



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20200211

基于 MVDR 近场聚焦波束形成的管道缺陷声源定位

贾笑云, 王秀清, 胡 烨

(天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

摘要: 针对管道缺陷声源特点,采用传感器阵列直接获取声发射信号,以最小方差无畸变响应(MVDR)近场聚焦波束形成方法为理论依据,对管道缺陷声源信号进行识别和分析.对单声源进行仿真分析,研究阵元间距、阵元数、声源半径以及声源信号频率参数对声场分布强度的影响,并对轴向、周向以及整体定位误差进行分析.仿真结果表明:频率处于100 kHz以上时,误差逐渐趋于平缓,误差值在0.5附近;阵元数处于10以上时,误差值较小,为0.157;阵元间距超过0.85 m时,误差上升趋势较大;声源半径在1.5~4 m范围内,误差呈下降趋势.因此,当声源信号频率越高、阵元间距越小、阵元数越多以及声源半径越大时,声场分布强度就越高,定位误差就越小,声源识别效果也越好.

关键词: 声发射信号; 传感器阵列; 最小方差无畸变响应; 近场聚焦波束形成; 声源识别

中图分类号: TE832

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2021)06-0037-07

Sound Source Localization of Pipeline Defects Based on MVDR Near-Field Focused Beamforming

JIA Xiaoyun, WANG Xiuqing, HU Ye

(College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science & Technology,
Tianjin 300222, China)

Abstract: According to the characteristics of the sound source of pipeline defects, the sensor array was used to directly obtain the acoustic emission signal, and the minimum variance distortion response (MVDR) near-field focused beam forming method was used as the theoretical basis to identify and analyze the sound source signal of the pipeline defect. For single sound source the simulation analysis was carried out, and the influence of the parameters such as the distance between the array elements, the number of the array elements, the sound source radius and the sound source frequency on the sound field distribution intensity was studied, and the axial, circumferential and overall positioning errors were analyzed. The simulation results showed that when the frequency was above 100 kHz, the error gradually tended to be flat, and the error value was about 0.5; when the number of array elements was above 10, the error value was small which is about 0.157; when the array element spacing was more than 0.85 m, the error rose more; the sound source radius was within the range of 1.5~4 m, and the error showed a downward trend. Therefore, when the sound source frequency is higher, the array element spacing is smaller, the number of array elements is bigger and the radius of sound source is larger, the intensity of the sound field distribution is higher, the positioning error is smaller, and the sound source recognition effect is better.

Key words: acoustic emission signal; sensor array; minimum variance distortionless response; near-field focused beamforming; sound source identification

波束形成 (beamforming, BF) 方法^[1]是一种基于传声器阵列测量的噪声源识别技术.它是由多个传感器按照空间位置进行固定,形成阵列采集和处理声

源信号,进而获取声场分布情况^[2],被广泛应用于各个领域^[3],受到研究人员的关注^[4].聚焦波束形成方法,可以满足近场声源的需求,其中常规近场聚焦波

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2021-06-22

作者简介: 贾笑云 (1994—), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生; 通信作者: 王秀清, 教授, lwxqly@163.com

束形成可以有效解决大尺寸、复杂系统的噪声源定位问题,具有良好的宽容性和易操作性. 最小方差无畸变响应^[5](minimum variance distortionless response, MVDR)聚焦波束形成方法是一种能超越瑞利限的高分辨近场定位算法,与常规的聚焦波束相比较,其参数设置更加广,也同样适用于大尺寸、中高频的噪声源近场定位.

对于波束形成方法, Kook 等^[6]将最大似然估计法运用在运动目标定位上,利用近场聚焦波束形成,得到汽车表面噪声源分布图. 王建新^[7]将传感器阵列与波束形成相结合识别噪声源位置. 毕杨等^[8]通过聚焦方法对波束形成算法进行优化,进而获得了更好的波束形成效果. 张书仙等^[9]将数字波束形成技术应用于单站测控系统中,实现了对多目标的测控效果. 韩闯等^[10]建立水平柱面测量模型,实现柱面声源分辨定位. 陈欢等^[11]提出了 MVDR 近场聚焦波束形成识别算法,估计水下噪声源的相对强度. 目前,该方法大多数情况都被用于对噪声源进行定位分析,在管道缺陷识别领域应用较少.

