

隐伏煤矿区 CSAMT 法煤系地层勘查研究

安志国¹, 底青云¹, 郭韶华²

(1. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 福建省煤田地质局, 福建 沙县 365500)

摘要: 对于复杂地形山区深部煤系地层的勘探, 可控源音频大地电磁法(CSAMT)是比较有效的一种方法. 在福建山区应用 CSAMT 法对隐伏矿区煤系地层进行了勘查研究. 根据复杂山区数据采集的特点, 提出了针对该地区的地形改正和静态校正的数据处理方法, 分析了原始曲线特征并比对反演结果. 结果表明, 对有严重静态影响的原始数据采用有阈值的全剖面比较静态校正处理后, 反演模型的响应曲线和原始曲线的拟合误差均小于 6%. 煤系地层在 CSAMT 反演电阻率断面上表现为中低阻, 和上覆介质有明显的电性差异. 结合研究区地质资料, 对 CSAMT 反演结果进行了地质解释, 划分了地层并圈定了有希望的煤系范围.

关键词: 深部隐伏; 煤系地层; CSAMT 法; 数据处理解释

中图分类号: P 631. 325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1964(2008)01-0118-07

Study of Exploration for Coal Stratum with CSAMT Method in Concealed Mine Area

AN Zhi-guo¹, DI Qing-yun¹, GUO Shao-hua²

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Coal-field Geologic Branch of Fujian Province, Sha County, Fujian 365500, China)

Abstract: Controlled source audio magnetic telluric(CSAMT) is an effective approach to detect deep coal stratum in complicated-terrain mountain. CSAMT method was applied for coal stratum in Sanming area, Fujian province. Based on the property of data acquisition in complicated mountain, a method of data processing influenced by terrain correction and static correction was proposed, and original curves were analyzed and compared with inverted data. All profile comparison method was adopted to carry out static correction, the fitness error of response curves between original data and inverted data is less than 6%. The results show that the electric property of coal stratum is middle-low resistivity in cross section of inverted resistivity, and coal stratum has clear difference compared with overburden medium. Based on geologic information of coal in research area, a geologic interpretation has been made on CSAMT results, the stratum is carved up, and the prospective coal is plotted out.

Key words: deep concealed; coal stratum; CSAMT method; data processing and interpretation

近几十年来,福建露天和半覆盖煤矿分布区域均已勘探、开发完毕,但是根据推覆构造等地质理论研究,以及近几年的地质调查和相关的钻孔信息

推断,福建省内仍然存在深部的煤系地层. 本文介绍了隐伏煤矿区 CSAMT 法煤系地层勘查的研究成果,属现在倡导较多的“三下找煤”,即在红层下、

收稿日期: 2007-01-27

基金项目: 中国科学院知识创新重要方向项目(KZCX2-YW-121;KZCX2-YW-113-1)

作者简介: 安志国(1977-),男,河南省安阳市人,博士研究生,从事电磁法数据处理和应用方面的研究.

E-mail: 2008dreamfuture@163.com Tel: 010-82998625

老地层下和火山岩下找煤。

地震法^[1]在地形起伏不大的情况下对煤层作精细探测应用得较多,瞬变电磁法^[2]在探测煤矿中不良地质构造时能发挥很好的作用,重磁法^[3]和 γ 能谱法^[4]在煤矿普查、圈定靶区勘探中有着独特的优势。此次福建煤系地层勘查的地区植被茂密,灌木丛生,地形复杂,而且探测目标体较深,最长达 1 500 m,上述地球物理方法难以发挥其优势。而在此种条件下,CSAMT 法变频测深,探测深度大;横向分辨率高;测量灵活;比值测量,地形影响较小等优势凸显。因此,采用 CSAMT 法在福建隐伏矿区进行煤系地层勘查研究。本文首先简单介绍了 CSAMT 法的基本原理,重点陈述复杂山区数据采集的特点和极端静态数据的处理解释方法,分析原始资料比对反演结果,进行拟合分析,并结合本区的地质资料,给出了以大田研究区为代表的 CSAMT 法煤系地层的电性结构特征并圈定了有希望的煤系范围。

1 方法原理

1971 年 Goldstein^[5], 1975 年 Goldstein 和 Strangway^[6]引入 CSAMT 法,它是利用人工场源发射变频电磁信号的一种测深技术。理论上讲,两端接地的电偶极子向地下供交变电流,感应出反映地下电性介质的电磁场,CSAMT 法通过测量感应出来的电场和磁场,根据 Cagniard 电阻率公式计算视电阻率,通过模型和视电阻率曲线的拟合反演,得到各研究区块的电性深度资料,从而获得对地电构造的认知。大勘探深度和高分辨率使得它在寻找地下水^[7-10]、勘查油气^[11]、矿产资源探测^[12-15]以及工程地质研究^[16-18]中应用颇多,此处不再赘述。

