

# 梯度电测深剖面法及其应用

葛为中<sup>1,2</sup>, 吕玉增<sup>2,3</sup>, 丁云河<sup>4</sup>

(1. 广西地球物理学会, 广西南宁 530000; 2. 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 3. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004; 4. 河南省有色地矿局7队, 河南郑州 450000)

**摘要:** 针对常规直流电测深的应用情况, 改革布极方式, 研究提出梯度测深剖面法。该法能简化布极工序, 可用多台接收机或多通道电测仪在多个电测深点上同时(连续)观测, 大大提高工作效率。其装置有三极测深、四极测深和中梯测深等, 其观测剖面上由于采用供电电极稀设方式, 能很好地适应二维正反演计算网格, 宜于获得带地形的电阻率、极化率断面, 实现电测深数据的层折成像。目前, 该梯度测深方法已应用于金属矿勘查和工程勘察之中, 取得成效。

**关键词:** 梯度电测深剖面; 直流电测深; 供电电极距; 三极测深; 中梯测深

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2011)02-0206-06

目前, 高密度直流电法和电磁类测深(TEM法、CSAMT法和EH-4仪)的应用日益广泛<sup>[1-4]</sup>, 然而在探测几十米至几百米深度的各类地质目标时, 电阻率测深和激电测深依然有着不可取代的作用, 因此, 有必要对电测深剖面观测技术和解释方法作进一步改进更新。近年, 笔者针对电法勘探现状及其存在问题, 提出直流电法勘探新理念, 改革传统电测深剖面布极方式<sup>[5]</sup>, 研究出梯度测深剖面法。

梯度测深剖面法沿袭直流电法的基本原理, 其工作方式类似于多极距的梯度剖面。它能简化电测深剖面布极工序, 提高外业工效数倍。梯度测深剖面可使用现有仪器装备, 只需稍微改变工作流程; 而若有多台单道接收机, 即可充分利用于多个电测深观测点同时测量。多通道电测仪更适于观测梯度测深剖面。这种测深剖面上供电电极点位有规律稀设, 适应二维正反演网格, 宜于获得带地形的电阻率(极化率)“真”断面, 实现电测深层折成像。其反演软件可用现有直流电法二维软件<sup>[6-7]</sup>加以改编。梯度电测深剖面法已在内蒙古、山西、广西几个金属矿区勘查和河北中关矿采空区等工程勘察中应用, 取得成效。

## 1 电测深剖面

### 1.1 电测深剖面的电极布设

测深剖面的一系列测深点沿测线布设, 供电电极

和测量极一般也沿测线向外移动。电测深剖面中最常用装置是对称四极测深, 其次是三极测深。传统电测深剖面上各测深点按统一的极距序列扩大供电电极距。常用“对数极距序列”<sup>[8]</sup>大极距情况的极距扩大过稀(几百米以上), 而相邻测点供电电极按点距(几十米)反复平移, 电测深剖面供电点位置并非有规律逐渐稀设。

电测深剖面一般是在其他电法剖面完成以后开展, 如在联合剖面异常上布置电阻率测深剖面、在激电中间梯度剖面扫面的异常区选择精测剖面布置激电测深剖面。短导线激电中梯常用多台接收机同时在相邻测线上观测, 但而后的激电测深却因受装置方式的限制, 只能用一台接收机。

如果各点的极距序列可以不尽一致, 对称四极的大极距供电电极位置允许不对称, 则在不影响探测能力的前提下, 就可少搬动供电电极, 每一次供电做多观测或借助测量电极阵列观测。

### 1.2 电测深断面的资料解释

电阻率测深剖面实测数据资料以视电阻率拟断面图来显示, 并对它作定性解释。众所周知, 实测视电阻率 $\rho_s$ 数据是电极系影响范围内地下电性不均匀和地形影响的综合反映。在拟断面图中 $\rho_s$ 数据却被人多地集中表示在二维拟断面图的 $(x, z)$ 点位上, 横坐标 $x$ 为装置规定点位, 纵坐标 $z$ 为电极距函

收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(40774057); 广西自然科学基金(桂科自0832263); 广西地质工程中心重点实验室项目(桂科能07109011-K009)

