

基于电流线等效的潜艇磁场估算与仿真

陈聪^{*①} 魏勇^② 姚陆锋^① 蒋治国^① 龚沈光^③

^①(海军工程大学理学院 武汉 430033)

^②(大连理工大学船舶工程学院 大连 116023)

^③(海军工程大学兵器工程系 武汉 430033)

摘要: 根据潜艇水下腐蚀相关电磁信号的产生机理, 该文提出可采用由电偶极子首尾相接而成的电流线对其进行模拟。分别采用边界元建模及电流线建模方法对潜艇模型的水下静态电场进行计算, 对比分析结果表明, 将电流线作为对潜艇水下腐蚀相关静态电磁信号进行估算的数学模型是可行的。在此基础上, 结合分层导电媒质中水平直流电偶极子的磁场表达式, 对潜艇腐蚀相关静态磁场在全空间中的分布特征进行了仿真分析。结果表明, 空气中潜艇腐蚀相关静态磁场近场量值可测, 分布特征明显, 可用于航空探潜; 海水中潜艇腐蚀相关静态磁场远场按距离的平方反比衰减, 可用于消磁潜艇的远程探测。分析所得典型结论为进一步的应用研究奠定了基础。

关键词: 腐蚀相关静态磁场; 兵器科学与技术; 腐蚀相关静态电场; 水平直流电流线; 估算模型

中图分类号: TM15; TJ6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2015)02-0461-07

DOI: 10.11999/JEIT140063

Estimation and Simulation Analysis of the Submarine Magnetic Field Based on Current-line Mode

Chen Cong^① Wei Yong^② Yao Lu-feng^① Jiang Zhi-guo^① Gong Shen-guang^③

^①(College of Sciences, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

^②(School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

^③(Department of Weaponry Engineering, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: According to the generation mechanism of the underwater corrosion-related-electromagnetic field of submarine, a current-line which is regarded as end-to-end electric dipole is proposed to simulate the field distribution. Firstly, the underwater static electric field of a submarine model is calculated respectively by the boundary-element method and the current-line method, and the contrastive analysis of the calculation results shows it is feasible that the current-line mode is selected to estimate the underwater corrosion-related-electromagnetic field of submarine. Then, based on the magnetic field expressions of the horizontal static electric dipole in layered-conductive media, the static corrosion-related-magnetic field distribution of the submarine in all the space is simulated and analyzed. The simulation results show that, the near-field of the magnetic field in air is suitable to be as a new target of the aerial submarine hunting because of its measurable magnitude and obvious distribution characteristic, as well as the far-field is suitable to be as signal source for remote detection or position fixing of the degaussing submarine because it degenerates with the inverse square of the distance. The typical research results lay the foundation for the further application research.

Key words: Static Corrosion-Related-Magnetic (CRM) field; Ordnance science and technology; Static Corrosion-Related-Electric (CRE) field; Horizontal static current-line; Estimation model

1 引言

潜艇在海洋环境中航行时, 由于建造材料的腐蚀以及所采取的防腐措施, 艇体周围的海水中将出现稳恒电流, 称为腐蚀电流或防腐电流。腐蚀电流

的主体部分从钢质艇壳经海水流向铜质螺旋桨, 再流经螺旋桨转轴, 通过各种导电连接回到艇壳, 形成闭合回路; 防腐电流的主体部分则从防腐系统的阳极流向被保护的艇壳及螺旋桨, 再经艇壳或螺旋桨转轴, 回到防腐系统的电源负极, 形成闭合回路。这些电流在导电的海水中流动, 必将带来相应的静态电场分布, 同时, 闭合的电流回路也将激发出空间中的稳恒磁场分布。潜艇周围的这部分电磁信号,

2014-01-08 收到, 2014-06-19 改回

国家自然科学基金(51109215)和国家部级基金资助课题

*通信作者: 陈聪 cckx7145@sohu.com

分别被称为腐蚀相关静态电场(static Corrosion Related Electric field, CRE)及腐蚀相关静态磁场(static Corrosion Related Magnetic field, CRM)^[1-4]。

