# 瞬变电磁晚期场资料的一维反演

#### 林长佑

(国家地震局兰州地震研究所,兰州 730000)

## 扬世荣 叶剑湘

(中国煤地质总局湖南省煤田地质局,株洲 412000)

**摘要** 本文研讨了由垂直磁偶源和水平电偶源所激发的瞬变电磁晚期场的 垂直磁场时间偏导数  $\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}$ 及其视电阻率的性态特征。探讨了其一维反演的某些 问题,研制出了对该时间域电磁响应函数的一维实用化反演程序,表明具有较好的 使用效果。

关键词: 瞬变电磁法; 晚期场; 一维反演

1 引言

瞬变电磁法(TEM)是近年来在国内外获得迅速发展的时间域电磁法。它通常以一水平 线框或一对供电电极作为垂直磁偶极或水平电偶极的激发源。在电流断开瞬间的某一适当 的延迟时间内,在接收点测量相应的电磁场分量,即包含有地球电导率结构信息的二次场。 反演这些时间域的电磁观测资料,则可能获得相应的地球电导率结构。

TEM 作为一种时间域电磁法,与相应的频率电磁法相比较(例如频率电磁测深, FESM),具有它自身的一定特色。TEM 是在一次场不存在的情况下观测纯二次场,消除了 频率域方法中的主要噪声源一装置耦合噪声;对于某些地电模型参数的分辨优于频率域方 法;其资料较少受到近旁非均匀性影响。特别是,对于某些特定的源一接收装置,选择适当的 响应函数,可以较为有效地消除表面三维非均匀性引起的静位移效应。而这一问题则是近年 来从事频率域电磁法的地球物理学家们为之大伤脑筋的问题之一,人们不得不花费大量的 时间和精力对这一问题进行探索研究。此外,对于近年来方为人们所注意到的人工源电磁法 中的"影子效应"问题,TEM 也可能具有它独到的优点。正因为如此,八十年代以来国外又 兴起了一个 TEM 的新的发展浪潮,其间有大量的文献报导出现并开始比较广泛地应用于 矿产资源勘探、工程地质、活断层填图以及地壳浅层结构研究。国内许多产业部门如石油、煤 炭、有色冶金、地矿等也已开始开展这一方法的试验研究工作。毫无疑问,TEM 有可能成为 一种有相当发展前景的电磁法。

2 TEM 晚期场响应函数的性态特征

与频率域电磁法中较低频资料含有较多深部地电结构信息相类似,较晚期的 TEM 观

#### 西北地震学报

测资料则含有较多深部地电结构信息。但是越是晚期其电磁场信号就越弱,观测资料的信噪 比也可能较低。因此观测的延迟时间是根据仪器装置、地电结构性质和勘探目的来加以适当 选择的。早期和晚期瞬变电磁场有着不同的特征,其视电阻率亦有不同的定义。对于电阻率 为  $\rho$  的均匀半空间当 $\sqrt{2\pi\rho t \cdot 10^7/r}$ 充分大时,则可认为是满足晚期条件的。这里 t 为延迟时 间、Y 为发、收距(源距)。

我们这里仅研究对于垂直磁偶源和水平电偶源两者,垂直磁场分量时间偏导数  $\frac{\partial B_{t}(t)}{\partial t}$ 及其视电阻率的晚期持征。在场源电流断开瞬间所产生瞬变电磁场与频率域的频谱 B<sub>t</sub>(ω) 具有如下关系<sup>(1)</sup>:

$$\frac{\partial B_{z}(t)}{\partial t} = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} QB_{z}(\omega) Sin\omega t d\omega$$
(1)

其中Q表示正交分量算子记号, w为园频率。而其磁场垂直分量的频谱则可表示为:

$$B_{z}(\omega) = \frac{M\mu}{4\pi} \int_{0}^{\infty} m^{2} D_{1} J_{0}(mr) dm \qquad (2)$$

这里, $\mu$ 为真空中的磁导率,M为偶极矩,J。(mr)为零阶贝塞尔函数,被积函数  $D_1$ 与地电结构参数有关。

因而,与频率域电磁法正演计算有所不同,在 TEM 中,首先是根据(2)式计算出磁场垂 直分量在频率域内的频谱 B<sub>z</sub>(ω),然后再由(1)式,利用付立时叶变换计算瞬变电磁时间响 应函数, <u>∂B<sub>z</sub>(t)</u>。其它电磁场分量的计算与此相类似。对于磁场垂直分量时间偏导数,其晚期 场视电阻率定义为:

$$\rho_{\rm r} = \frac{\mu}{4\pi t} \left(\frac{2\mu M}{5t(\partial B_z(t)/\partial t)}\right)^{2/3} \tag{3}$$

