

Forward Simulation and Apparent Resistivity Calculation of Transient Electromagnetic Method Using Magnetic Dipole Source on the Layered Medium

Jianping Xiao, Bo Liu, Fan Wang, Huichen Liang, Cui Yu, Shenglong He

School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha
Email: jpxiaohust@gmail.com

Received: Apr. 19th, 2013; revised: May 2nd, 2013; accepted: May 14th, 2013

Copyright © 2013 Jianping Xiao et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: The forward of transient electromagnetic method (TEM) is the basis of the theoretical study of multi-dimensional transient electromagnetic prospecting. Transient coupling curves of each field component of different geoelectric sections can be obtained through forward calculation, and all the field components decrease rapidly as time increases in the middle and late time. Important characteristics of the geoelectric sections can be acquired by converting the field components to apparent resistivity curves. The calculation formula is derived from Hankel transform and G-S transform, and the numerical algorithm is proposed for the vertical magnetic field of transient electromagnetic method with magnetic dipole source in the layered medium. Then the magnetic field components, calculated for several typical layered medium models, are converted to apparent resistivity values according to the definition of the apparent resistivity. The relative errors of the field components between the forward results and theoretical values are all less than 0.1%. The calculation results show that the apparent resistivity curves directly reflect the characteristics of geoelectric sections. And the anomaly of the low resistivity layer is more obvious than that of high resistivity layer. Furthermore, the negligible errors show that the forward results are reliable. It is valuable for theoretical research and practical application of transient electromagnetic method.

Keywords: Transient Electromagnetic Method Forward; Magnetic Dipole Source; Accuracy Verification; Apparent Resistivity Calculation

层状介质磁偶源瞬变电磁法正演及视电阻率计算

肖建平, 刘 博, 王 凡, 梁慧琛, 于 翠, 何生龙

中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙
Email: jpxiaohust@gmail.com

收稿日期: 2013年4月19日; 修回日期: 2013年5月2日; 录用日期: 2013年5月14日

摘 要: 瞬变电磁法正演是进行多维瞬变电磁勘探理论研究的基础, 通过正演计算可获得不同地电断面各场量瞬变耦合曲线, 而中晚期场量均随着时间的增加迅速减小, 将场量换算成视电阻率曲线, 可获取地电断面的重要特征。本文首先导出层状介质磁偶源瞬变电磁法垂直磁场的计算公式及数值计算方法, 建立典型的层状介质模型进行正演模拟, 获得了磁场分量的衰减曲线, 并将场量衰减曲线换算成视电阻率。计算结果表明视电阻率曲线直观的反映了地电断面特征, 瞬变电磁法对低阻介质层的异常反应明显, 同时场量误差分析表明正演结果可靠。

关键词: 瞬变电磁法正演; 磁偶极源; 精度验证; 视电阻率计算

1. 引言

TEM (Transient electromagnetic method)是电磁法勘探中应用较广的一种方法,已广泛应用于地质找矿,工程与地质灾害勘查等领域。瞬变电磁法一维正演是进行理论研究和实测资料处理与解释的基础。瞬变电磁法正演计算通常有两种途径,即在时间域内直接求解和在频率域中先求解再通过付氏变换到时间域,后者在一维情况下广泛采用^[1]。从频率域到时间域响应的转换,通常采用的方法有 Gaver-Stehfest 逆拉氏变换方法、延迟谱法、线性数字滤波法、折线化正余弦变换^[2]等方法。在频率域中磁场分量采用 Hankel 变换求解, Hankel 变换通常有两种途径实现,一种是采用线性数字滤波技术,另一种采用高斯积分求和方法^[3]。

