

团 体 标 准

T/CCCTA 0060—2025

海上浮式钢结构阴极保护

Cathodic protection for steel offshore floating structures

2025-05-28 发布

2025-08-28 实施

中国腐蚀控制技术协会 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统设计	2
5 外加电流系统	7
6 牺牲阳极系统	11
7 设备制造	13
8 运输贮存	13
9 安装施工	13
10 调试验收	16
11 监检测	17
12 运行维护	19
13 文件记录	20
附录 A (资料性) 海上浮式结构的阴极保护电流需求和涂层击穿系数	23
附录 B (资料性) 牺牲阳极设计计算	26
附录 C (资料性) 外加电流阳极的典型电化学特性	28
附录 D (资料性) 辅助阳极绝缘屏蔽层的计算	29
附录 E (资料性) 隔离箱布置	30
参考文献	32

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。

本文件由中国腐蚀控制技术协会提出。

本文件由中国腐蚀控制技术协会团体标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：苏州热工研究院有限公司、中核武汉核电运行技术股份有限公司、北京碧海云智新材料技术有限公司、大连科迈尔海洋科技有限公司、苏州希倍优海洋工程装备有限公司、浙江钰烯腐蚀控制股份有限公司、费县福瑞成防腐科技有限公司、深圳灵若科技有限公司、中国腐蚀控制技术协会。

本文件主要起草人：赵万祥、肖调兵、邸泰深、王水勇、赵海珠、孔全兴、马官兵、章强、杨树凯、程诚、杨波、张飞、李留罐、唐毅、邵彦峥、骆忠江、王志愿、郭仕奎、刘磊、刘笑言、陈纪国、杨小芸、王猷俊、纪大伟、李侠。

海上浮式钢结构阴极保护

1 范围

本文件定义了对浸没在海水和含盐泥浆中的钢制海上浮式结构和设备的金属表面进行阴极保护的方法和系统设计。海上浮式钢结构和设备主要包括：驳船、自升式平台、半潜式平台、储油船、浮动式海上风电机组、深海养殖平台、浮船坞、浮标等。

本文件适用于漂浮于海面的钢结构外部表面的阴极保护工程。

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 4948—2002 铝-锌-钢系合金牺牲阳极

GB/T 4950—2002 锌-铝-镉合金牺牲阳极

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 17005—2019 滨海设施外加电流阴极保护系统通用要求

GB/T 17731—2015 镁合金牺牲阳极

GB/T 21246—2020 埋地钢质管道阴极保护参数测量方法

GB/T 31316—2014 海水阴极保护总则

GB/T 33378—2016 阴极保护技术条件

GB/T 33423—2024 沿海及海上风电机组腐蚀控制技术规范

CB 3220 船用恒电位仪技术条件

CB/T 3855—2013 海船牺牲阳极阴极保护设计和安装

NB/T 31006—2011 海上风电场钢结构防腐蚀技术标准

ISO 20313: 2018 船舶和海洋技术-船舶阴极保护 (Ships and marine technology-Cathodic protection of ships)

ISO 24656: 2022 海上风电结构的阴极保护 (Cathodic protection of offshore wind structures)

3 术语和定义

GB/T 31316 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

大气区域 atmospheric zone

位于湿润层之上的区域，即无论结构是否在移动，正常海浪所能达到高度之上的区域。

3.2

水线带 boot topping

船体在轻载和满载状态之间的部分，通常是间歇性浸水。

3.3

阴极保护区 cathodic protection zone
结构中可以考虑阴极保护设计的区域。

3.4

浸没区 immersed zone
正常工作条件下水线以下区域。

3.5

飞溅区 splash zone
由于波浪和潮汐的作用，周期性地被水包围或在水外面的结构物或管道的外表面。

3.6

浸水带 submerged zone
包括浸水区和深水区。

3.7

水下船体 underwater hull
对浮式结构的稳定和浮力起重要作用的船体部分，即在轻水线以下区域。

3.8

最高天文潮位 highest astronomical tide
天体引潮力最大时引发的最高潮位。

3.9

最低天文潮位 lowest astronomical tide
天体引潮力最小时引发的最低潮位。

3.10

常湿区 frequently wetted zone
由于水位变化和波浪通过而经常被浸湿的结构部分。

4 系统设计

4.1 基本要求

4.1.1 阴极保护作为腐蚀防护技术中的一种，应满足 GB/T 33423—2024 和 NB/T 31006—2011 的相关规定。

4.1.2 海上浮式钢结构的阴极保护应能在整个系统寿期内提供适当的电流来保护钢结构及其附属部分。

4.1.3 应明确海上浮式钢结构所处环境的腐蚀因素和防护要求，以确定阴极保护系统的设计参数、施工规范和服役条件，确保阴极保护装置正确安装和安全运行。

4.1.4 系统设计、材料选择及相应的施工技术，应符合 GB/T 31316—2014 和 GB/T 33378—2016 标准要求，同时充分考虑所需保护电流随时间的变化情况，提供设计裕量。

4.2 设计准则

阴极保护效果以保护电位为评价标准。通常情况下，海上浮式钢结构阴极保护的**保护电位**应符合表 1 中的要求。

表 1 各类钢结构在海水中的阴极保护电位 (Ag/AgCl/海水参比电极)

材料		最小负电位 V	最大负电位 V
铁和钢	有氧环境	-0.8	-1.10
	厌氧环境	-0.9	-1.10
高强钢		-0.8	-0.95
不锈钢	奥氏体不锈钢 -(PREN \geq 40)	-0.30	没有限制
	-(PREN $<$ 40)	-0.60	没有限制
	双相不锈钢	-0.60	

各类钢结构材料的保护电位要求如下：

- 高强钢容易发生氢脆断裂，其最大阴极保护负电位应大于 -0.83 V (Ag/AgCl/海水参比电极)，同时还应避免产生高强钢外部覆盖层剥离或析氢导致的过保护；
- 通常情况下，不锈钢最小负电位达 -0.60 V 时可避免发生缝隙腐蚀；
- 因双相不锈钢易发生氢脆断裂，应避免使用过负的最大负电位；
- 在充气海水中，钢结构的阴极保护标准电位比 -0.80 V 更负 (Ag/AgCl/海水参比电极)；
- 通常情况下，海水中钢结构的负极限值为 -1.10 V (Ag/AgCl/海水参比电极)；
- 高强钢 (屈服强度不小于 700 MPa) 保护电位应在 $-0.80\text{ V}\sim-0.95\text{ V}$ (Ag/AgCl/海水参比电极) 之间；
- 当存在涂层剥离和腐蚀疲劳可能性时，负极限值应更正一点，并对该负极限值进行记录。

4.3 影响因素

阴极保护系统的设计应综合考量海上浮式钢结构的区域划分、结构特征和服役条件。

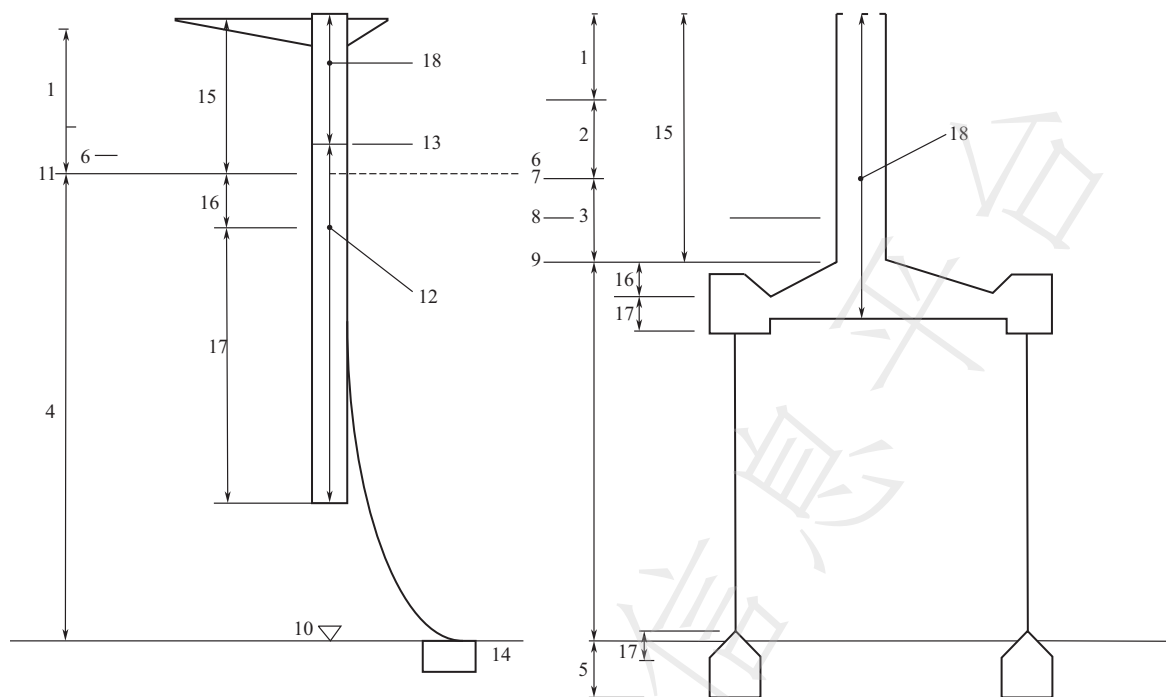
4.3.1 区域划分

通常情况下，应根据所处位置，将浮动钢结构分为不同的阴极保护区域，独立进行阴极保护设计 (即使各区域不是电绝缘的)。

示例 1: 对于储油船来说，部分特定部件 (海上阀箱) 可能不包括在水下船体阴极保护区中，它们构成自身独立的阴极保护区域。

示例 2: 对于浮标，一般作为单个阴极保护区域考虑，具体包括两个部分：浮标体和受影响的系泊链部分。

示例 3: 浮动式海上风电结构的区域划分示例如图 1 所示。



a) 立柱式 (spar) 浮动式海上风电结构图

b) 张力腿式 (TLP) 浮动式海上风电结构图

标引序号说明：

- | | |
|------------|----------------------|
| 1——大气区； | 10——海床线； |
| 2——飞溅区； | 11——圆柱式基础随海平面升降区； |
| 3——潮汐区； | 12——密封区； |
| 4——浸没区； | 13——内部平台下部； |
| 5——海底掩埋区； | 14——锚定系统； |
| 6——50%常湿区； | 15——结构外部：腐蚀裕量+涂层； |
| 7——最高天文潮位； | 16——结构外部：阴极保护+涂层； |
| 8——平均海平线； | 17——结构外部：阴极保护+选择性涂层； |
| 9——最低天文潮位； | 18——结构内部：涂层。 |

