

杂散电流对海底管道表面电位影响预测方法研究

余晓毅¹, 常炜¹, 于湑¹, 黄一², 宋世德², 尚世超², 胡尧²

(1.中海油研究总院, 北京 100026; 2.大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

摘要: 目的 外加电流阴极保护技术逐渐应用于船舶和海洋结构物防腐领域, 但随之而来的杂散电流很可能使平台附近的海底管道本身或者其牺牲阳极阴极保护系统产生电化学腐蚀, 缩短海底管道使用寿命, 甚至破坏管道本身结构而造成严重的生产事故, 因此需要预测外加电流阴极保护系统对附近海底管道及其牺牲阳极阴极保护系统可能造成的不利影响。方法 提出一种基于边界元法的预测海底管道杂散电流影响的数值模拟方法, 建立包括域内控制方程和对应的边界条件的数学模型, 可以计算得到海底管道受杂散电流影响区域的位置和范围, 并且得到受影响区域表面保护电位的分布情况。结果 通过实验室海底管道模型杂散电流试验测量结果与数值模拟结果进行比较, 验证该方法预测海底管道杂散电流影响的准确性, 数值模拟仿真结果与试验测量结果最大误差百分比约为 1.7%, 平均误差百分比小于 0.2%。数值模拟计算结果准确地预测了海底管道模型表面保护电位分布情况, 预测了导管架平台模型外加电流阴极保护系统对海底管道模型杂散电流的影响情况。结论 使用的边界元阴极保护数值模拟技术可以准确预测海底管道杂散电流的影响情况, 为海底管道杂散电流影响预测研究提供了有力工具。

关键词: 外加电流阴极保护; 杂散电流; 海底管道; 电化学腐蚀; 边界元法; 保护电位

中图分类号: TG174.3+6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)05-0067-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.05.010

Predicting Method for the Influence of Stray Current on the Potential Distribution of Submarine Pipeline

YU Xiao-yi¹, CHANG Wei¹, YU Tian¹, HUANG Yi², SONG Shi-de², SHANG Shi-chao², HU Yao²

(1.CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

ABSTRACT: **Objective** Impressed current cathodic protection technology is used in the field of ship and marine structures increasingly, but the attendant stray currents is likely to lead subsea pipeline itself or its sacrificial anode cathodic protection system near the platform to suffer from electrochemical corrosion, which can shorten the submarine pipeline's operation life, and even destroy the structure of the pipeline and cause serious accidents. Therefore, it is necessary to predict the adverse influence which impressed current cathodic protection system may cause on subsea pipelines and its sacrificial anode cathodic protection system. **Methods** This paper presented a numerical simulation method based on the boundary element method to predict the influence of stray current on submarine pipelines. The mathematical model including the control equation and the corresponding boundary conditions was established to calculate the position and range of protection potential of the submarine pipe-

收稿日期: 2016-01-13; 修订日期: 2016-04-22

Received: 2016-01-13; Revised: 2016-04-22

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。

Biography: YU Xiao-yi(1986—), Male, Master, Corrosion engineer, Research focus: anti-corrosion design for offshore engineering.

line which was influenced by the stray current, and the distribution of surface protection potential in the affected area could also be obtained. **Results** By comparing the results of model experiment in laboratory and numerical simulation, the accuracy of the method for predicting the influence of stray currents on subsea pipeline was validated. The largest percentage error of numerical simulation results compared to experimental measurements was about 1.7%, and the average of percentage error was less than 0.2%, consequently the numerical simulation results accurately predicted the protection potential distribution of the subsea pipeline model, in other words, the numerical simulation results predicted the influence of impressed current cathodic protection system of the jacket platform on subsea pipeline model by stray current. **Conclusion** The boundary element cathodic protection numerical simulation software used in this study could accurately predict the influence of stray current on the potential distribution of submarine pipeline, and it could be a powerful tool for study on prediction of influence of stray current on the potential distribution of submarine pipeline.

KEY WORDS: impressed current cathodic protection; stray current; subsea pipeline; electrochemical corrosion; boundary element method; protection potential

随着外加电流阴极保护技术逐渐被船舶和海洋结构物防腐领域所采用^[1-3], 该技术为海洋油气开发提供着越来越重要的安全保障, 但同时也带来了一些安全隐患^[4-7]。外加电流阴极保护系统由辅助阳极释放直流保护电流, 对平台水下结构进行防腐保护^[8-9], 而这带来的直接后果便是很可能使平台附近的海底管道产生杂散电流^[10]。杂散电流会使海底管道本身或者其牺牲阳极阴极保护系统产生电化学腐蚀, 缩短海底管道使用寿命, 甚至会破坏管道本身结构而造成严重的生产事故^[11]。海洋油气开采是规划复杂、投资巨大的系统工程, 一旦海底管道出现严重腐蚀的情况, 更换维修会非常困难且代价巨大^[11]。所以在建设初期, 就应预测外加电流阴极保护系统对附近海底管道及其牺牲阳极阴极保护系统可能造成的不利影响。因此, 开展海底管道杂散电流预测方法研究, 对具体的问题进行可预见性的评估, 以指导前期规划来减小或者消除不利影响, 对海洋油气开发具有重要意义。

