

石油地球物理勘探

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

严良俊* 胡文宝 陈清礼 胡家华

(江汉石油学院物探系)

摘要

严良俊,胡文宝,陈清礼,胡家华.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.石油地球物理勘探,1999,34(5):532~538

长偏移距瞬变电磁测深法(LOWTEM)作为电法勘探中的一门新兴技术,其研究与应用在我国尚属探索阶段,其测量数据的处理与解释也仅局限于定性范畴。为了使该方法获得的大量时间域数据能够得到快速准确的处理和定量解释,本文提出了一种实用的资料处理与解释方法,内容包括:①利用密集采样的感应电动势曲线积分求取随时间变化的垂直磁场值;②以垂直磁场定义全区视电阻率,然后采用数值迭代法求取电阻率曲线;③对计算结果进行时频转换;④引入MT反演方法对时频转换视电阻率曲线进行反演。

通过模型试算,证明该方法能够较好地解决多解性问题,实现了全区解释,提高了解释精度,具备了现场解释的能力。

主题词 瞬变电磁测深 全区视电阻率 大地电磁测深 感应电动势 趋肤深度 垂直磁场强度 反演

ABSTRACT

Yan Liangjun, Hu Wenbao, Chen Qingli and Hu Jiahua. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset transient electromagnetic sounding. *OGP*, 1999, 34(5):532~538

Long-offset transient electromagnetic sounding is a new technique in electric survey. Its research and application in China are only in initial phase, and its data processing and interpretation are only qualitative. In order to achieve efficient processing and quantitative interpretation of volumed transient electromagnetic data in time domain, we develop a practical method for data processing and interpretation, which includes four steps:

- Time-dependent vertical component of magnetic field is obtained by integrating an induced electromotance curve derived from dense sampling.
- All-time apparent resistivity is defined by using the vertical component of magnetic field, and then the apparent resistivity curve is calculated by taking nu-

* Yan Liangjun, Department of Geophysical Exploration, Jianghan Petroleum College, Jingzhou City, Hubei Province, 434102

本文于1998年12月29日收到。

merical iterative method.

• The resultant all-time resistivity is transformed from time domain to frequency domain.

• The inversion of transformed apparent resistivities is achieved finally by introducing MT inversion method.

Modeling computation testifies that the technique desirably avoids multi-solution, achieves reasonable all-time interpretation, and offers improved accuracy and field interpretation ability.

Subject heading: transient electromagnetic sounding, all-time apparent resistivity, magnetotelluric sounding, induced electromotance, skin depth, vertical magnetic field strength, inversion

引言

长偏移距长时窗瞬变电磁测深法(LOWTEM)试验与应用研究在我国尚属探索阶段,它作为电法勘探中的一门新兴技术,愈来愈受到勘探地球物理界的重视,自1990年以来,我们一直从事LOWTEM法的方法试验与解释研究,先后在南方碳酸盐岩地区多个工区成功地进行了LOWTEM方法试验,取得了一些令人鼓舞的结果,为LOWTEM方法进一步发展奠定了基础。

尽管LOWTEM法具有坚实的理论基础,而且它在分辨率、信噪比等诸多方面优于频域电磁勘探方法,但在数据处理与解释方面仍存在一些十分突出的问题。首先,由于该方法记录的是时间序列,采样点密集(一般为0.5ms采样间隔),周期长(32s甚至更长),数据处理及反演任务相当繁重,现场一般不能及时给出电性剖面,从而影响了对采集数据质量以及勘探效果的评价。尽管严良俊等人(1994)^[1]改进了瞬变电磁测深一维层状介质的正、反演算法,其反演速度还是很难适应现场处理的需要。

其次,常规瞬变方法的视电阻率曲线的获取往往是作了早、晚期近似处理,这样难以很好地解释过渡区,视电阻率曲线的直观性较差。

快速、准确地反演解释LOWTEM资料的难点在于该方法的视电阻率无法在全区内解析定义。目前许多资料的解释大都停留在早、晚期视电阻率近似的定性解释之上。LOWTEM方式下均匀半空间的响应函数(感应电动势)与电阻率的关系十分复杂,使得人们在定义全区视电阻率时只能采取数值方式。

Yang Sheng^[2]等人尝试了用感应电动势数值求解全区视电阻率的方法,效果较好,但实用性较差。李吉松(1993)^[3]等人提出了用垂直磁场本身来数值求解全区视电阻率,但一直未引起人们的重视。