管道缺陷定位的方法包括声波方法和基于机理模型的方法等. 郎宪明等^[12]提出采用超声波声速变化量的定位方法,对管道泄漏点进行定位. 郑晓亮等^[13]提出线性阵列两步定位方法对管道泄漏位置进行定位分析. 针对 MVDR 近场聚焦波束形成方法对于管道柱面声源的识别较少且都是基于空间直角坐标系的方式,为了更直观评价识别距离和角度误差,本文将 MVDR 近场聚焦波束形成方法进行改进,将空间直角坐标系转化为 (z, θ) 的形式,分别对轴向和周向进行声源识别定位. 建立管道柱面模型,对声源点和阵元之间的距离进行理论推导,经过仿真分析,得到 MVDR 近场聚焦波束形成方法的声场分布强度图以及三维空间图,并分析声源信号频率、声源半径、阵元数以及阵元间距等因素对声场分布强度的影响. 对轴向和周向识别定位偏差进行分析,给出可以对管道缺陷声源位置进行识别定位的最佳参数范围.

1 柱面 MVDR 近场聚焦波束形成方法

1.1 实验模型

大多数管道呈圆柱体状态,故选取水平柱面实验模型. 将管道缺陷的声发射信号当作点声源,以管道中心为原点建立空间直角坐标系 (x, y, z) . 其中,设 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta$, 可将坐标位置转换为 (z, θ) , r 为圆柱半径.

如图 1 所示, $R_0 = a$ 代表管道柱面半径,声源点位置为 $M(z, \theta)$, z 表示距离中心原点的横向距离, θ 表示点 M 在 x - y 平面的投影到 x 轴的角度值,以此坐标建立柱面模型.

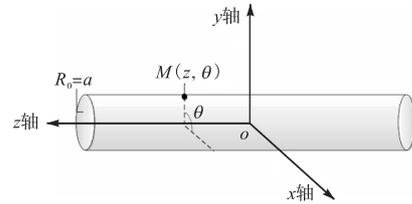


图 1 实验模型

Fig. 1 Experimental model

1.2 基本原理

假设声源点 I 空间坐标为 (x_i, y_i, z_i) , 阵元 n 的空间坐标为 (x_n, y_n, z_n) , 则声源点 I 与阵元 n 之间的距离可以表示为

$$R_{ni} = [(x_i - x_n)^2 + (y_i - y_n)^2 + (z_i - z_n)^2]^{1/2} \quad (1)$$

假设 $x_i = r \cos \theta_i, y_i = r \sin \theta_i$, 则声源点 I 空间坐标可以表示为 (z_i, θ_i) , 阵元 n 空间坐标可以表示为 (z_n, θ_n) , 则声源点与阵元之间的距离最终可以表示为

$$R_{ni} = [2r^2(1 - \cos(\theta_i - \theta_n)) + (z_i - z_n)^2]^{1/2} \quad (2)$$

假设 $p_1(T)$ 表示柱面测量面上第 I 个信号源, 沿 z 轴方向传播的某单位幅度声发射信号 $p_1(T)$ 可以表示为

$$p_1(T) = 2 \cos(\Delta kz - \Delta fT) \exp(-i(k(f_0)z - f_0T)) \quad (3)$$

则阵元接收的声发射信号可以表示为

$$P(T) = a(z, \theta) A(z, \theta) p_1(T) + n_1 \quad (4)$$

其中:

$$a(z, \theta) = \begin{bmatrix} 1/R_{11} & 1/R_{12} & \cdots & 1/R_{1N} \\ 1/R_{21} & 1/R_{22} & \cdots & 1/R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/R_{r1} & 1/R_{r2} & \cdots & 1/R_{rN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A(z, \theta) = \begin{bmatrix} \exp(-jkR_{11}) & \exp(-jkR_{12}) & \cdots & \exp(-jkR_{1r}) \\ \exp(-jkR_{21}) & \exp(-jkR_{22}) & \cdots & \exp(-jkR_{2r}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(-jkR_{N1}) & \exp(-jkR_{N2}) & \cdots & \exp(-jkR_{Nr}) \end{bmatrix} \quad (6)$$

k 为波数, $k = 2\pi f/c$; f 为声源信号频率; c 为声速; n_1 为引入的随机噪声.

