

在役海洋桩基平台牺牲阳极阴极保护数值模拟

周冰^{1,2}, 赵玉飞^{1,2}, 张盈盈^{1,2}, 韩文礼^{1,2}, 王顺³, 董亮⁴

(1. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 天津 300451; 2. 中国石油集团石油管工程重点实验室, 天津 300451; 3. 中国石油集团海洋工程有限公司设计院, 北京 100028; 4. 常州大学, 江苏 常州 213164)

摘要: **目的** 分析海洋桩基平台所在浅海区域牺牲阳极接地电阻和不同牺牲阳极方案的保护效果及施工量, 为海洋桩基平台牺牲阳极阴极保护设计提供指导。**方法** 利用 BEASY CP 数值模拟软件, 对桩基平台牺牲阳极阴极保护系统设计中阳极接水电阻和不同保护方案的保护效果进行数值模拟计算。**结果** 在文中桩基平台所在海域内, 所选牺牲阳极单支布置于海水/海泥界面 0.25 m 以上、水面 1.35 m 以下时, 接水电阻接近且相对最小, 约为 0.048 Ω, 比标准推荐公式计算的接水电阻大约 26%。多支组合阳极的接水电阻, 随阳极数量或阳极间距的增大而降低, 但因存在拥挤效应, 其接水电阻要明显高于理想的多支阳极并联电阻。在设定的牺牲阳极布置方案中, 将牺牲阳极布置于距离海水/海泥交界面 0.8 m 处, 共给出了 3 种阳极的组合方式, 即 5 支、3 支组合阳极和单支阳极。再基于阳极位置或数量变化合计, 设置 6 种牺牲阳极方案, 每种方案下的阳极总数处于 48~60 支之间。计算结果显示, 在不同牺牲阳极方案下, 桩基平台的保护电位分布区间较为接近, 约处于 -680~1080 mV (vs. CSE) 之间。不同方案的保护效果差异主要体现在对腐蚀性相对较高的海水和海水/海泥交界面附近主桩和隔水管的保护上, 随着阳极由 5 支组合阳极方案、3 支组合阳极方案到单支阳极方案转变, 牺牲阳极输出总电流由 110 A 增加到 133 A, 其对主桩和隔水管的保护效果越好, 即保护电位越负, 且保护距离增加。其中对主桩在海泥中的保护距离由 5~8 m 增加到 5~10 m, 对隔水管在海泥中的保护距离由 0~3 m 增加到 4~7 m。5 支组合阳极方案 1 中, 两侧阳极输出最大电流约为中间阳极输出电流的 2 倍, 3 支组合阳极方案 2 中各牺牲阳极输出电流相当。**结论** 通过数值模拟方法, 可优化牺牲阳极数量、组合方式和位置, 从而实现保护电位分布更均匀。基于案例提出的 3 支组合阳极方案 2 兼具了保护效果、阳极输出电流均匀性和相对较少的施工量等特点, 可为在役海洋桩基平台牺牲阳极阴极保护设计提供参考。

关键词: 桩基平台; 牺牲阳极; 阴极保护; 接水电阻; 电位分布; 数值模拟

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)01-0110-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.01.017

收稿日期: 2020-09-30; 修订日期: 2020-10-25

Received: 2020-09-30; Revised: 2020-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(51401017); 中国石油天然气集团公司重大科技专项(2019A-1010)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51401017) and Major science and technology project of CNPC (2019A-1010)

作者简介: 周冰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Biography: ZHOU Bing (1984—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection.

通讯作者: 董亮(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀与防护。

Corresponding author: DONG Liang (1983—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: corrosion and protection.

Numerical Simulation of Sacrificial Anode Cathodic Protection for Offshore Pile Foundation Platform in Service

ZHOU Bing^{1,2}, ZHAO Yu-fei^{1,2}, ZHANG Ying-ying^{1,2}, HAN Wen-li^{1,2}, WANG Shun³, DONG Liang⁴

(1. CNPC Engineering Technology Research Co., Ltd, Tianjin 300451, China; 2. Key Laboratory of CNPC Tubular Goods Engineering, Tianjin 300451, China; 3. Engineering & Design Institute of CPOE, Beijing 100028, China; 4. Changzhou University, Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: The analysis on the ground resistance of sacrificial anode and the protection effects and construction volumes of different sacrificial anode schemes for the offshore pile foundation platform in shallow sea provides guidance for the design of sacrificial anode cathodic protection of the offshore pile foundation platform. The anode-to-sea resistance and the protection effects of different protection schemes in the design of the sacrificial anode cathodic protection system for the offshore pile foundation platform are simulated and calculated with BEASY CP software. The results show that in the sea area of the offshore pile foundation platform, the anode-to-sea resistances are close and small when single sacrificial anode is placed above 0.25 m of sea water/mud interface and below 1.35 m of sea water surface. Such resistances are about 0.048 Ω , which is about 26% higher than that calculated by the standard recommended formula. The anode-to-sea resistance of multiple anodes combination decreases with the increase of anode number or anode spacing. However, due to crowding effect, it is significantly higher than that of ideal parallel connection resistance for multiple anodes. A total of six sacrificial anode schemes with different combined anodes in different locations are given where the sacrificial anodes are placed at 0.8 m away from the sea water/mud interface with single and multiple anodes. The calculation results show that the protection potential distribution range of pile foundation platform under different sacrificial anode schemes is close, which is between -680 mV and -1080 mV (CSE). The difference of protection effect of different schemes is mainly reflected in the protection of main piles and risers in highly corrosive areas including the sea and near the sea water/mud interface. With the transformation of anode from five combined anodes scheme and three combined anodes scheme to single anode scheme, the total output current of sacrificial anodes increases from 110 to 133 A. The protection distance of main pile in sea mud increases from 5~8 m to 5~10 m, and the protection distance of riser in sea mud increases from 0~3 m to 4~7 m. The maximum output current of the two anodes in scheme 1 of five combined anodes is about twice that of the middle anode, and the output current of each sacrificial anode in scheme 2 of three combined anodes is equivalent. The number, combination and position of sacrificial anode can be optimized to achieve more uniform protection potential distribution with numerical simulation. In this paper, the three combined anode schemes 2 proposed have the characteristics of protection effect, uniformity of anode output current and relatively small construction amount, which can be used as the recommended scheme for sacrificial anode cathodic protection of offshore pile foundation platform.

