

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2614823

瞬变电磁未爆弹定位的磁偶极子动态反演方法^{*}

刘龙欢¹, 廖 先¹, 杨 超², 徐正玉¹, 付志红¹

(1. 重庆大学电气工程学院 重庆 400044; 2. 重庆大学资源与安全学院 重庆 400044)

摘 要:为实现瞬变电磁 (TEM) 探测技术在浅地表未爆弹 (UXO) 探测中的快速工程应用, 解决传统装置抗干扰弱和反演效率低的问题, 提出对称结构收发一体化探测装置及磁偶极子 (MD) 动态反演方法。首先, 阐述该装置核心结构设计, 其采用同轴对称线圈布局, 通过简易机械固定实现探测姿态稳定控制, 可直接采集纯正水平二次场信号, 从硬件层面规避一次场强干扰, 提升浅地表微弱目标信号识别能力。在此基础上, 针对装置移动测量场景, 构建目标靶体 MD 动态等效模型, 明确模型参数与 UXO 空间位置的映射关系, 提出基于连续动态测量信号的特征提取算法, 精准捕获 UXO 空间位置信息; 同时, 采用优化的列文伯格-马夸尔特 (LM) 算法求解模型参数, 通过迭代策略改进缩短反演耗时, 计算效率较传统 LM 算法提升 2 倍以上, 加快 UXO 位置解译。最后, 在模拟浅地表实验场开展验证实验, 实验对比显示, 平放线圈的信噪比为 14.2 dB, 立放线圈的信噪比达 26.8 dB, 证实装置具备更优抗干扰能力; 此外, 2.5 m 半径内不同位置靶靶探测证实, 该装置及反演方法对浅地表 UXO 的平面定位最大误差 5.4 cm、垂向埋深反演最大误差 13.5 cm, 完全满足工程精度要求。该研究的阵列式传感器布置方案与优化算法, 有效降低现场作业时间与人力成本, 为相关领域快速连续探测提供了可行高效的技术方案。

关键词: 瞬变电磁; 未爆弹; 磁偶极子; LM 算法

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.10

Dynamic magnetic dipole inversion of unexploded ordnance based on the transient electromagnetics detection

Liu Longhuan¹, Liao Xian¹, Yang Chao², Xu Zhengyu¹, Fu Zhihong¹

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To realize the rapid engineering application of transient electromagnetic (TEM) detection technology in detecting the shallow underground unexploded ordnance (UXO) and solve the problems of weak anti-interference ability and low inversion efficiency of traditional equipment, this paper proposes an integrated transceiver detection equipment with a symmetric structure and a dynamic magnetic dipole (MD) inversion method. First, the key structural design of equipment is elaborated by adopting a coaxial symmetric coil layout, which realizes the stable control of detection attitude through simple mechanical fixation. This can also directly collect the pure horizontal secondary field signals, which avoids strong interference of the primary field at the hardware level and improves the ability to identify weak target signals in the shallow surface. Accordingly, a dynamic equivalent MD model of target is established aiming at the mobile measurement scenario, which clarifies the mapping relationship between model parameters and the spatial position of UXO, and proposes a feature extraction algorithm based on the continuous dynamic measurement signals to accurately capture the spatial position information of UXO. Meanwhile an optimized Levenberg-Marquardt (LM) algorithm with the improved iterative strategy is adopted to solve the model parameters, which improves the computational efficiency more than twice compared to the traditional LM algorithm and accelerates the interpretation of UXO position. Finally, the verification experiments are carried out at a simulated shallow surface experimental site, which shows that the signal-to-noise ratios of the horizontal and vertical coils are 14.2 dB and 26.8 dB, respectively, confirming that the equipment possesses the better anti-interference ability. Additionally detecting targets at different positions within a

收稿日期: 2026-01-04 Received Date: 2026-01-04

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金 (42474238) 项目资助

radius of 2.5 m verifies that the maximum horizontal positioning error and vertical burial depth inversion error of shallow underground UXO are 5.4 cm and 13.5 cm, respectively, which fully meets the engineering accuracy requirements. The array sensor layout scheme and optimized algorithm in this study effectively reduce on-site operation time and labor cost, providing a feasible and efficient technical solution for the rapid and continuous detection in related fields.

Keywords: transient electromagnetic; unexploded ordnance; magnetic dipole model; LM algorithm

0 引言

未爆弹(unexploded ordnance, UXO)指未发生爆炸的子弹药,常埋藏于浅地表或浅海域,其及时排查是保障人类生产生活及正常军事训练安全的重要前提,因此实现大面积区域内 UXO 的快速探测具有重要现实意义。当前主流 UXO 探测方法以地球物理勘查技术为主,主要包括红外法^[1]、地震法^[2]、磁法^[3-4]及瞬变电磁(transient electromagnetic, TEM)法^[5]等。其中,TEM 法作为一种主动源探测技术,具有探测效率高、受地形影响小、对低阻目标敏感等优势,广泛应用于资源勘探、环境与灾害防治等领域;在国防与公共安全领域,该方法作为新型探测技术,近年来亦受到学界广泛关注,凭借非接触式测量或少量测点即可完成探测的特点,已成为 UXO 探测的优选技术^[6]。

基于 TEM 的 UXO 探测研究主要集中于传感器研发与识别技术优化两大方向^[7]。例如,Zhang 等^[8]提出一种复合材料磁传感器,用于二次场信号的精准测量;Zhu 等^[9]提出一种 UXO 浅表探测的小回线 TEM 装置,结合图像识别算法实现目标定位;Lu 等^[10]提出利用信号时间衰减特征完成 UXO 定位与特性分析;Liu 等^[11]提出一种分离式 TEM 装置,采用磁传感器阵列感应目标体附近异常信号,基于信号峰值特征实现目标水平位置定位。