数(对数、算术或渐变算术、平方根等)。拟断面图存在多种不确定性,同一剖面上对称四极、偶极、三极的测深拟断面图异常形态特征差异明显,就是不确定性的表现之一,解释者要凭经验对拟断面图作定性推断。它不应被称为“电阻率断面图”。

为了提高电测深剖面的解释水平,必须对实测数据作二维反演,获得带地形的电阻率 $\rho(x,z)$ “真”断面图, $\rho$ 为单元电阻率, $x$ 为实际点位, $z$ 为实际深度或标高。然而,由于测深供电电极距变化跨度(从几米至几千米)相当大,传统电测深剖面上供电点位置并非有规律逐渐稀设,剖面上电极位置不像高密度电法那样网格化,使得传统电测深剖面的二维反演繁琐而难以实用。亟待研究实用的电测深剖面二维反演层析成像定量解释技术。

针对电测深剖面外业工作和资料反演解释方面的不足,对电测深剖面布极方式和工作顺序进行改革,研究出梯度测深剖面法。

## 2 梯度测深剖面法

梯度剖面是固定供电电极,移动  $MN$  极作梯度测量的剖面。若再向外变动供电电极,逐步扩大供电电极距,再作梯度剖面测量,就成为梯度测深剖面。梯度测深剖面可称为“GS”<sup>[9]</sup>。

### 2.1 梯度测深装置类型和电极布设

梯度测深装置包括三极梯度测深(含双向三极梯度测深)、四极梯度测深(含对称四极、亚对称四极、不对称四极和中梯测深)和偶极梯度测深(供电偶极距可大于测量偶极距 $AB \geq MN$ )等几种,可以单一使用(如三极或四极),也可以组合应用(如三极—偶极或四极—偶极),甚至可用“泛装置梯度测深”(含三极—偶极—四极等)。

梯度测深剖面适用于规则点距,每一极距供电时,剖面上多个测深点的电位差可由多台单道接收机同时(或连续)观测,若用多通道接收机则可在测

量电极阵列上快速连续观测。然后移动供电电极扩大电极距,继续作多测点观测…。 $MN$  极距可适度作扩大变更。根据测深点数、仪器的道数或台数,按多点(3~11点等)一串方式同步(或连续)观测,测深长剖面可多串分段完成。

电极的点位沿剖面有规律布设:在测深剖面起点的  $M$  极和终点的  $N$  极之间,为等间隔测量点区,之外为等间隔供电点区,再往外为供电点渐稀区。参考规则点距的极距序列,布设供电电极点位,供电电极距增大的间距可按点距的整数倍(1、2、4、8、12、16、24…)阶梯式增加。虽然相邻测深点的供电电极距序列不尽一致,然而剖面上所有测量极和供电极的点位分布(近区等间隔、远区分段渐稀)可对应正、反演数字模拟网格的节点,适应于二维数字模拟网格,宜于通过二、三维反演软件计算出带地形的电阻率(极化率)断面图像,实现电测深层折成像。

梯度测深剖面简化了布极工序,便于外业实施,供电电极减少反复平移,一次供电多点观测,加快观测速度,能使测深剖面外业工作的效率提高,成本降低。在干燥高阻地区,因梯度测深剖面供电电极移动少,宜于更充分地改善接地条件,增大供电电流,提高观测精度。在矿山等工业电强干扰区,可先布电极、电缆,趁矿山午间强电暂休、干扰减弱时段快速完成观测。

### 2.2 三极梯度测深剖面

三极梯度测深剖面属较常使用的装置,一般只作单向三极测深: $A-MN$  或  $MN-B$ ,也可作双向三极梯度测深。图 1 为  $MN-B$  单向三极梯度测深剖面的布极示意。测线上多个测深点①、②、③…⑤…共用一个供电电极  $B$  极,外移  $B$  极测量。如 9 个测深点间距 40 m,剖面长度 320 m, $B$  极到①的供电电极距序列  $O_1B = 20, 40, 60, 80, 100, 120, \dots, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 460, 500, 540, 600, 660, 720, 800, 900, 1000 \dots$ 。

