

## 船舶轴频电场等效源强度计算方法\*

程锐, 姜润翔, 龚沈光

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

**摘要:**为了利用水平时谐电偶极子对实际船舶的轴频电场进行建模,需要确定等效偶极子的源强度和位置。针对安装有外加电流阴极保护系统的船舶,通过分析轴频电场产生的物理机理,明确了等效源是两个方向相反的水平时谐电偶极子叠加的结果。在此基础上,提出一种轴频电场等效源强度计算的实用方法,即可通过反演测量静电场得到的静态偶极子源强度、轴频电场信号包络最大值与静电场信号幅值的比例系数综合确定,且等效源位置与静电场偶极子的位置相同。船模试验证实了所提方法的有效性。

**关键词:**船舶;轴频电场;静电场;电偶极子;外加电流阴极保护

**中图分类号:**TP274 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2016)02-138-06

## Calculation method of vessels' shaft rate electric field equivalent source magnitude

CHENG Rui, JIANG Runxiang, GONG Shenguang

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to exploit horizontal time-harmonic electric dipoles to model shaft rate electric field of practical vessels, the magnitude and location of equivalent source need to be determined. Aimed at vessels mounting the impressed current cathode protection system, the fact that the equivalent source is superimposition of two directionally opposite horizontal time-harmonic electric dipoles is clarified by analyzing the underlying physical mechanism of shaft rate electric field. On the basis of the former conclusion, a practical calculation method of equivalent source magnitude of shaft rate electric field was proposed, which means that the magnitude can be obtained by combining source magnitude of static electric dipole inverted from measured static electric field with the ratio coefficient between the maximum value of shaft rate signal envelope and that of static electric field signal. Besides, the location of equivalent source is identical to that of static electric dipole. The effectiveness of the proposed method is validated by the vessel model test.

**Key words:** vessel; shaft rate electric field; static electric field; electric dipole; impressed current cathode protection

船舶在海水中航行时,会向其周围辐射静电场、轴频电场、工频电场<sup>[1-3]</sup>。其中,轴频电场信号在时域上,远距离幅值通常可达 $\mu\text{V}/\text{m}$ 的量级;在频域上,是以主轴转动频率为基频的低频线谱。由于其明显特征,轴频电场信号被广泛应用于水中目标的远距离非声探测<sup>[4-6]</sup>。为了估计船舶被水下电场探测设备发现的可能性,必须对船舶的轴频电场信号的源强度进行评估。考虑到轴频电场信号在远场时可用水平时谐电偶极子来等效,而这种等效首先要确定的就是等效偶极子源的个数、强度和位置。

文献[7-9]将船舶等效为一个水平时谐电偶极子源,偶极子的位置位于外加电流阴极保护(Impressed Current Cathode Protection, ICCP)系统

辅助阳极和螺旋桨之间的中点,强度视为辅助阳极到螺旋桨的距离乘以大轴电流的波动幅度。实际应用中发现,上述模型的计算结果与实测数据差别较大,分析其原因,主要是由于在对轴频电场信号进行建模时,仅考虑了辅助阳极—海水—螺旋桨—船壳回路电流的变化,而忽视了辅助阳极—海水—通海阀/导流罩—船壳回路中的电流变化。本文在深入研究轴频电场产生机理的基础上,提出了轴频电场信号的水平时谐电偶极子源强度和位置设定的新方法。

### 1 轴频电场产生机理

以装备外加电流阴极保护系统的船舶为例,辅助阳极产生的保护电流,一部分用来保护船尾

\* 收稿日期:2015-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51109215);国家重大安全基础研究资助项目(613166)

作者简介:程锐(1988—),男,河南信阳人,博士研究生, E-mail:cheng-19880533@163.com;

姜润翔(通信作者),男,讲师,博士, E-mail:jiang\_runxiang@163.com

的舵板和螺旋桨,一部分用来保护船中和首部的通海阀和声呐导流罩等<sup>[10]</sup>。其中保护螺旋桨的电流,通过海水流向阴极(螺旋桨),再经过尾轴、轴承、联轴器、齿轮等接地结构返回到船壳形成回路。阴极保护系统与船体构成的等效电路如图1所示。

