

基于外加电流阴极保护法的 FPSO 保护方案

封加全¹, 张学辉², 宋世德¹, 黄一¹

(1.大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 2.上海外高桥造船有限公司, 上海 200137)

摘要: **目的** 确定目标 FPSO 主船体结构全寿命期下外加电流阴极保护系统中的最优参数。**方法** 采用计算机软件数值模拟的方法, 建立目标 FPSO 主船体结构外加电流阴极保护模型, 研究外加电流阴极保护系统中辅助阳极位置、数量以及输出电流对目标 FPSO 保护状态的影响。**结果** 分别在距离目标 FPSO 船尾 57、127、191、267 m, 吃水深度为 5.3、5.7、5.7、5.2 m 处的左、右两舷侧上对称布置共 8 个辅助阳极, 各个辅助阳极初期释放电流分别为 7、6、6、6 A, 外加电流阴极保护系统输出总电流以 34.6 A/a 线性增加, 可使得全寿命期下目标 FPSO 主船体结构水下部分处于完全保护状态。**结论** 采用计算机软件数值模拟计算可以快速得到外加电流阴极保护系统参数与目标 FPSO 保护状态之间的关系, 进而可得到阴极保护最优参数, 这为后续在目标 FPSO 上使用外加电流阴极保护系统确立最优参数提供了理论依据。

关键词: 阴极保护; 数值模拟; FPSO; 外加电流阴极保护; 辅助阳极; 边界元法; 优化设计

中图分类号: TG174.41

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)05-0100-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.05.013

FPSO Protection Scheme Based on Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)

FENG Jia-quan¹, ZHANG Xue-hui², SONG Shi-de¹, HUANG Yi¹

(1. Dalian university of Technology, Liaoning Dalian 116024, China;

2. Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding Co., Ltd., Shanghai 200137, China)

ABSTRACT: This paper is to determine the optimal parameters of impressed current cathodic protection system under the whole life cycle of the main hull structure of the target FPSO. The impressed current cathodic protection model of the main hull structure of the target FPSO is established by numerical simulation with computer software, and the influence of the position, quantity and output current of the auxiliary anodes in the impressed current cathodic protection system on the protection state of the target FPSO is studied. Eight auxiliary anodes are symmetrically arranged on the left and right sides at 57, 127, 191 and 267 m from the aft of the target FPSO and the intake depth is 5.3, 5.7, 5.7 and 5.2 m respectively. The initial release current of each auxiliary anode is 7, 6, 6 and 6 A respectively. The total output current of the impressed current cathodic protection system increases linearly at 34.6 A per year, which makes the underwater part of the main hull structure of the target FPSO in a fully pro-

收稿日期: 2021-03-17; 修订日期: 2021-08-09

Received: 2021-03-17; Revised: 2021-08-09

基金项目: 工信部[2018]473号

Fund: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China[2018] No. 473

作者简介: 封加全(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护工程。

Biography: FENG Jia-quan (1995-), Male, Master, Research focus: marine corrosion and protection engineering.

通讯作者: 宋世德(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为海洋腐蚀与防护工程。

Corresponding author: SONG Shi-de(1974-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: marine corrosion and protection engineering.

引文格式: 封加全, 张学辉, 宋世德, 等. 基于外加电流阴极保护法的 FPSO 保护方案[J]. 装备环境工程, 2022, 19(5): 100-105.

FENG Jia-quan, ZHANG Xue-hui, SONG Shi-de, et al. FPSO Protection Scheme Based on Impressed Current Cathodic Protection (ICCP)[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(5): 100-105.

tected state during its whole life. The relationship between the parameters of the impressed current cathodic protection system and the protection status of the target FPSO can be quickly obtained by numerical simulation with computer software, and then the optimal parameters of the cathodic protection can be obtained, which provides a theoretical basis for the subsequent use of the impressed current cathodic protection system on the target FPSO to establish the optimal parameters.

