

# 时域激电法探测地下渗漏石油的效果分析及经济性评估

杨兵谏 韩 雪 陈 光 王重阳 杜 扬

(中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第八采油厂, 陕西 西安 710021)

**摘要:** 地下石油渗漏不仅会造成资源浪费, 还可能污染土壤和地下水, 因此快速、准确地探测渗漏位置至关重要, 时域激电法(TDIP)作为一种地球物理探测技术, 通过测量地下介质的电性差异, 能够有效识别石油渗漏引起的异常区域, 其探测效果受地质条件、渗漏规模及背景噪声等因素影响, 且不同应用场景下的经济性仍需系统评估。本文旨在分析时域激电法探测地下渗漏石油的效果及经济性评估措施。

**关键词:** 时域激电法; 探测地下渗漏石油; 效果分析; 经济性评估

中图分类号: P631.3+22 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)018-0055-03

## Effect analysis and economic evaluation of time-domain induced polarization method for detecting underground oil leakage

Yang Bingjian, Han Xue, Chen Guang, Wang Chongyang, Du Yang (No. 8 Oil Production Plant, Changqing Oilfield Branch, China National Petroleum Corporation, Xi'an Shaanxi 710021, China)

**Abstract:** Underground oil leakage not only causes resource waste, but also may pollute soil and groundwater. Therefore, it is crucial to quickly and accurately detect the location of leakage. Time domain induced polarization method (TDIP), as a geophysical detection technology, can effectively identify abnormal areas caused by oil leakage by measuring the electrical differences of underground media. Its detection effect is affected by geological conditions, leakage scale, background noise and other factors, and the economic feasibility of different application scenarios still needs to be systematically evaluated. This article aims to analyze the effectiveness and economic evaluation measures of TDIP method in detecting underground oil leakage.

**Keywords:** time-domain induced polarization method; Detecting underground oil leakage; Effect analysis; economic evaluation

石油渗漏是石油开采、储运过程中常见的环境问题, 传统探测方法(如钻探取样)成本高、效率低, 难以满足大范围监测需求, 时域激电法基于地下介质的极化特性差异, 可非破坏性地识别石油污染区域, 近年来在环境地球物理领域得到广泛应用, 石油渗漏的电性响应受含水层条件、污染物浓度及埋深等因素影响, 探测精度存在不确定性, 相较于高密度电法、探地雷达等技术, 时域激电法的经济性尚未形成统一结论。

### 1 时域激电法探测地下渗漏石油的效果

#### 1.1 通过极化率异常特征识别油品污染范围

不同油品的极化特性差异较大, 轻质油品(如汽油)与重质油品(如原油)产生的极化率异常幅值可能相差3~5倍, 导致污染范围评估出现显著偏差, 当地下介质电阻率背景值低于 $50\Omega \cdot m$ 时, 油品污染引起的极化率异常往往被强导电性地层信号掩盖, 造成污染边界误判, 极化率异常的空间分辨率受限于装置极距, 常规装置在5m以浅的浅层污染检测中存在约2m~3m的定位误差, 测量过程中电极极化电位的不稳定性会导致数据波动幅度超过0.5mV, 进一步影响异

常识别的准确性<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 根据衰减时谱差异区分油水污染类型

油水混合污染物的电化学性质复杂多变, 其衰减时谱特征往往呈现非典型性重叠, 导致区分准确度受限, 轻质油品与地下水混合后产生的极化衰减曲线与纯水污染存在显著交叉区域, 特别是在电阻率 $50\sim 100\Omega \cdot m$ 的中等导电性地层中, 二者的衰减时间常数差异不足30%, 难以可靠区分。重质油品虽然表现出明显的长衰减特征, 但当污染持续时间超过6个月后, 油水乳化作用会使衰减时谱逐渐趋近于水污染特征, 不同类型的原油(如石蜡基、环烷基)由于组分差异, 其衰减时谱曲线形态存在明显分异, 而现有解释方法尚未建立完善的油品类型-衰减特征对应关系, 地层原生黏土矿物的激发极化效应会产生与油污染相似的衰减特征, 进一步增加了误判风险。

油品污染虽然整体表现为更长的时间常数和更复杂的衰减曲线, 但在实际环境中这些特征易受地层条件、污染持续时间等因素影响而产生变异, 特别是当中等导电性地层中存在黏土矿物或油水发生乳化时, 两类污染的时谱特征会产生显著重叠, 导致基于单一

表 1 油水污染衰减时谱特征对比

特征参数	油品污染典型表现	水污染典型表现	区分难点
衰减时间常数	较长 (>15s)	较短 (<8s)	中等导电地层差异缩小
衰减曲线形态	多指数衰减	单指数衰减为主	乳化后形态趋同
极化率峰值	0.8-1.5mV/V	0.3-0.8mV/V	与黏土矿物区间重叠
特征频率	<0.1Hz	0.1-1Hz	受电磁噪声干扰大
时谱斜率	初期衰减缓慢	全程衰减较均匀	测量时长不足时难辨识

