

DOI: 10.11779/CJGE201609016

# 基于参考模型的三维电阻率约束反演方法研究

王传武, 李术才, 刘斌, 聂利超\*, 张凤凯, 宋杰, 郭谦, 任玉晓

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 三维电阻率探测存在反演多解性问题, 易造成地质解译困难甚至判断错误。针对该问题, 提出将多种地球物理探测手段获得的已知信息构建为参考模型约束施加到电阻率反演方程中的解决思路。以地质钻探获得介质电阻率信息, 以地质雷达法获得异常体界面信息, 将得到的已知信息映射到三维电阻率反演得到参考模型, 在电阻率反演中施加参考模型约束, 形成了基于参考模型的三维电阻率约束反演方法, 其中携带有已知先验信息的参考模型约束, 具有定向引导电阻率反演方向的作用, 理论上有助于压制反演多解性。开展相应的数值试验和工程应用, 结果表明上述电阻率反演方法实现了对异常体形态、规模、电阻率值等的较好反映, 是实现多元地球物理探测信息融合、压制多解性的一条可行途径。

**关键词:** 三维电阻率探测; 约束反演; 参考模型; 地质钻探; 地质雷达; 信息融合

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2016)09-1685-10

**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 constrained electrical resistivity inversion method based on reference model

WANG Chuan-wu, LI Shu-cai, LIU Bin, NIE Li-chao, ZHANG Feng-kai, SONG Jie, GUO Qian, REN Yu-xiao  
(Research Center of Geotechnical & Structural Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** The results of 3D electrical resistivity detection are non-unique, and could easily lead to errors in geological interpretation and even misjudgment. A solution is proposed to solve this problem, in which the reference model constraints constructed by the known information from other geological methods are applied to the inversion equation. The electrical resistivity information is gained by the geological drilling, and the boundary information of anomalous bodies is obtained from ground penetrating radar (GPR). All the known information is mapped into the 3D inversion and then the reference model is obtained, which is introduced to the electrical inversion. Then the 3D constrained electrical resistivity inversion method based on the reference model is got. In this method, the reference model constraints containing the prior information can guide the direction of the inverse progress and make the inversion avoid falling into local optimization. This method can reduce the multiplicity of the inverse solutions in theory. The numerical tests and engineering applications are implemented. The results show that the proposed inversion method can map the shape, size, resistivity of the abnormal body well, and is a practical way to integrate information from multiple geophysical explorations and to suppress the multiplicity.

**Key words:** 3D electrical resistivity detection; constrained inversion; reference model; geological drilling; ground penetrating radar; information integration

## 0 引言

电阻率探测以介质导电性差异为基础, 具有实施快捷便利, 结果简单明了等优势, 应用范围扩大至工程勘察、环境评价、资源调查等领域, 因此也使得电阻率探测环境更加复杂, 对探测反演结果要求精度更高。作为一种地球物理探测手段, 反演多解性是电阻率探测的固有问题。当探查对象的位置形态变化、规模尺寸不同时, 多解性问题更加严重, 极易造成对探

查对象的定位偏差、规模判断不准等, 因此很有必要研究电阻率反演中压制多解性的方法。

国内外学者对压制电阻率反演多解性进行了诸多

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2013CB036002, 2014CB046901, 2015CB058101); 国家重大科研仪器设备研制专项(51327802); 国家自然科学基金面上项目(51479104); 国家自然科学基金青年项目(41502279)

收稿日期: 2015-11-16

\*通讯作者(E-mail: lichaonie@163.com)

尝试<sup>[1-6]</sup>。在反演计算中增加已知信息，可以改善反演方程的病态程度，是压制反演多解性的有效方法。Sasaki 等<sup>[7]</sup>在最小二乘反演中引入光滑约束，使相邻网格的电阻率差异极小，这种约束符合模型的基本特征，具有天然的合理性，对改善反演方程有较好的作用，但光滑约束没能在反演方程中增加具体的确定性的已知信息，对压制反演多解性的作用有限。吴小平等<sup>[8]</sup>基于非结构化四面体网格实现了三维带地形反演。Oldenburg 等利用模型参数化、障碍函数等方法，将已知的极化率或电阻率变化范围作为等式或不等式约束施加到反演方程，进一步改善了反演效果<sup>[9-12]</sup>。其已知的极化率或电阻率变化范围可来源于地质常识、钻孔数据或其它推断等，但地质推断得出的电阻率范围较为宽泛，钻孔数据仅能利用局部小范围内信息，因此等式或不等式约束反演还需要进一步的研究。Saunders 等<sup>[13]</sup>、Kaipio<sup>[14]</sup>、李术才等<sup>[15]</sup>、聂利超<sup>[16]</sup>提出基于空间结构约束的联合反演思想，在反演方程中施加空间结构约束，将地质雷达法等其它地球物理探测手段得到的已知异常体形态作为一种先验信息融合到激发极化反演中，有效去除了反演结果中的假异常和多余构造，明显的压制了反演问题的多解性。由此可见在电阻率反演中，光滑约束、等式或不等式约束等携带的约束信息存在电阻率值范围宽泛或约束区域范围较小的问题，基于联合反演思想的结构化约束反演研究尚处于起步阶段，现有的结构约束构造形式较为复杂。

针对电阻率反演多解性问题，本文提出基于参考模型的三维电阻率约束反演方法，以地质钻探方法获取介质电阻率信息<sup>[17]</sup>，地质雷达法得到异常体边界信息<sup>[18]</sup>，将得到的已知先验信息映射到三维电阻率反演模型中，形成参考模型约束。将参考模型约束施加到三维电阻率反演中，可以引导三维电阻率反演向已知确定的方向进行，一定程度上避免反演过程陷入局部最优，能够有效压制反演多解性。该方法以三维电阻率反演为载体，利用其它探测手段得到的已知先验信息引导反演，数学物理意义合理，参考模型约束构造简单，容易实现。数值算例与现场应用表明了该方法的可行性和有效性。

## 1 基于参考模型的三维电阻率约束反演方法

### 1.1 常规三维电阻率反演

常规三维电阻率反演是指在反演中增加光滑约束，形成的目标函数为

$$\Phi = (\Delta d - A \Delta m)^T (\Delta d - A \Delta m) + \lambda (C \Delta m)^T (C \Delta m)。 \quad (1)$$

式中  $\Delta d$  为实际观测数据与模型正演理论观测数据之差； $\Delta m$  为模型参数增量向量； $A$  为敏感度矩阵； $C$  为光滑度矩阵； $\lambda$  为拉格朗日常数，控制着光滑约束的权重。