CSAMT 法测量交变电磁场的电场分量 E 和磁场分量 H , 电场 E 用不极化电极测量电位值得,而磁场 H 用磁棒在相应地区的响应表示。根据水平电偶极子理论和 Maxwell 方程,可以计算 E 和 H 的 3 个分量,用水平电场分量 E_x 和水平磁场 H_y 的比值得出 Cagniard 电阻率^[19]。

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

式中: I 为供电电流强度; AB 为水平电偶极子长度; θ 为 AB 和均匀半空间任意点 M 的夹角。

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

式中 ρ_1 为水平层状模型中第 1 层的电阻率。

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

式中: μ_0 为磁导率; o 是 AB 的中点; r 为 o 到 M 的距离; ω 为角频率。

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

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

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

方程(1)除以方程(5),简化得

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_0 \omega} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2. \quad (7)$$

因此, Cagniard 电阻率为

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2.$$

阻抗相位: $P = E_{\text{phase}} - H_{\text{phase}}$ 。

趋肤深度: $D = 502 \times \sqrt{\frac{\rho}{f}}$ 。

CSAMT 法通常在电磁波传播的远场区采集数据,常见的频率系列为 $2^{13} \sim 2^{-3}$ Hz,地表电阻率一定的情况下,频率越低,探测深度越大。电极距的大小决定 CSAMT 法的横向分辨率。本次研究工作为了满足探测深度的要求,数据采集采用自动发射接收同步的 4F30 频率系列,测量电极距为 40 m,时间同步由 GPS 控制。

2 数据处理

野外采集到原始数据后,室内还要对这些数据进行编辑处理,首先观察原始记录曲线形态,剔除飞点、跳点,压制噪声,初步给出原始电阻率断面图,检查评估静态、地形的影响程度,然后对经初步圆滑处理后的数据进行静校、地改,进而进行反演。对比反演结果和原始曲线进行拟合分析,若拟合差大,则说明处理存在问题,需继续之前的静校、地改和反演,直到拟合差足够满足反演结果的合理性要求。

进行地质解释之前,还要分析各测深点的视电阻率-频率曲线,结合研究的目标探测体来说明曲线反映的地下介质的岩性变化。处理流程见图 1。下面就数据处理中涉及到的几个方面做一下介绍。

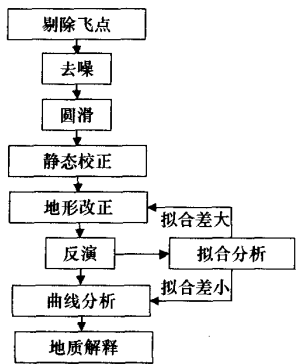


图 1 数据处理流程
Fig. 1 Data processing flow

2.1 静态校正

本研究采用 EMAP^[20]法低通滤波和全剖面比较校正处理^[21]来实现所得数据的静态校正. EMAP 滤波实现了极大地限度地提取勘探区域的地电信息,消除静态和地形影响、提高勘探精度、简化数据处理方法、提高解释精度和分辨率.

汉宁窗滤波公式为

$$h(x) = \begin{cases} \frac{1}{\omega} \left(1 + \cos \frac{2\pi x}{\omega} \right) & \left(|x| \leq \frac{\omega}{2} \right), \\ 0 & \left(|x| > \frac{\omega}{2} \right), \end{cases}$$

式中 ω 表示窗口宽度.

实际应用中, $h(x)$ 离散成 7 点滤波. 针对本区地质条件复杂、地表电性不均匀,还要采取全剖面数据比较分析校正,结合岩性测试或者综合分析,得出不受静态偏移的背景电性参数,再进行曲线平移,选择合理的阈值进行静态校正,亦可取得较好的校正效果. 同时也会参照其他的静校正方法对比研究以期消除、减小静态效应的影响,得到地下真实的地电反映. 图 2 为静态校正前后对比图,其中图 2a 为静校前,图 2b 为校正后消除了部分静态效应,条带明显减少.

