

doi: 10.11720/wtyht.2020.1517

陈紫静, 陈清礼. 瞬变电磁的逆时偏移成像方法[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1415-1419. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1517

Chen Z J, Chen Q L. Transient electromagnetic inverse time migration imaging method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1415-1419. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1517

瞬变电磁的逆时偏移成像方法

陈紫静¹, 陈清礼²

(1. 中国石化西北油田分公司采油一厂, 新疆 轮台 841600; 2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100)

摘要: 本文研究了中心回线瞬变电磁测深的逆时偏移成像问题。针对电磁波在大地中的传播速度远小于真空中的光速这个特性, 设计了一种适用于中心回线观测方式瞬变电磁测深的逆时偏移成像的算法, 其核心思想是根据不同观测点在成像点相同时刻的波场值的叠加, 进而获得成像点的总波场值。基于该算法, 对一条实测的中心回线瞬变电磁测深资料进行了逆时偏移成像处理, 结果表明, 逆时偏移成像结果与实际情况比较吻合, 得到了比较好的处理效果。因此, 逆时偏移成像是瞬变电磁测深法的一种比较有效的资料处理方法。

关键词: 电法勘探; 瞬变电磁测深; 逆时偏移成像; 电磁波速度

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2020)06-1415-05

0 引言

瞬变电磁测深法(TEM)是一种时间域电磁法^[1], 在多个领域得到应用^[2-12]。按照观测方式, 常用的有中心回线瞬变电磁法、大定源瞬变电磁法和长偏移距瞬变电磁法。TEM是一种人工场源方法, 与天然场源方法相比, 优点是信噪比高, 缺点是理论复杂, 资料处理和反演的难度非常大, 因此亟待提高资料处理解释和反演的水平^[13-14]。对于瞬变电磁法的反演而言, 主要还是基于视电阻率概念而展开的, 以前主要应用晚期视电阻率, 最近十多年来, 许多学者展开了全区视电阻率的研究^[15-18]。研究人员基本上是沿着 3 条路线展开反演研究, 其一是瞬变电磁法的视电阻率转化成大地电磁测深的等效视电阻率, 再利用大地电磁测深的反演理论^[19-21], 这条路线是在频率域中进行的; 第二条路线是在时间域中进行反演^[22], 如烟圈反演途径; 第三条路线是在时间域中直接进行偏移成像^[23-24]。前人提出了瞬变电磁场拟波动方程偏移成像, 由于大地中的电磁场主要服从扩散方程而不是波场方程, 因此该方

法需要进行波场变换, 再基于波动方程进行偏移成像, 理论与过程都比较复杂。与前人的成像方法不同, 本文的研究表明大地中的电磁波传播速度比较慢, 基于这个特性, 设计了一种逆时偏移成像算法, 该算法简单直观, 且无需进行大量的计算, 实践表明效果比较理想。

1 大地中电磁波的速度

逆时偏移成像的一个主要影响因素是电磁波的传播速度, 如果速度太大, 走时太小, 与资料采集时的采样率不匹配, 无法进行逆时偏移成像, 因此逆时偏移成像能否用于电磁法中取决于电磁波的速度。真空中电磁波的速度(即光速)是 300 000 km/s, 30 m 距离的走时是 10 ns, 对于 1 μs 采样的数据来说, 分辨地层的能力太差。但是, 我们的研究表明电磁波在大地中的传播速度远低于光速, 这就为利用逆时偏移成像技术提供了基础。

电磁波的传播速度取决于相位因素:

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]}, \quad (1)$$

收稿日期: 2019-11-02; 修回日期: 2020-05-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC060330502)

作者简介: 陈紫静(1980-), 桂林理工大学硕士研究生毕业, 主要从事地球物理的研究工作。Email: 845237768@qq.com

式中： ω 是电磁波的圆频率； μ 是介质的磁导率，由于绝大多数岩矿石磁导率与真空中的磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 相同，因此大地中的磁导率可取真空中的磁导率； ε 是介质的介电常数； γ 是电导率。电磁波的速度为：