在柱面坐标系建立的约束条件为

$$\min w^H F w \text{ Subject to } w^H b(z, \theta) / r_0(z, \theta) \quad (7)$$

构造协方差矩阵 $F = E(P(T)P(T)^H)$, 采用拉格朗日构造函数

$$G = w^H(z, \theta) F w(z, \theta) + u(w^H(z, \theta) - 1) \quad (8)$$

对式(8)取微分并令其为0, u 为常数,则

$$w = u F^{-1} \mathbf{b}(z, \theta) / r_0(z, \theta) \quad (9)$$

其中: $\mathbf{b}(z, \theta)$ 代表扫描面上的相对补偿向量, $r_0(z, \theta)$ 代表扫描面上归一化幅度补偿向量。

$$r_0(z, \theta) = [r_1 \ r_2 \ \cdots \ r_N] \sum_{n=1}^N 1/r_n \quad (10)$$

其中 r_n 表示扫描点到阵元的距离。

MVDR近场聚焦波束形成空间谱可以表示为

$$Q = 1 / \left(\left(\frac{\mathbf{b}(z, \theta)}{r_0(z, \theta)} \right)^H F^{-1} \frac{\mathbf{b}(z, \theta)}{r_0(z, \theta)} \right)^2 \quad (11)$$

在不考虑幅度补偿的情况下, MVDR近场聚焦波束形成空间谱形式^[11]可以表达为

$$Q = 1 / (\mathbf{b}(z, \theta)^H F^{-1} \mathbf{b}(z, \theta))^2 \quad (12)$$

柱面MVDR近场聚焦波束形成算法的具体实现过程:首先,建立柱面坐标模型,假设声源点坐标位置,将空间直角坐标转化为 (z, θ) 形式,通过一系列的理论推导,给出声源点与阵元之间距离的理论表达式;然后,根据声源信号频率、声速、波数等相关信息,通过理论推导计算获取某单位幅度的声发射信号值,再根据式(3)、式(5)、式(6)确定阵列所接收的声发射信号;最后,构造式(4)的协方差矩阵,并对所构造的拉格朗日函数取微分,最终得到只考虑相位补偿的空间谱。求得柱面上目标声源的空间分布位置以及声场分布强度,进而实现对目标声源的识别与定位。

2 仿真与分析

2.1 仿真流程

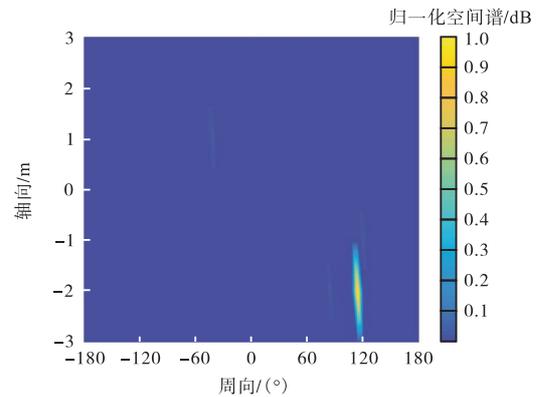
对管道缺陷目标声源定位时,采用MVDR近场聚焦波束形成方法进行模拟仿真。模拟仿真主要分为以下4个阶段:(1)对声发射信号波形的获取,现有的方法是给一个激励获取声发射信号波形,本文是使用传感器阵列直接获取声发射信号;(2)将获取波形的峰值频率均值、幅值、平均频率均值、中心频率均值等参数进行分析处理;(3)由于MVDR近场聚焦波束形成算法中阵元间距、阵元数、声源半径以及声源信号频率等参数会对声源分辨效果产生影响,因此进行大量的仿真实验,以确定最佳仿真参数;(4)确定目标声源位置,得到声场分布图、三维空间图。

2.2 声源仿真

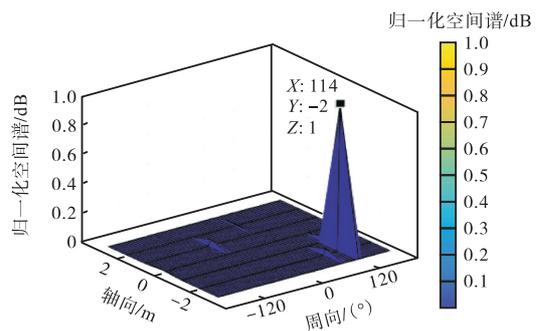
管道缺陷声源的声发射信号所处的频段范围较宽,考虑到低频段易受噪声影响,一般选取高频的超

声信号。本文选取的管道材质为钢管材料,管道壁厚根据燃气管道壁厚进行选择,壁厚约为5 mm,选取超声信号进行仿真,以此获得合理的实验参数,仿真中管道所处环境噪声较少。通过调整阵元间距、阵元数、声源信号频率以及声源半径,寻求最佳仿真效果时的仿真参数。实验中选取声源信号频率60~200 kHz,声速5 200 m/s,管道长度(L)6 m。