和潜艇建造材料的磁性所产生的磁场相比, 潜艇 CRM 的研究起步很晚, 近十几年来, 随着其产生机理的不断明晰, 才逐渐受到重视^[5-8]。由于实测时潜艇静态 CRM 无法直接与来源于建造材料磁性的磁场相区分, 通常只能采用理论预测与估算的方式对其进行特征分析。国外已采用边界元建模、偶极子建模等方法对其开展了一定研究, 得到一些结论, 但由于具体研究方法未公开, 所得表达式为复杂积分等, 相关研究结果尚无法直接为我所用。从目前可见到的研究进展来看, 相比较而言, 边界元建模需要编制大型边界元软件, 且只能计算结构参数、工作状态已知的合作目标, 且目前在计算全空间的磁场分布时还存在较大困难^[9-11]; 偶极子建模则可对任意目标进行电磁特征的分析 and 预测, 且模型相对简洁, 因此在实际应用中 CRM 的电偶极子建模方法更有吸引力^[12-14]。但常规偶极子建模往往采用按一定规则排列的离散电偶极子进行等效, 再利用实测场数据, 通过反演来获得未知模型参数, 该思路的实现需要依靠矛盾方程组的求解, 在一定程度上增加了应用的难度。

为获得浅海中潜艇腐蚀相关 CRM 的典型特征, 本文提出可根据潜艇结构及外加防腐系统的对称性, 采用由水平直流电偶极子首尾相接而成的水平电流线来对潜艇水下静态 CRM 进行估算和仿真。首先以潜艇腐蚀相关电磁场的产生机理为基础, 分别采用边界元建模和电流线建模方法, 计算了半无限大海水域中、加装了外加电流阴极保护系统的潜艇模型的水下电位分布。通过对结果的对比分析, 明确了水平电流线模型模拟潜艇水下静态 CRM 的可行性。随后, 基于该数学模型, 在空气-海水-海床 3 层模型下, 结合分层导电媒质中水平直流电偶极子的磁场表达式, 对潜艇全空间中的静态 CRM 场分布特征进行仿真分析, 从而为进一步的应用研究奠定基础。

2 潜艇 CRM 场的电流线模型

根据潜艇腐蚀相关电磁信号的产生机理可见, 腐蚀或防腐电流同时激发了空间中的静态 CRE 和静态 CRM, 因此本文首先以腐蚀相关静态电场为对象, 分别采用边界元建模及电流线建模方法对其进行模拟计算, 并通过对比场分布, 表明水平直流电流线可用来模拟潜艇水下腐蚀相关静态电磁信号,

因此将之作为对潜艇水下静态 CRM 进行估算的数学模型是可行的。

为突出主要因素, 不考虑潜艇细致构造。简化的潜艇模型结构及边界元建模如图 1 所示。前部为半球, 半径 5 m; 中部为圆柱体, 半径 5 m, 长度为 45 m; 后部为圆锥, 高 20 m, 底面半径 5 m, 尾部桨(园)半径 2 m。

为应用边界元建模, 考虑半无限大海洋环境, 海水电导率为 4 S/m。设潜艇模型位于水下 30 m 处。取艇体轴线为 x 轴, 并取指向螺旋桨方向为其正向, 距螺旋桨 35 m 处取为坐标原点, 坐标系建立如图 1 所示。外加电流阴极保护系统的阳极有两个, 对称布放在艇体两侧, 两者连线与水面平行, 且距螺旋桨垂直距离 15 m。考虑除螺旋桨裸露外, 艇体外表面全部绝缘。要求所加阴极保护电流能使得螺旋桨全部处于防腐电位。

采用边界元法计算潜艇模型轴线正下方 20 m (即 $y=0$ m, $z=20$ m), x 从 -100 m 到 +100 m 线上的标量电位分布, 如图 2 中“○线”所示。计算所得阴极保护总电流 $I=10.5$ A。

对该潜艇模型建立电流线模型。考虑到艇体结构的对称性及外加电流阴极保护系统的阳极布放方式等, 在艇体表面绝缘涂敷层完好的条件下, 将其腐蚀相关静态电场的主体部分采用一根由水平电偶极子首尾相接而成的水平直流电流线来模拟, 其电流正极位于外加电流阴极保护系统 (Impressed Current Cathodic Protection system, ICCP) 的对称中心, 负极位于螺旋桨中心。电流从正极流出, 流经海水, 最后从负极汇入。因此, 上文中潜艇模型对应的电流线模型参数为: $x_{0+}=20$ m, $x_{0-}=35$ m, $y_0=0$ m, $z_0=0$ m。如图 3 所示。流经电流线的电流即为由螺旋桨汇入的电流, 在涂覆层完好的情况下, 即阴极保护总电流。结合半无限大导电媒质中水平直流电偶极子的标量电位公式, 通过积分即可计算出潜艇模型轴线下方的标量电位, 如图 2 中“*线”所示。

