

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508189

用于海底输气管道微泄漏检测的声学成像 仪器及性能研究*

蒋晓斌^{1,2,3} 刘海超^{1,2,3} 罗懿^{1,2,3} 曲杰^{1,2,3}

(1. 天津市海底管道重点实验室 天津 300451; 2. 海油发展海底管道安全服役保障技术重点实验室 天津 300451;
3. 中海油(天津)管道工程技术有限公司 天津 300451)

摘要:海底输气管道微泄漏检测对海洋工程安全至关重要。声学成像仪器是实现海底输气管道微泄漏检测的重要手段,然而传统技术在复杂浅水环境中检测精度不足,难以早期识别微泄漏。为此,设计了一种基于多波束前视声学成像技术的高精度的水下声学成像仪器,通过在回波域利用回波与混响、回波与噪声之间统计特性的差异实现回波与干扰信号的分离,进而从回波域获取管道以及泄漏区域的强度特征。仪器可利用回波域和图像域的融合处理,实现微泄漏的检测,并根据气泡程度和泄漏速度估计泄漏量。实验结果表明,设计和研制的声学成像仪器能够判断气泡密集程度,检测出气泡微泄漏并对微泄漏位置定位。对于存在射流状态,压力为 3 MPa,泄漏孔径为 0.5 mm,微泄漏量远小于 0.5% 的情况,仪器能够在 10 m 距离处进行清晰检测。在海底管道及水下生产系统微泄漏检测领域具有较大的潜在应用。

关键词: 海底管道;微泄漏检测;声学成像;仪器研发

中图分类号: O427.4;TN958.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40;140.20

Study on acoustic imaging device and its performance for detecting micro-leakage of submarine gas pipeline

Jiang Xiaobin^{1,2,3} Liu Haichao^{1,2,3} Luo Yi^{1,2,3} Qu Jie^{1,2,3}

(1. Tianjin Key Laboratory of Submarine Pipeline, Tianjin 300451, China; 2. CNOOC Energy Technology & Services Limited Key Laboratory of Safety Service Guarantee Technology for Submarine Pipelines, Tianjin 300451, China;
3. CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd., Tianjin 300451, China)

Abstract: Micro leakage detection of subsea gas pipelines is crucial for the safety of marine engineering. Acoustic imaging instruments are an important means of detecting micro leaks in underwater gas pipelines. However, traditional techniques have insufficient detection accuracy in complex shallow water environments, making it difficult to identify micro leaks early. Therefore, this article designs a high-precision underwater acoustic imaging instrument based on multi beam forward-looking acoustic imaging technology. By utilizing the statistical differences between echo and reverberation, echo and noise in the echo domain, the separation of echo and interference signals is achieved, and the intensity characteristics of pipelines and leakage areas are obtained from the echo domain. This instrument can use the fusion processing of echo domain and image domain to detect micro leaks, and estimate the leakage amount based on the degree of bubbles and leakage speed. The experimental results show that the designed and developed acoustic imaging instrument can determine the density of bubbles, detect micro leaks of bubbles, and locate the location of micro leaks. For situations where there is a jet state, the pressure is 3 MPa, the leakage aperture is 0.5 mm, and the micro leakage amount is much less than 0.5%, this instrument can perform clear detection at a distance of 10 m. It has great potential applications in the field of micro leak detection in submarine pipelines and underwater production systems.

Keywords: offshore pipeline; micro-leakage detection; acoustic imaging technology; research and development

0 引言

海底管道担负着海洋油气资源的输送重任,海底管道一旦发生泄漏,如未能及时发现并采取相应措施,势必造成巨大的经济损失,同时对人身安全以及海洋生态环境产生严重的威胁。常规的管道泄漏监测技术,诸如参数计算法、次声波法以及光纤法等难以实现微泄漏情况的检测^[1-2]。

近年来,水下声学成像目标识别技术呈现多元化发展态势。在气体泄漏监测方面,蒲定等^[3]通过多波束数据特征分析构建了气泡团声学特征分离模型,有效提升了气态目标的辨识精度。Shahrestani 等^[4]针对水下持续监测需求,研发的自适应声呐图像解析框架实现了动态环境下的目标持续追踪功能。马亮等^[5]提出一种基于变分模态分解(VMD)和极限学习机(ELM)的管道微小泄漏工况识别的方法,有效解决管道泄漏信号难以从复杂背景噪声中分离以及微小泄漏特征提取困难的问题。在目标特征识别方面,Jeonghwe 等^[6]建立了基于几何拓扑分析的前视声呐识别系统,通过三维轮廓匹配实现水下物体的自动化辨识。Williams^[7]开发的自主式声呐图像解析系统突破性地实现了无监督条件下的目标定位与分类协同处理,为深海探测提供了新的技术路径。

然而,现有技术仍存在不足。瞬态泄漏事件产生的微弱声学特征可能低于常规成像系统的检测阈值,这仍是当前水下探测领域需要突破的技术瓶颈。针对这一问题,本文深入研究了多波束前视声呐的高分辨率高清晰度成像技术,设计了一种高精度的水下声学成像仪器^[8],用于对海底管道及微泄漏小气泡现象进行清晰成像。对于浅水复杂海洋环境,在回波域利用回波与混响、回波与噪声之间统计特性的差异实现回波与干扰信号的分离,从回波域获取管道以及泄漏区域的强度特征^[9]。进一步在图像域对微泄漏的可疑区域提取特征,包括尺度特征、强度特征以及形态特征等。通过回波域和图像域的融合处理,实现微泄漏的检测,并根据气泡程度和泄漏速度估计泄漏量。该研究为海底管道微泄漏监测提供了新的技术方法,具有重要的实际意义和创新价值。

