

“地球物理仪器新技术”专栏 编者按 我国新一轮找矿突破战略行动已经启动,作为矿产资源勘查主体手段的地球物理探测技术肩负着重要使命。为加强地球物理探测理论方法创新,实现关键核心技术突破,推动我国地球物理探测装备高质量发展与自立自强,中国地球物理学会地球物理技术委员会于2023年9月15~17日在成都召开了“中国地球物理学会地球物理技术委员会第十届学术会议——探索地学仪器原始创新·致力地球物理技术突破”研讨会。来自国内87多个科研院所、高校及企事业单位共400多人参加了会议和仪器展览。会议从地球物理探测方法技术与装备、全域立体探测方法技术与装备、创新地球物理探测方法技术与装备、前沿地球物理探测方法技术与装备、人工智能与大数据地球物理技术、地球物理探测技术示范与应用六个专题和青年论坛共118个报告,围绕近几年在创新的地球物理探测方法技术、人工智能与大数据、仪器装备等方面取得的先进成果而展开。《物探与化探》非常关注我国地球物理方法及探测仪器的进步与发展,与中国地球物理学会地球物理技术委员会联合创办专栏,向业内广泛征文,并获得了踊跃的响应,共征集到相关文章36篇,本期专栏中,我们从征集的论文中优先选择出8篇文章,奉献给读者,共同探讨地球物理仪器新技术方面的进展。

doi: 10.11720/wtyht.2024.0170

葛为中, 梁炳和, 高建东, 等. 基于借线遥控电极阵列的二维/三维电法勘探[J]. 物探与化探, 2024, 48(6): 1437-1447. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0170>

Ge W Z, Liang B H, Gao J D, et al. 2D/3D electrical exploration based on borrowing-line telecontrol electrode arrays[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(6): 1437-1447. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.0170>

基于借线遥控电极阵列的二维/三维电法勘探

葛为中^{1,2}, 梁炳和¹, 高建东³, 吕玉增², 陈龙^{1,4}

(1. 广西地球物理学会, 广西南宁 530023; 2. 桂林理工大学, 广西桂林 541004; 3. 山东正元地质勘查院, 山东济南 250101; 4. 上海艾都慧测智能科技有限公司, 上海 201108)

摘要: 借线遥控电极阵列是一种新型供电—观测电极阵列,它借助常规电法勘探的供电导线和测量导线载波传送信号,遥控各导线与其链接的系列编码电极开关,从而有序地开展供电和测量。这种阵列的电极点距可灵活改变,供电电极间距可逐渐遥控扩大,实现了梯度测深阵列化测量。借线遥控器可以与单道电测仪、多测道电法仪、高密度电法仪等配合使用,组合后电极的阵列能更有效地开展二维/三维电法勘探。应用实例表明,与传统探测方式或高密度方式相比较,借线遥控电极及其组合阵列在矿产、岩溶等复杂地形地质条件下展现出高效率和高灵活性,拓展了电法勘探深部探测应用技术体系,具有推广价值和前景。

关键词: 电极阵列;借线遥控;梯度测深;任意四极

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)06-1437-11

0 引言

为促进直流电法勘探的发展,2006年葛为中提出电阻率法新理念^[1],梯度电测深剖面法(简称梯度测深, gradient sequence, GS)^[2-4]。梯度测深是将测量电极(MN)平移的梯度电剖面法和供电电极(AB)

极距扩大的电测深有机结合,简化了电测深剖面布极和测量工序,适用于多测道电测仪,宜于数据反演成像,经推广应用梯度测深取得了实用成效^[3-8]。为实现梯度测深阵列化,基于直流电法通过供电导线及其电极向地下输送电流,通过测量导线及其电极测量电位差的原理,依据间歇供电、逐点观测的特点,提出“遥控电极阵列”和“借线遥控”的创新技

收稿日期: 2024-04-15; 修回日期: 2024-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(42274182)

第一作者: 葛为中(1942-),男,教授,从事勘探地球物理电法理论与应用研究工作。Email:61526029@qq.com

通讯作者: 吕玉增(1978-),男,博士,教授,主要从事电磁法勘探理论与应用研究工作。Email:Lyz@glut.edu.cn

术,即在常规电法的供电、测量导线及其一系列接地电极之间,连接“分布式遥控开关”,而遥控信号就借助其导线载波传送,从而控制相应电极的开启或关闭。

为了探索梯度测深阵列化的配套硬件,梁炳和研制了无线、手机、借线等多种电极阵列遥控器^[9]。多年来在有关单位的支持下,借线遥控电极阵列(简称 JYDZ)几经实地试用,借线遥控器改进升级。并于 2017 年申请获得国家发明专利“电法勘探电极阵列借线遥控器”(ZL 2017 1 1013579.5),2012 年获得授权^[10]。2022 年,上海艾都慧测智能科技有限公司将借线遥控器优化成产品:JYT-C1 型借线遥控发送机和 JYS-C1 型借线遥控接收机。

梯度电测深要应对野外复杂地形地质条件下的数据采集任务,供电电极与测量电极可以不在一条直线上灵活布设,亟待相应的实用数据处理反演软件。为此,高建东研发了基于最小二乘迭代方法^[11-12]的“任意四极电测深二维、三维反演软件”(简称 RESJCSFY),各电极之间的极距可根据现场环境灵活布设,只需记录各电极点的实际坐标,即可反演。这样一来,既有利于电极的实际布设,又提高了电测深反演数据的位置精度。

传统电法采用一对供电电极 A 、 B 和一对测量电极 M 、 N 及其导线。而多测道电法用集中式多芯电缆连接,由多个电极组成测量阵列,在一对供电电极 A 、 B 供电情况下,采用多对测量电极 M 、 N 进行测量,其供电电极尚未阵列化。1980 年研发的高密度电极阵列,开启了电法的全面电极阵列化模式,已成为电阻率法的主要应用方法。

高密度电法阵列采用固定道距的集中式几十芯电缆或固定道距分布式多芯(含通讯线、电源线和电极线等)电缆来连接几十个(或百余个)由电极组成的高度密集的电极阵列,程控变换选择 A 、 B 、 M 、 N 电极。这些电极自动切换,可进行多层电剖面观测。电极间距由多芯电缆固定道距所限定,适用于测点距小于 10 m 的各种常规装置的多极距电阻率剖面测量,当测点距为 10 m 时,60 道电极阵列的探测深度约为百余米。然而,对于测点距在 20 m 以上的大点距电法较大深度电测深、较大电流供电的激电法等,高密度电法并不适用。

