外加电流阴极保护系统在海洋工程结构陆地预安装中的技术难点与对策

张 旺

珠海市红海人力资源有限公司 广东珠海

【摘要】海洋工程结构长期处于复杂海洋环境，外加电流阴极保护系统对其防腐蚀至关重要。陆地预安装中，该系统面临诸多技术难题。如电流分布不均影响保护效果，海洋生物附着干扰系统运行，安装空间受限增加施工难度，且与其他系统兼容性差。通过优化阳极布置、研发防附着技术、创新安装工艺及强化系统兼容性设计等对策，可有效提升外加电流阴极保护系统在陆地预安装中的性能，保障海洋工程结构的耐久性与安全性。

【关键词】外加电流阴极保护；海洋工程结构；陆地预安装；技术难点；解决对策

【收稿日期】2025 年 6 月 11 日 【出刊日期】2025 年 7 月 10 日 【DOI】10.12208/j.jer.20250321

Technical challenges and solutions for alternating current cathodic protection systems in land pre-installation of offshore structures

Wang Zhang

Zhuhai Honghai Human Resources Co., Ltd., Zhuhai, Guangdong

【**Abstract**】Offshore structures are exposed to complex marine environments over extended periods, making alternating current cathodic protection systems crucial for corrosion resistance. However, land-based pre-installation faces multiple technical challenges, including uneven current distribution affecting protection effectiveness, marine biofouling interfering with system operation, installation space constraints increasing construction difficulty, and poor compatibility with other systems. By optimizing anode placement, developing anti-fouling technologies, innovating installation techniques, and enhancing system compatibility design, the performance of alternating current cathodic protection systems in land pre-installation can be significantly improved, ensuring the durability and safety of offshore structures.

【**Keywords**】Alternating current cathodic protection; Offshore structures; Land pre-installation; Technical challenges; Solutions

引言

海洋工程结构，如海上石油平台、跨海大桥及海底管道等，在海洋资源开发与海上交通等领域作用关键。因其长期处于高盐、潮湿且有海浪冲击的海洋环境，极易遭受腐蚀。外加电流阴极保护系统能有效抑制金属腐蚀，延长结构使用寿命。但在陆地预安装阶段，该系统面临系列技术挑战，研究这些难点并探寻对策，对保障海洋工程结构安全稳定运行、降低维护成本意义重大。

1 电流分布不均匀问题及解决措施

在陆地预安装外加电流阴极保护系统时，电流分布不均匀是一大核心难题。海洋工程结构的复杂形态为电流均匀分布设置了重重障碍。以海上石油平台的导管架为例，其由众多规格各异、相互交错的杆件构成不规则立体结构。当外加电流阴极保护系统启动运行，电流会遵循欧姆定律，优先选择电阻最小的路径传导，这就导致结构表面各区域电流密度差异显著。在拐角、边缘等部位，由于空间几何特性，电流容易出现聚集现象，使该区域电位过负，引发过保护效应，金属内部氢原子积聚形成氢脆，降低材料机械性能，埋下安全隐患。

解决电流分布不均匀问题，优化阳极布置是关键突破口。在设计阶段，需借助数值模拟技术构建精准的模型。通过输入海洋工程结构的详细参数，包括形状、尺寸、材料特性等，对不同阳极布置方案进行模拟分析。根据模拟结果，精确计算各部位所需的保护电流强度，从而合理确定阳极数量、安装位置及间距。对于复杂异形结构，增设辅助阳极是行之有效的方法[1]。在海上石油平台导管架预安装中，在电流易集中的拐角处和电流供应不足的隐蔽区域，布置小型辅助阳极，能够有效分散聚集电流，补充薄弱区域电流供应，改善整体电流

分布状况。

阳极布置的优化并非一蹴而就，需要结合实际施工过程进行动态调整。在陆地预安装过程中，通过实时监测各区域的电流密度和电位分布情况，收集数据并与模拟结果对比分析。若发现实际电流分布与预期存在偏差，及时调整阳极位置或更换阳极材料[2]。建立阳极布置效果评估体系，对不同阳极布置方案在实际应用中的保护效果进行长期跟踪和评价，总结经验教训，为后续海洋工程结构外加电流阴极保护系统的设计和安装提供参考依据，持续优化电流分布解决方案，保障海洋工程结构的安全稳定运行。

