

## ◆海洋调查技术◆

## 水下油气设施阴极保护及电位测量技术研究进展\*

黄明泉<sup>1,2</sup>, 朱志慧<sup>1,2</sup>, 刘彬<sup>1,2</sup>, 栾振东<sup>3,4,5\*\*</sup>

(1. 中海辉固地学服务(深圳)有限公司, 广东深圳 518067; 2. 广东省海上油气设施检测工程技术研究中心, 广东深圳 518067; 3. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071; 4. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东青岛 266071; 5. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**海上油气田水下设施投入生产后,各类型钢结构水下设施除涂层保护外,会采用牺牲阳极、外加电流或两者相结合的不同阴极保护技术的防腐措施,这些防腐系统的状态将会影响水下设施的安全和使用寿命。通过阴极保护检测和评估,能及时评估水下设施的腐蚀状态,及早发现异常并尽快采取补救措施,使设施长期安全运行。本文主要对阴极保护技术的基本原理、阴极保护的电位测量技术进行阐述,并对阴极保护在各类型水下设施的应用、电位测量技术的对比和应用情况进行分析,着重对辉固阴极保护监测系统(Fugro Cathodic Protection Monitoring System, FCPMS)的组成和应用成果进行介绍,以及对未来阴极保护技术和电位测量技术的使用趋势进行论述。

**关键词:**水下设施 阴极保护 水下遥控机器人 电位测量 电场梯度测量

中图分类号:P755.3 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2022)01-0011-09

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20220421.004

我国从20世纪60年代起对海洋油气资源不断勘探开发,海洋工程水下设施的应用由浅水逐步走向深水,数量越来越多,结构越来越复杂,工程投资成本也越来越大。由于金属材质的设施长期处于海上大气和海水腐蚀的复杂恶劣环境下,金属腐蚀将严重影响设施的使用寿命和安全运行,因此设施金属防腐尤为重要<sup>[1]</sup>。

中国海上油气田经过几十年的开发和建设,各油气田有大量的海上导管架、海底管道、浮式生产储油

卸油装置(Floating Production Storage and Offloading, FPSO)及各类水下结构物正在服役。水下的这些结构物结构复杂、造价昂贵,所处的海洋自然环境又十分恶劣,其不仅受到大气和海水的腐蚀,还遭受海水飞溅、潮汐、生物、底质沉积物等影响,从而产生剧烈的电化学腐蚀。为更好地保障这些水下结构物的正常运行和结构安全,就必须根据各种结构物的腐蚀特点采取科学有效的腐蚀防护措施,并进行定期测

收稿日期:2021-12-08

\* 中国科学院战略性先导科技专项“西太平洋深海调查”(XDA22050202)和中国科学院关键技术人才项目(2018-2021)资助。

## 【作者简介】

黄明泉(1983-),男,博士研究生,高级工程师,主要从事海洋地质、ROV检测、海洋测绘相关研究,E-mail:huangmq@cosl-fugro.com。

## 【\*\*通信作者】

栾振东(1976-),男,正高级工程师,硕士研究生导师,主要从事深海探测技术及海底地形地貌研究,E-mail:luan@qdio.ac.cn。

## 【引用本文】

黄明泉,朱志慧,刘彬,等.水下油气设施阴极保护及电位测量技术研究进展[J].广西科学院学报,2022,38(1):11-19.

HUANG M Q, ZHU Z H, LIU B, et al. Research Progress on Cathodic Protection and Potential Measurement Technology of Underwater Oil and Gas Facilities [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2022, 38(1): 11-19.

量,评估其保护状态。国内学者对海底管道、平台或导管架、FPSO 等单独设施的阴极保护技术研究较多,而对水下设施整体性和综合性的技术现状研究较少,同时对阴极保护技术实施后的电位测量技术和保护效果评估研究也相对偏少。

本文依据多年的行业实践,对海上油气田水下设施的阴极保护、电位测量技术和实践应用情况进行阐述和讨论,并对目前应用的各种电位测量技术进行对比分析,为水下防腐和电位测量相关技术的系统研究和提供理论基础和实践指导。

## 1 阴极保护技术的基本原理及分类

电化学腐蚀是活泼金属与电解质发生氧化还原反应而引起损耗的现象,与原电池的原理相同。水下设施是由活泼金属铁构成,而海水就是很好的电解质溶液,它们之间会发生一系列的氧化还原反应。而阴极保护技术是一种用于防止金属在电介质(海水、淡水及土壤等)中发生氧化还原反应的电化学保护技术,该技术的基本原理是将金属构件作为阴极,对其施加一定的直流电流,使其产生阴极极化,当金属的电位负于某一电位值时,该金属表面的电化学不均匀性得到消除,腐蚀的阴极溶解过程得到有效抑制,从而达到保护的目的。

常用的阴极保护技术分为牺牲阳极阴极保护技术及外加电流阴极保护(Impressed Current Cathodic Protection, ICCP)技术两种。牺牲阳极阴极保护技术是将被保护的金属与电位更负的活泼金属相连,组成电偶电池,依靠牺牲阳极不断溶解所产生的阴极电流来实现阴极保护。目前海洋工程水下设施普遍采用该保护法,从而达到保护钢质结构物的目的。其优点是设计简单、首次投资低、维护费用低;能恰当地保护电流利用率,不存在过保护风险;不仅达到保护的目,而且还能实现接地的效果。缺点是会增加导管架平台的重量,阳极在消耗过程中会产生重金属离子污染环境,同时阳极保护时间有限,消耗完毕后,平台延寿困难,成本较大<sup>[2]</sup>。ICCP 技术是强制将需保护结构设为阴极,而将辅助阳极(如石墨、废钢和贵金属等)设为阳极,构成一个腐蚀电池,通过外加电路向阴极输入电子,从而使阴极不易失电子(图 1)。优点是驱动电压高,灵活度高,适用于较大的场合;可适用于高电阻率或恶劣腐蚀的环境;用微溶性或不溶性的辅助阳极时,能达到长时间阴极保护的目,保护范围广。缺点是需要外部电源,后期维护量大,若系统设