借线遥控电极阵列(JYDZ)中连接电极 A 、 B 、 M 、 N 的导线分别与含遥控接收机的 A 、 B 、 M 、 N 电极阵列相连接。测量阵列可按梯度剖面进行布设,供电阵列可按测深供电点稀疏布设。操控与电法仪连接的借线遥控发送机,在连接 A 、 B 、 M 、 N 的导线中

各选取 1 个电极进行接通,当供电电极选定后,测量电极按梯度方式进行平移,扩大供电极距,进行梯度测深观测。JYDZ 电极间距灵活稀设可变,间距可为 10~500 m,供电导线可采用允许大电流通过的粗导线。借线遥控的电极阵列适用于较大探测深度的梯度电阻率测深、激电梯度测深和多供电电极的激电中梯测量。梯度测深不再限于直线、对称、等间距的传统装置布设,可允许点距改变、点位偏移、测线弯曲、供电点离散等情况。我们将这种低成本、轻便、灵活、电极密度低的 JYDZ 电极阵列称为“低密度电极阵列”。

借线遥控器可以与多种国内外电法仪器相配合:如单道电测仪配备借线遥控器后,就可具备供电阵列和测量阵列;借线遥控供电阵列与多测道电法仪^[13-15]或多台电测仪(如短导线激电多台接收机)配合,可增加供电阵列,组合成测量极间距可在 10 m 以上、供电极间距可渐稀至百米以上的电极阵列;借线遥控供电阵列可配备在高密度法阵列外侧,遥控供电极可从高密度阵列起止两端再渐稀外延至几百米以上,最大供电极距可增大数倍,探测深度也可成倍增加^[16],这种高密度法阵列与借线遥控供电阵列相组合的阵列,我们称为“超深高密度电法”^[17];借线遥控低密度供电阵列与三维高密度阵列的组合,能事半功倍地增加原三维高密度法的探测范围和探测深度,有助于三维电法勘探的实用化。

借线遥控电极阵列已经在河北矿山治理^[17]、海南温泉探测^[16]、陕西激电找矿^[18]、西南岩溶勘查等方面取得应用成效。

1 借线遥控器及其工作原理

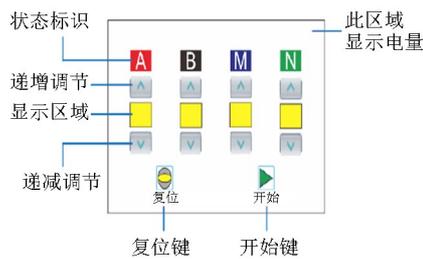
借线遥控器由一个发送机和几十个接收机(分布在每个电极与相应导线之间)组成。图 1 为上海艾都慧测智能科技有限公司生产的借线遥控器,包括 JYT-C1 型借线遥控发送机和 JYS-C1 型借线遥控接收机。



(a) JYT-C1 型发送机

图 1-1 借线遥控器

Fig.1-1 Remote control with wire



(b) 发送机面板上显示屏



(c) JYS-C1 接收机

图 1-2 借线遥控器

Fig.1-2 Remote control with wire

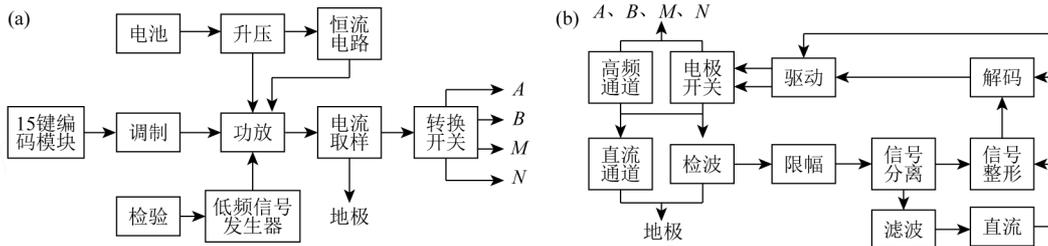


图 2 借线遥控发送机(a)和接收机(b)设计方框

Fig.2 Structure design of remote transmitter(a) and receiver(b)

图 2b 为借线遥控接收机结构设计方框,从导线上传过来的高频载波信号在电极开关已接通的情况下,可直接进入检波电路;如在电极开关未接通时,可通过高频通道进入检波电路,检波采用桥式电路,直流通道也称分流电路,它可减少接收机对电法仪器测量的影响。检波输出信号经限幅电路进入信号分离电路,限幅器是个稳压器,将进入分离电路的信号限制在额定值以下,信号分离电路输出信号,经滤波成为直流电压后给接收机各电路;另一路经信号整形后得出编号信号送至解码电路解码。当地址码与数据码均符合特定值时,解码电路有输出,驱动电路按要求控制电极开关的接通或断开;如不符合,解码器无输出,电极开关不工作。

遥控接收机内无天线、无电池,重量轻,体积小,使用简便。借线遥控信号可随导线传送几米至千米以上,且不受外部电磁场、地形、建筑、障碍物、人文干扰的影响。借线遥控方式是具有电法勘探特色的创新遥控技术。

借线遥控器是一发多收的多通道遥控并行系统, JYDZ 的遥控信号不用专属通讯电路或无线电波^[9,13-14] 传送,而是借助常规电法勘探布设的 A、B 供电或 M、N 测量的接地导线载波输送。通过发送机面板,就能分别遥控供电(A、B)、测量(M、N)接收机中编码电极开关。

图 2a 为借线遥控发送机结构设计方框,电源经升压后同时给功放及恒流电路供给,恒流电路提供稳定的起动电流,功放采用全桥输出电路,从而提高电源的利用率和输出功率。编码模块采用地址与数据综合编码方式,其输出编码信号经调制,再通过功放、电流取样、转换开关电路后分别输至 A、B、M、N 导线上的接收机。检验电路是检查接收机的电极是接通还是断开。编码模块输入端为 4 路并行数据输入,只能置“1”或“0”;输出控制端 A、B、M、N,每次遥控只能有一个置“1”,其余置“0”,高电位有效;编码模块输入端的 4 个脚分别变换置于高电位、低电位,来达到变换控制电极序号的目的。

2 借线遥控电极阵列的布设

借线遥控电极阵列(JYDZ)包含:安放在测站电测仪旁的借线遥控发送机,分布在每个电极与相应导线之间的借线遥控接收机,按阵列布设的 A、B 供电电极和 M、N 测量电极及其导线。电极阵列布设后,遥控发射机按梯度测深的供电电极和测量极工作序列,分别遥控供电 A、B 和测量 M、N 电极,开展供电、观测工作。

