

海上风机腐蚀监测系统应用与数据分析

蒙雪银¹, 冀卫东¹, 李荣富¹, 谭泓², 薛文飞², 钱秋培¹, 郝鹏²

(1. 金风科技股份有限公司, 北京 100176; 2. 江苏金风科技有限公司, 盐城 224100)

摘要:利用电阻探针传感器(TER)开发了海上风力发电机组腐蚀监测系统,并将其安装于南海域广东省湛江市某海上风电项目中,通过监测结果评估了该项目海上风力发电机组内外部腐蚀速率及腐蚀环境等级。结果表明:风机内外环境均为典型的海洋大气腐蚀环境,呈现典型的干-湿交替周期变化规律;风机内外腐蚀速率最大值均出现在腐蚀初期,并随着服役时间延长逐渐降低最后趋于稳定;根据数据拟合得到腐蚀量与时间的幂函数模型;最后,对机组防腐蚀系统设计等级及耐久性要求提出了一定的建议。

关键词:腐蚀监测;海上风机;腐蚀速率;防腐蚀系统

中图分类号: TG174

文献标志码: A

文章编号: 1005-748X(2024)11-0077-08

中国海岸线长达 1.8 万 km,海上风能资源十分丰富。根据中国气象局风能资源详查初步成果,我国近海水深 5~25 m 区域、海平面以上 50 m 高度范围内,风电可装机容量约 2 亿 kW,水深 5~50 m、海平面以上 70 m 高度范围内,风电开发潜力约 5 亿 kW。其中,固定式风电容量为 1 400 GW,漂浮式风电容量为 1 582 GW。截至 2022 年底,我国累计海上风电装机量为 31.44 GW,占亚太地区总装机量的 92%,全球总装机量的 48%^[1]。

随着海上风能资源逐步开发,海上风力发电机组(以下称风机)的服役环境由近海环境步入深远海环境,风机常受到高温、高湿、高盐雾、长日照、海泥、浮冰等恶劣海上气候条件的影响,在多种环境因素耦合作用下材料腐蚀加速,使海上风机存在安全隐患^[2]。

海上风机设计寿命通常为 25 a,风机防腐蚀系统的寿命与机组设计寿命相同,通常为 25~27 a。海上风机防腐蚀系统的设计由环境条件、服役年限、施工和维护性综合决定,总体采用差异化防腐蚀技术方案,主要包括有机/无机涂层、金属镀层^[3-4]、耐腐蚀材料、阴极保护^[5]、气相防锈、环境控制、预留腐蚀裕量^[6]、聚合物包覆^[7]等。

由于特殊的地理环境和技术要求,海上风机的

维修费用极高^[8]。海洋腐蚀不但给海上风机带来巨大安全隐患,缩短风机运营寿命,也大大增加了风机建设投资和运行维护成本。因此,及时掌握海上风机全生命周期内腐蚀环境变化趋势及防腐蚀系统服役状态至关重要^[9]。与人工巡检腐蚀方式不同,腐蚀传感器可通过监测海洋大气腐蚀环境和防腐蚀系统服役状态,实现对海上风机结构腐蚀状态的智能感知,在不破坏钢结构情况下完成海上风机的腐蚀监测,传感器的传输信号不易受干扰,大幅节约了通讯、电缆布线成本,整体提高了风电设备智能测控水平,实现了海上风机的远程化、无人化、实时化腐蚀在线监控,为风机预防性维修保养提供判断依据,保障海上风机能够可靠运行^[10-11]。

作者利用电阻探针传感器(TER)开发了海上风机腐蚀在线监测系统,并将该监测系统安装于南海海域某海上风电项目中,对海上风机腐蚀情况和腐蚀环境进行在线监测,评估了该项目海上风机外、内部腐蚀速率及腐蚀环境等级,为海上风机腐蚀环境准确识别积累了一定的数据基础。

1 海上风机腐蚀在线监测

1.1 工程概况

项目位于广东省湛江市某海上风场,地处北回归线以南的低纬度地带,项目地点离岸距离为 27 km,属亚热带海洋性季风气候,长夏无冬,热量充足、干湿季节分明,空气湿润,雨量充沛。根据项目地附近气象站资料,项目地全年平均气温为 23.3℃,平均相对湿度为 84%,平均降雨量为 1 379 mm,平均日照时数为 2 120 h。

收稿日期: 2024-01-22

基金项目:科技部项目(2022YFB4201400);中国长江三峡集团有限公司科研项目(NBWL202400464);浙江金风科技有限公司科研项目(G01338)

通信作者:蒙雪银(1991—),工程师,硕士,研究方向为海上钢结构腐蚀防护系统设计等,13771022346, mengxueyin1991@outlook.com

