

# 团 体 标 准

T/JSERS 4—2024 T/JSREA 2002—2024

## 海上风电外加电流阴极保护产品技术规范

Technical specification for impressed current cathodic protection products for  
offshore wind farm

2024 - 12 - 26 发布

2025 - 1 - 26 实施

## 目 次

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 前言 .....                      | II  |
| 引言 .....                      | III |
| 1 范围 .....                    | 1   |
| 2 规范性引用文件 .....               | 1   |
| 3 术语和定义 .....                 | 1   |
| 4 基本技术要求 .....                | 1   |
| 5 安装调试 .....                  | 4   |
| 6 质量验收 .....                  | 5   |
| 7 运行与维护 .....                 | 6   |
| 附录 A（资料性） 外加电流阴极保护的设计计算 ..... | 7   |
| 附录 B（资料性） 辅助阳极的参考型式 .....     | 8   |
| 附录 C（资料性） 阳极的布置参考方式 .....     | 10  |

## 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。

本文件由江苏省可再生能源行业协会、江苏省能源研究会提出并归口。

本文件起草单位：江苏能晟工程技术有限公司、中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司、浙江大学、河海大学、江苏沿海可再生能源技术创新中心、华电科工股份有限公司、深圳国能宸泰科技有限公司、江苏省可再生能源行业协会。

本文件主要起草人：胡炽昌、李伟、蔡新、侯智成、何军、齐道来、顾晓庆、潘跃斌、曹志强、刘爽、林斌、顾亚京、王沛、汪亚洲、张欣、付国庆、尹石磊、卓玲、陈鹏飞、朱鑫、王菲、张雯雯、严慧。

## 引 言

本文件的发布机构提请注意，声明符合本文件时，可能涉及到4.5辅助阳极相关的专利使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构保证，他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下，就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得：

专利持有人姓名：侯智成

地址：江苏省南京市秦淮区中山东路532-2号A1栋501室

请注意除上述专利外，本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

# 海上风电外加电流阴极保护产品技术规范

## 1 范围

本文件规定了海上风电外加电流阴极保护的基本技术要求、安装调试、质量验收和运行与维护。本文件适用于海上风电钢结构（单桩基础和导管架基础）的阴极保护。

## 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 3108 船体外加电流阴极保护系统
- GB/T 4208 外壳防护等级 (IP代码)
- GB/T 7387 船用参比电极技术条件
- GB/T 7388 船用辅助阳极技术条件
- GB/T 7788 船舶及海洋工程阳极屏涂料通用技术条件
- GB/T 17005 滨海设施外加电流阴极保护系统通用要求
- CB 3220 船用恒电位仪技术条件
- JTS 153-3 海港工程钢结构防腐蚀技术规范

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**外加电流阴极保护** impressed current cathodic protection (ICCP)  
通过外加电源向被保护体提供阴极电流以实现阴极保护的电化学保护方法。

### 3.2

**恒电位仪** potentiostat unit  
能自动保持被保护钢结构对电解质电位恒定的电源设备。

### 3.3

**网络之间互连的协议** internet protocol (IP)  
是TCP/IP体系中的网络层协议。

### 3.4

**数据监控系统** supervisory control and data acquisition (SCADA)  
是一种数据采集、监视和控制系统，用于实时监控和控制工业过程。

### 3.5

**阳极屏蔽层** anode shield paint  
覆盖在辅助阳极周围以优化电流分布的绝缘层。

## 4 基本技术要求

### 4.1 保护电位

4.1.1 钢板、铸铁结构件等组成的设备或系统，保护电位在 $-0.85\text{V}$ ~ $-1.10\text{V}$ 之间（相对硫酸铜参比电极）应符合 JTS 153-3 相关要求。

4.1.2 高强钢（屈服强度不小于 $700\text{MPa}$ ）保护电位应在 $-0.85\text{V}$ ~ $-1.0\text{V}$ 之间（相对硫酸铜参比电极）。

