

### 竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响研究

杨靖玄, 陈聪, 孙嘉庆, 谭浩, 司理锋, 杜初阳

引用本文:

杨靖玄, 陈聪, 孙嘉庆, 等. 竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3): 1-7.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 舰船机动中拖曳系统建模与定深控制研究

引用本文: 郑智林, 苑志江, 金良安, 等. 舰船机动中拖曳系统建模与定深控制研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(4): 106-110.

#### 2. 沉底水雷毁伤能力研究

引用本文: 李洪涛, 奚慧巍, 高顺林, 等. 沉底水雷毁伤能力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(7): 42-46.

#### 3. 电场抑制与磁场防护的共性技术研究

引用本文: 张海鹏, 陈新刚, 龚文超. 电场抑制与磁场防护的共性技术研究[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(1): 8-12.

#### 4. 基于ANSYS和SYSNOISE的水下目标低频散射声场仿真

引用本文: 陈鑫, 罗祎. 基于ANSYS和SYSNOISE的水下目标低频散射声场仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(5): 103-107.

#### 5. 弹载电源系统舰船环境贮存可靠性预计

引用本文: 张尚珠, 李华府. 弹载电源系统舰船环境贮存可靠性预计[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(12): 52-53, 58.

# 竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响研究

杨靖玄, 陈 聪, 孙嘉庆, 谭 浩, 司理锋, 杜初阳

(海军工程大学, 武汉 430033)

**摘要:**为研究竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响,采用水平电偶极子作为舰船电场等效场源,基于稳恒电场镜像理论,推导了表征竖直岸壁对舰船水下标量电位分布影响的数学表达式;采用数值仿真的方法,就竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响规律开展研究。结果表明:随岸壁、场点相对方位改变,竖直岸壁对标量电位的影响具有明显的方位指向性;与舰船航向平行的岸壁可使除舰船中横剖面外所有场点处的标量电位绝对值增加,且场点距离岸壁边界越近,其量值以及对称性受到影响越大。在实验室中模拟了同时存在四个方位竖直岸壁的海洋环境,实测模拟场源下方一定深度平面上的标量电位分布,通过和仿真结果的对比,验证了理论推导以及仿真研究结论的正确性。

**关键词:**舰船水下标量电位;直流电偶极子;竖直岸壁;镜像法;对称性;方位

**本文引用格式:**杨靖玄,陈聪,孙嘉庆,等. 竖直岸壁对舰船水下标量电位分布的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(03): 1-7.

**Citation format:** YANG Jingxuan, CHEN Cong, SUN Jiaqing, et al. Influence of Vertical Bank on Underwater Electric Field Distribution of Ships[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(03): 1-7.

中图分类号: TJ6

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2020)03-0001-07

## Influence of Vertical Bank on Underwater Electric Field Distribution of Ships

YANG Jingxuan, CHEN Cong, SUN Jiaqing, TAN Hao, SI Lifeng, DU Chuyang

(Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to study the vertical bank's influence on the underwater electric scalar potential produced by a ship in seawaters, the horizontal DC electric dipole was used as the equivalent field source. Based on the mirror theory of static electric field, the expressions for characterizing the vertical bank's influence on the underwater electric scalar potential distribution of ship were derived. The influence of the vertical bank parallel to the ship's course on the underwater electric scalar potential distribution was studied by numerical simulation. Simulation results show that the effect of the vertical bank on the scalar potential has obvious orientation directly with the change of the relative azimuth of the vertical bank and the field point, the bank which parallels to the ship's course can increase the absolute value of scalar potential except the midship plane. The closer the field point is to the bank, the greater the influence of its value and symmetry. The marine environment with four azimuthal bank boundaries was mimicked in laboratory, and the scalar potential distribution on a certain depth plane under the simulated field source was measured. These theoretical derivation and research conclusions of simulation were further confirmed by

收稿日期: 2019-05-24; 修回日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51109215); 海军工程大学自然科学基金自主立项项目(425317Q011)

作者简介: 杨靖玄(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事舰船电场水下目标特性研究, E-mail: 1114884300@qq.com.

通讯作者: 陈聪(1971—), 女, 博士, 教授, 主要从事水下军用目标特性及信息融合研究, E-mail: cckx7145@sohu.com.

comparing simulation results.