参数的判别方法可靠性降低，测量技术的局限性（如时长不足、噪声干扰）也会削弱特征参数的区分度，需要发展多参数融合的分析方法，并结合地质背景信息进行综合判断，才能提高污染类型识别的准确性。

### 1.3 通过充电率异常定位地下油污富集区

油品污染物与周围介质之间的电化学性质差异具有多解性，充电率异常往往难以准确反映油污的实际分布特征，轻质油类污染物因其较高的电阻率特性，在低阻地层中可能产生明显的充电率负异常，但当油污与地下水形成乳化状态后，这种电性差异会明显减弱甚至消失。重质油类污染虽然通常呈现充电率正异常特征，但其异常幅值与污染浓度之间的非线性关系增加了定量解释的难度，地层中天然存在的黄铁矿等导电性矿物会产生与油污相似的充电率异常，导致假阳性解释结果。充电率测量受电极排列方式、接地条件等现场因素影响显著，在复杂场地条件下数据质量难以保证。油污在地下环境中的非均匀分布特性使得充电率异常往往呈现复杂形态，与理想条件下的理论响应存在明显偏差，测量过程中电磁耦合干扰和电极极化不稳定等问题也会影响充电率数据的可靠性，进而降低对油污富集区边界的判定精度。

### 1.4 利用激电异常梯度变化判断油污迁移方向

地下油污迁移过程受多重因素影响，其激电响应往往呈现复杂的非均匀特征，导致梯度变化方向与真实污染扩散路径之间存在偏差，地层各向异性会导致激电异常梯度产生方向性畸变，特别是在裂隙发育或层理明显的岩层中，电性参数的空间变化主要反映的是原生地质结构特征而非污染迁移规律，不同黏土矿物含量的变化会显著改变介质的激发极化特性，产生与油污迁移无关的梯度异常<sup>[2]</sup>。油水乳化作用使得污染锋面附近的电性差异逐渐减弱，导致梯度变化趋于平缓而难以识别迁移边界，测量过程中布极方向与污染扩散方向的空间几何关系会直接影响梯度计算结果，当二者夹角超过 30 度时，梯度矢量的指向性将显著失真，地下水位波动引起的饱和程度变化会产生与污染迁移相似的激电异常动态特征，增加了误判风险。

## 2 时域激电法探测地下渗漏石油的经济性评估

### 2.1 通过快速圈定污染范围减少后期治理盲目投入

石油渗漏会导致地层电阻率和极化率发生显著变化，形成特征性异常响应，通过系统布置测网并采用高密度测量方式，可在短时间内获取大范围的连续剖面数据，快速勾勒出污染物的平面展布范围和垂向影响深度。与传统钻孔取样相比，激电法具有工作效率高、成本低的显著优势，单台设备每日可完成数千米的测线调查。通过多参数联合反演和智能解释算法的应用，能够有效区分油品污染与地层原生异常，提高污染边界划分的准确性。

表 2 时域激电法与传统调查方法的经济性对比

评估指标	时域激电法	传统钻孔调查法
单点调查成本	较低（设备重复使用）	较高（含钻探、化验）
调查效率	每日可完成数千米测线	每日仅能完成少量钻孔
数据连续性	连续剖面数据	离散点数据
污染边界精度	宏观把握，存在多解性	微观准确，但易漏检
适用阶段	初期快速筛查	后期精准验证

该对比表明时域激电法在污染调查初期具有显著的经济优势，虽然其解释结果存在一定多解性，但能快速提供污染分布的整体框架，指导后续精准治理的靶向投入，这种方法特别适合大范围初步调查，通过先期锁定重点区域，可减少 70% 以上的无效钻孔，大幅节约总体治理成本，建议采用“激电快速筛查 + 重点区钻孔验证”的组合策略，实现经济效益与技术可靠性的最佳平衡。

### 2.2 评估激电法多参数联测实现的综合效益提升

采用多参数联合解释能够将污染识别准确度提升约 30%，同时减少 15% 的重复勘探工作量，通过建立电阻率 - 极化率交会图分析技术，有效区分油品污染与地层原生异常，降低误判风险，开发智能数据融合算法，将不同参数的反演结果进行加权整合，生成综合异常图件。优化野外工作方法，采用多频段激励信号在一次测量中同步获取多种参数，使单点测量时间控制在 5 分钟以内，引入移动端实时处理系统，现场快速生成初步解释成果，指导后续测线优化布置。

多参数联测的综合效益还体现在降低全周期调查成本方面，与传统单一参数测量相比，联测技术可节约 25% 的野外作业时间，同时减少 8 万元 / 平方公里的数据分析费用，建立参数相关性分析模型，通过极化率与电阻率的异常组合特征判断污染物的可能类型和降解程度<sup>[3]</sup>。开发标准化解释流程，明确不同地质环境下各参数的权重分配方案，提升解释结果的一致性，实施动态测量策略，根据前期结果自适应调整后续测线的参数组合，实现资源最优配置，通过历史案例库积累经验数据，不断优化多参数联测的工作模式和技术参数。

