

# 高密度电法的进展与展望

严加永 孟贵祥 吕庆田 张昆 陈向斌

(中国地质科学院 矿产资源研究所 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室 北京 100037)

**摘要:** 高密度电法是浅层地球物理勘查的主要方法之一。文章从以下几方面分析、总结了高密度电法近十几年来进展及未来的发展趋势: ①对目前主流高密度电法仪器的性能进行了对比, 认为高密度电法仪正朝着多通道、多参数、多功能、大功率的趋势发展; ②高密度电法工作环境已从地表测量发展到水上、水下和跨孔测量, 并对后三种测量方式特点进行了分析, 认为高密度电法将实现全天候环境下的测量; ③在对高密度电法数据处理方法和反演发展现状分析的基础上, 对四维反演的理论和应用实例进行了阐述, 认为四维反演将在各类监测项目中发挥重要作用; ④分类总结了高密度电阻率法的应用领域。结果表明: 随着探测深度、观测精度的提高和观测形式的多样化, 高密度电法应用领域将更加宽广, 具有广阔的发展前景。

**关键词:** 高密度电法; 浅层地球物理勘查; 高密度电法仪; 四维反演

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2012)04-0576-09

高密度电法(electrical resistivity imaging, 简称ERI)起源于20世纪70年代末期的阵列电法探测思想。英国学者Johansson博士设计的电测深系统实际上就是高密度电法的最初模式<sup>[1]</sup>。在高密度电法研究初期阶段, 电极排列方式主要是温纳、偶极、微分三种类型。随后日本为适应山地工程的需要, 在设计和技术实施上采用了先进的自动控制理论和大规模集成电路。20世纪80年代中期, 日本地质计测株式会社借助电极转换板实现了野外高密度电阻率法的数据采集, 成功实现了电极自动“切换装置”, 使高密度电法实现了全面自动化, 但是由于整体设计的不完善, 这套设备没有充分发挥高密度电法的优越性, 所以并未引起人们的重视。直到20世纪90年代, 随着电子计算机的普及和发展, 其优点才被越来越多的人认识。经过20多年的发展, 已由原先的三种电极排列方式发展到施伦贝格、联剖、环形二极等十几种, 使高密度电法勘探能力得到明显的提高, 效率大大增加。随着仪器制造工艺、电子技术和计算机软硬件技术的飞速发展, 高密度电法在各方面均取得了长足进展。

20世纪80年代后期, 我国地矿部门开始了对高密度电法及其应用技术研究, 当时以引进仪器、技术为主, 主要还是沿袭国外的做法, 采用“三电位电极装置”系列:  $\alpha$ 装置(温纳装置AMNB)、 $\beta$ 装置

(偶极装置ABMN)和 $\gamma$ 装置(微分装置AMB $\bar{N}$ )。随后, 我国学者倡导使用“联合三极测深”装置, 并引入比值参数 $T$ 、 $\lambda$ 和 $G$ , 拓宽了资料定性解释的手段。罗延钟在此基础上, 建议采用“双向三极梯度装置”(即正向和反向三极“梯度装置”的组合电极装置), 并研制出用此电极装置的观测结果计算除电位装置以外的其他电极装置的视电阻率数据处理和成图软件系统。到90年代初期, 长春科技大学成功研制了由高密度工程电测仪和程控多路电极转换器的数据自动采集系统, 使该项技术在国内达到了实用化程度。其后, 电极转换开关也实现了由机械式向单片机控制的改进。现在, 国内高密度电法仪电极转换开关已具有机械式、电子式、分布智能式等多种形式, 其中, 多道并行分布式高密度电法系统具有中国自己的特色, 达到国际先进水平。

## 1 原理与特点

高密度电阻率法的基本理论与传统的电阻率法完全相同, 所不同的是高密度电法在观测中设置了较高密度的测点, 现场测量时, 只需将全部电极布置在一定间隔的测点上, 由主机自动控制供电电极和接收电极的变化, 完成测量(图1)<sup>[2]</sup>。在设计和技术实施上, 高密度电法测量系统采用先进的自动控制理论和大规模集成电路, 使用的电极数量多, 而且

收稿日期: 2011-02-28

基金项目: 地质调查项目(1212011085024); 地质国家深部探测技术与实验研究专项(Sinoprobe-03); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目((K2)007-4-3)

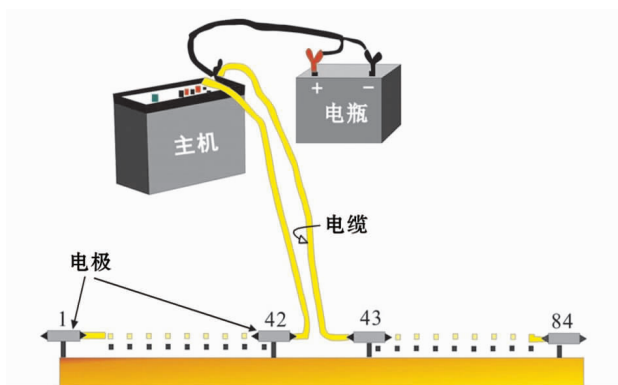


图1 高密度电法工作示意

电极之间可自由组合,这样就可以提取更多的地电信息,使电法勘探能像地震勘探一样使用多次覆盖式的测量方式<sup>[3]</sup>。与常规电法相比,高密度电法具有以下优点:①电极布设一次性完成,减少了因电极设置引起的干扰和由此带来的测量误差;②能有效地进行多种电极排列方式的测量,从而可以获得较丰富的关于地电结构状态的地质信息;③数据的采集和收录全部实现了自动化或半自动化,不仅采集速度快,而且避免了由于人工操作所出现的误差和错误;④可以实现资料的现场实时处理和脱机处理,大大提高了电阻率法的智能化程度;⑤可以实现多参数测量,同时观测电阻率、极化率和自然电位,能获取地下丰富的地电参数,从不同电性角度对地下结构进行刻画。由此可见,高密度电阻率法是一种

