

一种简单有效的船体外加电流阴极保护设计方法

刘英伟, 周子杰, 张洋

(哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: **目的** 提出一种简单确定外加电流大小和辅助阳极位置的方法。**方法** 对阳极的位置进行离散处理, 通过 Matlab 中的脚本程序, 控制 COMSOL 有限元软件的运行, 交替地调整电流大小和阳极位置, 经过搜索, 找到最佳阳极布局和相应的最小输入电流。采用这一方案进行有限元计算。**结果** 船体表面全部得到了保护, 保护率为 100%, 每个阳极所需电流只有 0.057 26 A, 最高保护电位为 0.84 V 左右, 过保护现象不严重。**结论** 提出的方法能够较好地解决外加电流阴极保护设计中遇到的难题, 具有简单、易操作的优点, 并具有普适性。

关键词: 外加电流阴极保护; 有限元; 腐蚀; 电化学; 阴极极化; 保护电位

中图分类号: TG174.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)07-0309-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.07.035

A Simple and Practical Method for ICCP Design of Ship

LIU Ying-wei, ZHOU Zi-jie, ZHANG Yang

(School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a simple method to determine the impressed current magnitude and position of auxiliary anode. The position of the anode was discretely processed at first. Then, the script program in Matlab was used to control the operation of the finite element software for calculating the optimal anode layout and corresponding minimum input current (COMSOL). The optimal anode layout and the corresponding input current were finally achieved by alternatively adjusting the current magnitude and anode position after search. This scheme was used for finite element calculation. The whole surface of the hull could be protected and the protection rate was 100%. The corresponding current required for each anode was only 0.057 26 A, and the highest protection potential was about ~0.84 V. The over-protection phenomenon was negligible. The problems encountered in the design of impressed current cathodic protection have been solved by the method proposed above, which has the advantages of simplicity, easy operation and universality.

KEY WORDS: ICCP; FEM; corrosion; electrochemistry; cathodic polarization; protective potential

外加电流阴极保护 (Impressed Current Cathodic Protect, ICCP), 以其保护寿命长、电位和电流可调节性强等优点成为防腐的首选^[1-7]。通过外电源向船体表面注入电流, 使表面发生阴极极化, 当极化电位达

到保护电位后 (800 mV 参比电极为 Ag/AgCl/Seawater), 腐蚀就会被抑制^[8-14]。这种方法理论上很简单, 但实施起来却并非易事。首先遇到的问题是: 如何确定外加电流的大小, 其次是如何合理地布置辅助阳极。一

收稿日期: 2018-11-16; 修订日期: 2019-04-09

Received: 2018-11-16; Revised: 2019-04-09

基金项目: 中央高校基础研究基金 (HEUCFJ171005)

Fund: Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(HEUCFJ171005).

作者简介: 刘英伟 (1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为腐蚀与防护。邮箱: lywbanner@163.com

Biography: LIU Ying-wei(1970—), Male, Ph. D., Associate professor, Research focus: corrosion and protection. E-mail: lywbanner@163.com

一个好的保护方案应该取得如下效果：在尽可能小的外加电流下，船体表面的保护面积达到最大。传统的确定外加电流的方法是基于平均电流密度的理念：即被保护构件表面各处的电流密度均相同。根据这一假设，将电流密度乘以保护面积就等于总电流，然后用总电流除以电极个数就得到每个阳极的输入电流大小。这种计算方法显得粗燥，因为船体表面为曲面，曲率分布也不均匀，因此表面各处的电流密度肯定不一样，据此确定的输入电流显得不够精确。另外，辅助阳极的位置对表面电位、电流的分布也有着重要影响。当外加电流一定时，不同的阳极位置对应着不同的电位分布，因此一定存在一个最佳的阳极位置，使得此时船体的保护面积达到最大。如果外加电流有所变化，那么这个最佳位置也必然有所改变。根据上述分析可知，确定最佳阳极位置是一件比较困难的事，采用实验的方法很难奏效，这是因为船体表面巨大，理论上的可能位置很多，实验量十分巨大。

采用数值模拟的方法，可以解决上述问题。文中提出了一套算法，利用 Matlab 中的脚本控制 COMSOL 有限元软件的运行，充分利用计算机的高运算速度，采用交替搜索的策略，交替改变电流大小和阳极位置，逐渐逼近最佳方案，这一方法简单，可操作性强，具有通用性。

