

海水电场受物体电导率及其形状影响分析^{*}

嵇斗,王立祝,张建春
(海军工程大学电气工程学院,湖北武汉 430033)

摘要:海水中电场测量体会对目标电场产生影响,为了提高电场测量的准确度,利用有限元分析的方法研究了物体对海水电场分布的影响因素,并确定畸变电场的分布规律。仿真结果表明:海水电场畸变峰值大小及其畸变区域受物体的电导率及其形状影响,物体电导率小于或大于海水电导率时对电场分布的影响截然相反,物体形状的曲率越大,电场畸变的峰值越大,但畸变区域越小。

关键词:海水电场;电场测量;电场畸变;有限元法

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)05-046-06

Analysis of seawater electric field influenced by conductivity and shape of the object

Ji Dou, WANG Lizhu, ZHANG Jianchun
(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Electric field measurements in seawater will affect the target electric field. In order to improve the accuracy of the electric field measurement, the influence factors of the object on distribution of the electric field in seawater were studied by the finite element method, and the distribution law of the distortion electric field was determined. The simulation results show that the magnitude of the distortion peak and the distortion area are affected by the conductivity and shape of the object. When the conductivity of the object is smaller or larger than that of the seawater, the effect on the electric field distribution is on the opposite: the larger the curvature of the object is, but the larger the peak value of the distortion is, but the smaller the distortion area is.

Keywords: seawater electric field; electric field measurement; electric field distortion; finite element method

不同的金属材质在海水中有不同的电位,舰船与海水接触的部位由多种金属材质组成,铜制的螺旋桨与钢制的船壳之间会因两者的电极电位不同在海水中激发产生电场^[1-3]。不同的金属材质组合在一起会发生电化学腐蚀^[4-6]。为了防止舰船腐蚀,当前阴极保护主要采用牺牲阳极和外加电流两种阴极保护方式,这些措施虽然能够减少舰船的腐蚀,但是却极大地增加了舰船周围电场的产生^[7-9]。潜艇在使用了低噪声技术和消声瓦以后,声呐探测距离大幅降低,以电场作为信号源更易被识别定位。随着科学技术的发展,舰船电场越来越多地被引入到战场环境。

舰船在海水中产生的电场强度较弱,一般为mV/m的数量级,易受外界干扰,尤其是舰船电场测量装置、水中兵器以及水中的漂浮物均会引起水中的舰船电场产生畸变。为了更好地分析舰船的水下电场,需要对舰船水下电场进行精确测量,

电场测量电极电导率、形状的选择,以及空间的测量位置的不同,直接决定了舰船电场的测量精度^[10-12]。海水中水雷引信的电导率以及水雷的空间摆放位置决定了水雷能否得到有效触发^[13]。用于定位、预警的水下电场探测电极的电导率、形状及空间摆放位置决定了能否及时有效地发现定位目标。

通过研究不同电导率及形状的物体在匀强电场中产生的畸变,分析不同电导率及物体的形状对海水电场的影响规律。考虑到海水中水动力学的影响,以及电场测量设备、水中武器的形状设计一般采用球体、椭球体和圆柱体,本文采用了球体和椭球体来研究不同形状对海水中电场分布的影响^[14]。

1 海水空间及球体内部电位分布

若已知海水空间电场中的某点电位 φ_0 ,则该

^{*} 收稿日期:2019-03-19
基金项目:国家自然科学基金面上基金资助项目(41476153)
作者简介:嵇斗(1975—),男,江苏灌南人,副教授,博士,E-mail:406091202@qq.com

点电场为:

$$\mathbf{E}_0 = -\nabla\varphi_0 = E_{0x}\mathbf{e}_x + E_{0y}\mathbf{e}_y + E_{0z}\mathbf{e}_z \quad (1)$$

当在海水空间中置入一个半径为 a 的球形物体时,以该物体的球心为坐标原点建立如图 1 所示的球坐标系。设球形物体的电导率为 σ_1 ,海水的电导率为 σ_2 ,均为各向同性介质。球形物体内外的电位分别记为 φ_1 、 φ_2 。在无电荷分布的海水空间区域中,各点电位符合拉普拉斯方程:

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (2)$$

则球坐标系中拉普拉斯方程为:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} = 0 \quad (3)$$

式中: r 为点 P 到球心的距离, φ 为 P 点电位, θ 为 P 点与 z 轴的夹角, α 为 P 点方位角。

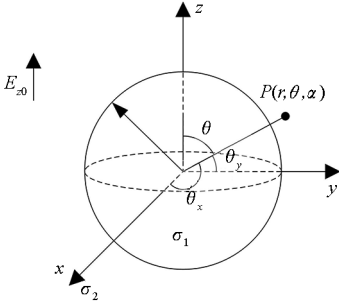


图 1 海水中球体坐标系

Fig. 1 Spherical coordinate system in seawater

海水中原电场的 z 轴分量为 $E_{0z}\mathbf{e}_z$,该分量产生的电位 φ_z 关于 z 轴成轴对称,不受方位角的影响,则

$$\varphi_{z1} = -\frac{3\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} E_{0z} r \cos \theta \quad (4)$$

$$\varphi_{z2} = \left(-1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \cdot \frac{a^3}{r^3} \right) E_{0z} r \cos \theta \quad (5)$$

同理,海水中原电场的 x 分量和 y 分量在球形物体内部和外界海水中产生的电位分别为:

$$\varphi_{x1} = -\frac{3\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} E_{0x} r \sin \theta \cos \alpha \quad (6)$$

$$\varphi_{x2} = \left(-1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \cdot \frac{a^3}{r^3} \right) E_{0x} r \sin \theta \cos \alpha \quad (7)$$

$$\varphi_{y1} = -\frac{3\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} E_{0y} r \sin \theta \sin \alpha \quad (8)$$

$$\varphi_{y2} = \left(-1 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \cdot \frac{a^3}{r^3} \right) E_{0y} r \sin \theta \sin \alpha \quad (9)$$

因此球形物体内部电位和外部海水中的电位分别为:

$$\varphi_1 = \varphi_{x1} + \varphi_{y1} + \varphi_{z1} = \frac{3\sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \varphi_0 \quad (10)$$

$$\varphi_2 = \varphi_{x2} + \varphi_{y2} + \varphi_{z2} = \left(1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 + 2\sigma_2} \cdot \frac{a^3}{r^3} \right) \varphi_0 \quad (11)$$

2 不同电导率对海水中电场分布的影响

根据球体的对称性,在不考虑形状对海水中电场分布的影响时,以半径为 15 mm 的球体模型为例来研究不同电导率对海水中电场分布的影响。在海水的自由空间中建立两个平行板相距 700 mm,两个极板之间外加直流电压 0.2 V,这样在两个平行极板之间就可以形成一个场强为 285.71 mV/m 的匀强电场。利用 COMSOL 软件在拉普拉斯方程的基础上求解球形物体在海水中的各点电场强度。海水的电导率与海水的温度、压力和盐度有关,在这里取整数海水电导率为 5 S/m^[15]。由式(11)可以看出,电导率是影响海水中电场分布的主要因素。

2.1 球体电导率等于海水电导率

当放入海水中的球体电导率与海水电导率均为 5 S/m 时,球体对海水电场分布的影响如图 2 所示。

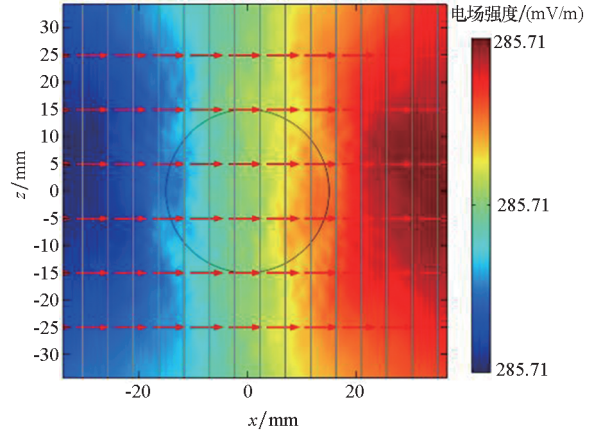


图 2 球体电导率等于海水电导率时的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution of sphere with conductivity equal to seawater conductivity

