

# 表面局部三维大地电磁曲线畸变校正 ——MT 畸变校正阻抗张量分解方法<sup>\*</sup>

王书明

(中国地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

**摘要** 针对三维/二维地质结构开发了大地电磁阻抗张量分解技术, 利用该技术仅需对各个独立测点的大地电磁资料进行分析即可分离和消除由三维局部异常体引起的其附近测点的 MT 响应函数的形态扭曲畸变. 通过理论模型实验, 证明了阻抗张量分解技术能够有效地校正三维/二维情况下三维异常体所造成的 MT 响应函数的形态畸变.

**关键词** 大地电磁测深 电阻率 异常 畸变 阻抗张量分解技术  
**中国图书分类号** P631; P631.325

## 0 引言

大地电磁测深法(简称 MT)是 50 年代初期提出的一种地球物理勘探方法, 近年来, 尤其是随着电子计算机技术的迅猛发展, MT 在基本理论、工作方法、资料的整理和解释以及仪器等方面都有了长足的进步, 现已发展成为仅次于地震法的一种地球物理勘探手段, 并且与地震法相比, 具有其不需人工场源, 成本低廉, 不受高阻层屏蔽影响, 对低阻层有较高的分辨能力等独特的优越性.

然而, 至今 MT 理论还未被发展到十分系统和完善的程度, 其反演解释仍存在很大局限性, 尤其是三维反演解释仍处于研究和探索阶段. 因此, 目前的大地电磁资料解释工作仍然基于一、二维反演解释. 但是, 实际地质条件十分复杂, 地电结构千变万化, 严格地说, 具有一、二维电性结构的地区是很少的, 大多数都是三维或近似三维的三维. 如果对从一个三维环境中所收集的资料不加以畸变分析和校正, 而仅用一、二维反演技术加以解释, 其解释结果很难反映地下地质构造的真实面目, 有时甚至面目全非. 虽然严格意义上的一、二维地质构造十分少见, 但实际上多数地质体仍可看作是具有一定延伸的二维构造, 就局部构造而言, 三维局部构造更为多见, 我们把这种区域为二维而近地表存在一三维局部异常体的地质构造称为三维/二维地质构造. 因此, 这种三维/二维地质构造在实际资料处理中显得格外重要.

对于三维/二维构造而言, 三维局部异常体会导致其附近测点的 MT 曲线发生严重畸变, 这种畸变称为局部畸变. 局部畸变表现在两个方面: 一方面是静态效应, 另一方面是视电阻率

收稿日期: 1997-12-24

<sup>\*</sup> 硕士学位论文

作者简介: 王书明, 男, 1966 年 4 月生, 硕士研究生, 现主要从事电磁测深研究.

和相位资料同时发生严重的扭曲. 由于受到反演解释水平的局限, 现虽已能作三维正演模拟, 三维反演仍主要处于研究阶段, 即便能作三维反演, 也因其野外工作量很大, 计算机计算耗时很长, 成本太高而为实际应用带来困难. 因此, 目前还是主要利用二维反演技术解释三维/二维构造. 为了提高二维反演解释的可靠性, 电磁资料综合解释的第一步就是要分析研究大地电磁响应函数的畸变特征, 尽可能排除其所受畸变影响. 对于局部畸变中的静态效应, 国内外许多地球物理学家已进行了大量的工作, 并总结出许多有效的校正方法, 其中比较重要的可归纳为: ① 空间滤波法; ② 曲线平移法; ③ 理论计算法; ④ 联合解释法; ⑤ MT 资料自身校正法等. 但对于局部异常体引起的 MT 响应函数的形态扭曲畸变研究得较少. 近年来发展起来的阻抗张量分解技术为解释这种资料提供了有力的工具, 并显示出了其独特的优越性. 该方法仅仅需要对各个独立测点的大地电磁资料进行分析, 即可分离和消除这种畸变的影响, 它把常规只利用阻抗张量两个非对角线元素进行解释发展到利用阻抗张量全部 4 个元素进行分析和解释, 扩大了信息利用量.

本文正是针对这种三维/二维地质结构, 开发了大地电磁阻抗张量分解技术, 并在利用该技术对三维/二维地质构造的 MT 资料进行处理和校正大地电磁响应函数形态畸变方面作了一定的探索.

## 1 基础理论

由 Cagniard(1953)所推导的 MT 理论基于一个一维模型, 该模型对应于电阻率随深度变化的一地球构造. 在这种情况下, 仅需用一组水平电分量和垂直磁分量来描述地球深度构造. 这种模型应用于标量 MT 方法.