计不合理,就会存在电流分配不均的风险<sup>[3]</sup>。

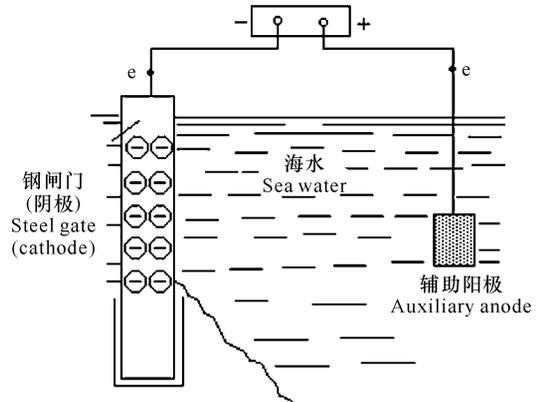


图 1 外加电流阴极保护技术

Fig. 1 ICCP technology

## 2 海上油气田水下结构阴极保护

### 2.1 海管和水下生产设施阴极保护

海底管道常年处在海底,海洋环境远比陆地环境严酷。阴极保护系统的选择需要充分考虑可靠性、耐久性等特点。考虑到外加电流阴极保护系统存在过保护的风险,牺牲阳极阴极保护系统是目前海底管道工程采用的较成熟且可靠的阴极保护方式<sup>[4]</sup>。我国海域所铺设的海管普遍采用牺牲阳极阴极保护系统。

水下生产设施通常结构复杂,包含电液管线、阀门、跨接管、控制系统单元等部件,可供牺牲阳极布置空间有限,为减少牺牲阳极用量并满足防腐要求,通常对水下设施采用牺牲阳极和水下防腐涂层联合保护的方案<sup>[5,6]</sup>。我国南海海域的流花 4-1 油田、番禺 34-1/35-1 气田,以及 2020 年投产的流花 16-2 和流花 29-1 等油田的众多水下设施都广泛采用该方案。

### 2.2 导管架阴极保护

我国早期一般会根据结构物所处的海洋环境对固定式导管架采用不同的防腐技术。导管架在全浸区的腐蚀程度比大气区严重,但比飞溅区要轻,因此全浸区和海底泥土区采用阴极保护或涂料与阴极保护联合保护的牺牲阳极阴极保护方式。随着服役年限的增加,许多阳极已经接近甚至超出了当初设计的使用年限,需要对超役导管架的阴极保护系统进行延寿修复。如果继续采用牺牲阳极阴极保护方法对导管架进行修复,则潜水员安装牺牲阳极的施工成本较高。而采用外加电流阴极保护方法进行延寿,不仅具有安装快速、安装费用低、发生电流大等优点,而且对平台负重小,不污染环境,是一种环境友好型的阴极保护技术<sup>[3]</sup>,该阴极保护技术适用于中等深水域和深

水区域平台的阴极保护<sup>[7-12]</sup>。

导管架外加电流阴极保护系统主要由电源、电缆、辅助阳极和参比电极等组成。根据辅助阳极固定方式的不同可分为远地式阳极外加电流系统、抗拉伸式阳极系统和固定式阳极系统。

(1)远地式阳极外加电流系统。该系统有两种设计方法,一种是在海底支撑底座(或阳极撬块)上预置辅助阳极,另一种是将辅助阳极设计为浮式结构安装在设计好的阳极支架上(图2)。2010年陆丰13-2WHP导管架安装了两套Deepwater公司远地式阳极外加电流系统。2018年文昌14-3WHPA导管架也首次投入使用了国内联合研发的远地式阳极外加电流系统。

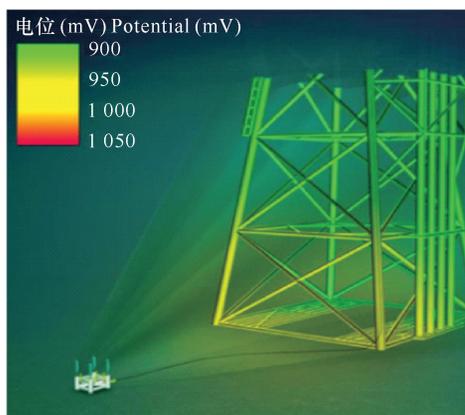
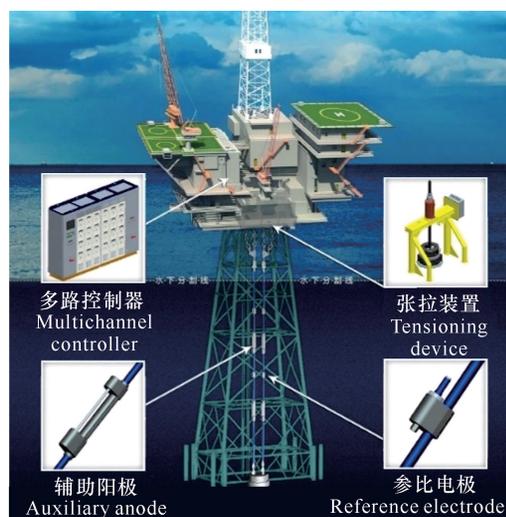