1 船体表面电位分布

1.1 控制方程

图1为带有四个辅助阳极的船体几何模型，阳极材料为惰性有色金属铂。当船体浸没在海水中时，除了铂表面外，其他表面将遭受海水的腐蚀，发生如下电化学反应：

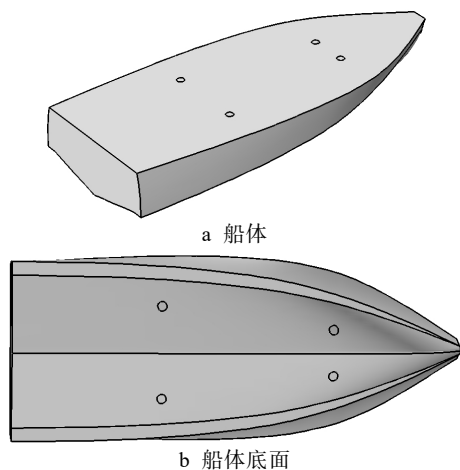


图1 船体几何模型

Fig.1 Geometry model of the ship: a) Ship body; b) Protection of ship bottom

在反应(2)中，水中的氧不断地从船体表面夺取电子而发生还原反应，而反应(1)需要不断地进行，为反应(2)提供电子。失去了电子的铁原子变成离子状态，在水分子这种极性分子的作用下，很容易溶解到水中，从而导致了船体的腐蚀。为了阻止腐蚀的发生，必须抑制反应(1)的进行。外加电流阴极保护，就是采用外电源向船体表面注入电流，以代替反应(1)向反应(2)提供电子。注入的电流使船体表面产生阴极极化，当极化电位达到 800 mV 时(参比电极为 Ag/AgCl/ Seawater)，表面就会得到保护。

当外电源向船体注入电流时，由于海水是强电解质，具有导电性，因此会在船体周围的一块水体里产生电场，存在电位分布。如果围绕船体周围划分出一块适当大小的水体 Ω ，如图 2a 所示，则当水体中电位处于稳态时，其分布满足 Laplace 方程：

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

式中： φ 为电解液电势； $x, y, z \in \Omega$ 。

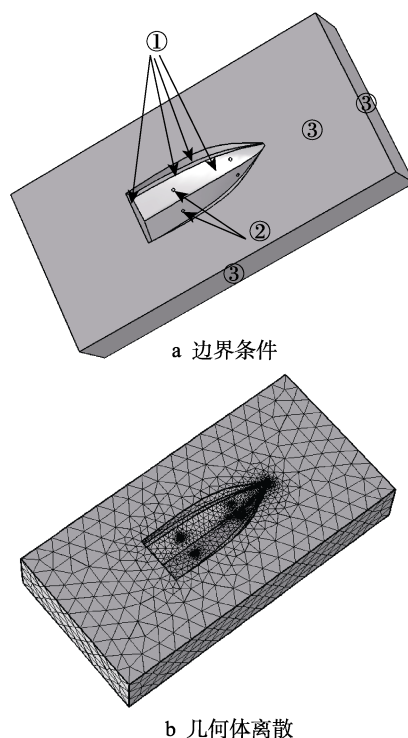


图2 边界条件与有限元离散

Fig.2 Boundary conditions and FEM discretization: a) Boundary conditions; b) Geometry discretization

1.2 边界条件

1.2.1 电化学反应界面

边界①上发生电化学反应(1)和(2)，其电流和电势关系分别遵循 Tafel 公式：

$$i_a = i_0^{\text{Fe}} e^{\left(\frac{\phi - \phi_{\text{Fe}}}{A_{\text{Fe}}} \right)} \quad (4)$$

$$i_c = i_0^{\text{O}_2} e^{\left(\frac{\phi - \phi_{\text{O}_2}}{A_{\text{O}_2}} \right)} \quad (5)$$

式中： ϕ_{Fe} 、 i_0^{Fe} 、 A_{Fe} 、 ϕ_{O_2} 、 $i_0^{\text{O}_2}$ 、 A_{O_2} 分别为铁和氧的平衡电位、交换电流密度和塔菲尔斜率，具体数据见表 1。

表 1 电化学参数
Tab.1 Electrochemical parameters

Parameters	Iron	Oxygen
Equilibrium potential/V	-0.76	0.189
Tafel slope/(V·m ⁻¹)	0.41	0.18
Exchange current density/(A·m ⁻²)	7.7×10 ⁻⁷	7.1×10 ⁻⁵
Modified exchange current density/(A·m ⁻²)	1.0787×10 ⁻⁷	9.94×10 ⁻⁶
Conductivity of sea water/(S·m ⁻¹)	4	

