

## 利用地表电阻率校正大地电磁静态偏移

陈清礼 胡文宝 李金铭 杨华

**摘 要** 基于大地电磁静态偏移的基本原理,通过对大量实测资料的处理,提出了一种比传统静态校正方法更有效地压制静态偏移的方法——静态偏移的标定校正法。其核心内容是利用岩性测试的电性参数和测点所在位置表层或浅层地层去标定视电阻率曲线的首支,并利用人机交互式可视化静态偏移校正软件去改正视电阻率曲线。经过40多条测线共700多个测点的实际应用,证明该方法是目前较理想的静态偏移校正方法。

**关键词** 大地电磁;静态偏移校正;标定

## THE APPLICATION OF SURFACE RESISTIVITY TO THE CORRECTION OF MAGNETOTELLURIC STATIC MIGRATION

*Chen Qingli<sup>1,2</sup>, Hu Wenbao<sup>1</sup>, Li Jinming<sup>2</sup>, Yang Hua<sup>2</sup>*

1) (Jiangnan College of Petroleum, Jingzhou 434102)

2) (China University of Geosciences, Beijing 100083)

**Abstract** : Based on the basic principle of magnetotelluric static migration and the processing of large quantities of measured data, this paper puts forward for suppressing static migration—the standardized correction method for static migration, which is more effective than the traditional static correction method. The kernel of this technique is the utilization of lithologic electrical parameters and the surface or shallow strata at the positions of measuring points to standardize the first branch of the apparent resistivity curve, and the use of interactive visualized static migration software to correct the apparent resistivity curve. Practice shows that this method is a fairly ideal technique for static migration correction.

**Key words** : magnetotelluric method; static migration correction; standardization

近10多年,大地电磁测深法(MT)在我国得到了迅速发展。在深部电性结构的研究、地热调查、天然地震的预测、石油天然气勘探等方面,MT都发挥了重要作用。尤其是近3 a来,随着我国南方油气勘探力度的加大,在广大南方地区做了大面积的大地电磁法勘探。观测资料普遍存在静态偏移,表现在相邻测点的视电阻率曲线或同一测点的2条视电阻率曲线之间发生较大数量的平移,严重妨碍资料处理解释。如不进行静态校正而直接对视电阻率曲线进行反演解释,将会使岩层的电阻率和界面发生严重的畸变,甚至使地质构造面目全非。

静态校正是大地电磁方法资料处理的一个核心问题。为了压制静态效应,不断提高MT的应用效果,国内外电法专家发表了许多论文<sup>[1]</sup>,提出了空间域滤波法<sup>[2]</sup>,

3]、理论计算法<sup>[4]</sup>、联合解释法<sup>[5, 6]</sup>、MT资料的自身校正法<sup>[7]</sup>、曲线平移法<sup>[8]</sup>。各种校正方法的原理和对资料的要求不同,在实际应用中都受到一定程度的限制,并且静态校正的效果不太理想。

在对我国南方地区的大量MT资料处理解释过程中,利用了各种可能使用的压制静态效应的方法,但都不能取得理想效果。为此,提出了利用表层或浅层地层的电阻率标定视电阻率曲线的首支进而压制静态效应的方法,并开发了人机交互式可视化静态偏移校正软件。经过40多条测线700多个MT点的实际资料处理表明,该方法适用性强,处理效果比较理想。

## 1 静态偏移的基本原理

为了有效地压制静态偏移,必须弄清楚静态偏移的规律并采取恰当的措施。首先讨论在垂直入射平面电磁波作用下,地表电性异常体引起的电磁场异常在波数域中的表达式<sup>[9]</sup>,进而考察核函数的性质并说明静态效应对视电阻率曲线的影响。