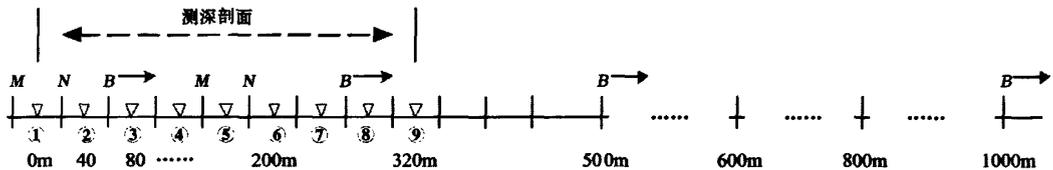


图 1 三极梯度电测深( $MN-B$ )布极示意

三极梯度测深拟断面图记录点的横坐标在  $MN$  中点、纵坐标建议取渐变算术  $AO/\lg(AO)$  或平方根  $\lambda \sqrt{AO}$  ( $\lambda$  为比例系数)<sup>[5]</sup>,也可取传统的算术  $AO/2$ 、 $AO/3$  或对数  $\lg(AO)$ 。三极梯度测深剖面还可绘

制每一测点的三极测深曲线。国外多通道电测仪器推荐采用“轴向单极—偶极测深”(即三极测深)和“双侧轴向单极—偶极测深”(即双向三极测深)<sup>[7]</sup>,其拟断面图记录点的  $x$  在  $AO$  的中点, $z$  取  $AO/2$ 。

三极梯度测深剖面的供电电极有规律稀设,适应反演网格,宜得电阻率(极化率)“真”断面。

### 2.3 四极梯度测深剖面

$MN$  在  $AB$  之内的四极装置有对称、亚对称、不对称等装置。四极电剖面有对称四极剖面 and 中间梯度剖面,四极电测深有对称四极测深,也可以有中间梯度测深<sup>[9]</sup>。

中间梯度测深剖面是  $AB$  在一段测深剖面之外固定后,移动  $MN$  极做中间梯度剖面测量,再向外变动供电极,不断扩大供电极距,又再作中梯剖面测量,就成为中间梯度测深剖面,简称中梯测深剖面。

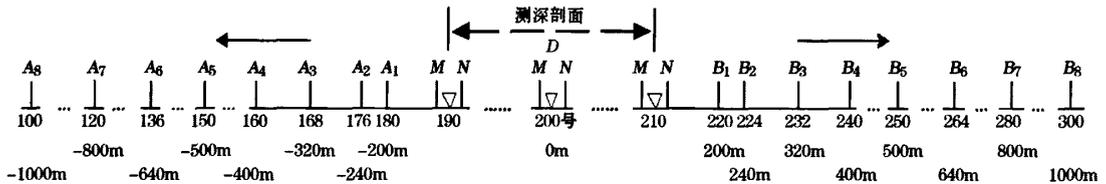


图2 中梯测深(A-MN-B)布极示意

中梯电测深法这种不对称电测深的的数据是确切的,但不宜绘制电测深曲线。中梯电测深剖面法拟断面图可用粗略的简便方式绘制,其点位横坐标为  $MN$  的中点;纵坐标笼统取  $AB/4$ 、 $(AB/2)/\lg(AB/2)$  或  $\lambda \sqrt{AB/2}$ 。这种粗略而不确切的拟断面图可作大致的定性解释。

中梯测深供电极逐渐稀的布极点位可对应反演网格节点,宜于获得带地形的电阻率(极化率)“真”断面图像,实现了电测深层折成像的实用化。中梯测深的拟断面图是它的中间成果图件,可以不绘制。二维反演定量解释的断面图像是中梯测深的最终成果图件,必须提交。

若需要  $AB < A_1B_1$  (最内那对  $AB$  极距) 情况下的小极距测深资料,可用小极距对称四极测深剖面或作变极距对称四极剖面,绘制  $AB < A_1B_1$  情况对称四极测深剖面拟断面图。

这种四极测深剖面采用“对称测深+中梯测深”混合组成:小极距用对称测深剖面,大极距用中梯测深剖面。拟断面图由上半幅对称四极测深拟断面图和下半幅中梯测深拟断面图拼接而成。对称测深剖面数据和中梯测深剖面数据一并由2.5维反演软件计算出“真”断面图像。

