

雷旭友,李正文,折京平.超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区和岩溶勘探中应用研究.地球物理学进展,2009,24(1):340~347  
Lei X Y, Li Z W, Zhe J P. Applications and research of the high resolution resistivity method in caves, mined region and  
exploitation of Karst region. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(1):340~347

## 超高密度电阻率法在土洞、煤窑采空区 和岩溶勘探中应用研究

雷旭友<sup>1</sup>, 李正文<sup>1</sup>, 折京平<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学, 成都 610059; 2. 阿雷德雷大学, 澳大利亚)

**摘 要** 超高密度电阻率法是 Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心积近十年的研究成果提出的全新的电阻率法勘探理念,是电法勘探从手工时代向计算机时代的一次跨越式发展,采用一次布板,采集所有可能组合电极间的电位信息,信息量较常规电法在信息量上翻了 40 倍以上,并且避开视电阻率概念,利用处理软件直接反演获取断面真电阻率值.针对目前还没有行之有效的地面物探方法可以勘探清楚的土洞、煤窑采空区和岩溶等复杂地质问题,我们采用该方法分别对机场岩溶和土洞、煤矿运煤巷道、隐伏小煤矿采空区和复杂地质病害隧道进行了试验勘探,经钻探验证,准确率在 60% 以上,达到国内领先水平,取得了较好效果,对复杂地质的工程勘探具有一定参考价值.

**关键词** 超高密度电阻率法,土洞、煤窑采空区和岩溶,勘探,研究

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2009)01-0340-08

## Applications and research of the high resolution resistivity method in exploitation of caves, mined regions and Karst region

LEI Xu-you<sup>1</sup>, LI Zheng-wen<sup>1</sup>, ZHE Jing-ping<sup>2</sup>

(1. Chengdu University of Technology, Chengdu, China, 610059, China; 2. The university of Adelaide, Australia)

**Abstract** The high resolution resistivity method is a ten-year research achievement of Australia's ZZ Resistivity Imaging Research Center in the resistivity exploration method. It created a brand new concept in resistivity data acquisition and data processing and is large improvement to the traditional data acquisition method. This new method can acquire data of all possible electrode combinations from only one layout of a set of electrodes. Such it can collect more than 40 times of the traditional resistivity data acquisition configuration. The new method completely abandons the psudosection & geometry factor concepts, and calculates true resistivity sections from survey data directly with an inversion technique. Currently, there still is no effective geophysical method that can accurately detect caves under rough surface topography. We use the new method to explore caves in Karst of airports, mined laneways, the small mined region of susurface and tunnels with complicated geological conditions. By drilling the new method can reach over 60 percent of accuracy. So we can say that the experiments completed with the new method show that this method can produce very promising results. In a word, the new method has some reference values for engineering explorations under complicated geological conditions.

**Keywords** high resolution resistivity method, coves, mined region, exploration and research

收稿日期 2008-02-10; 修回日期 2008-05-20.

作者简介 雷旭友,四川省成都市人,1963 年出生,男,在读博士生,高级工程师,高级注册咨询师,中铁二院集团成都地勘岩土工程有限公司物探所总工程师,长期从事工程物探勘察和研究.(E-mail:lxys30712@vip.sina.com)

## 0 引言

电阻率法是每一个从事工程物探的技术人员最熟悉、应用最多、使用范围最广、理论成熟的一种常规手段。但其本身存在先天不足,电阻率法装置有对称四极、偶极、三极、三电位等约十种装置。常规电法只测其中一种装置。高密度电法是按该类装置固有的布极方式进行测量,布设  $n \times 64$  根的电极阵,实用往往只测单一或两种装置。然后再分别反演各装置的“真”电阻率断面图。未能充分利用电极阵,造成采集数据信息非常有限,反演计算的精度也非常低,对复杂地质问题很难满足实际勘探的要求<sup>[1,3,4]</sup>。

Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心积近十年的研究成果,设计出的 FlashRES 多通道超高密度直流电法勘探反演系统,野外布极的施工方法与高密度电法相同,但其采用一次布极,采集所有可能组合的电极数据,信息量较常规电法翻了 40 倍以上<sup>[2]</sup>,采用处理软件反演获取断面真电阻率值,资料的精度大大提高;目前,土洞、煤窑采空区等世界级的复杂地质问题还没有行之有效的地面物探方法可以完全勘探解决<sup>[8]</sup>,超高密度电法的应用为我们采用地面电法手段解决该类问题带来了一线曙光,为此,我们进行了专门的试验和试生产,取得了一定的效果。

