徐顺强, 刘文超, 李清林, 等. 复杂条件下三维高密度电阻率 CT 在工程勘察中的应用[J]. CT 理论与应用研究, 2011, 20(1): 39-46.
Xu SQ, Liu WC, Li QL, et al. Application of 3D high density resistivity tomography in engineering detection of complex condition[J]. CT Theory and Applications, 2011, 20(1): 39-46.

复杂条件下三维高密度电阻率 CT 在工程勘察中的应用

徐顺强[1]✉，刘文超[1]，李清林[1]，陈治国[2]，王石[3]，秦建增[1]，何永波[1]

1.中国地震局地球物理勘探中心，郑州 450002
2.山东省物化探勘查院，济南 250000
3.山东省地质矿产勘查开发局第五地质大队，山东 泰安 271021

摘要：为了得到更丰富的地质目标的电性特征以及较直观的地质结构，在有条件的情况下，开展三维高密度电阻率[CT 工作，与二维观测方法不同，三维方法对工区场地有更高的要求，环境条件等因素对三维系统影响较大。本文利用一些复杂条件下得到的三维结果，进行了分析，认为在实践中根据这些复杂条件有针对性的采取必要的措施和方法，可以得到更加理想的结果以解决工程地质等问题。

关键词：3D；电阻率 CT；工程勘察；电法勘探；城市活断层

文章编号：1004-4140（2011）01-0039-08　　**中图分类号：**P 631　　**文献标识码：**A

近年来，随着国家对基础工程建设的投入加大，各种重大的建设工程基础地质健康成为令人瞩目的问题。对基础地质健康状况进行诊断中无损检测是一种主要的方法，工程无损检测主要借鉴应用地球物理的方法与原理，以解决基础地质、工程病害等问题，主要的理论方法有弹性波理论、电磁场理论等。

高密度电阻率层析成像（简称电阻率 CT）以观测人工源稳定电流场为基础，基于不同介质具有不同的电学性质来研究地下地质情况的一种的物探方法。通过观测和研究人工源稳定电流场的分布特点和变化规律以达到探测目标体的目的。电阻率 CT 属于常规电阻率法范畴，基本原理与传统电阻率法完全一样，所不同的是电阻率 CT 在观测中设置了较高密度的测点，电极布设一次完成。由程控系统根据设置的参数自动进行测量，同时具有电测深法和电剖面法的特点。其结果利用计算机强大的计算能力，使用一些正反演软件进行计算。随着基础理论的不断完善、具体实践的不断增加，反演理论不断得到提高并产出了一些可靠的反演程序。与二维方法类似，由一个点源引起的电阻率为随机三维分布和三维电场的一个三维地球模型[1-3]。

三维电阻率测量的优点很多，首先表现在它可以得到丰富的地下电性信息，可以从不同的角度进行数据处理，通过对各个切片进行分析、挖去高（低）值等方法，从而达到对目标体的全面透视，与以往的电法测量相比，又更进了一步。以往的电法测量只能在一维、二维平面内进行测量与分析，只能看到目标体的一个剖面形状，而不能够看到目标体的全

收稿日期：2010-11-22。

部。三维电阻率测量的缺点主要在两个方面：① 数据量大，观测及数据处理花费时间长；② 反演方法与技术不太成熟[4-5]。

三维电阻率成像也可以采用固定断面扫描测量，最常用的电极装置依然为 α 排列（温纳装置 AMNB）、β 排列（偶极装置 ABMN）、γ 排列（微分装置 AMBN），也可以采用三极装置等。测量时，一次将既可做供电电极又可做测量电极的数百根乃至上千根电极按固定点距布设在测线上，通过多芯电缆与多极电路转换器连接，在主机控制下可实现电极排列方式、极距及测点的扫描测量[6]。

本文使用国内外不同设备及一些配套的反演软件，对三维方法进行了大量的实验并在实际工作中对不同场地、不同环境条件、不同反演参数设置等方面对比研究。实际结果表明对某些特定问题采取合适的方法，并注意避开某些干扰源，能够取得理想的结果解决实际问题，且三维方法可以直观地、大范围地解决工程地质问题。

