

DOI: 10.11779/CJGE201702004

# 隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测反演与优化方法研究

王传武, 李术才, 聂利超\*, 刘斌, 郭谦, 任玉晓, 刘海东

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 超前地质预报是隧道施工中必不可少的环节, 将地面三维电阻率 E-SCAN 观测模式引入到隧道超前预报中, 其中供电与采集电极都布置在隧道掌子面, 可有效降低旁侧干扰因素的影响, 提出了基于三维电阻率 E-SCAN 的隧道超前探测新型观测模式。建立了隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测地电模型, 获得了敏感度矩阵分布特征: 矩阵元素数值较小且相差悬殊; 元素绝对值随深度衰减迅速; 靠近供电与采集电极位置元素绝对值较高。为改善反演的深度定位问题, 对敏感度矩阵中元素施加不同大小的增益因子, 对原有敏感度矩阵中高值元素进行抑制, 对低值元素进行增益, 形成了基于敏感度增益因子的隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测反演优化方法, 在理论上可以提高异常体的深度定位精度。开展数值算例与物理模型试验研究, 结果表明在隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测中, 相较于常规光滑约束反演, 反演优化方法在异常体的深度定位精度方面具有明显优势。

**关键词:** 隧道超前预报; 三维电阻率反演; E-SCAN; 敏感度矩阵; 光滑约束权重; 增益优化

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2017)02-0218-10

**作者简介:** 王传武(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事勘探地球物理与地下工程灾害防控方面的研究。E-mail: wangcw17@163.com。

## 3D E-SCAN resistivity inversion and optimized method in tunnel advanced prediction

WANG Chuan-wu, LI Shu-cai, NIE Li-chao, LIU Bin, GUO Qian, REN Yu-xiao, LIU Hai-dong

(Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Advanced geological prediction is one essential part in tunnel construction, and 3D E-SCAN resistivity device is introduced. In this device, the current and measuring electrodes are arranged on the tunnel face, which can reduce the impact of interference factors. Then a new observing device is proposed. Geological models are designed, and features of the sensitivity matrix are obtained as follows: the absolute values of elements are vastly different; the values decrease sharply with depth; the elements close to the current and measuring electrodes achieve high absolute values. The gain factors with different values are imposed onto the elements in the sensitivity matrix, and the initial elements with high values are suppressed, with the elements with low values enhanced. An optimized inverse method is formed based on the gain factors, and it can promote the depth accuracy of the abnormal in inverse results theoretically. Numerical examples and physical model tests are performed. The results show that in the 3D E-SCAN resistivity detection, compared with the traditional smooth constraints inversion, the optimized inverse method has obvious advantages in positioning the abnormal body in depth.

**Key words:** tunnel advanced prediction; 3D resistivity inversion; E-SCAN; sensitivity matrix; smooth constraint weight; gain optimization

## 0 引言

电阻率勘探是一种原理简单, 实施便利, 经济高效的地球物理探测方法, 在工程勘察、环境监测等领域应用广泛。隧道超前地质预报中主要的探测对象为断层破碎带与岩溶含水体等, 三维电阻率探测方法具有对岩溶含水体响应敏感的优势, 因此被引入到隧道超前预报中<sup>[1-5]</sup>, 得到越来越多的应用。

三维电阻率探测在地面探测与隧道超前预报中有

较大区别。地面探测中的干扰因素, 可以在一定程度上抑制或清除; 隧道施工中的钢筋混凝土支护结构等

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划 (“973”计划) 项目(2013CB036002, 2015CB058101); 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); 国家自然科学基金面上项目(51479104); 国家自然科学基金青年科学基金项目(41502279); 中国博士后科学基金项目(2015M572037); 国家重点研发计划(2016YFC0401805)

**收稿日期:** 2016-04-27

\*通讯作者 (E-mail: lichaonie@163.com)

会对电阻率探测造成干扰, 探测时干扰去除较为困难。地面探测中可充分利用地面空间, 测线长度一般为探测深度的 2 倍<sup>[6]</sup>; 隧道超前预报中电极布设可利用的隧道空间有限, 若电极仅在掌子面布设, 则预报距离仅为洞径的 1/2~1/3, 远不能满足工程需求, 若利用隧道空腔布设测线, 则受干扰因素影响太大。可见三维电阻率探测应用于隧道超前预报主要存在以下问题: ①受支护结构等干扰因素影响, 探测效果不佳; ②隧道可利用的探测空间有限, 探测装置形式适用性差, 三维电阻率异常体深度定位精度有待提高。

三维电阻率法在隧道超前预报中可尝试采用多种不同观测模式<sup>[7-8]</sup>。E-SCAN 三维观测模式是一种二极装置形式<sup>[9-10]</sup>, 将其引入到隧道超前预报中, 供电电极与采集电极阵列式布设于掌子面, N 极与 B 极布设在掌子面后方无穷远处, 由于供电与采集电极集中布设于隧道掌子面, 因此可一定程度减小干扰因素的不利影响。三维电阻率最小二乘反演中, 核函数随探测深度迅速衰减<sup>[11]</sup>, 为了抑制方程病态程度, 可以加入阻尼因子<sup>[12-13]</sup>。但阻尼系数仅能改善方程求解稳定性, 解的可靠性并没有提高。在电阻率反演中增加具有天然合理性的光滑约束<sup>[14-16]</sup>, 可以一定程度压制反演的多解性, 改善反演效果, 但是光滑约束对提高深度定位精度的作用有限。敏感度矩阵分析有助于对探测反演中异常解译<sup>[17]</sup>, 其在探测区域内的分布特征影响着反演结果中异常体的空间位置、规模形态、异常电阻率值等。因此分析敏感度矩阵分布特征, 并对其进行优化, 是提高探测深度定位精度的可行途径。

本文在隧道超前预报中提出三维电阻率 E-SCAN 新型观测模式, 可一定程度抑制旁侧干扰。通过建立的隧道三维 E-SCAN 超前探测地电模型, 分析反演计算中敏感度元素在探测区域内的分布特征, 评价光滑约束权重的影响。随后提出敏感度增益矩阵, 对敏感度矩阵中高值元素赋以较低增益因子, 低值元素赋以较高增益因子, 形成了三维 E-SCAN 探测反演优化方法, 在不改变电场分布规律的前提下对敏感度矩阵分布进行调整, 开展的数值算例与物理模型试验验证了该反演优化方法可提高反演深度定位精度。

## 1 三维 E-SCAN 观测模式与敏感度特征分析

### 1.1 三维 E-SCAN 观测模式

三维 E-SCAN 观测模式是一种常规电法勘探中二极装置, 其将电极以均匀网格方式布设在探测区域并编号, N 极与 B 极布置在无穷远处。已经编号的探测区域电极<sup>#1</sup> 供电, 其它电极依次采集电位, 然后变换

