

# 海洋平台导管架外加电流阴极保护设计数值模拟

李民强<sup>1</sup>, 郑震生<sup>1</sup>, 董亮<sup>2</sup>, 杨光<sup>1</sup>, 蔡峰<sup>2</sup>, 于俊峰<sup>1</sup>, 吴广春<sup>2</sup>

(1.胜利油田海洋采油厂, 山东 东营 257237; 2.安科工程技术研究院, 北京 100083)

**摘要:**目的 对海洋平台导管架外加电流阴极保护设计通电点的选择等问题进行分析, 为海洋平台导管架阴极保护设计提供指导。方法 利用 BEASY CP 数值模拟软件, 通过数值模拟计算方法对导管架外加电流阴极保护系统设计的基础问题进行了研究, 包括保护对象的确定、通电点的设置、辅助阳极选型和阳极数量及安装位置等。结果 导管架外加电流阴极保护设计时, 若只考虑海水浸渍部分, 则无法使导管架海水和海泥部分均得到有效保护。设置通电点时, 考虑电阻 ( $1.01 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ ) 和不考虑电阻两种情况下导管架的保护电位相近, 绝对误差不超过 1 mV, 通电点的位置对保护效果影响较小。阴极保护输出电流为 17 A 时, 三种不同直径 (300、600、900 mm) 辅助阳极阴极保护系统的保护相近, 保护电位在 803~899.2 mV(vs. CSE)之间。三种不同阳极设计方案的输出电流分别为 17、17、16.5 A, 对应的保护效果分别为 803.34~899.20 mV (vs. CSE)、802.96~850.64 mV (vs. CSE)、800.36~848.26 mV (vs. CSE)。2<sup>#</sup>阳极的保护效果比 1<sup>#</sup>阳极的保护效果均匀, 两支阳极方案在最低保护效果下所需电流比单支阳极更小且保护更均匀。结论 设计外加电流阴极保护系统时, 应当充分考虑与待保护对象相连接的所有金属结构物。对于小型导管架而言, 金属电阻对导管架外加电流阴极保护系统的电位分布影响很小, 因此通电点的选择较容易。外加电流阴极保护系统设计时应考虑电流密度对辅助阳极的消耗影响, 选取适当尺寸的阳极。通过数值模拟方法, 可以优化阳极数量和位置, 从而实现保护电流较小且保护效果更均匀, 并满足一定的经济性要求。

**关键词:** 导管架; 外加电流阴极保护; 数值模拟; 设计; 辅助阳极; 通电点

**中图分类号:** TG174.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)07-0109-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.07.019

## Design Problems in Impressed Current Cathodic Protection for Offshore Jackets Based on Numerical Method

LI Min-qiang<sup>1</sup>, ZHENG Zhen-sheng<sup>1</sup>, DONG Liang<sup>2</sup>, YANG Guang<sup>1</sup>, CAI Feng<sup>2</sup>, YU Jun-feng<sup>1</sup>, WU Guang-chun<sup>2</sup>

(1. Marine Oil Production Plant of Shengli Oil Field, Dongying 257237, China;

2. Safetech Research Institute, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** **Objective** The position of the structure where the electric current flows into and several other problems were studied in the designing process of impressed current cathodic protection for offshore jacket, and the achievement could offer a

