

海洋环境中大地电磁测深阻抗的 ROBUST 估计

李桐林¹⁾ 翁爱华²⁾ 林君¹⁾

(1) 长春科技大学信息科学与技术学院, 长春 130026; 2) 长春科技大学地球探测与信息技术学院, 长春 130026)

摘要 传统上, 地球的电磁响应函数均采用最小二乘法估计, 它假定信号的噪声是高斯正态分布。如果实际数据偏离这种分布, 对系统参数的估计将产生较大偏差。在海洋环境中, 研究表明, 海水产生的电磁场噪音偏离正态分布, 并且海水产生电磁噪音的频率范围正好与天然电磁场的“噪声洞”相符。这进一步降低了该频段的信噪比。讨论了 Robust 估计的原理、海洋环境的电磁噪声、Robust 的程序实现及其在海洋环境中大地电磁测深阻抗分析的应用。

关键词 阻抗分析 海洋 大地电磁测深

中图分类号 P631.2

第一作者简介 李桐林 男 36 岁 博士后 教授 地球物理专业 已发表“重磁数据人机联作系统的研制及其应用”等论文

在大地电磁观测中, 由于各种噪声的存在, 使得阻抗即地球的电磁响应函数的估计不可避免地产生误差。传统的阻抗获取方法基于电磁场的误差分布符合高斯分布, 利用频率分析及最小二乘回归求解。但是大地电磁资料误差分析的统计研究表明, 各数据道的误差并不相对独立也不完全遵从正态分布。并且大多数数据中都含有少量的异常数据点。当电磁信号的信噪比较低时, 飞点的影响十分突出。为了解决上述问题, 国内外专家发展了多种新的处理技术, 如根据相干性对数据段进行加权及选择, 用远参考道技术消除相关噪声等, 在一定程度上改善了大地电磁测深阻抗的质量, 但也都有各自的局限性。

Robust 统计学(或称稳健统计学)在过去 20 多年里受到人们的注目, 并得到了迅速发展, 它是研究实际模型与理想模型有微小偏离, 或当实际分布与理想分布在形状上有偏离时对这种偏离不敏感或相当不敏感的统计学方法。近年来, Egbert 和 Booker^[1]、Chave^[2]以及 Sutarno 和 Vozoff^[3]等人将 Robust 方法应用于电磁响应函数研究, 根据观测误差的剩余功率谱的大小对数据加权, 注重未受干扰的数据(假定其为正态分布), 降低飞点的作用, 从而改善了阻抗估计的质量^[4]。我们将该 Robust 方法用于海洋大地电磁测深的阻抗分析中, 获得了较好的效果。

1 Robust 估计原理

地球的地电模型通常都是二维或三维的, 即电阻率不仅沿垂向变化, 沿水平方向也存在变化。在此情况下, 理论和实验都表明: 地表观测的电场(E_x 、 E_y)和磁场(H_x 、 H_y)遵循如下公式^[5]

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \\ E_y &= Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \end{aligned} \quad (1)$$

其中 Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{xx} , Z_{yy} 是能够反映地球电性结构的阻抗函数。

将(1)式写成一般线性回归问题

$$X = U\beta + e \quad (2)$$

其中 U 是 $n \times 2$ 阶矩阵, U 为输入变量, 表示一对水平分量的 n 次观测值, 向量 X 为输出变量, 表示 E_x , E_y 的 n 次预估值, β 为待求的张量阻抗元素 Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} , Z_{yy} ; e 为未知的误差项。解的标准二乘形式为

$$\sum_{i=1}^n (x_i - \sum_{j=1}^p u_{ij}\beta_j)^2 = \text{极小} \quad (3)$$

在使预测值和观测值之间的差最小这点上, Robust 与最小二乘法所不同的是: Robust 方法不允许少量异常数据飞点在阻抗函数的估算中起控制作用, 其作法是使下式最小

$$\rho(r_i) = \sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{x_i - \sum_{j=1}^p u_{ij}\beta_j}{\sigma}\right) = \text{极小} \quad (4)$$

这里 $\rho(r)$ 为一适当函数, 称为损失函数, r 为误差,

σ 为最小二乘拟合的方差, 根据 Huber 的定义^[5]:

$$\rho(r) = \begin{cases} r^2/2 & |r| \leq r_0 \\ r_0|r| - r_0^2/2 & |r| > r_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中 r_0 是调整量, 一般取 $r_0 = 1.5$, 对 (5) 式的求解等价于求解它的一阶导数为零的方程, 即:

$$\mathcal{Q} \left(\frac{x_i - \sum_{j=1}^p u_{ij} \beta_j}{\sigma} \right) = 0 \quad (6)$$