对应的反演方程为

$$(A^T A + \lambda C^T C) \Delta m = A^T \Delta d。 \quad (2)$$

常规的光滑约束是使相邻网格的电阻率变化差异极小，从而保证介质电阻率变化连续。这种约束符合地质模型实际的电阻率变化规律，但是约束范围较为宽松，受权重系数影响较大，异常体易被背景掩盖或者反演结果中出现多余构造甚至假异常。常规的光滑约束对压制反演多解性起到的作用有限，因此需要携带有更多先验信息的约束形式引导反演计算。

### 1.2 基于参考模型的约束反演

由于多种地球物理探测手段在适用范围、探测距离、识别精度等方面存在不同，地质钻探可以得到确切的介质电阻率信息，地震反射法、地质雷达法可较好的识别异常体界面，因此为发挥各探测方法的优势，获得较精确的探测结果，经常采用三维电阻率、地质钻探、地质雷达等多种手段相互配合的方案进行地质探测。但是探测得到的结果仅在地质解译时进行简单的对比分析，其它探测手段得到的已知条件未能成为引导电阻率反演的有效先验信息，最终导致探测效果不好。

基于参考模型的三维电阻率约束反演，是将地质分析、钻探、地质雷达等探测手段得到的介质电阻率值、异常体边界及形态等结果映射为电阻率反演的参考模型，参考模型作为约束条件施加到三维电阻率反演，引导反演向先验信息确定的方向进行，起到压制反演多解性的作用。

将地质钻探得到的介质电阻率信息、地质雷达得到的异常体边界信息等映射到三维电阻率反演模型中，得到参考模型  $m_r$ ，并构建新的反演目标函数：

$$\Phi = \| \Delta d - A(m - m_0) \|^2 + \lambda \| C(m - m_0) \|^2 + \eta \| F(m - m_r) \|^2。 \quad (3)$$

式中  $m$  为本次反演所要求解的模型参数向量； $m_0$  为本次反演初始模型参数向量； $m_r$  为本次反演参考模型参数向量； $F$  为参考模型系数矩阵， $F_{ij} = 1, i = j; F_{ij} = 0, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, N$ ， $N$  为反演单元总个数； $\eta$  为参考模型约束的权重系数。

得到基于参考模型的反演方程为

$$(A^T A + \lambda C^T C + \eta F^T F) \Delta m = A^T \Delta d - \eta F^T F(m_0 - m_r)。 \quad (4)$$

对比常规光滑约束反演与基于参考模型的约束反演目标函数式可以看出，后者在前者的基础上增加了

其它地球物理探测手段得到的先验信息, 使模型电阻率参数向着先验信息确定的参考模型方向发展。该方法使其他地球物理探测手段得到的先验信息成为电阻率反演的定向引导条件, 实现了多元地球物理探测信息的融合, 在理论上有利于压制多解性问题。

### 1.3 参考模型约束反演流程

实施三维电阻率探测, 同时进行地质钻探法、地质雷达法的探测。根据前文叙述的反演方法, 形成基于参考模型的电阻率约束反演流程。

(1) 建立三维电阻率有限元模型, 根据视电阻率数据确定模型电阻率初值。

(2) 进行地质钻探并测量取芯电阻率, 确定测区内背景电阻率值与异常体电阻率值; 进行地质雷达法探测, 分析确定异常体边界, 将介质电阻率值、异常体边界等先验信息映射到反演计算模型, 形成参考模型。

(3) 对于给定的模型参数, 利用有限元法进行正演模拟计算, 得到理论观测数据  $\mathbf{d}_m$ 。

(4) 进行反演收敛判断, 以实测数据  $\mathbf{d}_{obs}$  与理论观测数据  $\mathbf{d}_m$  的均方差为判据, 若反演得到均方差小于设定收敛值或达到设定反演次数, 则反演结束, 输出此时的模型参数, 若均方差大于设定值且未达到反演设定次数, 则继续执行反演步骤。

(5) 根据参考模型约束和本次反演中的模型参数, 求解反演方程式(4), 得到模型参数向量变化量  $\Delta\mathbf{m}$ 。

(6) 得到新的模型参数, 进入步骤(3)进行下一代迭代反演。

## 2 数值算例

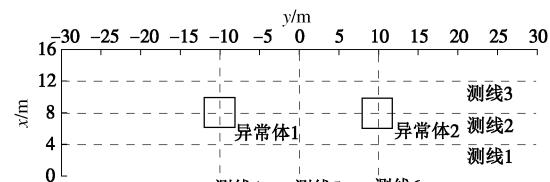
为了验证基于参考模型的约束反演方法具有压制多解性、改善反演效果的作用, 设计了三维电阻率数值模拟算例, 利用正演合成数据开展研究。

### 2.1 算例一

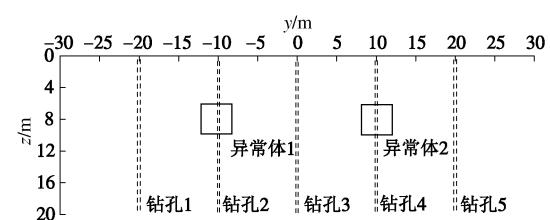
#### (1) 原始地电模型

建立地电模型见图1,  $x$ 轴与 $y$ 轴构成的 $xOy$ 平面为三维电阻率探测和雷达探测的展布平面,  $z$ 轴代表深度方向, 后文数值算例二中与此相同。模型背景电阻率为 $500 \Omega\cdot\text{m}$ , 异常体1为低阻异常, 电阻率为 $10 \Omega\cdot\text{m}$ , 异常体2为高阻异常, 电阻率为 $800 \Omega\cdot\text{m}$ 。分别进行三维电阻率法、地质钻探法、地质雷达法的模拟探测, 其中三维电阻率法探测采用温纳装置形式, 共3条测线, 分别为测线1, 2, 3, 测线间距4 m, 每条测线31个电极, 电极间距2 m; 地质钻探共进行5次, 位置在 $x=8 \text{ m}$ 的直线上依次排开; 雷达测线共6条, 分别为测线1~测线6, 天线中心频率为100

MHz。多种探测实施示意图见图1。



(a) 地质模型平面图及测线布置



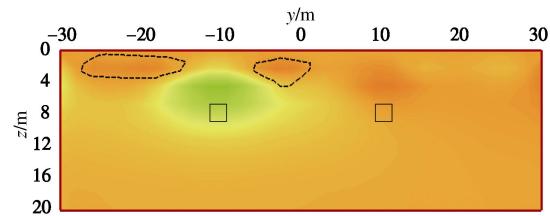
(b) 地质模型立面图及钻孔布置

图1 地质模型示意图(算例1)

