

电性源瞬变电磁短偏移探测方法

薛国强¹, 闫述², 陈卫营¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室, 北京 100029;

2. 江苏大学 计算机科学与通信工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了解决大深度、高分辨探测地下矿产资源的难点问题, 基于近区测深的优越性, 提出一种电性源短偏移瞬变电磁装置(SOTEM), 并对该装置下的探测技术进行研究。通过对时间域近场响应特性以及探测深度等面探测能力的分析, 认为 SOTEM 明显优于长偏移瞬变电磁(LOTEM)。接地线源短偏移瞬变电磁法比回线源瞬变电磁法易于施工, 且探测深度较大和探测精度相对较高, 是一种值得推广的方法。

关键词: 电性源; 瞬变电磁法; 短偏移; 全场域; 响应

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Exploration technique due to grounded wire source with short-offset

XUE Guo-qiang¹, YAN Shu², CHEN Wei-ying¹

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. School of Computer Science and Telecommunication Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to solve the problem of detecting of underground deep ore target with high-resolution, based on the advantage of near field survey, a new configuration named as wire-source with short-offset TEM (SOTEM) was proposed for deep detection and the detecting technique was studied. After analyzing the detection ability of this system, such as time-domain response, as well as detecting depth, the conclusion can be drawn that this kind of configuration has more merit than long-offset TEM(LOTEM). The proposed method is easier to operate and can be used to obtain larger detecting depth and higher detecting accurate. It also shows that SHOTEM is a kind of method worth to be developed.

Key words: grounded wire source; TEM; short-offset; whole field area; response

作为目前发展最迅速的地球物理勘探方法之一, 瞬变电磁法近年得到了较广泛的应用。在地面瞬变电磁实际测量中, 大多采用回线源的中心方式进行探测, 并取得了较多的研究和应用成果^[1-3]。但回线源的对称性使场有相互抵消作用, 能量在地层中衰减较快, 探测深度较浅, 且边长较大时不易敷设。另外, 磁性回线源仅有水平电场分量, 易于在低阻层中激发感应电流, 对探测低阻层十分有利^[4], 在煤田水文地质物探

中已成为首选方法。但在探测高阻层时, 利用大地表面上回线源装置形式往往不能取得好的效果。所以, 对于寻找深部高阻目标体的油气勘探中, 回线源装置很少使用。接地导线源不仅具有水平分量电场, 而且具有垂直分量电场, 水平分量激发的感应电流有利于低阻体的探测, 垂直分量在地层电性界面感应的电荷有利于高阻体的探测^[4]。在对地球物理方法技术要求越来越高的情况下, 深入开展接地源瞬变电磁新技术

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2012CB416605); 国家自然科学基金资助项目(41174090); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA08030400)

收稿日期: 2013-05-16; **修订日期:** 2013-06-30

通信作者: 薛国强; 副研究员; 电话: 18600512100; E-mail: ppxueguoqiang@163.com

研究,以便解决瞬变电磁深部精细探测这一科学问题具有重要的意义^[5]。

长偏移瞬变电磁法是应用较多的电性源瞬变电磁法。长偏移是指场点到源点的距离大于 4~6 倍探测深度。长偏移瞬变电磁法方法在国外研究较多^[5-11],在我国,长偏移瞬变电磁技术得到一定程度的研究和应用^[12-15],这些研究成果对推动电性源瞬变电磁法的发展起到重要作用。

但由于该方法要求源点到场点之间的距离较大,观测区域受到一定的限制;且随着收发距离的增大,信号强度急剧下降,信噪比降低,在一定程度上影响探测深度;而且收、发之间可能跨越多个构造单元,其间的地质构造、地形起伏等引起电性变化,不利于精细探测,使得长偏移瞬变电磁法较多地应用于地质构造简单、地形平坦的地区。

