· 90 ·

DOI: 10. 13382/j. jemi. B2407587

基于电场检测的船表涂层破损仿真分析*

郑朴真 林 君 梁尚清1 张 栋²

(1. 杭州电子科技大学电子信息学院 杭州 310018;2. 杭州电子科技大学材料与环境学院 杭州 310018)

要:涂层的破损缺失是船体腐蚀的主要原因之一,但由于船体检测通常耗时耗力,检查的频率较低,因此提出一种快速检测 定位涂层破损的方法。利用外加电流的阴极保护系统与涂层破损引起的船体周围电解质电位的变化,通过测量船体周边两侧 对称位置处的水下电势差异来检测船体涂层破损。通过水下电场传递实验证实了基于电场特征信号对破损位置测距和定位方 法的可行性,并采用 COMSOL Multiphysics 物理仿真软件模拟了阴极保护电流产生的腐蚀电场及船体表面金属的电化学腐蚀过 程。通过分析船体两侧测量线段上的电位变化,可以发现船体涂层破损点位两侧水下电势差异明显最大,根据水下电场传递规 律分析测量线上电解质电势分布实现了对破损点位的纵向及横向定位,平均偏差分别为0.2 m 和0.21 m。同时,发现平均电位 大小与破损面积呈线性关系。这种方法具有高精度,且适用于纵向定位间隔3m以上的多点情况,规避了环境因素对检测的 干扰,可实现对船体涂层破损的早期快速检测,改善船舶的防腐管理。

关键词:船体腐蚀;涂层破损;外加电流阴极保护;水下电势;有限元分析 国家标准学科分类代码: 510.1040

中图分类号: TG174; TN80 文献标识码: A

Simulation study on hull coating damage detection based on electric field measurement

Zheng Puzhen¹ Lin Jun¹ Liang Shangqing¹ Zhang Dong²

(1. School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China;

2. School of Materials and Environment, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Hull corrosion is primarily caused by the deterioration of protective coatings. Given that inspections of hulls are both timeconsuming and labor-intensive, thereby conducted infrequently, this study aims to propose a rapid detection and localization method for hull coating damage. Using the changes about underwater electric potential caused by the impressed current cathodic protection system and coating damage, the location of the damage can be identified by measuring the potential difference underwater at symmetrical positions on the hull. Underwater electric field transmission experiments have confirmed the feasibility of methods for ranging and locating fault positions based on electric field characteristic signals. Additionally, COMSOL Multiphysics simulation software was utilized to model the corrosion electric field generated by the cathodic protection current and the electrochemical corrosion processof metallic surfaces on the hull. By analysing the potential variation along the measurement segments on both sides of the hull, it is observed that the underwater potential difference is notably largest around the damaged coating area. Based on the transmission characteristics of the underwater electric field, longitudinal and transverse positioning of the damage points have been achieved, with average deviations of 0.2 m and 0.21 m. Moreover, a linear relationship between potential magnitude and damaged area was observed. This method offers high accuracy and is suitable for longitudinal positioning of multiple points with intervals greater than 3 m. It mitigates environmental factors' interference with detection, enabling early and rapid detection of hull coating damage and improving corrosion management for vessels.

Keywords: hull corrosion; coating damage; impressed current cathodic protection; underwater electric potential; finite element analysis

收稿日期: 2024-06-08 Received Date: 2024-06-08

^{*}基金项目:浙江省自然科学基金(LHY22E080005)项目资助

0 引 言

航运行业对船体涂层的完整性有严格要求,因为船 体涂层破损可能导致严重的结构失效^[1],威胁到人员安 全、经济和环境。船体未涂敷涂料的部分,容易发生腐 蚀,损害结构完整性,缩短使用寿命;而涂层如果局部破 损,易引发点蚀和裂纹^[2]。船舶工业因此面临巨额的年 度维修成本。据 2014 年的估计,腐蚀相关费用总额估计 为 58 000 亿元人民币,占当时行业主收入总额的 9.16%^[3]。传统的涂层检测主要依赖肉眼观察,不仅效 率低,还可能存在漏检的情况。因此,迫切需要一种更快 捷有效的检测方法,以早期识别涂层损伤和金属腐蚀,从 而减少维修成本并延长船只的服务寿命。

