

地形对不同反演的影响

朱崇利

(成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室, 四川成都 610059)

[摘 要] 根据观测数据和模型参数之间的关系, 通常将求误差函数的最优问题的方法通常分为线性反演和非线性反演; 线性反演要求有相当准确的背景介质模型的条件, 这和地球物理问题中的实际情况相矛盾。特殊情况下, 线性反演甚至出现发散的情况。而非线性反演不用求目标函数的偏导数, 全局随机搜索模型空间的最优解的办法, 避免了问题的线性化, 在山区复杂地形条件下, 通过对比论证, 非线性反演能够获取更合理的真实地电模型, 从而说明由于非线性反演适应性较强、精度较高已被广泛地应用于地球物理的各个领域。

[关键词] 地形 非线性共轭梯度 反演 线性

[中图分类号] P631 [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2014)01-0162-05

Zhu Chong-li. Influence of terrain on different inversions[J]. Geology and Exploration, 2014, 50 (1): 0162-0166.

0 引言

目前 MT 法已经应用于地质探矿各个领域, 而反演解释才是 MT 法的终极目的。反演问题最终形式都是求目标函数的最优化问题, 即最小值问题, 在转化的过程中所用的手段不同, 导致形成的算法也不同。如当今在 MT 反演中占据主导地位的牛顿法、拟牛顿法、Occam 等均采用新点、旧点之间按照某个方向不断的更新迭代, 直到收敛为止, 即达到最优目的。但是它们在根据目标函数梯度信息的线性化迭代过程中, 都躲不开计算目标函数的繁琐的 Hessian 矩阵 (或近似 Hessian 矩阵), 同时虽然它们在转化过程中所用的手段可能千差万别, 但是在线性迭代过程中离开不初始解, 导致最终结果往往是局部最小点。但地球物理反演问题通常是非线性的, 我们采用线性迭代可能会造成差之毫厘、谬以千里的结果, 因而地球物理学家不断寻求如何在全局范围内寻找最佳点。Rodi and Mackie (2001) 提出了非线性共轭梯度法 (NLCG), 是将 CG 技术直接应用于非线性目标函数最优化的方法, 无需计算矩阵, 是一种快速、稳定、收敛的二维反演计算方法。

1 非线性共轭梯度反演

在二维地电模型中, 给定边界条件后, 一般通过有限元法或者有限差分法进行正演模拟, 反演问题可表示为: $d = F(m) + e$ 。式中: $d = [d_1, d_2, \dots, d_N]^T$ 为观测数据向量; $F(m)$ 为模型正演响应函数, $m = [m_1, m_2, \dots, m_N]^T$ 为模型参数向量; e 为残差向量。观测数据与理论模型响应的拟合差可表示为 $\varphi_d = \|W_d e\|^2$ 。定义: $\varphi(m) = (d - F(m))^T - U^{-1}(d - F(m)) + \lambda m^T w^T w m$, 给定已知数值, 正则化因子 λ 是一个正数。正定矩阵 U 表示探测数据的误差。令 A 表示正演函数 F 的 Hessian: $A^{ij}(m) = \partial_j F^i(m)$, $i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, M$, 由 Fletcher 和 Reeves 首先提出来的非线性共轭梯度法 (NLCG) 可以不进行 Hessian 的计算而直接求得。算法引用了 Polak - Ribiere 的非线性共轭梯度方法来求解式中极小值。其求解过程如下: $m_0 = \text{given}$, $\varphi(m_k + \alpha_k p_k) = \min \varphi(m_k + c p_k)$, $m_{k+1} = m_k + \alpha_k p_k$, $k = 0, 1, 2, \dots, \alpha_{k,j+1} = \alpha_{k,j} - \frac{g_{k,j}^T p_k}{p_k^T \bar{H}_{k,j} p_k}$, 这里通过非精确的一维搜索确定

