

高密度电阻率法在工程、环境及地质勘察中的应用

孙寅鹤

(石油物探局地调五处 河北定兴 072656)

P631.322

X141

摘要: 高密度电阻率法其工作原理与常规直流电法类似,采用阵列式的工作方式,使用二维反演做为资料处理手段,大大提高了勘探效果。本文着重介绍了高密度电阻率法的工作原理及该电阻率法反演成像的原理,并以 AGI 公司的 STING-SWIFT 系统为基础,详细介绍了该系统的野外采集系统和资料处理系统,并结合一些工作实例说明了高密度电阻率法在工程勘察中的应用效果以及近年来它的新技术和新发展。

关键词: 高密度 电阻率法 勘察 应用

工程地质,环境地质,工作原理

1 前言

在工程、环境及地质调查中,往往由于问题的复杂性,使得常规电法勘探很难满足实际工作的需要,因而被称为地学中 CT 的高密度电阻率法有了长足的发展,在工程、地质及环境调查中发挥了重要的作用。

高密度电阻率法(又称电阻率影像法)是一种阵列式的电法勘探方法。关于这种方法的勘探思想早在 70 年代末期就有人开始考虑实施,其中以英国学者所设计的电测深偏置系统为高密度电阻率法的最初模式。80 年代后期,我国地矿部门首先开展了对高密度电阻率法及其应用技术的研究,并就该方法有关理论和技术方面的问题进行了探讨和完善。

高密度电阻率法相对于常规直流电法(常规电法由于其观测方式的限制,测点密度不高,测量的数据量较少,而且解释方法常以一维反常方法为主)而言,它的优势集中体现在“高密度”三个字上。野外观测时,一次布置可达几十至几百根电极,大大提高了工作效率;而且它采用了自动采集的智能化系统,减少了劳动强度;同时它的电极布置密集,保证了该方法的探测精度。下面将从高密度电阻率法的基本原理、野外工作方法、数据处理、应用效果和新技术新发展等五方面,对该方法加以介绍。其中涉及到的仪器及其参数都是以美国 AGI 公司生产的 STING-SWIFT 系统为蓝本的。

2 高密度电阻串法的基本原理

2.1 电法原理

高密度电阻率法与常规直流电法一样,是以探测地下目标体导电性差异为基础的一种物理勘探方法。当人工向地下加载直流电流时,在地表利用相

应仪器观测其电场分布,通过研究这种人工施加电场的分布规律来达到要解决的地质问题的目的。因此,我们要研究在施加电场的作用下,地层中传导电流的分布规律。求解其电场分布时,我们在理论上一般采用解析法。其电场分布满足以下偏微分方程:

$$\nabla^2 U = \frac{-I}{\sigma} \delta(x_0 - x_1) \delta(y_0 - y_1) \delta(z_0 - z_1)$$

式中: x_0, y_0, z_0 为电场点坐标, x_1, y_1, z_1 为源点坐标。

当 $x_0 \neq x_1, y_0 \neq y_1, z_0 \neq z_1$ 时,即只考虑无源空间时,上式变为拉普拉斯方程:

$$\nabla^2 U = 0$$

但是在复杂条件下,无法求得拉氏方程的解析解,因此主要是采用各种数值模拟方法。例如:二维地电模型使用点源二维有限法,三维地电模型则使用有限差分法等来解决上述问题。

高密度电阻率法在工作时,通过给 AB 极供电 I,利用 MN 测量电位差 ∇V 。如图 1 所示。

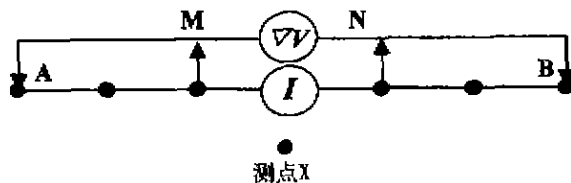


图1 工作原理图

通过式 $\rho = \frac{\nabla V}{I} \cdot K$ 求得测点 x 处的视电阻率值,其中 K 为装置系数,满足关系式:

$$K = \frac{2\pi}{(1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)}$$

2.2 传统三电位电极装置

高密度电阻率法的电极排列方式原则上是采用二极方式,但此方法必须增设两个无穷远极,这样就给实际工作带来了很大的不便。因此高密度电阻率法在实际工作时,采用三电位电极系——将温纳(AMNB)、偶极(ABMN)、微分(AMB)三种不同装置按一定方式组合后所构成的一种统一测量系统,(三种方式分别称为 α 、 β 、 γ 装置),其排列方式如图1所示,当点距为 a 时,其极距的设定满足关系式:

$$z = n \cdot a (n = 1, 2, 3, \dots, 15)$$

其中: n 为隔离系数。

而当我们在使用三电位电极系时,其供电电极在测量电极之间所产生的电位差可表示为:

$$\nabla U^{\alpha} = \nabla U^{\beta} + \nabla U^{\gamma}$$

当供电电流为一定值时,三者之间的阻抗关系式满足下式:

$$R^{\alpha} = R^{\beta} + R^{\gamma}$$

引入视电阻率和装置系数 K 后得:

$$\rho_s^{\alpha} / K^{\alpha} = \rho_s^{\beta} / K^{\beta} + \rho_s^{\gamma} / K^{\gamma}$$

整理上式变为:

$$\rho_s^{\alpha} = K^{\alpha} / K^{\beta} \cdot \rho_s^{\beta} + K^{\alpha} / K^{\gamma} \cdot \rho_s^{\gamma}$$

当极距为 z 的三种排列装置(α 、 β 、 γ)其系数 K 依次为: $K^{\alpha} = 2\pi z$ 、 $K^{\beta} = 6\pi z$ 、 $K^{\gamma} = 3\pi z$ 时,于是上式依次变为:

$$\rho_s^{\alpha} = 1/3 \rho_s^{\beta} + 2/3 \rho_s^{\gamma}$$

$$\rho_s^{\beta} = 3 \rho_s^{\alpha} - 2 \rho_s^{\gamma}$$

$$\rho_s^{\gamma} = 1/2(\rho_s^{\alpha} + \rho_s^{\beta})$$

以上既为传统的三电位电极系,当已知其中任意两种视电阻率参数时,通过上式就可计算出第三者。

高密度电阻率法在野外测量时,一次可布置几十到几百根电极,比如 AGI 公司的 STING-SWIFT 系统,该仪器最多一次可布设 200 多根电极。利用仪器的电极自动转换开关,可将每四个相邻电极进行一次组合测量,从而在一个测点可以得到多种组合的测量参数。当隔离系数不断增大时,即测量的深度不断增加时,测点便逐渐减少,使得整个测量断面呈倒三角状分布。如图 2 所示。

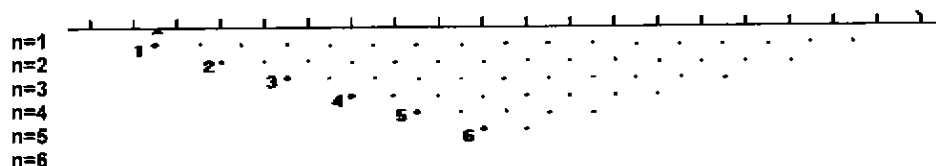


图 2 测量示意图 (图中 n 为隔离系数)

3 野外工作方法

3.1 排列装置的选择

由于高密度电阻率法可以有多种排列装置,如 AGI 公司的 STING-SWIFT 系统共有: Dipole-Dipole、Pole-Dipole; Wenner、Square、Schlumberger、Lee、Pole-Pole 和 Mise-a-la-Masse 等多种装置形式,这几种排列装置在测量功能上各有不同的侧重点。因此,应根据不同的地质任务来选择不同的排列装置,以达到最佳的勘探效果。

3.2 极距的确定

极距的设定包括供电电极距 AB 和测量电极距 MN 的确定。供电电极距 AB 的大小一般视目标的埋藏深度而定,一般应满足关系式: $AB \geq 3H$ (H 为探测深度)。而测量电极距 MN 的确定一般视目标体的范围大小而定,电极距 MN 与横向分辨率的要求有关。要提高分辨率,就要减小电极距 MN 。

高密度电阻率法工作时,其供电电极与测量电

极是一次性布设完成的。通常情况下,经由仪器的电极转换开关控制,排列中的某两根电极既作为供电电极 AB ,在下一组组合测量时又要作为测量电极 MN 。我们在工作时,总希望探测深度要深(即 AB 要大),又不会漏掉小的异常体(即 MN 要小)。要提高横向分辨率,就要牺牲它的探测深度,反之亦然。所以我们在设计极距时,既要充分考虑探测深度,又要兼顾横向分辨率。

极距和点距的关系,一般应满足公式: $z = n \cdot \Delta a$ 。其中 z 为极距, n 为隔离系数, a 为点距。

3.3 STING-SWIFT 仪器简介

近年来,随着电法理论的不断发展与成熟,以及电子技术的高速发展,高密度电阻率法的测量仪器越来越先进和自动化,使得野外采集更加方便,效率更高。下面就对 AGI 公司的 STING-SWIFT 系统的技术指标做一介绍。

