

音频大地电磁测深法在地质勘探中的应用

吴露

江西省地质局水文地质大队

摘要: 音频大地电磁法(以下简称AMT法)是通过观测由远程天然电磁场引起的天然平面电磁波信号以确定电阻率的差异作为物质基础,根据所观测到的视电阻率值的大小以及随着频率变化的情况来推断解释地下地质体空间分布的一种天然源频率域物探方法。由于其利用天然场源,无近场效应、过渡带效益影响,在工程中得到广泛的应用。AMT法野外采集的频率范围大致为10至100kHz,相比较于传统的大地电磁法,由于AMT法测量采集的频率较高,使其在勘探工作过程中对浅部的地层有较高的分辨率,对于浅层地质勘探效果更佳。本文通过对 AMT技术的模型模拟及实际工程应用等情况浅谈其在地质勘探中的应用,对今后AMT法在工程中的应用提供一定的参考经验。

关键词: AMT技术; 视电阻率; 地质体空间分布; 地质勘探

【DOI】 10. 12254/j. issn. 2096-6539. 2023. 11. 068

引言

音频大地电磁测深法通过观测由远程天电引起的天然平面电磁波信号以确定地下的电阻率值的方法,其原理和常规大地电磁测深法的原理大致相同,通过观测地面电磁场的分布情况,反演分析出地下岩体的电阻率,达到了解地下岩体分布和规模的一种新兴的地球物理勘探方法。AMT法具有无近场效应影响、仪器较轻便,适用于各种地形、气候恶劣的山区、观测频带较宽、AMT是张量和矢量测量,对二维构造反映较逼真,采用了TM、TE两种模式测量,通过不同方向测量能更好的探测地质结构,AMT法工作效率较高,不受区域通讯条件束缚,在项目场地能及时获得成像成果等特点,音频大地电磁测深法在各种工程领域如煤田勘探、矿产资源勘探、油气田勘探、寻找地下热水、岩溶勘探、破碎区探测、划分地层、地质灾害的预报和评价等工程中得到较广泛的应用。

一、音频大地电磁(AMT)方法原理

音频大地电磁法(AMT)是在大地电磁法的基础上形成演化而来的。其工作方法、采集参数等与传统MT法相同,它主要观测由远程天电引起的天然平面电磁波信号的方法。当电磁波在地下不同物性介质中传播时,由于其在电磁感应的作用下,不同岩层能反映出不同的电阻率值。实际探测过程中,对每个测点采集天然交变电磁场分量,其垂直四个分量(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y)在二维、三维理论模型中的电磁场关系方程为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = \mathbf{Z} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

由于实际探测中趋肤效应的作用,不同频率的电磁波在地层中具有不同的穿透探测深度,可以分析反演出不同深度地下岩性的分布信息。由于观测的天然电磁场是时间等信号,所以测量成果需从时间域的电磁场求取频率域不同周期内的振幅谱值,通过分析计算出岩性相对应的波阻抗和视电阻率值,以达到勘探的目的。

根据公式卡尼亚电阻率 $\rho = \frac{1}{5f} |k|^2$ 可知,不同频率探测深度及趋肤深度也将不同,解释为在探测过程中,不同频率能探测出不同深度下岩体的电阻率视值。由于AMT法采集频率相对较高,所以对浅部的分辨率会相对较高,所以此种方法更适合浅层地质勘探要求。

二、模型正演模拟

(一) 高低阻体纵向模型

通过建立高低组纵向模型,了解其在此种条件下的明显作用。此次模型横向为1000米,模型围岩背景值的电阻率为 $\rho_s = 1000 \Omega \cdot m$, 围岩中存在两异常体,其电阻率分别设为 $200 \Omega \cdot m$ 、 $2000 \Omega \cdot m$, 它们埋深分别设为550m、750m,长和宽分别设为100m、50m,低阻体覆盖在高阻体之上。实验中在不同的采集频率内选取一定的采集频点,试验中采样间隔定的设定是以10为底的对数,试验中将点距设定为20米,本次模拟试验采集50个测点数据。

下图2-1为大地电磁法高低组纵向模型模拟出的在TE模式及TM模式下不同的视电阻率及阻抗相位的成果图,成果图中横坐标表示为测线横向长度,单位设定为km,纵坐标是频率的对数形式,单位为HZ。图中不同颜色的色标代表反演出的不同地层岩性的视电阻率值。

