

中心回线瞬变电磁测深一维 Occam 反演*

张继令¹ 翁爱华²

(1. 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300251; 2. 吉林大学应用地球物理系, 吉林长春 130026)

Inversion Display of Occam Used in In-Loop Transient Electromagnetic Sounding

Zhang Jiling Weng Aihua

摘要 将 Occam 反演技术应用到中心回线瞬变电磁测深数据的反演中,为中心回线瞬变电磁测深数据的自动、快速解释奠定基础,解决 Occam 反演技术中的正则化参数选择、迭代步长的控制、模型约束的影响等关键问题。利用 Occam 反演技术可以较为准确地获得地电断面的电阻率分布,一般 5 次迭代目标函数就可以收敛到 5×10^{-2} 。相对视电阻率的定性或者半定量解释技术,Occam 反演的结果更准确。

关键词 瞬变电磁测深 中心回线 Occam 反演 一维模型

瞬变电磁测深在石油勘探、矿产勘察、甚至水文调查和工程勘察的广泛应用得益于一系列优点^[1-3]。由于瞬变电磁技术理论模拟的复杂性,对其观测数据目前仍然主要进行定性分析和一维定量半定量解释^[4-6]。在对模型进行一维定量反演时,通常从模型的某个猜测开始,采用迭代技术,对模型参数进行逐步的修正,最终得到反演结果^[7]。

非线性反演问题做线性化处理,导致反演对初始模型的依赖性较大,为了保证迭代稳定收敛,需要给出模型参数较为合理的初始猜测^[8]。但这项工作往往较为困难,因为许多情况下,反演者对最终的模型可能知之甚少。

尽管一般的迭代过程经过修正,能减轻反演对初始模型的依赖性。但在实际工作中,摆脱对初始模型的依赖仍然是非常有意义的问题。Constable 等^[9]、De Groot - Hedlin 等^[10]将传统的非线性反演迭代过程作

了改进,提出了著名的 Occam 反演方法,实现了反演过程的自动化,并将其应用到大地电磁测深和电阻率测深的一维、二维模型反演中。由于 Occam 反演的结果独立于初始模型猜测,国内也将其应用到大地电磁测深资料的反演中^[11,12],而且在其他的地球物理数据反演中也应用了该方法^[13]。

瞬变电磁测深观测到的是感应电动势,但一般都由其转换的视电阻率作为模型响应。由于视电阻率定义的复杂性及视电阻率计算方法的差异^[14-17],建议直接从感应电动势入手进行反演^[7]。本文将 Occam 反演方法,应用到瞬变电磁测深最常用的中心回线观测装置感应电动势的反演中。通过对理论模型与实际并旁瞬变电磁测深资料的反演,表明中心回线瞬变电磁测深数据的 Occam 反演收敛快,获得的模型较为准确、可靠,从而为中心回线瞬变电磁测深数据的自动、快速解释奠定基础。

1 Occam 反演基本原理

设用中心回线装置观测到 N 个感应电动势 $d = \{d_i, i = 1, \dots, N\}$, 它可表示为相应的模型理论响应与

收稿日期: 2007-01-26

*吉林省杰出青年基金(编号: 20050122)、大庆探区外围中新世代(编号: XQ2004-05-07)联合资助。

第一作者简介: 张继令(1968—),男,1993年毕业于西安地质学院物探专业,高级工程师。

参 考 文 献

- [1] 北京城建设计研究总院. 杭州地铁 1 号线初步设计方案 [R]. 杭州: 北京城建设计研究总院, 2006
- [2] 金兴平, 杨迎晓, 李辉煌. 杭州地铁一号线岩土工程问题探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005(11): 5680 - 5685

- [3] 杭州市勘测设计研究院. 杭州地铁 1 号线初步勘察报告 [R]. 杭州: 杭州市勘测设计研究院, 2004
- [4] GB50307—1999 地下铁道、轻轨交通岩土工程勘察规范 [S]
- [5] GB50107—2003 地铁设计规范 [S]

