

李术才, 聂利超, 刘斌等. 2015. 多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究. 地球物理学报, 58(4): 1434-1446, doi:10.6038/cjg20150429.

Li S C, Nie L C, Liu B, et al. 2015. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 58(4): 1434-1446, doi:10.6038/cjg20150429.

# 多同性源阵列电阻率法隧道超前探测方法与 物理模拟试验研究

李术才, 聂利超, 刘斌, 田明禛, 王传武,  
宋杰, 刘征宇, 王世睿

山东大学岩土与结构工程研究中心, 济南 250061

**摘要** 直流电阻率法以其对含水构造响应敏感且适应性强的特点, 是隧道施工期超前地质预报的常用方法. 针对目前定点源三极观测方式易受到测线附近旁侧异常干扰与聚焦观测方式探测距离过短无法三维成像的问题, 提出了一种基于多同性源阵列电阻率的隧道超前探测新方法, 利用环形布置的多同性源供电电压制隧道掌子面后方的异常体的干扰, 同时增强掌子面前方远处异常体的敏感度, 阵列电极测量可为含水构造的三维反演成像提供三维数据. 首先, 开展了含水构造超前探测的数值正演模拟, 发现多同性源方法的视电阻率纵向微分曲线极小值以及与横轴的交点位置可对异常体位置进行定性判断, 探讨了多同性源方法对后方及侧向异常干扰的响应特征及识别方法. 其次, 将电阻率光滑约束与轨迹光滑策略引入蚁群反演算法, 提出了一种最小二乘方法与改进蚁群算法相结合的混合反演算法, 反演数值算例表明混合反演算法能够实现含水构造的三维成像, 较好地反演出不同距离的含水构造位置, 并使其边界较为清晰. 为了验证多同性源探测方法的探测效果开展了物理模型试验, 多同性源阵列电阻率法能较好的反映含水构造的存在, 与实际含水构造的位置较为相符.

**关键词** 隧道超前地质预报; 多同性源电极阵列; 三维电阻率反演; 改进蚁群算法; 混合反演; 物理模型试验

doi:10.6038/cjg20150429

中图分类号 P631

收稿日期 2013-12-17, 2015-03-25 收修定稿

## Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel

LI Shu-Cai, NIE Li-Chao, LIU Bin, TIAN Ming-Zhen, WANG Chuan-Wu,  
SONG Jie, LIU Zheng-Yu, WANG Shi-Rui

*Geotechnical and Structural Engineering Research Center of Shandong University, Jinan 250061, China*

**Abstract** Direct current resistivity method with sensitive response to water-bearing structure and strong adaptability is widely used in tunnel advanced detection. Because the fixed-point source three-electrode observation mode is easily affected by abnormal interference close to the survey line and the short detection distance of focused electrical observation mode without 3D tomography capability, a new technique based on multi-electrode sources array resistivity method

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划项目(2013CB036002, 2014CB046901); 国家重大仪器设备研制专项(51327802); 国家自然科学基金重点项目(51139004); 国家自然科学基金青年项目(41102183); 山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ013); 山东大学基本科研业务费资助项目(2015GN004)资助.

**作者简介** 李术才, 男, 1965年生, 博士, 现任教授、博士生导师, 主要从事地下工程灾害防治与岩石力学方面的教学与研究工作.  
E-mail: lishucai@sdu.edu.cn

is proposed in tunnel advanced detection.

In this method, several measuring electrodes are arranged on the tunnel face to form the measuring system (i. e. the electrode M) to acquire data for the water-bearing structure's 3D inversion tomography, while 4 current electrodes are annularly arranged around the tunnel face to form the current system (i. e. the electrode A) which is used to suppress the abnormal interference behind tunnel face and increase the sensitivity to the distant abnormal bodies ahead of tunnel face. Simultaneously, the resistivity smooth constraint and trajectory smooth strategy are introduced into the ant colony optimization inversion algorithm, and the mixed inversion method combining least squares algorithm with improved ant colony algorithm is proposed. It takes the advantages of both linear and nonlinear inversion to overcome the shortcomings of linear inversion which is easily trapped into local optimum and to improve the efficiency of nonlinear inversion.

The forward numerical simulation for water-bearing structure's advanced detection is carried out to investigate the response characteristics of abnormal bodies with different thickness, different electrical parameters and different distances. It is discovered that the minimum value of apparent vertical differential conductance curve and its intersection of horizontal axis have significant positive correlation with the abnormal body's position. In the range of 0~10 m, the minimum value  $L_1$  of apparent vertical differential conductance curve is about 0.3 to 0.45 times that of the abnormal body's position  $d$ . In the range of 14~30 m, the intersection  $L_2$  between apparent vertical differential conductance curve and horizontal axis is about 0.85 to 0.95 times that of the abnormal body's position. It means that the minimum value of apparent vertical differential conductance curve and its intersection with horizontal axis can be used to roughly determine the abnormal body's position, which can serve as initial model to provide prior information for inversion position. Then the proposed mixed inversion method is applied in numerical simulation and model experiment. The multi-electrode sources array resistivity method can reflect the presence of abnormal body and it is consistent with the actual model. The detection distance can reach 30 m and its vertical resolution can reach 2 m with existing model parameters. It shows the effectiveness of this method and the interpretation accuracy for water-bearing structure is improved.

Based on the multi-electrode sources array resistivity method, the advanced detection for water-bearing structures 30 m ahead of tunnel face can be achieved. In addition, the resistivity method plays an important role in water-bearing structures' advanced detection and the prevention of water inrush disaster. So, further research should be taken urgently in the fields such as the advanced detection mechanism of resistivity method, inversion interpretation, computational efficiency, and the increase of effective observation data. Besides, the 3D parallel inversion, large proportion model experiment and project verification should also be carried out.

**Keywords** Tunnel advanced prediction; Multi-electrode sources array resistivity; 3D electrical resistivity inversion; Improved ant colony algorithm; Mixed inversion; Physical model test

## 1 引言

随着水利水电工程和交通工程建设重点向地形地质条件极端复杂的西部山区和岩溶地区转移,所遇到的工程地质条件异常复杂,施工中面临着突水、

突泥等诸多高风险地质灾害,突涌水灾害给施工安全带来了重大灾难和生命财产损失,开展隧道超前预报工作研究显得尤为迫切和重要(王梦恕,2004;李术才等,2007;李术才等,2008;钱七虎,2012)。超前地质预报,就是利用地质钻探与地球物理探测方法实现不良地质体三大核心属性(空间位置、赋存形

态、充填特性)的定性辨识和定量预报。

直流电阻率法对含水构造响应敏感且适应性强,在隧道(巷道)超前探测中得到广泛应用,与地面直流电阻率法相比,由于隧道掌子面空间狭小,导致地面的很多探测方法无法应用于隧道含水构造超前预报,很多学者对直流电法超前探测进行了研究。程久龙等(2000)通过超前探测实际地电模型,采用定点源三极法探讨了巷道前方存在低阻地质异常体的电阻率响应特征,并在实际应用中取得了较好的效果。黄俊革等(2006,2007)对抗道超前探测异常体的位置、厚度、电性以及产状等参数进行了系统研究,得到了视电阻率的响应规律,并设计了基于最小二乘反演方法。李术才、刘斌等采用定点源三极法在对多个含水构造进行了系统研究,提出了反演成像方法并在实际工程中得到验证(李术才等,2011;刘斌等,2012)。以上学者大都采用定点源三极法,定点源三极法将测线布置在隧道边墙或底板上,供电电极布置在掌子面固定不动,而测量电极 MN 在掌子面后方沿测线移动采集数据,难以屏蔽测线附近的旁侧异常干扰(强建科等,2011),在较复杂环境下很难从背景干扰数据中提取出掌子面前方的有用信息,该问题一直未能很好的解决。很多学者开始探索新的隧道超前探测方法,近年来聚焦类探测方法得到人们的关注,聚焦探测方法将屏蔽电极系统、供电电极和测量电极均布置在掌子面上。德国 GD 公司研发的基于聚焦电法的 BEAM 系统,仅在探测面上只设置单个测量电极,利用不同里程的连续探测结果来定性推断掘进面前方的含水情况,无法对异常体定位(朱劲等,2007;Kaus and Boening, 2008)。阮百尧等提出了一种坑道直流电阻率超前聚焦探测方法,通过掌子面设立不同功能的环状电极组使一次场电流聚焦,并探讨了聚焦探测的影响因素及最佳观测方式,可有效探测坑道掘进前方不良地质体(阮百尧等,2009;2010;张力等,2011)。强建科研究了三维坑道直流聚焦法电极组合,通过对比不同电极系的空间电位分布,优选出了最佳电极组合(强建科等,2010)。聚焦探测类方法的研究还处于起步阶段,从已有研究成果来看,仅在掌子面轮廓上布置屏蔽电极系统探测距离较短,且不能对异常体进行成像。