20 世纪 60 年代以后,前苏联学者建立了近区建场法^[5]。由于它相对于远区建场方法具有更大的探测深度及更好的探测详细程度,引起了广泛的关注。WRIGHT 等^[16-18]和 ZIOLKOWSKI 等^[19-20]提出了多道瞬变电磁(MTEM)的概念,并成功地用 MTEM 这一装置进行油气探测。MTEM 方法采用接地导线源、发送随机编码、陈列式多道观测,观测方式与地震勘探相类似,接收的脉冲响应数据可以像地震数据一样被处理。实现地下数千米深目标体的探查。目前,这项技术引起了国内专家学者的极大关注。ALUMBAUGH^[21]提出了短偏移距的方法,并用此方法对高阻目标体进行探测;CUEVAS 等^[22-23]研究了短偏移情况下瞬变电磁法对深部高阻层的探测,认为近区探测具有可行性。ZIOLKOWSKI^[24]申报了接地源短偏移变电磁法发明专利,电性源瞬变电磁法的装备和软件开发得到越来越多的投入,何继善^[25]提出了电磁法近区探测的可行性。上述新的研究成果促进了瞬变电磁的应用和发展。

对于深部目标探测来说,接地导线源瞬变电磁法可以在近场观测并获得较大的探测深度是非常有意义的研究。本文作者提出了电性源瞬变电磁短偏移(SOTEM)深部探测装置。与 LOTEM 定义不同,SOTEM 是指场点到源点距离与探测深度接近或者略小于探测深度的观测装置,开展该装置下的技术研究对于深部探矿具有重要意义。

长偏移瞬变电磁法与可控源音频大地电磁法(CSAMT)工作方式基本相似,可以实现深部探测。但是,短偏移瞬变电磁法的探测能力及探测深度等问题目前研究较少,还需要通过理论分析、数据对比、实

例验证等手段进行充分论证。

1 短偏移装置简介

图 1 所示为本文作者提出的电性源短偏移探测装置示意图。包括立体示意图和平面示意图。其特点是场源相对固定,可使用较大的场源,可在场源两侧多点观测,工作效率较高。使用该方法,可以实现对地下矿体快速三维立体、大深度、高精度探测。

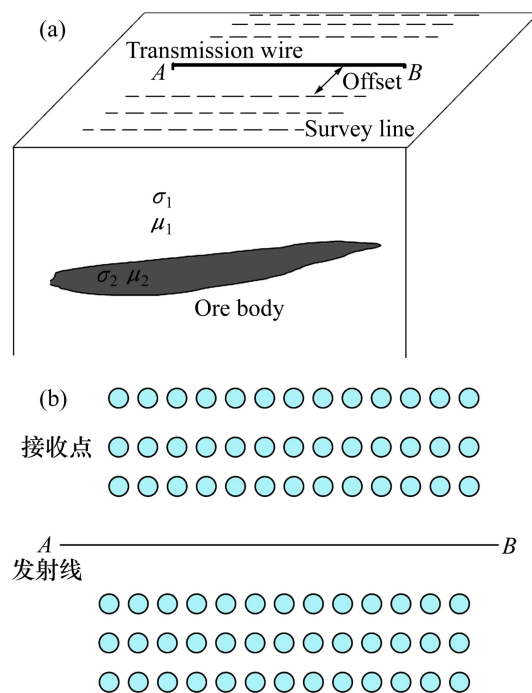


图 1 电性源短偏移装置示意图: (a) 三维图; (b) 平面图
Fig. 1 Schematic diagram of SHOTEM system: (a) 3-D scheme; (b) Plane survey diagram

工作方式与一般情况下的激发极化法扫面基本类似。布置好发射线源 AB 后,采用短偏移(收发距接近探测深度或者小于探测深度)的方式,在 AB 两侧一定位置范围内进行面积性旁线测量勘探,观测网度要求与瞬变电磁法的规范相同。使用的仪器可以是 V8、GDP32 等,可以用探头接收磁场信号,也可以用电极接收电场信号,施工方法与 LOTEM 的相同,只是采用短偏移形式,观测区域在电性源的近场区域和中场区域内。在旁线扫面测量时,可以采取逐点移动、单点测量的方式,也可以多道同时测量的排列形式,并实现空间多次覆盖,资料处理采用全场域技术进行解释。

