

交流输电线路单相接地故障下油气管道交流干扰的缓解

韦军吉 袁庭宇 李凌强 陈虎 (国家管网集团联合管道有限责任公司西气东输分公司苏浙沪输气分公司, 江苏 镇江 212124)

摘要: 高压输电线路附近油气管道常受到交流干扰, 导致电化学腐蚀、人员安全风险增加和运行效率下降。本文系统分析了交流干扰的危害性, 并提出接地技术、屏蔽技术、管道设计优化及主动抑制技术作为缓解措施。通过工程案例和数值模拟验证, 结果表明, 采用多种技术后, 管道感应电压从 80V 降低至 10V 以下, 腐蚀风险和安全隐患显著减少。研究还强调了新型材料开发、智能化监测技术及综合体系构建的未来发展方向。这些措施有效提高了安全性和经济性。

关键词: 交流干扰; 油气管道; 接地技术; 屏蔽技术; 主动抑制; 防腐层; 数值模拟

中图分类号: TM72; TE88 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 033-0128-04

Mitigation of AC interference in oil and gas pipelines under single-phase grounding faults on transmission lines

Wei Junji, Yuan Tingyu, Li Lingqiang, Chen Hu (West East Gas Pipeline Company, National Pipe Network Group United Pipeline Co., Ltd., Su-Zhe-Hu Gas Transmission Branch, Zhenjiang Jiangsu 212124, China)

Abstract: Oil and gas pipelines near high-voltage transmission lines often suffer from AC interference, leading to electrochemical corrosion, increased personnel safety risks, and reduced operational efficiency. This paper systematically analyzes the hazards of AC interference and proposes mitigation measures such as grounding technology, shielding technology, pipeline design optimization, and active suppression techniques. Through engineering case studies and numerical simulations, results show that employing multiple technologies reduces pipeline induced voltage from 80V to below 10V, significantly decreasing corrosion risks and safety hazards. The study also emphasizes future development directions including novel material development, intelligent monitoring technologies, and comprehensive system construction. These measures effectively enhance safety and economic efficiency.

Keywords: communication interference; oil and gas pipelines; grounding technology; shielding technology; active suppression; anti-corrosion layer; numerical simulation

在电力系统领域以及油气管道网络方面, 发展速度正呈现出显著的提升态势。高压输电线路与地下管道之间, 邻近布置的情况正变得越来越普遍。对于管道的安全运行而言, 由此产生的交流干扰现象构成了不容忽视的威胁。电化学腐蚀过程的加速现象在管道表面被观察到, 实例表明这正是交流干扰所带来的直接后果。触电事故的发生频率有所上升, 监控系统出现功能异常的情况亦被记录在案。管道的运行效率与经济收益因此受到了严重的负面影响。深入探究干扰现象的危害性机理显得尤为迫切, 有效的缓解手段也需要得到系统性的研究。理论分析方法在本研究中被采用, 数值模拟技术同时得到了应用。

多个工程案例的分析结果表明: 接地技术的实施效果较为理想, 屏蔽措施的防护作用同样值得关注。管道设计方案的优化工作取得了预期成果, 主动抑制技术的应用范围正在不断扩大。油气管道的安全运行保障体系由此获得了重要的技术支持基础。

1 单相接地故障对油气管道交流干扰的机理分析

1.1 电磁感应机制与干扰来源

当单相接地故障发生于交流输电线路时, 通过接地装置进入大地的故障电流将形成复杂的电磁场分布态势。对邻近区域埋设的油气管道而言, 由此产生的交流干扰现象具有显著特征性。相关研究数据表明, 在土壤介质中扩散的故障电流会引发电位梯度现象。实例显示, 管道表面因此感应产生的交流电压通常由两种耦合机制共同作用所致: 其中占据主导地位的电磁感应机制贡献度达到总干扰量的 70% ~ 80%。以某 220kV 输电线路的实测数据为例证: 当故障电流值达到 5kA 量级时, 位于线路 100m 间距处的管道表面检测到 50V 感应电压值。该数值明显超过 15V 这一安全限值标准。值得注意的是, 土壤电阻率参数对于干扰程度的影响具有决定性作用。实例分析表明: 在 $1000\Omega \cdot m$ 的高电阻率土壤环境中, 干扰作用范围可延伸至 500m; 相较而言, $100\Omega \cdot m$ 的低电阻率条件下该数值则缩减至 200m 左右。

