

基于导波理论的管道泄漏声发射定位新技术研究*

焦敬品 何存富 吴斌 费仁元

(北京工业大学机电学院 北京 100022)

摘要: 由于泄漏声发射信号的多模态特性和在管道内传播过程中的频散特性,使得通过相关分析进行管道泄漏定位的效果很差。根据模态声发射理论,将圆管中导波传播理论应用于管道泄漏的声发射检测,建立了管道中泄漏声发射信号的多模态传播模型。利用管道中导波传播的频散特性,在提取单一模态导波基础上,提出了一种实用的声发射泄漏定位方法。泄漏定位试验证明了该方法的有效性。

关键词: 管道 泄漏 模态声发射 导波 频散

中图分类号: TG115.28

0 前言

管道系统广泛应用于电力、石油、化工、天然气以及城市自来水等工业部门中。工业管道的工作环境通常非常恶劣,容易产生腐蚀、裂纹、疲劳破坏,最终导致管道的泄漏事故^[1,2]。因此,需要利用各种无损监控技术对管道的运行状况进行监测和诊断。声发射(Acoustic emission, AE)技术作为一种动态无损检测方法,可实现对结构区域或整体的大范围检测,对于管道泄漏检测具有特殊优势,成为国内外管道泄漏检测技术的热点之一^[3~7]。

管道泄漏声发射信号属于连续声发射信号,互相关分析是连续声发射源定位的重要方法之一,但采用互相关分析方法对于管道泄漏的定位却存在很大的局限性^[5~7]。这是因为,利用互相关的方法对管道泄漏定位时,没有考虑由多模态成分组成的泄漏声发射信号在管道内传播的频散特性,而简单地假设声发射传感器接收到的信号为泄漏激励信号延迟后的复制,其中的延迟时间则与传感器阵列离泄漏源的距离有关。实际上,充液(气)管线中各模态导波的频散特性对其传播波形影响很大。因此,泄漏声发射信号在传播过程中波形将不再是固定不变的,并随传播距离的增大使得波形失真更为严重,从而导致了通过互相关分析进行管道泄漏定位的效果很差。Lance^[7]在考虑频散对充液管线中泄漏声发射信号传播的影响基础上,建立了泄漏声发射定位模型,利用该模型很好地实现了对管道中模拟声发射源的定位。但对于定位模型中需要同时获得管道中许多个空间位置的泄漏声发射信号问题,未能解决,因此对于管道的泄漏检测缺少实用性。

模态声发射(Modal acoustic emission, MAE)是在传统共振传感器参数声发射基础上,近年发展起来的声发射检测新技术^[8,9]。认为被测结构中的源或声发射事件在负载作用下产生的是频率和模态丰富的导波信号,而且可以利用导波理论将一直困扰声发射推广应用中所面临的问题,如源定位不准确、信号解释困难等,从理论上得到了较好的解释和表达。根据模态声发射理论,将导波理论应用于管道声发射泄漏检测中,试图建立一种实用的、有效的管道泄漏的声发射定位方法。

1 管道泄漏声发射定位模型

1.1 管道泄漏多模态声发射检测数学模型的建立

根据模态声发射理论,液(气)体泄漏激发的是频率和模态丰富的导波信号,可以利用圆管中导波传播理论对其在管道内传播进行分析,建立管道泄漏声发射检测模型,如图1所示。假设管道泄漏激发出声发射信号由 n 种模态的导波组成,管道泄漏激励信号 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \sum_n s_n(t) \quad (1)$$

式中 $s_n(t)$ ——泄漏激励信号中第 n 种模态导波频谱

$$S_n(\omega) = \int s_n(t) \exp(i\omega t) dt = A_n(\omega) \exp(i\varphi_n) \quad (2)$$

式中 $A_n(\omega)$, φ_n ——泄漏激励信号中第 n 种模态导波的幅值和相位

根据圆管中导波传播理论,泄漏信号将沿管壁传播,在距离泄漏源的任意位置 x 处接收到的声发射信号 $u(x,t)$ 可以表示为

$$u(x,t) = \sum_n s_n(t - x/c_{pn}) = \sum_n s_n(t + x/c_{pn}) \quad (3)$$

式中 c_{pn} ——第 n 种模态导波传播的相速度

*国家自然科学基金(No.19972003, 10272007)和北京市自然科学基金(3011001)资助项目。20031107收到初稿,20040610收到修改稿

