

doi: 10.11720/wtyht.2015.4.19

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.http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.19

Chen W Y, Xue G Q. Detection capability of grounded electric source TEM for thin layer[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 775-779. http://doi.org/10.11720/wtyht.2015.4.19

电性源瞬变电磁对薄层的探测能力

陈卫营^{1,2}, 薛国强^{1,2}

(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)

摘要: 电性源短偏移距瞬变电磁法是目前的研究热点。针对地球物理勘查中经常遇到的薄层探测问题,以接地长导线源一维正演为基础,通过定义垂直磁场的相对异常,分析对比了电性源瞬变电磁法对不同电阻率、不同厚度、不同埋深的薄层的探测能力,并讨论了不同偏移距对探测灵敏度的影响。最后将电性源瞬变电磁法与回线源瞬变电磁法以及可控源音频大地电磁法进行对比,探讨不同电磁法装置对薄层的探测能力。结果显示,薄层电阻率越低、厚度越大、埋深越浅、观测偏移距越小越有利于电性源对薄层的探测;时间域电磁法对低阻薄层探测能力优于频率域电磁法,当偏移距较小时,电性源瞬变电磁对薄层的探测能力和回线源相当。

关键词: 瞬变电磁;短偏移距;电性源;薄层;探测能力

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2015)04-0775-05

电性源瞬变电磁法是时间域电磁法(TEM)的一种工作装置,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达到测深目的。由于探测深度大、施工方便等优点,电性源瞬变电磁受到越来越多的关注,并广泛应用于煤田地质勘探、金属矿探测、地热勘查、油气调查等领域^[1-5]。短偏移距电性源瞬变电磁(short offset transient electromagnetic)由于其采取近源观测的方式,而具有信号幅值高、性噪比强、探测深度大等优点,近年来受到越来越多关注^[6]。

薄层地质体的有效探测是勘探地球物理学面临的一个重要而困难的问题。许多地质问题的地球物理探测都可以近似为薄层探测问题,如储油层、储气层、深部采空区、深层地下水等,对此类薄层的研究具有巨大的实际意义。针对不同地质问题的物性差异选择合适的地球物理方法是解决薄层探测问题需考虑的首要因素。其中,时间域电磁法具有穿透低阻覆盖层能力强、无高阻屏蔽现象、垂向分辨率高等优点,在薄层探测方面发挥了重要作用。许多学者在此方面做了大量论述与研究,牛之琰^[7]结合野外实例讨论了瞬变电磁法对导电层的探测能力;唐新功等^[8]以层状介质中多个三维导电薄板为例,计算

了距离发送源不同位置的目标体的电磁场响应,并分析了探测难易性;薛国强等^[9]利用瞬变电磁一维正演理论,对有无薄层的地质模型进行分析研究,以晚期视电阻率的相对误差为参考对比了不同参数下回线源瞬变电磁对薄层的探测能力,并将 TEM 与可控源音频大地电磁(CSAMT)进行对比,认为 TEM 对薄层的分辨能力优于 CSAMT;王战军等^[10]对不同埋深厚度比、不同电阻率比情况下的低阻薄层模型进行了一维正演,利用二分法改进并定义了全期视电阻率,以视电阻率相对误差为参考归纳了瞬变电磁法对低阻薄层的识别及分辨能力;唐新功等^[11]研究了电性源在层状介质中三维薄板的瞬变响应,主要论证了不同异常体位置对电磁响应的影响,但是并未对薄层参数和装置参数的改变而带来的不同做出讨论。

总结发现,前人的研究重点主要集中于回线源瞬变电磁对薄层的探测能力,对电性源装置的讨论非常少。笔者以接地长导线源一维正演理论为基础,针对高、低阻薄层模型,通过改变电阻率、薄层厚度、埋深、偏移距等参数,讨论了电性源瞬变电磁对薄层的分辨能力,并与回线源瞬变电磁和可控源音频大地电磁进行了对比。

