

DOI: 10.11779/CJGE201704009

# 基于距离加权约束算法的围岩三维电阻率 CT 反演成像研究

刘征宇, 李术才, 刘斌\*, 范克睿, 聂利超, 张欣欣

(山东大学岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

**摘要:** 孔中电极附近成像效果差的问题是一直以来困扰三维电阻率 CT 精细探测的难题, 针对该问题, 提出了“距离加权”约束反演的思路, 通过构建“指型”衰减的距离加权因子分布模型, 对距孔中电源点不同远近的剖分单元赋予差异权重, 重点改善了孔中电源点附近区域反演敏感度较高而造成的成像形态畸变问题, 提高了三维电阻率 CT 反演成像方法对异常体三维定位和识别的精度及可靠性。通过数值反演试验和物理模型试验研究, 进一步检验了距离加权约束反演方法在改善孔中电极附近异常体成像形态方面的有益效果, 试验结果均比较准确地反映了异常体的空间位置、规模和形态。

**关键词:** 三维电阻率 CT; 反演成像; 距离加权约束

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)04-0652-10

作者简介: 刘征宇(1988-), 男, 山东昌乐人, 博士研究生, 主要从事隧道超前预报与勘探地球物理方面的研究。E-mail: liuzhy\_2011@163.com。

## 3D cross-hole resistivity inversion imaging of surrounding rock based on distance weighting constraint algorithm

LIU Zheng-yu, LI Shu-cai, LIU Bin, FAN Ke-rui, NIE Li-chao, ZHANG Xin-xin

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

**Abstract:** Aiming at improving the inversion quality of anomalies near the electrodes in boreholes, which has been a large issue interfering in the three-dimensional (3D) cross-hole electrical resistivity tomography (ERT), an inversion method based on the distance weighting constraint is proposed. Different weighting coefficients are assigned to different meshes in the model according to the distances away from the current points in the boreholes, and the computed exponential decay distribution model is established. Under this treatment, the image shape distortion problem of anomalies near the current points in the boreholes resulting from high inversion sensitivity is suppressed, and the resolution of 3D location and reliability of recognition of anomalies by the 3D cross-hole resistivity inversion method is improved. The effectiveness of the distance weighting constraint inversion is further tested and verified through numerical inversion examples and physical model tests. The distribution characteristics such as the spatial location, scale and shape of the anomalies are reflected accurately in the test results.

**Key words:** 3D cross-hole ERT; inversion imaging; distance weighting constraint

## 0 引言

三维电阻率勘探方法作为一种重要的浅地表地球物理探测方法, 在矿产、资源、岩土工程勘察等领域发挥着重要的作用。近年来, 随着工程中对成像精度和解译效果的要求愈来愈高, 三维电阻率勘探方法逐渐由地面拓展到钻孔中, 形成了基于孔-孔、孔-地观测模式的三维电阻率 CT 探测方法, 在精细化成像方面更具优势。在一些迫切需要高分辨率探测的工程实践中, 如城市地铁工程中花岗岩孤石群地层探测、中

小溶洞勘察、矿井导水通道探查等<sup>[1-5]</sup>, 三维电阻率 CT 方法发挥着重要作用。

三维电阻率 CT 方法在精细化探测方面具有明显

---

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)

收稿日期: 2016-01-08

\*通讯作者 (E-mail: liubin0635@163.com)

优势: ①探测电极安放在钻孔内, 深入围岩, 避开了各种电磁干扰; ②采用孔-孔、孔-地“透视对穿”的观测方式, 采集的数据量更多, 获得的介质地电信息更丰富; ③探测电极分布真正实现立体化观测, 能够获取更全面的地质异常三维空间分布信息。正是基于精细化探测成像的优势, 人们对三维电阻率 CT 探测方法进行了诸多研究与改进, 在观测模式<sup>[6-8]</sup>、正反演理论与方法<sup>[9-13]</sup>、成像效果改善<sup>[14-16]</sup>、试验与工程应用<sup>[17-20]</sup>等方面取得了一系列进展与突破。

然而, 利用三维电阻率跨孔 CT 开展地质勘查的过程中发现, 对于靠近某一钻孔的地质异常体, 其反演成像结果中对应的形态往往会发生较大的畸变, 同时会影响邻近区域的成像质量, 出现“多余构造”或假异常, 影响或误导地质解释和推断工作。该问题长期困扰三维电阻率跨孔 CT 探测, 目前除了依靠经验进行识别和校正之外, 没有更有效的方法。影响钻孔附近成像质量的原因主要为: ① 电阻率反演的本质是依据电位进行反演, 而位函数在电源点所在节点上是奇异的, 有限单元法在求解变分问题时, 不能完全拟合电源点附近总电位的变化情况, 在电源点附近节点的计算误差必然存在<sup>[21]</sup>; ② 全空间条件下, 电位与空间节点至电源点距离的一次方成反比, 使得反演过程对近电源点处的剖分单元的响应敏感程度更高, 受计算误差的影响, 电源点附近的异常体在反演成像结果中对应的形态容易产生较大偏差; ③ 针对三维电阻率 CT 孔中电阻率层析成像的特殊观测模式, 探测时电源点在孔中电极间跳转, 地层中异常体赋存位置过于接近钻孔引起电源点附近电阻率起伏较大, 导致反演成像结果不稳定。因此, 为保证三维电阻率 CT 勘探的效果, 垂待提出一种能够改善探测电极附近成像效果的方法, 提高对近电源点地质异常的识别和定位精度。

为解决以上问题, 本文从四平行钻孔“孔-孔”透视立体观测模式出发, 提出了基于“距离加权”约束算法的三维电阻率 CT 反演成像方法, 通过在反演方程中添加距离加权函数, 对距电源点不同远近的剖分单元赋予差异权重, 使得反演迭代过程中能够压制电源点附近节点计算误差的影响、约束近电源点剖分单元电阻率差异, 从而改善和优化三维电阻率 CT 探测电极附近地质异常体成像形态畸变的问题; 在此基础上, 开展了数值试验研究, 对钻孔附近的小尺寸高阻异常、低阻异常进行反演成像模拟, 检验了距离加权约束对改善探测电极附近异常体成像的有益效果; 最后, 通过物理模型试验对改进后的三维电阻率 CT 反演方法作了进一步验证。

## 1 三维电阻率 CT “距离加权”约束反演成像方法

三维电阻率跨孔 CT 探测典型的观测模式如图 1 所示, 4 个平行钻孔形成“孔-孔”透视对穿的观测模式, P1、P2、P3、P4 表示 4 个垂直地层打入的钻孔, 每个钻孔中均布置有一条测线, 每条测线上  $n$  个电极, 电极编号从<sup>#1</sup> 到<sup>#4n</sup>, 通过控制供电电极和测量电极阵列, 既可实现单孔数据采集, 也可实现跨孔数据采集。