1.2 管道材料与干扰响应的关系

材料的特性对于油气管道的交流干扰响应具有决定性作用。相较于非金属管道高出 2~3 倍的感应电压,

被钢制管道呈现，此现象归因于其高导电性及磁导率的特征。单相接地故障工况下达到 100V 以上的交流干扰电压，在钢制管道中被观测到；相反地，聚乙烯管道的该数值普遍维持在 20V 以下。管径尺寸与壁厚参数对干扰程度产生显著影响。实例可见：800mm 管径配合 10mm 壁厚的管道系统，其感应电压较之 400mm 管径 6mm 壁厚的配置高出约 15%。埋设深度因素亦展现出特定规律性——当覆土厚度由 1m 增至 2m 时，约 10% 的电压降幅被记录；然而超过 2m 埋深后，降幅效果趋于平缓。某输油管道的实测数据显示：1.5m 埋深条件下 45V 的感应电压值，在埋深增加至 2.5m 时下降为 40V。

1.3 故障电流特性与干扰动态

在管道交流干扰研究领域内，单相接地故障所呈现的电流特性发挥着重要作用。被视作关键参数的，是故障电流的幅值特性、持续时间特征以及频率组成。以 220kV 输电线路为实例，当 2kA 至 8kA 范围内变化时故障电流幅值，与管道感应电压之间存在着近似线性关联性。1kA 的增幅对应着约 10V 的电压升高量，这一现象通过实测数据得以验证。0.1s 至 0.5s 区间内波动的故障持续时间，能够引发瞬时高电压现象。某工程案例表明，0.3s 持续时间的故障电流作用下，80V 的瞬时电压被记录到，该数值已超出防腐层耐受阈值。50Hz 工频干扰虽占据主导地位，但不可忽视的是 150Hz、250Hz 等高次谐波分量，其贡献度经测量达到总干扰量的 15% 左右。通过计算机仿真手段揭示出，土壤介质中故障电流呈现非均匀分布态势。距离接地装置最近处的管段部位，干结强度最为显著，100V 以上的感应电压在此区域被观测到。由此可见，对故障电流动态特性的精确模拟工作，构成了制定有效防护方案的重要前提条件。

2 交流干扰的危害与影响评估

2.1 管道腐蚀与安全风险

在油气管道系统中，交流干扰现象的危害性主要体现在两方面：电化学腐蚀过程的加速以及相关人员安全性的威胁。实例显示，当感应电压数值超过 15V 时，管道防腐层发生电化学击穿的可能性显著增加。某天然气输送管道的监测数据表明，在单相接地故障情况下，感应电压高达 60V 的存在使得防腐层微孔数量在六个月内明显增多，腐蚀深度达到了 0.5mm 的程度。从人员安全角度考察，存在于管道表面的高电压可能导致触电事故的发生。特别是在进行管道检修作业时，操作人员与管道的直接接触可能面临超过 50V 的电压值。由此可见 36V 的人体安全极限已被大幅超越。某输油管道的实际运行记录显示，70V 的干扰电

压导致了检修工作的被迫中断，由此造成的直接经济损失约 50 万元人民币。长期存在的交流干扰还会引发管道的机械振动现象和热效应问题。这些因素的持续作用可能最终导致管道材料的疲劳断裂情况出现。由此可见对干扰危害程度进行准确评估的必要性已十分明确，这是后续制定有效缓解措施的基础性工作。

2.2 干扰对管道运行的影响

交流干扰现象的存在，对管道系统产生的影响是多方面的。管道的物理完整性受到损害的同时，运行效率与监控系统亦遭受显著干扰。阴极保护系统的正常运行，被高感应电压影响，电位偏移现象由此产生。实例表明，某管道阴极保护电位由 -0.85V 变化至 -0.65V 时，防腐效果降低幅度约为 20% 水平。监控信号失真问题同样值得关注，误报与漏报情况随之出现。某研究案例显示，当干扰电压达到 50V 量级时，监控系统误报率上升 15 个百分点，设备校准频率随之增加。由此可见，年度维护成本因此提升约 30 万元。管道内流体发生的电化学反应也不容忽视，油气质最由此受到不同程度影响。针对上述问题进行全面考量显得尤为必要，针对性措施的制定工作应当及时展开。