由于垂直磁场与电阻率之间的关系是一一对应的关系,加之高密度采样的LOWTEM数据易于数值积分求解垂直磁场,从而使得该全区视电阻率定义方法稳定、可靠且实用。

本文在实现LOWTEM方式的全区视电阻率求取之后,用层状模型对比分析了相同条件下的全区视电阻率曲线与MT视电阻率曲线特征,给出了它们之间的转换关系,然后引入MT反演方法,从而实现了LOWTEM法的快速反演。

物 理 勘 探

全区视电阻率曲线的求取及时频转换

全区视电阻率定义

电法勘探中的视电阻率定义是以半空间条件下电磁分量响应函数为理论依据的。如果作为自变量的电阻率与响应函数(电磁分量)的关系是一一对应的关系,且存在反函数,则视电阻率的定义形式为

$$\rho_a = F^{-1}(Y, t, r) \quad (1)$$

这里 Y 是对应的电磁分量; t 是观测时间, 单位:s; r 是收发距, 单位:m。

对于 LOWTEM 方式, 观测的是垂直磁场随时间的变化率, 即感应电动势, 其均匀半空间条件下的响应函数为

$$\frac{\partial h_z}{\partial t} = \frac{3x}{2t} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{1}{x}\right) - 2 \sqrt{\frac{1}{\pi x}} \left(1 + \frac{2}{3x}\right) e^{\frac{1}{x}} \right] \quad (2)$$

其中: $x = \frac{4\rho t}{\mu r^2}$; ρ 为均匀半空间的电阻率, 单位为 $\Omega \cdot m$; $\operatorname{erf}(x)$ 为误差函数; μ 为磁导率, 单位为 H/m 。

由于式(2)是电阻率 ρ 的超越函数, 目前数学上尚无法给出形如式(1)的反函数形式, 因而定义全区视电阻率存在困难, 唯一的途径是采用数值求解法来完成。Yang Sheng^[2]等人分析了式(2)随电阻率变化的特征, 发现感应电动势并非与电阻率一一对应, 即对于一个给定的感应电动势值, 一般有两个电阻率与之对应(图 1), 从而使数值求解视电阻率问题复杂化, Yang Sheng 提出了如何从两个电阻率中选取真值的规则, 较好地解决了式(2)条件下数值定义全区视电阻率的问题。但不足之处是实用性较差, 且有假极值现象存在。另外, 在特定条件下会出现无解的情况。

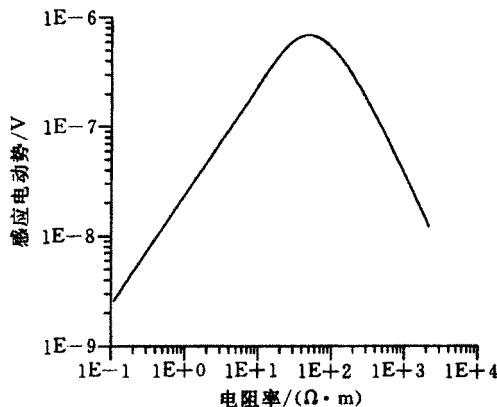


图 1 感应电动势与电阻率变化关系曲线

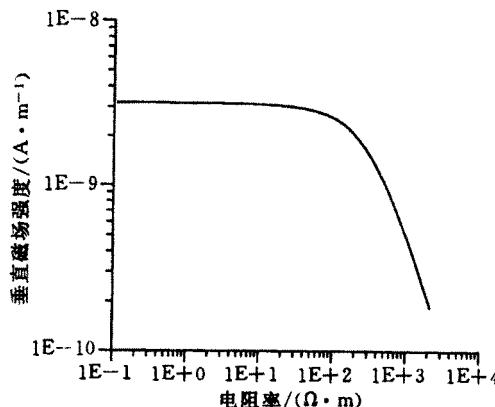


图 2 垂直磁场分量与电阻率变化关系曲线

李吉松等人全面分析了均匀半空间条件下垂直磁场分量响应函数

$$h_z(t, \rho) = \left(1 - \frac{3}{2}x\right) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{x}}\right) + 3 \sqrt{\frac{x}{\pi}} e^{-\frac{1}{x}} \quad (3)$$