瞬变电磁场的电、磁分量响应曲线在中晚期总是随着时间的增加而迅速减小,不同地电断面与瞬变耦合曲线间对应关系不明显。将场量的衰减曲线换算成视电阻率曲线能获得地电断面的重要特征,同样可对野外实测的衰减曲线转换成视电阻率曲线,方便实测数据的处理与解译。近年来,许多学者对瞬变电磁测深的视电阻率响应进行了研究,杨云见等^[4]采用正演拟合的方式定义了基于垂直磁场分量的全区视电阻率;郭嵩巍等^[5]提出了一种基于均匀半无限空间场的中心回线装置瞬变电磁测深法的全区视电阻率计算方法;白登海等^[6]根据中心回线方式磁场垂向分量时间变化率的核函数的特征分别计算了早期、晚期视电阻率;杨生^[7]提出了一种中心回线装置的全区视电阻率迭代反演计算方法;李建平等^[8]采用电偶极子迭加方法求取了回线装置的全区视电阻率方法;翁爱华等^[9]计算了矩形源层状模型的视电阻率响应;石显新等^[10]把大定源回线视电阻率算法引入到中心回线装置的数据处理解释中,消除了边缘效应引起的视电阻率计算误差;戚志鹏等^[11]提出了一种大定源装置下视电阻率的定义;Raiche 等^[12]提出了一种计算精确的晚期视电阻率的迭代算法。上述各种方法都是针对某种特定装置(如中心回线、大定回线等)进行视电阻率的计算,具有一定的局限性。

本文将对层状介质磁偶极源的正演及其视电阻率计算方法开展研究。从计算精度和计算效率综合考虑,瞬变电磁法正演将采用线性数字滤波技术的

Hankel 变换求解频率域磁场分量,然后采用 G-S 变换求出瞬变电磁场磁场分量,并对计算结果的精度进行评价。通过正演计算获得垂直磁场分量,采用一种有效的视电阻率的定义方法,求出不同地电模型的视电阻率,对理论研究和实际应用均有重要的指导作用。

2. 基本原理

2.1. 谐变场的公式推导

由文献[13]得垂直磁偶极源在层状介质中产生的垂直磁场为:

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} \left[e^{-u_0(z+h)} + r_{TE} e^{u_0(z-h)} \right] \frac{\lambda^3}{u_0} J_0(\lambda\rho) d\lambda \quad (1)$$

其中,空气中的波数 $k=0$, $\lambda=u_0$; 如果源和接收装置都敷在地面上,则 $z=0$, 且 $h=0$; 由上述两个条件可得:

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \int_0^{\infty} (1+r_{TE}) \lambda^2 J_0(\lambda\rho) d\lambda \quad (2)$$

2.2. Hankel 变换的数值解法

对于含有 0 阶 Bessel 函数的积分, Hankel 变换是解决该积分的高效的数值方法。算法描述如下:

若 $f(r) = \int_0^{\infty} K(\lambda) J_0(r\lambda) d\lambda$, 则 $f(r)$ 数值解为:

$$f(r) = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^n K(\lambda_i) C_i \quad (3)$$

其中 $\lambda_i = \frac{1}{r} \times 10^{a+(i-1)s}$, C_i 为滤波系数, $n=120$ 点时, $a = -8.385$ 为 hankel 积分中波数的初值, $s = 9.04226468670e-2$ 为波数间隔^[14]。

2.3. G-S 变换

G-S 变换是由频率域变换到时间域的有效手段,算法描述如下,

对给定的时间 t , 由拉氏变换变量 $S_m = \frac{\ln 2}{t} m$ 的拉氏变换值 $F(S_m)$, 计算电磁场瞬变响应值的数值方法:

$$f(t) = \frac{\ln 2}{t} \sum_{m=1}^n K_m \cdot F(S_m) \quad (4)$$

其中 $n=12$, K_m 是 G-S 变换系数^[15]。

2.4. 视电阻率计算公式

采用视电阻率的直接定义方法^[13], 可得到垂直磁场与视电阻率之间的关系表述为:

$$\frac{\rho_{\tau 1}}{\rho_1} = \left(\frac{H_z^{um}(\rho_1, t, r)}{2} \right)^{2/3} \quad (5)$$

式中 $H_z(t)$ 表示水平层状介质表面上观测到的磁场; H_z^{um} 为同一时刻 t 在电阻率为 ρ_1 的均匀半空间表面所测得的磁场; ρ_1 为层状介质地表第一层的电阻率; $\rho_{\tau 1}$ 即为各时刻的视电阻率值。

