

船体双区域外加电流阴极保护缩比模型模拟研究

梁成浩^{*1,2}, 于楠², 吴建华², 黄乃宝¹

(1. 大连海事大学 机电与材料工程学院, 辽宁 大连 116026;

2. 大连理工大学 化工学院, 辽宁 大连 116012)

摘要: 建立某船 1:100 缩比模型,研究了船体双区域外加电流阴极保护系统中船体保护电位分布.结果表明,双区域阴极保护的优化设计是在船艏区增加 1 组辅助阳极,且参比电极布置在两组辅助阳极之间;船艉区参比电极布置在辅助阳极外侧,此时船体保护电位曲线分布均匀,均在 $-0.80\sim-0.90\text{ V}$,船体得到有效的阴极保护.螺旋桨主轴接地后,发现船艉区辅助阳极附近电位降低,且随轴转动速率增加,辅助阳极附近电位进一步降低.船模主轴不同状态下,优化设计的双区域阴极保护系统,均能达到阴极保护要求.实验验证,采用缩比模型对船体外加电流阴极保护系统进行设计是一种方便、有效的方法,为船体阴极保护优化提供了新途径.

关键词: 缩比模型;外加电流阴极保护;保护电位

中图分类号: TG174.41 **文献标志码:** A

0 引言

海水是一种很强的腐蚀性介质,船舶处于海洋环境时,钢质船体不可避免地要发生腐蚀^[1,2].为了保护船体不受腐蚀,除涂层防腐外,还采用阴极保护系统,包括牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护,前者应用于小型船舶,后者应用于大型船舶.目前船体外加电流阴极保护优化有两种比较常用的方法,即数值计算和模型实验.关于数值计算的研究主要有有限差分法、有限单元法和边界元法^[3,4].模型实验是将原型根据一定的相似准则,从几何外形上按比例缩小制得模型^[5,6],利用模型通过实验进行优化,进而确定原型设计参数的一种优化方法.

目前,国内船体外加电流阴极保护普遍采用一套阴极保护装置,即由一台恒电位仪、一只参比电极和多只辅助阳极组成的阴极保护系统(即单区域阴极保护).这种系统在船体表面涂层完好且船舶静止的情况下,能够达到保护的要求.但是当船体涂层破坏严重时,往往达不到水线下船体全面保护的要求,造成局部腐蚀严重.特别是船舶在航时,螺旋桨高速旋转的扰动作用,往往造成船体

的欠保护.为解决这一问题,本文基于缩比模型理论,建立某船 1:100 缩比模型,并安装两套阴极保护装置,即由两台恒电位仪、两只参比电极和 2 组(4 支)辅助阳极组成的阴极保护系统(即双区域阴极保护).其中,每套阴极保护系统都可以分别针对较小区域内(如船艏区、船艉区)船体电位变化,调整恒电位仪的输出电流,使得船体电位分布趋于均匀,大大提高阴极保护效果、优化阴极保护系统.

本文研究双区域阴极保护系统中参比电极和辅助阳极位置及其数量对船体表面电位的影响规律,进而考察双区域外加电流时螺旋桨主轴转动对船体保护电位的影响.

1 实验方法

实验设施包括船舶模型、实验水池、外加电流阴极保护系统和船体保护电位测量系统.

1.1 船舶模型

船体、舵及减摇鳍采用厚度为 1 mm 的低碳钢 Q235-A 船体钢板,船体焊接材料采用 Q235-A 焊条;轴采用直径为 6 mm 的 Q235-A 圆钢;螺旋桨采用高锰铝青铜;美人架采用 Q235-A 钢及锡