(1) 转换电极:254 根。



(2) 排列装置: 三电位电极系各种排列方式二极排列方式的 ERT 转换。

(3) 隔离系数(n): 1~16 可选。

(4) 承受电压: $V \leq 400$ V (DC), 承受电流: $I \leq 500$ mA。

(5) 探测深度: ≤ 60 m。

(6) 采集方式: 完全自动。

(7) 通讯方式: 标准 RS232 串行口。

(8) 资料处理: 处理软件支持 Window 系统, 直

观方便。

(9) 应用范围: 各种工程、环境及地质调查。

(10) 工作环境: 水陆两用。

该仪器在工作前, 可预先在计算机中设定好所需用的排列装置方式, 给定相应参数, 然后再输入到仪器中。野外现场即可直接选定在计算机中设定好的排列装置方式进行采集, 也可利用手动给仪器完成上述设定, 其野外工作形式如图 3 所示。

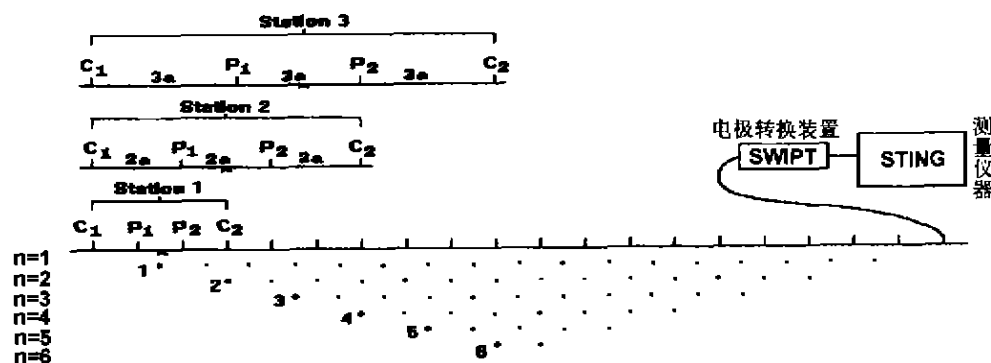


图 3 STING-SWIFT 野外工作形式图

4 资料处理

高密度电阻率法的测量数据在处理方法上大多采用佐迪方法进行二维反演。佐迪法是基于 Schlumberger 和 Wenner 法的解释而提出的。它的原理实际上是通过不断调整初始模型参数使正演曲线与实际曲线之差达到最小, 由此所得的最终模型参数作为反演结果。这样看来它是一种最小二乘优化法。

佐迪法的基本思想是: 首先设定模型上的层数和测深曲线上的点数相同, 每层的电阻率为测深曲线上相应各点的视电阻率, 每层的深度等于测深曲线上相应各点的电极距再乘以一常数。利用上述模型得到一理论测深曲线, 将该曲线与野外实测曲线对比, 若两曲线同相(一般幅值会有不同), 调整模型各层电阻率值, 再次正演计算理论曲线, 直到实测曲线和模型曲线的均方根误差达到最小。此时得到的模型就作为实际测量所得到的地质模型。

STING-SWIFT 系统的处理软件 Res2dinv 是以平滑约束最小二乘法为基础, 以拟牛顿最佳技术为准则的最小二乘法来实现的。这项技术在处理大数据量时比常规最小二乘法快 10 倍还多。平滑约束最小二乘法满足下式:

$$(J^T J + \mu F) d = J^T g$$

$$\text{其中 } F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

式中: f_x 为水平平滑滤波, f_z 为垂直平滑滤波, J 为雅可比偏导数矩阵, J^T 为雅可比偏导数矩阵的转置形式, μ 为阻尼因子, d 为模型扰动矢量, g 为模型误差矢量。

使用这种方法的优点之一就是阻尼因子和平滑滤波系数可以调整以适合不同的数据类型。在该系统中还使用常规的高斯——牛顿法, 它比拟牛顿法慢许多, 但是它在处理电阻率值相差很大(达到 10:1)的区域所采集到的数据时, 能够得到较好的反演结果。该系统的第三个优点就是用高斯——牛顿法先进行 2 到 3 次迭代, 然后使用拟牛顿法再进行迭代计算。在大多数情况下, 这种折衷的办法可以提供最好的结果。

程序中所使用的 2-D 模型, 是把地表分成许多矩形块(见图 4)。其目的就是测定矩形域的电阻率, 使其产生的视电阻率拟断面与实际测量相符。对于不同的装置形式, 模型每层的厚度与极距的比值都会不同, 例如对于 Wenner 和 Schlumberger 来说, 第一层厚度设为极距的 0.5 倍; 而对 Pole-Pole、Dipole-Dipole、Pole-Dipole, 其厚度分别设成电极距的 0.9、0.3 和 0.6 倍。

