

doi: 10.11720/wtyht.2019.1377

倪建福,刘四新.跨孔电波衰减成像初始振幅估算方法比较[J].物探与化探,2019,43(3):634-641.http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1377

Ni J F, Liu S X. Comparison of initial amplitude estimation methods for cross-hole electromagnetic wave attenuation tomography[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(3): 634-641. http://doi.org/10.11720/wtyht.2019.1377

跨孔电波衰减成像初始振幅估算方法比较

倪建福, 刘四新

(吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 跨孔电磁法衰减层析成像是一种利用电磁波振幅信息的方法,通过发射端到接收端电磁波的振幅变化来反演介质衰减常数分布。发射端振幅也就是初始振幅,一般情况下是未知的,它的精度很大程度上影响到层析成像结果,需要在反演前得到或者通过特殊反演方法来处理。本文总结了 4 种初始振幅处理方法——线性拟合法、矩阵反演法、双频电磁波法以及相邻道比值法,通过合成数据验证了这四种方法的可行性,并且指出了每种方法的优缺点:线性拟合法适合物性变化不大的情况;矩阵反演法对物性情况要求不高,但计算量较大;双频电磁波法能直接得到电导率分布,但只适合良导体情况;相邻道比值法适用情况最广,但容易受干扰影响。

关键词: 跨孔电磁波;层析成像;衰减常数;初始振幅

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2019)03-0634-08

0 引言

跨孔电磁波技术广泛应用在工程环境物探、矿产勘查、石油勘探等领域中,根据应用场所和测量特点不同,有坑透 CT、跨孔雷达、井间电磁法等诸多方法^[1]。这些方法的原理是相似的,都是通过在两个钻孔(坑道)中分别发射和接收电磁波来反演钻孔(坑道)间地层的物性信息。用于煤矿和工程勘察的坑透和井间电波透视操作频率一般为 1 MHz~32 MHz,而用于油田的井间电波法操作频率为 10 Hz~10 kHz,跨孔雷达的操作频率一般为 100 MHz。

衰减层析成像是一种利用了电磁波振幅信息或者质心频率信息来反演衰减常数分布的方法。衰减层析成像有三个主要的误差来源:观测误差、初始振幅的不确定性以及近区场效应^[2]。初始振幅也被称为初始场强或发射机振幅,一般情况下是未知的,需要在反演前得到或者通过特殊反演方法来处理。

最直接求取初始振幅的方法就是算法^[3],但

是由于仪器参数难以获取,在实际中很少应用^[4]。实际应用中普遍使用的是线性拟合法^[2,5],基于线性拟合的改进方法也比较多^[6-7]。另外,曹俊兴等提出了一种双频电磁波电导率层析成像方法,把两种不同频率的电磁波振幅相比来消除初始场强的影响^[8]。Holliger 等通过把初始振幅也当成一个未知数,参与到反演计算中,从而解决了初始振幅需要提前求取的问题^[9]。张辉等详细研究了坑透法中初始场强的问题,发现初始场强偏大或偏小都会导致不同形态的异常,具有其规律特点从而可以通过反演结果来判断初始场强是否合适,指导选择正确的初始场强^[10]。肖玉林等提出了利用发射巷近场源区场强数据计算初始场强值,再利用该初始场强值和接收巷透视场强数据计算吸收系数的方法^[11]。

初始振幅难以求取^[12-13],是跨孔雷达、坑透 CT、井间电磁法等电磁波方法的共性问题。此次以跨孔雷达衰减层析成像为对象,研究了上述初始振幅处理方法,总结出 4 种初始振幅处理方法。

收稿日期: 2018-10-23; 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41874136);国家重点研发计划“深部矿产资源地球物理综合探测与信息提取”(2016YFC0600505)

作者简介: 倪建福(1996-),男,吉林大学在读研究生,主要研究方向为探地雷达方法理论和应用。

通讯作者: 刘四新(1966-),男,山西太谷人,日本东北大学工学博士,教授,博士生导师,主要从事探地雷达、钻孔雷达及电磁波测井等的方法理论和应用方面的研究。Email: liusixin@jlu.edu.cn

1 衰减层析成像原理

衰减层析成像最常用的一种方法是时间域的振幅比法^[14-15]。在振幅比法中,衰减常数通过发射振幅和接收振幅之间的比值获得。理论上,平面波发射脉冲的振幅在均匀介质中按指数规律衰减^[16]。电磁波从发射端到接收端的振幅变化可以表示为

$$E_r = E_0 e^{-\alpha r}. \quad (1)$$

式中: E_r 为接收端的振幅, E_0 为发射端的初始振幅, r 为电磁波的传播距离, α 为衰减常数。实际测量中还需要考虑天线辐射模式和远场区几何扩散^[16],故式(1)还需考虑这两项:

$$E_r = E_0 e^{-\alpha r} \frac{T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{r}. \quad (2)$$

式中: $T_1(\theta_1)$ 表示发射天线与射线成 θ_1 角时的指向性增益, $T_2(\theta_2)$ 表示接收天线与射线成 θ_2 角时的指向性增益。

