

邱卫忠, 闫述, 薛国强, 等. CSAMT的各分量在山地精细勘探中的作用. 地球物理学进展, 2011, 26(2): 664~668, DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 035.

Qiu W Z, Yan S, Xue G Q, *et al.* Action of CSAMT field components in mountainous fine prospecting. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2011, 26(2): 664~668, DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 035.

CSAMT的各分量在山地精细勘探中的作用

邱卫忠¹, 闫述², 薛国强³, 陈明生⁴

(1. 山西省煤炭地质115勘查院, 大同 037003; 2. 江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013;

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 4. 煤炭科学研究总院西安研究院, 西安 710054)

摘要 为了在山地CSAMT精细勘探中取得好的效果, 充分利用标量观测中的全部信息, 在传统的比值视电阻率之外, 本文分别研究了构成比值的单分量电场和磁场。野外实测结果和理论分析表明: 电场对静态偏移、地形起伏等地表横向电性变化敏感, 磁场不受静态偏移的影响, 对地形影响不敏感; 噪声和其他干扰对电场和磁场的影响也不相同; 拟合反演计算表明CSAMT各分量及其比值对地层的纵向电性变化有着相同的分辨率。因此, 磁场可以作为静态和地形校正的基准, 以获得更客观的资料处理和解释成果, 当实测比值视电阻率受山地施工中不可避免的电磁噪声、电极接地和磁棒埋设不良等干扰时, 利用单个场量仍然有可能完成地质任务。

关键词 CSAMT, 单分量, 静态偏移, 地形影响, 拟合反演

DOI: 10.3969/j. issn. 1004-2903. 2011. 02. 035

中图分类号 P631

文献标识码 A

Action of CSAMT field components in mountainous fine prospecting

QIU Wei-zhong¹, YAN Shu², XUE Guo-qiang³, CHEN Ming-sheng⁴

(1. 115 Coal Geological Exploration Institute, Datong 037003, China; 2. School of Computer Science and

Telecommunication Engineering, Jiangsu University Zhenjiang 212013, China;

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;

4. Xi'an Branch, China Coal Research Institute, Xi'an 710054, China)

Abstract In order to obtain better results in CSAMT mountainous fine prospecting and exploit all information acquired from scalar measurement sufficiently, beside traditional specific apparent resistivity, we study single component electric and magnetic field respectively which composed it. Observed data from field and theoretical analysis exhibit that electric field is sensitive to static shift and topographic effects, i. e. transversal variation in resistivity, magnetic field is not subject to static shift and sensitive to topographic effect; noise and other interferences have different influences on electric field and magnetic field; fitting inversion computations show that each component and their specific value have the same longitudinal resolution of strata. Therefore, magnetic field could be used as datum for static and topographic correction to obtain more objective data processing and interpretation results, and when electromagnetic noise exists, the electrode and magnetic pole might be grounded and buried not very well inevitably in mountainous explorations that observes specific apparent resistivity have disturbed, the detection assignment could be completed by using single field components.

Keywords CSAMT, single component, static shift, topographic effect, fitting inversion

收稿日期 2010-10-15; 修回日期 2010-12-25.

基金项目 山西省科技攻关项目(工业):(20100321066)资助.

作者简介 邱卫忠, 男, 1963年生, 江苏常州人, 工程师, 副院长, 硕士, 从事煤田地质和电磁法勘探工作. (E-mail: 115qwz@sina. com)

0 引 言

山西是产煤大省,在煤炭开采过程中,安全生产是一个非常重要的问题.在为煤炭安全生产提供地质保障的电磁勘探方法中,可控源音频大地电磁测深(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric, CSAMT)由于探测深度大、分层能力强,横向分辨率高,在煤田水文地质勘探中获得了广泛的应用,探测积水老窑就是其中的一个重要任务. CSAMT 从天然场源的大地电磁测深(Magnetotelluric, MT)发展而来,采用了人工控制的激励源,提高了观测数据的信噪比和工作效率,并和 MT 方法一样可以穿透直流测深法难以穿透的高阻带.由于 CSAMT 是在 MT 的基础上发展起来的,它的方法理论和资料处理解释也沿用了 MT 法,如采用近场改正后的比值视电阻率等.但是,CSAMT 不完全等同于 MT 还有自身的特点,发掘 CSAMT 的特点,无论对于提高老窑探测精度,还是独立发展方法本身都具有理论和实际意义^[1~4].