图2 远地式辅助阳极外加电流阴极保护<sup>[12]</sup>

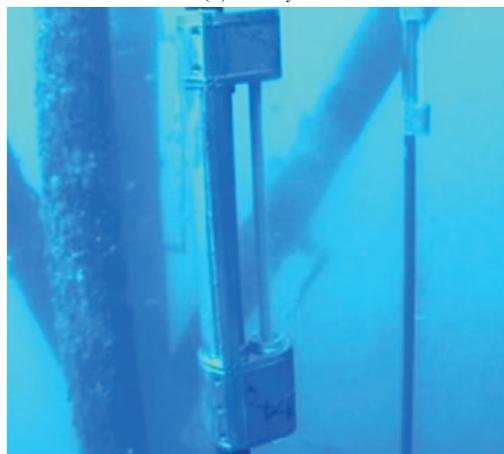
Fig.2 ICCP with remote auxiliary anode<sup>[12]</sup>

(2)抗拉伸式阳极系统。抗拉伸式阳极由一个或多个阳极固定在一条机械支撑作用的绳索上,绳索的上端固定在平台突出部位,绳索的下端悬挂重载或固定在外套管上。该系统有两种设计方法,一种是将抗拉伸式阳极的机械支撑部分和供电部分完全分离,即支撑绳和电缆分离,确保作用于系统中的机械力都集中在起支撑作用的钢绳上<sup>[9,11]</sup>,如DENORA公司的LIDA系统;另一种是将支撑部分和电缆芯设计成一体结构,电缆既起到供电作用又起到支撑作用,如格沃克公司的VTA系统。

由于从国外引进该技术产品的初始安装和后期维护费用十分昂贵,因此投入使用的范围有限,该技术在在我国主要作为超役导管架的延寿手段。随着国产化外加电流阴极保护技术的发展和进步,现在我国已有了经济可靠的固定式导管架外加电流阴极保护技术,如大连科迈尔防腐科技有限公司的VTA系统(图3)。在2017年,陆丰13-2WHP导管架因远地式



(a) VTA系统  
(a) VTA system



(b)系统辅助阳极  
(b) System auxiliary anode



(c)系统参比电极  
(c) System reference electrode

图3 陆丰13-2WHP导管架的VTA系统应用

Fig.3 VTA system application on LF 13-2 WHP jacket  
阳极外加电流系统故障,率先投入使用了国产化的VTA系统。该系统安装使用至今已正常运转4年,并抵御了数年南海台风的侵袭,经中国海洋石油集团

有限公司研究总院工程研究设计院评定该系统将为陆丰 13-2WHP 平台再延寿 15 年。同时,该技术已作为中海油“三新三化”技术在集团公司各海域推广,并于 2021 年 5 月在文昌 13-2A/B 导管架成功投入使用。随着国产化技术的逐步成熟和成本的大幅降低,该技术的应用不再局限于超役平台,今后将推广到牺牲阳极阴极保护失效平台和新建平台,如牺牲阳极阴极保护失效平台番禺 30-1 导管架,预计于 2022 年 5 月开始安装使用。

(3)固定式阳极系统。固定式阳极系统的安装一般与牺牲阳极法的布置相似,数量上接近,安装工程量较大,且不能发挥外加电流排流量大的优势。而安装辅助阳极的电缆接头和阳极托架,电缆走线布置都比较复杂,所以经济成本较高,适用于浅水域安装<sup>[3]</sup>。

### 2.3 FPSO 阴极保护

较早建造的浮式生产储油卸油装置(FPSO)普遍采用涂层加牺牲阳极阴极保护技术对船体以及压载舱、货油舱等舱室进行防腐保护,而现在建造的 FPSO 多采用牺牲阳极的阴极保护技术来保护舱室,同时在船艏到船艉的不同区域增加外加电流防护对船体进行防腐。

2014 年建成并投入使用的“海洋石油 118”FPSO,在压载舱、货油舱、污油舱、艏/艉间舱等舱室涂刷防腐底漆与安装锌块阳极相结合的方式防腐,而对船体的防护则是在船艏、左右舷、船艉的 4 个不同区域安装外加电流保护装置,以此达到船体防腐的目的<sup>[13,14]</sup>。

## 3 阴极保护电位测量技术及应用

为避免海上油气田水下设施因保护不当而发生严重腐蚀的情况,需采用恰当的测量技术来发现保护措施缺陷,再采取补救措施防止水下设施腐蚀,才能使水下设施长期安全运行。如何选择合适的测量技术检测水下结构所采用的阴极保护措施是否有缺陷显得尤为重要。

### 3.1 阴极保护电位测量方法

国内外海上油气田水下设施阴极保护电位测量方法主要有以下 5 种:下放电极式测量、接触式测量、双电极测量、拖缆式测量和电场梯度测量。

#### 3.1.1 下放电极式测量

下放电极式测量(Drop cell measurement)是将单电极(Ag/AgCl)放置在水下结构附近,通过参比电极和结构之间的电位差得到阴极保护电位值,适用于

长期电位监测(图 4)。该技术在海洋设施中普遍应用于导管架对水下部分钢结构杆件的监控,已在中国南海的番禺 30-1、番禺 34-1 和惠州 25-8 等众多平台投入使用。

