

# 大地电磁法数据的采集及质量分析

赵理芳<sup>1,2</sup>, 吴健生<sup>2</sup>

(1 江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队, 江苏 镇江 212005; 2 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 )

**摘 要:** 由于大地电磁测深法勘探的轻便和有效, 其作为深层构造研究的重要手段越来越受到重视。以 V 5-2000 大地电磁测深仪为例, 阐述了大地电磁数据的野外采集过程和影响 M T 数据质量的一些因素以及提高数据丰富质量的措施。

**关键词:** 大地电磁法; 数据采集; 综述; V 5-2000; 质量分析

**中图分类号:** P631.325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5663(2004)04-0393-04

大地电磁测深法 (Magnetotelluric Sounding), 简称 M T, 是利用天然场源采集数据以获取地下深部信息的勘探方法, 其特征是成本低、工作方便, 不受高阻层屏蔽, 勘探深度大, 对于确定地层深部构造以及在火成岩和碳酸盐覆盖地区作为地震勘探的补充有着重要的意义。

野外数据质量的好坏, 除了一些硬件技术和室内数据处理外, 采集时的条件也是相当重要的。了解布极的一些环节及引起数据误差的可能的起因, 对于野外操作人员和室内处理人员也将会有所帮助。本文将着重叙述野外 M T 数据采集的一些关键技术。

## 1 原理

大地电磁的场源为太阳风引起高空电离层的电流运动以及大气中的放电现象等。大地电磁波在介质中传播遵从麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times H = j + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = \rho \end{cases}$$

$\nabla$  是哈密顿算符;  $E$ 、 $H$  分别表示电场强度和磁场强度;

$D$ 、 $B$  则为电位移矢量和磁感应强度矢量;

$j$  为传导电流;  $t$  为时间;  $\rho$  为电阻率。大地电磁测深所讨论的电磁场频率是极低的, 这时导电介质中位移电流  $\frac{\partial D}{\partial t}$  相对于传导电流  $j = \sigma E$  可以忽略不计 ( $\omega \epsilon \ll \sigma$ ), 同时导电介质内部体电荷密度实际上为零, 于是, 导电介质低频谐变场的麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times E = i\omega \mu H \\ \nabla \times H = j = \sigma E \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = 0 \end{cases}$$

$\sigma$  为电导率;  $\mu$  为磁导率;  $\epsilon$  为介电常数;

由于高空电离层距地面很远, 场源的尺寸又远远大于测区的范围, 且空气和大地相比, 空气可视为绝缘体而地球为良导体, 向地球内部入射的电磁波折射系数很大, 因此, 可认为大地电磁测深是建立在平面波垂直入射到地下介质中的理论之上的。

由水平均匀层状介质中大地电磁响应函数定义的阻抗为:

$$Z(\omega, z) = \frac{E(z)}{H(z)}$$

视电阻率及其相位为:

$$\rho_a(\omega, z) = \frac{|Z(\omega, z)|^2}{\omega \mu_0}$$

$$Q(\omega, z) = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{Im} Z(\omega, z)}{\text{Re} Z(\omega, z)} \right]$$

$Z(\omega, z)$  为阻抗;  $\rho_a(\omega, z)$  为视电阻率;  $Q(\omega, z)$  为相位。

二维情况下,电磁波可以分解为两组互相独立的线性极化场,即  $E$  极化和  $H$  极化,或者称为两组线性偏振波,即  $E$  偏振和  $H$  偏振,平面电磁波亦称 TEM 波,因此,  $E$  偏振波又称为 TE 波,  $H$  偏振波又称为 TM 波。由于电磁波沿构造主轴方向极化时,

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = [Z] \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

所以经过坐标旋转,可以求得主轴方位上的阻抗  $Z_{TE}$  和  $Z_{TM}$ ,进而求得相应的  $\rho_{TE}$ 、 $\rho_{TM}$  和  $\varphi_{TE}$ 、 $\varphi_{TM}$ 。一般来讲,在高阻隆起地区,应用  $\rho_{TM}$  曲线反演,在凹陷地区用  $\rho_{TE}$  曲线反演; $\rho_{TM}$  曲线能更好地反映浅层电性不均匀,而  $\rho_{TE}$  曲线则能更好地反映深层的电性特征。

