

某煤矿典型 CSAMT 法视电阻率曲线的一维模拟

龚飞, 底青云

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 了解煤矿开采区的地层地质情况, 指明断层、破碎带、陷落柱等构造及其含水性, 并分析其对开采过程中可能造成的安全威胁是煤矿安全生产的重要保证。可控源音频大地电磁测深(CSAMT)法是浅层地球物理勘探的一种有力的手段, 可以用来探明从地表到地下 1500 米范围的地质情况。在开采区完成三维地震勘探, 对构造有了较系统的控制后, 利用电法 CSAMT 手段重点来分析构造及地层的含水及富水特性, 是一种科学的工作流程。本文采用一维正演方法对该矿区典型的 CSAMT 视电阻率曲线进行模拟并与实际曲线进行了对比。通过大量的模型拟合, 得到了较好的拟合效果, 这对反演解释提供了有用信息。

关键词 CSAMT, 视电阻率, 一维正演模拟

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2004)03-0631-04

1-D Simulation on model apparent resistivity curve of CSAMT method in certain mine

GONG Fei, DI Qing-yun

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract It is important to safe exploitation in mine by knowing geologic property of the exploitable area, including information of fault, falling body and water bearing fracture, and make sure that how dangerous in mining. The CSAMT method is the short name of the Controlled Source Audio frequency Magneto-Telluric method, it is one of the most powerful exploration methods of applied geophysics. CSAMT method can get the geologic information from the earth's surface to 1500m underground around. It is a scientific way that using the 3D seismic exploitation method to get the structure of the mine area firstly, and then use CSAMT method emphases in analyzing the water bearing character of the structure and the stratum. In this paper, we use 1D forward modeling method to simulate some type apparent resistivity curves of CSAMT method, and compare to the actual curve collecting in mine area. After large numbers of modal simulating, we get some good result. It is useful for us to get more preferable inversion result.

Keywords CSAMT, apparent resistivity, 1-D forward simulation

0 引言

煤矿开采大都采用综采等现代化的开采技术, 因此开采前煤田地质构造的细节及其含水性必须搞清楚, 否则在开采过程中引起突水等事故, 将对煤矿乃至国家带来不可估量的人身及经济损失。近几年, 我国各大煤业公司都非常重视煤层及其上下地层构造、含水性的勘查工作。现在普遍采用的工作方式是在采区大面积地开展三维高精度地震勘探, 对区内

大小构造及地层的情况得到很好的了解, 然后采用电法手段来分析构造的含水性特性及可能在开采过程中造成的危害。电法大多采用 CSAMT 法或者 TEM(瞬变电磁法)。此次我们在某煤矿开展的电法工作采用的就是 CSAMT 方法。

CSAMT 方法使用可控制的人工场源, 克服了大地电磁法场源的随机性和信号微弱的缺点, 信号强度比天然场要大得多, 可以大大降低工业干扰的影响。采用一次发射七个点同时接收和 GPS 时间控制

收稿日期 2004-01-13; 修回日期 2004-04-30.

基金项目 中国科学院知识创新项目(KZCX3-SW-134)资助.

作者简介 龚飞, 男, 1979年12月生, 湖北黄陂人, 学士, 现为中国科学院地质与地球物理研究所硕士研究生. 主要从事电磁场正反演的研究. (Email: gongfei@mail.igcas.ac.cn)

同步的方式使工作效率大大提高. 基于电磁波的趋肤深度原理, 利用改变频率进行不同深度的电测量, 勘探深度可达 1 ~ 2 km. 并且在接收电场的同时还要接收磁场, 因此高阻屏蔽作用小, 可穿透高阻层. 所以说 CSAMT 方法是浅层地球物理勘探的一种有力的手段. 对于开采价值比较高的煤矿, 矿体分布在几百米的深度范围内, 并且工作区内都存在较强的工业或者矿山开采电流干扰. 在这样的观测条件下要对矿区地层中的断层、含水破碎带、含水薄弱层等信息进行了解是很困难的. 作为一种电法的勘探手段, CSAMT 方法无疑是在煤矿勘查中较为有效的一种手段.

本次工作在某采区进行了大约 4 km² 的面积性 CSAMT 测量, 为矿山进行隐患治理提供资料. 本文拟用有限元方法编写的正演程序并建立一维的地层正演模型来模拟该地区的典型电性曲线并与实际曲线进行对比, 从而提供地层结构的有效信息.

