

# 直流电阻率测深中二维与三维反演结果的对比与分析

黄俊革, 阮百尧

(桂林工学院 资源与环境工程系, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 直流电阻率测深中, 用二维反演程序对三维地质体进行了反演, 并与三维反演结果进行对比和分析。首先, 对比二维和三维最小二乘反演在正演模拟算法和先验信息的确定方法; 然后, 对若干比较典型的模型进行反演实例对比。由于二维程序反演仅考虑单个剖面的电阻率信息, 无论是在异常位置、形态及电阻率特性上, 其反演精度都较低; 三维电阻率反演综合了多个测深剖面的电阻率信息, 其结果与实际模型吻合得非常好。

**关键词:** 电阻率测深; 二维; 三维; 反演

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2004)05-0447-04

近年来, 直流电阻率测深的应用领域不断拓宽, 野外观测和数据自动处理解释技术不断发展。高精度仪器设备和高密度探测技术是今后电阻率测深的发展方向; 与此同时, 对直流电阻率法的数据处理和资料解释也提出了新的要求。虽然目前采用二维反演方法可以快速地解释单个剖面的地质问题, 消除地形影响<sup>[1,2]</sup>, 但不能对测区内多个断面数据进行综合解释, 并且, 二维模型的假设与实际的三维介质相比具有较大差距, 反演只能是一种近似解释<sup>[3]</sup>, 其计算精度和整体反演效果必然不能满足生产中精确反演的实际需要。目前, 三维电阻率反演的研究已经完成并进入实用阶段, 且在正演模拟和偏导数矩阵的计算方法上采用了有限单元异常电位算法<sup>[4]</sup>, 提高了计算精度; 另外利用了比较符合实际情况的体积因子这一先验信息, 提高了深部网格的分辨能力<sup>[5]</sup>; 对于地下三维介质, 三维反演是否适应目前电阻率测深资料处理的发展步伐, 是否比二维反演更精确、更符合实际, 在实际工作中采用哪种方法更加合适, 是目前急需解决的问题。

## 1 二维、三维有限元最小二乘反演原理对比

电阻率二维有限元最小二乘反演法的主要原理, 是用直角网格对二维地电断面模型剖分。网格单元内电性呈双线性变化, 采用有限元总电位正演计算模型的电位分布并计算偏导数矩阵<sup>[6]</sup>, 用最小二乘法修改模型参数, 用理论计算结果拟合野外实测结果。

加上先验信息后的最小二乘反演问题可表示为求最佳模型参数改正值矢量  $\Delta m$ , 使目标函数  $\phi$  极小<sup>[7]</sup>。

$$\phi = \|W_d(\Delta d - A\Delta m)\|^2 + \|W_m(m - m_b + \Delta m)\|^2,$$

上式右端第一项为通常的最小二乘方法, 第二项为先验信息项。其中  $\Delta d$  ( $\Delta d_i = \ln\rho_{oi} - \ln\rho_{ci}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ ) 为数据差矢量, 其值等于实测视电阻率的对数值与模拟的视电阻率的对数值之差;  $m$  ( $m_j = \ln\rho_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$ ) 为预测模型参数矢量;  $m_b$  ( $m_{bj} = \ln\rho_{bj}$ ,  $j = 1, 2, \dots, M$ ) 为基本模型参数矢量;  $A$  ( $A_{ij} = \partial \ln\rho_{ci} / \partial \ln\rho_j$ ) 为偏导数 (Jacobian) 矩阵;  $W_m$  是模型加权矩阵, 被设计用来使模型具有先验信息。

反演中加入光滑度矩阵这一先验信息, 可使反演结果尽量简单光滑。光滑度矩阵的定义为<sup>[7]</sup>

$$C_{ij} = \begin{cases} \lambda / \sqrt{r_{ij}}, & j \text{ 为网格 } i \text{ 相邻上下左右网格} \\ 0, & j \text{ 为其他相邻网格} \end{cases}$$

$$C_{ii} = - \sum_{j=1}^m C_{ij},$$

$r_{ij}$  为相邻上下左右网格与中心网格的距离,  $\lambda$  为拉格朗日乘数。

三维反演采用六面体对三维断面进行剖分, 网格单元内电性均匀。以有限单元法中的异常电位正演方法为前提, 求解三维地电断面反演问题并求取偏导数矩阵, 与总电位法相比, 由于电源点附近的拟合误差很小, 正演精度高。利用体积因子作为先验信息, 加入到最小二乘反演方法中, 使反演更符合实际