$u(x, t)$ 关于时间的频谱 $U(x, \omega)$ 表示为

$$U(x, \omega) = \sum_n A_n(\omega) \exp[i(xk_n(\omega) + \varphi_n)] \quad (4)$$

式中 $k_n(\omega)$ ——第 n 种模态导波的波数, $k_n(\omega) = \omega/c_{pn}$

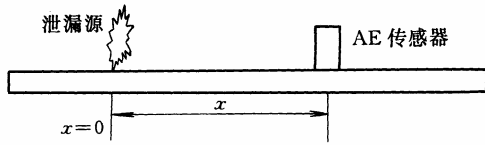


图 1 管道泄漏声发射信号的多模态模型

1.2 泄漏声发射信号的模态提取算法研究

以声发射传感器接收泄漏信号的位置 x_A 为中心, 在 $\pm\Delta$ 空间(如图 2 所示)内构造泄漏声发射信号的时间-空间频谱表达式 $V_A(\omega, \gamma)$

$$\begin{aligned} V_A(\omega, \gamma) &= \int_{-\Delta}^{\Delta} U(z + x_A, \omega) \exp(-i\gamma z) dz \\ &= \sum_n A_n(\omega) \int_{-\Delta}^{\Delta} \exp[i(kn(\omega) - \gamma)z] dz \times \\ &\quad \exp[i(k_n(\omega)x_A + \varphi_n)] = \\ &= \sum_n A_n(\omega) 2\Delta \frac{\sin(\Delta(k_n(\omega) - \gamma))}{\Delta(k_n(\omega) - \gamma)} \times \\ &\quad \exp[i(k_n(\omega)x_A + \varphi_n)] \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\gamma = k_m(\omega)$, 且 Δ 足够大时, 上式中的 $\sin c$ 函数简化为 δ 函数, 即

$$\frac{\sin[\Delta(k_n(\omega) - \gamma)]}{\Delta[k_n(\omega) - \gamma]} \approx \delta_{mn} \quad (6)$$

因此, 当 $\gamma = k_n(\omega)$ 时, 式(5)可简化为

$$V_A(\omega, \gamma) \cong A_n(\omega) \exp[i(k_n(\omega)x_A + i\varphi_n)] \quad (7)$$

上式表明, 通过对泄漏声发射信号进行某种空间变换的方法, 可以获得某单一模态泄漏声发射信号。

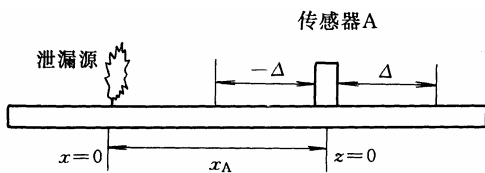


图 2 泄漏声发射信号的模态提取漏模型

1.3 管道泄漏模态声发射定位模型的建立

当 $\gamma = k_n(\omega)$ 时, 利用声发射传感器 A、B 所在位置为中心的时间-空间频谱表达式构造泄漏定位模型^[7](如图 3 所示)

$$\begin{aligned} \int V_A(\omega, \gamma) V_B^*(\omega, \gamma) \exp(-i\beta x) d\omega = \\ \int A_n(\omega) A_n(\omega) \exp[ik_n(\omega)(x_A - x_B)] \exp(-i\beta x) d\omega \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $*$ 表示复共扼。当 $\beta = k_n(\omega)$ 时, 上式在 $x = x_A - x_B = x_0$ 处, 取极大值。极大值对应的位置 x_0 , 即为两声发射传感器与泄漏源距离之差。假设定位试验中, 两个声发射传感器间的距离为 L , 则可以确定泄漏源与传感器 A 之间的距离为