1 响应计算及对比依据

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。传统方法一般以视电阻率为计算依据,分析对比不同薄层参数对探测效果的影响。然而,视电阻率并非地层响应的最真实反映,而是人们为了直观判断电磁响应因果关系的一种手段,并且目前视电阻率定义尚不完美,特别是当地层层数较多,电性结构较为复杂时,不能精确地反应地层电性变化。因此文中直接以地层产生的电磁场响应为计算依据,定义相对异常

$$P_i = \frac{|F_{ia} - F_{i0}|}{F_{i0}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: F_{ia} 代表存在薄层时地层产生电磁场响应, F_{i0} 代表不存在薄层的均匀半空间产生的电磁场响应。 P_i 值越大表示薄层产生的相对异常越大,薄层就越容易被识别。

目前在电性源瞬变电磁的实际工作中,主要测量由垂直磁场 H_z 在地表引起的感应电压,因此文中以垂直磁场 H_z 来分析各种参数下电性源对薄层的分辨能力。

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^[12]:

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

式中: (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氏变化得到时间域响应^[13]

$$f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\text{Im}[f(\omega)]}{\omega} \cos(\omega t) d\omega. \quad (3)$$

2 对不同参数的薄层模型的探测能力

关于不同埋深和不同薄层厚度对异常的影响问题,分别以高阻和低阻两种薄层模型进行讨论。研究中发射源参数固定不变,发射导线长度为 1 000 m,发送电流 10 A,基频 30 Hz,偏移距 $r = 1 000$ m。当存在低阻薄层时,设三层地电模型的电阻率分别为 $\rho_1 = 100 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2 = 10 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_3 = 100 \Omega \cdot \text{m}$;埋深 h_1 和薄层厚度 h_2 依次变化,并取两者的比值 h_2/h_1 为参考量;当存在高阻薄层时,薄层电阻 $\rho_2 = 1 000 \Omega \cdot \text{m}$,其他参数与低阻时一致。图 1、图 2 分别为薄层厚度和埋深变化时,低、高阻薄层模型的垂直磁场衰减曲线,可明显地以看出,低阻薄层产生的垂直磁场响应偏离均匀半空间的程度更高。为定量说明不同参数给响应带来的变化,将不同 h_2/h_1 情况下,高、低阻薄层产生的 P_i 极大值列于表 1,其中 $P_{\max,1}$ 代表低阻薄层产生的相对异常极大值, $P_{\max,h}$ 代表高阻薄层产生的相对异常极大值。