对式(2)两边取自然对数,移项整理可得:

$$\alpha r = \ln \left(\frac{E_0 T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{E_r r} \right), \quad (3)$$

写成离散化形式:

$$\sum_{j=1}^M r_{ij} \alpha_j = \ln \left(\frac{E_0 T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{E_r r} \right)_i, \quad (4)$$

令式(4)右端为 d_i ,则有:

$$d_i = \sum_{j=1}^M r_{ij} \alpha_j. \quad (5)$$

式中: r_{ij} 为第 i 条射线在第 j 个网格的射线长度; α_j 表示第 j 个网格的衰减常数。该矩阵可以通过代数重建法(ART)、联合迭代法(SIRT)、最小二乘 QR 分解法(LSQR)等诸多方法求解。LSQR 算法由 Paige 和 Saunders 在 1982 年提出,被广泛应用在层析成像领域^[17]。该算法在求解过程中涉及 QR 分解法,简单来说,QR 分解法把矩阵分解成一个半正交矩阵与一个上三角矩阵的积。LSQR 算法通过利用矩阵的稀疏性来简化计算,具有计算量小、内存要求低、迭代快的优点,适合求解大型稀疏矩阵^[18]。在之后的反演中,都选择使用了 LSQR 算法。

2 初始振幅计算方法

初始振幅 E_0 是一个比例因子,取决于发射机功率、接收机增益和天线效率的综合影响^[14]。 E_0 是未知的,需要在反演前得到或者通过特殊反演方法来处理。理想情况下,可以监控发射机性能,通过记

录输入电流和阻抗来引导数据中的 E_0 校正^[4]。但是一般雷达系统不记录这些发射机参数,因此需要其它合适的方法来解决。本节总结了四种初始振幅处理方法,分别为线性拟合法、矩阵反演法、双频电磁波法和相邻道比值法。

2.1 线性拟合法

E_0 是未知的,但通常假设在测量时是恒定的,因此可以在振幅反演过程中作为一个未知量^[9]。通过线性拟合来求取初始振幅的方法是最常用的^[2,5],对其改进方法也比较多^[6-7]。线性拟合法的關鍵就在于消除掉异常区的干扰,从而通过只反映背景值的数据进行线性拟合得到准确的初始振幅。下面介绍最基本的线性拟合方法。

对公式(4)移项变形,可以写成:

$$M_i = - \sum_{ij} r_{ij} \alpha_j + \ln E_0, \quad (6)$$

$$M_i = \left[\ln \frac{E_r r}{T_1(\theta) T_2(\theta)} \right]_i.$$

在物性变化不太大的区域,每条射线经过的网格衰减常数都相近,相当于各条射线的 $\sum_{ij} r_{ij} \alpha_j$ 可以看成是一个平均衰减常数乘上射线长度,即 $\bar{\alpha} \times r_i$ 。首先对接收端的振幅进行几何校正和天线指向性校正,然后取自然对数得中间参数 M_i ,最后让 M_i 与射线长度 r_i 数据进行线性拟合,得到一条拟合直线,可以表示为:

$$\tilde{M}_i = A r_i + B. \quad (7)$$

式中: A 为拟合直线的斜率,即平均衰减常数; B 为拟合直线的截距。根据拟合直线的截距就可以算出初始振幅,即 $E_0 = e^B$ 。

2.2 矩阵反演法

线性拟合法是在反演之前就算出初始振幅,这一节介绍一种无需提前计算初始振幅的方法^[9,19],笔者把这种方法命名为矩阵反演法。

改写式(4),将其中初始振幅项 $\ln E_0$ 整合到 $\sum_{ij} r_{ij} \alpha_j$ 中,这样相当于多求一个未知量,方程可以写成下面的形式:

$$d_i = \sum_{ij} r_{ij} \alpha_j, \quad (8)$$

$$d_i = \ln \left(\frac{T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{E_r r} \right)_i,$$

$$\alpha_j = [-\ln E_0 \quad \alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \cdots \quad \alpha_m]^T.$$

式中: α_j 表示的是初始振幅项加上衰减常数的 $m+1$ 阶列向量; r_{ij} 是由都为 1 的列向量 I 和网格长度矩阵 R 合并而成,可以表示为 $[I, R]$ 。为了方便理解,

对式(8)进行示例:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ 1 & r_{21} & & & \vdots \\ 1 & & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ 1 & r_{n1} & \cdots & \cdots & r_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\ln E_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \\ \vdots \\ d_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

只要解式(8)的矩阵,就可以同时解出初始振幅和衰减常数分布。

2.3 双频电磁波法

文献[8]提供了一种新方法,笔者把其命名为双频电磁波法,这种方法可以避免初始振幅计算问题。

衰减常数会随频率而发生变化,衰减常数可以表示为:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right]}, \quad (10)$$

其中: ω 表示角频率, $\omega = 2\pi f$; μ 表示磁导率,一般就用 μ_0 ; ϵ 表示介电常数, $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$; σ 表示电导率。

