

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/SHAPEI

团 体 标 准

T/SHAPEI XXXX—XXXX

在产企业土壤和地下水污染源头防控高密度电法预警技术规范

点击此处添加标准名称的英文译名

草案版次选择

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

上海市环境保护产业协会 发布

目 次

前言	
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号	2
5 总则	2
6 技术设计	3
7 仪器设备	6
8 数据采集、传输与处理	7
9 异常识别与预警发布	8
10 监测成果储存	9
附录 A（资料性） 不同污染物响应特性	11
附录 B（资料性） 高密度电阻率测试装置	12
附录 C（资料性） 电阻率背景值	16
参考文献	17

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由 宝武集团环境资源科技有限公司 提出。

本文件由上海市环境保护产业协会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

在产企业土壤和地下水污染源头防控高密度电法预警技术规范

1 范围

本文件规定了在产企业污染源头防控中高密度电法在线监测环境风险预警技术的技术设计、仪器设备、数据采集、传输与处理、监测成果储存的要求与技术规则。

本文件适用于工业园区、化工厂区等在产企业环境下的污染物泄漏监测与预警工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 17626.2 电磁兼容 试验和测量技术 静电放电抗扰度试验

GB 18597 危险废物贮存污染控制标准

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）

GB/T 50548 330kV~750kV架空输电线路勘测标准

DZ/T 0286 地质灾害危险性评估规范

HJ 25.1 建设用地土壤污染状况调查技术导则

HJ 25.2 建设用地土壤污染风险管控和修复 监测技术导则

HJ 25.3 建设用地土壤污染风险评估技术导则

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

高密度电阻率法 electrical resistivity tomography

一种通过多电极组合自动测量地下介质导电性差异的阵列式地球物理勘探技术。

3.2

污染土电阻率 contaminated soil resistivity

受污染物（如重金属、有机物、盐分等）影响的土壤导电特性，反映离子迁移能力及污染物-土壤相互作用。

3.3

预警阈值 early warning threshold

基于历史数据、理论模型或专家经验设定的监测指标临界值，需动态调整以适应环境变化和业务需求。

3.4

污染风险预警 pollution risk warning

污染风险预警是对环境中可能存在的各种风险因素进行全面分析，为管理者提供决策依据，以便制定针对性的预防和治理措施，从而保护生态环境和公众健康。

3.5

泄漏监测 leak monitoring

泄漏监测是通过传感器技术（如激光气体检测、光纤分布式传感）、实时数据采集系统及人工巡检，对工业设施（如储罐、管道）中有害物质（化学品、油气）的非受控释放进行识别、定位和量化，以防止环境污染或安全事故。

3.6

时移电阻率数据反演 time-lapse resistivity data inversion

一种基于多次重复测量的动态地球物理成像技术，通过对比不同时间节点（ t_1 、 t_2 、……， t_n ）获取的电阻率数据集，利用反演算法（如最小二乘法、贝叶斯反演或差异反演）重建地下介质电阻率时空演化模型，定量表征因环境变化（如污染物迁移、地下水动态、土壤盐渍化）或人为干预（如修复工程、注水驱油）引起的地下介质电性参数变化过程。

3.7

时移电阻率差异值 time-lapse resistivity difference

在不同的时间点（ t_1 、 t_2 、……， t_n ）测量同一材料或地质体的电阻率时，所得到的电阻率值之间的差异。这种差异通常用于监测和分析材料或地质体在时间维度上的变化，例如在环境监测、工程地质或水文地质研究中。

4 符号

下列符号适用于本文件。

AB: 供电电极距，单位为m。

I: 供电电流，单位为mA。

K: 装置系数，单位为m。

MN: 测量电极距，单位为m。

ρ : 电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$ 。

ΔU : 电位差，单位为mV。

5 总则

5.1 应用范围

高密度电法在线监测和预警技术主要用于在产企业（含化工、石化、制药、冶炼等行业）生产运营过程中，针对土壤和地下水环境污染泄漏的实时在线监测及预警，适用于以下情况：

- 地下储罐区、生产装置区、管廊管线等高风险泄漏源及周边区域；
- 企业厂界区域内地下水下游敏感区域；
- 已识别污染源及污染迁移扩散范围。

5.2 应用条件

宜开展高密度电法在线监测和预警工作的条件主要有：

- 目标区域与周围介质之间存在较明显的电阻率差异，能够引起可测量的异常，此电测异常能从干扰背景中分辨出来；
- 场地应具备稳定的供电条件和数据传输网络环境；
- 测区周围 15m 范围内无大功率电气设备及高压输电线。

注：大功率电器设备指额定功率超过50kW及以上的三相异步电动机、同步电动机，额定功率超过100kW的电弧炉、大型压缩机，容量超过100kVA的变压器，或者单个设备工作电流持续超过50A（380V电压工业电压供电）。

5.3 应用目标

5.3.1 核心监测目标

高密度电法在线监测和预警技术旨在实现以下核心监测目标：

- 实时监测企业生产区域及周边的潜在污染风险区域电阻率变化，通过时移电阻率数据反演，对污染泄露进行预警；
- 对已发生的污染物泄漏进行快速定位和范围界定，解析污染羽空间展布特征。