4.1.3 其他材料应参考 GB/T 17005 不同参比电极测定钢在海水中的保护电位及相互关系图。

## 4.2 保护寿命

外加电流阴极保护系统在设计寿命到期前，应进行系统评估，确认腐蚀损耗情况，制定必要的延寿方案，如更换辅助阳极或重新设计电源系统。

## 4.3 保护电流

4.3.1 为了使整个钢结构均达到阴极保护电位标准，应考虑钢结构各个部位的电流需求。

4.3.2 外加电流阴极保护的设计计算见附录 A。

## 4.4 阴极保护电源装置

### 4.4.1 阴极保护电源装置选型

#### 4.4.1.1 阴极保护电源装置

阴极保护电源装置内部所用电源模块及其输出功率具体应根据风机型号进行确定，不同型号风机、基础形式（单桩、导管架）保护面积不同，所需保护电流不同，需选用不同参数的电源模块。

#### 4.4.1.2 供电模式

阴极保护电源装置应采用分布式供电系统，分别为多个独立模块输出单元供电，实现分布式供电模式智能化、精细化控制。

#### 4.4.1.3 耐久性设计

电源机柜整体防护等级满足 IP54 要求，参照 GB/T 4208 外壳防护等级 (IP 代码) 相关要求。

电源机柜整体耐久性设计方面应采用多重保障措施，确保其能够在海洋大气环境下长期服役。具体保障措施如下：

- a) 电源机柜材质选用采用防干扰、防腐蚀的 Q235 碳钢材料，采用喷塑防腐涂层，漆膜厚度不小于  $120\mu\text{m}$ ，确保机柜本体的耐蚀性；
- b) 机柜柜门采用橡胶密封条密封，防止盐雾气氛侵入机柜内部；
- c) 电子设备所有电路板应涂有耐盐雾三防漆，用于保护电气板件免受盐雾腐蚀；
- d) 在电子元器件选型上，增大所选用元器件的电性能裕量，确保电子元器件在恶劣的环境下正常工作。

### 4.4.2 阴极保护电源装置技术性能

#### 4.4.2.1 基本性能

电源装置技术性能应符合如下要求：

- a) 参比电位控制范围： $-3.0\text{V}\sim 3.0\text{V}$  连续可控；
- b) 参比电位控制误差： $\leq \pm 0.005\text{V}$ ；
- c) 参比电极输入阻抗： $> 1\text{M}\Omega$ ，流经参比电极电流  $< 10\mu\text{A}$ ；
- d) 纹波系数： $\leq 5\%$ ；
- e) 恒电流控制精度： $\leq 1\%$ ；
- f) 运行参数自保持功能：断电停止运行后，恢复供电后仪器在原设定参数下自动开始运行。

#### 4.4.2.2 报警功能

阴极保护电源装置应具备“过保护”“欠保护”“超压”“过流”报警功能，报警参数及报警逻辑可在操作系统中进行设置，具有远程人工消除报警功能，系统可记录且存储报警信息。

## 4.5 辅助阳极

### 4.5.1 种类

4.5.1.1 海洋环境下采用的辅助阳极包括但不限于以下三种：

- a) 镀铂铌 (Pt/Nb)；
- b) 镀铂钛 (Pt/Ti)；

c) 钛基混合金属氧化物(Ti/MMO)。

#### 4.5.1.2 性能参数

辅助阳极应具有导电性能好、输出电流大、体积小、重量轻、机械强度高、耐冲击、消耗率低、消耗均匀、阳极极化率低等特点。原材料、化学成分、工作电流、电化学性能等主要性能应满足GB/T 7388的要求。性能参数的试验方法应参考GB/T 7388中的第5章节。

#### 4.5.2 型式

4.5.2.1 辅助阳极的型式包括管状、圆盘状、棒状和板状，不同型式的辅助阳极参考附录 B。

4.5.2.2 辅助阳极型式的选择应考虑如下因素：

- a) 被保护钢结构的型式；
- b) 结构件的防腐能力；
- c) 结构件的良好绝缘能力；
- d) 辅助阳极输出电流能力；
- e) 被保护钢结构所处海域的环境条件，如风、浪、海流、海泥、水深等
- f) 淤泥面高度；
- g) 阴极保护电流分布均匀性；
- h) 系统的可靠性。

#### 4.5.3 辅助阳极数量

辅助阳极数量按式（1）计算。

$$n = \frac{I}{I_a} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- n——辅助阳极数量；  
 $I_a$ ——单支辅助阳极的输出电流，单位为安培（A）；  
 I——总保护电流，单位为安培（A）。