**Key words:** ship's underwater scalar electric potential; horizontal direct current dipole; vertical bank; mirror image method; symmetries; azimuth

随着减震降噪、消磁、模拟尾流等隐身和对抗技术的不断发展,舰船电场作为新兴的目标特征信号逐步引起人们的重视<sup>[1]</sup>。和传统的3种舰船物理场一样,舰船电场也能够用于控制水中兵器引信<sup>[2]</sup>和制导系统的动作,从而实现目标多物理场信息融合<sup>[3]</sup>,提高水中兵器的抗干扰能力。针对近岸、港口、海峡等滨海作战环境特点,水中兵器及预警装置在相应浅海区域中利用电场信息对舰船等目标进行探测时除了需要考虑不同介质水平分层界面的影响,还需要考虑在近岸环境中电导率异于海水且在垂直于水平面方向上具有一定空间分布的物体对标量电位分布的影响,如岩石、堤坝、桥墩等。另外在实验室中对舰船电场等效模拟场源所激发的水下电场进行实测时,由于水池尺寸、结构的限制,水池四周的边界对水下标量电位分布的影响也不可忽略<sup>[4-5]</sup>。根据上述物体的几何特征以及电介质特性,一般可选择电导率小于海水的“竖直岸壁”介质为上述物体的抽象模型,其占据水平方向半空间,且与空气、海水、海床共同形成的交界面垂直于水平面并无限延伸。显然,竖直岸壁存在时分层海洋环境中舰船水下标量电位的分布特征更接近于真实的舰船水下电场目标特征,因此,研究竖直岸壁存在时舰船水下标量电位分布的一般特征,以及研究竖直岸壁对舰船水下标量电位分布影响的一般规律都具有明显的实用价值,并且有助于提高水中兵器的目标识别能力、打击精度以及抗干扰能力。

但相关文献在利用现有建模技术(如有限元法<sup>[6]</sup>、边界元法<sup>[7]</sup>、等效源法<sup>[8-9]</sup>),研究舰船水下电场分布特征时均未深入考虑竖直岸壁对场分布的影响<sup>[10]</sup>,仅个别研究略有涉足<sup>[4]</sup>。由于舰船电场的主体特征可以用一个沿船艏方向的水平电偶极子产生的场来描述<sup>[7]</sup>,因此文献[10]利用镜像法求解了三层水平分层的海洋环境中电偶极子水下电场分布,但该研究局限于无限大水平分层海域,未考虑竖直岸壁的存在。文献[4]在文献[10]的基础上利用镜像法求解了存在两种特殊方位的岸壁(与舰船航向平行、垂直)时电偶极子水下场分布的表达式并通过实验验证了其正确性,但研究重点针对相应场域中电偶极子水下场分布特征,而对于岸壁对标量电位的影响规律研究不够深入,且所研究的岸壁方位比较特殊,限制了文献[4]中所得表达式的应用范围。显然,还有必要继续深入研究竖直岸壁对舰船水下标量电位分布影响的一般规律。

本文中在上述研究的基础上,仍采用水平电偶极子作为舰船电场主体特征的模拟场源,用有岸壁时的电位分布相对于无岸壁时电位分布的变化来表征岸壁对水下标量电位分布带来的影响。首先基于镜像法推导了任意方位的竖直岸壁所带来影响的数学表达式,进而采用数值仿真的方法对影响规律开展研究,得到一些有实用价值的影响规律,最后在实验室中设计了相应的模拟场源和海洋环境,实测水下一定

深度平面的标量电位分布,验证了竖直岸壁对水下标量电位影响的理论推导以及仿真研究结论的正确性。

## 1 竖直岸壁对舰船水下标量电位分布影响的理论分析

实际应用中,岸壁边界与舰船目标、探测传感器的相对位置关系不尽相同,且岸壁自身的形态和尺寸有所区别,为获得岸壁影响最基本的规律,本文重点研究如图1所示的在三层水平分层的海洋环境中单一竖直岸壁对舰船水下电场分布特征的影响。其他场源和岸壁的情况可以以此为基础进行分析。

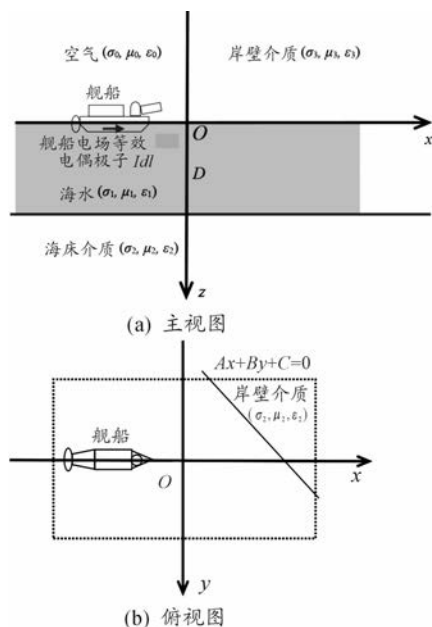


图1 竖直岸壁模型

建立如图1所示的坐标系,取水平面为 $xOy$ 平面, $z$ 轴垂直于水面且指向地心。取舰船航向为 $x$ 轴方向,则舰船电场主体特征的等效场源用一沿 $x$ 轴方向电偶极子替代,其极矩为 $Idl = I_x dl$ ,设其位于 $(x_0, y_0, z_0)$ 处。海水深度为 $D$ ,岸壁-海水边界为垂直于 $xOy$ 面的平面,其在水平面上的投影直线满足方程 $f(x, y) = Ax + By + C = 0$ 。则全空间被分为空气、海水、海床、岸壁四个部分,所占空间的集合分别表示为 $V_i, i=0, 1, 2, 3$ ,各部分介质均匀,其电导率、磁导率、电容率分别为 $(\sigma_i, \mu_i, \varepsilon_i)$ ,其中 $V_1$ 为本文所研究的存在竖直岸壁的分层海域。

