

引用格式: 张万远, 卞红雨, 周天, 等. 基于多波束测深声呐的海底气体泄漏实时报警系统[J]. 声学技术, 2022, 41(6): 813-820. [ZHANG Wanyuan, BIAN Hongyu, ZHOU Tian, et al. A real-time alarm system for subsea gas leakage based on multi-beam bathymetric sonar[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(6): 813-820.] DOI: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2022.06.004

# 基于多波束测深声呐的海底气体泄漏实时报警系统

张万远<sup>1,2,3</sup>, 卞红雨<sup>1,2,3</sup>, 周天<sup>1,2,3</sup>, 张宏伟<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 水声技术重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150001;

2. 海洋信息获取与安全工信部重点实验室(哈尔滨工程大学), 黑龙江哈尔滨 150001;

3. 哈尔滨工程大学水声工程学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 4. 天津大学机械工程学院, 天津市 300072)

**摘要:** 随着人们对海底油气资源的开发, 在海底铺设的管道越来越多, 海底管道泄漏风险日益增加, 亟需高效、实时的检测方法。文章利用自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)平台, 搭载多波束测深声呐与基于VxWorks的嵌入式处理单元, 设计了一套水下气体泄漏自动检测系统, 将多波束测深声呐采集的水体图像数据传送给嵌入式处理单元, 采用模板匹配方法对图像数据进行处理, 完成对海底管道气体泄漏点的实时检测。湖试和海试都验证了该系统方案的有效性与先进性。

**关键词:** 水下泄漏气体; 实时图像处理; 多波束测深声呐; 自主式水下航行器(AUV)

中图分类号: P715.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3630(2022)-06-0813-08

## A real-time alarm system for subsea gas leakage based on multi-beam bathymetric sonar

ZHANG Wanyuan<sup>1,2,3</sup>, BIAN Hongyu<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Tian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Hongwei<sup>4</sup>

(1. Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Marine Information Acquisition and Security, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

3. College of Underwater Acoustic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, Heilongjiang, China;

4. College of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** With the development of undersea oil and gas resources, more and more subsea pipelines have been laid on the seabed. There are also a large number of offshore pipelines will be constructed in the future. However, the risk of subsea pipeline leakage is increasing, and meanwhile, the efficient and real-time detection methods are urgently needed. In this paper, a set of underwater automatic gas leakage detection system is developed by using the Autonomous Underwater Vehicle (AUV) platform carrying the multi-beam bathymetric sonar and embedded processing unit with VxWorks. In this system, the water column image data collected by the multi-beam bathymetric sonar transmit to the embedded processing unit firstly, and then the template matching method is used to process the image data and complete the real-time detection of subsea pipeline. The efficiency and advance of the system have been verified by lake and sea trials.

**Key words:** subsea gas leaks; real-time image processing; multi-beam bathymetric sonar; autonomous underwater vehicle (AUV)

## 0 引言

随着人们对海底油气资源的不断开发, 在海底铺设的油气管道越来越多。海上频繁的第三方活动及海底滑坡等自然灾害对海底管道的安全运行造成

了严重威胁。由此引起的海底管道泄漏事故频频发生, 不仅造成了资源的浪费, 还严重损害了海洋生态环境<sup>[1-2]</sup>。近年来国内外已经有基于电容、半导体、光学、声学等多种原理的海底管道泄漏检测方法。其中, 前两者不具备泄漏点定位能力; 光学方法探测范围近、灵敏度一般, 并且在浑浊水域条件下使用受限; 而利用基于声学主动探测原理的多波束声呐, 进行水下油气管道泄漏的检测方法具有灵敏度高、效率高、三维定位精度高等优点, 因此受到了国内外研究学者的重视<sup>[3-5]</sup>。近年来国内外应用多波束声呐数据进行海底管道气体泄漏检测的研究越来越多。2007年Schneider等通过对ELAC

收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-06-11

基金项目: NSFC-浙江两化融合联合基金资助项目(U1709203)、国家科技重大专项项目(2016ZX05057)。

作者简介: 张万远(1991—), 黑龙江哈尔滨人, 博士研究生, 研究方向为声呐图像处理。

通信作者: 周天, E-mail: Zhoutian@hrbeu.edu.cn

SEABEAM 1000 多波束声呐数据进行 3D 可视化数据分析, 成功定位了黑海和北海的水下气体泄漏位置<sup>[6]</sup>; 2008 年 Nikolovska 等使用 ROV 搭载 Kongsberg EM710 多波束测深声呐对黑海海域的泄漏区域进行了泄漏气体声呐成像研究, 并对存在泄漏的位置进行了记录<sup>[7]</sup>。2012 年 Weber 等使用 EK60 单波束声呐和 EM302 多波束声呐获取到了墨西哥湾海底气体泄漏的水体成像数据<sup>[8]</sup>; 2012 年 Demling 等基于频率为 50 kHz 的多波束测深声呐, 使用粒子图像测速法(Particle Image Velocimetry, PIV)对气体的时间和空间漂移模型进行评估, 其检测效果得到大大提升<sup>[9]</sup>; 2015 年 Wilson 等通过对泄漏气体羽流流形态分析, 得出泄漏气体的垂直方向运动速度通常比洋流快得多, 因此通过气体的垂直运动状态判断是否有气体泄漏<sup>[10]</sup>; 2016 年, Urban 等利用 Kongsberg EM302 多波束声呐对处于北海浅水区域的天然气渗漏位置进行勘探与记录, 对采集到的声呐水体成像数据进行分析, 提出了一种可重复、有效的检测算法, 能够对泄漏气体进行较准确的识别, 并对北海的甲烷泄漏点进行精确的检测与绘图<sup>[11]</sup>。2020 年, 张万远等利用国内自研的多波束测深声呐采集水中气体泄漏数据, 并基于声呐图像完成泄漏气体检测和气体泄漏速度估计<sup>[12]</sup>。

