地信论坛
BBS.3S001.COM

第 20 卷第 4 期
1997 年 12 月

华东地质学院 学报
Journal of East China Geological Institute

Vol. 20 No. 4
Sum 60

# 高密度电阻率法在地下涵洞勘测中的应用

汤洪志
(华东地质学院地球科学系,江西临川,344000)
宫云鹏
(内蒙古赤峰市电力局,024000)

**摘 要** 本文介绍的高密度电阻率法是一种新兴的电阻率方法。与常规电阻率方法相比,高密度电阻率法具有成本低、效率高、测点密集,反映地电信息更丰富、更直观以及资料解释简单方便等特点。本文运用高密度电阻率法勘测地下涵洞,实践证明,高密度电阻率法获得的图形、质量高、解释误差小,是一种方便实用、效果良好、能广泛应用于工程勘测的物探方法。

**关键词** 高密度电阻率法;工程勘测;地下涵洞
**分类号** P631.332;P313.3;TV652.2

## 0 序言

工程物探可原位、无损测试,能立体透视目标,既经济,又轻便、快捷,已成为工程地质勘察中的重要手段之一。但因受勘探仪器和数据采集系统的限制,还存在着不能令人满意的地方。例如,应用岩、矿石电性差异解决地质问题时,大都采用常规方法——电阻率测深法或电阻率剖面法。而常规电阻率方法又受观测方式的制约,不仅测点稀、工作效率低、信息量小,而且难以从多种电极的排列组合上去研究地学断面的特征、结构与分布。因此,提供关于地电断面的地质信息比较贫乏,资料解释存在一定困难。为了克服上述困难与不足,更好地发挥物探工作在工程地质勘察中的优势,80 年代中期,日本地质计测株式会社首先对高密度电阻率法进行了试验。相对于常规电阻率方法,高密度电阻率法具有以下优点:

(1)电极可按一定间距一次性布设完毕。这样能有效地进行多种电极排列组合方式测量,从而提供更丰富的地电结构状态及地质信息。该方法在观测中设置了较高密度的测点,测量时若采取一些有效方案,可使数据采集系统有较高精度和抗干扰能力。与电阻率测深法和电阻率剖面法相比,高密度电阻率法,既能提供某一深度范围内沿水平方向的电性变化情况,又能反映铅垂方向上不同深度的电性畸变特征。

(2)野外数据采集、收录,可实现自动化和智能化。这样,既可方便地采集到大量的数据,也能避免人工操作带来的误差。高密度电阻率法可以快速采集数据,现场处理数据,从

收稿日期:1996-12-02

地信论坛
BBS.3S001.COM



而改变电法勘探的传统模式，提高了工作效率，减轻了劳动强度。

(3)室内资料处理时，可将采集的数据回放，降低了资料收录工作成本，提高了工作效率和可靠性，为资料整理、推断解释及成果图示自动化创造了条件。在资料处理过程中，可进行多种参数综合解释，从而弥补了常规电阻率法测点稀和解释单一的缺陷，提高了勘探能力。

## 1 高密度电阻率法的原理及工作方法

### 1.1 方法原理

高密度电阻率法的基本原理与常规电阻率法相同，仍然是以岩、矿石的导电性差异为基础，通过观测和研究人工建立的地中稳恒电流场的分布规律，以达到解决工程地质及其他地质问题的一种勘探方法。高密度电阻率法的正演问题，就是传导类电法勘探的正演问题，亦即求解稳定点源电流场的边值问题。先是在已知电阻率($\rho$)分布的求解区域内，建立相应的微分方程和边界条件，然后确立未知的电位函数$U(x,y,z)$或其变换函数$V(x,\lambda,z)$，使其在已知电导率$\sigma$分布的求解区域内，满足相应的微分方程和边界条件。

对于点源分区均匀的介质，电位函数$U(x,y,z)$或变换函数$V(x,\lambda,z)$分别满足泊松方程和亥姆霍兹方程：

$$\nabla^2 U(x,y,z) = f$$

$$\nabla^2 V(x,\lambda,z) - \lambda^2 \nabla^2 V(x,\lambda,z) = f/2$$

$$U(x,y,z) = \frac{2}{\pi}\int_0^\infty V(x,\lambda,z)\cos(\lambda y)\,d\lambda$$

