

隐伏断裂勘察中的综合地球物理方法研究

陈长敬¹, 黄理善², 罗士新¹

(1. 武汉地质矿产研究所, 武汉 430074;

2. 桂林矿产地质研究院, 桂林 541004)

摘要: 为了给城市工程建设规划提供基础地质资料, 需查明区内断裂的准确位置、产状以及覆盖层厚度。利用反射波法地震勘探、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法进行勘察工作。虽然区内人文干扰和电磁干扰严重, 但是野外施工时采用了多种手段以保证观测数据的可信度, 三种物探方法的数据采用不同的方式进行处理, 分析反演结果并结合已知地质资料, 给出了区内断裂的准确位置等信息。进行隐伏断裂勘察时不能只采用单一的物探方法, 必须采用综合物探的方法, 才能准确地反映出隐伏断裂的位置、产状等信息。

关键词: 综合地球物理方法; 反射波法; 瞬变电磁法; 可控源音频大地电磁法

中图分类号: P631.12

文献标识码: A

收稿日期: 2011—03—30

Integrated Geophysical Methods in Buried Fault Exploration

Chen Changjing¹, Huang Lishan², Luo Shixin¹

(1. Wuhan Institute of Geology and Minerals Resources, Wuhan 430074, China;

2. Guilin Institute of Geology and Minerals Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to provide basic geological information for a urban construction plan, it is necessary to identify the precise location of the faults, the occurrence and the thickness. In this paper, we used seismic reflection method, transient electromagnetic method and controlled source audio - frequency magnetotelluric method to do the exploring work. As there was strong electromagnetic interference in the exploring area, we took many measures to ensure the data obtained credible. Therefore, the data from three kinds of geophysical methods were processed by different methods. The inversion result was analyzed and the accurate positions of the faults in the area were located with the help of the known geological data. From this, we can see that one single geophysical method can not be used when doing buried fault exploration and the integrated geophysical methods should be adopted. Only in this way can the location of buried faults, occurrence and other information be accurate.

Key words: integrated geophysical methods; seismic reflection; transient electromagnetic method; controlled source audio - frequency magnetotelluric method

基金项目: 中国地质调查局珠三角地区 NW 向活动断裂调查与评价项目(编号: 1212011014006)资助。

作者简介: 陈长敬(1982—), 男, 安徽界首人, 实习研究员, 硕士, 主要从事地球物理勘察与研究。E-mail: cug0204@163.com

罗士新(1964—), 男, 湖北荆州人, 高级工程师, 主要从事地球物理勘察与研究。E-mail: 563675393@qq.com

1 引言

隐伏断层是在地表无显示或出露不明显,且潜伏在地表以下的断层。这种断层可以是在其形成以后又为新沉积物所覆盖,或者是断层被后来的侵位岩体占据,也可以是形成于地下深处没有切穿地表的断层。

断裂与地震和地质灾害紧密相关,对城市和工程安全直接造成威胁。现代工程技术还无法抗拒地震带来的破坏,我们只能在城市建设的规划期先将断裂的位置、产状、活动性等摸清,才能将地震带来的破坏降至最低^[1~4]。

现在高精度重磁探测、放射性气体探测、地震勘探和电法勘探等多种方法可供选择,但在有些工作区,由于地形地质条件复杂、第四系覆盖层厚度大,加之人工改造及植被的覆盖,隐伏断层的存在与否及其性质的调查变得尤为困难。而过去由于受仪器勘探深度、分辨率的限制以及资料处理技术水平较低加上钻探成本高等因素的影响,这个问题一直未能很好地解决,随着技术的发展,目前浅层地震法及电法在追溯和探查隐伏断层方面具有分辨率高、定位准确、成本低等优点,已被广泛采用,并日益显示出它的优越性。

根据前人的研究工作,珠三角地区发育两条NW向断裂及它们的次生断裂,由于工作程度不够,断裂的位置、产状、活动性等信息不清楚,为了更好地进行区域建设规划,在区域内某一条剖面开展了地球物理勘查工作,首先要求在区内查明断裂的具体位置和产状、覆盖层厚度,为区域建设规划提供基础地质资料,其次开展综合地球物理方法的研究工作,为今后进行隐伏断裂的地球物理勘查工作提供方法选择。