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}}, \quad (2)$$

当传导电流远大于位移电流时，即 $\frac{\gamma}{\omega\varepsilon} \gg 1$ ，电磁波的近似速度为：

$$\begin{aligned} v_p &= \frac{\omega}{\beta} \frac{\omega}{\omega \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]}} \\ &\approx \frac{2\pi f}{\sqrt{\mu\pi f\gamma}} \\ &= \frac{2\pi f}{\sqrt{4\pi \times 10^{-7} g\pi \cdot f\gamma}} \\ &= \frac{f}{\sqrt{f\gamma \times 10^{-7}}} \\ &= \sqrt{f\rho \times 10^7}。 \end{aligned} \quad (3)$$

式(2)是电磁波速度的精确计算式，而式(3)是忽略位移电流的情况下的电磁波近似速度计算公式。由式(3)可以看出，电磁波的频率越高，电磁波的传播速度越快，电阻率越高，速度也越快。

大地中电磁波的速度主要取决于电阻率和频率。表 1 列出了不同频率和不同电阻率时电磁波的传播速度。例如：1 000 Hz 的电磁波在电阻率为 $10 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ 的介质中传播，其速度是 316.23 m/ms，只有光速的千分之一左右。也就是说，1 μs 的时间，电磁波走过的距离只有 0.32 mm。目前瞬变电磁仪器的采样间隔可达 0.4 μs ，采样率与速度比较匹配，逆时偏移成像有理论基础。

2 逆时偏移成像算法

下面给出中心回线瞬变电磁测深的一种简洁的逆时偏移成像算法，其基本原理与地震勘探中的逆时偏移成像原理相同^[25]。在中心回线瞬变电磁测深条件下，对于地下某个成像点的波场（如电位或垂直磁场分量）值而言，是观测点的发射线框发射的波场按照球面波的形式由发射点传播到成像点的。在某个特定时刻，接收线圈接收的波场值可以

表 1 电磁波在介质中的传播速度

Table 1 The electromagnetic wave velocity in medium

电阻率 / ($\Omega \cdot \text{m}$)	频率 / Hz	精确速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	近似速度 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	以毫秒为单位的近似速度 / ($\text{m} \cdot \text{ms}^{-1}$)	与光速的比
10	0.001	316.23	316.23	0.32	1.05409E-06
10	0.01	1000.00	1000.00	1.00	3.33333E-06
10	0.1	3162.28	3162.28	3.16	1.05409E-05
10	1	10000.00	10000.00	10.00	3.33333E-05
10	10	31622.78	31622.78	31.62	0.000105409
10	100	100000.00	100000.00	100.00	0.000333333
10	1000	316227.68	316227.77	316.23	0.001054092
10	10000	999997.22	1000000.00	1000.00	0.003333324
100	0.001	1000.00	1000.00	1.00	3.33333E-06
100	0.01	3162.28	3162.28	3.16	1.05409E-05
100	0.1	10000.00	10000.00	10.00	3.33333E-05
100	1	31622.78	31622.78	31.62	0.000105409
100	10	100000.00	100000.00	100.00	0.000333333
100	100	316227.68	316227.77	316.23	0.001054092
100	1000	999997.22	1000000.00	1000.00	0.003333324
100	10000	3162189.82	3162277.66	3162.19	0.010540633
100	0.001	1000.00	1000.00	1.00	3.33333E-06
1000	0.01	10000.00	10000.00	10.00	3.33333E-05
1000	0.1	31622.78	31622.78	31.62	0.000105409
1000	1	100000.00	100000.00	100.00	0.000333333
1000	10	316227.68	316227.77	316.23	0.001054092
1000	100	999997.22	1000000.00	1000.00	0.003333324
1000	1000	3162189.82	3162277.66	3162.19	0.010540633
1000 万方数据	10000	9997222.61	10000000.00	9997.22	0.033324075

