



REETC/TN014: 2023

# 海上风电场钢结构防腐运维指南

Guideline of Corrosion Control Maintenance for the Steel  
Structures in Offshore Wind Farm

2023-11-29 发布

2023-11-29 实施

可再生能源专家技术委员会 发布

# 版权声明

本文为技术说明，不属于标准及规范性文件，可用于应对行业实际问题实施时提供执行依据，及行业制修订相关标准或规范性文件时提供参考。本文的著作权属于可再生能源专家技术委员会成员单位共有，任何成员单位或个人未经其他成员单位同意不得直接或变相将本文全部或部分用于商业用途及市场宣传。对于违反此声明或者其他违法使用本文内容者，可再生能源专家技术委员会将依法追究其法律责任。

本文件起草召集人：刘兆

本文件主要起草人员（按姓氏拼音排序）：白文柱、蔡继峰、曹文凯、冯乐、顾素平、郭奇、甘宽、胡泽坤、冀卫东、姜坤、金少强、李焯、李震、李伟华、李伟杰、李岩、李志川、林斌、刘兆、刘维斌、梁汉天、苗丰、蒙雪银、齐磊、史丽萍、汪文东、王中权、王杰、王伟、王宇、肖罗生、詹耀、张波、郑春辉、钟娜、周卫星、朱春生、张远虎



# 目录

1. 总则 .....	5
1.1. 目的 .....	5
1.2. 适用范围 .....	5
1.3. 服务对象 .....	5
2. 术语和定义 .....	5
3. 海上结构的暴露等级 .....	7
3.1. 海上平台结构的等级 .....	7
3.2. 海上风电平台的等级 .....	7
4. 海上结构的检验要求 .....	7
4.1. 检验一般要求 .....	7
4.2. 初次检测 .....	10
4.3. 定期检测 .....	12
5. 海上结构的检测方法 .....	16
5.1. 外观检查 (VI) .....	16
5.2. 涂层检查 .....	17
5.3. 磁粉探伤 (MT) .....	19
5.4. 超声波测厚 .....	19
5.5. 海生物厚度测量 .....	20
5.6. 牺牲阳极检测 .....	21
5.7. 结构电位测量和阳极电位测量 .....	21
5.8. 直线度检查 .....	23
5.9. 交流场检测 (ACFM) .....	23
5.10. 构件充水探测 (FMD) .....	25
5.11. 冲刷检测 .....	26
6. 海上结构的检验记录与报告 .....	28
7. 海上结构破损的分析方法 .....	29
8. 海上结构破损的处理要求 .....	30
8.1. 一般要求 .....	30
8.2. 上部组块检验结果分析与处理 .....	31
8.3. 飞溅区检验结果分析与处理 .....	32
8.4. 水下结构检验结果与分析 .....	32
8.5. 海床检验结果与分析 .....	33
9. 海上结构破损的处理方法 .....	33
9.1. 补漆 .....	34
9.2. 包覆 .....	35
9.3. 重新安装牺牲阳极 .....	38
9.4. 裂纹打磨 .....	39
9.5. 焊接 .....	40

9.6. 灌浆 .....	42
9.7. 卡箍 .....	44
9.8. 螺栓连接 .....	45
10. 参考文献 .....	46



# 1. 总则

## 1.1. 目的

本指南旨在为海上风电场的钢结构运维提供相应的参考和指导，重点关注其检验和维修工作，并依据现有海洋工程和风力发电行业标准，提供了相应的工作方法和建议。

## 1.2. 适用范围

本指南适用于中国固定式海上风电场的钢结构运维工作，对于其他区域应遵循当地法律法规进行相应的检验和运维等工作。

## 1.3. 服务对象

本指南服务于海上风电场的运维工作，服务对象包括但不限于与海上风电钢结构运维相关的设计方、业主和运维公司。

# 2. 术语和定义

### 2.0.1 外观检查（VI, Visual Inspection）

指通过直接观察物体的外观和表面特征，以判断其质量、状态、完整性和可用性的过程。

### 2.0.2 总体外观检查（GVI, General Visual Inspection）

总体外观检查是通过对平台结构大体外观检查，了解结构是否存在变形、损坏、腐蚀等。

### 2.0.3 近观检查（CVI, Close Visual Inspection）

近观检查是指检查时人手可触摸到检查位置的检验方式，通常对可疑区域、高应力区域应实施近观检查。

### 2.0.4 交流场检测（ACFM, Alternating Current Field Measurement）

利用导电材料中的缺陷会改变材料表面电磁场的原理，通过测量电磁场分布的变化，并和标准的理想缺陷所形成的电磁场进行比较，从而确定缺陷的性质、位置和大小。

### 2.0.5 构件冲水检测（FMD, Flooded Member Detection）

利用超声波探测平台结构构件是否进水，确定构件是否存在穿透性缺陷。

### 2.0.6 加强、改造和修理措施（SMR, Strengthening, Modification and Repairing）

指对在役平台结构进行的加强、改造和修理措施。

### 2.0.7 磁粉探伤（MT, Magnetic Detection）

利用钢结构缺陷处的漏磁场与磁粉的相互作用，观察磁痕，确定缺陷位置及形状的检测手

段。

#### 2.0.8 水下磁粉探伤 (UWMT, Under Water Magnetic Detection)

在水下利用钢结构缺陷处的漏磁场与磁粉的相互作用,观察磁痕,确定缺陷位置及形状的检测手段。

#### 2.0.9 包覆 (Covering)

为防止腐蚀,在结构物外表面符合一层耐蚀材料,使原来表面与环境隔离。

#### 2.0.10 复层矿脂包覆防腐技术 (Covering Anticorrosion Technology Of Multilayer Petrolatum)

一种用于钢铁构筑物表面,包含多层矿脂类材料外加硬质保护套的防腐技术。该技术多用于海洋浪花飞溅区钢铁构筑物的腐蚀防护。

#### 2.0.11 矿脂防蚀膏 (Anticorrosion Petrolatum Paste)

以矿物脂为原料,加入缓蚀剂、增稠剂、润滑剂、填料等加工制作的膏状防蚀材料。

#### 2.0.12 矿脂防蚀带 (Anticorrosion Petrolatum Tape)

以无纺布为载体,在含有复合防锈剂、增稠剂、润滑剂、填料等特制矿物脂中浸渍制成的带状防蚀材料。

#### 2.0.13 密封缓冲层 (Sealing Buffer Layer)

安装于防蚀保护罩内侧,缓冲外部冲击并起到密封作用的泡沫材料。

#### 2.0.14 防蚀保护罩 (Anticorrosion Cover)

由多层不饱和聚酯树脂浸透玻璃纤维现场制成的玻璃钢外壳。

#### 2.1.15 挡板 (Plate)

安装在矿脂防蚀带与密封缓冲层之间,用于密封的薄片玻璃钢。

#### 2.0.16 氧化聚合型包覆腐蚀控制技术 (Covering Corrosion Control Technology of Oxidative Polymerization)

一种用于钢结构表面,包含多层材料外加聚合物氧化膜的包覆防腐技术。

#### 2.0.17 防蚀膏 (Anticorrosion Paste)

以植物油为主题,包含缓蚀剂、防锈剂、无机填料,经混合、加热搅拌、冷却、分装等工艺加工制成的膏/糊状无机溶剂型产品。

#### 2.0.18 防蚀带 (Anticorrosion Tape)

以无纺布为载体,在含有防锈剂、填料等化合物中浸渍制成的带状防蚀材料。

#### 2.0.19 无人遥控潜水器 (ROV, Remotely Operated Vehicle)

是一种由水面控制，可以在水下三维空间自由航行的高科技水下工作系统，是无人潜水的重要设备。

### 3. 海上结构的暴露等级

#### 3.1. 海上平台结构的等级

根据人身安全和失效后果考虑，对海上平台结构的等级进行确认，具体分类见下表。

表 3.1-1 平台暴露等级表

人员-安全等级	后果等级		
	C1 高等级	C2 中等级	C3 低等级
S1: 人员值守-无法疏散	L1	L1	L1
S2: 人员值守-可疏散	L1	L2	L2
S3: 无人值守	L1	L2	L3

其中：

S1：一直有人员值守和居住的平台，在设计环境事件之前无法执行人员疏散。

S2：人员值守和居住的平台，并且在设计环境事件之前已有疏散计划并且有足够的时间从平台安全疏散所有人员。

S3：无人值守平台，偶然住人平台和包含临时人员避难设施的平台也应归属于此类平台。

C1：高后果故障类别，是指设计事件发生时平台无法关停。

C2：中后果故障类别，是指设计事件发生时平台可以关停。

C3：低后果故障类别，是指设计事件发生时平台可以关停，且易燃易爆和可能造成污染的物质仅限于最小加工存储量。

\*API 建议 C3 等级中还增加了设计水深不超过 30 米的要求。

#### 3.2. 海上风电平台的等级

海上风电场升压站和风力发电机组支撑结构一般为无人值守平台，且不存在易燃易爆和可能造成污染的物质存储等问题，属于 L3 暴露等级；如果海上风电场升压站或风电机组储能设备设计中包含易燃易爆物质生产（如制氢）或可能造成严重海洋污染的储能设备，其暴露等级应重新评价。

### 4. 海上结构的检验要求

#### 4.1. 检验一般要求

##### 4.1.1. 检验时间间隔

根据平台的暴露等级决定最终的检测频度，除非有以往的经验或/工程分析表明其他检测间隔的合理性，否则海上固定平台进行检测的时间间隔应不超过表 4.1.1-1 规定。如果改变检测时间间隔，其判定的依据和过程应形成文件并由操作者加以保存。

表 4.1.1-1 平台检测周期要求

暴露等级	I 级检测	II 级检测	III 级检测	IV 级检测
L1	每年	3~5 年	6~10 年	根据 III 级检测结果决定
L2	每年	5~10 年	11~15 年	根据 III 级检测结果决定
L3	每年	5~10 年	无要求	无要求
检测周期应以平台安装完成时间作为时间起始点				

下列因素将影响检测间隔的延长或者缩短：

- (1) 原始设计/评估标准；
- (2) 当前的结构情况；
- (3) 平台使用历史（如防腐系统状态、以前的检验结果、设计作业或载荷条件的改变、以前的损坏和修理工作等）；
- (4) 平台结构冗余度；
- (5) 平台对其他操作的关键性；
- (6) 平台位置（如周边水域、水深等）；
- (7) 损坏；
- (8) 疲劳敏感程度。

#### 4.1.2. 特殊检测

在台风或者地震之后进行 I 级检测，检测位置包含大气区和飞溅区的结构和设备，并附加水下阴极电位，如有风暴潮情况，海床和海缆的情况也应进行及时检查。除上述结构以外，电气部件接线和结构的螺栓连接在极端载荷中容易发生松动，应予以排查；另外，台风后的海上机组或升压站的气象站、单体、墙体等阻风结构部件也易发生破损，应在台风过后予以巡视。

可能导致结构退化的严重意外载荷（例如，船舶碰撞、坠物）发生后，或者超出平台原设计/设计准则的事件发生后，应尽快进行 II 检测。检测时需特别注意检测损坏和间接损坏迹象，例如海洋生物缺失的位置。

对平台结构整体性有关键影响的区域所做的结构性修理，应在修理完成后 1 年内进行 II 级检测。当过量的海生物妨碍在修理区域进行外观检测时，应进行 III 级检测。

监测可能会影响结构的适用性的已知缺陷、损坏、局部腐蚀、冲刷等其他条件。

应根据当地经验对易冲刷区域进行冲刷检测。周期性冲刷检测数据分析者应注意风暴后冲刷坑的回灌可能导致对风暴冲刷的范围的判断。

#### 4.1.3. 相关检测关系



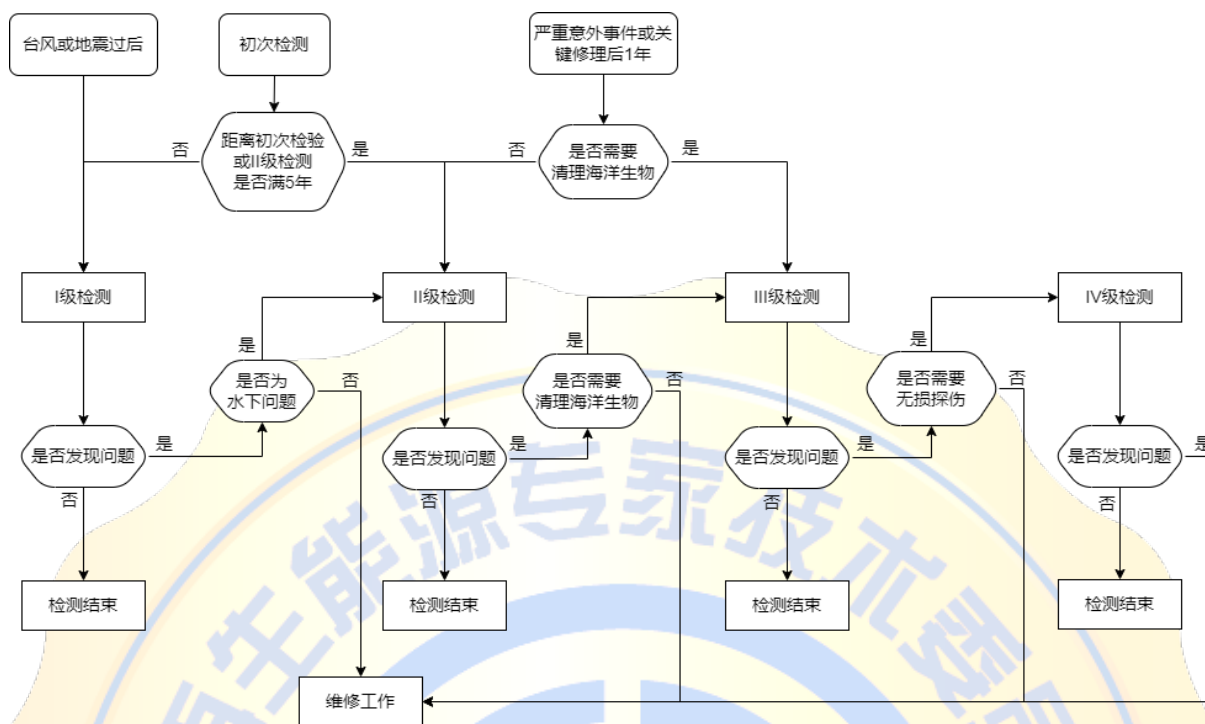


图 4.1.3-1 检测关系流程图

#### 4.1.4. 预选检验区域

在平台的初步设计及以后的重新分析中，应标明关键的构件和节点，以帮助确定将来进行平台检测的要求。关键区域的选定应根据平台设计和/或平台评估时确定的节点和构件载荷、应力、应力集中、结构的冗余量和疲劳寿命等因素。

