

# 用大地电磁法研究构造走向及维性特征

杨长福<sup>1</sup>, 林长佑<sup>2</sup>

(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:**介绍了大地电磁 GB 张量分解法及其对它的改进法, 可确定出更可靠更真实的区域构造走向. 将分解结果结合传统的座标旋转法所确定的视电阻率、相位、走向、偏离度等响应函数及维权参数进行分析, 可得到更详细的电性结构维性质信息. 对兰州地区的实测资料研究表明, 区域电性结构主体呈 2-D 结构, 走向方向大致为南北或东西向.

**关键词:**大地电磁; 张量分解; 走向; 维

**中图分类号:** P319      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0065-07

## 0 引言

由于目前更一般的大地电磁(MT)三维非均匀问题尚未得到很好的解决, 大多数情况下仍立足于一、二维正反演解释, 因此消除三维非均匀体引起的曲线畸变, 而后作常规的正反演解释, 乃是当前最流行而又实际的研究途径<sup>[9]</sup>. 基于目前的这种现状, 定量地确定电性构造的维参数和区域构造走向也显得越来越重要. 例如人们必须在事先确定在误差范围内是否表现强烈的 3-D 性, 3-D 性对 MT 响应为 1-D 或 2-D 假设的有效性的影响程度. 如果 3-D 性很强的资料用 2-D 反演方法进行解释, 势必造成很大误差. 在存在非均匀性的情况下, 用传统的座标旋转法求出的区域性构造走向, 由于表面非均匀性的强烈影响, 有时是凌乱或不正确的. 另外, 由于响应函数随座标旋转角(走向角)而变化, 因此走向角的偏差, 势必影响到用于反演的响应函数值, 从而也必将影响反演结果.

阻抗张量的偏离度被认为是定量量度观测阻抗张量 3-D 程度重要参数, 然而传统意义的偏离度对局部结构很敏感, 不能很好地表示出区域 3-D 程度. 例如对出现表面非均匀体的区域 2-D 结构, 传统偏离度可能偏高, 尽管区域结构是二维的; 另一方面, 在 2-D 表层结构覆盖 3-D 区域体的情况下, 传统方法定义的偏离度仅仅表示了局部 2-D 结构的偏小值<sup>[9]</sup>.

近年来发展的张量分解法将观测阻抗张量分解为畸变矩阵和未受畸变的区域阻抗张量, 使 MT 畸变研究取得了突破性进展. 比较有代表性的分解方法有 Bahr 的“相位偏离法”(phase deviation method)<sup>[4,5]</sup>, 它分两步: 第一步根据主方向座标系中观测阻抗张量中主对角元素的相位偏离而求出走向角; 第二步在主方向将观测阻抗张量分解为畸变矩阵和未受畸变的区域阻抗张量, 并定义了相位灵敏偏离度(phase-sensitive shew), 它不受局部构造的影响, 能较好

收稿日期: 2001-02-19

作者简介: 杨长福(1964-), 男(汉族), 江西余江人, 副研究员, 现从事电磁理论方法及深部探测方面的研究.

地表示区域 3-D 程度. 将它和传统方法确定的偏离度进行比较, 可以帮助我们判断局部和区域构造的维数. 但在模型较为简单的情况下, 它所确定的走向和维参数很不稳定. 最近 Pracer 和 Szark 发现了 Bahr(1991) 推导走向和偏离度公式的明显错误, 并进行了改正<sup>[10]</sup>. Groom 和 Baily 提出的 GB 分解法<sup>[7]</sup>, 直接将观测阻抗张量分解为畸变矩阵和未受畸变的区域阻抗张量, 并同时求得反映区域构造走向的角度, 通过分析分解结果, 便可了解电性构造的维参数特征. GB 分解是建立在观测数据无噪声和假设地电模型为区域 2-D 和局部 3-D 非均匀体的基础上的分解方法, 若偏离这个假设就不能成功地分辨出不畸变的阻抗张量; 若满足分解条件, 可得到可信度较高的分解结果.

作者对 GB 分解法进行了修改, 采用单个频点进行分解, 并将参加分解的观测阻抗张量改用视电阻率和相位, 使求解参数数减小, 方程性能得到改善, 使分解更少地受到限制而稳定地进行<sup>[3]</sup>. 本文将对兰州地区实测 MT 资料进行分解, 确定出构造走向; 并将分解结果结合维权参数<sup>[8]</sup>和观测响应函数进行综合分析, 揭示出构造维性质特征.

