

# 海底管道腐蚀防护状态检测方法

孙宇<sup>1</sup>, 常炜<sup>2</sup>, 杨翔堃<sup>1</sup>, 胡丽华<sup>2</sup>, 余晓毅<sup>2</sup>, 宋世德<sup>1</sup>, 黄一<sup>1</sup>

(1.大连理工大学, 辽宁 大连 116024; 2.中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

**摘要:** **目的** 介绍一种海底管道腐蚀防护状态的非接触式检测方法, 验证基于远地参比电极电位差测量的海底管道腐蚀防护状态检测方法的可行性。**方法** 论述基于远地参比电极电位差测量的非接触式检测方法的原理, 并应用数值模拟软件模拟计算 964.6 m 长的海底管道的电位, 分析 5 种不同工况下埋深海底管道的整体电位在 200 m 水深范围内的分布规律。**结果** 海底管道中的有效牺牲阳极分布越均匀, 距离管道越远, 管道整体电位分布越一致, 基于该方法的管道保护电位检测越精确。管道腐蚀防护层破损越严重, 牺牲阳极状态可检测性越好。**结论** 处于设计寿命末期的海底管道周围环境电场梯度较大, 这为基于远地参比电极电位差测量的非接触式检测方法提供了理论依据, 证实了远参比电极电位检测法的有效性。

**关键词:** 腐蚀防护状态检测; 电位差; 电位梯度; 数值模拟

中图分类号: TG172.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)01-0104-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.01.016

## A Detection Method for Corrosion Prevention Status of Submarine Pipelines

SUN Yu<sup>1</sup>, CHANG Wei<sup>2</sup>, YANG Xiang-kun<sup>1</sup>, HU Li-hua<sup>2</sup>, YU Xiao-yi<sup>2</sup>, SONG Shi-de<sup>1</sup>, HUANG Yi<sup>1</sup>

(1. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**ABSTRACT:** A non-contact detection method for the corrosion protection status of submarine pipelines is introduced, and the feasibility of this detection method based on the measurement of the remote reference electrode potential difference is verified. The principle of the non-contact detection method based on the measurement of the remote reference electrode potential difference is discussed, the potential of the 964.6 m long submarine pipelines is simulated and calculated by the numerical simulation software, and the distribution law of the overall potential of the submarine pipelines buried within 200 m water depth under 5 different working conditions is analyzed. The more uniform the distribution of the effective sacrificial anodes in the submarine pipelines is and the farther they are away from the pipelines, the more consistent the overall potential distribution of the pipelines is and the more accurate the pipeline protection potential detection based on this method is; the more seriously the pipeline corrosion protection layer is damaged, the better the detectability of the sacrificial anodes is. The environmental electric field gradient around the submarine pipelines at the end of their design life is large, which provides a theoretical basis for the non-contact detection method based on the measurement of the remote reference electrode potential difference and confirms the effectiveness of this detection method.

**KEY WORDS:** corrosion prevention status detection; potential difference; potential gradient; numerical simulation

收稿日期: 2020-09-29; 修订日期: 2020-10-11

Received: 2020-09-29; Revised: 2020-10-11

作者简介: 孙宇(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋工程腐蚀防护。

**Biography:** SUN Yu (1993—), Male, Master, Research focus: marine engineering corrosion protection.

通讯作者: 宋世德(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为腐蚀传感器。

**Corresponding author:** SONG Shi-de (1974—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: corrosion sensor.

海底管道是海洋油气资源开发系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>。为保障海底管道能够安全服役，通常采取防腐涂层和牺牲阳极联合的防腐措施<sup>[2-3]</sup>。海底管道完整性管理包括牺牲阳极的损耗情况、海底管道防护涂层的老化或损伤情况以及海管的腐蚀防护状态检测和评估<sup>[4]</sup>。因此，开展海底管道腐蚀防护状态检测方法研究具有重要的实际工程意义。

