

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107742

## 基于主动电场定位的海参水下识别技术\*

杨玉娥, 杜文豪, 刘鲁宁  
( 济 南 大 学 济 南 250022 )

**摘 要:**针对现有海参水下识别技术受水下可视条件影响大、设备繁重的问题提出了基于主动电场定位的海参水下识别技术。首先通过测量海参等材料的电导率,验证了主动电场定位技术用于海参识别的可行性;随后模拟海参栖息环境,搭建了海参识别试验平台,研究了提高距离、识别信号特征对海参识别效果的影响;其次研究了海参在不同姿态、不同位置下的识别效果,最后探究了海参与石块、钢块的水下分辨效果。结果表明:在 50 mm 提高距离下海参引起的扰动势变化率约为 5%,与其他物体对主动电场的影响机制明显不同,该技术可以有效识别海参,识别效果的分辨率与传感器提高距离、识别信号特性有关;该技术可对不同姿态、不同环境背景下的海参进行有效识别。

**关键词:** 海参;水下识别;主动电场定位;扰动势;试验平台

**中图分类号:** TH7      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Underwater sea-cucumber identification technology based on active electrolocation

Yang Yu'e, Du Wenhao, Liu Luning  
( University of Jinan, Jinan 250022, China )

**Abstract:** A sea-cucumber underwater identification based on active electrolocation is proposed to solve the problems of the existing underwater identification technology affected by underwater visual conditions and heavy equipment. Firstly, by measuring the electrical conductivity of sea-cucumber and other materials, the feasibility of using active electrolocation technology for sea-cucumber identification is evaluated. Then, a sea-cucumber identification test platform is built by simulating the sea cucumber habitat environment. And the influence of lift-off distance and recognition signal characteristics on the recognition effect of sea-cucumber is studied. Secondly, the recognition effect of sea cucumber in different posture and different positions is studied. Finally, the underwater discrimination effect of stone and steel block with sea-cucumber is explored. Results show that, at the lift-off distance of 50 mm, the perturbation potential change rate caused by sea cucumbers is about 5%, which is obviously different from the influence mechanism of other objects on the active electric field. This technology can effectively identify sea cucumbers. The resolution of the recognition effect is related to the lift-off distance of the sensor and the characteristics of the electrical signal. This technology can effectively identify sea-cucumbers in different postures and different environmental backgrounds.

**Keywords:** sea-cucumber; underwater identification; active electrolocation; perturbation potential; test platform

## 0 引 言

海参依靠人工进行捕捞,作业环境恶劣、危险系数高,是形成海参价格较高的原因之一。采用智能化捕捞设备代替人工水下捕捞作业是未来的发展趋势。当前的水下识别主要使用机器视觉技术<sup>[1-3]</sup>。

基于机器视觉的海参识别技术受水下可视条件的制约且需要繁重的设备作为支撑,在复杂水下环境中实用性有待提升。基于上述缺点,本文提出了基于主动电场定位的海参水下识别技术。主动电场定位技术起源于对弱电鱼的仿生研究,这种鱼类利用感知自生电场的变化来感知周围物体<sup>[4-5]</sup>。2013年,何春秋等<sup>[6]</sup>将主动电场定位技术应用于管道内泄漏点的检测。2016年 Gottwald

收稿日期:2021-04-11      Received Date: 2021-04-11

\* 基金项目:山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019NJ020)资助

等<sup>[7]</sup>研制了主动电场定位相机,可实现对目标轮廓的识别。2017 年 Gottwald 等<sup>[8]</sup>提出了一种基于主动电场的血管内血块检测装置,利用主动电场定位技术检测和分析血管内部及血管壁上的血栓。此外,主动电场定位技术在水下感知识别、导航、通信及水下机器人等领域<sup>[9-14]</sup>也已有应用。当前对主动电场定位的研究其研究对象多为材料特性明显的规则物体,针对海参这类活体物质的识别研究尚属空白。本文以电信号替代光信号,模拟海参栖息环境,搭建海参识别试验平台,通过扰动势曲线分析海参及不同物体对主动电场的影响规律,根据扰动势曲线规律实现对海参的识别及不同目标的区分。该技术设备简单、成本低,丰富了主动电场识别领域中海参识别的研究内容,对水下识别技术的发展具有重要意义。