1.2 海上风机腐蚀在线监测系统

1.2.1 电阻探针传感器

电阻探针传感器(TER)主要是通过测量腐蚀过程中金属丝或薄膜的电阻增量计算金属损失量,然后根据截面积与电阻的线性关系得出腐蚀速率,特别适用于监测均匀腐蚀^[12]。电阻探针传感器容易受到温度干扰,因此在传感器内部设置了温度补偿传感器,提高电阻探针测试的准确性,消除系统性环境误差^[10]。

1.2.2 监测平台

海上风机腐蚀监测平台由外腐蚀监测平台和内腐蚀监测平台两部分组成。外腐蚀监测平台被安装固定在风机外平台格栅板上,采用太阳能供电,测量参数包括风机外腐蚀量、测量电阻、腐蚀速率、温度、湿度等;内监测平台通过壁挂方式安装于机舱内,采用机舱内电源供电,测量参数包括机组内腐蚀量、测量电阻、腐蚀速率、温度、湿度等^[13]。选用丝状电阻探针作为腐蚀传感器,该传感器采用恒流源双向激励,开尔文四端测试法测试。该测试方法具有极高的分辨率和动态范围,电阻探针腐蚀总量为 1 000 μm ,减薄分辨率为 0.1 μm ,电阻探针材料为 Q235 钢,其化学成分(质量分数)为: $\leq 0.17\% \text{C}$, $\leq 1.4\% \text{Mn}$, $\leq 0.35\% \text{Si}$, $\leq 0.040\% \text{S}$, $\leq 0.040\% \text{P}$ 。同时,采用参比电阻测量,降低温度效应引起的测量误差。温度传感器测量范围为 $-40\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量误差 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度(RH)传感器测量范围为 $0\sim 100\%$,测量误差 $\leq \pm 3\%$ 。

1.2.3 数据传输

腐蚀数据平台传输采用 4G 网络,数据传输过程见图 1。根据监测设备的安装位置,机组上布置

2 个 DTU 通信模块,其中 1 个 DTU 安装于机组外(基础外平台处),另 1 个 DTU 安装于机组内(机舱内平台处),DTU 与腐蚀监测设备通过 RS485 两线连接并传输数据,传输协议为 Modbus 协议。通过 4G 网络将数据传输至云服务器以实现数据收集和展示。监测数据可通过网页或者手机 App 访问的形式在任何有网络的环境中查看。



图 1 海上风机腐蚀在线监测系统的数据传输

Fig. 1 Date transmission of on-line corrosion monitoring system for offshore wind turbine

2 结果与讨论

该在线监测系统运行时间为 2022 年 7 月 1 日到 2023 年 6 月 30 日,监测周期为 1 a,测量参数主要有腐蚀速率、腐蚀量、温度、相对湿度等。以下将对这些监测数据进行分析。

2.1 服役环境数据分析

在线监测系统温度、湿度传感器回传数据见图 2。海上风机内外环境均为典型的海洋大气环境,呈现明显的干-湿交替周期变化规律。白天温度较高,相对湿度较低;夜晚相对湿度较高,温度较低。同时,由于机舱内部安装了除湿机,机舱内相对湿度整体保持在较低水平,均处于金属腐蚀临界相对湿度(铁 65%,锌 70%,铝 76%)以下。

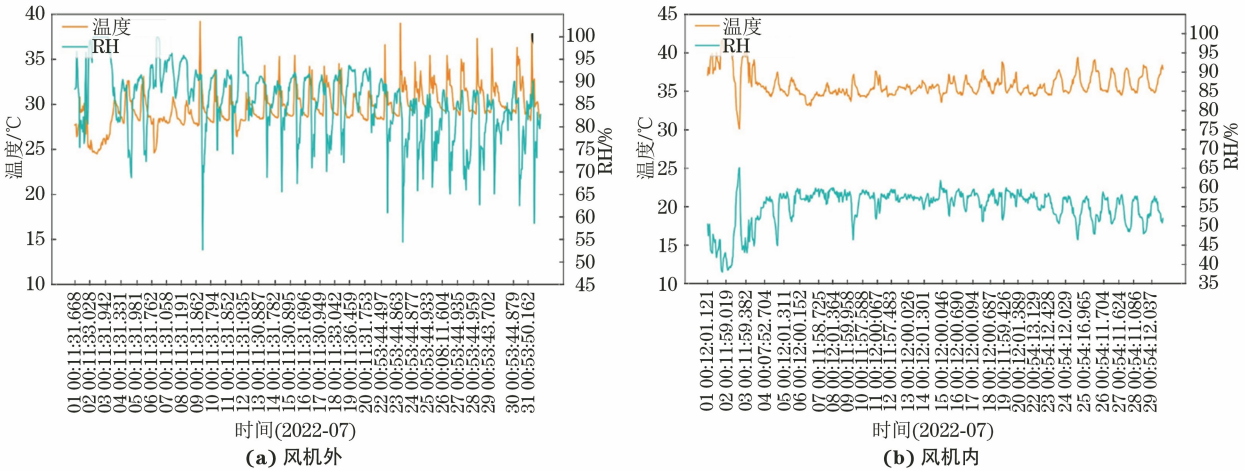


图 2 由在线腐蚀监测系统监测得到环境数据(2022-07)

