.032 7	0.283 9	-0.016 0	0.105 6	0.301 5	0.001 5
0.385 3	-0.014 7	0.508 5	0.393 3	-0.007 0	0.426 1	0.403 4	0.003 4
0.495 0	-0.000 5	1.383 6	0.489 0	-0.011 0	0.469 3	0.445 2	-0.054 8
0.623 0	0.023 0	3.358 1	0.612 0	0.012 0	1.646 6	0.643 4	0.043 4
0.671 3	-0.028 7	5.405 9	0.696 7	0.003 3	1.728 1	0.685 2	-0.014 8

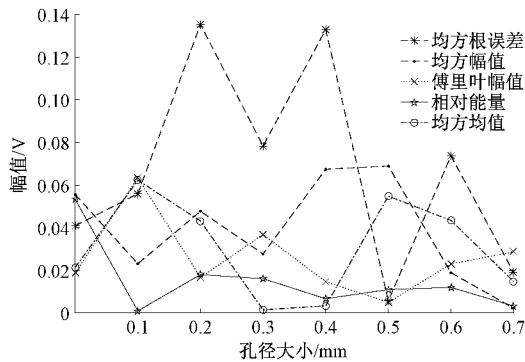


图 9 特征函数验证孔径回归误差图

从图 9 可以看出, 希尔伯特时域相对能量三阶特征函数比其他特征函数误差幅值较小, 波动幅值较低, 验证了特征函数拟合参数指标评定所得结果, 更加确定了希尔伯

特时域相对能量三阶特征函数的正确性, 并可知其对孔径的估算误差在 0.05 mm 范围内。将 6 种孔径打乱作为未知孔径以希尔伯特相对能量三阶特征函数, 在 ± 0.05 mm 误差标定下进行 50 组识别, 孔径识别正确率基本实现了 100%, 达到了孔径当量预估效果。

3 结 论

本文依据泄漏产生连续性超声波的原理, 以已知泄漏孔径数据为研究对象, 结合气动声学分析了泄漏主要声源形式为气体紊流导致的湍流作用形成的四级子声源。分析了泄漏信号的时频域性质, 得出在一定范围内泄漏孔径的频率脉冲量随着孔径的增大而增大。建立了针对时频域特征参数的提取, 在多个特征量中, 通过前期误差分析初步筛选出有效特征函数, 继而通过数据回归误差分析以

及孔径识别验证了特征函数对孔径的当量估算的正确性,所得特征函数在 0.05 mm 误差内以 0.1 mm 为间隔长度的孔径下对 0.2~0.7 mm 泄漏孔径具有很好的估算识别功能。文中所述方法为解决检测气体管道泄漏孔径当量问题提供了一种新的借鉴参考,但对于多种工况下例如改变测试距离等情况未作研究,需要进一步分析。

参考文献

- [1] 李帅永,夏传强,杨丽丽.不同方向的气体管道泄漏声发射信号模态特性分析[J].仪器仪表学报,2018,39(5):195-204.
- [2] 李惠.天然气加热系统气体泄漏捕集器设计研究及应用[J].燃气轮机技术,2020,33(4):69-72.
- [3] 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.
- [4] 郑晓亮,王强,薛生.输气管道泄漏的线性阵列两步定位方法[J].仪器仪表学报,2020,41(6):171-178.
- [5] 孙洁娣,乔艳雷,温江涛.压缩感知域智能天然气管道泄漏孔径识别[J].仪器仪表学报,2017,38(12):3071-3078.
- [6] SUN J, XIAO Q, WEN J, et al. Natural gas pipeline leak aperture identification and location based on local mean decomposition analysis [J]. Measurement, 2016,79:147-157.
- [7] 王辉,杨洋,沙洲,等.利用三元线性回归模型实现液体输水管道泄漏孔径大小的测量[J].电子测量与仪器学报,2018,32(2):18-22.
- [8] 王梦寒,刘文斌,丁建锋,等.典型电磁泄漏信号特征提取与统计分析[J].通信技术,2020,53(9):2320-2327.
- [9] 李尧斌,敬文霞,薛生,等.泄漏孔孔形对输气管道泄漏声源特性的影响[J].中国测试,2020,46(11):139-145.
- [10] 张宇.微小泄漏信号超声检测系统的研究与实现[D].北京:北京化工大学,2018.
- [11] 马鹏飞.飞机非封闭组件气密性的超声波检测技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
- [12] 綦磊,孙伟,孙立臣,等.非接触式超声泄漏检测系统设计及试验验证[J].航天器环境工程,2014,31(2):212-216.
- [13] 刘畅,张丕状,姚金杰,等.基于 FFT+FT 的 FMCW 雷达高精度测距算法研究[J].国外电子测量技术,2019,38(10):65-69.
- [14] 张刚,吴瑕.基于 Hilbert 的单边带调制随机共振的微弱信号检测[J].电子测量与仪器学报,2019,33(2):10-17.
- [15] 唐昉,谢江辉.一种舰船气体泄漏的声发射检测方法[J].船舶工程,2017,39(S1):191-194.
- [16] 方丽萍,李玉星,刘翠伟,等.气液管道泄漏检测及信号处理技术[J].电子测量与仪器学报,2018,32(11):26-34.

作者简介

李兵,硕士研究生,主要研究方向为信号处理技术与无损检测技术。

E-mail:3223583572@qq.com

王浩全(通信作者),博士,教授,主要研究方向为无损检测方向。

E-mail:2558260516@qq.com