从表 1 可以看出,电性源对低阻薄层较为敏感,围岩与薄层电阻率之比同样为 1/10 时,低阻薄层产生的相对异常要远大于高阻薄层产生的相对异常。

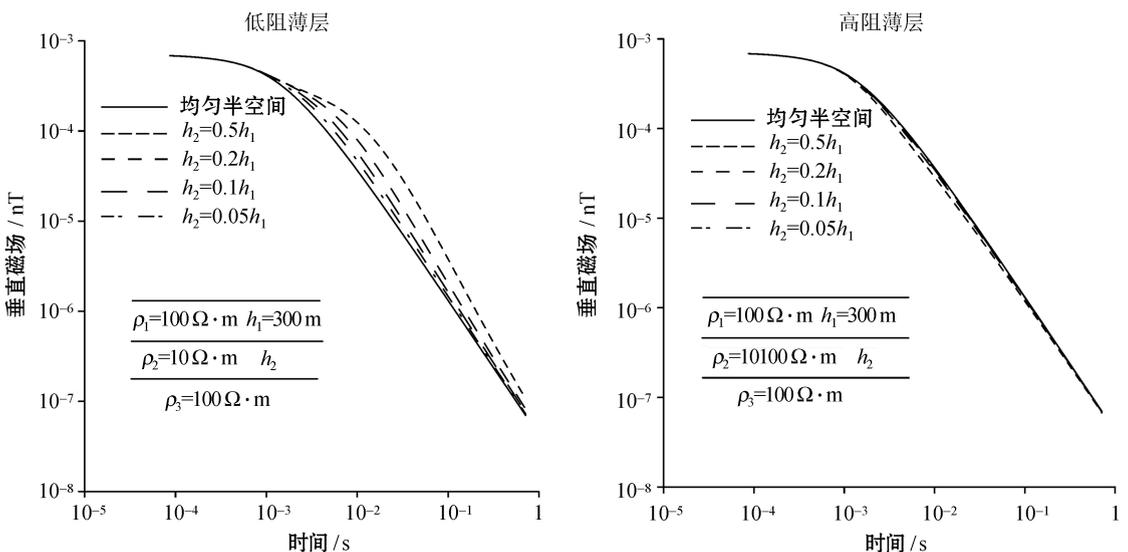


图 1 薄层厚度不同时的垂直磁场衰减曲线

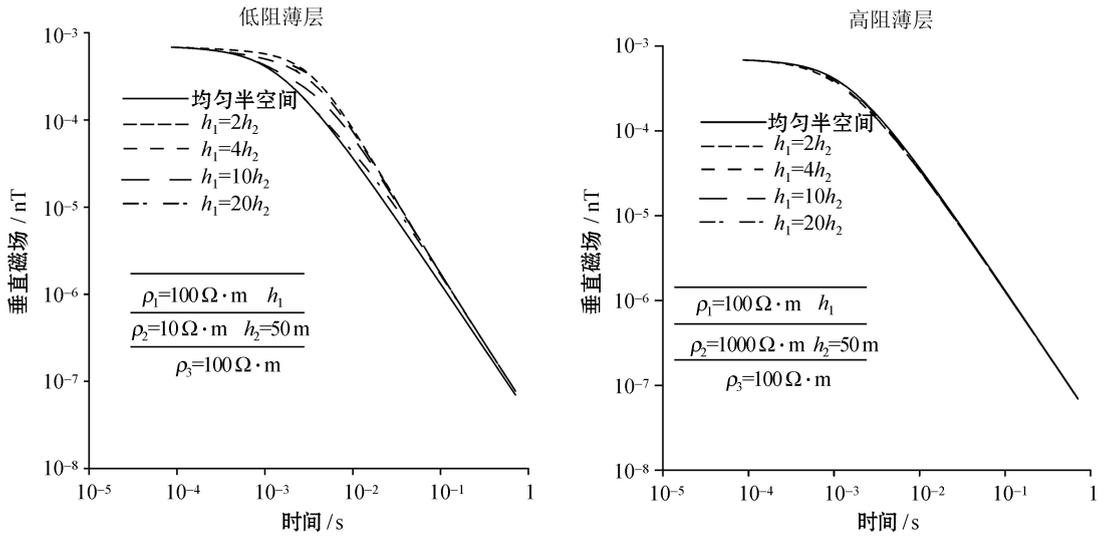


图 2 薄层埋深不同时的垂直磁场衰减曲线

表 1 不同 h_2/h_1 时相对异常极大值 P_{max}

h_2/h_1	1/2		1/3		1/4		1/5		1/10		1/20	
h_1/m	300	100	300	150	300	200	300	250	300	500	300	1 000
h_2/m	150	50	100	50	75	50	60	50	30	50	15	50
$P_{max,l}/\%$	280.8	134.4	184.3	120.8	135.9	108.5	107.7	98.0	51.9	62.4	25.3	33.7
$P_{max,h}/\%$	20.2	11.1	14.3	10.1	11.0	9.2	9.0	8.3	4.7	5.5	2.4	3.1

另外,薄层厚度与埋深之比越大,相对异常越大,这说明,埋深越浅或者薄层厚度越大,产生的相对异常也就越大,薄层就越容易被识别;而且从数据可以看出薄层厚度对异常的影响比埋深对异常的影响要大。