2 海洋生物附着干扰及应对策略

海洋生物附着是外加电流阴极保护系统陆地预安装过程中不可忽视的挑战。海洋生态系统生物种类丰富多样，贝类、藻类、藤壶等生物具有极强的附着能力。在陆地预安装阶段，虽然系统尚未真正投入海洋环境，但在存储、运输及安装过程中，一旦接触到含有海洋生物幼体或孢子的水体，这些生物就会迅速附着在保护系统的阳极和被保护金属表面。生物附着后，会在金属表面逐渐形成一层生物膜，生物膜的存在改变了金属表面的电化学性质，增加了表面电阻，阻碍电流传导，降低阴极保护系统的效率。

应对海洋生物附着干扰，研发防附着技术是首要任务。从涂料技术角度出发，开发新型防污涂料是重要方向。新型防污涂料通过特殊的化学成分和表面结构设计，抑制海洋生物的附着行为。含有机硅成分的防污涂料，因其表面具有低表面能特性，表面光滑，海洋生物难以在上面附着生长；含杀生剂的涂料则通过缓慢释放杀生剂，在金属表面形成一定浓度的防护层，驱赶或杀死靠近的海洋生物，阻止其附着[3]。在实际应用中，可根据海洋工程结构的使用环境和需求，选择合适的防污涂料，并优化涂料的涂刷工艺，确保涂料均匀覆盖，形成完整的防护膜。

除了涂料技术，物理防污方法也能发挥重要作用。利用超声波技术，定期向被保护结构发射特定频率和强度的超声波，超声波产生的机械振动和空化效应能够干扰海洋生物的附着行为，使生物幼体难以附着在金属表面。在阳极和金属表面安装防护网，可有效阻止大型海洋生物的附着，减少生物附着对阴极保护系统的影响。在实际工程中，将多种防附着技术结合使用，能够产生协同效应，显著提高防附着效果[4]。在海底管道陆地预安装时，先在管道表面涂刷防污涂料形成化学防护层，再在关键部位安装防护网进行物理防护，同时配合超声波技术定期清理，多管齐下，有效降低海洋生物附着对阴极保护系统的干扰，保障系统正常运行。

3 安装空间受限难题与处理办法

海洋工程结构陆地预安装过程中，安装空间受限是常见且棘手的问题。一方面，陆地预安装场地的外部环境会对施工空间造成限制。在一些小型码头改造工程中，周边已有的建筑物、设施以及狭窄的场地通道，使得大型安装设备难以进入和操作。另一方面，海洋工程结构自身的构造特点也会导致内部安装空间狭小。以海底管道为例，其内部空间有限，在安装阴极保护系统的电极和电缆时，施工人员活动空间极为狭窄，传统的大型安装设备和工具无法施展，增加了施工难度和安全风险。在有限的空间内进行安装作业，施工效率低下，需要投入更多的人力和时间成本，给工程进度和成本控制带来挑战。

为解决安装空间受限难题，创新安装工艺势在必行。研发小型化、轻量化的安装设备是重要途径。针对海底管道内部狭小空间的安装需求，设计专门的微型机器人。这种微型机器人体积小巧，能够灵活地在管道内移动，携带电极和电缆等部件，通过远程控制或自主导航系统，精准地完成安装工作。微型机器人的应用不仅提高了安装效率，还降低了人工操作的安全风险。优化安装流程，采用模块化安装方式[5]。将阴极保护系统拆分成多个功能模块，在工厂环境下预先完成各模块的组装和调试，然后运输到施工现场进行快速拼接。在海上风电基础陆地预安装中，将阳极、参比电极和电缆等部件组装成标准化模块，在有限的空间内，施工人员可以快速、便捷地完成模块安装，大大提高了安装效率。

除了设备和流程创新，利用先进的导向和定位技术也至关重要。在狭小空间内进行安装作业，安装精度直接影响系统的运行效果。采用激光导向、卫星定位等先进技术，实时监测和调整安装部件的位置和角度，确保安装精度。通过高精度的导向和定位，减少因安装误差导致的重复操作，避免资源浪费，进一步提高安装效率[6]。建立安装质量检测体系，在安装过程中对各环节进行严格检测，及时发现和纠正安装偏差，确保阴极保护系统在空间受限的环境下能够高质量完成安装，为海洋工程结构的正常运行提供保障。