#### 4.5.4 安装与布置

4.5.4.1 辅助阳极的安装型式可选用张紧式（拉伸式）、悬吊式、固定式、远地式或几种型式的结合，不同的安装型式参考附录 C。

4.5.4.2 圆盘状、板状辅助阳极固定式安装时，辅助阳极应远离钢结构 1.5m 以上；如无法满足距离要求，应在靠近辅助阳极的钢结构涂敷屏蔽层，屏蔽层的技术要求应符合 GB/T 7788 的要求。

4.5.4.3 辅助阳极的布置还应考虑以下因素：

- a) 减少波浪对阳极固定装置的冲击；
- b) 减少杂散电流影响；
- c) 远离节点、焊接点及复杂几何结构处；
- d) 安装方便、经济性；
- e) 辅助阳极维护的便利性；
- f) 阴极保护系统对邻近钢结构的干扰影响；
- g) 不应影响其他设施的施工及安装，如海底管道、海底电缆、钻井作业等。

#### 4.6 参比电极

宜采用高纯锌参比电极，其材质及技术质量指标和性能测试应满足GB/T 7387的规定。

#### 4.7 其他

##### 4.7.1 阳极屏蔽涂料

阳极屏蔽层是外加电流阴极保护系统中，使辅助阳极的输出电流可分布到较远的阴极表面，以达到被保护结构的电位比较均匀而覆盖在辅助阳极周围一定面积范围内的绝缘层，阳极屏蔽层设计寿命满足风机机组使用要求，阳极屏蔽层涂料的技术要求应符合GB/T 7788的规定。

#### 4.7.2 阴极汇流及测量接地

阴极汇流及测量接地装置应采用防水电缆接头与本体上预制的接线柱安装，确保其接触电阻不大于0.01Ω。

#### 4.7.3 电缆

4.7.3.1 传输电缆应采用专用海水屏蔽电缆，连接电缆水中部分应留有足够的长度余量。

4.7.3.2 参比电极电缆应选用耐海水腐蚀和耐老化的屏蔽电缆，电缆护套应具有良好的绝缘、抗老化、耐海洋环境和耐海水腐蚀性能，电缆护套的抗拉强度应通过 200 次循环试验验证，耐老化试验应进行 300h 以上的紫外线曝晒。

4.7.3.3 阴极保护电源装置应采用交流电力输入，电缆承载功率不宜低于 6kW。阴极保护电源装置设置在平台内部。电缆规格由具体项目而定。

4.7.3.4 辅助阳极电缆、导管架基础阴极电缆和测量接地电缆为低压直流电缆，为耐海水腐蚀的双护套电缆。选用交联、低烟、无卤、阻燃型，电缆通过电缆桥架敷设。

4.7.3.5 参比电极电缆为低压直流信号电缆，导管架风机基础内表面参比电极电缆为屏蔽电缆，为耐海水腐蚀的双护套电缆。选用交联、低烟、无卤、阻燃、屏蔽电缆，电缆通过电缆桥架敷设。

4.7.3.6 同一分区内的阴、阳极电缆的配置应保证每个阳极输出电流均匀，相差不超过 10%。

#### 4.7.4 数据监控装置

海上风电阴极保护数据监控系统应包括：传感器、数据采集模块、处理器、网络控制器、局域网、中控机、数据采集终端等，存储数据的最低时间要求为 10 年，数据格式应支持 XML 和 CSV 导出等。阴极保护数据监控系统功能应满足：

- a) 多台风电机组可独立组网或者利用风机厂家的数据网络进行组网，形成区域互联的阴极保护监测网络；
- b) 实时监测并显示保护电位、输出电流、输出电压、故障等参数，进行数据存储、传输、分析等；
- c) 具有历史数据及日志查询、分析功能，自定义筛选数据，自动生成报告和报表；
- d) 中控系统能够实现对各风电机组的多通路电源装置的远程控制，参数调节，运行模式切换，停复机等操作等。

