

大地电磁阻抗估计方法对比

汤井田, 张弛, 肖晓, 刘祥

(中南大学 地球科学与信息物理学院 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 比较了几种大地电磁阻抗估计方法的性能。为了给阻抗估计结果提供对照标准, 首先介绍大地电磁模拟数据的生成方法, 并从含噪数据中提取典型的噪声时间序列; 然后介绍最小二乘估计、M 回归估计、有界影响估计和重复中值估计这 4 种回归方法的基本原理, 并用一组标准数据测试了它们的性能; 最后采用 4 种估计方法处理不同程度加噪的模拟数据, 与模拟结果进行比较。结果表明: 重复中值估计的稳健性最优; 当磁道存在噪声时, 有界影响估计给出了明显优于 M 回归估计的结果, 也能满足要求。因此, 在实测数据处理中, 推荐使用重复中值估计方法与有界影响估计方法。

关键词: 大地电磁; 稳健阻抗估计; M 回归估计; 有界影响估计; 重复中值估计

中图分类号 P631.3

文献标志码: A

Comparison of methods for magnetotelluric impedance estimation

TANG Jing-tian, ZHANG Chi, XIAO xiao, LIU xiang

(Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
School of Geoscience and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The performances of different kinds of methods for magnetotelluric impedance estimation were compared. The method of generating magnetotelluric simulated data was introduced, the typical noise series was extracted from noisy data. The basic principles of four regression methods of least square estimator, M-regression estimator, bounded influence estimator and repeated median estimator were introduced. These methods were tested using a set of standard data. At last, simulated data added by noise at different levels were processed by the four different estimators and compared with the simulated results. The results show that the repeated median estimator is the most robust. When the noise exists in the magnetic channel, the results estimated by the bounded influence method are acceptable, which are more stable than those estimated by the M-regression method. So, in the magnetotelluric data processing, the repeated median method and bounded influence method are recommended.

Key words: magnetotelluric; robust estimation; M-regression estimation; bounded influence estimation; repeated median estimation

大地电磁测深法(Magnetotelluric, MT)自 20 世纪 50 年代诞生起, 就以勘探深度大、无需人工场源的优势成为矿产资源勘查、地下水和地热勘探、油气普查、地震预报、地壳及岩石圈深部结构探测等领域不可或缺的重要地球物理方法之一。但也正是大地电磁测深利用天然场源的原因, 低信噪比、易受干扰始终是制

约大地电磁法应用的因素。随着人类社会经济活动的不断开展, 人文电磁噪声日益严重, 特别是在人烟稠密的工业发达地区, 高压电网、电视塔、各种金属管网、广播电台、雷达、通讯电缆及信号发射塔等造成的电磁干扰, 严重污染了实际的大地电磁信号, 极大地影响了大地电磁数据质量和应用效果。因此, 如

基金项目: 国家科技专项“深部探测技术与实验研究专项”(SinoProbe-03); 国家自然科学基金资助项目(40874072, 41104071)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 汤井田, 教授, 博士; 电话: 13507317396; E-mail: jttang@mail.csu.edu.cn

何压制强干扰、提高信噪比、获取无偏的阻抗估计，一直是大地电磁测深领域最重要的研究前沿和热点之一。

针对这个问题，地球物理学家们提出了一系列技术，致力于得到无偏的大地电磁阻抗。这些技术手段主要集中于两个方面：其一是远参考方法，其二是稳健估计方法。GAMBLE 等^[1]首次提出了远参考方法，能够压制大地电磁中的不相关噪声。RITTER 等^[2]利用测点磁场与参考点磁场之间转移函数等指标判别各个数据段的含噪情况，将含有噪声的数据段剔除，不参与下一步的阻抗估计。在远参考点存在的条件下，LARSEN 等^[3]实现了测点的信噪分离，OETTINGER 等^[4]给出了一些实例。但是在实际工作中，有时并没有布设远参考点，并且远参考点的选择条件非常苛刻，尤其在矿集区等强干扰地区，这些都制约了远参考法的应用。

EGBERT 等^[5]将稳健估计引入地磁转换函数中，详细介绍了加权最小二乘及其改进算法，并比较了相关结果。CHAVE 等^[6-9]在大地电磁稳健阻抗估计方面研究成果很多：讨论了地球物理中几个重要物理量，功率谱、相干度和转换函数的稳健估计；评述了大地电磁阻抗估计中的很多细节，并提出了 Jackknife 估计阻抗误差的方法；还提出了一种基于帽子矩阵的有界影响估计方法，在磁道存在噪声的情况下也能给出稳健的估计，完整地论述了大地电磁有界影响估计阻抗的方法。SMIRNOV^[10]利用求取中值比求取均值稳健的性质，提出了一种重复中值的稳健阻抗估计方法，崩溃点接近 50%。SUTARNO^[11]对大地电磁阻抗函数的稳健估计方法进行了综述。