## 3 梯度测深剖面法的应用实例

### 3.1 三极梯度测深剖面法

河南有色地质7队自2006年8月起引进梯度

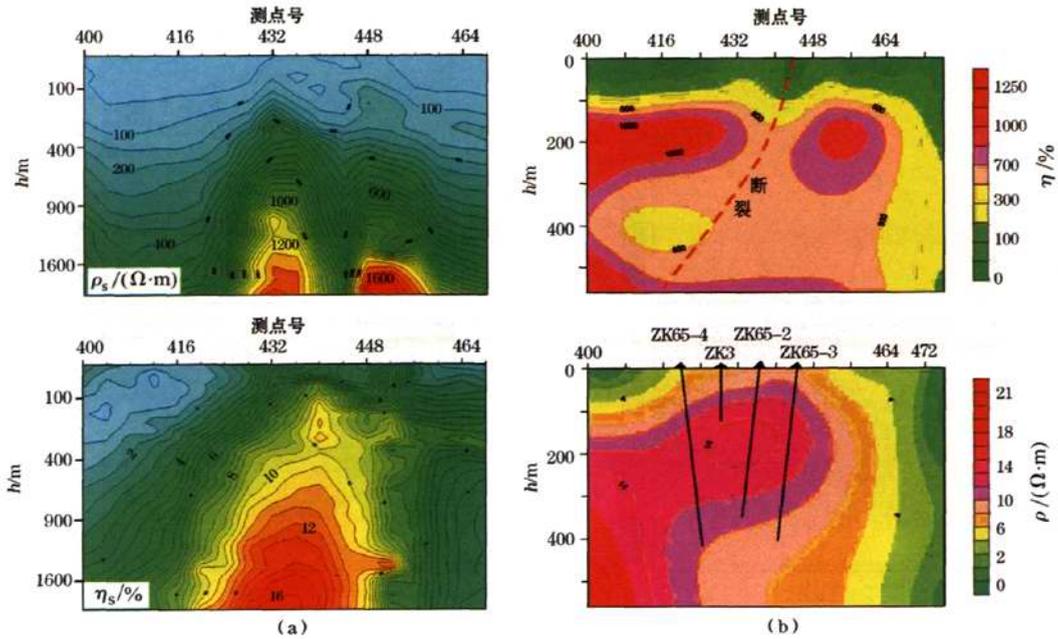
在测深剖面外侧,较对称地布置一系列逐渐稀设的  $A$ 、 $B$  极的点位。中梯测深剖面的测点可由多台单道接收机同时观测,若用多通道接收机则可在测量电极阵列上观测。

图2为中梯剖面测深布极示意,测深剖面长度  $D$ ,供电  $A$ 、 $B$  极的点位逐渐稀设。如测深剖面长度  $D=200$  m,中点在200点,测深点为190~210点间相距40m的6个测深点; $A$ 、 $B$  极的点位为  $(A_1, B_1)$  为(180, 220),  $(A_2, B_2)$  为(176, 224), ...,  $(A_8, B_8)$  为(100, 300)…。相应的  $AB/2$  为200, 240, 320, 400, 500, 640, 800, 1000 m, …。

测深新技术,开展精测剖面电测深新方式研究协作项目,2007年在内蒙古3个测区完成三极梯度激电测深200余点。

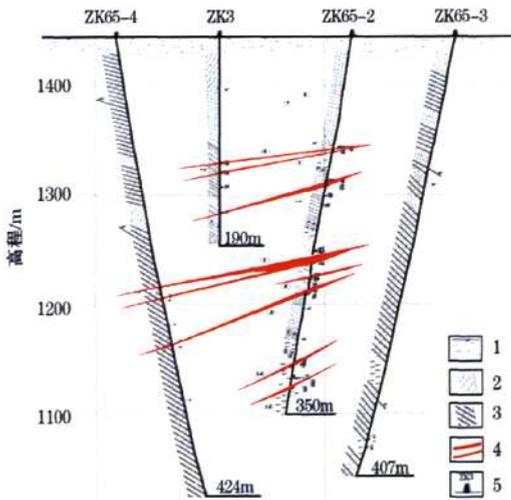
哈达特陶勒盖矿位于内蒙古二连—东乌旗铜金成矿带上。区内花岗斑岩、霏细斑岩等火山岩脉发育,铅锌矿(化)体主要赋存在泥盆系钙质砂岩中的破碎裂隙里,受断裂构造控制。物性测试表明,花岗斑岩脉和矿化砂岩的极化率、电阻率高出围岩几倍至十几倍。在哈达特矿区激电中梯IP3、IP6、IP7异常区,选择48、7、56、65勘探线4条精测剖面,布设三极梯度激电测深120点。用法国IPIS公司的VIP-10000发射机、ELERC-6六通道接收机,鉴于  $MN$  与点距不重合,只能用第1、3、5三个通道,以三点一串方式同步观测三极梯度激电测深。

