

基于数值模拟的海上平台阴极保护系统的技术研究

余晓毅¹, 赵赫², 常炜¹, 宋世德², 黄一²

(1.中海油研究总院, 北京 100027; 2.大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: **目的** 确认海上平台外加电流阴极保护系统维修方案的可行性。**方法** 开展两种工况下外加电流阴极保护作用效果的数值模拟计算, 对比分析两种工况下外加电流阴极保护系统对平台结构腐蚀防护的有效性。**结果** 得到两种工况下阴极保护系统处于最佳保护状态时平台结构的保护电位分布云图。**结论** 当远地式外加电流阴极保护系统失效时, 通过新增两套拉伸式外加电流阴极保护系统可以实现优良的阴极保护效果。

关键词: 海洋平台; 外加电流阴极保护; 腐蚀防护; 耦合系统

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.02.016

中图分类号: TJ07; TG174

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)02-0081-04

Technical Research on Cathode Protection System of Offshore Platform Based on Numerical Simulations

YU Xiao-yi¹, ZHAO He², CHANG Wei¹, SONG Shi-de², HUANG Yi²
(1.China National Offshore Oil Corporation Research Center, Beijing 100027, China;
2.Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: Objective To confirm the feasibility of maintenance scheme for Impressed Current Cathodic Protection (ICCP) of offshore platform. **Methods** The protection effectiveness of ICCP under two working conditions was compared and analyzed by numerical simulation computation. **Results** The protective potential distribution of the platform structure was obtained when the ICCP was in the best protection state under the two working conditions. **Conclusion** When the remote type ICCP system is invalid, the maintenance scheme can provide cathodic protection well by adding two sets of tension type ICCP systems.

KEY WORDS: offshore platform; impressed current cathodic protection; corrosion prevention; coupling system

在20世纪70、80年代,我国开始自主设计并建造各类海洋平台,现有各类海洋平台数量已达到200多座^[1-3],其中95%以上为固定式钢制平台。由于海洋平台所处的环境恶劣,在多种物理、化学因素作用下时常发生钢结构的腐蚀与破坏,为了确保海洋平台在其服役期间的安全性,应采取相应的腐蚀防护措施^[4-6],阴极保护方法为海洋平台结构提供了有效的腐蚀防护手段。常用的阴极保护方法有牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护两种。

牺牲阳极保护法具有设计简单、后期维护少、过保护风险小等优点^[7],为众多海洋平台所采用,但同时也带来了平台结构质量增加、环境污染、延寿成本高等问题。外加电流阴极保护系统具有质量轻、使用寿命长、环境友好、工作状态可适应性调控等多方面优点^[8],无论是新建海洋平台还是现役海洋平台,外加电流阴极保护系统越来越受到重视。由于海洋平台结构较为复杂,对外加电流阴极保护(ICCP)技术系统集成化程度要求比较高,因此相

收稿日期: 2017-01-18; 修订日期: 2017-02-10

基金项目: 十三五国家科技重大专项子任务(2016ZX05057012)

作者简介: 余晓毅(1986—),男,硕士,防腐工程师,主要研究方向为海洋工程防腐设计。

应的研究也比较少。现役平台延寿用外加电流阴极保护系统主要可分为拉伸式和远地式两种,拉伸式 ICCP 系统的辅助阳极一般位于平台内部,在水中垂直分布;远地式 ICCP 系统的辅助阳极一般集中位于远离平台的位置。数值模拟是评估阴极保护效果的有效方法^[9-10],因此文中主要针对海上某平台开展两种外加电流阴极保护系统耦合工况的数值模拟计算,分析确认两种外加电流阴极保护系统耦合工况对平台结构腐蚀防护的有效性。