#### 4.1.5. 档案和检验记录

海上结构防腐蚀维护管理档案应包括下列内容：

- (1) 钢结构的设计、施工资料和竣工资料；
- (2) 涂料、阴极保护的设计资料、施工资料和竣工资料；
- (3) 特殊检查、常规检查和详细检查的检查记录，检查记录包括工程名称、检查方式、日期、环境条件和发现异常的部位与程度；
- (4) 各项检查所提出的建议、结论和处理意见；
- (5) 涂装、阴极保护修复的设计和施工方案；
- (6) 涂装、阴极保护修复的施工记录、检测记录、调试记录和验收结论；
- (7) 所用钢材、防腐材料、检测设备设施等的相关合格证明文件；
- (8) 台风、冰冻、地震、海啸等异常海洋气象、水文记录。

其中检测记录应包括检测发现的详细叙述，包括录像、照片、测量数据和其他有关的检查

结果。记录也应识别所进行的检测级别，即 IV 级检测应指出哪里做了 III 级和/或 II 级检测。发现损坏的描述都应该全部形成文件，并纳入检测结果之中。任何修理或结构状态的工程评价都应该形成文件并妥善保存。

## 4.2. 初次检测

在海上风电场升压站或者海上风力发电机组安装完成后，均需进行验收检查工作，以确定安装后的结构状况。验收内容如果满足下列检查范围则可等同为初次检测工作，初次检测的最小检查范围应包括：

- (1) 全面覆盖的结构（构件和接头）、电缆、J 型管和各种附属物、桩腿处的海床状况，并检查碎屑和损坏；
- (2) 一组阴极电位读数，可全面覆盖水下结构（构件和接头），电缆和各种附属物；
- (3) 所有牺牲阳极、电极和任何其他防腐材料/设备的存在；
- (4) 测量相对于已安装结构的实际平均水面高程，并对潮汐和海况进行适当校正；
- (5) 倾斜度和结构方向；
- (6) J 型管与海床的接触；
- (7) 海床轮廓。

初次检验具体的检测内容和方法如下。

表 4.2-1 初次检测内容

初次检测	
位置	检测内容
水上结构与防腐涂层	<p>对于海上升压站和<b>全部</b>的海上风力发电机组平台</p> <p>全面覆盖结构、电缆、J 型管和各种附属物的目视检查。检测结构倾斜度和结构方向。</p> <p>近观检验要求包括：特殊构件和主要构件及其节点，如管节点、甲板构架与立柱及腿柱的连接、主梁、主要支撑、层间立柱等；重要设备与平台主要结构连接的部位，如吊机座与平台连接部位；飞溅区的构件（包括靠船构件）。</p> <p>重要节点焊缝的目视检查和无损检测，重点检查以下节点：</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>(1) 立柱与水平拉筋、斜拉筋的 T、K、Y 节点；</li> <li>(2) 直升机甲板斜撑与平台主体连接节点；</li> <li>(3) 甲板主梁与平台立柱的连接节点；</li> <li>(4) 甲板主桁与平台立柱的连接节点；</li> <li>(5) 甲板主梁与主桁的连接节点。</li> </ol> <p>如果目视检查发现疑似结构破损，可采用无损检测予以复检。</p> <p>无论目视检查是否发现问题，对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，5 年内也应进行 20% 比例上述位置的无损抽检*。</p> <p>结构测厚：对于油漆脱落且有明显腐蚀的结构，根据现场目测结果确定是否需要测厚。</p>
飞溅区	目视检查，并测量相对于已安装结构的实际平均水面高程，并对潮汐和海况进行适当校正。

	<p>如发现飞溅区油漆脱落，应进行结构测厚及附着力测试，以了解其腐蚀情况。</p> <p>对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，5 年内应对飞溅区进行一次全面测厚工作。由于飞溅区腐蚀一般较其他区域严重，测厚的测量点需比其他区域密集。如桩腿结构每米测量一个截面，每个截面根据桩腿直径测量均布 6 或 8 个点；其他支撑结构每 2 米测量一个截面，每个截面根据结构直径测量均布 4 或 6 个点；</p>
阴极保护	<p>对于海上升压站和<b>全部</b>的海上风力发电机组平台，检测可以全面覆盖水下结构和各种附属物的一组阴极电位，了解阴极保护是否足够，或是否出现过保护。</p> <p>对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，检查牺牲阳极（如锌块）外观状况，所有牺牲阳极均需检查，检查牺牲阳极是否丢失、与构件的连接是否牢固；并抽取 10% 数量的牺牲阳极块清除阳极上的海生物和白色斑点腐蚀，测量检查有没有失效的阳极以及过量耗蚀的阳极。对于带有外加电流系统的平台结构，应目视检查阳极和参比电极的状态。绝缘屏蔽层也应进行彻底检查，以确保它们完好无损、不间断地粘结到结构上。</p>
水下结构	<p>对于海上升压站和<b>全部</b>的海上风力发电机组平台</p> <p>不进行海洋生物清理，目视检查结构、各种附属物、附属物与结构的连接、J 型管与海床的接触情况以及各个构件的腐蚀情况。其中附属物连接可能包括相关的管夹和螺栓连接等状况。</p> <p>水下总体目测检查范围包括：导管架结构总体状况，检查是否存在弯曲、位移、凹陷及擦伤等缺陷；这些损坏的可能是外来物的碰撞或平台物体的坠落造成的；可能是平台监造安装时留下的；也可能是平台受到过大的应力造成的。如果发现上述缺陷，应对缺陷范围和程度进行查明，做好详细记录。</p> <p>近观检查导管架结构的腐蚀状况，如电位测量发现水下结构保护不足，需对该平台全部的牺牲阳极块进行状态检查和尺寸测量，检查有没有失效的阳极以及过量耗蚀的阳极，并对保护区域结构进行测厚，以了解结构是否已经有腐蚀情况发生。</p> <p>对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，5 年内应对水下结构的进行一次全面的腐蚀检查，要求清除海生物，可以结合构件的测厚及焊缝的无损检测，做扩大范围的清除达到局部检验的要求。</p> <p>主腿柱结构可按每段桩腿（二焊缝间）测量 3 个剖面（上、中、下）或者每 3 米测量一个剖面，每一剖面根据桩腿直径的大小测量 6 点或 8 点，其它支撑结构可按每段（二焊缝间）测量 2 个剖面，每一剖面根据直径的大小测量 4 点或 6 点。当外观检查较差时，则应适当增加测点，并且，测厚是应尽量选择腐蚀较为严重的区域来选取测点。</p> <p>有显著腐蚀的构件检测比例应扩大检测范围并在报告中单独列出，应尽量根据图纸准确绘制测厚图，详细标注测厚点及显著腐蚀区域的范围，导管架的管段可分为主腿柱管段、各水平层的水平支撑管段、各立面的斜支撑管段等几种类型，对于投产 5 年内的海上平台，这几种类型结构的各自的测厚抽查比例至少分别为 40%、30% 和 30%。</p> <p>5 年内应对管节点焊缝进行抽查比例为 10% 的无损检测，抽检节点应包含对疲劳敏感的管节点。</p> <p>对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，从海底到平均海平面一组代表高度的海洋生物测量。检测海生物厚度是否超过设计要求。海生物厚度超过平台设计硬质海生物的允许量，或平台经安全评估确定海生物厚度时，应进行清除。建议寻找代表性平台或者结构位置进行海生物测量，例如海上风电场角点机位和升压站，各构件每隔 3 米测量一剖面，每一剖面测量 4 点或 2 点海生物厚度。</p>
1 海床	<p>对于海上升压站和<b>全部</b>的海上风力发电机组平台以及海缆路由</p> <p>海底检查就是检查海底下沉、结构沉降、海管悬空情况。检查海底冲刷和堆积情况、结构沉降情况、海管悬空情况并对导管架的海床周围（如 10 米、50 米）进行调查，是否有残骸、杂物等。记录海床轮廓和检查情况。</p> <p>如果发现有海底冲刷，应测量冲刷的范围和深度（基盘、抗沉板底部到实际海底距离），并画好</p>

草图（测量点选择如：每个桩腿四周、每二个桩腿中间、每四个桩腿中间）。校对设计中对冲刷深度的限制，必要时校核桩侧抗力。对影响安全的应进行回填。  
如海缆敷设与设计要求不符，如埋深不足，路由变更等，应以实际情况绘制路由和埋深标识，后期检测或整改使用。

\*参考 CCS：对于前期未进行过在役无损检测的海上结构，对于投产达到 5 年及其以下平台，建议进行 20% 比例上述位置的无损抽检；对于 10 年及其以下的平台抽查比例 40%，对于 15 年及其以下平台抽查比例 60%，15 年以上平台抽查比例 100%。

根据平台的使用年限及总体状况，确定管节点焊缝无损检测抽查的百分比，对于 10 年及其以下的平台抽查比例 10%，对于 10 年以上平台 20%，抽检节点应包含对疲劳敏感的管节点。

初次检测如目视检查未发现疑似结构破损，可不进行无损检测，但建议应在海上结构服役满 5 年内进行，以明确海上结构的初始状态。

### 4.3. 定期检测

#### 4.3.1. 详细的工作范围和时间安排

定期检查的时间安排和详细工作范围应根据检查策略和检查计划确定。如果没有结构检查策略和程序，则应使用 4.1.1 中规定的默认定期检查程序。

#### 4.3.2. I 级定期检测

检测包括飞溅区和水面以上全部结构构件的一般性检查，要集中注意甲板腿柱、甲板梁和构架等比较关键部位的情况。如果发现水面以上有损坏，且目测检查不能确定其损坏程度时，应采用无损检测法。如果 I 级检查结果发现水下部分可能出现损坏，那么在条件允许的情况下应尽快进行 II 级检测。

表 4.3.2-1 I 级定期检测内容

I 级检测	
位置	检验内容
水上结构与防腐涂层	<p>对于海上升压站和<b>全部</b>的海上风力发电机组平台，水上所有结构的一般检查：防腐涂层的损耗破坏情况，防腐系统的有效性，构件或部件的腐蚀情况，构件的弯曲、丢失或者损坏情况，明显的过载或者设计缺陷以及与原设计用途的不一致情况。</p> <p>(1) 重点检查导管架以及平台组块的重要受力节点、应力集中部位检查结构主梁、立柱、斜撑及水平撑等主要结构及其节点焊缝，确认结构及焊缝的完整性，无裂纹、油漆脱落、变形等缺陷，必要时可进行测厚或 NDT 检查。</p> <p>(2) 逃生通道检查，逃生通道包括开敞甲板、通道、梯道、栏杆、靠船件、梯步和升降口等安全设施，应确认上述安全措施完整性及是否处于良好状态。</p> <p>(3) 电缆护管及 J 型管检查，观察结构是否完整、J 型管端部固定是否牢固、是否有裂纹、局部变形、腐蚀等现象。</p> <p>(4) 涂层状况，确认是否存在涂层脱落、磨损及涂层保护系统失效的情况，并对涂层进行系统的老化评级。</p> <p>(5) 对海上升压站和 <b>20%</b> 的海上风力发电机组密闭舱室内部的盐分沉积测试，</p>

	可采用电导率仪对塔筒内部、机舱、升压站各舱室内部的盐分沉积量进行检测，评估各舱室密闭性能是否良好。 (6) 平台水平度检测，如为单桩基础结构，增加垂直度检测。
飞溅区	对于海上升压站和 <b>全部</b> 的海上风力发电机组平台，不清理海洋生物情况下： (1) 飞溅区域结构的外观检查，确认无船舶以及漂浮物的碰撞及腐蚀引起的损坏。 (2) 涂层状况，确认是否存在涂层脱落、磨损及涂层保护系统失效的情况。
阴极保护	对于海上升压站和 <b>全部</b> 的海上风力发电机组平台，确认水下阴极保护系统的性能，要求测量至少一条结构支撑腿的阴极电位，可采用下放参比电极等测试方法。
水下结构	不包含。
海床	根据当地海流情况，制定额外增加的海床扫描工作。

根据我国海岸的海流情况，目前初步的建议为：

(1) 大江大河的入海口由于径流量作用，会有较大的冲击或者泥沙堆积，建议在有更详细的分析和实测数据下，每年进行一次扫海作业；

(2) 特定海峡，如台湾海峡、琼州海峡，由于陆地对海流的挤压作用，会有明显的狭管效应，海流较大，对海床冲刷作用明显，建议在有更详细的分析和实测数据下，至少每年进行一次扫海作业；

(3) 以上地区根据 3 年实测数据分析，获取海床变化和基础位置冲刷情况的年变化量，而后制定新的扫海计划或者防冲刷措施，但扫海间隔不应大于 5 年；

(4) 具体扫测海缆长度方面，由于海上升压站输出海缆重要度更高，建议全面扫测；针对风力发电机组至升压站的海缆，可根据当地海床和路由情况进行比例选取，并尽量代表最大风险。