际,提高了深部网格电阻率的分辨能力。体积因子的定义为

$$V_{ij} = \begin{cases} \lambda \cdot v_i, & j \text{ 为网格 } i \text{ 相邻上下左右网格} \\ 0, & j \text{ 为其他相邻网格} \end{cases}$$

$$V_{ii} = -\lambda \cdot v_i,$$

式中  $v_i$  为单元格  $i$  的体积(图 1)。体积因子的定义是基于如图 2 所示的区域剖分方法<sup>[8]</sup>;边界区域的网格大小以指数关系递增,电阻率均匀无变化,对计算结果的影响很小,在反演计算中可假定边界区网格的电阻率变化较小;目标区为异常体的存在区,为均匀剖分网格,网格的电阻率变化较大;由于边界区与目标区的网格体积有较大区别,因此可在目标函数中加入体积因子,使单元格的体积越大,电阻率的变化越小,这样就使模型具有了先验信息。

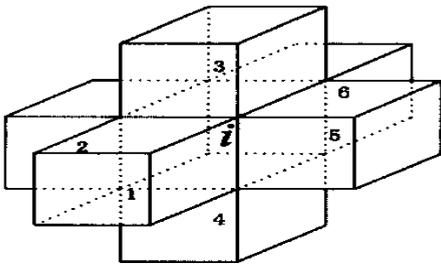


图 1 体积因子示意

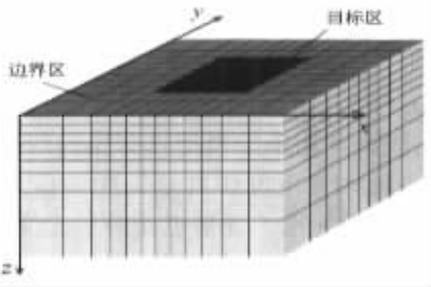


图 2 有限单元法区域剖分示意

由于反演涉及到的对象、反演技术途径有一定的差别,反演结果肯定有所不同。下面,将实际工作中一些比较常见的模型进行计算和分析,以对比二者的反演效果。

### 2 反演结果对比

文中的测深断面均为三维电阻率正演模拟结果,测量装置为二极装置,设计测量剖面 5 条,最小极距 1 m,最大极距 19 m,点距 1 m,围岩电阻率为  $100 \Omega \cdot m$ ,分别计算低阻、高阻和高低阻混合 3 种模型。为了加快反演速度,二维反演单元的大小设计为正演网格大小的 4 倍,由于二维反演不存在  $y$  方向变化,结果剖面数量可与测线数量相同,这里为

5 条(编号为 153~157);三维反演单元大小为正演网格的 8 倍,因而可得到 3 个反演断面(编号为 152-154,154-156,156-158)。

由于二维反演中网格单元中电导率是线性变化的,反演的结果参数表现为各网格节点上的电阻率;而在三维反演中网格单元电阻率均匀,为了便于对比两种反演结果,将三维反演结果的单元电阻率记录在单元的第一个节点上。

模型 1 为水平地形下的 1 个  $6 m \times 6 m \times 6 m$  的立方低阻地质体,埋深 2 m,电阻率为  $10 \Omega \cdot m$ ,是围岩电阻率的  $1/10$ 。图 3 为模型 1 的平面、断面和测线布置示意及其二维和三维反演结果。图 3b 所示的二维反演结果明显地示出了低阻立方体的位置和埋深,不过对低阻体延伸和电性的反映欠佳,对应低阻体中心位置的最低电阻率仅为  $38.5 \Omega \cdot m$ ,并将立方低阻体反演成为了  $x$  方向延伸较大, $z$  方向延伸略短的椭球体,随着剖面与低阻体中心距离的增加,对低阻体的反演效果逐渐变差。图 3c 所示的对低阻体的三维反演结果无论是位置、埋深,还是延伸和电性,均好于二维反演;低阻体中心位置的最低电阻率为  $3.9 \Omega \cdot m$ ,且  $x, y$  方向上的延伸均不是特别长,呈现出比较规则的立方体模样,与模型的吻合程度相当高。

