海洋环境下船舶电气设备接线端子锈蚀机理分析与防护策略研究

牛浩平　王　鹏

郑州机电工程研究所　河南　郑州　450000

摘　要：船舶电气设备的接线端子在复杂海洋环境下，常会受多场耦合影响出现腐蚀失效。本研究结合现场实测与加速腐蚀试验，建立了电偶、湿热、振动共同作用的分析模型，阐明高湿度环境下氯离子加速腐蚀的内在机理。经电化学测试与仿真分析，确定了关键点蚀电位阈值，并据此研制出 Ni-Sn 纳米复合涂层与双层密封结构，具备高效自修复与高等级防护性能。同时运用数字孪生与动态算法搭建在线监测系统，状态识别与寿命预测精度较高。整体成果为提升船舶电气连接可靠性提供了实用技术支撑，也促进了多维度一体化防护体系的发展。

关键词：海洋环境；船舶电气设备；接线端子；锈蚀机理；防护策略

引言

船舶电气设备的接线端子长期处在海洋高湿、高盐、温度频繁变化的恶劣环境中，很容易出现电化学腐蚀和材料老化问题，直接影响电气系统稳定，甚至危及航行安全。在实际运行过程中，这类端子会同时遭遇电偶腐蚀、点蚀、应力腐蚀开裂以及锡晶须生长等多种失效形式。其中，镀锡层表面钝化膜破损、接触面剥离，是造成接触电阻不稳定、设备性能下降的主要原因。目前相关研究大多只针对单一腐蚀机理或理想环境展开分析，很难真实反映盐雾、温湿、振动共同作用下的腐蚀发展过程。特别是对镀锡铜端子界面破损、蚀坑形成以及电阻变化等核心问题，还缺少完整深入的研究与认识。

1 研究背景与科学问题

海洋环境对船舶电气设备的长期可靠性构成严峻挑战，其中接线端子作为电能传输的关键连接部件，其失效直接威胁系统安全运行。当前关于接线端子腐蚀行为的研究仍以单因素控制实验为主，缺乏对真实服役条件下多物理场耦合作用机制的系统解析，导致防护策略难以实现精准适配与全生命周期管理。尤其在复杂海况下，温湿度波动、盐雾沉积、机械振动及电化学反应的协同效应显著加剧材料劣化速率，亟需从环境-结构-材料-监测四维角度重构失效分析范式。

1.1 海洋环境特征与腐蚀风险

海洋大气环境具有高湿度、高氯离子浓度、周期性温湿交替及持续机械振动等典型特征，显著促进接线端子表面电解质膜的形成与稳定。研究表明，局部区域相对湿度可长期维持在 98%以上，为氯离子吸附与扩散提供理想介质，加速点蚀与缝隙腐蚀的发生。在典型近海平台工况中，氯离子浓度可达 1.2-1.8mol/L，且在湿-干交替循环作用下，电解质膜反复形成与蒸发，诱导局部浓缩效应，显著提升电化学反应驱动力。此外，船舶航行过程中的持续振动导致接线端子接触界面微动磨损，进一步破坏保护层完整性，为腐蚀介质侵入提供通道，形成“腐蚀-损伤-失效”的正反馈机制。

1.2 典型失效模式与机理差异

不同服役场景下接线端子的失效模式呈现显著异质性。在近海平台环境中，应力腐蚀开裂（SCC）与锡晶须生长为主要失效形式，尤其在高应力区域与镀层界面处频繁发生；远洋船舶则以材料电偶腐蚀与界面剥离为主，特别是铜-锡合金与钢制端子间的电位差引发的电化学反应，导致界面脱粘与局部氧化。高湿盐雾环境下，镀锡层易发生脱附现象，造成接触面积减小与接触电阻上升，长期运行下电阻漂移可达原始值的 1.5 倍以上，显著影响信号传输与电力传导效率。这些差异揭示了环境因素在材料行为演化中的主导作用，也表明单一环境参数不足以解释真实失效路径。

1.3 现有研究局限与突破方向

现有研究多聚焦于单一环境因素下的加速腐蚀试验，或静态条件下的电化学行为分析，缺乏对湿热、盐雾、振动等多场耦合效应的系统建模。例如，多数实验室试验无法模拟真实海洋环境中温湿交替与动态载荷的协同作用，导致结果与实测数据偏差显著。同时，防护策略普遍依赖经验性设计，尚无统一的量化评估标准，

难以支撑全生命周期可靠性预测。近年来虽有研究尝试引入多物理场仿真，但多数仍局限于两维耦合或理想边界条件，缺乏对实际服役状态的动态响应机制建模[1]。因此，亟需构建融合环境-结构-材料-监测的四维协同分析框架，以实现对腐蚀演化过程的多尺度、全周期解析。该框架应具备动态输入能力，能够集成实时监测数据，支持基于数字孪生技术的在线预警与寿命推演。当前研究虽已初步验证“电偶-湿热-振动”三场耦合模型在短期预测中的有效性，其误差控制在 12%以内，但模型对长期非稳态环境适应性仍待验证。未来需结合 3 年以上实测数据，深化多场耦合机制研究，推动智能监测系统在船舶电气系统中的工程化部署，为实现全系统可靠性管理提供可量化的技术路径。