图 1 浮动式基础不同区域的腐蚀防护区域划分示意图

4.3.2 结构特征

各阴极保护区域通常包含多个部件，设计时应考虑阴极保护区域内各部件的材料、表面积和涂层特性（类型、寿命和涂层击穿系数）等特征参数进行全面考量。

4.3.3 服役条件

服役条件是影响阴极保护系统设计主要因素，主要条件参数包括：系统设计寿命、运行环境和运行条件等。

- 设计寿命：应能在系统设计寿命内提供足够的保护电位。
- 运行环境：应确定海水特性，影响阴极保护系统的主要海水参数有溶解氧含量、海水流速、温度、海洋生物、盐度。此外，海水 pH 值变化和碳酸盐含量是影响与阴极保护相关的石灰质层形成的因素，将影响裸钢表面需要达到和维持阴极保护的电流数值。
- 运行条件：阴极保护设计通常只考虑结构的静态条件，动态条件下的持续时间通常忽略不计。

4.4 参数设计

4.4.1 保护电流需求

为满足 4.1 所述条件下的保护电位标准，海上浮式钢结构的阴极保护系统应为钢结构中的每个部件提供适当的保护电流。各金属部件的电流需求是其表面积与所需电流密度的乘积，具体可按式 (1) 计算：

$$I_e = A_e \times J_{ce} \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中：

I_e ——单个部件所需的阴极保护电流需求，单位为安培 (A)；

A_e ——单个部件的表面积，单位为平方米 (m^2)；

J_{ce} ——单个部件所需的阴极保护电流密度，单位为安培每平方米 (A/m^2)。

每个阴极保护区域的保护电流需求 I_z 等于其区域内所有结构部件的保护电流需求之和，具体可按式 (2) 计算：

$$I_z = \sum_z I_e \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中：

I_z ——阴极保护区域内的各部件的保护电流需求总和，单位为安培 (A)。

注：对于需求电流的确定，水下表面积应始终包括浸没区，不包括大气区。

为保证阴极保护设计的安全裕量，针对未与钢结构电绝缘的锚链、电缆等部件的电流需求，应进行估算并增加至区域保护电流需求总和中。

4.4.2 保护面积

海上浮式钢结构保护面积的计算，应结合实际工况，根据几何尺寸分别计算不同材质、不同表面涂层条件下的被保护钢结构的浸水面积，计算时应采用被保护结构的最大浸水面积。

4.4.3 保护电流密度

应考虑海上浮式钢结构服役环境和运行条件的变化，计算调整各个部件所需的保护电流密度。保护电流密度的确定可根据在类似环境、类似结构中获得的经验值，也可根据特定的测试和测量结果。设计时应进行以下评估：

- a) 实现结构初始极化所需的初始电流密度；
- b) 维持结构极化所需的维护电流密度；
- c) 极端条件下结构再极化的最终电流密度，如在强风暴气象条件下或清洗后；
- d) 由于在稳定状态条件之前的初始极化通常比设计寿命短，结构寿命内的平均电流密度通常接近于维护电流密度。

整个设计寿命内阴极保护所需阳极材料的最小质量通常采用平均维护电流密度计算。

4.4.3.1 裸钢的保护电流密度

船舶、浮动式海上风电等结构中裸钢所需电流密度值见附录 A.1。

4.4.3.2 涂覆钢的保护电流密度

阴极保护系统通常与涂料系统相结合，改善电流在结构表面的分布，降低所需电流密度。通常用涂层击穿系数 (f_c) 描述由于涂层的存在阴极电流密度的预期减小。涂层击穿系数 (f_c) 值可参考附录 A.3。涂覆钢结构所需的保护电流密度可按式 (3) 计算：

$$J_c = J_b \times f_c \dots\dots\dots (3)$$

式中：

J_c ——涂覆钢保护电流密度，单位为安培每平方米 (A/m^2)；

J_b ——裸钢保护电流密度，单位为安培每平方米 (A/m^2)；

f_c ——由于老化和机械损伤而随时间变化的涂层击穿系数， $f_c = 0$ 表示完全绝缘涂层， $f_c = 1$ 表示没有绝缘性能的涂层（相当于裸钢结构）。

4.4.4 阳极尺寸设计

4.4.4.1 阴极保护系统的阳极尺寸由式（4）欧姆定律确定：

$$I = \Delta U / R \dots\dots\dots (4)$$

式中：

ΔU ——驱动电压，单位为伏特 (V)；

R ——电路电阻，单位为欧姆 (Ω)。

4.4.4.2 尺寸计算时应注意以下问题：

- a) 阳极电阻与阳极环境的电阻率和阳极的几何形状（形状和尺寸）成函数关系，经验公式可用于阳极电阻的估算，常用几何形状阳极的电阻率公式见附录 B；
- b) 在计算阳极电阻时，若阳极近距离成组排列，则应考虑阳极之间的相互干扰；
- c) 应确定阳极的数量和位置，以便在整个钢结构表面达到足够均匀的保护电位水平；
- d) 可使用基于有限元或边界元方法的计算机数值模拟来进行计算。

4.5 系统选型

4.5.1 按照保护电流的供给方式，阴极保护系统分为外加电流系统和牺牲阳极系统。

4.5.2 外加电流系统由直流电源设备提供阴极保护电流，牺牲阳极系统由牺牲阳极提供阴极保护电流。两类系统对比如表 2 所示。

表 2 牺牲阳极法和外加电流法对比

系统类型	牺牲阳极法	外加电流法
环境	只有在低阻抗的土壤和水中	不受土壤和水的阻抗限制，但在海水中可能产生 Cl_2
安装	安装简单	需要设计，很复杂
电源	不需要任何电源，不易被错误连接	需要外部电源、仔细安装、避免电流方向错误
阳极	块状的阳极材料可能限制水流，导致湍流和一些不良后果	所需数量少，阳极通常被设计成对水流产生较小影响
控制	一定的电流自调节能力	可实现自动连续的控制
相互影响	对邻近的结构几乎不产生任何影响	需注意对阳极附近的其他构筑物产生的影响
维护	一般不需要维护，在某些环境下，需要更换	设计使用寿命很长，需要定期检查电子设备，需要不间断电源
破坏	阳极本身不易受到机械破坏。如果一个由大量阳极构成的防护体系，个别阳极的破坏并不会对整个体系产生严重的影响，但阳极的连接处必须承受作用在构筑物上的外力	阳极很轻，对外部的机械破坏抵御较差，阳极的损坏对整个阴极保护体系产生重要影响

4.5.3 系统类型的选择应考虑以下因素：

- a) 保护电流需求；
- b) 杂散电流影响；
- c) 阴极保护电流对邻近构筑物影响；
- d) 电源可利用性；
- e) 实际可利用空间、与外部构筑物距离、可获得的通行权，海水条件及其他安装、维护相关因素；
- f) 区域未来发展和钢结构扩建需求；
- g) 安装、运行和维护费用。

4.5.4 通常情况下，外加电流系统是安装有电源和有高电流需求钢结构的首选，必要时可组合使用两种系统。

4.6 其他

4.6.1 电连续性

海上浮式钢结构附属物的阴极保护可采用安装独立的阴极保护系统，或与阴极保护的钢结构主体进行电连接两种方式，采用电连接时应满足以下要求：

- a) 连接电阻应足够小，以确保所有受保护部件得到充分的保护；
- b) 设计寿期内永久保持电连续性；
- c) 浮标等系泊结构，通常无需安装额外电连接装置，但应进行电连续性评估。

4.6.2 相互作用

4.6.2.1 应考虑周边构筑物导致的杂散电流腐蚀影响，并采取必要措施消除杂散电流对被保护钢结构的影响。

4.6.2.2 可通过测量下列参数确认是否存在杂散电流干扰：

- a) 钢结构相对电解质的电位波动；
- b) 钢结构相对电解质的正常电位的偏离；
- c) 电解质中的电压梯度；
- d) 管道试片或金属电缆护套的线电流。

4.6.2.3 可采用下列方法消除杂散电流影响：

- a) 使用排流设施；
- b) 安装绝缘法兰或绝缘接头；
- c) 应用涂层将整个钢结构绝缘等。

5 外加电流系统

5.1 一般规定

5.1.1 外加电流系统通过使用直流电源提供保护，直流电源输出的电流应在阴极保护系统的设计寿期内可控，以便在整个结构的钢表面获得并维持足够的保护电位水平。

5.1.2 外加电流阴极保护工程应与主体工程同时勘察、设计、施工和投运，若不能同时投运，应采取临时性阴极保护措施。

5.1.3 通常采用外加电流系统和涂料系统对钢结构进行联合保护，如单独采用外加电流系统时，应考虑施工期的防腐措施。

5.2 设计要求

5.2.1 外加电流系统包括一个或多个可变直流电源、若干阳极和若干参比电极，设计时应考虑系统设计要求、系统尺寸、系统布局 and 位置、系统设备规格、安装、检测 and 运维要求等。