发现垂直磁场分量 h_z 与电阻率之间的关系是一一对应的关系(图 2), 这使得我们应用式(3)以

数值求解的方式定义全区视电阻率具有唯一性和可靠性。

全区视电阻率计算

LOWTEM 测量的是感应电动势,首先需将感应电动势转换成垂直磁场分量,其转换关系式如下

$$h_z(t) = 1 - \int_0^t \frac{\partial h_z}{\partial t} dt \quad (4)$$

将积分所得的垂直磁场分量代入式(3)中,有

$$\left(1 - \frac{3}{2}x\right) \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{x}}\right) + 3\sqrt{\frac{x}{\pi}} e^{-\frac{1}{x}} - h_z(t) = 0 \quad (5)$$

求解方程(5)得根 x_t ,代入下式

$$\rho_a = \frac{\mu r^2 x_t}{4t} \quad (6)$$

式(6)即为全区定义的视电阻率值。

根据上述算法,我们计算了二层模型和三层模型的全区视电阻率曲线,如图 3 与图 4 所

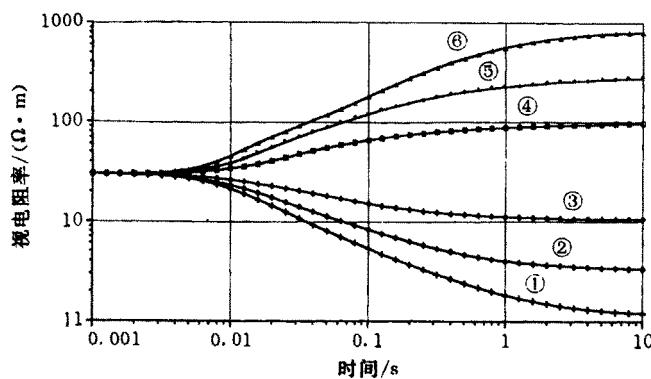


图 3 二层地电模型计算的全区视电阻率曲线(改变第二层电阻率)

模型参数: $H_1=400\text{m}$, $\rho_1=30\Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=1, 3, 10, 100, 300, 1000\Omega\cdot\text{m}$,
图中的①,②,...,⑥表示第二层电阻率取不同值时对应的结果

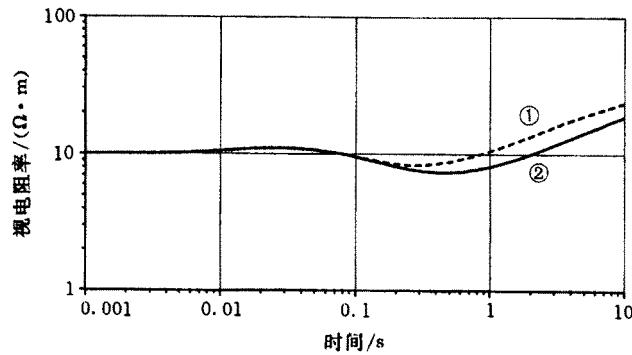


图 4 四层地电模型计算的全区视电阻率曲线(改变第三层的厚度)

模型参数: $\rho_1=10\Omega\cdot\text{m}$, $\rho_2=80\Omega\cdot\text{m}$, $\rho_3=5\Omega\cdot\text{m}$, $\rho_4=40\Omega\cdot\text{m}$;
 $H_1=300\text{m}$, $H_2=200\text{m}$, $H_3=1000$ 或 1500m ,
图中的①,②表示第三层厚度分别为 1000m 和 1500m 时的结果

示。图3是二层地电模型计算的全区视电阻率曲线,图中6条曲线分别是第二层电阻率取6种不同值时的计算结果。从图中可以看出,无论地电模型是G型还是D型,曲线能很好地反映出地电模型的形态特征,不存在假极值现象。该计算结果优于Yang Sheng以感应电动势定义的全区视电阻率,与Strack(1990)的计算结果相当。图4是KH型四层地电模型计算的全区视电阻率曲线,从图中看出,低、高、低、高的KH型形态十分清楚,也没有出现假极值现象。