遥控发送机在开机前先连接面板上的接线柱(见图 1):接地线柱连于遥控发送机旁接地良好的地极,接线柱 A、B、M、N 与导线 A、B、M、N 连接,接线柱 Ay、By、My、Ny 与电测仪的 A、B、M、N 连接。遥控发送机按电法工作电极序列分别遥控供电 A、B 电极,测量 M、N 电极后,电测仪器才开始工作,进行电流输送和数据测量。

例如,某场地和探测任务设计 JYDZ 布设方案如下(图 3),由借线遥控阵列导线、接收机和电极点

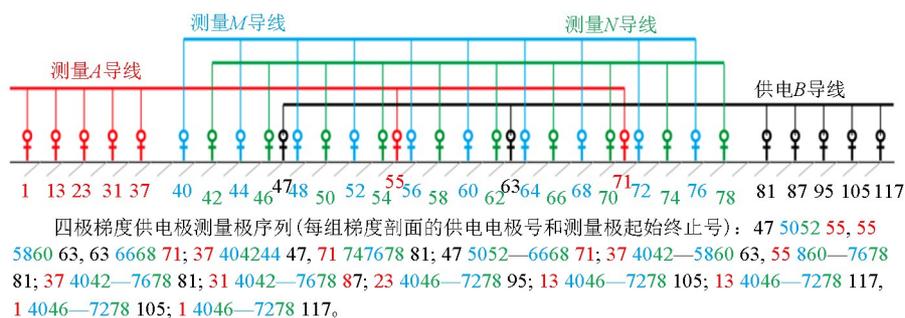


图3 借线遥控电极阵列示意图和GS的梯度电极序列示意

Fig.3 Schematic diagram of remote electrode array and gradient electrode sequence of GS

位以及GS一系列梯度剖面供电极和测量极序列组成。电极阵列中供电极为A1、A2、…、A7，置于71、55、37、…、1号；B1、B2、…、B7，置于47、63、81、…、117号。测量极为M1、M2、…、M10，置于40、44、…、76号；N1、N2、…、N10，置于42、46、…、78号。供电极A1、A2、B1、B2安插在测量阵列中间，可观测一些中小极距数据。

当供电电极A、B在测量阵列之外(图3中A极只有A3、…、A7，B极只有B3、…、B7)，这种四极梯度测深可称为中梯测深^[3]，或称多极距中梯^[4]、多重梯度(multiple gradient array)^[5]。

梯度测深序列是将供电极距逐步增加，每个供电极距观测1条梯度剖面数据。列出每组梯度剖面的供电电极号和测量极起始终止号。

在图3序列示意中，小极距测点稀少，对于一般梯度测深情况是可行的。若还要加强浅部探测，则可以先做小极距四极观测^[3,7]。例如图3中40、42、…、78电极布设后，暂时不与接收机连接，先用它们做小极距四极剖面，之后再接入遥控阵列。

当在测线的垂向无穷远处布设固定远极时，电极阵列可作为三极或二极梯度测深。若实际情况中固定远极达不到无穷远的要求，或不在垂向上，则需测定远极坐标，按通用四极装置系数K公式，计算实测视电阻率数据。并布3条以上测线，用三维软件进行反演。建议多布设固定远极，获得的实测数据就更多，三维反演结果更接近实际。

四极梯度测深阵列还可做“轴向多远极亚三极梯度测深”。这种测深AMN三极梯度的远极不置于垂向处，而设在测线方向上(轴向)，如图3中选B7为固定远极，再换B6为固定远极以此类推。相仿，做MNB三极梯度测深，可选A7为固定远极，再换A6，以此类推。这种轴向测深可作二维反演。

3 应用实例

3.1 弯曲测线非规则网的低密度阵列电法

直流电法视电阻率数据对电极点位的精度要求

相当严格，但实际工作中，存在较多障碍，如道路、河流、建筑物等，妨碍布线和布点，使点位不能全部位于一条直线上，点距也不能统一，因此很难开展直线、等点距的常规电法或高密度电法测量。针对复杂场地情况，采用借线遥控低密度电极阵列，按实际情况布设电极，允许测线有弯曲、点位不等距或偏移，并且可适当多布设测线、测点、离散供电极，只需要确定所有电极的坐标，保障梯度测深数据精度并开展任意四极电测深三维反演解释工作。

华北有色工勘院要求用地面电法探查河北某矿山地下帷幕的钻孔注浆情况，施工环境不允许布设等点距直线测线。由图4测线布极平面可见，在一段设计帷幕的地面区域，密集布设注浆孔位k101~k125，一条矿山公路跨越帷幕。以注浆竣工钻孔K113为中心，沿路边布置两条弯曲测线和非规则测点，1线布设测量电极M极和N极各8个，2线布设测量电极M极6个、N极5个，沿公路边布设10个供电A极，在测线垂向远处布设1个固定供电远极。借线遥控电极阵列与单道电测仪相配合，观测AMN三极梯度测深，最大极距AO为570m。图4中3896~4111~4357为x坐标，828~846为y坐标，单位m。

鉴于非规则情况，所有电极点位(包括固定供电远极)均由全站仪测定坐标，按通用四极装置系数K公式计算出实测视电阻率。1线和2线上一系列A极的实测三极梯度剖面视电阻率曲线见图5(注浆孔K113孔在测线110m处)和图6(注浆孔

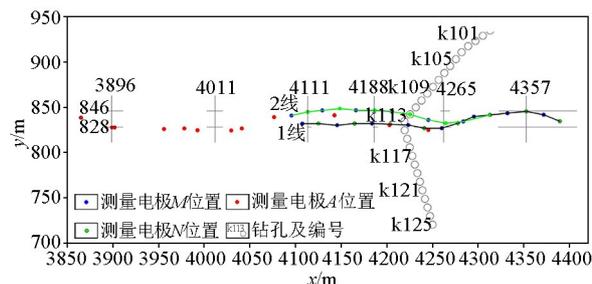


图4 帷幕注浆孔及测线电极布设平面
Fig.4 Layout plan of boreholes and measuring line electrodes resistivity inversion