$V_1$ 中电偶极子的标量电位满足泊松方程及相应的边界条件,可采用镜像法进行求解。

无竖直岸壁、仅考虑三层水平分层海域时,文献[10]采用镜像法对海水区域中的场分布进行了求解,并将空气-海

水、海水-海床界面对海水中场分布的影响,表达为场源偶极子关于两界面镜像得到的一系列竖直方向分布的偶极子产生的场的叠加,则海水中任意场点 $(x, y, z)$ 处的标量电位为场源偶极子及其关于水平分层界面镜像得到的竖直方向分布的偶极子(下文将它们一起称为源偶极子组,如图2(a)所示)共同在该点产生的标量电位。

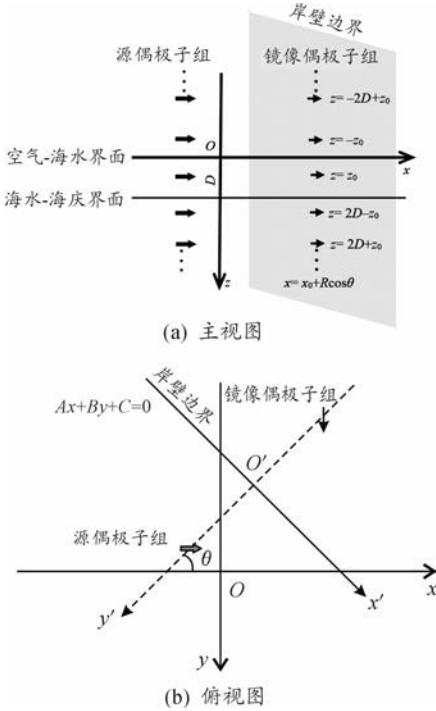


图2 存在竖直接壁时镜像偶极子位置

如图2所示,存在竖直接壁时,海水中任意场点的标量电位应为源偶极子组及其关于海水-岸壁边界镜像得到的镜像偶极子组在场点处产生标量电位的叠加。根据源偶极子组与岸壁的相对位置关系,可解得镜像偶极子组位于平行于 $z$ 轴的直线上,且在 $xOy$ 面的投影位置为:

$$\left(x_0 - 2A \frac{f(x_0, y_0)}{A^2 + B^2}, y_0 - 2B \frac{f(x_0, y_0)}{A^2 + B^2}\right) \quad (1)$$

为推导方便,先将 $O-xyz$ 坐标系变换至新坐标系 $O'-x'y'z'$ ,即:

1) 取 $O'$ 点位于源偶极子组与镜像偶极子组在水平面投影点连线的中点;

2) 取海水-岸壁边界为 $x'$ 轴;

3)  $z'$ 轴保持与 $z$ 轴同向。

变换后得到如图2(b)所示的坐标系 $O'-x'y'z'$ ,则两坐标系中位置坐标的变换关系为:

$$(x, y, z, 1) = (x', y', z', 1) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} \sin\theta & -\cos\theta & 0 \\ \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -x_0 \sin\theta + y_0 \cos\theta & x_0 \cos\theta - y_0 \sin\theta & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

偶极矩也需要变换。 $O-xyz$ 坐标系中一个偶极矩为

$Idli$ 的电偶极子可表示为新坐标系中的平行偶极子(其偶极矩为 $I_x \cdot dli'$ )和垂直偶极子(其偶极矩为 $I_y \cdot dlj'$ ),即:

$$Idli = I_x \cdot dli' + I_y \cdot dlj' = 9I_x dl \cdot \sin\theta i' + I_x dl \cdot \cos\theta j' \quad (3)$$

进而由文献[4]可得到,在新坐标系式(3)中的偶极子关于岸壁的镜像偶极子的偶极矩为:

$$I_M dl = \xi I_x dl \cdot \sin\theta i' - \xi I_x dl \cdot \cos\theta j' \quad (4)$$

式(4)中: $\xi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3}$ ;  $\theta = \arctan\left(-\frac{A}{B}\right) - \frac{\pi}{2}$ 。