[收稿日期] 2013-04-29; [修订日期] 2013-09-26; [责任编辑] 郝情情。

[基金项目] 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2009AA06Z108) 资助。

[第一作者] 朱崇利 (1974 年—), 男, 博士研究生, 从事地球物理数值模拟与电磁场理论应用研究。E-mail: 963066363@qq.com。

每一步的步长 α_k ，和线性 CG 迭代

$$\begin{cases} m_k^0 = m_k \\ m_k^{j+1} = m_k^j + \alpha_k^j p_k^j \quad j=0,1,2,\cdots,n-1 \text{ 中, 步长 } \alpha_k^j = \\ m_{k+1} = m_k^n \end{cases}$$

$-\frac{(g_k^j)^T p_k^j}{(p_k^j)^T H_k p_k^j}$ 的精确计算不同,搜索方向迭代如下:

$$p_0 = -C_0 g_0, p_k = -C_k g_k + \beta_k p_{k-1}, k=1,2,\cdots \text{ 式中}$$

$$\begin{cases} p_k^0 = -C_k g_k \\ p_k^j = -C_k g_k^j + \beta_k^j p_k^{j-1} \end{cases}, \text{ 引用 PRP 非线性共轭梯度算}$$

$$\text{法计算共轭方向向量的加权因子 } \beta_k: \beta_k = \frac{g_k^T C_k (g_k - g_{k-1})}{g_{k-1}^T C_{k-1} g_{k-1}}; \text{ 搜索方向没有必要与某些固定矩}$$

阵共轭,但是要满足一个条件: $p_k^T (g_k - g_{k-1}) = 0$ 则可,NLCG 无须计算 Hessian 矩阵,由以上比较可以知道,线性反演通过雅可比或海塞矩阵来求解修正量,所以初始解也就决定了相应的校正向量和迭代的前进方向,导致求解过程中收敛路径随之而来,最终部分初始解不收敛或者收敛到局部极值点。而 NLCG 的主要参与梯度的计算和步长非精确的一维搜索,即按照步长使得目标函数满足一定的准则(典型的如 Wolfe 准则)即可停止搜索。这种搜索方法避免了大量的正演计算,避免了线性搜索,而是全局随机寻找,不依赖于旧解或者依赖程度非常低,通过条件判断是否已经取得最优解,因此是全局最优解的可能性比线性算法大。生活中常用修改的高斯-牛顿型一维搜索,经检验十分有效。实践证明,NLCG 反演方法是快速、高效、稳定,反演结果具有较高的分辨率,可以进行较大规模反演问题的计算。另外,NLCG 反演方法可以进行联合反演,如 TE 和 TM 视电阻率和阻抗相位的联合。当然,NLCG 反演方法的自身缺陷也是在所难免的,比如:对初始模型的选择存在依赖性,正则化参数筛选需要凭经验输入。

2 模型算例

模型一:下面以高阻异常体为例:均匀半空间中有一个电阻率为 $1000\Omega \cdot m$,上底埋深为 $1km$,下底埋深为 $2km$,长度 $4km$ 矩形异常体,背景电阻率为 $10\Omega \cdot m$ 。图 1 是 TE 模式直接 NLCG 反演的结果(其中 NLCG 反演以 Bostick 反演为初始模型,最大迭代次数:10 次,平滑系数:0.02,最小拟合度:0.02。网格剖分: 60×48 ,下面与之相同);图 2 是

TE 模式 OCCAM 反演结果(其中 Occam 反演以 Bostick 反演为初始模型,最大迭代次数:10 次,平滑系数:0.02,最小拟合度:0.02。网格剖分: 60×48 ,下面与之相同)。