1 3D 电阻率 CT 的影响因素及反演结果的非唯一性

影响电阻率特性的因素较多，比如：含水率、饱和度、孔隙率、矿物成分、介质颗粒的结构等，同一岩土材料在不同条件下的电阻率数值比其他物理量有更大的变化范围，这使得基于电阻率特性的电法探测手段比其他物理量的地球物理探测方法对被测材料有更强的识别能力，更具优越性。通常情况下工区地质和地形条件复杂，存在众多影响电阻率 CT 的因素，实际结果可能与理论模型有差异，往往导致视电阻率曲线发生严重的畸变，产生形似高、低阻体的假异常。复杂条件下要得到理想的结果，必须研究复杂条件下的电阻率异常规律和在勘察前做一些有针对性的工作，比如：充分收集工区地质及地球物理资料、调查各种可能对电阻率产生异常的宏观因素等。

反演结果的非唯一性是反演的关键问题。对于同一组测量结果，在不同的收敛准则下，一般会有多个反演结果。为了减少可能存在的歧义电阻率结果，通常针对所探测的地下结果特点建立一些反演算法假设，最大可能地获取探测目标的一些先验知识。比如，对水平和竖直方向阻尼因子的选取可以控制反演结果在水平和垂直方向的分辨力。在一些情况下探测目标有一个渐变的边界，这时采用光滑约束反演方法可以给出一个与实际较吻合的结果。另外一些情况下，探测剖面是一些比较离散的集合体附于背景介质中，在不同地质体之间材料性质在边界上跳跃变化，这时采用健壮性约束的反演方法比较合适[7-9]。

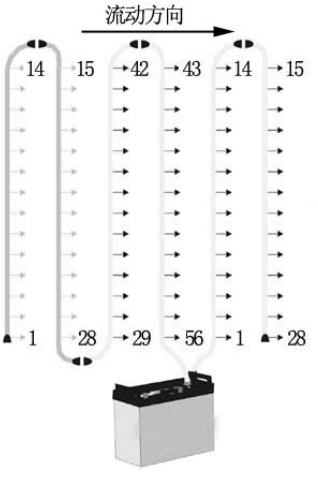


图 1 3D 电阻率 CT 电极布置图
Fig.1 CT electrode general arrangement of 3D

野外电测工作中出现的各种问题会影响到测量精度和探测效果，同时复杂条件下得到的观测数据对结果反演及解译也是一个挑战。其中覆盖层、低阻岩层、低阻矿体、地形、接地电阻、漏电等因素对电阻率 CT 结果的影响是我们在野外工作中经常碰到的问题，2D 方法在实际工作中许多相关专家分析了各种影响因素，并提出了相应的处理措施，但 3D 方法的影响因素及相应处理措施各类杂

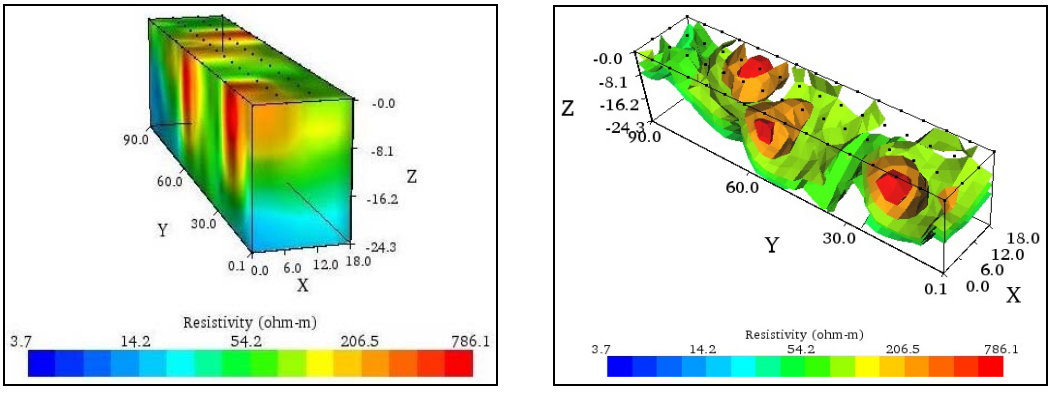
志鲜有介绍。

2　3D 电阻率 CT 应用实例

本文介绍的几个实例均采用温纳装置。

2.1　隐伏窑洞探测

河南中孚集团电解铝三期工程场地区属黄河中下游地区，位于黄河的二级阶地上，地貌单元属于黄土丘陵缓坡冲洪积侵蚀地貌，该场地内第四系广泛分布除缺失下更新统外，其他各统均有沉积。普遍不整合在上第三系及其以前的老地层之上，由于工厂扩建将一自然丘陵地带回填后建设，同时该地区存在人工窑洞而施工方在回填过程中没有充分考虑到该类工程场地问题，因此在打桩过程中发现该场不同规模的窑洞还处于空洞或不密实状态，需要进一步探测后有目标地回填处理。考虑到该场地回填厚度及要求较高的探测精度，采用 3D 高密度电阻率 CT 方法。



