

高纬度低温海域潜航器腐蚀相关静态电场的分布特征研究

邱名杰,胡明勇,李禹宏,刘逸群,赵宏森,孙嘉庆,陈 聪*

(中国人民解放军海军工程大学基础部,湖北武汉 430033)

摘要: 高纬度低温海域的冰盖为潜航器形成天然隐蔽屏障,而海冰覆盖改变了常规海域的场域空间特性,影响着潜航器腐蚀相关静态电场(Corrosion-Related Static Electric Field, CRSE)的分布。而CRSE是潜航器一项重要的水下军用目标特性,能量占比大且衍生的极低频交变电场具备远程探测优势,研究其在高纬度低温海域下的分布规律,是发展潜航器电场探测、定位及隐蔽技术的关键基础。本文先构建包含空气、海冰、海水、海床与潜航器的多域耦合物理模型,基于拉普拉斯方程,确定各域电位分布与边界条件。采用COMSOL有限元软件搭建三维仿真模型,设置海冰、海水及潜航器各部件的电导率、电容率等关键参数,仿真计算潜航器在海水域及冰层中的CRSE分布,并重点分析海冰电导率、厚度两大核心参数对电场电位与电场强度的影响规律。为验证仿真结论的正确性,本文在-15℃冻库中模拟高纬度低温海域自然结冰环境,构建搭载外加电流阴极保护系统的潜航器缩比模型,通过Ag/AgCl电极阵列对冰下水域、冰层中电位分布进行实测,获取实测电位数据后与仿真结果进行对比。研究表明,潜航器CRSE在海水域与冰层中均有分布,且冰层中场量值更为可观,冰层内电场呈现清晰的电偶极子分布特征。海冰的存在会普遍增强海水域的电位与电场强度,其电导率越低、厚度越大,增强效应越显著,且海冰对电场纵、垂向分量的影响程度远大于横向分量。此外,冰层环境、结构更稳定,测试干扰小,相较于海水域更易实现高精度的电场测试。本文系统揭示了高纬度低温海域中海冰对潜航器CRSE分布的影响规律,填补了该领域的研究空白,为高纬度低温海域潜航器电场目标特性的实际应用提供了全新思路,也为优化该海域潜航器隐蔽策略、开发针对性的电场探测与预警技术奠定了坚实的理论与实验基础,对提升相关海域潜航器作战效能与反潜探测能力具有重要工程应用价值。

关键词: 高纬度低温;海冰;潜航器;腐蚀相关静态电场;分布特征

基金项目: 国家基础研究项目(No.2023-JCJQ-ZD-079-00)

中图分类号: TN3;O441.4;U674.7

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)02-0623-11

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20250858

Study on the Distribution Characteristics of Corrosion-Related Static Electric Field of Underwater Vehicles in High Latitude and Low Temperature Sea Area

QIU Mingjie, HU Mingyong, LI Yuhong, LIU Yiqun, ZHAO Hongsen, SUN Jiaqing, CHEN Cong*

(Basic Courses Department, Naval University of Engineering, People's Liberation Army of China, Wuhan, Hubei 430033, China)

Abstract: The ice sheet in high-latitude low-temperature sea areas forms a natural concealed barrier for underwater vehicles, while the coverage of sea ice alters the field domain characteristics of conventional sea areas, affecting the distribution of the corrosion-related static electric field (CRSE) of the underwater vehicle. As a critical underwater military target feature of underwater vehicles, the CRSE accounts for a significant proportion of energy, and its derived extremely low-frequency alternating electric field offers advantages for long-range detection. Investigating its distribution patterns in high-latitude low-temperature sea areas is essential for advancing technologies in electric field detection, positioning, and stealth of underwater vehicles. This study first constructs a multi-domain coupled physical model incorporating air, sea ice, seawater, seabed, and the underwater vehicle. Based on the Laplace equation, the potential distribution and boundary conditions of each domain are determined. Using COMSOL finite element software, a three-dimensional simulation model is established, with key parameters such as electrical conductivity and permittivity assigned to components including sea ice, seawater, and the underwater vehicle. Simulations are conducted to calculate the CRSE distribution of the underwater vehicle in seawater and within the ice layer, with a focus on analyzing the influence of two core parameters—sea ice conductivity and thickness

—on electric field potential and intensity. To validate the simulation results, a natural ice formation environment in high-latitude low-temperature sea areas is simulated in a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ cold storage. A scaled-down model of the underwater vehicle equipped with an impressed current cathodic protection system is constructed. Using Ag-AgCl electrode arrays, the potential distribution in sub-ice water and within the ice layer is measured. The measured potential data are then compared with simulation results. The study shows that the CRSE of the underwater vehicle is distributed both in seawater and within the ice layer, with more significant field quantities observed in the ice layer, where the electric field exhibits a clear electric dipole distribution pattern. The presence of sea ice generally enhances the potential and electric field intensity in the seawater domain, with lower conductivity and greater thickness of sea ice leading to more pronounced enhancement effects. Furthermore, the influence of sea ice on the longitudinal and vertical components of the electric field is significantly greater than on the transverse component. Additionally, the ice layer provides a more stable environment and structure with minimal testing interference, making it more conducive to high-precision electric field measurements compared to seawater. This study systematically reveals the influence of sea ice on the CRSE distribution of underwater vehicles in high-latitude low-temperature sea areas, filling a research gap in this field. It provides new insights for the practical application of electric field target characteristics of underwater vehicles in such environments and lays a solid theoretical and experimental foundation for optimizing stealth strategies and developing targeted electric field detection and early warning technologies. The findings hold significant engineering value for enhancing the combat effectiveness of underwater vehicles and anti-submarine detection capabilities in relevant sea areas.

Keywords: high latitude and low temperature sea area; sea ice; underwater vehicles; corrosion-related static electric field; distribution characteristics

Foundation Item(s): National Basic Research Project (No.2023-JCJQ-ZD-079-00)

0 引言

高纬度低温海域的冰盖为现代潜航器提供了天然的隐蔽屏障,使其成为战略威慑的关键海域。在此极端环境下,如何确保己方潜航器的安全航行,同时有效探测并预警隐蔽的敌方潜航器,是提升高纬度低温海域潜航器作战能力的两大核心挑战^[1-3]。潜航器水下物理场(如声、磁、电、水压场等)既是己方潜航器的暴露源,也是探测敌方潜航器的信号源。因此,深入探究在高纬度低温海域条件下潜航器物理场的分布特性和规律,对于提升己方潜航器的隐蔽性与突破现有潜航器探测、预警、跟踪与打击技术至关重要^[4-6]。

由于异种金属存在而产生的腐蚀以及出于防腐目的而加装的外加电流阴极保护系统,都会使潜航器周围导电媒质中出现电流,进而产生电场。近年来的研究表明,随着电场测量传感器的快速发展,潜航器电场已成为除声场、水压场、磁场之外最重要的水下军用目标特性之一^[7-9]。其中,腐蚀相关静态电场(Corrosion-Related Static Electric field, CRSE)是其主体部分,能量占比最大,且被调制以后所形成的极低频交变电场在远程探测中展现出显著优势^[10-11]。因此,相关研究首先围绕静态电场展开,准确掌握潜航器水下静态电场的分布特征,显然是后续发展水下潜航器的电场定位、跟踪、打击以及电场控制技术的基础^[12-13]。

