

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508185

# 海上半潜油链式多节点传感器探测阵列研究\*

吴培良<sup>1,2</sup>  王智伟<sup>1</sup>  孔德明<sup>3,4</sup>  谢贝贝<sup>1,2</sup>  崔永强<sup>1,2</sup>

(1. 燕山大学人工智能学院(软件学院)  秦皇岛  066004; 2. 燕山大学河北省计算机虚拟技术与系统集成重点实验室秦皇岛  066004; 3. 燕山大学电气工程学院  秦皇岛  066004; 4. 中国科学院高能物理研究所天府宇宙线研究中心  成都  610299)

**摘要:**半潜油是一种长期悬浮和游荡在海水中的溢油,现有探测方法难以获取相当范围内完整一段半潜油的浓度、油种、组分、分布与边界等基本必要信息,从而无法对海上半潜油溯源、追踪和预测等探测问题开展深入研究。为此,研究了一种由多个主、辅节点相间组成的海上半潜油链式多节点传感器探测阵列。其中,主节点采用基于激光诱导时间分辨荧光光谱技术的水下探测装置以获取浓度、油种与组分等信息,辅节点则采用低成本的六电极电导率传感器以实现浓度、分布与边界测量。所述六电极传感器由6个按特定几何排列的环形电极构成,通过对多对电极间电压的测量获取局部电阻率数据,并据此构建电阻率——半潜油浓度的回归模型。最后,通过实验验证了该模型具有良好的泛化能力和较高的测量精度,其在校准和验证集中的决定系数分别0.95和0.96。该研究为大剖面、立体化探测海上半潜油提供了一种新的链式传感器阵列和浓度计算方法,很好地解决了探测半潜油所需的基本必要参数测量问题。

**关键词:** 溢油;半潜油;电阻率;六电极电导率传感器;链式多节点传感器探测阵列

**中图分类号:** TP212;TP274;TN06      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.8040

## Study of an offshore submerged oil chained multi-node sensor detection array

Wu Peiliang<sup>1,2</sup>  Wang Zhiwei<sup>1</sup>  Kong Deming<sup>3,4</sup>  Xie Beibei<sup>1,2</sup>  Cui Yongqiang<sup>1,2</sup>

(1. School of Artificial Intelligence(School of Software), Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. The Key Laboratory for Computer Virtual Technology and System Integration of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 4. Tianfu Cosmic Ray Research Center, Institute of High Energy Physics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China)

**Abstract:** Submerged oil is a type of oil spill that remains suspended and drifting in seawater for extended periods. Existing detection methods find it difficult to obtain the essential information of submerged oil over a considerable range, including concentration, type, composition, distribution, and boundary, making it difficult to conduct in-depth studies on its source tracking, tracking, and prediction. To this end, a chain-type multi-node sensor array for detecting submerged oil in marine environments was developed, consisting of alternating main and auxiliary nodes. The main nodes employ a high-sensitivity underwater detection device based on laser-induced time-resolved fluorescence spectroscopy to obtain information such as oil type, concentration, and composition, while the auxiliary nodes utilize low-cost six-electrode conductivity sensors to measure concentration, distribution, and boundary. The six-electrode sensor is composed of six annular electrodes arranged in a specific geometric configuration. By measuring the voltage between multiple pairs of electrodes, local resistivity data are obtained, based on which a regression model relating resistivity to the concentration of submerged oil is constructed. Finally, experimental validation demonstrated that the model exhibits strong generalization capability and high measurement accuracy, with coefficients of determination of 0.95 and 0.96 for the calibration and validation sets, respectively. This

收稿日期:2025-02-24      Received Date: 2025-02-24

\* 基金项目: 国家自然科学基金(62173289, U20A20167)、河北省自然科学基金(F202103079, F2021203084)、中央引导地方科技发展资金(236Z1811G, 236Z1704G)、河北省创新能力提升计划(22567626H)、秦皇岛市科学技术研究与发展计划(202302B023)项目资助

study provides a novel chain-type sensor array and concentration calculation method for large-profile, three-dimensional detection of submerged oil at sea, effectively addressing the measurement requirements for the fundamental parameters in such detection.

**Keywords:** oil spill; submerged oil; resistivity; six-electrode conductivity sensor; chained multi-node sensor detection array

## 0 引言

随着全球能源需求的不断增长,海洋运输业和海洋石油开采业快速发展,海上溢油污染问题日益严重,已成为威胁海洋环境和生态安全的重要隐患<sup>[1-3]</sup>。海上发生的溢油事故或由海底裂缝、冷泉等喷溢出的石油污染物,在波浪和海流等水动力条件、油品与海水的相互作用以及油品自身物理性质等多重因素的共同作用下,最终主要以漂浮于海面的溢油、悬浮于水体中的半潜油以及沉积于海底的沉底油 3 种形态存在<sup>[4-5]</sup>。其中,针对海面溢油的探测装置与治理技术相对成熟,可见光成像技术、激光诱导荧光技术、合成孔径雷达技术和高光谱探测技术均可实现海面溢油的监测与评估<sup>[6-10]</sup>,但对于沉底油和半潜油目前仍缺乏成熟的探测手段和有效的治理方法。传统的声呐技术、原位采样分析技术存在容易误判别、采样时间长、作业区域小等问题,无法满足实时跟踪探测的需求<sup>[11-12]</sup>。因此,半潜油和沉底油是海上溢油探测的难题之一<sup>[13]</sup>。相较于沉底油,半潜油因长期悬浮并随海流迁移扩散,具有较强的隐蔽性和游荡性,一旦大面积聚集或扩散至敏感海域,往往会对海洋生态系统造成更加严重且突发性的危害<sup>[14-16]</sup>。因此,开展高效、准确的海上半潜油探测研究,不仅是污染治理与生态修复的前提和必要保障,而且具有十分突出的紧迫性与现实意义。