而图 5 所示为该系统的处理结果。其中图 5-1 是经过处理后所得的正演图像,图 5-2 是加了地形校正后所得的二维反演结果。从图 5-2 中不仅

可以直观的反映出落差达到 5~6 m 的地形起伏,而且能够清晰地反映出地下地层的组成划分和埋藏在 3.5m 处的异常区。

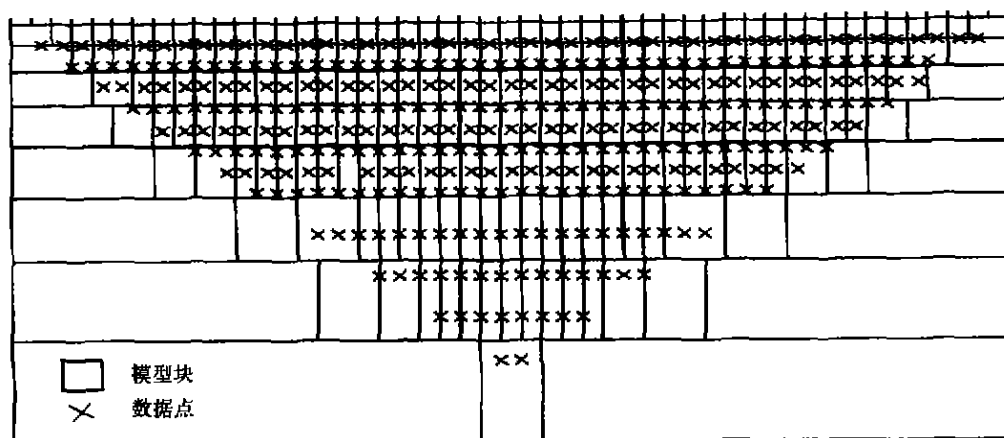


图 4 模型与采集点示意图

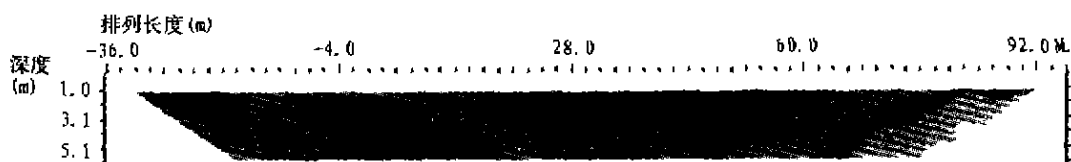


图 5-1 正演图像

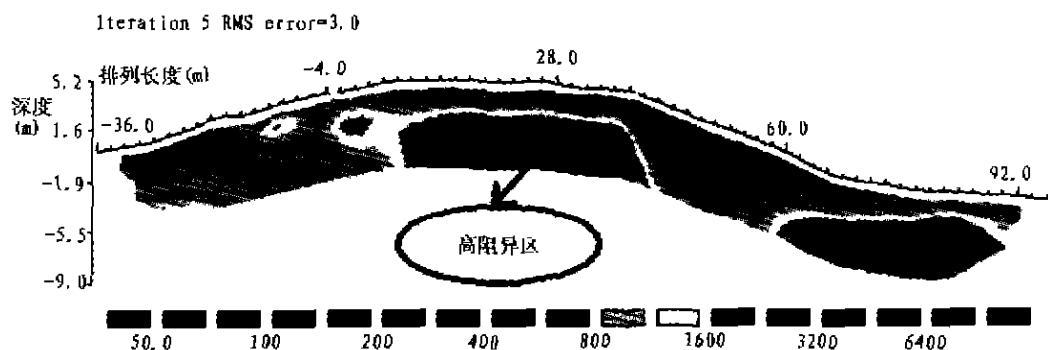


图 5-2 经过地形校正后的反演结果

图 5 经过处理后的剖面图

5 应用效果

高密度电阻率法由于在数据采集和资料处理等方面采取了一系列的特殊设计,因而在工程、环境及地质调查中得到了十分积极的应用,取得了常规直流电法难以达到的地质效果。下面是我们在实际应用中的部分实例。

5.1 湖南益阳地区长江某堤段的高密度电法探测结果

(1) 地球——地球物理条件

为了检测长江大堤的隐患,确保堤坝的安全,应国家防汛办的邀请,在湖南益阳长江大堤某段作了前期实验。在几家实验单位中,我处使用先进的 STING-SWIFT 高密度电阻率仪取得了较好的效果。