箭头方向表示电场方向,并且箭头的长度与电场幅值的大小成正比,竖直线条表示海水中的电势等值线。当球体放入海水中时,图 2 中箭头分布均匀,长度相等且水平向右,电势等值线平行且均匀分布。图例表示海水中各点电场强度相等且均为 285.71 mV/m,说明海水中的电场仍然是没放球体时设计的匀强电场,进而说明当物体的电导率与海水的电导率相同时,其不会对海水中的电场分布产生任何影响。当 $\sigma_1 = \sigma_2$ 时,式(10)和式(11)可简化为 $\varphi_1 = \varphi_0$ 、 $\varphi_2 = \varphi_0$,即当

球体置入海水中时各点电位不会发生变化,电场没有畸变,验证了仿真的结果。

2.2 球体电导率小于海水电导率

在球体的电导率小于海水电导率的情况下,以石英电导率为例,其电导率为 1×10^{-14} S/m,要远远小于海水的电导率,使用石英电导率进行仿真计算,研究其对海水电场分布的影响,结果如图 3 所示。

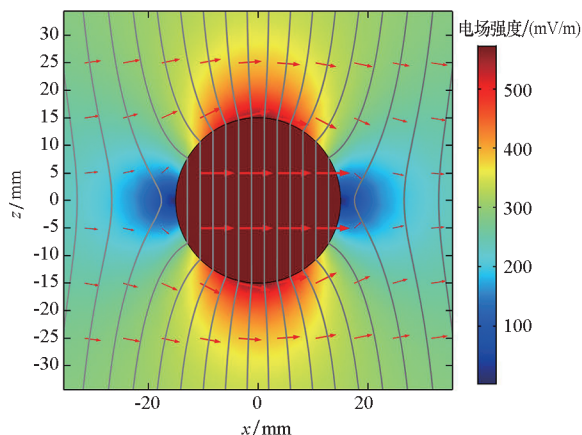


图 3 球体为石英材料时的电场分布

Fig. 3 Electric field distribution of spherical quartz material

由图 3 可得,当石英球体放入海水中时,球体周边的电场呈现上下对称、左右对称的分布。靠近球体上下部位的电势等值线较密集,箭头长度较长,表明靠近球体上下部位的海水电场增强^[16]。靠近球体左右两侧电势等值线变稀疏,箭头长度变短,表明靠近球体左右两侧的海水电场减弱。球体内部电势等值线非常密集,箭头长度变长,表明球体内部电场显著增强。

2.3 球体电导率大于海水电导率

在球体的电导率大于海水电导率的情况下,以黄铜电导率为例,其电导率为 6×10^7 S/m,要远大于海水的电导率,使用黄铜电导率进行仿真计算,研究其对海水电场分布的影响,结果如图 4 所示。

由图 4 可得,当黄铜材料的球体放入海水中时,球体周边的电场也同样呈现上下对称、左右对称的分布。但是靠近球体上下部位的电势等值线变稀疏,箭头长度变短,表明靠近球体上下部位的海水电场减弱。靠近球体左右两侧的电势等值线变密集,箭头长度变长,表明靠近球体左右两侧的海水电场增强。球体内部电势等值线和电场箭头并没有显现,表明球体内部电场接近于零。