或 $\mathcal{Q}(r) = \rho(r) = 0$

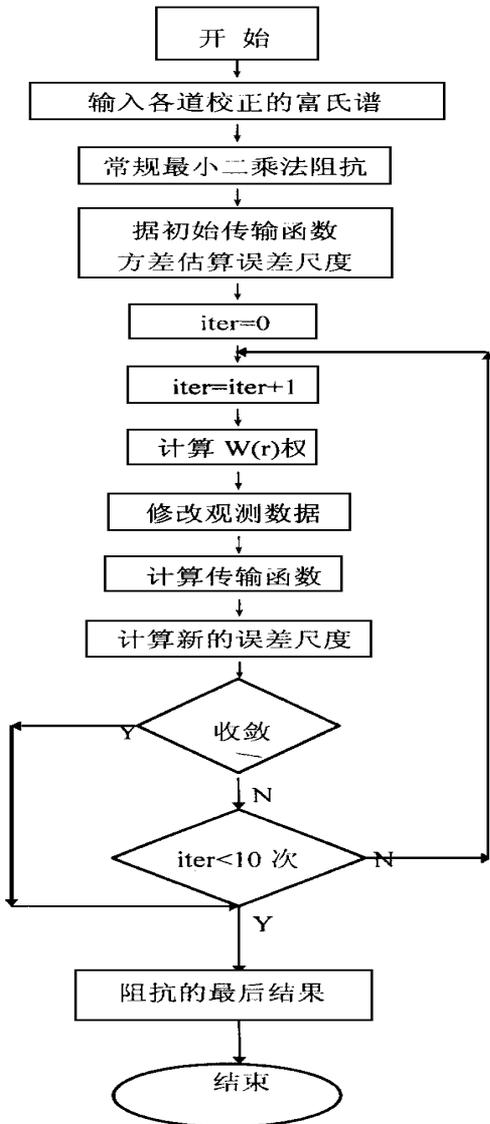


图 1 稳健阻抗分析程序框图

Fig 1 Flowchart of Robust impedance estimation

对 (6) 式的求解可以有各种数值算法, 最简单的是将其表示成加权最小二乘形式, 并使之线性化迭代求解, 定义权

$$W(r) = \mathcal{Q}(r)/r \quad (7)$$

对于 (7) 的 Huber 权函数为

$$W(r) = \begin{cases} 1 & |r| \leq r_0 \\ r_0/|r| & |r| > r_0 \end{cases}$$

权函数的物理意义很明显, 当误差 r 较小时, 权函数为 1, 原观测值不变, 而当 r 较大时, 权函数小于 1, 将原数据调小。

回归法求取大地电磁阻抗函数步骤如下:

首先用最小二乘法得到一初始解, 计算出剩余值和尺度估算的初值, 然后计算 $W(r)$, 并从 (6) 式解得 β_0 。每次迭代都用上一次迭代的剩余值和尺度估计, 并用修改的观测值 $\tilde{x}_i^{(m)}$ 代替原观测值 x_i

$$\tilde{x}_i^{(m)} = u_{ij} \hat{\beta}_j^{(m)} = \hat{e}_i^{(m)}$$

重复如上步骤, 直到收敛。按照如上思路, 给出了 Robust 的程序框图 (图 1)。

2 实验数据与结论

运动的海水同地球磁场作用 (罗伦兹力) 将对外源大地电磁场产生干扰。在浅海环境中, 海水的运动

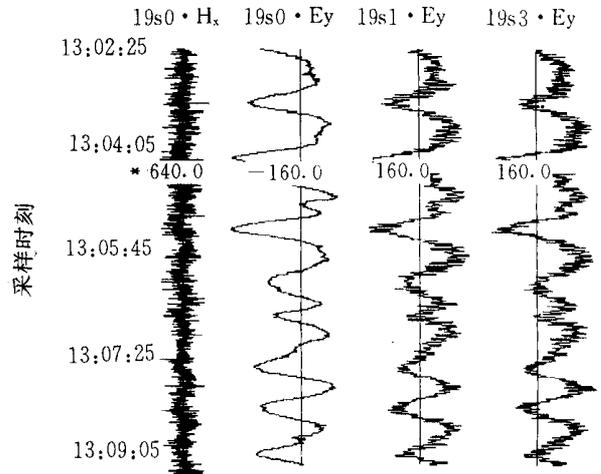


图 2 海陆阵列观测东西向电分量时域对比图

Fig 2 Oceanic and terrestrial E_x comparison

规律非常复杂, 因此其所产生的电磁干扰也非常复杂。图 2 是在辽河滩海地区, 利用阵列同步观测技术, 获得的海陆东西向电场分量对比图。两台仪器置于同一点。图中左端的数字代表采样时间, 从左到右的 4 条曲线分别为陆上南北向磁分量, 陆上东西向电分量, 海中两台仪器东西向的电分量。研究表明: 海水运动产生的电磁场主要是 1~ 10 s 间的干扰, 并且也不是正态分布, 而天然电磁场在 1~ 10 s 左右能量非常微弱, 恰与海水在该频段产生的干扰信号相混, 进一步降低了该频段的信噪比。而 1~ 10 s