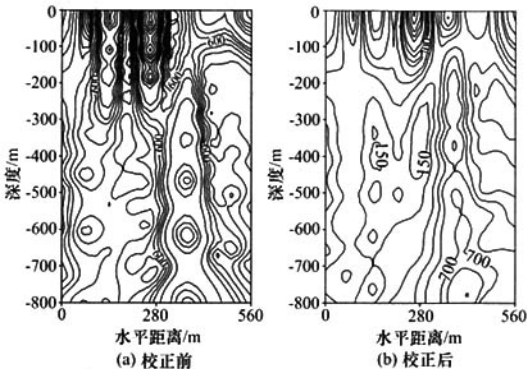


图 2 静态校正前后对比图
Fig. 2 Comparison of before and after static correction

2.2 地形校正

首先对二维纯地形和二维地形下包含异常体的各种变化条件下地形的影响进行正演模拟,模拟结果可以直观形象展示出地形对 CSAMT 法的视电阻率影响特征和规律. 然后用比值法(畸变张量法)作 CSAMT 地形校正,通过正演计算分别求出纯地形 $\rho_{地}$ 和水平地形均匀半空间的视响应 ρ_0 来求取校正因子,来对实测数据 $\rho_{实}$ 进行校正.

$$\rho_{校} = \rho_{实} / \rho_{地} * \rho_0.$$

再者由于工区地形复杂,很难做到发射的电磁波信号和各测点在同一高程平面上,这势必引起各测点上数据的不一致性. 为此需要详细测量各测点的高程,在二维地形影响正演计算结果的基础上根据经验对山体或沟的形态可能的影响做了定性分析,在反演结果解释时给予了考虑,具体如下

$$E_x = E_l \cos \theta = \frac{V_v}{V_l} \cos \theta = \frac{V_v}{V_x} \cos^2 \theta,$$

式中: E_x 为水平电场; E_l 为斜坡方向的电场; V_v 为斜坡得到的电位; V_l 为斜坡长度; θ 为斜坡倾角; V_x 为斜坡在水平上的投影.

2.3 曲线分析

在地质解释前,还要分析得到的视电阻率-频率曲线,分析不含煤系地层和含煤系地层的差别,结合相关的地质资料,就 CSAMT 法反演结果给出合理的地质解释.

从图 3a 可见,在视电阻率-频率曲线上,高频段视电阻率值约为 100 Ωm ,随着频率降低,视电阻率逐渐升高,大约在频率 200 Hz 左右时出现过渡区,电阻率变化不大,频率进一步变小时,电阻率曲线又开始上升,这表明在接收频率范围内,测深曲线没有反映存在低阻层,根据本区标本测线测定结果,煤系地层呈中低阻显示,则可判断是正常地层或完整岩层,没有煤系地层存在,该测深曲线是该区典型的不含煤系地层的反映.

从图 3b 的曲线上可以看出,在视电阻率-频率曲线上,高频段视电阻率值仍为 100~200 Ωm ,但随着频率降低,直到 100Hz 左右视电阻率仍不是很高,200 Ωm 左右,以后曲线形态逐渐抬升,到 10Hz 左右到达峰值,随后视电阻率又开始变小,测深曲线反映有低阻响应,说明存在低阻层,根据本区岩性标本的测试,地球物理推测可能存在煤系地层,而该视电阻率-测深曲线也是该区含煤系地层的典型反映的显示.

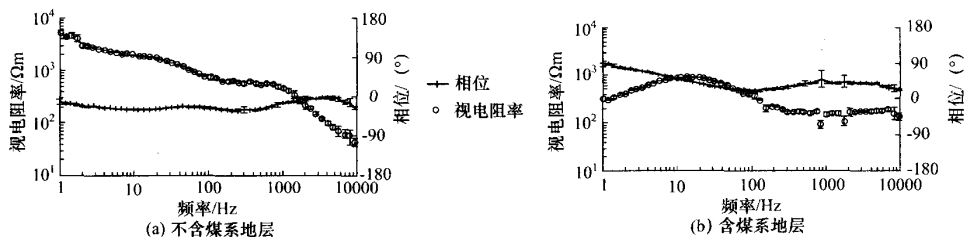


图3 含煤系地层和不含煤系地层的电性响应曲线对比
Fig.3 Comparison of electric property curves about non-coal stratum and coal stratum

2.4 拟合分析

在保证采集数据质量良好的前提下,反演后的数据必须和原始的视电阻率-频率数据进行拟合,只有好的拟合结果可以对反演结果的可靠性做出验证,也是给出合理的地质解释前提.得出反演结果后,笔者对反演结果和原始数据进行了拟合对比,表1是含煤系地层的测深点的反演结果及其视电阻率-频率曲线的拟合结果,从表1可以看出,拟合差都小于6%;也可从图4拟合曲线图上看,原始视电阻率-频率曲线和反演后的电阻率-频率曲线非常的接近,两者拟合得较好,较好地反映了各层的岩性变化,也说明了反演结果真实可靠.