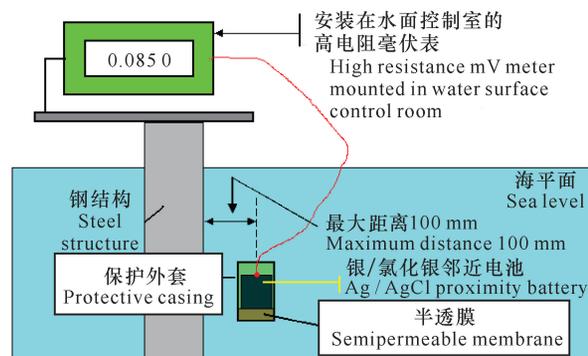


图 4 下放电极式测量示意图

Fig. 4 Schematic diagram of drop cell measurement

#### 3.1.2 接触式测量

接触式测量通过探针与被测结构表面接触,测得探针与参比电极的电位差,得到阴极保护电位值。阴极保护电位值直接关系到钢结构的保护效果,也是判断牺牲阳极阴极保护系统有效性及保护程度的重要参数。当电位值偏正时,则表示该阴极保护系统达不到设计要求的保护效果;当电位值偏负时,牺牲阳极消耗的电量过大,则整套阴极保护系统保护效果不佳,还可能导致钢结构表面析氢引起表面涂层剥落,或引起氢脆等不良后果<sup>[15]</sup>。

目前最为常见的测量方式是通过水下遥控机器人(Remote Operated Vehicle, ROV)或潜水员搭载电位测量设备对导管架、海管、水下生产系统和 FPSO 系泊系统进行测量。如使用潜水员搭载,可直接通过仪器进行电位测量读取;如采用 ROV 搭载,则由 ROV 携带测量电极,测量数据经 ROV 脐带缆传输至水面读取电位。中国海域各大油气田的海上设施年度例行检测普遍应用 ROV 搭载测量方法。

#### 3.1.3 双电极测量

双电极电位探头主要用来测量导管架水下钢结构关键节点部位和海管的阴极保护电位。ROV 搭载一个测量探头,包含探针和一个 Ag/AgCl 电极,另外还需要一个远程参比电极(Ag/AgCl 电极)。ROV 需先进行 1 次接触电位测量作为参考,随后定期接触才可确保数据准确,从而得到海管的非接触式、连续电位值(图 5)。该测量方法已在南海北部珠江口东部近海油田平台及北部湾油气田的 4 座固定式海洋石油生产平台上应用<sup>[16,17]</sup>。

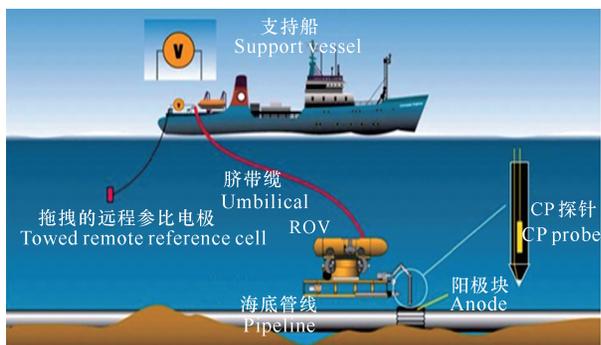


图5 双电极测量示意图

Fig. 5 Schematic diagram of proximity measurement

### 3.1.4 拖缆式测量

拖缆式测量即密间隔电位测量 (Close Interval Potential Survey, CIPS), 是将支持船上自动电位记录仪上带绝缘层金属导线的一端连接在平台立管绝缘法兰以下的管道, 另一端则与 ROV 上的测量电极相连接, 从而构成电位测量回路<sup>[18]</sup> (图 6)。该技术不适合应用在相对距离较远的管道检测上。

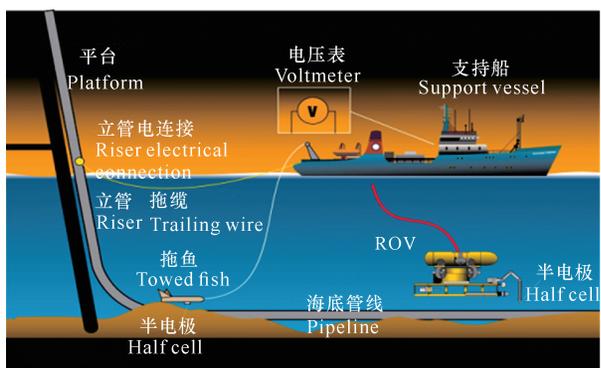


图6 拖缆式测量示意图

Fig. 6 Schematic diagram of trailing wire measurement

### 3.1.5 电场梯度测量

电场梯度测量法也称为“直流电位梯度测量法” (Direct Current Voltage Gradient, DCVG), 其测量原理是通过在海底管道上施加阴极保护, 若管道防腐层破损并裸露出金属部位, 则阴极保护电流将通过海水介质传导到破损的管道金属处, 在金属管破损区域形成电位梯度场。距离金属裸露点越近, 则电流越大, 电位梯度越集中。此外, 借助远程参比电极及固定参比电极 (Cell to Cell, CTC) 系统可同时测量管道的阴极保护电位及电场梯度, ROV 无需接触即可一次性检测获取连续数据, 同时利用电位分布数据及电场梯度数据的对比与验证, 提高检测的准确性<sup>[18,19]</sup> (图 7)。

