

T/GDAA

团 体 标 准

T/GDAA XXXX—XXXX

基于腐蚀检测的海上风电塔筒 腐蚀评价规范

Specification for corrosion evaluation of offshore wind turbine towers
based on corrosion inspection

（征求意见稿）

（本草稿完成时间：2026 年 10 月 16 日）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

发 布

目 次

前 言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本规定 3

5 评价指标体系 3

6 取值规则 4

7 评价结果形成规则 6

8 评价流程 7

9 评价结论与建议 7

10 评价报告与归档 8

附 录 A （资料性） 评价流程图 9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由××××提出。

本文件由××××归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件首次发布。

基于腐蚀检测的海上风电塔筒 腐蚀评价规范

1 范围

- 1.1 本文件规定了基于腐蚀检测数据的海上风电钢制塔筒评价的术语和定义、评价基本规定、监测数据要求、腐蚀状态评价及评价结论与建议的技术要求。
- 1.2 本文件适用于海上风电机组钢制塔筒（含水上大气区、内部区、飞溅和潮差区）的腐蚀状态评价。
- 1.3 本文件的输入数据应为按《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》要求获取的有效检测数据。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 1766	色漆和清漆 涂层老化的评级方法
GB/T 10123	金属和合金的腐蚀术语
GB/T 12466	船舶及海洋工程腐蚀与防护术语
GB/T 18590	金属和合金的腐蚀 点蚀评价指南
GB/T 35013	承压设备合于使用评价
GB/T 33423	沿海及海上风电机组腐蚀控制技术规范
GB/T 34430.5-2024	船舶与海上技术保护涂层和检查方法第5部分:涂层破损的评估方法
GB/T 8923.1-2011	涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第 1 部分：未涂覆过的钢材表面和全面清除原有涂层后的钢材表面的锈蚀等级和处理等级
GB 51008	高耸与复杂钢结构检测与鉴定标准
NB/T 47013.3 -2023	承压设备无损检测 第3部分 超声检测
NB/T 47013.4-2015	承压设备无损检测 第4部分 磁粉检测
NB/T 47013.6-2015	承压设备无损检测 第6部分 涡流检测
NB/T 47013.7-2012	承压设备无损检测 第7部分 目视检测
NB/T 47013.9-2012	承压设备无损检测 第9部分 声发射检测
NB/T 47013.10-2015	承压设备无损检测 第10部分 衍射时差法超声检测
NB/T 47013.15-2021	承压设备无损检测 第15部分 相控阵超声检测
NB/T 47013.21-2025	承压设备无损检测 第21部分 交流电磁场检测
JGJ 82	钢结构高强度螺栓连接技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

腐蚀检测数据 corrosion inspection data

按照《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》，通过目视、超声测厚、涡流、涂层测厚、电火花、电位测试、高清摄像等手段获取的塔筒腐蚀相关原始数据、图像、记录及报告。

3.2

腐蚀评价 corrosion assessment

基于腐蚀检测数据，对塔筒涂层状态、金属基体腐蚀、镀锌层状态、焊缝腐蚀、缝隙腐蚀等进行综合判定，划分腐蚀等级并给出维护决策的过程。

3.3

点蚀 pitting corrosion

金属表面局部集中形成小孔状的局部腐蚀。

[来源：GB/T 10123-2022]