需要注意的是， i_0^{Fe} 和 $i_0^{\text{O}_2}$ 是在船体没有防腐涂层的情况下测定的（即破损率为 100%）。当船体表面涂敷防腐涂层时，需要根据破损率进行修正，破损率可根据式（6）计算：

$$f_c = a + bt \tag{6}$$

式中： a 、 b 是和涂层厚度以及船体所处环境有关的参数，分别为 0.02 和 0.012^[15]； t 是使用年限，这里按 10 年计算。计算得到的破损率 $f_c = 0.14$ 。

确定了破损率以后，按式（7）修正交换电流密度：

$$i_m = i \times f_c \tag{7}$$

式中： i_m 为修正后的交换电流密度； i 是破损率为 100% 时的交换电流密度。

1.2.2 电流边界条件

电极和海水的接触面②共有四个（图 2a 只标识

了两个）。当外电源向船体表面注入电流时，电流也会通过接触面注入到海水中，因此存在如下关系：

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial n} = i_{\text{inject}} \tag{8}$$

其中： i_{inject} 为注入的电流密度； σ 为海水电导率。

外加电流密度是通过 DNV RP B401 规范确定的^[16]：在船体裸露的情况下，要使船体表面达到保护电位，所需的电流密度为 120 mA/m²。考虑到破损率，所需电流密度变为 $q=f_c \times 120=16.8 \text{ mA/m}^2$ 。船体被保护面积为 11.564 m²，因此所需要的总电流为： $I=0.1943 \text{ A}$ 。因为有四个电极供电，所以每个电极的供电电流约为 0.05 A。

1.2.3 无限远处边界条件

所谓无限远不是空间位置的无限远，而是指电场强度很弱，近乎为 0 的地方，如图 2a 中的表面③，此处表面电流可看作为 0：

$$\frac{1}{\sigma} \frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \tag{9}$$

式中： n 为表面法向方向。

1.3 几何模型离散及求解

设置完边界条件后，对几何模型进行离散，得到有限元模型，如 1.1 小节中图 2b 所示。然后对模型求解，得到船体表面电位分布云图和等值线图（如图 3 所示）。由图 3 可见，靠近电极的地方电位较高，电极中间区域电位较低。总体来看，船体表面电位均小于保护电位 0.8 V，可见整个船体都没有得到保护，说明先前估算的电流偏低，应适度增加电流供应。

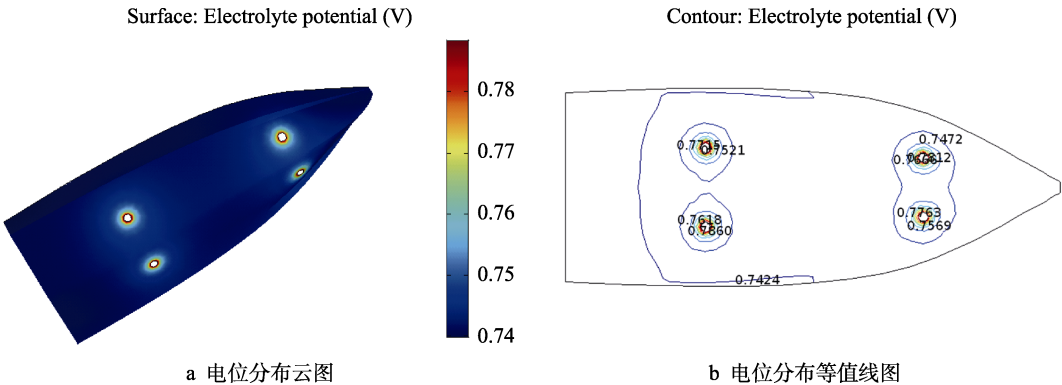


图 3 计算结果
Fig.3 Calculation results: a) cloud map of potential distribution; b) contour lines of potential

2 最优设计方案

2.1 思想概述

一个最优的保护方案，应达到这样的效果：在最小的输入电流下，船体表面的保护面积达到最大。1.2 节中的电极布局显然不是最佳布局，因为表面电位没

有达到 0.8 V 的保护电位，大部分处于未保护状态，需要增大电流，并且要调整电极位置。如果只是增大电流，则对布局的要求有所下降，即当电流增大到一定程度后，不管电极如何布置，船体表面都会得到保护。这种设计理念是粗放的，是以增大耗电量为代价的，不符合现代设计要求，所以必须确定合理的电流输入，以尽量小的电流，达到尽量大的保护面积。