3. 正演结果及精度分析

3.1. 层状介质模型的磁偶极源瞬变场的计算

图 1 为典型的层状介质地电模型。第一层(地表层)厚度为 100 米, 电导率为 0.01 S/m, 即电阻率为 100 $\Omega \cdot m$, 与地表第四系介质电阻率接近; 最底层介质向下无限延伸, 由于本文主要研究第二层介质和第三层介质分别高阻和低阻情况下的瞬变电磁场响应, 其电导率值取为 0.01 S/m, 相当于实际勘探中的背景场值; 通过改变 σ_2 和 σ_3 的值获得不同参数的模型, 分别为均匀半空间(Model_1), 两层模型 H 型(Model_2)和 K 型(Model_3), 三层模型 QH 型(Model_4)、HK 型(Model_5)、KH 型(Model_6)和 AK 型(Model_7), 其层厚均为 20 米, 如表 1 所示。电导率为 0.5 S/m 代表低阻层, 与金属硫化物的电导率接近; 电导率为 0.0005 S/m 代表高阻层, 与金属矿床中的高阻围岩阻值接近; 电导率为 0.1 S/m 代表较低阻层, 电导率为 0.001 S/m 代表较高阻层, 在工程勘查中的不良地质体(如溶洞)通常表现为这两种导电特性。因此, 图 1 和表 1 所示的模型是矿产及工程勘查典型的地电模型。

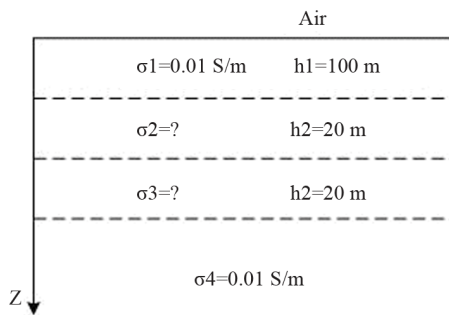


Figure 1. Layered medium models
图 1. 层状介质模型

Table 1. Layered medium models with different parameters
表 1. 不同参数的层状介质模型

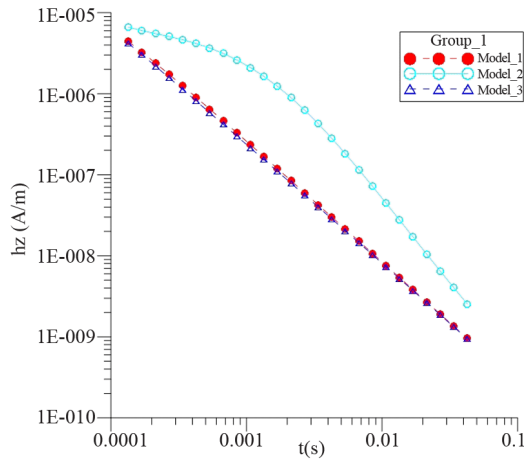
	σ_2 (S/m)	σ_3 (S/m)
Model_1	0.01	0.01
Model_2	0.01	0.5
Model_3	0.01	0.0005
Model_4	0.1	0.5
Model_5	0.1	0.0005
Model_6	0.001	0.5
Model_7	0.001	0.0005

将表 1 所示的 7 个正演模型分为 3 组, 第一组包括 Model_1, Model_2 和 Model_3 三个模型, 第二组包括 Model_1, Model_4 和 Model_5 三个模型, 第三组包括 Model_1, Model_6 和 Model_7 三个模型。分别对这三组模型进行正演计算, 得到如图 2 所示的结果。

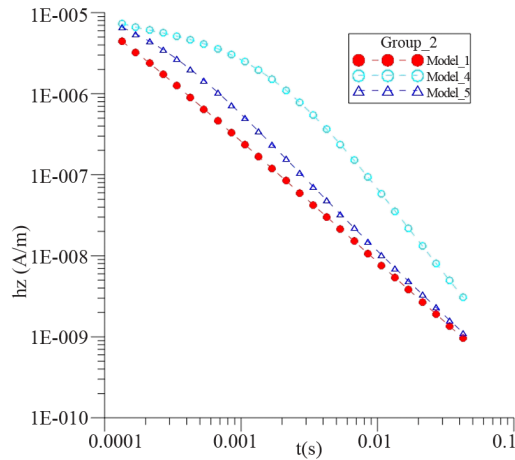
图 2 为三组层状介质模型的正演结果, 每组模型均包含均匀半空间模型 Model_1, 以便于其它模型仿真结果的对比。