用同样的方法可求出存在竖直接壁时,源偶极子组中的每一个电偶极子所对应的镜像偶极子(如图2(a))的偶极矩,进而可以求出海水中任意场点 $(x', y', z') \in V_1$ 处的标量电位应为源偶极子组和镜像偶极子组在该点产生的标量电位的叠加。显然,对比文献[10]可知,有岸壁时的电位分布相对于无岸壁时电位分布而言,变化来自于镜像偶极子组在场点处所产生标量电位,因此竖直接壁对水下标量电位分布的影响可用镜像偶极子组在场点处所产生标量电位来表示,即:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi(x', y', z') &= \Phi_M(x', y', z') = \\ &\sin\theta \cdot \xi \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{\eta^k I_x dl(x' - x'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{k11}^3} + \frac{\eta^k I_x dl(x' - x'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{k12}^3} \right] + \right. \\ &\sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{\eta^m I_x dl(x' - x'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{m11}^3} + \frac{\eta^m I_x dl(x' - x'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{m12}^3} \right] \left. \right\} - \\ &\cos\theta \cdot \xi \left\{ \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \frac{\eta^k I_x dl(y' - y'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{k11}^3} + \frac{\eta^k I_x dl(y' - y'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{k12}^3} \right] + \right. \\ &\sum_{m=0}^{\infty} \left[ \frac{\eta^m I_x dl(y' - y'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{m11}^3} + \frac{\eta^m I_x dl(y' - y'_0)}{4\pi\sigma_1 r_{m12}^3} \right] \left. \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: $r'_{k11}, r'_{k12}, r'_{m11}, r'_{m12}$ 分别为场点到镜像偶极子的位置矢量。即:

$$\begin{cases} r'_{k11} = (x' - x'_0)i + (y' + y'_0)j + (z' - 2kD + z'_0)k \\ r'_{k12} = (x' - x'_0)i + (y' + y'_0)j + (z' - 2kD - z'_0)k \\ r'_{m11} = (x' - x'_0)i + (y' + y'_0)j + (z' + 2mD - z'_0)k \\ r'_{m12} = (x' - x'_0)i + (y' + y'_0)j + (z' + 2mD + z'_0)k \end{cases} \quad (6)$$

根据两坐标系的位置坐标变换关系式(2),由式(5)、式(6)能够解得在 $O-xyz$ 坐标系中的 $\Delta\Phi(x, y, z)$ 。

## 2 竖直接壁对舰船水下标量电位影响规律的仿真分析

### 2.1 与舰船航向平行的岸壁对标量电位分布的影响

根据舰船在实际海峡、港口等水域中航行时其位置、航向与岸壁的相对位置关系可知,存在与舰船航向平行的竖直接壁(后文简称为平行岸壁)是比较常见的一种情形,因此本文重点研究平行岸壁对舰船水下标量电位分布的影响。

设舰船航向为  $x$  方向,则舰船电场等效场源为一沿  $x$  方向的电偶极子,海水-岸壁边界也平行于  $x$  方向。在图 1 所示的模型中设置仿真参数如下:场源电偶极矩  $I_s dl = 10 \text{ A} \cdot \text{m}$ ,场源位置  $(x_0, y_0, z_0) = (0.0, 0.0, 15.0) \text{ m}$ ,海水深度  $D = 50.0 \text{ m}$ ,海水电导率  $\sigma_1 = 4 \text{ S/m}$ ,海床电导率  $\sigma_2 = 0.4 \text{ S/m}$ ,岸壁电导率  $\sigma_3 = 0.4 \text{ S/m}$ 。海水-岸壁边界在  $xOy$  面上的投影满足方程  $y = -30.0 \text{ m}$ 。利用式(1)~(6),可计算出岸壁对  $z = 25.0 \text{ m}$  平面上各点的标量电位带来的影响  $\Delta\Phi$ ,结果如图 3 所示。

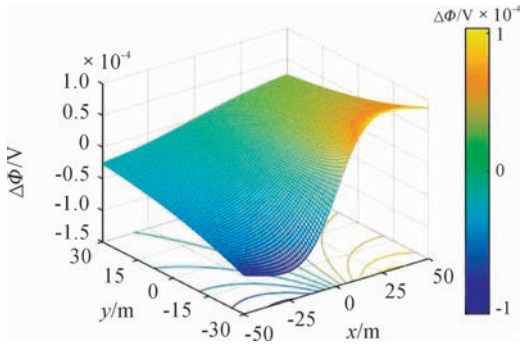


图 3 存在平行岸壁时  $z = 25.0 \text{ m}$  平面上  $\Delta\Phi$  分布

由图 3 可知:① 平行岸壁不影响舰船中横剖面 ( $x = 0.0 \text{ m}$ ) 上的场点的标量电位。② 平行岸壁对舰船水下标量电位分布的影响关于舰船中横剖面 ( $x = 0.0 \text{ m}$ ) 呈反对称,且使除  $x = 0.0 \text{ m}$  面以外其他场点处的标量电位绝对值普遍增大。③ 场点距离岸壁的垂直距离越近标量电位绝对值增大得越多,说明受岸壁的影响越大。

为进一步研究岸壁对场分布对称性的影响规律,选取与岸壁平行且关于偶极子所在平面 ( $y = 0.0 \text{ m}$ ) 对称的两条场线上的标量电位分布进行对比分析。设两场线与  $y = 0.0 \text{ m}$  平面的垂直距离均为  $\Delta y$ ,如图 4 所示。为表达方便,选择计算上述两条场线对应取样场点处标量电位差值的方均根 (Root Mean Square Difference, 简称为 RMSD) 来表达两者的差异,即:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\Phi_1(i) - \Phi_2(i)]^2} \quad (7)$$

