新能源设施金属腐蚀原位监检测技术的研究进展

郑　健[1]，陈伟成[1]，王圣焱[1]，孙立华[1]，于小鹏[1]，戚　鹏[2]
（1. 广东天广能源科技发展有限公司，广东 广州　510000；
2. 中国科学院海洋研究所海洋关键材料全国重点实验室，山东 青岛　266000）

[摘　要]新能源设施由陆地、沿海向深远海规模化部署，因金属腐蚀引起的结构完整性、电气性能与全生命周期寿命问题已成为系统性工程问题。分析了海上风力发电、光伏发电、输变电及接地网等典型金属构件的腐蚀监检测需求，按腐蚀发展的不同阶段（早期活化、中期损伤、后期失效）综述了现场监检测技术的研究进展与工程适配性。早期阶段以简化电化学阻抗谱、电阻探针及电化学噪声等技术感知防护层降解与界面劣化；中期阶段以超声波、涡流测厚以及视觉识别等技术监检测金属构件厚度减薄与缺陷萌生；后期阶段以光纤传感、声发射和数据驱动等技术跟踪钢结构退化趋势与预测剩余寿命。结合新能源典型设施各场景的服役环境与可达性约束，进一步分析了传统工业领域监检测技术选型逻辑与现场迁移瓶颈，旨在为新能源设施现场特殊场景的监检测技术选型与测试技术标准化提供参考。

[关键词]能源设施；腐蚀监测；电化学技术；无损检测；智能监测
[中图分类号] TG172　　[文献标识码] A　　doi：10.26935/j.issn.2097-5317.2026.0023
[文章编号] 2097-5317(2026)04-0038-14

Research Progress on In-Situ Monitoring and Detection Technologies for Metal Corrosion in New Energy Facilities

ZHENG Jian[1], CHEN Weicheng[1], WANG Shengyan[1], SUN Lihua[1], YU Xiaopeng[1], QI Peng[2]
(1. Guangdong Tianguang Engineering Supervision & Consultation Co., Ltd., Guangzhou 510000, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266000, China)

Abstract: With the large-scale deployment of new energy facilities from land and coastal areas to deep and far-reaching seas, structural integrity, electrical performance, and full-lifecycle management affected by metal corrosion have become systemic engineering issues. This paper analyzed the corrosion monitoring and detection requirements for typical metal components in off-

收稿日期：2026-05-06
Received：2026-05-06
基金项目：中国南方电网有限责任公司超高压输电公司科技服务项目(0188002025030301SC00008)
Funding：The Science and Technology Service Project of China Southern Power Grid Extra-High Voltage Transmission Company (0188002025030301SC00008)
通信作者：戚　鹏（1986-），博士，研究员，研究领域：海洋腐蚀与防护，E-mail：qipeng@qdio.ac.cn
Corresponding Author：QI Peng (1986-), Ph.D., Researcher, Research Focus: Marine Corrosion and Protection, E-mail: qipeng@qdio.ac.cn

shore wind power, photovoltaic systems, power transmission and transformation facilities, and grounding grids. It reviewed the research progress and engineering adaptability of field monitoring and detection technologies by different stages of corrosion development (early-stage metal activation, mid-term metal damage, and late-stage metal failure). In the early stage, simplified electrochemical impedance spectroscopy, electrical resistance probes, and electrochemical noise were employed to detect protective coating degradation and coating/metal interfacial deterioration. In the mid-term stage, ultrasonic thickness measurement, eddy current testing, and visual recognition were used to monitor and detect metal thinning and defect initiation in metal components. In the late stage, fiber optic sensing, acoustic emission, and data-driven methods were applied to track structural degradation trends and predict remaining service life. Furthermore, considering the service environments and accessibility constraints of various typical new energy facilities, the traditional industrial monitoring and detection technologies selection logic and field migration bottlenecks were analyzed, aiming to provide reference for technology selection in special field scenarios of new energy facilities and the standardization of testing technologies.

Key words: energy infrastructure; corrosion monitoring; electrochemical technology; nondestructive testing; intelligent monitoring

0 前 言

新能源设施是支撑新型能源开发、转换、输送与利用的关键载体,其运行可靠性直接关系新能源系统安全与社会经济稳定。近年来,以风电、光伏为代表的新能源发电技术已进入大规模开发与并网运行阶段,新能源装备所处的腐蚀环境远比传统火电、水电装备复杂[1,2]。随着国家对海洋经济的长远规划,风电、光伏等新能源开发重点由陆地向近海、深远海转移,发电基础结构形式从固定式单桩、导管架向漂浮式平台演进[3,4];光伏组件由陆地向盐碱滩涂、沙漠戈壁及沿海潮间带大面积扩展;特高压及超高压输电线路、交直流混联电网的空间尺寸和跨度不断增大[5,6]。发电端与输变电端的同步扩张,使新能源电力设施的服役环境呈现出空间异质性强、空间尺度大、服役环境耦合因素多的突出特征[7,8]。新能源设施运行环境从传统陆地、平原逐渐演变为严酷腐蚀的海洋和海水环境,金属构件的腐蚀问题已成为严重影响设施的结构完整性、电气稳定性、运行可靠性和预期寿命管理的系统性工程问题。

不同类型新能源由于服役环境和发电设施不同,装备面临的腐蚀环境和失效模式存在明显差异。随着新能源电力系统向大规模、分布式和高可靠性方向发展,仅依赖定期检修和事后被动维护已难以满足设备状态感知和风险预警需求。腐蚀监检测技术能够为金属损伤识别、局部定位、腐蚀程度评价、发展趋势分析以及维护决策提供关键支撑,是实现状态检修和全寿命管理的重要基础[9-11]。然而,新能源设施的特殊服役环境对监检测技术提出了严苛的挑战,如海上风电桩基与水下结构可达性差、维护窗口有限;分布式光伏阵列数量巨大、分布广袤,人工巡检效率低下;输变电设施带电运行,强电磁环境干扰显著;接地网埋地隐蔽,非开挖检测精度受限。

新能源电力基础设施腐蚀监检测的现场化研究目前仍处于起步的新兴发展阶段,多数技术尚处于探索验证阶段。为此,本文在梳理已有监检测技术现场应用文献的基础上,对传统相关领域成熟验证的技术向新能源场景的迁移路径与技术瓶颈进行评述,旨在为现场技术选型提供参考依据。

1 能源设施腐蚀特征

新能源电力基础设施涵盖风力发电、光伏发电、输变电及接地系统等多个子系统,其金属构件在不同服役环境下具有差异化的腐蚀行为。明确各类设施的腐蚀环境特征、失效模式及损伤形态,是合理选取监检测技术的前提。以下按设施类型分别阐述。

1.1 风力发电设施

海上风电设施是腐蚀环境最复杂、维护成本最高的典型场景之一。风电基础、过渡段、塔架、法兰连接及附属结构长期承受海洋环境多区域作用,浪溅区因干湿交替频繁、供氧充分,腐蚀速率通常显著高于全浸区[12]。海上风电桩基和导管架的焊接节点是腐蚀-疲劳耦合失效的高风险区域。焊接残余应力与腐蚀环境协同作用,显著缩短了材料的疲劳寿命[13]。同时,海底沉积物中硫酸盐还原菌活跃代谢易引发微生物腐蚀(MIC)和局部穿孔[14]。陆上风电塔架、法兰、螺栓、门框和机舱附属金属构件主要服役于常规大气环境中,整体腐蚀性虽低于海洋大气环境,但在高湿度、高温、工业污染和含盐积尘环境下仍存在显著风险,其典型问题包括涂层老化、点蚀、浓差腐蚀、缝隙腐蚀和紧固件电偶腐蚀[15]。

1.2 光伏发电设施

光伏设施的桩基、金属网架、连接件、紧固件和接地部件数量巨大,服役环境覆盖沿海、盐碱地、荒漠戈壁、海洋等地域。光伏支架主流材料为铝合金与热镀锌钢。铝合金依靠致密氧化膜钝化耐蚀,在服役环境中钝化膜破裂后诱发点蚀。镀锌钢依赖锌层牺牲阳极保护,但电偶腐蚀是沿海光伏系统的常见失效模式,铝合金与不锈钢紧固件、镀锌钢与铜接地系统之间因电位差产生电偶电流[16]。对于漂浮式或近海/潮间带光伏,波浪、盐雾、冷凝和湿热循环会进一步增加结构与连接部位的耐久性风险[6]。此外,支架切边和冲孔部位因镀层破坏形成局部腐蚀微电池,埋入段则面临土壤-大气交互腐蚀作用[17,18]。