5.3.2 技术性能指标

为保障监测预警系统的可靠性和有效性，高密度电法在线监测和预警技术需满足以下性能要求：

- 从污染物渗漏到系统预警信号发出的时间延迟不大于 60 分钟（含数据传输与处理时间）；
- 重点监测区平面分辨率不大于 2m×2m，垂向分辨率不大于 0.5m；
- 建立基于污染物类型及电阻率变化率的分级报警机制（阈值设定应参照 6.6 设定），实现污染事件的三级响应；
- 实现污染源三维空间定位及体积估算功能，实现污染区域定位准确率不小于 80%，污染物体积计算误差不大于 20%；
- 构建基于历史数据的渗漏污染扩散预测模型，实现 72 小时污染羽迁移路径模拟能力，扩散趋势三维可视化呈现，动态风险等级评估功能。

6 技术设计

6.1 技术路线

总体技术路线图见图1。

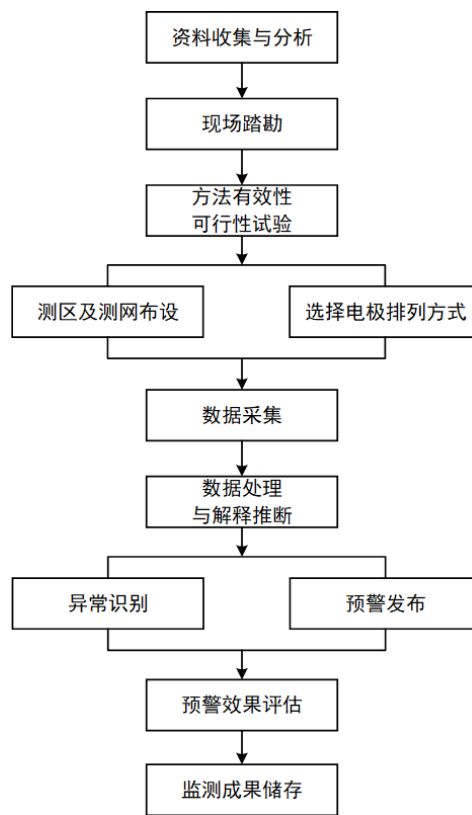


图1 总体技术路线图

6.2 资料收集和分析

设计工作前，应按照表1的要求收集相关资料。

表1 收集资料类型

资料类型	具体要求	相关标准/方法
地质水文	含水层结构（埋深、厚度）、渗透系数、地下水埋深及流向、地质构造空间展布特征、围岩层理发育程度等，精度需满足 1:1000 比例尺要求	HJ 25.1、DZ/T 0286
污染源特征	潜在泄漏源类型（储罐/管线）、污染物物性参数（电导率、密度）、历史泄漏记录（时间、位置、量级）	HJ 25.3、GB 18597
企业生产	生产设施布局图、地下管线分布图、设备运行周期（含	GB/T 50548

资料类型	具体要求	相关标准/方法
	大功率设备启停时间表)	
电磁环境本底数据	厂区 50Hz 工频干扰强度、瞬态脉冲干扰频谱特征	GB/T 17626.2

6.3 现场踏勘

现场踏勘应包括以下内容：

- 测区地形地貌特征、植被覆盖度、通视条件、交通及供电保障等环境条件；
- 测区范围内大功率设备、高压输电线、地下金属管线分布、形状、位置和运行状况；
- 核查测区范围内全部地质工程标志点与测绘控制点，建立基准点坐标数据库；
- 确保测区布设满足与高压输电线路水平间距小于 15m，与地下金属管道垂直净距不小于 3m；
- 实测测区的电磁干扰水平与特点。

6.4 方法有效性、可行性试验

6.4.1 在方法有效性或可行性存疑的测区，应进行针对性的技术可行性试验。

6.4.2 试验内容包括已知污染源的异常特征、电噪音干扰强度、合理的测量参数等，在污染物泄漏监测过程中，应保证测试误差小于污染物引起的土壤电阻率变化幅度，具体不同污染影响规律见附录 A 所示。

6.4.3 试验可采用剖面形式或单测深点形式，单测深点形式的测点数不宜少于 3 个。

6.4.4 具体试验方案见表 2。

表2 可行性试验类别

试验类别	技术要求	合格指标	
背景场稳定性	重复测量同一剖面，进行至少十次连续测量，统计相同点位处电阻率值的最大差异	ABMN 1D 测试	绝对误差 $<1 \Omega \cdot m$ 差值绝对值 $\leq 0.3 \Omega \cdot m$ 差值相对值 $\leq 0.4\%$
		2D 温纳测试	绝对误差 $<1.5 \Omega \cdot m$ 差值绝对值 $\leq 0.3 \Omega \cdot m$ 差值相对值 $\leq 0.4\%$
人工模拟泄漏	注入等效污染物（如 NaCl 溶液，浓度 5g/L，体积 $\geq 0.3m^3$ ），检测异常响应时效及信噪比	电阻率差值 $\geq 0.5 \Omega \cdot m$ 响应延迟 ≤ 20 分钟	
抗干扰能力	模拟厂区典型干扰（变频器启停、焊接作业），评估数据失真率	ABMN 1D 测试	有效数据率 $\geq 90\%$ 绝对误差 $<1 \Omega \cdot m$ 相对误差 $<50.0\%$
		2D 温纳测试	有效数据率 $\geq 90\%$ 绝对误差 $<1.5 \Omega \cdot m$ 相对误差 $<150\%$