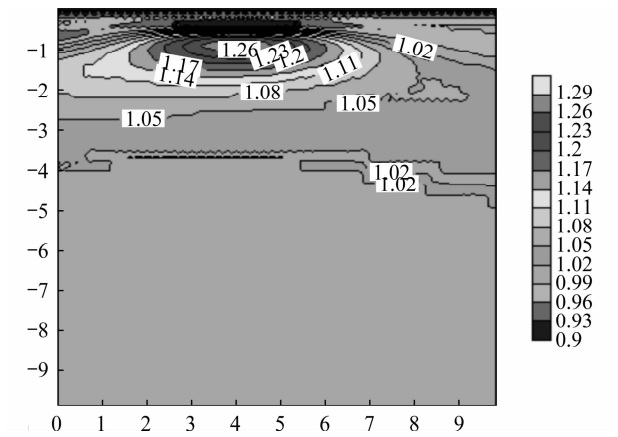


图 1 平地形非线性共轭梯度反演
Fig.1 Nonlinear conjugate gradient inversion without terrain

整体来看接近异常体中心位置与初始模型对应比较好,图 1 可以看出能比较准确地反映异常体的中心位置,并看向两边微弱扩散及向下延伸,反演结果与原始模型十分接近,在异常体大小埋深范围以及背景区域的分布等方面均有良好的反映效果。从图 2 可以看出,反演结果变形比较严重,致使反演电阻率剖面从上至下出现“挂面条”现象;从而说明线性反演往往无法找到目标函数的全局最小点,达不到最优化处理效果,有时离最优化处理追求的目标可能相差很远,导致反演的结果离实际目标相差很远。显而易见,图 1 的图像更能接近反映出地

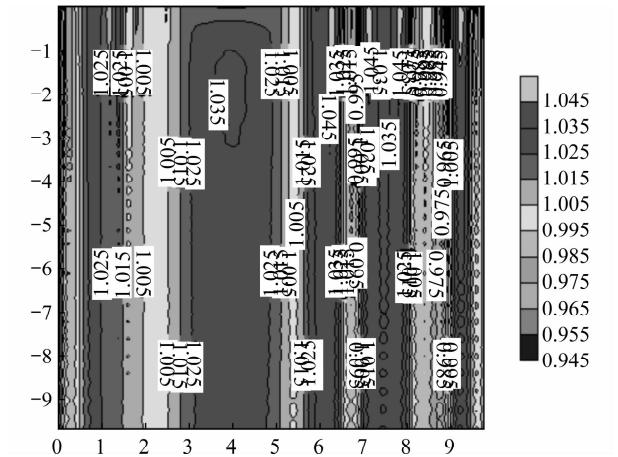


图 2 平地形奥可姆反演
Fig.2 Occam inversion without terrain

层的真实物性特性,能更好地解释地下真实的地电模型。这进一步论证非线性反演比线性反演更能真实反映地下电性。

经典的 MT 理论为水平地形条件下,但是随着开发的重点转向中国的西北、西南和南方的广大山区,许多测点周围有连绵的高山,到处是起伏的地形,所以有必要研究地形对大地电磁测深资料处理解释的影响。

模型二:在上面模型一的异常体的正上方,添加两个 V 形的等腰三角形,两个三角形底边都是 500m,和地表重合,小三角形高度是 200m,大三角形高度是 500m,两个三角形水平距离是 500m,构成一个山谷地形。图 3 是 TM 模式的 Occam 反演,图 4 是 TM 模式 NLCG 反演,图 5 是 TE&TM 模式的反演。图 3 可以看出反演结果和真实模型有明显差异,如果不作地形校正,由此反演结果可得出错误的地质解释。说明线性算法中有时矩阵 A 是病态的,最后使得解出的结果可能无用。图 4、图 5 反演的结果和平地形非常接近,整体轮廓基本吻合。这说明与线性算法相比非线性算法在地形复杂、数据量很大时,尤其是原始数据比较粗糙时,更难具有先天性优势,非线性反演适应性远强于线性反演,随机搜索挣脱了线性搜索固定模式,能够找到整个空间的所有信息,接近达到穷举法的效果,更能反映地下真实的模型物性。而且从图 4 和图 5 知,地形 TM 型波的影响比 TE 波严重,TM 型波在地形下凹处,视电阻率增大,上凸处,视电阻率减少。而 TE 型波在一定范围内,近似可以看成和它相反,所以本文采用 TE&TM 联合模式反演释处理弥补了二者的