从上式可以看出,衰减常数受多种因素影响。当雷达采用两种不同频率 ω_1 、 ω_2 时,介质衰减常数也会不同,可以分别表示为 α_1 、 α_2 。衰减常数的不同,也会使得两种频率下接收端测得的振幅不同:

$$E_1 = E_0 e^{-\alpha_1 r} \frac{T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{r}, \quad (11)$$

$$E_2 = E_0 e^{-\alpha_2 r} \frac{T_1(\theta_1) T_2(\theta_2)}{r} \quad (12)$$

其中: E_1 表示采用 ω_1 时的振幅, E_2 表示采用 ω_2 时的振幅。把式(11)、式(12)相比值,可以得到:

$$\frac{E_1}{E_2} = e^{(\alpha_2 - \alpha_1)r}, \quad (13)$$

可以看到初始振幅 E_0 、射线长度 r 和天线方向性增益 T 已被消去。对式(13)两边取自然对数得:

$$\ln E_1 - \ln E_2 = (\alpha_2 - \alpha_1)r \quad (14)$$

在良导体介质中,损耗角正切满足: $\sigma/\omega\epsilon \gg 1$ 。当 $\sigma/\omega\epsilon > 10$ 时,就可以看成是良导体,此时的衰减常数可以近似为^[20]:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} \quad (15)$$

把式(15)代入到式(14)中:

$$\ln E_1 - \ln E_2 = \left(\sqrt{\frac{\omega_2\mu\sigma}{2}} - \sqrt{\frac{\omega_1\mu\sigma}{2}} \right) r \quad (16)$$

把式(16)移项,整理得:

$$\sqrt{\sigma} \cdot r = \sqrt{\frac{2}{\mu}} \left(\frac{\ln E_1 - \ln E_2}{\sqrt{\omega_2} - \sqrt{\omega_1}} \right); \quad (17)$$

把式(17)写成离散化矩阵的形式:

$$d_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} b_j = \sqrt{\frac{2}{\mu}} \left(\frac{\ln E_1 - \ln E_2}{\sqrt{\omega_2} - \sqrt{\omega_1}} \right), \quad (18)$$

式中, r_{ij} 表示第 i 条射线在第 j 个网格中的长度; b_j 表示第 j 个网格中的根号电导率 $\sqrt{\sigma}$ 。解该矩阵方程就可以算出 $\sqrt{\sigma}$,对其平方后就可以得到电导率。

在低损耗介质中,衰减常数也可以进行近似:

$$\alpha \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2}} - \frac{\sigma^3 \sqrt{\mu\epsilon}}{16\omega^2 \epsilon^3} \quad (19)$$

但是,由于这种情况下频率对衰减常数的影响很小,两种不同频率得到的振幅对于现有仪器是分辨不出来的,因而在低损耗介质中简化衰减常数的思路不可行。

2.4 相邻道比值法

衰减层析成像不仅在跨孔雷达中应用,在跨孔地震中也有应用。在跨孔地震中也存在震源振幅 A_0 难以获得的问题。为了解决这个问题,跨孔地震衰减层析成像中出现了一种利用共炮点道集同源的特点,采取相邻道循环对比的方法^[22]。由于跨孔雷达和跨孔地震的相似性,把这种方法也引入到跨孔雷达衰减层析成像中。

对于同一个发射端相邻接收点的数据,可以分别表示为:

$$E_i = E_0 e^{-\sum_{j=1}^m \alpha_j r_{ij}} T_1(\theta_1)_i T_2(\theta_2)_i / \sum_{j=1}^m r_{ij},$$

$$E_{i+1} = E_0 e^{-\sum_{j=1}^m \alpha_j r_{i+1,j}} T_1(\theta_1)_{i+1} T_2(\theta_2)_{i+1} / \sum_{j=1}^m r_{i+1,j},$$

则有:

$$\frac{E_i}{E_{i+1}} = e^{\sum_{j=1}^m (r_{i+1,j} - r_{i,j}) \alpha_j} \frac{T_1(\theta_1)_i T_2(\theta_2)_i \sum_{j=1}^m r_{i+1,j}}{T_1(\theta_1)_{i+1} T_2(\theta_2)_{i+1} \sum_{j=1}^m r_{i,j}} \quad (20)$$

可以看到初始振幅 E_0 已经被消去,因此不需要再考虑初始振幅的问题。

对式(20)取自然对数并移项可以得到:

$$\sum_{j=1}^m (r_{i+1,j} - r_{i,j}) \alpha_j = \ln \frac{E_i T_1(\theta_1)_{i+1} T_2(\theta_2)_{i+1} \sum_{j=1}^m r_{i,j}}{E_{i+1} T_1(\theta_1)_i T_2(\theta_2)_i \sum_{j=1}^m r_{i+1,j}}, \quad (21)$$