1.3 输变电设施

输电塔和变电站外露金属构件长期暴露于自然大气和工业污染环境中,其腐蚀行为主要受气候类型和环境污染程度控制。工业污染环境中 SO_2、NO_2 和微尘颗粒物的沉积在金属表面形成酸性液膜,显著加速腐蚀[19]。导线特别是钢芯铝绞线(ACSR)中的钢芯在铝股间隙中积累水分和污染物,形成缝隙腐蚀微环境,腐蚀速率远高于自由暴露表面[20]。气体绝缘开关(GIS)设备中的金属部件在电弧放电或局部过热作用下与微量氧气和水反应,生成 SO_2F_2、SOF_2、SO_2、HF 等分解产物。这些分解产物不仅是设备内部故障的指示剂,其本身也对金属壳体和密封件具有腐蚀性[21]。变压器油箱和散热器长期暴露于室外环境,大气腐蚀威胁其结构完整性。在内部,变压器油中的腐蚀性硫化物会与铜绕组反应生成硫化亚铜,沉积在绕组表面降低散热效率,严重时可能导致绕组短路[22]。

1.4 接地网系统

接地网和埋地导体长期埋设于非均一土壤中,腐蚀受土壤电阻率、含水率、pH 值、盐分、氧化还原电位和微生物作用共同影响,其腐蚀既可能表现为整体均匀减薄,也可能表现为局部穿孔和断裂,一旦失效将影响故障电流泄放能力及安全接地性能[23]。杂散电流与泄漏电流是加剧接地网局部腐蚀的重要外源因素。直流杂散电流主要来源于电气化铁路、高压直流输电系统接地极及阴极保护装置的电流泄漏,其在土壤-金属界面驱动额外的电化学反应,使电流流入部位发生强制阴极极化并可能诱发析氢,电流流出部位则处于阳极极化状态,腐蚀速率显著加剧,形成局部坑蚀甚至穿孔[24]。交流杂散电流与泄漏电流主要源于电力系统接地故障、三相不平衡及电磁感应耦合,其腐蚀机制虽弱于直流,但长期作用仍可破坏金属表面钝化膜或腐蚀产物保护层,促进局部活化并加速均匀腐蚀向局部腐蚀转变[25]。此外,杂散电流与 MIC 存在协同效应:电流扰动改变埋地金属附近电位分布,影响微生物代谢活性及生物膜结构,进一步加剧局部腐蚀的不均匀性[26]。

能源基础设施不同场景在腐蚀环境、失效模式、可达性和运维约束方面差异显著,决定了腐蚀监检测技术很难有统一适用方案。海上风电更需要长期在线和多源协同监测,陆上风电与光伏更适合高效巡检和风险分级检测,输变电设施强调非接触和少干预手段,接地网和埋地导体则最依赖多方法联合诊断[27]。

2 新能源设施腐蚀检测技术进展

腐蚀损伤的发展具有显著的阶段性特征。从防护层微观劣化、涂层/金属界面电化学活性升高,到可测几何损伤的形成与扩展,再到危及结构安全的严重退化,不同阶段对监检测技术的灵敏度、分辨率和在线能力提出了差异化要求。本节按腐蚀演化阶段,将现有检测技术划分为金属早期活化与防护状态感知、中期损伤识别与缺陷定位、后期失效预警与长期趋势跟踪 3 个层次,分别评述其监检测原理、现场适用性及向新能源场景的迁移瓶颈。

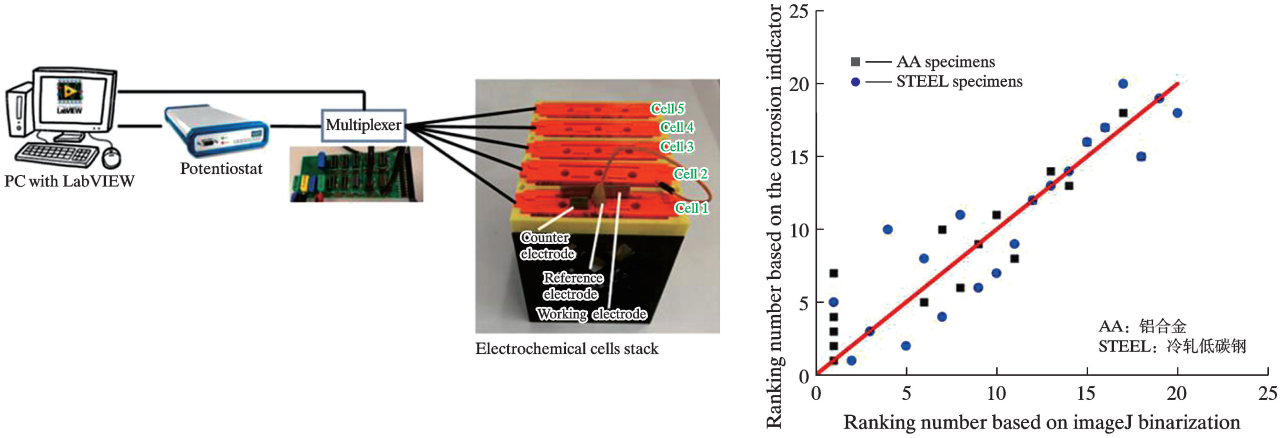
2.1 早期活化与防护状态感知技术

早期阶段金属腐蚀尚未造成金属结构可测几何损伤,主要表现为涂层或钝化膜微观劣化、界面电化学活性升高以及局部钝化膜破裂。此时金属基体可能仅出现纳米至微米级的表面状态变化,常规无损检测手段难以识别,但电化学技术已可测电化学阻抗、腐蚀电位或电流波动信号。此阶段监检测的核心难点在于信号微弱且易受环境噪声干扰,需要高灵敏度的在线连续监测手段捕捉瞬态活化事件,并及时判断防护层失效趋势和维护方案。

2.1.1 电化学阻抗谱技术

电化学阻抗谱(EIS)通过在不同频率下施加小幅正弦扰动并测量体系响应,获得界面的频域特征信息[28]。通过 Nyquist 谱、Bode 谱和等效电路拟合,可提取溶液电阻、膜层电阻、电荷转移电阻、双电层电容及扩散阻抗等参数,用于分析防护层完整性、界面反应活性及传质过程。其突出优势在于信息维度丰富

且外加扰动较小，适于长期跟踪同一体系状态变化[29,30]。Bongiorno 等[31]利用长期 EIS 监测，在多种有机涂层上系统研究了涂层降解与金属腐蚀指标的关联性（图 1）。提出了一种新的涂层降解指标，定义为低频阻抗模值倒数对暴露时间的积分，与传统仅依赖最终阻抗值的方法相比，该指标更准确地反映涂层性能优劣，综合考虑了涂层在整个暴露周期内的降解历史，而非仅捕获某一时刻的状态。Wang 等[32]将弛豫时间分布（DRT）分析应用于深地质处置条件下低碳钢的腐蚀演化研究。通过对 EIS 数据进行 DRT 反卷积处理，成功区分了好氧-厌氧转变过程中多个重叠的电化学过程，识别出对应氧化膜形成、基体溶解和产物层沉积的不同弛豫时间峰。在工程现场监测中，为规避等效电路模型非唯一性带来的解释不确定性，常通过追踪中频或高频阻抗模值的变化趋势，快速评估涂层失效或界面活化程度[33-35]。



（a）EIS测量装置　　（b）Image J排序结果与腐蚀发展指标之间的相关性

图 1　自主开发的电化学监测系统概述，以及腐蚀环境下涂层试样基于视觉外观排序与基于低频阻抗模量排序的相关性[31]

Fig. 1　Overview of the in-house developed electrochemical monitoring system and the correlation between visual ranking and impedance-based ranking of coated samples exposed to corrosive environments[31]

EIS 适用于海上风电塔筒外壁涂层、光伏支架镀层及变电站金属外壳涂层的早期老化监测，可在线跟踪防护层退化趋势。但其现场应用受温度波动、含水率变化及生物附着干扰，低频阻抗响应在海洋飞溅区和埋地环境中解释困难，目前更适合作为长期趋势跟踪的辅助手段，而非独立的失效判据[36]。

