

## EMD 信号分析方法的声发射管道泄漏检测研究

孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 靳世久, 周 琰

(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:** 针对管道泄漏声发射检测信号的非平稳特征, 提出了基于经验模态分解(EMD)的信号分析方法。该信号分析方法将管道泄漏产生的声发射信号通过 EMD 分解为多个平稳的固有模态函数(IMF)之和, 选择包含声发射特征的若干 IMF 分量进行重构, 可以提取到管道泄漏声发射信号的本质特征, 消除噪声信号的干扰。通过对重构后的信号进行互相关分析计算, 使基于声发射方法的管道泄漏检测的定位精度得到较大提高, 验证了 Hilbert-Huang 变换是表征声发射信号的非平稳特征及信号参数提取的有效工具。

**关键词:** 声发射; 管道泄漏检测; 经验模态分解(EMD); 相关分析

**中图分类号:** TE973.6 **文献标识码:** A

管道在石油、化工、天然气、城市建设等行业中, 起着非常重要的作用。随着管道网络的迅速发展, 由于服役期延长、介质腐蚀、老化等因素的影响, 管道事故频繁发生。管道缺陷的无损检测方法一直是人们研究的热点。常规的无损检测方法, 如射线、超声波、磁粉、渗透等, 由于检测过程为逐点扫描, 速度慢、效率低, 因此检测在役管道时只能采用抽查的方法, 极易造成缺陷漏检。管道漏磁通检测器(MFL-PIG)可以对管道的腐蚀情况进行在线检测, 是目前应用较为广泛的长距离管道内检测技术。但许多管道由于铺设较早, 管径和阀门的尺寸与现有的管道漏磁通检测器不匹配, 因此不适宜采用该技术。而且, 管道漏磁通检测的费用也相当高。

声发射作为一种动态无损检测方法, 可以在不停产的状况下对压力管道的活性缺陷和泄漏情况进行快速检测及判断, 而且其对管道特殊结构的形状不敏感。由于其在管道检测方面的独特优势<sup>[1]</sup>, 对声发射管道检测技术的研究具有重要的意义。

经验模态分解被认为是近年来信号分析领域的一个突破, 该方法是一种自适应的信号分解方法, 基于信号的时间尺度将信号分解为若干个固有模态函数之和, 分解出的各个 IMF 分量突出了信号的局部特征, 因此非常适用于非平稳信号的分析。管道泄漏产生的声发射信号具有强烈的非平稳特征, 采用适当的经验模态分解方法对其进行分析, 可以更准确、有效地把握信号特征信息。

## 1 检测原理

管道在运行一段时间后, 由于材料的腐蚀老化或在其它外力作用下, 管道可能产生裂纹或腐蚀孔, 由于管道内外压差的存在, 管道内的流体会向外部泄漏。管道泄漏激发的应力波携带着泄漏源的信息(如泄漏的大小、位置等)并沿管壁传播, 利用声发射传感器采集该应力波信号, 并分析处理, 就可以获得管道泄漏信息, 并对缺陷产生的位置及严重程度做出判断<sup>[2]</sup>。

对管道进行声发射检测时, 可采用声发射的时差线定位方法对管道缺陷或泄漏点进行定位。管道声发射检测至少需要两个声发射传感器, 其定位原理<sup>[3]</sup>如图1所示。

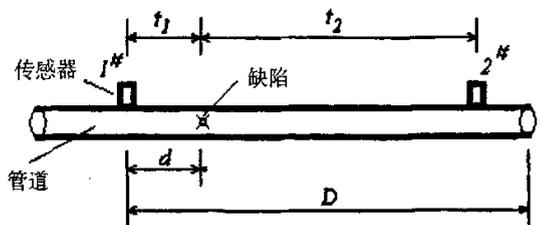


图1 管道泄漏的声发射检测原理

假设泄漏点发生在1#和2#传感器之间, 管道泄漏(声发射源)产生的声发射信号到达1#传感器的时间为 $t_1$ , 到达2#传感器的时间为 $t_2$ 。因此, 泄漏信号到达两个传感器之间的时差为 $\Delta t = t_2 - t_1$ , 图中D为两个传感器间的距离, 以 $v$ 表示声波在结构中的传播速度, 则泄漏点距1#传感器的距离为

$$d = \frac{1}{2}(D - v\Delta t) \quad (1)$$

时差线定位技术的关键是确定声波在管道中传播的速度 $v$ 和信号到达两个传感器的时间差 $\Delta t$ 。其中, $v$ 可以通过查阅工程手册或实测波速的方法来获得。当