7a 之后, Cantwell(1960)提出了一个更一般的理论, 该理论考虑了真实地球构造不足以以一层状模型来描述, 尤其考虑了自然岩石电阻率在许多数量级范围内变化. 在 Cantwell 的理论中, 一特殊测点的特征由一阻抗张量定义, 此阻抗张量在一特殊周期把水平磁分量和水平电分量联系起来. 阻抗张量存在及唯一性的直接根据是线性麦克斯韦方程组. 在其理论中, 作了这样的假设, 初始场为平面波且垂直射向地球表面, 为 EM 场的源. 初始场感应电场和磁场, 对于同一初始激发二者线性相关, 所以, 总的 EM 场自我线性相关, 则有

$$\begin{bmatrix} E_x(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \\ E_y(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \\ H_x(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx}(\vec{r}, \vec{k}, \omega) & Z_{xy}(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \\ Z_{yx}(\vec{r}, \vec{k}, \omega) & Z_{yy}(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \\ A(\vec{r}, \vec{k}, \omega) & B(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \\ H_y(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\vec{E}$ 、 $\vec{H}$  代表地表处的电磁场, 为频率  $\omega$  和波数  $\vec{k}$  (这种情况下为零) 的函数; 下标  $x$ 、 $y$  和  $z$  分别对应北向、东向及垂向分量;  $2 \times 2$  阶张量

$$\vec{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

为 MT 阻抗张量,  $(A, B)$  为 Parkinson(1967)引进的磁传递函数. 那么, 水平磁场分量可认为是线性滤波器  $\vec{Z}$  和  $(A, B)$  的输入, 其输出为水平电场和垂直磁场.

在此, 我们回顾一下  $\vec{Z}$  和  $(A, B)$  的下列性质:

$$\text{对于一维构造: } Z_{xx} = Z_{yy} = 0, Z_{xy} + Z_{yx} = 0, A = B = 0 \quad (3)$$

$$\text{对于二维构造: } Z_{xx} + Z_{yy} = 0, Z_{xy} + Z_{yx} \neq 0, A \neq B \neq 0 \quad (4)$$

当坐标系旋转到构造走向之后,有

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0, A = 0, B \neq 0 \quad (5)$$

对于三维构造:没有这样的限制.

这些性质必要但不充分.如:三维构造对所有周期存在  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ , 以及  $A = B = 0$ , 但这是例外.不过从实际的观点来看,上述的判断标准也是充分条件.

在结晶基底出露地区,经常发现地表处存在较大横向非均匀体,在该处完整的岩块以破裂区作为边界,该破裂区有代表性的电阻率比完整的岩石的电阻率小 100~1 000 倍<sup>[1]</sup>.这就解释了为什么我们很少发现具有一维张量性质的情况,或者甚至所有周期上都具有二维性质.然而,MT数据的解释和反演几乎总是用一维,至多用二维模型来完成,这是因为现在虽已能作三维正演模拟,三维反演仍主要处于研究阶段,即便能作三维解释,也因完全的地球三维解释太复杂,太昂贵,正常情况下测点的密度也太稀疏,以致不允许详细地模拟解释.

作为一种变通方法,在用各种较为简单的叠置模型近似实际的三维地球构造方面,众多的有关专家作了许多努力.由于大地电磁测深法属于体积勘探方法,而在勘探体积范围内一维地质构造十分少见,有些构造虽然表现为复杂的三维构造,但实际上多数地质体仍可看作是具有一定延伸的二维构造.因此,鉴于目前的解释水平,我们把重点放在二维问题上,而且采用这种近似步骤对解释结果影响不大.就局部构造而言,三维局部构造更为多见.所以,这种三维/二维地质构造在实际资料处理中显得非常重要.

## 2 三维/二维构造阻抗张量分解技术

### 2.1 基本情况

在所勘探的构造为一维或二维的情况下,实验 MT 结果的解释最为容易.然而,实验确定的 MT 阻抗张量很少符合理想二维阻抗张量,即不能通过旋转坐标轴使张量的对角元素皆为零.发生这种情况的原因可能是:① 一维或二维感应情况下数据误差;或② 三维感应;或③ 一维或二维感应与电流畸变效应(与频率无关)耦合.由于计算二维感应容易而计算三维感应却很困难这一历史原因,通常假设所给的数据中存在上述①情况,且通过旋转坐标轴从某种意义上来说(一般从最小平方角度)尽可能地接近理想二维张量(具有零对角元素).

近几年来数据质量的改善显示出第三种可能性(一维或二维感应与三维畸变耦合)在实际中非常重要.如果这种畸变存在,所测阻抗张量不一定接近真正二维阻抗张量,则基于上述假设的旋转或分解方法在这种情况下没有意义.许多替代的分解方法已由 Eggers(1982)等人提出,这些方法不对物理模型作任何假设,并利用与数据中存在的一样多的参数来表示这种张量(8个实参数与通过旋转到一个理想化的二维张量所保存的5个实参数相对应).在一维或二维感应与三维电流散射耦合的情况下,由于没有利用下置模型的单纯性,这些一般分解方法的应用前景可能不太乐观.

