

基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究

王光杰¹, 王勇², 李帝铨², 付长民¹, 张贵宾²

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要 提出了 CSAMT 方法测深的遗传算法反演, 比较传统的线性反演方法, 其对初始模型依赖性小, 全局寻优能力强, 适用于在地下电性参数比较模糊的条件下对测深曲线进行反演。本文设计多种理论模型进行模拟, 证明该算法精度高, 可行性强。

关键词 CSAMT, 遗传算法, 反演, 拟合

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)04-1285-05

The application of Genetic Algorithm to CSAMT inversion

WANG Guang-jie¹, WANG Yong², LI Di-quan², FU Chang-min¹, ZHANG Gui-bin²

(1. Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract A new way is created in the paper for inversion of CSAMT depth measuring through the nonlinear Genetic Algorithm(GA). Compared to the traditional linear inversion, the GA inversion depends less on original model, and has more ability to find the most available resolution. It's more usable than the traditional in the complex condition of the earth. Many theoretic models are designed to confirm the precision of the GA.

Keywords CSAMT, Genetic Algorithm, Inversion, Fitting

0 引言

可控源音频大地电磁法^[1~6] (Control Source Audio-frequency Magnetotellurics, 简称为 CSAMT)通过分析地面或井中观测到的由人工可控制的电磁波信号, 在地球介质中激发的电磁波场数据, 来达到勘探地球内部导电结构的目的。CSAMT 方法是在大地电磁(MT)方法上发展而来的, 其具有强大的人工信号源。相比大地电磁法, CSAMT 法能压制干扰, 可以采集到高质量的数据, 改善了 MT 方法中天然场源的不可预测、抗干扰差及接收能量小的缺点。自上世纪 70 年代中叶开始, CSAMT 法就成了地球物理勘探方法中一种强有力的非地震勘探手段, 并成功地用于矿产资源普查、隧(洞)道勘查、查找地热等地质工程领域^[7~11]。

对实测资料的反演解释是 CSAMT 方法的关键环节之一。目前一维反演的方法很多, 如马夸特

方法和广义逆矩阵法等^[12], 属于线性或局部线性法。由于反演的多解性, 此类方法比较依赖于初始模型, 并且容易陷入局部最优解。传统的全局随机搜索算法虽然在某种程度上能避免局部反演法的这些缺点, 但由于效率低而很少被采用。近年来, 模拟生物进化和遗传的遗传算法^[13]在自动控制、人工智能等领域得到了广泛应用。自 Sen 与 Stoffa 80 年代把遗传算法应用到地球物理领域^[14], 并成功地进行了平面地震波的反演后, 国内外学者开始重视地球物理问题的遗传算法反演^[15~22]。本文用遗传算法进行 CSAMT 方法测深的反演, 并结合实际工程, 取得了良好的结果。

1 CSAMT 原理^[6]

如图 1, CSAMT 方法通过沿一定方向(设为 X 方向)布置的接地导线 AB 向地下供入某一频率 f 的谐变电流

收稿日期 2006-01-10; 修回日期 2006-03-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40434009)资助.

作者简介 王光杰, 男, 1966 年生, 安徽碭山人, 博士, 副研究员, 主要从事固体地球物理研究. (E-mail: gjwang@mail.iggcas.ac.cn)

万方数据

$I = I_0 e^{-i\omega t}, (\omega = 2\pi f)$

在 AB 一侧 60 度张角的扇形区域内,沿 X 方向布置测线,逐个测点观测沿测线相应频率的电场分量 E_x 和与之正交的水平方向磁场分量 H_y ,进而计算卡尼亚视电阻率

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \tag{1}$$

和阻抗相位

$\varphi_z = \varphi_{E_x} - \varphi_{H_y}.$

式中, μ 是大地的磁导率, φ_z 为观测点上的电场 E_x 和磁场 H_y 之间的相位差. 在音频段 ($n \times 10^{-1} \sim n \times 10^3$ Hz) 逐次改变供电和测量频率,便可测出卡尼亚视电阻率和阻抗相位随频率的变化,完成频率测深观测.