由于 UXO 靶体的二次涡流响应可通过磁偶极子(magnetic dipole, MD)模型近似描述,因此该模型被广泛用于 UXO 探测的机理分析、传感器排布优化及定位算法构建^[12-13]。鲁亦舟等^[14]提出一种层状导电地层下垂直 MD 模型,设计长短期记忆网络模型,通过学习电磁信号特征实现目标体区分,有效降低误报率;陆子渊等^[15]提出单发多收 TEM 探测系统,利用偏心结构抵消一次场干扰,结合差分定位方法实现目标识别;Tang 等^[16]研发便携式 TEM 探测系统,基于 MD 模型构建目标体响应的磁梯度特征,完成平面位置解算。然而,现有基于图像识别或信号特征分析的方法难以充分挖掘目标体空间位置信息,大多局限于平面位置定位;对于包含埋深信息的三维定位问题,需基于 MD 模型构建目标函数,结合智能算法优化拟合以获取更全面的靶体信息。在智能优化算法中,最小二乘反演算法通过构造目标函数与优化求解直接获取最优解;相较于差分演化算法、遗传算法、模拟退

火算法等启发式算法,数值类算法借助目标函数梯度信息直接求解最优解,具有收敛速度快、计算成本低的优势^[17-18]。徐正玉等^[19]通过正演模拟获取 UXO 靶体响应特征,采用非线性优化算法开展反演计算,借助视电阻率剖面图实现目标水平位置定位;Wang 等^[20]提出拖曳式 TEM 传感器系统,该系统由 3 个发射线圈与 9 个三分量接收线圈组成,可同步采集目标体响应信号,基于 MD 模型构建两种磁梯度张量,实现埋深小于 2 m 单一目标体的探测;在此基础上,他们通过优化装置结构并引入纠错模型,进一步提升目标体位置信息的解算精度^[21]。

综上,基于 MD 模型与优化算法的 UXO 探测目标定位是 TEM 法的研究热点,但现有研究仍存在两方面关键问题:一方面,在 TEM 装置设计方面,一次场对二次场的干扰抑制难度大,现有跨环消耦、补偿消耦等装置均依赖特定结构设计,存在结构复杂、调试繁琐等缺陷^[22-23];另一方面,在反演方法研究方面,现有 MD 模型未考虑发射线圈移动对 MD 磁矩与方向的影响,相关研究均局限于单点静态反演,无法适配连续动态测量信号的反演需求,难以满足大面积区域 UXO 快速探测的实际应用要求。

针对上述问题,提出一种基于 TEM 法的 UXO 的 MD 动态实时反演方法。首先,设计对称消耦型收发一体化探测装置,通过简易固定结构抑制一次场干扰,实现纯正水平二次场信号的高效采集;其次,构建收发线圈同步移动场景下的 MD 动态模型,明确移动测量模式下目标靶体的响应特征并开展仿真验证;最后,采用优化列文伯格-马夸尔特(Levenberg-Marquardt, LM)算法提升空间信息反演效率,通过模拟靶体实验验证所提装置与方法的有效性。

1 装置模型及响应理论

1.1 装置结构及瞬变电磁响应机理

如图 1 所示,设计的对称消耦收发一体化装置主要由发射线圈与接收阵列线圈构成。其中,发射线圈采用多匝回线导线绕制而成,接收阵列线圈则由 5 个并排立式线圈组成,且整体布设于发射线圈的对称轴线上。基于该对称结构设计,发射线圈产生的磁力线不会穿过接收阵列线圈所在方向,从而使接收线圈可直接规避一次场干扰。

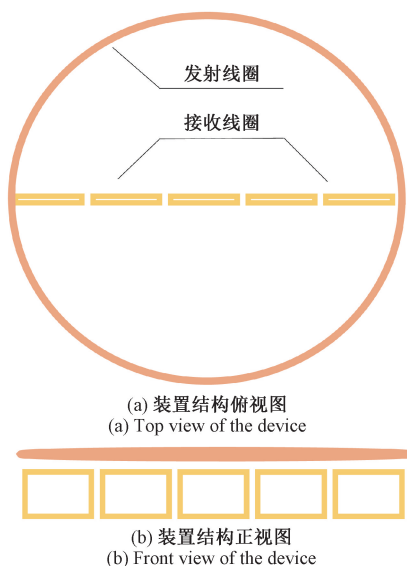


图1 对称消耦 TEM 装置结构

Fig. 1 Structure of symmetric decoupled TEM equipment

探测过程中,发射线圈以双极性方波电流作为激励信号。在发射电流关断阶段,其产生的一次磁场发生急剧变化,促使地表下方介质中感应产生二次场并逐步扩散;待发射电流完全关断后,一次场快速衰减消失。探测示意图如图2所示,当浅地表土壤介质中存在 UXO 标靶等低阻目标体时,标靶表面感应产生的涡流会缓慢衰减至零,直至进入下一激励周期。从时空特性来看,标靶涡流的衰减规律在时间维度上受标靶耦合条件及材料电磁特性调控,在空间维度上则主要取决于涡流空间位置与标靶形态。因此,在发射电流关断后的同一时间节点,通过分析地表二次场的幅值特征与空间分布规律,即可实现对 UXO 标靶的识别与定位。

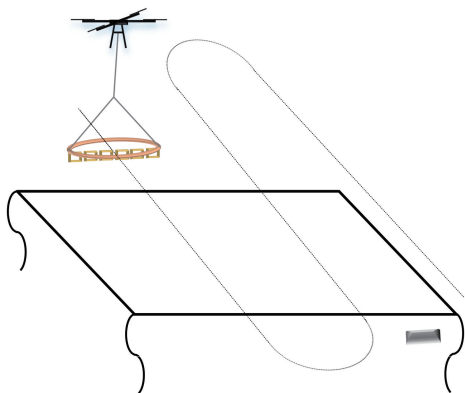


图2 对称消耦 TEM 装置探测

Fig. 2 Detection schematic of symmetric decoupled TEM equipment

1.2 基于 MD 的正演响应

针对高电导率类 UXO 目标体的 TEM 探测,所采用

的发射频率较低,其二次响应主要来自低电阻率 UXO 目标的二次涡流衰减,均质低电导率土壤地质环境下的背景电磁干扰影响可忽略不计。当探测装置与靶体的空间距离大于 UXO 最大特征尺寸 2.5 倍时,满足 MD 远场等效条件,因此靶体受激产生的涡流二次磁场可采用 MD 模型进行正演模拟^[24]。发射线圈激励过程中,靶体位置处 MD 的初始磁矩与该点一次磁场分布相关。对于全空间真空模型,标靶所在位置的一次磁场可按式(1)计算,即:

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} (3(\mathbf{m} \cdot \mathbf{r})\mathbf{r} - m^2\mathbf{r}^2) \quad (1)$$

其中, μ_0 为真空中的磁导率,大小为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, $\mathbf{r}$ 为发射激励点到目标点的向量, $\mathbf{m}$ 为发射磁矩向量。

在笛卡尔直角坐标系中,设定目标点的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,发射中心点的坐标为 (x_1, y_1, z_1) 。则目标点处的一次场如式(2)~(4)所示。

$$B_{x0} = \frac{3\mu_0(m_x(x_0-x_1)+m_y(y_0-y_1)+m_z(z_0-z_1))(x_0-x_1)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} + \frac{-\mu_0 m_x((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (2)$$

$$B_{y0} = \frac{3\mu_0(m_x(x_0-x_1)+m_y(y_0-y_1)+m_z(z_0-z_1))(y_0-y_1)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} + \frac{-\mu_0 m_y((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (3)$$

$$B_{z0} = \frac{3\mu_0(m_x(x_0-x_1)+m_y(y_0-y_1)+m_z(z_0-z_1))(z_0-z_1)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} + \frac{-\mu_0 m_z((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)}{4\pi((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (4)$$

其中, m_x, m_y, m_z 分别为 x, y, z 这 3 个方向的发射磁矩分量。若发射装置为半径 R 、匝数 n 、发射电流 I 的线圈,且发射平面平行于 xy 平面,则表达式可简化如式(5)~(7)所示。

$$B_{x0} = \frac{3R^2 n \mu_0}{4} \frac{((z_0-z_1)(x_0-x_1))}{((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (5)$$

$$B_{y0} = \frac{3R^2 n \mu_0}{4} \frac{((z_0-z_1)(y_0-y_1))}{((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (6)$$

$$B_{z0} = \frac{R^2 n \mu_0}{4} \frac{3(z_0-z_1)(z_0-z_1)}{((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} + \frac{R^2 n \mu_0 - ((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)}{4((x_0-x_1)^2+(y_0-y_1)^2+(z_0-z_1)^2)^{2.5}} \quad (7)$$

定义目标体耦合参数 k, k 值越大,表明目标体产生二次涡流的能力越强;且一次场变化速率越快,二次场响应幅值越大。设电流关断时间为 T ,则目标点处涡流磁矩可近似表示如式(8)~(10)所示。

$$m_{x0} = \frac{R^2 n \mu_0 S^2}{4T} \cdot k \cdot \frac{3(x_0 - x_1)(z_0 - z_1)}{((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{2.5}} \quad (8)$$

$$m_{y0} = \frac{R^2 n \mu_0 S^2}{4T} \cdot k \cdot \frac{3(y_0 - y_1)(z_0 - z_1)}{((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{2.5}} \quad (9)$$

$$m_{z0} = \frac{R^2 n \mu_0 S^2}{4T} \cdot k \cdot \frac{3(z_0 - z_1)^2}{((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{2.5}} + \frac{R^2 n \mu_0 S^2}{4T} \cdot k \cdot \frac{-((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)}{((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2)^{2.5}} \quad (10)$$

若接收传感器位于 (x_2, y_2, z_2) 处,则接收点的二次场分量可表示为如式(11)~(13)所示。

$$B_{x2} = \frac{3\mu_0(m_{x0}(x_2 - x_0) + m_{y0}(y_2 - y_0) + m_{z0}(z_2 - z_0))(x_2 - x_0)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} + \frac{-\mu_0 m_{x0}((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} \quad (11)$$

$$B_{y2} = \frac{3\mu_0(m_{x0}(x_2 - x_0) + m_{y0}(y_2 - y_0) + m_{z0}(z_2 - z_0))(y_2 - y_0)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} + \frac{-\mu_0 m_{y0}((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} \quad (12)$$

$$B_{z2} = \frac{3\mu_0(m_{x0}(x_2 - x_0) + m_{y0}(y_2 - y_0) + m_{z0}(z_2 - z_0))(z_2 - z_0)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} + \frac{\mu_0 m_{z0}((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)}{4\pi((x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 + (z_2 - z_0)^2)^{2.5}} \quad (13)$$

考虑线圈装置移动过程中的朝向角度变化,接收线圈中的感应量可修正为如式(14)所示。

$$B_{2n} = B_{2n_x} + B_{2n_y} \quad (14)$$

其中, n_x, n_y 分别表示接收线圈的水平方向向量。

1.3 动态 MD 正演矫正模型

MD 模型描述的是静态测量模式下的电磁响应关系,阵列感应探测与动态连续探测是提升 UXO 探测效率的两大关键技术途径。为构建动态 MD 正演矫正模型,本小节以静态 MD 模型为基础,搭建移动探测过程中阵列式探测数据的正演理论基础。

在实际移动测量过程中,探测装置的移动仅改变其与靶体的相对位置,UXO 的固有形态差异与姿态特征本会对单 MD 模型的等效精度产生影响,仅当探测装置在局部区域微小移动时,该 MD 模型才具备适用条件。为简化模型分析并保证分析结果的合理性,本研究选取 UXO 正上方水平距离 1 m 范围内的移动探测测量数据作为反演输入,采用统一的 MD 模型对其空间位置进行反演计算,此范围内移动探测时,UXO 的形态与姿态对涡流二次磁场的影响可忽略不计。

正演是从已知量推导待测量的过程,是反迭代计

算的基础。针对图 1(a)所示的装置结构,动态测量模式下 n 个连续测量点的已知量可归纳为装置传感器的探测位置向量 (X_2, Y_2, Z_2) 与水平方向向量 (N_x, N_y) ,具体表达如式(15)所示。

$$\begin{cases} X_2 = \{x_1(n) + mve_x(n) \mid m = -2, -1, 0, 1, 2\} \\ Y_2 = \{y_1(n) - mve_y(n) \mid m = -2, -1, 0, 1, 2\} \\ Z_2 = \{z_1(n) - h \mid m = -2, -1, 0, 1, 2\} \\ N_x = \{e_x(n) \mid m = -2, -1, 0, 1, 2\} \\ N_y = \{e_y(n) \mid m = -2, -1, 0, 1, 2\} \end{cases} \quad (15)$$