通过利用石英与黄铜两种电导率的材料研究了物体电导率对电场分布的影响。上述仿真计算结果表明:当物体的电导率高于海水电导率或低

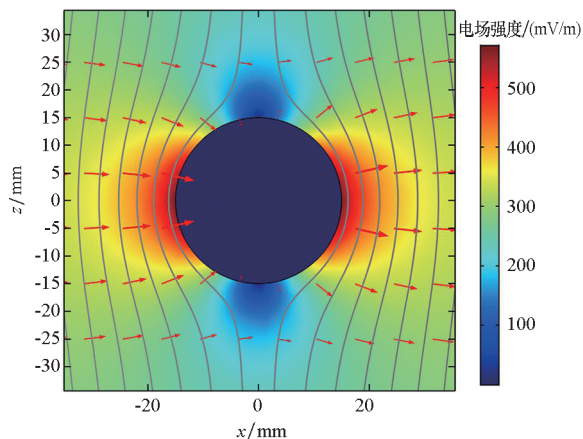


图 4 球体为黄铜材料时的电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of spherical brass material

于海水电导率时,均会引起海水电场形成畸变,且对电场分布的影响是截然相反的。

2.4 不同区域电场强度随物体电导率变化

球体表面区域大致可以分为沿电场方向区域和垂直于电场方向的区域。沿电场方向区域电场强度左右对称,垂直于电场方向区域电场强度上下对称。为了更好地研究物体电导率对海水电场分布以及物体内部电场的影响,以球心为坐标原点,经过球心由左向右为 x 轴正方向,由下向上为 z 轴正方向,垂直于 $z-x$ 平面,由外向内为 y 轴正方向,建立直角坐标系。在直角坐标系上取 $A(-20 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 、 $B(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 20 \text{ mm})$ 、 $C(0 \text{ mm}, 0 \text{ mm}, 0 \text{ mm})$ 三点,点 A 研究靠近球体左侧与电场方向平行的位置电场强度受物体电导率变化的影响规律,点 B 研究靠近球体上部与电场方向垂直的位置电场强度受物体电导率变化的影响规律,点 C 研究球体内部电场强度受物体电导率变化的影响规律。将该三维直角坐标系投影到 $z-x$ 平面,得出坐标系上的三点位置,如图 5 所示。

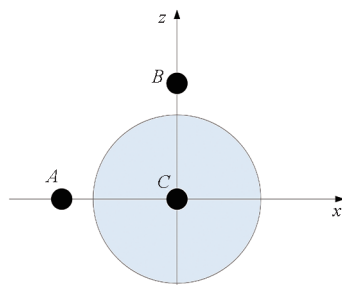


图 5 坐标系上的三点位置

Fig. 5 Position of three points in coordinate system

设置球体电导率为可变参数,以海水电导率值为中心,取球体电导率在 $0.01 \sim 10$ S/m 区间内

以 0.5 为步长,利用对球体电导率参数化扫描的方式求解 A、B、C 三点处电场强度随电导率的变化,并在二维直角坐标系中绘制出 A、B、C 三点电场强度随球体电导率变化的曲线图,如图 6 所示。

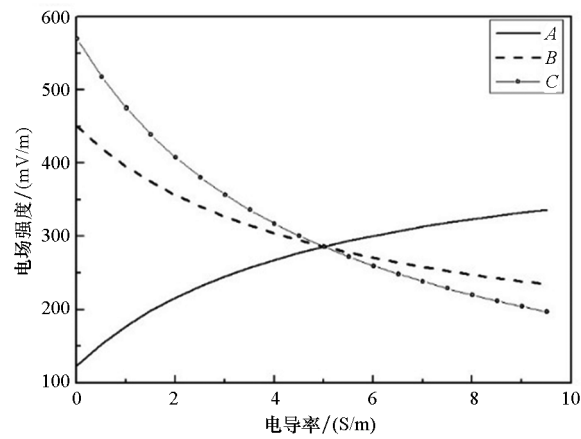


图 6 A、B、C 三点电场强度随电导率变化曲线
Fig. 6 Curves of electric field intensity at A, B and C point depending on conductivity