基金项目: 国家自然科学基金重点项目: 流体管网泄漏检测的新方法与关键技术研究(NO. 60534050)

收稿日期: 2007-01-25 修改稿收到日期: 2007-02-13

第一作者 孙立瑛 女, 博士生, 1973年生

声发射信号为突发型时,时差  $\Delta t$  可通过多通道声发射仪记录的信号到达各通道的时间来确定。由于管道泄漏产生的信号为连续型声发射信号,而且声发射信号在管道中传播过程中发生的衰减、频散,以及多模态现象<sup>[4]</sup>,因此,一般情况下无法直接提取到两传感器接收泄漏信号的时差。

相关分析<sup>[5]</sup>是时域中描述信号特性的一种重要方法,通过对两个传感器接收到的两个性状相近的声发射信号的波形进行相关运算,可以获得两个信号之间的时间差。在实际检测过程中,两传感器接收的管道泄漏产生的声发射信号分别为  $x(t)$  和  $y(t)$ ,经 A/D 转换后成为离散信号  $x(n)$  和  $y(n)$ ,其中  $n$  为整数。取两个声发射信号在相同时段、采样点为  $N$  的有限数据段进行相关运算,其互相关函数可表示为:

$$R_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n)y(n) \quad (2)$$

$x(n)$  和  $y(n)$  的相关系数  $\rho_{xy}$  为

$$\rho_{xy} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} x(n)y(n)}{[\sum_{n=0}^{\infty} x^2(n) \sum_{n=0}^{\infty} y^2(n)]^{1/2}} \quad (3)$$

在对两信号的波形进行相关计算后,相关结果最大时对应的采样点即为时差  $\Delta t$ 。

获得两传感器接收信号的时差后,利用公式(1),就可以确定位于两传感器间的泄漏点的位置。当  $\Delta t = 0$  时,声发射信号源位于两传感器的正中间;当  $\Delta t = D/v$  时,声发射信号源位于 1<sup>#</sup> 传感器处;当  $\Delta t = -D/v$  时,声发射源位于 2<sup>#</sup> 传感器处;当声发射源位于传感器阵列外部时(假定其位于 1<sup>#</sup> 传感器外侧),此时无论信号源距离 1<sup>#</sup> 传感器多远,时差总是  $\Delta t = t_2 - t_1 = D/v$ ,因此声发射源总是被定位在 1<sup>#</sup> 传感器处。

## 2 EMD 信号分析方法

### 2.1 EMD 算法

经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)基于如下假设<sup>[6,7]</sup>:任何信号都是由一些不同的固有模态组成的;每个模态可以是线性的,也可以是非线性的;其局部极值点数和零点相同,且上下包络线关于时间轴局部对称;任意时刻,一个信号都可以包含许多固有模态函数(Intrinsic Mode function, IMF),如果模态之间互相重叠,便形成复合信号。

EMD 算法本质上是一种将时域信号按频率尺度分解的数值算法,其结果是将信号中不同尺度的波动或趋势逐级分解出来,产生一系列具有不同特征尺度的固有模态函数。上述固有模态函数必须满足两个条件<sup>[8]</sup>:

(1) 曲线的极值点和零点的数目相等或至多相

差 1;

(2) 在曲线的任意一点,包络的最大极值点和最小极值点的均值等于零。

在上述假设条件下,可以用 EMD 将信号的本征模态筛选出来,其步骤如下:

1) 给变量赋初值:  $r_0(t) = x(t)$ ,  $i = 1$ ;