差异,这样间接起到了校正地形的效果。从两图分析知,TE&TM 模式反演效果更好。

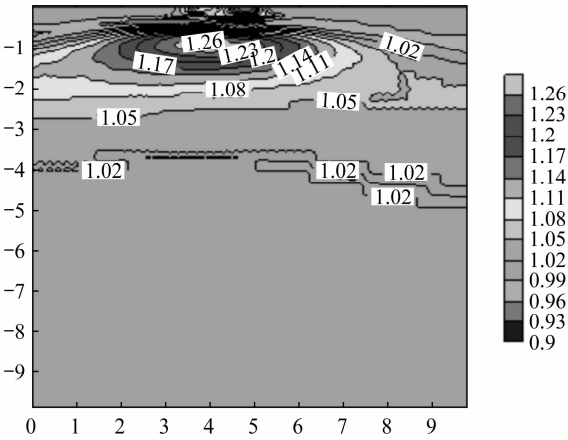


图 4 带地形 TM 模式 NLCG 反演
Fig. 4 NLCG inversion with terrain (TM mode)

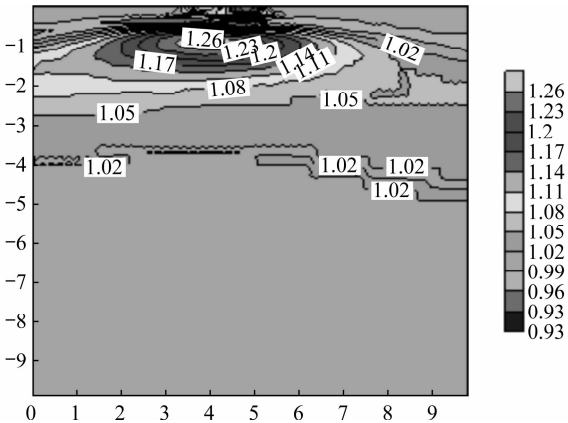


图 5 带地形非线性共轭梯度反演 (TEZTM)
Fig. 5 NLCG inversion with terrain (TEZTM)

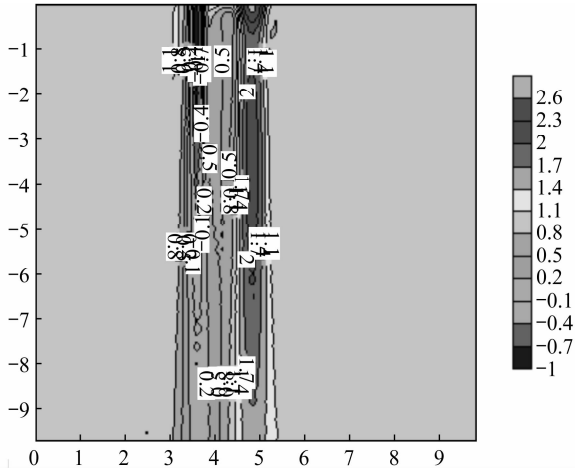


图 3 带地形的奥可姆反演
Fig. 3 Occam inversion with terrain

3 结论

(1) 反演的数学本质是一个最优化问题。地球物理反演问题通常是非线性的,即目标函数非线性。线性算法都是以某一点为初始点,把函数在该点展开成低阶泰勒多项式,来求解下一个更优的解,从而形成迭代点列。当点列不再前进,达到收敛,就认为是最优解。它是初始解附近的局部极值点,这样的反演结果准确性被降低。非线性算法也有初始点,但是新解不是按照函数的泰勒多项式来寻找,而是直接另外随机寻找,不依赖于旧解。通过一些适当的条件判断新解是否可取,不断迭代从而得到最优解。这样得到的最优解是全局最优解的可能性比线性算法大。而通过比较,非线性反演比线性反演的

结果更能真实的反映地下物性,线性反演结果可能得出错误的地质解释。

(2) NLCC 反演迭代 10 次迭,代误差降低了 0.9 左右;而 Occam 反演迭代 10 次,迭代误差增加了 2.1 左右。

(3) 在山区复杂地形条件下,在概率论的大数定律的保证下,TE&TM 模式非线性反演通过在样本空间内随机搜索,提取全解空间范围内的信息,能够获取更合理的真实地电模型。

(4) 非线性反演的适应性较强,精度较高,但是许多方面的研究没有系统化,认识存在不统一现象,许多结论还是停留在感性认识阶段。

[References]