## 1 海参水下识别原理

### 1.1 主动电场定位技术原理

主动电场定位技术的原理如图 1 所示<sup>[15]</sup>,将弱电鱼的放电器官及接收器管抽象为一对电偶极子,假设电场中存在一个球形物体,球形物体附近的电场强度<sup>[12]</sup>为:

$$\delta_{\varphi}(r) = E_0 \cdot r \left( \frac{a}{r} \right)^3 \frac{\rho_1 - \rho_2 + i\omega\rho_1\rho_2(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{2\rho_2 + \rho_1 + 2 + i\omega\rho_1\rho_2(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} \quad (1)$$

式中:  $\delta_{\varphi}$  为球形物体附近的电场强度, V/m;  $E_0$  为均匀电场中某一点对应的电场强度, V/m;  $\varepsilon_1$  为环境介电常数;  $\rho_1$  为环境的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $a$  为物体半径, m;  $\varepsilon_2$  为物体介电常数;  $\rho_2$  为物体的电阻率,  $\Omega \cdot m$ ;  $r = |r|$ , m。

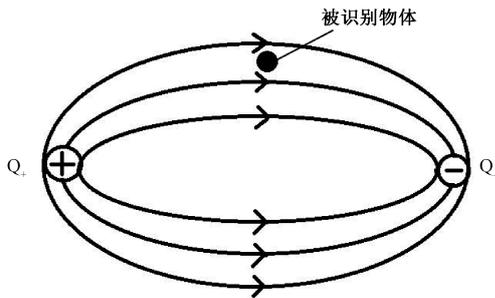


图 1 主动电场定位原理图

Fig. 1 Schematic diagram of active electrolocation

### 1.2 海参等材料的电导率

根据主动电场定位技术的原理,物体的电导率决定了物体对主动电场的影响机制。因此,需要测试海参、海水以及海参栖息环境中常见的钢块和石块电导率。选取产自山东烟台海域的海参作为试验样品,采用电导率仪进行测定。海参等电导率的测量现场如图 2 所示。海参等试验材料的电导率如表 1 所示。



1-电导率仪;2-测量电极;3-海参溶液

图 2 海参电导率的测量现场

Fig. 2 Measurement of electrical conductivity of sea-cucumber

表 1 海参等试验材料的电导率

Table 1 Conductivity of sea cucumber and other test materials

材料名称	电导率/( $S \cdot m^{-1}$ )
海参	0.319
海水	4.2
钢块	$2 \times 10^6$
石块	0
淡水	$1 \times 10^{-3}$

由表 1 可知,海参电导率与海水、淡水的电导率均不相同,与钢块和石块更是存在较大差异,因此,利用电导率不同的特性识别海水中不同材料的物体具备可行性。

## 2 海参识别试验平台

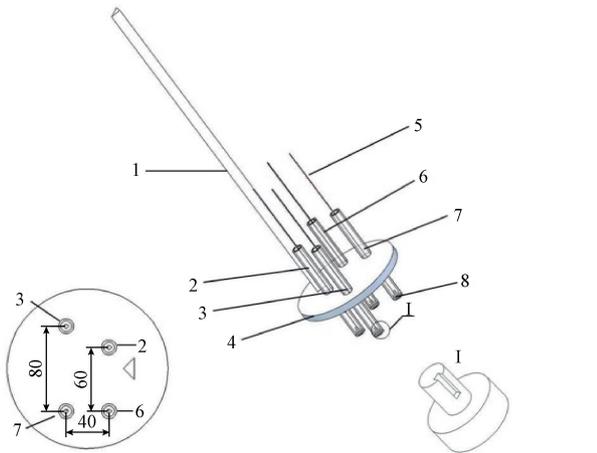
### 2.1 传感器设计

主动电场定位传感器示意图如图 3 所示, I 为电极放大后的结构图。主体结构部分由 4 根电极管、亚克力连接件及亚克力固定板构成;电极管内有电极及导线,电极选用具有优良导电性能及抗腐蚀性能的钛金属进行制作,在钛金属表面加工了用于连接导线的凹槽。