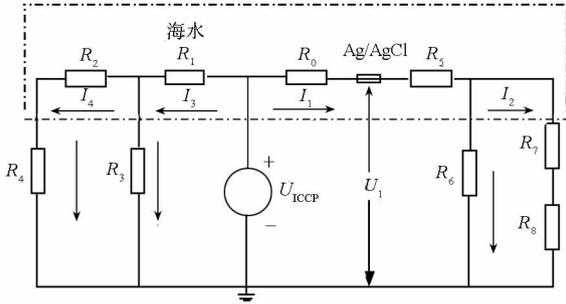


图1 船舶轴频电场的等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of vessel shaft rate electric field

图1中, $U_{ICCP}$ 为辅助阳极表面的电位, $U_1$ 为Ag/AgCl参比电极处的电位, $R_0$ 为辅助阳极到参比电极之间海水的电阻, $R_1$ 为辅助阳极到通海阀之间海水的电阻, $R_2$ 为通海阀到导流罩之间海水的电阻, $R_3$ 为通海阀的极化电阻, $R_4$ 为导流罩的极化电阻, $R_5$ 为参比电极到舵板和螺旋桨的海水电阻, $R_6$ 为舵板的极化电阻, $R_7$ 为螺旋桨的极化电阻, $R_8$ 为轴地等效电阻(主要是碳刷和滑环之间的电阻)。

由图1可知,ICCP辅助阳极输出的电流在海水中以两个不同的方向( $I_1, I_2$ 和 $I_3, I_4$ )分别返回船壳。通过主轴的电流 $I_2$ 为:

$$I_2 = \frac{U_1 R_6}{R_5 (R_6 + R_7 + R_8) + R_6 (R_7 + R_8)} \quad (1)$$

螺旋桨旋转时,式(1)中的 $R_8$ 会随着螺旋桨轴承的旋转而周期性地发生变化,由于恒电位仪的作用(保持 $U_1$ 不变),海水中的电流 $I_2$ 会随着电阻 $R_8$ 的变化而变化。 $R_8$ 减小时, $I_2$ 将变大, $I_1$ 也会变大,为了保持恒电位, $U_{ICCP}$ 将变大,进而 $I_3$ 和 $I_4$ 也将变大。反之,当 $R_8$ 增大时, $I_1, I_2, I_3, I_4$ 均会减小。

## 2 源强度等效模型

由第1节分析可知,轴地电阻的变化,引起的不仅仅是辅助阳极→螺旋桨之间电流的变化,还将引起流经辅助阳极→通海阀→导流罩的电流的变化,且这两个电流的方向是相反的。因此在水平时谐电偶极子来建模实际船舶的轴频电场信号时,仅考虑辅助阳极→螺旋桨这个等效偶极子,

是不合适的。如文献[9]中将船舶等效水平时谐电偶极子的源强度定义为

$$M = \vec{I} \cdot L \quad (2)$$

式中, $\vec{I}$ 为大轴电流交变信号的幅度, $L$ 为辅助阳极到螺旋桨的距离。等效偶极子的位置在辅助阳极和螺旋桨的中心点处。

由式(1)不难看出,上述建模是在假定 $R_3$ 和 $R_4$ 远远大于 $R_6$ 和 $R_7 + R_8$ 的前提下得到的。由电化学的知识可知,上述电阻值可统一表示为:

$$R = \frac{b + \rho}{S} \quad (3)$$

式中, $S$ 为通海阀、导流罩、舵板和螺旋桨各自的面积, $b$ 为材料对应的阴极极化率, $\rho$ 为材料表面的涂层电阻率。

对于通海阀、声呐导流罩、螺旋桨而言,其涂层电阻率可视为0,舵板的涂层电阻率和表面的涂层状态有关,涂层完好的船舶, $\rho \rightarrow \infty$ ,即 $R_6 \rightarrow \infty$ 。常见船体材料的阴极极化率<sup>[11]</sup>如表1所示。由表1可知,金属的极化率差别不大,因此,在计算电阻时,电阻的大小主要取决于材料的面积。