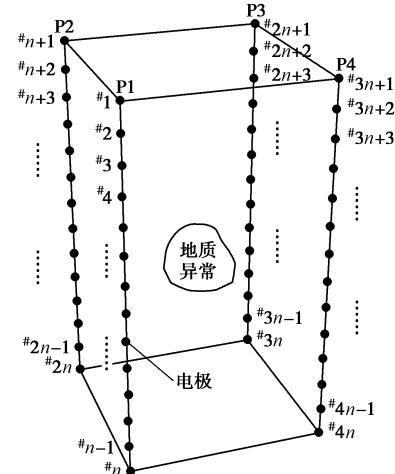


图 1 三维电阻率跨孔 CT 探测电极布置示意图

Fig. 1 Distribution of electrodes of 3D cross-hole ERT

由于三维电阻率 CT 反演的本质是电位反演, 全空间条件下电场电位与距离的关系为<sup>[22]</sup>

$$U = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} \quad , \quad (1)$$

式中,  $\rho$  表示介质电阻率,  $I$  为电流强度,  $R$  表示空间介质中某一点至电源点的距离,  $U$  则为该点的电位值。该表达式反映出点电源供电条件下全空间电位计算的两个特点: ① 电位随距离的增大而衰减, 表现为对远处分布的异常体敏感程度低, 分辨率下降; ② 另一方面, 位函数在电源点处是奇异的, 异常体分布过于接近电源点时, 附近节点的电位计算将存在较大误差。

对于三维电阻率跨孔 CT 层析成像的特殊观测模式, 由于探测和反演空间被约束在 4 个钻孔之间, 限定了剖分单元至孔中电源点的距离, 且钻孔测线之间相互对穿加密采样, 在很大程度上抵消了电位的衰减效应, 使得对孔间地质异常的识别和定位精度大大提高。然而另一方面, 由于探测电极安放于钻孔内, 大大增加了与地层中各种地质异常目标近距离接触的几率, 探测时电源点在孔中电极间变换跳转, 过高的敏感度导致近电源点异常体的成像畸变问题仍然比较突出。为此, 本文在三维电阻率 CT 反演方程中引入距

离加权约束项, 依据剖分单元至电源点距离的远近施加不同的权重系数, 重点调整孔中电源点附近区域的反演敏感度以改善其成像效果。

### 1.1 孔中点源条件下的距离加权函数表达式

利用有限单元法求解三维电阻率CT反演方程时, 常采用八节点六面体单元进行建模, 建立如图2所示直角坐标系, 假定三维模型中共有  $M$  个剖分单元, 第  $i$  个剖分单元中心点  $(x_i, y_i, z_i)$  至电源点  $A(x_A, y_A, z_A)$  的距离为  $d_{iA}$ , 那么有

$$d_{iA} = \sqrt{(x_i - x_A)^2 + (y_i - y_A)^2 + (z_i - z_A)^2} \quad (2)$$

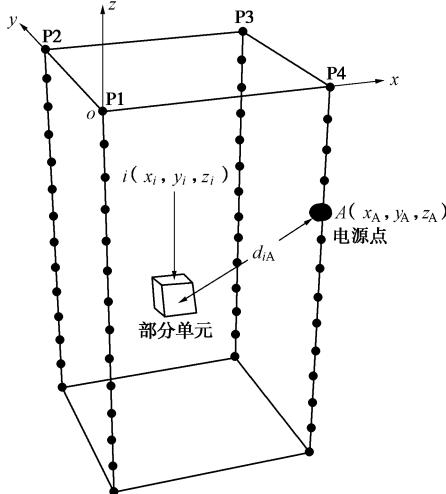


图 2 三维模型中第  $i$  个剖分单元与电源点  $A$  距离关系

Fig. 2 Relation of distance between current point and an arbitrary mesh in 3D model

此处, 本文引入“距离加权”约束<sup>[23-24]</sup>的思想, 依据模型剖分单元与电源点距离的远近对其赋予不同的权重, 调整反演区域不同空间位置剖分单元的反演敏感度, 对反演的网格电阻率进行加权。为改善电源点附近的成像效果, 距离加权函数的构建应使得近电源点的反演敏感度得到较大压制, 而对远电源点的反演敏感度产生较小影响, 换言之, 即剖分单元距电源点越近, 所赋予的权重系数应越大。据此, 本文给出了如下形式的距离加权因子表达式:

$$w_{iA} = \frac{\delta_{iA}}{\sqrt{d_{iA}^2 + \delta_{iA}^2}} \quad (i=1, \dots, M) \quad (3)$$

式中,  $\delta_{iA}$  表示一个很小的正数。 $d_{iA}$  远大于  $\delta_{iA}$  时, 距离加权因子  $w_{iA} \approx 0$ ;  $d_{iA}$  远小于  $\delta_{iA}$  时, 距离加权因子  $w_{iA} \approx 1$ 。值得注意的是, 式(3)中  $w_{iA}$  的计算结果受  $\delta_{iA}$  取值的影响较大, 若大部分  $d_{iA}$  的值远小于  $\delta_{iA}$ , 那么模型中剖分单元的加权因子  $w_{iA}$  的取值将均接近于 1, 距离加权函数将失去应有的效果。因此, 为克服这一问题、使不同空间位置的剖分单元获得较为合理的加权因子, 须对  $\delta_{iA}$  的取值进一步优化。本文中, 针对孔中某一特定位置的电源点  $A$ ,  $\delta_{iA}$  的计算公式如下:

$$\delta_{iA} = \frac{1}{d_{iA,\max} - d_{iA,\min}} (d_{iA,\max} - d_{iA}) \quad (i=1, \dots, M), \quad (4)$$

式中,  $d_{iA,\max} = \max \{d_{iA}\}$ ,  $d_{iA,\min} = \min \{d_{iA}\}$ ,  $i=1, \dots, M$ , 分别表示反演模型中所有剖分单元至电源点  $A$  的最大距离和最小距离。如式(4), 当剖分单元距电源点较近(即  $d_{iA}$  较小)时, 将得到一个相对较大的  $\delta_{iA}$ , 相应的距离加权因子  $w_{iA}$  的值也较大; 当剖分单元距电源点较远(即  $d_{iA}$  较大)时, 得到一个相对较小的  $\delta_{iA}$ , 那么相应的距离加权因子  $w_{iA}$  的值也将减小。