由于电极间的相对距离会影响主动电场性能<sup>[16]</sup>,因此结合海参的尺寸,发射电极之间距离设定为 80 mm,接收电极之间距离为 60 mm,发射电极与接收电极之间距离为 40 mm。最终制成的主动电场传感器实物如图 4 所示。

### 2.2 主动电场试验台的搭建

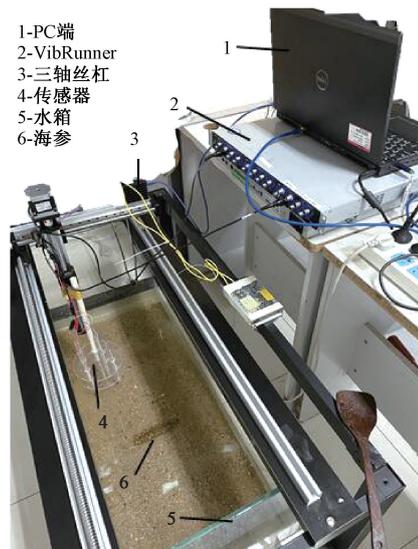
海参识别试验平台实物图如图 5 所示。海参识别试验平台的工作流程图如图 6 所示。海参识别试验平台主要由水箱、VibRunner 信号采集板卡、三轴丝杠、传感器、PC 组成,分别实现水环境的模拟、信号的发射与采集、传感器的运动控制、构建主动电场、数据的处理与分析等功能。



1-连接件;2-接收电极负极;3-发射电极负极;4-电极固定板;5-导线;6-接收电极正极;7-发射电极正极;8-电极

图3 主动电场定位传感器结构

Fig. 3 Structure of active electrolocation sensor



1-PC端  
2-VibRunner  
3-三轴丝杠  
4-传感器  
5-水箱  
6-海参

图5 海参识别试验平台实物图

Fig. 5 Sea-cucumber identification test platform



1-发射电极正极;2-接收电极正极;3-接收电极负极;4-发射电极负极

图4 主动电场定位传感器实物图

Fig. 4 Picture of active electrolocation sensor

2.3 试验方法

由于淡水与海参的电导率差值比海水与海参的电导率差值更小,如果在淡水环境下海参识别试验平台能够达到较好的识别效果,那么在海水中的识别效果理论上会更好。因此,在试验中首先选择淡水环境来模拟海水环境。

将海参纵向置于在水缸的中央位置。设置传感器提离距离为 50 mm,传感器起始位置位于水缸一角,传感器在水缸内沿规定型路径进行扫描识别试验,并在移动过程中同步发射信号和采集信号,识别信号选用 5 V, 1 000 Hz 的正弦信号,将采集的反馈信号导入



图6 海参识别试验平台的工作流程

Fig. 6 Flow of sea-cucumber identification test platform

MATLAB 软件中,利用寻峰算法将波峰点连接成曲线,定义为扰动势幅值曲线。传感器在水箱内的识别路径如图 7 所示。在海参不同位置和姿态识别试验,模拟实际环境识别试验中,传感器采用图 7 (b) 所示的“S”形曲线路径进行扫描,其他试验中采用图 7 (a) 所示的直线路径。

3 结果与讨论

3.1 提离距离对识别效果的影响

为了研究提离距离对识别效果的影响,在提离距离分别为 50、60、70、80 mm 的情况下进行试验,不同提离距离时的扰动势幅值曲线如图 8 所示。由图 8 可知:在传

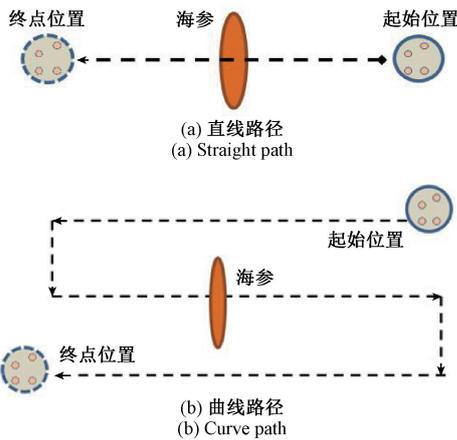


图 7 传感器在水箱内的识别路径

Fig. 7 Identification path of the sensor within the tank

传感器经过海参时,扰动势降低,在经过海参所在位置之后又恢复先前平稳状态;扰动势变化值的大小与提离距离有关。对其定量分析得图 9,由图 9 可知:当提离距离为 50 mm 时,扰动势变化率最大,约为 5%,随之提离距离的增加扰动势变化率减小,扰动势变化率与提离距离大致呈一次函数关系。