TEM 晚期场响应函数的性态特征与频率电磁响应函数有很大不同。作为例子,对于电 偶源的一个三层 H 型模型和磁偶源的一个三层 K 型模型,给出了  $\frac{\partial B_{a}(t)}{\partial t}$ 及其视电阻率一延 迟时间曲线(其模型参数为下文中表 1 和表 2 中的理论模型参数),它们具有某种典型性。由 图中两类响应函数曲线看来,如下的特征似乎是明显的:

(1)作为直接观测值的垂直磁场时间偏导数,随延迟时间的增加几乎是单调下降,且其 幅植的跨度范围很大。通常对于仅两个量级的延迟时间,其模值下降4-5个量级。表明在 源场电流断开瞬间电磁场的衰减是比较迅速的。这当然对观测造成了很大的因难。

(2) <u>3B<sub>s</sub>(t)</u> 随延迟时间增加衰减的速率与地电模型电导率分布有关,较低的地球电导率 将引起较快的衰减,反映出对所激发的电磁波有比较强烈的吸收,予示 TEM 对低电阻率层 有较好的分辨。同时其衰减速率与源距有关,较大的源距具有较低的起始值(在短延迟时间 方面),但随延迟时间增加衰减较慢。

(3)TEM 垂直磁场时间偏导数视电阻率曲线(在双数坐标上的 ρ,-t)对于模型层间电

导率反差虽然也表现出了某些起伏,但是远不如频率域电磁法响应曲线表现的那样明显。
(4)TEM 视电阻率曲线的首枝通常取一相当大的高值,只有到适当长的延迟时间才降
到大致相当于模型第一层电阻率值。而频率域电磁法(包括 MTS、CSAMT、FESM)其视电阻率曲线首技高频渐近值都为模型第一层电阻率。对于源场可以看成是均匀平面波的 MTS
视电阻率,当模型基底电阻率为有限时,曲线的尾技将趋于基底的电阻率,当基底电阻率为
∞或0时曲线尾枝在双对数 ρ<sub>4</sub>—T 图上将以 45<sup>-</sup>的斜率直线上升或下降。TEM 视电阻率曲
线的尾枝与 MTS 视电阻率曲线的尾枝具有十分相似的渐近特征,只是趋于渐近值的速度
很慢,需要相当长的延迟时间。而频率域内的人工源电磁法(如 FESM,CSAMT)视电阻率,
其曲线尾枝进入低频近场区后,在双对数 ρ−T 曲线图上都将以 45<sup>-</sup> 斜率呈直线上升,而与
模型电导率分布无关。

3 TEM 晚期场资料的反演方法



apparent resistivity in TEM.

设在场源电源断开瞬间一组延迟时间{ $t_i$ },获得 了一组 TEM 晚期场响应函数{ $\rho_{ii}$ }。这里的{ $\rho_{ii}$ }可以 是磁场垂直分量时间偏导数 $\frac{\partial B_i(t)}{\partial t}$ 。也可以 由它利 用(3)式计算的视电阻率。反演的目的是寻求一个由 一组参数{ $\lambda_i$ }所描述的模型,使得由该模型所计算 的相应的一组{ $\rho_{ci}(\bar{\lambda})$ }与观测值{ $\rho_{ii}$ }有最小的方差。 这里{ $\rho_{ii}$ }是由(1)、(2)、(3)式相联系的{ $\lambda_i$ }的高阶非 线性函数。如频率域电磁法资料反演中所作的那 样<sup>(2)</sup>,对响应函数和模型参数都取对数,将问题线性 化之后归结为用迭代的方法求解如下的线性方程 组。

$$\vec{A} \wedge ln\vec{\lambda} = \wedge ln\vec{\rho} \tag{4}$$

其中A称为线性反演的雅可比矩阵,其元素为

 $A_{ij} = \frac{\lambda_j}{\rho_i} \frac{\partial \rho_i}{\partial \lambda_j}$ 

 $\Delta \ln \rho$ 为反演响应函数观测值与理论值的对数差值 向量, $\Delta \ln \lambda$ 则为每次选代需求解的模型参数对数 改正向量。