联立式(2)~(4), 就得到一个随距离远近动态变化的距离加权因子计算式, 对于近电源点的剖分单元将被赋予一个相对较大的权重, 而远离电源点的剖分单元获得较小的权重。

三维电阻率CT方法在采集数据时, 电源点  $A$  在孔中电极间变换跳转, 对于某种特定的观测模式, 假定一次探测过程中电源点  $A$  完成  $K$  次不同位置的跳转, 那么, 模型中第  $i$  个剖分单元最终被赋予的综合加权因子  $w_i$  应为  $K$  个电源点对其权重的加权和, 用  $j=1, \dots, K$  表示电源点跳转的  $K$  个不同位置, 加权表达式如下:

$$w_i = \sum_{j=1}^K \left( \frac{1}{d_{ij}} \cdot w_{ij} \right) \quad (i=1, \dots, M) \quad (5)$$

式中, 取剖分单元至电源点距离的倒数作为加权系数, 一方面是为在宏观上稳定和调节综合距离加权因子的值域范围, 另一方面是为保证整个探测反演空间范围内近电源点的剖分单元能够获得相对较大的权重, 从而对其反演敏感度进行有效压制。

### 1.2 携带距离加权约束的三维电阻率 CT 反演方程

常规的三维电阻率探测反演的目标函数<sup>[25-27]</sup>为  $\Phi = (\Delta\mathbf{d} - \mathbf{A}\Delta\mathbf{m})^T (\Delta\mathbf{d} - \mathbf{A}\Delta\mathbf{m}) + \lambda(\mathbf{C}\Delta\mathbf{m})^T (\mathbf{C}\Delta\mathbf{m})$ , (6) 式中,  $\Delta\mathbf{d}$  表示实测数据与正演理论数据的差向量,  $\Delta\mathbf{m}$  表示模型参数增量向量,  $\mathbf{A}$  表示敏感度矩阵,  $\mathbf{C}$  表示光滑度矩阵; 前一项为数据方差项, 用于控制实测数据与理论数据的差异最小拟合; 后一项为模型方差项, 用于控制模型相邻剖分单元电阻率差异最小拟合;  $\lambda$  为拉格朗日常数, 用于控制数据方差项和模型方差项之间的权重。

设模型中剖分单元数量为  $M$ , 将距离加权函数写成矩阵形式, 即

$$\mathbf{W} = \mathbf{w} \cdot \mathbf{I} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & w_3 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & w_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

将距离加权函数施加到反演目标函数(6)中, 将

得到如下形式的携带距离加权约束的三维电阻率CT反演目标函数:

$$\Phi = (\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m})^T (\Delta \mathbf{d} - \mathbf{A} \Delta \mathbf{m}) + \lambda (\mathbf{W} \mathbf{C} \Delta \mathbf{m})^T (\mathbf{W} \mathbf{C} \Delta \mathbf{m}) \quad (8)$$

对目标函数公式(8)求极小值, 可得到对应的携带距离加权约束的反演方程如下:

$$[\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda (\mathbf{W} \mathbf{C})^T (\mathbf{W} \mathbf{C})] \Delta \mathbf{m} = \mathbf{A}^T \Delta \mathbf{d} \quad (9)$$

从理论上讲, 施加了距离加权约束后, 将有效改善反演方程对孔中电源点附近区域敏感度较高而造成的成像不稳定问题, 随着反演迭代次数的增加, 电源点附近区域的电阻率起伏和突变情况将受到持续压制, 异常体形态畸变的问题将相应的得到削弱, 进而提高对钻孔附近地质异常体的三维定位和识别精度。

### 1.3 距离加权因子分布曲线特征

为了清晰、直观的揭示三维电阻率CT有限元模型不同空间位置剖分单元所获得的加权因子的大小及分布规律, 针对孔中单点源、多点源的情况绘制出模型各剖分单元的加权因子分布曲线, 其中加权因子的大小表征了该位置剖分单元在反演过程中敏感度受到压制的程度。

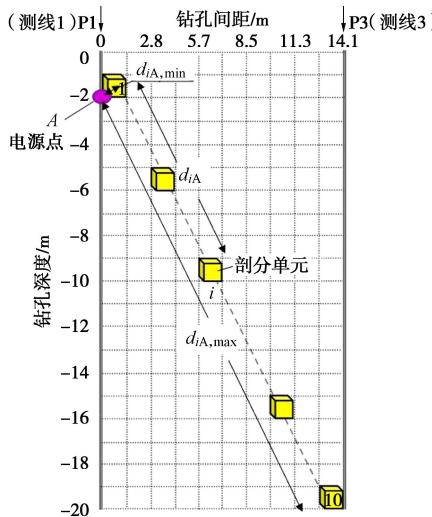


图3 P1-P3断面剖分单元与电源点A距离关系

Fig. 3 Relation of distances between current point  $A$  and meshes in P1-P3 profile

#### (1) 单点源条件距离加权因子的分布特征

在图2所示坐标系下, 以求解P1-P3断面剖分单元的距离加权因子为例, 如图3所示, 假定电源点  $A$  位于钻孔P1中, 空间坐标为  $(0, 0, -2)$ , 钻孔深度(也即测线长度)为20 m, 两对角钻孔水平间距约为14 m。距电源点  $A$  由近及远间隔选择10个不同位置的剖分单元, 各单元中心点坐标  $(x_i, y_i, z_i)$  如表1所示(其中, 编号为1的剖分单元距离  $A$  最近, 编号为10的剖分单元距离  $A$  最远)。根据式(2)~(4), 对各剖分单元的

加权因子  $w_{iA}$  的计算过程如表1所示, 最终得到单点源条件下模型距离加权因子分布曲线如图4所示。

表1 各剖分单元加权因子的求解过程

Table 1 Calculation of distance weighting factors of meshes

| 编号 | $(x_A, y_A, z_A)$ | $(x_i, y_i, z_i)$ | $\frac{d_{iA, \max}}{d_{iA, \min}}$ | $d_{iA}$ | $\delta_{iA}$ | $w_{iA}$ |
|----|-------------------|-------------------|-------------------------------------|----------|---------------|----------|
| 1  | $(0, 0, -2)$      | $(1, 1, -2)$      | 21.48                               | 1.414    | 1.000         | 0.577    |
| 2  | $(0, 0, -2)$      | $(2, 2, -4)$      | 21.48                               | 3.464    | 0.905         | 0.253    |
| 3  | $(0, 0, -2)$      | $(3, 3, -6)$      | 21.48                               | 5.831    | 0.794         | 0.135    |
| 4  | $(0, 0, -2)$      | $(4, 4, -8)$      | 21.48                               | 8.246    | 0.682         | 0.082    |
| 5  | $(0, 0, -2)$      | $(5, 5, -10)$     | 21.48                               | 10.678   | 0.569         | 0.053    |
| 6  | $(0, 0, -2)$      | $(6, 6, -12)$     | 21.48                               | 13.115   | 0.455         | 0.035    |
| 7  | $(0, 0, -2)$      | $(7, 7, -14)$     | 21.48                               | 15.556   | 0.342         | 0.022    |
| 8  | $(0, 0, -2)$      | $(8, 8, -16)$     | 21.48                               | 18.000   | 0.228         | 0.013    |
| 9  | $(0, 0, -2)$      | $(9, 9, -18)$     | 21.48                               | 20.445   | 0.114         | 0.006    |
| 10 | $(0, 0, -2)$      | $(10, 10, -20)$   | 21.48                               | 22.891   | 0             | 0        |

