

## 舰船轴频电场产生机理及控制技术\*

姜润翔<sup>1</sup>, 张伽伟<sup>2</sup>, 陈新刚<sup>3</sup>

(1. 海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军工程大学 兵器工程学院, 湖北 武汉 430033;  
3. 中国人民解放军 92942 部队, 北京 100161)

**摘要:**为了减小舰船轴频电场信号,在深入分析尾轴结构的基础上,建立轴频电场等效电路模型,明确碳刷和滑环接触电阻的波动是轴频电场产生的主要因素。在对主动式轴接地(Active Shaft Grounding, ASG)系统原理进行分析的基础上,研制了原理样机,并进行了实验室船模试验和海上实船试验。试验结果表明:所研制的 ASG 系统能有效抑制滑环和碳刷接触电阻变化所引起的轴频电场信号,抵消效果可达 90% 以上,且当轴地等效电阻在回路中的比例较大时,ASG 系统开启后,将导致静电场信号增加。对 ASG 系统输出电流的影响因素进行分析,结果表明:ASG 系统的最大输出电流与阴极保护状态密切相关,与航速关系不大。

**关键词:**舰船;轴频电场;主动式轴接地系统;静电场;外加电流阴极保护

**中图分类号:**TP216 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2019)06-111-07

## Ship's shaft-related electric field mechanism of production and countermeasure technology

JIANG Runxiang<sup>1</sup>, ZHANG Jiawei<sup>2</sup>, CHEN Xingang<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
2. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;  
3. The PLA Unit 92942, Beijing 100161, China)

**Abstract:** In order to reduce the vessel's shaft-related electric field, the equivalent circuit of shaft-related electric field was established on the basis of the analysis of the ship aft end structure, and it proved that the fluctuating resistance between the carbon brush and slip ring is the main factor that produces shaft-related electric field. The principle of the ASG (active shaft grounding) system was studied, and the prototype ASG system was developed and tested by shrinkage ratio ship model and real vessel experiments. The results showed that the shaft-rate electric field can be reduced effectively by 90% when the ASG system is employed. In addition, the ASG system will make static electric field increase when the resistance between the carbon brush and slip ring counts much in the equivalent circuit. After analyzing the factors that affect the output current of ASG system, it was found that the maximal output current is firmly related with the cathodic protection state, but not the sailing speed.

**Keywords:** vessel; shaft-related electric field; active shaft grounding system; static electric field; impressed current cathodic protection

舰船在海水中航行时,在螺旋桨的调制作用下向其周围辐射轴频电场<sup>[1-2]</sup>。轴频电场信号在时域上,幅值通常可达  $\mu\text{V}/\text{m}$  的量级;在频域上,轴频电场信号是以主轴转动为基频的低频线谱。鉴于以上特点,轴频电场信号被广泛应用于水中目标的远距离探测<sup>[3]</sup>。为了提高船舶的航行安全,国外在船舶设计、制造过程中通常采用主动式轴接地(Active Shaft Grounding, ASG)系统来减小轴频电场信号<sup>[4]</sup>,并对影响 ASG 系统的参数进行分析<sup>[5]</sup>。为减小轴频电场信号,必须首先明确其产生机理,文中在深入分析轴频电场产生机理的基础上,对 ASG 系统的原理进行了分析,并对

ASG 系统开启后对静电场、ASG 系统输出电流等的影响因素进行了研究。

### 1 轴频电场产生机理

在电化学腐蚀和防腐过程中,无论是腐蚀电流还是保护电流,都将从阳极(分别对应船壳和辅助阳极或牺牲阳极)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<sup>[1]</sup>,如图 1 所示。

以“船壳→海水→螺旋桨→轴接地→船壳”构成的电化学系统回路为例,回路的等效电路如图 2 所示。

\* 收稿日期:2018-06-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51509252,41476154);国家安全重大基础研究资助项目(613166)