国内学者多关注于大地电磁数据时间域的噪声压制或者时频转换技术在大地电磁数据处理中的应用^[12-13]。陈海燕等^[14]和景建恩等^[15]将广义 S 变换引入大地电磁数据处理，在阻抗估计部分采用 M 回归估计。此外，张刚等^[16]将重复均值估计应用于长周期大地电磁数据处理中。

本文作者系统讨论不同阻抗估计方法的基本原理，并用模拟数据验证方法的性能。

1 大地电磁模拟数据生成

由于真实的大地电磁数据均不同程度地含有噪声，且由于地下电性结构未知，实测数据不适合于测试阻抗估计方法的稳健性，因此，生成大地电磁模拟数据对于研究大地电磁数据处理方法意义重大，

ERNST 等^[17]和 LODDO 等^[18]均讨论了大地电磁模拟数据的生成方法。

为了达到本文的研究目的，生成了 4 道大地电磁模拟数据。首先分别对两个给定的不同地层模型进行一维正演，得到两组随频率变化的阻抗值；然后对于每个频点，将这两个阻抗值分别作为一个矩阵的非对角线元素，合成的矩阵 Z 即可用来模拟地下二维结构。磁道时间序列来自 1 000 s 采样率为 15 Hz 的实测数据，对磁道时间序列进行傅里叶变换，在频域上合成矩阵 H 。电道在频域上的矩阵 E 由 $E=Z \times H$ 可以得到，经过反傅里叶变换，即可得到电场时间序列 E_x 和 E_y 。

图 1 和 2 所示为模拟结果。图 1 所示为模拟地下二维结构的视电阻率曲线，该图数据即各种阻抗估计结果对照的标准，估计结果越接近图 2，对应的估计方法就越有效。图 2 所示为得到的 4 道采样率为 15 Hz、持续 1 000 s 的模拟时间序列。

为了测试各种阻抗估计方法在噪声存在情况下的稳健性，还需要对噪声序列进行模拟。从庐江-枞阳

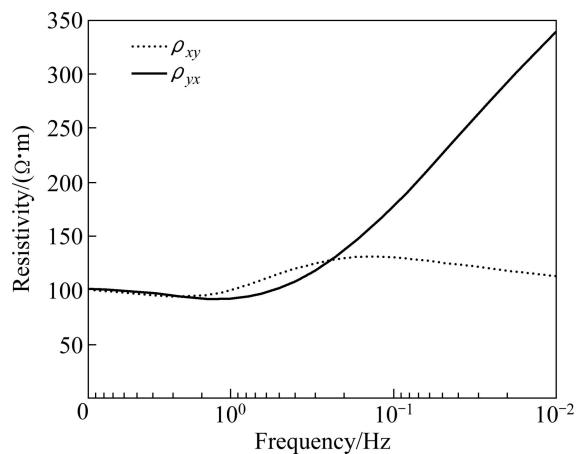


图 1 模拟视电阻率曲线

Fig. 1 Simulated resistivity curves

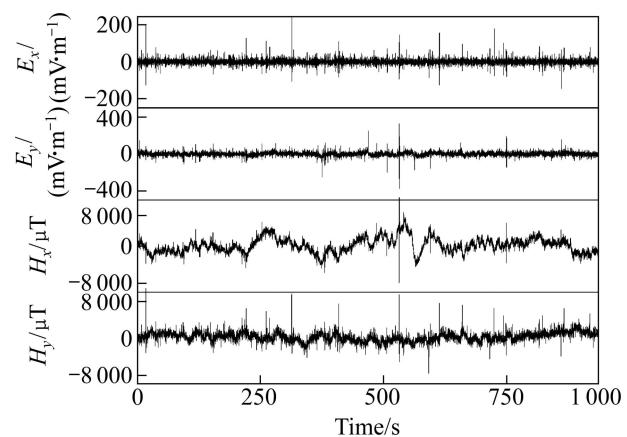


图 2 模拟时间序列

Fig. 2 Simulated time series

矿集区某大地电磁测点提取典型噪声波形, 如图3所示。从本课题组的实践经验来看, 图3中所示的方波噪声, 三角波噪声广泛存在于强干扰环境下的大地电磁低频数据中, 因此可以较真实地模拟强干扰环境下的噪声。

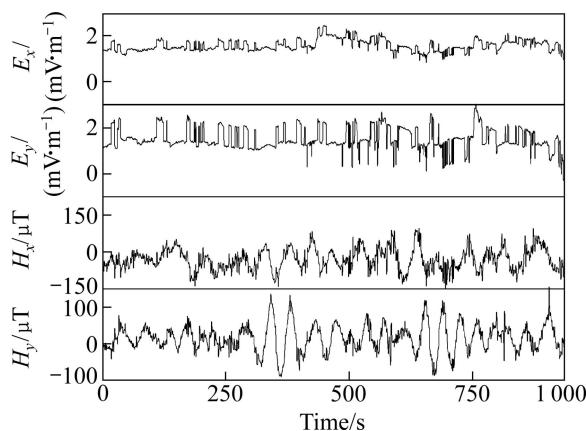


图3 从实测数据中提取的典型噪声时间序列

Fig. 3 Typical noise series extracted from magnetotelluric data

2 稳健阻抗估计方法及对比

大地电磁野外采集数据为 \mathbf{E}_x 、 \mathbf{E}_y 、 \mathbf{H}_x 和 \mathbf{H}_y 4 道时间序列, 将它们分成 n 段并进行傅里叶变换得到频域数据 \mathbf{e} 和 \mathbf{h} , 反映地下电性结构的阻抗 \mathbf{z} 在频域将电道与磁道联系在一起, 因此, 大地电磁阻抗的数学模型如下式所示:

$$\mathbf{e} = \mathbf{h} \cdot \mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为残差。

