

文章编号:1002-5634(2010)02-0074-05

地面/井地/井间超高密度电阻率成像技术

潘纪顺¹, 葛为中², 折京平³

(1. 华北水利水电学院, 河南 郑州 450011; 2. 广西地球物理学会, 广西 桂林 541004;
3. Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心, 澳大利亚 悉尼 伊士活 5063)

摘要:以电阻率法新理念,分析高密度电法的局限性和改进对策.介绍超高密度泛装置地面/井地/井间电阻率成像系统,通过在地面、井地、井间探测的应用,预见电阻率成像新方法的应用前景.

关键词:电阻率成像;超高密度;泛装置;井地;井间

中图分类号:P631;P319.1⁺2 **文献标识码:**A

高密度电阻率法工作模式是布设电极阵列后,仪器自动按某种装置固有的布极方式逐点移动,从小极距渐增到大极距,由浅至深地探测,通过绘制其视电阻率等值断面图,或反演出电阻率真断面图推测探测结果.在电极阵列上可分别进行多种装置的测量,并已得到广泛应用.几年前,葛为中提出了电阻率法新理念,澳大利亚籍华人学者折京平博士等2004年研制出Flash-RES电阻率成像仪,称之为超高密度电阻率成像系统.2005年,折京平邀请葛为中协作,参与这种新型地面/井地/井间电阻率测量和反演成像系统的应用性开发研究.

1 原高密度电法的局限性和改进对策

1.1 视电阻率拟断面图的不确定性

高密度电法观测数据为视电阻率,绘制图件为视电阻率断面图,视电阻率数据 ρ_s 是电极系影响范围内地下电性不均匀和地形起伏的综合反映.然而,高密度法 ρ_s 断面图上,人为地将它“集中”表示为横坐标 x (装置规定的点位)、纵坐标 z (电极距的函数)的一个点上的视电阻率 $\rho_s(x, z)$,进而绘制出倒梯形或矩形范围内视电阻率等值线拟断面图. $\rho_s(x, z)$, x, z 这三个参数均存在不确定性,当地形起伏变化大,点位纵横坐标复杂化,拟断面图不确定性

更加明显.高密度单装置视电阻率断面图上异常位置、形态与实际地电断面对应关系较模糊,其取决于选用的具体装置,同一剖面上对称四极、偶极、三极、三电位装置的视电阻率断面图形态特征有所不同.解释者要凭经验对视电阻率断面图作大致的定性推断,若盲目依靠视电阻率断面图作直观解释,就可能会造成推断失误.为此,要对高密度电法实测资料进行二维反演,所得二维断面分布的每个单元电阻率(ρ)、水平位置(x)和深度(z)都是比较确定的,称之为电阻率真断面图,也称为电阻率断面或电阻率图像.目前高密度电法2.5维反演软件已渐成熟,可以使用,还有针对实际的非正交剖面等情况研究的2.6维、2.7维和3维.

1.2 实测速度和反演精度问题

高密度法在电极阵列上选择某种装置进行($\Delta U/I$)数据观测,观测结果自动乘以装置系数得视电阻率值,绘制其视电阻率拟断面图,进而反演得该装置电阻率真断面图.这种“高密度单装置电法程式化模式”的反演精度受实测数据量和装置特点的限制,如60个电极的高密度单装置数据量只有500~1000个,反演精度不够高.有时先后用两三种装置实测,每种装置分别反演,所获得的电阻率真断面图虽比较相似,但还存在不同之处.若能将多种装置

收稿日期:2010-02-15

作者简介:潘纪顺(1968—),男,河南郑州人,副教授,博士,主要从事地球物理、地质工程方面的研究.

实测数据一起反演,实测数据成倍增加,反演精度提高,其电阻率真断面图更可靠.但目前由于现有高密度单装置单通道实测模式实测速度不够高,增加一种装置就要增加一倍左右的实测工时,多种装置多次测量的效率低,导致现有高密度电法未能充分利用电极阵,未更大程度发挥其潜能.