3.4

点蚀深度 pitting depth

塔筒金属基体表面点状蚀坑的最大垂直深度（mm）。

3.5

焊缝腐蚀 weld corrosion

塔筒环缝、纵缝、法兰对接焊缝区域发生的基体锈蚀、点蚀、微裂纹、层状撕裂等腐蚀类损伤。

3.6

缝隙腐蚀 crevice corrosion

在金属缝隙、接触面间隙内，介质滞留引发的局部腐蚀（法兰、螺栓接触面典型）。

3.7

法兰腐蚀 flange corrosion

塔筒法兰密封面、法兰母材、法兰边缘区域发生的锈蚀、点蚀、缝隙腐蚀。

3.8

高强度螺栓腐蚀 high-strength bolt corrosion

塔筒连接高强度螺栓、螺母、垫圈表面出现锈蚀、点蚀、缝隙腐蚀，包含螺纹区域腐蚀损伤。

3.9

在役评价单元 in-service evaluation unit

开展腐蚀评价时划分的塔筒独立评价区段，可按腐蚀分区、筒节、法兰连接节点划分。

3.10

腐蚀单项评价 single-item corrosion evaluation

针对焊缝、法兰、螺栓、涂层、钢基体等单一构件 / 防护体系，依据检测结果开展的腐蚀等级判定。

3.11

腐蚀综合评价 comprehensive corrosion evaluation

在各单项腐蚀评价基础上，结合构件受力重要程度、腐蚀分区、缺陷风险，对塔筒整体腐蚀状态进行综合等级判定。

3.12

腐蚀裕量 corrosion allowance

设计金属构件时，考虑使用期内可能产生的腐蚀损耗而增加的相应长度或厚度。

[来源：GB/T 12466—2019,2]

3.13

最小剩余壁厚 ($t_{\min}$, mm) minimum remaining wall thickness

塔筒同一评价区域测厚得到的最小钢材剩余厚度；剔除异常数据后取值。

3.14

构件允许最小壁厚 (t_{allow} , mm) minimum allowable wall thickness of component

满足塔筒结构强度、稳定性要求，考虑腐蚀裕量后的最低允许壁厚，由塔筒原设计文件确定。

3.15

腐蚀速率 corrosion rate

单位面积单位时间内金属的腐蚀损失率。

注：腐蚀速率的表示方法取决于体系和腐蚀的类型。可采用单位时间内腐蚀深度的增加或单位时间内、单位面积上腐蚀金属的减量或增量等来表示。

[来源：GB/T 12466—2019,2]

4 基本规定

4.1 评价目的

根据腐蚀检测数据，科学评定塔筒腐蚀状态，为运维决策提供依据。

4.2 评价原则

4.2.1 实测数据优先原则：评价全部原始数据应来源于《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》的检测输出，不得脱离实测数据主观判定。

4.2.2 分区评价原则：按塔筒所处环境分区（水上大气区、内部区、浪花飞溅区）分别评价，浪花飞溅区为高风险区域，从严评价。

4.2.3 最不利控制原则：单项、子系统、整体评价均采用最不利等级作为控制结果。

4.2.4 安全优先：当数据不确定或存在争议时，取保守侧评价。

4.3 评价数据

要求如下：

- 输入数据应为按《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》获取的有效数据；
- 数据应覆盖塔筒各腐蚀分区，具有代表性；
- 关键检测数据缺失的评价单元，不得开展定级评价，应补充检测；
- 评价应按评价单元独立开展，不同海洋腐蚀分区分别记录评价结果；
- 本文件评价指标采用 A/B/C/D 四级等级评价，A 级为完好、B 级为轻微缺陷、C 级为中度缺陷、D 级为严重缺陷。

4.4 评价程序

评价程序如下，具体参考附录A。

检测数据收集 → 数据有效性确认 → 单项指标评价 → 综合评价 → 结论与建议 → 编制报告

5 评价指标体系

5.1 指标层级框架

本文件评价指标体系如表1所示。

表 1 海上风电塔筒腐蚀评价指标体系

一级评价指标	二级评价指标	三级指标体系
涂层系统	塔筒外部大气区、塔筒内部区、浪花飞溅区、附属构件单元	涂层厚度、破损率、涂层老化性能、针孔检测
金属基体腐蚀	塔筒外部大气区、塔筒内部区、浪花飞溅区	点蚀检测（点蚀深度、点蚀密度）、壁厚检测（最小剩余壁厚，计算壁厚损失量与减薄率）、特殊区域（爬梯、支架等镀锌钢结构腐蚀（白锈、红锈、镀锌层厚度））检测记录
焊缝、螺栓、法兰等部位	塔筒外部大气区、塔筒内部区、浪花飞溅区	焊缝外观记录、无损检测结果，螺栓和法兰检测