（a）反演结果　　（b）挖去较低阻区域后结果

图 2　A 区域探测资料解释结果

Fig.2　Survey data interpretation result of A area

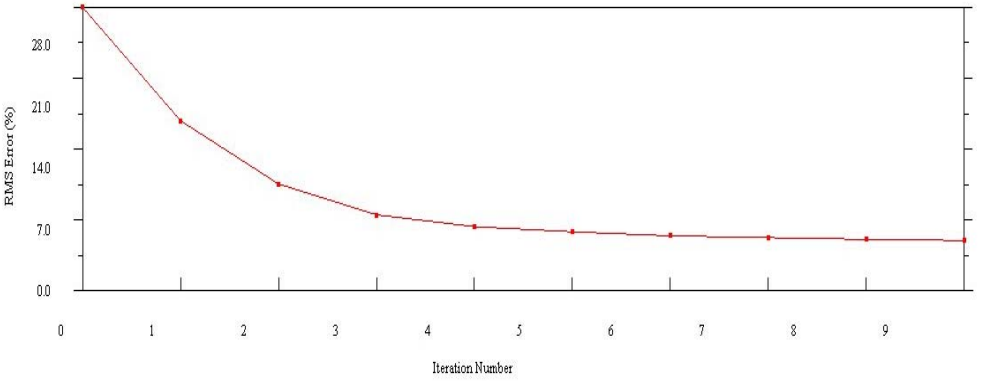
该场地条件较为复杂，最主要的干扰来源是已经打好下桩孔的各个空洞区域，而且密度较大，对现场布线和供电有一定影响，最终可能影响解释结果。为了尽可能消除存在的影响，采用增大供电电流、增加供电时间及进行多种观测系统对比、某些区域采用 2D 方法进行辅助等最终得到理想的观测结果。图 2 为场地 A 区域 3D 结果。A 区域测线东西走向布设，x 和 y 方向道间距均为 6 m，64 路电极，其中 x 方向 4 路，y 方向 16 路，剖面总长 90 m，宽 18 m，有效勘探面积 1 620 m^2。

数据预处理过程中对畸变点进行了必要的改正。反演采用 AGI EarthImager 3D 软件进行圆滑模拟反演，反演终止条件：最大重复误差 3%，最大交互误差 5%，最大均方误差 5%。正演采用有限差分方法，混合边界条件，矩阵方程使用共轭梯度方法，各项异性系数 1。

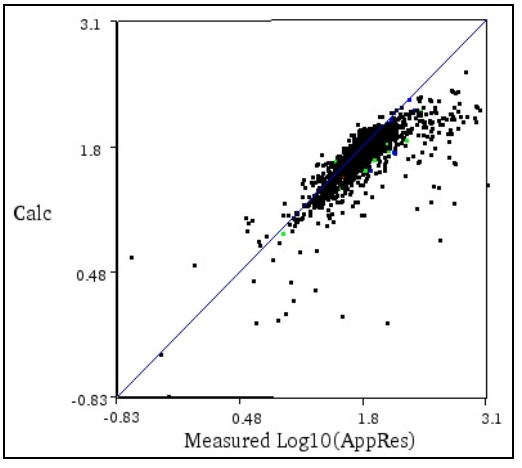
在 y 方向 10～12 m、x 方向 0～6 m 之间，y 方向 60～66 m、x 方向 2～10 m 之间及 y 方向 70～78 m、x 方向 6～12 m 之间，发现有高阻封闭圈，埋藏深度为 8～16 m 之间，推测这些高

阻封闭圈可能为窑洞。得到结果后立即组织对几个异常区域进行打钻开挖验证，结果证明其中两个区域为隐伏窑洞，另一处为垮塌窑洞，由于存在砖块影响导致出现不密实从而显示为高阻体。

