

LOTEM 与 CSAMT 联合勘探试验

郑丽萍^{1,2}, 严良俊^{1,2}, 谢兴兵², 周文华²

(1. 长江大学 油气资源与勘察技术教育部重点实验室, 荆州 434023;

2. 长江大学 地球物理与石油资源学院, 荆州 434023)

摘 要: 石油电磁勘探新方法长偏移距瞬变电磁测深法 LOTEM(Long Offset & Window Transient Electromagnetic Method)和常规的音频大地电磁测深法 CSAMT(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric)各有优缺点。受观测时窗(或频段)的限制, CSAMT 着重中浅层勘探(几十米至几千米), 而 LOTEM 着重于中深层勘探(几百米至几千米), 两者的有效结合才能有效地解决由浅至深的地质问题。本文对两种方法技术进行了阐述, 并通过相应的野外试验进行对比研究, 提出了两者结合反演方法, 为电法勘探的实际应用提供借鉴和参考。

关键词: 长偏移距瞬变电磁测深法; 可控源音频大地电磁法; 反演

中图分类号: P631

文献标识码: A

收稿日期: 2009—10—16

Joint Exploration Test With LOTEM and CSAMT

Zheng Liping^{1,2}, Yan Liangjun^{1,2}, Xie Xingbing², Zhou Wenhua²

(1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Geophysics and Oil Resources Institute, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: The LOTEM(Long Offset & Window Transient Electromagnetic Method) and the CSAMT(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric) have their own advantages and disadvantages in petroleum electromagnetic exploration. Owing to the restrictions on time window (or frequency band), CSAMT has mainly been applied to the exploration for shallow geological objects (the depth from tens of meters to one kilometer), while LOTEM has mainly been applied to the exploration for middle-deep geological object (the depth from hundreds of meters to several kilometers). If the two methods are effectively combined, the shallow to deep geological problems can be solved effectively. This paper discusses the two methods both in theory and practice, and studies their differences. The joint inversion of LOTEM and CSAMT is put forward. The result is significant in the practical application of electromagnetic exploration.

Key words: LOTEM; CSAMT; Inversion

1 引言

近年来,电磁勘探方法具有工作效率高、成本低廉等优点,在经过了十几年的发展后,电磁方法已在油气、固体矿藏、地热及深部构造等勘探领域中越来越显示出重要地位^[1]。电磁法勘探可以适用于各种复杂的地质地表条件,随着勘探程度的提高,电法勘探今后可能需要转向更加复杂的地质和地表(如我国南方碳酸盐岩覆盖的崇山峻岭地区^[2])地区。其中,长偏移距瞬变电磁测深 LOTEM(Long Offset & Window Transient Electromagnetic Method)是研究深部电性结构的一个有效方法(Strack, 1992; 严良俊等, 2001)且有分辨率高,勘探深度大等特点。严良俊等人开展了地堑地形对长偏移距瞬变电磁法的研究,能够很好地指导设计瞬变电磁法的野外勘探方案,对正确地进行资料解释也会起到有价值的指导作用^[3]。可控源音频大地电磁法 CSAMT(Controlled Source Audio-frequency Magnetotelluric)是一种利用接地水平电偶源为信号源的一种电磁测深法。其实质是利用人工激发的电磁场来弥补天然场能量的不足。奚先等人研究了堤坝防渗心墙在各种不同类型的孔洞缺陷下的 CSAMT 响应特征,得出一套防渗心墙孔洞缺陷的快速无损检测的技术方案来满足当前长江堤防工程质量无损检测工作之急需^[4]。此外,CSAMT 具有野外数据质量高、重复性好、解释与处理方法简单(解释方法直接套用 MT 方法)、解释剖面的横向分辨率高、方法不受高阻屏蔽及工作成本低廉等优点被广泛应用。

本文介绍了在内蒙古集宁某地采用两种方法联合进行的煤田与矿产区域普查实例。为了实现浅层几十米至深部近两千米范围内的有效勘探,通过采集方法试验,结合两方法的理论特点,获取了测区两种方法的高品质数据,实现了两种方法的联合反演与剖面成图,地质效果明显,为该条件下勘探提供了重要参考。