观测误差的和,即

$$d_i = f(Q_i, n) + \epsilon_i, i = 1, \dots, N \quad (1)$$

其中 ϵ_i 为方差为 σ_i^2 的 0 均值数据独立随机噪音, n 为长度为 M 的未知层状电阻率分布矢量。反演时,要求模型电阻率使下面的目标函数达到最小,即

$$\chi^2(n^{est}, d) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{d_i - f_i(n^{est})}{\sigma_i} \right]^2 \quad (2)$$

由于感应电动势是电阻率的非线性函数,对于上面的极小化问题可从一个初始猜测开始,通过迭代加以解决^[8]。假设初始模型为 n^0 接近真解,在该猜测一个小的邻域内,将模型响应展开,并忽略高次项,有

$$d_i = f(Q_i, n^0) + \sum_{j=1}^N J_{ij} n_j, i = 1, \dots, N \quad (3)$$

其中 $J_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial n_j} \right|_{n^0}$ 被称为灵敏度矩阵。为讨论方便,假设数据方差为 1。将上式代入 (1) 式并对模型参数修正量极小化,有

$$J n = b \quad (4)$$

由于问题的非适定性,通常要对模型修正量加以约束,得到稳定的解,即要求

$$\min: \|W n\|$$

满足

$$J n = b \quad (5)$$

式中 W 为模型约束矩阵。上式的求解可以通过下面的广义逆反演完成。第 $k+1$ 次模型估计可以通过修正第 k 次模型得到,即

$$n_{k+1}^{est} = n_k^{est} + J^+ b \quad (6)$$

其中, J^+ 为矩阵 J 的广义逆矩阵。

为了克服反演过程由于初始模型不合适导致的发散问题,Constable 等对上述过程做了调整^[9,10]。假设迭代进行了 k 次,相应的模型为 n^k ,基于该模型, (3) 式可以写成如下的矢量形式

$$d = f(n^k) + J^k n^k = f(n^k) + J^k n^{k+1} - J^k n^k \quad (7)$$

其中 n^{k+1} 为需要估计的第 $k+1$ 次模型参数。进一步可以将它用第 k 次模型参数表示,即

$$J^k n^{k+1} = d - f(n^k) + J^k n^k \quad (8)$$

在 (8) 式基础上,直接对模型参数本身,而不是其修正量进行约束,从而有如下的优化问题

$$\min: \|W n^{k+1}\|$$

满足

$$J^k n^{k+1} = d - f(n^k) + J^k n^k \quad (9)$$

上式的改进使得在实际工作中反演不再依赖于初始模型参数。(9) 式是 Occam 反演的基础。

在反演中,上述优化问题被等价成如下的线性方程组求解^[18]

$$\begin{bmatrix} J^k \\ W \end{bmatrix} n^{k+1} = \begin{bmatrix} d - f(n^k) + J^k n^k \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

该方程可以利用奇异值分解技术进行求解。通过 (10) 式,可以建立起反演迭代过程,图 1 是 Occam 反演的基本流程。

2 反演中的问题

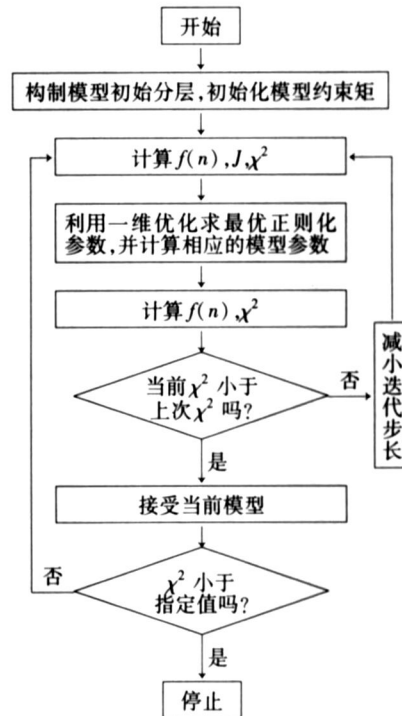


图 1 Occam 反演基本流程

2.1 正则化参数选择

正则化参数对反演结果的影响非常大。为了确定合理的正则化参数,认为使误差目标函数 (3) 达到最小的正则化参数是最优的^[10]。对于第 $k+1$ 次迭代,目标函数实际是正则化参数的单变量函数。在实际反演过程中,从非常小的数值开始,按照一定的步长,逐渐增大正则化参数到非常大的值,对每个正则化参数求解 (10) 式,获得对应的模型参数 n^{k+1} (), 并计算相应的目标函数 χ^2 (); 将最小的目标函数值对应正则化参数作为最优正则化参数,其对应的模型参数作为本次迭代的最优模型。

