

唐英杰, 葛为中. 井间电阻率 CT 在工程检测中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2013, 22(2): 275-282.
Tang YJ, Ge WZ. The application of the well between resistivity CT method to the engineering testing[J]. CT Theory and Applications, 2013, 22(2): 275-282.

井间电阻率 CT 在工程检测中的应用

唐英杰¹✉, 葛为中²

1. 华北有色工程勘察院有限公司, 石家庄 050021
2. 广西地球物理学会, 广西 桂林 541004

摘要: 由于地面高密度电法受到装置类型和地形的影响, 不能准确反映地质情况。本文重点介绍了井间电阻率 CT 的工作方法, 针对实际工作, 进行数值模拟试验和正反演计算, 并在探测浅部岩溶和检测深部帷幕注浆效果工程中进行了井间电阻率 CT 的应用。总结数据采集过程中的注意事项, 并将成果与钻孔资料进行对比分析, 取得了较好的效果。

关键词: 井间; 电阻率 CT; 岩溶; 矿山帷幕; 检测效果

文章编号: 1004-4140 (2013) 02-0275-08 **中图分类号:** P 631.3+22 **文献标志码:** A

井间电阻率 CT 属于地下直流电法, 是电阻率法一种新的应用。传统的电阻率法主要应用在陆地表面, 通过布置在地面的电极测量电压和电流, 探测出地层的视电阻率, 推断地下的地质情况。但因受到地面电极距离、装置类型和体积效应的限制, 随探测目标深度的增加, 探测精度也逐渐降低^[1]。

长期以来地球物理工作者在孔间电磁波 CT 成像、弹性波 CT 成像理论和应用方面取得了长足进展和大量成果^[2-7]。本文所介绍的井间电阻率 CT 成像技术, 借助在两个钻孔中的地下高密度电极阵, 进行泛装置方式的供电和测量^[2], 就能够对地下孔间目标做较精细的探测。从 20 世纪 90 年代开始, 我国各生产单位和科研院所相继探索井间电阻率成像数值模拟技术, 并形成了相对成熟的电阻率 CT 成像理论^[8-13]。井间电阻率 CT 根据稳恒电流场的 Frechet 导数解析式, 采用有限元法计算视电阻率对于空间任意一点模型变化的灵敏度系数, 应用非线性问题逐次线性化对偶空间反演方法, 对数值模型进行井间电阻串成像的数值模拟, 其结果表明井间成像的可能性^[3]。

2006 年我们根据检测深部帷幕工程注浆效果的需要, 引入多通道井间电阻率 CT 技术, 开始对其进行应用研究。本文针对浅部岩溶和检测深部帷幕注浆效果的应用实践, 研究井间电阻率 CT 的数值模拟试验, 以及井间电阻率 CT 进行精细物探探测的应用。

1 井间电阻率 CT 工作方法

井间电阻率 CT 检测时, 将两根带有电极的电缆分别放到两个钻孔中, 每根电缆带有数十个电极, 孔内测量段不能有金属套管或绝缘套管, 但可以有含筛孔的塑胶套管, 孔内要充水, 采用跨孔的方式进行供电和接收。

收稿日期: 2012-11-19。

检测过程中首先选定 A、B、M 点电极，其余电极同步测量一系列的 N 电极电位数据；然后移动 B 电极再做如上观测；最后移动 A 电极，再做如上观测，测量过程中每一对电极都可以任意组合作为 AB 供电电极和 MN 接收电极^[4]。

井间电阻率 CT 数据采集过程采用自动化数据采集，假设每根电缆 32 个电极，总电极数 64 个，将 64 个电极分为两组，A 奇数电极组 32 个（编号 1、3、5、…、61、63）和 B 偶数电极组 32 个（编号 2、4、6、…、62、64），供电电极 AB 一次通电过程中，测量 M 电极（随机选定）与其他所有电极（均作为 N 电极）的电位差，就可得到 61 个电位差（MN1、MN2、MN3、…、MN60、MN61）数据。奇数电极组 32 个电极和偶数电极组 32 个电极互相配对（即全排列）做供电电极，整个测量过程中有 $32 \times 32 = 1024$ 次供断电过程，每次供电可同时采集 61 个电位差数据，总采集数据量为 $32 \times 32 \times 61 = 62464$ 个^[14-15]。图 1 为井间电阻率 CT 数据采集示意图。