如图1所示,在电导率为 $\sigma_0$ 的围岩中有一电性异常体,其电导率为 $\sigma_1$ ,异常电导率

$$\Delta \sigma(r_1) = \sigma_1(r_1) - \sigma_0$$

在垂直入射平面电磁波的作用下,导电介质中任一观察点P处的电磁场可表示为一次场和二次场的和,即

$$E(r) = E_p(r) + e(r)$$

$$H(r) = H_p(r) + h(r)$$

其中, $E_p(r)$ 是一次电场, $e(r)$ 是二次电场。 $H_p(r)$ 是一次磁场, $h(r)$ 是二次磁场。

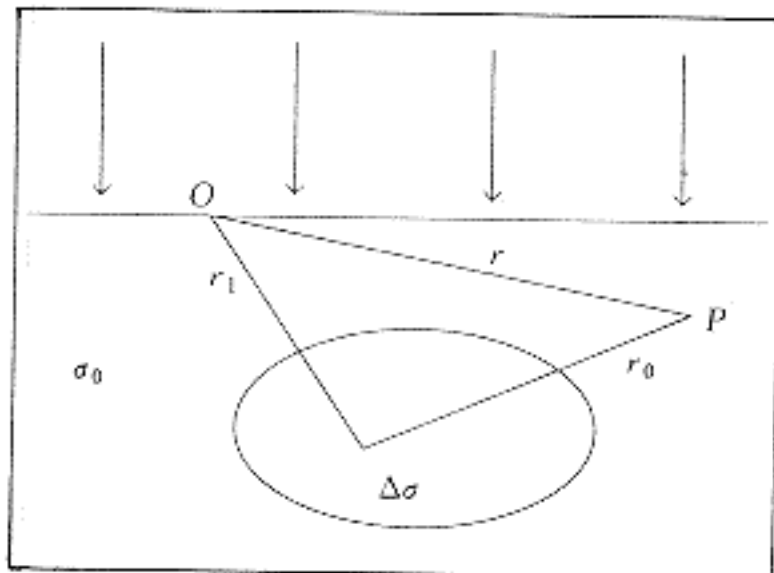


图1 异常体与观测点

可以证明, 二次电场 $e(r)$ 满足方程

$$\nabla^2 \mathbf{e}(\mathbf{r}) - i\omega\mu\mathbf{e}(\mathbf{r}) = i\omega\mu\Delta\sigma(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

利用格林函数可得

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}) = \int_v \Delta\sigma(\mathbf{r}_0)\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)\mathbf{E}(\mathbf{r}_0)d\mathbf{v}$$

其中 $G(r, r_0)$ 为格林函数。在大地电磁场的情况下, 如用一阶Born近似代替 $E(r_0)$

$$\mathbf{e}(\mathbf{r}) = \int_v \Delta\sigma(\mathbf{r}_0)\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)\mathbf{E}_0 e^{-ikz_0} d\mathbf{v}$$

$E_0$ 为一次电场的振幅,  $k$ 为电磁波的复波数。把上式写成分量形式

$$\frac{e_x(\mathbf{r})}{E_0} = \int_v \Delta\sigma(\mathbf{r}_0)G_x(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)e^{-ikz_0} d\mathbf{v}$$

若 $|\Delta\sigma(\mathbf{r})| \ll \sigma_0$ , 则相对电阻率异常为

$$\rho_n(\mathbf{r}_0) = \frac{\Delta\rho(\mathbf{r}_0)}{\rho_0} = -\frac{\Delta\sigma(\mathbf{r}_0)}{\sigma_0}$$

则上式变为

$$\frac{e_x(\mathbf{r})}{E_0} = \int_v \rho_n(\mathbf{r}_0)K_{ex}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)d\mathbf{v}$$

其中

$$K_{ex}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = -\sigma_0 G_x(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)e^{-ikz_0}$$

同理可得

$$\frac{\mathbf{h}_x(\mathbf{r})}{H_0} = \int_V \rho_n(\mathbf{r}_0) K_{hx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) dV$$

其中

$$K_{hx}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{\sqrt{2}}{\delta} \Delta_x(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) e^{-i(kz_0 + \frac{3}{4}\pi)}$$

$$\Delta_x(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0) = \frac{1}{i\omega\mu} \nabla_r \times \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{r}_0)$$

$\delta$  是电导率为  $\sigma_0$  的介质的穿透深度。

在地面观察时, 电阻率异常引起的电场异常或磁场异常可表示为

$$O(\xi, \eta) = \int_0^\infty \Lambda(\xi, \eta, z) R(\xi, \eta, z) dz \quad (1)$$

式中,  $O(\xi, \eta)$  为电场或磁场异常分量相对值之傅氏变换,  $\xi, \eta$  分别是  $x$  和  $y$  方向上的波数。  $R(\xi, \eta, z)$  表示电阻率相对异常值之傅氏变换,  $\Lambda(\xi, \eta, z)$  是输入  $R(\xi, \eta, z)$  与输出  $O(\xi, \eta)$  之频率特性, 又称为核函数。