在该工程场地布设多个 3D 电阻率 CT 测区，部分场地结合较成熟的 2D 电阻率 CT 方法共得到多处异常反映，经过实际的打孔、开挖等方式验证有效率达 90% 以上，使地质隐患经济高效地得到及时处理。



（a）收敛曲线



（b）数据错合交会图

图 3 数据质量评价

Fig.3 Data quality rating

图 3 给出的两个结果分别从不同角度对数据进行评价，根据评价结果可以指导对数据进行有针对性处理，其中收敛曲线显示了均方根（RMS）的百分比误差与迭代次数，迭代次数并非越多越好，而是要与 RMS 在一定区间内处于平缓。数据错合交会图是表现数据错合的另一个好方式，如果计算的视电阻率与相对应的测量视电阻率完全拟合，那么该数据点必定位于紫色对角线上。水平轴是测量视电阻率的对数，垂直轴是计算或模拟视电阻率的对数，由于负数的对数是非定义的，因此使用绝对值。以上两项工作是我们进行数据处理

的重要环节，能够对数据质量进行评价，可以有针对性剔除拟合不好的数据，设置反演方法及迭代次数等。

2.2　断层探测

近 10 年来，地球物理工作者对城市活断层的探测研究做了许多工作，利用各种有效手段进行活断层的形态、产状、上断点及高精度定位等，电阻率 CT 由于其成熟技术、简单快捷的工作方法以及相对较低的成本而成为有效手段之一。

潍坊市位于胶辽台隆、鲁西两个Ⅱ级构造单元接合部位的郯庐断裂带北段，地质构造比较复杂，城区分布的大范围第四系松散覆盖层掩盖了多条通过市区的断裂，使得这些断裂处于隐伏状态[11−12]。由于城区中分布着各种密集的地下管线、工业和民用高压线强电磁干扰，给利用多道直流高密度电阻率 CT 进行活断层勘察带来了困难。

3D 电阻率 CT 可以提供覆盖层介质和地下管线的基本赋存信息，为 2D 电阻率 CT、浅层地震勘探等进行活断层勘察的资料解释提供了基础信息，对于判断断层的垂向延伸和走向有重要意义。

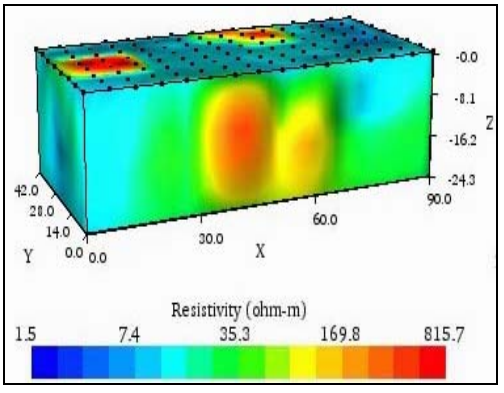
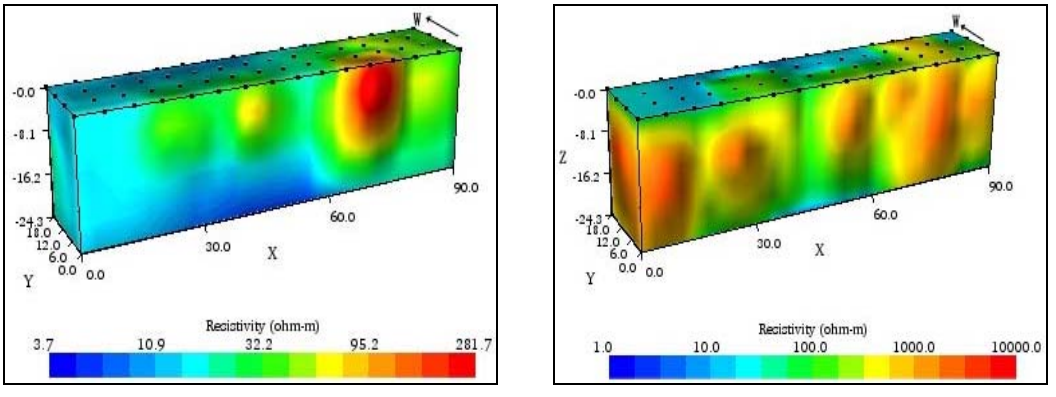


