

黄俊革,王家林,阮百尧. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究. 地球物理学报, 2006, 49(4):1206~1214
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(4):1206~1214

三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元 模拟异常特征研究

黄俊革¹, 王家林¹, 阮百尧²

1 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092

2 桂林工学院资源与环境工程系, 桂林 541004

摘要 工程电法勘探中,常需要探测埋深不大、规模较小、分布复杂的目标体,对探测方法的精度要求较高.由于三维高密度电阻率法数据采集密度大,可对目标体进行多方位观测,是目前工程探测中常用的方法之一.本文对三维高密度电阻率 E-SCAN 法的视电阻率异常特征进行研究.设计几种典型地质体模型,利用有限单元法进行正演计算,并分析其异常特征和分布规律.算例结果表明, E-SCAN 法对低阻体的分辨能力强于高阻体.无需对所有电极进行扫描供电观测,即可分辨地质体电性特征及水平位置,但观测结果难以分辨地质体纵向延伸.

关键词 三维, 高密度, 电阻率, E-SCAN 法, 视电阻率异常

文章编号 0001-5733(2006)04-1206-09

中图分类号 P631

收稿日期 2005-06-28, 2006-04-26 收修定稿

A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey

HUANG Jun-Ge¹, WANG Jia-Lin¹, RUAN Bai-Yao²

1 School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

2 Department of Resources and Environment Engineering, Guilin Institute of Technology, Guilin 541004, China

Abstract Geological bodies of small buried depths, small sizes, and complex distribution are often needed to be explored in engineering electric prospecting. Higher accuracy of detective methods is required. Using the 3-D high-density resistivity method, which is one of the normal methods in engineering prospecting, we can get plenty of data and detect the bodies in many bearings. A study of anomaly features in 3-D high-density E-SCAN resistivity survey is done in this paper. Several classical models are designed and calculated using the finite element method to study their anomalous features. The results show that, the resolving power of E-SCAN on low resistivity bodies is stronger than on high resistivity bodies. It dispenses with setting power on all electrodes and can distinguish geologic body's electrical properties and positions. But it is difficult to identify the downward extension of geological bodies by the measurements.

Keywords Three dimension, High-density, Resistivity, E-SCAN, Apparent resistivity anomaly

1 引言

高密度电阻率测量已在工程勘查、寻找地下水、

考古探测等方面得到广泛应用^[1-5]. 由于高密度电阻率法采集信息量大, 兼顾剖面 and 测深两种分支方法的优点, 加之一次性布设电极、仪器自动观测, 提高了生产效率, 取得了良好的地质效果. 目前, 高密

基金项目 国家自然科学基金项目(40064001), 上海博士后基金资助项目(05R214143).

作者简介 黄俊革, 男, 1966 生, 博士, 副教授. 2003 年于中南大学信息物理工程学院获博士学位. 目前在同济大学海洋与地球科学学院做博士后研究. 主要研究方向为电法勘探、地球物理数值模拟. E-mail: hjunge@163.com

度电阻率法普遍采用二维勘探方式,对其异常特征的研究已非常成熟^[6-13]。当需要进行面积测量时,通常先在一条测线上布设电极进行观测,然后转移到其他测线进行观测,多个剖面观测完成后再将观测结果进行数据处理和解释。对于小范围、电性分布复杂的地质体的探测,例如古墓、高低阻管道等,这种由线到面的测量方式工作效率较低,观测信息量和精度难以达到要求。如将电极按 E-SCAN^[14-21] 法布设,即所谓三维高密度电阻率法,一次布极、观测就可取得所有信息。在国内,三维电阻率法的仪器设备已开发完成,但该方法在实际工程探测中尚未普遍使用,对其异常形态特征的系统研究、认识不足。本文利用齐次边界条件下的有限单元异常电位法^[22-25]对常见的地质体的 E-SCAN 法异常进行正演计算,分析其异常特征,以指导野外生产。

2 E-SCAN 三维高密度法

E-SCAN 三维高密度电阻率测量方法使用单极-单极装置进行观测,即常规电法勘探中所使用的二极装置,其基本思想是将电极以均匀网格方式布设在地面上进行面积测量,无穷远极 B 、 N 在测区外 5~10 倍最大 AM 距离外分开布设。以 120 根电极为例,电极布设示意图见图 1 所示。在进行二极法剖面测量时,记录点为 M ,E-SCAN 的记录点与之相同;在进行测深工作时,二极法记录点位于 AM 中点,记录深度为 AM 或 $AM/2$ 。

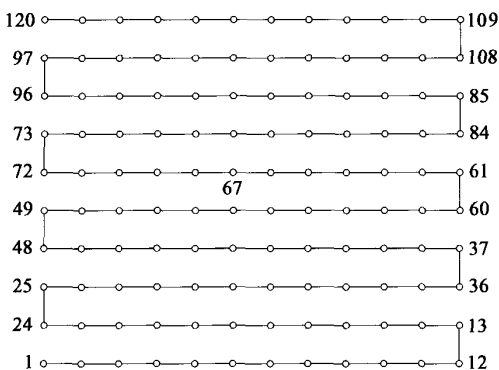


图 1 E-SCAN 三维高密度电阻率测量电极布设示意图

Fig. 1 Diagram of electrode array for 3-D high-density E-SCAN resistivity measurement