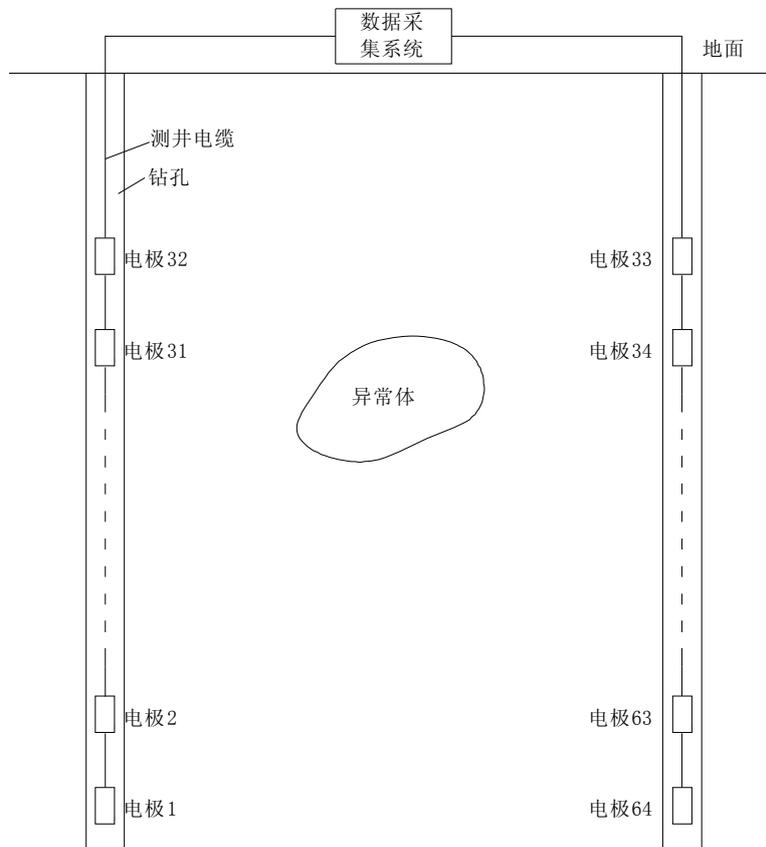


图 1 井间电阻率 CT 数据采集示意图

Fig. 1 CT data acquisition diagram of well between resistivity

普通电法勘探，供电电极 AB 供电一次，测量一次测量电极 MN 之间的电位差，然后计算出视电阻率值，完成一次数据采集。井间电阻率 CT 采用多通道技术，能够极大提高检测效率，采集数据是常规方法的几十倍，如此大量的数据，能够更多地记录地质信息，对所采集的数据进行 2.5 维反演，能够得到更可靠和精确的井间电阻率 CT 图像。

2 井间电阻率 CT 探测溶洞

溶洞是石灰岩地区最常见的地质现象，特别是我国南方地区，溶洞非常发育，给工程施工带来很大的安全隐患。我国南方地区地下水丰富，溶洞一般为充满水状态，相对其围岩为低电阻率体。

2.1 溶洞的井间电阻率 CT 数值模拟试验

根据溶洞及其围岩电性特征建立溶洞二维模型（图 2 (a)），图中中间低电阻率异常体为模拟溶洞，其电阻率值设定为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ ，围岩为高电阻率石灰岩，其电阻率设定为 $5000 \Omega \cdot \text{m}$ 。溶洞二维模型进行模拟井间电阻率 CT 检测的正演计算，对模拟检测数据再进行 2.5 维反演^[3]，可得到溶洞二维模型反演断面（图 2 (b)），图中可以很明显显示出地层中低电阻率异常，其大小、位置与模型中异常状态一致，反映效果较好。

