

# 高密度电法的发展与应用

董浩斌, 王传雷

(中国地质大学 地球物理系, 湖北 武汉 430074)

**摘 要** 文中从电极排列、反演处理方法、仪器等几个方面,介绍了高密度电法的发展,说明了所有电极排列方式是从对称四极、单极-偶极和单极-单极发展而来。在反演方法软件方面,介绍了基于圆滑约束最小二乘法及计算机反演快速计算程序。同时,提出供电时间、极化补偿和电极转换开关是高密度电法仪器发展的关键技术。文中列举了高密度电法在多个领域的应用简况,最后提出了高密度电法在今后发展的趋势为高密度激发极化法、三维高密度电阻率法。

**关键词** 高密度电法,电极排列,反演软件,仪器,电阻率成像

中图分类号:P631.3 文献标识码:A 文章编号:1005-2321(2003)01-0171-06

## 1 高密度电法发展概况

这里的高密度电法指的是直流高密度电阻率法,但由于从中发展出直流激发极化法,所以统称高密度电法。高密度电阻率法实际上是一种阵列勘探方法,野外测量时只需将全部电极(几十至上百根)置于测点上,然后利用程控电极转换开关和微机工程电测仪便可实现数据的快速和自动采集。当测量结果送入微机后,还可对数据进行处理并给出关于地电断面分布的各种物理解释的结果。显然,高密度电阻率勘探技术的运用与发展,使电法勘探的智能化程度大大向前迈进了一步。由于高密度电阻率法所具备的上述优势,因此相对于常规电阻率法而言,它具有以下特点(1)电极布设是一次完成的,这不仅减少了因电极设置而引起的故障和干扰,而且为野外数据的快速和自动测量奠定了基础。(2)能有效地进行多种电极排列方式的扫描测量,因而可以获得较丰富的关于地电断面结构特征的地质信息。(3)野外数据采集实现了自动化或半自动化,不仅采集速度快(大约每一测点需 2~5 s),而且避免了由于手工操作所出现的错误。(4)可以对资料进行预处理并显示剖面曲线形态,脱

机处理后还可以自动绘制和打印各种成果图件。(5)与传统的电阻率法相比,成本低、效率高,信息丰富,解释方便,勘探能力显著提高。

关于阵列电探的思想在 20 世纪 70 年代末期就有人开始考虑实施,英国学者所设计的电测深偏置系统实际上就是高密度电法的最初模式,80 年代中期,日本地质计测株式会社曾借助电极转换板实现了野外高密度电阻率法的数据采集,只是由于整体设计的不完善性,这套设备没有充分发挥高密度电阻率法的优越性。80 年代后期,我国原地质矿产部系统率先开展了高密度电阻率法及其应用技术研究,从理论与实际结合的角度,进一步探讨并完善了方法理论及有关技术问题,也研制成了几种类型的仪器。

目前,研究高密度电法的方法技术和仪器的主要有中国地质大学等,生产仪器的还有原长春地质学院、重庆的有关仪器厂家。

近年来该方法先后在重大场地的工程地质调查、坝基及桥墩选址、采空区及地裂缝探测等众多工程勘察领域取得了明显的地质效果和显著的社会经济效益。

## 2 高密度电法电极排列的发展

(1)高密度电阻率法测量方式:高密度电法开始时,研究的排列方式主要有 3 种: $\alpha$ 、 $\beta$  和  $\gamma$ <sup>[1~8]</sup>。现在排列方式已发展到十几种。不过仔细研究就可发现,所有排列都是从对称四极(施伦贝谢尔, Schlumberg-

收稿日期:2003-01-10,修订日期:2003-02-20

基金项目:国家“九五”重点攻关项目(96-221-01-02)