方程组(4)的性质、所求解的稳定性和选代收敛 的速度主要决定于雅可比矩阵 Å。图 2 和图 3 分别 给出了电偶源和磁偶源对三层的 K 型和 H 型模型 (模型参数与图 1 相同),TEM 晚期场视电阻率相应 Å的元素随延迟时间的变化特征。虽然其符号和幅 值表现出了一定的规律性,与频率域中有着某些相 似之处,例如对于模型浅部的参数在较小的延迟时



图 2 TEM 晚期场视电阻率的雅可比矩阵元素 a.H型模型(电偶源); b.K型模型(磁偶源)

Fig. 2 The partial derivatives for model parameter of apparent resistivity of late field in TEM.

间时段取较大的值,而对于模型深部的 参数则在较大的延迟时间时段取较大的 值。但总体来讲其变化型态是比较复杂 的,特别是对于磁偶源的情况。同时,雅 可比矩阵各元素模值之差虽然不如某些 频率域电磁法中那样大,但其各元素间 模值差别仍然是相当可观的,就图2所 给的例子而言、其最大差别亦可至1-2 个量级以上。表明方程(4)的病态性同样 是比较严重的存在的。此外,由图 2a 和 图 2b 的对比还可以看到,对同一地电模 型,两种场源的同一响应函数的雅可比 矩阵元素表现出了不尽相同的形态特 征。电偶源相应的 A矩阵元素随延迟时 间变化比较单调,予示着在其资料反演 中可能获得较好的反演效果。

这里尝试使用改进后的广义逆矩阵 法求解方程组(4)<sup>[23]</sup>。其中对解的稳定性 和收敛速度起着主导控制作用的阻尼因 子,由模型反演试验加以调节确定。

TEM 的 正演 计 算 比 频 率 域 的 FESM 更为繁杂。如前所述,首先是完成 频率域计算,获得瞬变场的频谱,再利用 付立叶变换获取时间域响应函数。同样, 对于 A矩阵的计算是否可以简化是能否 形成一个实用化的反演程序的关键。试 验研究表明,在利用差商法计算 A矩阵 元素的正演计算中,适当地缩小频率域 计算的频带宽度和减少频点密度,可以 较大幅度地提高 A矩阵的计算速度,并

保证其元素计算不至于有太大误差。重要的是,实际反演试验表明,采用近似计算的雅可比 矩阵,对反演解的稳定性、反演选代收敛速度和最终反演精度影响并不大。

虽然在某些情况下,TEM 可能比频率域电磁法具有较小的反演解非唯一性,但是因为 观测的延迟时间段长度是很有限的,观测的响应函数也具有一定的误差,反演解的非唯一性 仍然是比较严重的。越是复杂的模型其等价性作用范围也就越宽。在反演选代过程中对某 些模型参数加以限定必将大大缩小反演解的非唯一性范围。而在勘探实际中总是存某些确 定已知的有关地电结构的资料(例如钻井或其它物探地质资料),要求对 TEM 资料反演求 解时加以约束。在我们的程序设计中考虑到了这一需要。在反演选代中,当对模型的一个或 几个参数加以限定时,不仅大大缩小了反演解的非唯一性,而且明显提高了反演解的稳定性 和选代收敛的速度,同时还减少了计算时间。

在一系列试验研究的基础上,形成了对于 TEM 晚期场磁场垂直分量时间偏导数  $\frac{\partial B_r(t)}{\partial t}$  及其视电阻率的一维实用化的反演程序。利该程序对三层模型反演,在 IBM—PC 微机上选 代一次仅需 10—15 分钟。