5.2.2 因环境条件、结构布局和使用条件变化，引起维持极化所需的电流发生频繁、大幅变化时，可使用具有自动电位控制的直流电源。

5.2.3 各阴极保护区域应由独立系统进行保护，特殊区域可考虑采用多区域控制系统，以优化电流分布，满足阴极保护需求。

5.2.4 应充分考虑系统与毗邻非保护金属构筑物之间的干扰问题。当存在干扰时，应采取绝缘处理等防护措施。

5.2.5 可对阳极进行绝缘屏蔽，以优化流向阴极的电流分布，防止局部过保护。

5.2.6 应按 4.4.3 中所述极端条件下和最高涂层击穿系数计算电流需求，钢结构阴极保护区域所需最大保护电流需求 (I_z) 按式 (2) 计算。

5.2.7 外加电流系统可提供的电流应设计为最大保护电流需求的 1.1 至 1.5 倍。

5.3 设备要求

外加电流系统由电源设备、辅助阳极、绝缘屏蔽、参比电极、电缆等组成。

5.3.1 直流电源

直流电源的选取可参考 GB/T 17005—2019 的要求。

5.3.1.1 一般要求

外加电流系统直流电源应满足以下要求：

- a) 应能将电流输送到需要保护的区域，使阴极电位保持在设定范围内；
- b) 应能满足长期不间断供电要求，供电不可靠时应配备备用电源或不间断供电设备；
- c) 应具有可靠性高、维护简便，输出电流和电压连续可调，并具备抗过载、防雷、抗干扰和故障保护等功能；
- d) 输出电压应考虑电路的电阻（电缆、阳极、反电动势）和阳极的最大推荐工作电压；
- e) 应具备电位自动控制功能，当用于控制直流电源的其中一个参比电极的电位读数比设定的正限值负时，直流电源应仍具备电流输出功能；当用于控制直流电源的所有参比电极的电位读数均比设定的负限值更负时，直流电源应具备限制电流输出的功能；
- f) 可将每个阳极输出电流限制在预设值内；
- g) 无输出限流电路的直流电源发生外部短路时应可有效关闭。

5.3.1.2 设计计算

直流电源额定输出电流可按式 (5) 计算：

$$I_t = I_z \eta \dots\dots\dots (5)$$

式中：

I_t ——额定输出电流，单位为安培 (A)；

I_z ——被保护结构需求的保护电流，单位为安培（A）；

η ——电流负荷余量系数，1.1~1.5，对于浮动式海上风电、浮船坞等钢结构，一般至少为1.25。

直流电源额定输出电压可按式（6）计算：

$$V = I_a R_a + I_a R_L + I_a R_c \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中：

V ——电源设备额定输出电压，单位为伏特（V）；

I_a ——单只阳极排出电流，单位为安培（A）；

R_a ——单只阳极接水电阻，单位为欧姆（ Ω ）；

R_L ——导线电阻，单位为欧姆（ Ω ）；

R_c ——阴极过渡电阻，单位为欧姆（ Ω ）。

不同形状阳极接水电阻计算见附录 B.2。

直流电源额定功率可按式（7）计算：

$$P = \left(\frac{V \times I}{\eta} \right) \times 1.2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中：

P ——额定功率，单位为瓦特（W）；

V ——额定输出电压，单位为伏特（V）；

I ——额定输出电流，单位为安培（A）；

η ——工作效率。

5.3.2 辅助阳极

5.3.2.1 材料选取

- a) 辅助阳极材料可参考 GB/T 7388 选用，也可选用通过技术鉴定的新型阳极；
- b) 惰性阳极通常由钛、铌或钽与薄层铂或混合金属氧化物制成；
- c) 典型阳极的电化学特性参见附录 C，阳极寿命应与钢结构的使用寿命匹配，或可替换；
- d) 如初始阳极电流密度足够（20 A/m² 到 50 A/m²）产生和维持导电 PbO₂ 薄膜，则也可使用铅银半惰性阳极。

5.3.2.2 设计计算

应提前确定阳极的数量、尺寸和位置，其中钢结构所需阳极的有效表面积，可按式（8）计算：

$$S_a = I_t / i_a \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中：

S_a ——阳极总的有效表面积，单位为平方米（m²）；

I_t ——钢结构所需的总保护电流，单位为安培（A）；

i_a ——阳极的工作电流密度，单位为安培每平方米（A/m²），各类阳极的工作电流密度见附录 C。

单个阳极的有效表面积按式（9）计算：

$$S'_a = S_a / N \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中：

S'_a ——单个阳极的有效表面积，单位为平方米（m²）；

N ——阳极个数。

通常情况下，外加电流系统的阳极具有较高的电流输出，所需阳极数量较少，具体数量可按式(10)计算：

$$N = I_t / I_a \quad \dots\dots\dots (10)$$

式中：

I_a ——单个阳极的输出电流，单位为安培（A）。

阳极总的净质量可按式(11)计算：

$$m = KEI_m t \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

m ——阳极总的净质量，单位为千克（kg）；

K ——安全系数，一般取 1.1~1.5；

E ——阳极消耗率，单位为千克每安培年 [kg/(A·a)]；

I_m ——金属结构的平均保护电流，单位为安培（A）；

t ——阳极的适用年限，单位为年（a）。

5.3.2.3 安装布置

- a) 阳极的数量及布置应以保护电流均匀分布为原则，不同钢结构阳极的数量要求和布置方式不同；
- b) 发生阳极损失可能会显著降低系统性能，阳极组件及其附件应设计较高的抗机械损伤能力；
- c) 应采取预防措施避免阳极与钢结构直接电接触（阴极保护电路短路）；
- d) 应采取预防措施避免海水渗透渗漏，如安装隔离箱；
- e) 隔离箱隔应采用与钢结构冶金上相兼容的材料，安装布置方式见附录 E.1。

5.3.3 绝缘屏蔽

5.3.3.1 一般要求

- a) 绝缘屏蔽材料应符合工程应用要求；
- b) 绝缘屏蔽应能有效防止阴极剥离，避免阳极上产生腐蚀性化学物质；
- c) 应将屏蔽材料和器件可能的变质和老化纳入考量。

5.3.3.2 绝缘屏蔽层计算

为使钢结构的电位均匀分布，屏蔽层的形状应与辅助阳极的形状相对应。圆形阳极屏蔽层尺寸可按式(12)计算，长条形阳极的屏蔽层尺寸可按式(13)计算。

$$D = (I_a \rho) / [\pi(E_0 - E_1)] \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$D_c = 2L / \exp \left[\frac{\pi L (E_0 - E_2)}{\rho I_a} + 1 \right] \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中：

D ——阳极屏蔽层的直径，单位为米（m）；

I_a ——阳极的额定输出电流，单位为安培（A）；

ρ ——介质电阻率，单位为欧姆米（ $\Omega \cdot m$ ），海水通常取 $0.25 \Omega \cdot m$ ；

E_0 ——结构物的保护电位，单位为伏特（V）；

E_1 ——距阳极中心为 $D/2$ 处结构物的电位，单位为伏特（V），它取决于涂层的耐阴极电位值；

D_c ——阳极屏蔽层边缘距长度为 L 的阳极边缘的最短距离，单位为米（m）；

L ——阳极长度，单位为米（m）；

E_2 ——距阳极边缘 D_c 处钢结构的电位，单位为伏特（V），它取决于涂层的耐阴极电位值。

应对屏蔽层边缘的电位进行计算，以避免屏蔽层边缘处的电位引起涂层破坏，各类阳极屏蔽层边缘处的电位计算见附录 D。

5.3.3.3 绝缘屏蔽层厚度

阳极屏蔽层的厚度应根据涂层性能和设计寿期确定，通常情况下阳极托架附近应更厚一些，并向屏蔽层边缘逐渐过渡减薄，边缘厚度不应低于 0.5 mm。

5.3.4 参比电极

- 参比电极主要用于测量钢结构对海水的电位和控制阴极保护系统输出的电流；
- 参比电极性能、结构和安装方式应符合 GB/T 7387 规定，常用参比电极类型及主要性能见表 3；
- 在电阻率为 $25 \Omega \cdot \text{cm} \sim 100 \Omega \cdot \text{cm}$ 的海水和海淡水介质中宜采用银/氯化银或锌参比电极；
- 当电阻率大于 $100 \Omega \cdot \text{cm}$ 时，宜采用锌参比电极；

表 3 常用参比电极类型及主要性能

电极类型	电极电位稳定性 V	极化电位差 V	适用范围	使用寿命
银/氯化银电极	± 0.005	± 0.005	海水、海淡水	≥ 10
锌电极	± 0.015	± 0.020	海水、淡水	
铜/饱和硫酸铜电极	—	—	海水、淡水	—

注：锌电极包括锌铝硅合金及高纯锌参比电极。

5.3.5 电缆

- 电缆和连接绝缘材料应耐受其服役环境；
- 电缆应能够承受安装及使用中的外力，并采用护套等保护措施，避免正常使用过程中发生损坏；
- 应采用低烟、无卤、带阻燃绝缘护套的铜芯电缆，参比电极电缆和测量电缆应为屏蔽电缆；
- 在确定电缆截面时，应考虑电缆长度的电压降；
- 连接至同一电缆上的各个阳极间的输出电流差值应小于 10%；
- 对于给定尺寸的电缆，不能超过规定的最大额定电流。