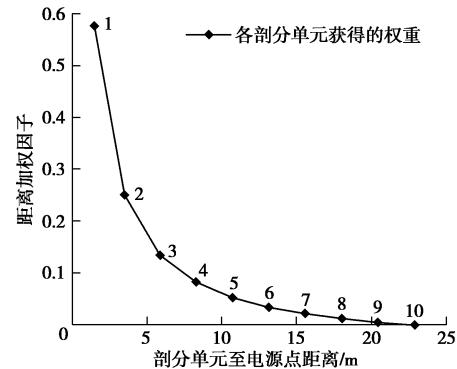


图4 单点源条件距离加权因子分布曲线

Fig. 4 Distribution curve of distance weighting factors under a single current point  $A$

可以看到, 距离加权因子的大小随剖分单元远离电源点而呈现“指数型”衰减, 距电源点近处的剖分单元被赋予了相对较大的权重(如编号为1的剖分单元的权重为0.577), 表示该剖分单元在反演过程中敏感度将受到较大压制; 而远离电源点的剖分单元被赋予的权重较小(如编号4~10的剖分单元权重均小于0.1), 表示此类剖分单元在反演过程中的敏感度将基本不会受到距离加权因子的影响而降低。

#### (2) 多点源条件距离加权函数对剖分单元的综合影响

如图5所示, 仍以求解P1-P3断面剖分单元的距离加权因子为例, 三维电阻率CT方法在探测及反演时, 电源点  $A$  在孔中电极间多次变换跳转, 此时剖分单元被赋予的综合权重应为多个电源点对其权重的加权求和。假定探测时电源点  $A$  在P1、P3测线上的所有电极上均供电一次, 则根据式(2)~(5), 可求得多点源条件下各剖分单元的综合距离加权因子分布曲线如图

6所示(根据对称性,选取深度方向 $z=-2, -4, -6, -8, -10$ 位置剖分单元的加权因子进行计算,具体的求解过程不再赘述)。

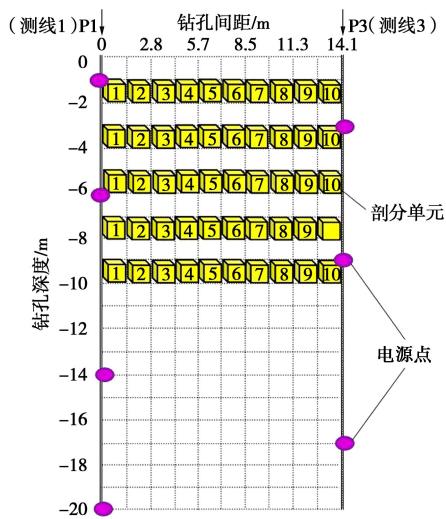


图 5 多点源供电 P1-P3 断面剖分模型

Fig. 5 Subdivision model of P1-P3 profile under multiple current points

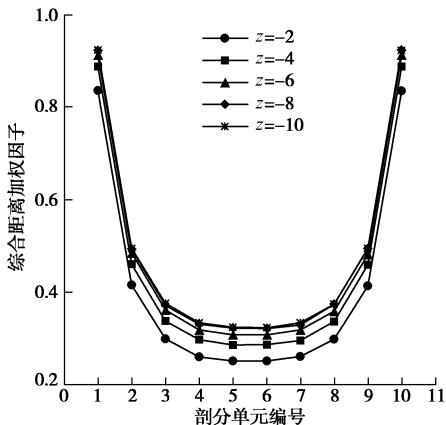


图 6 多点源条件综合距离加权因子分布曲线

Fig. 6 Distribution curves of synthesized distance weighting factors under multiple current points

如图5所示,编号为1的剖分单元靠近钻孔P1,编号为10的剖分单元靠近钻孔P3,而编号为5,6的剖分单元则位于两钻孔中间,距两钻孔均较远。从图6得到的计算结果可以看到,电源点附近的加权因子值较大(各层深位置靠近钻孔的1号、10号剖分单元被赋予的权重值在0.8~1.0之间),且曲线斜率变化也较大,表明电源点附近加权因子不仅灵敏度较高,对畸变异常的压制作用也较强,由于电场畸变效应主要发生在孔中电源点附近,因此较高的灵敏度和较强的压制作用能够起到比较明显的改善效果;随着远离电源点,加权因子值迅速减小(位于两钻孔中间的3~8号剖分单

元被赋予的权重均小于0.4),且曲线斜率变化趋于平缓,表明这些位置加权因子灵敏度明显降低,且压制作用变弱,这样处理是为了尽可能的减小对远离电源点的网格电阻率变化的影响。如此一来,在反演方程求解时,随着迭代次数的增加,钻孔附近剖分单元电阻率变化的敏感度将得到重点压制,这将有效改善反演成像中近钻孔异常体形态的畸变问题。

除此以外,根据本文所提出的距离加权函数表达式计算得到的综合加权因子值域范围为0~1.0,限定在此范围内,一方面可以避免靠近钻孔的剖分单元因过度加权(加权因子值过大)而造成异常体形态的另类畸变,另一方面对于保证反演方程求解的稳定性也是有利的。

## 2 数值反演算例

为检验施加距离加权约束后的反演方程对钻孔附近异常体反演成像的改善效果,选择孤石(高阻异常)、溶洞(低阻异常)两种地质异常类型进行概化和简化,构建原始地电模型,进而开展反演成像数值模拟试验研究,比较距离加权约束施加前、施加后反演成像异常体形态的差异。

孤石在地层中基本上以球状、近似球状或块状的形式赋存,可概化为高阻球体;对于溶洞,特别是近球形或椭球形溶洞,可概化为低阻球体。由于本文采用三维有限元八节点六面体进行建模,因此将二者在模型中进一步简化为正方体。

