

# 电场隐身型外加电流阴极保护系统电流优化控制技术

姜润翔<sup>1\*</sup>, 杨鹏程<sup>1</sup>, 陈新刚<sup>2</sup>, 孙兆龙<sup>1</sup>, 张伽伟<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军研究院, 北京 100161;

3. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033)

**摘要:**围绕外加电流阴极保护系统及其电流输出方式,为实现在船体防腐功能的基础上达到兼顾水下电场隐身的目的,采用“集成式”代替传统的“分区式”阳极电流控制方法,提出基于水下电场和参比电位测量信息的电流调整策略,主要思想是将相对于自然腐蚀状态的阴极保护电流的优化问题转化为相对于电场隐身时水下电场增量的最小化问题。通过仿真计算和缩比模型试验对所提出电流优化控制方法的有效性进行了检验,结果表明,以电位峰-峰值作为评价标准,并且全船电位满足防腐要求时,1.0B深度测量平面电位峰-峰值相对于船体处于自然腐蚀状态下能够降低20%以上,且该方法可快速计算得到外加电流阴极保护系统兼顾电场隐身和船体防腐所需的各个阳极的输出电流。

**关键词:**舰船;腐蚀相关静电场;外加电流阴极保护系统;电场隐身;辅助阳极;参比电极

**中图分类号:**U674.7+03.7 **文献标志码:**A

**文章编号:**1001-2486(2025)03-183-11



论文  
拓展

## Current optimization control technology of impressed current cathodic protection system with electric field stealth

JIANG Runxiang<sup>1\*</sup>, YANG Pengcheng<sup>1</sup>, CHEN Xingang<sup>2</sup>, SUN Zhaolong<sup>1</sup>, ZHANG Jiawei<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China; 3. College of Weaponry Engineering,

Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Based on the impressed current cathodic protection system and its current output mode, in order to achieve the purpose of taking into account the underwater electric field stealth on the basis of hull anticorrosion function, the “integrated” method was adopted to replace the traditional “zonal” anodic current control method, and the current adjustment strategy based on underwater electric field and reference potential measurement information was proposed. The main idea is to transform the cathodic protection current optimization problem with respect to natural corrosion state into the minimization problem of the electric field increment under water with respect to electric field stealth. The effectiveness of the proposed current optimization control method was verified through the simulation calculation and shrinkage ratio model test. The results show that when the peak-peak potential is taken as the evaluation criterion and the whole ship’s electrical potential meets the anticorrosion requirements, the peak-peak potential of the 1.0B depth measurement plane can be reduced by more than 20% compared with that in the natural corrosion state of the ship. Moreover, the proposed method can quickly calculate the output current of each anode required by the impressed current cathodic protection system for both electric field stealth and hull anticorrosion.

**Keywords:** ship; corrosion related electrostatic field; impressed current cathodic protection system; electric field stealth; auxiliary anode; reference electrode

腐蚀相关静电场是舰船一种重要的水下物理场目标特征,能够成为水下预警系统的探测源和水中兵器的攻击源<sup>[1]</sup>。为了降低舰船由于其电

场特征明显而暴露的概率,各国在舰船的设计阶段就开始考虑电场防护问题<sup>[2-4]</sup>,并对在役舰船的水下电场实行常态化监测<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2023-01-30

基金项目:基础加强计划技术领域基金资助项目(2019-JCJQ-JJ-040)

\*第一作者:姜润翔(1982—),男,河南开封人,助理研究员,博士,硕士生导师,E-mail:jiang\_runxiang@163.com

引用格式:姜润翔,杨鹏程,陈新刚,等. 电场隐身型外加电流阴极保护系统电流优化控制技术[J]. 国防科技大学学报, 2025, 47(3): 183-193.

Citation:JIANG R X, YANG P C, CHEN X G, et al. Current optimization control technology of impressed current cathodic protection system with electric field stealth[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2025, 47(3): 183-193.

为实现电场隐身的需求,除采用电隔离、屏蔽电场源、降低异种金属电极电位差等结构工艺措施的被动技术外,还可采用电流补偿、阴极保护优化等主动技术对腐蚀相关静态电场进行抑制<sup>[6-8]</sup>。

其中,电流补偿技术主要致力于解决电场隐身问题,但一般不考虑船体防腐;而基于 CP (corrosion protection) 软件对阴极保护系统进行优化设计尽管能够实现防腐条件下电场隐身的目标,但该方法仅对新设计的舰船具有实际意义,其基本思想是通过调整辅助阳极和参比电极的位置、数量进行优化,达到电场抑制和船体防腐目的,对于已交付使用的舰船却难以发挥有效作用。因为,船体表面的涂层状态会随着年龄的增长而发生改变,对应理论上即舰船水下电场求解模型的边界条件会出现变化。所以,若外加电流阴极保护(impressed current cathodic protection, ICCP)系统的辅助阳极继续输出在船体工况完好情况下所计算出的电流值,则无法达到抑制舰船静电场和保护船体的效果,甚至可能出现腐蚀加剧和电场特征增强的情况。

为了使 ICCP 系统的输出电流能够随着船体状态的变化进行调整,实现不同状态条件下均能达到较好的防腐与隐身效果,本文提出改变现有分区式的阴极保护控制方式,而采用水下电场、船体表面电位等测量信息作为输入量使 ICCP 系统的输出电流进行自动调整,或定期对各辅助阳极的电流分配方案进行修订,让 ICCP 系统实现防腐功能的同时能够发挥抑制静电场的作用。

## 1 ICCP 系统的控制方案

### 1.1 分区式控制

传统 ICCP 系统采用分区保护的控 制方式,其结构如图 1 所示。其中,各恒电位仪根据参比电极反馈的电位信息对辅助阳极的输出电流进行调整,使参比电极电位始终处于保护区间内。不过,其局限在于反馈信息源为测量船体电位的参

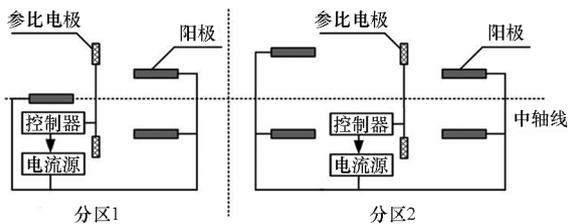


图 1 分区式外加电流阴极保护系统  
Fig. 1 Partitioned impressed current cathodic protection system

比电极,控制目标仅设定于将船体电位调整至保护区间内,而没有考虑电场隐身的需求。

### 1.2 集成式控制

为弥补分区式控制在电场隐身方面的缺陷,使 ICCP 系统实现防腐与隐身的双重功能,采用如图 2 所示的集成式控制方式<sup>[9]</sup>。该方式不预先分区,而是以多个参比电极电位作为反馈参数,通过数字计算单元以电场隐身的峰-峰值和船体防腐的电位值作为目标函数对全船的辅助阳极输出电流进行实时调整。

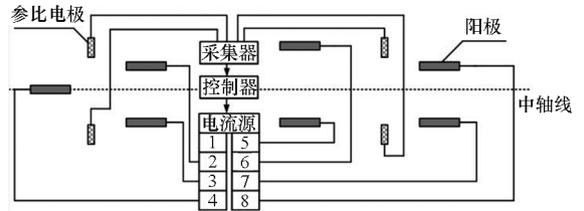


图 2 集成式外加电流阴极保护系统  
Fig. 2 Integrated impressed current cathodic protection system

