

泵喷推进型潜艇电场防护效果与阴极保护性能分析*

柳懿,唐炜豪,王向军,汪石川,胡育诚
(海军工程大学电气工程学院,湖北武汉 430033)

摘要:为探究泵喷推进型潜艇在电场防护和外加电流阴极保护这两种典型工作形态下的防护效果,采用边界元法建立了此型潜艇的腐蚀相关静电场模型,仿真分析了导流罩和导叶对电场防护与阴极保护效能的影响。结果表明:相较于传统推进方式,泵喷推进型潜艇在海水中电场峰峰值降低了约38%,且其仅需约50%的电流值便能达到更优的电场防护效果。此外,不论阴极保护过程中艇体涂层是否完好,泵喷推进装置处的电场峰值均有一定程度的降低,这表明泵喷推进装置具有更好的电场隐身性能;然而在对泵喷推进型潜艇外加电流阴极保护的过程中,只能在船身和大轴处达到较好的保护效果,其导流罩内部的叶轮和导叶难以达到保护电位,处于欠保护状态,局部腐蚀防护仍需加强。

关键词:泵喷推进;潜艇隐身;电场防护;阴极保护;边界元法

中图分类号:TM15 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)04-215-09



听语音
与作者互动
聊科研

Analysis of electric field protection effect and cathodic protection performance of pump-jet propulsion submarine

LIU Yi, TANG Weihao, WANG Xiangjun, WANG Shichuan, HU Yucheng

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to explore the protective effect of pump-jet propulsion submarine under the two typical working modes of electric field protection and impressed current cathodic protection, the boundary element method was used to establish the corrosion-related electrostatic field model of the submarine. The influence of fairing and guide vane on the electric field protection and cathodic protection performance was simulated and analyzed. The results show that compared with the traditional propulsion mode, the peak-to-peak value of electric field of pump-jet propulsion submarine in seawater is reduced by about 38%, and it can achieve better electric field protection effect with only about 50% current value. In addition, no matter whether the whole boat coating is intact or not in the cathodic protection process, the peak electric field at the pump-jet propulsion device is reduced to a certain extent, indicating that the pump-jet propulsion device has better electric field stealth performance. However, in the process of impressed current cathodic protection for pump-jet propulsion submarines, good protection effect can only be achieved at the hull and the major axis. The impeller and guide vane inside the fairing are difficult to reach the protection potential, which is in an under-protection state, so local corrosion protection still needs to be strengthened.

Keywords: pump-jet propulsion; submarine stealth; electric field protection; cathodic protection; boundary element method

现代潜艇为了更好地适应隐身性能的设计指标,广泛采用泵喷推进器作为驱动动力,这种推进器不同于传统的螺旋桨驱动,通过在旋转叶轮外侧加装导流罩改善进流条件,不仅使得流场更加均匀,而且屏蔽了叶轮旋转的噪声^[1-2],其中的定子导叶还可以改变水流动的方向,在喷口处实现轴向的射流,进一步提高推进效率^[3]。此外,由于导流罩的存在,泵喷推进下的旋转的叶轮并没有完全暴露在海水中,改变了舰船水下电场分布,目前,国内外关于泵喷推进下潜艇水下电场的研

究鲜见报道。

舰船处于海水环境时,由于其钢制的船壳和铜制的旋转叶轮之间存在电位差,再经由海水、大轴和舰船内部的一些器件及机械线路形成电气导通的状态,从而构成了一个宏观复杂的腐蚀电池^[4-5]。这种电气导通状态很难从物理上完全隔绝,导流罩的存在使得腐蚀电流无法从潜艇侧面流入叶轮,改变了原有电场的强度和方向^[6]。然而腐蚀电流仍然可以从导流罩前后开口流向叶轮;新型的无轴泵推系统由中心驱动变为了四周

* 收稿日期:2022-01-13

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(41476153)

作者简介:柳懿(1981—),男,湖北武汉人,副教授,博士,硕士生导师,E-mail:timjoan@163.com

驱动^[7-8],大轴的取消消除了舰船水下电场最主要的电气通路,能够大大地降低水下电场,但是腐蚀电流仍可以从导流罩固定处或者舰船其他机械线路找到通路。为了更严谨地研究潜艇水下电场,采用有轴泵推下的潜艇作为研究对象,通过边界元方法^[9]重点研究导流罩和导叶的存在对潜艇水下电场的影响。

1 潜艇边界元电场计算基本原理

潜艇腐蚀电场的边界元数学模型可由以下拉普拉斯方程与边界条件^[10]表示:

$$\nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0 \quad u \in \Omega \quad (1)$$

式中, u 表示求解域内的电位, x, y, z 为三维空间中场点的坐标值, Ω 为整个海水域。

$$u = u_0 \quad (2)$$

$$q = \frac{\partial u}{\partial n} = q_0 \quad (3)$$

$$q = \frac{i_a}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} f_a(u_a) \quad (4)$$

$$q = \frac{i_c}{\sigma} = \frac{1}{\sigma} f_c(u_c) \quad (5)$$

式(2)、式(3)、式(4)、式(5)分别表示恒电位边界、恒电流边界、阳极极化边界和阴极极化边界的边界条件。其中: u_0 为恒电位边界上电位 u 的恒定值, q 为电位的法向导数, n 为边界外法线, q_0 为恒电流边界上 q 的恒定值, σ 为海水电导率, i_a 和 i_c 分别为阳极和阴极的电流密度, $f_a(u_a)$ 和 $f_c(u_c)$ 分别为阳极和阴极的极化方程。

将区域边界离散化剖分,运用 Green 定理构造边界积分方程组:

$$\mathbf{H}u = \mathbf{G}\sigma q \quad (6)$$

式中, \mathbf{H} 和 \mathbf{G} 为系数矩阵。将边界条件代入式(6)中,迭代求解得到边界上的电位和电流密度分布,进而根据式(1)推广到海水域 Ω 内,可求解电场分布。