1 CSAMT 方法原理

CSAMT 法是可控源音频大地电磁法的简称. 该方法是八十年代末才兴起的一种地球物理新技术, 它基于电磁波传播理论和麦克斯韦方程组导出了水平电偶极源在地面上的电场及磁场公式

$$E_x = \frac{Id_{AB}\rho_1}{2\pi r^3}(3\cos^2\theta - 2), \quad (1)$$

$$E_y = \frac{3Id_{AB}\rho_1}{4\pi r^3}\sin^2\theta, \quad (2)$$

$$E_z = (i - 1) \frac{Id_{AB}\rho_1}{2\pi r^2} \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}} \cos\theta, \quad (3)$$

$$H_x = - (i + 1) \frac{3Id_{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}} \cos\theta \sin\theta, \quad (4)$$

$$H_y = (i + 1) \frac{Id_{AB}}{4\pi r^3} \sqrt{\frac{2\rho_1}{\mu_0\omega}} 3(\cos^2\theta - 2), \quad (5)$$

$$H_z = i \frac{3Id_{AB}\rho_1}{2\pi\mu_0\omega r^4} \sin\theta. \quad (6)$$

式中, I 为供电电流强度; d_{AB} 为供电偶极长度; r 为场源到接收点之间的距离.

将(1)式沿 x 方向的电场(E_x)与(5)式沿 y 方向的磁场(H_y)相比, 并经过一些简单运算, 就可获得地下的视电阻率(ρ_s)公式

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}, \quad (7)$$

式中 f 代表频率. 由(7)式可见, 只要在地面上能观

测到两个正交的水平电磁场(E_x, H_y)就可获得地下的视电阻率 ρ_s , 有人也称卡尼亚电阻.

又根据电磁波的传播效应理论, 导出了传播深度公式

$$H \approx 256 \sqrt{\frac{\rho}{f}}, \quad (8)$$

式中 H 代表探测深度, ρ 代表电阻率, f 代表频率.

从(8)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, 达到频率测深的目的.

2 某煤矿地质特征及典型 CSAMT 曲线

2.1 地质特征

某煤矿属于济宁地区, 该地区地表绝大部分被第四系覆盖, 以冲洪积及河湖相堆积为主. 石炭系只发育中、上统, 二叠系缺失上统上部的沉积, 二者是一套砂岩、页岩夹灰岩的含煤地层. 侏罗系为紫红、灰绿色砂岩、砂砾岩.

本次工区所研究的地层自上而下为: 第四系、上侏罗统、下二叠统山西组、石炭系上石炭统太原组、石炭系中石炭统本溪组.

第四系冲积层: 浅黄色、灰黄、橙黄色粘质沙土、沙质粘土及少量粘土. 局部夹有中细砂和中粗砂.

上侏罗统: 上部为灰色、深灰色粉砂岩、细砂岩互层, 含植物化石; 下部为紫红色中细粒泥、钙质胶结的砂岩; 底部为砾岩.

下二叠统山西组: 本组为陆相含煤地层, 由灰色、灰白色细砂岩及深灰色粉砂岩组成, 中部含可采煤 2 层.

石炭系上石炭统太原组: 本组为海陆交互含煤沉积, 以深灰色、灰黑色分砂岩、泥质岩为主夹薄层灰岩及煤数层.

石炭系中石炭统本溪组: 本组是海陆交互相沉积, 主要为杂色粘土岩夹 2 ~ 3 层灰岩, 底部具铁铝质页岩.

2.2 CSAMT 曲线特征

根据上述地质的信息和对大量野外实际曲线的对比和分析, 我们选取了一些干扰较小的曲线作为典型 CSAMT 曲线(见图 1).

由图 1 可以看到: 典型 CSAMT 曲线的形状为一平缓的 V 字形, 整个曲线的电阻率变化不大, 范围在几 Ω 到几百 Ω 之间. 从曲线的形态来看: 从 2 000 Hz 到 20 Hz, 视电阻率值从十几 Ω 缓慢下降; 从 20

Hz 到 5 Hz,视电阻率值从 10Ω 左右升高到 30 Ω;从 5 Hz 到 2 Hz,视电阻率值上升较快,到达 100 Ω 左右;从 2 Hz 到 0.5 Hz,视电阻率值上升到 200 Ω 左右.从上述对曲线的描述,我们可以做下面的推测:表层的厚度相对较厚;地层的变化趋势是低阻一次低阻—高阻一次高阻.