随着图像处理和机器人技术的运用^[4-5],操控水下设 备对船体表面进行拍摄取样^[6-7],利用计算机视觉和水下 图像增强技术^[8-10]来检查分析金属表面状况的方法可以 作为肉眼观察的替代方案。此外,超声测厚技术也被应 用于以高精度测量涂层和船体、管道金属的厚度^[11]。尽 管这些方法提高了检测的准确性和效率,但水下图像检 测受限于环境因素如海水透光率,而超声测厚技术在操 作上要求高,过程繁琐。因此,现有的检测方法虽然能够 识别出一些船体损伤,但仍存在局限性,需要更多元化和 系统化的方法来全面评估船体涂层的状况。

在船体防腐方面,结合使用保护涂层和船体外加电流的 阴极 保护(impressed current cathodic protection, ICCP)系统可以有效增强防腐效果^[12]。一个有效的阴极 保护系统需要考虑船舶的形状、涂层系统的逐步损伤以 及动态航行状态,当涂层损坏时,阴极保护系统提供额外的保护,同时涂层破损会改变船体外部电场,影响周围电 解质的电位分布^[13-14]。

Thiel 等^[15]利用有限元法(finite element method, FEM)进行数值模拟,计算得到的水下电势(underwater electric potential,UEP)数据并定义涂层损伤的位置,输入 ICCP系统的电流和电位特征训练人工神经网络,通过模 拟数据预测涂层损伤的位置,并能以超过90%的准确率 预测损伤。Hu等^[16]则提出一种基于机器学习的涂层损 伤检测方法,计算损伤一侧的累积差分值,然后从水下 电场信号中提取特征,通过成对特征接近度降维,去除 冗余信息,最后用层次原型分类器分类检测,准确率分 别在模拟和测量的数据中为96.67%和92.00%。这些 方法利用了机器学习技术,提升了自动化处理的效率。 而处理精细化的区域检测和多点损伤识别时,模型的 准确性和人工神经网络的预测能力受到训练数据质量 和数量的限制。过拟合和欠拟合现象可能会影响最终 的检测成果。 针对传统船体涂层破损监测方法存在的计算量大、 效率低等问题,提出了一种基于水下电场测量的新方案。 根据 Wang 等^[17]的研究,航行状态下螺旋桨调制的轴频 电场信号频率极低(<7 Hz)^[18],船体电场强度会有一定 程度的增大,而分布特征不变。让船体匀速通过两个固 定的 Ag/AgCl 海洋电场电极传感器^[19],通过分析 ICCP 系统和船体表面涂层破损导致的 UEP 变化,实现对破损 位置的监测和定位。

这种基于电场测量的方法采用无损检测,非接触式 获取数据,避免海水透光率影响,提高了监测效率和精 度,同时减少了对数据和计算资源的依赖,为船舶维护提 供了有力支持。

1 系统模拟方法

1.1 ICCP 系统工作原理

船体腐蚀本质上是由于船体与海洋环境中海水、氧 气、海风等因素相互作用而导致的电化学反应。在这腐 蚀介质中,裸露的船表面易于发生电化学反应:

 $2H_2O + O_2 + 4e^- \rightarrow 4OH^-$ (1)

 $2Fe \rightarrow 2Fe^{2+} + 4e^{-} \tag{2}$

而 ICCP 系统的原理是通过施加外加电流,将船体金 属材料的电位降低到一定范围内,从而抑制电化学腐蚀 过程。系统中的恒电位仪持续监测参比电极的电位,并 根据监测结果调节阴极保护电流的大小。

在优化设计的 ICCP 系统中,辅助阳极布置在船体表面的不同位置,向周围的海水中释放保护电流,流向船体各个部位的阴极表面,在金属表面形成均匀的负电位分布。当船体表面的电位控制在-1.0 V~-0.8 V (vs. Ag/AgCl 电极)的范围内时,可以为船体提供有效的阴极保护,大大减缓腐蚀速率。这一电位范围能够有效抑制金属的阳极溶解,同时避免因过度保护而引起的氢脆问题^[20]。