海上半潜油通常以油颗粒或油球形式悬浮于水中,表现出缓慢上浮、下沉或漂移的动态特征。在某些情况下,半潜油还可能向上与海面溢油连接,或向下沉积至海底形成沉底油,形成水体中结构如“长龙”般延展的油带。受溢油源、海流和水体环境等影响,此类油带在漂浮移动趋势上存在显著差异,如有的油滴群体持续上浮,有的则缓慢沉降,油滴尺寸分布范围广泛,从微米到厘米级不等,常呈离散分布或局部聚集状态。近年来,激光雷达、水下视觉成像等新兴技术也被尝试应用于半潜油探测。其中,激光雷达利用特定波段激光在海水中具有较强透过性的特点,通过测量半潜油所产生的后向散射回波信号,实现对半潜油的探测<sup>[17]</sup>。水下视觉成像技术则主要依托航行器搭载的成像设备开展工作<sup>[18]</sup>。该技术多以船载遥控潜水器或自主水下航行器作为平台,配备适用于水下环境的相机或摄像机,通过采集和分析水下图像或视频数据,对半潜油的存在及分布情况进行识别与判别。尽管此类方法在直观展示半潜油形态和分布方

面具有一定优势,但其获取的信息仍然局限,属于“欠缺”范畴,即无法同时获取半潜油的浓度、油种、组分、分布及边界等 5 类完整信息。这一不足显著限制了其在成因分析、演化规律研究及溯源预测等方面的应用深度,难以为半潜油污染的系统研究和综合治理提供有力支撑。

相较于上述探测方法,孔德明等<sup>[19]</sup>基于激光诱导时间分辨荧光光谱(laser-induced time-resolved fluorescence spectroscopy, LITRFS)技术,研究了一种海上半潜油原位探测装置。该装置采用 SR163 型固定光栅光谱仪与 DH720-18F-0 型增强电荷耦合器件(intensified CCD, ICCD)替代 FLS1000 荧光光谱仪中的旋转光栅光谱仪与光电倍增管,从而实现了时间分辨荧光光谱数据的快速采集,大幅提升了现场实时探测能力。在结构设计上,装置中的光源舱和接收舱独立布置,二者之间为海水流经区域。当船舶曳带装置在水下移动时,含有油滴的海水会流经光源舱和接收舱之间的区域,实现原位探测。这种设计显著改善了探测过程中的水交换性能,从而提升了探测的灵敏度、准确性与可靠性。然而,基于 LITRFS 的水下探测装置仍然存在一定的局限性,其所能获取的信息范围有限,难以实现对较大水体范围内半潜油浓度、油种、组分、分布和边界等 5 种基本必要信息的全面探测。

为获取一段完整半潜油探测所需的基本必要信息,本文在 Jurgen 等<sup>[20]</sup>提出的用于测量海水盐度的链式探测阵列结构的基础上,进一步研究了一种由多个主、辅节点相间组成的链式多节点传感器探测阵列,旨在实现对半潜油连续、广域探测,从而弥补传统方法在空间覆盖和信息完整性上的局限。链式多节点传感器探测阵列中的主节点采用基于 LITRFS 技术的水下探测装置。鉴于探测阵列需由一定数量的传感器组成,而主节点传感器造价成本较高,为降低探测成本,本文重点研究了一种由六电极电导率传感器组成的辅助节点传感器,旨在实现经济性科学与科学探测之间的平衡。通过测量船舶拖曳所研究的链式多节点传感器探测阵列在海上巡回移动,可实现对海上半潜油大范围、立体化、高分辨力探测,从而得到包含浓度、油种、组分、分布和边界等参数在内的“满秩”探测信息。此外,本文还基于六电极电导率传感器的检测数据,建立了半潜油浓度量化模型,为浓度参数的准确测量提供了一种新的方法。该研究不仅在技术层面推动了半潜油探测手段的创新,而且在应用层面为海洋溢油污染治理和生态环境保护提供了重要的理论支撑。