理论上, 船体表面上的每个点都是电极的可能位置, 这些位置可以组合成很多布局。由于船体关于 yz 面对称, 因此只用 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 四个坐标即可描述电极位置, 如图 4a 所示。为方便起见, 将这四个坐标的组合简称为 $POS=[x_1, y_1, x_2, y_2]$, 称为布局。当输入电流一定时, 不断变化 x_1 、 y_1 、 x_2 、 y_2 , 就可以得到很多布局。选择有限数目的布局进行计算, 并从中寻找最佳布局的突破口。

为了把问题从无限个布局中寻找最佳布局变为

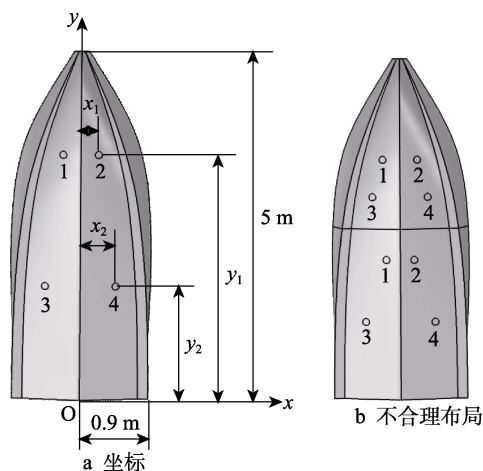


图4 船体底面

Fig.4 Projection of the ship bottom:
a) Coordinates; b) Unreasonable layout

从有限个布局中寻找最佳布局, 需要人为地对船体底面进行网格划分 (不是有限元网格划分)。如图 5a 所示, 用一条中线将船体分为左、右两部分。由于船体右部宽窄变化较大, 因此网格划分稍密一些, 而左部宽度变化不大, 因此网格可划分稀疏一些。这样右部网格点数目为 40 个, 左部为 32 个, 总的位置组合 (布局) 则有 1280 种 (图 5a 只是划分示意图, 并不是真实的划分结果), 网格节点就是电极的位置。最佳布局有可能是 1280 种布局中的某一个, 但也有可能不是, 而且往往不是的可能性更大一些。寻找最佳设计方案, 包括确定最低输入电流和最佳阳极布局这两项, 且这两者是强烈关联在一起的。在实际搜索时, 需采取交替搜索的策略, 具体过程包括初级搜索和精细搜索。

2.2 初级搜索

首先, 确定一个试探性的初始外加电流。在 1.2 节中, 根据规范确定的电流为 0.05 A, 计算结果表明该电流不符合要求, 因此这里把电流调大一些, 比如 0.08 A, 然后以这个电流作为初始, 以一定的步长, 逐渐将电流调低, 每调低一次, 就充分利用计算机的高运算速度, 计算 1280 种布局的电位分布以及达到保护电位的表面面积, 并找到最大保护面积所对应的布局, 将它们列在表 2 中。