其中, h 为传感器平面与发射线圈所在平面的垂直距离, w 为传感器水平间距。据此,5个传感器所在位置的待测量 f 可整理为:

$$f(x_0, y_0, z_0, k, X, Y, Z, N_x, N_y) = B_{x2}N_x + B_{y2}N_y \quad (16)$$

考虑实际探测环境的背景干扰及目标体响应系数的差异,需对 MD 模型的数值计算结果进行尺度与偏移矫正,以矫正后的数值计算结果作为模拟值,与实测或仿真结果进行对比验证。矫正公式如式(17)所示。

$$f_2 = af + b \quad (17)$$

其中, a 为尺度因子, b 为偏移因子。

为验证 MD 矫正数值模型的可行性,本研究采用 COMSOL 软件构建对应的电磁仿真模型。仿真模型中,UXO 靶体设为球体,半径为 8 cm,电导率为 10^7 S/m;背景土壤层电导率设为 10^{-2} S/m。发射线圈匝数为 2 匝、半径为 2 m、离地高度为 2 m,发射电流幅值为 10 A,电流关断时间为 10 μ s,选取关断后 4 μ s 的响应数据。在仿真模型与数值模型中,分别计算靶体埋深为 1、2、3 和 4 m 时,装置沿 x 方向移动测量($x = 0.1 \sim 1$ m)过程中,发射线圈正下方 0.5 m 处单位面积内的二次场感应电压值 B'_2 和 f_2 ,结果如图 3 所示。

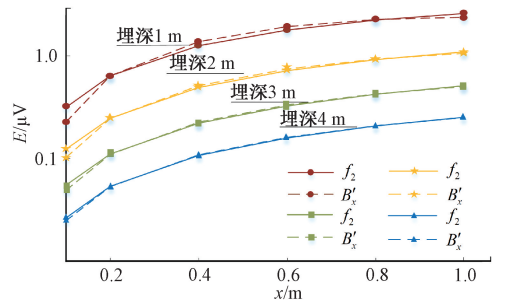


图3 MD 矫正模型与 COMSOL 仿真模型对比

Fig. 3 Comparison between MD correction model and COMSOL simulation model

由图 3 可知,MD 矫正数值模型与 COMSOL 仿真模型的结果曲线整体吻合,响应数值差异较小,表明该矫正数值模型可有效复现靶体电磁响应的基本特征。此外,埋深对响应幅值的影响显著:靶体埋深越小,响应幅值越

高,且随水平位移 x 增大的衰减趋势更平缓;埋深越大,响应幅值则显著降低,衰减速率加快。该规律在两类模型中均一致体现,验证了矫正数值模型在多数工况下的可靠性。

2 目标位置反演优化

2.1 LM 算法

在 UXO 的 TEM 探测中,反演的核心目标是通过测量数据估计 UXO 空间位置关键参数,使数值计算结果与实测数据达到最优拟合,进而实现快速定位。待反演参数包括 UXO 的空间位置参数 (x_0, y_0, z_0) 与耦合参数 k , 这些参数共同决定 MD 模型的正演响应特性。实时反演以残差平方和最小化为优化准则,迭代拟合过程中,目标函数定义为实测响应与正演模型预测响应的偏差平方和,如式 (18) 所示。

$$S(x_0, y_0, z_0, k) = \| \mathbf{r}_2 \|^2 \quad (18)$$

其中, $\mathbf{r}_2 = \mathbf{B} - \mathbf{f}(x_0, y_0, z_0, k, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y)$ 为残差响应。

为实现实时优化求解,采用 LM 算法求解目标函数极小值,其核心思路是利用残差向量的梯度信息迭代更新待反演参数^[25]。LM 算法的参数更新如式 (19) 所示。

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \cdot \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \cdot [\delta_{x_0}, \delta_{y_0}, \delta_{z_0}, \delta_k] = \mathbf{J}^T \mathbf{r} \quad (19)$$

其中, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial x_0} & \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial y_0} & \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial z_0} & \frac{\partial \mathbf{r}_2}{\partial k} \end{bmatrix}$ 为雅克比矩阵。

引入增益比 ρ 调控迭代过程,其定义如式 (20) 所示。

$$\rho =$$

$$S(x_0, y_0, z_0, k) - S(x_0 + \delta_{x_0}, y_0 + \delta_{y_0}, z_0 + \delta_{z_0}, k + \delta_k)$$

$$[\delta_{x_0}, \delta_{y_0}, \delta_{z_0}, \delta_k]^T (\lambda \cdot \text{diag}(\mathbf{J}^T \mathbf{J}) \cdot [\delta_{x_0}, \delta_{y_0}, \delta_{z_0}, \delta_k] + \mathbf{J}^T \mathbf{J}) \quad (20)$$

其中, λ 为阻尼因子,用于控制每次迭代的参数更新量;增益比 ρ 的数值大小用于迭代过程中阻尼因子 λ 的动态调整。

2.2 算法优化

在迭代计算过程中,待反演参数的特性存在差异。空间位置参数 (x_0, y_0, z_0) 与二次场呈非线性关系,而耦合参数 k 对二次场的影响在数值上呈线性关系。基于此特性,可在目标函数设计中剥离耦合参数 k ,即在尺度矫正与偏移矫正过程中固定耦合参数 k ,从而简化迭代过程,提升计算效率。

$$\mathbf{a} = \mathbf{f}(x_0, y_0, z_0, 1, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}, \mathbf{N}_x, \mathbf{N}_y) \cdot \frac{\sigma_B}{\sigma_f} \quad (21)$$

$$\mathbf{b} = \bar{\mathbf{B}} - \mathbf{a} \cdot \bar{\mathbf{f}} \quad (22)$$

其中, σ_B, σ_f 分别表示实测场 B 和数值计算场 f 的标准差。 $\bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{f}}$ 分别表示实测场 B 和数值计算场 f 的均值,据此,优化后的残差向量和雅克比矩阵分别为:

$$\mathbf{r}_2 = \mathbf{B} - \mathbf{f}_2 \quad (23)$$

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x_0} & \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial y_0} & \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial z_0} \end{bmatrix} \quad (24)$$