由于有限差分法和有限元法本身的固有缺陷, 目前普遍认为边界元法是进行阴极保护问题数值模拟^[13-15]和确定杂散电流腐蚀的理想方法^[5], 国内外也多用边界元法对杂散电流问题进行模拟仿真^[4-5]。J. Trevelyan^[16]等利用边界元法, 对船舶外加电流阴极保护系统附近长钢片的杂散电流问题进行了模拟研究, 结果表明长钢片局部会产生强烈的腐蚀。Metwally^[17]等使用边界元阴极保护数值模拟软件模拟了油田中管道和井套的直流杂散电流问题, 得出外加电流阴极保护系统会对周围非保护结构产生杂散电流的结论。赵红梅^[4]利用边界元数值模拟软件对大船新船重工有限公司船舶杂散电流问题

进行模拟分析, 验证了防止杂散电流腐蚀方法的有效性。王璐^[5]使用边界元数值模拟软件对曹妃甸煤码头船体杂散电流腐蚀进行了模拟研究, 得到了该海区电场电位分布情况。本研究与上述研究的不同之处在于, 海底管道本身具有牺牲阳极阴极保护系统, 因而模拟海底管道受到外加电流阴极保护系统杂散电流影响时, 需考虑两个阴极保护系统之间的耦合作用。本研究通过在边界元法的方程系统中加入每个独立防腐系统的电流平衡条件, 解决了各独立防腐系统所产生的子电场之间的干涉耦合问题, 可以求解海洋工程中多种阴极保护系统之间的杂散电流腐蚀问题, 能够正确预测海底管道杂散电流的影响情况。

1 边界元阴极保护数值模拟方法研究

在使用边界元法研究阴极保护问题时, 假设电解质区域内为均匀分布的单一导体, 且阴极保护系统不随时间变化, 处于稳态。

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。电解质区域内存在场源时, 根据电荷守恒定律和欧姆定律可得到如下的域内控制方程。

$$\frac{1}{\rho} \nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为电解质的电阻率; ϕ 为电位。

准确的边界条件是正确求解阴极保护问题的关键。通常假设电解质区域有以下三类边界条件: 电位值已知的边界, 电流密度值已知的边界, 电位和电流密度关系已知的边界。电解质区域联合边界

条件表达式如下。

$$\begin{cases} \phi = \phi_0 & \text{on } S_1 \\ q = q_0 & \text{on } S_2 \\ q = f(\phi) & \text{on } S_3 \end{cases} \quad (2)$$

其中, q 为电流密度, 使用加权残差法并经格林公式降阶, 加入各个独立阴极保护系统的电流平衡条件, 得到如下所示的方程组。

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \varphi_P + \int_S q^*(P, Q) \varphi dS = \int_S q \varphi^*(P, Q) dS + \frac{1}{\rho} \varphi_\infty \\ \int_S q dS = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P 为指定待求的某一点; Q 为积分点; φ_P 为 P 点处的电位; φ^* 为拉普拉斯方程标准解; q^* 为 φ^* 的法向导数 (即电流密度); φ_∞ 为无穷远处的电位。

对研究对象划分网格后, 即可得到阴极、阳极的表面电位、电流密度等相关的方程组。利用边界元法形成离散化的边界积分方程组, 可表示为如下矩阵形式。

$$[H]\{\Phi\} = [G]\{Q\} \quad (4)$$

其中, $[H]$ 和 $[G]$ 为系数矩阵, 在边界条件为材料极化曲线描述的部位, 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。

2 海底管道模型杂散电流试验

本研究首先采用自主编写的基于边界元法的阴极保护数值模拟软件, 预测导管架平台模型外加电流阴极保护系统对附近海底管道模型及其牺牲阳极阴极保护系统的影响情况; 然后, 建立导管架平台模型外加电流阴极保护系统和海底管道模型, 实施海底管道模型杂散电流验证试验; 最后, 将数值模拟结果与试验测量结果进行比较, 验证本研究提出的预测海底管道杂散电流影响方法的准确性。

实验室水池长 3.95 m, 宽 3.03 m, 深 2.2 m (水深 1.85 m)。池中模拟海水是由自然海水、自来水按照体积比 1:4 配制而成, 池水电阻率为 $0.96 \Omega \cdot \text{m}$ 。根据某海上平台导管架平台制作导管架平台模型, 分层交错布置辅助阳极。导管架平台模型和辅助阳极布置如图所示, 图中白色结构为辅助阳极支架 (如图 1 中椭圆框所示)。