成本低、效率高、信息丰富、解释方便且勘探能力显著提高的勘探方法<sup>[4-5]</sup>。

## 2 仪器进展

高密度电法仪实质上是一个多电极测量系统,所以,高密度电法仪的核心是普通的电测仪+电极转换开关,也是业内人士将其称为“超级万用表”的原因。早期电极转换由人工进行,随着微型计算机(处理器)的发展,电极转换开关实现了自动化。最近几年,国内外涌现了不少新型仪器,表1列出了其中有代表性的仪器性能。

FlashRES64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统由澳大利亚阿德雷德大学 Stewart Greenhalgh 所带领 Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心开发,该系统集传统的四极和偶极装置于一身,在不增加野外布极工作量的情况下,利用61个通道可一次性完成60 000多个数据的采集工作,采集数据量是常规高密度电法的60倍,由于其数据量很大,可以较好地压制随机干扰,提高资料的精度。FlashRES64 不仅能做地面电法勘探,还可以做井-井、井-地勘探。它不同于常规的 MISE-A-LA-MESSE 方法,仅将供电电极放入井中,在地表测量电位;FlashRES64 的井-井、井-地测量是将数个电极放入井中,既用做供电电极,也用于测量电极,这样可以更全面地测量数据,由于在井中的电极距离异

表1 高密度电法仪器性能对比

仪器名称	生产厂家	通道数	测量模式	功率 W	输入阻抗 $M\Omega \cdot m$	最大输出电流 A	类型	测量按钮
FlashRES64	澳大利亚 Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心	61	电阻率	750	>107	2	分布式	笔记本控制
SuperSting R8/IP	美国 AGI 公司	8	电阻率、极化率、自然电位	200	>20	2	集中式 分布式	主键盘内集成
RESECSII	德国 DMT 公司	8	电阻率、极化率、复电阻率	250	30	2.5	分布式	主键盘内集成
Syscal/ Syscal switch	法国 Iris Instruments 公司	10	电阻率、极化率	250	100	2.5	分布式	主键盘内集成
McOHM Profiler	日本 Oyo Instruments 公司	4	电阻率	200	10	0.12	分布式	主键盘内集成
Terrameter LS	瑞典 ABEM 公司	4~12	电阻率、极化率、自然电位	250	200	2.5	分布式	主键盘内集成
GDP32 多功能电法仪	美国 Zonge Engineering 公司	16	电阻率、极化率、复电阻率	30k	10	*	集中式	主键盘内集成
V8 多功能电法仪	加拿大 phoenix geophysics 公司	取决于 盒子个数	电阻率、极化率、复电阻率	30	10	*	集中式	主键盘内集成
DUK-2A 高密度电法系统	重庆地质仪器厂	单道	电阻率、极化率、自然电位	4.5k	$\geq 50$	5	集中式	主键盘内集成
Geopen E60 系列	骄鹏集团	单道	电阻率、双频极化率、自然电位	400	20	1.5	分布式	主键盘内集成
DCX-1 多功能 高密度电法仪	北京地质仪器厂	单道	电阻率、极化率	2.8k	$\geq 20$	4	集中式	主键盘内集成
WGMD-6	重庆奔腾数控 技术研究所	单道	电阻率、极化率	4.5k	$\geq 50$	3	分布式	主键盘内集成

注: \* 表示取决于接地电阻

常体较近,所以较容易勘测到,对于井孔百米以内的地质异常体具有较好的探测效果。

SuperSting R8/IP 是美国 AGI 公司生产的高密度电法仪,该仪器是同类产品中档次较高的重量级产品,它性能稳定、轻便牢固,输入阻抗大于 20 M $\Omega$ ,功率最大为 200 W,自动消除自然电位影响。该仪器采集的通道数为 8 道,通过电极转换箱,可以连接上千个电极。由于其采用了独创的双模式电极,可以在一个电极位置上安放钢电极(供电)和不极化电极(接收),用于同时测量电阻率和极化率,大大拓宽了高密度电法仪的应用范围<sup>[6]</sup>。

RESECS II 高密度电法仪是德国 DMT 公司开发的分布式高密度电法仪,一条 7 芯电缆可连接 960 个电极,分为单通道和 8 通道接收机,最大输出电流 2.5 A,最大功率 250 W,具有多种观测模式,可实时计算和显示视电阻率及伪断面图,包括电阻率、极化率、复视电阻率,还可监视电阻率随时间变化,可自动设置多达 10 种的标准装置,用户也可自行设计装置,以适应不同的探测目标,可进行三维观测、跨井观测和水域观测。其操作界面为 Windows 系统,实时显示接收道和发射道的时间过程,由预置的标准偏差值自动控制观测质量,实时显示失效道位置并可随时或统一进行补测,具有硬、软件压制噪声功能。该仪器设有特殊的监测模式,对地下电阻率变化进行实时或定时监测,用以监视地下电阻率随时间和空间的变化,从而实现 4D 勘探<sup>[7]</sup>。

Syscal/Syscal switch 系列高密度电法仪由法国 Iris Instruments 公司开发,该仪器 10 通道接收道,可以同时获得事先放置好的 10 个电阻率数据采集端的通讯数据,并且深度可以达到普通测量的 10 倍。非常短的电流反映时间(150 ms)使得 10 道电阻率数据采集时间大大缩短。在测量期间可以使用 GPS 采集连续长剖面数据,采集频率为 2 s,即使在 3 km/h 的速度下也能得到非常好的采集精度。在陆地环境下,高输出电压值(高达 800 V)使得该仪器在低阻区域也可以获得非常高品质的结果。该仪器还能进行水下测量,在高导区域(例如盐水)高电流输出值(高达 2.5 A)可以获得非常高品质的数据<sup>[8]</sup>。

McOHM Profiler 由日本 Oyo Instruments 公司制造,目前已经发展到第 4 版本。该仪器为四通道被动式仪器,通过外加多路电极转换开关,最多可升级到 288 个电极,利用装配的内置时钟和基于 RS-232 端口的遥控装置可以自动定时测量。整套系统包括 32 个电极转换功能、带有高分辨率 24 位 A/D 转换

