

的团队扣减绩效，激发全员管控积极性。

规范合同管理流程，签订严密的分包合同与采购合同，明确价格调整条款、质量标准与违约责任。建立合同履约跟踪机制，及时处理工程款支付、索赔等争议，避免法律风险导致的额外成本。

#### 4.3 供应链协同：优化资源配置效率

构建多元化供应商体系，避免单一依赖，通过公开招标、竞争性谈判等方式选择高性价比供应商。与核心供应商签订长期合作协议，共享需求信息，争取更优惠的采购价格与服务条件。

优化采购计划与物流管理，根据施工进度制定精准的材料设备采购时间表，避免积压或短缺。采用“就近采购+集中运输”模式，减少运输成本与仓储费用；现场仓库实行“分类存放、就近布置”原则，减少材料二次搬运损耗。

建立材料价格动态跟踪机制，利用大数据分析预测价格走势，对钢材、电缆等价格波动大的主材，适时调整采购时机，规避涨价风险。

#### 4.4 数字化赋能：搭建智能管控平台

搭建成本管理信息化平台，整合 BIM 模型数据、施工进度数据、成本核算数据，实现多维度数据联动分析。通过平台实时监控人工、材料、机械等成本支出，自动生成成本偏差预警，为决策提供数据支撑。

#### 4.5 人才保障：提升专业管控能力

组建跨专业成本控制小组，涵盖造价、技术、采购、施工等领域人员，形成协同管控机制。在项目关键节点召开成本分析会议，共同解决管控难题，确保成本控制措施落地见效。加强项目团队专业培训，重点提升造价人员、施工管理人员的成本管控技能与数字化工具应用能力。定期组织行业案例分享与技术交流，学习先进的成本控制方法与经验<sup>[5]</sup>。

### 5 典型案例分析

#### 5.1 案例一：西咸新区秦汉中心医院机电工程

此项目总建筑面积 25.5 万 m<sup>2</sup>，涵盖门诊楼、医技楼、住院部等多个区域，机电系统包括通风、给排水、强弱电等十余个子系统，管线密度大，且需满足医疗功能对空间净高的严苛要求。项目初期面临管线碰撞风险高、支吊架选型安全隐患等问题。通过采用品茗 HiBIM 软件进行全流程成本管控，通过三维模型进行管线碰撞检测与空间净高分析，优化综合支吊架设计，替代传统单管支吊架。建立动态成本跟踪机制，实时对比预算与实际支出，严格控制设计变更。推行预制加工技术，风管、支吊架等构件工厂预制，现场组装，提高施工效率。

最终，项目累计节约费用 150 余万元，节约管材 1745 米，

工期缩短 41 天。成本偏差率控制在 3% 以内，其中材料损耗率从传统的 5% 降至 1.8%。项目荣获 2024 年度安装行业 BIM 技术应用二等奖，实现了成本、质量、进度的协同优化。

#### 5.2 案例二：某工业厂房机电安装项目

此项目总投资 5000 万元，涵盖暖通、电气、消防等系统，初期存在预算编制粗放、材料采购分散、施工组织不合理等问题，成本超支风险较高。通过决策阶段开展详细可行性研究，预留 4% 不可预见费；设计阶段推行限额设计，利用 BIM 技术优化管线路径，减少管道长度 12%；施工阶段实行集中采购，主材批量采购获得 7% 折扣，推行限额领料制度；建立月度成本分析会制度，及时纠偏超支问题。最终，项目实际成本 4750 万元，成本节约率 5%，人工效率提升 20%，机械闲置时间减少 30%。竣工结算周期缩短 25%，未发生重大设计变更导致的成本超支，项目投资回报率较预期提升 3 个百分点。