实质上, 大地电磁阻抗估计是一个二元线性回归问题, 如何在存在噪声的情况下解出 \mathbf{z} 是地球物理学家关注的问题, 从下主要讨论 4 种求取阻抗 \mathbf{z} 的方法。

2.1 最小二乘估计

SIMS 等^[19]最早提出了大地电磁阻抗张量的最小二乘估计方法(Least square estimator), 这成为了阻抗估计最基本的估计方法。它通过最小化 $\mathbf{r}^T \mathbf{r}$ 得到估计值 $\hat{\mathbf{z}}$, 其中, $\mathbf{r} = \mathbf{e} - \hat{\mathbf{e}} = \mathbf{e} - \mathbf{h}\hat{\mathbf{z}}$, \mathbf{e} 为观测值, $\hat{\mathbf{e}}$ 为估计值, 回归问题的最小二乘解如式所示:

$$\hat{\mathbf{z}} = (\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{b}})^{-1} (\bar{\mathbf{b}}^T \mathbf{e}) \quad (2)$$

式中: 上标“-”代表平均值, 上标 T 代表共轭转置。

根据 Gauss-Markov 理论, 只有当满足残差 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 互不相关且方差相同时, 最小二乘估计为最优无偏估计, 但在大地电磁实际工作中, 这个条件很难满足, 因此, 最小二乘估计很难给出满意的结果。

2.2 M 回归估计

EGBERT^[5]详细地讨论了 M 回归估计(M-regression estimator), 它与最小二乘估计的思路是一致的, 最小二乘解是通过最小化 $\mathbf{r}^T \mathbf{r}$ 得到的, 而 M 估计的解则是通过最小化 $\mathbf{R}^T \mathbf{R}$ 得到的, \mathbf{R} 为 N 行向量, 第 i 个元素为 $\sqrt{\rho(r_i/d)}$, 其中 $\rho(x)$ 即损失函数(Loss function), 用于衡量观测值与估计值之间的距离, 因子 d 决定需要降权的残差值。

对于最小二乘估计来说, 损失函数为 $\rho(x) = x^2/2$ 。M 估计的损失函数如下所示:

$$\rho(x) = \begin{cases} x^2/2, & |x| \leq \alpha \\ \alpha|x| - \alpha^2/2, & |x| > \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 通常取 1.5。当 $x < 1.5$ 时, 认为该点为正常值, 损失函数与最小二乘一致; 当 $x > 1.5$ 时, 用不同的损失函数来降低对应数据在回归问题中所占的权重。

类似于最小二乘估计式(2), M 回归估计的迭代格式为

$$\hat{\mathbf{z}}^{*[k]} = (\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{v}}^{[k]} \bar{\mathbf{b}})^{-1} (\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{v}}^{[k]} \mathbf{e}) \quad (4)$$

式中: k 为迭代次数, \mathbf{v} 为权重函数, 是损失函数的导数。在 M 回归估计中有不同的权重函数可供选择, 常见的有 Huber 权重和 Thomson 权重, 分别如式(5)和(6)所示(式(6)中 ξ 为与参加估计数目 n 有关的参数, 一般取 $\xi = \sqrt{2 \lg n}$):

$$v_{ii} = \begin{cases} 1, & |x_i| \leq \alpha \\ \alpha / |x_i|, & |x_i| > \alpha \end{cases} \quad (5)$$

$$v_{ii} = \exp[-\xi^2] \exp[-\xi(|x_i| - \xi)] \quad (6)$$

图4 所示为 Huber 权重函数与 Thomson 权重函数的对比, 展示这两种权重函数是如何降权、进而确保稳健性的。当 $|x_i|$ 接近于 0 时, 对应的数据被认为是正常数据, 权重矩阵对角线元素 v_{ii} 为 1; 当 $|x_i|$ 较大时, 对应的数据被认为是异常数据, 权重矩阵对角线元素 v_{ii} 较小, 甚至为 0。

如上文所述, α 通常取 1.5, 即以 1.5 作为是否降低权重的分界线。由图4可知, 当 $2 < |x_i| < 4$ 时, Huber 权重函数效果较好; 当 $|x_i| > 4$ 时, Thomson 权重函数效果较好。因此, 在 M 回归估计中可以采用混合的权重。