集成式控制的核心在于各辅助阳极输出电流的控制策略:第一种方法是根据船体表面可测物理量,如参比电位、轴电流、阳极输出电流等,实时预报水下电场值,结合船体保护电位的设定动态调整各阳极输出电流;第二种方法是在水下电位、船体表面电位测量信息的基础上,学习优化各个阳极的函数关系  $f$ ,在总保护电流(其值根据设定的船体保护电位值确定)条件下,根据优化后的函数关系  $f$  自动调整阳极输出电流<sup>[10-11]</sup>。

实际上,受船体结构的影响,难以在船体表面布放大量的传感器实现对水下电场值的实时预测,因此,上述第二种方法更具实际意义,其关键在于,在特定状态(航速、涂层)及海洋环境(温度、盐度、含氧量)下学习得到的优化的函数关系  $f$  是否可推广至其他状态。研究表明,影响  $f$  的因素主要为船体涂层状态,鉴于涂层破损率大约为 2%/a,涂层状态的变化属于缓慢过程,因此可采用定期学习的方法更新函数  $f$ <sup>[6]</sup>。

## 2 电流优化控制方法及流程

### 2.1 电流控制方法

电流控制的基本思想是,建立辅助阳极输出电流与水下电场和船体表面电位的函数关系,在此基础上,依据控制相同输出电流引起水下电场增量较小的辅助阳极输出更多保护电流的原则分配各辅助阳极的输出电流。在实际过

程中通过学习的方式优化函数 $f$ 时,受航次数量的影响,难以像CP软件优化算法一样采取较小的电流变化步长进行计算,所以,有效的优化算

法必须以较少的测量数据为输入,更快速地计算得到最佳的优化电流值。电流控制策略示意图如图3所示。

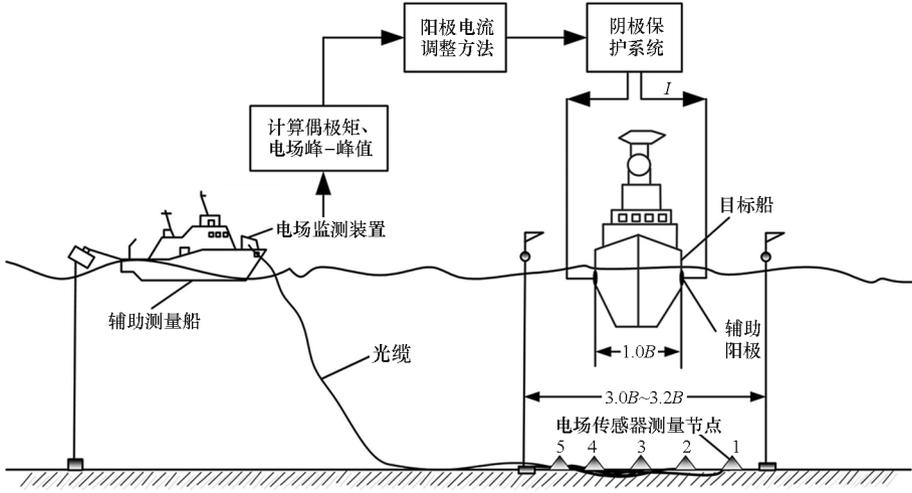


图3 阳极输出电流调整控制策略确定方法

Fig. 3 Method for determining control strategy of output current on anode

由文献[11]可知,兼顾防腐条件下的静电场隐身问题可表示为式(1)的最优化问题。

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m |E_i|^2, i = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -800 \text{ mV} \leq u_j \leq -1000 \text{ mV}, j = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq I_k \leq I_{\max}, k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_i$ 为 $1.0B$ ( $B$ 表示船宽)深度平面第 $i$ 个测点的电场值, $u_j$ 为第 $j$ 个参比电极的电位值, $I_{\max}$ 为阳极允许输出的最大电流值, $m$ 为水下电场的测点个数, $n$ 为船体表面参比电极个数, $N$ 为辅助阳极的个数。

若设 $1.0B$ 深度平面电位值的最大值 $U_{\max}$ 、最小值 $U_{\min}$ 之间的电阻为 $R$ ,将平面 $S$ 离散化,每一个微元的面积为 $\Delta S$ ,海水电导率为 $\sigma$ ,则 $\frac{(U_{\max} - U_{\min})^2}{R}$ 最小与 $I^2 R = (\sum_{i=1}^m |E_i| \Delta S \sigma)^2 R$ 最小是等价的,即式(1)的求解可转化为式(2)的计算问题。

$$f = \min(U_{\max} - U_{\min})$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -800 \text{ mV} \leq u_j \leq -1000 \text{ mV}, j = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq I_k \leq I_{\max}, k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (2)$$

需要说明的是,一方面,若以自然腐蚀状态为初始状态求解式(2),需要依次测量每个阳极电流与水下电场和参比电位的信息值<sup>[12]</sup>;另一方面,由于船体在施加防腐电流的过程中,逐渐由阳极向阴极过渡,若利用阳极极化率代替阴极极化

率将引起计算误差。

鉴于采用电流补偿技术已使水下电位峰-峰值减小,且船体电位处于自平衡电位附近<sup>[13]</sup>,若记 $1.0B$ 深度平面测量点 $i$ 对应的电位值为 $U_{0i}$ ,船体表面测量点 $j$ 对应的参比电位值为 $u_{0j}$ ,补偿阳极输出电流为 $I_0$ ,则式(2)的求解可转化为相对于 $U_{0i}$ 增量的最小化问题,即

$$f = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m |U_i - U_{0i}|^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m |\Delta U_i|^2$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -800 \text{ mV} \leq u_{0j} + \Delta u_j \leq -1000 \text{ mV}, j = 1, 2, \dots, n \\ 0 \leq I_k \leq I_{\max}, k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

$U_i$ 和 $u_j$ 值可表示为

$$\begin{cases} U_i = \sum_{k=1}^N \alpha_{ki} I_k + U_{0i}, i = 1, 2, \dots, m \\ u_j = \sum_{k=1}^N \beta_{kj} I_k + u_{0j}, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\alpha_{ki}$ 和 $\beta_{kj}$ 分别为第 $k$ 个阳极与第 $i$ 个测点、第 $j$ 个参比电极之间的函数关系。 $\alpha_{ki}$ 和 $\beta_{kj}$ 可通过监测阳极 $k$ 工作前、后的水下电位值 $U_{0i}$ 、 $U_{ki}$ 和参比值 $u_{0j}$ 、 $u_{kj}$ 拟合计算得到,本文采用二次项拟合的方法建立阳极 $k$ 输出不同电流 $I_k$ 与水下电位和参比电位的函数关系,即 $\alpha_{ki}$ 和 $\beta_{kj}$ 可表示为

$$\begin{cases} \alpha_{ki} = P_{ki} I_k^2 + Q_{ki} I_k + R_{ki} \\ \beta_{kj} = p_{kj} I_k^2 + q_{kj} I_k + r_{kj} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $P_{ki}$ 、 $Q_{ki}$ 、 $R_{ki}$ 为 $\alpha_{ki}$ 的拟合系数, $p_{kj}$ 、 $q_{kj}$ 、 $r_{kj}$ 为 $\beta_{kj}$ 的拟合系数。