### 6 结论与展望

机电工程施工项目成本控制是一项系统工程，需贯穿项目全生命周期，结合技术优化、管理创新、数字化赋能等多重手段，实现从“事后核算”向“事前预控、事中管控、事后优化”的转型。本文提出的全流程成本控制体系，通过决策阶段精准策划、设计阶段源头优化、施工阶段动态管控、竣工阶段复盘沉淀，可有效解决当前行业存在的预算粗放、变更频繁、管控滞后等痛点。典型案例验证表明，优化后的措施能够实现项目成本降低 8%-15%，工期缩短 10%-20%，显著提升项目经济效益与企业市场竞争力。

未来，随着数字孪生、人工智能等技术的深度应用，机电工程成本控制将向智能化、精细化方向发展，通过构建全要素、全流程的智能管控平台，实现成本风险的精准预判与实时调控。施工企业应主动适应行业发展趋势，加强数字化工具应用与人才培养，完善成本管控机制，将成本控制融入项目管理各环节，为企业高质量发展与建筑行业绿色转型提供有力支撑。

#### 参考文献

- [1] 张磊,王敏.基于BIM的机电工程全生命周期成本控制研究[J].机电工程,2024,41(6):789-795.
- [2] 陈明,赵伟.供应链协同视角下机电工程材料成本控制措施[J].施工技术,2024,53(11):124-128.
- [3] 张伟,陈涛.预制装配技术在机电工程成本优化中的应用实践[J].建筑施工,2024,46(7):1365-1368.
- [4] 李娟,刘峰.机电工程施工项目成本管控痛点与优化路径[J].建筑经济,2023,44(8):67-72.
- [5] 王丽,周健.数字化转型背景下机电工程成本动态管控体系构建[J].工程管理学报,2023,37(5):89-94.

# Comprehensive Treatment of Pipeline Cathodic Protection Interference by Sporadic Current

Qiang Liao Yong Liu Longfei Hu

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 433100, China

## Abstract

Scattered current interference is a critical factor causing failures in pipeline cathodic protection systems and triggering localized corrosion, posing a severe threat to the operational safety of energy transmission pipelines such as oil and gas. Using a long-distance oil and gas pipeline project as a case study, this paper analyzes the interference mechanisms and hazards of DC and AC scattered currents based on their generation and erosion characteristics. It establishes a comprehensive management framework encompassing "source control, path interruption, terminal protection, and monitoring/early warning." The study details practical approaches for addressing interference sources, upgrading protective technologies, and enhancing operation and maintenance management. Through coordinated application of multiple technologies, the research achieves precise prevention and control of scattered current interference, providing technical support for stable pipeline cathodic protection system operation. This ensures long-term safety and extends the service life of energy transmission pipelines.

## Keywords

pipeline; cathodic protection; stray current interference; comprehensive treatment; corrosion protection

## 管道阴极保护杂散电流干扰的综合治理方案实践

廖强 刘勇 胡龙飞

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

杂散电流干扰是导致管道阴极保护系统失效、引发管道局部腐蚀的核心因素, 严重威胁油气等能源输送管道的运行安全。本文以某长输油气管道工程为案例, 基于杂散电流的生成机制与侵蚀特性, 深入分析直流与交流杂散电流的干扰方式及危害, 构建“源头控制-路径阻断-末端防护-监测预警”全链条综合治理方案体系, 详细阐述干扰源处理、防护技术升级、运维管理强化等关键技术的实践要点。通过多技术协同应用, 实现杂散电流干扰的精准防控, 为管道阴极保护系统稳定运行提供技术支持, 保障能源输送管道长期安全并延长其使用寿命。

## 关键词

管道; 阴极保护; 杂散电流干扰; 综合治理; 腐蚀防护

## 1 引言

管道传输作为油气等能源的核心输送方式, 具备高效、经济、环保等优势, 在能源保障体系中占据关键地位。钢管在土壤、地下水等腐蚀环境中易发生电化学腐蚀, 阴极保护系统通过施加外部电流或牺牲阳极, 使管道表面形成稳定钝化膜, 成为抑制管道腐蚀的核心技术。随着工业电气化水平提升, 电力线路、电气化铁路、电解工业等设施大量布局, 导致土壤环境中存在大量杂散电流, 这类无序流动的电流会严重干扰管道阴极保护系统的正常运行。杂散电流通过土壤与管道的导电回路, 造成管道阴极保护电位偏移, 破坏原有腐蚀防护平衡, 引发局部腐蚀、点蚀等问题, 甚至导致

