

# 基于点电源电场的船舶电场特性研究

史建伟 龚梅

江苏伏波海洋探测科技有限公司 江苏 常熟 215500

**摘要:** 电场是船舶除声场、水压场之外的又一重要的物理场信息, 可被用于船舶水下探测的被动探测信号源。本文利用点电源电场对船舶电场信号进行计算, 并与边界元法的计算结果进行比较, 得到较好的一致性。通过调整模型参数, 对船舶电场的特性进行分析, 得出船舶电场的相关特性, 为船舶电场的水下传播应用提供理论依据。

**关键词:** 船舶; 船舶电场; 静电场建模;

**引言:** 船舶电场主要起源于腐蚀和防腐措施, 船舶异种金属之间的电化学腐蚀和防腐系统均会在海水中产生电流, 从而在船舶周围会产生电场和磁场<sup>[1][2]</sup>。电场是船舶除声场、水压场之外的又一重要的物理场信息, 可被用于水下预警系统的被动探测信号源, 本文利用单极性的点电源构成的模型对船舶电场进行计算, 可以有效地减少模型方程的维数和数据量, 提高求解的精度。并且根据点电源电场对船舶电场的仿真计算结果, 得到船舶电场的相关特性, 为船舶电场的实际应用提供较高的理论依据。

## 1 船舶电场的分类

船舶电场按照信号的类别划分, 主要可以划分为<sup>[1]</sup>:

(1) 静态电场 (Static Electric Field, 简称SE)

船舶腐蚀和各类防腐措施在船舶附近海水中形成稳定的电流分布, 相应地在船舶周围海水中产生水下电势分布 (Underwater Electric Potential, 常被称为UEP), 并形成静态电场。UEP和SE存在于船舶周围的海水中, 有明显的分布特征。

(2) 极低频电场 (Extremely Low Frequency Electrical Field, 简称ELFE)

极低频电场 (1~1000Hz) 是在静电场的基础上调制产生的, 按照调制的原理进行划分, ELFE主要有两个来源, 一是螺旋桨旋转时主轴和船壳之间电阻的变化, 使得流经船舶主轴的腐蚀或防腐电流被调制, 产生以主轴旋转频率为基频的轴频电场及其谐波电场; 二是由于船舶外加电流阴极保护系统电源滤波不佳产生以工频为基频的工频电场。

## 2 点电源建模基本原理

假设船壳 (闭曲面S, 如图2.1所示) 上的电荷密度为Q(S), 则S在某一场点P处的电位可表示为:

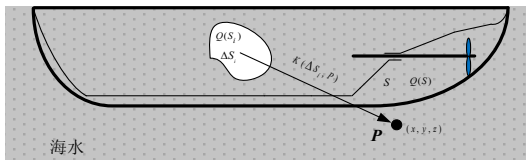


图2.1 静电场建模示意图

$$U = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_S Q(S) K(S, P) dS \quad (2.1)$$

式中,  $\sigma$  ——海水电导率;

$K(S, P)$  ——点P与S之间的距离函数。

将表面S分为n个小面源

$S_i, i=1, 2, \dots, n$ , 每个小面源的电荷密度为 $Q(S_i)$ ,

有:

$$U = \frac{1}{4\pi\sigma} \sum_{i=1}^n Q(S_i) \Delta S_i K(\Delta S_i, P) = \frac{1}{4\pi\sigma} \sum_{i=1}^n Q_i K(\Delta S_i, P) \quad (2.2)$$

式中,  $Q_i$  ——面源 $S_i$ 上的电荷大小;

$\Delta S_i$  ——等效面源的面积;

$K(\Delta S_i, P)$  ——面源 $S_i$ 和场点P之间的距离函数。

为了将面源 $S_i$ 等效为一个点电荷, 由电多极矩的相关知识可知, 如果场点P距离等效面源 $S_i$ 区域较远, 可将 $K(\Delta S_i, P)$ 相对面源 $S_i$ 内的某一点 $(x_i, y_i, z_i)$ 进行泰勒展开, 得:

$$K(S_i, P) = K_1(S_i, P) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k!} \left[ (x_p - x_i) \frac{\partial}{\partial x} + (y_p - y_i) \frac{\partial}{\partial y} + (z_p - z_i) \frac{\partial}{\partial z} \right]^k K_1(S_i, P) \quad (2.3)$$

在0阶收敛半径之外, 可忽略高次项, 仅保持第一项, 则式(2.2)可表示为:

$$U = \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{i=1}^n Q_i K_1(S_i, P) \quad (2.4)$$

