

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311450

随掘连续超前探测异常体辨识成像研究^{*}

许少毅¹, 卢文庭¹, 王承涛¹, 林嘉睿², 邢方方³

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221000; 2. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072;
3. 徐州工业职业技术学院 徐州 221140)

摘要:本文提出了一种新型随掘连续超前探测异常体辨识成像方法,有效解决了固定场源超前探测单次成像准确度差的问题,为巷道掘进与超前探测并行作业提供有力支撑。首先,构建了随掘连续超前探测异常体辨识成像理论模型;然后,对异常体辨识成像效果及成像准确度提高方法进行研究,在可有效辨识前方异常几何体形态的基础上,通过扩大随掘里程、加快电位采集频率和增加电位测点数量,将电导率均方误差分别从0.273降至0.156、0.173降至0.153、0.183降至0.167,成像准确度逐渐增高;最后,分析了随掘场源前方不同类型、形状异常体成像效果,构建泥槽实验系统并进行了成像效果对比实验,验证了本方法的有效性。

关键词: 随掘连续超前探测;异常体辨识成像;成像准确度;电法超前探测

中图分类号: TH86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on anomaly identification imaging with continuous advanced detection of excavation

Xu Shaoyi¹, Lu Wenting¹, Wang Chengtao¹, Lin Jiarui², Xing Fangfang³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221000, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. Xuzhou College of Industrial Technology, Xuzhou 221140, China)

Abstract: This article proposes a new method for continuous advanced detection and imaging of abnormal body during excavation. The problem of poor accuracy in single imaging with fixed field sources is effectively addressed. It provides strong support for parallel operation of tunnel excavation and forward detection. Firstly, a theoretical model for continuous advanced detection and imaging of abnormal body during excavation is formulated. Then, the imaging effect and accuracy improvement methods for abnormal body identification are studied. On the basis of effectively identifying the geometric shape of the abnormal body ahead, the mean square error of conductivity is reduced from 0.273 to 0.156 by increasing the excavation mileage, from 0.173 to 0.153 by increasing the potential sampling frequency, and from 0.183 to 0.167 by increasing the number of potential measurement points. The imaging accuracy is gradually increased. Finally, the imaging effect of anomalies with different types and shapes in front of the field source during excavation is analyzed. A mud trough experimental system is established, and comparative experiments on imaging effects are carried out. The effectiveness of this method is evaluated.

Keywords: continuous advanced detection during excavation; abnormal body identification imaging; imaging accuracy; electrical advanced detection

0 引言

煤矿智能化是煤炭行业高质量发展的核心技术

支撑和必由之路^[1],其中超前探测技术是实现煤矿智能化掘进的关键保障技术之一。“超前探测”技术是通过各种手段对勘探区域的岩石、地层、构造等地质情况进行调查研究^[2]。目前煤矿巷道超前探测方法

收稿日期:2023-05-19 Received Date: 2023-05-19

^{*} 基金项目:国家自然科学基金面上项目(52174153)、江苏省自然科学基金面上项目(BK20221545)、江苏省自然科学基金青年项目(BK20221120)、精密测试技术及仪器国家重点实验室开放基金(PILAB2201)、中国矿业大学英才培育工程专项(优青)(2021YCPY0109)资助

主要有地震波法、探地雷达法、瞬变电磁法和直流电阻率法等。

直流电阻率法^[3-4]是以含水目标体与围岩的电阻率差异为物理基础,通过在掘进工作面附近布置点电源形成全空间电流场,在后方采集电位差数据,提取前方异常体信息,进而实现超前探测。国内外学者对此开展了大量研究,在直流电阻率法二维反演成像方面,陈卓等^[5]通过在电阻率法和重力勘探反演的目标函数中引入电阻率和剩余密度梯度累加约束项,实现了电阻率法和重力勘探数据的二维联合反演;刘佳成等^[6]引入模糊均值聚类(fuzzy c-means, FCM)模型约束函数对电阻率与速度进行约束,开展二维直流电阻率法与地震初至波走时成像法联合反演研究,改善了成像模型的分辨率;边世强等^[7]利用电阻率层析成像技术及模型模拟的方法,以黑方台罗家坡滑坡为例,对黄土斜坡内部电阻率与含水量关系进行量化,并结合 surfer 软件对斜坡内部水分进行二维成像;姜奋勇等^[8]基于快速 Occam 正则化反演方法,采用伴随方程法推导灵敏度矩阵并结合加权平方法计算模型粗糙度;张志勇等^[9]开展了同时考虑介质电阻率与磁导率变化的大地电磁二维正则化反演问题研究。

在直流电阻率法三维反演成像方面,为分析三维直流电阻率反演成像效果,刘斌等^[10]利用巷道有限空间进行三维电阻率超前探测,从数值模拟、物理模型试验及工程应用 3 个方面进行了研究;鲁晶津^[11]应用全空间三维电阻率反演软件建立含/导水构造模型并进行反演成像,对比分析了不同观测系统、数据采集密度、模型参数和噪音水平下的反演结果。为消除地形因素对反演结果的影响,Lu 等^[12]提出了一种利用数字高程模型生成四面体网格,并与电阻率层析成像方法结合进行三维反演的方法,结果表明三维反演结果与真实地形的图像误差小,相关系数大。为提高三维电阻率反演成像效率,戴前伟等^[13]利用阻尼型高斯牛顿法进行三维直流电阻率反演,改善了对初始模型有依赖的问题,同时节约了反演占用的内存并且使得反演速度更快;Meng 等^[14]开发了一种快速优化多信道系统,并采用一维小波变换方法对雅可比矩阵的存储进行压缩,有效减少了计算时间和内存需求。为提高三维直流电法的分辨率,高卫富等^[15]提出了对角偶极装置采集模式及多装置的数据叠加反演处理方法,以增加工作面内采集数据点;Meng 等^[16]研究利用电流电极和电位偶极子之间的不同偏移来提高测量空间分辨率,提出了一种同时利用矢量阵列电位幅值和方向的反演新方法。电阻率三维反演虽然可以较为明确的反演出前方地质中的异常体,但是其反演结构复杂,计算量庞大以及计算机内存需求巨大,而电阻率二维反演结构较为简单,大大减少了计算时间,保证了连续实时监测,在二维平面上反演出前方异常体的形状、大小、阻值等信息,一定程度上可反映出三维空间地质中异常体的物理特征。

以上学者均基于传统固定点电源的超前探测理论模型并获取测点电位变化规律,针对超前探测研究中某一方法进行改进研究以提高探测精度、成像效果等,但这些技术均属于单次静态探测,无法满足掘进工作面智能化实时动态监测的需求,无法对突水地质灾害实时连续感知及预警,掘进和探测无法同步并行,需要进行频繁探测,会严重影响生产,耗时费力,而随掘探测获得的数据更多,能在实现实时监测的同时进行多次反演,提高探测精度和成像效果。基于此,部分学者提出随掘超前探测方法^[17-19],王季等^[20]采集以掘进机震动为震源的随掘地震数据,在不影响掘进施工的条件下,实现了巷道前方地质条件的连续跟踪探测和实时监测;程久龙等^[21]基于改进人工蜂群的独立分量分析方法能够较好地分离随掘地震记录中的有效信号和干扰噪声信号,改善随掘地震有效信号的提取质量;李亚豪等^[22]基于交错网格有限差分方法进行随掘地震超前探测数值模拟,分析随掘地震超前探测波场特征,并使用互相关技术对模拟数据进行处理。刘强^[23]将随掘地震信号的噪声衰减视作求解一个反问题,在反问题的求解过程中嵌入 L1 范数的约束,提高了随掘数据的处理质量。然而,上述随掘超前探测方法因其利用掘进机截割头截割煤岩时产生的震动作为震源,与传统炸药震源相比,其震动产生的能量较低,以及煤矿井下环境噪声复杂,故采集到的震源信号信噪比较低,探测效果仍需进一步提高。

因此,基于以上问题,本文开展了随掘连续超前探测异常体辨识成像研究,构建了随掘电法连续探测反演模型,研究随掘电法连续探测的可行性并对成像准确度的影响因素进行分析,对随掘场源前方不同类型、形状异常体成像效果进行比对,最后构建了泥槽实验系统并开展了成像效果对比实验,对理论模型和分析结论进行验证。

1 随掘连续超前探测异常体辨识成像理论模型

随掘连续超前探测系统以掘进机的截割头为场源,融合掘进主体和物探方法,该系统由随掘场源激励、激励电流测量单元和电位测量阵列等组成,基于该系统构建的异常体辨识连续成像方法,首先,将煤层电阻率设定初始值,连续改变场源位置,通过正演计算不同场源位置的电流场电势分布,获取不同场源位置的电位计算值;然后,设定容差值,将正演获得的电位计算值跟电位测量阵列获得的电位测量值进行比对,如果比对结果大于容差,则构建目标函数并进行正则化和线性化;最后,通过反演算法求解煤层电阻率的扰动量,修改煤层电阻率值,并重新进行正演计算,直到电位计算值与电位测量值之间的

差值在容差范围内,此时的煤层电阻率值即为随掘连续超前探测异常体辨识成像结果。

本文所构建的随掘连续超前探测异常体辨识成像理论具体为:

将整个煤层空间离散成 m 个均匀分布的微小网格,为每个微小网格随机赋值一个初始电阻率,用 $m \times 1$ 矢量 $\mathbf{s} = [s_1, s_2, \dots, s_m]^T$ 表示煤层初始电阻率的空间分布。

随掘超前探测系统的测量电极阵列采集 n 个电位数据,用 $n \times 1$ 矢量 $\mathbf{y}_{observed} = [y_{o1}, y_{o2}, \dots, y_{on}]^T$ 及 $\mathbf{y}_{predicted} = [y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{pn}]^T$ 分别表示超前探测过程中的电位实际测量值和正演计算值;当进行随掘连续超前探测时,随着场源的移动,可得到不同场源位置对应的电位值并以矩阵形式进行表征;假设随着场源移动开展的超前探测次数为 M ,则电位测量值矩阵和正演计算值矩阵如式(1)中的 $\mathbf{Y}_{observed}$ 和 $\mathbf{Y}_{predicted}$ 所示。

随着场源移动开展了 M 次测量,用 $n \times m$ 矩阵 $\mathbf{G}^i$ 表示第 i 次正演模型, i 的取值为 $1 \sim M$;在模型电阻率空间分布给定的情况下,上述随掘正演可得测点电位计算值如式(2)所示。