6 牺牲阳极系统

6.1 一般规定

6.1.1 应在牺牲阳极系统设计寿期内始终保证钢结构表面达到保护电位。

6.1.2 牺牲阳极一般由电负性合金制成，通常与钢结构直接相连，通过自身腐蚀提供电流。

6.2 设计要求

6.2.1 牺牲阳极系统设计应符合 CB/T 3855—2013 的要求，设计时需考虑 4.4.1 中定义的三种设计电流密度：

- a) 维持电流密度可用于确定阳极大小，使结构在设计寿命期内保持足够的极化水平；
- b) 初始电流密度可用于验证新阳极的输出电流容量，即其初始尺寸能够使结构完全初始极化；
- c) 再极化电流密度可用于验证阳极消耗到其利用系数（即其最终可用尺寸）时的输出电流容量是否能在风暴等极端条件下使结构重新极化。

6.2.2 牺牲阳极通常由锌或铝基合金制成，阳极性能主要取决于合金成分，不同阳极适用环境不同。

- a) 铝基阳极适合在弱碱性、盐度高且含氧量大的海水中使用，当电阻率超过 $2 \Omega \cdot \text{m}$ ，则不应继续使用铝阳极；
- b) 锌基阳极可用于海上结构，但其较高的密度会导致阴极保护系统质量较大；
- c) 镁基合金可用于短期临时性或过渡性的阴极保护；
- d) 阳极材料的电化学性能应予以记录或通过适当的测试确定，所需资料包括：
 - 对极化钢结构的驱动电位，即闭合电路阳极电位与保护电位标准的正极限之间的差值；
 - 实际电流容量 ($\text{A} \cdot \text{h}/\text{kg}$) 或消耗速度 [$\text{kg}/(\text{Aa})$]；
 - 对钝化的敏感性；
 - 晶间腐蚀敏感性。

6.3 牺牲阳极

6.3.1 牺牲阳极材料

6.3.1.1 阳极的化学成分和电化学性能应符合 GB/T 4948—2002、GB/T 4950—2002 和 GB/T 17731—2015 的规定，或电化学性能优于上述标准规定并通过鉴定的阳极。

6.3.1.2 对于不同电阻率的海水介质，可按照上述标准规定选用适合的阳极。

6.3.1.3 应考虑电解液中合金金属元素释放造成的环境影响。

6.3.2 牺牲阳极计算

- a) 阳极设计计算方法参见附录 B；
- b) 阳极电流输出取决于环境电阻率和阳极形状和尺寸（参见 4.4 和附录 B）。对于大部分浮动式海上风电结构，其阴极保护系统的阳极为梯形界面，且长度远超截面尺寸，是决定阳极其电流输出的主要因素；
- c) 阳极材料在不同环境中使用时消耗速度不同；
- d) 对于给定的电流输出，阳极寿命取决于阳极材料（消耗速度）及其质量；
- e) 应优化阳极的尺寸和数量，减少牺牲阳极的总质量，以提供大于等于结构所需的保护电流，确保阳极在使用寿命期内获得长效保护；
- f) 可使用基于有限元或边界元方法的计算机数值模拟来进行计算。

6.3.3 牺牲阳极位置

6.3.3.1 阳极的分布应确保钢表面的极化在 4.2 的推荐限度内。

6.3.3.2 可使用基于有限元、边界元计算方法或模型试验进行位置模拟分析。

6.3.3.3 阳极的顶高程应至少在最低水位以下 1.0 m，底高程应至少高于泥面以上 1.0 m。

6.3.3.4 应避免在以下区域放置阳极：

- a) 阳极不应放置在可能干扰结构正常运行的区域；
- b) 阳极不应该安装在高应力区域或承受高疲劳负荷的区域，如对接或接缝处；

- c) 阳极不应该被放置在可能被损坏的地方（被意外掉落的物体或靠近的船只损坏）；
- d) 阳极宜采用局部加固的方式安装。

7 设备制造

7.1 阴极保护系统的设备制造主要包括外加电流阴极保护设备制造和牺牲阳极阴极保护设备制造。

7.2 外加电流阴极保护设备制造过程所选用的辅助阳极、参比电极、直流电源、电缆及其他安装辅材应相互协调匹配，并满足 5.2 和 5.3 中的要求。

7.3 牺牲阳极阴极保护设备制造过程的材料、器件、尺寸应满足 6.2 和 6.3 中的规定。

7.4 对设备制造全过程专业技术监理，设置生产质量质保监查；各主要部件应进行到货检验和验收。

7.5 应明确设备制造质量标准，建立阴极保护工程质量管理保证体系并有效实施，制定质量计划，列明制造和验收过程中的所有工艺、程序、工作细则、试验和检验的流程图或工序表，并注明制造单位停工待检点。

7.6 应对阴极保护设备制造阶段的各项性能数据进行记录和存档，并移交采购方作为运维阶段基准数据，具体包括以下内容。

- a) 牺牲阳极、铁脚材质、尺寸、型号等性能参数：牺牲阳极化学成分、电化学性能、表面质量，以及铁脚材质、表面质量、重量及尺寸等。
- b) 参比电极相关性能参数：电极表面质量、电极电位（相对于饱和甘汞电极）、电位稳定性、绝缘电阻、电极化学成分等。
- c) 辅助阳极相关性能参数：外形尺寸及表面质量、绝缘性能、水密性、极板原材料、化学成分、氧化物涂层厚度、电化学性能、涂层结合力状态等。
- d) 直流电源相关性能参数：外形尺寸、输出电流、电压范围、参比电位控制范围及误差、波纹系数、数据显示及报警功能、控制模式、防腐措施及防护等级等。
- e) 电缆相关性能参数：直流电阻、绝缘电阻、传输电流、导体材质、温度范围、阻燃性能、耐腐蚀性能、导体结构、绝缘层、护套层、铠装层以及电压等级等。

8 运输贮存

8.1 应制定阴极保护系统专项运输和贮存方案，形成规范化程序文件，作为运输贮存的指导性文件。

8.2 阴极保护设备的运输总体应符合国家包装运输有关规定。

8.3 运输前应用软质材料对辅助阳极阳极面、参比电极电极体进行保护，防止划伤损坏。

8.4 运输时应应对直流电源运输机柜触摸屏、进出风口进行保护，防止磕碰，应采用木制箱体包装运输，避免机柜漆面破损。

8.5 电缆的运输和贮存应符合国家有关要求。

8.6 投运前，阴极保护设备应在室内贮存，并对设备状态定期检查和记录。

9 安装施工

9.1 一般规定

9.1.1 阴极保护系统安装和施工管理应符合国家健康和安全管理规定。

9.1.2 为实现预期设计功能，阴极保护系统的安装应符合 4.1~4.6 中的设计要求。

9.1.3 应选择对周围其他结构影响小、损坏概率低的地点进行系统安装。

9.1.4 应按照施工图样进行阴极保护系统的安装施工。

9.2 安装准备

9.2.1 电连续性要求

9.2.1.1 应对钢结构进行电连接，并满足 4.6.1 的要求。

9.2.1.2 根据电连续性测试结果，对施工图、钢结构进行评估，确定是否需要增加电连接。

9.2.2 电绝缘要求

涂漆的阴极保护部件与无阴极保护部件之间应设置绝缘装置。

9.3 通用安装要求

9.3.1 阳极（包括辅助阳极或牺牲阳极）和参比电极安装

9.3.1.1 应使用已被试验或工程实践证明的方法和工艺进行阳极和参比电极的安装。

9.3.1.2 严禁阳极、参比电极与任何金属构件发生短路。

9.3.1.3 阳极的安装应符合下列要求：

- a) 阳极与结构的连接方法取决于其类型和施工方式，但在阳极的整个使用寿命中均需保持低电阻连接；
- b) 阳极宜采用连续焊接的方式将其钢芯连接到需保护的钢结构上，以使焊件位置应力最小化；
- c) 阳极的钢芯可用螺栓固定在分离的支架上，支架则通过连续焊接连接到钢结构上，每个支架至少使用两个螺栓；
- d) 当低水动力阻力较低时，应优化阳极的形状和连接方法。

9.3.1.4 参比电极的安装应符合下列要求：

- a) 安装时应采取有效预防措施避免参比电极与钢结构直接接触，如安装隔离箱（见附录 E.2）；
- b) 参比电极应安装在能代表各阴极保护区平均电位的位置；
- c) 应在结构电位有可能超出设定限值的地方安装附加参比电极。

9.3.2 阳极和参比电极的电缆连接

9.3.2.1 每个阴极保护区都应配置多根与阳极、参比电极连接的电缆。

9.3.2.2 阳极、参比电极与电缆的连接和安装方法应通过试验或工程实践证明，并满足电连接要求。

9.3.2.3 电缆与阳极和参比电极的接头应进行加固与密封处理，并用密封接线盒保护。

9.3.3 电气安装

9.3.3.1 应将交流电缆与低压直流电缆、参比电极测量电缆分开。

9.3.3.2 直流电源输出端、接线盒及其连接端的电缆应进行标识。

9.3.3.3 电缆应有完善的支撑和保护以避免环境、人为或其他的破坏。

- 9.3.3.4 阳极和参比电极的电缆连接接头应在密封罩或接线盒内。
- 9.3.3.5 密封罩和接线盒应采取完善的防水密封措施。
- 9.3.3.6 直流电源输出电压超过 24 V 时，阳极应设置隔离系统，避免人与其直接接触。
- 9.3.3.7 按照相关核电厂标准对设备的电气安全、测试和维护进行标识。
- 9.3.3.8 电缆与阴极的接点应保持良好的电性连接，并采取防腐处理，建议采用 316 L 不锈钢或更耐腐蚀的紧固件。