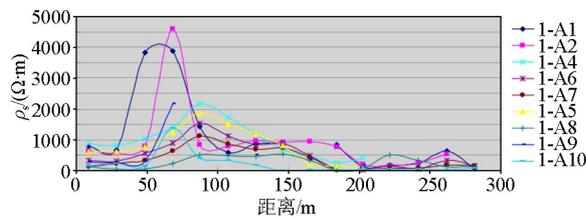


图5 1线梯度剖面视电阻率曲线

Fig.5 Apparent resistivity curves of line1 profile

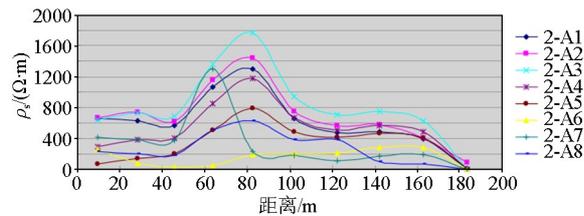


图6 2线梯度剖面视电阻率曲线

Fig.6 Apparent resistivity curves of line2 profile

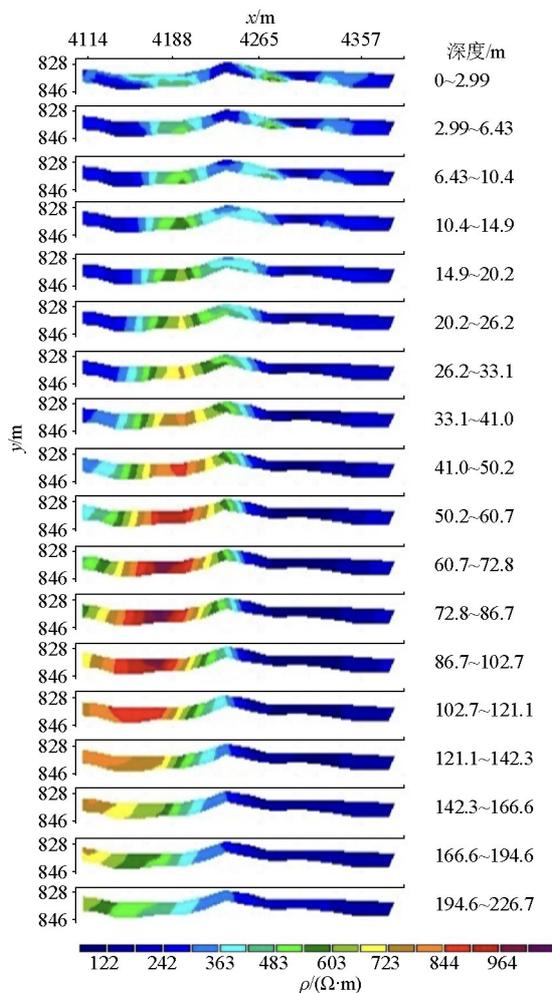


图7 GS反演电阻率断面

Fig.7 Section images of GS resistivity inversion

K113孔在测线125 m旁侧处)。实测数据用RESJCSFY软件进行三维反演,仅有两条测线获得GS反演电阻率图像(图7)。将地下深度0~210 m

分为18层的深度反演切片平面(x :4114~4360 m, y :828~846 m),拼制成图7反演电阻率断面。此图中高阻异常明显,推断地下帷幕基本形成,但在深度80 m处尚有局部低阻异常,左旁侧呈现较大范围高阻异常,推断该处灰岩裂隙强发育,导致高压水泥大量漏浆,这与K113孔注浆施工纪录中深孔段的水泥用量超多情况基本符合。

3.2 二维梯度激电测深

多测道激电仪或多台激电接收机与借线遥控供电阵列组合后,激电测深效率翻倍,且获得的数据更宜反演^[18],激电中梯结果就可从视极化率图升级到反演极化率图像^[4]。

西北有色物化探总队于2018~2019年立项开展“阵列式激电方法技术应用研究”,在激电梯度测深新理念的基础上,引进借线遥控设备和数据处理解释软件,通过与激电仪器设备的整合,对阵列激电在数据采集、处理、解释方面进行研究,建立了阵列式激电方法新体系。

图8为借线遥控供电阵列与加拿大IPR-12时域激电仪(8个测道)组合的示意,激电电源发射机连接借线遥控发送机,通过导线、遥控接收机、电极实施供电;IPR-12仪的8个测道实施观测,开展阵列式激电四极梯度或偶极测深的信息采集。

陕西华阳铅锌矿激电方法对比试验表明:在矿化体部位有低阻、高极化异常特征,而梯度激电测深二维反演结果(图9)在勘探深度、断面异常特征方面,都比对称四极激电测深效果更好。与传统激电测深相比,阵列式激电明显提高了工作效率,减少了劳动强度,降低了施工成本,能取得更为丰富的实测数据。阵列式梯度激电测深兼有激电测深勘探深度大和阵列式电法效率高的优点,适宜在山区工作,能对目标体进行详细勘查与评价。

3.3 三维梯度激电测深

常规中梯激电已有“1对供电,多线测量”的方式,因在主测线两端仅有一对供电极,其实测数据较为单薄不宜用做反演计算,而若用多对供电极就可对实测数据进行三维反演。

三维中梯电法扫面往往需要多对供电,以实现测区全覆盖。多条供电线的A极可接于1条A导线上,多条供电线的B极可接于1条B导线上,用1台借线遥控发送机就能分别遥控三维电法的供电电极。

广西二一五队在丹池成矿带板才矿区投入短导线时域激电方法,探测构造带及其空间展布形态,推断锑、铅、锌矿的成矿部位。按本文的思路开展了三

维中梯激电测深。首先在研究区地质平面(图 10)上进行布线、布极设计;垂直已知控矿构造带,以 3 条测线为 1 组布设三维中梯激电测深单元;在主测线两侧各布设 1 条旁测线,测线间距离为 60 m,测点距为 20 m,测线长度为 500 m,供电电极布在主

测线两端外延方向。在设计图上读出测线端点、测点、供电极点坐标,用 RTK 读取放样点大地坐标及高程,以 A5 点为坐标原点,用供电极、测量极坐标及高程计算各实测点装置系数 K 值。