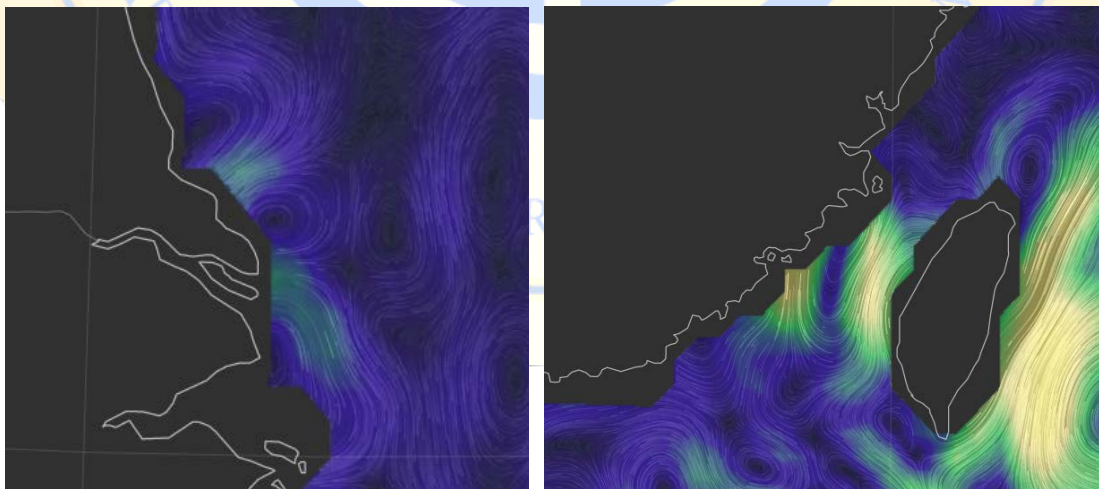


图 4.3.2-1 长三角海流与福建台湾海流大致情况

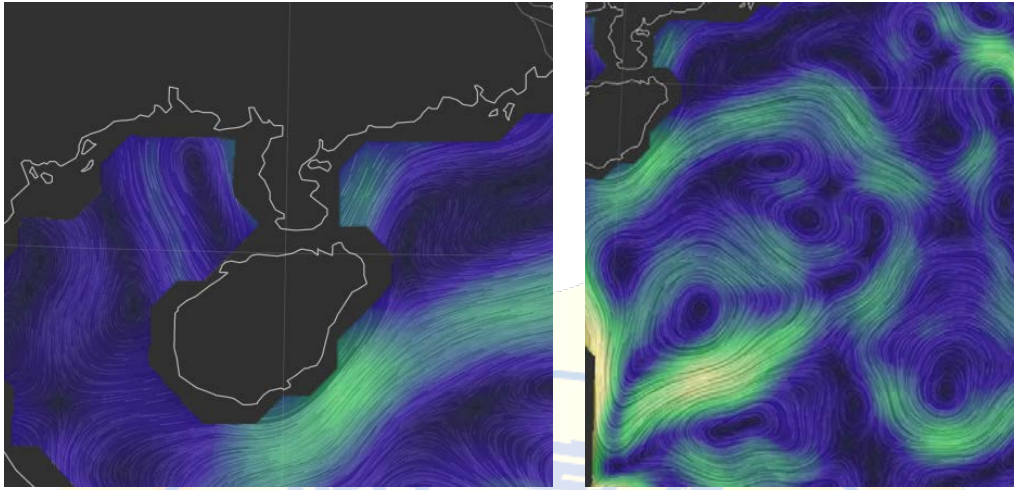


图 4.3.2-2 雷州半岛、海南海流与南海海流大致情况

### 4.3.3. II 级定期检测

检测包括水面上结构、飞溅区和潜水员或者无人潜水器的水下结构构件的外观检查和海床检查，要重点注意甲板腿柱、甲板梁和构架等比较关键部位的情况。在 II 级检测中发现重大结构损坏时，应启动 III 级检测，应在条件允许的情况下尽快进行全面或相关位置的 III 级检测。

表 4.3.3-1 II 级定期检测内容

II 级检测																					
位置	检验内容																				
水上结构与防腐涂层	同 I 级检测																				
飞溅区	同 I 级检测																				
阴极保护	同初次检测																				
水下结构	<p>目视检测同初次检测。 海洋生物测量同初次检测。 结构测厚同初次检测，增加：对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台（建议选取初次检测未检测机组，对初次检测发现腐蚀严重的机组可再次检测），测结构厚抽检比例建议根据平台投产年限进行修改：</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>构件名称</th> <th>投产年数 ≤ 10</th> <th>10 &lt; 投产年数 ≤ 15</th> <th>15 &lt; 投产年数 ≤ 20</th> <th>投产年数 &gt; 20</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>主腿柱管段</td> <td>40%~70%</td> <td>60%~90%</td> <td>80%~100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>各水平层的水平支撑管段</td> <td>30%~60%</td> <td>50%~80%</td> <td>70%~100%</td> <td>100%</td> </tr> <tr> <td>各立面的斜支撑管段</td> <td>30%~60%</td> <td>50%~80%</td> <td>70%~100%</td> <td>100%</td> </tr> </tbody> </table> <p>节点检测同初次检测，增加：抽检节点比例建议随平台使用年限进行修改：对于 10 年及其以下的平台抽查比例 10%，对于 10 年以上平台 20%，抽检节点应包含对疲劳敏感的管节点。</p>	构件名称	投产年数 ≤ 10	10 < 投产年数 ≤ 15	15 < 投产年数 ≤ 20	投产年数 > 20	主腿柱管段	40%~70%	60%~90%	80%~100%	100%	各水平层的水平支撑管段	30%~60%	50%~80%	70%~100%	100%	各立面的斜支撑管段	30%~60%	50%~80%	70%~100%	100%
构件名称	投产年数 ≤ 10	10 < 投产年数 ≤ 15	15 < 投产年数 ≤ 20	投产年数 > 20																	
主腿柱管段	40%~70%	60%~90%	80%~100%	100%																	
各水平层的水平支撑管段	30%~60%	50%~80%	70%~100%	100%																	
各立面的斜支撑管段	30%~60%	50%~80%	70%~100%	100%																	
海床	同初次检验。																				

#### 4.3.4. III 级定期检测

III 级检测包括对预选的区域和根据 II 级检测的结果，对已知或怀疑损坏的区域进行水下近距离目视检查（CVI）。应充分清除这些区域的海生物，以便彻底检查。需检测区域的预选应当依据特别容易发生结构损坏的区域，或者需要重复检测以便在整个事件内监测其完整性的区域的工作评估。III 级检测应包括预选区域的腐蚀情况的近距离目视检查。

如果在 III 级检查中发现重大结构损坏或仅凭外观检查无法确定损坏程度，则应启动 IV 级检查，在条件允许的情况下尽快进行全面或相关位置的 IV 级检查。

表 4.3.4-1 III 级定期检测内容

III 级检测	
位置	检验内容
水上结构与防腐涂层	同 I 级检测
飞溅区	对于海上升压站和 <b>全部</b> 的海上风力发电机组平台 (1) 飞溅区域结构的外观检查，确认无船舶以及漂浮物的碰撞及腐蚀引起的损坏。 (2) 涂层状况，确认是否存在涂层脱落、磨损及涂层保护系统失效的情况。 对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，对飞溅区进行一次全面测厚工作。由于飞溅区腐蚀一般较其他区域严重，测厚的测量点需比其他区域密集。如桩腿结构每米测量一个截面，每个截面根据桩腿直径测量均布 6 或 8 个点；其他支撑结构每 2 米测量一个截面，每个截面根据结构直径测量均布 4 或 6 个点；
阴极保护	同初次检测。
水下结构	目视检测同初次检测。 结构测厚同初次检测。 节点检测同初次检测。 海洋生物测量同初次检测。 此外增加： (1) 对 II 级检测过程中发现或怀疑损坏的区域，去除海洋生物，进行目视检查。 (2) 对于海上升压站和 <b>25%</b> 的海上风力发电机组平台，构件充水探测（FMD）应覆盖 50% 的主支撑结构，以代表整体结构并覆盖潜在损坏/易疲劳区域。如果结构配置不允许使用构件充水探测，近距离目视检查（CVI）也许可作为替代方法。进行海洋生物清洁后近观检查，至少应进行 20 个或 5%（以较小为准）的主要构件以及节点连接，其中应包括 5 个主支撑和腿的节点连接。IV 级检测结果也可以代替上述构件充水探测要求。
海床	同初次检验。

#### 4.3.5. IV 级定期检测

IV 级检查应包括初次检查的全部范围和 III 级检查结果或已知或可疑损坏中预先选择的区域的水下详细测量和无损检测（NDT）。

为确定结构是否发生损坏，在预选区以外的疲劳敏感点和/或易于发生裂纹区域进行 III 级

和/或 IV 级检查有可能是必要的。

表 4.3.5-1 IV级定期检测内容

IV 级检测	
位置	检验内容
水上结构与防腐涂层	同初次检测。
飞溅区	同初次检测。
阴极保护	同初次检测。
水下结构	目视检测同初次检测。 结构测厚同初次检测。 节点检测同初次检测。 海洋生物测量同初次检测。 此外增加： 对疲劳敏感节点和怀疑裂纹预选区域或根据 III 级检测结果已知或怀疑损坏的区域进行水下无损检测和测量，包含 100%焊缝长度的无损检测。
海床	同初次检验。

## 5. 海上结构的检测方法

### 5.1. 外观检查（VI）

外观检查是最直接有效的结构检测方式，分为水上外观检查和水下外观检查。结构可见的缺陷大部分均是通过外观检查发现的。

#### 5.1.1. 水上外观检查

水上外观检查分为总体外观检查（GVI）和近观检查（CVI）。总体外观检查是通过对平台结构大体外观检查，了解结构是否存在变形、损坏、腐蚀等。近观检查是指检查时人手可触摸到检查位置的检验方式，通常对可疑区域、高应力区域应实施近观检查，通过近观检查，可以详细了解到结构开裂、腐蚀、损坏变形程度。近观检查有时候需要利用脚手架、梯子、小艇和吊篮等才能实现。

上部结构的修理同样需要进行外观检查，包括装配、焊缝外观、油漆等。通过外观检查，了解装配精度、焊缝外观质量能否满足焊接工艺和施工标准，以及油漆喷涂外观质量能否满足工艺要求。

#### 5.1.2. 水下外观检查

水下外观检查是通过潜水员或无人遥控潜水器的外观检查、水下摄像和水下照相，以及通过双向通信设备及闭路电视对检测进行监控，对结构水下部分进行的外观检查。



水下外观检查的种类：

(1) 一般性外观检查：潜水员对构件的明显损伤进行检测；

(2) 详尽外观检查：先对平台待测部位进行预清理，然后由潜水员来检查构件隐藏的损伤。

## 5.2. 涂层检查

钢结构水下区以上部位涂层劣化评估分级标准和处理要求

表 5.2-1 钢结构水下区以上部位涂层劣化评估分级标准和处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	同时符合下列条件时： (1)无粉化变色或者轻微粉化变色，无裂纹、起泡和脱落生锈； (2)涂层干膜厚度 $\geq$ 原设计厚度的 90%； (3)涂层粘结力 $\geq$ 5.0MPa (GB/T 5210)	不必采取措施
B	符合下列任一条件时： (1)明显粉化变色、分散的裂纹、起泡和脱落生锈面积 $\leq$ 0.3%； (2)原设计厚度的 75% $\leq$ 涂层干膜厚度 $<$ 原设计厚度的 90% (3)4.0 MPa $\leq$ 涂层粘结力 $<$ 5.0MPa (GB/T 5210)	及时进行局部修补
C	符合下列任一条件时： (1)较严重粉化变色、裂纹、起泡和 0.3% $<$ 脱落生锈面积 $\leq$ 1.0%； (2)涂层干膜厚度 $<$ 原设计厚度的 75%； (3)涂层粘结力 $<$ 4.0MPa (GB/T 5210)	立即进行修补
D	符合下列任一条件时： (1)严重粉化变色、大范围的裂纹、起泡和脱落生锈面积 $>$ 1.0%； (2)涂层干膜厚度 $<$ 原设计厚度的 75%； (3)刀刮容易剥离	立即进行全面修补

依据 GB/T 1766: 色漆和清漆 涂层老化的评定，从起泡、脱落、粉化、生锈、开裂几个方面对涂层老化进行定性评定。当在检测值出现剥落程度达到 5 级、开裂程度 5 级、生锈程度达到 5 级任何一个值，即可以判定当前涂层已经失效。依据 ASTM D 4541-09: 便携式附着力测定仪测试涂层附着力，对涂层进行附着力测试定量评定，当测试结果 $<$ 5MPa 时，即可判定该部位涂层失效，需进行及时维护。当检测结果出现小于判定值时，根据表观检测结果，以及涂层减薄速率、力学性能测量值等结果，进行对涂层的老化程度进行一个综合评判。

检测区域和检测项目和重要性见下表。

表 5.2-2 涂层检测区域和检测项目和重要性

项目	平台各区域						
	大气工作区,工作温度低于 120℃	大气工作区,工作温度高于 120℃	大气工作区,储罐内表面	大气工作区,通道、置物区、直升机平台	大气工作区,防火涂层	飞溅区	修补涂层

外观	●	●	●	●	●	●	●
厚度	●	●	●	●	▲	▲	●
漏点	●	●	▲	●	●	▲	▲
附着力	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
老化	●	●	●	●	●	▲	●
表面电阻率		▲需导静电涂层					▲需导静电涂层
备注					耐火极限		

\*●：一般；▲：重要

根据美国腐蚀工程师协会（NACE）海洋平台腐蚀勘验指南（OCAT）将平台各部位按照其实际功能划分为：生产区（下甲板、生产甲板、生产甲板夹层、主甲板、吊机）、钻井区（泥浆泵区、管甲板、钻台）、生活区（生活模块、飞机甲板）等。

每个区域再细分为（并非所有区域均包含以下所有结构）：

主体钢结构：区域内所有斜撑、立柱、水平支撑；

甲板面：区域内所有地板面（不含格栅板）；

顶部天花：区域内所有头顶反底；

管线、法兰、设备：区域内所有管线、法兰及布置的相关设备；

支架：区域内所有管线及设备的支撑结构件；

安全部件：区域内所有安全防护用的护栏、扶手、楼梯、格栅等；

区域内检测项目包括：外观、涂层厚度、漏点、附着力、表面电阻率、老化评级等。

根据美国腐蚀工程师协会（NACE）海洋平台腐蚀勘验指南（OCAT）对平台结构腐蚀状态等级的定义，划分为 A~E 共 5 个等级

等级 A：3 年内无需进行任何维护工作

等级 B：3 年内需要进行维护工作

等级 C：1 年内需要进行维护工作

等级 D：需重要重点关注的位置（如：钢结构边缘棱角消失等）

等级 E：不符合项（如：结构锈穿等）

表 5.2-3 涂层检测区域和检测项目和重要性

项目	综合等级				
	A	B	C	D	E
变色/变泽	明显	严重	严重	-	-
开裂/剥落	3 (S2)	4 (S4)	5 (S5)	-	-
粉化	轻微	明显	严重	-	-
起泡	3 (S3)	4 (S5)	5 (S5)	-	-
生锈	3 (S3)	4 (S5)	5 (S5)	底材出现损耗	底材大量损耗

等级说明	评估结构处于“3年内无需任何维护工作”的状态	评估结构处于“3年内需进行维护工作”的状态	评估结构处于“1年内需进行维护工作”的状态	评估结构属于“需重点关注的位置（如：钢结构边缘棱角消失等）”	评估结构属于“不符合项（如：结构锈穿等）”
------	------------------------	-----------------------	-----------------------	--------------------------------	-----------------------

\*：变色/变泽为参考项，主要依据业主的需求而定；开裂/剥落、粉化、起泡应结合其造成的涂层或底材锈蚀情况进行判断；生锈为该评价体系的关键内容，尤其应关注生锈引起的结构缺陷

涂层的检测周期应遵循适度、必要的原则，NACE 一般建议涂层外观及老化评级每半年进行一次；涂层厚度、漏点检测、附着力等项目每年进行一次。如进行附着力检测，应在检测完成后做好防护补漆工作。