2 泵喷推进下电场防护效果研究

外加电流的电场防护方法是通过在船体上安装电场补偿装置,使补偿电流与腐蚀电流在海水中产生的电场方向相反,从而实现降低海水中腐蚀电场的目的^[11-12]。传统螺旋桨推进方法的螺旋桨完全暴露在水域中,而泵喷推进的导流罩使得舰船产生的腐蚀电流通路减少,理论上泵喷推进具有更小的腐蚀电场。

2.1 仿真设定

为了研究泵喷推进与传统螺旋桨推进电场分布的不同之处,采用 COMSOL 仿真软件中电流分布(边界元)接口建立了潜艇腐蚀静电场模型,模型网格剖分如图 1 所示。

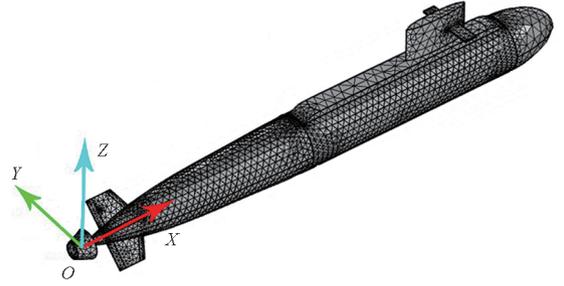


图 1 潜艇三维网格剖分

Fig. 1 3D mesh generation of submarine

由于潜艇在深海工作时整个船体均浸没在海水中,设置潜艇破损状态为船身全局破损,总破损率为 2%,外加电流阴极保护(impressed current cathodic protection, ICCP)系统关闭,其求解域和边界条件设定如下:①无限空区域为均匀海水,设定电导率 $\delta = 4 \text{ S/m}$;②将铜合金的非线性极化曲线设置为旋转叶轮的边界条件;③将 2% 涂层破损的碳钢非线性极化曲线设定为整个船身与舵的边界条件;④由于导流罩涂层的存在,设置导流罩边界条件为绝缘;⑤受海水中含氧量和海水流速限制,设置潜艇船身和舵表面发生氧化还原反应的极限电流密度为 0.6 A/m^2 ;⑥为了简化模型,忽略潜艇大轴电阻,叶轮与船体的电势都设置成零。

以潜艇叶轮旋转中心为坐标原点,构建坐标系,其中 X 轴为潜艇大轴轴向方向,为了直观地分析潜艇水下腐蚀电场,设置四条电场测线分别位于潜艇正下方、正上方、正左方和正右方,命名为测线一、测线二、测线三、测线四,四条测线皆平行于 X 轴且距离 X 轴 16 m,其坐标位置见表 1。

表 1 四条测线位置分布

Tab. 1 Position distribution of four measuring lines

单位:m

测线编号	起点	终点
测线一	(-80, 0, -16)	(160, 0, -16)
测线二	(-80, 0, 16)	(160, 0, 16)
测线三	(-80, 16, 0)	(160, 16, 0)
测线四	(-80, -16, 0)	(160, -16, 0)

2.2 补偿阳极位置及电流选择

为了对泵喷推进下电场补偿性能做出分析,需要确定补偿电流的位置。文献[10]仿真得出补偿阳极分布在距离螺旋桨中心5 m处时,电场模量的防护效果可以达到最小。本文在距螺旋桨中心轴向距离5 m处即 $X = 5\text{ m}$ 的尾舵位置中部设置补偿阳极,如图2(a)所示,艉舵上的补偿阳极分别编号为①②③④,如图2(b)所示。

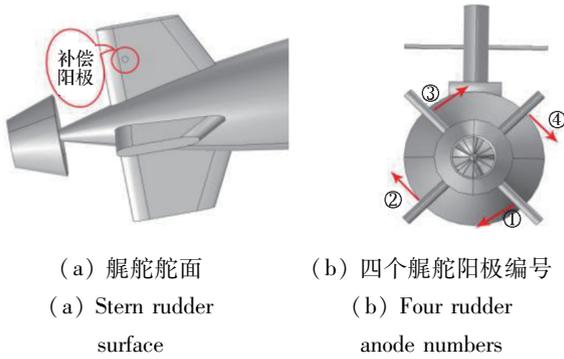


图2 补偿阳极位置分布

Fig. 2 Position distribution of compensation anode

根据补偿阳极布放的不同,设置三种补偿阳极的布放情况:一个补偿阳极①,如图3所示;两个相对的补偿阳极①③,如图4所示;四个补偿阳极①②③④,如图5所示。为了找到最优补偿电流,在仿真过程中从零开始依次递增设置补偿电流值,观察四条测线上电场模值的变化情况,仿真设置所有参与外加电流补偿的阳极输出电流均相等,其中横轴补偿电流为补偿系统工作时所有补偿阳极的总电流,同时定义使得测线上电场模峰值最小的电流数值为最优补偿电流。

分析图3可知,当单个补偿阳极工作时,潜艇周围的电场分布并不均匀,四个方向上的电场最优补偿电流不一致,随着补偿电流的递增,最接近补偿阳极①的测线一最先达到最优补偿电流值,