堤坝探测段的地质背景较简单。大堤上层为新近所覆盖的沙砾石土层,视电阻率值约 70~100 $\Omega \cdot m$;中层是均匀的土层结构,视电阻率值约 20~400 $\Omega \cdot m$;底层即坝基砂岩结构,视电阻率值约 200~400 $\Omega \cdot m$ 。

(2) 野外工作方法

在野外测量时要考虑到它的探测精度,又要兼顾探测深度,因此我们采用滚动的 Dipole-Dipole 装置形式,点距 2 m。一次布设两个排列,每个排列长 56 m,两个排列交替移动,完成在 150 m 内的连续测量剖面,见图 6 所示。

(3) 资料处理与解释

野外测量的数据,经过 STING - SWIFT 系统的处理软件 Res2dinv,生成连续的彩色二维剖面图。这次实验地段由于地质背景较为简单,其它人文干

扰也比较小,因此采集得到的原始数据资料非常好,使得反演结果与实际模型的拟合误差减小到 1.9%。其中图 6-1 是实际测量所得的数据模型;图 6-2 是经过计算处理后所得的正演结果;图 6-3 是最终的二维反演结果。剖面图中清晰直观地展示了堤坝的三层结构:从地表起往下到 3 m 左右是上层的沙砾石土层;大约从 3~8 m 的蓝色段为中间均匀土层反映;下层红色段从 8 m 以下就是坝基的砂岩反映。

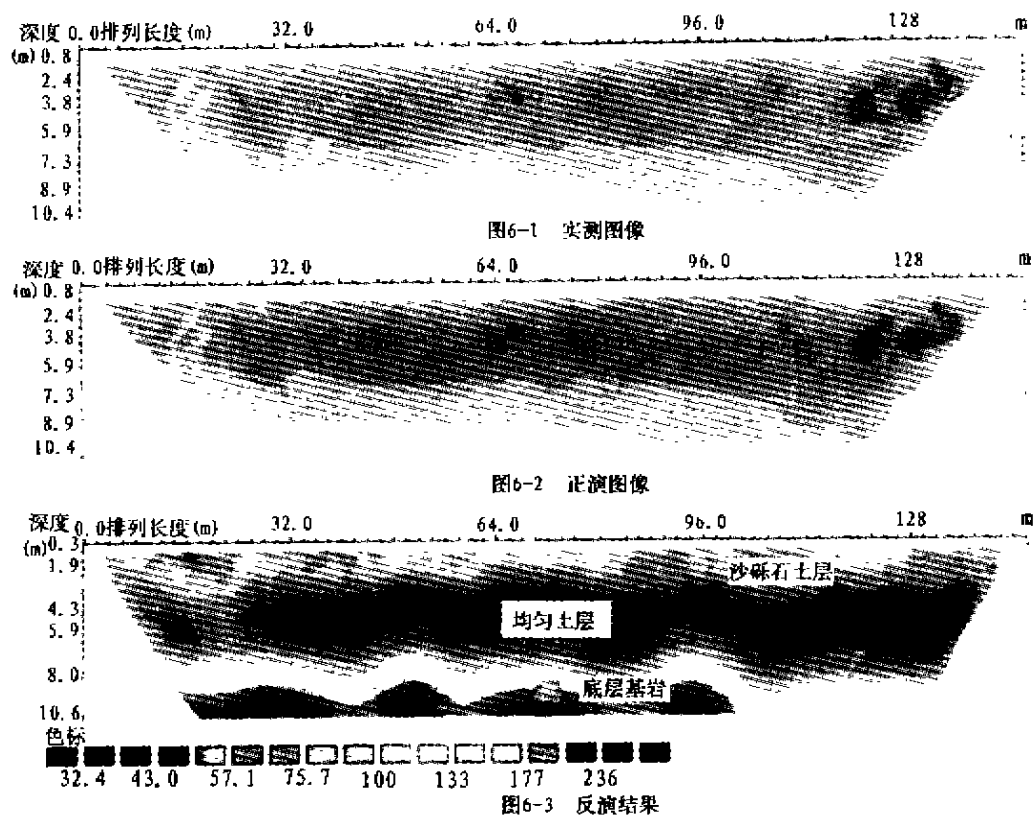


图6 湖南益阳长江某堤段的高密度电法探测结果

5.2 在黑龙江北安某地寻找炮弹中的应用

(1) 地质和地球物理条件

1999年,我处应解放军总参的邀请,赴黑龙江北安地区查找在战争时期遗留下来埋藏在地下的炮弹。

根据以往挖掘经验来看,大多为一定数量的炮弹堆埋在一起,外层用水泥砖块垒砌起来。由于水泥与围土、水泥与炮弹在施加相同电场条件下,它们所表现出来的电性、磁性差异很大。水泥表现出高阻性,而围土则表现出低阻性。在常规情况下炮弹所表现的也是低阻性,但它因受周围水泥的影响很大,加上炮弹本身的锈蚀作用,其总体也呈现出高电