为进一步验证所提优化 LM 算法的收敛性能提升效果,明确算法优化对定位求解效率的改善作用,在上述相同的数值模拟条件下,设计对比测试,对优化前后目标函数的迭代收敛过程进行追踪记录,测试结果如图 4 所示。

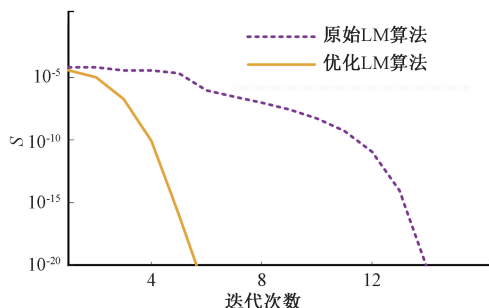


图4 优化前后目标函数迭代变化曲线

Fig. 4 Iterative variation curves of the objective function before and after the optimization

图4中曲线直观表征了优化前后两种算法在迭代过程中目标函数值的动态变化趋势,其中目标函数值的大小直接反映反演求解与真实目标参数的偏差程度,函数值下降越快,收敛迭代次数越少,表明算法求解效率越高。由曲线趋势可清晰看出,优化后目标函数的下降速率显著快于原始 LM 算法:优化后算法仅需迭代至 5 次左右时,目标函数值便已快速降;而原始 LM 算法需持续迭代至 13 次左右,目标函数值才逐步趋近于相近量级。这一对比结果充分表明,在相同的数据输入与求解精度要求下,优化后的 LM 算法能够缩短迭代收敛周期,更高效地完成目标靶体空间定位信息的迭代求解,其收敛效率较原始算法提升 2 倍以上。这一优势对于浅地表 UXO 大面积快速探测具有重要工程意义,可有效减少现场探测的实时数据处理耗时,进一步提升整体探测作业效率。

2.3 噪声影响

为进一步系统明确所提对称结构收发一体化装置对不同空间位置目标体的探测效能,同时量化评估其抗噪声干扰特性,验证装置在复杂信号环境下的定位可靠性,特设计针对性数值模拟实验。实验严格沿用前文所述的模型参数,以保证分析结果的可比性与有效性。具体实验方案设定为:将模拟 UXO 的目标靶体分别置于与探测装置水平偏移 0、2、4 和 6 m 的特征位置,覆盖近距至中远距的典型探测场景;为模拟实际工程探测中的电磁干扰环境,对各偏移位置下采集的接收信号分别叠加 100 组幅值在

范围 $0.1 \sim 10 \mu\text{V}$ 连续分布的随机噪声,每组噪声信号均符合正态分布特征;基于叠加噪声后的接收信号,采用前文提出的 MD 动态反演方法进行迭代计算,获取各工况下目标靶体的定位结果;通过对比定位结果与靶体实际位置的偏差,定量分析水平偏移距离与噪声幅值两大关键因素对定位精度的耦合影响规律,其结果如图 5 所示。

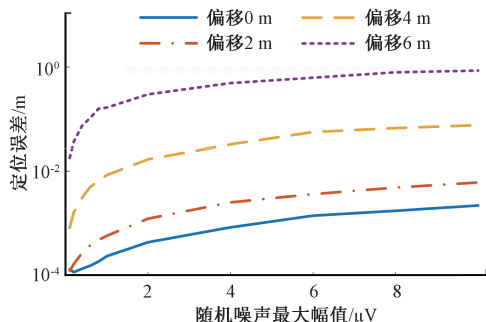


图 5 不同噪声幅值下各偏移位置目标体的探测误差

Fig. 5 Detection errors of the target at different offset positions under various noise amplitudes

图 5 清晰呈现了不同水平偏移位置、不同噪声幅值双重变量作用下的反演定位误差统计结果,其中误差以定位坐标与实际坐标的欧氏距离表征,直观反映了各工况下装置的定位精度水平。由图 5 中数据趋势可明确得出两点结论:1)随着随机噪声幅值从 $0.1 \mu\text{V}$ 逐步增大至 $10 \mu\text{V}$,各水平偏移位置对应的定位误差均呈现显著的单调上升趋势,且在噪声幅值大于 $5 \mu\text{V}$ 后,误差增长速率明显加快。这一现象充分表明,环境电磁噪声是导致定位误差产生的核心干扰源之一,且强噪声环境会削弱目标微弱二次场信号的可识别性,进而降低反演计算的精度;2)在相同噪声幅值条件下,目标靶体的水平偏移距离越大,定位误差的整体水平越高。例如,在噪声幅值为 $1 \mu\text{V}$ 时,偏移 0 m 处的定位误差仅为 0.001 m ,而偏移 6 m 处的定位误差已达到 0.1 m 以上,误差增幅超 100 倍。这一结果反映出目标体与探测装置的空间距离对定位精度具有显著影响,目标体离探测装置越远,其产生的二次场信号幅值衰减越明显,信号信噪比降低,使得反演算法对目标位置的识别精度更易受外界干扰,最终导致定位误差扩大。综上,所提装置在近距离、低噪声环境下具备较高的定位可靠性,而在中远距、强噪声场景下需进一步优化信号处理算法以提升定位精度。

3 实验

3.1 实验装置

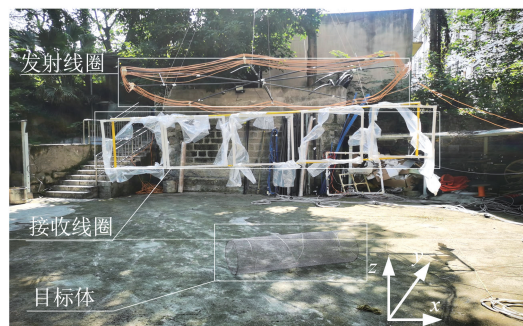
本实验于室外模拟浅地表实验场开展,实验场下方地质为均质黏土,以模拟实际浅地表 UXO 探测的典型地

质环境。实验前已清除地表上方金属杂物,模拟实际检测场景。实验标靶采用 UXO 探测领域典型的空心圆柱状铁质靶体,尺寸为直径 0.5 m 、长度 1.5 m ,以模拟 UXO 的外形与电磁特征。如图 6 所示,实验装置由发射接收一体机、发射线圈及接收阵列线圈构成。