2 方法原理概述

2.1 LOTEM 长偏移距瞬变电磁测深法

LOTEM 法是在前苏联建场法的基础上发展并完善起来的一种时间域电磁测深方法。此法是以有限长接地导线为场源向地下供以脉冲电流,

在地下建立起一次脉冲磁场,在一次磁场间歇期间,在距场源中心一定距离处同时观测感应的二次电、磁场参数。由于该法早期信号反映浅部地电特征,晚期信号反映较深部地电断面,这就可以达到测深的目的。

2.2 CSAMT 可控源音频大地电磁测深法

CSAMT 法是一种人工源的频率域电磁测深法。其原理和常规大地电磁测深法类似,即测量互相垂直的水平磁场分量和电场分量计算卡尼亚尼(Cagniard)视电阻率。在实际工作中,标量 CSAMT 法 MKS 制单位计算视电阻率公式:

$$\rho = \frac{1}{5f} \cdot \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2} \quad (1)$$

CSAMT 采用人工源具有较强的抗干扰能力,且更容易获得对地电变化较灵敏的相位信息、野外数据质量高、重复性好,解释与处理方法简单(解释方法直接套用 MT 方法)、解释剖面横向分辨率高。

2.3 LOTEM 与 CSAMT 方法比较

LOTEM 法是利用二次场可实现近区勘探,最大探测深度可达到 5 000m。LOTEM 布设时间长,采集时间长,设备较重,每天最多能完成 16 个物理测点,据设计要求 800 个物理点在工期要求范围内不可能完成。

CSAMT 方法的工作频率是 0.1~10kHz,其探测深度范围为几十米至几千米。CSAMT 野外施工简单,效率高,每天最快可完成 30~40 个物理点的测量。

表 1 LOTEM 时窗中值及对应频率(经验值)和 CSAMT 频率
Table 1 Average value time window

序号	LOTEM 时窗中值/ms		换算对 CSAMT 频率 /Hz		序号	LOTEM 时窗中值/ms		换算对 CSAMT 频率 /Hz	
	值/ms	率/Hz	率/Hz			值/ms	率/HZ	率/Hz	
1	21.46	9.32	9600.00	15	539.05	0.37	88.89		
2	27.02	7.40	7680.00	16	678.62	0.29	64.00		
3	34.01	5.88	5120.00	17	854.33	0.23	44.44		
4	42.82	4.67	3840.00	18	1075.54	0.19	32.00		
5	53.90	3.71	2560.00	19	1354.02	0.15	22.22		
6	67.86	2.95	1920.00	20	1704.61	0.12	16.00		
7	85.43	2.34	1280.00	21			11.11		
8	107.55	1.86	1024.00	22			8.00		
9	135.40	1.48	711.11	23			5.56		
10	170.46	1.17	512.00	24			4.00		
11	214.60	0.93	355.56	25			2.78		
12	270.16	0.74	256.00	26			2.00		
13	340.11	0.59	177.78	27			1.39		
14	428.18	0.47	128.00	28			1.00		