高纬度低温海域表面冰层的存在使得场域空间不同于常温海域,必然会带来潜航器电场分布特征的

变化。同时,相比于海水,冰层中设置探测传感器更利于实际应用,因此冰层中潜航器静态电场的分布特征也十分值得关注。为此,本文聚焦高纬度低温海域潜航器在冰层及海水域中产生的CRSE的分布特征开展建模分析和实验测试。首先,基于COMSOL有限元软件对潜航器冰中CRSE及海水域中CRSE分布进行仿真计算。进而,通过对比不同海冰电导率、不同海冰厚度时的电场分布特征,揭示海冰对潜航器CRSE的影响规律。最后,通过实验室中的模拟实验对仿真分析结果的正确性进行验证。研究所得场分布特征将为在高纬度低温海域中潜航器CRSE的进一步军事应用奠定基础,为潜航器在高纬度低温海域的隐蔽策略优化与电场探测技术开发提供理论指导。

1 物理问题

潜航器CRSE主要来源于外加电流阴极保护(Impressed Current Cathodic Protection, ICCP)系统的阳极-阴极电流回路,电流从ICCP系统阳极流出,从潜航器螺旋桨(阴极)汇入,流入导电媒质(如海水、海冰、海床等)中的电流就形成了潜航器电场。如图1所示,潜航器在表面覆盖冰层的海域中航行,潜航器外区域可分为空气(域I)、海冰(域II)、海水(域III)、海床(域IV),各区域中的电位分布(以无穷远处为零电位)、电导率及电容率分别用 U_i 、 σ_i 及 ε_i ($i=1, 2, 3, 4$)表示,气-冰分界面、冰-水分界面、水-底分界面、水-潜航器分界面、ICCP阳极及螺旋桨表面分别用 Σ_1 、 Σ_2 、 Σ_3 、 Σ_4 、

Σ_5 、 Σ_6 表示。四个区域内的电位分布均满足拉普拉斯方程,且在 Σ_1 、 Σ_2 、 Σ_3 、 Σ_4 分界面电位连续、电流法向分量连续。而在 Σ_5 、 Σ_6 分界面,海水域中电流法向分量的总和与阳极输出电流及螺旋桨流入电流分别相等。为简化问题的分析,假设 ICCP 系统含一对圆形阳极片,对称布设在潜航器左右舷,且阳极、螺旋桨的几何中心与潜航器轴线位于同一平行于水面的平面上。同时假设除阳极外,潜航器消声瓦覆盖完好,无其他导电区域。为后续表述方便,建立如图 1 所示直角坐标系。其中,取阳极几何中心连线的中点与螺旋桨中心连线的中点为坐标原点,取潜航器艏指向潜航器艉方向为 x 正向,指向潜航器右舷方向为 y 正轴,向上为 z 轴正向。

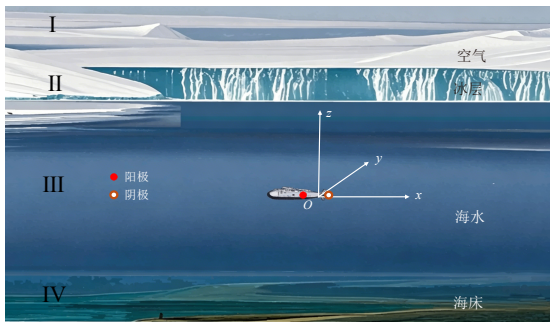


图 1 潜航器及场域空间示意图
Figure 1 Underwater vehicle and field space display

上述物理问题涉及复杂几何形状、边界和材料属性,已难以用解析方法获得其解,因此本文考虑采用数值计算的方法来进行分析。

2 基于 COMSOL 的潜航器 CRSE 分布的建模分析

考虑到 COMSOL 软件在处理多物理场耦合问题

方面的能力以及求解器的稳定性、网格划分的适用性,本文选择其“电流”接口用于上述问题的求解。在计算的过程中主要考虑的参数有空间电导率、电容率、电流密度及相关边界条件的设定。

2.1 仿真模型建立及网格剖分

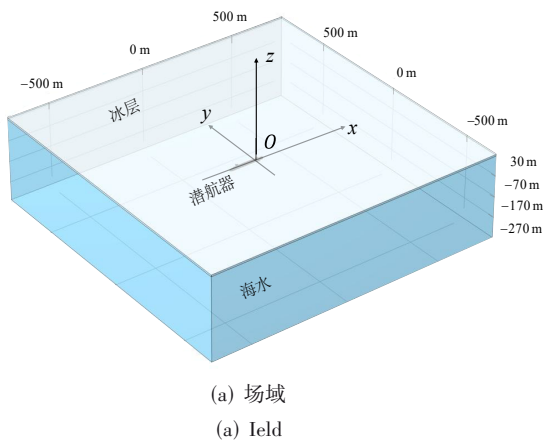
在 COMSOL 仿真软件中构建含海冰、海水、潜航器的三维仿真模型,如图 2(a)所示。为简化分析,假设海床为绝缘媒质,因此在仿真模型建立时,将场域边界条件设置为绝缘以体现海床及空气的影响。场域为长方体型,其中,海水域尺寸为 $1\ 500\text{ m} \times 1\ 500\text{ m} \times 400\text{ m}$,冰层尺寸为 $1\ 500\text{ m} \times 1\ 500\text{ m} \times 10\text{ m}$,坐标系建立与图 1 一致。潜航器的位置布设使得坐标原点与水面下 20 m 的深度平面的几何中心点重合,此时冰层上表面 $z_{\text{冰层上表面}} = 30\text{ m}$,即潜航器位于冰层上表面下方 30 m 处,冰-水交界面 $z_{\Sigma_2} = 20\text{ m}$,水-底交界面 $z_{\Sigma_3} = -370\text{ m}$ 。

设潜航器 ICCP 系统阳极材质为铂片,面积 0.5 m^2 ,两阳极片几何中心点分别位于 $(-20.0\text{ m}, \pm 6.5\text{ m}, 0.0\text{ m})$ 处。螺旋桨设为半径 3.9 m 的铜质圆片,几何中心点位于 $(20.0\text{ m}, 0.0\text{ m}, 0.0\text{ m})$ 。海水、冰层、潜航器外壳、阳极、螺旋桨的电导率、相对电容率以及 ICCP 系统的阳极、阴极电流等参数设置见表 1。

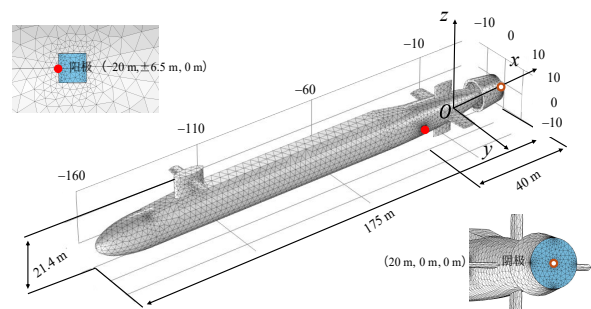
在完成建模及参数设定后,采用自由四面体单元,对图 2(a)所示的仿真模型进行空间离散,并引入自适应网格划分机制,也就是网格划分依据几何结构和物理场的复杂程度自动生成,变化越复杂的位置网格划分得越密,以确保几何复杂区域的高精度离散。如图 2(b)所示,本文共划分 57 369 058 个网格,设置相对容差为 0.001,这些设置较好地控制了计算过程中的误差积累,共同保证了仿真结果的稳定性及精度。