表1 几种金属材料的阴极极化率

Tab.1 Cathode polarizability of some metal materials

金属品种	船体位置	$b/\Omega \cdot m^2$	
		平均值	方差
低合金钢	船壳	2.0	0.2
铜合金	螺旋桨、通海阀等	5.0	1.0
不锈钢	声呐导流罩	5.0	2.0

实际船舶中部和首部的通海阀、声呐导流罩的面积和明显大于螺旋桨的面积,即 $R_3 + R_4 < R_6$ ,因此在对轴频电场建模时,其等效水平时谐电偶极子的源强度和位置应视为辅助阳极→通海阀→声呐导流罩和辅助阳极→螺旋桨两个不同方向的电偶极子叠加的结果,而不能仅以辅助阳极→螺旋桨这一个等效偶极子作为其数学模型。

## 3 建模方法

由轴频电场信号的产生机理可知,它是在静电场信号调制的基础上产生的,其量值相对于静电场信号小得多,且利用静电场信号反演源强度的方法已比较成熟<sup>[12-14]</sup>。因此若能通过数学模型反演出静电场的等效偶极子信息,同时,知道轴频电场信号相对于静电场信号的调制系数,便可以间接地完成对轴频电场信号的建模工作。上述问题的关键便是确定调制系数,由图1的电路分

析可知,轴地电阻  $R_s$  的变化引起电流  $I_1, I_2, I_3$  和  $I_4$  的调制系数是不同的( $I_2$  的调制系数最大)。如果分别计算每个电流的调制系数,在实际中是很难实现的。

实际上,测量得到的轴频电场信号是电流  $I_1, I_2, I_3, I_4$  (同时产生静电场信号) 和其调制系数综合作用的结果,因此,若能同时测量静电场和轴频电场信号,即可利用一个方向上轴频电场信号包络的最大值和该时刻静电场幅值的比例作为其综合调制系数。综合上述分析,确立轴频电场等效源强度的建模方法为:

1) 利用电场传感器同时测量静电场信号和轴频电场信号,计算实际测量得到的轴频电场信号的包络最大值与该时刻的静电场信号的幅值比  $\eta$ ;

2) 利用静电场信号反演出其静态电偶极子的水平偶极矩  $M_s$  和位置  $(x_s, y_s, z_s)$ ;

3) 确立轴频电场的等效水平时谐电偶极子源强度

$$M = M_s \times \eta \quad (4)$$

位置为  $(x_s, y_s, z_s)$ 。

## 4 试验验证

### 4.1 轴频电场信号的测量

为了检验上述计算方法是否有效,进行了实验室船模的验证工作。船模(外部硫化处理,可视作绝缘层)长 165 cm、最大宽度为 24 cm。以船首为原点,在船体正下方,距离船首距离为 20 cm, 40 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm 和 120 cm 的位置分别放置总面积为 100 cm<sup>2</sup> 的铜板以模拟实际船舶上的通海阀部件(通海阀在外部与船壳断开或连接),其材料与螺旋桨材料一致,均为铜合金。螺旋桨为 7 叶桨,其直径为 6 cm,螺旋桨转速为 60 转/min。