作者简介:姜润翔(1982—),男,河南尉氏人,讲师,博士,E-mail:jiang\_runxiang@163.com

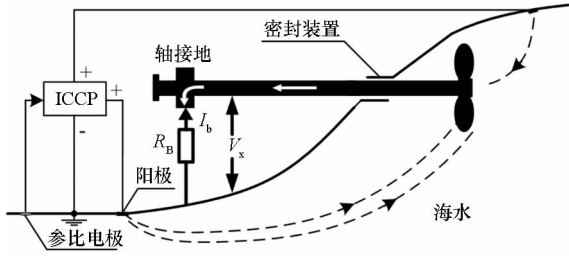


图 1 轴频电场产生原理

Fig. 1 Principle of the shaft-related electric field

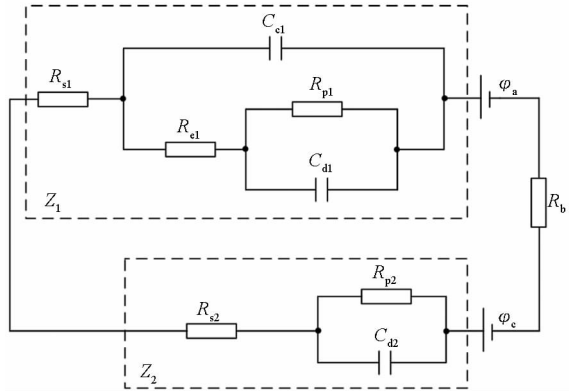


图 2 轴频电场产生的等效电路

Fig. 2 Circuit diagram of the shaft-related electric field

图 2 中,在电导率为  $\sigma$  的海水中,系统中的回路阻抗为:

$$Z = Z_1 + Z_2 + R_b \quad (1)$$

式中: $Z_1$  由面积为  $S_1$  的船体在海水中的泄漏电阻  $R_{s1}$ 、船体涂层阻抗(涂层电阻  $R_{e1}$  和涂层容抗  $1/(\omega C_{d1})$ )和船体极化阻抗(极化电阻  $R_{p1}$  和界面双电层容抗  $1/(\omega C_{d1})$ )组成; $Z_2$  由面积为  $S_2$  的螺旋桨在海水中的泄漏电阻  $R_{s2}$  和螺旋桨极化阻抗(极化电阻  $R_{p2}$  和界面双电层容抗  $1/(\omega C_{d2})$ )组成; $R_b$  为船体内部回路轴地等效电阻。

对于充分浸泡海水的船体涂层,其涂层电容率约为  $5 \mu\text{F}/\text{m}^2$ ,而涂层电阻率通常为  $100 \Omega \cdot \text{m}^2$ [6-7]。对于浸水面积为  $2000 \text{ m}^2$  的舰船,其涂层电容  $C_{e1}$  为  $0.01 \text{ F}$ ,其涂层电阻  $R_{e1}$  为  $0.05 \Omega$ ,考虑到螺旋桨的转动频率较低( $0.5 \sim 20 \text{ Hz}$ ),转动频率为  $20 \text{ Hz}$  时,其对应的容抗约为  $0.8 \Omega$ ,远大于涂层电阻  $R_{e1}$  的值,即在研究轴频电场时,可忽略涂层电容  $C_{e1}$  的影响。而船体材料双电层的电容  $C_{d1}$  值远大于  $C_{e1}$  的值(双电层电容率约为  $0.2 \text{ F}/\text{m}^2$ ),在轴频范围内,其容抗值与极化电阻值  $R_{p1}$  的量级接近,不能忽略其影响。因此,在研究轴频电场时,图 2 的电路模型可简化为图 3 所示的电路模型。

为了分析不同频率  $f$  条件下电阻  $R_p$  及容抗

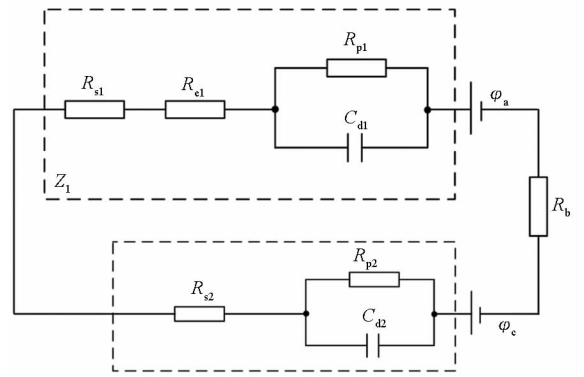


图 3 轴频电场等效电路简化模型

Fig. 3 Simple circuit diagram of the shaft-related electric field

$|1/(2\pi f C_d)|$  的变化规律,在对金属电极交流阻抗谱分析的基础上,拟合得到电极的电阻率  $A$  及电容率  $B$  分别为:

$$A = a\omega^\alpha \quad (2)$$

$$B = b\omega^\beta \quad (3)$$

其中, $\omega = 2\pi f$  为交变电流的角频率。

式(2)和式(3)中的  $a, b, \alpha, \beta$  等参数由金属的交流电化学特性决定,不同金属电极的  $a, b, \alpha, \beta$  值见表 1。

