

大地电磁测深精度提高与去噪方法

颜 良

(中南大学信息物理工程学院, 长沙, 410083)

【摘 要】 大地电磁测深法是工程勘探, 特别是石油非地震勘探的主要方法之一。但是如何提高精度是一个重要问题。本文首先从理论研究、仪器使用、野外采集、资料处理与解释等方面分析了一些去噪方法和技术, 以提高探测精度。

【关键词】 大地电磁法; 去噪; 精度

国外研究大地电磁测深法(简称 MT)始于 20 世纪 50 年代, 60 年代我国开始研究并于 1980 年前后开始应用。由于其具有探测深度大(可探测至上地幔), 不受高阻层屏蔽, 分辨能力较强(特别是对良导介质), 等值范围较窄, 工作成本低(相对地震勘探)和野外装备轻便等特点而广泛应用于矿产勘探, 特别是油气勘探等领域。如何去噪是提高其探测精度一个重要方面, 本文从仪器、野外采集、资料处理与解释、理论研究等各方面进行了分析讨论。

1 仪 器

仪器是大地电磁法的信号进行处理的第一个外部条件, 所以对它的要求是比较高的。现在在仪器中大量采用去噪方法和抗干扰措施。20 世纪 50 年代中期到 70 年代中期国外使用的勘探仪器主要是模拟大地电磁测深仪, 70 年代末到现在国内外普遍使用的是数字大地电磁测深仪。70 年代末到 80 年代末我国一般使用美国生产的 PROM 系列大地电磁测深仪, 采用磁带记录, 记录时间系列数据, 采集电磁场的五分量信号, 这种仪器将信号放大、信号模拟、信号记录三部分集中为三个箱体(重达 500 kg 左右)并安装在仪器车上。由于 PROM 系列仪器较为笨重只适用勘探地表相对平坦、地形条件简单的地区, 目前已基本被淘汰。现在大地电磁测深中正在更新有多道、数传、同步、宽频带($1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^4$ Hz)、多种方法、实时定位、实时处理、遥控遥测等更加轻便、实用的新型仪器^[1]。

我们要在这些仪器中使用多种去噪的措施。如进行选频滤波, 可以采用同步检波及积分采样(因为同步检波甚至对同频率的干扰都有很强的压制能力, 而积分对对称性干扰压制能力极强), 提高接收机的灵敏度并且采取多次叠加等技术, 以达到提高信噪比的目的^[2]。

2 野外采集工作

野外采集数据涉及许多人为的因素和环境的因素。大地电磁测深以随时间变化的大地电磁场为场源, 大地场源的频率和强度主要受太阳风活动的控制, 场源频率范围宽, 信号强度一般很小。在大地上电磁测深法常用的频段内, 相应周期为 $10^{-4} \sim 10^4$ s。由于大地电磁场磁分量功率谱密度差异, 在 $1s$ 附近有一个低能量窗口, 即所谓的“噪声洞”。“噪声洞”的存在使

得 1 Hz 的几个频点很难取得好的观测资料。除“噪声洞”外, MT 的噪声源主要可归结为 2 类: 装置引入的噪声和文化噪声。

2.1 装置引入的噪声

观测装置产生的噪声是因野外施工不严格或观测装置本身连接不当造成的。电极距不准、两电道不完全正交、磁棒方向偏差等原因造成观测资料的人为偏差。电场的测量值是由成对电极的电压除以电极长度而得, 电极距偏大, 电场值小于真实值; 电极距偏小, 电场值大于真实值, 导致视电阻率偏离正常值, 造成高阻或低阻的假象。同理, 磁棒方位的误差也会造成视电阻率的偏差。观测装置本身的原因有: 使用无屏蔽的、绝缘性能不良的电缆; 电缆接头的连接方法不正确或接头处绝缘性能降低造成漏电; 电缆线悬空敷设, 由风动产生感应干扰; 不极化电极电化学性质不稳定; 屏蔽体接地不良; 磁场信号传输线中存在温差电动势或磁屏蔽不良等。除此之外, 测量仪器内部的电子元件的热效应和散粒效应会产生电路噪声。自然界的雷电、风和地表不均匀体也会产生对测量信号不利的噪声^[3]。

