

doi: 10.11720/wtyht.2016.1.33  
侯东洋,薛国强,陈卫营.SOTEM 与 CSAMT 对低阻层的分辨能力比较[J].物探与化探,2016,40(1):185-189.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.1.33  
Hou D Y,Xue G Q,Chen W Y.Distinguishing capability of SOTEM and CSAMT for low resistivity layer[J].Geophysical and Geochemical Exploration, 2016,40(1):185-189.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.1.33

# SOTEM 与 CSAMT 对低阻层的分辨能力比较

侯东洋<sup>1,2</sup>,薛国强<sup>1,2,3</sup>,陈卫营<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院 矿产资源研究重点实验室,北京 100029;2.中国科学院 地质与地球物理研究所,北京 100029;3.国土资源部 煤炭资源勘查与综合利用重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘 要:**克服低阻覆盖层的屏蔽以及实现对地下低阻层的有效探测,一直是勘探电磁法面临的重要问题。电性源短偏移瞬变电磁法(SOTEM)采用近源观测,受到越来越多关注。为了分析 SOTEM 的探测能力,开展了与目前普遍使用的电性源频率域装置——可控源音频大地电磁法(CSAMT)的对比性研究。首先分析了 SOTEM 和 CSAMT 在一维层状介质下的理论响应特征,然后,分别设计了不同情况下低阻覆盖层和地下低阻夹层两组地电模型,通过计算相对异常误差,分析了二者的探测能力。研究结果表明:SOTEM 比 CSAMT 对低阻覆盖层更加敏感,对低阻夹层的探测能力更强,更有利于探测地下导电夹层。  
**关键词:**电性源短偏移瞬变电磁法(SOTEM);可控源音频大地电磁法(CSAMT);低阻层;分辨能力  
**中图分类号:**P631      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-8918(2016)01-0185-05

克服低阻覆盖层的屏蔽并实现对地下低阻层的有效探测,一直是勘探电磁法的重要问题。对于在煤田地质勘探、金属矿探测、地热勘查、油气调查等领域普遍使用的回线源瞬变电磁法装置和可控源音频大地电磁法(CSAMT)装备,许多学者进行了相关的研究<sup>[1-5]</sup>。牛之琰<sup>[6]</sup>结合野外实例探讨了瞬变电磁法对导电层的探测能力;薛国强等<sup>[7]</sup>以晚期视电阻率为基础,研究了不同参数下瞬变电磁法对薄层的探测能力;王战军等<sup>[8]</sup>以全区视电阻率为基础,分析了回线源瞬变电磁对低阻层的分辨能力;武军杰等<sup>[9]</sup>研究了 TEM 对深部低阻层的分辨能力。CSAMT 是频率域电磁法中较为广泛应用的装置,殷长春<sup>[10]</sup>进行了 CSAMT 一维正演以及三种方法的精度比较;龚飞<sup>[11]</sup>进行了煤矿中典型 CSAMT 视电阻率曲线一维模拟;安志国等<sup>[12]</sup>分别研究了 TM 和 TE 模式下,CSAMT 对低阻薄层结构的分辨能力;汤井田等<sup>[13]</sup>研究了 CSAMT 视电阻率曲线对水平层状大地的识别和分辨;王若等<sup>[14]</sup>研究分析了 CSAMT 一维层状介质的灵敏度,为地下薄目标层的有效识别提供了理论依据。

电性源短偏移距瞬变电磁装置采用两端接地的长导线源供以阶跃电流,在旁侧一定范围内接收二次场电磁信号,以达到测深目的。作为一种新方法<sup>[15]</sup>,近年来受到越来越多的关注<sup>[16-17]</sup>,陈卫营等<sup>[18]</sup>以垂直磁场  $H_z$  为目标,分析了不同参数下,电性源对薄层的探测能力。  
为了更好地推广 SOTEM 及指导野外生产,在以往对回线源瞬变电磁法、CSAMT 对低阻层的探测能力研究基础上,需要开展与目前普遍使用的电性源频率域装置——CSAMT 进行对比性研究。笔者首先分析了 SOTEM 和 CSAMT 在一维层状介质下的理论响应特征,然后,分别设计了不同情况下低阻覆盖层和地下低阻夹层两组地电模型,基于其相对异常误差,对比分析了二者的探测能力。