表 1 不同金属电极的  $a, b, \alpha, \beta$  值

Tab. 1  $a, b, \alpha, \beta$  of different metal electrodes

序号	金属类型	$a$	$\alpha$	$b$	$\beta$
1	铝青铜	0.320	-0.45	2.64	-0.38
2	锡青铜	0.435	-0.49	1.91	-0.30
3	黄铜	0.523	-0.34	0.556	-0.32
4	铝合金	0.306	-0.37	0.794	-0.43
5	铜及其合金	0.177	-0.31	2.45	-0.46
6	钛合金	12.45	-0.53	0.167	-0.28
7	合金钢	40	-0.64	2.7	-0.22

图 3 中的阻抗为:

$$Z_1 = \left[ R_{s1} + R_{e1} + \frac{R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{d1}^2 R_{p1}^2} \right] - j \frac{\omega C_{d1} R_{p1}^2}{1 + \omega^2 C_{d1}^2 R_{p1}^2} \quad (4)$$

$$Z_2 = \left[ R_{s2} + \frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{d2}^2 R_{p2}^2} \right] - j \frac{\omega C_{d2} R_{p2}^2}{1 + \omega^2 C_{d2}^2 R_{p2}^2} \quad (5)$$

其中,  $R_{p1} = \frac{A_1}{S_1}, C_{d1} = B_1 S_1, R_{s1} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi S_1}}, R_{e1} = \frac{\rho_1}{S_1}, R_{p2} = \frac{A_2}{S_2}, C_{d2} = B_2 S_2, R_{s2} = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi S_2}}, \rho_1$  为涂层电阻率,下标 1 和 2 分别对应船壳和螺旋桨; $j$  为

虚数。

将式(2)和式(3)代入式(4)和式(5)中即可计算出回路的阻抗  $Z$ ,从而得到“船壳→海水→螺旋桨→轴接地→船壳”回路中的电流为:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_c}{Z_1 + Z_2 + R_b} \quad (6)$$

当螺旋桨旋转时,图 2 中双电层电容  $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$  引起的电流变化称为外调制,电阻  $R_b$  引起的电流变化称为内调制。内、外调制均会在海水中产生以螺旋桨转动频率为基频的电场信号,称为轴频电场。

### 2 轴频电场产生的主要因素

由第 1 节分析可知,内调制和外调制均会引起轴频电场信号,为了有效减小轴频电场信号,需明确何种调制方式是轴频电场产生的主要因素。一艘舰船的尾部结构如图 4 所示。

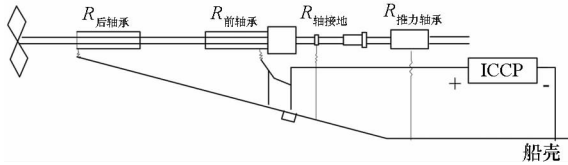


图 4 一艘舰船的尾部结构

Fig. 4 Circuit diagram of the ship aft end structure

由图 4 可知,保护电流经过尾轴时可以通过多条路径返回船壳,若忽略大轴电阻,船体内部的轴-地等效电阻  $R_b$  可视为由多个电阻并联的结果。如图 4 中的轴地等效电阻  $R_b$  可表示为:

$$\frac{1}{R_b} = \frac{1}{R_{前轴承}} + \frac{1}{R_{后轴承}} + \frac{1}{R_{轴接地}} + \frac{1}{R_{推力轴承}} \quad (7)$$

文献[8]给出了等效回路中电阻的数量级,由文献[8]可知,轴接地装置(碳刷和滑环)的电阻明显小于其他接地电阻。即有  $R_b \approx R_{轴接地}$ ,因此  $R_b$  以碳刷和滑环之间的接触电阻为主。

一艘中型舰船的浸水面积  $S_1 = 2500 \text{ m}^2$ ,螺旋桨面积  $S_2 = 60 \text{ m}^2$ ,船体及螺旋桨材料分别为合金钢和铝青铜,忽略船体涂层电阻(取  $R_{e1} = 0 \Omega$ ),若海水电导率  $\sigma = 4 \text{ S/m}$ , $R_b = 0 \Omega$ ,依据表 1 计算出不同转动频率下的阻抗  $Z$  的实部及虚部,如图 5 所示。

由图 5 可知,不同频率条件下回路阻抗的电阻值远大于容抗值,若考虑涂层电阻  $R_{e1}$  的影响,其电阻值将进一步增大。若轴接地装置采用铜石墨碳刷-铜基滑环,一般条件下,可取  $R_b = 20 \text{ m}\Omega$ ,其波动系数为 10%~30%(轴系运转不平衡时,波动系数将更大),即变化电阻值为