2 多场景腐蚀机制与防护策略对比分析

2.1 典型场景腐蚀特征分析

不同服役场景下接线端子腐蚀机制差异显著，反映环境复杂性对材料行为的深刻影响。中性盐雾与交变湿热条件主要诱发电偶腐蚀与点蚀协同作用，其机理源于电解质膜在金属表面的持续形成与破裂，导致局部电位波动，加速阳极溶解。在近海平台等高湿、高盐、温变剧烈环境中，应力腐蚀开裂（SCC）与锡晶须生长成为主导失效模式。实验数据显示，此类环境下接线端子表面氯离子浓度可达 2.8mol/m³，显著高于大气暴露基准值（0.3mol/m³），驱动晶界优先溶解。锡晶须生成率在温度循环达 120 次后提升至 1.6×10^{-4}mm²/min，超出安全阈值的 3.5 倍。

远洋航行船舶所处的真实海洋大气环境，表现出电偶腐蚀与界面剥离的共存特征。该环境下，金属基体与镀层间存在电势差，形成微电池结构，加速阳极区域金属溶解。界面剥离现象在湿度超过 80%时显著加剧，剥离面积占比达 42%，与镀层与基体间结合力下降直接相关。高湿盐雾环境下，镀锡层脱附现象频繁发生，接触电阻漂移速率高达 0.8mΩ/h，远超 0.3mΩ/h 的安全限值。

表 1 案例研究关键特征对比表

案例来源	研究环境	核心腐蚀机制	防护技术重点
典型船舶电气系统	中性盐雾 + 交变湿热	电偶腐蚀与点蚀协同	镀层完整性、界面稳定性
近海作业平台	盐雾-振动-温湿耦合	应力腐蚀开裂与锡晶须生长	密封设计、自修复涂层
远洋航行船舶	真实海洋大气	电偶腐蚀与界面剥离	纳米复合涂层、防潮绝缘

2.2 防护技术适用性与工程实现难点

防护技术需匹配特定服役环境特征，其工程实施效果受材料匹配性、结构设计及长期稳定性制约。表面镀层技术，如 Ni/Sn/Au 多层镀层，具备良好的电化学钝化能力，适用于高可靠性端子，但对镀层完整性要求极高。实测表明，镀层厚度低于 1.2μm 时，点蚀萌生时间缩短至 14 天，较标准值下降 68%。

有机/无机复合涂层具备多层阻隔与自修复潜力，其内部微胶囊体系在裂纹扩展时可释放修复剂，抑制腐蚀扩散。然而，在湿热环境下，涂层附着力衰减显著，1000 小时加速试验后附着力下降达 45%以上，导致防护失效风险上升。

密封结构设计通过物理隔离湿热盐雾实现 IP68 防护等级，但装配复杂度高，装配精度要求控制在 ±0.05mm 以内，否则易形成微渗漏通道[2]。实测显示，密封结构在 10000 小时振动-温湿循环后密封失效率上升至 23%，主要源于材料热胀冷缩引起的界面应力集中。

智能监测系统依赖数字孪生与在线预警机制，可实现接触电阻动态监测与寿命评估。系统基于多源传感数据融合，结合 LSTM 模型实现未来 30 天内接触电阻变化趋势预测，误差控制在 ±0.15mΩ 以内。但其依赖长期数据支撑，初始模型训练需至少 12 个月实测数据，制约其在新部署系统中的快速应用。

表 2 防护策略与工程应用模式对比表

防护类型	技术原理	适用场景	实施难点
表面镀层（Ni/Sn/Au）	电化学钝化	高可靠性端子	镀层完整性控制
复合涂层	多层阻隔与自修复	复杂曲面	附着力衰减与耐久性验证
密封结构	物理隔离湿热盐雾	IP68 防护	装配工艺与长期稳定性
智能监测	数字孪生与在线预警	全生命周期	数据融合与模型更新

2.3 多场耦合机制建模与仿真验证

基于有限元模拟构建湿热场与电场协同分布模型，揭示缝隙内高湿度核心区形成机制。仿真结果显示，缝隙内部相对湿度在高温高湿条件下可达 98%，显著高于外部环境的 75%。该高湿环境促进氯离子向金属界面迁移，离子通量提升至 3.1×10^{-12}mol/(cm²·s)，较无缝隙条件增加 2.7 倍。结合电化学阻抗谱与极化曲线定量分析，识别点蚀电位阈值为-0.28V（vs.Ag/AgCl），为防护设计提供关键参数依据。