图 2 是目标函数随正则化参数的变化情况。从图 2 可见,随着迭代的进行,最优正则化参数逐渐减小,并趋于稳定值。实际上,在迭代开始时,数据拟合差大,为平衡目标函数与模型约束,需要较大的正则化参数。随着迭代的进行,目标函数逐渐减小,必须减小正

则化参数,以拟合观测数据。

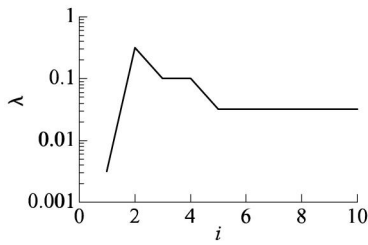


图2 目标函数随正则化参数变化规律

2.2 迭代步长的控制

在上述的反演过程中,虽然每次迭代的最终模型参数是对应使预测误差达到最小的正则化参数,但不能保证在反演过程中,预测误差始终减小。即可能出现迭代步长过大的可能。为了保证迭代误差逐渐减小,当迭代步长过大时,可以通过压缩步长,使误差不会致增大。

假设第 k 次模型 n^k 与第 $k+1$ 次模型 n^{k+1} 的目标函数为 λ_k^2 和 λ_{k+1}^2 。如果 $\lambda_k^2 > \lambda_{k+1}^2$,说明迭代是逐渐收敛的,则接受 n^{k+1} ,继续进行迭代。但如果 $\lambda_k^2 < \lambda_{k+1}^2$,预测误差增大,说明迭代的步长过大。此时,可以减小迭代步长,比如减小 $1/2$,计算目标函数,直到 $\lambda_k^2 > \lambda_{k+1}^2$ 。

2.3 模型约束的影响

模型约束可以采用能量最小、模型最平坦或者最光滑等。模型能量最小相当于要求反演的模型与某个指定的先验模型误差最小。由于先验模型控制反演结果,如果不合适,导致反演不能收敛。因此,在 Occam 反演技术中,一般不采用能量最小约束。而更多采用最平坦模型与最光滑模型约束^[9, 10, 18]。相应的约束矩阵分别为

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \dots & 0 \\ 0 \dots & -1 & 1 & \dots 0 \\ & & \dots & \dots \\ 0 \dots & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}_{(M-1) \times M} \quad (11)$$

$$W = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & 0 & \dots \\ & & \dots & \dots & & \\ 0 & \dots & 0 & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}_{(M-2) \times M} \quad (12)$$

采用 (11) 式与 (12) 式约束反演的结果见图 3。图 3a 是反演拟合曲线,图中“ \bullet ”为观测数据,实线为理论模型计算感应电动势,其右上角小图为光滑模型约束时拟合差在迭代过程中的变化规律。从图中可见,随迭代的进行,目标函数先是快速下降,然后趋于稳定,在迭代 3~4 次后,目标函数都小于 2.5×10^{-2} ,

说明收敛是快速而且稳定的。上述规律对最平坦约束也是一样的。

图 3b 为两种约束的反演模型。从图中可见,在断面的相对浅部,两种约束基本没有区别。在深部,光滑模型的反演层电阻率要比平坦模型的大。从而说明,反演方法的选择对深部模型的分辨效果可能存在较大的影响。无论如何,由于两者反演的电阻率随深度变化规律是一样的,因此都可以称为光滑模型反演。但由于瞬变电磁测深对高阻地质体的反应不灵敏,可以认为平坦模型更为合理。

