

智能化检测技术提升船舶船体防腐运维效能的实践研究

王益飞

上海中远海运重工有限公司, 上海 201913

DOI:10.61369/ME.2026050032

摘 要： 船体外板、压载水舱与焊缝邻域长期承受盐雾、海水和交变载荷作用，局部涂层失效往往早于定期坞修节点。面向船舶在役防腐管理，将机器视觉、超声测厚、涡流与电场信号编入同一检测任务，建立部位编码、缺陷分级、复测规则和维修派工的数据衔接方式。实践方案以广域图像筛查确定疑似区，再用定点无损检测核验基材剩余状态，依据缺陷面积、程度和扩展趋势安排处置时序。这一做法可减少重复开舱与无效打磨，使检测记录直接服务于防腐决策。

关 键 词： 智能化检测；船体防腐；无损检测；运维管理

Practical Research on Enhancing the Anti-corrosion Maintenance Efficiency of Ship Hulls through Intelligent Detection Technology

Wang Yifei

COSCO Shipping Heavy Industry (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201913

Abstract： Hull plating, ballast tanks and welded zones are exposed to salt spray, seawater and cyclic loads, while local coating failure may occur before a scheduled docking interval. For in-service corrosion maintenance, machine vision, ultrasonic thickness measurement, eddy-current sensing and electric-field signals are organized in one inspection task. The proposed practice links location coding, defect grading, reinspection rules and maintenance work orders. Wide-area image screening is used to locate suspected zones, followed by point-based nondestructive examination of the remaining substrate condition. Repair priority is assigned according to defect area, depth and propagation tendency. This workflow reduces repeated access and unnecessary surface treatment, and turns inspection records into direct evidence for corrosion-control decisions.

Keywords： intelligent inspection; hull corrosion protection; nondestructive testing; maintenance management

引言

传统船体防腐检查多依靠坞修期间的目视观察和局部测厚，记录常以照片、纸质表单与单机数据分散保存。检测人员能够发现锈斑、起泡和涂层脱落，但同一位置的历史状态难以连续比对，维修人员也无法从一张图片中直接判定打磨边界、复涂范围和复检时点。智能化检测的工程价值不在于单一仪器替代人工，而在于把“发现异常—定量核验—分级派工—修后复测”连成可追溯作业链。

一、船体防腐运维的检测对象与数据基线

（一）按腐蚀环境划分检测单元

船体防腐任务不宜只按左舷、右舷或舱室名称分类，还要把浸水时间、通风状态、积水可能性和结构形态写入检测单元。外板水线带、压载舱顶部纵骨、舱底积水区、焊缝热影响区和异种金属连接处分别建立编码，每个编码下保留总览图、近景图、涂层状态、测厚点和上次处置日期。检测网格可以舱段为一级单元，以肋位与纵骨交点为二级定位，对高风险节点再设置3个以上复核点。船体结构的防腐方式需同时考虑涂层、阴极保护和结构细节之间的配合关系^[1]。完成编码后，新一轮记录才能与历史照片和仪器数据对齐，避免用“舱底附近”一类模糊描述指导

维修。

（二）形成可比对的初始状态档案

初始状态档案应在涂层表面清洁、光照和拍摄距离基本可控的条件下建立。总览照用于记录缺陷在构件上的相对位置，近景照应放入尺度标识，并用固定色卡降低色温变化对锈蚀区分割的影响。无缺陷位置也要保留1组基准图和厚度记录，不能只收集异常样本。每组数据至少包含部位编码、时间、仪器编号、操作人、表面处理状态和原始文件地址等6类字段。基于电场信号的船表涂层破损识别能够表征不同破损位置的响应差异^[2]。对这类数据应保留原始波形与阈值版本，算法更新后可以重新计算，而不必重复进舱采样。