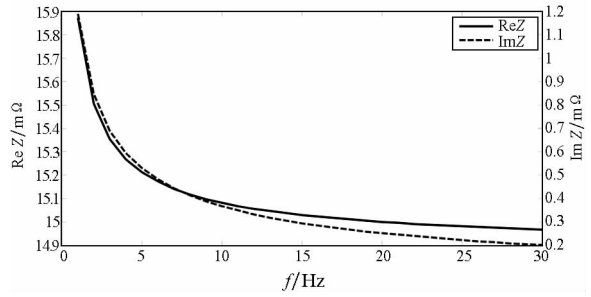


图 5 不同转动频率下的阻抗值

Fig. 5 Impedance values at different rotational frequencies

$\Delta R_b = 2 \sim 6 \text{ m}\Omega$ ,该波动电阻值明显大于界面双电层的容抗值。另外,由于海水的温度、溶解氧浓度和离子浓度等参数在短时间内基本不变,因此,存在船体及螺旋桨双电层的容抗变化值  $\Delta|C_d|$  远远小于  $\Delta R_b$ 。综合上述分析可知,内调制是产生轴频电场的主要因素。

### 3 ASG 系统原理分析

由第 2 节分析可知,轴频电场主要是因轴-地等效电阻(碳刷和滑环接触电阻为主)的波动而产生,研究表明,若减小轴和地之间的电位差,即可将轴频电场信号进行有效抑制<sup>[9]</sup>。在舰船没有进行腐蚀防护时,ASG 系统如图 6 所示(此原理同样适用于安装有阴极保护系统的舰船)。图 6 中,PNP 三极管发射极和基极的电压差为  $V_{be}$ ,船壳和螺旋桨间的腐蚀电位差为  $E_w$ ,转动轴和船壳间的电位为  $V_x$ ,转动轴和船壳间的等效电阻为  $R_b$ ,电流为  $I_b$ ,船壳和螺旋桨之间的海水电阻为  $R_w$ ,电流为  $I_w$ ,A 为放大器的直流增益。

在没有接 ASG 之前, $R_b$  变大, $I_b = I_w$  变小, $R_w$  上的压降变小, $V_x$  变大; $R_b$  变小, $I_b = I_w$  变大, $V_x$  变小,因而变化的  $R_b$  在海水中产生了变化的电流。

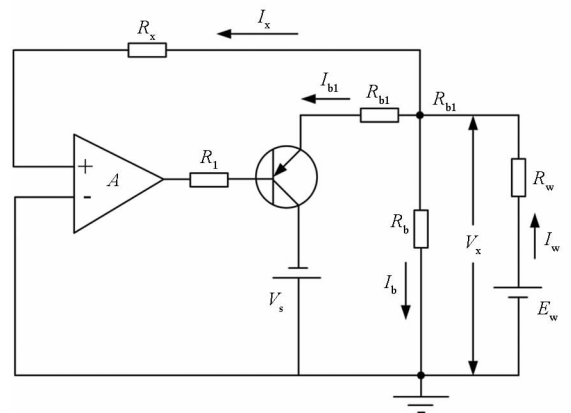


图 6 主动轴接地系统示意图

Fig. 6 Circuit diagram of the ASG system

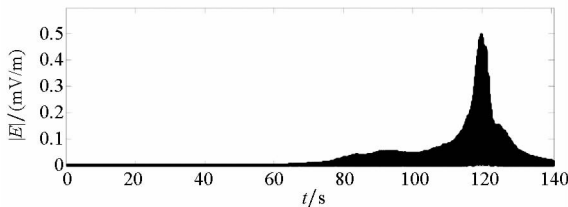
在接有 ASG 后,ASG 系统通过轴上的集电环测得  $V_x$ ,将  $V_x$  送放大器放大后,控制电流源输出正比于  $V_x$  的电流  $I_{b1}$ , $I_{b1}$  通过另一个滑环加在船壳和螺旋桨之间,当  $R_b$  变大, $I_b$  变小, $V_x$  变大时, $I_{b1}$  变大,流过  $R_{b1}$  的电流增大,使得  $V_x$  变小,反之亦然。即在 ASG 系统的负反馈作用下, $I_w = I_b + I_{b1}$  基本维持不变,使海水中极低频电磁场的轴频扰动分量减小,具体推导过程参见文献[9]。