KEY WORDS: cathodic protection; numerical simulation; FPSO; impressed current cathodic protection (ICCP); auxiliary anode; boundary element method (BEM); optimization design

FPSO 船体远离海岸作业, 不能像其他船舶一样可以定期进入船坞维修、保养, 其长期处于海水和盐雾环境中, 受到周围介质的作用会产生长期的腐蚀^[1-2]。腐蚀会降低 FPSO 结构的力学性能, 缩短其使用寿命^[3]。因此, 对 FPSO 进行腐蚀防护显得十分重要。

目前, 通常采用涂层和阴极保护并用的复合防护措施对 FPSO 进行腐蚀防护。牺牲阳极 (SACP) 和外加电流 (ICCP) 是阴极保护的 2 种方法^[4-5]。上述 2 种方法都是基于电化学腐蚀的防腐手段, 其中外加电流阴极保护是国内外公认的防止钢质结构物腐蚀最环保、经济、有效的防腐措施^[6-7]。

在利用外加电流阴极保护系统对 FPSO 进行阴极保护时, FPSO 水下结构表面电位的分布是评判阴极保护效果的重要指标^[8]。外加电流阴极保护系统中, 对 FPSO 水下结构表面保护电位分布起决定性作用的参数有: 辅助阳极数量、位置以及输出电流。为了实现目标 FPSO 保护效果好、后续运作成本低的目的, 需借助计算机软件数值模拟技术来确定上述参数。

1 数学模型

1.1 控制方程

在海水环境中, FPSO 上外加电流阴极保护系统产生电场的电位和电流密度满足式 (1)^[9-11]:

$$\mathbf{q} = -\frac{1}{\rho} \nabla \varphi \quad (1)$$

式中: \mathbf{q} 表示电流密度矢量; φ 表示电位; ρ 表示海水电阻率。

电解质电场中微小体积元 ($dx dy dz$) 各个方向上法向电流密度如图 1 所示^[12]。

在任意时刻, 微小体积元中的电流变化量为:

$$Q = \mathbf{q}_x dy dz + \mathbf{q}_y dx dz + \mathbf{q}_z dx dy + \mathbf{q}'_x dy dz + \mathbf{q}'_y dx dz + \mathbf{q}'_z dx dy = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) dx dy dz \quad (2)$$

当外加电流阴极保护系统产生的电场达到平衡状态时, 电流变化量 $Q=0$ 。由电荷守恒原理可知, 微小单元处于恒定状态, 根据式 (2) 得到该电场域内的控制方程, 见式 (3)。

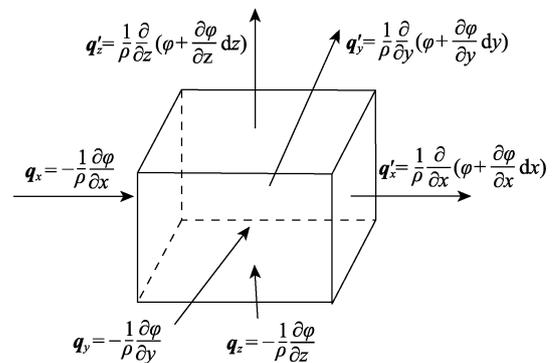


图 1 各方向电流密度

Fig.1 Schematic diagram of current density in all directions

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

该控制方程即为外加电流阴极保护电场域内的拉普拉斯方程^[13-14]。

1.2 边界条件

外加电流阴极保护的边界条件一般为以下 3 类: 第一类边界条件, 边界上的电位是已知值, 见式 (4)。

$$\varphi = \varphi_0 \quad (4)$$

第二类边界条件, 边界上的电流密度已知, 见式 (5)。

$$\mathbf{q} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \mathbf{q}_0 \quad (5)$$

式中: \mathbf{q}_0 为边界上的电流密度。

第三类边界条件, 被保护结构边界上的电流密度与电位满足极化曲线, 见式 (6)。

$$\mathbf{q} = f(\varphi) \quad (6)$$

用边界元法将上述控制方程转化为边界积分方程, 再将边界条件代入到边界积分方程内。利用计算机边界元程序求解描述阴极保护电场的方程, 从而可以计算得到被保护结构水下部分表面电位的分布。参数经优化后, 可得到外加电流阴极保护系统的最佳设计参数^[15]。