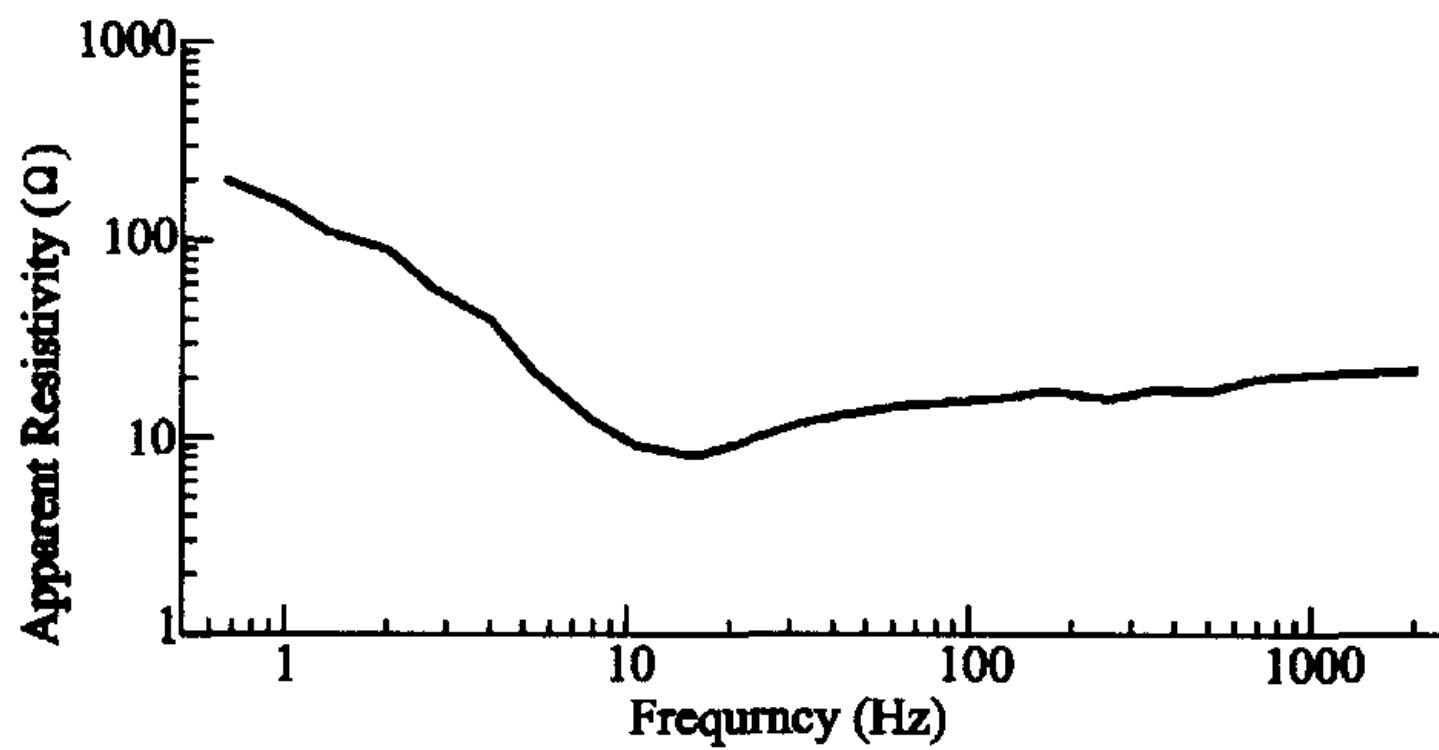


图 1 双对数坐标下的典型 CSAMT 曲线
Fig. 1 Picture 1 The representative CSMAT curve in log-log coordinate

该工区现有的测井曲线提供了下二叠统和石炭系的岩石的视电阻率情况:细纱岩、粉砂岩的电阻率为 10 ~ 15 Ω · m,砂岩的电阻率为 20 ~ 30 Ω · m,砾岩的电阻率为 40 ~ 50 Ω · m,泥质岩的电阻率为 15 ~ 20 Ω · m,煤层的电阻率为 100 ~ 250 Ω · m,灰岩

的电阻率为 150 ~ 400 Ω · m.从该工区测井曲线来看,厚度不到一米的煤层视电阻率在 100 到 150 Ω 变化,厚度为 4 m 以上的煤层视电阻率可达到 250 Ω 以上.灰岩大多数为薄层,视电阻率为 150 Ω 左右.

根据对典型曲线和测井资料的分析,将正演初始模型分成 4 个电性层:第一层厚度为 100 m,电阻率为 15 ~ 20 Ω · m;第二层厚度为 500 m,电阻率为 20 ~ 40 Ω · m;第三层厚度为 100 m,电阻率为 200 ~ 250 Ω · m;第四层作为结束层取厚度为 300 m,电阻率为 100 ~ 150 Ω · m.