由图 6 可知,当物体电导率低于海水电导率时,相比于原有海水中的电场,平行于电场方向位置的电场减弱,而垂直于电场方向位置的电场增强,物体内部的电场也显著增强。当物体的电导率等于海水的电导率时,三条曲线汇聚于一点,该点电场强度即为设计的匀强电场值。当物体电导率高于海水电导率时,相比于原有海水中的电场,平行于电场方向位置的电场增强,而垂直于电场方向位置的电场减弱,物体内部的电场也显著减弱。由曲线趋势图得出,垂直于电场方向位置和物体内部的电场随电导率的增大而减小,平行于电场方向位置的电场随电导率的增大而增大。

3 不同形状对电场分布的影响

为了研究不同物体的形状对海水电场分布的影响,将置入海水中的物体电导率统一设置为 1000 S/m,选取面积相等的椭圆形、圆形来进行仿真分析,通过研究不同形状物体左侧区域电场的变化来研究不同形状对电场分布的影响。

定义椭圆长半轴平行于电场方向时的椭圆为横置椭圆即水平放置椭圆,如图 7 所示,在椭圆左侧尖部的电势等值线变得非常密集,箭头长度变长,这说明电场峰值畸变较强,但是电场畸变区域较小。这是由于椭圆尖部曲率较大,导致电场畸变峰值较高,畸变区域较小。

定义椭圆的长半轴垂直于电场方向时的椭圆

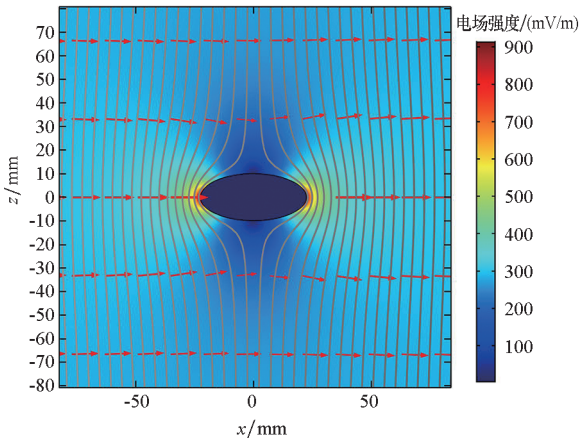


图 7 水平放置椭圆的电场分布
Fig. 7 Electric field distribution of horizontal ellipse

为竖置椭圆,如图 8 所示,椭圆左侧平坦部位产生的电场畸变区域扩大了,但是电场畸变的峰值要小于椭圆水平放置时左侧尖部产生的峰值。这是由于椭圆平坦部位的曲率较小,导致电场畸变峰值较小,畸变区域较大。

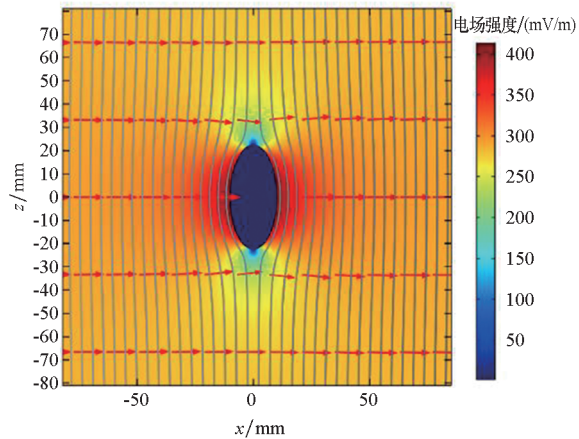


图 8 竖置放置椭圆的电场分布
Fig. 8 Electric field distribution of vertical ellipse

圆形曲率介于椭圆的尖部和椭圆的平坦部位之间,因此选取与椭圆等面积的圆形来研究不同曲率对电场畸变的影响,如图 9 所示。由图 9 可知,圆形水平方向电场畸变的峰值要小于水平放置椭圆的尖部产生的峰值,大于竖置放置椭圆的平坦部位产生的峰值。圆形水平方向电场畸变的区域大于水平放置椭圆的尖部产生的电场畸变区域,小于竖置放置椭圆的平坦部位产生的电场畸变区域。这种畸变的产生是由于圆形曲率小于椭圆的尖部曲率,大于椭圆的平坦部位曲率^[17]。