管道穿孔泄漏, 引发安全事故与环境风险。本文结合工程实践, 深入探讨管道阴极保护杂散电流干扰的综合治理技术, 为管道运维单位提供科学可行的解决方案。

## 2 工程概况

该工程系某长输油气管道建设项目, 管道采用的是 L360 钢质管材。管道周边地形繁复, 经过工业区、铁路干线、高压输电线路走廊等诸多高干扰地带, 周边坐落着 3 家电解电镀企业、2 座化工厂, 存在持续的直流杂散电流排放; 输电线路横跨 2 条 500kV 高压直流输电线路、3 条 220kV 交流输配电线路, 存在因电磁感应与电容耦合产生的交流杂散电流干扰; 沿着线路的土壤类型是以粉质黏土、砂壤土作为主要类型, 其土壤电阻率处于 50~300 $\Omega \cdot m$  范围, 部分地段 pH 值在 4.5~6.0 之间, 有较强的腐蚀性, 管道初始设计选用强制电流阴极保护体系, 配置 2 座阴极保护站, 阳极地

【作者简介】廖强 (1989-), 男, 本科, 助理工程师, 从事阴极保护研究。

床采用浅埋式布局。启用3年后，经过检测发现，管道沿线3处监测点的阴极保护电位偏离了-0.85~-1.2V的最优防护范围，正向最大偏移达到0.5V，有4处管道涂层发生破损，部分区域已形成点蚀坑，杂散电流干扰现象十分明显，迫切需要实施综合治理。

### 3 杂散电流干扰的产生机制与危害

#### 3.1 杂散电流的来源与分类

杂散电流指在设计电路之外无序流动的电流，按电流性质可分为直流杂散电流与交流杂散电流两大类，其主要来源与特性如下表1所示。

表1 杂散电流来源与特性分类表

杂散电流类型	主要来源	传播特性	影响因素
直流杂散电流	高压直流输电线路、电气化铁路牵引供电系统、电解电镀工业、阴极保护系统泄漏	通过接地极或土壤介质形成稳定传导通路，构建“土壤-管道”导电回路	工业设施运行状态、土壤导电性能、管道与干扰源距离
交流杂散电流	交流输电线路、工业设备运行产生的谐波电流	通过电磁感应、电容耦合途径感应生成，形成周期性电位波动	设施运行频率、与管道间距、电磁环境强度

杂散电流的强度与分布呈现明显动态变化特性，受工业设施运行工况、土壤导电性能、管道与干扰源距离等多重因素影响。

#### 3.2 干扰机制

##### 3.2.1 直流杂散电流干扰机制

直流杂散电流干扰的核心是形成“土壤-管道”导电回路。当杂散电流从土壤流入管道时，管道表面发生还原反应，获得阴极保护效果，无腐蚀发生；当杂散电流从管道流出至土壤时，管道表面金属原子失去电子发生氧化反应，形成腐蚀电池，引发局部腐蚀。该过程导致管道阴极保护电位正向偏移，超出最优保护范围，缩小阴极保护系统有效保护区间，使原本受保护的管道段落成为腐蚀敏感区域，同时加速管道涂层破损处的腐蚀进程<sup>[1]</sup>。

##### 3.2.2 交流杂散电流干扰机制

交流杂散电流主要通过电磁感应与电容耦合两种途径干扰管道阴极保护系统，其中电磁感应是最主要的干扰类型。交流输电线等设施运行时产生周期性变化的磁场，管道作为闭合导体在磁场中感应生成交流电压与电流，导致管道阴极保护电位周期性起伏；电容耦合则发生在高压交流设施与管道间距较近的场景，通过电场耦合使管道表面聚集电荷，造成电位偏移<sup>[2]</sup>。交流杂散电流会降低阴极保护系统极化效果，导致管道“过保护”与“欠保护”交替出现，同时可能诱发电解腐蚀，破坏管道表面钝化膜，加速涂层老化。

