

大地电磁地震前兆多参量综合分析^{*}

王书明^{1,2}, 林长佑², 陈军营², 扬国栋²

(1. 中国地质大学地球物理系, 湖北武汉 430074,

2. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃兰州 730000)

摘要: 对于大地电磁地震前兆多参数综合分析方法, 充分利用包含于各参数内的信息, 对它们随时间的变化进行综合分析研究有利于更可靠地判断新出现的大地电磁地震前兆. 结合实际资料, 具体论述了 6 个大地电磁响应函数在地震监测中的效能和应用现状.

关键词: 大地电磁; 响应函数; 电阻率

中图分类号: P319 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2002)01-0072-06

0 引言

用于地球电导率结构探测的大地电磁测深(MT)法, 在最小 5 道配置下, 在地表直接观测 MT 场中电场两水平分量 $e_x(t)$ 、 $e_y(t)$ 及磁场两水平分量和一个垂直分量 $h_x(t)$ 、 $h_y(t)$ 和 $h_z(t)$ 的时间序列. 然后利用频谱分析方法获得各电磁场的频谱 $E_x(\omega)$ 、 $E_y(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$ 、 $H_z(\omega)$, 最后在频率域内进行资料处理和解释. 对于某一给定频率, 各电磁场分量间满足如下线性关系(以下各式中忽略变量 ω)

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad (1)$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \quad (2)$$

$$H_z = AH_x + BH_y \quad (3)$$

根据上式可以估算出 6 个仅与地球电导率有关的 ω 的复函数 Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、 Z_{yy} 、 A 、 B , 其中前 4 个总称为阻抗张量, 后 2 个合称为倾子函数^[1]. 这 6 个函数是最基本的 MT 地球响应函数, 根据其性质特征及与地球电导率结构的关系, 可以定义一系列 MT 响应函数, 它们以不同的形态特征和方式, 从不同的侧面反映出地球电导率结构特征. 因为集肤效应作用, 不同频率的电磁场具有不同的穿透深度, 它将带来不同深度岩石电性质的信息. 当作为一种地震前兆, 地球电导率分布发生了某些变化时, 这些响应函数可能发生不同程度的特征变化. 因而充分利用包含于诸多 MT 响应函数内的信息, 对它们随时间的变化进行综合分析研究, 不仅有利于更为可靠地判断所出现的 MT 前兆, 而且对于更为深入地研究该前兆的特征性质, 从而不断提高 MT 地震前兆监测的技术水平和应用效能是很有意义的.

收稿日期: 2001-04-02

^{*} 中国地震局兰州地震研究所论著编号: LC2002012

作者简介: 王书明(1966-), 男(汉族), 陕西铜川人, 在职攻读中国地质大学(武汉)博士学位. 主要从事信号分析与处理, 地球物理资料处理与解释.

1 MT 地震前兆的多参量综合分析方法

在过去的一些理论研究中, 虽曾论述过 MT 前兆参量综合分析方面的问题, 但直到 1994 年, 在 MT 监测实际地震异常分析中, 主要还只是利用了 2 主方向阻抗张量的视电阻率曲线. 对某给定周期 T , 它们被定义为:

$$\rho_{xy} = 0.2 T |Z_{xy}|^2 \quad (4)$$

$$\rho_{yx} = 0.2 T |Z_{yx}|^2 \quad (5)$$

然后人工平滑出一条曲线作为观测曲线. 但使用该方法进行前兆异常的判断不够科学合理. 原因有三: (1) 由于噪声干扰的存在, 仪器的观测精度有限, 资料处理及 MT 响应函数估算过程中误差的传播, 对于观测频带内单个周期所估算的 MT 响应函数值不可能组成一条精确的光滑曲线, 人为的平滑中必然带入某些非客观的因素; (2) 不能直观地判断不同时间所观测的某 MT 响应函数的差异是在观测误差范围内允许的波动, 还是观测值真正随时间的变化. (3) 由于测量方向阻抗向主方向 MT 响应函数换算的误差累加, 特别是通常模值较小的辅阻抗的影响, 使得主方向 MT 响应函数产生了较大的相对误差. 因此, 此后我们在分析 MT 前兆时不再使用主方向 MT 响应函数曲线, 而是带有误差限的测量方向的 MT 响应函数资料, 其图形表述则是观测频带内呈条带状分布、带有误差棒的数十个资料点所组成的响应函数-周期(或频率)图.