2 测区地质地球物理概况

珠江三角洲地区地层隶属华南地层大区中的东南地层区,主体为东江地层分区,地层出露齐全,从震旦系至第四系均有出露,以泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、第四系为主。奥陶系及志留系呈条带状零星出露,仅见于经济区西部的肇庆一带;以中酸性喷出岩为主的侏罗系大面积展布于樟木头至惠东龙船窝一带;第四系(主要由海陆交互相堆积物构成)广泛分布于珠江三角洲平原。

因隐伏断层潜伏在地表以下,因此单凭野外的地质调查难以发现线索。但是,由于断层切断了岩层的水平连续性,上下盘的错动和断层滑动面的破碎导致岩层中地震波的传播特征和电性特征发生明显变化,当这种地震波的传播异常和电性异常突出到一定程度就能够通过地面的地球物理探测反映出来。一般而言,相对于反射波法浅层地震勘探来说,由于断层的存在,使所取得的地震反射波同相轴存在错动,相对于围岩介质的电阻率,断层可表现为低阻断层或高阻断层,取决于断层的性质、破碎带宽度、胶结程度、含水特征、岩脉侵入等特性及围岩电阻率特性。根据断层的发育情况及其与两侧岩层的电性差异,断层的电性特征主要有以下几种表现:当断层破碎带宽、断层电阻率与两侧岩层电阻率差异明显时,断层表现为高阻或低阻板状体;当断层带不发育或断层电阻率与两侧岩层电阻率差异不明显时,如果断层两侧岩性不同,断层将表现为岩性分界面。根据以上特征,我们在该条剖面上采用了三种地球物理方法,分别是浅层地震反射波法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁法。

3 方法原理

3.1 反射波法地震勘探原理

浅层地震反射波法是利用地震波在弹性介质传播的理论,通过人工在地面激发地震波向地下深处传播,遇弹性不同的介质分界面,就会产生波的反射,用检波器接收其反射波信号,通过浅层地震仪接收返回的反射地震波。研究不同反射界面反射回来的反射波场,利用同相轴的连续性和几何形态,可以进行岩层分界面的解释^[5~8]。

3.2 瞬变电磁法方法原理

瞬变电磁测量是利用不接地线圈(或称回线)向地下发射一次瞬变磁场,通常是在发射线圈上供一个电流方波,可在地下产生稳定的磁场分布,当电流方波关断后,地球介质将产生涡流,其大小取决于地球介质的导电程度。该涡流不能立即消失,它将有一个过渡的过程,过渡过程产生的磁场向地表传播,地表接收线圈把磁场的变化转化为感应电压的变化^[9~11]。

瞬变电磁法工作过程可以划分为发射、电磁感应和接收三部分。当发射回线中的稳定电流突然切断后,根据电磁感应理论,发射回线中电流突

然变化必将在其周围产生磁场,该磁场称为一次磁场。一次磁场在周围传播过程中,如遇到地下良导电的地质体,将在其内部激发产生感应电流,又称涡流或二次电流。由于二次电流随时间变化,因而在其周围又产生新的磁场,称二次磁场。由于良导电矿体内感应电流的热损耗,二次磁场大致按指数规律随时间衰减。二次磁场主要来源于良导体内的感应电流,因此它包含着与岩层有关的地质信息。二次磁场通过接收回线来观测,并对所观测的数据进行分析和处理,进而解释地下岩层的分布及相关物理参数。

3.3 可控源音频大地电磁测深(CSAMT)方法原理

可控源音频大地电磁法^[12~14]简称CSAMT法。20世纪70年代Goldstein和Strangway引入该方法,是20世纪80年代末开始兴起的一种地球物理新技术,我国从20世纪80年代开始研究,取得了一些重要成果,其大勘探深度和高分辨率使它在寻找勘查油气、矿产资源探测、地下水以及工程地质研究中应用颇多^[15~21]。

该法基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出了电场(E)、磁场(H)与电阻率(ρ_s)的关系式:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (1)$$