但上述算法及应用都是对传感器采集到的数据进行离线分析, 难以满足泄漏检测报警的实时性需求。本文利用自主式水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)平台搭载多波束测深声呐与基于 VxWorks 的嵌入式实时处理单元, 设计了一套水下气体泄漏自动检测系统。该系统将多波束测深声呐采集的水体图像数据传送给嵌入式实时处理单元, 采用模板匹配方法对图像数据进行处理, 完成对海底管道气体泄漏点的实时检测。当检测到气体泄漏时, 水下机器人立即上浮至水面, 通过铱星上报泄漏点位置信息, 实现对海底管道泄漏点的实时、高效检测和报警。

## 1 系统硬件集成设计

海底管道气体泄漏检测系统主要由 AUV、多波束测深声呐和嵌入式实时处理单元三个部分组成, 系统组成如图 1 所示。多波束测深声呐通过供电电缆和数据电缆与 AUV 相连; 处理单元采用 PC104 总线的信号处理模块, 集成于 AUV 水密电子舱内, 提供 RJ45 网络(千兆)接口和串口, 全部电源由 AUV 供电单元提供。主要信息流关系如下: (1) 嵌入式处理单元与 AUV 主控单元连接, 功能包

含接收 AUV 各状态信息、接收 AUV 控制命令和预报泄漏信息, 为双工通信; (2) 多波束测深声呐向嵌入式处理单元发送水体成像数据, 多波束测深声呐和嵌入式处理单元分别连接到电子舱中网络交换机; (3) 嵌入式处理单元存储多波束测深声呐传送的水体成像数据; (4) AUV 向多波束测深声呐和嵌入式处理单元发送同步信号。

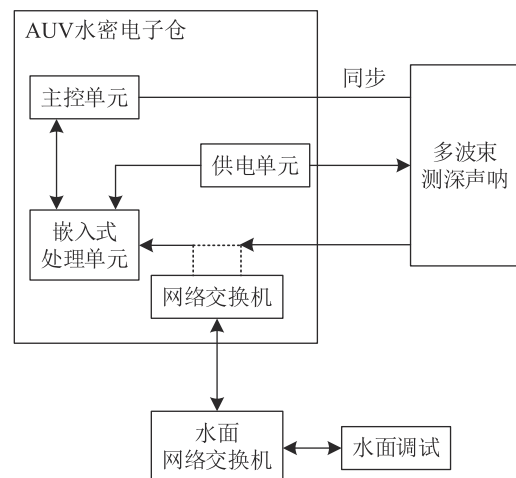


图 1 海底管道气体泄漏检测系统组成

Fig.1 Composition of gas leakage detection system for submarine pipeline

### 1.1 AUV 平台

该 AUV 采用流线型细长体外形, 主体结构共分为三个舱段和桅杆。前舱为传感器舱, 搭载多波束测深声呐和变浮力系统; 中间舱为干舱, 用于搭载 48 V、17 kWh 锂离子电池和导航控制系统; 尾舱为推进舱, 用于搭载十字形全动舵机和三叶螺旋桨推进器。背部桅杆搭载了卫星通信天线、无线天线、频闪灯、声学通信换能器和超短基线信标等。AUV 的主要功能技术参数如下表 1 所示。

表 1 AUV 主要功能技术参数  
Table 1 Main function and technical parameters of AUV

指标	参数
尺寸	$\Phi 533 \text{ mm} \times 5.5 \text{ m}$
重量/kg	650
耐压深度/m	400
续航能力	300
航行速度/Kn	2~3
通信方式	卫星通信+声学通信
避障方式	BlueView M450 避障声呐
导航方式	INS+DVL 组合导航

注: 1 kn=1.852 km·h<sup>-1</sup>, INS 为惯性导航系统, DVL 为多普勒测速仪。

由于海底管道泄漏检测属于长距离航行任务。该 AUV 集成了变浮力系统, 在水下航行时, 可以

通过调节浮力，减少航行时的水动力损耗和航行阻力，提高了航行距离。该 AUV 最大浮力调节量为 5 L 海水引起的浮力。在搭载声呐方面，与常规多波束声呐需要保持距海底高度 40 m 以上高度的扫测方式不同，AUV 执行海底管道检测任务时，为了提高扫测精度，定高航行时距海底高度只有十几米甚至更低，因此需要采取避碰措施，而且管道巡检作业海区往往较浅，大型船舶往来频繁，采油树和采油平台等海上结构物较为密集。为此，AUV 系统集成了 BlueView M450 避障声呐，并开发了避障算法，实现了避碰功能。