1 声学成像仪器设计

海底输气管道微泄漏检测装置前视声呐系统由换能器、电子舱、处理机组成。换能器与电子舱可安装在水下无人设备或水面船只上,工作时通过数据传输网络将信息发送至处理终端,实现实时处理和显示功能。

1.1 换能器基阵设计

发射阵由一个垂直相控阵和一个水平弧形阵组成;

接收阵为水平多波束接收阵。

相控发射声基阵垂直方向为多路相控线列阵,其声场可看作由多路基元声场按一定的幅度和相位叠加而成。由乘积定理,相控发射阵垂直指向性计算式如下:

$$D(\theta) = \left[\sin\left(\frac{\pi a \sin\theta}{\lambda}\right) / \frac{\pi a \sin\theta}{\lambda} \right] \cdot \left[\sin\left(N \frac{\pi d \sin(\theta_s - \theta)}{\lambda}\right) / N \sin\left(\frac{\pi d \sin(\theta_s - \theta)}{\lambda}\right) \right] \quad (1)$$

式中:左端为单个基元的指向性, a 为基元垂直方向尺度;右端为基元数(N)个等间距点源的指向性; d 为基元垂直方向的中心距; θ_s 为波束相控角。

综合考虑波束覆盖范围及声源级要求,弧形发射声基阵水平方向为多条陶瓷基元拼接成的圆弧形,其水平指向性按多路线段基元辐射声压进行叠加计算。

当辐射面弧半径取 70 mm、圆心角取 90°时,弧形阵水平指向性如图 1 所示,-3 dB 开角为 92.9°。弧形发射阵垂直方向的指向性为线段指向性。

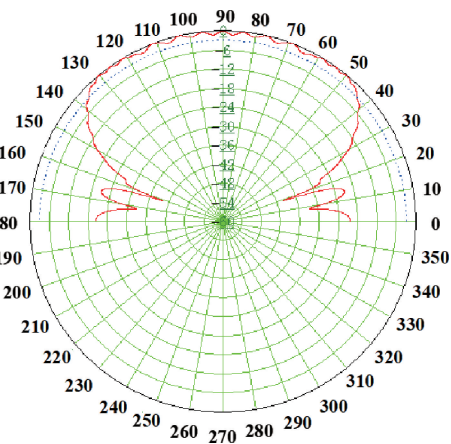


图1 弧形发射阵水平指向性图

Fig. 1 Horizontal directivity diagram of arc-shaped launch array

当垂直方向上换能器单元的有效长度 L 取 5.5 mm 时,弧形发射阵垂直指向性图如图 2 所示,其中 -3 dB 开角为 15.2°,第一旁瓣级为 -13 dB。

弧形发射阵基元同样采用发射型 P4 陶瓷材料。由于大半径薄壁圆弧形陶瓷较难一次成型,所以采用多路陶瓷条在水平方向拼接成弧的设计方案。按工作频率 700 kHz、水平方向 64 路基元设计,每路基元尺寸约为 5.5 mm×1.2 mm×1.8 mm。

为实现水平多波束接收,接收声基阵采用水平相控线列阵结构,水平方向共排布 96 路基元,垂直方向为 1 路基元。其指向性计算方式同发射阵。当 L 取 5.5 mm 时,接收阵垂直指向性如图 3 所示,其中 -3 dB 开角为 15.2°,第一旁瓣级为 -13 dB。