2) 提取第  $i$  个 IMF 分量:

Ⓐ 给变量赋初值:  $h_0(t) = r_i(t)$ ,  $j = 1$ ;

Ⓑ 确认  $h_{j-1}(t)$  的所有局部极大值点和极小值点;

Ⓒ 用三次样条函数对  $h_{j-1}(t)$  的局部极大值点和极小值点插值形成上、下两条包络线;

Ⓓ 计算上下包络线平均值  $m_{j-1}(t)$ ;

Ⓔ 计算差值:  $h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$ ;

Ⓕ 利用标准偏差 SD 的值判断每次筛选结果:

$$SD = \sum_{i=0}^j \frac{|h_j(t) - h_{j-1}(t)|^2}{h_j(t)^2} \leq \varepsilon, \quad (4)$$

取  $\varepsilon$  的值在 0.2 到 0.3 之间,标准偏差满足上式,则停止计算并令:  $imf_i(t) = h_j(t)$ , 否则转到 (b) 并令  $j = j + 1$ ;

3)  $r_i(t) = r_{i-1}(t) - imf_i(t)$ ;

4) 若  $r_i(t)$  极值点不少于 2 个,则  $i = i + 1$ , 转到 2; 否则,分解结束,  $r_i(t)$  是残余分量。

最后可得:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n imf_i(t) + r_n(t), \quad (6)$$

式中  $r_n(t)$  代表信号的平均趋势,即原始数据序列可以表示为固有模态函数分量和一个残余项之和<sup>[9]</sup>。

管道泄漏产生的声发射信号具有的非平稳特征非常明显,因此,采用 HHT 时频分析方法可以对声发射信号的成分进行本质分析。对管道泄漏声发射信号进行经验模式分解后,可在时域内对信号进行分析,由于固有模式函数代表了信号的内在波动模式,因此对分解后的固有模式函数进行分析可以获得信号中更丰富的波动信息。

## 3 声发射管道检测实验及信号分析结果

### 3.1 现场管道检测实验

利用一条管径为 100 mm 的管道进行气体泄漏的实验,两传感器之间的距离为 15.58 m,泄漏孔距离 1<sup>#</sup> 传感器的距离为 580 mm,检测管道的示意图如图 2 所示。

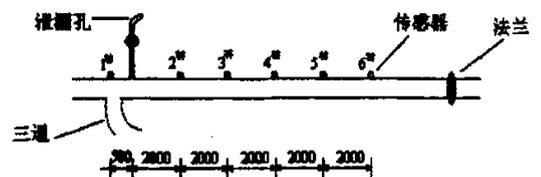


图2 实验管道示意图

由于管道检测现场的情况比较复杂,而且实验现场距离公路较近,车辆驶过时会使现场采集的声发射信号受到一定的噪声干扰,如图 3 所示为检测现场 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>传感器采集到的管道泄漏声发射信号。实验时管道内压力为 0.6MPa,采样频率为 1 MHz,数据采集时间为 30 ms,采样点数为 30 K。