模型 2 为水平地形下含有 1 个夹在 2 个高阻板之间的低阻立方体(图 4)。低阻体和高阻板的埋深都为 2 m,围岩电阻率为  $100 \Omega \cdot m$ 。低阻体大小、电性与模型 1 的低阻体相同,两侧高阻板电阻率为  $1000 \Omega \cdot m$ ,大小为  $2 m \times 6 m \times 4 m$ ,距离低阻立方体的水平距离均为 2 m。该模型主要用来对比 2 种方法的水平分辨能力。图 4b 的二维反演结果中,对低阻体的位置、埋深反映比较准确,但电性反演的精度不高,对两侧的高阻板几乎没有反映,对应低阻体中心位置的最小电阻率为  $41 \Omega \cdot m$ ,对应高阻板位置的最大电阻率为  $132 \Omega \cdot m$ ,与真实电阻率相差较大。图 4c 的三维反演结果与二维结果相比有了明显改善,高、低阻电性对比分明,对应低阻体中心位置的最小电阻率为  $8 \Omega \cdot m$ ,对应高阻板位置的最大电阻率为  $587 \Omega \cdot m$ ,位置准确,延伸范围恰当,低阻体和高阻板的形态也与模型对应得非常好。

模型 3 为水平地形下含有隐伏于高阻板下方的低阻体(图 5),高阻板的埋深为 2 m,围岩电阻率为  $100 \Omega \cdot m$ 。高阻板电阻率为  $500 \Omega \cdot m$ ,大小为  $6 m \times 6 m \times 2 m$ ,低阻体大小为  $6 m \times 6 m \times 6 m$ ,电阻率为  $5 \Omega \cdot m$ 。该模型主要用来对比 2 种方法的垂