由图 2 可见, 两种建模方法分析所得电位分布十分吻合, 表明在潜艇艇体表面涂层完好的条件下, 对防腐电流所引起的潜艇水下腐蚀相关的静态电磁信号, 采用水平直流电流线来模拟是可行的。其中, 水平直流电流线的正极位于 ICCP 阳极的对称中心, 负极位于螺旋桨中心, 电流即为阴极保护总电流。

事实上, 更多的仿真分析表明, 同样的建模思路可用在涂层有破损、防腐电流不对称或者艇体上

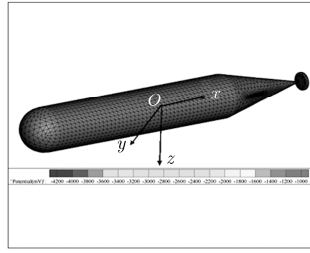


图1 边界元建模

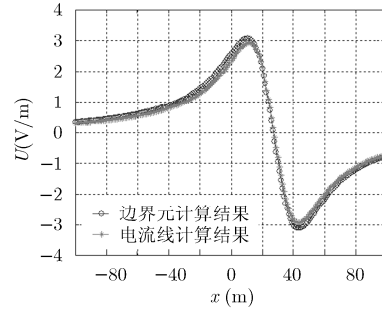


图2 标量电位分布(正下方 20 m)

存在其他电偶源的情况,可分别依据流入海水的腐蚀或防腐电流的源、汇点及在艇体上的电流通路来建立恰当的电流线进行模拟。同时还可以根据所考虑的场域范围进行适当简化,这将给实际工程应用带来极大的方便。

3 分层导电媒质中水平直流电流线的磁场分布

3.1 分层导电媒质中水平直流电偶极子的磁场分布

为更接近真实的海洋环境,考虑采用“绝缘媒质-导电媒质 1-导电媒质 2”3 层分层导电媒质模型对浅海进行模拟。如图 4 所示建立坐标系,下标 1, 2, 3 分别代表相应的媒质空间, $\sigma_1 = 0$, 对海洋环境, 3 种媒质磁导率可均取为 μ_0 。水平直流电偶极子位于中间层。电流从其正极流出到导电媒质中, 形成空间电流, 再从其负极汇聚流入, 经源本身流至正极, 因此空间中的磁场应包括两部分, 一部分是电偶极子源本身的电流(如图 4 中粗箭头所示)产生的磁场, 另一部分是空间电流所产生的磁场。另外由于空间电流和电场之间满足 $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ 的约束关系, 因此导电媒质中电偶极子的电场及磁场分布应联合求解^[15,16]。

位于 (x_0, y_0, z_0) 处的水平直流电偶极子 $I d\mathbf{l}$ 在全空间产生的标量电位 Φ 、矢量磁位 $\mathbf{A}$ 应满足式(1)

及边界条件:

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 \Phi_1 &= 0 \\ \nabla^2 \Phi_2 &= -\frac{\rho_V}{\varepsilon_2} \\ \nabla^2 \Phi_3 &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{A}_1 &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{A}_2 &= -I d\mathbf{l} \delta(x-x_0, y-y_0, z-z_0) \\ \nabla^2 \mathbf{A}_3 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

矢量磁位和标量电位的约束条件取为: $\nabla \cdot \mathbf{A} + \sigma \Phi = 0$ 。

应满足的边界条件为: 在 $z=0$ 及 $z=D$ 的分界面上, $\Phi, \sigma \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \nabla \times \mathbf{A}$ 连续。

由于空间电荷分布 ρ_V 未知, 因此本文先采用镜像法求出场点位于各层媒质中时源的电像及相应的标量电位 Φ ^[16], 再采用场点处的矢量磁位等于源产生的矢量磁位加上电像产生的修正磁位的方法, 求出 3 个场域中的矢量磁位 $\mathbf{A}$ 。在图 4 所示的直角坐标系中, $\mathbf{A}$ 表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1 &= \frac{I d\mathbf{l}}{4\pi R_0} \mathbf{i} + \frac{I d\mathbf{l}}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \mathbf{k} \\ &+ \frac{I d\mathbf{l}}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \cdot \frac{z-z_0}{R_0} \mathbf{k} \end{aligned} \quad (2)$$