器的四通道接收电路、最大输入为 400 V 的供电电路(峰流量 800 V、120 mA)和用于技术支持的基于 PC 的控制器。此外,既能监视和显示电流波形,也能方便监视和显示电位波形,可以有效控制数据的质量<sup>[9]</sup>。

Terrameter LS 是瑞典 ABEM 公司最新的高密度电法仪。该仪器为主动式,通道数 4~12 道,可以测量电阻率、极化率和自然电位,操作界面可以选择多种语言,方便不同国家工程技术人员使用。通过电极转换箱,最多支持 16 320 个电极,极大方便了大面积的 3D 面积观测<sup>[10]</sup>。

GDP-32 II 和 V8 不是严格意义上的高密度电法仪。它们能实现大多数的电磁法测量,包括电阻率法、时间域或频率域激发极化法(TDIP/FDIP)、磁激发极化法(MIP)、复电阻率法(CR)、频域电磁法(FEM)、瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、音频大地电磁法(AMT)及大地电磁法(MT)等多种测量,但当采用多道测量时,它们也能实现高密度电法测量功能。

GDP-32 II 是美国 Zonge 公司生产的第四代多功能电法仪,该仪器已开发成为既可进行深部地质调查,又可应用于超浅层岩土工程地质探测的电(磁)法综合系统。做高密度电法时,其最大通道为 16 道,可以测量电阻率、极化率和复电阻率。GDP-32 II 发射机功率较大,目前国内引进的多为 30 kW,一方面可以发射大电流,提高信噪比,获取较好的观测数据,另一方面,由于发射机体积质量较大,给施工带来不便,使得某些装置(如对称四极)的测量增加了施工成本,因此,该仪器多采用偶极-偶极的方式进行剖面测量<sup>[11]</sup>。

V8 多功能电法仪由加拿大 phoenix geophysics 公司开发生产。该仪器采用了 GPS 同步和网络实时传输技术,比以往的同步技术更为先进、可靠,操作系统采用了可视化操作界面,方便野外数据的采集和参数设置,利用系统的操作界面实时对观测结果进行监控。与 GDP-32 II 类似,V8 也可以测量电阻率、极化率和复电阻率,目前国内引进发射机功率多为 30 kW,因此,比较适合用偶极-偶极排列进行高密度测量。由于 V8 采用网络化同步技术,其采集道数取决于辅助盒子单元的个数(每个盒子有三道),在经费允许的前提下,道数在理论上可以无限扩充<sup>[12-13]</sup>。

中国研究和生产高密度电法仪的厂家主要有重庆地质仪器厂、矫鹏集团、中国地质大学(LGM-2000 型高密度电法仪)等。国产仪器测量参数较多,受

制造工艺限制,多为单道模式测量。实际工作中应用较为广泛的主要有重庆厂的 DUK-2A 高密度电法测量系统和矫鹏 E60 系列高密度电法仪。

重庆地质仪器厂的 DUK-2A 高密度电法测量系统是单通道的集中式高密度电法系统,该系统由 DZD-6A 多功能直流电法仪和多路电极转换器组成,可以测量自然电位  $V_{sp}$ 、一次场电位  $V_p$ 、供电电流  $I$ 、视电阻率  $R_o(\rho_s)$ 、视极化率  $M_{1-6}$ 、半衰时  $T_H$ 、衰减度  $D$ 、综合激电参数  $Z_p$  和偏离度  $R$ 。该仪器采用全数字化自动测量,可对自然电位、漂移及电极极化进行自动补偿。采用大屏幕液晶汉字显示,在密度测量模式时可直接显示 14 种以上的布线工作模式;在 DZD-6A 单机模式时可直接显示 9 种电极排列方式;同时在工作时可实时显示曲线等<sup>[14]</sup>。

矫鹏 E60 系列高密度电法仪为单通道分布式,该型仪器可以进行各种装置的高密度电阻率、双频高密度激发激化法、自然电位法、充电法等勘探方法的数据采集任务,由于仪器本身配置有高性能的计算机,配合相应的处理软件系统,可对上述所采集的资料进行现场处理<sup>[15]</sup>。

从上述分析可以看出,高密度电法仪正朝着多通道、多参数、多功能、大功率趋势发展。通道数从最早的单道接收,逐渐发展为 8 道,最多的 FlashRES64 达到了 61 道,地震勘探已经发展到上万道,相信随着技术的发展和仪器研发投入的增加,高密度电法道数将会越来越多,道数的增加将促进三维高密度走向实用化。多参数测量也越来越受人们关注,仪器普遍能进行电阻率、极化率测量,有的还增加了复电阻率、自然电位等测量参数,若能获取同一工区更多参数,对地电模型的解释将更加可信。所谓多功能,是指高密度电法不仅能作常规地面测量,辅以相应模块,还能进行井-井测量(跨孔成像)、井地测量、水下测量和水上测量等。为满足更大的勘探深度要求和获取更高信噪比的高品质数据,可采用的主要办法是提高供电电流和减小接地电阻;一般情况下,接地电阻改善到一定程度就很难再减小,可行的方法是尽量提高供电电流,因此,高密度电法发射功率也在逐渐增大,如 GDP-32 和 V8 为代表的多功能电法仪,其标准功率为 30 kW,最大功率已达到了 200 kW。

### 3 数据采集进展

#### 3.1 测量方式

高密度电法常规采集环境均在陆地地表进行。近几年来,高密度电法的施工环境发生了很大变化,

测量方式从地表采集发展到水上、水下和钻孔间采集。

水上高密度是指将电缆漂浮在水面上,主机安放在船上,采用 GPS 定位电极位置并用水听器确定水体深度,使船以 2~5 km/h 的速度拖动电缆前行,实现连续的高密度电法测量,通常也称之为水上连续高密度电法测量(图 2)。高密度电法探测的是介质电阻率之间的比值,而不是通过做加减法得到的差值,如海水的电阻率为  $0.2 \Omega \cdot m$ ,海底淤泥的电阻率为  $1.5 \Omega \cdot m$ ,二者的电阻率差异为二者的比值,即  $1.5/0.2=7.5$ ,而不是二者的差:  $1.5-0.2=1.3$ ,因此,水上高密度电法可以在  $0.2 \Omega \cdot m$  的海水上获得有用的数据<sup>[6]</sup>。