夏伟君<sup>[5]</sup>提出了基于电位梯度测量数据的非接触式防腐状态检测方法，通过数值模拟仿真技术计算了一个典型的海底管道模型来得到各相关参数的关系数据库，然后应用神经网络算法得到了电位梯度与海管防腐状态参数之间的关系。郭晓丽<sup>[6]</sup>提出了利用电位梯度获取海底管道涂层破损的非接触式检测方法，通过模拟计算带有破损涂层的管道模型来获取涂层破损处的电位梯度，以此来训练神经网络。由于基于电位梯度的检测方法存在着局限性，如两个检测探头之间的距离难以确定等，文中提出了基于远地参比电极电位差测量的非接触式检测方法。海底管道、牺牲阳极以及海水和海泥等环境介质构成的电池体系将在管道周围环境区域形成电场分布，在离开管道较远区域或海面，电场梯度趋于“0”或电位趋于常数<sup>[7-8]</sup>。通过在“0”电位梯度区域放置一远参比电极对海底管道电位进行初期标定，然后在检测时，记录靠近管道的参比电极与远离管道的参比电极之间的电位差，基于该电位差和远参比电极的标定值即可得到海底管道表面的腐蚀电位值。在该研究检测方法的基础上，采用数值模拟计算技术确认该检测方法的有效性。

## 1 检测原理

埋地管道的外腐蚀检测技术比较丰富，如 Person 检测法、短间歇电位检查法、组合电位测试法、直流电压梯度法等<sup>[9-13]</sup>。对于海底管道腐蚀防护状态的检测，由于其特殊的检测环境，检测技术较少，通常采用检测管道表面保护电位的方法<sup>[14]</sup>。传统的检测方法使用一根“地线”，该“地线”的一端连接平台与管道交接点附近，另一端连接电位计，而电位计的另一极连接一个参比电极。在实际的检测中，使参比电极尽量靠近海底管道，但不能与海管接触，读取此时的电位值，并与规范所规定的临界保护电位值进行比对，以评估该管道当前的腐蚀防护状态。这种方法操作较为容易，但是对于远距离传输的海底管道，该方法就会受到“地线”长度的约束，且无法检测埋深下的海底管道<sup>[15-17]</sup>。基于远地参比电极电位差测量的检测方法是非接触式检测，其可以不受“地线”长度的限制，检测方便快捷。该方法检测原理中，主要包括“远地参比电极”标定电位和“远地参比电极”与“近地参比电极”环境电位差两项电场参数。

“远地参比电极”与“近地参比电极”环境电位差：采用两个参比电极及高灵敏度电位计来测量海底管道阴极保护系统产生的环境电位差。在测量时，将远离管道一定距离的海水区域作为“0”电位梯度区域，并将参比电极通过悬浮装置置于该区域中，形成电位稳定的远地参比电极电位，而在海底，利用下潜装置携带另一参比电极，使其处于海底管道形成的电位变化的区域，并沿着管道行进，得到随管道腐蚀防护状态变化的近地参比电极电位。在行进过程中，利用高灵敏度电位计来实时记录两个参比电极之间的环境电位差，来检测整个海底管道周围介质中的电位分布。其基本公式为：

$$\Delta E_{\text{环境}} = E_{\text{电位计}} - (\varphi_{\text{参}1} - \varphi_{\text{参}2}) \quad (1)$$

式中： $\Delta E_{\text{环境}}$ 为环境电位差； $E_{\text{电位计}}$ 为电位计所测得的两个参比电极之间的电位差； $\varphi_{\text{参}1}$ 、 $\varphi_{\text{参}2}$ 为参比电极自身稳定电位。

远地参比电极标定电位：在检测前或检测中，利用近地检测装置上的探针与海底管道或者牺牲阳极进行接触，形成“地线”的效果，并利用电位计读出管道与远地参比电极之间的电位值<sup>[16-17]</sup>。由于此时远地参比电极处于“0”电位梯度区域内，因此可得到稳定的管道电位值，也可称作远地参比电极的标定值。