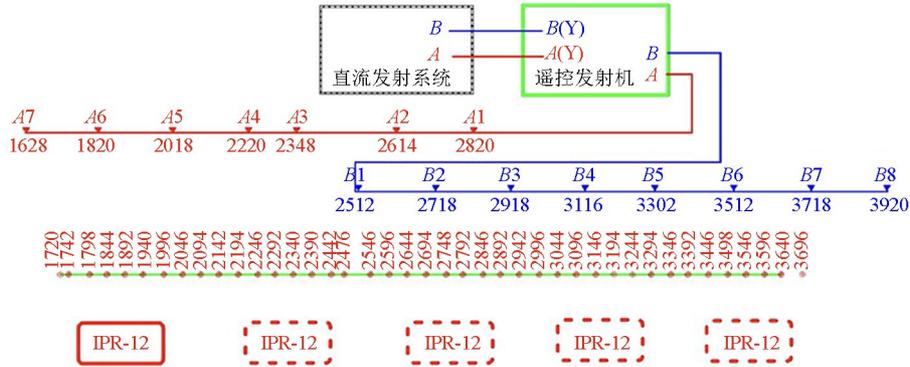


图 8 借线遥控供电阵列与 IPR-12 激电法仪组合

Fig.8 The combination of remote power supply array and IPR-12 IP meter

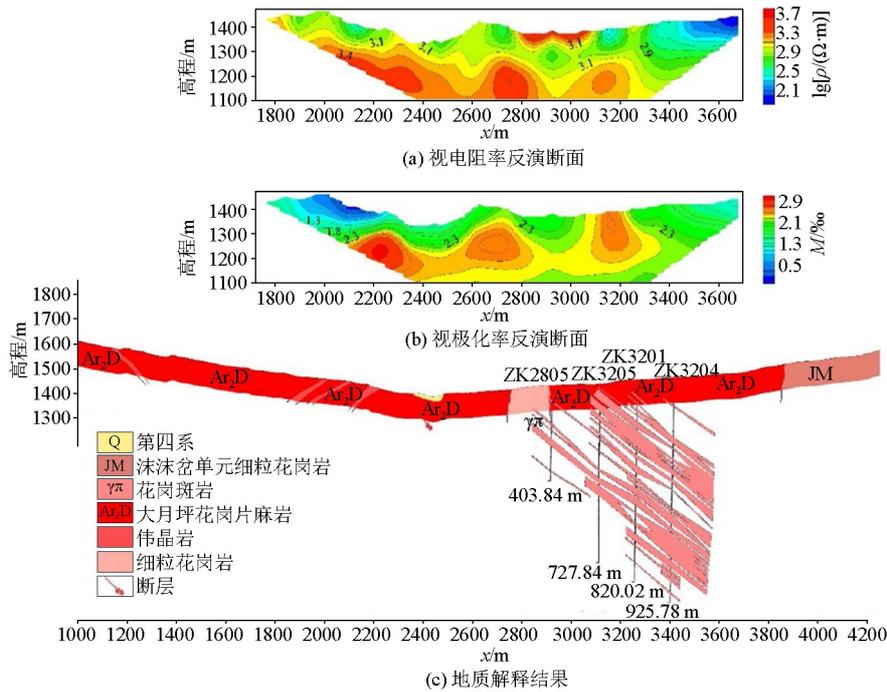


图 9 华阳铅锌矿 Z2 线梯度激电测深二维反演结果

Fig.9 2D inversion image of Z2 line gradient IP sounding in Huayang lead-zinc mine

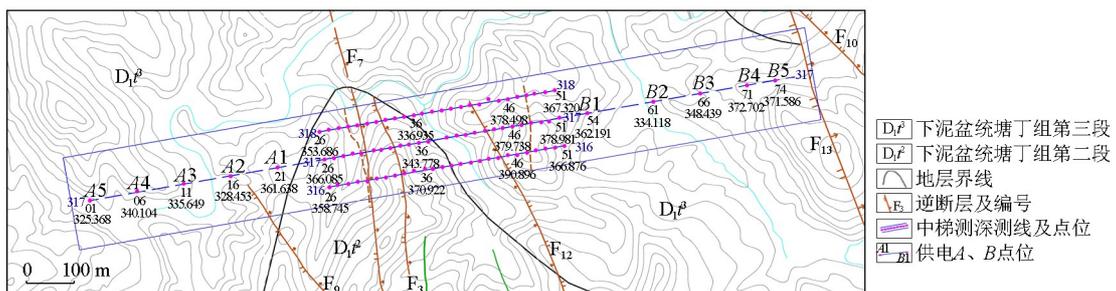


图 10 板才矿区三维中梯激电测深布极平面

Fig.10 3D distribution plane of IP sounding in Bancai mining area

主测线两端外延线各布置 5 个供电极,供电极距: $A_1B_1 = 660\text{ m}$, $A_2B_2 = 900\text{ m}$, $A_3B_3 = 1\ 100\text{ m}$, $A_4B_4 = 1\ 300\text{ m}$, $A_5B_5 = 1\ 460\text{ m}$ 。为增加深部数据,还可加测 A_4B_5 、 A_5B_4 等。当借线遥控供电阵列按序接通某对供电 A 、 B 极后,遥控发送机关闭,激电发射机工作,3 条测线上的各激电接收机逐点观测中梯激电剖面,完成后激电电源关闭;遥控发送机更换供电极 A 、 B 再完成 3 条中梯激电剖面观测,以此

类推。

主测线中梯测深的二维反演极化率结果(图 11)中,异常主要位于中浅部,旁测线采集的数据不能进行二维反演,图 12 为中梯测深数据做 RESJCS-FY 三维反演极化率立体图,根据异常形态,推断出 F_{w-3} 、 F_{w-4} 为新断裂,选定为找矿工作范围进行开采,已见铅、锌矿。

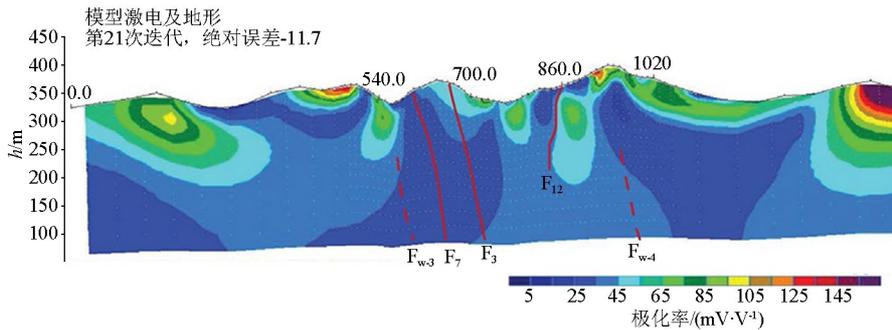


图 11 板才矿区主测线二维反演极化率断面

Fig.11 2D inverse polarizability profile image of the main survey line of Bancai mining area

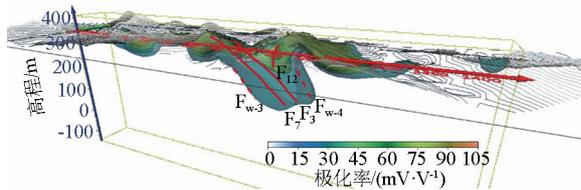


图 12 板才矿区三维反演极化率侧视立体图像

Fig.12 3D inverse polarizability image of Bancai mining area

3.4 二维超深高密度电法

二维超深高密度电法^[13-14]的阵列,即“高密度

与遥控供电组合阵列”,由高密度阵列及其外延的借线遥控供电电极阵列组合而成,见图 13。高密度仪进行常规装置数据观测后,再开展以借线遥控电极供电、高密度电极做测量极的中梯测深数据的采集,使用“任意四极电测深的二维反演软件”对中梯测深数据与常规高密度数据进行处理。此外,还可以以若干个借线遥控 B (或 A) 电极作为固定远极供电,高密度阵列作 AMN (或 MNB) 法的轴向多远极亚三极梯度测深数据的采集。