式中,  $K(S_i, P)$  为等效点电荷的坐标 $(x_i, y_i, z_i)$ 到场点 $P(x, y, z)$ 处的距离函数。

根据式(2.5)可知, 船舶的静电场可等效为n个点电荷产生的电场叠加。在利用式(2.5)进行电场计算时, 其核心参数 $K(S_i, P)$ 在空气—海水—海床三层均匀介质 (如图2.2所示的坐标) 条件下为:

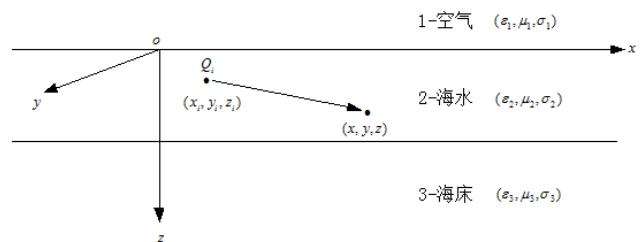


图2.2 空气—海水—海床三层均匀介质坐标系

$$K_1(S_i, P) = \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p + 2mH)^2}} + \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i - z_p - 2mH)^2}}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i + z_p + 2mH)^2}} \\
 & + \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_p)^2 + (y_i - y_p)^2 + (z_i + z_p - 2mH)^2}}
 \end{aligned} \quad (2.5)$$

式中，H为海水深度， $k = (\gamma - \gamma_1) / (\gamma + \gamma_1)$ 为海底反射系数， $\gamma$ 为海床电导率，m为反射层数，实际计算中其上限值可取10~20。

值得注意的是，在利用式(2.4)计算场点P处的电位时，为了减小计算误差，场点与等效点源之间的距离应大于函数K(Si,P)泰勒公式展开时的收敛半径<sup>[3]</sup>。

有了海水中任意一点的电位表达式(2.4)，便可计算出该点的三分量电场表达式为：

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial U}{\partial x} = \sum_{i=1}^n Q_i K_{1x}(S_i, P) \\ E_y = -\frac{\partial U}{\partial y} = \sum_{i=1}^n Q_i K_{1y}(S_i, P) \\ E_z = -\frac{\partial U}{\partial z} = \sum_{i=1}^n Q_i K_{1z}(S_i, P) \end{cases} \quad (2.6)$$

式中，

$$\begin{aligned}
 K_{1x}(S_i, P) &= \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i - 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{x_p - x_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i - 2mH)^2)^{3/2}}
 \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
 K_{1y}(S_i, P) &= \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i - 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{y_p - y_i}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i - 2mH)^2)^{3/2}}
 \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned}
 K_{1z}(S_i, P) &= \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{z_p - z_i + 2mH}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{z_p - z_i - 2mH}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p - z_i - 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{z_p + z_i + 2mH}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i + 2mH)^2)^{3/2}} \\
 &+ \frac{1}{4\pi\gamma} \sum_{m=0}^{\infty} k^m \frac{z_p + z_i - 2mH}{((x_p - x_i)^2 + (y_p - y_i)^2 + (z_p + z_i - 2mH)^2)^{3/2}}
 \end{aligned}$$

### 3 静电场建模及等效源强度计算方法

为了计算船舶电场，还需要给出每个等效电荷的位置，假设阳极和阴极通过的电流均匀，此时可将每个阳极和阴极的几何中心设定为等效电荷的位置，即

$$x_i = \frac{x_{\max} + x_{\min}}{2}, \quad y_i = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2}, \quad z_i = \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} \quad (3.1)$$

式中，带max和min的符号对应阳极和阴极表面在船舶坐标系中的最大和最小坐标值。利用式(3.1)计算出每个点电荷的等效电流和坐标位置后，便可对静电场进行建模<sup>[4]</sup>。

在得到每个等效电极的电流后，可计算出船舶三个方向的等效电偶极矩<sup>[5][6]</sup>：

$$\begin{cases} P_x = \sum_{i=1}^N I_i \cdot x_i \\ P_y = \sum_{i=1}^N I_i \cdot y_i \\ P_z = \sum_{i=1}^N I_i \cdot z_i \end{cases} \quad (3.2)$$

船舶电偶极矩的绝对值按下式计算：

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2} \quad (3.3)$$

为了验证基于点电荷的静电场建模方法是否有效，通过计算结果值作为参考，分别计算了一艘水面船舶自然腐蚀状态和阴极保护状态时不同深度的电场信号值，其中，水面船舶长为154m，船宽为20m，吃水深度为6m，船体、美人架和舵板材料为涂层破损率10%的钢，螺旋桨为镍铝青铜。海水电导率 $\sigma = 4\text{S/m}$ ，海底电导率 $\sigma_1 = 0.01\text{S/m}$ ，模拟海水深度为200m。