表1 原始数据和反演结果拟合表 Table 1 Fitness of original data and inverted data			
频率/Hz	原始视电阻率/Ωm	反演电阻率/Ωm	拟合差/%
1.0	574.2	542.4	5.5
2.0	470.0	460.0	2.1
4.0	580.5	547.7	5.7
8.0	750.3	708.7	5.5
11.3	768.4	726.8	5.4
16.0	809.3	766.9	5.2
22.4	788.4	749.3	5.0
32.0	686.2	655.8	4.4
44.9	583.7	562.2	3.7
64.0	454.3	443.4	2.4
90.0	369.9	366.1	1.0
128.0	288.6	278.7	3.4
189.5	218.4	214.3	1.9
256.0	184.0	181.5	1.4
369.2	152.2	150.3	1.2
512.0	149.6	146.2	2.3
724.5	138.4	135.0	2.5
1024.0	127.5	124.9	2.1
1440.0	144.5	140.5	2.8
2057.0	157.4	152.9	2.9
2880.0	162.8	158.5	2.7
4114.0	183.8	178.0	3.2

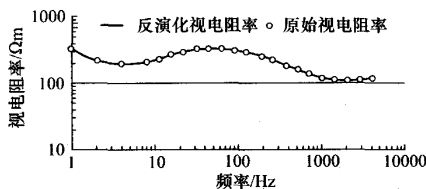


图4 原始数据和反演数据拟合对比
Fig.4 Curve comparison of original data and inverted data

3 研究区地质和岩石电性特征

本次 CSAMT 勘查研究工作集中在 4 个试验区块,满足三下找煤的要求,具体分布见图 5.

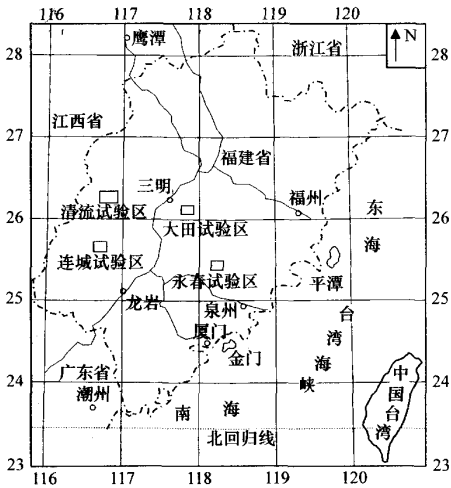


图5 测区位置示意
Fig.5 CSAMT survey areas in Fujian province

由于大田试验区测量剖面附近有钻孔验证,故本文选择大田试验区作为典型代表,阐述解释 CSAMT 法勘查深部隐伏煤层的成果.

区内属中低山地貌,山势较高,地形较陡峭,平均标高 750 m 以上. 全年气候温暖、湿润、雨量充沛,林木茂盛.

3.1 地质概况

试验区的出露地层:中上元古界麻源群(Ptmy)、加里东期花岗岩体(γm³)及上侏罗统长林组(J₃c)、南园组(J₃n),部分为上泥盆统桃子坑组(D₃t);区内隐伏煤系地层为下二叠统童子岩组(P₂t),地层总厚度大于 680 m.

童子岩组的盖层为印支期二层式推覆体.上层为广平推覆体,其推覆体由麻源群(Ptmy)和混合花岗岩(γm³)构成,下层为上泥盆统桃子坑组一下石炭林地组(D₃tz-C₁D)构成.

根据矿区周边的相关资料,总体为宽缓的复式向斜.除了主体推覆断层以外,尚有 NE 走向、SE

倾向,形成自西北往东南逐渐下落的台阶构造的正断层,对下伏煤系地层的整体性有一定破坏作用,煤系地层受其切割,往往保存不完整。

3.2 岩石电性特征

表 2 为大田试验区的岩石标本测定表,采自勘查剖面周围的相关钻孔。

表 2 岩石标本电性测定
Table 2 Electric property of rock samples

标本编号	钻孔	深度/m	岩石名称	电阻率/ Ωm
XI	ZK6-1	552.0	炭质泥岩	50.4
FJ-1	地表	0.0	泥岩	114
IX	ZK2001	525.0	灰岩	1 674
I	ZK2001	680.0	砂岩	324
VIII	ZK2001	536.0	细砂岩	810
V	ZK6-1	13.0	变质砂砾岩	2 300
VI	ZK6-1	891.0	变质砂岩	5 800
IV	ZK6-1	778.5	硅化岩	6 300
X	ZK2001	514.0	蚀变花岗岩	1 900
II	ZK2001	253.7	花岗岩	53 520
III	ZK2001	404.7	花岗岩	61 560
VII	ZK6-1	414.5	变砾岩	88 714

