

用 TEM 反演法进行 MT 静位移的识别和校正

杨长福¹, 林长佑²

(1. 南京大学地球科学系, 江苏南京 210093; 2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 对瞬变电磁(TEM)资料进行反演时, 采用观测磁场而不用视电阻率, 避免了由于 TEM 视电阻率定义而引起的误差, 并且由源象磁场和观测磁场之间的拟合进行反演使反演结果受非均匀性影响较小; 将反演结果构置出地电模型, 计算出它的 MT 曲线作为静位移校正的参考曲线, 使它用于 MT 静位移校正更为可靠, 同时也解决了两种电磁资料从时间域到频率域的转换问题. 由此实现用 TEM 反演的方法进行 MT 静位移的识别和校正. 实例表明, 这种方法对 MT 静位移的识别和校正十分有效.

关键词: 瞬变电磁; 反演; 大地电磁; 静位移校正.

中图分类号: P631.3⁺25 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2001)06-0609-06

作者简介: 杨长福(1964-), 男, 副研究员, 2000 年在青岛海洋大学获应用地球物理专业博士学位, 主要从事电磁测深理论、方法和应用等方面的研究工作.

0 引言

野外实践和理论研究表明, 在出现近表非均匀体时, 双对数坐标系中的 MT 视电阻率曲线, 总是垂直地平移一个和频率无关的常数因子(通常称为静位移), 它不能直接由单测点记录的 MT 数据来决定, 且阻抗相位不受畸变^[1].

应当指出的是^[2], 两 MT 曲线平行错位意味着出现静位移, 但若两曲线无错位, 并不能保证没有静位移发生. 一般地, 真实视电阻率可能位于两种极化方式的视电阻率曲线上方、下方、两者之间或和其中之一重合, 静位移的特征和表面电性非均匀体的边界和非均匀体界面的方向及距离有关系, TM 极化方式对表面电荷更为敏感.

MT 静校先期工作大致分为 6 类: (1) 用密布 MT 测点的空间滤波法, 也被称为电磁阵列剖面成图法, 简称 EMAP 法^[3]; 这种方法虽很有效地校正静位移, 但代价昂贵. (2) 由理论计算近表非均匀体引起的静态位移^[4], 此法可以对静位移提供深刻的物理透视, 但无法事先知道确切的异常体模型, 而且计算量也太大. (3) 由地形引起的静位移的理论计算

来进行校正^[5], 此法不能解决近表非均匀体引起的静位移问题. (4) 根据已知地质知识解释. (5) 利用反演方法直接进行静位校正^[6~9]. (6) 加长测量电场的电极距、通过区域视电阻率平均及利用区域特征高导层等方法进行静位移校正.

MT 静位移本质上是与 3D 异常体相联系的电流效应, 其大小和方向依赖于 3D 体的电阻率特征. MT 解析法所面临的问题是不知道近表 3D 体的确切形状和位置, 因此就难以用 3D 解析法^[4,10]进行 MT 静位移校正. 传统的方法是寻找有效的校正手段来解决这种表面不定 3D 异常问题, 在缺少任何有利信息的条件下, 一种静校方法是将有疑问的视电阻率曲线移到由某种统计或某种特征标准所确定的参考曲线上^[1,11], 这种方法结合地表测量的有利先验信息而得到了进一步的发展, 但由于地质构造较复杂, 这种方法难以使静位移得到准确的校正. Sternberg 等^[2]和 Pellerin 等^[12]用方形发射源中心回线 TEM 视电阻率数据来校正 MT 静位移, 成为具有标志意义的工作, 他们证实了该方法的有效性, 使瞬变电磁(TEM)作为深部 MT 解释的有力工具而不断普及. 一般瞬变电磁测深只测量磁场而不测量电场, 不受非均匀体边界电荷堆积的影响^[2], 所以表面非均匀体对瞬变电磁测深曲线的影响很小, 是进行 MT 校正的一种很有效的手段. 目前国内已注