### 1 SOTEM 和 CSAMT 响应理论机制

人工电偶极源电磁法的原理是通过两端接地的长导线源(图 1),向地下供以不同形式的发送电流,电场和磁场间交互感应激发,如变化的磁场激发涡旋状的电场,变化的电场又激发涡旋状的磁场,电磁

波通过这种交互感应运动和传播,在一定的范围内接收来自地下目标体感应场信号,以达到勘探的目的。

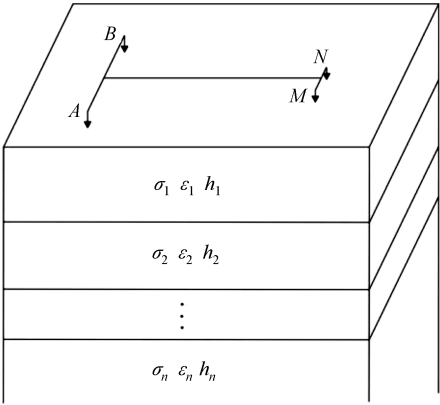


图 1 人工电偶极源示意

人工电偶极源电磁场响应公式<sup>[19]</sup>

$$E_x = \frac{Ia}{4\pi\sigma_1 r^3} [2e^{ik_1 r} (1 - ik_1 r) + 3\cos 2\theta - 1], \quad (1)$$
$$H_y = \frac{Ia}{2p} \frac{1}{r^2} I_1 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) K_1 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) + \frac{iIa}{8\pi} \frac{k_1}{r} (\cos 2\theta - 1) \cdot \left[ I_2 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) K_1 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) - I_1 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) K_2 \left( -\frac{ik_1 r}{2} \right) \right]. \quad (2)$$

由于在场源附近主要存在自有场,场源消失则自有场消失,不具备变频测深的能力;在远场情况下,主要存在辐射场,在频率域电磁勘探中,变频测深能力就来源于辐射场。为了使具变频测深能力的辐射场占主导地位,应使 CSAMT 在远区观测。CSAMT 远场情况下的电磁场公式<sup>[20-22]</sup>

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

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

其中: $I$  为供电电流强度, $AB$  为供电偶极长度, $r$  为场源到接收点之间的距离。

将式(3)沿  $x$  方向的电场  $E_x$  与式(4)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

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

其中: $f$  代表频率。由式(5)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  $\rho_s$ ,也称卡尼亚电阻率。

对于瞬变电磁场,当采用阶跃源进行激发时,在

阶跃源关断后观测纯二次场,由此将自有场和辐射场分离开来,获得短偏移距的深部探测能力。所以, SOTEM 可以在近场进行探测(图 2)。而且,由于观测点离发射源较近,一方面可以提高信号强度和数据质量,另一方面大大降低了勘探体积效应和静态偏移效应的影响。

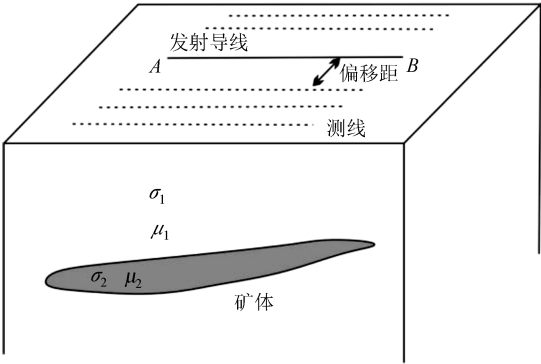


图 2 SOTEM 工作示意

按照偶极子叠加原理,层状介质中长接地导线源在地表产生的频率域垂直磁场计算公式为<sup>[23]</sup>

$$H_z(\omega) = \frac{Iy}{4\pi} \sum_{n=1}^N \frac{\Delta x}{r_n} \int_0^\infty (1 + r_{TE}) e^{u_0 z} \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda r_n) d\lambda, \quad (6)$$

其中: $(x, y, z)$  为接收点坐标, $r_n$  为接收点到偶极子的距离, $r_{TE}$  为 TE 模式下的反射系数, $J_1(\lambda r)$  为一阶贝塞尔函数。得到频域响应后利用傅里叶变化得到时间域响应<sup>[24]</sup>

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln[f(\omega)]}{\omega} \cos(\omega t) d\omega. \quad (7)$$