### 2.1 小尺寸高阻异常体反演成像数值试验

建立如图7所示原始地电模型,图中有两处高阻异常(分别编号为①、②),均为边长2.0 m的立方体,电阻率值均为2000  $\Omega\cdot\text{m}$ ,围岩电阻率值为100  $\Omega\cdot\text{m}$ ,高阻异常①靠近钻孔P2,高阻异常②靠近钻孔P4,异常体边界距离两钻孔均约1.5 m,底部边界埋深分别为15, 10 m。假定4个钻孔孔深均为20 m,孔间距10 m,孔中各布置20个电极,电极间距1 m。分别采用简单光滑约束(未施加距离加权约束)和施加距离加权约束后的三维电阻率CT反演方程进行计算,采用组合式观测模式<sup>[28]</sup>获取数据,反演迭代次数均为8次,对异常体的反演成像提取结果分别如图8,9所示。

从反演成像效果看,受孔中电源点附近反演敏感度较高的影响,简单光滑约束反演结果中高阻异常体呈环绕状向钻孔两侧边界延伸,近钻孔处电阻率值起伏较大,状似“牛角”,形态较原始地电模型有明显变形;而施加距离加权约束后的反演成像结果中,异常体形态的畸变问题得到明显的压制和改善,对异常体

边界的识别效果有了较大提高, 成像质量较高, 两处高阻异常体的形态与原始地电模型更为吻合。本数值算例表明距离加权约束对于削弱钻孔附近电场畸变影响、解决反演敏感度较高的问题具有较好的效果。

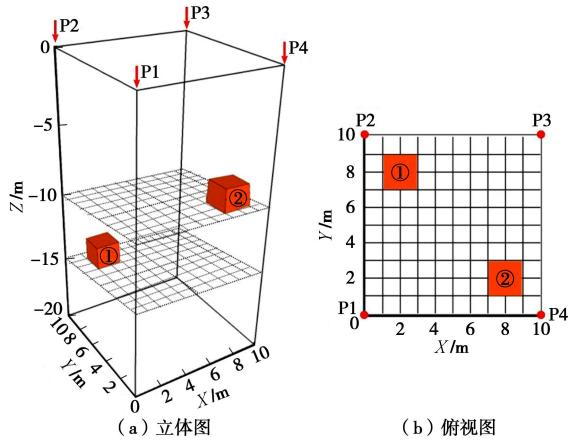


图 7 两处高阻异常在原始地电模型中赋存位置示意图

Fig. 7 Location of anomalies with high resistivity in original geoelectrical model

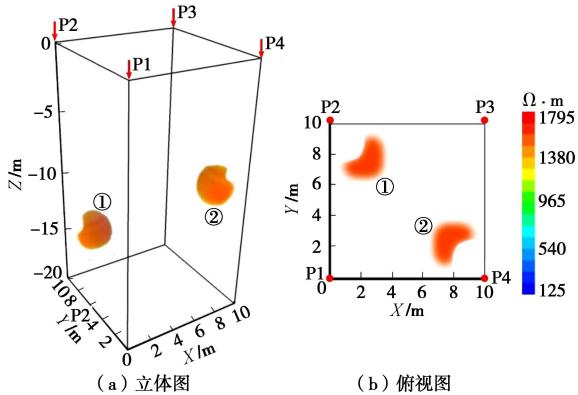


图 8 异常体反演成像提取结果 (简单光滑约束)

Fig. 8 Extraction images of anomalies resulting from simple smooth constraint inversion

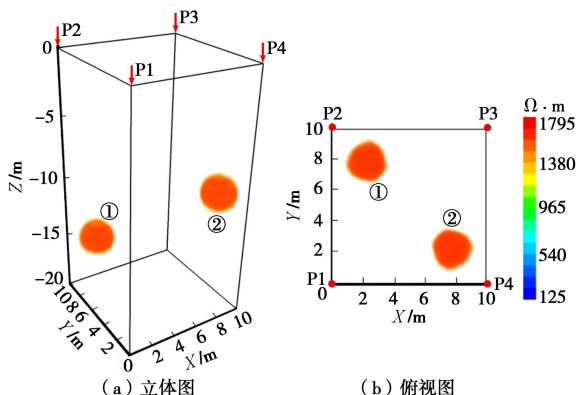


图 9 异常体反演成像提取结果 (距离加权约束)

Fig. 9 Extraction images of anomalies resulting from distance weighting constraint inversion

## 2.2 小尺寸低阻异常体反演成像数值试验

建立如图 10 所示原始地电模型, 图中有两处低阻异常(分别编号为①、②), 假定电阻率值均为  $20 \Omega \cdot \text{m}$ , 围岩电阻率为  $500 \Omega \cdot \text{m}$ , 两低阻异常均靠近钻孔 P1, 其中, 低阻异常①为边长  $1.5 \text{ m}$  的立方体, 底部边界埋深  $13 \text{ m}$ , 距离 P1 约  $1.5 \text{ m}$ , 低阻异常②为边长  $1.2 \text{ m}$  的立方体, 底部边界埋深  $11 \text{ m}$ , 距离 P1 约  $3.5 \text{ m}$ 。孔深、孔间距等布置参数与图 7 模型一致, 分别采用简单光滑约束(未施加距离加权约束)和施加距离加权约束后的三维电阻率 CT 反演方程进行计算, 采用组合式观测模式<sup>[28]</sup>获取数据, 反演迭代次数均为 8 次, 对异常体的反演成像提取结果分别如图 11, 12 所示。

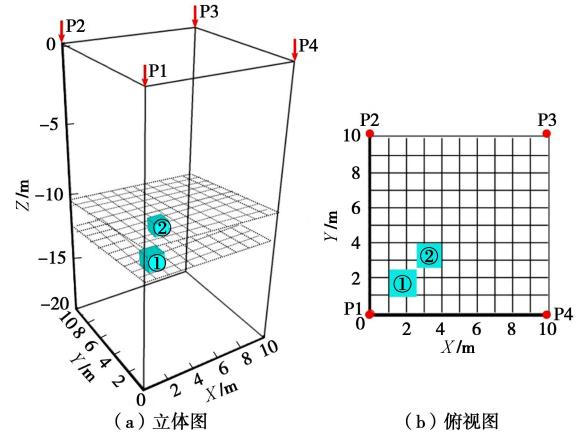


图 10 两处低阻异常在原始地电模型中赋存位置示意图

Fig. 10 Location of anomalies with low resistivity in the original geoelectrical model