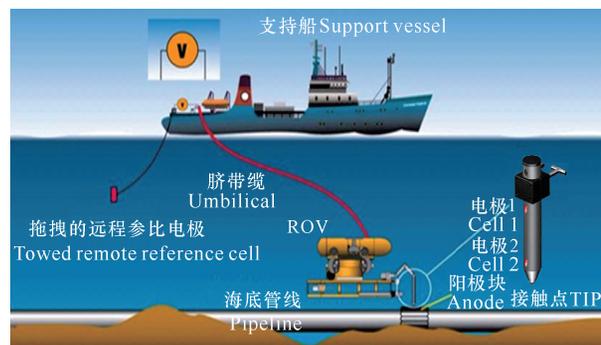


图7 电场梯度测量示意图

Fig. 7 Schematic diagram of electric field gradient measurement

应用电场梯度测量技术, 可记录和体现水下结构阴极保护系统的整体电位和趋势性变化, 并结合数据进行阴极保护系统状态的评估。同时, 将获得的测量电位值和电场梯度值 (图 8), 应用电位梯度判断管道的外防腐层破损点, 结合相关计算方法可估算出阳极剩余寿命, 具有重要的工程参考意义。目前辉固集团 (Fugro) 采用该技术原理建立辉固阴极保护监测系统 (Fugro Cathodic Protection Monitoring System, FCPMS), 其在南海的荔湾 3-1 气田海管、崖城至香港 780 km 天然气输送海管和陵水 17-2 水下结构物等检测中已成功应用。

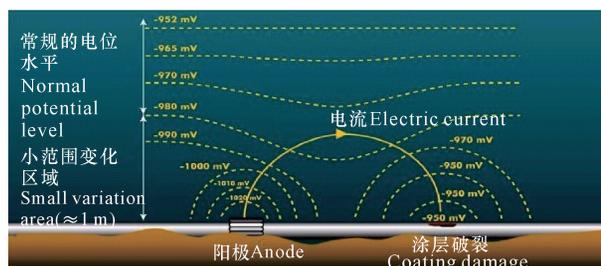


图8 电场梯度测量法原理示意图

Fig. 8 Schematic diagram of electric field gradient measurement technology

## 3.2 FCPMS 组成和应用成果

FCPMS 系统由 CP 测量探头、水下电子舱、信号转换器、控制电脑 (含辉固自主开发的 FCP 软件)、远程参比电极及其他辅助设备 (探针和校准设备等) 组成, 并通过 ROV 搭载对海管进行电场梯度测量作业, 以下为具体检测程序:

(1) 在实施海管电位测量前, 将测量探头、水下电子舱和信号转换器安装在 ROV 上, 通过 ROV 脐带缆将水下电子舱搜集的探针甲板校准数据传输至控制电脑, 确保设备检测和采集数据正常 (图 9)。

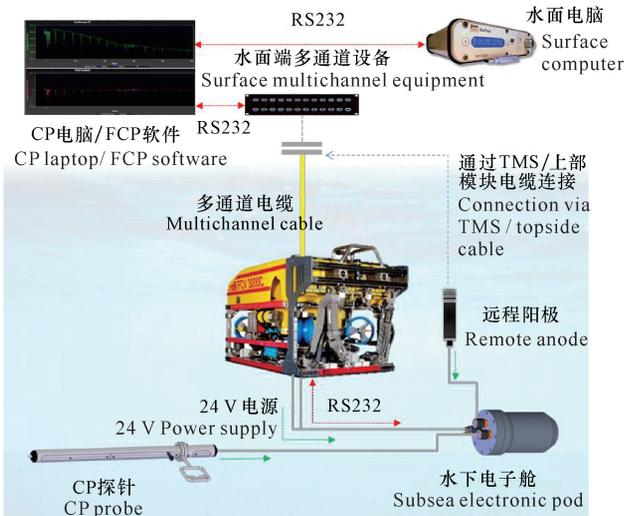


图9 ROV模式的电场梯度测量系统组成图

Fig. 9 Composition diagram of electric field gradient measurement system in ROV mode

(2)完成甲板测试后,ROV随即入海下潜至所需检测结构附近,同时将远程参比电极从船舷侧下放入海。在海底,ROV采用接触式电位测量海管电位进行水下校准工作,再次确保设备功能正常。

(3)FCPMS系统功能测试正常后,即可开展检测作业,在检测过程中,采集的原始数据通过计算(图10、图11)后可以获得连续电位值和电场梯度值(图12)。在作业期间,若发现阳极时,需使用接触式电位测量方法采集阳极电位值和校验电场梯度值。

