

天然气管道受杂散电流干扰的监测及防护措施研究

郝 鹏 (山东港华培训学院, 山东 济南 250000)

摘 要: 随着天然气在能源供应中的地位日益凸显, 其管道的安全运行成为关乎国计民生的重要问题。杂散电流干扰是影响天然气管道安全的一大隐患, 在当前天然气管道铺设规模日益提升的背景下, 必须对其干扰问题进行有效监测与防护。本文主要分析杂散电流干扰的监测方法, 进而探讨杂散电流干扰的防护措施, 并对不同的防护措施进行了经济性分析, 以期在保证天然气管道安全运行的前提下, 找到经济性最优的防护方案, 为管道企业和相关部门提供决策参考。

关键词: 天然气管道; 杂散电流干扰; 监测方法; 防护措施

随着天然气在全球能源结构中的比重不断增加, 其管道运输的安全性和可靠性显得尤为重要。但目前而言, 杂散电流干扰已成为威胁天然气管道安全运行的一大问题。杂散电流不仅可能加速管道的腐蚀, 降低其使用寿命, 还可能引发安全事故, 对人民生命财产安全构成严重威胁。因此, 需要深入研究杂散电流干扰的监测方法和防护措施, 以确保天然气管道的安全运行。

1 天然气管道受杂散电流干扰概述

天然气管道受杂散电流干扰是一个重要问题, 它不仅影响管道的正常运行, 还可能对管道的安全构成威胁。杂散电流指的是那些不按照设计路径流动, 而是通过非预期路径 (如土壤) 移动的电流。在存在直流电牵引系统、阴极保护系统故障或地下电缆破损等情况下, 此类电流可能会进入埋地金属结构, 例如天然气管道。当杂散电流流入管道时, 它会在入点处引起腐蚀, 这种现象被称为“电流侵蚀”。随着电流持续流入和流出管道, 金属表面会逐渐被破坏, 导致管道壁变薄, 最终可能导致泄漏或破裂。此外, 如果杂散电流与管道的阴极保护系统相互作用, 还可能削弱保护效果, 使得管道更容易受到腐蚀的影响^[1]。

2 天然气管道受杂散电流干扰的监测方法

2.1 天然气管道在线监测系统部署

在线监测系统对于天然气管道的杂散电流干扰问题至关重要。该系统可以在关键位置安装高精度传感器来实现对管道沿线电流变化的实时监控, 包括管地电位传感器、直流电压梯度 (DCVG) 传感器和通/断测试仪器等, 此类传感器能够精确捕捉到微小的电流波动, 提供有关管道电位状态的详尽信息。例如, 当检测到超过 $\pm 100\text{mV}$ 的管地电位波动时, 可能意味着存在杂散电流干扰的风险, 需进一步调查原因并采取相

应措施。为了确保数据传输的稳定性和可靠性, 传感器与中央控制系统相连, 利用 GPRS、卫星通信或光纤网络等技术将收集的数据即时发送至远程服务器进行分析。这种实时的数据流有助于快速响应任何异常情况, 并为后续的维护工作提供决策支持。此外, 根据 API RP 980 标准, 每年至少一次的校准是必要的, 以保证传感器测量结果的准确性, 从而提高整个系统的可信度。同时, 软件平台集成了数据分析、可视化和预警功能, 允许操作人员通过图形界面直观地了解管道的健康状况。对历史数据的趋势分析, 可以提前预测可能出现的问题, 并制定相应的预防策略。平台还可以自动识别异常模式, 一旦发现超出预设阈值的情况, 即刻发出警报通知相关人员采取行动, 确保管道的安全运行^[2]。

2.2 天然气管道定期现场检测与评估

定期的现场检测是保障天然气管道不受杂散电流损害的重要环节, 专业团队会在计划的时间内前往现场, 使用便携式仪器执行一系列详细的测量任务, 涵盖土壤电阻率测量、管地电位测量以及涂层缺陷检测。土壤电阻率测量采用 Wenner 四极法或其他先进方法 (如 Schlumberger 法), 以确定土壤导电性的分布情况。理想的电阻率范围应在 $100\Omega \cdot \text{m}$ 到 $10,000\Omega \cdot \text{m}$ 之间。高电阻率 ($>1,000\Omega \cdot \text{m}$) 通常意味着较低的腐蚀风险, 而低电阻率 ($<500\Omega \cdot \text{m}$) 则可能指示较高的腐蚀可能性。此信息对于理解杂散电流的流动模式至关重要, 并且可以指导后续的防护措施设计。为了确保测量结果的准确性, 建议在不同季节和天气条件下进行多次测量, 因为土壤湿度和温度变化会显著影响电阻率值。

管地电位测量是通过铜/硫酸铜参比电极 (CSE) 在多个位置记录管地电位值, 绘制出整段管道的电位图谱。理想情况下, 管道的管地电位应保持在

-850mV CSE 至 -1100mV CSE 之间, 以确保阴极保护的有效性。如果某些区域的电位异常偏低, 可能是杂散电流的入口或阴极保护不足的表现。此外, 当检测到超过 $\pm 100\text{mV}$ 的管地电位波动时, 需进一步调查原因并采取相应措施。为了提高测量精度, 建议使用多点同时测量技术, 并结合 GPS 定位系统, 确保每个测量点的位置精确无误。