综上所述,防腐条件下的电场隐身问题可转化为方程式(3)的优化求解问题,其最优解可采用粒子滤波、模拟退火等优化算法求解。本文采用粒子滤波优化算法寻找最优解。由于材料极化曲线的非线性特点,因此根据式(4)计算出各阳极的输出电流与实际阴极保护所需求的电流量会存在偏差,为此可计算出各阳极电流的输出权重(比例系数)为

$$\gamma_k = \frac{I_k}{I_1 + I_2 + \dots + I_N} = \frac{I_k}{\sum_{k=1}^N I_k}, k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

在电流补偿隐身的基础上,阳极输出的总电流  $\sum_{k=1}^N I_k$  可根据船体参比电极电位值(如平均值、中值等)自动调整,并按照式(5)分配给各个辅助阳极,当补偿阳极与编号为  $k$  的辅助阳极共用时,则辅助阳极  $k$  的总输出电流为  $I_k = I_{\Sigma} \gamma_k$  与  $I_b$  之和( $I_{\Sigma}$  为总输出电流值,  $I_b$  为补偿阳极输出的补偿电流值)。

## 2.2 优化及控制流程

通常情况下,在 1.0B 船宽深度平面,正横距为 0 m 时测线的电位峰-峰值与平面的峰-峰值一致,为此,可重点测量 1.0 倍船宽深度平面正横距为 0 m 时的水下电位值。在 2.1 节的基础上,确定集成式外加阴极保护电流优化和控制过程如下:

1) 首先基于电流补偿的原理实现不考虑防腐时的静电场隐身,在补偿阳极输出电流为  $I_0$  时,测量 1.0 倍船宽深度平面正横距 0 m 对应测线的电位值  $U_0 = [U_{01}, U_{02}, \dots, U_{0i}, \dots, U_{0m}]$  和船体表面参比电极电位  $u_0 = [u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0j}, \dots, u_{0n}]$ ;

2) 在补偿阳极输出电流为  $I_0$  时,使辅助阳极  $k$  输出电流  $I_k$ , 测量  $I_0$  与  $I_k$  共同作用时的电场值  $U_k = [U_{k1}, U_{k2}, \dots, U_{ki}, \dots, U_{km}]$  和参比电位的电压值  $u_k = [u_{k1}, u_{k2}, \dots, u_{kj}, \dots, u_{kn}]$ , 根据式(5)建立阳极  $k$  与第  $i$  个测点、第  $j$  个参比电极之间的函数关系  $\alpha_{ki}$  和  $\beta_{kj}$ ;

3) 根据式(4)建立水下电位和参比电位的预测计算模型,并将其预测结果代入式(3),利用粒子滤波优化算法求解式(3)的最优解,计算用于船体保护的各辅助阳极输出电流值,并按照式(6)计算不同阴极保护电流的比值;

4) 当舰船航行海域发生变化时,系统根据参比电位设定值实时调整阴极保护的总电流  $I_{\Sigma}$ , 并根据事先学习设定的比例系数  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$  确定各阳极的输出电流  $I_{\Sigma} \gamma_1, I_{\Sigma} \gamma_2, \dots, I_{\Sigma} \gamma_N$ 。

5) 当船体涂层状态发生改变时,应重新按照步骤 1~4 确定新的比例系数。

## 3 试验验证

为了验证所提方法的有效性,分别利用同一艘舰船的仿真计算模型和 1:50 缩比模型进行试验验证,其中,舰船(如图 4 所示)长度  $L = 136$  m, 船宽  $B = 17$  m, 吃水深度  $T = 4.57$  m。船体材料为涂层钢,螺旋桨为铜合金。

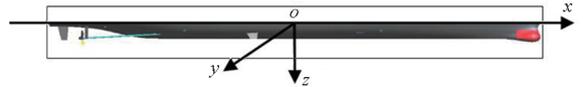


图 4 艇体结构

Fig. 4 Hull structure

为了实现防腐条件下的隐身,舰船 A 首部至尾部安装有 4 对钛基氧化物阳极(编号依次为 1、2、3、4,对应的电流分别为  $I_1, I_2, I_3, I_4$ )。以舰船中轴线为  $ox$  轴、横向为  $oy$  轴、垂向为  $oz$  轴,建立坐标系  $o-xyz$ , 4 对阳极坐标如表 1 所示。其中,阳极 4 兼顾补偿阳极与辅助阳极共同使用。为了全面考察船体的保护状态,在龙骨表面沿舰船纵向方向依次布放了 21 个 Ag/AgCl 参比电极,其编号依次为 1、2、...、21, 相邻参比电极纵向距离为 6.8 m。

表 1 辅助阳极的坐标

Tab. 1 Installation position of auxiliary anode

阳极编号	$x/m$	$y/m$	$z/m$
1	23.7	$\pm 5.289$	2.141
2	-30.5	$\pm 6.292$	2.145
3	-52.5	$\pm 4.027$	3.159
4	-59.5	$\pm 4.029$	3.504

## 3.1 仿真计算

由于边界元法已被广泛应用于 ICCP 系统保护和舰船电场隐身领域,并通过缩比模型验证了其性能<sup>[14-15]</sup>,因此本文首先利用边界元法验证算法的有效性。阳极 1~4 输出不同电流时,深度 17 m、正横距为 0 m 时的水下电位峰-峰值( $U_{pp}$ )的变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在  $I_0 = I_4 = 20$  A 时,水下电位峰-峰值达到最小值,即利用阳极 4 输出 20 A 降低电场的方法称为电流补偿技术,但此时的船体平均电位为 -551.01 mV,未实现有效防腐。

阳极 1、2、3(在  $I_4 = 20$  A 条件下)及阳极 4 输出不同电流时对应的水下电位(水深 17 m、正横距为 0 m)和船体电位分别如图 6 和图 7 所示。

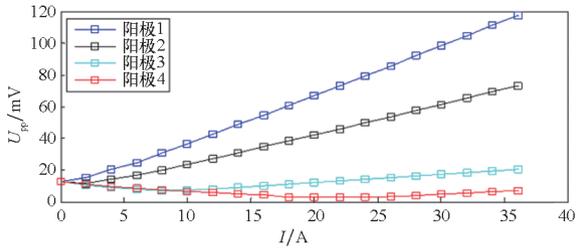
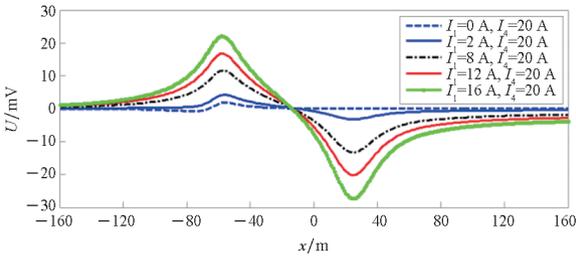
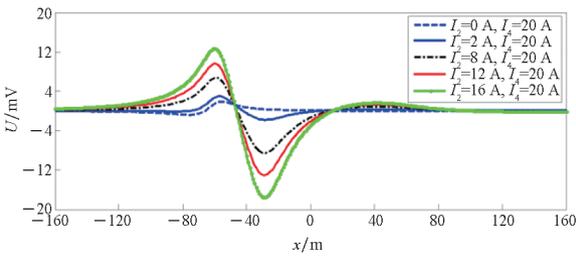