KEY WORDS: pile foundation platform; sacrificial anode; cathodic protection; water resistance; potential distribution; numerical simulation

海洋桩基平台常见于浅海或滩海,是海洋油气开采的固定平台之一。为缓解外部海水和海泥腐蚀,类似的海洋平台往往设计了牺牲阳极阴极保护系统或外加电流阴极保护系统提供电化学保护^[1-2],设计寿命一般为 10~15 年左右,通过监测检测阴极保护电位、牺牲阳极消耗状况等来评估保护状况^[3-6]。对于牺牲阳极保护的在役海洋油气设施,当发现阴极保护不足而需要延寿设计时,由于牺牲阳极数量较多,水下焊接操作的难度大、费用高,采用增加牺牲阳极或牺牲阳极组配合机械连接进行改造是较为经济的方式^[5-6],国内也在尝试采用外加电流阴极保护系统

进行改造^[7]。然而,对于在役的复杂结构桩基平台的牺牲阳极阴极保护系统重新设计,牺牲阳极多以组合方式置于海床上,牺牲阳极的组合方式及布置位置会影响其输出电流大小及保护效果,由于相关实践较少,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^[8-11]能够适应影响因素多、结构复杂的保护对象及多样的牺牲阳极组合,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,广泛应用于海洋结构阴极保护设计中。如海底管道^[6]、海洋平台^[5,7,12-13]、海洋船只^[14-16]、浮式生

产储油装置 (FPSO) 等^[17-18]。文中基于桩基平台所处浅海区域特点, 数值模拟研究牺牲阳极布置位置及组合方式对其接水电阻的影响, 优选合适的阳极组合及安装位置, 进而对某桩基平台在已有设计及调整方案下的保护电位分布及牺牲阳极输出电流进行数值模拟, 通过模拟分析以期类似平台设计牺牲阳极阴极保护设计提供指导。

1 基本原理

当桩基平台牺牲阳极阴极保护系统达到稳定状态时, 根据电荷守恒定律, 海水和海泥中各处的电位分布满足式 (1):

$$\nabla(k\nabla\phi)=0 \quad (1)$$

式中: ∇ 是 Laplace 算子; k 为介质电导率; ϕ 为海水和海泥中各处的电位。

在结构所在区域内可假定海水和海泥介质各自是均匀的, 由于海水和海泥中各处的电位分布均满足 Laplace 方程^[8-19]:

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

假设所研究桩基平台及其阴极保护系统区域被表面 Γ 所包围, 则:

$$\Gamma = \Gamma_I + \Gamma_A + \Gamma_C + \Gamma_{\text{Interface}} \quad (3)$$

其中: Γ_I 为绝缘表面, 即海水水平面, 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 0; Γ_C 为阴极保护系统中被保护金属结构物即桩基平台水下部分的外表面, 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 $J=f(E)$; Γ_A 为阴极保护系统中牺牲阳极的外表面, 边界条件可根据极化函数确定或采用恒电位边界条件, 即将其稳定的工作电位作为其边界条件; $\Gamma_{\text{Interface}}$ 为海水/海泥界面, 在该界面处海水侧和海泥侧的电位一致。

由于上述边界条件和求解的区域复杂, 无法直接求得 Laplace 方程的解析解, 而需采用数值模拟方法, 即依次通过构建桩基平台及牺牲阳极结构的几何模型、划分成网格、设置各结构和网格的边界条件, 进而采取数值计算方法获得数值解。常见的数值计算方法包括有限差分法、有限元法和边界元法等, 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, 计算得到边界上的电位和电流密度即是阴极保护所需参数, 因而在阴极保护系统中的应用最为广泛^[14-19]。文中数值模拟所采用的 BEASY CP 软件即是基于边界元法开发的阴极保护电场数值模拟软件, 在海洋阴极保护中有着广泛的工程应用^[2,5-7,16-17,19]。

2 基础资料

以某海洋桩基平台为例, 基于其设计和施工图纸获得基础信息, 建立如图 1 所示的桩基平台的几何模型。其中 8 支隔水管, 直径为 0.914 m; 其余 32 支为主桩钢管, 直径为 1.829 m; 隔水管和主桩钢管均为碳钢。入泥深度均为 40 m, 海水水深 2.6 m。