## 1 利用张量分解方法确定构造走向

Groom 和 Baily 在表层局部 3-D 异常体覆盖在 2-D 区域结构之上的假设下, 将观测阻抗张量  $Z$  分解为:

$$Z = RCZ_{2-D}R^T = gRTSAZ_{2-D}R^T \quad (1)$$

其中  $C$  为与频率无关的局部畸变矩阵,  $C = gTSA$ ,  $gRT$ ,  $g$  为常数,  $R$  为单位旋转矩阵,  $R^T$  为  $R$  的转置矩阵,  $T$  为扭变矩阵,  $S$  为剪切矩阵,  $A$  为分裂张量,  $Z_{2-D}$  为区域真实的 2-D 阻抗张量, 它们分别为:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} 1 & -t \\ t & 1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 1 & e \\ e & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1+s & 0 \\ 0 & 1-s \end{bmatrix}$$

其中  $\theta$  为旋转角(走向角);  $t$  为扭变(twist)因子,  $e$  为剪切(shear)因子,  $s$  为分裂比例因子.  $T$  表示将场分量顺时针旋转一角度  $\arctan t$ ;  $S$  表示将  $x$  轴上的分量顺时针折射到角度为  $\arctan e$  的方向上, 而将  $y$  轴的分量逆时针折射相同的角度;  $A$  将区域 2-D 阻抗张量 2 个分量进行不同的放大或缩小.  $gAZ_{2-D}$  在数学上有非唯一确定的困难.  $gA$  的物理含义相当于发生静移, 它们与  $Z_{2-D}$  的乘积和  $Z_{2-D}$  在形式上完全一样, 无法区分, 因此又叫静位移因子, 故并入  $Z_{2-D}$  中, 而改用  $Z_2$  表示  $gAZ_{2-D}$ . 这样  $Z$  就可写成:

$$Z = RTSZ_2R^T \quad (2)$$

式(2)有 7 个未知数, 它们是  $Z_2$  中较大阻抗  $a$  的实部和虚部(或视电阻率和相位),  $Z_2$  中较小阻抗  $b$  的实部和虚部(或视电阻率和相位), 走向角  $\theta$  及剪切角  $\arctan e$  和扭变角  $\arctan t$ . 将式(2)展开得 4 个方程:

$$Z_1 = tp + eq \quad (3a)$$

$$Z_2 = (q - etp)\cos 2\theta - (tq + ep)\sin 2\theta \quad (3b)$$

$$Z_3 = -p + etq \quad (3c)$$

$$Z_4 = -(tq + ep)\cos 2\theta - (q - etp)\sin 2\theta \quad (3d)$$

$$p = a + b, q = a - b \quad (4)$$

其中:

$$Z_1 = Z_{xx} + Z_{yy} \quad (5a)$$

$$Z_2 = Z_{xy} + Z_{yx} \quad (5b)$$

$$Z_1 = Z_{yx} - Z_{xy} \quad (5c)$$

$$Z_4 = Z_{xx} - Z_{yy} \quad (5d)$$

$Z_{xx}$ 、 $Z_{yy}$ 、 $Z_{yx}$  和  $Z_{xy}$  分别为观测阻抗张量元素。

对单个频点,式(3)按实部和虚部展开有 8 个方程 7 个未知数,用最小二乘法求解,可求得区域阻抗、走向角及畸变参数。若观测频点数为  $n$ ,则有  $n$  级这样的方程,即  $8n$  个方程,包括  $7n$  个未知数。用最小二乘法求解,计算量很大。在数据存在噪声和区域结构偏离 2-D 而使数据受非均匀性影响严重时,方程的病态得到了放大,致使拟合很难收敛。作者对单个频点进行分解,并将参加分解的观测阻抗张量改用相应的视电阻率和相位,使得一次求解的计算量大大减小,并最大程度地减小了方程的病态,使分解更少地受分解条件限制而稳定地进行。由此可求得区域阻抗张量、畸变参数(切变角  $e$  和扭变角)及走向角  $\theta$ 。我们对兰州地区实测资料进行了分解,图 1 是对几个测点(ydml、glhj、hzxc、dxlq)观测资料分解后求得的畸变参数和构造走向角的例子。由张量分解求得的走向角(图 1 中的 4 个 b 图),可视为畸变消除或减小后代表 2-D 区域性构造的走向角,和张量分解前由传统的座标旋转法所确定的走向角(图 1 中的 4 个 a 图)相比,显得更为稳定一致。兰州地区实测资料的分解结果表明,该区各测点都具有比较一致的区域走向,大致呈南北或东西向,这和由地质资料所确定的构造走向是一致的。说明由张量分解所确定的构造走向角更真实可靠。