(4)FCP软件实时采集检测数据并处理,生成电位曲线。

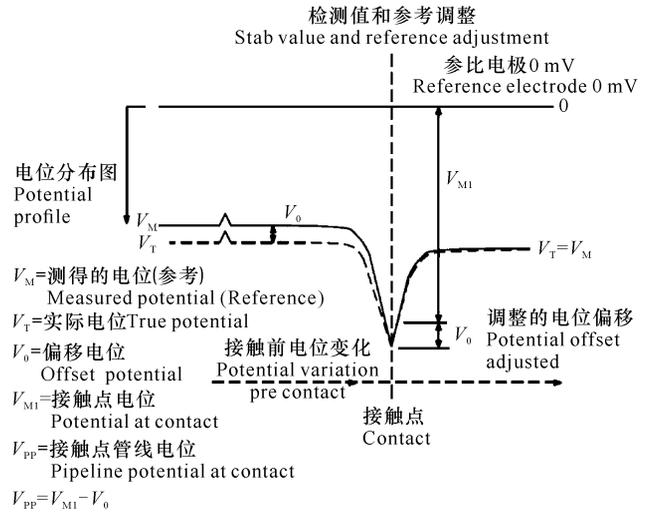


图10 连续电位计算原理

Fig. 10 Calculation principle of continuous potential

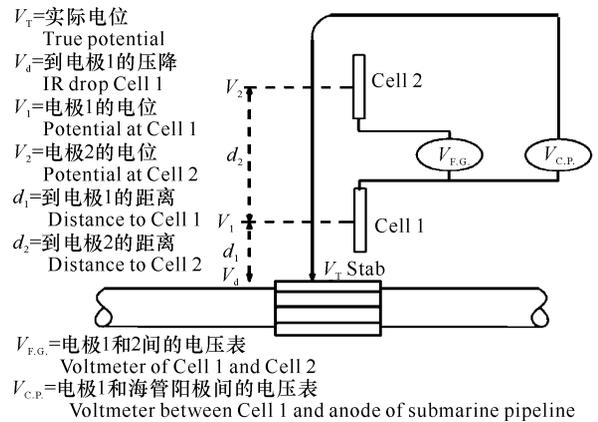


图11 电场梯度值计算原理

Fig. 11 Calculation principle of field gradient

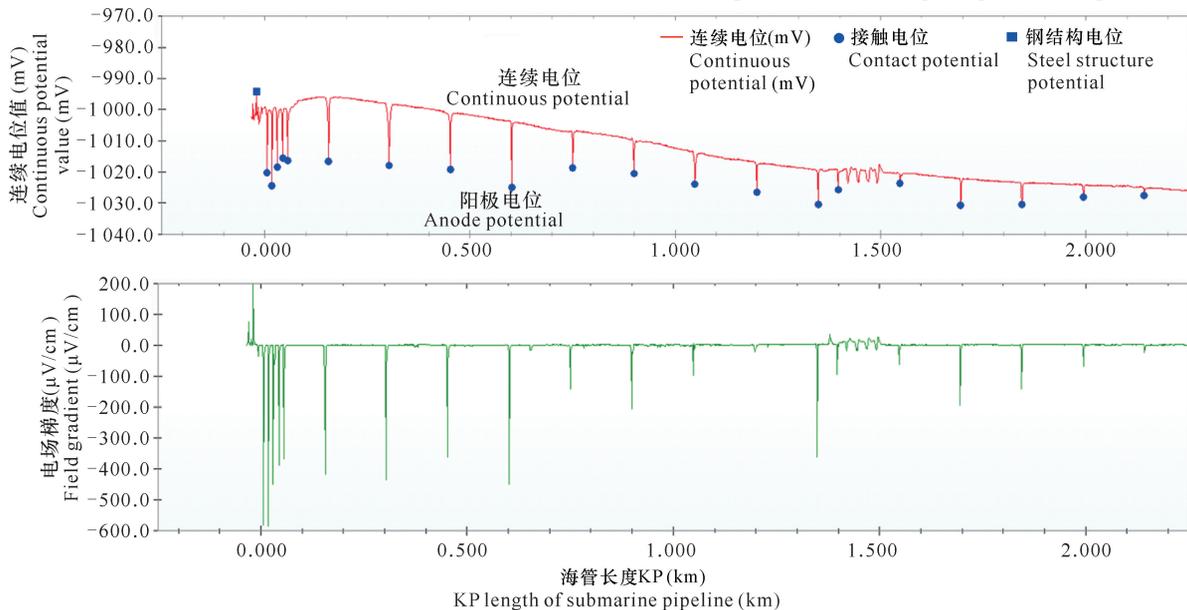


图12 某海管计算所得连续电位值和电场梯度值

Fig. 12 Continuous and field gradient potential value calculated for a submarine pipeline

(5)完成海上现场检测后,所有采集的数据和资料经陆地技术部门核对和二次处理后,形成最终报告。

2018年,FCPMS应用于南海某条海管的阴极保护系统检测,采集整条海管的电位值和相关数据(图13)。通过数据分析,该海管2018年的电位值为

-1 130 mV至 -1 040 mV,与2016年采集的电位数据相比,电位值正在发生正偏移,表明该海管的阴极保护系统的保护状态在减弱,但此时的海管阴极保护状态仍能很好地防止外部腐蚀。经过分析和对比得出海管阳极活性低于平均值,电流范围为-168 mA至52 mA。