### 5 安装调试

#### 5.1 安装前检查

材料安装前检查应按照以下步骤：

- a) 安装前需提交正式的产品检验资料，报送监理（或监造）审批；
- b) 辅助阳极、参比电极的工作表面质量及单体重量、尺寸的检验应逐个进行；
- c) 辅助阳极和参比电极的安装配件，仔细核对数量和材质，确保安装过程中不遗漏。

#### 5.2 现场安装

现场安装应按下列步骤进行：

- a) 辅助阳极、参比电极的实际安装位须严格按照施工图进行安装，中心点位置最大允许误差为 ±50mm；
- b) ICCP 安装过程应服从供应商安排的现场技术人员全程指导；
- c) 辅助阳极、参比电极和恒电位仪需要在岸上进行，所有电缆可以在岸上完成的安装都要在岸上完成，减少海上作业内容，初次安装应在服务工程师现场指导下进行；

- d) 辅助阳极应与基础结构绝缘，应把阳极体固定在绝缘座内，仅露出工作面。导电杆和电缆连接处应确保绝缘和水密性；
- e) 辅助阳极屏蔽涂料配套及施工工艺按照本项目基础施工技术要求执行，同时阳极绝缘底座附近应加厚并对根部位置进行预涂；
- f) 电缆从电极底座出来，需要通到上方的控制箱位置，预先设计和准备走线的管道，导线管的对接处需要进行套管加固处理；
- g) 辅助阳极导线和参比电极导线的布线需要距离主电缆 0.5m 以上，避免强电场影响；
- h) 电源机柜应牢固安装且有接地线，应在控制箱 50cm 范围内预留一个接地螺栓；
- i) 电源机柜需要三相交流供电；
- j) 电源机柜需要有个 IP 地址，提前分配好 IP 地址给 ICCP 电源机柜；
- k) 电源机柜应联网，预留网络端口和网线给 ICCP 控制箱；
- l) 从导线管出来的阳极电缆和参比电极电缆应通到塔筒内部；
- m) 安装完成后，应检查安装质量，保证辅助阳极、参比电极与被保护钢结构的电绝缘，检查系统接线，做好安装记录，进行回查和追踪；
- n) 辅助阳极电缆、参比电极电缆，阴极线缆、零位电缆、接地电缆等电缆的接线符合工艺要求；
- o) 电缆按照安装图纸进行布置和连接，所有的连接点都应保证良好的机械和导通性能；
- p) 在首批 ICCP 系统海上安装完毕，竣工验收之前，应至少进行连续 1 个月的通电调试，发现保护电位达不到设计要求时，应及时采取补救措施。

### 5.3 检验

检验应按照如下步骤进行：

- a) 辅助阳极、参比电极组装后，各紧固部件不应有任何松动现象；外观表面必须清洁，无任何沾污等不良现象；
- b) 辅助阳极、参比电极与风机基础主体钢材间应确保水密性良好。对于 ICCP 系统（如参比电极、辅助阳极、导电杆等）涉及到穿过基础主体钢材的情况，穿越位置需由 ICCP 厂家与设计院共同确定，相关水密性试验方法应参考 GB/T 7388；
- c) ICCP 系统应使基础结构电位达到如下范围：
  - 1) 相对于 Zn 参比电极：0~0.25V；
  - 2) 相对于 Ag/AgCl 参比电极：-1.05V~-0.80V；
  - 3) 相对于 Cu/饱和 CuSO<sub>4</sub> 参比电极：-1.1V~-0.85V。
- d) 基础的 ICCP 系统验收前，应按规定要求完成试验及检测内容；
- e) ICCP 系统建成后应集成于风电场升压站的 SCADA 系统内，可在系统显示屏显示，显示内容至少包括（但不限于）保护设定值、风机的实时保护电位值、输出电压及电流、运行状态及报警状态，验收时应对 ICCP 系统保护的有效性每个指标进行复核。

### 5.4 调试

5.4.1 在启动系统电源之前，应核实所有安装工作已完成，确保相关结构按设计要求和规范保持电气连接。

5.4.2 初始通电时，应采用手动方式以较低的电流值运行，通电过程实时监测电位值，当达到最小保护电位后可转入自动模式。

5.4.3 调试过程中应完成工作内容包括：

- a) 测量并记录调试期间电源设备的运行参数；
- b) 测量并记录所有辅助阳极的输出电流；
- c) 测量并记录所有参比电极的电位，判断是否达到规定的保护电位；
- d) 对比实际测量数据与数据监控系统显示的参数是否一致。