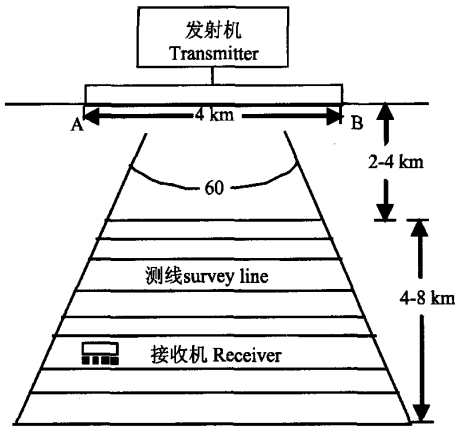


图 1 CSAMT 法工作装置图
Fig. 1 Setting of CSAMT measuring

2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm,简称 GA)是在 Darwin 的进化论和 Mendel 的遗传学说的基础上引用随机理论形成的,并遵循“适者生存”原则^[15~20]. GA 首先将求解问题的各参数用二进制(或者其他进制)进行编码,编码后的各参数连接在一起形成染色体.随机产生一群染色体(或称为初始种群),通过“再生”、“交换”、“变异”产生新一代的种群,重复这一过程直到种群均一或者种群中的最优个体满足某种要求.

2.1 求解问题的参数

假定地电剖面是均匀水平分层的,CSAMT 反演的问题参数就是各层的厚度和电阻率值($h_1\rho_1, h_2\rho_2, \cdots, h_{n-1}\rho_{n-1}, h_n\rho_n$),其中 $h_n = \infty$,不参加参

万方数据

数反演.将这些参数值用二进制编码并顺序连接起来形成一条染色体.染色体的长度由各参数的搜索范围及分辨率来确定,假如 h_1 的搜索范围为 10~138 m,分辨率为 1 m,则取 7 位二进制数表示该层厚度.

2.2 目标函数及适应函数的选取

染色体能否遗传给下一代,要通过目标函数来判定.根据卡尼亚视电阻率的计算公式,并考虑到相位的影响作用,我们选择的目标函数为

$E(m) = 100$

$$\times \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(\log \rho_o^i - \log \rho_r^i)^2 + c(\varphi_o^i - \varphi_r^i)^2]}, \tag{2}$$

其中 ρ_o, ρ_r 分别表示模型和观测的视电阻率值, φ_o, φ_r 分别表示模型和观测的相位值, c 为匹配系数,表示相位在反演过程中所占的权重, n 表示在某点上观测的频率个数.在式中,由于相位为弧度值,相比视电阻率值很小,所以对视电阻率取对数后再进行方差,最后将均方差放大 100 倍,以提高目标函数的灵敏度.

目标函数用来直接评定模型的优劣,我们采用另一函数称为适应函数来对模型的再生概率进行判断,公式(3)为本文采用的适应函数

$$F(m) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E(i) - \bar{E})^2} / \sum_{i=1}^n e^{\frac{E(m) - E(i)}{2}}. \tag{3}$$

n 表示初始种群数, \bar{E} 为初始种群中所有染色体目标函数的平均值, $E(i)$ 为初始种群中某个染色体的目标函数值.染色体的适应函数值越大,它的再生概率就越大.

3 反演实例

3.1 两层理论曲线反演

表 1 为两层理论曲线反演的结果,初始种群为 32,再生概率为 0.9,变异概率为 0.02,经过 80 次迭代.

表 1 两层理论曲线反演结果

Table 1 The inversion result of the theoretical curve for two-layer model

| 参数 | h_1 (m) | ρ_1 (Ωm) | ρ_2 (Ωm) |
|------|-----------|-------------------------|-------------------------|
| 模型 | 50 | 50 | 500 |
| 搜索范围 | 1~500 | 1~400 | 10~2000 |
| 二进制位 | 9 | 9 | 8 |
| 反演结果 | 50.80 | 50.97 | 501.65 |