2 相关参数

2.1 环境参数

目标 FPSO 在西非、墨西哥湾和巴西等地的热带

海域作业,海水温度为 27.5 °C,海水盐度为 3.639%,海水电导率为 57.34 mS/cm,海水电阻率为 0.174 Ω·m。

2.2 FPSO 参数

FPSO 船型参数见表 1。

表 1 FPSO 船型参数
Tab.1 FPSO vessel type parameters

m				
总长	垂线间长	型宽	型深	设计吃水
338	328.2	62	32.8	25

2.3 保护电位

目标 FPSO 水线以下表面的保护电位的取值为 800~1 100 mV (vs. Ag/AgCl)^[15],湿表面积电位值与保护状态之间的关系见表 2。

表 2 湿表面积电位值与保护状态之间的关系
Tab.2 Relationship between wet surface area potential and protective status

阴极保护电位范围 (vs. Ag/AgCl) /mV	保护状态
<800	欠保护
800~1 100	完全保护
>1 100	过保护

2.4 辅助阳极

以乙烯基酯树脂纤维增强材料作为辅助阳极的绝缘座,以具有更高电化学活性的钛基金属氧化物作为辅助阳极的阳极体^[16],制成圆盘状钛基金属氧化物阳极(MMO 阳极)对目标 FPSO 进行阴极保护。辅助阳极各参数见表 3。

表 3 辅助阳极参数
Tab.3 Auxiliary anode parameters

直径/ mm	厚度/ mm	阳极体工作面积/ mm ²	氧化物层厚度/ μm
330	27	57 255.5	10

2.5 涂层破损率

目标 FPSO 外表涂层会随着作业时间而出现破损,涂层破损率的计算见式(7)^[16]。

$$f_c = a + bt \quad (7)$$

式中: f_c 为目标 FPSO 涂层破损率; a 、 b 为涂层破损率系数,结合目标 FPSO 船型参数和作业环境,取 $a=0.02$, $b=0.012$; t 为目标 FPSO 外表涂层的设计寿命。

2.6 阳极屏

在使用外加电流阴极保护系统对 FPSO 进行阴极

保护时,考虑到辅助阳极附近区域过高的电位会引起 FPSO 船体表面涂层的剥离,以及要使得目标 FPSO 水下表面电位分布相对均匀,需在辅助阳极附近区域涂上耐剥离的阳极屏涂层。阳极屏尺寸参考式(8)^[17]。

$$r = \frac{I_a \rho}{2\pi(E_0 - E)} \quad (8)$$

式中: r 为阳极屏半径; ρ 为海水电阻率; I_a 为辅助阳极额定输出电流; E_0 为目标 FPSO 在海水中所需要的最低保护电位,取 -0.8 V (vs. Ag/AgCl); E 为阳极屏边缘距离辅助阳极中心 r 处的涂层耐阴极剥离电位值。

3 数值模拟计算

采用大连理工大学船舶与海洋工程结构所自主研发的海洋工程阴极保护数值仿真系统——CPVS 软件,对目标 FPSO 进行外加电流阴极保护数值模拟计算。CPVS 软件基于边界元法(BEM)开发,该方法以拉普拉斯方程为基础,建立边界积分方程,并结合插值、离散等方法求解方程,其克服了有限差分法(FDM)和有限元法(FEM)数据准备量大的缺陷^[18-20],尤其适用于海洋工程结构物的腐蚀数值模拟计算。

根据目标 FPSO 型线图,建立设计水线以下主船体几何模型和边界元模型,如图 2 所示。其中,水线以下主船体面积为 35 207 m²,边界元模型采用实体三角形单元,单元数目为 36714 个。

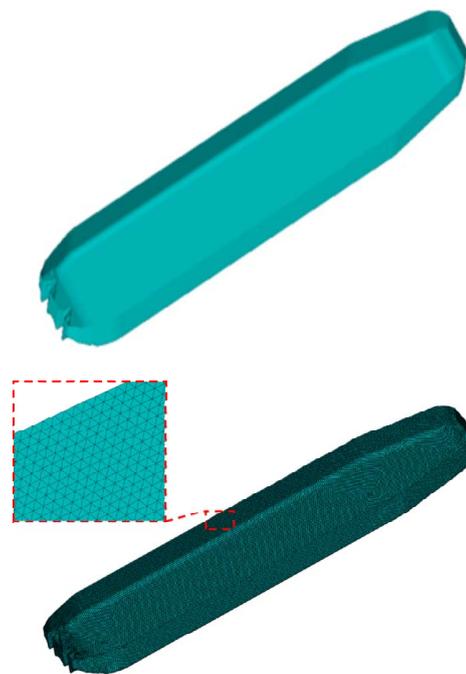


图 2 目标 FPSO 设计水线以下主体几何模型与边界元模型
Fig.2 Geometric model and boundary element model of main body below design waterline of target FPSO

