

ICS 27.180

P 61

NB

中华人民共和国能源行业标准

P

NB/T 10626—2021

海上风电场工程防腐蚀设计规范

Code for Design of Corrosion Protection
for Offshore Wind Power Projects

2021-04-26 发布

2021-10-26 实施

国家能源局 发布

中华人民共和国能源行业标准
海上风电场工程防腐蚀设计规范

Code for Design of Corrosion Protection for
Offshore Wind Power Projects

NB/T 10626—2021

主编部门：水电水利规划设计总院

批准部门：国 家 能 源 局

施行日期：2021 年 10 月 26 日

中国水利水电出版社

2021 北 京

国家能源局

公 告

2021 年 第 3 号

国家能源局批准《水电工程建设征地企业处理规划设计规范》等 282 项能源行业标准（附件 1）、《Code for Buildings Design of Wind Power Projects》等 19 项能源行业标准外文版（附件 2），现予以发布。

附件：1. 行业标准目录
2. 行业标准外文版目录

国家能源局

2021 年 4 月 26 日

附件 1:

行业标准目录

序号	标准编号	标准名称	代替标准	采标号	批准日期	实施日期
...						
22	NB/T 10626—2021	海上风电场工程 防腐蚀设计规范			2021-04-26	2021-10-26
...						

前 言

根据《国家能源局关于下达 2015 年能源领域行业标准制（修）订计划的通知》（国能科技〔2015〕283 号）的要求，规范编制组经广泛调查研究，认真总结实践经验，并在广泛征求意见的基础上，制定本规范。

本规范的主要技术内容是：总则、术语、基本规定、钢结构防腐设计、钢筋混凝土结构防腐设计、防腐施工技术要求、防腐运行维护技术要求。

本规范由国家能源局负责管理，由水电水利规划设计总院提出并负责日常管理，由能源行业风电标准化技术委员会风电场规划设计分技术委员会（NEA/TC1/SC1）负责具体技术内容的解释。执行过程中如有意见或建议，请寄送水电水利规划设计总院（地址：北京市西城区六铺炕北小街 2 号，邮编：100120）。

本规范主编单位：水电水利规划设计总院

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

本规范参编单位：上海勘测设计研究院有限公司

本规范主要起草人员：罗成喜 张晓明 冀 昊 钟 耀 糜又晚 伏亮明

颜 彪 林毅峰 黄 俊 黄春芳 刘功鹏 周 凯

姜 娟 刘海超 胡小峰 范 可 孙晓娟 曾启东

汪 睿 王 军 左晶晶 曹园园 黄俊华 曾凡权

本规范主要审查人员：赵生校 谢宏文 何 伟 甘 毅 朱锡昶 南有博

叶葱葱 毕明君 赵朝志 游先辉 梅卫东 曹忠露

董国华 刘碧燕 李威力 王 宁 汪 杰 田其磊

李仕胜

目 次

1 总 则	1
2 术 语	2
3 基本规定	3
4 钢结构防腐设计	5
4.1 一般规定	5
4.2 表面处理	7
4.3 涂料防腐	8
4.4 金属热喷涂防腐	10
4.5 热浸镀锌防腐	11
4.6 阴极保护	11
4.7 包覆防腐	14
5 钢筋混凝土结构防腐设计	16
5.1 一般规定	16
5.2 混凝土	16
5.3 表面涂层	18
5.4 硅烷浸渍	19
5.5 钢筋阻锈剂	19
5.6 阴极保护	20
6 防腐施工技术要求	23
6.1 一般规定	23
6.2 钢结构防腐施工技术要求	23
6.3 钢筋混凝土结构防腐施工技术要求	24
7 防腐运行维护技术要求	26
7.1 一般规定	26
7.2 钢结构防腐运行维护技术要求	26
7.3 钢筋混凝土结构防腐运行维护技术要求	27
附录 A 阴极保护设计计算公式	28

附录 B 阳极屏蔽层的尺寸计算方法.....31

附录 C 露点温度计算.....32

本规范用词说明33

引用标准名录34

附：条 文 说 明37

Contents

1	General Provisions	VI
2	Terms	2
3	Basic Requirements	3
4	Corrosion Protection Design for Steel Structures	5
4.1	General Requirements	5
4.2	Surface Treatment.....	7
4.3	Coating for Corrosion Protection	8
4.4	Metallic Thermal Spraying for Corrosion Protection	10
4.5	Hot-Dip Galvanizing for Corrosion Protection	11
4.6	Cathodic Protection	11
4.7	Covering for Corrosion Protection.....	14
5	Corrosion Protection of Reinforced Concrete Structures	16
5.1	General Requirements	16
5.2	Concrete.....	16
5.3	Surface Coating	18
5.4	Silane Impregnation.....	19
5.5	Corrosion Inhibitors for Rebars	19
5.6	Cathodic Protection	20
6	Construction Requirements for Corrosion Protection.....	23
6.1	General Requirements	23
6.2	Construction Requirements for Corrosion Protection of Steel Structures	23
6.3	Construction Requirements for Corrosion Protection of Reinforced Concrete Structures	24

7	Technical Requirements for Operation and Maintenance of Corrosion Protection.....	26
7.1	General Requirements	26
7.2	Technical Requirements for Operation and Maintenance of Corrosion Protection of Steel Structures	26
7.3	Technical Requirements for Operation and Maintenance of Corrosion Protection of Reinforced Concrete Structures.....	26
Appendix A	Calculation Formulae for Cathodic Protection	26
Appendix B	Methods for Calculating the Dimensions of Anode Shields	31
Appendix C	Dew Point Calculation.....	32
	Explanation of Wording in This Code	33
	List of Quoted Standards	34
	Addition: Explanation of Provisions.....	37

1 总 则

1.0.1 为统一海上风电场工程防腐蚀设计的基本原则、主要内容和技术要求，制定本规范。

1.0.2 本规范适用于海上风电场工程钢结构和钢筋混凝土结构防腐蚀设计。本规范不适用于海上风电机组及塔筒的防腐蚀设计。

1.0.3 海上风电场工程防腐蚀设计，除应符合本规范外，尚应符合现行国家有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 包覆防腐 `covering for corrosion protection`

将复合耐腐蚀材料包覆于结构表面，使结构表面与腐蚀环境隔离，从而保护结构的防腐措施。

2.0.2 计算泥面 `calculation mudline`

设计最低冲刷线的泥面位置。

3 基本规定

- 3.0.1** 海上风电场工程应根据环境条件、结构型式、结构材质、设计使用年限、施工安装和维护管理条件等因素进行防腐蚀设计。
- 3.0.2** 海上风电场工程结构防腐蚀设计使用年限应与风电机组和海上升压站的设计使用年限相匹配。
- 3.0.3** 基础结构腐蚀区域（图 3.0.3）宜分为外部和内部，外部宜包括大气区、浪溅区、水位变动区、全浸区和泥下区；内部宜包括大气区、水位变动区、全浸区和泥下区。在水深和波高均较大的工程海域若出现浪溅区下界低于水位变动区下界的情况，重叠区域应按浪溅区考虑。当工程结构处于有掩护的环境条件下，大气区下界宜为设计高水位加 1.5m。

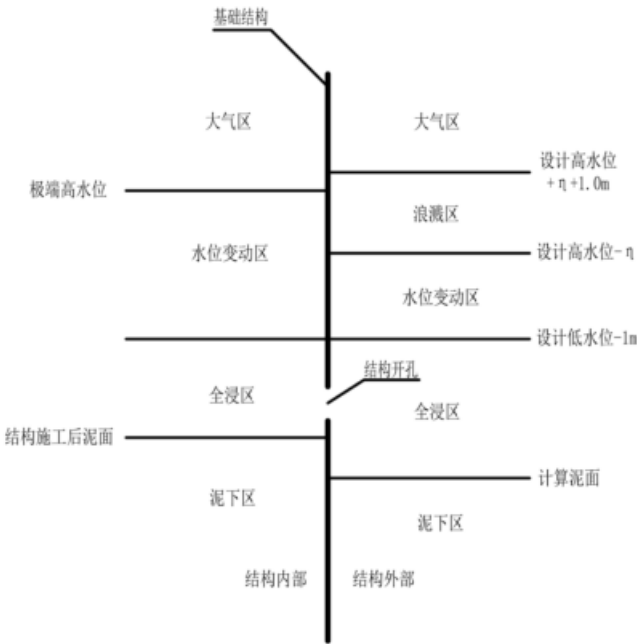


图 3.0.3 基础结构腐蚀区域

注：图中 η 对风电机组基础，为设计高水位时重现期 50 年的 $H_{1\%}$ 的三分之二；对海上升压站，为设计高水位时重现期 100 年的 $H_{1\%}$ 的三分之二。

3.0.4 涂层不应使用含超标准放射性物质或易溶出有毒有害物质的材料。

3.0.5 采用外加电流阴极保护系统的海上风电场工程结构，应在风电场陆上集控中心或升压站设置对阴极保护系统进行远程监测、控制和分析评估的在线监控系统；采用牺牲阳极阴极保护系统，宜设置在线监测系统。