1 CSAMT 方法和比值视电阻率的定义

在煤田水文地质 CSAMT 勘探中,通常采用标量的多道工作方式.例如 GDP32 和 V8 的一个排列为 7 道,其中 6 道电道,1 道磁道.发射源尽可能地远离接收点,使场处于远区以便接近 MT 的情况.在 MT 方法中,视电阻率由均匀大地表面上波阻抗定义为^[5,6]

$$Z_{TM} = Z_{TE} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{E_y}{H_x}, \quad (1)$$

式中下标 TM 表示横磁波、TE 表示横电波,由此导出比值视电阻率(或者叫做卡尼亚视电阻率)

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2, \quad (2)$$

其中 ω 、 μ 分别为圆频率和磁导率.

MT 的天然激励源是位于高空的电流层,对于地面勘探来说是远区场;CSAMT 的激励源是位于地面的水平电偶极子,不可能在观测的整个频段完全满足远区场的条件.由 MT 波阻抗定义的比值视电阻率,在实际应用中也取得了良好的地质效果.但山地积水老窑探测精度要求高,不能完全套用适应大构造勘探的 MT 的资料处理和解释方法,山地探测中的静态、地形影响^[7~12]对原本就微弱的地质异常造成了干扰,应利用各分量对这些影响的不同反映,进行有效的消除.

2 山地对 CSAMT 各分量的影响分析

3.1 静态偏移和地形影响

以山西大同煤田 V8 仪器采集的数据为例,分析山地探测中静态偏移和地形对观测数据产生的影响.如燕子山矿 315 盘区工地,属黄土覆盖的低山丘陵地貌.地下地层平缓、稳定,但地表在侵蚀切割作用下,造成电性不均匀引起静态偏移和地形影响.图 1 是其中的 L9 测线,测点点距 40 m,每隔 240 m 观测 1 个磁场.图 1(a)、(b)、(c)分别是同时观测电场和磁场测点上的比值视电阻率 ρ_a 、磁场单分量 H_y 、电场单分量 E_x ,图 1(d)、(e)分别是全部测点上电场 E_x 频道图和磁场 H_y 频道图,图 1(f)是该测线的地形剖面.在图 1(a)的双对数坐标中,测点 560 m 和 1520 m 两处的比值视电阻率曲线形态相似,点 1520 m 处的曲线整体向下平移了一段;其他的曲线彼此之间即有平移,也有曲线形态上的变化.比值视电阻率曲线同时受到了静态偏移和地形的影响,在有些测点上两者的影响是单独的,有些是交织在一起的;观察图 1(b)的单分量磁场 H_y ,可以看到各点磁场曲线没有明显的上下平移现象,7 个测点磁场曲线的总平均相对误差为 3.75%(比值视电阻率曲线为 84.5%、单分量电场为 36.4%)变化很小;而图 1(c)的电场曲线有和图 1(a)比值视电阻率曲线类似的平移和形态变化.根据静态偏移产生的机理,地表的电性不均匀仅对电场有影响不会对磁场产生影响^[13],电场受地表电性不均匀的影响是比值视电阻率曲线静态平移的原因,这些都为图 1(a)~(c)的实测曲线所证实.

