

高密度电法的三维数据场可视化

祁 民, 张宝林, 梁光河

(中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室, 北京 100029)

摘 要 高密度电法是重要物探方法之一, 由于它具有施工快捷、分辨率高、可靠性好、图像直观等优点, 已被广泛应用于寻找金属非金属矿、地下水及各类工程地质勘察等众多领域。目前, 该方法在数据资料处理方面还局限在二维图像。本文结合在山西阳泉复杂采空区利用高密度电法和高精度 GPS 测量联合勘察的工程实例, 基于 WinDisp 软件平台, 实现了高密度电法的三维数据场可视化, 构建了视电阻率参数下的三维地质体结构模型, 并且可以任意移动、旋转、切片、分层显示、实时显示真实地理坐标等。该模型客观、真实、形象地反映了电性异常的三维地质结构, 为高分辨率预测复杂采空区的空间分布特征提供了直观、可靠的资料。

关键词 可视化, 三维数据场, 高密度电法, 复杂采空区, 空间分布特征, 物探

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2006)03-0981-06

The visualization of three dimension data field sof high-density electrical technique

QI Min, ZHANG Bao-lin, LIANG Guang-he

(Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China)

Abstract High density electrical technique is one of the most important geophysical exploration methods, because it possesses the advantages of rapid operation, high resolution, high reliability, intuitionistic image, etc. Upon to now, high density electrical technique has been widely used in lots of exploration fields, such as metal and non-metal resources, underground water and various engineering geology. However, the technique is restricted two dimension imaging level in data processing aspect. Based on the WINDISP self-contained software package, the paper has realized the three dimension data field visualization with the example of detecting complicated cavity by using high density electricity technique and high-resolution GPS survey. It has constructed three dimension geological structure model which can be moved and rotated randomly. Moreover, it can be sliced and viewed in layers. It can also display the true geographical coordinates in real time, etc. The model has truly, objectively and visually reflected the three dimension geological structures of electricity abnormality, and it has provided the intuitionistic and reliable data for predicting the space distribution character of complicated cavities with high-resolution.

Keywords visualization, three dimension data field, high density electrical technique, complicated cavity, space distribution character, geophysical exploration

0 引 言

高密度电法是工程物探的关键技术之一^[1], 它以地下岩石的导电性差异为物质基础, 通过观测和研究人工建立的地下稳定电流场的分布规律反演地质结构。该方法在检测路基、寻找金属矿产、非金属矿产、煤田构造及地下水等方面得到了有效的应用,

在探测采空区和地面塌陷区方面也有一些应用^[2~4]。

目前, 高密度电法主要用于二维地质结构的剖面探测, 其显著特点是施工快捷、数据量大、分辨率高、可靠性好、图像直观。由于预测目标是复杂交错的各种类型的采空区, 在地下空间具有三维展布特征。所以, 仅仅依靠简单的二维剖面图像不能直观精

收稿日期 2005-09-10; 修回日期 2005-12-20.

基金项目 中国科学院“知识创新工程”试点单位基金和阳泉煤业集团联合资助。

作者简介 祁民, 女, 生于 1978 年, 博士研究生, 主要从事复杂地质体三维计算机成像研究工作。

确的反映预测目标的空间分布,必须建立以高密度电法参数为依据的地质体结构模型,实现该地球物理参数下的三维数据场可视化。

1 三维数据场可视化发展现状

众所周知,计算机用于科学计算已有五十多年的历史。但是,长期以来,由于计算机软硬件水平的限制,大量的数据不能及时处理,无法得到计算结果的直观、形象的整体概念。近年来,随着科学技术的迅猛发展,待处理的数据量越来越大,来自超级计算机、地球卫星、宇宙飞船、CT 扫描仪、核磁共振仪以及地震等地球物理勘探的数据与日俱增,使得科学计算数据的可视化和计算过程的交互干预和引导日益成为迫切需要解决的问题。否则,只能将这些数据收集起来束之高阁,不能得到有效利用。

可视化技术的出现有着深刻的历史背景,这就是社会的巨大需求和技术水平的进步。可视化技术由来已久,早在 20 世纪初期,人们已经将图表和统计等原始的可视化技术应用于科学数据分析当中。随着人类社会的飞速发展,人们在科学研究和生产实践中,越来越多地获得大量科学数据。计算机的诞生和普及应用,使得人类社会进入了一个信息时代,它给人类社会提供了全新的科学计算和数据获取手段,使人类社会进入了一个“数据的海洋”。人们进行科学研究的目的不仅仅是为了获取数据,而是要通过分析数据去探索自然规律。传统的纸、笔可视化技术和数据分析手段的低效性,已严重制约着科学技术的进步。随着计算机软、硬件性能的不提高和计算机图形学的蓬勃发展,促使人们将这一新技术应用于科学数据的可视化中。