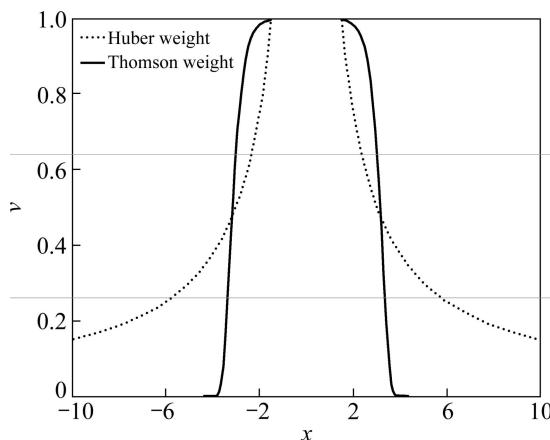


图4 Huber 权重函数与 Thomson 权重函数对比

Fig. 4 Comparison of Huber weight and Thomson weight functions

2.3 有界影响估计

从2.2的论述可知, M回归估计降低奇异值的权重均是基于 r 的, 即表明仅在电道存在噪声时, M回归估计可以给出稳定的结果。在大地电磁实际工作中, 尽管磁道信号的抗干扰能力强于电道信号的抗干扰能力, 但磁道存在噪声的情况非常普遍, 在这种情况下, M回归估计效果变差。因此, 需要一种在电道磁道均含噪声的情况下仍然稳健的估计方法, 有界影响估计(Bounded influence estimator)就是为了解决这一问题而提出的。

在统计学中, 自变量(在大地电磁中即磁道)中的噪声称为杠杆点(Leverage point)。在回归理论中, 帽子矩阵(Hat matrix)是一个重要的辅助量, 用于判断自变量中是否存在奇异值^[20]。

如前文所述, 大地电磁阻抗估计模型可以写为 $\mathbf{e} = \mathbf{h}^T \mathbf{z} + \boldsymbol{\varepsilon}$, 阻抗的最小二乘解为 $\mathbf{z} = (\mathbf{h}^T \mathbf{h})^{-1} (\mathbf{h}^T \mathbf{e})$, 将最小二乘解代入阻抗估计模型可得 $\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{h}(\mathbf{h}^T \mathbf{h})^{-1} \mathbf{h}^T \mathbf{e}$, 因此得到帽子矩阵的定义如下:

$$\mathbf{H} = \mathbf{h}(\mathbf{h}^T \mathbf{h})^{-1} \mathbf{h}^T \quad (7)$$

帽子矩阵是一个投影矩阵, 如 $\hat{\mathbf{e}} = \mathbf{H}\mathbf{e}$ 所示, 它将 \mathbf{e} 投影为 $\hat{\mathbf{e}}$, 看起来就像给 \mathbf{e} 戴了一顶帽子一样, 这也是它得名的由来。

由式(7)可知, 帽子矩阵 \mathbf{H} 仅与输入道 \mathbf{h} 有关, 与输出道 \mathbf{e} 无关。

帽子矩阵满足如下性质:

- 1) \mathbf{H} 为对称矩阵, 幂等矩阵;
- 2) \mathbf{H} 的特征值或者为0, 或者为1, 非0个数等于矩阵的秩;

3) \mathbf{H} 对角线元素 h_{ii} 满足 $0 < h_{ii} < 1$;

4) \mathbf{H} 对角线元素 h_{ii} 的期望值为 p/N , 其中, p 为待估计参数个数, 在大地电磁阻抗估计中为2, N 为参与估计的数据段数, 在大地电磁阻抗估计中通常为分段处理的段数 n , 通常 $N \gg p$;

5) 一般而言, \mathbf{H} 对角线元素 h_{ii} 满足 $h_{ii} > 2p/N$ 时, 认为对应的第 i 道输入存在奇异值。

类似于M估计迭代格(式(4)), 有界影响估计阻抗的迭代格式为

$$\hat{\mathbf{z}}_{\#}^{[k]} = (\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{w}}^{[k]} \mathbf{v}^{[k]} \bar{\mathbf{b}})^{-1} (\bar{\mathbf{b}}^T \bar{\mathbf{w}}^{[k]} \bar{\mathbf{v}}^{[k]} \mathbf{e}) \quad (8)$$

式中: \mathbf{v} 与M回归估计相同, 可采用Huber权重函数或者Thomson权重函数, \mathbf{w} 为用于降低杠杆点的矩阵, 其对角线上元素为 $w_{ii}^{[k]} = w_{ii}^{[k-1]} \exp[e^{-x^2}] \cdot \exp[e^{-x(y_i-x)}]$, $y_i = \text{tr}h_{ii}^{[k]} / p$, tr为矩阵 $\mathbf{u}^{[k]} (\mathbf{u}^{[k]} = \mathbf{v}^{[k]} \mathbf{w}^{[k]})$ 的迹, 参数 χ 类似于M回归估计中的因子 d , 决定哪些数据被认为是杠杆点, 是需要降低权重的。