写成离散化矩阵的形式:

$$d_i = \sum_{j=1}^M \Delta r_{ij} \alpha_j = \ln \frac{E_i T_1(\theta_1)_{i+1} T_2(\theta_2)_{i+1} \sum_{j=1}^m r_{i,j}}{E_{i+1} T_1(\theta_1)_i T_2(\theta_2)_i \sum_{j=1}^m r_{i+1,j}},$$

$$\Delta r_{ij} = r_{i+1,j} - r_{i,j}.$$

式中: d_i 可以由第 i 和第 $i+1$ 条射线的接受端振幅、天线指向性和射线长度算出; Δr_{ij} 表示的是相邻两条射线 i 和 $i+1$ 在第 j 个网格中的长度差。解该矩阵方程就能得到研究区域的衰减常数分布。

3 方法效果分析

本文主要侧重于初始振幅的处理方法研究,故采用较为简单明确的直线追踪算法,层析成像算法都采用 LSQR 算法。下面通过合成数据反演来说明上述四种方法的优缺点。为了对比研究方便,四种方法采用同一个形态的模型(图 1)。采用该种模型可以较好地观察层析成像结果横向和纵向的分辨情况,高阻异常区和低阻异常区都存在也比较符合实际复杂地质情况。

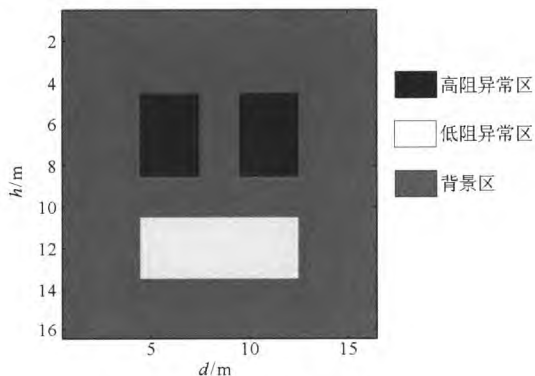


图 1 模型示意

Fig.1 Model diagram

该模型纵向长度为 16 m, 横向长度为 16 m。网格划分为 16×16 , 纵向网格间距 1 m, 横向网格间距 1 m。测点位置在纵向网格的中点处, 测点间距 1 m。接收点和发射点位置相同, 这样一共可以有 256 条射线(图 2)。

3.1 线性拟合

线性拟合法、矩阵反演法、相邻道比值法使用的都是同一物性参数的模型。模型物性参数为: 高阻异常区电导率 0.004 S/m , 介电常数 $3.2\epsilon_0$; 低阻异常区电导率 0.006 S/m , 介电常数 $4.2\epsilon_0$; 背景介质电导率 0.005 S/m , 介电常数 $4\epsilon_0$ 。跨孔雷达频率选择为 100 MHz, 磁导率为真空中磁导率, 初始振幅设置为 1×10^7 , 相当于 140 dB。把上述参数代入式(10)可以得到的衰减常数(单位为国际单位制 Np/m)模