4 钢结构防腐设计

4.1 一般规定

4.1.1 海上风电场钢结构防腐设计可采用涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌、阴极保护、包覆和预留腐蚀裕量等措施。

4.1.2 钢结构全浸区应采用阴极保护。

4.1.3 钢结构采用涂料或阴极保护时，主要结构应留有腐蚀裕量，不同部位的单侧腐蚀裕量可按下式计算：

$$\Delta\delta=K\left[(1-P)t_1+(t-t_1)\right] \tag{4.1.3}$$

式中：Δδ——钢结构单面腐蚀裕量（mm）；

K——钢结构单面平均腐蚀速率（mm/年），工程所在地无确切钢结构的腐蚀速率时，钢结构单面平均腐蚀速率可按表 4.1.3-1 取值；

P——保护效率（%），采用涂层保护时，在涂层的设计使用年限内，保护效率可取 50%~95%；采用阴极保护和涂层联合保护时，保护效率可取 85%~95%；仅采用阴极保护时，保护效率可按表 4.1.3-2 取值；

t₁——防腐蚀措施的设计使用年限（年）；

t——钢结构的设计使用年限（年）。

表 4.1.3-1 钢结构单面平均腐蚀速率（mm/年）

腐蚀区域			平均腐蚀速率
大气区			0.05~0.10
浪溅区和水位变动区			0.40~0.50
全浸区			0.12
泥下区			0.05
内部区	密闭	有水	0.01~0.10
		无水	0
	与外部海水或空气连通		根据实际情况按大气区、水位变动区或全浸区考虑

注：表中平均腐蚀速率适用于 pH 值为 4~10 的环境条件，在有严重污染的环境中，应适当增大。

表 4.1.3-2 保护效率 (%)

部位	P
水位变动区	$20 \leq P < 85$
全浸区、泥下区	$P \geq 90$

4.1.4 风电机组基础和海上升压站钢结构主要结构的不同腐蚀区域,钢结构单侧最小腐蚀裕量应符合表 4.1.4 的规定。

表 4.1.4 钢结构单侧最小腐蚀裕量 (mm)

腐蚀区域			最小腐蚀裕量	
			风电机组基础	海上升压站
大气区			1	3
浪溅区和水位变动区			3	6
全浸区			2	3
泥下区			1	2
内部区	密闭	有水	1	2
		无水	0	0
	与外部海水或空气连通		根据实际情况按大气区、水位变动区或全浸区考虑	

4.1.5 海上风电场工程钢结构不同腐蚀区域的防腐蚀措施可按表 4.1.5 的规定确定。

表 4.1.5 海上风电场工程钢结构不同腐蚀区域的防腐蚀措施

腐蚀区域			防腐蚀措施
大气区			涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌
浪溅区和水位变动区			涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌、包覆防腐保护
全浸区			阴极保护
			阴极保护和涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌联合保护
泥下区			阴极保护
内部区	密闭	有水	涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌保护
		无水	—
	与外部海水连通		根据实际情况按大气区、水位变动区或全浸区考虑

4.1.6 现场安装的结构构件不宜采用焊接连接;必须采用焊接连接的部位,应按设计方案对涂层进行修复。

4.1.7 结构设计时不宜出现易使海水、雨水存留或其他腐蚀介质堆积的凹型结构,无法避免时应采取排水措施。

4.1.8 结构设计时不宜出现难以检查、维护的缝隙与死角,无法避免时应对构件进行预涂装。

4.1.9 焊接材料及螺栓、垫圈、节点板等连接构件的耐腐蚀性能不应低于主体材料。

4.1.10 内部区域与海水接触的小型构件，如电缆管等，其内部宜采用热浸镀锌防腐。

4.1.11 冰区风电场抗冰结构的防腐蚀涂层宜提高抗冲、耐磨性能要求。

4.2 表面处理

4.2.1 海上风电场工程在实施涂料保护、金属热喷涂、热浸镀锌和包覆前应对钢结构进行表面处理。

4.2.2 表面处理应主要包括预处理、除油、除盐分、除锈和除尘。

4.2.3 钢结构涂装前的表面处理等级和处理方法应符合现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第4部分：表面类型和表面处理》GB/T 30790.4的有关规定。

4.2.4 钢结构表面缺陷处理等级应满足现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第3部分：焊缝、边缘和其他区域的表面缺陷的处理等级》GB/T 8923.3规定的P3级。

4.2.5 表面油污宜采用清洁剂进行低压喷洗或软刷刷洗，并应采用洁净淡水冲洗残余物。

4.2.6 涂装前钢材表面可溶性氯化物含量不应大于 50 mg/m²。

4.2.7 钢结构涂装前宜采用金属磨料喷射清理方法除锈，涂层缺陷的局部修补和无法进行喷射除锈的区域可进行手工或动力工具除锈，钢结构表面除锈后最低清理等级应符合表 4.2.7 的要求。金属磨料应符合现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 喷射清理用金属磨料的技术要求 第3部分：高碳铸钢丸和砂》GB/T 18838.3的有关规定。除锈完工后，应清除浮尘和碎屑，表面清洁度应达到现行国家标准《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第3部分：涂覆涂料前钢材表面的灰尘评定（压敏粘带法）》GB/T 18570.3规定的3级。

表 4.2.7 钢结构表面除锈后最低清理等级

除锈方法	防腐蚀措施	清理等级
喷射除锈	热喷涂铝及铝合金、无机富锌底漆	Sa3
	热喷涂锌及锌合金、环氧类底漆	Sa2 1/2
	包覆防腐	Sa2
手工和动力除锈	环氧类底漆	St3
	包覆防腐	St2

4.2.8 除锈后的表面粗糙度不宜大于涂层总厚度的 1/3，不同防腐蚀措施的钢结构表

面粗糙度值宜按表 4.2.8 选取。

表 4.2.8 钢结构表面粗糙度值 (μm)

防腐蚀措施	粗糙度
热喷涂金属	60~100
无机富锌底漆	50~80
其他防腐涂层	40~75

4.2.9 表面粗糙度检验应符合现行国家标准《产品几何技术规范 (GPS) 表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法》GB/T 10610 的有关规定。

4.3 涂料防腐蚀

4.3.1 涂层配套系统应根据钢结构构件所属的腐蚀区域制定。涂层配套方案宜按表

4.3.1 选用,干膜厚度的测定应符合现行国家标准《色漆和清漆 漆膜厚度的测定》GB/T 13452.2 的有关规定。

表 4.3.1 涂层配套方案

腐蚀区域	配套涂层	涂料类型
大气区	底层	有机富锌、无机富锌
	中间层	环氧类
	面层	聚氨酯类、丙烯酸类、氟树脂类
浪溅区和水位变动区	底层	有机富锌、无机富锌、环氧类
	中间层和面层	环氧类
全浸区	底层	有机富锌、无机富锌、环氧类
	中间层和面层	环氧类
内部区	底层	有机富锌、无机富锌
	中间层和面层	环氧类

注：对于与外界海水连通的内部区域，应根据实际情况按大气区、水位变动区或全浸区考虑。

4.3.2 涂层体系性能要求应符合表 4.3.2 的规定。

表 4.3.2 涂层体系性能要求

腐蚀区域	耐盐水试验 (h)	耐湿热试验 (h)	耐盐雾试验 (h)	人工加速老化试验 (h)	附着力 (MPa)	
					富锌类	其他类
内部区	—	—	1000	800	≥5	≥8
大气区	—	4000	4000	4200		
浪溅区和水位变动区	4200	4000	4000	4200		
全浸区	4200	4000	—	—		

注：当内部区域与外界海水连通时，应根据实际情况按大气区、水位变动区或全浸区考虑。

4.3.3 钢结构涂层耐盐水试验后涂层应满足不生锈、不起泡、不开裂、不剥落，允许轻微变色或失光的要求，试验方法应符合现行国家标准《船舶漆 耐盐水性测定 盐水和热盐水浸泡法》GB/T 10834 的有关规定。

4.3.4 钢结构涂层耐湿热试验后涂层应满足不生锈、不起泡、不开裂，允许轻微变色的要求，试验方法应符合现行国家标准《漆膜耐湿热测定法》GB/T 1740 的有关规定。

4.3.5 钢结构涂层耐盐雾试验后涂层应满足不生锈、不起泡、不剥落、不开裂的要求，试验方法应符合现行国家标准《色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定》GB/T 1771 的有关规定。

4.3.6 钢结构涂层人工加速老化性能试验后涂层应满足不生锈、不起泡、不剥落、不开裂，允许轻度粉化和 3 级变色、3 级失光的要求，试验方法应符合现行国家标准《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》GB/T 1865 的有关规定。

4.3.7 钢结构涂层的附着力试验应符合现行国家标准《色漆和清漆 拉开法附着力试验》GB/T 5210 的有关规定。

4.3.8 涂层体系应进行划线处的腐蚀宽度试验，有阴极保护区域的涂层体系底漆应进行耐阴极剥离试验，试验方法和性能要求应符合现行国家标准《色漆和清漆 海上建筑及相关结构用防护涂料体系性能要求》GB/T 31415 的有关规定。