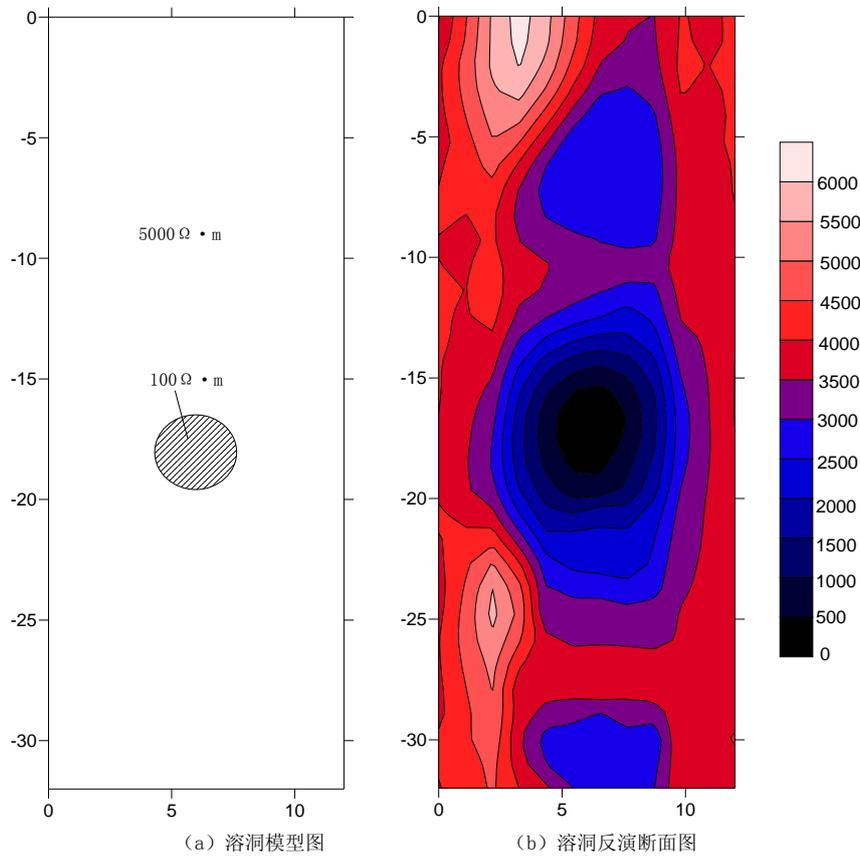


图 2 溶洞模型及其反演结果

Fig.2 The karst model and its inversion results

2.2 井间电阻率 CT 探测路基下溶洞

广州某高速公路建设中的一些路段将遇到岩溶、洞穴，工程施工时可能引起地面坍塌，为准确找出这些岩溶、洞穴的位置，采用井间电阻率 CT 进行检测。检测过程中为防止钻孔坍塌，

在检测钻孔中下入带有筛孔的 PVC 套管，在套管中下入两根测量电缆，每根电缆带有 32 个电极，电极距 1 m。图 3 为 CT2、CT1 两钻孔探测结果及其推断解释，两钻孔相距 12 m。