炭质泥岩、泥岩电阻率较低,约为 $100\ \Omega\text{m}$ 左右;灰岩为 $1\ 500\ \Omega\text{m}$ 左右;砂砾岩、砂岩电阻率 $2\ 308\ \Omega\text{m}$;而硅化岩、花岗岩、变粒岩这些火成岩和老的变质岩电阻率一般较高,都在几千到几万 Ωm 。上伏的老地层电阻率较高,而下伏的煤系地层电阻率较低,具备开展地面电法工作的物性条件。

通过物性测定,结合多年来本区电法的工作成果,综合本区及邻区资料,以及本次 CSAMT 测得的断面图结果,汇总给出本区煤系地层及几种常见岩石电性统计结果:

二叠系童子岩-文山组 ($P_1t\sim P_1w$) 电阻率范围: $50\sim 800\ \Omega\text{m}$;

白垩系(K)电阻率范围: $100\sim 1\ 000\ \Omega\text{m}$;

元古界麻源群 ($Ptmy$) 电阻率范围: $1\ 000\sim 20\ 000\ \Omega\text{m}$;

下石炭-上泥盆系 ($C_1\sim D_3$) 电阻率范围: $1\ 000\sim 1\ 500\ \Omega\text{m}$;

花岗岩 ($\gamma_m\sim \gamma_\pi$) 电阻率范围: $900\sim 38\ 000\ \Omega\text{m}$;

二叠系栖霞组-石炭系 ($P_1q\sim C_2$) 电阻率范围: $600\sim 2\ 000\ \Omega\text{m}$;

二叠系翠屏山组 (P_2cp) 电阻率范围: $400\sim 1\ 200\ \Omega\text{m}$;

上侏罗统南园组 (J_3n) 电阻率范围: $500\sim 1\ 500\ \Omega\text{m}$;上侏罗统长林组 (J_3c) 电阻率范围: $200\sim 800\ \Omega\text{m}$ 。

4 CSAMT 反演结果和地质解释

前面提到,本文将大田工作区作为实例来解释 CSAMT 法在福建隐伏煤矿区勘查深部煤层的结果。此剖面长度 $2\ 800\ \text{m}$,方位 SE,穿过煤层露头,并且有钻孔验证,是本次资源勘查工作的重要剖面,也是检验 CSAMT 法探测隐伏煤系地层有效性的一个典型实例。该剖面反演解释断面图见图 6。

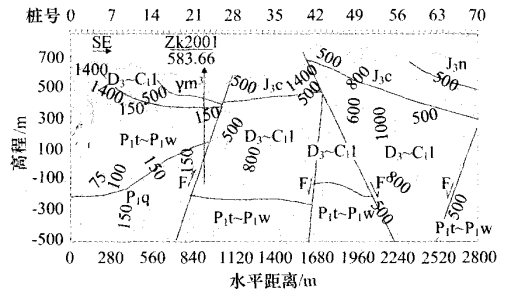


图 6 大田测线电阻率反演解释断面

Fig. 6 Inversion and interpretation section of survey line in Datian area

从电阻率断面图上的电性结构特征看,横向上可分为 2 大段,第 1 段为 $0\sim 1\ 120\ \text{m}$ 段,第 2 段为 $1\ 120\sim 2\ 800\ \text{m}$ 段,下面分段论述。