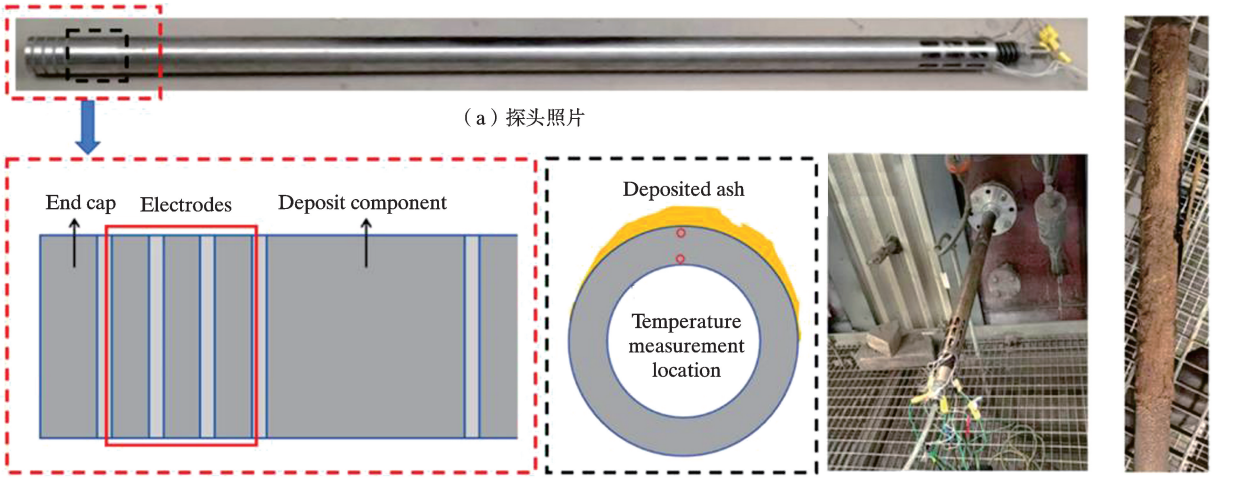
2.1.2　线性极化电阻与电阻探针技术

线性极化电阻（LPR）法通过腐蚀电位附近的小幅极化求取极化电阻，测试快速、扰动小，是工程现场应用较广的腐蚀速率评价手段之一[37]。对于海洋环境中的钢结构、埋地导体和接地试片，LPR 可用于比较不同环境中的腐蚀活性、跟踪腐蚀速率演化以及评价防护措施效果。

Liu 等[38]针对垃圾焚烧锅炉受热面高氯灰沉积诱导腐蚀难以实时评估的问题，采用了一套以 LPR 为核心测量原理的在线腐蚀监测系统（图 2）。该系统通过探针尖端的三电极体系对 TP 347H 工作电极施加±10 mV 的微极化电压，以 3 min 间隔连续采集电位-电流响应，实时获取腐蚀速率并揭示沉积-腐蚀耦合的 3 阶段演化规律。LPR 积分结果与实测金属损失偏差仅 28.2%，证实了该方法在高温高氯环境中的工程适用性。需要指出的是，LPR 方法存在明确适用边界，LPR 中 Stern-Geary 常数 B 并非固定值，在实际环境中的变化范围可达 13～52 mV，若简单采用固定 B 值，可能引入约±50%的腐蚀速率误差。针对以上问题，Yahi 等[37]提出了一种以 LPR 为核心的新型腐蚀探针方法，设计了一种集成 3 片 P235GH 碳钢试样的聚四氟乙烯探针，其中 2 片分别作为 LPR 测量的工作电极与对/参比电极，第 3 片专用于质量损失分析以实验标定 Stern-Geary 常数，进而将在线测得的极化电阻实时转化为腐蚀速率。

电阻探针（ER）技术基于金属试片因腐蚀减薄而导致电阻增大的物理原理，通过对比暴露于腐蚀环境的工作片与密封保护的参比片之间的电阻差异，实现累积腐蚀损失的连续量化。该方法无需与腐蚀介质形成电化学回路，对金属表面薄液膜不敏感，可长期在线连续测量且无需参比电极，较传统电化学方法更能准确地反映大气腐蚀速率与累积腐蚀损失。高精度 ER 探针已被部署于跨海大桥主缆密封系统内部，实现了高湿密闭环境下微腐蚀速率的连续跟踪，证实

了 ER 技术在缺乏稳定液膜条件下的可靠性[39]。在高压直流接地极领域,ER 探针被用于评估接地极土壤-大气界面处碳钢的大气腐蚀行为,为接地极材料寿命评估提供了累积损失数据[40]。



(a) 探头照片　(b) 腐蚀与温度测量部分示意图　(c) 温度测量位置示意图　(d) 现场测试设置　(e) 测试后探头照片

图 2　垃圾焚烧炉沉积物腐蚀在线监测系统[38]

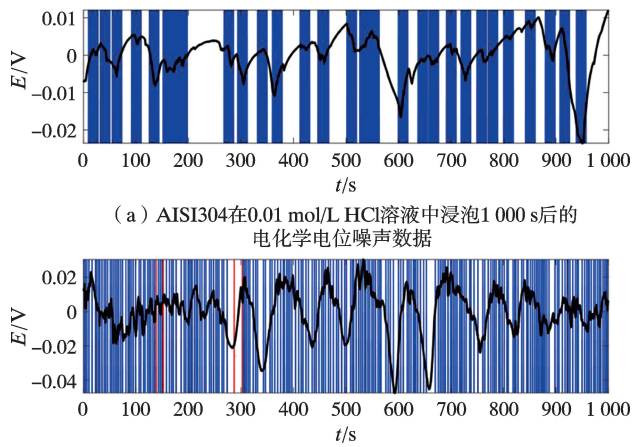
Fig. 2　Online corrosion monitoring system for under-deposit corrosion monitoring in a waste-to-energy plant[38]

LPR 适用于海上风电飞溅区、潮差区等潮湿高盐环境的腐蚀活性在线监测,可实时获取瞬时腐蚀速率。向新能源场景迁移时,ER 探针可直接安装于风电塔筒、光伏支架等关键部位,实现全周期累积损失跟踪,但其局限在于仅反映累积结果而无法提供腐蚀过程的动力学信息。

2.1.3　电化学噪声技术

电化学噪声(EN)是腐蚀体系在自然状态下自发产生的电位和电流波动信号。与需要施加外部扰动的电化学阻抗、动电位极化等方法不同,EN 可在较弱干预条件下反映腐蚀过程的自然随机演化,因而对点蚀、缝隙腐蚀和膜层破裂等局部事件具有较高敏感性[41,42]。Homborg 等[43]以 EN 为核心监测信号,首次将其时频瞬态信息的解读转化为图像分类问题,提出了基于卷积神经网络(CNN)的自动化腐蚀类型识别方法。利用连续小波变换(CWT)将一维 EN 信号映射为时频谱,并结合模极大值技术精确提取与局部腐蚀事件相关的瞬态特征(图 3)。实验结果表明,单独使用 CWT 谱或模极大值(MM)的 CNN 分类准确率分别为 0.72 和 0.84,而基于 CWT 与 MM 联合图像的 EN 分析准确率达到 0.97(标准差 0.05),且对浸泡 9 000~10 000 s 后 AISI 304 不锈钢和 AA2024-T3 铝合金的后期点蚀过程仍保持稳健识别。

EN 适用于海上风电焊缝、法兰连接处及输电塔紧固件等关键部位的局部腐蚀早期预警,可在肉眼可见损伤出现前捕捉点蚀或缝隙腐蚀的瞬态事件。但



(a) AISI304在0.01 mol/L HCl溶液中浸泡1 000 s后的电化学电位噪声数据

(b) AA2024-T3在0.1 mol/L NaCl溶液中浸泡1 000 s后的电化学电位噪声数据

图 3　基于连续小波变换频谱与模极大值组合数据的电化学电位噪声瞬态分类结果(蓝色表示正确分类,红色表示错误分类)[43]

Fig. 3　Classification results of electrochemical potential noise transients based on combined continuous wavelet transform spectra and modulus maxima[43]

新能源设施现场普遍存在与腐蚀信号频带重叠的电磁干扰(EMI)和机械振动/流体噪声(声发射),海上风电变频器和变电站高压设备运行时的背景噪声尤为显著,信噪比低于 10 dB 时分类性能急剧退化[44]。此外,EN 对腐蚀速率的精确定量仍较困难,不同材料和介质体系间尚未建立统一的转换关系。因此,EN 更适合作为局部腐蚀早期预警的辅助技术,并宜与 EIS、LPR 或局部无损检测手段联合使用[45]。