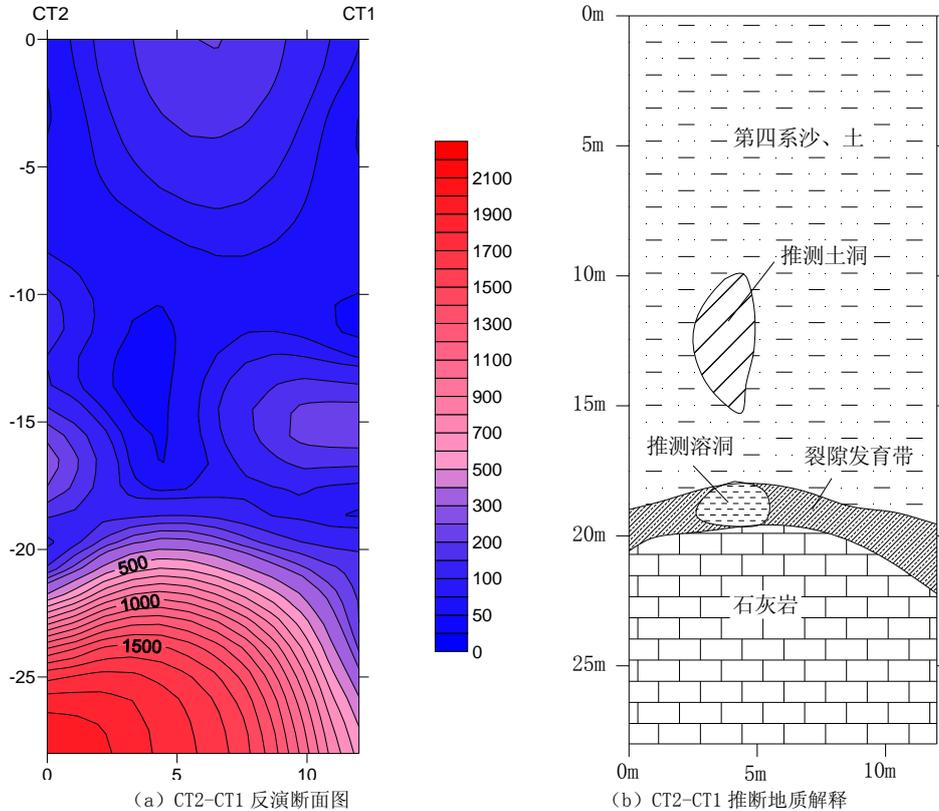


图3 CT2-CT1 井间电阻率 CT 探测结果及地质推断

Fig.3 CT1-CT2 well between resistivity CT detection results and geological inference

根据 CT2-CT1 井间电阻率 CT 图推断：深度 0~15m 的电阻率小于 $150 \Omega \cdot m$ ，为填土、泥沙层；靠近 CT2 孔水平位置 4m 左右、深度 13m 上下，有电阻率小于 $50 \Omega \cdot m$ 的异常，推测为土洞；深度 15~18m 电阻率 $150 \sim 300 \Omega \cdot m$ ，为砂土、风化层；深度 18~22m 的电阻率值小于 $200 \Omega \cdot m$ ，推测为岩溶裂隙发育带；CT2 孔 17.8~21.8m 见溶洞，CT1 孔 19.24~22.9m 间每隔 20cm 左右有小溶洞，23.5~25m 见溶洞，推断在水平位置 4~6m，深度 18~20m 可能有溶洞；CT2-CT1 断面深度 22~25m 以下，电阻率大于 $500 \Omega \cdot m$ 等直线的范围为微风化石灰岩。

在推断异常位置布置了钻孔进行验证，在 12.6~14.3m 见土洞，在 19.1~21.2m 见溶洞，物探推断结果与钻孔钻探结果基本一致。

3 井间电阻率 CT 检测帷幕注浆效果

历来矿山帷幕注浆效果检测都是工程检测的一个难题，由于其深度大（一般大于 500m），采用地面物探方法进行检测达不到检测精度，因此必须采用测井的方法进行，井间电阻率

CT 方法轻便、快捷、效率高，是最理想的检测方法。矿山帷幕注浆材料一般采用硅酸盐水泥，注浆后岩石的裂隙岩溶被水泥结石充填，因此注浆后地层相对于注浆前地层具有较高的电阻率特征。

3.1 矿山帷幕的井间电阻率 CT 数值模拟试验

根据矿山帷幕电性特征，建立二维层状模型（图 4 (a)），图中中间高阻异常层为注浆后地层裂隙、岩溶等过水通道被水泥等注浆材料充填，所形成的高电阻率帷幕墙，帷幕墙电阻率设定为 $5000 \Omega \cdot \text{m}$ ，厚度 24 m ，其上下围岩为未注浆地层，电阻率设定为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 。