船体上的辅助阳极释放保护电流,通过水介质流向 船体不同部分,如螺旋桨等推进系统附件周围^[21],保护 金属表面。当船体表面的涂层剥离时,由于船表的钢材 极化电位相比螺旋桨的铜合金更低,从而阴极保护电流 改变流向,从阳极流向受保护区,确保有效保护,如图 1 所示。

裸露的钢材表面在海水介质中作为电流流入的阴极时,氧浓度与腐蚀电化学反应相互影响^[22]。电极动力学 方程采用随浓度变化的 Butler-Volmer 方程:



Fig. 1 ICCP system principle

 m^2)为交换电流密度, E(SI 单位: V)为船表电势, $E_{eq}(SI 单位: V)$ 为平衡态电势, T(SI 单位: K)为热力学温度, z 为该电极反应中涉及的电子数目, F为法拉第常数 (96 485 C/mol), R为气体常数(8.314 J/(mol·K)), α_c 为阴极方向电荷传递系数。 α_a 为阳极方向电荷传递系数。通过这个方程更好地理解和预测海水中电化学反应的电荷转移。

1.2 参数方程设置

采用 COMSOL 物理仿真软件中考虑了电导率随电 位和浓度变化的二次电流分布模型,由于电解反应速 率有限导致额外的阻抗,电位差可能偏离其平衡值。 设置电极工作电位差 E_{et} (SI单位:V)和平衡电位差 E_{et} 的差值即活化过电位 η (定义为 $\eta = E - E_{eq}$)用来确保 电化学反应的进行。其中,Ag/AgCl参比电极与标准氢 电极(SHE)之间电位差约为 0. 197 V,在此基础上设置 平衡电位差为 0,定义了全局参考电位 $\phi_{s,ref}$ (SI单位: V):

$$\phi_{\rm s,ref} = E_{\rm eq} + \phi_1 \tag{4}$$

其中, ϕ_1 (SI单位:V)为电解质电位。而工作电位差 E_{et} 等于标准电极电势 $\phi_{\text{s,ext}}$ 和电解质电位 ϕ_1 之差:

$$E_{\rm ct} = \phi_{\rm s,ext} - \phi_1 \tag{5}$$

其中,设置标准电极电势 φ_{s,ext} 为-850 mV。在得到 电极电势后,为了模拟船体在海水中的腐蚀行为和轴 系电流的形成,使用了真实的极化曲线作为边界条件。 具体地,螺旋桨采用镍铝青铜(NAB)合金,艉轴采用 625 合金,船体表面则使用 HY-80 钢的极化曲线,如图 2 所示。

模拟中设定了船体涂层部分损伤,并假设极化电流 密度为100%,忽略钝化效应。考虑到轻微老化和涂层损 耗,模拟中对于螺旋桨和艉轴,设置了5%的均匀损伤以 模拟水流冲刷^[15]产生的较弱腐蚀电流的情况。考虑到 氧在海水中的传输受到表面传输速率的限制,电极动力 学表达式的极限电流密度 *i*_{lim} 为5 A/m²。通过材料实验



图 2 各个材料海水中的极化曲线

Fig. 2 Polarization curve of each material in seawater

极化数据 $i_{loc,expr}$ (SI 单位:A/m²)得到局部电极电流密度 i_{loc} 为:

$$_{\text{loc}} = \frac{i_{\text{lim}} \cdot |i_{\text{loc,expr}}|}{i_{\text{lim}} + |i_{\text{loc,expr}}|}$$
(6)

在电极和电解质域之间的界面上发生的电荷转移反 应会产生一个正常的电流通量,该通量等于所有反应电 流的总和。将电解质电位的边界条件设置为局部各个电 极反应电流密度:

$$\cdot i_1 = \sum_{m} i_{loc,m} \tag{7}$$

其中,**n**为法向量,方向指向域外部,*i*_{loe,m}(SI单位: A/m²)为第 m 处的电极反应电流密度,可以换算得到涂 层破损位置处的电势空间分布。