哈达特65线400~468号测深点18个,间隔40m,供电极距从20m起,最大为1920~2060m,有20余个极距。如第一串400、404、408号3个点,  $A$  极移动一次同步观测这3点的数据。哈达特65线激电测深成果见图3。在图3a的下部( $AO > 400$  m以下)呈现未封闭的2个高阻异常( $\rho_s > 500 \Omega \cdot m$ )和一个高极化异常( $\eta_s > 10\%$ )。图3b为2.5维反演后的电阻率、极化率“真”断面图,是电测深剖面层析成像定量解释图件,图中深80~350m间呈现高极化异常和2个高阻异常;高阻异常在436~444点之间隔开,推断为断裂带通过所致,而断裂带左侧明显的高阻、高极化异常体,推断为矿体。



a—实测的视电阻率  $\rho_s$ 、视极化率  $\eta_s$  拟断面; b—电阻率、极化率 2.5 维反演断面

图 3 内蒙古哈达特 65 线三极梯度测深剖面



1—第四系; 2—花岗斑岩脉; 3—钙质砂岩; 4—铅锌矿体; 5—钻孔位置

图 4 哈达特 65 线验证钻孔矿体地质剖面

为验证物探推断的矿体和断裂带, 设计了 4 个验证钻孔: ZK65-4、ZK3、ZK65-2 和 ZK65-3, 分别位于 420 点、428 点、436 点和 444 点(图 4)。在深 120 ~ 320 m 间打到 8 层矿体, 矿体累计厚度 14 m, 单层厚度 6.7 m, Pb + Zn 平均含量为 4.22%。揭示的工业矿体对应于反演的高阻高极化异常体范围。此外, ZK65-2 和 ZK65-3 两钻孔见断裂破碎带, 与推断