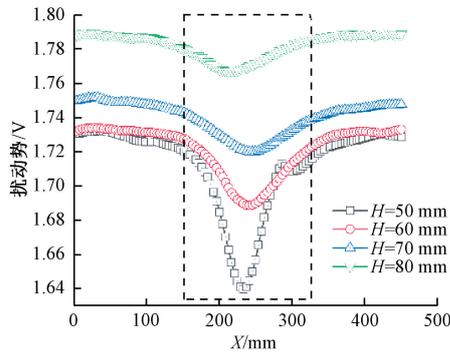


图 8 不同提离距离下的扰动势幅值曲线

Fig. 8 Perturbation potential amplitude curves at different lift-off distance

### 3.2 识别信号特性对识别效果的影响

在提离距离为 50 mm 时,只改变信号的电压幅值,重复试验过程。为了防止对海参造成伤害,电压幅值分别选为 2、4、6、8、10 V,扰动势差值与识别电压幅值的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知:以取得 40 mV 差值为标准,采用 8 V 电压信号可在 70 mm 提离距离取得,而采用 6 V 电压在 60 mm 取得,说明提高电压幅值能够增大有效识别范围。

出于对海参的保护,将信号电压设定为 8 V,随后改变电信号的频率进行重复试验,识别正弦信号的频率分别选取为 1、50、200、500、800、1 000 Hz。扰动势差值与

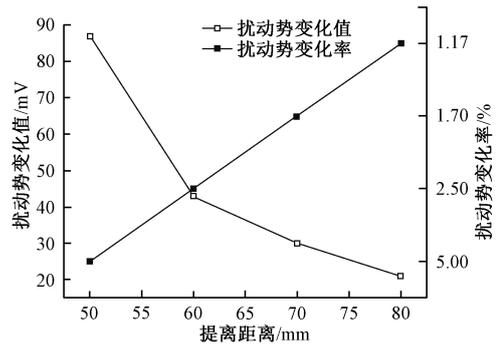


图 9 不同提离距离下扰动势变化规律

Fig. 9 Variation law of perturbation potential at different lift-off distances

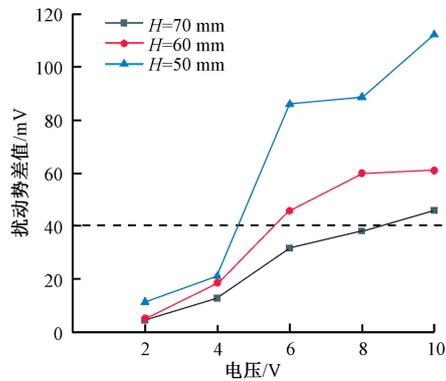


图 10 扰动势差值与识别信号电压的关系

Fig. 10 Relation between the perturbation potential difference and voltage of identification signal

电信号频率的关系曲线如图 11 所示。由图 11 可知:随着识别信号频率的升高,扰动势变化幅度变大,当频率超过 800 Hz 后变化幅度增大,因此试验中的正弦信号频率设定为 1 000 Hz。

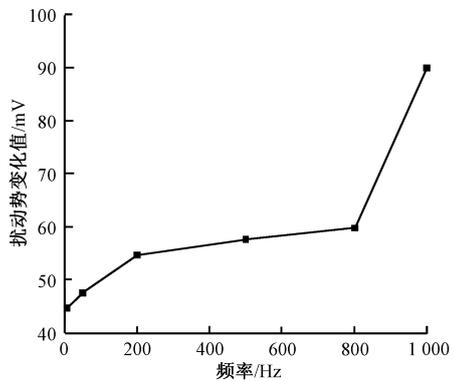


图 11 扰动势差值与识别信号频率的关系

Fig. 11 Relation between the perturbation potential difference and frequency of identification signal