黄铜 HSn62-1。

实验用船舶模型依据某型号船舶 1:100 比例缩小制造,同时模拟实际船体螺旋桨和轴接地的设计,船模长度为 1.36 m。船模只限于船体及螺旋桨的模拟,没有考虑上层建筑的模拟,采用装饰性甲板。船体从船艏到船艉按照肋骨由 0[#]至 250[#]依次进行编号,示于图 1。船模甲板边线配有船舷肋骨号刻度标尺以用于船体表面的具体区域定位。其中 0[#]~180[#]肋骨区域为船艏区,180[#]~250[#]肋骨区域为船艉区。螺旋桨的每个轴上加装 4 个铜滑环,每个铜滑环按 90°角安装 2 个碳刷,实现轴接地。螺旋桨转动过程是以无线遥控操作完成的,并由直流电动机带动其旋转,其转速在 180~360 r/min 无级连续可调。

实验水池尺寸为 1.8 m×0.6 m×0.9 m,池中介质按照缩比模型理论相应地将天然海水电导率缩小至 1/100,电导率值为 350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

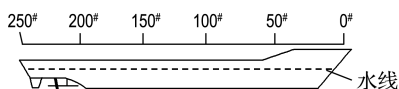


图 1 船体肋骨编号示意图

Fig. 1 Schematic illustration of ship's frame number

1.2 外加电流阴极保护系统

外加电流阴极保护采用三电极体系:辅助阳极材料选用直径为 3 mm 的铂铌丝,阳极托架及阳极屏的模拟采用聚四氟乙烯材料一体制作,辅助阳极布置在船体水线下 2 cm 处,并且均是左、右弦对称安装。参比电极体系由带 Luggin 毛细管的饱和银/氯化银微电极(SSC)组成,布置在船壳体的左弦水线下 1.5 cm 处,工作电极为船体水线下部分。恒电位仪给定电位为 -0.85 V。

1.3 电位测量

将船模放入 1.8 m×0.6 m×0.9 m 水池中浸泡 2 d 后,采用静电场测量系统测试船体右舷水线下 2 cm 的 10[#]、30[#]、50[#]、70[#]、90[#]、110[#]、130[#]、150[#]、170[#]、190[#]、210[#]、230[#]和 250[#]肋骨处电位。

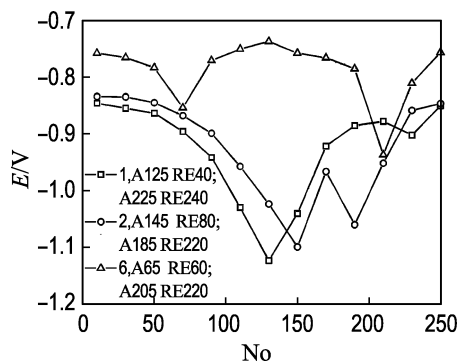
同时,在 200[#]肋骨处测试船体的螺旋桨主轴静止不接地、静止接地及接地后,主轴转速为 180、240、300、360 r/min 时的船体保护电位。