## 2 维权参数

MT 测深曲线可视为一定程度地受到电性横向非均匀性畸变影响的 1-D 曲线<sup>[6]</sup>。给定地区的电性结构可能是 1-D、2-D 或 3-D,也可能是它们的某种组合。维参数指标有偏离度、偏心率和椭率。传统方法定义的偏离度:

$$a = |-Z_1/Z_3| \quad (6)$$

$Z_1$  和  $Z_3$  为旋转不变量,参见(5)。按(6)可求出偏离度,此处绘出几个测点的偏离度(图 2)。对 1-D 和 2-D,  $a$  为 0;对 3-D 结构,  $a$  不为 0,此时可视为 3-D 构造的  $a$  下限值却无明显的界限值。Reddy et al. (1977)、Ting Hohmann(1981)及 Park et al. (1983)的 3-D 正演模拟分别得到  $a$  的下限值为 0.4、0.12 和 0.5, Hermance(1982)则示意  $a$  取 0.001 到 0.72 对近表畸变程度不能作出精确的判断。尽管如此,  $a$  仍是一个很有用的维参数指标。

偏心率为:

$$\beta(\theta) = |Z_4/Z_2| \quad (7)$$

椭率:

$$\beta_0 = \beta(\theta_0) \quad (8)$$

其中  $\theta_0$  为  $|Z_2|$  取最大时的方向和测量轴的夹角。这些用传统方法定义的维参数指标尽管很有用,但不能很清楚地评估 3-D 畸变的程度。Kao Orr 介绍了一组归一化的维权参数<sup>[6]</sup>:

$$D_1 = |-Z_3|/S \quad (9a)$$

$$D_2 = |Z_2|/S \quad (9b)$$

$$D_3 = |Z_1|/S \quad (9c)$$

其中  $S = |-Z_3| + |Z_2| + (|Z_1| + |Z_4|)/2$ , 称为维权因子(dimensional weight factor, 本文改称维权参数,下同)。  $D_1$ 、 $D_2$  和  $D_3$  分别描述了模型结构的 1-D、2-D 和 3-D 程度,或分别表示了模型结构的 1-D、2-D 和 3-D 的相对重要性<sup>[6,1,2]</sup>。按式(9)可确定出兰州地区各测点的维权参数(图 2)。