## 1 FlashRES64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统

Australia ZZ Resistivity Imaging 研发中心是由澳大利亚阿德雷德大学地球物理学系教授 Stewart Greenhalgh 所带领的精英研究团队组成。此研发中心的主要研究方向是电法勘探的方法和仪器研究<sup>[2]</sup>。他们在数据采集和反演算法的研究处于世界领先水平,又积近十年的研究成果设计出世界领先的 FlashRE64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统。

### 1.1 系统构成

Flash-RES 多通道超高密度直流电法勘探反演系统由 FlashRES64 电法仪、12 V 到 220 V 升压器、计算机、电缆、电极和相应的反演软件系统构成。

### 1.2 系统特点

#### 1.2.1 地面勘探

新型测量系统在电极阵布置完成后,尽可能地进行各种装置的测量,包括传统的装置和不对称的任意装置。如任意四极装置的供电极和测量极排列次序有如下三种方式:

A M N B; A B M N; A M B N.

在已布电极阵范围内, A、B、M、N 四种电极的间距较任意,不规定必须对称或等间隔。实测时不分装置方式进行混合观测。由多通道采集器自动在 A、B、M 极选定后,同时测量 AB 极间的供电电流 I 和所有其它电极与此 M 极间的电位差  $dV$ 。从而同时获得多个观测数据  $dV/I$ 。



图 1 FlashRES64 电法仪和 12 V 到 220 V 升压器

Fig. 1 FlashRES64 Resistivity System and DC12 V to DC220 V inverter

不再计算装置系数和视电阻率。仪器自动依次逐一变更 M、B、A 点位……,进行布极范围内任意四极装置的一系列数据采集。从而完成任意装置的实测数据采集工序。该仪器由于采用了多通道技术,61 道数据同时采集,采集速度达每分钟 1000 以上。比现有高密度电法仪器快 40 倍。通过对大量的采集数据处理后,进行反演计算,获得真电阻率断面数据或图像。

#### 1.2.2 井地电阻率法成像

井—地电阻率成像系统是在钻孔中投入一段高密度电缆,布下井中高密度电极阵。在地面布设另一段高密度电极阵。进行井—地之间的一系列供电、测量,实测  $dV/I$  数据后,反演获得的井—地之间电阻率分布断面数据和成像图件。若在井口地面若干方位布设电极阵,取得多方位井—地电阻率成像图,能更有效分析井地间深部地电异常体问题。

#### 1.2.3 井间电阻率法成像

井—井电阻率成像系统是在两个钻孔中分别投入两段高密度电缆,布下井—井高密度电极阵,进行一系列跨孔供电、测量,实测  $dV/I$  数据后,反演获得的井—井之间的电阻率分布断面数据和成像图。

1.2.4 电阻率法三维观测成像系统

在同一场地,若同时开展地面、井-地、井-井或井-地-井的电阻率法测量,则能形成三维观测系统.应用二维、三维反演软件,获得该场地下立体化电阻率分布图像.

2 正演计算例子

2.1 断层模型

图2为一断层模型的超高密度电法正演计算结果,常规电法对断层的产状一般反映不敏感,但超高密度电法对断层的产状反映明显,宽度与断层实际宽度大致吻合.

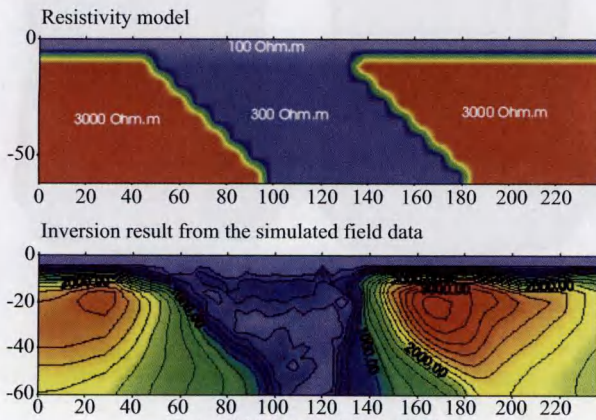


图2 断层模型及计算结果

Fig. 2 A fault model and the resistivity distribution obtained by inversion

2.2 高低阻复杂组合模型

图3为高低阻组合模型,采用超高密度电法系统进行正演的结果,从该图上可以看出:高低阻模型在等值线图上的深度、位置以及电阻率大小均与实际吻合.