#### 3.3 主要危害

杂散电流干扰对管道及阴极保护系统的危害具有多维度、不可逆转的特点，具体危害及影响程度如下表2所示。

表2 杂散电流干扰主要危害程度表

危害类型	具体表现	影响程度	风险后果
阴极保护系统失灵	保护电位偏移，极化效果失效	严重	管道失去腐蚀防护，腐蚀速率骤增
局部腐蚀与点蚀	隐蔽性强、破坏速率快，形成点蚀坑	极严重	管道壁厚变薄，引发穿孔渗漏
管道涂层破坏	加速涂层老化、脱落，绝缘性能下降	严重	扩大腐蚀隐患，加剧管道破损
运维成本上升	设备损耗加重，修复与维护投入增加	中等	提高运营成本，降低经济效益
安全与环境隐患	油气渗漏、火灾爆炸等险情	极严重	人员伤亡，环境污染

### 4 综合治理关键技术实践

#### 4.1 源头控制技术

源头控制是杂散电流干扰治理的核心环节，旨在减少杂散电流的生成与逸散。改良接地极布置与形式，采用深埋接地极、多极接地设计，降低接地极周边电位梯度；合理选择接地材料，提升接地系统稳定性与导电能力<sup>[3]</sup>；变更电气化铁路牵引供电系统回流模式，采用双边供电、回流线敷设等技术，减少回流电流外泄。优化电极布局与电流调控，减少生产过程中杂散电流的生成。加强谐波治理，降低谐波电流引发的杂散电流干扰。

#### 4.2 路径阻断技术

选用高性能防腐涂层，增强管道表面绝缘能力；对管道涂层进行全面检测与修补，处理涂层破损、剥离等问题；

在强干扰区域，额外包裹绝缘套管或缠绕绝缘胶带，提升局部绝缘防护效果。

在管道合适位置安装绝缘接头或绝缘法兰，将管道划分为独立防护单元，阻止杂散电流在管道内传导，避免干扰范围扩大<sup>[4]</sup>；定期检测绝缘性能，及时处理绝缘失效问题。在管道周边土壤导电率较高区域，敷设绝缘砂垫层或施用土壤改良剂，减弱土壤导电能力；在管道与干扰源之间设置绝缘阻挡物（如绝缘板、绝缘浆液），截断传播路径。路径阻断技术的实施流程如下图1所示。

#### 4.3 末端防护技术

末端防护技术针对管道本体，通过优化阴极保护系统与增设防护装置，抵御杂散电流干扰。采用强制电流阴极保护与牺牲阳极协同保护模式，提升系统抗干扰能力；提高阴

极保护设备输出功率与调节范围，安装智能电位调控装置，实时补偿杂散电流引发的电位偏差；改良阳极地床排布，避免与杂散电流干扰源叠加。

针对直流杂散电流，安装直流排流阀，当管道电位偏移超出阈值时，自动开启排流回路，将杂散电流引导至大地或干扰源回流系统；针对交流杂散电流，设置交流排流装置

或滤波设备，阻止交流电流累积，降低干扰强度；根据干扰动态变化，选择自动排流、强制排流等方式<sup>[9]</sup>。在强干扰区域增添辅助阳极，提升阴极保护电流分布均匀度；改良管道接地装置，采用深井接地、环形接地等方式，减小接地电阻，增强杂散电流引流效率。不同类型杂散电流的末端防护装置及技术参数如下表4所示。