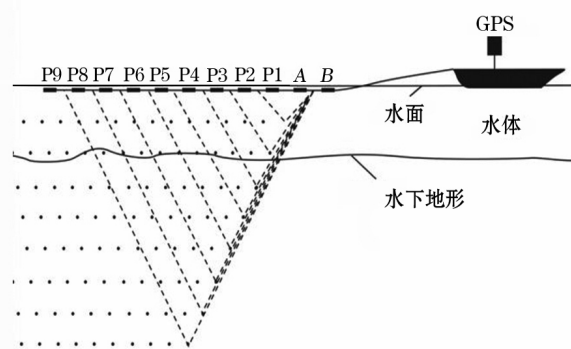


图 2 水上高密度电法工作示意

水下高密度测量是指将防水电缆沉入水底,主机置于船上或地表,进行各种排列测量,研究水底之下地电结构的一种高密度电法测量。在利用水听器获取水底地面起伏的基础上,可实现带地形的反演,使得水下地电结构更加直观。图 3 是用高密度电法勘探海底天然气水合物的示意图,防水的主机和拖缆置于 800 m 深度下的海底,在墨西哥湾成功发现了天然气水合物矿床的赋存位置<sup>[16-17]</sup>。

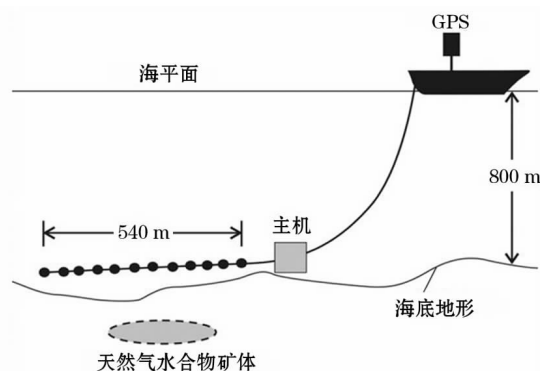


图 3 水下高密度电法工作示意

水上和水下高密度测量的出现,使得高密度电法突破了水体障碍,可以直接获取水底之下的电阻率和极化率,为研究近海岸海水与淡水分界线以及

水下岩溶坑探测、水下地质填图、堤坝渗漏检测、水底考古、桥梁选址等工作提供了极大的方便。

跨孔高密度电法将电极安置于同一或不同钻孔中进行测量(图4),又称为跨孔电阻率层析成像(electrical resistivity tomography,简称 ERT)。由于电极置于不同深度,因此跨孔高密度在深部具有更高的分辨率。目前,该法还处于二维阶段,在近似直线的多个钻孔中布设电极;为改善近地表分辨率,还可同时将一部分电极布设在地面。根据 AGI 公司的资料,为获取高质量跨孔高密度测量结果,应该保证钻孔深度与孔间距的比值大于 1.5,尽量减小钻孔泥浆电阻率与围岩电阻率的差异,选择二极排列可以提高信噪比<sup>[6]</sup>。

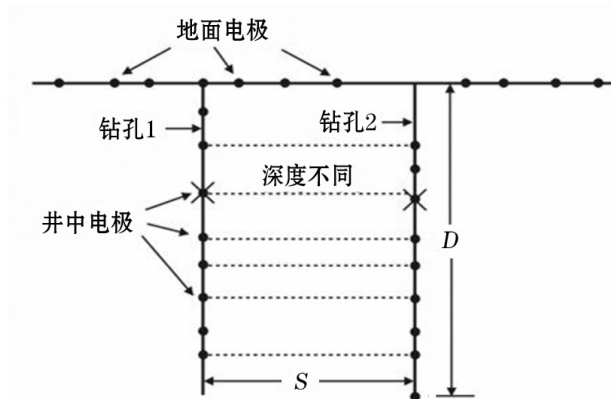


图4 跨孔高密度电法工作示意

### 3.2 排列方式

在电法探测中,电极排列方式已扩展到十几种,最常用的是四极排列中的 $\alpha$ 排列、 $\beta$ 排列及 $\gamma$ 排列方式<sup>[2]</sup>。由于各种电极排列方式对异常体所表现的视电阻率特征各不相同,在探测中根据目标体选择适当的探测方式至关重要,这直接关系到探测结果的解释及可靠程度评价<sup>[18-19]</sup>。受仪器性能限制,以往高密度数据采集只能按上述某一种排列

方式进行,近几年,随着软硬件的发展,逐渐发展出了组合排列和自定义排列方式。

组合排列系指将多种排列融合到一起,进行同时测量。在电极距和接地电阻不变的情况下,利用组合排列代替单一排列的测量方式,可有效提高分辨率,但需增加观测时间,为获取有效数据,牺牲一些测量时间也是必要的。为说明组合排列的优势,选择新疆某工区 76 线进行的组合排列实验。在相同电极数量和相同点距的情况下,组合排列(Schlumberger 与 Dipole-Dipole 组合)比单一排列(Schlumberger)的测深点数量增多,分布均匀,横向和纵向分辨率明显提高(图5)。特别是在接地较差的测段,如在 420~490 m 之间, Schlumberger 排列测量出现了空值区,利用组合排列后,空值得到了有效改善,所得测点基本覆盖了该区段。组合排列的另一个优点是具有被组合各种排列的所有优点,能兼顾到勘探深度和分辨率。

自定义排列是根据工区特点,自行编排供电电极(AB)和接收电极(MN)之间的位置关系,形成具有针对性的排列方式。自定义排列在障碍较多的复杂地区,可以发挥灵活布极的优势,特别是在三维勘探中,如在测区中有房屋等不能布设电极的障碍物存在时,可以自行定义排列,避开障碍物后仍能形成不规则三维测网,最大限度地满足数据采集的要求。

## 4 数据处理与反演方法进展

### 4.1 数据处理

野外数据采集过程中难免存在各类干扰,因此,需对数据进行优化处理。目前常用的方法有以下几种。剔除突变点,即对与相邻电阻率相比有数十倍的差异的测点,在数据预编辑时就将其剔除,然后进行曲线插值。数据平滑,为消除测量过程的随机干