### 5.3. 磁粉探伤（MT）

磁粉探伤适用于检验构件或焊缝的表面和近表面缺陷（对非磁性材料不适用）。通常在在水上或水下外观检查时，如发现有可疑之处，可考虑采用磁粉探伤，以检测肉眼检查不到的缺陷（特别是裂纹）。

#### 5.3.1. 磁粉探伤（MT）

磁粉探伤经常使用于高应力区、长期处于交变载荷区域、过量腐蚀等可疑区域。从事磁粉探伤人员应至少持有 II 级磁粉探伤资格证书。

#### 5.3.2. 水下磁粉探伤（UWMT）

水下磁粉探伤主要采用荧光磁粉探伤，应注意以下事项：

- （1）检测区域须按检测作业计划进行划定和标记；
- （2）检测区域内影响磁痕显示的海生物、油漆涂层及其它表面沉积物须进行清理。最好用高压水枪或钢丝刷清理至裸金属，一般打磨仅用于有极坚硬沉积物或海生物的情况；
- （3）荧光磁粉施加到检查区域，需用紫外光源（黑光）来判读；
- （4）现场用已知的裂纹试件或灵敏度试块对系统的灵敏度进行校验。磁化电流和探测触头的间距也应校验；
- （5）当手提式触头磁化法对导管架的 K 形或 X 形管节点焊缝检测效果不佳时，可采用电缆缠绕法进行磁化检测；
- （6）对水下局部小范围的检测，也可使用永久磁铁法；
- （7）磁悬液如是水溶性荧光磁悬液，使用前须在经滤波的紫外光下校验。悬浮磁粉的浓度要适当，一般约为 0.5%。

### 5.4. 超声波测厚

超声波测厚主要是用于检查构件的厚度。通常在检验中如发现平台油漆普遍脱落或有明显

腐蚀情况，应要求进行测厚检查，以确认构件的腐蚀情况。平台在进行结构评估时，如需要获得构件厚度，也应进行测厚检查。

测厚人员或潜水员必须取得测厚资格证书，如超声波探伤资质等，并且测厚公司也应取得相应的认可证书。测厚仪应按照认可的国家/国际标准校验，并有适当的标贴；仪器精度要求应符合如下标准且满足仪器说明书的规定：

(1) 板材厚度 $<10\text{ mm}$  精度  $\pm 0.1\text{ mm}$ ；

(2) 板材厚度 $\geq 10\text{ mm}$  精度  $\pm 0.2\text{ mm}$ 。

对于点腐蚀的测厚检验，点腐蚀可以在涂层气泡下发现，故鼓泡的涂层应在检查之前铲除。测量点腐蚀或缝凹槽腐蚀的剩余厚度，用一般超声波传感器（一般 $10\text{mm}$ 直径）是不够的，应用一种袖珍传感器（ $3\sim 5\text{mm}$ 直径）。或者测厚公司应使用点腐蚀量规作为等效测量工具测量点腐蚀或凹槽腐蚀的深度，并计算剩余厚度。

测厚前应先查明结构设计的腐蚀余量、设计厚度和建造厚度。如果腐蚀量没有超过设计腐蚀厚度，则只需采取有效防腐措施即可。

测厚完成之后，测厚公司应提交测厚报告。测厚报告中的图示应与平台图纸相一致，对于开裂、锈穿等位置要加以标注。对于所测量的点要编制代码，使图示与测厚报告中的代码相对应，便于识别。

## 5.5. 海生物厚度测量

海生物厚度测量通常在平台定期检验时进行。海生物厚度超过平台设计硬质海生物的允许量或平台经安全评估需清除海生物时应进行清除。海生物增加导管架受流面积、增加导管架的惯性力，对平台的安全起负面作用。

海生物测量前，应提交测量方案供业主审核。方案中应明确测量方法（如各构件每隔 $3\text{米}$ 测量一个剖面，每一剖面测量 $4$ 点或 $2$ 点海生物厚度）及测量时画好草图，对各个部位的海生物厚度进行详细记录。

潜水员应采用直尺和卷尺，对平台水下杆件海生物附着厚度进行测量，辅助以图表对各个部位的海生物厚度进行详细记录，并提交报告。

测量一般通过两种方式进行：一是通过测量杆件和污损生物附着在一起时杆件的周长，再通过换算来求出，这就要求测量绳保证是在与构件轴线相垂直的一个平面上，这与海况关系很大，当海况较好时就较准确，也具有较好的代表性，反之则不然，当海况较差时，测量结果误差较大，进而产生错误的判断；另外一种方法是通过清理某一点的海生物，然后测量该点边缘

处（可测量 4 点进行平均）海生物的厚度，这种方法受海况影响较小，测量值也较准确，但缺点是该点的代表性受到一定程度的限制，例如当污损生物的生长速度受海流的方向影响而在不同的方向有较大的不同时，就不能较准确地表达海生物厚度状况。

## 5.6. 牺牲阳极检测





牺牲阳极检测通常在平台定期检验时进行，用于确认平台阳极的损耗情况。

清除掉阳极上面覆盖的海生物，测量阳极剩余周长和长度以确定阳极消耗情况。对所有抽检阳极进行电位测量，每块阳极测量 3 个数值。如果耗蚀超过 2/3（与原先尺寸比较），应进行更换。

除了对耗损阳极进行测量外，还必须注意不起作用的牺牲阳极，如果发现不起作用的阳极，应及时进行更换。

对阳极进行目视检查，并进行等级划分，等级划分标准为：

表 5.6-1 牺牲阳极等级划分

等级	阳极状态	剩余阳极	阳极形貌图示
1	状态如新，棱角分明，无麻点。	95%~100%	
2	状态良好，棱角变圆，轻微麻点。	80%~94%	
3	状态开始恶化，已难辨原始形状，麻点广泛分布。	50%~79%	
4	状态很差，阳极骨架露出，麻点密布。	50%以下	

等级 3 和 4 应该被视为异常，并需报告业主，根据耗蚀情况应进行更换。阳极如果出现松动、损坏、丢失也应该被视为异常，并进行维修。

## 5.7. 结构电位测量和阳极电位测量

在海水中，经保护的钢结构电位必须低于-0.8V，理想的钢结构电位处于-0.9V 和-1.0V 之间（相对 Ag/AgCl）。如果电位到-1.1V 或更低，检测时应确认是否形成释氢裂纹。

对平台水下结构进行随机抽查，对外观检查到阳极耗蚀严重位置、或阳极不起作用位置应重点检查。通常电位测量选取 10% 的阳极和每一水平层的钢结构。被选择的阳极平均分布在导管架的不同侧面和不同水平层上。

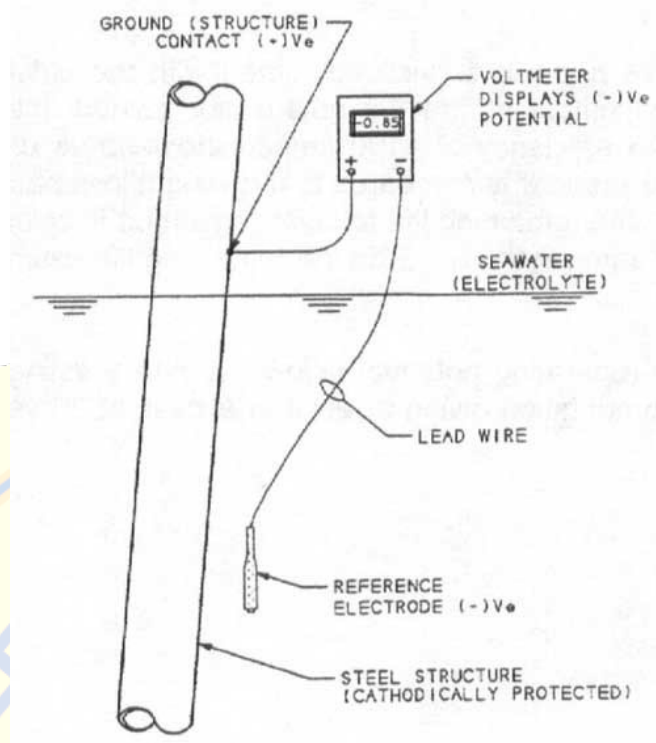


图 5.7-1 电位测量示意图

电位测量时应注意以下事项：

- (1) 测量仪器常用 BCM 型电位仪。每次电位测量前后，都应使用饱和的甘汞电极对测量电极进行校验。测量前用要检测平台附近海域的海水将仪器及试块浸泡 2-3 小时，对仪器校正，确保数值准确。使用前应校正。每个班（8 小时）校正一次；
- (2) 对钢结构进行测量时，测量位置应尽量远离牺牲阳极；
- (3) 金属触点与被检测结构表面的电接触：对于 Ag/AgCl 电极来说，不良的电接触会导致电位读数误差在 -0.9~-0.6mV 之间。因此在测量前，须将待测点处钢材表面和阳极块上的腐蚀物清理干净，使测量电极的金属探头与被测结构表面（钢表面或阳极材料）保持良好的接触；
- (4) 明确电位测量的位置及测量方法，根据牺牲阳极的布置图，分析保护最弱的地方进行电位测量，如：在每两块阳极之间、或构件尺寸变化的地方、节点处；
- (5) 如果被保护结构电位太高，则表明保护不够，应考虑更换/增加阳极。如果发现被保护结构电位过低，则可在后期优化设计中考虑减少阳极数量；
- (6) 执行水下电位检测的潜水员应有相应的资格证书，经过合适的培训。检测仪器也应检定合格。

表 5.7-1 钢结构牺牲阳极和外加电流阴极保护效果评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	保护电位在 -1.0V~-0.9V 之间，阳极的剩余保护年	不必采取措施

	限可满足设计使用年限	
B	保护电位在-1.0V~-0.9V 之间, 阳极的剩余保护年限不满足设计使用年限	查明原因并及时采取措施
	保护电位在-0.8V~自然腐蚀电位之间	
C	保护电位低于-1.1V 或为自然腐蚀电位	查明原因并立即采取措施

表 5.7-2 混凝土外加电流阴极保护效果评估分级标准及处理要求

等级	分级标准	处理要求
A	断开电源后 0.1s~1s 测得的瞬时断电电位负于 -720mV 或者瞬时断电电位在断电后 24h 内电位衰减不小于 100mV	不必采取措施
B	瞬时断电电位在断电后 24h 内电位衰减小于 100mV	查明原因并及时采取措施
C	普通混凝土中钢筋瞬时断电电位负于-1100mV, 预应力混凝土中钢筋瞬时断电电位负于-900mV	查明原因并及时采取措施

\*混凝土外加电流阴极保护电位为相对于 Ag/AgCl/0.5mol/L KCl 参比电极测得的电位

如检测环境不同或采用其他材质参比电极, 被保护结构的电位具体范围见下表。

表 5.7-3 电位范围表

参比电极	经保护结构电位范围/V		
	Cu/CuSO <sub>4</sub>	Ag/AgCl	Zn 合金
含氧环境	-1.10~-0.85	-1.00~-0.80	+0.00~+0.25
缺氧环境	-1.10~-0.95	-1.00~-0.90	+0.00~+0.15
高强度钢 ( $\sigma_s \geq 700\text{MPa}$ )	-1.00~-0.85	-0.95~-0.80	+0.10~+0.25

## 5.8. 直线度检查

当发现承载构件的破损后, 如其成因为船舶碰撞引起, 应补充变形量的测量和检查, 最为常见的检查为构件的直线度检查, 其常用方式为拉线法测量。采用拉线法测量时由于海况影响, 可能会造成测量误差较大, 可另行采用米尺或其他测量工具。

## 5.9. 交流场检测 (ACFM)

交流场检测技术的理论基础是电磁感应原理, 一个通交变电流的特殊线圈 (激励线圈) 靠近导体时, 交变电流在周围的空间中产生交变磁场, 被测工件 (导体) 表面的感应电流由于集肤效应聚集于工件的表面。当工件中无缺陷时, 感应电流线彼此平行, 工件表面由于匀强磁场存在; 若工件中油缺陷存在, 由于电阻率的变化, 势必对电流分布产生影响, 电流线在缺陷附近就会产生偏转, 工件表面的磁场就会发生畸变。这个磁场的变化强弱, 就能反映出裂纹的尺寸。

缺陷对电流及磁场的影响如下图所示。在工件表面产生的电磁场中，ACFM 技术是检测感应磁场来检测裂纹，因为磁场渗透率强于电场，衰减慢于电场；其原理法拉第电动势原理：通电线圈（检测线圈）切割磁场产生电动势，检测此电动势即可检测感应磁场。

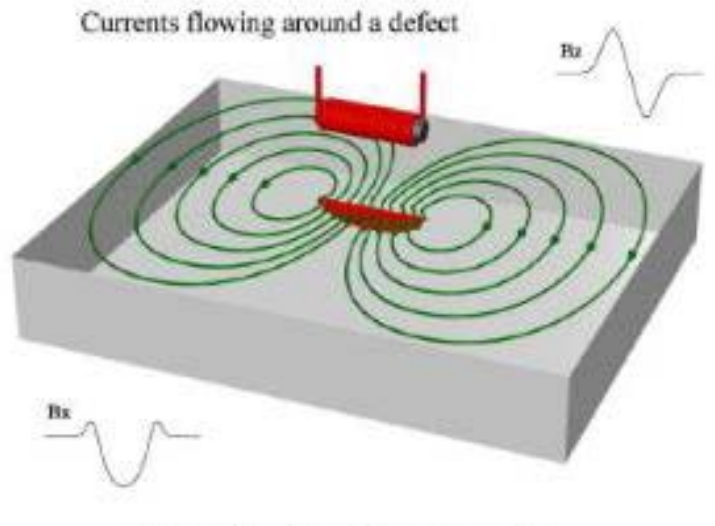


图 5.9-1 裂纹周围感应电流示意图

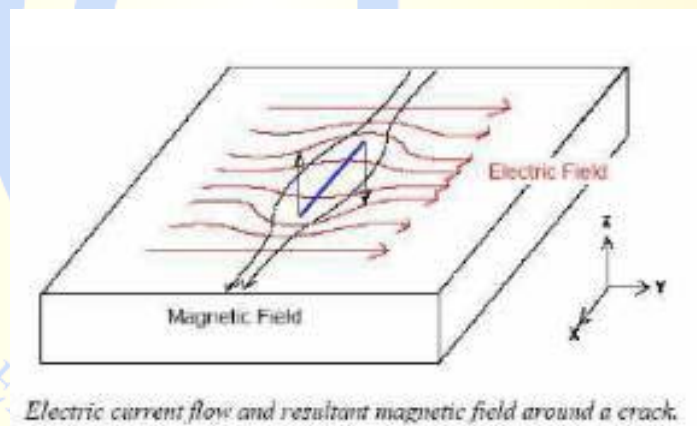


图 5.9-2 环绕裂纹的感应电场示意图

交流场检测用于水上结构或水下结构裂纹检测，具有对工件表面的处理要求低、对水下探头的操作人员的专业技能要求少等优点。

交流场检测应注意以下事项：

(1) 从事交流场检测操作的人员必须持有 II 级及以上证书，I 级人员应能够根据书面说明和在 II 级人员监督下进行检测操作。报告应有 II 级证书人员编写；

(2) 进行交流场检测检测所需要的附件设备：电磁标记箭头、画棒、卷尺或标尺、用于备份和记录的光盘，水下检测发现的缺陷如不立即处理，应做好标记；



(3) 检测区域需要清除海生物，一般用高压水枪清理，同时清理疏松的杂物，以保证探头能平稳移动。清理工作完成后，需要用涂料棒标记定位信息，沿焊道长度方向，确定初始点，以适当的间隔（如 20mm）作出标记。当检测焊缝为环形焊缝时，可以做好重点位标记以作为定位标记；