模型考虑了辅助阳极输出保护电流,使得辅助阳极 周边电解质电位 ϕ_1 与边界电解质电位相等 $\phi_{1,bnd}$ 。为了 均匀分布电流并避免过度保护,采用了涂层来防止电流 集中和析氢反应。模型假设阳极周边无损坏,描述船体 的单元边界不面向海水,施加以下等式模拟涂层的保护 效果:

$$\cdot i_{\mathbf{k}} = 0$$
 (8)

其中, i_k (SI 单位: A/m^2)为电流密度矢量,k=1,s分别是电解质和电极的索引。

在模拟船体电场变化过程中,定义与电解质域相邻 的外部边界存在无限延伸的电解质。结合使用欧姆定律 和电荷平衡:

$$_{1} = -\sigma_{1} \nabla \phi_{1} \tag{9}$$

$$\nabla \cdot i_1 = 0 \tag{10}$$

其中, σ_1 (SI 单位: S/m)海水的电解质电导率, $\nabla \phi_1$ 为电位的梯度。默认海水可近似为各向同性导电媒质, 介电常数为 80,电解质电导率 σ_1 为4 S/m^[23]。定义带电 离子在成分均匀的电解质中的传递,以及电极中的电流 传导。使研究的船体周围海域满足拉普拉斯方程,维持 电解质域上电流平衡。

2 水下电场传递规律验证

2.1 实验条件

船体涂层破损处作为阴极端流入保护电流,电流相 对集中,根据微分形式的欧姆定律:

 $J_1 = \sigma_1 E \tag{11}$

可知电解质中电场强度与电流密度成正比,腐蚀电 场结合衰减特性,破损产生的电场信号在电解质中具有 区域性,通过测量水下电位信号分布可定位破损点。

为验证该方法在实际海洋环境中的可行性,在一个 1 m 长的水槽中注入了 3.5%的 NaCl 溶液,以模拟海水 的电导率。采用等效源法以简化阴极保护流程,由铜丝 组成的直径为 5 mm 的小球作为阳极和阴极,连接信号 发生器来模拟辅助阳极和破损处,控制输出电流模拟电 偶极子对。测量传感器由一对相距 2 cm 的高灵敏度 Ag/AgCl 电极组成,测量电极对之间的电势差得到电场 模大小。

通过 COMSOL 软件的三维环境下 AC/DC 模块等比模拟实验环境,通过在端子节点输入实验得到的电流大小,计算得到电解质中的电流密度:

$$\int_{a} J_1 \cdot \boldsymbol{n} \, \mathrm{d}s = i_1 \tag{12}$$

通过式(11)可换算得到相应位置的电场模大小,通 过实验验证其仿真的准确性以及通过水下电场传递规律 对破损定位测距的可行性。

2.2 电场强度测距方法及其验证

在稳定环境下,由于海水电解质中电场强度关于距 离呈指数衰减,远离破损的电场强度会明显更小且对距 离变化不灵敏。将测量线段破损点处的电场强度根据电 场衰减推断出破损点的大致距离。

将一对施加 1 V 信号的阴阳极端子,放在水面下 4 cm 的位置,两者相距 7.5 cm,皮安计测得电流通过电 流稳定在 3.4 mA,如图 3(a)所示用传感器测量垂直于 两端子连线方向上距离阴极 4~10 cm(图 3(a)中直线 段)的电场强度,换算得到如图 3(b)所示的电场强度与 距离的关系图。COMSOL 上的等比模型在电流端子周围 的电场模数据与实验得到的水下电场模数据基本一致。 因此,在稳定环境下通过模拟 UEP 空间分布确定破损点 的距离是可行的。

2.3 电场特征定位方法

ICCP 系统在工作时,会导致涂层破损处、阳极和螺旋桨附近的电流密度增加,周围电解质内的电场强度也随之增大。为了准确定位破损点,需要考虑系统的影响,并采取相应措施减少干扰。通过设计对照组,可以在不同位置测量电场强度的差异。具体而言,对照组中涂层