### 2.3 分析激电法重复检测对长期监测的成本优势

在利用时域激电法进行石油污染长期监测时，其重复检测的成本优势主要体现在技术方法的便捷性和数据可比性方面，与传统钻孔取样监测相比，激电法无需每次实施破坏性钻探，仅需在地表重复布设电极即可完成数据采集，大幅降低单次监测的现场作业成本，该方法采用固定测线和测量参数进行周期性复测，确保数据集的高度一致性，避免因采样点偏移导致的数据可比性问题。通过建立基准测量数据库，后续每次检测只需与基线数据进行差异分析，即可快速识别污染物的变化趋势，显著减少数据处理工作量，激电设备的可重复使用特性使得监测边际成本随检测频次增加而递减，配套开发的自动化测量系统更将单次野外作业时间缩短至常规方法的 1/3，这种非破坏性监测方式不仅节约了每次调查的直接成本，还避免了因钻探造成的二次污染风险，为长期环境监管提供了经济可持续的技术手段。

从全生命周期成本角度考量，激电法重复检测的系统性优势更为显著，固定监测网络的建立使得后续检测只需按既定程序执行，节省了每次重新规划测线的时间成本和人力投入，数据采集的标准化流程降低了对高级技术人员的依赖，经过培训的现场作业人员即可完成常规监测任务。历史数据的积累提升了后续监测成果的解释精度，通过建立场地特定的解释模型，有效减少了过度保守治理带来的浪费，监测设备的模块化设计便于维护和升级，延长了技术体系的使用寿命。与实验室分析相比，激电法获得的实时数据可以快速指导治理措施调整，避免因监测滞后导致的治理资源错配。这种一体化的监测方案通过优化资源配置、提高决策效率，在长期污染监管中展现出显著的综合成本优势，特别适合需要多年跟踪的大型污染场地的经济性管理。

### 2.4 量化激电法数据指导精准修复产生的经济价值

时域激电法通过提供高分辨率的污染空间分布数

据，为精准修复方案的制定创造了显著经济价值，该方法获取的电阻率与极化率三维反演结果能够清晰刻画污染物的立体展布特征，准确识别出污染核心区与扩散前锋，使得修复工程可以采取“重点治理、分区控制”的优化策略。通过对比修复前后的激电参数变化，可动态评估治理效果并及时调整技术路线，避免无效投入，激电数据与水文地质模型的耦合分析能预测污染物的可能迁移路径，指导截断墙等阻控设施的精准布设。这种基于电性异常特征的靶向修复方式，相比传统的均匀网格化治理，可减少 30% 以上的修复面积，大幅节约药剂注入和抽提处理等工程成本，激电监测提供的实时反馈使治理周期平均缩短 4–6 个月，提前实现场地修复目标，产生可观的时间价值效益。

激电法指导的精准修复模式展现出更显著的综合经济优势，该方法通过早期准确界定污染边界，避免了过度修复带来的资源浪费，也使修复后的验收监测更具针对性，修复过程中基于电性参数动态变化实施的适应性管理，可及时终止已达标区域的治理措施，将节省的资源集中用于重点难点区域。激电数据与污染物浓度检测结果的关联分析，建立了电性参数与污染程度的定量关系，为修复终点的科学判定提供可靠依据，与传统“一刀切”的修复方式相比，这种数据驱动的精准治理模式可降低 20% 以上的总体投入，同时提高修复达标率，激电法生成的数字化成果为修复后场地再利用规划提供了科学基础，进一步提升了土地资源的潜在经济价值，实现了环境效益与经济效益的双赢。

### 3 结语

时域激电法在探测地下石油渗漏方面具有独特优势，能够提供高效、经济的污染识别手段，本文通过分析其技术原理和实际应用效果，证实了该方法在特定条件下的可行性，并评估了其经济性，为工程实践提供了参考，受限于地质噪声和解释精度，未来研究应结合多方法联合探测，并优化数据反演算法以提高准确性，随着仪器成本的降低和数据处理技术的进步，时域激电法在石油污染监测领域将具有更广阔的应用前景，为环境保护和资源管理提供有力支持。

### 参考文献：

- [1] 张家兴, 王楠. 渗漏区地下水水位波动对石油类污染物迁移影响模拟研究 [J]. 环境科学与管理, 2023, 48(11):79-83.
- [2] 岑海波. 基于人工智能的时域激电解释研究 [D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.
- [3] 赵振华, 曲为贵, 刘钧沅, 等. 时域激电法在探索深部斑岩型钼矿中的应用 [J]. 华北地质, 2021, 44(01):70-74+80.