### 1.2 多波束测深声呐

该多波束测深声呐为声呐探头集成声呐信号处理器和控制器的结构，这种结构的声呐在干端部分只有一个小巧的声呐接口模块和 PC 机，具有体积小、重量轻、无甲板主机特点，从而使这种结构更适合 AUV、水下机器人(Remote Operated Vehicle, ROV)进行作业。多波束测深声呐系统结构如图 2 所示。

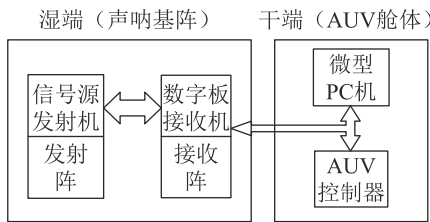


图2 多波束测深声呐系统结构框图

Fig.2 The structure diagram of multi-beam bathymetric sonar system

在多波束测深声呐系统中，接收基阵和发射基阵采用 T 型布阵的结构，为满足探测性能指标，接收和发射基阵的尺寸都比较大。因此声呐系统采用了两个仓室分别装配发射基阵和接收基阵，仓室间通过水密电缆相连。

在多波束测深声呐的设计中，为了提高探测效率，多波束测深声呐的发射换能器设计采用马蹄形，增加了外侧方向的辐射面积，有效提高了外侧的发射声源级。另外，为了保证探测扇面空间的均匀性，采用了发射纵摇实时补偿和接收横摇实时补偿处理，其主要功能参数如表 2 所示。

### 1.3 嵌入式处理单元

嵌入式处理单元是海底管道气体泄漏检测系统的数据处理中心，PC104 主板为嵌入式开发提供了标准的硬件平台环境，为开发者提供了标准的系统组件，因其具有标准可靠的工业规范、模块可自由扩展、功耗低的特点，常在水下目标探测领

表 2 多波束测深声呐主要功能技术参数

Table 2 Main function and technical parameters of multi-beam bathymetric sonar

指标	参数
工作频率/kHz	300
覆盖扇面/°	160
耐压深度/m	400
重量/kg	40
波束宽度	1°×1°
纵摇发射实时补偿功能	具备
横摇接收实时补偿功能	具备
水体成像功能	具备

域<sup>[13-14]</sup>。嵌入式探测处理单元选用 SCM9022 型号的 PC104 主板作为硬件平台，能够支持 VxWorks 操作系统(本文所选操作系统)，具有非常强的稳定性、可靠性以及较高的运行效率，被广泛应用在嵌入式微处理器的软件开发领域中。系统同时开发了水下泄漏气体检测功能算法，并实时实现。

水下气体泄漏检测程序部分主要包括三个部分：数据接收部分，数据处理及存储部分和检测结果传输部分。其主要的功能为：通过网络编程方法，使用网口与多波束测深声呐进行通信，接收多波束水体成像数据，随后对输送管道进行泄漏检测、预警处理以及对多波束水体成像数据进行存储处理。泄漏检测程序框图如图 3 所示。

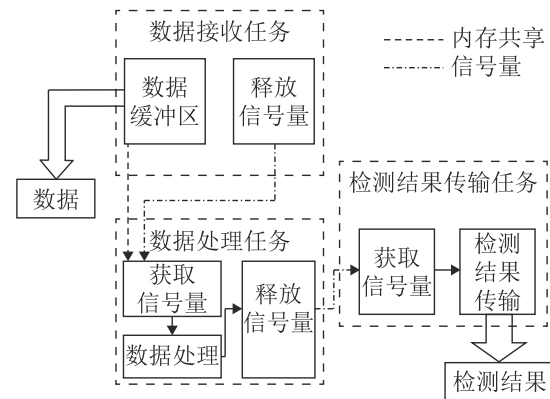


图3 泄漏检测程序框架图

Fig.3 Framework of the leakage detection program

其中数据接收部分：该部分主要负责与多波束测深声呐进行通信，获取其发送过来的声呐图像数据信息。数据处理部分负责对从数据接收模块得到的多波束水体成像数据进行管道泄漏检测处理以及原始水体成像数据的存储。在该部分，泄漏检测任务在创建之后一直处于阻塞状态，等待获取信号量，当得到信号量之后，执行检测算法。检测结果传输部分负责将检测结果传送给其他控制模块。

## 2 声呐图像处理

多波束测深声呐成像原理是声呐向水中发射水平方向宽、垂直方向窄的扇形波束,采集反向散射回波,利用波束形成得到不同方向上的回波强度,通过拼接得到空间图像。当声波被气泡群或海底这类物体反射时,回波反射强度较高,在图像上体现为较高的灰度值。声呐图像数据一般是以矩形方式进行,本文接收的图像数据分辨率为 $512 \times 6720$ ,即水平方位向有512个波束,距离向有6720个采样点,采样频率为22 kHz,扇形开角为 $153^\circ$ 。如图4所示,海底以及气体都为亮度较高的区域,其中图像的横坐标为波束号,纵坐标为采样点。对图4(b)进行极坐标系到直角坐标系的转换,可得到更直观的声呐图像的扇形显示,如图5所示。