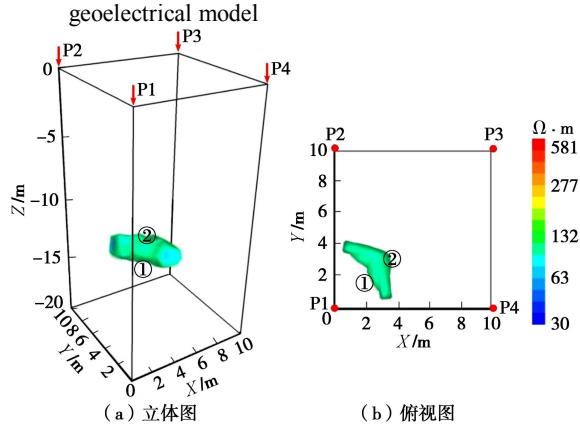


图 11 异常体反演成像提取结果 (简单光滑约束)

Fig. 11 Extraction images of anomalies resulting from simple smooth constraint inversion

从反演成像效果看, 由于两处低阻异常的赋存位置较为接近, 简单光滑约束反演结果中异常体形态不仅出现较大畸变, 且两处低阻异常相互干扰、相互重叠, 给识别和定位造成较大困难。与之相比, 携带距离加权约束的反演方法对两处异常体边界的识别效果有了明显改善, 在对钻孔附近异常体成像形态的畸变效应进行压制后, 反演结果中能够清楚地识别出两处

低阻异常,且其位置、规模、形态和电阻率值等方面与原始地电模型更为接近。

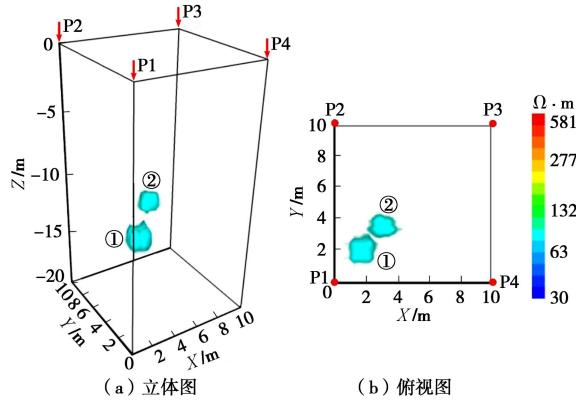


图 12 异常体反演成像提取结果 (距离加权约束)

Fig. 12 Extraction images of anomalies resulting from distance weighting constraint inversion

从数值反演试验的结果来看,施加距离加权约束后的反演方程对孔中电源点附近的剖分单元反演敏感度的压制效果是十分明显的。另外,由于在反演方程中增加了距离加权约束信息,也使得反演的多解性得到改善,对提高反演效果具有积极作用,增强了对异常体三维精细化定位和识别的可靠性。

### 3 物理模型试验

笔者所在课题组进一步开展了三维电阻率CT探测物理模型试验研究,试验模型中共埋设3处低阻体,分别为小尺寸低阻体①、倾斜板状低阻体②及水平板状低阻体③,异常体大小及空间埋设位置示意图如图13所示。模型几何比尺设定为1:20,各几何因素原型尺寸与模型尺寸对照结果如表1所示。

表 1 各几何因素原型尺寸与模型尺寸对照表

Table 1 Comparison of different geometric factors in prototype and model dimensions

| 几何因素         | 原型尺寸/m   | 模型尺寸/m      |
|--------------|----------|-------------|
| 试验模型长度×宽度×高度 | 40×40×30 | 2.0×2.0×1.5 |
| 电极套管深度       | 30       | 1.5         |
| 套管间距         | 16       | 0.8         |
| 套管中电极间距      | 3.0      | 0.15        |

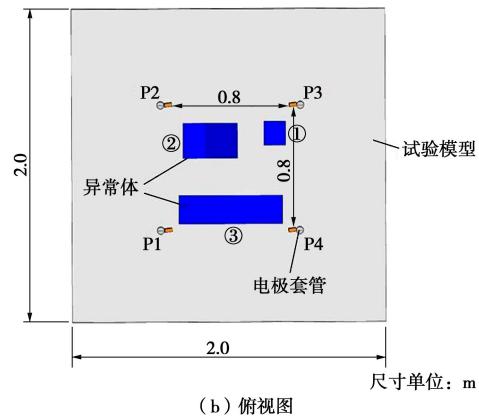
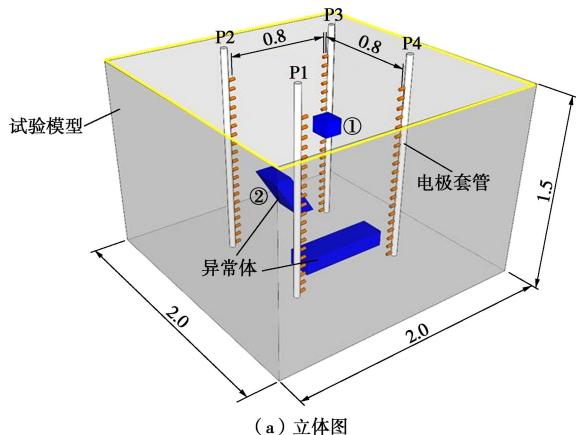


图 13 三维电阻率 CT 探测试验模型示意图

Fig. 13 Schematic test model of 3D cross-hole ERT detection

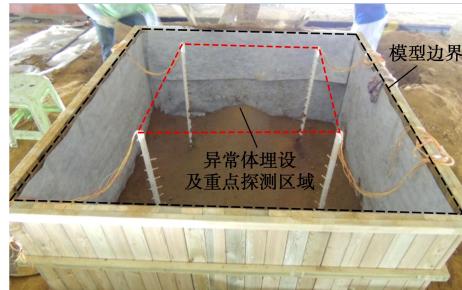


图 14 试验模型照片

Fig. 14 Photo of test model



图 15 模型中用以模拟低阻的相似材料

Fig. 15 Similar materials used to simulate low-resistivity anomalies in model

试验过程如图14、15所示,模型中充填导电性能良好的黏土材料来模拟围岩环境,通过调节黏土的含水率和压实度等控制其电阻率值保持在300  $\Omega\cdot\text{m}$ 左右;电极套管利用PVC管、铜电极和导线制作而成,总共4根套管,长度均为1.5 m,每根套管上有10个电极,电极间距均为0.15 m;用于模拟低阻体的相似材料如图15所示,相似材料成分为黏土、食盐和水,通过控制配比调节其电阻率值控制在20~50  $\Omega\cdot\text{m}$ 。试验中采用组合式观测模式获取数据,然后分别采用常规三维电阻率CT反演方法和携带距离加权约束的三维电阻率CT反演方法进行成像,反演迭代次数均为7次,对异常体成像提取后的结果(立体图、俯视图)分别如图16、17所示。