## 1 链式多节点传感器探测阵列组成结构及关键技术研究

本文的技术路线为通过分析现有方法在获取一段连续、完整半潜油探测信息方面的不足,提出构建链式多节点传感器探测阵列的总体方案。该阵列主要由主、辅节点传感器相间组成,其中主节点采用课题组前期研制的基于 LITRFS 技术的水下探测装置,辅节点则采用自主研发的六电极电导率传感器,以在确保探测精度的同时有效降低整体成本。在此基础上,结合六电极电导率传感器的测量原理,建立半潜油浓度量化模型,实现对浓度参数的准确表征。最后,通过实验进一步验证了六电极电导率传感器的可靠性以及所建立浓度量化模型的有效性。

### 1.1 链式多节点传感器探测阵列组成结构

本文所研究的海上半潜油链式多节点传感器探测阵

列总体结构如图 1(a)所示。

由图 1(a)可见,海上半潜油链式多节点传感器探测阵列主要由拖缆、拖鱼以及主、辅节点传感器等组成。其中,主、辅节点传感器通过万向节固定安装在拖缆上,拖缆则通过拖船上的绞车实现回收与下放。在拖船的牵引下,该链式多节点传感器探测阵列能够随拖船移动主动响应半潜油悬浮与游荡的输移特性,从而实现对“长龙”中一段完整半潜油基本必要信息的探测。此外,当拖船牵引链式多节点传感器在水下沿单一方向移动时,传感器阵列可在水下形成连续的水平 and 垂直测量剖面,类似于海洋的一个切片。经过多次巡回移动后,多个剖面数据叠加形成一个三维立方体数据集,如图 1(b)所示。在该数据集中,任意两条测量直线的交点对应不同深度和空间位置的半潜油参数信息。通过对这些交点  $P(x_i, y_i, z_i)$  处的数据进行解析、反演及相关处理,即可获取半潜油探测所需的基本必要信息,为后续浓度定量和空间分布分析提供数据支撑。

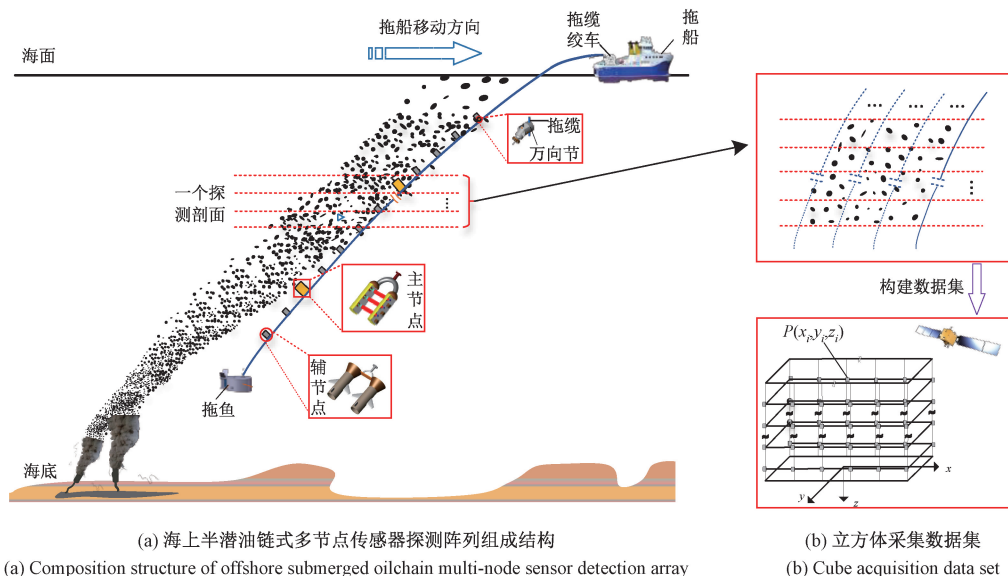


图 1 海上半潜油链式多节点传感器探测阵列组成结构和立方体采集数据集

Fig. 1 Offshore submerged oil chained multi-node sensor detection array

compositional structure and cube acquisition dataset

基于 LITRFS 技术的水下半潜油探测装置作为链式多节点传感器探测阵列中的主节点,关于该装置的详细内容可参考文献[19]。尽管主节点传感器在油种识别、浓度预测与组分分析上具有高灵敏度和高分辨力的优势,但其研制与部署成本较高,限制了在大范围、高密度中大量布设的可行性。在保证探测科学性与完整信息获取的前提下兼顾工程可行性与经济性,本文提出在链式探测阵列中采用主、辅节点相间布设的混合结构,即以少量高性能 LITRFS 主节点负责识别油种和组分,配以大

量低成本的辅节点用于密集化的浓度、分布与边界测量。这种排布方式既节约了探测成本,还能够有效地探测大剖面、不同水深下的半潜油信息。本文将重点研究链式多节点传感器探测阵列中的辅助节点传感器,深入探讨其组成结构和工作原理,以为半潜油探测提供更加优化的方案。