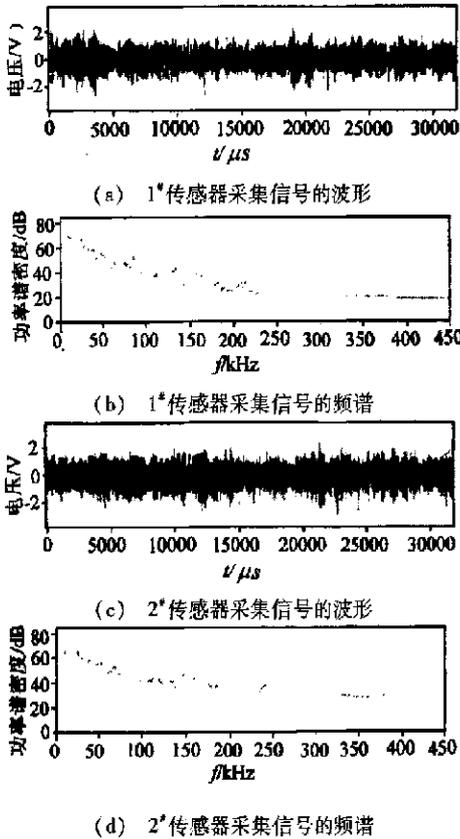


图 3 两传感器采集的管道泄漏声发射信号

对 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>传感器采集的 AE 信号直接做互相关分析,相关系数为 0.754,  $\Delta t = 2.17$  ms,由实测波速(6 948 m/s)计算出泄漏点距离 1<sup>#</sup>传感器之间的距离为  $d = 251.5$  mm,泄漏点距 1<sup>#</sup>传感器的距离为 580 mm。计算值与真实值相差 328.5 mm。可见,直接进行互相关分析定位误差明显偏大。

在管道检测过程中,现场的环境一般都比较复杂。传感器接收到的有效信号中往往包含有一定量的噪声信号,因此,从实测信号中剔除干扰噪声、提取有效信息一直是人们研究的热点。由于实测信号及其干扰信号都属于非稳态信号,因此很难通过对实测数据直接滤波的方法来予以消除。考虑到 EMD 方法总是将信号中最主要的成分先提取出来,因此可以尝试利用分解得到的前几个 IMF 来恢复被干扰的真实信号,而对于后几个 IMF,如果干扰的成分比较突出,可以直接将其滤除。再把所有处理后的 IMF 与趋势项重新构造,万方数据

就得到没有干扰的数据。

### 3.2 实验及信号分析结果

图 4 为 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>传感器采集的管道泄漏声发射信号的原始波形及其 EMD 分解结果。该信号经 EMD 分解后得到 9 个不同的固有模式函数(如图所示从上到下依次排列),以及一个表征趋势的残余分量。由于得到的残余分量是单调的,幅值也较小,对于声发射信号的分析作用不大,故在声发射信号分析中可以不考虑残余分量的影响。

从图 4(a)中可以看出,IMF 6 及其以后的固有模式振幅已经相当小,前五个模态已基本描述了该种信号的特征。根据管道泄漏声发射信号的特征,在五个有效 IMF 分量中,可以确定分量 IMF1、IMF2 和 IMF3 (具有明显的声发射物理意义)具有典型的泄漏声发射信号的特点。