(a) 发射接收一体机

(a) Transmitter-receiver integrated device



(b) 发射接收线圈

(b) Transmitting and receiving coils

图 6 实验装置及场景搭建

Fig. 6 Experimental equipment and scene construction

其中,发射接收一体机用于输出双极性方波激励电流,通过发射线圈激发一次磁场,发射接收一体机重量 10 kg ;发射线圈为半径 4.8 m 、匝数 9 匝的圆形线圈;接收阵列线圈由 5 个边长 1 m 的正方形空心线圈并排组成,其感应电压由一体机采样模块采集并存储,采样频率为 1.25 MHz ,线圈装置总重量约 20 kg 。整个探测装置总重量约 30 kg ,结合常规中型无人机即可完成快速挂载吊装。

3.2 线圈结构对比

为对比所提立放线圈装置的结构性能特点,在同一发射激励、同一标靶探测条件下开展连续测量实验,设计中心平放线圈与立放线圈的信号特征对比实验,其结果如图 7 所示。

平放线圈感应的是标靶二次涡流所产生的 z 轴分量信号,立放线圈感应的是标靶二次涡流 x 轴(探测前进方向)上的分量信号。由图 7 中归一化感应电压强度曲线可知,当探测路径经过标靶正上方时,平放线圈的感应信

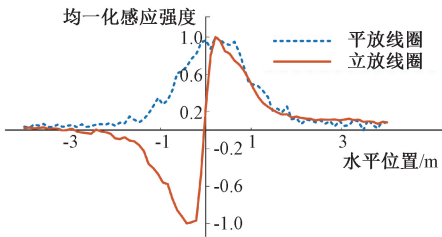


图7 平放线圈和立放线圈感应信号特征对比

Fig. 7 Comparison of horizontal and vertical coils induced signal characteristics

号出现极大值,而立放线圈的感应信号出现极小值,且该位置处立放线圈信号沿探测前进方向的斜率达到最大值。实验测得,平放线圈的信噪比为 14.2 dB,立放线圈的信噪比为 26.8 dB。其中立放线圈的噪声主要来源于空间环境电磁干扰,而平放线圈的噪声除空间电磁干扰外,还包含探测装置移动过程中,接收线圈与发射线圈间细微抖动产生的耦合干扰。上述对比结果表明,所提立放线圈结构相较于平放线圈,具备更优的抗干扰能力。

3.3 靶体偏移测试

为进一步验证所提装置及反演算法在实际移动探测场景下的定位精度与稳定性,针对浅地表典型探测距离范围,选取水平偏移 0.2 m(近距探测)与 2.5 m(中距探测)两个特征工况开展专项实验,重点分析目标体空间位置对探测成像与反演定位结果的影响。图 8 为搭建的实验布置示意图,其中发射接收一体机如图 6(a)所示,发射机设定发射电流恒定幅值为 120 A,关断时间为 336 μs 。实验采用匀速移动与连续测量模式,对两种不同水平偏移量的靶体进行探测,连续采集移动过程中 5 个接收线圈在发射电流关断后的响应信号幅值。

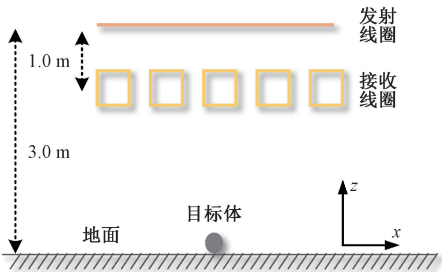
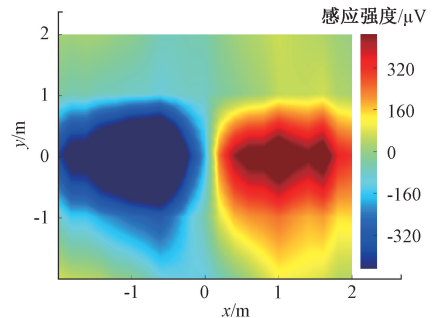


图8 实验布置

Fig. 8 Schematic of experimental arrangement

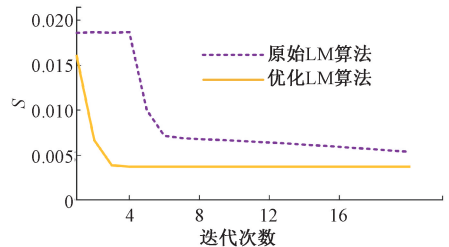
图 9 给出水平偏移 0.2 m 时的探测结果。将装置移动测量过程中不同位置采集的信号幅值进行网格化插值与成像处理,结果如图 9(a)所示。从成像图中可清晰观察到,在 $x = 0$ m 附近出现明显的检测信号感应强度变化极值点,该极值点对应目标靶体的大致空间位置;进一

步分析可知,横向极值位置集中在 $y = 0$ m 附近,同时存在轻微向 y 负方向偏移的现象,这一偏移与目标靶体相对偏移相互印证。为精准获取目标体三维坐标,选取 x 在 $-2 \sim 2$ m 范围的有效信号数据代入 MD 动态反演模型进行计算;优化前后算法的迭代初始值均统一设定为该数据区域的中心点(0, 0, -1)。20 次迭代过程中的损失函数动态变化曲线如图 9(b)所示,曲线趋势直观反映了算法的收敛过程。最终反演结果为 (0.053, -0.194, 0.385),经计算对应水平定位误差为 5.4 cm,埋深定位误差为 13.5 cm。



(a) 接收信号幅值成像

(a) Imaging of received signal amplitude



(b) 20次反演迭代过程

(b) Iteration process of 20 inversion runs

图9 水平偏移 0.2 m 时的探测结果

Fig. 9 Detection results at a horizontal offset of 0.2 m

图 10 为水平偏移 2.5 m 时的探测结果。图 10(a) 为不同移动位置信号幅值的网格化成像结果,与近距探测工况类似,在 $x = 0$ m 附近出现显著的感应强度变化极值点,这表明所提装置在中距探测场景下仍能有效捕获目标体的信号特征;不同之处在于,此工况下横向极值位置偏移至 $y = 2$ m 边缘处,这与目标体相对于探测装置的水平偏移位置相匹配,进一步验证了成像结果的合理性。采用与水平偏移 0.2 m 工况完全一致的反演策略,迭代初始值同样设定为数据区域中心点(0, 0, -1),20 次迭代过程中的损失函数变化规律如图 8(b)所示。最终反演结果为 (0.021, -2.580, 0.344),对应水平定位误差 2.3 cm,埋深定位误差 9.4 cm。