有界影响估计通过矩阵 \mathbf{v} 降低电道异常数据在阻抗估计中的权重, 通过矩阵 \mathbf{w} 降低磁道噪声数据在回归问题中的权重。

2.4 重复中值估计

重复中值估计(Repeated median estimator)最早由SIEGEL^[21]提出, SMIRNOV^[10]将它应用于大地电磁阻抗估计中。重复中值估计的思路与前面几种估计方法不尽相同, 它巧妙地利用了中值远比均值稳健这一特性, 是一种高效的估计方法。

对于参与估计的第 i, j 组数据, 大地电磁阻抗估计模型可写成如下形式:

$$\begin{pmatrix} e_{xi} & e_{yi} \\ e_{xj} & e_{yj} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{xi} & h_{yi} \\ h_{xj} & h_{yj} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_{xx} & z_{xy} \\ z_{yx} & z_{yy} \end{pmatrix} \quad (9)$$

因此, 对每一组数据, 都可以根据最小二乘法解出 $z_{ij} = (\mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{b}_{ij})^{-1} (\mathbf{b}_{ij}^T \mathbf{e}_{ij})$, 经过两次循环求取中值即可得到重复中值估计结果, 如下式所示:

$$\hat{z} = \underset{i}{\text{med}} \underset{j \neq i}{\text{med}} z_{ij} \quad (10)$$

2.5 稳健性测试

稳健性测试数据来源于ROUSSEEUW等^[22], 为测试回归算法稳健性的标准数据。该数据来自天文实验, 横轴表示不同星球的表面温度, 纵轴表示星球的光线强度。

不同方法的估计结果如图5所示。其中最小二乘估计结果 $y = -0.4133x + 6.7935$, M回归估计结果

$y=-0.4134x+6.7939$, 这两种估计结果相近, 均受右上角四组奇异数据影响严重, 在图 5 中近似重合。有界影响估计结果 $y=3.0431x-8.4951$, 重复中值估计结果 $y=2.5738x-4.3400$ 。有界影响估计显示出了优越的性能, 反映了数据主体的线性关系, 此外, 重复中值估计对斜率的估计是可以接受的, 图像上显示与有界影响估计近似平行, 但截距估计失败。有界影响估计结果与 ROUSSEEUW 等^[22]给出的结果 $y=3.898x-12.298$ 与 CHAVE 等^[8]给出的结果 $y=3.2038x-9.1905$ 接近。从本数据来看, 有界影响估计的性能最为良好。

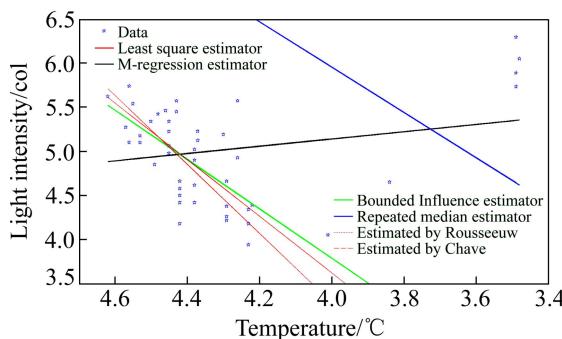


图 5 不同估计方法的标准数据测试结果比较

Fig. 5 Comparison of standard data estimated by different regression methods

3 大地电磁模拟数据处理

评价回归方法的稳健性, 崩溃点(Breakdown point)是一个重要的指标, 简单来说, 崩溃点是指该回归方法所能承受的异常数据的百分比。任何稳健回归方法的崩溃点不会超过 50%, 这一点可以从直观上理解, 因为当异常数据占总数据的一半以上时, 回归关系已经被完全淹没。通过添加不同噪声来考察不同阻抗估计方法的稳健性, 幅值与长度是添加噪声中的两个变量。本文作者对噪声序列的幅值进行归一化处理, 使能量均值为信号能量均值的 0.2 倍, 添加噪声的长度是唯一的变量, 如添加 10% 的噪声是指 1 000 s 数据中有 100 s 数据添加了噪声。

3.1 电道添加随机噪声与有色噪声

为了验证不同估计方法的稳健性, 首先添加随机噪声与有色噪声。图 6 所示为在电道添加 20% 的随机噪声时最小二乘估计与 M 回归估计结果的对比; 图 7 所示为在电道添加 20% 的有色噪声时最小二乘估计与 M 回归估计结果的对比。图 6 和 7 表现的特征相似,

从图 6 和 7 可以看出, M 回归估计的结果略优于最小二乘估计, 除少数飞点外, 二者均得到了可以接受的结果。可见, 对于一定程度的随机噪声与有色噪声, 最小二乘估计与 M 回归估计都是稳定的, 崩溃点可达到 20%。