图 1 导管架平台模型及其外加电流阴极保护系统
Fig.1 Jacket platform model and ICCP system

海底管道模型由 $\phi 21 \text{ mm} \times 2000 \text{ mm}$ 规格的 Q235 钢管制作而成, 两端密封。涂层为液态环氧, 干膜厚度为 $150 \sim 200 \mu\text{m}$ 。海底管道模型采用镯型牺牲阳极。

阴极保护系统只涉及水下结构, 根据上述导管架平台模型、海底管道模型和水池的几何尺寸, 得到如图所示的阴极保护数值模拟计算模型。

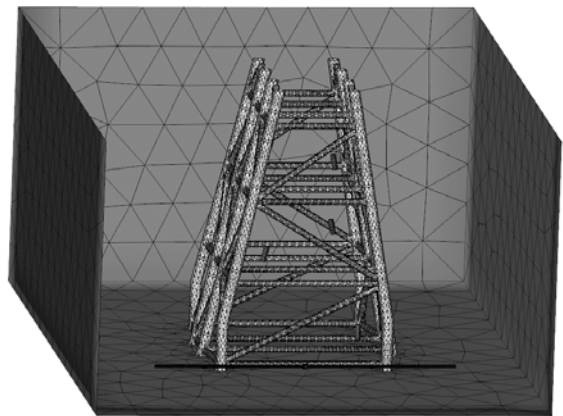


图 2 海底管道模型杂散电流数值模拟计算模型
(水池模型前侧墙壁隐去)

Fig.2 Numerical simulation calculation model for submarine pipeline model stray current

测量模拟海水中导管架平台模型材料试样、海底管道模型材料试样、辅助阳极材料试样和牺牲阳极材料试样的极化曲线, 作为海底管道模型杂散电流影响数值模拟计算的边界条件。模拟计算得到海底管道模型表面保护电位分布如图 3 所示, 保护电位单位为 mV (vs. Ag/AgCl 参比电极)。

计算结果表明, 在靠近底层辅助阳极的长度约 200 mm 的区域内, 表面保护电位明显高于邻近区



图3 海底管道模型表面保护电位分布云图

Fig.3 Surface protective potential distribution of submarine pipeline model

域;而靠近另一端导管腿的区域,表面保护电位则明显低于邻近区域。这说明外加电流阴极保护系统使附近的海底管道模型产生了杂散电流,路径为“辅助阳极→海水→海底管道模型→海水→导管架模型”,靠近底层辅助阳极的区域为杂散电流流入区域,表面保护电位绝对值升高,另一端导管腿的区域为杂散电流流出区域,表面保护电位绝对值降低。但由于海底管道模型自身牺牲阳极的保护作用,其表面保护电位仍处于受保护的电位范围内,即海底管道模型仍处于良好阴极保护状态。

按照阴极保护数值模拟工况,固定导管架平台模型和海底管道模型相对位置,开启导管架平台模型外加电流阴极保护系统。待海底管道模型表面保护电位稳定后,使用参比电极沿海底管道模型长度方向测量表面保护电位值,如图4所示。



图4 海底管道模型表面保护电位测量

Fig.4 Measurement of the protective potential of submarine pipeline model

参比电极试验测量的电位值与数值模拟结果比较如表所示。

表1数据表明,数值模拟仿真结果与试验测量结果最大误差百分比约为1.7%,平均误差百分比小于0.2%,数值模拟计算结果准确地预测了海底管道模型表面保护电位分布情况,预测了导管架平台模型外加电流阴极保护系统对海底管道模型杂散电流的影响情况。

表1 数值模拟仿真电位与参比电极测量电位

Tab.1 Potentials simulated by numerical simulation and measured by model experiment

Number	Position	Potentials of model experiment /mV	Potentials of numerical simulation/mV	Errors /mV
1	Head	963	957	-6
2	1 [#] leg	938	954	16
3	Anode's position	971	965	-6
4	2 [#] leg	975	965	-10

注:在靠近海底管道模型的两条导管腿中,远离底层辅助阳极的导管腿记为1[#],另一条记为2[#]。

3 结论

本研究运用基于边界元法的阴极保护数值模拟软件对海底管道模型杂散电流影响情况进行了预测,得到了海底管道模型表面保护电位的分布情况,实施了实验室海底管道杂散电流验证试验,并测量了海底管道模型表面电位分布。数值模拟计算结果与试验测量结果最大误差百分比约为1.7%,平均误差百分比小于0.2%。研究及试验结果表明,本研究使用的边界元阴极保护数值模拟技术可以准确预测海底管道杂散电流的影响情况,为海底管道杂散电流影响预测研究提供了有力工具。