对于电磁法来说,所谓对地层的探测能力是指某种方法装置在目标层所产生的异常场超过背景场的水平,并且依据此种方法的理论可以从异常场提取地层信息的能力。相对异常的计算公式为

$$P = \frac{|F_a - F_0|}{F_0} \times 100\%, \quad (8)$$

其中: $F_a$  为存在低阻层时的电磁响应, $F_0$  为不存在低阻层时均匀半空间的电磁响应。 $P$  值越大表示低阻层产生的相对异常越大,其就越容易被识别。

## 2 低阻覆盖层情况数值模拟对比

首先设计一组地电模型(图 3),包括均匀半空间模型和二层模型,然后分别进行 SOTEM、CSAMT 响应计算。

采用如下参数进行模拟:低阻覆盖层厚度为 100 m,逐渐改变其电阻率,分别为 50、100、150、200  $\Omega \cdot m$ ,而大地的电阻率为 300  $\Omega \cdot m$ 。



图 3 地电模型

对于 SOTEM,发射源长度  $AB=1\,000\text{ m}$ ,偏移距  $r=1\,000\text{ m}$ ,电流为  $10\text{ A}$ 。对于 CSAMT,发射源长度  $AB=1\,000\text{ m}$ ,偏移距  $r=4\,000\text{ m}$ ,电流为  $10\text{ A}$ 。

2.1 低阻覆盖层情况下 SOTEM 数值模拟结果

从图 4 可以看出,当低阻层厚度一定,而电阻率变化时,其电阻率越小,其与均匀半空间的差别就越大,反应就越明显。随着其电阻率逐渐增大,其衰减曲线就越接近于均匀半空间的情况。

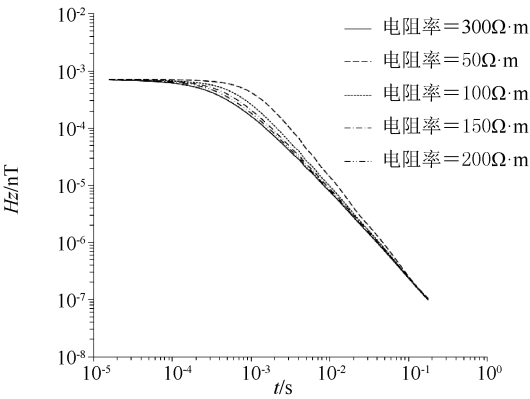


图 4 不同低阻覆盖层下  $H_z$  随时间的衰减曲线

根据相对异常公式以及  $H_z$  的数值,算出不同低阻覆盖层情况下,相对异常的最大值(表 1),从表中可知,低阻覆盖层电阻率为  $50\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,厚度为  $100\text{ m}$  时,其相对异常的最大值约为  $177.7\%$ ,随着厚度的增加,其相对异常急剧增大。可见其对低阻覆盖层比较敏感,反应较大。

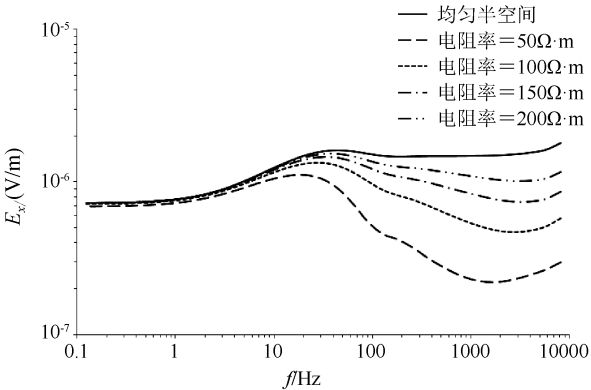
表 1 不同低阻覆盖层情况下,相对异常的极大值 %

| 厚度/m | $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$ |       |       |      |
|------|------------------------------|-------|-------|------|
|      | 50                           | 100   | 150   | 200  |
| 100  | 177.7                        | 63.3  | 30.1  | 14.5 |
| 300  | 505.8                        | 166.3 | 78.5  | 36.8 |
| 500  | 742.9                        | 240.1 | 108.1 | 51.4 |

