

# Simulation and Experiment of Underwater Target Active Electromagnetic Detection Based on SLF/ELF Artificial Source

Zongyang Shi<sup>1,\*</sup>, Yiyu Zhao<sup>1</sup>, Lichao Ma<sup>1</sup>, Xueming Peng<sup>1</sup>, Yike Xu<sup>1</sup>, Shurong Guo<sup>1</sup>, Meng Wang<sup>2</sup>, Yuhong Wang<sup>3</sup>

<sup>1</sup>The Fourth Research Department, Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing, China

<sup>2</sup>School of Geophysics and Information technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing, China

<sup>3</sup>Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan, China

## Email address:

shizongyang13@mails.ucas.ac.cn (Zongyang Shi), zhyznd@163.com (Yiyu Zhao), wangmeng@cugb.edu.cn (Meng Wang),

wyhong@zju.edu.cn (Yuhong Wang)

\*Corresponding author

## To cite this article:

Zongyang Shi, Yiyu Zhao, Lichao Ma, Xueming Peng, Yike Xu, Shurong Guo, Meng Wang, Yuhong Wang. Simulation and Experiment of Underwater Target Active Electromagnetic Detection Based on SLF/ELF Artificial Source. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 2, 2021, pp. 58-67. doi: 10.11648/j.sd.20210902.17

Received: March 3, 2021; Accepted: April 15, 2021; Published: April 26, 2021

**Abstract:** In view of the detection performance constraints brought by the further application of demagnation and noise reduction technology to traditional sonar and magnetic anomaly detection technology, in order to explore the possibility and detection mode of active electromagnetic (EM) detection technology applied to underwater large target detection and positioning, the active EM detection method for underwater targets based on SLF/ELF artificial EM field source is established in this paper, and the active EM detection method of underwater target is modeled and simulated by Ansys Maxwell, the magnetic anomaly field induced by underwater target is calculated and analyzed. Then, the key parameters of the underwater target active EM detection system are listed based on the simulation, and a underwater target active EM detection prototype has been developed. Finally, the simulation results and prototype parameters of the active EM detection method of underwater targets are verified by the scaled ratio experiment. The results show that the parameters of prototype system designed according to the simulation results are correct and effective, and the active EM detection technology based on SLF/ELF can be applied to the underwater large target detection.

**Keywords:** Active Underwater Target Detection, Simulation Model bAsed on Ansys, Underwater Target Detection Experiment, Magnetic Detection

## 基于SLF/ELF人工源的水下目标主动电磁探测仿真与实验

时宗洋<sup>1,\*</sup>, 赵一字<sup>1</sup>, 马力超<sup>1</sup>, 彭雪明<sup>1</sup>, 徐轶轲<sup>1</sup>, 郭树荣<sup>1</sup>, 王猛<sup>2</sup>, 王玉红<sup>3</sup>

<sup>1</sup>第四研究室, 北京机械设备研究所, 北京, 中国

<sup>2</sup>中国地质大学(北京)地球物理与信息技术学院, 北京, 中国

<sup>3</sup>浙江大学海洋学院, 舟山, 中国

## 邮箱

shizongyang13@mails.ucas.ac.cn (时宗洋), zhyznd@163.com (赵一字), wangmeng@cugb.edu.cn (王猛),

wyhong@zju.edu.cn (王玉红)

**摘要：**针对当前及未来水下大型目标进一步应用消磁降噪技术给传统声呐及磁异常探测技术探测性能提升带来的瓶颈约束问题，为探索主动电磁探测技术应用于水下大型目标探测定位的可能性及探测模式，本论文建立了基于超低频(SLF)/极低频(ELF)人工电磁场源的水下目标主动电磁探测方法，通过Ansys Maxwell对水下目标主动电磁探测方法进行建模仿真，分析了目标磁异常场；然后，基于仿真结果给出水下目标主动电磁探测系统关键参数，并研制了一套水下目标主动电磁探测样机；最后，通过缩比实验对水下目标主动探测方法仿真结果及样机参数进行了初步验证。结果表明，根据仿真结果设计的缩比样机系统参数正确有效，基于SLF/ELF的主动电磁探测技术能够应用于水下大型目标的探测。

**关键词：**水下目标主动探测，Ansys建模仿真，水下目标探测实验，磁探测

## 1. 引言

水下大型目标探测一直是关系国家资源、安全等重要技术领域，传统上由于光、电等物理量在水下传播困难，声呐是水下探测的主要技术手段。声呐分为主动式声呐和被动式声呐两种，主动式声呐通过主动发送声波并检测回波实现对目标的定位，由于需要发送大功率声波，因此往往在有效检测范围外，就将自身位置暴露给了目标；被动声呐通过监听目标引起的特征音频信号，寻找目标的大致方位，做不到对目标的精准定位。在这一背景下，发展非声探测技术成了亟需解决的任务。非声探测手段主要有红外探测、激光探测、电磁探测等，由于一般来说，构成水下大型目标的材料中不可避免包含铁磁性材料，因此电磁探测方法脱颖而出，成为最具有潜力的技术发展方向[1, 2]。

电磁探测技术原本是在地质勘探领域发展起来的一种探测技术，从原理上，分为主动式和被动式探测两大类。将被动式电磁探测技术用于水下探测，早在1918年，美国就进行了船只拖曳式的探测实验。主动式电磁探测即结合低频人工场源的一种电磁探测方式，目前研究仍然集中在地质勘探上，从地质勘探的结果上来说相对于被动式探测，在分辨率，探测速度等方面具备一定的技术优势[3, 4]，因而有必要将这一探测技术应用于水下目标探测领域，希望能够得到优于被动磁异常探测的效果。

首先从原理上建立基于SLF/ELF人工源的水下目标电磁探测方法的理论，从Maxwell方程出发，研究海水中的电磁传播特性，结合仿真数据，找到一种可能的探测模式。为验证这一探测模式，搭建了实验平台和实验环境，开展了水下探测相关实验。从实验结果上看，达到了预期的探测效果，因此说明该方法在水下大型目标探测方面具备一定的研究价值。

## 2. 基本理论

海水环境中同样条件下，水下水平电偶极天线较水下垂直电偶极天线从海水中辐射进入空气中的电磁场强度更具优势，且水下水平磁偶极天线较水下垂直磁偶极天线从海水中辐射进入空气中的电磁场强度更具优