式(7)中:  $\Phi_1(i)$ 、 $\Phi_2(i)$  分别表示图 4 中的两条场线上第  $i$  个取样场点的标量电位值。

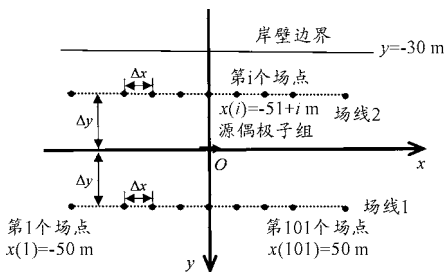


图 4 对称场线布置俯视图

保持前述仿真参数,选取两场线  $x$  方向的取值范围为  $-50.0 \leq x \leq 50.0$ ,且场线 1、2 上第  $i$  个场点坐标为分别为  $(-51.0 + i, \Delta y)$ 、 $(-51.0 + i, -\Delta y)$ ,则各场线上采样场点数相同,均为  $n = 101$ 。分别计算无岸壁、有平行岸壁条件下不同  $\Delta y$  时的 RMSD,仿真结果如图 5 所示。

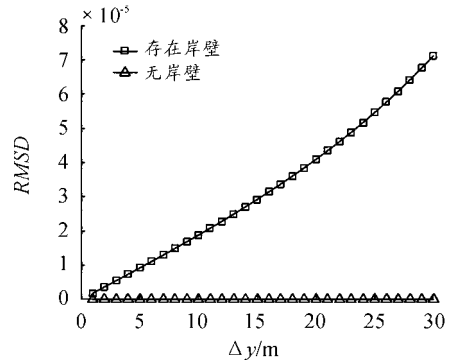


图 5 对称场线上  $\Phi$  的 RMSD 随  $\Delta y$  变化曲线

由仿真结果图 5 可知:(1) 在无岸壁三层分层海洋环境中,不论  $\Delta y$  为多少,RMSD 均为 0,即对称场线上标量电位分布总是相同,这说明该深度平面上标量电位分布关于舰船中纵剖面对称,与文献[10]研究结论一致。(2) 存在平行岸壁时 RMSD 随  $\Delta y$  增大而线性增大。这说明平行岸壁使得场分布失去了原有对称性,且场线距离岸壁垂直距离越近场分布的对称性受影响越大。这与前文结论是一致的。

产生上述现象的根本原因在于岸壁相对于海水为高阻体,会阻碍电流的流动,由此使靠近岸壁处的场点标量电位增加;且越靠近岸壁,影响越大。

## 2.2 固定竖直岸壁对不同场点处标量电位的影响

对于水雷以及电磁探测阵列而言,在布设时除了需要考虑战术使用需求,也需要根据岸壁对探测信号的影响规律选择影响较小的位置进行布设,或根据影响规律对探测信号进行修正,以提高对非合作目标的探测精度,因此有必要研究在相同的岸壁和场源条件时,不同场点受到岸壁影响的差别。

在本文 2.1 节仿真条件下,保持场点与场源的水平距离  $R$  不变,改变场点与源偶极子连线在水平方向上的投影与  $x$  轴正方向的夹角  $\alpha$ ,如图 6 所示,计算呈圆形分布的各个场点的  $|\Delta\Phi|$ ,仿真结果如图 7 所示。

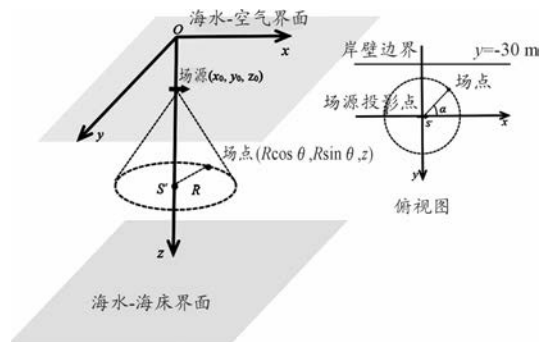


图 6  $z = 25.0 \text{ m}$  平面上岸壁与场源相对位置关系示意图

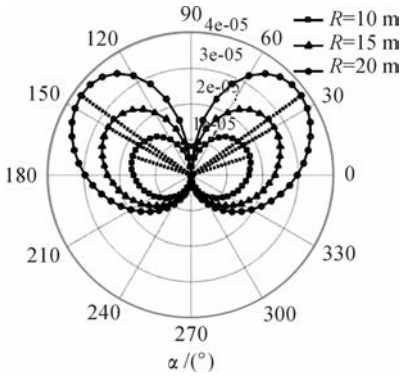


图7 固定平行岸壁和场源时,圆形场线上  
 $|\Delta\Phi|$ 随 $\alpha$ 的变化

由图6、图7可知:① 平行岸壁对与场源水平距离相同的不同方位场点处的标量电位影响不同,具有明显方位指向性。近似为两相切于场源投影点且关于 $x=0$  m 对称的椭圆,在 $\alpha=90^\circ$ 、 $270^\circ$ 时 $|\Delta\Phi|$ 取最小值0,而取最大值的方位角随 $R$ 增大逐渐靠近 $\alpha=90^\circ$ ,即当场点与场源投影点的水平连线垂直于岸壁时,岸壁对场点标量电位无影响。②  $\alpha$ 相同时 $|\Delta\Phi|$ 随 $R$ 增大而增大,即随场点与岸壁垂直距离减小,岸壁对同一方位场点标量电位的影响增大。