随掘连续超前探测异常体辨识成像的本质是通过正演得到的 $\mathbf{Y}_{predicted}$ 无限逼近实际测量的电位数据 $\mathbf{Y}_{observed}$,最终获取煤层电阻率 $\mathbf{s}$ 的实际空间分布;由于实际测量数据 $\mathbf{Y}_{observed}$ 包含测量误差,所以假设 $\mathbf{Y}_{observed}$ 精确等于式(2)的 $\mathbf{G}\mathbf{s}$ 不能成立;此外,假设测量误差极小且可忽略,但矩阵 $\mathbf{G}$ 不一定可逆,通过对矩阵 $\mathbf{G}$ 求逆,直接求得 $\mathbf{s} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{Y}_{observed}$ 同样不能成立。

$$\mathbf{Y}_{predicted} = [\mathbf{y}_{predicted}^1 \quad \mathbf{y}_{predicted}^2 \quad \dots \quad \mathbf{y}_{predicted}^M] = \begin{bmatrix} y_{p1}^1 & y_{p1}^2 & \dots & y_{p1}^M \\ y_{p2}^1 & y_{p2}^2 & \dots & y_{p2}^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{pn}^1 & y_{pn}^2 & \dots & y_{pn}^M \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_{observed} = [\mathbf{y}_{observed}^1 \quad \mathbf{y}_{observed}^2 \quad \dots \quad \mathbf{y}_{observed}^M] = \begin{bmatrix} y_{o1}^1 & y_{o1}^2 & \dots & y_{o1}^M \\ y_{o2}^1 & y_{o2}^2 & \dots & y_{o2}^M \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{on}^1 & y_{on}^2 & \dots & y_{on}^M \end{bmatrix} \quad (2)$$

$\mathbf{Y}_{predicted} = \mathbf{G}\mathbf{s} = [\mathbf{G}^1 \quad \mathbf{G}^2 \quad \dots \quad \mathbf{G}^M] \mathbf{s}$
因此,定义电位测量值 $\mathbf{Y}_{observed}$ 与其正演计算值 $\mathbf{Y}_{predicted}$ 的差值为 $\boldsymbol{\varepsilon}$,将随掘超前探测反演问题转换为:

$$Q = \min(\boldsymbol{\varepsilon})^2 = \min \|\mathbf{Y}_{observed} - \mathbf{Y}_{predicted}\|_F^2 \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)构建目标函数为:

$$Q = \min \|\mathbf{Y}_{observed} - \mathbf{G}\mathbf{s}\|_F^2 = \min \sum_{i=1}^M \|(\mathbf{y}_{observed}^i -$$

$$\mathbf{G}^i \mathbf{s})\|_2^2 = \min \sum_{i=1}^M (\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s})^T (\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s}) \quad (4)$$

当存在足够多的电位测量值 $\mathbf{Y}_{observed}$ 来约束未知电阻率矢量 $\mathbf{s}$ 时,即: $\mathbf{Y}_{observed}$ 的数据个数 $n \times M$ 远大于 $\mathbf{s}$ 的维度 m ,此时需求解的问题为线性超定问题,对式(4)中 $\mathbf{s}$ 求偏导得:

$$\frac{\partial Q}{\partial \mathbf{s}} = \sum_{i=1}^M (-\mathbf{G}^{iT} (\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s})) = \sum_{i=1}^M (\mathbf{G}^{iT} \mathbf{G}^i \mathbf{s} - \mathbf{G}^{iT} \mathbf{y}_{observed}^i) \quad (5)$$

令式(5)等于 0,可得电阻率矢量 $\mathbf{s}$ 为:

$$\mathbf{s} = \left(\sum_{i=1}^M \mathbf{G}^{iT} \mathbf{G}^i \right)^{-1} \left(\sum_{i=1}^M \mathbf{G}^{iT} \mathbf{y}_{observed}^i \right) \quad (6)$$

而在实际的随掘连续超前探测系统中,电位测量阵列的测点数量有限,而实际待求解区域经过精细离散化后,其电阻率 $\mathbf{s}$ 矢量包含大量元素,即 $\mathbf{Y}_{observed}$ 数据数量 $n \times M$ 远小于 $\mathbf{s}$ 的维度 m ,这种情况下缺乏足够多的数据约束使得电阻率 $\mathbf{s}$ 解是唯一的,即系统是欠定的。因此,在异常体辨识成像过程中引入正则化思想,将式(4)的目标函数改写为:

$$Q = \min \sum_{i=1}^M (\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s})^T (\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s}) + \alpha g(\mathbf{s}) \quad (7)$$

式中: $g(\mathbf{s})$ 为罚函数,可以惩罚 $\mathbf{s}$ 矢量中特别大或特别小的不合适值、不平滑的参数; α 为正则化因子,用来调节式(7)中最小二乘项与罚函数之间的权重。

式(7)通过正则化处理解决了欠定问题,进一步针对正演模型 $\mathbf{G}$ 在实际情况中可能出现的非线性问题,采用线性函数进行近似,将式(7)中 $\mathbf{G}^i \mathbf{s}$ 进行一阶 Taylor 展开:

$$\mathbf{G}^i \mathbf{s} \approx \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k + \nabla \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k (\mathbf{s} - \mathbf{s}_k) \quad (8)$$

则式(7)变换为:

$$Q = \min \|\mathbf{Y}_{observed} - \mathbf{G}\mathbf{s}\|_F^2 + \alpha g(\mathbf{s}) = \min \sum_{i=1}^M \|\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s}\|_2^2 + \alpha g(\mathbf{s}) = \min \sum_{i=1}^M [\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k - \nabla \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k (\mathbf{s} - \mathbf{s}_k)]^2 + \alpha g(\mathbf{s}) \quad (9)$$

将 $(\mathbf{y}_{observed}^i - \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k)$ 视作 $\mathbf{e}^i$, $\nabla \mathbf{G}^i \mathbf{s}_k$ 为雅克比矩阵 $\mathbf{J}$ 的第 i 行,则式(9)变换为:

$$Q = \min \sum_{i=1}^M [\mathbf{e}^i - \mathbf{J}^i (\mathbf{s} - \mathbf{s}_k)]^2 + \alpha g(\mathbf{s}) \quad (10)$$

则求解得:

$$\mathbf{s} - \mathbf{s}_k = \left[\sum_{i=1}^M (\mathbf{J}^{iT} \mathbf{J}^i) \right]^{-1} \left[\left(\sum_{i=1}^M \mathbf{J}^{iT} \mathbf{e}^i \right) - \alpha g'(\mathbf{s}) \right] \quad (11)$$

令 $\mathbf{s} - \mathbf{s}_k = \Delta \mathbf{s}_k$,得到列文伯格-马夸尔特算法的迭代方向 $\Delta \mathbf{s}_k$,从第 k 次迭代得到的模型参数向量 $\mathbf{s}_k$ 出发,

沿方向 Δs_k 做一维搜索,并确定最优步长 t_k ,则第 $k+1$ 次迭代过程中模型参数修正公式如式(12)所示。

$$s_{k+1} = s_k + t_k \Delta s_k$$

(12)

根据此式修改模型参数,并进行正演计算,得到第 $k+1$ 次正演时输出的电位值矩阵 $\mathbf{Y}^{k+1}_{predicted}$,并计算与实际探测输出的电位值矩阵 $\mathbf{Y}_{observed}$ 之间的拟合差 RMS 值,其计算公式如式(13)所示。

$$RMS = \sqrt{\frac{\|\mathbf{Y}_{observed} - \mathbf{Y}^{k+1}_{predicted}\|_F^2}{n \times M}}$$

(13)

不断进行循环迭代,当拟合差 RMS 达到期望值 ε_{inv} 或者循环迭代次数达到最大时停止迭代,输出反演结果。

2 场源连续随掘与单点固定成像效果对比

本文所提出的场源随掘是将掘进机的截割头作为场源,在掘进机的电控箱中布置电流激励源,其正极通过导

线连接至掘进机的截割头、负极连接返回电极,返回电极埋设在已掘进巷道的底板并远离截割头。当掘进机向前掘进时,即:场源跟随掘进机向前移动时,对比场源连续随掘与单点固定成像效果,验证随掘超前探测相较于单点固定场源超前探测在成像性能上的优势。

在有限元仿真平台中建立长宽均为 100 m 二维地质体模型,此区域为异常体辨识成像的研究区域,该区域有空间可变的介质电导率 σ_s (S/m),此区域的四周被无限元域包围,用来模拟无限的围岩区域,此无限元域的电导率设置为一定值 σ_{s0} 。

本节通过上述 100 m×100 m 区域的电导率 σ_s 变化,来实现异常体辨识成像研究,首先将上述二维区域分解为 10×10 的正方形栅格,并假设每个正方形栅格的电导率为一常数,将每个值以 10 为底对数化并保留 3 位小数如表 1 所示,其中 X 、 Y 坐标为每个正方形栅格中心位置坐标。

表 1 二维区域 10×10 正方形栅格电导率对数化初值
Table 1 Logarithmic initial value of conductivity of 10 ×10 square grid in two-dimensional area

Y	X									
	-45 m	-35 m	-25 m	-15 m	-5 m	5 m	15 m	25 m	35 m	45 m
-45 m	-2.521	-2.515	-2.561	-2.547	-2.533	-2.574	-2.587	-2.557	-2.516	-2.581
-35 m	-2.521	-2.579	-2.551	-2.533	-2.556	-2.582	-2.534	-2.545	-2.575	-2.556
-25 m	-2.540	-2.513	-2.558	-2.574	-1.146	-1.128	-1.192	-2.555	-2.553	-2.521
-15 m	-2.558	-2.507	-2.566	-2.509	-1.125	-1.130	-1.109	-2.549	-2.558	-2.575
-5 m	-2.516	-2.509	-2.563	-2.583	-1.139	-1.149	-1.109	-2.578	-2.553	-2.564
5 m	-2.512	-2.554	-2.535	-2.570	-1.153	-1.169	-1.142	-2.550	-2.541	-2.538
15 m	-2.593	-2.507	-2.576	-2.551	-1.144	-1.122	-1.199	-2.537	-2.570	-2.588
25 m	-2.599	-2.537	-2.578	-2.522	-1.142	-1.146	-1.118	-2.566	-2.568	-2.548
35 m	-2.519	-2.558	-2.587	-2.551	-2.579	-2.580	-2.583	-2.580	-2.585	-2.587
45 m	-2.562	-2.579	-2.524	-2.535	-2.539	-2.525	-2.575	-2.525	-2.577	-2.574

将表 1 电导率初值在仿真平台绘图界面中可视化显示,如图 1 所示。在图 1 中,中间矩形区域的电导率对数化数值要大于其余区域,故中间矩形区域相较于整个区域视为低阻异常体区域。

在该研究区域布置超前探测电位测点,电位测点的位置固定,其坐标为 $(-41, 0)$ 、 $(-40, 0)$ 、 $(-39, 0)$ 、 $(-38, 0)$ 、 $(-37, 0)$ 、 $(-36, 0)$ 、 $(-35, 0)$ 、 $(-34, 0)$ 、 $(-33, 0)$ 、 $(-32, 0)$ 、 $(-31, 0)$ 、 $(-30, 0)$ 和 $(-29, 0)$,在电位测点后方 $(-50, 0)$ 位置处布置场源负极,场源在与电位测点同一水平线处从 $(-24, 0)$ 点开始沿 x 轴正方向向前移动,场源及电位测点如图 2 所示。