图 4　昌邑县于家山下 3D 电阻率 CT 结果

Fig.4　Resistivity CT result of 3D of Yujiashan Changyi county



（a）粘土　　（b）部分基岩露头

图 5　3D 高密度电阻率 CT 对不同覆盖层的反映

Fig.5　3D resistivity CT to different overburden layer reflection

图 4 为昌邑县于家山下 3D 电阻率 CT 图，x 和 y 方向道间距均为 6 m，128 路电极，其中 x 方向 8 路，y 方向 16 路。剖面总长 90 m，宽 42 m，有效勘探面积 2 780 m^2。从图中可以看出存在明显的高低阻间断面，地质调查结果显示西侧的高阻异常是砾砂和粗砂岩的反映；东侧的低阻异常为砂质粘土层的反映。二维结果显示该区域的岩性和其电性差异明显，有断层穿过。在上部出现的两个高阻异常，认为是工作区内两个地窖的扰动，反映出 3D 电阻率 CT 对一定直径地下管线或洞体的敏感性。

图 5 是在不同介质覆盖区域进行的 3D 勘探试验，两个测区 x 和 y 方向道间距均为 6 m，64 路电极，其中 x 方向 4 路，y 方向 16 路。剖面总长 90 m，宽 18 m，有效勘探面积 1 620 m^2。主要目的是查明一定深度内覆盖层赋存状况。一些接地条件较差的地方，为了降低接地电阻，采用浇注盐水、增加电极等办法，保证数据质量。结果显示 3D 电阻率 CT 能够得到直观、可靠的三维信息，可以合理解释浅部的地质信息。

3 观测系统和点距大小对 3D 结果的影响

综合多年的野外工作经验和参考文献资料，主要获得以下认识：

1）不同观测系统对 3D 结果的影响。结果认为，装置系统是影响分辨率和勘探精度的重要因素。与 2D 结果类似，对于 3D 电阻率 CT，偶极系统适应于浅部探测，而温纳装置适应于深部探测。对于接地条件差、供电干扰严重的环境（例如城市地区），采用温纳装置具有一定的优势。

2）不同观测点距对 3D 结果的影响。一般来讲，点距愈小，分辨率和勘探精度就愈高；反之，点距愈大，分辨率和勘探精度就愈低。但是对于断层勘探而言，规模小的断层（断距小、倾角陡），需要较小点距的观测系统；而规模大的断层（断距大、倾角缓），需要较大点距的观测系统，也就是说，断距大、倾角大的断层，采用小点距的观测系统并不一定有利于对资料的解释推断[13]。

4 结论

① 3D 高密度电阻率 CT 能够提供即时的反馈信息，能有效反应地质体的导电性，并提供有关地质构造的丰富信息。② 复杂条件下要得到理想的结果必须充分认识这些复杂条件及其影响结果，有针对性地进行实验和利用已知的方法进行克服。③ 资料解释过程中应该充分认识到多解性，反演过程中需根据已知结果对反演结果进行约束。④ 直流电法勘探无论采用什么装置，它都是一种体积效应，通常的二维剖面法测量方式，其结果主要反映剖面下方地电体的影响，一定距离以外旁侧影响的体积效应无法考虑，因此，高精度、高分辨率的勘探应该开展三维地电结构的数据采集和反演成像处理。三维电阻率反演相对二维要复杂得多，但它比二维电阻率反演得到地下更真实的电性结构图像。实践证明 3D 电阻率 CT 异常范围要比实际地质目标略大一些。⑤ 电阻率 CT 图像中显示的基岩电性界面埋深与第四纪覆盖厚度存在差距，这是由于基岩风化程度不同，风化的基岩中含水不同所致，在贫水地区，风化层中基岩阻值接近完好基岩阻值，基岩电性界面的埋深与钻孔提供的数据较接近，反之差距较大。因此，直接用基岩电性界面埋深来判别第四纪覆盖层厚度是不准确的。

参考文献

[1] 郭秀娟，张志毅，梁伟杰，等. 三维电阻率成像新方法及应用[J]. 吉林大学学报：地球科学版，2005，35(1)：119-122.
Guo XJ, Zhang ZY, Liang WJ, et al. The application of three-dimensional resistivity mapping in airborne EM surveys[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 35(1): 119-122.