结合上述两项电场参数，则引出式（2）：

$$\varphi_{\text{近地}} = \varphi_{\text{远地}} + \Delta E_{\text{环境}} \quad (2)$$

式中： $\varphi_{\text{近地}}$ 为近地参比电极处的管道电位值； $\varphi_{\text{远地}}$ 为远地参比电极测得的电位值（标定值）。其中远参比电极附近电场梯度近似为“0”，所以在该海域中没有其他电场干扰的情况下，其电位值是几乎不变的。由此，随着下潜装置携带近地参比电极的移动，远地参比电极与近地参比电极间的环境电位差  $\Delta E_{\text{环境}}$  会随着管道周围电场的改变而改变，进而通过式（2）计算出近参比电极处的管道电位值<sup>[18]</sup>。对于牺牲阳极状态的检测，原理也相同，即可检测牺牲阳极发出的环境电场，来间接检测牺牲阳极的状态。

## 2 海底管道电位分布数值模拟

### 2.1 模型参数

文中采用的数值模拟软件为笔者课题组自主研发的船舶与海洋工程防腐系统数值模拟优化设计软件系统，该软件是基于边界元方法，且已在多项实际工程中得到成功应用。模拟的实际海底管道参数如下：某海底输油管道全长约为 37.5 km，管道的材质为 X60 钢，管道采用牺牲阳极的阴极保护法，输油管道施工后全部埋于海泥中<sup>[19]</sup>。牺牲阳极的间隔为 75.2 m，管径为 762 mm。牺牲阳极的材质为铝合金，形状为镯式，包裹在海管上，牺牲阳极的内径为 0.8 m，阳极的外径为 1.2 m，沿海管长度为 1 m。海水、海泥的电导率分别为 5、1.5 S/m，模拟埋深 1.5 m。截取部

分管长, 共计模拟管长 964.6 m, 牺牲阳极 13 个<sup>[20]</sup>。

### 2.2 数值模拟模型及工况设计

为了尽量增加计算模型的长度, 在模型中的海水区域使用大网格(8 m), 其他区域使用小网格(1 m)。管道模型的局部展示见图 1, 图中深色部分代表海泥, 浅色部分代表海水, 中间白色部分是海底管道, 海管位于海泥环境中, 且位于泥沙面以下 1.5 m 深处。



图 1 埋深管道部分模型  
Fig.1 Partial model of buried pipelines

该段海底管道的工况设计如下所述。

海管正常运作时的工况: 所有阳极均正常工作、只有 1 个阳极失去作用、只有 1/2 阳极正常工作。

处于临界保护时的工况: 所有牺牲阳极按照可以取到的最大间距来布置, 根据 GB/T 35988—2018《石油天然气工业海底管道阴极保护标准》这个间距取值为 300 m。

海管处于欠保护状态时的工况: 只模拟中间一个阳极有效的情况。

### 2.3 数值模拟结果

#### 2.3.1 海管正常运作时

1) 所有阳极均正常工作。图 2 显示, 在牺牲阳极附近的电场梯度较大, 在远离牺牲阳极的区域电位相差不大。图 3 显示, 从泥面附近到 200 m 水面的电位差值不超过 3 mV, 并且离管道越远的地方, 电位的分布越类似, 电位梯度越小。



图 2 所有阳极均正常工作时电位分布数值模拟云图  
Fig. 2 Numerical simulation cloud diagram of potential distribution when all anodes are working normally

2) 只有 1 个阳极失去作用。图 4 显示, 牺牲阳极失效区域的电位值要低于其余区域, 但海底管道整体仍能受到良好的保护。该工况下的整体电位分布规律与无阳极失效时的工况基本一致。图 5 显示, 泥面以上区域整体电位值基本一致, 相差不超过 3 mV, 且由于中间阳极的失效, 管道表面及泥面附近电位分布曲线缺失了该处的电位峰值, 表明了该处牺牲阳极的失效。

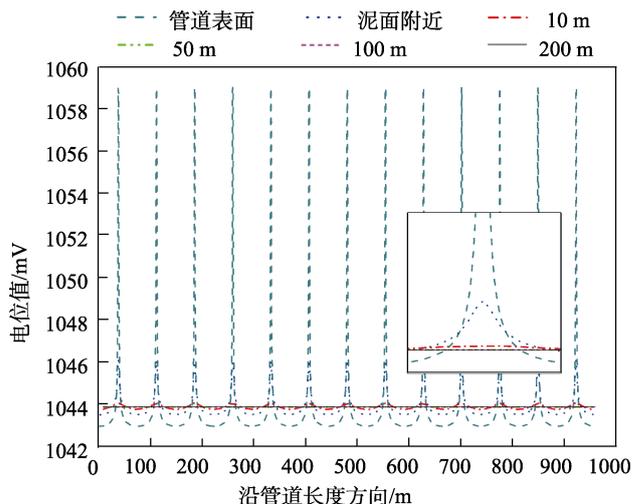


图 3 所有阳极均正常工作时电位分布数值曲线图  
Fig. 3 Numerical curve diagram of potential distribution when all anodes are working normally