2.2 潜航器附近场域中的电流及电位分布

为观察空间中潜航器附近电流和电位的分布情



(a) 场域
(a) Field



(b) 网格划分
(b) Meshing

图 2 仿真模型构建及网格剖分

Figure 2 Simulation model construction and mesh segmentation

表 1 仿真参数设定

Table 1 Simulation parameter setting

符号	参考值	单位	描述
σ_2	0.025	S/m	冰层的电导率
σ_3	2.91	S/m	海水在 0 °C 时的电导率
σ_{sub}	1×10^{-5}	S/m	潜航器外壳的电导率
σ_k	5.7×10^7	S/m	螺旋桨材料的电导率
σ_a	9.7×10^6	S/m	ICCP 阳极材料的电导率
I_{a1}	22.00	A	单个阳极的电流值
I_k	-44.00	A	阴极的电流值
ϵ_{r2}	2.8	—	海冰相对电容率
ϵ_{r3}	80	—	海水相对电容率
ϵ_{rsub}	2.3	—	潜航器壳体相对电容率

况,首先以 3.1 节中所构建的仿真模型为基础,调用 COMSOL 中的“AC/DC 模块”(用于求解静态与动态电场问题)进行求解,分别得到 $x = 0 \text{ m}$ 、 $y = 0 \text{ m}$ 、 $z = 0 \text{ m}$ 三个平面电流、电位分布,结果如图 3(a)~(c)所示。图中带箭头的流线,仅表示电流的流向、路径,线条颜色代表电流密度的大小对应下方图例,单位为 A/m^2 。除去带箭头的流线外,图中其余部分表示电势分布,用不同颜色区分电势大小,对应上方图例,单位为 V 。

对比文献[14-16],总体来看,三个平面上的电流分布、电位分布与水下—对可近似看出电偶极子的电极产生的电流和电位分布相似。

(1)ICCP 电流主要分布在阳极与螺旋桨之间,越靠近阳极或螺旋桨,电流密度越大。从图 3(a)和(b)可见,潜航器上方冰层中电流密度很小,这是因为海冰电导率相对海水要小得多;图 3(a)和(c)则体现出水下 IC CP 电流分布的对称性,这源于潜航器及 IC CP 系统设置的对称性。

(2)从三个平面上的电位分布来看,离场源越近,电位量值越大。 $x = 0.0 \text{ m}$ 平面上电位均为正,且潜航器附近量值最大,这是因为坐标原点的选取虽为 IC CP 阴、阳极连线的几何中点,但由于两个阳极的设置使之并非为电位零点; $y = 0.0 \text{ m}$ 平面上电位分布存在一个正极大(0.096 V)和一个负极大(-0.485 V); $z = 0.0 \text{ m}$ 平面上电位分布存在两个正极大(与两个阳极对应)和一个负极大(与阴极对应),潜航器表面电位分布沿潜航器中轴线对称。

2.3 海水域中 CRSE 场分布

保持上述参数设置,计算得到潜航器下方海水中 $z = -25.0 \text{ m}$ 平面上的电位、三分量电场 E_x 、 E_y 、 E_z 分布,结果分别如图 4(a)~(d)所示。

对比文献[14-16]可见,在该深度平面上,电位分布仍具有电偶极子场的基本特征,平面上电位分布存在位置对称的正负峰,但因 IC CP 设置了两个阳极,其

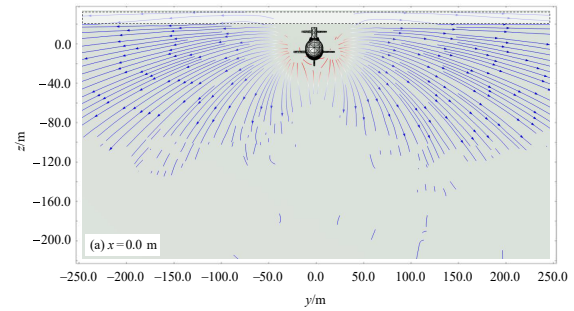
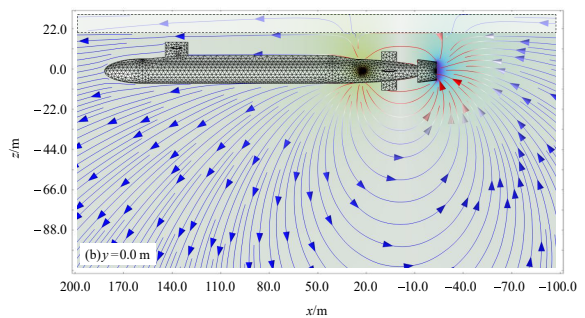
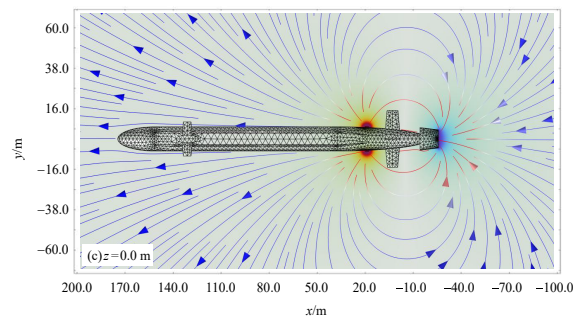
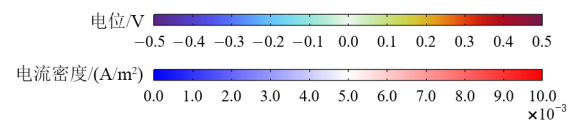
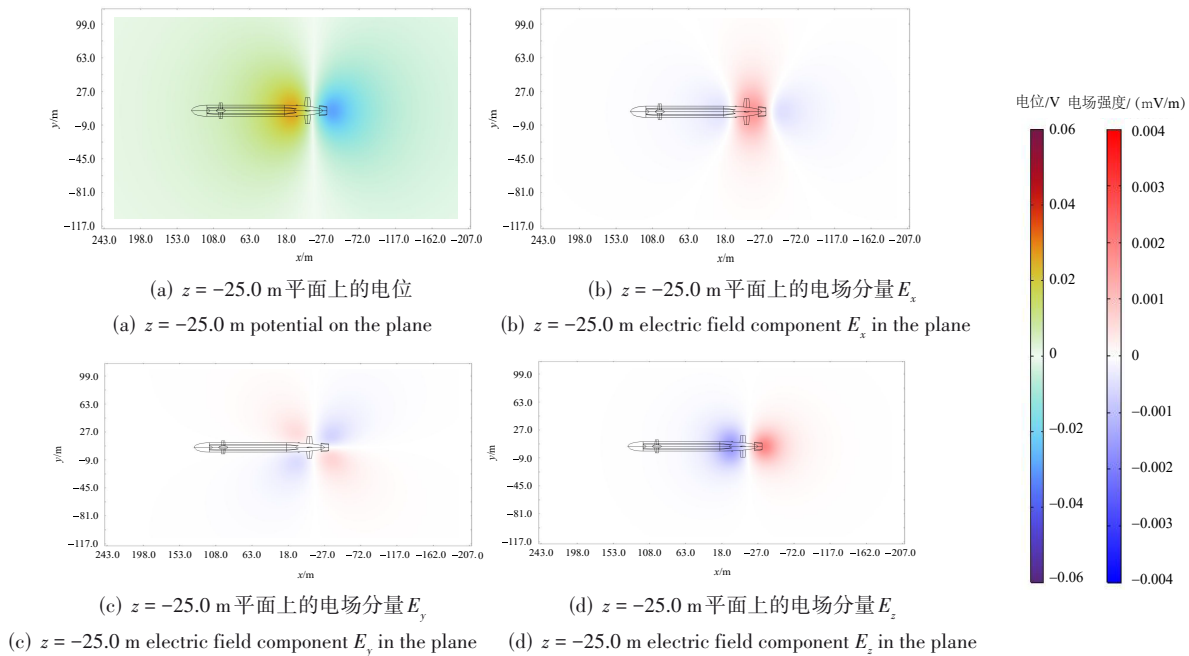
(a) 过原点的 zOy 截面图(a) zOy section through origin(b) 过原点的 zOx 截面图(b) zOx section through origin(c) 过原点的 xOy 截面图(c) xOy section through origin