Fig. 2 Environmental data monitored by on-line corrosion monitoring system (2022-07): (a) outside wind turbine; (b) inside wind turbine

风机内外全年环境数据见表 1。海上风机外部处于海洋大气腐蚀环境,年最高气温出现在 7 月,为 39.20 ℃,年最低气温出现在 1 月,为 11.90 ℃,实测年均气温为 24.56 ℃。风机外环境湿度较高,年均相对湿度为 87.22%,月平均润湿(相对湿度大于 85%)时间为 20.94 d,4 月与 11 月润湿概率(润湿时

间/总时间)均超过 90%。风机内安装了配电柜、控制柜等电控柜体,致使风机内部温度高于外部。由表 2 可见,风机内年最高温度出现在 5 月,可达 44.5 ℃,年最低温度出现在 12 月,为 15.3 ℃,年平均温度为 32.09 ℃。风机内部环境的湿度较为稳定,年平均相对湿度为 50.51%。

表 1 风机外全年环境数据

Tab. 1 Annual environmental data outside wind turbine

日期	温度/℃			相对湿度/%			润湿时间/d	润湿概率/%
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值		
2022-07	39.2	24.5	29.66	99.90	52.70	85.50	17.71	57.12
2022-08	33.9	23.6	29.06	99.90	54.60	82.62	20.83	67.20
2022-09	33.9	23.6	29.06	99.90	54.60	82.62	10.21	34.03
2022-10	31.4	16.1	25.97	99.90	49.80	79.10	10.83	34.95
2022-11	27.6	20.6	23.99	99.90	56.60	91.72	28.00	93.33
2022-12	21.7	12.9	17.86	99.90	44.80	79.13	16.29	52.55
2023-01	24.0	11.9	16.96	99.90	47.70	86.17	20.17	65.05
2023-02	25.1	15.3	19.57	99.90	72.40	90.42	20.04	71.58
2023-03	28.4	18.3	21.68	99.90	70.00	91.78	27.58	88.98
2023-04	30.6	18.3	24.32	99.90	78.90	93.94	28.38	94.58
2023-05	34.1	21.6	27.38	99.90	70.90	92.82	26.79	86.42
2023-06	37.5	24.5	29.27	99.90	64.70	90.83	24.50	81.67

表 2 风机内全年环境数据

Tab. 2 Annual environmental data inside wind turbine

日期	温度/℃			相对湿度/%		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
2022-07	41.7	30.1	35.85	65.10	38.00	54.98
2022-08	40.5	32.2	35.38	59.40	41.90	54.38
2022-09	42.5	31.6	35.78	59.40	33.40	49.97
2022-10	41.5	28.4	34.42	58.50	22.30	42.66
2022-11	38.1	27.9	31.46	58.60	25.60	53.48
2022-12	34.3	15.3	26.18	65.30	17.60	42.65
2023-01	31.9	21.0	25.85	57.20	22.80	45.70
2023-02	36.9	24.4	28.33	57.30	29.50	48.87
2023-03	40.2	22.6	29.44	65.60	31.80	51.29
2023-04	40.9	28.9	32.77	58.00	36.10	51.99
2023-05	44.5	28.0	34.71	66.90	35.40	54.08
2023-06	41.5	29.7	34.98	66.60	44.10	56.06

2.2 腐蚀速率分析

环境参数与风机内外腐蚀速率关系见图 3 和图 4。由图 3 和图 4 可见,海上风机直接服役于海洋大气环境,当机外环境温度超过 25 ℃时,温度、湿度参数呈现明显的负相关,环境温度越高,湿度越低,而机内环境温度超过 35 ℃时同样呈现这一特点。同

时,海上风机内外腐蚀速率最大值均出现在腐蚀初期。腐蚀初期电阻探针表面无腐蚀产物覆盖,腐蚀速率较大;随着服役时间延长,腐蚀产物逐渐在电阻探针表面堆积,且其耐蚀性略高于基材,可以对基材起到了一定的保护作用,从而降低腐蚀速率^[14]。

2.3 腐蚀量-时间幂函数计算模型

针对广东省湛江市某海上风电项目测试周期内腐蚀环境监测数据,对风机外腐蚀量-时间进行了非线性回归分析^[15-16],相关幂函数计算模型见图 5,得到了腐蚀量与时间幂函数计算模型,如式(1)所示,其拟合度为 0.994,该幂函数计算模型可用于同项目其他机位点服役周期内腐蚀量预测^[17-18]。

$$D = 4.13 \cdot t^{1.16} \tag{1}$$

式中: D 为腐蚀量, μm ; t 为腐蚀时间,月。

2.4 Spearman 相关系数分析

根据广东省湛江市某海上风电项目温度、相对湿度、腐蚀速率、腐蚀量等数据统计情况,按月取极大值、极小值、均值等进行了 Spearman 相关系数分析,分析结果见图 6。由计算结果可知,在海洋大气腐蚀环境中,影响风机腐蚀速率(最大腐蚀速率 CR_{max} 、最小腐蚀速率 CR_{min} 、平均腐蚀速率 CR_{mean})因素较多,腐蚀过程与环境因素