二、多源智能化检测的现场作业方法

（一）机器视觉完成广域缺陷筛查

广域筛查负责回答“哪些位置需要近距离复核”，而不直接代替涂层和基材判定。爬壁载体或手持稳定器沿编码网格完成拍摄，相邻图像保留约20%的视野重叠，对曲面、焊缝和加强材背面分别调整补光角度。图像预处理先校正畸变与亮度，再分割起泡泡、裂纹、脱落和锈斑区，输出缺陷边界、面积占比和置信度。DeepLabv3+类语义分割方法可对船体结构腐蚀图像进行像素级识别，但实船光照、污渍和水膜会改变输入特征^[9]。因此，低置信度区、边界不连续区以及与历史图像差异突增的区域统一进入人工复核清单。现场人员只需对清单所指的位置进行清洁、标记和定点检测，可避免全舱无差别打磨后才寻找缺陷。

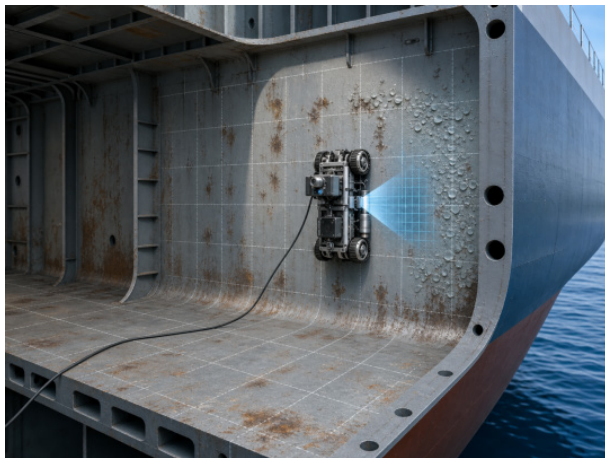


图1 船体舱内爬壁装置广域巡检示意

（二）超声测厚与无损检测核验基材

图像中的锈色和脱落边界只反映表面现象，处置方式还取决于钢板剩余厚度、点蚀程度与缺陷延伸方向。测厚前在疑似区中心、边界和外延正常区布置不少于5个点，同一点连续取3次稳定读数，原始回波、耦合状态和探头频率随结果一并保存。超声测厚在船体腐蚀检测中具有单面接近的作业特点，表面粗糙、涂层厚度和耦合状态会影响波形判读^[4]。当回波不稳定、局部几何形状不利于直探头布置时，可改用小尺寸探头或另选邻近点交叉验证。焊缝附近、重要承载构件和海水管系连接处则根据材料与缺陷类型选用渗透、磁粉或涡流复核。船舶金属材料无损探伤需将检测方法与可疑缺陷的位置、方向和材料磁性相匹配^[9]。多方法结果不一致时，不直接取最严重的一项下结论，而是复核定位、校准与表面处理记录后再判级。

（三）电场与涡流信号识别隐蔽异常

压载舱边角、管系支架根部和涂层下方异常不一定具有明显视觉特征，可用电场或涡流阵列对重点带进行二次扫查。作业前在已知完好区和可模拟破损区各取一组对照信号，记录探头间距、扫查速度、涂层表面水膜和温度状态。现场建议将重要带分为长度不超过2 m的作业段，每段至少完成正向与反向两次扫查，用来识别运动速度造成的伪差异。信号异常若与图像分割边界重合，则将该位置列为精细测厚点；若仅信号异常而表面完好，则保留原涂层，用不破坏的方式复测。检测数据必须与作业段编码

绑定，单独保存一张无位置信息的波形图不能进入派工判定。

三、检测结果转换为防腐运维任务

（一）用缺陷组合信息实施风险分级

缺陷分级不能只看锈蚀图像的颜色或面积，应同时读取涂层破损边界、基材厚度差异、所在构件的承载属性和历史扩展记录。运维可设A、B、C三级：A级为重要构件上的活性腐蚀、快速扩展缺陷或多方法均报警位置，需在24 h内组织专业复核；B级为局部涂层失效且基材信号稳定的位置，可纳入7 d内的维修窗口；C级为轻微粉化、无扩展记录且无损信号正常的位置，保留监测即可。表中时限为运维方案设定值，实船应根据船级、结构位置和管理制度校核。海洋环境下的腐蚀检测与防护质量监理需要把检查结果落到具体防护工序和验收记录^[9]。分级结果由系统输出判据字段，不只给出一个颜色标记，便于维修负责人追查该等级来自哪幅图像和哪组仪器信号。表中编码1至6依次对应A1、A2、B1、B2、C1、C2六类处置路径。