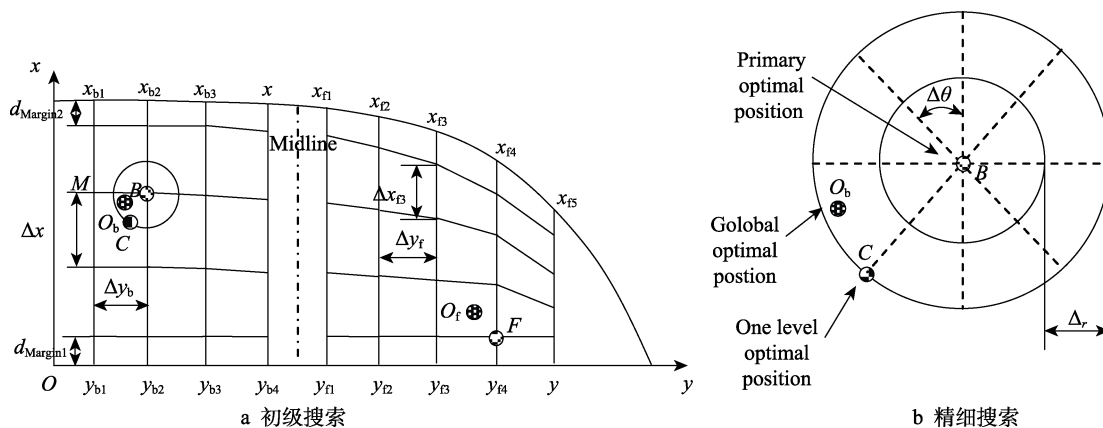


图5 电极位置离散

Fig.5 Discretization of the anode position: a) primary search; b) fine search

表2 初级搜索部分结果
Tab.2 Partial results of primary search

Case	y_1/m	x_1/m	y_2/m	x_2/m	Injected current/A	Protected area/ m^2	Total area/ m^2	Protection rate/%
1	2.676 427	0.07	0.226 427	0.07	0.059	11.564	11.564	100.00
2	2.676 427	0.591 06	0.979 727	0.715 71	0.058	11.564	11.564	100.00
3	3.076 427	0.528 19	0.726 427	0.723 78	0.057 29	11.481	11.564	99.28
4	3.076 427	0.528 19	0.726 427	0.723 78	0.057 28	11.466	11.564	99.15
5	3.076 427	0.528 19	0.726 427	0.723 78	0.057 27	11.448	11.564	99.00
6	3.076 427	0.528 19	0.726 427	0.723 78	0.057 26	11.429	11.564	98.83
7	3.274 327	0.07	0.979 727	0.715 71	0.057	10.359	11.564	89.58
8	3.476 427	0.444 37	1.726 427	0.681 86	0.056	6.9634	11.564	60.22

对表 2 中的数据分析,可以得到以下初步结论:1)第 1、2 方案中布局不同,所施加的电流也不同,但保护率达都到了 100%,这说明布局一定不是最佳布局,同时电流也不是最低电流,因此二者均有调整的必要。2)从第 2—7 方案看出,当电流由 0.058 A 下降到 0.057 A 以后,保护率由 100%下降到 89.58%,尤其当电流降到 0.056 A 时,保护率只有 60.22%,因此可以认定,最低电流应在 0.057~0.058 A 之间,故从 0.058 A 开始,电流下调的幅度开始变小。根据微调后的电流,计算得到了保护面积和保护率。此时保护率均低于 100%,表面上看似乎电流需要调高,但由于此时布局不一定是最佳的,因此再通过调整布局来提高保护率。在保持较小电流的情况下,进一步精细调整电极的位置,从而使保护率达到 100%,这就是所谓的精细搜索。

2.3 精细搜索

选择表 2 中的方案 6 (此时电流最低),作为精细搜索的出发点,并暂定方案 6 为初级最优。尽管初级最优布局不是全局最优,但它一定和全局最优比较接近,因此可以在其附近做进一步搜索,寻找全局最优。如图 5b 所示,假设电极 3 的全局最佳位置为 O_b ,而经过初级搜索后得到初级最优布局为 B,则以 B 为圆心,以一定的径向步长和角度,在其附近搜索,会找到更接近全局最优的布局 C (称为一级最优)。找到一级最优布局后,还可以以它为出发点,在其附近做类似的搜索,得到二级最优布局,仿此模式,一级一级地搜索下去,理论上搜索能够无限接近全局最优布局。文中的计算表明,只需一级搜索就可以得到很满意的结果,具体结果见表 3。由表 3 可见,在输入电流 (57.26 mA) 一定的情况下,第一个布局使得表面的保护面积达到 100%,可作为最优方案。

表 3 精细搜索结果(电流为 57.26 mA)
Tab.3 Results of fine search (impressed current: 57.26 mA)

Case	y_1/m	x_1/m	y_2/m	x_2/m	Protected area/ m^2	Total area/ m^2	Protection rate/%
1	2.902 855	0.524 87	0.725 727	0.721 93	11.564	11.564	100
2	3.656 155	0.527 98	0.722 627	0.722 41	11.456	11.564	99.07
3	3.402 855	0.524 19	0.722 627	0.725 15	11.455	11.564	99.06
4	3.402 855	0.526 7	0.722 427	0.723 5	11.454	11.564	99.05
5	3.402 855	0.527 42	0.724 427	0.723 64	11.454	11.564	99.05
6	3.402 855	0.527 81	0.722 927	0.721 9	11.452	11.564	99.03

