

引用格式: 吴梦龙, 何凤东, 房佳瑶, 等. 海上风机叶片腐蚀数据规范化研究[J]. 标准科学, 2025(6): 98–103.

WU Menglong, HE Fengdong, FANG Jiayao, et al. Standardization of Corrosion Data for Marine Wind Turbine Blades: A Comprehensive Study [J]. Standard Science, 2025(6): 98–103.

海上风机叶片腐蚀数据规范化研究

吴梦龙¹ 何凤东¹ 房佳瑶¹ 何琛¹ 姜维宾² 吴晟^{1*}

(1. 哈尔滨工程大学 烟台研究院; 2. 烟台台芯电子科技有限公司)

摘要: 【目的】解决海上风机叶片腐蚀数据标准化缺失问题。【方法】融合现有数据标准, 构建涵盖存储架构、三维定位、特征量化、环境耦合的规范化体系, 建立腐蚀形貌拓扑链与环境参量数据库。【结果】创建国内首个全生命周期叶片腐蚀数据标准, 实现腐蚀表征从定性到定量的转化。【结论】该标准填补了海上风电腐蚀数据空白, 为风机健康监测、防腐技术研发及数字化运维提供数据基础, 助力产业降本增效。

关键词: 海上风机叶片; 数据格式; 腐蚀类型; 规范化; 海上环境

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.06.013

Standardization of Corrosion Data for Marine Wind Turbine Blades: A Comprehensive Study

WU Menglong¹ HE Fengdong¹ FANG Jiayao¹ HE Chen¹
JIANG Weibin² WU Sheng^{1*}

(1. Harbin Engineering University Yantai Research Institute; 2. Yantai Taixin Electronics Technology Co., Ltd.)

Abstract: [Objective] The study aims to resolve the standardization gap in corrosion data management for marine wind turbine blades. [Methods] Integrating existing data protocols, the paper constructs a unified framework addressing storage architecture, 3D spatial corrosion mapping, multi-scale damage quantification, and environmental parameter integration, establishing a corrosion topology database with dynamic environmental linkages. [Results] China's inaugural lifecycle-oriented corrosion data standard is developed, enabling systematic transition from qualitative inspection to quantitative corrosion analytics. [Conclusions] This standard bridges critical gaps in marine corrosion data standardization, offering robust data for blade integrity assessment, anti-corrosion R&D, and smart O&M strategies, thereby enhancing industrial sustainability.

Keywords: marine wind turbine blades; data format; corrosion types; standardization; marine environment

基金项目: 本文受国家重点研发计划项目“大功率海上漂浮式垂直轴风电机组关键技术与装备研发”(项目编号: 2024YFB4205400)资助。

作者简介: 吴梦龙, 硕士研究生, 研究方向为海上风力、光伏发电, 故障诊断等。

吴晟, 通信作者, 博士, 博士后, 研究员, 研究方向为海洋传感器、光伏薄膜组件、海上光伏发电与储能技术、海洋工程监测系统、海上工程智慧运维系统。

0 引言

中国于2020年提出的“双碳”目标将可再生能源发展推向战略高度。作为清洁能源的重要组成部分,海上风电凭借其资源丰富、不占用陆地空间、发电效率高等优势,成为实现能源结构转型的关键抓手^[1]。然而,海上复杂环境(高盐雾、强紫外线、微生物侵蚀及动态冲刷)导致风机叶片腐蚀问题突出,直接威胁设备使用寿命并影响运维经济性^[2-3]。尽管国际标准如IEC 61400—5:2020、国家标准如GB/T 33630—2017等已对风机防腐提出基础性要求,但现有规范多聚焦于检测技术或涂层性能,对腐蚀数据的采集、存储及共享标准鲜有涉及^[4-12]。数据格式的碎片化严重制约了腐蚀机理研究、防护技术优化及国际数据协作,成为海上风电规模化发展的瓶颈。

针对上述挑战,本文系统提出海上风机叶片腐蚀数据标准化框架,重点突破四大核心问题。

(1) 数据储存格式规范化:整合ASTM G107—95^[13-14]与国内材料腐蚀数据库标准^[15-16],构建兼容XML结构化存储的通用数据模板;

(2) 腐蚀坐标体系统一化:基于叶素理论^[17]建立二维空间编码系统,实现对腐蚀位置与深度的精准量化;

(3) 腐蚀程度分级标准化:结合环境分区与面积占比法,提出动态腐蚀等级划分模型;