意到用 TEM 法进行 MT 静位移校正,而且可能引起了有关人士的重视,但有关的详细报道却很少,而且也仅局限于使用 TEM 视电阻率曲线作为参考进行校正。众所周知,TEM 视电阻率的定义非常复杂,求取精确值也非常困难,人们常用早期或晚期视电阻率进行近似解释,误差较大,当然将它直接用于 MT 静位移校正,也有不可靠之处;另外这种方法还需要将时间域的 TEM 视电阻率转换到频率域 MT 视电阻率,也将带来一定的误差。

考虑到瞬变电磁法在无任何其他信息的情况下进行 MT 静位移校正的独特有效性和多种电磁方法联合解释的需要,作者发展了一种瞬变电磁近似反演方法^[13],这种方法不用视电阻率而采用观测磁场(若只观测磁场偏导数,则用样条插值法求取)进行反演,而且受非均匀性影响较小。将反演结果构置出地电模型,计算出它的 MT 曲线,作为静位移校正的参考曲线,从而实现用 TEM 反演的方法进行 MT 静位移的识别和校正。

1 瞬变电磁近似反演

在瞬变电磁法(TEM)中,均匀半空间和层状模型的正反演问题已得到了较好的解决,但对于更为复杂的二、三维模型,其响应函数极为复杂,并且计算代价也很为昂贵。因此目前解决这种复杂模型的正反演解释是非常困难的。为简化起见,根据烟圈理论^[14],将发射源在地球中感应的电流线看成是随时间向下扩散的烟圈,这称之为发射源象。若源象大小、形状及磁矩等被看成和发射源完全一样,则根据电磁场理论,将源象在地表的磁场和源附近测得的响应磁场相对比,就可确定源象深度,由此用三次样条插值法求出源象扩散速度,将此速度和与电阻率相关联的均匀半空间中烟圈向下扩散的速度进行对比,就可以近似地估算出随深度变化的电阻率^[15]。由于中心回线瞬变测深装置与其他装置相比,对电阻率横向变化更不敏感,所以中心环瞬变测深装置最适合于静位移校正^[16]。本文讨论圆发射源中心回线情形。

在本文描述的反演方法中避开使用 TEM 视电阻率而采用更为客观反应地下电性结构的观测磁场,但观测系统通常观测得到的数据是磁场对时间的偏导数值,而未直接给出磁场值,所以必须根据这些偏导数值估算出观测磁场值。由磁场偏导数值,用

多项式拟合的方法,延拓出大于最迟延迟时间的磁场偏导数值,直到某延迟时刻,磁场偏导数值可忽略不计为止,再由公式^[16]

$$H_0 = \int_{\infty}^{t_0} (dH/dt) dt \quad (1)$$

计算出所给出的最迟观测延迟时刻的磁场值 H_0 ,最后由

$$H = H_0 + \int_{t_0}^t (dH/dt) dt \quad (2)$$

计算出观测时间范围内任意观测时刻的磁场值,这些值即可作为观测磁场值。

由于所测得的响应函数是在一维层状介质或二、三维介质上得到的,因此必须用拟合迭代法求取象深度,拟合办法是采用单源多接受器装置,使象场拟合观测磁场就是使两者之差取极小^[17],即

$$\Delta H = \sum_{j=1}^N |H_{sj}(t_i) - H_{sj}^i(t_i, d)| / N \quad (3)$$

取极小。 N 为接受器总个数, $H_{sj}(t_i)$ 表示在 t_i 时刻第 j 个接受器上观测到的垂直磁场, $H_{sj}^i(t_i, d)$ 表示源象在时刻 t_i , 深度 d 时第 j 个接受器位置上的垂直磁场。在各分离延迟时间,得到了确定的源象位置之后,下一步便是估算介质电阻率及对应的勘探深度。

在均匀半空间情况下,对圆回形源,磁场偏导数最大值出现的深度(穿透深度)在 t 时刻的扩散速度^[18]

$$V = \frac{\gamma^{1/2}}{\sigma \mu a} \{C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + [1 + C_1 / (C_1^2 + 2)^{1/2}] \gamma C_2\} \quad (4)$$