假设声源位置在 $(-2, 60^\circ)$ 、频率 $f=60$ kHz、阵元数 $N=20$ 、阵元间距 $d=0.32$ m、声源半径 $R_0=1.5$ m的点,对声源进行仿真分析,取信噪比为20的高斯白噪声作为背景噪声。声场分布图、三维空间图如图2所示。由图2可知:声场分布较强的位置为 $(-2, 114^\circ)$,轴向声源识别位置较为准确,但周向声源识别位置相差 54° ,相差较大,因此无法识别声源点位置。



(a) 声场分布图



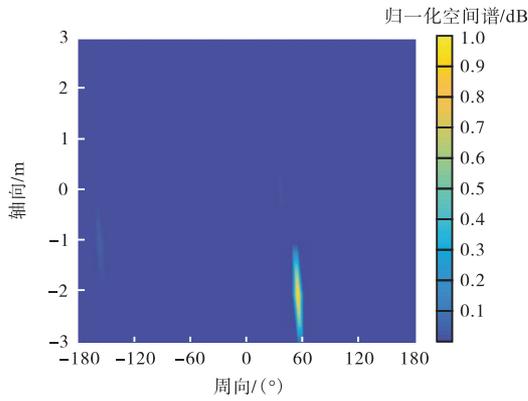
(b) 三维空间图

图2 $f=60$ kHz、 $N=20$ 、 $d=0.32$ m、 $R_0=1.5$ m的声场分布图和三维空间图

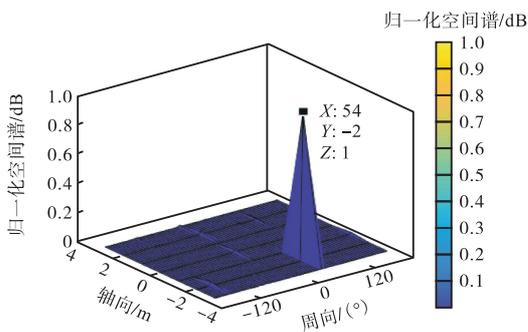
Fig. 2 Sound field distribution diagram and three-dimensional space diagram with $f=60$ kHz, $N=20$, $d=0.32$ m, $R_0=1.5$ m

放宽参数,选取频率 $f=150$ kHz,其他参数不变,其声场分布图、三维空间图如图3所示。由图3可知:声场分布较强的位置为 $(-2, 54^\circ)$,轴向声源识

别位置为准确值,周向声源识别位置相差 6° ,对于此次仿真周长为 9.42 m 的管道而言相差较小,可忽略不计,因此可以识别声源点位置;与图 2 相比,增大声源信号频率,周向声源识别的位置误差也随之减小,提高了整体的识别精度.



(a) 声场分布图



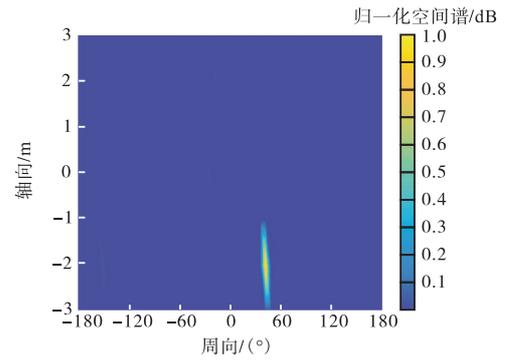
(b) 三维空间图

图 3 $f = 150\text{ kHz}$ 、 $N = 20$ 、 $d = 0.32\text{ m}$ 、 $R_0 = 1.5\text{ m}$ 的声场分布图和三维空间图

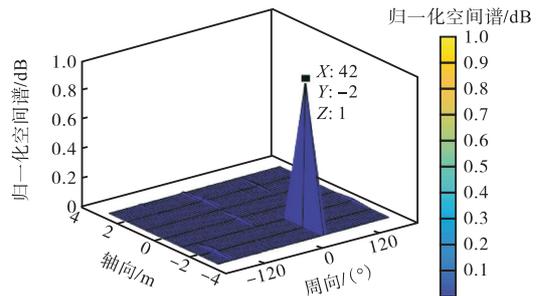
Fig. 3 Sound field distribution diagram and three-dimensional space diagram with $f = 150\text{ kHz}$, $N = 20$, $d = 0.32\text{ m}$, $R_0 = 1.5\text{ m}$

改变参数,选取频率 $f = 150\text{ kHz}$ 、阵元数 $N = 8$ 、阵元间距 $d = 0.86\text{ m}$,其他参数不变,其声场分布和三维空间图如图 4 所示.由图 4 可知:声场分布较强的位置为 $(-2, 42^\circ)$.轴向声源识别位置为准确值,周向声源识别位置相差 18° ;与图 3 相对比,减少了阵元数,周向声源识别的位置误差也随之增大,降低了识别精度.