式中 f 代表频率。在地面上测定的电场与磁场之比具有阻抗概念,可获得地电阻率,称之为卡尼亚电阻率。

根据电磁波的趋肤效应理论,导出趋肤深度公式:

$$H \approx 356 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (2)$$

式中 H 为探测深度, ρ 为地表电阻率, f 为频率。

从(2)式可见,当地表电阻率固定时,电磁波的传播深度(或探测深度)与频率成反比。高频时,探测深度浅,低频时,探测深度深。人们可以通过改变发射频率来改变探测深度,从而达到变频测深的目的。

4 野外工作方法

根据已有地质资料及前人工作研究成果,本次野外工作中布置了一条600m长的测线。

此次浅层地震勘探采用的是骄鹏公司的SE2404-NT地震勘探系统。野外数据采集时,需对各种干扰予以识别和压制,获得分辨率和信

噪比合格的记录是浅层地震反射波法成功的关键。数据采集质量将直接关系到勘探成果的精度,而数据采集又取决于野外观测系统和仪器参数的准确选择。经过工区典型性试验,对于干扰波(面波、声波及其他不规则波)进行了频率和速度分析后,设计工作参数:震源为人工锤击震源,大锤重量10kg,采用6次覆盖系统,偏移距15m,道间距3m,24道接收,采样间隔为0.2ms。

瞬变电磁法(TEM)所采用的仪器为澳大利亚Terra TEM系统。采用中心回线装置进行数据采集,发射线框为200m×200m,接收线圈的等效面积为2444m²,点距20m,供电电流15~25A。

野外工作时,供电线圈尽可能在同一水平方向上布成正方形,接收探头置于供电回线的几何中心,靠水准器调平,工作现场远离金属物体及强电磁干扰,在相同装置上的同一个测点上的观测值,多采用6~9次叠加的办法来压制干扰。

此次可控源音频大地电磁测深(CSAMT)采用仪器为骄鹏公司的E60EM系统,频率选择10000~0.325Hz,共计59个频点,发射机采用30kW发电机,最大发射电流30A,点距为50m。

CSAMT法在开展大面积工作之前,进行方法试验和参数选择是必要的,尤其是对发射和接收的频率以及对发射与接收距离 R 进行选择。在本区考虑到探测目标较深,尽量利用中低频段,所以选择的频率为10000~0.325Hz,此频段可实现从地表探测到地下2000m的深度。CSAMT法的探测深度既受到频率的控制,又受到收发距 R 的限制,这里选取 R 为5000m, AB 长为1000m,从地表到地下1000m的深度范围内保证探测结果可靠。

为了接收到可靠的信号,在每次观测前,都要测量接地电阻,保证接地电阻小于1000 Ω ,以获得较强的电场信号和较高的信噪比。对于磁探头的埋设,克服各种困难,使其与供电电极 AB 方向垂直,并保证其水平放置;同时,将其埋实,以避免环境干扰。

5 资料处理与解释

5.1 浅层地震资料处理与解释

进行野外数据采集后,需要对地震数据进行处理。地震资料的数据处理是提高浅层反射资料信噪比和分辨率的重要措施,同时也是浅层反射

波法工作的重要一环。其中包括消除由于扩散或高频传输诱发的低频波组分、清除个别道的飘零现象、进行必要的频谱分析以及滤波处理等,以突出有效波,压制干扰波。在资料处理过程中,静校正与速度分析对处理结果影响较大。为了通过CDP叠加提高信噪比,反射波相位不允许有大的偏差;尤其是静校正,因原来相位差较大,更需准确地确定校正量,以提高分析精度。通过选定一个海拔高程作为基准线(面),利用野外实测得到的各点高程、低速带厚度、速度等资料,将所有的炮点和检波点都校正到此线(面)上,用基岩速度替代低速带速度,从而去掉表层因素的影响。速度分析工作是资料处理重要的一环,地震波速度的纵向与横向的分布以及它的准确性,决定了浅层地震勘探的质量和精度。进行常速扫描是选取叠加速度的一种比较直观的方法,依据动校正结果结合所掌握的地质资料选取叠加速度,并以此进行动校和叠加处理。本次数据处理流程如图1。