Bahr(1988)所作的工作表明:电流畸变或电流通道效应并不破坏有关下置二维感应过程信息中的大多数.Bahr论证了能够恢复这种信息的各种可能的办法,并且给出了一种场情况下的应用.所以对于这种分解问题我们所采用的物理近似是作一些特殊的假设:测量阻抗张量由局部畸变引起,具有区域一维或二维构造大尺度的感应电流性质,其中局部畸变由任意的三维构造产生.即使该模型对所有的频率非真,对于受到限制的频段仍可能为真,因为“区域”尺度的定义随频段的不同而不同.我们给出一种适合这种特殊物理模型的分解方法,这种模型虽然不是最一般的模型,但比严格二维模型具有广泛得多的应用范围,这种严格二维模型正是

Swift 分解方法的理论基础.

总之,在区域构造至多是二维,局部构造仅引起电场电流散射的假设下,我们的分解方法的目的是尽可能多地把局部和区域参数分开,并按乘积因子分解形式达到这个目的.

## 2.2 畸变模型

现在先详细地复习一下作为分解方法基础的理想化物理模型.设地球具有二维区域导电构造,任何上置的三维构造感应都很微弱.在二维构造主轴上,区域平均电场  $e_r$  和磁场  $h_r$  的关系为

$$e_r = Z_2 h_r = \begin{bmatrix} 0 & a \\ -b & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $a, b$  为区域平均化二维构造的阻抗元素.任何点处测量场  $e$  和  $h$  受到局部变量干扰而偏离其区域值.电场  $e$  可能受到积累在电导率边界上的局部电荷的强烈干扰.磁场  $h$  并没有受到由大地电流密度加权空间平均所确定的那样强的干扰.这样我们作一个简化假设:  $h = h_r$ . 另一方面,  $e$  必定通过一个畸变张量  $C$  与  $e_r$  相联系,当没有局部畸变时  $C$  简化为单位张量.

Bahr(1988)提出

$$e = C e_r = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} e_r \quad (7)$$

因畸变构造在此设为弱感应,  $C$  的所有元素都可设为实数.要用 4 个独立参数表示最一般的畸变张量,这个要求可在理论上进行论证<sup>[2]</sup>.

正如 Bahr 有关一般情况下电流畸变的论述,以及 Zhang 等关于二维电流畸变的论述,没有必要为了恢复下置二维阻抗的信息而明确地求解  $C$  的各个元素.然而,在此寻找的是阻抗张量的一个明确的分解方法以便清楚地分辨出确定的部分和不确定的部分,  $C$  为非确定部分,首先有必要定量地描述这一方法.

已知

$$e = Z_m h \quad (8)$$

其中  $Z_m$  为测量阻抗.在区域或主轴系统中,由(6)、(7)式把测量阻抗表示为

$$Z_m = CZ_2 \quad (9)$$

或在测量轴系统中,表示为

$$Z_m = RCZ_2R^T \quad (10)$$

式中  $C$  为畸变张量,即在区域感应主轴系统中所表示的.  $R$  为旋转矩阵,其通过一个角度  $\theta$  把张量从区域测量轴系统转到测量轴系统.

虽然测量阻抗张量因子分解(10)式表示了下置物理模型,但很明显,对于测量数据不能唯一地从这一因子分解中进行参数提取.

## 2.3 一种有用的畸变张量因子分解方法

前面讨论了一个物理模型和一个相应阻抗的非常一般的分解方法.下面开发一种畸变张量  $C$  的因子分解方法<sup>[2]</sup>,这是本文阻抗张量分解方法的基础.

为了矩阵表示方便,在此据 Spitz(1985)的一个例子,引进一个 Pauli 旋转矩阵的变换形式,即

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\sum_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\sum_2 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\sum_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

虽然任何2阶张量  $M$  都能够表示为这些矩阵的一种和的形式,即

$$M = \alpha_0 I + \alpha_1 \sum_1 + \alpha_2 \sum_2 + \alpha_3 \sum_3 \quad (15)$$

但在此还可提出  $C$  的一种有用的因子分解

$$C = gTSA \quad (16)$$

$g$  为一个标量,张量因子  $T$ 、 $S$ 、 $A$  定义为

$$T = N_2(I + t \sum_2) \quad (17)$$

$$S = N_1(I + e \sum_1) \quad (18)$$

$$A = N_3(I + s \sum_3) \quad (19)$$

应该注意,这种因子分解并不是奇异值分解方法(SVD).  $T$ 、 $S$ 、 $A$  的物理解释将在下面进行讨论. 为了方便,归一化因子  $N_i$  以下列方式定义:

$$N_1 = \frac{1}{\sqrt{1+e^2}} \quad (20)$$

$$N_2 = \frac{1}{\sqrt{1+t^2}} \quad (21)$$

$$N_3 = \frac{1}{\sqrt{1+s^2}} \quad (22)$$

通过这样的归一化,矩阵  $T$  实际上变为一个一般的旋转矩阵,这种归一化的实际目的是确保  $T$ 、 $S$ 、 $A$  的元素在任何过程中保持有界.