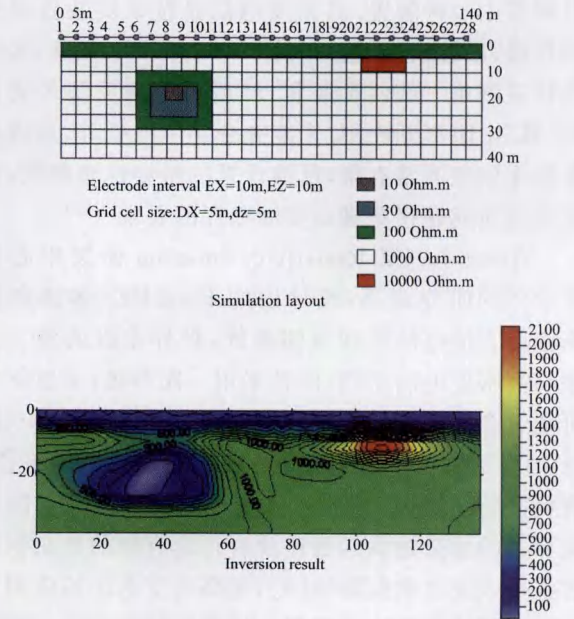


图3 高低阻组合模型及计算结果

Fig. 3 A model with high and low resistivity anomalies and the calculation result

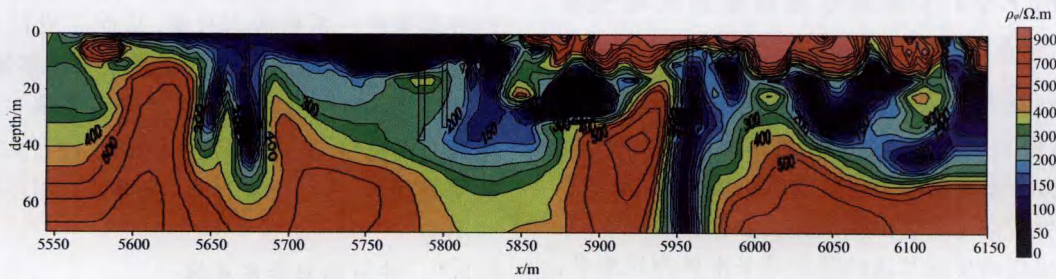


图4 638测线电阻率断面图

Fig. 4 The inverted resistivity distribution of line 638

表1 638测线异常验证情况

Table 1 Validation of line H1 by drilling

钻孔编号(点号)	终孔深度/覆盖层深度(m)	异常深度(m)	异常性质	异常特征	验证效果
ECK400(5677)	28.0/10.4	18.0~18.6	空溶隙	垂直延伸的较窄的低阻条带	较差
ECK392+1(5785)	27.0/16.0	16.0~22.5 24.0~24.5	土洞, 空溶洞	土洞反映为中阻带中的相对高阻闭合圈,溶洞较小,于中阻带中没有形成明显的异常	好
ECK392(5800)	40.4/16.0	16.3~17.5 25.3~32.4 36.5~40.4	空溶洞 充填溶洞 空溶洞	规模较大的低阻带	好
ECK450(5958)	32.0/12.0	无		垂直延伸的较窄的低阻带	差

### 3 FlashRES64 系统野外勘探试验

#### 3.1 西南某新机场试验工作

为了考察 FlashRE64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统对岩溶洞穴的勘探效果,2007 年 4 月 20~23 日,在西南地区某新建机场工地进行了试验性勘探,试验测线与已完成直流电测深勘探的测线完全重合,以利于资料对比,本次试验共完成 6 条测线试验性勘探,并进行了 11 个钻孔的验证工作.

##### 3.1.1 DP-638 测线

测线上(见图 4),在 0~50m 深度范围内存在明

显的低阻和中阻异常,分别在 DP-638-5677、-5785、-5800和-5958 四处进行了钻探验证,验证结果表明,该方法对土洞有一定反映,低阻团块状异常一般为溶洞的反映,验证效果好,较窄的低阻条带异常一般为溶缝的反映,钻探验证效果较差,详见表 1.