3.1 初步方案数值模拟验证

根据船型及相关参数, 结合挪威船级社 (DNV) 阴极保护规范, 目标 FPSO 外加电流阴极保护初步方案为: 左右舷侧对称设置共 6 个辅助阳极, 如图 3 所示。图 3 中, 深色部分为辅助阳极的阳极屏区域, 计算得到阳极屏的半径为 6 m, 各个辅助阳极布置在阳极屏区域的中心位置, 各辅助阳极位置 (船舶坐标系下) 以及初期输出电流见表 4。

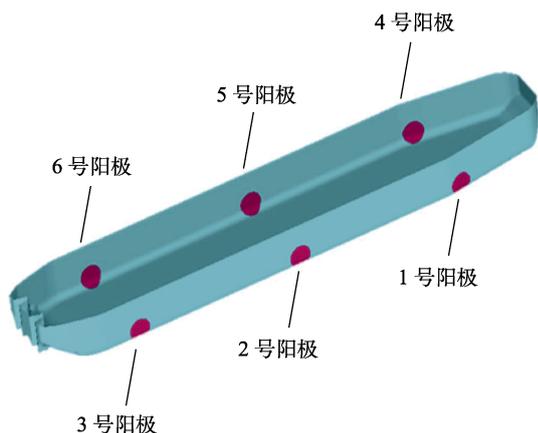


图 3 目标 FPSO 外加电流阴极保护初步方案
Fig.3 Schematic diagram of the initial scheme of impressed current cathodic protection of target FPSO

表 4 初步方案各辅助阳极位置及输出电流信息

Tab.4 Preliminary scheme of each auxiliary anode position and output current information

阳极编号	x 轴坐标/ m	y 轴坐标/ m	z 轴坐标/ m	初期输出电流/ A
1 号	105	27.6	5.1	8
2 号	0	31	5.7	8
3 号	-109	31	5.7	9
4 号	105	27.6	5.1	8
5 号	0	-31	5.2	8
6 号	-109	-31	5.7	9

目标 FPSO 船体外壳所需的电流密度根据 DNV 阴极保护规范规定的涂层破损系数进行计算, 分别计算 FPSO 服役初期、中期和末期的腐蚀防护状态, 验证初步方案是否满足设计要求。目标 FPSO 末期外加电流阴极保护初步方案数值模拟的结果如图 4 所示。此时, 目标 FPSO 水下表面电位为 782~1 129 mV, 阳极屏附近船体外壳出现过保护区域, 从而对船体涂层造成剥蚀; 船尾处和船底部分区域出现欠保护区域, 不能达到保护效果。故初步方案不能使得目标 FPSO 水线以下主船体在全寿命期内都处于全保护状态, 需对方案进行优化。

3.2 优化方案

在 3.1 小节初步方案的基础上, 对腐蚀防护方案

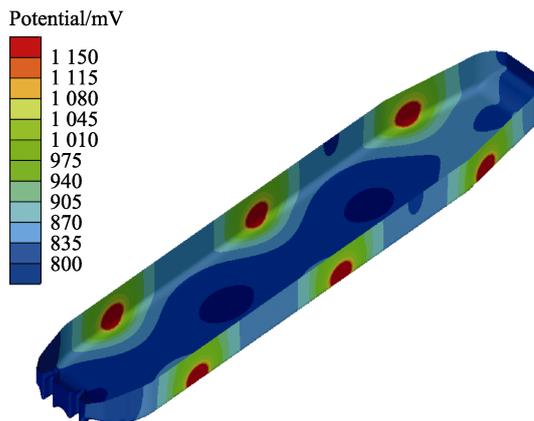


图 4 FPSO 船体外壳阴极保护初步方案末期保护电位分布云图
Fig.4 Distribution cloud map of the end of preliminary scheme of cathodic protection of FPSO hull