## 6 质量验收

验收应按照如下要求进行：

- a) 恒电位仪安装前应测定输出电压及电流的变化范围、控制范围、电位误差、输入阻抗、绝缘电阻、介电强度、限流或过流保护测试等，测试方法及要求详见 CB 3220；
- b) 钛基金属氧化物阳极表面氧化物涂层应光滑、无异物。每个阳极表面划痕不超过两处，每条划痕长不大于 20mm，深度不露出基材。阳极工作表面要保持清洁，不沾有油漆或油污；
- c) 辅助阳极、参比电极的工作表面质量及单体重量、尺寸的检验应逐个进行；
- d) 辅助阳极检验规则及试验方法按照 GB/T 7388 执行，其中电化学性能检验应确保工作电流密度  $< 600\text{A}/\text{m}^2$ ，消耗率  $5.0 \times 10^{-6}\text{kg}/(\text{A} \cdot \text{年})$ ，额定工作电流下的恒电流极化电位  $< 1.9\text{V}$ ；
- e) 参比电极应检验项目包括（但不限于）：电极电位、电位稳定值、极化值、电极体化学成分分析、表面质量、绝缘性能、水密性。检验标准及方法依据本技术要求，未有规定时参照 GB/T 7387 执行；
- f) 辅助阳极及参比电极应进行化学成分分析，试验方法参照 GB/T 7388、GB/T 7387 等执行；
- g) 阳极屏蔽涂料应满足 GB/T 7788 和 GB/T 3108 的相关要求。

## 7 运行与维护

### 7.1 系统运行

在外加电流阴极保护系统正常运行情况下，24h 应至少记录一次被保护设施的电位。当直流电源的输出电压、输出电流采用恒电位仪时，应记录其给定电位；当采用直流电源时，待系统运行稳定后，应根据参比电极的反馈数值对输出电流进行调整，使整个系统达到最佳保护状态。

### 7.2 系统维护

7.2.1 当被保护设施停机大修时，应切断直流电源，对外加电流阴极保护系统进行全面检查，检查内容应包括：

- a) 阳极及参比电极表面状况；
- b) 阳极屏蔽层表面状况；
- c) 各密封处是否有泄漏；
- d) 阳极、参比电极及阴极电缆的破损情况；
- e) 记录阳极及参比电极等设备更换维修情况。

7.2.2 恒电位仪等电气设备宜每两年进行一次全面维修保养。

7.2.3 在被保护设施大修期间，应有专人负责检查外加电流阴极保护系统，对于系统中各部件的拆装应严格按照设备维护手册及相关技术要求进行。设施大修完毕后，外加电流阴极保护系统应及时投入正常运行。

附录 A  
(资料性)  
外加电流阴极保护的设计计算

### A.1 保护电流计算

保护电流按公式 (A.1) 计算:

$$I = \sum i_i S_i F_i \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

I—保护电流, A;

$i_i$ —被保护结构内各种材料在不同涂装条件下的保护电流密度,  $A/m^2$ ;

$S_i$ —被保护结构内各种材料在不同涂装条件下的浸水面积,  $m^2$ ;