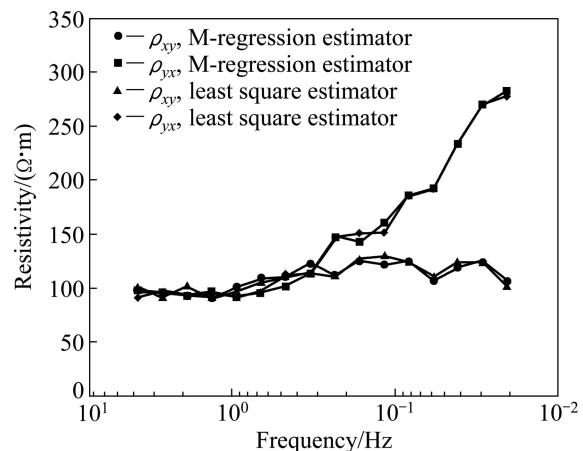


图 6 电道添加 20% 随机噪声时最小二乘估计与 M 回归估计结果的对比

Fig. 6 Comparison of results estimated by least square estimator and M-regression estimator with 20% white noise in electric channel

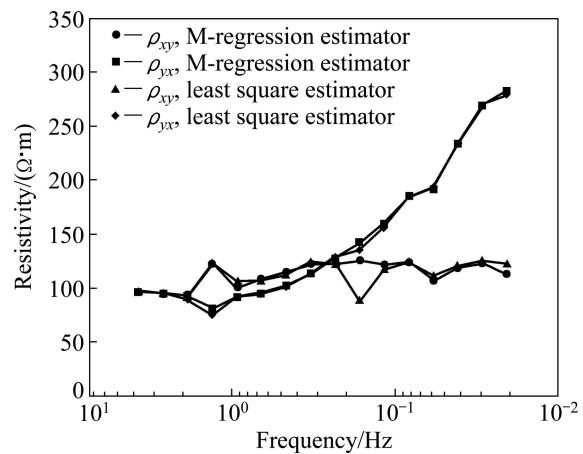


图 7 电道添加 20% 有色噪声时最小二乘估计与 M 回归估计结果的对比

Fig. 7 Comparison of results estimated by least square estimator and M-regression estimator with 20% color noise in electric channel

3.2 电道添加提取噪声

矿集区实测数据中的强电磁干扰对大地电磁阻抗估计造成的影响远大于随机噪声与有色噪声。图 8 所示为电道添加 10% 提取噪声时最小二乘估计与 M 回归估计结果的对比。从图 8 可以看出, 最小二乘估计

结果已经难以接受,存在这样的噪声时,最小二乘估计的崩溃点小于10%。而M回归估计显示了良好的性能,给出了与模拟曲线非常接近的结果。

图9所示为电道添加20%提取噪声时M回归估计与重复中值估计结果的对比;图10所示为电道添加30%提取噪声时M回归估计与重复中值估计结果的对比。由图9和10可以看出:当添加20%提取噪声时,M回归估计的结果出现飞点,但不影响曲线形态的确定,重复中值估计表现出了更好的稳健性;当添加30%提取噪声时,M回归估计曲线凌乱,无法确定形态,而重复中值估计的结果仍然稳定,因此,可以认为M估计的崩溃点在20%~30%之间,重复中值估计崩溃点在30%以上。

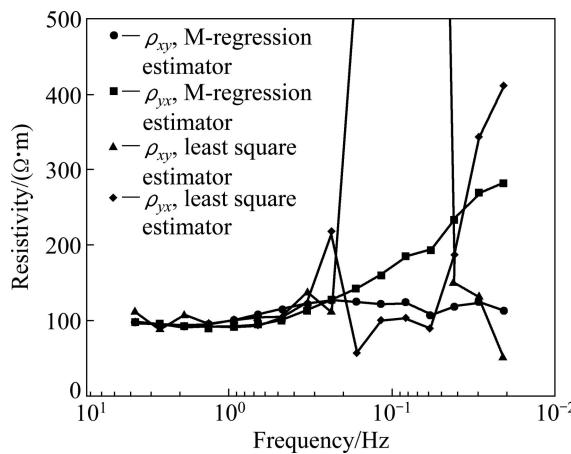


图8 电道添加10%提取噪声时最小二乘估计与M回归估计结果的对比

Fig. 8 Comparison of results estimated by least square and M-regression with 10% extracted noise in electric channel

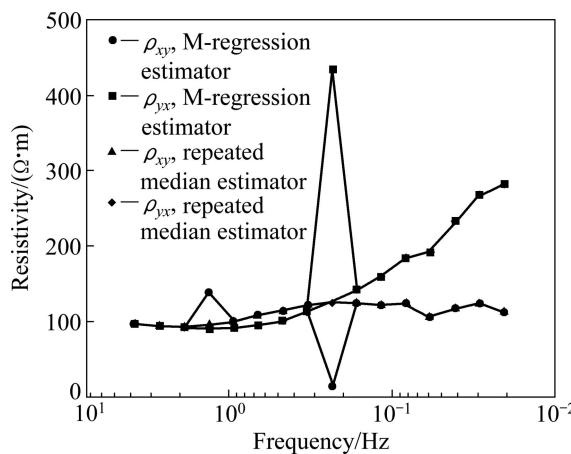


图9 电道添加20%提取噪声时M回归估计与重复中值估计结果的对比

Fig. 9 Comparison of results estimated by M-regression estimator and repeated median estimator with 20% extracted noise in electric channel