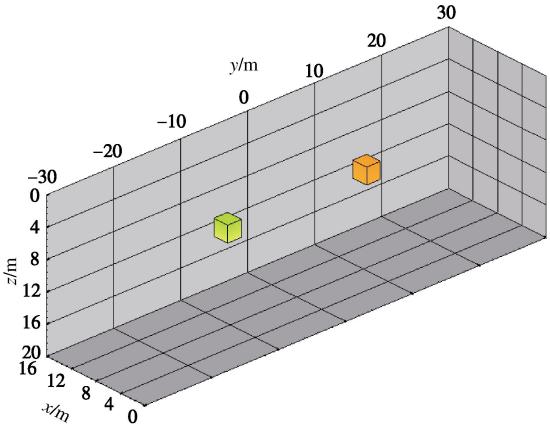
Fig. 1 Sketch of geological model (example 1)

#### (2) 常规光滑约束反演结果

利用合成观测数据, 进行常规光滑约束反演计算, 迭代计算5次, 得到计算结果见图2。图2(a)  $x=8 \text{ m}$ 处的切片中, 出现了并不明显的低阻与高阻区域, 分别对应于异常体1与异常体2, 但是异常区域形态、位置等与地质原型中异常体有较大差距, 甚至在异常体1两侧出现了原始模型中并不存在的多余高阻异常。图2(b)对原始模型中异常体区域进行三维提取,



(a)  $x=8 \text{ m}$ 处切片



(b) 异常体提取图



图2 常规光滑约束反演结果(算例1)

Fig. 2 Inversion results with conventional smooth constraints (example 1)

得到对应异常体 1 区域的电阻率值范围大致为  $350\sim400 \Omega\cdot m$ , 远高于原型中电阻率值为  $10 \Omega\cdot m$  的低阻异常, 异常体 2 对应区域电阻率大致为  $600\sim700 \Omega\cdot m$ , 低于原型中高阻异常值  $800 \Omega\cdot m$ 。算例一中常规光滑约束反演结果中异常体不明显, 且出现了多余构造, 造成解译困难。

### (3) 参考模型构建

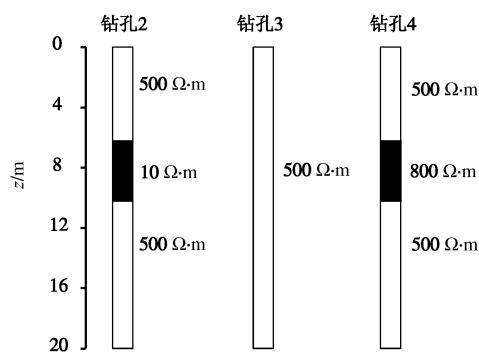


图 3 钻孔揭露电阻率信息(算例 1)

Fig. 3 Resistivity information revealed by drilling (example 1)

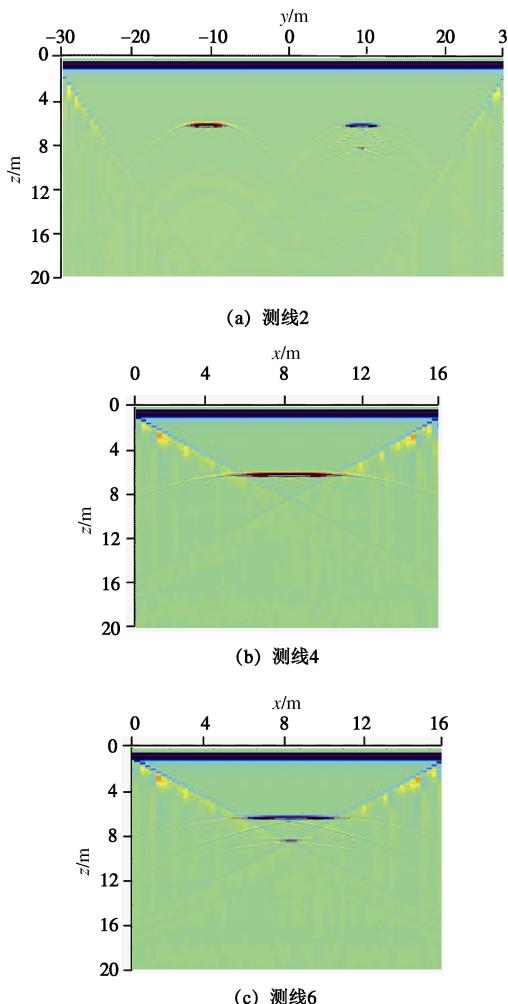


图 4 地质雷达法结果(算例 1)

Fig. 4 Results of GPR (example 1)

通过地质钻孔取芯测量可以得到介质电阻率信息, 钻孔 2 在深度  $6\sim10 \text{ m}$  共  $4 \text{ m}$  的范围内, 电阻率值为  $10 \Omega\cdot m$ , 钻孔 4 在深度  $6\sim10 \text{ m}$  共  $4 \text{ m}$  的范围内, 电阻率值为  $800 \Omega\cdot m$ , 其它段落电阻率值为  $500 \Omega\cdot m$ , 钻孔 3, 钻孔 1、钻孔 5 得到电阻率值均为  $500 \Omega\cdot m$ , 见图 3。图 4 (a) 为地质雷达法测线 2 的结果, 在深度  $6 \text{ m}$  的位置,  $y=-10 \text{ m}$  和  $y=10 \text{ m}$  处分别出现宽度为  $4 \text{ m}$  的异常体界面, 在图 4 (b)、4 (c) 中深度  $6 \text{ m}$  的位置, 出现了与之对应的异常体界面, 宽度都为  $4 \text{ m}$ , 对应于  $x=6\sim10 \text{ m}$  的范围。根据地质钻探和地质雷达法探测得到的已知有效信息, 可以构建参考模型, 其中背景电阻率值为  $500 \Omega\cdot m$ ; 异常体 1 电阻率值为  $10 \Omega\cdot m$ , 分布范围为  $x=6\sim10 \text{ m}, y=-12\sim-8 \text{ m}, z=6\sim10 \text{ m}$ ; 异常体 2 电阻率值为  $800 \Omega\cdot m$ , 分布范围为  $x=6\sim10 \text{ m}, y=8\sim12 \text{ m}, z=6\sim10 \text{ m}$ 。