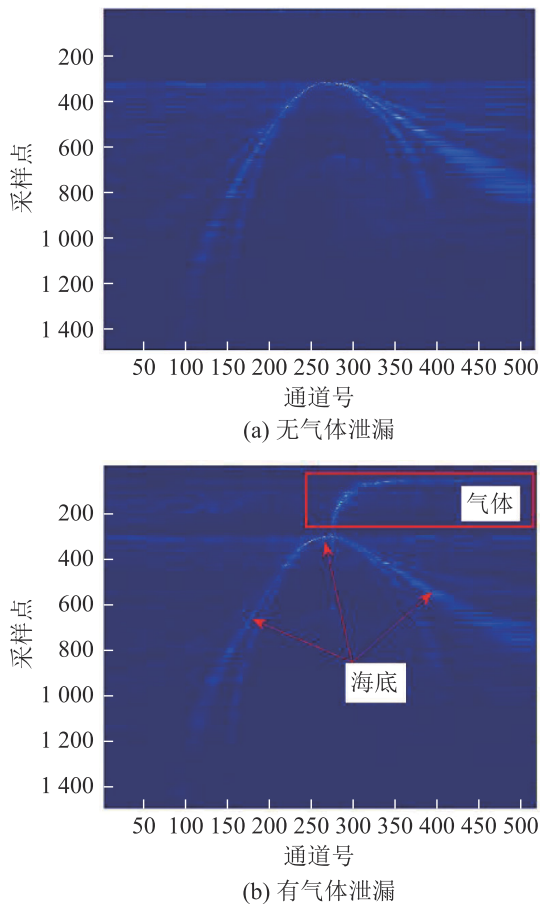


图4 有、无气体泄漏时的声呐图像

Fig.4 The rectangular shaped sonar image: without or with gas leakage

### 2.1 声呐图像处理

本系统中多波束测深声呐水体成像每帧图像的数据量大于13 MB,纵向波束宽度为 $1^\circ$ ,探测精度较高但覆盖的探测范围较小。为了保证AUV航行

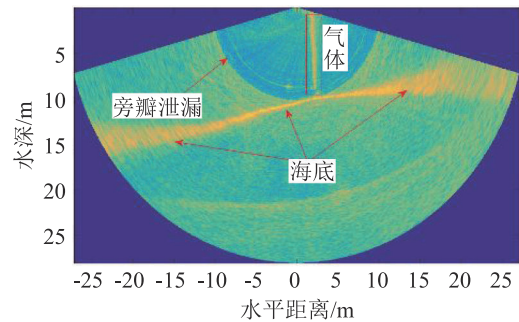


图5 声呐图像的扇形显示

Fig.5 The sector shaped sonar image

状态下及时检测到泄漏并采取处置措施,设置泄漏检测的工作节拍为每秒一次,其中数据接收和存储占用 $2/3$ 的时间,用于算法处理的时间只有约300 ms。另一方面,本系统同样面临着水下高分辨探测中混响和噪声干扰强、虚假目标干扰、目标有效区域小等问题。

基于以上分析,设计检测算法时,必须在保证稳健的检测性能,同时充分考虑嵌入式系统的处理效率,在检测的正确性、稳健性、处理速度之间进行综合优化。经过对多次外场试验数据的分析和处理,我们设计了“去底部以下无用采样点数据-图像对比度增强-显式方式转换-泄漏检测与识别”这一总的处理流程。

本文接收的图像数据分辨率为 $512 \times 6720$ ,即每个波束有6720个采样点,因为实验场地水深约15 m,所以只截取前1500个采样点进行处理。由图4(b)可见,泄漏点位于海底,所以对海底以下的采样数据进行处理会占用较多的时间。为了去除底部以下无用采样数据,设计了基于回波时间梯度的海底判别算法。嵌入式处理单元获取的数据主要由波束数据和测深深度的双程回波时间 $t_i$ 两部分组成,其中 $i$ 为波束号、双程回波时间记录每个波束上回波最强的采样点。在AUV正常航行状态下,声学原点正下方波束发射声波的方向垂直于海底,所以小于其他波束的双程回波时间 $t_i$ 。当无气体泄漏时,双程回波时间 $t_i$ 随着波束开角增大单调增加,当有气体泄漏时,波束上最强回波采样数据可能在气泡处,因而 $t_i$ 与波束开角不是单调递增关系。

考虑到管道尺度有限的实际工况,可以认为每个节拍的数据最多含有单一泄漏点,因此一定有一侧的双程回波时间与波束开角近似成单调递增关系。基于此,设计了基于回波时间梯度的海底判别方法,通过比较左右两侧相邻两个波束双程回波时间梯度来判断真实海底,并在海底管道铺设于平坦海底的前提下,用真实海底的一侧替代另一侧,可以避免在有气泡或者其他目标干扰时导致的海底检