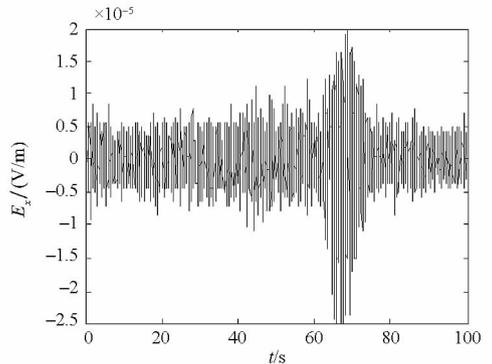
ICCP 系统通过 CS350 电化学工作站模拟,2 片辅助阳极(铂阳极,单个面积为 1 cm<sup>2</sup>) 对称布置船体左右两侧,距离螺旋桨的距离为 30 cm,参比电极(Ag/AgCl 固体电极)位于辅助阳极和螺旋桨之间,距离螺旋桨的距离为 20 cm,实验过程中,利用电化学工作站将保护电位设定在 -820 mV。

电场正交三分量测量传感器由 4 个 Ag/AgCl 电极组成,电极 1 作为坐标原点,电极对(1-2), (1-3) 和(1-4) 分别用来测量  $x, y$  和  $z$  方向上的电场信号  $E_x, E_y, E_z$ ; 三个方向的电极距均为 10 cm。其中,测量电极 1, 2 和 3 距离模拟海水

(海水深度 80 cm、电导率为 0.567 S/m) 表面的距离为 30 cm,电极 4 距离海水表面 40 cm。

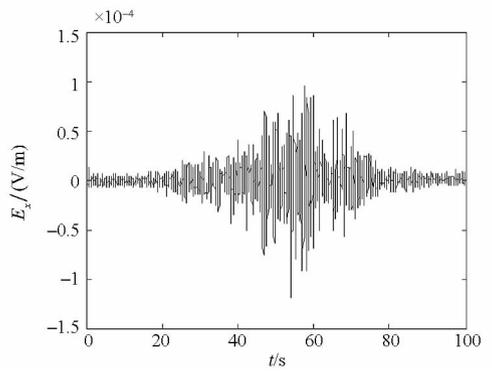
### 4.2 试验结果分析

图 2(a) 和图 2(b) 分别为通海阀断开和连接时,船模以 4 cm/s 的速度通过电场传感器上方正横距 18 cm 时轴频电场的  $E_x$  信号,其中,船首、辅助阳极和螺旋桨通过传感器的时刻分别为 30.5 s, 63.5 s 和 71 s。对比两图,可明显发现,轴频电场信号  $E_x$  的峰值点位置差别较大,连接通海阀时,其峰值位置在 55 s,而断开通海阀时,其峰值点位置在 67 s(与阳极和螺旋桨之间的中点位置一致)。这一实验结果表明:在存在通海阀时,轴频电场的确是两个方向相反的水平偶极子共同作用的结果。



(a) 未连接通海阀时

(a) Not connecting Kingston valve



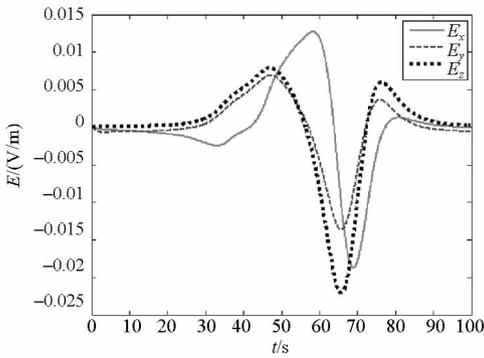
(b) 连接通海阀时

(b) Connecting Kingston valve

图 2 两种通海阀情况下的轴频电场信号

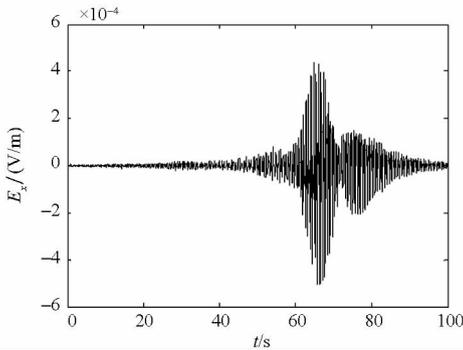
Fig. 2 Shaft rate signals under two Kingston valve conditions