2 近场响应特性分析

在深部探测中,接地源电磁法主要有可控源音频大地电磁法(CSAMT)和瞬变电磁法(TEM)。在近区情况下,由于偶极子近似,均匀半空间 CSAMT 方法的6个分量响应在直角坐标中可表示为^[25-26]

$$E_x = \frac{IAB}{4\pi\sigma_1} \frac{1}{r^3} (3\cos 2\theta + 1) \quad (1)$$

$$E_y = \frac{3IAB}{4\pi\sigma_1} \frac{1}{r^3} \sin 2\theta \quad (2)$$

$$E_z = \frac{i\mu_0\omega IAB}{4\pi} \frac{1}{r} \cos \theta \quad (3)$$

$$H_x = \frac{IAB}{4\pi} \frac{1}{r^2} \sin 2\theta \quad (4)$$

$$H_y = \frac{IAB}{4\pi} \frac{1}{r^2} \cos 2\theta \quad (5)$$

$$H_z = \frac{IAB}{4\pi} \frac{1}{r^2} \sin \theta \quad (6)$$

式中: E_x 、 E_y 和 E_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的电场强度; H_x 、 H_y 和 H_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的磁场强度; I 为发射电流; AB 为发射偶极长度; r 为收发距离; θ 为 r 与 AB 的夹角。

在近区情况下,只有电场水平方向与垂直方向的2个分量与大地电阻率有关,但这2个分量又与频率无关,其他4个分量已经不能反映地层电性结构,因此,近区场不能进行频率测深,只可以进行几何测深,这说明在激励源近区,以感应场为主,源消失则场消失,是几何测深的场源;远区场以辐射场为主,可以脱离场源独立存在,是频率测深的场源^[26]。也就是说,频率域电磁法无法将一次场和二次场分离开来,处于近区的场点感应场占优势,失去了以频变为特征的探测能力,只保留了某些分量的几何探测能力。

虽然时间域响应理论公式建立在频率域响应公式基础上,但频率域场与时间域场还存在一定的差异性^[4],由于频率域电磁测深测量的是总场,在远场(偏移距离比趋肤深度大得多)情况下,一次场相对较弱,二次场相对较强,易于识别二次场信息;而在近区情况下,一次场较强,二次场相对较弱,携带地质体信息的二次场被强大的一次场所覆盖。时域瞬变场激励源关断后的观测方式,分离出了二次场,在任何场区观测的都是激励源关断后的辐射场。由此获得了近区探测能力,不仅能进行短偏移距勘探,还能在奇点处的源点进行零偏移距勘探。

对于 TEM 近场探测可行性,可进行如下的计算。图2所示为一个放置在均匀半无限空间地面的电偶极子示意图,坐标原点 $O(0, 0)$ 为发射 AB 的中点,发射 AB 的长度为 $2a$,接收点坐标为 (x_R, y_R) ,偶极子微元的坐标为 $(x, 0)$ 。

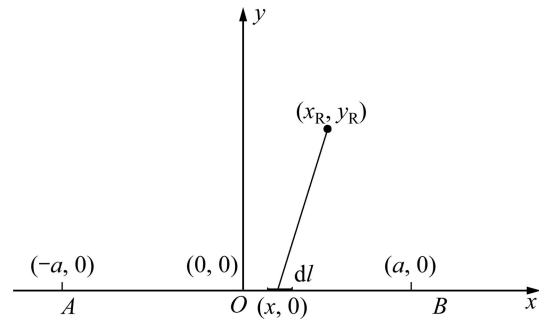


图2 电性源迭加偶极子响应示意图

Fig. 2 Diagrammatic explanation for calculating response for wire loop source

在均匀半空间情形下,水平电偶极子源 Id_s 的垂直磁场频域解的解析表达式^[6, 27]如下:

$$h_{dl} = \frac{Idl r}{4\pi r^2} \frac{y_R}{r} \left[\left(1 - \frac{3}{2u^2} \right) \varphi(u) + \frac{3}{u\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \right] \quad (7)$$

$$u = \sqrt{\mu_0 r^2 / (4\rho t)}, \quad r = \sqrt{(x - x_R)^2 + y_R^2} \quad (8)$$