实际工作中,首先在 1 号电极供电,其他电极依次测量电位,然后依次更换供电点做类似测量。为节省工作时间,根据互换原理,后续电极供电时,无需

观测序号小于供电电极的测量电极电位。供电次数为 $n-1$,观测总量 $N = n(n-1)/2$ 。

3 三维模型计算

大多数工程地质勘探中的三维体,与围岩之间的电性差异较大,为三维高密度电阻率法的实施提供了良好的地球物理前提。野外常见的三维地质体大致有以下几种:低阻立方体或球体,例如局部充水溶洞、球形金属体等;高阻立方体或球体,例如无水溶洞、古墓等;低阻长方体、圆柱体,例如延伸较长的充水溶洞、金属管道等;高阻长方体、圆柱体,例如延伸较长的溶洞、混凝土管道等;水平、倾斜、直立的高低阻板状体,例如高阻石英脉、含水破碎带等。数值模拟实施工程中所采用观测装置与通常的实际工作装置完全相同,布设电极数为 120 个,将所有电极均匀网格化为 12×10 ,其中 X 方向 12 个电极, Y 方向 10 个电极;点距、线距均为 1 m;电极编号如图 1 标注所示。

为保证计算精度和速度,文中采用齐次边界条件下的有限单元异常电位法对上述这些三维体的电阻率异常特征进行数值模拟。有限单元法在处理复杂的几何形状和边界时,其灵活性和适应性很强。有限单元异常电位数模模拟方法中由于不包含电源项,计算精度高,适应性强^[22,23]。通过简化异常电位算法的边界条件,齐次边界条件下的有限单元法可在保证精度的前提下大幅度提高计算速度^[24,25]。将整个区域用六面体进行剖分, X 方向剖分单元数为 48 个, Y 方向为 38 个, Z 方向为 20 个;区域中心的 $40 \times 30 \times 16$ 范围内单元剖分均匀,称为目标区;其余部分为边界区,单元大小呈指数关系递增,以模拟无穷远边界。将全区域的积分分解为每个单元的积分,将各单元的积分相加,可以得到以下方程组:

$$Ku = -K'u_0,$$

其中 K 和 K' 为系数矩阵, u 为待求异常电位向量, u_0 为正常电位向量, $u_0 = I\rho/(2\pi r)$,解方程组,可得各节点的异常电位 u ,与预先计算的各节点正常电位 u_0 相加,便可得到节点的总电位。

3.1 立方体模型

单个立方体尺寸为 $4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$,埋深 1 m,平面与空间具体位置如图 2(a,b)所示;围岩电阻率 $100 \Omega\text{m}$,低阻体电阻率为 $5 \Omega\text{m}$,高阻体的电阻率为 $2000 \Omega\text{m}$ 。由于立方体具有对称性,设计 3 个供电点,分别是位于远离立方体的 1 号点、立方体正上方的

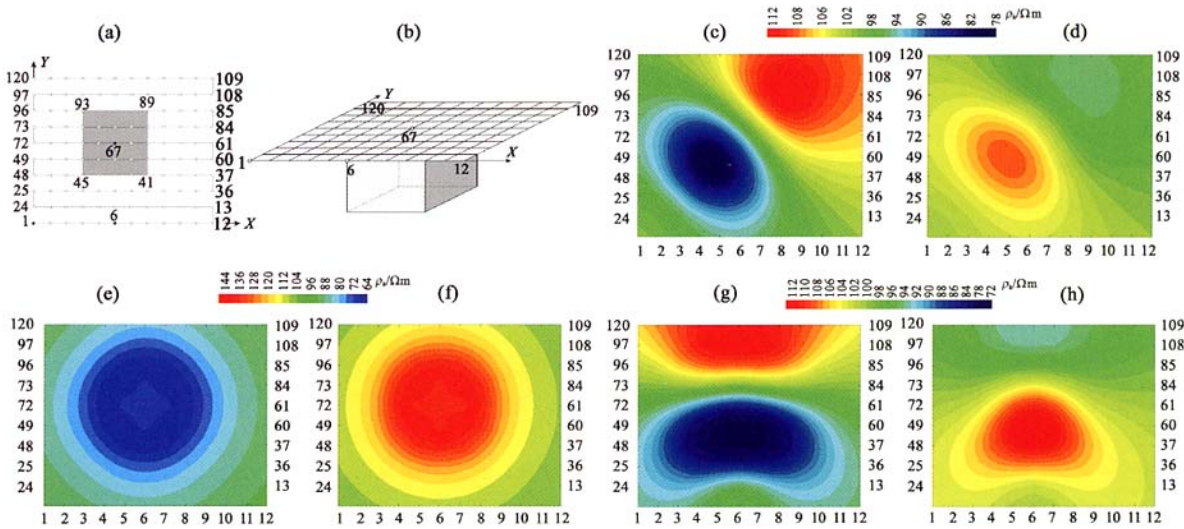


图 2 低阻、高阻立方体 E-SCAN 法视电阻率平面图

(a) 测线、模型平面示意图; (b) 测线、模型空间示意图; (c) 1 号点供电低阻立方体异常; (d) 1 号点供电高阻立方体异常; (e) 67 号点供电低阻立方体异常; (f) 67 号点供电高阻立方体异常; (g) 6 号点供电低阻立方体异常; (h) 6 号点供电高阻立方体异常。

Fig. 2 Apparent resistivity plans of E-SCAN on a cubic

(a) Plane diagram of survey line and model; (b) Spatial diagram of survey line and model; (c) Anomaly of low-resistivity cubic, No.1 power; (d) Anomaly of high-resistivity cubic, No.1 power; (e) Anomaly of low-resistivity cubic, No.67 power; (f) Anomaly of high-resistivity cubic, No.67 power; (g) Anomaly of low-resistivity cubic, No.6 power; (h) Anomaly of high-resistivity cubic, No.6 power.