3 1D-CSAMT 模拟结果分析及与实际曲线的对比

通过一维 CSAMT 有限元程序的正演模拟,发现大多数曲线浅表存在一个相对的小高阻层.最后模拟的结果将模型分成 5 个电性层:第一层厚度 15 ~ 30 m,电阻率为 15 ~ 20 Ω · m;第二层厚度 90 ~ 100 m,电阻率为 8 ~ 11 Ω · m;第三层厚度 450 ~ 480 m,电阻率为 25 ~ 30 Ω · m;第四层厚度 70 ~ 90 m,电阻率为 250 ~ 300 Ω · m;第五层作为结束层取厚度为 200 ~ 250 m,电阻率为 100 ~ 150 Ω · m.将模拟的结果与地质上的信息进行对比发现:第一、二电性层对应第四系冲积层,电阻率为 10Ω 左右,与

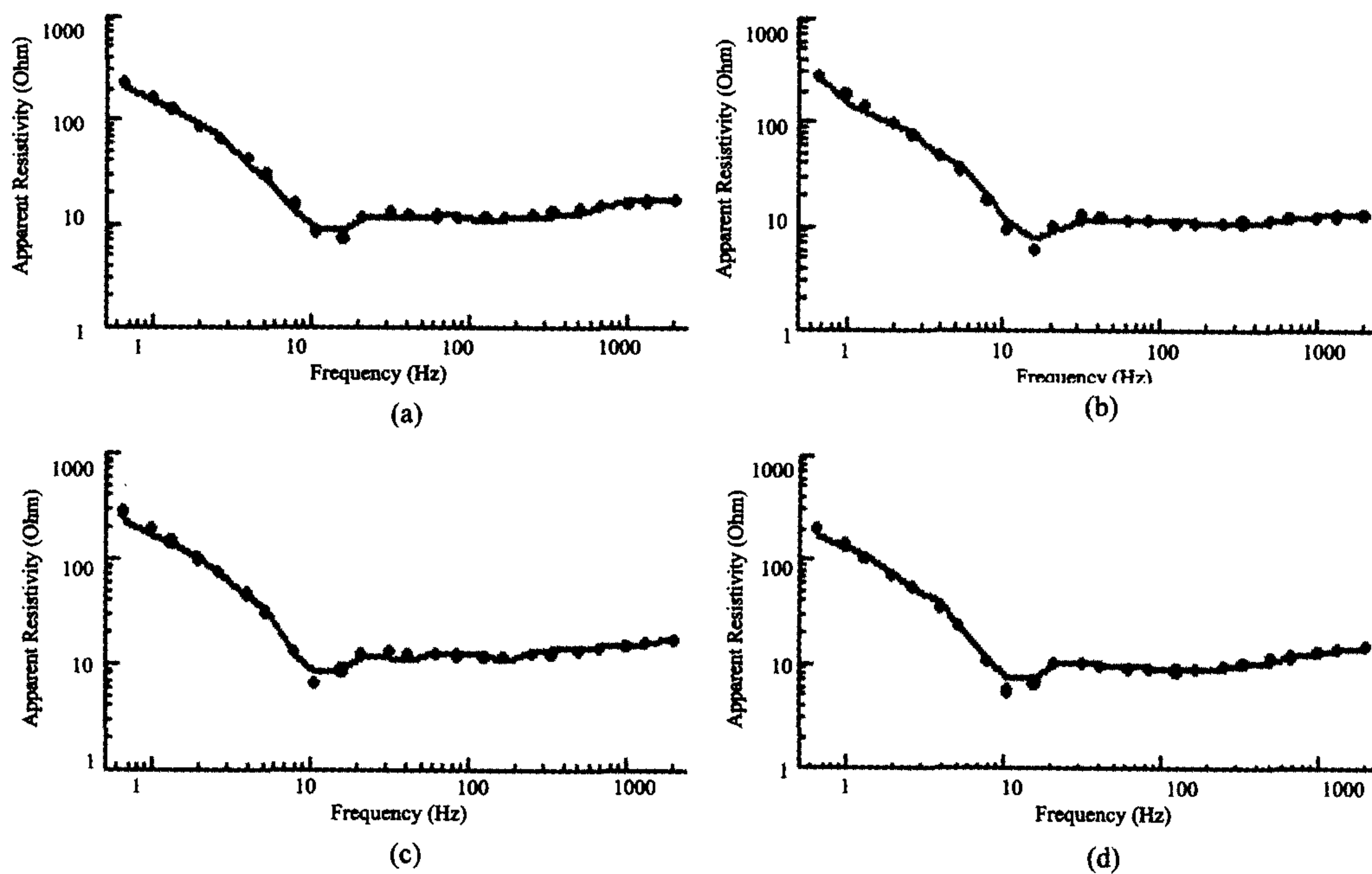


图 2 正演模拟曲线与实际曲线对比(实线为原始实际曲线,点线为正演模拟曲线)
(A)为 210 线 151 号点原始数据, (B)为 50 线 125 号点原始数据, (C)为 140 线 141 号点原始数据, (D)为 260 线 125 号点原始数据.
Fig. 2 Compare between actual curve and simulated curve

粘土、砂质粘土的电阻率相近;第三电性层对应上侏罗统,电阻率为 25Ω 左右,与砂岩的电阻率相近;第四电性层与下二叠统对应,由于煤层的电阻率比较高,所以整个层的电阻率相对也偏高;第五电性层与石炭系相对应,由于岩层夹有薄灰岩和薄煤层,电阻率值比实际岩石电阻率要高一些,但是相对第四电性层要低一些,从典型曲线上也可以看出曲线末端有明显的走低趋势。

这里我们选取了测区不同测点的实际曲线与模拟的曲线进行拟合,图 2 中给出了其中四条曲线的拟合结果.由图 2 可以看出模拟曲线和实际曲线拟合的很好,说明用一维的有限元程序来模拟地层的基本信息是有效的。

引入误差的概念来量化拟合的程度,由下面的误差公式来描述一下曲线的拟合度

$$E = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i^m - x_i^s)^2}{n} \times 100\%, \quad (9)$$

式中 X_i^m 为模型正演数据, X_i^s 为实际测量数据, n 为总频点数.表 1 给出了计算的结果.结果表明拟合误差最大不超过 25%。

表 1 曲线拟合度

Table 1 Simulation analysis of curves

曲线	A	B	C	D
拟合精度	0.160 565	0.153 478	0.236 957	0.067 391

4 结 论

4.1 CSAMT 方法在存在干扰的情况下能得到较为可靠的野外实际数据,是一种有效的浅层地球物理勘探的手段。

4.2 基于地质资料的信息和一维的正演模拟结果,得到以下的认识:该工区内的第四系覆盖层较厚,大约为 120 ~ 130 m;上侏罗统也较厚,大约为 450 ~

480 m;下二叠统山西组表现为高阻,大约 70 ~ 90 m;石炭系表现为次高阻,厚度大约为 200 ~ 250 m。