作者简介:董浩斌(1964—),男,博士,教授,地球物理及智能化仪器专业,主要从事地学、工控等智能化仪器仪表的研究开发、信号处理等研究和教学工作。

er) 偶极-偶极(dipole-dipole) 单极-偶极(pole-dipole) 单极-单极(pole-pole) 演变而来(其中,  $\gamma$  排列方式无变种)。如:  $AM = MN = NB$  时, Schlumberger 排列就变成  $\alpha$  排列;  $AB = BM = MN$  时, 偶极-偶极排列就变成  $\beta$  排列; 对于单极-偶极排列, 就有  $AMN$ ,  $MNB$ ,  $AM = MN$  和  $AM \neq MN$  等 4 种。至于所谓的滚动排列装置, 在电极排列方式上基本不变, 只不过是其排列方式有利剖面滚动衔接而已。

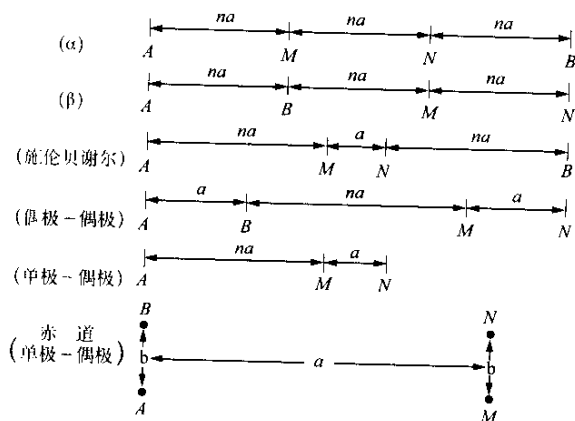


图 1 高密度电阻率法常用排列示意图

Fig.1 Common arrays used for 2D resistivity imaging surveys  
A, B—供电电极; M, N—测量电极; a—电极距; n—电极系数

(2) 高密度电阻率法反演的发展: 国内研究反演方法的很多, 如王兴泰等“电阻率图像重建的佐迪(Zohdy)反演及其应用效果”(1996年)<sup>[1~8]</sup>; 王若等“用改进的佐迪反演方法进行二维电阻率图像重建”(1998年); 张大海等“二维视电阻率断面的快速最小二乘反演”(1999年); 王丰等“改进的模拟退火方法及其在电阻率图像重建中的应用”(1999年); 王运生等“用目标相关算法解释高密度电法资料”(2001年), 但真正推出商用软件的不多。

国外主要研究计算机自动二维、三维反演。二维反演程序是基于圆滑约束最小二乘法(deGroot-Hedlin和Constable 1990, Sasaki 1992)的计算机反演计算程序, 使用了基于准牛顿最优化非线性最小二乘新算法(Loke和Barker, 1996)<sup>[7,8]</sup>, 使得大数据量下的计算速度较常规最小二乘法快 10 倍以上。圆滑约束最小二乘法基于以下方程

$$(J'J + uF)d = J'g \quad (1)$$

其中,  $F = f_x f_x' + f_z f_z'$ ;  $f_x$  = 水平平滑滤波系数矩阵(horizontal flatness filter);  $f_z$  = 垂直平滑滤波系数矩阵(vertical flatness filter);  $J$  = 偏导数矩阵;  $J' = J$  的转置

矩阵;  $u$  = 阻尼系数;  $d$  = 模型参数修改矢量(model perturbation vector);  $g$  = 残差矢量(discrepancy vector)。

这种算法的一个优点是可以调节阻尼系数和平滑滤波器以适应不同类型的资料。

反演程序使用的二维模型把地下空间分为许多模型子块。然后确定这些子块的电阻率, 使得正演计算出的视电阻率拟断面与实测拟断面相吻合。对于每一层子块的厚度与电极距之间给一定的比例系数。最优化方法主要靠调节模型子块的电阻率来减小正演值与实测视电阻率值的差异。这种差异用均方误差(RMS)来衡量。然而, 有时最低均方误差值的模型却显示出了模型电阻率值巨大的和不切实际的变化, 从地质勘察角度而言, 这并不总是最好的模型。通常, 最谨慎的逼近是选取迭代后均方误差不再明显改变的模型, 这通常在第三和第五次迭代之中出现。