阻率特征。由此我们可以根据水泥的高阻性,很容易把它和周围的围土区分开来。

(2) 野外工作方法

探测区位于北安镇内,隶属居民区,地表环境复杂,人文干扰大。由于埋藏点的未知性,我们先用 G-858 磁力仪探测出异常区,然后在异常区布设高密度电法。其测线共 3 条,分别跨异常区左中右三部分,每条测线长 56 m。

根据以往挖掘经验,炮弹埋藏深度一般在 4 m 以内,因此采用的高密度装置形式为 Wenner 装置,点距 1 m,排列长度 56 m。这样就保证了探测精度



与探测深度。

(3) 资料处理与解释

野外观测数据经 Res2dinv 软件处理后, 所得剖面见图 7(为中间一条测线)。图 7-3 很好地反映出存在四个高阻异常区。通过对高阻异常区电阻率值、异常区形态的分析以及地表的调查, 确认了两处炮弹埋藏点。一处是从左边零点起往右约 3 m 处, 为一小型炮弹埋藏区, 深度约 1.5 m 左右; 另一处异

常点为中间 28 m 处, 是一个大型的炮弹埋藏点, 深度约 2 m 左右。后经开挖验证, 左边 1.5 m 处的异常区埋藏炮弹十几枚; 中间 28 m 处的大型异常区埋藏炮弹上千发。而位于 38 m 处的第三异常点, 经过调查确认为原气象站的水泥平台; 20 m 处的小异常点, 则是一小型洞穴。

从上述结果看: 高密度电阻率法对寻找地下炮弹及其它异常体, 其效果是令人满意的。

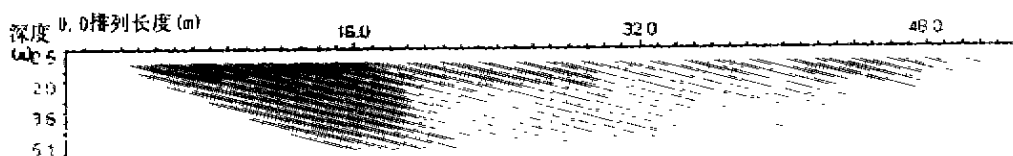


图 7-1 实测图像

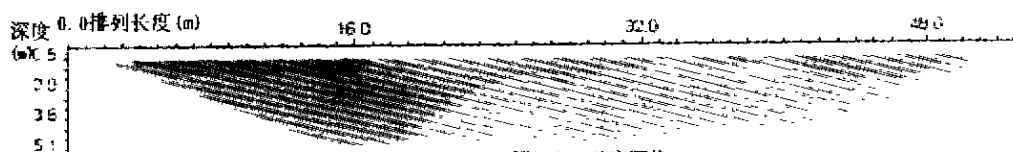


图 7-2 正演图像

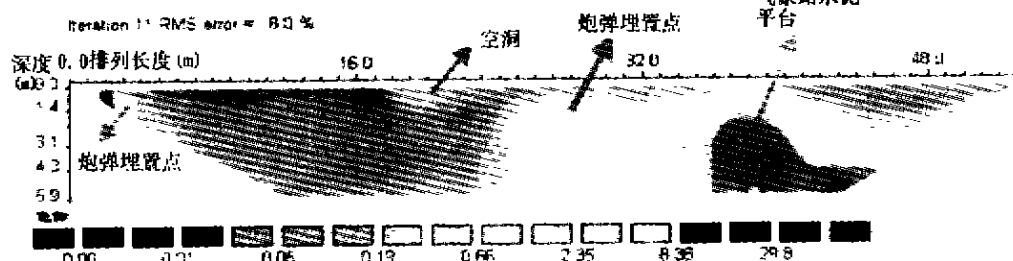


图 7-3 反演结果

图 7 黑龙江北安地区高密度反演图

6 高密度电阻率法新技术新发展

高密度电阻率法在解决地质问题的过程中, 也逐渐暴露出它的一些不足之处:

(1) 密度电阻率法的装置形式众多, 分别侧重不同的地质问题。在地电条件不明或多种地质勘察任务时, 如何选择装置形式就成了一个问题。若对各种装置形式进行逐个测量, 则造成野外观测劳动量大; 若只对个别装置进行观测, 则有可能造成所选装置类型不适合, 所反映的地电构造就会不明确。

(2) 高密度电阻率法在工作时, 是对逐个排列进行观测(每个排列布置一定的电极), 与之对应的处理软件, 也是按单排列进行处理的。因此对于超过一个排列长度的测线, 得出的断面图在各个排列的梯形断面图之间出现“空白区”, 且相邻排列各自计算的归一化参数断面图之间不能相互拼接。若使用传统高密度法的解决手段就是重复观测上一排列

的某一部分, 这样也增加了工作量。

(3) 由于高密度电阻率法在测量时, 一般所使用的都是极化电极。虽然各种仪器都有自己的极化补偿功能, 但是在特殊地区, 其电极的极化效应对探测效果影响还是很大。

针对上述缺点, 高密度电阻率法发展了新的观测手段和新的观测技术来弥补自身的不足:

(1) 仅采用一种电极装置——正、反向(简称双向)单极梯度装置(见图 8)观测, 其余各种装置(α 、 β 、 γ 装置及偶极-偶极等四极装置)的视电阻率, 可根据资料解释的需要, 由双向单极梯度装置所观测的结果计算得出。由于此方法布设了一无穷远极, 实际可把它看成为任意两种三极装置形式的组合: $AMN\infty$ 和 $BMN\infty$, 这样解决了上述第一个缺点。

其计算公式简单推导如下:

由于 $\rho_s^A = K^A \cdot \Delta U^A / I$,

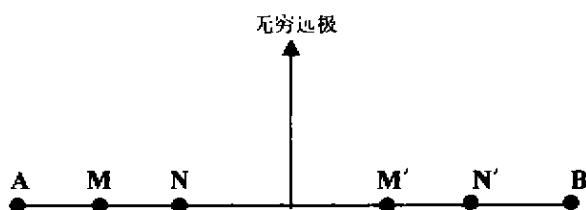


图8 双向单极梯度装置

$$\rho_s^B = K^B \cdot \Delta U^B / I, \rho_s^{AB} = K^{AB} \cdot \Delta U^{AB} / I$$

而且

$$\Delta U^{AB} = \Delta U^A \pm \Delta U^B$$

故

$$\rho_s^{AB} = K^{AB} (\Delta U^A \pm \Delta U^B) / I$$

把上式转换形式,得

$$\rho_s^{AB} = K^{AB} (\rho_s^A / K^A \pm \rho_s^B / K^B)$$

在均匀大地情况下,则有

$$\rho_s^{AB} = \rho_s^A = \rho_s^B$$

所以

$$K^{AB} = K^A \cdot K^B / (K^A \pm K^B)$$

将上式代入

$$\rho_s^{AB} = K^{AB} (\Delta U^A \pm \Delta U^B) / I$$

则得

$$\begin{aligned} \rho_s^{AB} &= K^A \cdot K^B / K^A \pm K^B (\rho_s^A / K^A \pm \rho_s^B / K^B) \\ &= (K^B \rho_s^A \pm K^A \rho_s^B) / (K^A \pm K^B) \\ &= (\rho_s^A \pm \varphi \rho_s^B) / (\varphi \pm 1) \end{aligned}$$

其中 $\varphi = K^A / K^B$

式中: ρ_s^A, ρ_s^B 为双向单极梯度法观测的任意两个三极装置 AMN ∞ 、BMN ∞ 视电阻率, ρ_s^{AB} 为所要计算的任一四极装置的视电阻率。对于 α 装置, $K^A = K^B$, 则 $\varphi = 1$, 故上式“ $\pm$ ”取“+”号; 对于偶极-偶极装置 ABMN, 则“ $\pm$ ”取“-”号。

(2) 针对第二个缺点, 在长测线(长度大于一个工作排列)工作时, 对测线进行滚动方式的排列测量(见图8), 把整条测线的数据作为一个数据形式, 一起进行处理和成图。这样便可获得整条测线连续统一的剖面图。