电化学检测技术能够从界面反应层面揭示金属

腐蚀活性与防腐层防护状态,是监测能源基础设施早期腐蚀的重要手段。表 1 对比了这几种技术在核心原理、时间分辨率、在线能力和适用场景上的显著差异。EIS 特别适用于防护层退化机理分析与界面过程长期跟踪,LPR 因测试快速、成本低、现场适用性强而成为工程应用最广泛的腐蚀速率评价手段,EN 以秒级分辨率被动采集自发电位/电流波动,对点蚀等局部事件早期敏感。但是,电化学在线监测的关键瓶颈在于参比电极长期稳定性。Ag/AgCl 参比电极在混凝土和含氯环境中应用最广,但在高碱环境下与 AgCl 反应会导致电位负向漂移 50~150 mV,且 AgCl 膜溶解和剥落会降低其寿命[46]。

表 1 腐蚀早期电化学腐蚀检测技术综合对比

Table 1 Comprehensive comparison of electrochemical corrosion detection techniques at the early-stage of corrosion

技术类型	核心原理	时间分辨率	在线能力	核心优势	局限性
EIS	宽频阻抗谱解析	分钟级	可在线(固定频率)	界面过程信息丰富;涂层降解定量	低频耗时;等效电路非唯一性
LPR	线性极化电阻换算	分钟级	成熟在线	快速;成本低;现场适用性强	B 值不确定;仅均匀腐蚀近似
EN	自发电位/电流波动	秒级	可在线	非扰动;点蚀早期敏感	噪声干扰;定量困难;判据不统一

除电化学方法外,输变电设施早期腐蚀状态还可通过特征产物检测间接评估。气体绝缘开关(GIS)设备内部金属部件的腐蚀风险可通过 SF_6 分解产物间接评估,金属氧化物半导体(MOS)传感器是目前检测该类分解产物的主要手段[21],可为 GIS 内部腐蚀状态提供早期预警。变压器油中腐蚀性硫化物会与铜绕组反应生成硫化亚铜,拉曼光谱等快速检测方法已被用于腐蚀性硫的识别与定量分析[22],为变压器内部腐蚀风险评估提供依据。对于接地网系统,土壤腐蚀性是风险判断的重要基础;土壤电阻率、氧化还原电位、pH 值、含水率及氯离子、硫酸根浓度是决定腐蚀性的关键参数,多参数综合评价方法将上述指标纳入统一模型,可实现土壤腐蚀性的定量分级[47],为接地网腐蚀监测提供环境本底数据。

2.2 中期损伤识别与缺陷定位技术

中期阶段金属腐蚀已造成可测量的几何损伤,表现为厚度减薄、点蚀坑萌生、局部裂纹形成或锈层明显堆积。此时金属结构完整性开始受到实质性影响,但尚未发生穿孔或断裂,仍具备修复和延寿价值。此阶段监检测的核心任务是从大范围结构中识别出损伤具体位置,并对剩余厚度或缺陷尺寸进行定量评估,为维修决策提供直接依据。

2.2.1 超声波检测技术

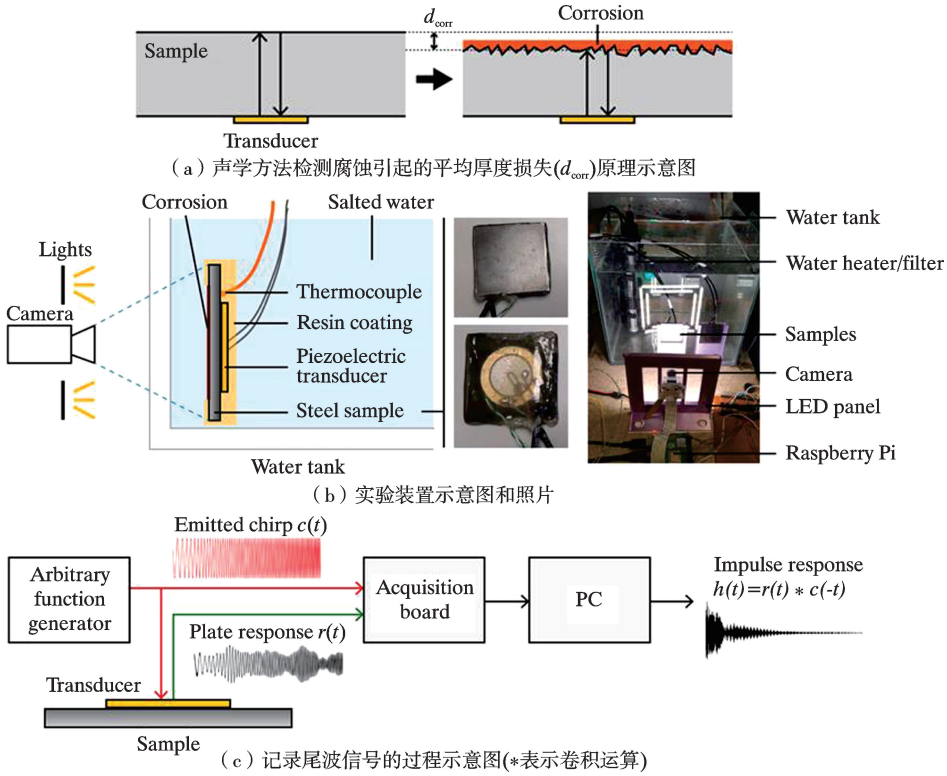
超声波检测(UT)通过声波在材料中的传播、反射、散射和衰减规律识别厚度变化或内部缺陷,是腐蚀评估中最成熟的无损方法之一。常规脉冲回波超声可用于板材、管材、法兰和焊缝等部位的剩余厚度测量,精度可达 0.1 mm 量级。对于风电塔架、输电构件和光伏结构支撑件,超声测厚已成为局部减薄确认的标准手段之一。在常规超声波基础上,相控阵超声(PAUT)、全聚焦成像(TFM)和超声导波技术进一步提高了复杂结构中的检测能力。PAUT/TFM 可实现更灵活的波束合成与高分辨成像,适于法兰过渡区、焊接接头和局部腐蚀形貌分析;超声导波则适用于长尺寸构件和难以全面接近的区域筛查,在一定条件下可实现米级乃至更长距离的快速检测[48]。

Farin 等[49]提出了一种基于超声尾波干涉测量(CWI)的钢材盐水腐蚀监测方法,该方法利用压电换能器向钢板发射 5~15 MHz 的调频脉冲,采集由多次反射和散射形成的尾波信号。通过分析尾波信号相对于参考状态的拉伸因子 α,并结合温度补偿,从而反演瞬时腐蚀速率与深度(图 4)。Lyu 等[50]综述了超声导波(UGW)技术在管道腐蚀检测中的应用,指出导波凭借单点激励、长距离传播及全截面覆盖优势,并分析了 Lamb 波与剪切水平波的模态选择、频散及多模态特性,梳理了压电陶瓷与电磁超声换能器等换能器进展,并探讨了导波结合 CNN 与机器学习在缺陷识别中的前沿应用,指出未来需通过高阶模态与智能算法提升对小缺陷和厚度减薄的检测灵敏度。

超声波测量金属剩余厚度定量法是中期损伤评估的基准手段。相控阵和全聚焦成像适用于风电法兰焊接接头和输电塔节点等复杂几何部位的缺陷成像。但新能源现场中,风电塔筒粗糙涂层和厚锈层易造成超声耦合失效,高空与水下结构的可达性限制了大范围快速部署,且超声对极早期活化阶段的识别能力有限,需与其他早期感知技术配合使用[51,52]。

2.2.2 涡流与脉冲涡流检测

涡流检测利用交变磁场在导电材料中感应涡流,通过测量阻抗变化识别腐蚀缺陷。常规涡流检测(ECT)



（a）声学方法检测腐蚀引起的平均厚度损失(d_{corr})原理示意图

（b）实验装置示意图和照片

（c）记录尾波信号的过程示意图(*表示卷积运算)

图 4　基于超声波尾波干涉的腐蚀监测试验装置示意图[49]

Fig. 4　Schematic of the experimental setup for ultrasonic coda wave interferometry-based corrosion monitoring[49]

适用于近表面缺陷，对均匀腐蚀引起的厚度减薄响应为渐进式阻抗变化，点蚀表现为阻抗局部突变，应力腐蚀裂纹（SCC）阻抗产生方向性扰动。脉冲涡流（PEC）采用宽频脉冲激励，对更深层的缺陷具有检测能力，且无需接触表面，可穿透涂层和薄保温层。隧道磁电阻（TMR）传感器作为新一代磁场敏感元件，其灵敏度比传统霍尔效应传感器高 2 个数量级，为柔性涡流阵列探头的发展提供了新可能[53,54]。