综上所述,目前的直流电阻率超前探测方法主要有定点源三极法与聚焦电阻率法。主要存在问题如下:①定点源三极法电极 MN 在掌子面后方移动测量,易受到掌子面后方测线附近异常体的干扰,容

易导致预报精度降低甚至误报,且仅采集几条视电阻率曲线,对掌子面近处的异常体响应太过敏感,导致对远处的异常体探测效果差。②聚焦电阻率超前探测方法进行了有益探索,为解决以上问题提供了借鉴,但由于需随隧道开挖连续探测依靠趋势判断,探测距离过短是制约聚焦类探测方法的关键问题。定点源三极法与聚焦超前探测均是电阻率超前探测的观测方式,观测方式的不同带来探测效果的差异,因此,电阻率超前探测的观测方式是关键问题。针对以上问题,提出了一种多同性源阵列电阻率的隧道超前探测新方法,探讨了不同距离异常体的响应特征,提出一种依靠观测数据分析与反演定位的异常体解译方法,开展了多同性源阵列电阻率法的反演数值研究与物理模型试验,为隧道直流电阻率法超前探测提供可行的途径。

## 2 多同性源阵列电阻率超前探测观测模式

针对传统的隧道三极法探测模式易受到后方干扰与聚焦探测需连续探测依靠趋势判断导致探测距离近的难题,设计了一种新型的隧道超前探测模式。常规的定点源三极法将供电电极 A 布置在掌子面,测量电极 MN 沿着测线在掌子面后方移动测量,单动电源供电方法将测量电极 M 布置在掌子面,供电点 A 沿着测线在掌子面后方移动测量。多同性源阵列电阻率超前探测具体观测方式如下:在隧道掌子面上布置 3 条测线,每条测线布置若干测量电极组成阵列测量电极系(电极 M)。在测量电极系的外围掌子面周边布置 4 个供电电极组成供电电极系(电极 A),供电 B 电极与供电 N 电极位于隧道后方无穷远处,一般认为无穷远布置在 5 倍以上的电极间距,可以忽略“趋于无穷远”对观测数据的影响,隧道超前探测时自然电位一般为较小(毫伏级别),对供电测量电压影响较小。探测时,4 个供电电极系 A 供入相同电流,阵列测量电极 M 测量电势,待阵列测量电极系中的每个测量电极测量结束后,然后向掌子面后方移动供电电极系 A,继续测量阵列电极 M 的电势,直至供电电极系移动到预定位置探测结束,如图 1 所示。利用多同性源供电理论上具有减弱电极附近异常体干扰的优势,测量电极距离供电电极的等效距离增大压制了掌子面近处异常体的敏感性,多同性源电极向掌子面后方移动探测,提供探测距离,不需随着隧道开挖连续探测,阵列电极的接收

模式可以实现异常体的三维反演成像。

考虑到多个同性源电极供电,由于隧道空腔的存在,每个测点的装置系数  $K_s$  不能准确计算,采用归一化视电阻率方法计算装置系数  $K_s$ ,即仅有隧道空腔存在时,正演得到掌子面上 3 条测线不同测点的电势,然后将每个测点的视电阻率归一化到围岩的视电阻率,则当异常体存在时的归一化视电阻率  $\rho_a$ :

$$\rho_a = K_s \frac{U_s}{I},$$

其中,

$$K_s = \frac{I \rho_r}{U_r}, \quad (1)$$

式中  $U_s$  为异常体存在时测点的电势,  $I$  为供电电流,  $\rho_r$  为围岩的电阻率,  $U_r$  为仅有隧道空腔时测点的电势。

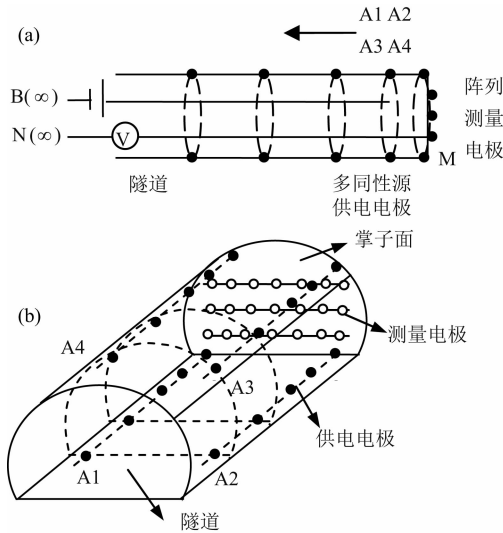


图 1 多同性源电极阵列电阻率超前探测示意图

(a) 观测方式剖面图; (b) 观测方式三维示意图。

实心为供电电极; 空心为测量电极。

Fig. 1 Schematic diagram of advanced prediction in multi-electrodes array resistivity method

### 3 多同性源阵列电阻率超前探测数值模拟

#### 3.1 多同性源阵列电阻率异常体响应特征分析

为了对多同性源供电阵列电阻率探测方法进行评价,研究与掌子面不同距离的异常体的响应规律,探索多同性源供电与单电源、定点源三极法的区别,设计了以下一组数值模拟算例,如图 2 所示。

隧道断面宽  $12 \text{ m} \times$  高  $8 \text{ m}$ , 从上到下布置 3 条

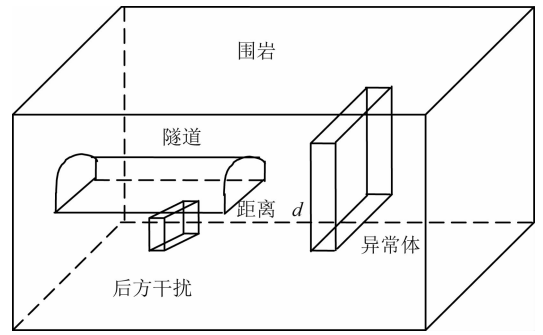


图 2 三维地电模型超前探测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 3D geo-electric model for advanced prediction

测线,依次为测线 1、2、3。每条测线布置 13 个测点(测点 1#~13#),如图 3,为了增加观测数据量,提高反演的解译精度,在隧道掌子面后方布置 15 个动电源剖面,每个剖面间距 2 m,采用 4 个供电点,异常体大小为  $12 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,距离掌子面距离为  $d$  ( $d$  依次为 4、6、10、14、20、28 m),异常体大小为  $12 \text{ m} \times 8 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ ,围岩电阻率为  $1000 \text{ } \Omega\text{m}$ 。按照异常体的大小与电阻率不同,分为以下三组模型,采用有限单元法进行正演计算,其中对模型一选取代表性的测点绘制曲线如图 4 所示。

表 1 三组正演模型参数表

Table 1 Parameters of three modeling models

模型	异常体尺寸(m)	围岩电阻率( $\Omega\text{m}$ )	异常体电阻率( $\Omega\text{m}$ )
模型一	$12 \times 8 \times 4$	1000	10
模型二	$12 \times 8 \times 2$	1000	10
模型三	$12 \times 8 \times 4$	1000	100