为了验证第 3 节所提轴频电场的建模方法,在连接通海阀情况下,进一步进行了试验。图 3 为船模以 4 cm/s 通过电场传感器上方正横距 18 cm 时的静电场信号和轴频电场信号(采样频率为 62.5 Hz)。需要说明的是,图 3(b) 和图 2(b) 中的信号波形差别较大,主要是由于钙镁



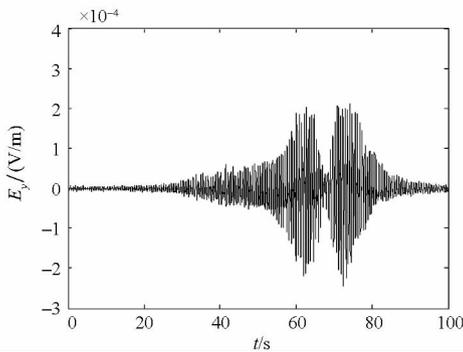
(a) 静电场信号

(a) Static electric field signal



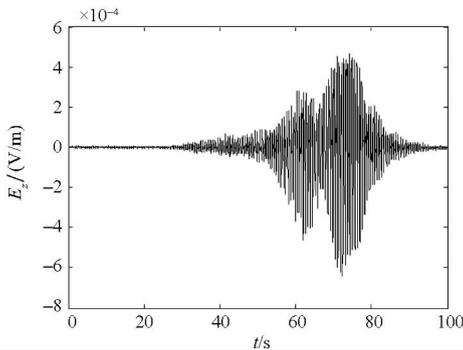
(b)  $E_x$  信号

(b) Signal  $E_x$



(c)  $E_y$  信号

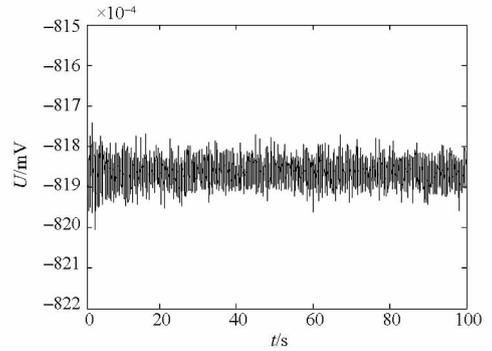
(c) Signal  $E_y$



(d)  $E_z$  信号

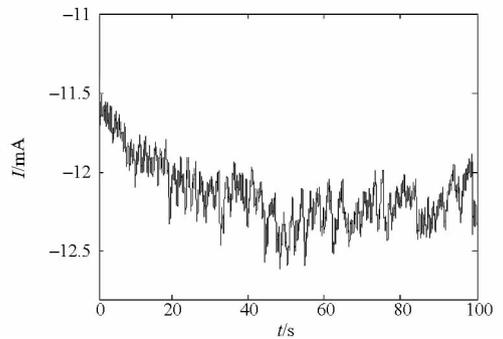
(d) Signal  $E_z$

沉积层的形成,导致螺旋桨和通海阀的电化学状态发生了改变<sup>[15]</sup>。对比图 3 (a) 和图 3 (b)、图 3 (c)、图 3 (d) 可发现,轴频电场信号与静电场信号的包络差别较大,其中,  $E_x$  包络的最大值为 0.52 mV/m,对应时刻的静电场幅值为 18 mV/m,即  $\eta = 2.89\%$ 。此次试验过程中,参比电极电位和电化学工作站的输出保护电流分别如图 4 (a) 和图 4 (b)、图 4 (c) 所示(采样频率为 100 Hz)。由图 4 (b) 可知, ICCP 辅助阳极的输出电流在 11.5 mA ~ 12.5 mA 之间波动,从图 4 (c) 还可发现,