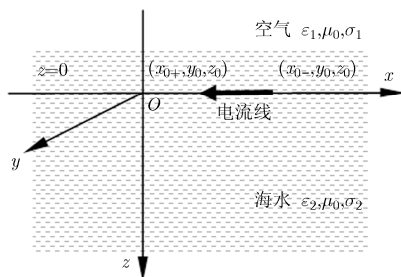


图3 电流线模型

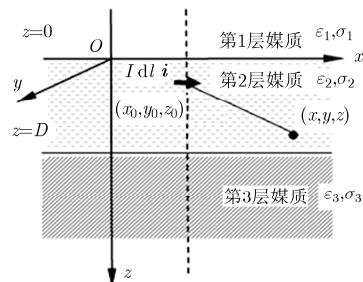


图4 3层导电媒质模型

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2 = & \frac{Idl}{4\pi R_0} \mathbf{i} + \frac{Idl}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \mathbf{k} - \frac{Idl}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \\ & \cdot \left[\sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\eta^k(z-2kD+z_0)}{r_{1k}} + \frac{\eta^k(z-2kD-z_0)}{r_{2k}} \right] \right. \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\eta^m(z+2mD-z_0)}{r_{1m}} \right] \\ & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\eta^m(z+2mD+z_0)}{r_{2m}} \right] \right] \mathbf{k} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_3 = & \frac{Idl}{4\pi R_0} \mathbf{i} + \frac{Idl}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \mathbf{k} - \frac{Idl}{4\pi} \cdot \frac{x-x_0}{\rho^2} \\ & \cdot \left[\sum_{m=1}^{\infty} \left[\frac{\xi \eta^m(z+2mD-z_0)}{r_{1m}} \right] \right. \\ & \left. + \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{\xi \eta^m(z+2mD+z_0)}{r_{2m}} \right] - \frac{\eta(z-z_0)}{R_0} \right] \mathbf{k} \quad (4) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \rho &= [(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]^{1/2} \\ R_0 &= [\rho^2 + (z-z_0)^2]^{1/2} \\ r_{1k} &= [\rho^2 + (z-2kD+z_0)^2]^{1/2} \\ r_{2k} &= [\rho^2 + (z-2kD-z_0)^2]^{1/2} \\ r_{1m} &= [\rho^2 + (z+2mD-z_0)^2]^{1/2} \\ r_{2m} &= [\rho^2 + (z+2mD+z_0)^2]^{1/2} \\ \eta &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_2 + \sigma_3}, \xi = \frac{2\sigma_3}{\sigma_2 + \sigma_3} \end{aligned}$$

由 $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \mathbf{A}_3$ 表达式可见, 第 1 项 $\frac{Idl}{4\pi R_0} \mathbf{i}$ 即为电偶极子源电流本身在无限大绝缘媒质中的磁矢势, 除此以外的其他项则代表导电媒质中的空间电流产生的磁矢势 $\mathbf{A}_s$ 。可写为: $\mathbf{A}_{1,2,3} = \frac{Idl}{4\pi R_0} \mathbf{i} + \mathbf{A}_{s,1,2,3}$ 。

对 $\mathbf{A}_{1,2,3}$ 及 $\mathbf{A}_{s,1,2,3}$ 求旋度, 即可得全空间中的磁场强度分布及由空间电流产生的磁场强度。

3.2 分层导电媒质中水平直流电流线的磁场分布

由于水平直流电偶极子电流方向为 $\mathbf{i}$ 方向, 因

此在图 4 所示的直角坐标系中有 $d\mathbf{l} = dx$ 。通过对式 (2)~式 (4) 求旋度得到各磁场强度分量后再对 x 积分, 从负极坐标 x_{0-} 积到正极坐标 x_{0+} , 即可得到水平直流电流线的磁场强度分布。

下文即采用积分的方法, 在空气-海水-海床 3 层模型下, 基于电流线模型对上文中潜艇模型的 CRM 场进行估算和仿真。

4 潜艇 CRM 场的仿真分析

4.1 某一深度平面上的磁场分布特征

设海水深度 $D=100$ m, 海水电导率同前为 $\sigma_2 = 4$ S/m, 海底电导率 $\sigma_3 = 0.04$ S/m。针对前述潜艇模型, 用 Matlab 编程, 分别计算水面上 10 m ($z=-10$ m)、水面下 70 m ($z=70$ m)、水面下 110 m ($z=110$ m) 3 个平面上的磁场强度分布。计算结果如图 5 和图 6 所示。