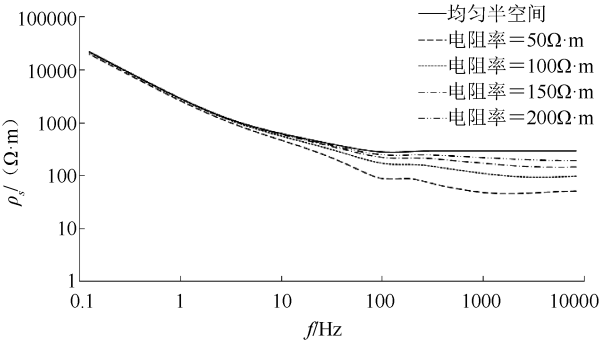
2.2 低阻覆盖层情况下 CSAMT 数值模拟结果

从图 5 可以看出,当低阻层厚度一定,电阻率越小,与均匀半空间的差别就越大,反应越明显。随着电阻率逐渐增大,其电阻率曲线接近于均匀半空间

的情况。



(a) 不同低阻覆盖层下  $E_x$  随着频率的变化



(b) 不同低阻覆盖层下视电阻率随频率的变化曲线

图 5 CSAMT 数值模拟结果

根据相对异常公式以及  $E_x$  的数值,算出不同低阻覆盖层情况下,相对异常的最大值(表 2),从表中可知,低阻覆盖层电阻率为  $50\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,厚度为  $100\text{ m}$  时,相对异常的最大值约为  $85\%$ ,随着厚度的增加,其相对异常变化不大,可见其对低阻覆盖层同样敏感,但是比 SOTEM 的反应小的多。

表 2 不同低阻覆盖层情况下,相对异常的极大值 %

| 厚度/m | $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$ |      |      |      |
|------|------------------------------|------|------|------|
|      | 50                           | 100  | 150  | 200  |
| 100  | 84.6                         | 68.9 | 52.2 | 35.0 |
| 300  | 86.3                         | 69.1 | 52.3 | 35.1 |
| 500  | 88.8                         | 71.9 | 54.1 | 35.7 |

3 低阻夹层情况数值模拟对比

当存在低阻夹层时,首先设计一组三层地电模型,然后分别进行 SOTEM、CSAMT 响应计算。

采用如下参数进行模拟:第一层厚度为 300 m,电阻率为 300 Ω·m,第二层厚度为 100 m,逐渐改变其电阻率,分别为 50、100、150、200 Ω·m,第三层的电阻率为 300 Ω·m(图 6)。

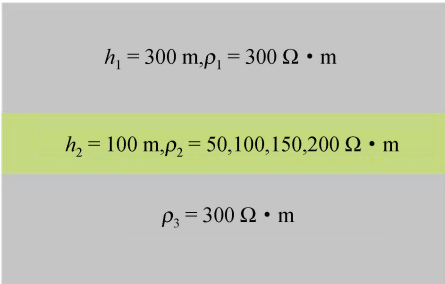


图 6 三层地电模型

对于 SOTEM,发射源长度  $AB=1\,000\text{ m}$ ,收发距为  $1\,000\text{ m}$ ,电流为  $10\text{ A}$ 。对于 CSAMT,发射源长度  $AB=1\,000\text{ m}$ ,收发距为  $4\,000\text{ m}$ ,电流为  $10\text{ A}$ 。

3.1 低阻夹层情况下 SOTEM 数值模拟结果

从图 7 可以看出,当低阻夹层厚度一定时,电阻率越小,其与均匀半空间的差别就越大,反应就越明显。随着其电阻率逐渐增大,其电阻率曲线就越接近于均匀半空间的情况。

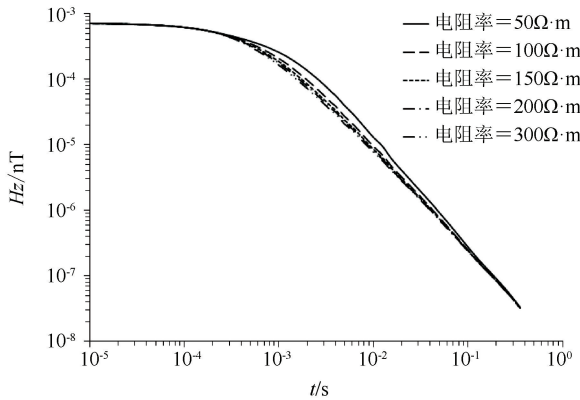


图 7 不同低阻夹层情况下  $H_z$  随时间的衰减曲线

从表 3 可以看出,当地下低阻夹层的电阻率为  $50\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,厚度为  $100\text{ m}$  时,其相对异常的最大值大约为  $94.8\%$ ,随着厚度的增加,其相对异常急剧增大。可见 SOTEM 对低阻夹层较为敏感,能够有效地探测出地下低阻薄夹层。