供电电极做类似测量<sup>[9]</sup>。将三维 E-SCAN 观测模式引入到隧道超前预报中, 掌子面尺寸为 8 m×8 m, 在掌子面布设 3 条测线, 测线间距 2 m; 每条测线各 9 个电极, 电极间距 1 m; B, N 电极在无穷远处, 超前探测模型与电极布置形式见图 1。

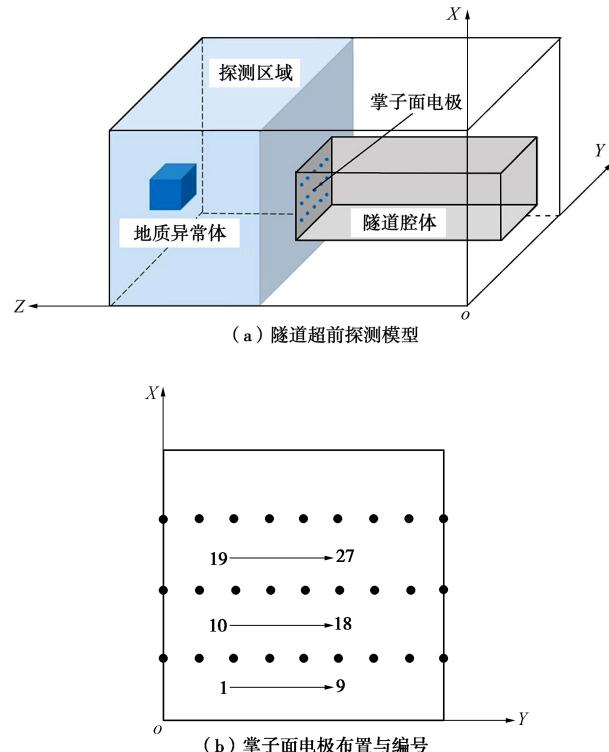


图 1 隧道三维 E-SCAN 电阻率探测示意图

Fig. 1 Diagram of 3D E-SCAN resistivity survey in tunnel

### 1.2 隧道三维 E-SCAN 观测模式敏感度矩阵特征

三维电阻率反演计算中, 可得到线性方程组<sup>[12]</sup>:

$$\Delta \mathbf{d} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{m} \quad , \quad (1)$$

式中,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left( \frac{\partial f_1}{\partial m_1} \right)^0 & \left( \frac{\partial f_1}{\partial m_2} \right)^0 & \cdots & \left( \frac{\partial f_1}{\partial m_N} \right)^0 \\ \left( \frac{\partial f_2}{\partial m_1} \right)^0 & \left( \frac{\partial f_2}{\partial m_2} \right)^0 & \cdots & \left( \frac{\partial f_2}{\partial m_N} \right)^0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \left( \frac{\partial f_M}{\partial m_1} \right)^0 & \left( \frac{\partial f_M}{\partial m_2} \right)^0 & \cdots & \left( \frac{\partial f_M}{\partial m_N} \right)^0 \end{bmatrix},$$

$M$  为观测数据个数,  $N$  为反演计算模型单元个数,  $\mathbf{m}$  是  $N$  维模型向量,  $\Delta d_i = d_i - d_i^0$  为第  $i$  个观测数据  $d_i$  与  $\mathbf{m}^0$  时第  $i$  个理论观测数据  $d_i^0$  之差, 即观测数据增量,  $\Delta m_j = m_j - m_j^0$ , 即第  $j$  个模型参数的增量, 矩阵  $\mathbf{A}$  为偏导数矩阵, 也称为敏感度矩阵,  $\left( \frac{\partial f_i}{\partial m_j} \right)^0$  代表在初始模型  $\mathbf{m}^0$  处, 第  $i$  个观测数据  $d_i$  对第  $j$  个模型参数  $m_j$

的偏导数。

利用三维电阻率探测数值模拟试验, 探究隧道超前预报中反演敏感度矩阵的特征。利用第 1.1 节中建立的隧道超前探测模型与三维 E-SCAN 观测装置形式, 在隧道掌子面前方设置块状低阻异常体, 用以模拟实际探测中的含水溶洞。低阻异常体在掌子面正前方中心处, 中心位置与掌子面距离 10 m, 尺寸为 8 m×8 m×4 m, 电阻率值为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ , 围岩背景电阻率值为  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ 。利用三维电阻率 E-SCAN 观测模式得到正演结果, 作为超前探测反演的观测数据。在反演开始时, 围岩初始电阻率值设定为  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ , 得到反演第 1 次时敏感度矩阵中每个元素值。

敏感度矩阵中元素  $a_{ij}$  代表第  $i$  个观测数据对第  $j$  个模型单元的敏感响应程度,  $a_{ij}$  的绝对值大, 表示该

观测数据对第  $j$  个模型单元电阻率变化敏感响应强;  $a_{ij}$  的绝对值小, 表示该观测数据对第  $j$  个模型单元电阻率变化敏感响应弱。第 1 次反演迭代计算时, 模型电阻率为统一的初始电阻率  $1000 \Omega \cdot \text{m}$ , 此时选取代表性观测数据对应敏感度矩阵中的元素进行分析。

敏感度矩阵中元素绝对值相差较大, 甚至出现量级差别, 因此对矩阵元素绝对值取以 10 为底的对数进行分析。绘制代表性测点敏感度矩阵元素在探测区域内三维分布图, 见图 2。提取掌子面代表性测点沿隧道走向延伸线上敏感度元素绝对值, 绘制元素绝对值随深度增加的变化曲线见图 3。图 2 色标与图 3 纵坐标轴中数值  $a$  代表元素绝对值为  $1.0 \times 10^a$ , 例如 -15 代表元素绝对值为  $1.0 \times 10^{-15}$ , -4 代表元素绝对值为  $1.0 \times 10^{-4}$ , 矩阵元素绝对值越大代表敏感响应越强。