图 5(a)~5(c) 分别为空气、海水、海床中的磁场强度各分量随 x 的变化 ($y=10$ m), 图 6(a)~6(c) 分别为空气、海水、海床中的磁场强度各分量随 y 的变化 ($x=10$ m)。为便于对比, 特意取两个关于源垂向对称、与源的高度差均为 40 m 的平面 ($z=-10$ m 和 $z=70$ m) 进行计算, 以反映界面及媒质性质的影响。

(1) 由图 5 和图 6 可见, 在本文所设参数下, 空气、海水、海床 3 个区域中潜艇腐蚀相关静态磁场的磁感应强度幅值均可达到 nT 以上, 且区域性强, 分布特征明显, 这给水中潜艇的探测提供了新的思路。特别是在空气中激发的磁场分布, 十分有利于潜艇的航空磁探。

(2) 比较图 5(a), 5(b), 可见, 在关于源电流垂向对称的两个深度上, 磁场的垂向分量 H_z 相同, 但空气中纵向水平分量 H_x 大于海水中的对称场点, 而横向水平分量 H_y 却小于海水中的对称场点, 且具体影响与场点、源点之间的水平偏移量 $x-x_0$, $y-y_0$ 有关。比较图 6(a), 6(b), 亦可得到相同的结果。由于所计算的两个深度平面与源的高度差相同,

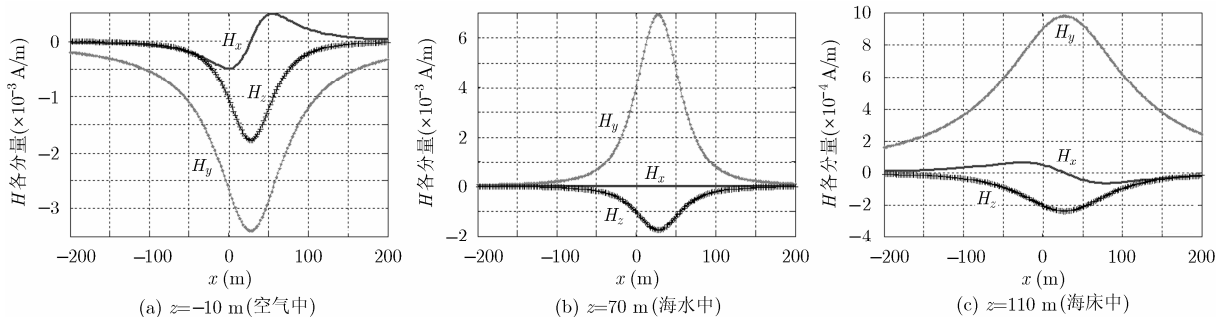
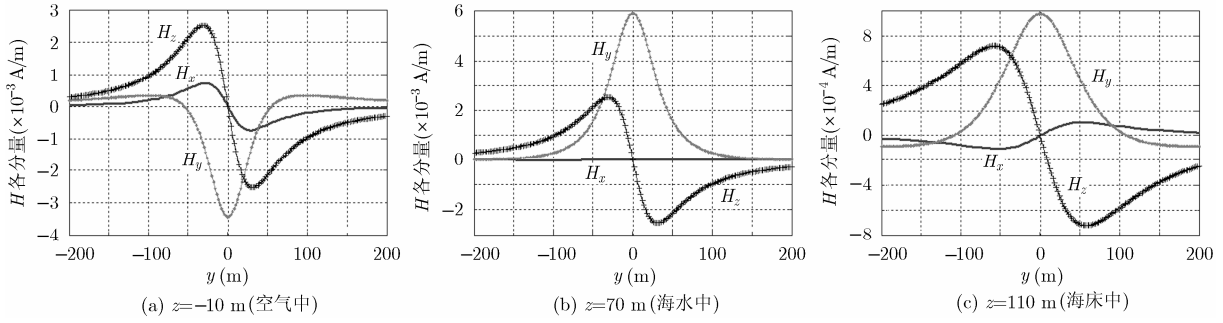


图 5 磁场强度各分量随 x 的变化

图6 磁场强度各分量随 y 的变化

对称场点到源点的距离相同, 因此场分布的差别应反映了媒质结构对场的影响, 本质来源于空间电流产生的磁场的不同。

对上文中的 $\frac{Idl}{4\pi R_0} \mathbf{i}$ 及 $\mathbf{A}_s$ 求旋度后再对 x 积分,

即可得到水平直流电流线的源电流及空间电流所产生的磁场强度分布。显然, 由磁矢势表达式可见, 源电流本身产生的磁场强度没有 x 方向分量, 而空间电流产生的磁场强度没有 z 方向分量, 也就是说, 场点的 H_x 完全是空间电流贡献的, 而 H_z 完全是源电流贡献的, H_y 则是两者共同产生的, 因此对称深度上, 磁场的垂向分量 H_z 一样, 但两个水平分量均不同。