改变参数,选取频率 $f = 150\text{ kHz}$ 、阵元数 $N = 8$ 、阵元间距 $d = 0.86\text{ m}$ 、声源半径 $R_0 = 3\text{ m}$,其声场分布图、三维空间图如图 5 所示.由图 5 可知:声场分布较强的声源点位置为 $(-2, 54^\circ)$,轴向声源识别位置为准确值,周向声源识别位置相差 6° ;与图 4 相对比,增大声源半径,周向声源识别的位置误差也随之变小,提高了识别精度.



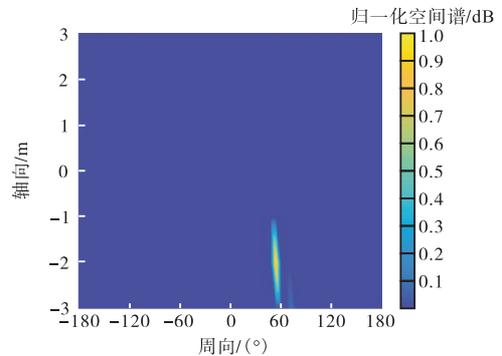
(a) 声场分布图



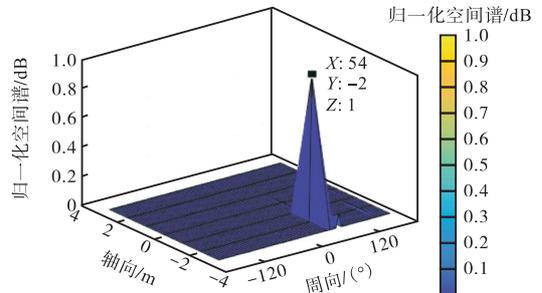
(b) 三维空间图

图 4 $f = 150\text{ kHz}$ 、 $N = 8$ 、 $d = 0.86\text{ m}$ 、 $R_0 = 1.5\text{ m}$ 的声场分布图和三维空间图

Fig. 4 Sound field distribution diagram and three-dimensional space diagram with $f = 150\text{ kHz}$, $N = 8$, $d = 0.86\text{ m}$, $R_0 = 1.5\text{ m}$



(a) 声场分布图



(b) 三维空间图

图 5 $f = 150\text{ kHz}$ 、 $N = 8$ 、 $d = 0.86\text{ m}$ 、 $R_0 = 3\text{ m}$ 的声场分布图和三维空间图

Fig. 5 Sound field distribution diagram and three-dimensional space diagram with $f = 150\text{ kHz}$, $N = 8$, $d = 0.86\text{ m}$, $R_0 = 3\text{ m}$

3 定位误差分析

假设实际声源值坐标为 $M(z, \theta)$, 使用 MVDR 近场聚焦波束形成算法获取的坐标为 $M_1(z_1, \theta_1)$, 定位误差为 D , 则定位误差分析如图 6 所示。

整体的声源定位误差为

$$D = \left\{ 2r^2 \left[1 - \cos(\theta - \theta_1) + (z - z_1)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (13)$$

轴向和周向的定位误差^[5]为

$$DE(Z) = E(Z_1) - Z = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N Z_i - Z \quad (14)$$

$$DE(\theta) = E(\theta_1) - \theta = 1/N \cdot \sum_{i=1}^N \theta_i - \theta \quad (15)$$