(4) 环境因素动态耦合:集成多源传感器数据与动态补偿算法,建立环境-腐蚀速率关联图谱。

本研究填补了海上风机腐蚀数据标准化领域的理论空白,其成果可为跨国数据共享、智能防腐决策及全寿命周期管理提供核心支撑,助力实现《“十四五”可再生能源发展规划》提出的海上风电装机容量目标,并为全球风电产业标准化进程贡献中国方案。

1 数据储存格式规范化

海上风机叶片腐蚀数据规范化聚焦数据储存

格式、风机叶片坐标和质量评估等方面,从而确保采集到的数据在质量、分类和一致性上满足标准化要求。风机叶片腐蚀通常由不同原因导致,采集到的腐蚀程度、类型、面积、速率等数据没有一个共同标准,同时受限于其他标准,如ISO 8407:2021《金属和合金的腐蚀 — 从腐蚀测试样品中去除腐蚀产物》^[18]、ISO 12944—2017《钢结构防护涂料系统的腐蚀保护》^[19-20],不同材料被分类记录,尚无规范化记录。

表1总结了现阶段国内外使用较多的腐蚀数据储存格式,其中使用最广泛的是美国材料实验协会的ASTM G107—95 (2020) E1标准。数据储存格式规范化有利于简化处理流程,提高数据的使用率,促进不同组织和企业对于海上风电防腐的科学研究。

建议基于国家材料腐蚀与防护科学数据中心数据,结合ASTM存储格式,根据GB/T 25385—2019标准定期采集备份风电场及监控系统数据。腐蚀数据应涵盖叶片材料、腐蚀类型、面积、程度及检测方法。为便于后续防腐研究及国际交流合作,推荐采用XML格式存储扩展信息(如腐蚀环境、速率、质量损耗和防护措施),其结构化特性优于CSV文件,更适用于复杂数据整合。

考虑到海上风机叶片的腐蚀类型通常与地域性有极强关联,建议将海域坐标、实时与预测天气数据(包括温度、湿度、降水量及风速变化趋势)、环境化学参数(如海水pH值、溶解氧含量、微生物群落)等内容写入XML文件的原始数据信息中,从而增加各腐蚀影响因素之间的关联性。此方案不仅增强了数据兼容性与可追溯性,还可为跨国风电项目提供统一的数据接口,促进国际防腐技术经验共享与标准互认,减少地域差异导致的运维成本冗余,推动全球海上风电产业标准化与可持续发展。

2 叶片坐标体系规范化

目前,全球海上风机叶片的设计和装配领域

表1 国内外现行腐蚀数据储存格式

组织机构	数据格式/标准	内容描述	目的及应用范围
国家材料腐蚀与防护科学数据中心 ^[15-16]	CDC数据储存格式	收集和整理材料腐蚀与防护的相关数据,进行科学研究和数据共享服务,建立了大型数据库和国家级共享服务平台	落实《科学数据管理办法》和《国家科技资源共享服务平台管理办法》,提供数据支持和服务
美国材料试验协会 (ASTM) ^[13-14]	ASTM G107-95 (2020) E1	将金属腐蚀数据采集和编译输入电子数据库,涵盖必要的数据类别和特定数据元素,适应搜索策略和数据比较	评估金属和合金在各种环境和暴露条件下的兼容性,确保数据适用于不同的数据库和环境
国际腐蚀工程师协会 (NACE) ^[21-22]	NACE RP0775-91	与特定的测试方法或腐蚀控制领域相关,与腐蚀挂片的准备和安装有关,为石油作业中的腐蚀监测提供指导	指导石油作业中的腐蚀监测活动
德国标准化学会 (DIN) ^[23]	DIN 50918:2018-09	针对金属材料的电化学腐蚀测试法,相关行业进行金属材料的腐蚀性能评估	为相关行业提供金属材料的腐蚀性性能评估标准

尚未形成统一的国际标准,不同国家和企业往往基于自身需求或行业习惯制定规范。这种分散化导致叶片在几何参数、材料选择,甚至防腐策略上存在显著差异,尤其在坐标系的应用上问题突出。例如,一些研究采用以叶片根部为原点的局部坐标系分析结构应力分布,而另一些研究则选择以塔基或海平面为基准的全局坐标系评估动态载荷。此外,气动坐标系(用于翼型参数分析)与腐蚀监测坐标系(定位损伤位置)的并存,进一步加剧了数据格式的碎片化。不同坐标系的混杂使用不仅增加了数据整合的难度,还使得跨团队协作和防腐技术的普适性验证变得复杂。