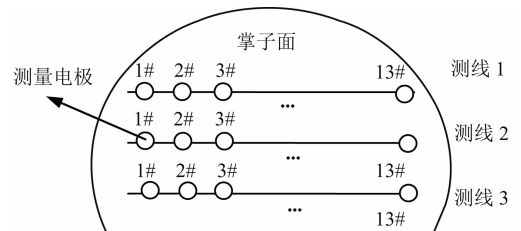


图 3 掌子面阵列电极布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of electrodes array in tunnel face

综合分析图 4(a—f),视电阻率值随着异常体距离掌子面的增大而增大,由距离  $d=4 \text{ m}$  时视电阻率最小值  $868.8 \text{ } \Omega\text{m}$ ,到距离  $d=28 \text{ m}$  时视电阻率最小值  $998.8 \text{ } \Omega\text{m}$ ,视电阻率值随异常体距离增加而增加是较为明显的特征,但由于现场围岩与异常体电阻率未知而不能据此判断异常体的位置.对于某

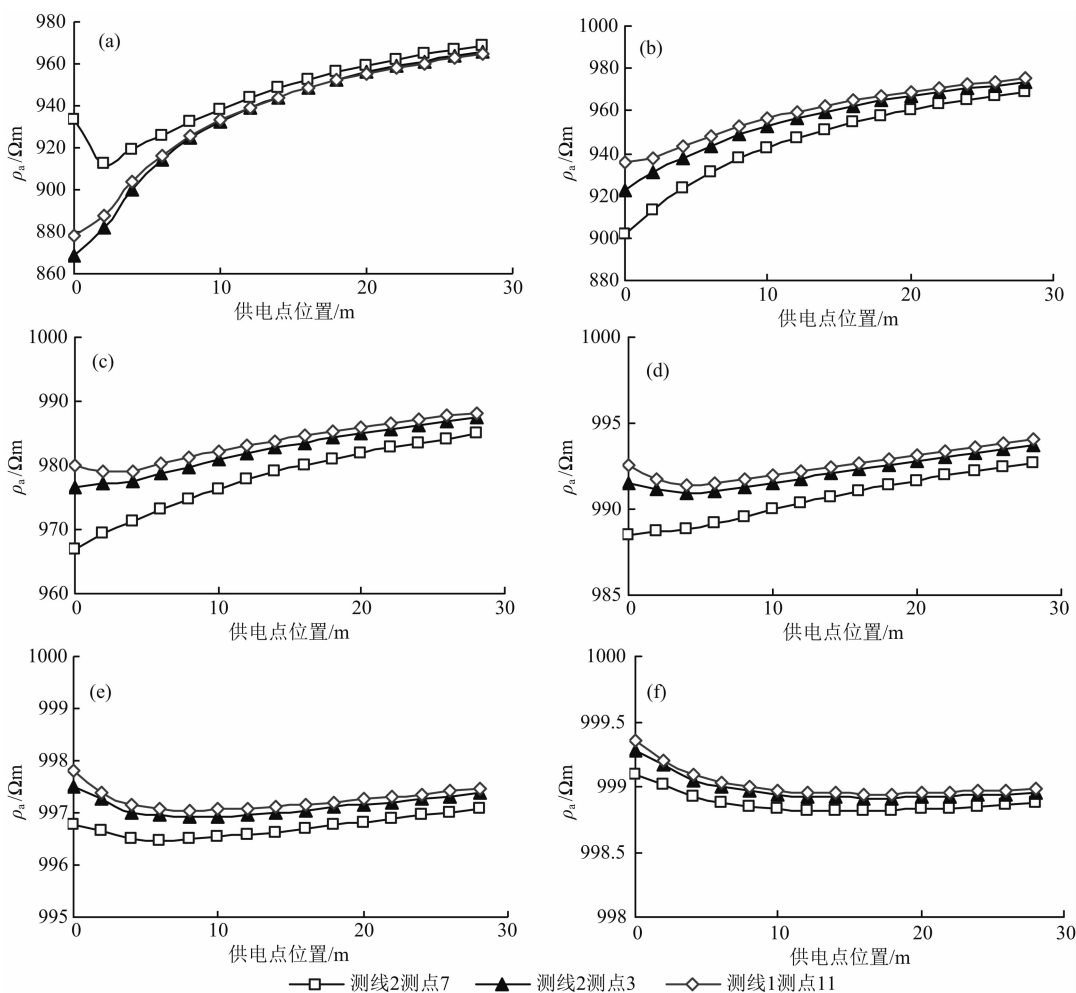


图4 多同性源供电不同位置异常体的正演结果

(a) 异常体  $d=4$  m 的正演结果; (b) 异常体  $d=6$  m 的正演结果; (c) 异常体  $d=10$  m 的正演结果;  
(d) 异常体  $d=14$  m 的正演结果; (e) 异常体  $d=20$  m 的正演结果; (f) 异常体  $d=28$  m 的正演结果。

Fig. 4 Modeling result of different locations anomalies base on multi-electrodes

一距离的异常体而言,视电阻率随供电电位置的曲线形态的变化趋势存在明显特征,即存在视电阻率变化趋势的转折点,且曲线末端趋近于围岩电阻率值,这一现象可为定性判断异常体位置提供依据,为此将视电阻率曲线横坐标采用对数处理,并采用三次样条插值,然后对视电阻率曲线进行视纵向电导微分处理,结果如图5所示。

综合分析图5(a—f),视纵向电导微分曲线随供电点距离的增大曲线尾部趋于0值,随低阻异常体距离的增大微分的绝对值减小,但不同的阶段具有明显的特征:

当低阻异常体距离掌子面较近时(4~10 m),如图5(a—c),纵向电导微分曲线整体位于横轴下方,且存在明显的极小值.由于低阻异常体(导电性强)距离掌子面较近,供电点在近处时导电性增强,

随着供电点向掌子面后方移动,与低阻异常体的距离变大,导电性下降速度变大,当供电点远离到某一个距离时,下降速度达到最大而后开始减小,直至尾部导电性变化不大,因而视纵向电导微分曲线在某一个距离出现极小值,异常体距离的不同视纵向电导微分曲线极小值位置亦不同。

当低阻异常体距离掌子面较远时(14~28 m),如图5(d—f),纵向电导微分曲线整体从横轴上部穿越到横轴下部,微分值大于0表征着视纵向电导随横轴导电性增加,视纵向电导微分值小于0表征地层导电性降低.由于低阻异常体距离掌子面较远,供电点在近处时受低阻异常体影响较小,随着供电点远离掌子面导电性逐渐增加,当供电点远离到某一个距离时,导电性增加到最大而后开始减小;视纵向电导微分曲线与横轴的交点表征着导电性增加到