9.4 外加电流系统

9.4.1 电源设备

- 9.4.1.1 电源设备应安装在便于操作、易于检修的地方，预留足够空间用于电缆安装、检测与维护。
- 9.4.1.2 电源设备与阴极保护电缆的连接应符合设计要求，接线正确，电性连接良好，电缆标识明确。
- 9.4.1.3 直流电源设备应置于通风良好、清洁的环境中，安装在户外时，应设置防尘、防水、防腐蚀的保护罩。

9.4.2 辅助阳极和参比电极

- 9.4.2.1 辅助阳极和参比电极的安装应根据被保护钢结构的类型，在不影响被保护钢结构设备正常运行的前提下，采用镶嵌式、悬臂式或支架式安装结构。
- 9.4.2.2 对于采用恒电位仪的外加电流阴极保护系统，其控制用参比电极应远离辅助阳极。

9.4.3 轴接地装置

轴接地装置应安装在干燥、无油污、便于观察及维护处。

9.5 牺牲阳极系统

- 9.5.1 安装前，应进行安全检查，避免在阳极附近使用明火或热源，以免引发火灾或爆炸。
- 9.5.2 应彻底清除阳极表面的油污、氧化物等杂质，使阳极表面呈现金属光泽，提高防腐效率。
- 9.5.3 阳极可通过电缆与钢结构实现电连接，也可直接焊接在钢结构上。
- 9.5.4 阳极应以电流最优分布的方式安装在被保护钢结构上。
- 9.5.5 采用焊接法连接时，焊接应牢固，焊缝饱满、无虚焊。
- 9.5.6 当阳极紧贴钢表面安装时，阳极背面或钢表面应涂覆涂层或安装绝缘屏蔽层。
- 9.5.7 安装完成后，应对阳极进行全面检查，包括阳极的固定情况、与被保护设施的连接情况、回填料的使用情况等。
- 9.5.8 阳极宜采用连续焊接的方式将其钢芯连接到需保护的结构上，以最小化焊件位置处应力。

9.6 安装测试

- 9.6.1 应对所有回路极性进行检查。
- 9.6.2 应对所有回路的电连接性进行检查。

9.6.3 应对所有回路进行绝缘检查，以确保直流电源的正极电缆与负极电缆、参比电极电缆与测量接地电缆之间是电绝缘的。

9.6.4 应按照 CB 3220 进行直流电源测试。

10 调试验收

10.1 一般规定

10.1.1 应在阴极保护系统投运前完成阴极保护系统调试。

10.1.2 阴极保护系统应按照有关标准、订货合同要求验收。

10.1.3 应对阴极保护系统进行全面检查，确保外观整洁、安装无误、正确标识。

10.2 通电测试

阴极保护系统通电测试包括通电前测试和通电测试，具体要求可按照 GB/T 33423—2024 进行。

10.3 调试要求

阴极保护系统调试应符合下列要求：

- a) 应将系统的保护电位调整至满足 4.2 中保护电位要求；
- b) 阴极保护系统应在初始设置电位下极化一定长的时间（通常在 3 d~5 d 之间），然后进行初始性能评估。

10.4 性能评估

阴极保护系统性能应符合下列要求：

- a) 用固定参比电极测量钢结构的保护电位，应符合 4.2 中保护电位要求；
- b) 用便携式参比电极测量敞开结构的保护电位，应符合 4.2 中保护电位要求；
- c) 测量直流电源输出电流、输出电压，测量值变化应平稳，并在设计范围内且有裕量。

10.5 验收要求

10.5.1 阴极保护系统竣工验收时，应满足下列要求：

- a) 竣工验收的阴极保护系统符合设计要求；
- b) 提交的技术文件齐全、完整；
- c) 系统外观检查、工程质量符合设计要求；
- d) 按设计要求进行测试和检验，并作记录。

10.5.2 为指导后续阴极保护系统运维管理，交接验收时还应提交下列技术文件：

- a) 实际施工图；
- b) 设计变更文件；
- c) 产品和设备的说明书、合格证件、试验记录、安装图样等技术文件；
- d) 安装施工记录；
- e) 调试试验记录、阴极保护参数记录；
- f) 隐蔽工程记录（电缆敷设、汇流点、阳极装置、检查片等）。

11 监检测

11.1 一般规定

11.1.1 阴极保护系统监检测数据是阴极保护系统评价的主要依据。

11.1.2 为保证阴极保护系统正常运行，应按照 GB/T 21246—2020 进行阴极保护参数的检查测量。

11.1.3 为了解阴极保护系统的变化，应按照 GB/T 21246—2020 定期进行阴极保护参数监测。

11.2 设计要求

11.2.1 监检测系统应能适应所处环境，户外布置时，其保护外壳应能抵御海水飞溅、盐雾、雨水、紫外线和海洋腐蚀，测量导线和仪器的连接点应绝缘密封。

11.2.2 监检测系统应具有测量并显示钢结构保护电位、电源设备的输出电流和输出电压等基本功能，有条件时，宜采用具有远距离遥测、遥控和分析评估功能的设备和系统。

11.2.3 可在传统阴极保护系统中引入智能化技术（人工智能技术、物联网技术、虚拟现实技术、数字孪生技术等）和智慧化运维理念，对阴极保护系统进行智能化监测和预警，以实现安全、经济、长周期和绿色环保的监检测。

11.3 监检测设备

11.3.1 开展监检测所需的仪器和设备包括：

- a) 万用表；
- b) Cu/CuSO_4 或 Ag/Cl 参比电极；
- c) 介质电阻率测试仪器；
- d) 接地电阻测量仪；
- e) 其他可用于阴极保护系统测量评价的仪器设备。

11.3.2 海水中氯离子含量较高时，不宜使用 Cu/CuSO_4 参比电极进行测量。

11.4 监检测项目

监检测项目应能反映阴极保护系统的实际运行情况，至少包括以下参数：

- a) 被保护钢结构各位置处的保护电位；
- b) 阴极保护电源的输出电流、电压及运行参数；
- c) 外加电流阳极床接地电阻；
- d) 牺牲阳极开路电位、输出电流、单只阳极的输出电流和接水电阻、组合阳极的总输出电流和总接水电阻；
- e) 其他影响阴极保护系统功能的参数。

11.5 监检测周期

11.5.1 阴极保护系统监检测可分为日常检测、定期检测和实时监测。

11.5.2 日常检测应每日测量记录阴极保护设备的运行参数，以及时发现设备故障。

11.5.3 定期检测为定期（如每年）对阴极保护设备进行检修维护，以发现预兆，预防实际故障发生。

11.5.4 应根据设备类型、系统腐蚀风险、环境条件及其他要求确定具体的监检测周期。

- a) 直流电源设备每两月应至少检查一次，运行是否正常的判据是：电流输出、功耗、设备的指示信号或被保护钢结构的阴极保护水平；
- b) 外加电流系统保护设施应至少每年检查一次，检查内容应包括电气运行状态、接地点、仪表精度、效率及系统回路电阻；
- c) 反向电流开关、二极管、干扰跨接和其他保护装置等，每两月应进行至少一次功能检查。

11.6 注意事项

11.6.1 电位测量

电位测量时应注意以下事项：

- a) 钢结构的电位测量可用连接到参比电极的高阻抗电压表测量，参比电极应尽可能靠近要检查的钢表面；
- b) 对于浮船坞等敞开式结构，可用便携式铜/饱和硫酸铜参比电极定期测量水中结构物的保护电位；
- c) 如测量电路为永久连接，应注意不要将电流输送到参比电极，避免参比电极发生极化并给出错误读数。

11.6.2 参比电极

参比电极使用时应进行校准：

- a) 现场测量用参比电极应在测量前后按照 GB/T 31316—2014 中的要求进行校准；
- b) 对于不能从固定位置拆卸参比电极的结构，应使用便携式参比电极进行校准，并与长效参比电极近距离放置。

11.6.3 输出电流

输出至每个阳极的电流应在相应的直流电源输出端或所用的配电箱处测量。

11.6.4 电源控制

为保障直流电源控制，应配备以下控制设备或仪表：

- a) 测量直流输出电压的电压表；
- b) 测量直流输出强度的电流表；
- c) 过电压和短路保护装置；
- d) 应安装小时计记录直流电源的运行周期。

11.7 智能化监检测

应按照 GB/T 33378—2016 中 5.5.9 阴极保护在线监控专家系统要求，进行阴极保护系统智能化设计，将人工智能技术、物联网技术、虚拟现实技术、数字孪生技术应用于外加电流阴极保护工程全生命周期中，实现智能化监检测。阴极保护智能化监检测系统应具备以下功能：

- a) 可采用无线或有线方法传输数据及信息，若采用无线方法，则需要满足网络覆盖通讯条件；
- b) 可通过在线监检测方式定期采集通电电位、极化电位、交流干扰电压、交流电流密度、腐蚀速率等参数数据；
- c) 具备对所记录的阴极保护系统数据进行智能算法分析，并自动判断保护系统有效性的功能；
- d) 对数据采用规范化、标准化处理后，可按照业主要求进行数据传输，并存储到数据库中；

- e) 应设有反馈执行单元，可根据腐蚀源的变化情况智能控制电位参数，调整电源输出电流；
- f) 可基于在线监测获取的相关数据和智能算法分析，实时监测钢结构的阴极保护状态，检测失效异常，对阴极保护系统进行精确量化评估，诊断阴极保护系统可能存在的失效类型、失效位置、失效严重程度，预测失效变化趋势和外加电流阴极保护系统寿命。