收稿日期: 2016-03-23; 修订日期: 2016-06-12

Received: 2016-03-23; Revised: 2016-06-12

作者简介: 李民强 (1977—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为油气工程。

**Biography:** LI Min-qiang (1977—), Male, Engineer, Research focus: oil and gas senior engineer.

通讯作者: 吴广春 (1986—), 男, 硕士, 主要研究方向为腐蚀与防护。

**Corresponding author:** WU Guang-chun (1986—), Male, Master, Research focus: corrosion and protection.

reference for cathodic protection of platform offshore jackets. **Methods** In this paper, several problems in the design of impressed current cathodic protection for offshore jacket, including protected objects, power point, the selection of auxiliary anode, the number and the location of auxiliary anode, were studied by the numerical simulation software, BEASY CP. **Results** If only considering the part of offshore jacket surrounded by seawater, the structure could not be protected effectively by the impressed current cathodic protection system. The protective potential of the two design schemes including and excluding resistance ( $1.01 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ ) was close to each other and the absolute error was less than 1 mV. The protective potential was less affected by the setting of power point. The distribution of protective potential with three different diameters of auxiliary anode, 300 mm, 600 mm and 900 mm, were all in the range of 803~899.2 mV (vs. CSE). The protective potential of three anode design schemes with 17 A, 17 A and 16.5 A output current respectively, were 803.34~899.20 mV (vs. CSE), 802.96~850.64mV (vs. CSE) and 800.36~848.26 mV (vs. CSE), respectively. It can be seen that the protective effect of 2<sup>#</sup> anode scheme was better than 1<sup>#</sup> anode scheme, and the anode scheme with two anodes was the best. **Conclusion** All metal structures should be considered in the designing process of the impressed current cathodic protection system for offshore jacket. For small jacket, the protective potential was less affected by metal resistance, so the power point was easy to determine. It was important to consider the influence of current density on anode consumption and select the suitable anode size in the process of cathodic protection system design. The number and setting location could be optimized by numerical simulation method in order to obtain a better protective effect and reduce the requirement of protective current.

**KEY WORDS:** offshore jackets; impressed current cathodic protection; numerical simulation; design; auxiliary anode; power point

海洋平台导管架是海上油气开采的重要结构设施,为缓解外部海水和海泥腐蚀,往往设计牺牲阳极阴极保护系统提供电保护,但设计寿命一般约为 10~15 年,而国内许多平台建设于 20 世纪 90 年代初,平台运行周期超过 20 年,阴极保护系统需要延寿设计。由于牺牲阳极数量较多,水下焊接操作的难度大,费用高,采用外加电流阴极保护系统进行改造是未来发展的趋势。然而,对于导管架这种复杂结构的外加电流阴极保护系统设计,由于实践较少,也缺少相应的参考标准,设计难度较大。

数值模拟技术辅助阴极保护的设计<sup>[1-6]</sup>能够适应影响因素多、结构复杂的保护对象,通过参数输入和模拟计算得到其保护电位分布,从而可通过参数调整最终实现阴极保护的优化。国际上已有成熟的阴极保护数值模拟技术软件,本文所采用的 BEASY CP 是基于边界元计算方法的数值模拟软件,国际上认可度高,在阴极保护领域有着广泛的应用<sup>[7-9]</sup>。本文基于海洋平台外加电流阴极保护系统设计的基础问题,如通电点的选择等,进行模拟分析,以期设计提供指导。

## 1 阴极保护数值模拟技术基本原理

当导管架外加阴极保护系统达到稳定状态时,

由于所处区域海水介质均匀,根据电荷守恒定律,海水中的电位分布满足 Laplace 方程<sup>[10]</sup>:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

式中:  $\nabla$  为 Laplace 算子;  $\phi$  为海水各处的电位。

假设所研究导管架及其阴极保护系统区域被表面  $\Gamma$  所包围,则:

$$\Gamma = \Gamma_A + \Gamma_C + \Gamma_I \quad (2)$$

式中:  $\Gamma_I$  为绝缘表面,采用恒定电流密度作为边界条件,绝缘表面上无电流的流入流出,电流密度为零;  $\Gamma_A$  和  $\Gamma_C$  分别为阴极保护系统中辅助阳极和被保护金属结构物的外表面。边界条件常根据极化函数确定,该函数表示了极化电流密度  $J$  与极化电位  $E$  之间的关系,可通过实验测量极化曲线确定,即:

$$J = f(E) \quad (3)$$

当边界条件或求解区域复杂时,无法得到 Laplace 方程的解析解,只能采取数值计算方法获得数值解。在过去数十年中,计算机的快速发展为复杂问题的数值计算提供了良好的平台,涌现出了有限差分法、有限元法和边界元法等数值计算方法。其中,边界元法的离散和计算都只在边界上,减少了未知数的个数,计算得到的边界上的电位和电流密度是阴极保护的关键参数,因而在阴极保护系统