4.3 通过对地层的正演模拟以及和实际曲线的对比,我们可以知道原始资料的采集质量并且对原始资料进行各种反演前的校正提供了依据.通过一维正演对地层信息的了解,使我们能得到较好反演初始模型,从而能够更好的反演出地下的断层、含水破碎带、含水薄弱层等地质构造。

参 考 文 献 (References):

- [1] 石昆法,著.可控源音频大地电磁法理论与应用[M].北京:科学出版社,1999年.
- [2] 底青云,王妙月,石昆法,张庚利.高分辨 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):744 ~ 748.
- [3] 华东地区区域地层表(山东省分册)[M].北京:地质出版社,1978年.
- [4] 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.
- [5] 于昌明,石昆法,高宇平.CSAMT 法在四台矿 402 盘区陷落柱构造探测中的应用[J].地球物理学进展,1996,11(2):137 ~ 147.
- [6] Cagniard L. Principle of the magneto-telluric method, a new method of geophysical prospecting[J]. Ann de Geophys,1953,9:95 ~ 125.
- [7] Yu Changming. Application of CSAMT method on gold mineral deposits exploration[J]. Chinese J Geophys. (Acta Geophysica Sinica),1998,41(1):133 ~ 138.
- [8] Bartel L C, Jacobson R D. Results of a controlled source audio frequency magneto telluric survey at the Pubiman thermal area[J]. Kilauea Volcano, Hawaii. Geophysics, 1987,52(3):665 ~ 677.
- [9] Basokur A T, Rasmussen, Kaya T M, Altun Yand Aktas K. Comparison of induced polarization and controlled source audio magneto telluric methods for massive chalcopryrite exploration in a volcano area[J]. Geophysics,1997,62(4):1087 ~ 1096.
- [10] Sandberg S K, Hohmann G W. Controlled source audio magneto telluric in geothermal exploration. Geophysics,1982,47(1):100 ~ 116.