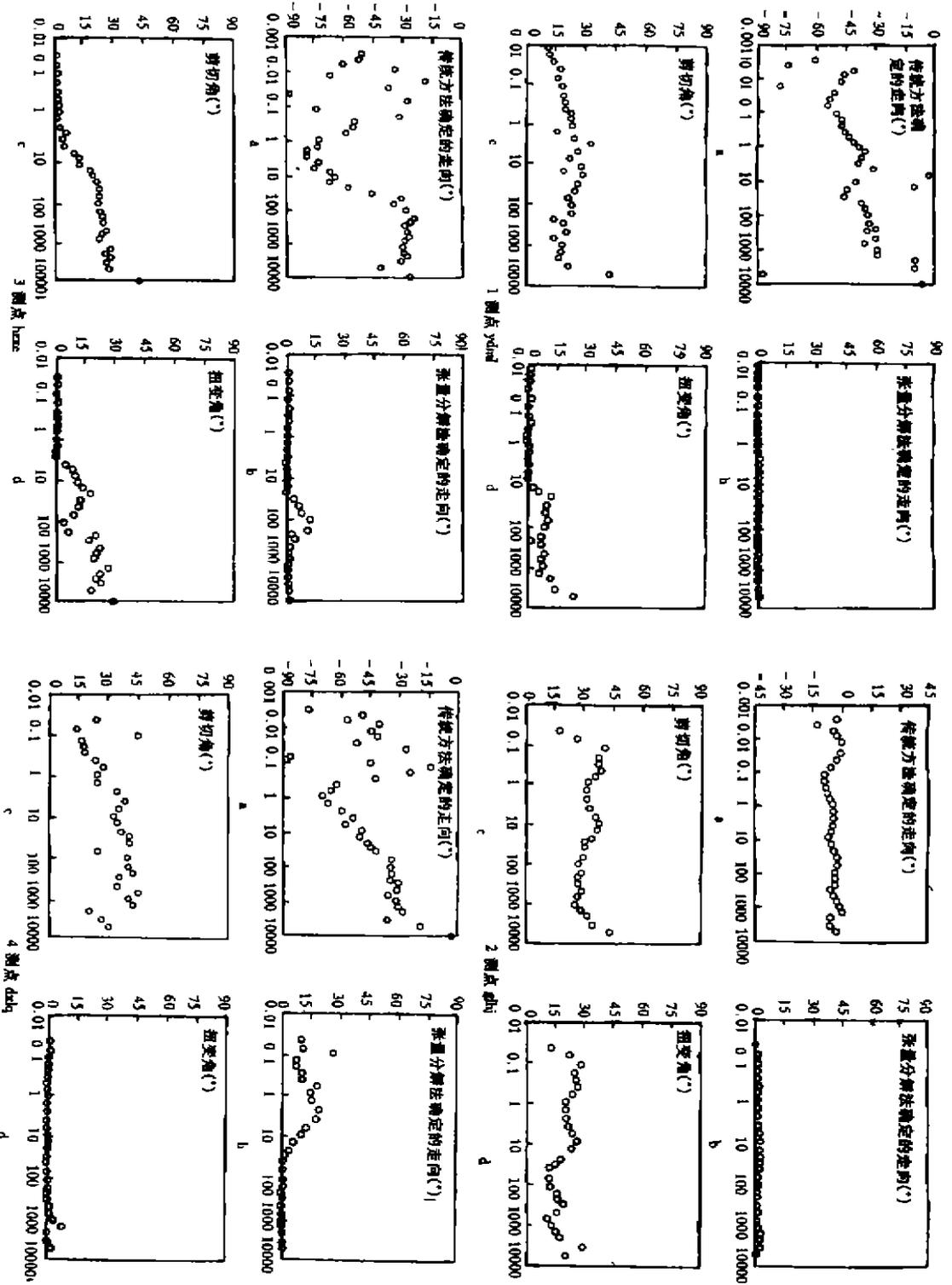


图 1 兰州 4 个测点的应变参数和构造走向角(横轴为深度(s))  
 Fig. 1 The strain parameters and angle of structure strike at four points in Lanzhou area.