上述两次不同水平偏移工况的实验结果充分表明,所提对称结构收发一体化装置及 MD 动态反演算法,可稳定实现埋深 2 m 处目标靶体的快速定位。统计可知,

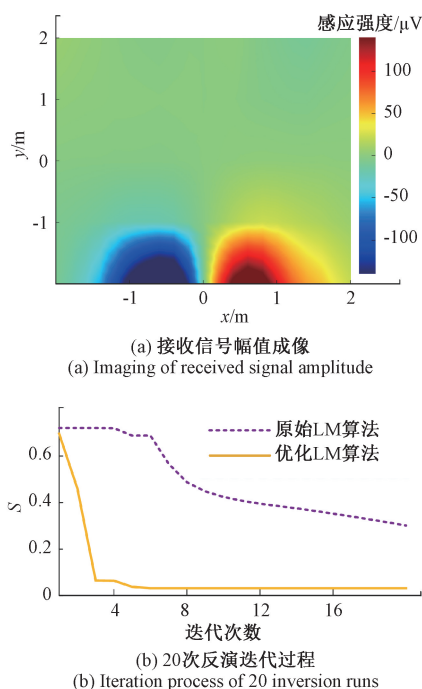


图10 水平偏移2.5 m时的探测结果

Fig. 10 Detection results at a horizontal offset of 2.5 m

两次实验的水平定位误差最大值为5.4 cm,埋深定位误差最大值为13.5 cm,整体定位精度满足浅地表UXO探测的工程技术要求。进一步分析误差来源可知,水平定位误差主要与移动测量过程中的装置水平定位偏差、信号采集的同步性误差相关;而埋深定位误差则主要源于靶体实际尺寸对动态MD点源模型近似性的影响,同时受地层介质不均匀性导致的信号衰减差异干扰。尽管埋深定位误差相对靶体中心点而言略大,但两次实验的反演结果均准确落在靶体所在的空间范围内,未出现明显的定位偏移,充分验证了所提装置与反演算法的可行性与可靠性。

4 结 论

针对TEM技术在浅地表大面积区域UXO探测的应用需求,提出一种对称结构TEM阵列探测装置及基于MD的动态检测模型。通过对迭代拟合过程中的未知量进行近似拟合,减少反演求解的未知量个数,保留核心求解信息;结合一定距离内的连续测量数据进行联合反演,实现浅地表靶体的快速定位。实验场分别开展了水平偏移0.2和2.5 m两种工况的验证实验,结果显示水平定位误差最大5.4 cm,埋深定位误差最大13.5 cm。实验结果证实,所提装置及模型算法为TEM技术在浅地表大面积区域UXO快速普查中的应用提供了可行方案。针对实际场景中可能存在的复杂环境约束与干扰问题,进一步提

升系统实用性,后续将重点优化传感器参数与反演校正算法。

参考文献

- [1] LING ZH G, ZHAO H, ZHAO X, et al. A dual mode detection method for unexploded ordnance based on YOLOv5 for low altitude unmanned aerial vehicle [J]. IEEE Access, 2025, 13: 42634-42649.
- [2] 李金辉,马辉,杨辰烨,等. 用于声-地震耦合探雷的激光测振技术研究进展(英文)[J]. 中国光学,2021, 14(3): 487-502.
LI J H, MA H, YANG CH Y, et al. Research progress of the laser vibration measurement techniques for acoustic-to-seismic coupling landmine detection [J]. Chinese Optics, 2021, 14(3): 487-502.
- [3] WANG H P, MENG T, LUO W, et al. Overhauser sensor array based 3-D magnetic gradiometer for the detection of shallow subsurface unexploded ordnance[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 3277942.
- [4] SHEN Y, CHEN ZH Y, GAO J Q, et al. Sensitive aeromagnetic system for unexploded ordnance detection with high detection accuracy and range [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2025, 22: 1-5.
- [5] ZHANG L X, GAO H T, DU J, et al. Detecting the transient electromagnetic characteristic response of unexploded ordnance buried in the seafloor [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62, 1-16.
- [6] 张栋,葛良胜,吕新彪,等. 法证军事地球物理:战场侦察与痕迹识别[J]. 地球物理学进展,2025, 40(1): 372-386.
ZHANG D, GE L SH, LYU X B, et al. Forensic military geophysics: Battlefield reconnaissance and trace identification [J]. Progress in Geophysics, 2025, 40(1): 372-386.
- [7] 陈栋,闫小伟,石胜斌. 地表未爆子弹药检测与识别定位技术研究综述[J]. 航空兵器,2023, 30(5): 1-10.
CHEN D, YAN X W, SHI SH B. Review on detection and identification positioning technology of surface unexploded submunitions [J]. Aero Weaponry, 2023, 30(5): 1-10.
- [8] ZHANG Y T, BIAN L X, XU ZH, et al. Dual-mode detection method for UXO targets by measuring magnetic anomaly and electromagnetic response with FeNiMoSiB/PZT-5A composite [J]. IEEE Transactions on Geoscience