上述结论与前文是一致的,从 $\Delta\Phi$ 的表达式出发也易于理解该结论。由于将岸壁对场分布的影响用镜像偶极子组在场点处产生的场来表示,而 $\Delta\Phi$ 与场点和镜像偶极子间距的三次方成反比,且与上述间距沿偶极矩方向的分量成正比。因此当 $\alpha$ 变化时场点与镜像偶极子的相对位置不断改变,使得 $|\Delta\Phi|$ 分布具有前述研究所描述的特征。

### 2.3 不同方位竖直岸壁对固定场点标量电位的影响

尽管在多数航行条件下舰船航向均平行于海水-岸壁边界,但由于航线设计等原因也会存在与舰船航向呈不同方位的岸壁,因此研究不同方位岸壁对舰船水下标量电位的影响对于探测机动目标水下电场信号有着重要作用。

为分析方便起见,取舰船所在位置为坐标原点,在2.1节仿真条件下,如图8所示,固定场源到岸壁的垂直距离为 $d$ ,仅改变岸壁相对舰船航向的方位(该方位用过原点的岸壁法线与 $x$ 轴正方向的夹角 $\beta$ 来表示),计算不同 $\beta$ 时固定场点(5.0, 7.0, 25.0)、(-6.0, 4.0, 25.0) m处的 $|\Delta\Phi|$ ,仿真结果如图9所示。

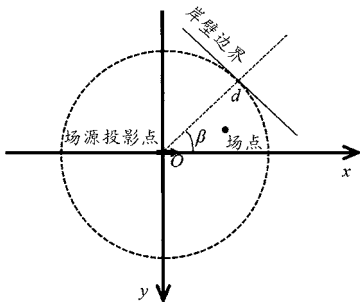
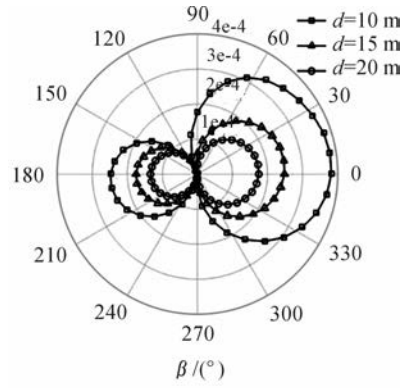
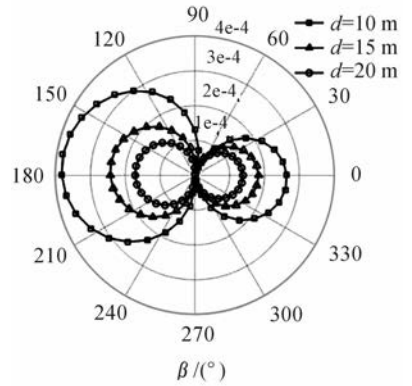


图8 岸壁与固定场源投影点的相对位置关系俯视图



(a) (5.0, 7.0, 25.0)场点



(b) (-6.0, 4.0, 25.0)场点

图9 存在不同方位岸壁时固定场点处  
 $|\Delta\Phi|$ 随 $\beta$ 变化方位图

由图8、图9可见:① 不同方位的岸壁对于同一场点处的标量电位的影响不同,其方位分布具有明显的指向性,且与场点位置、岸壁与场源间距有关,但根据大量场点处的仿真研究表明 $\beta=90^\circ$ 、 $\beta=270^\circ$ 时 $|\Delta\Phi|$ 取最小值,即平行岸壁(即方位与场源偶极矩平行)对标量电位的影响最小。② 当岸壁方位相同时岸壁距离场源越近,标量电位受到的影响越大。

如图10所示,为深入研究岸壁方位这一单一因素对场分布的影响,在本节前述仿真条件下,选择随岸壁方位改变满足以下条件的场点作为研究对象,即:① 固定场点与岸壁的垂直距离为 $d-R$ ,其中场点与场源投影点的水平距离 $R=6.0$  m;② 场点与场源投影点的水平连线与 $x$ 轴正方向的夹角为 $\beta$ 。

计算不同 $\beta$ 时满足上述条件的场点处的 $|\Delta\Phi|$ ,仿真结果如图11所示。

由图10、图11可知,当场点与岸壁的垂直距离固定时, $|\Delta\Phi|$ 分布除了具有前述研究所具有的特征外,其分布近似为两沿 $\alpha=180^\circ$ 、 $0^\circ$ 方向排列且相切于场源投影点的相同椭圆,当 $\beta=0^\circ$ 、 $\beta=180^\circ$ 时 $|\Delta\Phi|$ 取最大值,即垂直岸壁(即方位与场源偶极矩垂直)对标量电位的影响最大。