图 3 潜航器附近场域中的电流密度及电位分布仿真结果

Figure 3 Simulation results of current density and potential distribution in near field of underwater vehicle

正负峰的量值并不相等,位于阳极一侧的电位正极大值为 26.08 mV ,而位于阴极一侧的负极大值为 -29.03 mV 。电场强度三分量的空间分布特征与电偶极子场也有相似之处,但正负峰的量值均不相等,如 E_x 正负极大值分别为 $1.62 \text{ mV}/\text{m}$ 、 $-0.48 \text{ mV}/\text{m}$; E_y 正负极大值分别为 $0.67 \text{ mV}/\text{m}$ 、 $-0.67 \text{ mV}/\text{m}$; E_z 正负极大值分别为 $1.92 \text{ mV}/\text{m}$ 、

图4 潜航器下方海水域中的电位及电场强度分布($z = -25.0$ m)Figure 4 Distribution of potential and electric field intensity in the waters below the underwater vehicle ($z = -25.0$ m)

-1.57 mV/m。

计算结果体现了仿真模型结构的对称性,也和水下电极产生电流场分布的一般规律相一致^[17-19]。由此说明电导率分布均匀、空间尺寸规则、面积足够大的冰层覆盖所带来的电导率突变边界不会改变潜航器 CRSE 空间分布总体特征。

2.4 冰层中 CRSE 场分布

以前述仿真模型为基础,计算潜航器上方海冰中 $z = 25.0$ m 平面上的电位、三分量电场 E_x 、 E_y 、 E_z 分布,结果分别如图 5(a)~(d) 所示。由图 5 可见,在冰层中,电位分布仍具有电偶极子场的基本特征,正负峰位置对称,量值不等,电位正极大值为 54.86 mV,负极值为 -59.59 mV。电场强度三分量的空间分布特征仍与电偶极子场相似,但正负峰的量值均不相等,如 E_x 正负极大值分别为 3.51 mV/m、-1.25 mV/m; E_y 正负极大值分别为 1.53 mV/m、-1.53 mV/m; E_z 正负极大值分别为 1.35 mV/m、-1.78 mV/m。

与关于潜艇对称的平面上的场分布(场点位于海水域中,如图 4 所示)对比,可以得出以下结论:

(1) 总体分布特征一样。

(2) 量值大小对比可见,在与潜艇垂向距离相等的两个对称平面上,冰层中的场点电位值更大一些,电场强度 x 分量和 y 分量更强一些。电场强度 z 分量量值差别不大,但冰层中略弱一些。并且在冰层中,场点的电场强度以 E_x 为主(x 方向分量大于其他两个方向的分量),而在海水中,场点的电场强度以 E_z

为主。

(3) 两个对称平面上电场强度的方向对比,冰层中和海水域中场强的 x 分量方向一致,但 y 、 z 分量方向相反。不难理解,这是因为两个测量平面分属艇体的上、下方两个区域,而 ICCP 电流的总体流向都是从阳极经导电媒质流向阴极。

上述仿真结果表明,海冰中的潜艇电场分布特征明显,量值可测,是值得关注的目标特性;由于海冰中更易于部署测量系统,因此该特性可为极地环境中水下潜艇的探测提供新的思路。

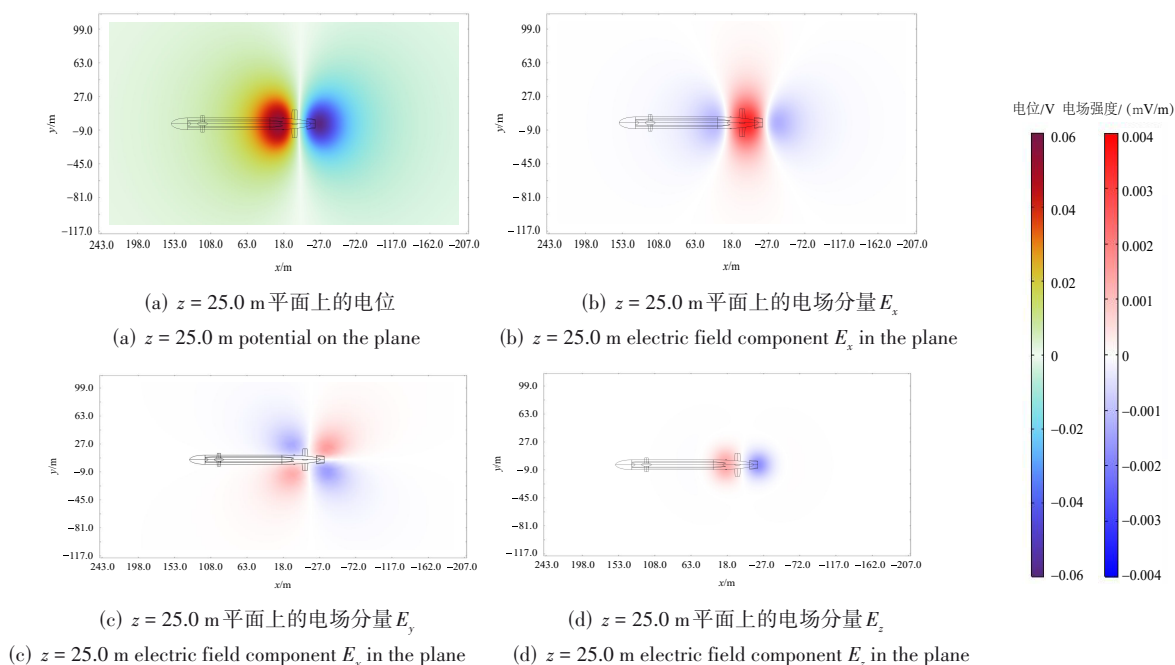
3 海冰对潜航器 CRSE 的影响

3.1 海冰覆盖对潜航器水中 CRSE 的全局增强作用

为研究海冰覆盖对潜航器水中 CRSE 产生的影响,将图 2(a) 中的冰层换成海水,其余参数保持不变,仿真计算无冰层模型中潜航器 CRSE 分布,并与冰层覆盖模型的计算结果进行对比。有冰和无冰模型的计算结果分别用下标 1、2 加以区别,并用二者的差值来表示冰层对潜航器水中 CRSE 的影响,分别记作 $\Delta U = U_1 - U_2$ 、 $\Delta E_x = E_{x1} - E_{x2}$ 、 $\Delta E_y = E_{y1} - E_{y2}$ 、 $\Delta E_z = E_{z1} - E_{z2}$,用下标 max 和 min 分别表示平面上上述物理量的最大值和最小值。