看成是由该时刻之前成像点的波场传播到观测点的波场值,这样就可以由某个特定时刻的观测波场值按传播时间计算得到成像点的波场值。之所以说简洁,是因为不是按照波动方程理论而是按照射线理论,按照成像点与观测点之间电磁波的走时,把观测点的波场逆时传播到成像点。逆时传播时,速度的确定非常重要,由于瞬变电磁测深方法的频带具有一定的宽度,而速度取决于频率、电阻率等因素,依据采样定理,采样的频率 f_s 决定了观测数据的最高频率 $f_{\max} = 0.5f_s$,因此,瞬变电磁测深观测数据的频带范围是 $[0, f_{\max}]$ 。在电阻率一定的情况下,速度主要决定于频率。本文利用频带范围 $[0, f_{\max}]$ 内能谱最大对应的频率来计算速度。

1) 算法的输入数据

① 所有观测点的位置数据 (u, v) , u 表示测点距离测线头的距离, v 表示测点的高程, 单位 m。

② 每个测点的观测数据序列 $(y_1, y_2, y_3, \dots, y_n)$, 观测数据可以是感应电动势、磁场或者电场等波场数据。采样时间间隔 ΔT 。

③ 成像网格数据, 也就是成像点 P 的坐标 (x, z) , 可按照纵、横方向的步长自动由程序代码产生。

2) 算法的输出数据

所有测点成像点的成像数据 (x, z, F) , 其中 x, z 是剖面上成像点的位置, F 是成像点的波场数据。

3) 成像算法

① 读取数据, 存入数组中: 测点 A 坐标 $u(i)$ 、 $v(i)$, 采样时间间隔 ΔT , 观测数据 $yobs(i, j)$; 其中 i 代表测点, j 代表时间。

② 设置成像点 P 坐标 $x(i, k)$ 、 $y(i, k)$, 其中 i 代表测点, k 代表深度。

③ 依次计算每个成像点 P 的波场值 F :

a) 计算成像点 P 到每个测点 A 的距离 R , 路程 $S = 2R$, 时间 $T = S/V$ 。速度 V 与电阻率和频率有关, 在工区范围不大的情况下, 可认为电阻率基本不变, 这样速度可以是常数。

b) 根据观测数据 $yobs(i, j)$ 的开始时刻、采样时间间隔 ΔT 、时间 T 找到测点 A 的对应时间的波场值 F_A 。

c) 由观测点的波场值 F_A , 按照电磁波传播的规律, 计算成像点 P 的波场值 F_p 。具体计算方法视波场采用的参数(感应电动势、垂直磁场)而定。如果波场参数是感应电动势, 那么 $F_A = 0.5 F_p$; 如果波场参数是垂直磁场, 那么 $F_p = 0.25 F_A$ 。

d) 把所有测点在 P 点的波场值进行叠加, 得到成像点 P 的总波场值 F 。总波场值是成像点处电磁

波波阻抗的间接反映, 与地下电性分布直接相关。因此总波场值断面等值线图反映了断面的电阻率分布状态。

④ 把所有成像点的波场值, 按照 x (距离), z (深度), F_A (波场值) 输出到数据文件中, 再利用等值线绘图软件(如 *surfer*) 绘制等值线断面图。

需要说明的是, 在均匀半空间中瞬变电磁观测数据具有早强晚弱的衰减特性, 在进行偏移成像之前需要进行均衡校正。均衡校正的意义类似于地震勘探中的道数据增益补偿, 也就是不同时间采集的数据采用不同的放大倍数进行放大, 时间越晚放大倍数越高。由于实践中很难进行精确的均衡校正, 文中采用了二代小波变换算法进行均衡校正的替代方案。

3 实测资料的逆时偏移成像

为了检验该算法的有效性, 在某煤矿采空区进行了实验研究。以 5 m 的点距, 在一条测线上对 10 个测点进行了数据采集; 采用中心回线瞬变电磁观测方式, 发射电流 20 A, 观测数据是感应电动势, 采样时间间隔为 0.8 ns, 共观测 32 000 个数据。图 1 是这 10 个测点中一个测点的实测感应电动势曲线, 总记录时间是 24 ms。