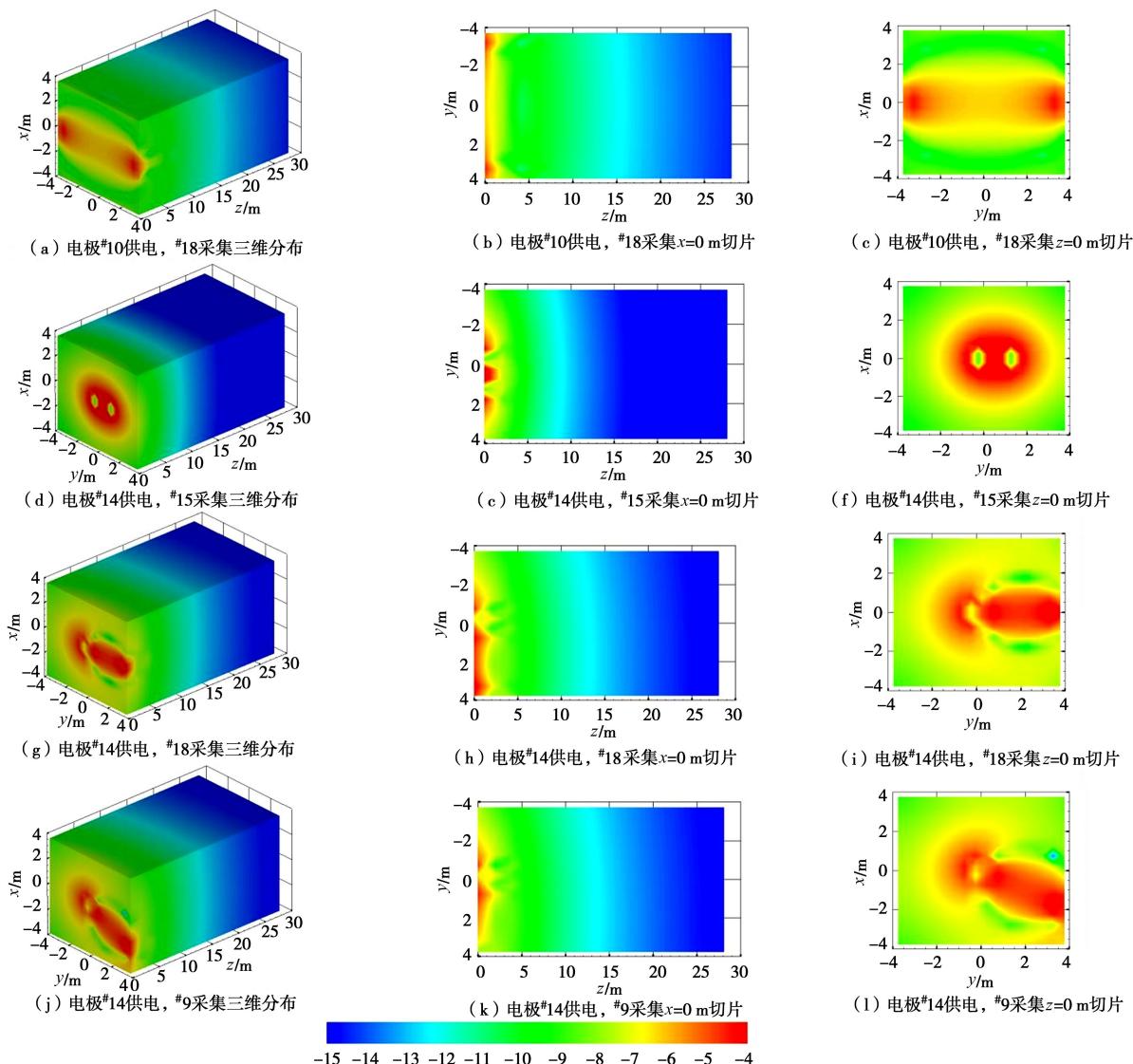


图 2 代表性测点敏感度矩阵结果图

Fig. 2 Results of sensitivity matrix with representative points



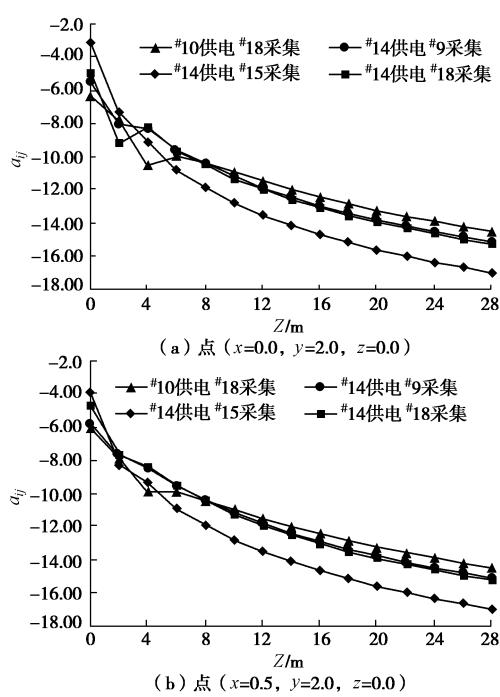


图 3 敏感度元素随深度变化曲线

Fig. 3 Curves of sensitivity element with depth

分析敏感度矩阵元素绝对值在探测区域内的三维分布, 得出隧道超前预报中三维电阻率探测 E-SCAN 观测模式下敏感度矩阵分布的基本规律:

(1) 在探测反演区域内, 敏感度矩阵元素绝对值较小, 绝大部分绝对值量级小于  $10^{-3}$ , 同一观测数据的不同反演区域敏感度绝对值相差悬殊, 比值可达  $10^{10}$ 。

(2) 敏感度矩阵元素呈现随深度增加而急剧衰减特性, 衰减速度与供电和采集电极之间距离有关, 距离远时衰减相对较慢, 距离近时衰减相对较快。

(3) 对某一特定观测数据而言, 敏感度分布与供电和采集电极位置有较大关系, 绝对值较大区域集中在供电电极区域、采集电极区域、供电与采集电极的中间区域, 敏感度绝对值在以上区域之外迅速衰减。

需要说明的是: 在敏感度分布图像中供电与采集电极对应位置处都出现了敏感度绝对值低值点, 原因是在求取敏感度系数时, 供电电极和采集电极都会作为电源点分别供电, 有限单元法不能完全模拟电源点附近的电位变化, 从而造成计算误差。

## 2 光滑约束分析

计算模型中相邻单元电阻率差异极小, 是模型的基本特征, 将这一信息作为约束条件满足天然的合理性, 因此在反演计算中增加光滑约束, 使模型中相邻单元电阻率值光滑过渡。施加光滑约束后的三维电阻率反演方程为<sup>[18]</sup>

$$(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{m} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d}, \quad (2)$$

式中,  $\mathbf{C}$ 为光滑度矩阵,  $\lambda$ 为拉格朗日常数, 决定光滑约束权重。

理论上光滑约束的权重系数  $\lambda$  较小时, 模型中相邻单元电阻率值变化可能会有急剧变化, 光滑约束作用较弱, 反演结果中往往出现除真实异常体之外的多余构造; 光滑约束的权重系数  $\lambda$  较大时, 模型中相邻单元电阻率值变化较缓, 此时光滑约束可一定程度上抑制多余构造的出现, 同时也可能使模型单元过度光滑, 掩盖真实存在的异常体。

利用第1节中地电模型开展数值模拟试验, 权重系数  $\lambda$  分别设置为 5.0, 0.5, 0.05, 0.005, 反演迭代 10 次, 反演结果见图4。 $\lambda=0.5$  时反演结果中出现了对应于地质原型的低阻异常区域, 异常区域电阻率值较接近原型中的低阻异常值, 此时光滑约束起到了较好的约束作用, 较好的反映了真实存在的异常体, 同时抑制了假异常体的出现。