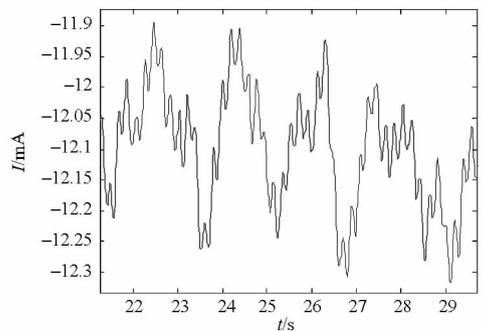
(a) 参比电极电位

(a) Potential of reference electrode



(b) 1 ~ 100 s 输出电流

(b) Output current during 1 ~ 100 s



(c) 47 ~ 53 s 输出电流

(c) Output current during 47 ~ 53 s

图 3 正横距为 18 cm 时的电场信号  
Fig. 3 Shaft rate electric field signals with the beam distance of 18 cm

图 4 参比电极电位和辅助阳极输出保护电流  
Fig. 4 Potential of reference electrode and auxiliary anode output protection current

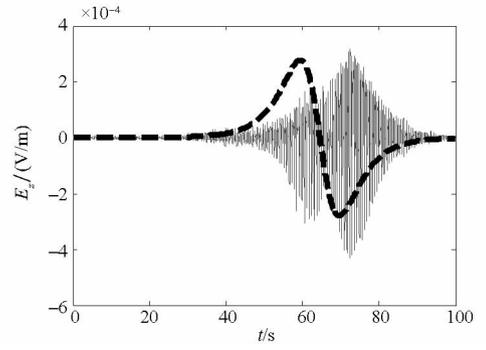
除了电化学调整过程中的电流整体变化趋势外, 电流也出现了周期性的波动, 此波动即为螺旋桨旋转引起的 ICCP 辅助阳极输出电流的变化。

### 4.3 计算值与实测结果对比

利用文献[13]所提方法, 借助于实测静电场信号对船模的等效静态偶极子源强度和位置进行计算, 上述方法是将静电场视为若干个点电荷场的叠加, 在计算出点电荷的量值后, 可分别计算出正、负电荷的中心和等效偶极子强度, 偶极子的位置为正、负电荷中心的中点位置。根据图 3(a) 中的静电场数据, 计算得到的沿船体纵向分布的等效静态偶极子强度  $M_s = -7.1 \text{ mA} \cdot \text{m}$ , 位置位于船体的中轴线上, 距离船首 130.2 cm (基本与辅助阳极的位置相重合), 对应的通过时刻为 63.75 s。

为了对计算的轴频电场等效偶极子源进行验证, 对正横距分别为 28 cm 和 98 cm 的轴频电场信号的包络进行计算。计算时, 轴频电场的等效水平时谐电偶极子源强度  $M = M_s \times \eta = 0.2 \text{ mA} \cdot \text{m}$ , 其位置与由静电场信号换算出的偶极子位置一致。

图 5 和图 6 分别为实际测量得到的轴频电场信号和换算出的轴频电场信号包络, 图中细实线为实测值, 粗虚线为计算的包络值。由图 5 和图 6 可知, 计算出的轴频电场  $E_x$  信号的包络与实际

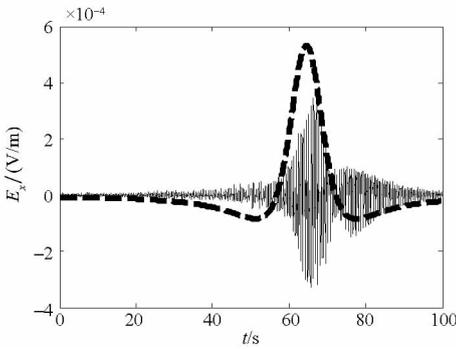


(c)  $E_z$  信号  
(c) Signal  $E_z$

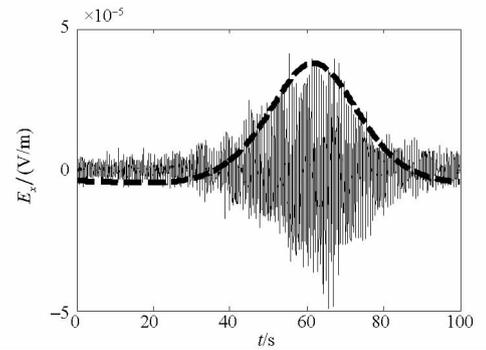
图 5 实测轴频电场信号和计算出的信号包络 (正横 28 cm)