式中，$f = -2I\rho\delta(M-A)$，$I$为供电电流，$M$为观测点坐标，$A$为供电点坐标，$\lambda$为空间波数。

对于简单的地电条件下电场分布的计算，可用解析法。对于复杂的地电结构条件下电场分布的求解，通常需要借助数值计算方法，如有限单元法、有限差分法和边界单元法等。其中的边界单元法在计算纯地形和地下异常地质体数目不多的问题时，是十分方便的。因为它使用了边界积分方程，从而使问题的维数下降，代数方程组的元素大大减少，因而输入数据变得简单，剖分后的边界与实际边界拟合良好，计算成本低，计算精度高。与其他数值模拟方法相比，边界单元法对计算机内存的要求大大降低，尤其对二、三维问题更为显著，对于直流电法这种无限区域和源头集中的问题尤为适用。

边界单元法的解题过程是：首先把描述场的偏微分方程用加权余量表示，经分部积分或用格林公式转化为边界上的积分方程，然后对边界进行单元剖分，将边界积分方程离散化，代入边界条件，解离散代数方程，即得到问题的数值解。

### 1.2 工作方法

高密度电阻率法勘探系统如图1所示。勘探系统由测量系统(即电极排列)、野外数据收录系统和资料处理系统组成。野外数据收录系统是通过多路电极转换器及多功能直流电测仪实现。多路电极转换用程序控制。资料处理系统由计算机、处理指令及外部设备，采用人机对话方式实现。

高密度电阻率法的野外工作，只须将全部电极按一定间距(最小极距$a$)沿测线一次性布设完毕，然后通过多芯电缆连接到多路电极转换器上，使测量讯号由转换器送入多功能直流电测仪，并将结果依次存入存储器。

地信论坛
BBS.3S001.COM



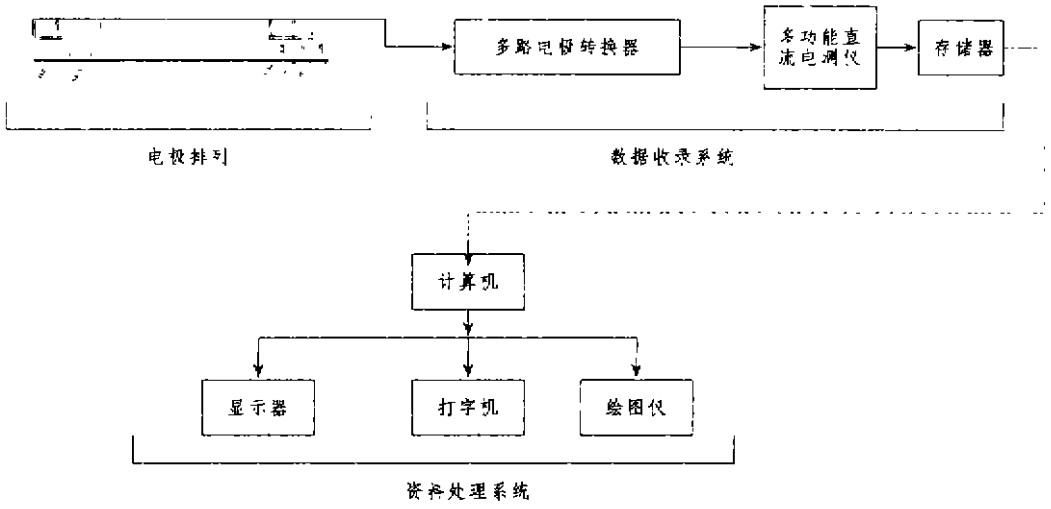



图1　高密度电阻率法工作示意图
Figure 1　The flow chart of high density resistivity method.