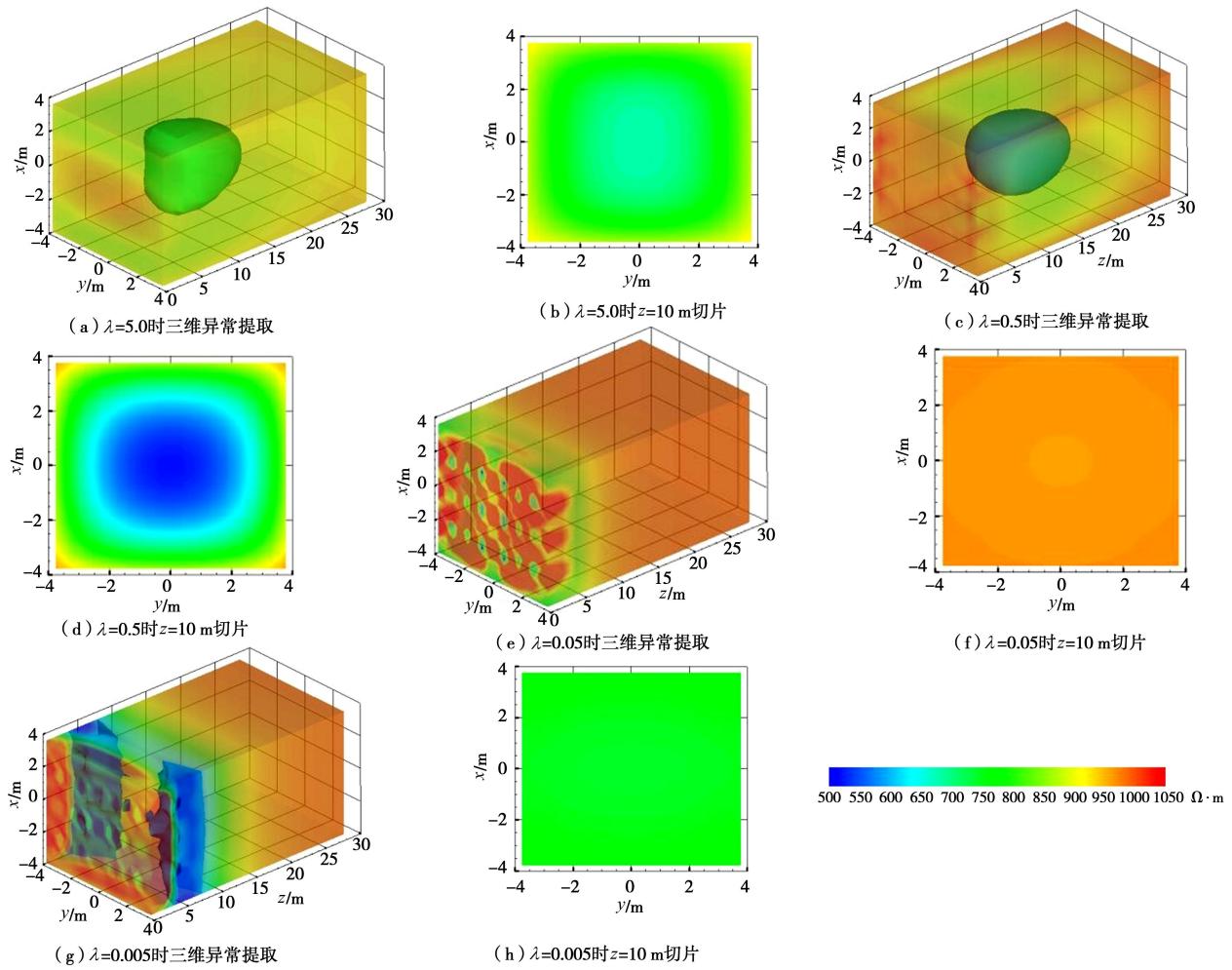
通过大量的数值模拟计算得到, 在隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测中  $\lambda$  值在 0.1~1.0 范围时反演结果较好。当隧道超前预报中三维 E-SCAN 装置电极布设、有限元计算模型等因素改变时,  $\lambda$  值需在此范围内作相的调整。此外, 光滑约束对提高异常深度定位准确度的作用有限, 需要在此基础上对反演方程作进一步优化。

## 3 基于增益因子的反演优化方法与数值模拟

为提高隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测深度定位精度, 在第1.2节得到敏感度矩阵在隧道探测区域内分布特征与规律的基础上, 根据敏感度矩阵元素绝对值的高低对元素赋以不同的增益因子, 对绝对值高的元素进行抑制, 对绝对值低的元素进行增益, 形成了基于增益因子的反演优化方法。

### 3.1 增益因子对敏感度矩阵的优化

隧道三维电阻率 E-SCAN 探测反演中, 可以得到每次迭代计算的敏感度矩阵, 根据每一个观测数据对应敏感度矩阵元素的数值, 提出基于增益因子的优化方法。当敏感度矩阵中第  $i$  行元素, 即第  $i$  个观测数据对应元素的变化区间为  $[a_i^{\min}, a_i^{\max}]$  时, 对该行敏感度元素赋以不同数值的增益因子。敏感度元素绝对值相差悬殊, 增益因子以指数形式给出, 相较于线性形式、倒数形式等, 增益因子变化更悬殊, 可以更好的对低值元素进行增益, 因此给出指数形式的增益因子表达式:

图 4 不同  $\lambda$  取值反演计算结果Fig. 4 Inversion results with different values of  $\lambda$ 

$$w_{ij} = 10^{\eta \left( \frac{|a_{ij}|_{\max} - |a_{ij}|}{|a_{ij}|_{\max} - |a_{ij}|_{\min}} \right)} \quad . \quad (3)$$

式中  $\eta$  为增益因子系数, 需人为给定;  $w_{ij}$  为敏感度矩阵元素  $a_{ij}$  的增益因子, 变化范围为  $[1, 10^\eta]$ ; 供电电极、采集电极不断切换,  $i$  取值从 1 变化到  $M$ , 供电与采集电极确定后,  $i$  保持不变;  $j=1, \dots, N$ ;  $|a_{ij}|$  为敏感度矩阵元素  $a_{ij}$  的绝对值;  $|a_{ij}|_{\max}$  为  $i$  固定,  $j$  从 1 变化到  $N$  时敏感度矩阵元素绝对值最大值;  $|a_{ij}|_{\min}$  为  $i$  固定,  $j$  从 1 变化到  $N$  时敏感度矩阵元素绝对值最小值。敏感度元素量级差别很大, 式 (3) 中对  $a_{ij}$  的操作是对其取以 10 为底的对数后进行。