经过上述流程进行数据处理以后,可以得到地震反射剖面图(图2)。横轴为CDP点,纵轴为反射旅行时。从地震反射剖面图上来看,在CDP点为2043与2053之间,反射旅行时在60~120ms之间,地震反射波同相轴存在明显的错动。由地震反射波法勘探原理可以推断,在该区间的地质层可能存在错动,即该处可能存在断裂。

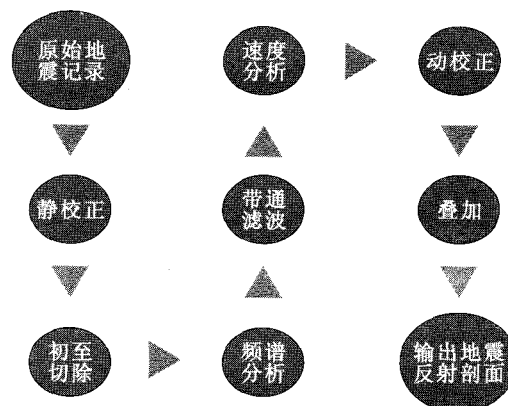


图1 地震资料数据处理流程

Fig. 1 Seismic data processing

5.2 瞬变电磁(TEM)数据处理与解释

数据处理主要是把实际观测的瞬变响应数据转化成视电阻率参数,再反演出与其对应的深度的过程。本次瞬变电磁数据采用美国IX1Dv3软件进行数据处理,其数据反演采用最小二乘法进行反演解释。经过处理后,得到综合剖面解释图(图3)。从图上可以看出,在300~600m区间,电性层分布均匀,在0~300m区间,电性层分布呈高低起伏变化,推测是由于断裂产生的破碎带引起的电性层分布变化,推测此处存在断裂F1和断裂F2。