其中:

$$C_1 =$$

$$0.75 \sqrt{\pi} \left[1 - \gamma/4 - \sum_{k=2}^{\infty} \frac{(2k-3)!!}{k!(k+1)!} (\gamma/2)^k \right],$$

$$C_2 = 0.75 \sqrt{\pi} \left[1/2 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(2k-1)!!}{k!(k+2)!} (\gamma/2)^k \right],$$

$$\gamma = \sigma \mu a^2 / 4t.$$

在(4)式中,若我们估算出速度 V ,便可用逐步迭代的拟合方法求得电阻率。在求得镜象位置即源象深度后,用三次样条函数插值法求得各延迟时间的扩散速度。若将此估算速度直接代入(4)式后难以求得电阻率值。采用拟合迭代法,先将视电阻率代入(4)式,算出一个速度值,再和三次样条插值速度进行对比,修改电阻率值,这样逐步迭代修改,直到满足拟合差为止,最后根据经验公式^[15]

$$h_i = 0.44d(t_i) \quad (5)$$

求得勘探深度,其中 0.44 为由经验所确定的常数。

根据以上分析,设计出反演程序,并对一维理论层状模型进行了反演试验,结果表明,反演效果较好^[13]。

2 用瞬变电磁法进行 MT 静位移校正

MT 静移是由近表非均匀体界面上堆积的电荷形成的附加电场对实测电场产生的畸变而引起的,它对磁场分量无影响,而瞬变电磁法只测量磁场分量,而不受近表局部非均匀体的影响,据 Sternberg 等^[2],当延迟时间大于 $50 \mu\text{s}$,存在近表非均匀体时的瞬变电磁视电阻率曲线和不存在非均匀体时的视电阻率曲线完全重合(在下文待列例子中,采集瞬变资料时所用的 V5 瞬变仪的观测延迟时间是 $0.1063 \times 10^{-3} \text{ s}$ 到 $0.8446 \times 10^{-2} \text{ s}$,故可认为不受近表非均匀体影响)。因此瞬变电磁资料的反演结果可以作为参考,实现对 MT 静移的识别和校正。

2.1 勘探深度的确定

发射回线的大小主要取决于瞬变电磁勘探深度,对瞬变测深曲线影响并不大,但瞬变曲线必须和 MT 曲线有一定长度的重合,方能进行 MT 静移校正,这就要求瞬变测深要有一定的勘探深度^[2],以保证静校正的有效性。

Spies^[18]介绍了估算电磁法的勘探深度的简单方法,指出 MT 勘探深度主要取决于观测频率和地球电阻率,对层状地球和已确定的观测系统,则取决于平均电导率(定义为积分电导除以总厚度),作为深度函数所计算的平均电导率也可用于近似估算层状反演深度的下界,在频率域,此深度大约为 1.5 倍的趋肤深度(用平均电导率和最低观测频率计算),在时间域约为 1 个扩散深度(由平均电导率和最大延迟时间计算),同样用最高观测频率(在频率域)或最小延迟时间(在时间域)可估算出所能分辨的最小勘探深度,但最小深度之上所能确定的电导率仅是平均电导率。而 TEM 除取决于观测延迟时间和地电阻率外,还和源大小(用磁矩度量)及噪声水平有关^[18]。

$$d \approx 40(IA/\sigma)^{1/5} \quad (6)$$

如在下文待列例子中,上式中 I 为 7.5 A ,线框面积 $A=100 \times 100 \text{ m}^2$,测点所在处的平均视电导率为 0.01 S/m ,可估算出瞬变电磁勘探深度约为

1000 m ,而同一测点处所计算出来的 MT 最小勘探深度约为 350 m ,因此两者有一定长度的勘探深度重叠(下文实际计算也证实了这一点),说明将列实例中的瞬变资料可用于 MT 静位移校正。