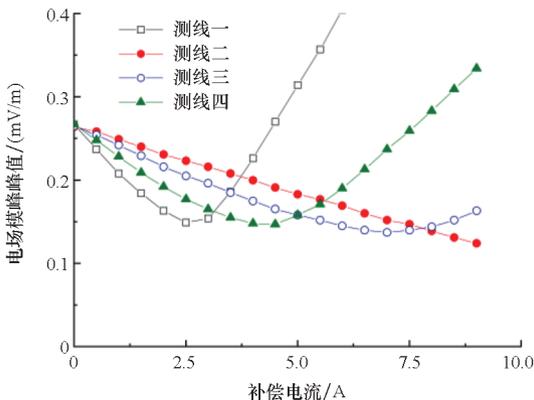


图3 一个补偿阳极①工作

Fig. 3 A compensation anode ① work

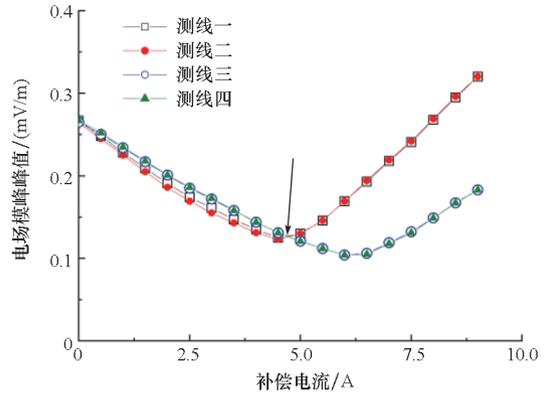


图4 两个相对的补偿阳极①③工作

Fig. 4 Two opposite compensation anodes ①③ work

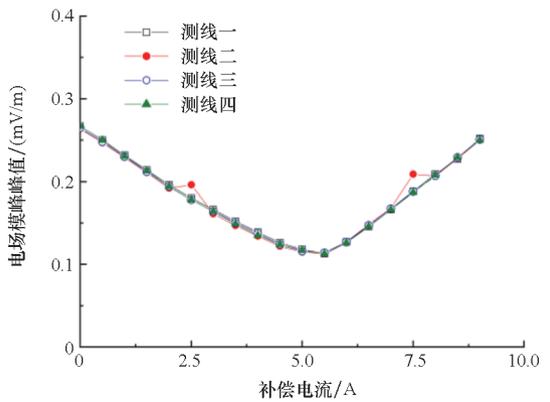


图5 四个补偿阳极①②③④工作

Fig. 5 Four compensation anodes ①②③④ work

距离补偿阳极最远的正上方测线二在设定的补偿电流区间内未达到最优补偿电流。

可见,单个补偿电极由于在潜艇各个方向上的电场防护效果不相同:距离补偿阳极近的方向电场防护效果好,仅需要较小的电流即可达到最优补偿电流。距离补偿阳极远的方向电场防护效果差,需要更大的电流才能达到最优补偿电流。实际工作时难以选取阳极电流使潜艇各个方向上电场防护效果都能达到最优。

分析图4可知,当两个相对的补偿阳极①③工作时,相对的两条测线随着补偿电流的增大,电场模峰值变化趋势趋于一致,四条测线上电场模峰值都是先减小后增大,其中测线一、二先达到最优补偿电流,测线三、四随后达到最优的补偿电流。四条测线在图4中交于一点,即为图4中四条测线的箭头所指交点处,记此点对应的电流值为均匀补偿电流。

由于补偿阳极的输出电流不能同时满足四条测线的最优补偿,而均匀补偿电流在四条测线最优补偿电流的最小值和最大值之间,是补偿电流-电场模峰值图中四条测线的交点,所以进

行均匀补偿是可实现的,并且可以使得各个测线上的电场防护效果保持一致。

分析图 5 可知,当四个补偿阳极①②③④同时工作时,四条测线上的电场模峰峰值变化趋势一致,可见当补偿阳极在潜艇周向均匀分布时,潜艇四个方向上的电场分布同样均匀,此时易于选择各个方向上都满足最优补偿的补偿电流。

2.3 电场补偿效果分析

由于潜艇补偿阳极的安装调试较为复杂,成本较高,为了保证潜艇的持续作战能力,表 2 分析了仅使用两个补偿电极进行电场防护的可行性,在螺旋桨和泵喷两种推进方式下分析同一型号潜艇电场分布。将电场防护效果定义为:

$$\Delta |E| = \frac{|E|_0 - |E|_c}{|E|_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中, $\Delta |E|$ 表示电场防护效果, $|E|_0$ 表示无电流补偿即自然腐蚀状态下测线上电场的峰峰值, $|E|_c$ 表示外加电流补偿时测线电场峰峰值。

分别计算各个测线上的最优补偿电流 I_{c1} 和四条测线均匀补偿电流 I_{c2} 对应的电场峰峰值 $|E|_{c1}$ 和 $|E|_{c2}$, 以及电场防护效果 $\Delta |E|_1$ 和 $\Delta |E|_2$, 如表 2 所示, 其中均匀补偿电流为图 4 中箭头指向的四条测线交点处电流。分析表 2 可知:

1) 在无电流补偿状态下, 各个测线的电场峰峰值几乎相同, 可见电场的分布较为均匀, 其中泵喷推进的四条测线电场峰峰值在 0.265 mV/m 左右, 螺旋桨推进的电场峰峰值在 0.428 mV/m 左右, 相较于螺旋桨推进, 泵喷推进的电场峰峰值降低了约 38%。

2) 针对各个测线的最优补偿, 可以看出测线一、二仅需要较小的电流就能达到最优补偿, 且二

者最优补偿电流相同。由于测线三、四与补偿阳极的距离较远, 需要更大的补偿电流, 螺旋桨推进的测线三、四最优补偿电流是测线一、二的 1.5 倍, 电场防护效果增加了约 7.2%; 泵喷推进的测线三、四最优补偿电流是测线一、二的约 1.33 倍, 电场防护效果增大了约 7.8%。在测线一、二上, 泵喷推进最优补偿电流仅为螺旋桨推进的 56.3%, 而电场防护效果增大了约 4.2%; 而在测线三、四上, 泵喷推进最优补偿电流仅为螺旋桨推进的 50%, 其电场防护效果增大了约 4.5%。

3) 螺旋桨推进的均匀补偿电场防护效果在 48.5% 左右, 而泵喷推进的均匀补偿电场防护效果在 52.0% 左右。由于电场防护效果是相对于这两种推进方式各自自然腐蚀状态的, 计算泵喷推进均匀补偿相对于螺旋桨推进的自然腐蚀状态的电场防护效果在 70.1% 左右, 可见泵喷推进的潜艇在电场隐身方面有着显著的优势。