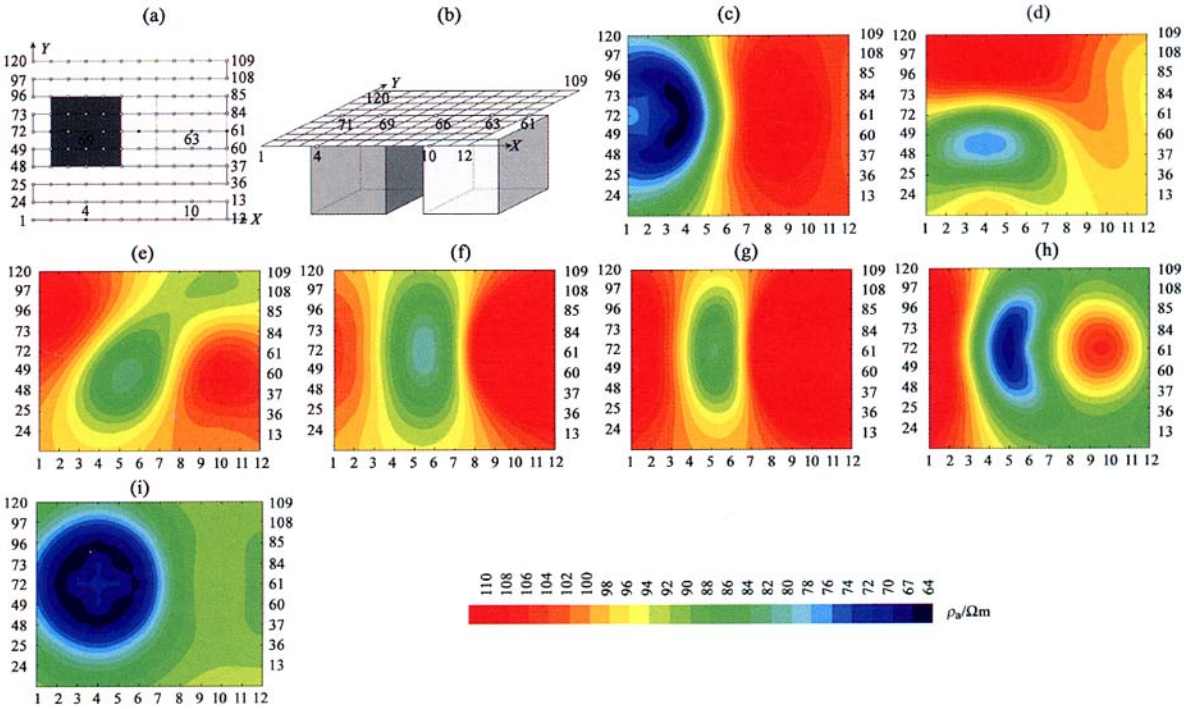


图 3 复杂地质体分布 E-SCAN 法视电阻率平面图

(a) 测线、模型平面示意图; (b) 测线、模型空间示意图; (c~i) 分别为 71、4、10、61、63、66、69 号点供电高低阻立方体异常。

Fig. 3 Apparent resistivity planes of E-SCAN on complex geologic bodies

(a) Plan diagram of survey line and model; (b) Spatial diagram of survey line and model; (c~i) Anomalous of geologic bodies, No. 71, No. 4, No. 10, No. 61, No. 63, No. 66 and No. 69 power.

67 号点以及立方体侧面的 6 号点。

图 2c, 2d 分别为供电点位于 1 号点时低阻体和高阻体的视电阻率平面等值图。从这两图中均可以看到成对出现的低阻异常和高阻异常;高、低阻异常连线均指向源点,连线的中点对应立方体的中心。两图中异常所在的位置恰好相反:低阻体的低阻异常出现在源点一侧,高阻体的异常形态相反,低阻异常出现在远离源点的一侧。图 2c 的低阻异常幅值最大为 15.7%,而最大高阻异常为 11.8%,略低于低阻异常;图 2d 的低阻异常幅值最大达到 5.7%,而最大高阻异常为 8.9%,异常幅值略高于低阻异常。总体来说,对低阻体的分辨能力要稍强一些。图 2(e, f)分别为供电点位于 67 号点(立方体正上方)时低阻体和高阻体的视电阻率平面等值图。两张图的电阻率异常与立方体的电性、位置有严格的对应关系,没有出现干扰异常。低阻体低阻异常最大幅值为 35.6%,高阻体高阻异常最大幅值为 43.4%,对高阻体的分辨强于低阻体。

当供电点位于立方体侧面时(6 号点,图 2g, 2h),异常位置及形态与电源位于 1 号点时的异常相差不多,异常幅值和宽度相对要大一些;异常连线中心向电源点反方向稍稍偏离立方体中心位置。

实际工作中,地下介质分布复杂,高低阻并存的情况比比皆是。这种情形下 E-SCAN 法的异常形态和特征与上述单个立方体异常相比,其推断解释要复杂得多。在下例中,将两个大小、埋深相同的高、低阻立方体设计在同一模型中进行计算。立方体尺寸均为 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 4\text{ m}$,埋深 1 m,两地质体水平距离 2 m,平面与空间具体位置如图 3(a, b)所示;围岩电阻率 $100\ \Omega\text{m}$,低阻立方体电阻率为 $5\ \Omega\text{m}$,高阻立方体电阻率为 $2000\ \Omega\text{m}$ 。根据高低阻地质体分布,设计供电点 7 个,布设在 71、4、10、61、63、66 以及 69 号电极上。计算结果平面图见图 3(c~i)所示。

71、4 号电极,分别位于低阻立方体的两个不同侧面的中心延长线上,4 号电极与低阻体的距离要稍远些;由图 3(c, d)可知:低阻异常和高阻异常成对出现,高低阻异常连线均指向源点,低阻异常靠近源点。这一特征与单个低阻体异常形态非常近似(图 2(c, g))。

图 3(e~h)分别为供电点位于高阻立方体的两个不同侧面的中心延长线上(10、61 号电极)、高阻立方体中心正上方(63 号电极)以及两立方体正中(66 号电极)的视电阻率平面图。其共同的异常特征是:

① 测区内存在两个高阻异常和一个低阻异常,低阻异常位于两高阻异常之间;

② 供电点附近的高阻异常与高阻立方体的水平位置相对应;