[2] 胡博，登帅奇. 高密度按电法在复杂场地地基勘察中的应用[J]. 地质学刊，2008，32(2)：218-220.
Hu B, Deng SQ. Application of high density resistivity method in foundation detection of complex area[J]. Jiangsu Geology, 2008, 32(2): 218-220.

[3] 刘福臣，黄怀峰，马祥配，等. 电法勘探找水野外常见干扰问题分析与处理[J]. 水利水电科技进展，2008，28(5)：74-77.
Liu FC, Huang HF, Ma XP, et al. Problems of the electrical prospecting method of field water exploration and their solutions[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2008, 28(5): 74-77.

[4] 许新刚，岳建华，许杰，等. 三维直流电法勘探在地下人防工程勘察中的应用[J]. 物探与化探，2004，28(4)：187-188.
Xu XG, Yue JH, Xu J, et al. The application of 3D direct current survey to the prospecting of subsurface air-raid shelters[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(4): 187-188.

[5] 黄俊革，王家林，阮百尧，等. 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 JG, Wang JL, Ruan BY, et al. A study on FEM modeling of anomalies of 3D high-density E-SCAN resistivity survey[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1206-1214.

[6] 张致付，程志平，阮百尧，等. Zohdy 方法在三维电阻率测深数据反演中的应用[J]. 地质与勘探，2003，39(增刊)：114-119.
Zhang ZF, Cheng ZP, Ruan BY, et al. Zohdy method application to three-dimensional resistivity sounding data inversion[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(Supplement): 114-119。

[7] 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.

[8] 冯宁. 高密度电阻率法正、反演研究及其在工程勘查中的应用[D]. 长沙：中南大学，2006.
Feng N. Research of resistivity tomography image forward and inversion method and in engineering detect application[D]. Changsha: Central South University, 2006.

[9] 汤洪志，刘庆成，宫育龄，等. 三维电阻率测量方法试验研究[J]. 地质与勘探，2003，39(增刊)：126-129.
Tang HZ, Liu QC, Gong YL, et al. A discussion On 3D resistivity survey from theoretical and practical viewpoints[J]. Geology and Prospecting, 2003, 39(Supplement): 126-129.

[10] 王日升. 三维电阻率层析成像技术研究[D]. 重庆：重庆交通大学，2007.
Wang RS. Research on 3-D resistivity tomography[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2007.

[11] 李清林，秦建增，谢汝一，等. 高密度电阻率二维层析成像在郯庐断裂带山东段试验结果的初步分析[J]. 地震地质，2006，28(4)：589-596.
Li QL, Qin JZ, Xie RY, et al. A preliminary study on the experimental result of 2-D resistivity tomography survey along Tanlu fault zone in Weifang, Shangdong[J]. Seismology and Geology, 2006, 28(4): 589-596.

[12] 秦建增，杨磊，贺为民，等，电阻率成像技术研究与应用[J]. CT 理论与应用研究，2008，17(3)：50-56.
Qin JZ, Yang L, He WM, et al. Research and application of resistivity tomography technology[J]. CT Theory and Applications, 2008, 17(3): 50-56.
[13] 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.

Application of 3D High Density Resistivity Tomography in Engineering Detection of Complex Condition

XU Shun-qiang[1✉], LIU Wen-chao[1], LI Qing-lin[1],
CHENG Zhi-guo[2], WANG Shi[3], QIN Jian-zeng[1], HE Yong-bo[1]

1.The Geophysical Exploration Center of CEA, Zhengzhou 450002, China
2.Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Jinan 250000, China
3.The Fifth Institute of Geology and Mineral Exploration of Shandong province, Taian 271021, China

Abstract: In order to be more abundant geological target of electrical characteristics as well as more intuitive geological structure, in the case of conditions to carry out three-dimensional high-density electrical resistivity tomography to work with the two-dimensional observation method of different, three-dimensional approach to the work area venues require a higher, environmental conditions and other factors on the three-dimensional system, a greater impact. In this paper, obtained under the condition of some of the complex three-dimensional results of an analysis that in practice, in accordance with these complex conditions, targeted to take the necessary measures and methods, you can get more good results to solve the engineering geology and other issues.

Key words: 3D; resistivity CT; engineering detection; electrical exploration; city active fault

作者简介：徐顺强✉（1982－），男，中国地震局地球物理勘探中心助理工程师，主要从事工程地球物理勘探、矿产资源勘查等工作，Tel：15937148332，E-mail：sq_xu@126.com。