$$x_A = (x_0 + L)/2 \quad (9)$$

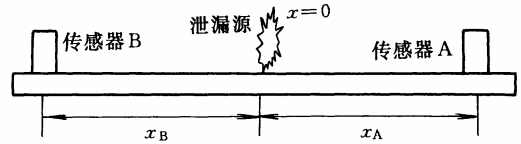


图 3 管道泄漏的模态声发射定位模型

1.4 基于导波理论的管道泄漏声发射定位算法实现

泄漏声发射信号的模态提取算法中, 需要利用接收传感器附近 $\pm\Delta$ 范围内泄漏声发射信号。管道泄漏声发射检测试验过程中, 在如此大空间范围内同时记录泄漏声发射信号是不现实的。将管道中导波传播理论引入管道泄漏声发射定位中, 使得该问题得以解决。

根据结构中导波传播理论, 在已知被研究结构中导波传播特性基础上, 根据空间某一位置处传感器接收的导波波形 $g(t)$, 可以确定导波在时间-空间任意位置 (x, t) 处的传播波形 $u(x, t)$ ^[10]

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{1}{2\pi} \sum_n \int_{-\infty}^{\infty} G(\omega) \exp[i(k_n(\omega)x - \omega t)] d\omega \\ U(x, \omega) &= \sum_n G(\omega) \exp[ik_n(\omega)x] \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $U(x, \omega)$ —— $u(x, t)$ 关于时间的频谱

$G(\omega)$ —— $g(t)$ 的频谱

因此, 若 $g(t)$ 为图 3 中传感器 A 接收到的管道泄漏声发射信号, 则式(5)中 $U(z + x_A, \omega)$ 可以表示为

$$U(z + x_A, \omega) = \sum_n G(\omega) \exp[ik_n(\omega)z] \quad (11)$$

通过对试验管道中导波传播特征进行数值分析, 可以获得管道中导波频散传播特性, 即可以确定管道中各模态导波的波数随频率变化关系 $k_n(\omega)$ 。考虑到实际问题的特点, 上式中的求和项仅取待提取模态导波的波数, 因此可以将求和号去掉

$$U(z + x_A, \omega) = G(\omega) \exp[ik_n(\omega)z] \quad (12)$$

综上所述, 基于导波理论的管道泄漏声发射定位方法可以用图 4 所示流程图表述。

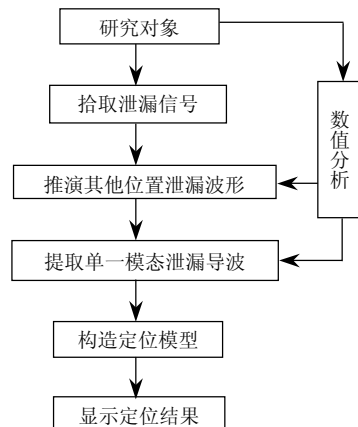


图 4 基于导波理论的管道泄漏声发射定位流程图

2 模态声发射定位算法应用

在试验室内，建立管道泄漏声发射检测试验系统，如图 5 所示。主要包括：待检测管道、PCI-DSP 声发射数字采集板(PAC)、声发射传感器(PAC R15、A3)、前置放大器(PAC 1220A)、滤波器、泵及附件。待检测管道为外径 108 mm，厚度 4.5 mm，长 40 m 的钢管，管道无外包层，由几个支撑架自由支撑。管道内充水，压力从 0~0.5 MPa 可调，泄漏孔直径可以在 0.5~5.0 mm 变化。利用模态声发射技术进行管道泄漏定位试验研究。