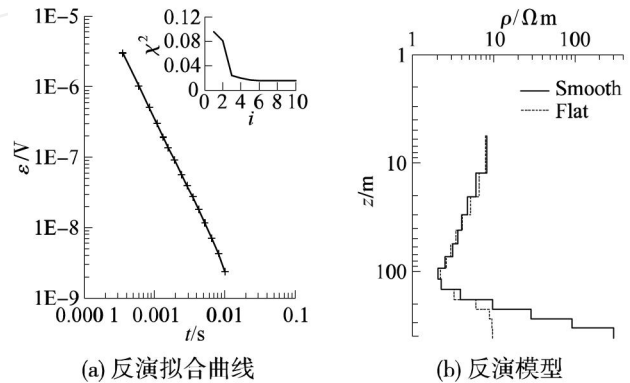


图3 不同模型约束的反演结果

3 数值结果

在下面的讨论中,地电断面被剖分为厚度逐渐增大的 15 个电性层,具体的厚度由线圈大小、采样时间和断面平均电阻率确定^[4]。在反演中,各个电性层初始电阻率都为 10 m 。迭代要求 1% 拟合差或者最多 10 次的迭代。

3.1 理论数据

为了便于比较与分析,图 4 给出了一个基于 4 层 KHK 型电阻率断面理论模型 (图 4b 中的粗实线) 的感应电动势 (图 4a 中 \bullet) 反演结果。经过 5 次的迭代,获得了图 4b 中反演结果。此时,目标函数达到 1×10^{-2} ,反演稳定收敛。从图 4b 可见,对于低阻层,反演的结果是可靠的。

3.2 实际数据

实际数据来自一次野外测量结果^[7] (图 5a 的左边部分)。经过 4 次迭代,拟合差相应达到 10^{-3} (图 5a 右上小图),对应的正则化参数变化情况见图 5a 右下角。相应的反演结果见图 5b。距离采集点 200 m 左右有一口勘探井,并进行电阻率测井 (图 5c)。从图 5c 可见,测点附近地层电阻率非常低,一般电阻率都小于 10 m ,部分地层甚至低于 1 m 。因此,即使采用边

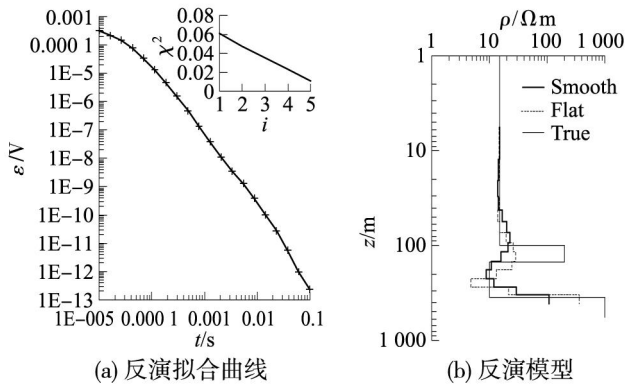
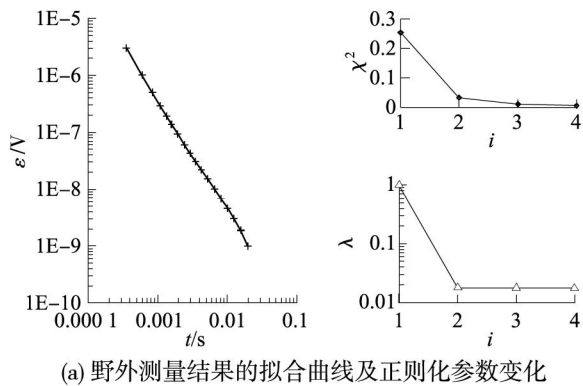


图 4 四层理论模型的反演结果

长 100 m 的发射线圈,勘探的深度也不会很大。反演



(a) 野外测量结果的拟合曲线及正则化参数变化

的结果表明,实际数据能控制的深度大约 300 m 左右。比较测井结果可见,在层位的标定上,反演的模型基本反映断面上电阻率随深度变化。但在深部,光滑模型反演效果比平坦模型好。