2 结果与讨论

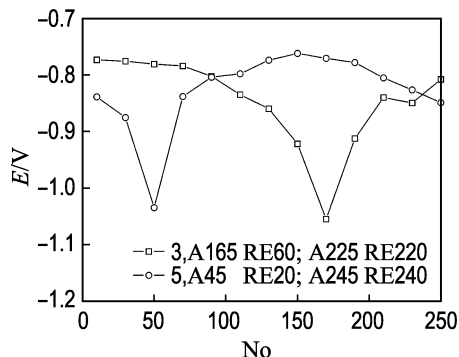
2.1 双区域船体阴极保护电位测试结果

图 2 示出给定电位 -0.85 V 时,双区域不同辅助阳极和参比电极位置对船体电位影响曲线。图中纵坐标(E/V)均为电极电位的测量值。其中

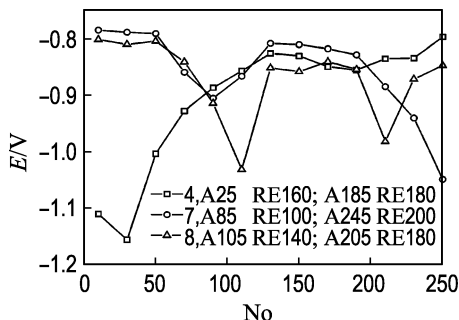
图 2(a)为两个参比电极(图中用 RE 表示)布置在两组辅助阳极(图中用 A 表示)外侧;图 2(b)为参比电极布置在辅助阳极前;图 2(c)为参比电极布置在两组辅助阳极内侧。由图可知,参比电极和辅助阳极的位置对船体电位分布曲线影响较大。在 3 种布置方式中都存在电位向负方向突变的现象,突变位置与辅助阳极布置位置相对应,即在辅助阳极附近出现“阴极峰”。譬如,图 2(a)辅助阳极在 125[#](曲线 1)、145[#](曲线 2)、205[#](曲线 6)肋骨处,图 2(b)的 45[#](曲线 5)、165[#](曲线 3)肋骨处,图 2(c)的 25[#](曲线 4)、105[#](曲线 8)和



(a) 参比电极在辅助阳极外侧



(b) 参比电极在辅助阳极前



(c) 参比电极在辅助阳极内侧

图 2 双区域不同辅助阳极和参比电极位置对船体电位影响

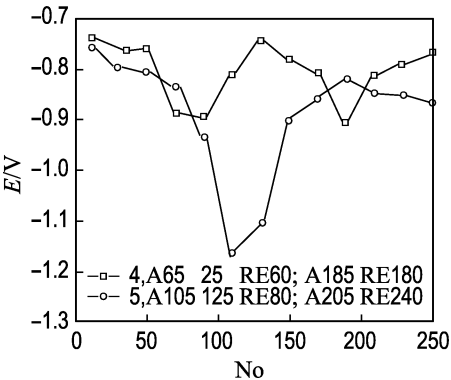
Fig. 2 Effect of different anode and reference electrode allocation on ship's potential in double-zones

85[#] (曲线 7) 肋骨处的“阴极峰”负向突变最大, 发现船体一些部位电位正于 -0.75 V , 处于欠保护状态; 而一些在辅助阳极所在位置出现电位很负的“阴极峰”, 峰值电位高达 -1.16 V , 这将导致船体钢板发生析氢腐蚀。所以双区域外加电流阴极保护系统需要进一步优化设计。

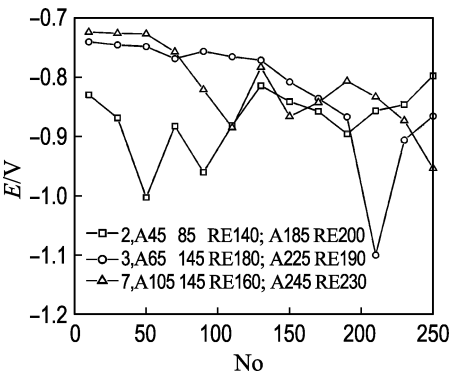
为此, 在优化设计中将船艏区辅助阳极数量增加为 2 组, 双区域给定电位 -0.85 V 时, 不同辅助阳极和参比电极位置的船体电位变化关系曲线示于图 3。其中图 3(a) 为船艏区的参比电极布

置在两组辅助阳极前侧; 图 3(b) 为船艏区的参比电极布置在辅助阳极后侧; 图 3(c) 为船艏区的参比电极布置在两组辅助阳极之间。结果表明, 船艏区参比电极布置在两组辅助阳极之间, 船艏区参比电极布置在辅助阳极外侧 (如图 3(c)) 得到的船体保护电位曲线分布较均匀, 除 25[#] (曲线 1)、165[#] (曲线 1) 和 205[#] (曲线 6) 肋骨处电位负于 -1.0 V 之外, 其他部位处在 $-0.80\sim-1.0\text{ V}$, 优于图 3(a) 和图 3(b) 中的电位曲线。这是因为在船艏区, 参比电极布置在两组辅助阳极之间可以同时影响两组辅助阳极输出电流的大小, 而船艏区参比电极的后置, 能够降低船艏区的反馈影响。对比图 2 可知, 船艏区增加辅助阳极的数量能降低辅助阳极附近的电位突变, 并且电位波动也较小。显然增加辅助阳极的数量能够改善船艏区欠保护和辅助阳极附近过保护的问题。