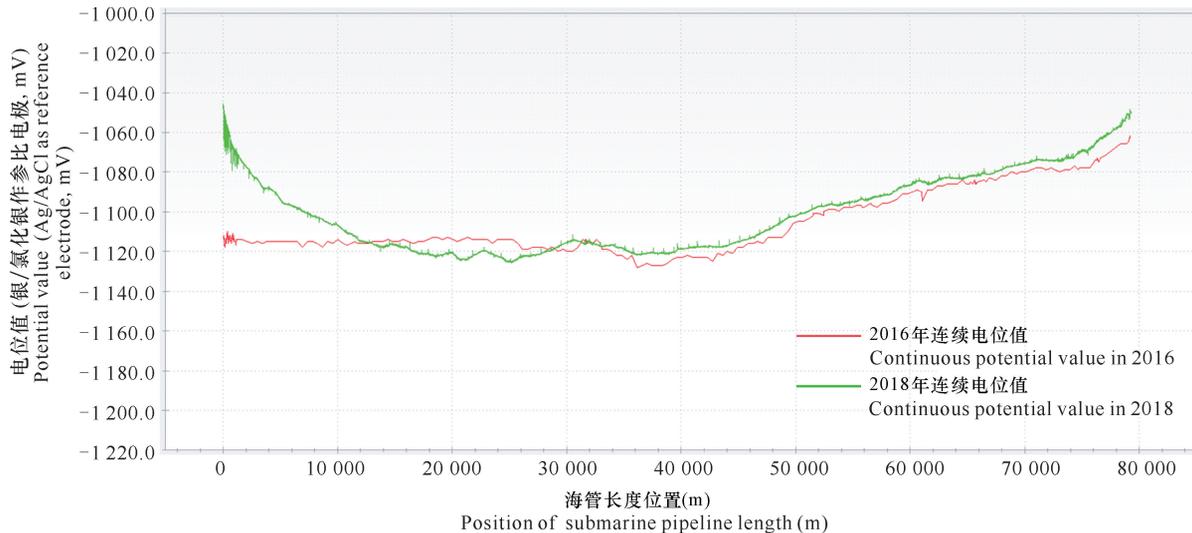


图13 2016年与2018年连续电位值对比图

Fig. 13 Comparison of continuous potential values in 2016 and 2018

同时,通过采集各牺牲阳极的电流值,结合相应数据,可根据以下公式<sup>[20]</sup>计算出基于当时电流情况下牺牲阳极的剩余寿命:

$$T_1 = \frac{u \cdot W_0}{K \cdot I_{cm}} - T_0,$$

式中: $T_1$ 为牺牲阳极剩余寿命(yrs); $W_0$ 为阳极设计质量(kg); $u$ 为阳极使用因子(参考 DNV GL-RP-B401-June 2017 Cathodic protection design 的相应数据标准<sup>[20]</sup>); $K$ 为阳极消耗率(参考 GB/T 4948-2002 铝-锌-钢系合金牺牲阳极,表11“电化学性能的参数”<sup>[21]</sup>); $I_{cm}$ 为计算出的牺牲阳极电流值(Apms); $T_0$ 为牺牲阳极服役年限(yrs)。

表1 5种阴极保护电位测量技术对比及应用

Table 1 Comparison and application of five cathodic protection potential measurement technology

测量方法 Measuring method	检测周期 Inspection cycle	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	应用场景 Application scenario
下放电极式 Drop cell measurement	长期 Long-term	长期持续监测,集成度高 Continuous monitoring and high integration	故障排除困难,维护维修成本高 Difficult troubleshooting and high maintenance cost	导管架 Jacket
接触式 Contact type	临时或周期性 Temporary or periodicity	操作简单,获取数据直观,成本低 Simple operation, intuitive data acquisition and low cost	受限于 ROV 载体的活动范围、能见度以及对检测物体的正确识别,检测效率低 Limited by the activity range and visibility of ROV and the correct recognition of detected objects, low inspection efficiency	导管架、FPS 及系泊系统、水下生产系统、海管 Jacket, FPS and mooring chain system, subsea production system, submarine pipeline

续表

Continued table

测量方法 Measuring method	检测周期 Inspection cycle	优点 Advantage	缺点 Disadvantage	应用场景 Application scenario
双电极 Double electrode	临时或周期性 Temporary or periodicity	受 ROV 载体活动范围影响小,可检测掩埋海管,获取连续电位值,接触测量次数少,检测效率高 Less affected by the activity range of ROV. It can inspect buried submarine pipelines and obtain continuous potential value. Less contact measurement times and high inspection efficiency	受限于能见度以及对检测物体的正确识别,需定期接触牺牲阳极采集数据,后期数据处理量大 Limited by visibility and correct identification of detected objects. It is necessary to contact the sacrificial anode regularly to collect data, and the amount of data processing in the later stage is huge	导管架、海管 Jacket, submarine pipeline
拖缆式 Close interval potential survey	临时或周期性 Temporary or periodicity	对能见度以及检测物体识别不受限制,获取连续电位值,无需接触检测物体,检测效率高 There is no restriction on visibility and detection object recognition. Continuous potential value can be obtained without touching the inspection object, high inspection efficiency	拖缆需提前连接导管架,受船舶和拖缆范围影响大,ROV/AUV 需贴近海管,后期数据处理量大 The streamer needs to be connected to the jacket in advance, which is greatly affected by the scope of the ship and streamer, the ROV / AUV needs to be close to the submarine pipeline, and the workload of data post-processing is huge	海管 Submarine pipeline
电场梯度 Direct current voltage gradient	临时或周期性 Temporary or periodicity	对 ROV 载体活动范围、能见度以及检测物体识别等不受限制,无需接触检测物体,获取连续或整体电位值和趋势性变化,可评估阴极保护状态,可评估牺牲阳极寿命,检测效率高 There is no restriction on the activity range, visibility and inspection object identification of ROV. There is no need to contact the inspection object to obtain the continuous or overall potential value and trend change. It can evaluate the cathodic protection status and the service life of sacrificial anode with high inspection efficiency	检测设备存储条件高,后期数据处理量大,成本高 High requirements for storage conditions of inspection equipment, and the workload of data post-processing is huge and cost highly	导管架、FPSO 及系泊系统、水下生产系统、海管 Jacket, FPSO and mooring chain system, subsea production system, submarine pipeline