③ 远离供电点的高阻异常与低阻异常成对出现,高、低阻异常中心与供电点呈一直线(这一点在图 3e 中尤其明显),高、低阻异常连线中点对应低阻体中心;

④ 低阻异常幅值与供电点和低阻体之间距离成反比。

图 3i 为供电点位于低阻体正上方 69 号电极时的视电阻率平面图。图中不存在高阻异常,低阻异常呈规则圆形,异常中心对应低阻立方体中心,异常范围与低阻体的水平分布相吻合。

在实际工作中,可先根据平面图中较明显的异常响应推测出低阻体的水平位置,然后将供电点远离低阻体,探测高阻体的覆存情况。

3.2 长方体或柱体模型

有一定走向长度的三维体,在实际工作中比较常见。金属管道、充填水或泥土的溶洞表现为低阻,非金属管道和空洞则表现为高阻。

长方体的直径大小一般不会影响异常的形态,圆柱体和长方体的电阻率异常形态也不会有很大差异。这里采用截面为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的长方体进行计算,长度为 15 m 左右,位于测区对角线上,埋深 1 m。由于柱体具有一定走向长度,设计 3 个供电点进行观测,分别分析其异常特征。这 3 个供电点分别位于柱体端头的 1 号点、柱体中心上方的 67 号点以及柱体外侧的 120 号点。具体测线布设和模型位置见图 4a, 4b。

图 4(c, d)分别为供电点位于 1 号点时低阻长方体和高阻长方体的视电阻率平面等值图。此时,供电点位于长方体端头。图 4c 中既有高阻异常,又有低阻异常,高阻异常最大幅值为 37.6%,远远高于低阻异常最大幅值 20.8%,低阻异常有封闭等值线圈,高阻异常为半封闭曲线;高低阻异常中心连线与异常体走向一致。图 4d 中几乎没有低阻异常出现,在供电点附近形成高阻闭合异常,其形态与高阻立方体中心处供电时的异常相似;异常幅值较低,最大异常只有 12%。

图 4(e, f)分别为供电点位于 67 号点时低阻长方体和高阻长方体的视电阻率平面等值图。供电点位于长方体中心。图 4e 的中心有一明显的低阻异常闭合圈,异常形态为椭圆,长轴方向与低阻体走向垂直;在低阻异常两侧存在两个未封闭的高阻异常。三

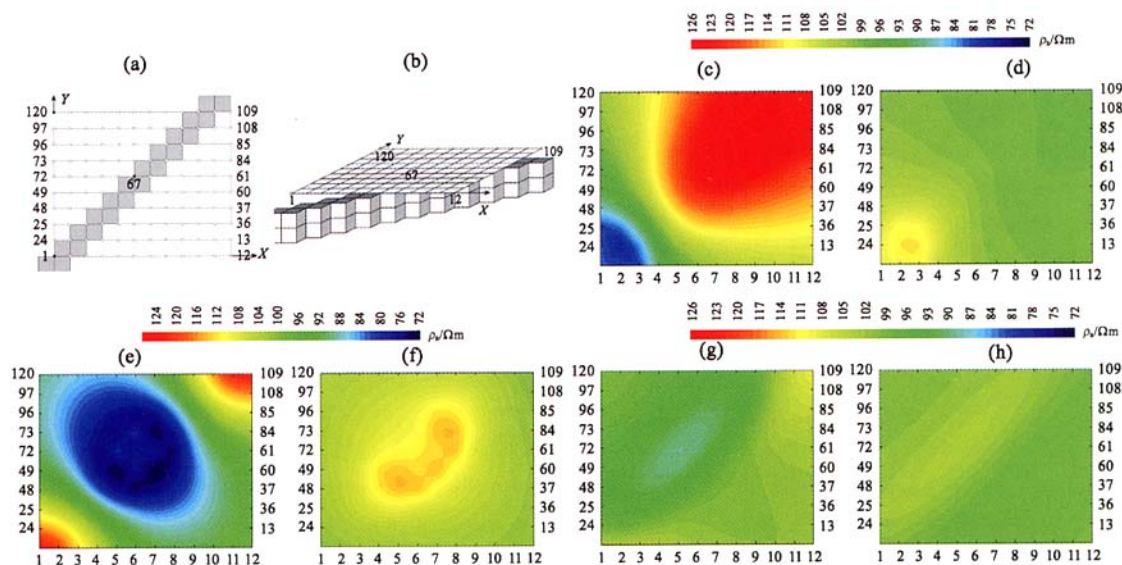


图 4 低阻、高阻长方体 E-SCAN 法视电阻率平面图

(a) 测线、模型平面示意图; (b) 测线、模型空间示意图; (c, d) 为 1 号点供电低阻、高阻长方体异常; (e, f) 为 67 号点供电低阻、高阻长方体异常; (g, h) 为 120 号点供电低阻、高阻长方体异常。

Fig. 4 Apparent resistivity planes of E-SCAN on a cuboid

(a) Plane diagram of survey line and model; (b) Spatial diagram of survey line and model; (c, d) Anomalous of low-resistivity cuboid and high-resistivity, No. 1 power; (e, f) Anomalous of low-resistivity cuboid and high-resistivity cuboid, No. 67 power; (g, h) Anomalous of low-resistivity cuboid and high-resistivity cuboid, No. 120 power.