对于这种噪声引入, 可以采用如下措施:

(1) 对观测装置或布极过程中工作差错所造成的人为噪声, 可采取一人布极、另一人检查的方式, 加强管理, 严格检查监督来解决;

(2) 电场信号线要使用轻便、具有较高抗拉强度的单一金属线, 接头不要焊接, 以免在接头处产生接触电位差; 最好采用同轴电缆, 要求绝缘电阻不小于 5Ω 。电极作为电场传感器, 其高质量和高可靠性也是减少噪声、保证观测质量的重要措施。电极的极差应长期稳定并小于 1 mV。布极完成后测量各电道的交直流电位和接地电阻, 一定要以黑接线柱为低电位参考端。成对电极中红接线柱端较高时, 测量值为正; 黑接线端较高时, 测量值为负。若不固定参考端, 输入参数本身的误差就是测量值的两倍。当两电极间直流电位差大于 100 mV 时, 应重点检查电极的极差是否过大、电极内的充填物是否漏失和缺损。经验证明, 交、直流电压过高, 都将使背景噪声增大, 很难取得合格资料;

(3) 磁场信号比电场信号更弱, 应特别注意磁传感器及其传输线。不要随意更改原接线的连接方式, 传感器内连接线断开, 不能使用普通焊锡焊接; 不能用锡焊法加长信号线; 不要用与原型号不同的导线替换原信号线; 因为两种不同的金属接触会在接触面产生温差电动势, 电动势的方向与材料的性质有关。这个电动势虽然很小, 但足以对仪器产生干扰;

(4) 当传输电缆被风吹动而在地磁场中摆动时, 传输线中将产生感应电流对仪器形成干扰。这种干扰既影响电道又影响磁道。将传输电缆加以固定或掩埋, 不使其悬空或摆动即可克服这种干扰。而对雷电产生的干扰则可在仪器输入端加接限幅滤波器, 滤掉这种尖脉冲即可;

(5) 为了降低静态偏移的影响, 除了在选择布极时注意避开地形的影响外, 如山顶、深谷、断裂带、溶洞等, 还应尽可能采用长电极距有助于降低地表不均匀体的影响。另外, 大地电磁场随时间的变化与太阳的活动有密切的关系。应根据大地电磁场的变化规律选择, 大地电磁场相对较强的时间段进行观测, 可削弱噪声的影响, 有助于提高 MT 观测资料的质量。

2.2 文化噪声

文化噪声主要指人类的生产和生活产生的电磁感应和电磁辐射, 如广播电台、空中和海

上导航台、铁路、高压输电线、用电设备的开关和控制信号、地下电缆、矿山、电站、产生电火花的机器、机动车辆的点火系统等。

文化干扰是来自测量系统以外的干扰,是 MT 测量中最主要的噪声源。文化干扰源主要来自工业交流电(简称工频)。正常的电磁信号 H_x 与 E_y 在时间上同轴,在空间上互相垂直,从时间轴上可看到同时变化的规律,而受工频干扰的电磁信号则没有任何规律。工频干扰可分为:①高压大电流输电线路产生的电磁场,直接干扰测量仪器;②大功率用电设备在空间产生的强磁场,通过互感耦合干扰测量线路和仪器;③空间电磁波以辐射形式对线路和仪器产生的干扰;④工频地电流。