上述计算结果说明,LOWTEM方式以磁场定义的全区视电阻率曲线优于MT的视电阻率曲线,直观性强,便于定性与定量解释。

时—频转换

从物理上讲,频域中的趋肤深度与时域中的趋肤深度具有等效性,频域中的趋肤深度为

$$\delta_F = \sqrt{2\rho/(2\pi f\mu)} \quad (7)$$

时域中的趋肤深度为

$$\delta_T = \sqrt{2\rho t/\mu} \quad (8)$$

令式(7)等于式(8)有

$$f = \frac{1}{2\pi t} \quad (9)$$

应用式(9),可将时域的全区视电阻率曲线转换成等效的MT视电阻率曲线。

LOWTEM与MT视电阻率曲线对比

与瞬变电磁测深定义早、晚期视电阻率不同,全区视电阻率不再受收发距等装置系数的影响,而仅仅是地下地电构造的反映。对于一维层状均匀介质而言,其全区视电阻率曲线应与相同模型下MT视电阻率曲线一致。

图5是H型三层地电模型的MT视电阻率曲线与LOWTEM全区视电阻率转换曲线对比图,从图中看出,两曲线一致性很好,相比较而言,MT曲线存在假极值现象,而LOWTEM全区视电阻率曲线没有,因而不会导致虚假解释。

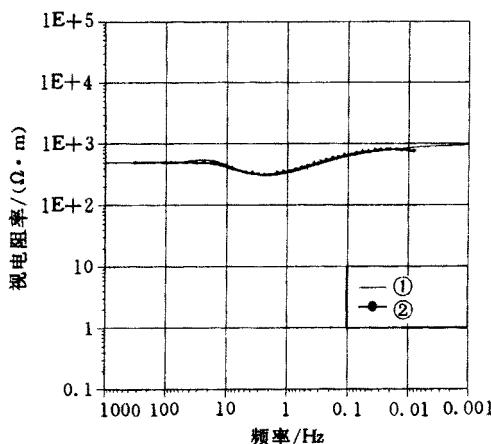


图5 H型三层地电模型的MT视电阻率曲线与LOWTEM全区视电阻率转换曲线对比图

对比LOWTEM与MT视电阻率曲线发现,视电阻率的幅值、形态几乎完全相同,这种相似性促使我们有理由将LOWTEM全区视电阻率曲线转换成MT视电阻率曲线后,采用MT中的反演方法直接对LOWTEM数据进行反演解释,由此我们提出了LOWTEM快速反演方法。

LOWTEM资料快速反演

本文提出的快速反演方法实际上是将LOWTEM数据等效转换成MT视电阻率曲线,然后采用MT的快速反演方法,从而快速、

准确地获取地电剖面信息。反演过程由以下三个步骤组成。

初始模型的构造

在大地电磁测深法中,最具代表性的近似反演技术是 Bostick 反演法。尽管结果不够精确,但运算方便快捷,能直观地给出地下电阻率随深度的变化关系。电阻率和深度的 Bostick 变换关系式为

$$\rho_i = \rho_a(T_i) \frac{1 + m(T_i)}{1 - m(T_i)} \quad (10)$$

式中: ρ_i 为 Bostick 电阻率; $\rho_a(T_i)$ 为视电阻率; $m(T) = \frac{d\log(\rho_a(T))}{d\log(T)}$ 。另

$$d_i = \sqrt{\frac{\rho_a(T_i)T_i}{2\pi\mu}} \quad (11)$$

这里 d_i 是 Bostick 深度, T_i 为周期。

由式(10)和式(11)得出的 $\rho_i, d_i (i=1, 2, \dots, N)$ 构制出反演的初始模型。

深度参数的修正

采用 Zondy(1989)^[5] 提出的反演参数修改方法,具体步骤是:

(1)保持电阻率参数不变,将 N 个深度参数乘以 0.9 或 1.1,即深度参数向正方向或负方向变化 10%;

(2)用修正之后的模型正演视电阻率曲线;

(3)按下式计算拟合度

$$PN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\rho_{ai} - \rho_{ci})^2}{\rho_{ai}^2}} \quad (12)$$

这里 ρ_{ai} 是转换后的全区视电阻率, ρ_{ci} 是正演的视电阻率。当 PN 小于给定的误差时,反演迭代终止。否则,重复(1)~(3)的步骤。应该注意,拟合度减小时,应保持深度参数的修正方向不变;拟合度增加时,应改变修正方向。

电阻率参数的修正

保持深度参数不变,根据模型正演视电阻率曲线与转换的全区视电阻率曲线比较来确定电阻率参数的修改方向,修改原则是

$$\rho_i^{\text{new}} = \rho_i^{\text{old}} \{ \log(\rho_{ai}) / \log(\rho_{ci}) \} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

