2026 年第 41 卷 第 5 期
2026,41(5):2319-2329
地球物理学进展 Progress in Geophysics
http://www.progeophys.cn
ISSN 1004-2903
CN 11-2982/P

张必成,魏宝君,王荣贞,等.2026.水下航行器腐蚀电场正反演研究.地球物理学进展,41(5):2319-2329,doi:10.6038/pg2026JJ0413.
ZHANG BiCheng, WEI BaoJun, WANG RongZhen, *et al*. 2026. Research on the forward and inverse modeling of corrosion electric fields for underwater vehicles. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 41(5):2319-2329,doi:10.6038/pg2026JJ0413.

水下航行器腐蚀电场正反演研究

Research on the forward and inverse modeling of corrosion electric fields for underwater vehicles

张必成,魏宝君*,王荣贞,刘健
ZHANG BiCheng, WEI BaoJun*, WANG RongZhen, LIU Jian

中国石油大学(华东)理学院,青岛 266580
School of Science China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, *China*

摘 要 采用极低频率下层状介质的并矢 Green 函数模拟多层海水环境中水下航行器等效电偶极源产生的腐蚀电场,分析了海水电导率、深度对腐蚀电场不同分量的影响.将并矢 Green 函数与粒子群优化算法相结合,反演不同数目等效电偶极源的位置和强度.计算结果表明,海水电导率越高,海水中腐蚀电场的强度越低,二者彼此成反比关系.由于电场法向分量在层界面处不连续,故可以利用该分量确定分层海水层界面位置.随着等效电偶极子数目的增加,腐蚀电场的反演结果越来越准确.反演结果和水下航行器腐蚀电场仿真结果的一致性说明用等效电偶极子电场代替水下航行器电场是可行的.

关键词 水下航行器;腐蚀电场;并矢 Green 函数;等效电偶极子;粒子群优化算法

中图分类号 P631,P738
文献标识码 A
doi:10.6038/pg2026JJ0413
CSTR:32085.14.pg2026JJ0413

Abstract The corrosion electric field generated by equivalent electric dipoles of an underwater vehicle in multilayer seawater environment was simulated using ultra-low frequency dyadic Green's function for stratified media. The influence of the seawater's conductivity, depth, and stratification state on different components of the corrosion electric field was analyzed. By combining the dyadic Green's function with the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, the location and intensity of equivalent electric dipoles with different number were inverted. The calculation results showed that the intensity of the corrosion electric field in seawater will decrease with increasing seawater's conductivity and they are inversely proportional to each other. Since the normal component of the electric field is discontinuous at layer interfaces, this component can be used to determine the interface position of stratified seawater. The inversion results of the corrosion electric field become more and more accurate with increasing number of equivalent electric dipoles. The consistency between the inversion results and the simulation results of the corrosion electric field of the underwater vehicle indicated that it is feasible to replace the underwater vehicle's electric field with the equivalent d ipole's electric field.

Keywords Underwater vehicle; Corrosion electric field; Dyadic Green's function; Equivalent electric dipole; Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm

0 引 言

水下航行器在海水中由于电化学腐蚀和防腐措施,容易形成腐蚀电流和防腐电流,这些电流会在海水中产生腐蚀电场(刘春阳等,2018,2022;张心心,2021;Keddie *et al*., 2007;陆璐等,2011;朱禛等,

收稿日期 2025-12-05; **修回日期** 2026-05-10. **投稿网址** http://www.progeophys.cn
基金项目 国家重点研发计划(2019YFC1408104)资助.
第一作者简介 张必成,男,硕士研究生,研究方向为海洋电磁理论及探测方法.E-mail:956611617@qq.com
***通讯作者** 魏宝君,男,教授,博士,教育部"新世纪优秀人才支持计划"入选者,研究方向为电磁探测理论及应用.
E-mail:weibj@upc.edu.cn

2022;赵玉龙等,2022).腐蚀电场是一种重要的物理场,对水下航行器的电场隐身性能和安全构成严重威胁.通过建立等效源模型并采用合适的反演方法,可预测水下航行器腐蚀电场的分布以及等效电偶极子的位置和强度,为水下航行器的防腐设计和电场隐身提供理论支持,从而达到优化水下航行器设计、削弱甚至消除腐蚀电场、降低被电磁探测发现几率的目的.

如图1所示,水下航行器的钢制船体和铜合金螺旋桨在海水中会形成电偶腐蚀电池:船体作为阳极被腐蚀,螺旋桨作为阴极发生氧还原反应,产生稳定的腐蚀电流回路.同时,外加电流阴极保护系统(ICCP)也会产生防腐电流回路.这两种电流回路都会形成腐蚀电场(张济平等,2019;陈聪等,2014a).这种阴阳极的电荷分离特性与电偶极子的正负电荷对具有等效性.水下航行器腐蚀电场已有的理论研究以及水下航行器缩比模型实验和仿真模拟均表明:在远场点处,来源于水下航行器腐蚀电场的主体部分可以用一个或多个电偶极子模拟(陈聪等,2010,2014b;Zhang *et al.*,2014;刘文宝等,2010;Wang *et al.*,2018).

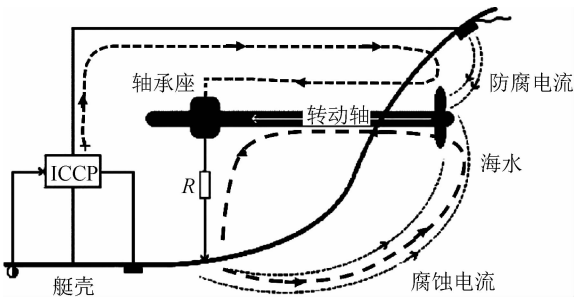


图1 腐蚀电流和防腐电流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of corrosion current and anti-corrosion current

关于水下航行器腐蚀电场分布的数值模拟方法已有多人研究,其中既包括等效电偶极子模拟方法(卢新城等,2004;倪海等,2006;毛伟等,2010),也包括有限元(刘春阳等,2017;Liu *et al.*,2020;焦达文等,2021)等数值仿真方法,反演方法主要有Tikhonov正则化方法(张建春等,2024).对于计算层化海洋环境下电场的传播,并矢Green函数法是最常用的方法之一,契合了海洋环境的水平层状结构和电偶极子的点源特性,可通过解析直接、精确地推导出各分层中电场的积分表达式,极大地简化了计算过程,为分析水下电磁场提供了高效的理论工具;粒子群优化算法易实现、收敛快、鲁棒性强且适配广,无需梯度计算、参数少,能通过群体协作快速逼近最优解.将二者相结合可快速、准确的反演出电偶极子的位置和极矩.笔者利用已开发的层状介质中的并矢Green函数(Wei *et al.*,2008;魏宝君等,2009,2010,2023,2024)模拟多层海水背景下水下航行器等效电偶极子产生的腐蚀电场.基于COMSOL模拟得到的水下航行器的腐蚀电场分布,将并矢Green函数与粒子群优化算法结合,反演得到等效电偶极子的位置和强度,分析等效电偶极子数目对反演精度的影响,得到等效电偶极子阵列的最优分布,从而为海洋环境下水下航行器腐蚀电场分析与目标探测提供理论支持和优化方法.