当 N 取 96、 a 取 0.8 mm、 d 取 0.9 mm,相控角分别取

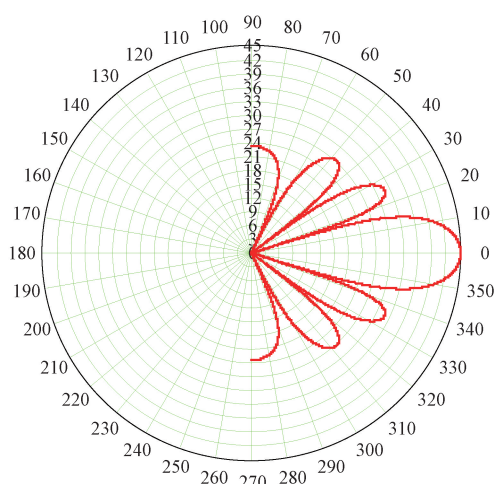


图 2 弧形发射阵垂直指向性图

Fig. 2 Vertical directivity diagram of arc-shaped launch array

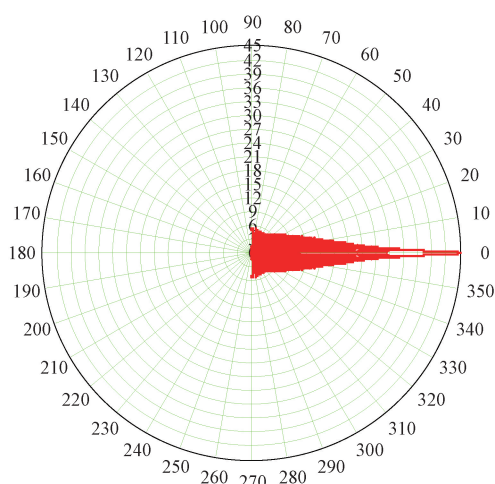


图 4 接收阵水平指向性图

Fig. 4 Horizontal directivity map of receiving array

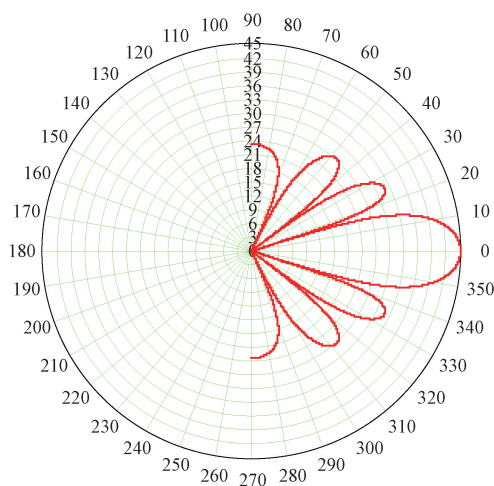


图 3 接收阵垂直指向性图

Fig. 3 Vertical directivity diagram of receiving array

0°时,接收阵水平指向性图如图 4 所示,其中主瓣宽度为 1°。

接收基元采用接收性能较为优异的 P5 陶瓷材料,并采用机电转换效率较高的纵向振动模式。按工作频率 700 kHz、垂直方向 96 路基元设计,每路基元尺寸约为 5.5 mm×0.9 mm×2.2 mm。

前视声呐的换能器设计为薄型圆盘,其顶部配置了 3 个声基阵,而圆盘的后端则通过密封圈与电子舱实现机械连接。

1.2 电子舱设计

电子舱主要完成声呐信号发射、信号接收、信号采集和预处理和网络通信等功能。主要组成部分包括前放模块、调理模块、信号处理模块、发射模块和电源模块。

前放模块主要功能是对 64 通道接收通道进行 20 dB

的固定增益放大。调理模块具备带通滤波和可编程增益调节功能,能够对输入模拟信号进行放大和滤波处理,使其达到适合后续信号处理板采集的标准。信号处理板是基于高速模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)+现场可编程门阵列(field-programmable gate array, FPGA)+高级精简指令集机器(advanced reduced instruction set machine, ARM)架构的通用多通道高速数据采集模块,可以实现 1 路发射驱动信号的生成、接收机增益曲线控制、1 路接收信号的高速采集和处理、大容量数据的本地存储和实时传输、本地存储数据的快速读取、千兆以太网通信等功能。发射模块运用了高效的 D 类全桥电路设计,具备独立的全桥输出功能。该模块对发射信号源生成的信号进行功率放大,并通过匹配网络驱动换能器。电源模块负责将直流电源(direct current, DC)转换为适合各功能模块板卡使用的二次转换电源。

1.3 处理机设计

处理机主要模块包括网络模块、文件回放模块、数据处理模块、图像处理模块、声图显示模块、管线检测模块、微泄漏检测模块、管线及微泄漏状态显示模块等。

网络模块包括网络连接的初始化、网络连接、网络接收线程、接收缓冲区的初始化、网络发送、网络的断开等功能。文件回放模块包括数据文件的打开、数据文件读取线程、文件读取的开始、停止、暂停、加速减速等功能。声呐数据处理模块包括实时工作线程、回放线程、结束线程等线程的创建和初始化,数据包的解析、声呐数据的存储以及界面设置与各线程的交互等功能。图像处理模块封装了波束数据转换、灰度映射、生成位图数据等功能。声图显示模块实现的功能包括调色板的映射、绘制声图、标尺刻度的绘制等。管线检测模块通过分析声呐波束数据检测管线位置,并基于多信息融合处理,实现对管线跟

踪和危险状态分析。微泄漏检测模块,通过分析声呐数据检测微泄漏状态是否存在并实现微泄漏位置定位。管线及微泄漏状态显示模块基于增强现实(augmented reality, AR)技术等,在高分辨率清晰度图像基础上显示检测结果。

2 海底输气管道微泄漏检测方法

2.1 高分辨率成像算法

海底输气管道微泄漏监测系统能够捕捉到泄漏气泡产生的反射信号,进而对采集的输气管道微泄漏气泡数据采用近场动态聚焦技术和脉冲压缩技术进行高分辨率成像^[10]。脉冲压缩的过程公式如下:

$$z_n(t) = s_n(t) * h(t) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (2)$$

$$h(t) = s_o^*(-t) \quad (3)$$

式中: $s_n(t)$ 为第 n 个接收通道的微泄漏回波信号; $h(t)$ 为匹配滤波器系数; $s_o(-t)$ 为声呐系统的发射信号; $*$ 为共轭运算; N 为接收通道数目; $z_n(t)$ 为匹配滤波的输出。

近场动态聚焦过程公式如下:

$$Y(t) = W^H Z(t) \quad (4)$$

式中: W 为加权系数,与距离和角度有关; $Z(t)$ 为所有接收通道的匹配滤波输出矢量; $Y(t)$ 是输出的波束域数据。

所获取的图像通过中值滤波技术进行了降噪处理,以便更好地突出微泄漏气泡的细节。处理后的声呐图像中,假设只剩下气泡的回波信号。

为了确定微泄漏气泡的动态检测阈值,对所获取的所有微泄漏气泡图像进行了图像区域的特征提取,并对气泡图像进行了平均值计算和数据统计分析^[11]。

$$T_d = \beta E\{Y(t)\} \quad (5)$$

式中: $E\{g\}$ 为求均值; β 为检测门限系数; T_d 为动态幅度检测门限。

通过门限检测方法,可以识别出潜在泄漏位置。针对这些疑似泄漏区域,通过计算能量参数并进行监测,可以确定海底管道是否发生泄漏以及泄漏的具体量级。最后,结合声呐成像技术,能够实现泄漏点的精确定位。