测错误的问题。通过对海底的修正，实现在转扇形后只处理海底以上数据保证嵌入式处理单元的实时性，海底的去底修正结果如图6、7所示。

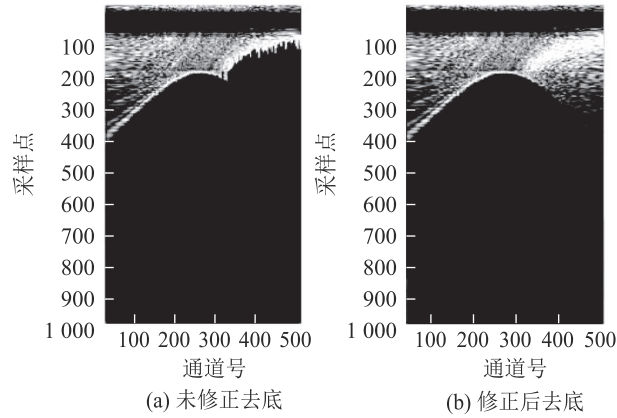


图6 去底修正前后声呐图像

Fig.6 Sonar images before and after seabed removing correction

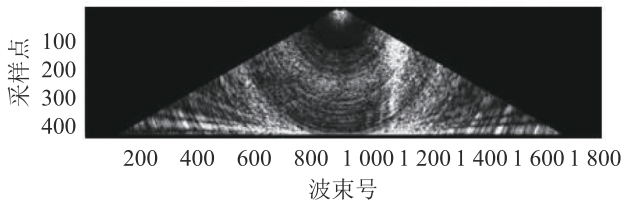


图7 转为扇形显示后只保留底部以上区域的声呐图像

Fig.7 Sonar image in the sector display after coordinate transformation where only the data above seabed remain

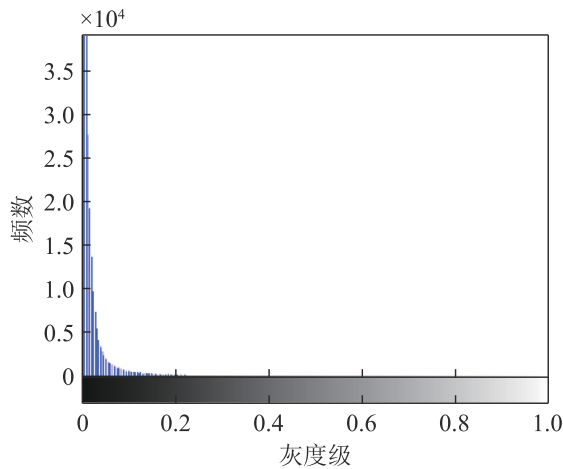


图8 原始图像灰度分布直方图

Fig.8 Histogram of gray distribution of the original image

由图4(b)的直方图(图8)可见，原始图像灰度分布偏低，从数据分析或主观观察均难以看到是否有泄露，需要利用对比度增强算法改善原始图像质量。常用的利用极大值进行归一化的结果如图9(a)所示。但该方法并不能取得理想的处理效果，这是因为目标区域灰度级低且像素数量小。

为此我们采用了截断式增强处理方法，归一化系数值  $C_{nor}$  设置如下：

$$C_{nor} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m p(i,j)}{m \cdot n} \times 10 \quad (1)$$

其中： $m$ 为波束数， $n$ 为深度方向采样点数， $p(i,j)$ 为在第 $j$ 个波束上的第 $i$ 个采样点的数据。对图像进行以上方法归一化后的图像效果如图9(b)所示，可见，处理后明显增大了目标区域与背景的对比度。由于矩形显示不符合物理探测空间的真实情况，须将矩形显示转换为扇形显示，结果如图10所示。转换后的图像中，气泡呈现垂直状态，可以为后续的检测识别提供稳定特征。

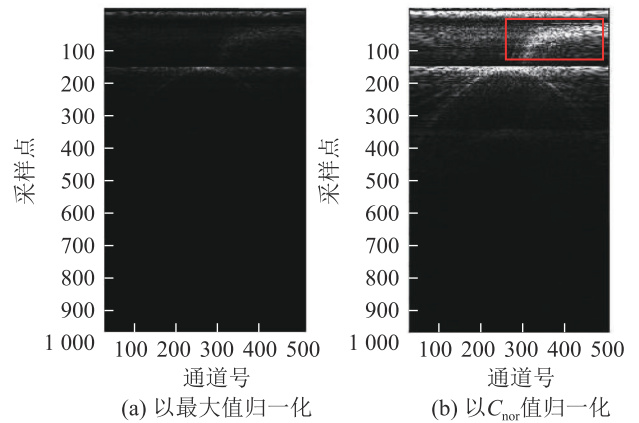


图9 矩形显示的归一化声呐图像

Fig.9 Normalized sonar image displayed in a rectangular pattern

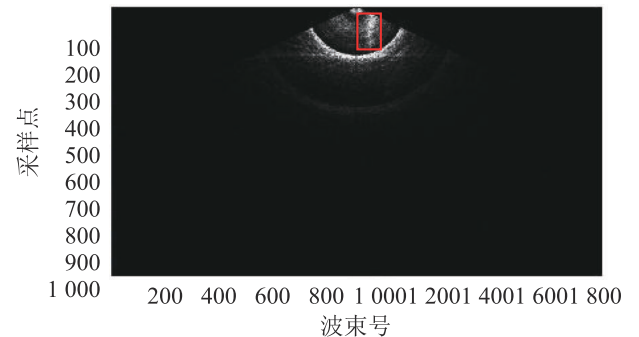


图10 转换为扇形显示的归一化声呐图像

Fig.10 Normalized sonar image displayed in a sector pattern after coordinate transformation