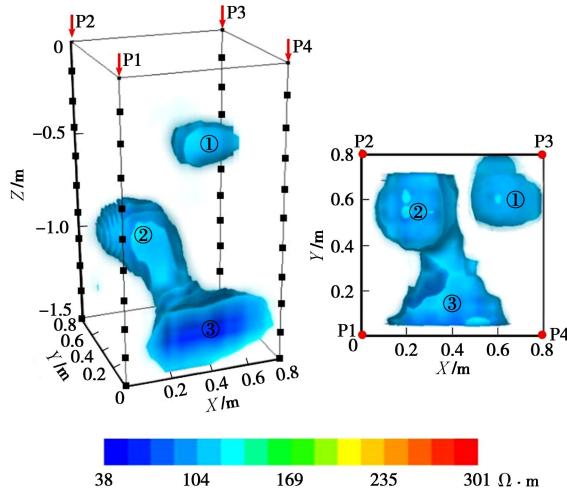


图 16 常规三维电阻率 CT 反演成像结果

Fig. 16 Inversion images resulting from conventional 3D cross-hole ERT method

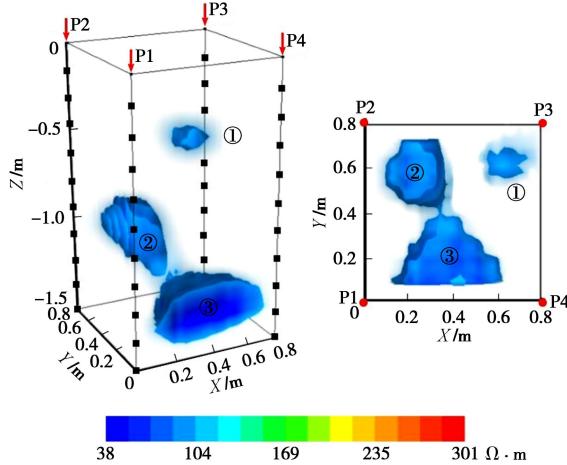


图 17 携带距离加权约束的三维电阻率 CT 反演成像结果

Fig. 17 Inversion images resulting from 3D cross-hole ERT method with distance weighting constraint

从模型试验的探测结果可以看出, 经两种方法处理后的反演结果中提取出的低阻异常区在空间分布位置、规模等方面与试验模型中埋设的目标体较为一致, 如低阻异常②、③除规模较模型中目标体略大外, 其位置及倾斜、水平形态与模型中目标体②和③是比较吻合的, 成像结果印证了三维电阻率 CT 方法本身在异常体三维精细化定位和识别方面具有较高的可靠性。另外, 对于靠近钻孔的异常体成像形态和边界识别效果而言, 未施加距离加权约束的常规反演方法尚存在不足, 与试验模型中所埋设的低阻体相比, 从图 16 中的俯视图可以看到, 低阻异常①的形态出现畸变, 呈“牛角”状环绕钻孔 P3 向两侧延伸; 而施加距离加权约束后的成像结果则如图 17 所示, 低阻异常①的成像形态得到明显改善, 这样的结果将为地质判

别提供更为准确的参考信息。

图 18 给出了携带距离加权的三维电阻率 CT 反演方程求解过程收敛曲线与常规算法收敛曲线的对比结果, 反演迭代 7 次后, 收敛曲线趋于平稳, 且收敛误差均小于 5%, 反演结果已比较稳定。可以看到, 加权后的收敛速度更快, 最终收敛误差也更小, 增加距离加权约束后反演求解过程得到了优化。

从物理模型试验结果整体来看, 三维电阻率 CT “距离加权”约束反演方法较为有效地改善了钻孔附近异常体的成像效果, 使得三维电阻率 CT 方法的探测分辨率和对异常体的定位精度得到更为全面可靠的保证。

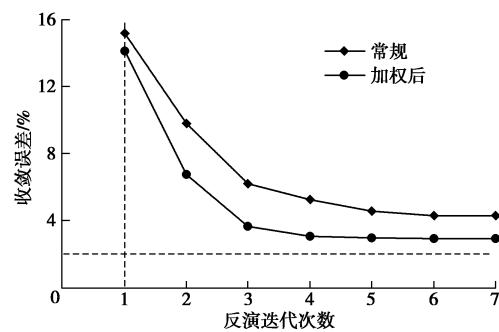


图 18 反演迭代过程收敛曲线

Fig. 18 Convergence curves of resistivity inversion

## 4 结 论

(1) 针对三维电阻率 CT 方法孔中电极附近区域成像效果差的问题, 本文从 4 个平行钻孔的“孔-孔”立体观测模式出发, 提出了三维电阻率 CT “距离加权”约束反演成像方法, 引入距离加权函数, 根据反演模型剖分单元距离孔中电源点的远近施加不同的权重系数, 构建距离加权因子分布模型, 重点改善了孔中电源点附近区域反演敏感度较高而造成的成像形态畸变问题, 提高了反演成像的效果。

(2) 开展了对小尺寸高阻异常、低阻异常数值反演成像试验, 以及对多个低阻目标体探测的物理模型试验研究, 试验结果均比较准确地反映了异常体的空间位置和规模, 一方面验证了三维电阻率 CT 探测反演方法在异常体三维精细化定位和识别方面具有显著的效果及较高的可靠性; 另一方面, 通过距离加权约束对整个模型空间反演敏感度的宏观调节, 也使得三维电阻率 CT 反演成像的多解性问题得到进一步改善, 所得成像结果将为地质判别提供更加准确的参考。