“科学计算可视化”一词正式出现于 1987 年 2 月美国国家科学基金会(National Science Foundation, 简称 NSF)召开的一个专题研讨会上。研讨会后发表的正式报告给出了科学计算可视化的定义、覆盖的领域以及近期和长期研究的方向。这标志着“科学计算可视化”作为一个学科在国际范围内已经成熟^[5]。

科学计算可视化技术的核心是三维空间数据场的可视化。三维空间数据场与二维数据场不同,它是对三维空间中的采样,表示了一个三维空间内部的详细信息,这类数据场最典型的是医学 CT 采样数据,每个 CT 照片实际上是一个二维数据场,照片的灰度表示了某一片物体的密度。将这些相片按一定的顺序排列起来,就组成了一个三维数据场。此外,

用大规模计算机计算的航天飞机周围的密度分布也是一个三维数据场的例子。

目前,科学可视化的方法可分为两类,即表面绘制方法(Surface Rendering)和体绘制方法(Volume Rendering)^[6~8]。

表面绘制法基于传统的计算机图形学原理,通过在三维空间数据场中构造出实体的几何模型,如点、线(直线和曲线)和面(平面和曲面)等图形基元,然后借助传统的计算机图形学技术实现画面绘制。面绘制方法发展比较成熟,主要有边界表示法,构造实体几何(CSG)和空间分解三种表示模型,其中,最有代表性的方法如 Lorensen 的移动立方体(Marching Cubes)方法和 Boissonnat 的“从平面轮廓重建三维形体”。几何模型虽然是表示有形而且规则形体的理想模型,但它们对于描述像烟云等无形物体以及山脉、树木等复杂形体时则显得过于笨拙。同时,它们描述的只是物体的表面信息,而无法刻画形体内部复杂的细微结构。另外,面绘制需要构造中间曲面表示,必须要通过阈值或极值方法提取出中间曲面,即分割和重建的过程,由于目前的分割方法还不很完善,所以三维数据场中的细节信息常常被丢失,结果的保真性差。

相比之下,体绘制方法与表面绘制的主要区别就在于其不构造中间几何模型,而直接由三维数据场产生屏幕上的二维图像,从而回避了分割和重建,保留了体素中的许多细节信息。该方法最早于 1987 年由美国科学基金会(NSF)McCormick 等人提出,经过十几年的发展,衍生出两个方向,分别是 Westover 提出的以物空间为序的体绘制方法(Object-Space Methods)和 Levoy 提出的以像空间为序的体绘制方法(Image-Space Methods)。前者是将物体空间中每一个数据采样点的光亮度值变换到图像平面,也就是计算每一个数据采集点的光亮度值对屏幕上单个象素点的贡献,然后进行合成,得出最后的图像。后者则是从屏幕上的每一个象素点发出一条射线穿过三维数据场,用三次线性插值求得射线上各采样点的光亮度值,通过采样积累得到该象素点的光亮度值。

目前,通用的科学计算可视化软件系统中,比较著名的有美国的 Stardent 计算机公司开发的 AVS (Application Visualization System), SGI 公司开发的 IRIS Explorer 以及俄亥俄超级计算中心开发的 apE 系统。另外,还有 LandMark 公司的 EarthCube 和 OpenVision, GeoQuaset 公司的 GeoViz 和 CPS—

3, CSD 公司的 VoxelGeo 及 DGI 公司的 EarthVision, Photon System 公司的 CAEX, Tech Logic 公司的 IREX 等, 他们代表了当今地球物理三维可视化应用软件的先进水平. 这些可视化软件的开发与应用, 将地球物理测量所获得的各种结构复杂的数据转换成直观的、易于理解和控制的图形(图像)形式, 为工作人员进行解释、资源预测、评价提供了有力的依据. 我国的一些地球物理学家和计算机技术人员在此方面也进行了长期的探索. 如林振民和陈少强^[9]等人编写的 PANDACAEX 系统等^[10].

本文使用的 WinDisp 是澳大利亚科学计算与应用公司 (Scientific Computing and Applications) 基于 Windows 的独立软件平台. 该平台主要用于地球物理、地球化学等多种数据格式的统计、分析和图形化数据. 同时, 它具有强大的三维实体建模功能. 另外, 它还具有为其它不同软件之间的交流转换数据格式等多种功能.