1 基本理论

1.1 多层海水建模及计算

考虑到实际海洋环境,构建如图2所示的多层海水模型用来计算等效电偶极子的腐蚀电场.图2中x轴和y轴平行于海面,z轴正方向垂直于海平面指向海底,多层海水上方为空气层(编号为0),空气层和第一层海水的分界面位于$z_0=0$ m处,第n层海水下方为沉积层(编号为$n+1$).各层的相对介电常数和电导率分别为ε_l、σ_l($l=0,1,\cdots,n+1$).等效电偶极子可置于海水层中的任意位置并可沿任意方向.

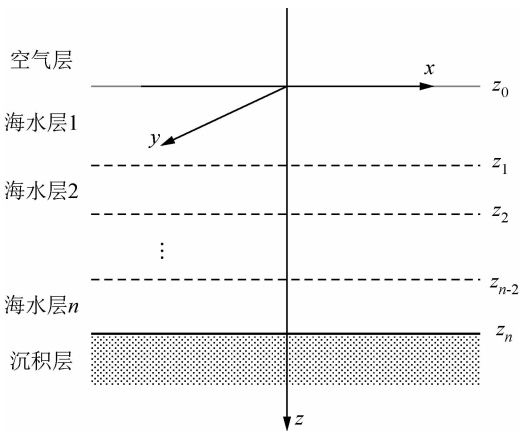


图2 多层海水模型

Fig. 2 Multi-layer seawater model

可采用水平层状介质中的电流源电型并矢Green函数模拟多层海水中电偶极源产生的电场的所有分量.电流源电型并矢Green函数用$\boldsymbol{G}^{\mathrm{EJ}}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$表示,其中$\boldsymbol{r}'$为源点坐标、$\boldsymbol{r}$为场点坐标,为一个3×3阶矩阵,可统一表示为如下形式:

$$\boldsymbol{G}^{\mathrm{EJ}}=\begin{pmatrix} G_{xx}^{\mathrm{EJ}} & G_{xy}^{\mathrm{EJ}} & G_{xz}^{\mathrm{EJ}} \\ G_{yx}^{\mathrm{EJ}} & G_{yy}^{\mathrm{EJ}} & G_{yz}^{\mathrm{EJ}} \\ G_{zx}^{\mathrm{EJ}} & G_{zy}^{\mathrm{EJ}} & G_{zz}^{\mathrm{EJ}} \end{pmatrix}, \tag{1}$$

并矢 Green 函数每个元素的具体表达式参见文献 Wei 等(2008),可通过递推矩阵方法快速高效地计算. $\boldsymbol{G}^{\mathrm{EJ}}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')$的每个元素均可表示为背景项和散射项之和,对于非含源层,则只有散射项. $\boldsymbol{r}'$点沿任意方向放置的电流元 $I\Delta\boldsymbol{l}$ 在场点 $\boldsymbol{r}$ 处产生的电场强度为:

$$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{r})=I\boldsymbol{G}^{\mathrm{EJ}}(\boldsymbol{r},\boldsymbol{r}')\cdot\Delta\boldsymbol{l}(\boldsymbol{r}'), \tag{2}$$

在利用并矢 Green 函数模拟直流电源产生的电场时采用极低频率并取实部即可.

1.2　粒子群优化算法

粒子群优化算法(杨云飞等,2024;韩江洪等,2006;邱宁等,2010;张涛等, 2023)(Particle Swarm Optimization, PSO)是一种基于群体智能的全局优化算法,其灵感来源于鸟群或鱼群的社会行为,其原理是通过群体中个体之间的协作与信息共享来寻找最优解. 在 D 维目标搜索空间中,种群总数为 I 的群体中每个粒子都有一个位置向量和速度向量,代表了在解空间中的搜索状态,其中位置向量表示当前所处位置的解,速度向量表示搜索过程中粒子移动的方向和快慢,且每个粒子都具有记忆功能,能够记住所搜寻到的最佳位置. 在算法实施的每一步,每个粒子在空间中搜寻并得到个体最优解 $p_{id}(i=1,2,\cdots,I;\ d=1,2,\cdots,D)$,并将个体最优解与群体中的其他粒子共享,根据当前所有粒子的个体最优解得到整个粒子群当前的全局最优解 p_{gd}. 粒子群中的每个粒子根据当前个体最优解和全局最优解不断改变自身的位置和速度,更新个体最优解和全局最优解,直至达到最大迭代次数或收敛到最佳位置. 图 3 为粒子群优化算法原理图.

给定群体中每个粒子的初始位置 $x_{id}^{(0)}$、初始速度 $v_{id}^{(0)}$、初始个体最优解 $p_{id}^{(0)}$($p_{id}^{(0)}=x_{id}^{(0)}$)、初始全局最优解 $p_{\mathrm{gd}}^{(0)}$(群体中适应度最优的粒子位置),第 k 次迭代粒子的速度更新公式为:

$$v_{id}^{(k)}=wv_{id}^{(k-1)}+a_1b_1\left[p_{id}^{(k-1)}-x_{id}^{(k-1)}\right]+a_2b_2\left[p_{\mathrm{gd}}^{(k-1)}-x_{id}^{(k-1)}\right]\ (k=1,2,\cdots), \tag{3}$$

式中:$v_{id}^{(k)}$ 为第 k 次迭代粒子 i 的第 d 维飞行速度;$x_{id}^{(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次迭代粒子 i 的第 d 维位置;a_1、a_2 为学习因子,一般取 $a_1=a_2\approx2$;b_1、b_2 为[0,1]区间的随机数;$p_{id}^{(k-1)}$、$p_{\mathrm{gd}}^{(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次迭代粒子第 d 维位置的个体最优解和全局最优解;w 为惯性权重,可以是固定值也可以动态调整(如在一定上下限范围内线性递减),本文取 $w=0.8(1.1-k/K)$,其中 K 为最大迭代次数.

粒子的位置更新公式为:

$$x_{id}^{(k)}=x_{id}^{(k-1)}+v_{id}^{(k)}, \tag{4}$$

在粒子的位置更新完成后,对每个粒子计算目标函数 $f_i(x_{id}^{(k)})$(例如最小化误差函数),完成适应度计算. 比较 $f_i(x_{id}^{(k)})$ 与 $f_i(p_{id}^{(k-1)})$,若 $f_i(x_{id}^{(k)})<f_i(p_{id}^{(k-1)})$,则 $p_{id}^{(k)}=x_{id}^{(k)}$,否则 $p_{id}^{(k)}$ 仍保留上次数值,从而完成对个体最优解的更新. 在所有粒子中选择适应度最优(即目标函数最小)的个体最优解,将其作为本次迭代新的 $p_{\mathrm{gd}}^{(k)}$,从而完成对全局最优解的更新. 更新完成后实施下一轮迭代.

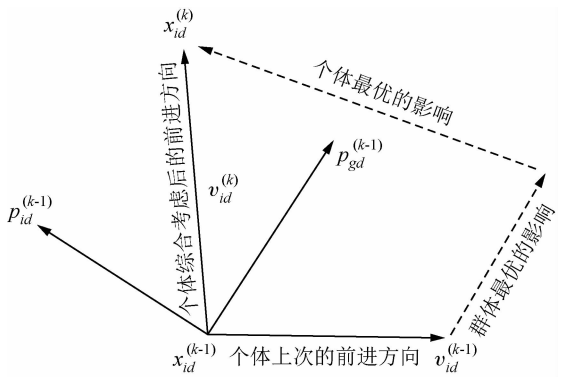


图 3　粒子群优化算法原理图

Fig. 3　Principle diagram of particle swarm optimization algorithm

在水下航行器腐蚀电场的反演中,对等效电偶极子阵列模型的优化可简化为电偶极子位置和电偶极矩的优化问题. 设采样点总数目为 M,等效电偶极子的数目为 N,由式(2)有:

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{P}, \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{E}$ 为 $3M\times1$ 阶矩阵,是所有采样点电场的三分量数据;$\boldsymbol{G}$ 为 $3M\times3N$ 阶系数矩阵,与海水模型参数、采样点的位置、等效电偶极子的位置有关;$\boldsymbol{P}$ 为 $3N\times1$ 阶矩阵,是所有等效电偶极子的三分量电偶极矩. 目标搜索空间的维度 D 与 N 的关系为 $D=3N$.