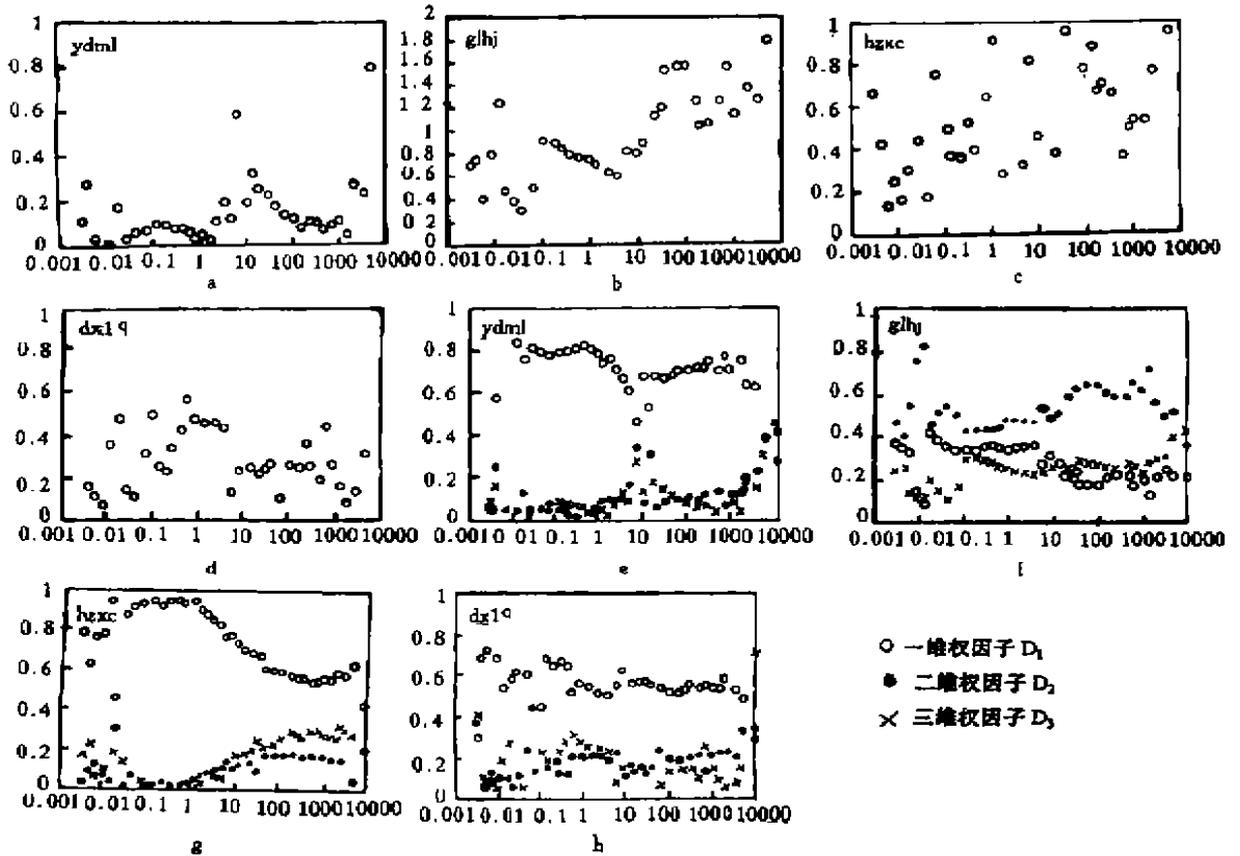


图 2 兰州 4 个测点的偏离度和加权参数

Fig. 2 The skew and dimensional weight parameter at four points in Lanzhou area.

从图 2 看出,维权参数比用传统方法算出的偏离度要直观得多,而且也稳定得多,因此它可用来作为判断模型结构维性特征的一个重要参数指标。

### 3 维参数特征分析

根据张量分解结果,分析畸变参数特点,并将分解结果结合传统方法所确定的响应函数(视电阻率、相位、走向、偏离度等)和上面描述的维权参数,得到更详细的构造维性质信息。下面就上述测点作为例子进行分析。

(1) ydml 测点:两主方向视电阻率形状较一致。传统方法确定的偏离度在 0.3 以下(图 2a);走向在  $-45^\circ$  左右(即北西方向)。而张量分解的视电阻率曲线几乎重合<sup>[3]</sup>;区域走向为  $0^\circ$ (南北向)剪切角和扭变角随频率变化很小。另外维权参数(图 2e),  $D_1 \gg D_2, D_3$  说明该测点具有很强的一维性。由此还可以推断,由传统的坐标旋转方法所确定的构造走向受到表面非均匀体的影响。进而可知, YDML 测点在深部表现较强的一维性,并有近北西走向的表面 2-D 结构。

(2) glhj 测点:传统方法所确定的偏离度(图 2b)较大(0.8 以上),走向较稳定一致( $5^\circ \sim 10^\circ$  之间摆动)。张量分解后走向为  $0^\circ$ (南北向);维权参数(图)  $D_2 > D_1, D_3$ 。剪切角和扭变角随频率变化不大。张量分解后视电阻率近乎平行,相位几乎相同<sup>[3]</sup>。表明该测点有很强的表层

非均匀结构,并有明显的静位移现象,同时也解释了该测点的传统偏离度可能是受局部影响而致使它偏大<sup>[9]</sup>. glhj 测点的视电阻率曲线和左边相邻测点的曲线较一致<sup>[9]</sup>,表明异常体的右边界距该测点较近,且该测点在低阻异常体之上. 区域结构可视为二维.

(3) hzxc 测点:传统法确定的偏离度较大(图 2c),在 0.2 以上;主方向视电阻率 1 s 以后几乎重合<sup>[3]</sup>,然后分离;走向在 100 s 以前变化较大,100 s 以后较稳定. 1 s 以前维权参数  $D_1 \gg D_3 > D_2$ (图 2 g);1 ~ 100 s 之间  $D_1$  下降, $D_2$  和  $D_3$  增大;100 s 以后, $D_1 > D_3 > D_2$ . 张量分解走向除在 20~200 s 之间有些变化外,接近南北向. 剪切角和扭变角在 10 s 以前稳定,且接近 0;10 s 以后也较稳定,随频率变化不大,可近似认为随频率不变. 若将整个频段分成 2 段(10 s 以前和 10 s 以后)分别考虑,则在第一段(10 s 以前)内,可视为一维结构;在第二段(10 s 以后)内,畸变参数不为 0,且可近似认为独立于频率,因此有很强的表面局部非均匀性影响. 所以可推测该测点可能在某一深度或某频段(对应有 10~200 s)存在 3-D 异常体.