M. H. Loke 的二维、三维电阻率法和激发极化法反演程序已商品化, 被国内外大多数公司、单位所使用, 并与仪器相配套。

(3) 深度问题: 电阻率法的探测深度随着供电电极 AB 距离的增加而增大, 当隔离系数  $n$  逐次增大时, AB 电极距也逐次增大, 对地下深部介质的反映能力亦逐步增加。常规电阻率法在资料处理时多是以  $AB/2$  为深度, 为此, 国内一些单位在处理高密度电法资料时, 用 SUFER 软件形成视电阻率断面图进行解释, 没有进行反演处理。解释多数凭人的经验。在高密度电法中, 由于极距小, 地电信息丰富, 人工解释的方法往往会造成误解。在 M. H. Loke 的二维反演软件中, 层厚的设置: 对于温纳和施伦贝谢尔排列, 第一层子块的厚度设置为 0.5 倍电极距。对于单极-单极、偶极-偶极和单极-偶极排列, 首层层厚分别设置为 0.9, 0.3 及 0.6 倍电极距。后继层的厚度依次递增 10% (或 25%)。层厚也可由使用者设置改变。

(4) 图示方法: 高密度电阻率剖面一般采用拟断面等值线图、彩色图或灰度图表示, 由于它表征了地电断面每一测点视电阻率的相对变化, 因此该图在反映地电结构特征方面具有更为直观和形象的特点。

(5) 资料处理: 数据圆滑是资料处理的常用方法之一, 原则上适用于各种电极排列的测量结果, 但是考虑到偶极排列(包括偶极-偶极、单极-偶极和  $\beta$  排列)异常和地电体之间具有较复杂的对应关系, 因此, 一般只对温纳四极排列(即  $\alpha$  和施伦贝谢尔排列)的测量结果进行圆滑处理。圆滑处理一般采用坏点切除和滑动平均等。

### 3 高密度电法仪器的发展

高密度电法是在常规电法基础上发展起来的, 高密度电法仪实质上是一个多电极测量系统, 所以, 高密度电法仪形式是普通的电测仪 + 电极转换开关。早期, 电极转换由人工进行, 后来微型计算机( 处理器) 的发展, 电极转换开关实现了自动化。

高密度电法测量系统包括数据收录和资料处理两大部分。高密度电法仪器结构上的主要问题是: 如何实现测量主机与众多电极之间的连接。为此, 出现两种形式: 传统式高密度电法仪和分布式智能化高密度电法仪。(1) 传统式高密度电法仪结构如图 2, 一般 60 根电极, 通过 60 根导线( 有的做法是用 10 芯或 12 芯的电缆, 有的干脆用工程浅层地震仪的检波器

接触可靠性, 继电器式主要是连接电线问题( 前者同样存在此问题)。(2) 新型分布式智能化高密度电法仪结构示意图如图 3<sup>[9]</sup>。主要由笔记本式计算机( 或工控机) 主机、主电缆和电极连接盒等组成。主机包括发送控制命令、接收信号等部分; 主电缆由 10 芯电线组成, 主要作用是信号传输; 电极连接盒根据主机的命令进行电极转换和数据采集、传输。由于是一根电缆覆盖所测量的剖面, 并且使用微机进行控制, 使得每一个电极都可能成为 A、B、M、N 极, 中国地质大学( 武汉) 研制生产的分布式高密度电法仪最多可进行 240 道电极输入, 原则上可方便地进行无限扩展( 由于受导线电阻、工作电流、工作电压和干扰的原因的限制, 所以建议道数不要过分追求) 整套仪器体积小、重量轻, 再者, 电极的连接是任意的, 使用十分方便。