中的应用最广泛<sup>[11-14]</sup>。本文 BEASY 软件采用边界元法, 在海洋阴极保护中有着广泛应用<sup>[15-16]</sup>。

## 2 导管架外加电流阴极保护设计基础资料

以某海洋平台导管架为例, 基于其设计和施工图纸获得基础信息, 建立如图 1 所示的导管架几何模型。



图 1 某海洋平台导管架结构的几何模型

Fig.1 Geometric model of an offshore platform jacket structure

导管架所在海域地处温带, 对于导管架结构物的边界条件, 根据标准要求, 裸钢在海水中处于阴极保护中期或者平均电流密度为  $110 \text{ mA/m}^2$ , 在海泥中处于阴极保护中期或者平均电流密度为  $20 \text{ mA/m}^2$ <sup>[11]</sup>。导管架表面涂层为多层高氯聚乙烯涂层, 干膜厚度  $>250 \mu\text{m}$ , 已服役 18 年, 参照标准获得涂层破损率为 50%。海水电阻率为  $25 \Omega \cdot \text{cm}$ ; 电导率  $4 \text{ S/m}$ , 海泥电阻率  $100 \Omega \cdot \text{cm}$ , 电导率约为  $1 \text{ S/m}$ 。数值模拟中采用了该电导率数值。

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 保护对象的确定分析

在阴极保护设计中, 确定保护对象非常重要, 由于导管架各结构均电连接, 如海水和海泥中的部分, 在以往牺牲阳极阴极保护的设计中往往只考虑导管架海水部分, 而对于海泥中桩腿的保护效果略欠考虑, 这与牺牲阳极保护距离短有关, 但外加电

流阴极保护设计中是否应全面考虑是未知的。

假设辅助阳极为混合金属氧化物 (MMO) 球形阳极, 直径为  $300 \text{ mm}$ , 通过水泥底座固定于海泥面上, 输出电流为  $12.3 \text{ A}$ 。通过数值模拟计算得到在相同外加电流下, 仅对海水部分导管架进行保护和海水、海泥部分均进行保护两种保护设计, 计算结果如图 2 所示。可以看出, 相同的电流下, 仅考虑海水部分可以达到保护目的, 但无法使导管架海水、海泥部分均获得有效的保护。因此在外加电流阴极保护系统设计中, 应充分考虑所有电连接的结构物。

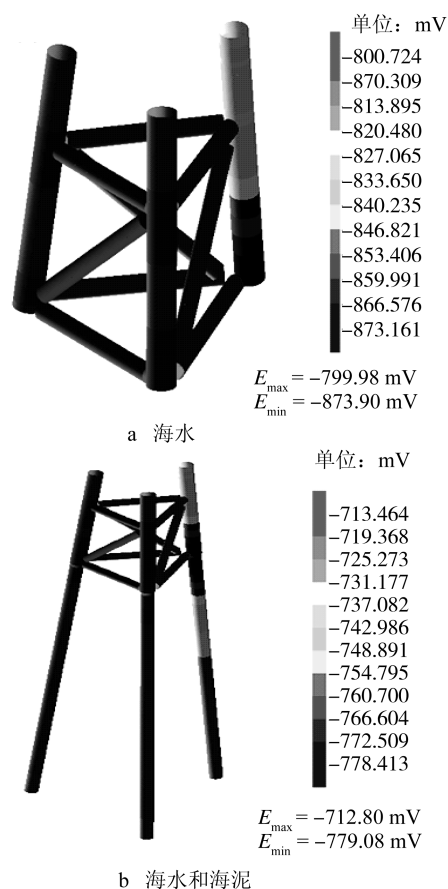


图 2 两种环境下的保护效果比较

Fig.2 Comparison of protective effects between the model only considering the part of seawater and the model considering both the parts of seawater and sea-mud: a) seawater, b) seawater and sea-mud