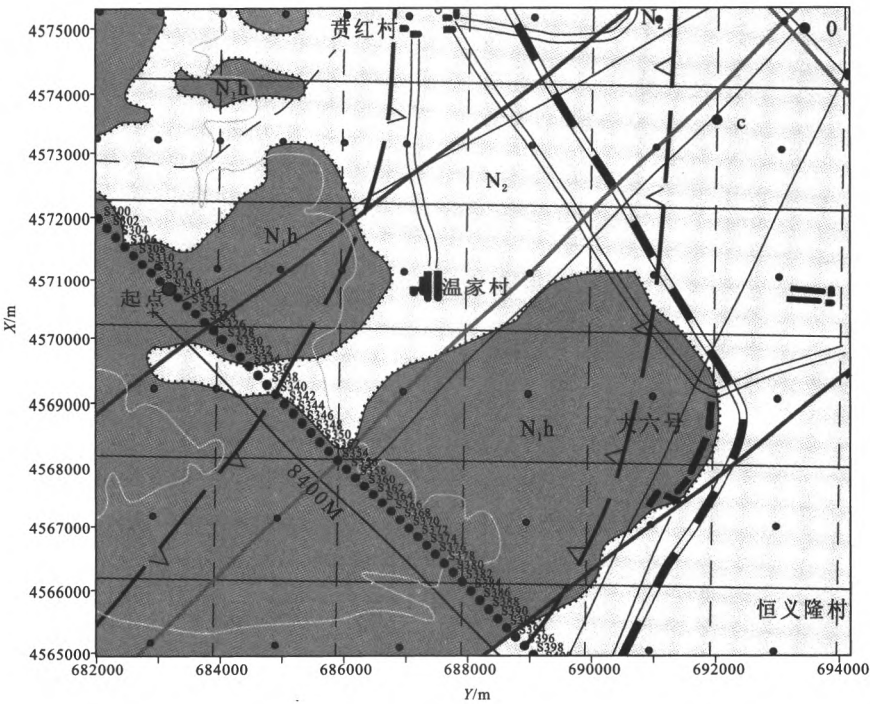


图 1 方法实验测线点位

Fig.1 Position of the measuring line

3 联合试验与效果

3.1 试验区地质情况和岩石电性特征

实验区在内蒙古集宁某地,该区属华北地台北缘内蒙古台隆中段,勘探区为山间盆地型。其上上古生界石炭系、二叠系,中生界侏罗系、白垩系,新生界第三系、第四系均有分布,其中第三系为主要含煤岩系。本区为山间凹陷构造,勘探区北部构造大致为北西转变为北东向,南部为北东或近东西,总体认为是一倾向北东的向斜或单斜构造。在勘探区中央表现为背斜,南北两翼相对较缓,无论是沿倾斜、走向均有不同程度的波状起伏。该区电性特征见地层电阻率表(表 2)。

3.2 试验参数的选择

如图 1 所示,在 UTM(4570869,169683131)(S316)至 UTM(4564929,169689071)(S400)长 8400m 的测线上分别布设了 42 个 CSAMT 物理点,点距 200m,24 个 LOTEM 物理点,点距 400m。

3.2.1 LOTEM 实验技术参数

发射波形为双极性方波,周期为 16s,时窗 20 个,电流 20A,发射距 2000m,收发距 6000m。

表 2 地层电阻率

Table 2 Formation resistivity

地 层	代号	岩 性	电阻率 / $\Omega \cdot m$	特征
第四系全新统	Q_4^{al+pl}	冲洪湖积砂 30~70 砾石层		中等
第四系全新统	Q_4^1	湖积砂黏土层 9~10		低阻
第三系中上新统	N_2-N_1	红色泥岩层 7~12		低阻
第三系中上新统	N_2-N_1	玄武岩夹泥 35~70 岩层		中高
第三系渐新统	E_3^3	泥岩砂岩砂 17~30 砾岩		低中
第三系渐新统	E_3^2	泥岩、砂质泥 4~16 岩、炭质泥 岩、煤层		低阻
第三系渐新统	E_3^1	泥岩砂岩砂 17~30 砾岩		低中
集宁群变质岩	ArJ	片麻岩、片麻 >30~45 花岗岩、大理岩		高阻

每个物理测点分别测两正交电道 E_x 、 E_y ,电极距 100m;一个垂直磁道 B_z ,线圈面积 25000m²;每排列 4 个物理测点,点距 400m,采集时间 1h,布站时间 1.5~2.5h,每天可最多完成 4

个排列,16个物理测点。

3.2.2 CSAMT 实验技术参数

发射波形谐波,最高频率 9600Hz,最低频率 1Hz,频点数 28 个,最大发射电流 18A,发射距 2000m,收发距 10000m。

每个排列 7 个物理点,每个物理点一个电道 E_x ,电极距 200m,1 个排列 1 个磁道 H_y ,采集时间 0.5h,布站时间 1h 左右,每天可完成 6 个排列,42 个物理测点。

3.3 资料处理

经过实时或现场处理后的资料,一般还不能直接用于解释,必须再处理。经过地形校正,针对 CSAMT 来说还需要进行场源校正,而对于 LOTEM 来说,数据要经过叠前和叠后处理等等。这里主要介绍一下反演的新方法,在电法资料反演方法中,“正演修正法”^[5]非线性反演方法具有精度高、非唯一性小和对初始模型的依赖小等特点。“正演修正法”二维反演的基本步骤如下。

第一步:沿剖面对各测点的实测电阻率曲线 ρ_a 作一维非线性反演,利用已知资料对一维反演电阻率剖面进行修正,修正时考虑地形,从而组合成带地形的二维剖面,将其作为初始二维反演剖面。