增益因子系数  $\eta$  的取值影响增益因子  $a_{ij}$  的变化范围, 增益因子太大会导致反演求解方程奇异, 无法求解, 增益因子太小则达不到减缓敏感度矩阵系数随深度快速衰减的目的。本文在数值算例与物理模型试验中设定不同  $\eta$  取值进行了反演试算, 在  $\eta=2.0$  时增益优化反演效果较好。

敏感度增益因子  $w_{ij}$  组成的增益矩阵  $\mathbf{W}_{MN}$  与敏感度矩阵  $\mathbf{A}_{MN}$  作 Hadamard 乘积<sup>[19]</sup>, 即对应位置元素相

乘, 记作  $\mathbf{W} \circ \mathbf{A} = [w_{ij} a_{ij}]_{MN}$ 。因此得到新的反演求解方程:

$$((\mathbf{W} \circ \mathbf{A})^T (\mathbf{W} \circ \mathbf{A}) + \lambda \mathbf{C}^T \mathbf{C}) \Delta \mathbf{m} = (\mathbf{W} \circ \mathbf{A})^T \Delta \mathbf{d} \quad . \quad (4)$$

反演计算方程中引入增益因子, 对每个观测数据中每个模型单元的敏感度赋以不同权值, 敏感度高值元素赋以低值增益因子, 低值元素赋以高值增益因子, 使反演过程中靠近供电电极、采集电极的敏感度高值区域敏感响应程度受到抑制, 远离供电电极、采集电极的敏感度低值区域敏感响应程度得到增益。该方法应用于隧道三维电阻率 E-SCAN 超前探测中, 在不改变电场分布基本规律的前提下, 一定程度上调整了探测区域内的模型单元对电阻率敏感响应程度, 理论上能够改善反演效果。

### 3.2 数值算例一

地质原型见图 5(a), 隧道掌子面尺寸为  $8 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ , 采用与第 1.2 节中相同的三维电阻率 E-SCAN 探测装置形式。低阻异常体尺寸为  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ , 位置在掌子面中心处正前方, 中心位置距掌子面距离为 1 倍洞径 8 m, 电阻率值为  $10 \Omega \cdot \text{m}$ , 围岩背景电阻率值为  $1000$

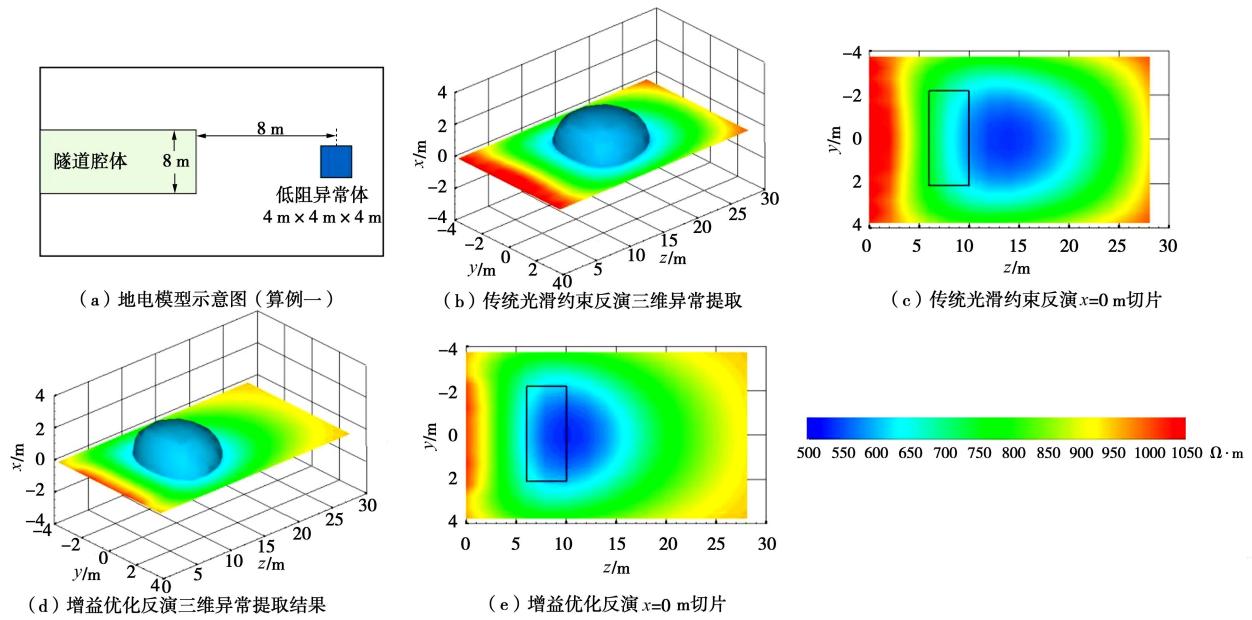


图5 反演计算结果(算例一)

Fig. 5 Inversion results (example 1)

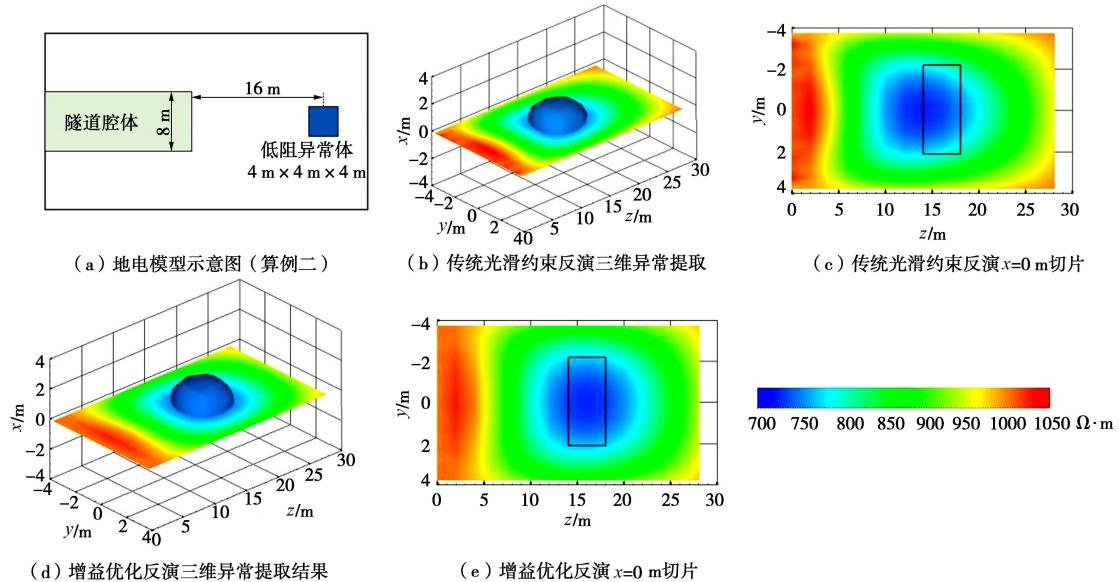


图6 反演计算结果(算例二)