$0\sim 1\ 120\ \text{m}$ 段,浅表层(标高 $400\ \text{m}$ 以浅)电阻率较高,其电阻率可达 $500\ \Omega\text{m}$ 以上,尤其是 $0\sim 230\ \text{m}$ 段,其电阻率最高可达 $1\ 500\ \Omega\text{m}$,这个高阻异常位于测线边部,地形又特别复杂,推测为干扰异常。浅表层以下(标高 $400\sim -300\ \text{m}$)电阻率较低,为几十 Ωm 。结合地表露头和附近钻孔的地质资料,推断浅表(标高 $400\ \text{m}$ 以浅)的中高阻层为 D_3-C_1l 和 γ_m 地层。其下部(标高 $400\sim -200\ \text{m}$)的低阻层,有 $>600\ \text{m}$ 厚,推断为 $P_1t\sim P_1w$ 煤系地层,大体以 40° 倾角向小号点倾斜。从老地层覆盖于 P_1 新地层之上的接触关系,推断为残留推覆体。 $P_1t\sim P_1w$ 地层以下(标高 $-200\sim -500\ \text{m}$),电阻率又有抬升,推断为 P_1q 地层。

$1\ 120\ \text{m}$ 号点的岩性边界推断为断层。

$1\ 120\sim 2\ 800\ \text{m}$ 段,电性特征分布在横向上不均匀,成层性差,但仍可看出, $300\ \text{m}$ 深度以浅(标高 $400\ \text{m}$ 以上)为中高阻层($1\ 000\ \Omega\text{m}$ 左右), $300\sim 700\ \text{m}$ 深(标高 $400\sim -300\ \text{m}$)为中阻厚层,电阻率约为 $800\ \Omega\text{m}$ 。 $700\ \text{m}$ 深(标高 $-300\ \text{m}$)以下,电阻率又变低,约为 $300\sim 500\ \Omega\text{m}$ 。根据地质情况,推测上部为 J_3 地层,中部为 D_3-C_1l 地层,下部的低阻显示,有可能有局部残留煤系地层,深度较深。

1 680 m 附近有明显的低阻带,推断该低阻带为一断层破碎带,向大号点倾斜.

图 7 为大田区块测线 900 m 处的钻孔 ZK2001 岩芯信息和该测深点的反演电阻率-深度曲线对比关系.在图 6 中钻孔 ZK2001 对应 900 m 位置处,根据电性特征解释地质情况,从浅到深依次为花岗岩、D₃-C₁l、P₁t~P₁w 和 P₁q 地层,反演解释同钻孔岩芯对应较好,较好地验证了 CSAMT 法的反演结果的可靠性.

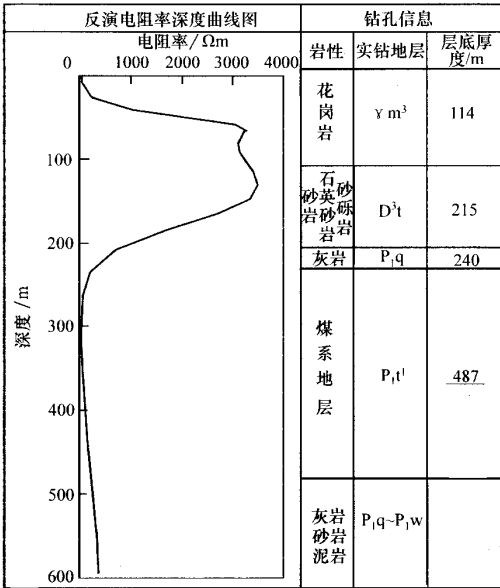


图 7 测深点反演结果与钻孔信息对比
Fig. 7 Comparison between inverted result and borehole information

5 结 论

1) CSAMT 法对于复杂地形山区深部煤系地层的勘探,是比较有效的一种方法.在复杂山区数据采集时,采用地形改正和静态校正的数据处理方法,提高了 CSAMT 法煤系地层勘查准确度.

2) 对有严重静态影响的原始数据采用有阈值的全剖面比较静态校正处理后,反演模型的响应曲线和原始曲线的拟合误差均小于 6%.

针对复杂山区受地形、静态严重影响的数据处理工作进行研究,对于提高原始数据的可信度有可取之处,也为 CSAMT 方法研究积累了一些经验.

致谢 感谢福建省煤田地质局所给予的帮助和支持,也感谢 Prof. Ganquan Xie 和王妙月研究员给予本稿中肯的建议和意见.

参考文献:

[1] 吴钦宝,陈同俊,陈凤云. 中国东部煤矿深部开采中的地质勘探技术[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2):370-373.

WU Qin-bao, CHEN Tong-jun, CHEN Feng-yun. Geological exploration techniques used in deep coalmining in China[J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(2):370-373.

[2] 刘树才,刘志新,姜志海. 瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4):414-417.

LIU Shu-cai, LIU Zhi-xin, JANG Zhi-hai. Application of TEM in hydrogeological prospecting of mining district[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2005, 34(4):414-417.