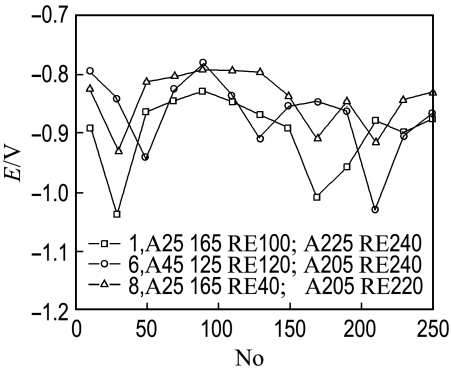
进而, 应用均匀设计软件对实验数据进行回归分析, 得到双区域阴极保护系统的最优条件如下: 船艏区辅助阳极位于 60[#] 和 120[#] 肋骨, 参比电极位于 110[#] 肋骨; 船艏区辅助阳极位于 230[#] 肋骨, 参比电极位于 240[#] 肋骨。图 4 示出在最优设计条件下, 外加电位 -0.85 V 时, 不同辅助阳极和参比电极位置的船体电位变化关系曲线。结果表明, 船体表面电位都在 $-0.80\sim-0.90\text{ V}$, 船体达到阴极保护要求。



(a) 参比电极在辅助阳极前侧



(b) 参比电极在辅助阳极后侧



(c) 参比电极在辅助阳极之间

图 3 双区域增加辅助阳极后船体电位关系曲线
Fig. 3 Potential curves of ship when adding anode in double-zones

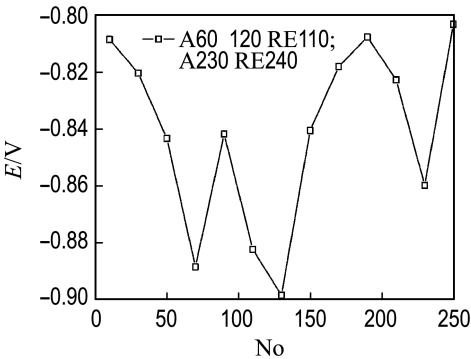


图 4 双区域优化设计阴极保护后的船体电位关系曲线
Fig. 4 Potential curves of optimized ICCP's ship in double-zones

2.2 船体主轴不同状态对船体电位影响

表 1 列出外加电位 -0.85 V 时, 在优化设计条件下螺旋桨主轴不同状态对双区域船艏区和船艏区恒电位仪输出电流的影响。船体主轴接地, 导致船艏区阴极电流很大一部分流到裸露的螺旋桨上, I_2 为 6.51 mA , 与轴不接地时输出的 2.60

mA 相比, 电流显著增大; 而船艏区电流 I_1 有所减小. 螺旋桨主轴转速为 240 r/min 时, I_2 增大到 9.05 mA, 这可能是因为主轴转动使螺旋桨对介质的扰动作用增强, 氧向螺旋桨表面扩散的速度增加, 阴极反应加快, 所需保护电流增大. 随着轴的转动速率继续增大, I_2 略有增加, 表明此后海水中溶氧的扩散速度达到极限. 同时, 主轴不同状态对应的 I_1 减小. 可见, 船体采用双区域阴极保护系统后, 各自系统的恒电位仪能够根据各自区域内电位的变化调整输出的电流.