Pham 等[55]提出了一种基于高斯脉冲涡流检测与脉冲卷积神经网络融合的新型腐蚀检测技术。该技术以高斯脉冲作为激励源，通过灵活选择频率带宽增强对微小腐蚀缺陷的激励灵敏度；探头采用激励线圈与中心霍尔传感器组合，捕获由腐蚀引起的磁场扰动信号；信号经短时傅里叶变换（STFT）映射至时频域，提取表征腐蚀的谱特征向量，随后输入脉冲神经网络进行处理；在铝合金样件上的实验表明，该系统能够准确区分腐蚀区与非腐蚀区，展现出优异的识别鲁棒性。Tang 等[56]采用差分涡流检测（DECD）技术研究了涂层铝合金腐蚀缺陷的检测规律。通过预制不同尺寸点蚀缺陷并结合有限元分析，发现缺陷直径与深度的增加显著增强涡流信号，腐蚀产物对信号无显著影响，而涂层厚度增加会削弱信号强度。

涡流与 PEC 适用于变电站带电设备、输电塔紧固件及风电塔筒法兰等部位的近表面缺陷筛查，尤其适用于带涂层或保温层结构，无需打磨即可检测。但向新能源现场迁移时，变电站强电磁场环境会显著降低信噪比，使轻微腐蚀缺陷产生的磁场异常被背景噪声淹没[57]。在变电站内部强电磁环境下，背景干扰会显著降低检测分辨率；对不严重且未断裂的腐蚀，磁场异常可能并不明显[58]。因此，涡流检测法更适合作为异常筛查和局部定位手段，后续仍需辅以开挖验证、超声或电化学信息进行综合判断。

对于接地网这类隐蔽埋地结构，电磁检测方法同样发挥着重要作用。接地网腐蚀检测通常采用间接判断与局部验证相结合的策略。电网络分析法基于端口电阻增量建立故障诊断方程，原理简洁且定量性较好，但对完整拓扑结构依赖较强，中大型接地网的端口需求迅速增加[59,60]。电磁场分析法通过异频注入和地表响应测量实现异常定位，是目前接地网腐蚀检测的主流无损手段之一，可在不开挖条件下实现导体断点或严重腐蚀区的初步定位[61]。

2.2.3　视觉检测

视觉检测仍是工程上最常用的腐蚀检查方式，包括人工目视、高清图像采集和无人机巡检等[62]。随

着图像识别和深度学习技术的发展,视觉方法已由定性观察逐渐向定量识别演进。Das 等[63]系统评估了深度学习在钢结构腐蚀自动检测中的性能,对比了 Dense Net121、Efficient NetB7、Res Net34 和 UNet 等骨干网络,发现 Res Net34 在泛化性能上表现最优。钟万才等[64]设计了一种面向 500 kV 超高压输电铁塔的无人机非接触腐蚀检测平台。该平台以六旋翼无人机为载体,通过机载摄像头与激光测距仪实现视觉辅助定位,实时回传铁塔表面影像并远程判断探头与目标的相对距离,确保检测仪器处于有效工作区间。

视觉检测与无人机巡检适用于分布式光伏阵列、陆上风电塔筒外部、输电铁塔及变电站构架的大范围快速筛查,可高效识别表面锈蚀、涂层剥落和几何变形。但向新能源现场迁移时,沿海盐雾和工业污染物在光伏组件及输电塔表面形成的污渍会降低图像质量;光照变化、遮挡和样本偏差影响识别准确性;对早期隐性锈蚀(无颜色变化)辨识度不足,且对内部腐蚀、背面损伤和埋地腐蚀的直接感知能力有限。因此视觉检测更适合作为表面异常的大范围筛查手段,对关键部位仍需超声或涡流复核[65]。

在中期损伤阶段,超声波测厚、涡流检测和视觉识别等技术具有定量评估厚度减薄与表面缺陷等几何损伤的检测能力。表 2 对比了各技术的各类技术性能。超声波检测厚度定量精度高且技术成熟,以离线检测为主,其主要局限在于非均匀腐蚀的定量解释仍较复杂;涡流检测的突出优势在于检测速度快,且能够穿透保温层实现保温层下腐蚀检测,但深层小缺陷的分辨率不足是其主要局限;视觉检测技术适用于表面腐蚀的大范围快速非接触巡检,但其误检率受光照、气候、遮挡和样本偏差影响。

表 2 腐蚀中期各类监检测技术的性能对比

Table 2 Performance comparison of various monitoring and detection techniques at the mid-stage of corrosion

技术	原理	分辨率	检测深度	在线能力	核心优势	主要局限
超声检测技术	声波反射时差	毫米级	全壁厚	离线为主	壁厚精度高,技术成熟	非均匀腐蚀解释复杂
涡流检测技术	电磁感应变化	厘米级	<5 mm	可在线	速度快,可实现保温层下腐蚀(CUI)检测	分辨率低,趋肤效应限制深层检测
视觉检测技术	光学成像+AI 识别	毫米级	表面	可在线	大范围快速覆盖,非接触	误检率较高,早期缺陷难辨

2.3 后期失效预警与长期趋势跟踪技术

后期阶段金属腐蚀已扩展至危及结构安全的程度,表现为大面积厚度减薄、穿孔、裂纹扩展或腐蚀产物累积导致的应力集中与承载力下降。此时单次检测已难以满足安全管控需求,必须通过长期连续监测获取退化趋势数据,建立剩余寿命预测模型,在失效前实现预警。

2.3.1 光纤传感技术

光纤布拉格光栅(FBG)通过 Bragg 波长漂移响应应变和温度变化,可嵌入金属结构或黏附于涂层表面,通过腐蚀产物膨胀或基体减薄引起的应变变化间接评估腐蚀状态[66]。布里渊光时域分析(BOTDA)基于布里渊频移实现数十公里连续测量,光频域反射(OFDR)基于瑞利散射达到毫米级分辨率[67]。光纤传感器可通过感知腐蚀产物膨胀、局部变形、应变集中和环境温度变化来间接表征腐蚀状态[68]。Chen 等[69]基于分布式光纤传感技术,开发了一种钢管非均匀腐蚀监测方法。他们将光纤螺旋缠绕于钢管表面,通过捕捉腐蚀产物膨胀产生的微应变,结合质量损失模型实现腐蚀定量反演;经 162 d 码头现场验证,应变法测算的腐蚀质量损失与 3D 激光扫描结果误差仅 7.48%。Wang 等[70]围绕长距离基础设施中温度、应变与振动等多参量综合监测的需求,提出了一种低成本集成化的分布式光纤传感方案。他们将 BOTDA 与相位敏感光时域反射(ϕ-OTDR)2 种系统进行融合,通过光开关切换与共享窄线宽激光器、掺铒光纤放大器等核心器件,在单根 18.7 km 光纤上同步实现了三参量测量(图 5);实验结果显示,系统对温度变化具有良好的线性响应,能够准确定位应变扰动位置,并在 16.37 km 处成功解调出 120 Hz 的振动频率。

光纤传感适用于海上风电水下桩基、潮差区过渡段及埋地接地网等可达性差部位的长期免维护监测,可嵌入风电基础或黏附于塔筒表面,实现腐蚀产物膨胀和结构变形的连续感知,且具备抗电磁干扰特性,适用于变电站等强电磁环境。但向新能源现场迁移时,应变-温度交叉敏感是核心瓶颈,腐蚀产物膨胀与热胀冷缩在信号上难以区分,沿海昼夜温差和沙漠大幅温度波动会加剧干扰[71]。

2.3.2 声发射技术

声发射技术被动捕捉腐蚀过程中释放的弹性波,

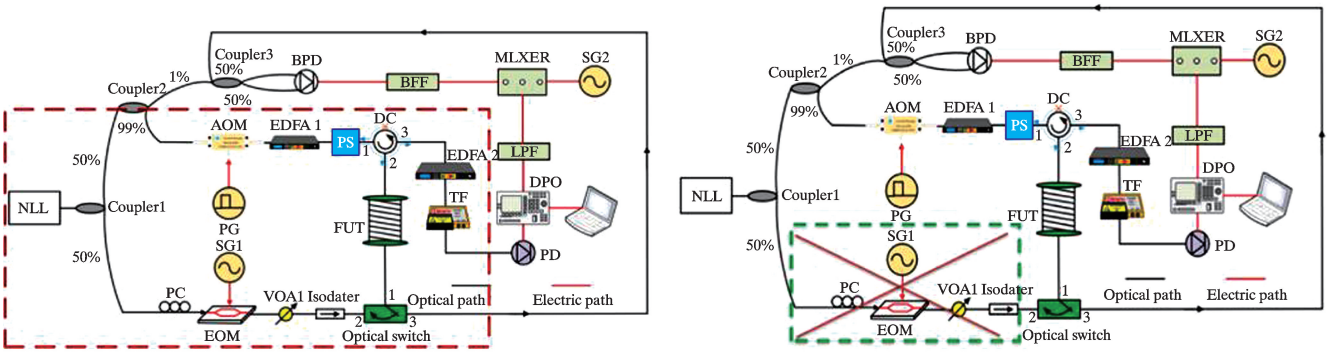


图 5　光纤传感系统的实验设置[70]