沿水平方向穿过横置椭圆、竖置椭圆和圆形的中心取一条数据采样线,椭圆长半轴为 20 mm,则取采样线 x 轴的范围为 -25 ~ 25 mm,求解出水平方向上物体附近海水区域及物体内部的电场

模值分布情况,如图 10 所示。

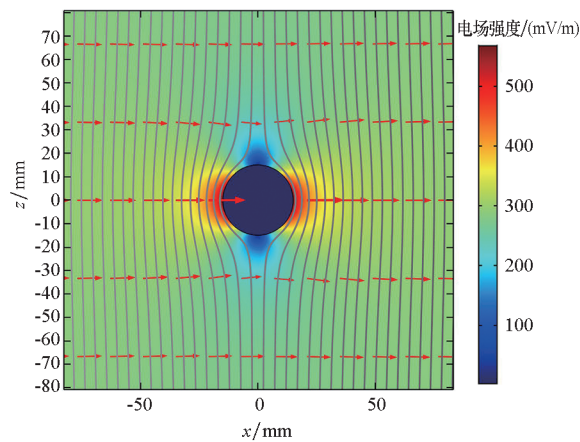


图 9 同椭圆等面积圆形的电场分布

Fig. 9 Electric field distribution of the circle with the same elliptical area

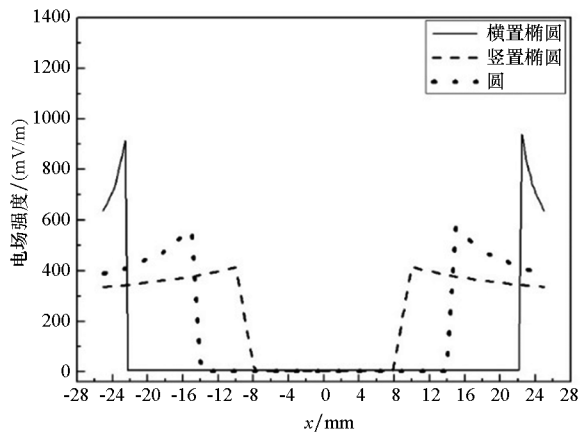


图 10 采样数据线上电场分布

Fig. 10 Electric field distribution on sampling data line

由图 10 可知,海水电场在椭圆的尖部能够产生非常强的电场畸变,越靠近椭圆的尖部,电场增强的速率越快,而随着物体形状曲率的减小,由椭圆的尖部曲率到圆形曲率,再到椭圆的平坦部位曲率,电场畸变的峰值也减小。在 $x = 0\text{ mm}$ 附近电场强度基本为零,即在物体的内部电场强度基本为零。三种形状对水平电场畸变的峰值及对原有海水电场的放大倍数见表 1。

表 1 三种形状电场畸变峰值及放大倍数

Tab.1 Peaks and amplification multipliers of electric field distortion in three shapes

	峰值电场强度/ (mV/m)	电场放大 倍数
横置椭圆	915.44	3.20
竖置椭圆	412.15	1.44
圆	566.23	1.98

4 结论

海水电场空间中置入一个物体时,由于其电导率与海水的不同,物体会引起周边的海水电场产生畸变,从而改变原有电场的强度和方向。

1) 当物体电导率与海水电导率一致时,该物体不会引起原有空间电场产生畸变。

2) 当物体电导率低于海水电导率时,该物体沿原电场方向上的区域电场减弱,垂直于原电场方向的区域电场增强,物体内部电场增强,且电导率越低,这种现象越明显。

3) 当物体电导率高于海水电导率时,该物体沿原电场方向上的区域电场增强,垂直于原电场方向的区域电场减弱,物体内部电场减弱,且电导率越高,这种现象越明显。

当将不同于海水电导率的物体放入海水中时,物体的形状不同会引起海水中原有电场产生不同程度的畸变,越是尖锐的部位对原有电场的畸变强度越大,畸变区域越小。而越是平缓的部位对原有电场的畸变强度越弱,但畸变区域较大。

参考文献 (References)