当随掘场源在 $(-24, 0)$ 、 $(-20, 0)$ 、 $(-16, 0)$ 、 $(-12, 0)$ 位置时,后方电位测点采集电位数据,视场源

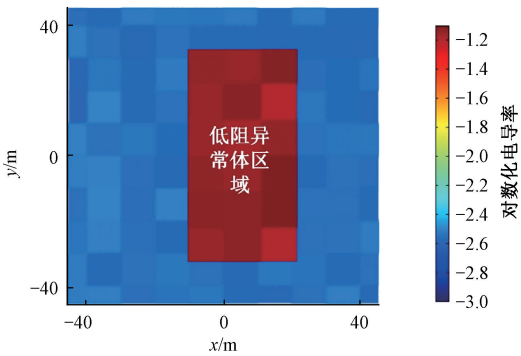


图 1 电导率对数化初值可视化示意图
Fig.1 Visualization diagram of logarithmic initial value of conductivity

在单个点时为单点固定点电源,场源大小为线电流源 0.01 A/m,当场源向前移动时,对此模型进行正演数值模拟计算,得到其后方测点电位数据如表 2 所示。

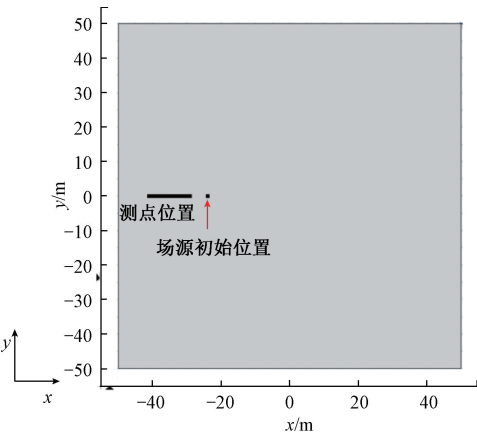


图 2 电位测点位置及场源初始位置示意图
Fig. 2 Diagram of potential measuring point position and initial position of field source

表 2 场源移动时后方测点电位

测点坐标	场源坐标			
	(-24,0)	(-20,0)	(-16,0)	(-12,0)
(-41, 0)	3.612 687	3.478 303	3.478 303	3.239 540
(-40, 0)	3.641 735	3.500 272	3.500 272	3.251 453
(-39, 0)	3.673 965	3.524 312	3.524 312	3.264 149
(-38, 0)	3.708 314	3.549 546	3.549 546	3.277 102
(-37, 0)	3.745 225	3.576 198	3.576 198	3.290 369
(-36, 0)	3.785 149	3.604 471	3.604 471	3.303 978
(-35, 0)	3.828 655	3.634 605	3.634 605	3.317 965
(-34, 0)	3.876 485	3.666 898	3.666 898	3.332 370
(-33, 0)	3.929 596	3.701 707	3.701 707	3.347 238
(-32, 0)	3.989 316	3.739 487	3.739 487	3.362 621
(-31, 0)	4.057 487	3.780 817	3.780 817	3.378 585
(-30, 0)	4.136 959	3.826 512	3.826 512	3.395 229
(-29, 0)	4.234 886	3.879 193	3.879 193	3.413 222

用上述电位值、场源位置及场源电流值大小进行低阻区域的异常体辨识成像研究,将 4 组电位值分别装填到有限元仿真软件中,设置误差允许范围为 0.005,模型最大迭代次数为 1 000,研究区域的每个正方形栅格电导率对数化初值调整为与四周无限元域一致 $\lg\sigma_0 = -2.5$,即研究区域每个正方形栅格成像迭代的初始值为-2.5。

成像结果分析:只使用单组电位测点数据(场源从(-24, 0)点至(-12, 0)点)的成像结果依次如图 3 所示,从 4 幅图中可见成像效果并不明显,无法判别前方异常体类型、大小、范围等。

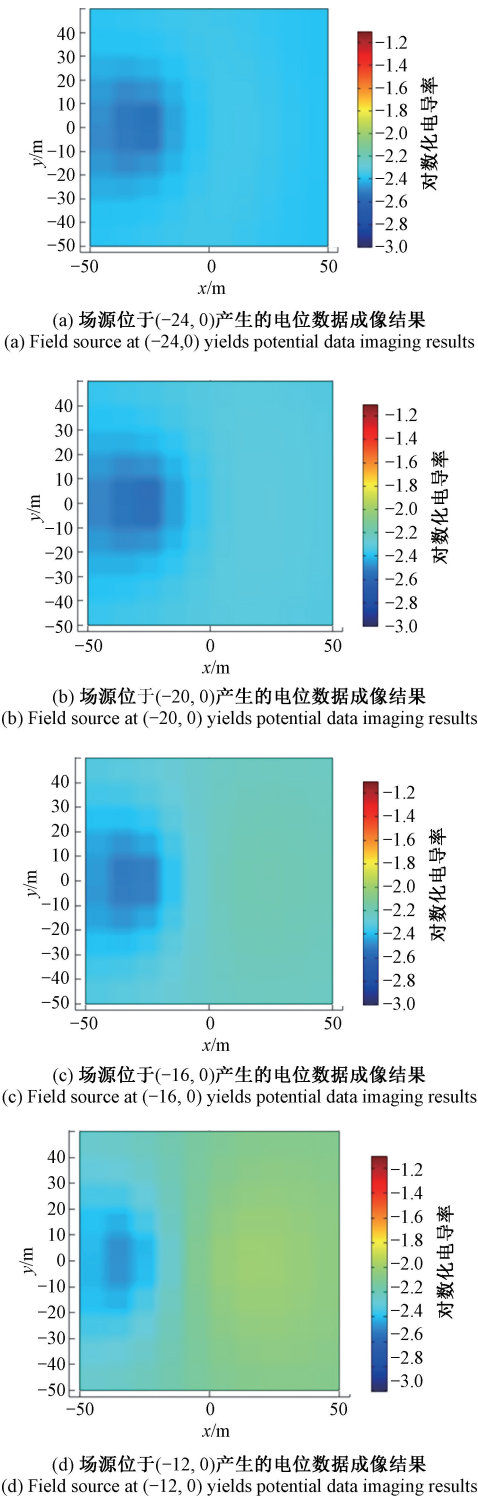


图 3 由单组场源产生的电位数据成像结果
Fig. 3 Imaging results of potential data generated by a single set of field sources

采用随掘探测方式可将 4 组测点电位数据综合利用,其成像结果如图 4 所示。能够看出,其明显优于单次成像结果,图中虚框为实际低阻异常体位置,本组随掘成像中异常体中心位置基本正确,但其识别的异常体范围仍较小。

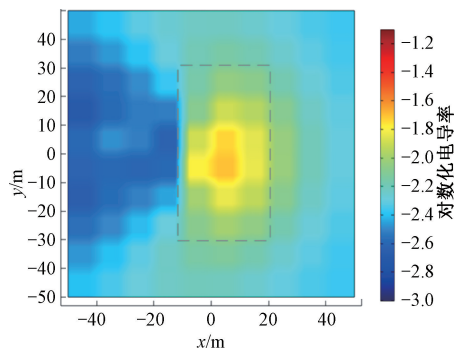


图 4 随掘成像效果:由四组场源分别产生的电位数据综合利用成像结果

Fig. 4 Accompanying tunneling imaging effect: Comprehensive utilization of imaging results of potential data generated by four groups of field sources

将图 4 随掘成像的对数化电导率初值导出,如表 3 所示,将其与正演模型进行对比计算电导率均方误差 (mean square error, MSE),计算方法如下所示:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_s - \sigma'_s)^2 \tag{14}$$

式中: σ_s 为正演模型的对数化电导率, σ'_s 为随掘成像的对数化电导率。根据式 (14) 所提供的 MSE 计算方法,图 4 随掘成像对数化电导率初值与正演模型对数化电导率计算结果的均方差为 0.173。

3 随掘异常体辨识成像准确度提高方法

根据第 2 节成像对比结果可知,随掘成像的效果优于单点固定点电源的成像效果,但随掘成像的准确度仍有待提高。本节分析影响随掘成像准确度的主要因素,包括:场源随掘里程、后方电位测点采集电位的频率、后方电位测点的数量。

表 3 随掘成像电导率对数化初值

Table 3 Logarithmic initial value of conductivity of accompanying tunneling imaging

Y	X									
	-45 m	-35 m	-25 m	-15 m	-5 m	5 m	15 m	25 m	35 m	45 m
-45 m	-2.405	-2.348	-2.283	-2.231	-2.203	-2.211	-2.249	-2.301	-2.344	-2.365
-35 m	-2.472	-2.406	-2.320	-2.227	-2.144	-2.123	-2.172	-2.251	-2.320	-2.358
-25 m	-2.566	-2.498	-2.412	-2.286	-2.083	-1.997	-2.055	-2.171	-2.276	-2.338
-15 m	-2.654	-2.573	-2.513	-2.445	-1.995	-1.836	-1.925	-2.087	-2.228	-2.315
-5 m	-2.620	-2.592	-2.610	-2.589	-1.790	-1.699	-1.837	-2.032	-2.197	-2.299
5 m	-2.593	-2.481	-2.517	-2.628	-1.887	-1.736	-1.849	-2.035	-2.197	-2.298
15 m	-2.691	-2.585	-2.525	-2.518	-2.089	-1.895	-1.949	-2.092	-2.228	-2.313
25 m	-2.624	-2.570	-2.490	-2.369	-2.157	-2.043	-2.074	-2.175	-2.274	-2.335
35 m	-2.522	-2.468	-2.385	-2.287	-2.189	-2.148	-2.180	-2.251	-2.317	-2.356
45 m	-2.439	-2.386	-2.322	-2.264	-2.225	-2.221	-2.251	-2.298	-2.340	-2.362

3.1 场源随掘里程对成像准确度的影响

本节研究场源随掘里程对成像准确度的影响,首先,控制后方电位测点采集电位的频率和后方电位测点的数量一致,具体为:1)假设场源从(-24, 0)点沿 x 轴方向每移动 2 m 时,后方电位测点采集一次电位数据,即电位测点的采集频率为 2 m/次;2)后方电位测点的数量与第 2 节一致,为 13 个。其次,设置场源移动的总里程,因为正演模型异常体所在 x 轴宽度为-10~20 m,设定随掘场源最终移动至(-12, 0)点,场源随掘总里程为 12 m。综上所述,场源随掘里程每增加 2 m,即场源在

