

埋地长输天然气管道阴极保护系统常见故障分析

汤慧文 陈 萌（山东港华燃气集团有限公司，山东 济南 250014）

摘 要：随着全球能源需求的增长，埋地长输天然气管道在能源供应链中扮演着关键角色。这些管道不仅为城市和工业区域提供必需的能源，还能确保能源输送的连续性和安全性。本文通过分析埋地长输天然气管道阴极保护系统的常见故障，包括电位异常、阳极快速消耗、电缆连接问题等，探讨了这些问题的成因及其对系统性能的影响。本文旨在提供阴极保护系统故障分析的深入见解，为实际应用中的问题解决和系统优化提供参考。

关键词：埋地长输；天然气管道；阴极保护系统；常见故障

0 引言

在能源输送中，管道运输占有重要位置，尤其是输送天然气的长输管道。作为现代工业的生命线，管道输送对于保障能源供应稳定和确保国家能源安全起到了不可替代性的作用。在此背景下，保护这些关键基础设施免受腐蚀的挑战尤为重要。阴极保护系统作为防止管道腐蚀的重要技术，其性能直接影响到管道的安全和寿命。

1 阴极保护系统的基本原理

1.1 阴极保护的定义与分类

阴极保护是一种通过控制金属结构表面的电位，使其保持在一个被动状态以防止电化学腐蚀的技术。此方法主要应用于埋地或水下的金属管道及其他结构，防止由环境介质（如土壤或海水）引起的腐蚀。阴极保护系统可分为两大类：外加电流阴极保护（ICCP）和牺牲阳极阴极保护（SACP）。外加电流阴极保护涉及使用外部电源对被保护结构施加电流，通过外部阳极均匀分布负电荷以抵消腐蚀过程。相比之下，牺牲阳极阴极保护不依赖外部电源，而是使用比被保护金属活性更高的金属（如镁或锌）作为阳极，这些阳极材料在电化学反应中逐渐消耗，从而保护主体结构不受腐蚀。选择适用的阴极保护类型通常基于结构的材质、环境条件以及经济效益考量。此外，阴极保护的效果需要通过电位测量来定期监测，确保所有组成部分均在最佳工作状态，以维持系统的长效防护功能。

1.2 阴极保护系统的组成与工作原理

阴极保护系统由电源装置、阳极材料、参比电极、电缆与连接方式及电位测量与控制设备组成。电源装置为整个系统提供必需的电流或电压，以促使保护流向管道或结构的金属表面。阳极材料的选择取决于其在特定环境中的效率和耐久性，通常为镁、锌或铂等，

其通过与阴极（即被保护的结构）之间的电化学反应牺牲自身以保护结构免遭腐蚀。参比电极用于监测系统的保护电位，确保电位控制在一个安全范围内，通常选用银/银氯或铜/铜硫酸盐电极因其稳定性高。电缆和连接方式确保电流能够有效传递至阳极和参比电极，其材质和设计必须保证长期暴露于腐蚀环境中的可靠性。最后，电位测量与控制设备负责实时监控保护电位和调整输出电流，以适应外部环境变化，确保系统的持续有效运行^[1]。

2 阴极保护系统的常见故障分析

2.1 电位异常

电位异常是阴极保护系统中最常见的故障之一，表现为被保护结构的电位未能维持在理想的保护范围内。这种异常通常由几个因素引起，包括电源故障、阳极耗损不均、电缆和连接部件的损坏或老化以及参比电极的失效。电源故障由于电源本身的故障或外部供电问题导致输出电流不稳定或中断。阳极如果耗损过快或不均匀，会导致某些区域电位过高，而其他区域则因为电流供给不足而电位过低。电缆和连接部件的老化或损坏会影响电流的连续传输，造成局部或广泛的电位下降。参比电极的失效通常因环境污染或物理损伤，导致其监测数据不准确，进而影响整个系统的电位调节。

2.2 阳极耗损过快

阳极耗损过快是阴极保护系统中一个常见的技术问题，主要由于阳极材料在电化学反应中加速牺牲，导致其预期寿命大大缩短。这种情况由几个具体因素引发：首先，环境腐蚀条件的变化，如土壤电导率的增加或水化学性质的变动，会增加阳极的腐蚀速率；其次，如果阳极安装位置不正确或与阴极的距离过近，也因电流密度过高而加速阳极的消耗；此外，阳极材料选择不当或质量问题同样会导致其在实际应用中耗

损过快。例如，镁阳极在高盐分或低 pH 值的环境中耗损速度会显著提高。此外，阳极保护系统设计不足，如电流输出设置不当，同样会导致部分阳极在短时间内过度消耗^[2]。