2.4 注意事项

模拟过程中,有很多技术细节关系到模拟的成败。首先网格的划分需要考虑计算量以及船体的几何特征。如图 4b 所示,阳极 1、2 和 3、4 显然不可能全部位于中间线的上部或下部,应该分别位于两侧。因此电极 1、2 的横向位置应限制在 $[y_{b1}, y_{b4}]$ 范围内,而电极 3、4 的横向位置应限制在 $[y_{f1}, y_{f5}]$ 范围内,这样可大大减少位置的组合数目,从而降低计算量。另外在初级搜索阶段,网格划分需要考虑几何特点。如图 5a 所示,船体的前部和后部几何形状差别较大,后半部分表面较平坦,且宽度变化不大,而前半部分由宽逐渐变窄,且表面曲率变化较大。因此网格的划分是不同的,前半部分 $\Delta y_f=0.2 \text{ m}$,后半部分 $\Delta y_b=0.25 \text{ m}$ 。在纵向,为了使电极不越过船体边界,在边界处留有一定的空白,即 $d_{\text{Margin}1}=0.07 \text{ m}$, $d_{\text{Margin}2}=0.09 \text{ m}$,这一区域电极不能进入。扣除边缘空白后,剩下的部分是电极活动区,该区纵向采用均匀划分:

$$\Delta x_{fi}=(x_{fi}-d_{\text{Margin}2}-d_{\text{Margin}1})/n_x (i=1,2,3,4,5; n_x=4)$$

$$\Delta x_{bj}=(x_{bj}-d_{\text{Margin}2}-d_{\text{Margin}1})/n_x (j=1,2,3,4; n_x=4)$$

一级搜索时,搜索半径和角度的确定也很重要。

一般来说,搜索半径应为前后、上下网格最大间距的 1/2。以图 5a 中的 B 点为例,以它为中心的搜索半径为: $r=\frac{1}{2}\max[\Delta x_{b1},(y_{b2}-y_{b1})]$ 。全局最优基本在这个范围内,因为如果超过这个范围,那么离全局最优位置 O_b 最接近的位置应该是 M 点,初级最优应该是 M,而不是 B 点,这样的话,精细搜索应在 M 处展开。搜索角度 $\Delta\theta$ 也应合理确定,太小的话,需要搜索的点很多,计算量很大;太大的话,有可能将最优解漏掉,经试算, $\Delta\theta$ 取 10° 较为合适。

2.5 结果讨论

用 $x=0$ 和 $y=2.84 \text{ m}$ 的平面与船体相截,得到曲线上的保护电位分布如图 6 所示。可以看出,曲线上的保护电位均超过 0.8 V ,处于被保护状态,而最高的电位只有 0.8065 V 左右,过保护并不严重。船体底面保护电位的分布云图和等值线图如图 7 所示,可以看出,船体底面电位全部高于保护电位,在电极附近电位最高,大约在 $0.84\sim 0.85 \text{ V}$ 之间,有轻微过保护现象,但程度不大。总的来说,采用该方案,取得了比较满意的结果。

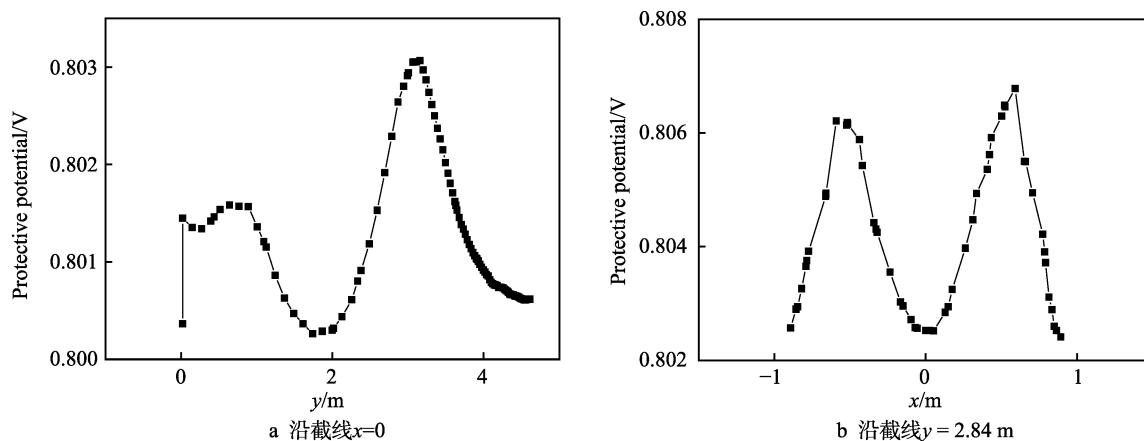


图6 保护电位分布

Fig.6 Protective potential distribution: a) Intercepted by plane at $x=0$; b) Intercepted by plane at $y=2.84$ m