#### 4 TEM 晚期场资料反演效果

这里仅对两个三层模型给出了磁偶源磁场垂直分量偏导数及电偶源该偏导数相应视电 阻率资料反演的例子(表1、表2),具有一定的代表性。在初始模型与理论模型有相当大的差 别,初始拟合度高达百分之几十的情况下,通常经过3-4次选代即可使拟合度下降至百分 之几以下,在较好的情况下(表1),经过6次选代,资料拟合度下降了4个半量级,达到了可 以与所给资料数据精度相比拟的拟合,反演选代所搜寻到的模型与理论模型几乎完全一致, 与理论模型参数差别最大的是方法本身分辨最不好的基底电阻率(如图2a所示,其相应雅 可比矩阵元素模值很小,予示对该参数仅有很低的分辨),其相对差值亦在0.7%以下,即使 对于反演选代收敛比较缓慢的情形(表2),经过5次选代拟合度降到0.8%以下,模型参数 除方法本身分辨不好的中间高阻层的电阻率而外(如图2b所示,其相应雅可比矩阵元素模 值比其它元素小一个量级以上),其它4个模型参数与理论模型参数相对差值最大不超过 4%。由此看来,对于具有百分之几观测误差的实际资料的反演来说,本程序系统是完全适用 的。

选代		资料				
次 数	βι	ρ2	P3	h1	h2	拟合度
0	200	25.0	200	400	250	5. $65 \times 10^{-1}$
1	173	19.2	194	347	294	2.47×10 <sup>-1</sup>
2	140	17.5	194	306	364	8.70×10 <sup>-2</sup>
3	125	15.8	233	298	404	$1.52 \times 10^{-2}$
4	120	15.0	278	300	399	6.39×10-4
5	120	15.0	295	300	399	9.61×10 <sup>-5</sup>
6	120	15.0	298	300	400	2. 97×10 <sup>-5</sup>
理论 参数	120	15.0	300	300	400	0. 0000

表1 电偶源视电阻率资料一维反演结果

电偶极距-1000m;收、发距-1000m;采样点数-20;延迟时间区间-0.855-71.4ms。

同时由表 1 和表 2 反演效果的对比我们还可以看到,具体反演效果的优劣与装置、模型、反演参数等因素都有关。尽管表 2 所给反演例子包含有较长的延迟时间时段和较多采样 点数,即较多的反演拟合资料,但其效果仍明显不如表 1 所给例子。通常情况是,电偶源装置 资料的反演优于磁偶源装置资料的反演,其原因主要在于前者具有较大源距,在观测的延迟 时间时段内观测量的模值变化比较平缓(图 1),其相应雅可比矩阵元素变化形态比较单调。 垂直磁场时间偏导数资料的反演劣于相应视电阻率资料反演。不同模型反演效果的差别则 是在频率域电磁法中也存在的情形,取决于电磁感应现象的物理实质。

-		er in 3 war - wer -						
选代		资料						
	ρι	ρ2	ρ3	h1	h <sub>2</sub>	拟合度		
0	20.0	250	10. 0	200	600	1.87×10 <sup>-1</sup>		
1	18.5	250	10.1	198	607	1.56×10 <sup>-1</sup>		
2	17.6	252	10.1	143	472	$1.74 \times 10^{-1}$		

121

105

99.7

100

569

411

413

400

 $1.33 \times 10^{-1}$ 

3.54×10<sup>-2</sup>

7.26×10-3

0.0000

14.8

20.2

20.1

20.0

#### 表 2 磁偶源磁场垂直分量时间偏导数一维反演结果

迥线面积 250m×250m;收、发距-0m;采样点数-30;延迟时间区间-0.0855-71.4ms。 ρ-电阻率,欧姆米;hi-层厚,米。

在反演选代中,对模型某些参数加以限定后其反演效果明显优于不加限定的情形(表 3)。无论是对于反演解稳定性、反演选代收敛速度还是反演最终逼近理论模型参数的程度而 言都是如此。特别是如表列第4次选代的情形那样,尽管限定参数反演的不拟合程度大于不 加限定的情形,限定参数反演所搜寻到的模型明显更接近于理论模型。对于模型参数不加限 定的情况,尽管不拟合程度下降至了0.1%以下,反演所获得的模型参数与理论模型参数之 差却相当大,充分暴露出了其反演解的非唯一性。表明对于所给定的模型和资料,在低达0. 1%以下的不拟合程度下,模型的等价范围是相当宽的。