1 系统原理及布置

外加电流阴极保护系统主要由整流器(电源)、多路控制系统、辅助阳极组成。远地式 ICCP 系统的辅助阳极安装于导管架平台外,其布置如图 1 所示(Retrobuoy2)。拉伸式 ICCP 系统(vertical tension anode ICCP system, VTA)的辅助阳极张紧悬挂于导管架内部,共 2 套,其布置如图 2 所示(VTA #A 与 #B)。

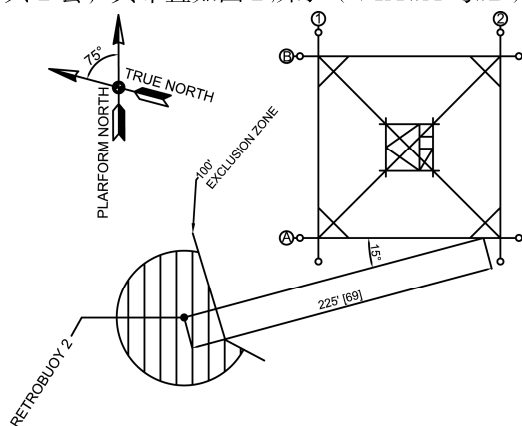


图 1 远地式 ICCP 系统布置

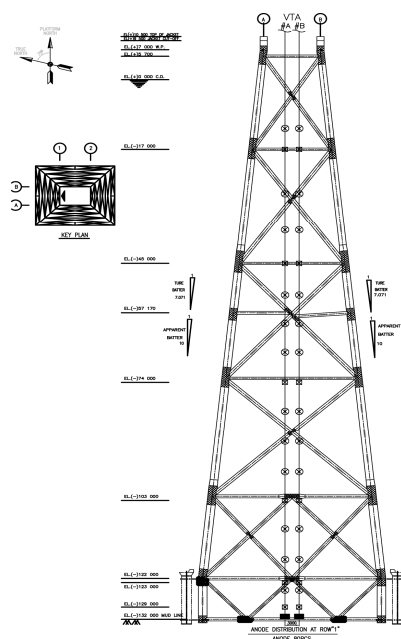


图 2 拉伸式 ICCP 系统布置

2 阴极保护系统数值计算方法

2.1 模拟计算工况

海洋平台阴极保护的技术指标如下:依据 DNV-RP-B401 规范^[11],采用阴极保护电位(相对于 Ag/AgCl 参比电极,下同)范围为 $-800 \sim -1100$ mV,以避免过保护和欠保护。

距离目标平台位置约 70 m 处有一套远地式外加电流阴极保护系统为导管架提供保护。根据海洋平台阴极保护系统的相关检测和监测信息可以判断,导管架结构表面目前处于良好的极化状态,导管架所需保护电流约 500 A。在该研究中,针对两种工况开展数值模拟计算:新增拉伸式 ICCP 系统和一套远地式 ICCP 系统同时工作;新增拉伸式 ICCP 系统独立工作。

根据目标平台目前及末期保护电流要求,数值模拟计算所采用的外加电流阴极保护系统的额定输出电流见表 1。

表 1 目标平台外加电流系统的额定输出电流

外加电流阴极 保护系统名称	最大可 输出电流/A	备注
远地式	500	现有
拉伸式A	500	新增
拉伸式B	500	新增

每套新增拉伸式 ICCP 系统设置 12 个辅助阳极。

2.2 外加电流阴极保护数值模拟

外加电流阴极保护数值模拟采用边界元法^[12],阴极保护问题的数学模型包括域内控制方程和对应的边界条件。针对阴极保护问题特点,建立数值模型时提出以下假设:电解质在所研究区域内是均匀的;系统状态不随时间而变化,处于稳态。

在满足上述假设情况下,电解质中存在场源时,可得到如式(1)所示的泊松方程。

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 \phi = Q_s \quad (1)$$

通常假设电解质区域有以下三类边界条件:边界上的电位已知、边界上的电流密度已知以及边界上的电位和电流密度之间的关系已知。电解质区域联合边界条件的数学表达如式(2)所示。

$$\begin{cases} \phi = \phi_0, & \text{on } S_1 \\ q = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial n} = q_0, & \text{on } S_2 \\ q = f(\phi), & \text{on } S_3 \end{cases} \quad (2)$$