仿真参数设置同 2.1 节,分别计算 $z = -25$ m 平面上 ΔU 、 ΔE_x 、 ΔE_y 、 ΔE_z 的分布,结果如图 6 所示。

由图 6 可见:

图5 潜航器上方冰层中的电位及电场强度分布($z = 25.0$ m)Figure 5 Distribution of potential and electric field intensity in the ice layer above the underwater vehicle ($z = 25.0$ m)

(1) 海冰覆盖普遍增强了平面上电位和电场强度三分量, 增强程度取决于场点位置。

(2) ΔU 、 ΔE_x 、 ΔE_y 、 ΔE_z 的平面分布特征与偶极子场特征类似, 呈现出一定的空间分布对称性, 且在极值点处量值变化最大。在本文所设参数条件下, 在电位正极大处, $\Delta U_{\max} = 1.55$ mV (增幅 6.31%); 在电位负极大处, $\Delta U_{\min} = -1.76$ mV (增幅 6.45%); 在电场强度三分量各自的极值点处, $\Delta E_{x\max} = 0.079$ mV/m (增幅 5.12%), $\Delta E_{x\min} = -0.0017$ mV/m (增幅 3.54%); $\Delta E_{y\max} = 0.019$ mV/m (增幅 2.95%), $\Delta E_{y\min} = -0.019$ mV/m (增幅 2.97%); $\Delta E_{z\max} = 0.073$ mV/m (增幅 3.93%), $\Delta E_{z\min} = -0.058$ mV/m (增幅 3.88%)。可见极值点处电场获得最大程度的增强。上述结果中, 同一物理量正负极值点处的变化程度略有差异, 这源于仿真模型中场源结构的非完全对称性。

(3) 场强三分量受冰层影响程度并非一致, 从图6来看, E_x 、 E_z 分量(纵向、垂向分量)受冰层影响明显, E_y 分量(横向分量)影响较小, 表明海冰覆盖对纵向和垂向电流路径的影响更强。

3.2 海冰电导率对潜航器 CRSE 的影响

改变海冰电导率 σ_2 , 其余仿真参数设置同 2.1 节。取 σ_2 分别为 0.025 S/m、0.5 S/m、1.0 S/m、1.5 S/m、2.0 S/m、2.5 S/m, 计算冰层中 $z = 25$ m 平面上的 U_{\max} 、 $E_{x\max}$ 、 $E_{y\max}$ 、 $E_{z\max}$ 四个物理量的值, 以观察海冰电导率对冰层中 CRSE 的影响。计算结果如图 7(a) 所示。同时也对潜航器下方海水中 $z = -25$ m 平面上的上述四个物

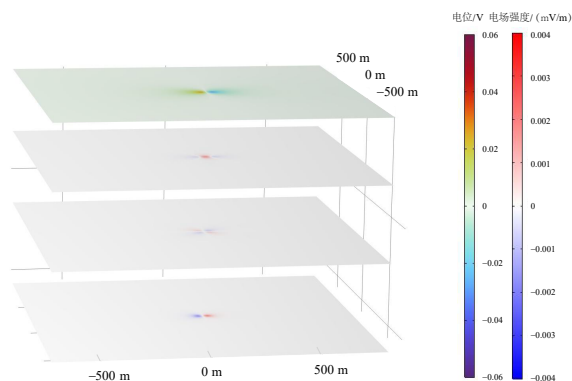


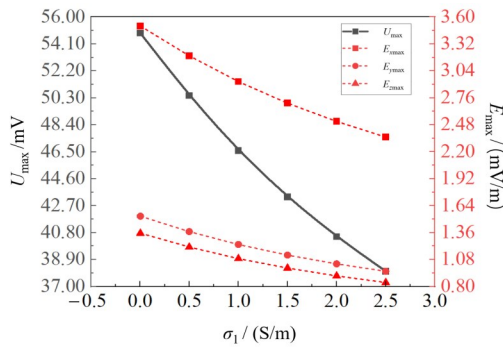
图6 海冰覆盖对潜航器水中 CRSE 的影响

Figure 6 Effect of sea ice cover on CRSE in underwater

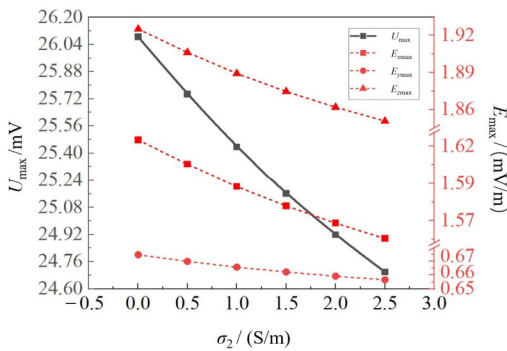
理量进行仿真计算, 以观察海冰电导率对水中 CRSE 的影响, 结果如图 7(b) 所示。

由图可见, 不论在冰层中还是潜航器下方海水中, 同一测量平面上, U_{\max} 、 $E_{x\max}$ 、 $E_{y\max}$ 、 $E_{z\max}$ 四个物理量的值均随海冰电导率 σ_2 的减小而增大, 具体有以下特征:

(1) 海冰电导率从 2.5 S/m 降至 0.025 S/m 时, $z = 25$ m 测量平面上的电位相对变化率达 44.06%, 电场强度三分量相对变化率分别为 49.08%、59.63%、60.80%; $z = -25$ m 测量平面上的电位相对变化率仅 5.61%, 电场强度三分量相对变化率分别为 4.60%、2.76%、3.60%。显然, 海冰电导率的变化对冰层中的 CRSE 影响更为明显。



(a) 潜航器上方冰层中
(a) In the ice above the drone



(b) 潜航器下方水域中
(b) In the waters below the underwater vehicle

图 7 海冰电导率对潜航器 CRSE 的影响

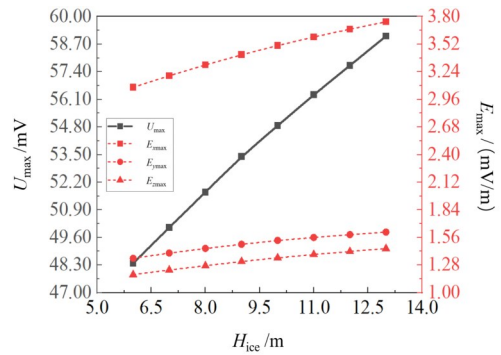
Figure 7 Influence of sea ice conductivity on CRSE of underwater vehicle