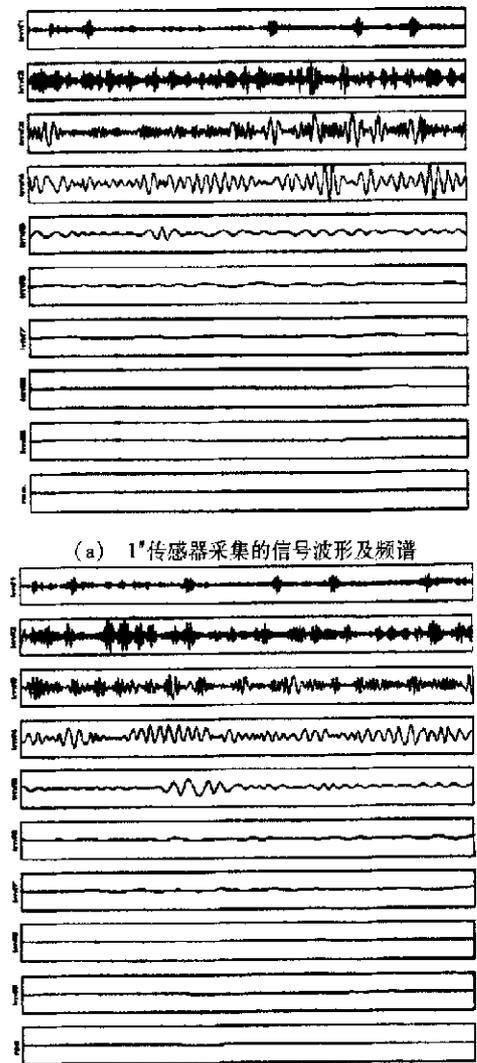


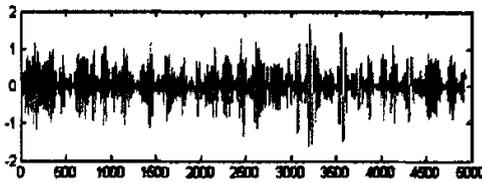
图 4 管道泄漏声发射信号的 EMD 分解结果

因此,选取前 IMF1 ~ IMF3 三个固有模态分量进行重构,重构后的信号如图 5(a)所示。

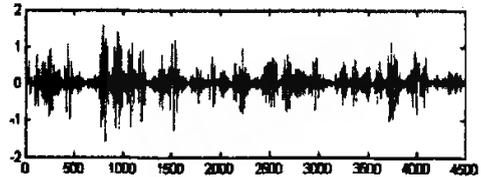
图 4(b)为 2<sup>#</sup>传感器采集的管道泄漏声发射信号的原始波形及其 EMD 分解结果,该信号经 EMD 分解同样得到 9 个不同的固有模式函数。与 1<sup>#</sup>传感器采集的管道

泄漏声发射信号的分解结果类似,IMF 6 及其以后的固有模态振幅已经相对较小。前五个有效 IMF 分量中,分量 IMF1、IMF2 和 IMF3 具有典型的声发射含义。

因此,选取前 IMF1 ~ IMF3 三个固有模态分量进行重构,重构后的信号如图 5(b)所示。



(a) 1<sup>#</sup>传感器采集信号的重构波形



(b) 2<sup>#</sup>传感器采集信号的重构波形

图5 管道泄漏声发射信号 EMD 分解的重构信号

对重构后的信号作相关分析,可以计算出泄漏信号到达传感器的时差为  $\Delta t = 2.085 \text{ ms}$ ,由公式(1),泄漏点距离第一个传感器之间的距离为  $d = 543.2$ ,与真实值之间的相对误差为 6.3%,考虑到传感器的布置等因素也可能产生一定的误差,故根据 EMD 分解向量得到的重构信号计算的泄漏点定位精度有了显著提高。可见,采用 EMD 分解并对包含有效声发射信号特征的 IMF 分量进行重构能够提取管道泄漏声发射信号的本质特征,提高了泄漏点的定位精度。

#### 4 结 论

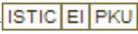
Hilbert-Huang 变换基于信号的局部特征时间尺度,将信号自适应地分解为若干个 IMF 分量之和,使得瞬时频率具有了实际的物理意义,同时也使这种新的时-频分析方法不同于用很多谐波分量来表示复杂的非线性与非平稳信号的传统方法,如傅立叶方法,也不同于小波或小波包分析中尺度的频率定义方法,而是同频率的经典定义方法相一致,从而可以精确的给出信号的能量随频率和时间的联合分析情况,非常适合于处理非线性和非平稳信号。

实验及信号分析结果表明,基于 EMD 分解得到的各个 IMF 分量包含了原始泄漏信号的局部特征信息,能够直接、真实的反映了声发射信号的非平稳特性。本文基于 EMD 的管道泄漏声发射信号分析方法能够提取出管道泄漏产生的声发射信号的本质特征,通过提取包含有效声发射信号特征的 IMF 分量进行信号重构,对信号进行相关运算,可以获得对泄漏声发射事件较高精度的定位结果。验证了 Hilbert-Huang 变换是表