## 2 数据的采集

目前,在 MT 石油勘探领域中,常用的仪器是加拿大凤凰公司生产的 V 5-2000 型大地电磁测深仪。它是较早引入我国带有 GPS (Global Position System) 时钟和坐标系统的大地电磁测深仪器。

其布极示意图见图 1。

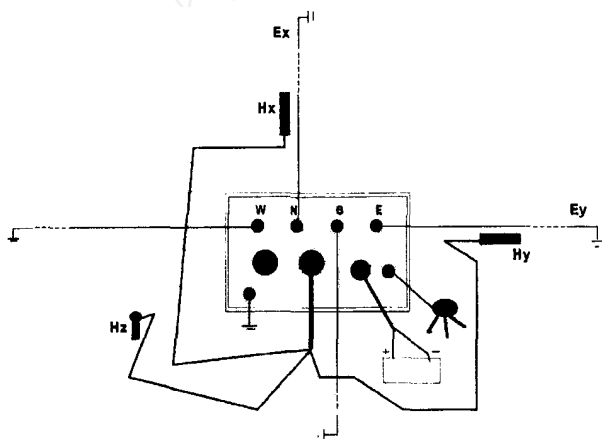


图 1 V 5-2000 布极示意图

Fig 1 Sketch of laying pole of V 5-2000

V 5-2000 其特点是时间域数据采集,通过 GPS 时钟系统控制采集时间。数据采集通常为 5 道,即  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$ ,  $x$ 、 $y$  为水平方向,  $x$  取北为正,  $y$  取东为正,  $z$  取垂直向下为正。当然,有时也取测线方向为  $x$  方向。仪器放置时,注意前面是  $x$  正方向,这样有利接线的正确,同时也可减少信号线之间的互相感应干扰。

布极应尽量选在干扰少、地形较平坦和较开阔的地方,电极、探头不要布在树下,线不能悬空,如需悬空时可把线绷紧(以免晃动时切割磁力线,产生感应电流,即所谓的“风动干扰”)。电极布设时应注意:(1)不可布在陡坎边上,以免半空间效应造成接地电阻的增大,此时可选择收缩极距或者布在陡坎下;(2)接地电阻过大时,可适当加些盐水;(3)为了保持电极的稳定,电极应避免暴晒,同时电极坑也不应积水。磁探头的布设则应水平、深埋,旁边不要有铁器之类高磁性的东西。

采集之前要用万用表测量 S、N 和 W、E 的电极接线,以了解接地情况和当地的人文干扰。先测量接地电阻,接地电阻小于  $1k\Omega$  为佳,大于  $2k\Omega$  时,可采取浇灌盐水、深挖电极坑、清除石块和虚土、更换地点等。当其中一个电阻比其它电阻都大很多时,有可能需更换电极或检查线是否快断了等。

交流 AC 反映的是当地人文干扰的大小,通过测量 AC 可了解周围的环境和更好的设置增益级别,增益在放大信号的同时会放大噪声,增益级别一般可设为中,如果采集时间较长,增益级别一般设为低,这样可避免饱和和数据过多而影响测量。直流 DC 反映的是电极的自电,如果其中一个自电比其它自电大很多时,需检查电极是否有问题或者布极环境不妥。地形常常会造成电极自电的增大,仪器虽然有自电补偿的硬件设计,但并不能完全消除过大的自电电位的影响。自电电位的存在相当于把一较恒定的假信号加在真实的电信号之上,有可能增加或者减少电信号的幅度,同时自电的存在会使接地条件在采集过程中发生变化,这些都会影响采集的质量。一般说来,DC 小于  $50mV$  是比较理想的。

MT 数据采集前,还应设置耦合为 DC 耦合,滤波频率在国内大都设为  $50Hz$ ,这是因为国内的高压线产生的电磁场频率大都在  $50Hz$  左右。

V 5-2000 数据采集的时间是通过 GPS 控制的格林威治时间。采集时,高频的采样率较高(如果每秒都采集,数据量将很大,这样也没有必要)。为了避开干扰,高频采集采取全时间段抽样采集,起止时间段和低频的起止时间段相同,采集一般为 1-8-5 模式,即每  $5min$  采集一次高频或中频的样(高频、中频交替采集),其中有  $1s$  的高频数据(采样率  $2560$  个样/ $s$ ),连续  $8s$  的中频数据(采样率  $320$  个样/ $s$ )。下面即为某高频原始数据 1-8-5 模式的采集时间及其采样数:

... ..