4.3.9 需在施工现场拼装焊接的钢结构，其焊缝两侧应先涂刷不影响焊接性能的车间底漆，焊接完毕后应对焊缝热影响区进行二次表面清理，并按设计要求进行重新涂装。

4.3.10 每道涂层涂装的间隔时间应符合产品技术要求规定。

4.3.11 涂层配套体系中各道涂层宜采用不同颜色区分。

4.3.12 涂层体系的最终干膜厚度应符合下列规定：

- 1 所有测点干膜厚度不应低于设计干膜厚度的 90%。
- 2 所有测点干膜厚度的平均值不应低于设计干膜厚度。
- 3 所有测点中，低于设计干膜厚度但不低于 90%设计干膜厚度的测量点不应超过总测量点的 10%。
- 4 规定了最大干膜厚度时，所有测点的干膜厚度不应大于规定的最大干膜厚度；未规定最大干膜厚度时，所有测点干膜厚度不宜大于设计干膜厚度的 3 倍。

4.3.13 钢结构涂层的干膜厚度检测应符合现行行业标准《海上风电场钢结构防腐技术标准》NB/T 31006 的有关规定。

4.4 金属热喷涂防腐

4.4.1 金属热喷涂材料宜选用锌、锌合金、铝和铝合金，其性能应符合现行国家标准《热喷涂 火焰和电弧喷涂用线材、棒材和芯材 分类和供货技术条件》GB/T 12608 的有关规定。

4.4.2 金属热喷涂保护系统应包括热喷金属层、封闭层和面层。

4.4.3 热喷金属层最小局部厚度应符合表 4.4.3 的规定。

表 4.4.3 热喷金属层最小局部厚度 (μm)

腐蚀区域	喷涂金属	最小厚度
大气区	锌	200
	铝	160
	AlMg5	160
	ZnAl15	160
浪溅区、水位变动区、全浸区	锌	300
	铝	200
	AlMg5	200
	ZnAl15	300

4.4.4 封闭剂宜使用粘度低、易渗透、成膜物中固体含量高、能够使热喷金属层表面发生磷化的活性涂料或其他合适的涂料。常用封闭剂可选磷化底漆、双组分环氧漆或双组分聚氨酯。封闭层应与热喷金属层、有机涂层有相容性。

4.4.5 金属热喷涂保护系统面层可按本规范表 4.3.1 选择配套涂层。

4.4.6 热喷金属层厚度应均匀，两层或两层以上涂层应采用相互垂直、交叉的方法施工覆盖，单层厚度宜为 $25\ \mu\text{m} \sim 80\ \mu\text{m}$ 。同一层内各喷涂带之间应有 $1/3$ 的重叠宽度。

4.4.7 钢构件的现场焊缝两侧应预留 $100\ \text{mm} \sim 150\ \text{mm}$ 宽度涂刷车间底漆作为临时保

护，待拼装焊接后，对预留部分应按设计技术要求重新进行表面清理和喷涂施工。

4.4.8 热喷金属层表面应均匀一致，无气孔和基体裸露的斑点。

4.5 热浸镀锌防腐蚀

4.5.1 热浸镀锌所用熔融锌液除铁、锡外的杂质总含量不应大于总质量的 1.5%，选用锌锭应符合现行国家标准《锌锭》GB/T 470 的有关规定。

4.5.2 钢构件热浸镀锌层未经离心处理的平均厚度值不宜小于 85 μm ，当需要较厚镀层时，供需双方应确认热浸镀锌技术的可行性。

4.5.3 热浸镀锌前，钢材基体还应满足下列要求：

- 1 封闭空腔应按工艺要求设置排气孔和导流孔。
- 2 应设置悬挂点。
- 3 应完全烘干或采取防止飞溅锌液烫伤人体的防护措施。

4.5.4 钢结构构件镀锌后，宜采用涂料涂装。涂装体系和厚度要求应符合现行国家标准《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第 5 部分：防护涂料体系》GB/T 30790.5 的有关规定。

4.6 阴极保护

I 技术要求

4.6.1 钢结构阴极保护措施可根据工程状况选择牺牲阳极保护或外加电流保护。阴极保护设计计算公式应符合本规范附录 A 的有关规定。

4.6.2 牺牲阳极阴极保护系统应主要包括牺牲阳极和与被保护结构的连接部件。

4.6.3 外加电流阴极保护系统应主要包括阳极系统、直流电源、监控系统和电缆。

4.6.4 阴极保护计算面积应包括水位变动区、全浸区和泥下区钢结构的表面积。

4.6.5 与外部海水连通的内部区，应按本规范第 4.6.4 条计算保护面积，并单独进行阴极保护。

4.6.6 阴极保护可单独使用，也可与涂层联合使用。

4.6.7 采用阴极保护的钢结构每一个设计单元或整体应具有电连续性。电连续性宜采用焊接连接，也可采用电缆连接和机械连接，连接点面积应大于金属连接件或电缆芯的截面面积，连接电阻应小于 0.01 Ω 。

4.6.8 阴极保护系统电缆应符合下列要求：

- 1 电缆应根据其所处环境条件采取保护措施。
- 2 阳极电缆和阴极电缆宜采用多股，铜芯电缆，电缆护套应具有绝缘、抗老化、耐海洋环境性能。
- 3 参比电极电缆应选用屏蔽电缆。
- 4 电缆截面积应根据电缆的工作电流、允许压降和机械强度等因素确定。
- 5 水中不应设置电缆接头。辅助阳极、参比电极和电缆的接头以及钢结构和电缆的接头应进行密封防水处理。
- 6 阴极电缆和测量电缆不得共用。

4.6.9 牺牲阳极或辅助阳极的工作表面不应沾有油漆和油污。

4.6.10 采用阴极保护的钢结构应与水中其他金属结构物电绝缘，无法电绝缘时应考虑其他金属结构对阴极保护系统的影响，同时应避免阴极保护对邻近结构物的干扰。

4.6.11 与采用阴极保护的钢结构相邻的其他金属结构电位偏移超过 20 mV 时，应采取措施防止杂散电流腐蚀。

4.6.12 阴极保护的总保护电流应按下列公式计算：

$$I = \sum I_n + I_f \quad (4.6.12-1)$$

$$\sum I_n = \sum \varphi i_n s_n \quad (4.6.12-2)$$

式中： I ——总保护电流（A）；

I_n ——被保护钢结构各分部位的保护电流（A）；

I_f ——其他附加保护电流（A）；

φ ——涂层破损系数，无涂层时取 1，有涂层时涂层的初始破损系数可取 0.01~0.02，每年破损系数增加值可根据涂料性能和设计使用年限取 0.01~0.03；

i_n ——被保护的无涂层钢常用保护电流密度（A/m²），可按表 4.6.12 取值；

s_n ——被保护钢结构各分部位的保护面积（m²）。

表 4.6.12 无涂层钢常用保护电流密度（mA/m²）

环境介质	初始值	维持值	末期值
静止海水	100~130	55~70	70~90
流动海水	150~180	60~80	80~100
海泥	25	20	20

4.6.13 阴极保护电位应符合表 4.6.13 的规定，当实测保护电位不满足表中规定时，可采用最小偏移量不低于 100 mV 的准则判断阴极保护的有效性。

表 4.6.13 阴极保护电位（V）

材质	环境	数值
碳钢和低合金钢	含氧环境	-1.10~-0.80
	有硫酸盐还原菌腐蚀的缺氧环境	-1.10~-0.90

注：表中阴极保护电位指相对于 Ag/AgCl 海水电极的电位。

4.6.14 阴极保护所有电连接点应进行外观目视检查和电连接电阻的抽样检测。

II 牺牲阳极保护

4.6.15 牺牲阳极材料品种、化学成分、电化学性能和表面质量等级应符合现行国家标准《铝-锌-铟系合金牺牲阳极》GB/T 4948 的有关规定。

4.6.16 牺牲阳极设计计算应符合本规范第 A.1 节的有关规定。

4.6.17 牺牲阳极的布置应使被保护钢结构的表面电位分布均匀，安装位置应符合下列规定：

- 1 牺牲阳极不应安装在钢结构的高应力和高疲劳区域。
- 2 牺牲阳极应在被保护结构范围内均匀对称布置，安装顶高程应在全浸区内。安装底高程宜高于泥面以上 1.0 m。
- 3 牺牲阳极与被保护钢结构表面的距离应大于 150 mm。

4.6.18 牺牲阳极检验应符合现行行业标准《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209 的有关规定。

III 外加电流保护

4.6.19 外加电流阴极保护系统供电电源应符合下列规定：

- 1 供电电源应持续供电。
- 2 电源设备的输出电流和电压应连续可调，并具有抗过载、防雷、抗干扰和故障保护等功能。
- 3 电源设备安装在户外时，应设置防尘、防水和防腐蚀的保护罩。
- 4 直流电源的输出电流和输出电压应根据使用条件、辅助阳极的类型、被保护结构所需电流和保护系统回路电阻计算确定。