图5 不同阳极输出电流与水下电位峰-峰值的关系曲线(仿真)

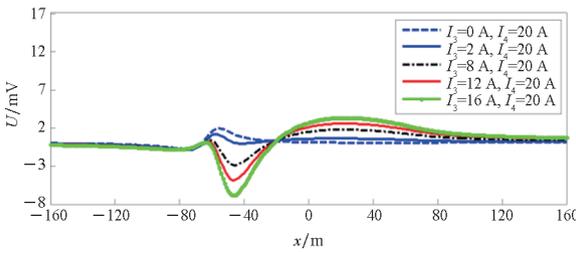
Fig.5 Relationship curve between different anode output current and peak-peak value of underwater potential(simulation)



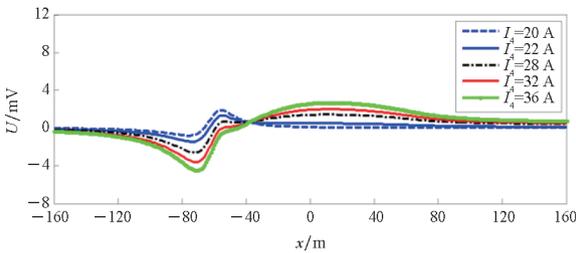
(a) 阳极1  
(a) Anode 1



(b) 阳极2  
(b) Anode 2

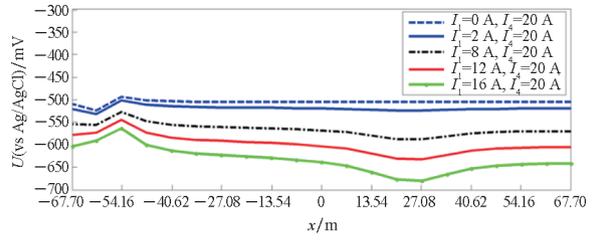


(c) 阳极3  
(c) Anode 3

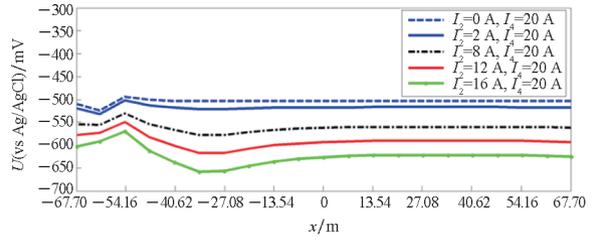


(d) 阳极4  
(d) Anode 4

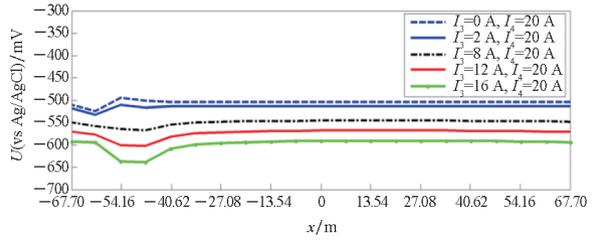
图6 阳极输出电流与水下电场的关系曲线(仿真)  
Fig.6 Relation curve between anode output current and underwater electric field (simulation)



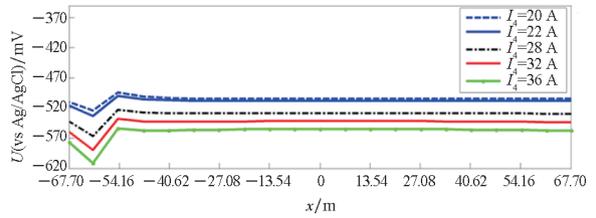
(a) 阳极1  
(a) Anode 1



(b) 阳极2  
(b) Anode 2



(c) 阳极3  
(c) Anode 3



(d) 阳极4  
(d) Anode 4

图7 阳极输出电流与船体电位的关系曲线(仿真)

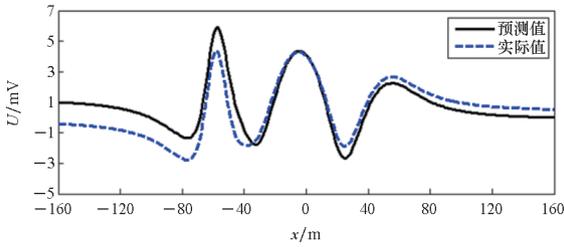
Fig.7 Relationship curve between anode output current and hull potential(simulation)

在图6和图7的基础上,根据式(5)计算得到1.0倍船宽深度平面、正横距为0 m测线上321个场点与不同辅助阳极之间的拟合系数和龙骨21个参比电位与不同辅助阳极之间的拟合系数,代入式(3)并采用粒子滤波算法,在 $I_0 = 20$  A基础上,优化得到的电流增量值为 $I_1 = 6.4928$  A,  $I_2 = 4.4018$  A,  $I_3 = 10.6806$  A,  $I_4 = 53.1275$  A,总的输出电流为74.7027 A。鉴于阳极4还输出20 A的补偿电流,从而得知阳极4的总输出电流为73.1275 A,全船总的保护电流为94.7027 A。将上述优化得到的电流值代入边

界元软件,计算得到水下电位和参比电位如图 8 所示。由图 8 可知,水下电位的预测值与实际值、参比电位的预测值与实际值具有较好的相似性。

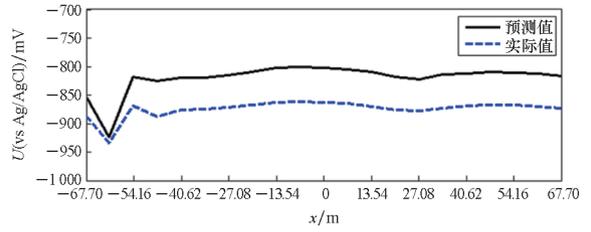
### 3.2 缩比模型试验

为进一步验证方法的有效性,在仿真计算的基础上,制作 1 : 50 缩比模型,阳极与参比电极布



(a) 水下电位值

(a) Underwater potential value



(b) 参比电位值

(b) Reference potential values

图 8 水下电位值与参比电位值

Fig. 8 Electric field value and potential value of hull keel

置如图 9 所示,与仿真计算不同,船体龙骨下参比电极的数量为 10 个。为便于实际控制,在阳极 4 附近增加了阳极 5,即阳极 4 用作补偿阳极,阳极 5 用作辅助阳极,两者的纵向距离为 1 cm。