野外数据收录系统，有长春地质学院研制的 GC—2 程控多路电极转换仪、地矿部机械电子研究所生产的 MIR—1B，MIR—1C 等型号多功能直流电测仪以及重庆奔腾公司生产的 WDZD—1 多功能综合电测仪。上述仪器电极转换总数一般为 60～120 路。目前，国内还有少量进口仪器在使用。

资料处理系统，是通过电测仪与微机之间的通讯，将采集的数据回放到微机内，进而实施对原始数据的各种处理，并将结果用图件直观、清晰地反映出来。

## 2　高密度电阻率法常用的解释参数和图件

高密度电阻率法测量系统采用三电位电极系。它不仅可以获得三种常用的电极装置的视电阻率参数，而且还将三种测量结果作某种组合，得到视电阻率异常的几种比值参数。比值参数不仅以某种醒目的方式再现异常的特征，而且使某些比值参数在一定程度上具有抑制干扰和分解复合异常的能力，从而大大改善了地质对象赋存状态的反映能力。

三电位电极系是将 $\alpha$ 排列（温纳四极装置 AMNB），$\beta$ 排列（偶极装置 ABMN）和 $\gamma$ 排列（AMBN）按一定方式组合而构成的一种测量系统。其视电阻率关系为：

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

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

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

如果增加一个无穷远极，还可以做温纳联合测深。

比值参数有以下几种：

$$\lambda(i,i+1) = \frac{\rho_s^A(i)}{\rho_s^B(j)} \Big/ \frac{\rho_s^A(i+1)}{\rho_s^B(j+1)}$$

$$G(j) = \frac{\rho_s^A(j)}{\rho_s^B(j+1)} + \frac{\rho_s^A(j)}{\rho_s^B(j+1)}$$

地信论坛
BBS.3S001.COM



$$T_s(j) = \rho_s^2(j)/\rho_s^1(j)$$

式中，$\rho_s(i)$、$\rho_s(i+1)$ 表示断面图上相邻两点的视电阻率值。

为了反映不同深度测量的整体效果，提高异常的信度和信噪比，突出有用信息，还可以采用下面的数学模型对原始数据进行处理：

$$\rho_s^T = \frac{1}{K_n}\sum_{j=-n}^{n}\left[\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(\Delta\rho_s(i))^2\right]$$

式中，$i$ 为纵向变量，$j$ 为横向变量，$\Delta\rho_s(i)$ 为第 $i$ 个深度上第 $j$ 个测点的实测值与该点的背景值 $\rho_{sb}$ 的差，$K_n = 2n+1$ 为滤波系数，$\rho_s^T$ 为纵向综合视电阻率。

上述视参数的断面图，都是采用一系列不同极距测量得到的。记录点的位置是根据各种装置的特点而确定的，并将各点的视参数值绘制成断面图。

以温纳装置为例说明之。温纳装置的特点是：$AM = MN = NB = na$。其中 $a$ 为电极排列的最小极距，取 $a = 1,2,3,\ldots$。如果地形平坦，记录点一定在过 $MN$ 中点的垂线上，记录点深度定为 $AB/3$ 或 $AB/2$。如图 2 所示。