(3) 本文的研究对于提高三维电阻率 CT 方法的探测分辨率、改善反演效果等方面提供了有益参考, 下一步将研究不同类型加权方法的效果以及更为精

确、量化的评价方法。

### 参考文献:

- [1] 李术才, 苏茂鑫, 薛翊国, 等. 城市地铁跨孔电阻率 CT 超前地质预报方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 913 - 920. (LI Shu-cai, SU Mao-xin, XUE Yi-guo, et al. Study on computed tomography of cross-hole resistivity in urban subway geological prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(5): 913 - 920. (in Chinese))
- [2] 李红立, 张华, 汪传斌, 等. 跨孔高密度电阻率法溶洞探测效果验证分析[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(3): 339 - 343. (LI Hong-li, ZHANG Hua, WANG Chuan-bin, et al. Analysis of applying cross-hole ultra-density resistivity method to detecting karst cave[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2010, 7(3): 339 - 343. (in Chinese))
- [3] 吴荣新, 刘盛东, 张平松, 等. 地面钻孔并行三维电法探测煤矿灰岩导水通道[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 2): 3585 - 3589. (WU Rong-xin, LIU Sheng-dong, ZHANG Ping-song, et al. Detection of limestone water-conducting channels in coal mine by parallel 3d electric method of surface boreholes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S2): 3585 - 3589. (in Chinese))
- [4] 吴荣新, 刘盛东, 张平松. 双巷并行三维电法探测煤层工作面底板富水区[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 454 - 457. (WU Rong-xin, LIU Sheng-dong, ZHANG Ping-song. The exploration of two-gateways parallel 3-D electrical technology for water-rich area within coal face floor[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 454 - 457. (in Chinese))
- [5] 刘盛东, 吴荣新, 张平松, 等. 三维并行电法勘探技术与矿井水害探查[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 927 - 932. (LIU Sheng-dong, WU Rong-xin, ZHANG Ping-song, et al. Three-dimensional parallel electric surveying and its applications in water disaster exploration in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 927 - 932. (in Chinese))
- [6] ZHOU Bing, GREENHALGH S A. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. Geophysical Prospecting, 2000, 48(5): 887 - 912.
- [7] GOES B J M, MEEK J A C. An effective electrode configuration for the detection of DNAPLs with electrical resistivity tomography[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2004, 9(3): 127 - 141.
- [8] 王俊超, 师学明, 万方方, 等. 探测孤石高阻体的跨孔电阻率 CT 水槽物理模拟实验研究[J]. CT 理论与应用研究, 2012, 21(4): 647 - 657. (WANG Jun-chao, SHI Xue-ming, WAN Fang-fang, et al. The physical experiment research in laboratory of cross-hole electric resistivity[J]. CT Theory and Applications, 2012, 21(4): 647 - 657. (in Chinese))
- [9] LEONTARAKIS K, APOSTOLOPOULOS G V. Laboratory study of the cross-hole resistivity tomography: the model stacking (MOST) technique[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 80(1): 67 - 82.
- [10] 董清华, 田宪模. 井间电阻率成像中 Frechet 导数的算法比较[J]. 物探化探计算技术, 1997, 19(1): 41 - 45. (DONG Qing-hua, TIAN Xian-mo. A comparison of methods for calculating frechet derivatives in crosshole resistivity image[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 19(1): 41 - 45. (in Chinese))
- [11] 沈平, 强建科, 李永军. 井间视电阻率的几何成像方法[J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2010, 41(3): 2079 - 2084. (SHEN Ping, QIANG Jian-ke, LI Yong-jun. Geometry image method of crosshole apparent resistivity[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 2079 - 2084. (in Chinese))
- [12] 王桦, 纪洪广. 跨孔直流电阻率法 CT 勘探技术研究[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(5): 1833 - 1840. (WANG Hua, JI Hong-guang. Study on CT prospecting technology by the pole-pole cross-hole direct-current resistivity method[J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(5): 1833 - 1840. (in Chinese))
- [13] 张文俊, 李术才, 苏茂鑫, 等. 基于井间电阻率成像的城市地铁溶洞探测方法[J]. 山东大学学报 (工学版), 2014, 44(3): 75 - 82. (ZHANG Wen-jun, LI Shu-cai, SU Mao-xin, et al. Detection method of karst caves in city subway based on the cross-hole resistivity tomography[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2014, 44(3): 75 - 82. (in Chinese))
- [14] HIROMASA S. 2D and 3D resistivity image reconstruction using crosshole data[J]. Geophysics, 1992, 57(10): 1270 - 1281.
- [15] DAILY W, OWEN E. Cross-borehole resistivity tomography[J]. Geophysics, 1991, 56(8): 1298 - 1235.
- [16] YULASA S. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation[J]. Geophysical Prospecting, 1992, 40: 453 - 464.

- [17] TSOKAS G N, TSOURLOS P I, VARGEMEZIS G N, et al. Using surface and cross-hole resistivity tomography in an urban environment: an example of imaging the foundations of the ancient wall in Thessaloniki, North Greece[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2011, **36**(16): 1310 – 1317.
- [18] JONATHAN E C, PAUL B W, ALAN L W, et al. Mineshift imaging using surface and crosshole 3D electrical resistivity tomography a case history from the East Pennine Coalfield, UK[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, **62**(4): 324 – 337.
- [19] 岳建华, 刘志新. 井—地三维电阻率成像技术[J]. 地球物理学进展, 2005, **20**(2): 407 – 411. (YUE Jian-hua, LIU Zhi-xin. Three-dimensional resistivity tomography of mine-ground[J]. Progress in Geophysics, 2005, **20**(2): 407 – 411. (in Chinese))
- [20] 刘树才, 刘鑫明, 姜志海, 等. 煤层底板导水裂隙演化规律的电法探测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(2): 348 – 356. (LIU Shu-cai, LIU Xin-ming, JIANG Zhi-hai, et al. Research on electrical prediction for evaluating water conducting fracture zones in coal seam floor[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2009, **28**(2): 348 – 356. (in Chinese))
- [21] 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))
- [22] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983. (FU Liang-kui. Tutorial for electrical prospecting[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983. (in Chinese))
- [23] LI Yao-guo, DOUGLAS W. Oldenburg. 3-D inversion of magnetic data[J]. Geophysics, 1996, **61**(2): 394 – 408.
- [24] LI Yao-guo, DOUGLAS W. Oldenburg. 3-D inversion of gravity data[J]. Geophysics, 1998, **63**(1): 109 – 119.
- [25] 刘斌, 李术才, 聂利超, 等. 基于自适应加权光滑约束与 PCG 算法的三维电阻率探测反演成像[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1646 – 1653. (LIU Bin, LI Shu-cai, NIE Li-chao, et al. Inversion imaging of 3D resistivity detection using adaptive-weighted smooth constraint and PCG algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1646 – 1653. (in Chinese))
- [26] LIU B, LI S C, NIE L C, et al. 3D resistivity inversion using an improved genetic algorithm based on control method of mutation direction[J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, **87**(8): 1 – 8.
- [27] 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))
- [28] 李术才, 刘征宇, 刘斌, 等. 基于跨孔电阻率 CT 的地铁盾构区间孤石探测方法及物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(3): 446 – 457. (LI Shu-cai, LIU Zheng-yu, LIU Bin, et al. Boulder detection method for metro shield zones based on cross-hole resistivity tomography and its physical model tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(3): 446 – 457. (in Chinese))