5 电源设备功率和电源设备输出电压计算应符合本规范第 A.2.1 条的有关规定。

4.6.20 外加电流阴极保护系统辅助阳极应符合下列规定：

1 辅助阳极材料选用宜符合现行国家标准《船用辅助阳极技术条件》GB/T 7388 的有关规定。

2 辅助阳极应根据设计使用年限、使用条件、被保护钢结构的结构型式以及辅助阳极允许的工作电流密度、输出电流和设计使用年限等进行设计。

3 辅助阳极计算应符合本规范第 A.2.2 条的有关规定。

4 辅助阳极应均匀布置，顶高程应在全浸区内，底高程宜高于泥面以上 1.0 m。

5 辅助阳极与被保护钢结构的最小距离应根据阳极的输出电流和介质的电阻率确定，并不宜小于 1.5 m；当辅助阳极与被保护钢结构的距离小于 1.5 m 时，应使用阳极屏蔽层，阳极屏蔽层的尺寸计算方法应符合本规范附录 B 的有关规定。

4.6.21 外加电流阴极保护系统参比电极应符合下列规定：

1 阴极保护用参比电极的技术条件应符合现行国家标准《船用参比电极技术条件》GB/T 7387 的有关规定。

2 采用恒电位控制时，每台电源设备应至少安装一个控制用参比电极；采用恒电流控制时，每台电源设备应至少安装一个测量用参比电极。

3 参比电极宜安装在钢结构表面距辅助阳极近端和远端的代表性位置。

4.6.22 外加电流阴极保护系统阳极屏蔽层应符合现行国家标准《船舶及海洋工程阳极屏涂料通用技术条件》GB/T 7788 的有关规定。

4.6.23 辅助阳极宜按现行国家标准《船用辅助阳极技术条件》GB/T 7388 的有关规定进行检验。

4.6.24 每个阴极保护单元构件的阴极保护电位应进行现场检测，检测方法应符合现行行业标准《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209 的有关规定。

4.6.25 每个阴极保护单元构件应设置远程阴极保护测量装置，测量点不应少于 1 个。

4.7 包覆防腐蚀

4.7.1 包覆防腐蚀可采用氧化聚合型包覆、复层矿脂包覆等。

4.7.2 氧化聚合型包覆防腐蚀层结构由防蚀膏、防蚀带和外防护剂组成，其性能指标、检测及施工方法应符合现行国家标准《钢结构氧化聚合型包覆防腐蚀技术》GB/T 32120 的有关规定。

4.7.3 复层矿脂包覆防腐层结构由矿脂防蚀膏、矿脂防蚀带、密封缓冲层、防蚀保护罩组成，其性能指标及施工方法应符合现行国家标准《海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐技术》GB/T 32119 的有关规定。

4.7.4 包覆防护前基材表面处理、包覆层厚度以及电火花检漏等检验可按现行国家标准《海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐技术》GB/T 32119 和《钢结构氧化聚合型包覆防腐技术》GB/T 32120 的有关规定执行。

5 钢筋混凝土结构防腐设计

5.1 一般规定

5.1.1 钢筋混凝土结构防腐耐久性设计，应根据结构功能和所处环境条件，选择混凝土材料、钢筋、结构构造和防腐措施。

5.1.2 钢筋混凝土基础宜采用高性能混凝土，宜同时采取附加防腐措施；当采用普通混凝土时，应采取附加防腐措施。附加防腐措施可采用防腐涂层、硅烷浸渍、钢筋阻锈剂或不锈钢钢筋、阴极保护。

5.1.3 大气区、浪溅区和水位变动区钢筋混凝土结构可采用硅烷浸渍、涂层保护或联合阴极保护。

5.1.4 钢筋混凝土结构保护层厚度、最大裂缝宽度和混凝土拉应力限制系数应符合现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》JTS 151 的有关规定。

5.1.5 同一构件受力钢筋宜选用同一品种和等级，并应符合现行行业标准《水运工程混凝土结构设计规范》JTS 151 的有关规定。

5.1.6 钢筋混凝土结构表面应有利于排水，不应在接缝或止水构造处排水。

5.1.7 钢筋混凝土构件截面几何形状应简单、平顺，暴露部位构件的最小截面尺寸应符合下列规定：

- 1 直线形构件的最小边长不宜小于保护层厚度的 6 倍。
- 2 曲线形构件的最小曲率半径不宜小于保护层厚度的 3 倍。

5.1.8 施工缝的设置宜避开浪溅区。

5.2 混凝土

5.2.1 海洋腐蚀环境混凝土的最低强度等级应符合表 5.2.1 的规定。

表 5.2.1 海洋腐蚀环境混凝土的最低强度等级

腐蚀区域	普通混凝土			高性能混凝土
	钢筋混凝土	预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土和预应力混凝土
大气区	C35	C40	C20	C40
浪溅区、水位变动区	C40	C40	C25	C45
全浸区	C35	C40	C25	C40
泥下区	C35	C40	C25	C40

5.2.2 海水冻融环境混凝土抗冻等级应符合表 5.2.2 的规定。

表 5.2.2 海水冻融环境混凝土抗冻等级

建筑物所在地区	普通混凝土		高性能混凝土
	钢筋混凝土及预应力混凝土	素混凝土	钢筋混凝土及预应力混凝土
严重受冻地区，最冷月月平均气温低于-8℃	F350	F300	F350
受冻地区，最冷月月平均气温为-4℃~-8℃	F300	F250	F300
微冻地区，最冷月月平均气温为 0℃~4℃	F250	F200	F250

注：1 试验过程中试件所接触的介质应与建筑物实际接触的介质相同。

2 无掩护的受冻地区浪溅区的混凝土构件宜采用高性能混凝土。

5.2.3 海洋腐蚀环境混凝土水胶比最大允许值应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

5.2.4 海洋腐蚀环境混凝土的胶凝材料最高用量不宜超过 500 kg/m³，胶凝材料最低用量应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

5.2.5 海洋腐蚀环境混凝土拌合物氯离子含量占胶凝材料质量比最高限值应符合表 5.2.5 的规定。

表 5.2.5 海洋腐蚀环境混凝土拌合物氯离子含量占胶凝材料质量比最高限值（%）

类型	预应力混凝土	钢筋混凝土	素混凝土
数值	0.06	0.10	1.30

5.2.6 处于大气区、浪溅区和全浸区的钢筋混凝土和预应力混凝土结构，海水环境混凝土抗氯离子渗透性最高限值宜符合表 5.2.6 的规定。

表 5.2.6 海水环境混凝土抗氯离子渗透性最高限值 (C)

类型	普通混凝土	高性能混凝土	
		钢筋混凝土	预应力混凝土
电通量	2000	1000	800

注：1 试验用的混凝土试件，对掺入粉煤灰或粒化高炉矿渣粉的混凝土，应按标准养护条件下 56d 龄期的试验结果评定；其他混凝土应按标准养护条件下 28d 龄期的结果评定。

2 当构件为蒸汽养护或离心式成型等工艺时，可按同条件养护下留置样品或构件取芯样品 28d 龄期的结果评定。

3 检验方法应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

5.2.7 混凝土用水泥、骨料、掺合料、拌合用水以及外加剂等品种、用量及性能指标应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

5.2.8 有抗冻要求的混凝土应掺入引气剂。

5.2.9 混凝土强度、抗冻性能、抗渗性能和氯离子含量的检测应符合现行行业标准《水运工程混凝土试验检测技术规范》JTS/T 236 的有关规定。

5.3 表面涂层

5.3.1 混凝土表面涂层体系性能指标应符合表 5.3.1 的规定，浪溅区及以下部位涂料还应具有湿固化性能。涂层的耐老化性应按现行国家标准《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》GB/T 1865 的有关规定测定。涂层的耐冲击性应按现行国家标准《漆膜耐冲击测定法》GB/T 1732 的有关规定测定。涂层的抗氯离子渗透性、粘结强度、耐碱性和外观质量应符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

表 5.3.1 混凝土表面涂层体系性能指标

项目	性能指标
耐老化性	≥2000h
耐冲击性	≥50kg·cm
抗氯离子渗透性	≤5.0×10 ⁻³ mg/cm ² d
粘结强度	≥1.5MPa
耐碱性	合格
外观质量	合格

5.3.2 混凝土表面涂层体系应符合下列规定：

- 1 涂层体系可由底层、中间层和面层涂料组成，配套涂料之间应具有相容性。
- 2 涂层体系应根据结构所处环境条件确定。混凝土表面涂层体系配套涂料可按表 5.3.2 选用。

表 5.3.2 混凝土表面涂层体系配套涂料

配套涂层		涂料类型
1	底层	环氧树脂封闭漆
	中间层	环氧树脂漆
	面层	聚氨酯磁漆、丙烯酸树脂漆、乙烯树脂漆、聚硅氧烷面漆或氟碳面漆
2	底层	丙烯酸树脂封闭漆
	面层	丙烯酸树脂漆或氯化橡胶漆
3	底层	环氧树脂封闭漆
	面层	环氧树脂漆

5.3.3 混凝土结构表面涂层应进行干膜厚度、表面粘结力及抗氯离子渗透性检验，检验方法及标准应符合现行行业标准《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209 的有关规定。

5.4 硅烷浸渍

5.4.1 硅烷浸渍宜采用异丁基三乙氧基硅烷或异辛基三乙氧基硅烷作为材料，其性能宜符合现行行业标准《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