通过依次检查各个因子对于区域电场的影响,可以了解到这种因子分解的一些物理意义.“各向异性”或“分裂”张量

$$A = N_3(I + S \sum_3) = N_3 \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix} \quad (23)$$

通过不同的因子简单地扩大了两个场分量,由于该畸变产生了一个各向异性,对于区域感应阻抗张量  $Z_2$  中已经存在各向异性的情况,只是简单地再增加上该畸变,就象该阻抗张量沿同样的坐标轴被展开那样. 注意:任意的2阶对角矩阵以及此类的任意畸变因子都能表示成这种形式. 这种畸变各向异性在实验上不能够与感应各向异性区别开,除非可独立地获知  $Z_2$  的各向异性时才能进行区分.

“剪切”张量(此叫法是由变形理论而来)

$$S = N_1(I + e \sum_1) = N_1 \begin{bmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

在轴上发展了各向异性,并把区域感应主轴分为两部分.

“扭变”张量

$$T = N_2(I + t \sum_2) = N_2 \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

单单是把电场向量顺时针旋转  $\tan^{-1}t$  这样一个角度。

最后,  $g$  对电场作了一个比例标绘. 这是必要的, 因为  $A$ 、 $S$ 、 $T$  是以这样的方式被归一化的: 它们的积与真实畸变张量差一标量因子  $g$ . 可把该标量看作“位置增益”。

这种畸变张量  $C$  的因子分解的优点现已显现. 由于  $Z'_2 = gAZ_2$  看起来象一等价有效的理想二维阻抗张量, 即具有零对角元素,  $g$  和  $A$  都不能分别从  $Z_2$  中确定, 所以在此采纳传统的方法: 仅试图确定  $Z'_2$  而非  $Z_2$ , 并知道在  $Z'_2$  中我们所确定的两个主阻抗将分别由未知的但与频率无关的因子所标绘. 上述畸变张量  $C$  的因子分解的一个明显的优点是: 它允许  $C$  的未知部分在不破坏阻抗张量的理想二维形式情况下被吸收到所确定的阻抗张量中. 在一维情况下, 此处所给的分解方法同样适用。

如果大地畸变确实与频率无关, 把  $g$  和  $A$  吸收进  $Z_2$  中将不会改变主视电阻率的形状或相位. 这样除了一部分“静位移”之外, 我们能够正确地确定它们. 这与传统的方法不一样, 在传统的方法中, 还要把  $T$  和  $S$  吸收到  $Z_2$  中, 这样使它根本不同于理想二维张量。

可以证明, 对于所有合理的畸变张量, 存在一个唯一的乘积因子分解(16)式, 即利用实数值  $g$ 、 $t$ 、 $e$  和  $s$  的  $C$  的因子分解(16)式存在且唯一<sup>[2]</sup>。

#### 2.4 三维/二维构造阻抗张量分解技术

如果把上面讨论的因子分解(16)式代入(10)式, 则有

$$Z_m = gRTSAZ_2R^T \quad (26)$$

如果  $g$  和  $A$  被吸收进  $Z_2$ , 成为  $Z'_2$ , 则上式可写为

$$Z_m = RTSZ_2R^T \quad (27)$$

因  $Z_2$  和  $Z'_2$  在实验上无法分辨,  $Z_2$  上的“'”被去掉. 即  $Z_2 = g \begin{bmatrix} 0 & (1+s)Z_{\perp} \\ -(1-s)Z_{\parallel} & 0 \end{bmatrix}$

其中  $Z_{\perp}$  和  $Z_{\parallel}$  均为实际二维阻抗. (27)式构成所希望的分解, 它有 7 个实参数, 分别是: ①和②较大的主阻抗  $a$  的实部和虚部(或等价的较大的视电阻率和相位), ③和④较小的主阻抗  $b$  的实部和虚部(或等价的较小的视电阻率和相位), ⑤较大的视电阻率的方位角  $\theta$ , ⑥剪切角  $\varphi_e = \tan^{-1}e$ , ⑦扭变角  $\varphi_t = \tan^{-1}t$ . (另外还有一个可替换的并包含同样信息的参数为局部畸变走向)。

为了由一个测量阻抗张量计算这些参数, 必须明确地把这些参数与乘开的因子分解的数据联系起来. 数据  $Z_m$  可以很方便地由其简明的分解系数  $\alpha_i$  表示, 即

$$Z_m = \frac{1}{2}(\alpha_0 I + \alpha_1 \sum_1 + \alpha_2 \sum_2 + \alpha_3 \sum_3) \quad (28)$$

$$\alpha_0 = Z_{xx} + Z_{yy} \quad (29)$$

$$\alpha_1 = Z_{xy} + Z_{yx} \quad (30)$$

$$\alpha_2 = Z_{yr} - Z_{xy} \quad (31)$$

$$\alpha_3 = Z_{xr} - Z_{yy} \quad (32)$$

如果(27)式被具体地表示出来, 经过一些代数运算可得一非线性方程组, 即

$$\alpha_0 = t\sigma + e\delta \quad (33)$$

$$\alpha_1 = (\delta - e\sigma)\cos 2\theta - (t\delta + e\sigma)\sin 2\theta \quad (34)$$

$$\alpha_2 = -\sigma + et\delta \quad (35)$$

$$\alpha_3 = -(t\delta + e\sigma)\cos 2\theta - (\delta - e\sigma)\sin 2\theta \quad (36)$$

为了方便,式中  $\sigma = a + b$  和  $\delta = a - b$  分别对应所应用的主阻抗的和与差.通过规定  $\theta$  位于  $0^\circ$  到  $90^\circ$  之间来解决  $\theta$  中  $90^\circ$  角的意义上的含糊性.