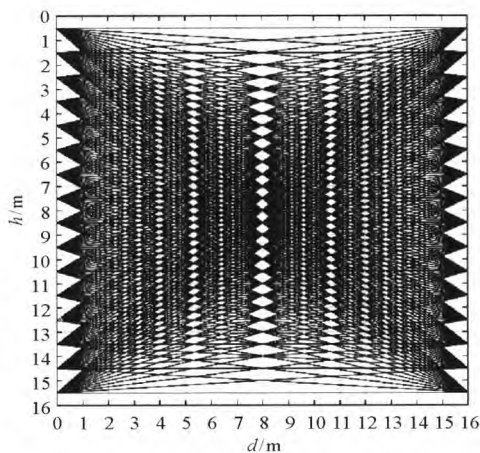


图 2 观测系统示意

Fig.2 Observation system

型, 见图 3a。

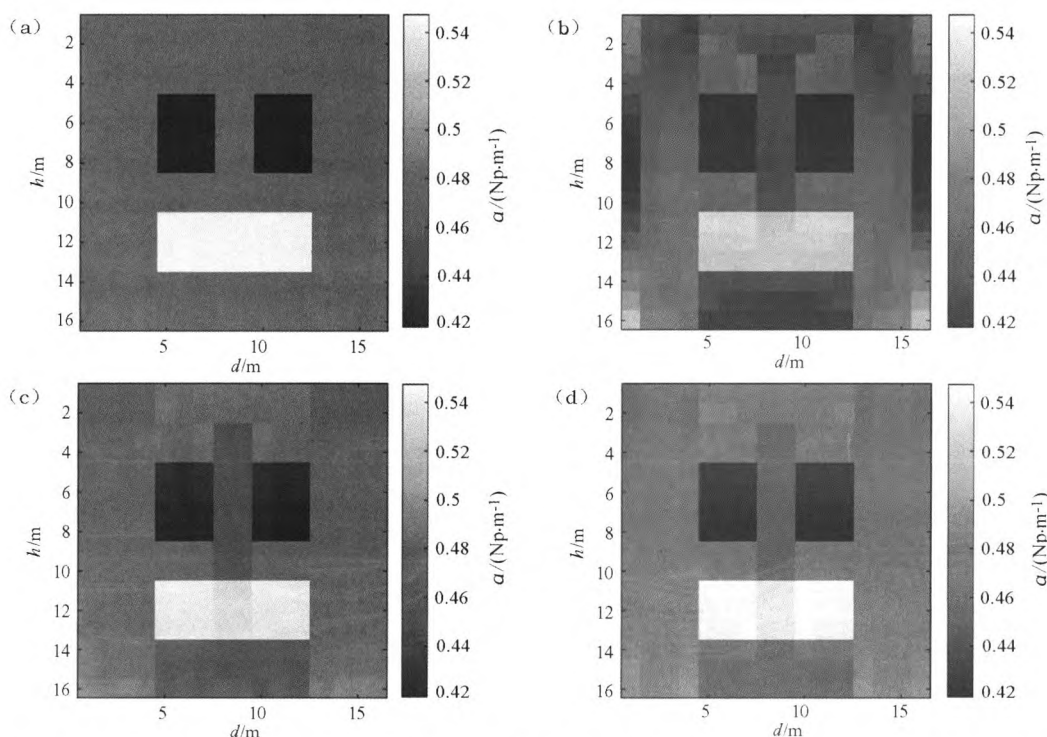
图 4 为通过合成数据进行线性拟合得到的拟合直线, 纵轴上的黑点代表截距点。通过拟合直线的截距, 可以算出初始振幅为 7.03×10^6 , 这与真实初始振幅 1×10^7 相差较大。使用线性拟合得到的初始振幅, 进行后续层析成像得到结果见图 3b。

对比图 3a 和图 3b 可以看到, 使用有偏差的初始振幅反演出的图像也能圈定出异常区的位置, 但是异常区对应的衰减常数值与真实值相差较大。另外层析成像图像周围出现一些假异常, 尤其是底部假异常区面积很大, 数值上也明显偏离真实背景值。可以说, 初始振幅误差带来的层析成像误差已经很大程度上影响到了异常的判断。

线性拟合法产生初始振幅误差是由于异常区的存在, 从而导致物性分布不均匀。这种情况下, 平均衰减常数不再是个定值, 而是一个随射线路径而变化的值。举例来说, 穿过低阻异常区射线的平均衰减常数要大于只穿过背景介质射线的平均衰减常数。当拟合点的平均衰减常数是同一个值时, 通过拟合直线截距算出的初始振幅是准确的。但当拟合点的平均衰减常数不都是相同时, 通过拟合直线截距算出的初始振幅就会有误差了。

为了解决这个问题, 出现了一些线性拟合的改进方法^[6-7]。这些方法的核心思想都是剔除出经过异常区的射线, 把剩下反映背景介质信息的射线数据进行线性拟合。这样相当于把具有相同平均介电常数的射线进行拟合, 就能得到准确的初始振幅。

线性拟合法是除了算法之外唯一的能提前获取初始振幅的方法。只要异常区域面积相对背景区域不是太大, 就能取得较好的层析成像效果。但是实际中物性分布未知, 且地下介质情况是十分复杂的, 直接使用该方法会导致假异常的出现。对



a—衰减常数模型;b—线性拟合法衰减层析成像结果;c—矩阵反演法衰减层析成像结果;d—相邻道比值法衰减层析成像结果
a—attenuation constant model diagram;b—attenuation tomogram of linear fitting method;c—attenuation tomogram of matrix inversion method;d—attenuation tomogram of neighboring traces method

图 3 衰减常数模型与三种方法层析成像对比

Fig.3 Comparison of attenuation constant model and tomography of three methods

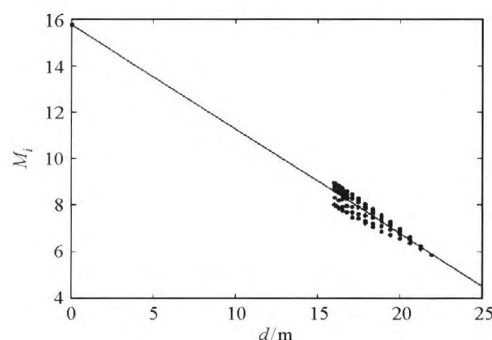


图 4 线性拟合曲线

Fig.4 Linear fit graph

线性拟合法的进行改进,剔除出一些经过异常区的射线数据,能一定程度上减小初始振幅误差,改善层析成像效果。因此,线性拟合方法适用于异常区域较小、物性分布较均匀的情况。

3.2 矩阵反演法

通过矩阵反演法得到的初始振幅十分接近真实初始振幅。使用该种方法得到的层析成像结果(图 3c)与衰减常数模型(图 3a)基本一致,上下两侧及两个高阻异常之间有一些轻微的假异常。这些类似的假异常在其他初始振幅处理方法中也有出现。为了分清这些假异常是由初始振幅处理方法导致还是由层析成像算法(LSQR 算法)导致,本文这里使用