矿山帷幕模型进行模拟井间电阻率 CT 检测的正演计算，对模拟检测数据进行 2.5 维反演，得到矿山帷幕模型反演断面图（图 4 (b)），图中很明显显示出帷幕高阻层的位置、规模，其电阻率值在 $4500 \sim 5500 \Omega \cdot \text{m}$ ，异常位置 $195 \sim 220 \text{ m}$ ，与模型异常位置基本一致。

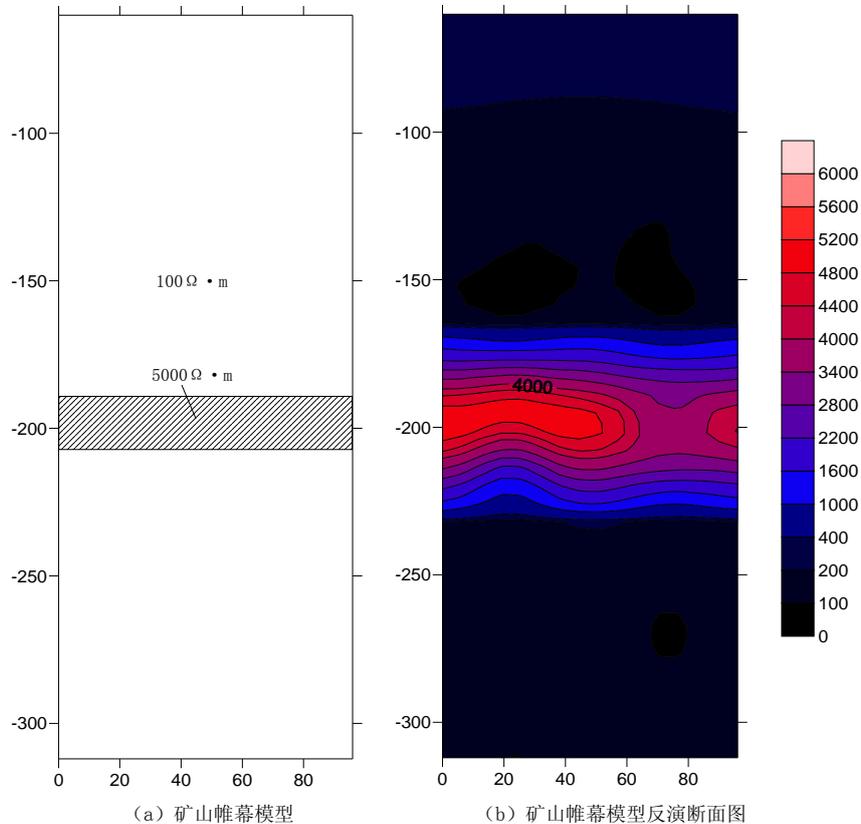


图 4 矿山帷幕模型及其反演结果

Fig.4 A mine curtain model and its inversion results

3.2 井间电阻率 CT 检测中关铁矿深部帷幕的注浆效果

中关铁矿位于河北省沙河市，是一个大型隐伏矿床，矿体埋深 $300 \sim 700 \text{ m}$ ，为实现合理开采和保护地下水资源，采用帷幕注浆治理地下水，设计帷幕线长 3397 m ，帷幕防渗能力 $q \leq 2 \text{ Lu}$ ，帷幕墙厚度 10 m 。为对帷幕注浆效果进行检测，在大量注浆孔中采用井间电阻率 CT 方法进行检测。

图 5 为 K104-K108 钻孔井间电阻率 CT 检测结果, 两钻孔相距 72 m。根据其电阻率分布情况, 在水平方向 30~50 m, 垂直方向 490~510 m, 存在低电阻率异常, 异常电阻率值为 2 500~4 000 $\Omega \cdot \text{m}$, 与其围岩相差较大, 推测可能存在较强过水通道, 建议布置检查孔或加密孔。根据检测结果, 在 42 m 处布置加密孔 T3, 加密孔 T3 在 486~525 m 平均单位透水率 2.37 Lu, 平均单位注浆量 436.03 kg/m, 平均单位透水率和平均单位注浆量均很大, 与推测结果一致。