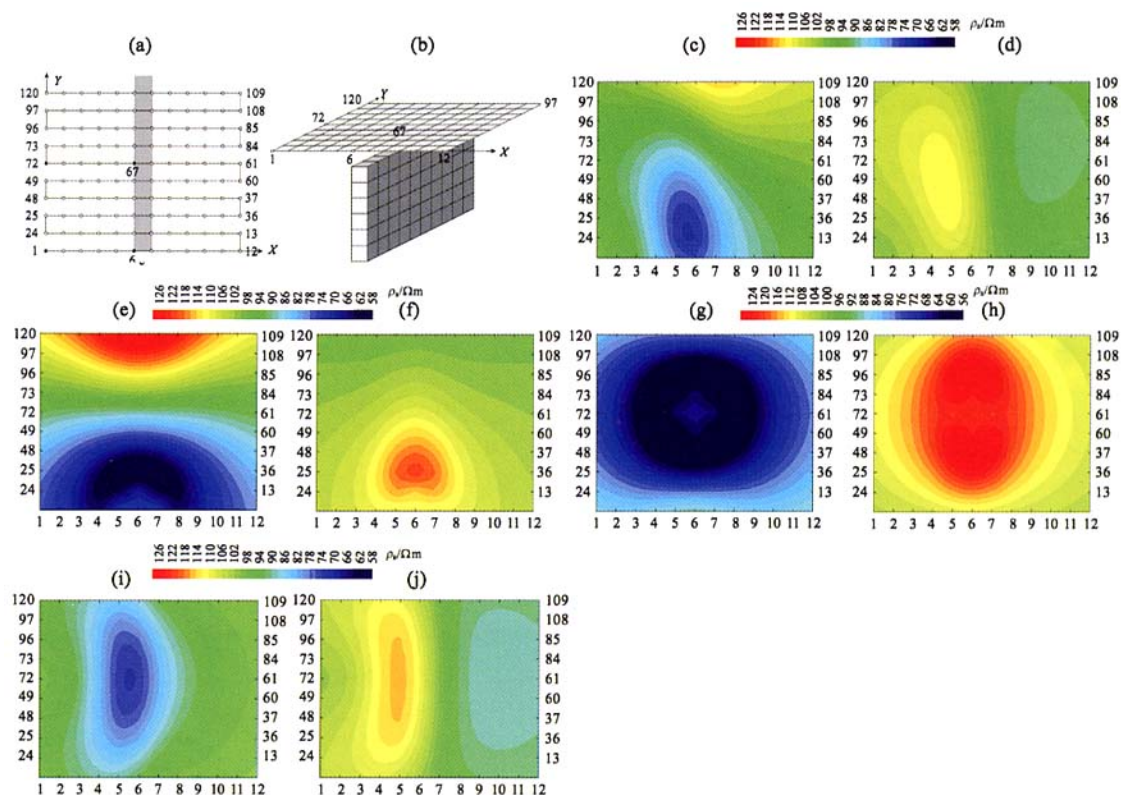


图 5 直立低阻、高阻板状体 E-SCAN 法视电阻率平面图

(a) 测线、模型平面示意图; (b) 测线、模型空间示意图; (c, d) 1 号点供电低阻、高阻板状体异常; (e, f) 6 号点供电低阻、高阻板状体异常; (g, h) 67 号点供电低阻、高阻板状体异常; (i, j) 72 号点供电低阻、高阻板状体异常。

Fig. 5 Apparent resistivity planes of E-SCAN on a vertical plate-shaped body

(a) Plane diagram of survey line and model; (b) Spatial diagram of survey line and model; (c, d) Anomalous of low-resistivity table and high-resistivity table, No. 1 power; (e, f) Anomalous of low-resistivity table and high-resistivity table, No. 6 power; (g, h) Anomalous of low-resistivity table and high-resistivity table, No. 67 power; (i, j) Anomalous of low-resistivity table and high-resistivity table, No. 72 power.

个异常连线与低阻体走向吻合.图 4d 中只存在高阻异常,幅值小,只有 14% 左右,其走向与异常体一致.

当供电点位于异常体两侧时,无论低阻体还是高阻体,异常简单明了,性质与地质体电性相吻合,空间位置也对应较好,见图 4(g, h).只是异常幅值不高,低阻异常为 10% 左右,高阻异常要低些,只有 3% 左右.按电法勘探的标准说来,高阻长方体平面图中不存在高阻异常.

柱体的探测中,低阻柱体上方供电和高阻柱体端头上方供电所观测的视电阻率曲线,最易产生错误解释.对于低阻柱体,可在高低阻异常中心连线的垂直线上供电便可识别.高阻柱体旁测时异常较微弱,最好以高阻异常为中心做米字形供电观测,需要的工作量稍大于低阻体.

3.3 高、低阻板状体

实测工作中板状体的延伸一般较长.这里,采用有限长度的板状体进行计算,延伸较大的板状体可参照进行解释.计算模型分为直立板状体和水平板状体,厚度 1 m,埋深均为 1 m.围岩电阻率为 100 Ωm ,低阻板为 5 Ωm ,高阻板为 2000 Ωm .

直立板状体模型走向延伸 10 m,垂向延伸 6 m,位于测区中心,走向沿 Y 方向.板体两侧测点对称,故设计 4 个供电点,其一为任意点,设置在远离板体的 1 号点;其二置于板体端头的 6 号点;第三个供电点置于板体中心正上方的 67 号点,第四个位于板体走向中垂线的 72 号点.模型设计见图 5(a, b).

1 号点供电时,供电点距离板体中心较远,异常幅值较小.图 5c 的低阻板异常中,低阻条带状异常出现在靠近电源点一侧板体端头上方附近,向电源点方向稍有偏离;板体另一端头表现为未封闭的高阻异常,中心位置相对于板体稍稍偏离,偏离方向与低阻异常相反;高低阻异常连线与板体走向间有一小夹角.图 5d 的高阻板异常图中,高低阻异常分别出现在板体两侧,高阻异常幅值大于低阻异常,均呈椭圆形,长轴方向与板体平行.