Fig. 6 Inversion results (example 2)

$\Omega \cdot m$ 。利用三维E-SCAN观测模式得到的正演结果作为反演观测数据, 分别利用传统光滑约束反演方法、增益因子调整敏感度矩阵后的反演优化方法进行反演计算, 迭代进行10次, 得到反演计算结果见图5。

图5(b)、(d)分别为传统光滑约束反演、增益优化反演的异常体三维提取图, 得到的异常体形态、尺寸等较为接近, 都位于掌子面中心的前方区域, 规模大致为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 6\text{ m}$ , 电阻率值大致低于 $600 \Omega \cdot m$ 。图5(c)为传统光滑约束反演结果中 $x=0\text{ m}$ 切片, 图像反映出低阻异常核心区域位置在 $z=14\text{ m}$ 处, 而地质原型中异常体中心位置 $z=8\text{ m}$ , 传统光滑约束反演结果异

常体与原型中异常体在 $z$ 轴方向相差6 m。图5(e)为增益优化反演结果中 $x=0\text{ m}$ 切片, 图像中低阻异常核芯区域位置在 $z=10\text{ m}$ 处, 与地质原型中 $z=8\text{ m}$ 的位置相差2 m。可见两种方法的反演结果中低阻异常体与原型都有偏差, 但增益优化反演方法偏差明显减小。

数值算例一表明, 当低阻异常体位于掌子面前方1倍洞径8 m时, 增益因子反演优化方法计算结果相比常规光滑约束反演方法更接近真实情况。

### 3.3 数值算例二

地质原型见图6(a), 采用与数值算例一相同的低阻异常体尺寸、低阻体与围岩背景电阻率值三维电阻

率E-SCAN探测装置形式,与算例一相同,但低阻体位置在掌子面中心处正前方,中心位置距掌子面距离为2倍洞径16 m。同样利用三维E-SCAN观测模式得到的正演结果作为反演观测数据,分别利用传统光滑约束反演方法、增益因子调整敏感度矩阵后的反演优化方法进行反演计算,迭代计算10次,得到反演计算结果见图6。

图6(b)、(d)分别为传统光滑约束反演、增益优化反演的异常体三维提取图,得到的异常体形态、尺寸等较为接近,都位于掌子面中心的前方区域,规模大致为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 6\text{ m}$ ,电阻率值大致低于 $750\Omega\cdot\text{m}$ 。图6(c)传统光滑约束反演结果 $x=0\text{ m}$ 切片中,低阻异常核心区域位置在 $z=14\text{ m}$ 处,而地质原型中异常体中心位置 $z=16\text{ m}$ ,传统光滑约束反演结果异常体与原型中异常体在 $z$ 轴方向相差2 m。图6(e)增益优化反演结果 $x=0\text{ m}$ 切片中,低阻异常核心区域位置在 $z=16\text{ m}$ 处, $z$ 轴方向上与地质原型基本一致。可见与传统光滑约束反演结果相比,增益优化反演结果中低阻异常体位置更接近于地质原型。

数值算例二表明,当低阻异常体位于掌子面前方2倍洞径16 m时,增益因子反演优化方法结果相比传统光滑约束反演结果更接近真实情况。综合数值算例一与算例二可以看出,增益因子反演优化方法可以提高三维电阻率E-SCAN超前探测对异常体深度定位精度。

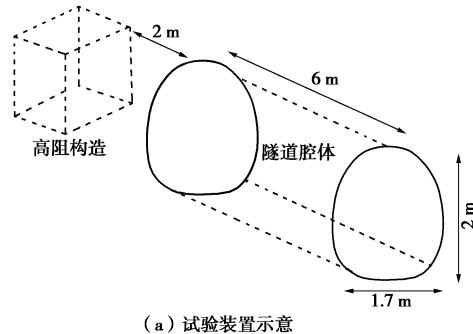
## 4 物理模型试验

参照文献[20],设计了隧道三维电阻率E-SCAN超前探测物理模型试验。物理模型试验中隧道腔体尺寸为 $6\text{ m} \times 1.7\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ,用于模拟围岩的填充材料电阻率在 $200\Omega\cdot\text{m}$ 左右,电阻率结构均匀;在掌子面布设3条测线,间距0.5 m,每条测线9个测点,测点间距0.15 m,电极编号方式与第1.1节相同,见图7所示。模型试验满足相似性原理,相似比为5。因此对应实际中隧道腔体为 $30\text{ m} \times 8.5\text{ m} \times 10.0\text{ m}$ ,测线间距2.5 m,测点间距0.75 m,围岩背景电阻率为 $1000\Omega\cdot\text{m}$ 。

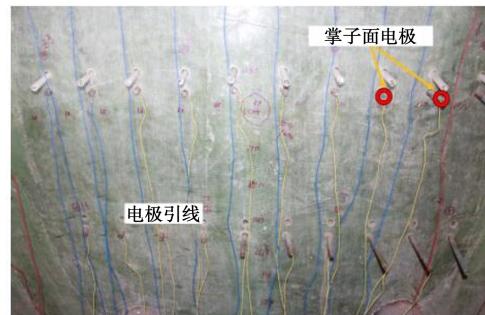
### 4.1 物理模型试验一

高阻异常构造A设置在掌子面正前方2 m处,用于模拟隧道超前探测中无充填的溶洞。异常构造尺寸为 $1.0\text{ m} \times 1.0\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ,外壳厚度为0.05 m,异常内部内无填充,电阻率相当于空气电阻率值,具体可见图8(a)。根据相似原理,对应异常构造尺寸为 $5.0\text{ m} \times 5.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ,中心位置在掌子面正前方10 m处;高阻异常相当于空气电阻率。

(a)。根据相似原理,对应异常构造尺寸为 $5.0\text{ m} \times 5.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ,中心位置在掌子面正前方10 m处;高阻异常相当于空气电阻率。



(a) 试验装置示意



(b) 掌子面电极布设

图7 物理模型试验装置图

Fig. 7 Simulator device of model tests

根据物理模型试验参数建立三维有限元模型,采用三维电阻率E-SCAN观测模式进行采集得到试验观测数据,利用观测数据分别进行常规光滑约束反演与增益优化反演,反演迭代10次,得到计算结果见图8。

图8(b)传统光滑约束反演三维异常提取图中,高阻异常区域体积与原型相近,电阻率值大致高于 $1800\Omega\cdot\text{m}$ ,图8(c)反映高阻异常体深度方向位置在6~8 m范围内,与原型中异常体9~11 m范围相差3 m。