式中: I 表示发射电流; dl 表示偶极子的长度; t 是采样时间; r 是收发距离; ρ 是电阻率。沿 AB 对式(7)进行积分,得

$$h_{AB} = (b + y_R) \int_{-a}^a \frac{\varphi dx}{r} \quad (9)$$

$$\varphi = \frac{I}{4\pi r^2} \left[\left(1 - \frac{3}{2u^2} \right) \text{erf}(u) + \frac{3}{u\sqrt{\pi}} e^{-u^2} \right] \quad (10)$$

$$\text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt \text{ 是概率积分。}$$

由式(10)可以得到均匀半空间情况下电性源瞬变电磁响应。

对于层状介质,式(10)变为^[5]

$$\varphi = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Im} \left[\frac{I}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\lambda}{\lambda + u_1 / R_1} J_1(\lambda r) d\lambda \right] \frac{\cos(\omega t)}{\omega} dt \quad (11)$$

根据式(7)~(11)进行电性源瞬变电磁场响应计算。地电模型如下: $\rho_1=100 \Omega \cdot \text{m}$, $\rho_2=30 \Omega \cdot \text{m}$, $h_1=1\,000 \text{ m}$ 。图3所示为线源长度为 $1\,000 \text{ m}$ 、发送电流为 10 A 时不同偏移距离情况下($r=700 \text{ m}$, $1\,000 \text{ m}$, $2\,000 \text{ m}$, $3\,000 \text{ m}$, $4\,000 \text{ m}$)磁场曲线的计算结果。由图3可见,只要信噪比足够大,利用小极距 r 可探测大深度,就

像图 3 所显示的那样, $r=700\text{ m}$ 的极距就可探测到 $1\ 000\text{ m}$ 深的目标层。这是因为瞬变场没有一次场的“掩盖”, 探测深度与偏移距离无关, 主要取决于衰减时间。

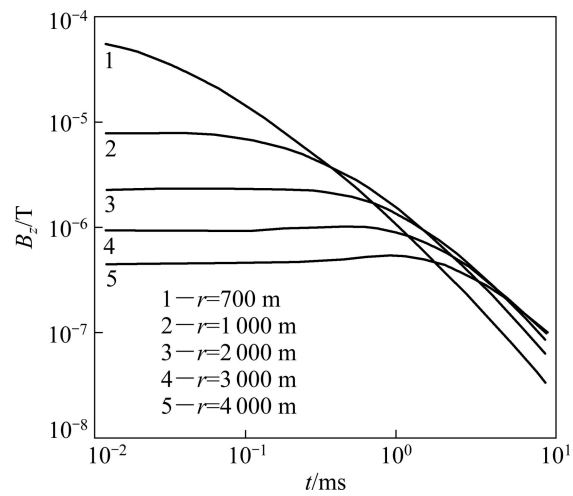


图 3 不同偏移距离情况下的磁场曲线
Fig. 3 Magnetic decay curves at different offsets

3 TEM 近场探测深度分析

在理论分析中, 扩散深度定义为给定时间内 TEM 涡流场极值所能达到的最大深度, SPIES^[28]给出的扩散深度(d)公式为

$$d = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \sqrt{t/(\sigma\mu_0)}$$
 (12)

式中: t 为时间; σ 为电阻率。

由式(12)可见, 扩散深度主要与时间及地电结构有关, 与场源类型和偏移距离无关^[29]。在理论研究中, 大多根据式(12)来计算特定地电结构情况下电磁场在某一时刻的扩散深度。

对电性源短偏移装置的探测深度进行如下定量分析。设均匀半空间的响应值(背景场, 电阻率为 $500\ \Omega\cdot\text{m}$)为 V_0 , 均匀半空间中有一个良导薄层(埋藏深度为 $1\ 000\text{ m}$, 电阻率为 $50\ \Omega\cdot\text{m}$)引起的响应值(异常场)为 V_c , 按式(7)~(11)计算不同偏移距离情况下的响应。图 4 所示为偏移距为 $1\ 000\text{ m}$ 时的响应曲线, 虚线为背景模型的响应曲线, 实线为良导薄层模型的响应曲线。