6.4.5 试验报告需包含反演结果与实际注入位置的吻合度分析（平面误差不大于 1.5m，深度误差不大于 0.5m）。

6.5 测区及测网布设

6.5.1 测区范围应根据工作任务及测区的地质条件确定，范围应包括污染源的异常分布区域，并适当扩延至重点监测区上游，各测区具体布设参数和技术要求可参考表 3。

6.5.2 测线方向应垂直于地下水流向，如遇污染源分布复杂、地形限制或重点区域，可沿地下水流向呈放射状布设。

6.5.3 测电极距与测网密度应根据测区地电断面的复杂程度与工作任务设计。

6.5.4 重点区域电极间距不大于 2m，监测深度需穿透浅层含水层。

6.5.5 连续一个月采集重点监测区上游监测数据，建立动态本底模型。

表3 测区划分表

监测分区	布设参数	技术要求
重点区域	电极间距 0.5~2m, 监测深度 ≥8m, 可采用三维网格布设 (线距 ≤2m)	覆盖全部高风险源 (生成设施、储罐、管线等)
重点区域下游	电极间距 2~5m, 监测深度 10m, 沿地下水流向布设放射状测线 (夹角 ≤30°)	监测污染羽迁移前沿
重点区域上游	电极间距 5~10m, 监测深度 15m, 布设于厂区内风向或地下水上游区域	提供动态本底参考值

6.5.6 应确保测区内测线与大功率设备或高压输电线路水平距离不小于 15m, 与地下金属管道垂直距离不小于 3m。

6.5.7 基线监测周期、动态监测和监测数据有效性应达到如下条件:

- 基线监测周期: 连续采集 30 天 (涵盖企业完整生产周期), 采样间隔 ≤30 分钟;
- 动态监测模式: 常规监测 (间隔 1~3 小时) + 事件触发模式 (异常时自动加密至间隔 10 分钟);
- 数据有效性: 每日完整数据率 ≥95%, 缺失数据需通过插值法补全。

6.5.8 若大功率设备或高压输电线路产生的电磁干扰较强, 可增加测线与干扰源的距离, 同时加密测网; 若测区范围无法增加距离, 可在监测设备和电极周围设置屏蔽装置, 如金属屏蔽网, 减少大功率设备产生的电磁辐射对监测信号的干扰。

6.6 预警阈值设定

预警阈值设定应符合下列要求, 预警阈值参考值见表4。

- 结合企业污染物特性及地质条件, 通过理论分析和现场试验确定电阻率变化的预警阈值;
- 当测区周围有大功率设备时, 应结合大功率设备的运行情况、电磁影响特点进行现场试验, 调整预警阈值;
- 根据测区范围地下水水位、温度、湿度、土压力等外界环境变化, 定期评估预警阈值, 进行动态调整。

表4 预警阈值参考

预警等级	深度	有机污染物电阻率变化差值 ($\Omega \cdot m$)	重金属电阻率变化差值 ($\Omega \cdot m$)	响应措施
黄色预警	0~1.5m	5	5	数据复核, 启动人工排查, 排查降雨等天气因素影响
	1.5~4m	3	3	
	4~8m	2	2	
橙色预警	0~1.5m	10	8	现场表层或地下设施设备污染泄漏巡查
	1.5~4m	5	5	
	4~8m	3	3	
红色预警	0~1.5m	15	10	触发应急响应, 停产排查, 进行现场土体的送样检测, 样品采集与分析应参照 HJ 25.2 中的指定方法进行
	1.5~4m	8	8	
	4~8m	5	5	

6.7 测地工作

高密度电法的测地工作精度要求见表5。

表5 测地工作精度

测点电极距 (m)	点位中误差 (m)	高程中误差 (m)	电极距均方相对误差
0.5~1	≤0.5	≤0.25	≤3%
1~2	≤1	≤0.5	≤5%
2~5	≤2	≤1	≤5%
5~10	≤5	≤2	≤8%

6.8 电极排列方式

6.8.1 常用电极排列方式包括温纳装置、施伦贝谢装置、偶极-偶极装置等，具体电极排列方式见附录 B。

6.8.2 针对在产企业不同污染风险场景，应按表 6 的要求选择高密度电法电极排列方式类型。

表6 高密度电阻测试装置

应用场景	推荐排列方式	技术参数	适用性说明
储罐区/生产装置区	温纳、偶极装置	电极距 0.5-5m，最大探测深度 $\geq 15\text{m}$	适用于空间受限区域，对深部渗漏敏感（可识别埋深 10m 以下的储罐底部泄漏）
地下管线走廊	施伦贝谢装置	电极距 2-5m，测量层数 ≥ 8 层	沿管线走向布设，可追踪羽状污染路径（水平分辨率 $\leq 2\text{m}$ ）
厂界屏障监测区	温纳 α 装置	电极距 5m，覆盖深度 5-8m	高横向分辨率，适合浅层污染快速筛查（可检出 $\geq 1\text{m}^3$ 的渗漏体）
应急排查场景	滚动三极装置	移动步距 $\leq 2\text{m}$ ，实时成像刷新率 ≤ 10 分钟	快速响应突发泄漏事件，支持车载式移动监测（定位精度 $\leq 1.5\text{m}$ ）