Fig. 5 Measured shaft rate electric field signal and computed signal envelope (beam distance of 28 cm)

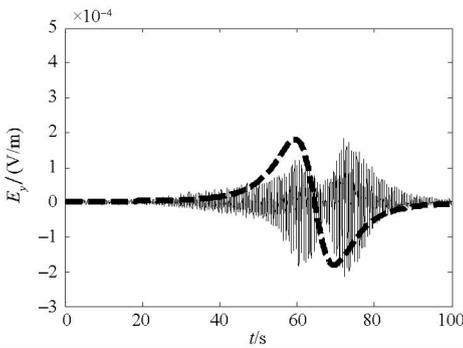
值吻合得比较好。对比两图还可发现, 当正横距较远时, 换算出的误差较小, 换算信号的包络与实测信号的最大值和过零点值基本吻合, 这是因为随着距离的变远, 将船体模型的静电场和轴频电场视为偶极子激发场的假设合理性在增强。但同时也可注意到, 信噪比同时也在相应地下降。



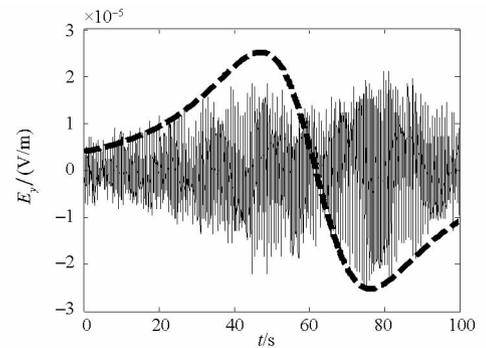
(a)  $E_x$  信号  
(a) Signal  $E_x$



(a)  $E_x$  信号  
(a) Signal  $E_x$



(b)  $E_y$  信号  
(b) Signal  $E_y$



(b)  $E_y$  信号  
(b) Signal  $E_y$

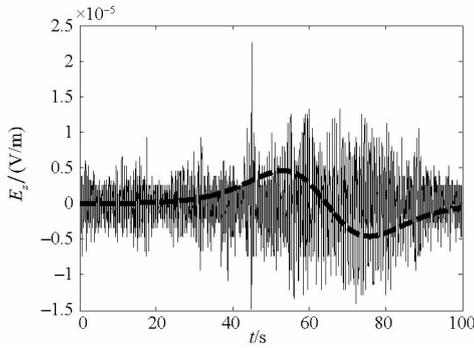
(c)  $E_z$  信号(c) Signal  $E_z$ 

图6 实测轴频电场信号和计算出的信号包络(正横 98 cm)

Fig.6 Measured shaft rate electric field signal and computed signal envelope (beam distance 98 cm)

## 5 结论

本文在分析轴频电场产生机理的基础上,得到了在装备 ICCP 系统的船舶上,对轴频电场进行建模时,其等效偶极子源应视为由辅助阳极—通海阀、声呐导流罩和辅助阳极—螺旋桨两个相反方向的水平时谐电偶极子源叠加的结论。轴频等效源的位置与静电场反演出的静态偶极子位置一致,强度应为静态偶极子源强度乘以轴频电场信号的包络最大值与该时刻的静电场信号幅值的百分比。