### (4) 基于参考模型的约束反演结果

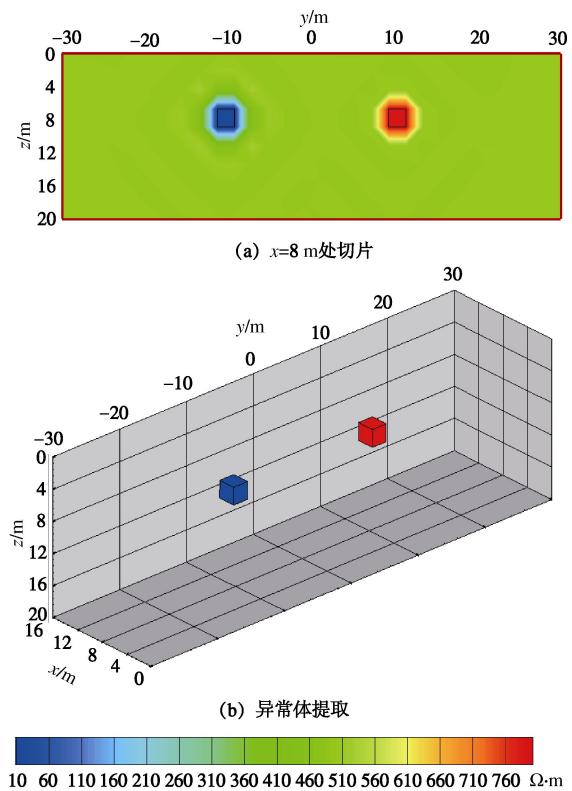


图 5 参考模型约束反演结果(算例 1)

Fig. 5 Inversion results with reference model constraints  
(example 1)

在三维电阻率反演中, 引入携带有已知先验信息的参考模型作为约束条件, 迭代计算 5 次, 得到反演计算结果见图 5。图 5 (a)  $x=8 \text{ m}$  处切片图像中反映了低阻异常 1 与高阻异常 2 的存在, 图 5 (b) 中提取异常体 1 对应区域, 得到的电阻率值大致在  $50 \Omega\cdot m$  以下, 提取异常体 2 对应区域, 得到的异常体电阻率值大致在  $750 \Omega\cdot m$  以上。由此可以看出, 反演结果中

异常体在空间位置、异常尺寸、电阻率值等方面与原始模型较为接近, 并且图像中无明显的多余构造和假异常。

### (5) 不完全异常体信息的参考模型约束反演

在算例一中假定只得到了高阻异常体信息, 没有得到低阻体的信息, 以此构建参考模型: 背景电阻率为  $500 \Omega\cdot\text{m}$ ; 高阻异常体电阻率值为  $800 \Omega\cdot\text{m}$ , 分布范围为  $x=6\sim10 \text{ m}$ ,  $y=8\sim12 \text{ m}$ ,  $z=6\sim10 \text{ m}$ 。以只携带有高阻异常体信息的参考模型作为约束条件进行三维电阻率反演, 迭代计算 5 次, 得到反演计算结果见图 6。

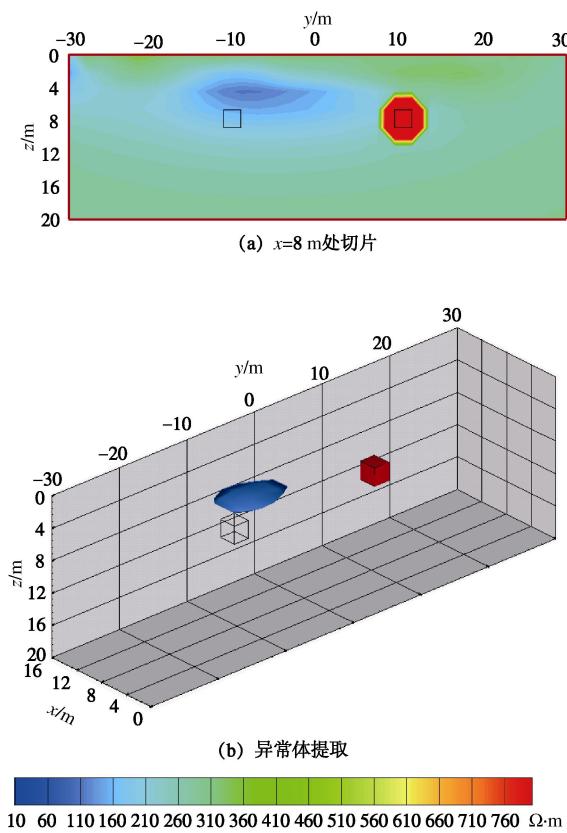


图 6 不完全异常信息的参考模型约束反演结果(算例 1)

Fig. 6 Inversion results of reference model with incomplete information (example 1)

图 6 (a) 为反演结果  $x=8 \text{ m}$  处切片, 图像中反映出了高阻体的存在, 且高阻异常体位置规模与原型中相近, 电阻率值高于  $760 \Omega\cdot\text{m}$ ; 图像中同时出现了电阻率低值区域, 其空间位置与原型中低阻异常体位置接近, 电阻率值大致低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$ 。图 6 (b) 中提取了电阻率值高于  $760 \Omega\cdot\text{m}$  异常区域, 其位置、规模、形态等与原型中高阻异常体较为接近, 同时提取了电阻率值低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  的低阻异常区域, 其空间位置与原型中低阻异常体相近。可见在算例一中, 以不完全异常体信息构建参考模型作为约束条件的反演比基于

完全异常信息的参考模型约束反演效果差, 但明显优于常规光滑约束反演。

在算例一中, 地质钻探得到了测区电阻率值分布信息, 地质雷达法获得了异常界面, 参考模型约束反演对异常体位置、规模、电阻率值等的反映与原型较为接近, 反演效果较好。不完全异常信息构建参考模型的约束反演结果同样优于常规光滑约束反演, 可起到改善反演结果的作用。

## 2.2 算例二

### (1) 原始地电模型

建立地电模型见图 7, 模型背景电阻率为  $500 \Omega\cdot\text{m}$ , 低阻异常体电阻率为  $10 \Omega\cdot\text{m}$ 。分别进行三维电阻率法、地质钻探法、地质雷达法的模拟探测, 三维电阻率探测装置型式、地质钻探施做、地质雷达探测与测线布置等与 2.1 节相同。

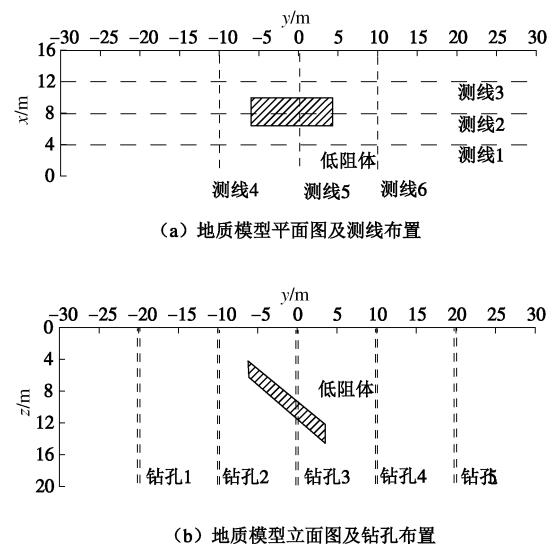
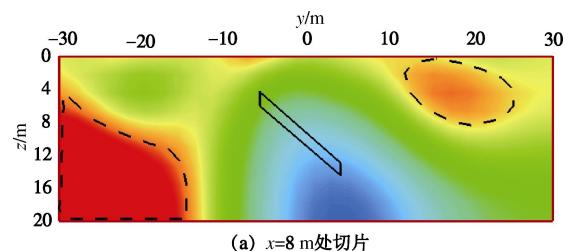