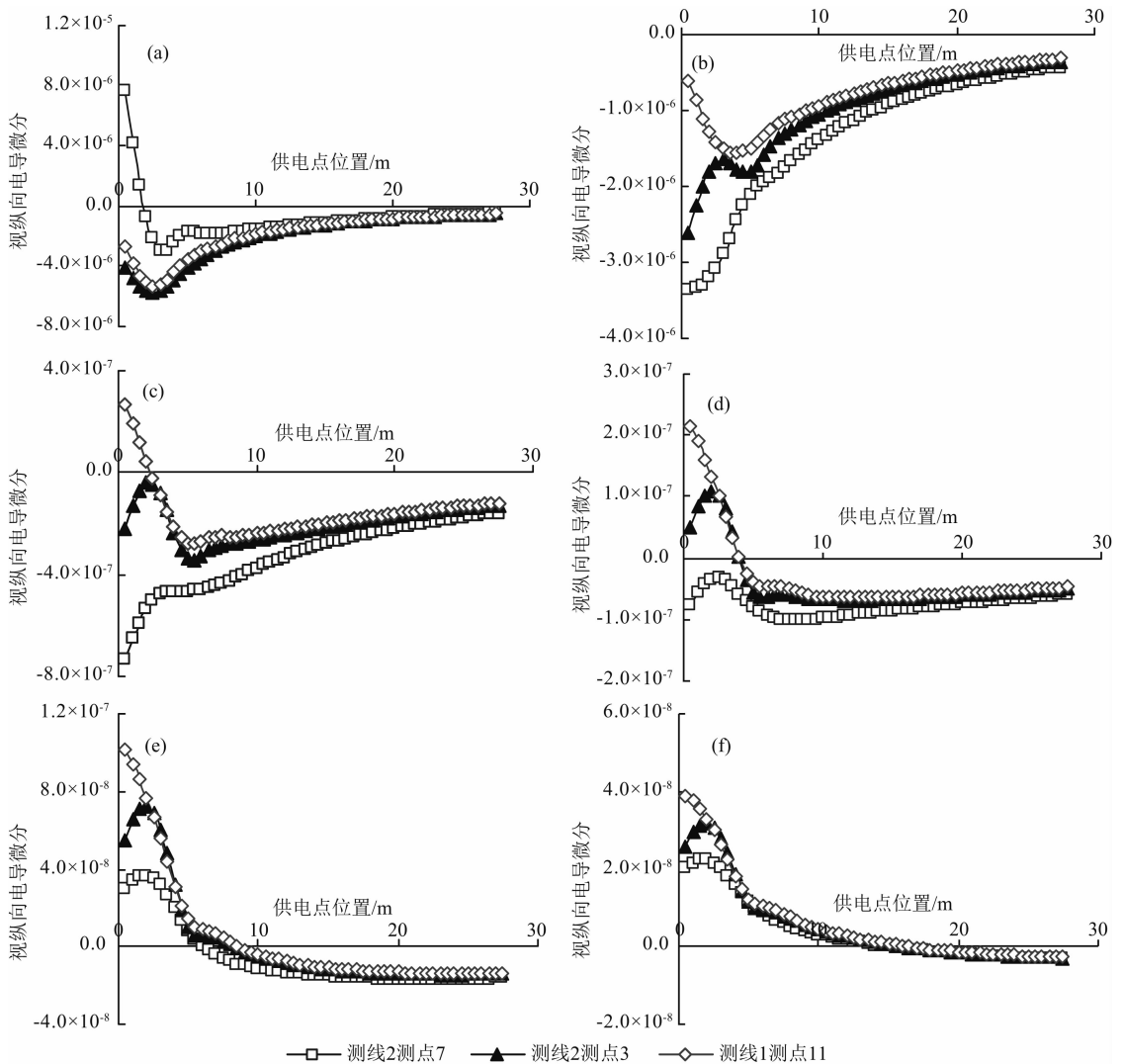


图5 视电阻率纵向微分结果

(a) 异常体  $d=4$  m; (b) 异常体  $d=6$  m; (c) 异常体  $d=10$  m; (d) 异常体  $d=14$  m; (e) 异常体  $d=20$  m; (f) 异常体  $d=28$  m.

Fig. 5 Longitudinal differential of apparent resistivity

最大,且异常体距离的不同视纵向电导微分曲线与横轴交点不同。

### 3.2 多同性源阵列电阻率探测异常体定性解译

为了建立对异常体定性判断方法,在模型一的基础上对模型二与模型三进行分析,视纵向电导微分曲线微分值变化较小且曲线形态一致,因此,视纵向电导微分曲线的极小值以及横轴的交点与异常体的位置存在明显的正相关关系,将三组模型中视纵向电导微分曲线对于不同距离异常体响应的极小值位置以及横轴的交点进行对比,选取测线1测点11,如表2所示,综合考虑异常体的厚度与电性参数,在  $0\sim 10$  m 范围内,视纵向电导微分曲线极小值位置  $L_1$  约为  $0.3\sim 0.45$  倍异常体的位置  $d$ ,即  $L_1=(0.3\sim 0.45)d+1.5$ ;在  $14\sim 30$  m 范围内视纵

表2 不同距离异常体特征参数对比

Table 2 Characteristic parameters comparison of different distance anomaly

异常体 距离 (m)	4	6	10	14	20	28
模型一	极小值	2.5~3	3.5~4	5~5.5	—	—
	交点	—	—	2~2.5	4~4.5	8.5~9
模型二	极小值	3~3.5	4~4.5	5~5.5	—	—
	交点	—	—	2.5~3	4~4.5	9~9.5
模型三	极小值	2.5~3	3.5~4	5~5.5	—	—
	交点	—	—	2~2.5	4~4.5	8~8.5

向电导微分曲线与横轴的交点  $L_2$  约为  $0.85\sim 0.95$  倍异常体的位置  $d$ ,即  $L_2=(0.8\sim 0.95)d-8.5$ 。由

于异常体的规模、电阻率大小等因素变化,正演曲线参数很难与异常体位置建立精确的对应关系,利用视纵向电导微分曲线极小值以及交点对异常体的位置进行大体判断,可作为初始模型为反演定位提供指导,且正演曲线的末端接近于围岩电阻率,可为反演提供背景场初值,异常体的定位需结合正演定性的基础上开展定量的反演定位。

### 3.3 多同性源阵列电阻率超前探测干扰响应特征

为了探索多同性源旁侧异常干扰响应规律及其识别方法,设计了后方异常体干扰算例. 后方异常体干扰的模型为:异常体大小为  $12\text{ m} \times 8\text{ m} \times 4\text{ m}$ ,位于掌子面前方  $14\text{ m}$  处,干扰异常体的大小为  $2\text{ m} \times 4\text{ m} \times 2\text{ m}$ ,在掌子面后方  $14\text{ m}$ ,干扰异常体位于隧道左下角供电点源测线下方,其上表面位于隧道底板处,电阻率均为  $10\ \Omega\text{m}$ . 计算结果如图 6 所示。

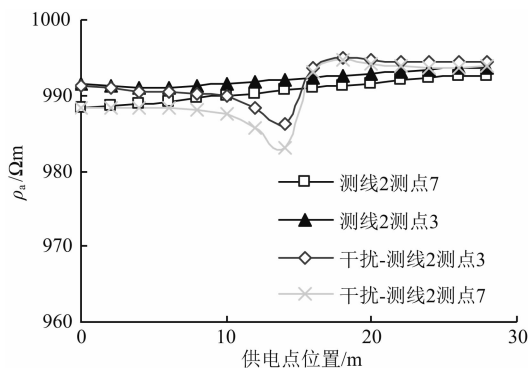


图 6 旁侧异常体干扰响应结果

Fig. 6 Disturbance response of anomalies

在掌子面后方存在异常体干扰时,以异常体位于掌子面前方  $14\text{ m}$  处为例,选取掌子面后方干扰异常体响应最大的测点(测点 1—13),对定点源三极法干扰异常一般可接近正常值一倍,而多同性源供电方法的影响幅度仅为  $1.9\%$ . 结合其他算例,多同性源方法的干扰影响幅度一般约为定点源三极法的  $3\%$ . 可见,多同性源供电方法大幅压制了掌子面后方干扰异常体的影响,较大程度改善了传统探测方法易受到掌子面后方干扰的难题. 当异常体位于隧道底板下方时,当供电点远离旁侧干扰时,各测点视电阻率受影响较小,与无旁侧干扰时曲线相差较小;当供电点接触旁侧干扰时,视电阻率曲线出现明显变化,受低阻旁侧干扰响应出现突变的极小值,因此,视电阻率曲线出现突变的极小值是存在旁侧干扰比较显著的特征. 鉴于旁侧干扰响应特征,剔除视电阻率曲线突变点,可采用圆滑滤波技术处理。

## 4 多电极阵列电阻率超前探测混合反演解译方法

对于三维电阻率反演,基于光滑约束的最小二乘线性反演方法是进行三维电阻率反演的主要方法,其反演的目标函数如下:

$$\Phi = \varphi_d + \lambda \varphi_m \\ = (\Delta d - A \Delta m)^T (\Delta d - A \Delta m) + \lambda (C \Delta m)^T (C \Delta m), \quad (2)$$