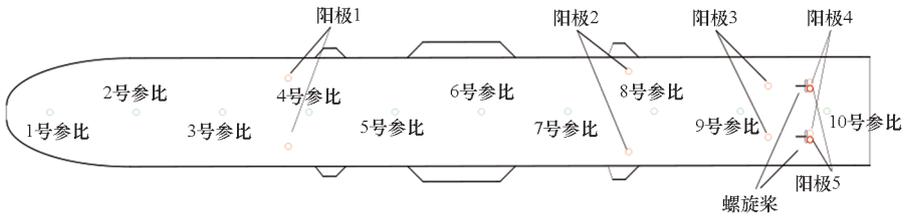


图 9 阳极与参比电极布置图

Fig. 9 Layout drawing of the anode and the reference electrode

#### 3.2.1 试验一

利用电机拖动装置拖动船模以 5.5 cm/s 速度通过由 Ag/AgCl 电极组成的水下电场传感器阵列(电场阵列测量水深为 34 cm),船舶、船艏通过的时间分别为 12 s 和 61.5 s,不同阳极输出电流与正横距离为 0 cm 的水下电位峰 - 峰值的关系曲线如图 10 所示。由图 10 可知,在  $I_4 = 8$  mA 时,电位峰 - 峰值达到最小值。

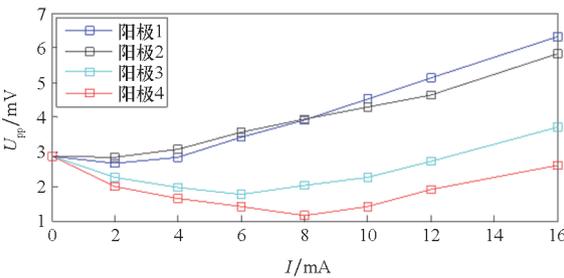
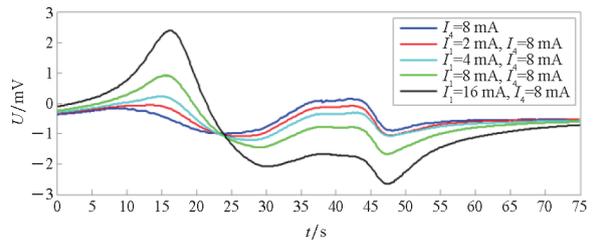


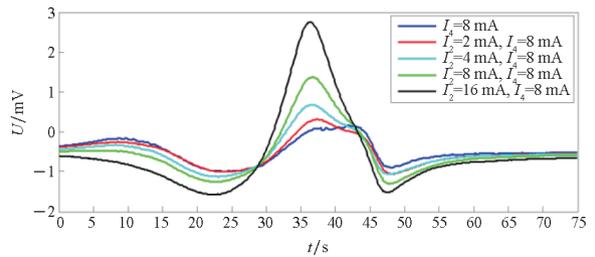
图 10 不同阳极输出电流与水下电位峰 - 峰值关系曲线(试验一)

Fig. 10 Relationship curve between different anode output current and peak-peak value of underwater potential (experiment 1)

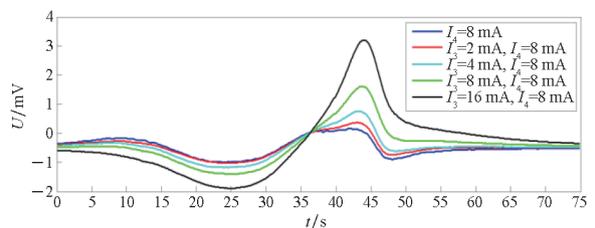
在  $I_4 = 8$  mA 条件下,阳极 1、2、3、5 输出不同电流时的水下电位和船体电位分别如图 11 和图 12 所示。



(a) 阳极 1  
(a) Anode 1



(b) 阳极 2  
(b) Anode 2



(c) 阳极 3  
(c) Anode 3

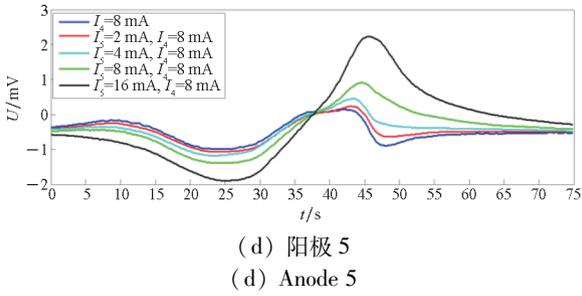


图 11 阳极输出电流与水下电位的关系曲线(试验一)

Fig. 11 Relation curve between the anode output current and the underwater electric field (experiment 1)

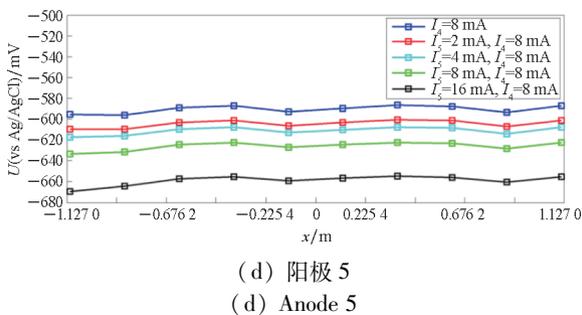
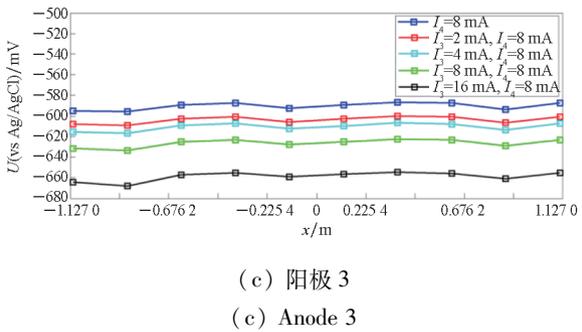
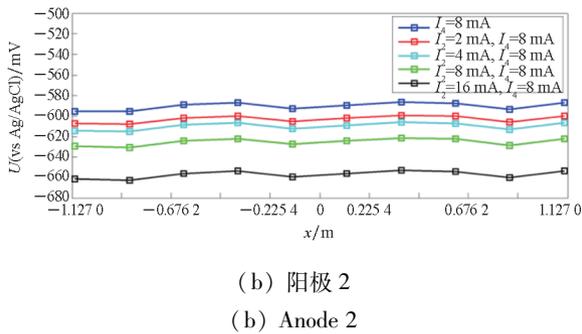
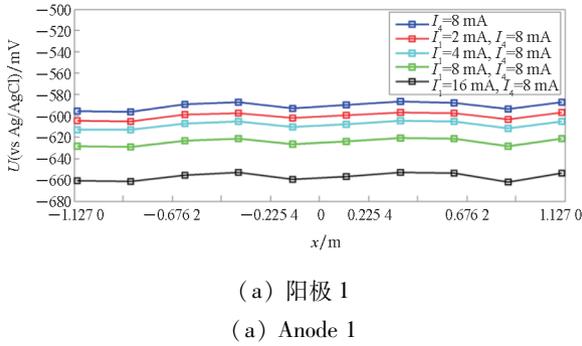


图 12 阳极输出电流与船体电位的关系曲线(试验一)

Fig. 12 Relation curve between the anode output current and the hull potential (experiment 1)