1.3 泛装置工作方式

电阻率法新理念认为,电阻率法的装置、测量、反演要创新,即它仍沿用高密度电极阵列,但突破原有程式化单装置模式的束缚,不再分装置方式观测和反演.鉴于其装置广泛,暂称之为“泛装置高密度电阻率成像系统”.其 4 极泛装置(简称 F4 装置)的 M, N 允许在供电电极 A, B 点位之外的电极阵列任一点位, A, B, M, N 电极的次序和间距较任意,不规定必须对称或等间隔,也不规定 $MN \leq AB$,可能允许有 $F_\alpha, F_\beta, F_\gamma, F_\delta$ 4 种排列,如图 1 所示.

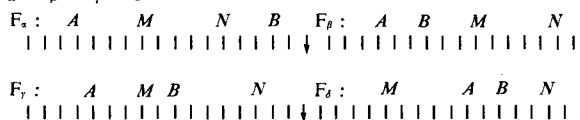


图 1 泛装置 4 极的排列方式示意图

$F_\alpha, F_\beta, F_\gamma$ 的对称等间隔特殊情况,就是三电位的 α, β, γ 排列.所以常用的装置就将 4 个电极排列成某种特定的位置关系^[1].

1.4 应用领域有待拓宽

电阻率法多局限在地面工作,现有高密度法基本未涉及井-地或井-井探测技术,若充分利用钻孔、巷道开展地下电阻率法探测,使供电电极和测量极深入地下,更接近目标体,就能增加勘查深度,提高电法解决深部问题的能力.有待拓宽有不规则测点测线问题和有个别丢点、局部不等间距、测线略有扭曲情况及其实测、反演技术等方面的研究.

2 超高密度泛装置电阻率成像新方法

2.1 超高密度电阻率成像系统的技术指标

ZZ Resistivity Imaging 公司初期研制的 Flash-RES 仪为 28 道,2006 年改进为 64 道. Flash-RES 64 直流电法勘探仪器的电压通道 62 道,输入阻抗大于 100 MΩ,测量精度小于 0.5% 和 1 bit,对 50 Hz 工频干扰压制大于 80 dB;仪器重量 4.5 kg,体积 350 mm × 300 mm × 150 mm;供电电源为 12 V 充电电池,可发送 30, 90, 270 V 供电电压,供电电流小于 3 A;工作环境温度 -20 ~ 50 °C,工作环境湿度 95% RH;外接笔记本电脑,用于采集实测 $\Delta U/I$ 数据、监视测量过程.附 4 根 16 芯电缆,电极 64 个.该

系统必须软件支撑,有专用 2.5 维电阻率反演软件 and 数据处理绘图软件.本系统一机多用,仪器、电缆、软件均通用于地面、井地、井间电阻率成像方式.

2.2 超高密度装置工作方式

超高密度装置工作方式是泛装置工作方式的一种,基本上保持 M 极为第 1 个电极,如图 2 所示.