由于采样点的数目 M 一般远大于电偶极子的数目 N,所以利用式(5)根据已知电场 $\boldsymbol{E}$ 求解电偶极矩是对超定方程的求解,可采用最小二乘法实现,其解可表示为:

$$\boldsymbol{P}=\boldsymbol{G}^{+}\cdot\boldsymbol{E}, \tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{G}^{+}$ 为 $\boldsymbol{G}$ 的广义逆矩阵.

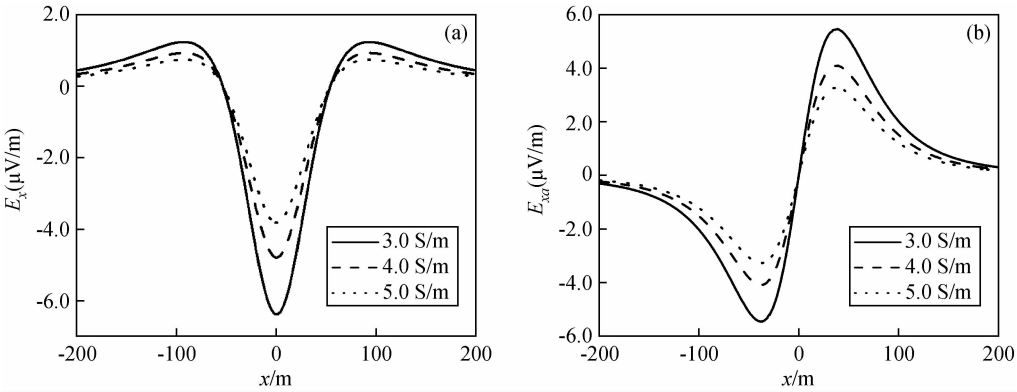


图 4 不同海水电导率情况下电偶极子电场的对比

(a) E_x;(b) E_z.

Fig. 4 Comparison of electric field produced by an electric dipole under different seawater conductivities

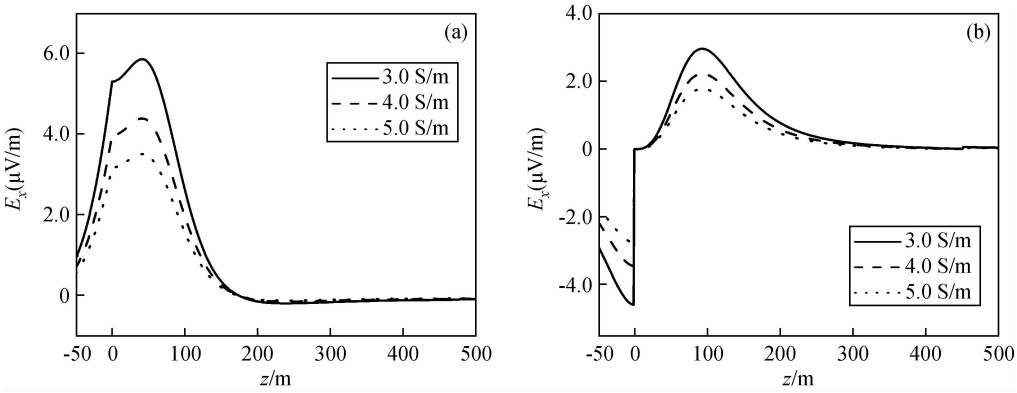


图 5 发射源位于水下 50 m 处时电场随深度的变化关系

(a) E_x;(b) E_z.

Fig. 5 Relationship between electric field and depth when the source is located at the depth of 50 m in seawater

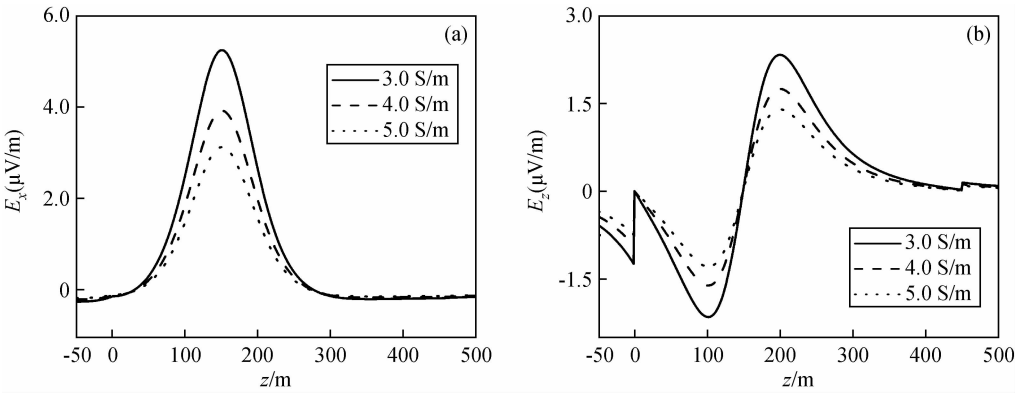


图 6 发射源位于水下 150 m 处时电场随深度的变化关系

(a) E_x;(b) E_z.

Fig. 6 Relationship between electric field and depth when the source is located at the depth of 150 m in seawater

为确保反演结果的精度与算法全局收敛性,给定粒子总数目 I(本文取 $I=100$)和最大迭代次数 K(本文取 $K=800$),根据实际情况将每个粒子都限制在一个具有特定形状的有限范围内(本文为旋转椭球体),每个粒子根据当前位置给出一个系数矩阵 $\boldsymbol{G}$,然后利用式(6)计算当前粒子位置对应的最优电偶极矩 $\boldsymbol{P}$. 利用适应度函数计算适应度值,适应度函数为仿真电场与当前粒子拟合的电场的相对误差,即:

$$f=(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{P})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{G}\cdot\boldsymbol{P})/(\boldsymbol{E}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}), \tag{7}$$

根据前述步骤循环这 I 个粒子得到所有粒子的适应度值并完成对个体最优解的更新,取最小适应度值所对应电偶极子的位置和电偶极矩作为当前全局最优解,根据当前个体最优解和全局全局最优解不断更新粒子的位置和速度,直到达到最大迭代次数,输出电偶极子的位置和电偶极矩.

2　海水中电偶极子产生的电场

2.1　海水电导率的影响

为研究海水不同电导率对直流电偶极子源产生的电场的影响,在利用并矢 Green 函数模拟计算时取数值为 1×10^{-8} Hz 的极低频率以等效直流情形,采用三层介质模型,自上而下依次为空气层、海水层和沉积层. 空气层和海水层分界面为 $z=0$ m 处,海水层电导率 σ_1,海水层和沉积层分界面位于 $z=450$ m 处,沉积层电导率 $\sigma_2=0.4$ S·m^{-1}. 沿 x 轴方向放置的电偶极子位于水深 150 m 处,坐标为(0 m,0 m,150 m),电偶极矩大小为 $p=I\Delta l=100$ A·m.