5.4.2 硅烷应分两遍喷涂，间隔时间不应少于 6 h。液体硅烷喷涂量不应少于 400 ml/m²，膏体硅烷喷涂量不应少于 300 ml/m²。

5.4.3 浸渍硅烷应以每 500 m² 为一个批次进行吸水率、硅烷浸渍深度和氯化物吸收量的降低效果检测，检测方法应符合现行行业标准《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209 的有关规定。

5.5 钢筋阻锈剂

5.5.1 钢筋阻锈剂包括内掺型和外涂型，新建混凝土结构宜采用内掺型。

5.5.2 钢筋阻锈剂的用量应根据结构的重要性和所处环境状况确定。

5.5.3 钢筋阻锈剂检测项目及技术指标应符合表 5.5.3 的规定，其检测方法宜符合现

行行业标准《水运工程混凝土试验检测技术规范》JTS/T 236 和《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153 的有关规定。

表 5.5.3 钢筋阻锈剂检测项目及技术指标

钢筋阻锈剂类型	检测项目	技术指标
内掺型钢筋阻锈剂	盐水浸烘环境中钢筋腐蚀面积百分率	减少 95%以上
	凝结时间差	±60min 内
	抗压强度比	≥0.9
	坍落度经时损失	满足施工要求
	抗渗性	不降低
内掺型钢筋阻锈剂、外涂型钢筋阻锈剂	盐水溶液中的防锈性能	无腐蚀发生
	电化学综合防锈性能	无腐蚀发生
外涂型钢筋阻锈剂	渗透深度	≥50mm

注：1 表中所列的盐水浸烘环境中钢筋腐蚀面积百分率、凝结时间差、抗压强度比、坍落度经时损失、抗渗性均指掺加钢筋阻锈剂混凝土与基准混凝土的相对性能比较。
2 电化学综合防锈性能试验仅适用于阳极型钢筋阻锈剂。
3 渗透深度是指外涂型钢筋阻锈剂本身在混凝土中的渗透。

5.6 阴极保护

I 技术要求

- 5.6.1 钢筋混凝土结构阴极保护宜采用外加电流保护。
- 5.6.2 采用阴极保护的钢筋混凝土结构宜根据构件类型、所处腐蚀环境和选用阳极的种类，划分为若干独立的保护单元。
- 5.6.3 钢筋混凝土保护单元内连接总电阻应小于 1.0 Ω。
- 5.6.4 钢筋混凝土阴极保护单元内普通钢筋的电连接可采用焊接连接或机械连接等方式，预应力钢筋的电连接应采用机械连接的方式。
- 5.6.5 保护单元的保护电流应按下式计算：

$$I = k \cdot i \cdot S \tag{5.6.5}$$

式中：I——每个保护单元的保护电流（A）；
k——安全系数，取 1.2~1.5；
i——保护电流密度（A/m²），初始值宜由现场试验确定，无法进行现场试

验时，钢筋混凝土阴极保护电流密度值可按表 5.6.5 选取；
 S —表层钢筋的表面积（ m^2 ）。

表 5.6.5 钢筋混凝土阴极保护电流密度值（ mA/m^2 ）

钢筋周围的环境及钢筋的状况	电流密度
碱性、供氧少、钢筋尚未锈蚀	0.1
碱性、露天结构、钢筋尚未锈蚀	1.0~3.0
碱性、干燥、有氯盐、混凝土保护层厚，钢筋轻微锈蚀	3.0~7.0
潮湿有氯盐、混凝土质量差，保护层薄或中等厚度，钢筋普遍发生点蚀或全面锈蚀	8.0~20.0
氯盐含量高，潮湿，干湿交替，富氧，混凝土保护层薄，气候炎热，钢筋锈蚀严重	30.0~50.0

5.6.6 相对于 $\text{Ag}/\text{AgCl}/0.5\text{mol/L KCl}$ 参比电极，每个保护单元内保护电位应符合下列要求之一：

- 1 去除 IR 电压降后的保护电位范围，普通钢筋为 $-1100\text{ mV} \sim -720\text{ mV}$ ，预应力钢筋为 $-900\text{ mV} \sim -720\text{ mV}$ 。
- 2 极化电位衰减值不小于 100 mV 。

5.6.7 参比电极的电位值允许偏差应为 $\pm 10\text{ mV}$ 。

II 外加电流保护

5.6.8 外加电流阴极保护的辅助阳极应根据构件型式、保护年限、保护单元的划分、保护电流的分布、辅助阳极的性能和适用性等因素进行设计，并应满足下列要求：

- 1 辅助阳极应具备设计使用年限内承载发射电流的能力。
- 2 辅助阳极应具有抗酸化及与混凝土的粘结能力。
- 3 辅助阳极宜采用金属氧化物阳极。

5.6.9 外加电流阴极保护的直流电源应具有稳定、维护便捷、抗过载、防雷、抗干扰、抗盐雾、故障保护等性能，其布置应根据直流电源的数量、保护单元的划分、结构型式、使用条件、维护管理等因素确定。

5.6.10 外加电流阴极保护监控设备应主要包括参比电极、测量端子、数据采集和传输设备、接线箱。

5.6.11 外加电流阴极保护阳极系统检验应符合现行行业标准《海港工程钢筋混凝土

结构电化学防腐技术规范》JTS 153-2 的有关规定。

III 牺牲阳极保护

5.6.12 钢筋混凝土结构用牺牲阳极可采用铝基或锌基合金材料。

5.6.13 牺牲阳极应在使用期内保持阳极活性、电位和输出电流稳定。

5.6.14 牺牲阳极阴极保护系统每个保护单元所需牺牲阳极的质量应按下式计算：

$$W = \frac{E_g \cdot I \cdot t}{\mu} \quad (5.6.14)$$

式中： W ——所需的牺牲阳极质量（kg）；

E_g ——牺牲阳极的消耗率（kg/A·年）， E_g 的取值应符合本规范附录 A 的有关规定；

I ——所需平均保护电流（A）；

t ——保护年限（年）；

μ ——牺牲阳极的利用系数， μ 的取值应符合本规范附录 A 的有关规定。

5.6.15 牺牲阳极阴极保护监测设备宜主要包括参比电极、测量端子、数据采集和传输设备、电缆。

6 防腐蚀施工技术要求

6.1 一般规定

- 6.1.1 防腐蚀施工所用的设备、材料和仪器应经过实际应用或有关试验论证，并具备出厂质量证明文件或检验报告。
- 6.1.2 施工过程中应对已完成防腐蚀措施的构件采取防损保护措施。
- 6.1.3 钢结构在运输、堆存和安装过程中若有涂层破损应进行修复。
- 6.1.4 混凝土构件施工期的吊环、紧固件和连接件在构件安装就位后应割除并作表面保护。

6.2 钢结构防腐蚀施工技术要求

- 6.2.1 钢结构表面除锈及有机涂层涂装应在空气相对湿度不高于 85%、钢材表面温度至少高于露点 3℃的环境条件下作业。露点温度计算应符合本规范附录 C 的有关规定。施工环境的温度和湿度每工班测量次数不应少于 3 次。
- 6.2.2 涂层涂装作业应保证周围环境的清洁，涂装工作环境温度宜高于 5℃。
- 6.2.3 钢结构表面预处理与涂装之间的间隔时间不宜超过 4 h；车间作业或相对湿度低于 50%的晴天作业，间隔时间不宜超过 12 h。
- 6.2.4 涂装方法和涂刷工艺应根据所选用涂料的物理性能、施工条件和被涂装钢结构的形状进行选择。
- 6.2.5 涂装完成后应对涂层进行维护，涂层固化前应避免雨淋、曝晒和践踏。
- 6.2.6 涂料涂装宜采用高压无气喷涂施工，复杂形状构件可采用空气喷涂或刷涂施工。
- 6.2.7 热喷涂锌及锌合金宜采用火焰喷涂，热喷涂铝及铝合金宜采用电弧喷涂。
- 6.2.8 金属热喷涂工作环境温度应高于 5℃且被涂基体表面温度高于露点 3℃。施工环境的温度和湿度每工班测量次数不应少于 3 次。
- 6.2.9 金属热喷涂施工应符合现行国家标准《金属和其他无机覆盖层 热喷涂 操作安全》GB/T 11375 的有关规定。
- 6.2.10 热喷金属层厚度的检测方法、数量应符合现行国家标准《热喷涂涂层厚度的无损测量方法》GB/T 11374 的有关规定。

6.2.11 热喷金属层结合性能检验应按现行国家标准《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》GB/T 9793 的有关规定执行。

6.2.12 浸镀施工应按工艺流程和要求进行，镀件宜一次完成浸镀，若镀件尺寸过大而无法一次完成，可分步浸镀。

6.2.13 镀锌层质量检测方法和标准应符合现行国家标准《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912 的有关规定。

6.2.14 阴极保护电源的安装施工应符合现行国家标准《电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范》GB 50254 的有关规定。