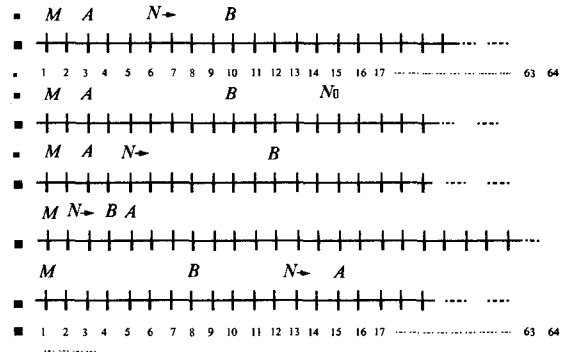


图 2 超高密度电阻率法装置示意图

超高密度电阻率法的数据采集过程全部自动化.程序自动将每个排列的 64 个电极分为奇数组 32 个(1, 3, 5, ..., 61, 63)和偶数组 32 个(2, 4, 6, ..., 62, 64)2 组,然后在这两组电极中各选取一个作为供电电极 A 和 B ,在一次通电过程中同时测量其它电极(61, 63 个 N 极)相对于某一电极 M 的电位差,就可得到 61 个电位差($MN_1, MN_2, MN_3, \dots, MN_{60}, MN_{61}$)数据.而奇数组 32 个电极和偶数组 32 个电极互相配对(即全排列)作为供电电极,即一个排列有 $32 \times 32 = 1\ 024$ (次)供断电过程,每次供电可同时采集 61 个电位差数据,所以总的数据量为 $32 \times 32 \times 61 = 62\ 464$ (个).

测量仪按多通道(如 61 道)方式采集所有的电位差 ΔU ,除以 AB 极间的供电电流 I ,获得一系列观测数据($\Delta U/I$).然后,依次变更 B 极的点位, A 极的点位,.....完成所需范围 4 极泛装置的观测和大量数据采集工序,采集数据量相当多,60 余个电极泛装置实测几万个数据,超过原有高密度单装置数据量的 20 倍,而仪器采集速度达每分钟 300 个以上,比现有高密度电法仪器快 40 倍.

通过对大量采集数据($\Delta U/I$)处理后,对它进行二维反演计算,获得电阻率真断面数据,进而绘制高像素电阻率断面图像,它比原有高密度单装置反演的电阻率断面更可靠.直接对泛装置($\Delta U/I$)数据集作有限元数字模拟迭代反演,实现电阻率成像. $\Delta U/I$ 的含义可理解为 A, B 极电场中 M, N 2 个等位面所含介质的电阻^[2].

此外,在泛装置的实测过程中,有部分的布极情

况测量信号极少,可舍弃不用.

2.3 地面电阻率成像

超高密度泛装置电阻率成像法地面电极阵与原有高密度法基本相似,一条剖面泛装置的实测时间与原有高密度单一装置实测时间相差不大,但其实测数据量大得多,数字解释的精度更高,可为详勘剖面提供精确电阻率断面图像.地面高密度泛装置电阻率成像技术已应用于基岩起伏、塌陷、采空区、岩溶、断层和裂隙方面的探测.