进行优化。初步方案中 6 个阳极到保护末期, 由于单个阳极输出电流过大, 导致阳极屏周围电位超过设计保护电位, 船尾处也由于涂层破损增大而得不到更好的保护, 因此优化方案中增加 1 对辅助阳极, 共设置 8 个辅助阳极, 如图 5 所示。同时将阳极屏半径由 6 m 增加到 6.5 m, 以保证末期阳极屏周围的电位不超过船体表面涂层的耐阴极剥离电位值。

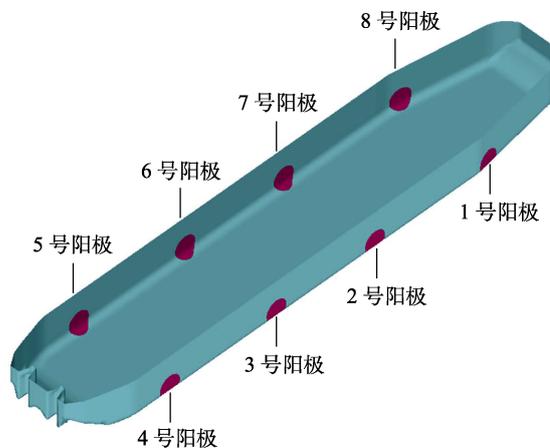


图 5 目标 FPSO 外加电流阴极保护优化方案
Fig.5 Schematic diagram of optimization scheme for impressed current cathodic protection of target FPSO

在 CPVS 软件里重新输入阳极位置、输出电流等信息, 按照如图 6 所示流程进行数值模拟计算。经过反复优化参数与计算, 最终得到了使得目标 FPSO 在全寿命期内都处于保护状态的最优保护参数, 各辅助阳极位置信息见表 5。初期, 1—8 号辅助阳极输出电流分别为 6、6、6、7、6、6、6、7 A, 阴极保护系统总的输出电流为 50 A, 目标 FPSO 水下部分主船体保护良好, 电位分布在 991~1 016 mV, 电位云图如图 7 所示。随着时间推移, FPSO 船体外表面涂层将逐渐出现破损。为达到设计的保护电位需求, 各个阳极的输出电流将逐步增加, 1—8 号阳极输出电流分别以

4.3、4.2、4.2、4.6、4.3、4.2、4.2、4.6 A/a 的变化率线性增加。初期、中期和末期各阳极输出电流见表 6。到末期，目标 FPSO 水下部分主船体保护状态仍然良好，电位分布在 814~1 099 mV，电位云图如图 8 所示。

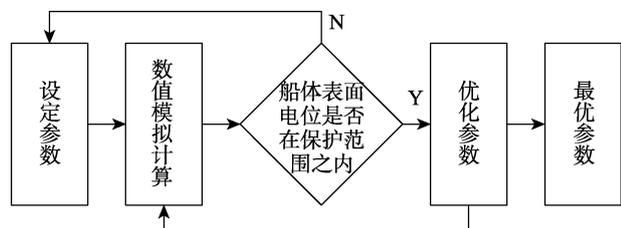


图 6 数值模拟计算流程
Fig.6 Flow chart of numerical simulation

表 5 优化后各辅助阳极位置信息

Tab.5 Position information of each auxiliary anodes after optimization

阳极编号	x 轴坐标/m	y 轴坐标/m	z 轴坐标/m
1 号	103.3	28.9	5.2
2 号	27.6	31	5.7
3 号	-37.3	31	5.7
4 号	-107.1	31	5.3
5 号	103.3	-28.9	5.2
6 号	27.6	-31	5.7
7 号	-37.3	-31	5.7
8 号	-107.1	-31	5.3