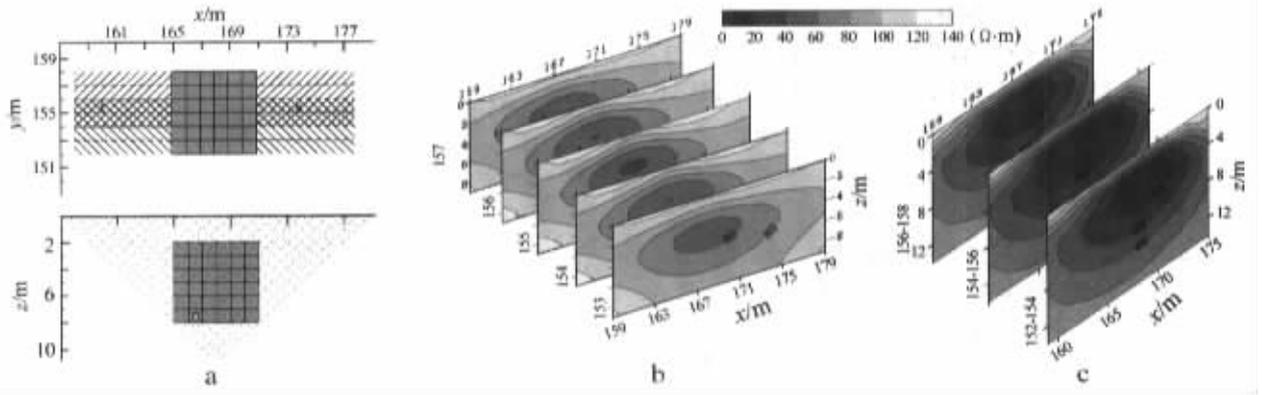


图3 模型1平、断面示意(a)及其二维反演(b)和三维反演(c)结果

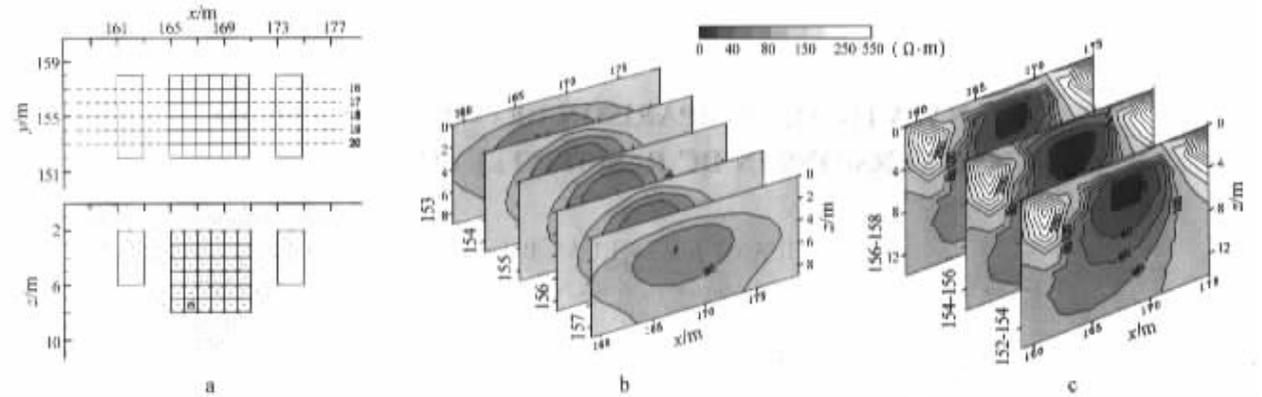


图4 模型2平、断面示意(a)及其二维反演(b)和三维反演(c)结果

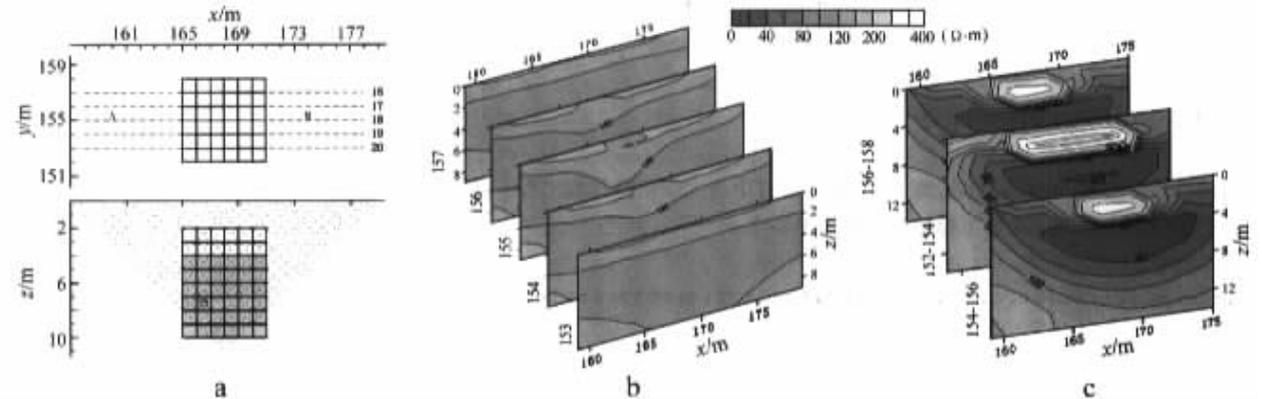


图5 模型3平、断面示意(a)及其二维反演(b)和三维反演(c)结果

向分辨能力。

图5b的二维反演结果,没有明显反应出浅部的高阻覆盖;深部低阻异常范围宽,两侧电阻率稍低于对应模型中心位置电阻率,形态呈马鞍形,与低阻立方体的对应关系不明显,即反演的低阻异常并未真实反映下伏低阻体。反映在图5c的三维反演结果,在浅部与高阻板对应位置上,有一明显板形的高阻异常,中心(154~156)断面浅部2 m处的最大电阻率为490 Ω·m;深部有一半圆形的低阻异常,上界面的深度为3 m,中心最低电阻率为17 Ω·m,这与