### 1.2 辅助节点传感器组成结构和测量原理

#### 1) 辅助节点传感器组成结构

本文研究的辅助节点传感器组成结构如图 2 所示。



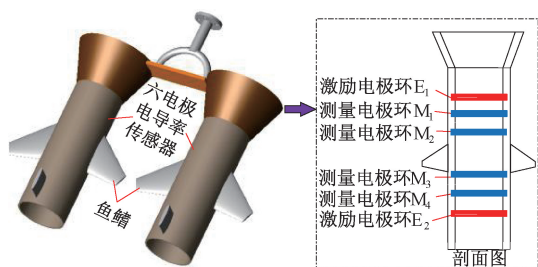


图 2 辅助节点传感器组成结构

Fig. 2 Auxiliary node sensor composition

由图 2 可见,为了确保辅助节点传感器在水中移动时的平稳性,辅节点采用了由两个相同规格尺寸的六电极电导率传感器组合而成的结构。其中,每个六电极电导率传感器均由一个环形多级电阻模块组成,该模块主要包括两个恒流源激励电极环  $E_1$ 、 $E_2$  和 4 个测量电极环  $M_1 \sim M_4$  等。这些电极环均采用不锈钢材料制作而成并嵌入到绝缘层中,如图 3 所示。绝缘层采用聚醚醚酮材料注塑而成,其表面光滑、不易沾污、挂蜡。这种高强度的检测管件具有良好的电检测特性。在实际海域应用中,六电极电导率传感器的上端需设计为喇叭口结构,这可有效汇聚流体,增强被测海水的交换特性,从而改善流体流经传感器测量管道的均匀性,提升整体测量精度与稳定性。此外,传感器外侧增设的“鱼鳍”结构能够显著增强辅助节点在水中的受流稳定性,有助于维持传感器的平衡姿态,减少因水流冲击导致的晃动,从而进一步保证测量数据的可靠性。

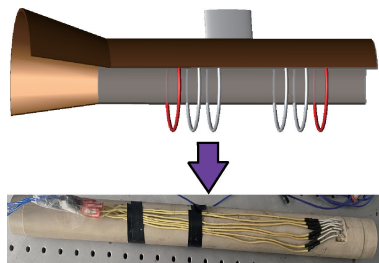


图 3 六电极电导率传感器实物

Fig. 3 Physical diagram of six-electrode conductivity sensor

相较于传统的现场采样方法,六电极电导率传感器具备实时、连续采集数据的显著优势;与激光雷达、水下视觉成像以及 LITRFS 等方法相比,它还具有成本低廉、易于批量生产和灵活部署等特点。凭借这些优势,六电极电导率传感器作为辅助节点能够大规模应用于链式多节点阵列中,从而显著提升海上半潜油的空间覆盖范围,并在一定程度上弥补现有方法在广域和立体探测能力上的不足。

## 2) 辅助节点传感器测量原理

辅助节点中六电极电导率传感器的半潜油浓度测量

原理如图 4 所示。

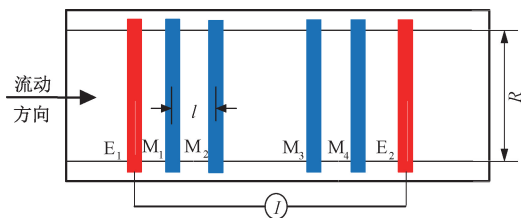


图 4 六电极电导率传感器测量浓度原理

Fig. 4 Schematic diagram of concentration measurement by six-electrode conductivity sensor

由图 4 可见,在走航式巡回探测过程中,海水流经六电极电导率传感器的测量管道。此时,海水作为连续相,而分散于其中的油滴则构成离散相。随着离散相体积分数的随机波动,流体体系的整体导电性能受到扰动,其等效电阻率也会发生相应变化。由于油通常被视为绝缘体,其在水中的含量越高,对导电性能的破坏作用越显著,从而导致油水混相体系的电阻率升高<sup>[21]</sup>。基于这一物理机理,利用六电极电导率传感器实时获取的电阻率变化,即可进一步计算并反演得到对应的半潜油浓度、分布及其边界,为后续量化分析提供数据支撑。

结合图 4 可知,在激励电极环  $E_1$  和  $E_2$  上施加恒定电流  $I$  后,上游测量电极  $M_1$ 、 $M_2$  以及下游测量电极  $M_3$ 、 $M_4$  会在局部电场作用下产生相应的电位差,并输出电压信号。以上游测量电极  $M_1$ 、 $M_2$  为例,根据两端测得的电压值,可分别计算其在全水相条件和油水混相条件下的电阻率:

$$\begin{cases} \rho_w = \frac{U_w S^2}{IV} \\ \rho_m = \frac{U_m S^2}{IV} \\ S = \frac{\pi R^2}{4} \\ V = Sl \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho_w$  和  $U_w$  分别为  $M_1$ 、 $M_2$  两个测量电极之间全水相电阻率和电压值; $\rho_m$  和  $U_m$  分别为油水混合流体的电阻率和电压值;两个测量电极之间为一个圆柱体, $S$  和  $V$  分别表示该圆柱体的底面积和体积; $R$  和  $l$  分别为 26 和 20 mm,分别表示底面直径和两个测量电极之间的距离; $I=13.3$  mA,表示恒流源电路激励电流。因此,六电极电导率传感器在混相条件下的电阻率  $\rho_{1,m}$  表示为:

$$\rho_{1,m} = \frac{\rho_{1,2,m} + \rho_{3,4,m}}{2} \quad (2)$$

式中: $\rho_{1,2,m}$  和  $\rho_{3,4,m}$  分别六电极电导率传感器  $M_1$ 、 $M_2$  和  $M_3$ 、 $M_4$  两对检测环得到的混相电阻率。