(4) 检测前，先进行外观检查，确保检测位置适宜检测。潜水员水下操作探头前，告知水面检测员探头方向（A 方向或 C 方向），在水面检测员的指令下开始检测，同步移动探头（最大速度 50mm/s），当探头跨越钟点位（间隔标志）时应告知水面的检测员；

(5) 带输入电流和输出电压的多条线缆在单个探头脐索里同时运行，需要注意防止脐索尾随至靠近探头头部的结构物，因为这样可能会改变磁场感应强度；

(6) 探头应沿与焊缝平行的方向移动以探测平行焊缝方向的疲劳裂纹。标准探头（包括紧凑型探头但不包括铅笔式探头）扫描的宽度是 20mm 宽，标准的扫描方法是探头顶端在焊趾上，热影响区和焊缝各 10mm 的扫描范围，扫描应总是沿着两侧焊脚进行。如果焊缝的宽度超过 20mm，应进行多次在焊道上扫描以覆盖整个焊缝宽度；

(7) 当发现裂纹时，应以较慢的速度进行更仔细的扫描，在焊缝的两侧指示长度的两头各多扫描 30mm，确定裂纹梢并标明。表面裂纹的长度应报给水面的检测员。

检测完成后，应提交检测报告。检测报告中应至少说明以下内容：

(1) 检测员姓名，探头操作员姓名，构件号码/名称；

(2) 在焊缝上的位置（如主弦杆，支撑杆，焊缝），探头型号和系列号，探头方向，时钟位置或标尺指示的位置；

(3) 缺陷显示的详细记录/异常情况，在焊缝的位置，缺陷开始位置，缺陷结束位置，缺陷长度（mm），缺陷深度（mm），示意图/被检部件的图纸。

## 5.10. 构件充水探测（FMD）

构件充水探测（FMD）探头可由潜水员或无人遥控潜水器操作。

构件充水探测应注意以下事项：

(1) 构件充水探测主要的检测对象为已封口内空构件。被检测体必须是圆形的管道，内外壁光滑规则；

(2) 检测前须确保探头内部完全浸水，没有任何空气在探头内部；

(3) 待测管件直径须大于 200mm，厚度范围为 10mm 到 50mm；

(4) 检测前应确认设备运行良好。

## 5.11. 冲刷检测

冲刷有两种：普遍冲刷、局部冲刷。

钢结构投入使用后，由于海底海流绕导管架下面撑杆流动，使本来稳定的海底受到扰动，在钢结构靠近海底的构件附近形成局部冲刷。基础被局部冲刷后，主要影响导管架侧向土压力，改变桩的受力及支承件，因此需要对每台风机基础进行局部冲刷检测。基本要求是要以适宜方式布设测线，对风机基础周边  $100\text{m} \times 100\text{m}$  范围实现全覆盖海底地形扫测。局部冲刷检测应在基础施工基本完成后，第一年内至少每半年观测一次，至并网后两年，共计检测四次。每次检测时间可考虑选在台风、风暴潮等恶劣季节之后。后续观测频次可根据现场冲刷情况作相应调整。

冲刷检测应查明钢结构周围的冲刷情况，测量海床冲刷、桩腿倾斜和沉降等情况，包括因冲刷或淤积造成平台位置水深的变化等，从而对平台的安全稳定性受冲刷程度的影响做出定量的评价。

冲刷检测应对平台各桩腿冲刷/堆积情况进行检查，并记录冲刷的范围、深度和堆积高度。

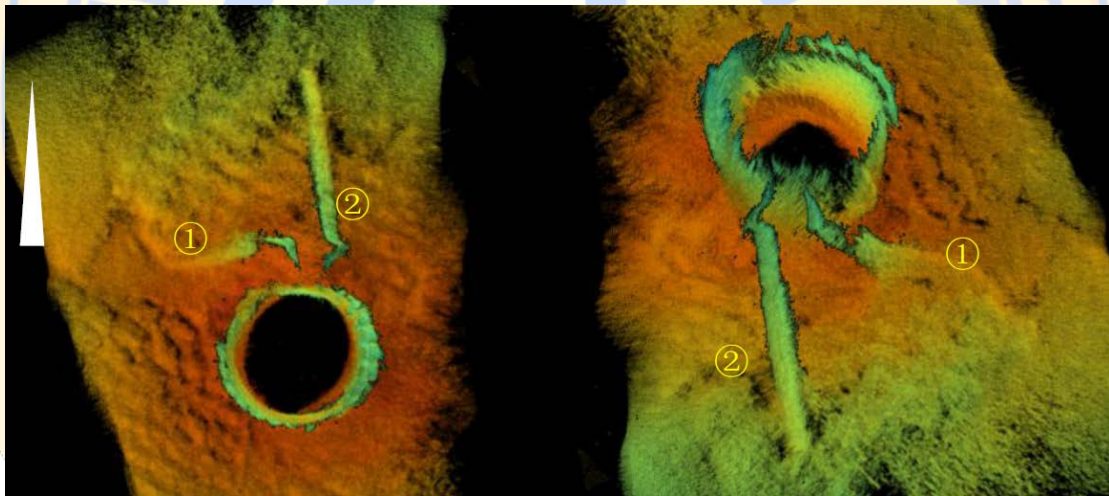


图 5.11-1 桩基三维扫测图

海缆在施工后，由于波浪和潮流对海底地形的扰动，主要受到普通冲刷。新投运海缆在投运一年后，应对整个回路进行一次路由探测，以后每五年进行一次路由探测，并记录结果，如路由埋深及位置与设计比有变化明显，应认真分析原因并采取相应措施。

海缆扫测的基本技术要求为对指定海缆的实际路由、实际敷设深度进行浅地层剖面探测，探测线间距为  $100\text{m}$ ，对指定海缆路由沿线(两边各  $50\text{m}$  范围)海床面上的障碍物进行扫测调查，对指定海缆路由沿线(两边各  $50\text{m}$  范围)进行水下地形测量。

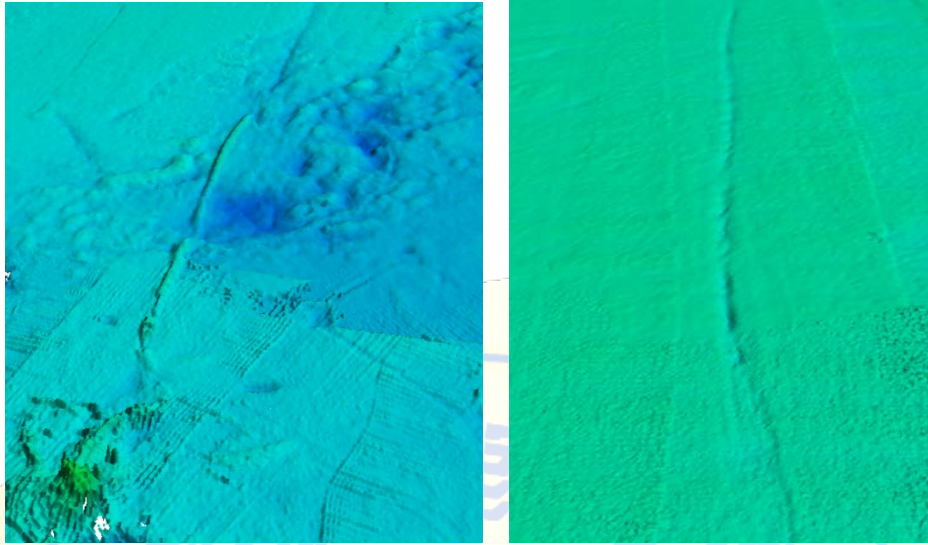


图 5.11-2 海缆路由三维扫测图

冲刷检测主要采用的设备及软件如下：

表 5.11-1 冲刷检测主要仪器软件表

序号	仪器设备及软件	图示
1	GNSS 接收机	
2	多波束测深系统	 
3	光纤罗经	
4	自容式声速剖面仪	

序号	仪器设备及软件	图示
5	侧扫声呐	
6	浅地层剖面仪	
7	便携式计算机	/
8	测量系统导航定位	/
9	多波束数据采集、数据后处理软件	/
10	浅地层剖面数据后处理软件	/
11	水深图制作软件	/

## 6. 海上结构的检验记录与报告

施工现场检测数据记录，项目组技术员负责对检测数据的记录工作，现场记录的数据要求和潜水检测员报告的数据吻合确保数据的真实性有效性，检测数据按照不同的检测手段记录到相应部位的记录表格中，记录的数据要求不能涂改且字迹要清晰，最终汇总到“一机一档”的台账中；

检验报告的编制，检验报告编制由潜水监督和技术员联合完成，检测定位图采用专用绘图软件进行绘制，要求每张图应清晰明了。标注的图纸号、测点号、节点号、杆件号以及有关尺寸数据明白无误，准确反映图上所有检测点所在位置，如结构复杂采用整体布置图和局部细节图相结合的方式绘制，报告上的每一个测点数据均可准确对应定位图上的对应编号测点，焊缝节点号、杆件号尽量和平台的设计图纸编号一致，如没有找到原始的图纸，则应合理编排节点号和杆件号。对原始录像要完整保存备份后对作业过程中录像按照要求分层次作业手段进行编辑完善，检验文字报告要按照不同作业手段分层次图文并茂进行编辑完善，文字报告检测数据要与原始记录资料检测数据要吻合，文字描述要精准到位与潜水检测员第一手报告内容意思一样，关于业主方包括如下内容（批准的技术方案；作业对象及检测的结果；检测位置改变后备注描述；检测数据收集及数据变化情况；临时增加的作业内容）检验报告编辑完善后提交业主审核，最后由评估方向业主提交平台导管架的综合评估报告。

## 7. 海上结构破损的分析方法

检验中如发现的缺陷，了解结构受损原因、性质、范围是十分必要的。结构损伤识别原因包括：

(1) 设计缺陷：设计缺陷可能引起结构屈曲、节点失效、变型、撕裂及疲劳裂纹。这些损坏严重影响平台结构完整性；

(2) 建造缺陷：包括因工作差错使用低强度材料，不合适尺寸材料。但最常见的缺陷基本为焊接缺陷，诸如未焊透、咬边等，或对需要灌水结构忘记开排气孔。后者可能导致结构内破裂，前者可能导致疲劳裂纹；

(3) 海上安装损坏：多数海上安装损坏在打桩时发生。桩管跌落损坏裙桩结构被视为跌落物损坏，然而，也有报告显示打桩过程过度震荡导致结构产生裂纹；另外，螺栓紧固不牢也会造成塔筒振动过大等问题。

(4) 疲劳损伤：疲劳载荷是引起疲劳裂纹的原因，疲劳裂纹起因通常为环境载荷和构件自身，通常出现在交变应力区或高应力区，或者先天不足的焊缝。疲劳裂纹的扩展会引起结构断裂，也会从一个构件扩张到另外一个构件，比如次要构件的裂纹会扩张到主要构件；

(5) 跌落物损伤：跌落物通常为外物，包括钻杆、桩管、吊车货物等，跌落物通常引起结构凹陷、弯曲、破洞，甚至结构断裂或撕裂。如果跌落物是钢绳，那么钢绳在波浪作用下反复摩擦构件，严重情况下会锯断构件；

(6) 碰撞：碰撞也会引起结构的刮伤。运维船碰撞通常造成水下结构凹陷和弯曲，由于锚链缠绕造成结构损坏也有发生过；

(7) 腐蚀：引起腐蚀原因通常是设计缺陷、阴极保护不够而造成结构减薄；

(8) 海冰：寒冷海洋环境，飘浮海冰冲击结构造成构件断裂；

(9) 爆炸：平台附近存在非法炸鱼作业，冲击炸伤平台结构。

海上结构如发生破损，应对破损构件和节点进行承载力分析。

表 7-1 水运工程水工建筑物安全性评估分级标准及要求

等级	分级标准	处理要求
A	安全性符合国家有关标准要求，具有足够的承载能力	不必采取措施
B	安全性略低于国家有关标准要求，尚不显著影响承载能力	宜加强检测，视情况采取维护措施
C	安全性不符合国家有关标准要求，显著影响承载能力	及时进行修复、补强，视条件和要求恢复到 A 级或 B 级标准
D	安全性严重不符合国家有关标准要求，已严	立即进行修复、补强，视条件和要求恢复到 B 级

	重影响承载能力	标准或报废
--	---------	-------

耐久性评估为 BCD 级的结构构件应根据结构型式和腐蚀、受损程度进行减少载荷、构件加固或结构整体加强等缓解措施。

如采用降低载荷措施，应对其降载情况和结构承载力进行验算，确保措施得当并且结构安全。构件加固后如改变传力路线或使结构自重明显增大，应对相关结构构件和地基基础进行验算。结构整体加强后，应对新结构完全进行重新验算，确保承载力和疲劳耐久性达到相关标准要求。

轴心受力构件应考虑加固后可能出现的构件截面形心偏移的影响。

负荷状态下当采用焊接加固时，原有构件或连接的实际名义应力值应小于 0.55 倍钢材屈服强度标准值，且不得考虑加固构件的塑性变形发展；当采用加大截面法加固时，最大名义应力值可按 JTS311-2011 附录 J 计算，其绝对值不应大于 0.4 倍钢材屈服强度标准值；非焊接结构实际名义应力值应小于 0.7 倍钢材屈服强度标准值。