四条测线上的电场分布如图 6 所示(测线三和测线四的电场分布存在微小差别, 但此微小差别在电场分析时可忽略), 电场峰峰值出现在螺旋桨对应的 X 轴坐标附近, 即 $X = 0$ m 的位置, 这是由于螺旋桨或旋转叶轮在腐蚀反应里作为阴极产生的, 且测线上的电场分布呈现由峰峰值处向两侧递减的趋势。

1) 自然腐蚀状态下, 由于整个船体均匀腐蚀, 在整个船体即 0 ~ 60 m 处电场模值大小较为接近, 远离船体后电场模值开始逐步递减, 电场分布图呈现出如图 6 测线一、三、四中的自然腐蚀图像。同时由于潜艇水平舵的存在, 使得正上方的测线二在自然腐蚀状态下出现了一个较小的峰值。

2) 加入均匀补偿电流进行电场补偿后, 可以

表 2 两个相对的补偿阳极①③补偿电流的选择及其电场防护效果

Tab. 2 Two opposite compensation anodes ①③ selection of compensation current and protection effect of electric field

测线编号	$ E _0 / (\text{mV/m})$	I_{c1} / A	$ E _{c1} / (\text{mV/m})$	$\Delta E _1 / \%$	I_{c2} / A	$ E _{c2} / (\text{mV/m})$	$\Delta E _2 / \%$
螺旋桨测线一	0.427	8.0	0.218	48.9	9.0	0.221	48.2
螺旋桨测线二	0.430	8.0	0.218	49.3	9.0	0.220	48.8
螺旋桨测线三	0.427	12.0	0.186	56.4	9.0	0.220	48.4
螺旋桨测线四	0.428	12.0	0.186	56.5	9.0	0.219	48.8
泵喷测线一	0.267	4.5	0.125	53.2	4.7	0.128	52.1
泵喷测线二	0.264	4.5	0.123	53.4	4.7	0.127	51.9
泵喷测线三	0.265	6.0	0.104	60.8	4.7	0.128	51.7
泵喷测线四	0.267	6.0	0.104	61.0	4.7	0.127	52.4

看到图中各个测线 $X=0$ m 位置处的电场峰峰值显著减小,各个测线上船体 $0 \sim 60$ m 处大小较为接近的电场分布消失不见,电场模值由 $X=0$ m 处的峰峰值向测线两端迅速递减,这是因为补偿电流抵消了潜艇腐蚀带来的腐蚀电场。由于电场模峰峰值在整条测线上极为明显,具有代表性,所以利用测线上的电场模峰峰值来评估电场防护效果是可行的。

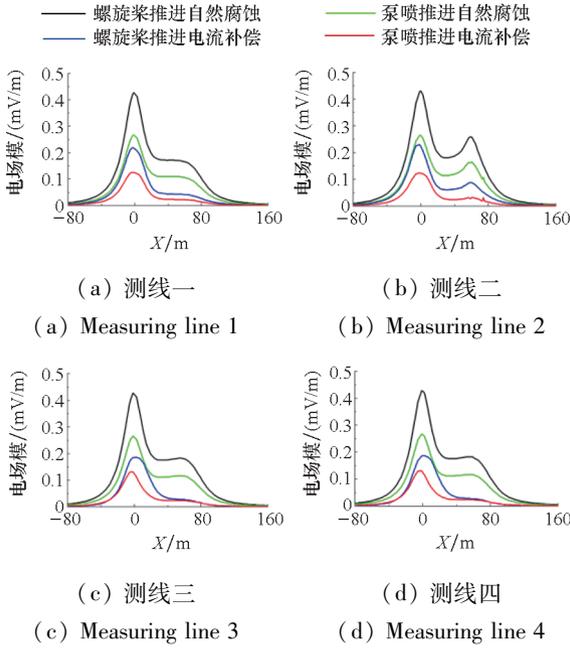


图6 四条测线上的电场分布

Fig.6 Electric field distribution on four measuring lines

3 泵喷推进下外加电流阴极保护研究

外加电流阴极保护法的原理是由外部的直流电源直接向需要被保护的船体通以阴极电流,使之阴极极化,达到阴极保护的目的^[13-14]。其核心参数是保护电位,通常需要在船体上安装参比电极判断船身是否受到足够的保护。泵喷推进导流罩的存在使得罩内大轴和导叶难以接受辅助阳极的极化电流,可能出现保护不完全的情况,本节对此种情况进行仿真分析。

3.1 仿真设定

在上一节讨论的电场防护仿真设定的基础上,开启 ICCP 系统,此时潜艇船身受到充足保护,船身不再做腐蚀反应的阳极。结合实际情况,由于旋转叶轮和大轴未敷设涂层且具有不一样的电化学特性,易于发生电偶腐蚀^[15],为了研究 ICCP 系统的保护性能,在其余条件不变的情况下,将仿真边界条件更改如下:

1) 船身和舵分两种情况讨论:a. 涂层完好,

边界条件设定为绝缘;b. 涂层破损,边界条件设定为 2% 涂层破损的碳钢非线性极化曲线。

2) 将旋转叶轮或螺旋桨材料设置为镍铝青铜(nickel aluminum bronze, NAB)合金。

3) 大轴材料采用 625 不锈钢合金。两种材料的电化学参数参照文献[16]。

4) 为了满足模型收敛性要求,将 a 情况中计算得出的边界电位结果设置为 b 情况中的迭代初始值。

在艉舵两个相对的补偿阳极①③的基础上,于潜艇船身两侧 $X=30$ m、 $X=60$ m 处增设两对辅助阳极,分别记为⑤⑥、⑦⑧,同时在 $X=15$ m 处设一对参比电极。涂层完好时,①③⑤⑥同时工作,⑦⑧不工作;涂层 2% 破损时,①③⑤⑥⑦⑧六个辅助阳极同时工作。电极位置如图 7 所示,图中仅展示船身辅助阳极⑤和⑦的位置,辅助阳极⑥和⑧以 XZ 平面为对称平面分别对称分布于⑤和⑦的另一侧。