2.2 由瞬变电磁资料进行静位移校正

首先将所采集的瞬变电磁资料转换成相应的 MT 视电阻率曲线。所应注意的是瞬变电磁资料是在时间域而 MT 资料是在频率域,因此应将瞬变电磁的时间轴转换为相应的频率或周期^[2]。

MT 趋肤深度为:

$$\delta_{\text{MT}} = 1.750\sqrt{\rho T} \quad (7)$$

瞬变电磁趋肤深度或穿透深度^[14]为:

$$z = 1.28\sqrt{t/\sigma\mu} \quad (8)$$

若令 $\delta_{\text{MT}}=z$,可得:

$$194/f = t \quad (9)$$

其中: f 为 MT 观测频率,单位为 Hz ; t 为瞬变电磁的延迟时间,单位为 ms ; 194 为常数因子,称转换系数,其值可取 150 至 250,本文 f 改用周期 T ,单位为 s ,延迟时间 t 单位改用 s ,且常数因子取为 200,则上式可改为:

$$T = 5t \quad (10)$$

有两种方法可以进行 MT 静位移的识别和校正。一是用 TEM 反演结果计算出 TEM 视电阻率或直接用 TEM 观测视电阻率,由(9)或(10)将 TEM 视电阻率曲线的时间轴转换成相应的频率,再比较 TEM 视电阻率曲线和 MT 视电阻率曲线,对 MT 视电阻率曲线的静位移进行识别并确定静位移量而实现对 MT 静位移的校正。对半空间模型,这种方法是可行的,但对实际地球模型,由(9)或(10)式将时间域 TEM 视电阻率转换至频率域,必然产生一定的误差,因此实际应用时要根据具体情况确定式中的转换系数。另一种方法(尤其是在观测资料只有磁场或磁场偏导数情况下)是由瞬变电磁反演结果,构置出层状地电模型,由此计算出相应的 MT 视电阻率曲线,以此曲线作为参考,并将此曲线和实测 MT 视电阻率曲线进行对比,判断 MT 曲线是否发生静移。若由瞬变电磁资料反演结果所计算出的相应模型的 MT 视电阻率曲线和该测点对应的两实测 MT 曲线或其中之一的重叠部分发生了明显的平行错位,则可认为该测点的 MT 视电阻率曲线发生了静态位移,并可根据平行移动量来确定校正因子,最后将发生静移的 MT 实测曲线平移到参考曲

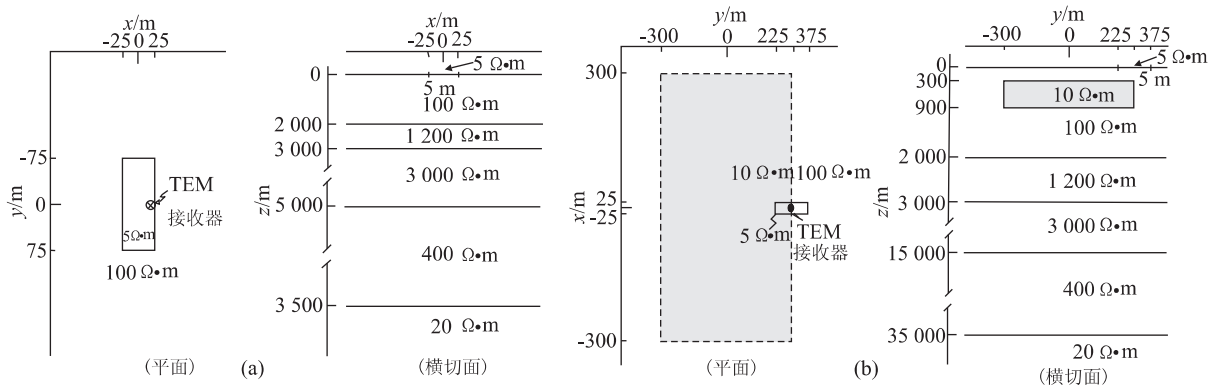


图 1 电阻率结构模型

Fig. 1 Model of resistance structure

a. 模型 1. 层状地球中存在一个 $50\text{m} \times 150\text{m} \times 5\text{m}$ 的导电表面非均匀体, 平面图标出了方形发射源中心环 TEM 接收器所在位置; b. 模型 2. 层状地球存在一导电表面非均匀体和一较大埋深 3D 体同(a), 平面图阴影区表示埋深 $100\ \Omega \cdot \text{m}$ 层顶面的 $10\ \Omega \cdot \text{m}$ 体, TEM 接收器位于表面体中央(引自 Pellerin 等^[12])