二维情况时, 设  $y$  轴垂直构造走向。对 TE 极化而言, 仅有如下分量不为零

$$\begin{aligned} \Lambda_{ex}(\eta) &= \frac{i\omega\mu\sigma_0}{i\xi} r_1(\eta) e^{-i(\xi+k)z_0} \\ \Lambda_{hy}(\eta) &= -\sqrt{i\omega\mu\sigma_0} r_4(\eta) e^{-i(\xi+k)z_0} \\ \Lambda_{hz}(\eta) &= -\sqrt{i\omega\mu\sigma_0} r_6(\eta) e^{-i(\xi+k)z_0} \end{aligned}$$

式中,

$$r_1(\eta) = \frac{\xi}{\xi - i|\eta|} \quad r_4(\eta) = \frac{|\eta|}{|\eta| + i\xi} \quad r_6(\eta) = \frac{\eta}{\xi - i|\eta|}$$

由此可知, 核函数的分量与  $y$  方向的波数  $\eta$ 、 $z$  方向的波数  $\xi$ 、电导率异常体的埋深  $z_0$ 、角频率  $\omega$  有关。电导率异常体的埋深越小, 角频率越高, 对电磁场的影响越大。

对 TM 极化而言, 仅有一个分量不为零

$$\Delta_{ey}(\eta) = \frac{i\omega\mu\sigma_0}{i\xi} e^{-i(\xi+k)z_0} + \frac{\eta^2}{i\xi} e^{-i(\xi+k)z_0} \quad (2)$$

该式包括2项，第一项的大小随角频率 $\omega$ 而变。角频率越大，对电磁场的影响越大，反之则越小，这一项称为动态项。第二项称为静态项，其值与角频率无关，不受电磁波的频率影响。静态项说明了在垂直构造走向上的电场，由于受电阻率异常的影响而外加了一个与频率无关的量。静态项与 $y$ 方向波数 $\eta$ 的平方成正比，表现出高通特性。 $\eta$ 越大， $z_0$ 越小，作用越明显。由（1），（2）两式及波阻抗和视电阻率的公式可以推论，在双对数坐标轴上，因地表电性异常体的影响，视电阻率曲线沿纵轴发生一常数因子的位移，这个位移我们称为静态偏移，即

$$\rho_s(f) = \rho_n(f) + C \quad (3)$$

$\rho_s(f)$ 为视电阻率， $\rho_n(f)$ 为没有地表局部电性异常体时的电阻率， $C$ 为静态偏移量。

## 2 静态偏移的标定校正算法

压制静态偏移，就是要从实测视电阻率曲线中尽量剔除 $C$ 的影响。获得 $C$ 值的不同方式构成了不同的静态校正方法。标定校正方法是通过利用岩性测试的电性参数和测点所在位置表层或浅层地层，确定视电阻率曲线首支的正确位置，并利用人机交互式可视化静态偏移校正软件一步一步将视电阻率曲线移动，直到其首支到达正确位置为止。详细算法如下。

（1）读入一条测线的测点数 $N$ ，并根据测点数把该线上所有测点的视电阻率从磁盘文件中读入二维实数数组 $R[I, J]$ 中，周期读入二维实数数组 $T[I, J]$ 中，各测点的频点数放入一维整数数组 $M[I]$ 中。 $I$ 代表测点数， $J$ 表示频点号。

（2） $I$ 从1到 $N$ ， $J$ 从1到 $M[I]$ ，循环对 $R, T$ 取对数。

（3）读入静态偏移的校正步长 $DC$ 。

（4）将整条测线的所有点按图2显示在屏幕上，并在屏幕的下部放上“上偏”、“下偏”、“OK”、“CANCEL”4个按钮。

（5）用鼠标选择要进行静态偏移的曲线，即选择当前测点。

（6）不断重复点击“上偏”或“下偏”按钮，点击一次“上偏”时，当前测点的视电阻率曲线 $R$ 增加一个 $DC$ ，点击一次“下偏”时，视电阻率曲线 $R$ 减少一个 $DC$ ，并重画当前测点的曲线，此时曲线上下移动一个 $DC$ ，直到曲线的首支到达正确位置为止。