计算两者的比值 V_c/V_0 , 当 $V_c/V_0 \geq 50\%$ 时, 在此条件下时间所对应的扩散传播深度为有效探测深度^[4], 按式(12)计算深度, 计算结果如表 1 所列^[5]。

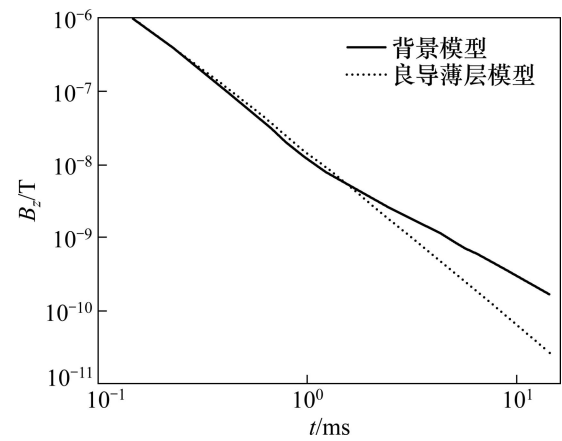


图 4 良导薄层模型响应曲线
Fig. 4 Response curves of thin conductance layer model

表 1 有效探测深度的计算结果
Table 1 Calculated results of effective detecting depth ($H=1\ 000\text{ m}$, $AB=1\ 000\text{ m}$, $I=10\text{ A}$)

偏移 距离/m	250	500	700	1 000	2 000	3 000	4 000
探测 深度/m	3.6	4.1	4.2	4.2	4.1	3.9	3.7

由表 1 分析可知, 当 $\frac{r}{H} = 0.7 \sim 1$ 时, 探测深度较大。此外, 近场区探测深度明显大于远场区。

在实际应用中, 对于有效探测深度, 往往要考虑设备的功能及接收仪器的灵敏度、测量精度、噪声强度和地电参数等因素。TEM 的实际探测深度定义为信号衰减到噪声电平时的扩散深度。在实际工作中, 往往根据以下公式估计电性源远场区探测深度(d_f)^[27, 30]:

$$d_f = 0.28 \left(\frac{I\rho AB}{\eta} \right)^{1/4}$$
 (13)

式中: η 为仪器最小可分辨电压; ρ 为地层电阻率; I_0 为发送电流; AB 为发射线长度。

对于近场区探测深度(d_n), 需要采用以下公式进行计算:

$$d_n = 0.48 \left(\frac{I\rho AB}{\eta} \right)^{1/5}$$
 (14)

由式(13)和(14)可知: 为了实现深部探测, 除了需要较长的时间延迟, 还需要有较强的信号以及较高的信噪比。在同样条件下, 近场区信号明显比远场区信号强, 信噪比高, 所以, 瞬变电磁可以在短偏移情况下实现大深度探测。

为了进一步对比远场区和近场区的探测深度, 给

定发射电流和 AB 长度, 分别采用式(13)和(14)进行计算远场区探测深度(d_f)和近场区探测深度(d_n), 计算结果如表 2 所列。从表 2 可以看出: 近场探测深度大于远场区探测深度。

表 2 远场区和近场区探测深度

Table 2 Calculated detecting depths using far-zone mode and near-zone mode

I/A	$\rho/(\Omega\cdot m)$	AB/m	r/m	d_f/m	d_n/m
1	20	100	50		211.6
			70	212.7	226.3
			100		243.1
5	50	300	100		501.9
			200	526.4	576.5
			300		625.2
10	100	500	200		842.5
			300	845.9	913.7
			500		1 012.0
20	300	1 000	40		1 590.9
			0	1 574.5	1 779.3
			700		1 910.9
			1 000		3 853.1
50	1000	4 000	1 000		
			3 000	3 783.3	4 800
			4 000		5 084.2