通过加权残差理论和格林定理,由式(1)和式(2)所描述的边值数理问题转变为等价的边界积分方程,如式(3)所示。

$$\frac{1}{\rho}c_p\phi_p+\int_s q^*(P,Q)\phi ds=\int_s q\phi^*(P,Q)ds+\sum_{k=1}^K\phi_k^*I_k$$

(3)

在外加电流阴极保护系统中,电极表面电流密度 q 和辅助阳极发出电流 I_k 的平衡条件如式 (4) 所示。

$$\int_s qds+\sum_{k=1}^KI_k=0$$

(4)

利用边界元法形成离散化的边界积分方程组,如式 (5) 所示。

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_j \\ \phi_{ref} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{ij} & \phi_{tk}^* \\ S_j & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_j \\ I_k \end{Bmatrix}$$

(5)

在边界条件为材料极化曲线描述的边界上, ϕ 和 q 之间的关系是非线性的。为了有效地求解这个非线性方程组,可采用分段拟线性方法来处理非线性边界条件。

依据边界元法,大连理工大学黄一等人自主研发了边界元阴极保护数值仿真软件^[12-13]。依此进行文中阴极保护数值仿真,对目标导管架平台进行边界元建模,如图 3 所示。

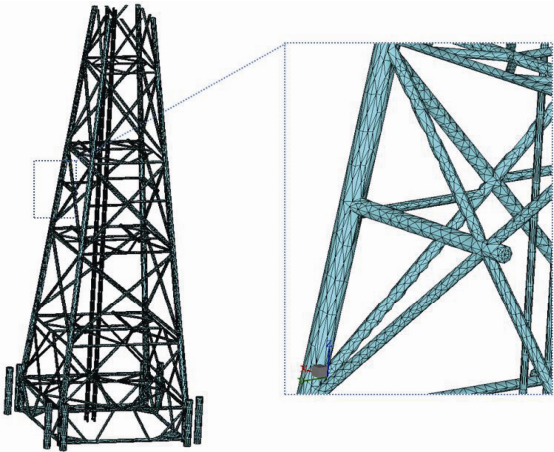


图 3 导管架平台边界元建模

3 结果与分析

3.1 远地式和新增拉伸式 ICCP 系统耦合工况

该导管架所处海域为中国南海,数值模拟的主要参数见表 2。

表 2 主要参数

导管架海水电阻率		涂层破损	保护电位
材料	$\rho/(\Omega\cdot\text{m})$	因子 f_c	$E_c(\text{vs. Ag/AgCl/Seawater})/\text{mV}$
Q235	0.23~0.26	$k_1=0.02,$ $k_2=0.012$	—800~—1100

针对上述工况一,即远地式 ICCP 系统与新增拉伸式 ICCP 系统耦合工况进行数值模拟计算。通过调

整新增拉伸式 ICCP 系统中每个辅助阳极的释放电流,得到最佳保护状态下该平台结构的保护电位分布,如图 4 所示。

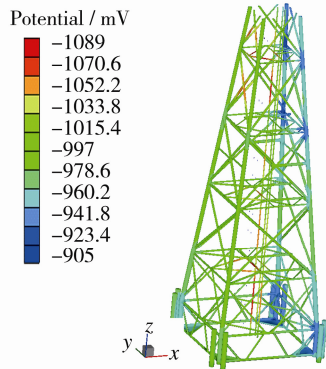


图 4 远地式 ICCP 系统与新增拉伸式 ICCP 系统耦合工况下平台结构表面保护电位分布

系统耦合工况数值模拟计算结果显示,导管架结构表面的保护电位处于 $-905 \sim -1089 \text{ mV}$ 范围,因而平台结构处于良好保护状态,满足相关规范^[12]的要求,且是推荐的优良保护电位范围(比 -900 mV 更负)。计算结果中,两套新增拉伸式 ICCP 系统输出电流均为 187 A ,远地式外加电流系统输出电流 100 A ,总输出电流为 474 A 。