(-24, 0)、(-22, 0)、(-20, 0)、(-18, 0)、(-16, 0)、(-14, 0)、(-12, 0)点时电位测点分别采集一次数据,电位测点每测一组数据时,将此时测得的数据与之前测得的数据进行联合异常体辨识成像,即场源在(-24, 0)、(-22, 0)点,共两点时为一次成像,场源在(-24, 0)、(-22, 0)、(-20, 0)点,共三点时为一次成像,以此类推,随掘成像效果如图 5 所示。

从图 5 可知,当场源随掘里程逐步增加时,其联合成像的效果从初始的探测效果差、异常体无法分辨(图 5(a)~(c))到探测效果渐佳、异常体的轮廓逐渐显

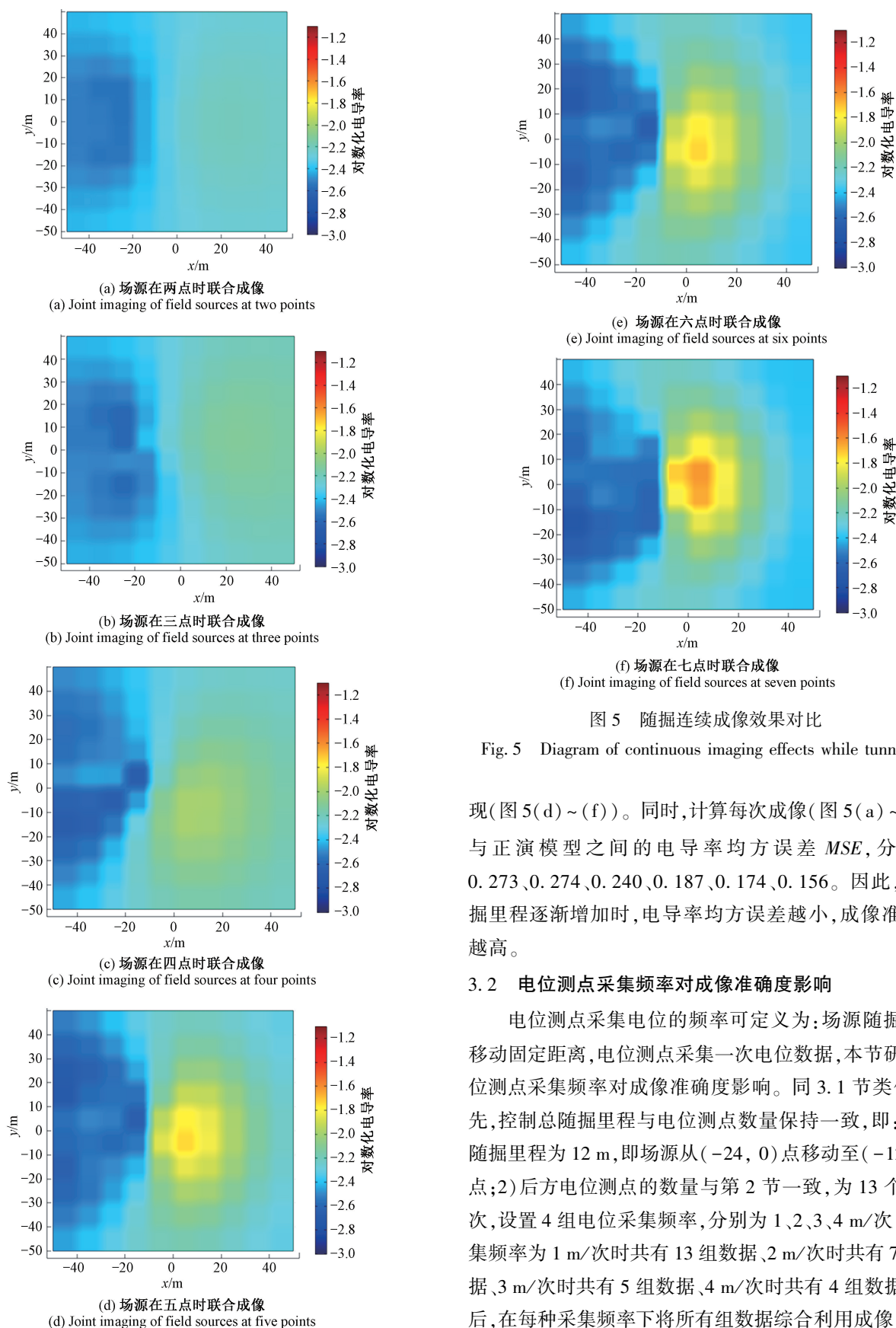


图 5 随掘连续成像效果对比

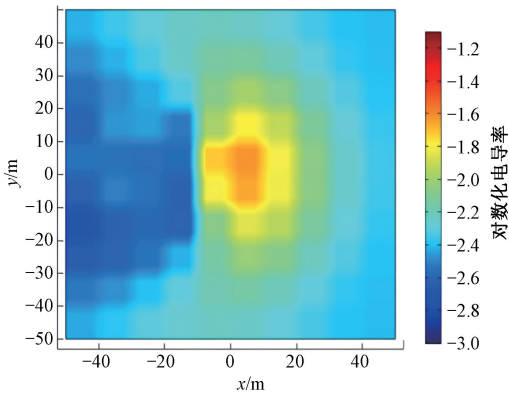
Fig. 5 Diagram of continuous imaging effects while tunneling

现(图 5(d)~(f))。同时,计算每次成像(图 5(a)~(f))与正演模型之间的电导率均方误差 MSE , 分别为 0.273、0.274、0.240、0.187、0.174、0.156。因此,当随掘里程逐渐增加时,电导率均方误差越小,成像准确度越高。

3.2 电位测点采集频率对成像准确度影响

电位测点采集电位的频率可定义为:场源随掘时每移动固定距离,电位测点采集一次电位数据,本节研究电位测点采集频率对成像准确度影响。同 3.1 节类似,首先,控制总随掘里程与电位测点数量保持一致,即:1)总随掘里程为 12 m,即场源从 $(-24, 0)$ 点移动至 $(-12, 0)$ 点;2)后方电位测点的数量与第 2 节一致,为 13 个。其次,设置 4 组电位采集频率,分别为 1、2、3、4 m/次,当采集频率为 1 m/次时共有 13 组数据、2 m/次时共有 7 组数据、3 m/次时共有 5 组数据、4 m/次时共有 4 组数据。最后,在每种采集频率下将所有组数据综合利用成像,成像结果如图 6 所示。

由图6不同采集频率下的成像效果可知,当电位采集频率为1 m/次时,成像效果最好,计算不同电位采集频率成像结果与正演模型间的电导率均方误差 MSE 分别为0.153(1 m/次)、0.156(2 m/次)、0.165(3 m/次)、0.173(4 m/次),可见当电位采集频率越高时,其电导率均方误差越小。然而,当电位采集频率越高也意味着数据量越大,计算所用时间可能也越长,对比分析不同电位采集频率下的成像迭代次数与迭代时间如表4所示。



(d) 采集频率:4 m/次
(d) Acquisition frequency: 4 m/time

图6 不同电位采集频率下成像效果对比

Fig. 6 Comparison of imaging effects under different potential acquisition frequencies

表4 不同电位采集频率下成像迭代次数、成像时间、电导率 MSE

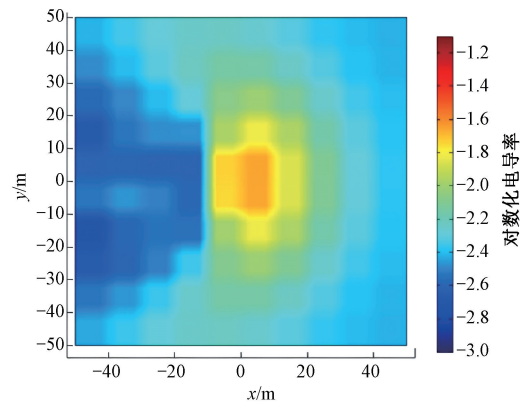
Table 4 Imaging iterations, imaging time and MSE of conductivity at different potential acquisition frequencies

电位采集 频率/(m/次)	成像迭代次数	成像时间/s	电导率均方误差
1	33	7 881	0.153
2	35	381	0.156
3	22	186	0.165
4	39	241	0.173

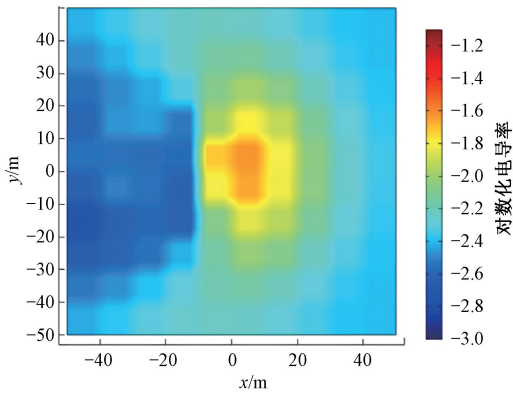
当电位采集频率为1 m/次时成像所需时间为7 881 s,成像所需时间过长,而电位采集频率为2 m/次时成像所需时间为381 s,两种采集频率下电导率均方误差的差值仅为0.003,所以需综合考虑成像效果与成像时间的关系,以在较快时间下实现较好的成像效果。

3.3 电位测点数量对成像准确度影响

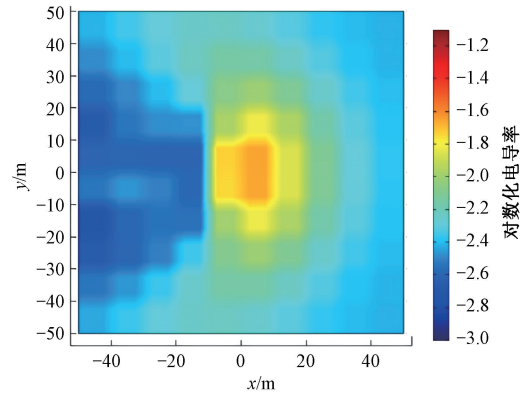
由3.1及3.2节可知,增加场源随掘里程与增加电位测点采集频率均可提高异常体辨识成像的准确度,本节研究电位测点的数量对成像准确度的影响。首先,控制总随掘里程与电位采集频率保持一致,即:1)总随掘里程为12 m,即场源从(-24, 0)点移动至(-12, 0)点;2)后方电位测点采集电位频率为4 m/次。其次,设置4组不同数量的电位测点,4组电位测点的起始位置保持一致,范围为(-41, 0)~(-29, 0),数量分别为7、13、16、21个。最后,分别对每组数据进行异常体辨识成像,其成像结果如图7所示。