4 结论

1) 采用电性源装置探测易于实现一发多收, 及类地震的施工和资料处理方法, 生产效率相对较高。对于工程勘查、煤田勘探, 由于矿区干扰大, 利用电性源瞬变电磁测深, 发展大功率发射、小偏移距(发射与接收间距离)接收方法和技术, 以提高信噪比, 是一种发展方向。由于采用小偏移距测量, 这样可使测量更为集中于发射源的附近, 克服了以往长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)信号较弱的缺点。相对于远区方法具有对地层断面以及对有限导体的探测能力强、附加效应小、探测深度大等优点。该方法不仅可以实现对地下分析分辨单元的多次覆盖测量, 还实现了瞬变电磁的三维立体探测及快速扫面。可以获得更精确的地下目标体的位置、大小和形状的信息, 对于研究精细地质结构有重要意义。

2) 提出了一种快速高效、易于实现的电性源瞬变电磁短偏移(作者定义为 SOTEM)深部目标体精细探

测方法与处理技术。通过对时间域近场响应特性以及探测深度等方面的探测能力的分析, 认为 SOTEM 明显优于长偏移瞬变电磁(LOTEM); 所提出的新的探测装置及方法系统, 为电磁勘探理论发展提供了新的突破点。接地线源短偏移瞬变电磁法比回线源瞬变电磁法易于施工, 且探测深度和探测精度相对较高, 是一种值得推广的方法。

REFERENCES

[1] 石显新, 闫述, 傅君眉, 陈明生. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进[J]. 地球物理学报, 2009, 52(7): 1931-1936.
SHI Xian-xin, YAN Shu, FU Jun-mei, CHEN Ming-sheng. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(7): 1931-1936.

[2] XUE Guo-qiang, BAI Chao-ying, YAN Shu, GREENHALGH S, LI Mei-fang, ZHOU Nan-nan. Deep sounding TEM investigation method based on a modified fixed central-loop system [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 76(1): 23-32.

[3] XUE Guo-qiang, QIN Ke-zhang, LI Xiu, LI Guang-ming, QI Zhi-peng, ZHOU Nan-nan. Discovery of the large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through modified TEM exploration method[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2012, 17(1): 19-25.

[4] KAUFMAN A A, KELLER G V. 频率域和时间域电磁测深[M]. 王建谋, 译. 北京: 地质出版社, 1987.
KAUFMAN A A, KELLER G V. Frequency and transient soundings [M]. WANG Jian-mou, transl. Beijing: Geological Publishing House, 1987.

[5] 牛之璠. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007.
NIU Zhi-lian. Theory of time domain electromagnetic method [M]. Changsha: Central South University Press, 2007.

[6] NABIGHIAN M N. 勘察地球物理电磁法第一卷理论 [M]. 赵经祥, 王艳君, 译. 北京: 地质出版社, 1992.
NABIGHIAN M N. Electromagnetic methods in applied geophysics — Theory society of exploration geophysicists Volume 1[M]. ZHAO Jin-xiang, WANG Yan-jun, transl. Beijing: Geological Publishing House, 1992.

[7] STRACK K M, HANSTEIN T, LEBROCQ K, MOSS D C, VOZOFF K, WOLFGRAM P A. Case histories of long-offset transient electromagnetic (LOTEM) in hydrocarbon prospective areas[J]. First Break, 1989, 7(12): 467-477.

[8] STRACK K M, LÜSCHEN E, KÖTZ A W. Long-offset transient electromagnetic (LOTEM) depth soundings applied to crustal studies in the Black Forest and Swabian Alps, Federal Republic of Germany[J]. Geophysics, 1990, 55(7): 834-842.