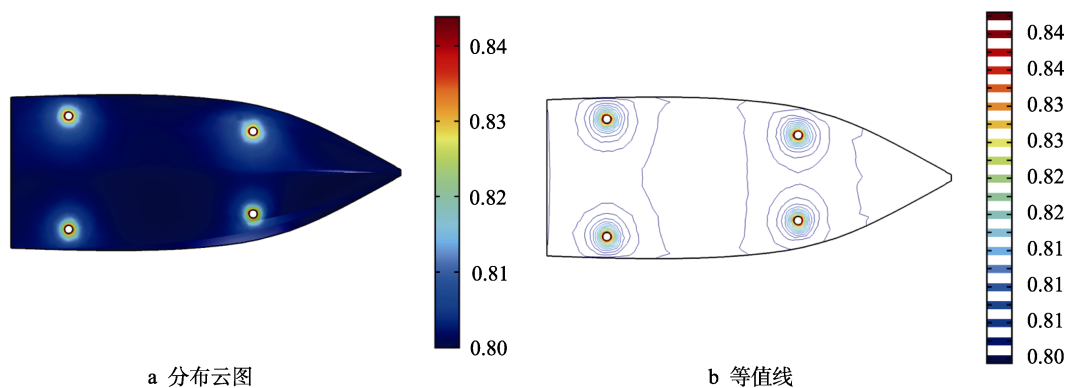


图7 船体底面保护电位

Fig.7 Protective potential distribution on the ship bottom: a) Cloud map of distribution; b) Line contours

3 结论

1) 外加电流阴极保护方案的确定是一件很困难的工作,传统设计方法存在不完善的地方,问题解决不完美。采用有限元方法可以得到较好的结果,并且效率大大提高,节约人力、物力。

2) 采用交替调整外加电流和电极位置的方法,能够逐步接近全局最优布局,此时所需外加电流最少,保护面积最大。

3) 由于采用了逐步微调方法来确定外加电流,代替了传统的估算方法,因此所确定的外加电流更精确。

4) 利用最佳方案计算得出的电位分布表明:船体表面均得到保护,电极附近存在轻微的过保护现象,但并不严重。

5) 文中提出的方法,可以用于解决其他类似的问题,具有通用性。

参考文献:

- [1] 王巍. 几种金属在海水中阴极保护数值计算及瞬态激励影响研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2011.
WANG Wei. Numerical simulation of cathodic protection

and transient impulse influence for structures in seawater[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, 2011.

- [2] 刘存, 赵增元, 马永青. 海洋结构物牺牲阳极阴极保护设计方法探讨[J]. 全面腐蚀控制, 2011, 25(9): 7-10.
LIU Cun, ZHAO Zeng-yuan, MA Yong-qing. Conclusion of galvanic anode cathodic protection for offshore structures[J]. Total corrosion control, 2011, 25(9): 7-10.
- [3] 曾晓燕. 船体外加电流阴极保护系统设计问题的探讨[J]. 中国航海, 2009, 32(8): 93-96.
ZENG Xiao-yan. Study on the distribution of protection current and protection potential in impressed current cathode protection system design[J]. Navigation of China, 2009, 32(8): 93-96.
- [4] 郝宏娜, 李自力. 阴极保护数值模拟计算边界条件的确定[J]. 油气储运, 2011, 30(7): 504-507.
HAO Hong-na, LI Zi-li. Determination of boundary conditions for cathodic protective numerical simulation[J]. Oil & gas storage and transportation, 2011, 30(7): 504-507.
- [5] 陈迎春, 王新华, 王翠. X65 和 X80 管线钢在大港模拟土壤溶液中的阴极保护参数研究[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 218-223.
CHEN Ying-chun, WANG Xin-hua, WANG Cui. Cathodic protection parameters of X65 and X80 pipeline