## 8. 海上结构破损的处理要求

### 8.1. 一般要求

耐久性评估为 BCD 级的结构构件应根据结构型式和腐蚀、受损程度进行构件加固或结构耐久性修补。

加固方案应根据结构受力状况构件型式和施工条件综合研究确定可采用负荷加固、卸荷加固、从原结构上拆下加固或更新部件等。一般结构的缓解措施见下图。

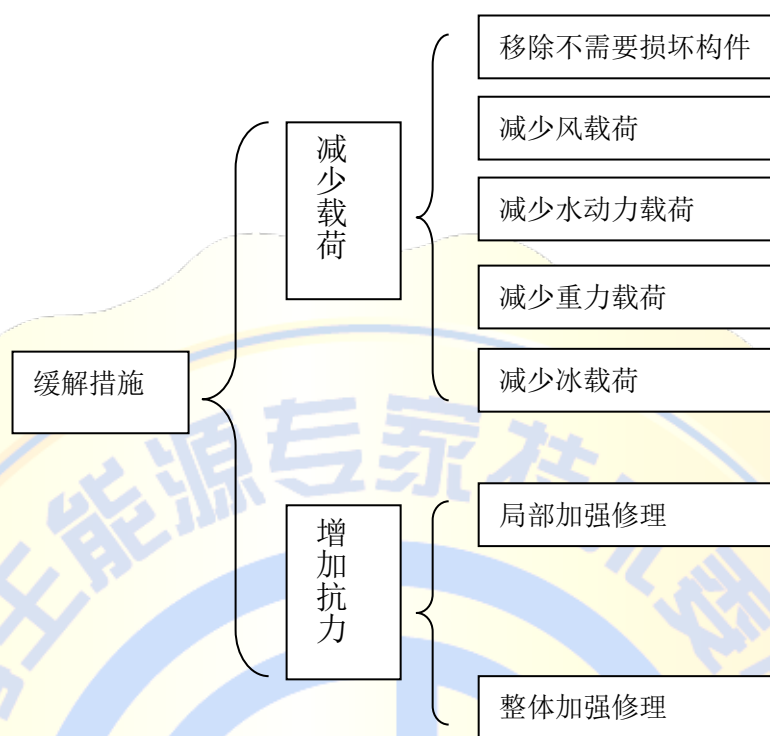


图 8.1-1 一般结构缓解措施

减少载荷方面，海上风力发电机组支撑结构可主要考虑降低额定功率以降载、对特定风速风向进行扇区管理、对风-浪耦合进行扇区管理、海生物清理、临时生活舱减重以及增加抗冰锥等措施；而海上升压站平台由于其主载荷为波浪和海流，且不具备控制环境载荷能力，其降载方面可主要考虑上部组块降低风阻外形、海生物清理、零部件精简或者集成优化、临时生活舱减重、水箱减重和抗冰锥等措施。

增加抗力方面，构件和节点局部加固可采用加大截面、裂纹修复（打磨和补焊等）、灌浆、卡箍、螺栓连接和其他有效方法。结构整体加固则可以从整体设计上增加构件，例如增加导管架斜撑等方式，进行结构的整体加固。加固设计考虑现场施工条件、待加固件劣化程度和可能出现的加固件应力滞后等因素宜适当降低加固结构抗力强度设计值。

无论采用上述何种措施（减少载荷或者增加抗力），均应进行对缓解措施下的结构进行承载能力极限状态和正常使用极限状态验算，必要时应对其剩余疲劳强度进行专题论证。

## 8.2. 上部组块检验结果分析与处理

如发现上部组块非承载结构破坏，可根据情况予以拆除或者修补更换。对于非承载构件的破损，需要考虑其破损是否涉及人员安全，其破坏是否会发展到承载结构，其破坏是否会破坏海上平台的正常工作（例如海上升压站舱壁的破损将导致电气部件暴露在海洋环境下引发事故风险）。如果涉及上述问题，应尽早予以处理，处理方式参见承载结构的修补工作；如不涉及上述问题，可在破损位置予以明显标识，一年内进行修复或者更换工作。

如果发现上部组块承载结构破损，根据破损情况可以进行不同的补救工作。由于上部组块位于海平面以上，相关的防腐修补、打磨以及结构加强施工均方便进行，仅需要额外考虑海洋环境对一些特种作业的限制，如潮湿环境下的焊接保护等。

一般来说如发现防腐层的破损，应进行打磨修补防腐涂层的工作；如在防腐层破损处发现其存在严重的腐蚀，应在打磨光滑后补充测厚工作，如其损失厚度在腐蚀裕度之内，则仅可进行防腐涂层修补，如壁厚损失超过了设计腐蚀裕度，则需要进行设计文件的核查或者复算，确认该构件或者节点的设计在新壁厚下裕度是否满足安全要求。如无法满足安全要求，应进行结构加强措施的设计工作并予以实施。

结构的加强措施可以采用常用的钢结构加强方式，如增加立柱或者支撑以降低该缺陷位置的承载、钢板焊接以增加局部强度等。

### 8.3. 飞溅区检验结果分析与处理

由于飞溅区的腐蚀速度较快，该区域一旦发现防腐系统破损，应立即进行结构厚度测量工作（包括前期清理、打磨等工作）。飞溅区施工受潮汐和海浪影响，可在退潮和小风浪情况下予以施工操作。测厚结果判断与相关修补措施与上部组件的承载结构相似，此外也应对破损原因进行分析。如果认为飞溅区局部构件（例如登船结构）的原防腐设计与实际环境情况并不匹配，则可采用新的防腐方式，如防腐复合材料等方式予以改进，改进方案需进行有效评估。

海生物厚度超过平台设计硬质海生物的允许量或平台经安全评估确定海生物需清除时应进行清除。处理方式一般有高压水枪和人工铁铲清除，清除过后应检查该区域，确定清除工作是否对防腐系统造成了损伤，并进行拍照和记录。

### 8.4. 水下结构检验结果与分析

牺牲阳极检查如果发现其表面基本没有受到耗蚀，可以怀疑阳极不起作用，应补充电位测量。另一方面如果牺牲阳极耗蚀超过 2/3，建议换新，耗蚀超过 90% 应立即换新。

在海水中，经保护的钢结构电位必须低于 -0.8V，理想的钢结构电位测量结果应处于 -0.9V 和 -1.0V 之间（相对 Ag/AgCl）。如经保护的钢结构电位如果到 -1.1V 或更低，检测时应确认是否形成释氢裂纹，并在优化设计中考虑减少阳极数量。如果被保护结构电位太高，则表明保护不够，应对保护区域结构进行清除海生物和测厚甚至充水检查工作，以了解结构是否有腐蚀，并考虑更换/增加阳极。

海生物厚度超过平台设计硬质海生物的允许量或平台经安全评估确定海生物需清除时应进行清除。处理方式一般有高压水枪和人工铁铲清除，清除过后应检查该区域，确定清除工作



是否对防腐系统造成了损伤，并进行拍照和记录。

检查结果如果发现结构存在弯曲、位移、凹陷及擦伤等缺陷，多数结构缺陷可以采用打磨以及灌浆方式予以修补。修补方案应得到充分计算分析，确保修补结构的效果。打磨的修补方式一般是在裂纹深度在腐蚀裕度之内采用；如果杆件裂纹深度超过腐蚀裕度，应检查该杆件的设计裕度（UC），如打磨之后杆件可以保证结构的极限、稳定性和疲劳强度等要求，可以采用打磨方式予以修补，并根据修补后的裕度制定针对其后期的检验计划。针对杆件的凹陷缺陷，应首先确定其是否发生了弯曲变形甚至充水，由于凹陷的常见原因为船舶碰撞，凹陷缺陷一般会伴随杆件弯曲情况。考虑凹陷杆件的强度和稳定性问题，通常采用灌浆方式予以弥补。灌浆方案应考虑灌浆对导管架的节点影响，如果凹陷过于尖锐，凹陷对构件的应力集中作用应予以考虑。另外采用卡箍也是针对构件和节点缺陷的常见修复方案，具体可参看 9.7 章节。最后对焊接修复进行说明，由于水下干式焊接施工难度较大成本高而湿式焊接强度可靠性低，一般水下焊接是作为最终备选方案，不轻易采用。如果水下结构裂纹位置无法修补，应采取断裂力学方法计算可接受的裂纹尺寸，并对其进行长期监测。

### 8.5. 海床检验结果与分析

校对设计中对冲刷深度的限制，必要时校核桩侧抗力。对影响安全的应进行回填。如果冲刷已经造成了海缆悬空，一般可以采用回填方式进行临时性补救，或者设计新的海缆固定装置避免海缆的断裂。

## 9. 海上结构破损的处理方法

对于海上钢结构破损的处理方式包括补漆、打磨、更换牺牲阳极、灌浆、增加卡箍和焊接等方式。下表对各种修复方式的优缺点进行了汇总。

表 9-1 海上钢结构破损修复方式及优缺点比较

工艺	优点	缺点
干式焊	适用各种缺陷	需要明火作业。 需要安装水下密闭舱，花时间且昂贵。 在水线附近的密闭舱需要抵抗波浪载荷。
湿式焊	是业经证实，比较快速的工艺	在世界范围内不被认可，效果不如干式焊。
趾端打磨	疲劳寿命成倍增加。	只适合增加疲劳寿命。
改善打磨	是业经证实，比较快速消除疲劳裂纹的工艺。	对静载强度需进行评估。
捶击	提高疲劳寿命非常有效。	只适合增加疲劳寿命。

张紧型机械卡箍	是业经证实，立竿见影效果的工艺，可用来增加结构构件。	对公差要求高，不适合管节点，焊缝余高等必须打磨。
非张紧型灌浆卡箍	是业经证实，适用性强，可用来增加结构构件。	卡箍相对长，除非可焊接。
张紧型灌浆卡箍	是业经证实，适用性强，卡箍相对短，可用来增加结构构件。	张紧螺栓前，灌浆需要充分养护。
橡胶衬垫卡箍	是业经证实，有相当的适用性，可用来增加结构构件。	摩擦系数比预想低。 由于橡胶具有伸缩性，使得交变载荷增大。
灌浆填充构件	是业经证实，比较快速的工艺。	增加结构重量，尤其对地质差的环境带来不利。 很难做到整个构件完全灌满浆。
灌浆填充节点	是业经证实，比较快速的工艺。对改善静载荷和疲劳载荷都有利。	增加结构重量，尤其对地质差的环境带来不利。 对有内部加强环结构以及变径构件，很难做到整个构件完全灌满浆。
螺栓连接	对上部组块的加强、改造修理有效。	水下结构加强、改造修理基本无效。
拆除结构	是业经证实，比较快速的工艺。	
合成材料	重量轻，不需要热工作业。	水下结构修理后寿命未经证实。

## 9.1. 补漆

根据 NACE 对平台涂层失效的分级制定修复方法，见下表。

表 9.1-1 涂层失效修复方法表

涂层评价 (ISO 4628)	维修方式
面漆出现 3 级以上粉化，且粉化减薄的厚度大于初始厚度的 50%	彻底清理涂层后，涂装与原涂层相容的配套面漆 (1~2) 道
涂膜处于 (2~3) 级开裂，或 (2~3) 级起泡，但底涂层完好	选择相应的中间漆、面漆，进行维修涂装
涂膜发生 Ri2~Ri3 锈蚀	打磨处理和彻底清洁表面，涂装相应底漆、中间漆、面漆

表 9.1-2 涂层失效修复方法表

损坏面积	重涂方式
小面积维修涂装	先清理损坏区域周围松散的涂层，延伸至未损坏区域 50~80mm，修成坡口，表面处理至 Sa2 级或 St3 级，按照要求的涂装体系进行涂装
整体重新涂装	表面处理至 Sa2.5 级，按照要求的涂装体系进行涂装

涂层维修应主要注意如下几个方面：

- (1) 涂层修复先采用清洁剂、淡水等清洁后，再表面打磨粗糙和除锈处理；
- (2) 内表面维修或重新涂装底漆宜采用适用于低表面处理的环氧底漆并采用浅色高固体分或无溶剂环氧涂料；
- (3) 处于浪溅区的钢构件，在水位变动情况下涂装时，选择表面容忍性好的涂料，并能

适应潮湿涂装环境的涂层体系；

(4) 对于已知涂层体系，使用原涂层体系进行维修施工。

局部油漆损坏可采用铁锤和砂纸等进行手工除锈后进行油漆，对于大面积油漆失效，应采取喷砂除锈后进行喷漆。

喷砂应选取在晴天，白天进行，空气相对湿度小于 85%，金属表面温度大于露点 3 度。砂子应干燥，不含酸、溶剂、铁锈等杂物。喷砂结果应为近白级(Sa2.5)。

喷漆应选取在晴天，天黑前四小时内进行，空气相对湿度小于 85%，气温大于 10℃，钢材表面温度高于露点 3℃ 以上。油漆喷涂应均匀。涂层外观应该没有开裂、气孔、夹渣和飞溅。各层油漆厚度和黏附力能满足油漆商推荐的要求，完成喷漆后应进行致密性试验。

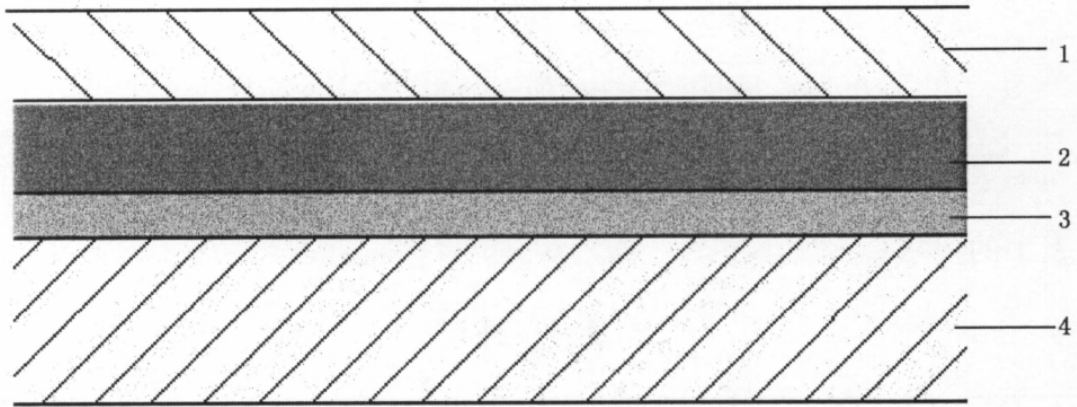
## 9.2. 包覆

如涂层破损在登临设施附近，由于靠船等维护作业影响，防腐系统易遭到破坏，可以采用涂层加复合材料密封套箍等方式予以加强防护。

早期出现的防腐套包覆技术有包覆金属或合金护套以及包覆混凝土或玻璃钢两种防腐方法。两者对于海洋平台桩腿、码头钢管桩飞溅区域的钢结构均具有良好保护效果。但包覆金属或合金护套技术存在着价格昂贵、易形成电偶腐蚀、抗冲击性能差、接触腐蚀以及施工困难等缺点。包覆混凝土或玻璃钢技术密闭性较差，单用玻璃钢外罩一旦海水渗入将腐蚀混凝土从而缩短防护套的使用寿命。