这里 ρ_i^{old} 是上一次迭代的模型电阻率参数, ρ_i^{new} 是新修改的模型电阻率参数。然后用修改后的模型正演,代入式(12)计算拟合度,直至满足精度要求为止。

通过上述多次迭代、不断修改过程之后的最终模型,即为反演所求的地电模型。

模 型 试 算

为了验证、考察该反演算法的可靠性与准确性,我们分别以三层和五层地电模型正演结果进行反演试算,其结果如图 6 与图 7 所示。从两图中可以看出,Bostik 反演模型比较圆滑,无论是厚度参数还是电阻率参数均与真实模型存在较大的差距;而通过快速反演算法修正之后的模型更接近真实模型,说明反演效果良好。

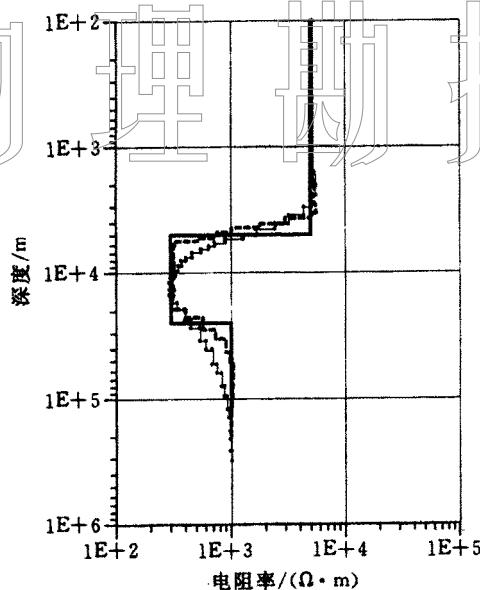
物
理
探
索

图 6 H 型地电模型快速反演结果
与 Bostick 反演结果对比

实线: 地电模型; 点画线: Bostick 反演结果; 虚线: 快速反演结果

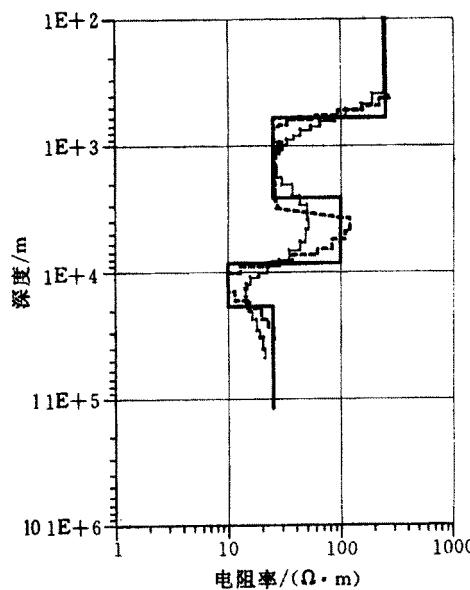


图 7 HK 型地电模型快速反演结果
与 Bostick 反演结果对比

图中曲线的表示与图 6 相同

结 论

(1) 均匀半空间下水平线圈感应的电动势是电阻率的多值函数, 而磁场与电阻率的关系是单值函数, 因而利用磁场定义全区视电阻率简单、方便且唯一。

(2) 利用电磁趋肤深度的等效性实现的时频转换通过模型验证是可行的。

(3) 在 Bostick 反演模型的基础之上进一步修改模型参数, 提高了模型正演结果与实测数据的拟合精度, 因而使得反演结果可以用于定量解释。

(4) 本文提出的先计算全区视电阻率, 然后进行时频转换, 最后进行快速反演的长偏移距瞬变电磁测深资料处理流程简便、快速、实用, 便于现场处理与资料质量评价。

参 考 文 献

- 1 严良俊等. 瞬变电磁测深一维反演方法及结果分析. 江汉石油学院学报, 1994, (4)
- 2 Yang S. A single apparent resistivity expression for loop-offset transient electromagnetics. *Geophysics*, 1986, 51(6): 1291~1297
- 3 李吉松, 朴华荣. 电偶极源瞬变测深一维正演及视电阻率响应研究. 物化探计算技术, 1993, 15(2)
- 4 Strack K M. *Exploration with deep transient electromagnetics*, Elsevier science publishers B V Amsterdam, The Netherlands, 1990
- 5 Zohdy A A R. A new method for the interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 1989, 54(2): 245~253

(本文编辑:张雷)