# 用 Occam 法及广义逆法对兰州地区 MT 资料的 一维反演解释

杨长福<sup>1</sup>,林长佑<sup>2</sup>,陈军营<sup>2</sup>,王书明<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:分别用 Oceam 法和广义 逆法 对兰 州地区 MT 资 料进行了 一维 反演,两种 反演结 果可相互印证,使得解释结果 更为可靠,并和相应资料的二维反演结果相一致. 关键词:大地电磁; Oceam, 广义逆;反演;兰州 中图分类号: P631.3<sup>+</sup>25 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2002)04-0289-06

0 引言

对 MT 实测资料的完善解释目前还有很多困难,尤其对三维(3-D)资料仍未研究出实用的 反演程序.但是如何由观测资料进行一维反演却有大量的文献报导<sup>[1~4]</sup>.另外一维反演方法也 非常成熟,因此仍是 MT 解释的一种重要手段.

假设电性介质为二维时, TM 极化观测数据比 TE 极化观测数据更少地受到一般三维体影响<sup>[3]</sup>.由于电性分界面上的电荷分布, 引起 y 向(垂直走向)电场分量 E<sub>y</sub> 在界面附近甚至很短的距离内发生很大跃变<sup>[6]</sup>, 界面电荷要求穿过边界的电流连续.由于 Helmhotz 方程局部变为 Poisson 方程, 二维或三维结构周围边界电荷的影响在长周期内仍然很强, 但和周期无关, 结果 引起阻抗的大致成倍数关系的静位移.所以深部电阻率变化只在长周期影响 MT 观测数据, 而 近表电荷则影响短周期到任意长周期的观测结果.此时需反复测量 MT 响应, 尤其是电场分量, 甚至需要沿剖面作连续电场测量<sup>7</sup>.所幸只有阻抗或视电阻率发生这种畸变, 且和周期无关, 故相位不发生畸变.因此小尺度浅部非均匀体只在短周期内影响相位, 而更大更深的异常 体则在更大的周期范围内影响相位.这就使得识别深部目标体容易起来.但要得到深度和电阻 率值, 还得结合数字模拟过程.有利的是, TM 响应函数对偏离测线剖面的电性结构的变化(3-D 效应)不是很敏感, 其反演解受 3-D 异常体影响很少<sup>[5.8]</sup>.

对纯二维结构,由于极化电场平行于走向,不受边界电荷的影响,所以相对大尺度的深部 异常体对 TE 响应函数的影响可能出现在更大的周期范围内,而无近表非均匀体引起的静态 畸变.在此意义下的二维 TE 响应很像一维响应,常用来构置一维电性模型.然而 TE 响应对走 向方向的异常体(三维影响)很敏感,不仅在有近表非均匀体的情况下,而且也可能在出现深部 异常体时存在.即偏离纯二维时界面电荷会导致 TE 视电阻率的畸变,不能用纯二维的 TE

收稿日期: 2002-06-11

作者简介:杨长福(1964-),男(汉族),江西余江人,副研究员,现在南京大学地科系作博士后,主要从事地球物理正反 演研究.

模拟来解释<sup>19</sup>.尽管如此,其阻抗相位可用于检查深部目标体的证据.

复杂环境下(通常为 3-D)的 MT 解释是很困难的.在缺乏有效三维反演方法的情况下,用一维或二维模型来简化解释过程不失为一种有效途径.二维 TE 极化的一维解释可得到较为 准确的结构,但 TM 极化的一维解释则不能得到合理的结果.Wannamaker et al.<sup>[58:10]</sup> 和 Park et al.<sup>[11]</sup> 指出,在 3-D 结构中,TE 极化响应函数也受到畸变,因此任何一种极化方式的 1-D 解释都 将产生严重误差.此时,远离 3-D 体的 TM 极化曲线的 2-D 解释可得到较准确的结构,但问题是 3-D 环境下 TE 极化和 TM 极化根本就不能解耦出来而无法区分.因此 2-D 解释只在某些特定 的条件下有效,只有 3-D 模拟才是真正有效的工具.