第一组模型(包括 Model_1, Model_2, Model_3)第一层、第二层第四层介质电导率均为 0.01 S/m, 而第三层介质电导率各不相同, 其中 Model_2 中的第三层介质电导率为 0.5 S/m, Model_3 中的第三层介质的电导率为 0.0005 S/m。该组模型的仿真结果如图 2(a)所示。从图 2(a)可以看出, Model_1 的磁场分量在对数坐标中呈近直线衰减, 对应时间点处 Model_2 的磁场分量值明显大于 Model_1 的值, Model_3 的磁场衰减曲线几乎与 Model_1 重合。上述正演结果表明, 磁偶极源瞬变电磁法对低阻层介质探测时可获得明显的物探异常, 而对高阻层介质的反应不明显。

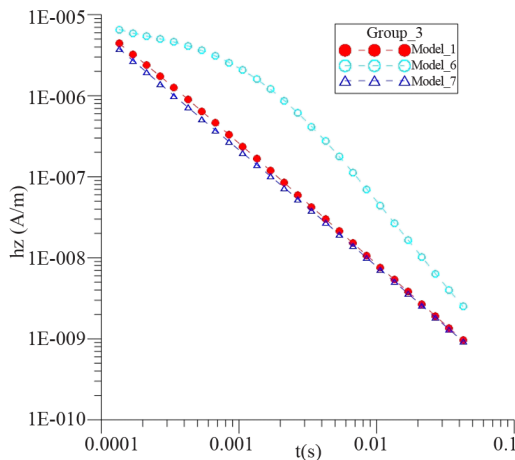
第二组模型(包括 Model_1, Model_4, Model_5)与第一组模型的区别是第三组模型的 Model_4 和 Model_5 的第二层介质为低阻层, 电导率为 0.1 S/m。第三组模型(包括 Model_1, Model_6, Model_7)与第一组模型的区别是第三组模型的 Model_6 和 Model_7 的第二层介质为高阻层, 电导率为 0.001 S/m。如果将这两组模型中的第三层作为探测对象, 第二层视为干扰层, 对比图 2(c)和图 2(a)可以看出, 对应的曲线形态基本一致, 说明对高阻覆盖层下的目标进行探测, 异常信号受覆盖层的干扰较小; 而对比图 2(b)和图



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Forward results of different models
图 2. 不同模型的正演结果

2(a)可以看出,除两个图中均有 Model_1 的正演曲线外, Model_4 的正演曲线在对应时刻的值明显高于 Model_2 的正演结果,同样, Model_4 的正演曲线在

对应时刻的值明显高于 Model_2 的正演结果,说明对低阻覆盖层下的目标进行探测,异常信号受干扰覆盖层的影响较大。

3.2. 精度验证

对于层状介质垂直磁偶极源的瞬变场没有解析解,因此其数值解得不到直接验证。而根据文献[13]可知,均匀半空间的磁偶极源有精确的解析解,如式(5)所示。

$$h_z = \frac{m}{4\pi\rho^3} \left[\frac{9}{2\theta^2\rho^2} \operatorname{erfc}(\theta\rho) - \operatorname{erfc}(\theta\rho) - \frac{1}{\pi^{1/2}} \left(\frac{9}{\theta\rho} + 4\theta\rho \right) e^{-\theta^2\rho^2} \right] \quad (5)$$

现将上节中的正演模型 Modle_1 的瞬变电磁响应采用层状介质的瞬变响应方法进行计算,然后与均匀半空间瞬变响应的解析解进行对比,对比结果如表 2 所示。表 2 中 Hz_N 为层状介质正演程序求解的各时刻磁场分量值, Hz_A 为根据公式(5)磁场分量的解析解,从表中可以看出,各时刻磁场分量值的相对误差均小于 0.1%,从而说明了各层状介质模型正演结果的可靠性。