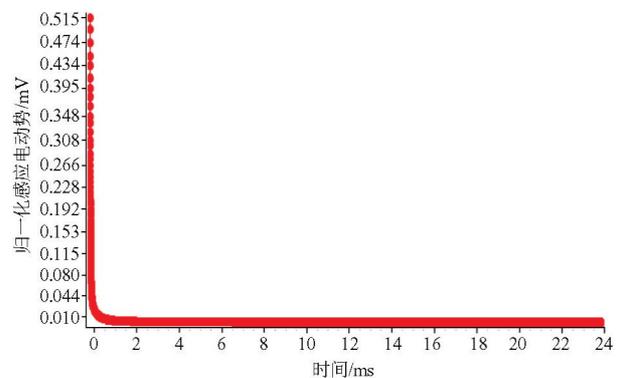


图 1 一个测点的实测感应电动势曲线

Fig.1 The measured induced electromotive force curve of a site

此时, 观测数据的频带范围 $[0, 0.625 \times 10^8]$ Hz, 由表 1 可知, 不同频率的电磁波的传播速度不同, 需要确定用于成像的平均速度。虽然观测数据的频带范围很宽, 但成像时使用的频带范围很窄, 具体范围根据勘探目标的最小深度和最大深度来确定, 这样平均速度的误差不大。

利用这 10 个测点的感应电动势数据, 首先进行均衡校正, 也就是剔除背景值, 提取异常数据; 而后

根据上述逆时偏移成像算法,计算了地下不同位置的波场(即电动势)数据;最后利用得到的地下各个点波场数据,采用 surfer 绘图软件,绘制出该测线的波场等值线断面(图 2)。由图可见,在坐标点(17 m, -15 m)附近有一个低波场异常体,与实际煤矿采空区一致。采空区由于充填地下水而具有低阻特性,理论上说低阻具有低波场值的特性,这就初步说明了本文提出的中心回线瞬变电磁法的逆时偏移成像算法是有效的。

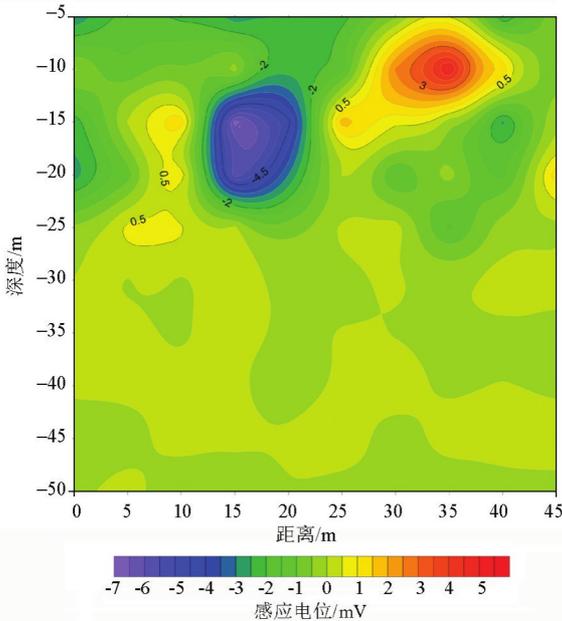


图 2 中心回线瞬变电磁法逆时偏移成像断面
 Fig.2 The inverse time migration imaging section of the center loop transient electromagnetic method

4 结论

针对中心回线瞬变电磁法反演十分困难的问题,基于大地中电磁波的低速特性,依据地震逆时偏移成像的基本原理,设计并编写程序代码实现了瞬变电磁逆时偏移程序算法,通过实际验证,该算法能有效揭示地下地质异常体。主要认识有以下几点:

1) 大地中电磁波的传播速度与电阻率和频率成正比关系,电磁波的频率越高、电阻率越大,则速度越快。100 Hz 的电磁波在电阻率为 $10 \Omega \cdot m$ 的大地中传播的速度是 316.23 m/ms,远低于光速 300 000 m/ms,只有光速的千分之一左右。