#### 3.1 国外仪器

国外生产高密度电法仪的主要有日本的 OYO 公司、瑞典的 ABEM 公司、法国的 IRIS 公司、美国的 AGI 公司。这些仪器价位在 6 ~ 7 万美元( 60 个电极配置)。国外仪器大多数是将电测仪与电极转换开关分开的。2002 年 12 月份, 美国的 AGI 公司出品一款新仪器将电测量主机与开关单元结合在一起。但未见国外仪器中使用 PC 机或类似 PC 机作为仪器主控制器, 实现现场测量曲线的报道。

#### 3.2 国内研制仪器的概况

国内自引进高密度电法以来, 有不少单位投入了该方法的理论、方法技术和仪器准备的研制。最早的做法是: 电极 + 连接导线或多芯电缆 + 机械式电极转换开关( 由步进电机控制) + 工程电测仪。1994 年的《地学仪器》杂志上发表文章, 报道了原地质矿产部机电研究所研制的 MIR 高密度电法仪, 其结构将机械式电极转换开关改进成由单片机控制的电子开关。现在, 有的仪器厂生产的高密度电法仪就是引用的该技术。1997 年 12 月《地学仪器》杂志发表了中国地质大学( 武汉) 在国内首创的分布式智能化高密度电法测量系统的文章<sup>[9]</sup>。

可见, 国内高密度电法仪电极转换开关方面分 3 类: 机械式电极转换开关、电子式电极转换开关及分布式智能化电极。

在主机方面, 多数仪器使用的是单片机( 微处理器), 而使用 PC 机( 或工控机) 作为主控制器, 并在屏幕进行现场曲线显示的只有中国地质大学( 武汉) 和原长春地质学院骄鹏公司等少数仪器。

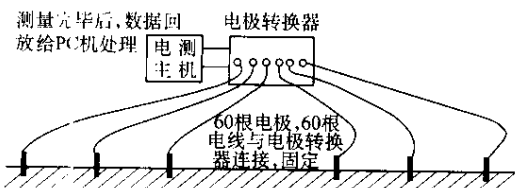


图 2 传统式高密度电法仪结构示意图

Fig. 2 Schematic of traditional multi-channel 2D resistivity imaging meter

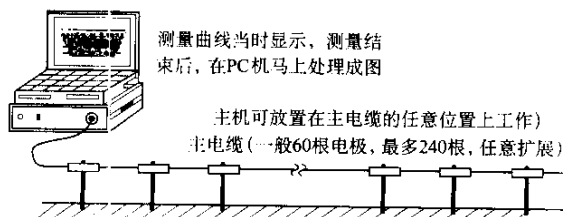


图 3 新型分布式智能化高密度电法仪结构示意图

Fig. 3 Schematic of new distributed multi-channel 2D resistivity imaging meter

电缆, 这样势必会造成耐压低、电流小) 与电极转换器连接。电极转换器有前述的两种, 一种是步进电机驱动的机械触点式, 由 60 路触点底盘、4 路触点、电极排列选择开关、驱动隔离电路及步进电机等部件组成, 由工程电测仪控制步进电机的转动, 以实现不同的电极极距和不同的排列方式。再一种是继电器型电极转开关, 工程电测仪输出一定的控制数码, 通过译码电路分别驱动不同的继电器的吸合、释放, 达到不同电极、不同极距的切换。这两种转换开关的仪器有两点问题值得注意: 机械式的问题主要是机械触点

### 3.3 高密度电法的关键技术

(1) 极化补偿、供电时间问题<sup>[10]</sup> 电法勘探中, 电极的极化电位成分是非常复杂的, 笔者认为有如下电位: ①金属电极插入地面, 金属表面与土壤之间就会产生接触电位。②地面本身存在自然电位。③在通过一定电流时, 电极与土壤之间、土壤内部(特别是潮湿土壤)发生离子迁移, 断电后, 离子继续扩散, 这一系列过程产生各种电位<sup>[4]</sup>。而且, 这些电位是随时间、随温度变化的, 其变化范围在毫伏(mV)级以上。就这一点而言, 分辨率太高的仪器发挥不了作用。