如果与阻抗张量相对应的物理模型正确,且不存在噪声,对于一个给定的阻抗张量实际上存在一个唯一的分解(33)~(36)式(前提条件是解决了  $\theta$  中的含糊性,并限制了低剪切).实际上,具有噪声的实验数据或偏离物理模型的实验数据永远不会恰好拟合这种分解.这种情况下,含有7个分解参数的这4个复方程(33)~(36)的一组解必须通过最小平方拟合方法来求得.这必须具备好的数据.

当存在信号噪声时,通过该方法所恢复的参数可能不稳定,在这种情况下,限制区域走向(即  $\theta = 0^\circ$ )能够稳定地恢复正确的区域阻抗相位、正确的区域视电阻率形状以及正确的畸变参数值扭变和剪切.由于两个与频率无关的标量  $s, g$  的作用,视电阻率曲线发生了一定程度的平移<sup>[3]</sup>.

### 3 阻抗张量分解技术的实施过程

为了便于利用最小平方拟合方法求解方程组(33)~(36),首先必须把它们化成实数形式的非线性方程组,通过一定的代换和运算,(33)~(36)式化为如下形式:

$$x_1x_5 + x_3x_6 - r_0 = 0 \quad (37)$$

$$x_2x_5 + x_4x_6 - i_0 = 0 \quad (38)$$

$$-x_1x_5x_6x_7 - x_1x_6x_8 - x_3x_5x_8 + x_3x_7 - r_1 = 0 \quad (39)$$

$$-x_2x_5x_6x_7 - x_2x_6x_8 - x_4x_5x_8 + x_4x_7 - i_1 = 0 \quad (40)$$

$$-x_1 + x_3x_5x_6 - r_2 = 0 \quad (41)$$

$$-x_2 + x_4x_5x_6 - i_2 = 0 \quad (42)$$

$$x_1x_5x_6x_8 - x_1x_6x_7 - x_3x_8 - r_3 = 0 \quad (43)$$

$$x_2x_5x_6x_8 - x_2x_6x_7 - x_4x_5x_7 - x_4x_8 - i_3 = 0 \quad (44)$$

$$x_7^2 + x_8^2 - 1 = 0 \quad (45)$$

$$x_7 - 1 = 0 \quad (46)$$

式中  $x_1 = a_r + b_r$ , 即所恢复的较大主阻抗  $a$  的实部与较小主阻抗  $b$  的实部之和;  $x_2 = a_i + b_i$ , 即所恢复的较大主阻抗  $a$  的虚部与较小主阻抗  $b$  的虚部之和;  $x_3 = a_r - b_r$ ;  $x_4 = a_i - b_i$ ;  $x_5 = t$ ;  $x_6 = e$ ;  $x_7 = \cos 2\theta$ ;  $x_8 = \sin 2\theta$ ;  $r_0 = Z_{1r} + Z_{4r}$ , 即测量阻抗张量  $Z_{xx}$  的实部与  $Z_{yy}$  的实部之和;  $i_0 = Z_{1i} + Z_{4i}$ ;  $r_1 = Z_{2r} + Z_{3r}$ ;  $i_1 = Z_{2i} + Z_{3i}$ ;  $r_2 = Z_{3r} - Z_{2r}$ ;  $i_2 = Z_{3i} - Z_{2i}$ ;  $r_3 = Z_{1r} - Z_{4r}$ ;  $i_3 = Z_{1i} - Z_{4i}$ . (46) 式是当噪声存在时,限制区域走向  $\theta = 0^\circ$  的方程,如在实际资料处理中,限制区域走向为其它角度时,此方程应作相应的改变.

至此,在三维/二维(包括三维/一维)情况下,即区域构造至多为二维,局部为三维,区域感应响应中畸变形态校正的关键是解非线性方程组(37)~(46).一般情况下,该非线性方程组所对应的线性方程组都存在一定的病态,用一般的方法难以得到令人满意的结果.从理论上讲,若采用奇异值分解方法(SVD),即广义逆矩阵方法,即使在包含有零奇异值的情况下,也能得到唯一解.但在计算机上进行数值计算时,遇到的多是很小的奇异值,它们将导致相应的参数

改正量很大,以致超出线性近似所允许的范围,使模型参数沿着错误的方向变化,最后引起迭代发散.所以在实际求解过程中,必须设法压制小奇异值的不利作用,这时,用加阻尼的办法可以减小小奇异值的不利影响,控制其相应参数的改正量.因此,这里采用了改进的广义逆矩阵方法求解该非线性方程组.通过求解实践证明,应用改进的广义逆矩阵方法,可以保证迭代过程稳定收敛,得到令人满意的结果.可见,改进的广义逆矩阵方法是至今为止解决 MT 反演问题的最有效的方法.