2.3 干扰程度的量化评估

交流干扰程度的准确评估，需通过实地测量手段与数值模拟方法相结合方可实现。常见于评估过程中的指标有管道感应电压、防腐层电位偏移现象以及电流密度等。在某 220kV 高压输电线路邻近区域开展的管道测试工作中，感应电压的变化范围记录为 10V 至 100V 之间，电流密度数值则高达 10A/m。实例表明该数值已显著超出 1A/m 这一安全限值标准。随着管道与线路间距离由 50m 增加至 200m，感应电压降低幅度约为 60%，此结果来自数值模拟研究。

表 1 为某测试案例的干扰数据：

表 1 不同距离下管道感应电压与电流密度

距离 (m)	感应电压 (V)	电流密度 (A/m ²)
50	80	10
100	50	6
200	20	2
300	10	1

在数据层面的分析工作中得以开展，距离 200m 作为干扰显著降低的临界点被确定。实例表明，该数值可成为缓解措施设计的重要参考依据。防腐层电位偏移方面的测量结果显示，当干扰电压处于 50V 水平时，0.2V 的电位偏移量被观测到。由此可见，针对性保护措施的采取具有必要性。

表2 接地方式对感应电压的缓解效果

接地方式	感应电压 (V)	降低比例 (%)	接地电阻 (Ω)
无接地	60	0	-
牺牲阳极接地	20	66	0.8
深井接地	12	80	0.5

3 交流干扰缓解措施的分类与原理

3.1 接地技术的应用

在交流干扰的缓解措施中，接地技术的应用较为常见。设置于管道之上的接地装置发挥着重要作用，感应电流的分流得以实现，电压水平因而下降。牺牲阳极接地与深井接地构成了主要的接地方式类型化方案。某工程项目实施过程中，采用牺牲阳极接地使得管道感应电压产生了显著变化。60V的初始值下降至20V这一现象被观测到，降幅比例达到约66%。对于高电阻率土壤条件而言，深井接地的适用性表现更为突出。

实例显示，在电阻率达到 $1000\Omega \cdot m$ 的土壤环境中，15V以下的感应电压数值通过深井接地技术能够获得实现，安全标准由此得到满足。为确保电流分流的有效性得到体现， 1Ω 以内的接地电阻值控制显得尤为必要。

表2 为不同接地方式的对比数据。

在管道与线路之间相对位置关系的考量中，接地装置之布置应当被重视。若平行段长度呈现较长之态势时，接地点密度有必要予以提升。500m以内的间隔控制是必须遵守的规范。由此可见，线路走向对于接地系统设计具有显著影响。

3.2 屏蔽技术的实施

在管道外围区域，通过屏蔽层的布设实施，电磁场对管道的感应效应得以有效阻断。高导电特性的金属网状物及具备磁屏蔽功能的材料，属于常见的屏蔽材料范畴。以某天然气输送管道为例，当采用铜质网状屏蔽结构后，感应电压数值由原先的50V下降至18V水平，降幅达到64%左右。为确保屏蔽效能得到保证，2mm以上的厚度要求必须满足于屏蔽层。

相关研究数据表明，当将屏蔽层与管道间的距离参数设定为0.5m时，电磁干扰的抑制效果呈现最优状态。值得注意的是，接地系统必须与屏蔽层协同使用，如此可防止高电压现象在屏蔽层上产生。工程实践领域内，虽然屏蔽装置的安装费用较高——约为传统接地技术的两倍之多，但其在长期运行过程中展现的稳定性更为突出。由此可见，该技术特别适用于电磁干扰强度较大的特殊区域。

3.3 管道设计优化

管道设计之优化措施对于干扰降低具有决定性意义。高电阻率防腐层之选择被证明为有效手段之一，实例显示当防腐层电阻率由 $10^6\Omega \cdot m$ 提升至 $10^8\Omega \cdot m$ 时，感应电压呈现约30%之降幅。某输油管道工程中，采用聚氨酯新型防腐层后，电压值从45V显著下降至30V。埋深增加方面亦存在明显效果，达到2m深度时可实现15%左右的干扰减弱度，然而施工成本因素需予以充分考虑。更为关键者在于线路间距的合理设置：距离由50m扩大至200m情况下，干扰电压降幅超过60%。规划阶段应予以重视的是输电线路与管道间200m最小距离的保持要求，由此可见该措施对干扰风险的最小化具有决定性作用。