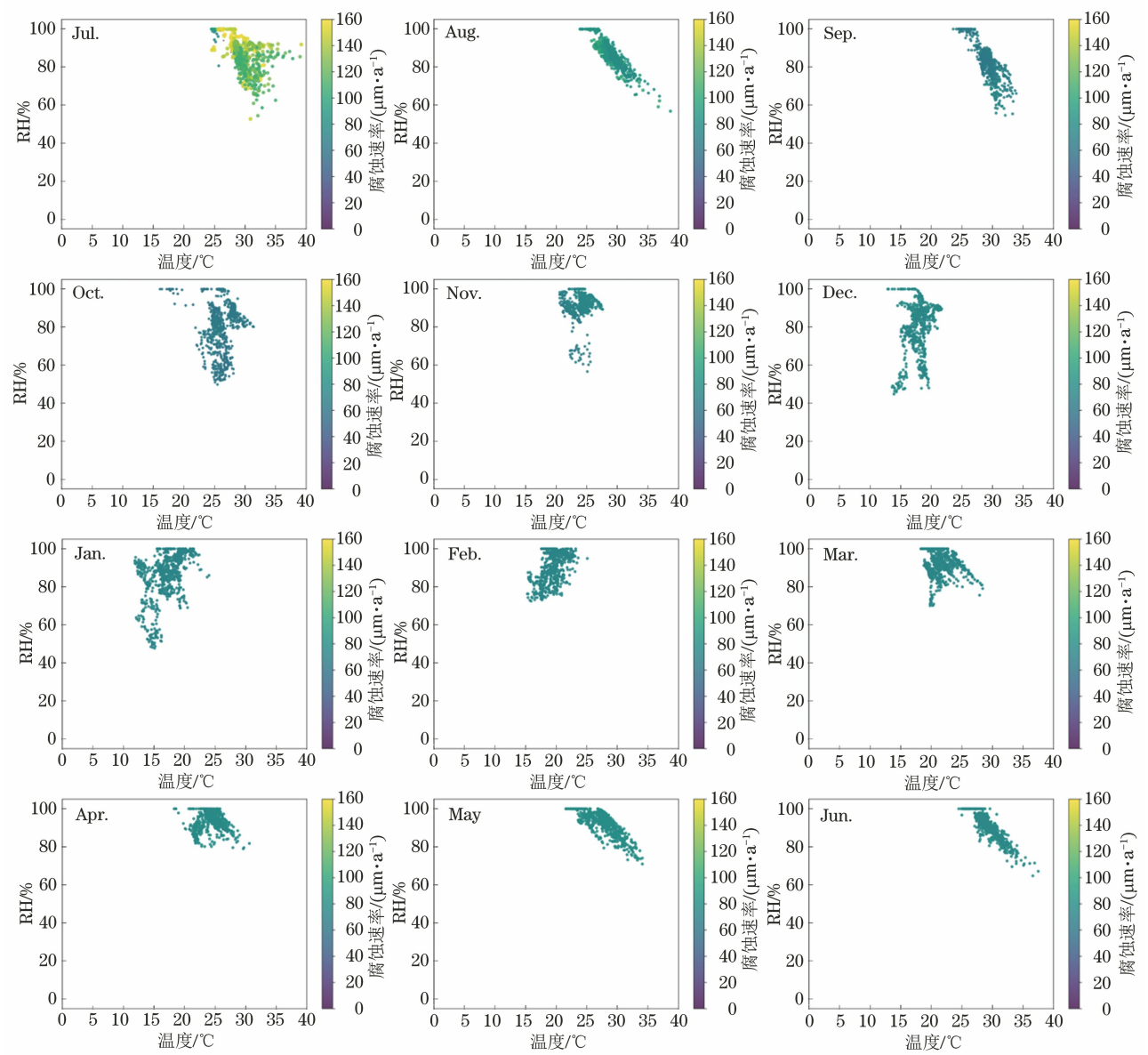


图 3 风机外腐蚀速率(2022-07~2023-06)

Fig.3 External corrosion rate of wind turbine (2022-07—2023-06)