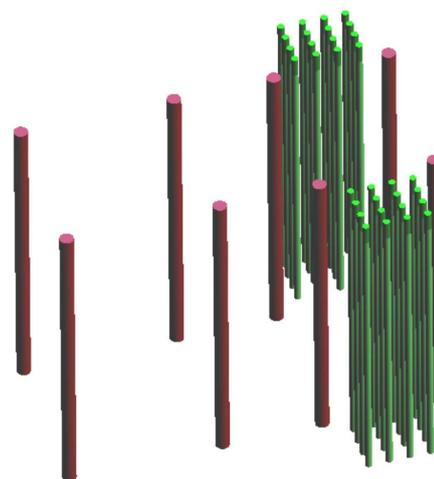


图 1 某桩基平台结构的几何模型

Fig.1 A geometric model of an offshore pile foundation platform

初始设计采用的梯形牺牲阳极规格尺寸为 2600 mm×(250+270) mm×270 mm, 净质量为 420 kg。牺牲阳极工作电位经实验室测试为 -1.13 V (vs. CSE), 消耗速率测试为 4.06 kg/(A·a), 根据 DNV RP B401—2011 确定该梯形牺牲阳极的利用因子为 0.85^[20]。

桩基平台所在海域地处温带, 通过在模拟介质中采用电化学方法测试的阴极极化曲线作为桩基平台结构在海水和海泥中的极化边界条件, 如图 2 所示。桩基平台表面涂层消耗殆尽, 处于裸露状态。数值模拟采用的海水电导率为 5 S/m, 海泥电导率为 1 S/m。

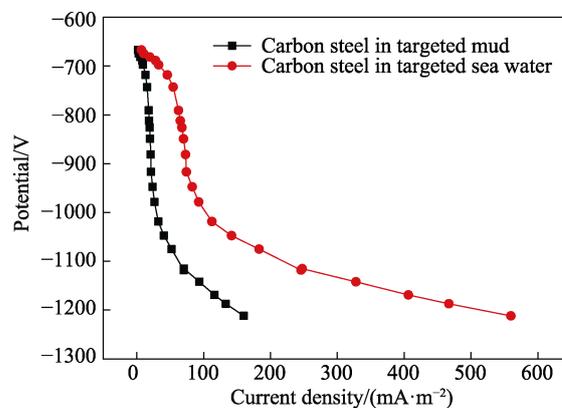


图 2 碳钢在所处海域模拟介质中的阴极极化曲线
Fig.2 Cathodic polarization curves of carbon steel in simulated mediums of targeted sea area

3 结果与分析

3.1 牺牲阳极位置及数量对接水电阻的影响

在常规的阴极保护设计中，阳极接水电阻的计算参考标准推荐的计算公式，以 DNV RP B401—2011 为例，对于长条形阳极接水电阻 R_a 的计算公式为：

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left[\ln\left(\frac{4L}{r}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

式中： ρ 为阳极所处介质（海洋桩基平台所在海域中海水或海泥）的电阻率，即为电导率的倒数， $\Omega \cdot m$ ； L 为阳极长度， m ； r 为阳极等效半径，对非圆柱阳极， $r=C/2\pi$ ； C 为阳极的截面周长， m 。

由此可计算出初始设计所用牺牲阳极在海水和海泥中的接水电阻分别为 0.038Ω 和 0.191Ω 。上述公式只适用于单支牺牲阳极在海水或海泥中的情况，而桩基平台大多位于浅海区域，阳极处于不同水深或不同组合放置方式对应的接水电阻可能变化较大，从而影响其电流输出量。为此，在数值模拟中考虑不同牺牲阳极布置位置及多支阳极组合方式的情况，其中定义海水/海泥交界面为 0，在海水中的距离为正，在海泥中的距离为负，将牺牲阳极平行于水平面布置，阳极中性线分别位于 -2.25 、 -1.75 、 -1.25 、 -0.75 、 -0.25 、 0.25 、 0.75 、 1.25 、 $1.75 m$ 处。基于数值模拟获得的阳极接水电阻随阳极水平位置的变化如图 3 所示，结果表明，将牺牲阳极置于海泥中接水电阻较大。处于海水中 $0.25 \sim 1.25 m$ 处时，接水电阻接近且相对最小，约为 0.048Ω 。牺牲阳极适合布置在该区间内，同时也能避免冬季表面结冰的影响。该接水电阻比标准推荐公式计算的接水电阻大约 26%，这与采用公式法计算时只代入海水的电阻率，而数值模拟法更接近实际工况，还考虑了海泥的影响有关。

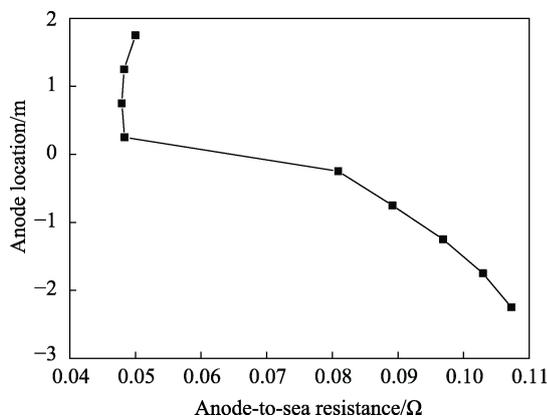


图 3 数值模拟获得的阳极接水电阻随阳极布置位置的变化
Fig.3 Anode-to-sea resistance obtained by numerical simulation change with anode location