图 4 只有一个阳极失去作用时电位分布数值模拟云图  
Fig.4 Numerical simulation cloud diagram of potential distribution when only one anode fails

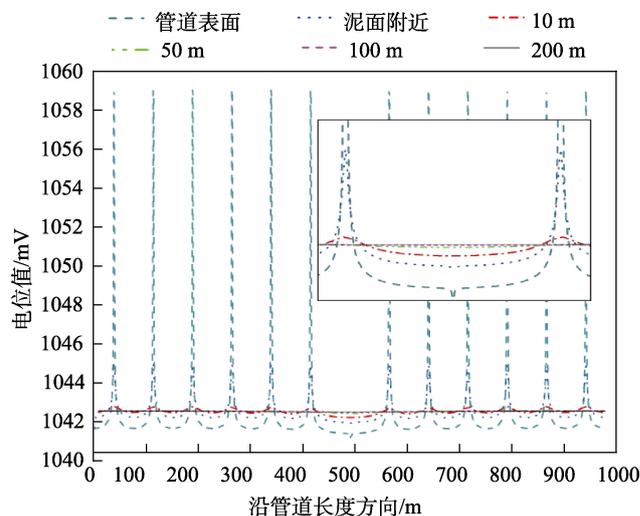


图 5 只有一个阳极失去作用时电位分布数值曲线  
Fig.5 Numerical curve diagram of potential distribution when only one anode fails

3) 只有 1/2 阳极正常工作。该工况模拟的是两种特殊电场的叠加, 以观察整体电位值是否会出现明显的变化。图 6 及图 7 显示, 牺牲阳极正常工作区域的电位值要平均高于牺牲阳极失效区域。从全局来看, 除去泥面附近电位梯度较大, 其余高度下电位值基本一致。分析原因为: 正常工作的牺牲阳极产生的保护电流可以到达阳极失效的区域。

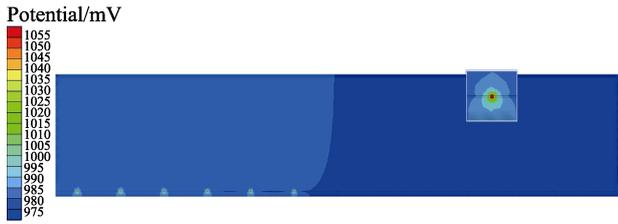


图 6 只有 1/2 阳极正常工作时电位分布数值模拟云图  
Fig.6 Numerical simulation cloud diagram of potential distribution when only half of the anodes are working

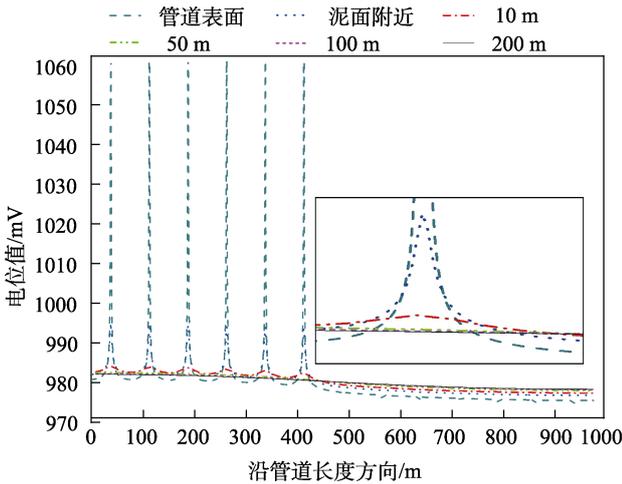


图 7 只有 1/2 阳极正常工作时电位分布数值曲线  
Fig.7 Numerical curve of potential distribution when only half of the anodes are working