本文在对兰州地区的 MT 资料进行定性分析、静位移校正、确定出各条剖面的构造走向等处理之后,根据上述分析和各测点资料情况,挑选出各测点用于一维反演的 TE 或 TM 曲线<sup>[12]</sup>,然后分别用 Occam 反演方法<sup>[13]</sup> 和广义逆反演法进行一维反演.

## 1 兰州邻近地区 MT 测线布设

本文用于研究的兰州地区 19 个 MT 测点分布如图 1 所示.观测仪器为美国 EMI 公司的大地电磁观测系统 MT-1 观测仪;电场观测采用"L"形布极方式,极距 100 m;实行 5 分量(两个电分量,三个磁分量)观测;观测频率为0.000 1~0.003 Hz.从全部资料看,在高频段某些测点出现散乱,如东乡龙泉、临洮尧甸、永靖巴米等测点<sup>[12]</sup>,可能是人为工业干扰造成的,在低频少数几个频点出现较严重的分散,主要是由于最后几个频点的资料是通过分样得到而造成的.总的来说,除临洮尧甸、永靖巴米两测点外,其它测点的视电阻率和相位曲线还是很光滑的,尤其是在中间频段(0.001~10 Hz),资料质量较好.以兰州为中心,大致可以构成 4 个剖面.由于各剖面上的测点并非严格在一条直线上,本文将其至测线的垂直投影位置定为剖面上该测点的位置.

剖面 I 由测点 52、21、53 和 54 共 4 个测点 组成,全长约 74 km,近东西走向;剖面 II 由测 点 15、53、24、51、60、59、58 和 29 共 8 个测点组 成,全长约 190 km,近南北走向;剖面 III由测点 54、25、55、22、56、57 和 27 共 7 个测点组成,全 长约 160 km,近南北走向;剖面 IV由测点 29、 28、27 和 26 共 4 个测点组成,全长约 88 km,近 东西走向.

## 2 一维反演及其结果

众所周知,有限观测数据的 MT 反演是非 唯一的,存在无限个能拟合数据的模型.但追 求单一模型是目标.Constable et al.<sup>[3]</sup>认为这 个模型应尽可能地简单或光滑.Smith 和 Booker<sup>[14]</sup>也指出过拟合会造成伪结构,应进行 最小结构的反演.为了获得光滑的反演模型, Constable et al. <sup>2</sup> 义了粗糙度(roughness)的概 念,并要求反演模型满足其为最小的条件,粗



图 1 兰州地区 MT 测点分布. Fig. 1 The distribution of MT stations in Larzhou region.

糙度定义为

其中: m 为模型参数,即地层电阻率;z 为深度.尽管式(1)需要光滑变化的函数作为模型,可采 用一分段为常数层的模型,使计算机的正演计算更为容易,令

 $m(z) = m_i, \ z_{i-1} < z \leq z_i \qquad i = 1, 2, ..., N$  (2)

其中: z<sub>0</sub> = 0; N 一般取 20 ~ 100之间, 使 z<sub>i-1</sub> /z<sub>i</sub> 取某一比1小的常数;并取均匀半空间结束模型. 采用差分可认为

$$R = \sum_{i=2}^{N} (m_i - m_{i-1})^2$$
(3a)

$$R = \sum_{i=2}^{N-1} (m_{i+1} - 2m_i + m_{i-1})^2$$
(3b)

或

一维反问题就是使目标函数

$$\Phi = R + X^{2} = R + \sum_{j=1}^{M} [d_{j} - F_{j}(m)]^{2} / \sigma_{j}$$
(4)

取极小.其中: *d* 为观测数据; *M* 为观测频点个数; *F*(*m*)表示由模型计算的观测响应; σ<sub>i</sub> 是第*j* 个数据的统计独立的误差; *X*<sup>2</sup> 为模型响应对观测数据的拟合差.