12 运行维护

12.1 一般规定

12.1.1 阴极保护系统应按设计要求长期稳定运行。

12.1.2 阴极保护系统的运行及维护应遵守相关安全规定。

12.1.3 为确保阴极保护系统正常运行，应按照 11.1~11.6 中的要求定期进行阴极保护参数的测量和检查，监测阴极保护系统的变化。

12.1.4 应定期进行被保护钢结构腐蚀情况检查，如有明显腐蚀，应对阴极保护系统有效性进行检测。

12.1.5 应编制运行与维护手册，操作人员应按照运行与维护手册程序开展工作。运行维护手册应包含以下内容：

- a) 系统及系统组成说明；
- b) 调试报告；
- c) 竣工图纸；
- d) 供应商提交的技术资料；
- e) 日常维护和检查周期及程序；
- f) 性能评估及数据分析的周期和程序；
- g) 日常维护、检查和性能评估；
- h) 系统主要部件清单及安全操作指南。

12.2 外加电流系统

12.2.1 系统运行稳定后，应根据日常监测数据对输出电流进行调整，使整个外加电流系统达到最佳保护状态。

12.2.2 当被保护钢结构本体进行维护时，应切断直流电源，对外加电流系统也进行全面检查，检查内容包括：

- 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) 清洗轴接地装置的导电滑环及碳刷的油污，必要时可直接更换；
- f) 应定期对恒电位仪等电气设备进行全面维修保养。

12.2.3 应安排专人进行外加电流系统设备维护，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。

12.2.4 钢结构相关设施和设备维护完毕后，外加电流系统应及时投入正常运行。

12.3 牺牲阳极系统

12.3.1 保护度测量

应在腐蚀严重或代表性的部位安装与被保护钢结构材质相同的检查试片，每处安装两组试片，每组不少于3个试片，试片的尺寸和表面状态应一致，其中一组与钢结构电连接，另一组电绝缘。钢结构维护时，测量两组试样的腐蚀失重，称量精度为0.0001g。按式(14)计算保护度。在寿期内，保护度应不低于90%。

$$\epsilon = \frac{(Q_c - Q_p)}{Q_c} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中：

ϵ ——保护度，单位为百分数(%)；

Q_c ——绝缘试样的腐蚀失重，单位为克(g)；

Q_p ——电连接试样的腐蚀失重，单位为克(g)。

12.3.2 更换

牺牲阳极在达到设计保护年限后应进行更换，出现下列情况之一时应提前更换：

- a) 工作表面不溶解，或部分溶解且被保护钢结构无法达到最小保护电位；
- b) 阳极溶解速度过快，其余量已无法满足至下次检修间隔所需用量；
- c) 阳极消耗量超过初始设计值；
- d) 存在阳极脱落的风险。

13 文件记录

13.1 一般规定

13.1.1 与阴极保护系统有关的信息、数据和结果均应进行记录，包括：

- a) 腐蚀环境记录；
- b) 海上浮式钢结构记录；
- c) 阴极保护系统记录。

13.1.2 应对阴极保护有效性进行评价并记录，保存期限与系统服役年限一致，其他文件信息记录保存期限以合同要求为准。

13.1.3 对设计有智能化系统的阴极保护系统，应将智能设计、监检测、运维、管理所产生的全部数据分类录入数据库存档，并进行智能管理、分类、检索和趋势分析，以辅助运维决策。

13.2 腐蚀环境记录

应记录腐蚀环境以下特征信息：

- a) 海水盐度；
- b) 电阻率；
- c) pH值；
- d) 温度；
- e) 其他影响腐蚀的参数信息。

13.3 海上浮式钢结构记录

应记录海上浮式钢结构以下信息：

- a) 海上浮式钢结构的尺寸、材料等基本特征信息；
- b) 海上浮式钢结构采用的腐蚀控制措施及其施工建设规范；
- c) 绝缘装置、测试导线及其他测试装置设计参数、位置、及外部腐蚀相关控制措施的细节信息。

13.4 阴极保护系统记录

应按照 GB/T 33378—2016 进行阴极保护系统的设计信息、安装调试信息和运行维护信息的记录。

13.4.1 设计信息记录

13.4.1.1 外加电流系统

应记录外加电流系统以下设计信息，并保持更新：

- a) 设计标准信息，包括设计前提、设计寿期、阴极保护面积、电流密度要求、阳极输出电流的假设值等；
- b) 阳极的数量、尺寸、规格、阳极设备和连接的描述、有效输出电流密度和许用电压，以及制造商/供应商提供的其他参考资料和文件等。

13.4.1.2 牺牲阳极系统

应记录牺牲阳极系统以下设计信息，并保持更新：

- a) 设计标准信息，包括设计前提、设计寿命、选用的保护标准、阴极保护面积、电流密度需求、不同时期和工作条件下阳极输出电流的假设值、阳极理论效率和驱动电压等；
- b) 阳极数量、尺寸、质量、规格、合金成分、有效消耗速度（测试数据）以及制造商/供应商提供的其他参考资料和文件等。

13.4.2 安装调试信息记录

13.4.2.1 外加电流系统

应记录外加电流系统以下安装调试信息：

- a) 每个阳极的位置信息（标明所有与设计位置不一致的阳极）、安装日期信息等，该数据在钢结构的生命周期内应该保持更新；
- b) 外加电流系统仪器、设备安装位置和投运信息，如直流电源的安装位置、详细规格和输出特性及其工厂测试报告信息等；
- c) 电缆规格信息、绝缘类型信息；
- d) 调试过程产生的各项数据和调试结果信息，包括电位检查数据、各直流电源的电流和电压输出值，以及对非自动装置所作的任何调整措施。

13.4.2.2 牺牲阳极系统

应记录牺牲阳极系统以下安装调试信息：

- a) 每个阳极的位置安装信息（标明所有与设计位置不一致的阳极）、安装日期信息等，该数据在钢结构的生命周期内应该保持更新；

- b) 牺牲阳极系统仪器、设备安装位置和投运信息；
- c) 电缆规格信息、绝缘类型信息；
- d) 调试过程产生的各项数据和调试结果信息。

13.4.3 运行维护记录

13.4.3.1 应通过阴极保护监测系统进行日常运行数据记录，以跟踪钢结构保护电位水平状态的变化。

13.4.3.2 应对阴极保护系统的设备维护信息进行记录，具体包括：

- a) 恒电位仪或其他直流电源设备的维修记录；
- b) 阳极、接头、导线或电缆的维修或更换信息；
- c) 其他附件系统，如外部覆盖层、绝缘装置、测试导线和相关测试装置的维护、修理或更换记录。

附录 A

(资料性)

海上浮式结构的阴极保护电流需求和涂层击穿系数

A.1 裸钢在海水中的设计保护电流密度

对于船舶结构，其在海水中的设计保护电流密度可参考表 A.1 数值：

表 A.1 裸钢在海水中的设计保护电流密度

典型工况	裸钢的设计电流密度 mA/m ²	有涂层船舶的整体设计电流密度	
		干坞间隔 3 年	干坞间隔 5 年
接近静态			
无潮汐影响	100~200	5~10	8~16
有潮汐影响	150~250	7~13	12~20
航行状态			
速度 < 20 kn (约 10 m/s)	220~350	11~18	17~28
速度 ≥ 20 kn (约 10 m/s)	350~500	18~25	28~40
冰面上	500~750	35~55	60~90

对于浮动式海上风电结构其在海水中的设计保护电流密度可参考表 A.2、表 A.3 数值：

表 A.2 位于外部浸没区和常湿区的裸钢的设计保护电流密度（初期值/维持值/末期值）

海水标定流速 m/s	保护电流密度 mA/m ²			
	区域			
	热带地区 20 °C ~ 25 °C	亚热带地区 12 °C ~ 20 °C	温带地区 7 °C ~ 11 °C	北极地区 < 7 °C
0.3	160/45/95	185/55/110	210/60/120	250/75/150
0.5	175/50/100	205/60/120	230/65/130	275/80/160
0.75	200/55/105	240/65/128	265/70/170	320/85/170
1.0	225/60/110	270/70/135	300/75/180	360/90/180
1.5	265/70/145	315/85/170	350/95/190	420/115/230
2.0	315/80/160	380/95/190	420/105/210	505/130/250
2.5	354/85/165	460/100/200	460/110/220	550/130/265
3.0	390/100/195	470/120/240	520/130/260	625/155/310

注：海水标定流速可参考 ISO 24656。

表 A.3 位于内部浸没区的裸钢的设计保护电流密度（初期值/维持值）

含氧量 10^{-6}	保护电流密度 mA/m^2			
	区域			
	热带地区 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	亚热带地区 $12\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	温带地区 $7\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 11\text{ }^{\circ}\text{C}$	北极地区 $<7\text{ }^{\circ}\text{C}$
1	9/3	10/4	11/4	14/5
2	17/5	21/6	23/7	27/8
3	26/8	31/9	34/10	41/12
4	31/11	41/13	46/14	54/17
5	43/13	52/15	57/17	68/20
6	51/15	62/18	68/20	81/20
7	60/17	73/21	80/23	95/27
8	68/20	83/25	91/27	109/32
9	77/24	95/30	102/30	125/38

注：内部浸没区的海水标定流速均为 0。

在没有其它文献经验的情况下，可参考表 A.4 的数值：

表 A.4 裸钢在海水中的设计保护电流密度

环境介质	保护电流密度 mA/m^2		
	初期值	维持值	末期值
海水	150~180	60~80	80~100
海泥	25	20	20
海水混凝土或水泥砂浆包覆	10~25		