[3] 袁照令,沈 博,李大明,等. 高精度重磁勘探在推覆体下找煤中的应用[J]. 物探与化探, 1999, 23(4):283-289.

YUAN Zhao-ling, SHEN Bo, LI Da-ming, et al. The application of high resolution gravity and magnetic survey in coal exploration under nappe[J]. Geophysical & Geochemical exploration, 1999, 23(4): 283-289.

[4] 申 燕,邓爽岭,林建忠,等. 贵州桐梓煤田地面 γ 能谱法找煤试验研究[J]. 新疆地质, 2006, 24(2): 215-217.

SHEN Yan, DENG Shuang-ling, LIN Jian-zhong, et al. Exploration for coal by using upper R-ray spectra at the Tongzi colliery in Guizhou province[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(2):215-217.

[5] GOLDSTEIN M A. Magnetotelluric experiments employing an artificial dipole source[D]. Univ. Toronto, 1971.

[6] GOLDSTEIN M A, STRANGWAY D W. Audio frequency magnetotelluric with a grounded dipole source[J]. Geophysics, 1975, 40(4):669-683.

[7] SANDBERG S K, HOHMANN G W. Controlled-source audio-frequency magnetotellurics in geothermal exploration[J]. Geophysics, 1982, 47(1):100-116.

[8] BATREL L C, JACOBSON R. D. Results of a controlled-source audiofrequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area[J]. Geophysics, 1987, 52(4):665-677.

[9] 吴璐苹,石昆法,李荫槐,等. 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.

WU, Lu-ping, SHI Kun-fa, LI Yin-huai, et al. Ap-

- plied study of CSAMT method on ground water exploration[J]. *Geophysica Sinica*, 1996, 39(5):712-717.
- [10] WANNAMAKER P E. Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U. S. A, Part I: Implications for structure of the western caldera[J]. *Geophysics*, 1997, 62(2):451-465.
- [11] 王一新, 钟慧智, 姚治龙, 等. 可控源声频电磁测深法在油气勘探中的应用[J]. *河南石油*, 1995, 9(2):13-18.
- WANG Yi-xin, ZHONG Hui-zhi, YAO, Zhi-long, et al. The application of CSAMT method in exploring for oil-gas[J]. *Henan Petroleum*, 1995, 9(2):13-18.
- [12] BASOKUR A T, RASMUSSEN T M, KAYA C, et al. Comparison of induced polarisation and controlled-source audio-magnetotellurics methods for massive chalcopryite exploration in a volcanic area [J]. *Geophysics*, 1997, 62(6):1087-1096.
- [13] 于昌明. CSAMT 法在寻找隐伏金矿中的应用[J]. *地球物理学报*, 1998, 41(1):133-138.
- YU Chang-ming. The application of CSAMT method in looking for hidden gold mine[J]. *Geophysica Sinica*, 1998, 41(1):133-138.
- [14] BOERNER D E, WRIGHT J A, THURLOW J G, et al. Tensor CSAMT studies at the Buchans mine in central Newfoundland[J]. *Geophysics*, 1993, 58(1):12-19.
- [15] CHEN C S. Application of CSAMT method for gold-copper deposits in Chinkuashih Area, Northern Taiwan[J]. *TAO*, 1993, 4(4):339-350.
- [16] 李志华. 某新建铁路复杂长隧道岩层地质与 CSAMT 特征[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(4):1190-1195.
- LI Zhi-hua. Geology and CSAMT character of long complex railway tunnel[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(4):1190-1195.
- [17] 底青云, 王妙月, 石昆法. 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):744-754.
- DI Qing-yun, WANG Miao-yue, SHI Kun-fa. An applied study on prevention of water bursting disaster in mines with high resolution V6 system[J]. *Geophysica Sinica*, 2002, 45(5):744-754.
- [18] 底青云, 伍法权, 王光杰, 等. 地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(20):3631-3638.
- DI Qing-yun, WU Fa-quan, WANG Guang-jie, et al. Geophysical exploration over long deep tunnel for west route of South-to-North water transfer project [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(20):3631-3638.
- [19] CAGNIARD L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting[J]. *Geophysics*, 1953, 63(6), 605-635.
- [20] BOSTICK F X. Electromagnetic array profiling (EMAP) [C]// SEG Annual Meeting Expanded Technial Program Abstracts with Biographies, Houston:[s. n.], 1986: 60-61.
- [21] 安志国, 黄兆辉, 底青云. 几种静态校正方法的对比研究[C]// 中国地球物理二十二届年会. 成都: 四川科技出版社, 2006.