### 3.3 海参与水下常见材料的分辨试验

海参位于海底的生活环境中常常有沙子、礁石和沉没船只遗存的钢铁等金属物质,因此需要进行海参与石块和铁块的分辨测试。海参与石块的扰动势曲线如图12所示。实线标注的为钢块,虚线标注的为海参。由图12可知:当传感器经过海参上方时,扰动势的幅值降低,降低的幅值约为0.06 V;而当传感器经过石块上方时,扰动势幅值升高,升高的幅值约为0.04 V;这说明石块与海参的扰动势变化趋势截然相反,石块与海参非常易于识别。

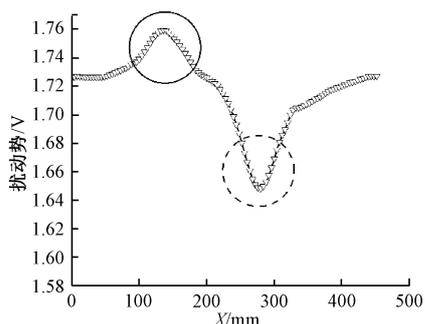


图12 识别海参与石头的扰动势曲线

Fig. 12 Perturbation potential curve of identifying sea-cucumber and stone

识别海参与钢块的扰动势曲线如图13所示。实线标注的为钢块,虚线标注的为海参。由图13可知:当传感器经过海参与钢块上方时,扰动势的幅值均降低,但扰动势变化量明显不同,经过钢块时降低的幅值更大,约为0.14 V,而经过海参时降低的幅值约为0.06 V,经过钢块时的降幅约是海参的2.3倍。这说明钢块与海参的扰动势变化趋势虽然相同,但对主动电场的具体影响机制不同,仍然易于识别。

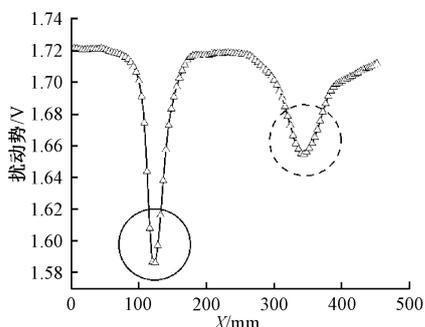


图13 识别海参与钢块的扰动势曲线

Fig. 13 Perturbation potential curve of identifying sea-cucumber and steel block

### 3.4 海参的位姿对识别效果的影响

采用8 V、1 000 Hz 正弦信号作为识别信号进行试验,分别将海参横向、斜向放置,如图14所示。海参不同放置方向时的扰动势云图如图15所示。由图15可知:云图中扰动势降低的区域为蓝色区域,与海参在水缸中的位置相对应,当传感器经过海参某一部位上方时即可对海参进行识别;海参的放置姿势对识别结果的影响不大,但所得扰动势云图中蓝色区域却呈现出了不同形状,可根据扰动势云图判断海参的当前姿态。

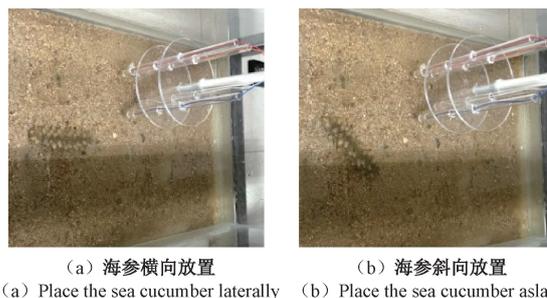
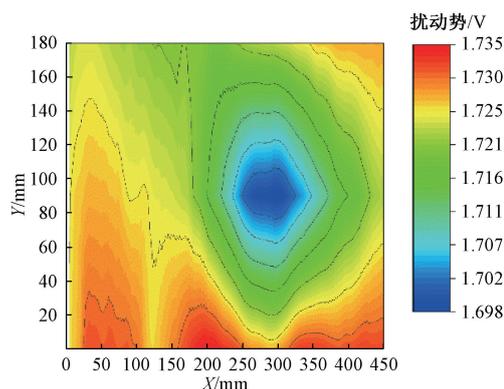