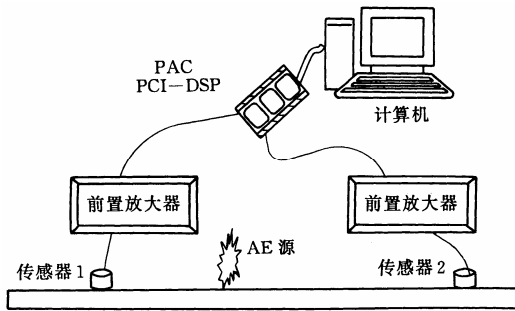


图 5 管道泄漏声发射检测系统

在泄漏孔径为 2 mm，压力为 0.5 MPa，两声发射传感器间距为 37 m 情况下进行声发射泄漏检测试验，图 6 为两传感器接收到的波形及频谱。

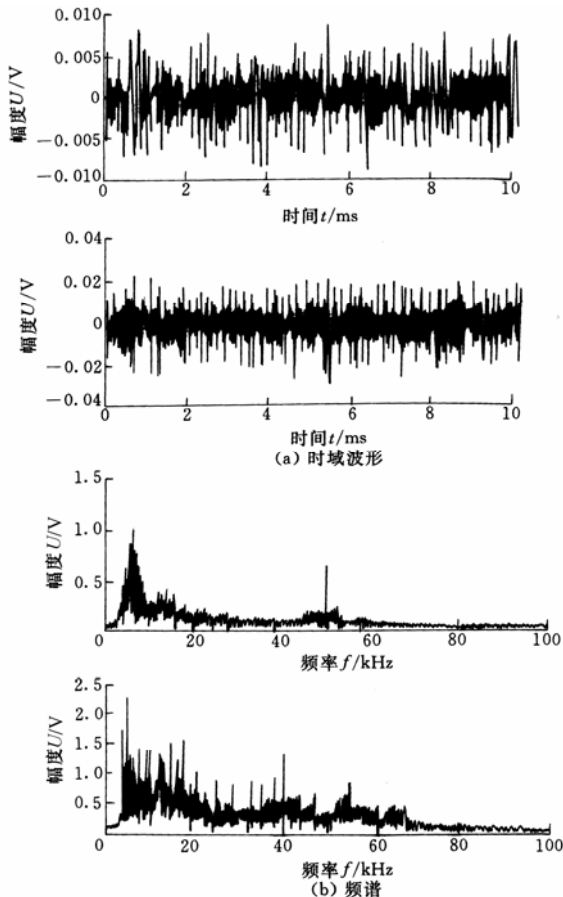


图 6 两声发射传感器接收到的管道泄漏声发射信号

对本试验选用的充水管道的简化模型进行数值分析，得到该管道中导波传播特性曲线，如图 7 所示。可以看出，充水管道中导波传播具有频散和多模态特性，导致利用传统相关分析的方法很难确定泄漏位置。根据充水管道中各模态导波传播的频散、波结构和衰减特性，可以确定出模态声发射泄漏定位中主要的导波模式形式。具体而言，在泄漏声发射信号的主要频段内，选择的导波模式应具有：较小的频散，较大的轴向位移，较小的径向位移和较小的衰减。

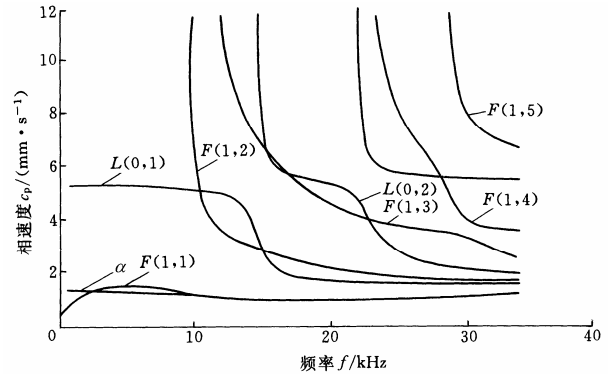


图 7 外径 108 mm、厚度 4.5 mm 充水钢管频散曲线

其中，泄漏声发射信号能量集中的频段主要与管道的材料、内充介质性质(气体或液体及粘稠度等)及压力、漏空的大小及形状等因素相关，该类问题与泄漏声发射信号的产生机理研究相关。

由于泄漏声发射信号属于非对称载荷激励问题，同时考虑到实际管道的长度及各个模式导波的传播特性情况，选定 F(1,1) 模式导波进行泄漏定位。利用模态声发射泄漏定位算法，提取单一的 F(1,1) 模式进行泄漏定位，其结果如图 8 所示。确定两传感器与泄漏源距离差为 20.2 m，利用式(9)确定传感器 A 与泄漏孔的距离为 28.6 m，与实际传感器 A 和泄漏孔距离 28 m 相比，绝对误差为 0.6 m，相对误差为 2.1%。在泄漏孔径为 2 mm、压力为 0.5 MPa