板体端头上方 6 号点供电,图 5e 的低阻板异常与图 4c 的柱体异常相似,电源点附近表现为大范围、大幅度低阻异常,板体另一端则为形态相似的高阻异常,异常分界点在板体中心;高低阻连线与板体走向对应.相对于低阻板,高阻板异常形态非常简单,异常幅值较小,但没有假异常,这一点与低阻板异常区别较大,见图 5f 所示.“桃形”高阻异常出现在电源点和板体中心之间,桃尖在板体中心附近,

“桃心线”与板体走向对应.

图 5(g, h)分别为板体中心上方供电低阻、高阻板异常图.低阻板异常整体大致呈长方形分布,长边与板体垂直,板体走向反而与异常短边对应,这一点与图 4e 的柱体异常类似;最大异常分布在以板体中心为圆心的圆环内,板体中心为次低阻.高阻板高阻异常呈纺锤形,长轴对应板体走向.

当供电点位于板体中垂线上时,图 5(i, j)的低、高阻异常与板体位置、走向、电性对应良好,比较直观.

无论供电点位置如何,直立板状体的电阻率异常均较明显分辨,选取两个相隔较大的供电点进行观测,即可分辨异常位置和电性.不过,直立板异常与柱体异常的形态差异并不大,表明 E-SCAN 法对地质体的纵向反应不理想.

水平板状体的供电点设置与直立板模型相同,分别位于水平板中心 67 号点、水平板端头 6 号点、水平板中垂线上的 72 号点以及测区边缘 1 号点.图 6(a, b)为模型示意图.

当供电点位于低阻板体中心时,低阻异常近似为圆形,与低阻立方体异常相同,平面图中只有低阻异常.当供电点位于低阻板体外侧时,在板体近电源点一侧存在低阻异常,另一侧表现为高阻异常,各个异常中心与板体边缘对应,高低阻异常连线中心位置对应板体中心;同时,低阻异常的幅值和范围小于高阻异常.见图 6c, 6e, 6g, 6i 所示.

高阻水平板的异常形态与低阻板完全不同,平面图中只存在高阻异常.板体外侧非中心位置供电时(1 号点,图 6b),高阻异常中心偏离板体中心,近电源点的板体边缘对应高阻异常中心.在板体端头、中心、中垂线上的供电点,观测的高阻异常位置与板体对应得非常好.

无论水平板的电性如何,异常形态与立方体异常形态类似,同样说明了 E-SCAN 法对地质体深部信息反应不佳.

为进一步验证结论,对高阻水平板和高阻立方体这两个地表投影形态相似、深部延伸不同的地质体异常进行比较.具体做法是:分别将图 2 中高阻立方体和图 6 中高阻水平板上方各个电极逐一供电(共 119 个供电点),并观测所有 7140 个电极的数据,以 $AM/2$ 为探测深度,以 AM 中点作为水平记录点,相同探测深度数据做深度切片图.当同一位置记录点对应不同的供电点和观测点时,将视电阻率值进行叠加平均.最小切片深度取 0.5 m,深度切片间

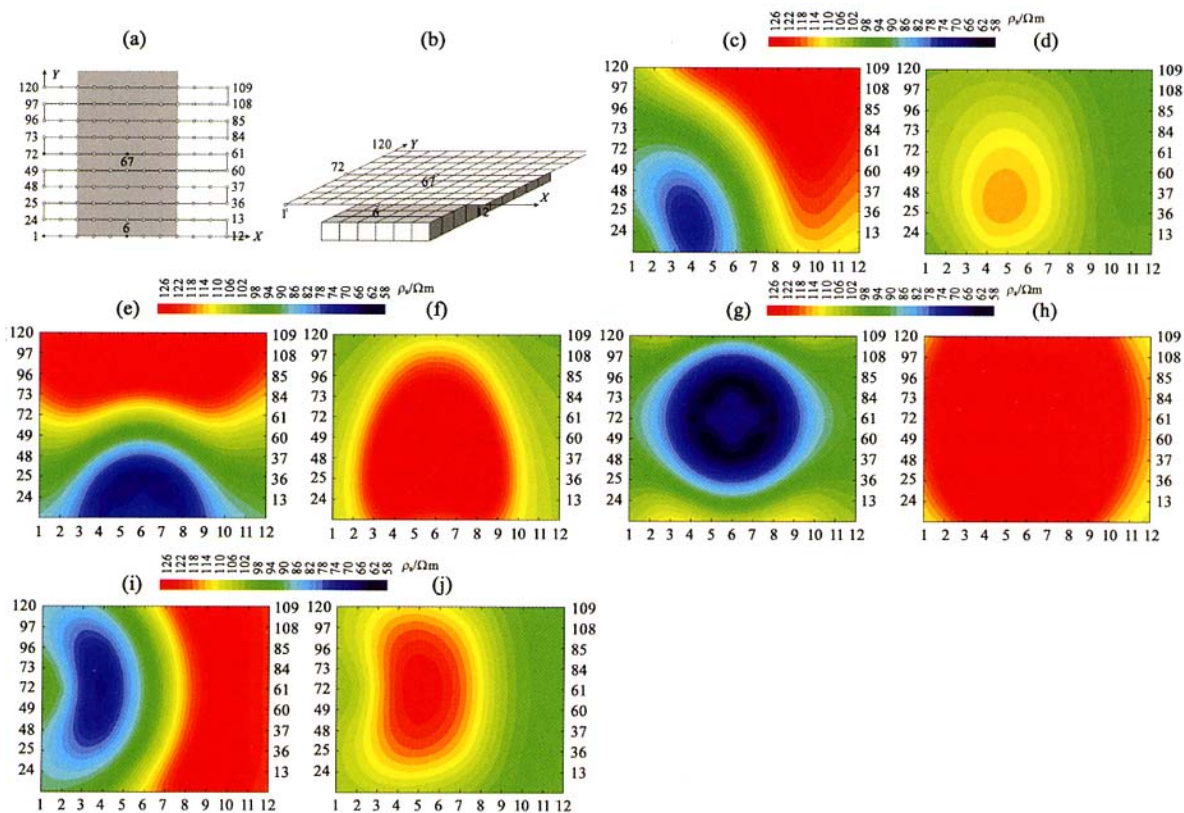


图 6 水平低阻、高阻板状体 E-SCAN 法视电阻率平面图

(a) 测线、模型平面示意图;(b) 测线、模型空间示意图;(c, d) 水平低阻、高阻板外侧 1 号点供电观测异常;(e, f) 水平低阻、高阻板端头 6 号点供电观测异常;(g, h) 水平低阻、高阻板中心 67 号点供电观测异常;(i, j) 水平低阻板、高阻中线 72 号点供电观测异常。