势[5-7, 9]。综合考虑四种天线辐射模式辐射性能和实际实验的设计实施难易程度，本论文选择以水下水平电性天线作为电磁辐射天线。

### 2.1. 海水中水平电性天线辐射的电磁场

#### 2.1.1. 典型层状海洋模型

典型层状海洋模型包含空气层、海水层和海底层，其中海底层可根据海底不同深度电导率变化分成多层海底。考虑仿真模型的一般性，本论文中所指的层状海洋模型中的海底为均匀半空间。

海水层深度为 $d_1$ ，空气-海水分界面与海水-海底分界面互相平行，水平方向上无限延伸，空气、海水和海底的介电参数分别为 $\sigma_i$ 、 $\varepsilon_i$ ， $i=0,1,2$ ，其中 $i=0$ 表示空气层， $i=1$ 表示海水层。真空磁导率为 $\mu_0$ ，相对磁导率 $\mu_r$ 设置为1。AB表示电性天线首尾，天线长度为 $L$ ，天线电极矩为 $P=IL$ ，天线中点位于原点 $O$ 正下方，目标所在深度为 $H$ ，距离海底深度为 $h$ ，各层厚度为 $d_i$ 。笛卡尔坐标系正 $z$ 方向垂直水平面向下， $o-xyz$ 满足右手螺旋定则。假设任意姿态电性天线（见图1）在 $XOY$ 平面内的投影与 $x$ 轴夹角为 $\theta$ ，天线与 $XOY$ 平面的夹角为 $\phi$ 。

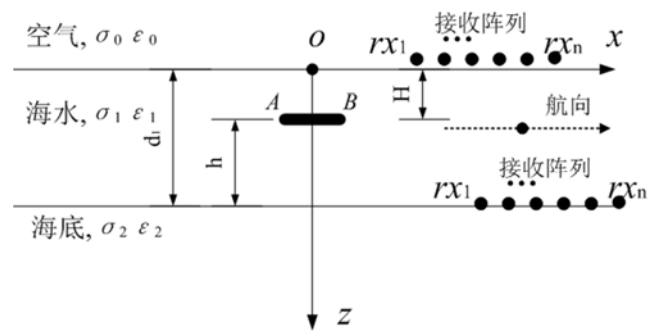


图1 层状海洋模型水平电偶极天线示意图。

#### 2.1.2. 水平电偶极天线辐射电磁场

层状海洋模型下偶极天线辐射电磁场的推导基于以下假设[1, 8, 11, 13, 15]:

- 满足准静态近似条件，频率应小于100kHz；
- 准静态近似下忽略海水和海底环境的位移电流，波数为 $k_i^2 = -i\omega\mu_0\sigma_i$ ， $i=1,2$ 。空气中仅存在位移电流，约定电导率为 $\sigma_0 = i\omega\varepsilon_0$ ，波数为 $k_0^2 = \omega^2\mu_0\varepsilon_0$ ；

- c) 空气、海水及海底媒介各向同性，参数与时间、温度及压强无关；  
d) 准静态近似下，认为媒介参数与频率无关，磁导率采用真空中的参数。

对于没有自由电荷的空间，电性天线在空间中产生的电磁场满足如下麦克斯韦方程组[16, 18-19]。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = j\mu\omega\mathbf{H} \\ \nabla \times \mathbf{H} = (\sigma - j\epsilon\omega)\mathbf{E} \\ \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \\ \nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

定义电矢量为 $\mathbf{A}$ ，满足 $\mathbf{H} = \nabla \times \mathbf{A}$ 。由式得到电场与电矢位关系，

$$\mathbf{E} = j\mu\omega\mathbf{A} - \nabla U \quad (2)$$

其中 $U$ 为标量位，满足 $U = -\frac{1}{\sigma} \nabla \cdot \mathbf{A}$ 。

层状海洋模型下水平电偶极子天线辐射电磁场具有对称性[17]，其电矢位 $\mathbf{A}$ 仅包含沿偶极矩方向的分量 $A_x$ 和沿垂直海水-空气界面的分量 $A_z$ 。并且电矢位、电场及磁场应满足下面条件：

- a) 整个空间中，除发射源位置外，矢量位 $\mathbf{A}$ 处处为有限值，且在无穷远处，矢量位为零，即 $\mathbf{A}(\mathbf{r} \rightarrow \infty) \rightarrow 0$ ；  
b) 各层分解面上，电场和磁场的切向分量连续。

根据边界条件约束，电场 $E$ 、磁场 $H$ 与矢量为 $A$ 和标量位 $U$ 之间的关系，采用分离变量法可得到各层中矢量位各分量的解。

空气中电磁场各分量频域计算式为：

$$\begin{cases} E_{x0} = \frac{Idl}{4\pi\sigma_0} \int_0^\infty [k_0^2 C_0 + (B_0 m_0 - C_0) m^2 \cos^2 \phi] e^{m_0 z} J_0(mr) dm \\ + \frac{Idl}{4\pi\sigma_0} \int_0^\infty (B_0 m_0 - C_0) m e^{m_0 z} \frac{\sin^2 \phi - \cos^2 \phi}{r} J_1(mr) dm \\ E_{y0} = \frac{Idl}{4\pi\sigma_0} \sin \phi \cos \phi \int_0^\infty (B_0 m_0 - C_0) m e^{m_0 z} \left[ m J_0(mr) - \frac{2}{r} J_1(mr) \right] dm \\ E_{z0} = \frac{Idl}{4\pi\sigma_0} \cos \phi \int_0^\infty (B_0 m^2 - C_0 m_0) m e^{m_0 z} J_1(mr) dm \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} H_{x0} = \frac{Idl}{4\pi} \sin \phi \cos \phi \int_0^\infty B_0 m e^{m_0 z} \left( m J_0(mr) - \frac{2}{r} J_1(mr) \right) dm \\ H_{y0} = \frac{Idl}{4\pi} \int_0^\infty (m_0 C_0 - m^2 \cos^2 \phi B_0) e^{m_0 z} J_0(mr) dm \\ - \frac{Idl}{4\pi} \int_0^\infty B_0 m e^{m_0 z} \frac{\sin^2 \phi - \cos^2 \phi}{r} J_1(mr) dm \\ H_{z0} = \frac{Idl}{4\pi} \sin \phi \int_0^\infty C_0 m e^{m_0 z} J_1(mr) dm \end{cases} \quad (4)$$

其中， $Idl$ 表示电偶极源的电矩， $m$ 为积分变量， $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 为收发距， $m_i = \sqrt{m^2 - k_i^2}$ ， $i = 0, 1, 2$ ， $\phi$ 为观测点与电偶极源位置连线在XOY平面投影与 $x$ 轴的夹