### 2.3.2 处于临界保护时

图 8、图 9 显示，距离泥面 10 m 以上的水域范围内，海管的电位差值在 5 mV 以内。因为正常工作的牺牲阳极数量的减少，管道整体电位值偏低，基本上在保护电位的上限 900 mV 左右。海管在处于临界保护的工况下，因为牺牲阳极的均匀分布，从而使牺牲阳极产生的保护电流均匀分布。

从图 9 中可观察到泥面附近的电位值明显变大。分析原因为：随着正常工作的牺牲阳极数量的减少，剩余的牺牲阳极要保护的区域大大增加，因此，剩余的牺牲阳极处释放的电流显著增加，从而导致牺牲阳

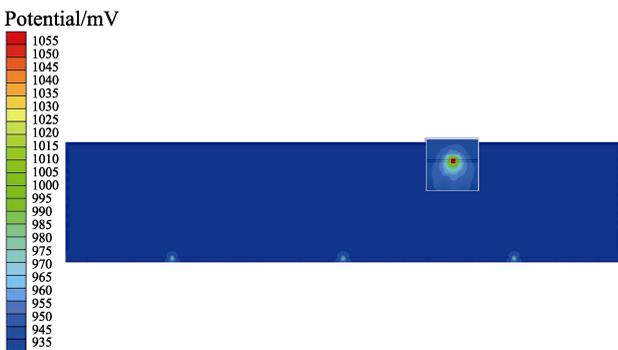


图 8 处于临界保护时电位分布数值模拟云图  
Fig.8 Numerical simulation cloud diagram of potential distribution under critical protection

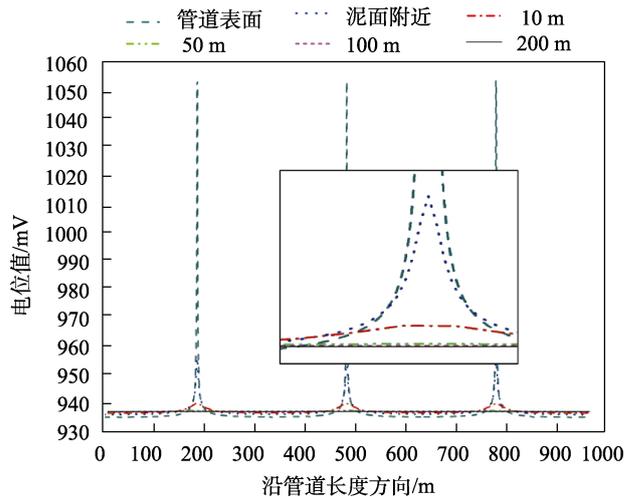


图 9 处于临界保护时电位分布数值曲线  
Fig.9 Numerical curve diagram of potential distribution under critical protection

极附近的电位梯度变大。由此可见，随着牺牲阳极需要保护区域的增大，阳极附近的电位梯度也明显变大，有效阳极的可检测性也会显著增加。

### 2.3.3 海管处于欠保护状态时

图 10 及图 11 显示，除阳极附近电位梯度较大，

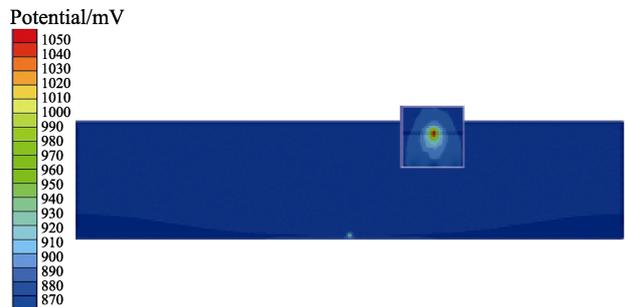


图 10 单阳极有效电位分布数值模拟云图  
Fig.10 Numerical simulation cloud diagram of potential distribution when a single anode is working