征声发射信号的非平稳特征及管道泄漏声发射信号特征参数提取的有效工具。

#### 参 考 文 献

- [1] Huo Zheng, Cheng Chuimei, Zhu Renxiang. Acoustic emission inspection of pipeline leakage[J]. Non-destructive Testing Journal( in Chinese), 1997,19(4):105—107.
- [2] Roberts Ron A, Rewerts Lance E, Clark M Amanda. The role of propagation characteristics in acoustic Emission pipeline leak location[J]. Renew of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1998, 17(5):501—508.
- [3] Samoilov B V. In-line inspection, repairs used on ageing Russian product lines. Oil & Gas Journal, International Petroleum New & Technology, November 1998: 42—46.
- [4] Cao Zhong. Chemical acoustic emissions from gas evolution processed recorded by a piezoelectric transducer[J]. Sensors and Actuators, 1998, 50(1): 27—37.
- [5] Gao Y, Brennan J, Joseph P F, Muggleton J M, Hunaidi O. A modal of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 277: 133—148.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc. Roy. Soc. London, 1998, 454: 903—995.
- [7] Wu Z, Huang N E. Study of the characteristic of white noise using the Empirical mode decomposition method, Proc. Roy. Soc. London, Dec. 2003.
- [8] Huang Daji, Zhao Jinping, Sun jilan. Practical implementation of Hilbert-Huang Transform Algorithm[J]. Acta Oceanologica sinica, 2003, 22(1):1—14.
- [9] Huang Daji, Zhao Jinping, Su Jilan. On the end extending in the Hilbert-Huang Transform. Progress in Coastal Engineering and Oceanography[J], Coastal Oceanography of Asian. Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 1991:81—92.

作者: 孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 靳世久, 周琰, SUN Li-ying, LI Yi-bo, QU Zhi-gang, JIN Shi-jiu, ZHOU Yan  
作者单位: 天津大学精密测试技术与仪器国家重点实验室, 天津, 300072  
刊名: 振动与冲击   
英文刊名: JOURNAL OF VIBRATION AND SHOCK  
年, 卷(期): 2007, 26(10)  
引用次数: 0次

## 参考文献(9条)

1. Huo Zheng, Cheng Chuimei, Zhu Renxiang Acoustic emission inspection of pipeline leakage 1997(04)
2. Roberts Ron A, Rewerts Lance E, Clark M Amanda The role of propagation characteristics in acoustic Emission pipeline leak location 1998(05)
3. Samoilov B V In-line inspection, repairs used on ageing Russian product lines 1998
4. Cao Zhong Chemical acoustic emissions from gas evolution processed recorded by a piezoelectric transducer 1998(01)
5. Gao Y, Brennan J, Joseph P F, Muggleton J M, Hunaidi O A modal of the correlation function of leak noise in buried plastic pipes 2004
6. Huang N E, Shen Z, Long S R The Empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis 1998
7. Wu Z, Huang N E Study of the characteristic of white noise using the Empirical mode decomposition method 2003
8. Huang Daji, Zhao Jinping, Sun jilan Practical implementation of Hilbert-Huang Transform Algorithm[期刊论文]-Acta Oceanologica Sinica 2003(01)
9. Huang Daji, Zhao Jinping, Su Jilan On the end extending in the Hilbert-Huang Transform 1991