某给定周期 2 主阻抗张量的相位被定义为:

$$\Phi_{xy} = \arctan[\text{Im}(Z_{xy}) / \text{Re}(Z_{xy})] \quad (6)$$

$$\Phi_{yx} = \arctan[\text{Im}(Z_{yx}) / \text{Re}(Z_{yx})] \quad (7)$$

它与式(4)、(5)所定义的视电阻率以频散关系, 由下式相互关联, 仅依赖于地球电导率分布:

$$\Phi_{ij}(T_0) = \frac{\pi}{4} - P \int_{-\infty}^{\infty} K[T, T_0, d(\ln T)] d \ln [\rho_{ij}(T)]^{1/2} \quad (8)$$

其中 P 为积分主部, 积分核函数 K 为需求相位值的周期 T_0 , 被积视电阻率周期 T 和采样间隔的函数. 研究表明, 将它们与视电阻率组合进行联合反演, 以获取地球电导率结构具有很好的应用前景^[2]. 对于地球电导率结构而言, 相位具有一些与视电阻率不同的依赖关系特征, 特别是地球电导率分布的某些横向非均匀构造对它们的影响很不相同. 以近年来国内外广泛关注的地表附近局部非均匀性产生的静位移效应为例, 这一畸变效应在很宽的频带内对视电阻率产生了巨大的影响, 但几乎不影响相位资料^[3].

在 MT 测深中二维判别系数—偏离度 S 被定义为:

$$S = |Z_{xx} + Z_{yy}| / |Z_{xy} - Z_{yx}| \quad (9)$$

为一正实数, 它描述了地球电导率结构维性质特征. 对于理想的一、二维介质取零值, 该值越大则地电结构偏离二维(向三维)越大. 如果作为一种地震前兆, 地球电导率分布发生了某种与维性质相关联的变化, 则 S 可以成为前兆异常的一个判别因子. 对于 1976 年松潘、平武大震, 我们就曾观测到一些测点大震前后这一 MT 响应函数随时间的变化^[4].

由本文式(3)所确定的倾子函数, 反映了地表一点观测到的 MT 场 3 个磁场分量间的关系. 当入射的 MT 场可以看作均匀平面波, 地球为一维导电介质时, 将不存在磁场的垂直分量; 而当介质电导率结构偏离一维时, 则可感生出磁场垂直分量. 因此早先的一些地磁研究中又把倾子函数称为感应向量函数. 地球电导率结构发生变化时亦当可能导致倾子函数的变化, 其模值定义为:

$$T = (|A|^2 + |B|^2)^{1/2} \quad (10)$$

这一响应函数仅包含磁场的测量,较少受到表面局部非均匀性所产生静位移效应(起因于非均匀体表面静电荷积累)的影响.但是,当地球电导率结构与一维偏离不是很大时,磁场垂直分量的量值很小,倾子函数的模值也很小,所估算的倾子函数的误差也很大.在MT法中倾子函数的实际应用尚待研究,而将其应用于前兆监测亦属一种探索.

MT测深法是一种以趋肤效应为物理基础的体积勘探方法,地下有效勘探深度上方任何一深度范围内电导率分布的变化将会引起某一观测频带内MT响应函数的变化.但是,由于存在观测噪声和干扰,也会使某些MT响应函数在个别频点上发生离散和跳动.在排除了由于测量装置、仪器、资料处理方法及其它干扰因素影响之后,仅将连续3个频点以上的一个频段内MT响应函数同方向的系统性变化,视为与地震前兆相关的异常变化.