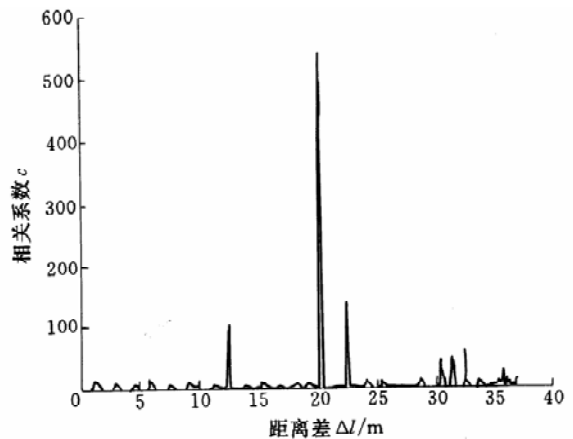


图 8 管道泄漏模态声发射定位结果

情况下,在不同传感器间距下进行模态声发射定位试验,定位结果如表 1 所示。

为了验证定位算法的稳定性,在外径为 159 mm,厚度为 6 mm,长 90.4 m 的钢管上进行气

体泄漏声发射检测试验。在压力为 0.5 MPa,泄漏孔直径为 2 mm 情况下,将两传感器间距保持为 75 m,重复进行声发射泄漏定位试验,结果如表 2 所示。

表 1 40 m 长充水管道泄漏定位结果

序 号	AE 传感器间 距 L/m	两传感器与泄漏孔的 距离差 $\Delta l/m$	试验检测传感器 A 与 漏孔距离 l_A/m	传感器 A 与漏孔实 际距离 l/m	绝对误差 δ/m	相对误差 $\delta/\%$
1	12	5.24	8.62	8	0.62	7.70
2	15	4.50	9.75	9	0.75	8.30
3	18	6.70	12.35	12	0.35	2.90
4	21	6.99	13.99	14	0.01	0.07
5	24	7.68	15.35	16	0.65	4.10
6	27	8.40	17.70	18	0.30	1.67
7	29	12.90	20.95	20	0.95	4.80
8	31	13.30	22.15	22	0.15	0.68
9	33	10.80	21.90	24	2.10	8.75
10	35	23.80	29.40	26	3.40	13.00
11	37	20.20	28.60	28	0.60	2.10
12	39	24.50	31.75	30	1.75	5.80

表 2 90.4 m 长充气管道泄漏定位结果

序 号	AE 传感器间 距 L/m	两传感器与泄漏孔的 距离差 $\Delta l/m$	试验检测传感器 A 与 漏孔距离 l_A/m	传感器 A 与漏孔实 际距离 l/m	绝对误差 δ/m	相对误差 $\delta/\%$
1	75	24.0	49.50	50	0.50	1.0
2	75	24.9	50.35	50	0.35	0.7
3	75	25.8	50.40	50	0.40	0.8
4	75	23.7	49.35	50	0.65	1.3
5	75	20.8	47.90	50	2.10	4.2
6	75	27.0	51.00	50	1.00	2.0
7	75	27.6	51.30	50	1.30	2.6
8	75	26.7	50.85	50	0.85	1.7

3 结 论

根据模态声发射理论,将圆管中导波传播理论应用于管道泄漏的声发射定位试验研究。得出以下结论。

(1) 该方法可以较准确地确定管道泄漏的位置。由表 1 可知,定位误差最大为 13%,绝大多数在 5% 以内。

(2) 该定位方法的稳定性较好。由表 2 可知,8 次重复试验定位误差均在 5% 以内。

(3) 该定位方法可用于充气和充液管道的泄漏定位检测。表 1、表 2 分别为检测充水和充压缩空气管道的泄漏定位结果。

基于导波理论的管道泄漏声发射定位技术较好地解决了泄漏孔位于两传感器之间的泄漏定位问题,但对于泄漏孔位于两传感器外侧的情况下,定位结果为两个传感器之间的距离,因此需要重新调整两传感器的布置位置,直到泄漏孔位于两传感器之间(此时定位结果小于两传感器之间的距离)。