Fig. 5　Experimental setup for fiber sensing systems[70]

能够监测腐蚀过程的实时动态，而非仅获取某一时刻的状态快照。通过小波包变换与快速傅里叶变换进行多分辨率特征提取，结合支持向量机或卷积神经网络分类，可实现腐蚀模式的自动识别[72]。传统方法基于振铃计数、能量、幅度等统计参数，结合人工神经网络或支持向量机进行分类。近年来，卷积神经网络直接从原始声学波形或时频图（如小波变换、短时傅里叶变换谱图）中学习特征，避免了人工特征选择的主观性[73]。Thirumalaiselvi 等[74]系统综述了机器学习在离散声发射信号解释中的最新进展与应用。秦培岭等[75]提出了一种基于声发射图像识别的 Q235 钢点蚀严重度评价方法。通过声发射技术实时采集点蚀声学信号，采用 K-means+聚类将声源划分为 3 类并对应点蚀前、中、后期；进而利用连续小波变换生成时频图，训练 CNN 模型实现声发射声源的智能图像识别，总体准确率达 98.25%；同步电化学验证表明，声发射识别结果与腐蚀电位演化规律一致，证实了该方法对点蚀严重度的精准评价能力。

声发射适用于海上钢结构焊缝、法兰及关键连接件的长期在线监测，可实时捕捉点蚀萌生和裂纹扩展的活性事件，为结构安全预警提供动态依据。但向新能源现场迁移时，机械振动、流体噪声和环境电噪声与腐蚀声发射信号频带常存在重叠，海上风电塔筒在风载作用下的结构振动和变电站设备运行噪声尤为突出，低信噪比条件下分类性能急剧退化；不同结构间的声传播特性差异也使模型迁移困难。因此声发射更适合作为腐蚀/裂纹活性事件的辅助预警手段，长期部署需解决传感器布置优化与噪声抑制问题。

2.3.3　数据驱动诊断技术

腐蚀监测数据具有多源异构、时变性强、噪声大和标签稀缺等特点，传统经验分析难以充分挖掘其规律。随着机器学习和深度学习技术的发展，数据驱动方法已逐步进入腐蚀图像识别、传感信号解析、状态分类和趋势预测等领域[76]。Das 等[63]基于大数据驱动深度学习开发了钢结构腐蚀自主检测方法。针对腐蚀语义分割数据稀缺问题，作者构建现场图像数据集并通过增强策略扩增至 4 000 张样本，以 UNet 架构结合 Res Net34、Dense Net121 及 Efficient NetB7 骨干进行像素级分割；研究表明，在 ImageNet 大数据预训练的迁移学习模式下，Efficient NetB7 达到 98.5%像素准确率；但在完全训练模式下，深层网络因数据量相对不足性能骤降，而 Res Net34 仍保持 96.78%准确率与极低假阳性，展现出更优的大数据泛化与特征提取效率。

数据驱动技术适用于风电场、光伏电站等分布式基础设施的预测性维护，通过融合超声波、视觉、电化学等多源数据实现腐蚀趋势预测和剩余寿命评估。但向新能源现场技术迁移时，边缘算力受限导致复杂模型难以在风机机舱或光伏逆变器侧实时运行；现场数据标签稀缺使监督学习模型泛化性不足；模型决策过程缺乏物理可解释性，降低了工程信任度。因此数据驱动方法当前更适合作为辅助决策工具，而非独立的腐蚀判据，需与物理模型和专家经验结合使用[77]。

在腐蚀后期失效阶段，光纤传感、声发射和数据驱动等技术具有长程连续跟踪结构退化趋势与预测剩余寿命的预警能力。表 3 对比了各技术的性能。光纤传感技术具备优异的在线监测能力、抗电磁干扰特性和多路复用能力，但应变-温度交叉敏感问题尚未完全解决。声发射技术可实现在线监测并实时捕捉腐蚀/裂纹活性事件，但现场机械振动和流体噪声会严重干扰腐蚀声发射信号。数据驱动监测技术能够面向预测性维护和全寿命周期映射，但边缘算力受

限、模型验证困难以及物理可解释性不足仍是制约工　　程信任的关键瓶颈。

表 3　腐蚀后期无损腐蚀监检测技术的性能对比

Table 3　Performance comparison of non-destructive corrosion monitoring and detection techniques at the late-stage of corrosion

技术	原理	分辨率	检测深度	在线能力	核心优势	主要局限
光纤传感技术	应变/温度引起光学特征变化	毫米-米级	表面/近表面	在线监测	抗电磁干扰,可多路复用	应变-温度交叉敏感,无法提供电化学参数
声发射技术	弹性波被动捕捉	厘米-分米级	材料内部	在线监测	实时捕捉腐蚀/裂纹活性	噪声干扰严重,定量困难
数据驱动监测技术	仿真+AI 融合	依赖输入	依赖输入	可在线	预测性维护,全寿命映射	边缘算力受限,模型验证难

3　结论与展望

本文围绕工程现场新能源电力设施服役现状,按腐蚀发展阶段梳理了现场监检测技术的研究进展与适配性。早期金属活化感知以电化学测试技术为主,中期金属损伤定位和测试以超声测厚和视觉检测为基准,涡流检测适用于带电或带涂层场景;金属腐蚀后期趋势跟踪以光纤传感和数据驱动为发展方向。各类技术因现场服役环境适应性、成熟度和技术瓶颈差异而具有不同的适用边界和优缺点。当前腐蚀监检测技术的研究多集中于实验室测试或传统工业应用场景(如石油化工管道、桥梁、船舶),其向新能源设施现场技术迁移时,仍面临传感器可靠性、环境干扰、部署成本与标准化等多维瓶颈。

从金属腐蚀不同演化阶段来看,单一方法难以同时满足早期识别、精确定量和大范围覆盖的多重需求;面向风电、光伏、输电设施、接地网及储能系统等不同场景,金属腐蚀监检测技术选型应综合考虑腐蚀环境、失效模式、可达性和运维约束。多技术融合、在线连续监测、数字孪生和标准体系建设是腐蚀监检测技术未来的主要发展方向,而 AI 驱动方法的物理可解释性不足以及现场验证不充分,则是制约工程推广的关键瓶颈。

[参 考 文 献]

[1] 高俊杰, 鲁成林, 张继超. 海上光伏的腐蚀破坏与防护策略研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(5): 190-192.
GAO J J, LU C L, ZHANG J C. Research on Corrosion Damage and Protection Strategies of Offshore Photovoltaics [J]. Science & Technology Information, 2025, 23(5): 190-192.

[2] SHAMIR M, BRAITHWAITE J, MEHMANPARAST A. Fatigue life assessment of offshore wind support structures in the presence of corrosion pits[J]. Marine Structures, 2023, 92: 103505.

[3] LAMAS J S, TACQ J, TEERLINCK B. Assessing the potential of electrochemical techniques for monitoring pitting corrosion in carbon steel for offshore structures[J]. Electrochimica Acta, 2026, 563: 148721.

[4] ZOU D J, LUO W, CHEN Q Y, et al. Corrosion evolution and quantitative corrosion monitoring of Q355 steel for offshore wind turbines in multiple marine corrosion zones [J]. Ocean Engineering, 2024, 311: 119044.

[5] RANA Z, OLIVARES D, MARZO A, et al. Accelerated corrosion performance of solar cells: A critical review[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2026, 297: 114103.

[6] RANA Z, ZAMORA P P, SOLIZ A, et al. Solar Panel Corrosion: A Review[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(13): 5960.

[7] 旦乙画, 张芮漩. 电力系统接地装置腐蚀特性及其诊断技术[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(11): 26-41.
DAN Y H, ZHANG R X. Corrosion characteristics and diagnosis technologies of grounding devices in power systems [J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(11): 26-41.