（7）将 $R$ 取指数后，按原来文件格式写回磁盘文件，静态偏移校正结束。

根据上述算法，利用Delphi软件开发环境，设计并实现了一个人机交互式静态校正软件。该软件除可以进行静态偏移校正外，还可对原始观测资料自动平滑或剔除飞点，可以挑选TE或TM极化方式。主要是可以按照资料处理人员的意愿对视电阻率曲线进行可视化平移。资料处理人员可利用该软件首先剔除飞点，而后进行曲线平滑，

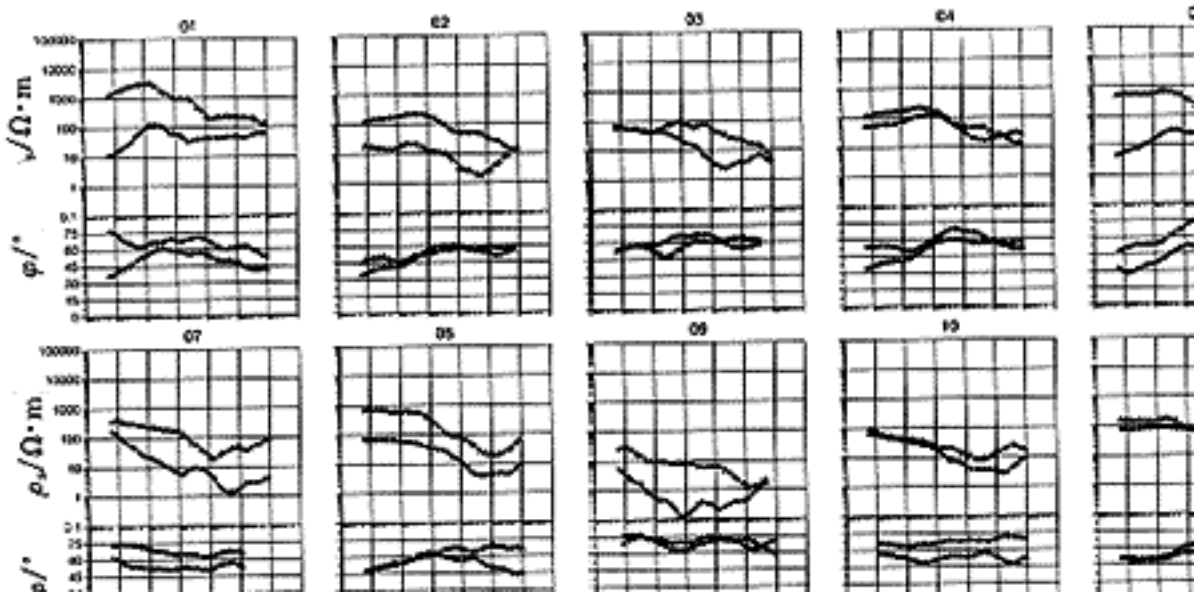
最后进行静态校正。

标定静态偏移校正法的关键在于如何正确地确定视电阻率曲线的首支应该到达的正确位置。有2种方法可以确定一个测点视电阻率曲线首支的正确位置：其一是通过岩石电性参数测量结果获得工区内各个地层的电阻率，依据测定所在位置的表层或浅层地层可得到首支的正确位置；其二是在没有岩石测试资料的情况下，通过分析判断出不受或少受静态偏移影响并且资料质量较好的测点，通过统计各个出露地层上测点的视电阻率曲线首支，获得各地层的电阻率。通常情况下，一个工区在进行电法勘探的同时，总是要进行岩石电性参数测量，所以在绝大多数情况下可用第一种方法。

若要取得较好的效果，要求资料处理解释人员有一定的经验。比如，平移时要充分结合地面地质资料进行，做到恰如其分，因为视电阻率曲线的首支并非一条水平直线，表层地层较薄时要考虑第二层地层电阻率的大小。正是这些因素，使标定静态偏移校正法与传统意义上的曲线平移校正法有本质的区别。传统的平移是通过计算来实现的，计算对于某些测点有效，对有些测点反而越校越糟；而通过可视化人机交互方式，可以把资料处理解释人员已掌握的信息融合进去，增大了信息量，从而减少了不确定性，提高了校正的效果。