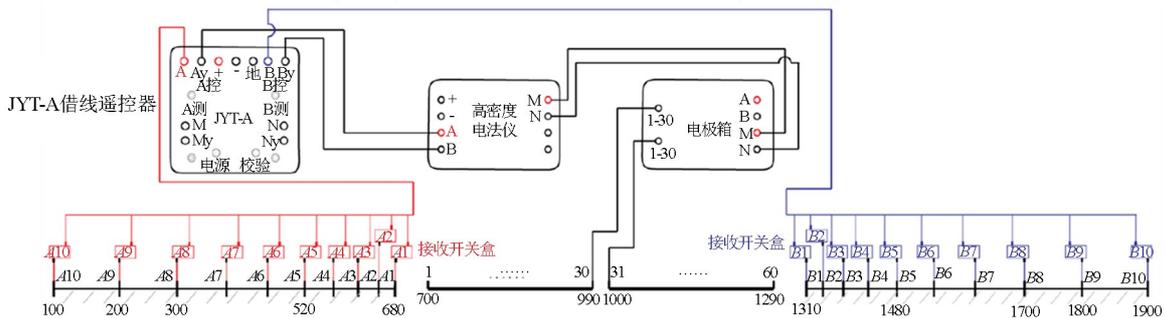


图 13 二维超深高密度法的高密度阵列与借线遥控供电阵列布设示意

Fig.13 Schematic diagram of high-density array and remote power supply array by the 2D ultra-deep high-density method

海南水文工程地质勘察院是借线遥控器早期用户,参与二维超深高密度电法应用的研发,曾在昌江县燕窝岭测区按图 13 布设超深高密度组合阵列,使探测深度从一百余米加深至三百余米,从而找到温泉^[16]。杨兴沐编写了“二维超深高密度电法使用说明”后,在乐东县温泉勘查中将超深高密度法遥控

供电极距增加到 $AB_{\max} = 2\ 500\text{ m}$,探测深度达 500 m。图 14 为海南乐东县红水 31 线实测成果,最小测点距 15 m,阵列排列 A 极起于-450 号, B 极终于 2050 号;中段高密度阵列道距 15 m 的 60 个电极位于 0~885 号,采集温纳装置 19 层的 570 个高密度数据;外延遥控供电极:在 -450~0 号布置 9 个 A

极,在 900~2050 号布置 14 个 B 极,电极间距约逐增 100 m。采集 14 对外延电极供电、高密度阵列电极测量的 826 个中梯测深数据。31 线的高密度数据和外延供电电极中梯测深数据一并由 RESJCSFY

进行二维反演,获得的反演电阻率断面(图 14)深度为 450 m,其中 540 号地下 300~400 m 处呈现明显低阻异常,推断与温泉水源有关。

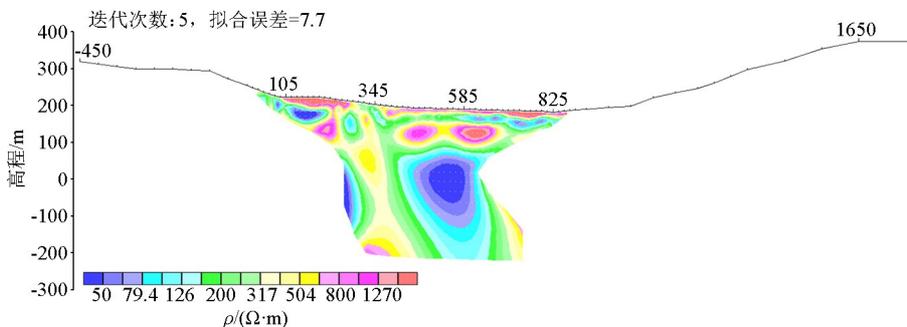


图 14 海南省红水 31 线二维超深高密度电法反演电阻率断面

Fig.14 Resistivity inversion image based on 2D ultra-deep high-density electrical data of Hongshui line 31 in Hainan Province

3.5 三维高密度与遥控供电组合阵列

三维高密度法一般是由高密度长电缆折成回线进行布设^[19-20],如 120 道电缆可折成多条测线,这种回线称为“蛇形三维阵列”。由于其供电电极局限于回线,三维高密度 E-SCAN 法及常规装置的探测范围小、探测深度浅。而“三维高密度与遥控供电组合阵列”是在三维高密度蛇形阵列外,布置多线渐稀借线遥控供电阵列,从而供电电极距增大、供电方向增多,组合三维阵列的探测范围及深度增大。

这种高密度蛇形阵列外部布置遥控供电阵列的新型三维阵列,我们称为“龙形三维阵列”,以区别于“蛇形阵列”。

中电建贵阳勘测设计院物探分院承接云南某景区引水工程岩溶探测项目,我们参与了测区二维/三维电阻率法方案策划和数据反演工作。其中包含二维高密度剖面 5 条(图 15),每条由高密度电缆(120 道、8 m 道距)布设点距 5 m、线长 590 m 的测线,相邻测线间距 50 m 左右。

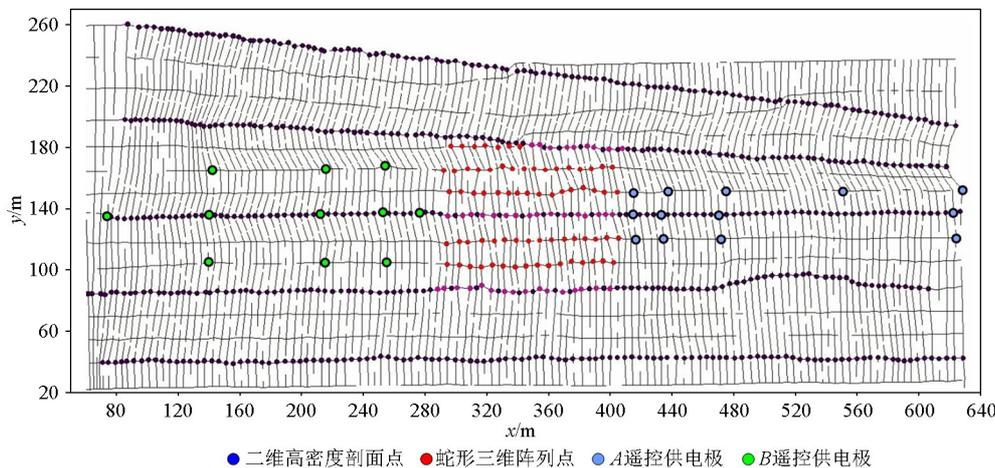


图 15 岩溶区 5 条二维剖面、三维电极阵列、有限元网格平面

Fig.15 2D sections, 3D electrode array and finite element grid plan in karst area