角， $\sin \phi = \frac{y}{r}$ ， $\cos \phi = \frac{x}{r}$ 。积分核中的 $J_i(mr)$ ， $i = 0, 1$ 代表第 $i$ 阶贝塞尔函数。参数 $C_i$ 、 $B_i$ 、 $D_i$ 和 $E_i$ 为待定系数，通过理论推导计算结果如下：

$$\begin{cases} C_0 = \frac{m}{m_1} \frac{1 - N_{01}}{e^{m_1 H}} \frac{1 - N_{21} e^{-2m_1 d_1} e^{2m_1 H}}{1 - N_{21} N_{01} e^{-2m_1 d_1}} \\ B_0 = B_1 + E_1 \\ C_1 = \frac{m}{m_1} N_{21} \frac{e^{-2m_1 d_1} (N_{01} e^{-m_1 H} - e^{m_1 H})}{1 - N_{21} N_{01} e^{-2m_1 d_1}} \\ B_1 = -\frac{P_{21} e^{-2m_1 d_1} e^{m_1 H} + P_{01} e^{-m_1 H}}{m} \frac{1 - P_{01} P_{21} e^{-2m_1 d_1}}{1 - P_{01} P_{21} e^{-2m_1 d_1}} + \frac{m_1}{m^2} C_1 \\ D_1 = \frac{m}{m_1} N_{01} \frac{e^{-m_1 H} - N_{21} e^{-2m_1 d_1} e^{m_1 H}}{N_{21} N_{01} e^{-2m_1 d_1} - 1} \\ E_1 = \frac{P_{01} P_{21} e^{-2m_1 d_1} e^{m_1 H} + P_{01} e^{-m_1 H}}{m} \frac{1 - P_{01} P_{21} e^{-2m_1 d_1}}{1 - P_{01} P_{21} e^{-2m_1 d_1}} + \frac{P_{01}}{m} e^{-m_1 H} - \frac{m_1}{m^2} D_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中的 $N_{01}$ 、 $N_{21}$ 、 $P_{01}$ 和 $P_{21}$ 计算式如下：

$$\begin{cases} N_{01} = \frac{m_0 - m_1}{m_0 + m_1}, N_{21} = \frac{1 - \frac{m_1}{m_2} R_z^*}{1 + \frac{m_1}{m_2} R_z^*} \\ P_{01} = \frac{\sigma_1 m_0 - \sigma_0 m_1}{\sigma_1 m_0 + \sigma_0 m_1}, P_{21} = \frac{1 - \frac{\rho_1 m_1}{\rho_2 m_2} Q_2^*}{1 + \frac{\rho_1 m_1}{\rho_2 m_2} Q_2^*} \end{cases} \quad (6)$$

式中的 $R_2^*$ 和 $Q_2^*$ 的递推计算式为：

$$\begin{cases} R_N^* = 1 \\ R_k^* = \frac{m_k R_{k+1}^* + m_{k+1} \tanh(m_k d_k)}{m_{k+1} + m_k R_{k+1}^* \tanh(m_k d_k)} \\ Q_N^* = 1 \\ Q_k^* = \frac{\rho_k m_k Q_{k+1}^* + \rho_{k+1} m_{k+1} \tanh(m_k d_k)}{\rho_k m_k Q_{k+1}^* \tanh(m_k d_k) + \rho_{k+1} m_{k+1}} \end{cases}, 2 \leq k \leq N-1 \quad (7)$$

### 2.1.3. 有限长度水平电性天线辐射电磁场

典型层状海洋模型下有限长度水平电性天线辐射电磁场的计算需要通过对天线长度进行积分获得。假设电性天线 $l$ 位置的电偶极子在观测位置 $\vec{r}$ 处产生的响应（电场或磁场）表示为 $f(p, \phi, \vec{l}, \vec{r})$ ，其中 $f(\dots)$ 可以表示辐射电磁场 $E_x$ 、 $E_y$ 、 $E_z$ 、 $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$ 的计算式。 $p = Idl$ ， $p$ 表示天线 $l$ 位置处的电偶极矩， $I$ 为天线中电流强度， $dl$ 表示 $l$ 位置的偶极子单位长度， $\vec{l}$ 和 $\vec{r}$ 分别为电偶极子天线和观测点的相对于坐标原点的位置矢量。因此，有限长电性天线的电磁场计算式如下

$$\int_L f(p, \phi, \vec{l}, \vec{r}) dl \quad (8)$$

实际应用中,为实现加速计算同时保持计算精度可以采用非均匀稀疏分割积分方法求解上式,相关方法参见[10, 11]。

## 2.2. 海水中电磁场波传播特性

为了在仿真建模过程中设置合理的天线辐射电磁波基频和天线尺寸等参数,需要对电磁波在海水中的传播特性进行研究。根据电磁波在空气-海水界面传播规律,电磁波从海水中向空气传播时,以近似垂直入射的形式穿透海水-空气界面;当电磁波从空气中向海水中传播时,无论入射方向如何,透射的电磁波均以近似垂直于海水-空气界面形式传播[12-14, 19]。为增大主动探测模式下主动电磁场对水下目标的感应范围,需要尽可能的利用空气波(侧面波,路径为海水-空气-海水-目标)或者海底导行波(路径为海水-海底-海水-目标)以实现衰减减小和快速的感应目标,见图2。而无论是空气波还是海底导行波,其传播路径的最后从分界面到目标的电磁波近似为平面波,为此根据平面电磁波在海水中的衰减和传播规律确定论文仿真设置的频率和天线长度。

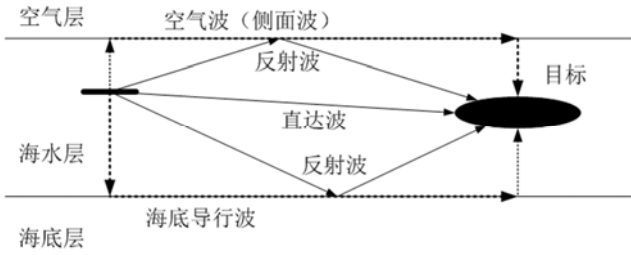


图2 SLF/ELF电磁波在海水中传播的多径相应。

### 2.2.1. 海水中电磁波的特征参数

根据平面电磁波在海水传播规律,其传播常数 $\gamma$ 、衰减常数 $\alpha$ 和相移常数 $\beta$ 的计算式如下。其中,海水媒介的磁导率取真空磁导率,海水相对介电常数为81,电导率取4S/m[9]。

$$\gamma = \sqrt{j\omega\mu_s\sigma_1 - \omega^2\mu_s\epsilon_1}$$

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu_s\epsilon_1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2\epsilon_1^2}} - 1 \right)}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu_s\epsilon_1}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{\sigma_1^2}{\omega^2\epsilon_1^2}} + 1 \right)}$$