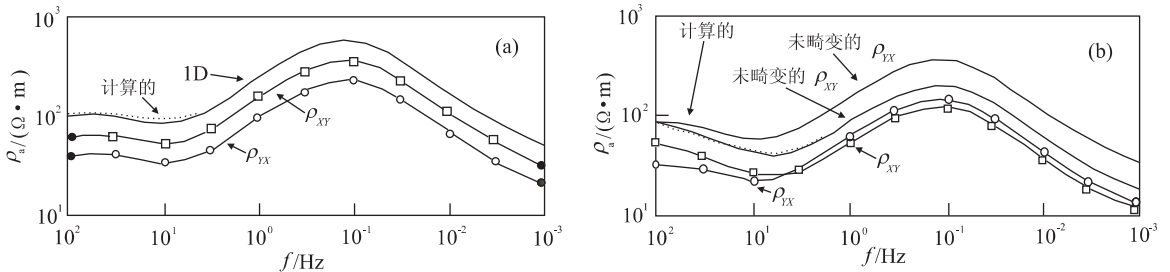


图 2 静位移校正示意

Fig. 2 Diagram for static shift correction

矩形和圆圈表示的曲线分别为 XY 和 YX 极化方式的畸变响应, 虚线表示畸变曲线将要平移到的所计算校正曲线. a. 对模型 1(实线表示未畸变的 1D 响应); b. 对模型 2(实线表示未畸变的两种极化响应)(引自 Pellerin 等^[12])

线上;若无明显错位,则可认为没有发生静移. 本文使用的是后一种方法. 应指出的是,采用这种方法,通过瞬变电磁反演求出地电模型而计算 MT 视电阻率,自然实现时间域的瞬变电磁资料到频率域的 MT 曲线的转换,而不再需要按(9)或(10)式来将时间域转换为频率域,但是(9)或(10)式可以帮助我们根据瞬变电磁观测时间来估算或确定反演地电模型的 MT 曲线的频率范围,以便在更合适的频率范围内得到更准确的 MT 曲线.

2.3 实例

Pellerin 等^[12]用方形发射源中心回线 TEM 法进行了 MT 静位移校正,此处引入其中所列理论模型例子来说明该方法的有效性. 图 1a 和图 1b 分别是带有表层非均匀体的 1D 和 3D 理论模型,图 2a 和图 2b 分别是这两种模型的静位移校正示意图,其中光滑曲线表示不考虑表面非均匀体所计算的 MT 视电阻率曲线,由小矩形和小圆圈连接的曲线分别

表示由表层非均匀体影响的 XY 极化和 YX 极化的 MT 视电阻率曲线,由图可见,是否考虑表面非均匀性影响所算出的两种极化视电阻率曲线彼此平行,说明发生了明显的静位移;虚线则表示由 TEM 反演结果所计算的作为静位移校正的参考 MT 曲线,由图可见,它和未发生静位移的 MT 曲线(或两种极化曲线其中之一)在高频端几乎重合,只要将发生静位移的曲线平行移动到参考曲线上,即可完成静位移校正,说明了用 TEM 方法进行 MT 静位移校正的有效性.