针对这一问题,建议在海上风机叶片的腐蚀

研究中推动坐标体系的统一化。同时引入腐蚀专用参数(如腐蚀深度、面积占比等),构建一套兼容性强、可扩展的标准化框架。这一框架不仅能为不同研究团队提供一致的数据基准,还能促进国际项目间的数据共享,为全球海上风电产业的协同创新与标准制定提供技术支撑。

针对不同风机叶片形状、尺寸及传感器差异导致的坐标系建模多样性,简化叶素理论(BEM)^[17],建立腐蚀区域专用二维坐标系,如图1所示。以转轴为原点构建坐标系。

(1) (x, y) : 定位腐蚀点距转轴的横向与纵向距离(单位: m)。

(2) $z(n-b)$: 复合参数编码腐蚀类型与程度。

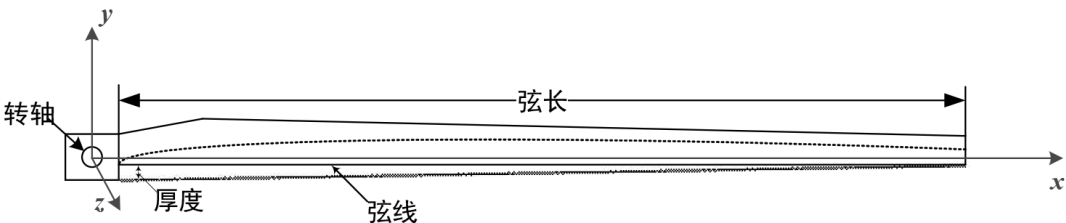


图1 海上风机叶片腐蚀坐标系规范示意图

其中, n 为腐蚀类型代码 (①盐雾腐蚀; ②微生物腐蚀; ③紫外线腐蚀; ④冲刷腐蚀), b 为腐蚀程度, 定义为腐蚀区域面积与叶片总面积的比值 ($0 < b \leq 1$)。

该体系通过空间维度的量化与标准化编码, 显著提升了防腐方案的规划效率。

3 叶片腐蚀程度标准化

海上风机叶片腐蚀程度评估数据在叶片防腐工程中至关重要。针对海域环境独特性, 建立规范的叶片腐蚀程度数据库, 能够为今后防腐工作提供可视化数据。海上风机所处环境复杂, 其垂直方向可划分为大气区、飞溅区、潮差区、全浸区及海泥区^[24], 如图2所示。叶片主要位于大气区, 叶尖周期性进入潮差区, 这两区域因干湿交替与盐雾沉积成为腐蚀高发区。

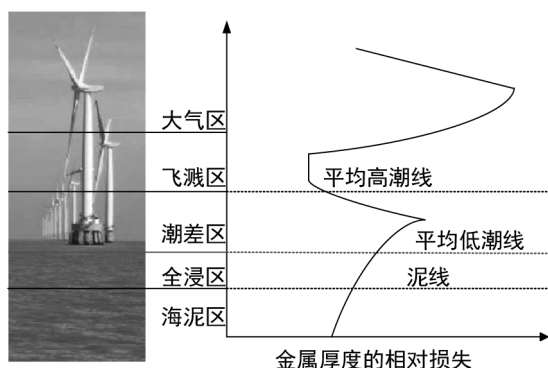


图2 海洋环境分区及区域金属厚度相对损失对比

根据第2节定义的 $z(n-b)$ 编码规则, 腐蚀类型由 n 标识, 腐蚀程度 b 通过面积占比法量化^[25]。结

合图2所示的海洋分区特征, 进一步提出动态腐蚀等级划分模型, 具体示例如图3所示。在图1所建立的坐标系中, 假定该叶片遭受了盐雾腐蚀, 腐蚀面积与叶片面积之比为 b_1 , 在二维风机坐标上的位置为 (x_1, y_1) , 那么该组腐蚀坐标数据即可表示为 $EB[x_1, y_1, z(①-b_1)]$, 其中EB为腐蚀叶片。

4 腐蚀环境因素规范化

本文针对海洋极端环境与风机叶片动态形变导致的腐蚀数据失真问题, 通过标准化采集校准技术构建抗干扰数据体系。采用动态补偿算法消除风速旋转形变误差, 将数据偏差率从15%~20%压缩至<5%, 同步集成盐雾浓度、温湿度等实时环境参数构建多因子腐蚀速率预测模型。基于风机叶片25年全寿命周期建立的动态腐蚀数据库, 可量化分析材料对海域特异性腐蚀因子的耐受阈值, 支撑涂层防腐、阴极保护等技术的适配性优化。该体系通过环境-腐蚀响应图谱指导新型复合材料研发, 并实现腐蚀因子阈值预警, 使运维成本降低30%, 为海上风电全生命周期精准管控提供核心数据引擎。