(a) 采集频率:1 m/次
(a) Acquisition frequency: 1 m/time



(b) 采集频率:2 m/次
(b) Acquisition frequency: 2 m/time



(c) 采集频率:3 m/次
(c) Acquisition frequency: 3 m/time

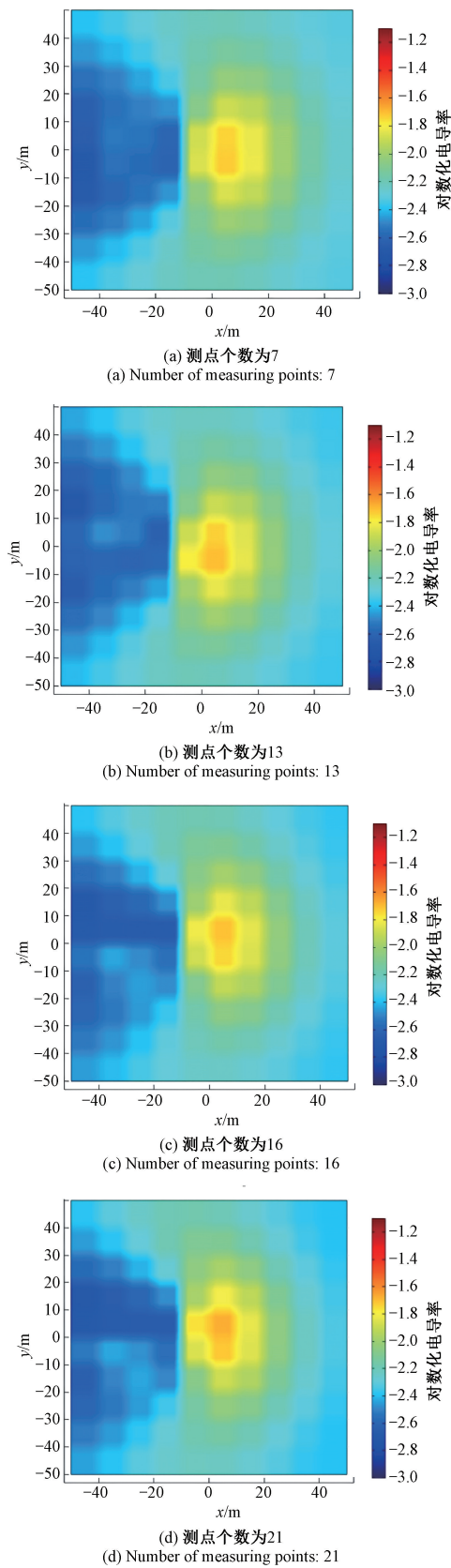


图 7 不同测点数量下成像效果对比

Fig. 7 Comparison of imaging effects under different number of measuring points

仅观察其成像结果发现,测点数量的增加对成像效果影响较小,计算不同测点数量下成像结果与正演模型间的电导率 MSE 分别为 0.183、0.173、0.174、0.167,可以看出电位测点数量为 21 时,成像电导率均方误差最小;电位测点为 13 或 16 时,电导率均方误差接近;电位测点为 7 个时,电导率均方误差最大;成像迭代次数与迭代时间如表 5 所示,测点数量越多,数据量越大,所需成像时间越长。

表 5 不同测点数量下成像迭代次数、成像时间、电导率 MSE

Table 5 Imaging iterations, imaging time and MSE of conductivity at different number of measuring points			
测点个数	成像迭代次数	成像时间/s	电导率均方误差
7	37	137	0.183
13	39	241	0.173
16	36	295	0.174
21	29	298	0.167

4 随掘场源前方不同类型、形状异常体成像效果分析

第 2、3 节的研究所采用的正演模型一致,随掘场源前方的异常体为低阻异常体,形状为板状长方体,然而,在实际煤矿井下无法预先确定场源前方异常体的类型和形状,故本节拟从随掘场源前方为不同类型、形状异常体的成像效果进行分析。本节首先研究场源前方为高阻板状异常体时的成像效果,其次研究场源前方存在低阻三角形异常体时的成像效果。

4.1 随掘场源前方为高阻板状异常体成像效果

对比第 2 节异常体成像的正演模型,将正演模型 10×10 的正方形栅格中的低阻对数化电导率更改为高阻对数化电导率,将其每个值取对数化,如表 6 所示,其中 X 、 Y 坐标为每个正方形栅格中心位置坐标。

将上述电导率初值在仿真平台绘图界面中可视化显示,如图 8 所示,在图 8 中,中间矩形区域的电导率对数化数值要小于其余区域,故中间矩形区域相较于整个区域视为高阻异常体区域。

设置场源的随掘里程为 12 m,电位测点的采集频率为 4 m/次,电位测点的数量为 13 个。基于电位测点数据进行高阻异常体辨识成像,其成像结果如图 9(a) 所示,图中虚线框为实际高阻异常体所在位置,可以看出高阻异常体成像结果较为发散,成像出的异常体区域要大于实际异常体区域。对比图 9(b) 所示的低阻异常体成

表6 含高阻异常体的10×10正方形栅格电导率对数化初值

Table 6 Logarithmic initial value of 10×10 square grid conductivity with high resistivity anomaly

Y	X									
	-45 m	-35 m	-25 m	-15 m	-5 m	5 m	15 m	25 m	35 m	45 m
-45 m	-2.521	-2.515	-2.561	-2.547	-2.533	-2.574	-2.587	-2.557	-2.516	-2.581
-35 m	-2.521	-2.579	-2.551	-2.533	-2.556	-2.582	-2.534	-2.545	-2.575	-2.556
-25 m	-2.540	-2.513	-2.558	-2.574	-4.992	-4.979	-4.906	-2.555	-2.553	-2.521
-15 m	-2.558	-2.507	-2.566	-2.509	-4.959	-4.958	-4.932	-2.549	-2.558	-2.575
-5 m	-2.516	-2.509	-2.563	-2.583	-4.956	-4.943	-4.977	-2.578	-2.553	-2.564
5 m	-2.512	-2.554	-2.535	-2.570	-4.936	-4.992	-4.946	-2.550	-2.541	-2.538
15 m	-2.593	-2.507	-2.576	-2.551	-4.949	-4.955	-4.997	-2.537	-2.570	-2.588
25 m	-2.599	-2.537	-2.578	-2.522	-4.934	-4.971	-4.923	-2.566	-2.568	-2.548
35 m	-2.519	-2.558	-2.587	-2.551	-2.579	-2.580	-2.583	-2.580	-2.585	-2.587
45 m	-2.562	-2.579	-2.524	-2.535	-2.539	-2.525	-2.575	-2.525	-2.577	-2.574

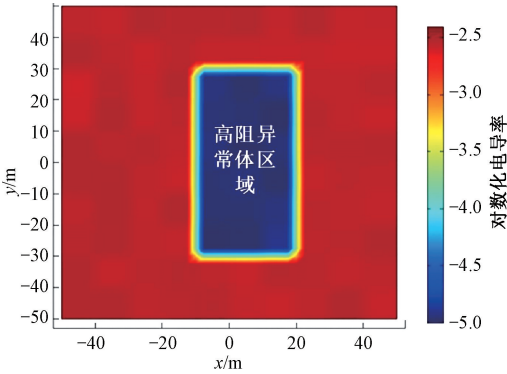
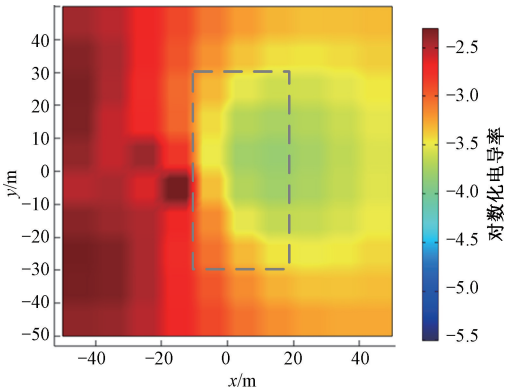
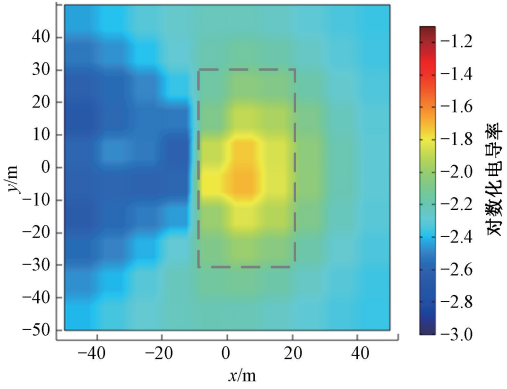


图8 含高阻异常体电导率对数化初值可视化示意图

Fig.8 Visualization diagram of logarithmic initial value of conductivity of body with high resistivity anomaly



(a) 含高阻异常体
(a) High resistivity abnormal body



(b) 含低阻异常体
(b) Low resistivity abnormal body

图9 异常体辨识成像结果

Fig.9 Abnormal body identification imaging results

像效果,在随掘里程、电位测点采集频率、电位测点数量等各超前探测变量相同的情况下,低阻异常体成像结果较为集中,成像区域在实际低阻异常体区域之内。

计算高阻异常体成像结果与正演初始模型间的电导率均方误差为0.704,对比相同条件下低阻异常体均方误差0.173,高阻异常体成像均方误差较高。同时高阻异常体成像迭代次数为149次、成像时间为1 009 s,也高于低阻异常体的39次、241 s。

4.2 随掘场源前方存在低阻三角形异常体时成像效果

前文对比分析了随掘场源前方分别为低阻、高阻板状异常体时的成像效果,但实际工况中随掘场源前方异常体的形状随机性较强且不会保证为规则的几何形态,本节分析当随掘场源前方存在低阻三角形异常体时,随掘成像的异常体辨识效果。

在正演模型10×10的正方形栅格中设置三角形低阻异常体,将其每个值取对数化保留3位小数如表7所示,

其中X、Y坐标为每个正方形栅格中心位置坐标,将其可视化展示如图10所示。

表 7 含低阻三角形异常体的 10×10 正方形栅格电导率对数化初值

Table 7 Logarithmic initial value of 10×10 square grid conductivity with triangular anomaly body with low resistivity

Y	X									
	-45 m	-35 m	-25 m	-15 m	-5 m	5 m	15 m	25 m	35 m	45 m
-45 m	-2.521	-2.515	-2.561	-2.547	-2.533	-2.574	-2.587	-2.557	-2.516	-2.581
-35 m	-2.521	-2.579	-2.551	-2.533	-2.556	-2.582	-2.534	-2.545	-2.575	-2.556
-25 m	-2.540	-2.513	-2.558	-2.574	-1.192	-2.579	-2.506	-2.555	-2.553	-2.521
-15 m	-2.558	-2.507	-2.566	-2.509	-1.159	-1.158	-2.532	-2.549	-2.558	-2.575
-5 m	-2.516	-2.509	-2.563	-2.583	-1.156	-1.143	-1.177	-2.578	-2.553	-2.564
5 m	-2.512	-2.554	-2.535	-2.570	-1.136	-1.192	-1.146	-2.550	-2.541	-2.538
15 m	-2.593	-2.507	-2.576	-2.551	-1.195	-1.155	-2.597	-2.537	-2.570	-2.588
25 m	-2.599	-2.537	-2.578	-2.522	-1.134	-2.571	-2.523	-2.566	-2.568	-2.548
35 m	-2.519	-2.558	-2.587	-2.551	-2.579	-2.580	-2.583	-2.580	-2.585	-2.587
45 m	-2.562	-2.579	-2.524	-2.535	-2.539	-2.525	-2.575	-2.525	-2.577	-2.574