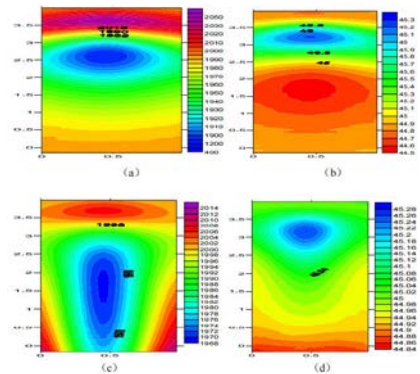


图2-1 电阻率及阻抗相位模拟图

- (a) TE模式下视电阻率色谱图
- (b) TE模式下模型相位色谱图
- (c) TM模式下视电阻率色谱图
- (d) TM模式下模型相位色谱图

从电阻率及阻抗相位模拟图 2-1可以看出,在测量过程中,TE模式及TM模式都能探测出异常结构体。在TE模式中,反映出异常体是呈现出扁平状的,异常区反应的色谱发散;在TM模式下,异常体在横向上的反应相对来说收敛性较好。总体而言,TE模式和TM模式都能在实际的探测过程中对岩性有一定的分辨能力。

(二) 高低阻体水平模型

通过建立高低组水平模型,了解其在此种条件下的明显作用。此次模型横向为1000米,模型围岩背景值的电阻率值为 $1000 \Omega \cdot m$, 围岩中存在两异常体,其电阻率分别设为 $200 \Omega \cdot m$ 、 $2000 \Omega \cdot m$, 他们埋深都设为

500m, 长和宽分别设为100m、50m, 低阻体在高阻体的右边。实验中在不同的采集频率内选取一定的采集频点, 试验中采样间隔定的设定是以10为底的对数, 试验中将点距设定为20米, 本次模拟试验采集50个测点数据。

下图2-2为大地电磁法高低阻纵向模型模拟出的在TE模式及TM模式下不同的视电阻率及阻抗相位的成果图, 成果图中横坐标表示为测线横向长度, 单位设定为km, 纵坐标是频率的对数形式, 单位为HZ。图中不同颜色的色标代表反演出的不同地层岩性的视电阻率值。

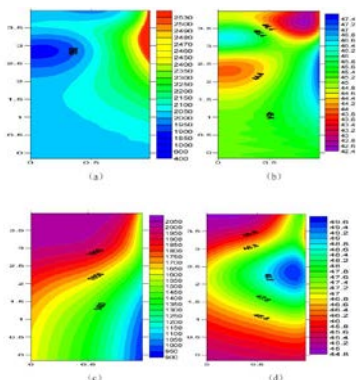


图2-2 电阻率及阻抗相位模拟图
(a) TE模式下视电阻率色谱图
(b) TE 模式下模型相位色谱图
(c) TM模式下视电阻率色谱图
(d) TM 模式下模型相位色谱图

通过AMT视电阻率和阻抗相位成果色谱图2-2可以知道, TE测量模式中, 所测量的视电阻率对于判断低阻范围区有很好的作用, 但是有可能低阻异常影响到高阻体异常的反应, 所以在此模拟中反演结果不是很明显的反应高阻体的异常区。TM 模式模拟成果图异常区域呈现长条状, 通过分析对比可知TE模式相对于TM 模式, 在探测过程中具有更好的纵向分辨率。

通过以上试验模型, 大体得出大地电磁测深法中TE模式对岩体的纵向有较好的分辨率、TM模式对岩体的横向探测有较好的分辨率。在实际的探测过程中, 通过横纵向的数据采集综合分析对比, 对断层破碎带、岩体的高低阻体等异常体划分解释时, 有更好的参照对比作用。

三、野外工作方法

勘探线由专业测量人员进行实地放点, 保证所采集的野外数据真实可靠。野外工作电极的布置采用“+”字型的布极方式, 采用这种布极方式能较好的克服土壤表层电流场不均匀分布的影响。仪器放置在“+”字交叉点附近时, 对消除共模干扰更有一定的作用, 使采集的数据真实可靠。

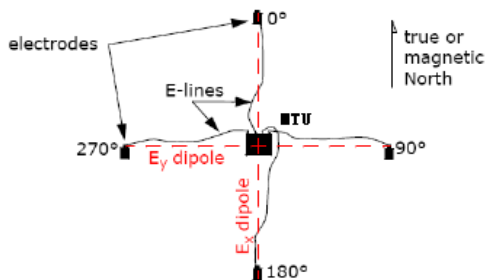


图3-1 音频大地电磁测深法现场布置示意图

为了确保现场仪器工作的正常, 采集的数据质量真实可靠, 在正式采集工作之前需对仪器各采集通道进行数据一致性试验。

一致性试验: 通过一致性试验可检测磁棒信号的一致性。试验时将两个磁棒朝同一方向平行放置, 间隔5m, 电偶极也平行布设, 布设方向与磁棒方向垂直, 电偶极距相等, 每组电偶极间隔0.5m。磁通道、电通道所得时间序列波形、幅值完全一致、自功率谱也具有很好的一致性, 说明仪器工作正常。