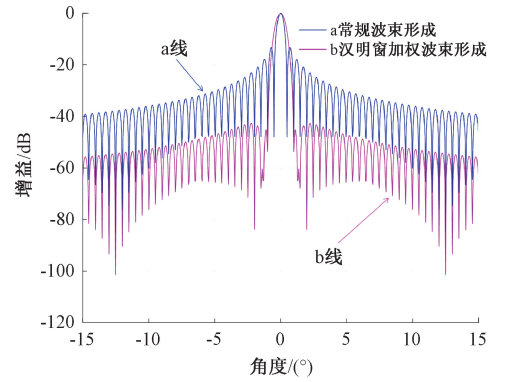
$$P_d = \sum_{k=1}^K |\hat{Y}(k)|^2 \quad (6)$$

式中: $\hat{Y}(k)$ 为过动态幅度门限的泄漏监测处的数值; K 为过动态幅度门限的泄漏监测点数目; P_d 是动态能量检测门限。

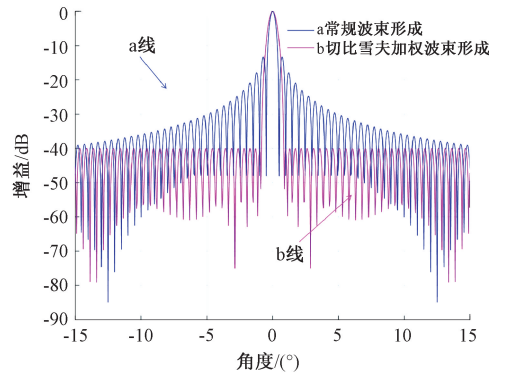
通过结合门限值和泄漏能量特性,可以实现对海底管道泄漏的准确检测和定位。

对于高频图像声呐而言,目标强度与背景噪声强度形成较高的对比度,高对比度的图像有利于目标的准确检测。图像的角度向高对比度,拟采用线性加权降低波束域旁瓣,提高图像的波束域高对比度^[12]。常用的线性

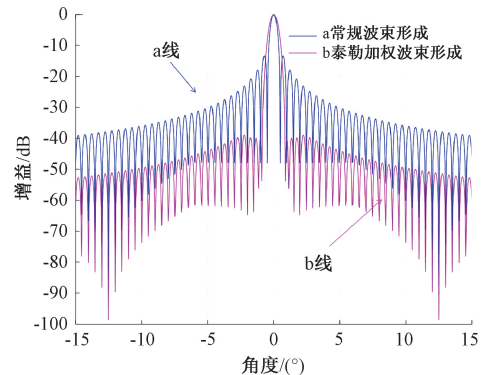
加权,主要包括汉明窗加权^[13]、可以自适应调节的泰勒窗加权^[14]和旁瓣水平一致的切比雪夫窗加权^[15]等,能够实现波束域低旁瓣,改善图像的对比图。线性加权波束图对比如图5所示。由图5可知,采用常规预成接收多波束形成声图,其声图中目标附近的高旁瓣对目标检测造成影响,而切比雪夫线性加权,能够获得低副瓣声图,目标与水体背景形成较高的对比度,有利于水下小目标的检测。



(a) 汉明窗加权波束对比
(a) Hamming window weighted beam comparison



(b) 切比雪夫加权波束对比
(b) Chebyshev weighted beamforming comparison



(c) 泰勒加权波束对比
(c) Taylor weighted beamforming comparison

图5 线性加权波束图对比

Fig. 5 Linear weighted beamforming comparison

假设存在一个目标点,其位于(0°, 10 m),进行距离

向高分辨率高清晰度成像,距离向分辨率仿真结果如图 6 所示。从图 6 可以看出声图距离向分辨率为 0.018 m。

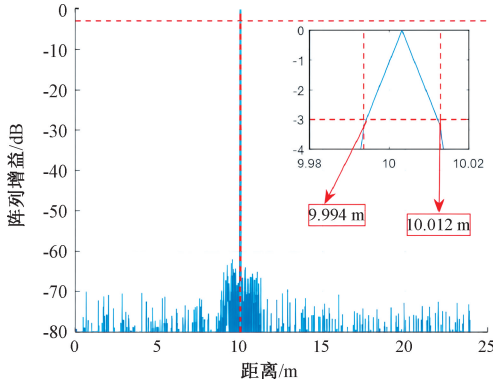


图 6 距离向分辨率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of distance resolution

为优化高频成像声呐的空间感知能力,其接收阵列采用了多传感器协同工作机制。通过阵列信号处理系统中的定向波束合成算法,该技术能够实现空间选择性信号增强,在预设方位形成能量聚焦的辐射模式。这种智能化的空域调控机制实质上构建了具有方向选择性的空间传递函数,通过调整各阵元信号的相位和幅值关系,可在抑制非目标区域回波干扰的同时,有效增强指定探测方向的声学响应特性^[16-17]。该技术突破传统全向接收的物理限制,赋予声呐系统类似光学透镜的电磁波空间域调控能力。

本文采用盲解卷积去模糊算法^[18]对波束形成后的波束域数据进行处理,获得更加精细的声图。盲解卷积算法是高精度成像算法中核心的一步。

假设源信号为 $s(x)$, 水下声信道冲激响应为 $h(y|x)$, 噪声为 $n(y)$, 则阵列接收信号为:

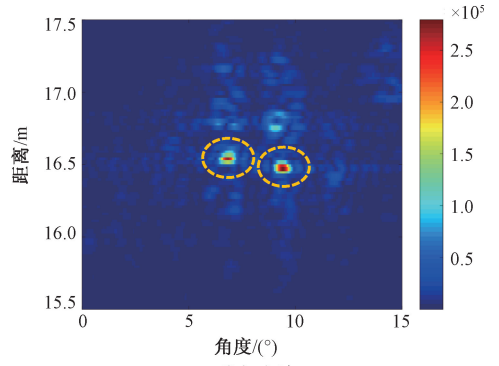
$$r(y) = h(y|x) \times s(x) + n(y) \quad (7)$$