图 7 地质模型示意图(算例 2)

Fig. 7 Sketch of geological model (example 2)

### (2) 常规光滑约束反演结果

利用合成观测数据, 进行常规光滑约束反演计算, 得到计算结果见图 8。图 8 (a)  $x=8 \text{ m}$  的切片中, 出现了低阻区域, 电阻率值大致在  $100\sim200 \Omega\cdot\text{m}$  范围, 图像中还存在电阻率值高于  $500 \Omega\cdot\text{m}$  的高阻区域, 对正确解译造成干扰。图 8 (b) 对电阻率值低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  区域进行三维提取, 可以看出低阻区域与原始地电模型中低阻异常体有较大差异。算例二中常规光滑约束三维电阻率反演的结果解译困难, 易造成误判或漏判。



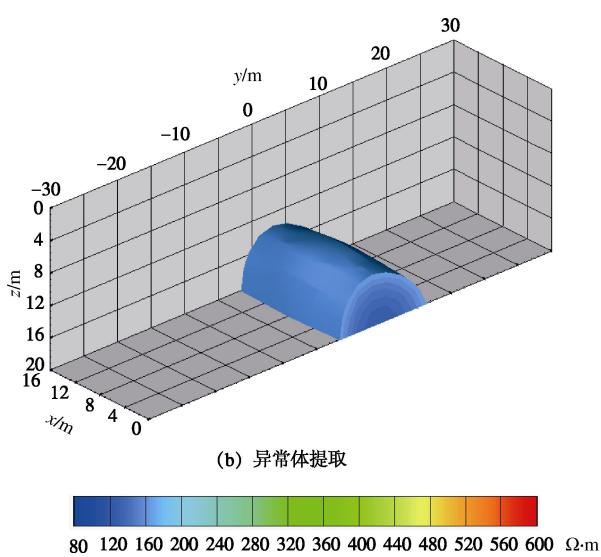


图 8 常规光滑约束反演结果(算例 2)

Fig. 8 Inversion results with conventional smooth constraints  
(example 2)

### (3) 参考模型构建

通过地质钻孔取芯测量可以得到介质电阻率信息, 钻孔 3 在深度 9~11 m 共 2 m 的范围内, 电阻率值为  $10 \Omega\cdot\text{m}$ , 其它段落电阻率值为  $500 \Omega\cdot\text{m}$ , 钻孔 1, 2, 4, 5 得到电阻率值均为  $500 \Omega\cdot\text{m}$ , 见图 9。图 10 为地质雷达法测线 2、测线 5 的模拟探测结果, 可以看出  $x=6\sim10 \text{ m}$ ,  $y=-6\sim4 \text{ m}$ ,  $z=4\sim14 \text{ m}$  范围内, 存在 1 个倾斜的异常体。因此构建参考模型在上述区域内存在 1 个倾斜的低阻体, 电阻率值为  $10 \Omega\cdot\text{m}$ , 测区内背景电阻率值为  $500 \Omega\cdot\text{m}$ 。

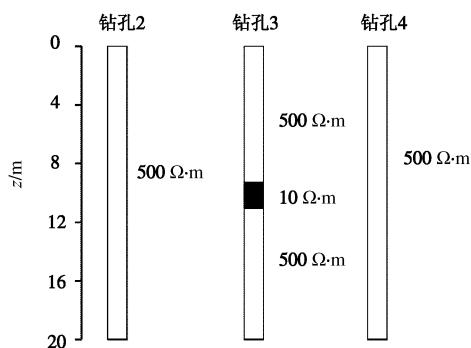


图 9 钻孔揭露电阻率信息(算例 2)

Fig. 9 Resistivity information revealed by drilling (example 2)

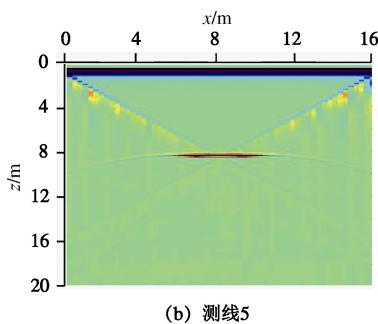
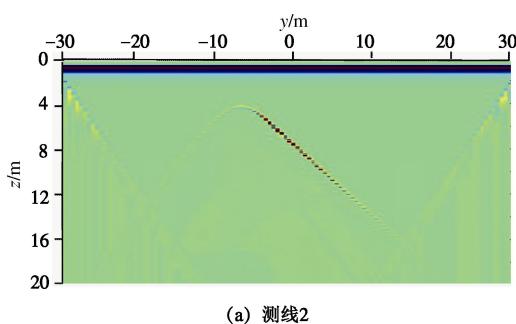


图 10 地质雷达法结果(算例 2)

Fig. 10 Results of GPR (example 2)

### (4) 基于参考模型的约束反演结果

利用已经确定的参考模型, 进行三维电阻率约束反演, 迭代计算 5 次, 得到反演结果见图 11。图 11(a) 为反演结果在  $x=8 \text{ m}$  处切片, 图像中存在倾斜的低阻区域, 电阻率值大致低于  $100 \Omega\cdot\text{m}$ , 与原始地电模型中低阻体相近。图 11(b) 对电阻率值低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  区域进行三维提取, 得到倾斜的三维低阻异常体, 与地质原型中设定的低阻体在空间位置、形态规模等方面较为接近。

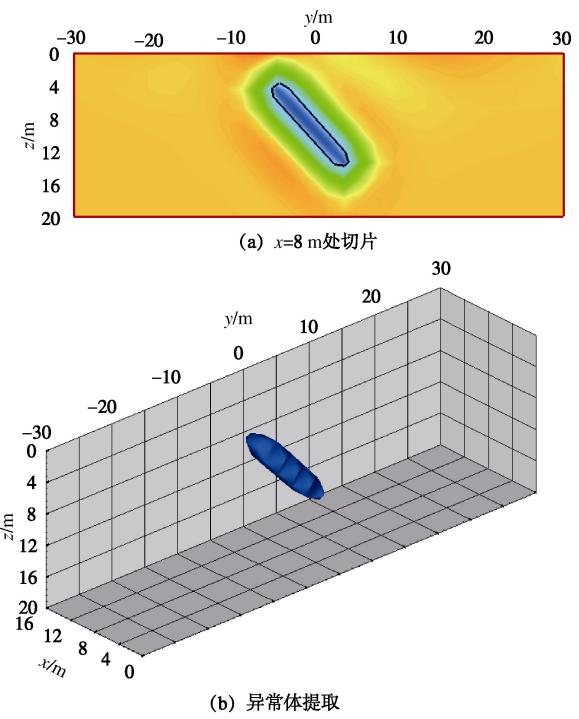


图 11 参考模型约束反演结果(算例 2)