4. 视电阻率计算

将图 1 和表 1 所示的地电模型的正演结果(如图 2 所示)代入公式(5)中,得到不同模型的视电阻率曲线如图 3 所示。

地电模型 Model_1 的四层介质电阻率值相同,相当于均匀半空间,从图 3 可以看出其视电阻率曲线为

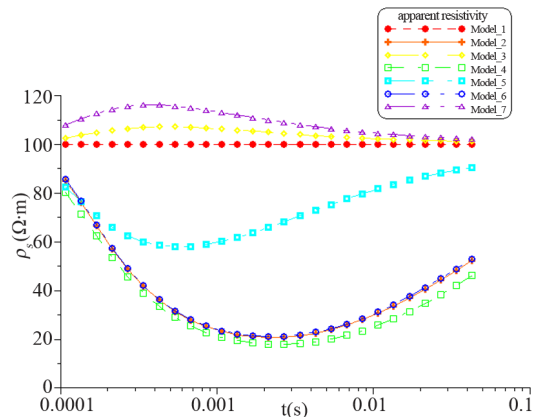


Figure 3. Apparent resistivity curves of different models
图 3. 不同模型的视电阻率曲线

Table 2. Comparison between numerical solution and analytical solution of the homogeneous media
表 2. 均匀介质模型的数值解与解析解比较

t (s)	Hz_N (A/m)	Hz_A (A/m)	Error (%)	t (s)	Hz_N (A/m)	Hz_A (A/m)	Error (%)
1.35E-04	4.41006E-06	4.41137E-06	0.03	2.69E-03	5.98481E-08	5.98786E-08	0.05
1.70E-04	3.25559E-06	3.25478E-06	0.02	3.39E-03	4.24586E-08	4.24782E-08	0.05
2.14E-04	2.38262E-06	2.38103E-06	0.07	4.26E-03	3.01089E-08	3.01215E-08	0.04
2.69E-04	1.73163E-06	1.73007E-06	0.09	5.36E-03	2.13450E-08	2.13521E-08	0.03
3.39E-04	1.25153E-06	1.25035E-06	0.09	6.75E-03	1.51278E-08	1.51317E-08	0.03
4.26E-04	9.00551E-07	8.99815E-07	0.08	8.50E-03	1.07194E-08	1.07212E-08	0.02
5.36E-04	6.45758E-07	6.45375E-07	0.06	1.07E-02	7.59327E-09	7.59500E-09	0.02
6.75E-04	4.61779E-07	4.61629E-07	0.03	1.35E-02	5.37925E-09	5.37963E-09	0.01
8.50E-04	3.29522E-07	3.29502E-07	0.01	1.70E-02	3.80994E-09	3.81006E-09	0.00
1.07E-03	2.34757E-07	2.34796E-07	0.02	2.14E-02	2.69758E-09	2.69819E-09	0.02
1.35E-03	1.67031E-07	1.67087E-07	0.03	2.69E-02	1.91093E-09	1.91067E-09	0.01
1.70E-03	1.18722E-07	1.18775E-07	0.04	3.39E-02	1.35275E-09	1.35293E-09	0.01
2.14E-03	8.43198E-08	8.43617E-08	0.05	4.26E-02	9.58261E-10	9.57957E-10	0.03

一条与时间轴平行的直线, 其视电阻率值为 $100 \Omega \cdot m$, 说明了采用公式(5)进行视电阻率计算的结果正确。图 3 中其余各模型视电阻率曲线均能准确反应各自模型的地电特性。

图 3 中 Model_2 和 Model_3 曲线分别表示地下介质中有一低阻层和高阻层的模型视电阻率, 其中 Model_2 偏离均匀半空的视阻率曲线的幅度大于 Model_3 的偏离幅度, 说明瞬变电磁响应对低阻层的更敏感。