每套新增拉伸式外加电流阴极保护系统设置 12 个辅助阳极。由以上计算结果可知,在耦合工况下,单个辅助阳极仅需输出电流 16 A 即可满足阴极保护的要求。

3.2 新增拉伸式 ICCP 系统单独工况

当远地式 ICCP 系统失效时,将进入新增拉伸式 ICCP 系统独立工况,针对该工况进行数值模拟计算。通过调整每个辅助阳极的释放电流,得到最佳保护状态下该平台结构的保护电位分布,如图 5 所示。

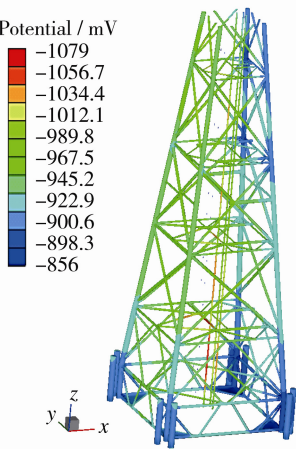


图 5 新增拉伸式 ICCP 系统独立工况下平台结构表面保护电位分布

新增两套拉伸式 ICCP 系统独立工况数值模拟计

算结果显示,导管架结构表面的保护电位处于 $-856 \sim -1079$ mV 范围,满足相关规范^[12]的要求。此时计算结果中新增两套拉伸式 ICCP 系统输出电流均为 220 A,总输出电流为 440 A。在新增拉伸式 ICCP 系统独立工况下,单个辅助阳极仅需输出电流 19 A 即可满足阴极保护的要求。

4 结 论

针对某海上平台外加电流阴极保护系统维修工程,开展了远地式 ICCP 系统和新增拉伸式 ICCP 系统耦合工况以及新增 ICCP 系统独立工况共两种工况的数值模拟计算,确认了某海上平台外加电流阴极保护系统维修方案的可行性,具体结论如下。

1) 在目前一套远地式 ICCP 系统处于正常工作状态的情况下,可采用远地式 ICCP 系统和新增拉伸式 ICCP 系统耦合工况实现平台结构优良的阴极保护。

2) 当远地式 ICCP 系统失效时,仅凭新增的两套拉伸式 ICCP 系统也可以实现优良的阴极保护效果。

参考文献:

[1] 詹晖. 海洋石油导管架平台外加电流阴极保护优化设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.

- [2] 李碧英, 周美. 海洋钢结构物腐蚀防护的研究[J]. 中国海洋平台, 2001, 16(5/6): 45—49.
- [3] 李妍, 刘忠斌. 海洋平台的阴极保护[J]. 中国造船, 2002, 43(1): 162—164.
- [4] 孙荣. 导管架平台外加电流阴极保护系统设计与实现[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [5] 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.
- [6] 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(3): 20—23.
- [7] 栾媛, 马长江, 胡校苹. 自升式平台外加电流阴极保护技术[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(10): 33—37.
- [8] 尹鹏飞, 张伟, 许征凯, 等. 导管架平台外加电流阴极保护技术[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(2): 18—22.
- [9] 刘福国, 武素如. 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.
- [10] 董亮, 杜艳霞, 张建宇, 等. 导管架牺牲阳极阴极保护数值模拟评价与优化改造[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 754—758.
- [11] DNV-RP-B401, Cathodic Protection Design[S].
- [12] A Study on the Boundary Element Method for Cathodic Protection Problems, Doctoral Dissertation of Hiroshima University, Japan, 1992. 10.
- [13] 涂三山. 阴极保护数值仿真可视化与高性能计算研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.