##### 3.1.2 DP-658 测线

测线上(见图 5),在 DP-658-7655 号点附近存在一明显低阻闭合圈异常,在该处进行了钻探验证:0~2.0 m 红黏土;2.0~3.0m 强风化灰岩;3.0~31.2m 中风化灰岩,其中 12.5~13.5m 局部裂隙中充填,25.1~31.2,岩芯破碎,根据工程需要,钻探深

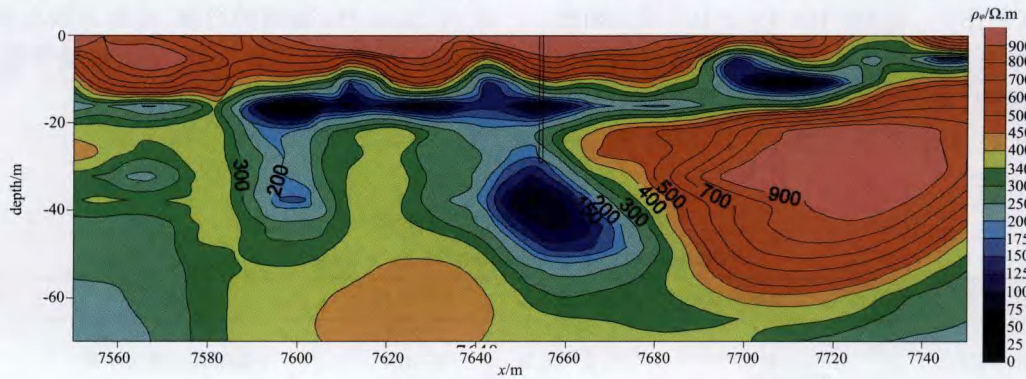


图 5 658 测线电阻率断面图

Fig. 5 The inverted resistivity distribution of line 658

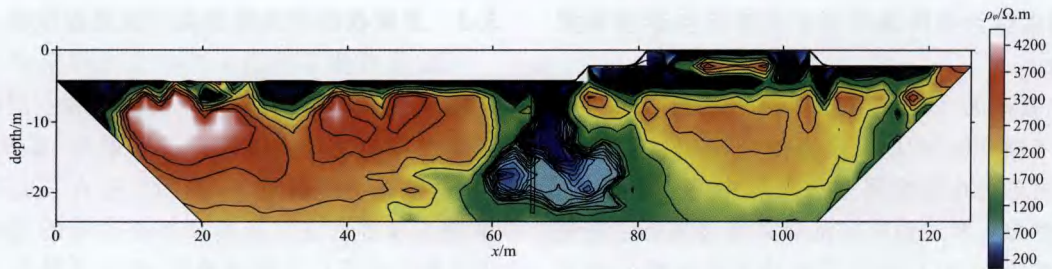


图 6 766 测线电阻率断面图

Fig. 6 The inverted resistivity distribution of line 766

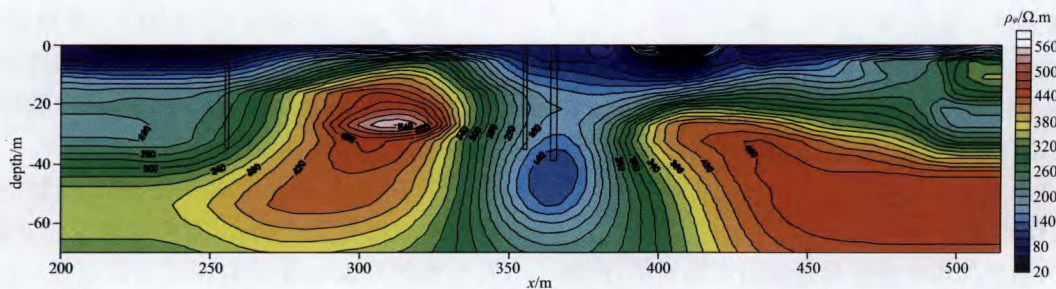


图 7 H1 测线电阻率断面图

Fig. 7 The inverted resistivity distribution of line H1

度仅为 31.2m,未到达异常核心部位,但也基本揭示了该异常存在的信息,验证效果较好。

### 3.1.3 DP-766 测线

测线上(见图 6),在 DP-766-60~80 号点间存在一片明显的中低阻异常,在 DP-766-65 处进行了钻探验证,钻探结果为:0~13m 红黏土;13~14.7m 土洞,无填充物,掉钻;14.7~15.1m 强化蚀灰岩;15.1~20.1m 溶洞,无填充物,掉钻;20.1~32.2m 中风化灰岩,表明 60-80 号点间的中低阻异常为空土洞和溶洞的综合反映,验证效果好。

