

用改进的佐迪反演方法 进行二维电阻率图像重建

王 若 王兴泰 卢元林 孙仁国 闫来福

(长春科技大学地球探测与信息技术学院, 长春 130026)

摘要 针对佐迪反演方法在二维拟断面应用中的缺陷进行了三个方面的改进: 固定佐迪反演方法中用于转换电极距和深度关系的深度转换因子, 可使绝大多数数字模型的反演过程稳定收敛; 在调整视电阻率的公式中加入一个迭代系数, 可使计算值快速趋向于观测值, 减少了迭代次数; 对于含有噪声的数据, 加入滤波因子可以在一定程度上抑制噪声。通过数字模拟和野外实测数据对改进后的佐迪反演方法在二维电阻率反演应用中的可行性进行了验证。模拟研究包含了简单模型, 也包含一些复合模型, 二者均取得较理想的应用效果。

关键词 佐迪反演方法 改进佐迪反演方法 深度转换因子 迭代系数 滤波因子

中图分类号 P631.3

对地下电性特征的分布状况进行成像, 特别是在工程勘察及考古等领域的开发应用上, 越来越受到人们的关注。电阻率层析成像的发展借鉴了医学 CT 的基本原理, 即通过在目标外围进行测量来获得关于其内部结构的清晰分布。近几年发展起来的高密度工程电测系统, 使采集大批量的数据成为可能, 广义上说, 只要能获得足够数据的地方, 都可以应用层析成像。从这种意义上说, 把电极置于地表的高密度电阻率方法也可以看作是一种特殊的电阻率层析成像数据的采集方法。

根据给出初始模型的方法, 二维视电阻率的反演技术可以分为两类: 一类是用简单的结构来对所观测的数据进行模拟, 这些方法在提供地下电阻率分布的初始模型方面很有用, 比如电阻率反投影技术^[1]。另一类就是给不同的地质结构一个合理的精确的初始模型, 利用非线性优化技术来改进初始模型, 如最小二乘优化方法。虽然传统的最小二乘优化方法已经成功地应用于二维电阻率数据的反演, 但由于涉及到雅可比矩阵的求取, 所以它的一个主要缺点就是计算时间太长。

佐迪(Zhody)提出了一种自动解释温纳测深曲线的新方法^[2], 该方法提供了一种不同于以往任何方法的新思路, 引起了电法勘探学术界的极大关注。

本文着重对佐迪反演方法进行改进, 并通过数字模拟进行了实验性研究。最后, 用一个野外实测数据进行了验证, 取得了较好的应用效果。

国家自然科学基金资助项目(No. 4957228)

第一作者简介 王 若 女 27 岁 硕士 工程物探专业

收稿日期 1997-06-03

1 改进的佐迪反演方法

用于一维电阻率测深的佐迪反演技术具有三重优点: 即初始模型简单、计算方法简单、反演后的结果更为接近真实电阻率的分布状况, 所以受到地球物理学者的广泛关注, 并将其引入到二维拟断面的反演解释中。但是该方法在应用中存在着不可忽视的两个缺点, 即收敛速度缓慢; 对噪声很敏感^[3, 4]。如果能克服这两个缺点, 将会把佐迪反演方法推向实用化。

仔细分析佐迪反演方法, 发现深度转换因子对收敛速度有着不可忽视的作用, 深度转换因子选择得是否合适, 关系到反演后的地层是否与实际地层保持同相, 如果同相, 会使反演的迭代过程稳定收敛, 否则会很快导致发散; 收敛速度较慢的原因是每次的修改尺度较小, 如果加大修改尺度, 就会加速迭代的收敛过程; 佐迪反演方法对噪声很敏感, 这是由于存在局部异常所致, 如果用滤波方法把局部异常圆滑掉, 会在一定程度上起到压制噪声的作用。本文对以上三个方面进行改进, 使收敛速度和稳定性都得到较大改善。