### 4 试验验证

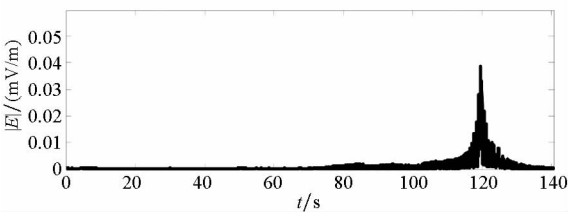
#### 4.1 船模试验

为了检验所研制的主动轴接地系统原理样机的性能,首先进行了实验室环境下的缩比模型试验,船模材料为涂层钢,螺旋桨材料为镍铝青铜,大轴通过接地碳刷与船壳连接,ASG 系统通过测量碳刷和补偿碳刷与大轴连接,外加电流阴极保护 (Impressed Current Cathodic Protection, ICCP) 系统辅助阳极为直径为 5 mm 的铂片,阴极保护系统开启时,电流的流向为辅助阳极→海水→螺旋桨→大轴→碳刷→船壳。

ASG 系统开启前后,利用 3 对正交 Ag/AgCl 电极 (每对电极距离均为 10 cm) 测量得到的轴频电场信号如图 7 所示。试验中,模拟海水深度为 100 cm,船模吃水 15 cm,海水电导率为 3.87 S/m,ICCP 供电电压为 1.2 V,辅助阳极输出电流为 10 mA。



(a) ASG 系统关闭  
(a) ASG system closed



(b) ASG 系统开启  
(b) ASG system opened

图 7 ASG 系统开启前后的轴频电场信号

Fig. 7 Shaft-related electric field when ASG system is used

从图 7 可以发现,在主动轴接地系统开启前后,轴频电场信号均有较大幅度的减小,以系统开

启前后的轴频电场信号  $|E|$  包络的峰值作为评价准则,其抑制效果达到 90% 以上。

#### 4.2 实船试验

为了进一步验证 ASG 系统的效果,分别在大连和湛江海域进行实船试验,在验证 ASG 系统有效性的同时,还重点分析了 ASG 系统对静电场的影响,阴极保护电位、航速等对 ASG 系统输出电流的影响 (结果见第 5、第 6 节)。

试验舰船 H1 采用牺牲阳极和外加电流联合防腐,外加电流阴极保护输出电流为 3.6 A,参比电极保护电位为 -950 mV 左右,螺旋桨转速为 140 r/min。图 8 为 ASG 系统开启前后的水下某一定点的水下电场信号,其中,ASG 系统开始工作时刻为 75 s。由图 8 可知,ASG 系统开启后,能够有效降低轴频电场信号,以电场信号  $E_x$  的峰-峰值评价,抑制效果可达 85% 以上。

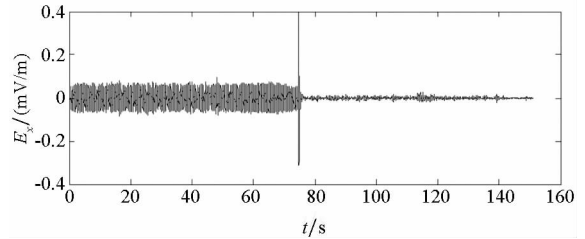


图 8 试验舰船 H1 ASG 系统开启前后某一定点的电场信号

Fig. 8 Electric field when the ASG system is used for vessel H1

需要说明的是,对于安装多个转动轴的舰船,为了有效抑制轴频电场,每个轴上均应安装 ASG 系统。若仅 1 个轴上安装 ASG 系统,当 ASG 系统工作时,仅能减小安装有 ASG 系统的轴转动引起的交变轴电流及轴频电场。

安装于试验舰船 H2 的 ASG 系统工作前后的轴电流信号如图 9 所示,其中,舰船 ICCP 系统在自动调节模式下,船体保护电位为 -0.8 V,右轴及左轴 ASG 系统的开启时刻分别为 33.4 s 和 69.3 s。

由图 9 可知,在右轴 ASG 系统开启后,右轴的低频电流得到有效降低,而左轴的低频电流却未发生改变,仅在左轴 ASG 系统开启后,方能有效降低左轴的低频电流。

### 5 ASG 系统对静电场的影响分析

由图 2 可知,在 ASG 系统工作前后,海水中的稳态电流  $I_w$  由  $E_w/(R_b + R_w)$  变化为  $E_w/R_w$ 。由此可知,当  $R_b$  的值较大时,ASG 系统工作后,