### 3.1.4 DP-H1 测线

测线上(见图 7),在 DP-H1-330~400 号点附近存在一明显中低阻直立异常带,两侧的高阻体为较完整灰岩的反映,该异常在直流电测深资料上没有任何反映,针对该异常分别在 DP-H1-355 和 DP-

H1-365 号点处进行了钻探验证,从表 2 可以看出,通过该异常带的两个钻孔均钻探到了溶洞,特别是 TCK208 号钻孔,由于岩体破碎在孔深 39.2m 处卡钻,未能继续下钻,否则应该还会遇到更大的溶洞。

根据上述测线的钻探验证结果可以看出:对工程影响较大的溶洞和土洞,该方法均有一定的反映,由于文章篇幅限制,未将各测线的对称四极电测深的视电阻率断面图显示出来,除 H1 测线外,其它测线对称四极电测深的视电阻率断面图对溶洞均有一定反映,有的反映为等值线低阻下凹,有的反映为局部视电阻率较低,但没有超高密度资料反映直观、明显,特别是 H1 测线的溶洞,对称四极电测深的视电阻率断面图完全没有反映,等值线呈平直延伸,向深部电阻率递增。

表 2 H1 测线异常验证情况

Table 2 Validation of line H1 by drilling

钻孔编号(点号)	终孔深度/覆盖层深度(m)	异常深度(m)	异常性质	异常特征	验证效果
TCK208(365)	39.2/7.6	13.8~15.5	空溶洞	中低阻直立带状异常	好
		20.8~26.0	空溶洞		
		30.7~39.2	岩体极破碎		
TCK208+1(355)	36.2/11.7	17.3~18.3	空溶洞	中低阻直立带状异常	好
		18.5~21.9	空溶洞		
		31.2~34.0	空溶洞		

## 3.2 四川省犍为县陶家河煤矿煤窑采空巷道勘探试验

### 3.2.1 试验概况

为了考察 FlashRE64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统在煤窑采空区勘探中的应用效果,在四川省犍为县罗成镇陶家河煤矿煤窑进行了巷道地表勘探试验,主要目的是了解该系统对矿山地下巷道和采空区的勘探效果。目标巷道为陶家河煤矿正在使用中的已知出煤主巷道,洞径大小约为 2.0×2.5m,下降坡度为 25°,巷道内底部铺有铁轨,运煤车的密度较大,约 5~10 分钟一趟。

根据地表的地形地物条件布置了一条测线,采用 2m 电极距,测线总长 126m。试验时正下小雨,地表湿润,接地良好,采用 90v 电压供电,电流较大,部分电流峰值达到了 1A 以上。

### 3.2.2 试验结果

图 8 为陶家河煤矿采煤巷道电阻率断面图,已知采煤巷道位于 68 号点附近,埋深约 26m。在 65~72 号点间 26~29m 深度范围有一高阻异常,对应为该巷道的位置,为巷道的异常反映,试验取得较好效果。

## 3.3 玉蒙铁路隧道煤窑采空区勘探试验

玉蒙铁路某隧道施工中发现煤窑采空区,并引起隧顶塌方,为查明采空区的分布和空间位置,采用超高密度电法对该隧道进行了勘探。图 9 为勘探结果,从该图上可以看出,剖面上存在三处高阻异常,推测为煤窑采空区及其顶部松动带的反映,据此在 225 号点处进行了钻探验证,验证结果在 29.8~32.2m 见采空区,已回填或垮塌,因此根据高阻异常对采空区进行判释。

## 3.4 黔桂铁路某病害隧道勘探试验

为了进一步考察 FlashRE64 多通道超高密度直流电法勘探反演系统在复杂地质条件下的勘探效果,于 07 年 5 月 12 日至 5 月 17 日在黔桂线某病害隧道进行了勘探试验。

图 10 为本次勘探成果图,图上反映的岩性分界线与地质推断完全吻合,含煤地层反映为低阻区,地质推测的采煤巷道呈串珠状高阻反映,说明该巷道局部尚未坍塌,呈高阻反映,坍塌部位为低阻反映,结合隧道塌顶现象,推测该采煤巷道延伸到了 400 号点以后;400 号点以后浅部高阻体被一直达地表