第二步:对初始二维反演剖面作二维正演,得到各测点上正演拟合视电阻率 ρ_{aT} 。

第三步:比较各测点上实测视电阻率(ρ_a)和二维正演拟合所得视电阻率(ρ_{aT}),根据其差异修正实测视电阻率,得到“类一维视电阻率”近似值($\rho_{a/d}$)。

$$\rho_{a/d} = \frac{\rho_a}{\rho_{aT}} \cdot \rho_a = \gamma \cdot \rho_a = \frac{\rho_a^2}{\rho_{aT}} \quad (2)$$

这里 γ 为修正因子。如果正演拟合视电阻率 ρ_{aT} 比实测视电阻率 ρ_a 大,则“类一维视电阻率”近似值 $\rho_{a/d}$ 比实测视电阻率 ρ_a 小,那么下一步反演时就得到比较小的电阻率值;反之,如果正演拟合视电阻率 $\rho_{a/d}$ 比实测视电阻率 ρ_a 小,则“类一维视电阻率”近似值 $\rho_{a/d}$ 比实测视电阻率 ρ_a 大,那么下一步反演时就得到比较大的电阻率值。

第四步:对前一次的“类一维视电阻率”近似值 $\rho_{a/d}^{(k-1)}$ 进行非线性一维正演,得到新的二维反演剖面。

第五步:对新二维反演剖面做二维正演,得各

测点上的新的正演拟合视电阻率 $\rho_{aT}^{(k)}$ 。

第六步:比较各测点上实测电阻率(ρ_a)和二维正演拟合视电阻率($\rho_{aT}^{(k)}$),根据其差异修正前一次的“类一维视电阻率”近似值 $\rho_{a/d}^{(k-1)}$,得到新的“类一维视电阻率”新的近似值 $\rho_{a/d}^{(k)}$ 。

$$\begin{aligned} \rho_{a/d}^{(k)} &= \frac{\rho_a}{\rho_{aT}^{(k)}} \cdot \rho_{a/d}^{(k-1)} = \gamma^{(k)} \rho_{a/d}^{(k-1)} \\ &= \frac{\rho_a^{(k+1)}}{\rho_{a/d}^{(1)} \cdot \rho_{a/d}^{(2)} \cdots \rho_{a/d}^{(k)}} \\ (k &= 2, 3, 4, \dots) \end{aligned} \quad (3)$$

这里 $\gamma^{(k)}$ 为修正因子。

第七步:回到第四、五、六步进行循环迭代。直至一条测线所有测点的实测视电阻率和二维正演拟合视电阻率的总体均方根误差小于预先指定的一个很小的数 ϵ_0 。

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{1}{N \cdot M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (\rho_{a(i,j)} - \rho_{a(i,j)}^{(k)})^2} &\leq \epsilon_0 \\ (i &= 1, \dots, N; j = 1, \dots, M) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, N 是单个测点观测周期数(或频率点)数, M 是 CSAMT 测线上的总测点数。

3.4 LOTEM 和 CSAMT 方法与联合反演的实验处理结果分析

将图 2、图 3 和图 4 与实际工作情况进行 LOTEM 和 CSAMT 方法实验对比分析:

表 1 中,LOTEM 仅有 20 个时窗,而且是固定时窗,不可更改,时窗中值从最短 21.46ms 至最长 1704.61ms,对应频率(经验值)9.32~0.12Hz。经反演解释(图 2~图 4),表层电阻率在几十欧姆米,基底电阻率偏高,基本都在 1000 $\Omega \cdot m$ 以上。根据电磁波传播理论,随着电阻率的增大或频率的降低,探测深度加深,所以 LOTEM 最浅探测深度在 100m 以下,最深探测深度可达 5000m,表层信息无法得到,深部信息由于时窗的限制也略显粗糙。

CSAMT 频率从最高 9600Hz 到 1Hz,频点可以随意加密,取舍灵活,本实验选取了从高到低的 28 个频点。经反演解释,探测深度最浅可到 20m 左右,最深可达 2000m。由于 CSAMT 是连续频率测深,能穿透高阻层,对高阻分辨率高,所以表层信息反应清楚,细节分辨能力强,能从浅到深很好地反应地质特征。