### 3 静态偏移标定校正的应用效果

从南方某工区40多条测线中随机抽出一条，共13个测点，分别利用标定校正法和目前进行静态偏移校正比较理想的自适应空间域低通滤波法进行处理，并加以比较(图2、图3)。



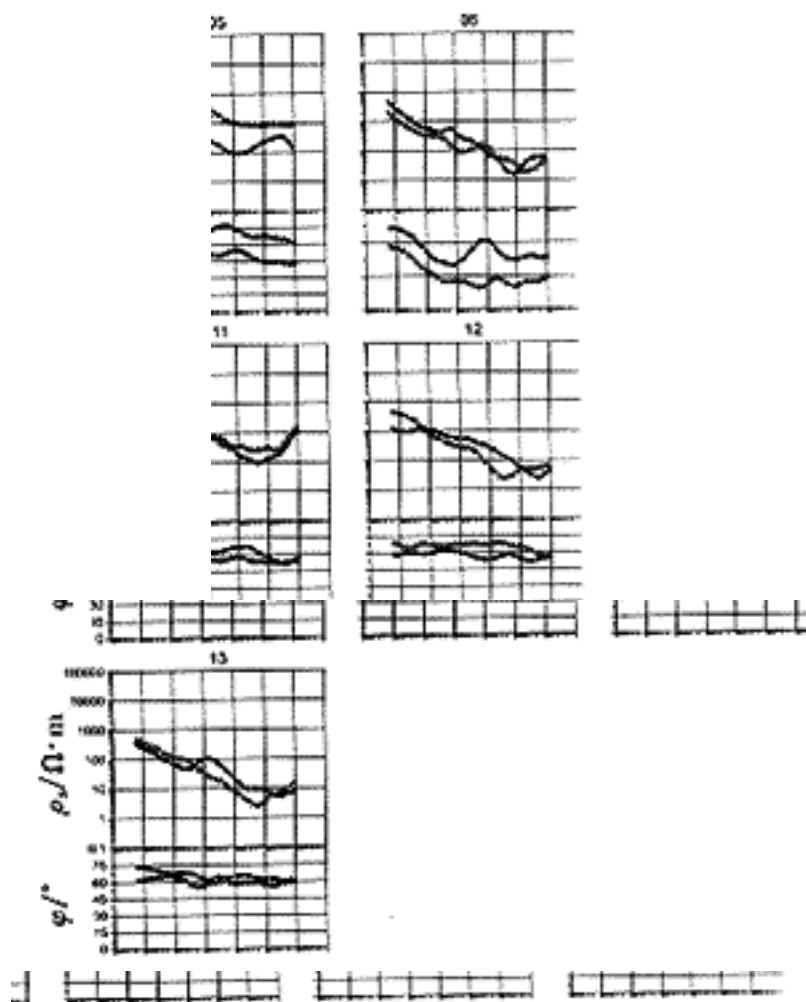
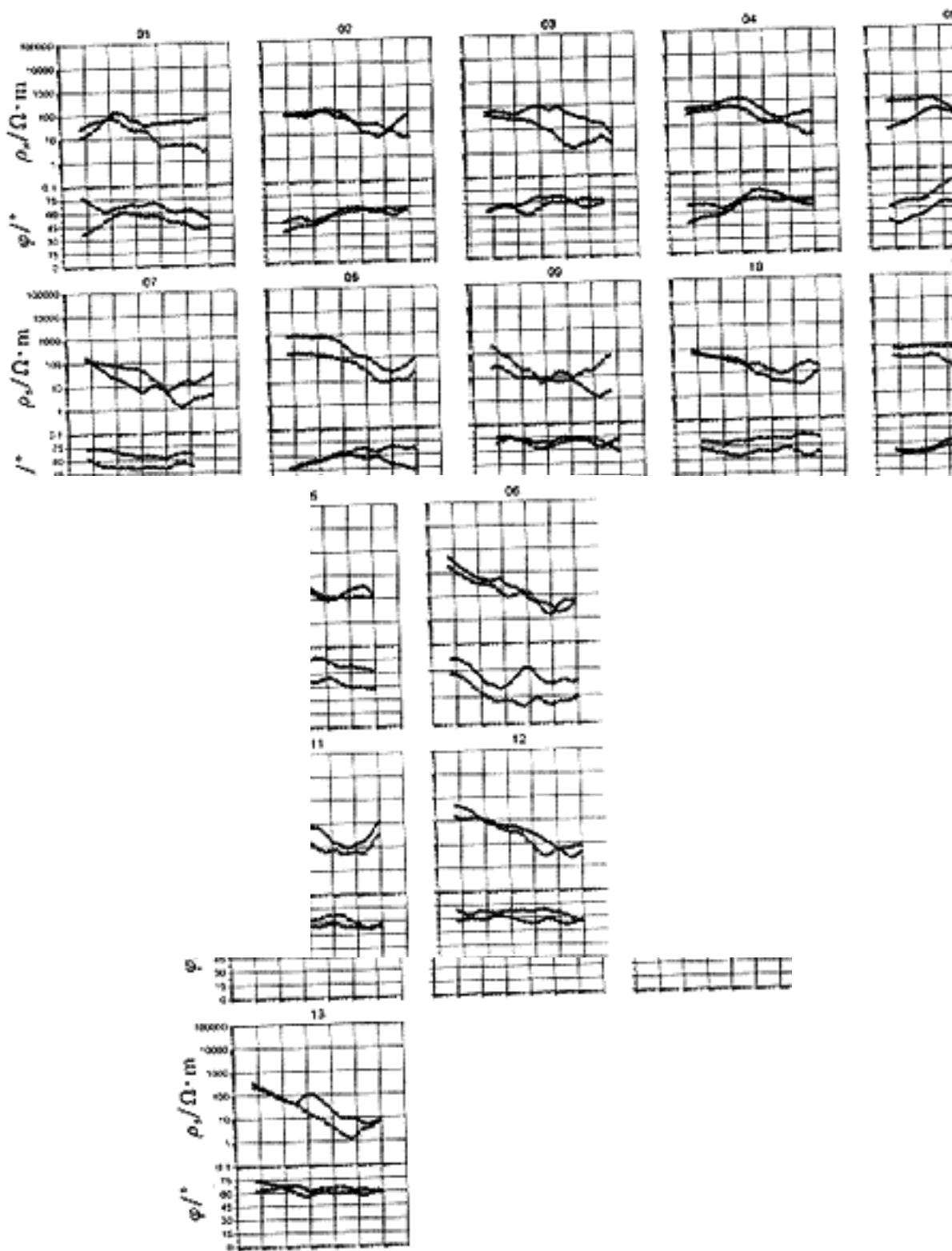