其中, $s_i(x)$ 为第 i 轮复原的图像; $h(y|x)$ 为退化函数; $r(y)$ 为退化图像, 如果图像各区域模糊函数相同, 迭代公式可以进一步化简为:

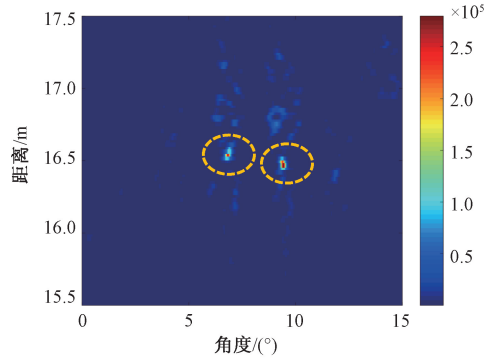
$$s_{i+1}(x) = s_i(x) \left[\frac{r(y)}{s_i(x) \times h(y|x)} \times h(-y|x) \right] \quad (8)$$

常规波束成像方法和高分辨率高清晰度成像方法试验对比如图 7 所示。其中, 模型为均匀线性阵列, 目标为点源。在成 k 声呐中, 利用波束域高分辨成像方法, 不仅能够实现高分辨率成像的功能, 而且能够实现低旁瓣成像的功能, 大大地优化了系统成像的性能, 并降低了信号处理算法的复杂度。

假设存在一个目标点, 其位于 $(0.1^\circ, 10 \text{ m})$, 进行距离向高分辨率高清晰度成像, 仿真结果如图 8 所示。角度向分辨率仿真结果如图 9 所示, 声图角度向分辨率约为 0.2° 。



(a) 常规方法
(a) Conventional method



(b) 高分辨率高清晰度成像方法
(b) High resolution and high definition imaging methods

图 7 成像方法对比

Fig. 7 Comparison of imaging methods

2.2 基于高频高分辨率前视成像声呐的检测定位方法

采用基于高频高分辨率前视成像声呐的检测定位方法具体步骤如下^[19]:

1) 采用自主式水下航行器集成前扫高频声学成像系统, 通过采集海底输运管道细微渗漏的声学回波信号, 运用常规波束赋形法构建 M 通道的多波束观测域。在此基础上引入超分辨信号处理技术对波束域数据进行增强处理, 有效提升泄漏气液混合物的成像清晰度。

2) 针对超分辨处理后的波束域数据实施网格化分割, 其空间划分基准依据泄漏气泡的弥散特征确定。设定各子单元方位维度延展量为 L_1 , 对应划分数量为 H_1 ; 径向维度跨度值为 L_2 , 分块总量为 H_2 。通过计算各网格单元内声学反射强度的统计平均值, 定位气泡聚集区(对应统计峰值区域), 并将统计峰值与预设系数相乘生成动态判别阈值。

$$P_{i,j} = \frac{1}{N_{L1}N_{L2}} \sum_{j=0}^{N_{L2}} \sum_{i=0}^{N_{L1}} B_f(i,j) \quad (9)$$

$$C = \eta \max(P_{i,j}) \quad (10)$$

式中: $B_f(i,j)$ 是第 (i,j) 点的波束域幅值; N_{L1} 表示每块区域方位向长度为 L_1 对应的波束数目; N_{L2} 表示每块区域距离向长度距离向长度为 L_2 对应的采样点数目; η 为一

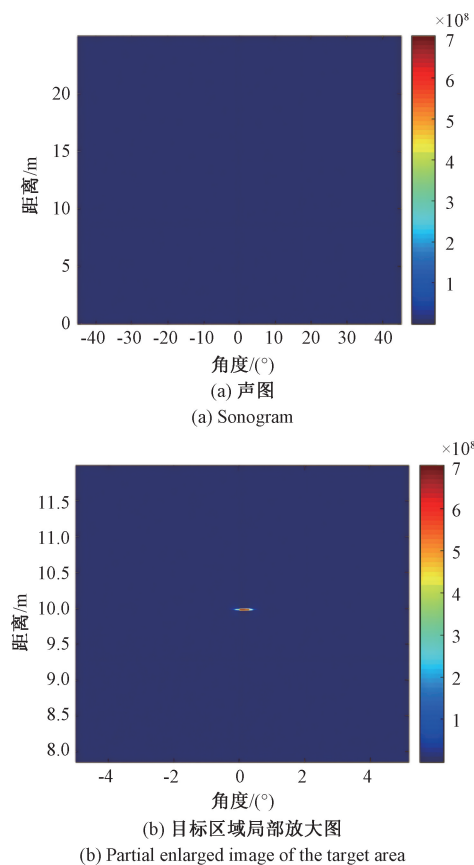


图8 声图仿真结果

Fig. 8 Soundwave simulation result chart

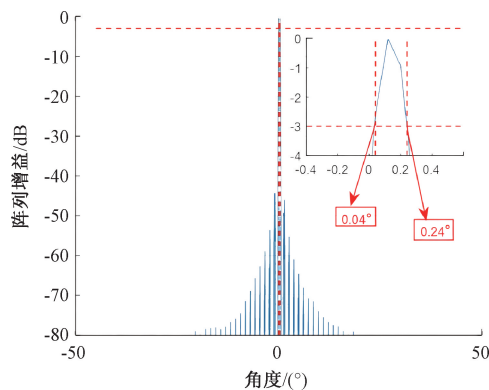


图9 角度向分辨率仿真结果

Fig. 9 Simulation results of angular resolution

常数,其目的在于调整门限阈值。

3) 利用步骤2) 计算得到的动态判别阈值,对疑似微泄漏气泡进行定位分析,并通过空间聚集特征剔除离散噪声信号。

$$|r(j) - \tilde{r}| < \mu L2 \quad (11)$$

式中: \tilde{r} 是步骤2) 超过自适应门限阈值检测点的距离

向均值, μ 为比例系数。

4) 在步骤3) 中,针对已剔除离散噪声信号的潜在微泄漏气泡点,进一步施加区域特征限制。依据前视声呐对微泄漏探测的特性,将这些气泡点限定在特定的矩形区域内,并根据该区域内气泡的聚集程度,完成对海底输气管道微泄漏的识别。