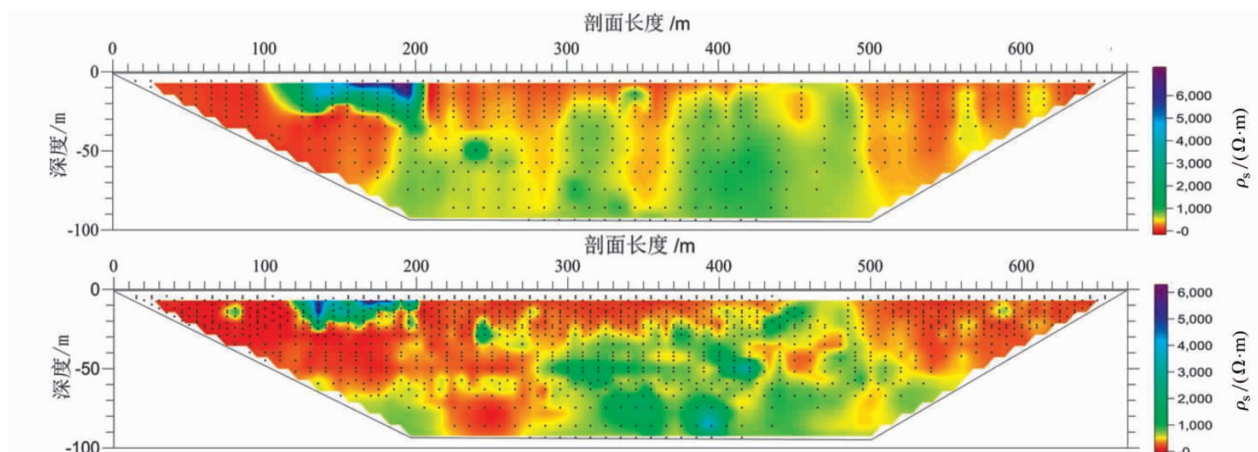


图5 76线单排列(上)与组合排列(下)测量结果对比



扰,可采用滑动平均等方法处理数据。陈斌文等<sup>[20]</sup>采用数据滤波处理技术,对电极接触不好或某些干扰使数据出现虚假点或突变点,造成电阻率断面图上的虚假异常进行处理,有效地压制了虚假异常。苏兆锋等<sup>[21]</sup>将小波分析引入高密度电阻率法信号降噪处理中,通过建立小波降噪模型并与传统五点线性平滑降噪效果对比,确定了以 sym4 小波为降噪小波,并采用了软阈值和分解层数为四层的降噪方法,经过工程实例验证,证明了小波变换降噪技术在高密度电阻率信号处理应用中的可行性和优越性。

#### 4.2 反演方法及软件

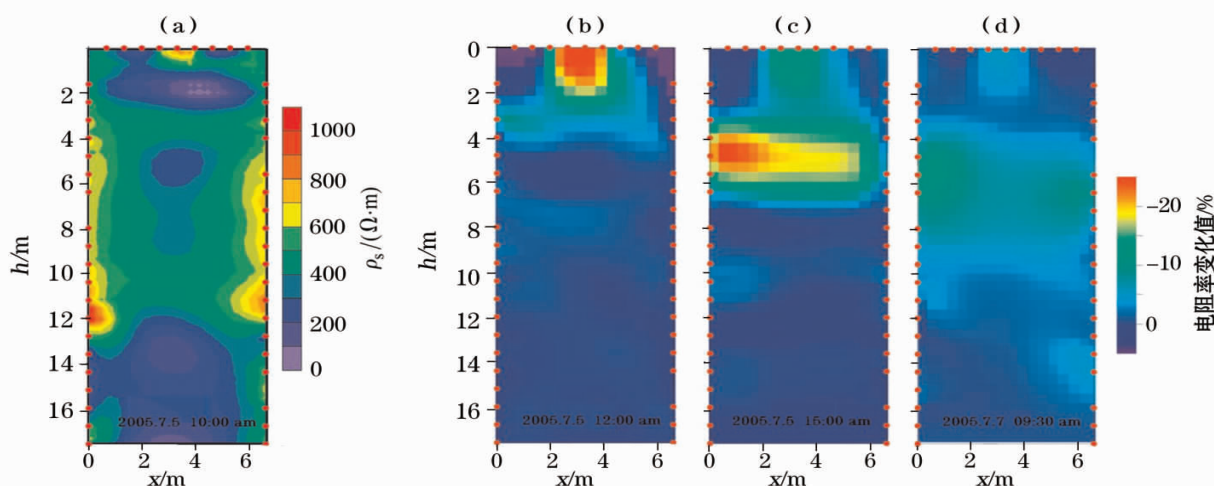
高密度电法测量得到的数据是各个电极在不同位置时测得的视电阻率,还需要对数据进行反演,计算出地下真实电阻率并以图件形式显示,直观反映地下物质的电阻率变化。研究电阻率反演方法的学者很多,对一些常用的反演方法都有较深入的研究。佐迪反演法相关的研究有王兴泰<sup>[22]</sup>、王若等<sup>[23]</sup>、底青云等<sup>[3]</sup>、徐小兵等<sup>[24]</sup>。与最小二乘反演法相关的有 DeGroot-Hedlin 等<sup>[25]</sup>和 Sasaki 等<sup>[26]</sup>的基于圆滑约束最小二乘法计算,Loke 等<sup>[27]</sup>的基于准牛顿最优化非线性最小二乘新算法,国内有张大海等<sup>[28]</sup>对电阻率断面进行快速最小二乘反演。其他还有: Mauriello P.<sup>[29]</sup>提出了高密度电法概率成像技术,刘小军等<sup>[30]</sup>将其引入中国并应用在堤防隐患探测中;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”<sup>[31]</sup>;王运生等“用目标相关算法解释高密度电法资料”<sup>[32]</sup>均取得了一定效果。