在泄漏检测与识别环节中，我们基于区域检测算法，综合考虑了像素的灰度与空间分布特征、聚集特征、形态特征等，设计了利用模板卷积对泄漏区域进行检测的方法，模板卷积的原理是利用分组处理，根据一个像素的邻近像素来计算新的像素值，其中模板通常为矩形大小可根据需要进行定义，例如 $3 \times 3$ 的模板示意图如图11所示。其中 $w_0 \sim w_8$ 为9个加权系数，用于原图计算新图像上的一个点。新点即为模板中阴影部分，通过以下公式来计算新图像中第 $(i, j)$ 的点的像素值 $X$ ，用以上模板对原图 $O$ 进行式(2)的处理：

$$\begin{aligned}
 X(i,j) = & w_0 \times O(x-1,y-1) + w_1 \times O(x,y-1) + \\
 & w_2 \times O(x+1,y-1) + w_3 \times O(x-1,y) + \\
 & w_4 \times O(x,y) + w_5 \times O(x+1,y) + \\
 & w_6 \times O(x-1,y+1) + w_7 \times O(x,y+1) + \\
 & w_8 \times O(x+1,y+1)
 \end{aligned} \quad (2)$$

$w_0$	$w_1$	$w_2$
$w_3$	$w_4$	$w_5$
$w_6$	$w_7$	$w_8$

图 11 卷积模板示意图

Fig.11 Schematic diagram of convolution template

基于以上理论, 我们根据气体向上的竖直形态, 设计了竖直的模板, 权值根据数据进行设计。卷积处理后得到如图 12 所示的图像。在高出海底范围内的数据中寻找最大值点, 并判断该最大值是否大于根据经验设置的阈值。如果大于阈值, 则判断该位置存在气体泄露, 并以该点为中心, 以卷积模板尺寸还原出矩形框进行目标范围的标定, 标记后的结果图如图 13 所示。

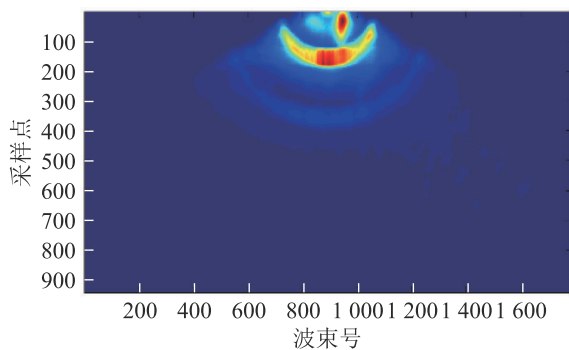


图 12 模板卷积伪彩图

Fig.12 Template convolution pseudo-color image

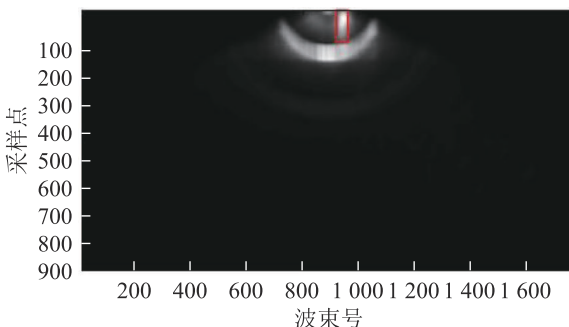


图 13 检测结果标记图

Fig.13 Label chart of detection results

利用模板卷积法对存在上升形态的气体目标进行特征的提取, 可以根据气体目标的灰度特性、形态特性进行模板系数的设计。该方法灵活性好、计算效率较高, 易于根据得到的特征值区分是否存在目标。与光学数据特征清晰、可以提取细节特征判断是否存在目标不同, 本文采用的声呐图像数据细

节纹理特征受到各种条件的影响, 变化较多, 且不够清晰, 利用模板卷积法虽然没有利用图像的细节纹理特征, 但受到干扰较小, 稳定性和实用性较高。其不足在于模板参数及判决阈值需要根据对探测数据分析的积累经验来设定。

## 2.2 离线测试

对图像检测算法进行 PC104 移植实现后, 利用 200 帧数据对算法进行有效性和稳定性评估, 其中有气体泄漏数据为 70 帧, 无气体泄漏为 130 帧, 通过对数据进行离线回放, 判定泄漏检测结果以及泄漏位置的准确性, 分类准确性测试结果如表 3 所示。

表 3 算法分类准确性测试  
Table 3 Algorithm classification accuracy test

有、无 气体泄漏	数据量/帧	检测结果/帧		分类 准确率/%
		有泄漏	无泄漏	
有	70	64	6	91.4
无	130	5	125	96.2

对于有气体泄漏数据分类的准确率为 91.4%, 无气体分类的准确率为 96.2%。对 64 帧有泄漏检测结果数据进行确认, 经与数据的回放显示对比可知, 其中有泄漏的图像位置检测正确的图像为 63 帧, 另外 1 帧泄漏位置检测错误, 则有气体泄漏数据检测的准确率为 90.0%。