海水层电导率 σ_1 可变. 取海水电导率 σ_1 分别为 3 S·m^{-1}、4 S·m^{-1}和 5 S·m^{-1},图 4 给出了采用并矢 Green 函数计算得到的 $y=0$ m、$z=225$ m 处沿 x 轴方向 $-200\sim200$ m 范围内 E_x 和 E_z 随场点位置坐标 x 的变化关系.

由图 4 可知,不同的海水电导率情况下电场的变化规律相同. 随着海水电导率的增加,采样线上 E_x 和 E_z 的强度均逐渐降低,电场强度与海水电导率成反比关系. 这是由于电导率越高的介质中自由移动的电荷越多,在外加电场作用下自由电荷的定向移动会产生更大的感应电流,感应电流将产生反向电场,这会抵消掉一部分由电偶极子产生的电场. 因此,海水电导率越高,反向电场越大,总电场强度越小.

2.2　海水深度的影响

为研究海水不同深度对直流电偶极子产生的电场的影响,仍采用上述三层介质模型. 取海水电导率 σ_1 分别为 3 S·m^{-1}、4 S·m^{-1}和 5 S·m^{-1},图 5 给出了发射源位于水下 50 m 处时采用并矢 Green 函数计算得到的 $x=100$ m、$y=0$ m 处沿 z 轴方向 $-50\sim500$ m 范围内 E_x 和 E_z 随场点位置坐标 z 的变化关系,图 6 给出了发射源位于水下 150 m 处时 E_x 和 E_z 随海水深度的变化关系曲线.

由图 5a、图 6a,在与发射源深度接近处 E_x 的幅度达到极大值,随着场点垂向坐标逐渐远离偶极子源,E_x 的幅度变小. 由于在层界面处 E_x 属于切向分量,故在 $z=0$ m 和 $z=450$ m 处 E_x 连续. 由图 5b、图 6b,在与发射源深度接近处 E_z 的幅度为零,上下两侧正负反号. 由于在层界面处 E_z 属于法向分量,故在 $z=0$ m 和 $z=450$ m 处 E_z 不连续,发生突变.

取海水电导率 σ_1 为 4 S·m^{-1},图 7 给出了发射源位于水下 50 m 处时 $y=0$ m 剖面 E_x 和 E_z 幅度的分布,图 8 给出了发射源位于水下 150 m 处时 $y=0$ m 剖面 E_x 和 E_z 幅度的分布. 由图 7a,由于发射源距离空气—海水层界面相对较近,$|E_x|$ 的分布受空气层的影响相对较大,上下两侧对称性较低,且场点沿 x 方向距离发射源越远,$|E_x|$ 的峰值越偏离源的垂向位置向空气层靠近,$|E_x|$ 的上下对称性越低. 对比图 8a 与图 7a 可以看出,当发射源位于水下 150 m 处时,由于发射源距离空气—海水层界面相对较远,$|E_x|$ 的分布受空气层的影响相对较小,图像上下两侧对称性高于图 7a,随 x 的增加 $|E_x|$ 的峰值偏离源的垂向位置的程度相对较低. 两种情况下由于发射源距离海水—沉积层界面均较远,$|E_x|$ 的分布受沉积层的影响可以忽略.

由图 7b,受空气层的影响,$|E_z|$ 的上下对称性也较低,且随着场点沿 x 方向距离的增加,$|E_z|$ 的零值点快速偏离源的垂向位置向空气—海水层界面靠近. 图 8b 中 $|E_z|$ 的上下对称性大大提高,且随着场点沿 x 方向距离的增加 $|E_z|$ 的零值点偏离源的垂向位置向空气—海水层界面靠近的速度较慢. 无论是图 7b 还是图 8b,$|E_z|$ 在空气—海水层和海水—沉积层界面处均发生突变,层界面位置被清晰地显示出来.

将海水分为三层,自上而下各层海水的电导率分别为 $\sigma_1=3$ S·m^{-1}、$\sigma_2=4$ S·m^{-1}、$\sigma_3=5$ S·m^{-1},第一、二层海水分界面位于 $z=100$ m 处,第二、三层海水分界面位于 $z=250$ m 处,海水与沉积层分界面仍位于 $z=450$ m 处,其余参数同上. 图 9 给出了发射源位于水下 150 m 处时 $y=0$ m 剖面 E_x 和 E_z 幅

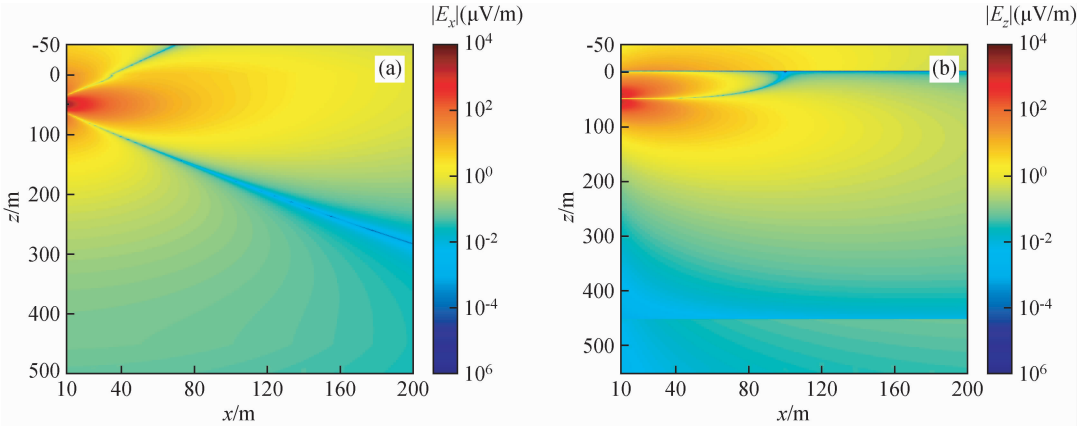


图 7 发射源位于水下 50 m 处时 $y=0$ m 剖面电场幅度的分布

(a) $|E_x|$;(b) $|E_z|$.

Fig. 7 Distribution of electric field's amplitude on $y=0$ m section when the source is located at the depth of 50 m in seawater

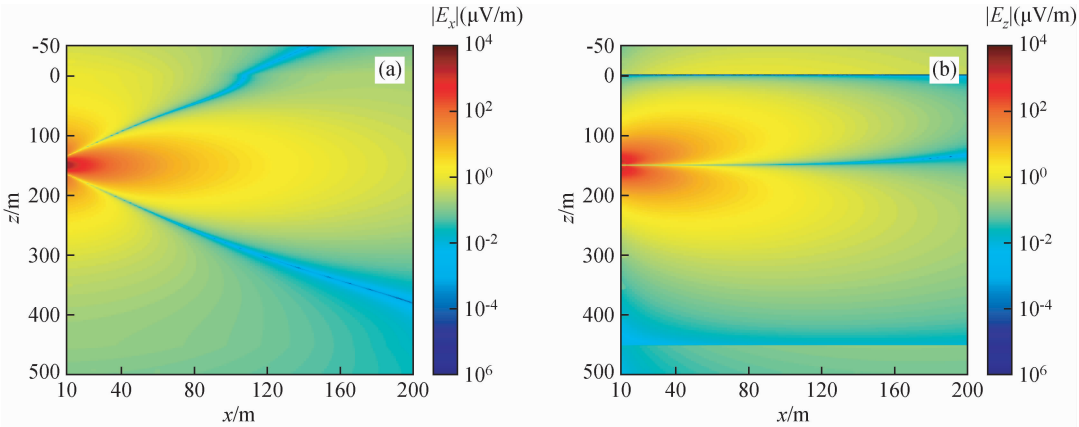


图 8 发射源位于水下 150 m 处时 $y=0$ m 剖面电场幅度的分布

(a) $|E_x|$;(b) $|E_z|$.