高密度电法反演正从传统的一维、二维向三维、四维发展。目前的三维反演均是以地下介质各项同性为前提的,反演的数据可以通过真三维观测和多

条二维测线合并为三维测网这两种方式得到。真三维观测指按网状布设电极,在测线方向和垂直测线方向均进行供电和测量,通过滚动电缆获得研究区的地电数据。另一种方式是通过布设多条平行的测线,每条测线仅沿测线方向测量,用处理软件将这些测线合并拼接为网状数据。相比较而言,第一种三维观测所得数据进行的三维反演更为精确,可以获取测线方向和垂直测线方向的电阻率或极化率,但需要较多道数才能获得较大的探测深度,此外,投入成本也较后者高。

四维高密度电法在三维高密度电法中增加一个时间维,电阻率(极化率)是三个空间坐标和一个时间坐标的函数:  $\rho = \rho(x, y, z, t)$ ,其采集是同样的电极排列在同一地点,不同时间重复进行三维数据采集<sup>[33]</sup>。四维反演使用差分反演算法,反演出不同时刻同一地点电阻率(极化率)与初始时刻的差异,从而研究地下三维介质电阻率随时间的变化,其基本思路是先用正常的方法反演背景数据,再用差分反演的方法一组接一组地反演多组监测数据,背景模型(第一次测量数据反演结果)用作所有监测数据的先验模型并且使用了计算差分图像。四维反演可以监测环境污染的过程和海水入侵、地下储油罐漏油及大坝泄露等。

图6是 Rita Deiana 等<sup>[34]</sup>在意大利米兰某地进行的一个注水试验,该试验的目的是研究农业污染源在地下扩散的规律。首先在两个钻孔上做跨孔测量,然后在这两个钻孔中间注水  $3.5 \text{ m}^3$ ,电极位置不变,在不同时间进行数据采集,做 4D 差分反演。图6可见到 2 h 和 5 h 反演所得电阻率降低较快(变化率  $< -20\%$ ) 区域,显示了水在地下的扩散状态,



a—注水前; b—注水后 2 h; c—注水后 5 h; d—注水后 47.5 h

图6 注水试验的四维差分反演电阻率剖面

47.5 h 后电阻率除在 4~8 m 两侧深度降低外,其他地方基本与注水前一致,说明此时水已经向四周扩散,仅在 4~8 m 深度两侧局部残留。该实验准确刻画了流体(污染源)在地下的扩散路径和残留情况,为农业污染治理提供了理论支持。

几乎所有仪器都配有自己的处理反演软件,但使用最广泛的商业软件主要有瑞典 Res2DINV 和 Res3DINV 系列软件,AGI 公司的 Earthimage 2D、Earthimage 3D 系列软件等。国内也有人编制相关反演软件,如吕玉增等<sup>[35]</sup>采用了 VC++/C 和 Fortran 混合编程技术,开发了二维反演软件;韩永琦等<sup>[36]</sup>用 VB 编写了高密度电法数据格式转换程序,但国内真正推出的商用软件并不多。

Res2DINV 系列软件是瑞典 M. H. Loke 博士开发的密度电法处理软件。RES2DINV 为二维处理、反演程序,该程序采用强制平滑的最小二乘法反演技术,利用地面上的电阻率数据生成地下的二维模型,可进行全自动化无初始模型的反演;对内存使用进行了优化以减少磁盘交换所需的时间,可完成大数据量的反演。Res2DINV 与免费二维正演建模程序 RES2DMOD 一起构成完整的电阻率二维正演建模与反演软件包。1999 年, M. H. Loke 又开发了可用于电阻率和极化率三维反演的程序——RES3DMOD。该程序采用强制平滑的最小二乘法反演技术,利用地面上的电阻率数据生成地下的三维模型,同 RES2DINV 一样完全自动化,无需提供初始模型;随着测量网格、测量区域以及计算机系统速度的不同,一个三维数据系列的反演时间在几分钟到 12 h;采用扭曲的有限元网格模拟表面网格从而实现地形进行校正;对反演结果进行各方向的切片,形象地刻画了地下电阻率(或极化率)的三维分布情况<sup>[37-38]</sup>。

Earthimage 系列高密度电法软件由美国 AGI 公司杨贤进博士开发,由 Earthimage 1D、Earthimage 2D 和 Earthimage 3D 等几个模块组成,分别进行一维、二维和三维电阻率和极化率的处理、反演和正演模拟。在二维和三维软件中,还增加了许多实用功能模块,如 CRP(连续电阻率反演)、ERT(跨孔成像)、水下电阻率反演以及时间推移反演(time lapse inversion)等。Earthimage 系列软件可视化,易于使用,特别是 3D 反演程序,能进行等位面(isosurfaces)、任意方向切片(slice)、电阻率透明度控制、旋转、缩放等,这些操作都是人机交互界面,极大地方便了高密度电法资料的分析解释<sup>[6]</sup>。

## 5 应用领域进展

高密度电法应用领域越来越宽广,发展中国家一般在常规领域中应用较多,一些发达国家除在传统领域中的应用外,更加侧重于开拓新领域。环境领域是高密度电法在国外的一个重要应用领域,利用高密度反演电阻率确定垃圾填埋场范围,分析填埋场中污染物扩散状态,对放射性污染物分布范围进行圈定与监测。如在美国 Hanford 储藏化学和放射性污染物场地中进行的高密度探测,显示地下 30 m 深度放射性污染物的分布;用跨孔高密度研究美国奥克拉荷马州地下储油罐漏油情况,确定了漏油的准确位置。

从美国 AGI 公司公布的资料情况看,水上高密度电法在国外已被广泛应用。如:使用拖曳式电极对湖底、浅海海底电阻率分布进行研究,在加勒比海上的 British West Indies Anguilla 岛上,水上高密度在研究灰岩深度和物理性质、海水深度测量、海底沉积物填图和沙滩侵蚀分析的基础上,很好地指导了在海滩下面修建引海水管道的工程方案。水下高密度电法探测深度已经达到了几百米,美国地质调查局曾用此方法探测海底可燃冰,确定了可燃冰可能存在的位置。日本将高密度电法作为火山口形状调查、局部地质构造和空洞调查、断层构造调查方面的主要手段。此外,高密度电法在地质灾害预警中也得到广泛应用,AGI 采用动态高密度电法观测,建立了采石场洪水预警系统,对采石场边坡稳定进行了监控,保障了采石场的安全生产。