[8] 樊志彬, 姜　波, 王　蝶, 等. 基于数据挖掘的输电杆塔典型材料大气环境腐蚀预测研究[J]. 材料保护, 2025, 58(9): 157-166.
FAN Z B, JIANG B, WANG D, et al. Study on Atmospheric Corrosion Prediction of Typical Transmission Tower Materials Based on Data Mining[J]. Materials Protection, 2025, 58(9): 157-166.

[9] SHEETAL, KUNDU S, THAKUR S, et al. A Review of Electrochemical Techniques for Corrosion Monitoring-Fundamentals and Research Updates[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2025, 55(1): 161-186.

[10] 熊鸿楗, 王继承, 李延龙, 等. 电力系统接地网腐蚀检测技术研究[J]. 电子设计工程, 2019, 27(20):

59-63.
XIONG H J, WANG J C, LI Y L, et al. Research on corrosion detection technology of power system grounding grid [J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(20): 59-63.

[11] 王希彬, 郁大照, 王 琳, 等. 飞机电搭接装置腐蚀防护技术要求[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 40-45.
WANG X B, YU D Z, WANG L, et al. Technical Requirement for Corrosion Protection of Aircraft Electrical Bonding Devices[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 40-45.

[12] OKENYI V, BODAGHI M, MANSFIELD N, et al. A review of challenges and framework development for corrosion fatigue life assessment of monopile-supported horizontal-axis offshore wind turbines[J]. Ships and Offshore Structures, 2024, 19(1): 1-15.

[13] ZHANG J, YU D, LI G, et al. Multi-hazard performance assessment of monopile offshore wind turbine considering coupled corrosion and fatigue damage[J]. Ocean Engineering, 2025, 316: 119985.

[14] GLORIEUX T, TAVASSOLIAN R, DEPOVER T, et al. Cathodic protection and sulphate-reducing bacteria: a complex interaction in offshore steel structures[J]. Corrosion Reviews, 2025, 43(2): 209-241.

[15] MEMARI M, SHAKYA P, SHEKARAMIZ M, et al. Review on the Advancements in Wind Turbine Blade Inspection: Integrating Drone and Deep Learning Technologies for Enhanced Defect Detection[J]. IEEE Access, 2024, 12: 33 236-33 282.

[16] SHAKER L M, ALAMIERY A, ISAHAK W N R W, et al. Corrosion in solar cells: challenges and solutions for enhanced performance and durability[J]. Journal of Optics, 2023: 1-15.

[17] LIU Y, GAO H, WANG H, et al. Study on the corrosion behavior of hot-dip galvanized steel in simulated industrial atmospheric environments[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19(1): 100445.

[18] HE C, WANG Z, YOU Y, et al. Influence of soil variability on the corrosion of buried hot-dip galvanized steel [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2025, 20(1): 100889.

[19] ZHANG Y, CHEN W, YAN H, et al. The Effect of Atmospheric Chloride Ions on the Corrosion Fatigue of Metal Wire Clips in Power Grids[J]. Atmosphere, 2023, 14(2): 237.

[20] 陈保安, 徐中凯, 郑 薇, 等. 架空输电导线的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(5): 54-58.
CHEN B A, XU Z K, ZHENG W, et al. Corrosion and Protection of Overhead Transmission Conductors[J]. Corrosion & Protection, 2021, 42(5): 54-58.

[21] WEI Q, LI B, ZHAO B, et al. Highly Sensitive Photoacoustic Multi-Gas Detection of SF_6 Decomposition Components[J]. Photonic Sensors, 2025, 15(4): 1-13.

[22] WANG Z, SONG R, CHEN W, et al. Raman spectroscopy based detection of corrosive sulfur in transformer oil: Method and application[J]. High Voltage, 2022, 7(6): 1 175-1 184.

[23] 高智悦, 姜 波, 樊志彬, 等. 典型接地材料在碱性土壤模拟液中的腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 191-196.
GAO Z Y, JIANG B, FAN Z B, et al. Corrosion Behavior of Typical Grounding Materials in Artificial Alkaline Soil Solution[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 191-196.

[24] WANG X, TANG X, WANG L, et al. Corrosion Behavior of X80 Pipeline Steel under Coupling Effect of Stress and Stray Current[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2014, 9(8): 4 574-4 588.

[25] ZHU Z, SHI C, ZHANG Y, et al. The effects of Cl^- and direct stray current on soil corrosion of three grounding grid materials[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(1): 73-82.

[26] 王 东, 陈继浩, 马 艳, 等. 土壤分层不均匀性对接地网冲击接地阻抗的修正模型研究[J]. 电工技术, 2026(4): 214-216.
WANG D, CHEN J H, MA Y, et al. Research on a Modified Model of Soil Layering Heterogeneity for Impulse Grounding Impedance of Grounding Grids[J]. Electric Engineering, 2026(4): 214-216.

[27] NIU L, CHENG Y F. Electrochemical characterization of metastable pitting of 3003 aluminum alloy in ethylene glycol-water solution[J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(20): 8 613-8 617.

[28] MANSFELD F. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) as a new tool for investigating methods of corrosion protection[J]. Electrochimica Acta, 1990, 35(10): 1 533-1 544.

[29] LI J J, JIANG X, KHAN F, et al. Field deployable impedance-based corrosion sensor[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 236.

[30] 于金山, 万 闪, 赵 鹏, 等. 高压电网大气腐蚀在线监测技术进展[J]. 装备环境工程, 2020, 17(4):

27-33.
YU J S, WAN S, ZHAO P, et al. Advances of Atmospheric Corrosion On-line Monitoring Techniques for Electric Power Grid[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(4): 27-33.

[31] BONGIORNO V, MICHAILIDOU E, CURIONI M. Evaluating organic coating performance by EIS: Correlation between long-term EIS measurements and corrosion of the metal substrate [J]. Materials and Corrosion, 2024, 75(2): 156-173.

[32] WANG Y, QIAO S, XIE J, et al. DRT analysis on EIS data to identify aerobic-anaerobic corrosion evolution of low-carbon steel under deepgeological disposal condition [J]. Corrosion Science, 2025, 255: 113118.

[33] CAI G, WANG H, JIANG D, et al. Impedance sensor for the early failure diagnosis of organic coatings[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2018, 15(6): 1 259-1 272.

[34] 熊启勇, 蒋婉娟, 曾美婷, 等. 基于双电极电化学阻抗实现现场涂层老化状态的快速无损检测[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(4): 1 025-1 034.
XIONG Q Y, JIANG W J, ZENG M T, et al. In situ Rapid Non-destructive Diagnosis on Degradation of Coatings Based on Dual-electrode Electrochemical Impedance Probe[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(4): 1 025-1 034.

[35] 聂晋峰, 金绪良, 殷爱鸣, 等. 海上升压站涂层老化在线监测系统设计研究[J]. 材料保护, 2023, 56(8): 177-183.
NIE J F, JIN X L, YIN A M, et al. Design of Online Monitoring System of Coating Degradation for Offshore Booster Station [J]. Materials Protection, 2023, 56(8): 177-183.

[36] SUN Z, LIU G, SI Y, et al. Corrosion Quantification and Prediction of Steel Structures Using Electromechanical Impedance based Sensors and Deep Neural Networks [J]. Construction and Building Materials, 2026, 514: 145615.

[37] YAHI S, BENSMAILI A, LEHMUSTO J, et al. A novel methodology for monitoring low-temperature corrosion caused by hygroscopic salts using linear polarization resistance[J]. Electrochimica Acta, 2024, 478: 143827.

[38] LIU W, WANG Y, WANG Y, et al. Online monitoring of deposit-induced corrosion in a Waste-to-Energy boiler [J]. Waste Management, 2026, 217: 115507.

[39] 张 毅, 周遇袁, 赵梦瑶, 等. 某跨海悬索大桥主缆腐蚀环境在线监测系统设计及试验研究[J]. 材料保护, 2024, 57(10): 175-181.
ZHANG Y, ZHOU Y Y, ZHAO M Y, et al. Design and Experimental Study on the Online Monitoring System for Corrosion Environment of the Main Cable in a Trans-Strait Suspension Bridge [J]. Materials Protection, 2024, 57(10): 175-181.

[40] 李 伟, 郭子豪, 王 容, 等. 高硅铬铁高压直流接地极腐蚀监测技术与焦炭层填充试验研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 119-125.
LI W, GUO Z H, WANG R, et al. Corrosion Monitoring Technology of High Silicon Ferrochrome High-Voltage DC Grounding Electrode and Experimental Study on Coke Layer Filling [J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 119-125.