A.2 碳钢在海水中的设计保护电流密度

对于干净的碳钢，其在海水中的初始最大保护电流密度预估值如表 A.5：

表 A.5 碳钢在海水中的初始最大保护电流密度预估值

线性速度 m/s	碳钢初始阴极保护电流密度 ($7\text{ }^{\circ}\text{C}$) mA/m^2				
	含氧量 6×10^{-6}	含氧量 7×10^{-6}	含氧量 8×10^{-6}	含氧量 9×10^{-6}	含氧量 10×10^{-6}
0	68	80	91	102	114
0.3	78	91	105	118	131
0.4	82	85	109	123	136
0.6	89	103	118	133	148
1	102	119	136	153	170
2	136	159	182	205	227
4	205	239	273	307	341

A.3 用于阴极保护系统设计的常用涂料系统的涂层击穿系数值

A.3.1 用于海上浮式钢结构的涂料系统的涂层击穿系数可按式 (A.1) 计算:

$$f_c = a + bt \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

f_c ——涂料系统的涂层击穿系数;

a 、 b ——涂层破损系数, 根据涂层类型和海水环境确定, 详见 DNV RP B401—2021;

t ——使用年限。

A.3.2 初期、平均和末期涂层击穿系数可按式 (A.2)、式 (A.3) 和式 (A.4) 计算:

$$f_{ci} = a \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

$$f_{cm} = a + b \times \frac{t}{2} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

$$f_{cf} = a + b \times \frac{t_f}{2} \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

f_{ci} ——涂料系统的初期涂层击穿系数;

f_{cm} ——涂料系统的平均涂层击穿系数;

f_{cf} ——涂料系统的末期涂层击穿系数;

t_f ——涂料系统的末期涂层击穿系数。

A.3.3 如按式 (A.3) 和式 (A.4) 计算所得值超过 1, 则应按 1 计算。

A.3.4 当阴极保护系统的设计寿命超过按照涂料系统的实际计算寿命时, 可按式 (A.5) 计算涂料系统的平均涂层击穿系数:

$$f_{cm} = 1 - b \times \frac{(1-a)^2}{2 \cdot b \cdot t_f} \quad \dots\dots\dots (A.5)$$

A.3.5 用于船舶系统的涂料系统的涂层击穿系数可参考以下数值。

- a) 初始涂层击穿系数一般为 1%~2%;
- b) 参照 ISO 12944-1 和 ISO 12944-2, 处于 Im 2 类腐蚀环境的不同耐久性的涂层的年折损率 (涂层破损系数年增加值):
 - 低耐久性涂层为 3%;
 - 中耐久性涂层为 1.5%;
 - 高耐久性涂层为 0.5%。
- c) 处于高速航行状态 (>12.86 m/s) 或在冰面等恶劣条件下服役的涂层其年折损率更高。

A.3.6 其他海上钢结构涂料系统的涂层击穿系数可参考以下数值。

- a) 初始涂层击穿系数: 浸没区为 1%~2%;
- b) 折损率: 每年 1%至 1.5%;

A.3.7 通常的涂料系统包括至少两层常温固化涂料 (煤焦油环氧、环氧等), 干膜厚度为 250 μm ~500 μm 。

附录 B
(资料性)
牺牲阳极设计计算

B.1 牺牲阳极发生电流计算

牺牲阳极的发生电流按式 (B.1) 计算：

$$I_a = \frac{\Delta E}{R} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- I_a ——单只阳极的发生电流，单位为安培 (A)；
- ΔE ——阳极驱动电位，单位为伏特 (V)；锌合金阳极取 0.25 V，铝合金阳极取 0.30 V；
- R ——阳极接水电阻，单位为欧姆 (Ω)。

铁和钢 (碳钢)、高强度钢一般使用铝合金牺牲阳极或锌合金牺牲阳极，不锈钢通常采用铁合金牺牲阳极或高电位铝合金牺牲阳极。

B.2 牺牲阳极电阻 (R_a) 公式

距钢结构表面 0.3 米以上位置安装的细长阳极，如果其长度不小于其半径的 4 倍，即 $L \geq 4r$ ，则其电阻 (R_a) 按公式 (B.2) 计算：

$$R_a = \rho / 2\pi \times [\ln(4L/r) - 1] \dots\dots\dots (B.2)$$

如果其长度小于其半径的 4 倍，即 $L < 4r$ ，则其电阻 (R_a) 按公式 (B.3) 计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2\pi L} \times \left\{ \ln \left[\frac{2L}{r} \times \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right) \right] + \frac{r}{2L} - \sqrt{1 + \left(\frac{r}{2L} \right)^2} \right\} \dots\dots\dots (B.3)$$

平板阳极电阻按公式 (B.4) 计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2S} \dots\dots\dots (B.4)$$

圆盘状阳极电阻按公式 (B.5) 计算：

$$R_a = \frac{\rho}{2d} \dots\dots\dots (B.5)$$

其他形状阳极电阻按公式 (B.6) 计算：

$$R_a = 0.315 \frac{\rho}{\sqrt{A}} \dots\dots\dots (B.6)$$

式中：

- R_a ——阳极电阻，单位为欧姆 (Ω)；
- ρ ——环境电阻率，单位为欧姆米 ($\Omega \cdot m$)；
- L ——阳极长度，单位为米 (m)；
- r ——阳极半径 (对于其他形状的圆柱形， $r = C/2\pi$ ，其中 C 为截面周长)，单位为米 (m)；
- S ——阳极长度和宽度的算术平均值，单位为米 (m)；
- d ——阳极直径，单位为米 (m)；
- A ——阳极的外表面积，单位为平方米 (m^2)。

在没有任何有关环境的平均电阻率资料的情况下，可以使用下列数值范围：

- 冷水：0.30 Ω·m~0.35 Ω·m；
- 温暖海水：0.15 Ω·m~0.25 Ω·m；
- 盐水泥浆：0.70 Ω·m~1.70 Ω·m。
- 对于微咸水，电阻率随含盐量的不同而波动较大（0.20Ω·m至10Ω·m）。

B.3 牺牲阳极平均发生电流计算

牺牲阳极平均发生电流按式（B.7）计算。

$$I_m = 0.7 I_a \dots\dots\dots (B.7)$$

式中：

- I_m ——牺牲阳极平均发生电流，单位为安培（A）；
- I_a ——牺牲阳极发生电流的数值，单位为安培（A）。

B.4 牺牲阳极寿命

阳极寿命（Y）可按公式（B.8）确定：

$$Y = \frac{Q \times G}{8760 I_m} \times \frac{1}{k} \dots\dots\dots (B.8)$$

式中：

- Y——阳极使用寿命，单位为年（a）；
- Q——阳极实际电容量，单位为安培小时每千克（A·h/kg）；
- G——每只阳极的重量，单位为千克（kg）；
- 1/k——阳极的利用系数，推荐系数值可参考表 B.1；
- I_m ——每只阳极平均发生电流，单位为安培（A）。

表 B.1 各形状阳极利用率推荐值

环境介质	保护电流密度 mA/m ²		
	初期值	维持值	末期值
海水	150~180	60~80	80~100
海泥	25	20	20
海水混凝土或水泥砂浆包覆	10~25		

B.5 牺牲阳极数量

阳极数量（N）可按公式（B.9）确定：

$$N = \frac{I}{I_a} \dots\dots\dots (B.9)$$

式中：

- N——牺牲阳极的数量，单位为只（只）；
- I——保护电流的数值，单位为安培（A）；
- I_a ——每只阳极发生的电流，单位为安培（A）。

附录 C

(资料性)

外加电流阳极的典型电化学特性

外加电流阳极的典型电化学特性见表 C.1。

表 C.1 外加电流阳极的典型电化学特性

阳极类型	电流密度 A/m ²		消耗率 g/(A·a)	使用寿命 a
	最大	通常		
铅-银合金	350	50~180	≤100	10~20
铅-银微铂	600	150~450	≤8	20~30
铂-铌复合丝、板	2 000	500~1 000	≤0.006	
铂-钛复合丝、板		500		
钛基金属氧化物阳极	1 000	500~600	≤0.005	

附录 D

(资料性)

辅助阳极绝缘屏蔽层的计算

圆形阳极屏蔽层边缘处的电位 (E) 按公式 (D.1) 计算:

$$E = E_C - \frac{\rho \cdot I}{D \cdot \pi} \quad \dots\dots\dots (D.1)$$

当 $B^2 > (A^2 - L_a^2)$ 时, 矩形阳极屏蔽层边缘处的电位 (E_{as}) 按公式 (D.2) 计算:

$$E_{as} = E_C - \left[\frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L_a} \right] \cdot \ln \left[\frac{(A + L_a)}{(A - L_a)} \right] \quad \dots\dots\dots (D.2)$$

当 $B^2 < (A^2 - L_a^2)$ 时, 长条矩形阳极屏蔽层边缘处的电位 (E_{as}) 按公式 (D.3) 计算:

$$E_{as} = E_C - \left[\frac{\rho \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot L_a} \right] \cdot \ln \left[\frac{(X + L_a)}{(X - L_a)} \right] \quad \dots\dots\dots (D.3)$$

式中:

I ——阳极的额定输出电流, 单位为安培 (A);

ρ ——环境电阻率, 单位为欧姆米 ($\Omega \cdot m$);

D ——屏蔽层直径, 单位为米 (m);

A ——屏蔽层长度, 单位为米 (m);

B ——屏蔽层宽度, 单位为米 (m);

L_a ——阳极长度, 单位为米 (m);