表1 船体防腐缺陷分级与处置时限设定

等级编码	报警方法数 / 项	复核时限 / h	复测周期 / h	证据数 / 件
1	3	24.000	24.000	6
2	2	24.000	48.000	5
3	2	168.000	168.000	5
4	1	168.000	336.000	4
5	1	720.000	720.000	4
6	0	720.000	720.000	3

（二）自动生成可执行的维修工单

风险等级只有转化为可执行工单，才能改变防腐作业节奏。工单自动带入舱段与构件编码、缺陷截图、外扩边界、建议处理类型、安全条件和复检项目。对仅有涂层局部破损且基材状态稳定的位置，工单限定打磨与补涂范围；对已出现厚度异常或裂纹信号的位置，工单不预设维修方法，而是转交船体专业人员审核。同一舱室的任务可按脚手架、通风、表面处理和涂装条件进行合并，但不得因为工单合并而丢失单个缺陷编码。现场接单时扫描编码，确认位置后才显示作业内容；结束时上传处理边界、材料批次、环境记录和完工照片。这种双向绑定可防止检测报告在派工时被二次转抄，也便于识别某类涂层或某个作业班组的重复缺陷。



图2 多源检测结果转换为维修派工示意

（三）修后复测与数据条件对齐

防腐工单关闭前必须回到原检测单元完成复测，并使用与初始记录一致的定位和采样条件。涂层处置后拍摄总览与近景图，核对处理边界是否覆盖缺陷外延区；涉及基材的任务复测原定位点，不用邻近正常点替代。新旧数据的对比字段包括缺陷面积变化、异常信号是否消失、复发间隔和二次开单原因。运维绩效可以“首次发现到复核”、“复核到开单”和“完工到复测”3个时间段分别统计，而不把所有时间压成一个平均值。对同一位置在12个月内重复开单2次以上的情况，取消普通补涂路径，转入表面处理、材料选型、阴极保护或结构积水原因的专项复查。这些时间窗口和次数均为方案设定值，使用时需结合船舶营运计划调整。

复测不只验证表面是否已被新涂层覆盖，还要检查修复边界外的原始异常是否继续延伸。对图像类缺陷，使用相同焦距、拍摄距离和光照方向重拍，并保留未裁剪原图；对测厚类缺陷，按原点位图找回中心点和边界点，每点至少取3次稳定读数。若处置过程改变了表面状态，新读数与原读数之间不直接计算改善比例，而是先记录耦合条件、涂层厚度和仪器设置的差异。对无法恢复同等采样条件的位置，复测结论标记为“条件改变”，不将其与普通复检结果混合统计。

（四）运维时效与重复缺陷分析

运维时间应按责任界面分段记录。检测系统生成疑似点的时间、人工复核完成的时间、工单批准时间、现场开工时间和复测完成时间分别入库。当任务因船期、气象、通风或舱内其他作业停顿时，记录停顿开始、结束和原因代码。统计检测到处置的时长时，分别给出自然时长和可由防腐管理控制的作业时长。两个值的差异可帮助管理人员判断问题在于数据复核、资源等待还是船期冲突，避免把不同原因都归结为检测设备速度。

重复缺陷分析要回到部位、材料和工序三类条件。系统按部位编码汇总同一区域的开单次数，再对照补涂材料批次、表面处理方式、作业环境和班组。如果多个舱室使用同一材料批次后出现相似起泡，转入材料与施工条件复查；如果缺陷只在某一积水区复发，则检查排水、结构死角和阴极保护状态；如果仅某一班组的补涂边界出现连续返工，优先核打打磨范围、清洁和涂装间隔记录。归因过程必须保留对照证据，不根据单个工单直接归责。