参照 3.1 节,在测量数据的基础上,对阳极 1、2、3、5 的输出电流关系进行优化,得到阳极 1、2、3、5 的占比为 0.293 5、0.296 4、0、0.410 1。在保持  $I_4 = 8 \text{ mA}$  不变的条件下,利用 10 个参比电极的平均电位值调整总的保护电流,并根据占比控制阳极 1、2、3、5 的输出电流值,阳极输出总电流如图 13 所示,图 14(a)为对应的水下电位值,图 14(b)为龙骨参比电位值。

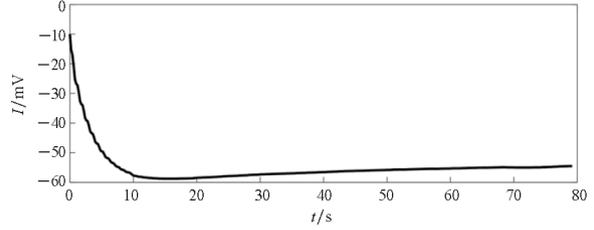


图 13 阳极输出总电流

Fig. 13 Total current output from the anode

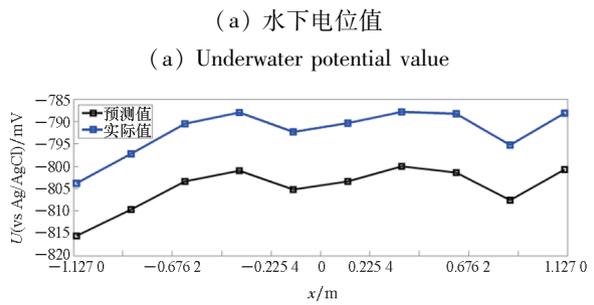
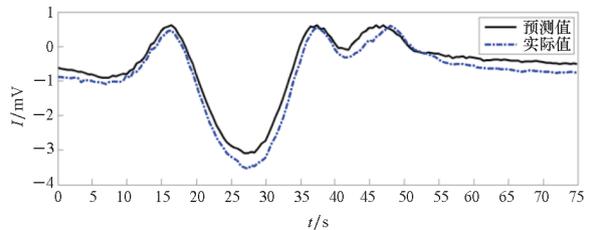
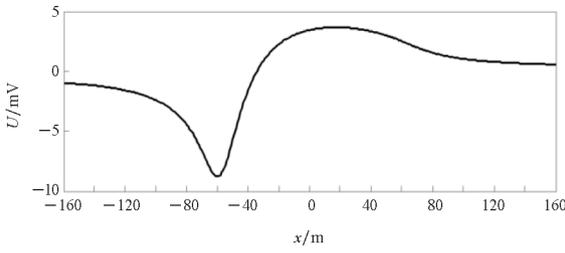


图 14 优化后的水下电位值及龙骨电位

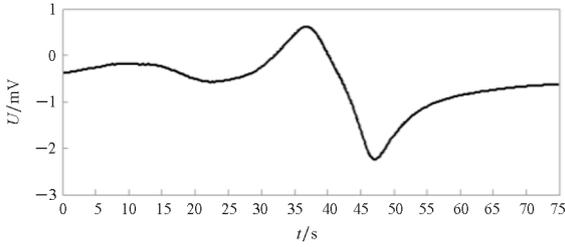
Fig. 14 Optimized underwater potential value and keel potential

由上述结果可知,缩比模型阳极 3 的电流占比为 0,与仿真计算结果出现了较大的偏离,这是由于缩比模型试验的阳极位置是按照仿真计算布置的,而缩比模型在制作过程中存在表面涂层、材料的不均匀性。对比两者自然腐蚀状态下电场值(如图 15 所示)可发现,缩比模型在船体舭前部存在局部阴极(肋骨焊缝涂层破损),阴极的位置在图 15(b)中 24 s 附近,对应于图 15(a)中的 35 m 的位置,而仿真计算模型在此处为阳极。因此,基于此种条件下优化得到的阳极 3 未输出电流。



(a) 仿真计算,方向从艏到艉

(a) Simulation calculations, the direction from stern to bow



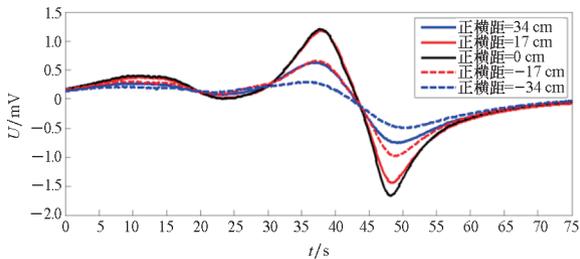
(b) 缩比模型,方向从艏到艉

(b) Scale reduction model, the direction from bow to stern

图 15 自然腐蚀状态下的电场值

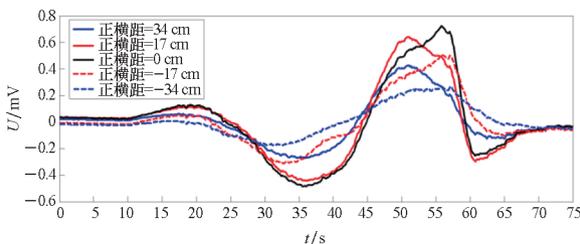
Fig. 15 Electric field value in the natural corrosion state

上述试验的过程中发现:①螺旋桨钙镁沉积层的产生会影响腐蚀和防腐电流的大小,这与实船试验的结论是相符的<sup>[16]</sup>;②缩比模型腐蚀和防腐电场并不是严格按照中轴线对称(自然腐蚀、电流补偿、集成式阴极保护控制三种状态下去均值处理后的水下电位信号如图 16 所示)。



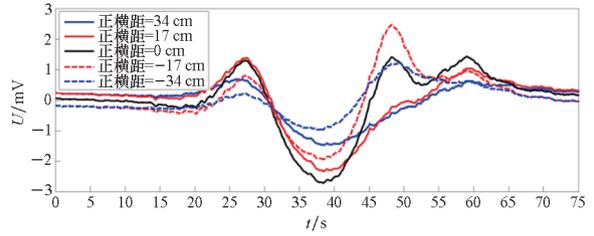
(a) 自然腐蚀

(a) Natural corrosion



(b) 电流补偿

(b) Current compensation



(c) 集成式阴极保护

(c) Integrated cathode protection

图 16 三种状态下的电位信号

Fig. 16 Potential signal in the three states

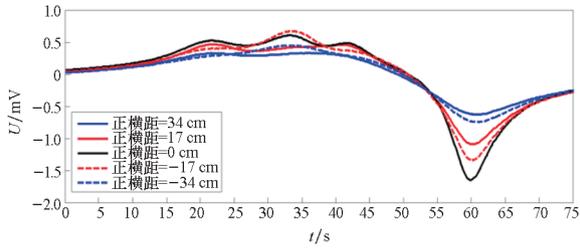
### 3.2.2 试验二

为进一步验证涂层状态改变时,所提方法是否具有适应性,在试验一的基础上进行如下改进:一是将阳极 3 的位置移动至缩比模型中部附近(在舰船坐标系中,  $x = 0$  cm);二是在螺旋桨附近增加气泡发生装置,减小螺旋桨表面钙镁沉积层的作用;三是改变优化及控制过程中的目标函数,目标函数由 1.0B 深度平面正横距为 0 m 测线的电位峰-峰值最小,变化为 1.0 倍深度平面正横距为 17 cm、0 cm、-17 cm 三条测线的电位峰-峰值最小(定义为平面集成式阴极保护)。将缩比船模静态放置 18 d,重新按照试验一的过程进行试验,优化及控制过程中的目标函数为  $f$ 。此次试验,还对算法对船模不同速度条件下的适应性进行检验。