1997 年我们在兰州东南榆中峡口(东经 $104^{\circ}01.0'$, 北纬 $35^{\circ}49.0'$)测点进行了 MT 观测,观测视电阻率参见图 3. 1998 年铁道部第一勘测设计院物探公司在该地附近利用 V5 瞬变仪,采用 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的方形发射源线框沿一测线进行了 TEM 测量,观测接收点沿过线框中心的测线分布. 发射源线框电流为 7.5 A, 各观测数据点的观测延

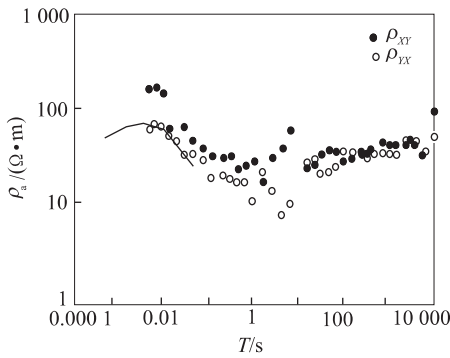


图 3 由 TEM 反演结果所计算的 MT 视电阻率曲线(实线)及观测 MT 曲线

Fig. 3 MT apparent resistivity (solid line) calculated by TEM inversion result and the observed MT curves

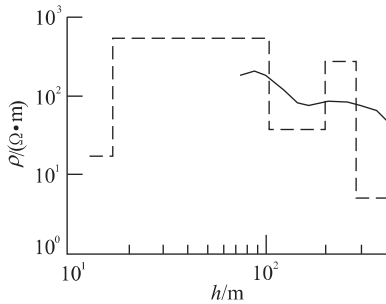


图 4 榆中峡口测点 TEM 反演结果

Fig. 4 TEM inversion results at Yuzhong Xiakou
实线为本文方法反演结果,虚线为广义逆反演结果

迟时间从 0.1063×10^{-3} s 到 0.8446×10^{-2} s, 每次数据采集时, 保持装置参数不变. 由于本文介绍的近似反演程序只适用于圆形源, 因此为了检验它, 只能用方形线框中心的测点. 因为在方形线框中心观测到的磁场可等效于相同面积的圆形发射源中心所观测到的磁场, 因此只要从 $\pi r^2 = a^2$ 出发, 求出等效半径 $r = a\pi^{-1/2}$, 则方形线框中心测点的反演, 就可采用本文所述的方法, 为此对方形线框中心测点进行了反演, 并将反演结果和用晚期场瞬变电磁广义逆反演方法^[19]所反演的结果进行了对比, 对比结果表明两种反演结果基本一致^[13]. 用 TEM 法进行 MT 静位移校正必须保证两种电磁法的测点位置相同, 图 4 即为符合这一要求所在测点的 TEM 反演结果. 由该测点 TEM 反演结果构置出的地电模型所计算的 MT 视电阻率曲线如图 3 中的粗实线所示, 用以作为静位移校正的参考曲线. 该测点两实测 MT 曲线也置于图中(参见图 3), 以便比较. 从图 3 中可知, ρ_{XY} 极化曲线发生了比较轻度的静移, ρ_{YX} 极化曲线则几乎无静移, 通过对比确定 ρ_{XY} 极化曲线

的校正因子约为 0.9, 即将 ρ_{XY} 曲线上的数据乘以 0.9, 使其平移到 TM 曲线上.

需要注意的是, 静位移畸变只影响视电阻率曲线, 而对相位曲线不产生影响, 因此无需考虑相位曲线^[1].

3 结语

(1) 本文介绍的用 TEM 反演法进行 MT 静位移的识别和校正的方法, 在 TEM 反演过程中, 不采用 TEM 视电阻率, 而直接采用观测的磁场偏导数, 这就避免了使用目前还无统一精确的 TEM 视电阻率定义进行反演解释而带来的误差, 同时也避免了在进行 MT 静位移校正时, 两种电磁资料之间的从时间域到频率域的转换麻烦, 由此也就避免了这种转换带来的误差.

(2) 由源象磁场和观测磁场之间的拟合进行反演的结果受非均匀性影响较小, 这就使得由 TEM 反演结果构置的地电模型所计算出来的用于 MT 校正的 MT 参考曲线更为可靠, 从而使 MT 静位移校正的结果也更为真实可靠.

(3) 与用 TEM 和 MT 资料联合反演进行静位移校正的方法相比较, 不存在选择哪种 MT 极化方式的视电阻率曲线进行反演的问题.