05'00'', 2560; 10'00'', 320; 10'01'', 320; 10'02'',  
320; 10'03'', 320; 10'04'', 320; 10'05'', 320; 10'06'',  
320; 10'07'', 320;

15'00'', 2560; 20'00'', 320; 20'01'', 320; 20'02'',  
320; 20'03'', 320; 20'04'', 320; 20'05'', 320; 20'06'',  
320; 20'07'', 320;

25'00'', 2560; 30'00'', 320; 30'01'', 320... ..

低频数据(采样率 24 个样/s)为全时间段采集,即每秒都采集 24 个样。采集起始时间如果设在仪器时间和 GPS 时间同步之前,那仪器和 GPS 一旦同步,马上开始采集;如果设在其之后,则到时间再采集。V 5-2000 处理系统采取级联分样的办法得到各个频点的数值,一般 3~ 4h 左右的采集可至 38 频点,7h 左右的采集可至 40 频点,为了增加叠加次数,提高数据质量,可适当延长观测时间。

V 5-2000 具有卫星同步测量的功能,因此,在数据采集方面已有条件实现“远参考道测量”。远参考道设立在离测点几十公里以外,可至 100km 以外<sup>[10]</sup>或 1000km<sup>[5]</sup>。远参考道噪声很小,一般测量的是两个水平垂直的磁道。为了充分使用 M T 观测数据,远参考站采集的时间段应尽量把 M T 观测时间段包含在内,计算时只需截取相同的时间段计算即可。远参考技术避免了自功率谱参与计算,因此能有效压制相关噪声和互不相关噪声。现在,在一些强干扰地区、地质构造复杂区和大 地电磁信号微弱的地区,大地电磁野外数据采集正在逐步推广“远参考道测量”方法<sup>[9]</sup>。

采集结束后,V 5-2000 形成 3 个原始文件:XXX-XXXX. TBL、XXX-XXXX. TSH、XXX-XXXX. TSL 文件。TBL 文件记录的是采集的一些参数设置,TSH 记录的是高频时间域数据,TSL 记录的是低频时间域数据。计算时可把远参考数据加入一起计算,为了有效压制干扰,在远参考技术运用的同时常结合 Robust 处理。Robust 数据处理方法根据观测误差的剩余功率谱的大小对数据进行加权,注重未被干扰的数据,降低突变点数据的权,使它对大地电磁阻抗估算值的影响最小,从而明显改善受电磁噪声污染的单站大地电磁测深资料。但 Robust 处理会增加计算时间和降低曲线的平滑度,因此当干扰较小时,就不必进行 Robust 处理。

计算时会要求把所有的数据按某种加权方式分成若干个 XPR,分块越多,编辑时可挑选的余地越

大,但与此同时也必然会加大工作量,一般情况分成 10~ 20 个 XPR。计算结果生成 M T 文件。

### 3 M T 点数据质量的分析

在处理解释前,对于数据质量有问题的点,应了解可能造成的质量问题的原因。因此,野外采集班报的天气、地形、环境、接地等情况需引起重视。大地电磁资料的噪声可分为场源噪声、地质噪声和人文噪声。场源噪声起源于地球外部的天然电磁场;地质噪声为测区地质因素对地球介质电性的影响形成的噪声;人文噪声源于地球本体的人工电磁场与其它活动产生的噪声(孙洁等,2000)。现简单介绍一下常见的噪声及其影响。(1)场源噪声:距观测点太近的雷电与平面波假设相违背,还有雷电的电磁波幅度较大,超出仪器的接收范围,形成阻尼振荡,常造成低频数据的飞点;而雨水天气则使接地条件不稳定以及违背空气是绝缘体的设定,造成采集数据的质量较差。场源噪声目前比较难以消除,只能通过对大地电磁原理或者仪器的改进找到办法。(2)地质噪声:如果地表存在不均匀体时,则在不均匀体边界上或电导率梯度区产生静电荷,由于静电荷产生的电场与电磁场源有关,相当于原场乘了一个系数,造成在对数坐标中视电阻率曲线整体向上或者向下平移,形成静位移现象。地质噪声的消除比较容易,可以通过 EMAP 方法、钻井资料的对照、阻抗张量的正则分解、小波变换等加以改正。(3)人文噪声:高压线常影响高频数据,造成高频数据的蹦跳;高速公路和铁路等磁干扰较大,所以往往造成中频视电阻率数值的减小;远处大型的电力系统造成地下很多游散电流,一般表现为使视电阻率曲线以近于 45° 上升而相位曲线下跌至零。人文噪声可以通过重新选择布极点、避开高峰用电时间等减少其影响。