式中,  $\Delta d$  为实际观测数据与正演观测数据的差向量,  $\Delta m$  为模型参数的增量向量,  $A$  为偏导数矩阵,  $C$  为光滑度矩阵,  $\lambda$  为拉格朗日常数,表示  $\varphi_d$  与  $\varphi_m$  的权重.  $\varphi_d$  表示实际观测数据与理论正演观测数据的方差,  $\varphi_m$  表示相邻网格电阻率的差异。

对于线性反演方法,由于场的等效性、观测空间和数据不足等原因,是一个欠定问题,多解性问题较为突出,反演结果严重依赖模型约束条件和先验信息,容易导致陷入局部极小,使得反演结果与实际情况相差较大,影响探测效果. 地球物理问题本身是非线性问题,随着勘探地球物理学的发展和并行计算机的出现,非线性反演方法发展迅速,已成为反演学者研究重点. 非线性反演方法基本都是全局反演方法,全局搜索能力强,对初始模型的依赖程度很低,但往往收敛很慢,计算时间消耗大. 为此,提出一种基于光滑约束最小二乘线性反演与改进蚁群算法反演相结合的混合反演解译方法。

### 4.1 基于电阻率光滑与轨迹光滑策略的改进蚁群算法

针对蚁群算法搜索效率低的问题(段海滨, 2005; 李丽香等, 2007; Yang, et al., 2008), 将电阻率光滑约束引入选择概率中,使得相邻网格电阻率变化较为光滑;同时引入轨迹光滑策略,使得蚂蚁选择的当前路径与前一次全局最优路径的差异最小,使得蚂蚁意识中保留了全局最优的选择方向,从而提高蚁群算法的稳定性和搜索效率。

(1) 蚁群算法电阻率反演的目标函数(段海滨, 2005; 张凌云等, 2011)

基于蚁群算法的三维电阻率反演的目标函数为

$$\Phi_{mn} = \sum_{i=1}^{num} \left( \frac{\rho_{di} - \rho_{si}}{\rho_{di}} \right)^2, \quad (3)$$

式中,  $num$  为观测数据的个数,  $\rho_{di}$  为第  $i$  个实测数据,  $\rho_{si}$  为第  $i$  个正演数据。

## (2) 选择概率

$P_{ij}^k$  为蚂蚁  $k$  的选择概率,在蚁群基本算法表示蚂蚁  $k$  到了  $i$  节点处向下一个节点  $j$  选择的概率大小,在本文中用来表示蚂蚁  $k$  选择第  $i$  个单元上第  $j$  个节点的概率,计算公式如式(4)(段海滨, 2005; Huang et al., 2003)

$$P_{ij}^k = \frac{[\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{i=1}^{num} [\tau_{ij}]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, \quad (4)$$

$$\eta_{ij} = \frac{1}{|\rho_{i-1j-1} - \rho_{ij}| + \rho_0}, \quad (5)$$

式中,  $\tau_{ij}$  为第  $i$  个单元上节点  $j$  的信息素强度,  $\eta_{ij}$  在基本蚁群算法中表示路径  $(i, j)$  的可见度,  $\alpha$  为信息素强度的重要性,  $\beta$  为可见度的重要性. 在电阻率反演中对其进行改进,  $\rho_{ij}$  表示  $i$  单元上选择的节点  $j$  电阻率值,  $\rho_0$  为网格跨度的一半. 在用来表示从  $i-1$  单元上的节点  $j-1$  向  $i$  个单元上节点  $j$  选择的光滑度,即节点  $j$  的值与节点  $i$  的值相差越小  $\eta_{ij}$  越大,反之亦然,将模型参数光滑变化施加到选择概率中,从而提高蚂蚁选择光滑模型参数的可能性.

## (3) 信息素更新策略

$\tau_{ij}^{\text{new}}$  表示信息素的更新后的强度,  $\tau_{ij}^{\text{old}}$  表示当前信息素强度,更新策略如式(6)所示(Huang et al., 2003)

$$\tau_{ij}^{\text{new}} = \lambda \tau_{ij}^{\text{old}} + \Delta \tau_{ij}^k, \quad (6)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q/\Phi' & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过 } ij \\ 0 & \text{蚂蚁 } k \text{ 不经过 } ij \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\lambda$  为信息素挥发因子 ( $0 < \lambda < 1$ ),  $\Delta \tau_{ij}^k$  为信息素更新的强度,  $Q$  为一常数,  $\Phi'$  为某只蚂蚁的目标函数值.

$$c_n = \sum_{i=1}^{num} (\rho_{ni}^m - \rho_{ki}^{m-1})^2 \quad \text{if } (\Phi_{mm} \leq \Phi_{\min}) \quad (8)$$

$$\Phi' = \begin{cases} \Phi_{\min} & \text{if } (\Phi_{mm} > \Phi_{\min}) \\ \Phi_{mm} & \text{if } (\Phi_{mm} \leq \Phi_{\min} \text{ and } c_n = c_{\min}) \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $c_n$  为第  $n$  只蚂蚁的轨迹光滑度,  $\rho_{ki}^{m-1}$  为第  $m-1$  次迭代最优的路径上第  $i$  个单元的电阻率值,  $\Phi_{mm}$  为第  $m$  次迭代后  $n$  只蚂蚁的目标函数值. 采用全局最优策略更新信息素强度,同时引入轨迹光滑策略,即每次迭代后,在  $N$  只蚂蚁小于此时全局最小的  $\Phi_{\min}$  的几只蚂蚁中,计算轨迹光滑度  $c$  并选取当前轨迹光滑度最小的  $c_{\min}$ ,更新此只蚂蚁走过路径的信息素强度. 轨迹光滑度的引入使得在全局最优的基础上将确定性选择与随机选择相结合,提高了本次最优模型与全局最优模型的稳定,继承了上次全局最优的选择方向.

## 4.2 混合反演算法

为了结合线性反演与非线性反演的优势,改善线性反演易陷入局部最优的缺点,以及提高非线性反演的效率,提出了一种将光滑约束的最小二乘方法与改进蚁群算法相结合的混合反演算法,如图 7 所示,其流程如下:

(1) 首先进行线性反演阶段,定义反演参数和初始模型,通过数值正演得到理论观测数据,若不收敛则进行反演迭代,直至满足收敛值,转入非线性求解阶段.

(2) 依据线性反演的结果,设置非线性算法初始信息素强度等参数,计算蚂蚁选择某个单元上某个节点的选择概率,利用蚂蚁的可见度,将模型光滑度加入到选择概率中,依据选择概率  $N$  只蚂蚁完成对  $N$  组模型参数的选择;利用有限元正演计算目标函数值,并判断是否为全局最优(即小于目前全局最小的值),如不是全局最优则  $N$  只蚂蚁重新选择  $N$  组模型参数,然后计算所有小于上次全局最优模型的轨迹光滑度,选取轨迹光滑度最小的模型参数,重复计算选择概率并重复以上步骤;判读非线性迭代次数是否达到设定上限,达到迭代次数上限,则重新进

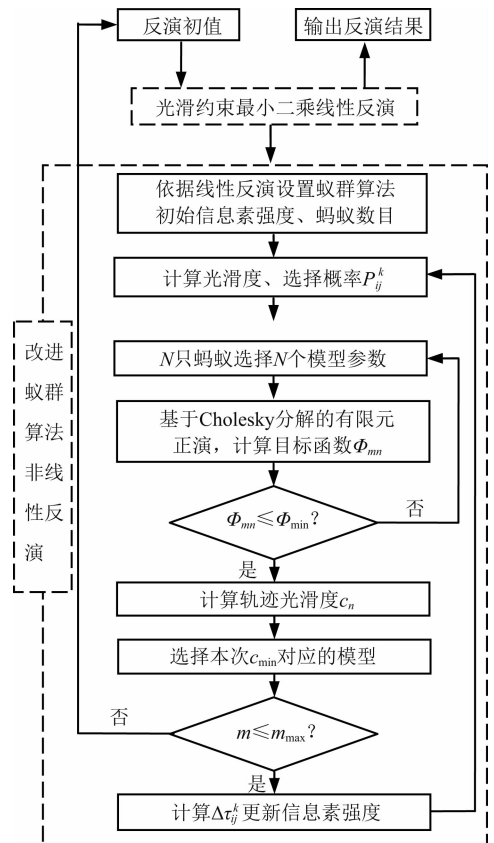


图 7 混合反演方法流程

Fig. 7 Process of joint inversion method



入线性反演阶段.