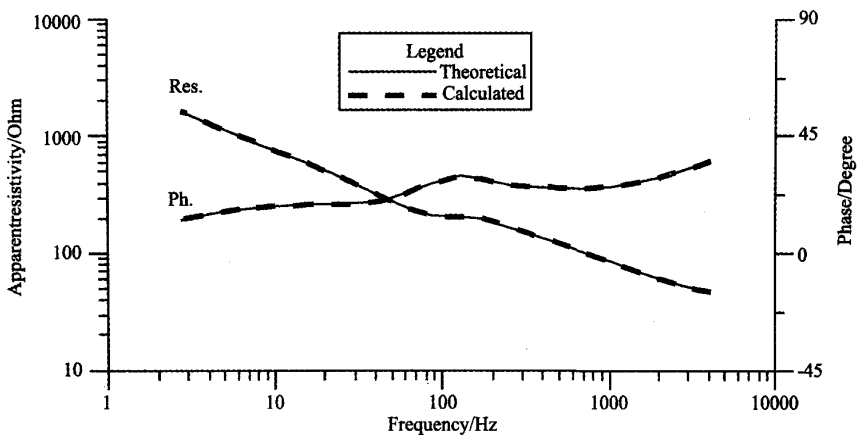


图 2 两层模型的理论视电阻率及相位曲线与反演结果计算的曲线的拟合
Fig. 2 Fitting of theoretical and calculated apparent resistivity and phase curve by inversion result for two-layer model

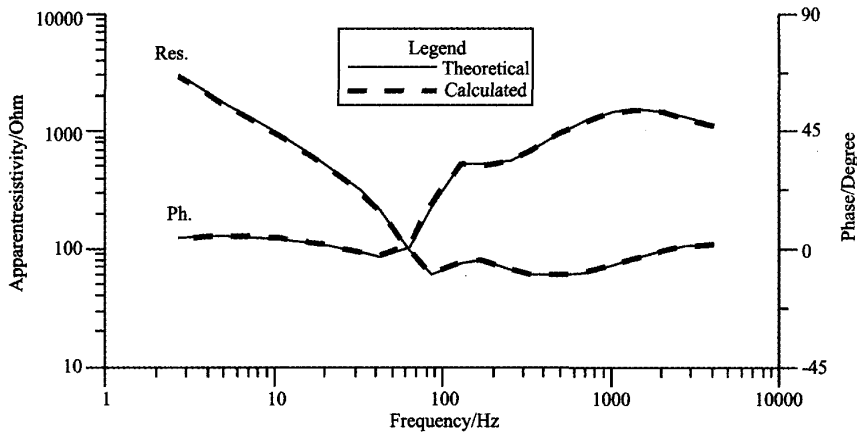


图 3 三层 H 型理论视电阻率和相位曲线与反演结果计算的曲线的拟合
Fig. 3 Fitting of theoretical and calculated apparent resistivity and phase curve by inversion result for three-layer model (H-type)

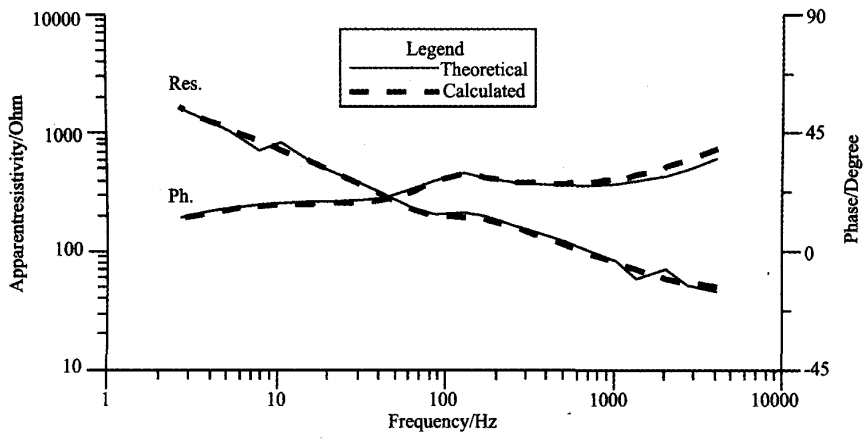


图 4 噪声干扰下两层模型的理论视电阻率及相位曲线与反演结果计算的曲线的拟合
Fig. 4 Fitting of theoretical and calculated apparent resistivity and phase curve by inversion result for two-Layer Model within the noise