6.2.15 氧化聚合型包覆施工环境温度应高于 5℃，相对湿度应小于 95%，不应在雨、雪天气施工。

6.2.16 复层矿脂包覆防腐施工环境温度应高于-10℃。

6.3 钢筋混凝土结构防腐蚀施工技术要求

6.3.1 钢筋混凝土结构表面涂层施工时混凝土龄期不应少于 28 d。待涂装的钢筋混凝土结构表面应修补缺陷，清除附着的碎屑、灰尘和油污等表面杂质，大气区钢筋混凝土表面含水率应小于 6%。

6.3.2 钢筋混凝土结构表面涂层涂装前应在实体构件上按设计涂层体系和产品使用要求进行涂装试验，试验区面积不宜小于 5 m²。

6.3.3 硅烷浸渍施工工艺应符合现行行业标准《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209 的有关规定。

6.3.4 硅烷浸渍施工应符合下列规定：

- 1 喷涂硅烷的混凝土龄期不应少于 28 d，或混凝土修补后不应少于 14 d。
- 2 钢筋混凝土表面温度应在 5℃~45℃之间。
- 3 钢筋混凝土表面应为面干状态。

6.3.5 钢筋混凝土采用内掺型钢筋阻锈剂时施工应符合下列要求：

- 1 当使用水剂型钢筋阻锈剂时，混凝土拌合水量应扣除钢筋阻锈剂中含有的水量。
- 2 混凝土在浇筑前，应通过试验确定钢筋阻锈剂对混凝土初凝和终凝时间的影响。

6.3.6 钢筋混凝土采用外涂型钢筋阻锈剂时施工应符合下列规定：

- 1 钢筋阻锈剂应直接涂覆在钢筋混凝土表面。施工时，应采取防止日晒、雨淋或

海水侵蚀的措施。施工完成后，宜覆盖薄膜养护不少于 7 d。

2 当钢筋混凝土表面有油污、油脂、涂层等影响渗透的物质时，应去除后再进行涂覆操作。

6.3.7 钢筋混凝土阳极系统安装应牢固、可靠，不得与钢筋、金属预埋件、绑扎丝搭接；辅助阳极之间的搭接不应小于 50 mm，采用焊接方式搭接时，每个搭接部分点焊不应少于 3 点。

6.3.8 钢筋混凝土点式牺牲阳极与基体混凝土之间应采用水泥基材料填充密实。

6.3.9 钢筋混凝土面式阳极安装前，混凝土表面宜进行喷砂处理，阳极与基体混凝土粘结附着力应大于 1.0 MPa。

7 防腐运行维护技术要求

7.1 一般规定

- 7.1.1 海上风电场工程防腐设计文件应提出运行期内的检查与维护要求。
- 7.1.2 海上风电场工程防腐运行维护技术要求应包括下列内容：
- 1 具体防腐措施的维护技术要求。
 - 2 进行定期检查、检测，判断结构防腐措施设施的运行状态。
 - 3 根据检查及检测结果对防腐效果做出判断，确定防腐措施修复、更换技术要求及实施方案。
- 7.1.3 结构检测不宜损坏防腐措施。
- 7.1.4 牺牲阳极保护应定期对保护电位进行检测，当发现保护电位不满足设计要求时应及时修复。
- 7.1.5 外加电流保护系统的直流电源、监控系统、阳极系统、电缆等所有部件应进行检查和维护，并对保护电位和输出电流进行监测，当发现保护电位不满足设计要求时应及时修复。

7.2 钢结构防腐运行维护技术要求

7.2.1 海上风电场工程钢结构防腐定期检查可分为常规检查和详细检查，钢结构定期检查的项目、内容、部位和周期宜符合表 7.2.1 的规定。当周围环境发生重大变化或保护电位出现异常时应及时进行检查。

表 7.2.1 钢结构定期检查的项目、内容、部位和周期

项目分类	检查项目	检查部位	检查内容	检验周期（月）
常规检查	防腐涂层外观检查	水上涂装钢结构	涂层破损情况	6
	阴极保护运行检测	水中钢结构	保护电位	12
详细检查	水下外观检查	水中钢结构	局部腐蚀、涂层破损	60
	防腐涂层性能检查	水上钢结构	鼓泡、剥落、锈蚀	36
	腐蚀量检测	钢结构	测定钢结构壁厚	120
	阳极消耗量检测	牺牲阳极	测定阳极实际尺寸	60

7.2.2 钢结构防腐涂层运行维护应符合下列规定：

- 1 涂层破损处的表面清理可采用动力或手工除锈，其表面清洁度等级应达到 St3 级。
- 2 搭接部位的涂层表面应无污染和附着物，并对搭接部位涂层打毛。
- 3 飞溅区、全浸区涂层破损区可采用具有湿固化性能的涂料或包覆材料修复。

7.3 钢筋混凝土结构防腐蚀运行维护技术要求

7.3.1 海上风电场工程钢筋混凝土结构防腐蚀定期检查可分为常规检查和详细检查，钢筋混凝土结构定期检查的项目、内容、部位和周期宜符合表 7.3.1 的规定。当周围环境发生重大变化或保护电位出现异常时应及时进行检查。

表 7.3.1 钢筋混凝土结构定期检查的项目、内容、部位和周期

项目分类	检查项目	检查部位	检查内容	检验周期 (月)
常规检查	钢筋混凝土外观	钢筋混凝土	裂缝、破损情况	6
	涂层外观	水上涂装混凝土	涂层破损情况	6
	阴极保护运行状态	-	保护电位	12
详细检查	表面涂层	水上涂装钢筋混凝土	涂层外观、涂层干膜厚度及涂层粘结强度	36
	硅烷浸渍	钢筋混凝土	钢筋混凝土中氯离子渗透情况和碳化深度	36

7.3.2 钢筋混凝土防腐涂层运行维护应符合下列要求：

- 1 防腐涂层在风电场运行过程中应定期进行检查，如有损坏应及时修补。修补用涂料的类型和性能应与原涂料相同或相容。
- 2 当检查发现涂层有龟裂、气泡、粉化及脱落时，应重新进行涂装。再次涂装时，应将失效涂层铲除，再用清水冲洗干净后方可涂装；涂料可使用原配套涂料，或重新设计配套涂料。

附录 A 阴极保护设计计算公式

A.1 牺牲阳极设计计算

A.1.1 牺牲阳极输出电流可按下式计算：

$$I_a = \frac{\Delta U}{R} \quad (\text{A.1.1})$$

式中： I_a ——单个牺牲阳极的输出电流（A）；

ΔU ——牺牲阳极的驱动电压（V），锌合金阳极取 0.20 V~0.25 V，铝合金阳极取 0.25 V~0.30 V；

R ——牺牲阳极和被保护刚结构之间的回路总电阻（ Ω ），其值近似于牺牲阳极的接水电阻。

A.1.2 牺牲阳极的数量可按下式计算：

$$N = \frac{I}{I_a} \quad (\text{A.1.2})$$

式中： N ——牺牲阳极的数量；

I ——金属结构的保护电流（A）。

A.1.3 牺牲阳极寿命可按下式计算：

$$t = \frac{m_i \mu}{E_g I'_a} \quad (\text{A.1.3})$$

式中： t ——牺牲阳极的使用年限（年）；

m_i ——单个牺牲阳极的净重（kg）；

μ ——牺牲阳极的利用系数，长条状阳极取 0.90~0.95，手镯式阳极取 0.75~0.80，其他形状阳极取 0.75~0.90；

E_g ——牺牲阳极的消耗率（kg/（A·年）），铝-锌-镉-镁-钛牺牲阳极取 3.37，锌-铝-镉系合金取 11.23，其他铝合金牺牲阳极取 3.65；

I'_a ——牺牲阳极在使用年限内的平均输出电流（A），取 $0.5 I_a \sim 0.55 I_a$ 。

A.2 外加电流设计计算

A.2.1 电源设备功率和电源设备输出电压可按下列公式计算：

$$P = \frac{IU}{\eta} \quad (\text{A.2.1-1})$$

$$U = I(R_a + R_L + R_c) \quad (\text{A.2.1-2})$$

式中： P ——电源设备的输出功率（W）；

I ——电源设备的输出电流（A）；

U ——电源设备的输出电压（V）；

η ——电源设备的效率，一般取 0.7；

R_a ——辅助阳极的接水电阻（ Ω ）；

R_L ——导线电阻（ Ω ）；

R_c ——阴极过渡电阻（ Ω ）。

A.2.2 辅助阳极的数量可按下式计算：

$$N = \frac{I}{I_a} \quad (\text{A.2.2})$$

式中： N ——辅助阳极的数量；

A.3 阳极接水电阻

A.3.1 长条阳极接水电阻的计算应符合下列规定：

1 若 $L \geq 4r$ ，且长条状阳极与保护对象之间的距离不小于 0.3 m，长条状阳极接水电阻可按下列公式计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{r} - 1 \right) \quad (\text{A.3.1-1})$$

$$r_c = \frac{C}{2\pi} \quad (\text{A.3.1-2})$$

$$r_m = r_c - (r_c - r_t)\mu \quad (\text{A.3.1-3})$$

2 若 $L < 4r$ ，且长条状阳极与保护对象之间的距离不小于 0.3 m，长条状阳极接水电阻可按下列公式计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \left\{ \ln \left[\frac{2L}{r} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} \quad (\text{A.3.1-4})$$