(温度 T、相对湿度 RH、润湿时间 Time_over85)均存在正相关性。由 Spearman 相关系数分析结果可知,腐蚀速率(最大腐蚀速率、最小腐蚀速率、平均腐蚀速率)与温度相关性较大,而腐蚀量(C_volume)与相对湿度相关性较大。同时,海上风机外部腐蚀环境复杂,还受到其他腐蚀因素的影响,如 SO₂ 沉降和 Cl⁻ 浓度等;风机内部通过除湿机及空气过滤装置进行环境控制,致使风机内腐蚀性气体含量和环境相对湿度远低于风机外部,因而风机内部腐蚀反应主要受到温度、相对湿度等因素影响。

2.5 防腐蚀系统等级及耐久性设计

图 7 为海上风电项目风机内外环境数据分布

情况直方图。其中柱形面积代表该区间数据发生概率。表 3 为风机内外腐蚀速率统计结果。根据在线监测数据情况及历史数据,广东省湛江市某海上风电项目机组外部位于海洋大气腐蚀环境,腐蚀速率整体处于 C4~C5 等级,最大瞬时腐蚀速率可达 161.28 μm/a,机组内部腐蚀速率处于 C1~C2 等级。海上风力发电机组设计寿命通常为 25 a,其防腐蚀系统耐久性要求与机组同寿命。综上所述,海上机组外钢结构及外附件(如轮毂、塔架、运维吊机)等部位的防腐蚀系统应按照 C5-VH 以上等级设计,内部钢结构及内附件应按照 C2-VH 以上等级设计^[19-20]。

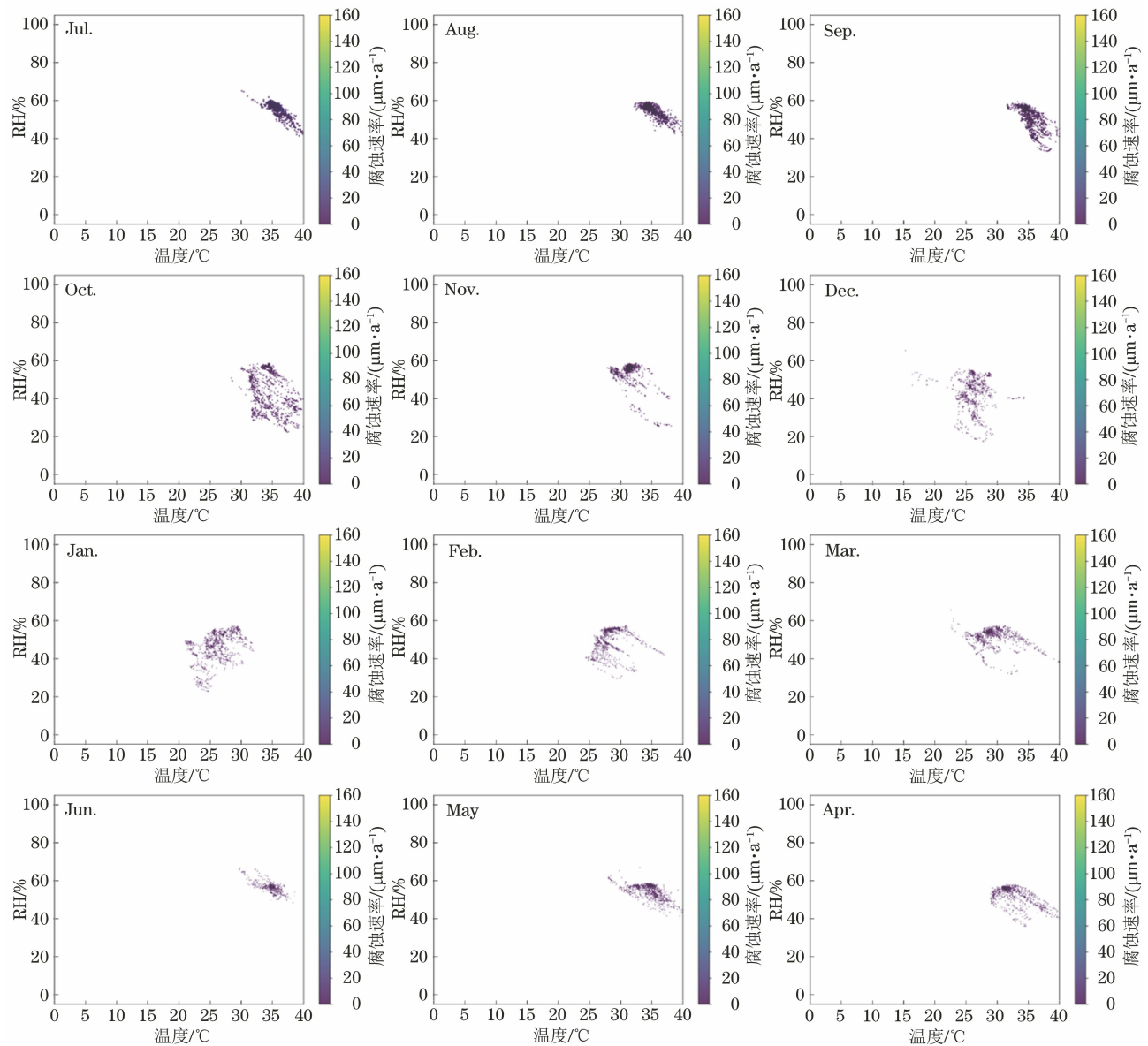


图 4 风机内腐蚀速率(2022-07~2023-06)