真实模型是非常吻合的,证明三维反演在垂向上的分辨能力明显优于二维反演。

### 3 结论与建议

三维反演程序,由于在模型设计、正演模拟和偏导数矩阵求取的计算精度上有较大改善,与二维反演的结果相比,反演适应性和精度都有所提高。

通过对若干个不同的模型的反演算例结果对比来看,三维反演在反映地下地质体的空间位置、形态和电性分布等方面,其精度比二维反演有很大提高,

基本达到了精确反演的要求。

由于区域剖分网格的数量是二维剖分的数十倍,反演计算量较大;以目前的计算机速度来说,计算时间较长,故目前不宜在野外做实时反演。

参考文献:

[1] 单娜琳,阮百尧,程志平. 二维有限元反演法在金矿电法勘探中的应用[J]. 桂林工学院学报,2000,20:14-21.

[2] 单娜琳,阮百尧,程志平,等. 激发极化数据二维有限元反演法在金矿勘探中的应用[J]. 长春科技大学学报,2000,30(2):194-197.

[3] 熊彬,阮百尧,黄俊革. 直流电阻率测深中二维反演程序对三维

数据的近似解释[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2003(1).

[4] 黄俊革,阮百尧,鲍光淑. 三维地电断面激发极化法有限元数值模拟[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2003,28(3):323-326.

[5] 黄俊革. 三维电阻率/极化率有限元正演模拟与反演成像[D]. 中南大学,2003.

[6] 阮百尧. 视电阻率对模型电阻率的偏导数矩阵计算方法[J]. 地质与勘探,2001,37:39-41.

[7] 阮百尧,村上裕,徐世浙. 电阻率/激发极化法数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术,1999,21:116-125.

[8] 黄俊革,阮百尧,鲍光淑. 齐次边界条件下三维地电断面电阻率有限元数值模拟法[J]. 桂林工学院学报,2002,22(1):11-14.

## AN ANALYTICAL COMPARISON BETWEEN 2D AND 3D INVERSIONS IN DC RESISTIVITY SOUNDING

HUANG Jun-ge, RUAN Bai-yao

(Department of Resource and Environment Engineering Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** The results of 3D inversion are analytically compared with the results of applying 2D inversion program to conducting inversion of 3D geological bodies in DC resistivity sounding. The methods for modeling and confirmation of prior information are compared, followed by a comparative analysis of several inversion examples of typical models. In 2D inversion, the precision of location, shape and resistivity is relatively low in that only single section information is taken into consideration. The results of 3D inversion are in good accord with the practical models because such an inversion has synthesized the information of several sections.

**Key words:** resistivity sounding; 2D; 3D; inversion

作者简介:黄俊革(1966—),男,博士,2003年7月中南大学信息物理工程学院毕业,副教授,现在桂林工学院资环系任教,主要研究方向为电法勘探和数值模拟与反演成像技术。



上接 446 页

**Abstract:** The suppression or utilization of the peg-leg multiple wave is a difficult problem in seismic data processing and interpretation. The forward simulation constitutes the basis of suppressing or utilizing peg-leg multiple wave. Using the nonlinear model theory of layered media, the authors developed a method for forward simulation of peg-leg multiple wave. The tentative application of this method to deep seismic data interpretation in the Zhongyuan oilfield yielded some useful results. This method can also play its role in the analysis and processing of seismic elementary wave and the improvement of seismic data resolution.

**Key words:** nonlinear model; peg-leg multiple wave; forward simulation; seismic data interpretation

作者简介:姚姚(1945—),男,1967年北京地质学院本科毕业,1981年武汉地质学院硕士研究生毕业,现任中国地质大学教授,博士生导师,中国地球物理学会海洋专业委员会委员,中国石油学会石油物探专业委员会委员,湖北省石油学会理事兼石油物探专业委员会副主任,主要研究方向为复杂非均匀介质地震波场的正、反演问题,共出版了专著、教材5本,公开发表了论文62篇。 万方数据