在现有MT监测很宽的观测频带范围内(MT-1仪器观测频带达到6.5个数量级),某些MT响应函数幅值可能达到数个量级.对比变化分析研究中绝对变化没有很大的实际意义,因此,在定量研究其变化时以使用相对变化为宜.对某一给定或充分相近的频点,某MT响应函数2次观测值 F_1 和 F_2 的相对变化值定义为: $2|F_1 - F_2| / (|F_1| + |F_2|)$;将某频点处MT响应函数的2次观测的相对误差定义为: $(|\Delta F_1 / F_1| + |\Delta F_2 / F_2|) / 2$,其中 ΔF_1 和 ΔF_2 分别为观测误差.将异常频带范围内MT响应函数的相对变化的平均值,以及其相对变化值与相对误差之比,作为异常的一种定量判据.

2 大地电磁前兆多参量综合分析方法的应用

在1995年度MT监测的趋势分析判断中,我们以2个测量方向主阻抗视电阻率为主、辅以相应的相位资料,肯定了山丹霍城测点1994年11月和1995年11月2次观测MT响应函数变化所反映出的前兆异常,而对同期在临泽梨园堡测点所观测到的两视电阻率变化持保留态度.根据当时所掌握的资料,山丹霍城测点两视电阻率曲线,在约20s以前的高频部分,1995年11月观测资料相对于1994年11月的观测结果有明显的变化(图1),而2次观测的相位资料在同一频段内也显示出了明显的系统性变化(图2).因而所观测到的这4种MT响应函数的同步变化,可能确实与该测点邻近地下电导率分布的某种变化有关.临泽梨园堡测点1995年11月观测的 ρ_{xy} 视电阻率资料,在1~20s频段范围内,较1994年11月观测值有系统性下降变化, ρ_{yx} 整个观测频段范围内,则发生了明显的近整体平移下降变化(图3);为了判定两视电阻率的变化是否与地球较深处电导率分布变化有关,我们利用了2次观测的相位资料(图4).显然,2次观测的相位资料在观测误差范围内基本一致,并未出现明显的系统性变化.以后两年地震活动证实了我们分析判断的正确性,在邻近山丹霍城测点地区发生了多次中强地震,而邻近临泽梨园堡测点的祁连山中段西部地区并未发生4级以上中强震,测点位置及地震分布见图5.

应用上述综合分析方法于1996年和政一渭源一线4个测点观测资料,发现其两视电阻率和相位

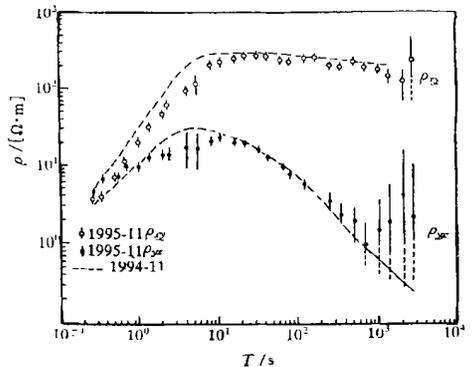


图1 山丹霍城2个测量方向电阻率对比

Fig. 1 The contrast of apparent resistivities between two measurement direction at Huocheng, Shandan.

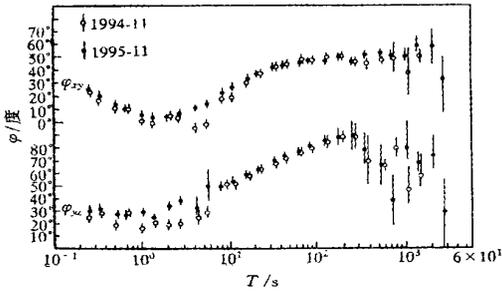


图 2 山丹霍城两测量方向相位对比

Fig. 2 The comparison of phase between two measurement direction at Huocheng, Shandan.