6.9 数据处理与解释推断

6.9.1 数据处理应包括数据格式转换、预处理、正演和反演计算，标准化流程如表 7 所示。

表7 数据标准化处理流程

处理阶段	技术方法	关键指标
数据预处理	删除坏点（突变点）；温湿补偿；使用滤波器或去噪算法（如小波变换、平滑滤波等）去除随机噪声；截取数据（数据量过大）	数据信噪比 $\geq 4:1$
时移反演	采用电阻率层析成像技术：正则化约束最小二乘法（阻尼系数 0.8-1.2）；精细网格（介质电阻率差异大于 20:1）	反演残差 $\leq 5\%$
异常提取	调整垂向/水平平滑滤波比值；钻孔子块附加阻尼	垂向异常：调高垂向/水平平滑滤波比值

6.9.2 解释推断应结合地质背景、污染物类型及电阻率变化特征进行综合分析，具体判断依据如表 8 所示。

表8 污染物综合判别依据

电阻率变化特征	典型污染物类型	辅助判据
电阻率下降 $> 50\%$	高矿化度废水 ($\text{Cl}^- > 5 \text{ g/L}$)	地下水电导率同步上升（变化率 $> 30\%$ ）
电阻率上升 $> 50\%$	轻质非水相液体（LNAPLs）	土壤（地下水）中石油类物质检出（ $\geq 0.1\text{mg/L}$ ）
局部骤降+外围缓升	酸液渗漏（ $\text{pH} < 4$ ）	土壤 Eh 值 $< -200\text{mV}$

6.9.3 输出解释成果应包括时移电阻率差异云图（时间切片间隔不大于 1 小时）、污染源概率定位图、污染物等效体积计算表（注明误差范围）、污染羽迁移趋势动画（时间跨度为 72 小时）和地下水监测井数据的联合分析报告。

7 仪器设备

7.1 仪器设备技术要求

7.1.1 主要仪器设备包括高密度电阻率测试装置、网络采集传输装置，供电装置及可视化云平台装置。其中高密度电阻率测试装置主机、网络传输装置数据收发器、供电装置宜安装在户外防水机箱中。

7.1.2 仪器设备应满足长期监测需求。其具体技术要求见表 9。

表9 高密度电阻测试设备技术要求

设备参数	技术指标要求
测量通道	≥ 60 通道同步采集

电阻率测量范围	$0 \Omega \cdot m - 10000 \Omega \cdot m$
测量精度	$\leq \pm 2\%$ (全量程)
电极材料	耐腐蚀钛合金电极
防护等级	IP68 (地下电极) / IP65 (主机)
数据回传	支持 4G/5G 无线传输

7.2 仪器设备使用和维护

- 7.2.1 仪器设备应定期进行校准和维护，确保测量精度。
- 7.2.2 在使用过程中应注意防潮、防震、防曝晒，避免仪器受损。
- 7.2.3 仪器设备发生故障后，应及时检修并记录。

8 数据采集、传输与处理

8.1 数据采集

- 8.1.1 应通过高密度电阻率测试装置及网络采集传输装置自动采集数据。数据采集应为 Windows 系统。
- 8.1.2 采集过程中应避免人为干扰，确保数据的真实性。

8.2 数据传输

- 8.2.1 数据传输可采用平台端和移动端两种方式。长期在线监测可采用远距离网络传输，现场数据传输可通过蓝牙近距离发送至手机、平板。
- 8.2.2 数据传输应采用标准化的通信协议，确保数据传输的兼容性和安全性，如 TCP/IP 协议。
- 8.2.3 监测数据应通过网络实时传输至监控平台。优先选择稳定性高、抗干扰能力强的传输方式，如工业企业级无线网络（如 4G/5G 专网）、局域网或光纤网络。
- 8.2.4 传输系统应具备自动重连功能，确保在网络中断或受干扰后自动恢复传输，记录中断情况，生成记录日志。

8.3 数据处理

8.3.1 数据预处理

数据预处理应：

- 结合地质资料和水文地质条件对采集的数据进行预处理，包括数据校正、滤波、异常值剔除等；
- 采用专业的数据处理软件进行反演计算，生成电阻率断面图或三维模型；
- 结合预警阈值对监测结果处理结果进行解释，判别潜在污染风险。

8.3.2 温湿度噪声抑制处理

8.3.2.1 温湿度影响规律

监测周期长、监测区域温湿度变化较大的情况下，影响规律如下：

- 浅层（0-1m）视电阻率受环境温湿度变化影响显著，温度升高或湿度增大会导致视电阻率下降，二者呈负指数关系；
- 温度影响因子系数随埋深增加呈线性衰减（衰减系数约 0.03-0.04/m），湿度影响因子在 2m 以下可忽略；
- 深层（ $\geq 1m$ ）视电阻率受环境波动影响较小（标准差 $\leq 1\Omega \cdot m$ ），数据稳定性显著优于浅层。