数值模拟获得的阳极接水电阻随 2 支阳极的间距的变化情况如图 4 所示。结果表明，将 2 支牺牲阳

极置于海水 $0.75 m$ 处平行布置时，接水电阻随着 2 支阳极的平行间距增大而降低。在阳极间距为 $0.5 m$ 和 $3 m$ 时，阳极的接水电阻分别为 0.041Ω ，与单支阳极的接水电阻相比分别降低了 15% 和 29%，这与多支阳极间的拥挤效应息息相关。

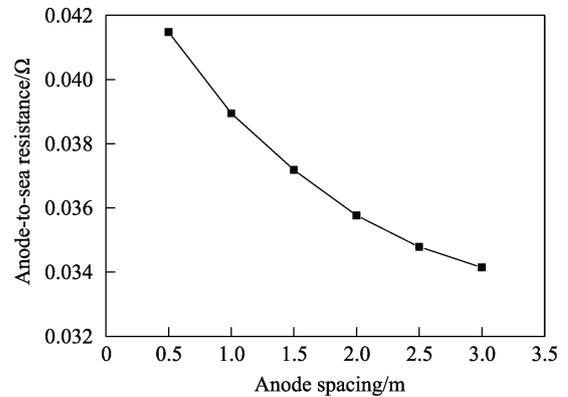


图 4 数值模拟获得的阳极接水电阻随阳极间距的变化
Fig.4 Anode-to-sea resistance obtained by numerical simulation change with anode spacing

3 支和 5 支组合阳极的布置方式如图 5 所示，7 支阳极的布置方式依此类推，阳极水平和垂直间距均为 $1 m$ 。数值模拟获得的组合阳极接水电阻随阳极数量的变化如图 6 所示。结果表明，组合阳极的接水电阻随着阳极数量的增加而降低，但 7 支阳极的接水电阻约为 0.031Ω ，远大于理想情况下 7 支阳极并联的效果，即理想并联接水电阻为单支阳极接水电阻的 $1/7$ ，即为 0.0069Ω 。同样地，这也与多支阳极间的拥挤效应息息相关。在设计组合阳极方案时，应结合实际施工的便利性和接水电阻的变化规律，组合阳极的数量应尽可能地少。

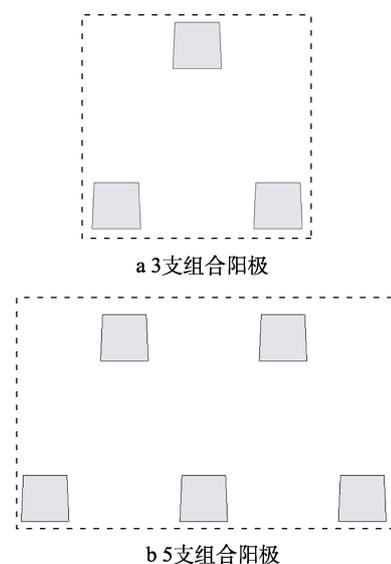


图 5 数值模拟中设置的组合阳极布置方式
Fig.5 Arrangements of combined anodes in numerical simulation: a) three combined anodes; b) five combined anodes

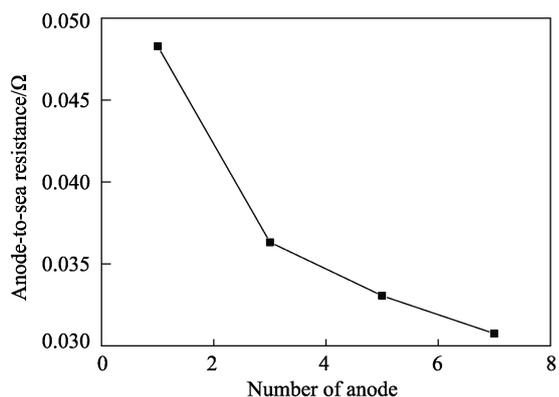


图6 数值模拟获得的阳极接水电阻随阳极数量的变化
Fig.6 Anode-to-sea resistance obtained by numerical simulation change with number of anode

3.2 牺牲阳极阴极保护优化设计

通过上述对单支牺牲阳极及组合牺牲阳极接水电阻的计算结果,将牺牲阳极布置于合适的海水区域

中,结合施工的便利性和可施工的位置,分别考虑5支组合阳极、3支组合阳极和单支阳极各2种方案,多采用对称式布置方式,即如图7所示的6种方案。其中,5支组合阳极方案1(初始设计方案)和方案2中,每组阳极包括5支平行布置的牺牲阳极,阳极中心间距为1m,放置在海水中,距离海水/海泥界面0.8m,距离主桩边缘1m,牺牲阳极总数为60支。3支组合阳极方案1中每组包括3支平行布置的牺牲阳极,阳极中心间距为1m,放置在海水中,距离海水/海泥界面0.8m,距离主桩边缘1m,牺牲阳极总数为60支;3支组合阳极方案2中每组包括3支呈120°夹角布置的牺牲阳极,放置在海水中,距离海水/海泥界面0.8m,距离主桩边缘1m,牺牲阳极总数为48支。单支阳极方案1和方案2中,采用单支牺牲阳极放置在海水中,距离海水/海泥界面0.8m,距离主桩边缘1m,方案1为60支牺牲阳极,方案2为52支牺牲阳极。