下面分别计算图 5(a)和图 5(b)中, 空气和海水中的对称场点的横向水平分量 H_y 的构成。如图 7 所示。

显然, 对称深度上的场点, 由于场源距离一样, 源电流自身产生的 H_y 除了方向相反以外, 大小是相同的, 但由于空间电流产生的磁场强度不同, 最终导致总的 H_y 的差别。

4.2 磁场分布随深度的变化特征

在前述海洋环境、源参数条件下, 用 Matlab 编程, 计算 $x=y=10$ m 时, 磁场强度各分量随场点

深度 z 的变化。计算结果如图 8 所示。由图可见: (1)空气—海水、海水—海床分界面两边磁场强度各分量均是连续的; (2)深度 $|z|$ 趋于无穷时, 场趋于 0, 也就是离开场源无限远时, 磁场强度为 0; (3)水平偏移量相同的场点中, 磁场强度纵向水平分量 H_x 在分界面处最大, 垂向分量 H_z 在与源点同高度处最大, 横向水平分量 H_y 则受空间位置及媒质分布的影响较大, 与源点同高度处为 0, 两边方向相反, 分别存在一个场值的极大, 且由于受分层媒质的影响, 两个极大值并不相等。

4.3 磁场远程衰减特征

考虑磁场远程衰减特性时, 取 $\rho \gg D$, 且 $\rho \gg |z - z_0|$, 因此可以在满足此条件下任选一个深度平面, 计算磁场强度随 ρ 的衰减特征, 并对衰减曲线进行二次方反比及三次方反比拟合, 如图 9 所示。图中计算时深度选取同前。

由图 9 可见, 在距离源 $20D$ 至 $2000D$ 的范围内 (即 2 km 至 200 km 范围内), 3 个场域中的磁场强度远场均随场源间距的增加不断衰减, 且用平方反比曲线可以很好地拟合, 拟合曲线及拟合精度见表 1, 因此, 潜艇 CRM 的远场按距离的平方反比衰减, 相对于铁磁材料所产生的磁场而言 (按距离的负三