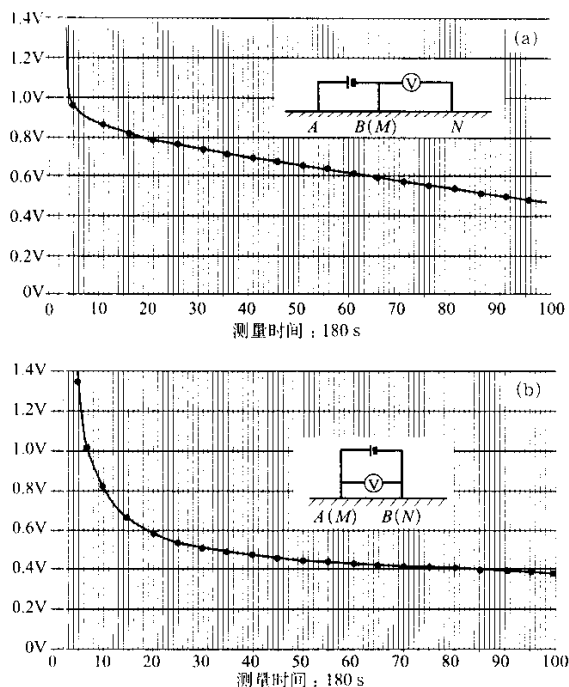


图4 不同供电情况下电极电位变化曲线

Fig. 4 The potential curve in different supply

在激发极化法中, 第三种电位是待测的有用信号, 而在电阻率法中, 该信号是干扰。第一和第二种电位相对讲是比较稳定的, 而离子迁移产生的电位与电场强度、供电时间成比例。高密度电法数据采集较快, 供电电极供电完后, 马上又转换成测量电极, 如果转换的时间较短, 而极化电位下降较慢, 这就给测量结果带来较大的误差。做过高密度电法的人都有体会, 在极距较大、电位差信号较小时, 同一极距的剖面曲线蹦跳得较厉害。实际上这种现象是电位差测量不准造成的。这也许是前述中, 美国仪器做偶极-偶极工作时要求  $n < 8$  的原因之一。另外, 还有一个体

会, 当测量时间间隔较小时( $< 3$  s), 数据质量也不是很好。这都说明, 在高密度电法中, 有两点需要注意: ①极化补偿要有多种方式, 一般要求硬件和软件双重补偿, 必要时需要反复循环; ②测量时间间隔不能太短(笔者经验  $> 3$  s), 这一点与工作效率矛盾。

图4(a)、图4(b)是高密度电法测量系统中, 两种出现最大电极电位的情况。电极A、B之间的供电电压都是15 V直流, 电极距都是3 m, 在断电瞬间开始, 每隔1 s测量一次电位变化。经过180 s, 电极电位都不能恢复到供电前的水平。可见, 极化补偿在高密度电法测量系统中是比较关键的技术。

(2) 电极转换开关 对于传统式仪器, 电极与电缆是一一对应, 但对于分布式仪器来说, 智能电极是仪器的关键所在。从主机电缆输出的信号, 通过接口电路控制电极转换开关进行电极切换。对此电路的要求是: ①抗干扰能力强, 正确执行主机的指令, 不能有差错, 否则造成测量结果不对或对仪器带来损害; ②对意外情况有一定的保护功能; ③由于电极道数较多, 要求道间干扰小, 对采集的数据无畸变。