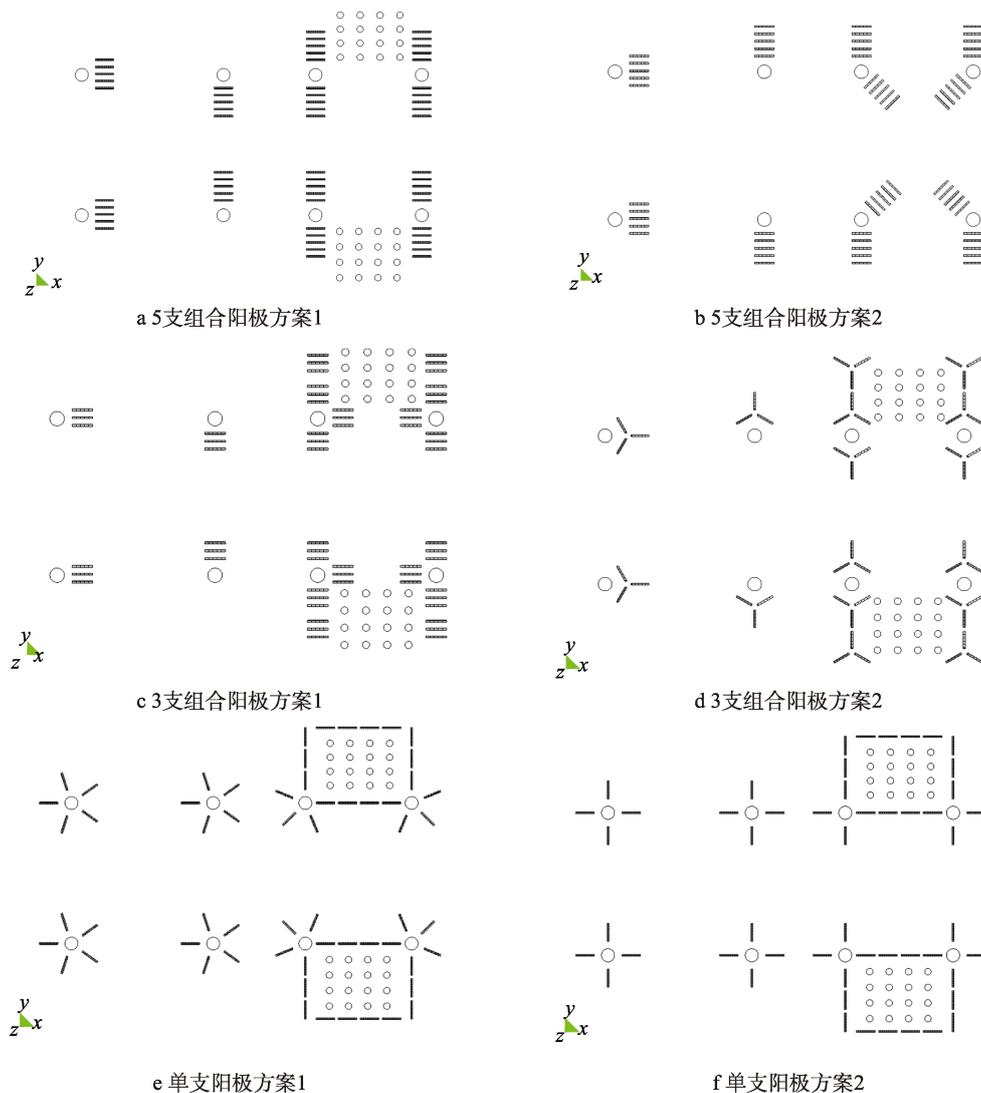


图7 桩基平台牺牲阳极布置方案

Fig.7 Layout programs of sacrificial anode for pile foundation platform: a) five combined anodes 1; b) five combined anodes 2; c) three combined anodes 1; d) three combined anodes 2; e) single anode 1; f) single anode 2

数值模拟获得的桩基平台电位分布云图见图 8。在不同牺牲阳极方案下，桩基平台的保护电位分布区间较为接近，约处于-680~1080 mV 之间。这是由于不同方案下牺牲阳极均位于海水/海泥交界面附近，距离主桩和隔水管的最小距离和最大距离即在海泥深处的位置相当。不同方案的保护效果差异主要体现在海水中和在海水/海泥交界面附近主桩和隔水管的保护上。由于碳钢在全浸区中的海水区域和海

水/海泥交界面附近的腐蚀速率较在海泥中要高得多，在海泥 1 m 以下深度腐蚀轻微，且深度越深，腐蚀越轻^[21-23]，因此在本设计中主要对比不同方案对海水/海泥交界面及海水区域的保护效果上。随着阳极由 5 支组合阳极方案、3 支组合阳极方案到单支阳极方案转变，其对主桩和隔水管的保护效果越好。5 支阳极方案中，由于隔水管部分区域未布置阳极，保护效果相对较差。