- steels in Dagang simulated soil solution[J]. Surface technology, 2018, 47(6): 218-223.
- [6] SERGIO L, TOMMASO P, TIZIANO B. Cathodic protection modelling of a propeller shaft[J]. Corrosion Science, 2016(100): 36-46.
- [7] KEAR G, BARKER B D, STOKES K R. Corrosion and impressed current cathodic protection of copper-based materials using a bimetallic rotating cylinder electrode (BRCE)[J]. Corrosion science, 2005, 47(7): 1694-1705.
- [8] 潘峻, 熊建波, 丁建军. 淡水水环境下钢结构阴极保护的设计与实现[J]. 施工技术, 2013, 42(5): 261-263.
PAN Jun, XIONG Jian-bo, DING Jian-jun. Cathodic protection design for steel structure in brackish water[J]. Construction technology, 2013, 42(5): 261-263.
- [9] 余晓毅, 赵赫, 常炜. 基于数值模拟的海上平台阴极保护系统的技术研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(2): 81-84.
YU Xiao-yi, ZHAO He, CHANG Wei. Technical research on cathode protection system of offshore platform based on numerical simulations[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(2): 81-84.
- [10] 王弯弯, 张胜寒, 张秀丽. 沿海及盐渍地区输电杆塔混凝土钢筋阴极保护技术研究[J]. 华北电力技术, 2016(8): 13-17.
WANG Wan-wan, ZHANG Sheng-han, ZHANG Xiu-li. research on cathodic protection of reinforced concrete transmission tower in salinization and coastal areas[J]. North China electric power, 2016(8): 13-17.
- [11] 谢飞, 王月, 王兴发. 辽河油田土壤中溶解氧对X70管线钢腐蚀的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 186-191.
XIE Fei, WANG Yue, WANG Xing-fa. Effect of dissolved oxygen on corrosion of X70 pipeline steel in Liaohe oil-field[J]. Surface technology, 2018, 47(10): 186-191.
- [12] 朱万武, 许杨溢. 船体外加电流阴极保护的应用[J]. 广东造船, 2011(1): 55-58.
ZHU Wan-wu, XU Yang-yi. Application of impressed current cathode protection system for hull[J]. Guangdong shipbuilding, 2011(1): 55-58.
- [13] 尚兴彬, 胡乃科, 张守峰. 外加电流阴极保护电流屏蔽与阴极干扰研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2015, 32(6): 14-18.
SHANG Xing-bin, HU Nai-ke, ZHANG Shou-feng. Study on current shielding and interference of impressed current cathodic protection[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2015, 32(6): 14-18.
- [14] 孙斌, 王广, 赵文革. 沙钢取水船阴极保护技术的应用[J]. 城市建筑, 2013(22): 332-334.
SUN Bin, WANG Guang, ZHAO Wen-ge. Application of the Shagang water boat cathodic protection technology[J]. Urbanism and architecture, 2013(22): 332-334.
- [15] 刘极莉. 船体内舱阴极保护设计技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
LIU Ji-li. Study on cathodic protection design technology of ship internal tank[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [16] RP-B401—2010, Cathodic Protection Design[S].

(上接第301页)

- [16] 浦素云. 金属植入材料及其腐蚀[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1990.
PU Su-yun. Metal implant materials and their corrosion[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 1990.
- [17] REN L, MEMARZADEH K, ZHANG S, et al. A novel coping metal material CoCrCu alloy fabricated by selective laser melting with antimicrobial and antibiofilm properties[J]. Materials science & engineering C, 2016, 67: 461-467.
- [18] 马政. 新型含铜抗菌钛合金的制备与性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
MA Zheng. Study on preparation and properties of new-type copper-containing antibacterial titanium alloy[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [19] WANG S, YANG C, REN L, et al. Study on antibacterial performance of Cu-bearing cobalt-based alloy[J]. Materials letters, 2014, 129(32): 88-90.
- [20] 李小宇, 郑美华, 王洁琪, 等. 3D打印和铸造钴铬合金耐蚀性及力学稳定性比较[J]. 中华口腔医学研究杂志, 2016, 10(5): 327-332.
LI Xiao-yu, ZHENG Mei-hua, WANG Jie-qi, et al. 3D Printing and casting the corrosion resistance and mechanical stability of cobalt-chromium alloy[J]. Chinese journal of stomatology research, 2016, 10(5): 327-332.
- [21] 邹洁, 胡滨. 选择性激光熔融技术所制牙科合金的研究进展[J]. 北京口腔医学, 2014(5): 292-294.
ZOU Jie, HU Bin. Research progress of dental alloys made by selective laser melting technology[J]. Beijing oral medicine, 2014(5): 292-294.
- [22] VANDENBROUCKE B, KRUTH J P. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts[J]. Rapid prototyping journal, 2007, 13(4): 196-203.
- [23] JEVREMOVIC D, PUSKAR T, KOSEC B, et al. The analysis of the mechanical properties of F75 Co-Cr alloy for use in selective laser melting (SLM) manufacturing of removable partial dentures(RPD)[J]. Metalurgija, 2012, 51(2): 171-174.
- [24] 段小冬. 银、铜离子对人角质形成细胞增殖的影响及机制探索[D]. 重庆: 第三军医大学, 2015.
DUAN Xiao-dong. Effects of silver and copper ions on the proliferation of human keratinocyte cells and its mechanism[D]. Chongqing: Third Military Medical University, 2015.