4 结论

将 Occam 反演成功应用于中心回线瞬变电磁测深资料的反演中,克服了由于瞬变电磁测深感应电动势电性参数意义不明确,导致常规参数化非线性迭代反演中,合理初始模型选择困难的缺点。相对视电阻率的定义等定性或者半定量解释技术,Occam 反演的结果更准确。

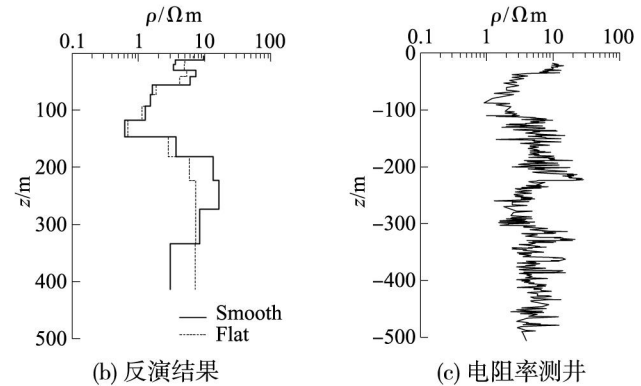


图 5 井旁测深反演结果

致谢 本文得到吉林省杰出青年基金(编号:20050122)和大庆探区外围中新世(编号:XQ2004-05-07)的联合资助。

参考文献

- [1] 朴化荣. 电磁测深原理 [M]. 北京:地质出版社, 1990
- [2] 纳比吉安著,赵经祥,等译. 电磁法勘探—理论卷 [M]. 北京:地质出版社, 1992
- [3] 张小路,王 钟. 瞬变电磁测深在海南福山凹陷的试验研究 [J]. 石油地球物理勘探, 1997, 32(6): 878 - 883
- [4] 蒋邦远. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探 [M]. 北京:地质出版社, 1998
- [5] Christensen N B. A generic 1 - D imaging method for transient electromagnetic data Geophysics, 2002, 67(2): 438~ 447
- [6] 严良俊,胡文宝. 中心回线瞬变电磁测深法快速电阻率成像方法及应用 [J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(6): 58~ 61
- [7] 翁爱华,董瑞春. 瞬变电磁测深约束反演解释软件系统及其应用 [J]. 地质与勘探, 2004, 40(增刊): 180~ 183
- [8] 杨文采. 地球物理反演的理论与方法 [M]. 北京:地质出版社, 1997
- [9] Constable S C, Parker R L, Constable C G Occam 's inversion: a practical algorithm for generating smooth modes from electromagnetic

sounding data Geophysics, 1987, 52(2): 289~ 300

- [10] De Groot - Hedlin C, Constable S C. Occam 's inversion to generate smooth two - dimensional models from magnetotelluric data Geophysics, 1990, 55(12): 1613~ 1634
- [11] 杨长福,林长佑,陈军营,等. 用 Occam 法及广义逆法对兰州地区 MT 资料的一维反演解释 [J]. 西北地震学报, 2002, 24(4): 289 - 294
- [12] 翁爱华,刘国兴. 大地电磁测深法光滑模型反演原理. 地球物理测井学术论文集 [G]. 北京:石油工业出版社, 2003: 71~ 76
- [13] 欧阳联华,王家林,吴健生. 利用面波频散反演场地参数的 Occam 法 [J]. 物探化探计算技术, 2003, 25(1): 1~ 4
- [14] 殷长春,朴化荣. 电磁测深法视电阻率定义问题的研究 [J]. 物探与化探, 1991, 15(4): 290~ 299
- [15] 严良俊,胡文宝. 长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率的求取及快速反演方法 [J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 532~ 538
- [16] 翁爱华,陆冬华,刘国兴. 利用连分式定义瞬变电磁法全区视电阻率研究 [J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 56~ 58
- [17] 白登海, Meju M A, 卢 健,等. 时间域瞬变电磁法中心方式全区视电阻率的数值计算 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697~ 704
- [18] 翁爱华. 核磁共振测井基础理论与实验研究 [D]. 吉林大学, 2001