准确的初始振幅进行反演,得到了与初始振幅处理方法无关的反演结果(图 5)。

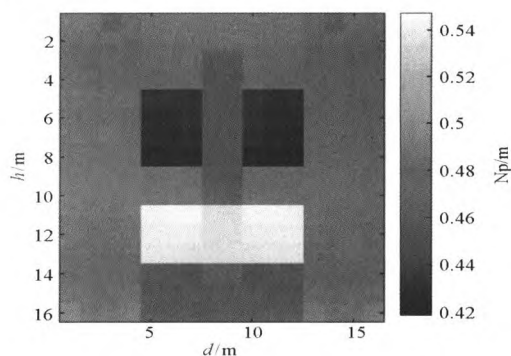


图 5 已知初始振幅时的衰减层析成像

Fig.5 Attenuation tomography with known initial amplitude

比较图 3b、图 3c、图 3d 与图 5 可以看到,两个高阻区间的假异常和低阻区下部的假异常在各个图像中都存在,可以判断出假异常是由层析成像算法导致的。层析成像算法产生假异常,根本上归结于数据量太少,而未知网格较多,方程组欠定。

矩阵反演法无需提前获取初始振幅,只需要对矩阵进行改动就可以直接反演出衰减常数,因此相比线性拟合法,这种方法更加方便。然而反演矩阵中多了一个与初始振幅相关未知数,且未知数对

反演结果影响很大,故该方法对迭代精度和迭代次数要求高。另一方面,迭代精度和迭代次数要求高也导致了计算量的增加。综上所述,矩阵反演法对介质物性均匀程度没有要求,尽管计算量有所增大,但其应用范围相比线性拟合方法可以更加广泛。

3.3 双频电磁波法

在实际数据采集过程中,由于发射天线面积、供电电源电压及周围环境中低阻物体的影响,会导致初始振幅随发射端的位置变化而发生改变^[4,10-12]。因此,认为初始振幅不变的前两种方法处理实际数据时会产生一些误差。

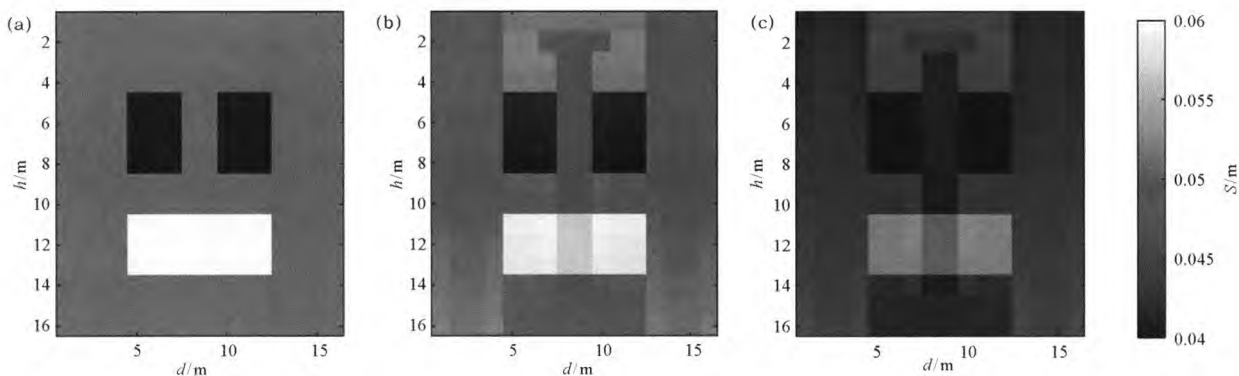
对于双频电磁波法,先发射两种频率的电磁波,再把接收到的这两种电磁波的振幅进行比值,这样就可以消去初始振幅项,从而消除初始振幅的影响的。

由于要符合良导体条件,对模型电导率和雷达频率有要求,因而需要重新设计一个模型(图 6a)。新模型物性参数为:高阻异常区电导率 0.04 S/m,介

电常数 $3.2\varepsilon_0$;低阻异常区电导率 0.06 S/m,介电常数 $4.2\varepsilon_0$;背景介质电导率 0.05 S/m,介电常数 $4\varepsilon_0$ 。跨孔雷达的两种频率分别是 1 MHz 和 1.2 MHz,磁导率为真空中磁导率,初始振幅设置为 1×10^7 。

由图 6a 和图 6b 对比可知,该方法层析成像结果和模型基本一致,两者间存在的差异也是由于层析成像算法。通过两种频率的振幅比值来消去初始振幅,可以完全消除初始振幅误差对层析成像的影响。另外,良导体情况下的双频电磁波法无需进行衰减常数计算就可实现电导率层析成像。但是这种方法只能应用到良导体介质中,有其局限性。