参 考 文 献

- 1 高福庆.管道检测的必要性.管道技术与设备,1998,14(2): 40~42
- 2 陈积懋.管道无损检测和评价技术.石油化工设备技术,1997,18(1): 59~62
- 3 Lee M R, Lee J H. Acoustic emission technique for pipeline leak detection. Key Engineering Materials, 2000,183~187: 887~892
- 4 Miller R K. A reference for the development of acoustic emission pipeline leak detection techniques. NDT&E, 1999,32(1): 1~8
- 5 Amanda M C, Lance E R, Ron R R. Experimental studies on the role of backfill and pipeline characteristics in the application of acoustic leak location to underground pipelines. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,1997,16: 467~473
- 6 Lance E R, Ron R R, Amanda M C. The role of propagation characteristics in acoustic emission pipeline leak location. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation,1998,17: 501~508

- 7 Lance E R, Ron R R, Amanda M C. Dispersion compensation in acoustic emission pipeline leak location. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, 1997, 16: 427~434
- 8 Surgeon M, Wevers M. Modal analysis of acoustic emission signal from CFRP laminates. NDT&E International, 1999, 32: 311~322
- 9 刘松平, Michael G, 陈积懋. 模态声发射检测技术. 无损检测, 2000, 22(1): 38~41
- 10 Wilcox P D. A rapid signal processing technique to remove the effect of dispersion from guided wave signals. IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2003, 50(4): 419~427

NEW TECHNIQUE FOR MODAL ACOUSTIC EMISSION PIPELINE LEAK LOCATION

*Jiao Jingpin He Cunfu Wu Bin Fei Renyuan
(College of Mechanical Engineering & Applied
Electronics Technology, Beijing University of
Technology, Beijing 100022)*

Abstract: Due to the multi modes and dispersion nature of acoustic emission (AE) propagating in pipeline, traditional cross correlation technique do not perform well for acoustic leak location. Based on the theory of modal acoustic emission, the principle of guided waves in pipe is applied to AE leak location, and an acoustic leak model with dispersive multi-mode is developed. With the disperse characteristic of guided waves in pipe, an individual mode is isolated by the time-space analysis of the acoustic leak signals. Further more using the information of the individual mode a new leak location model is brought out. Leak location experiments are conducted to verify the validity of the location technique. It is indicated that the acoustic leak location model is practical and effective to locate the leak both of the liquid and gas.

Key words: Pipeline Leak location
Modal acoustic emission
Guided waves Disperse

作者简介: 焦敬品, 女, 1973 年出生, 讲师, 博士研究生。主要研究领域为利用超声导波和声发射技术对管道缺陷进行检测。

E-mail: jiaojp@bjut.edu.cn



(上接第 76 页)

*(State Key Laboratory of Fluid Power Transmission
and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027)*

*Deng Yaowen Wu Huimin
(Commercial Vehicle Research & Development
Center, Dongfeng Motor Co., Ltd., Shiyao 442001)*

Abstract: A kind of truck as the researched object, mensurated the front axle's fatigue characteristic curve, and it's load-time history when truck is running on the proving ground enhancement roads, mountainous roads and tar-paved roads, obtained the distributing function of loads by means of rain-flow counting met-hod and statistical theory. According to

the fatigue characteristic curve and routine loads spectrums of each roads, calculated the front axle's fatigue life respectively, taking advantage of amended Miner linear accumulated fatigue damage theory, obtained the enhancement coefficients of each roads by comparative norm of tar-paved roads. Provided an important foundation for precisely evaluating automotive reliability and establishing a reasonable principle of automotive reliability enhancement test.

Key words: Automobile Reliability test
Enhancement coefficient

作者简介: 郭虎, 男, 1971 年出生, 高级工程师, 硕士。主要研究方向为汽车可靠性工程

E-mail: guohoo@163.com