- [9] NEWMAN G A, HOHMANN G W, ANDERSON W L. Transient electromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth [J]. *Geophysics*, 1986, 51(8): 1608–1627.
- [10] NEWMAN G A. Deep transient electromagnetic soundings with a grounded source over near-surface conductors [J]. *Geophysical Journal*, 1989, 98(3): 587–601.
- [11] PODDAR M. Grounded-source TEM modeling of some deep-seated 3D resistivity structures [J]. *Geophysical Prospecting*, 1999, 47(6): 945–958.
- [12] 陈明生, 田小波. 电偶源瞬变电磁测深研究(IV): 瞬变电磁测深视电阻率[J]. *煤田地质与勘探*, 1999, 27(4): 52–55.
CHEN Ming-sheng, TIAN Xiao-bo. Study on the transient electromagnetic (TEM) sounding with electric dipole (IV): Apparent resistivity in TEM sounding [J]. *Coal Geology and Exploration*, 1999, 27(4): 52–55.
- [13] 唐新功, 胡文宝, 严良俊. 地堑地形对长偏移距瞬变电磁测深的影响研究[J]. *工程地球物理学报*, 2004, 1(4): 313–317.
TANG Xin-gong, HU Wen-bao, YAN liang-jun. Graben topography effects to the long-offset transient electromagnetic response [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2004, 1(4): 313–317.
- [14] 严良俊, 胡文宝, 陈清礼, 胡家华. 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.
YAN Liang-jun, HU Wen-bao, CHEN Qing-li, HU Jia-hua. The estimation and fast inversion of all-time apparent resistivities in long-offset transient electromagnetic sounding [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999, 34(5): 532–538.
- [15] 翁爱华, 王雪秋. 长偏移距瞬变电磁测深甚晚期响应及视电阻率的数值计算[J]. *地震地质*, 2003, 25(4): 664–670.
WENG Ai-hua, WANG Xue-qiu. Numerical simulations of very late time response and apparent resistivity in long-offset TEM sounding [J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(4): 664–670.
- [16] WRIGHT D A, ZIOLKOWSKI A, HOBBS B A. Hydrocarbon detection with a multi-channel transient electromagnetic survey[C]//*Proceedings of the 71st Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts*. Sanantonio, USA, 2001: 1435–1438.
- [17] WRIGHT D, ZIOLKOWSKI A, HOBBS B. Hydrocarbon detection and monitoring with a multi-component transient electromagnetic (MTEM) survey [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(9): 852–864.
- [18] WRIGHT D A. Detection of hydrocarbons and their movement in a reservoir using time-lapse multi-transient electromagnetic MTEM data[D]. Edinburgh: University of Edinburgh, 2003.
- [19] ZIOLKOWSKI A. Detection of subsurface resistivity contrasts with application to location of fluids: USA, 6914433[P]. 2005–05–05.
- [20] ZIOLKOWSKI A, HOBBS B A, WRIGHT D. Multi-transient electromagnetic demonstration survey in France [J]. *Geophysics*, 2007, 72(4): 197–209.
- [21] ALUMBAUGH. Research proposal on 3D numerical analysis of the grounded electric source[Z]. *Transient Electromagnetic Geophysical Method*, 2002.
- [22] CUEVAS N H, ALUMBAUGH D. Near source response of a resistive layer to vertical electrical dipole excitation[C]//*Proceedings of the SEG Annual Meeting Expanded Abstract*. Houston, 2009: 794–798.
- [23] CUEVAS N H, ALUMBAUGH D. Near source response of a resistive layer to vertical electric dipole excitation[C]//*Proceedings of the SEG 2009 International Exposition and Annual Meeting*. Houston, 2009: 794–798.
- [24] ZIOLKOWSKI A. Short-offset transient electromagnetic geophysical survey: USA, 8143897 B2[P]. 2012–03–27.
- [25] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE Ji-shan. WAN electromagnetic method and pseudo-random signal electric method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [26] 陈明生, 闫述. 论频率测深应用中的几个问题[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
CHEN Ming-sheng, YAN Shu. Discussion of some questions in the application of frequency-domain sounding [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [27] 方文藻, 李予国, 李貅. 瞬变电磁法测深原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
FANG Wen-zao, LI Yu-guo, LI Xiu. Theory of TEM sounding[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1993.
- [28] SPIES B R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods[J]. *Geophysics*, 1989, 54(7): 872–888.
- [29] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁法的探测深度问题[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1583–1591.
YAN Shu, SHI Xian-xin, CHEN Ming-sheng. The probing depth of transient electromagnetic field method [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1583–1591.
- [30] 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.
LI Xiu. The theory and application of transient electromagnetic sounding [M]. Xi'an: Shaanxi Science Technology Press, 2002.

(编辑 陈卫萍)