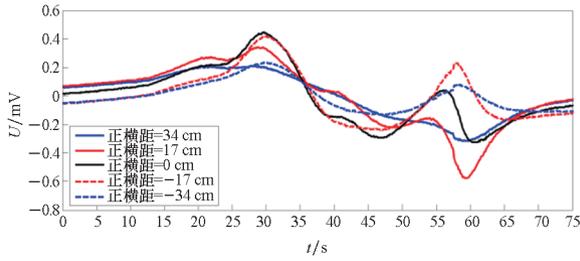
对阳极 4 输出不同电流时的水下电场信号进行监测,确定补偿电流  $I_4 = 7$  mA。保持  $I_4 = 7$  mA 恒流输出时,依次测量阳极 1、2、3、5 电流输出 2 mA、4 mA、8 mA 和 16 mA 的水下电位和参比电位值;将测量数据代入优化算法,优化计算各阳极在防腐电流中的占比,  $f$  目标函数条件下阳极 1、2、3、5 的占比分别为 0.224 2、0.258 1、0.243 7、0.273 9,并将占比代入至电化学保护系统,测量集成式阴极保护时的水下电位和参比电位值。

自然腐蚀状态下,  $I_4 = 7$  mA (电流补偿) 时,集成式阴极保护控制不同状态下的水下电位测量结果如图 17 所示,龙骨电位测量结果如图 18 所示。由图 17 和图 18 可知,所提方法实现了在舰船防腐条件下的电场抑制,对比自然腐蚀状态,水下电位峰-峰值由 2.32 mV 降低至 1.76 mV,抑制比为 24.14%。

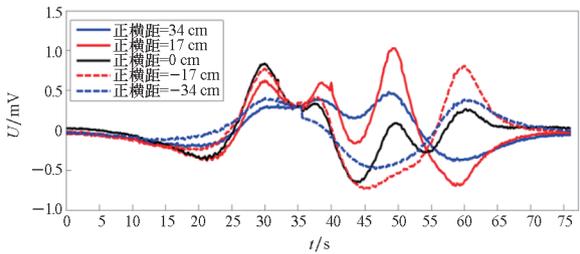
保持  $I_4 = 7$  mA 和阳极 1、2、3、5 电流占比关系不变,改变船模拖动速度,速度分别为 10 cm/s、15 cm/s、20 cm/s、25 cm/s,船模航行过程中总的阴极保护电流分别为 31.64 mA、31.45 mA、



(a) 自然腐蚀  
(a) Natural corrosion



(b) 电流补偿  
(b) Current compensation



(c) 平面集成式阴极保护  
(c) Planar integrated cathodic protection

图 17 不同状态下的电位信号(水深 34 cm)  
Fig. 17 Potential signal in different states,  
with a water depth of 34 cm

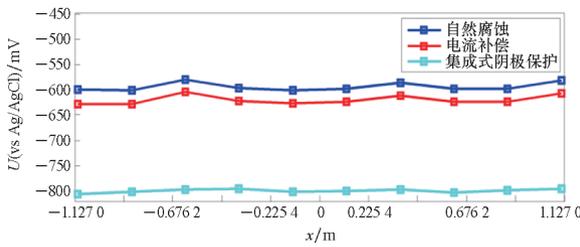
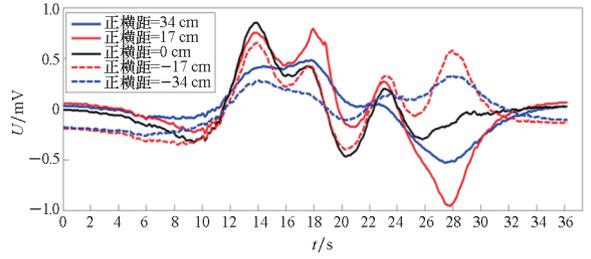
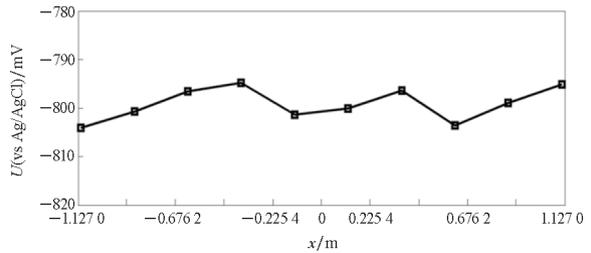


图 18 不同状态下的龙骨电位对比  
Fig. 18 Comparison of the keel potential in  
the different states

31.48 mA、31.39 mA,对应的水下电场信号和龙骨电位如图 19 ~ 22 所示,其电位峰 - 峰值为 1.807 5 mV、2.032 2 mV、2.08 mV、1.987 4 mV,龙骨电位平均值为 -799.18 mV、-798.99 mV、-798.95 mV、-799.03 mV。由图 19 ~ 22 可知,所提出的阴极保护电流调整方法,对不同航行速度的船模均具有较好的适应性。

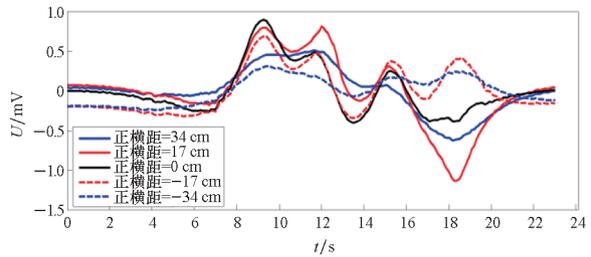


(a) 水下电位信号  
(a) Underwater potential signal

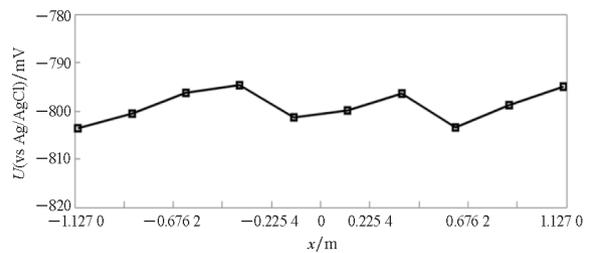


(b) 龙骨电位信号  
(b) Keel potential signal

图 19 航速 10 cm/s 时的水下电位及龙骨电位  
Fig. 19 Underwater potential and  
keel potential at 10 cm/s



(a) 水下电位信号  
(a) Underwater potential signal

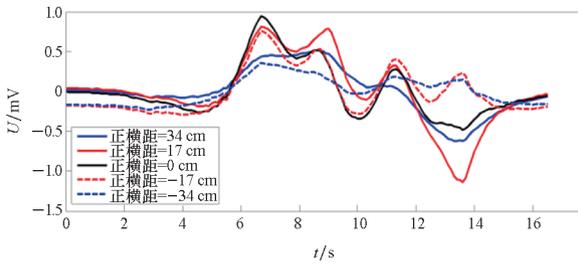


(b) 龙骨电位信号  
(b) Keel potential signal

图 20 航速 15 cm/s 时的水下电位及龙骨电位  
Fig. 20 Underwater potential and  
keel potential at 15 cm/s