参数取值一致的情况下, 在频率范围 60 ~ 200 kHz 内采用 MVDR 近场聚焦波束形成方法进行仿真实验, 不同频率下的定位误差如图 7 所示。

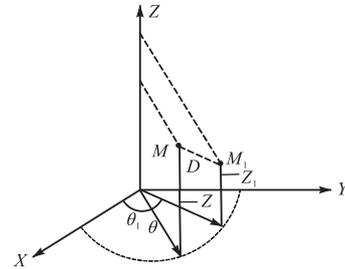


图 6 误差分析图

Fig. 6 Error analysis chart

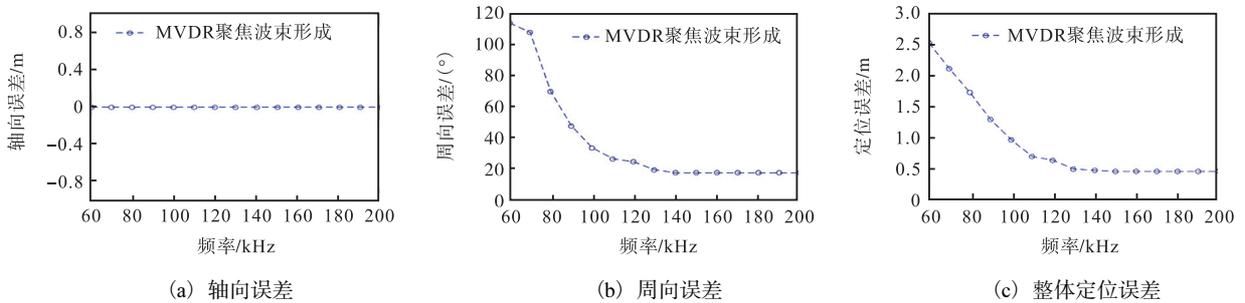


图 7 不同频率下的定位误差

Fig. 7 Positioning errors at different frequencies

参数取值一致的情况下, 在阵元数 5 ~ 20 范围内采用 MVDR 近场聚焦波束形成方法进行仿真实验, 不同阵元数下的定位误差如图 8 所示。

参数取值一致的情况下, 在声源半径范围 1.5 ~ 4 m 内采用 MVDR 近场聚焦波束形成方法进行仿真实验, 不同声源半径下的定位误差如图 9 所示。

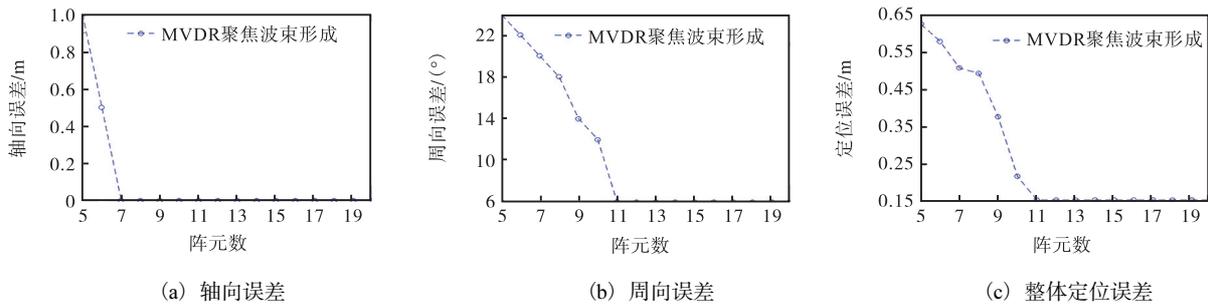


图 8 不同阵元数下的定位误差

Fig. 8 Positioning errors under different numbers of array elements

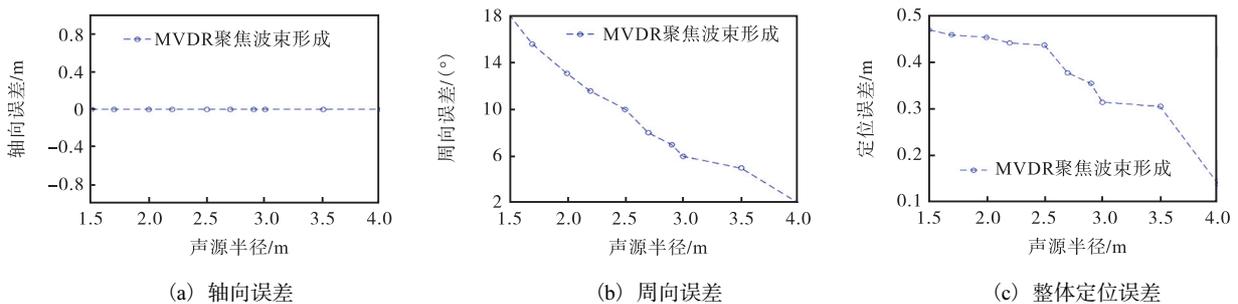


图 9 不同声源半径下的定位误差

Fig. 9 Positioning errors under different sound source radiuses

参数取值一致的情况下,在阵元间距范围 0.32 ~ 1 m 内采用 MVDR 近场聚焦波束形成方法进行仿真实验,不同阵元间距下的定位误差如图 10 所示.