图7 辅助阳极与参比电极位置示意

Fig.7 Position indication of auxiliary anode and reference electrode

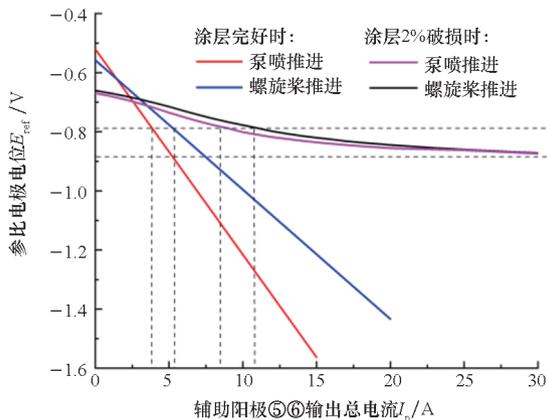
3.2 辅助阳极电流的选择

记参比电极处表面电位值为 E_{ref} (参比 Ag/AgCl 电极),记船侧⑤⑥两辅助阳极输出总电流为 I_p ,当船身涂层 2% 破损时,六个辅助阳极同时工作,令⑦⑧两辅助阳极输出总电流与⑤⑥输出总电流相等,同为 I_p 。由于泵喷推进电场防护过程中,两个相对的补偿阳极同时工作时均匀补偿电流为 4.7 A,为了在设计阴极保护的过程中同时兼顾电场防护性能,设置阴极保护仿真中辅助阳极①③输出总电流为 $4.7 \text{ A} + I_p$,同理,对于螺旋桨推进方式①③输出总电流为 $9 \text{ A} + I_p$,仿真设置 I_p 从零开始递增。

参比电极电位平均值变化如图 8 所示。图 8(a)中,涂层完好时参比电极电位变化趋势呈线性,这是由于船身和舵的涂层完好时边界条件设置为绝缘,辅助阳极输出电流全部流向推进装置,船体和舵不流入电流,其表面电位与阳极输出电流变化线性相关。

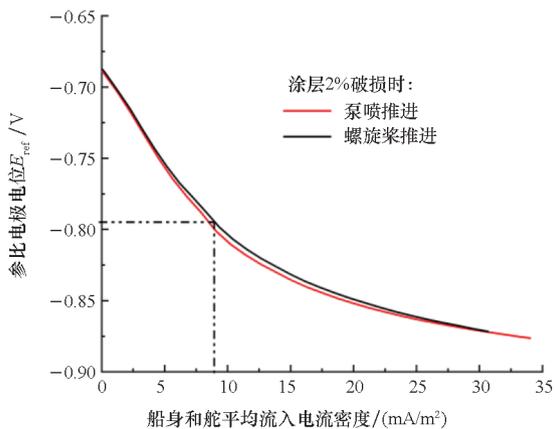
船身和舵涂层破损时,参比电极电位随着船身和舵的非线性极化而在图 8 中呈现非线性变

化,需要更大的保护电流才能使参比电极电位降低。ICCP 系统正常工作时,泵喷推进保护电流是螺旋桨推进的 91%,此时图中两种推进方式的电位变化趋势几乎一致,这表明船体和舵的涂层状态依然是影响辅助阳极输出保护电流的主要因素。而在船身和舵涂层完好时,泵喷推进的潜艇大约需要螺旋桨推进 ICCP 系统保护电流的 63% 即可使 ICCP 系统正常工作,具有更少的电能消耗。



(a) 参比电极电位随 I_p 的变化

(a) Change of reference electrode potential with I_p



(b) 参比电极电位随船体和舵平均流入电流密度的变化

(b) Change of reference electrode potential with average current density of ship and rudder

图 8 两种推进方式下参比电极电位变化拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of reference electrode potential change under two propulsion modes

由于船身所用高强度钢(500 ~ 900 MPa)的最佳保护电位在 $-0.89 \sim -0.79 \text{ V}$ 范围内^[17],可知参比电极电位值对应的船体状态为:①欠保护,即 $E_{\text{ref}} > -0.79 \text{ V}$;②最佳保护,即 $-0.79 \text{ V} \geq E_{\text{ref}} \geq -0.89 \text{ V}$;③过保护,即 $E_{\text{ref}} \leq -0.89 \text{ V}$ 。根据最佳保护电位范围,结合图 8 设置仿真过程中

阳极输出电流,如表 3 所示。

表 3 阴极保护仿真中辅助阳极输出电流
Tab. 3 Auxiliary anode output current in cathodic protection simulation

推进形式	涂层情况	单位:A			总
		①③	⑤⑥	⑦⑧	
泵喷	完好	9.2	4.5	0	13.7
螺旋桨	完好	15.5	6.5	0	22.0
泵推	破损	18.7	14	14.0	46.7
螺旋桨	破损	23.0	14	14.0	51.0

3.3 阴极保护效果分析

船体和舵 2% 涂层破损时,外加电流阴极保护表面电位如图 9 所示。可以看出,除了靠近辅助阳极或推进装置的区域,整个船体电位分布相当均匀,在 -0.85 V 左右,达到了最佳保护电位。船体和舵平均保护电流密度为 15.8 mA/m^2 。

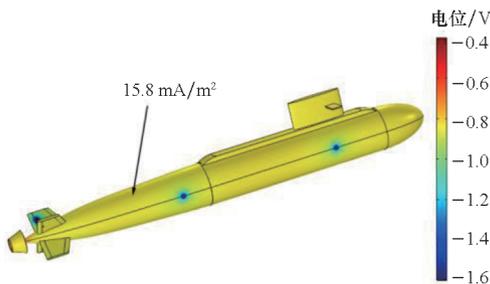
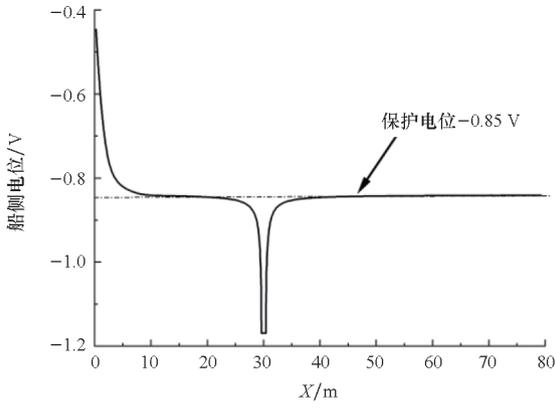