Fig.6 Apparent resistivity plans of E-SCAN on a horizontal plate-shaped body

(a) Plan diagram of survey line and model; (b) Spatial diagram of survey line and model;

(c, d) Anomalous of low-resistivity and high-resistivity table, No.1 power; (e, f) Anomalous of low-resistivity and high-resistivity table, No.6 power; (g, h) Anomalous of low-resistivity and high-resistivity table, No.67 power;

(i, j) Anomalous of low-resistivity and high-resistivity table, No.72 power.

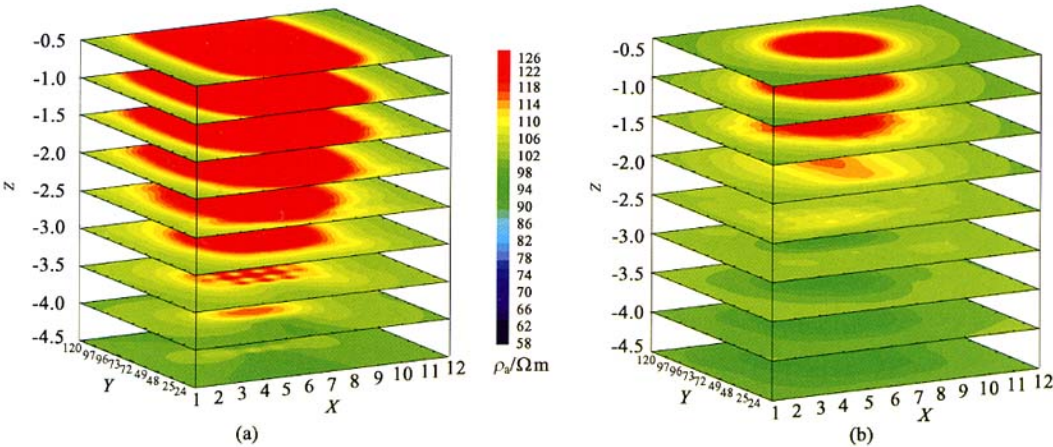


图 7 E-SCAN 法视电阻率深度切片图

(a) 高阻水平板状体;(b) 高阻立方体。

Fig.7 Slicing map on depth of E-SCAN

(a) High-resistivity horizontal tabular body; (b) High-resistivity cubic.

隔 0.5m,最大切片深度取 4.5m.切片图见图 7(a, b),图中 X, Y 坐标与平面图相同.图 7a 的水平板异常切片图中,高阻异常深部延伸比图 7b 的立方体异常要大得多,这是由于水平板的水平分布范围大于立方体所造成的.两图的对比说明,水平分布范围对 E-SCAN 法异常的影响要比深部延伸影响大. E-SCAN 法对深部信息的反映弱很多.

4 结论与建议

(1)采用 E-SCAN 法进行三维高密度电阻率测量,根据几个供电点的异常特征,便可以高效率地探测、解释浅部异常体的水平位置和分布范围.

(2)无论供电点位置如何,高密度 E-SCAN 法对低阻体的响应均非常明显,勘探效果非常好;相比较而言,高密度 E-SCAN 法探测高阻体的效果较差;当高低阻异常体并存时,供电点位置的选取对高阻体的探测有一定影响.建议在实际工作中首先推测低阻体位置,然后在高阻体周围设置供电点进行进一步探测.

(3)当供电点位于地质体正上方时,可根据异常平面图基本准确判断异常体的形状、大小和电性.当供电点不在立方体上方时,可根据高低阻异常位置的连线中点判断异常体中心位置,并根据低阻异常或高阻异常的相对位置和大小判断异常体性质:当低阻异常出现在供电点一侧时,可推测为低阻体的反映;反之,则为高阻体.为判断推测的准确性,可在异常连线中心供电,重复观测一次便可得到地质体的正确信息.这样,无需对所有电极进行遍历扫描探测,观测数据由原来的 $N = n(n-1)/2$ 减少为 $2(n-1)$ 次,提高了野外和解释工作的效率.

(4)仅从平面图中视电阻率异常的特征进行分析、推断解释, E-SCAN 法对异常体深部细节分辨能力较差.全电极扫描观测并不会增加(视电阻率)深部信息的反映.

(5)建议在实际工作中,可先采用 E-SCAN 法做面积测量,确定异常范围,然后进行三维反演以了解其纵向及空间分布情况.