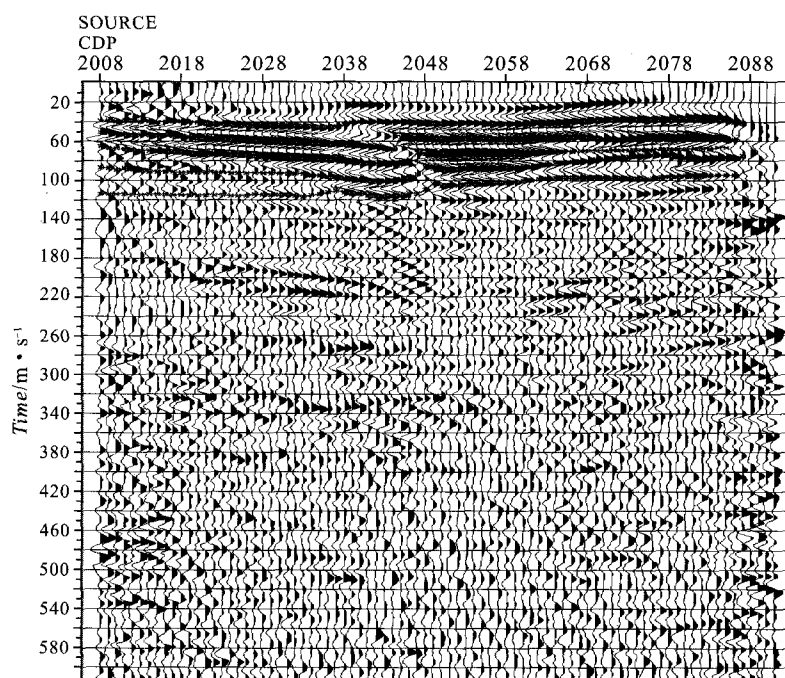


图2 地震反射剖面示意

Fig. 2 Schematic diagram of seismic reflection profile

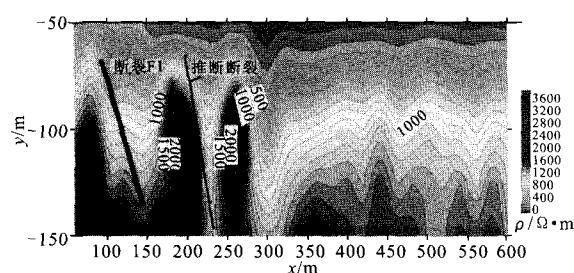


图3 TEM电阻率反演剖面

Fig. 3 TEM resistivity inversion profile

5.3 CSAMT 数据处理与解释

在获得了可信的原始数据后,首先对资料进行预处理。本次工作虽然采用了种种避开干扰的方法,但还是受到比较严重的电磁干扰,数据出现飞点,因此数据预处理主要是去噪和静态校正。对于去噪,试验了五点三次、五点二次平滑以及三点、五点汉宁窗滤波等方法。经过对比,发现采用五点二次平滑在忠于原始曲线趋势的情况下能最大限度的平滑飞点,取得较好的效果。静态效应^[22~24]是困扰 CSAMT 处理的几大难题之一,严重影响着处理解释的结果。为此,需要对 CSAMT 资料进行静态校正来提高处理解释质量。本次数据处理采用空间滤波法做静态校正。

经过上述处理步骤以后,还需要对 CSAMT 数据进行反演,近年来国内外一些地球物理学家开始寻求不考虑近场校正的全场资料的数值模拟和反演方法,并开发成功基于遗传算法^[25~29]的 CSAMT 全资料反演程序。本次将基于遗传算法的 CSAMT 全场资料反演程序应用到数据处理。

经过上述方法进行数据处理以后,可得到如图所示综合剖面解释(图4)。从 CSAMT 反演剖

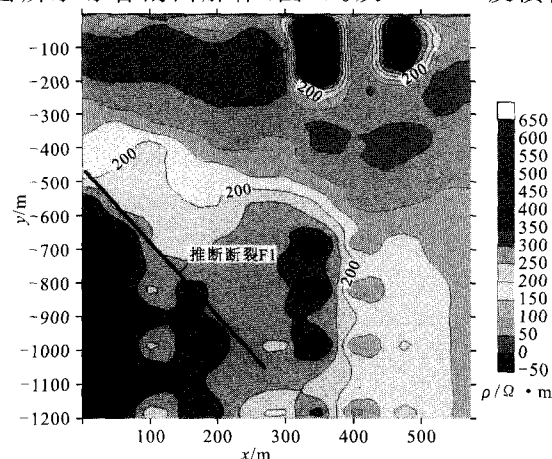


图4 CSAMT电阻率反演剖面

Fig. 4 The resistivity profile from CSAMT inversion

面的电性特征来看,该测线的浅部为低阻层,从左侧到右侧低阻层逐渐加厚,厚度由 200m 逐渐变为 400m,在 300~500m 之间浅部出现 2 个局部的高阻,该段穿过马路,判定为来往车辆所形成的高频干扰造成的。从剖面来看,在深度 500m 以下,0~300m 的范围内电性明显变化,推断为 F1 断裂。

6 结 语

对同一条地质剖面,采取了三种地球物理方法进行勘察研究,总的说来,三种方法各有自己的优缺点。

1) 由于环境条件限制,浅层地震勘探采用人工锤击的方式作为震源,激发能量较小,勘探深度较浅,所反映的深度仅在 0~50m 的范围。如果能采取炸药作为震源,所取得的勘探深度能进一步加大。瞬变电磁法与可控源音频大地电磁测深法勘探深度较大,其中瞬变电磁的勘探深度可以达到 200m,可控源音频大地电磁测深法的有效勘探深度可以达到 1000m。由于仪器及外界环境的影响因素,瞬变电磁法所取得的数据在 50~150m 的范围内可认为有效,可控源音频大地电磁测深法所取得的数据在 200~1000m 的范围内可认为有效。

2) 浅层地震法所取得的地震反射波剖面能直观地反映出地下岩层的分布规律,地震反射剖面同相轴可以直观地反映地层的变动情况,瞬变电磁法和可控源音频大地电磁测深法所反映的为地下岩层的电性分布规律,根据电性分布特征可以推断出地下地层的分布特征。