对比图 1(d)、(e)和(f),可以观察到实测数据所反映的地形影响.在 0~720 m 这一段电场的变化与地形起伏相反,从 760~1400 m 地形的影响及在受到影响后电场的振荡变化,与静态偏移的影响交织在一起,1440~1640 m 电场频道图表现的是单纯的地形影响.电场的响应与理论和数值模拟的结果^[14,15]相一致.总之,实测电场 E_x 表现出了地形的影响.和静态偏移类似,磁场 H_y 对地形的影响也不敏感.图 1(e)所示的磁场频道图基本上是一条直线,只反映了深部的地质构造.由此可见,CSAMT 电场磁场的各分量对相同的地质构造有着不同的响应特征,因此有必要在 CSAMT 方法中发掘单分量视电阻率的作用.

3.2 单分量视电阻率

由单分量磁场 H_y 和电场 E_x 的远区场公式^[13]

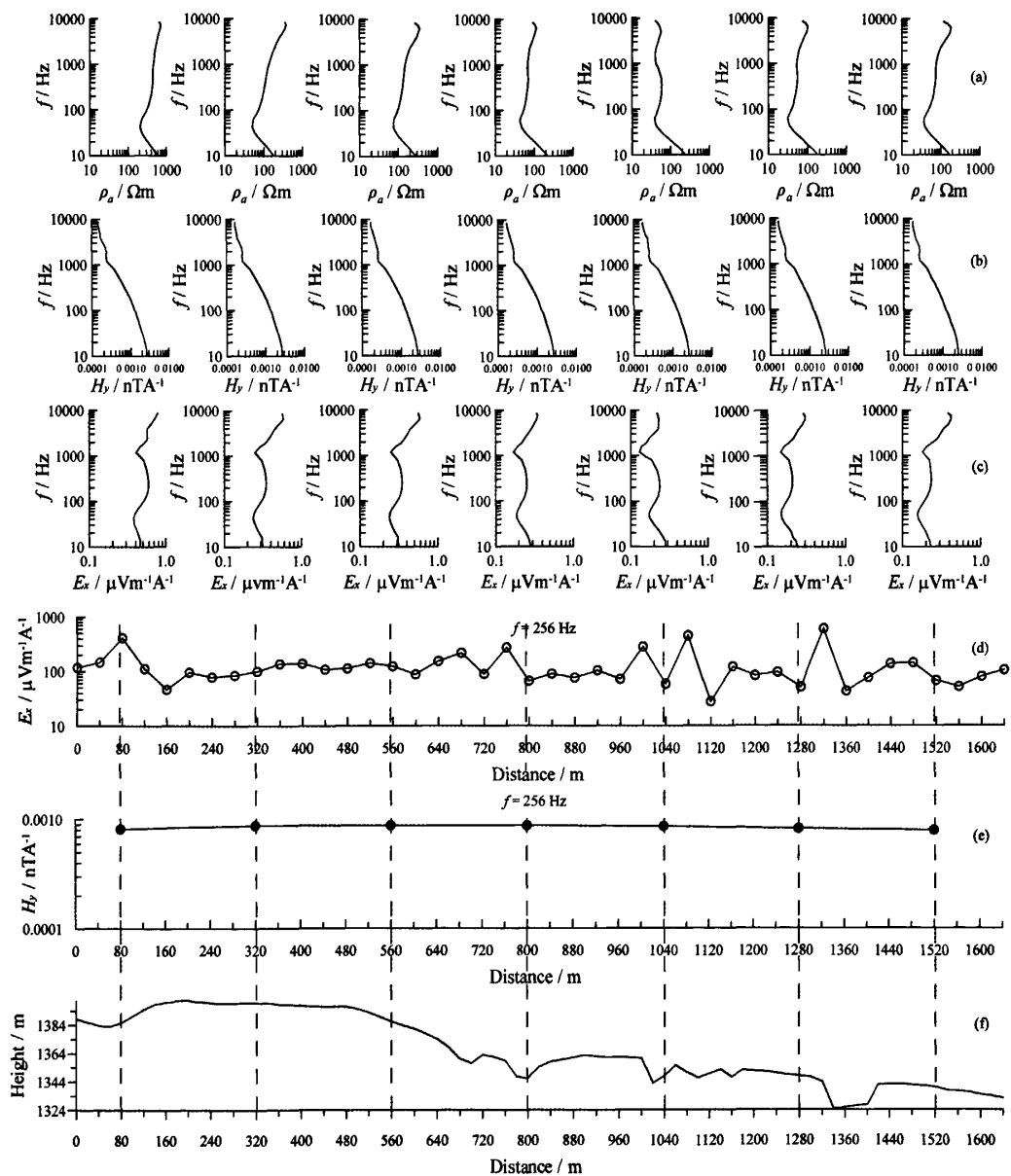


图 1 燕子山煤矿 315 盘区 CSAMT 勘探 L9 测线综合剖面图

(a) 比值视电阻率 ρ_a 曲线; (b) 磁场 H_y 曲线; (c) 电场 E_x 曲线; (d) 电场 E_x 频道图; (e) 磁场 H_y 频道图; (f) 地形剖面

Fig.1 Composed profil of CSAMT L9 line in Yanzishan coal mine 316 area

$$H_y = (1 + i) \frac{Ia}{4\pi \sqrt{2\omega\mu\sigma}} \frac{1}{r^3} (3\cos 2\theta - 1), \quad (3)$$

$$E_x = \frac{Ia}{4\pi\sigma} \frac{1}{r^3} (3\cos 2\theta - 1), \quad (4)$$

导出单分量视电阻率

$$\rho_{H_y} = \frac{16\pi^2\omega\mu r^6}{9(Ia)^2} \left| \frac{H_y}{3\cos(2\theta) - 1} \right|, \quad (5)$$