图3.1为船体处于自然腐蚀状态下，不同水深Z时的正横距为10m时，利用等效点电荷法和边界元法的计算得到的电位信号对比结果。其中，电位信号为去均值后的结果。

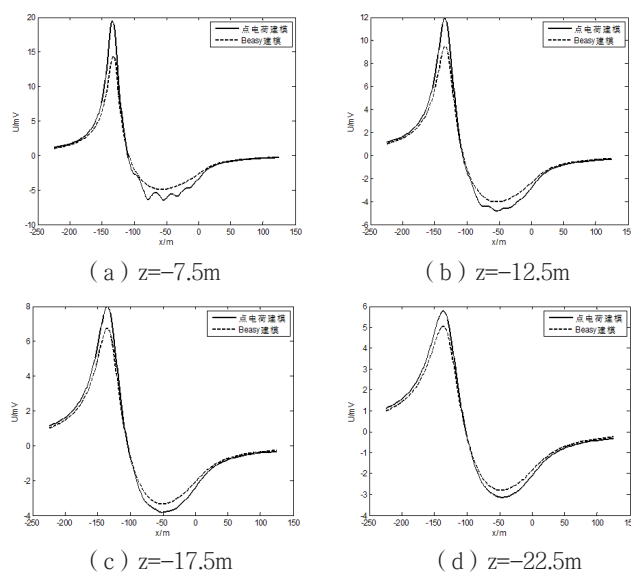


图3.1 自然腐蚀状态，不同水深Z时的正横距为10m时水面船舶产生的电位信号

静电场为低频场,其信号频率与船舶的航速、船长、异种金属的分布和测点相对于船舶的位置密切相关,通常情况下,其能量主要集中在DC~0.2 Hz频段,是连续谱。随着航速及测点相对于船舶距离的减小,其频率向高频方向移动。

随正横距离的增大,静电场的幅值衰减较快,其能量主要集中在-1.5B~1.5B(B为船宽)范围内,且在正横距较小时,电场 $E_y$ 的值相对较小。

静电场的幅值与涂层表面的破损状态、航速、船体表面的保护电位、航行海域的电导率等因素密切相关。当电导率由2.0 S/m变化至3.75 S/m时,随着电导率的增大,自然腐蚀电流增大,静电场信号明显增大,而当电导率由3.75 S/m变化至4.20 S/m时,静电场增大并不明显,这主要是由于电导率过大时,海水盐度较高,含氧量减小,从而导致腐蚀电流减小的缘故<sup>[7]</sup>。

#### 4 结论

(1) 利用单极性的点电源构成的船舶电场模型可以很好的模拟船舶的辐射电场,由于该模型可以优化计算量,从而使得在嵌入式系统上实现船舶电场的计算成为可能。

(2) 根据点电源模型构建的船舶电场模型的计算与理论分析得到船舶电场具有以下特性:

① 船舶静电场属于低频场,其频率与航速、船长、不同金属的分布和测试点在船舶上的位置密切相关;

② 静电场在船舶的正横距离上衰减较快,主要能量集中在船宽的 $\pm 1.5$ 倍范围内;

③ 静电场的幅值与涂层破损和海水电导率密切相关。

#### 参考文献:

[1]林春,龚沈光.船舶物理场[M].北京:兵器工业出版社,2007:233-246.

[2]Schaefer D, Thiel C, Doose J. Above water electric potential signatures of submerged naval vessels[J]. Journal of Marine Science and Engineering,2019,7(2):1-12.

[3]陈聪,蒋治国,姚陆锋,等.浅海中潜艇腐蚀相关静态电磁信号特征[J].海军工程大学学报,2014(3):1-6.

[4]胡鹏,龚沈光,胡英娣.基于小波包熵的船舶轴频电场信号检测[J].华中科技大学学报(自然科学版),2011,39(11):15-18.

[5]孙宝全,颜冰,姜润翔,等.船舶静电场在船舶跟踪定位中的应用[J].水下无人系统学报,2018,26(1):57-62.

[6]孙宝全,颜冰,姜润翔,等.船舶静电场跟踪的渐进更新扩展卡尔曼滤波器[J].国防科技大学学报,2018,40(6):134-140.

[7]张伽伟,姜润翔,肖大为,等.基于静态电位差的船舶跟踪算法[J].哈尔滨工程大学学报,2020,41(6):812-816.