式中： R_a ——阳极的接水电阻（ Ω ），当牺牲阳极与保护对象之间的距离小于

0.30m 但达到 0.15m 时，长条状阳极接水电阻应乘以 1.3 的修正系数；

ρ ——介质电阻率 ($\Omega \cdot \text{m}$)；

L ——阳极长度 (m)，末期长度取 $0.9L$ ；

r ——阳极等效半径 (m)，分为 r_c 和 r_m ；

C ——阳极截面周长 (m)；

r_c ——初期等效半径 (m)；

r_m ——末期等效半径 (m)；

r_t ——阳极铁芯半径 (m)。

A.3.2 板状阳极接水电阻可按下式计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2S} \quad (\text{A.3.2})$$

式中： S ——阳极的长度和宽度算术平均值 (m)。

A.3.3 其他阳极的接水电阻可按下式计算：

$$R_a = \frac{0.315\rho}{\sqrt{A}} \quad (\text{A.3.3})$$

式中： A ——阳极的裸露面积 (m^2)。

附录 B 阳极屏蔽层的尺寸计算方法

B.0.1 涂层耐阴极剥离电位值可按表 B.0.1 选用。

表 B.0.1 涂层耐阴极剥离电位值（V）

涂层种类	耐阴极剥离电位值
环氧沥青系涂层	-1.25
有机富锌涂层	-1.30
无机富锌涂层	-1.30
环氧系涂层	-1.50

注：剥离电位值为相对于 Ag/AgCl 电极。

B.0.2 圆形阳极的屏蔽层尺寸可按下式计算：

$$r = \frac{\rho I_a}{2\pi(E_0 - E)} \tag{B.0.2}$$

式中： r ——阳极屏蔽层的半径（m）；
 E_0 ——结构的保护电位（V）；
 E ——屏蔽层外延的涂层所能经受的最负电位（V），可按表 B.0.1 取值。

B.0.3 长条形阳极的屏蔽层尺寸可按下列公式计算：

$$b_0 = \frac{2L \exp \left[2\pi L (E_0 - E) / \rho I_a \right]^{\frac{1}{2}}}{\left\{ \exp \left[2\pi L (E_0 - E) / \rho I_a \right] \right\} - 1} + 2b \tag{B.0.3-1}$$

$$L_0 = \frac{L \left\{ \left\{ \exp \left[2\pi L (E_0 - E) / \rho I_a \right] \right\} + 1 \right\}}{\left\{ \exp \left[2\pi L (E_0 - E) / \rho I_a \right] \right\} - 1} + L \tag{B.0.3-2}$$

式中： b_0 ——阳极屏蔽层的宽度（m）；
 L ——阳极长度（m）；
 b ——阳极宽度（m）；
 L_0 ——阳极屏蔽层的长度（m）。

附录 C 露点温度计算

C.0.1 露点温度可按下式计算：

$$t_d = 234.175 \times \frac{(234.175 + t)(\ln 0.01 + \ln \varphi) + 17.08085t}{234.175 \times 17.08085 - (234.175 + t)(\ln 0.01 + \ln \varphi)} \quad (C.0.1)$$

式中： t_d ——露点温度（℃）；
 t ——空气温度（℃）；
 φ ——相对湿度（%）。

C.0.2 露点温度计算应符合表 C.0.2 的有关规定。

表 C.0.2 露点温度计算表

相对湿度 (%)	空气温度 (℃)									
	0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0	40.0	45.0
95	-0.7	4.3	9.2	14.2	19.2	24.1	29.1	34.1	39.0	44.0
90	-1.4	3.5	8.4	13.4	18.3	23.2	28.2	33.1	38.0	43.0
85	-2.2	2.7	7.6	12.5	17.4	22.3	27.2	32.1	37.0	41.9
80	-3.0	1.9	6.7	11.6	16.4	21.3	26.2	31.0	35.0	40.7
75	-3.9	1.0	5.8	10.6	15.4	20.3	25.1	29.9	34.7	39.5
70	-4.8	0.0	4.8	9.6	14.4	19.1	23.9	28.7	33.5	38.2
65	-5.8	-1.0	3.7	8.5	13.2	18.0	22.7	27.4	32.1	36.9
60	-6.8	-2.1	2.6	7.3	12.0	16.7	21.4	26.1	30.7	35.4
55	-7.9	-3.3	1.4	6.1	10.7	15.3	20.0	24.6	29.2	33.8
50	-9.1	-4.5	0.1	4.7	9.3	13.9	18.4	23.0	27.6	32.1
45	-10.5	-5.9	-1.3	3.2	7.7	12.3	16.8	21.3	25.8	30.3
40	-11.9	-7.4	-2.9	1.5	6.0	10.5	14.9	19.4	23.8	28.2
35	-13.6	-9.1	-4.7	-0.3	4.1	8.5	12.9	17.2	21.6	25.9
30	-15.4	-11.1	-6.7	-2.4	1.9	6.5	10.5	14.8	19.1	23.4

本规范用词说明

- 1 为便于在执行本规范条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：
 - 1) 表示很严格，非这样做不可的：
正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。
 - 2) 表示严格，在正常情况均应这样做的：
正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。
 - 3) 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：
正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。
 - 4) 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。
- 2 条文中指明应按其他有关标准执行的写法为：“应符合……的规定”或“应按……执行”。

引用标准名录

- 《锌锭》GB/T 470
- 《漆膜耐冲击测定法》GB/T 1732
- 《漆膜耐湿热测定法》GB/T 1740
- 《色漆和清漆 耐中性盐雾性能的测定》GB/T 1771
- 《色漆和清漆 人工气候老化和人工辐射曝露 滤过的氙弧辐射》GB/T 1865
- 《铝-锌-镉系合金牺牲阳极》GB/T 4948
- 《色漆和清漆 拉开法附着力试验》GB/T 5210
- 《船用参比电极技术条件》GB/T 7387
- 《船用辅助阳极技术条件》GB/T 7388
- 《船舶及海洋工程阳极屏涂料通用技术条件》GB/T 7788
- 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第3部分：焊缝、边缘和其他区域的表面缺陷的处理等级》GB/T 8923.3
- 《热喷涂 金属和其他无机覆盖层 锌、铝及其合金》GB/T 9793
- 《产品几何技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法》GB/T 10610
- 《船舶漆 耐盐水性的测定 盐水和热盐水浸泡法》GB/T 10834
- 《热喷涂涂层厚度的无损测量方法》GB/T 11374
- 《金属和其他无机覆盖层 热喷涂 操作安全》GB/T 11375
- 《热喷涂 火焰和电弧喷涂用线材、棒材和芯材 分类和供货技术条件》GB/T 12608
- 《色漆和清漆 漆膜厚度的测定》GB/T 13452.2
- 《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层 技术要求及试验方法》GB/T 13912
- 《涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的评定试验 第3部分：涂覆涂料前钢材表面的灰尘评定（压敏粘带法）》GB/T 18570.3
- 《涂覆涂料前钢材表面处理喷射清理用金属磨料的技术要求 第3部分：高碳铸钢丸和砂》GB/T 18838.3

《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第4部分：表面类型和表面处理》GB/T 30790.4

《色漆和清漆 防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第5部分：防护涂料体系》GB/T 30790.5

《色漆和清漆 海上建筑及相关结构用防护涂料体系性能要求》GB/T 31415

《海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐蚀技术》GB/T 32119

《钢结构氧化聚合型包覆防腐蚀技术》GB/T 32120

《电气装置安装工程 低压电器施工及验收规范》GB 50254

《海上风电场钢结构防腐蚀技术标准》NB/T 31006

《水运工程混凝土结构设计规范》JTS 151

《水运工程结构耐久性设计标准》JTS 153

《海港工程钢筋混凝土结构电化学防腐蚀技术规范》JTS 153-2

《水运工程结构防腐蚀施工规范》JTS/T 209

《水运工程混凝土试验检测技术规范》JTS/T 236

中华人民共和国能源行业标准

海上风电场工程防腐蚀设计规范

NB/T 10626-2021

条 文 说 明

制 定 说 明

《海上风电场工程防腐蚀设计规范》NB/T 10626—2021，经国家能源局 2021 年 4 月 26 日以第 3 号公告批准发布。

本规范制定过程中，编制组在广泛调查、深入研究的基础上，调研了近年来部分海上风电工程、海洋港口工程、跨海大桥工程、海上石油工程的实践经验，吸收了近年来国内外在海上风电防腐蚀设计、施工和运行维护方面所取得的科技成果，并向有关设计和科研单位征求了意见。

为便于广大设计、施工、科研和学校等单位有关人员在使用本规范时能正确理解和执行条文规定，《海上风电场工程防腐蚀设计规范》编制组按章、节、条顺序编制了本规范的条文说明，对条文规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项进行了说明。但是，本条文说明不具备与规范正文同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规范规定的参考。