的低阻异常带分割,推测该低阻异常带岩体软弱破碎,为构造破碎带的反映,隧道变形坍塌位置为 362~401 号点,其宽度与推测的构造破碎带在地表出露宽度吻合;300 号点以后中部存在的低阻带向右

上方延伸,为一已知断层的反映;综上所述,隧道坍塌是由煤窑采空区、构造破碎带和已知断层共同作用的结果,后来的病害整治揭示物探资料基本准确,本次试验勘探取得了较好的效果。

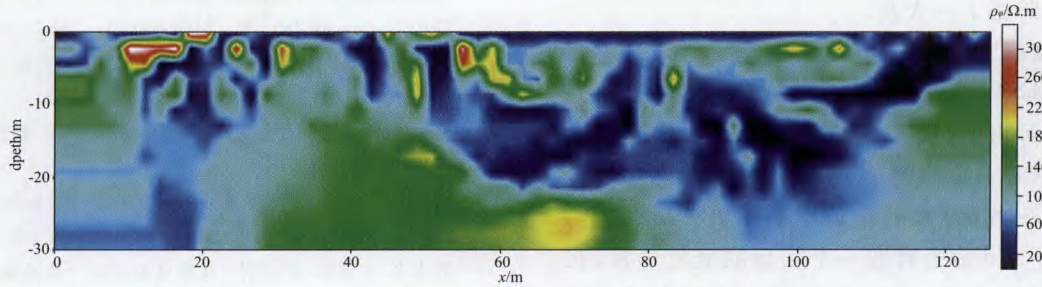


图 8 陶家河煤矿采煤巷道电阻率断面图

Fig. 8 The inverted resistivity distribution for the survey completed in a coal mining tunnel at Taojiahe mining site

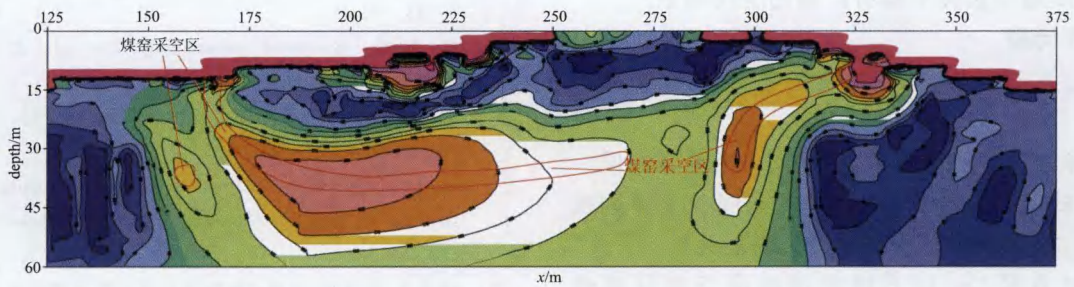


图 9 玉蒙铁路某隧道煤窑采空区电阻率断面图

Fig. 9 The inverted resistivity distribution for the survey completed in a railway tunnel at Yumeng for detecting an abandoned underground coal mining tunnel

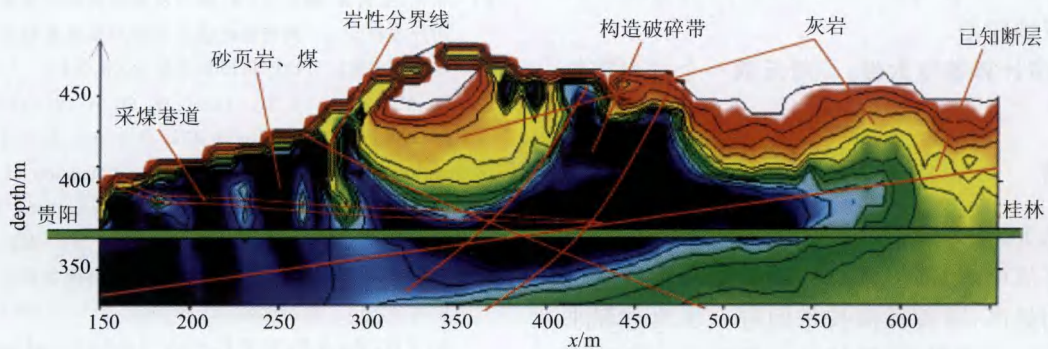


图 10 黔桂铁路某病害隧道电阻率断面图

Fig. 10 The inverted resistivity distribution for the survey completed in a railway tunnel at Qiangui railway for detecting dangerous geological structure