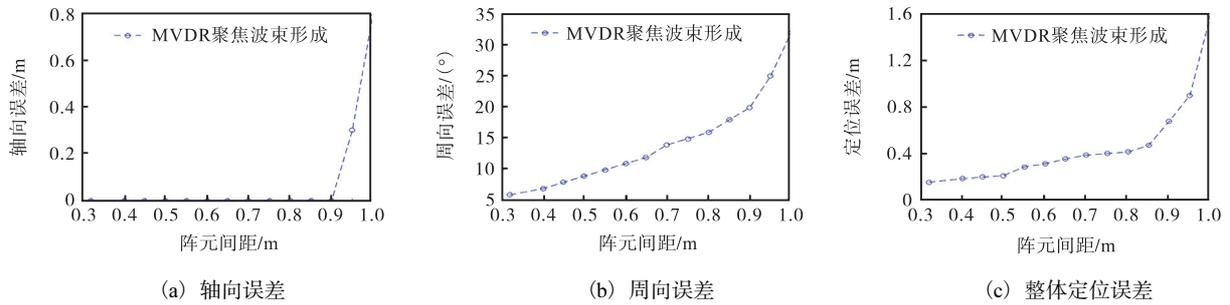


图 10 不同阵元间距下的定位误差

Fig. 10 Positioning errors under different array element spacing

基于上述仿真情况,在声源信号频率 60 ~ 200 kHz、阵元数 5 ~ 20、声源半径 1.5 ~ 4 m、阵元间距 0.32 ~ 1 m 范围内进行大量仿真实验,部分仿真结果统计见表 1.

由表 1 以及定位误差图可知:随着声源信号频率、声源半径的增加、阵元间距的减少和阵元数的增加,整体定位误差会越来越小,声源识别效果也会越

来越好.当选取阵元间距较小时,虽然分辨效果越来越好,但也使得实际工程操作难度大大增加.因此,在实际测量过程中,在对声源分辨结果没有造成影响的情况下,应最大程度地降低测量精度,综合考虑声源信号频率、声源半径、阵元数、阵元间距的取值范围和实际可操作性以及经济实用性.

表 1 仿真结果

Tab. 1 Simulation results

分组	f/kHz	R_0/m	d/m	L/m	N	D/m	$DE(Z)/\text{m}$	$DE(\theta)/(^{\circ})$
1	60	1.5	0.32	6	20	1.362	0	54
2	150	1.5	0.86	6	8	0.469	0	18
3	150	3.0	0.86	6	8	0.314	0	12
4	150	4.0	0.86	6	8	0.105	0	6
5	150	1.5	0.60	6	11	0.157	0	6
6	150	1.5	0.32	6	20	0.157	0	6
7	200	1.5	0.86	6	8	0.469	0	6
8	200	3.0	0.86	6	8	0	0	0
9	200	1.5	0.32	6	20	0	0	0

4 构建声发射定位实验系统

声发射采集定位实验实际连接图见图 11.

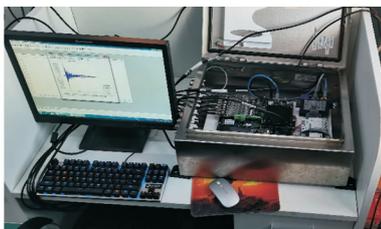


图 11 声发射采集定位实验实际连接图

Fig. 11 Actual connection diagram of acoustic emission acquisition and positioning experiment

将声发射传感器阵列按一定布局布置到管道上,

声发射信号通过信号处理模块传输到总线控制器,通过 PCLE 总线传递到 CPU 主板上,将信号传输到上位机进行定位分析和显示,获取管道缺陷位置.

考虑到实验条件,选取长为 1500 mm、直径为 35 mm 的竖状暖气管道,按 8 个测量点进行实验.上位机 AEwin 软件获取的定位结果如图 12 所示.图 12 中红色点位置(0.4916 mm, 898.8 mm, 13.61 mm)为声源点位置.