干扰源对测量线路和仪器的干扰可认为是以感应场(似稳场)的形式存在。多数情况下认为高电压、小电流的工频电力线产生的干扰场主要是电场;而大电流、低电压的工频电力线产生的干扰场主要是磁场。通过以上分析可知,干扰信号进入测量系统的途径大致可以分成以下几种。①测量系统位于干扰源的“远区”时,干扰信号以电磁辐射形式(即平面电磁波),从空间进入测量线路、仪器或测量系统。如广播、电视、雷达和电台等设备的工作频率多在兆赫以上,它们距测量电路的距高大都满足 $\gg \lambda/2\pi$ 的条件,它们对测量电路产生的干扰主要是辐射干扰;②在近区内电场和磁场的方向互相垂直,相位相差 90° ,所以不能向外辐射能量。干扰信号是以漏电和耦合的形式,以绝缘支撑物等(包括空气)为媒介,以阻抗为通路进入测量线路、仪器或系统;③工频地电流引起的共模干扰主要由电网容性漏电、电力线短路或绝缘强度下降引起。特别是农村电网为了节省投资,把大地作为一相传输线的“两线一地”供电方式,地电流将对电道测量产生严重干扰。

对于这种文化噪声,可采取如下措施减少其影响:

(1) 辐射干扰可以说无处不在,因为不论是照明电源线还是动力电源线,都像天线一样,向外辐射电磁波;同样,较长的信号输入和输出线、控制线等也具有天线效应,既能辐射电磁波,也能接收电磁波,但一般情况下,这种干扰产生射频以上的高频;另一方面由于辐射干扰衰减很快,只要干扰源与被干扰对象拉开一定距离就可防止。当测点距辐射源较近又无法移动时,利用交变电磁场在金属中传播时场强衰减的特点,用金属作屏蔽,防止交变电磁场对测量线路或仪器产生干扰;

(2) 在选点布极时尽量避开工业输电线路,远离电磁干扰源。对无法避开的低压电力线,将电道和磁道的布设方向与电力线走向成 45° ,使电场干扰噪声和磁场干扰噪声在同一测量道上的分量大致相等,从而将绝大部分噪声相互抵消;

(3) 加强屏蔽保护,使外界电磁场变化引起的噪声降低到最低限度。对低频电场而言,产生电场的电荷本身不断变化,屏蔽体外侧的电荷也不断地通过接地的导线流入大地或流回屏蔽体,这部分电流要产生热而消耗一部分能量,这部分能量来自变化的电场。低频的交流磁场在穿过磁屏蔽时,要在磁屏蔽体内产生感应电流。感应电流产生的次生磁场和入射磁场的变化方向相反,能够抵消一部分入射磁场。同时,在磁屏蔽体内的感应电流要产生热量而损耗一部分能量,这部分能量来自入射磁场。只要屏蔽装置得当,接地合理,就可使干扰产生的噪声降到最低限度;

(4) 工频地电流引起的共模干扰是由工频地电流通过传输线在仪器输入端产生大小相等方向相同的干扰信号。克服共模干扰的措施除了在仪器的输入端采用差分放大器之外,布极时应尽量采用十字型对称布极方式,可有效地抑制共模干扰对仪器的影响。

(5) 用两套仪器同时观测, 一台置于强干扰区, 一台置于安静地区, 并以安静区的仪器为参考基站。两台仪器观测时用时钟同步采集, 记录时间序列数据, 处理时可根据各时间段记录的干扰程度进行挑选^[4]。

以上这些是我们野外工作时应该注意的, 它们可以减少噪声的影响, 从而提高 MT 数据的质量。

3 资料处理与解释

MT 资料处理是从采集的大地电磁信号的时间系列中提取反映地下地电特征的各种频谱成分, 并计算相应的阻抗张量要素。在资料处理过程中, 应该对资料进行去噪处理。

3.1 Robust 处理

它是近 20 年来发展起来的一种统计学方法(或称稳健统计方法), 其实质是在实际情况与理想模型有微小偏离, 或当实际分布与理想分布在形态上略有偏离而这种偏离不敏感或相当不敏感时的一种统计方法。近年来许多作者通过对大地电磁资料误差分布规律的分析与研究发现, 大地电磁测深资料的误差分布并不完全遵循高斯误差分布的假定, 所以建立在该假定之上的常规最小二乘阻抗张量估算法会导致处理结果的分散或偏高。为此国内外一些大地电磁工作者将 Robust 统计过程引入到大地电磁测深法的阻抗张量估算处理中, 提出了大地电磁 Robust 处理方法。该方法根据观测误差和剩余功率谱的大小对数据进行加权处理, 注重未受干扰的数据(假定为正态分布), 降低“飞点”的权, 使之对大地电磁阻抗函数的估算影响最小。Robust 处理较常规最小二乘方差估算而言俱有优越性, 可以有效地减小视电阻率和相位的分散度, 目前在 MT 资料处理中已得到广泛应用。