Fig. 4 Internal corrosion rate of wind turbine (2022-07—2023-06)

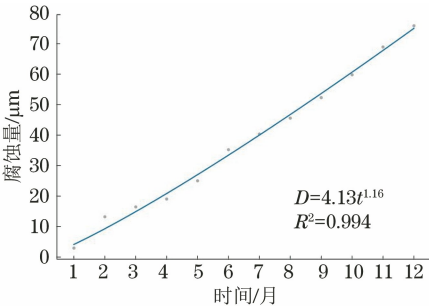


图 5 腐蚀量-时间幂函数模型(风机外)

Fig.5 Corrosion volume vs. time power function model (outside wind turbine)

3 结 论

(1) 广东省湛江市海上风电项目风机内外均为

典型的海洋大气腐蚀环境,呈现明显的干-湿交替周期变化规律。白天环境温度相对较高,湿度相对较低;夜晚湿度相对较高,温度相对较低。

(2) 风机内外腐蚀速率最大值均出现在腐蚀初期,并随着服役时间延长逐渐降低最后趋于稳定。随着服役时间延长,腐蚀产物逐渐在电阻探针表面堆积,且表面锈层耐蚀性略高于基材,从而减缓了腐蚀的发生。

(3) 根据腐蚀监测数据,得到了项目地腐蚀量与时间幂函数模型, $D = 4.13 \cdot t^{1.16}$,拟合度为0.994,并进行了 Spearman 相关系数分析。

(4) 根据该风机内外历史数据分布情况,风机外部位于海洋大气腐蚀环境,腐蚀速率整体处于

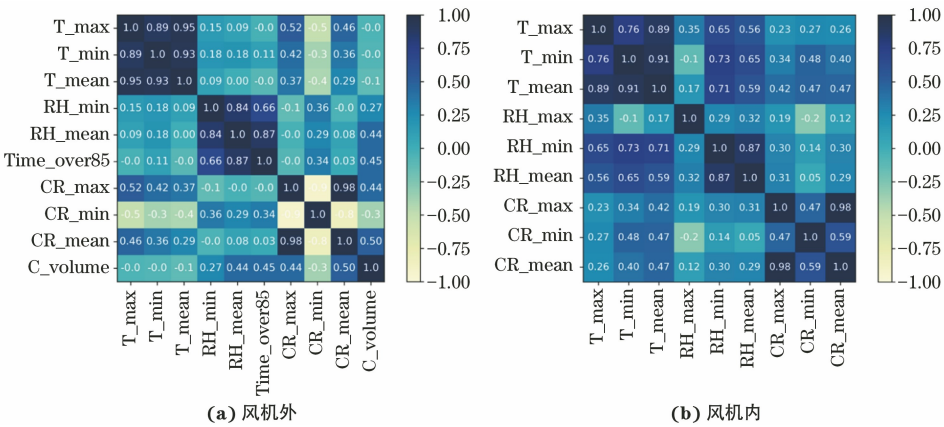


图 6 Spearman 相关系数分析结果

Fig.6 Spearman correlation coefficient analysis results: (a) outside wind turbine; (b) inside wind turbine

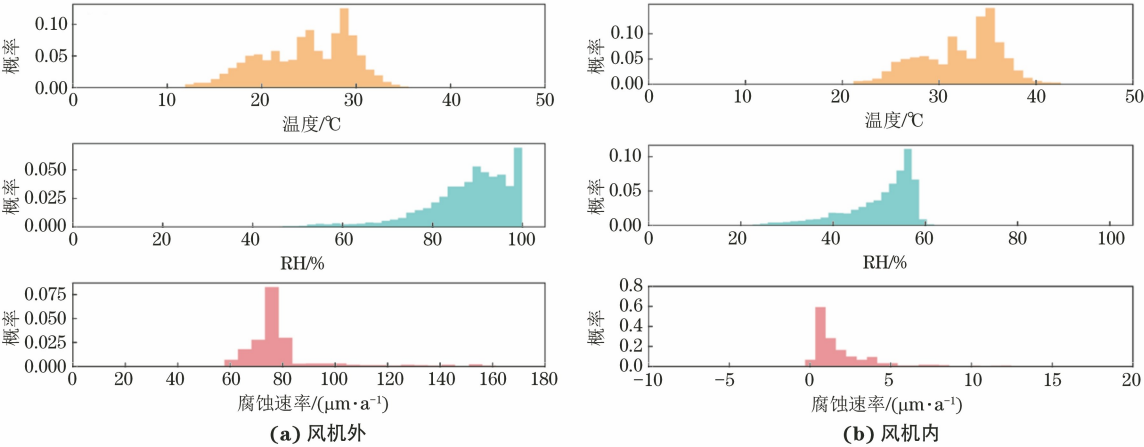


图 7 风机内外环境数据分布

Fig.7 Distribution of environmental data: (a) outside wind turbine; (b) inside wind turbine