(2)对冰层中的 CRSE 而言,海冰厚度对电场强度三分量的影响程度基本相同,但对海水域中的 CRSE 而言,随着海冰电导率的减小,电场强度的 x 分量和 y 分量增长速率要明显高于 y 方向分量,这对于水下探测思路的选择是有益的,这一点也与 3.1 节的结论是一致的。

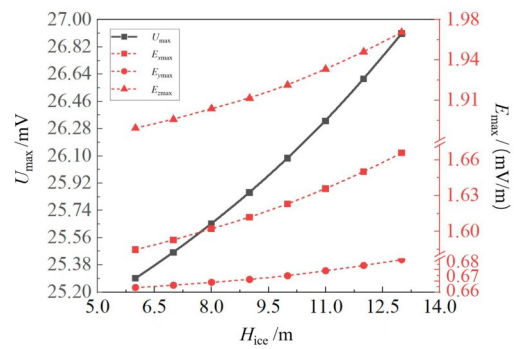
3.3 海冰厚度对潜航器 CRSE 的影响

保持海冰电导率 σ_2 为 0.025 S/m,改变海冰厚度从 6 m 变化至 13 m,分别计算 $z = 25$ m 和 $z = -25$ m 平面上的 U_{\max} 、 $E_{x\max}$ 、 $E_{y\max}$ 、 $E_{z\max}$ 四个物理量的变化,以观察随海冰厚度 H_{ice} 对潜航器 CRSE 的影响规律。计算结果如图 8 所示。

由图可见,随冰层厚度 H_{ice} 的增大, U_{\max} 、 $E_{x\max}$ 、 $E_{y\max}$ 、 $E_{z\max}$ 非线性增长,说明冰层越厚对潜航器 CRSE 的影响越大。计算结果可见,冰层厚度由 6 m 增长至 12 m 时, $z = 25$ m 测量平面上的电位相对变化率达 19.24%,电场强度三分量相对变化率最大可达 19.45%; $z = -25$ m 测量平面上的电位相对变化率达 5.23%,电场强度三分量相对变化率最大可达 5.41%。显然,海冰厚度的增加对冰层中的 CRSE 影响更为明



(a) 潜航器上方冰层中
(a) In the ice above the drone



(b) 潜航器下方水域中
(b) In the waters below the underwater vehicle

图 8 海冰厚度对潜航器 CRSE 的影响

Figure 8 Influence of sea ice thickness on CRSE of underwater vehicle

显。同时对冰层中的 CRSE 而言,海冰厚度对电场强度三分量的影响程度基本相同,但对海水域中的 CRSE 而言,随着 H_{ice} 的增大,电场强度的 x 分量和 z 分量增长速率要明显高于 y 方向分量。

上述结论和 3.1 节及 3.2 节的结论一致。

4 实验室测试

4.1 实验装置及参数设置

为对本文仿真分析结果的正确性进行验证,搭建如图 9 所示的实验装置。整个实验装置在 -15 °C 的冻库中自然结冰,以模拟高纬度低温海域环境,外加 ICCP 系统的潜航器模型布设在冰下海水中,利用 Ag/AgCl 电极阵列测量潜航器 CRSE 分布。坐标系建立如前。

图 9(a)中,模拟海水域尺寸为 $3.30 \text{ m} \times 2.00 \text{ m} \times 1.35 \text{ m}$,模拟海水电导率为 1.15 S/m,海水自然结冰厚度 $H_{\text{ice}} = 0.115 \text{ m}$ 。

潜航器模型如图 9 中 ① 所示。潜航器模型长 0.70 m,直径 0.13 m,两侧对称布设铂片阳极(尺寸: $8.00 \text{ mm} \times 7.00 \text{ mm} \times 1.00 \text{ mm}$),螺旋桨阴极用圆形铜

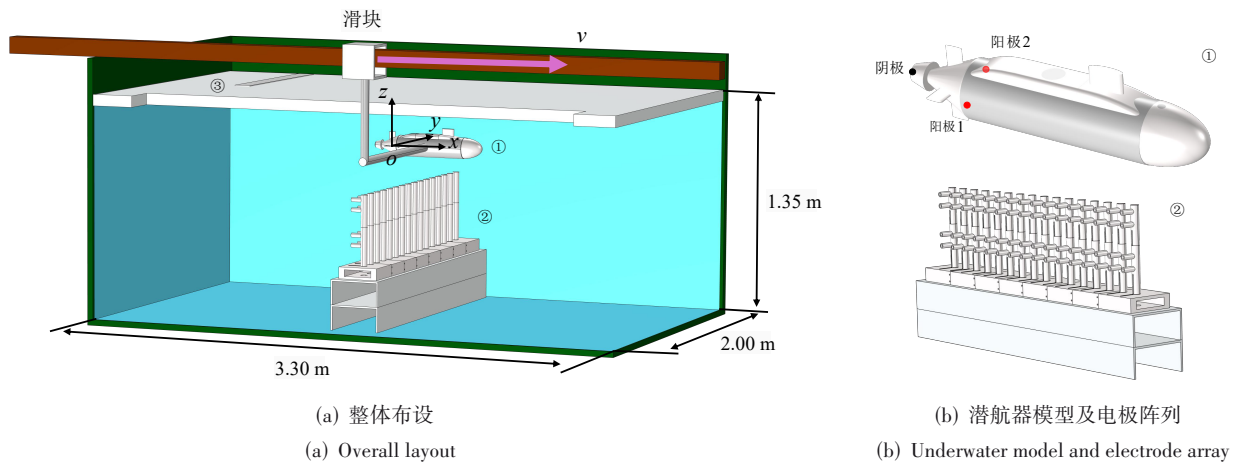


图9 实验装置示意图

Figure 9 Schematic diagram of experimental device

薄片模拟(半径 31.00 mm, 厚度 1.00 mm), 铂片阳极几何中心、阴极圆心、潜航器轴位于同一水平面, 阳极中心间距 120.00 mm, 阳极几何中心与阴极中心间隔 170.00 mm。实验中冰层上表面, 冰层厚 0.065 m。单个阳极的电流值设置为 0.15 A, 阴极电流值为 0.30 A。其余各材料电导率、相对电容率设置同表 1。

水下探测电极布设于 $x = 0.00$ m, $z = -0.21$ m 的线上, 共包含 13 个电极, 两两间隔 0.10 m, 并关于 x 轴对称, 如图 9 中 ② 所示。实验中通过导轨、滑块和传动杆驱动潜航器模型在水下沿 x 方向移动来代替探测电极阵列的移动, 从而获得潜航器模型下方水域中多条测线上电位随 x 的变化曲线。因此本实验中潜航器模型一次移动, 可获得 $z = -0.21$ m 的平面上, $y = 0.00$ m, ± 0.10 m, ± 0.20 m, ± 0.30 m, ± 0.40 m, ± 0.50 m, ± 0.60 m 的 13 条测线上的电位分布。