2 高密度电法的数据特点

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, 其结果主要反映了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电性结构的资料采集和反演成像处理^[11]. 国内很多学者也在这方面做了很多工作^[12~15].

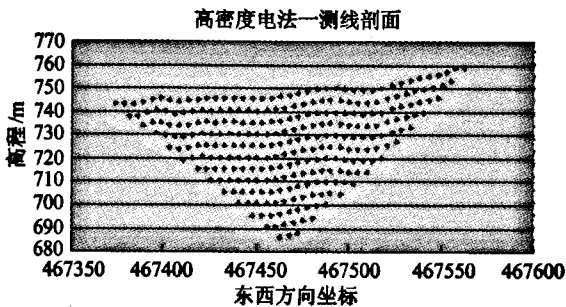


图 1 测线 1 剖面数据点位置示意图

Fig. 1 The sketch map of data position in profile of line 1

高密度电法的数据处理与医学 CT 采样原理类似, 测量的结果是一组电阻率值, 每个电阻率值对应着唯一的一个空间位置, 因此, 可以把电阻率值看作该点的属性, 作为第四维变量. 高密度电法测量的每一条测线完成后, 对应的测量范围是一个倒梯形剖面, 这些电阻率值就均匀的分布在剖面上, 可以用不

同的颜色映射不同范围的电阻率值. 如果把平行的或者近似平行的测量剖面按照实际的空间顺序排列起来, 也就形成了高密度电法测量范围内的三维数据场. 本次高密度测量的 1 号测线剖面如图 1 所示.

从高密度电法仪传到计算机的数据文件是每个记录为 1 个电阻率值的文本文件, 经过数据处理后, 可以生成具有 x 、 y 、 z 和电阻率值四个字段的数据库文件.

整理后的数据库文件格式如下:(单位:m)

南北方向(x)	东西方向(y)	深度(z)	电阻率值($\Omega \cdot m$)
4194102.681	467562.381	759.052	14.94868
4194102.991	467557.5395	758.677	65.2893
4194103.133	467552.942	757.379	19.40861
4194103.063	467548.285	756.024	35.07125
4194103.037	467543.3695	755.198	18.94266

.....

在阳泉复杂采空区的高密度电法测量数据原则是 $5 \times 5 \times 5 \text{ m}^3$. 在三维数据场中属于规则数据场中的均匀网格结构化数据, 假定数据场的函数值分布在体元的 8 个顶点中, 这类数据均匀地分布在三维网格点上, 即在 x 、 y 、 z 三个方向上, 网格点之间的距离均相等. 所谓“规则数据场”指的是由均匀网格或规则网格组成的结构化数据. 每个网格是结构化数据的一个元素, 称为体元 (Voxel) (唐泽圣, 1999).

3 阳泉复杂采空区应用实例

本文讨论的采空区, 主要是指个体施工人员开采山西境内奥陶系灰岩风化面附近的铁矿和铝土矿而形成的空洞, 它不同于国有矿山按照统一计划掘进、开采而形成的采空区, 具有规模不同、深度不一、形态复杂、采掘及回填或塌陷情况不清的特点, 属于复杂类型的采空区^[16].

野外测量中使用了重庆地质仪器厂生产的 DUK-2 型高密度电法仪测量系统, 该仪器由多路电极转换器 DUK-2 和多功能直流电法仪 DZD-6 共同组成, 观测参数为视电阻率 ρ_s , 野外测量时将剖面电极一次性布好, 设置好仪器的采集参数和装置参数, 则可自动进行断面视电阻率值的测量和存储记录工作; 然后将仪器内的数据回收至笔记本电脑^[17].

本次野外布线方式采用的是经典的温纳 AM-NB 装置(即对称四极装置方式, WN), 它的电极排列规律是: A, M, N, B(其中 A, B 是供电电极, M, N

是测量电极), $AM=MN=NB$ 为一个电极间距, 随着间隔系数 n 由 $n(\text{MIN})$ 逐渐增大到 $n(\text{MAX})$, 四个电极之间的间距也均匀拉开. 该装置适用于固定断面扫描测量, 其特点是测量断面为倒梯形^[10].