3 不同偏移距对探测能力的影响

对于同一个低阻薄层模型,在不同收发距处计算了垂直磁场响应(图 3)以及在每个收发距处与均匀半空间计算结果的相对异常值(图 4)。

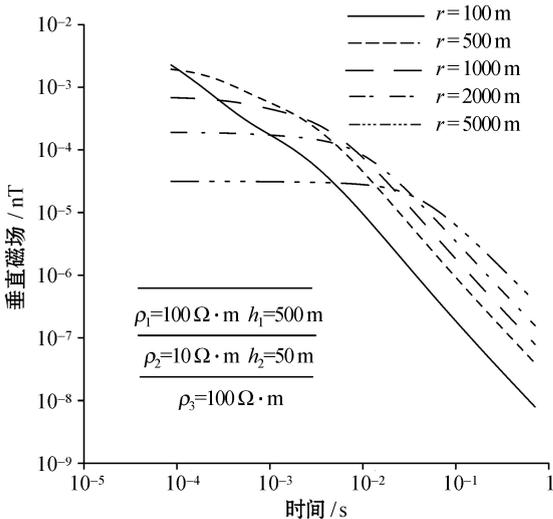


图 3 不同偏移距时低阻薄层垂直磁场响应衰减曲线

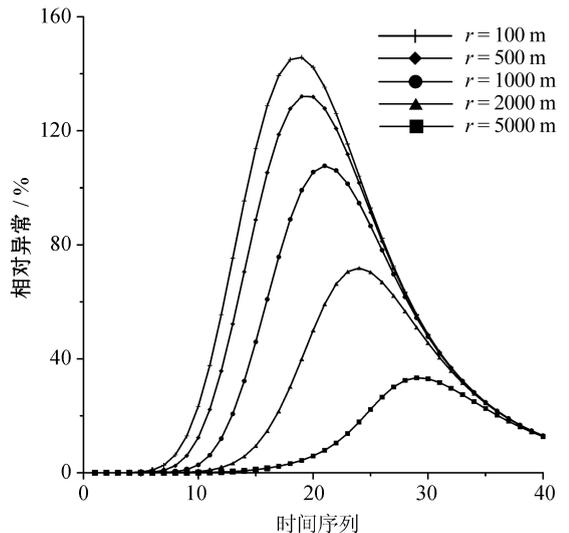


图 4 不同偏移距时低阻薄层相对异常

从图 3 可以看出,早期场在短偏移处较大,长偏移处较小;随着时间推迟,短偏移对应的场值相对变小,而长偏移处场值相对变大。这说明电性源产生的垂直磁场响应极大值从场源附近出发向远处扩散,并且极值的振幅逐渐减小。从图 4 中相对异常极大值的变化规律也可以看出,随着偏移距的增加相对异常值呈逐渐减小的趋势,并且相对异常的极值,逐渐向晚时间道推移。因此可以得出结论,短偏移处测量对地层分辨率更高,分辨异常的时间更早。

4 与其他电磁法对比对薄层的探测能力

回线源装置是目前应用最为广泛的时间域电磁法装置,而 CSAMT 是频率域电磁法中应用较为广泛的装置。结合本文的研究思路,有必要将电性源装置与以上两种装置进行对比研究,分析三者在薄层探测方面能力的不同。针对低阻和高阻薄层模型,同时计算了三种装置的垂直磁场响应值,并按照公式(1)计算了各自的相对异常值。其中电性源瞬变电磁偏移距分别取 $r=100, 500, 1\ 000\text{ m}$,其他参数与前文一致;回线源瞬变电磁发射参数为回线尺寸 $200\text{ m}\times 200\text{ m}$,发射电流 10 A ,基频 30 Hz ;CSAMT 发射参数为发射源 $AB=1\ 000\text{ m}$,发送电流 10 A ,频率范围 $8\ 192\text{ Hz}\sim 0.125\text{ Hz}$ 。表 2 为计算的三种装置对于相同高、低阻薄层模型的相对异常极大值。

表 2 不同电磁法装置对薄层的探测能力对比

相对异常极大值	电性源			回线源	CSAMT
	$r=100\text{ m}$	$r=500\text{ m}$	$r=1\ 000\text{ m}$		
$P_{\text{max}}^H / \%$	71.6	69.1	62.4	72.8	37.3
$P_{\text{max}}^K / \%$	11.4	11.2	10.4	11.6	10.8