$$\rho_{a^x}^E = \frac{4\pi r^3}{Ia} \left| \frac{E_x}{3\cos(2\theta) - 1} \right|. \quad (6)$$

在上面公式中 Ia 是电偶极距, r 是发射到接收之间的距离, θ 是 r 与发射电偶极的夹角. 比较 (3)、(4) 两式可以看到, 大地电导率与电场是线性关系, 与磁场是平方根的关系. 磁场对大地电性参数的变化较不敏感, 这也是 CSAMT 一个排列中 6 个电道

可以共用 1 个磁道的原因。用磁场做静态偏移校正可以克服空间滤波、小波滤波的校正不足或过头现象,比数值模拟方法简单、快速,为曲线平移法提供可靠的基础数据^[7]。还可以利用磁场受地形影响小的特点,取得深部地层的基本参数,对电场(实际上也就是对比值视电阻率)进行地形校正,获得更高的横向分辨率。总之,磁场的 H_y 分量对地表电性不均匀和地形影响不敏感,可以在 CSAMT 资料处理中用做静态偏移校正和地形影响校正的基准。

3.3 CSAMT 各分量的不同观测质量

除了静态偏移和地形影响以外,CSAMT 观测的各分量在噪声干扰下也会有不同的性状。一般来说,一个排列所测的电场与磁场同时受到相同噪声源的干扰,观测数据发生相似的偏差,采用比值视电阻率可抵消干扰,但情况也并不是完全如此,电磁干扰的方向不同, x 向电场和 y 向的磁场收到的干扰可

能就不同;磁性源和电性源的干扰对磁接收和电接收的干扰也会不同;施工中磁棒和电极的连接、埋设、接地的好坏也可能有差异。因此,电场和磁场的观测质量也会不同。图 2 为大同姜家湾工区 L1 测线共 10 个测点的实测曲线,该区地面平缓、电性均匀,但电、磁场的观测质量不同。

图 2(a)中第 1 个排列的比值视电阻率曲线畸变严重;观察图 2(b)电场曲线发现,排列(1)中只有 1、2 号点的电场受到干扰,其他测点电场正常;由图 2(c)可知第(1)个排列的磁场畸变影响了整个排列的比值视电阻率。由图 2 还可以看到,第(2)个排列的电、磁场数据都正常,比值电阻率也正常。因此,当比值视电阻率观测质量达不到要求时,可进一步观察电或磁场分量,挖掘可用数据。