[41] ABDULMUTAALI A, ALDRICH C, LEPKOVA K. Unsupervised process monitoring of corrosion based on electrochemical noise and multivariate image analysis[J]. NPJ Materials Degradation, 2025, 9(1): 43.

[42] HAKIMIAN S, BOUZID A H, HOF L A. Corrosion type identification in flanged joints using recurrent neural networks on electrochemical noise measurements [J]. NPJ Materials Degradation, 2025, 9(1): 88.

[43] HOMBORG A, MOL A, TINGA T. Corrosion classification through deep learning of electrochemical noise time-frequency transient information[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 133: 108044.

[44] COMAS C, HUET F, NGO K, et al. Corrosion propagation monitoring using electrochemical noise measurements on carbon steel in hydrogenocarbonated solution containing chloride ions[J]. Corrosion Science, 2021, 193: 109885.

[45] HU J, DENG J, DENG P, et al. Corrosion monitoring method of 304 stainless steel in a simulated marine-industrial atmospheric environment: electrochemical noise method[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2022, 69(6): 629-635.

[46] CHAWLA S, EVANS K, FENG S, et al. Long-Term Performance of Reference Electrodes in Alkaline Radioactive Waste Storage Environments [J]. Corrosion, 2024, 80(5): 472-488.

[47] 毛锐锐, 张 洁, 卞亚飞, 等. 安徽省电网镀锌钢接地材料的土壤腐蚀及其规律[J]. 材料保护, 2025, 58(11): 155-164.
MAO R R, ZHANG J, BIAN Y F, et al. Study on Soil Corrosion and Its Mechanisms of Galvanized Steel Grounding Materials in the Power Grid of Anhui Province[J]. Materials Protection, 2025, 58(11): 155-164.

[48] LU Y, ZHU Z, YIN A, et al. Evaluation of corrosion resistance of 316L stainless steel by laser ultrasonic nondestructive testing technology[J]. Materials Research Express, 2023, 10(9): 096519.

[49] FARIN M, MOULIN E, CHEHAMI L, et al. Monitoring saltwater corrosion of steel using ultrasonic coda wave interferometry with temperature control[J]. Ultrasonics, 2022, 124: 106753.

[50] LYU F, ZHOU X, DING Z, et al. Application Research of Ultrasonic-Guided Wave Technology in Pipeline Corrosion Defect Detection: A Review[J]. Coatings, 2024, 14(3): 358.

[51] 左万君, 戴西斌, 江 华. 管道超声导波检测技术研究进展[J]. 无损检测, 2024, 46(11): 81-90.
ZUO W J, DAI X B, JIANG H. Research progress in pipeline ultrasonic guided wave detection technology[J]. Nondestructive Testing, 2024, 46(11): 81-90.

[52] LI Y, LUO X, LIU R, et al. Waveguide Structure Design and Simulation for High-Temperature Corrosion Thickness Detection[J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12960.

[53] LU Z, LI Y, XIANG S, et al. Research Progress and Development Trends in Pulsed Eddy Current Testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2025, 61(S1): S114-S136.

[54] MUNIR N, HUANG J, WONG C N, et al. Machine learning based eddy current testing: A review[J]. Results in Engineering, 2025, 25: 103724.

[55] PHAM C T, PHAM P H, LE D M, et al. Gaussian-Pulsed Eddy Current Testing With Spiking CNN for Spectral Feature-Based Corrosion Detection[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(14): 26 786-26 793.

[56] TANG X, ZHOU J, JIAN G, et al. Nondestructive differential eddy current testing for corrosion detection on coated aluminium alloys[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2024, 71(6): 855-867.

[57] HUANG P, LI Z, LONG J, et al. Measurement of Lift-Off Distance and Thickness of Nonmagnetic Metallic Plate Using Pulsed Eddy Current Testing[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.

[58] SOPHIAN A, TIAN G, FAN M. Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing and Evaluation: A Review[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.

[59] 魏 巍, 吴欣强, 柯 伟, 等. 接地网材料腐蚀与防护研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(3): 273-277.
WEI W, WU X Q, KE W, et al. Research progress on corrosion and protection of grounding grid materials[J], Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(3): 273-277.

[60] 冯南战, 李志忠, 李亨特, 等. 高压变电站接地网的腐蚀防护与监测技术研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 331-338.
FENG N Z, LI Z Z, LI H T, et al. Review on Research Progress of Technologies for Corrosion Protection and Monitoring of Grounding Grid of High Voltage Transformer Substation[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 331-338.

[61] DAN Y, ZHANG Z, WANG X, et al. A corrosion degree detection method of grounding electrodes considering lightning grounding performance and thermal stability[J]. Measurement, 2024, 238: 115272.

[62] KOCH C, GEORGIEVA K, KASIREDDY V, et al. A review on computer vision based defect detection and condition assessment of concrete and asphalt civil infrastructure[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(2): 196-210.

[63] DAS A, DORAFSHAN S, KAABOUCH N. Autonomous Image-Based Corrosion Detection in Steel Structures Using Deep Learning[J]. Sensors, 2024, 24(11): 3630.

[64] 钟万才, 孙阔腾, 李文戈. 用于超高压输电铁塔非接触式腐蚀检测的无人机检测平台[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(11): 66-71.
ZHONG W C, SUN K T, LI W G. Development of UAV Detection Platform for Non-Contact Corrosion Detection of UHV Transmission Tower[J]. Corrosion & Protection, 2025, 46(11): 66-71.

[65] Yılmaz Y, Nayır S, Erdoğdu Ş. Real-time detection of steel corrosion defects using semantic and instance segmentation models based on deep learning[J]. Materials Today Communications, 2025, 44: 112050.

[66] TAN X, FAN L, HUANG Y, et al. Detection, visualization, quantification, and warning of pipe corrosion using distributed fiber optic sensors[J]. Automation in Construction, 2021, 132: 103953.

[67] CHEN E, LI Y X, ZHANG S S. Quantitative monitoring of localized pitting corrosion in steel bars through a combined use of distributed optical fiber sensors and finite element analyses[J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 136970.

[68] BUDINSKI V, NJEGOVEC M, PEVEC S, et al. High-

Order Fiber Bragg Grating Corrosion Sensor Based on the Detection of a Local Surface Expansion[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2023, 2023(1): 9972511.

[69] CHEN J, ZHANG R, LI Q, et al. Non-Uniform Corrosion Monitoring of Steel Pipes Using Distributed Optical Fiber Sensors in the Fluctuation Zone of a Coastal Wharf[J]. Sensors, 2025, 25(10): 3194.

[70] WANG Z, ZOU Y E, GUO C Y, et al. Integration of BOTDA and φ-OTDR distributed fiber sensing for multiple parameters monitoring[J]. Physica Scripta, 2025, 100(4): 045512.

[71] HABBABA N, MUSTAPHA S, LU Y. Early detection of corrosion in reinforced concrete using ultrasonic guided wave technique correlated with embedded fiber bragg grating strain sensors[J]. Ultrasonics, 2025, 154: 107701.

[72] JIRARUNGSATIAN C, PRATEEPASEN A. Pitting and uniform corrosion source recognition using acoustic emission parameters[J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 187-197.

[73] WANG X, XU S, ZHANG Y, et al. A Method for the Pattern Recognition of Acoustic Emission Signals Using Blind Source Separation and a CNN for Online Corrosion Monitoring in Pipelines with Interference from Flow-Induced Noise[J]. Sensors, 2024, 24(18): 5991.

[74] THIRUMALAISELVI A, SASMAL S. Machine learning-based acoustic emission technique for corrosion-induced damage monitoring in reinforced concrete structures[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 137: 109121.

[75] 秦培岭, 丛 蕊, 张盛瑀, 等. 基于声发射图像识别的 Q235 钢点蚀严重度评价方法[J]. 腐蚀与防护, 2025, 46(5): 30-36.
QIN P L, CONG R, ZHANG S Y, et al. Evaluation Method for Pitting Severity of Q235 Steel Based on AE Image Recognition[J]. Corrosion & Protection, 2025, 46(5): 30-36.

[76] WU T, MIAO X, SONG F. Residual strength prediction of corroded pipelines based on physics-informed machine learning and domain generalization[J]. NPJ Materials Degradation, 2025, 9(1): 12.

[77] SHABAN W M, ELBAZ K, ZHOU A, et al. Physics-informed deep neural network for modeling the chloride diffusion in concrete[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 125: 106691.

[编校:陈 鸣]