注：1. 在线监测数据不作为定级三级指标，仅作为评价辅助参考信息。
2. 浪花飞溅区评价单元同等缺陷条件下评价从严。

5.2 评价单元适用说明

每个二级评价单元独立开展评价；不同评价单元之间指标结果不互相覆盖，各单元分别输出 A/B/C/D 等级。

6 取值规则

6.1 通则

- 6.1.1 三级评价指标检测数据应来自按《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》执行的检测作业。
- 6.1.2 数据形式包括：原始记录、测厚数据、涂层厚度数据、电位数据、图像 / 视频、缺陷位置图、检测报告。
- 6.1.3 在每一个二级评价单元内部，对各一级子系统下全部三级评价指标进行判级，每个三级指标输出 A 级、B 级、C 级、D 级。
- 6.1.4 飞溅和潮差区评价单元，同等实测缺陷条件下应从严取值。
- 6.1.5 关键三级指标检测数据缺失的二级评价单元，不得开展定级评价，应补充检测。
- 6.1.6 各级评价指标取值规则及处置建议见表 2-5。

表 2 三级评价指标取值规则

数据类型	三级评价指标	取值规则	参考标准
涂层系统	涂层厚度、破损率、涂层老化性能、针孔检测	轻微失光、无起泡、开裂、脱落、锈蚀； 涂层平均膜厚≥设计膜厚90%； 大气区破损率≤3%； 附属钢结构破损率≤5%。	GB 51008 GB/T 1766 GB/T 34430.5-2024 GB/T 33423
金属基体腐蚀	点蚀检测（点蚀深度、点蚀密度）、壁厚检测（最小剩余壁厚，计算壁厚损失量与减薄率）	—— $t_{min} \geq t_{allow}$ ； ——无连片点蚀、无焊缝腐蚀坑； ——均匀腐蚀速率 $v_{corr} \leq 0.05mm/a$ 。	GB/T 18590 GB/T 35013
焊缝、螺栓、法兰等部位	焊缝外观记录、无损检测结果，螺栓和法兰检测	焊缝防护完好，无锈蚀、点蚀、裂纹； 螺栓、螺母、垫片防护完整，无锈蚀，预紧力合格； 法兰端面、密封面无锈蚀、无间隙腐蚀	NB/T 47013系列 JGJ 82

表 3 涂层系统三级评价指标取值规则及处置建议

等级	三级评价指标	评价描述	处置建议
A级完好	涂层厚度、破损率、涂层老化性能、针孔检测	轻微失光、无起泡、开裂、脱落、锈蚀； 涂层平均膜厚≥设计膜厚90%。	无需处理
B级轻微缺陷		轻微粉化、分散小缺陷，裸露锈蚀面积≤0.3%； 75%≤实测膜厚<90%设计膜厚。	计划局部修补

表3 涂层系统三级评价指标取值规则及处置建议（续）

等级	三级评价指标	评价描述	处置建议
C级 中度缺陷		满足其一： ——局部涂层起皮、起泡：锈蚀面积 0.3%~1.0%； ——实测膜厚<设计厚度 75%。	限期修补
D级 严重缺陷		满足其一： ——大面积涂层剥落、多处连片锈蚀，裸露面积>1.0%； ——涂层大面积空鼓，刀刮成片剥离。	尽快全面翻新