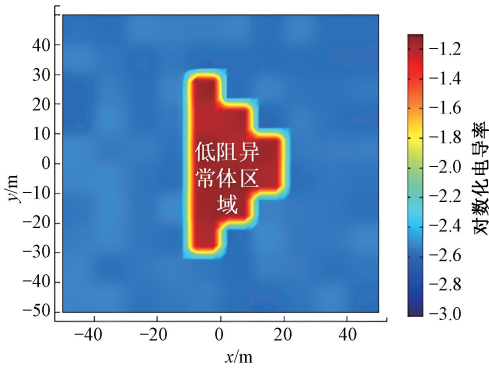


图 10 含低阻三角形异常体电导率对数化初值可视化示意图

Fig. 10 Visualization diagram of logarithmic initial value of conductivity of body with triangular anomaly body with low resistivity

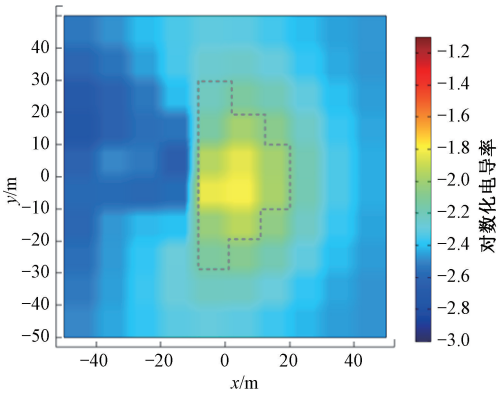


图 11 低阻三角形异常体辨识成像结果

Fig. 11 Identification and imaging results of low-resistivity triangular anomaly

设置场源的随掘里程为 12 m, 电位测点的采集频率为 4 m/次, 电位测点的数量为 13 个。基于电位测点数据进行低阻三角形异常体辨识成像, 其成像结果如图 11 所示, 图中虚线框为实际低阻三角形异常体所在位置。可以看出, 对于低阻三角形异常体, 其超前探测成像结果可以分辨出三角形形状, 成像结果中低阻三角形异常体范围要略大于真实范围。计算成像结果与正演初始模型间的电导率均方误差为 0.121, 成像迭代次数为 68 次、成像时间为 482 s。

5 随掘连续超前探测实验研究

5.1 泥槽实验系统搭建

本文所构建的模拟实验平台如图 12 所示, 实验用掘进机截割头模型采用铝合金材料 3D 打印, 以保证其良好

的导电性。将 3D 打印掘进机截割头作为场源, 截割头通过电旋转装置和转动轴连接后方电机实现机械传动, 利用泥槽实验模拟真实掘进时随掘连续超前探测。在截割头后方共布置 8 个电位测点, 编号为 1~8 号, 电位测点阵列等距排列, 每个电位测点之间的距离为 3 cm。8 号测点与截割头场源掘进的初始位置间的距离为 6.5 cm。实验采用恒流源供电, 输出电流为 30 mA。

实验分 3 次进行: 第 1 次泥槽中无异常体, 截割头场源向前移动的过程中, 测量后方测点间的电势差值, 根据泥槽内实验土壤尺寸、测点位置与数量、恒流源的大小等, 在有限元仿真平台中构建泥槽实验二维截面异常体辨识成像模型, 导入无异常体时实验电位数据, 输出无异常体时成像效果图; 第 2 次在泥槽中设置高阻异常体模拟高阻断层, 截割头场源以高阻异常体为掘进方向, 重复第 1 次实验测量步骤, 进行异常体辨识成像, 得到高阻异

常体的成像结果,并与无异常体时的成像结果进行对比;第3次在泥槽中设置低阻异常体模拟低阻含水带,截割头场源以低阻异常体为掘进方向,重复第1次实验测量步骤,并分析异常体辨识成像结果。

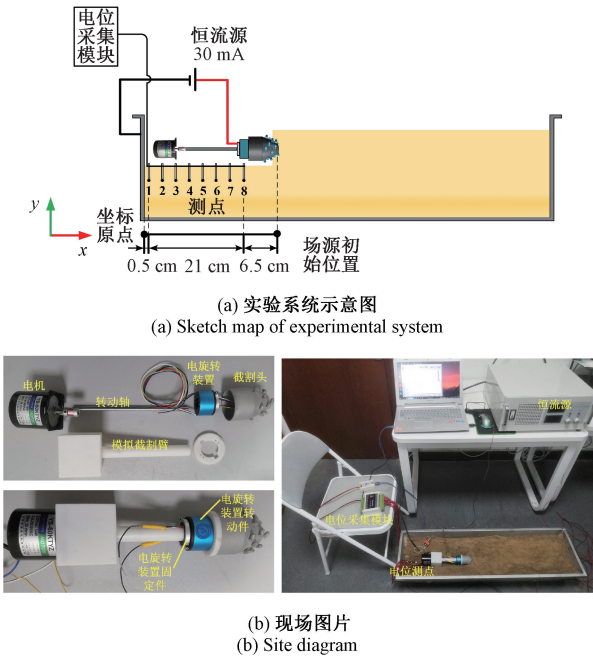


图 12 泥槽实验系统

Fig. 12 Experimental diagram of mud tank

5.2 探测区域前方无异常体

截割头前方为正常地质(无异常体)时,为模拟随掘过程,场源随截割头自掘进初始位置起,每向前掘进 3 cm 时,提取一次后方电位测点间电势差(即 1 号测点与 2 号测点间电势差、2 号测点与 3 号测点间电势差,以此类推),将 1 号测点的电位记为零电位,将相邻测点间电势差累加即可得每个测点的电位值。

根据泥槽内实验土壤尺寸、测点位置与数量、恒流源的大小等,在有限元仿真平台中构建二维截面异常体辨识成像模型,导入无异常体时实验电位数据,划分网格数为 6×30 个,如图 13 所示。通过迭代每个网格的对数化电导率值,直至满足优化容差为 0.07 时,输出无异常体成像效果图,如图 14 所示。图 14(a)为场源在初始位置,图 14(b)为场源由初始位置向前掘进 3 cm,图 14(c)为场源由初始位置向前掘进 6 cm,图 14(d)为场源由初始位置向前掘进 9 cm,图 14(a)~(d)分别为场源每次掘进在单点位置处的一次数据成像效果,图中黑色虚框为超前探测区域,因场源不断向前移动,探测区域逐渐减小,由图 14 可以看出 4 幅图的探测区域均无明显异常。

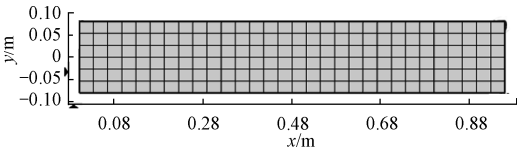


图 13 异常体辨识成像模型网格划分图

Fig. 13 Grid division diagram of abnormal body identification imaging model

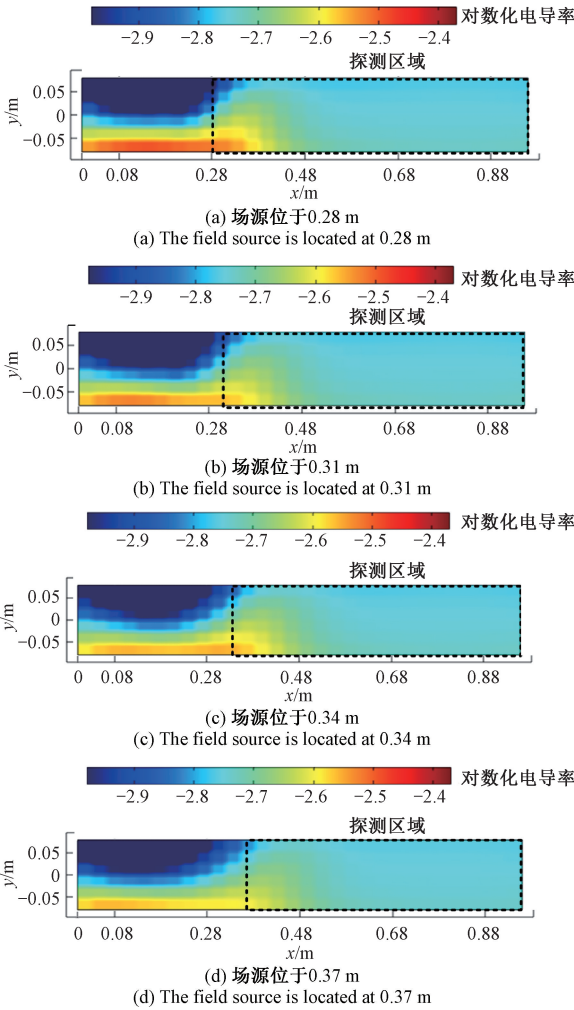


图 14 无异常体时单次成像结果

Fig. 14 Single imaging results without abnormal body

将 4 次采集得到的电位数据进行联合辨识成像,成像结果如图 15 所示,探测区域无明显异常,符合实验实际情况。

5.3 探测区域前方为高阻异常体

为在实验中构造高阻异常体,在截割头掘进初始位置前方 11 cm 处开挖一个 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 的长方体坑体,用于模拟高阻异常体,如图 16 所示,重复无异常体时的实验步骤。

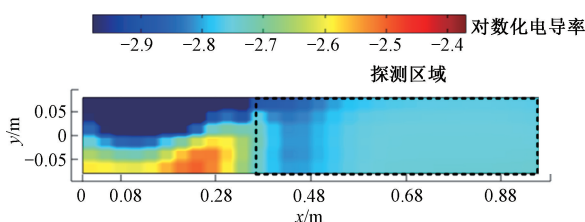


图 15 无异常体时联合随掘成像结果

Fig. 15 Joint accompanying tunneling imaging results when there is no abnormal body