Fig. 3 Analysis of electric field attenuation in seawater

完好无损的正常区域扮演着重要的基准参考角色。这些 区域距离破损点较远,涂层完整,电场强度通常较为平 稳,数值在一个相对稳定的范围内波动。而在疑似破损 区域,由于涂层受损,电场强度会出现明显的峰值,数值 远高于正常区域。通过分析电场强度差值,可以精确定 位破损点的位置。这种方法相比直接测量单点电位,能 够消除辅助阳极的干扰,提高检测的准确性和可靠性。

在上述实验装置中设置一条长度为 65 cm 的测量线 (图 4(a)的直线段),阳极放置在距测量线段 4.5 cm 的 位置,固定阴阳极端子间距,设置阴极端子距离测试线段 2 和 7 cm,施加 1 V 信号,测得电流稳定在 2.65 mA。利 用传感器对测量不同距离测量线上的电场变化。两组阴 极端子附近的电场强度存在较大的差异。通过对数据的 差值分析可以减少阳极对测量的影响,确保阴极的定位 结果准确性。在 COMSOL 软件上等比模型条件设置的 仿真结果与实验中电场模差值的分布曲线近似如图 4(b)所示。

实验结果表明,该方法通过测量不同位置的电场强度,可以有效地实现破损点的定位。为进一步仿真模拟 船体腐蚀情况及定位破损点提供了重要依据。

3 船模仿真结果分析

3.1 船模设定

为了模拟实际船体的电化学保护过程,首先定义了 一艘简化的船模,水下尺寸为 50 m×12 m×4.5 m。建立 了以船尾向船首的方向为 x 轴,龙骨向左舷的方向为 y



Fig. 4 The mechanism of longitudinal axis positioning

轴,竖直向上为z轴的空间坐标系。考虑到船体相比海 水的高电导率,内部电势差被视为0,简化内部建模。为 了精确捕捉船体在 ICCP 系统下的电场变化,设置了沿x 轴方向延伸70 m 的测量线段,位于龙骨两侧 10 m,水下 5 m 处。这些测量线段用于模拟如图 5 所示的船体涂层 破损检测方法。在仿真中获取船体匀速通过两端电场传 感器时,由 Ag/AgCl 海洋电极对测得的 UEP 信号。



图 5 船体涂层检测方法 Fig. 5 Methods for testing hull coatings

利用 COMSOL 的自适应与误差估计对三维模型网格进行细化和修正。离散化的精细程度影响有限元分析的准确性和可靠性。对测量线段以及船体附近区域进行了精细划分,以提高周围海域的电势分布准确性和对称性,减小计算误差,确保准确捕捉到涂层损伤引起的电场变化,如图 6 所示。



图 6 三维坐标轴与细分网格剖视图 Fig. 6 Three-dimensional coordinate axes with subdivided grid cross-section view

3.2 破损纵轴定位

在上文中验证了破损点附近的电流密度增大、电场 强度峰值显著的特征。为了获取船舶电场强度的空间分 布,在船舶龙骨下方测量一段线段上的信号大小。这种 方法能够有效地反映金属腐蚀对船体周围 UEP 的影响。 但由于干扰源的存在,需要额外记录对照数据进行分析, 在应用中会相对繁琐。

考虑到船体对称且涂层完整,船舶两侧电场强度受 辅助阳极和螺旋桨影响是对称的,当涂层发生破损时,船 舶两侧的电场强度将呈现出明显的差异,形成一个突变 的峰值。通过测量破损点附近两侧的电场强度,可以发 现电场强度差值在破损点附近达到最大。因此,通过分 析电场强度差值的分布特征,可以准确地确定破损点在 纵轴方向上的位置。

为了验证这种方法的有效性,进行了简化船模的仿 真测试。图7为水下5m的电解质电位数据和分布图, 当船体涂层完整时,两侧的电位信号和水下电解质电位 分布相同,理想差值为0。当涂层发生0.5m²破损时,破 损点附近的电场强度差值最大,指向了破损点的位置。 为了进一步验证了该方法的适用性,在进行船体涂层破 损定位的仿真中,设置螺旋桨叶的涂层完好,然后在船舷 一侧靠近水面的位置添加一个矩形破损区域,其面积为 固定值(例如0.25m²)。接着,沿着船身纵向每隔2m 移动一次,改变破损点的位置,分别在船体正下方和船体 两侧测量电场强度的大小,并记录破损点的纵轴坐标。