(责任编辑 姚志昌)

作者: [安志国](#), [底青云](#), [郭韶华](#), [AN Zhi-guo](#), [DI Qing-yun](#), [GUO Shao-hua](#)
作者单位: [安志国,底青云,AN Zhi-guo,DI Qing-yun\(中国科学院,地质与地球物理研究所,北京,100029\)](#), [郭韶华,GUO Shao-hua\(福建省煤田地质局,福建,沙县,365500\)](#)
刊名: [中国矿业大学学报](#)[\[ISTIC\]\[EI\]\[PKU\]](#)
英文刊名: [JOURNAL OF CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY](#)
年,卷(期): 2008, 37(1)
被引用次数: 3次

参考文献(21条)

1. 吴钦宝;陈同俊;陈风云 [中国东部煤矿深部开采中的地质勘探技术](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2005(02)
2. 安志国;黄兆辉;底青云 [几种静态校正方法的对比研究](#) 2006
3. 刘树才;刘志新;姜志海 [瞬变电磁法在煤矿采区水文勘探中的应用](#)[期刊论文]-[中国矿业大学学报](#) 2005(04)
4. 吴璐苹;石昆法;李荫槐 [可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 1996(05)
5. BATREL L C;JACOBSON R D [Results of a controlled-source audiofrequency magnetotelluric survey at the Puhimau thermal area](#) 1987(04)
6. SANDBERG S K;HOHMANN G W [Controlled-source audio-frequency magnetotellurics in geothermal exploration](#) 1982(01)
7. GOLDSTEIN M A;STRANGWAY D W [Audio frequency magnetotelluric with a grounded dipole source](#) 1975(04)
8. GOLDSTEIN M A [Magnetotelluric experiments employing an artificial dipole source](#) 1971
9. 申燕;邓爽岭;林建忠 [贵州桐梓煤田地面 \$\gamma\$ 能谱法找煤试验研究](#)[期刊论文]-[新疆地质](#) 2006(02)
10. 袁照令;沈博;李大明 [高精度重磁勘探在推覆体下找煤中的应用](#)[期刊论文]-[物探与化探](#) 1999(04)
11. BOSTICK F X [Electromagnetic array profiling \(EMAP\)](#) 1986
12. CAGNIARD L [Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting](#) 1953(63)
13. 底青云;伍法权;王光杰 [地球物理综合勘探技术在南水北调西线工程深埋长隧洞勘察中的应用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(20)
14. 底青云;王妙月;石昆法 [高分辨率V6系统在矿山顶板涌水隐患中的应用研究](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 2002(05)
15. 李志华 [某新建铁路复杂长隧道岩层地质与CSAMT特征](#)[期刊论文]-[地球物理学进展](#) 2005(04)
16. CHEN C S [Application of CSAMT method for gold-copper deposits in Chinkuashih Area, Northern Taiwan](#) 1993(04)
17. BOERNER D E;WRIGHT J A;THURLOW J G [Tensor CSAMT studies at the Buchans mine in central Newfoundland](#)[外文期刊] 1993(01)
18. 于昌明 [CSAMT法在寻找隐伏金矿中的应用](#)[期刊论文]-[地球物理学报](#) 1998(01)
19. BASOKUR A T;RASMUSSEN T M;KAYA C [Comparison of induced polarisation and controlled-source audio-magnetotellurics methods for massive chalcopyrite exploration in a volcanic area](#)[外文期刊] 1997(06)
20. 王一新;钟慧智;姚治龙 [可控源声频电磁测深法在油气勘探中的应用](#) 1995(02)
21. WANNAMAKER P E [Tensor CSAMT survey over the sulphur springs thermal area, Valles Caldera, New Mexico, U. S. A, Part I: Implications for structure of the western caldera](#)[外文期刊] 1997(02)

引证文献(3条)

1. 张琦伟. [安志国](#). [林万顺](#). [刘光华](#) [北京市潮白河、怀河地区奥运应急水源地CSAMT勘查研究](#)[期刊论文]-[地球物理学](#)

进展 2010(1)

2. 余传涛, 刘鸿福, 于艳梅, 马志飞 CSAMT法在煤矿隐伏断层探测中的应用[期刊论文]-CT理论与应用研究 2010(1)
3. 王若, 底青云, 王妙月, 王光杰 用积分方程法研究源与勘探区之间的三维体对CSAMT观测曲线的影响[期刊论文]-地球物理学报 2009(6)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgkydxxb200801023.aspx