Fig. 11 Inversion results with reference model constraints  
(example 2)

### (5) 不完全异常体信息的参考模型约束反演

在算例二中假定只得到了异常体上边界信息, 没有得到异常体下边界信息和异常体电阻率信息。异常体上边界在  $x=6\sim10 \text{ m}$ ,  $y=-6\sim4 \text{ m}$ ,  $z=4\sim14 \text{ m}$  范围内向右下方倾斜, 常规光滑约束反演结果中出现了电

阻率值在  $100\sim200 \Omega\cdot m$  范围的低阻区域, 构建参考模型时异常体电阻率值可据此设定为  $200 \Omega\cdot m$ 。因此构建参考模型如下: 背景电阻率值为  $500 \Omega\cdot m$ ; 在  $x=6\sim10 m$ ,  $y=-6\sim4 m$ ,  $z=4\sim14 m$  范围内, 存在 1 个向右下方倾斜的低阻异常体, 异常体深度方向厚度设定为 4 m, 电阻率值设定为  $200 \Omega\cdot m$ 。此时的参考模型中携带有异常体上边界信息, 推断得到的异常体下边界信息与异常电阻率值信息, 进行参考模型约束反演计算, 迭代计算 5 次, 得到反演计算结果见图 12。

图 12 (a)  $x=8 m$  处切片图像中出现了低阻区域, 电阻率值大致低于  $250 \Omega\cdot m$ , 低阻区域与原型中低阻异常体位置较为接近。图 12 (b) 提取了电阻率值低于  $250 \Omega\cdot m$  的区域, 得到的异常区域在位置、规模、形态方面与原型中低阻异常体较为接近。可见在算例二中, 仅得到异常体上边界信息时构建参考模型进行约束反演比基于完全异常信息的参考模型约束反演效果差, 但优于常规光滑约束反演结果。

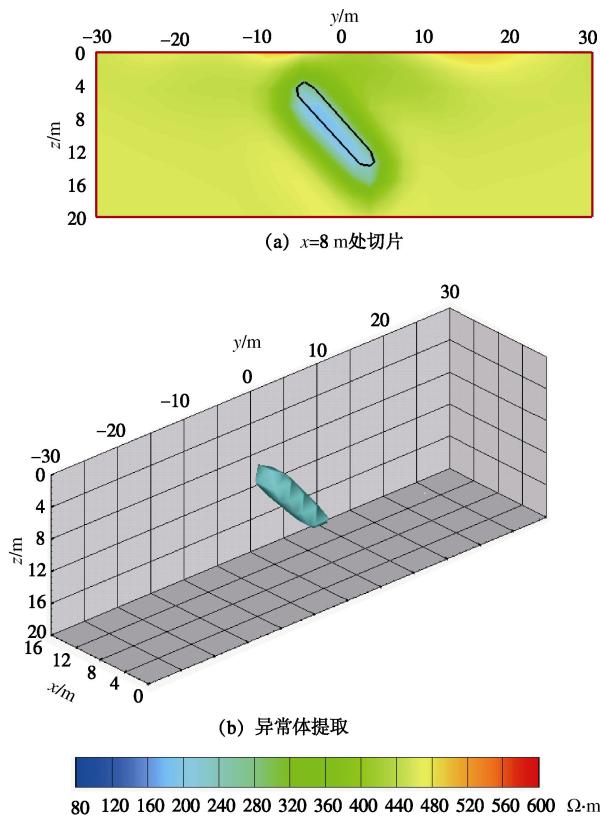


图 12 不完全异常信息的参考模型约束反演结果(算例 2)

Fig. 12 Inversion results of reference model with incomplete information (example 2)

算例二中基于参考模型的约束反演结果对地质异常体的反映较为准确, 仅有异常体上边界信息的参考模型约束反演结果同样优于常规光滑约束, 可见参考模型约束改善了反演效果。

在数值算例中, 地质钻探获取了测区内电阻率值分布情况和异常体深度展布信息, 地质雷达法探得的

异常界面反映了异常体的空间展布, 综合两种探测手段得到的信息构建参考模型约束, 使三维电阻率反演可以有效的识别异常体, 同时具有压制反演多解性的作用。相对于凭借多种手段的探测结果进行对比解译, 基于参考模型的三维电阻率约束实现了多元地球物理探测的信息融合, 结果更准确直观。当参考模型中携带的异常体边界信息、异常电阻率值信息不完全时, 基于参考模型的约束反演结果仍可有效反映异常体, 反演效果较好。

### 3 工程应用

以某水电站地下厂房开挖中的探测结果为例, 验证基于参考模型的三维电阻率约束反演的有效性和实用性。在地下厂房开挖过程中, 需不断向底面下方开挖, 在进行到 EL816 m 位置时, 实施地质钻探法、地质雷达法、三维电阻率法探测, 以此查明底板下方地质情况。

#### 3.1 现场地质情况与探测布置

地下厂房围岩为灰色、深灰色厚层中厚层灰岩, 含不连续的千枚岩条带, 溶蚀裂隙发育可能性大。施做地质钻孔、地质雷达和三维电阻率探测, 见图 13, 其中  $x$  轴垂直于地下厂房轴线方向,  $y$  轴与地下厂房方向平行,  $z$  轴表示深度方向。地质钻孔 1 个, 在测区中心位置, 深度 30 m; 地质雷达法测线共 3 条, 平行于  $y$  轴, 天线中心频率为 100 MHz; 三维电阻率采用二级法, 供电电极 A 共 8 个, 测量电极 M 分为 2 条测线, 测线间距 10 m, 每条测线 9 个测量电极, 极距 1.6 m, B, N 在相对无穷远处。

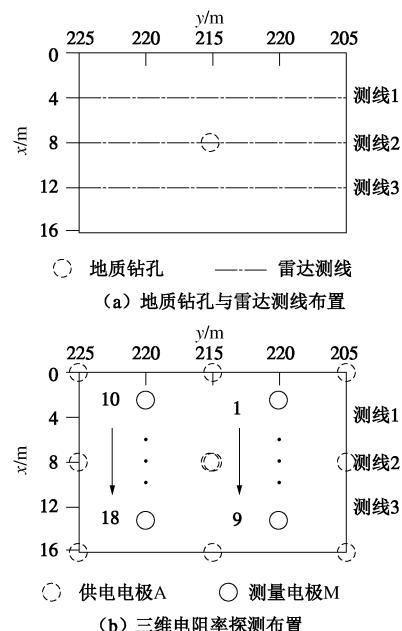


图 13 现场探测示意图

Fig. 13 Sketch of field detection

### 3.2 参考模型约束反演结果及地质解译

地质钻探结果揭露在钻探位置处, 底板以下 4~10 m 范围内岩体破碎且充填有黄泥, 得到破碎段落电阻率为  $150 \Omega\cdot\text{m}$ , 正常段落电阻率值为  $1000 \Omega\cdot\text{m}$ 。地质雷达探测结果中存在异常段落, 测线 1 中段落 223~218 m, 深度 4~10 m 范围内, 测线 2 中段落 216~213 m, 深度 4~10 m 范围内, 测线 3 中段落 208~205 m, 深度 4~10 m 范围内, 存在明显的强反射信号, 见图 14。根据上述已知的信息构建含有低阻异常体的参考模型。