表4 金属基体腐蚀三级评价指标取值规则及处置建议

等级	三级评价指标	评价描述	处置建议
A级 完好	点蚀检测（点蚀深度、点蚀密度）、壁厚检测（最小剩余壁厚，计算壁厚损失量与减薄率）	—— $t_{\min} \geq t_{\text{allow}}$ ； ——无连片点蚀、无焊缝腐蚀坑； ——均匀腐蚀速率 $v_{\text{corr}} \leq 0.05 \text{ mm/a}$ 。	按既定检测周期正常运维
B级 轻微缺陷		满足任一： —— $0.90 \cdot t_{\text{allow}} \leq t_{\min} < t_{\text{allow}}$ ； ——局部少量分散点蚀，最大坑深<壁厚10%； —— $0.05 < v_{\text{corr}} \leq 0.10 \text{ mm/a}$ 。	无需立即修复，需缩短检测周期，2年内完成复测，同步实施涂层修补阻断腐蚀发展。
C级 中度缺陷		满足任一： —— $0.80 \cdot t_{\text{allow}} \leq t_{\min} < 0.90 \cdot t_{\text{allow}}$ ； ——出现连片点蚀：焊缝存在腐蚀回坑：坑深 $\geq$ 壁厚10% —— $v_{\text{corr}} > 0.10 \text{ mm/a}$ 。	6个月内完成防腐修复；开展局部有限元强度校核，限制极端工况运行。
D级 严重缺陷		满足任一： —— $t_{\min} < 0.80 \cdot t_{\text{allow}}$ ； ——焊缝腐蚀伴随裂纹迹象（PT/MT检出）；大面积深度坑蚀。	立即制定停机检修方案，必要时局部补强或塔筒更换。

表5 焊缝、螺栓、法兰三级评价指标腐蚀取值规则及处置建议

等级	三级评价指标	评价描述	处置建议
A级 完好	焊缝外观记录、无损检测结果，螺栓和法兰检测	焊缝： 表面涂层完整，无锈蚀、无点蚀、无微裂纹，焊缝成型完好，无损检测无缺陷，连接防护与结构性能完好； 螺栓： 螺栓、螺母、垫片防护层完整，无锈蚀、无丝扣损伤，紧固扭矩合格，无松动、无电化学腐蚀现象； 法兰： 防护层完整，端面、密封面无锈蚀、无点蚀、无结垢，法兰贴合紧密，无间隙腐蚀，整体防护及连接状态完好。	按既定检测周期正常运维
B级 轻微缺陷		满足任一： 焊缝： 局部轻微涂层破损、少量浮锈，无点蚀、无裂纹、无未焊透缺陷，未影响焊缝有效承载截面；无需立即修复，持续跟踪监测； 螺栓： 局部轻微浮锈、表层涂层轻微脱落，丝扣完好，无松动、无卡死，预紧力满足规范要求，不影响连接可靠性；缩短检测周期观测； 法兰： 边缘、螺栓孔周边局部轻微涂层破损、少量浮锈，密封面完好，无间隙腐蚀，法兰贴合状态正常，不影响整体密封与连接性能。	无需立即修复，需缩短检测周期
C级 中度缺陷		满足任一： 焊缝： 局部出现少量分散点蚀，局部涂层成片脱落；未出现裂纹，无焊接原生缺陷；焊缝有效承载截面存在局部损耗，腐蚀存在进一步扩展风险；应缩短检测周期，择期开展防腐处理，重点复查； 螺栓： 出现局部点蚀，表层锈蚀扩展，丝扣轻微损伤；预紧力存在小幅衰减但仍处于合格区间，无明显松动；连接可靠性有所下降，应加密监测，择期评估更换必要性； 法兰： 法兰螺栓孔、过渡圆角局部出现点蚀，局部涂层失效；尚未侵入密封贴合面，存在初期间隙腐蚀迹象，少量积盐结垢；密封性能基本完好，腐蚀具备扩展风险，应重点监测，择期防腐处理。	加密检测频次，择期开展局部检修、防腐处理，开展风险跟踪。