图 3 中的 Model_4、Model_5、Model_6、Model_7 分别为四层模型的视电阻率响应。若将第二层介质看作干扰层, 第三层介质作为目标探测层, 则 Model_4 和 Model_5 对应低阻覆盖层下的介质视电阻率响应, 从图 3 可以明显看出, Model_4 和 Model_5 曲线上任意时刻值均低于均匀半空间响应(Model_1)的值, 整体表现为低阻, 而地电模型 Model_5 的第三层实际上是高阻层, 视电阻率曲线并不能反映这一高阻层的存在; Model_6 和 Model_7 对应高阻覆盖层下的介质视电阻率响应, Model_6 曲线上任意时刻值均低于均匀半空间响应(Model_1)的值, 表现为低阻, 与模型中第三层介质为低阻(电导率为 0.5 S/m)的情况相吻合, 而 Model_7 曲线上任意时刻值均大于均匀半空间响应(Model_1)的值, 表现为高阻, 与模型中第三层介质为

高阻(电导率为 0.0005 S/m)的情况一致。这一现象表明若探测对象上有低阻覆盖层, 则覆盖层干扰非常严重, 在实际勘探中可能造成误判。

另一方面, 相对于图 2 的场量响应曲线, 视电阻率曲线能更直观的反映地电结构, 有利于瞬变电磁法资料的处理和定性解释。由于本文计算方法是从视电阻的定义导出, 可将该方法应用于不同模型, 不同装置的瞬变电磁法视电阻率的计算。

5. 结论

采用对层状介质磁偶源进行正演及视电阻率计算, 结果表明瞬变电磁法对低阻介质层的勘探效果良好, 但在实际勘探任务中必须考虑低阻覆盖层对目标勘探层异常的干扰效应。通过对计算结果精度的研究, 表明本文所采用方法能获得高精度的正演结果。从视电阻的定义出发, 获得将瞬变电磁法场量转换为视电阻的公式, 并通过典型地电模型的正演数据进行了验证, 可将该方法推广至不同地电模型、不同装置类型的瞬变电磁法的视电阻率计算, 对瞬变电磁法的理论研究及实际应用具有重要参考价值。

参考文献 (References)

- [1] T. Wang, G. W. Hohmann. A finite-difference time-domain solu-

- tion for three-dimensional electromagnetic modeling. *Geophysics*, 1993, 58(6): 797-809.
- [2] J. H. Knight, A. P. Raiche. Transient electromagnetic calculation using the GAVER-stehfest inverse Laplace transform method. *Geophysics*, 1982, 47(1): 47-50.
- [3] G-Q. Xue, X. Li and Q.-Y. Di. Research progress in TEM forward modeling and inversion calculation. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4): 1165-1172.
- [4] 杨云见, 何展翔, 赵晓明. 接地长导线源瞬变电磁法全区视电阻率定义探讨[J]. *物探装备*, 2010, 20(4): 117-120.
- [5] 郭嵩巍, 王绪本. 瞬变电磁全区视电阻率数值计算方法研究[J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(5): 500-507.
- [6] 白登海, M. A. Meju, 卢键等. 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.
- [7] 杨生. TEM中心回线法计算考虑关断时间的全区视电阻率[J]. *物探与化探*, 2003, 32(6): 647-651.
- [8] 李建平, 李桐林, 赵雪峰等. 层状介质任意形状回线源瞬变电磁全区视电阻率的研究[J]. *地球物理学进展*, 2007, 22(6): 1777-1780.
- [9] 翁爱华, 刘云鹤, 陈玉玲等. 矩形大定源层状模型瞬变电磁响应计算[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(3): 646-650.
- [10] 石显新, 闫述, 傅君眉等. 瞬变电磁中心回线装置资料解释方法的改进[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1931-1936.
- [11] 戚志鹏, 李貅, 朱宏伟等. 大定源装置下瞬变电磁法视电阻率定义[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(8): 1350-1358.
- [12] A. P. Raiche. Transient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earths. *Geophysics*, 1987, 52(6): 785-793.
- [13] M. N. Nabighian. *Electromagnetic methods in applied geophysics—Theory*. Society of Exploration Geophysics, 1988.
- [14] W. L. Anderson. Numerical integration of relation of related Hankel transform of orders 0 and 1 by adaptive digital filtering. *Geophysics*, 1979, 44(7): 1287-1305.
- [15] Y.-Z. Luo, Y.-J. Chang. A rapid algorithm for G-S transform. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5): 684-690.