良导体情况下的双频电磁波法尤其需要注意雷达频率及频率差的选择。图 6c 中雷达使用的频率是 10 MHz 和 12 MHz,它的层析成像效果明显比图 6b 要差。经过试验,发现雷达频率选择地越低越好,这是因为在电导率固定的情况下,频率越低,式(15)的近似效果越好。而频率差的选择主要取决于电导率^[23]。



a—良导体电导率模型;b—双频电磁波法电导率层析成像结果(1 MHz,1.2 MHz);c—双频电磁波法电导率层析成像结果(10 MHz,12 MHz)
a—conductivity model diagram in the case of good conductor;b—conductivity tomography of dual-frequency electromagnetic wave method (1 MHz & 1.2 MHz);c—conductivity tomography of dual-frequency electromagnetic wave method (10 MHz & 12 MHz)

图 6 双频电磁波法电导率模型与两组频率电导率层析成像结果对比

Fig.6 Comparison of dual-frequency electromagnetic wave method conductivity model and two sets of frequency conductivity tomography results

双频电磁波法是利用了衰减常数的频散效应。事实上,电导率、介电常数也会有频散效应,在低频时尤其需要明显^[24]。电导率和介电常数与频率的关系十分复杂,故本文中只能通过选择合适频率来减小这两者的频散效应。

3.4 相邻道比值法

对于相邻道比值法,它是通过相邻射线的振幅比值来消除初始振幅的影响的。初始振幅的变化也不会影响到这种方法的成像效果。对比图 3a 和图 3d 可以看到,相邻道比值法成像效果良好。

这种方法适用于任何地质情况,计算量也没有

显著地增加。同时,该方法不受初始振幅变化的影响,且比起双频电磁波法,还不用考虑介质导电性问题。唯一的缺点就是相邻射线间的长度差异不大,射线的振幅差异较小,如果干扰因素比较严重,容易造成错误结果。

4 结论

1) 初始振幅的精度会很大程度上影响到反演效果,因此要足够重视初始振幅处理方法的选择。

2) 初始振幅会随发射点位置变化而发生改变

是一个值得深入研究的问题。线性拟合法和矩阵反演法将不再适用,双频电磁波法和相邻道比值法能较好的解决这个问题。

3) 线性拟合法是除了算法之外唯一的能提前获取初始振幅的方法。在异常区域较小、物性分布较均匀时,层析成像效果好;在异常区域大、物性分布不均匀时,层析成像效果差。

4) 矩阵反演法无需提前获取初始振幅,不受物性分布情况影响,但迭代精度和迭代次数要求高,计算量较大。

5) 双频电磁波法只适用于良导体介质,是其特点也是限制之处。另外,这种方法无需进行衰减常数计算即可实现电导率成像。

6) 相邻道比值法的适用性最广,但是由于相邻射线间的长度差异不大,射线的振幅差异较小,较容易受干扰因素影响。

4 种初始振幅处理方法都有其优缺点,没有适用于任何情况的方法。因此,实际应用中要根据研究区域的特点及测量状况,综合考虑选取初始振幅处理方法。

参考文献 (References):