电磁波在海水中的趋肤深度 $\delta$ 可根据衰减常数进行计算。图3绘制电磁波趋肤深度与频率的关系,可知为实现百米级目标探测深度,选用的0.01Hz~n×10Hz范围的频率。

$$\delta = 1/\alpha \approx \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_s\sigma_1}}$$

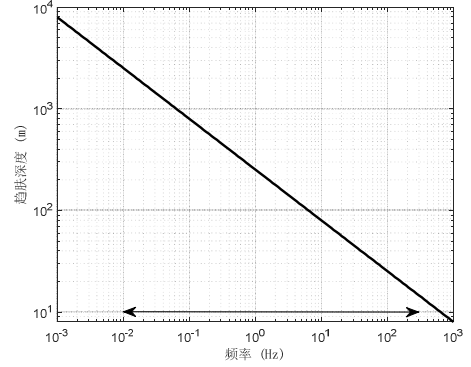


图3 海水中SLF/ELF电磁波的趋肤深度与频率的关系。

SLF/ELF电磁波在海水中的传播速度 $v$ 和波长 $\lambda$ 可以根据相移常数计算。为实现几十米到百米的目标分辨率,应尽可能选择高频段,这里可考虑选择10Hz~300Hz频段内的电磁波。为尽可能提升水下天线的辐射功率,天线尺寸应与电磁波在海水媒介中波长的1/10相当,因此,天线尺寸选择9m~50m之间为较佳。

$$v_p = \frac{\omega}{\beta}$$

$$\lambda = \frac{v_p}{f}$$

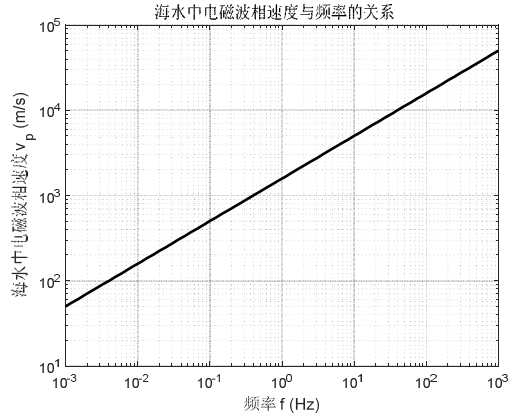


图4 海水中SLF/ELF电磁波波速与频率的关系。

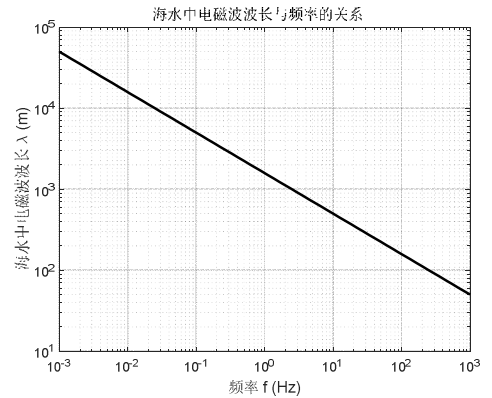


图5 海水中SLF/ELF电磁波波长与频率的关系。

2.2.2. 电磁波的频段选择

综合考虑水下大型目标探测深度、目标分辨率等因素，结合图3和图5关系图，本论文仿真模型中选定电磁波频率采用25Hz发射基频，天线长度5m，天线位于水下距离水面10m的深度。

3. 建模仿真与分析

激励源加载、边界设置、仿真设置、观测设置（时频域观测）、并对测点、测线和测面的仿真结果进行分析。

为对水下目标主动探测的可能性和效果进行分析，建立有无目标两种工况的仿真模型。两种工况下除目标有无外，其他条件相同。其中水下水平电性天线沿x轴方向，目标轴向沿x方向。Ansys Maxwell进行建模仿真时设置参数见表1。

表1 水下目标主动探测建模仿真参数列表。

参数符号	参数信息		
	取值	单位	物理意义
$\epsilon_0$	$8.85\times10^{-12}$	F/m	真空介电常数
$\mu_0$	$4\pi\times10^{-7}$	H/m	真空磁导率
$\epsilon_{sr}$	81	-	海水相对介电常数
$\sigma_1$	4	S/m	海水电导率
f	25	Hz	天线辐射电磁场基频
L	5	m	水下水平电性天线长度
$(x_a,y_a,H)$	(0,0,-10)	m	水平电性天线所在位置
$L_t$	100	m	目标轴向长度
$R_t$	10	m	目标外径
$(x,y,z)_t$	(500,500,-100)	m	目标所在位置
$\sigma_t$	1100000	S/m	目标电导率
$\mu_{tr}$	1	-	目标相对磁导率
$\sigma_{sl}$	0.01	S/m	海底电导率
$\epsilon_{slr}$	1	-	海底相对介电常数
$\mu_{slr}$	1	-	海底相对磁导率

3.1. 水下目标主动探测仿真建模

3.1.1. 层状海洋模型仿真域

图6给出了本论文建立的水下目标主动探测的仿真模型域，其中全局坐标系XOY的原点位于目标正上方的海水水平面上。水平面上方对应z轴为正，海水中对应z轴为负。海水域的长宽高大小为2km×2km×0.2km。模型中海水和海底的网格剖分基于长度的体内部网格剖分。