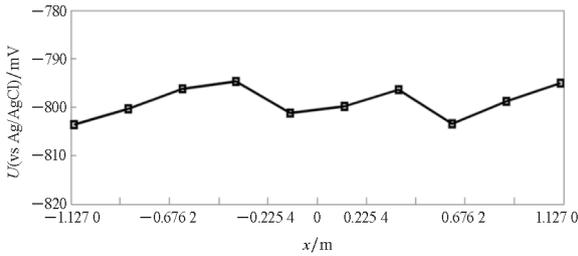
#### 4 结论

为解决防腐条件下的电场隐身问题,本文首先在仿真数据的基础上,分析传统分区式外加电流阴极保护与集成式外加电流阴极保护的差异,



(a) 水下电位信号

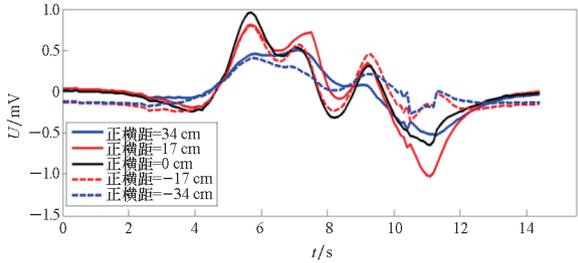
(a) Underwater potential signal



(b) 龙骨电位信号

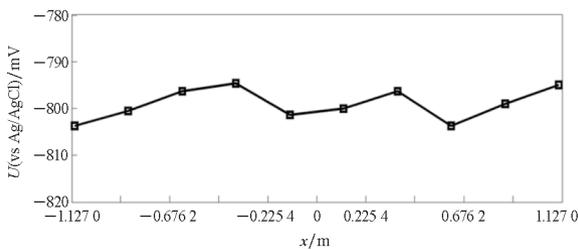
(b) Keel potential signal

图 21 航速 20 cm/s 时的水下电位及龙骨电位  
Fig. 21 Underwater potential and keel potential at 20 cm/s



(a) 水下电位信号

(a) Underwater potential signal



(b) 龙骨电位信号

(b) Keel potential signal

图 22 航速 25 cm/s 时的水下电位及龙骨电位  
Fig. 22 Underwater potential and keel potential at 25 cm/s

验证了集成式外加电流阴极保护在实现电场隐身方面的优势;其次提出了建立在水下电场和参比电位测量信息基础上的电流调整策略和计算方法;最后通过仿真计算和缩比模型试验验证了方法的有效性,试验结果证明了该方法计算量小、优

化效果好的特点,实现了防腐与隐身的双重目的。仿真计算与缩比模型试验的差异说明,后续在设计外加电流阴极保护系统时,为防止局部破损导致部分阳极优化失效,可通过增加阳极数量予以解决。下一步的研究重点是船体涂层破损和海洋环境的变化对舰船电场隐身控制策略的影响。

### 参考文献 (References)

[1] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京: 兵器工业出版社, 2007: 237-242.  
LIN C S, GONG S G. Ship physical field [M]. 2nd ed. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007: 237-242. (in Chinese)

[2] 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 J F, YU P, ZHANG J W, 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)

[3] 何金平. 船舶外加电流阴极保护系统设计[J]. 船电技术, 2020, 40(8): 14-16.  
HE J P. Design of impressed current cathodic protection system[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2020, 40(8): 14-16. (in Chinese)

[4] BORTELS L, VAN DEN BOSSCHE B, PARLONGUE J, et al. Protecting floating offshore platforms with ICCP systems[C]// Proceedings of Corrosion-National Association of Corrosion Engineers Conference and Exposition, 2010.

[5] DAYA Z A. The international RIMPASSE ship signature management trial: a close-out report of DRDC engagement in RIMPASSE [R]. Canada: Defence Research and Development Canada, 2018.

[6] 姜润翔, 陈新刚, 张伽伟. 舰船电场及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020: 240-270.  
JIANG R X, CHEN X G, ZHANG J W. Ship electric field and its application [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2020: 240-270. (in Chinese)

[7] 谭浩, 张伽伟. 船舶静电场抑制效果的影响因素研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(4): 50-55.  
TAN H, ZHANG J W. Study on influencing factors of static electric field suppression effect of a ship [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(4): 50-55. (in Chinese)

[8] 郭昕, 郑攀峰, 耿攀, 等. 外加电流补偿方法静电场抑制效果研究[J]. 船电技术, 2021, 41(4): 43-45.  
GUO X, ZHENG P F, GENG P, et al. Study on the effect of static electric field reduction with impressed current compensation[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2021, 41(4): 43-45. (in Chinese)

[9] DEGIORGI V G, HOGAN E, LUCAS K E, et al. Shipboard impressed current cathodic protection system (ICCP) analysis[J]. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 2005, 7: 13-44.

[10] 何芳, 王向军, 王晓蓓. 外加补偿电流与潜艇腐蚀静电场的函数关系研究[J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44(1): 88-92.

- HE F, WANG X J, WANG X B. The functional relationship of the compensation current and submarine corrosion electrostatic field [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2022, 44(1): 88–92. (in Chinese)
- [11] Aish Technologies. Low signature cathodic protection [EB/OL]. [2023-01-01]. <https://www.aishtechnologies.com/wp-content/uploads/2021/03/Aish-ICCP-White-paper.pdf>.
- [12] PEI Y H. Joint optimisation of corrosion protection and electric signature of a naval platform [M]//ADEY R A. *Modelling of Cathodic Protection Systems*. Massachusetts: WIT Press, 2005: 83–124.
- [13] 喻鹏, 姜润翔, 程锦房. 舰船腐蚀相关静电场隐身方法研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2017, 41(6): 1017–1021.
- YU P, JIANG R X, CHENG J F. Stealth method research on corrosion related electrostatic field of warship[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2017, 41(6): 1017–1021. (in Chinese)
- [14] 魏勇, 黄一, 龚沈光. 基于边界元法的舰船 ICCP 系统引起的静态 CRM 场[J]. *海军工程大学学报*, 2013, 25(6): 36–42.
- WEI Y, HUANG Y, GONG S G. A study of static CRM field induced by vessel ICCP system by using BEM[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2013, 25(6): 36–42. (in Chinese)
- [15] 朱祺, 王向军, 徐庆林, 等. 舰船腐蚀静电场在海水中的传播规律研究[J]. *舰船科学技术*, 2022, 44(10): 107–110.
- ZHU Z, WANG X J, XU Q L, et al. Research on propagation law of corrosive electrostatic field of ship in seawater[J]. *Ship Science and Technology*, 2022, 44(10): 107–110. (in Chinese)
- [16] 曹振宇. 模拟深海环境阴极保护初期钙镁沉积层的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- CAO Z Y. Study for calcareous deposits under initial cathodic protection in simulated deep ocean environment [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. (in Chinese)