#### 4 FlashRES64 系统野外勘探试验结论

##### 4.1 设计理念

FlashRES64 多通道、超高密度直流电法勘探

反演系统集传统的四极和偶极装置于一身,理论基础也是成熟的,在不增加野外布极工作量的情况下一次性完成 60000 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,利用其随机反演软件对数据进行处理和联合反演,获得真电阻率断面图,国内尚未见到该类设备,其设计思路突破使用了几十年的常规电法模式,使电法勘探在方法技术上跨进了一大步。

#### 4.2 试验结果

FlashRES64多通道、超高密度直流电法勘探反演系统通过岩溶、煤窑采空区和复杂地质体组成三次试验,宏观上电阻率在剖面上的分布与常规电法结果基本一致,异常的验证准确率在60%以上;机场DP-H1-370附近存在一个明显的低阻异常,在常规电法上没有反映,钻探验证该处溶洞直径大于15m,部分土洞也有明显反映;煤矿采煤巷道或采空区埋深均大于25m,采用常规地面电法,根据经验肯定是没有反映的,该方法也有反映,说明该方法在复杂和高难度地质勘探中具有广阔的应用前景。

#### 4.3 存在问题

(1)三次试验都没有对设备的井下部分进行试验。

(2)异常的多解性较多:一是同一类异常在同一条测线反映的介质性质不一样;二是同一个排列反演计算中,初始参数对反演结果影响很大。

(3)对直径2m以下的充填溶洞反映敏感性较差。

(4)仪器本身对野外干扰没有采取消除措施,当干扰较强时,对数据进行反演计算的结果影响可能较大,造成同一地层相邻(20m以内)测线电阻率断面图的相似性较差。

(5)反演计算速度太慢,一般反演一个排列需要5个小时。

#### 5 结语

我们认为,该方法采用常规电法的成熟理论,集成大部分直流电法装置,采集的数据量与常规电法相比有质的提高,随着反演技术的进一步改进和采集系统的进一步完善,工程技术人员对该方法的资料认识水平不断总结提高,特别是该方法对土洞和煤窑采空区等工程中常见的,但采用常规手段无法解决的难题有一定的反映,而常规电法能解决的问题它也能解决,替代常规电法勘探的部分领域是必然趋势,值得推广应用。

**致谢** 感谢张国华同志为本文提供了部分实例,同时感谢余洋和余年先生对本文进行了校核。

#### 参 考 文 献 (References):

- [1] Stummer P, Maurer H, Green A. Experimental design; electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information[J]. *Geophysics*, 2004, 69:120~139.
- [2] Zhe J, Greenhalgh S, Marescot L. Multi-channel, full waveform and flexible electrode combination resistivity imaging system[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2):57~64.
- [3] 李金铭,罗延中,主编.电法勘探新进展[M].北京:地质出版社,1996,98~101.  
Li J M, Luo Y Z. *New Progress in electrical prospecting*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996, 98~101.
- [4] 苏永军,王绪本,罗建群.高密度电法在三星堆壕沟考古勘探中应用研究[J].*地球物理学进展*, 2007, 22(1):268~272.  
Su Y J, Wang X B, Luo J Q. The archaeological application of high-density resistivity method to ditch exploration on Sanxingdui Site [J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(1):268~272.
- [5] 傅良魁,主编.电法勘探教程[M].北京:地质出版社,1983,7~143.  
Fu L K. *Electrical prospecting Tutorial* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983, 7~143.
- [6] 徐海浪,吴小平.电阻率二维神经网络反演[J].*地球物理学报*, 2006, 49(2):584~589.  
Xu H L, Wu X P. 2-D resistivity inversion using the neural network method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(2):584~589.
- [7] 谭茂金,张庚骝.用模式匹配法计算电阻率测井响应研究进展[J].*地球物理学进展*, 2006, 21(1):208~213.  
Tan M J, Zhang G J. Progress In Numerical Mode-Matching Method Of Electrical Logs[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1):208~213.
- [8] 祁民,张宝林,梁光河,等.高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征——高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J].*地球物理学进展*, 2006, 21(1):256~262.  
Qi M, Zhang B L, Liang G H, et al. High-resolution prediction of space distribution characteristics of complicated underground cavities—Preliminary application of high-density electrical technique in an area of Yangquan, Shanxi [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1):256~262.
- [9] 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):296~299.  
Jia Z K, An X F, Li Z F, et al. Application of unconventional electric detecting method in engineering geology survey [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1):296~299.
- [10] 周灿灿,王昌学.水平井测井解释技术综述[J].*地球物理学进展*, 2006, 21(1):152~160.  
Zhou C C, Wang C X. Technology Review on the log interpretation of horizontal well [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1):152~160.
- [11] 沈鸿雁,李庆春.高密度电阻率法勘探长测线多排列数据连接处理[J].*地球物理学进展*, 2008, 06(12):1970~1974.  
Shen H Y, Li Q C. Long line and multi-array data linkage