冰层中的探测电极布设 $x = -0.90$ m, $z = 0.25$ m 的线上, 共包含 7 个电极, 两两间隔 0.14 m, 如图 9 中 ③ 所示。7 个电极的 y 坐标分别为 -0.11 m, 0.03 m, 0.17 m, 0.31 m, 0.45 m, 0.59 m, 0.73 m, 因此本文实验中潜航器模型一次移动, 可获得 $z = 0.25$ m 的平面上, $y = -0.11$ m, 0.03 m, 0.17 m, 0.31 m, 0.45 m, 0.59 m, 0.73 m 的 7 条测线上的电位分布。

4.2 冰层及水中电位测试结果及仿真分析

实验测量了 $z = 0.25$ m (潜航器模型上方冰层中)、 $z = -0.21$ m (潜航器模型下方水域中) 两个平面上的电位分布, 分别如图 10(a) 和 (b) 所示。同时采用本文第 2 节中所述仿真方法对平面上的电位数据进行仿真, 仿真结果同步在图 10 中显示, 以方便二者对比。图中下标 e 表示实验数据, s 表示计算结果。图 10(a) 中, 下标 1-7 分别对应于 $y = 0.73$ m, 0.59 m, 0.45 m, 0.31 m, 0.17 m, 0.03 m, -0.11 m 7 条测线; 图 10(b) 中, 下标 1-7

分别对应于 $y = 0.60$ m, 0.50 m, 0.40 m, 0.30 m, 0.20 m, 0.10 m, 0.00 m 7 条测线。

需要说明的是, 由于冰中测量传感器布设时将探测线阵置于水槽一侧(线阵 $x = -0.90$ m), 因此图 10(a) 中的测量结果并不能关于 y 轴对称。另外, 考虑到场分布关于 x 轴对称, 为便于图示, 图 10(b) 中仅给出 $z = -0.21$ m 平面上 $y \geq 0$ m 的 7 条测线上的电位分布。根据实验中采样率的设置, 图 10 中实验数据点两两间隔 0.19 cm, 仿真数据点则两两间隔 5.00 cm, 因此每一条测线共提供 1 054 个测试数据点和 41 个仿真数据点。

定义第 i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) 条测线上实验与仿真数据的平均相对偏差 δ_i 为

$$\delta_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left| \frac{U_{sij} - U_{ejj}}{U_{ejj}} \right|, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7; N = 41 \quad (1)$$

可计算上述两个平面上各 7 条测线实验与仿真数据的平均相对偏差如表 2 所示。

表 2 实验与仿真数据的平均相对偏差

Table 2 The average relative deviation of experimental and simulation data

测线	1号	2号	3号	4号	5号	6号	7号	测线平均值/%
	%	%	%	%	%	%	%	
$z = -0.21$ m	8.29	4.74	3.36	3.60	5.50	5.88	6.16	5.36
$z = 0.25$ m	4.42	7.36	8.29	8.91	10.37	6.79	7.15	7.61

由图 10 和表 2 结果可见, 各测线上的平均相对偏差最高为 10.37%, 两个测试平面上的全部测点的平均相对偏差分别为 5.36% ($z = -0.21$ m) 和 7.61% ($z = 0.25$ m)。综合考虑实验中空间位置测量、潜航器模型运动、电极极差稳定性等多方面的误差来源, 可认为实验测试与仿真计算结果吻合程度较好, 实验数据

具有较高的可信度,同时也验证了前文所采用的数值仿真模型的准确性及仿真分析结果的可靠性。

特别需要指出的是,对比测试结果图 10(a)中的 U_{s6} 及 10(b) 中的 U_{s7} , 尽管前者对应的测点与潜航器模型的垂向与横向间距都大于后者,但前者电位负峰量值仍显著高于后者,可见在冰层中潜航器 CRSE 呈

现出更明显的场分布特性。

另外,潜航器模型上方冰层中的测试结果准确度要高于水中,这是因为固态冰层环境相对稳定,对于潜航器电场的测试更为友好,这也从另一个方面体现出海冰中监测水下潜航器的电场目标特性的优越性。

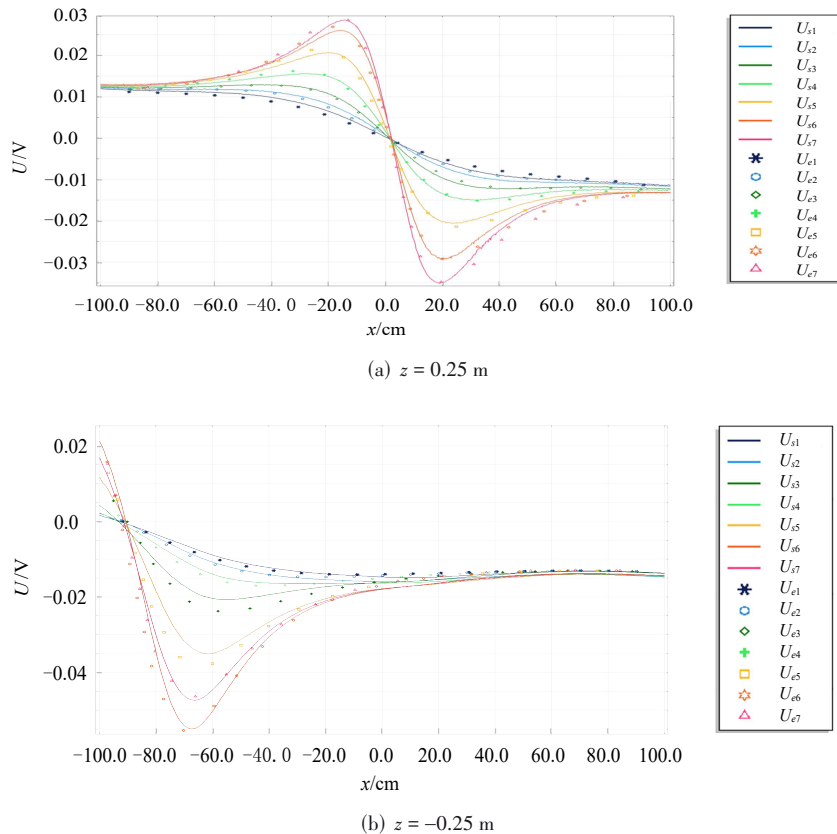


图 10 实验结果与计算结果对比图

Figure 10 Comparison chart of experimental results and calculated results

5 结束语

高纬度低温海域环境下的潜航器隐蔽与探测技术是当前海洋军事研究的前沿领域,而 CRSE 作为水下潜航器的重要信号源,其分布特征直接关系到潜航器的生存能力与作战效能。本文构建了海冰覆盖下水下潜航器外加 ICCP 系统的物理模型,结合 COMSOL 仿真与实验室模拟实验,给出了高纬度低温海域潜航器 CRSE 分布特征以及海冰覆盖对潜航器 CRSE 的影响规律,为提升高纬度低温海域环境下潜航器的隐蔽性与反潜探测技术提供了基础理论支撑。