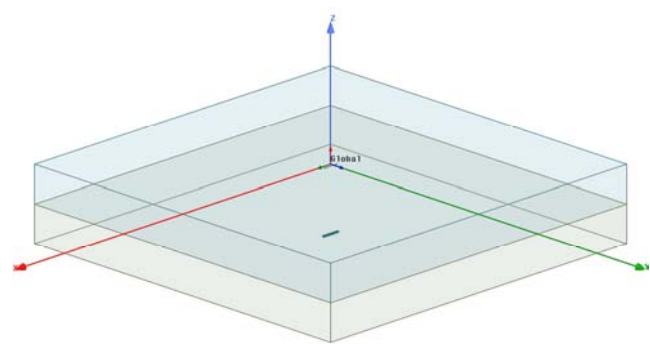


图6 层状海洋模型仿真计算域。

模型中目标的几何结构和网格剖分见图7，其中目标轴向长度100m，外径10m。

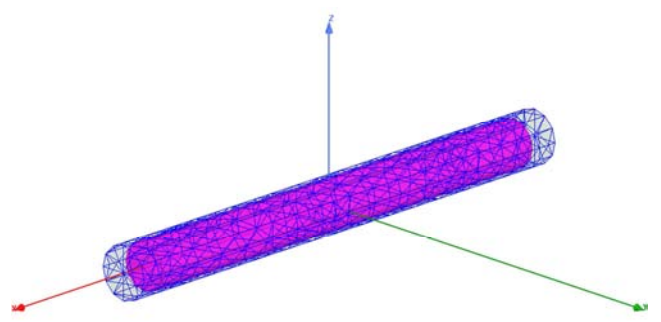


图7 圆柱形目标模型及网格剖分示意图。

3.1.2. 仿真模型激励设置

仿真模型激励添加基频25Hz，占空比为50%，峰值电流为5000kA的方波电流，设置仿真过程考虑海底、海水及天线的涡流效应。

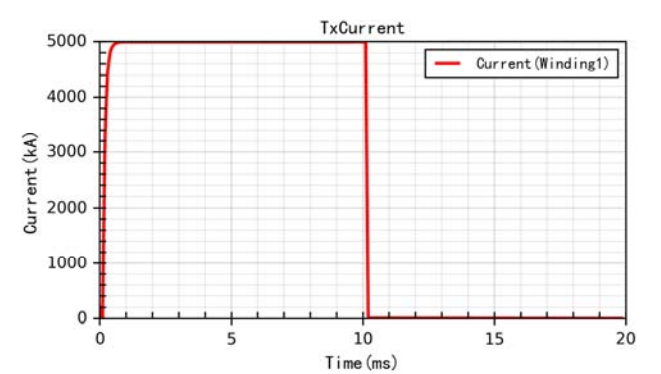


图8 水下目标电磁探测仿真激励波形。

仿真求解器可以选择Ansys Maxwell的时域(Transient)求解模块或者频域(Eddy Current)求解模块，本论文采用时域求解模块，计算分析脉冲期间或者脉冲间歇期间目标附近海面磁场的分布特征及强度，为提升仿真效率，开启Ansys仿真软件的GPU加速功能。

3.1.3. 仿真模型观测设置

仿真结果通过磁场各分量的测线和测面分布进行可视化分析。测线编号及相关信息见表1。

表1 仿真观测测线设置。

序号	观测设置	
	测线编号	测线信息
1	LineXInSea	目标正上方，平行于X轴，水下1m
2	LineXInAir_1m	目标正上方，平行于X轴，水上1m
3	LineXInAir_100m	目标正上方，平行于X轴，水上100m
4	LineYInSea	目标正上方，平行于Y轴，水下1m
5	LineYInAir_1m	目标正上方，平行于Y轴，水上1m
6	LineYInAir_100m	目标正上方，平行于Y轴，水上100m



3.2. 水下目标主动探测仿真结果与分析

3.2.1. 测线仿真结果及分析

图9-图12分别展示了总磁感应强度及各分量磁感应强度沿X方向测线的分布图，观测时刻15ms，其中目标位于测线500m位置，红色实线对应沿测线LineXInSea的分布图；棕色实线对应沿测线LineXInAir\_1m的分布图；蓝色实线对应沿测线LineXInAir\_100m的分布图。

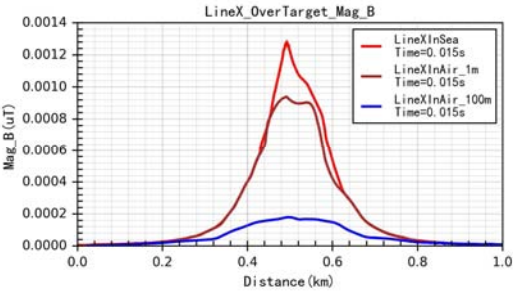


图9 总磁感应强度沿x方向测线分布图。

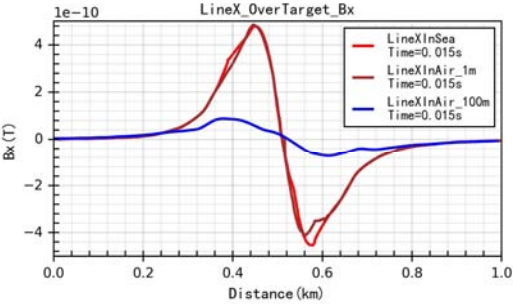


图10 B<sub>x</sub>沿x方向测线分布图。

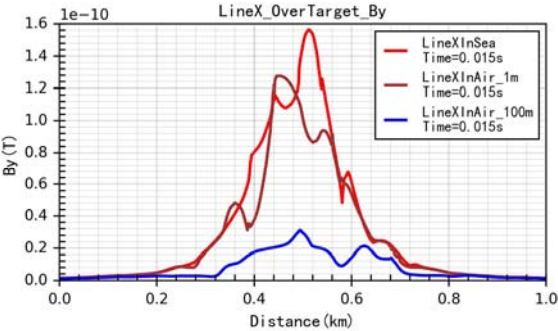


图11 B<sub>y</sub>沿x方向测线分布图。

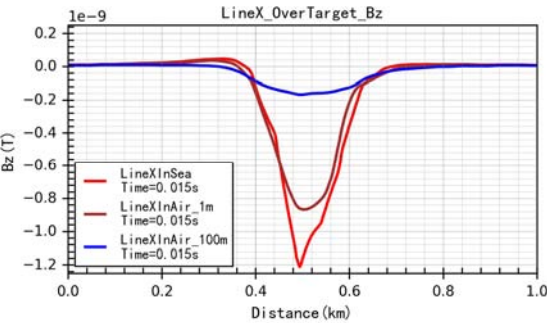


图12 B<sub>z</sub>沿x方向测线分布图。

从测线分布特征可以发现：测线经过目标正上方（此时测线与目标轴向平行）时， $B_x$ 在目标正上方出现信号极性反转，信号在目标位置两侧出现波峰和波谷，测线分布关于目标位置总体呈奇对称； $B_y$ 在目标正上方附近达到峰值，测线分布关于目标位置总体呈偶对称； $B_z$ 在目标正上方达到峰值，且关于目标位置总体呈偶对称。随着测线位置高度的增加，三轴响应信号幅值逐渐减小，各分量磁感应强度沿x方向测线分布峰值强度见表2。