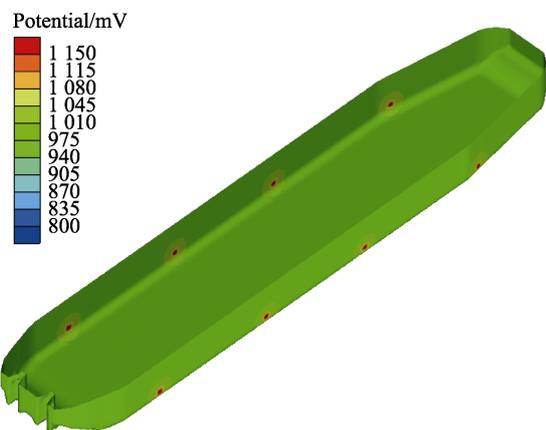


图 7 最优参数下初期目标 FPSO 电位云图
Fig.7 Cloud map of initial target FPSO potential under optimal parameters

表 6 最优参数下各阳极输出电流

Tab.6 Output current of each anode under optimal parameters A

时间/a	1 号	2 号	3 号	4 号	5 号	6 号	7 号	8 号
1	6	6	6	7	6	6	6	7
15	66.2	64.8	64.8	71.4	66.2	64.8	64.8	71.4
30	103.7	127.8	127.8	140.4	130.7	127.8	127.8	140.4

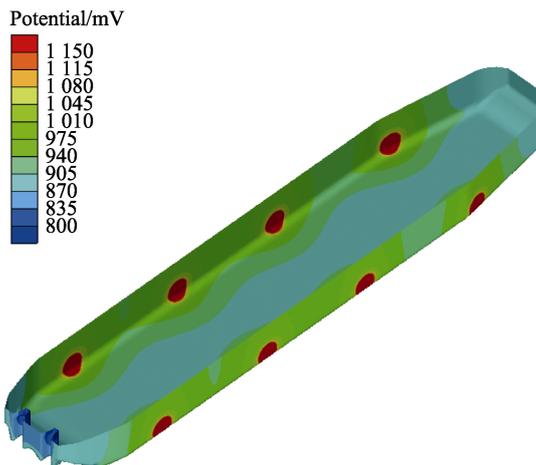


图 8 最优参数下末期目标 FPSO 电位云图
Fig.8 Cloud map of final target FPSO potential under optimal parameters

4 结论

1) 利用基于边界元法的数值模拟软件对 FPSO 进行阴极保护数值模拟计算，可得到 FPSO 外加电流阴极保护系统的最优参数。

2) 设计人员可依据计算结果，在实际工程中对 FPSO 进行腐蚀防护布置。

参考文献：

- [1] 杨树敏, 董广河. 阴极保护系统在“海洋石油 118FPSO”上的应用[J]. 船海工程, 2016, 45(5): 76-78.
YANG Shu-min, DONG Guang-he. Application of Cathodic Protection System in FPSO Industry[J]. Ship & Ocean Engineering, 2016, 45(5): 76-78.
- [2] 赵耕贤. FPSO 设计综述[J]. 船舶, 2005, 16(6): 1-5.
ZHAO Geng-xian. FPSO Design Summary[J]. Ship & Boat, 2005, 16(6): 1-5.
- [3] 黄鹏亮. 谈钢结构的腐蚀和防护[J]. 建筑工程技术与设计, 2018, (16): 4613.
HUANG Pengliang. Corrosion and protection of steel structure[J]. Construction Engineering Technology and Design, 2018, (16): 4613.
- [4] 张馨予. 固定式外加电流阴极保护系统在导管架平台上的工程应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
ZHANG Xin-yu. Engineering Application of the Fixed ICCP System on Jacket Platform[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [5] 张玉萍, 杨娟, 鞠鹤. 外加电流阴极保护用钛阳极概述[J]. 科技创业家, 2012(12): 174.
ZHANG Yu-ping, YANG Juan, JU He. Titanium Anodes for Impressed Current Cathodic Protection[J]. Technological Pioneers, 2012(12): 174.
- [6] 刘福国, 武素茹. 导管架平台外加电流阴极保护数值模拟计算研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2011, 28(6):