本文在进行高密度电法测量的同时, 利用先进的 RTK 技术. 由于常规的 GPS 测量方法, 如静态、快速静态、动态测量都需要事后进行解算才能获得厘米级的精度, 而 RTK 是能够在野外实时得到厘米级定位精度的测量方法, 它采用了载波相位动态实时差分 (Real-time kinematic) 方法, 它能够实时地提供测站点在指定坐标系中的三维定位结果, 并达到厘米级精度. 在 RTK 作业模式下, 基准站通过数据链将其观测值和测站坐标信息一起传送给流动站. 流动站不仅通过数据链接来自基准站的数据, 还要采集 GPS 观测数据, 并在系统内组成差分观测值进行实时处理, 同时给出厘米级定位结果, 历时不到一秒钟. 使用仪器是法国泰雷兹公司生产的 6501SK 型测量设备, 精确测量了每一个电极的坐标, 点位误差小于 2 厘米.

本次工作区布置了 21 条测线, 每条测线 43 个电极, 电极距和线间距以 5 米为原则, 如图 2. 由于客观原因, 测线无法完全平行, 有的测线或测点偏离设计位置, 如图 1 所示, 在平面位置共计完成了 903 个测点, 每条测线在高程方向分为 13 层, 参与计算的数据点共计 5733 个.

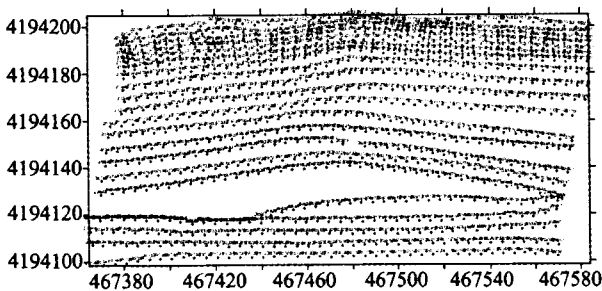


图 2 测线和电极点位分布示意图

Fig. 2 Sketch map of line and electrode position

为生成规则的格网数据, 本次采用了最小曲率法对原始数据进行插值. 最小曲率法广泛用于地球科学, 用最小曲率法生成的插值面类似于一个通过各个数据值的, 具有最小弯曲量的长条形薄弹性片. 该方法试图在尽可能严格地尊重数据的同时, 生成尽可能圆滑的曲面. 使用最小曲率法时, 要涉及到两个参数 (最大残差参数和最大循环次数参数), 并

以此来控制最小曲率的收敛标准.

数据处理的三维地质模型如图 3 所示. 其中, 地表模型从红色到蓝色表示地势从高到低, 地下模型从红色到蓝色表示视电阻率值从高到低. 该三维模型可以任意旋转, 还可以自定义旋转方向, 让模型自动旋转. 可以任意切割, 包括左右、前后、上下方向的均匀切割, 切割效果截图见图 4. 标注、网格、框架、地形、3D 模型等都是按图层设计和管理. 可以实时显示真实地理坐标.

从 3D 模型来看, 地表的高低起伏走势与实际地形完全吻合. 地下是视电阻率反映的地质结构模型, 从地质勘察结果来看, 蓝色低阻部位对应于第四纪黄土, 红色高阻部位对应于采空区或致密灰岩, 见图 3. 钻探验证结果表明, 第一、区内尚未发现较大规模的断层; 第二、测区地下采空区数量非常多, 但其深度、方向、规模均无明显规律可循. 第三、深部的采空区 (塌落坑) 或溶洞规模较大, 但基本未充水. 浅部采空区规模较小, 以目前的 3~5 米极距尚无法准确圈定.

4 结论与讨论

(1) 本文利用分布比较规则的高密度电法剖面测量数据成功建立了电阻率参数下的三维地质结构体, 为分析目标地质体结构提供了最直观可靠的资料.

(2) 构建的高密度电法三维可视化模型的实质是空间散点数据的视电阻率数值色标化. 即每一个数据值区间对应着一种颜色, 用不同的颜色来区分视电阻率的高低, 以此圈定电性异常的地质体.

(3) 建立的地质体结构模型是在某一物理参数下的模型, 确定模型中的地质结构不仅需要利用各种已知的地质信息, 还需要钻孔验证.

(4) 为建立测区地下高精度的三维电性异常结构模型, 在可能地区情况下, 工作区范围内的电极应该达到一定密度, 而且电极均匀分布效果为最佳. 电极密度越大, 三维地质体结构模型分辨率越高.

(5) 本次虽然初步实现了三维可视化模型的立体显示, 但离物探界追求的立体分析解释, 几何体完全受控的三维地质建模, 地质和地球物理过程的仿真模拟等差距还比较大^[18], 需要继续深入研究.