表5 焊缝、螺栓、法兰三级评价指标腐蚀取值规则及处置建议（续）

等级	三级评价指标	评价描述	处置建议
D级 严重缺陷		满足任一： 焊缝 ：出现连片锈蚀、密集点蚀坑、微裂纹或涂层大面积脱落，存在隐性焊接缺陷，削弱焊缝连接强度，存在结构安全隐患；需立即复检、修复或补强； 螺栓 ：出现明显连片点蚀、丝扣磨损损伤，存在松动、预紧力衰减超标、电化学腐蚀严重等问题，连接可靠性显著下降；需更换螺栓并复检同批次连接件； 法兰 ：密封面、贴合面出现锈蚀、点蚀、间隙腐蚀，涂层大面积失效，存在渗水、积盐、结垢现象，影响法兰密封及整体连接刚度；需拆解检修、防腐翻新处理。	应立即开展检修、修复或更换处置，必要时开展结构复核。

6.2 数据有效性判定

6.2.1 评价前应对检测数据的完整性、准确性进行审查。

6.2.2 存在以下情况之一的数据不得用于评价：

- 未按《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》获取的数据；
- 超出设备校准有效期采集的数据；
- 未经过复测确认的异常数据；
- 无法追溯检测人员和检测日期的数据。

7 评价结果形成规则

7.1 通则

评价结果逐级形成：三级指标单项等级 → 二级评价单元内子系统等级 → 二级评价单元综合等级 → 塔筒整机综合等级；全部层级采用最不利等级判定规则。

7.2 二级评价单元内一级子系统等级形成

在同一个二级评价单元内部，某一项一级子系统下包含若干三级评价指标，取该子系统全部三级指标的最差等级，作为该二级评价单元内此项一级子系统的等级。

示例：飞溅和潮差区二级单元的涂层系统下，干膜厚度 A 级，涂层破损率 C 级，则飞溅和潮差区单元内涂层一级子系统等级为 C 级。

7.3 二级评价单元综合等级形成

取该二级评价单元内部全部一级子系统等级中的最差等级，作为该二级评价单元的综合腐蚀等级。

7.4 塔筒整机综合腐蚀等级形成

取全部二级评价单元综合等级中的最差等级，作为塔筒整机综合腐蚀等级。输出结果应同时列明各二级评价单元各自等级与整机综合等级。

7.5 评价结果应用

评价等级对应运维处置建议如下：

- A 级（完好）：塔筒防护体系完好，无腐蚀隐患；执行常规检测周期，无需修复作业；
- B 级（轻微缺陷）：塔筒存在局部可控轻微腐蚀缺陷，无即时安全风险；维持或略缩短检测周期，做好跟踪观测；
- C 级（中度缺陷）：塔筒存在中度腐蚀缺陷，腐蚀有扩展风险；缩短检测周期，择期开展局部维修，重点监控缺陷发展；必要时开展局部结构复核；

——D 级（严重缺陷）：塔筒存在严重腐蚀损伤；应依据 GB 51008 开展构件承载力复核，限期实施整改修复；必要时采取停机管控，整改复检合格后方可恢复服役。

7.6 在线监测数据辅助评价

在线监测不作为独立单项等级，用于辅助判断腐蚀发展趋势；当连续监测显示电位持续偏移、腐蚀速率持续走高时，应提高现场检测频次。

8 评价流程

8.1 数据收集与核验

8.1.1 收集《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》出具的检测数据、报告、图像。

8.1.2 核验数据完整性、有效性、准确性，数据缺失或异常需补充检测。

8.2 分区指标计算

8.2.1 依据海洋腐蚀分区，将塔筒划分为对应的二级评价单元：塔筒外部大气区、塔筒内部区、飞溅和潮差区、附属构件单元；飞溅和潮差区作为高风险单元应重点管控。各二级评价单元独立开展评价。