$$\begin{cases} |\theta(i) - \bar{\theta}| < L1 \\ |r(j) - \bar{r}| < L2 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\theta(i)$ 为疑似微泄漏气泡检测点的方位向值; $\bar{\theta}$ 为步骤3) 剔除离散噪声信号疑似微泄漏气泡检测点的方位向均值; $r(j)$ 为疑似微泄漏气泡检测点的距离向值; \bar{r} 为步骤3) 剔除离散噪声信号的疑似微泄漏气泡检测点的距离向均值。

当 Mc 值超过预设的区域气泡密集度阈值时,判定该区域存在管道微泄漏,并输出微泄漏矩形框的中心坐标 (θ_0, r_0) 。其中, Mc 代表满足式(10) 条件的潜在微泄漏气泡检测点的数据量。

5) 结合水下无人潜器的经纬度数据,利用步骤4) 中获取的微泄漏矩形区域的方位值和距离值 (θ_0, r_0) , 在地球坐标系中完成海底输气管道的定位。

$$long2 = long1 + r_0 \cdot \sin\theta_0 / [\gamma \cdot \cos(lat1) \cdot 2\pi/360] \quad (13)$$

$$lat2 = lat1 + r_0 \cdot \cos\theta_0 / (\gamma \cdot 2\pi/360) \quad (14)$$

式中: $(long1, lat1)$ 为载体的经纬度, $(long2, lat2)$ 为海底管道微泄漏位置的经纬度; γ 是地球的平均半径。

为了进一步改善成像质量,采用中值滤波的非线性空间域滤波方法对移位后的图像进行滤波处理,如图10所示。

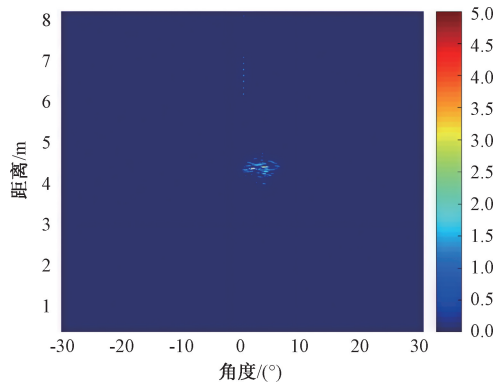


图10 微泄漏中值滤波后声图

Fig. 10 Microleakage median filtered acoustic image

背景混响抑制后的图像如图11所示。在微泄漏探测过程中,相比于背景噪声混响,微泄漏属于运动目标,背景混响抑制算法利用微泄漏相对于背景混响属于运动目标的性质,依据背景不变而运动目标改变进行目标识别。

别,从而抑制背景混响^[20]。

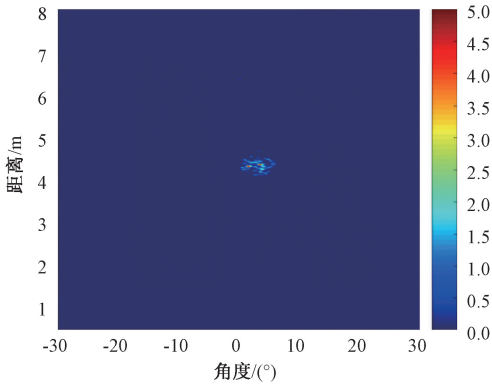


图 11 微泄漏背景差分后声图
Fig. 11 Micro leakage background differential acoustic image

3 性能测试

3.1 实验条件

在水池进行了管道微泄漏探测试验,所采用的消声水池长 50 m,宽 15 m,深 10 m。在消声水池,进行了侧视声呐距离分辨率和水平角度分辨率的测试。

海底输气管道模拟微泄漏试验仪器由试验管段、进气口、泄放口、电磁阀、法兰、支座、吊耳以及管路组成。

采用频率为 900 kHz 的高频前视声呐探测钢管微泄漏,进行海底输气管道消声水池模拟试验,试验布局如图 12 所示。前视声呐布放于水下约 3 m,输气管道布放于水下约 4 m,管道的直径为 33.33 cm,管道的泄漏孔直径为 0.5、1 mm,管道内压力为 3 MPa。

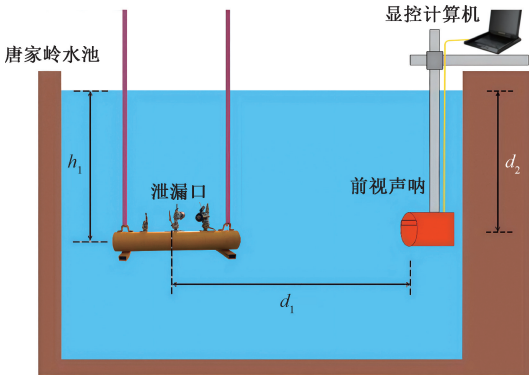


图 12 试验布局图
Fig. 12 Experimental layout diagram

海底输气管道泄漏检测实验实物如图 13 所示。

3.2 实验结果

对实验数据逐帧处理,其中一帧数据的微泄漏声呐

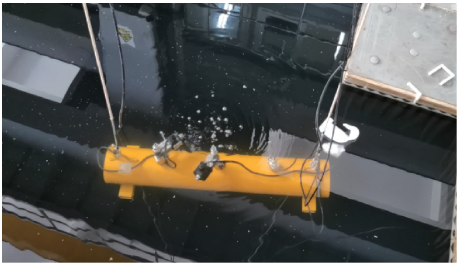


图 13 海底输气管道泄漏检测实验实物
Fig. 13 Physical picture of leak detection experiment for submarine gas pipeline