资料在观测误差内都与 1991 年观测结果一致,因而判断该区近一年内无强震发生的可能,事实上该邻近地区内确无中强以上地震发生;由于兰州以北 4 个测点都出现了主要 MT 响应函数的不同程度的系统变化,提出了对该区加强监测的意见,而在其后一段时间内该区有频繁的中强地震活动。

综合分析兰州以北地区 4 个测点 1997 年的观测结果,由于仅个别测点的个别 MT 响应函数发生变化,从而推测该区近一年内发生强震的可能性不大,在其后的 1~2 年内该区邻近地区确处于一个中强活动的一个相对低潮期。而在兰州以

南之和政—渭源一线 4 个测点,则观测到了同时的两视电阻率的系统变化,认为相对来讲南区比北区应更加注意,后面我们可以看到这些异常可能反映了 1998 年邻近测区的西秦岭构造带内的一系列中强地震活动。

表 1 给出了兰州邻近地区 8 个测点在 1998 年 4 月和 1997 年 9 月 2 次观测的 6 个 MT 响应函数、相对变化值及其与相对误差比的取值范围。其中,考虑到仪器观测精度和观测误差等方面的因素,对于相对变化取了 2 个限值 0.05 和 0.1,对于该量与相对误差之比取了一个限值 3。即如果某 MT 响应函数相对变化小于 0.05,则认为该量并未出现前兆异常意义的系统性变化;如果相对变化大于 0.1,但相对变化与相对误差之比小于 3,则可认为该变化在误差范围内无法分辨。表中 ρ_{xc} 和 ρ_{xr} 、 P_{xc} 和 P_{xr} 、 ρ_{yc} 和 ρ_{yr} 、 P_{yc} 和 P_{yr} 、 S_c 和 S_r 、 T_c 和 T_r 分别为: ρ_{xy} 的相对变化和与其相对误差之比、 φ_{xy} 的相对变化和与其相对误差之比、 ρ_{yx} 的相对变化和与其相对误差之比、 φ_{yx} 的相对

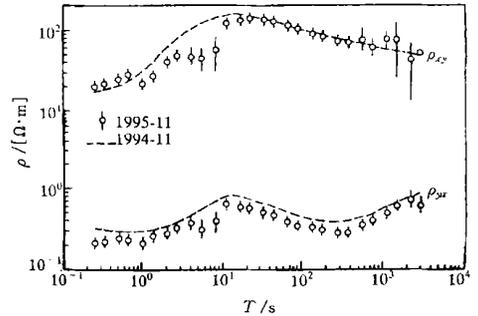


图 3 临泽梨园堡两测量方向视电阻率对比

Fig. 3 The contrast of apparent resistivities between two measurement direction at Linyuanbao, Linze.

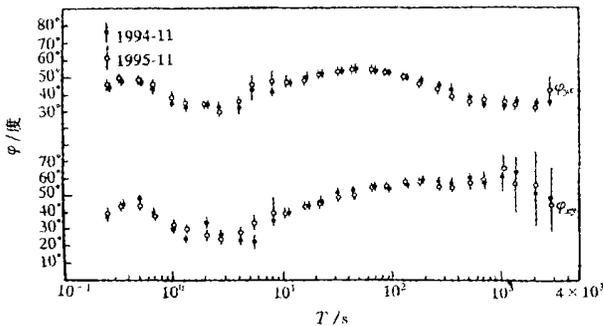


图 4 临泽梨园堡两测量方向相位对比

Fig. 4 The contrast of phase between two measurement direction at Linyuanbao, Linze.

变化和与其相对误差之比、 S 的相对变化和与其相对误差之比、 T 的相对变化和与其相对误差之比。

由表 1 所列结果利用上述分析方法,首先可以排除其中测点 22、15、29、26 存在异常的可能性。而其余位于兰州以北测区的 2 个测点 21、24 的异常仅出现在高频首端几个频点(表列值是对有系统变化一个频段的统计),主要受地表附近噪声干扰的影响,不应该与该测区邻近的中强地震有关。而位于兰州以南的测点 27、28 所出现的异常确实存在,