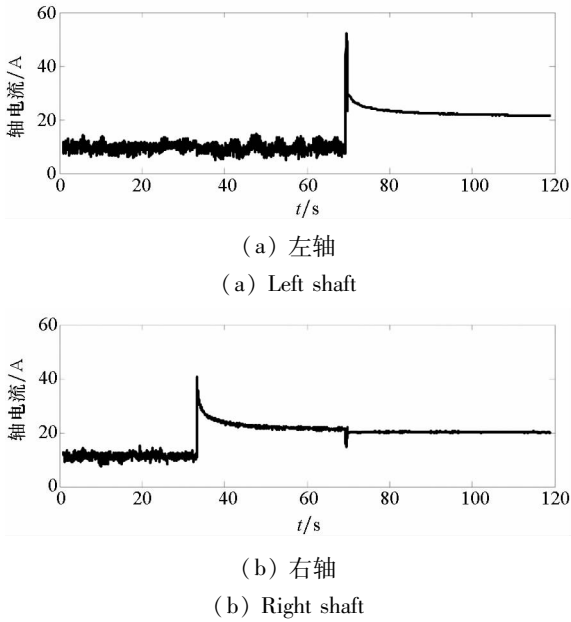
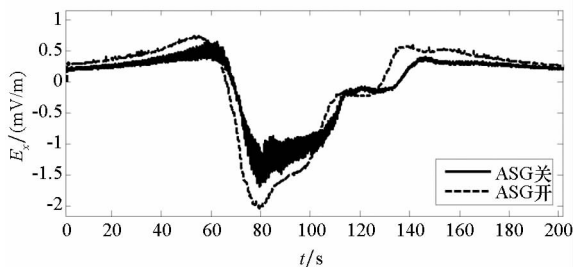


图9 ASG系统工作前后的轴电流信号

Fig. 9 Shaft current when ASG system is used

将导致海水中电流  $I_w$  增大,即螺旋桨电流增大,由于静电场信号的主要来源为螺旋桨,因此静电场信号也将增大。通常情况下,实船的回路总电阻( $R_b + R_w$ )为几百毫欧至几欧,而被动轴接地电阻不足  $20 \text{ m}\Omega$ ,因此当采用 ASG 系统后,被动轴接地系统的电阻将为  $0 \Omega$  时,对回路的总电阻影响不大,即回路中的电流变化不大,进而静电场变化不大。但若被动轴接地系统碳刷和滑环电阻值  $R_b$  较大,ASG 系统工作后,将导致轴电流的明显增大,从而导致静电场增大。

图 10 所示为试验舰船 H2 上 ASG 系统工作前后的水下电场信号  $x$  分量的通过特性,其中,低通滤波截止频率为  $5 \text{ Hz}$ ,测量方向为尾部至首部,正横距为  $8.6 \text{ m}$ 。从图 10 中可发现,当 ASG 系统工作后,轴频电场信号得到抑制,而静电场信号的峰-峰值有所增大。监测轴电流发现,舰船轴电流值由  $12 \text{ A}$  变化至  $16 \text{ A}$ ,船体参比电极电位为  $-0.8 \text{ V}$ ,估算出的回路电阻  $R_b + R_w \approx$

图 10 试验舰船 H2 ASG 系统工作前后水下电场信号  $x$  分量Fig. 10 Underwater electric field  $x$  component when the ASG system is used for vessel H2

$67 \text{ m}\Omega, R_b \approx 17 \text{ m}\Omega$ 。

综合上述可知:若轴地等效电阻  $R_b$  的值相对于  $R_w$  较大,ASG 系统工作后,将导致轴电流和静电场信号增大;反之,ASG 系统开启后对静电场的影响不大。

## 6 ASG 系统输出电流强度的影响因素

当 ASG 系统开启后, $I_w = I_{bl}$ ,为了保证系统能够可靠工作,ASG 系统的输出电流应大于 ASG 系统工作后船体处于正常保护状态下流经螺旋桨的极限电流。受舰船航行海域电导率、阴极保护系统工作状态、舰船航速等因素的影响,通过螺旋桨的极限电流是变化的。鉴于海水电导率差别不大,重点分析阴极保护电位和航速对 ASG 系统输出电流的影响。

### 6.1 阴极保护电位

当舰船外加电流阴极保护系统恒电位仪工作在恒电位保护自动调节模式下时,可利用参比电极与螺旋桨之间的海水电阻值估算出 ASG 系统工作时的极限负载电流。

$$I > I_w = \frac{U_{\text{Ag/AgCl}} - U_1}{R_1} \quad (8)$$

式中: $U_{\text{Ag/AgCl}}$  为保护电位设定值,取值范围为  $-1.0 \sim -0.8 \text{ V}$ ;  $R_1$  为螺旋桨和参比电极之间的海水电阻;  $U_1$  为螺旋桨表面电位值。由于螺旋桨处于阴极极化状态,其电位值小于螺旋桨的自平衡电极电位值,计算极限负载电流时,可取螺旋桨的电极电位值( $-300 \sim -200 \text{ mV}$ )代替阴极极化后的电位值  $U_1$ 。