(4) dxlq 测点:用传统方法所确定的偏离度(图 2d)在 0.2~0.6 之间,走向变化较大. 维权参数  $D_1$  大于  $D_2$  和  $D_3$ (图 2h),且它们相差不是太大. 张量分解后所确定的走向在 10 s 以前 15°左右,10 s 以后接近 0°. 切变角随频率有所变化,但大致可分为 2 段;在 2 s 以前和 2 s 以后可近似认为和频率无关,扭变角几乎不变. 类似于测点 hzxc 的分析方法,可推测该测点在 10 s 以前(或该频率对应的深度之上)和 10 s 以后是 2 个具有不同走向的二维结构的叠加模型;也可能在某深度(10 s 对应深度附近)存在异常体.

对兰州地区其它各测点,采用类似的方法进行综合分析<sup>[9]</sup>,得到该区电性结构主体表现为二维结构的结论.

#### 4 结论

采用修改后的 GB 张量分解法可以确定较为真实可靠的区域构造走向. 根据张量分解结果,对畸变参数特点进行分析. 若畸变参数和频率无关或分段和频率无关,则可视为局部畸变或某频段内局部畸变;若畸变参数随频率变化很大,则应视为三维结构. 将分解结果结合传统方法所确定的视电阻率、相位、走向、偏离度等响应函数及维权参数进行综合分析,可得到更详细更可靠的构造维参数信息. 对兰州地区的实测 MT 资料进行分解及综合分析之后,得到该区域电性结构主体呈 2-D 结构,走向方向大致为南北或东西向.

#### [参考文献]

- [1] 林长佑,刘晓玲,武玉霞. 试论大地电磁测深法在震前兆探索中的进一步应用[J]. 地震学报,1990,12(2):166—175.
- [2] 武玉霞,林长佑. 西北某些地区地电结构的维性质特征[J]. 地震研究,1990,13(1):61—68.
- [3] 杨长福. 兰州地区深部电性结构研究[D]. 青岛:青岛海洋大学,2000.
- [4] Bahr K. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types[J]. Phys. Earth Planet Inter., 1991, 66:24—38.
- [5] Bahr K. Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor, region induction and local telluric distortion[J]. J. Geophys., 1988, 62:119—127.
- [6] Beamish D. Geoelectric structural dimensions from magnetotelluric data; Method of estimation, old and new[J]. Geophysics, 1986, 51:1298—1309.
- [7] Groom R. W., Baily R. C. Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of three-dimensional galvanic distortion[J]. J. G. R., 1989, 94:1913—1925.
- [8] Kao D, Orr D. Magnetotelluric studies in the Market Weighton area of eastern England[J]. Geophys. J. Roy. Astr. Soc.,

1982, **70**, 323—337.

- [9] Kawakami N Y, et al. Local galvanic distortions in the central part of north—eastern Jappen (Part I)[J]. *J. Geomag. Geoelectr.*, 1997, **49**, 1387—1400.
- [10] Pracer E, Szarka L. A correction to Bahr's "phase deviation" method for tensor decomposition[J]. *Earth Planets Space*, 1999, **51**, 1019 —1022.

## THE STUDY ON STRUCTURAL STRIKE AND DIMENSIONAL CHARACTER USING MAGNETOTELLURIC METHOD

YANG Chang-fu<sup>1</sup>, LIN Chang-you<sup>2</sup>

(1. *The Earth Science Department of Nanjing University, Nujing 210093, China;*  
2. *Lanzhou Institute of Seismological, CSB, Lanzou 730000, China*)

**Abstract:** MT tensor decomposition method and its improvements are introduced, and more credible real regional structural strike be determined by decomposing the actually measured MT data using the iproved method. Combining the decomposition results, the response function such as apparent resistivite, phase, strike, skew et al, and dimensional weight parameter to make a comprehensive analysis, the more detailed information for the demensional parameter of structure can be obtained. The study of the actually measured MT data in Lanzhou area shows; in the area the regional conductivity structure is mainly two dimensional, and the strike is approximately in north—south or in west—east.

**Key words:** Magnetotellurics; Tensor decomposition; Strike; Dimension