4 与其他系统兼容性问题及优化方案

海洋工程结构功能复杂，通常配备多种系统，如电气系统、通信系统、监测系统等，外加电流阴极保护系统需要与这些系统协同工作。然而，在陆地预安装阶段，各系统间的兼容性问题频繁出现。阴极保护系统运行

时产生的变化电流和电位，会形成较强的电磁场，对电气系统的正常运行产生干扰。这种干扰可能导致电气设备出现误动作、电压波动等问题，影响设备的稳定运行。在通信系统方面，阴极保护系统产生的电磁干扰会使通信信号发生衰减、失真，降低通信质量，甚至导致通信中断。对于监测系统，阴极保护系统的干扰会影响传感器数据采集的准确性，使监测结果出现偏差，无法真实反映海洋工程结构的实际状态，给工程的安全运行带来隐患。反之，其他系统产生的电磁辐射等也会对阴极保护系统造成干扰，降低其保护性能，影响保护效果。

解决与其他系统兼容性问题，强化系统兼容性设计是核心。在设计阶段，需对各系统进行综合规划，充分考虑系统间的相互影响。对阴极保护系统的电路进行优化设计，采用屏蔽电缆和滤波装置。屏蔽电缆能够有效隔离电磁场，减少电流和电位变化对其他系统的电磁干扰；滤波装置则可以过滤掉电路中的杂波，稳定电流和电位输出[7]。针对电气系统和通信系统，在布线设计时，合理规划线路走向，使其远离阴极保护系统的强电场区域，降低电磁干扰的影响。在海上石油平台陆地预安装中，将阴极保护系统的电缆与电气、通信电缆分开铺设，并对电缆进行屏蔽处理，有效减少了各系统间的相互干扰，保障了系统的稳定运行。

对监测系统的传感器进行抗干扰设计也不可或缺。通过改进传感器的电路结构、采用抗干扰材料以及优化信号处理算法等方式，提高传感器对阴极保护系统干扰的抵抗能力。建立系统间的协同工作机制，制定统一的通信协议和数据交互标准，确保各系统之间能够准确、稳定地进行数据传输和信息共享。在实际运行过程中，加强对各系统运行状态的监测和分析，及时发现兼容性问题并采取相应的解决措施[8]。通过对各系统的协同优化设计和持续改进，确保外加电流阴极保护系统与其他系统在海洋工程结构中能够稳定、高效地协同工作，共同保障海洋工程结构的安全可靠运行。

5 结语

外加电流阴极保护系统在海洋工程结构陆地预安装中虽面临诸多技术难点，但通过采取优化阳极布置、研发防附着技术、创新安装工艺及强化系统兼容性设计等对策，可有效克服。未来，随着科技发展，应持续探索新技术、新材料，进一步提升阴极保护系统性能。如研发更智能的电流调节技术，使其能根据海洋环境变化自动调整保护参数；开发更环保、高效的防污材料，减少对海洋生态环境影响。通过不断创新，为海洋工程结构提供更可靠的防腐蚀保护，推动海洋工程领域持续发展。

参考文献

[1] 王英伟,赵海旭,陈同彦,等. 基于深度学习的海洋工程结构位移响应重建方法[J/OL].海洋工程,1-11[2025-08-02].

[2] 李宇键. 海洋工程结构无损检测技术的创新与应用研究[J].中国设备工程,2025,(09):145-147.

[3] 章靖卓. 海洋工程结构物在极端环境下的动力响应分析[J].中国高新科技,2025,(08):43-45.

[4] 赵士桥,王宇. 海洋工程结构防腐蚀技术研究[J].中国设备工程,2024,(09):259-261.

[5] 王玮,黄龙,张乐,等. 海洋工程结构物装船自动调载技术研究[J].中国水运,2024,(09):135-137.

[6] 陈振雷,石凡,于春令. 海洋工程结构物设计虚拟仿真实验平台建设及其在教学中的应用[J].高教学刊,2024,10(10): 27-30.

[7] 王飞. 高强度结构用钢在海洋工程结构中的应用研究[J].中国设备工程,2024,(03):244-246.

[8] 明付仁,李陈峰,孙士丽,等. 船舶与海洋工程结构力学课程思政教学实践——以弹性支座化简为例[J].高教学刊,2023,9(32):182-185.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/