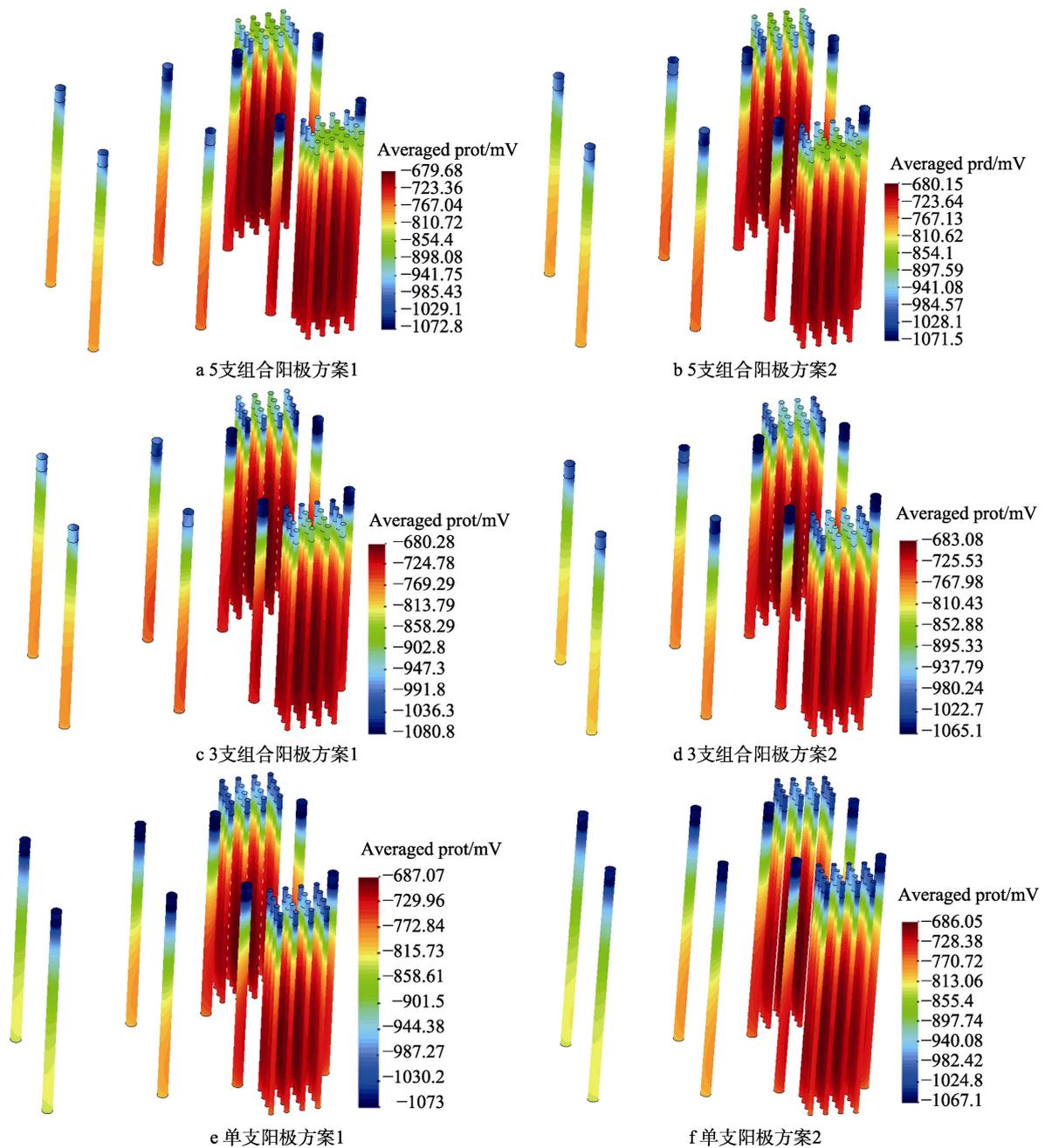


图 8 桩基平台牺牲阳极阴极保护电位分布

Fig.8 Potential distribution of pile foundation platform under different sacrificial anode cathodic protection systems: a) five combined anodes 1; b) five combined anodes 2; c) three combined anodes 1; d) three combined anodes 2; e) single anode 1; f) single anode 2

表 1 统计了不同牺牲阳极方案下牺牲阳极的输出总电流 I 、阳极数量 N 、平均电流 I_a 、满足 -850 mV

或更负保护标准时对应主桩在海水和海泥中的保护距离 d_{1s} 和 d_{1m} ，以及对应的隔水管在海水和海泥中的

表 1 不同牺牲阳极方案下输出电流及保护距离统计

Tab.1 Anode output currents and protection distances under different sacrificial anode cathodic protection systems

Program	I/A	N	I_a/A	d_{1s}/m	d_{1m}/m	d_{2s}/m	d_{2m}/m
Five combined anodes 1	110	60	1.83	2.6	5~8	2.6	0~3
Five combined anodes 2	112	60	1.87	2.6	5~8	2.6	0~3
Three combined anodes 1	116	60	1.93	2.6	5~8	2.6	1~6
Three combined anodes 2	119	48	2.48	2.6	5~8	2.6	4~6
Single anode 1	133	60	2.22	2.6	5~10	2.6	4~7
Single anode 2	130	52	2.50	2.6	5~10	2.6	4~7