参考文献

- [1] 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, 3(2):18—22.
YIN Peng-fei, ZHANG Wei, XU Zheng-kai, et al. Jacket Platform Impressed Current Cathodic Protection Technology[J]. Corrosion & Protection, 2012, 3(2):18—22.
- [2] 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—3.
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 (2):49—53.
- [3] 刘福国, 张国庆, 张伟, 等. 基于缩比模型的导管架平台外加电流阴极保护系统优化设计[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5):125—131.
LIU Fu-guo, ZHANG Guo-qing, ZHANG Wei, et al. Design Optimization of ICCP System for Jacket Platform Based on Physical Scale Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5):125—131.
- [4] 龚敏, 张婷, 熊娟. 油气运输管道防腐层的抗阴极剥离性能[J]. 表面技术, 2012, 41(1):30—32.
GONG Min, ZHANG Ting, XIONG Juan. A Performance

- Research of Cathodic Disbonding of the Anti-corrosive Coating in Oil and Gas Transport Buried Pipelines[J]. Surface Technology, 2012, 41(1):30—32.
- [5] 王璐, 黄一. 钢板桩码头靠泊船杂散电流腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- WANG Lu, HUANG Yi. The Stray Current Corrosion Research on the Ship Berthing at the Steel Sheet Dock[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [6] 周兰, 陶文亮, 李龙江. 埋地钢质管道强制电流阴极联合保护研究[J]. 表面技术, 2015, 44(4):118-122.
- ZHOU Lan, TAO Wen-liang, LI Long-jiang. Experimental Studies on the Impressed Current Cathodic Joint
- [7] 熊娟, 郑兴文, 张文艳. 西南地区某输油管道外腐蚀分析[J]. 表面技术, 2014, 43(4):59-63.
- XIONG Juan, ZHENG Xing-wen, ZHANG Wen-yan. Analysis on the External Corrosion for an Oil Pipeline in Southwest China[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 59—63.
- [8] 高连烨, 穆胜军, 许海东, 等. 海洋石油 161 桩腿外加电流阴极保护装置优化研究与实施[J]. 资源节约与环保, 2012(5):182—184.
- GAO Lian-ye, MU Sheng-jun, XU Hai-dong, et al. Optimization and Implementation of Impressed Current Cathodic Protection System on the Leg of Offshore Oil 161[J]. Resource Saving and Environmental Protection, 2012(5): 182—184.
- [9] 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, 30(1):55—58.
- ZHU Wan-wu, XU Yang-yi. Application of Impressed Current Cathode Protection System for Hull[J]. Guangdong Shipbuilding, 2011, 30(1):55—58.
- [10] 蓝绎圣. 海工钢结构阴极保护系统的自生杂散电流及其防止法[J]. 海洋工程, 1986(2): 85—94.
- LAN Yi-sheng. Autogenous Stray Current of Cathodic Protection System of Marine Steel and Prevention Act[J]. The Ocean Engineering, 1986(2): 85—94.
- [11] 姜长洪, 于婉丽, 吴星刚, 等. 输油管道腐蚀与杂散电流测量[J]. 管道技术与设备, 2004(1):10—12.
- JIANG Chang-hong, YU Wan-li, WU Xing-gang, et al. Pipeline Corrosion and Stray Current Measurements[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2004(1):10—12.
- [12] 王秀通. 海水和海泥中阴极保护系统的边界元计算[D]. 青岛: 中国科学院研究生院 (海洋研究所), 2005.
- WANG Xiu-tong. Boundary Element Method Simulation of Cathode Protection System[D]. Qingdao: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Marine Research), 2005.
- [13] 胡舸. 海底管线腐蚀检测与腐蚀预测的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- HU Ke. Study on Submarine Pipeline Corrosion Detection and Corrosion Prediction[D]. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [14] 何其昀. 海洋工程防腐系统数值模拟优化设计技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- HE Qi-yun. Research on Numerical Simulation and Optimization Design of Anti-Corrosion Systems in Ocean Engineering[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [15] 郭宇. 船舶与海洋结构物阴极保护电位数值仿真与优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- GUO Yu. Numerical Simulation and Optimization of Cathodic Protection for Ship and Ocean Structure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [16] TREVELLYAN J, HACK H P. Analysis of Stray Current Corrosion Problems using Boundary Element Method[J]. Boundary Element Technology IX, 1994:347—356.
- [17] METWALLY I A, AI-MANDHARI H M, NADIR Z, et al. Boundary Element Simulation of DC Stray Currents in Oil Industry Due to Cathodic Protection Interference[J]. European Transactions on Electrical Power, 2007, 17(5): 486—499.