对比发现,三种装置对低阻薄层的敏感度都远大于高阻薄层,而且时间域电磁法对低阻薄层的探测灵敏度明显优于频域 CSAMT。电性源装置在偏移距 $r=100\text{ m}$ 时,产生的相对异常最大,随着偏移距增大,异常极值随之减小。在上述三个偏移距处,电性源装置对两种薄层的灵敏度都要稍微弱于回线源装置,在偏移距较小处,电性源装置对高阻薄层的探测能力要稍强于 CSAMT。

5 结论

通过本次研究,对电性源瞬变电磁在薄层探测方面有了进一步的认识,可以概括为以下几点:

(1) 与其他电磁法装置类似,电性源瞬变电磁对低阻目标体的敏感度远大于高阻目标体,薄层厚度和埋深对探测效果影响较大,薄层厚度大、埋深浅更容易被探测。

(2) 垂直磁场响应的极值随时间由发射源向四周扩散并衰减,偏移距较小时,电性源对地层的分辨能力越强,而且能够更早的分辨异常。

(3) 短偏移距电性源瞬变电磁与回线源瞬变电磁相比,对薄层分辨的能力稍弱但相差不大;与 CSAMT 相比,两者对高阻薄层探测能力相仿,但对低阻薄层电性源要明显优于 CSAMT。

(4) 本文仅以垂直磁场为例进行分析研究,对于电性源装置产生的其他电磁分量未做讨论。今后非常有必要综合研究多分量的探测技术,以寻求对地层探测能力最优的分量进行探测。

参考文献:

- [1] Strack K M.Exploration with deep transient electromagnetic method [M].Elsevier,1992.
- [2] Newman G A. Deep transient electromagnetic soundings with a grounded source over near-surface conductors [J]. Geophysical Journal,1989,98:587-601.
- [3] Strack K M,Hanstein T,LeBrocq K.Case histories of LOTEM surveys in hydrocarbon prospective areas[J].First Break,1989(7):467-477.
- [4] 严良俊,胡文宝,陈清礼,等.长偏移距瞬变电磁测深法在碳酸盐岩覆盖区落实局部构造的应用效果[J].地震地质,2001,23(2):271-276.
- [5] 黄力军,陆桂福,刘瑞德.电性源瞬变电磁法在煤田水文地质调查中的应用[J].工程地球物理学报,2004,1(2):174-177.
- [6] 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.
- [7] 牛之珺.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.
- [8] 唐新功,胡文宝,严良俊.瞬变电磁法对地下不同位置多个三维薄板探测能力的研究[J].物探与化探,2004,28(6):528-531.
- [9] 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,2007,42(6):709-713.
- [10] 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(8):646-651.
- [11] 唐新功,胡文宝,严良俊.层状地层中三维薄板的瞬变电磁响应[J].石油地球物理勘探,2000,35(5):628-633,650
- [12] 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.
- [13] 牛之珺.时间域电磁法原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1992.

Detection capability of grounded electric source TEM for thin layer

CHEN Wei-Ying^{1,2}, XUE Guo-Qiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Nowadays, the short-offset grounded electric source transient electromagnetic method (SOTEM) is a hot research topic. In this paper, based on the 1-D forward calculation algorithm and using relative anomalies between vertical magnetic field responses generated by a thin layer and homogeneous half space, the authors investigated the detection capability of SOTEM for thin layered models with different resistivities, different thicknesses and different buried depths as well as the impact of different offsets. In addition, the difference between electric source TEM and loop source TEM as well as CSAMT was comparatively studied. It is concluded by analysis that low resistance, greater thickness, smaller buried depth and smaller transmitter-receiver offset will be favorable for increasing the sensitivity to the earth. On the other hand, the time domain electromagnetic method is more sensitive to low resistance layer than the frequency domain electromagnetic method, and the SOTEM and the loop source TEM almost have an equal detection capability when the offset is small. What we have done in this paper has important reference value for the field production.

Key words: transient electromagnetic; short offset; grounded electric source; thin layer; detection capability

作者简介: 陈卫营(1987-),男,博士,从事瞬变电磁场理论与应用研究工作。E-mail: chenweiyang1987@163.com