1.1 深度转换因子的选择

深度转换因子的选择对整个反演过程来说是至关重要的, 它直接影响着反演过程的收敛性, 所以, 必须尽可能选择合适的深度转换因子。如果把电极间距与深度很好地联系起来, 以便使计算得出的视电阻率值与观测数据保持同相是佐迪反演的关键问题之一。佐迪在一维反演当中, 在不考虑电阻率幅值的情况下, 先对深度转换因子在一定范围内进行选择, 经过一系列迭代, 使得迭代误差达到最小时的深度作为真实深度, 此时的深度与电极距的比为深度转换因子。对于二维反演来说, 如果能一次性合理地固定深度转换因子, 将会省去一半的迭代过程, 节约了计算时间。

其实, 探测深度和电极距的关系很复杂, 并不具有这种简单的线性关系。因为野外观测数据是地电信息的综合反映, 用相同的装置形式在不同地区进行探测, 会因地电结构的不同探测深度也不相同。由于地电结构是不可知的, 所以, 地球物理学家一直在寻求合适的深度转换因子。

根据 Edwards 所定义的有效探测深度, 用 0.34 作为深度转换因子^[5]。虽然这个值只对均匀介质正确, 但把它应用于非均匀介质所起的作用仅仅是降低了收敛速度^[3]。实践证明, 采用这个转换因子改进迭代误差曲线的收敛性, 对于大多数模型来说, 迭代误差曲线是一致收敛的。

对数字模型的正演是用有限元方法来实现的, 所以必须将探测区进行剖分, 根据所选择的深度转换因子, 横向剖分尺度为 1 个最小极距, 各个电极都落在地表的节点上, 纵向剖分除第一行外, 都按 0.5 倍最小极距进行剖分, 第一行将网格直接延伸至地面。这样的剖分方式, 使某些观测点落在了网格的边界上, 这时, 把相邻观测点的均值作为该单元的电导率值。当观测点落在网格中间时, 便把该观测点的值作为小单元的电导率值。对于勘探区外的网格取相邻小单元的值作为该单元的电导率值。

1.2 收敛速度

仔细分析一下佐迪反演公式的实质, 通过在迭代公式中加入一个迭代系数来加快收敛速度。

用于二维电阻率反演中的佐迪方法迭代公式为:

$$\rho_{i+1}(l, n) / \rho_i(l, n) = \rho_0(l, n) / \rho_{ci}(l, n) \quad (1)$$

可写成

$$c_i(l, n) = e_i(l, n) \quad (2)$$

的形式, 其中:

$$c_i(l, n) = \lg(\rho_{i+1}(l, n)) - \lg(\rho_i(l, n))$$

$$e_i(l, n) = \lg(\rho_0(l, n)) - \lg(\rho_{ci}(l, n))$$

为了加快佐迪的收敛速度, 将(2)式右端乘一个因子 $f_i(l, n)$, 变成

$$c_i(l, n) = f_i(l, n) e_i(l, n) \quad (3)$$

关于 $f_i(l, n)$ 的选取, 原则上 $f_i(l, n)$ 越大, 佐迪的收敛速度越快, 但鉴于佐迪公式存在修改过度的情况, 使得 $f_i(l, n)$ 的值不能太大, 必须对其进行限制, 取

$$f_i(l, n) = f_{i-1}(l, n) \cdot (1.0 + e_i(l, n) / e_{i-1}(l, n)) \quad (4)$$

上式只有在条件 $f_1 = f_2 = 1.0$ 和 $e_{i-1}(l, n) - e_i(l, n) > 0.001$ 下才适用。后者实质上是 $e_{i-1}(l, n) > e_i(l, n)$, 使得 $f_i(l, n)$ 的值不会变化太大, 确保在增大收敛速度时, 不会过分导致迭代的振荡现象产生。

在实际工作中, $f_i(l, n)$ 取 $1.0 \sim 2.0$ 之间的数值, 即当 $f_i(l, n) > 2.0$ 时, 取 $f_i(l, n) = 2.0$, 当 $f_i(l, n) < 1.0$ 时, $f_i(l, n) = 1.0$ 。