$F_i$ —被保护结构内各种材料在不同涂装条件下的涂层破损系数。

### A.2 常用阳极在海水中的主要性能

常用阳极在海水中的主要性能见表A.1。

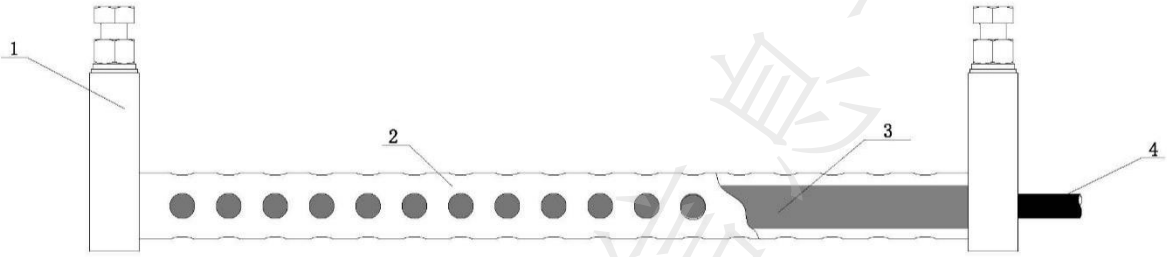
表A.1 常用阳极在海水中的主要性能

| 阳极种类    | 电流密度, $A/m^2$ |          | 设计使用寿命, 年 |
|---------|---------------|----------|-----------|
|         | 最大            | 通常       |           |
| 铂/铌     | 2000          | 500~1000 | 20~40     |
| 铂/钛     | 2000          | 500      | 20~40     |
| 钛基金属氧化物 | 1000          | 500      | 20~40     |