4 各单分量拟合反演效果比较

由前面的分析可知,CSAMT 各分量对各类干扰和地表横向电性不均匀有着不同的敏感程度,本节通过理论上的曲线拟合反演分析各分量及其比值的纵向电性分辨能力。表 1 列出了 H 型地层各分量拟合的结果。可以看出,电场、磁场、及其比值视电阻率的拟合效果相差无几。公式(3)表明 y 分量磁场对地表的横向电性变化即静态偏移、地形影响不敏感,野外实测数据图 1(b)、(e)也证实了这一点,但 H_y 对纵向电性变化的敏感程度与 E_x 相当,因此用来对电场做地形校正也是可行的;CSAMT 单分量既不用进行近场改正也无需作全区视电阻率计算,不会影响拟合反演的效果,单分量的计算还可以得到更好的反演稳定性和收敛性。应用中区场公式的曲线拟合反演不必再做近场改正,解释结果更接近真实地质构造。

表 1 单分量和比值视电阻率拟合反演结果比较

Table 1 Comparison of fitting inverse results between signal and ratio apparent resistivity

地层参数	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	ρ_3 (Ωm)	h_1 (m)	h_2 (m)
实际模型	100	50	300	150	50
初始模型	50	100	300	100	40
E_x 反演	100.0	50.42	300.2	149.6	50.64
H_y 反演	100.0	51.92	300.5	148.6	53.08
比值反演	100.3	50.20	300.2	149.8	50.34
拟合差 %	E_x : 0.0071, H_y : 0.0097, ρ_a : 0.0091				

注: $R=1000\text{ m}$, 频率范围 $f=10.67\sim8533\text{ Hz}$, 共 29 个频点。

5 结论与讨论

5.1 CSAMT 的各分量对地表的横向电性变化和

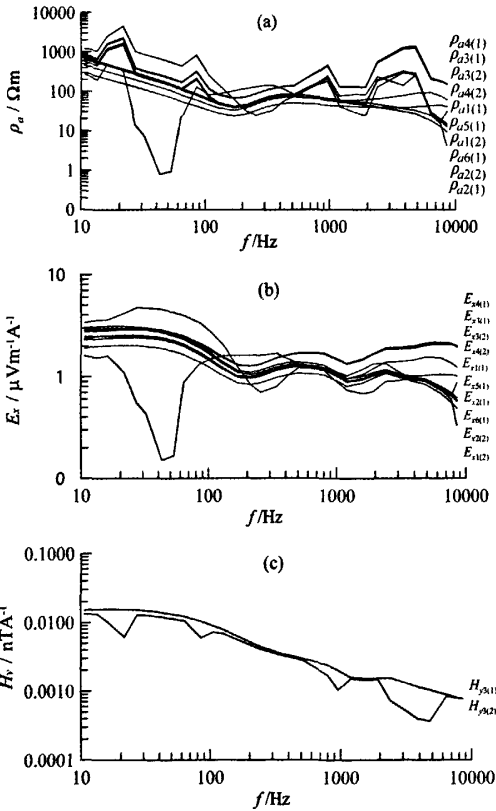


图 2 姜家湾 CSAMT 勘探 L1 测线实测曲线图
(a) 比值视电阻率曲线, (b) 电场 E_x 曲线, (c) 磁场 H_y 曲线。
图中下标 1(1)表示排列(1)的 1 号点

Fig. 2 Measurement CSAMT curves of L1 line
in Yangjiawan

各类干扰有着不同的响应,但对地层的纵向电性变化的分辨能力是相同的.充分利用这些特点可以在山地探测中有效地对静态偏移、地形影响进行校正,挖掘畸变数据中的可用信息,使积水老窑等精细探测有所突破.

5.2 在 CSAMT 的资料处理和解释中,单分量电场和磁场及其比值视电阻率的使用要根据实际情况而定.例如博斯蒂克反演应使用比值视电阻率,因单分量曲线的假极值(图 1(b)、(c)中 $f=1200$ Hz 附近),在相比后可部分抵消;曲线拟合选用观测质量好的分量即可;磁场对地表电性不均匀和地形影响不敏感可用来校正电场;电场横向分辨率较高可在地质大体确定之后对断层、局部异常给予判定.