从图 8 中可以得知, 双边差分测量相对于单线段测量(以船体下方为参照)具有明显的优势, 特别是在数据处理和测量准确性方面。由于螺旋桨和破损点均为系统的阴极, 当阴极电流增大时, 螺旋桨附近的电位变化较大, 可能导致单线段测量的偏差增加。特别是当破损点靠近辅助阳极时, 保护电流可能会削弱破损点的电位信号, 导致定位偏差。尤其是当螺旋桨处的破损面积增大时, 轴系电流的干扰作用会增强, 单线段测量与对照数据的比对将变得困难。

双边差分法通过船体两侧辅助阳极周围电解质电位



Comparative analysis of electrolyte potential data and distribution maps based on coating integrity



Fig. 7

Fig. 8 Comparison of two measurement methods

基本相等,螺旋桨处阴极电流对称,将对称位置的 UEP 信号作为参考,有效规避了轴系电流的干扰。得到的峰 值位置与实际腐蚀位置呈线形相关,斜率接近1(0.998), 与实际破损位置高度吻合,平均偏差仅为0.2 m,比单线段 测量方法更精确。在实际应用中,两边差分测量不仅简化 了数据处理过程,而且提供了更准确可靠的破损定位结 果,对于船体的维护和修复具有重要意义。

3.3 破损横轴定位

已知了破损点在纵轴上的位置,要确定其在横轴上 的位置,根据电场衰减关系,需要分析两侧电位差的峰值 大小。在简化船模不同位置检测差值峰值与破损点位置 的关系。在每个测试点,将 0.25 m²的破损点沿船体表

面移动,得到两侧 UEP 差值的峰值大小,绘制出破损点 横向关系图,如图9所示。其中两侧得到的 UEP 差值受 船体形状影响,与2.2节中电场衰减有所差异。





图 9 显示了破损点 γ 轴位置与电位差值的关系。在 大部分区域,破损点在 y 轴位置的移动引起的电位差值 变化较为线性,每移动1m大致增加1.1mV。由于破损 靠近阳极,保护电流变小,观察到在阳极附近时电位差值 变化减小,呈现非线性趋势,但仍单调递增,如图9所示。 破损点在船尾时,由于螺旋桨和艉轴的阴极作用,导致电 位差变化量较小,每移动1m大致增加1mV。船模整体 测得的电位差值转换到 y 轴上与实际点位的平均差值为 0.21 $\,m_{\,\circ}$

3.4 破损面积判断

船体金属腐蚀,这一过程参比电极提供的参考电位 φ_{s,ref} 会升高,通过监测参比电极和被保护结构之间的电 位差,ICCP 系统调整输出的保护电流,使周围区域电解 质电位整体下降。在此基础上,如果破损面积增加时,阳 极输出电流也会增加,周围海域的电解质电位进一步下 降。通过监测海水电解质电位的变化,可以间接发现船 体是否存在破损,以及评估船体涂层破损情况。



Fig. 10 Damage area was estimated by average potential

由于不同局部位置的破损对参比电极周边的电解质 电位的影响不同,因此为了评估方法的适用性,在远离参 比电极的位置(x = 40 m)和靠近参比电极的位置(x = 20 m)设置一系列面积($0.03 \sim 1$ m²)的涂层破损区域。 通过式(9),将电流大小换算得到电解质电位。取两段 测量线段上的电位信号平均值,拟合出图 10 所示的电解 质平均电位大小与破损面积的相关曲线。当破损面积每 扩大 1 m²,测量得到的平均电位大致呈线性下降 0.2 V。 其中破损位置更靠近参比电极会影响参考电位 $\phi_{s,ref}$,电 解质电位下降更快。

3.5 多个破损点的定位

在单点破损情况下,依据测量得到的平均电位大小 判断涂层破损面积,再两边差分方法对破损点定位测距 是一种有效的策略。然而实际情况中,船体涂层可能会 出现多点破损的情况。在多点破损情况下,判断涂层破 损的复杂性增加了。在两个破损点大小一致都为 0.25 m²情况下,当固定船舷一侧的破损点,移动另一处 的破损点位置,在船体两侧获得如图 11(a)所示的电位 信号差值。