## 4 高密度电法的应用

(1) 国内应用 国内应用高密度电法比较多, 领域也较广, 据不完全收集, 主要有<sup>[11~20]</sup>。刘晓东等(2002年)将高密度电法用在岩溶灾害调查中用于划分可溶岩区、勘查基岩断裂构造、了解基岩岩溶发育情况等方面; 郭铁柱(2001年)使用高密度电法在某水库坝基渗漏勘查中收到了良好的效果; 吴长盛(2001年)在某水库坝堤裂缝检测与评定研究中, 运用高密度电法, 准确地确定了堤坝的隐患, 并提出了水库堤坝隐患治理的建议; 王文州(2001年)将高密度电法用在高速公路高架桥岩溶地区地质勘探中。刘晓东等(2001年)在管线探测、物探找水、岩溶及地质灾害调查等工程物探中使用了高密度电法; 王玉清等(2001年)在高层建筑选址工作中的应用高密度电法, 对区内浅层溶洞的平面分布情况和空间展布形态, 从环境地球物理角度对工程选址及地基处理提出了合理的建议; 杨湘生(2001年)在湘西北岩溶石山区找水中应用高密度电法, 在确定最佳井位方面发挥了重要作用; 张献民等(1994年)应用高密度电法探测煤田陷落柱, 表明该法可有效地探测煤田陷落柱; 刘康和等(1994年)采用高密度电法等, 查明地表下一定深度的断层; 侯烈忠等(1997年)通过对某机场主跑道

高密度电法实测资料的处理和分析,简述了所探测的异常体在多种处理图件上的反映特征及高密度电法在地基勘探中的效果;王士鹏(2000年)在水文地质和工程地质中的应用高密度电法,在寻找地下水,查明采空区,探测岩溶发育带和划分地层诸方面得到了应用。

值得一提的是,王传雷和董浩斌等(1999—2001年)将高密度电法应用于长江堤坝坝体电性随长江水位变化研究中,提出使用高密度电法来监测堤坝隐患的发展<sup>①</sup>。徐义贤、董浩斌等(2000年)使用高密度电法对树根分布情况进行探测,从而提出对名优树种进行科学施肥的方案<sup>②</sup>。

归纳起来看,主要应用领域和解决的问题有:

水利水电工程:①堤坝探测;②水坝粘土芯墙渗检测;③堤坝灌注质量检测;④堤坝结构体探测;⑤水库堤防渗漏检测;⑥水库堤防裂缝检测;⑦黄河堤防隐患探测;⑧长江堤防垂直防渗墙质量检测。

环境工程地质:①滑坡调查;②边坡软弱夹层调查;③冻土调查;④古岩溶探测;⑤岩溶探测。

工程地质勘察:①基岩面调查;②隧道渗漏探测;③基岩面调查;④断层探测。

城市工程勘察:①城市管线探测;②人防工程探测;③城市地下埋藏物探测;④路面塌陷调查。

工程质量检测:①隧道灌浆质量检测;②堤防灌浆质量检测;③煤田采空区处理灌注质量检测。

考古、其它工程等。

(2)国外应用:从AGI公司公布的资料情况看,高密度电法在国外被广泛应用,如:使用拖曳式电极对湖底、浅海海底电阻率分布进行研究,堤坝隐患探测,地下水探测,隧道开挖方案确定(尽可能寻找软土层位),污染物侵蚀分布情况探测,岩溶探测等等。

## 5 展望

(1)二维工作方式将更加完善,特别是数据处理方面。我国有关部门和单位应该担负起此责任,开发出具有自主知识产权的软件产品。

(2)二维测量中,将同时进行时间域激电测量。该功能在传统式高密度电法仪中难以实现,在分布式

仪器中,将能较好地解决。美国AGI公司、中国地质大学(武汉)都推出了多用智能电极转换开关,可同时接金属电极和不极化电极,以便可同时进行电阻率和极化率测量。

(3)三维高密度电法测量将得到应用。三维高密度电法由于其测量时间和反演运算时间长等原因,其应用受到影响。国外AGI公司有相关报道,国内中国地质大学(武汉)也进行了相关研究和试验<sup>[21]</sup>。随着仪器水平的提高,软件水平的进步,相信三维高密度电法将广泛应用。

本文应用了国内外相关的文献,但有些来源于Internet,故有的难以注明出处,为此特向有关人士致谢!