海上风机叶片腐蚀情况往往与其所在海域的环境直接相关, 如该海域的经纬度、盐雾、涌浪、温度、湿度、光照、离岸距离、海水成分和风速等条件。不同经纬度的海域, 其气候、温度、湿度等环境因素存在差异, 这些差异会影响风机叶片的腐蚀速率。表2总结了某海域中影响风机叶片腐蚀的环境因素, 重点阐明了在海洋环境中盐雾腐蚀对材料性能的显著影响。盐分 (如 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 等) 的存在对腐蚀过程至关重要, 高盐浓度

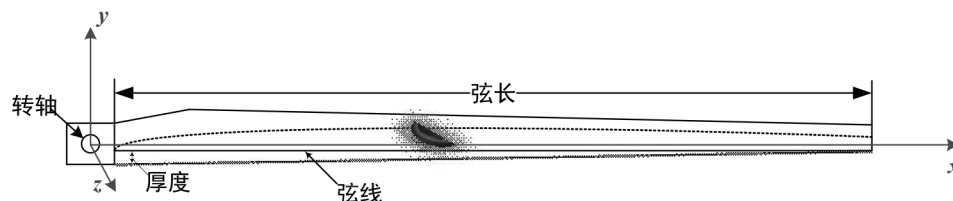


图3 腐蚀数据坐标化规范化表示

往往加速材料的腐蚀速率。环境因素（如温度、湿度和风速等）也显著影响盐雾腐蚀行为，进一步推动材料劣化。在研究海洋环境下的腐蚀机理时，盐雾腐蚀需受到特别关注，以便制定有针对性的防护策略。

以烟台市的华能山东半岛南4号海上风电场为例，绘制如图4的海上风机叶片腐蚀类型与环境条件因果图（以盐雾腐蚀为例），数据来源：海阳市政府官网。

5 结语

研究提出海上风机叶片腐蚀数据标准化体系，通过统一数据存储格式、叶片坐标系、腐蚀程度及环境参数标准，构建全链条数据管理框架。该标准有利于保障风机叶片腐蚀数据质量、提升数据共享与分析效能。通过统一数据标准消除协作壁垒，有助于行业内形成统一的评估体系和技术规范，促进海上风电设备的设计、制造、运营和维护的标准化发展，提升行业的技术水平和竞争力。

表2 某海域腐蚀影响因素

环境因素	影响描述	腐蚀类型
经纬度	影响气候、温度、湿度等，不同经纬度海域风机腐蚀速率不同	盐雾腐蚀
盐雾	含Na ⁺ , Cl ⁻ , K ⁺ 和SO ₄ ²⁻ 等离子，形成电解质溶液，加速腐蚀过程	盐雾腐蚀
涌浪	周期性干湿交替，加剧叶尖腐蚀，冲击力导致材料疲劳损伤	冲刷腐蚀
温度	温度波动影响腐蚀反应速率，高温加速腐蚀，低温减缓	盐雾腐蚀
湿度	影响水分在叶片表面的沉积，高湿度加剧腐蚀反应	盐雾腐蚀
光照	紫外线辐射加速材料老化，破坏表面涂层，降低抗腐蚀性能	紫外线腐蚀
风速	风速越大，盐雾沉积速度越快，腐蚀速率增加；风速变化导致交变应力，加速疲劳损伤	盐雾腐蚀、冲刷腐蚀
离岸距离	影响盐雾、湿度等腐蚀因素，离岸越远，腐蚀影响越小，但维护成本上升	盐雾腐蚀
生物群落	海藻、石灰虫、苔藓虫、藤壶等附着性生物，以及海鸟粪便中的尿酸等化学物质加剧腐蚀过程	微生物腐蚀
海水成分	影响腐蚀过程，如盐离子种类和浓度	盐雾腐蚀