在破损点相距较远时,可以在电位信号差值中观察 到两个明显的用于定位的峰。破损间距小于 8 m 时,电 位信号叠加,失去双峰特征,难以准确反映其独立位置, 可以将分散较近的几处点视为整个破损点,通过得到中 心点判断位置。由于单点半峰全宽(full width at half-



maximum,FWHM)约为15m,根据FWHM与破损点间距的关系(如图11(b)所示)可知,当破损点间隔3m以上时,FWHM增量大致与间距增量相等。通过确定中心点位置后,进一步利用FWHM得到破损点间距,从而得到更精确的破损位置,采取适当的措施进行修复或维护,以确保正常运行和安全性。

4 结 论

利用水下电位的空间分布进行船体破损无损检测已 经通过实验及模型仿真验证了可行性。该方法通过双边 差分测量电解质电位,利用电场强度差异最大处纵向定 位,以及差值大小进行横向定位,实现了对船体涂层破损 的无损检测。这种方法在横轴及纵轴定位上有较高的准 确性,并且能够估计破损面积的大小,同时能够处理多点 破损的复杂情况。

此外,该方法适用于浮船检测,对船期的干扰较小, 检修周期较短,比传统船坞检验更经济,并避免了海水透 光率的影响。采用非侵入式检测,极大程度地减少了对 昂贵设备和耗时程序的需求。相较于固定在船体上的测量方式,该方法可以面向更多的船舶进行破损点定位,更 具经济价值。综合而言,该无损检测方法具有非破坏性、 全面性、实时性和经济性的优势,尽管如此,该方法仍面 临技术挑战,如精确测量微小破损的电位差异、处理船体 电场干扰以及在涂层破损不明显或破损位置恰好在测量 线段正中线时的测量难度。未来可以通过改进算法和 传感器布局来提高检测精度,并发展多点破损的高精 度定位技术。此外,开发新模型以估算船体腐蚀速率 将有助于更准确地预测和管理长期维护需求。这些改 进将优化维护策略,降低运营成本,并提升船舶安全性 和耐用性。

参考文献

- [1] DONG Y, GARBATOV Y, SOARES C G. Review on uncertainties in fatigue loads and fatigue life of ships and offshore structures [J]. Ocean Engineering, 2022, 264: 112514.
- [2] LIN B R, LI X G, MA X M, et al. Ship hull inspection: A survey[J]. Ocean Engineering, 2023, 289: 116281.
- [3] HOU B, LI X, MA X, et al. The cost of corrosion in China[J]. npj Materials Degradation, 2017, 1(1): 4.
- [4] MUTHUGALA M A V J, SAMARAKOON S M B P, ELARA M R. Toward energy-efficient online complete coverage path planning of a ship hull maintenance robot based on glasius bio-inspired neural network [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 187: 115940.
- [5] WU H Y, CHEN Y L, YANG Q M, et al. A review of underwater robot localization in confined spaces [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(3): 428.
- [6] KIM B C, KIM H C, HAN S H, et al. Inspection of underwater hull surface condition using the soft voting ensemble of the transfer-learned models [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2022, 22(12): 4392.
- [7] KIM H C, KIM B C, PARK Y. Cleaning condition inspection of underwater hull surface images using a convolution neural network [J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, 2021, 45(9): 817-823.
- [8] 李国民,邵姮,朱代先,等.改进同态滤波与多尺度融合的腐蚀图像增强[J].电子测量技术,2024,46(13):118-123.

LI G M, SHAO H, ZHU D X, et al. Improved homomorphic filtering and multiscale fusion for corroded image enhancement [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 46(13): 118-123.

[9] 林森,周天飞,查子月. 基于通道量化与红色先验融合

的水下光学图像清晰化[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(2): 110-120.

LIN S, ZHOU T F, ZHA Z Y. Underwater optical image sharpening based on fusion of channel quantization and red prior [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(2): 110-120.