Fig. 8 Distribution of electric field's amplitude on $y=0$ m section when the source is located at the depth of 150 m in seawater

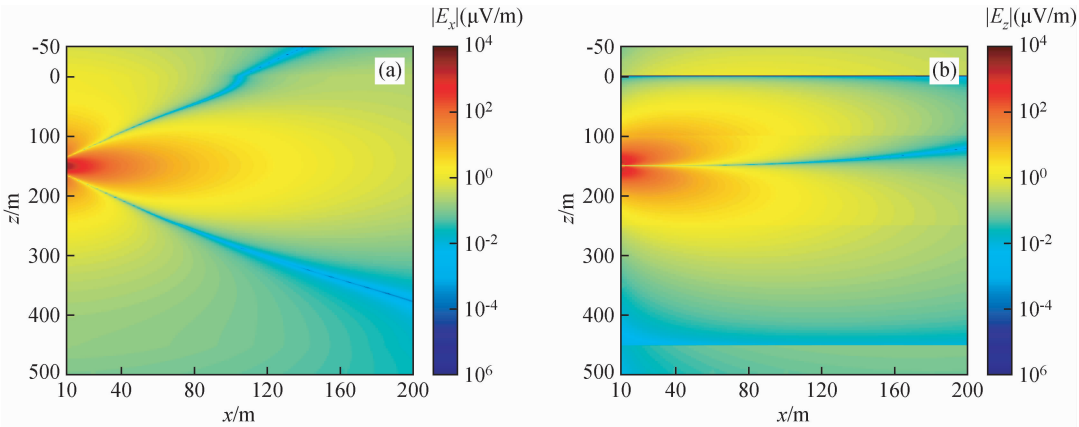


图 9 三层海水中发射源位于水下 150 m 处时 $y=0$ m 剖面电场幅度的分布

(a) $|E_x|$;(b) $|E_z|$.

Fig. 9 Distribution of electric field's amplitude on $y=0$ m section when the source is located at the depth of 150 m in 3-layer seawater

度的分布. 由于不同海水层的电导率差别较小,并且在层界面处 E_x 连续,因而图 9a 与图 8a 非常接近,无明显差异. 由于 $|E_z|$ 在层界面处发生突变,故图 9b 中 $z=100$ m 和 $z=250$ m 处能显示出层界面位置. 当然,由于不同海水层的电导率差别较小,100 m 和 250 m 处层界面的显示不如 0 m 和 450 m 处清晰.

3　水下航行器腐蚀电场的反演

3.1　模型构建

采用有限元软件 COMSOL 模拟水下航行器的腐蚀电场作为待反演的测量值. 水下航行器仿真模型及所采用的直角坐标系如图 10 所示,坐标原点位于船体中心. 船体长度为 50 m,船体主体为圆柱形,直径为 6 m. 围壳高出船体顶部 3.5 m,长度为 10 m,厚度为 2 m,围壳中心位于 $x=3$ m 处. 螺旋桨基座由长 1.1 m、半径 0.4 m 的圆柱体和半径为 0.4 m 的半球壳组成,基座上有 4 片螺旋桨桨片,连接基座与船体的螺旋桨轴为半径和长度均为 0.2 m 的圆柱体. 船首部分为一个半径为 3 m 的半球壳,潜艇尾部设置两个辅助阳极,位于 $x=-17$ m 处,用来模拟外加电流阴极保护系统. 将上述模型导入 COMSOL Multiphysics 中,利用其中的“阴极保护”模块模拟电解质中的电流分布及金属表面的腐蚀反应. 在“材料”选项中,螺旋桨选用镍铝青铜 (NAB) 合金,螺旋桨轴选用 625 合金. 在“边界条件”选项中,将螺旋桨和螺旋桨轴的表面设置为电极表面,在二者表面发生的电极反应设置为氧还原过程. 根据文献刘春阳等(2022),在氧还原过程中电极动力学表达式的极限电流密度选用 5 $A\cdot m^{-2}$. 在“模型”选项中添加“参比电极”节点(电位为 0 V),然后将辅助阳极的电极电位相对于参比电极的电位设置为 -850 mV,用于模拟阴极保护系统. 对水下航行器表面的剩余部分所有边界使用默认的“绝缘”条件. 为模拟海洋的无限延伸,电解质域外部边界使用“无限电解质”条件.

在模拟时设海水均匀并忽略空气层和沉积层的影响,取海水的电导率为 4 $S\cdot m^{-1}$. 在水下航行器上下方沿 y 方向各布设两条采样线(图 10),利用各采样线上由 COMSOL 模拟得到的三分量电场作为训练集,每条采样线上的采样点数为 41. 采样线 1 的位置为 $x=-10$ m、$z=23$ m,采样线 2 的位置为 $x=-10$ m、$z=-17$ m,采样线 3 的位置为 $x=10$ m、$z=-17$ m,采样线 4 的位置为 $x=10$ m、$z=23$ m,各采样线在 y 方向的采样范围为 -100 ~ 100 m.

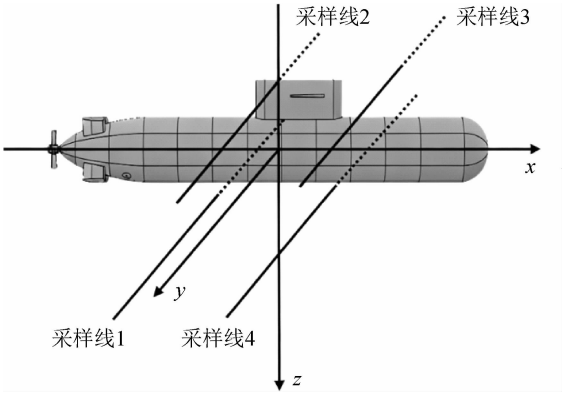


图 10　水下航行器仿真模型

Fig. 10　Simulation model of underwater vehicle

3.2　腐蚀电场反演

在反演水下航行器的腐蚀电场时,基于船体尺寸将电偶极子的分布范围限制在半长轴为 25 m(与船体等长)、半段短轴为 3 m(与船体等宽)的旋转椭球体内. 分别假设等效电偶极子的数目为 1 个、5 个和 10 个,根据在上述 4 条采样线上由 COMSOL 模拟得到的三分量腐蚀电场数据,利用并矢 Green 函数法和粒子群优化算法,经反演得到三种情况下等效电偶极子的位置和电偶极矩分别如表 1、表 2 和表 3 所示. 对比表 1 ~ 表 3 可以看出,随着数目的增加,等效电偶极子的分布更接近于水下航行器的尺寸和位置.