同理,可以得到辅节点中另一个六电极电导率传感

器的混相电阻率  $\rho_{2,m}$ , 故整个辅助节点传感器获取的混相电阻率  $\rho$  则表示为:

$$\rho = \frac{\rho_{1,m} + \rho_{2,m}}{2} \quad (3)$$

综上所述, 半潜油浓度与混相电阻率具有显著相关性。基于上述电学测量原理, 本文利用辅助节点传感器在不同油浓度条件下采集的电阻率数据, 并结合线性回归方法建立浓度量化模型, 从而实现半潜油浓度的预测与反演。

### 3) 半潜油浓度量化模型

为研究混相电阻率与半潜油浓度之间的定量关系, 本文假设二者满足如下线性回归模型:

$$y = kx + b \quad (4)$$

式中:  $x$  表示混相电阻率;  $y$  为半潜油浓度。为了利用式(4)快速计算半潜油浓度, 可通过最小二乘法求解拟合参数  $k$  和  $b$ 。最小二乘法的核心思想通过最小化模型预测值与实测值之间的误差平方和, 得到最优参数估计, 从而使模型具有最佳拟合效果。其目标函数可表示为:

$$J_1 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \frac{1}{2} (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y})^T (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \quad (5)$$

式中:  $\hat{\mathbf{y}} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_m]^T$  为模型估计值;  $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$  为实测值。为了便于推导, 可将估计值  $\hat{\mathbf{y}}$  写成矩阵形式:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X}\boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \\ \boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{k} \\ \hat{b} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中, 可得目标函数:

$$J_1 = \frac{1}{2} (\mathbf{X}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{y})^T (\mathbf{X}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{y}) \quad (7)$$

对式(7)关于  $\boldsymbol{\theta}$  求偏导并令其等于 0, 得到方程:

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \boldsymbol{\theta} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (8)$$

解得参数估计量为:

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (9)$$

将式(9)代入式(4)中, 即可得到混相电阻率与半潜油浓度之间的线性回归方程。至此, 半潜油浓度量化模型建立完成。在此基础上, 本文进一步搭建了实验系统, 对不同浓度条件下的半潜油进行模拟实验, 以验证辅助节点传感器的测量性能及浓度量化模型的有效性。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验环境与样品制备

为验证辅助节点中六电极电导率传感器的实际测量性能, 本文在实验室环境下搭建了半潜油浓度测量系统, 其结构示意和实物如图 5 所示。该系统能够模拟不同浓度条件下的油水混合状态, 并为传感器提供稳定可控的测试环境, 从而有效评估传感器在半潜油浓度检测过程中的灵敏度、稳定性及测量精度。

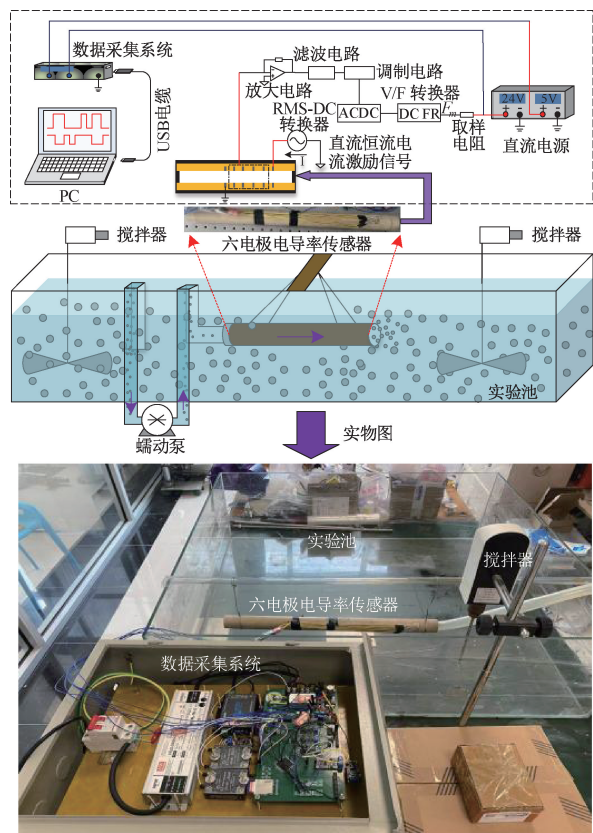


图 5 半潜油浓度测量系统

Fig. 5 Concentration measurement system for submerged oil

由图 5 可见, 半潜油浓度测量系统主要由一个尺寸为  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$  的实验池、蠕动泵、搅拌器、输送管道、六电极电导率传感器、激励与信号处理电路、数据采集系统以及 PC 等部分构成。其中, 激励与信号处理电路包括直流恒流源、放大与滤波调制电路、RMS-DC 转换器、V/F 转换器及  $24 \text{ V}$  直流电源等模块, 用于为传感器提供稳定的激励电流, 并对输出信号进行转换, 以满足后续数据采集与处理的需求。在系统采集数据过程中, 蠕动泵用于驱动半潜油流经传感器, 搅拌器确保油水混合的均匀性, 输送管道实现流体的有序传输, 六电极电导率