由式(8)可知,ASG 系统的负载电流与参比电极的设定保护电位值密切相关,随着保护电位值的负移,ASG 系统的输出电流将明显增大。另外,ASG 系统开启后,也将影响阴极保护系统的输出电流。这是由于阴极保护系统的输出电流除了保护螺旋桨外,还需要保护船体,当 ASG 系统工作后,螺旋桨回路的电阻值将减小,进而更多的保护电流通过螺旋桨返回船壳,从而导致船体的电位值正移。试验舰船 H2 处于牺牲阳极阴极保护时,ASG 系统开启前后,船体中部参比电极的电位由  $-700 \sim -650 \text{ mV}$  变化为  $-536 \sim -535 \text{ mV}$ ,而尾部参比电极的电位由  $-690 \sim -630 \text{ mV}$  变化为  $-509 \sim -508 \text{ mV}$ ,这说明 ASG 系统开启后,较多的电流流向了螺旋桨。试验舰船 H2 不同航速、不同阴极保护(牺牲阳极与 ICCP 联合防腐)状态下的 ASG 系统工作输出

电流见表 2。

表 2 试验舰船 H2 不同状态下的 ASG 系统工作输出电流  
Tab.2 ASG system output current of vessel H2  
under different states

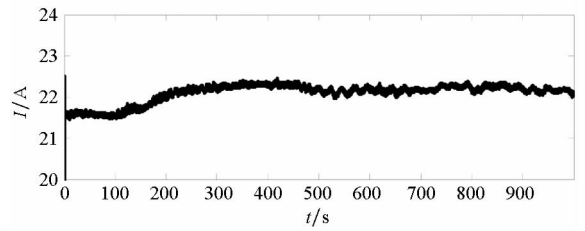
航速/ kn	保护电 位/V	ICCP 电流/A		ASG 输出电流/A	
		ASG 关	ASG 开	左舷	右舷
	-0.8	8	19	22.5	20.9
5.8	-0.9	22	34	25.0	23.2
	-1.0	37	48	27.3	25.5
13.3	-0.8	9	20	23.3	21.8
	-0.9	22	35	25.4	23.7
22.5	-1.0	38	50	28.2	26.3
	-0.8	8	20	24.2	22.6
22.5	-0.9	23	38	26.8	25.1
	-1.0	40	52	30.1	28.0

由表 2 可发现:①在相同航速条件下,随着保护电位的负移,ASG 系统及阴极保护系统输出电流均出现明显增大,且在参比电位由  $-0.8\text{ V}$  变化为  $-0.9\text{ V}$  和  $-0.9\text{ V}$  变化为  $-1.0\text{ V}$  时,ASG 系统输出电流及阴极保护系统输出电流的增量基本一致;②恒电位仪的电流变化值明显大于轴电流的变化值,这是由于恒电位仪的输出电流除了保护船体外,还有一部分电流通过螺旋桨返回船壳;③当保护电位相等且航速增大时,ASG 系统的输出电流及阴极保护系统的输出电流未发生显著变化,初步说明了 ASG 系统的输出电流与航速关系不大。

## 6.2 航速

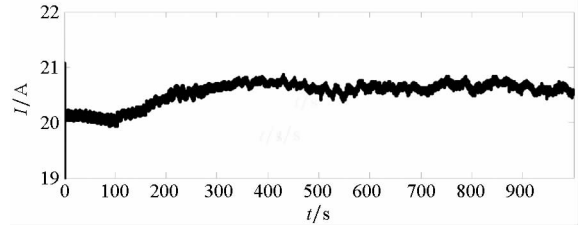
为了进一步验证航速对 ASG 系统输出电流的影响,在短时间内,对试验舰船 H2 进行加减速试验。相同阴极保护状态下,试验舰船 H2 航速由  $2.1\text{ kn}$  变化至  $18.4\text{ kn}$  时经过  $0.5\text{ Hz}$  的低滤波后 ASG 系统的输出电流如图 11 所示,其中,在  $488\text{ s}$  时,加速至  $18.4\text{ kn}$ 。相同阴极保护状态下,试验舰船 H2 航速由  $22\text{ kn}$  降至  $2\text{ kn}$  时,ASG 系统的输出电流如图 12 所示,其中,减速时刻为  $620\text{ s}$ 。由图 11 和图 12 可知,在相同阴极保护状态条件下,ASG 系统的输出电流随着航速的增大,略有增加,但增加幅度不明显。

由 Nernst-Plank 方程可知,舰船与螺旋桨构成的电解偶电流主要由电迁移、扩散和对流三种传质方式<sup>[10]</sup>,电迁移控制的电化学反应对应的是