## References[参考文献]:

- [1] WANG Xingtai, LI Xiaolin. The image reconstruction of electric resistivity by Zohdy inversion and its application effect[J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1996, 20(3): 228-233 (in Chinese). [王兴泰, 李小琴. 电阻率图像重建的佐迪(Zohdy)反演及其应用效果[J]. 物探与化探, 1996, 20(3): 228-233.]
- [2] WANG Ruo, WANG Xingtai. 2-D resistivity image reconstruction using improved Zohdy inversion method[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 28(3): 339-344 (in Chinese). [王若, 王兴泰. 用改进的佐迪反演方法进行二维电阻率图像重建[J]. 长春科技大学学报, 1998, 28(3): 339-344.]
- [3] ZHANG Dahai, WANG Xingtai. Rapid least-squares inversion of 2D apparent resistivity pseudosection[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1999, 21(1): 2-8 (in Chinese). [张大海, 王兴泰. 二维视电阻率断面的快速最小二乘反演[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(1): 2-8.]
- [4] WANG Feng, WANG Xingtai. A hybrid inversion method used simulated annealing and simplex in the resistivity map reconstruction[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 1998, 29(2): 175-178 (in Chinese). [王丰, 王兴泰. 改进的模拟退火方法及其在电阻率图像重建中的应用[J]. 长春科技大学学报, 1999, 29(2): 175-178.]
- [5] WANG Yunsheng, WANG Xuming. The interpretation of high density resistivity data by means of objective correlation method[J]. *Prospecting Science & Technology*, 2001(1): 62-64 (in Chinese). [王运生, 王旭明. 用目标相关算法解释高密度电法资料[J]. 勘察科学技术, 2001(1): 62-64.]
- [6] deGROOT-HEDLIN C, CONSTABLE S. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data[J]. *Geophysics*, 1990, 55: 1613-1624.
- [7] SASAKI Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation[J]. *Geophysical Prospecting*, 1992, 40: 453-464.
- [8] LOKE M H, BARKER R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method[J]. *Geophysical Prospecting*, 1996, 44: 131-152.
- [9] DONG Haobin. The distributed and smart multi-channel 2D resistivity imaging system[J]. *Geo-instrument*, 1997(4): 11-13 (in Chinese). [董浩斌. 分布式智能化高密度电法测量系统[J]. 地学仪器,