- and Remote Sensing, 2024, 62: 1-11.
- [9] ZHU X G, SHU Y, LUO CH P, et al. Transient electromagnetic voltage imaging of dense UXO-like targets based on improved mathematical morphology[J]. IEEE Access, 2020, 8: 150341-150349.
- [10] LU T M, GAO H T, YANG Y K, et al. The transient electromagnetic characteristics of multitarget unexploded ordnance (UXO)[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 1-14.
- [11] LIU H, ZHAO CH F, ZHU J X, et al. Active detection of small UXO-like targets through measuring electromagnetic responses with a magneto-inductive sensor array[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(20): 23558-23567.
- [12] 王雨菲, 韩文花. 基于坐标偏移磁偶极子-牛顿-拉夫逊法的三维不规则缺陷重构方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(6): 328-336.
- WANG Y F, HAN W H. 3D irregular defect reconstruction method based on coordinate offset magnetic dipole-Newton-Raphson method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(6): 328-336.
- [13] 郑梦玲, 宋欣达, 周斌权, 等. SERF 原子磁强计自适应参数标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 1-9.
- ZHENG M L, SONG X D, ZHOU B Q, et al. Research on the adaptive parameter calibration method of SERF atomic magnetometer[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 1-9.
- [14] 鲁亦舟, 马斌, 毛伟帆, 等. 基于长短期记忆网络的未爆弹探测方法及多因素分析[J]. 探测与控制学报, 2025, 47(6): 63-75.
- LU Y ZH, MA B, MAO W F, et al. LSTM-based unexploded ordnance detection method with multi-factor analysis[J]. Journal of Detection & Control, 2025, 47(6): 63-75.
- [15] 陆子渊, 何勇, 卞雷祥, 等. 基于一发多收线圈阵列的频域电磁法未爆弹探测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(5): 79-87.
- LU Z Y, HE Y, BIAN L X, et al. Frequency domain electromagnetic method based on the configuration of single transmitting and array receiving coils for unexploded ordnance detection[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(5): 79-87.
- [16] TANG M H, ZENG Q N, WANG L J, et al. Real-time detection system for portable transient electromagnetic unexploded ordnance[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2624(1): 012019.
- [17] WANG X F, WANG P, ZHANG X T, et al. Target electromagnetic detection method in underground environment: A review[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 13835-13852.
- [18] 卢勇, 阎力恒, 谢肖肖, 等. 全局-局部混合算法瞬变电磁反演与接地网检测[J/OL]. 电子测量与仪器学报, 1-12[2025-12-31].
- LU Y, YAN L H, XIE X X, et al. Global-local hybrid algorithm transient electromagnetic inversion and grounding grid detection[J/OL]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 1-12[2025-12-31].
- [19] 徐正玉, 罗朝鹏, 付志红, 等. 无人机航空瞬变电磁法未爆弹探测试验研究[J]. 现代雷达, 2023, 45(12): 47-52.
- XU ZH Y, LUO CH P, FU ZH H, et al. Experimental study on unexploded bomb detection by UAV airborne transient electromagnetic method[J]. Modern Radar, 2023, 45(12): 47-52.
- [20] WANG L J, ZHANG SH, CHEN SH D, et al. Fast Localization and characterization of underground targets with a towed transient electromagnetic array system[J]. Sensors, 2022, 22(4): 1648.
- [21] WANG L J, CHEN SH D. Error correction of magnetic gradient tensor localization for UXO-like targets with portable transient electromagnetic systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(3): 5327-5336.
- [22] XIA T, YUE M X, YANG X D, et al. A small-loop double-coil decoupling transient electromagnetic device for high-sensitivity near-surface detection[J]. Geophysics, 2024, 89(6): 2026-2036.
- [23] HU X Q, FU N Y, CHEN ZH Y, et al. Adjustable compensation technique for primary field elimination in the transient electromagnetic system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-10.
- [24] 薄瑞, 张志杰, 陈昊泽. 一种新型未爆弹探测传感器的仿真研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(2): 171-178.
- BO R, ZHANG ZH J, CHENG H Z. Simulation research on a new type of unexploded ordnance detection sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35(2): 171-178.
- [25] 张立峰, 张梦涵. 基于自适应模拟退火及 LM 联合反演算法的 ECT 图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2021,

42(12):228-235.

ZHANG L F, ZHANG M H. Image reconstruction for electrical capacitance tomography based on adaptive simulated annealing and LM joint inversion algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12):228-235.

作者简介



刘龙欢, 于 2017 年获得重庆大学学士学位, 2020 年获重庆大学硕士学位, 目前于该校攻读电气工程专业工学博士学位。主要研究方向为电磁成像技术及其在接地网、未爆弹与石油管道领域的应用。

E-mail: 20133954@cqu.edu.cn

Liu Longhuan received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2017, his M. Sc. degree from Chongqing University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University. His main research interests include electromagnetic imaging technology and its applications in grounding grids, unexploded ordnance detection and oil pipeline detection.



廖先(通信作者), 2016 年获得重庆大学学士学位, 2025 年获得重庆大学博士学位, 同年进入该校开展博士后研究工作。主要研究方向包括瞬变电磁仪器、信号检测、处理方法及电路设计。

E-mail: cquliao@xian@cqu.edu.cn

Liao Xian(Corresponding author) received his B. Sc. degree from Chongqing University in 2016, his Ph. D. degree from Chongqing University in 2025, and joined the same university for postdoctoral research in the same year. His main research

interests include transient electromagnetic instruments, signal detection, processing methods and circuit design.



杨超, 于 2005 年获哈尔滨理工大学学士学位, 2010 年获重庆大学硕士学位, 2021 年获重庆大学电气工程专业博士学位, 同年进入重庆大学资源与安全工程学院从事博士后研究。主要研究方向为全航空瞬变电磁勘察、数字信号处理。

E-mail: yc_aemcc@cqu.edu.cn

Yang Chao received his B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 2005, his M. Sc. degree from Chongqing University in 2010, and his Ph. D. degree in Electrical Engineering from Chongqing University in 2021. In the same year, he joined the College of Resources and Safety Engineering, Chongqing University, as a postdoctoral researcher. His main research interests include full-aerial transient electromagnetic survey and digital signal processing.



付志红, 于 1987 年获中国地质大学学士学位, 2001 年和 2007 年分别获重庆大学电气工程专业工学硕士学位和工学博士学位。现任重庆大学电气工程系教授, 主要研究方向包括电磁测量与电能计量。

E-mail: fuzhihong@cqu.edu.cn

Fu Zhihong received his B. Sc. degree in Applied Geophysics from China University of Geosciences in 1987, and his M. Eng. and Ph. D. degrees in Electrical Engineering from Chongqing University in 2001 and 2007, respectively. He is a professor in the Department of Electrical Engineering, Chongqing University. His main research interests include electromagnetic measurement and electric energy metering.