表 3 风机内外腐蚀速率统计结果

Tab.3 Statistical results of corrosion rate data inside and outside wind turbine

序号	日期	风机外腐蚀速率/($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)			风机内腐蚀速率/($\mu\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$)		
		最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
1	2022-07	161.28	6.06	126.72	25.27	1.83	11.90
2	2022-08	77.68	63.11	69.54	7.29	3.26	4.95
3	2022-09	77.68	63.11	69.54	4.17	2.07	3.35
4	2022-10	66.26	59.60	63.30	2.89	1.75	2.27
5	2022-11	76.30	65.84	72.80	2.09	1.17	1.61
6	2022-12	77.43	73.33	75.93	1.63	0.79	1.11
7	2023-01	74.05	72.12	72.99	1.32	0.28	0.93
8	2023-02	74.30	72.22	73.60	1.16	0.68	0.90
9	2023-03	75.70	73.71	74.36	1.13	0.57	0.90
10	2023-04	78.87	75.38	76.86	1.03	0.63	0.82
11	2023-05	79.88	78.65	79.34	0.96	0.59	0.81
12	2023-06	79.16	75.09	76.97	0.95	0.21	0.56

C4~C5 等级,风机内部腐蚀速率处于 C1~C2 等级。风机外钢结构及外附件的防腐蚀系统应按照 C5-VH 等级设计,内部钢结构及内附件应按照 C2-VH 等级设计。

参考文献:

[1] 陶建根,陈怡,黄博远. 海上风电发展现状与趋势分析[J]. 能源工程,2023,43(4):1-9.

- TAO J G, CHEN Y, HUANG B Y. Current situation and development trend of offshore wind power[J]. Energy Engineering, 2023, 43(4): 1-9.
- [2] 贾文虎,徐群杰. 海上风电设施防腐蚀技术研究进展[J]. 发电技术, 2023, 44(5): 703-711.
- JIA W H, XU Q J. Research progress of anti-corrosion technology for offshore wind power facilities[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 703-711.
- [3] 温家浩,杨中桂,白洁,等. 海上风电设备防腐技术与展望[J]. 船舶工程, 2022, 44(增): 57-60.
- [4] 李全德,龚显龙,倪荣,等. 海上型风力发电系统涂装体系研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(2): 160-166.
- LI Q D, GONG X L, NI R, et al. Assessment of coating systems for offshore wind power generation system[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(2): 160-166.
- [5] 任伟,陈有登,谢志猛,等. 海上风电防腐蚀研究现状与前景[J]. 应用能源技术, 2022(2): 49-52.
- REN W, CHEN Y D, XIE Z M, et al. Research status and prospect of corrosion prevention for offshore wind power[J]. Applied Energy Technology, 2022(2): 49-52.
- [6] 回世翔,张冉,徐亚茜,等. 海上风电机组桩基腐蚀防护研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2023, 37(9): 8-13.
- HUI S X, ZHANG R, XU Y Q, et al. Research progress of pile foundation corrosion protection for offshore wind turbines[J]. Total Corrosion Control, 2023, 37(9): 8-13.
- [7] 杨黎晖,徐玮辰,王秀通,等. 氧化聚合型包覆技术(OTC)在热带海洋大气环境螺栓中的应用[J]. 装备环境工程, 2023, 20(3): 62-68.
- YANG L H, XU W C, WANG X T, et al. Application of oxidation tape and covering system(OTC) in tropical marine atmospheric environment [J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(3): 62-68.
- [8] 李美明,徐群杰,韩杰. 海上风电的防腐蚀研究与应用现状[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(增): 584-589.
- [9] 李理,范玉鹏,常志明,等. 海洋风电机组防腐蚀技术研究进展[J]. 分布式能源, 2021, 6(5): 51-58.
- LI L, FAN Y P, CHANG Z M, et al. Research progress of anti-corrosion technology for offshore wind turbines[J]. Distributed Energy, 2021, 6(5): 51-58.
- [10] 张真,殷爱鸣,金绪良,等. 海上风电腐蚀监测技术研究现状[J]. 分布式能源, 2022, 7(5): 39-45.
- ZHANG Z, YIN A M, JIN X L, et al. Research status of offshore wind power corrosion monitoring technology[J]. Distributed Energy, 2022, 7(5): 39-45.
- [11] 周梦鑫,吴军,樊志彬,等. 大气腐蚀在线监测技术研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 38-46.
- ZHOU M X, WU J, FAN Z B, et al. Current situation and prospect of on-line monitoring technology for atmospheric corrosion testing of metallic materials [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 38-46.
- [12] 渠蒲,于慧文,陈永浩,等. 电阻探针在油田站场生产设施腐蚀平台中的应用研究[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2023, 40(4): 39-42.
- QU P, YU H W, CHEN Y H, et al. Application research on resistance probe in corrosion platform of oilfield station production facilities[J]. Corrosion & Protection in Petrochemical Industry, 2023, 40(4): 39-42.
- [13] 裴梓博. 碳钢大气环境腐蚀大数据研究及主要影响因素作用规律[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- PEI Z B. Study on atmospheric environmental corrosion of carbon steel with big data and the law of main influencing factors [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021.
- [14] WANG B Q, LI Y R, CHENG X Q, et al. Data-driven optimization model customization for atmospheric corrosion on low-alloy steel: incorporating the dynamic evolution of the surface rust layer [J]. Corrosion Science, 2023, 221: 111349.
- [15] OHARA S, KOSAKI A, SHUMUTA Y, et al. Evaluation of the applicability of dose-response functions to the data of outdoor exposure tests for carbon steel and zinc in Japan[J]. Zairyo-to-Kankyo, 2018, 67(10): 416-425.
- [16] LEUENBERGER-MINGER A U, BUCHMANN B, FALLER M, et al. Dose-response functions for weathering steel, copper and zinc obtained from a four-year exposure programme in Switzerland [J]. Corrosion Science, 2002, 44(4): 675-687.
- [17] MIKHAILOV A A, STREKALOV P V, PANCHENKO Y M. Atmospheric corrosion in tropical and subtropical climate zones; 3. Modeling corrosion and dose-response function for structural metals[J]. Protection of Metals, 2007, 43(7): 619-627.
- [18] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京:化学工业出版社, 2005.
- CAO C N. Natural environment corrosion of China materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[19] Corrosion of metals and alloys — corrosivity of atmospheres — classification, determination and estimation: ISO 9223 — 2012 [S]. Geneva: ISO, 2012.