### 3.2 通电点的设置分析

在外加电流阴极保护设计中, 往往只有一个通电点或汇流点, 在结构物中集中的阴极保护电流经过导管架自身金属电阻, 产生压降, 从而可能对阴极保护效果产生影响。

假设辅助阳极为 MMO 球形阳极, 直径为  $300$

mm, 置于海泥床上, 输出电流为 17 A, 导管架通电点与阳极连接位置如图 3 所示, 分别考虑电阻 ( $1.01 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ ) 和不考虑电阻, 不同条件下外加电流阴极保护的计算结果如图 4 所示。由图 4 可见, 两种条件下的模拟计算结果所得导管架的保护电位分布接近, 绝对误差不超过 1 mV, 即在计算条件下, 导管架结构电阻的影响较小。这是因为导管架结构设计壁厚较厚, 接近 20 mm, 且结构四通八达, 因此通电点的位置对保护效果影响很小。对于

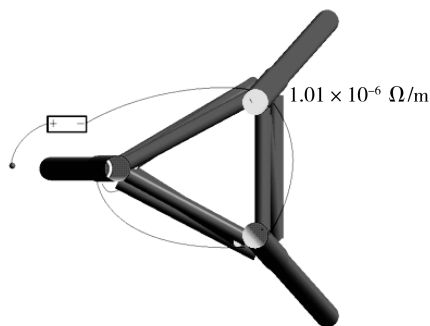


图 3 通电点位置及阴极保护系统连接示意图

Fig.3 Power point location and the diagram of connection of the cathodic protection system

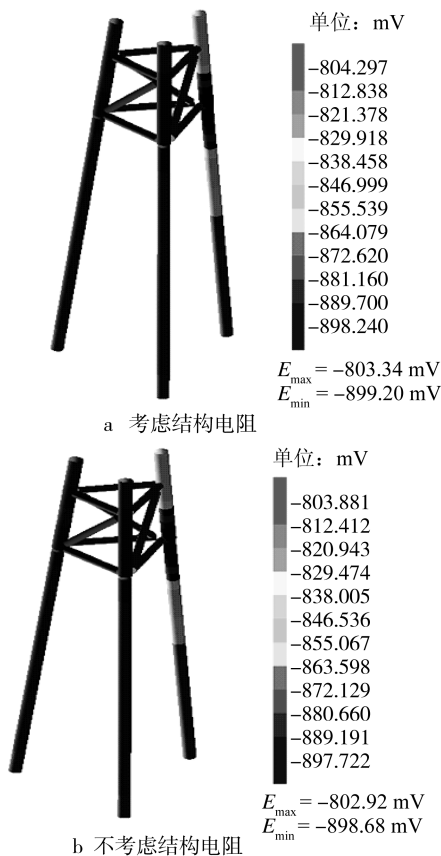


图 4 保护效果对比

Fig.4 The Comparison of protective effects: a) considering the structure resistance, b) without considering the structure resistance

大型结构物, 尽管结构物电阻也很小, 但所需阴极保护电流会增大, 是否需要考虑电阻对通电点选择的影响也可作类似的分析。

### 3.3 阳极选型分析

考虑外加电流阴极保护系统中, 辅助阳极尺寸大小对阴极保护效果的影响, 使用数值模拟技术, 在电流和阳极位置相同的情况下采用三种不同尺寸阳极进行保护, 计算导管架保护电位分布情况, 计算结果如表 1 和图 5 所示。结果显示, 各尺寸阳极条件下计算结果的保护电位范围相差较小, 阳极尺寸对导管架保护影响较小。因为相对于导管架的结构, 三种辅助阳极的尺寸均很小, 对保护效果的影响较小。虽然阳极尺寸对当前模型金属结构的保护效果影响不大, 但在设计中考考虑到辅助阳极的输出电流较大, 在一定的输出电流水平下, 尺寸小的辅助阳极输出电流密度高, 因此消耗较快。为保证外加电流阴极保护系统达到预期的设计寿命, 应综合考虑辅助阳极足够大。