(3)依据非线性反演结果,重新设置线性反演的初值,并重复步骤(1),直至满足收敛条件,输出反演结果,混合反演算法结束.

#### 4.3 基于混合反演的数值试验

为了评价提出的多同性源供电阵列电阻率超前探测新方法,并检验提出的线性与非线性结合的混合算法,开展了基于混合反演算法的数值算例.对于隧道超前探测而言,尤其是隧道含水构造探测,对隧道能造成危害的含水构造目标一般较大,且多发生于沉积岩地层的石灰岩、白云岩的岩溶地区,沉积岩具有分层沉积的现象,具明显层理,因此,对于隧道轮廓面内的围岩假定为薄层,如图8所示.

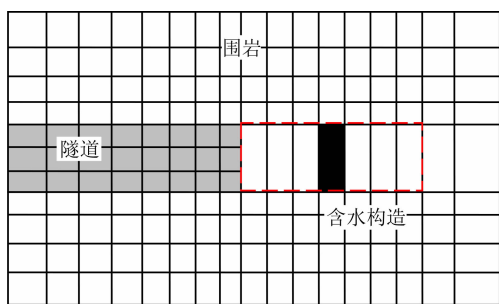


图8 隧道含水构造超前探测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of water-inrush source in tunnel

隧道断面宽  $12\text{ m} \times$  高  $8\text{ m}$ ,采用数值正演算例中的探测方法.异常体大小为  $12\text{ m} \times 8\text{ m} \times 4\text{ m}$ ,围岩电阻率为  $1000\ \Omega\text{m}$ ,异常体电阻率为  $10\ \Omega\text{m}$ ,分别计算异常体距离掌子面距离为  $20\text{ m}$ 、 $28\text{ m}$  两个数值算例,同时考虑异常体较小的情况(小于隧道断面尺寸),设计以下四组数值模型.

表3 四组反演模型参数表

Table 3 Parameters of four inversion models

模型	异常体尺寸 (m)	距离掌子面 (m)	围岩电阻率 ( $\Omega\text{m}$ )	异常体电阻率 ( $\Omega\text{m}$ )
模型一	$12 \times 8 \times 4$	20	1000	10
模型二	$12 \times 8 \times 4$	28	1000	10
模型三	$8 \times 8 \times 4$	20	1000	10
模型四	$12 \times 8 \times 2$	20	1000	10

采用有限单元法得到理论观测数据,依次作为实测数据采用基于光滑约束最小二乘线性反演与改进蚁群算法非线性反演的混合反演算法进行计算,对观测数据视电阻率曲线进行分析,依据曲线尾部视电阻率值,将光滑约束最小二乘反演背景值设置为  $1100\ \Omega\text{m}$ ,依据视纵向电导微分极小值与交点位置设置先验模型,为了避免反演结果严重依赖于初始模型,异常体电阻率与背景值差异不宜太大,将获

取异常体位置的电阻率设置为  $1090\ \Omega\text{m}$ ,光滑度因子为  $1.0$ ,蚁群反演算法采用线性反演结果作为初始模型,蚂蚁数目选择  $15$  只,第二次线性反演选用非线性反演的结果作为初值,光滑度因子为  $0.01$  反演结果如图9—11所示.

分析图9—10可知,仅采用基于光滑约束的最小二乘线性反演方法时,对于距离掌子面距离  $20\text{ m}$  的异常体,异常体区域的中心位置在  $20\text{ m}$ ,与实际异常体的位置一致,但异常体的区域较大,不能反映异常体的位置,且异常体电阻率值最小为  $704.3\ \Omega\text{m}$ ,与真实异常体电阻率值  $10\ \Omega\text{m}$  相差较大.对于距离掌子面距离  $28\text{ m}$  的异常体,异常体的低阻区域较大,中心位置位于  $22\text{ m}$ ,与实际位置  $28\text{ m}$  相差较大,且异常体电阻率值最小为  $825.6\ \Omega\text{m}$ ,与异常体真实电阻率值相差较大.采用与蚁群算法相结合的混合反演算法时,对于距离掌子面  $20\text{ m}$  的异常体,反演出的异常体区域位置在  $21\text{ m}$ ,最小电阻率为  $89.8\ \Omega\text{m}$ ,对于掌子面  $28\text{ m}$  的异常体,反演出的异常体区域位置在  $27\text{ m}$ ,最小电阻率为  $312.7\ \Omega\text{m}$ ,与真实异常体较为一致.对于异常体较小的情况( $8\text{ m} \times 8\text{ m} \times 4\text{ m}$ ),光滑约束最小二乘线性反演位置为  $19\text{ m}$ ,但异常体区域较大,且异常体电阻率值最小为  $891.2\ \Omega\text{m}$ ,异常不明显.采用与蚁群算法相结合的混合反演算法,异常体的位置为  $21\text{ m}$  边界清晰,异常体最小电阻率值为  $503.6\ \Omega\text{m}$ ,如图11所示,异常体厚度为  $2\text{ m}$  的反演算例(图12),亦较好的反应了低阻异常体的存在.从以上算例可以得出,多同性源阵列电阻率法探测距离可以达到  $30\text{ m}$ ,超前探测分辨率包括横向分辨率与纵向分辨率,对于隧道超前探测而言,隧道断面相对于地面探测区域较小,更关注对纵向地层的分辨能力,在纵向上可实现对  $2\text{ m}$  厚度异常体的识别.

## 5 多同性源阵列电阻率超前探测模型试验研究

### 5.1 物理模型试验设计

为了验证多同性源阵列电阻率超前探测方法的有效性,开展了物理模型试验.电阻率物理模型试验满足相似性原理,即几何相似与电阻率相似.几何相似指模型与实际几何的相似,包括尺寸、形状、电极极距等;电阻率相似指模型与实际地质参数的相似性,包括电阻率等电学参数的相似.

设计试验的几何相似比  $G=100$ ,水槽尺寸为

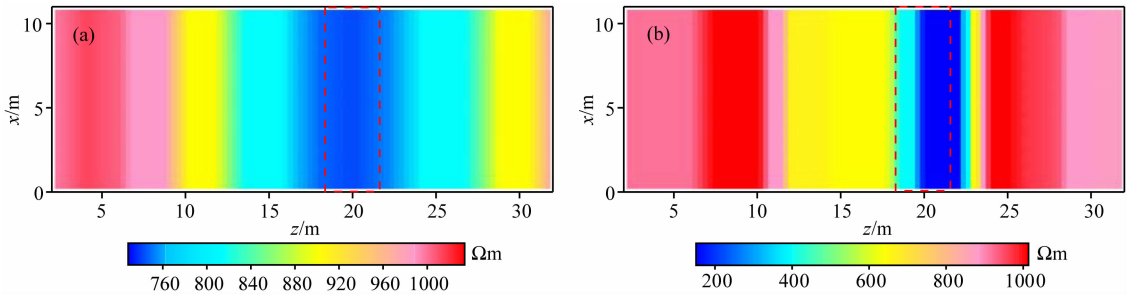


图 9 混合反演 28 m 距离异常体反演结果

(a) 光滑约束最小二乘反演结果(距离 20 m); (b) 混合反演结果(距离 20 m).