## 相似文献(10条)

1. 期刊论文 孙立瑛, 李一博, 曲志刚, 王伟魁, SUN Li-ying, LI Yi-bo, QU Zhi-gang, WANG Wei-kui 基于EMD的声发射管道泄漏检测研究 - 压电与声光 2008, 30(2)  
针对声发射管道泄漏检测信号的非平稳特征, 该文提出了基于经验模态分解(EMD)的声发射信号分析方法. 该信号分析法将管道泄漏产生的复杂声发射信号分解成有限个固有模态信号(IMF), 使Hilbert-Huang变换(HHT)的瞬时频率具有了实际物理意义, 提高了管道泄漏检测的定位精度. 结果表明, HHT法能准确描述声发射波形信号的非线性、非平稳时变特征, 是声发射信号时频分析的有效工具.
2. 期刊论文 孙立瑛, 李一博, 靳世久, 曲志刚, 李俊霖 基于小波包和HHT变换的声发射信号分析方法 - 仪器仪表学报 2008, 29(8)  
针对声发射管道泄漏检测过程中的噪声干扰问题, 对基于小波包和经验模态分解(EMD)的声发射信号处理方法进行了研究. 采用小波包分解算法和经验模态分解都可以对管道泄漏声发射信号进行分解, 但分解结果却存在一定区别. EMD是近年来非平稳信号分析领域的一个突破, 对管道泄漏声发射信号进行EMD分解后, 选择包含声发射特征的若干固有模式函数(IMF分量)进行重构, 可以提取到管道泄漏声发射信号的本质特征, 消除噪声信号的干扰. 相对小波包分解方法而言, 对根据IMF分量重构的声发射信号进行相关分析计算, 得到的管道泄漏点的位置更为精确.
3. 会议论文 辛若家, 张来斌, 王朝晖, 秦先勇 小波神经网络在声发射管道泄漏检测中的应用研究  
声发射管道泄漏检测的目的是获得泄漏源的相关信息(泄漏孔的大小和位置等). 管道泄漏声发射信号既携带泄漏源特征信息, 同时又有大的随机性和不确定性, 属于一种非平稳随机信号. 因此泄漏声发射信号的分析与识别成了研究的重点和热点. 综合小波变换和神经网络模式识别两种方法的优点, 提出了一种小波神经网络的信号分析方法, 提高了泄漏声发射信号的识别能力.
4. 期刊论文 王朝晖, 张来斌, 辛若家, 梁伟, WANG Zhao-hui, ZHANG Lai-bin, XIN Ruo-jia, LIANG Wei 声发射技术在管道泄漏检测中的应用 - 中国石油大学学报(自然科学版) 2007, 31(5)  
传统的管道泄漏检测法如负压波诊断法要求有很强的实时性, 常因不能及时捕捉到泄漏信号而造成诊断失败, 而声发射检测技术作为一种成熟的无损检测方法, 可根据泄漏时流体与泄漏孔隙产生的声发射信号判断泄漏, 实现对泄漏信号的连续捕捉, 在检测原理上有很大的优势. 利用声发射技术对管道泄漏检测进行了试验研究, 通过对声发射信号进行时频分析, 实现了对泄漏信号的有效识别. 试验结果表明, 泄漏发生时的声发射能量主要集中在140~160 kHz, 随着泄漏距离的增加, 在200 kHz处的声发射能量将产生较大的衰减, 从而验证了应用声发射技术进行管道泄漏检测的可行性.
5. 会议论文 焦敬品, 费仁元, 何存富, 吴斌 基于模态声发射的管道泄漏监控技术研究

管道泄漏监测是保障生产系统和制造设备正常运行的必要条件之一。本文针对利用传统声发射技术对管道泄漏定位效果较差,且无法实现泄漏孔位于两传感器外侧的泄漏监测,将导波理论引入声发射泄漏检测中,利用模态声发射技术对管道泄漏进行监控。通过对泄漏声发射信号进行时频分析,从中提取单一模态的泄漏声发射信号,构建了一种新型的泄漏定位模型。管道声发射泄漏监测试验表明,利用该模型可很好实现两传感器之间和外侧的泄漏监测,定位误差一般小于5%。