2) 由于大地中电磁波速度慢,可对自激自收观测方式的电磁资料进行逆时偏移成像。

3) 依据成像点与观测点之间的双程走时,把观测点的波场逆时传播到成像点获得该测点在成像点

的波场,把所有测点在成像点的波场进行叠加得到成像点的波场。

4) 逆时偏移成像算法的一个关键是速度,在进行逆时偏移成像时,要依据频率和当地的电阻率给出合理的速度参数,而且要用群速度而非相速度。

该方法目前只适用于收发同点的瞬变电磁观测方式,也适合探地雷达资料的偏移成像。发射点和接收点相距很远的观测装置不适用于本方法。

参考文献 (References):

[1] 牛之琏.时间域电磁法原理[M].长沙:中南大学出版社,2007. Niu Z L. Principle of electromagnetic method in time domain [M]. Changsha:Central South University Press, 2007.

[2] 薛国强,李貅,底青云.瞬变电磁法理论与应用研究进展[J].地球物理学进展,2007,22(4):1195-1200. Xue G Q, Li X, Di Q Y. The progress of TEM in theory and application[J]. Progress in Geophysics, 2007,22(4):1195-1200.

[3] Strack K-M, Vozoff K. Integrating long-offset transient electromagnetics (LOTEM) with seismics in an exploration environment [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44(6): 997-1017.

[4] Strack K M, Hanstem T, LeBrocq K, et al. Case histories of long-offset transient electromagnetics (LOTEM) in hydrocarbon prospective areas [J]. First Break, 1989(7): 467-477.

[5] Manzella A, Volpi G, Zaja A. Combined TEM-MT Investigation of Shallow-depth resistivity structure of Mt Somma-Vesuvius [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2004, 131: 19-32.

[6] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等.长偏移距瞬变电磁测深法在碳酸盐岩覆盖区落实局部构造的应用效果[J].地震地质,2001,23(2):271-276. Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. Trial with lotem to investigate detailed geological structure in the area covered with carbonatite [J]. Seismology and Geology, 2001, 23(2): 271-276.

[7] 严良俊,王正茂,谢兴兵.表层结构调查中的 TEM 地形校正[J].勘探地球物理进展,2007,30(5):396-398. Yan L J, Wang Z M, Xie X B. Topographic correction for TEM data and its application in near surface investigation[J]. Progress in Exploration Geophysic, 2007, 30(5): 396-398.

[8] 张保祥,刘春华.瞬变电磁法在地下水勘查中的应用研究综述[J].地下水,2004,26(2):129-133. Zhang B X, Liu C H. Review of the application of tem in groundwater exploration [J]. Ground Water, 2004, 26(2): 129-133.

[9] 廖忠,李文尧.线源 TEM 在腾冲热水塘寻找地热的应用效果[J].工程勘察,2002(2):67-69. Liao Z, Li W Y. The application effect of TEM in Tengchong geothermal reservoir survey [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2002(2): 67-69.

[10] 陈清礼,严良俊,胡文宝,等.瞬变电磁法探测水库坝基溶洞的效果[J].长江大学学报:自然科学版,2005,2(7):201-203. Chen Q L, Yan L J, Hu W B, et al. Effect of transient electromagnetic method (TEM) for probing karst cave in dam foundation [J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2005, 2(7): 201-203.