附录 B  
(资料性)  
辅助阳极的参考型式

B.1 管状辅助阳极

管状辅助阳极典型结构图参见图B.1。

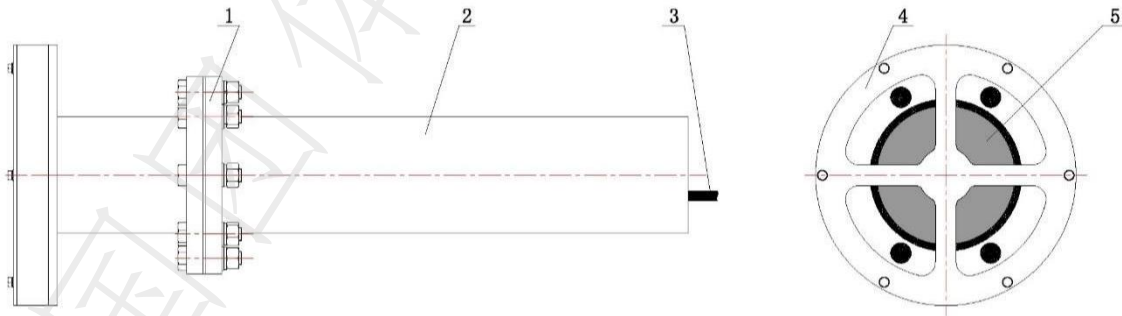


标引序号说明：  
1—支撑夹具；  
2—阳极护管；  
3—阳极主体；  
4—电缆。

图B.1 管状辅助阳极典型结构图

B.2 盘状辅助阳极

盘状辅助阳极典型结构图参见图B.2。

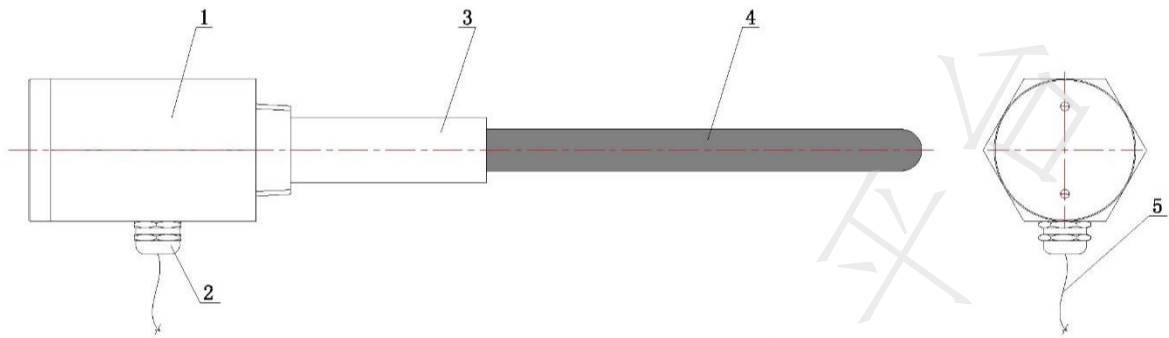


标引序号说明：  
1—法兰；  
2—支座；  
3—电缆；  
4—阳极护板；  
5—阳极主体。

图B.2 盘状辅助阳极典型结构图

B.3 棒状辅助阳极

棒状阳极典型结构图参见图B.3。

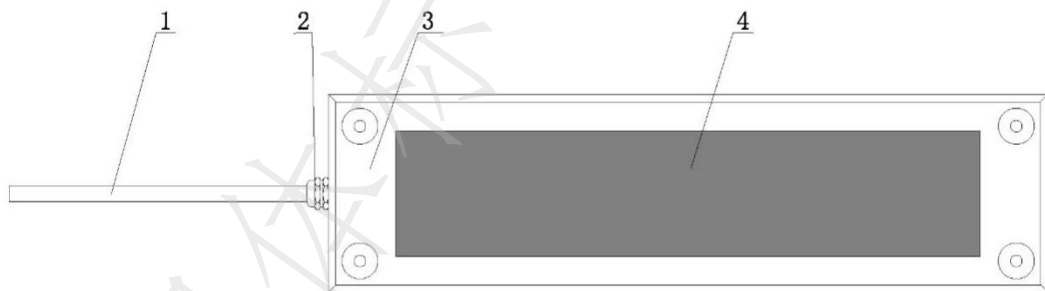


- 标引序号说明：  
 1—密封舱；  
 2—电缆接头；  
 3—阳极保护管；  
 4—阳极主体；  
 5—电缆。

图B.3 棒状辅助阳极典型结构图

#### B.4 板状辅助阳极

板状辅助阳极典型结构图参见图B.4。



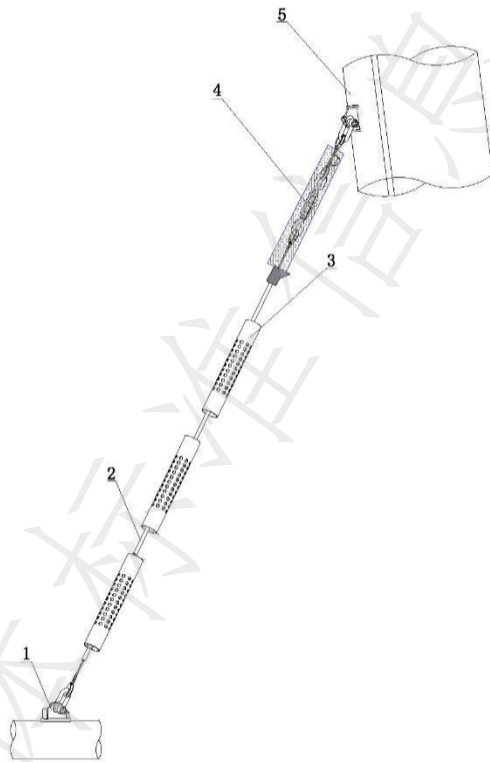
- 标引序号说明：  
 1—电缆；  
 2—电缆接头；  
 3—绝缘底座；  
 4—阳极主体。