图 9 泵喷推进下外加电流阴极保护船身电位

Fig. 9 Ship body potential of external current cathodic protection under pump-jet propulsion

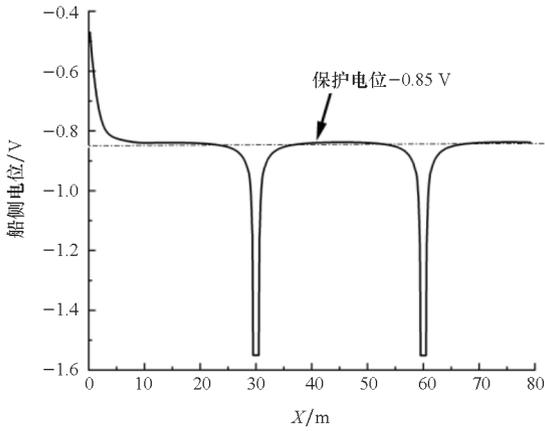
图 10 为泵喷推进下,坐标原点到潜艇右侧阳极连线延长线的船身电位,该图表明辅助阳极周围的船体表面电位较低,存在过保护的风险,而与船体表面其他区域相比,大轴附近的电位较高,这表明在船体中这一位置相较于其他位置受到的保护较少,处于欠保护状态。由于涂层破损时需要的阴极保护电流更大,对比图 10(a)和图 10(b)可以看出,涂层破损时的辅助阳极周围电位更低,同时因为涂层破损时⑤⑥和⑦⑧号阳极输出电流相等,在图 10(b)上出现了两个几乎相同的负峰值。

图 11 显示了船身和舵涂层 2% 破损时阴极保护下两种推进装置的表面电位。图 11(a)泵喷推进中叶轮电位范围为 $-0.44 \sim -0.36 \text{ V}$,导叶电位范围为 $-0.54 \sim -0.42 \text{ V}$,大轴电位范围为 $-0.56 \sim -0.36 \text{ V}$,其电位最大值出现在叶轮和



(a) 船身和舵涂层完好

(a) Hull and rudder are well coated



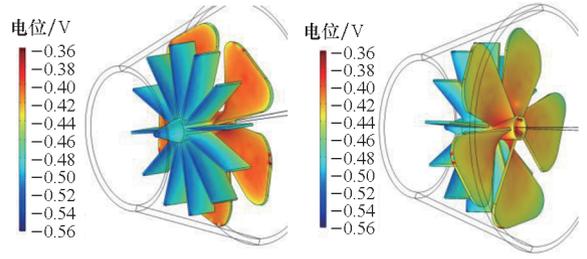
(b) 船身和舵涂层 2% 破损

(b) 2 % damage of hull and rudder coating

图 10 ICCP 系统开启后泵喷推进潜艇右侧船身电位
Fig. 10 Pump-jet propulsion submarine right body potential after ICCP system opens

轴连接处, 电位最小值出现在大轴末端。图 11(b) 中叶轮表面电位较高, 在 -0.44 V 左右。对比图 11(a) 和图 11(b) 可以发现, 泵喷推进装置叶轮正面相对其背面可以更好地接受阴极保护。图 11(c)、图 11(d) 所示螺旋桨推进方式中, 螺旋桨与大轴电位分布均在 $-0.50\text{ V} \sim -0.40\text{ V}$ 范围内, 螺旋桨与大轴连接处电位最高, 远离连接处的位置电位较低。出现这种电位分布情况的原因是异种金属在海水溶液中接触形成了电偶腐蚀。

通过 NAB 合金和 625 不锈钢合金的极化曲线可知, 叶轮和螺旋桨的材料 NAB 合金的保护电位范围为 $-0.60\text{ V} \sim -0.45\text{ V}$, 而大轴采用的 625 不锈钢合金材料的保护电位范围为 $-0.55\text{ V} \sim -0.40\text{ V}$ ^[10]。泵喷系统中导叶部分的材料采用高强度钢材料时, 其保护电位需要小于 -0.79 V 。因此, ICCP 系统工作过程中, 螺旋桨推进的大轴表面与螺旋桨大部分区域都能达到保护电位, 而

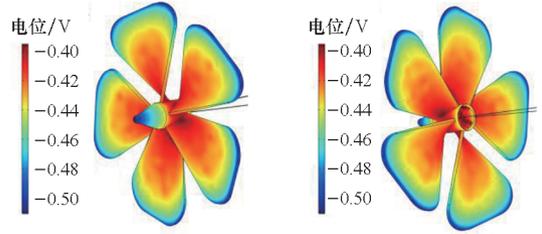


(a) 泵喷推进装置背面

(b) 泵喷推进装置正面

(a) Pump-jet propulsion back

(b) Pump-jet propulsion front



(c) 螺旋桨推进装置背面

(d) 螺旋桨推进装置正面

(c) Propeller propulsion back

(d) Propeller propulsion front

图 11 外加电流阴极保护时推进装置处电极电位
Fig. 11 Potential at propulsion device under external current cathodic protection

泵喷推进导流罩内的叶轮和导叶存在明显欠保护的情况, 大轴部分与叶轮连接处也同样处在欠保护的电位。

仿真计算两种推进装置的保护电流密度平均值, 螺旋桨推进中的螺旋桨和大轴电流密度平均值分别为 1.42 A/m^2 和 1.34 A/m^2 , 泵喷推进中的叶轮和其大轴电流密度平均值分别为 0.88 A/m^2 和 0.55 A/m^2 。可以看出, 泵喷推进装置处的保护电流密度明显低于螺旋桨推进, 阴极保护性能欠佳。