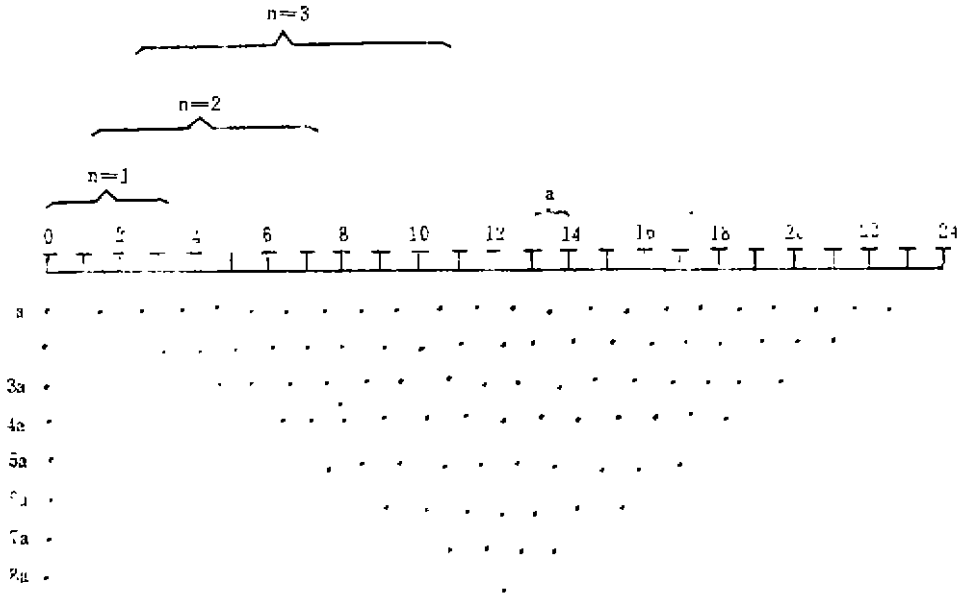



图 2 四极装置记录点排列方式

Figure 2 The arrange way of record points of four-pole device.

T- 电极，· —记录点

如果地形起伏，温纳装置测得的 $\rho_s$ 值应记录在 P 点上。如图 3 所示。设 AM 的中心为 O，NB 的中心为 O'，P 点则在 OO' 的垂直平分线上，距 OO' 线为 a 或 1.5 a 的地方。

记录点的深度取 AB/3 还是 AB/2，应根据具体情况确定。一般认为它和工作区地电结构有关。如果这个深度取得合适，就会使 $\rho_s$ 等值线断面图基本能反映实际地电结构特征。

地信论坛
BBS.3S001.COM



## 3　应用实例

本文主要对江西临川市温泉疗养院内的排水涵洞位置进行勘测。涵洞目标大致位于疗养院办公楼后面，估计涵洞延伸方向为 N35° W。测量地段地表平坦，表层为人工填土，厚度不等，其下为第四系粉质粘土。

测量时的天气是雨过天晴，地表湿润，接地条件良好。由于涵洞少水，目标和围岩介质的电阻率差异明显，因此，开展高密度电阻率测量的前提条件良好。

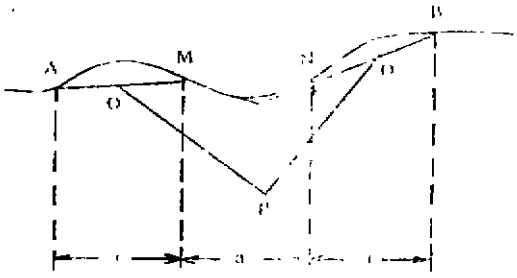



图 3　高密度电阻率法温纳装置起伏地形记录点位置

Figure 3　The location of wave topography record point of Wenner device of high density resistivity method.

根据情况，测线布置为北东向(N55°E)，最小极距采用 0.5 m(a=0.5 m)，有效剖面长度为 30 m。采用温纳四极装置测量，当测到 n=10 时，探测深度约为 5 m 左右，此时完全达到目的体的埋深。

通常理论上认为温纳装置的探测深度大致为 AB/3。实际上，勘探深度和电测深曲线类型有关。电测深曲线中的假类型曲线特征点的 AB/2 值，多数情况下很接近该点的解释深度。按上述两种方法绘制了两张 $\rho_s$ 等值线断面图(图 4)。由图 4 可以看出，浅部差别很小，随着 n 的增加差别逐渐明显。经比较后，认为取 AB/3 较为合适。

图 4(a)是根据记录点深度为 AB/3 勾绘的 $\rho_s$ 等值线断面图。从图上可以看到：粉质粘土的电阻率在 300 Ω.m 左右，作为背景本底值；在第 30 号电极正下方出现一高阻异常等值圈，形态与涵洞实体十分相似，最高的等值线圈的位置基本表明涵洞的空间位置。

计算纵向综合视电阻率 $\rho_t$ 时，取 n=2，m=3 背景值取 $\rho_{sb}$=300 Ω.m，计算结果如图 4(b)所示。$\rho_t$ 曲线有单峰，峰值为 178 Ω.m，正好落在第 30 号电极位置上，亦能反映地下高阻涵洞体的存在。

高密度电阻率法温纳装置 $\rho_s$ 等值线断面图，并没有出现“八”字形曲线，其纵向视电阻率 $\rho_t$ 也没有出现高阻“双峰”的极大值。图件直观、解释方便。