（五）绩效抽查与数据接口保障

防腐运维绩效的月度复核可设定5类记录：检测覆盖单元数、疑似点复核数、按时关闭工单数、超期原因和同位置复发次数。覆盖单元数只统计实际完成采集且文件可读的编码，因遮挡、安全条件或设备故障未完成的单元单列。每月随机抽取不少于5个已关闭位置，从原始图像、仪器读数、分级判据、完工证据到复测结论逐项核对。当某一字段连续缺失时，修正采集端必填规则，不在月报中追加估算值。上述抽取数为管理方案设定值，船舶数

量和工单规模变化时应重新校核。

数据接口的可用性直接影响检测结果能否进入维修。图像文件、测厚数组、涡流波形和工单平台使用同一部位编码，时间统一保留时区和到秒的采集时刻。上传前检查文件完整性，上传后返回存储标识，任一文件失败时保留本地副本并记录重传次数。现场网络中断时允许离线采集，但不允许在未同步数据上直接关闭工单。系统对超过2次未成功上传的记录生成设备检查任务，核对存储空间、文件格式和网络状态。上述重传次数为方案设定值，可根据船上通信条件调整，但需保留改动版本。

（六）人员设备与应急任务闭环

人员能力复核与设备校准使用同一任务清单管理。新操作人员在已知缺陷试板上完成图像采集、测厚与定位后，再进入实船作业。每次任务开始前检查相机、补光、探头、耦合剂、位置标识和离线存储六类状态，结束后核对文件数与作业单元数。设备超过校准日期、对照件结果异常或原始文件缺失时，当次记录不进入自动分级。管理人员每季度抽查1次记录与现场位置的一致性，重点检查复发缺陷、人工改级和重复上传记录。季度频次同样属于管理设定，不代替船级或企业制度中的强制要求。

对应急修理任务，智能化检测仍要保留最小证据组。当现场无法完成全部图像和仪器采集时，至少保留部位编码、异常近景、总览定位、一组有效仪器读数、处置人和处置时间等6项内容。修理完成后48 h内补齐常规复测，若船期不允许，则登记下一可接近窗口和临时巡检频次。紧急状态不能成为删除原始数据或跳过后续复测的理由。对多次以应急方式处理的同一区域，在下次坞修前组织专项评审，重新判断结构细节、防腐方案和检测可达性。上述48 h为运维设定窗口，使用时依船舶安全管理要求调整。

四、结语

智能化检测技术用于船舶船体防腐运维，需要把图像、测厚和电磁信号放到统一的部位编码与作业时序中。广域筛查缩小定点检测范围，无损检测用于核验基材状态，缺陷组合信息则决定复核时限和派工路径。工单中保留原始数据、判据和修后记录，可以辨别缺陷是否复发，也能发现补涂材料、表面处理或积水环境中的持续问题。这类作业链的成效应由检测覆盖、复核时间、重复开单和修后复发等记录判定，不以设备数量或算法名称代替运维结果。后续管理应优先核对未覆盖单元、人工改级记录与重复开单位置，根据复发原因调整巡检路径、检测方法和维修窗口。当数据条件不一致时，保留条件差异而不强行合并结论，使每一次处置都能回到具体位置和原始证据。记录完整并完成复核后，方可关闭对应任务。

参考文献

- [1] 陈启超, 吕志云. 船体结构的腐蚀防护技术研究 [J]. 船舶物资与市场, 2025, 33(1): 8-10.
- [2] 郑朴真, 林君, 梁尚清, 等. 基于电场检测的船表涂层破损仿真分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 90-98.
- [3] 向林浩, 方昊昱, 周健, 等. 基于 DeepLabv3+ 的船体结构腐蚀检测方法 [J]. 船海工程, 2024, 53(2): 30-34.
- [4] 董艳冲. 超声波测厚在船体腐蚀检测中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(12): 42-44.
- [5] 李仕麒, 张亚东. 船舶制造中金属材料无损探伤检测技术 [J]. 中国科技信息, 2024, (17): 91-93.
- [6] 苏泽新. 海洋环境下船体结构腐蚀检测与防护质量监理策略研究 [J]. 水上安全, 2025, (19): 151-153.