泵喷推进下 ICCP 系统保护电流流向如图 12 所示, 其中红色线条表示保护电流的流动轨迹, 保护电流在对潜艇尾部推进装置进行保护时, 由于导流罩的存在, 保护电流只能从导流罩进水口和出水口流入推进装置, 这极大降低了阴极保护效果。

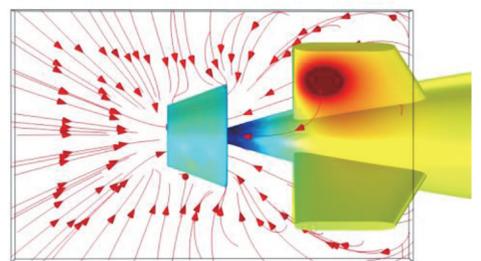


图 12 ICCP 系统保护电流流向俯视图
Fig. 12 Flow direction view of ICCP system protection current

为了更好地分析泵喷推进装置内的阴极保护性能,绘制船身和舵涂层 2% 破损时,叶轮背面和导叶电极电位平均值随 I_p 变化双 Y 轴图,如图 13 所示。可以看出,随阴极保护电流增大,叶轮背面与导叶电极电位下降幅度较小,这说明保护电流难以到达此处进行保护,这是由于叶轮背面和导叶距离接近,且周围存在导流罩影响,易于发生腐蚀,若继续增大输出保护电流,会导致辅助阳极周围过保护区域增大,影响潜艇寿命。

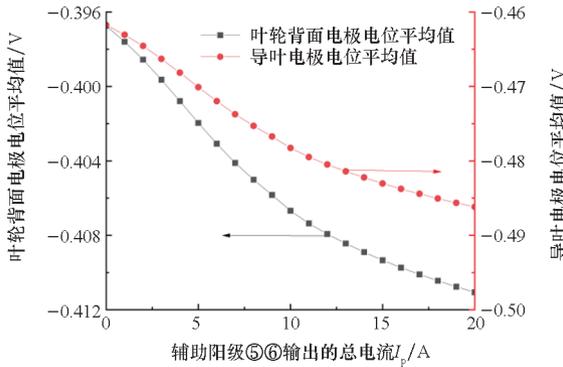


图 13 叶轮背面和导叶的电极电位平均值随 I_p 的变化

Fig. 13 Change of average potential of impeller back and guide vane with I_p

3.4 ICCP 系统电场分析

两种推进方式下潜艇周围四条测线的电位分布如图 14 所示,电场峰值出现在 $X = 0$ m、 $X = 30$ m 和 $X = 60$ m 附近,这与辅助阳极的布放位置对应。

对比四条测线上 $X = 0$ m 附近的峰值,可以看出,不论船身和舵是绝缘还是破损,泵喷推进 $X = 0$ m 附近的电场峰值相较于螺旋桨推进都有一定程度的减小,船身和舵涂层完好状态下泵喷推进相对于螺旋桨推进电场峰峰值降低了约 40%,潜艇推进装置处电场隐身性能较强。船身和舵涂层破损会导致 $X = 0$ m 附近的电场峰值向 X 轴正方向移动,潜艇正左方和正右方的测线三、四电场峰峰值出现在 $X = 30$ m 附近,由于艏舵涂层破损吸收了部分保护电流,潜艇正上方的侧线二在 $X = 30$ m 处未出现峰值。

对比四条测线中 $X = 30$ m 和 $X = 60$ m 附近的峰值可以看出,当船身和舵涂层完好时,泵喷推进依然有着较小的峰值,而当船身和舵涂层破损时,泵喷推进相对于螺旋桨推进电场峰值差距不明显,在测线一、二上螺旋桨推进的电场峰值略高于泵喷推进,而测线三、四与之相反,这说明不同推进装置对潜艇电场分布的影响主要存在于推进装置周围。

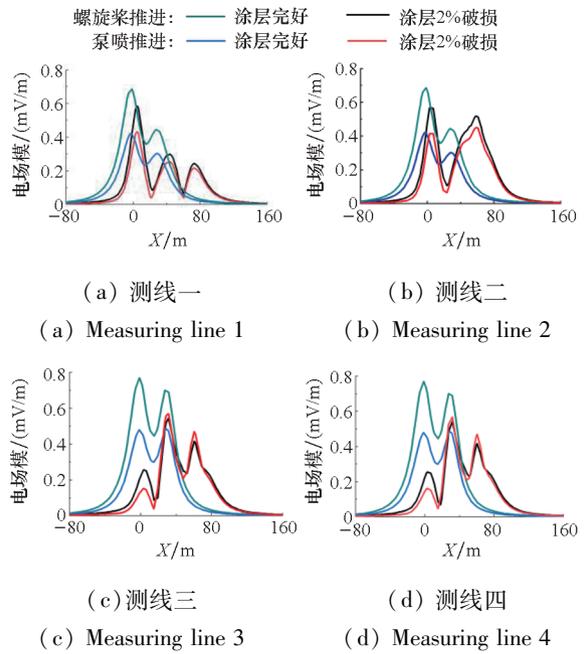


图 14 ICCP 系统开启后两种推进方式的四条测线电场分布
Fig. 14 Electric field distribution of four measuring lines in two propulsion modes after ICCP system opens

4 结论

本文依据边界元法建立的泵喷推进的潜艇电场防护与阴极保护模型,分析了潜艇周围电场分布特征和电场防护效果,同时对 ICCP 系统阴极保护性能进行了研究,与传统螺旋桨推进方法进行了对比,主要结论如下:

1) 选择补偿阳极位置时,单个补偿阳极会造成潜艇周围不同方向的电场分布不均,难以确定补偿电流 I_c ;两个补偿阳极相对分布可以找到一个均匀补偿电流,使得潜艇周围电场分布相对均匀;四个在潜艇周向均匀分布的补偿阳极同时工作时,具有更好的电场防护效果。而在确定补偿阳极位置后,泵喷推进仅需要螺旋桨推进补偿电流的 1/2 左右便能达到更优的电场防护效果。