多场耦合模型中，振动载荷引入周期性应力波动，降低材料屈服强度约 18%，并促进微裂纹萌生。当振动频率为 25Hz，加速度为 3g 时，应力腐蚀开裂起始时间由 47 天缩短至 19 天[3]。湿热-振动-电场三场耦合效应使腐

蚀速率提升 3.2 倍以上，接触电阻增量达 1.2mΩ，显著超出安全阈值。

所构建的“电偶-湿热-振动”三场耦合模型经实验验证，预测误差控制在 12%以内。模型引入自适应时间步长算法，可动态响应环境突变，提升长期演化模拟精度。该模型为防护策略优化提供了可量化的仿真支撑，推动从经验性防护向机理驱动型设计转型。

3 讨论

海洋环境中接线端子腐蚀速率显著提升，其核心机制源于湿热、盐雾与振动三场耦合效应的非线性叠加。实验数据表明，三者协同作用下腐蚀速率提升达 3.2 倍以上，接触电阻增量突破 1.2mΩ，远超安全阈值，反映出多物理场协同对材料界面劣化的放大效应。该现象与湿热环境下电化学反应速率加快、盐雾提供氯离子侵蚀通道、振动引发微动磨损及界面松动密切相关，三者共同促进金属表面钝化膜破裂与局部腐蚀形核。尤其在电偶腐蚀驱动下，不锈钢与铜合金接触界面因电位差产生微电流，加速阳极金属溶解，同时湿热循环诱导涂层内应力释放，导致界面脱粘与附着力下降超过 40%，进一步加剧了腐蚀扩散路径的形成[4]。接触电阻的异常上升主要归因于镀锡层脱附与锡晶须生长，二者均与电偶腐蚀诱导的界面应力累积直接相关，致使有效接触面积减少，界面剥离率超过 15%。此类失效模式在高盐雾与高湿度交替环境下的金属-金属接触面中尤为突出，与已有研究中关于配电网线夹失效机制的分析具有一致性，但本研究进一步揭示了振动在加速界面破坏中的关键作用，拓展了传统电化学腐蚀理论的应用边界。

在防护策略方面，Ni-Sn 纳米复合涂层展现出优异的自修复能力，在划伤后 30 分钟内修复率超过 90%，其机理可能源于纳米颗粒在局部电场驱动下向损伤区迁移并沉积形成保护层，这一特性与现有涂层材料在极端环境下的耐久性研究相呼应。同时，双层密封结构实现 IP68 防护等级，盐雾试验后接触电阻增量控制在 0.5mΩ 以下，验证了结构设计对环境隔离的有效性[5]。该设计通过物理屏障阻断盐雾与湿气的渗透路径，有效抑制了腐蚀介质的侵入，其防护效率显著优于单一涂层防护方案，与船舶电气设备维护策略中强调密封与材料协同的建议一致。更为重要的是，研究构建的“电偶-湿热-振动”三场耦合模型实现了预测误差不超过 12%，显著优于传统经验模型，表明多场耦合机制的引入可显著提升腐蚀演化过程的可预测性。该模型不仅考虑了电化学反应动力学，还引入了机械振动对界面稳定性的影响参数，使模型更具环境适应性与工程实用性，与海洋环境下混凝土钢筋锈蚀监测技术中建立多参数耦合模型的研究思路保持一致。

结语

综上所述，海洋环境中湿热、盐雾与振动共同作用，对船舶电气接线端子腐蚀影响显著，三者叠加可使腐蚀速率提高 3.2 倍以上，接触电阻增至 1.2mΩ，超出安全限值。本研究建立了三场耦合分析模型，预测误差不高于 12%，并结合数字孪生实现了在线监测、预警与寿命评估，构建起多维度协同防护思路。但受加速试验和现场数据不足的限制，长期疲劳与复杂工况建模仍有欠缺。后续将结合更长周期的实船运行数据，深入研究长期腐蚀演化规律，加快智能监测系统在船舶工程中的实际应用。

参考文献

[1] 卢立讯, 徐永锋. 大型船舶艉轴故障机理分析及优化策略研究 [J]. 中国船检,2026(03):78-84.

[2] 王得安, 张剑韬, 朱春波, 等. 海洋环境对水下无线电能传输系统的影响机理研究进展 [J]. 电工技术学报,2025(03):653-675.

[3] 向本龙, 王俊, 李慧, 等. 热带海洋环境下配电设备失效机理研究 [J]. 环境技术,2025(07):8-14.

[4] 赵东, 裴文利, 郁大照, 等. 海洋环境下机载电连接器腐蚀分析与失效机理 [J]. 海军航空大学学报,2022(06):429-436.

[5] 毕贵欣. 船舶电气系统安全性评估与防护策略研究 [J]. 船舶物资与市场,2024(12):69-71.