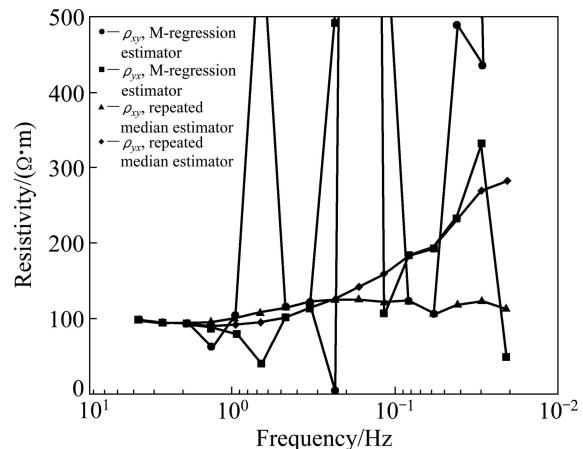


图10 电道添加30%提取噪声时M回归估计与重复中值估计结果的对比

Fig. 10 Comparison of results estimated by M-regression estimator and repeated median estimator with 30% extracted noise in electric channel

3.3 电道磁道添加提取噪声

在大地电磁实际数据采集过程中,测点数据经常受到电磁相关噪声污染,研究电道磁道添加同步噪声具有很大意义。图11所示为电道磁道均添加20%提取噪声时M回归估计结果;图12所示为电道磁道均添加20%提取噪声时有界影响估计与重复中值估计结果的对比。由图11和12可看出,在电道磁道均存在噪声的情况下,M回归结果很差,基本无法确定曲线形态;如期望的那样,有界影响估计表现出了良好的性能,仅存在少数飞点,不影响视电阻率曲线形态的确定。另外,重复中值估计表现出了很稳定的性能,估计结果略优于有界影响估计。

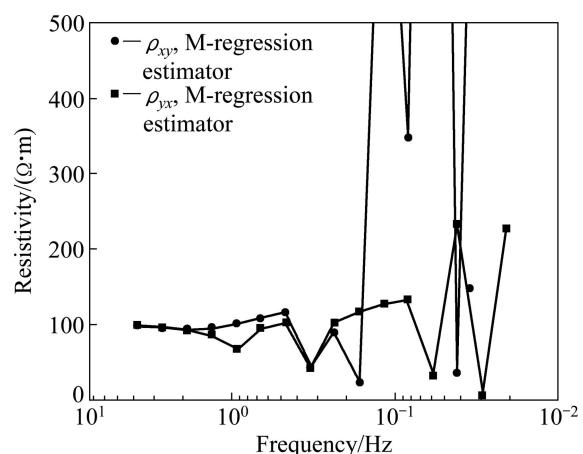


图11 电道磁道均添加20%提取噪声时M回归估计结果

Fig. 11 Results estimated by M-regression estimator with 20% extracted noise in both electric channel and magnetic channel

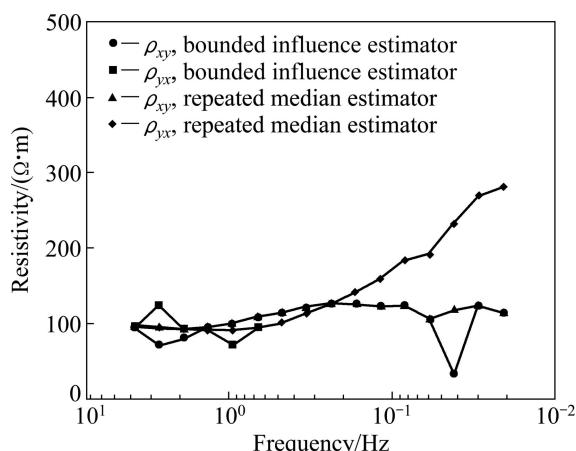


图 12 电道磁道均添加 20% 提取噪声时有界影响估计与重复中值估计结果的对比

Fig. 12 Comparison of results estimated by bounded influence estimator and repeated median estimator with 20% extracted noise in both electric channel and magnetic channel

4 结论

1) 模拟了仿真度高的大地电磁时间序列与噪声序列, 为后续研究提供了可对照的标准。阐述了最小二乘估计、M 回归估计、有界影响估计和重复中值估计 4 种估计方法的原理。

2) 比较稳健性测试结果与大地电磁模拟数据处理结果可知, 有界影响估计和重复中值估计表现出了良好、稳定的性能, 建议在大地电磁阻抗估计中采取这两种估计方案。

3) 从模拟数据处理结果看, 大地电磁原始数据的质量仍然是非常重要的, 因为稳健估计方法并不能完全地解决大地电磁噪声问题, 最稳健的估计方法崩溃点也在 40%~50% 之间, 这就要求原始数据中有一半以上的数据段是不含噪声的。因此, 对大地电磁时间序列进行信噪识别或者信噪分离, 对提高大地电磁数据处理效果也是非常必要的。