分析原因为:电偶极子在海水中产生电流的主要方向与

电偶极矩一致,因此容易理解垂直岸壁较平行岸壁对海水中场分布的影响更大。

以上研究反映了在分层海洋环境中,垂直岸壁对舰船水下电场主体特征的影响规律。本文研究为在复杂海洋环境中水中兵器利用舰船电场特性实现对目标的预警、探测、打击提供了理论基础。

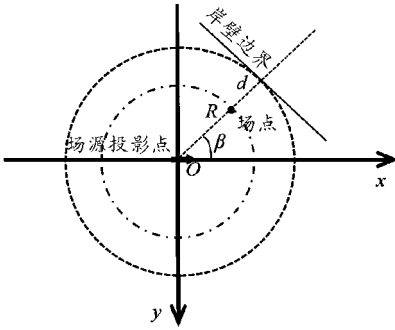


图10 岸壁与场源投影点、场点的相对位置关系俯视示意图

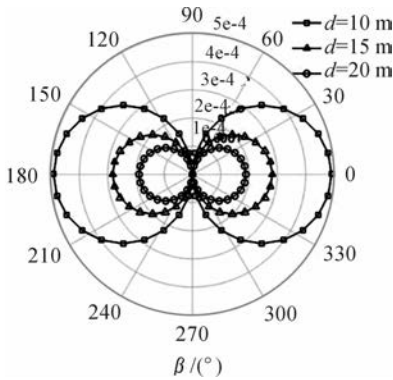


图11 存在不同方位岸壁时  $R=6.0\text{ m}$  上场点处  $|\Delta\Phi|$  随  $\beta$  变化方位图

### 3 实验验证

为验证上述理论推导以及仿真分析结论的正确性,利用如图12所示装置进行实验。首先在尺寸为  $L_1 \times L_2 \times L_3 = 130.0\text{ cm} \times 60.0\text{ cm} \times 80.0\text{ cm}$  的玻璃水槽中配置电导率为  $0.716\text{ S/m}$  (水温为  $24.4\text{ }^\circ\text{C}$ ) 的模拟海水,深度  $D=38.0\text{ cm}$ 。建立如图2所示的  $O-xyz$  坐标系,用间距  $2.0\text{ cm}$  的两金属铂片,沿  $x$  方向平行放置以模拟场源,并置于  $(0.0, 0.0, 10.0)\text{ cm}$  处,并通以恒定电流  $I=0.05\text{ A}$ 。利用9只固态  $\text{Ag-AgCl}$  电极形成  $y$  方向测线,通过沿  $x$  方向移动,测得  $z=19.0\text{ cm}$  平面上的标量电位分布。将场点处实测结果减去无岸壁三层模型下标量电位的仿真值,并将此值作为四周岸壁对标量电位影响的实测值  $\Delta\Phi$ ,如图13(a)所示。在本文2.3

节所述模型基础上,根据实验条件考虑存在  $\beta=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  四个方位的竖直岸壁,岸壁与场源的间距分别为  $L_1/2, L_2/2, L_1/2, L_2/2$ 。根据式(5)、(6),计算  $z=19.0\text{ cm}$  上四周岸壁对水下标量电位分布的影响,仿真结果如图13(b)所示。图14为测量平面上的两根垂直场线上的实测与仿真结果对比。

由图13、图14可知,  $\Delta\Phi$  实测值与考虑四个方位岸壁时的理论仿真值吻合较好;进一步计算432个测量点处  $\Delta\Phi$  仿真值与实测值的平均偏差为  $1.1 \times 10^{-5}\text{ V}$ ,较  $\Delta\Phi$  量值而言偏差较小。

综上所述,实验验证了前述理论推导和仿真分析的正确性。

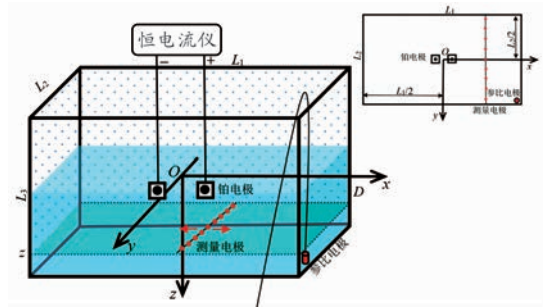
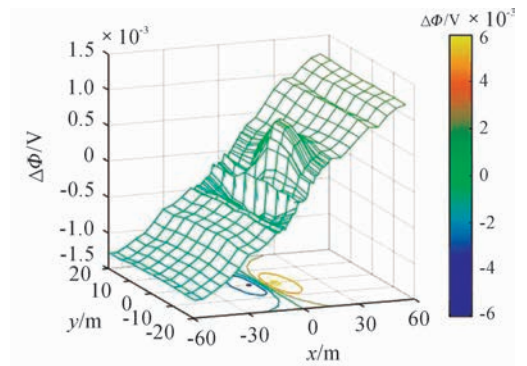
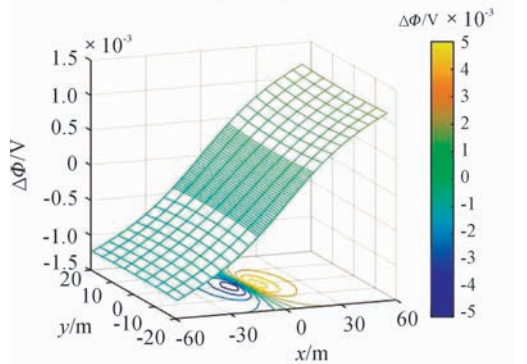