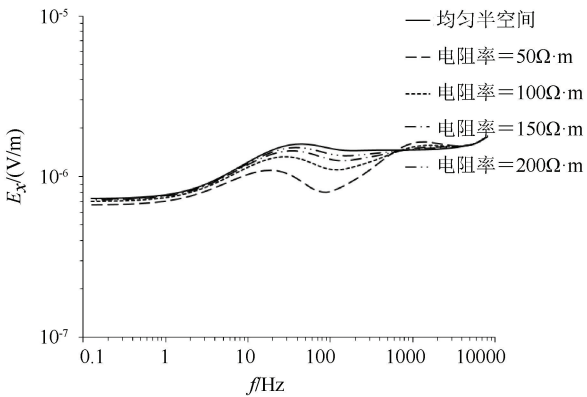
3.2 低阻夹层情况下 CSAMT 数值模拟结果

从图 8 可以看出,当低阻夹层厚度一定时,电阻率越小,其与均匀半空间的差别就越大,反应就越明

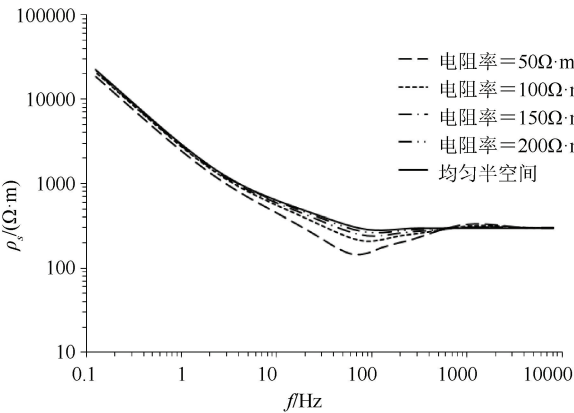
显。随着其电阻率逐渐增大,曲线就越接近于均匀半空间的情况。

表 3 不同夹层情况下,相对异常的极大值 %

| 厚度/m | $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$ |      |      |      |
|------|------------------------------|------|------|------|
|      | 50                           | 100  | 150  | 200  |
| 100  | 94.8                         | 34.9 | 16.7 | 8.3  |
| 200  | 190.9                        | 66.9 | 31.7 | 15.4 |
| 300  | 272.1                        | 94.8 | 44.8 | 21.5 |



(a) 不同电阻率下  $E_x$  随频率的变化



(b) 不同电阻率下视电阻率随频率的变化

图 8 CSAMT 数值模拟结果

从表 4 可以看出,当夹层电阻率为  $50\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ ,厚度为  $100\text{ m}$  时,其相对异常最大值为  $53.6\%$ ,随着厚度的增大,相对异常增大的幅度较小。说明 CSAMT 对低阻夹层同样敏感,具有探测低阻夹层的能力。但是,CSAMT 的相对异常比 SOTEM 小的多,可见 SOTEM 对低阻夹层更加敏感,对低阻夹层的探测能力更为明显。

表 4 不同夹层情况下,相对异常的极大值 %

| 厚度/m | $\rho/(\Omega\cdot\text{m})$ |      |      |      |
|------|------------------------------|------|------|------|
|      | 50                           | 100  | 150  | 200  |
| 100  | 47.3                         | 26.0 | 14.5 | 7.8  |
| 200  | 62.1                         | 38.5 | 23.8 | 13.3 |
| 300  | 69.1                         | 46.4 | 29.2 | 17.1 |

4 结论

SOTEM 比 CSAMT 对于低阻覆盖层、地下低阻

夹层更加敏感,对其探测能力更强,更有利于探测地下导电夹层。

参考文献:

[1] 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.

[2] Newman G A. Deep transient electromagnetic soundings with a grounded source over near-surface conductors [J]. Geophysical Journal International, 1989, 98(3): 587-601.

[3] 严良俊, 胡文宝. 长偏移距瞬变电磁测深的全区视电阻率求取及快速反演方法[J]. 石油地球物理勘探, 1999, 34(5): 532-538.