表2 各分量磁感应强度沿x方向测线分布峰值强度。

测线编号	各分量测线分布峰值强度(nT)			
	B <sub>x</sub>	B <sub>y</sub>	B <sub>z</sub>	MagB
LineXInSea	0.5	0.16	1.25	1.3
LineXInAir_1m	0.5	0.13	0.88	0.9
LineXInAir_100m	0.1	0.03	0.20	0.2

图13-图16分别展示了总磁感应强度及各分量磁感应强度沿Y方向测线的分布图，观测时刻15ms，其中目标位于测线500m位置，红色实线对应沿测线LineXInSea的分布图；棕色实线对应沿测线LineXInAir\_1m的分布图；蓝色实线对应沿测线LineXInAir\_100m的分布图。

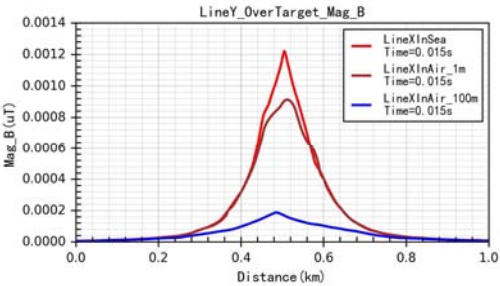


图13 总磁感应强度沿y方向测线分布图。

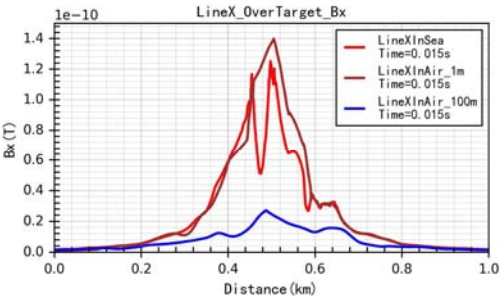


图14 B<sub>x</sub>沿y方向测线分布图。

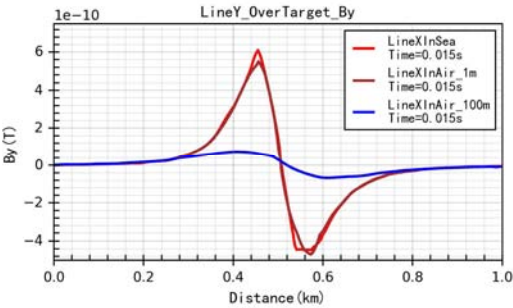


图15 B<sub>y</sub>沿y方向测线分布图。

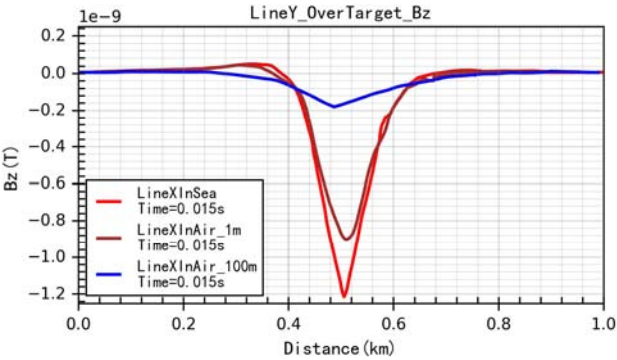


图16 B<sub>z</sub>沿y方向测线分布图。

从测线分布特征可以发现：测线经过目标正上方（此时测线与目标轴向垂直）时， $B_x$ 在目标正上方达到峰值，测线分布关于目标位置总体呈偶对称； $B_y$ 在目标正上方出现信号极性反转，测线分布在目标位置两侧出现波峰和波谷，测线分布关于目标位置总体呈奇对称； $B_z$ 在目标正上方达到峰值，测线分布关于目标位置总体呈偶对称；总磁感应强度在目标正上方达到峰值，且关于目标位置总体呈偶对称。随着测线位置高度的增加，三轴响应信号幅值逐渐减小。各分量磁感应强度沿x方向测线分布峰值强度见表3。

表3 各分量磁感应强度沿y方向测线分布峰值强度。

测线编号	各分量测线分布峰值强度(nT)			
	B <sub>x</sub>	B <sub>y</sub>	B <sub>z</sub>	MagB
LineYInSea	0.125	0.6	1.25	1.3
LineYInAir_1m	0.14	0.55	0.9	0.9
LineYInAir_100m	0.025	0.1	0.20	0.2

通过仿真结果还发现，13ms~16ms阶段 $B_x$ 、 $B_y$ 和 $B_z$ 及总磁感应强度信号的测线分布基本一致，即目标的存在引起的测线分布异常持续时间较长（3ms以上），因此对于异常信号观测的速度要求较低（采样率较低），关断期间观测信号的冗余度较高。因此，测线图绘制及定性解释时能够进一步降低工作量，提高效率。

需要注意的是，沿x方向测线和y方向测线观测结果在目标物正上方峰值不完全一致，比如表2和表3中 $B_x$ 和 $B_y$ 分量，这可能是仿真模型求解域网格剖分在x方向和y方向密度不完全一致，导致计算测线上结果时出现较大偏差。

3.2.2. 测面仿真结果及分析

图17给出了脉冲间歇期目标在海水表面及海底磁感应强度分布。仿真结果表明，目标位置正上方的海水表面及正下方海底出现明显的磁异常，该异常磁感应强度的大小能够被当前常用磁场传感器感知，图磁通门磁力仪及高温超导量子磁强计。在发射电流峰值为5000kA，发射天线长度为100m时，对于距离水平发射天线水平偏移距707m的处于水下100m深的目标能够产生最大1.3nT的磁异常，此时目标可以被探测到。