5.3 传统上 CSAMT 勘探的基础数据是比值视电阻率,仪器配备的软件大多也是针对于此的.但是电磁勘探解释是一个非常复杂的过程,本文以构成比值的单分量作为基础数据,力图通过综合运用野外观测得到的全部信息,求得更好的地质效果.

参 考 文 献 (References):

- [1] 赵国泽, Nikolay Palshin, 黄清华. 地球电磁法研究新进展——“第 19 届国际地球电磁感应学术研讨会”专辑[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 469~478.
Zhao G Z, Palshin N, Huang Q H. Recent advances of geoelectromagnetic methods—preface to the special issue on “The 19th International Workshop on Electromagnetic Induction in the Earth”[J]. Chinese Journal Geophysics, 2010, 53(3): 469~478.
- [2] 李帝铨, 张永超, 薛融晖, 等. CSAMT 在某重大城市活动断层探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2010, 25(4): 1387~1395.
Li D Q, Zhang Y C, Xue R H, et al. Application of CSAMT to detection of active faults [J]. Progress in Geophysics, 2010, 25(4): 1387~1395.
- [3] 成江明. 可控源音频大地电磁法在隐伏煤矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 2008, 23(4): 1269~1272.
Cheng J M. Application of CSMAT method in hidden coalmine [J]. Progress in Geophysics, 2008, 23(4): 1269~1272.
- [4] 王若, 王妙月. 一维全资料 CSAMT 反演[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 107~114.
Wang R, Wang M Y. Inversion of 1D full CSAMT data [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 107~114.
- [5] Cagniard L. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting [J]. Geophysics, 1953, 18: 605~635.
- [6] 闫述, 傅君眉. 低频谱变电磁偶极源激发的地下电磁场的闭式解煤田地质与勘探[J]. 2003, 31(3): 49~51.
Yan S, Fu J M. The closed form expressions of the electromagnetic field in the earth by a low2frequency harmonic electric dipole [J]. Coal Geology & Exploration, 2003, 31(3): 49~51.
- [7] 张翔, 陈清礼, 苏朱刘, 等. 同步阵列大地电磁测深法及其在山区的应用技术与效果[J]. 石油物探, 1999, 38(3): 93~100, 75.
Zhang X, Chen Q L, Su Z L, et al. Synchroarray magnetotelluric sounding method and its application in mountainous areas [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 1999, 38(3): 93~100, 75.
- [8] 蔡军涛, 陈小斌, 赵国泽. 大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究(一)——阻抗张量分解与构造维性分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2516~2526.
Cai J T, Chen X B, Zhao G Z. Refined techniques for data processing and two-dimensional inversion in magnetotelluric I: Tensor decomposition and dimensionality analysis [J]. Chinese Journal Geophysics, 2010, 53(10): 2516~2526.
- [9] 黄兆辉, 底青云, 侯胜利. CSAMT 的静态效应校正及应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(4): 1290~1295.
Huang Z H, Di Q Y, Hou S L. CSAMT static correction and its application [J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(4): 1290~1295.
- [10] 雷达. 起伏地形下 CSAMT 二维正反演研究与应用[J]. 地球物理学报, 2010, 53(4): 982~993.
Lei D. Studies and applications of 2-D CSAMT modeling and inversion with a dipole source and topography [J]. Chinese Journal Geophysics, 2010, 53(4): 982~993.
- [11] 闫述, 陈明生. 电偶源频率电磁深三维地电模型有限元正演[J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(3): 50~56.
Yan S, Chen M S. Finite element solution of three-dimensional geoelectric models in frequency electromagnetic sounding excited by a horizontal electric dipole [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(3): 50~56.
- [12] 胡祖志, 何展翔, 孙卫斌, 等. 一种改进的大地电磁地形校正方法及相关问题探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(3): 343~348.
Hu Z Z, He Z X, Sun W B, et al. An improved MT topographic correction method and discussion on relative issues [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2008, 43(3): 343~348.
- [13] 陈明生, 闫述. 论频率测深应用中的几个问题[M]. 地质出版社, 1995: 69~72, 9.
Chen M S, Yan S. Problems in frequency electromagnetic soundings[M]. Beijing: Geology Press, 1995: 69~72, 9.
- [14] 阎述, 陈明生, 李志民. 频率测深二维地形影响的边界元素法正演模拟[J]. 物探化探技术, 1996, 18(4): 310~319, 324.
Yan S, Chen M S, Li Z M. Boundary element method forward solution of two dimension topography effect electromagnetic frequency sounding [J]. computing techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 1996, 18(4): 310~319, 324.
- [15] 陈明生, 闫述. CSAMT 勘探中场区、记录规则、阴影及场源复印效应的解析研究[J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 951~958.
Chen M S, Yan S. Analytical study on field zones, record rules, shadow and source overprint effects in CSAMT exploration[J]. Chinese Journal Geophysics, 2005, 48(4): 951~958.