- 9-12.
LIU Fu-guo, WU Su-ru. Study on Numerical Simulation Calculation for Applied Current Cathodic Protection of Platform[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2011, 28(6): 9-12.
- [7] 于楠, 梁成浩, 吴建华, 等. 基于缩比模型理论的船舶外加电流阴极保护系统水线下表面电位的研究[J]. 腐蚀与防护, 2006, 27(6): 276-279.
YU Nan, LIANG Cheng-hao, WU Jian-hua, et al. Surface Potential Measurement under Waterline for Ship's Impressed Current Cathodic Protection System Based on Physical Scale Model[J]. Corrosion & Protection, 2006, 27(6): 276-279.
- [8] 李佳奇. 埋地金属管道的管外阴极保护数值模拟研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2015.
LI Jia-qi. Numerical Simulation Research of Cathodic Protection in Buried Metal Pipeline[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2015.
- [9] 杨璐嘉, 钟文军, 曹亚洲, 等. 基于数值模拟计算的铺管船阴极保护系统设计[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(11): 1072-1076.
YANG Lu-jia, ZHONG Wen-jun, CAO Ya-zhou, et al. Cathodic Protection Design of a Pipe Laying Vessel Based on Numerical Simulation[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(11): 1072-1076.
- [10] 赵菊梅. 舰船阴极保护电磁效应数值模拟仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
ZHAO Ju-mei. A Simulation Research on the Numerical Method of Vessels' Magnetic Field Caused by Cathodic Protection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [11] 陈磊, 郗春满, 王树立, 等. 水环境中管道结构对阴极保护系统电位分布影响的数值模拟[J]. 工业安全与环保, 2018, 44(9): 76-81.
CHEN Lei, XI Chun-man, WANG Shu-li, et al. Numerical Simulation of the Impact of Pipeline Structure on the Potential Distribution of Cathodic Protection System[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2018, 44(9): 76-81.
- [12] 梁旭巍, 吴中元, 孟宪级, 等. 油田区域性阴极保护计算机辅助优化设计研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1998, 17(5): 90-94.
LIANG Xu-wei, WU Zhong-yuan, MENG Xian-ji, et al. Study on the Computer Assistant Optimization Design for the Regional Cathodic Protection System[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1998, 17(5): 90-94.
- [13] 梁旭巍, 吴中元, 孟宪级, 等. 油田区域性阴极保护计算机辅助优化设计研究[J]. 天津纺织工学院学报, 1998, 17(5): 90-94.
LIANG Xu-wei, WU Zhong-yuan, MENG Xian-ji, et al. Study on the Computer Assistant Optimization Design for the Regional Cathodic Protection System[J]. Journal of Tianjin Institute of Textile Science and Technology, 1998, 17(5): 90-94.
- [14] DEGIORGI V G, WIMMER S A. Geometric Details and Modeling Accuracy Requirements for Shipboard Impressed Current Cathodic Protection System Modeling[J]. Engineering Analysis With Boundary Elements, 2005, 29(1): 15-28.
- [15] RIEMER D P, ORAZEM M E. A Mathematical Model for the Cathodic Protection of Tank Bottoms[J]. Corrosion Science, 2005, 47(3): 849-868.
- [16] DNV RP B401—2010, Cathodic Protection Design[S].
- [17] 许立坤. 阴极保护用金属氧化物阳极研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
XU Li-kun. Study on Mixed Metal Oxide Anodes for Cathodic Protection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [18] CB/T 3455—1992, 船用阳极屏蔽层的设计与涂装[S].
CB/T 3455—1992, Design and Coating of Marine Anode Shielding Layer[S].
- [19] ZAMANI N G. Boundary Element Simulation of the Cathodic Protection System in a Prototype Ship[J]. Applied Mathematics and Computation, 1988, 26(2): 119-134.
- [20] 孟宪级, 庄新国, 吴中元, 等. 区域性阴极保护数学模型算法的改进[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1998, 18(3): 221-226.
MENG Xian-ji, ZHUANG Xin-guo, WU Zhong-yuan, et al. Improvement of Algorithm for Regional Cathodic Protection Model[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1998, 18(3): 221-226.
- [21] 邱枫, 徐乃欣. 用带状牺牲阳极对埋地钢管实施阴极保护时的电位和电流分布[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1997, 17(2): 106-110.
QIU Feng, XU Nai-xin. Potential and Current Distributions on Pipelines Cathodically Protected with Ribbon Sacrificial anodes[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1997, 17(2): 106-110.

责任编辑: 刘世忠