## 3 系统联调与外场实验

### 3.1 海底管道泄漏检测系统实验室联调

在实验室条件下, 取出多波束测深声呐的 ARM 数据传输与控制板, 再下载之前获取的水体数据, 用作 PC104 板卡的调试输入, 两者通过千兆交换机连接。

上电后, ARM 开发板与声探测处理单元 PC104 板卡建立 TCP 连接, 向 PC104 板卡每秒发送数据, 检验其传输、处理和存储功能。经过充分测试验证了实验室条件下, 处理单元能够很好地完成对声呐数据的接收。后续用串口调试助手验证了声探测处理单元的串口发送, 能够正确地得到串口发送的处理结果。将多波束测深声呐和 AUV 接口联调, 声呐能够正确地接收到 AUV 电子舱下发的控制指令以及姿态等辅助传感器数据信息。

### 3.2 海底管道泄漏检测系统外场实验

#### 3.2.1 声呐探测泄漏可行性实验

为验证声呐探测泄漏气体的可行性, 项目组于

2018年7月以实验船为声呐搭载平台，在某湖对水中气体目标进行综合检测实验。首先利用三角铁架将管道及喷嘴固定，然后将其放入湖底，水深大约12 m，在岸上管道的另一端与空气压缩机连接作为气体发生装置，通过阀门开关控制压力大小。通过实时显控界面可以清晰地看到上升气泡群的图像信息，声呐也可实现对气泡群形态的检测。

### 3.2.2 系统可靠性实验

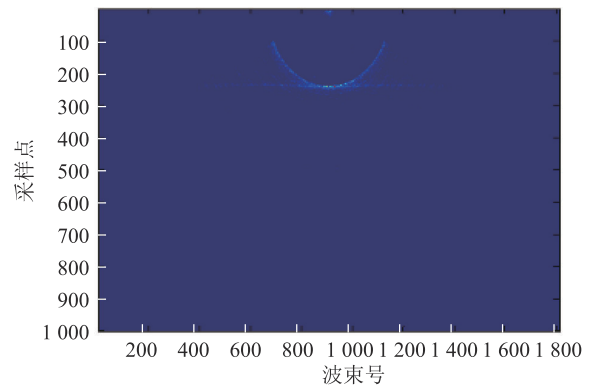
为了验证海底管道泄漏检测系统的可靠性，项目组于2019年11月将海底管道泄漏检测系统集成于水下机器人后于某深海基地进行了水下试验。系统每次工作时间为1~3 h，每秒处理1帧的数据，在AUV工作状态下监测是否有虚警漏报情况，停止工作后，用多波束声呐数据处理模块通过FTP回收存储的数据分析实时检测的状态。测试时大概每10~15 min经过一次气泡，每次扫到气体的图像约1~3帧。经测试，系统全程稳定工作，数据完整回收，测试几天累计工作时长15 h左右，经过数据后处理得到有气体图像94帧，现场实时检测到气体图像86帧，有气体图像检测准确率为91.4%。另外在累计15 h的测试中，虚警次数为9次；对工作状态下检测的泄漏位置坐标数据进行保存后，通过与回收数据的人工判断比对气体泄漏位置的准确性，实时检测到有气体的86帧图像中，位置检测正确的有86帧，位置全部检测正确。图14是实验中有、无气体泄漏情况下自动检测的结果。实验现场检测到泄漏后，AUV实时上浮，通过铱星传输管道泄漏位置。

### 3.2.3 系统实用性测试实验

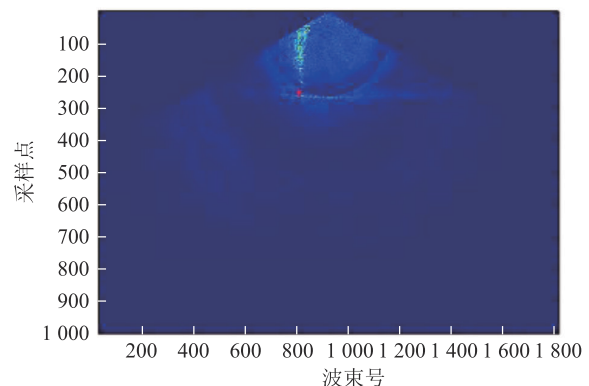
2020年8月，项目组在南海开展了海底管道泄漏检测系统的实用性测试实验。把模拟管道用重物沉底，通过气泵将气体从海底泵出，模拟海底天然气管道泄漏情景。AUV的航行轨迹如图15所示。AUV平台从泄漏点经过，多波束声呐实时采集和处理水体图像，图16为泄漏气体检测结果。在检测到水体中含有泄漏气体之后，AUV自动上浮。最后通过卫星向指定手机和邮箱回传泄漏位置数据，然后继续执行当前航线任务。实验一共进行了四次，皆成功报警。