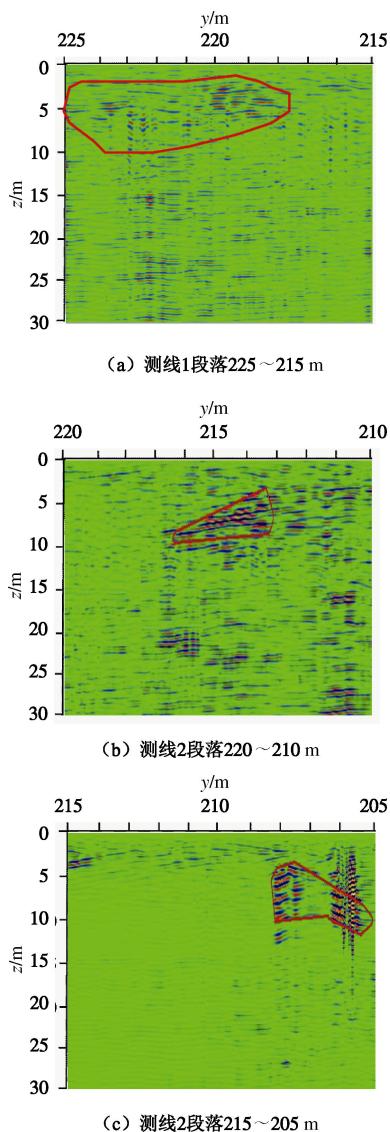


图 14 现场雷达探测结果

Fig. 14 Results of GPR in field

利用观测数据并施加含有已知先验信息的参考模型约束进行三维电阻率反演, 迭代计算 5 次, 得到反演结果, 见图 15。图 15 (a)  $z=8 \text{ m}$  处的切片图像中, 存在宽度约 4 m 的低阻条带, 电阻率值大致在  $150 \Omega\cdot\text{m}$  以下。图 15 (b) 对电阻率值低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  的区域进行三维提取, 可发现探测区域内存在 1 条电阻率

低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  的异常体条带, 与地下厂房轴线夹角大致为  $30^\circ$ , 深度大致在 4~10 m 范围内。

根据三维电阻率探测结果, 并结合现场地质情况, 给出探测地质解译与推断: 探测区域内存在 1 条明显的低阻异常带, 推断为富水的溶蚀裂隙, 该溶蚀裂隙宽度大致为 4 m, 深度在 4~10 m 范围内, 与地下厂房主轴线夹角大致为  $30^\circ$ , 向右侧边墙方向延展。溶蚀裂隙岩体破碎, 且裂隙富水。除此条异常体外, 测区内无其它明显异常, 推断无其它地质异常构造。

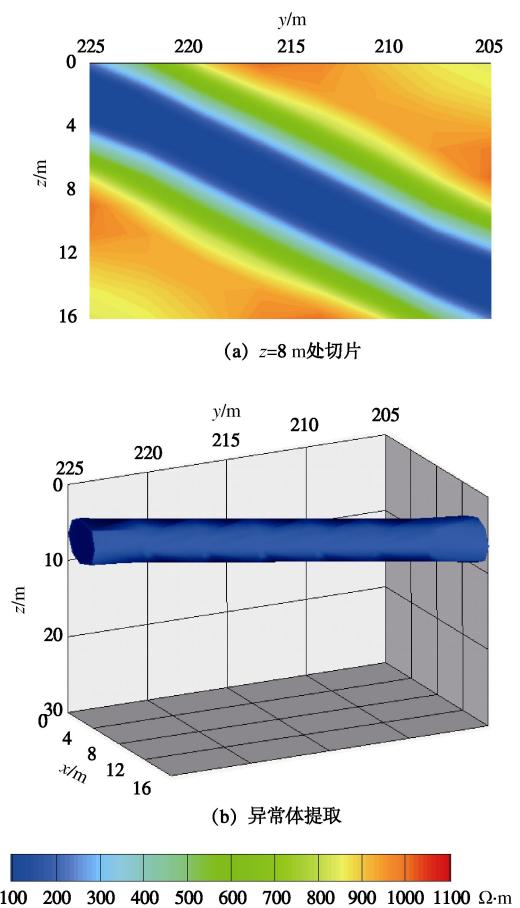


图 15 现场参考模型约束反演结果

Fig. 15 Inversion results with reference model constraints in field

### 3.3 常规光滑约束反演结果

利用常规光滑约束反演方法对三维电阻率探测数据进行反演处理, 计算迭代 5 次, 得到反演结果, 见图 16。图 16 (a)  $z=8 \text{ m}$  处的切片图像中, 出现了明显的电阻率低值区域, 但是低阻区域范围较大, 占满探测区域整个宽度方向, 同时图像上存在较明显高阻区域, 解译判断较为困难。图 16 (b) 对电阻率值低于  $150 \Omega\cdot\text{m}$  区域进行三维提取, 得到深度在 3~13 m 范围, 宽度在 4~12 m 范围, 厂房主轴线方向在 217~206 m 范围的低阻异常体, 异常体基本平行于厂房主轴线方向展布。

### 3.4 探测结果评价

对开挖揭露的地质情况进行了记录。在 EL812~EL806 范围内发育溶蚀裂隙, 产状  $180^\circ \angle 68^\circ$ , 与厂方主轴线夹角  $25^\circ$ , 宽度大致为  $3\sim4$  m, 同时裂隙导水并充填破碎岩体。可见参考模型约束反演方法得到的结果与实际地质情况较为一致, 这证明了基于参考模型的三维电阻率约束反演方法的实用性和有效性。