对整个地电断面进行反演是困难的。定量解释时，只对假定半无限空间均匀介质中存在一高阻水平空洞的情况进行了反演计算，如图 4(c)所示。利用边界元法，迭代 18 次后，所得空洞半径 R=2 m，中心埋深 H=2.3 m。

## 4　结论

(1)应用高密度电阻率法探测地下涵洞的前提条件是，只要存在一定的电性差异，便可得清晰、明显、直观的二维异常图。

(2)高密度电阻率法，实际上是集多个深度电剖面和密集的电测深于一体的方法，有利于反映地电断面局部信息的微弱变化。它对寻找断层、接触带、岩溶、岩脉、矿体以及确定矿体产状都有一定的作用。特别是在工程地质勘探中，应用高密度电阻率法会得到更好的效果。另外，该方法操作方便、自动化程序高，值得推广。

(3)记录点深度、测区电测深曲线特征点的 AB/2 与该点反映层面的解释深度之比值有

地信论坛
BBS.3S001.COM



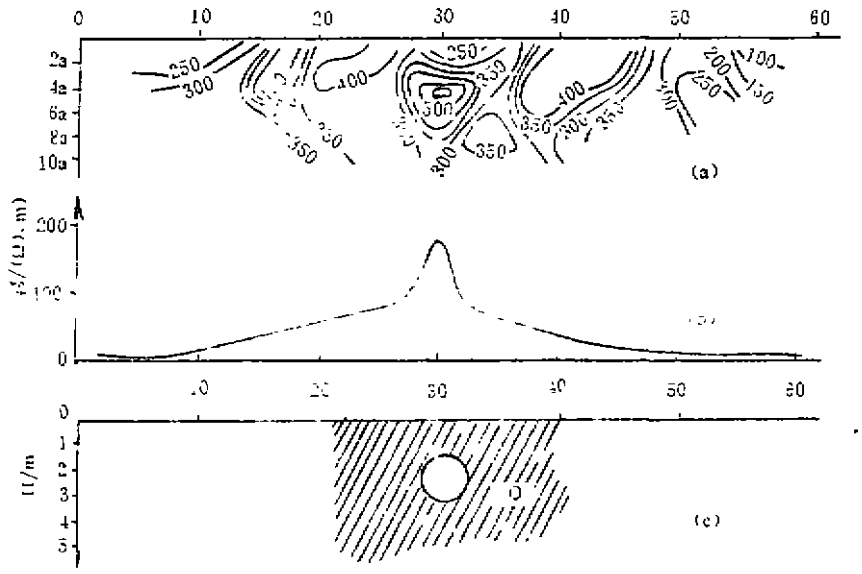



图 4 高密度电阻率法综合解释图

Figure 4 The comprehensive interpretation map of high density resistivity method.

关。因此在绘制 $\rho_s$ 等值线断面图时，应对具体问题具体分析，以保证图件质量。

## 参考文献

[1]王文龙等. 浅论高密度电法在工程勘探中的应用效果. 物探与化探，1995，(3)：

[2]张献民等. 应用高密度电法探测煤田陷落柱. 物探与化探 1994，(5)

[3]郑传森等. 电测深假类型曲线和计算机解释. 物探与化探 1986，(3)

[4]王兴森等. 高密度电法电阻率图像重建的佐迪(zohdy)反演方法. 物探与化探 1996，(1)

# Application of the High Density Resistivity Method to the Underground Culvert Exploration

Tong Hongzhi

(Department of earth sciences, East China Geological Institute, linchuan, JX 344000)

Gong Yunpeng

(Chifeng City Electricity Bureau, Chifeng, Inner Mongolia, 024000)

**Abstract** The high density resistivity method is newly developed resistivity method. It has the features of low cost, high efficiency, dense measuring points, more abundant information about ground resistivity, and easy to interpret comparing with common resistivity method. This paper applies it to the underground culvert exploration. The results shows that the high density resistivity method can obtain better quality figure and smaller interpretation error. It is a convenient practical engineering geophysics method with better effect, and can be widely used in engineering exploration.

**Key Words** the high density resistivity method; engineering geophysics; the underground culvert