基于对二维高密度对称四极资料处理分析,在主异常区以落水洞为中心,布设“三维高密度与遥控供电组合阵列”测网;高密度电缆(120 道、8 m 道距)折成蛇形回线(图 15 中红色点),回线含 7 条测线,每条 16 个电极、点距 8 m、线长 120 m、线距 16 m;回线两侧外延区分别布设十余个 A、B 遥控供电电极,组合成龙形三维电极阵列。

鉴于测区地形起伏大、几条高密度剖面并不平行,三维高密度阵列电极有偏离,外延供电电极离散等现象,必须测定实际电极坐标及其高程,才能计算视电阻率数据和设置三维有限元网格(图 15 中黑色细线)。

测区 5 条测线的二维(2D)高密度的对称四极视电阻率数据为 1.8 万个;中部蛇形回线三维(3D)

高密度视电阻率数据加上龙形阵列的 3D 梯度测深视电阻率数据为 3.3 万个。将 2D、3D 视电阻率数据分别用 RESJCSFY 进行三维反演,以及所有 2D+3D 数据合并后进行 RESJCSFY 三维反演,计算中实

测数据利用率达 90% 以上。三维反演获得丰富的反演电阻率信息,有多种断面、平面切片图像,多视角立体图像等,如三维反演电阻率图 16 和图 17。

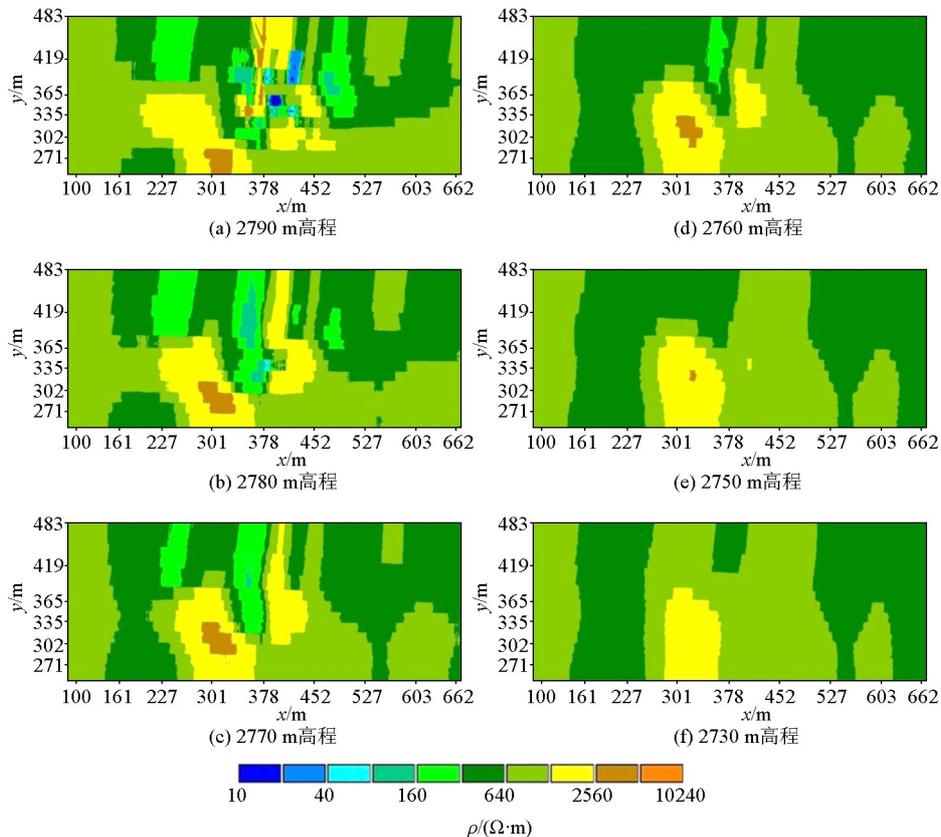


图 16 2D+3D 数据三维反演电阻率平面切片

Fig.16 3D inverse resistivity plane slice image from 2D+3D data

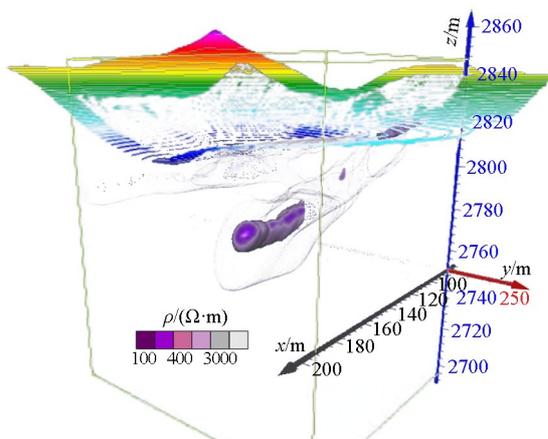


图 17 3D 数据三维反演电阻率异常立体

Fig.17 3D inversion resistivity image of 3D surveying data

分析测区 2D+3D 数据的三维反演所得 2 790 ~ 2 730 m 高程的 6 幅反演电阻率平面切片(图 16),以及测区中部 3D 数据三维反演电阻率异常立体图像(图 17)可见,落水洞附近的低阻异常明显,标高 2 760 m 以浅的低阻异常走向近 SN 方向,推断为岩

溶强发育带或岩溶通道;标高 2 750 m 以深未见明显低阻异常,推断深部岩溶发育弱,岩溶发育延深有限。布置钻探和井间电磁波 CT,验证了龙型阵列 3D 数据反演电阻率和 2D+3D 数据三维反演电阻率结果符合实际情况。

4 结论

1) 借线遥控电极阵列借助电法导线载波遥控,阵列轻便、灵活、成本低,是一种自主创新技术的电法勘探装备。借线遥控器可与单道电测仪、多测道电法仪、时域激电仪、高密度电法仪等配合使用。

2) 梯度电测深法结合借线遥控电极阵列硬件和任意四极电测深反演软件后,适用能力显著提高,在常规电法和高密度电法尚不能开展的场地,梯度测深阵列也可进行有效探测。借线遥控供电电极阵列配合高密度电法探测深度更深,配合激电中梯剖面可实现激电中梯测深,用于反演解释工作。

3) 借线遥控供电阵列与三维高密度阵列组合后,可增加探测范围及深度,尚待改进为简约、轻便、实用的三维电法勘探。

4) 含借线遥控等新技术的多功能多阵列电测系统有待研发。

5) 借线遥控器还可用于含接地电极的长期、定期、远程等检测、监测系统。

参考文献 (References):