四、音频大地电磁测深法资料解释

AMT法的资料处理分为以下两个部分: 资料预处理及资料后续处理。资料处理的好坏将直接影响到成果的解析判定。

(一) 预处理

资料预处理是将原始采集的数据中原始各测点场量的时间序列数据通过专门的成图处理软件, 将其转换为频率域测深曲线, 解析出各个频率上的相对应的视电阻率值和阻抗相位等成果资料。

(二) 后续处理

通过对资料的预处理步骤后, 将对预处理过的资料进行后续处理。在处理数据过程中, 首先对预处理数据进行去噪和静态校正等一系列处理, 处理后对数据资料进行一维及二维反演, 反演成图后结合已有的地质资料对项目进行综合解释。

在对反演资料分析过程中, 电阻率值的大小、数据相对值、背景值、色谱图的等值线的形态等等都将成为解译成果的参考因数。通过综合分析, 才能使解译成果真实可靠。

五、工程实例分析

(一) 某隧道工程音频大地电磁测深法勘探的应用

本次隧道音频大地电磁测深法勘探, 经野外数据采集及处理, 结合区域地质及现场调绘能初步反映场区内覆盖层、地质构造, 具体分析如下:

如图5.1所示, 隧道音频大地电磁反演电阻率断面整体来看其电阻率由浅至深呈低-高的分布形态, 电阻率值分布范围从 $20 \Omega \cdot m$ 到 $2000 \Omega \cdot m$, 电阻率纵向梯度大。结合地质、钻探综合推断断面上部电阻率从 $40 \Omega \cdot m$ 到 $700 \Omega \cdot m$ 为凝灰岩, 下部电阻率值电阻率从 $700 \Omega \cdot m$ 到 $2000 \Omega \cdot m$ 为熔结凝灰岩, 浅部蓝色低阻区域其横向电阻率的变化是由于覆盖层厚度变化以及凝灰岩岩差异分化所致。在断面的里程 $k0+401 \sim k0+521$ 区段, 附近电阻率相对较低, 结合地质调查等地质信息综合推断为地势低洼处局部岩体较破碎富水引起低阻异常。在断面的里程 $K1+909$ 附近左右两端区段电性差异明显, 结合地质调查及钻探情况综合推断为凝灰岩与泥岩接触破碎带引起。

本次音频大地电磁经过处理和分析, 经过统计确定整个场区存在1处物探异常区域; 结合地质调绘和钻探成果推测为岩性接触破碎带, 具体见表5.1。

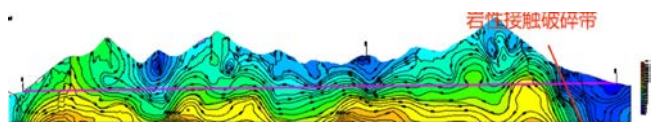


图5-1 AMT资料反演成果图

本次工程中采用的ATM法反演成果基本上探查清楚

表5.1 隧道物探异常统计表

编号	异常里程位置	异常宽度	异常形态	异常分类	推测的物探方法
1	K1+909~K1+969	60	电阻率两侧差显, 纵波速度等值线凹	岩性接触破碎带	音频大地电磁法

本场地中风化及微风化层的埋深等情况, 其埋藏深度在2m~35m不等。隧道进口覆盖层较薄, 出口及洞身段覆盖层较厚; ATM法反演成果图较好的反映了此次勘探场地地层结构及地质构造等特征。在里程K1+909~K1+969段音频大地电磁测深和浅震均有着很好的异常反应, 与附近钻孔资料较吻合。

(二) 音频大地电磁测深法在地下水勘探中的应用

为查明某场地内的地层岩性和地质结构、以及地层形态变化特征, 分析地下构造的位置、走向, 地下构造体之间的连通性, 从而更好地勘探出地下水在地下岩层中的空间分布规律、富集区域、地下水的埋藏深度、贮量等信息, 本次勘探采用传统的物探方法中的音频大地电磁测深法进行前期勘探, 为后期钻孔施工提供参考依据。

通过分析此项目区域地质构造及分析了解岩性差异, 本场地岩性差异为ATM法在该场地的实施应用提供了基本的地球物理前提条件。

当采样点下部存在破碎区或局部含水时, 通过对该点数据采集分析后, 破碎含水层在电测深曲成果曲线图上表现为低阻体, 测深频率数据体现出向下凹陷, 低阻异常的反应特征在电阻率成果图上的表现为色谱图中曲线闭合, 色谱与围岩有一定的差异性。由于破碎条带在地质构造中体现的是两边地层的错动, 与完整的岩体存在一定的差异性, 所以破碎条带在色谱图中的表现为条带状低阻异常带; 当成果图分析现出岩性不同时, 分析表现为分界面曲线的突然变化, 在反演成果色谱图上体现出低阻体及高阻体左右出现的异常条带, 不同的岩性反演出不同的色谱能很好的分析岩层的分界面。