交流电压梯度 (ACVG) 技术结合物理检查用于查找防腐层破损的位置。此方法可以在不破坏涂层的情况下, 有效地识别潜在的缺陷区域。一旦发现缺陷, 及时修补这些部位可以防止杂散电流直接接触金属表面引发腐蚀, 保障管道结构的完整性。对于已知存在缺陷的区域, 可以考虑使用超声波测厚仪 (UT) 或磁通泄漏检测 (MFL) 等非破坏性检测工具, 进一步确认缺陷的具体位置和严重程度。及时修复涂层缺陷不仅能够延长管道的使用寿命, 还能减少维修成本和停机时间。

2.3 天然气管道智能诊断工具的应用

智能诊断工具的应用显著提升了天然气管道管理的效率和精度。借助大数据分析和机器学习算法, 如支持向量机 (SVM)、随机森林等, 可以从海量的监测数据中挖掘出潜在的问题模式。通过设定合理的阈值, 如持续超过 50mV 的电位波动, 模型可以在早期预警阶段提供警报, 帮助运维人员迅速定位问题源头并采取适当措施。数字孪生技术为每一段管道创建了虚拟副本, 模拟实际运行环境下的各种物理现象, 不仅允许工程师在不影响真实系统的情况下测试不同的防护策略, 优化资源配置, 而且还能用来培训新员工, 提高他们对复杂系统的理解和操作技能。数字孪生提供了动态的交互平台, 使得复杂的工程概念变得易于理解, 促进了知识传承和技术进步。自适应控制算法则开发了专门针对杂散电流干扰的自动调节机制。依据实时监测数据, 动态调整阴极保护参数, 如基于模糊逻辑控制器或 PID 控制器, 使保护电流输出始终保持在一个最优水平。

3 天然气管道受杂散电流干扰的防护措施

3.1 天然气管道阴极保护系统的优化与升级

阴极保护是防止天然气管道遭受杂散电流腐蚀的核心措施, 向管道施加一个直流电场, 使管道成为阴极, 进而抑制金属表面的阳极溶解反应, 达到防腐的目的。根据最新的监测数据, 定期评估现有阴极保护站的工作效率, 确保其能够覆盖所有易受影响区

域, 并维持足够的保护电位。一般要求管地电位保持在 -850mV CSE 至 -1100mV CSE 之间, 以确保充分的保护效果。对于存在高风险的地段, 考虑增加临时或永久性的辅助阳极, 例如深井阳极或浅埋柔性阳极, 以增强局部保护效果。深井阳极通常可以提供超过 20 年的使用寿命, 并且可以在远离人口密集区的位置安装, 减少对环境的影响^[3]。

此外, 引入区域性阴极保护网络概念, 将多个保护站连接起来形成协同效应, 可以更均匀地分布保护电流, 减少电流流失到非目标区域的可能性。区域性阴极保护网络的设计应考虑土壤电阻率、管道涂层状况等因素, 以确保最佳性能。最后, 利用先进的监控技术如远程终端单元 (RTU), 实现对阴极保护参数的实时跟踪与自动化调节, 确保系统始终处于最佳运行状态。RTU 可以运用 GPRS、卫星通信等手段, 将现场数据传输到中央控制中心, 支持工程师进行远程诊断和维护。

3.2 实施天然气管道的物理隔离措施

实施物理隔离措施旨在切断杂散电流流入天然气管道的主要路径, 从而降低腐蚀风险。一方面, 构建绝缘接头是一种常见做法, 它可以在不影响流体传输的前提下, 阻止电流沿管道传播。绝缘接头通常由高强度塑料、橡胶或其他非导电材料制成, 安装于不同管段之间, 特别是跨越铁路、公路等潜在电流源的地方。绝缘接头的电阻值应大于 $10^{12}\Omega$, 以确保良好的电气隔离性能。在实际应用中, 建议每隔一定距离 (如每公里) 设置一个绝缘接头, 以最大限度地限制杂散电流的影响范围。

另一方面, 在特定位置铺设防蚀带或涂层, 形成额外的屏障来抵御外部电流侵袭。例如, 采用环氧树脂涂层或聚乙烯护套等高性能防腐材料, 可显著提高管道对外部环境变化的抵抗力。环氧树脂涂层的厚度应在 $300\mu\text{m}$ 以上, 以保证长期有效的防护效果。对于已经受到杂散电流影响的管道部分, 可以采取牺牲阳极法, 在管道外壁附加一些更容易被腐蚀的金属块 (如镁、锌合金), 优先吸引杂散电流, 进而保护管道本身免受侵蚀。牺牲阳极的设计需考虑阳极材料的选择、尺寸计算以及安装位置, 确保其提供的保护电流足以抵消杂散电流的影响。