- [1] 葛为中.电阻率法新理念[C]//中国地球物理学会第22届年会,2006.
Ge W Z. New concepts in resistivity method [C]//Proceedings of the 22nd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2006.
- [2] 葛为中.电测深布板装置及观测方式的变革[C]//中国地球物理学会第23届年会,2007.
Ge W Z. Transformation of electrode arrangement and observation method in electrical sounding [C]//Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2007.
- [3] 葛为中,吕玉增,丁云河.梯度电测深剖面法及其应用[J].物探与化探,2011,35(2):206-211.
Ge W Z, Lyu Y Z, Ding Y H. The gradient sounding profile method and its application [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35 (2): 206-211.
- [4] 吕玉增,葛为中,彭苏萍.多极距中梯观测与反演研究[J].物探与化探,2013,37(1):92-97
Lyu Y Z, Ge W Z, Peng S P. A study of multiple electrode distance central gradient survey and inversion [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37 (1): 92-97.
- [5] Dahlin T, Zhou B. Multiple-gradient array measurements for multi-channel 2D resistivity imaging [J]. Near Surface Geophysics, 2006, 4(2): 113-123
- [6] 高建东,高勇,杜利明,等.四极梯度电测深野外实测剖面对比研究[C]//华东六省一市地学科技论坛,2013.
Gao J D, Gao Y, Du L M, et al. Comparative study on field measured profiles of four-Electrode gradient electrical sounding [C]//Proceedings of the Geological Science and Technology Forum of Six Eastern Provinces and One City, 2013.
- [7] 邱光辉,尹学爱,张启生,等.四极梯度测深在智利某铜矿区的应用[J].物探与化探,2018,42(6):1059-1063.
Qiu G H, Yin X A, Zhang Q S, et al. The application of quadrupole gradient sounding to a certain copper mine in Chile [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42 (6): 1059-1063.
- [8] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. Three-dimensional tomography using high-power induced polarization with the similar central gradient array [J]. Applied Geophysics, 2017, 14(2): 291-300, 324.
- [9] 梁炳和.电法勘探电极多通道遥控器的研制[J].企业科技与发展,2010,20:68-70
Liang B H. Development of a multi-channel remote controller for electrical prospecting electrodes [J]. Enterprise Science and Technology Development, 2010, 20: 68-70.
- [10] 梁佳会,葛为中,梁炳和.电法勘探电极阵列借线遥控器: CIV201711013579.5 [P]. 2021-03-06.
Liang J H, Ge W Z, Liang B H. Electrical exploration click array borrowing remote control; CN201711013579.5 [P]. 2021-03-06.
- [11] 高建东. GDF 高密度电法二维正反演软件及模型测试结果 [C]//中国地球物理学会第23届年会,2007.
Gao J D. GDF high-density electrical method 2D forward and inverse software and model test results [C]//Proceedings of the 23rd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, 2007.
- [12] Loke M H, Kiflu H, Wilkinson P B, et al. Optimized arrays for 2D resistivity surveys with combined surface and buried arrays [J]. Near Surface Geophysics, 2015, 13(5): 505-517.
- [13] 黄智伟.单片无线发射与接收电路设计[M].西安:西安电子科技大学出版社,2009.
Huang Z W. Design of single-chip wireless transmission and reception circuit [J]. Xi'an: University of Electronic Science and Technology Press, 2009.
- [14] 杜树春.数字集成电路:原理、测试与应用[M].北京:化学工业出版社,2023.
Du S C. Digital integrated circuits: Principles, testing, and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2023.
- [15] 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.
Liang B H, Ge W Z. Development and application of multi-channel resistivity instruments [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2010, 31(4): 116-119.
- [16] 杨兴沐,黄卓雄,葛为中,等.遥控电极阵列拓展高密度电阻率法勘探深度研究[J].物探与化探,2016,40(1):73-77.
Yang X M, Huang Z X, Ge W Z, et al. Research on electrical resistivity imaging with telecontrol electrode array in surveying depth [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(1): 73-77.
- [17] 葛为中,梁炳和,高建东,等.遥控电极阵列和二/三维超深高密度电法的研究[C]//中国建筑学会工程勘察分会工程物探专业委员会第14届全国工程物探与岩土工程测试学术大会,2015.
Ge W Z, Liang B H, Gao J D, et al. Research on remote control electrode array and two/three-dimensional ultra-deep high-density electrical method [C]//Proceedings of the 14th National Conference on Engineering Geophysics and Geotechnical Engineering Testing of the Engineering Geophysical Professional Committee of the China Building Society, 2015.
- [18] 冉军林,刘俊岩.组合激电测深装置的应用与研究[J].物探与化探,2018,42,(6):1259-1263.
Ran J L, Liu J Y. The application and study of induced polarization group device [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(6): 1259-1263.
- [19] Wang J, Zhang X P, Du L Z, et al. Comparing methods of 3D acquisition of simulated multi-electrode resistivity data using TOPSIS

- [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 159: 631–639. (ERI), unmanned aerial vehicle (UAV), and finite element method (FEM) numerical modeling for forensic analysis. [J]. *Transportation Geotechnics*, 2023, 40: 100949.
- [20] Nobahar M, Salunke R, Alzoghoul O E, et al. Mapping of slope failures on highway embankments using electrical resistivity imaging

2D/3D electrical exploration based on borrowing-line telecontrol electrode arrays

GE Wei-Zhong^{1,2}, LIANG Bing-He¹, GAO Jian-Dong³, Lv Yu-Zeng², CHEN Long^{1,4}

(1. *Guangxi Geophysical Society, Nanning 530023, China*; 2. *Guilin University of Technology, Guilin 541004, China*; 3. *Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, Jinan 250101, China*; 4. *Shanghai Aidu Intelligent Detection Technology Co. Ltd., Shanghai 201108, China*)

Abstract: The telecontrol electrode array is a new type of electrode array for power supply and observations that utilizes the carrier waves of the power-supply and measurement wires used in conventional electrical prospecting to transmit signals. By remotely controlling a series of coded electrode switches between various wires and their connections, this array allows for orderly power supply and measurements. This array enables flexible spacings between electrodes and the gradual expansion of the distances between power supply electrodes via remote control, thus achieving a gradient-based sounding array. The borrowing-line remote controller can be used combined with single-channel, multi-channel, and high-density resistivity instruments, and the combined arrays can perform 2D/3D electrical prospecting more effectively. Followed by the brief introduction of the principle of the borrowed-line telecontrol electrode array, this study discusses the applications and examples of this array and several combined arrays in the resistivity method and induced polarization (IP).

Key words: electrode array; borrowing line remote control; gradient sounding; arbitrary quadrupole

(本文编辑:王萌)