图8(d)为增益优化反演结果的三维异常提取图,图中提取得到的异常区域体积与原型相近,电阻率值大致高于 $1900\Omega\cdot\text{m}$ ,高于传统光滑约束反演得到的高阻异常体电阻率值。图8(e)为 $x=0\text{ m}$ 切片,图中反映高阻异常区域深度位置在9~11 m范围,与原型较为接近,优于传统光滑约束反演结果。

### 4.2 物理模型试验二

高阻异常构造B设置在掌子面正前方3 m处,用于模拟隧道超前探测中无充填的溶洞。异常构造尺寸为 $1.0\text{ m} \times 0.4\text{ m} \times 0.4\text{ m}$ ,外壳厚度为0.05 m,异常内部内无填充,电阻率相当于空气电阻率值,具体可见图9(a)。根据相似原理,对应异常构造尺寸为 $5.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m}$ ,中心位置在掌子面正前方15 m处;高阻异常相当于空气电阻率。

采用与物理模型试验一相同的观测模式采集得到试验观测数据,进行常规光滑约束反演与增益优化反演,反演迭代10次,得到计算结果见图9。

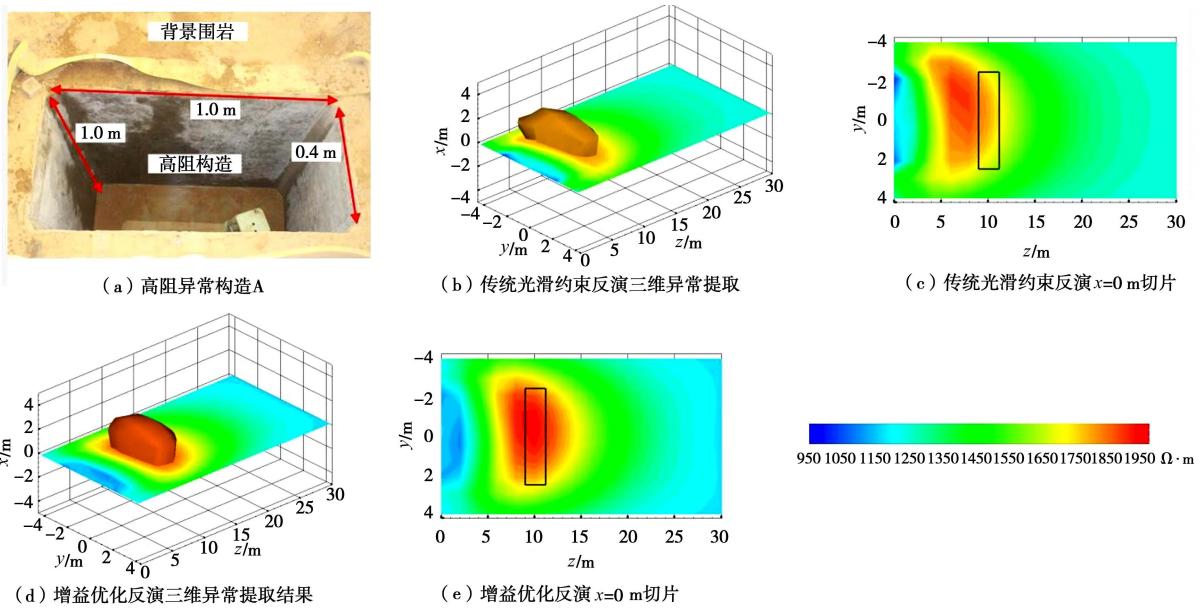


图 8 反演计算结果(高阻异常 A)

Fig. 8 Inversion results (abnormal high resistivity structure A)

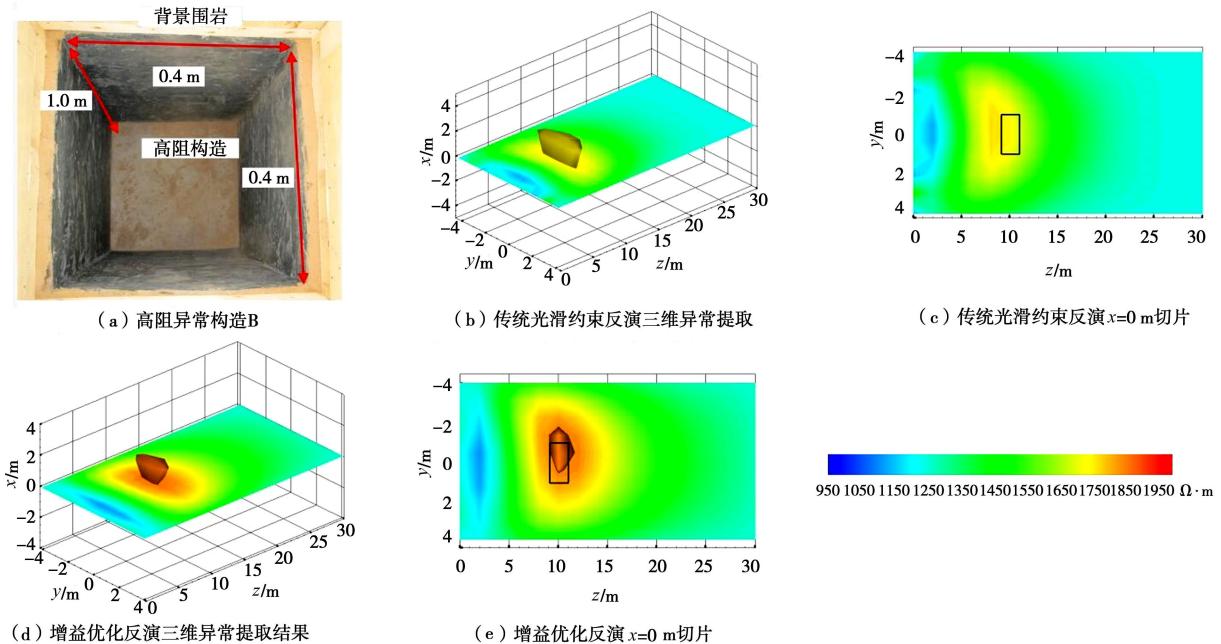


图 9 反演计算结果(高阻异常 B)

Fig. 9 Inversion results (abnormal high resistivity structure B)

图9 (b) 传统光滑约束反演三维异常提取图中, 高阻异常区域体积与原型相近, 电阻率值大致高于  $1750 \Omega \cdot \text{m}$ , 图9 (c) 反演高阻异常区域深度方向位置在7~9 m范围内, 与原型中异常体9~11 m范围相差2 m。

图9 (d) 为增益优化反演结果的三维异常提取图, 图中提取得到的异常区域体积与原型相近, 电阻率值大致高于  $1850 \Omega \cdot \text{m}$ , 高于传统光滑约束反演得到的高阻异常体电阻率值。图9 (e) 为  $x=0 \text{ m}$  切片, 图中反映