图像和微泄漏检测定位结果如图 14、15 所示,其中 * 为检测出的疑似微泄漏气泡,矩形框为泄漏定位区域。

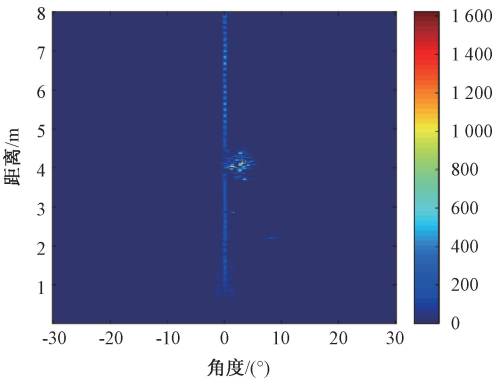


图 14 海底输气管道微泄漏声呐图像
Fig. 14 Sonar images of micro leaks in subsea gas pipelines

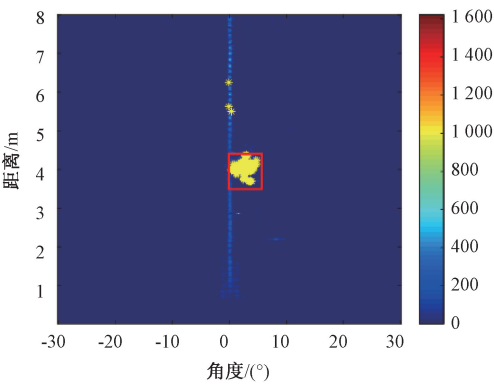
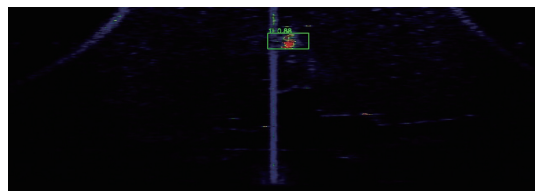


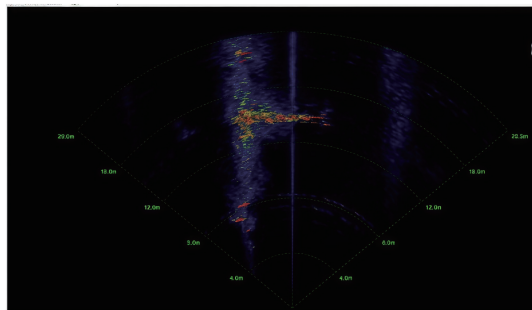
图 15 海底输气管道微泄漏检测定位结果
Fig. 15 Detection and positioning results of micro leaks in subsea gas pipelines

微泄漏高分辨率高清晰度成像(水池试验)如图 16 所示。从方位-距离图中直接获得检测距离。结果表明,在海底输气管道微泄漏为射流状态,压力 3 MPa 的条件下,当泄漏孔径为 0.5 mm、微泄漏量远小于 0.5% 时,探测距离为 13 m 处可清晰检测;当漏孔径为 1 mm、微泄漏

量小于 0.5% 时,探测距离为 18 m 处可清晰检测。



(a) 3 MPa, 0.5 mm 孔
(a) 3 MPa, 0.5 mm hole



(b) 3 MPa, 1 mm 孔
(b) 3 MPa, 1 mm hole

图 16 微泄漏高分辨率高清晰度成像(水池试验)

Fig. 16 Micro leakage high-resolution and high-definition imaging (water tank test)

4 结 论

为提升海底管道微泄漏检测精度,本文深入研究多波束前视声纳的高分辨率成像技术,设计并研制了一种高精度的水下声学成像仪器,用于海底管道及微泄漏小气泡的清晰成像。并通过试验探究了前视声纳仪器的性能及在微泄漏检测中的应用。

实验结果表明,所设计的海底输气管道微泄漏检测仪器在实验水池环境下,对于 0.5 mm 泄漏孔径,在 10 m 距离能够进行清晰检测,可用于海底输气管道泄漏的检测和定位。该仪器具有性能优异、成本低廉、适用于水下生产设施并实现原位监测等优点,为海底管道泄漏监测领域带来了新的技术突破,有望在实际海洋工程中得到广泛应用和推广。后续将进一步优化仪器性能,拓展其不同海洋环境下的适用性,并探索其在更多水下监测场景中的应用潜力。

参考文献

- [1] 蒋晓斌,张晓灵,闫化云,等. 海底管道泄漏监测系统可行性分析[J]. 石油工程建设,2017,43(1):76-79.
JIANG X B, ZHANG X L, YAN H Y, et al. Feasibility analysis of subsea pipeline leakage monitoring system[J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(1): 76-79.
- [2] 吴希明,李江丰,严谨,等. 海底油气管道泄漏检测与

定位技术研究进展[J]. 石油工程建设,2022,48(3):1-7.

WU X M, LI J F, YAN J, et al. Research progress on leak detection and localization technologies for submarine oil and gas pipelines [J]. Petroleum Engineering Construction, 2022, 48(3): 1-7.

- [3] 蒲定,张万远,郭骏,等. 水中气体目标的多波束声呐成像与检测算法[J]. 应用科技,2017,44(5):12-16.