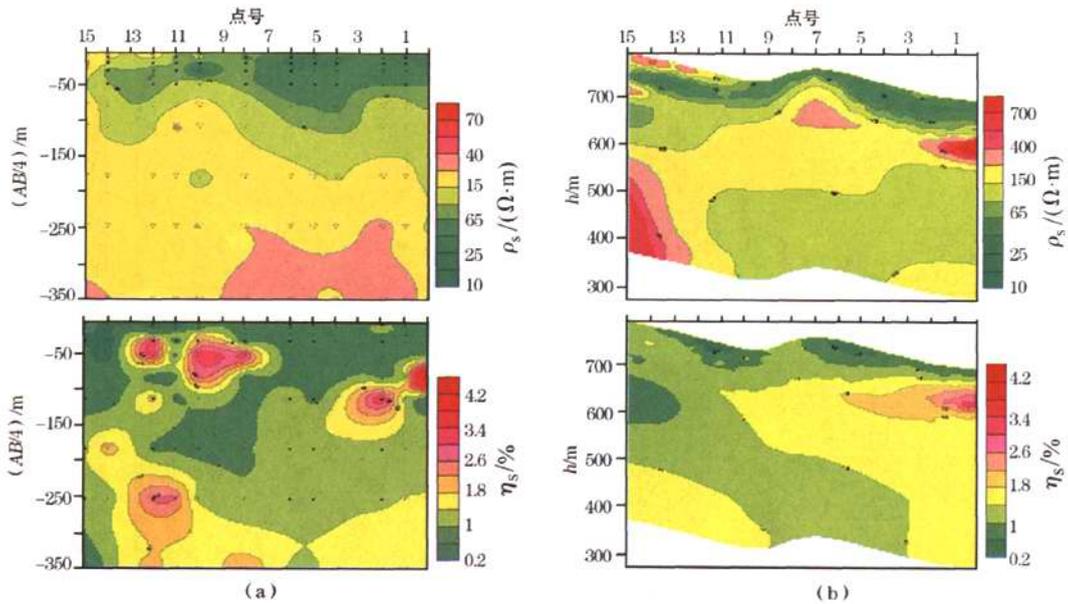
基本吻合。

### 3.2 四极梯度测深剖面

工区在山西中条山某铜矿区, 山势陡峻, 标高在 600 ~ 1 150 m 之间。在中条山区的含矿变质火山岩系中, 金属矿化(黄铜矿化、黄铁矿化等)多以星散状和浸染状出现, 容矿岩石或近矿围岩为含碳质绿泥片岩, 它们都具有较高的极化率值。

桂林理工大学用重庆奔腾数控技术研究所 WDFZ-2 发射机和 WDJS-1 接收机完成激电中梯剖面 6 条(共 3.6 km)后, 实测激电测深剖面 4 条(共 50 个测深点), 采用“对称测深 + 中梯测深”混合四极测深剖面:  $AB/2 = 10, 15, 25, 40, 60, 100, 160$  m 的对称测深和  $AB/2 = 160, 220, 360, 500, 700$  m 的中梯测深。当  $AB/2 = 10 \sim 60$  m 时,  $MN = 6$  m; 当  $AB/2 = 60 \sim 220$  m 时,  $MN = 20$  m, 当  $AB/2 = 360 \sim 700$  m 时,  $MN = 80 \sim 120$  m。

在 J19 线的 0、1、2、4、5、6、8、10、11、12、14、15 点布设了 12 个测深点, 图 5 为该线激电四极梯度测深剖面成果。实测拟断面图的横轴水平(不宜用地形线), 拟断面图由两种图拼接: 上半幅  $AB/4 \leq 80$  m 为对称四极测深剖面拟断面, 下半幅  $AB/4 > 80$  m 为中梯测深剖面拟断面, 每对  $AB$  各点不对称测深数据的纵坐标笼统用  $AB/4$  表示。图 5a 上有几处  $\eta_s$  异常。用桂林理工大学 2.5 维反演软件计算出带地形的断面图像(图 5b), 电阻率断面上地形干扰



a—实测的视电阻率  $\rho_s$ 、视极化率  $\eta_s$  拟断面;b—电阻率、极化率 2.5 维反演断面

图5 山西中条山某铜矿区 J19 线四极梯度测深剖面

已消除,得到高阻异常。推断 J19 线 0~3 点下方,标高 600~650 m 范围内深度约 100 m 的高阻、高极化异常体为隐伏岩体。这个推论已被其后的山地工程证实。

#### 4 梯度电测深剖面法适用的多通道电测仪

国外的多通道电测仪器(法国的 ELREC、美国 GDP-32、加拿大的 IPR-12、V-8 等)多适于观测梯度测深剖面(三极、偶极和中梯测深等)。根据葛为中建议,国内已针对梯度测深剖面法研制成功多通道电阻率仪器和多道大功率激电系统。

广西地球物理学会已研制电阻率梯度测深适用的多通道电阻勘探仪(RGS-11 型)<sup>[10]</sup>,其 11 个观测通道均有本道的极化补偿电路,各通道在电气上完全隔离,测量时各通道间不会互相影响。当 MN 数值任意时可用 6 道,当 MN 为点距的 3、2、1 倍时选用 9、10、11 道,依次快捷观测各点( $\Delta V/I$ )数据,因此称为 RGS-6/9/10/11 多通道电阻勘探仪。

多通道电阻勘探仪已用于河北沙河中关矿采空区勘察。采空区埋深在 100~200 m,静水位在 200 m 以下。测区布置 20 余条三极梯度测深剖面,点距 20 m,线距 20、40 m。MN=40 m,AO 在 60~400 m。用 6 点一串方式和 9 点一串方式观测,15 天完成 392 个测深点,分析高阻异常分布,推断采空区位置