8.2.2 在每一个二级评价单元内，依据本标准第 6 章取值规则，对各一级评价指标下属全部三级评价指标对照实测检测结果逐项判级，得到各三级指标的 A/B/C/D 单项等级。飞溅和潮差区评价单元同等缺陷条件下从严判级；在线监测数据仅作趋势辅助，不参与等级判定。

8.2.3 同一二级评价单元内，某一级评价指标（子系统）下所有三级评价指标，按照最不利等级判定原则，取该子系统全部三级指标中的最差等级，作为该二级评价单元内该一级子系统的腐蚀等级。

8.2.4 在同一个二级评价单元内，汇总该单元全部一级评价指标（子系统）等级，采用最不利等级判定原则，取全部一级子系统的最差等级，作为该二级评价单元综合腐蚀等级。输出各二级评价单元独立的 A/B/C/D 等级结果。

8.3 整体等级综合判定

汇总塔筒全部二级评价单元的综合等级，采用最不利等级判定原则，取全部二级评价单元中的最差等级，作为塔筒整机综合腐蚀等级。评价结果应同时列明各二级评价单元各自等级与整机综合等级，不得仅输出整机等级掩盖局部高风险单元缺陷。

8.4 形成评价结论与维护决策建议

依据整机综合等级，结合各二级单元缺陷情况，对应本文件 7.5 的运维处置建议，形成针对性评价结论、风险说明和运维处置建议。

9 评价结论与建议

9.1 检测周期建议

- A 级（安全）：常规每年外双检，每 3 年一次全面壁厚腐蚀检测；
- B 级（关注）：每年外观+局部壁厚复测；每 2 年全面检测；
- C 级（危险）：每年不少于 2 次腐蚀专项检测，完成修复后恢复常规周期；
- D 级（严重危险）：停机监测，整改完成并验收合格后方可恢复运行。

9.2 腐蚀缺陷处置通用要求

- A 级：维持现有防腐运维方案；
 - B 级局部锈蚀：除锈达到 St3，后进行涂层打磨修复，配套同体系涂料局部修补；
 - C 级大面积涂层失效：条件允许分段停机整体喷砂翻新（Sa2.5）；
 - D 级：防腐修复完成后复测壁厚，必要时开展结构强度验算；
- 注：塔筒内壁腐蚀优先改善除湿系统，控制内部湿度从源头降低腐蚀速率。

10 评价报告与归档

10.1 报告内容

- 塔筒基本信息：编号、塔筒参数、位置、材质、设计壁厚、设计腐蚀裕量、投运年限、防腐体系；
- 检测数据概述：腐蚀环境分区、检测时间、方法、仪器信息、人员、数据来源；
- 分区评价结果：各区域指标计算值、腐蚀等级判定；
- 腐蚀原因分析：主要腐蚀成因、关键问题部位；
- 维护决策建议：风险结论、运维处置措施、检测周期、下次检测时间建议、修复方案；
- 附件：现场照片、测点示意图、原始检测记录附件。

10.2 报告审核

- 评价报告需经评价人、审核人、批准人三级签字，加盖评价机构公章；
- C级以上腐蚀报告需经结构工程师、防腐专家双审核；
- UT检测结果评定与报告签发应由UT II级及以上人员担任。

10.3 报告与检测报告的关系

本文件的腐蚀评价报告应以符合《海上风电塔筒腐蚀检测技术规范》要求的检测报告作为输入基础。检测报告提供原始检测数据、检测记录与客观检测结果；评价报告利用检测报告的实测数据开展腐蚀指标判级、综合等级评定、风险分析并给出运维处置建议。评价报告不得脱离检测报告原始数据开展主观评价。

10.4 记录与存档

- 腐蚀评价报告、检测数据、图像、审核记录等应存档，保存期限不少于塔筒设计寿命；
- 存档形式：纸质版 + 电子版，电子版需加密存储，确保数据可追溯。

附录 A
(资料性)
评价流程图