保护距离 d_{2s} 和 d_{2m} 。计算结果表明,从保护效果来说,单支阳极方案对主管和隔水管的保护效果最优,其次为3支组合阳极方案2的保护效果。从阳极数量来看,3支组合阳极方案2的阳极用量最少。

由于组合阳极总数少,施工相对便利。进一步分析5支组合阳极和3支组合阳极的输出电流分布情况(如图9所示),并基于该输出电流和式(5)计算了牺牲阳极的寿命。结果表明,5支组合阳极方案1中各支牺牲阳极输出电流差异较大,两侧牺牲阳极输出电流较高,而中间牺牲阳极输出电流较低,最大/最小

电流之比约为2。主要是由于其阳极数量多,较为拥挤,输出电流的空间受限。5支组合阳极方案1的所有阳极中最大输出电流为3.73 A,最小为0.96 A,对应的阳极寿命分别为23.6 a和91.6 a,差异较大。3支组合阳极方案2中各支牺牲阳极和每组阳极输出电流较为接近,所有阳极中最大输出电流为3.44 A,最小为1.93 A,对应的阳极寿命分别为25.6 a和45.6 a,差异较小。考虑施工量及牺牲阳极输出特点,在本桩基平台的牺牲阳极阴极保护改造设计中推荐3支组合阳极方案2。

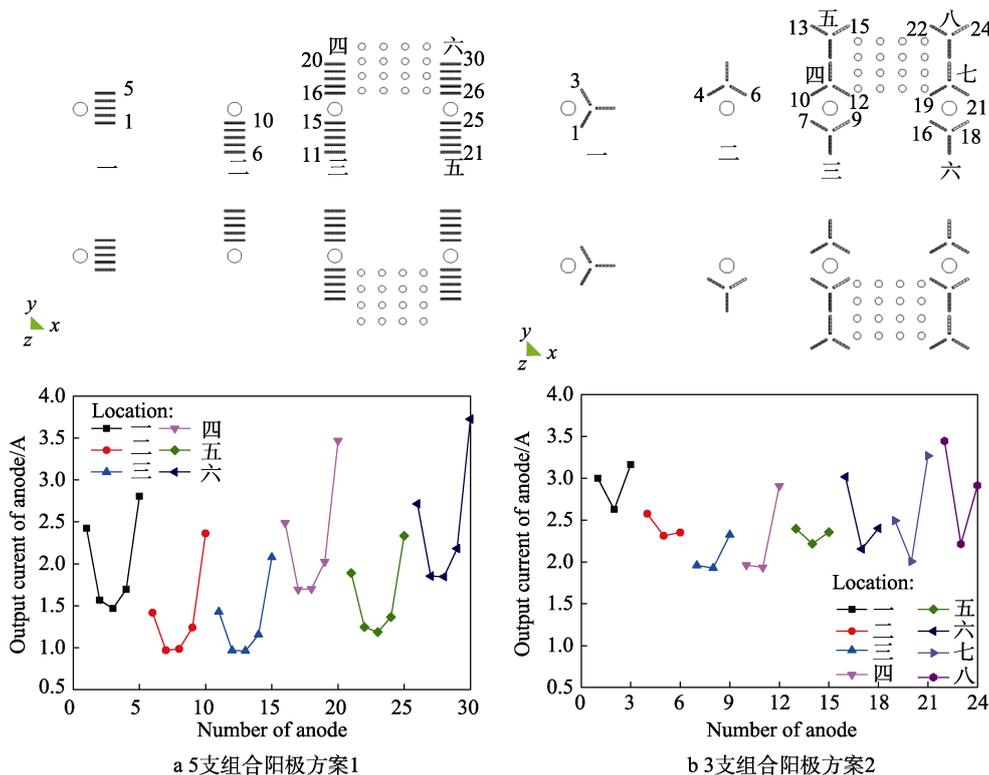


图 9 多支组合阳极下各牺牲阳极输出电流

Fig.9 Output current of each sacrificial anode under multiple combined anodes: a) five combined anodes 1; b) three combined anodes 2

$$T = \frac{uG}{vI} \quad (5)$$

式中: T 为阳极寿命, a; u 为阳极利用因子, 即 0.85; G 为阳极净质量, 即 420 kg; v 为阳极消耗速

率, 即 4.06 kg/(A·a); I 为阳极输出电流, A。

综上所述,综合考虑保护效果、阳极用量及施工工作量对比,推荐3支组合阳极方案2,兼具保护效果和经济性。

4 结论

1) 在浅海区域, 将牺牲阳极布置于海水/海泥界面 0.25 m 以上、距离水平面 1.35 m 以下时, 其接水电阻相对较小, 可减小牺牲阳极输出电流阻力, 同时能够避免冬季结冰的影响。采用组合阳极时, 阳极的数量应尽可能少, 且阳极间距应尽可能地大, 以同时兼顾阳极输出和施工便利性。

2) 桩基平台设定的 6 种牺牲阳极方案中, 单支牺牲阳极方案 1 和方案 2 的保护效果最好, 3 支组合阳极方案 2 的保护效果次之; 5 支组合阳极方案下总的阳极组数最小, 施工量最小, 但由于中间牺牲阳极输出电流受限, 导致 5 支牺牲阳极输出电流差异较大且保护效果相对最差, 而 3 支组合阳极方案 2 兼具了保护效果、阳极输出电流均匀性和相对较少的施工量等特点, 作为文中海洋桩基平台牺牲阳极阴极保护的推荐方案。