3) 三种物探方法所反映的深度范围不同,但是在同一位置均反映有断层存在,该处断层产状随深度变化而有所变化。经过本次物探勘察工作,准确定位了区内断裂的位置、产状及其覆盖层厚度。经过后期钻探验证,在该剖面 140m 的位置处钻探出断裂破碎带。

4) 由于地球物理反演的多解性,采用单一的物探方法并不能准确地判断断裂的位置、产状等信息,采用浅层地震和电法相结合的方法可以准确地确定隐伏断裂的位置和产状信息。

参考文献:

- [1] 邓起东,徐锡伟,张先康,等. 城市活动断裂探测的方

- 法和技术的[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 93~104.
- [2] 易兵, 曾昭发, 李恩泽, 等. 电法探测城市活断层的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35(sup): 115~118.
- [3] 徐明才, 高景华, 刘建勋, 等. 应用于城市活断层调查的地震方法技术[J]. 中国地震, 2005, 21(1): 17~23.
- [4] 吴子泉, 刘元生, 刘保金, 等. 地球物理方法在城市地震活动断层精确定位中的应用[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 528~533.
- [5] 王振东. 浅层地震勘探应用技术[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [6] 高颖. 浅层地震反射波勘探法[J]. 大庆石油地质与开发, 1986, 39(1): 1~12.
- [7] 姚姚. 地震波场与地震勘探[M]. 北京: 地质出版社, 2006. 75~90.
- [8] 李录明, 李正文. 地震勘探原理方法和解释[M]. 北京: 地质出版社, 2007. 68~97.
- [9] 方文藻, 李予国, 李貅. 瞬变电磁测深原理[M]. 西安: 长安大学地测学院, 2002.
- [10] 李貅. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [11] 蒋邦远. 实用近区场源瞬变电磁法勘察[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [12] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
- [13] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [14] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [15] 吴璐萍, 石昆法. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712~717.
- [16] 底青云, 王妙月, 石昆法, 等. 高分辨率 V6 系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 1~5.
- [17] 底青云, 石昆法, 王妙月, 等. CSAMT 法和高密度电法探测地下水资源[J]. 地球物理学进展, 2001, 16(3): 53~54.
- [18] 谭儒蛟, 胡瑞林, 徐文杰, 等. 金沙江龙蟠变形体隐伏构造 CSAMT 探测与解译[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(1): 283~288.
- [19] 白登海, 王立凤, 孙洁, 等. 城市活断层探测中电磁噪音和环境干扰对浅层电磁方法的影响[J]. 地震地质, 2002, 24(4): 549~556.
- [20] Yutaka Sasaki, Yoshihiro Yoneda. Resistivity imaging of controlled source audio frequency magnetotelluric data[J]. Geophysics, 1992, 57(7): 952~955.
- [21] Wannamaker P. Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area[J]. Geophysics, 1997, 62(2): 466~476.
- [22] 王家映. 我国大地电磁测深研究新进展[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 206~213.
- [23] 罗延钟, 何展翔. 可控源音频大地电磁法的静态效应校正[J]. 物探与化探, 1991, 15(3): 3~5.
- [24] 罗延钟, 周玉水, 万乐. 一种新的 CSAMT 资料近场校正方法[A]. 勘查地球物理勘查地球化学文集(第20集)[C]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [25] 冯思臣, 王绪本, 王光杰, 等. 基于遗传算法 CSAMT 反演计算研究[J]. 地球物理学进展, 2006, 24(4): 1285~1289.
- [26] 冯思臣, 王绪本, 阮帅. 一维大地电磁测深几种反演算法的比较研究[J]. 石油地球物理勘探, 2004, 39(5): 594~599.
- [27] 刘云峰, 曹春蕾. 一维大地电磁测深的遗传算法反演[J]. 浙江大学学报, 1997, 31(3): 300~304.
- [28] 师学明, 王家映, 张胜业, 等. 多尺度逐次逼近遗传算法反演大地电磁资料[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 122~130.
- [29] 王若, 王妙月. 可控源音频大地电磁数据的反演方法[J]. 地球物理学新进展, 2003, 18(2): 197~202.