## 4 结论

经过多次外场试验，验证了基于多波束测深声呐的海底管道泄漏检测系统检测性能稳定，具有效



(a) 无泄漏自动检测结果



(b) 有泄漏自动检测结果

图14 自动检测结果

Fig.14 Automatic detection result

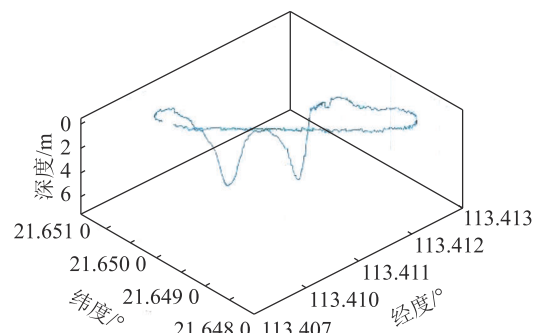


图15 AUV航行轨迹

Fig.15 The trajectory of AUV

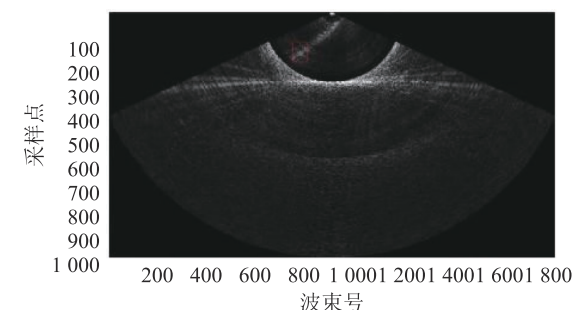


图16 泄漏气体检测结果

Fig.16 Identification results of gas leakage

率高、实时性好的优点。系统搭载在AUV平台上，可以很好地完成水下管道周期巡检，特别是应急工况可以实现泄漏点实时定位与报警，保障管道安

全。后续研究工作需进一步考虑底流等复杂环境影响, 增强算法鲁棒性, 提高灵敏度、降低虚警率, 并将成果拓展应用至输油管道泄漏检测等领域。

### 参 考 文 献

- [1] 姜诗源, 盛积良, 陈国明, 等. 海底滑坡作用下滩海管道结构安全分析[J]. 海洋工程, 2020, **38**(2): 128-134.  
JIANG Shiyuan, SHENG Jiliang, CHEN Guoming, et al. Study on safety limits of the pipelines under submarine glide block[J]. The Ocean Engineering, 2020, **38**(2): 128-134.
- [2] 黄启峰, 郭海燕, 李伟, 等. 海底管道受坠物锚击损伤试验与数值模拟研究[J]. 海洋工程, 2018, **36**(3): 84-88.  
HUANG Qifeng, GUO Haiyan, LI Wei, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage of submarine pipeline impacted by dropped objects[J]. The Ocean Engineering, 2018, **36**(3): 84-88.
- [3] 李海森, 周天, 徐超. 多波束测深声纳技术研究新进展[J]. 声学技术, 2013, **32**(2): 73-80.  
LI Haisen, ZHOU Tian, XU Chao. New developments on the technology of multi-beam bathymetric sonar[J]. Technical Acoustics, 2013, **32**(2): 73-80.
- [4] 魏波, 沈嘉俊, 周天, 等. 波束锐化技术在多波束测深声纳中的应用[J]. 声学技术, 2016, **35**(2): 167-173.  
WEI Bo, SHEN Jiajun, ZHOU Tian, et al. Application of beam narrowing technique in multi-beam bathymetric sonar [J]. Technical Acoustics, 2016, **35**(2): 167-173.
- [5] XU C, WU M X, ZHOU T, et al. Optical flow-based detection of gas leaks from pipelines using multibeam water column images[J]. Remote Sensing, 2020, **12**(1): 119.
- [6] VON DEIMLING J S, BROCKHOFF J, GREINERT J. Flare imaging with multibeam systems: data processing for bubble detection at seeps[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, **8**(6): 1-7.
- [7] NIKOLOVSKA A, SAHLING H, BOHRMANN G. Hydroacoustic methodology for detection, localization, and quantification of gas bubbles rising from the seafloor at gas seeps from the eastern Black Sea[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2008, **9**(10): 1-13.
- [8] WEBERT T C, MAYER L A, BEAUDOIN J. Mapping gas seeps with the deepwater multibeam echosounder on okeanos explorer[J]. CENTER FOR COASTAL AND OCEAN MAPPING, 2012, **25**(1): 54-55.
- [9] VON DEIMLING J S, PAPENBERG C. Technical Note: detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images[J]. Ocean Science, 2012, **8**(2): 175-181.
- [10] WILSON D S, LEIFER I, MAILLARD E. Megaplume bubble process visualization by 3D multibeam sonar mapping[J]. Marine and Petroleum Geology, 2015, **68**: 753-765.
- [11] URBAN P, KÖSER K, GREINERT J. Processing of multi-beam water column image data for automated bubble/seep detection and repeated mapping[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2017, **15**(1): 1-21.
- [12] 张万远, 王雪斌, 周天, 等. 基于多波束测深声纳的水中气体目标检测方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, **41**(8): 1143-1149.  
ZHANG Wanyuan, WANG Xuebin, ZHOU Tian, et al. Detection of underwater gas targets by using a multi-beam bathymetric sonar[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, **41**(8): 1143-1149.
- [13] 杨嘉斌. 基于多波束测深声纳的海底管道泄漏检测模块[D]. 哈尔滨工程大学, 2018.
- [14] 李万堃. 水下气体泄漏自动检测算法设计及嵌入式实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.