参考文献(References)

[1] 寇绳武,李克祥,郭舜等.高密度电阻率法探测洞穴、采空区的效果分析.工程勘察,1994,6:61~65
Kou S W, Li K X, Guo S, et al. Analysis of effect on high density resistivity method to prospect cave and exhausted working. *Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), 1994, 6: 61 ~

65

- [2] 孟琪,丑景俊.高密度电阻率法探测岩溶的应用研究.东北地震研究,1996,12(3):58~63
Meng Q, Chou J J. The application of high density resistivity method to prospecting Karst. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 1996, 12 (3): 58 ~ 63
- [3] 王士鹏.高密度电法在水文地质和工程地质中的应用.水文地质工程地质,2000,1:52~56
Wang S P. The application of high density resistivity method in hydrologic and engineering geology. *Hydrologic Geology & Engineering Geology* (in Chinese), 2000, 1: 52 ~ 56
- [4] 汤洪志,宫云鹏.高密度电阻率法在地下涵洞勘测中的应用.华东地质学院学报,1997,20(4):343~348
Tang H Z, Gong Y P. Application of the high density resistivity method to the underground culvert exploration. *Journal of East China Geological Institute* (in Chinese), 1997, 20(4): 343 ~ 348
- [5] 郭秀军,王兴泰.用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题.物探与化探,2001,25(4):306~315
Guo X J, Wang X T. Some problem in the application of high density resistivity method to cavity exploration. *Geophysics & Geochemical Exploration* (in Chinese), 2001, 25(4): 306 ~ 315
- [6] 李志武,周燕云,刘永东等.多电极直流探测系统及其应用效果.物探与化探,1996,20(6):461~473
Li Z W, Zhou Y Y, Liu Y D, et al. Multi-Electrode D.C. detection system and effects of its application. *Geophysics & Geochemical Exploration* (in Chinese), 1996, 20(6): 461 ~ 473
- [7] 丑景俊,王进,孟琪.高密度电阻率法应用技术研究.东北地震研究,1995,11(4):54~57
Chou J J, Wang J, Meng Q. Research on application technology of high density resistivity prospecting. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 1995, 11(4): 54 ~ 57
- [8] 汤洪志,周亚东,徐飞等.高密度电阻率法二维成像方法及其应用.华东地质学院学报,2003,26(1):87~94
Tang H Z, Zhou Y D, Xu F, et al. Method and application examples of 2-D high-density resistivity imaging. *Journal of East China Geological Institute* (in Chinese), 2003, 26(1): 87 ~ 94
- [9] 罗延钟,谭义东.高密度电阻率法新观测方案及其数据处理和成图软件系统.物探化探计算技术,1996,18(2):134~140
Luo Y Z, Tan Y D. A new scheme of high density resistivity method and its data processing-plotting software system. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1996, 18(2): 134 ~ 140
- [10] 宁淑敏,潘玉玲,魏文博.高密度电阻率法中二极装置的一些理论与实验研究结果.现代地质——中国地质大学研究生院学报,1994,8(2):209~215
Ning S M, Pan Y L, Wei W B. Theoretical studies and test results of high density resistivity method with double-pole device. *Geoscience, Journal of Graduate School, China University of Geosciences* (in Chinese), 1994, 8(2): 209 ~ 215
- [11] 底青云,倪大来,王若等.高密度电阻率成像.地球物理学进展,2003,18(2):323~326
Di Q Y, Ni D L, Wang R, et al. High density resistivity image.

- Progress in Geophysics* (in Chinese), 2003, **18**(2): 323 ~ 326
- [12] 杨文强. 三维任意形体高密度电阻率法数值模拟方法. 物探化探计算技术, 1997, **19**(3): 270 ~ 278
Yang W Q. The forward modeling method of high density resistivity curves for a 3-D body. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 1997, **19**(3): 270 ~ 278
- [13] 郭秀军, 王兴泰. 利用高密度电阻率法进行断层破碎带探查的数值模拟方法. 青岛海洋大学学报, 2001, **31**(5): 755 ~ 761
Guo X J, Wang X T. Numerical simulation method in the exploration of faultage with high density resistivity. *Journal of Ocean University of Qingdao* (in Chinese), 2001, **31**(5): 755 ~ 761
- [14] Li Y, Oldenburg D W. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International*, 1992, **109**: 343 ~ 362
- [15] Loke M H, Barker R D. Practical techniques for 3-D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, 1996, **44**: 499 ~ 523
- [16] Griffiths D H, Barker R D. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, 1993, **29**: 211 ~ 226
- [17] Loke M H, Barker R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophys. Prosp.* 1996, **44**: 499 ~ 523
- [18] Xu B, Noel M. On the completeness of data sets with multielectrode systems for electrical resistivity survey. *Geophys. Prosp.* 1993, **41**: 791 ~ 801
- [19] Dey A, Morrison H F. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures *Geophysics*, 1979, **44**: 753 ~ 780
- [20] Robain H, Alouy Y, Dabas M, et al. The location of infinite electrodes in pole-pole electrical surveys: Consequences for 2D imaging. *J. Appl. Geophys.*, 1999, **41**: 313 ~ 333
- [21] Dahlin T, Bernstone C, Loke M H. A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Lernacken, Sweden. *Geophysics*, 2002, **67**: 1692 ~ 1700
- [22] 徐世浙. 地球物理中的有限单元法. 北京: 科学出版社, 1994. 178 ~ 188
Xu S Z. The Finite Element Method in Geophysics (in Chinese). Beijing: Science Press, 1994. 178 ~ 188
- [23] 阮百尧, 熊彬, 徐世浙. 三维地电断面电阻率测深有限元数值模拟. 地球科学, 2001, **26**(1): 73 ~ 77
Ruan B Y, Xiong B, Xu S Z. Finite element method for medeling resistivity sounding 3-D geo-electric section. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2001, **26**(1): 73 ~ 77
- [24] 黄俊革, 阮百尧, 鲍光淑. 齐次边界条件下三维地电断面电阻率有限元数值模拟法. 桂林工学院学报, 2002, **22**(1): 11 ~ 14
Huang J G, Ruan B Y, Bao G S. FEM under quantic-boundary condition for modeling resistivity on 3-D geoelectric section. *Journal of Guilin Institute of Technology* (in Chinese), 2002, **22**(1): 11 ~ 14
- [25] 黄俊革. 三维电阻率/极化率有限元正演模拟与反演成像[博士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2003
Huang J G. 3-D resistivity/IP modeling and inversion based on FEM [Ph. D. thesis] (in Chinese). Changsha: Central-South University, 2003

(本文编辑 汪海英)