国内高密度电法应用领域主要包括工程勘察、矿产资源勘查、工程质量检测、考古、煤矿采空区勘查、水利水电工程和环境等领域。1987 年河北保定冶金工业部勘察研究总院从地质计测株式会社引进了该项方法技术后,于 1988 年又引进了 GER-300AD 型交直流电法探测仪,该院使用该项方法技术在寻找地下水、探测采空区、查明岩溶发育和划分地层中取得了较好的效果。张献民等<sup>[39]</sup>应用高密度电法探测煤田陷落柱,有效地探测到了煤田陷落柱的分布范围;郭铁柱<sup>[40]</sup>使用高密度电法在某水库坝基渗漏勘查,成功找到了渗漏的位置;吴长盛<sup>[41]</sup>在天津北大港水库堤坝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,赵敏敏<sup>[42]</sup>、紫民<sup>[43]</sup>等也开展了病险水库探测,为防止溃坝提供了及时有效的数据;王文州<sup>[44]</sup>将高密度电法应用在高速公路高架桥岩溶地区地质勘探中;王玉清等<sup>[45]</sup>在高层建筑

选址工作中应用高密度电法,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;侯烈忠<sup>[46]</sup>对某机场主跑道高密度电法实测资料进行了处理和分析,通过异常体在多种处理图件上的反映特征分析,表明高密度电法在地基勘探中的效果明显;王传雷和董浩斌等<sup>[2]</sup>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方案;引入关注的秦始皇陵地宫的探测,所用的探测方法中就有高密度电法,有效地反映了墓区古河道范围及古城墙墙基<sup>[47]</sup>。另外,高密度电法在地质灾害评价、环境污染监测和检测等新兴领域也引起了重视,在探测煤矿底板突水、评价岩层含水性、划分底板含水层和隔水层等方面,运用高密度电法也取得了良好的效果。

由于高密度电法能同时获取极化率和电阻率两个参数,在矿产资源勘查,特别是与硫化物有关的矿产资源勘查中开始显现出良好的前景。鉴于高密度电法具有分辨率高、探测深度较浅的特点,对矿脉宽度不大的矿床类型是一种行之有效的方法。如王文龙<sup>[48]</sup>、陈瑞林<sup>[49]</sup>等将高密度电法引入到石英脉型金矿勘探中,确定了石英脉的走向、延伸,划分出了含矿石英脉的分布范围;陈新奇<sup>[50]</sup>在细脉浸染状铅锌矿床上开展了高密度电法,由于脉体较小,常规激电未能有效识别出矿体,采用高密度电阻率法后,提高了分辨率,清晰显示了矿体位置;周明平<sup>[51]</sup>在裂隙带型锌矿上开展了高密度电法,根据低阻高极化特征,确定了找矿靶区并获得了验证;李水平<sup>[52]</sup>根据铝土矿与围岩的电阻率差异,部署了高密度电法,有效识别出赋存在古岩溶盆地中的层状铝土矿。

## 6 结论与展望

(1) 高密度电法对地下地电结构具有高分辨率,是研究浅层地质结构行之有效的方法。

(2) 随着深部找矿等深部勘探工作的巨大需求,大功率、大探测深度、多参数测量和一机多能是高密度电法仪器今后发展的主要方向。

(3) 高密度电法施工环境突破地表限制,实现坑道、井中、水上、水下的全天候勘探,井-井、井-地、坑道-地表联合测量将大大提高高密度电法的分辨率。

(4) 二维反演在未来较长时间内将仍然是高密度反演的主要方法,三维反演将随着三维数据采集成本的降低而逐渐增加,四维反演,特别是定时遥测四维监测系统的反演,在污染监测、堤坝渗漏、海水入侵等一些对时间比较敏感的领域中将发挥重要作用。