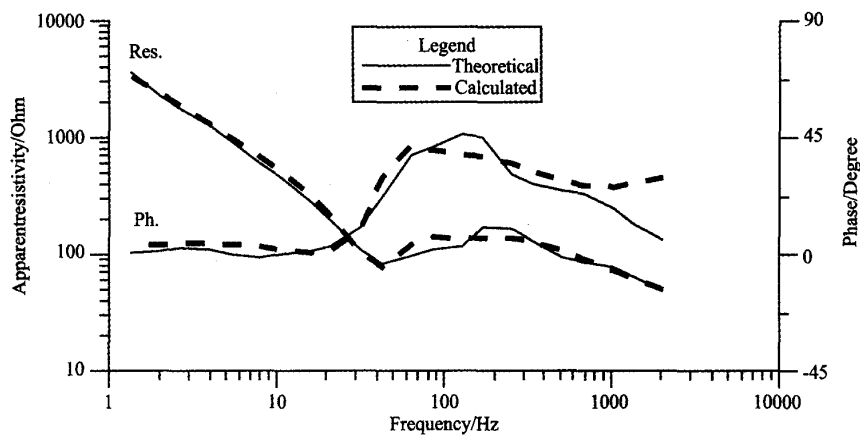


图 5 实测视电阻率和相位曲线与反演结果计算的曲线的拟合
Fig. 5 Fitting of observed and calculated apparent resistivity and phase curve by inversion result

由表和拟合图可以看出,理论数据与反演结果两者完全吻合.

3.2 三层 H 型理论曲线反演

| 表 2 三层 H 型理论曲线反演结果 | | | | | |
|--|-----------|------------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| Table 2 The inversion result of the theoretical curve for three-layer model (H-type) | | | | | |
| 参数 | h_1 (m) | ρ_1 (Ω m) | h_2 (m) | ρ_2 (Ω m) | ρ_3 (Ω m) |
| 模型 | 100 | 100 | 40 | 20 | 1000 |
| 搜索范围 | 1~500 | 1~400 | 1~200 | 1~200 | 10~2000 |
| 二进制位 | 9 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| 反演结果 | 107.44 | 98.01 | 25.53 | 13.49 | 962.08 |

从表 2 中模型值与反演结果的对比看出,中间低阻薄层的反演结果值与模型值的偏差较大,但是在图 2 中并没有表现出来,理论数据曲线与反演结果曲线两者拟合的很好,这是由于,在中间薄层厚度很小的情况下从曲线上无法得到中间层的响应,本文验证了这一结论.

3.3 噪声干扰下两层理论曲线反演

实测的视电阻率曲线通常都是有噪声的,为了进一步验证该算法的可行性,我们给两层理论曲线加上 15% 的随机噪声,表 3 给出了在噪声干扰情况下的反演结果

在 15% 的随机噪声干扰下,反演结果同理论曲线的拟合程度还是很好的,最小目标函数值为 7.67.

| 表 3 在噪声干扰下两层理论曲线的反演结果 | | | |
|--|-----------|------------------------|------------------------|
| Table 3 The inversion result of the theoretical curve for two-layer model within the noise | | | |
| 参数 | h_1 (m) | ρ_1 (Ω m) | ρ_2 (Ω m) |
| 模型 | 50 | 50 | 500 |
| 搜索范围 | 1~500 | 1~400 | 10~2000 |
| 二进制位 | 9 | 9 | 8 |
| 反演结果 | 62.52 | 57.22 | 509.45 |

3.4 新疆某金属矿区实测曲线反演

该矿区矿产资源以铜为主,地质构造十分复杂,选择 4 层地电模型来进行反演,结果如表 4.

| 表 4 实测曲线反演结果 | | | | | | | |
|--|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|------------------------|
| Table 4 The inversion result of the observed curve | | | | | | | |
| 参数 | h_1 (m) | ρ_1 (Ω m) | H_2 (m) | ρ_2 (Ω m) | h_3 (m) | ρ_3 (Ω m) | ρ_4 (Ω m) |
| 搜索范围 | 1~200 | 1~300 | 1~500 | 1~800 | 1~500 | 1~1000 | 1~4000 |
| 二进制位 | 7 | 7 | 8 | 9 | 8 | 9 | 7 |
| 反演结果 | 48.01 | 43.31 | 384.71 | 394.90 | 199.16 | 66.66 | 1166.06 |