表 1　1 个等效电偶极子的位置和电偶极矩

Table 1　Position and moment of 1 equivalent electric dipole

序号	x/m	y/m	z/m	P_x/(A·m)	P_y/(A·m)	P_z/(A·m)
1	4.2	0.0	1.2	146.4	0.1	-70.9

表 2　5 个等效电偶极子的位置和电偶极矩

Table 2　Position and moment of 5 equivalent electric dipoles

序号	x/m	y/m	z/m	P_x/(A·m)	P_y/(A·m)	P_z/(A·m)
1	-15.0	-1.8	1.6	-3.8	3.9	3.0
2	-5.0	-1.7	2.4	18.2	-22.2	-13.0
3	-5.0	-0.1	-0.1	1.9	33.0	-30.7
4	5.0	-2.0	1.2	133.2	-30.5	-24.4
5	15.0	1.1	1.4	-7.1	17.9	-11.1

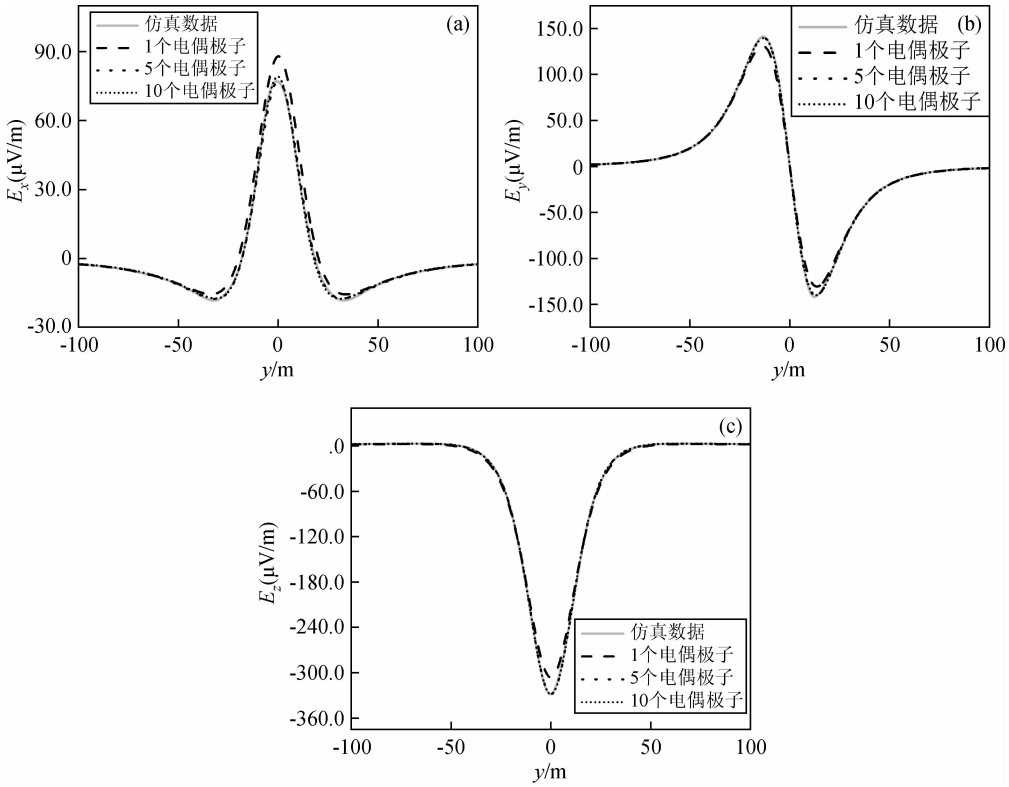


图 11 采样线 1 上等效电偶极子产生的电场与仿真电场的对比

(a) E_x;(b) E_y;(c) E_z.

Fig. 11 Comparison of electric field generated by the equivalent dipole and simulated electric field on sampling line 1

表 3 10 个等效电偶极子的位置和电偶极矩

Table 3 Position and moment of 10 equivalent electric dipoles

序号	x/m	y/m	z/m	P_x/(A·m)	P_y/(A·m)	P_z/(A·m)
1	-20.0	0.4	-0.2	-51.7	-29.9	-58.2
2	-15.0	0.7	-1.9	211.6	113.7	131.7
3	-10.0	-0.7	-2.7	-360.0	3.1	-14.7
4	-5.0	2.2	-1.9	320.0	-5.6	-118.0
5	0.0	-0.1	-3.0	-103.4	-209.6	-47.4
6	0.0	1.4	2.1	-51.0	49.0	-36.8
7	5.0	-1.4	-2.6	267.8	65.5	94.6
8	10.0	-0.1	-2.7	-142.0	2.6	10.3
9	15.0	0.4	2.4	73.2	12.8	0.3
10	20.0	1.1	-1.4	-19.8	-1.9	-40.9

图 11 给出了三种电偶极子数目情况下利用并矢 Green 函数计算得到的采样线 1 上腐蚀电场的三个分量与原始仿真数据的对比,其他三条采样线上的变化趋势和对比结果与采样线 1 类似,故不再画出.

由图 11,E_x 和 E_z 均相对于 $y=0$ m 平面对称,在 $y=0$ m 处幅度值达到最大,E_y 相对于 $y=0$ m 平面反对称,在 $y=0$ m 处 $E_y=0$ m. 另由图 11 可以看出,基于仿真电场反演得到的多个电偶极子产生的电场,与仿真电场的整体变化趋势一致. 在距船体较近处,1 个等效电偶极子产生的腐蚀电场与原始仿真腐蚀电场存在较大差异,在电场幅值最大处,E_x 的相对误差为 16.7%,E_y 的相对误差为 11.5%,E_z 的相对误差为 7.3%. 当等效电偶极子数目增加至 5 个时,电偶极子产生的腐蚀电场与仿真电场的差异减小,幅值最大处 E_x 的相对误差为 3.11%,E_y 的相对误差为 3.2%,E_z 的相对误差为 0.3%. 当等效电偶极子数目增加至 10 个时,电偶极子产生的腐蚀电场与仿真电场曲线高度重合,幅值最大处 E_x 的相对误差为 2.0%,E_y 的相对误差为 1.6%,E_z 的相对误差为 0.2%. 由此可见,随着等效电偶极子数目的增加,腐蚀电场的反演结果越来越准确. 当然,当等效电偶极子数目增加到一定数量后,相对误差不会有明显改观,因此等效电偶极子的数目选择也不宜太多.