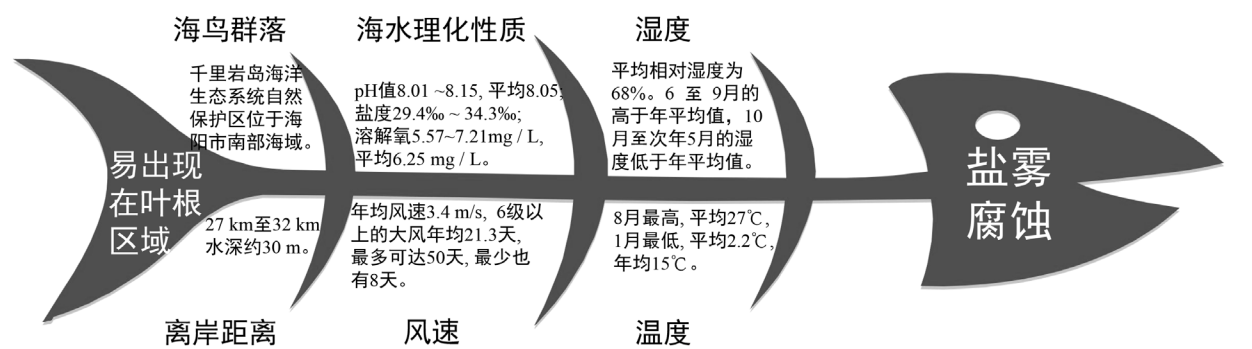


图4 海上风机叶片盐雾腐蚀因果图

参考文献

- [1] International Renewable Energy Agency. Global wind energy report 2024[M]. Abu Dhabi: IRENA, 2024.
- [2] International Energy Agency. World energy outlook 2023[M]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [3] 李志川,齐磊,赵楠,等.海上浮式风电装备防腐技术[J].船舶工程,2024,46(S2):159–166.
- [4] International Organization for Standardization. Condition monitoring and diagnostics of wind turbines — Part 1: General guidelines: ISO 16079–1:2017[S].
- [5] International Organization for Standardization. Paints and varnishes — Coating systems for wind–turbine rotor blades — Part 7: Determination and evaluation of resistance to hail: ISO/TS 19392–7[S].
- [6] International Electrotechnical Commission (IEC). Wind turbine blades: IEC 61400–5:2020[S].
- [7] International Electrotechnical Commission (IEC). Lightning protection for wind turbine generators and wind power systems: IEC 61400–24:2019[S].
- [8] 国家机械工业局. 风力发电机组风轮叶片: JB/T 10194—2000[S].
- [9] 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组 风轮叶片超声波检测方法: GB/T 42592—2023[S].
- [10] 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组 风轮叶片红外热像检测指南: GB/T 37431—2019[S].
- [11] 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组 雷电保护: GB/T 33629—2017[S].
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 海上风力发电机组防腐蚀规范: GB/T 33630—2017[S].
- [13] Corrosion tests and standards: application and interpretation[M]. ASTM international, 2005.
- [14] American Society for Testing and Materials. Standard guide for formats for collection and compilation of corrosion data for metals for computerized database input: G107–95 (2020) E1[S].
- [15] 吴伟同,徐迪,程学群,等.国家材料腐蚀与防护科学数据中心建设历程与发展现状[J].材料导报,2024,38(23):197–204.
- [16] 叶春波. “国家材料腐蚀与防护科学数据中心” 正式成为20个国家科学数据中心之一[J].石油化工腐蚀与防护,2020,37(1):41.
- [17] SUN Z, CHEN J, SHEN W Z, et al. Improved blade element momentum theory for wind turbine aerodynamic computations[J]. Renewable energy, 2016, 96: 824–831.
- [18] International Organization for Standardization. Corrosion of metals and alloys — Removal of corrosion products from corrosion test specimens: ISO 8407: 2021[S].
- [19] International Organization for Standardization. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems: ISO 12944: 2017[S].
- [20] WU M, GUO W, DONG S, et al. A hybrid triboelectric nanogenerator for enhancing corrosion prevention of metal in marine environment[J]. npj Materials Degradation, 2022, 6(1): 73.
- [21] BOTH A C. Benchmarking International Cathodic Protection and Alternating Current Mitigation Standards to Determine Suitable Protection Criteria[C]//AMPP Middle East Corrosion Conference and Exhibition. AMPP, 2023: AMPP–MECC–2023–20206.
- [22] National Association of Corrosion Engineers. Preparation, installation, analysis, and interpretation of corrosion coupons in oilfield operations: NACE. RP0775[S].
- [23] Deutsches Institut für Normung. Corrosion of metals – Electrochemical corrosion tests: DIN 50918:2018–09[S].
- [24] 王宇晗,李俊,刘恒维,等.海洋环境中金属材料微生物腐蚀研究进展[J].中国腐蚀与防护学报,2025,45(3):577–588.
- [25] International Organization for Standardization. Corrosion of metals and alloys — Corrosivity of atmospheres — Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Second edition: ISO 9226: 2012[S].