8.3.2.2 降噪效能

对环境温湿度引起的噪声干扰进行系统性处理，具体要求如下：

- 浅层（0-1 m）降噪后视电阻率标准差降低 40%-60%（建议降至 $2.0\Omega \cdot m$ 以下）；
- 深层（ $\geq 1m$ ）标准差降低 50%-70%（建议降至 $1.0\Omega \cdot m$ 以下）；

——降噪后数据时间序列波动范围缩小 50%-70%，污染信号识别灵敏度提升 2-3 倍。

8.3.2.3 通用降噪模型

视电阻率噪声修正公式：

$$\rho_{校正} = \rho_{实测} \cdot e^{(-a \cdot \Delta T)} \cdot e^{(-b \cdot \Delta w)} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

a：环境温度影响因子， $a = -\alpha * (\ln(\rho) - m)$ ，建议取初始值 $m=2.406$ ， m 初始值应根据现场实际调整， ρ 为基准电阻率， α 与深度相关；

b：环境湿度影响因子， $b = -\beta * (\ln(\rho) - n)$ ，建议取初始值 $n=2.525$ ， n 初始值应根据现场实际调整， ρ 为基准电阻率， β 与深度相关， β 在 $z \geq 2m$ 时取0；

ΔT 、 Δw ：相对基准日的温湿度变化量。

8.3.2.4 模型适用条件

通用降噪模型针适用于以下条件：

- 监测系统布置：电极间距等于 c (m)，同步温湿度传感器垂向分辨率不大于 c (m)；
- 数据采集周期：基准数据采集不小于 30 天，采样间隔不大于 1 小时；
- 地质条件：适用于松散层、黏性土等均匀介质，基岩区需另行校正。

8.3.2.5 实施要求

对数据采集、处理及分析，各环节要求如下：

- 基准日选择应避开极端天气（暴雨、持续高温等）；
- 温度影响因子需通过至少 72 小时温度梯度试验标定；
- 湿度影响因子在浅层（ $z \leq 1m$ ）需结合降雨事件数据率定；
- 降噪后视电阻率标准差应满足：浅层（ $z < 1m$ ）不大于 $2\Omega \cdot m$ ，深层（ $z \geq 1m$ ）不大于 $1\Omega \cdot m$ ；
- 降噪后数据稳定性要求时间序列变异系数不大于 7%；
- 采用专业的数据处理软件进行统计学分析，生成降噪效果对比图；
- 结合预警阈值对监测结果处理结果进行解释，判别潜在污染风险。

9 异常识别与预警发布

9.1 异常识别

9.1.1 根据电阻率变化特征识别异常区域，分析异常的形态、位置和规模，异常智能筛查流程及要求见表 10。

表10 异常智能筛查流程

处理阶段	技术方法	判定标准
初筛报警	实时计算时移电阻率差异（ $\Delta \rho$ ），触发阈值监测	触发三级预警（参照 5.5 条款）
特征提取	三维形态学分析，低阻包裹高阻/高阻包裹低阻	判定为疑似污染事件
成因判别	联合地下水温/电阻率/水位数据，执行多参数耦合分析	排除降雨入渗等自然干扰

9.1.2 结合企业污染物特性及地质条件，判断异常是否与污染风险相关，部分污染异常识别特征见表 11。

表11 部分污染异常识别特征

异常特征	污染类型关联性	验证方法
条带状低阻体（走向与管线重合）	高盐废水管道泄漏	同步检测土壤 EC 值（ $>500 \mu S/cm$ ）
透镜状高阻体	石油类 LNAPLs 渗漏	地下水 UV 荧光检测（特征峰波长 280-320nm）
星点状异常群（电阻率骤降 $>40\%$ ）	酸液渗漏	现场 pH 试纸快速检测（ $pH < 3.5$ ）

9.1.3 不同土壤类型、水文地质条件对应的电阻率背景值可参考附录 C。

9.2 预警发布

9.2.1 当监测数据超过预警阈值并且满足触发条件时，应及时发布预警信息。

9.2.2 预警信息分为红橙黄三个预警等级，不同预警等级应符合下列要求：

- 黄色预警：短信报警+监测平台黄色标识，含异常坐标、初步体积估算（±30%）、建议排查路径；
- 橙色预警：声光报警+平台橙色标识，推送污染概率分布图（热力图）、扩散预测模型（72小时）、应急物资调度清单；
- 红色预警：上报企业应急指挥部门，发布污染溯源报告（含责任源概率分析）、实时三维污染羽模型。