将参数导入 MVDR 近场聚焦波束形成声源定位软件得到的声源定位结果如图 13 所示.由图 13 可知定位出声源位置在(900 mm, 90°)位置,通过坐标转换,得到声源点位置约在(0 mm, 900 mm, 17.5 mm).与图 12 声源定位结果相对比,误差不大,因此可以说明两者定位效果相符,表明声源定位方法

可行.

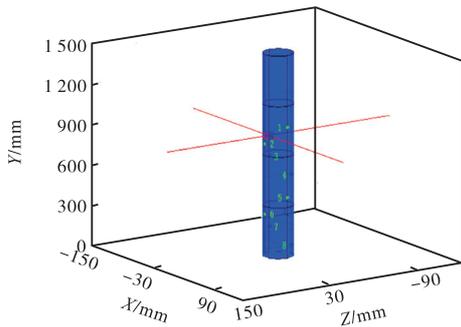


图 12 AEwin 声源定位图

Fig. 12 Location map of AEwin sound source

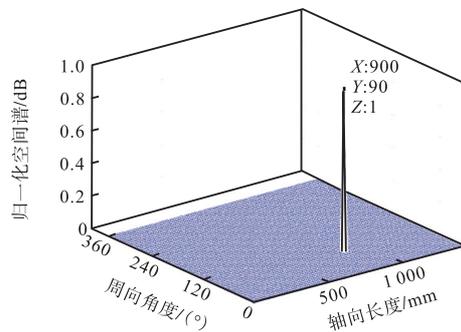


图 13 MVDR 声源定位图

Fig. 13 Location map of MVDR sound source

5 结 语

运用 MVDR 近场聚焦波束形成方法,研究柱面管道缺陷声发射信号源识别仿真及影响声源分辨效果的测量参数,寻求最佳的声源识别仿真效果.结果表明:频率处于 100 kHz 以上时,误差逐渐趋于平缓,误差值在 0.5 附近;阵元数处于 10 以上时,误差值较小,为 0.157;阵元间距超过 0.85 m 时,误差上升趋势较大;声源半径在 1.5 ~ 4 m 范围内,误差呈下降趋势.当声源信号频率越高、阵元间距越小、阵元数越多以及声源半径越大时,声场分布强度就越高,定位误差就越小,声源识别效果也越好.因此,可将 MVDR 近场聚焦波束形成技术推广应用于大型油气管道或者大型储罐缺陷声源的检测,从而实现管道

或储罐缺陷位置的声源识别与定位,以达到提前预防泄漏的效果.

参考文献:

- [1] DOUGHERTY R P. Noise source imaging by beamforming[EB/OL]. [2020-12-09]. <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2008-36-0518/>.
- [2] 郭庆. 波束形成和近场声全息方法在发动机噪声源识别上的应用[D]. 长沙:湖南大学,2017.
- [3] MICHEL U. History of acoustic beamforming[EB/OL]. [2020-12-09]. <https://www.mendeley.com/catalogue/4d46a493-5bbd-355a-a970-478b4947c9a4/>.
- [4] 褚志刚,杨洋,蒋忠翰. 波束形成传声器阵列性能研究[J]. 传感技术学报,2011,24(5):665-670.
- [5] 吴亚军. MVDR 波束形成在噪声源识别中的应用[J]. 鱼雷技术,2011,19(2):101-103.
- [6] KOOK H, MOEDS G B, DAVIES P, et al. An efficient procedure for visualizing the sound field radiated by vehicles during standardized passby tests[J]. Journal of sound and vibratin, 2000, 233(1):137-156.
- [7] 王建新. 基于波束形成的噪声源深度定位技术[D]. 昆明:昆明理工大学,2019.
- [8] 毕杨,王英民,王奇. 宽带聚焦波束形成算法优化[J]. 电子测量与仪器学报,2016,30(6):951-958.
- [9] 张书仙,李璐,潘点飞. 基于数字波束形成的多目标测控[J]. 国外电子测量技术,2014,33(8):73-77.
- [10] 韩闯,于树华,时胜国,等. 基于水平阵的柱面声源高分辨时反聚焦定位方法[J]. 振动与冲击,2015,34(22):92-97.
- [11] 陈欢,何良,杨德森,等. 基于幅度补偿的 MVDR 水下噪声源近场定位识别方法研究[J]. 振动与冲击,2012,31(2):51-54.
- [12] 郎宪明,郭颖,高文帅,等. 基于超声波声速的流体管道泄漏点定位方法[J]. 信息与控制,2020,49(5):546-551.
- [13] 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.

责任编辑:郎婧