- [11] 陈卫, 杨生, 王有霖, 等. 时间域瞬变电磁法在地质勘探中的应用[J]. 矿产与地质, 2006, 20(4): 538-542.
Chen W, Yang S, Wang Y L, et al. Application of TEM in geological exploration [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20(4): 538-542.
- [12] 周平, 施俊法. 瞬变电磁法(TEM)新进展及其在寻找深部隐伏矿中的应用[J]. 地质与勘探, 2007, 43(6): 63-69.
Zhou P, Shi J F. New progresses and application of transient electromagnetic method (TEM) in deep-concealed ore finding [J]. Geology and Prospecting, 2007, 43(6): 63-69.
- [13] 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: 162-198.
Jiang B Y. Practical near-field magnetic source transient electromagnetic exploration [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 162-198.
- [14] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法正反演问题研究进展[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1165-1172.
Xue G Q, Li X, Di Q Y. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1165-1172.
- [15] 陈清礼, 严良俊, 付志红, 等. 长偏移距瞬变电磁法全区视电阻率的二分搜索数值算法[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(6): 779-782.
Chen Q L, Yan L J, Fu Z H, et al. The all-time apparent resistivity bisearch numerical algorithm based on long offset transient electromagnetic method [J]. OGP, 2009, 44(6): 779-782.
- [16] 付志红, 孙天财, 陈清礼, 等. 斜阶跃场源瞬变电磁法的全程视电阻率数值计算[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 15-21.
Fu Z H, Sun T C, Chen Q L, et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for ramp transient electromagnetic method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 15-21.
- [17] 白登海, Meju M A, 卢健, 等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697-704.
Bai D H, Meju M A, Lu J, et al. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2003, 46(5): 697-704.
- [18] 严良俊, 胡文宝, 陈清礼, 等. 长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 532-538.
Yan L J, Hu W B, Chen Q L, et al. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset transient electromagnetic sounding [J]. OGP, 1999, 34(5): 532-538.
- [19] Maxwell A M. A simple method of transient electromagnetic data analysis [J]. Geophysics, 1998, 63(2): 405-410.
- [20] Anderson W L. Nonlinear least-squares inversion of transient soundings for central induction loop system (program NLSTCI) [R]. U.S. Geological Survey, 1982.
- [21] 薛国强, 李貅, 郭文波, 等. 从瞬变电磁测深数据到平面电磁场数据的等效转换[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5): 1539-1545.
Xue G Q, Li X, Guo W B, et al. Equivalent transformation from TEM field sounding data to plane-wave electromagnetic sounding data [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(5): 1539-1545.
- [22] Nekut A G. Direct inversion of time-domain electromagnetic data [J]. Geophysics, 1987, 52: 1431-1435.
- [23] 陈本池, 李金铭, 周凤桐. 瞬变电磁场拟波动方程偏移成像[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 546-554.
Chen B C, Li J M, Zhou F T. Quasiwave equation migration of transient electromagnetic field [J]. Progress in Exploration Geophysics, 1999, 34(5): 546-554.
- [24] 吕国印. 瞬变电磁法二维逆时偏移[J]. 物探与化探, 1998, 22(2): 139-142.
Lu G Y. Two-dimensional counter-time shift in transient electromagnetic method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1998, 22(2): 139-142.
- [25] Zhou H W, Hu H, Zou Z H, et al. Reverse time migration: A prospect of seismic imaging methodology [J]. Earth-Science Reviews, 2018, 179(2): 207-227.

Transient electromagnetic inverse time migration imaging method

CHEN Zi-Jing¹, CHEN Qing-Li²

(1. No. 1 Oil Production Plant of Northwest Oil Field Company, Sinopec, Luntai 841600, China; 2 School of Geophysics and Petroleum, Yangtze University, Wuhan 430100, China)

Abstract: In this paper, inverse time migration imaging of center loop transient electromagnetic sounding is studied. In view of the fact that the propagation velocity of electromagnetic wave in the earth is much lower than that of the speed of light in the vacuum, an inverse time migration imaging algorithm is designed which is suitable for transient electromagnetic sounding in the center loop observation configuration. The core idea of the algorithm is to obtain the total wave field value of the imaging point according to the superposition of the wave field value of different observation points at the same time of the imaging point. Based on this algorithm, inverse time migration imaging was performed on a measured center loop transient electromagnetic sounding data. It is shown that the results of inverse time migration imaging are in good agreement with the actual situation and can obtain better processing effect. Therefore, inverse time migration imaging is an effective data processing method for transient electromagnetic sounding.

Key words: electrical prospecting; transient electromagnetic sounding; inverse time migration imaging; electromagnetic velocity