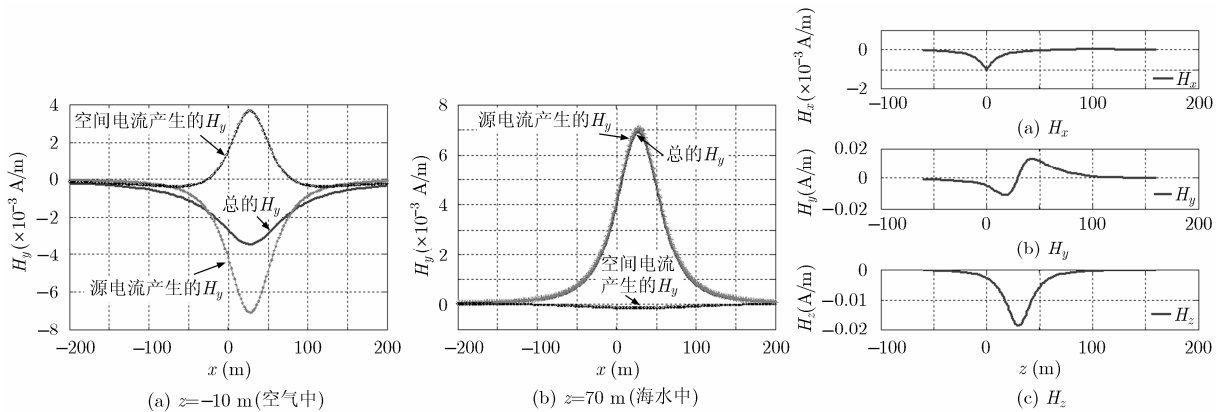


图7 空间电流的磁场分量

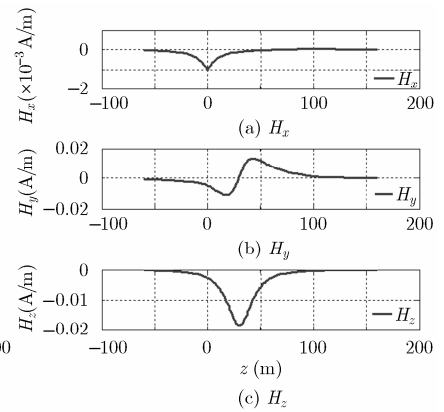


图8 磁场强度随深度的变化

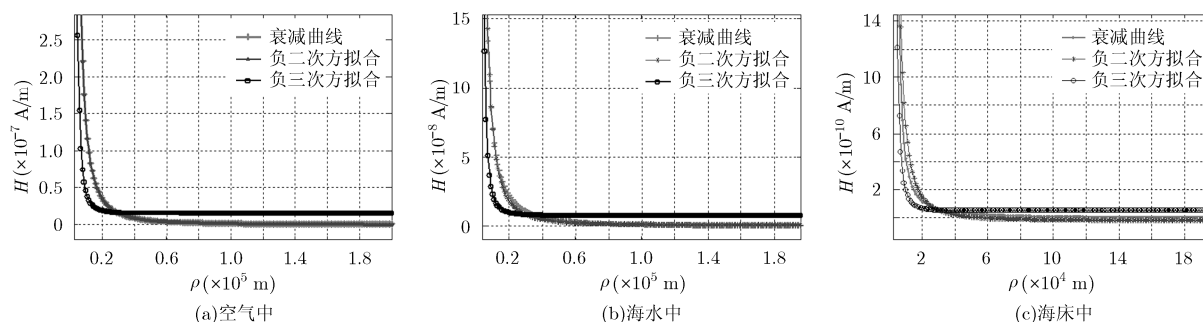


图 9 磁场的衰减曲线

表 1 磁场强度拟合公式及其精度

场域	拟合表述式 (A/m)	拟合精度		
		SSE(和方差)	R-square(拟合系数)	RMSE(标准误差)
空气中	$14.180\rho^{-2} - 7.153 \times 10^{-11}$	1.920×10^{-17}	1.0000	3.122×10^{-10}
	$3.003 \times 10^4 \rho^{-3} + 1.505 \times 10^{-8}$	6.909×10^{-13}	0.9572	5.922×10^{-8}
海水中	$6.955\rho^{-2} - 6.208 \times 10^{-10}$	4.224×10^{-15}	0.9989	4.630×10^{-9}
	$1.481 \times 10^4 \rho^{-3} + 7.947 \times 10^{-9}$	1.265×10^{-13}	0.9675	2.534×10^{-8}
海床中	$0.0676\rho^{-2} - 2.169 \times 10^{-11}$	2.153×10^{-18}	0.9942	1.045×10^{-10}
	$1.454 \times 10^2 \rho^{-3} + 4.810 \times 10^{-11}$	6.740×10^{-18}	0.9817	1.850×10^{-10}

注：和方差：Sum of Squared Error (SSE)；拟合系数：Coefficient of determination (R-square)；标准误差：Root mean squared error(RMSE)

次方衰减), 衰减要慢, 十分有利于消磁潜艇的远程探测。

5 结论

从潜艇腐蚀相关静态电场、磁场的产生机理出发, 采用边界元建模和电流线建模两种方法, 计算一艘潜艇模型的水下电位分布, 并通过对计算结果的对比, 表明采用水平电流线模拟潜艇水下静态 CRM 场是可行的; 进而以此模型为基础, 对潜艇全空间中的静态 CRM 场分布进行了仿真和估算, 获得浅海中潜艇腐蚀相关 CRM 场的典型特征。

本文研究表明: (1)采用外加电流阴极保护的潜艇, 在艇体表面绝缘涂敷层完好地条件下, 采用水平直流电流线可以较好地模拟其水下静态 CRM 的主体部分, 其电流正极位于 ICCP 阳极的对称中心, 负极位于螺旋桨中心。流经电流线的电流即为阴极保护总电流。同样的建模思路可用在涂层有破损、防腐电流不对称或者艇体上存在其他电解偶源的情况, 这将大大减少工程应用中相关场的计算或评估。(2)电流线可视为电偶极子首尾相接而成的, 因此其周围场的分布可通过对电偶极子场的积分来获得。(3)潜艇静态 CRM 在全空间中量值可观, 且分布特征十分明显, 可用于潜艇的探测、定位、打击等实