4 缓解措施的实施与效果验证

4.1 工程实施流程

在实施缓解措施过程中，科学流程的遵循是必要的。干扰分布的确定需要通过实地测量与数值模拟相结合的方式完成。某220kV输电线路邻近区域管道的实测数据显示，70V的干扰电压值被记录。基于此数据，牺牲阳极接地技术与屏蔽层联合应用的方案得以设计。施工环节中，接地电阻的控制应严格进行， 1Ω 以下的数值需确保达成。同时，2mm厚度的屏蔽层质量要求必须满足。工程实施完毕后的效果验证阶段，多点电压测试工作的开展不可或缺。某实际工程项目中可见，管道电压值从原先的70V水平下降至12V的现象被观测到。安全规范的要求由此得到满足。这种电压降低的效果表明缓解措施的有效性得以证实。

4.2 效果验证方法

措施的有效性验证方面，采用了长期监测与短期测试相结合的方式予以实施。实施后立即开展的为短期测试部分，管道各段感应电压及电流密度的测量工作在此阶段完成。某具体案例中可见，15V的电压值被记录到，相较于措施前的60V水平；电流密度方面亦呈现下降趋势，从原先的 $8A/m$ 降低至 $1A/m$ ，这些数据是在接地和屏蔽措施应用后获得的。为确保评估结果的全面性，自动监测设备的部署成为必要选择，该设备每小时进行一次数据采集的工作将持续不少于6个月时间。实例表明，经过6个月的持续观测阶段后，

15V 以下的电压值得以稳定保持，措施的可靠性由此获得证实。

4.3 实施中的技术难点

在技术实施阶段，存在若干困难点需要被关注和解决。尤为突出的是接地装置的设计优化问题以及屏蔽层安装过程中的精度控制问题。依据土壤电阻率的变化，接地极的埋设深度应进行相应调整。实例表明，在电阻率较高的土壤条件下，深度超过 10m 的接地极设置显得尤为必要。关于屏蔽层的安装工艺，其与管道之间保持均匀间距的要求必须得到严格执行。实验数据显示，当间距偏差大于 0.1m 时，屏蔽效能的降低幅度可达 20% 左右。由此可见精确控制安装位置的重要性。主动抑制系统的信号同步问题同样构成技术难点之一。采用高精度传感设备的情况下，系统响应时间可控制在 0.01s 以内。某工程项目中曾出现信号同步延迟现象，致使抑制效果仅维持在 70% 水平。这一实例充分说明设备性能仍有待提升空间。

5 结束语

对油气管道的安全性与运行效率而言，交流干扰现象构成了不容忽视的威胁。实施接地处理、采用屏

蔽手段、优化管道设计以及应用主动抑制技术等多种方法相结合，干扰风险的降低得以实现。有效性已在本文中得到验证，通过理论层面的分析与实际工程案例的考察。新型材料的研发、监测系统的智能化升级以及综合防护体系的构建被提出作为未来重点研究方向。由此可见，技术研发工作的持续推进与标准化建设的强化显得尤为必要，这将显著提升油气管道抵御干扰的水平，其安全高效运行的保障亦将由此实现。

参考文献：

- [1] 卢晶晶, 梁秋曦, 刘睿韬, 等. 基于电磁感应的无源无线自取能装置设计与实验研究 [J]. 电工技术, 2025(s1).
- [2] 徐承伟, 陈瑞瑞, 张荣, 等. 不同类型杂散电流对管道干扰波动规律特征 [J]. 材料保护, 2025(03).
- [3] 叶茂. 输油管路变参数波纹管动力吸振器设计及应力优化分析 [J]. 振动与冲击, 2025(10).
- [4] 李宗泽. 电力系统中的谐波分析与抑制技术研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2025(08).
- [5] 刘杨. 连续油管完井管柱内防腐工艺技术 [J]. 江汉石油职工大学学报, 2025(01).