Fig. 9 Inversion result of 28m distance abnormal body base on mixed inversion

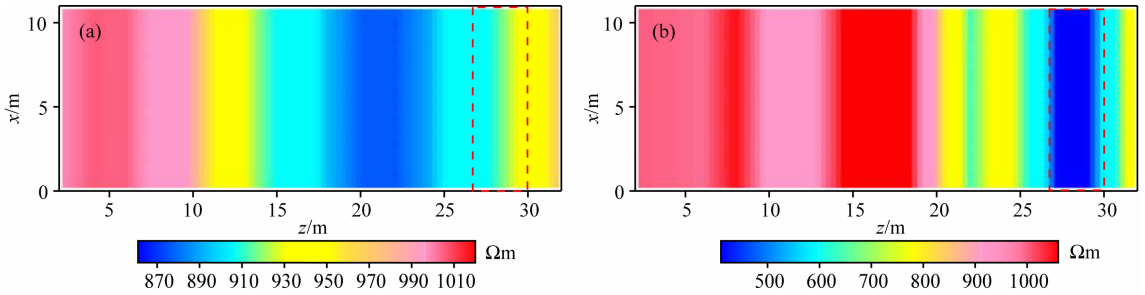


图 10 混合反演 28m 距离异常体反演结果

(a) 光滑约束最小二乘反演结果(距离 28 m); (b) 混合反演结果(距离 28 m).

Fig. 10 Inversion result of 28 m distance abnormal body base on mixed inversion

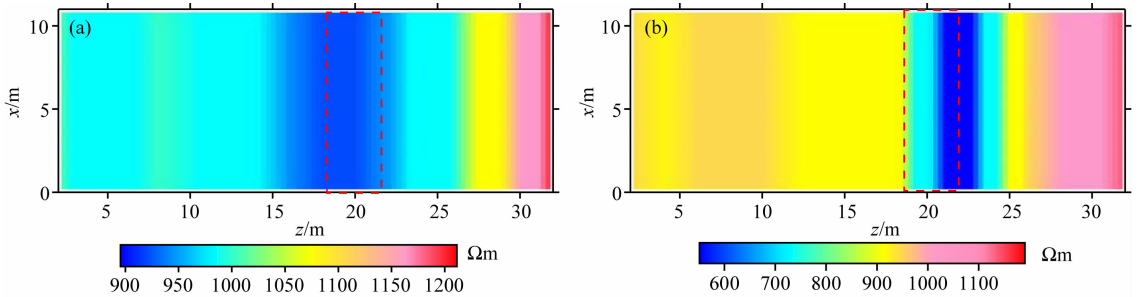


图 11 混合反演 20 m 距离异常体反演结果(8 m×8 m×4 m)

(a) 光滑约束最小二乘反演结果(8 m×8 m×4 m 距离 20m); (b) 混合反演结果(8 m×8 m×4 m 距离 20 m).

Fig. 11 Inversion result of 20m distance abnormal body base on mixed inversion(8 m×8 m×4 m)

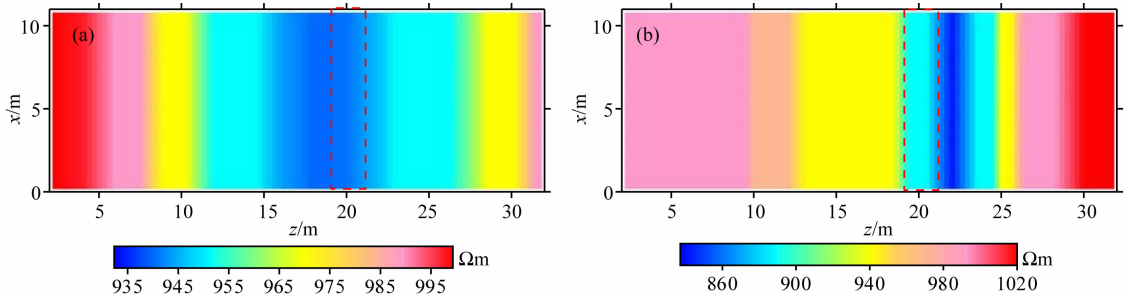


图 12 混合反演 20m 距离异常体反演结果(12 m×8 m×2 m)

(a)光滑约束最小二乘反演结果(8 m×8 m×4 m 距离 20 m); (b) 混合反演结果(12 m×8 m×2 m 距离 20 m).

Fig. 12 Inversion result of 20m distance abnormal body base on mixed inversion(12 m×8 m×2 m)

1.2 m×1.2 m×1.8 m,隧道采用PVC管制作直径为0.12 m,异常体尺寸为0.10 m×0.10 m×0.04 m,距离掌子面距离为0.16 m,如图13、14所示;采用水模拟围岩,电阻率 $\rho_1 = 20 \Omega\text{m}$ ,采用黄铜为低阻异常体,考虑表层氧化等因素电阻率 $\rho_2 = 0.05 \Omega\text{m}$ , $\rho_1/\rho_2 = 400$ ,与围岩电阻率1000  $\Omega\text{m}$ 、低阻异常体2.5  $\Omega\text{m}$ 相似.隧道掌子面上设计三条测线,每条测线上设计10个测点,选用4个环形布置的电极作为同性源供电电极,供电断面为5个,距离依次为0、0.02、0.06、0.14、0.30 m.

## 5.2 试验数据分析

对观测数据进行分析,并设置反演初始参数,采用混合反演算法进行反演,反演结果如图15所示.对于水槽物理模型试验探测数据,光滑约束最小二乘反演结果存在低电阻率区域,能够反映低阻异常

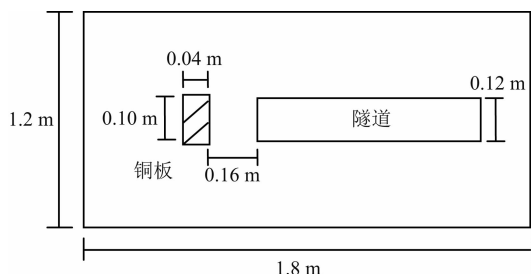


图13 物理模型试验装置图

Fig. 13 Device of model test



图14 物理模型试验整体照片

Fig. 14 Photo of whole model test

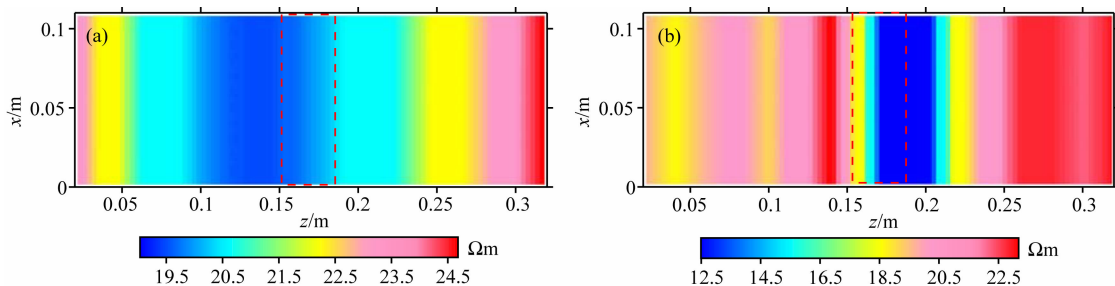


图15 模型试验反演结果

(a)光滑约束最小二乘反演结果;(b)混合反演结果.

Fig. 15 Inversion result of model test

体的存在,但位置和规模存在较大的偏差,电阻率最低为19.0  $\Omega\text{m}$ ,与围岩的电阻率差异较小不利于识别.混合反演算法的反演结果存在明显的低阻异常区域,电阻率最低为12.5  $\Omega\text{m}$ .低阻异常体的位置在0.17 m,与实际位置0.16 m较为接近,相差约0.01 m.反演结果与实际出现偏差主要原因在于:水槽电化学现象对测量数据的干扰的影响,建议开展大型物理模型试验研究.

结合其他大量的数值算例与物理模型试验,基于光滑约束最小二乘的线性反演与蚁群算法的非线性反演方法能较好地反映异常体的位置与电阻率值,改善了传统光滑约束最小二乘法易陷入局部最优的缺点,提高了对含水构造的解译精度.

## 6 结论

(1) 针对隧道定点源三极法超前探测易受后方异常干扰以及聚焦探测方法探测距离短无法三维成像的问题,提出了一种多同性源阵列电阻率超前探测新方法,利用多同性源供电减弱后方异常体干扰并压制掌子面近处异常体的敏感性,从而使得掌子面远处的异常体敏感性相对提高,阵列测量电极可以实现对含水构造的三维反演成像,提高了对含水构造的探测能力.