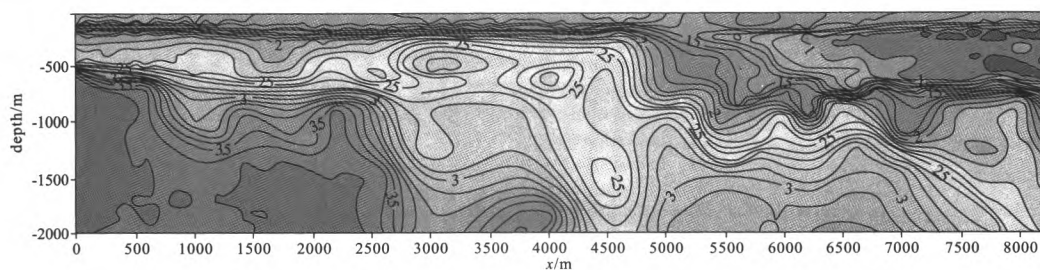


图 2 LOTEM 反演结果

Fig. 2 Inversion result of the LOTEM

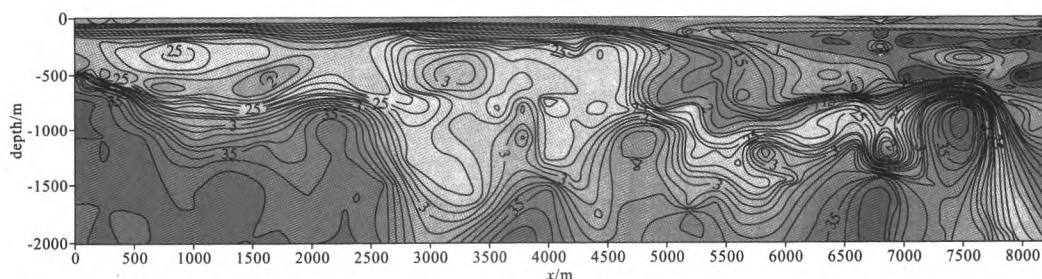


图 3 CSAMT 反演结果

Fig. 3 Inversion result of the CSAMT

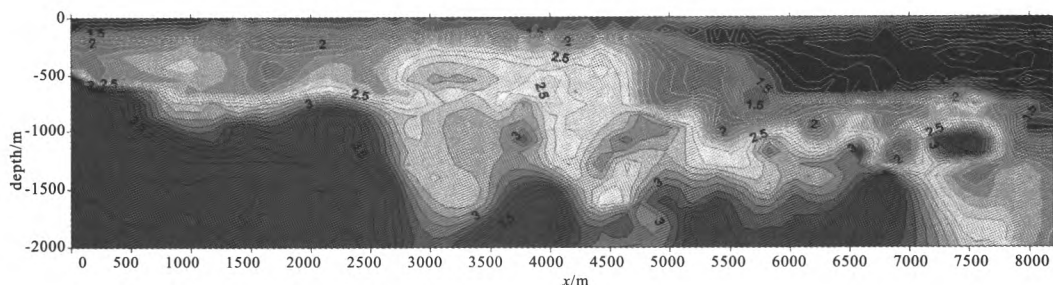


图 4 LOTEM 和 CSAMT 联合反演结果

Fig. 4 Joint inversion result of LOTEM and CSAMT

4 结 论

1) LOTEM 法采用类似地震的多次叠加技术压制噪声,信噪比高,探测深度大,但浅层分辨能力差。

2) CSAMT 法采用人工源具有较强的抗干扰能力,且更容易获得对地电变化较灵敏的相位信息、野外数据质量高、重复性好,解释与处理方法简单、解释剖面横向分辨率高,浅层分辨能力强。

3) LOTEM 法和 CSAMT 法这两种联合勘探可实现优势互补,提高了整个剖面的分辨能力。

此外,由于 LOTEM 仅观测垂直磁场分量,不受静位移影响,因而 LOTEM 剖面可对 CSAMT 剖面进行静偏移校正。文中工区因地质构造简单,CSAMT 剖面几乎不存在静偏移问题,

CSAMT 与 LOTEM 剖面一致性较好。

参考文献:

- [1] Strack K M. Exploration with deep transient electromagnetic method[M]. Elsevier,1992.
- [2] 严良俊,胡文宝,苏朱刘,等. 电磁勘探方法及其在南方碳酸盐岩地区的应用[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
- [3] 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.
- [4] 奚先,沈远彤,韩世勤,等. 堤坝防渗心墙的孔洞缺陷及其 CSAMT 响应特征[J]. 工程地球物理学报,2004,1(1):65~73.
- [5] 苏朱刘,罗延钟,胡文宝. 大地电磁测深“正演修正法”一维反演[J]. 石油地球物理勘探,2002,37(2):138~144.