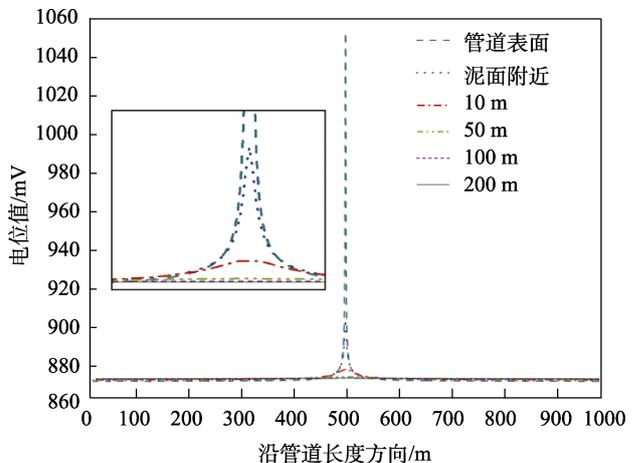


图 11 单阳极有效电位分布数值曲线  
Fig.11 Numerical curve diagram of potential distribution when a single anode is working

其余区域整体电位值基本保持一致。由于海管需要保护的面积过大, 电位值大于保护电位的上限, 牺牲阳极产生的电流达到最大, 牺牲阳极附近电位梯度也达到最大。

### 3 结论

文中对非接触式的远参比电极电位检测法进行了原理性阐述和实际海底管道数值模拟计算验证, 分析了长为 964.6 m 的埋深海底管道在 200 m 水深范围内的整体电位分布规律。由于目前该方法在国内外几乎找不到应用案例, 所以笔者课题组针对该方法完成了实验室的缩比模型试验, 正在开展实海海底管道原型试验, 以验证该方法的有效性和检测精度。

结合上述工作, 可得到以下结论:

1) 所有工况下, 标定电位距离泥面越远, 整体电位分布就越均匀, 管道电位检测也越精确。管道整体电位分布情况随着正常工作的牺牲阳极数量和分布的变化而变化, 但是从所有阳极均正常工作的工况到海管处于欠保护状态时的工况, 10 m 以上水域的电位梯度很小。同时, 管道表面电位与泥面附近电位相差不大, 可以使用泥面附近检测值来代替管道表面电位。

2) 有效牺牲阳极分布得越均匀, 管道整体电位分布也越趋于一致。即使阳极出现大范围的失效, 如 1/2 有效、1/2 失效的模型, 整体电位分布也相差不大。考虑到有限的模拟长度, 如果海管上的牺牲阳极出现超大范围的失效, 如千米级别的范围, 海管电位会随着离有效牺牲阳极的距离的增大而降低, 导致同一高度处的电位差距增大, 标定值偏离增大。若远地参比电极标定值无法进行重新标定, 则远参比电极电位检测法的电位检测精度下降。