(2) 探讨了不同厚度、电性参数、距离异常体的响应特征,发现视纵向电导微分曲线的极小值以及横轴的交点与异常体的位置存在明显的正相关关系,在0~10 m范围内,视纵向电导微分曲线极小值位置 $L_1$ 约为0.3~0.45倍异常体的位置 $d$ ,在14~30 m范围内视纵向电导微分曲线与横轴的交点 $L_2$ 约为0.85~0.95倍异常体的位置 $d$ ,利用视纵向电导微分曲线极小值以及交点对异常体的位置进行大体判断,可作为初始模型为反演定位先验

信息.

(3) 改进了蚁群算法,将电阻率光滑约束与轨迹光滑策略引入蚁群反演算法,提出了一种将光滑约束的最小二乘方法与改进蚁群算法相结合的混合反演算法,反演数值试验与模型试验表明,多同性源阵列电阻率法能较好地反映异常体的存在,与实际模型较为一致,探测距离可达 30 m,对于现有模型参数在纵向上可实现 2 m 厚度异常体的识别,显示了该方法的有效性,提高了对含水构造的解译精度.

(4) 电阻率方法对隧道含水构造的探测、预防突涌水灾害的发生具有重要作用,在电阻率超前探测机理、反演解译与计算效率以及增加有效观测数据等方面亟待进一步的研究,需要开展三维并行反演、大比例物理模型试验与工程验证等方面的工作.

## References

- Cheng J L, Wang Y H, Yu S J, et al. 2000. The principle and application of advance surveying in roadway excavation by resistivity method. *Coal Geology & Exploration* (in Chinese), 28(4): 60-62.
- Duan H B. 2005. *Ant Colony Algorithms: Theory and Application* (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Huang J G, Ruan B Y, Wang J L. 2007. The fast inversion for advanced detection using DC resistivity in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(2): 619-624.
- Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. 2006. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 49(5): 1529-1538.
- Huang L, Zhou C G, Wang K P. 2003. Hybrid ant colony algorithm for traveling salesman problem. *Progress in Nature Science*, 13(4): 295-299.
- Kaus A, Boening W. 2008. BEAM—geolectrical ahead monitoring for TBM-Drives. *Geomechanics and Tunneling*, 1(5): 442-450.
- Li L X, Peng H P, Yang Y X, et al. 2007. Parameter estimation for Lorenz chaotic systems based on chaotic ant swarm algorithm. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 56(1): 51-55.
- Li S C, Li S C, Zhang Q S, et al. 2007. Forecast of karst-fractured groundwater and defective geological conditions. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 26(2): 217-225.
- Li S C, Liu B, Li S C, et al. 2011. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 30(7): 1297-1309.
- Li S C, Xue Y G, Zhang Q S, et al. 2008. Key technology study on comprehensive prediction and early-warning of geological hazards during tunnel construction in high-risk karst areas. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 27(7): 1297-1307.
- Liu B, Li S C, Li S C, et al. 2012. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(1): 260-268, doi: 10. 6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 01. 025.
- Qian Q H. 2012. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* (in Chinese), 31(10): 1945-1956.
- Qiang J K, Ruan B Y, Zhou J J. 2010. Research on the array of electrodes of advanced focused detection with 3D DC resistivity in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(3): 695-699, doi: 10. 3969/j. issn. 00015733. 2010. 03. 024.
- Qiang J K, Ruan B Y, Zhou J J, et al. 2011. The feasibility of advanced detection using three-electrode method in coal-mine tunnel. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 26(1): 320-326, doi: 10. 3969/j. issn. 10042903. 2011. 01. 038.
- Ruan B Y, Deng X K, Liu H F, et al. 2010. Influential factors and optimum survey method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 25(4): 1380-1386, doi: 10. 3969/j. issn. 10042903. 2010. 04. 029.
- Ruan B Y, Deng X K, Liu H F, et al. 2009. Research on a new method of advanced focus detection with DC resistivity in tunnel. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(1): 289-296.
- Wang M S. 2004. Hydrologic and geological forecast of tunnel construction in the karst district. *Railroad Survey* (in Chinese), (1): 7-9.
- Yang J H, Shi X H, Maurizio M, et al. 2008. An ant colony optimization method for generalized TSP problem. *Progress in Nature Science*, 18(11): 1417-1422.
- Zhang L, Ruan B Y, Lü Y Z, et al. 2011. Study of full-space numerical modeling of advanced exploration in tunnel with DC Focus resistivity method. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(4): 1130-1139, doi: 10. 3969/j. issn. 00015733. 2011. 04. 029.
- Zhang L Y, Liu H F. 2011. The application of ABP method in high-density resistivity method inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 54(1): 227-233, doi: 10. 3969/j. issn. 0001. 5733. 2011. 01. 024.
- Zhu J, Li T B, Li Y L, et al. 2007. Application of an electrical method “BEAM” for advanced geological exploration to tunnel in TONGLUO mountains for Dian-Lin highway. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 15(2): 258-362.

## 附中中文参考文献

- 程久龙, 王玉和, 于师建等. 2000. 巷道掘进中电阻率法超前探测原理与应用. *煤田地质与勘探*, 28(4): 60-62.
- 段海滨. 2005. *蚁群算法原理及其应用*. 北京: 科学出版社.
- 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 2007. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演. *地球物理学报*, 50(2): 619-624.
- 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 2006. 坑道直流电阻率法超前探测研究.

- 地球物理学报, 49(5): 1529-1538.
- 李丽香, 彭海朋, 杨义先等. 2007. 基于混沌蚂蚁群算法的 Lorenz 混沌系统的参数估计. 物理学报, 56(1): 51-55.
- 李术才, 李树忱, 张庆松等. 2007. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究. 岩石力学与工程学报, 26(2): 217-225.
- 李术才, 刘斌, 李树忱等. 2011. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究. 岩石力学与工程学报, 30(7): 1297-1309.
- 李术才, 薛翊国, 张庆松等. 2008. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究. 岩石力学与工程学报, 27(7): 1297-1307.
- 刘斌, 李术才, 李树忱等. 2012. 基于不等式约束的最小二乘法三维电阻率反演及其算法优化. 地球物理学报, 55(1): 260-268, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.01.025.
- 钱七虎. 2012. 地下工程建设安全面临的挑战与对策. 岩石力学与工程学报, 31(10): 1945-1956.
- 强建科, 阮百尧, 周俊杰. 2010. 三维坑道直流聚焦法超前探测的电极组合研究. 地球物理学报, 53(3): 695-699, doi: 10.3969/j.issn.00015733.2010.03.024.
- 强建科, 阮百尧, 周俊杰等. 2011. 煤矿巷道直流三极法超前探测的可行性. 地球物理学进展, 26(1): 320-326, doi: 10.3969/j.issn.10042903.2011.01.038.
- 阮百尧, 邓小康, 刘海飞等. 2009. 坑道直流电阻率超前聚焦探测新方法研究. 地球物理学报, 52(1): 289-296.
- 阮百尧, 邓小康, 刘海飞等. 2010. 坑道直流电阻率超前聚焦探测的影响因素及最佳观测方式. 地球物理学进展, 25(4): 1380-1386, doi: 10.3969/j.issn.10042903.2010.04.029.
- 王梦恕. 2004. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见. 铁道勘察, (1): 7-9.
- 张力, 阮百尧, 吕玉增等. 2011. 坑道全空间直流聚焦超前探测模拟研究. 地球物理学报, 54(4): 1130-1139, doi: 10.3969/j.issn.00015733.2011.04.029.
- 张凌云, 刘鸿福. 2011. ABP 法在高密度电阻率法反演中的应用. 地球物理学报, 54(1): 227-233, doi: 10.3969/j.issn.0001.5733.2011.01.024.
- 朱劲, 李天斌, 李永林等. 2007. Beam 超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用. 工程地质学报, 15(2): 258-362.

(本文编辑 汪海英)