传感器对半潜油的电阻率进行实时测量,数据采集系统则完成信号同步采集与传输,最终由 PC 进行处理与存储。

本文实验所用半潜油样本由白油与海水混合而成。选用十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)作为分散剂,以促进油品在海水中的快速混合和均匀悬浮,从而模拟半潜油的实际存在状态。以制备浓度为 50% 的半潜油样本为例,其具体步骤如下:1)向容器中注入预先准备的海水,并将水面高度控制在 0.13 m;2)向容器中加入一定量的 SDS,随后使用搅拌器对海水进行搅拌,直至分散剂完全溶解并均匀分布于水体中;3)在持续搅拌条件下,逐步向容器内缓慢加入白油,并控制液面高度维持在 0.13 m。通过持续搅拌作用,白油得以均匀分散并稳定悬浮于海水中,最终形成典型的半潜油样本。

基于上述方法,本文制备了 10 种不同浓度的半潜油样品,以覆盖实验所需的浓度梯度区间。各样品的具体配比及参数如表 1 所示,为后续传感器性能测试与浓度反演模型构建提供了可靠的实验基础。

表 1 实验油品溶液浓度

Table 1 Experimental oil solution concentrations			
样本	浓度/%	样本	浓度/%
1	2	6	25
2	5	7	30
3	10	8	35
4	15	9	40
5	20	10	50

2.2 数据采集

由于实验池尺寸有限,数据采集过程中六电极电导率传感器需保持固定位置,半潜油则通过蠕动泵流经传感器,这样可近似模拟船舶拖曳传感器在海水中的移动的实际情况。在半潜油流经传感器的过程中,六电极电导率传感器会实时输出随时间变化的电压波动信号。这些信号由多通道信号采集系统进行同步采集,并通过数据接口传输至 PC 进行进一步处理与存储。随后,通过对 PC 采集到的原始信号进行滤波、去噪及计算等处理,可获得油水混相条件下的有效电阻率数据,为建立电阻率与半潜油浓度之间的定量关系提供实验依据。

在实验过程中,每种浓度的电阻率采集时间均设定为 30 s,采样频率为 32 Hz,以保证数据的时效性与代表性。不同浓度条件下由上、下游电极(M<sub>1</sub>和 M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>和 M<sub>4</sub>)分别测得的混相电阻率结果如表 2 所示。

2.3 结果分析

由表 2 可见,随着半潜油浓度的增加,上游与下游混相电阻率均呈现明显上升趋势,表明半潜油的导电性随

含油量的增加而逐渐降低。其中,上游电阻率的增长幅度大于下游。上、下游电阻率差异相对较小,且下游电阻率略高于上游。总体而言,半潜油浓度越高,则导电性越差,电阻率越大,这一规律与油水混合物的物理特性相一致。

表 2 不同浓度上、下游电极测得的混相电阻率值

Table 2 Multiphase resistivity values measured at upstream and downstream electrodes at different concentrations		
浓度/%	上游混相电阻率/(Ω·m)	下游混相电阻率/(Ω·m)
2	5.81	9.64
5	6.16	9.94
10	6.61	10.28
15	7.71	11.10
20	8.90	11.92
25	10.34	12.86
30	11.89	13.79
35	13.89	14.91
40	16.04	16.03
50	22.18	18.86

在不同浓度条件下,分别采集上、下游电极的电阻率,并取其平均值作为该浓度下的代表性电阻率,再将该结果代入式(9)计算可得:

$$\begin{cases} \hat{k} = 3.60 \\ \hat{b} = -19.78 \end{cases} \tag{10}$$

将式(10)代入式(4)中,可得半潜油浓度量化模型为:

$$y = 3.60x - 19.78 \tag{11}$$

在不同电阻率条件下,半潜油浓度的实测值与根据式(11)计算得到的预测值进行了对比,其结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,六电极电导率传感器测得的电阻率随着半潜油浓度的增加而整体呈现上升趋势,且电阻率与浓度之间具有较为显著的线性相关性。这说明电阻率参数能够有效反映半潜油浓度变化的规律。进一步分析可见,当半潜油浓度低于 10% 时,传感器测量值与实际浓度之间的偏差相对较大,可能受到低浓度条件下油水混合均匀性不足及信号分辨率限制的影响。而当浓度达到或超过 10% 时,模型表现出较高的稳定性与准确性,其测量值与实际值之间的平均相对误差仅为 6.06%。这一结果表明,所构建的电阻率—浓度回归模型在中高浓度范围内具有良好的量化精度和应用潜力,可为海上半潜油的浓度监测提供可靠的实验支撑。