作者：[邱卫忠](#)，[闫述](#)，[薛国强](#)，[陈明生](#)，[QIU Wei-zhong](#)，[YAN Shu](#)，[XUE Guo-qiang](#)，[CHEN Ming-sheng](#)

作者单位：[邱卫忠](#)，[QIU Wei-zhong](#) (山西省煤炭地质115勘查院, 大同, 037003)，[闫述](#)，[YAN Shu](#) (江苏大学计算机科学与通信工程学院, 镇江, 212013)，[薛国强](#)，[XUE Guo-qiang](#) (中国科学院地质与地球物理研究所, 北京, 100029)，[陈明生](#)，[CHEN Ming-sheng](#) (煤炭科学研究总院西安研究院, 西安, 710054)

刊名：[地球物理学进展](#) **ISTIC PKU**

英文刊名：[PROGRESS IN GEOPHYSICS](#)

年，卷(期)：2011, 26 (2)

参考文献(15条)

1. [陈明生;闫述](#) [CSAMT勘探中场区、记录规则、阴影及场源复印效应的解析研究](#) 2005 (04)
2. [阎述;陈明生;李志民](#) [频率测深二维地形影响的边界元素法正演模拟](#) 1996 (04)
3. [陈明生;闫述](#) [论频率测深应用中的几个问题](#) 1995
4. [胡祖志;何展翔;孙卫斌](#) [一种改进的大地电磁地形校正方法及相关问题探讨](#) 2008 (03)
5. [闫述;陈明生](#) [电偶源频率电磁测深三维地电模型有限元正演](#) 2000 (03)
6. [雷达](#) [起伏地形下CSAMT二维正反演研究与应用](#) 2010 (04)
7. [黄兆辉;底青云;候胜利](#) [CSAMT的静态效应校正及应用](#) 2006 (04)
8. [蔡军涛;陈小斌;赵国泽](#) [大地电磁资料精细处理和二维反演解释技术研究\(一\)—阻抗张量分解与构造维性分析](#) 2010 (10)
9. [张翔;陈清礼;苏朱刘](#) [同步阵列大地电磁测深法及其在山区的应用技术与效果](#) 1999 (03)
10. [闫述;傅君眉](#) [低频谐波电偶极源激发的地下电磁场的闭式解](#) 2003 (03)
11. [Cagniard L](#) [Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting](#) 1953
12. [王若;王妙月](#) [一维全资料CSAMT反演](#) 2007 (01)
13. [成江明](#) [可控源音频大地电磁法在隐伏煤矿区的应用](#) 2008 (04)
14. [李帝铨;张永超;薛融晖](#) [CSAMT在某重大城市活动断层探测中的应用](#) 2010 (04)
15. [赵国泽;Nikolay Palshin;黄清华](#) [地球电磁法研究新进展——“第19届国际地球电磁感应学术研讨会”专辑](#) 2010 (03)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_dqwlxjz201102035.aspx