5 展望

本文把 WINDISP 平台成功地应用于高密度电法, 随着算法的进一步优化以及仪器水平的提高, 未

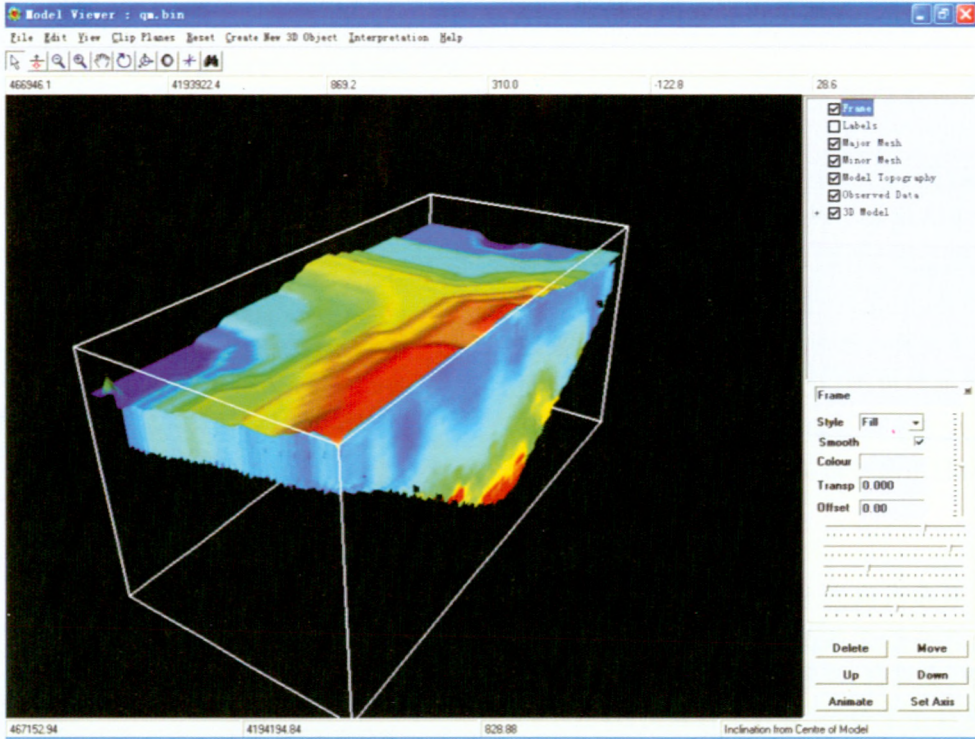


图 3 电阻率参数下的三维地质结构模型

Fig. 3 Three dimension geology structure model by the parameter of electricity resistance