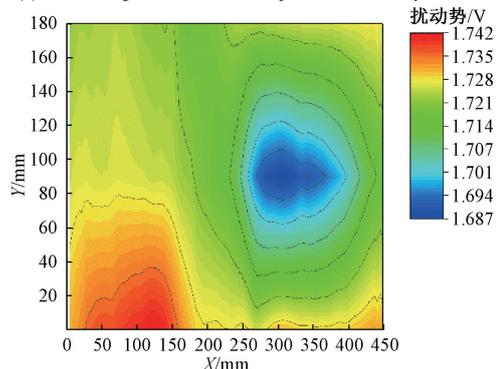
图14 海参不同的放置方向

Fig. 14 Different orientation of sea-cucumbers



(a) 海参横向放置云图

(a) Cloud image of sea cucumbers placed horizontally



(b) 海参斜向放置云图

(b) Cloud image of sea cucumbers placed aslant

图15 海参不同放置方向时的扰动势云图

Fig. 15 Perturbation potential cloud image of sea-cucumber in different placement directions

根据海参在水下的实际情景,海参有时会位于礁石表面上,有时会位于石缝中,为验证复杂地貌下的识别效果,使用 8 V、1 000 Hz 的正弦信号作为识别信号,对礁石表面和石缝中的海参进行识别试验,如图 16 所示。由图 16(c)可知:在  $X = 75$  mm 处的深色区域为海参,在  $X = 350$  mm 处的深色区域为礁石,在礁石附近的扰动势明显升高,2 个海参位置( $X = 75$  mm、 $X = 225$  mm 处)的扰动势降低,由于位于礁石表面的海参与传感器之间的距离更小,因此在  $X = 75$  mm 处扰动势降低的幅度更大,对海参的识别效果更好。

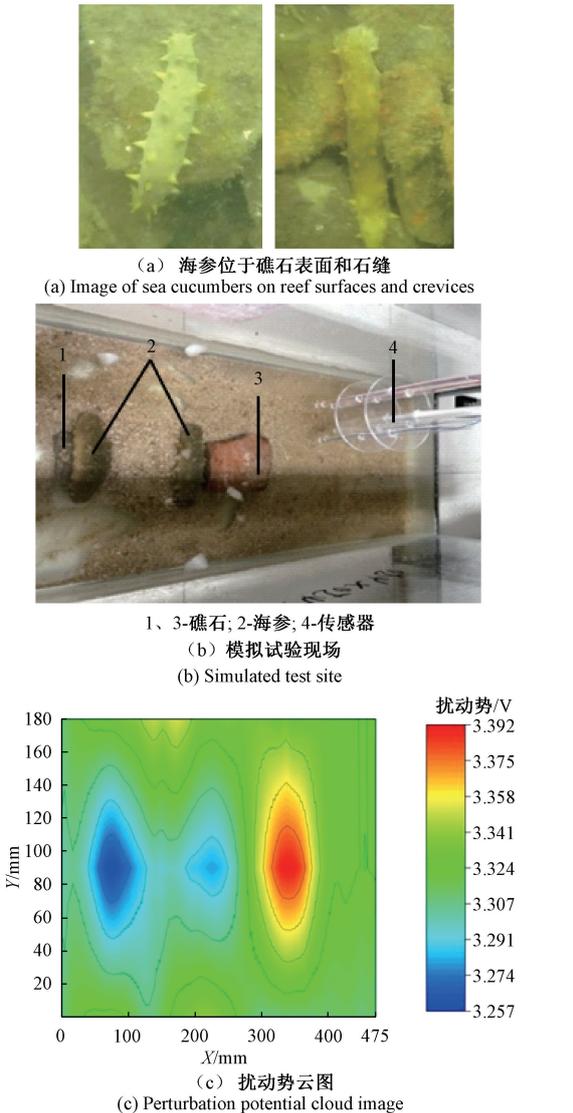


图 16 海参位于礁石表面和石缝时的识别试验  
Fig. 16 Identification test of sea cucumber on reef surface and rock crevices