### 4 EMAP 方法

EMAP (Electromagnetic Array Profiling) 方法是 M T 方法的一种延伸,也有人称之为 CEMP (continual electromagnetic profiling)。EMAP 方法采用阵列式排列,用首尾相连的电偶极子沿测线测量电场,一个阵列中可只布置一个“+”字型电道测量,几个电偶极子共用一个磁场。EMAP 通过在时间域采

用相邻多道迭加的办法或者在频率域进行低通滤波处理来抑制表层电性不均匀的静位移干扰和随机干扰。时间域和频率域两者稍有差别,以一维水平均匀层状介质视电阻率为例:

$$\rho_a(\omega, z) = \frac{|Z(\omega, z)|^2}{\omega\mu_0} = \frac{\left|\frac{1}{n} E(z)\right|^2}{|H(z)|^2 \omega\mu_0} < \rho_b(\omega, z)$$

$$= \frac{|Z(\omega, z)|^2}{\omega\mu_0} = \frac{\left|\frac{1}{n} E(z)\right|^2}{n |H(z)|^2 \omega\mu_0}$$

显然,时间域求取的视电阻率略小于频率域求取的视电阻率。应该说时间域的方法更加准确,但频率域应用起来更加简单方便。

EMAP 方法勘探密度大,不受静态干扰的影响,对于详细勘探有着重要的地位。因此,在我国西北和东北等人烟稀少的地方得到了较为广泛的应用。

## 5 结论

准确的原始数据是后续处理的基础,大地电磁法原始数据不可靠有时是可以避免的,合理的布极、尽可能的减少干扰因素、设立远参考站、Robust 处理等措施都能有效的改进 MT 点数据的质量。

大地电磁方法由于数据的采集有“靠天吃饭”的

说法,如果我们能够了解其中的规律,相信大地电磁法的数据采集质量会更上一个台阶。

## 参考文献:

- [1] 陈乐寿,等. 大地电磁测深资料处理与解释[M]. 石油工业出版社, 1988
- [2] 刘国栋,邓前辉主编. 电磁方法研究与勘探[M]. 地震出版社, 1993
- [3] 邱景辉,等编. 电磁场与电磁波[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2001
- [4] 石应骏,等. 大地电磁测深法教程[M]. 地质出版社, 1987
- [5] 陈清礼,等. 长距离远参考大地电磁测深试验研究[J]. 石油地球物理勘探, 2002, 37(2).
- [6] 刘国栋,赵国泽. 大地电磁法新进展[J]. 地球科学进展, 1994, 9(4).
- [7] 李桐林,刘福春,韩英杰,等. 50 万伏超高压输电线的电磁噪声的研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(1).
- [8] 孙洁,等. 大地电磁测深资料的噪声干扰[J]. 物探与化探, 2000, 24(2).
- [9] 魏文博. 我国大地电磁测深新进展及瞻望[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(2).
- [10] G Oettinger, V Haak and J C Larsen. Noise reduction in magnetotelluric time-series with a new signal-noise separation method and its application to a field experiment in the Saxonian Granulite Massif[J]. Geophys. J. Int., 2001, 146: 659-669.

## DATA COLLECTION AND QUALITY ANALYSIS OF MAGNETOTELLURIC METHOD

ZHAO Li-fang<sup>1,2</sup>, WU Jian-sheng<sup>2</sup>

(Team 814 of East China Nonferrous Metals Geo-exploration Bureau, Zhenjiang, Jiangsu 212005, China;

2 Ocean and Geoscience College of Tongji University, Shanghai, China)

**Abstract:** For its effect and handiness magnetotelluric sounding is regarded as an important means to study deep structure. The article states some process of data collection in the field, the problems which affect the MT data quality and the countermeasure to improve data quality, taking model V5-2000 as an example.

**Key Words:** magnetotelluric sounding, data collection, summarize, V5-2000, quality analysis