目前，复层矿脂包覆防腐技术被公认为最成熟的防腐套包覆技术，并在日本、英国等发达国家都有较为广泛地使用，使用寿命可达 30 年以上。

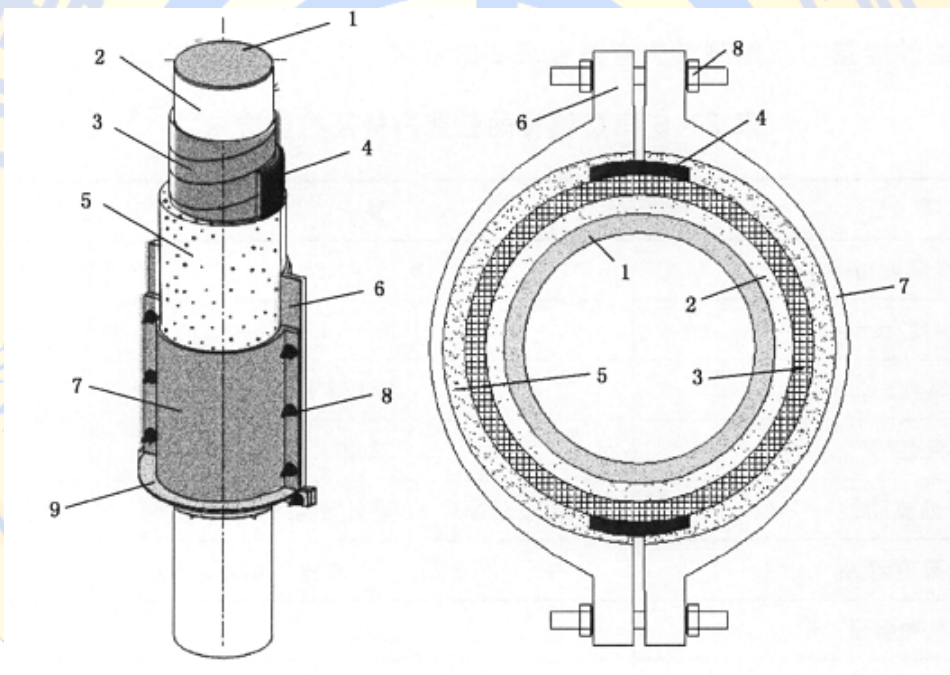
复层矿脂包覆防腐层由矿脂防蚀膏、矿脂防蚀带和防蚀保护罩组成，如图 1 所示。其中防蚀保护罩分为规则防蚀保护罩和不规则防蚀保护罩，规则防蚀保护罩还包括密封缓冲层、法兰、螺栓、挡板和支撑卡箍等配套组件。规则防蚀保护罩端部应采用封闭胶泥进行密封处理。



说明:

- 1——防蚀保护罩
- 2——矿脂防蚀带
- 3——矿脂防蚀膏
- 4——钢铁基体

图 9.2-1 复层矿脂包覆防腐层结构示意图



说明:

- 1——钢铁基体;
- 2——矿脂防蚀膏;
- 3——矿脂防蚀带;
- 4——挡板;
- 5——密封缓冲层;
- 6——法兰;
- 7——防蚀保护罩;
- 8——螺栓;
- 9——支撑卡箍。

图 9.2-2 规则防蚀保护罩结构图

矿脂防蚀膏以及矿脂防蚀带含有缓蚀成分，可减缓海水对被保护体表面的侵蚀；密封缓冲层和防蚀保护罩则具有密闭和抗冲击性能。该技术特点在于对基体表面处理要求低，达到 ISO St2 标准即可，施工方便、可带水作业、质量轻、对结构物无附加载重和压力、绿色环保。因此，其可作为飞溅区腐蚀防护修复技术，适用于各种海洋腐蚀环境下的管线保护，只是防腐套对于带有横支撑等结构的异型钢管桩防护存在一定的困难，仍有待进一步解决技术难题。

防腐层材料的外观应符合表 9.2-1 的要求。

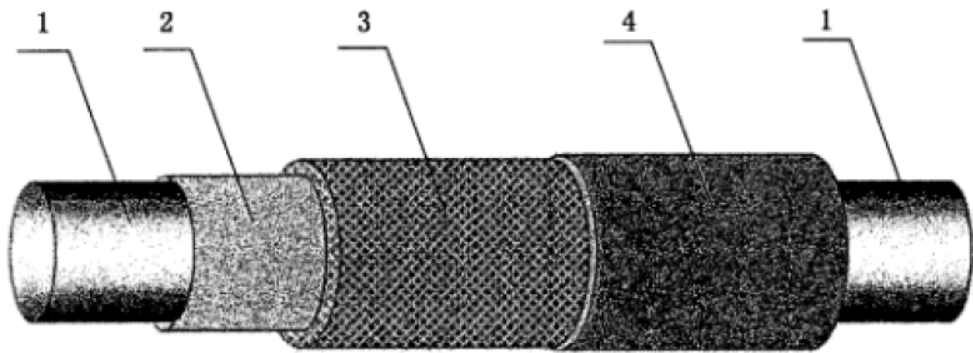
表 9.2-1 防腐层材料外观要求

项目	要求			
	矿脂防蚀膏	矿脂防蚀带	防蚀保护罩	封闭胶泥
状态	膏状	卷状缠带	光滑密实坚硬壳状	油泥状
色泽	淡褐色	淡黄色	根据需要调配	任意色
气味	油脂味	油脂味	无	无



图 9.2-3 复层矿脂包覆防腐层的应用

氧化聚合包覆防腐蚀技术同为目前成熟的包覆防腐技术。氧化聚合包覆防腐蚀技术由防蚀膏、防蚀带及外防护层组成，如图 9.2-4 所示。表面不平整，有接缝、孔洞等处应采用防蚀胶泥进行填充。



说明：  
 1——钢铁基体；  
 2——防锈膏；  
 3——防锈带；  
 4——外防护层。

图 9.2-4 氧化聚合型包覆防腐层结构示意图

突出的优点包括：防锈膏直接与被保护的金属基体接触，所含特殊成分能将金属结构表面锈组分转化成黑色氧化膜，形成保护性封闭层，防止金属继续氧化、锈蚀，起到除锈、防锈作用；该技术对表面处理要求低，可带锈施工。防锈带适应性强，可粘贴在任意形状金属结构表面，永久保持非固化、柔韧状态。外防护剂与空气氧化聚合形成坚韧皮膜，具有良好的耐老化性能，防腐寿命可达数十年，是“可粘贴的重防腐涂料”。



图 9.2-5 氧化聚合型包覆防腐层的应用

### 9.3. 重新安装牺牲阳极

牺牲阳极块通常采用焊接和螺栓连接进行重新安装。如果采用水下湿式焊接，应注意焊口必须在结构的复板或旧阳极块的铁芯上，焊接强度必须得到保证。如果采用钢带螺栓连接，应

注意在完成安装后要测量阳极块和结构之间电阻，避免电阻过大（最大电阻的上限为  $0.01\Omega$ ）影响牺牲阳极对结构保护。最可靠的工艺是采用钢带螺栓固定和焊接相结合的方法，既保证阳极能有效固定，又能够保证阳极块和结构的导通。

重新安装阳极块后，应对阳极保护处结构进行电位测量，确保阳极保护正常。

#### 9.4. 裂纹打磨

裂纹通常出现在交变应力区或高应力区，或者先天缺陷的焊缝，裂纹的端部容易出现应力集中，进一步促使裂纹的扩展，当裂纹扩展到一定的长度和深度，结构会因没有足够强度出现突然断裂，特别是有外加载荷（比如，台风、机械冲击等）时，造成设备损坏或造成人员伤亡。

平台结构检验发现非穿透性裂纹后，应对裂纹进行打磨，直至磁粉探伤发现裂纹完全消失。在结构构件上如发现穿透性裂纹，可在板件裂纹端外约 0.5 倍板厚处钻直径 1.0 倍板厚的小孔作为临时处理方案，并及时根据构件安全性计算结果和裂纹性质采取修复与加固措施。

进行未穿透裂纹去除打磨的工艺要求是：打磨裂纹打磨方向应沿裂纹长度的垂直方向，即裂纹受张力作用方向。打磨区域应由裂纹底部圆滑过渡到打磨区边缘。裂纹单侧打磨的宽度应不小于 4 倍的裂纹深度值，总的打磨区域宽度不小于 8 倍裂纹深度值。裂纹长度方向两端也应按此过渡要求打磨。每次打磨结束后，应采用磁粉或交流场检测重新进行检测。当距离裂纹根部剩余 1mm 左右时，应采用精细打磨头，每次打磨厚度应控制在 0.2mm 以内，打磨完毕后应采用磁粉或交流场检测进行再次检测，直至裂纹消失。

改善轮廓性质的裂纹打磨：裂纹无论深度如何，都必须进行改善轮廓性质打磨，以防止应力集中造成裂纹扩展。但这种改善轮廓性质深度通常限定不超过结构厚度的 60%。如果打磨裂纹深度超过结构板厚的 60%，除非能对构件进行焊补，以维持该位置结构完整性，否则应按照穿透性开裂考虑加强。改善轮廓性质的裂纹打磨例子见下图。

如果打磨裂纹后结构剩余强度不能满足要求，应采取焊补进行修理。在焊补不现实情况下，则应考虑更换结构或其他替代处理方式（比如，卡箍、灌浆等）。

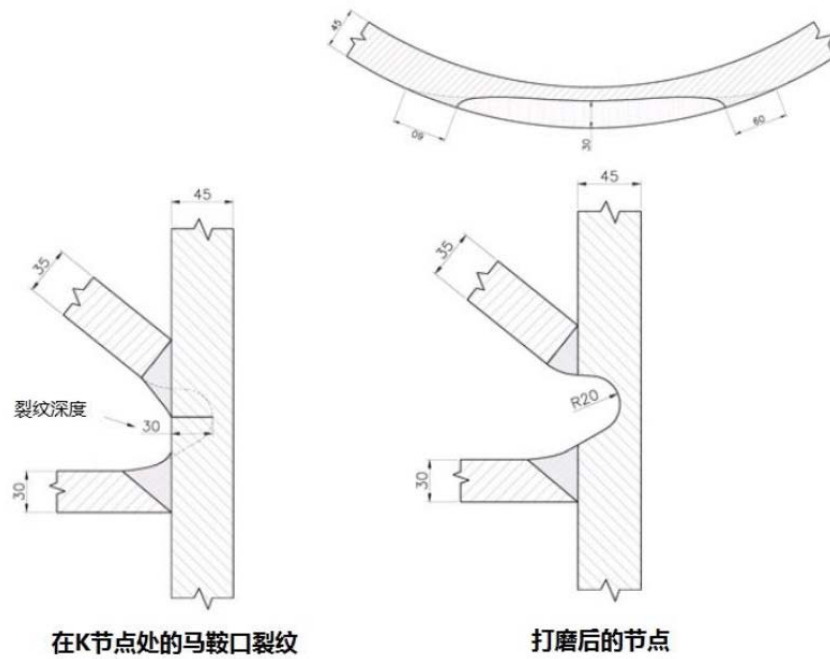


图 9.4-1 改善轮廓性质的裂纹打磨图例 (CCS)

## 9.5. 焊接

焊接分为干式焊和湿式焊接两种。

### (1) 干式焊

干式焊通常认为是结构加强、改造及修理最佳方法，在条件许可情况下优先考虑。对于水上结构，都要采用干式焊接方法进行加强、改造及修理。水下结构可以采用水下密闭舱室进行干式焊（包括高压干法水下焊接、常压干法水下焊接和局部干法水下焊接等），各种焊接方法都可以使用，但通常情况下钨极氩弧焊、手工电弧焊及药芯气体保护焊应用最广泛。水下干式焊接主要采用有围堰（浅水位）、水下压力室、压力干式焊接等方式。

水下局部干法焊接是用气体把正在焊接的局部区域的水人为地排开，形成一个较小的气相区，使电弧在其中稳定燃烧的焊接法。由于它降低了水的有害影响，使焊接接头质量比湿法焊接得到明显改善。与其他水下干式焊接相比，无需大型昂贵的排水气室，适应性明显增大。它综合了湿法和干法两者的优点，是一种较先进的水下焊接方法，也是当前水下焊接研究的重点与方向。

### (2) 湿式焊

湿式焊是指电弧直接接触海水的水下焊接方式。它的优点是不需要复杂压力舱室，能节省时间和金钱。缺点是焊缝力学性能差、需要较高的焊工技能，容易引发触电风险。湿式焊的主要焊接方法是手工电弧焊，焊接时使用防水焊枪和焊条，很容易在水下形成电弧，然而焊工的



视线容易被焊接烟雾所遮住。

使用湿式焊，由于熔池很快被海水冷却，以及被加热的水汽容易陷入熔融金属，导致热影响区和焊缝金属性能下降，表现在强度和韧性降低。湿式焊最大问题是焊接质量不如干式焊，一些原因归结于焊接时熔渣混入海水导致能见度差。但最大问题还在熔融金属本身原因：

- 熔融金属夹入水汽容易引起氢析裂纹；
- 焊缝和热影响区由于海水冷却快容易变硬脆，甚至产生裂纹；
- 湿式焊的疲劳强度低于干式焊，所以不宜在有疲劳载荷的位置焊接。

湿式焊接接头的力学性能只能部分达到或接近干式焊的水平，所以湿式焊接只能对次要结构等进行临时处理。对于工艺而言，不能要求必须达到干式焊的要求，但必须达到评估或设计的要求。

裂纹修复宜采用焊接方法应按下列工序和要求进行：

- (1)清洗裂纹两边 80mm 以上范围内板面至露出洁净的金属面；
- (2)将裂纹边缘加工出坡口,直达纹端的钻孔,坡口的形式根据板厚和施工条件按国家现行有关标准的要求选用；
- (3)设计合理的焊接预热和保持温度；
- (4)用与钢材相匹配的低氢型焊条或超低氢型焊条施焊；
- (5)采用小直径焊条以分段分层逆向焊施焊；
- (6)按设计要求检查焊缝质量；
- (7)对承受动力荷载的构件堵焊后其表面磨光至与原构件表面齐平,磨削痕迹线与裂纹切线方向基本垂直；
- (8)对重要结构或厚板构件,堵焊后应考虑退火处理。