Occam 反演就是寻找使粗糙度 R 尽可能小而拟合差 X<sup>2</sup> 取可接受值的模型.由于 MT 观测数据由有限个不精确的数据组成,反演问题就存在无限个解.如紧密地拟合观测数据或理论数据,就可能导致最大粗糙度的模型结构;然而通过降低不拟合度,哪怕是很小数量,都可能得到极光滑的模型.更不可能导致数据的过拟合而造成人为分层所加诸模型的假性不连续层,而保留所有可能解的共同特征,从而反映 MT 法真正解决问题的能力.

Occam 反演法还可提供进一步用其它反演法所需要的初始猜测模型和重要依据.为了得到更简单的一维层状模型,作者对Occam 反演模型进行了分析并作了人工分层,并用修改后的 广义逆反演法<sup>[15]</sup>进行了一维层状模型反演,以获得较少的大地分层参数.图 2 是兰州地区天 祝松山(测点 15)、张家大坪(测点 51)两测点的一维 Occam 反演法和一维广义逆反演法的反演 结果模型及观测视电阻率和相位的拟合图,其余各测点的反演模型图可参见文献[16].

对兰州地区所有 MT 测点进行一维 Occan 和一维广义逆反演之后,可得到有关该区电性结构的一些结论.图 3 是由这种反演结果而绘成的 4 条电阻率剖面图.

### 2.1 剖面 [(图 3a)

显示较好的电性分层.地表附近存在一数百米厚的低阻带,从测点21向东至测点54逐渐 变薄,并有尖灭趋势;而测点52附近地表则出现一中等电阻率表层.底界面埋深约20~30km 左右的高阻带下存在一厚约20~30km的低阻带对应下地壳内高导层,从21号点向东至54号 测点逐渐变薄,顶面埋深有西浅东深之趋势;而52号测点的该低阻带在一维和二维TM反演 中似无明显显示(二维反演结果详见文献[16]),但二维反演结果却显示这一低阻带的存在.且 其以下的分层电阻率反差较小,取一中等电阻率值.

#### 2.2 剖面 II(图 3b)

在其地表附近存在一数百米及至 1~2 km 厚的低阻带,且由北向南有逐渐变薄之趋势.上 地壳内高阻层之下的下地壳内出现间断的低阻带.二维 TE 反演结果显示<sup>119</sup>,以 60 和 59 号测 点为界,其北端 4 个测点该低阻带顶面埋深 20~30 km,由北向南逐渐变厚并迅速尖灭于 60 测 点之下;其南端 58 和 29 两测点 顶面约40 km 左右,厚度比北面 大.但二维 TM 反演结果显示北 端该低阻带从北向南有渐薄之 势;而南端的顶面埋深和厚度与 北端相比无太大差异,这和二维 TE 反演结果有所差异.另外北 面的一维反演结果看所差异.另外北 面的一维反演结果有些出入. 但本测线除测点 60 外,在大约 30~50 km 之间存在一个下部 地壳低阻层是没有疑问的.

#### 2.3 剖面 III(图 3c)

在其地表附近存在数百米 到一公里左右的低阻带,并有从 北向南逐渐变厚的趋势,其中北 面三个测点 54、25 和 55 约 100 ~300 m 厚, 南面四个测点 22、 56、57和26约为700~1000m 厚.一、二维反演结果均显示,上 地壳内高阻层之下的下地壳内 出现间断的低阻带.以56号测 点为界,其北端4个测点该低阻 带顶面埋深 30 km 左右, 厚度由 北向南逐渐变厚并迅速尖灭于 56 测点之下; 而南面 57 和 26 两 测点之下比北边要厚,且二维反 演结果显示其南端该低阻带及 其以下表现为较小差异的电性 特征,上地幔第一个高导层的顶 面埋深约为 100~120 km 左右, 其中最北端的测点 15 较深,由 北向南变浅,厚约20~30 km:但 二维 TE 反演结果对该低阻带 (除南端两测点 57 和 26 外)显 示不太明显.