## 参考文献 (References)

- [1] 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 Shenguang. Physical field of warship[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] 张伽伟, 熊露, 龚沈光. 金属体在海水中运动产生的感应电场建模[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(6): 147-151.  
ZHANG Jiawei, XIONG Lu, GONG Shenguang. Modeling of the electric field generated by metal body moving under seawater [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(6): 147-151. (in Chinese)
- [3] Dymarkowski K, Uczciwek J. The extremely low frequency electromagnetic signature of the electric field of the ship[C]// Proceedings of Undersea Defense Technology, Washington: Nexus Media Limited, 2001: 1-6.
- [4] 姜润翔, 史建伟, 龚沈光. 船舶极低频电场信号特性分析[J]. 海军工程大学学报, 2014, 26(1): 5-8.  
JIANG Runxiang, SHI Jianwei, GONG Shenguang. Analysis of signal characteristics of ship's extremely low frequency electric field [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2014, 26(1): 5-8. (in Chinese)
- [5] 胡鹏, 龚沈光, 胡英娣. 基于小波包熵的船舶轴频电场信号检测[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(11): 15-18.  
HU Peng, GONG Shenguang, HU Yingdi. Detection of ship shaft-rate electric field signals using wavelet packet entropy[J].

- [6] Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2011, 39(11): 15-18. (in Chinese)  
贾亦卓, 姜润翔, 龚沈光. 基于小波模极大值的船舶轴频电场检测算法研究[J]. 兵工学报, 2013, 34(5): 579-584.  
JIA Yizhuo, JIANG Runxiang, GONG Shenguang. Research on wavelet modulus maximum-based detection algorithm of ship's shaft-rate electric field[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(5): 579-584. (in Chinese)
- [7] 李松. 舰船电场目标特征提取与检测方法研究[D]. 武汉: 海军工程大学, 2008.  
LI Song. Research on feature extraction and detection algorithms of ship electric field signal [D]. Wuhan: Naval University of Engineering, 2008. (in Chinese)
- [8] 熊露, 姜润翔, 龚沈光. 浅海中船舶轴频电场建模方法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(1): 98-103.  
XIONG Lu, JIANG Runxiang, GONG Shenguang. Ship modeling method of shaft-ELFE in shallow sea[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014, 36(1): 98-103. (in Chinese)
- [9] 陈连平, 李斌. 船舶轴频电场耦合轴频磁场的模型仿真计算[C]//水下电磁场产生机理与特征控制研讨会论文集, 大连, 2012: 67-71.  
CHEN Lianping, LI bin. Simulation calculation of vessel shaft rate electric and magnetic field coupling model [C]// Proceedings of Underwater Electromagnetic Fields Generation Mechanism and Features Control Workshop, Dalian, 2012: 67-71. (in Chinese)
- [10] 吴建华. 水下船体阴极保护与腐蚀电磁场优化控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.  
WU Jianhua. The optimization of hull cathodic protection and control of corrosion related electromagnetic field under seawater [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 王凤平, 康万利, 敬和民. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.  
WANG Fengping, KANG Wanli, JING Hemin. Corrosion electrochemical principles, methods and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [12] 胡英娣, 龚沈光, 闫永贵. 一种新的船舶静态电场深度推算方法[J]. 海军工程大学学报, 2013, 25(5): 16-20.  
HU Yingdi, GONG Shenguang, YAN Yonggui. A new method for depth extrapolation of ship's electric field [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2013, 25(5): 16-20. (in Chinese)
- [13] 姜润翔, 胡英娣, 龚沈光. 基于点电源的船舶静态电场深度推算方法研究[J]. 电波科学学报, 2014, 29(4): 685-693.  
JIANG Runxiang, HU Yingdi, GONG Shenguang. Depth conversion of the vessel static electric field based on point charge source [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2014, 29(4): 685-693. (in Chinese)
- [14] 陈聪, 李定国, 龚沈光. 舰船静态电场深度推算方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(6): 719-722.  
CHEN Cong, LI Dingguo, GONG Shenguang. The method of the extrapolation of the static electric field of ships [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(6): 719-722. (in Chinese)
- [15] 宋积文, 兰志刚, 王在峰, 等. 海洋环境中阴极保护设计与阴极产物膜[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(4): 265-267.  
SONG Jiwen, LAN Zhigang, WANG Zaifeng, et al. Cathodic protection design and cathodic product films in seawater[J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(4): 265-267. (in Chinese)