表 1 不同阳极尺寸保护效果

Tab.1 The protective effects of anodes of different sizes

Scheme No.	The sizes of anodes (diameter)/mm	Output current of anode/A	Distribution of the protective potential (vs. CSE)/mV
1	300	17	-803.34~-899.20
2	600	17	-803.09~-896.90
3	900	17	-803.08~-896.15

### 3.4 阳极数量和安装位置的确定

对海洋平台导管架外加电流系统采用单支阳极且改变阳极位置及采用两支阳极等三种保护方案, 阳极距导管架垂直距离为 300 m, 通过水泥底座固定于海泥面上, 阳极安装位置如图 6 所示。模拟计算其保护效果, 结果见表 2、图 7 和图 8。可见在达到最低保护效果时, 单支阳极保护下, 2<sup>#</sup>阳极的保护效果比 1<sup>#</sup>阳极的保护效果均匀, 两支阳极方案在最低保护效果下所需电流比单支阳极更小且保护更均匀, 但材料及施工费用更高。因此通过模拟分析结合现场施工条件及费用统计, 可优化设计外加电流阴极保护系统。

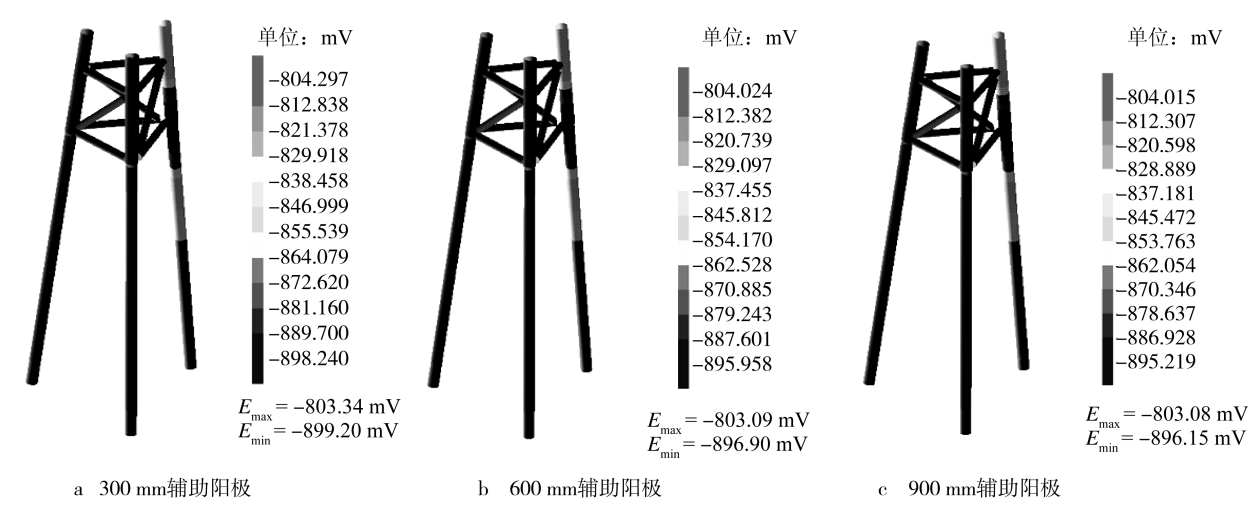


图 5 不同阳极尺寸对导管架及结构物保护效果

Fig.5 The protective effects of anodes of different sizes: a) anode diameter 300 mm; b) anode diameter 600 mm; c) anode diameter 900 mm