3.3 天然气管道与第三方设施的协调合作

天然气管道往往与其他基础设施共存于同一地理区域内, 如电力线路、铁路牵引系统、通信电缆等,

这些设施可能是杂散电流的重要来源。因此，建立有效的沟通机制至关重要。

首先，应主动与附近的电力公司、铁路运营方等可能产生杂散电流源的机构建立联系，共同商讨减少干扰的方法。例如，推动相关方改善接地系统设计，确保其接地电阻不超过 4Ω ，避免电流意外流入土壤；或者调整操作模式，如改变电力牵引系统的供电频率或电压等级，从源头上降低杂散电流的发生概率。具体来说，对于直流牵引系统，可以通过安装单向导通装置（ODD）来限制杂散电流的流动路径，ODD 的额定电流可达数千安培，能有效减轻轨道附近结构的腐蚀风险。

其次，参与制定联合应急预案，确保在发生故障时能迅速采取行动，限制杂散电流扩散范围。应急预案应包括应急响应流程、资源调配方案以及恢复计划等内容，确保各方能够在最短时间内做出反应^[4]。

最后，鼓励多方签订合作协议，明确规定各方责任与义务，涵盖定期交换监测数据、共同开展研究项目以及分享成功经验和技术成果。此合作方式不仅有助于提升整体防护水平，也为行业内的长期稳定发展奠定了坚实基础。合作协议还可以规定定期的技术交流会议，促进各方之间的知识共享和技术进步，共同探索更高效的杂散电流管理策略。

4 管道防护措施的经济性分析

在天然气管道的安全运营中，选择合适的防护措施不仅关乎技术上的可行性，更涉及到成本效益的考量。为了确保防护方案既能有效抵御杂散电流干扰，又能实现经济效益最大化，必须对不同防护措施进行全面而深入的经济性分析。

从初始投资成本来看，阴极保护系统的优化与升级涉及设备采购（如阳极、参比电极）、安装工程及调试费用等。对于新建项目而言，阴极保护系统的构建成本相对固定；但对于既有管道，则需要考虑额外的改造费用，例如增设辅助阳极或更新现有设施。尽管一次性投入较大，但考虑到该系统可以显著延长管道使用寿命，并减少后续维修需求，因此从长远来看具有较高的性价比。相比之下，构建绝缘接头和铺设高性能防腐涂层等物理隔离措施同样涉及较高的初期投资。特别是当面对长距离管道时，每公里设置一个绝缘接头的成本累积效应明显。然而，这些一次性投入能够在很大程度上阻断杂散电流路径，降低因腐蚀导致的直接经济损失，同时减少了未来可能发生的泄

漏风险带来的间接损失^[5]。

在长期维护费用方面，优化后的阴极保护系统能够提供更加稳定可靠的保护效果，从而降低了定期检查和调整参数的频率，进而减少了人力物力支出。更重要的是，高效的阴极保护有助于维持管道结构完整性，减少了由于腐蚀引起的突发性故障，避免了由此产生的高额抢修费用。一旦完成物理隔离措施的部署，在正常情况下无需频繁维护，只有在发现新的潜在威胁或者原有防护失效时才需进行必要的修复工作。

就潜在损失规避而言，保持管道良好的防腐蚀状态，阴极保护系统可以有效防止因腐蚀造成的泄漏事故，保障了能源输送的安全性和连续性。这对于维护社会稳定、保障公共安全至关重要。物理隔离措施则切断了杂散电流流入的主要路径，减少了腐蚀风险，进而保护了管道的物理完整性和功能性能。

5 结束语

综上所述，天然气管道受杂散电流干扰是一个需要高度重视的问题。通过部署在线监测系统、定期现场检测与评估以及应用智能诊断工具，可以有效监测杂散电流干扰情况。同时，采取优化阴极保护系统、实施物理隔离措施以及与第三方设施协调合作等防护措施，可以显著降低杂散电流对天然气管道的影响。在选择防护措施时，还需进行经济性分析，以确保在保障管道安全运行的前提下，找到经济性最优的防护方案，为管道企业和相关部门提供有力支持。

参考文献：

- [1] 包文红, 李广印, 吴少炯. 天然气管道受交流杂散电流干扰评估及排流防护治理 [J]. 特种设备安全技术, 2024(03):12-15.
- [2] 阎宗攀, 王永丰, 徐卓, 等. 天然气管道受杂散电流干扰的监测及防护 [J]. 化工管理, 2023(24):113-115.
- [3] 赵晓隆, 包文红, 李广印, 等. 天然气管道受杂散电流干扰评价及规律研究 [J]. 天然气与石油, 2022,40(06):88-93.
- [4] 江永强. 长输天然气管道受杂散电流干扰的监测及防护探讨 [J]. 石油和化工设备, 2022,25(03):96-98.
- [5] 黎金华, 秦朝葵, 刘睿涵, 等. 地铁对高压天然气管道杂散电流干扰监测评价 [J]. 煤气与热力, 2022,42(08):1-8+19.

作者简介：

郝鹏 (1985-), 男, 汉族, 山东济南人, 本科, 工程师, 研究方向: 城镇燃气 (天然气、LNG) 工程、气源管理。