用。

(5) 高密度电法应用领域将更加宽广。

## 参考文献:

- [1] 李金铭,罗延钟. 电法勘探新进展[M]. 北京:地质出版社, 1996.
- [2] 董浩斌,王传雷. 高密度电法的发展与应用[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 171-176.
- [3] 底青云,倪大来,王若. 高密度电阻率成像[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(2): 323-326.
- [4] 杨发杰,巨妙兰. 高密度电阻率探测方法及其应用[J]. 矿产与地质, 2004, 18(4): 356-360.
- [5] 吕玉增,阮百尧. 高密度电法工作中的几个问题研究[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 264-269.
- [6] supersting R8 技术说明[EB/OL]. [2012]. <http://www.agiusa.com/supersting.shtml>.
- [7] RESECS II 高密度电法仪[EB/OL]. [2012]. <http://www.ouhualian.com/uploadfile/2012/0411/20120411044025175.pdf>.
- [8] Syscal/Syscalswitch 系列高密度电法仪操作手册[EB/OL]. [2012]. [http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/SwitchPro\\_Gb.pdf](http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/SwitchPro_Gb.pdf).
- [9] McOHMProfiler 高密度电法仪[EB/OL]. [2012]. <http://www.oyo.co.jp/english/instruments.html>.
- [10] Terrameter LS 高密度电法仪介绍[EB/OL]. <http://www.abem.se/products/ls/ls.php>.
- [11] GDP 32II 多功能电法仪[EB/OL]. [2012]. [http://www.zongec.com/PDF\\_Equipment/InstrSys.pdf](http://www.zongec.com/PDF_Equipment/InstrSys.pdf).
- [12] V8 多功能电法仪[EB/OL]. [2012]. <http://www.phoenix-geophysics.com/products/receivers/v8>.
- [13] 廖全涛. V8 多功能电测系统特点及应用范围[J]. 资源环境与工程, 2008, 22(12): 150-153.
- [14] DUK-2A 多功能电法仪[EB/OL]. [2012]. <http://www.cgif.com.cn/showProduct.aspx?id=336>.
- [15] 骄鹏 E60 序列高密度电法仪[EB/OL]. [2012]. <http://geopen.shuoyi.com/shtml/geopen/product/ade2425d1c8f516.html>.
- [16] Edwards R N. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using sea-floor transient electric dipole-dipole method[J]. Geophysics, 1997, 62: 63-74.
- [17] Yuan J, Edwards R N. The assessment of marine gas hydrates through electrical remote sounding: Hydrate without a BSR[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27: 2397-2400.
- [18] 王爱国,马巍,王大雁. 高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比[J]. 工程勘察, 2007, 1(1): 72-75.
- [19] 马志飞,刘鸿福,叶章,等. 高密度电法不同装置的勘探效果对比[J]. 物探装备, 2009, 19(1): 52-56.
- [20] 陈斌文,龚剑平,嵇其伟. 高密度电阻率法空洞探测的数据处理方法[J]. 路基工程, 2009, 1(1): 175-177.
- [21] 苏兆锋,陈昌彦,张在武. 小波降噪技术在高密度电阻率信号处理中的应用[J]. 工程勘察, 2008, 1(1): 72-74.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 徐小兵, 程久龙, 韩承强. 高密度电阻率法层析成像技术及其在水文地质中的应用[J]. 煤矿开采, 2006, 11(5): 21 – 24.
- [25] Dw groothedline constable s. Occam inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data[J]. Geophysics, 1990, 55: 1613 – 1624.
- [26] Sasaki Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation[J]. Geophysical Prospecting, 1992, 40: 53 – 464.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Mauriello P, Patella D. Resistivity anomaly imaging by probability tomography[J]. Geophysical Prospecting, 1999, 47: 411 – 429.
- [30] 刘小军, 李长征, 王家林, 等. 高密度成像技术在堤防隐患探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2006, 3(6): 415 – 418.
- [31] 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.
- [32] 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(1): 62 – 64.
- [33] Loke M H. Time-lapse resistivity imaging inversion. Proceedings of the 5th Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society[C]. 1999: 56 – 64.
- [34] Rita Deiana, Giorgio Cassiani, Andreas Kemna, et al. An experiment of non-invasive characterization of the vadose zone via water injection and cross-hole time-lapse geophysical monitoring [J]. Near Surface Geophysics, 2007, 4(5): 183 – 194.
- [35] 吕玉增, 阮百尧. 高密度电法二维反演软件设计与实现[J]. 桂林工学院学报, 2004, 24(4): 417 – 421.
- [36] 韩永琦, 张守智. 用 VB 编写高密度电法数据格式转换程序[J]. 物探与化探, 2000, 24(4): 317 – 420.
- [37] Loke M H, Barker R D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method[J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 131 – 152.
- [38] Loke M H, Barker R D. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion [J]. Geophysical Prospecting, 1996, 44: 499 – 523.
- [39] 张献民, 王俊茹, 刘国辉. 应用高密度电法探测煤田陷落柱[J]. 物探与化探, 1995, 18(5): 363 – 371.
- [40] 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: 44 – 46.
- [41] 吴长盛. 北大港水库堤坝裂缝检测与评定技术研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(5): 61 – 63.
- [42] 赵敏敏, 殷玉琴. 高密度电法 CT 成像技术在病险水库探测中的应用[J]. 水利建设与管理, 2002, 5: 57 – 58.
- [43] 紫民, 耿东青. 高密度电法在坝体渗漏勘察中的应用[J]. 岩土工程技术, 2003, (5): 272 – 275.
- [44] 王文州. 物探技术在高速公路路沿地区地质勘探中的应用[J]. 中外公路, 2001, 21(4): 56 – 58.
- [45] 王玉清, 张晓春, 马德蕪, 等. 综合物探在高层建筑选址工作中的应用[J]. 河南地质, 2001, 19(3): 208 – 211.
- [46] 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(4): 58 – 60.
- [47] 刘士毅. 秦始皇陵地宫地球物理探测成果与技术[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 102 – 106.
- [48] 王文龙, 杨拴海, 张慧玉. 高密度电法在金矿找矿中的应用[J]. 黄金地质, 2002, 8(3): 53 – 56.
- [49] 陈瑞林, 张慧玉, 杨秀华, 等. 高密度电法在山东土堆 – 沙旺金矿的应用[J]. 黄金地质, 2003, 9(1): 56 – 59.
- [50] 陈新奇. 高密度电法在福建大田雄峰铅锌矿区找矿中的应用[J]. 福建地质, 2003, 4(3): 140 – 144.
- [51] 周明平, 朱大伟. 高密度激发极化法在大碛喇汞锌矿勘探中的应用[J]. 贵州地质, 2006, 23(4): 312 – 315.
- [52] 李水平. 高密度电阻率法在铝土矿床上的应用[J]. 物探与化探, 2009, 33(1): 8 – 10.

## THE PROGRESS AND PROSPECT OF THE ELECTRICAL RESISTIVITY IMAGING SURVEY

YAN Jia-yong, MENG Gui-xiang, LV Qing-tian, ZHANG Kun, CHEN Xiang-bin

(MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** This paper has summed up the progress of the ERI method over the past decade of years as well as its future development trend in the following aspects: ① A comparison of the performances of the main ERI instruments used at present shows that the ERI instruments tend to develop in the multi-channel, multi-parameter, multi-functional, high-power direction; ② ERI measurement environment has changed from surface measurement to water surface, underwater and cross-hole measurements, with the last three kinds of measurements analyzed in this paper; ③ On the basis of analyzing ERI data processing method and inverse development status, this paper describes three-dimensional and four-dimensional inversion theory of ERI with practical examples; ④ ERT applications are summed up, and several new applications are introduced. It is concluded that, with the improvement of the probing depth and observation precision as well as the diversification of the observation models, the application field of ERI will become broader and broader, and this technique will surely have wide development prospect.

**Key words:** electrical resistivity imaging; shallow geophysical exploration; high density electric instrument; four-dimensional inversion

作者简介: 严加永(1977 –), 男, 副研究员, 博士, 主要从事矿产资源地球物理探测研究。