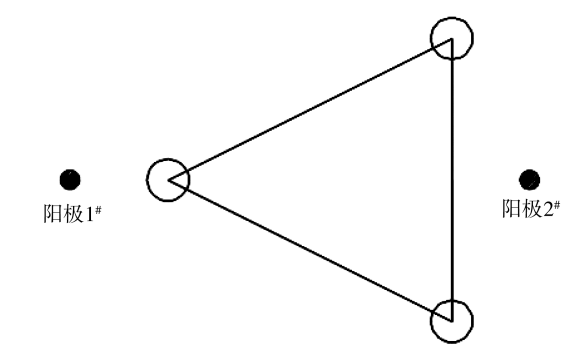


图 6 不同阳极放置方案位置示意图

Fig.6 The diagram of auxiliary anode location for different design schemes

表 2 不同阳极放置方案保护效果			
Tab.2 The protective effects of different design schemes for auxiliary anode			
Scheme No.	Anode No.	Output currents of anodes/A	Distribution of the protective potential (vs. CSE)/mV
1	1 <sup>#</sup>	17	-803.34~-899.20
2	2 <sup>#</sup>	17	-802.96~-850.64
3	1 <sup>#</sup>	8.2	-800.36~-848.26
	2 <sup>#</sup>	8.3	

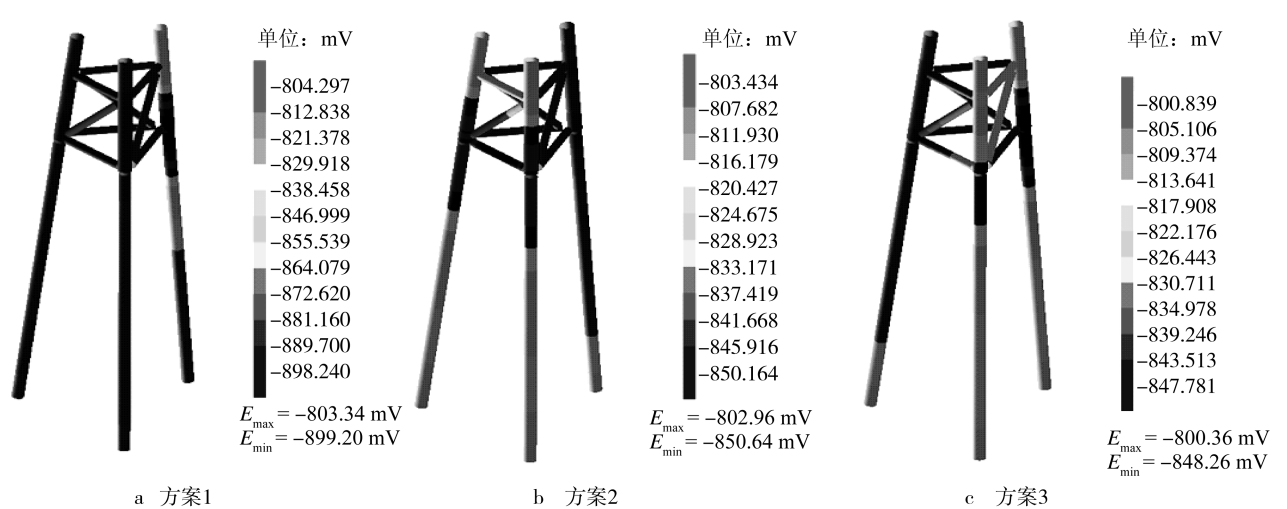


图 7 不同阳极方案下的保护效果

Fig.7 The protective effects of different anode schemes: a) scheme No.1, b) scheme No.2, c) scheme No.3

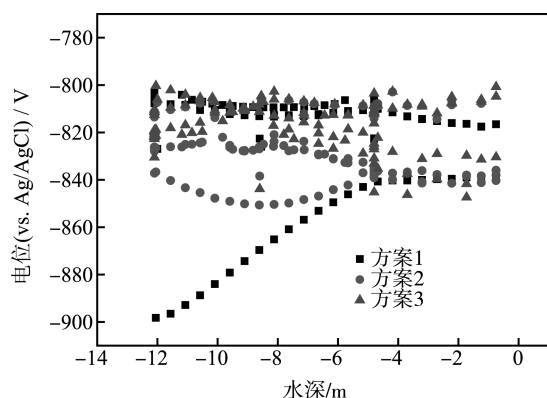


图8 不同阳极方案下各位置保护效果对比

Fig.8 The protective effects of different design schemes for auxiliary anode

## 4 结论

1) 外加电流阴极保护系统设计时,应当充分考虑与待保护对象相连接的所有金属结构物。

2) 对于小型导管架而言,由于所需阴极保护电流相对较小,设计时壁厚较厚,且各导管之间存在错综复杂的结构联系,金属电阻对导管架外加电流阴极保护系统的电位分布影响很小,因此通电点的选择较容易。