选 代	反演	模型参数(电阻率一欧姆米,层厚度一米)							资料
次数	方式	ρ1	P2	ρ3	Ρ4	hı	h2	h3	拟合度
0	自由	200	30.0	500	5.00	300	200	200	2.40×10 <sup>-1</sup>
	限定	120	30.0	500	5.00	200	200	200	1.28×10 <sup>1</sup>
2	自由	183	28.5	503	7.54	175	263	299	3. $61 \times 10^{-2}$
	限定	120	25.8	506	7.43	200	233	322	$2.73 \times 10^{-2}$
4	自由	185	27.7	524	9.83	140	235	331	9.74×10 <sup>-4</sup>
	限定	120	16.9	566	9.93	200	120	376	4.01×10 <sup>-3</sup>
6	自由	182	27.5	535	9.84	141	233	332	9.93×10 <sup>-4</sup>
	限定	120	15.1	674	10.1	200	105	388	2.33×10 <sup>-4</sup>
	参数	120	15.0	300	10.0	200	100	400	0.0000

表 3 模型参数部分限定和不加限定电偶源视电阻率反演效果对比

电偶极距--1000m;收、发距--1000m;采样点数--20;延迟时间原间--0.885--74.4ms;限定参数--第一层 电阻率 ρ<sub>1</sub> 和层厚 h<sub>1</sub>;其它说明同前表。

图 3给出了某实测剖面 TEM 晚期场资料的反演结果,该资料由 EM37 仪器观测系统采

3

4

5

理论

参数

12.0

12.2

12.2

12.0

223

229

243

400



### 图 3 某剖面 TEM 晚期场视电阻率资料反演结果 1.断层;2.地质分层界面;3TEM 资料反演电视分层界面 4.图中数字为分层电阻率(单位:欧姆米)

Fig. 3 The inverse results for apparent resistivity data of TEM late field along some profiles.

4ms,采样总点数 24(中频和低频段 各 20 个采样点,其中有 16 个点相 互重叠,取二者平均),测量装置为 磁偶源同心迴线,反演响应函数为 磁场垂直分量时间偏导数视电阻 率。对于图中所列6个测点,反演中 并未对层参数加以限定,而反演选 代都最终在观测误差范围内拟合了 观测资料,图中从左至右6个测点 资料最终拟合度依次为 0.064、0. 055、0.035、0.064、0.051、0.046 其 最大拟合度不超过 6.5%。为了对 TEM 资料反演结果有所比较,图 3 中同时绘出了由钻井及其它物探方 法所给出的地质粗分层剖面,该断 面是一个比较复杂的推覆构造体。 可以看出,除了左端一个测点(地下

集,采样延迟时间段为 0.355-71.

结构十分复杂、根本不具有水平层状结构特征)而外,由其它测点 TEM 资料反演所获得得的电性分层彼此是自相符的,同时与地质分层有某种对应关系。表明这一方法在解决实际问题中是有一定作用的。

(本文 1993 年 1 月 29 日收到)

#### 参考文献

- 1 A A 考夫曼,G V 凯勒. 频率域和时间域电磁测深. 王建谋译,北京:地质出版社,1987.216--281.
- 2 林长佑,张慧育,武玉霞,利用改进广义逆对电偶源频率电磁测深资料反演,物探化探计算技术,1991,13(2): 116--126.

### THE ONE DIMENSIONAL INVERSION OF TEM LATE TIME FIELD DATA

Lin Changyou

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB Lanzhou 730000) Yang Zhirong, Ye Jianxiang (Coal Geology Bureau of Hunan Province, CGBC, Zhuzhou, 412000)

In this paper, the behavious and character of time partial derivative of vertical magnetic field and its apparent resistivity for the TEM late time field excited by vertical magnetic dipole and horizontal electric dipole are discussed. Some problems about one dimensional inversion for them are studied , a practically applied inverse program is designed. It is shown that this inverse program has better applied effect.

Key Words: Transient eletromagnetic method; Late field; One dimensional inversion

#### (上接 95 页)

## DEVELOPMENT OF THE COMPUTER SOFTWARE SYSTEM FOR EARTHQUKE ANALYSIS AND PREDICTION PRACTICE IN GANSU PROVINCE

Guo Jiankang, Guo Daqing, Wang Zhenya (Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

#### Abstract

This paper presents the earthquake prediction practice system (EPPS) in Gansu province. EPPS makes full use of existing software and hardware configuration. The seismological data base, the computer software for the key task of the earthquake analysis and prediction practice, the expert system for earthquake prediction and the consulation conference on earthquake system were on — line used. Experience and practical use show that EPPS is more suitable and practical, and improves the work for earthquake analysis and prediction in Gansu province.

Key Words: Gansu; Application softwave; Earthquake analysis and prediction; Data system.