在反演资料解释的过程中, 对同一地区的物探成果进行解析时, 往往会存在多种解释成果, 所以在实际的物探资料解析过程中, 应当通过地下岩体在不同的环境下物性的差异的综合分析判断对地下地质构造进行解释。由于地下岩土体电阻率受到岩体孔隙度、含水量、含泥量等各种各样的因素影响, 使的在探测相同的岩体在不同因数作用下岩体物性是不同的。因此, 在进行最终地质成果解释时, 仅仅通过测量的电阻率差异对现场的岩土体进行简单的划分是不可取的, 在资料的解析过程中, 必须充分研究结合分析已知以往物探资料、区域地质资料, 结合本次物探初步资料进行综合分析, 以提高对提交成果的准确性。

本次找水项目结合实际生产任务及目的, 拟定采用音频大地电磁测深法对指定区域进行物探勘查。下图5-2为本次ATM法探测反演成果图。从成果图可以明显发现, 在浅部, 分析反演出多条低阻带, 且低阻带之间具有较好的连通性, 由此推断解释此区域岩体破碎, 具有很好的储水条件。在成果图水平距离510m、2510m处解析出两条呈现陡立的低阻区异常体, 且与破碎体连通, 结合本场地区域地质资料综合分析判断出断层破碎带F1、F2, 初步解释推断这两条断层破碎条带为地下水流向浅部的通道, 通过成果图上分析得出, 埋深为1410~1740m 位置的低阻异常体是地下储热层, 并且通过断层破碎条带 F1、F2将地下水输送到地面处。

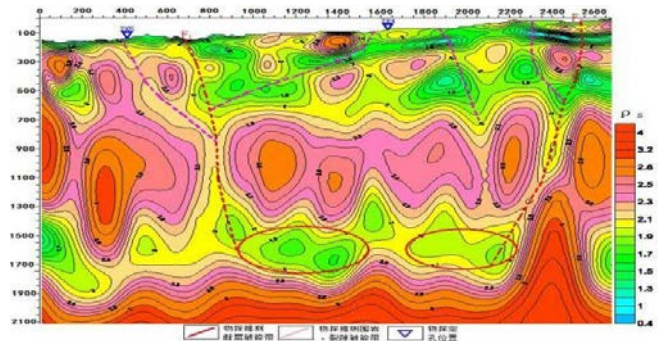


图5-2 某区域地下水勘探AMT资料反演成果图

结合ATM法的成果分析指定, 在此测线上区域位置为400m和1600m处钻探, 成两口地热井, 钻探深度到达230m处时就已经出水, 日出水量达到500吨/天, 孔口出水温度更是达到83℃。由此, 通过采用音频大地电磁测深法物探方法指导本次地热钻孔的定位, 指导孔位刚好处于断层F1、F2上。通过对地热井进行物探测井分析得出, 地下热水实际储存位置和通过ATM法解析推断区域位置非常吻合, 充分验证了ATM法在实际工程当中对地下水勘查的应用效果。

六、结束语

AMT法目前已发展为一门独立的勘探地球物理方法, 理论上亦逐渐趋于成熟, 它具有有很多独特的优点, 特别是勘探深度大, 不受高阻屏蔽, 不需人工供电, 工作效率高、成木低, 适用于工程中多数地质勘查任务。因此, AMT法是一种很有发展前途的物探新方法。但是, 由于ATM法中大地磁场信号相对较弱, 因此对AMT仪器设备的要求很高, 且仪器更新制造的难度很大。此外, AMT场的频谱十分丰富, 但它随时间和地点的变化十分复杂, 信号本身具有随机性, 其研究程度是很不够的, 因此这种方法还有很大的潜力。总之, 音频大地电磁法是一种高效且具有很好的发展前途一种的地球物理勘探方法。随着电子计算机应用技术及ATM法理论研究的不断发展更新, AMT法也将日趋完善, 成为一种更有效的勘探工具, 为找矿、找水、解决工程地质问题和其他浅部地质构造问题服务。

参考文献

[1] 陈旭乐. 音频大地电磁测深法和高密度电阻率法对隧道岩溶的识别研究与应用[D]. 成都理工大学, 2017.
 [2] 刘奎. 音频大地电磁测深在地热勘查中的应用研究[D]. 成都理工大学, 2014.
 [3] 黄日华, 朱通, 廖文鹏, 刘凯. 音频大地电磁测深在某隧道工程中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(02) 211-216
 [4] 肖明宇, 孙雯. 音频大地电磁测深技术在隧道不良地质体勘探中的应用[J]. 西藏科技, 2017(12) 29-30.