#### 2.4 剖面 IV(图 3d)

一维反演和二维 TM 反演 得到较一致的结果并显示出很 好的电性分层.整条剖面在地表





(左图中的实线为 Occam 法反演结果, 右图中由"○"所连虚线 为其所计算的响应曲线; 左图中虚线为广义逆法反演结果, 右图中由"×"所连较光滑连线为其相应的响应曲线, 由"Δ"所连折线为观测响应曲线.)

图 2 天祝松山、张家大坪两测点一维反演结果

Fig. 2 The one-dimensional inversion results at Songshan station and Zhangjiadaping station. Tianzhu county.



- Ingham M. R., Hutton V. R. S. Crustal and upper mantle electrical conductivity structure in southern Scotland
   J. Geophys. J. R. astr. Soc., 1982, 69: 579-594.
- [2] Lilley F. E. M. Magnetotelluric analysisusing Mohrcircles
   [J] Geophysics, 1993 58: 1498-1506.
- [3] Ingham M...Magnetotelluric soundings across the Southern Alps orogen, South Island of New Zeland; data presentation
- 图3 兰州地区一维MT反演结果剖面图 (数值为电阻率值;实线为电性 分层界面;虚线为推测界面.)
  - Fig. 3 The resistivity profiles based on the inversion results from one-dimensional MT data in Lanzhou region.

and preliminary interpretation [J]. Phys. Earth Planet Inter., 1996, 94: 253-260.

- [4] Parker R. L., Booker J. R. Optimal onedimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements[J]. Phys. Earth Planet Int., 1996, 98: 269-282.
- [5] Wannamaker P. E., et al. Magnetotelluric observations across the Juan de Fuca subduction system in the EMSLAB project [J]. J. G. R., 1989, 94: 14111-14125.
- [6] Price A.T.. The theory of geomagnetic induction [J]. Phys. Earth Planet Inter., 1973, 7:227-233.
- [7] Torres—verdin C., Bostic Jr, F. X. Principles of spatial surface electric field filting in magnetotelluric: Electromagnetic Array Profiling (EMAP) [J]. Geophysics, 1992, 97: 603—622.
- [8] Wannamaker, et al. Resistivity cross section through the Juan de Fuca subduction systemin the EMSLAB project[J]. J. G. R., 1989
   (b), 94: 14127-14144.
- [9] Wannamaker P. E., et al. Electromagnetic modeling of three-dimensional bodies using integral equations J. Geophysics, 1984, 49: 60-74.
- [10] Wannamaker P. E., et al. Magnetotelluric responses of three-dimensional bodies in layered earths [J]. Geophysics, 1984, 49: 1517-1533.
- [13] Constable S. C., et al. Occam's inversion; a practical gorithm for generating smooth models from EM sounding data[ J]. Geophysics, 1987, 52: 289-300.
- [14] Smith J.T., Booker J. R. Magnetotelluric inversion for minimum structure J. Geophysics, 1988, 53: 1565-1576.

[ 15]	,	•		[J].	, 1994, <b>16</b> (	4): 10–18.
[16]	,	,	,	[J].	, 2002	•

## ONE-DIMENSIONAL INVERSION FOR THE MAGNETOTELLURIC DATA IN LANZHOU REGION BY OCCAM'S AND GENERAL INVERSE METHODS

YANG Chang-fu<sup>1</sup>, LIN Chang-you<sup>2</sup>, CHEN Jun-ying<sup>2</sup>, WANG Shu-ming<sup>2</sup>

(1. The Earth Science Department of Nanjing University, Nanjing 210093, China;

2. Lanzhou Institute of Seismological, CSB, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The one-dimensional inversions for the MT data in Lanzhou region are respectively conducted by using Occam's and general inverse methods. The two inversion results confirm each other, which make the interpretation more reliable, and the results of the one-dimensional interpretation are consistent with that of the two-dimensional inversion for the same data.

#### Kew words: Magnetotellurics; Occam; General inverse; Inversion; Lanzhou