- [1] 王均双, 薄夫利, 马冲. 坑透 CT 成像技术在工作面地质构造探测中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(10): 93-96.
Wang J S, Bo F L, Ma C. Application of mine penetration CT imaging technology to probe geological tectonics of fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(10): 93-96.
- [2] Fullagar P K, Livelybrooks D W, Zhang P, et al. Radio tomography and borehole radar delineation of the McConnell nickel sulfide deposit, Sudbury, Ontario, Canada Radio and Radar Delineation[J]. Geophysics, 2000, 65(6): 1920-1930.
- [3] 肖玉林. 煤矿综采工作面无线电波透视技术研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2010.
Xiao Y L. Study on Radio Wave Penetration Technology for Mechanized Coal Face[D]. Hefei: Anhui University Of Science & Technology, 2010.
- [4] Zhou B, Fullagar P K. Delineation of sulphide ore-zones by borehole radar tomography at Hellyer Mine, Australia[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47(3-4): 261-269.
- [5] Peterson, Jr J E. Pre-inversion corrections and analysis of radar tomographic data[J]. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, 2001, 6(1): 1-18.
- [6] 于师建, 颜世杰. “三软煤层”电磁波吸收特征分析[J]. 煤田地质与勘探, 1999, 27(6): 60-62.
Yu S J, Yan S J. Analysis on the absorbing characteristics of electromagnetic wave in coal seam with soft coal, roof and floor[J]. Coal Geology & Exploration, 1999, 27(6): 60-62.
- [7] 郭方, 李培根, 齐顺, 等. 基于测线分类的无线坑透初始场强求取探讨[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(12): 97-99, 104.
Guo F, Li P G, Qi S, et al. Discussion of solving initial field intensity of radio tunnel perspective based on classified probe lines[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(12): 97-99, 104.
- [8] 曹俊兴, 朱介寿. 双频电磁波电导率层析成像[J]. 物探化探计算技术, 1997, 19(4): 329-332.
Cao J X, Zhu J S. Transmission EM conductivity tomography[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1997, 19(4): 329-332.
- [9] Holliger K, Musil M, Maurer H R. Ray-based amplitude tomography for crosshole georadar data: A numerical assessment[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47(3-4): 285-298.
- [10] 张辉, 潘冬明, 刘朋, 等. 模拟分析初始场强对坑透反演结果的影响[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2788-2795.
Zhang H, Pan D M, Liu P, et al. Simulation and analysis of the influence of initial field intensity on the inversion results[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2788-2795.
- [11] 肖玉林, 吴荣新, 严家平, 等. 工作面坑透场强传播规律及有效透视宽度研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 712-718.
Xiao Y L, Wu R X, Yan J P, et al. Field strength propagation law of radio wave penetration and effective perspective width for coal face[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 712-718.
- [12] 宁书年, 张绍红, 杨峰, 等. 无线电波层析成像技术及在矿井坑透中的应用[J]. 煤炭学报, 2001, 26(5): 468-472.
Ning S N, Zhang S H, Yang F, et al. Radio wave tomography technique and its application in underground radio wave probing[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(5): 468-472.
- [13] 刘鑫明, 刘树才, 姜志海, 等. 有耗媒质中任意入射角电磁波传播衰减特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(6): 96-99.
Liu X M, Liu S C, Jiang Z H, et al. Study on propagation attenuation features of random incidence angle electromagnetic wave in lossy medium[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(6): 96-99.
- [14] Olsson O, Falk L, Forslund O, et al. Borehole radar applied to the characterization of hydraulically conductive fracture zones in crystalline rock 1[J]. Geophysical prospecting, 1992, 40(2): 109-142.
- [15] Holliger K, Bergmann T. Numerical modeling of borehole georadar data[J]. Geophysics, 2002, 67(4): 1249-1257.
- [16] 王飞. 跨孔雷达走时层析成像反演方法的研究[D]. 吉林大学, 2014.
Wang F. Research on crosshole radar travelttime tomography[D]. Jinlin University, 2014.
- [17] Paige C C, Saunders M A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares[J]. ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 1982, 8(1): 43-71.
- [18] 杨薇, 刘四新, 冯彦谦. 跨孔层析成像 LSQR 算法研究[J]. 物探与化探, 2008, 32(2): 199-202.
Yang W, Liu S X, Feng Y Q. A study of the LSQR algorithm for cross-hole tomography[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2008, 32(2): 199-202.
- [19] Maurer H, Musil M. Effects and removal of systematic errors in crosshole georadar attenuation tomography[J]. Journal of Applied Geophysics, 2004, 55(3-4): 261-270.
- [20] 王文娟, 潘克家, 曹俊兴, 等. 基于 Tikhonov 正则化的双频电磁波电导率成像反演[J]. 地球物理学报, 2009, 52(3): 750-757.
Wang W J, Pan K J, Cao J X, et al. Electrical conductivity ima-

- ging using dual-frequency EM data based on Tikhonov regularization[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(3): 750 - 757.
- [21] Gloaguen E, Marcotte D, Giroux B, et al. Stochastic borehole radar velocity and attenuation tomographies using cokriging and co-simulation[J]. Journal of Applied Geophysics, 2007, 62(2): 141 - 157.
- [22] 王辉, 常旭, 刘伊克, 等. 时间域相邻道地震波衰减成像研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44(3): 396 - 403.
Wang H, Chang X, Liu Y K, et al. Seismic neighboring traces attenuation tomography in time domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(3): 396 - 403.
- [23] Cao J, He Z, Zhu J, et al. Conductivity tomography at two frequencies[J]. Geophysics, 2003, 68(2): 516 - 522.
- [24] 曾昭发, 刘四新, 冯珏. 探地雷达原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
Zao S F, Liu S X, Feng X. Ground penetrating radar principle and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

Comparison of initial amplitude estimation methods for cross-hole electromagnetic wave attenuation tomography

NI Jian-Fu, LIU Si-Xin

(College of Geo-Exploration Sciences and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China)

Abstract: Cross-hole electromagnetic attenuation tomography is a method that uses the amplitude information of electromagnetic waves to invert the distribution of the attenuation constant of the medium by the amplitude change of the electromagnetic wave from the transmitting to the receiving. Transmitter amplitude is also called the initial amplitude, which is generally unknown. Its accuracy largely affects the tomographic results and it needs to be obtained before inversion or by special inversion methods. This paper summarizes four initial amplitude processing methods, i.e., linear fitting method, matrix inversion method, dual-frequency electromagnetic wave method and neighboring traces method. The feasibility of these four methods is verified by synthetic data, and the advantages and disadvantages of each method are pointed out: Linear fitting method is suitable for the case where the physical property changes little; matrix inversion has low requirements for physical condition, but the amount of calculation is relatively large.; dual-frequency electromagnetic wave method can directly obtain the conductivity distribution, but only for the good conductor case; the applicable situation of neighboring traces method is the most extensive, but it is susceptible to interference.

Key words: cross-hole electromagnetic wave; tomography; attenuation constant; initial amplitude

(本文编辑:沈效群)