研究结果证实,海冰介质中潜航器 CRSE 呈现显著偶极子分布特征,量值明确可测,且实验测试表明固态冰层中更易于实现高精度的电场测试,这为高纬

度低温海域反潜作战提供了全新目标特性依据,也为解决水域中测量系统布放稳定性差、信噪比低的技术难题提供了新的思路。

研究表明,高纬度低温海域的冰层不仅是潜航器的物理屏障,更通过电学特性放大了其水下电场信号,冰层电导率越低、厚度越大,其对 CRSE 的增强效应越显著。这对潜航器隐蔽策略的优化提出了新的挑战,需重新评估冰层覆盖区域潜航器的电场暴露风险,并针对性地改进防腐系统的电流调控方案以抑制信号泄漏。另外,研究还揭示了海冰层电导率与厚度对电场分量的非对称影响,这为发展基于电场分量的定向探测技术提供了新思路。

本文将复杂的三维电场分布简化为多域耦合的拉普拉斯方程求解,并利用 COMSOL“AC/DC”模块进

行仿真,验证了数值模型对冰-水-潜航器多界面问题的适用性。实验室实验进一步证实了仿真结果的可靠性,本文所采用的研究方法为后续高纬度低温海域复杂环境下的电场预测提供了可复现的技术路径。

本文研究结果也为高纬度低温海域潜航器的隐蔽航行提供了量化依据,为基于电场的探潜装备设计提供了参考,具有明显的军事应用价值。

参考文献

- [1] Collins Jeffrey. Towards a renewed Canadian submarine capability[J]. Niobe Papers, 2019, 4(9): 1-23.
- [2] Buckley Adele. Destabilization of the Arctic[J]. Journal of Autonomy and Security Studies, 2023, 7(2): 128-143.
- [3] Regehr Ernie. Strategic nuclear patrols and an arctic military code of conduct[J]. Journal of Autonomy and Security Studies, 2023, 7(2): 144-157.
- [4] 杜初阳,陈聪,黄高聪. 平行分层海域中电偶极子源的定位方法研究[J]. 电子学报, 2021, 49(9): 1761-1767.
Du Chuyang, Chen Cong, Huang Gaocong. Research on localization method of electric dipole sources in parallel layered seas[J]. Acta Electronica Sinica, 2021, 49(9): 1761-1767. (in Chinese)
- [5] 邓辉,张志宏,易文彬,等. 有界流场中潜艇水压场特性的预报方法和重要特征[J]. 兵工学报, 2024, 45(2): 527-540.
Deng Hui, Zhang Zhihong, Yi Wenbin, et al. Modeling method and key characteristics of submarine hydrodynamic pressure field in bounded flow field[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(2): 527-540. (in Chinese)
- [6] Kim Yongsang, Sangjin Ko, Lee Sangkyu, et al. Analysis of underwater electromagnetic field reduction by mixed-type cathodic protection using the boundary element method[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2017, 55(8): 591-599.
- [7] 程锦房,喻鹏,张伽伟,等. 水下电场探测定位技术应用研究现状[J]. 海军工程大学学报, 2022, 34(4): 68-74.
Cheng Jinfang, Yu Peng, Zhang Jiawei, et al. Application and development of underwater electric field detection and location technology[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2022, 34(4): 68-74. (in Chinese)
- [8] 张伽伟,喻鹏,姜润翔,等. 基于舰船电场的目标跟踪方法研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(3): 559-566.
Zhang Jiawei, Yu Peng, Jiang Runxiang, et al. Research on target tracking method based on ship electric field[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(3): 559-566. (in Chinese)
- [9] 张心心. 基于电场特性的复杂海洋环境舰艇隐蔽性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
Zhang Xinxin. Analysis of ship concealment in complex ocean environment based on electric field characteristics[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [10] 徐庆林,王向军,张建春,等. 温度对舰船阴极保护和腐蚀静电场的影响[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 182-189.
Xu Qinglin, Wang Xiangjun, Zhang Jianchun, et al. Influence of temperature on the cathodic protection and corrosion electrostatic field of ships[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 182-189. (in Chinese)
- [11] Zhang Jiawei, Yu Peng, Jiang Runxiang, et al. Real-time localization for underwater equipment using an extremely low frequency electric field[J]. Defence Technology, 2023, 26: 203-212.
- [12] 姜润翔,张伽伟,林春生. 基于点电荷模型的腐蚀相关静电场快速预测方法研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(4): 735-743.
Jiang Runxiang, Zhang Jiawei, Lin Chunsheng. Study of quick prediction method for ship corrosion related static electric field based on point charge source model[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(4): 735-743. (in Chinese)
- [13] 徐以东. 基于优化理论的水下目标电场定位技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
Xu Yidong. Research on techniques of underwater target electro-location based on optimization theory[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018. (in Chinese)
- [14] Thiel Christian, Broecheler Claas, Ludwar Frank, et al. A simple superposition formulation to predict the underwater electric potential signature of naval vessels[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(2): 105.
- [15] 陈聪,吴旭,孙嘉庆,等. 半无限大导电媒质中恒定电流元的电场分布研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(8): 122-127.
Chen Cong, Wu Xu, Sun Jiaqing, et al. Research on electric field generated by constant current differentiation in semi-infinite conductive medium[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(8): 122-127. (in Chinese)
- [16] 杨鹏程,杨靖浩,姜润翔. 舰船腐蚀相关静态电场水下电位特征研究[J]. 水下无人系统学报, 2023, 31(4): 545-551.
Yang Pengcheng, Yang Jinghao, Jiang Runxiang. Underwater potential characteristics of static electric field related to ship corrosion[J]. Journal of Unmanned Undersea

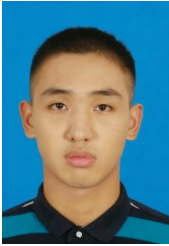
Systems, 2023, 31(4): 545-551. (in Chinese)

- [17] Haroon Amir, Andrei Swidinsky, Sebastian Hölz, et al. Step-on versus step-off signals in time-domain controlled source electromagnetic methods using a grounded electric dipole[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(9): 2825-2844.
- [18] 徐庆林, 王向军, 张建春, 等. 补偿阳极位置对舰船腐蚀电场防护效果的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 123-128.

Xu Qinglin, Wang Xiangjun, Zhang Jianchun, et al. Influence of compensation anode position on corrosion electric field damping effect of ship[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 123-128. (in Chinese)

- [19] Miroslaw Woloszyn, Krystian Buszman, Tomasz Rutkowski, et al. An analytical four-layer horizontal electric current dipole model for analysing underwater electric potential in shallow seawater[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 8727.

作者简介



邱名杰 男, 1995年9月出生于海南省三亚市。现为中国人民解放军海军工程大学非全日制硕士研究生。主要研究方向为水下上目标特征。

E-mail: 941522922@qq.com



陈聪 女, 1971年4月出生于湖北省武汉市。现为中国人民解放军海军工程大学教授、博士研究生。主要研究方向为水下目标特性。

E-mail: 0907041013@nue.edu.cn



孙嘉庆 男, 1993年7月出生于山东省日照市。现为中国人民解放军海军工程大学讲师、博士研究生。主要研究方向为水下目标特性、量子导航。

E-mail: 1920191109@nue.edu.com