为验证所构建浓度量化模型的泛化能力,本研究采用 Kennard-Stone 抽样算法对 10 个不同油浓度的半潜油



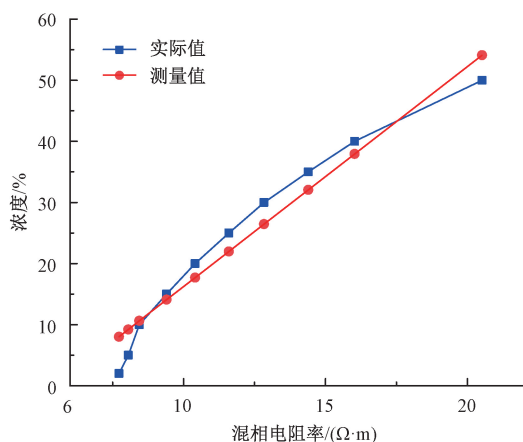


图 6 不同电阻率下浓度的实际值与测量值

Fig. 6 Actual and measured values of concentrations corresponding to different resistivities

样本进行合理划分。该算法能够在样本空间中均匀选取具有代表性的数据点,从而保证校准集与验证集在分布上的覆盖性和多样性。其中,7 个样本被划入校准集,用于模型训练与参数拟合;其余 3 个样本划入验证集,用于检验模型在未见数据上的预测性能。图 7 所示为模型在校准集与验证集上的预测浓度与实际浓度的散点对比关系。从图 7 可以直观地看出,模型在两类数据集上均表现出良好的拟合趋势与预测一致性,这为后续的精度分析与性能评价提供了可靠依据。

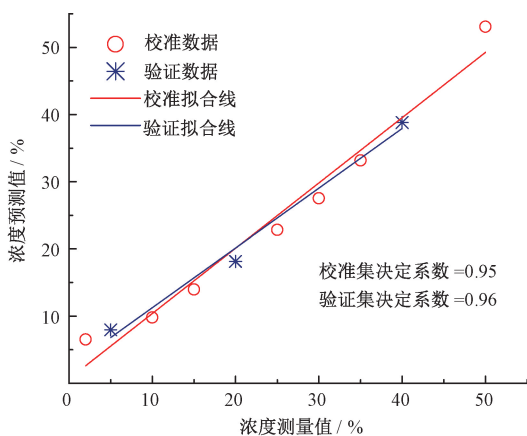


图 7 校准集和验证集中浓度测量值和预测值的散点图

Fig. 7 Scatter plot of measured and predicted concentration values in the calibration and validation sets

由图 7 可见,所建立的模型在半潜油浓度量化方面取得了较为理想的结果。决定系数作为衡量模型拟合优度的重要统计指标,其取值范围为 0~1,数值越接近 1,表明模型对实际数据的拟合程度越高、预测效果越好。本文采用线性回归方法构建的浓度量化模型在校准集和

验证集上的决定系数分别为 0.95 和 0.96。如此高的一致性结果不仅说明模型能够较好地反映半潜油浓度与电阻率之间的线性关系,而且表明其在未见数据上的预测性能同样可靠,具有较强的泛化能力和应用潜力。

### 3 结 论

为获取一段完整海域内半潜油的基本必要信息,本文研究了一种由多个主、辅节点相间组成的海上半潜油链式多节点传感器探测阵列。其中,研究重点集中在由六电极电导率传感器构成的辅助节点传感器。基于该传感器,本文在实验室环境下搭建了半潜油浓度测量系统,并开展了系统性实验研究。实验结果表明,利用六电极电导率传感器采集的电阻率数据,结合线性回归方法建立的浓度量化模型,在校准集和验证集上的决定系数分别达到 0.95 和 0.96,显示出该模型具备较高的拟合精度和良好的预测性能。上述结果进一步验证了所研制辅助节点传感器在半潜油浓度测量中的可靠性与实用性,为链式多节点阵列在海上半潜油“满秩”探测中的应用奠定了坚实的实验基础与理论支撑。

### 参考文献

- [1] YANG J, WAN J, MA Y, et al. Research on object-oriented decision fusion for oil spill detection on sea surface [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2019.
- [2] PASHNA M, YUSO R, ISMAIL Z H, et al. Autonomous multi-robot tracking system for oil spills on sea surface based on hybrid fuzzy distribution and potential field approach [J]. Ocean Engineering, 2020, 207:107238.
- [3] 彭伟,厉运周,高艳波,等.我国海洋观测仪器设备体系化发展研究[J].仪器仪表学报,2023,44(12):88-100.
- [4] PENG W, LI Y ZH, GAO Y B, et al. Research on the systematization of China's marine observation instrumentation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(12): 88-100.
- [5] FANG S, MU L, JIA S, et al. Combining artificial intelligence and laboratory experiments to explore behavior process of sunken and submerged oil: A typical oil drift and diffusion detection technology [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,367:133026.
- [6] FANG S, MU L, JIA S, et al. Research on sunken & submerged oil detection and its behavior process under the action of breaking waves based on YOLOv4 algorithm [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 179:113682.