9.3 预警效果评估

9.3.1 误报溯源

溯源时效要求：应在预警触发后48小时内完成预警原因回溯分析，区分三类情况：仪器故障、算法缺陷、新型污染类型。

分析方法：采用三级验证机制，原始数据复核、装置交叉验证、物性参数比对。

9.3.2 模型校准

样本更新要求：每起真实污染事件需更新反演参数库（至少增加5组训练样本）和污染羽三维电阻率分布图。

9.3.3 系统优化

时效性指标：季度评估预警响应时效需满足异常识别≤0.5小时、应急启动≤1小时、总响应≤1.5小时。

优化措施：响应延迟超过阈值时启动装置优化；提升采样频率。

10 监测成果储存

10.1 要求

10.1.1 监测成果应由系统自动收集、整理并留档。

10.1.2 监测成果应附有原始监测数据、应急处理措施、结果图表及相关原始记录，所有资料均留档、可在线查看，数据存储架构应符合表 12 的要求。

表12 数据存储架构

数据类型	存储格式	存储周期	更新频率
原始电位数据	HDF5（含时间戳及电极 ID）	永久保存	实时同步
时移电阻率反演数据	NetCDF（三维网格化）	≥10年	每4小时增量存储
预警事件记录	JSON（结构化事件日志）	≥5年	事件触发式更新
污染羽模型数据	STEP（AP242 扩展格式）	≥项目运营期	模型版本迭代时更新

10.2 成果报送

监测成果主要包括监测数据结果、预警数据、异常解释及分析，包括的数据具体内容见表13。

表13 监测数据类别

数据类别	具体内容	元数据要求
原始监测数据	电极电位原始值、供电电流、接地电阻、环境温度、大功率设备状态	包含设备 ID、采集时间 (UTC+8)、坐标 (CGCS2000)、数据质量标志位 (0-正常, 1-异常)
预处理数据	温压补偿后数据、滤波去噪数据集、背景场校正系数	记录处理算法名称、参数设置 (如小波基函数类型、阈值)、操作员 ID
预警事件数据	报警触发时间、异常体特征参数、响应措施记录、处置效果反馈	关联应急预案编号、污染物类型代码、责任人员签章
解释成果数据	时移电阻率差异云图、污染源定位报告、反演残差分析表	注明解释模型版本、校验人员、置信度评估结果

附录 A
(资料性)
不同污染物响应特性

不同污染物响应特性见表A.1。

表A.1 不同污染物响应特性

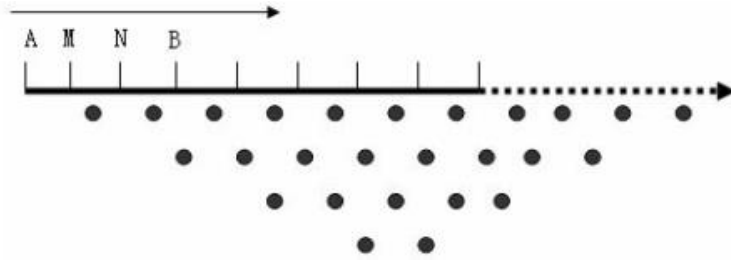
污染物类型	典型污染物示例	泄漏深度范围	最低可检浓度	最小可检面积	电阻率变化特征	干扰因素	验证方法	参考标准
重金属污染	铅、镉、铬(六价)	0-15m	50mg/kg (土壤)	$\geq 2\text{m}^2$	电阻率下降 10% - 40% (与价态相关)	土壤本底电导率波动	XRF 现场检测	GB 36600
轻质非水相液体 (LNAPLs)	苯系物、石油类	0-8m	0.1% (体积比)	$\geq 1.5\text{m}^2$	电阻率上升 5% - 30%	土壤含水量变化 (> ± 5%)、温度梯度引起的自然极化效应	PID 现场检测	/
高矿化度废水	Cl ⁻ 、SO ₄ ²⁻ 等离子废水	3-20m	5000mg/L	$\geq 0.8\text{m}^2$	电阻率骤降 > 50%	地下水天然矿化度背景	EC 现场检测	/
酸性渗滤液	硫酸、盐酸 (pH < 3)	0-10m	pH < 4.5	$\geq 1\text{m}^2$	电阻率下降 25% - 60% (伴随温度上升)	降雨入渗干扰	pH、温度 现场检测	GB 14848

附录 B
(资料性)
高密度电阻率测试装置

B.1 温纳装置

B.1.1 该装置适用于固定断面扫描测量，如层状地层探测、大面积均匀介质电阻率调查、深部探测等场景。

B.1.2 装置特点：对称等距排列， $AM=MN=NB=\alpha$ 。

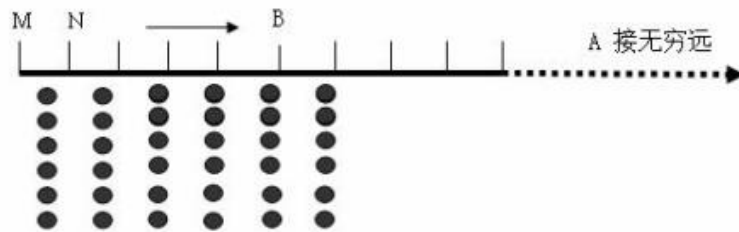


图B.1 温纳装置排列示意图

B.1.3 测量方式： $AM=MN=NB=\alpha$ 为一个电极间距，A、M、N、B逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着AM、MN、NB增大一个电极间距，A、M、N、B逐点同时向右移动，得到另一剖面线；依此规律不断扫描测量，得到倒梯形断面。