4 结论

(1) 通过数值模拟和实际应用, 井间电阻率 CT 在溶洞探测、注浆效果检测等工程上应用是可行的, 而且其应用不受地形、埋深的限制, 应用范围广, 既能探测浅部溶洞又能探测深部矿山帷幕注浆效果, 解决了地面物探方法难以探测深部小规模异常的难题。

(2) 井间电阻率 CT 探测无损、快速、简捷、成本低, 适宜在以后相关工程中进行推广应用。

(3) 反演电阻率为地质体相对电阻率值, 在进行推断解释前有必要进行物性试验, 以了解不同地质体间的相对电阻率差异。

(4) 地下探测目标一般为不规则三维地质体, 采用二维方法检测会受到旁侧效应的影响^[16], 而目前井间电阻率 CT 检测还只能进行二维数据反演和定性解释, 今后还需要在井间三维数据反演和定量解释方面进行进一步研究。

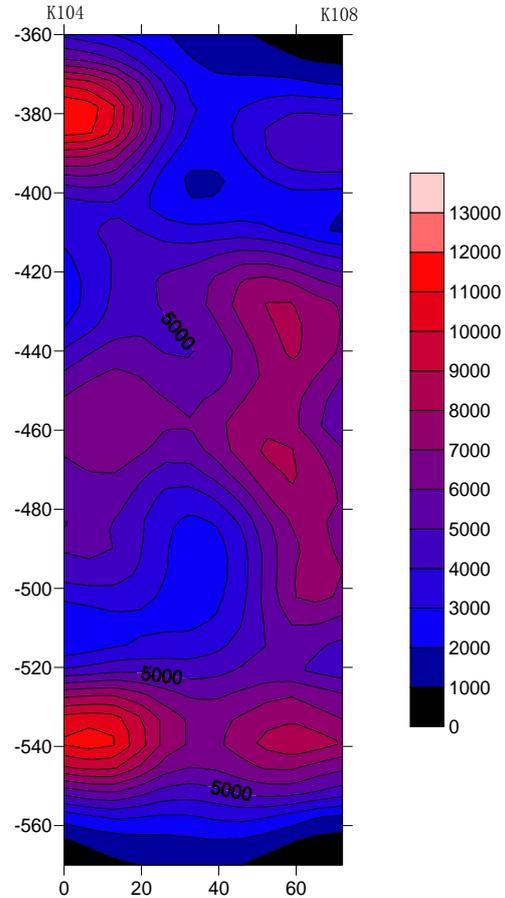


图 5 K104-K108 井间电阻率 CT 检测结果
Fig. 5 K104-K108 well between resistivity CT results

参考文献

- [1] 傅良魁. 电法勘探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1983: 202-249.
Fu LK. Electrical prospecting course[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 202-249.
- [2] 王劲松, 王兴泰, 葛为中. 关于电阻率成像问题的初步探讨[C]//中国地球物理学会第十届年会论文集. 北京: 地质出版社, 1994: 312-313.
Wang JS, Wang XT, Ge WZ. Preliminary study of the resistivity imaging[C]//Chinese Geophysical Society 10th Annual Meeting Proceedings. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 312-313.
- [3] 周兵, 曹俊兴. 井间电阻率成像数值模拟[J]. 物探化探计算计算, 1995, 17(4), 9-17.