和规模。钻孔在 130 m 见采空区,验证了物探成果。

重庆奔腾数控技术研究所已研制新一代短导线多道大功率激电系统:WDJS-3 多道(6/12/20 道)数字直流激电接收机和 WDFZ-5T/10T 大功率发射机(可实现 3/6 多组 AB),其收、发机之间可选用三种同步(软件、石英钟和 GPS)方式,发射机配合供电极控制器和转接器,实现任选多个供电极中的一对 AB 极供电,接收机通过多芯电缆连接测量电极(不极化)阵列,几分钟即可采集这对 AB 极供电的 12 个测深点的视电阻率和视极化率数据,再控制 A、B 极变更后供电,扩大供电电极距又采集多点观测数据…。这套多道激电系统很适宜激电梯度测深剖面法。

#### 5 结论

通过新、老电测深剖面方法的对比和在矿产勘查的应用表明,梯度测深剖面法能简化布极工序,提高观测效率,宜于二维反演,实现层折成像,是具有实用价值、宜于推广的直流激电测深新方法。它将促使测深电极阵列化的研究、观测仪器的升级、解释软件的开发,使电测深上升到新的发展台阶。今后还将在三极测深远极改革、泛装置测深、用户软件方面作进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 于泽新,敖颖锋,吕景增,等. CSAMT 法在辽西康杖子区深部探矿中的应用[J]. 地质与勘探,2009,45(5):600-605.
- [2] 王冲,董平,孙斌,等. EH4 电磁测深在江西城门山矿区深部及外围找矿中的应用[J]. 地质与勘探,2009,45(6):742-747.
- [3] 石明生,张永雨. 电测深法和钻探相结合在山区地质勘察中的应用[J]. 地质与勘探,2005,41(5):92-95.
- [4] 贾志宽,安西峰,李振峰,等. 非常规电测深法在工程地质勘查中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):192-199.
- [5] 葛为中. 电测深布极装置及观测方式的变革[A]//中国地球物理. 青岛:中国海洋大学出版社,2007:259-260.
- [6] 阮百尧,村上裕,徐世浙. 电阻率/激发极化数据的二维反演程序[J]. 物探化探计算技术,1999,21(2):116-125.
- [7] 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.
- [8] 葛为中. 绘制电测深等值断面图的新方法[J]. 勘察科学技术,1997,(3):58-60.
- [9] 葛为中,吕玉增,丁云河. 直流电法梯度测深剖面的研究及应用[A]//中国地球物理. 北京:中国大地出版社,2008:200.
- [10] 梁炳和,葛为中. 多通道电阻率仪的研制和应用[J]. 华北水利水电学院学报,2010,31(4):116-119.
- [11] 雒志锋,彭兴刚. 双侧轴向单极-偶极激电测深在勘查铅锌等多金属矿中的应用[J]. 物探与化探,2009,33(5):501-506.
- [12] 马德锡,于爱军,葛良胜,等. 高密度电法在金矿勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2008,44(3):65-69.
- [13] 柳建新,何欢,刘海飞,等. 起伏地形垂直电测深二维反演及应用[J]. 物探化探计算技术,2009,31(4):293-296.

## THE GRADIENT SOUNDING PROFILE METHOD AND ITS APPLICATION

Ge Wei-zhong<sup>1,2</sup>, LU Yu-zeng<sup>2,3</sup>, Ding Yun-he<sup>4</sup>

(1. Guangxi Geophysical Society, Nanning 530000, China; 2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 4. Bureau of Non-ferrous Geology and Mineral Resources Exploration of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** According to the practical application of DC sounding, this paper puts forward a new gradient sounding profiles method. The surveying system can simplify the working procedure through using more than one receiver or multi-channel electrical measuring instrument in a number of electrical sounding points at the same time. Moreover, the gradient sounding system includes tri-electrode gradient arrangement, dipole-dipole gradient array and central gradient array, which is suitable to 2-D inverse interpretation. The system has been applied to metallic ore exploration and engineering investigation successfully.

**Key words:** gradient electrical sounding profiles, DC sounding, current distance, three-pole sounding, central gradient sounding

作者简介: 葛为中(1942-),男,教授,长期从事电法勘探等地球物理工作。