表 1 轴不同状态时恒电位仪的输出电流

Tab. 1 Output current of potentiostat with different shaft conditions

实验	轴状态	I_1 (船艏区)/mA	I_2 (船艉区)/mA
1	①静止、不接地	3.90	2.60
2	②静止、接地	1.59	6.51
3	③240 r/min、接地	0.83	9.05
4	④300 r/min、接地	0.60	9.62
5	⑤360 r/min、接地	0.48	9.80

在优化设计条件下, 双区域给定电位 -0.85 V 时, 船体主轴不同状态对船体电位的影响示于图 5. 其中图 5(a) 是船静止、轴不接地和接地, 图 5(b) 是轴接地并转动, 转动速率分别为 240、300 和 360 r/min. 主轴不同状态下, 船体电位变化趋势基本一致, 并且船艏区电位曲线没有明显变化. 与图 2 的静止状态一样, 电位曲线中都存在电位向负方向突变的现象, 在辅助阳极附近出现了“阴极峰”. 即辅助阳极所在区域船体保护电位较负, 而远离辅助阳极区域时电位变正. 譬如, 图 5(a) 轴状态①中船体主轴静止没有接地时, 130[#] 肋骨处电位为 -0.899 V, 而 190[#] 肋骨处电位升至 -0.808 V. 图 5(b) 轴状态⑤中船体主轴接地、转动速率为 360 r/min 时, 230[#] 肋骨处电位为 -0.900 V, 而 190[#] 肋骨处电位升至 -0.801 V. 同时, 还观察到当主轴接地后, 船艉区辅助阳极附近电位降低, 且随轴转动速率增加, 辅助阳极附近电位进一步降低. 这与表 1 中轴不同状态时的输出电流测试结果相吻合.

5 种实验条件下, 船体不同肋骨处的电位列于表 2 中. 由表可知, 船体保护电位波动于 $-0.801 \sim -0.900$ V. 即船模主轴不同状态下双区域阴极保护系统能够达到船体防腐蚀 ($-0.80 \sim -1.0$ V vs. SSC) 国标^[7]的要求.

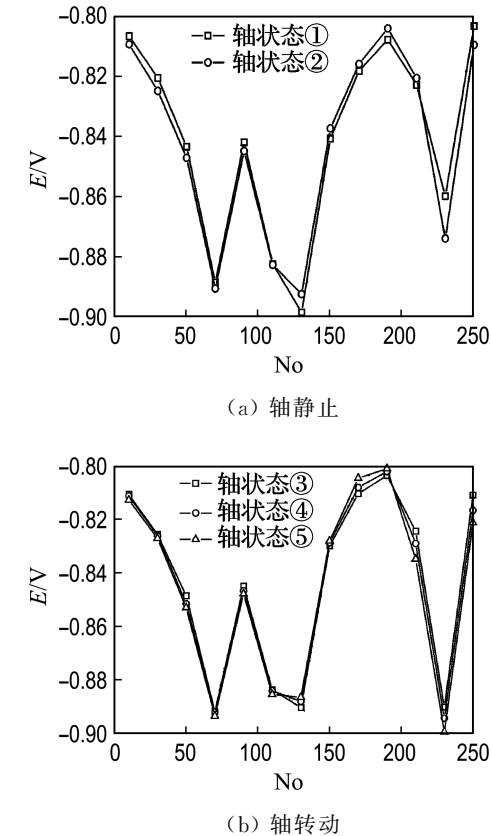


图 5 船体主轴不同条件下电位关系曲线
Fig. 5 Potential curves of different ship's shaft conditions

表 2 不同实验条件下的船体保护电位
Tab. 2 Protection potential of ship at different experiment conditions V

肋骨	实验				
	1	2	3	4	5
10 [#]	-0.807	-0.809	-0.811	-0.811	-0.813
30 [#]	-0.820	-0.825	-0.826	-0.826	-0.827
50 [#]	-0.843	-0.847	-0.849	-0.852	-0.853
70 [#]	-0.889	-0.891	-0.892	-0.892	-0.894
90 [#]	-0.842	-0.845	-0.845	-0.847	-0.848
110 [#]	-0.882	-0.883	-0.884	-0.884	-0.885
130 [#]	-0.899	-0.893	-0.890	-0.888	-0.887
150 [#]	-0.841	-0.837	-0.830	-0.829	-0.828
170 [#]	-0.818	-0.816	-0.810	-0.808	-0.805
190 [#]	-0.808	-0.804	-0.804	-0.802	-0.801
210 [#]	-0.823	-0.821	-0.824	-0.829	-0.835
230 [#]	-0.860	-0.874	-0.890	-0.894	-0.900
250 [#]	-0.803	-0.809	-0.811	-0.817	-0.821

3 结 论

(1) 采用缩比模型对船体外加电流阴极保护系统进行设计, 是一种方便、有效的方法, 为船体阴极保护优化提供了新途径.