设非线性方程组为  $f_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m; m \geq n)$ , 利用改进的广义逆矩阵方法求解该方程组,实质上就是求  $n$  维变元  $x^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  的  $m$  维函数  $f(x)^T = (f_1(x), \dots, f_m(x))$  在给定初始解  $x_0$  附近欧氏模平方的极小

$$\|f(x)\|^2 = f(x)^T f(x) = \min \quad (47)$$

其中  $T$  表示转置. 当  $m = n$  时, 则变为解非线性方程组

$$f(x) = 0 \quad (48)$$

作  $f(x)$  在  $x_0$  附近的一级台劳近似

$$f(x) \approx f_0 + A_0 \Delta x \quad (49)$$

其中  $f_0 = f(x_0)$ ;  $A_0$  为  $m \times n$  阶雅可比矩阵,  $A_0 = (a_{ij})_{m \times n}$ ,  $a_{ij} = \partial f_i / \partial x_j |_{x = x_0}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ );  $\Delta x^T = (\Delta x_1, \dots, \Delta x_n)$ . 于是, 在欧氏模平方极小意义下, 该问题由如下迭代公式给出近似解

$$x_{k+1} = x_k - B_k^+ f_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (50)$$

其中  $f_k = f(x_k)$ ,  $B_k^+$  为  $f(x)$  在  $x_k$  处的一阶偏导数矩阵  $A_k$  的改进的广义逆矩阵.

通过实验, 可确认如下控制迭代终止的判据是有效的, 即利用阻尼系数  $g$  变得很小后又突然增大这一标志来控制迭代终止. 实际上, 随着迭代过程的进行, 一般来说阻尼是自动减小的, 参数经过改正, 逐渐逼近真值; 如果出现继续减小阻尼, 目标函数已不能下降的情况, 这时增大阻尼继续迭代下去其结果也不会有多大改善. 从另一角度来看, 在迭代过程中阻尼由大到小意味着由梯度法向高斯-牛顿法过渡, 收敛加快, 很快使目标函数趋于极小值点. 再迭代下去, 阻尼会增加到很大, 从而转向梯度法的收敛方向. 而在极小值点附近, 用梯度法迭代, 收敛甚微. 在这时终止迭代是合适的. 由于个别情况下在迭代开始阶段会出现阻尼的波动, 故应在程序中加上控制语句, 使这一判据在经过一定次数的迭代后才有效<sup>[4]</sup>. 改进了的广义逆计算程序见图 1.

## 4 理论模型试验实例

本文在作正演模拟时, 所用平面网格由  $15 \times 15$  个均匀正方形组成, 每个正方形的边长为 5 km, 选用了 6 个测点, 三维异常体的位置及测点位置如图 2 所示, 剖面为层状构造, 各层的厚度以及电阻率的分布情况如图 3 所示. 同时, 还用到了美国麻省理工学院 Stephen Park 教授的三维正演程序, 该程序的基础是广义薄层方法, 其模拟工作是把许多不均匀层叠在一起构成一般三维介质.

本文利用理论模型试验检验阻抗张量分解技术校正效果的具体作法是: 首先, 构造一个二维地质模型, 利用三维正演程序得到一组相应的视电阻率资料; 其次, 在此二维地质模型的基础上, 在地表处增加一个三维异常体, 这样就构造了一个三维/二维地质模型, 然后利用三维正演程序计算出相应的视电阻率资料; 再次, 利用笔者所设计的基于阻抗张量分解技术的校正程



序,对三维/二维地质模型的视电阻率资料进行处理,得到一组校正后的视电阻率资料;最后,比较以上 3 组视电阻率资料,对于同一测点而言,如果在一定频段范围内的各个频点校正后的视电阻率资料与二维地质模型相应的视电阻率资料之比相同或相近,而各个频点上的三维/二维地质模型的视电阻率资料与相应的二维地质模型的视电阻率之比相差较大,则说明三维/二维地质模型下,相对于二维模型而言被扭曲的视电阻率资料,经过阻抗张量分解技术处理后,恢复或基本恢复了二维视电阻率资料的形态,消除或基本消除了三维局部构造对二维视电阻率资料形态畸变的影响。

表 1、表 2 给出了  $S_1$ 、 $S_2$  这两个测点处的校正结果,每个测点处所用的实验周期范围为:250~30 s,选取其中 8 个周期,它们分别为 250s, 230s, 200s, 170s, 100s, 70s, 50s 和 30s. 表中的  $\tilde{x}_y$  和  $\tilde{y}_x$  分别表示 MT 响应函数的  $x_y$  分量和  $y_x$  分量;  $\rho_{a2}$ 、 $\rho_{a3}$  和  $\rho_{a2}$  分别表示二维构造视电阻率、三维/二维构造视电阻率和三维/二维构造经阻抗张量分解技术校正后的视电阻率;  $r_1$  和  $r_2$  分别表示同一分量三维/二维视电阻率与二维视电阻率之比和校正后的视电阻率与二维视电阻率之比。