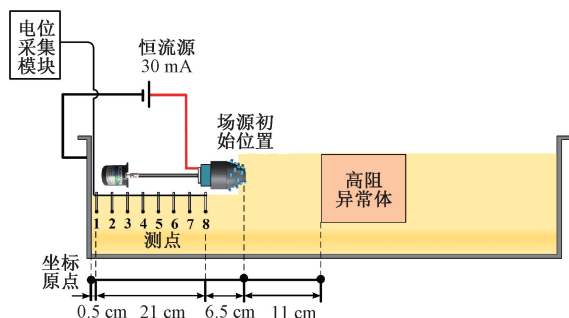


图 16 有高阻异常体泥槽实验示意图

Fig. 16 Diagram of mud tank experiment with high resistance anomalies

同 5.2 节辨识成像方法相同,当前方有高阻异常体时,对比单点电源成像效果与场源随掘成像效果。单点电源成像分析如下:将截割头场源向前移动 3、6、9 cm 时后方测点采集到的单次电位数据进行异常体辨识成像,其成像效果如图 17 所示,图中黑色虚框为探测区域。从图 17(a)~(d)中能够发现,探测区域并无明显高阻异常,在探测区域之外,颜色加深,其对数化电导率减小,附近网格电阻率值增加,由此可见单次电位数据在探测区域对高阻异常体的辨识成像效果并不佳,在数据迭代过程中易发生探测区域之外的区域电阻率值增大。因此,需要场源随掘联合 4 次电位数据进行高阻异常体辨识成像。

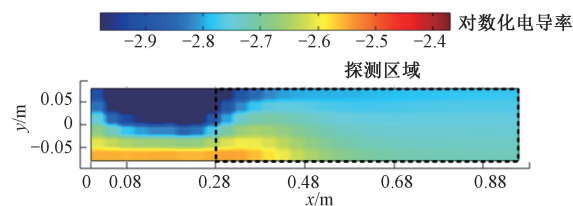
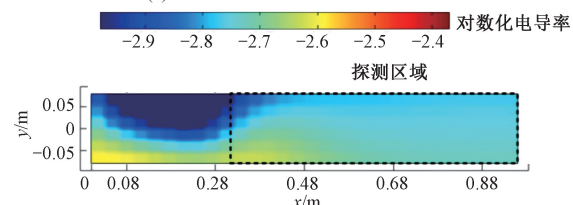
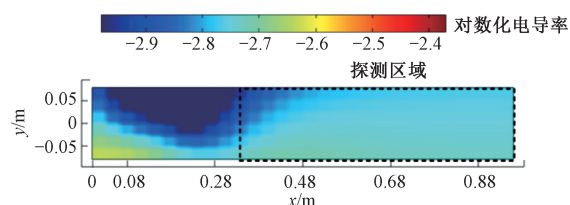
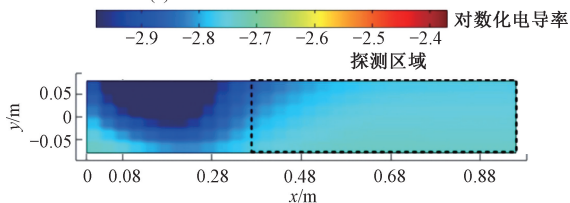
(a) 场源位于 0.28 m
(a) The field source is located at 0.28 m(b) 场源位于 0.31 m
(b) The field source is located at 0.31 m(c) 场源位于 0.34 m
(c) The field source is located at 0.34 m(d) 场源位于 0.37 m
(d) The field source is located at 0.37 m

图 17 有高阻异常体时单次成像结果

Fig. 17 Single imaging results under high resistivity abnormal bodies

将 4 次电位数据联合随掘成像,其成像效果如图 18 所示,可以看出在探测区域中明显可以发现高阻异常体,高阻异常体的范围约为 0.38~0.58 m,与实际高阻异常体的范围相符。

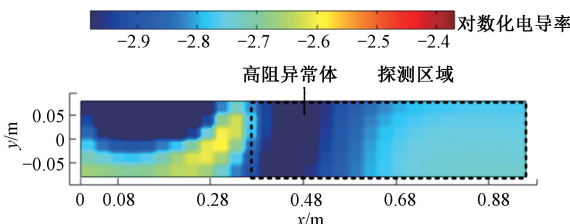


图 18 有高阻异常体时联合随掘成像结果

Fig. 18 Joint accompanying tunneling imaging results under high resistivity abnormal bodies

5.4 探测区域前方为低阻异常体

为构造低阻异常体,在 5.3 节中 15 cm×15 cm×10 cm 的长方体坑体中,放置一个直径为 14 cm、高为 8 cm 的不锈钢圆柱体,不锈钢圆柱体内注满导电盐溶液,以此不锈钢圆柱体模拟低阻异常体,如图 19 所示,重复无异常体时的实验步骤。

当前方有低阻异常体时,对比单点电源成像效果与场源随掘成像效果。分别将截割头场源向前移动 3、6 和 9 cm,基于后方测点采集到的单次电位数据进行异常体辨识成像,单点电源成像效果如图 20 所示;图 20 中黑色虚框为探测区域,图中是对数化电导率的成像,数值越大即表示电导率越高、电阻率越低,即探测区域中深色区域表示低阻异常体区域。

在图 20(b)与(c)中,场源在掘进 3 cm 与掘进 6 cm 时低阻异常体的辨识效果较为明显;在图 20(a)与(d)

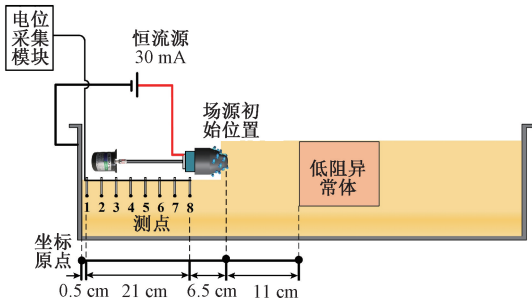


图 19 有低阻异常体泥槽实验示意图

Fig. 19 Diagram of mud tank experiment with low resistance abnormal body

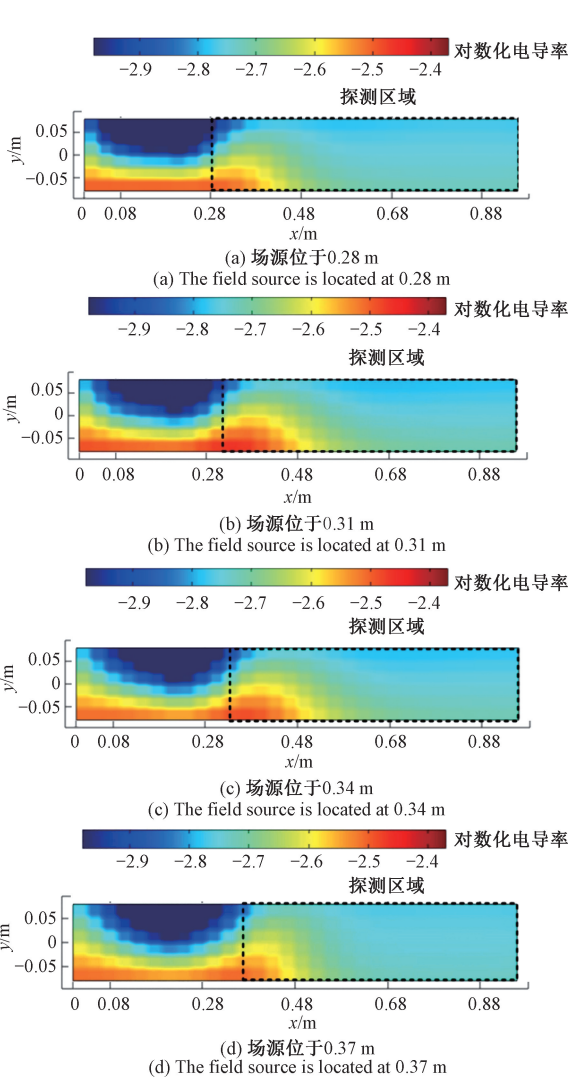


图 20 有低阻异常体时单次成像结果

Fig. 20 Single imaging results under low resistance anomalies

中,场源在初始位置与掘进 9 cm 时低阻异常体的辨识效果不明显;由此可见,单次电位数据在探测区域对低阻异常体的辨识成像效果具有偶然性,需要场源随掘联合 4 次电位数据进行低阻异常体辨识成像。将 4 次电位数

据联合随掘成像,其成像效果如图 21 所示,在探测区域中清晰辨识低阻异常体,成像效果更加稳定。

在泥槽实验中,高阻异常体(图 18)测量成像效果优于低阻异常体(图 21),分析原因如下:

1) 高阻和低阻异常体体积、形状有较大差异。泥槽实验中,高阻异常体为 $15\text{ cm}\times 15\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ 的长方体坑体,其体积为 $2\,250\text{ cm}^3$,低阻异常体为一个直径为 14 cm,高为 8 cm 注满导电盐溶液的不锈钢圆柱体,体积为 $1\,231.5\text{ cm}^3$,低阻异常体的体积小于高阻异常体体积,如图 22 所示,探测时异常体类型及大小会直接影响探测电流的大小,从而影响最终反演成像效果。

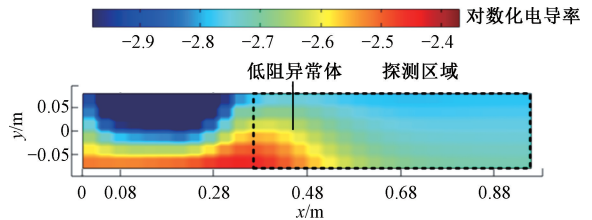


图 21 有低阻异常体时联合随掘成像结果

Fig. 21 Joint accompanying tunneling imaging results under low resistance anomalies

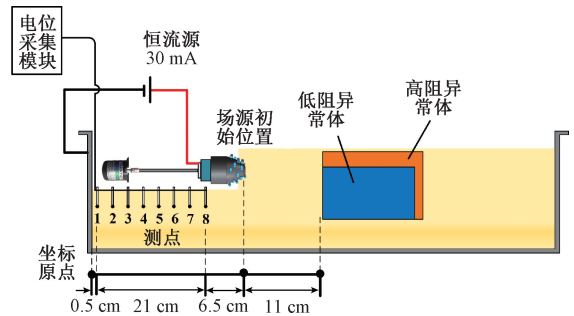


图 22 泥槽实验高阻和低阻异常体大小对比图

Fig. 22 Comparison chart of the size of high-resistance and low-resistance anomalies in mud tank experiments

2) 泥槽实验中,高阻异常体为长方坑体,电阻率为 $3\times 10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,低阻异常体为注满导电盐溶液不锈钢圆柱体,导电盐溶液的电阻率为 $15\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,不锈钢的电阻率为 $7\times 10^{-7}\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,围岩电阻率为 $300\text{ }\Omega\cdot\text{m}$,高阻异常体电阻率与围岩电阻率的差值远大于低阻异常体。

以上原因均使得泥槽实验中,前方有高阻异常体时,由后方测点测得的电位值大小与正常地质体的差值变化量大于有低阻异常体时的差值变化量,导致由电位值计算得到的高阻异常体视电阻率差值大于低阻异常体视电阻率差值,从而使得在由测量数据进行反演得到前方地质情况的成像方法中,高阻异常体的反演成像效果优于低阻异常体反演成像效果。