高阻异常区域深度位置在9~11 m范围, 与原型较为接近, 优于传统光滑约束反演结果。

物理模型试验表明, 隧道三维电阻率E-SCAN探测中增益反演优化方法对高阻异常体的定位精度优于常规光滑约束反演结果, 可以一定程度提高电阻率探测深度定位精度。

## 5 结 论

本文在隧道超前预报中引入三维电阻率E-SCAN

观测装置形式, 通过有限元地电模型获得了敏感度分布特征规律, 进行了光滑约束分析, 提出了增益反演优化方法, 得到如下结论:

(1) 隧道超前预报三维电阻率E-SCAN观测模式下, 敏感度矩阵元素绝对值较小, 量级大都小于 $10^{-3}$ ; 元素绝对值沿深度方向迅速衰减; 靠近供电电极、采集电极的区域敏感度元素绝对值较高, 远离的区域敏感度元素绝对值较低, 高值与低值之间比值可达 $10^{10}$ 。

(2) 隧道三维E-SCAN探测模式进行反演计算时, 光滑约束权重参考范围为0.1~1.0, 当电极极距、计算模型等变化时, 光滑约束权重需在此范围内作相应调整。

(3) 根据敏感度矩阵元素绝对值确定指数形式的增益因子, 对绝对值高的元素进行抑制, 对绝对值低的元素进行增益, 形成了基于增益因子的反演优化方法, 理论上可提高隧道三维电阻率E-SCAN超前探测的深度定位精度。

(4) 数值算例与物理模型试验中, 反演优化方法得到的异常体深度位置比传统光滑约束反演结果更接近于真实情况, 验证了反演优化方法可提高隧道三维电阻率E-SCAN超前探测中异常体深度的定位精度。

## 参 考 文 献:

- [1] 李术才, 刘斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(6): 1090~1113. (LI Shu-cai, LIU Bin, SUN Huai-feng, et al. State of art trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(6): 1090~1113. (in Chinese))
- [2] 李术才, 聂利超, 刘斌, 等. 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[J]. 地球物理学报, 2015, **58**(4): 1434~1446. (LI Shu-cai, NIE Li-chao, LIU Bin, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, **58**(4): 1434~1446. (in Chinese))
- [3] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 隧道含水构造直流电阻率法超前探测研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(10): 3093~3101. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. Study of advanced detection of water-bearing geological structures with DC resistivity method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(10): 3093~3101. (in Chinese))
- [4] 李术才, 刘斌, 李树忱, 等. 基于激发极化法的隧道含水地质构造超前探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(7): 1297~1309. (LI Shu-cai, LIU Bin, LI Shu-chen, et al. Study of advanced detection for tunnel water-bearing geological structures with induced polarization method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(7): 1297~1309. (in Chinese))
- [5] 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 Bin, LI Shu-cai, NIE Li-chao, et al. Advanced detection of water-bearing geological structures in tunnels using 3D DC resistivity inversion tomography method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(10): 1866~1876. (in Chinese))
- [6] 董浩斌, 王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, **10**(1): 171~176. (DONG Hao-bin, WANG Chuan-lei. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. Earth Science Frontiers, 2003, **10**(1): 171~176. (in Chinese))
- [7] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(5): 1529~1538. (HUANG Jun-ge, WANG Jia-lin, RUAN Bai-yao. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, **49**(5): 1529~1538. (in Chinese))
- [8] 强建科, 阮百尧, 周俊杰. 三维坑道直流聚焦法超前探测的电极组合研究[J]. 地球物理学报, 2010, **53**(3): 695~699. (QIANG Jian-ke, RUAN Bai-yao, ZHOU Jun-jie. Research on the array of electrode of advanced focus detection with 3D DC resistivity in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, **53**(3): 695~699. (in Chinese))
- [9] 黄俊革, 王家林, 阮百尧. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究[J]. 地球物理学报, 2006, **49**(4): 1206~1214. (HUANG Jun-ge, WANG Jia-lin, RUAN Bai-yao. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, **49**(4): 1206~1214. (in Chinese))
- [10] LI Y, OLDENBURG D W. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems[J]. Geophysical Journal International, 1992, **109**(2): 343~362.
- [11] LI Y, OLDENBURG D W. 3-D inversion of induced polarization data[J]. Geophysics, 2000, **65**(6): 1931~1945.
- [12] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. (WANG Jia-ying. Inverse theory in geophysics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese))

- [13] 聂利超, 李术才, 刘斌, 等. 电阻率层析成像法探测滑坡面正演模拟与反演成像研究[J]. 岩土力学, 2011, **32**(9): 2873 – 2879. (NIE Li-chao, LI Shu-cai, LIU Bin, et al. Numerical simulation and inversion imaging research of electrical resistivity tomography method for detecting landslide-face location[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(9): 2873 – 2879. (in Chinese))
- [14] SASAKI Y. 3-D resistivity inversion using the finite-element method[J]. Geophysics, 1994, **59**(12): 1839 – 1848.
- [15] 宛新林, 席道瑛, 高尔根, 等. 用改进的光滑约束最小二乘正交分解法实现电阻率三维反演[J]. 地球物理学报, 2005, **48**(2): 439 – 444. (WAN Xin-lin, XI Dao-ying, GAO Er-gen, et al. 3-D resistivity inversion by the least-squares QR factorization method under improved smoothness constraint condition[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, **48**(2): 439 – 444. (in Chinese))
- [16] 黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑. 基于有限单元法的三维地电断面电阻率反演[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, **35**(2): 295 – 299. (HUANG Jun-ge, RUAN Bai-yao, BAO Guang-shu. Resistivity inversion on 3D section based on FEM[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2004, **35**(2): 295 – 299. (in Chinese))
- [17] 吴小平, 徐果明. 电阻率三维反演中偏导数矩阵的求取与分析[J]. 石油地球物理勘探, 1999, **34**(4): 363 – 372. (WU Xiao-ping, XU Guo-ming. Derivation and analysis of partial derivative matrix in resistivity 3-D inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 1999, **34**(4): 363 – 372. (in Chinese))
- [18] 黄俊革. 三维电阻率/极化率有限元正演模拟与反演成像[D]. 长沙: 中南大学, 2003. (HUANG Jun-ge. 3-D resistivity/IP modeling and inversion based on FEM[D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese))
- [19] MATHIAS R. An arithmetic-geometric-harmonic mean inequality involving Hadamard products[J]. Linear Algebra and Its Applications, 1993, **184**: 71 – 78.
- [20] 聂利超. 隧道施工含水构造激发极化定量超前地质预报理论及其应用[D]. 济南: 山东大学, 2014. (NIE Li-chao. Quantitative identification theory and its application of advanced geological prediction for water-bearing structure using induced polarization in tunnel construction period[D]. Jinan: Shandong University, 2014. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要的项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先利用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhr.ac.cn。

(本刊编辑部)