海参最常见的位置还是处于沙地表面及礁石附近。因此,海参位于沙地表面及石缝的识别试验如图 17(a) 所示。由图 17(b)可知:在经过  $X = 75$  mm、 $X = 250$  mm

处的石块附近时,扰动势明显升高,在经过 2 个海参位置( $X = 175$  mm、 $X = 375$  mm 处)扰动势降低,其中  $X = 175$  mm 处的扰动势降低幅度更大,识别效果更好。此时海参与石块距离较近,电信号在此处的衰减程度小于识别沙地表面的海参时的衰减程度,因此在相同高度下,经过礁石旁边时的信号更强烈,识别效果更好一些。

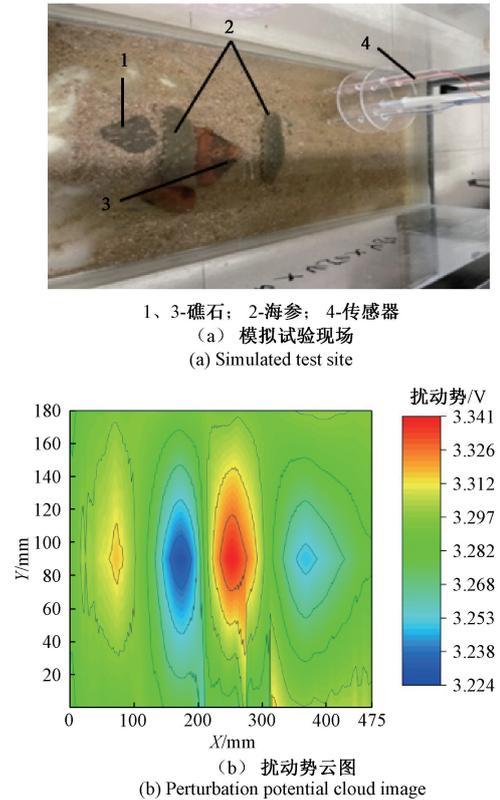


图 17 海参位于沙地表面及礁石附近的识别试验  
Fig. 17 Identification test of sea cucumber located on sandy surface and near reef

综上,主动电场定位技术可对不同位姿(横向或斜向)和环境背景下(礁石、沙地或石缝中)的海参进行有效识别,识别效果取决于海参与传感器的垂直距离,传感器提离距离越小,识别效果越好。

#### 4 结 论

在传统水下海参识别技术设备复杂、浑浊水域识别效果差的背景下提出了基于主动电场定位的海参水下识别技术,通过搭建试验台进行了海参水下识别验证实验。试验结果表明,主动电场定位技术可以有效识别海参,影响识别效果的主要参数为提离距离及识别信号的特性,在 50 mm 提离距离下海参引起的扰动势变化率约为 5%,海参与其他物体对主动电场的影响机制不同,主动

电场定位技术可以有效区分海参。石块及金属等物体。该技术相比于机器视觉有不受水下可视条件影响的独特优势,采用电信号作为识别信号保证了识别率,结构简单利于降低成本,该技术为水下识别提供了新的思路。