(4) 实际的静位移校正例子表明, 本文所用的校正方法简易、实用而有效, 可在一般个人计算机上不到一分钟内完成, 用于野外现场处理十分方便.

参考文献:

[1] Jones A G. Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment [J]. Geophysics, 1988, 53: 967—978.
 [2] Sternberg B K. Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings [J]. Geophysics, 1988, 53: 1459—1468.
 [3] Torres-verdin C, Bostic Jr F X. Principles of spatial surface electric field filtering in magnetotelluric; electromagnetic array profiling (EMAP) [J]. Geophysics, 1992, 97: 603—622.
 [4] Wannamaker P E. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths [J]. Geophysics, 1984, 49: 1517—1533.
 [5] Wannamaker P E. Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modelled using finite elements

- [J]. *Geophysics*, 1986, 51: 2131—2144.
- [6] deGroot-Hedlin G. Removal of static shift in two dimensions by regularized inversion [J]. *Geophysics*, 1991, 56: 2102—2106.
- [7] deGroot-Hedlin G. Inversion for regional 2-D resistivity structure in the presence of galvanic scatters [J]. *Geophys J Int*, 1995, 122: 877—888.
- [8] Ogawa T, Uchida T A. Two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift [J]. *Geophys J Int*, 1996, 126: 69—76.
- [9] Meju M A. Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: some effective practical considerations [J]. *Geophysics*, 1996, 61: 56—65.
- [10] Wannamaker P E. Electromagnetic modelling of three-dimensional bodies using integral equations [J]. *Geophysics*, 1984, 49: 60—74.
- [11] Beamish B, Travassos J M. A study of static shift removal from magnetotelluric data [J]. *J Appl Geophys*, 1992, 29: 157—178.
- [12] Pellerin L, Hohmann G W. Transient electromagnetic inversion: a remedy for magnetotelluric static shifts [J]. *Geophysics*, 1990, 55: 1242—1250.
- [13] 杨长福, 林长佑. 三维瞬变电磁近似反演[J], *地震学报*, 2000, 22(4): 377—384.
- [14] Nabighian M N. Quasi-static transient response of a conducting half space—an approximate representation [J]. *Geophysics*, 1979, 44: 1700—1705.
- [15] Eaton P A, Hohmann G W. A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings [J]. *Phys Earth Planet Int*, 1989, 53: 384—404.
- [16] Nekut A G. Direct inversion of time-domain electromagnetic data [J]. *Geophysics*, 1987, 52: 1431—1435.
- [17] Raiche A P, Gallagher R G. Apparent resistivity and diffusion velocity [J]. *Geophysics*, 1985, 50: 1628—1633.
- [18] Spies B R. Depth of investigation in electromagnetic methods [J]. *Geophysics*, 1989, 54: 872—888.
- [19] 林长佑, 杨世荣, 叶剑湘. 瞬变电磁晚期场资料的一维反演[J]. *西北地震学报*, 1994, 16(2): 71—78.

JUDGMENT AND CORRECTION FOR MT STATIC SHIFT BY TEM INVERSION METHOD

Yang Changfu¹, Lin Changyou²

(1. *Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China*; 2. *Lanzhou Institute of Seismology, China Seismological Bureau, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: The inversion for TEM data using the observed magnetic fields instead of using the apparent resistivities avoids the errors caused by the definition of the TEM apparent resistivity. In addition, the inversed results by fitting the magnetic fields of the transmitter source's image to those of the observed magnetic fields are relatively less affected by the conductivity inhomogeneity. The MT apparent curves calculated from the geo-electric model constructed with the TEM inversion results, serve as reference curves for the more reliable correction of MT static shift, and also actualize the transformation from time domain to frequency domain between these two kinds of electromagnetic data. Therefore, TEM inversion can be applied to the correction of the MT static shift. Many field studies show that this method is very effective for the judgment and correction of the MT static shift.

Key words: TEM; inversion; telluric electromagnetism; correction of MT static shift.