- [10] 王海涛,林森,陶志勇.双注意力机制与改进 U-Net 的水下图像增强[J]. 电子测量技术, 2024, 46(1): 181-187.
 WANG H T, LIN S, TAO ZH Y. Underwater image enhancement based on dual attention mechanism and improved U-Net [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 46(1): 181-187.
- [11] 王晓娟,杨帆,王错,等.面向超声导波检测的管道 腐蚀建模及仿真实现[J].仪器仪表学报,2023, 44(5):71-80.
 WANG X J, YANG F, WANG C, et al. Pipeline corrosion modeling and simulation for guided-waves-based inspection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44(5):71-80.
- [12] XU L, XIN Y, MA L, et al. Challenges and solutions of cathodic protection for marine ships [J]. Corrosion Communications, 2021, 2: 33-40.
- [13] KALOVELONIS D T, RODOPOULOS D C, GORTSAS T V, et al. Cathodic protection of a container ship using a detailed bem model[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(5): 359.
- [14] GURRAPPA I, YASHWANTH I V S, MOUNIKA I. Cathodic protection technology for protection of naval structures against corrosion [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences, 2015, 85(1): 1-18.
- [15] THIEL C, NEUMANN K, LUDWAR F, et al. Coating damage localization of naval vessels using artificial neural networks[J]. Ocean Engineering, 2019, 192: 106560.
- [16] HU Y CH, WANG X J, WANG SH CH, et al. Coating damage detection of vessels using machine learning-based underwater electric field [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7956-7967.
- [17] WANG X J, WANG SH CH, HU Y CH, et al. Electric field trends of vessels in navigation [J]. Ocean Engineering, 2024, 294: 116834.
- [18] 李婧,韩鹏,朱莹.一种改进的随机共振技术在舰船 轴频电场信号检测中的应用[J].国外电子测量技 术,2021,40(4):130-134.

LI J, HAN P, ZHU Y. Application of an improved stochastic resonance technique detecting ship's shaft-rate electric field signal [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2021, 40(4): 130-134.

[19] 申振,宋玉苏,王烨煊,等. Ag/AgCl 和碳纤维海洋 电场电极的探测特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(2): 211-217.

SHEN ZH, SONG Y S, WANG Y X, et al. Study on the detection characteristics of Ag / AgCl and carbon fiber marine electric field electrodes [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(2): 211-217.

- [20] XING S H, LI Y, SONG H Q, et al. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel [J]. Ocean Engineering, 2016, 113: 144-150.
- [21] 刘春阳, 汪小娜, 王向军, 等. 螺旋桨涂层对潜艇水 下静电场影响仿真分析[J]. 中国舰船研究, 2018, 13(S1): 182-188.

LIU CH Y, WANG X N, WANG X J, et al. Simulation analysis of the influence of propeller coating on the underwater electrostatic field of submarines [J]. Chinese Ship Research, 2018, 13(S1): 182-188.

- [22] WANG X J, WANG SH CH, HU Y CH, et al. Mixed electric field of multi-shaft ship based on oxygen mass transfer process under turbulent conditions [J]. Electronics, 2022, 11(22): 3684.
- [23] KALOVELONIS D T, GORTSAS T V, TSINOPOULOS S V,

et al. Accelerated boundary element method for direct current interference of cathodic protections systems [J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111705.

作者简介



郑朴真,2022年于陕西科技大学获得 学士学位,现为杭州电子科技大学硕士研究 生,主要研究方向为海洋电场检测。 E-mail: 222040267@ hdu. edu. cn

Zheng Puzhen received his B. Sc. degree

from Shaanxi University of Science &

Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in Hangzhou Dianzi University. His main research interest includes ocean electric field detection.



林君(通信作者),2007年于浙江大学 获得学士学位,2013年于浙江大学获得博 士学位,现为杭州电子科技大学讲师、硕士 生导师,主要研究方向为电化学传感、海洋 电场探测。

E-mail: junlin@hdu.edu.cn

Lin Jun (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhejiang University in 2007, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2013, respectively. Now he is a lecturer and M. Sc. supervisor in Hangzhou Dianzi University. His main research interests include electro-chemical sensing and ocean electric field detection.