Chen Le-shou, Wang Guang-e. 1990. Magnetotelluric sounding method [M]. Beijing: Earthquake Press; 27 - 31 (in Chinese)

Chen Le-shou. 2009. Magnetotelluric sounding: An effective approach to survey electrical property and state of matter in the deep earth [J]. Chinese Journal of Nature, 31 (1) : 39 - 46 (in Chinese with English abstract)

Cheng fang-dao. 1987. Push our mining geophysical exploration work forward with reference of the experience of foreign Countries [J]. Geology and prospecting, 2 : 81 - 83 (in Chinese)

Ke Han-sheng. 1987. Geological and geophysical features of the qing-long mining district [J]. Geology and Prospecting, 10 : 36 - 40 (in Chinese)

Liu Guang-ding, Hao Tian-tiao. 1995. Searching of hidden mineral deposits by geophysical methods [J]. Journal of Geophysics, 38 (6) : 850 - 854 (in Chinese)

Liu Jian-xin, Hu Hou-ji, Liu Chun-ming. 2006. Application of synthetic geophysical method on exploration of deep-seated resources [J]. Geology and Prospecting, 4 (4) : 71 - 74 (in Chinese with English abstract)

Niu Zhi-lian. 1992. Detectability of an intermediate conductive layer by transient electromagnetic sounding (1) [J]. Geology and Prospecting, 28 (1) : 42 - 47 (in Chinese with English abstract)

Niu Zhi-lian. 1992. Detectability of an intermediate conductive layer by transient electromagnetic sounding (2) [J]. Geology and Prospecting, 28 (7) : 37 - 40 (in Chinese with English abstract)

Shi Xue-ming, Wang Jia-ying, Zhang Sheng-ye, Hu Xiang-yun. 2000. Multiscale genetic algorithm and its application in magnetotelluric sounding data inversion [J]. Chinese Journal of Geophysics, 43 (1) : 122 - 130 (in Chinese with English abstract)

Sun Zhong-ren, Zhang Guo-rui, Wei Wen-bo, Jin Xin, Zhao Xue-juan. 2005. Discussion on some problems in the application of electromagnetic method in mineral exploration [J]. Geology and Prospecting, 14 (4) : 305 - 309 (in Chinese with English abstract)

Tan Han-dong, Li Cong-pin, Ye Gao-feng, Shu Qing, Wang Cai-qí, Xie Yu-chun. 2003. Application of three-dimensional magnetotelluric inversion to the exploration of TUWU copper ore deposit - data acquisition and preprocessing [J]. Geology and Prospecting, 39 (1) :

21 - 24 (in Chinese with English abstract)

Tang Jing-tian, Xiao Xiao, Du Hua-kun, Wang Ye. 2008. Application of RRI method in interpretation of EH4 Data [J]. Geology and Prospecting, 44 (1) : 75 - 79 (in Chinese with English abstract)

Tang Jin-tian, He Ji-shan. 2005. Methods and applications of CSAMT [M]. Changsha: Zhongnan University Press; 250 - 285 (in Chinese)

Wang Qing-yi. 2007. Frequency effect of transient field and capability of great deep exploration [J]. Geology and Prospecting, 43 (1) : 79 - 83 (in Chinese with English abstract)

Wang Ruo, Wang Miao-yue. 2003. Inversion method of controlled source audio-frequency magnetotelluric data [J]. Progress in Geophysics, 18 (2) : 197 - 202 (in Chinese with English abstract)

Yan Li-guang. 1987. Status and trends in minging geophysics in USSR [J]. Geology and Prospecting, 12 : 44 - 47 (in Chinese with English abstract)

Yan Shu, Shi Xian-xin, Chen Ming-sheng. 2009. The probing depth of transient electromagnetic field method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (6) : 1583 - 1591 (in Chinese with English abstract)

Yu Chang-ming. 1998. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine [J]. Chinese Journal of Geophysics, 41 (1) : 133 - 138 (in Chinese with English abstract)