频段的阻抗对于以石油勘探为目的的大地电磁测深非常重要。图 3 是常规最小二乘和 Robust 方法进行阻抗分析的对比图。可以看出: Robust 方法较最小

二乘方法对于抑制非高斯分布噪声和信噪比较低频率段的阻抗分析为优, 特别是在 1~ 10 s 之间的频段。

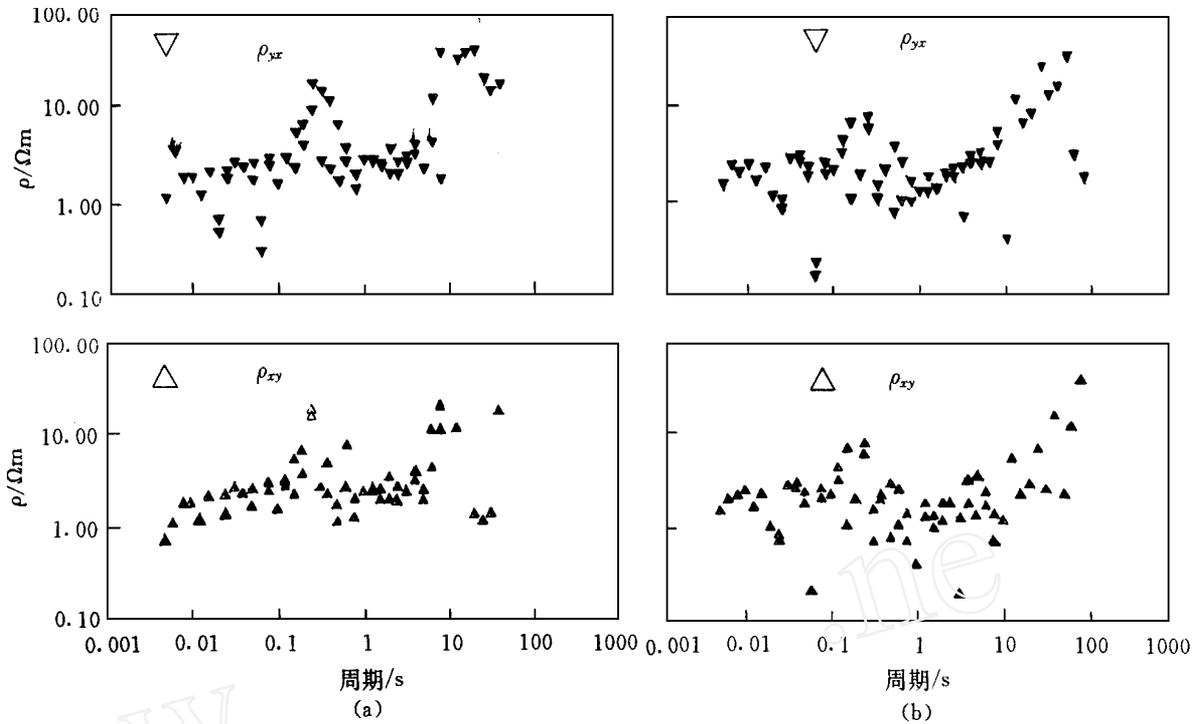


图 3 最小二乘同稳健分析结果对比图

Fig 3 Comparison between least mean square and Robust

(a) 最小二乘结果; (b) Robust 的结果

参 考 文 献

1 Egbert G D, Booker J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions Geophys Roy Astro Soc, 1986, **87**: 175~ 194

2 Chave A D, Thomson D J, Ander M E. On the Robust estimation of power spectra, Coherences, and transfer functions J Geophys, 1987, **92**: 633~ 648

3 Sutarno D, Vozoff K. Robust estimation of magnetotelluric impedance tensors Expl Geophys, 1989, **20**: 383 ~ 398

4 Jones A G, Chave A D, Egbert G D, et al A comparison of techniques for magnetotelluric response estimation J Geophys Res, 1989, **94**: 14 201~ 14 213

5 刘国栋, 邓前辉主编. 电磁法研究与勘探. 北京: 地震出版社, 1993

ROBUST ESTIMATION OF ELECTROMAGNETIC FUNCTION FOR MARINE MAGNETOTELLURIC DATA

Li Tonglin, Weng Aihua, Lin Jun

(Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026)

Abstract The electromagnetic transfer function of the earth is traditionally estimated by least square method. The departures from ideal behavior (Gaussian distribution) are often large enough to seriously contaminate ordinary least square procedure. Robust estimation of electromagnetic transfer function has been used in marine magnetotelluric study. The principles, program flow chart and its effectiveness of Robust are discussed in the paper.

Key words impedance estimation, ocean, magnetotelluric