2.3 电缆与连接问题

电缆与连接问题在阴极保护系统中是引发性能下降的关键因素之一，主要表现为电缆绝缘层破损、连接部件腐蚀或接触不良。电缆绝缘层的损坏由外部机械应力、化学腐蚀或紫外线暴露导致，这种损坏会引起电流泄漏，降低系统的电流效率。连接部件的腐蚀或接触不良通常是由于接头材料选用不当或安装时的技术问题引起的，如接头螺纹松动或氧化，这会导致电阻增加，从而影响到电流的连续和均匀传递。电缆和连接部件的问题不仅限于物理损坏，还包括由于设计不当导致的电缆配置问题，如电缆截面面积选取不当或布线路径规划不合理，这些因素都会导致系统的整体效率和寿命降低。

2.4 参比电极故障

参比电极故障是阴极保护系统中常见的技术问题，影响系统监测和调节保护电位的准确性。参比电极的主要功能是提供一个稳定的参考点，用于测量被保护结构的电位，以确保其维持在防腐蚀所需的范围内。参比电极失效通常由两大类因素引起：一是环境因素，如温度极端、化学腐蚀或物理损伤，这些条件会导致参比电极的电化学性能降低，从而失去其稳定性和可靠性；二是参比电极固有的物理和化学老化，例如，银/银氯参比电极在高氯环境中会加速氯化，而铜/铜硫酸盐参比电极则因硫酸盐结晶而堵塞或损坏。此外，错误的安装位置和不当的维护也是参比电极故障的常见原因，如将参比电极安装在电位变化大的区域，或者维护不足导致接触不良和污染累积。

3 阴极保护系统故障的检测与诊断技术

3.1 在线监测技术

在线监测技术是阴极保护系统故障检测的核心组成部分，能实时捕捉到系统性能参数并进行数据分析，从而快速识别潜在的故障。这类技术主要依赖于安装在被保护结构及其周围的传感器和监控设备，如电位传感器、电流密度传感器和环境参数传感器等。电位传感器能够精确测量并记录结构表面的电位变化，通常以毫伏为单位，精度可达 $\pm 0.1\text{mV}$ ，确保电位控制在防腐蚀所需的安全范围内。电流密度传感器则用于测量流经保护区域的电流强度，单位为安培每平方米

(A/m^2)，帮助评估阳极材料的消耗速率和均匀性。环境参数传感器，如温度、湿度和 pH 值传感器，提供关于腐蚀环境条件的实时数据，这些数据对于调整阴极保护策略至关重要^[3]。

通过在线监测技术，阴极保护系统的运维人员能够获得关键的操作数据，这些数据不仅指示当前的保护状态，还能预测未来可能的问题点。例如，通过分析长期收集的电位和电流数据，可以使用趋势分析方法来识别阳极耗损的加速或电缆绝缘性能的衰减。此外，集成的数据分析软件可以实现复杂的算法运算，如机器学习模型，这些模型能根据历史数据预测系统的故障趋势，提供预警信息。这种预测性维护策略能减少突发性故障的风险，优化维护计划和资源配置。数据参数的具体应用包括电位阈值的自动调整，电流输出的优化以及环境因素变化的快速响应，从而确保系统在不同操作条件下都能维持最佳的防腐蚀效果。

3.2 非破坏性检测技术

非破坏性检测技术在阴极保护系统的故障诊断中起着关键作用，允许技术人员在不影响系统运行的情况下评估保护措施的有效性和结构的完整性。电磁探测法利用电磁波的传播和反射原理来检测埋地管道的腐蚀情况和物理缺陷。该技术通过向被检测结构发送特定频率的电磁波，并分析反射波的变化来识别缺陷和腐蚀产生的异常区域。电磁波的敏感性使其能够探测到微小的结构变化，精度可达到毫米级别。此外，电磁探测法的数据处理速度快，可以实时生成腐蚀图像和深度分布图，能极大地提高检测效率和准确性。

超声波检测法是另一种广泛应用的非破坏性技术，它通过发送高频声波并接收其在材料内部的回声来评估材料的厚度和内部结构。这种技术特别适用于检测管道和储罐的壁厚和腐蚀程度。超声波传感器能够精确地测量声波在不同介质中的传播速度和反射强度，从而确定腐蚀的位置和严重性。超声波检测的分辨率可以达到 0.1mm ，使其成为检测早期腐蚀和微小缺陷的理想选择。与此同时，地理信息系统 (GIS) 的应用为阴极保护系统的管理和维护提供了一个强大的工具。GIS 能够整合和分析地理位置数据，帮助管理人员在空间上可视化管道的布局、腐蚀热点和保护电位的分布。通过 GIS，可以轻松地跟踪维护历史和预测潜在的腐蚀区域，优化资源分配和维护计划。GIS 系统能够处理大量的空间数据和属性数据，提供包括地形、土壤类型和环境条件在内的综合信息，从