[20] Paints and varnishes — corrosion protection of steel structures by protective paint systems — part 2: Classification of environments: ISO 12944-2 — 2017 [S]. Geneva: ISO, 2017.

Application and Data Analysis of Corrosion Monitoring System for Offshore Wind Turbines

MENG Xueyin¹, JI Weidong¹, LI Rongfu¹, TAN Hong², XUE Wenfei², QIAN Qiupei¹, HAO Peng²
(1. Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100176, China;
2. Jiangsu Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Yancheng 224100, China)

Abstract: A corrosion monitoring system for offshore wind turbines was developed using resistance probe sensors (TER) and installed in an offshore wind power project in Zhanjiang, Guangdong Province, in the South China Sea. The internal and external corrosion rates and corrosion environment levels of the offshore wind turbines in the project were evaluated based on the monitoring results. The results show that the internal and external corrosion environment of offshore wind turbines were typical marine atmospheric corrosion environment, showing obvious wet-dry rotation. The maximum corrosion rate of external and internal corrosion appeared at the primal phase, and gradually decreased with the extension of service time and finally tended to be stable. The power function model of corrosion volume and time was obtained by fitting the data. Finally, some suggestions on the design grade and durability requirements for offshore wind turbines were proposed.

Key words: corrosion monitoring system; offshore wind turbine; corrosion rate; anti-corrosion system

~~~~~

(上接第 76 页)

Research Progress on Corrosion and Protection of Natural Gas Pipeline Welds in Coastal Towns

LI Juanjuan<sup>1</sup>, WANG Hanbing<sup>2</sup>, QI Jiantao<sup>2</sup>, REN Zengxin<sup>3</sup>  
(1. Special Equipment Safety Inspection and Research Institute of Henan Province, Zhengzhou 450000, China;  
2. New Energy College, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;  
3. Petrochina Liaohe Petrochemical Company, Panjin 124010, China)

**Abstract:** As the weak link of natural gas transmission pipeline, the welded joints of pipeline are more prone to corrosion failure in the highly corrosive coastal soil environment. The corrosion factors and main corrosion types of welded joints of natural gas pipelines in coastal towns in China are reviewed, and the main pipeline protection technologies are introduced, including adding corrosion inhibitor, anti-corrosion coating, improving corrosion environment and cathodic protection. Finally, combined with the increasing demand for comprehensive utilization of hydrogen energy, the risk of hydrogen embrittlement in welded joints of hydrogen mixed natural gas pipelines is analyzed, and the key technologies for developing hydrogen resistant coatings to ensure the long-term safe service of hydrogen mixed natural gas pipelines in the future are prospected.

**Key words:** coastal town; natural gas pipeline; corrosion; protection against; hydrogen resistant coating