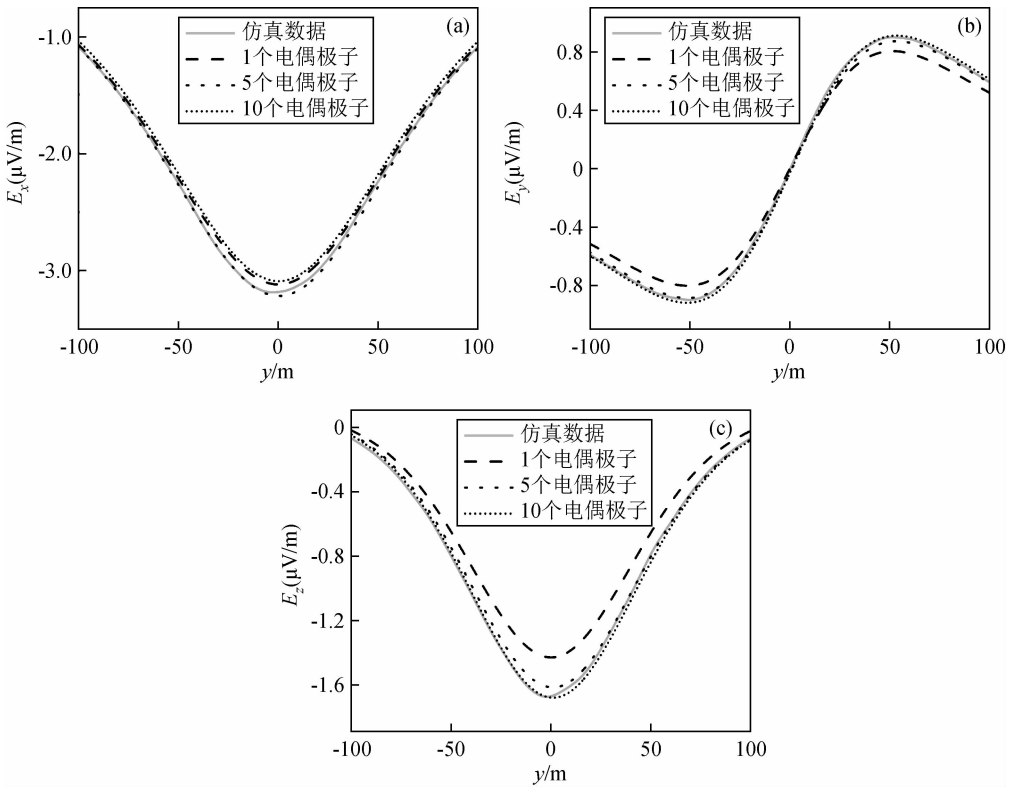


图 12　采样线 5 上等效电偶极子产生的电场与仿真电场的对比

(a) E_x;(b) E_y;(c) E_z.

Fig. 12　Comparison of electric field generated by the equivalent dipole and simulated electric field on sampling line 5

根据上述反演得到的不同数目电偶极子的位置和电偶极矩,利用并矢 Green 函数计算 $x=-10$ m、$z=100$ m 处一条较远距离采样线(采样线 5)上腐蚀电场的三个分量,并与 COMSOL 仿真水下航行器腐蚀电场的计算结果进行对比,见图 12. 图 12 各分量相对于 $y=0$ m 平面仍保持了图 11 中的对称和反对称特征. 由于该采样线在水下更深处,距离水下航行器更远,因而腐蚀电场各分量幅度的峰值更小,随 y 的变化更缓慢. 在 E_x 幅值最大处,1 个、5 个和 10 个等效电偶极子产生的电场与仿真电场的相对误差分别为 2.0%、1.1% 和 2.7%. 在 E_y 幅值最大处,上述三种数目等效电偶极子产生的电场与仿真电场的相对误差分别为 10.6%、3.4% 和 0.9%. 在 E_z 幅值最大处,上述三种数目等效电偶极子产生的电场与仿真电场的相对误差分别为 14.4%、3.5% 和 0.4%. 在三个分量中,尽管等效电偶极子数目为 10 个时 E_x 的相对误差存在不降反升的情况(三种情况下 E_x 的相对误差本身较小且差异不大),但 E_y 和 E_z 的相对误差则大幅下降. 总体而言,等效电偶极子数目与腐蚀电场反演精度呈现正相关关系,这也说明等效电偶极子数目越多,腐蚀电场的反演结果越来越准确.

4　结　论

(1)采用极低频率下层状介质的并矢 Green 函数可有效模拟多层海水环境中水下航行器等效直流电源产生的腐蚀电场. 海水电导率越高,海水中腐蚀电场的强度越低,二者成反比关系.

(2)将并矢 Green 函数与粒子群优化算法相结合,可以精确反演不同数目等效电偶极源的位置和强度. 计算发现,随着等效电偶极子数目的增加,腐蚀电场的反演结果越来越准确. 反演结果和水下航行器腐蚀电场仿真结果的一致性说明了用等效电偶极子电场代替水下航行器电场是可行的.

致　谢　感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

Chen C, Gong S G, Li D G. 2010. Research on the static magnetic field related with corrosion and anticorrosion of ships based on the electric dipole model. Acta Armamentarii (in Chinese), 31(1): 113-118.

Chen C, Jiang Z G, Yao L F, *et al*. 2014a. Research on the influence from ocean environment on the static corrosion-related-electromagnetic field of a submarine. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering) (in Chinese), 38(5): 950-954.

Chen C, Li D G, Jiang Z G, *et al*. 2014b. Research on the corrosion-related magnetic field produced by a submarine in deep seas. Journal of Harbin Engineering University (in Chinese), 35(6): 684-689.

Han J H, Li Z R, Wei Z C. 2006. Adaptive particle swarm optimization algorithm and simulation. Journal of System Simulation (in Chinese), 18(10): 2969-2971.

Jiao D W, Wu Y C, Peng F, *et al*. 2021. Application of finite element method in the electric field simulation calculation of horizontal electric dipole. Ship Electronic Engineering (in Chinese), 41(1): 73-76.

Keddie A J, Pocock M D, DeGiorgi V G. 2007. Fast solution techniques for corrosion and signatures modelling. WIT Transactions on Engineering Sciences, 54: 225-234.

Liu C Y, Wang X N, Wang X J. 2017. Research on electric field produced by electrochemical corrosion of submarine. Ship Electronic Engineering (in Chinese), 37(10): 16-18, 94.

Liu C Y, Wang X N, Wang X J, *et al*. 2018. Simulation analysis on influence of propeller coating on submarine's underwater electrostatic fields. Chinese Journal of Ship Research (in Chinese), 13(S1): 182-188.

Liu C Y, Wang J S, Zhao Y L. 2022. Effects of marine environment on cathodic protection and underwater corrosion electrostatic field of submarine. Marine Electric & Electronic Engineering (in Chinese), 42(6): 56-61.

Liu D H, Zhang J C, Wang X J. 2020. Numerical simulation of submarine shaft-rate electric field based on COMSOL finite element. //Recent Developments in Mechatronics and Intelligent Robotics. Singapore: Springer, 107-116.

Liu W B, Wang X J, Ji D. 2010. Conversion of static electric field depth of ships based on electric dipole model. Journal of Air Force Radar Academy (in Chinese), 24(6): 435-438.

Lu L, Xing S H, Yan Y G, *et al*. 2011. Simulation study on corrosion related electromagnetic field of ship. Equipment Environmental Engineering (in Chinese), 8(1): 24-28.

Lu X C, Gong S G, Zhou J, *et al*. 2004. Analytical expressions of the electromagnetic fields produced by a ELF time-harmonic HED embedded in the sea. Chinese Journal of Radio Science (in Chinese), 19(3): 290-295.

Mao W, Zhou M, Zhou Y Z. 2010. EM fields produced by a moving, vertically-directed, time-harmonic dipole in a three-layer medium. Journal of Harbin Engineering University (in Chinese), 31(12): 1580-1586.

Ni H, Sun M, Gong S G. 2006. Calculation of the electromagnetic fields generated by horizontal current element in semi-infinite space of seawater. Journal of Academy of Armored Force Engineering (in Chinese), 20(1): 63-65, 69.

Qiu N, Liu Q S, Zeng Z X, *et al*. 2010. Nonlinear inversion of magnetic data based on chaotic and particle swarm optimization. Progress in Geophysics (in Chinese), 25(6): 2150-2155, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.06.036.

Wang X J, Xu Q L, Zhang J C. 2018. Simulating underwater electric field signal of ship using the boundary element method. Progress in Electromagnetics Research M, 76: 43-54.

Wei B J, Zhang G J, Liu Q H. 2008. Recursive algorithm and accurate computation of dyadic Green's functions for stratified uniaxial anisotropic media. Science in China Series F: Information Sciences, 51(1): 63-80, doi: 10.1007/s11432-007-0069-7.