图3为岩溶区典型的高、低阻组合二维地电体

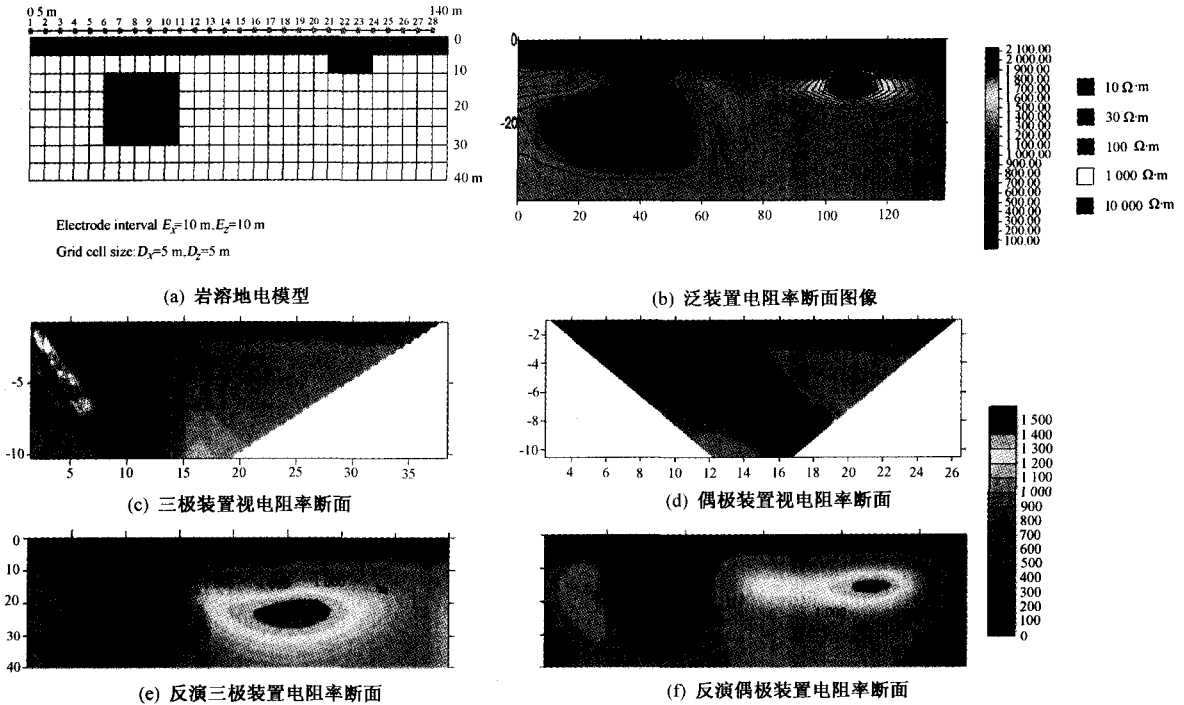


图3 地面电阻率法对比算例

的对比算例.覆盖层下灰岩的浅部有一高阻岩洞,下部暗河及其周围岩溶发育带为组合低阻体(图3(a)).分别计算出超高密度泛装置电阻率成像图、高密度单装置(三极和偶极)视电阻率拟断面图及其反演电阻率真断面图(由桂林工学院吕玉增计算得).可见三极装置和偶极装置视电阻率拟断面图相差较大,较难解释,而它们的反演电阻率真断面图较相似,右侧浅部高阻异常体过深,左侧组合低阻体异常体形态不够清晰.超高密度泛装置电阻率图像最接近理论地电模型.

2.4 井中或巷道电阻率成像

在充水钻孔中投入高密度电缆,电缆上的裸铜管就成为一系列电极,在钻孔中布设成一串井中电极阵.注意不宜在金属套管或塑料套管中工作,可用塑料筛管.通过井中电极阵进行地下全空间的高密度泛装置测量,采集大量($\Delta U/I$)数据,经过资料处理和反演计算,获得以钻孔为中轴线的地下电阻率分布图像,可在巷底边线布设高密度电极阵,进行地下全空间超高密度泛装置测量、采集、反演,获得以巷道为中轴线的地下电阻率分布图像,为寻找巷道周围或外围矿藏提供信息.

2.5 井地电阻率成像

在钻孔中投入一段高密度电缆,在地面布设另一段高密度电极阵.进行井一地之间的一系列供电、测量,采集泛装置实测($\Delta U/I$)数据后,用井一地反演软件获得井一地之间电阻率分布断面成像图件.

若在井口地面若干方位布设电极阵,可取得多方位井一地电阻率成像资料.若有多个钻孔,可同时作多井一地电阻率成像.钻孔一地面、巷道一地面、巷道中钻孔一巷道布设两段高密度电缆(这两段电缆的电极间距或数量可以不同),就可获得井一地之间泛装置电阻率图像.

2.6 井间电阻率成像

2个钻孔中分别投入两段高密度电缆,进行一系列跨孔供电、测量,采集高密度泛装置实测($\Delta U/I$)数据后,用井一井反演软件获得井间电阻率分布断面成像图件,通过这种井间电阻率透视层析成像CT图件,可分析深部地电异常问题.

详勘区钻孔较密,当一对钻孔的孔距小于孔深二分之三的情况,可开展井一井电阻率透视成像.矿山地下相邻巷道之间,也可用巷道一巷道超高密度泛装置电阻率透视成像,取得相邻巷道之间电性分

布资料.