而为阴极保护系统的优化管理提供决策支持。

3.3 故障诊断与预测模型

故障诊断与预测模型是阴极保护系统维护的一个重要组成部分，基于大数据分析的故障预测模型能够通过分析历史数据和实时数据来识别潜在的故障风险。这些模型通常包括统计分析方法、机器学习算法或深度学习框架，能够处理和解析来自阴极保护系统的大量监测数据，如电位、电流、环境参数等。例如，通过使用回归分析或神经网络，可以建立模型预测特定环境条件下阳极耗损的速率或电缆绝缘层的退化速度。这些模型能够在故障发生前预警，允许操作人员采取预防措施，从而避免昂贵的维修和系统停机。

人工智能（AI）技术在故障诊断中的应用为阴极保护系统提供了进一步的智能化和自动化能力。AI模型，特别是基于深度学习的模型，可以识别复杂的模式和关系，这在传统方法中难以实现。例如，卷积神经网络（CNN）可用于分析从电磁探测或超声波检测收集的图像数据，以识别结构损伤或异常腐蚀的迹象。此外，故障树分析（FTA）和失效模式及影响分析（FMEA）是两种系统化的分析方法，用于识别和评估故障发生的可能性及其对系统的影响。FTA通过构建故障的逻辑树来分析导致系统功能失败的多个原因，而FMEA则评估每个组件的失效模式及其对系统性能的潜在影响^[4]。

4 阴极保护系统的维护与管理

4.1 定期维护与检修计划

定期维护与检修是确保阴极保护系统长期有效运行的关键环节。维护周期的确定应基于系统的实际运行状况及环境因素，通常包括年度全面检查和季度性的例行检测。关键维护点包括电位的稳定性检查、阳极和参比电极的功能评估、电缆及连接部件的完整性测试以及防腐层的完好性审查。此外，所有维护活动的详细记录至关重要，这不仅有助于追踪系统的历史性能，还能为未来的维护策略提供数据支持。检修记录应详细包括检查日期、检查人员、发现的问题、采取的措施及后续跟踪的结果。

4.2 故障预防策略

故障预防策略是阴极保护系统维护计划中的核心部分，旨在通过提前识别潜在问题并采取预防措施来避免故障发生。这些策略包括定期的系统审查、精确的材料选择、严格的安装标准以及持续的性能监测。系统审查涉及对阴极保护系统的所有组件进行定期检

查和测试，确保其按照设计参数正常工作，及时发现和修复初期损耗或损害。在材料选择方面，选择高质量、适应当地环境条件的阳极和电缆材料，可以显著提高系统的耐久性和可靠性。安装标准的遵守能确保系统的正确布局和组装，防止因安装错误导致的长期问题。

4.3 新技术的应用

在阴极保护系统的现代化进程中，新技术的应用起着决定性的作用。智能监控系统的集成为阴极保护提供了高度自动化的监控能力，能够实时捕捉关键运行参数，并通过远程通讯技术发送到中央控制室，从而实现对系统状态的持续监控和即时调整。同时，新型阳极材料的开发也在不断推进，如混合金属氧化物（MMO）阳极，其具有更高的耐久性和更佳的电化学性能，有效延长了系统的使用寿命并降低了维护成本。此外，阴极保护系统的升级与改造也是提升系统性能的关键步骤，包括替换老化的电子元件、优化电路设计以及提高系统的能源效率^[5]。

5 结语

总而言之，埋地长输天然气管道的阴极保护系统至关重要，但也面临多种故障风险。系统中的电位异常、阳极耗损过快、电缆与连接问题、参比电极故障及地电流干扰等问题均需关注。解决这些问题的关键在于采用先进的监测技术、定期执行维护检查，并适时进行技术升级。通过这些措施，可以显著提高系统的稳定性和效率，确保天然气管道的长期安全运行。此外，随着新材料和智能技术的应用，阴极保护系统的管理和维护将更加高效，进一步保障能源输送的可靠性。

参考文献：

- [1] 陈川, 寇爽. 埋地长输天然气管道阴极保护系统常见故障分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(14): 41-43.
- [2] 王俊, 李靖博, 李芳芳. 基于长输天然气埋地管道阴极保护系统检测案例分析 [J]. 大众标准化, 2022(24): 187-189.
- [3] 李云海. 长输天然气管道防腐层与阴极保护常见缺陷分析 [J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(08): 126-127+134.
- [4] 宣明艺. 天然气长输管道阴极保护系统设计与优化研究 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(04): 135-137.
- [5] 谢娜娜, 郑显丰, 黄勇. 埋地长输天然气管道阴极保护系统故障 [J]. 科技创新导报, 2019, 16(34): 13+15.