(2) 外加电位 -0.85 V 时, 双区域阴极保护

系统中参比电极和辅助阳极的位置对船体电位分布曲线影响较大. 电位曲线中都存在电位向负方向突变的现象, 突变位置与辅助阳极布置位置相对应, 即在辅助阳极附近出现“阴极峰”.

(3) 双区域阴极保护的优化方案是将船艏区辅助阳极数量增加 1 组 (2 支), 布置在 60[#] 和 120[#] 肋骨, 参比电极布置在 110[#] 肋骨; 船艉区辅助阳极布置在 230[#] 肋骨, 参比电极布置在 240[#] 肋骨. 此时船体的保护电位处在 $-0.80 \sim -0.90$ V, 电位曲线分布均匀, 船体能得到有效的阴极保护.

(4) 双区域阴极保护系统主轴接地后, 船艉区电流明显增大, 而船艏区电流减小. 随着轴转速增加, 船艉区电流进一步增大, 船艏区电流减小.

(5) 船模主轴不同状态下, 优化设计的双区域阴极保护系统中保护电位处在 $-0.801 \sim -0.900$ V, 达到阴极保护要求. 螺旋桨主轴接地后, 船艉区辅助阳极附近电位降低, 且随轴转动速率增加, 辅助阳极附近电位进一步降低.

参考文献:

[1] 侯保荣. 海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 科学出版社, 1997: 59-71

- [2] 梁成浩. 金属腐蚀学导论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999: 133-137
- [3] KARISALLEN K J. Impressed current cathodic protection (ICCP) physical scale modelling (PSM) and CPBEM modelling of canadian patrol frigate (CPF) hull potential profiles [C] // **Defence Research Establishment Atlantic**. Nova Scotia: [s n], 2001
- [4] GURRAPPA I. Physical and computer modelling for ship's impressed current cathodic protection systems [J]. **Corrosion Prevention & Control**, 1994, **41**(2): 40-42
- [5] PARKS A R, THOMAS E D, LUCAS K E. Physical scale modeling verification with shipboard trials [J]. **Materials Performance**, 1991, **30**(5): 26-29
- [6] DITCHFIELD R W, MCGRATH J N, TIGHE-FORD D J. Theoretical validation of the physical scale modelling of the electrical potential characteristics of marine impressed current cathodic protection [J]. **Journal of Applied Electrochemistry**, 1995, **25**(1): 54-60
- [7] 中国国家质量技术监督局. GB/T3108—1999 船体外加电流阴极保护系统[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999

Research on physical scale model of ICCP systems in double-zones of hull

LIANG Cheng-hao^{*1,2}, YU Nan², WU Jian-hua², HUANG Nai-bao¹

(1. Electromechanics and Materials Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

2. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China)

Abstract: A 1 : 100 physical scale model of a vessel is established and used to study the distribution of the potential in the impressed current cathodic protection (ICCP) system of a hull's double-zones. The optimized design as below is obtained based on the experimental results of the 1 : 100 physical model. Two anodes are added to the bow area and reference electrode (RE) is fixed between two anodes, and RE is outside the anodes in the buttock area. Under the optimization operational condition, the potential range along the surface of the hull is between -0.80 V and -0.90 V, which provides adequate corrosion protection to the hull of the vessel. When the shaft is earthed, the potential around anodes reduces, and decreases with the increase of shaft's rotation rate. The optimized double-zones ICCP system can provide adequate corrosion protection of the vessel when the shaft is kept under different conditions. It is proved that the use of physical scale model provides a practical and flexible tool for the design and optimization of ICCP system of a ship.

Key words: physical scale model; impressed current cathodic protection; protection potential