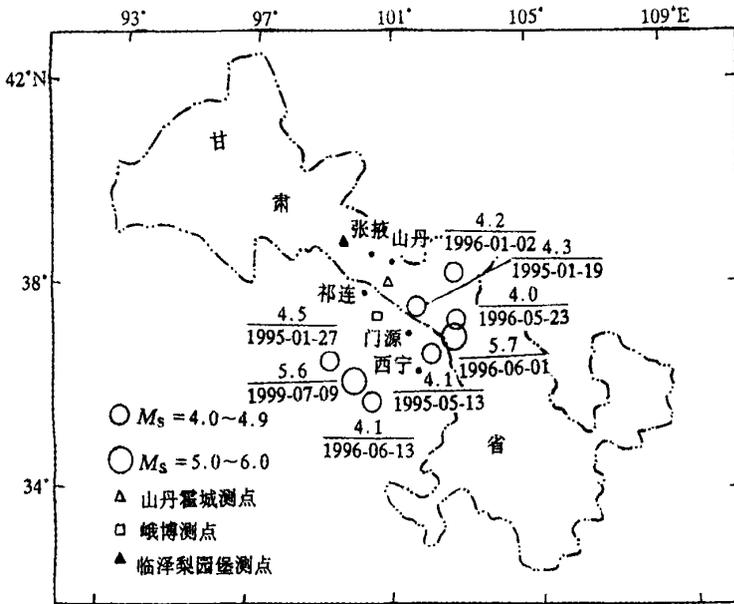


图 5 测点位置及地震分布

Fig. 5 The locations of observations and earthquake distribution.

但并非 6 级以上强震之前兆. 事实上, 它对应了 4 个月后发生在该测区的中强地震活动, 其中一 4 级地震距测点 28 和 27 分别为 26 km 和 51 km. 1997 年 9 月~1998 年 4 月所观测到的测点 27-28(渭源-和政一线)的异常反映了邻近测点的西秦岭构造带内的一次中强地震活动高潮. 这一异常到 1999 年的再次观测时已基本恢复正常.

表 1 1998 年 4 月和 1997 年 9 月 MT 响应函数相对变化和相对误差

	ρ_{xc}	ρ_{xr}	P_{xc}	P_{xr}	ρ_{yx}	ρ_{yr}	P_{yc}	P_{yr}	S_c	S_r	T_c	T_r
测点 22	< 0.5	< 3	< 0.05	> 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	> 3	< 0.05	< 3
测点 24	> 0.1	> 3	> 0.1	> 3	> 0.1	> 3	> 0.1	> 3	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3
测点 15	< 0.05	< 3	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	> 0.1	< 3	> 0.1	< 3
测点 21	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	> 0.1	< 3	> 0.1	< 3	< 0.05	< 3
测点 29	< 0.05	> 3	> 0.1	> 3	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3
测点 28	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3	> 0.1	> 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3
测点 27	< 0.05	< 3	> 0.1	> 3	> 0.1	< 3	< 0.05	> 3	< 0.05	< 3	> 0.1	< 3
测点 26	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3	< 0.05	< 3

3 讨论

在 MT 法中已有定义的 MT 响应函数不止上述 6 种.

() ,

MT 监测中的前兆异常判别参量.

MT 响应函数.

MT 前兆的综合判断识别之中,

MT 地震监测效能的参数指标.

[]

- [1] , . [M] . : , 1984. 1—4.
- [2] , . [J] . , 1993, 15(2): 100—110.
- [3] . — MT 畸变校正阻抗量分解方法 [J] . , 1998, 20(4): 1—8.
- [4] . [A] . : [C] . : , 1981. 80—88.

THE MULTIPLE PARAMETERS COMPREHENSIVE ANALYSIS METHOD OF MT EARTHQUAKE PRECURSOR

WANG Shu-ming^{1,2}, LIN Chang-you², CHEN Jun-ying², YANG Guo-dong²
 (1. *University of Geology of China, Wuhan 430074, China;*
 2. *Lanzhou Institute of Seismology, CSB, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: To the multiple parameters comprehensive analysis method of MT earthquake precursor, it is useful to judge reliably latest appearing MT precursor that fully using the information from every parameters, comprehensively studying and analyzing their variation with time. With practical data, the earthquake monitor efficiency and applied present situation on 6 MT response function are discussed.

Key words: Magnetotelluric; Response function; Resistivity