- processing for high density resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 06(12):1970~1974.
- [12] 滕吉文. 中国地球物理仪器和实验设备研究与研制的发展与导向[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2): 276~281.  
Teng J W. The development and guide direction of Research and manufacture of Geophysical instruments and experimental equipments in China[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 276~281.
- [13] 涂广红,王传雷,江为为. 田野白蚁主巢的高密度电法探测实例[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(1): 279~283.  
Tu G H, Wang C L, Jiang W W. The instance of detecting nests of termites in the fields with 2-D Resistivity Imaging Method[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(1): 279~283.
- [14] 韩学辉,匡立春,何亿成,等. 岩石电学性质实验研究方向展望[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(2): 348~356.  
Han X H, Kuang L C, He Y C, *et al.* A view of the experimental study on rock electric property[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2): 348~356.
- [15] 滕吉文. 当代地球物理学向何处去[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 327~339.  
Teng J W. Where is the contemporary Geophysics of China going[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(2): 327~339.
- [16] 祁民,张宝林,梁光河. 高密度电法的三维数据场可视化[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(3): 981~986.  
Qi M, Zhang B L, Liang G H. The visualization of three dimension data field of high-density electrical technique[J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(3): 981~986.
- [17] 江玉乐,周清强,黄鑫,张朝霞. 高密度电阻率法在滑坡探测中的应用[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2008, (05): 542~546.  
Jinag Y L, Zhou Q Q, Huang X. Application of the high density resistivity method to landslide prediction[J]. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 2008, (05): 542~546.
- [18] 黄俊革,王家林,阮百尧. 三维高密度电阻率 E-SCAN 法有限元模拟异常特征研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1206~1214.  
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on FEM modeling of anomalies of 3-D high-density E-SCAN resistivity survey [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1206~1214.
- [19] 黄俊革,王家林,阮百尧. 坑道直流电阻率法超前探测研究[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(5): 1529~1538.  
Huang J G, Wang J L, Ruan B Y. A study on advanced detection using DC resistivity method in tunnel[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(5): 1529~1538.
- [20] 李剑浩. 混合物整体电导率的研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(6): 1406~1411.  
Li J H. Study on the whole conductivity of mixture[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(6): 1406~1411.
- [21] 刘兵,李曙光. 高密度电法在云南某高速公路岩溶勘察中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2008, 5(10): 543~546.  
Liu B, Li S G. Application of Multi-Electrodes Electrical Method to Karst Exploration of one Highway in Yunna[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2008, 5(10): 543~546.
- [22] 付长民,李帝铨,王光杰,底青云. 高密度电法数值模拟及其在寻找北京人头盖骨化石中的应用[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(1): 263~269.  
Fu C M, Li D Q, Wang G J, Di Q Y. Numerical simulation of resistivity tomography and it's application in finding Beijing cranium fossil [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2008, 23(1): 263~269.
- [23] 吴华桥,周启友,刘汉乐. 树干水分分布及运移的高密度电阻率成像法时空监测[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(4): 1310~1316.  
Wu H Q, Zhou Q Y, Liu H L. Temporal and spatial monitoring of water distribution and migration in a tree trunk using electrical resistivity tomography [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2008, 23(4): 1310~1316.
- [24] 刘汉乐,周启友,吴华桥. 轻非水相液体污染过程的高密度电阻率成像法室内监测[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(4): 1246~1254.  
Liu H L, Zhou Q Y, Wu H Q. Laboratorial monitoring of the LNAPL contamination process using electrical resistivity tomography[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2008, 51(4): 1246~1254.