1.3 稳定性

为了克服噪声所产生的影响, 引入滤波系数, 以压制局部噪声, 公式如下所示:

$$c_i(l, n) = c_0 e_i(l, n) + c_s \{ e_i(l-1, n-1) + e_i(l-1, n) + e_i(l-1, n+1) + e_i(l, n-1) + e_i(l, n+1) + e_i(l+1, n-1) + e_i(l+1, n) + e_i(l+1, n+1) \} \quad (5)$$

式中, 在求每一小单元的迭代电阻率时, 将周围小单元的影响考虑在内, 在一定程度上抑制了该单元独立迭代时的振荡性, 使得迭代能够稳定收敛。在公式(5)中令 $c_0 = n c_s$, 同时令所有权的总和等于 1, 其中 n 为中心单元周围小单元的个数。在投影数据所形成的倒梯形断面的边缘与底部, 电阻率没被探测到, 采用网格法进行插值, 以减小由于数据的缺失而造成的迭代不稳定。

在实际工作中, 应同时将收敛速度和稳定性考虑在内, 把公式(3)和(5)结合起来使用。用观测值(或正演值)和计算值的均方根误差作为判断二者接近程度的标志。

$$Y_{ms} = \lg \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\rho_0(l, n) - \rho_{ci}(l, n)}{\rho_0(l, n)} \right)^2}{n}} \quad (6)$$

其中, m 为勘探区的小单元的总个数。当满足以下几种情况时, 程序自动终止, 迭代次数大于 15, Y_{ms} 值不是减小而是增大。

2 改进的佐迪反演方法的应用效果

利用计算机数字模拟对改进的佐迪反演方法的可行性进行了验证, 进而把这种反演方法应用到野外实测数据中, 取得了较好的应用效果。

2 1 改进的佐迪反演方法的收敛速度

以图 2(e) 为模型来说明改进的佐迪反演方法的收敛速度。图 1 给出了加入迭代系数和未加迭代系数时反演过程的迭代误差曲线。由图看出: 加入迭代系数后, 收敛速度明显加快。用其它模型进行反演时也得到了相同的结果, 说明本文所用的迭代系数是有效的。

2 2 改进的佐迪反演方法对噪声的抑制作用

模型如图 2(e) 所示, 球体与围岩的电阻率之比为 1 : 5。

用有限元方法对模型进行正演后, 对正演结果分别加入 5% 和 10% 的随机噪声, 用来模拟含有一定噪声的观测结果, 图 2(a) 给

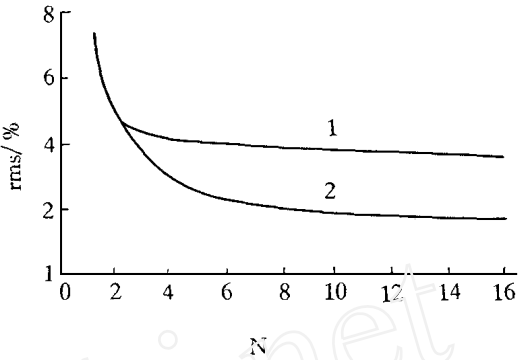


图 1 改进的佐迪反演方法中迭代因子对收敛速度的影响

Fig 1 The effect of iteration factor over convergence in improved Zhody inversion method