## 4 结语

在海上油气田水下设施阴极保护方面,因海管的铺设工艺及长距离等特性和水下生产系统的复杂程度及紧凑性等特征,海管和水下生产系统在未来仍以牺牲阳极作为阴极保护的主要方法。随着外加电流阴极保护系统发展的成熟及国产化,在已建平台延寿和新建深水平台上,其将可能逐步替代导管架牺牲阳极阴极保护作为主要的手段。FPSO 所采用的牺牲阳极和外加电流相结合的阴极保护技术能较好地控制 FPSO 的腐蚀速度,这两种技术相结合的方法将会被普遍采用。

在阴极保护测量技术方面,接触式测量方法虽然存在一定的受限条件,但由于操作成本较低,已成为国内海洋油气公司水下设施电位测量的首选方式,目前应用较广泛。但随着国产化技术的发展以及测量成本的下降,高效率、无受限条件和数据成果丰富、可靠、准确的电场梯度电位测量技术,必将成为未来海上油气田水下设施阴极保护检测的主要手段和发展方向。

## 参考文献

- [1] 肖治国,张敬安,郑辉,等.海上油气田钢结构物腐蚀及防护技术[C]//中国海洋工程学会.第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集.北京:海洋出版社,2011:848-853.
- [2] 赵鹏.外加电流阴极保护系统(ICCP)关键技术研究[D].上海:东华大学,2014.
- [3] 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.
- [4] 李雪,魏艳平,李海涛,等.海洋管道阴极保护技术与探讨[J].现代化工,2016,36(10):205-207.
- [5] 钱思成.水下生产设施阴极保护系统设计[J].化工设计通讯,2017,43(5):46-47.
- [6] 程锐,黄施蓬,文欢,等.水下采油树牺牲阳极阴极保护设计方法应用[J].化工管理,2021(7):185-186.
- [7] 夏定健.近海固定平台阴极保护阳极系统设计原则及应用[C]//中国工业防腐蚀技术协会.第三届中国国际腐蚀控制大会技术推广文集.北京:中国工业防腐蚀技术协会,2005:118-126.
- [8] 刘云,王海辉,施以航,等.海洋平台水下结构阴极保护系统优化设计技术研究[J].腐蚀与防护,2015,36(2):

- 62-68.
- [9] 付志国. 导管架外加电流阴极保护系统关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [10] 邱富荣. 石油平台阴极保护的检测与监测技术[J]. 中国海洋平台, 1995, 10(4): 167-170.
- [11] 尹鹏飞, 刘福国, 张国庆, 等. 南海某导管架平台的阴极保护延寿修复技术方案探讨[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(11): 856-860.
- [12] 陈武, 陈超, 李阳松. 深水平台导管架外加电流阴极保护系统改造[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 39(4): 6.
- [13] 杨树敏, 董广河. 阴极保护系统在“海洋石油 118 FPSO”上的应用[J]. 船海工程, 2016, 45(5): 76-82.
- [14] 封加全. FPSO 用外加电流阴极保护系统关键技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [15] 薛方, 张伟, 张宇, 等. 海上设施水下结构牺牲阳极保护及修复技术[C]//中国航海学会救助打捞专业委员会. 第七届中国国际救助论坛论文集. 青岛: 海洋大学出版社, 2012: 416-418.
- [16] 熊信勇, 严涛, 许川壁, 等. 海洋平台阴极保护监测系统的研制及应用[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(1): 70-75.
- [17] 常炜, 栗艳侠, 徐桂华, 等. 海上平台阴极保护原位监测系统[J]. 中国海上油气, 1999, 11(3): 27-34.
- [18] 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.
- [19] 汪良生, 陈永福. 水下电位测量技术[J]. 中国海洋平台, 1999, 14(4): 19-22.
- [20] DNV GL AS. Cathodic protection design: DNVGL-RP-B401:2017 [S/OL]. [2021-11-10]. <http://www.dnvgil.com>, is the officially binding version.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 铝-锌-钢系合金牺牲阳极: GB/T 4948-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

## Research Progress on Cathodic Protection and Potential Measurement Technology of Underwater Oil and Gas Facilities

HUANG Mingquan<sup>1,2</sup>, ZHU Zhihui<sup>1,2</sup>, LIU Bin<sup>1,2</sup>, LUAN Zhendong<sup>3,4,5</sup>

(1. China Offshore Fugro GeoSolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518067, China; 2. Guangdong Offshore Oil and Gas Facility Inspection Engineering and Technology Research Center, Shenzhen, Guangdong, 518067, China; 3. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, CAS, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 4. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong, 266071, China; 5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

**Abstract:** After the underwater facilities of offshore oil and gas fields are put into production, in addition to coating protection, different cathodic protection technologies, such as sacrificial anode, ICCP (Impressed Current Cathodic Protection) or a combination of them will be adopted for various types of steel structure underwater facilities. The state of these anti-corrosion systems will affect the safety and service life of the underwater facilities. Through cathodic protection detection and assessment, the corrosion status of underwater facilities can be evaluated in time, the anomalies can be found early and remedial measures can be taken as soon as possible to ensure the long-term safe operation of the facilities. This article mainly expounds the basic principle of cathodic protection technology and the potential measurement technology of cathodic protection. The application of cathodic protection in various types of underwater facilities, the comparison and application of potential measurement technology are analyzed. The composition and application results of the Fugro Cathodic Protection Monitoring System (FCPMS) are mainly introduced, and the application trends of cathodic protection technology and potential measurement technology in the future are discussed.

**Key words:** underwater facilities; cathodic protection; remote operated vehicle; potential measurement; field gradient measurement

责任编辑: 唐淑芬