#### 6. 学位论文 [谭兴强 管道泄漏声发射检测系统的研究](#) 2006

管道泄漏一直是困扰管道运输业的一个难题,研究对管道泄漏进行监、检测和定位的理论及方法对提高管道运输能力意义重大。特别是计算机处理能力的飞速发展,利用软件和虚拟仪器技术,结合现有的管道泄漏检测定位方法,研究全数字式的管道泄漏检测系统,能有效的提高泄漏检测定位的精度和可靠性,同时具有更好的适应性。声发射泄漏检测是基于管道泄漏时激发的在管道中传播的超声波进行检测的一种方法。本文将声发射检测与计算机数字信号处理、神经网络相接合,在均匀圆管上研究了管道泄漏的信号处理和定位的方法,并在实验中证明了运用小波提取声发射泄漏信号中特定频带信号进行定位的可行性,具体来说本文进行了以下方面的研究工作。①分析了泄漏声发射声波的产生机制以及其在理想均匀圆管中传播的特点,并建立了泄漏声发射声波检测系统的模型;设计了泄漏声发射信号检测的实验方案,并完成了泄漏声发射信号的数据采集工作。②在VC6.0环境下自行开发了一套具用虚拟仪器功能的适应于声发射泄漏信号处理和定位的软件系统。对泄漏声发射信号的时域统计特征、频域分布特征、泄漏信号的相关性作了详细的分析;并运行自适应滤波方法、小波软、硬阈值方法对泄漏声发射信号进行了有效的去噪处理。③为适应泄漏声发射信号的中心频率在不同的泄漏状态下发生改变后仍能分析泄漏信号,系统采用功率谱计算与小波分解能量计算相结合的方法分析泄漏信号的中心频带,根据中心频带来确定滤波参数、选择小波分解和提取泄漏信号的级数,从而达到了良好的滤波和信号提取效果。④对时差相关定位、小波奇异点时差定位方法在管道泄漏源定位中的应用进行了研究,并提出和重点研究了基于小波提取和BP神经网络相结合的管道泄漏检测与定位新方法。⑤在文章的第五节重点叙述了软件系统的结构,并对软件中涉及声发射信号处理和定位的功率谱、自互相关、自适应滤波、小波分解、小波去噪、小波重构、BP神经网络等主要模块的算法作了详细的介绍。

#### 7. 会议论文 [吴斌,李涌,何存富,焦敬品 模态声发射检测技术在管道泄漏检测中的应用](#) 2002

本文通过实验的方法研究了管道泄漏所激发的声发射信号的特点以及声波在充液管道中传播的规律,为以后压力管泄漏的源定位问题的研究提供了依据。

#### 8. 期刊论文 [张立,侯迪波,周泽魁 基于声发射技术管道泄漏检测无线智能传感器的设计](#) -[传感器世界](#)2008, 14(4)

设计了基于声发射技术的管道泄漏检测无线智能传感器,它将智能化功能结合到传感器中一进行了敏感元件的选型、硬件电路和传感器外形结构的设计,并编写了传感器接口应用程序。将该智能传感器用于管道泄漏检测实验,结果表明:该传感器可很好地应用于管道泄漏信号检测,集成度高。

#### 9. 学位论文 [李鹏 基于模态声发射检测技术的管道泄漏研究](#) 2008

管道泄漏检测是石油、化工、天然气和城市供水等领域中需要解决的重要问题之一。研究管道泄漏的检测理论、检测方法,实现对管道泄漏点的精确定位,对于维护管网的安全运行,避免资源的浪费,有着重要的理论意义和应用价值。

管道导波检测技术是近年来研究的一个热点,从理论上较好地解决了声发射技术应用中面临的源定位不准确、信号解释困难和噪声等问题。本文从声发射基本理论展开,介绍了声发射信号在管壁中传播的导波特性和对管道进行了泄漏实验研究。

利用泄漏声发射信号的互能量谱密度函数,考虑结构中导波的多模态和频散特性,对充液管道泄漏源定位技术进行了研究,构造了泄漏声发射源定位算法模型。通过对声发射信号进行时频分析,利用结构频散特性确定相关参数、提取单一导波模态的方法,减小了多模态和频散特性对定位的不利影响,从而较好地实现管道泄漏源的定位。

#### 10. 期刊论文 [姜根山,安连锁,杨昆 锅炉换热器管道泄漏口声辐射指向性特征数值研究](#) -[中国电机工程学报](#)

2002, 22(6)

该文从理论上研究了锅炉换热器管道泄漏口声辐射的频谱规律及指向性特征,将泄漏口视作轴向坐标和方位角的可分离辐射源,计算了矩形泄漏源在不同频率下辐射声压级及位相在远场的分布规律,指出了声场空间分布与声波频率、管道直径以及泄漏源强度及大小的关系,讨论了检测点布置位置及频率选择对被动式管道泄漏检测定位技术的影响,为锅炉换热器管道的泄漏检测及定位技术提供了理论依据。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_zdycj200710035.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zdycj200710035.aspx)

下载时间: 2010年5月31日