在泥槽实验中,围岩利用粘土模拟,而在真实工况下,围岩因岩石的矿物成分、结构、构造,岩石空隙、地下温度等因素的影响,围岩电阻率可高达 $1\,000\ \Omega\cdot\text{m}$,远高于泥槽实验所用粘土的电阻率 $300\ \Omega\cdot\text{m}$;此外真实地下环境中含水层的体积远大于泥槽实验模拟的低阻异常体,电阻率也受部分岩石矿化的影响低于泥槽实验模拟的低阻异常体。因此,在后续实验中,将对泥槽实验所用的粘土进行高电阻率处理,在粘土中添加矿物质颗粒,对粘土进行晒干处理,减少其水分,提高粘土的电阻率,更接近实际工况下围岩的真实电阻值;对低阻体选用体积更大的容器,增大低阻异常体体积,使模拟实验更贴近实际地下实际含水层赋存情况。

6 结 论

本文研究电法随掘连续超前探测异常体辨识成像方法,建立随掘异常体辨识成像理论模型,分析了场源随掘里程、后方电位测点采集电位频率和后方电位测点数量 3 个因素对成像准确度的影响,确定了异常体成像的最优测量方案。分析了随掘场源前方不同类型、形状异常体对成像效果的影响,结果表明:高阻异常体成像的电导率均方误差要大于低阻异常体,低阻三角形异常体成像的范围要略大于真实范围。最后,构建了泥槽模拟实验系统,进行了无异常体、高阻异常体、低阻异常体辨识成像实验,验证了本文所提出的随掘连续超前探测异常体辨识联合成像的有效性。进一步地,将对泥槽实验所用的粘土进行高电阻率处理,选用体积更大的容器,增大低阻异常体体积,更贴合真实地质环境,提高反演精度与成像效果。

参考文献

[1] 程德强, 陈杰, 寇旗旗, 等. 融合层次特征和注意力机制的轻量化矿井图像超分辨率重建方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 73-84.

CHENG D Q, CHEN J, KOU Q Q, et al. Lightweight super-resolution reconstruction method based on hierarchical features fusion and attention mechanism for mine image[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 73-84.

[2] 岳建华, 杨海燕, 冉华赓. 矿井电法勘探研究现状与发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 259-276.

YUE J H, YANG H Y, RAN H G. Research status and development trends of mine electrical exploration[J]. Coal Field Geology and Exploration, 2023, 51(1): 259-276.

[3] 王鹏, 鲁晶津, 王信文. 再论巷道直流电法超前探测技术的有效性[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 257-263.

WANG P, LU J J, WANG X W. Further discussion on the effectiveness of the advanced detection technology using direct current method in tunnels[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 257-263.

[4] 张平松, 李永盛, 胡雄武. 巷道掘进直流电阻率法超前探测技术应用探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 135-140.

ZHANG P S, LI Y SH, HU X W. Discussion on the application of direct current resistivity method for advance detection technology in tunnel excavation[J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 135-140.

[5] 陈卓, 谭捍东, 彭森. 基于物性参数梯度累加约束的电阻率法和重力勘探数据二维联合反演[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(1): 171-184.

CHEN ZH, TAN H D, PENG M. Two-dimensional joint inversion of data of resistivity method and gravity exploration based on summative gradient constraint of physical properties parameters [J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(1): 171-184.

[6] 刘佳成, 张志勇, 周峰, 等. 基于 FCM 聚类约束的直流电阻率法与地震走时成像法二维联合反演[J]. 地球物理学报, 2023, 66(7): 3048-3059.

LIU J CH, ZHANG ZH Y, ZHOU F, et al. Two-dimensional joint inversion of DC resistivity method and seismic traveltome tomography method based on the FCM cluster constraint [J]. Journal of Geophysics, 2023, 66(7): 3048-3059.

[7] 边世强, 杨云鹏, 马建花, 等. 黄土斜坡内部水分二维成像研究——以黑方台罗家坡滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2020, 28(4): 840-851.

BIAN SH Q, YANG Y P, MA J H, et al. Two-dimensional imaging study of internal moisture in loess slope: A case study of the luojiapo landslide in heifangtai terrace [J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 28(4): 840-851.

[8] 姜奋勇, 叶益信, 陈海文, 等. 基于非结构网格的带地形 MT 二维 Occam 反演及应用[J]. 物探与化探, 2022, 46(2): 482-489.

JIANG F Y, YE Y X, CHEN H W, et al. Application of

- 2D inversion of magnetotelluric data bearing terrain information based on an unstructured mesh [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46(2): 482-489.
- [9] 张志勇, 谢尚平, 李曼, 等. 二维 MT 电阻率与磁导率同时反演研究[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(4): 405-412.
- ZHANG ZH Y, XIE SH P, LI M, et al. Research on simultaneous inversion of 2D MT resistivity and permeability [J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 41(4): 405-412.
- [10] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测三维反演成像[J]. *岩土工程学报*, 2012, 34(10): 1866-1876.
- LIU B, LI SH C, NIE L CH, et al. 3D inversion imaging of tunnel water bearing structure advanced detection by DC resistivity method [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, 34(10): 1866-1876.
- [11] 鲁晶津. 煤矿井下含/导水构造三维电阻率反演成像技术[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(3): 687-695.
- LU J J. 3D electrical resistivity inversion and imaging technology for coal mine water-containing/ water-conductive structures[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(3): 687-695.
- [12] LU D B, ZHOU Q Y, JUNEIO S A, et al. A systematic study of topography effect of ERT based on 3-D modeling and inversion[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2015, 172(6): 1531-1546.
- [13] 戴前伟, 柴新朝, 陈德鹏. 基于阻尼型高斯牛顿法的三维直流电阻率反演[J]. *工程地球物理学报*, 2012, 9(4): 375-379.
- DAI Q W, CHAI X CH, CHEN D P. 3D DC resistivity inversion based on damped Gauss Newton's method method[J]. *Journal of Engineering Geophysics*, 2012, 9(4): 375-379.
- [14] MENG H L, PAPADOPOULOS N, WILKINSON P B, et al. The inversion of data from very large three-dimensional electrical resistivity tomography mobile surveys[J]. *Geophysical Prospecting*, 2020, 68(8): 2579-2597.
- [15] 高卫富, 翟培合, 肖乐乐, 等. 环工作面三维直流电阻率法研究及应用[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(9): 3534-3544.
- GAO W F, ZHAI P H, XIAO L L, et al. Research and application of 3D DC resistivity method for ring working face[J]. *Journal of Geophysics*, 2020, 63(9): 3534-3544.
- [16] MENG H L, WILKINSON P B, GANCE J, et al. Measurement and inversion strategies for 3-D resistivity surveys with vector arrays[J]. *Geophysical Prospecting*, 2022, 70(3): 578-592.
- [17] 王保利, 程建远, 金丹, 等. 煤矿井下随掘地震震源特征及探测性能研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 10-19.
- WANG B L, CHENG J Y, JIN D, et al. Study on the characteristics and detection performance of seismic sources during underground mining [J]. *Coal Geology and Exploration*, 2022, 50(1): 10-19.
- [18] 李圣林, 张平松, 姬广忠, 等. 随掘地震超前探测掘进机震源信号的复合干涉处理研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2): 305-316.
- LI SH L, ZHANG P S, JI G ZH, et al. Research on composite interference processing of seismic source signal of tunneling machine in advance detection with excavation earthquake [J]. *Journal of Mining and Safety Engineering*, 2022, 39(2): 305-316.
- [19] 霍晶晶, 查华胜, 苗园园, 等. 突出煤层巷道随掘超前探测技术研究[J]. *煤矿开采*, 2018, 23(6): 19-23.
- HUO J J, CHA H SH, MIAO Y Y, et al. Research on advance detection technology for outburst coal seam tunnels following excavation [J]. *Coal Mining*, 2018, 23(6): 19-23.
- [20] 王季, 覃思, 吴海, 等. 随掘地震实时超前探测系统的试验研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 1-7.
- WANG J, QIN S, WU H, et al. Experimental study on the real time advance detection system for drifting earthquake [J]. *Coalfield Geology and Exploration*, 2021, 49(4): 1-7.
- [21] 程久龙, 程鹏, 李亚豪. 基于 IABC-ICA 的随掘地震去噪方法[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(1): 413-422.
- CHENG J L, CHENG P, LI Y H. An IABC-ICA based denoising method for excavation seismic data[J]. *Journal of Coal Science*, 2022, 47(1): 413-422.

- [22] 李亚豪,程久龙,姜旭,等. 基于互相关的随掘地震超前探测有效信号提取方法研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(5): 82-85, 114.

LI Y H, CHENG J L, JIANG X, et al. Research on effective signals extraction method of seismic while drilling ahead detection based on cross-correlation[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(5): 82-85, 114.

- [23] 刘强. L1 范数约束的随掘地震噪声衰减[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 2699-2705.

LIU Q. Noise attenuation based on L1-norm constraint inversion in seismic while drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2699-2705.

作者简介



许少毅, 2010 年于中国矿业大学获得学士学位, 2015 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为采掘装备智能化。

E-mail: shaoyi@cumt.edu.cn

Xu Shaoyi received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2010 and 2015, respectively. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at China University of Mining and Technology. His main research interest is intelligent mining equipment.



卢文庭, 2019 年于安徽理工大学获得学士学位, 2023 年于中国矿业大学获得硕士学位, 主要研究方向为采掘装备智能化。

E-mail: TS20050035A31@cumt.edu.cn

Lu Wenting received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2019 and M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2023. His main research interest is intelligent mining equipment.



王承涛(通信作者), 2015 年于中国矿业大学获得学士学位, 2020 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为中国矿业大学讲师, 主要研究方向为大数据处理与分析。

E-mail: chengtaowang@cumt.edu.cn

Wang Chengtao (Corresponding author) received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from China University of Mining and Technology in 2015 and 2020, respectively. He is currently a lecturer at China University of Mining and Technology. His main research interest is big data processing and analysis.



林嘉睿, 2006 年于天津大学获得学士学位, 2012 年于天津大学获得博士学位, 现为天津大学副教授、博士生导师。主要研究方向为激光及光电测试、大尺寸精密测量技术。

E-mail: linjr@tju.edu.cn

Lin Jiarui received his B. Sc. degree and Ph. D. degree both from Tianjin University in 2006 and 2012. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Tianjin University. His main research interests include photoelectric testing technology and large-scale precision measurement.



邢方方, 2010 年于安徽科技学院获得学士学位, 2013 年于中国矿业大学获得硕士学位, 现为徐州工业职业技术学院讲师, 主要研究方向为机电系统智能控制。

E-mail: cumtxingfangfang@163.com

Xing Fangfang received her B. Sc. degree from Anhui Science and Technology University in 2010 and M. Sc. degree from China University of Mining and Technology in 2013. She is currently a lecturer at Xuzhou College of Industrial Technology. Her main research interest is intelligent control of electromechanical system.