3) 通过数值模拟方法, 可以优化牺牲阳极数量、组合方式和位置, 从而实现保护电位分布更均匀, 同时确保施工量相对较小以满足一定的经济性要求。

参考文献:

- [1] 张脉松, 尹鹏飞, 马长江. 海洋平台牺牲阳极阴极保护技术[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.
- [2] 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. Research on impressed current cathodic protection for offshore jackets based on numerical method[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2011, 28(6): 9-12.
- [3] 邵静, 刘福国, 王秀通, 等. 海洋平台阴极保护与监测技术的应用[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 24-28.
SHAO Jing, LIU Fu-guo, WANG Xiu-tong, et al. Application of cathodic protection and monitoring technology on offshore platform[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(3): 24-28.
- [4] 张亮, 宋积文, 陈胜利, 等. 海洋石油平台导管架阴极保护监测数据分析与讨论[J]. 装备环境工程, 2018, 15(3): 20-23.
ZHANG Liang, SONG Ji-wen, CHEN Sheng-li, et al. Analysis and discussion on cathodic protection monitoring data of offshore oil platform jacket[J]. Equipment environmental engineering, 2018, 15(3): 20-23.
- [5] 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.
DONG Liang, DU Yan-xia, ZHANG Jian-yu, et al. Numerical simulation evaluation and optimal retrofit of sacrificial anode cathodic protection systems for offshore jackets[J]. Corrosion and protection, 2015, 36(8): 754-758.
- [6] 陈波, 李全华, 王丹, 等. 某海管阴极保护状况评估及牺牲阳极更换的优化[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(5): 49-53.
CHEN Bo, LI Quan-hua, WANG Dan, et al. Evaluation and retrofit optimization of sacrificial anode cathodic protection system on submarine pipeline[J]. Corrosion and protection, 2020, 41(5): 49-53.
- [7] 李民强, 郑震生, 董亮, 等. 海洋平台导管架外加电流阴极保护设计数值模拟[J]. 表面技术, 2016, 45(7): 109-114.
LI Min-qiang, ZHEN Zhen-sheng, DONG Liang, et al. Design problems in impressed current cathodic protection for offshore jackets based on numerical method[J]. Surface technology, 2016, 45(7): 109-114.
- [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] 任勇, 成光. 海洋环境金属材料腐蚀与防护仿真研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 93-98.
REN Yong, CHENG Guang. Research progress on corrosion and protection simulation of metal materials in marine environment[J]. Equipment environmental engineering, 2019, 16(12): 93-98.
- [11] HAMEED K W, YARO A S, KHADOM A A. Mathematical model for cathodic protection in a steel-saline water system[J]. Journal of Taibah University for Science, 2016, 10(3): 64-69.
- [12] BAYNHAM J M, FROOME T, ADEY R A. Jacket SACP design and optimization using simulation[C]// Corrosion/2012. Houston, TX: NACE, 2012.
- [13] LAN Z, WANG X, HOU B, et al. Simulation of sacrificial anode protection for steel platform using boundary element method[J]. Engineering analysis with boundary elements, 2012, 36(5): 903-906.
- [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] 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 and protection*, 2015, 36(11): 1072-1076.
- [16] LEE M J, SI G J. ICCP system design on the hull of an ice breaker by computational analysis[C]// *Corrosion/2014*. Houston, TX: NACE, 2014.
- [17] ADEY R A, PERATTA C, BAYNHAM J M. How interference can impact the life of CP systems. An FPSO case study[C]// *Corrosion/2016*. Houston, TX: NACE, 2016.
- [18] KIM Y S, KIM J, CHOI D, et al. Optimizing the sacrificial anode cathodic protection of the rail canal structure in seawater using the boundary element method[J]. *Engineering analysis with boundary elements*, 2017, 77(1): 36-48.
- [19] JIA J X, SONG G, ATRENS A, et al. Evaluation of the BEASY program using linear and piecewise linear approaches for the boundary conditions[J]. *Materials and corrosion*, 2004, 55(11): 845-852.
- [20] RP-B401-2011, Cathodic protection design[S].
- [21] 侯保荣, 郭公玉. 海洋环境中海-气与海-泥交换界面区腐蚀与防护研究[J]. *海洋科学*, 1993, 17(2): 31-34.
HOU Bao-rong, GUO Gong-yu. Studies on corrosion and protection of steel in seawater-ocean atmosphere jucture areas and sea clay-seawater jucture areas[J]. *Marine sciences*, 1993, 17(2):31-34.
- [22] 张经磊, 侯保荣. 海水海泥跃变区钢铁电化学腐蚀行为研究[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(1): 98-102.
ZHANG Jing-lei, HOU Bao-rong. Studies on electrochemical corrosion behaviour of steel in jucture area between sea clay and seawater[J]. *Oceanologia ET limnologia sinica*, 1995, 26(1): 98-102.
- [23] 邓培昌, 刘泉兵, 李子运, 等. X70 管线钢在热带海水-海泥跃变区的腐蚀行为研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2018, 38(5): 415-423.
DENG Pei-chang, LIU Quan-bing, LI Ziyun, et al. Corrosion behavior of X70 pipeline steel in the tropical juncture area of seatwater-sea mud[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2018, 38(5): 415-423.