### 参考文献

- [ 1 ] 张韞峰,李娟,黎明. 基于图像处理的水下海参识别和定位方法[J]. 水下无人系统学报, 2021, 29(1): 111-123.  
ZHANG Y F, LI J, LI M. Underwater sea cucumber identification and localization method based on image processing[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2021, 29(1): 111-123.
- [ 2 ] 李娟,朱学岩,葛凤丽,等. 基于计算机视觉的水下海参识别方法研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(7): 171-177.  
LI J, ZHU X Y, GE F L, et al. Research on underwater sea cucumber identification based on computer vision[J]. Journal of Chinese Agricultural, 2020, 41(7): 171-177.
- [ 3 ] 王聪,薛晓军,李恒,等. 基于颜色校正和改进二维伽马函数的水下图像增强[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(2): 171-178.  
WANG C, XUE X J, LI H, et al. Underwater image enhancement based on color correction and improved 2D gamma function[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(2): 171-178.
- [ 4 ] CAPUTI, ARIEL A. The bioinspiring potential of weakly electric fish[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(2): 025004.
- [ 5 ] CAPUTI A A, AGUILERA P A. Strategies of object polarization and their role in electrosensory information gathering [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2020, 15(3), DOI:10.1088/1748-3190/ab6782.
- [ 6 ] 何春秋,彭杰纲. 主动电场管道堵塞内检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1054-1061.  
HE CH Q, PENG J G. Research on on-line inspection of blockage in pipeline based on active electrolocation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1054-1061.
- [ 7 ] GOTTWALD M, HERZOG H, EMDE G. A bio-inspired electric camera for short-range object inspection in murky waters [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2019, 14(3): 035002.
- [ 8 ] GOTTWALD M, MATUSCHEK A, GERHARD V. An active electrolocation catheter system for imaging and analysis of coronary plaques [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2017, 12(1): 015002.
- [ 9 ] BAI Y, SNYDER J B, PESHKIN M, et al. Finding and identifying simple objects underwater with active electrosense [J]. International Journal of Robotics Research, 2016, 34(10): 1255-1277.
- [ 10 ] PENG J. A study of amplitude information-frequency characteristics for underwater active electrolocation system[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015, 10(6): 066007.
- [ 11 ] DIMBLE K D, RANGANATHAN B N, KESHAVAN J, et al. Robust analysis of an underwater navigational strategy in electrically heterogeneous corridors [J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2016, 11(4): 045004.
- [ 12 ] 彭杰纲,雍涛,王文龙. 一种基于FFT特征提取定位算法的甚低频仿生水下主动电场定位系统[J]. 机械工程学报, 2016, 52(2): 157-165.  
PENG J G, YONG T, WANG W L. A biomimetic very low frequency(VLF) active electrolocation system based on FFT feature extraction localization algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(2): 157-165.
- [ 13 ] 潘德敏. 电流场水下无线通信系统发射机的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.  
PAN D M. Design and implementation of underwater wireless communication system transmitter based on current field [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [ 14 ] DU W H, YANG Y, LIU L N. Research on the recognition performance of bionic sensors based on active electrolocation for different materials[J]. Sensors, 2020, 20(16): 4608.
- [ 15 ] TURNER R W, MALER L, BURROWS M. Electroreception and electrocommunication [J]. Journal of Experimental Biology, 1999, 202(10): 1167-1458.
- [ 16 ] 杜文豪,杨玉娥,刘鲁宁,等. 主动电场定位中探头结构的优化[J]. 电子测量技术, 2020, 43(7): 23-28.  
DU W H, YANG Y E, LIU L N, et al. Optimization of

probe structure in electrolocation [ J ]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(7): 23-28.

## 作者简介



**杨玉娥**, 2002 年于山东农业大学获学士学位, 2005 年于山东农业大学获硕士学位, 2013 年于北京工业大学获博士学位, 现为济南大学副教授, 主要研究方向为传感器技术和无损检测技术。

E-mail: me\_yangye@ujn.edu.cn

**Yang Yu'e** received her B.Sc. degree from Shandong Agricultural University in 2002, received her M.Sc. degree from Shandong Agricultural University in 2005, and received her Ph.D. degree from Beijing University of Technology in 2013. She is currently an associate professor at University of Jinan. Her main research interests include sensor technology and NDT.



**杜文豪**, 2013 年于聊城大学获硕士学位, 现为济南大学硕士研究生, 主要研究方向为机械装备设计与分析。

E-mail: 201821200559@mail.ujn.edu.cn

**Du Wenhao** received his B.Sc. degree from Liaocheng University in 2013. He is currently a master student at University of Jinan. His main research interest is design and analysis of mechanical equipment.



**刘鲁宁**, 1992 年于山东工业大学获学士学位, 2004 年于山东大学获硕士学位, 2013 年于山东大学获博士学位, 现为济南大学机械工程学院教授, 主要研究方向为机械设计制造及其自动化、高效洁净刀具设计。

E-mail: me\_liuln@ujn.edu.cn

**Liu Luning** received her B.Sc. degree from Shandong University of Technology in 1992, received her M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Shandong University in 2004 and 2013, respectively. She is currently a professor at University of Jinan. Her main research interests include mechanical design, manufacturing and automation and design of high efficiency clean cutting tool.