际应用。特别是空气中的 CRM 分布, 为水下潜艇的航空磁探提供了新的思路。(4)潜艇静态 CRM 的远场按距离的平方反比衰减, 相对于铁磁材料所产生的磁场而言, 衰减要慢。因此潜艇静态 CRM 更适合作为消磁潜艇的远程探测。(5)关于源电流垂向对称的两深度平面上, 静态 CRM 场的垂向分量相同, 但水平分量不同, 这种差别主要来源于媒质结构, 来源于空间电流贡献的磁场不同。

参考文献

- [1] 李定国, 陈聪, 刘华波, 等. 舰船水下静态电场深度换算的格林函数法[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(3): 1-6.
Li Ding-guo, Chen Cong, Liu Hua-bo, et al. Green function method for extrapolating of ship's underwater static electric field[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2012, 24(3): 1-6.
- [2] 谭浩, 贾亦卓, 龚沈光. 基于径向神经网络回归预测的船舶轴频电场实时检测方法[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(1): 167-172.
Tan Hao, Jia Yi-zhuo, and Gong Shen-guang. Real-time detection of shaft-rate electric field of ships based on RBF neural network regressive prediction[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(1): 167-172.
- [3] John J H. Exploitation of a Ship's Magnetic Field Signatures

- (Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics)[M]. New York: Morgan and Claypool Publishers, 2006: 23-35.
- [4] Rodrigo F J, María-Dolores B, and Sánchez A. Underwater threats detection based on electric field influences[C]. Undersea Defence Technology Conference Europe, Hamburg, Germany, 2010: 1-6.
- [5] Allan P J. Investigations of the magnetic fields from ships due corrosion and its countermeasures[D]. [Ph.D. dissertation], Glasgow: University of Glasgow, 2004.
- [6] 罗晓强, 陈聪, 陈勇. 舰船水下标量电位分布特征研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(11): 48-52.
- Luo Xiao-qiang, Chen Cong, and Chen Yong. Research on the underwater electric potential distribution of a ship[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 34(11): 48-52.
- [7] John J H. Reduction of a Ship's Magnetic Field Signatures (Synthesis Lectures on Computational Electromagnetics)[M]. New York: Morgan and Claypool Publishers, 2008: 12-15.
- [8] 贾亦卓, 姜润翔, 龚沈光. 基于小波尺度相关的船舶轴频电场检测方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 25-29.
- Jia Yi-zhuo, Jiang Run-xiang, and Gong Shen-guang. Detection method of ship shaft-rate electric field signal using scale correlation in wavelet domain[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(3): 25-29.
- [9] Iwata M, Huang Y, and Fujimoto Y. Application of BEM to design of the impressed current cathodic protection system for ship hull[J]. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1992(171): 377-380.
- [10] Adey R and Baynham J. Predicting corrosion related electrical and magnetic fields using BEM[C]. Undersea Defence Technology Conference Europe, London, UK, June, 2000: 473-475.
- [11] Keddie A J, Pocock M D, and DeGiorgi V G. Fast solution techniques for corrosion and signatures modeling[J]. *Simulation of Electro-chemical Processes II(WIT Transactions on Engineering Sciences)*, 2007, 54: 225-234.
- [12] Wimmer S A, Hogan E A, and DeGiorgi V G. Dipole modelling and sensor design[J]. *Simulation of Electro-chemical Processes II(WIT Transactions on Engineering Sciences)*, 2007, 54: 143-152.
- [13] Adey R and Baynham J M W. Predicting corrosion related signatures[J]. *Simulation of Electro-chemical Processes II(WIT Transactions on Engineering Sciences)*, 2007, 54: 213-223.
- [14] Demilier L, Durand C, Rannou C, *et al.* Corrosion related electromagnetic signatures measurements and modelling on a 1: 40th scaled model[J]. *Simulation of Electro-chemical Processes II(WIT Transactions on Engineering Sciences)*, 2007, 54: 368-370.
- [15] King R W P. The electromagnetic field of a horizontal electric dipole in the presence of a three-layered region[J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(12): 7987-7995.
- [16] 陈聪, 李定国, 蒋治国, 等. 二次等效法求三层媒质中静态电偶极子的场分布[J]. 物理学报, 2012, 61(24): 244101-1-244101-7.
- Chen Cong, Li Ding-guo, Jiang Zhi-guo, *et al.* Electric field of a static electric dipole in three-layer medium model using secondary equivalent method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(24): 244101-1-244101-7.
- 陈 聪: 女, 1971 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为军用目标特性与信息融合.
- 魏 勇: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为船舶水下腐蚀相关电磁场.
- 姚陆锋: 男, 1976 年生, 讲师, 研究方向为军用目标特性与信息融合.