- Zhou B, Cao JX. Numerical modeling for crosshole resistivity image[J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1995, 17(4): 9-17.
- [4] Zhe JP, Greenhalgh S, Marescot L. Multi-channel, full waveform and flexible electrode combination resistivity imaging system[J]. *Geophysics*, 2007, 72(2): 57-64.
- [5] Zhou B, Greenhalgh SA. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations[J]. *Geophysical Prospecting*, 2000, 48: 887-912.
- [6] Zhou B, Dahlin TA. Numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays[J]. *Geophysical Prospecting*, 2004, 52: 379-398.
- [7] Lv Yuzeng, Ruan Baiyao, Wei Liuye, et al. 3-D resistivity approximate inversion of borehole-surface data[C]//The 19th International Workshop on EM Induction in The Earth, Beijing China, 2008: 23-29.
- [8] 冯锐, 李智明, 李志武, 等. 电阻率层析成像技术[J]. *中国地震*, 2004, 20(1): 13-30.
Feng R, Li ZM, Li ZW, et al. Resistivity tomography[J]. *Earthquake Research in China*, 2004, 20(1): 13-30.
- [9] 白登海, 于展. 电阻率层析成像理论和方法[J]. *地球物理学进展*, 1995, 10(1): 56-75.
Bai DH, Yu Z. Theory and methods of resistivity tomography[J]. *Progress in Geophysics*, 1995, 10(1): 56-75.
- [10] 曹立斌, 孟永良, 周建兰. 电阻率层析成像技术的回顾与展望[J]. *勘探地球物理进展*, 2004, 27(3): 170-173.
Cao LB, Meng YL, Zhou JL. Review and prospect of resistivity tomography technology[J]. *Progress in Exploration Geophysics*, 2004, 27(3): 170-173.
- [11] 沈平. 井间电阻率成像方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
Shen P. Study of cross-hole resistivity tomography[D]. Changsha: Zhong Nan University, 2010.
- [12] 罗延钟, 万乐. 高密度电阻率法成像[J]. *CT理论与应用研究*, 2006, 15(1): 61-65.
Luo YZ, Wan L. High density resistivity image[J]. *CT Theory and Applications*, 2006, 15(1): 61-65.
- [13] 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.
Dong HB, Wang CL. Development and application of 2D resistivity imaging surveys[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(1): 171-176.
- [14] 唐英杰, 张卫东. 井间高密度电阻率成像法检测帷幕注浆效果[J]. *工程勘察*, 2009, (s2): 462-466.
Tang YJ, Zhang WD. The effect detection of curtain grouting by cross-well high density electrical resistivity tomography[J]. *Geotechnical Investigation and Surveying*, 2009, (s2): 462-466.
- [15] 胡树林, 陈烜, 帅恩华. 超高密度电阻率法在岩溶及破碎带探测中的应用[J]. *物探与化探*, 2011, 35(6): 821-824.
Hu SL, Chen X, Shuai EH. The application of the ultra-high density resistivity method to the investigation of Karst caves and fracture zones[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35(6): 821-824.
- [16] 尹极, 王晓东, 程邈, 等. 高密度电阻率法在果香峪溶洞勘查中的应用效果分析[J]. *CT理论与应用研究*, 2011, 20(3): 301-310.
Yin J, Wang XD, Chen M, et al. Analysis on application effect of high density resistivity method to guoxiangyu solution cavity exploration[J]. *CT Theory and Applications*, 2011, 20(3): 301-310.

The Application of the Well between Resistivity CT Method to the Engineering Testing

TANG Ying-jie^{1✉}, GE Wei-zhong²

1. North China Engineering Investigation Institute limited company, Shijiazhuang 050021, China

2. Guangxi Geophysical Society, Guilin 541004, China

Abstract: As a result of the terrain and type of device, the method of ground high density resistivity cant reflect the geology accurately. This paper mainly introduces the working method of the well between resistivity CT. In view of the practical work, we carried out the numerical simulation test and forward-inversion calculation, and applied the method while detecting deep karst and the effect of the deep curtain grouting. We summarized the attention in the process of data acquisition and got the result and the drilling data for a comparative analysis and achieved a better result.

Key words: well between; resistivity CT; Karst; mine curtain; grouting effect



作者简介: 唐英杰[✉] (1981—), 男, 本科, 华北有色工程勘察院有限公司工程师, 主要从事工程物探、水文物探工作研究, Tel: 13930455211, E-mail: tang0705@shou.com。