B.2 非对称四极装置

B.2.1 该装置适用于变断面连续滚动扫描测量。



图B.2 MN-B 排列示意图

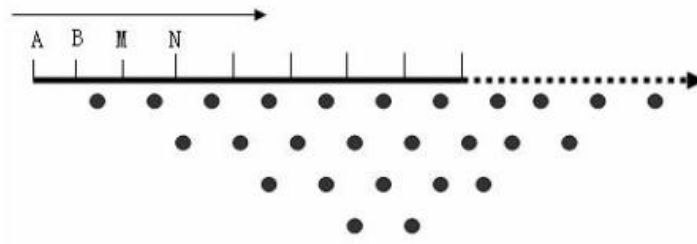
B.2.2 测量方式：M、N不动，B逐点向右移动，得到一条滚动线；接着M、N、B同时向右移动一个电极，M、N不动，B逐点向右移动，得到另一条滚动线；依此规律不断扫描测量，得到矩形断面。

B.3 偶极装置

B.3.1 β 排列

B.3.1.1 该装置适用于深部探测和横向分辨率要求高的场景，如固定断面扫描测量。

B.3.1.2 装置特点：供电电极A、B和测量电极M、N均采用偶极，并按一定的距离分开，四个电极都在同一测线上。

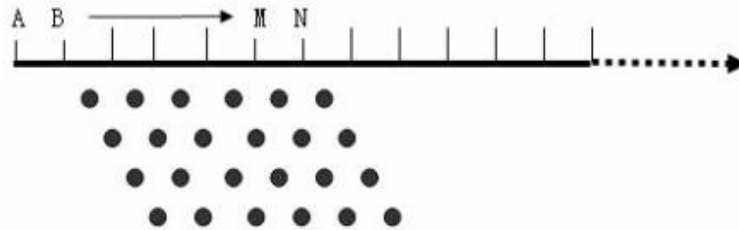


图B.3 β 排列偶极装置示意图

B. 3. 1. 3 测量方式： $AB=BM=MN=\alpha$ 为一个电极间距，A、B、M、N逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着AB、BM、MN增大一个电极间距，A、B、M、N逐点同时向右移动，得到另一剖面线；依此规律不断扫描测量，得到倒梯形断面。

B. 3. 2 AB-MN偶极排列

B. 3. 2. 1 该装置横向分辨率较高，适用于变断面连续滚动扫描测量，宜用于溶洞、裂缝等测量场景。



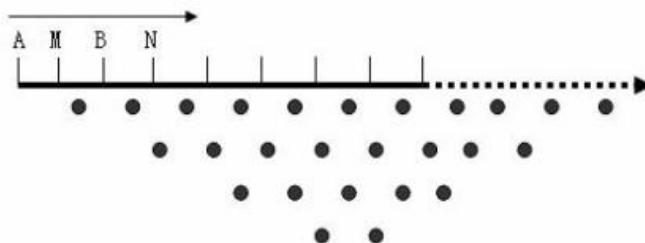
图B.4 AB-MN 偶极排列示意图

B. 3. 2. 2 测量方式：A、B不动，M、N逐点向右同时移动，得到一条滚动线；接着A、B、M、N同时向右移动一个电极，A、B不动，M、N逐点向右同时移动，得到另一条滚动线；依此规律不断扫描测量，得到平行四边形断面。

B. 4 微分装置

B. 4. 1 该装置适用于固定断面扫描测量，如垂向电性差异明显的层状地层，不适用于横向非均匀性强的区域，对浅部灵敏度较低。

B. 4. 2 测量方式： $AM=MB=BN=\alpha$ 为一个电极间距，A、M、B、N逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着AM、MB、BN增大一个电极间距，A、M、B、N逐点同时向右移动，得到另一剖面线；依此规律不断扫描测量，得到倒梯形断面。

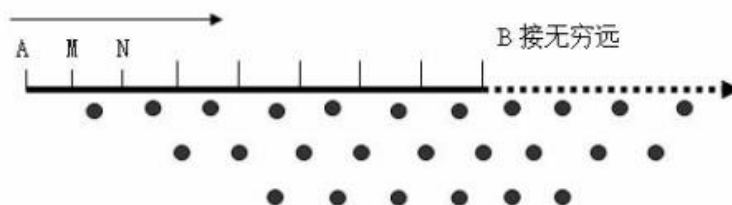


图B.5 微分装置排列示意图

B.5 联剖装置

B.5.1 联剖正装置

B.5.1.1 该装置适用于固定断面扫描测量，单侧供电电极（ ∞ 极）适用于场地受限情况，不适用于倾斜地层等需要双侧供电的复杂构造，因单极供电信号弱，不宜用于深部探测。

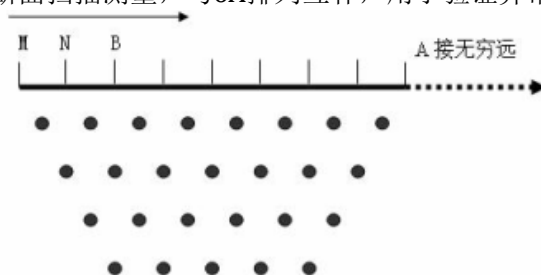


图B.6 联剖正装置 δA 排列示意图

B.5.1.2 测量方式：AM=MN为一个电极间距，A、M、N逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着AM、MN增大一个电极间距，A、M、N逐点同时向右移动，得到另一剖面线；依此规律不断扫描测量，得到倒梯形断面。