由表中所给出的校正结果可以比较明显地看出:各个测点在周期大于 200s 的范围内同一分量的  $r_1$  值非常接近,而在小于 200s 的较短周期段内,随着周期的减小,其  $r_1$  值明显增大. 这说明,在较长周期范围内,三维异常体的畸变影响主要表现为静态效应,视电阻率曲线的形状基本上未被扭曲. 而在较短周期段,随周期的减小,三维异常体所引起的视电阻率曲线的形状扭曲畸变越来越严重;但是,同一分量的  $r_2$  值在所研究的整个周期范围内都非常接近或相差不大,这说明三维/二维结构的视电阻率资料经过阻抗张量分解技术校正以后,基本上消除了三维局部构造所引起的二维视电阻率资料的形状扭曲畸变。

通过以上的理论模型试验,证明了采用阻抗张量分解技术能有效地校正三维/二维情况下三维异常体所造成的 MT 响应函数的形态畸变,说明经阻抗张量分解技术校正后的 MT 响应函数更能真实地反映二维区域构造的本来面目。

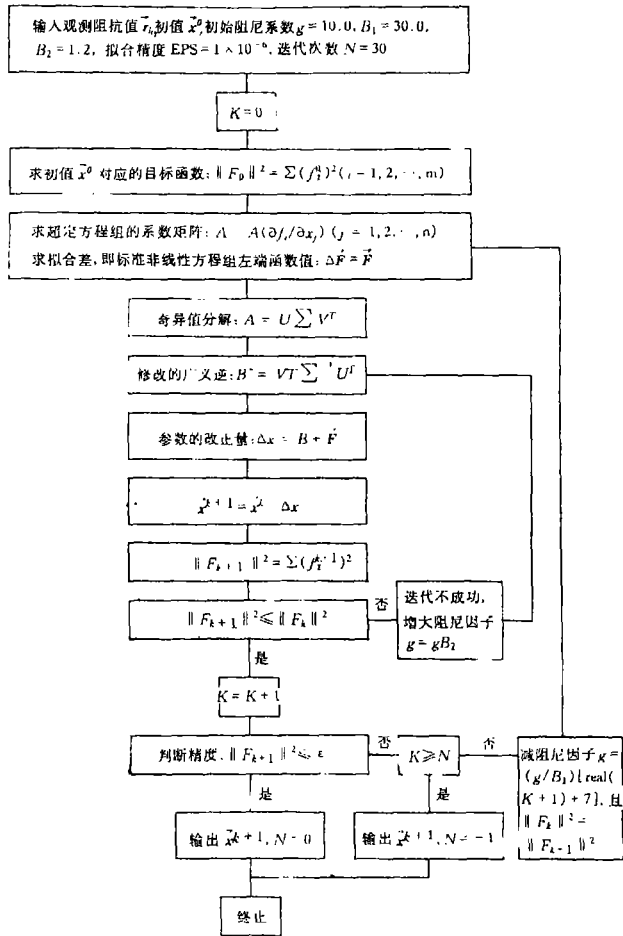


图 1 改进的广义逆计算程序

Fig. 1 The routine flowchart of improved generalized inverse matrix method.

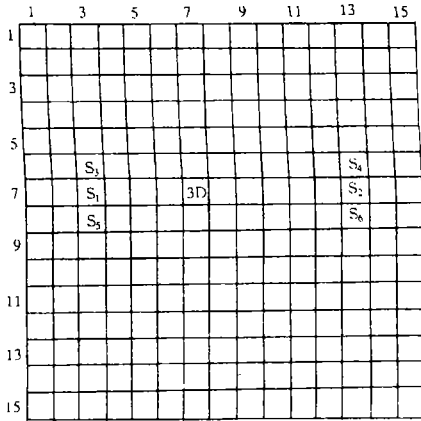


图2 三维MT正演模拟平面网格  
Fig. 2 The plane net for 3-D MT forward model.

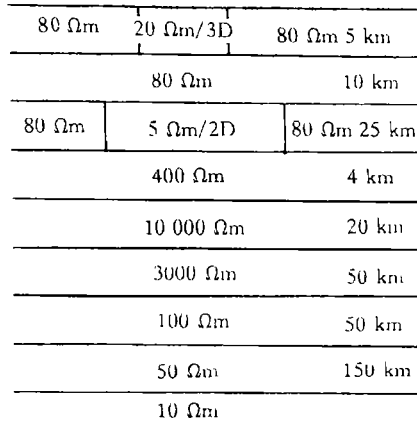


图3 三维MT正演模拟剖面构造  
Fig. 3 The profile for 3-D MT forward model.