[4] 周楠楠, 薛国强, 李海. 回线源瞬变电磁水平分量对薄层的分辨能力[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(5): 2347-2355.

[5] 薛国强, 邓湘. 瞬变电磁法对薄层的探测能力[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 42(6): 709-713.

[6] 牛之琰. 瞬变电磁测深法对导电层的探测能力[J]. 地质与勘探, 1992, 28(7): 37-40.

[7] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.

[8] 王战军, 朱自强, 李建慧, 等. 瞬变电磁法对低阻薄层的分辨能力研究[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(6): 646-651.

[9] 武军杰, 杨毅, 张杰, 等. TEM 对于深部低阻层的分辨能力模拟分析[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(5): 547-554.

[10] 殷长春. 可控源音频大地电流法一维正演及精度评价[J]. 长春地质学院学报, 1994, 24(4): 438-443.

[11] 龚飞, 底青云. 某煤矿典型 CSAMT 法视电阻率曲线的一维模拟[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 631-634.

[12] 安志国, 底青云. CSAMT 法对低阻薄层结构分辨能力的探讨[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 27(2): 32-38.

[13] 汤井田, 周聪, 邓晓红. CSAMT 视电阻率曲线对水平层状大地的识别与分辨[J]. 地质与勘探, 2010, 46(6): 1079-1086.

[14] 王若, 殷长春, 王妙月, 等. CSAMT 法一维层状介质灵敏度分析[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(3): 1284-1291.

[15] 薛国强, 陈卫营, 周楠楠, 等. 接地源瞬变电磁短偏移深部探测技术[J]. 地球物理学报, 2013, 56(1): 255-261.

[16] Zhou N N, Xue G Q, Chen W, et al. Large-depth hydrogeological detection in the North China-type coalfield through short-offset grounded-wire TEM[J]. Environmental Earth Sciences, 2015: 1-12.

[17] Chen W Y, Xue G Q, Muhammad Y K, et al. Application of Short-Offset TEM (SOTEM) technique in mapping water-enriched zones of coal stratum, an example from east China[J]. Pure and Applied Geophysics, 2015, 172(6): 1643-1651.

[18] 陈卫营, 薛国强. 电性源瞬变电磁对薄层的探测能力[J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 775-779.

[19] 曹昌祺. 水平电偶极变频测深的低频特性和对高阻层的穿透问题[J]. 地球物理学报, 1982, 25(6): 516-537.

[20] 汤井田, 周聪, 肖晓. 复杂介质条件下 CSAMT 最小收发距的选择[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(6): 1681-1693.

[21] 王显祥, 底青云, 许诚. CSAMT 的多偶极子源特征与张量测量[J]. 地球物理学报, 2014, 57(2): 651-661.

[22] 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.

[23] 米萨克 N 纳比吉安. 勘查地球物理: 电磁法(第一卷)[M]. 赵经祥, 王艳君, 译. 北京: 地质出版社, 1992.

[24] 牛之琰. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1992.

Distinguishing capability of SOTEM and CSAMT for low resistivity layer

HOU Dong-Yang<sup>1,2</sup>, XUE Guo-Qiang<sup>1,2,3</sup>, CHEN Wei-Ying<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and comprehensive Utilization, Ministry of land and resource, Xi'an 710054)

**Abstract:** Overcoming the shielding effect of conductor covered layer and realizing the effective detection of low resistivity layer underground constitute an important problem in electromagnetic exploration. Short offset transient electromagnetic (SOTEM) is receiving more and more attention because of its near source observation method. In order to analyze its detection capability, the authors made a comparison with a grounded electric source frequency device-(CSAMT), which is generally used nowadays. In this paper, the response characteristics of SOTEM and CSAMT in 1-D layered media are studied. In addition, two groups of electric models of low resistivity covered layer and low resistivity interbedded with different electrical characteristics are designed. Then detection capability is comparatively studied by calculating relative anomaly error. It is concluded by analysis that SOTEM is more sensitive to low resistivity covered layer than CSAMT and hence it is more favorable for detecting underground conductor layer.

**Key words:** SOTEM; CSAMT; low resistivity layer; distinguishing capability

**作者简介:** 侯东洋(1989-),男,硕士研究生,主要从事瞬变电磁法理论和应用研究. E-mail: houdongyang@mail.iggcas.ac.cn