PU D, ZHANG W Y, GUO J, et al. Multibeam sonar imaging and detection algorithms for gaseous targets in water [J]. Applied Science and Technology, 2017, 44(5): 12-16.

- [4] SHAHRESTANI S, BI H, LYUBCHICH V, et al. Detecting a nearshore fish parade using the adaptive resolution imaging sonar (ARIS): An automated procedure for data analysis [J]. Fisheries Research, 2017, 191(1): 190-199.

- [5] 马亮,安腾飞,刘文黎,等. 基于声信号的给水管微小泄漏检测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(12):113-123.

MA L, AN T F, LIU W L, et al. Research on micro-leakage detection technology in water supply pipes based on acoustic signals [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12): 113-123.

- [6] JEONGHWE G, JUHYUN P. A method for automatic detection of underwater objects using forward-looking imaging sonar [J]. Oceans 2015-MTS/IEEE Washington, 2015.

- [7] DAVID P. WILLIAMS. Fast target detection in synthetic aperture sonar imagery: A new algorithm and large-scale performance analysis [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(1): 71-92.

- [8] 张延厚,王超,张奇,等. 水声目标探测和识别融合技术发展综述[J]. 信号处理,2023,39(10):1711-1722.

ZHANG Y H, WANG CH, ZHANG Q, et al. Review on the development of fusion technologies for underwater acoustic target detection and identification [J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(10): 1711-1722.

- [9] SEONGHUN H. A robust underwater object detection method using forward-looking sonar images [J]. Remote Sensing Letters, 2023, 14(5): 442-449.

- [10] KASETKASEM T, TIPSUWAN Y, TULSOOK S, et al. A pipeline extraction algorithm for forward-looking sonar images using the self-organizing map [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2020(99): 1-15.

- [11] ZHANG T D, LIU S W, HE X, et al. Underwater target tracking using forward-looking sonar for autonomous underwater vehicles [J]. Sensors, 2019, 20(1): 102.

- [12] HENSON B T, ZAKHAROV Y V. Attitude-trajectory estimation for forward-looking multibeam sonar based on acoustic image registration [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2019, 44(3): 753-766.
- [13] 陈阳, 田波, 王春阳, 等. 基于 MVDR 波束形成的 FDA 平台外干扰抑制[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(1): 32-40.
CHEN Y, TIAN B, WANG CH Y, et al. Out-of-platform interference suppression of FDA platform based on MVDR beamforming [J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(1): 32-40.
- [14] 刘咏, 顾力伟, 韩光威. 基于 Matlab 仿真的窗函数阵列加权性能分析[J]. 舰船电子对抗, 2021, 44(1): 75-81.
LIU Y, GU L W, HAN G W. Performance analysis of window function array weighting based on matlab simulation [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2021, 44(1): 75-81.
- [15] 孙仲民, 黄俊, 杨健维, 等. 基于切比雪夫窗的电力系统谐波/间谐波高精度分析方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 117-123.
SUN ZH M, HUANG J, YANG J W, et al. High-precision analysis method for harmonics/inter-harmonics in power systems based on chebyshev window [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 117-123.
- [16] 孙显彬, 郑轶, 于非. 基于多源信息融合的浅海超低频声源目标探测关键技术及实现[J]. 海洋科学, 2019, 43(1): 95-100.
SUN X B, ZHENG Y, YU F. Key technologies and implementation of shallow water ultra-low frequency sound source target detection based on multi-source information fusion [J]. Marine Sciences, 2019, 43(1): 95-100.
- [17] 刘东涛, 卢术平. 基于声场环境知识的多基地声呐检测跟踪算法[J]. 声学及电子工程, 2022(3): 12-15, 33.
LIU D T, LU SH P. Multi base sonar detection and tracking algorithm based on acoustic environment knowledge [J]. Acoustics and Electronics Engineering, 2022(3): 12-15, 33.
- [18] 韦祥, 李本威, 赵勇, 等. 卷积混合的频域盲解卷积法诊断转子故障[J]. 噪声与振动控制, 2015, 35(1): 219-224.
WEI X, LI B W, ZHAO Y, et al. Rotor fault diagnosis using frequency-domain blind deconvolution method for convolutional mixture [J]. Noise and Vibration Control, 2015, 35(1): 219-224.
- [19] 蒋晓斌, 罗懿, 王晓东, 等. 前视声呐成像设备的海底输气管道微泄漏检测系统及方法: 中国, CN116557794A[P]. 2023-08-08: 7-8.
JIANG X B, LUO Y, WANG X D, et al. Micro leakage detection system and method for underwater gas pipelines using forward-looking sonar imaging equipment: China, CN116557794A[P]. 2023-08-08: 7-8.
- [20] 朱甜甜, 周正干, 周文彬, 等. 曲面构件阵列超声频域逆时偏移成像方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 156-165.
ZHU T T, ZHOU ZH G, ZHOU W B, et al. Research on reverse time migration imaging method for curved component array in ultrasonic frequency domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 156-165.

作者简介



蒋晓斌(通信作者), 2002 年于西安石油学院获得学士学位, 2006 年于西安石油大学获得硕士学位, 现为中海油(天津)管道工程技术有限公司海底管道重点实验室负责人, 高级工程师, 主要研究方向为海底管道评估评价及监检测。

E-mail: jiangxb3@cnoc.com.cn

Jiang Xiaobin (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Xi'an Petroleum Institute in 2002, M. Sc. degree from Xi'an Shiyou University in 2006. Now he is the head and senior engineer of the Key Laboratory of Submarine Pipeline Engineering Technology Co., Ltd. of CNOOC (Tianjin) Pipeline Engineering Technology Co., Ltd. His main research interests include the evaluation and monitoring of submarine pipelines.