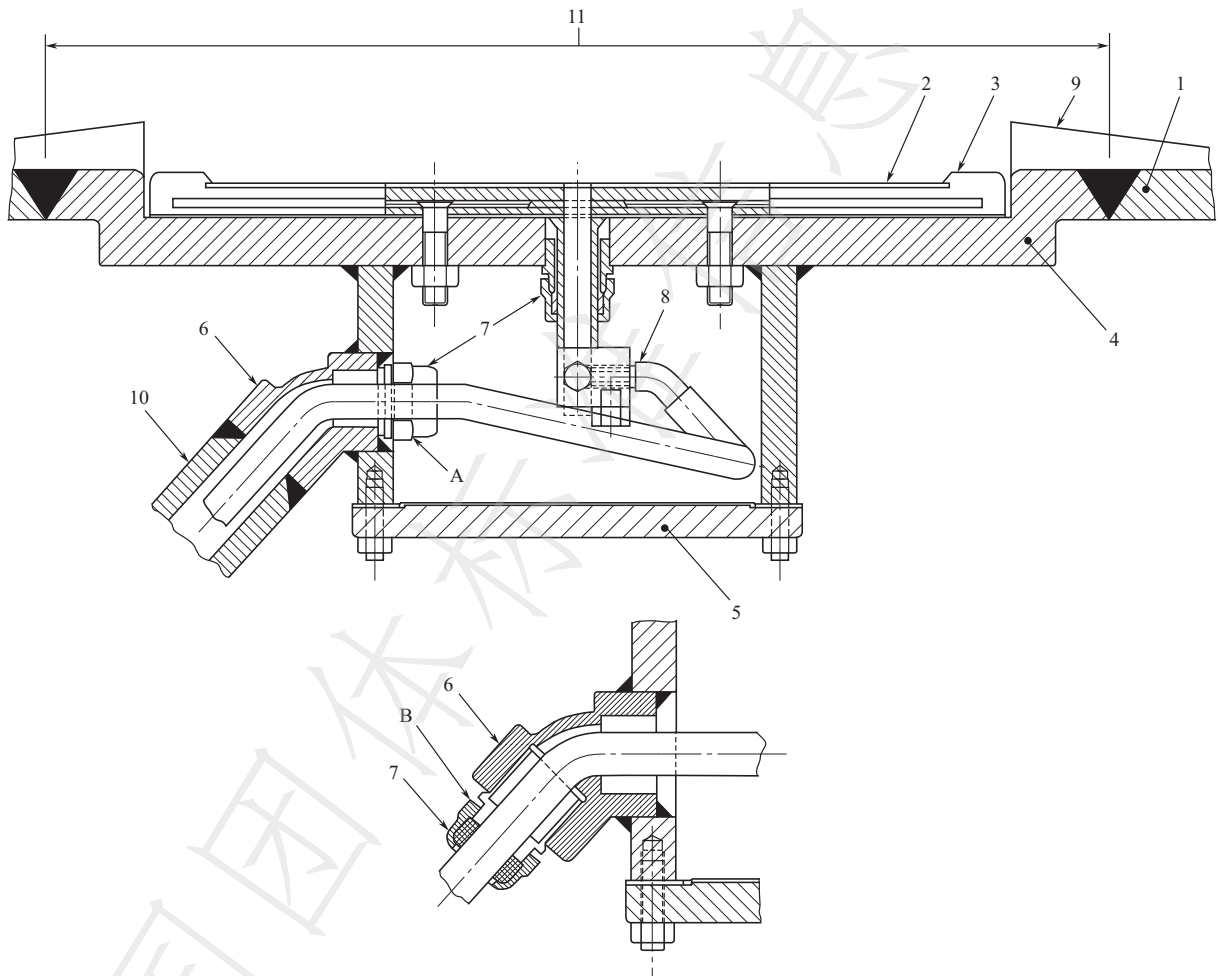
E_C ——结构保护电位, 单位为伏特 (V);

X —— $\sqrt{(L_a^2 + B^2)}$ 。

附录 E
(资料性)
隔离箱布置

E.1 辅助阳极隔离箱安装结构示意图

船用嵌入式辅助阳极的隔离箱安装示意图如图 E.1 所示。



注 1: 安装在舱内时, 压盖 (A) 安装在围堰内;

注 2: 安装在空隙处时, 压盖 (B) 安装在隔离箱外侧。

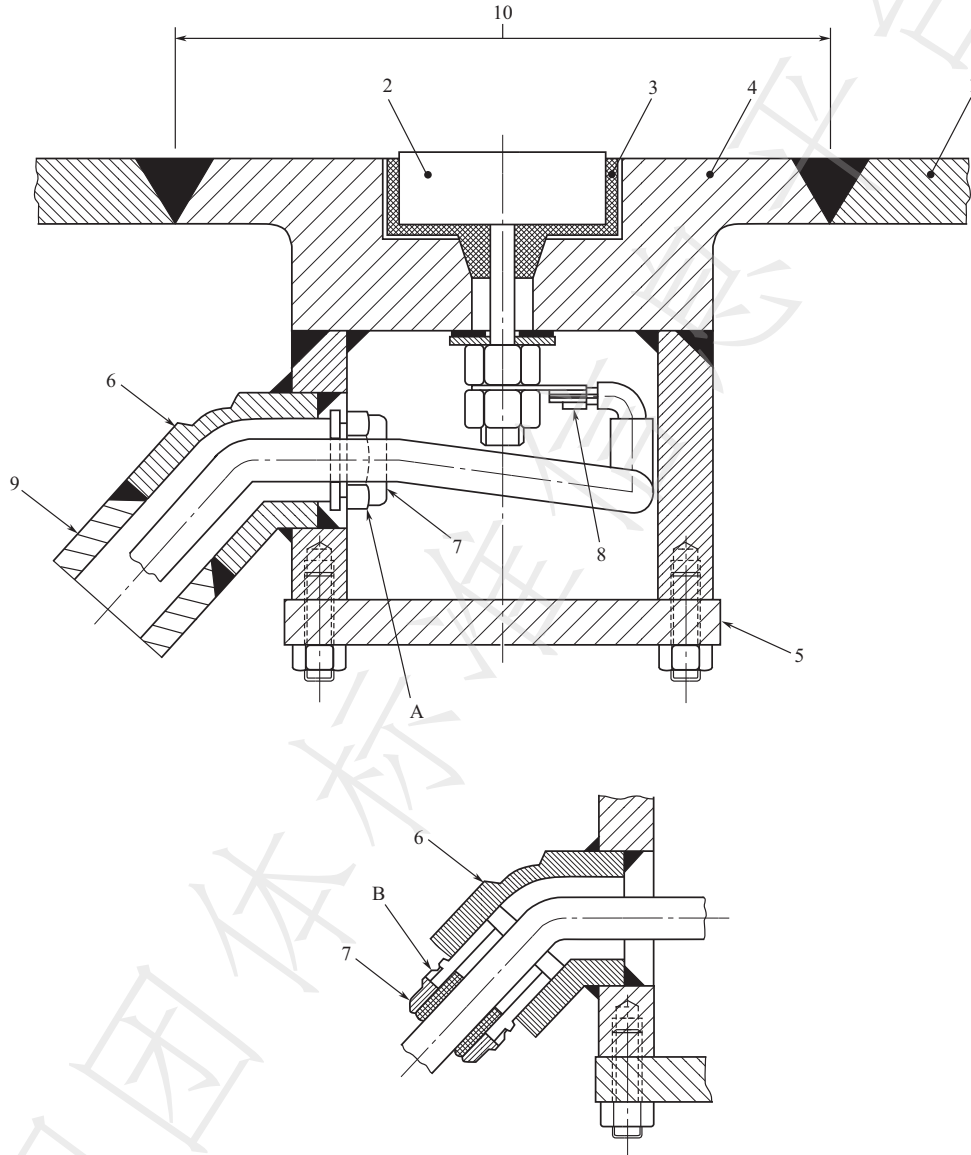
标引序号说明:

- | | |
|----------------|--------------|
| 1——船壳板; | 7——电缆密封头; |
| 2——带涂层的 Ti 阳极; | 8——电插头; |
| 3——阳极塑料屏蔽装置; | 9——阳极屏蔽; |
| 4——船体隔离箱和连接件; | 10——压载水舱电缆管; |
| 5——隔离箱盖板; | 11——船壳板开口。 |
| 6——电缆管弯头; | |

图 E.1 典型嵌入式辅助阳极的隔离箱安装示意图

E.2 参比电极隔离箱安装结构示意图

船用参比阳极的隔离箱安装示意图如图 E.2 所示。



注 1: 安装在舱内时, 压盖 (A) 安装在围堰内;

注 2: 安装在空隙处时, 压盖 (B) 安装在隔离箱外侧。

标引序号说明:

- | | |
|----------------|-------------|
| 1——船壳板; | 6——电缆管弯头; |
| 2——参比电极; | 7——电缆密封头; |
| 3——参比电极塑料屏蔽装置; | 8——电插头; |
| 4——船体隔离箱和连接件; | 9——压载水舱电缆管; |
| 5——隔离箱盖板; | 10——船壳板开口。 |

图 E.2 典型参比阳极的隔离箱安装示意图

参 考 文 献

- [1] DNV RP B401—2021 Cathodic protection design.
 - [2] ISO 12944—1: 2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 1: General introduction.
 - [3] ISO 12944—2: 2017 Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of environments.
-

中国腐蚀控制技术协会
团体标准

海上浮式钢结构阴极保护

T/CCCTA 0060—2025

出版发行：化学工业出版社

(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

北京科印技术咨询服务有限责任公司数码印刷分部

880mm×1230mm 1/16 印张2½ 字数68.1千字

2025年9月北京第1版第1次印刷

书号：155025·4335

购书咨询：010-64518888

售后服务：010-64518899

网址：<https://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定价：31.00元

版权所有 违者必究