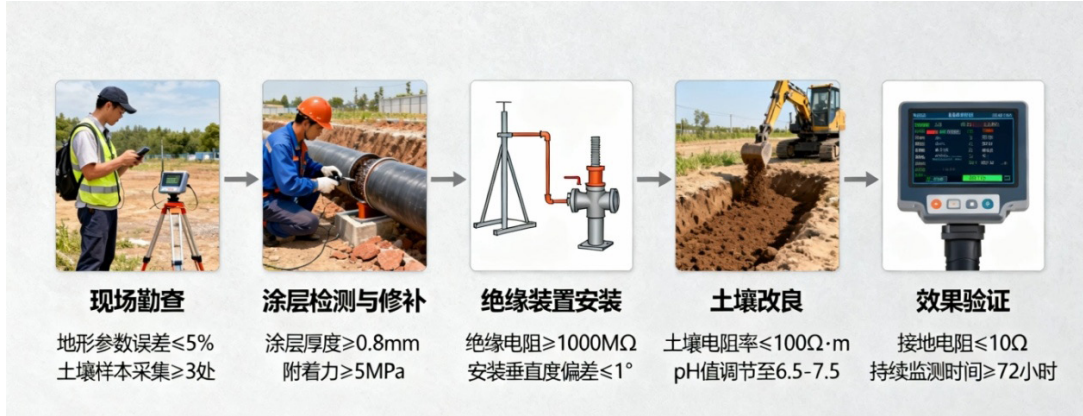


图1 路径阻断技术实施流程图

表4 末端防护装置类型及技术参数表

防护装置类型	适用干扰类型	核心技术参数	防护效果
直流排流阀	直流杂散电流	动作电位范围: -0.85~-1.5V, 排流能力 ≤50A	管道电位偏移修正率 ≥90%
交流排流装置	交流杂散电流	滤波频率: 50Hz, 交流阻抗 ≤1Ω	交流干扰强度降低 75% 以上
智能电位调控装置	交直流混合干扰	调节精度: ±0.05V, 响应时间 ≤1s	管道电位稳定在 -0.85~-1.2V 最优范围
辅助阳极	强干扰区域	输出电流密度: 1~5A/m <sup>2</sup> , 使用寿命 ≥15 年	阴极保护电流分布均匀度提升 60%

#### 4.4 监测预警与运维管理技术

设置电位监测点、电流监测点、土壤腐蚀监测点，实时监控管道阴极保护电位、杂散电流强度、土壤腐蚀性等参数；采用在线监测与离线检测相结合的方式，在线系统实现数据实时采集与传输，离线检测定期对关键参数精准校正；利用卫星定位、无线通信技术，搭建远程监测平台，实现数据集中管控与分析。监测点布置及监测参数如下表5所示。

基于监测数据，构建杂散电流干扰风险评估模型，设置预警阈值，当监测指标超出阈值时自动发出告警信号；制定应急处理预案，明确不同干扰强度下的应急措施，如调整阴极保护参数、启用备用排流装置、临时停止干扰源运行等，快速响应并控制风险。风险预警与应急处置流程如下图

2 所示。

### 5 综合治理效果验证

本工程实施综合治理方案后，通过为期1年的持续监测，各项指标均达到预期目标。治理前直流杂散电流最大强度达到3.2A，治理后降至0.5A以下，交流杂散电流最大强度由5.8A降到1.2A以下，干扰强度的下降幅度均超出75%；在管道沿线，98%以上监测点的阴极保护电位处于-0.85~-1.2V的最佳防护范围，电位偏差修正比率达到92%；涂层破损之处未产生新的点蚀坑，先前点蚀坑的腐蚀速率从治理之前的0.3mm/a下降到0.05mm/a以下；阴极保护系统运行故障出现率由8.5%降至1.2%，运维开支比治理前降低了30%。

表5 监测点布置及核心监测参数表

监测点类型	布置间距	核心监测参数	监测频率	预警阈值
电位监测点	1~2km/个	管道阴极保护电位	实时在线监测	超出 -0.85~-1.2V
电流监测点	3~5km/个	杂散电流强度	实时在线监测	直流 ≥1A, 交流 ≥5A
土壤腐蚀监测点	5~8km/个	土壤电阻率、pH值、氧化还原电位	每月离线检测1次	电阻率 ≤100Ω·m, pH <5 或 >9