[1] 谭浩, 陈聪, 蒋治国. 船舶水下电场的预测方法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 168-172.
TAN Hao, CHEN Cong, JIANG Zhiguo. Electric field prediction method for ships at sea [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2016, 38(6): 168-172. (in Chinese)

[2] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.
LIN Chunsheng, GONG Shengguang. Physical field of warship[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007. (in Chinese)

[3] 嵇斗, 单潮龙. 基于三稳随机共振的舰船轴频电场弱信号检测研究[J]. 海军工程大学学报, 2018, 30(6): 12-16.
JI Dou, SHAN Chaolong. Weak signal detection in ship's shaft-rate EM field based on stochastic resonance of a tri-stable system [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2018, 30(6): 12-16. (in Chinese)

[4] 侯保荣. 海洋腐蚀环境理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
HOU Baorong. Theory and application of marine corrosive environment [M]. Beijing: Science Press, 1999. (in Chinese)

[5] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.
WEI Baoming. Theory and application of metal corrosion[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984. (in Chinese)

[6] 张建新, 王向军. 层流介质中金属板腐蚀电位分布研究[J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(6): 157-164.
ZHANG Jianchun, WANG Xiangjun. Corrosion potential

distribution research of metal plate in laminar flow [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(6): 157-164. (in Chinese)

[7] Hber T, Wang Y. Effect of propeller coating on cathodic protection current demand: sea trial and modeling studies[J]. Corrosion, 2012, 68(5): 441-448.

[8] 嵇斗,王向军,杨振. 一种新的补偿阳极优化方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(2): 1562-1566.

JI Dou, WANG Xiangjun, YANG Zhen. A new optimized algorithm of compensatory anode [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(2): 1562-1566. (in Chinese)

[9] 杨清学. 外加电流阴极保护装置在舰船防腐中的应用研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(5A): 181-183.

YANG Qingxue. Impressed current cathodic protection on the application of anticorrosion of the ship [J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(5A): 181-183. (in Chinese)

[10] 蔡岳丰,范啸平,邵能灵. 船舶水中电场分析方法研究综述[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1410-1416.

CAI Yuefeng, FAN Xiaoping, TAI Nengling. Review of analytical methods for underwater electric field in ships [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2018, 52(10): 1410-1416. (in Chinese)

[11] 张树. 水下电场测量设备校准研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2011.

ZHANG Shu. Research on calibration of underwater electric field measuring equipment [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2011. (in Chinese)

[12] 嵇斗,王向军,张怀亮. 基于小波分析的自适应谱线增强信号提取[J]. 中国舰船研究, 2010, 5(2): 74-77.

JI Dou, WANG Xiangjun, ZHANG Huailiang. Signal extraction of adaptive spectral enhancement based on wavelet multi-resolution analysis [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2010, 5(2): 74-77. (in Chinese)

[13] 牟兰. 国外舰船电场特性研究及其在水雷战上的应用[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(9): 138-142.

MOU Lan. The characteristic research of foreign warship's electric field and its application on mine warfare [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(9): 138-142. (in Chinese)

[14] 张月辉,龚仕仙. 基于球体-椭球体联合模型的中段目标几何特性反演[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(6): 42-47.

ZHANG Yuehui, GONG Shixian. The characteristic inversion of the mid-course missile based on the sphere-ellipse model[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(6): 42-47. (in Chinese)

[15] 张兆英. 海水电导率、温度和深度测量技术探讨[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4): 38-41.

ZHANG Zhaoying. Discussion on CTD measurement technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(4): 38-41. (in Chinese)

[16] 陈重,崔正勤. 电磁场理论基础[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003.

CHEN Zhong, CUI Zhengqin. Fundamentals of electromagnetics theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003. (in Chinese)

[17] 张旭东,赵其杰. 基于离散曲率特征的弧线形状检测方法[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(5): 702-713.

ZHANG Xudong, ZHAO Qijie. Arc contour detection method based on discrete curvature characteristics [J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2017, 23(5): 702-713. (in Chinese)