3) 管道需要被保护面积的增加, 使得牺牲阳极释放电流增加, 阳极附近电位梯度增加, 牺牲阳极状态的可检测性增加, 即可检测到该位置处的牺牲阳极是否有效。

#### 参考文献:

- [1] 孔德慧, 仪记敏. 海底管道的腐蚀及防治措施[J]. 辽宁化工, 2016, 45(12): 1543-1544.  
KONG De-hui, YI Ji-min. Corrosion and prevention measures of submarine pipelines[J]. Liaoning chemical industry, 2016, 45(12): 1543-1544.
- [2] 方娜, 陈国明, 朱红卫, 等. 海底管道泄漏事故统计分析[J]. 油气储运, 2014, 33(1): 99-103.  
FANG Na, CHEN Guo-ming, ZHU Hong-wei, et al. Statistical analysis of submarine pipeline leakage accidents[J]. Oil and gas storage and transportation, 2014, 33(1): 99-103.
- [3] 王诗鹏. 海底管道腐蚀缺陷修复评估方案的确定[J]. 油气储运, 2011, 30(12): 949-950.  
WANG Shi-peng. Determination of the evaluation plan for the repair of corrosion defects in submarine pipelines[J]. Oil and gas storage and transportation, 2011, 30(12): 949-950.
- [4] 张余, 董绍华. 管道完整性管理的发展与腐蚀案例分析[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(2): 125-130.  
ZHANG Yu, DONG Shao-hua. The development of pipeline integrity management and corrosion case analysis[J]. Corrosion and protection, 2012, 33(2): 125-130.
- [5] 夏伟君. 海底管道防腐状态检测关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
XIA Wei-jun. Research on key technologies of submarine pipeline anticorrosion state detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [6] 郭丽晓. 基于非接触检测的水下管线腐蚀状态的建模研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.  
GUO Li-xiao. Modeling research on the corrosion state of underwater pipelines based on non-contact detection[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [7] 张炬, 陈振栋. 海底管道腐蚀与防护措施研究现状[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(6): 55-58.  
ZHANG Ju, CHEN Zhen-dong. Research status of corrosion and protective measures for submarine pipelines[J]. Total corrosion control, 2015, 29(6): 55-58.
- [8] 孙长保. 海底管道检测最新技术及发展方向[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2018, 38(14): 43-44.  
SUN Chang-bao. The latest technology and development direction of submarine pipeline inspection[J]. China petroleum and chemical standards and quality, 2018, 38(14): 43-44.
- [9] 柳言国, 陈蕴衡. 油田埋地管线腐蚀检测技术现状及发展方向[J]. 腐蚀与防护, 2003, 23(6): 260-265.  
LIU Yan-guo, CHEN Yun-heng. The current situation and development direction of corrosion detection technology for buried pipelines in oilfields[J]. Corrosion and protection, 2003, 23(6): 260-265.
- [10] 薛吉明. 天然气长输管道外腐蚀直接检测评价技术与应用[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(2): 189-191.  
XUE Ji-ming. Direct detection and evaluation technology and application of external corrosion of natural gas long-distance pipeline[J]. Corrosion and protection, 2014, 35(2): 189-191.
- [11] 王金龙, 何仁洋, 张海彬, 等. 海底管道检测最新技术及发展方向[J]. 石油机械, 2016, 44(10): 112-118.  
WANG Jin-long, HE Ren-yang, ZHANG Hai-bin, et al. The latest technology and development direction of sub-sea pipeline inspection[J]. Petroleum machinery, 2016, 44(10): 112-118.
- [12] 李曙. 海底管道检测技术综述[J]. 现代计算机(专业版), 2015(13): 7-9.  
LI Shu. Summary of submarine pipeline inspection technology[J]. Modern computer (professional edition), 2015(13): 7-9.

- 2015(13): 7-9.
- [13] 孙长保, 邹定杰. 基于 ROV 的深水管道外检测技术[J]. 石油工程建设, 2019, 45(2): 1-5.  
SUN Chang-bao, ZOU Ding-jie. ROV-based external detection technology for deepwater pipelines[J]. Petroleum engineering construction, 2019, 45(2): 1-5.
- [14] 王鹏菲. 海底管道腐蚀检测系统研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.  
WANG Peng-fei. Research and design of submarine pipeline corrosion detection system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014.
- [15] 曲杰, 王志涛, 倪剑, 等. 海底管道外防腐检测技术浅析[J]. 中国设备工程, 2017(12): 173-174.  
QU Jie, WANG Zhi-tao, NI Jian, et al. Analysis of submarine pipeline external corrosion detection technology[J]. China equipment engineering, 2017(12): 173-174.
- [16] 兰杰. 海底管道防腐状态检测关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
LAN Jie. Research on key technologies of submarine pipeline anticorrosion state detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [17] 贾铮, 戴长松, 陈玲. 电化学测量方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
JIA Zheng, DAI Chang-song, CHEN Ling. Electrochemical measurement method[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [18] 郭鹤桐, 覃奇贤. 电化学教程[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.  
GUO He-tong, QIN Qi-xian. Electrochemistry course[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.
- [19] 陈利琼, 李卫杰, 孙磊. 油气管道阴极保护效果评估技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(9): 41-45.  
CHEN Li-qiong, LI Wei-jie, SUN Lei. Research on cathodic protection effect evaluation technology of oil and gas pipelines[J]. Total corrosion control, 2013, 27(9): 41-45.
- [20] 郗春满, 季廷伟, 王树立, 等. 海底输油管道阴极保护数值模拟[J]. 油气储运, 2018, 37(3): 336-342.  
XI Chun-man, JI Ting-wei, WANG Shu-li, et al. Numerical simulation of cathodic protection of submarine oil pipeline[J]. Oil & gas storage and transportation, 2018, 37(3): 336-342.