图2 未经校正的原始曲线







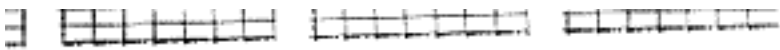


图3 标定校正方法处理后的曲线

该区出露地层可分为3个电性层，即志留系、泥盆—二叠系和三叠系。根据岩石电性参数资料，志留系电阻率约为 $70\ \Omega\cdot\text{m}$ 、泥盆—二叠系电阻率约为 $300\ \Omega\cdot\text{m}$ ，三叠系电阻率约为 $420\ \Omega\cdot\text{m}$ 。

测线上各测点出露地层情况是：01，03，04，10，11点为志留系；02，05，07点为泥盆—二叠系；其它测点为三叠系。

图4、图5分别是用2种方法处理后的反演剖面。从图5中可明显看出：5号点到7号点之间以及8号点到11号点之间有2个向斜，另外，在 $2\sim4\text{ km}$ 的深度范围内存在1个低阻层，这些均与实际情况吻合较好。而图4所反应的则与实际情况相差很大，说明利用地表电阻率标定法进行静态校正的效果较好。

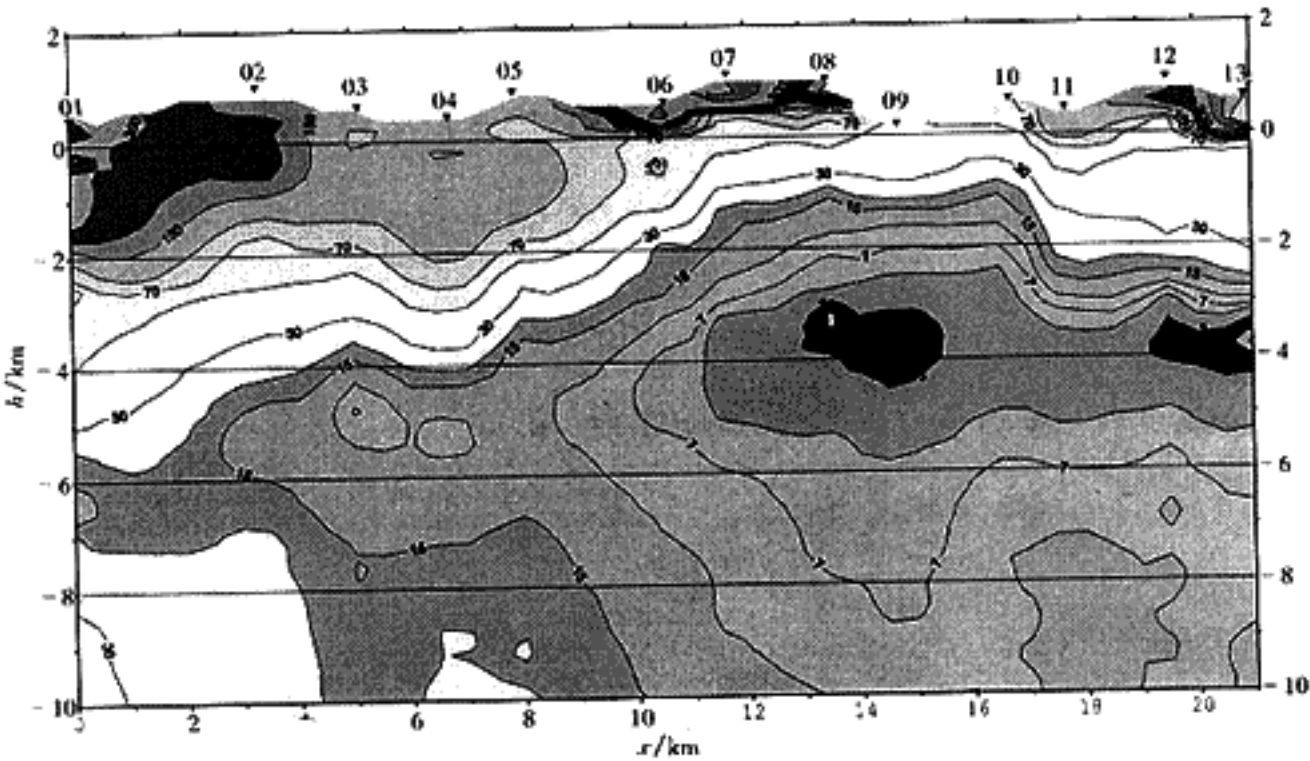


图4 空间域自适应低通滤波处理后的反演剖面

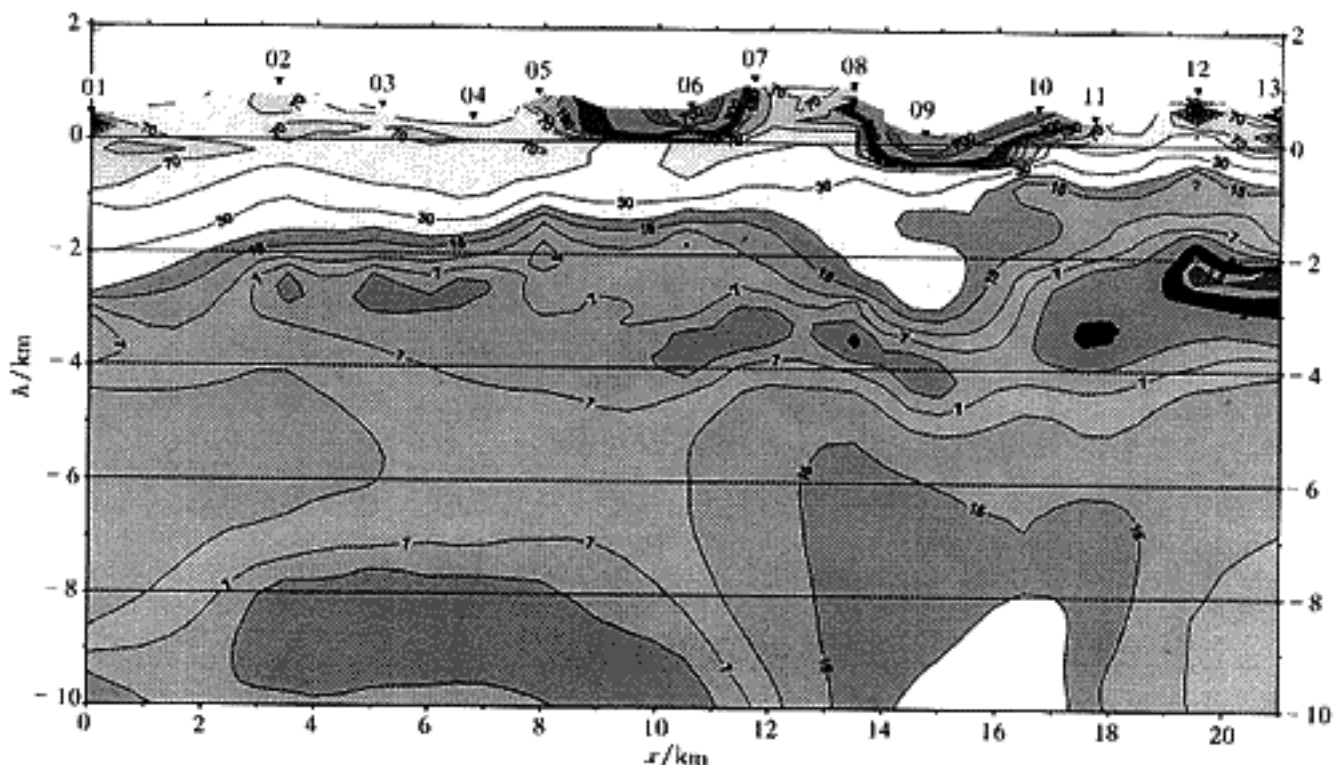


图5 标定校正方法处理后的反演剖面

#### 4 结论

依据静态偏移的规律, 提出了大地电磁静态偏移的标定校正法, 其校正效果颇佳。静态偏移的规律是在双对数坐标系中, 视电阻率曲线沿纵轴发生上下位移, 位移的幅度不随频率而改变。利用岩性测试的电性参数和测点所在位置的表层或浅层地层去标定视电阻率曲线首支的正确位置, 进而压制静态偏移。利用Delphi软件开发环境实现了静态偏移的标定校正算法, 并对实测资料进行了校正, 处理结果表明该方法能够有效地压制大地电磁静态偏移。

作者简介: 陈清礼, 男, 1990年毕业于中国地质大学(武汉), 硕士学位, 现为中国地质大学(北京)地球物理系博士生, 主要从事教学及科研工作, 参加过国家自然科学基金等多个项目, 主要研究方向为大地电磁测深及瞬变电磁测深, 曾发表多篇论文。

作者单位: 陈清礼 胡文宝 江汉石油学院, 荆州 434102  
李金铭 杨 华 中国地质大学, 北京 100083

#### 参考文献

- 1 王家映. 关于大地电磁的静校正问题. 地质科技情报, 1992, 11(1): 69~76