3 应用实例

3.1 桥基钻孔井—地电阻率法成像预测孔底溶洞

在广州西二环公路桥基用钻孔探查溶洞时,应用超高密度泛装置电阻率成像,先在地面布设 28 个电极,地面电阻率成像在 70—100 号下部未见异常(图 4(b)). 后又在 87 号处钻孔的金属套管下面布设几个电极进行井—地电阻率法成像. 在钻孔底下出现异常(图 4(c)),加深该钻孔后发现了溶洞.

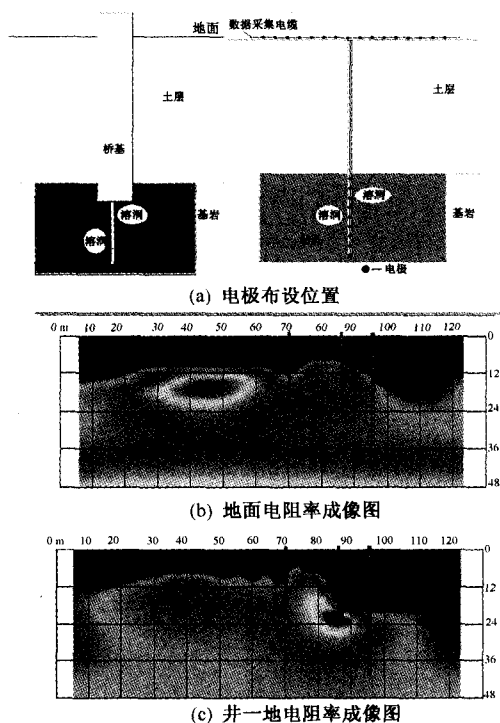


图 4 桥基钻孔井地电阻率成像图

3.2 岩溶区含水构造的地面和井地电阻率成像

广西地球物理学会 2005 年底在桂北勘查含水构造,曾开展地面电阻率成像和钻孔与地面间的井—地电阻率成像的试验,结果如图 5 所示.

在 6 号线地面布设电极阵列,电极 28 根、间距 12 m,开展 4 极泛装置测量,反演后的电阻率图像(图 5(b))在 12—13 号下显示低阻异常纵线位置布设验证钻孔. 钻探揭示地下 22~62 m 岩溶裂隙较发育,40~43 m 和 59~62 m 还见方解石脉,有 2 含水层位. 此外,用梯度电测井观测到低阻层位: 30~62 m 电阻率小于 $800 \Omega \cdot m$,其中 47,55 m 附近电阻率小于 $300 \Omega \cdot m$.

井—地电阻率成像是在钻孔中投入电缆,含电极 14 个置于套管以下,其间距 6 m. 地面电极阵有电极 14 根间距 12 m. 先后在两个方位作井地电阻率成像观测,图 5(a)所示两方位的井—地电阻率图

像均未再发现低阻异常. 推断此测线下不再有其他断层岩溶构造带.

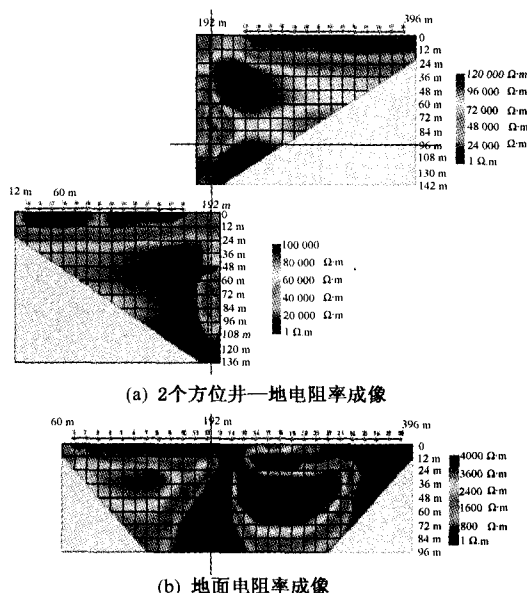


图 5 桂北岩溶区含水构造的电阻率成像图

3.3 井间电阻率成像检测矿山帷幕注浆工程

华北某矿区地下 200~500 m 深部灰岩的裂隙发育,富含地下水. 为了开采下部铁矿,保护地下水,应用较密集布设的钻探作深部注浆帷幕工程. 但因钻孔深部落差水压过高,不能采用井间地震波透射检测注浆效果. 笔者策划了井间电阻率成像检测方案,解决了检测钻探深部帷幕注浆效果的难题.