1. 加迭代系数前; 2. 加迭代系数后

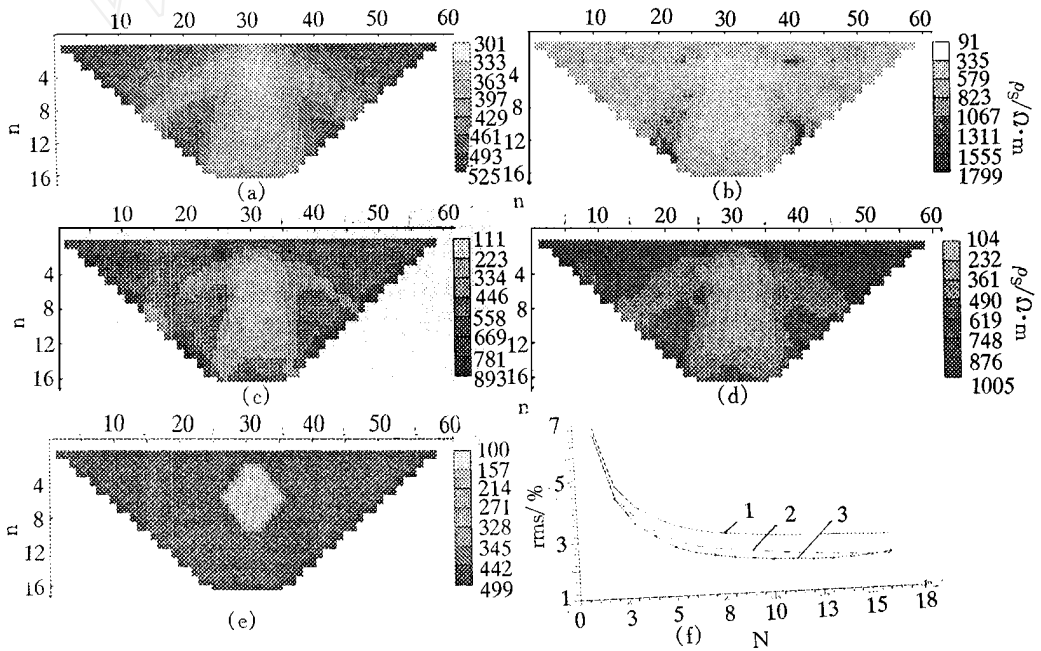


图 2 改进佐迪反演对噪声的压制效果

Fig 2 The results of noise canceling improved Zhody inversion method

(a) 加 5% 噪声时的有限元正演结果; (b) 未加滤波因子加 5% 噪声时的改进佐迪反演结果; (c) 加滤波因子后对含 5% 噪声数据的改进佐迪反演结果; (d) 加滤波因子后对含 10% 噪声数据的改进佐迪反演结果; (e) 模型; (f) 反演过程的迭代误差曲线;

1. 加滤波因子加 10% 噪声的改进佐迪反演; 2. 加滤波因子加 5% 噪声的改进佐迪反演; 3. 未加滤波因子加 5% 噪声的改进佐迪反演

出的图像为加入 5% 随机噪声后的正演结果, 背景和基底都有一定的畸变, 特别是在背景中, 出现较多零乱的伴随异常。

为了说明改进的佐迪方法对噪声的抑制作用, 用不加滤波因子的改进佐迪方法得到的反演结果和加入滤波因子后的反演结果进行对比。

图 2(f) 示出了迭代过程的收敛情况, 可见, 如果不加滤波因子, 反演过程迭代到第 8 次便开始发散, 加了滤波因子后, 迭代过程能稳定收敛。但迭代过程的收敛速度减慢, 可见, 稳定性是以降低迭代过程的收敛速度为代价的。观测数据含的噪声越多, 反演时的迭代误差曲线收敛速度越慢。

取迭代误差最小时的结果成图, 可以看出, 加滤波因子前图 2(b) 几乎看不出异常的形态, 加了滤波因子后图 2(c) 背景均一, 明显反映出异常形态。

图 2(d) 为加 10% 噪声时的反演结果, 也明显将异常体的形态反映了出来。

由此可见, 加入滤波因子对噪声起到了一定的抑制作用, 使得异常体的形态突出, 克服了传统的佐迪反演方法对噪声敏感的缺点。

2.3 对野外实测数据的应用效果

东南亚某地的地层可以分为三层: 第一层为亚砂土和腐植土, 该层较薄且电阻率较低, 有一定的起伏; 第二层为风化层, 薄厚不等, 由于灰岩的风化破碎, 破碎带含水较多, 电阻率较低; 第三层为基岩, 基岩完整, 质地致密, 电阻率较高。