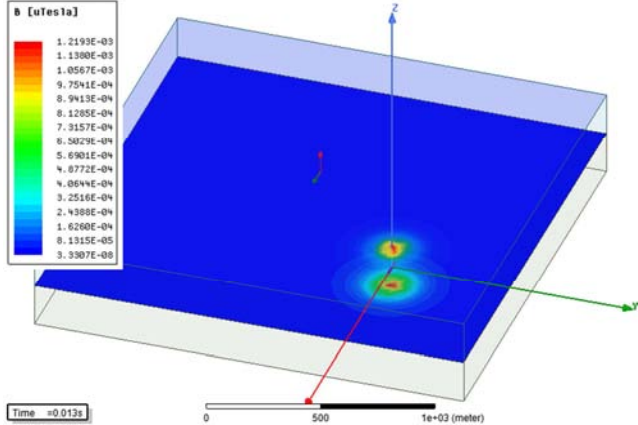


图17 目标在海水表面及海底引起的异常磁感应强度分布，目标位于水下100m处。

4. 实验验证与分析

介绍探索性实验的设计思路，可以对等效缩比实验设计过程进行简要说明。给出实验设置的参数、场地、目标物、设备及设备性能说明及相关图表，给出实验获得的环境噪声、电流数据、磁场数据，给出原始数据图和预处理后的结果图，对处理后的结果图进行简要分析，最后落脚到等效缩比实验验证的探测技术的可能性及对应的信号水平及设备参数建议。

4.1. 水下目标主动探测实验

本课题团队于2020年11月在浙江舟山进行了水下目标主动探测缩比验证性实验，实验地点见图18。实验用各设备相关信息见表4，相关设备见图19-图22。

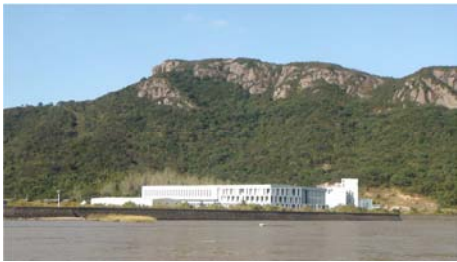


图18 水下目标主动探测实验地点。

实验过程中采用5m长的水下水平电性天线，天线距离水面约0.5m，天线与目标距离在20m-35m范围可根据需要进行调整，目标沉入海水水下1.5m。

表4 水下目标主动探测实验各设备信息。

序号	实验用设备信息		
	设备名称	设备参数	功能用途
1	电磁场源产生装置	最大功率50kW，基频占空可调，最大输出100A	主动辐射低频电磁波
2	电磁数据接收装置	三轴同时观测，6通道采集，6pT/sqrt (Hz)	采集记录监测磁场信号
3	目标物	轴向长5m，外径0.5m	-
4	实验场地	长宽高53m×7m×3.3m	-





图19 电磁场源产生装置。

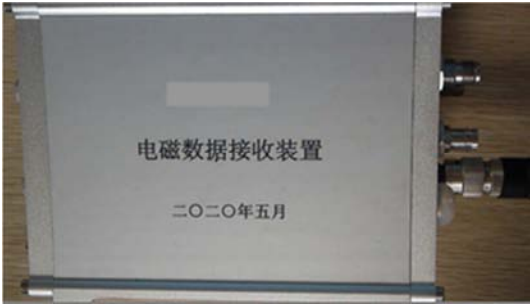


图20 电磁数据接收装置。



图21 磁场传感器。



图12 目标物。

实验内容包括背景噪声干扰观测、天线无辐射情况下目标磁异常观测、天线辐射情况下目标耦合磁信号观测。基本思路是，目标磁异常和目标耦合磁信号分别与背景噪声相减获得主被动模式下目标存在导致的磁场分布异常对比分析。

实验观测背景磁场干扰强度水平方向分别是14nT和5nT，垂直方向12nT。天线辐射电磁波时发射电流强度约30A，距离发射天线25m处水面上方约2m处的磁感应强度信号见图18，其中红色实线为原始信号，黑色实线为PCA后的信号。

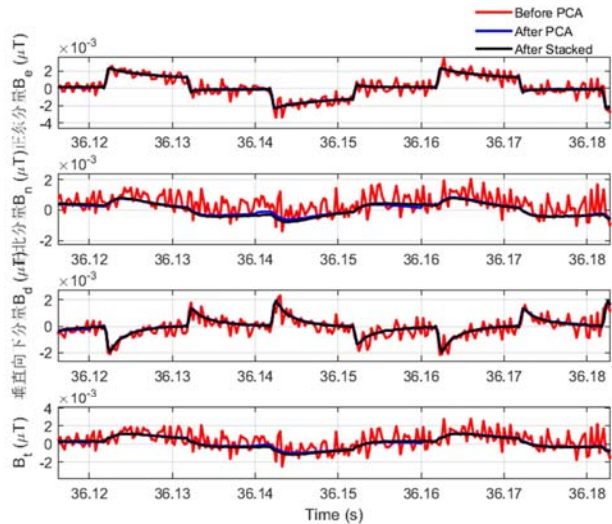


图23 水池上方(X=3m, Y=26m)处观测各方向磁感应强度信号。

4.2. 水下目标主动探测实验结果与分析

4.2.1. 被动模式目标探测效果

图24给出了目标沿东西方向布置于长边方向28m-33m之间时，目标在水面上方约2m高度平面磁图分布。磁图显示，被动模式下可以较清晰的显示大约在30m-35m之间存在异常。

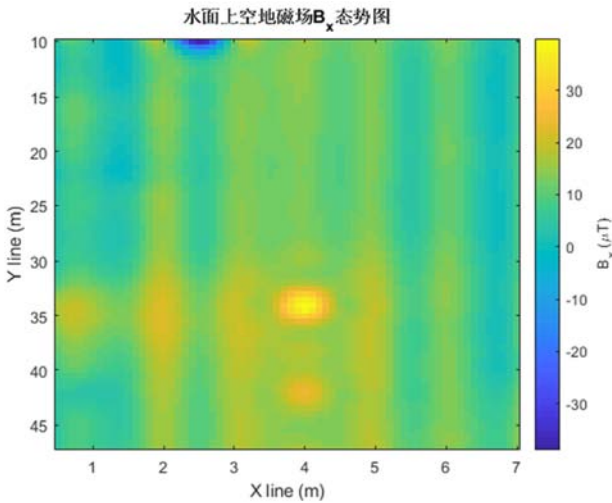


图24 被动模式下，目标存在引起的B<sub>x</sub>分量磁图。

4.2.2. 主动模式目标探测效果

图25给出了目标沿东西方向布置于长边方向28m-33m之间时，目标在水面上方约2m高度平面磁图分布。磁图显示，主动模式下可以较清晰的显示大约在30m-35m之间存在异常，并且可以清晰显示出目标位置附近的耦合磁异常波峰和波谷效应。图26则给出了主动模式下目标耦合磁感应强度分量B<sub>x</sub>在去除地磁场引起的磁异常后的磁图分布。可以发现，主动模式相较被动模式对水下目标探测具有更高的信噪比，同时可以发现，联合主被动模式探测信息可以对干扰去除，实现对目标的准确探测，降低虚警。