① 王传雷, 董浩斌. 科学技术部重点项目、武汉市配套项目“堤坝隐患探测技术研究”(1999—2001年)。

② 徐义贤, 董浩斌. 深圳市农科中心北侧树林探测根系试验报告, 2000年。

- 1997(4):11-13. ]
- [ 10 ] DONG Haobin. Discussion of in 2D resistivity imaging and tden[ A ]. *Chinese Geophysical Engineering* [ C ]. Beijing : Seismic Publishing House 2001( in Chinese ). [ 董浩斌. 高密度电法和瞬变电磁法几个问题探讨[ A ]. 中国工程地球物理检测技术 2001[ C ]. 北京 地震出版社 2001. ]
- [ 11 ] LIU Xiaodong. The application of high density electrical method to karst geological survey in Yichun City[ J ]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2002, 13( 1 ): 72-75( in Chinese ). [ 刘晓东. 高密度电法在宜春市岩溶地质调查中的应用[ J ]. 中国地质灾害与防治学报, 2002, 13( 1 ): 72-75. ]
- [ 12 ] GUO Tiezhu. The application of high density electrical method to leakage detecting in Chongqing Reservoir Dam[ J ]. *Beijing Water Resources*, 2001( 2 ): 39-40( in Chinese ). [ 郭铁柱. 高密度电法在崇青水库坝基渗漏勘查中的应用[ J ]. 北京水利, 2001( 2 ): 39-40. ]
- [ 13 ] WU Changsheng. Detecting technology of dam leakage of Beidagang Reservoir[ J ]. *Water Resources and Hydroelectric Technology*, 2001( 5 ): 61-63( in Chinese ). [ 吴长盛. 北大港水库坝堤裂缝检测与评定技术研究[ J ]. 水利水电技术, 2001( 5 ): 61-63. ]
- [ 14 ] WANG Wenzhou. The application of geophysical prospecting for geological surveys in karst region of highway[ J ]. *Foreign and Chinese Highway*, 2001( 4 ): 56-58( in Chinese ). [ 王文州. 物探技术在高速公路岩溶地区地质勘探中的应用[ J ]. 中外公路, 2001( 4 ): 56-58. ]
- [ 15 ] LIU Xiaodong. Practical examples for engineering geophysics by high density electrical method[ J ]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2001( 4 ): 64-66( in Chinese ). [ 刘晓东. 高密度电法在工程物探中的应用[ J ]. 工程勘察, 2001( 4 ): 64-66. ]
- [ 16 ] WANG Yuqing. The application of comprehensive physical prospecting in selecting address on high building[ J ]. *Henan Geology*, 2001( 3 ): 208-211( in Chinese ). [ 王玉清. 综合物探在高层建筑选址工作中的应用[ J ]. 河南地质, 2001( 3 ): 208-211. ]
- [ 17 ] YANG Xiangsheng. Application of high density e-phase method for prospecting underground water in karst mountain area in Northwestern Hunan[ J ]. *Hunan Geology*, 2001( 3 ): 230-232( in Chinese ). [ 杨湘生. 高密度电法在湘西北岩溶石山区找水中的应用[ J ]. 湖南地质, 2001( 3 ): 230-232. ]
- [ 18 ] ZHANG Xianmin. The application of the high-density electrical method to the detection of coalfield depressed pillars[ J ]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1994( 5 ): 363-370( in Chinese ). [ 张献民. 应用高密度电法探测煤田陷落柱[ J ]. 物探与化探, 1994( 5 ): 363-370. ]
- [ 19 ] LIU Kanghe, PANG Xuemao. The geophysical prospecting and its effect in dam address selecting in Daliushu Dam of Yellow River[ J ]. *Yellow River*, 1994( 1 ): 30-32( in Chinese ). [ 刘康和, 庞学懋. 黄河大柳树坝址区物探方法及其效果浅析[ J ]. 人民黄河, 1994( 1 ): 30-32. ]
- [ 20 ] HOU Liezhong, QIU Xingguo, LUO Yi. The effectiveness of high density electrical method in foundation detection[ J ]. *Coal Geology & Exploration*, 1997( 4 ): 58-60( in Chinese ). [ 侯烈忠, 秋兴国, 罗奕. 高密度电法在地基勘探中的效果[ J ]. 煤田地质与勘探, 1997( 4 ): 58-60. ]
- [ 21 ] DONG Haobin, WANG Chuanlei. 3D electrical imaging surveys and its experiments[ J ]. *Collection of 2001 Annual Meeting of the Chinese Geophysics*, 2001( in Chinese ). [ 董浩斌, 王传雷. 三维高密度电法试验[ J ]. 中国地球物理年刊, 2001. ]

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF 2D RESISTIVITY IMAGING SURVEYS

DONG Hao-bin, WANG Chuan-lei

( Geophysics Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China )

**Abstract** : The development of 2D resistivity imaging surveys is introduced including electrodes array, data inversion and instrument. The switch time of current electrodes, SP compensating and switches of multi-electrodes are the special technology in the instrument of multi-electrodes system. Some examples of application of 2D resistivity imaging surveys are represented over many domains. The developing tendencies of 2D resistivity imaging surveys are also discussed.

**Key words** : 2D resistivity imaging surveys, electrodes array, inversion software, instrument, resistivity CT