3.2 远参考道技术

近年来开发出的新型大地电磁测量系统, 如 V5-2000 系统, 电、磁信号的采集站由过去的电缆同步方式改为卫星时钟跟踪同步技术, 使远参考方法的实施变得十分容易。采用最小二乘法, 从信号分析的角度而言, 实质上是以磁道 H 作为参考信号, 实行相关检测。但是由于所用的参考信号同时又是被检测的磁道信号, 关系式中出现自相关项, 所以相关检测难以将噪音消除。假如能再观测一个与原来的信号相关而噪音不相关的参考信号, 那么就可以使关系式中不出现自相关项。远参考方法正是基于上述的认识提出的, 即另设一个信号观测道——远参考道 R , 与实测点资料相关处理, 以获得真正的大地电磁响应。

3.3 Robust 与远参考道方法联合处理

Robust 处理与远参考道方法均能不同程度地抑制、消除大地电磁测深资料中的干扰噪声, 自然将这 2 种处理方法组合起来对实测资料实施去噪处理, 想象中效果应该会更好, 并且目前的 MT 野外资料处理人员也是这样实施的, 实际情况证明是很好的。

3.4 采用相位资料对畸变视电阻率曲线进行校正

3.5 人工资料筛选

在 V5-2 000 系统中,电、磁信号的总功率谱是由分段时间序列的子功率谱通过加权叠加而成的。由于干扰噪声的随机性,不同的时序段由于资料受干扰污染的程度是不同的,所以各子功率谱的数据质量是有区别的。人工资料筛选则是通过人机联作,对各个子功率谱进行取舍,保留那些质量高、合理的子功率谱,删除那些受干扰影响严重的子功率谱,以使整体数据质量得以提高。实践证明,不论采用哪种自动去噪处理,最后人工资料筛选工作是必经的一步工作,虽然这项工作既劳心又劳力,但是这是值得的。

除了以上这些外,还有其他的方法,如采用阻抗张量分解和小波变换进行大地电磁静校正,应用小波分析提高 MT 资料信噪比,利用 TE M 测深校正 MT 静态偏移等,这些也是很有用的方法^[5]。

4 理论研究

理论研究可以说是任何技术进步的巨大动力。所以要提高 MT 资料的精度,就要不断研究新的方法及理论,研究更先进的去噪方法等,并把它们应用到实际中来。理论上需要继续研究二维、三维和地形影响等复杂地质问题的解决办法,研究垂直入射电磁波低频段(小于 1×10^{-3} Hz)对地球深层介质的影响,相位、频率等参数在解释中的作用,消除静态影响更加有效的校正办法,有效的噪声消除方法等。同时还要编制相应的处理解释软件,以提高解释精度等。

总之,我们要从不同方面进行考虑,从多种方法中来实现探测精度的提高。

参考文献

- [1] 王家映. 我国大地电磁测深研究新进展[J], 地球物理学报, 1997 年, 第 40 卷增刊
- [2] 温佩琳, 赵秋梅. 大深度激发极化法初步探讨[J], 物探与化探, 1996. 10, 20(5)
- [3] 胡家华, 陈清礼, 严良俊, 张翔. MT 资料的噪声源分析及减小观测噪声的措施[J], 江汉石油学院学报, 1999, 21(4)
- [4] 陈高, 金祖发, 马永生, 苏朱刘. 大地电磁测深远参考技术及应用效果[J], 石油物质, 2001, 40(3)
- [5] 张全胜, 杨生. 大地电磁测深资料去噪方法应用研究[J], 石油物探, 2002, 41(4)