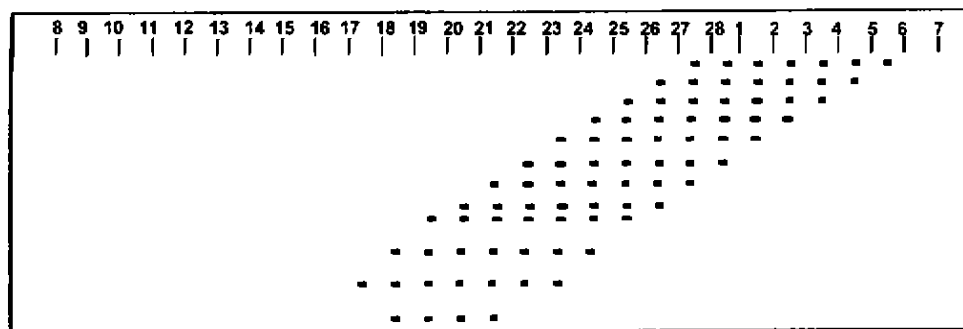


图9 每次移动7个电极的滚动 Dipole-Dipole 方式

(3) 由于电极的极化效应主要是针对直流电法来说, 因此可以采用交流供电, 来达到消除或减小极化效应。

总之, 任何一种方法都有它的局限性, 高密度电阻率法也不外如此。反之, 有了自身的不足, 使它才有发展的动力, 在以后的发展方向上, 才会朝着解决自身问题的方向前进。

7 小结

综上所述, 高密度电阻率法是一种相对有效的解决地质问题的方法, 它相对常规电法而言具有以下特点:

1. 几十至几百根电极一次布设完成, 野外采集效率高。
2. 能够进行多种电极组合装置的测量, 可以获得较为丰富的地质信息。

3. 野外数据采集实现了自动化, 采集速度快, 避免了手动操作带来的误差, 同时相对于常规电法中的跑极而言也减小了工作强度。

4. 可以实现现场资料处理, 对野外资料采集的质量起到及时监控的作用。

由此可见高密度电阻率法具有成本低、效率高、资料可靠、解释方便、勘探能力显著提高等特点, 尤其是对浅层的各种异常的判断能力非常强, 对确定目标体的范围和目标体的埋藏深度而言也达到很高的可信程度。当然它也有力所不及的地方: 如它的探测深度不够深; 地表坚硬、很难钉下电极的地区及高压电网密布的地区等都是高密度电法无法工作的地方。不过随着电法勘探技术的不断发展和完善, 高密度电阻率法在工程、地质及环境调查中, 将发挥出更大的作用。

参考文献:

- [1] 王兴泰等:高密度电阻率及其应用技术,《长春地质学院学报》,1991,第 21 卷,第 3 期
- [2] 王兴泰、万明浩等:《工程与环境物探新方法新技术》,地质出版社,1996
- [3] 黄仲良等:《石油重、磁、电法勘探》,石油大学出版社,1998
- [4] 金铭、罗延钟等:《电法勘探新进展》,地质出版社,1996

(收稿日期:2000 年 10 月 24 日)

The Applications of High Density Resistivity Method in Engineering, Environment and Geological Prospecting

Abstract: In this paper, the author emphatically introduces the principle of high density resistivity method, presents in detail the data collecting and treating systems of STING - SWIFT instrument from AGI, and describes the applications of high density resistivity method in engineering, environmental and geological prospecting. Finally, the author briefs the new technology and new development in high density resistivity method. (By Xun Yinhe)

Key words: High Density, Resistivity, Prospecting, Application

架 信 息 桥 铺 成 功 路

欢迎订阅 《岩土工程界》

《岩土工程界》是适应信息技术高速发展和岩土工程专业市场不断扩大形势,融“政策、技术、市场”于一体的大型综合信息技术月刊,1998 年初创刊,经新闻出版署和国家科技部批准,2000 年开始面向国内外公开出版发行。

《岩土工程界》面向勘察设计单位、岩土工程施工企业、设备制造及代理厂商、科研单位、大专院校、学会协会、房地产开发商等,内容涵盖岩土工程专业各个领域,是沟通岩土工程相关各层次群体交流与合作的综合信息平台。

《岩土工程界》2001 年改为大 16 开本,每月 28 日出版,国内外公开发售。国内统一刊号:CN11-4489/TD,连续出版物号:ISSN 1009-5098。全国各地邮局均可订阅本刊,邮发代号为 2-656;读者也可通过《全国非邮发报刊联合征订服务部》网站(网址:WWW.LHZD.com)下载“电子订单”并订阅本刊;亦可直接汇款向本编辑部订阅。定价每期 8 元,全年 12 期共 96 元。

本刊兼营广告,收费合理,读者面广,是广告客户的理想选择。

本刊除诚征学术、技术稿件外,还诚征业界新闻、施工动态、书刊评述,稿酬照付。展会消息免费刊登。

本刊地址:北京市朝阳区安外安贞里 2 区 11 楼 1 层 邮政编码:100029

电 话:010-64435074 010-64417951

传 真:010-64435075 电子信箱:geo-pro@263.net