(a) 左轴 ASG 输出电流

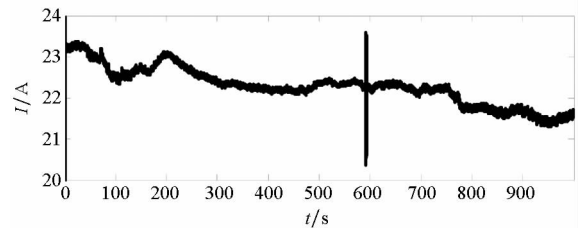
(a) ASG output current of left shaft



(b) 右轴 ASG 输出电流

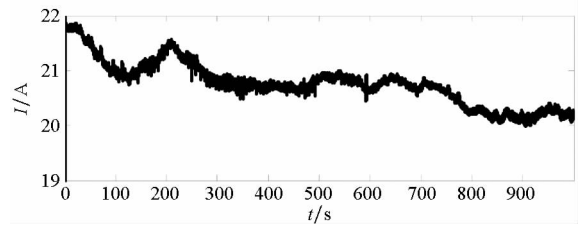
(b) ASG output current of right shaft

图 11 加速试验不同航速条件下的 ASG 系统输出  
Fig. 11 Outputs of the ASG in speeding up period



(a) 左轴 ASG 输出电流

(a) ASG output current of left shaft



(b) 右轴 ASG 输出电流

(b) ASG output current of right shaft

图 12 减速试验不同航速条件下的 ASG 系统输出  
Fig. 12 Outputs of the ASG in slowing down period

电化学反应,其他两种控制的电化学反应对应的是浓差极化。舰船在海水中航行时,舰船腐蚀为吸氧腐蚀,由于新鲜海水的氧离子浓度基本不变,因此,舰船的腐蚀电化学反应主要为电化学反应。当舰船在某海域航行时,考虑到海水的温度、盐度和电导率等参数不会发生大的改变,从而材料的极化电阻基本保持不变。即使极化电阻发生变化,由于极化电阻较涂层电阻和海水电阻小得多,因此,航速变化时,腐蚀和防腐电流将不发生大的改变,即 ASG 系统的负载电流将不发生明显改

变。综上分析可知,ASG 系统的负载电流与阴极保护系统的保护电位值密切相关,而与航速关系不大。

## 7 结论

在理论分析的基础上,自主研发了主动式轴接地补偿系统原理样机,并进行了试验验证。结果表明:所研制的主动轴接地补偿系统能够有效地消除碳刷和滑环之间接触电阻变化引起的轴频电场信号,抑制效果可达 90% 以上,且 ASG 系统的最大输出电流与阴极保护状态密切相关,而与航速关系不大。同时,当轴地等效电阻在回路中的比例较大时,ASG 系统开启后,将导致静电场信号增加,这为不同类型舰船 ASG 系统的研制奠定了基础。

## 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 Shengguang. Physical field of warship[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [2] Dymarkowski K, Uczciwek J. The extremely low frequency electromagnetic signature of the electric field of the ship[C]// Proceedings of Undersea Defense Technology Conference, 2001.
- [3] Dymarkowski K, Uczciwek J. Ships detection based on measurement of electric field in disturbance existing region [C]// Proceedings of Undersea Defence Technology Conference, 2000.
- [4] Hubbard J C, Brooks S H, Torrance B C. Practical measures for reduction and management of the electro-magnetic signatures of in-service surface ships and submarines [C]// Proceedings of Undersea Defense Technology Conference, 1996.
- [5] Birsan M. Variability of ship's electric signature during the RIMPASS trial [R]. Canada: Defence Research and Development Canada, 2015.
- [6] 张丽. 外加电流阴极极化下环氧富锌涂层的失效行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.  
ZHANG Li. The influence of cathodic polarization on performance of zinc-rich coatings on steel [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013. (in Chinese)
- [7] 贾芳科. 几种船舶涂层失效过程的电化学阻抗谱研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.  
JIA Fangke. Investigating the failure process of several marine coatings by EIS [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] Howard L C, Ballston L N. Naval electro-chemical corrosion reducer: 5052962[P]. 1990-10-01.
- [9] 常明, 姜润翔, 张伽伟, 等. 基于主动式轴接地系统的舰船轴频电场抵消方法[J]. 海军工程大学学报, 2015, 27(1): 64-67.  
CHANG Ming, JIANG Runxiang, ZHANG Jiawei, et al. Characteristic of ship's extremely low frequency electrical field study[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2015, 27(1): 64-67. (in Chinese)
- [10] 贾铮, 戴长松, 陈玲. 电化学测量方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.  
JIA Zheng, DAI Changsong, CHEN Ling. Electrochemistry measurement methods [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015. (in Chinese)