2) 自然腐蚀状态下,泵喷推进的电场峰峰值相较于螺旋桨推进降低了约 38.1%,当进行电场防护时,螺旋桨推进的均匀补偿电场防护效果在 48.5% 左右,而泵喷推进的均匀补偿电场防护效果在 52.0% 左右。ICCP 系统工作时,不论阴极保护过程中整艇涂层是否完好,泵喷推进装置处的电场峰值均一定程度上小于螺旋桨推进,可见,泵喷推进的潜艇具有较好的电场隐身性能,其推进装置受到电场引信武器攻击的概率更低。

3) 当船身和舵涂层完好时,泵喷推进的潜艇大约需要螺旋桨推进 ICCP 系统保护电流的 63% 即可使 ICCP 系统正常工作,具有更少的电能消

耗;而当船身和舵涂层出现 2% 破损时,船体需要的保护电流更大,由于二者需要保护的船体和舵面积一致,此时两种推进方式电能消耗差距缩小,泵喷推进保护电流是螺旋桨推进的 91%。

4) 在 ICCP 系统对潜艇进行阴极保护的过程中,螺旋桨推进的潜艇能够对整个船体进行较为完整的保护,而泵喷推进只能对船身和大轴达到较好的保护效果,其导流罩内部的叶轮背面和导叶由于保护电流密度较小难以达到保护电位,处于欠保护状态。

参考文献 (References)

- [1] 张明宇,林瑞霖,王永生,等. 潜艇无轴泵喷推进器水下辐射噪声数值预报及分析[J]. 船舶力学, 2018, 22(11): 1323-1332.
ZHANG M Y, LIN R L, WANG Y S, et al. Numerical prediction and analysis of underwater radiated noise of no-shaft pumpjet[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(11): 1323-1332. (in Chinese)
- [2] 付建,王永生. 基于点源模型的螺旋桨负载噪声频域预报[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(4): 77-80.
FU J, WANG Y S. Predicting the loading noise of propeller based on point source model in frequency domain[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(4): 77-80. (in Chinese)
- [3] 王永生. 喷水推进和泵喷推进的概念: 共性、特性及区别[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(5): 1-9, 41.
WANG Y S. Concepts of waterjet propulsion and pumpjet propulsion: their common characteristics, special characteristics and differences[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(5): 1-9, 41. (in Chinese)
- [4] 张济平,柳懿,王向军. 舰船水下静电场防护因素的仿真分析研究[J]. 船电技术, 2019, 39(12): 50-54.
ZHANG J P, LIU Y, WANG X J. Simulation analysis of protective factors of submarine electrostatic field of ships[J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2019, 39(12): 50-54. (in Chinese)
- [5] 张建春,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 J C, WANG X J. 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)
- [6] 嵇斗,王立祝,张建春. 海水电场受物体电导率及其形状影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2020, 42(5): 46-51.
JI D, WANG L Z, ZHANG J C. Analysis of seawater electric field influenced by conductivity and shape of the object[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2020, 42(5): 46-51. (in Chinese)
- [7] 王群. 无轴泵喷推进器——下一代核潜艇的推进系统[N]. 中国国防报, 2017-07-21(14).
- [8] WANG Q. The propulsion system for the next generation nuclear submarine is no-shaft pumpjet [N]. China National Defense Newspaper, 2017-07-21(14). (in Chinese)
祝昊,靳栓宝,王东,等. 无轴泵喷推进器敞水特性[J]. 兵工学报, 2021, 42(4): 835-841.
ZHU H, JIN S B, WANG D, et al. Open-water characteristics of shaftless pump-jet thruster [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(4): 835-841. (in Chinese)
- [9] KIM Y S, KO S J, LEE S, et al. Analysis of underwater electromagnetic field reduction by mixed-type cathodic protection using the boundary element method[J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2017, 55(8): 591-599.
- [10] 徐庆林,王向军,张建春,等. 补偿阳极位置对舰船腐蚀电场防护效果的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 123-128.
XU Q L, WANG X J, ZHANG J C, et al. Influence of compensation anode position on corrosion electric field damping effect of ship [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 123-128. (in Chinese)
- [11] 王向军,嵇斗. 舰船电场防护原理[M]. 武汉: 海军工程大学出版社, 2016.
WANG X J, JI D. Electric field elimination principle of ship [M]. Wuhan: Naval University of Engineering Press, 2016. (in Chinese)
- [12] 林春生,龚沈光. 舰船物理场[M]. 2版. 北京: 兵器工业出版社, 2007.
LIN C S, GONG S G. Ship physical field [M]. 2nd ed. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2007. (in Chinese)
- [13] 柳懿,王向军. 影响舰船外加电流阴极保护电位因素分析及仿真[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(1): 38-41, 62.
LIU Y, WANG X J. Simulation and analysis about the ICCP protective potential of the ship[J]. Total Corrosion Control, 2017, 31(1): 38-41, 62. (in Chinese)
- [14] 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 Q X. Impressed current cathodic protection on the application of anticorrosion of the ship[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(5A): 181-183. (in Chinese)
- [15] 徐庆林,王向军,张建春,等. 温度对舰船阴极保护和腐蚀静电场的影响[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(4): 182-189.
XU Q L, WANG X J, ZHANG J C, et al. Influence of temperature on the cathodic protection and corrosion electrostatic field of ships[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2019, 41(4): 182-189. (in Chinese)
- [16] HACK H P. Atlas of polarization diagrams for naval materials in seawater; CARDIVNSWC-TR-61-94/44 [R]. Bethesda: Naval Surface Warfare Center, 1995.
- [17] 邢少华,李焰,马力,等. 深海工程装备阴极保护技术进展[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 49-53.
XING S H, LI Y, MA L, et al. Research progress in cathodic protection technology for marine infrastructures in deep sea environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(2): 49-53. (in Chinese)