3) 在外加电流阴极保护系统中,由于辅助阳极的尺寸相对导管架结构较小,其对阴极保护效果的影响较小,设计应考虑电流密度对辅助阳极的消耗影响,应当选取适当尺寸的阳极。

4) 通过数值模拟方法,可以优化阳极数量和位置,从而实现保护电流较小且保护效果更均匀,并满足一定的经济性要求。

## 参考文献

- [1] 刘福国, 武素茹. 导管架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. Research on Impressed Current Cathodic Protection for Offshore Jackets Based on Numerical Method[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2011, 28(6): 9—12.
- [2] 张脉松, 尹鹏飞, 马长江. 海洋平台外加电流阴极保护技术[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(3): 20—23.  
ZHANG Mai-song, YIN Peng-fei, MA Chang-jiang. Impressed Current Cathodic Protection Technology for Offshore Platform[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(3): 20—23.
- [3] 李妍. 深水导管架的阴极保护[J]. 全面腐蚀控制, 2004, 18(4): 18—20.  
LI Yan. Cathodic Protection of Deepwater Jacket[J]. Total Corrosion Control, 2004, 18(4): 18—20.
- [4] BAYNHAMJ M, FROOME T, ADEY R A. Jacket SACP Design and Optimization Using Simulation[C]// Corrosion. Houston: NACE, 2012: 0001281.
- [5] BAZZONI B. Current and Potential Distribution Modeling for Cathodic Protection of Tank Bottoms[C]// Corrosion. Houston: NACE, 2008: 059.
- [6] 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(4): 49—54.  
XING Shao-hua, LI Yan, MA Li, et al. Research Progress in Cathodic Protection Technology for Marine Infrastructures in Deep Sea Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 49—54.
- [7] 常炜, 栗艳侠, 徐桂华, 等. 海洋平台阴极保护电位检测系统[J]. 中国海洋油气(工程), 1999, 11(3): 27—30.  
CHANG Wei, LI Yan-xia, XU Gui-hua, et al. Potential Detection System of Cathodic Protection System for Offshore Platform[J]. China Offshore Oil and Gas, 1999, 11(3): 27—30.
- [8] 杜艳霞, 张国忠, 李健. 阴极保护电位分布数值计算[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(1): 53—58.  
DU Yan-xia, ZHANG Guo-zhong, LI Jian. Numerical Calculation of Cathodic Protection Potential Distribution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(1): 53—58.
- [9] 孙吉星. 海洋结构物阴极保护优化模型及数值模拟计算[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.  
SUN Ji-xing. Optimization Model and Numerical Calculation of the Cathodic Protection System for Marine Structure[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006.
- [10] DOUGLAS P R, MARK E O. A Mathematical Model for the Cathodic Protection of Tank Bottoms[J]. Corrosion Science, 2005, 47(3): 849—868.
- [11] 宋积文, 兰志刚, 王在峰, 等. 海洋环境中阴极保护设计与阴极产物膜[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(4): 265—267.  
SONG Ji-wen, LAN Zhi-gang, WANG Zai-feng, et al. Cathodic Protection Design and Cathodic Product Films in Seawater[J]. Corrosion and Protection, 2010, 31(4): 265—267.
- [12] DU Yan-xia, LU Min-xu, LIU Jia, et al. Study on the Cathodic Protection Test Probe for Buried Steel Pipeline[J]. Corrosion, 2012(4): 2989—2999.
- [13] METWALLY I A, AI-MANDHARI H M, GASTLI A, et al. Stray Current of ESP Well Casings[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2008, 32(1): 32—40.
- [14] 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.
- [15] NACE standard SPO176—2007, Corrosion Control of Submerged Areas of Permanently Installed Steel Off-shore Structures Associated with Petroleum Production [S].
- [16] RP-B401-2011, Cathodic Protection Design[S].