目 次

3	基本规定	40
4	钢结构防腐设计	41
4.1	一般规定	41
4.2	表面处理	41
4.4	金属热喷涂防腐	41
4.5	热浸镀锌防腐	41
4.6	阴极保护	42
4.7	包覆防腐	42
5	钢筋混凝土结构防腐设计	43
5.1	一般规定	43
5.3	表面涂层	43
5.4	硅烷浸渍	43
5.5	钢筋阻锈剂	44
5.6	阴极保护	44
6	施工技术要求	45
6.1	一般规定	45
7	运行维护技术要求	46
7.1	一般规定	46

3 基本规定

3.0.3 本条中设计高水位采用高潮累计频率 10%的潮位或历时累积频率 1%的潮位，设计低水位采用低潮累积频率 90%的潮位或历时累积频率 98%的潮位。

4 钢结构防腐设计

4.1 一般规定

4.1.3 本条规定了钢结构在不同腐蚀区域的平均腐蚀速率取值范围，需要指出的是，钢结构在海洋环境中的局部腐蚀速率远大于平均腐蚀速率（约为平均腐蚀速率的 5 倍~10 倍），这种局部腐蚀速率会造成结构物腐蚀穿孔或应力集中，成为结构物的安全隐患。以平均腐蚀速率为计算依据的腐蚀裕量法并不能完全弥补局部腐蚀造成的危害。

4.1.4 海洋钢结构防腐涂层设计使用年限一般不超过 20 年，为保证风电场运行期内的安全运行，对使用防腐涂层和阴极保护的钢结构，需要在结构设计时考虑一定的腐蚀裕量，本条针对不同腐蚀部位的钢结构，综合考虑腐蚀速率、采用的防腐蚀措施以及运行时间等，给出了理论最小腐蚀裕量。

国际上，NACE-RP0176 对飞溅区的腐蚀裕量进行了描述，规定其一般不小于 6mm，DNVGL 对结构内部区域腐蚀裕量进行了规定，其中单侧腐蚀裕量不小于 1mm，双侧腐蚀裕量不小于 2mm，上述取值与本规范给出的理论最小腐蚀裕量存在一定的差异。实际工程设计时要根据结构所处腐蚀环境、防腐蚀保护措施以及防腐涂层修复难度进行酌情考虑。

4.2 表面处理

4.2.6 本条规定了钢材除锈前的表面氯化物含量，国内外相关规范对该值的要求有一定差异，《Corrosion protection for wind turbines》DNVGL-RP-0416 规定为不大于 20mg/m²，《海上风电场钢结构防腐蚀技术标准》NBT 31006—2011 规定为不大于 70mg/m²，本规范综合两种规范的要求，同时结合目前国内实际项目情况，规定钢材除锈前的表面氯化物含量不大于 50mg/m²。

4.4 金属热喷涂防腐蚀

4.4.4 金属热喷涂系统中封闭剂的作用一方面是封闭金属涂层孔隙，阻止腐蚀介质直接渗透到钢结构表面；另一方面封闭剂可以起到中间漆的作用，增强面漆和金属涂层的结合力。

4.5 热浸镀锌防腐蚀

4.5.2 本条规定的最小镀锌厚度，是根据海洋大气区锌的腐蚀速率，结合海上风电现场设计使用年限综合而定。

4.6 阴极保护

4.6.1 牺牲阳极保护法和外加电流保护法都是海上钢结构成熟且应用广泛的阴极保护技术。牺牲阳极阴极保护系统优点是无需外部电源，易安装，维护少，缺点是驱动电压小与保护范围小，对大型钢结构需要较多阳极；外加电流阴极保护优点是使用寿命长，作用半径大，对构造复杂的钢结构保护效果较好，缺点是需要提供持续稳定外部电源，维护成本相对较高，较容易导致过保护。设计要根据项目的腐蚀环境特点、施工条件、供电条件、维护管理和项目投资等情况进行综合评估，选择合适的阴极保护方式。

4.6.6 采用联合保护措施可以提高保护系统的效率和可靠性，特别是对于浪溅区部位，无法持续提供导电性介质，采用与涂层结合的阴极保护措施效果更好。

4.6.12 结构能否达到充分的保护状态，是以结构的阴极极化电位作为依据，极化电位除与金属材料本身有关外，还与介质环境、表面涂装状态有关。维持极化所需的保护电流密度无法通过实验确定时，可以按本规范推荐值选取。

4.6.21 辅助阳极较近的代表性位置是指钢结构阴极保护电位最负的位置，如果无阳极屏涂料，该位置是辅助阳极安装位置 1 米范围内，如果有阳极屏涂料，则该位置是阳极屏涂料与钢结构整体涂料结合位置。辅助阳极较远的代表性位置是指钢结构阴极保护电位最正的位置。

4.7 包覆防腐蚀

4.7.1 包覆防腐蚀技术一般应用于对结构防腐蚀要求较高的结构部分，或者用于防腐涂层的修复。氧化聚合型包覆防腐蚀技术和复层矿脂包覆防腐蚀技术是目前海上风电、港口等海洋工程应用较为成熟的防腐蚀技术，其使用寿命一般可以达到 30 年以上。

5 钢筋混凝土结构防腐设计

5.1 一般规定

5.1.2 采用高性能混凝土本身是一种混凝土防腐措施，混凝土附加防腐措施除本条规定的外，还有环氧涂层钢筋，环氧涂层钢筋由于表面光滑，其与混凝土的胶结和摩阻力降低，咬合作用也因容易滑脱而受影响，致使粘结性能减弱。根据试验研究表明：与普通钢筋比较，涂层钢筋的粘结锚固强度降低约 10%，在最不利锚固条件下可以降低 20%，锚固长度约增长 25%，搭接锚固强度约降低 13.8%，鉴于以上原因，本规范不推荐采用环氧涂层钢筋。

5.1.5 不同品种、不同级别的钢筋化学成分不同，钢筋的自然电位有差别，钢筋之间的电位差在电连接情况下会形成腐蚀电池，可能会发生电偶腐蚀，本条的规定是为了避免不同钢筋之间可能产生的电偶腐蚀。

5.1.7 混凝土构件形式越复杂，暴露表面面积越大，则有害物质渗入的可能性越大。因此在设计阶段就要考虑简单且易于施工的结构形式，减少构件棱角，避免受力过于复杂，有利于提高耐久性。

5.3 表面涂层

5.3.1 涂层耐碱性性能按本条规定进行试验后，涂层若无变色、气泡、剥落、分化、软化等现象视为合格；施工后涂层匀，无色差、流挂、斑点、起泡、龟裂、剥落等现象视为外观质量合格。

5.4 硅烷浸渍

5.4.1 海上风电混凝土结构长期处于氯化物侵入的海洋环境中，由于毛细管的吸收或扩散作用，使氯化物侵入混凝土中，是混凝土结构中钢筋腐蚀的最重要原因。硅烷特殊的小分子结构与混凝土基材有着良好的亲和力，能轻易渗透到混凝土内部，硅烷活性成分与暴露在环境中的空气及基底中的水分产生化学反应，生成羟基团。这些羟基团将与基材及其本身产生交联、堆积，结合在毛细孔的内壁，最终在混凝土的毛细孔表面形成一层牢固的憎水性有机硅网络保护层，能够有效地阻止外部水分和有害物质的入侵，并让内部水气和有害气体逸出，从而大大提高混凝土结构的防水性、耐盐碱

性、抗冻融性等特性，延长钢筋混凝土寿命。

5.5 钢筋阻锈剂

5.5.1 钢筋阻锈剂主要用于氯盐腐蚀为主的环境条件。阻锈剂可以提高引起钢筋锈蚀的临界氯离子浓度的阈值，但要保证结构的抗氯离子腐蚀性，仍有赖于混凝土保护层本身具有较好的密实性和良好的抗氯离子渗透性能。

5.5.3 钢筋阻锈剂产品的成分和含量决定其阻锈性能，也是混凝土质量控制的必要措施。在选择阻锈剂时，需要根据阻锈剂产品的有效成分和含量、使用方法、掺量等进行试验检测，经证明其质量和性能符合规定要求时才能使用。

5.6 阴极保护

5.6.1 混凝土除外加电流和牺牲阳极阴极保护外，还有电化学脱盐及电沉积两种电化学保护方法，后两种主要是作为防腐修复措施应用于遭受腐蚀的已建混凝土结构。

5.6.2 大型钢筋混凝土结构物中，各构件的湿度、氯盐污染程度、保护层厚度和几何尺寸等常有差异，从而造成钢筋自腐蚀电位和混凝土电阻存在较大的差异。为使阴极保护连续有效，将钢筋周围环境存在显著差异的各个区域，分成彼此独立的单元，并与相应的阳极系统，构成独立的电流回路。

6 施工技术要求

6.1 一般规定

6.1.2 防腐蚀措施在施工过程中的损坏要尽量避免，尤其是涂层的损坏。由于现场施工环境一般无法达到涂层修复施工的要求，其保护效果也会因此降低。

7 运行维护技术要求

7.1 一般规定

7.1.1 根据目前海洋工程防腐蚀技术水平，钢结构或钢筋混凝土结构的涂层体系难以满足海上风电场 25 年以上的设计使用年限，需要结合运行期的管理维护使其满足要求。

防腐蚀措施的维护管理需要从设计阶段开始进行合理的规划，贯穿风电场的设计、施工及全部运行期。