### 5 结束语

阻抗张量分解技术的提出、发展和开发应用进一步提高了受近地表局部异常影响的MT资料的解释水平. 其主要思路是: 利用一种有用的因子分解式, 尽可能多地把局部和区域参数分开, 保留区域参数, 舍弃其余部分, 最终把三维形式的阻抗张量变成标准二维形式, 这个二维形式的阻抗张量恢复了正确的区域阻抗相位和区域视电阻率曲线形态. 其中视电阻率曲线由于两个与频率无关的标量作用而发生了一定程度的平移.

阻抗张量分解技术不但可以用来校正由地表局部三维异常体引起的区域二维MT响应函数的形状扭曲, 而且还可较好地确定区域异常的特征, 如构造维数和走向. 由于时间有限, 本文仅对三维/二维地质构造情况下的阻抗张量分解技术进行了一定的分析和研究, 由于手头没有全部四分量阻抗

表1 测点 S<sub>1</sub> 处的校正结果

周期 (s)	分量	$\rho_{a2}/\Omega m$	$\rho_{a3}/\Omega m$	$r_1$	$\rho'_{a2}/\Omega m$	$r_2$
250	xy	35.6	18.0	0.51	10.50	0.30
	yx	14.7	17.7	1.20	7.48	0.51
230	xy	34.0	17.9	0.53	10.20	0.30
	yx	14.6	17.7	1.21	7.14	0.49
200	xy	31.5	17.8	0.57	9.54	0.30
	yx	14.7	17.8	1.21	6.55	0.45
170	xy	28.8	17.8	0.62	8.77	0.30
	yx	15.0	18.4	1.23	6.09	0.41
100	xy	22.7	19.1	0.84	6.34	0.28
	yx	17.9	22.9	1.28	5.05	0.28
70	xy	20.7	21.8	1.05	5.55	0.27
	yx	21.0	28.6	1.36	5.58	0.27
50	xy	20.4	26.0	1.28	5.03	0.25
	yx	24.0	35.7	1.49	6.47	0.27
30	xy	22.2	36.9	1.66	5.06	0.23
	yx	26.4	48.2	1.83	8.80	0.33

表2 测点 S<sub>2</sub> 处的校正结果

周期 (s)	分量	$\rho_{a2}/\Omega m$	$\rho_{a3}/\Omega m$	$r_1$	$\rho'_{a2}/\Omega m$	$r_2$
250	xy	35.6	17.9	0.50	9.33	0.26
	yx	14.7	17.7	1.20	7.72	0.53
230	xy	34.0	17.8	0.52	9.19	0.27
	yx	14.6	17.7	1.21	7.48	0.51
200	xy	31.5	17.7	0.56	8.71	0.28
	yx	14.7	17.8	1.21	6.97	0.47
170	xy	28.8	17.7	0.61	7.94	0.28
	yx	5.0	18.4	1.23	6.33	0.42
100	xy	22.7	19.0	0.84	6.41	0.27
	yx	17.9	22.9	1.28	5.61	0.31
70	xy	20.7	21.6	1.04	4.90	0.24
	yx	21.0	28.6	1.36	5.75	0.27
50	xy	20.4	25.9	1.27	4.41	0.20
	yx	24.0	35.7	1.49	6.12	0.26
30	xy	22.2	36.7	1.65	4.46	0.20
	yx	26.4	48.2	1.83	8.90	10.31

张量实际观测资料,因而也未能利用该技术进行实际资料处理.当然,还有许多有关的理论和实际问题需要进一步研究和探索,如相位资料的恢复、区域异常特征的确定等.通过本文的理论模型试验证明了用阻抗张量分解技术进行局部畸变校正的有效性,显然,用该技术得到的MT响应函数更能真实地反映区域地电构造.

本文是在林长佑研究员的精心指导下完成的,在此表示衷心感谢.

### 参考文献

- 1 杨菱,石永辉.复杂地区大地电磁测深曲线的性质及资料解释问题综述.中国地质大学学报,1990,15(增):69~77.
- 2 Groom R W, Bailey R C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. J Geophys Res, 1989, 94(B2): 1913~1925.
- 3 Groom R W, Bailey R C. Analytic investigations of near-surface three-dimensional galvanic scatterers on MT tensor decompositions. Geophysics, 1991, 56(4): 496~518.
- 4 陈乐寿,刘任,王天生.大地电磁测深资料处理与解释.石油工业出版社,1989.

## THE CORRECTION OF MAGNETOTELLURIC CURVE DISTORTION CAUSED BY SURFICIAL LOCAL THREE-DIMENSION INHOMOGENEITIES: THE IMPEDANCE TENSOR DECOMPOSITION TECHNIQUE FOR THE CORRECTION OF MT CURVES DISTORTION

Wang Shuming

(Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000)

### Abstract

Just for 3-D/2-D geological structures, the decomposition technique of MT impedance tensor is developed. It can separate and remove the twist distortion of MT corresponse function shape resulting from 3-D local abnormal objects near surveying site by using the technique to analyze the MT data of each independent site. The theoretical model tests in this paper have shown the effectiveness of the technique in removing the local distortion.

**Key words** Magnetotelluric sounding, Resistivity, Anomaly, Distortion, Impedance tensor decomposition technique