由于实测曲线无法避免受到噪声的干扰,在这种情况下或多或少要影响反演的正确性。但是从图 4 中可以看到,反演的结果与观测值吻合的还是较好的,可以满足实际生产的要求。

4 结论与建议

遗传算法作为一种非线性算法,较线性算法对初始值依赖小,收敛较快。能够定量反映地下电性参数,给地质解释带来更大的实用价值。在地下电性参数模糊的情况下,可以通过扩大搜索范围和增加层数来进行反演。比较局部线性算法,遗传算法的效率要低,但就目前的计算水平,这样的代价是值得的。由于遗传算法是基于拟合观测数据的优化方法,若观测误差大,反演结果误差就会很大,因此提高观测精度是反演成功的重要条件。

在遗传算法反演的过程需要反复进行正演计算,因此需要对正演计算进行优化,以提高反演的速度,使该算法更具有可行性。

参 考 文 献 (References):

- [1] 龚飞,底青云. 某煤矿典型 CSAMT 法视电阻率曲线的一维模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 631~634.
- [2] 于昌明. CSAMT 方法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. 地球物理学报, 1998, 41(1): 133~138.
- [3] Cagniard L. Principle of the magnetotelluric method, a new method of geophysics prospecting [J]. Ann de Geophys, 1953, 9: 95~125.
- [4] 底青云, Martyn Unsworth, 王妙月. 复杂介质有限元法 2.5 维可控源音频大地电磁法数值模拟[J]. 地球物理学报, 2004, 47(4): 723~730.
- [5] 底青云, Martyn Unsworth. 有限元法 2.5 维 CSAMT 数值模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 317~324.
- [6] 何继善, 温佩琳, 等. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [7] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [8] 殷长春. 可控源音频大地电流法一维正演及精度评价[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(4): 438~453.
- [9] 吴路萍, 石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712~717.
- [10] 徐世浙, 刘斌. 电导率分层连续变化的水平层的大地电磁正演[J]. 地球物理学报, 1995, 38(3): 262~268.
- [11] 底青云, 王妙月, 石昆法. 高分辨率 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 1~5.
- [12] 刘云峰, 曹春蕾. 一维大地电磁测深的遗传算法反演[J]. 浙江大学学报, 1997, 31(3): 300~304.
- [13] 师学明, 王家映, 张胜业, 胡祥云. 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, 2000, 43(1): 122~130.
- [14] 张晓绩, 戴冠中, 徐乃平. 一种新的优化搜索算法——遗传算法[J]. 控制理论与应用, 1995, 12(3): 265~273.
- [15] 石耀霖. 遗传算法在地球物理中的应用[J]. 地球物理学报, 1992, 35(增刊): 367~371.
- [16] 石耀霖, 金文. 面波频散反演地球内部构造的遗传算法[J]. 地球物理学报, 1995, 28(2): 189~198.
- [17] Stoffa P L. and Sen M K. Nonlinear multi-parameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane-wave seismograms[J]. Geophysics, 1991, 55(11): 1794~1810.
- [18] 王若, 王妙月, 卢元林. 高山峡谷区 CSAMT 观测系统研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 125~130.
- [19] 底青云, 石昆法, 等. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 53~54.
- [20] 底青云, 王妙月, 等. V6 多功能系统及其在 CSAMT 勘查应用中的效果[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(4): 663~670.
- [21] 冯思臣, 王绪本, 阮帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 594~599.
- [22] 王兴泰, 李晓芹, 孙仁国. 电测深曲线的遗传算法反演[J]. 地球物理学报, 1996, 39(2): 279~285.

作者: [王光杰](#), [王勇](#), [李帝铨](#), [付长民](#), [张贵宾](#), [WANG Guang-jie](#), [WANG Yong](#), [LI Di-quan](#), [FU Chang-min](#), [ZHANG Gui-bin](#)

作者单位: [王光杰, 付长民, WANG Guang-jie, FU Chang-min\(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029\)](#), [王勇, 李帝铨, 张贵宾, WANG Yong, LI Di-quan, ZHANG Gui-bin\(中国地质大学\(北京\), 北京, 100083\)](#)

刊名: [地球物理学进展](#) **ISTIC PKU**

英文刊名: [PROGRESS IN GEOPHYSICS](#)

年, 卷(期): 2006, 21 (4)