- 2 Bostick F X. Electromagnetic array profiling (EMAP). In: 56th Ann Mtg Soc Expl Geophys Expanded Abstracts, 1986, 60~

- 3 罗志琼.用电磁阵列剖面法压制MT静态效应影响的研究.地球科学, 1990, 15(增刊): 13~22
- 4 Larsen J C. Removal of local surface conductivity effects from low frequency mantle response curves. Acta Geodaet, Geophys. et Mantalist. Acad. Sci. Hung, 1997, 12: 183~186
- 5 Andrieux P, Wightman W E. The so-called static corrections in magnetotelluric measurements. In: 54th Ann Mtg Soc Expl Geophys Expanded Abstracts, 1984, 43~44
- 6 Sternberg B K, Washburne J C, Pellerin L. Correction for the static shift in magnetotelluric using transient electromagnetic sounding. Geophysics, 1998, 53: 1459~1468
- 7 Jones A G. Static-Shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. Geophysics, 1988, 53: 967~978
- 8 Zonge L, Hughes L J. Controlled Source Audio-frequency Magnetotellurics submitted for inclusion in Nabighian. In: M N, E M Methods in Applied Geophysics. SEG, 1998
- 9 王家映. 电磁阵列剖面法的基本原理. 地球科学, 1990, 15(增刊): 1~11

1998年11月19日收稿。