图12 实验装置示意图



(a) 实测  $\Delta\Phi$  三维图



(b) 仿真  $\Delta\Phi$  三维图

图13  $z=19.0\text{ cm}$  上实测、仿真  $\Delta\Phi$  三维图

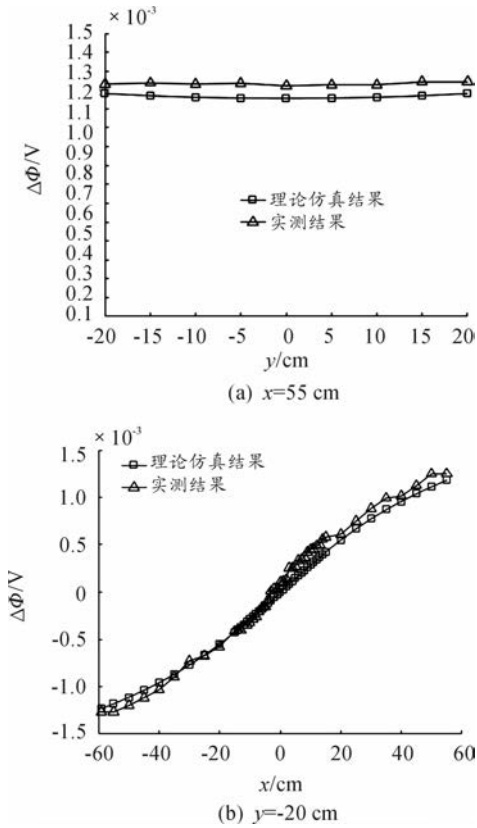


图 14  $z=19.0\text{ cm}$  上  $\Delta\Phi$  随  $x, y$  变化曲线

## 4 结论

1) 平行岸壁使除舰船中横剖面外所有水下场点处的标量电位绝对值增大,相应地改变了无岸壁时标量电位分布关于舰船中纵剖面的对称性,且场点距岸壁越近岸壁的影响作用越明显。

2) 固定平行岸壁对与舰船电场等效场源中心水平距离相同的不同方位场点处标量电位影响具有明显的方位指向性,且上述圆形场线上受岸壁影响最大的场点的方位随场线半径增大逐渐靠近舰船中横剖面。

3) 岸壁方位对舰船水下标量电位分布的影响具有明显方位指向性,其中垂直岸壁对标量电位影响最大,而平行岸

壁的影响最小。

4) 可对位于海峡、群岛水道、港口泊位等受限水域中的舰船目标的电场信号进行修正,提高探测、识别和打击精度。基于本文所建立的竖直岸壁模型,能够通过对不同方位岸壁的组合,实现对复杂海洋环境以及实验室模拟海洋环境的容器边界条件的模拟,具有广泛的适用性。

## 参考文献:

- [1] FALLAH M A, ABIRI H. Electromagnetic Fields Induced by the Motion of Di-Hull Bodies in a Conducting Fluid[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49 (10): 5257 - 5263.
- [2] 张海鹏,陈新刚,龚文超. 电场抑制与磁场防护的共性技术研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(1): 8 - 12.
- [3] 李永强,赵琪,李铁,等. 基于多物理场的舰船目标识别方法[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(1): 11 - 16.
- [4] 陈夫余. 海洋环境边界对船舶腐蚀静电场的影响[D]. 武汉: 海军工程大学, 2016.
- [5] 危玉倩. 舰船水下腐蚀相关电场场源等效规律的实验研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2017.
- [6] 潘龙. 用于目标探测的水下电场传感器研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2015.
- [7] 谭浩,蒋治国,王宇. 基于边界元法的船舶水下静电场模型[J]. 海军工程大学学报, 2016, 28(6): 84 - 88.
- [8] 姜润翔,林春生,龚沈光. 基于点电荷模型的舰船静电场反演算法研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 545 - 551.
- [9] 刘胜道,肖昌汉,龚沈光. 两层模型中直流电流元产生的电磁场[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2004, 28(5): 641 - 644.
- [10] 陈聪. 舰船电磁场的模型研究及深度换算[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.

科学编辑 杨盼盼 博士(长安大学副教授)

责任编辑 周江川