被引用次数: 10次

参考文献(22条)

1. [Caginiard L](#) [Principle of the magnetotelluric method, a new method of geophysics prospecting](#) 1953
2. [于昌明](#) [CSAMT方法在寻找隐伏金矿中的应用](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1998 (01)
3. [底青云; Martyn Unsworth; 王妙月](#) [复杂介质有限元法2.5维可控源音频大地电磁法数值模拟](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 2004 (04)
4. [底青云; 王妙月; 石昆法](#) [高分辨率V6系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 2002 (05)
5. [徐世浙; 刘斌](#) [电导率分层连续变化的水平层的大地电磁正演](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1995 (03)
6. [王兴泰; 李晓芹; 孙仁国](#) [电测深曲线的遗传算法反演](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1996 (02)
7. [冯思臣; 王绪本; 阮帅](#) [一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究](#) [期刊论文] - [石油地球物理勘探](#) 2004 (05)
8. [底青云; 王妙月](#) [V6多功能系统及其在CSAMT勘查应用中的效果](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2002 (04)
9. [底青云; 石昆法](#) [CSAMT法和高密度电法探测地下水资源](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2001 (03)
10. [王若; 王妙月; 卢元林](#) [高山峡谷区CSAMT观测系统研究](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2004 (01)
11. [Stoffa P L; Sen M K](#) [Nonlinear multi-parameter optimization using genetic algorithms: Inversion of plane-wave seismograms](#) 1991 (11)
12. [石耀霖; 金文](#) [面波频散反演地球内部构造的遗传算法](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1995 (02)
13. [石耀霖](#) [遗传算法在地球物理中的应用](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1992 (zk)
14. [张晓绩; 戴冠中; 徐乃平](#) [一种新的优化搜索算法—遗传算法](#) 1995 (03)
15. [师学明; 王家映; 张胜业; 胡祥云](#) [多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 2000 (01)
16. [吴璐萍; 石昆法](#) [可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 1996 (05)
17. [殷长春](#) [可控源音频大地电流法一维正演及精度评价](#) 1994 (04)
18. [石昆法](#) [可控源音频大地电磁法理论与应用](#) 1999
19. [何继善; 温佩琳](#) [可控源音频大地电磁法](#) 1990
20. [底青云; Martyn Unsworth](#) [有限元法2.5维CSAMT数值模拟](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2004 (02)
21. [龚飞; 底青云](#) [某煤矿典型CSAMT法视电阻率曲线的一维模拟](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2004 (03)
22. [刘云峰; 曹春蕾](#) [一维大地电磁测深的遗传算法反演](#) 1997 (03)

引证文献(10条)

1. [文成哲; 刘财; 郭智奇; 韩颜颜](#) [遗传算法和LM算法联合反演瑞雷波相速度](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2010 (1)
2. [程辉; 李帝铨; 底青云; 付长民; 王若](#) [基于CSAMT法的地基基础评价](#) [期刊论文] - [中南大学学报 \(自然科学版\)](#)

3. 李帝铨, 张永超, 薛融晖, 杜宝平, 李新友, 李英贤, 石昆法 [CSAMT在某重大城市活动断层探测中的应用](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2010(4)
4. 李帝铨, 底青云, 王光杰, 李英贤, 石昆法, 岳安平, 白大为 [CSAMT探测断层在北京新区规划中的应用](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2008(6)
5. 杨云见, 何展翔, 王绪本, 罗卫锋 [AMT、TEM、VES地层响应特征模拟分析及其联合反演探讨](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2008(5)
6. 郭良辉, 孟小红, 石磊, 张国利 [重力异常分离的相关法](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2008(5)
7. 李帝铨, 王光杰, 底青云, 王妙月, 王若 [基于遗传算法的CSAMT最小构造反演](#) [期刊论文] - [地球物理学报](#) 2008(4)
8. 岳安平, 底青云, 石昆法 [从CSAMT信号中提取IP信息探讨](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2007(6)
9. 陈发宇, 尚永生, 杨长春 [Matching Pursuits方法综述](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2007(5)
10. 郑庆生, 韩大匡 [高阶神经网络在储层分布参数定量预测中的应用](#) [期刊论文] - [地球物理学进展](#) 2007(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqwlxjz200604037.aspx