Wei B J, Wang T T, Wang Y. 2009. Computing the response of multi-component induction logging in layered anisotropic formation by the recursive matrix method for magnetic-current-source dyadic Green's function. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52(11): 2920-2928, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.028.

Wei B J, Tian K, Zhang X, *et al*. 2010. Physics of directional electromagnetic propagation measurements-while-drilling and its application for forecasting formation boundaries. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53(10): 2507-2515, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.024.

Wei B J, Liu Y, Liu J, *et al*. 2023. Simulating multi-component low-frequency MCSEM responses in anisotropic formation using weak-form BCGS algorithm for volume integral equations. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (in Chinese), 47(1): 62-73.

Wei B J, Bian X, Liu J. 2024. Simulating surface-to-borehole electromagnetic remote detection responses using dyadic Green's functions. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science) (in Chinese), 48(6): 48-58.

Yang Y F, Li J P, Su J C, *et al*. 2024. Research on strain inversion in local areas within plates: taking Heshun Town as an example. Progress in Geophysics (in Chinese), 39(3): 930-937, doi: 10.6038/pg2024HH0315.

Zhang J C, Liu C Y, Zhao Y L. 2024. Inversion method of submarine steady electric field using point-type current source and Tikhonov regularization. Journal of National University of Defense Technology (in Chinese), 46(4): 212-221.

Zhang J P, Liu Y, Wang X J. 2019. Simulation analysis of protective factors of submarine electrostatic field of ships. Marine Electric & Electronic Engineering (in Chinese), 39(12): 50-54.

Zhang L C, Wang Y M, Huang A P. 2014. Effect of seawater on radiation field of electric dipole. //2014 IEEE China Summit & International Conference on Signal and Information Processing. Xi'an: IEEE, 800-803.

Zhang T, Li Y P, Liu X Y, *et al*. 2023. Lithology interpretation of deep metamorphic rocks with well logging based on APSO-LSSVM algorithm. Progress in Geophysics (in Chinese), 38(1): 382-392, doi: 10.6038/pg2023GG0155.

Zhang X X. 2021. Analysis of ship concealment in complex ocean environment based on electric field characteristics[Master's thesis] (in Chinese). Dalian: Dalian University of Technology.

Zhao Y L, Liu C Y, Zhou D. 2022. Estimation of submarine underwater corrosion electric field based on equivalent circuit and point current source. Journal of National University of Defense Technology (in Chinese), 44(3): 176-183.

Zhu Z, Wang X J, Xu Q L, *et al*. 2022. Research on propagation law of corrosive electrostatic field of ship in seawater. Ship Science and Technology (in Chinese), 44(10): 107-110.

附中文参考文献

陈聪, 龚沈光, 李定国. 2010. 基于电偶极子的舰船腐蚀防腐相关静态磁场研究. 兵工学报, 31(1): 113-118.

陈聪, 蒋治国, 姚陆锋, 等. 2014a. 分层海洋环境对潜艇腐蚀相关静态电磁信号的影响研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 38(5): 950-954.

陈聪, 李定国, 蒋治国, 等. 2014b. 深海中潜艇腐蚀相关磁场全空间分布特征分析. 哈尔滨工程大学学报, 35(6): 684-689.

韩江洪, 李正荣, 魏振春. 2006. 一种自适应粒子群优化算法及其仿真研究. 系统仿真学报, 18(10): 2969-2971.

焦达文, 吴云超, 彭飞, 等. 2021. 有限元法在水平电偶极子电场仿真计算中的应用. 舰船电子工程, 41(1): 73-76.

刘春阳, 汪小娜, 王向军. 2017. 潜艇电化学腐蚀电场特性研究. 舰船电子工程, 37(10): 16-18, 94.

刘春阳, 汪小娜, 王向军, 等. 2018. 螺旋桨涂层对潜艇水下静电场影响仿真分析. 中国舰船研究, 13(S1): 182-188.

刘春阳, 王建山, 赵玉龙. 2022. 海洋环境对潜艇阴极保护和水下腐蚀静电场的影响. 船电技术, 42(6): 56-61.

刘文宝, 王向军, 嵇斗. 2010. 基于电偶极子模型的舰船静电场深度

换算. 空军雷达学院学报, 24(6): 435-438.

卢新城, 龚沈光, 周骏, 等. 2004. 海水中极低频水平电偶极子电磁场的解析解. 电波科学学报, 19(3): 290-295.

陆璐, 邢少华, 闫永贵, 等. 2011. 船舶腐蚀相关电磁场特征仿真研究. 装备环境工程, 8(1): 24-28.

毛伟, 周萌, 周耀忠. 2010. 浅海中运动时谐垂直电偶极子产生的电磁场. 哈尔滨工程大学学报, 31(12): 1580-1586.

倪海, 孙明, 龚沈光. 2006. 半无限大海水空间中水平电流元产生的电磁场计算. 装甲兵工程学院学报, 20(1): 63-65, 69.

邱宁, 刘庆生, 曾佐勋, 等. 2010. 基于混沌-粒子群优化的磁法数据非线性反演方法. 地球物理学进展, 25(6): 2150-2155, doi: 10.3969/j.issn.1004-2903.2010.06.036.

魏宝君, 王甜甜, 王颖. 2009. 用磁流源并矢 Green 函数的递推矩阵方法计算层状各向异性地层中多分量感应测井响应. 地球物理学报, 52(11): 2920-2928, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.028.

魏宝君, 田坤, 张旭, 等. 2010. 定向电磁波传播随钻测量基本理论及其在地层界面预测中的应用. 地球物理学报, 53(10): 2507-2515, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.10.024.

魏宝君, 刘莹, 刘健, 等. 2023. 利用体积分方程的弱化 BCGS 算法模拟各向异性地层中多分量低频海洋可控源电磁响应. 中国石油大学学报(自然科学版), 47(1): 62-73.

魏宝君, 边旭, 刘健. 2024. 利用并矢 Green 函数模拟地井电磁远探测响应. 中国石油大学学报(自然科学版), 48(6): 48-58.

杨云飞, 李金平, 苏家灿, 等. 2024. 板块内部局部区域应变反演研究——以和顺镇为例. 地球物理学进展, 39(3): 930-937, doi: 10.6038/pg2024HH0315.

张建春, 刘春阳, 赵玉龙. 2024. 利用点电流源和 Tikhonov 正则化的潜艇稳恒电场反演方法. 国防科技大学学报, 46(4): 212-221.

张济平, 柳懿, 王向军. 2019. 舰船水下静电场防护因素的仿真分析研究. 船电技术, 39(12): 50-54.

张涛, 李艳萍, 刘晓宇, 等. 2023. 基于自适应粒子群优化最小二乘支持向量机的深层变质岩测井岩性识别. 地球物理学进展, 38(1): 382-392, doi: 10.6038/pg2023GG0155.

张心心. 2021. 基于电场特性的复杂海洋环境舰艇隐蔽性分析[硕士论文]. 大连: 大连理工大学.

赵玉龙, 刘春阳, 周丹. 2022. 基于等效电路和点电流源的潜艇水下腐蚀电场估算. 国防科技大学学报, 44(3): 176-183.

朱禛, 王向军, 徐庆林, 等. 2022. 舰船腐蚀静电场在海水中的传播规律研究. 舰船科学技术, 44(10): 107-110.