网状分叉裂纹和有破裂过烧或烧穿等缺陷的梁柱腹板部位宜采用嵌板加固。采用嵌板加固应按下列工序和要求进行：

- (1)加固前检查确定缺陷的范围；
- (2)将缺陷部位切成带圆角的矩形孔,切除部分的尺寸均比缺陷范围的尺寸大 100mm；
- (3)用等厚度同材质的嵌板嵌入切除部位嵌入板的长宽边缘与切除孔间二个边留有 2~4mm 的间隙并将其边缘加工成对接焊缝要求的坡口形式；
- (4)嵌板定位后，将孔口四角区域预热，采用分段分层逆向焊法施焊；
- (5)检查焊缝质量打磨焊缝余高使之与原构件表面齐平。

附加盖板加固裂纹时宜采用两面附加盖板，裂纹两端均应钻孔。

负荷状态下焊缝连接的加固不宜采用长度垂直于受力方向的横向焊缝，不可避免时应采取专门的技术措施和施焊工艺。采用焊接加固螺栓或铆钉连接的构件应按焊缝承受全部作用力设

计，且不宜拆除原有连接件。

## 9.6. 灌浆

灌浆是重要的结构加强、改造及修理方式。按照灌浆构件位置，分为构件灌浆和管节点灌浆。

### (1) 构件灌浆

构件灌浆能防止构件屈曲、或阻止损坏构件的凹陷进一步扩展，并增加构件强度。在完全灌浆的管件中，灌浆体承受压力载荷从而使得总体抗屈曲强度得到增强。但如果对于一个不完全灌浆浆液的管件，浆体几乎没有对压力载荷起任何作用。

完全灌浆管对增强构件（尤其受损构件）强度起了很大作用。但也要看到构件灌浆使得结构重量增加，这对结构抗环境载荷（比如地震）起负面作用，必须额外考虑。

有时候，构件灌浆用于卡箍修理的附属工作，此时，灌浆作用主要用来防止张力卡箍对结构的可能损坏。这种情况下，不完全灌浆也能接受。

由于灌浆必须灌满才能增强构件，然而，很可能在管节点附近出现的灌浆死角（死角形成如下图）会使灌浆作用大打折扣，这是因为灌浆管必须依靠整个灌浆体来传递载荷。此外，灌浆死角还经常出现在有内部加强环或大小头接头处。

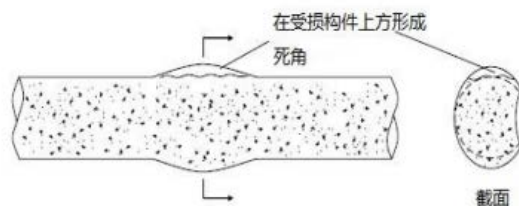
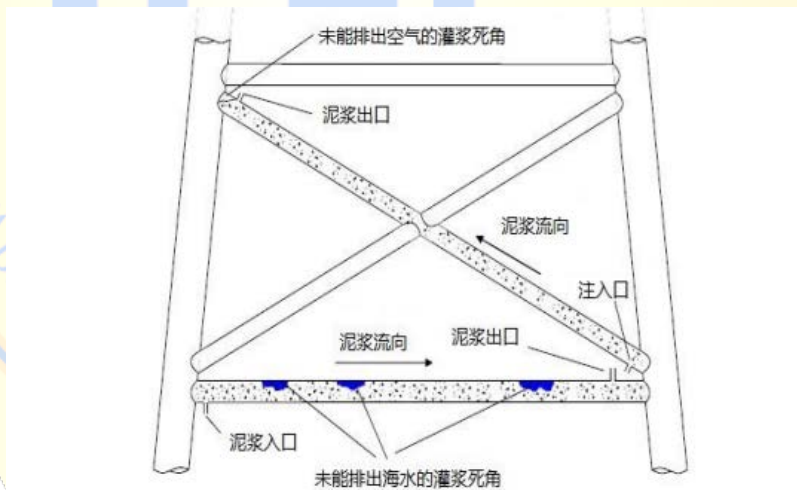


图 9.6-1 灌浆死角形成 (CCS)

灌浆虽然能增加承受外来载荷能力，然而，一些载荷，比如增加的浆体重量载荷，还必须依靠钢结构本身承担。增加的浆液重量应在地震活跃区域另外考虑。对于在大管径（比如：24 英寸及以上）上的灌浆，因浆液凝固过程产生的热量可能会恶化浆体的质量，应引起注意。

## （2）管节点灌浆

管节点灌浆是指在管节点上对主杆进行灌浆加强的形式。主杆可能是全部灌浆，或是内部插上加强管，然后在两管空腔进行灌浆，见下图。这两种灌浆方式都能使得结构更好承担静载荷和疲劳载荷。原因有：

- （1）灌浆能加强主杆刚度，分担主杆弯曲应力，防止主杆变形；
- （2）由于主杆应力得到有效的分担，所以疲劳寿命增强；
- （3）由于主杆刚度增加，能有效分配其他杆件传递的应力；
- （4）灌浆能避免主杆变形，因而增强承载能力。

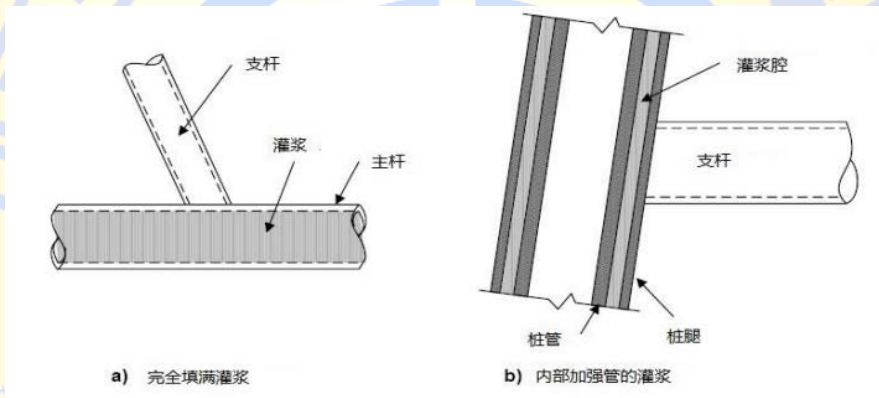


图 9.6-2 节点灌浆

总之，灌浆是一个简单且有效的结构加强、改造及修理成熟工艺，有广泛的应用前景。但应该注意到其局限性，主要有：

- （1）节点灌浆只限于加强支杆传递的载荷；
- （2）由于泥浆的灌入增强抵抗某些载荷同时也因重量增加而带来一些载荷；
- （3）在大管径（比如：24 英寸及以上）上的灌浆，因浆液凝固过程产生的热量可能会恶化浆体的质量，应引起注意；
- （4）增加的浆液重量应在地震活跃区域另外考虑；
- （5）灌浆经常在有内部加强环或大小头接头处出现死角，影响效果，应充分考虑适合的程序及选用合适的出口。

管节点施工工艺要求和现场质量检查要求和构件灌浆一致，但如果使用内插加强管灌浆，应注意设定位块，使内插管和受加强管同心，并设计上应该提供 38mm 的最小环形空间宽度。

并设计合理灌浆方法防止浆液泄漏。

## 9.7. 卡箍

卡箍是针对受损构件的外形做成的外包结构，可以是两瓣或多瓣的，并用螺栓把各瓣连接起来，形成一个管夹，把受损构件夹紧，依靠管夹与受损构件之间的摩擦力或剪力键来传力。

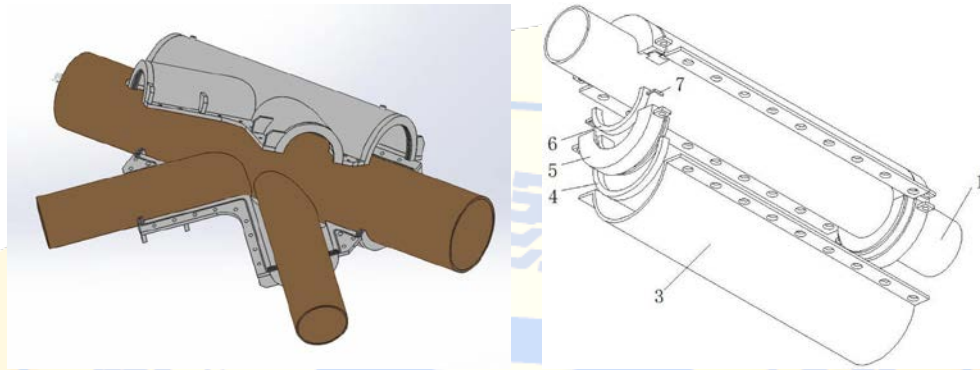


图 9.7-1 卡箍示意图

卡箍大致分为以下几种：

- (1) 张力机械卡箍；
- (2) 无张力灌浆卡箍/衬套；
- (3) 张力灌浆卡箍；
- (4) 张力橡胶垫卡箍等。

这些卡箍通常由两个及以上的部件组成，通过螺栓连接夹住构件，根据螺栓是否需要张紧，分为张力卡箍和无张力卡箍两种。虽然从结构应力传递上看，这两者没有很大区别，但如果从公差选取角度看，灌浆卡箍和橡胶垫卡箍可以有较宽的公差范围。带有剪力键的灌浆卡箍承载力高，性能可靠，填充膨胀水泥性能更加优异，是目前应用最多的一种合理卡箍。近二十年来，卡箍在平台加强、改造和修理中得以广泛应用，成功案例包括：

- (1) 对强度不足的构件进行加强、改造和修理；
- (2) 对强度不足的节点进行加强、改造和修理；
- (3) 增加在役平台构件的连接；
- (4) 更换构件的连接。

建议设计上不要在受损的构件上安装卡箍，尤其是疲劳裂纹构件，因为这些裂纹会扩散而导致构件失效，也建议不要在焊缝上安装卡箍，因为这些焊缝日后可能有检测要求。鉴此情况，从设计理念上最好设计卡箍具备能承受构件整体应力的强度，而不要只承担部分强度。

卡箍尺寸的计算上必须满足下列三个要求：

- (1) 要有足够摩擦力防止卡箍滑动，对张力卡箍而言，抗滑动能力来自螺栓张力；
- (2) 螺栓要有足够张紧力防止卡箍因载荷作用解体；
- (3) 螺栓紧固力不能损坏卡箍结构。

对于无张力卡箍，螺栓作用是把两个马鞍板结构连接在一起，而不是施加紧固力，所以上述 3 点不适用。无张力卡箍事实上只有满足上述 1 点就可以了。

## 9.8. 螺栓连接

螺栓连接是指通过螺栓方式对结构构件进行紧固的工艺。通常螺栓连接仅局限对上部组块加强、改造和修理，不适合对飞溅区和水下结构。螺栓连接的优点是：高速、简易、成熟、灵便。螺栓固定对临时性修复来讲更合适。使用螺栓连接进行加强、改造和修理应考虑以下因素：作用、螺栓和结构的刚度、螺栓位置和数量、板材表面情况（平整度、摩擦系数等）、丝扣设计和润滑、预张紧力、材料属性。

接头的设计根据海上设施疲劳应力许可条件进行考虑。包括：疲劳因素、螺栓效果、螺栓随时间变化松动情况、腐蚀及脆化。螺栓本身因素包括材质、预张紧力、丝扣。接头设计应经过评估。

螺栓或铆钉的连接需拆除更换并将连接孔扩钻平整时，应复核被连接板件的净截面强度。

## 10. 参考文献

- [1]. GB/T 33630-2017 海上风力发电机组防腐规范
- [2]. GB/T 32119-2015 海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐技术
- [3]. GB/T 32120-2015 钢结构氧化聚合型包覆防腐技术
- [4]. GB/T 5210-2006 涂层附着力的测定法 拉开法
- [5]. NB/T 31006-2011 海上风电场钢结构防腐技术标准
- [6]. JTS 153-3-2007 海港工程钢结构防腐技术规范
- [7]. JTS 311-2011 港口水工建筑物修补加固技术规范
- [8]. JTS 304-2019 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范
- [9]. JTJ 275-2000 海港工程混凝土结构防腐技术规范
- [10]. SY/T 4091-2016 滩海石油工程防腐技术规范
- [11]. SY/T 10008-2000 海上固定式钢质石油生产平台的防腐控制
- [12]. SY/T 10009-2002 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法——荷载抗力系数设计法(增补 1)
- [13]. SY/T 10030-2004 海上固定平台规划 设计和建造的推荐作法 工作应力设计法
- [14]. GB/T 32119-2015 海洋钢铁构筑物复层矿脂包覆防腐技术
- [15]. DB37/T 32120-2022 钢结构氧化聚合型包覆防腐控制技术
- [16]. DB37/T 2318-2013 海洋钢筋混凝土结构重防腐涂料评价方法
- [17]. DB37/T 2319-2013 海洋钢结构浪花飞溅区复层矿脂包覆防腐技术规程
- [18]. 中国船级社, 固定式导管架结构可靠性分析及应用指南, 2015
- [19]. 中国船级社, 海上平台状态评定指南, 2005
- [20]. 中国船级社, 在役导管架平台结构检验指南, 2020
- [21]. 中国船级社, 海上风电场设施检验指南, 2017
- [22]. 中国船级社天津分社海工处. 海上设施测厚指南-固定导管架式平台. 2006
- [23]. API RP 2A-WSD, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Working Stress Design
- [24]. API RP 2A-LRFD, Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms—Load and Resistance Factor Design
- [25]. NACE RP0176-2003: Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Structures Associated with Petroleum Production
- [26]. NACE SP0108-2008: Corrosion Control of Steel Fixed Offshore Structures Associated with Petroleum Production
- [27]. NACE Offshore Corrosion Assessment Training (OCAT)
- [28]. ASTM D 4541-09 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
- [29]. ISO 19902 Petroleum and natural gas industries — Fixed steel offshore structures
- [30]. ISO 4628 Paints and varnishes — Evaluation of degradation of coatings — Designation of quantity and size of defects, and of intensity of uniform changes in appearance
- [31]. 钱思成, 张有慧, 张国庆等. 导管架阴极保护及监测系统设计[J]. 中国造船, 2009.11, 50 卷增刊: 770-776
- [32]. 宋积文, 兰志刚, 杜敏. 海洋工程阴极保护初期保护电流密度的研究[J]. 2009 年全国石油和化学工业腐蚀与防护技术论坛论文集, 2009, 251-255
- [33]. 张亮, 宋积文, 陈胜利等. 海洋石油平台导管架阴极保护监测数据分析与讨论[J]. 装备环境工程, 2018.03, 15 (3): 20-23
- [34]. 王亮, 邱海荣. 导管架平台受损杆件修复方案比选及应用[J]. 海洋石油, 2019, 39 (1): 93-98

[35].Jim Britton. Cathodic Protection Surveys of Offshore Platforms - A New Approach[TS]. Corrosion98, 1998, Paper No. 729