REFERENCES

- [1] GAMBLE T D, GOUBAU W M, CLARKE J. Magnetotellurics with a remote magnetic reference[J]. Geophysics, 1979, 44(1): 53–68.
- [2] RITTER O, JUNGE A, DAWES G. New equipment and processing for magnetotelluric remote reference observations[J]. Geophysical Journal International, 1998, 132(3): 535–548.
- [3] LARSEN J C, MACKIE R L, MANZELLA A, FIORDELISI A, RIEVEN S. Robust smooth magnetotelluric transfer functions[J]. Geophysical Journal International, 1996, 124(3): 801–819.
- [4] OETTINGER G, HAAK V, LARSEN J C. Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif[J]. Geophysical Journal International, 2001, 146(3): 659–669.
- [5] EGBERT G D, BOOKER J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophysical Journal International, 1986, 87(1): 173–194.
- [6] CHAVE A D, THOMSON D J, ANDER M E. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1987, 92(B1): 633–648.
- [7] CHAVE A D, THOMSON D J. Some comments on magnetotelluric response function estimation[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B10): 14215–14225.
- [8] CHAVE A D, THOMSON D J. A bounded influence regression estimator based on the statistics of the hat matrix[J]. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 2003, 52(3): 307–322.
- [9] CHAVE A D, THOMSON D J. Bounded influence magnetotelluric response function estimation[J]. Geophysical Journal International, 2004, 157(3): 988–1006.
- [10] SMIRNOV M Y. Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high breakdown point[J]. Geophysical Journal International, 2003, 152(1): 1–7.
- [11] SUTARNO D. Development of robust magnetotelluric impedance estimation: A review[J]. Indonesian Journal of Physics, 2008, 16(3): 79–89.
- [12] 汤井田, 李晋, 肖晓, 张林成, 吕庆田. 数学形态滤波与大地电磁噪声压制[J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1784–1793.
TANG Jing-tian, LI Jin, XIAO Xiao, ZHANG Lin-cheng, LU Qing-tian. Mathematical morphology filtering and noise suppression of magnetotelluric sounding data[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(5): 1784–1793.
- [13] 汤井田, 李晋, 肖晓, 徐志敏, 李灏, 张弛. 基于数学形态滤波的大地电磁强干扰分离方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2215–2221.
TANG Jing-tian, LI Jin, XIAO Xiao, XU Zhi-ming, LI Hao, ZHANG Chi. Research on magnetotelluric sounding data strong interference separation method based on mathematical morphology filtering[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2215–2221.
- [14] 陈海燕, 魏文博, 景建恩, 贺日政, 田继枫. 广义 S 变换及其在大地电磁测深数据处理中的应用[J]. 地球物理学报, 2012, 27(3): 988–996.
CHEN Hai-yan, WEI Wen-bo, JING Jian-en, HE Ri-zheng, TIAN Ji-feng. The generalized S-transform and its application in

- the processing of magnetotelluric sounding data[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(3): 988–996.
- [15] 景建恩, 魏文博, 陈海燕, 金 胜. 基于广义 S 变换的大地电磁测深数据处理 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 4015–4022.
JING Jian-en, WEI Wen-bo, CHEN Hai-yan, JIN Sheng. Magnetotelluric sounding data processing based on generalized S transformation[J]. Chinese J Geophys, 2012, 55(12): 4015–4022.
- [16] 张 刚, 王绪本, 张 伟, 罗皓中, 罗 威. 重复中位数估计 Robust 算法在长周期大地电磁中的应用 [J]. 物探与化探, 2011, 35(6): 813–816.
ZHANG Gang, WANG Xu-ben, ZAHNG Wei, LUO Hao-zhong, LUO Wei. The application of robust algorithm based on repeated median estimator in the long-period magnetotelluric survey[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 813–816.
- [17] ERNST T, SOKOLOVA E Y, VARENTSOV I M, GOLUBEV N G. Comparison of two techniques for magnetotelluric data processing using synthetic data sets[J]. Acta Geophysica Polonica, 2001, 49(2): 213–244.
- [18] LODDO M, SCHIAVONE D, SINISCALCHI A. Generation of synthetic wide-band electromagnetic time series[J]. Annals of Geophysics, 2009, 45(2): 289–301.
- [19] SIMS W E, BOSTICK JR F X, SMITH H W. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data[J]. Geophysics, 1971, 36(5): 938–942.
- [20] HOAGLIN D C, WELSCH R E. The hat matrix in regression and ANOVA[J]. The American Statistician, 1978, 32(1): 17–22.
- [21] SIEGEL A F. Robust regression using repeated medians[J]. Biometrika, 1982, 69(1): 242–244.
- [22] ROUSSEEUW P J, LEROY A M. Robust regression and outlier detection[M]. New Jersey: Wiley, 2005.

(编辑 陈卫萍)