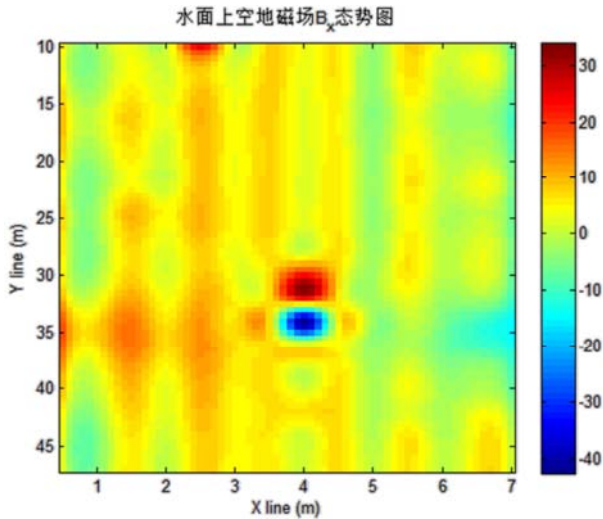


图 25 主动模式下, 目标存在引起的 $B_x$ 分量磁图。

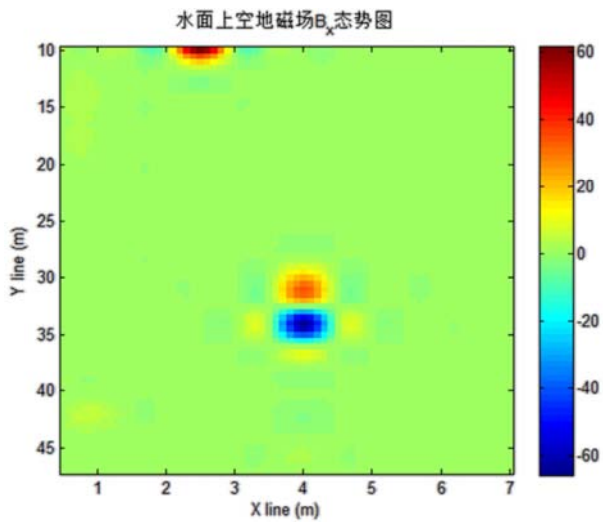


图26 目标存在时, 主动模式下 $B_x$ 去除目标磁异常后的磁图。

## 5. 结论

为探索主动电磁探测技术应用于水下大型目标探测定位的可能性及探测模式, 论文通过研究电磁波在海水中的传播规律及水下偶极天线辐射电磁场的分布规律和性能对比, 提出了基于超低频(SLF)/极低频(ELF)的人工电磁场源的水下目标主动电磁探测方法, 利用Ansys Maxwell建模仿真, 分析目标耦合磁场强度和分布规律, 据此进行水下目标主动电磁探测系统关键参数设计, 研制了一套水下目标主动电磁探测样机; 最后, 通过缩比验证实验对水下目标主动探测方法进行了初步验证。仿真结果表明, 基于SLF/ELF电磁波的主动电磁探测技术能够应用于水下大型目标的探测。缩比实验结果表明, 根据仿真结果设计的缩比样机系统参数正确有效。本论文证明了基于SLF/ELF主动电磁探测技术应用于水下大型目标探测的可能性, 下一步课题组将从水下天线辐射效率提升优化设计、传感器性能提升及电磁数据精细处理等方向进一步深入研究, 为工程样机的性能提升提供技术基础。

## 参考文献

- [1] 渠晓东. 甚低频/极低频电磁法在目标探测中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 62-64.
- [2] 申茂冬. 高温超导全张量磁梯度测量技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [3] Ping Yu et al. The analysis on Marine Controlled-Source Electromagnetic Research Status [J]. IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science, 2019. 252(5).
- [4] 翟景红. 海洋聚焦电磁法理论与实验研究[D]. 2018, 北京: 中国地质大学(北京), 2018:13-33.
- [5] S. Durrani. Air-to-undersea communication with electric dipoles. Antennas and Propagation[J], IRE Transactions on, 1962, 10(5): 524-528.
- [6] S. Durrani. Air to undersea communication with magnetic dipoles. Antennas and Propagation [J], IEEE Transactions on, 1964, 12 (4): 464-470.
- [7] H. Wang, K. Zheng, K. Yang et al. Electromagnetic field in air produced by a horizontal magnetic dipole immersed in sea: theoretical analysis and experimental results [J]. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 2014, 62 (9): 4647-4655.
- [8] H. Wang, K. Yang, K. Zheng. Electromagnetic field radiated in air from a horizontal/vertical magnetic dipole in sea. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29 (7): 858-873.
- [9] 王宏磊. 电磁波跨越海-空界面传播特性研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015:11-17, 32-53.
- [10] Shi Z, Liu L, Xiao P, et al. Simulation and Analysis of the effect of ungrounded rectangular loop distributed parameters on TEM response [J]. Journal of Applied Geophysics, 2018, 149.
- [11] 时宗洋. 半航空瞬变电磁系统探测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018: 41-42.
- [12] 王杨婧. 水下大型目标的磁探测研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [13] Nabighian M N. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 1, Theory [M]. Society of Exploration Geophysicists, 1991.
- [14] 渠晓东. 甚低频/极低频电磁法在目标探测中的应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017: 62-64.
- [15] Kaufman A A, Keller G V. Frequency and transient soundings [M]. Springer, 1983.
- [16] NIGEL EDWARDS. MARINE CONTROLLED SOURCE ELECTROMAGNETICS: PRINCIPLES, METHODOLOGIES, FUTURE COMMERCIAL APPLICATIONS [J]. Surveys in Geophysics, 2005, 26: 675-700.
- [17] Rong Liu, Jianin Liu, Jianxin Wang, Zhuo Liu, Rongwen Guo. 1D EM response modeling with arbitrary source-receiver geometry based on vector potential and its implementation in Matlab [J]. Geophysics, 2020. 85 (3): F27-F38. DOI:10.1190/geo2019-0224.1.

- [18] KerryKey, OCCAM1DCSEM An Open-Source Inversion Program for Generating Smooth 1D Models from Controlled-Source Electromagnetic and Magnetotelluric Data [R]. San Diego: Scripps Institution of Oceanography, University of California, 2011.
- [19] Andrew Pethick, Planning and 4D Visualisation of the marine controlled source electromagnetic method [D]. Australia: Department of Exploration Geophysics, Curtin University of Technology, 2008.