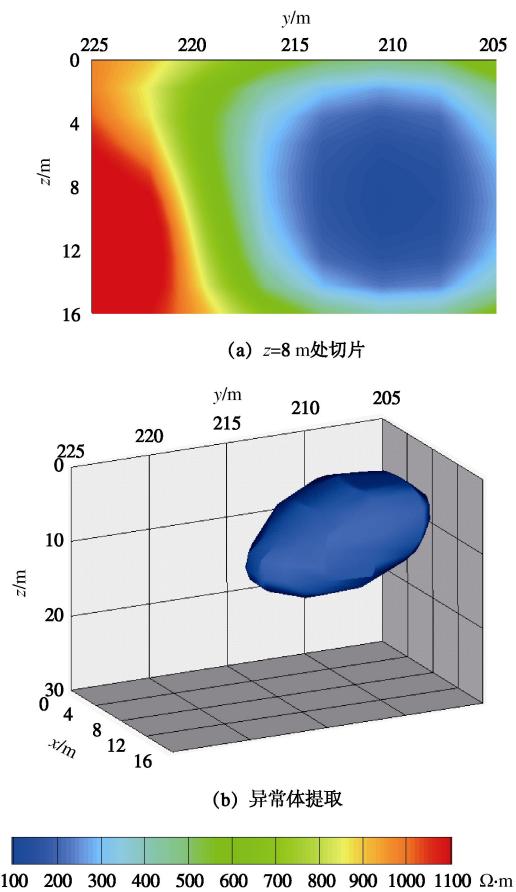


图 16 现场光滑约束反演结果

Fig. 16 Inversion results with smooth constraints in field

## 4 结论与讨论

(1) 本文利用地质钻探法获得介质电阻率值、地质雷达法获得异常体边界等先验信息, 通过构建参考模型约束, 将已知先验信息施加到三维电阻率反演方程, 形成了基于参考模型的三维电阻率约束反演方法, 实现了三维电阻率探测与其他多种地球物理探测信息的融合。

(2) 参考模型约束携带有三维电阻率探测之外的其它探测手段得到的已知先验信息, 可以引导三维电阻率反演向已知的确定性方向进行。数值算例中参考模型约束反演方法刻画出的异常体位置、规模、电阻率值等与原型较为接近, 工程现场探测结果与开挖揭露情况较为一致, 证明了该方法的可行性与有效性。

(3) 地质雷达等其它探测方法结果本身存在多解性, 以此构建参考模型作为约束条件可能会导致三维电阻率反演的不确定性。因此基于参考模型的三维电阻率约束反演方法是一种单向约束反演方法。接下来可以研究多种地球物理探测信息相互约束的反演方法, 以进一步融合探测信息, 得到更好的探测结果。

## 参考文献:

- [1] ZHANG J, MACKIE R L, MADDEN T R. 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients[J]. Geophysics, 1995, **60**(5): 1313~1325.
- [2] 阮百尧, 村上裕, 徐世浙. 电阻率/激发极化率数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术, 1999, **21**(2): 116~125. (RUAN Bai-yao, MURAKAMI Y, XU Shi-zhe. 2D inversion program of induced polarization data[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration 1999, **21**(2): 116~125. (in Chinese))
- [3] 吴小平, 徐果明. 利用共轭梯度法的电阻率三维反演研究[J]. 地球物理学报, 2000, **43**(3): 420~426. (WU Xiao-ping, XU Guo-ming. Study on 3D resistivity inversion using conjugate gradient method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, **43**(3): 420~426. (in Chinese))
- [4] 底青云, 王妙月. 积分法三维电阻率成像[J]. 地球物理学报, 2001, **44**(6): 843~851. (DI Qing-yun, WANG Miao-yue. 3D resistivity tomography by integral method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, **44**(6): 843~851. (in Chinese))
- [5] 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**(1): 439~444. (in Chinese))
- [6] PIDLISECKY A, HABER E, KNIGHT R. RESINVM3D: A 3D resistivity inversion package[J]. Geophysics, 2007, **72**(2): H1~H10.
- [7] SASAKI Y. 3-D resistivity inversion using the finite-element method[J]. Geophysics, 1994, **59**(12): 1839~1848.
- [8] 吴小平, 刘洋, 王威. 基于非结构网格的电阻率三维带地形反演[J]. 地球物理学报, 2015, **58**(8): 2706~2717. (WU Xiao-ping, LIU Yang, WANG Wei. 3D resistivity inversion incorporating topography based on unstructured meshes[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, **58**(8): 2706~2717. (in Chinese))

- [9] OLDENBURG D W, LI Y. Inversion of induced polarization data[J]. Geophysics, 1994, **59**(9): 1327 – 1341.
- [10] LI Y, Oldenburg D W. 3-D inversion of induced polarization data[J]. Geophysics, 2000, **65**(6): 1931 – 1945.
- [11] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 矿井突水灾变过程电阻率约束反演成像实时监测模拟研究[J]. 煤炭学报, 2012, **37**(10): 1722 – 1731. (LIU Bin, LI Shu-cai, NIE Li-chao, et al. Research on simulation of mine water inrush real-time monitoring of using electrical resistivity constrained inversion imaging method[J]. Journal of China Coal Society, 2012, **37**(10): 1722 – 1731. (in Chinese))
- [12] 刘斌, 李术才, 李树忱, 等. 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[J]. 地球物理学报, 2012, **55**(1): 260 – 268. (LIU Bin, LI Shu-cai, LI Shu-chen, et al. 3D electrical resistivity inversion with least-squares method based on inequality constraint and its computation efficiency optimization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, **55**(1): 260 – 268. (in Chinese))
- [13] SAUNDERS J H, HERWANGER J V, PAIN C C, et al. Constrained resistivity inversion using seismic data[J]. Geophysical Journal International, 2005, **160**(3): 785 – 796.
- [14] KAIPIO J P, KOLEHMAINEN V, VAUHKONEN M, et al. Inverse problems with structural prior information[J]. Inverse Problems, 1999, **15**(3): 713 – 729.
- [15] 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, 2015, **33**(6): 1090 – 1113. (LI Shu-cai, LIU Bin, SUN Huai-feng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **33**(6): 1090 – 1113. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 文武, 高玉文, 刘洪臣, 等. 黔西南贞丰背斜卡林型金矿的综合地球物理勘查—钻孔岩芯物性研究[J]. 黄金科学技术, 2013, **21**(2): 1 – 7. (WEN Wu, GAO Yu-wen, LIU Hong-chen, et al. The integrated geophysical exploration of Zhenfeng anticline carline - type gold deposit in southwest of Guizhou: a study of the drilling core physical property[J]. Gold Science and Technology, 2013, **21**(2): 1 – 7. (in Chinese))
- [18] LI Shu-cai, NIE Li-chao, LIU Bin, et al. 3D electrical resistivity inversion using prior spatial shape constraints[J]. Applied Geophysics, 2013, **10**(4): 361 – 372.

## 本期广告索引

- 封 2 南京嘉兆仪器设备有限公司  
 封 3 南瑞集团水利水电技术分公司  
 封 4 北京理正软件股份有限公司  
 后插 1 江苏三恒科技股份有限公司  
 后插 2 重庆地质仪器厂