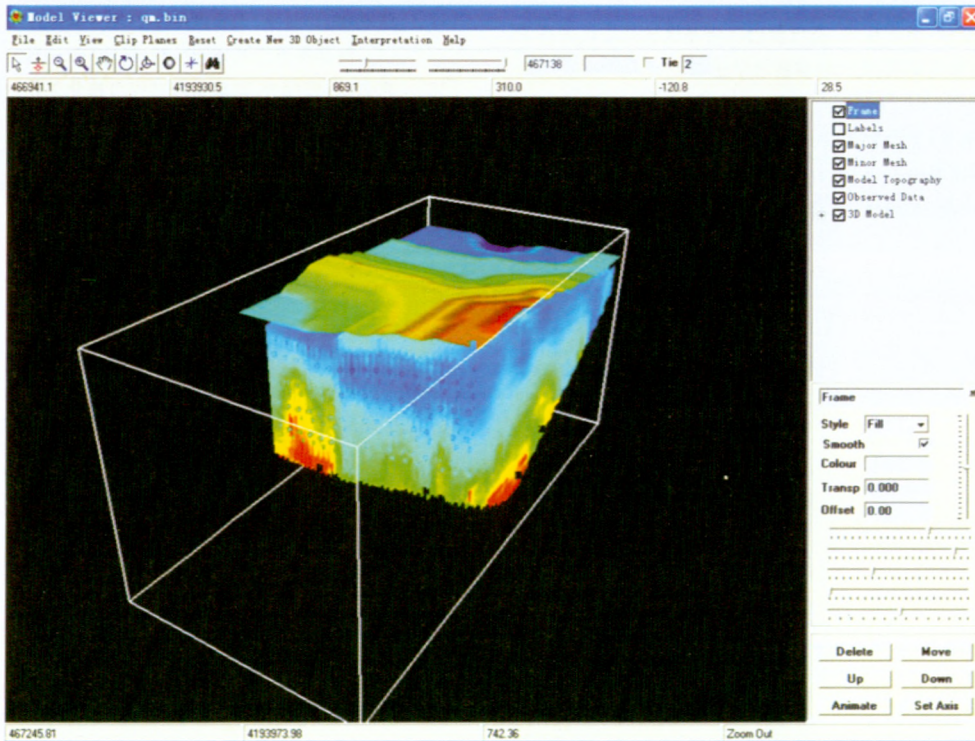


图 4 沿自东向西方向切割后的电阻率参数下的三维地质结构模型

Fig. 4 Three dimension geology structure model by the parameter of electricity resistance after cutting along the east-west direction

来可尝试将其应用于地震勘探、大地电磁测深等其它地球物理勘探方法,为地球物理数据场搭建三维可视化平台。

地球物理是将物理学的理论、方法用来研究地球(刘光鼎,2003)^[19]。从而与物理学的分支学科相对应有重力、磁力、电法、地震、放射性和地热等多种方法。每一种地球物理方法都以岩石的一种物理性质(如:密度、磁化率、电阻率、速度、波阻抗等)为参数来认识地质体。但是这种认识只是地质体的一个侧面,因为地质体具有多种物理性质^[19]。所以,要建立真实的三维地质模型,仅凭一种地球物理性质是远远不够的。如何综合分析同一地质体的各种物理参数以及如何利用测井数据约束模型都是需要认真研究的问题。

致谢 特别感谢澳大利亚专家 Peter Jones 和 John Coggon 先生给予的热心帮助。参加野外测量的还有蔡新平、臧有恒、李振坤等。室内研究过程中,王杰副研究员给予了帮助。野外工作期间,得到了阳煤集团水泥项目筹备处、地质处有关领导和同志的大力支持,在此一并表示感谢。

参 考 文 献 (References):

- [1] 张建强,张全录,汤跃超等. 高压输电线塔基煤矿采空区的高密度电阻率法探查研究[J]. 地球物理学进展,2004,19(3): 684~689.
- [2] 王超凡,赵永贵,靳洪晓等. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用[J]. 地球物理学报,1998,41(增刊),367~376.
- [3] 吕惠进,刘少华,刘伯根. 高密度电阻率法在地面塌陷调查中的应用[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):381~386.
- [4] 葛双成,江影,颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患中的应用[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):263~272.
- [5] 唐泽圣等. 三维数据场可视化[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [6] 管伟光. 体视化技术及其应用[M]. 北京:电子工业出版社,1998.
- [7] Boissonant J-D. Shape reconstruction from planar cross sections. CVGIP,1988,44:120~126.
- [8] Levoy Marc. Display of surface from volume data. IEEE CG&A. 1988,8(3):148~156.
- [9] 林振民,陈少强. 三维可视化技术在固体矿产中的应用[J]. 物探化探计算技术. 1994,16(4):338~344.
- [10] 郁延红,周云轩,刘万崧. 地球物理位场可视化建模初步探讨[J]. 长春科技大学学报,2000,30(2):185~189.
- [11] 吴小平. 非平坦地形条件下电阻率三维反演[J]. 地球物理学报,2005,48(4):932~936.
- [12] 王友善,魏传根. 电磁测深方法研究[J]. 地球物理学报,2006,49(1):256~263.
- [13] 吴小平,汪彤彤. 利用共轭梯度算法的电阻率三维有限元正演[J]. 地球物理学报,2003,46(3):428~432.
- [14] 黄俊革,鲍光耀,阮百尧. 坑道直流电阻率测深异常研究[J]. 地球物理学报,2005,48(1):222~228.
- [15] 底青云,王妙月. 积分法三维电阻率成像[J]. 地球物理学报,2001,21(6):843~852.
- [16] 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[J]. 地球物理学进展,2006,21(1):256~262.
- [17] 张进国,徐新学. 高密度电法在地下煤矿采空区探测中的应用[J]. 西部探矿工程,2004,99:65~66.
- [18] 张剑秋,张福炎. 地球物理勘探可视化工作的挑战与机遇[J]. 石油地球物理勘探,1997,32(6):884~888.
- [19] 刘光鼎,祝靛宜. 近期油气勘探地球物理的一些新进展[J]. 地球物理学进展,2003,18(3):363~367.