- [6] MASSARO A, LAY-EKUALILLE A, CARATELLI D, et al. Optical performance evaluation of oil spill detection methods: Thickness and extent [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(12): 3332-3339.
- [7] 程朋飞, 朱燕萍, 潘金燕, 等. 三维荧光光谱技术结合交替残差三线线性化算法检测成品油污染物[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 62-69.
- CHENG P F, ZHU Y P, PAN J Y, et al. Detection of pollutants in finished oil products using three-dimensional fluorescence spectroscopy technology combined with the alternating residual trilinearization algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 62-69.
- [8] 李煜, 陈杰, 张渊智. 合成孔径雷达海面溢油探测研究进展[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 751-762.
- LI Y, CHEN J, ZHANG Y ZH. Research progress on synthetic aperture radar detection of oil spills on the sea surface [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2019, 41(3): 751-762.
- [9] 吴一全, 郝亚冰, 吴诗姘, 等. 基于KFCM和改进CV模型的海面溢油 SAR 图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2812-2818.
- WU Y Q, HAO Y B, WU SH Y, et al. SAR image segmentation of marine oil spills based on KFCM and improved CV models [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2812-2818.
- [10] 薛庆生, 田中天, 郝锡杰, 等. 基于小波分析的快照式高光谱海面溢油厚度分析[J]. 光学学报, 2020, 40(17): 207-213.
- XUE Q SH, TIAN ZH T, HAO X J, et al. Analysis of oil spill thickness on the sea surface using snapshot hyperspectral imaging based on wavelet analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(17): 207-213.
- [11] HANSEN K A, GUIDROZ L, HAZEL B, et al. Sunken oil recovery system recommendations [C]. International Oil Spill Conference Proceedings. American Petroleum Institute, 2014(1): 2014-2023.
- [12] LI J, AN W, XU C, et al. Sunken oil detection and classification using MBES backscatter data [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 180: 113795.
- [13] 李跃全. 渤海半潜和沉底油漂移预测模型及风险评估[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- LI Y Q. Prediction model and risk assessment for oil drift from submerged and Bottom-sitting oil spills in the bohai sea [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.
- [14] 孔德明, 崔耀耀, 仲美玉, 等. 基于TSFS结合高阶张量特征提取方法的海水半潜油种类鉴别研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(1): 62-69.
- KONG D M, CUI Y Y, ZHONG M Y, et al. Research on the identification of semi-submersible oil types in seawater based on TSFS combined with high-order tensor feature extraction methods [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(1): 62-69.
- [15] JACKETTI M, BEEGLE-KRAUSE C, ENGLEHARDT J D. A review on the sinking mechanisms for oil and successful response technologies [J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 160: 111626.
- [16] YUE Y U, GAO Y L, XUE Z, et al. A laboratory study on the effect of suspended particulate matter concentration on the submerging and sinking process of oil spill [J]. Chinese Journal of Marine Environmental Science, 2017, 36(6): 858-863.
- [17] 王钰, 赵一鸣, 潘超, 等. 激光雷达对沉潜油探测的探索[J]. 遥测遥控, 2020, 41(2): 36-42.
- WANG Y, ZHAO Y M, PAN CH, et al. Exploration of laser radar for submerged oil detection [J]. Remote Sensing and Remote Control, 2020, 41(2): 36-42.
- [18] SHAFFER F, SAVA O, LEE K, et al. Determining the discharge rate from a submerged oil leak jet using ROV video [J]. Flow Measurement & Instrumentation, 2015, 43: 34-46.
- [19] 孔德明, 王智伟, 陈晓玉, 等. 基于激光诱导时间分辨荧光光谱的半潜油水下探测装置研究[J]. 计量学报, 2025, 46(7): 967-975.
- KONG D M, WANG ZH W, CHEN X Y, et al. Research on a semi-submersible oil detection device based on laser-induced time-resolved fluorescence spectroscopy [J]. Acta Metrologica Sinica, 2025, 46(7): 967-975.
- [20] JURGEN S. A towed CTD chain for two-dimensional high resolution hydrography [J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research, 1997, 44(1): 147-165.
- [21] 孙金辉, 谢丽蓉. 原油含水率测量传感器性能优化实验研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(8): 97-104.
- SUN J H, XIE L R. Experimental study on performance optimization of crude oil water content measurement sensors [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(8): 97-104.



作者简介



吴培良,2004 年于燕山大学获得学士学位,2010 年于燕山大学获得博士学位,现为燕山大学教授,主要研究方向为智能信息处理、家庭服务机器人、海面溢油探测。  
E-mail: peiliangwu@ysu.edu.cn

**Wu Peiliang** received his B. Sc. degree from Yanshan university in 2004, and Ph. D. degree from Yanshan university in 2010, respectively. Now he is a professor in Yanshan university. His main research interests include intelligent information processing, home service robots, and marine oil spill detection.



孔德明(通信作者),2007 年于燕山大学获得学士学位,2015 年于北京航空航天大学获得博士学位,现为燕山大学教授,主要研究方向为智能信息处理、海面溢油探测。  
E-mail: demingkong@ysu.edu.cn

**Kong Deming** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Yanshan university in 2007, and Ph. D. degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2015, respectively. Now he is a professor in Yanshan university. His main research interests include intelligent information processing, and marine oil spill detection.