图 6 为其中 6 号和 7 号两个钻孔(孔距 60 m)之间的井—井跨孔透视检测情况及其井间电阻率成像图. 电缆有 16 个电极、间距 8 m,一次测量覆盖 120 m. 分 5 次跨孔透视测量:先在 6 号孔将电缆深入 348~228 m,7 号孔电缆深入 411~291 m,进行两孔中电缆一上一下斜向透视. 7 号孔电缆提升 88 m 后,又测量,……,共测得 7 万个数据,拼接处理

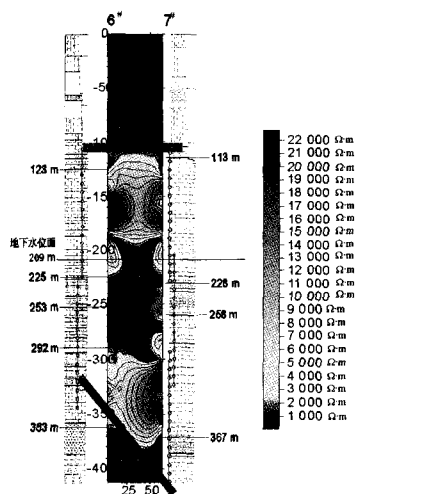


图 6 井间电阻率成像检测矿山帷幕注浆工程

后反演得图6所示的井间电阻率成像图. 地下水位线在200 m左右, 电阻率图像在200~300 m呈低阻异常, 推断为灰岩裂隙发育富含地下水, 而在钻孔注浆较多的井段, 有局部高阻异常. 而后两孔之间又做钻探注浆, 再做井间电阻率成像对比检测.

4 结 语

超高密度泛装置电阻率成像法使电阻率法上升到一个新台阶, Flash-RES电测仪能多通道快速实测超大量数据, 反演出高像素电阻率分布图像. 根据初步应用实例的成效, 可预见这种新方法在工程勘察和矿产勘查等领域有广阔的应用前景. 它在地面可测得高精度的电阻率断面图像资料, 特色是利用钻探、坑探、巷道, 开展井中/井地/井间的地下电法

探测.

参 考 文 献

- [1] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983.
- [2] 刘国兴. 电法勘探原理和方法[M]. 北京: 地质出版社, 2005.
- [3] 葛为中. 电阻率法新理念[C]//中国地球物理. 成都: 四川科学技术出版社, 2006: 208-209.
- [4] 葛为中. 地面地下直流电勘探新方法在矿山勘探中的应用前景[C]//中国有色金属协会地矿会刊, 2007: 71-76.
- [5] Zhe Jingping, Greenhalgh S, Marescot L, et al. Multichannel, full waveform and flexible electrode combination resistivity-imaging system[J]. Geophysics, 2007, 72(2): 57-64.

High-density Electrical Resistivity Imaging Technique of Ground/Borehole-to-surface/Inter-well

PAN Ji-shun¹, GE Wei-zhong², ZHE Jing-ping³

(1. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Guangxi Institute of Geophysics, Guilin 541004, China;

3. Australia ZZ Resistivity Imaging R & D Center, Sydney 5063, Australia)

Abstract: The limitations and countermeasures of the high-density electrical resistivity method were analyzed with the new ideas of electrical resistivity. High density pan-devices resistivity imaging system of ground/borehole-to-surface/inter-well was described. The new resistivity imaging method was predicted to have broad prospects of applications.

Key words: electrical resistivity imaging; high-density; pan-devices; borehole-to-surface; inter-well

(责任编辑: 杜明侠)