图 B.4 板状辅助阳极典型结构图

附录 C  
(资料性)  
阳极的布置参考方式

C.1 张紧式（拉伸式）

辅助阳极采取张紧式（拉伸式）安装时，安装方式见图C.1。

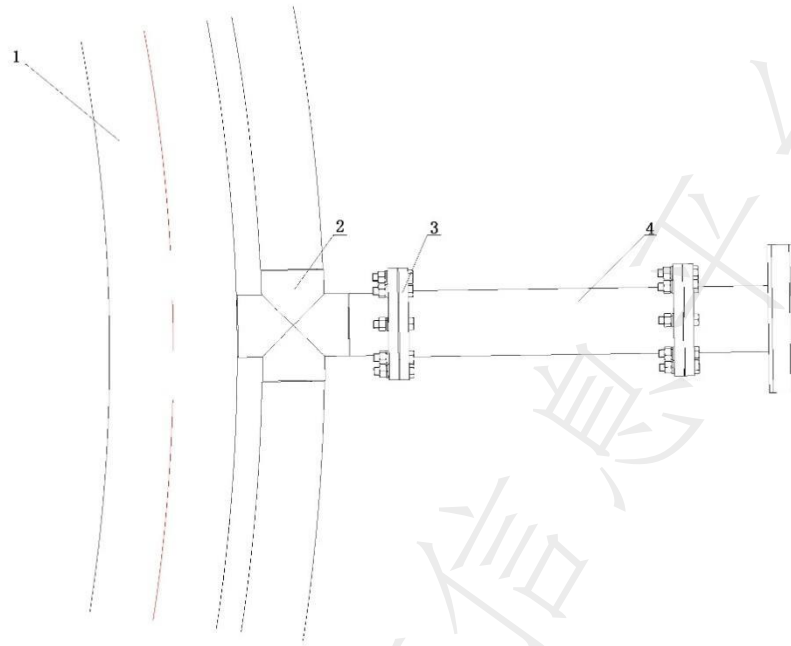


- 标引序号说明：  
1—锚固结构；  
2—复合缆；  
3—辅助阳极；  
4—张紧结构；  
5—被保护钢结构。

图 C.1 张紧式（拉伸式）安装方式示意图

C.2 固定式

辅助阳极的固定式安装方式见图C.2。



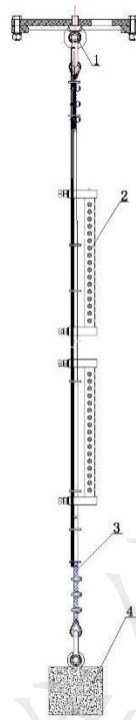
标引序号说明：  
1—被保护钢结构；  
2—三通；  
3—对接法兰；  
4—辅助阳极。

图 C.2 固定式安装方式示意图

### C.3 悬吊式

悬吊式辅助阳极吊装、拉伸在钢结构一侧，应保证阳极拉紧，不得使辅助阳极与钢结构产生之间电接触。

悬吊式的安装方式见图C.3。



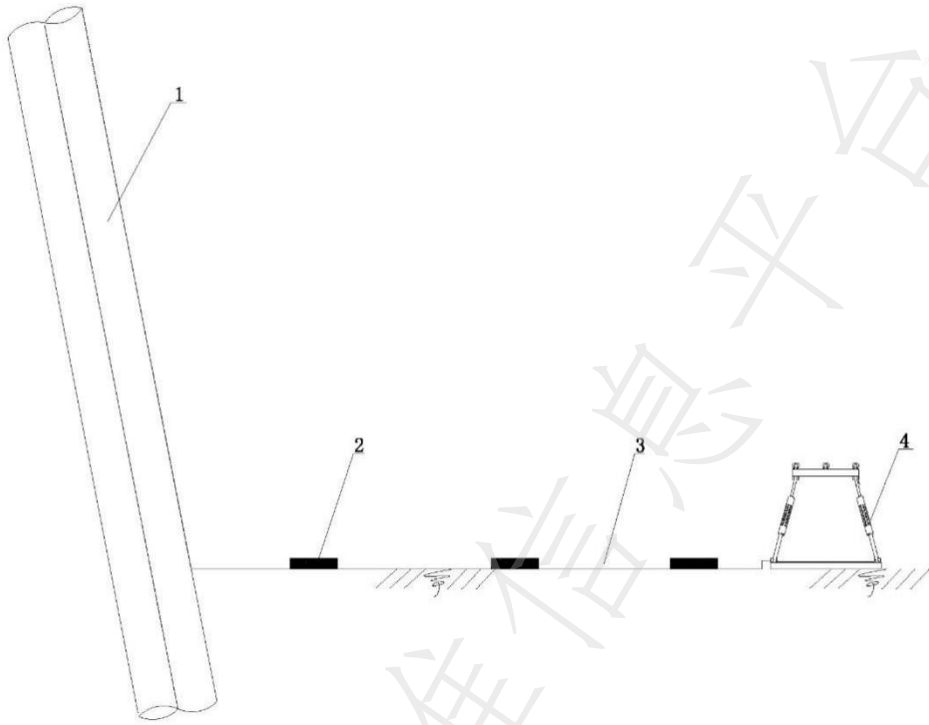
- 标引序号说明：  
1—悬吊装置；  
2—辅助阳极；  
3—海工绳；  
4—配重。

图 C.3 悬吊式安装方式示意图

#### C.4 远地式

远地式辅助阳极沉放置海床，距离被保护钢结构不小于50米，远地式阳极正上方应安装浮标，起到标识作用。

远地式的安装方式见图C.4。



- 标引序号说明：  
1—被保护钢结构；  
2—电缆配重压块；  
3—阳极电缆；  
4—辅助阳极。

图 C.4 远地式安装方式示意图