B.5.2 联剖反装置

B.5.2.1 该装置适用于固定断面扫描测量，与 δA 排列互补，用于验证异常。

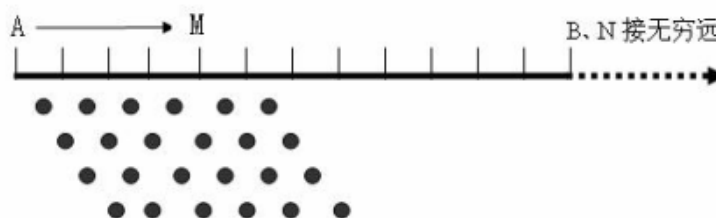


图B.7 联剖反装置 δB 排列示意图

B.5.2.2 测量方式：MN=NB为一个电极间距，M、N、B逐点同时向右移动，得到第一条剖面线；接着MN、NB增大一个电极间距，M、N、B逐点同时向右移动，得到另一剖面线；依此规律不断扫描测量，得到倒梯形断面。

B.6 两级装置

B.6.1 该装置适用于变断面连续滚动扫描测量，如管线、空洞等浅层高分辨率探测。



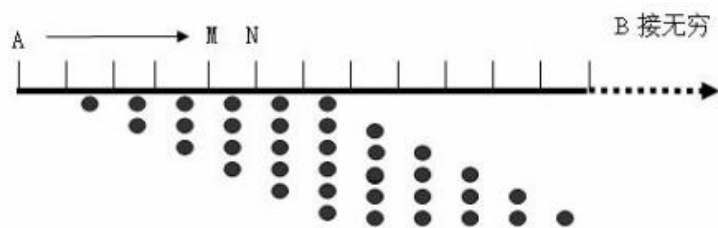
图B.8 二级排列示意图

B.6.2 测量方式：A不动，M逐点向右移动，得到一条滚动线；接着A、M同时向右移动一个电极，A不动，M逐点向右移动，得到另一条滚动线；依此规律不断扫描测量，得到平行四边形断面。

B.7 三级装置

B. 7.1 A-MN三极排列

B. 7.1.1 该装置适用于变断面连续滚动扫描测量。

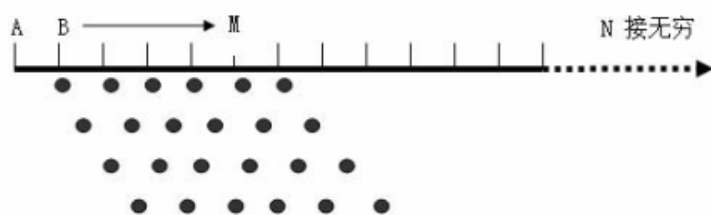


图B. 9 A-MN 三极排列示意图

B. 7.1.2 测量方式：A不动，M、N逐点向右同时移动，得到一条滚动线；接着A、M、N同时向右移动一个电极，A不动，M、N逐点向右同时移动，得到另一条滚动线；依此规律不断扫描测量，得到平行四边形断面。

B. 7.2 AB-M三极排列

B. 7.2.1 该装置适用于变断面连续滚动扫描测量。



图B. 10 AB-M 三极排列示意图

B. 7.2.2 测量方式：A、B不动，M逐点向右移动，得到一条滚动线；接着A、B、M同时向右移动一个电极，A、B不动，M逐点向右移动，得到另一条滚动线；依此规律不断扫描测量，得到平行四边形断面。

附录 C
(资料性)
电阻率背景值

不同污染物响应特性见表C.1。

表C.1 不同污染物响应特性

土壤类型	含水率	温度	电阻率背景值范围
黏土	25%-36%	常温	2-35 $\Omega \cdot m$
		0-20℃	10-35 $\Omega \cdot m$
	$\geq 36\%$	常温	2-15 $\Omega \cdot m$
粉质黏土	6%-20%	常温	5-120 $\Omega \cdot m$
		0-20℃	20-330 $\Omega \cdot m$
	$\geq 25\%$	常温	3-30 $\Omega \cdot m$
粉砂	$\geq 25\%$	常温	5-50 $\Omega \cdot m$
粉土	$\geq 25\%$	常温	2-70 $\Omega \cdot m$
淤泥质粉质黏土	$\geq 25\%$	常温	4-30 $\Omega \cdot m$
泥岩	12%-32%	3-17℃	15-320 $\Omega \cdot m$
软黏土	9%-27%	常温	5-100 $\Omega \cdot m$
砂	3%-25%	常温	40-900 $\Omega \cdot m$
	$\geq 25\%$	常温	55-70 $\Omega \cdot m$

参 考 文 献

- [1] 环办土壤函[2019] 770号 《地下水环境状况调查评价工作指南》
 - [2] 环办土壤[2022]16号 《地下水污染地球物理探测技术指南》
 - [3] GB/T 14499 《地球物理勘查技术符号》
 - [4] DZ/T 0072 《电阻率测深法技术规范》
 - [5] CJJ/T 7 《城市工程地球物理探测规范》
 - [6] DZ/T 0073 《电阻率剖面法技术规程》
-