用 M IR 多功能电测仪在该地采集到一组高密度电阻率数据, 然后用改进的佐迪方法对其进行反演。实测结果和反演结果分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示, 由实测结果看出, 有一向右下方倾斜的低阻带向下延伸, 这可能是基岩中溶蚀低阻破碎带的响应。反演时迭代过程不能一致收敛, 所以取了迭代误差最小时的结果成图, 从图中看出, 破碎带处的响应明显加大。由此可见, 该反演方法用于野外实测资料的处理, 也获得了令人满意的结果。

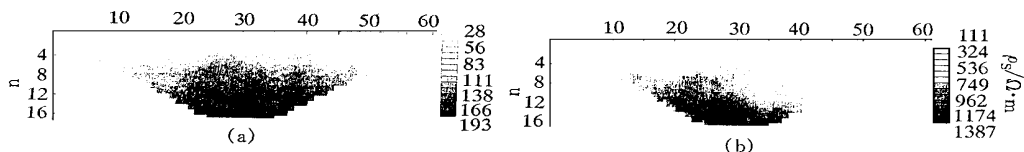


图 3 东南亚某地实测数据的改进佐迪反演方法的应用效果

Fig 3 Application results of improved Zhody inversion method for field data in the South-East Asia

(a) 实测结果; (b) 改进的佐迪反演结果

通过大量的数字模拟表明: 随着迭代次数的增加, 反演得到的结果在异常形状和电阻率值上都更加接近了真实模型。

4 结 论

通过对大量的模拟实验得到的数据与野外实测数据进行反演, 可以得到下述结论:

(1) 改进后的佐迪反演方法明显优于传统的佐迪反演方法, 主要表现在改进后的反演过程收敛速度加快。另一个主要表现是能够在一定程度上抑制噪声。

(2) 改进的佐迪反演方法能使大多数模型的反演结果稳定收敛, 说明选择的深度转换因子是有效的。

(3) 用改进的佐迪方法进行反演时, 迭代过程的前几次收敛速度明显加快, 以后收敛速度明显减慢, 这时随着迭代次数的增加, 异常体的形状改变较小, 但电阻率逐渐接近于真实值, 所以, 在精度要求不太高的情况下, 可较快地终止迭代过程, 节约了计算时间。

(4) 观测值的可信度直接影响着反演结果, 可信度越高, 反演结果也就越好。

(5) 由于大地构造的复杂性, 所以对野外实测数据的反演虽然不能够一致收敛, 但可取迭代误差最小时的电阻率值作为最后的反演结果。

(6) 电极距与深度的关系仍需作进一步地研究, 如果能找到不同地质情况时的电极距与深度的转换关系, 将把该方法推向更实用的阶段。

参 考 文 献

- 1 王兴泰, 李晓芹. 电阻率图像重建的“佐迪”反演及其应用效果. 物探与化探, 1995, **20**(3): 228~ 233
- 2 Zhody A A R. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner Sound-ing curves. Geophysics, 1989, **54**(2): 245~ 253
- 3 Barker R D. A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface: First Break, 1992, **10**(2): 53~ 62
- 4 王兴泰, 王劲松, 李晓芹. 二维电阻率图像重建的一种新方法. 物探与化探, 1995, **19**(1): 53~ 59
- 5 Edwards L S. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization measurements PhD thesis Massachusetts Institute of Technology, 1977

2-D RESISTIVITY IMAGE RECONSTRUCTION USING IMPROVED ZHODY INVERSION METHOD

Wang Ruo, Wang Xingtai, Lu Yuanlin, Sun Renguo, Yan Laifu

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026)

Abstract In this paper, three kinds of improvement are made against the disadvantages of Zhody inversion method. The inversion procedure of major digital model could stably converge if the depth transformation factor used to transform the space of electrode to depth is fixed; If a iterative coefficient is added to the formula used to adjust apparent resistivity, the calculated value will rapidly access to observation value, therefore the number of iteration is lowered. The noise will be effectively oppressed if filter factor is added to the data involved noise. The availability of Zhody inversion method used to two dimensional resistivity inversion is verified through digital simulation and field data. The simulation includes simple model and complex model, and both of them give us quite ideal application results.

Key words Zhody inversion method, improved Zhody inversion method, depth transformation factor, iteration coefficient, filter factor