Yu Ze-xin, Ao Ying-feng, Lv Jing-zeng, Long Jun, Ja Guang-ning, Wang Hai-fu, Zhang Lei. 2009. The application of CSAMT in prospecting in depth in Kangzhangzi Deposit in western Liaoning Province [J]. Geology and Exploration, 45 (5) : 600 - 605 (in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

陈乐寿 . 2009. 大地电磁测深 - 探测地球深部电性和物质状态的一种有效手段 [J]. 自然杂志, 31 (1) : 39 - 46

陈乐寿, 王光镔. 1990. 大地电磁测深法 [M]. 北京: 地震出版社: 27 - 31

程方道. 1987. 借鉴国外经验推动我国金属物探工作的发展 [J]. 地质与勘探, 2 : 81 - 83

柯汉生. 1987. 青龙金矿区的地质地球物理特征 [J]. 地质与勘探, 10 : 36 - 40

刘光鼎, 郝天挑. 1995. 应用地球物理方法寻找隐伏矿床 [J]. 地球物理学报, 38 (6) : 850 - 854

柳建新, 胡厚继, 刘春明. 2006. 综合物探方法在深部接替资源勘探中的应用 [J]. 地质与勘探, 4 (4) : 71 - 74

牛之琰. 1992. 瞬变电磁测深法对导电层的探测能力 (1) [J]. 地质与勘探, 28 (1) : 42 - 47

牛之琰. 1992. 瞬变电磁测深法对导电层的探测能力 (2) [J]. 地质与勘探, 28 (7) : 37 - 40

师学明, 王家映, 张胜业, 胡祥云. 2000. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料 [J]. 地球物理学报, 43 (1) : 122 - 130

孙中任, 张国瑞, 魏文博, 金鑫, 赵雪娟. 2005. 目前电磁法用于矿产勘查面临的几个问题的思考 [J]. 地质与勘探, 14 (4) : 305 - 309

谭捍东, 李聪斌, 叶高峰, 舒晴, 王彩旗, 谢裕春 . 2003. 大地电磁三维反演在土屋铜矿床探测中的应用研究 [J]. 地质与勘探, 39 (增刊) : 21 - 24

汤井田,何继善. 2005. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社: 250 – 285

汤井田,肖 晓,杜华坤,王 烨. 2008. RRI 方法在 EH4 数据解释中的应用[J]. 地质与勘探,44(1):75 – 79

王 若,王妙月. 2003. 可控源音频大地电磁法数据的反演方法[J]. 地球物理学进展, 18(2): 197 – 202

王庆乙. 2007. 近区瞬变场的频率效应与大深度探测能力的研究 [J]. 地质与勘探, 43(1): 79 – 83

闫 述,石显新,陈明生. 2009. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. 地球物理学报,52(6):1583 – 1591

阎立光. 1987. 苏联金属矿床物探现状及发展趋势[J]. 地质与勘探, 12:44 – 47

于昌明. 1998. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. 地球物理学报,41(1): 133 – 138

于泽新,敖颖锋,吕景增,龙 军,贾广宁,王海富,张磊. 2009. CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用[J]. 地质与勘探,45(5):600 – 605

Influence of terrain on different inversions

ZHU Chong-li

(Key Laboratory of Earth Exploration and Information Techniques of the Ministry of Education ,
Chengdu University of Technology , Chengdu ,Sichuan 610059)

Abstract: According to the relationship between observation data and the model parameters, the methods of solving the optimal problem of error function are usually divided into linear inversion and nonlinear inversion methods. Linear inversion requires a fairly accurate background medium model, which is contradict to the actual situations of geophysical problems. Under special circumstances, in the linear inversion appears even divergence. While the nonlinear inversion does not need to calculate the partial derivative of target function, in which the optimal solution of the global random search model space avoids the linearization of the problem. Under the condition of complex terrain in mountains, comparison and argument indicate that nonlinear inversion can obtain a more reasonable and true electric model, indicative of the strong adaptability and high precision. So the nonlinear inversion has been widely applied in various fields of geophysics.

Key words: terrain, nonlinear conjugate gradient, inversion, linear